



VIII POLSKA
KONFERENCJA
OPTYCZNA



KSIĄŻKA ABSTRAKTÓW

Organizator

• **candela** •


Partner



Polskie Towarzystwo Fizyczne
Sekcja Optyki

Wspierane przez

Ministerstwo Nauki
i Szkolnictwa Wyższego

 **Dokonała
Nauka II**

WTOREK

1 LIPCA 2025

Poprawa widzialności interferencji dwufotonowej za pomocą soczewki czasowej

J. Krzyżanowski^{1, †}, J. Szuniewicz¹, S. Kapoor¹, F. Sońnicki^{1,2}, M. Karpiński¹

¹Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski, Pasteura 5, 02-093 Warszawa

²Integrated Quantum Optics, Institute for Photonic Quantum Systems (PhoQS), Paderborn University, Warburger Str. 100, 33098 Paderborn, Niemcy

†email: Jan.Krzyzanowski@fuw.edu.pl

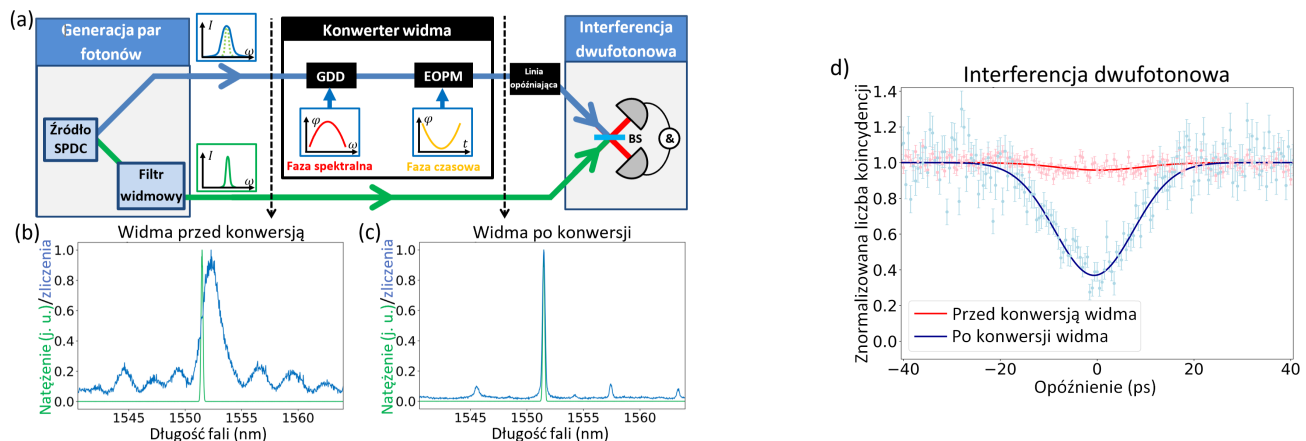
Nierozróżnialność pojedynczych fotonów jest kluczowa dla wielu fotonicznych technologii kwantowych. Wpływa ona na widzialność interferencji dwufotonowej [1], która jest podstawą m.in. wymiany splątania i teleportacji kwantowej. Rozróżnialność fotonów zaburza wymianę informacji kwantowej między układami o różnych własnościach widmowych [2].

Wąskopasmowe filtrowanie spektralne jest powszechnie stosowane do przywracania nierozróżnialności fotonów, korygujących widmo [2], jednak znacząco zmniejszając liczbę zliczeń. Alternatywą, może być konwerter szerokości widmowej [3], który umożliwi wydajną modyfikację widma pojedynczych fotonów.

W niniejszej pracy pokazujemy, nieklasyczną interferencję dwufotonową fotonów poddanych kompresji spektralnej. Uproszczony schemat eksperymentu przedstawiliśmy na Rys. 1(a). Zaczynamy od pary fotonów o różnych szerokościach widmowych, generowanych w procesie spontanicznego parametrycznego podziału częstości (SPDC) w połączeniu z filtrowaniem widmowym jednego z nich. Widma na tym etapie eksperymentu są przedstawione na Rys. 1(b). Zmierzona widzialność interferencji dwufotonowej (Rys. 1(d).) dla tych widm wynosi $(4.2 \pm 1.9)\%$.

Do drugiego fotonu, o szerokim widmie, zastosowaliśmy konwerter widma oparty na soczewce czasowej. Skompresował on widmo o czynnik ok. 10, co umożliwiło dopasowanie go do widma wąskopasmowego fotonu. Widma fotonów na tym etapie eksperymentu przedstawiliśmy na Rys. 1(c). Po zastosowaniu konwertera widzialność interferencji dwufotonowej wzrosła do $(63.2 \pm 1.9)\%$, por. Rys. 1(d). Ten wynik pokazuje, że dopasowanie szerokości widmowych zwiększa widzialność interferencji dwufotonowej z praktycznie niewidocznego efektu $((4.2 \pm 1.9)\%)$ do powyżej progu 50% definiującego nieklasyczną interferencję. Ponadto transmisja używanego konwertera była ok. 10 razy wyższa od transmisji dającego analogiczny efekt filtra, co jest główną zaletą przedstawionej techniki.

Przedstawione rozwiązanie pozwala na efektywną integrację systemów kwantowych o różnych własnościach spektralnych, czyniąc krok w kierunku splątania fotonów z różnych źródeł i budowy sieci kwantowych. Może być również wykorzystane do ulepszenia technik obliczeń kwantowych i komunikacji opartych na interferencji dwufotonowej.



Rysunek 1: Uproszczony schemat eksperymentu (a). Para fotonów jest generowana w procesie SPDC. Jeden z fotonów jest filtrowany widmowo. Widma fotonów na tym etapie eksperymentu przedstawiliśmy w panelu (b). Do drugiego fotonu, o szerokim widmie, zastosowaliśmy konwerter widma oparty na soczewce czasowej. Nakłada on kwadratową fazę spektralną wykorzystując ośrodek z dyspersją prędkości grupowej (GDD) i kwadratową fazę czasową wykorzystując elektro-optyczny modulator fazy (EOPM). Widma fotonów za konwerterem przedstawiliśmy w panelu (c). Tak przygotowane fotony interferują na światłowodowym dzielniku wiązki 50:50 (BS) i są zliczane przez detektory (d) Wyniki interferencji dwufotonowej (na czerwono przed konwersją widma, na niebiesko po konwersji): znormalizowana liczba koincydencji pomiędzy wyjściami dzielnika wiązki w funkcji względnego opóźnienia między fotonami.

Literatura

- [1] C. K. Hong, Z. Y. Ou, L. Mandel, *Phys. Rev. Lett.* **59**, 2044 (1987).
- [2] T. Huber i in., *Quant. Sci. Technol.* **2**, 034016 (2017).
- [3] F. Sońnicki i in., *Nat. Photon.* **11**, 53 (2017); F. Sońnicki i in., *Appl. Phys. Lett.* **116**, 234003 (2020).

Szybko, tanio, bezpiecznie: optyczna dystrybucja klucza kryptograficznego

**K. Banaszek^{1,2,3,†}, M. Jarzyna^{2,3}, M. Kucharczyk^{1,3}, K. Łukanowski^{2,3}, A. Stabrawa³, P. J. Urban^{3,4},
P. Kolenderski⁵, M. Lasota⁵, Ł. Pajewski^{5,6}, Ł. Chorchos⁷, J. Toński⁷, J. P. Turkiewicz^{7,8},
S.-H. Yang⁹, P.-Y. Hong⁹, P.-W. Li⁹**

¹Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski, Pasteura 5, 02-093 Warszawa

²Centrum Optycznych Technologii Kwantowych, CeNT, Uniwersytet Warszawski, Banacha 2c, 02-097 Warszawa

³Quantum Optical Technologies sp. z o.o., Lisa Kuli 4, 35-032 Rzeszów

⁴Wydział Elektryczny, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny, Sikorskiego 37, 71-313 Szczecin

⁵Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej, Uniwersytet Mikołaja Kopernika, Grudziądzka 5/7, 87-100 Toruń

⁶Wydział Informatyki i Telekomunikacji, Politechnika Wrocławska, Wybrzeże Wyspiańskiego 7/9, 50-372 Wrocław

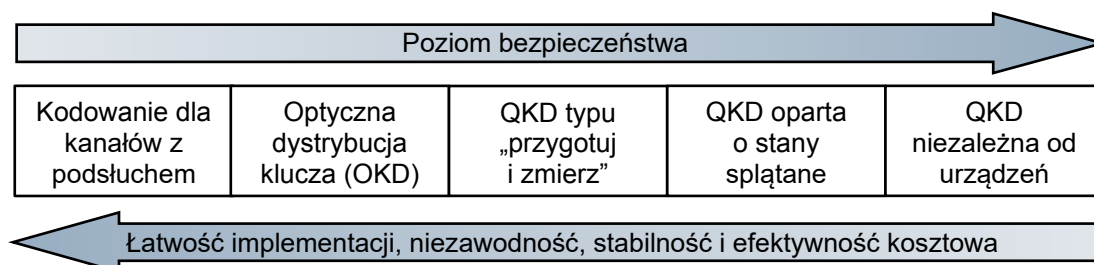
⁷Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych, Politechnika Warszawska, Nowowiejska 15/19, 00-665 Warszawa

⁸Orange Innovation Poland, Orange Polska, Al. Jerozolimskie 160, 02-326 Warszawa

⁹Institute of Electronics, National Yang Ming Chiao Tung University, Hsinchu, Tajwan

†email: k.banaszek@uw.edu.pl

Bezpieczeństwo współczesnych systemów teleinformatycznych jest zapewniane w przeważającej mierze przez rozwiązania algorytmiczne implementowane w wyższych, cyfrowych warstwach tych systemów. Obecnie coraz więcej prac badawczo-rozwojowych poświęcane jest możliwości zabezpieczenia warstwy fizycznej (PLS – *Physical Layer Security*) łączy telekomunikacyjnych, zwłaszcza wykorzystujących pasmo optyczne. Zależnie od branych pod uwagę scenariuszy ataku i poziomu zaufania do dostawców sprzętu i usług dostępny jest szereg potencjalnych rozwiązań, począwszy od kodowania dla kanałów z podsłuchem, a skończywszy na kwantowej dystrybucji klucza (QKD – *Quantum Key Distribution*) w wersji niezależnej od urządzeń, co przedstawiono schematycznie na rys. 1. Zwiększona odporność na ataki wiąże się jednak z rosnącymi wymaganiami sprzętowymi oraz infrastrukturalnymi, takimi jak wyodrębnione (ciemne) włókna optyczne, detekcja pojedynczych fotonów lub detekcja koherentna na poziomie szumu śrutowego w przypadku urządzeń QKD. Biorąc pod uwagę uwarunkowania budżetowe, łatwość integracji z istniejącą infrastrukturą oraz konieczność zapewnienia niezawodnego i stabilnego działania rozwiązań PLS, obiecującym rozwiązaniem jest optyczna dystrybucja klucza (OKD – *Optical Key Distribution*), do której realizacji wystarczy modulacja natężeniowa i detekcja bezpośrednia światła (IM/DD – *Intensity Modulation/Direct Detection*), a ilość generowanego klucza jest funkcją założonej przewagi strony podsłuchującej [1]. Co więcej, w systemach IM/DD możliwe jest zintegrowanie optycznej dystrybucji klucza z transmisją danych w oparciu o hierarchiczną wieloskalową wielopoziomową modulację amplitudy impulsu (PAM – *Pulse Amplitude Modulation*) [2]. Otwiera to ciekawe perspektywy zastosowania techniki OKD zarówno w sieciach światłowodowych, jak i w satelitarnej łączności optycznej [3], gdzie zasadniczym wyzwaniem są wymagania w zakresie rozmiaru, wagi i poboru mocy (SWaP – *Size, Weight, and Power*). Wydajność generacji klucza metodą OKD może być zwiększona poprzez użycie innowacyjnych detektorów niskoszumnych, np. opartych o germanowe kropki kwantowe [4]. Temat ten jest przedmiotem projektu SEQOLOND – *Secure Quantum Optical Communication with Low-Noise Detectors* finansowanego w ramach XI polsko-tajwańskiego konkursu przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju oraz tajwański National Science and Technology Council i realizowanego we współpracy międzynarodowej z National Yang Ming Chiao Tung University na Tajwanie. Wydajna generacja klucza kryptograficznego, niskie koszty wdrożenia oraz adekwatność do obecnego poziomu zagrożeń czynią z podejścia OKD potencjalnie bardzo atrakcyjne rozwiązanie praktyczne.



Rysunek 1: Przykłady rozwiązań zapewniających bezpieczeństwo warstwy fizycznej telekomunikacyjnych łączy optycznych.

Literatura

- [1] K. Banaszek, M. Jachura, P. Kolenderski, M. Lasota, *Opt. Express* **29**, 43091 (2021)
- [2] M. Jachura et al., *Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2024*, wystąpienie W1H.6
- [3] M. Jachura, M. Lasota, P. Kolenderski, K. Banaszek, *International Conference on Space Optics – ICSO 2022; Proc. SPIE* **12777**, 127771B (2023)
- [4] C.-H. Lin et al., *IEEE Trans. Electron Dev.* **70**, 2113 (2023)

Generacja i przetwarzanie korelacji kwantowych w układzie modów optycznych

J. Bembenek, Z. Ficek[†]

Zakład Optyki i Inżynierii Kwantowej, Instytut Fizyki Uniwersytetu Zielonogórskiego, ul. Szafrana 4a, 65-516 Zielona Góra

[†]email: z.ficek@if.uz.zgora.pl

Korelacje kwantowe odgrywają kluczową rolę w obecnie prężnie rozwijającej się technologii kwantowej, która ma szereg praktycznych zastosowań, np. w komunikacji kwantowej, kryptografii kwantowej, metrologii kwantowej, uczeniu maszynowym czy komputerach kwantowych. Szczególne zainteresowanie jest w zastosowaniu optycznych układów gaussowskich, gdyż takie układy są łatwo dostępne w laboratoriach [1].

Układy (mody) optyczne w stanach gaussowskich reprezentowane są za pomocą bozonowych operatorów kreacji i anihilacji fotonów $a_i^\dagger (a_i)$, ich stany wewnętrzne określone są za pomocą jednomodowych funkcji korelacji $\langle a_i^\dagger a_i \rangle$ oraz $\langle a_i a_i \rangle$, a ich wzajemne korelacje za pomocą dwumodowych funkcji korelacji, $\langle a_i a_j \rangle$ oraz $\langle a_i^\dagger a_j^\dagger \rangle$, ($i \neq j$). Znaczenie każdej z tych funkcji jest następujące: Funkcja $\langle a_i^\dagger a_i \rangle$ jest miarą populacji modów, $\langle a_i a_i \rangle$ jest miarą dwufotonowych korelacji wewnątrz modów, które to korelacje prowadzą do ściśnięcia fluktuacji, a funkcja $\langle a_i^\dagger a_j^\dagger \rangle$, ($i \neq j$) jest miarą spójności, inaczej koherencji modów. Natomiast niezerowa wartość $\langle a_i a_j \rangle$ ($i \neq j$) jest konieczna dla splątania modów.

Poprzez oddziaływanie (sprzężenie) pomiędzy modami możemy generować nowe oraz przetwarzać istniejące już w układzie korelacje kwantowe. Dobierając odpowiedni rodzaj oddziaływania możemy kontrolować stan w jakim znajdują się mody, w sposób kontrolowany przetwarzać korelacje istniejące wewnątrz modów na korelacje pomiędzy modami i odwrotnie. Najczęściej rozważane są dwa rodzaje oddziaływań, oddziaływanie liniowe określone Hamiltonianem oddziaływania $g a_i^\dagger a_j + g^* a_j^\dagger a_i$, oraz oddziaływanie nieliniowe inaczej zwane parametrycznym określone Hamiltonianem oddziaływania $g a_i^\dagger a_j^\dagger + g^* a_j a_i$, gdzie g jest stałą sprzężenia. Sprzężenie liniowe jest znane z tego, że może prowadzić do splątania modów jedynie wtedy gdy mody zawierają kwantowe korelacje [2, 3]. Natomiast sprzężenie nieliniowe prowadzi do splątania modów będących w stanach klasycznych [4, 5].

W niniejszej prezentacji rozważymy układ kwantowy złożony z dwóch modów optycznych będących w skorelowanych stanach gaussowskich i na podstawie otrzymanych wyników przeprowadzimy dokładną analizę następujących problemów: W jaki sposób są generowane i przetwarzane korelacje wewnątrz i pomiędzy modami. W jaki sposób sprzężenia liniowe oraz nieliniowe wpływają na generację i przetwarzanie określonego typu korelacji. W jaki sposób wytworzyć spójność, a w jaki splątanie pomiędzy modami. Czy spójność, jako zjawisko jednofotonowe i splątanie, jako zjawisko dwufotonowe mogą jednocześnie występować i w jaki sposób wzajemnie wpływają na siebie. Wyniki analityczne dla funkcji korelacji, uwzględniające dekoherencję modów pokazują, że:

- Procesy generacja i przetwarzanie korelacji kwantowych za pomocą sprzężenia liniowego są możliwe jedynie wówczas gdy stany modów nie są identyczne. Mianowicie, funkcja spójności $\langle a_i^\dagger a_j \rangle$ może być różna od zera jedynie wtedy gdy obsadzenia (populacje) modów nie są jednakowe. Natomiast, funkcja korelacji $\langle a_i a_j \rangle$ konieczna do splątania może być różna od zera jedynie wtedy gdy mody mają niejednakowy rozkład fluktuacji.
- W przypadku sprzężenia nieliniowego pomiędzy modami warunek na generację i przetwarzanie korelacji jest odwrotny do tego jaki zaobserwowaliśmy dla sprzężenia liniowego. Mianowicie, procesy generacji i przetwarzania korelacji kwantowych są możliwe jedynie wówczas gdy stany modów są identyczne. Innymi słowy, nie ulegają sprzężeniu te wielkości, które w obu modach nie są identyczne. Ponadto, obecność dwufotonowych korelacji jednomodowych nie wpływa na generację dwufotonowych korelacji dwumodowych $\langle a_i a_j \rangle$, które to korelacje generowane są w wyniku zmiany (wzrostu) populacji modów. Zaskakujące jest to, że mimo nieliniowego charakteru sprzężenia, jednomodowe korelacje dwufotonowe $\langle a_i a_i \rangle$ przetwarzane są na dwumodową korelację $\langle a_i^\dagger a_j \rangle$, określającą korelacje jednofotonowe.
- Dla obu rodzajów sprzężeń, generacja korelacji kwantowych pomiędzy modami (splątania) powoduje redukcję korelacji kwantowych istniejących wewnątrz modów do ich klasycznych wartości. W stanie maksymalnego splątania, stan każdego z modów zostaje zredukowany do stanu termicznego.

Literatura

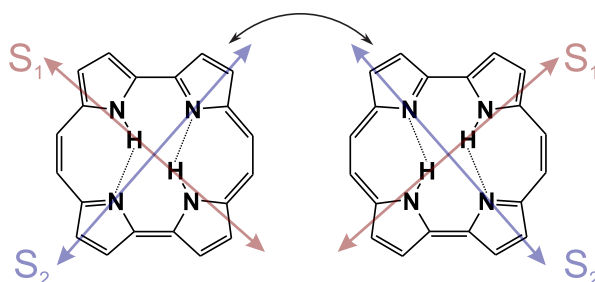
- [1] W. Asavanant and A. Furusawa, Phys. Rev. A **109**, 040101 (2024).
- [2] M. S. Kim, W. Son, V. Buzek, and P. L. Knight, Phys. Rev. A. **65**, 032323 (2002).
- [3] R. Tahira, M. Ikram, H. Nha, and M. S. Zubairy, Phys. Rev. A. **79**, 023816 (2009).
- [4] M. J. Collett and C.W. Gardiner, Phys. Rev. A **30**, 1386 (1984).
- [5] L. H. Sun, Y. Liu, C. Li, K. K. Zhang, W. X. Yang, and Z. Ficek, Entropy **24**, 692 (2022).

Przeniesienie atomów wodoru w cząsteczce porficyny jako modelowy układ dla spektroskopii kwantowej

P. Fita

Instytut Fizyki Doświadczalnej, Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski, Pasteura 5, 02-093 Warszawa
email: fita@fuw.edu.pl

Porficyna to cząsteczka organiczna, w której dochodzi do spontanicznego, jednoczesnego przeniesienia dwóch atomów wodoru ulokowanych w „klatce” utworzonej przez cztery atomy azotu (rys. 1). Symetria cząsteczki sprawia, że przeskok tych atomów nie zmienia jej struktury chemicznej, a jedynie prowadzi do reorientacji momentów przejść dipolowych, co wpływa na prawdopodobieństwo oddziaływania cząsteczki ze światłem spolaryzowanym liniowo. Porficyna stanowi więc fizyczną realizację symetrycznej podwójnej studni potencjału, której dynamikę można bezpośrednio obserwować przy użyciu światła spolaryzowanego liniowo [1].



Rysunek 1: Podwójne przeniesienie atomów wodoru w cząsteczce porficyny i towarzysząca mu reorientacja kierunków momentów przejść dipolowych ze stanu podstawowego do pierwszego i drugiego wzbudzonego stanu singletowego.

Na podstawie wyników badań przeprowadzonych technikami spektroskopii ultraszybkiej wykazano, że w mechanizmie przeniesienia atomów wodoru w porficynie i jej pochodnych dominuje tunelowanie kwantowe, nawet w fazie skondensowanej i w temperaturze pokojowej [2]. Szybkość tego procesu można kontrolować, podstawiając do cząsteczki porficyny różne grupy funkcyjne [3]. Z kolei pomiary przeprowadzone w szerokim zakresie temperatur dla cząsteczek unieruchomionych w matrycach polimerowych ujawniły istotne różnice w dynamice przeniesienia atomów wodoru w zależności od typu matrycy: sztywny poli(metakrylan metylu) wywołuje silny efekt „zamrożenia” poprzez zaburzenie symetrii cząsteczek, podczas gdy żelowa struktura poli(alkoholu winylowego) pozwala na większą swobodę ruchu atomów wodoru [4]. Wyniki te pokazują, że porficyna może pełnić rolę sondy dynamiki swojego otoczenia na poziomie molekularnym.

Obecnie proponujemy wykorzystanie porficyny i jej pochodnych jako układów modelowych do testowania nowych metod spektroskopowych wykorzystujących kwantowe stany światła. W ostatnich latach zaproponowano i teoretycznie przeanalizowano kilka takich metod, opartych na splątanych stanach fotonów, służących do badania dynamiki procesów molekularnych [5, 6, 7], lecz większość z nich nie została dotąd zrealizowana eksperymentalnie. Dzięki temu, że czas podwójnego przeniesienia atomów wodoru w różnych pochodnych porficyny mieści się w przedziale od dziesiątek femtosekund do setek pikosekund, można go dopasować do czasu korelacji par splątanych fotonów generowanych w procesie parametrycznej konwersji częstości w dół. Porficyny mogą więc stać się optymalnym układem modelowym do testowania nowoczesnych metod spektroskopii kwantowej.

Literatura

- [1] P. Fita, L. Grill, A. Listkowski, H. Piwoński, S. Gawinkowski, M. Pszona, J. Sepioł, E. Mengesha, T. Kumagai, J. Waluk, *Phys. Chem. Chem. Phys.* **19**, 4921 (2017).
- [2] P. Ciąćka, P. Fita, A. Listkowski, C. Radzewicz, J. Waluk, *J. Phys. Chem. Lett.* **7**, 283 (2016).
- [3] P. Ciąćka, P. Fita, A. Listkowski, M. Kijak, S. Nonell, D. Kuzuhara, H. Yamada, C. Radzewicz, J. Waluk, *J. Phys. Chem. Lett.* **119**, 2292 (2015).
- [4] P. Kasprzycki, P. Kopycki, A. Listkowski, A. Gorski, C. Radzewicz, D. J. S. Birch, J. Waluk, P. Fita, *Phys. Chem. Chem. Phys.* **22**, 17117 (2020).
- [5] Y. Fujihashi, K. Miwa, M. Higashi, A. Ishizaki, *J. Chem. Phys.* **159**, 114201 (2023).
- [6] J. Kim, *J. Phys. Chem. Lett.* **15**, 5407 (2024).
- [7] J. J. Fan Z.-Y. Ou, Z. Zhang, *Light Sci. Appl.* **13**, 163 (2024).

Wielowymiarowa kwantowa dystrybucja klucza z efektywną detekcją

M. Ogrodnik^{1, †}, A. Widomski¹, D. Bruß², G. Chesi³, F. Grasselli⁴, H. Kampermann², C. Macchiavello³,
N. Walk⁵, N. Wyderka², M. Karpiński¹

¹Uniwersytet Warszawski, Wydział Fizyki, Pasteura 5, 02-093 Warszawa, Polska

²Institut für Theoretische Physik III, Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf, Universitätsstraße 1, D-40225 Düsseldorf, Niemcy

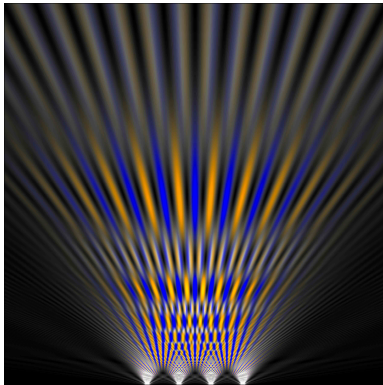
³National Institute for Nuclear Physics, Sezione di Pavia, Via Agostino Bassi 6, 27100 Pavia, Włochy

⁴Leonardo Innovation Labs – Quantum Technologies, Via Tiburtina km 12,400, 00131 Roma, Włochy

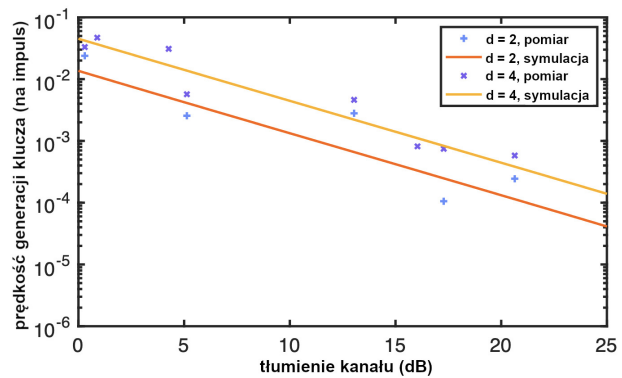
⁵Dahlem Center for Complex Quantum Systems, Freie Universität Berlin, Arnimallee 14, D-14195 Berlin, Niemcy

†email: mm.ogrodnik@uw.edu.pl

Choć kwantowa dystrybucja klucza (QKD) oparta na dwuwymiarowym (kubitowym) kodowaniu jest dojrzałą technologią, to jej wydajność jest niewystarczająca dla wielu zastosowań. Wielowymiarowe kodowanie w QKD zwiększa przepływność i odporność na błędy w porównaniu do standardowych, kubitowych układów. Jednak eksperymentalne implementacje takich układów są bardziej skomplikowane i drogie [1]. Ponadto ich implementacja może wprowadzić takie podatności jak prawdopodobieństwo detekcji zależne od bazy [2]. Przedstawiamy eksperymentalną realizację wielowymiarowej, czasowo-fazowej QKD typu BB84 z prostą detekcją [3]. Stany wabikowe są przygotowywane przez zmiany ustawień dwóch elektrooptycznych modulatorów amplitudy. Pomiar w bazie generacji klucza są realizowane poprzez nadprzewodzące detektory pojedynczych fotonów z rozdzielczością w czasie. Do pomiaru symboli QKD w bazie kontrolnej stosujemy prostą eksperymentalnie metodę wykorzystującą czasowy efekt Talbota [4]. Prędkości generacji klucza wyznaczone na podstawie danych eksperymentalnych w dwu- i czterowymiarowym przypadku pokazują przewagę wielowymiarowego kodowania przy wysokim poziomie błędów, również w miejskiej sieci światłowodowej. Porównujemy prędkości wymiany klucza otrzymane za pomocą dwóch dowodów bezpieczeństwa: standardowego d -wymiarowego wabikowego protokołu BB84 oraz modyfikacji z użyciem przestrajalnego dzielnika wiązki, którą zaproponowano w pracy [2]. Drugie podejście uwzględnia podatność prawdopodobieństwa zależnego od bazy, a zatem zwiększa bezpieczeństwo przez zmniejszenie założeń dotyczących implementacji protokołu. Nasze wyniki stanowią wkład do debaty na temat zalet wielowymiarowego kodowania oraz podkreślają wpływ analizy bezpieczeństwa na osiągalną wydajność QKD.



(a)



(b)

Rysunek 1: (a) Czasowy dywan Talbota pokazuje zależność względnych faz czterech impulsów. Pozioma oś odpowiada czasowi, a pionowa zastosowanej dyspersji opóźnienia grupowego. Niebieskie i pomarańczowe prążki odpowiadają odpowiednio superpozycjom z równymi i naprzemiennymi $0, \pi$ fazami. (b) Eksperymentalnie otrzymane prędkości wymiany klucza dla 2- i 4-wymiarowego wabikowego protokołu BB84 na podstawie pomiarów w sieci miejskiej.

Literatura

- [1] N. T. Islam, C. C. W. Lim, C. Cahall, J. Kim, D. J. Gauthier, *Provably secure and high-rate quantum key distribution with time-bin qudits*, *Science Advances* **3**, e1701491 (2017).
- [2] F. Grasselli, G. Chesi, N. Walk i in., *Quantum key distribution with basis-dependent detection probability*, *Physical Review Applied* **23**, 044011 (2025).
- [3] M. Ogrodnik, A. Widomski, D. Bruß i in., *High-dimensional quantum key distribution with resource-efficient detection*, preprint arXiv, arXiv:2412.16782 (2024).
- [4] A. Widomski, M. Ogrodnik, M. Karpiński, *Efficient detection of multidimensional single-photon time-bin superpositions*, *Optica* **11**, 926 (2024).

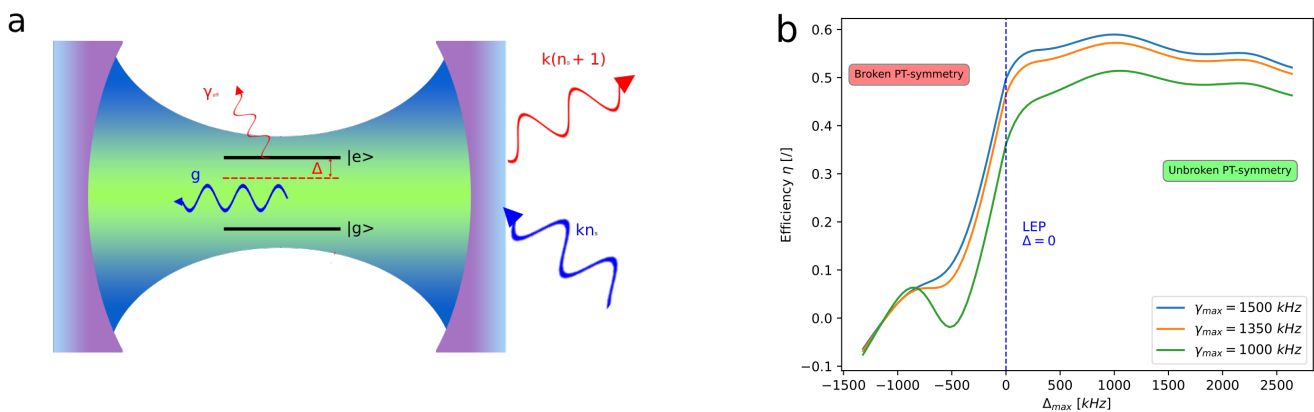
"Prawdziwy" Kwantowy Silnik Ciepły o Wyjątkowej Sprawności

I. Davydenko¹, G. Chimczak^{1, †}

¹ Wydział Fizyki i Astronomii, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, Uniwersytetu Poznańskiego 2, 61-614 Poznań

†email: grzegorz.chimczak@amu.edu.pl

Kwantowe silniki ciepłe (QHE), będące odpowiednikami klasycznych maszyn ciepłych, działają na układach wykazujących efekty kwantowe. W ciągu ostatniej dekady przyciągnęły one znaczną uwagę ze względu na swoje zastosowanie w miniaturowych i niskomocowych systemach, testowaniu kwantowych ograniczeń termodynamicznych oraz ich rolę w procesach biomolekularnych[1, 2]. QHE zostały zaimplementowane w formie mikroskopowych układów elektromechanicznych[3], a także jako pojedyncze jony[4], kropki kwantowe[1] czy ultrazimne atomy bozonowe[5].



Rysunek 1: (a) Model kwantowego silnika ciepłego. Dwupoziomowy atom w optycznej wnęce, która jest w kontakcie ze zbiornikiem ciepła (rezerwuarem). g – stała sprzężenia atom-wnęka, γ_{eff} – efektywne tłumienie, Δ – odstrojenie od rezonansu między częstotliwością atomu a częstotliwością wnęki, n_s – średnia liczba fotonów termicznych w rezerwuarze. (b) Sprawność kwantowego silnika ciepłego jako funkcja Δ_{max} dla różnych wartości γ_{max} .

W ostatnich latach badany był wpływ wyjątkowych punktów Liouvilleana (LEP) na wydajność QHE. Wykazano, że okrążenie LEP może poprawić wydajność oraz sprawność QHE w formie jonu $^{40}\text{Ca}^+$ [4]. Jednak taki silnik jest napędzany polem laserowym opisanym przez stan koherentny. W związku z tym nie powinien być traktowany jako kwantowy analog klasycznej maszyny ciepłej, która wykorzystuje chaotyczną kąpiel cieplną jako źródło energii. W naszej prezentacji przedstawiamy implementację QHE napędzanego przez stany termiczne. Nasz model, przedstawiony na Rys. 1(a), składa się z dwupoziomowego atomu sprzężonego z wnęką optyczną. Straty wnęki są opisane przez κ . Termiczne fotony są dostarczane do silnika z rezerwuaru znajdującego się w stanie termicznym. Kwantowy cykl Otto był zaimplementowany za pomocą zmieniającego się w czasie odstrojenia od rezonansu Δ lub efektywnego tłumienia γ_{eff} , podczas gdy drugi z parametrów pozostaje stały. Jak pokazano na Rys. 1(b), obserwowany jest znaczący wzrost sprawności silnika, jeżeli cykl otacza kilka LEP co zbadano dla różnych γ_{max} . Podsumowując, pokazano możliwość wykorzystania efektów w pobliżu punktów EP do ulepszenia wydajności kwantowego silnika ciepłego zasilanego przez stany termiczne!

Podziękowania i źródła finansowania

Praca ta była dofinansowana w ramach grantu Narodowego Centrum Nauki (NCN) Maestro nr DEC-2019/34/A/ST2/00081. I.D. dziękuje za wsparcie w ramach projektu Inicjatywa Doskonałości – Uczelnia Badawcza nr 119/39/UAM/0009.

Literatura

- [1] Josefsson, M., Svilans, A., Burke, A.M. et al. Nature Nanotech 13, 920–924 (2018).
- [2] Keye Zhang, Francesco Bariani, and Pierre Meystre, Phys. Rev. Lett. 112, 150602 (2014).
- [3] Steeneken, P., Le Phan, K., Goossens, M. et al. Nature Phys 7, 354–359 (2011).
- [4] J.-T. Bu, J.-Q. Zhang, G.-Y. Ding, J.-C. Li, J.-W. Zhang, B. Wang, W.-Q. Ding, W.-F. Yuan, L. Chen et al. Phys. Rev. Lett. 130, 110402 (2023).
- [5] O. Fialko and D. W. Hallwood, Phys. Rev. Lett. 108, 085303 (2012)

Obrazowanie magnetyczne i kontrola dynamiki wielociałowej w nanoskali

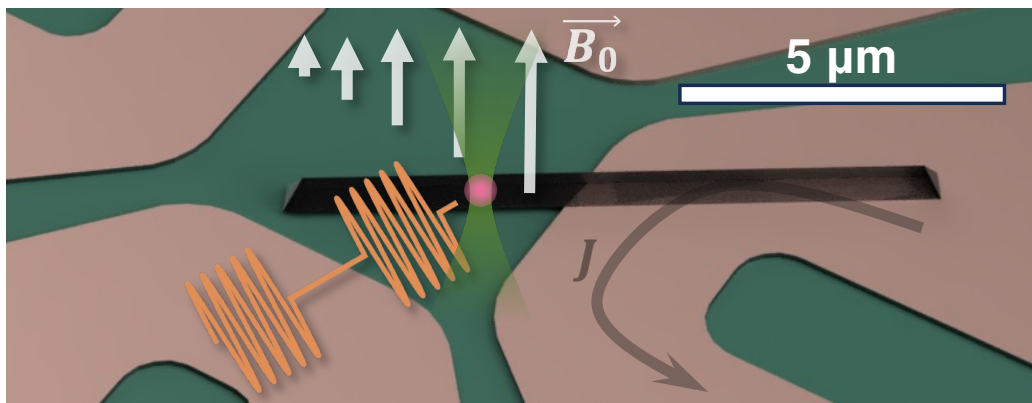
P. Put¹, **N. T. Leitao**¹, **C. Spaegle**¹, **H. Gao**¹, **O. A. Makarova**¹, **F. Capasso**¹, **L.S. Martin**^{1,2}, **H. Park**^{1,2}, **M. D. Lukin**¹

¹ Department of Physics, Harvard University, Cambridge, MA 02138, USA

² Department of Chemistry and Chemical Biology, Harvard University, Cambridge, MA 02138, USA

†email: pput@fas.harvard.edu

Obrazowanie metodą rezonansu magnetycznego (MRI) to potężna technika analityczna szeroko stosowana w naukach materiałowych, biologii i medycynie. Jednak jej rozdzielczość przestrzenna jest zazwyczaj ograniczona do skali makroskopowej [1]. W tej prezentacji pokażę MRI o rozdzielczości nanometrycznej poprzez integrację silnych lokalnych gradientów pola magnetycznego z gęstym zespołem czujników kwantowych opartych na spinach elektronowych w diamencie. Łącząc szybkie sterowanie gradientem magnetycznym wraz z inżynierią Floquet, obrazujemy dynamikę precesji przestrzennie niejednorodnych spiral spinowych. Motywowani nowym teoretycznym powiązaniem między hydrodynamiką spinową a skalowalnym ścisaniem spinowym, wykorzystujemy to podejście do kontrolowania i sondowania koherentnej wymiany dipolowej spinów napędzającej wielociałową ewolucję spirali [2]. Nasze obserwacje otwierają drogę do kwantowej kontroli metrologicznie użytecznego splątania [3] oraz obrazowania materiałów [4] i układów biologicznych w nanoskali.



Rysunek 1: Ilustracja urządzenia wykorzystywanego w celu obrazowania i kontroli spinów elektronów w nanoskali przedstawiająca próbkę "czarnego diamentu" na powierzchni cewki tworzącej niejednorodne pole magnetyczne \vec{B}_0 . Zaznaczono również zielone światło laserowe, czerwoną fluorescencję oraz pole mikrofalowe, które są odpowiedzialne za przygotowanie, odczyt i koherentną kontrolę stanu spinowego zbioru centrów barwnych azot-wakancja w diamencie.

Literatura

- [1] Budakian, Raffi, et al. "Roadmap on nanoscale magnetic resonance imaging." *Nanotechnology* 35.41 (2024): 412001.
- [2] Put, Piotr, et al. "Nanoscale Magnetic Resonance Imaging and control of many-body dynamics in a strongly interacting dipolar system"(in preparation) (2025).
- [3] Gao, Haoyang, et al. "Signal amplification in a solid-state quantum sensor via asymmetric time-reversal of many-body dynamics." *arXiv:2503.14598* (2025).
- [4] Koyluoglu, Nazli U., et al. "Interaction-enhanced correlation sensing via non-equilibrium quench dynamics"(in preparation) (2025).

Magnetometria bez mikrofal z centrami barwnymi azot-wakancja w nanodiamentach

M. Mrózek¹ †, O. Dhungel^{2,3}, T. Lenz^{2,3}, V. Ivády^{4,5,6}, A. Gali^{7,8,9}, A. Wickenbrock^{2,3}, D. Budker^{2,3,10}, W. Gawlik¹, A. M. Wojciechowski¹

¹Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej, Uniwersytet Jagielloński, ul. Lojasiewicza 11, 30-348 Kraków, Polska

²Helmholtz-Institut Mainz, GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH, 55128 Mainz, Germany

³Johannes Gutenberg-Universität Mainz, 55128 Mainz, Germany

⁴Department of Physics of Complex Systems, ELTE Eötvös Loránd University, Egyetem tér 1-3, H-1053 Budapest, Hungary

⁵MTA-ELTE Lendület "Momentum" NewQubit Research Group, Pázmány Péter, Sétány 1/A, 1117 Budapest, Hungary

⁶Department of Physics, Chemistry and Biology, Linköping University, 581 83 Linköping, Sweden

⁷Wigner Research Centre for Physics, P.O. Box 49, H-1525 Budapest, Hungary

⁸Budapest University of Technology and Economics, Institute of Physics, Department of Atomic Physics, Műegyetem rakpart 3., 1111 Budapest, Hungary

⁹MTA-WFK Lendület "Momentum" Semiconductor Nanostructures Research Group, P.O. Box 49, H-1525 Budapest, Hungary

¹⁰Department of Physics, University of California, Berkeley, California 94720-300, USA

†email: mariusz.mrozek@uj.edu.pl

Nanodiamenty (ND) z ujemnie naładowanymi centrami barwnymi azot-wakancja (NV⁻) oferują wiele interesujących zastosowań, takich jak wykrywanie pól elektrycznych i magnetycznych, temperatury i/lub ciśnienia, także w żywych komórkach.

W naszych badaniach skupiamy się na pomiarach fluorescencji pochodzącej z centrów NV w nanodiamentach w funkcji statycznego zewnętrznego pola magnetycznego. Obserwujemy charakterystyczne rezonanse blisko zerowego pola magnetycznego i analizujemy zależność szerokości i kontrastu tych rezonansów od rozmiaru diamentu (w zakresie 30 nm–3000 nm) oraz od wartości polaryzującego pola magnetycznego przyłożonego poprzecznie do skanowanego pola. Przeprowadzamy również pomiary optycznie wykrywanego rezonansu magnetycznego (ODMR), aby określić ilościowo rozszczepienie rezonansu ODMR w zerowym polu w zależności od różnych rozmiarów nanodiamentów i porównujemy je z pomiarami szerokości i kontrastu rezonansów zeropolowych w zarówno dla nanodiamentów, jak i próbek typu bulk. Zaobserwowane właściwości dostarczają przekonujących dowodów na istnienie efektów relaksacji krzyżowej w układach NV, zachodzących blisko zerowych pól magnetycznych. Omówiony zostanie także potencjał tej techniki do wykorzystania w praktycznej magnetometrii.

Literatura

- [1] O. Dhungel, M. Mrózek, T. Lenz, V. Ivády, A. Gali, A. Wickenbrock, D. Budker, W. Gawlik, and A. M. Wojciechowski, "Near-zero-field microwave-free magnetometry with nitrogen-vacancy centers in nanodiamonds," *Opt. Express* 32, 21936-21945 (2024)

Optycznie Detektowany Rezonans Magnetyczny w trybie hyperspectralnym: zastosowania do badań struktur kwantowych

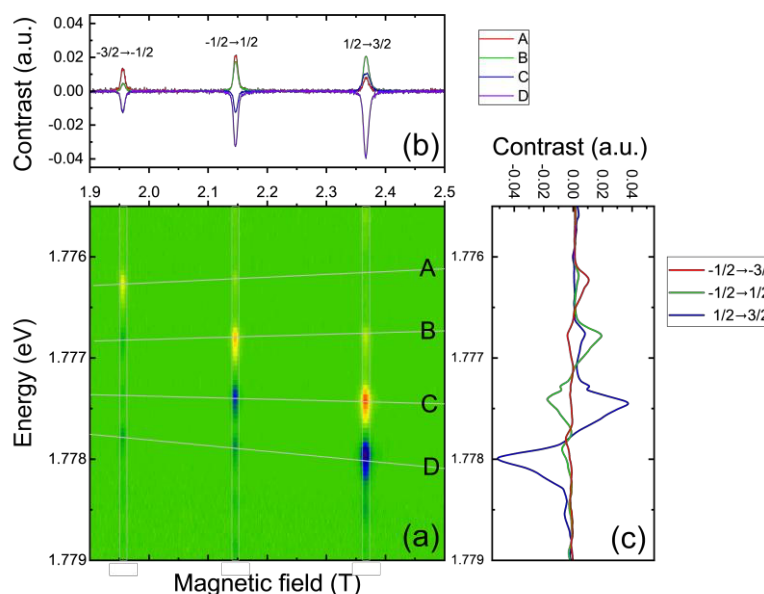
V. Yu. Ivanov^{1†}, J. Dresner²

¹Institut Fizyki Polskiej Akademii Nauk, aleja Lotników 32/46 02-668 Warszawa

²Eurotek Int.Sp.z o.o. Skrzetuskiego 6, 02-726 Warszawa

†email: ivanov@ifpan.edu.pl

Optycznie detektowany rezonans magnetyczny (in English – “optically detected magnetic resonance” – ODMR) jest unikatowym narzędziem do badań struktury i dynamiki spinowej układów kwantowych - nanostruktur półprzewodnikowych, centrów emisji w kryształach etc. gdyż pozwala na detekcję przejść spinowych w pojedynczych (zlokalizowanych przestrzennie) układach elektronowych do zastosowania w obliczeniach kwantowych oraz w sensorach kwantowych. Najbardziej spektakularnym przykładem zastosowania ODMR są badania centrów NV⁻ w diamencie – emiterów pojedynczych fotonów [1,2]. Rozszerzenie zastosowania techniki ODMR do wszechstronnych badań nanostruktur z układami kwantowymi wymaga znacznego podwyższenia czułości układu detekcji oraz jednoczesnej akwizycji wszystkich sygnatur widma optycznego (amplitudy, energii przejścia, stopnia polaryzacji, szerokości spektralnej linii, czasu relaksacji) w funkcji pola magnetycznego. Rozwiązaniem tego problemu jest zastosowanie do rejestracji widma optycznego kamery FFT-CCD synchronizowanej z impulsami pompowania mikrofalowego (w zakresie milisekundowym) oraz ze skanowaniem pola magnetycznego czyli realizacji reżymu hyperspektralnej akwizycji sygnału ODMR. W tym komunikacie przedstawimy szczegóły realizacji aparaturowej układu ODMR, pracującego w pasmie 60 GHz oraz wyniki badań ODMR układów spinowych w nanostrukturach półprzewodnikowych (studniach kwantowych oraz kropkach kwantowych), NV⁻ - centrów w diamencie, oraz jonów Cr³⁺ w Al₂O₃ oraz Ga₂O₃. Pokażemy przykłady zastosowania techniki ODMR w trybie hyperspektralnym do identyfikacji układów spinowych i określenia ich podstawowych parametrów: całkowitego spina, współczynnika g, stałą pola zerowego D, energii przejść optycznych, symetrii lokalnej, czasów relaksacji spinowej i prawdopodobieństwa przejścia radiacyjnego. Wynik pomiaru ODMR R₁-linii emisji jonu Cr³⁺ w rubinie (Al₂O₃) przedstawiony na rysunku 1.



Rysunek 1: ODMR jonu Cr³⁺ (3d³) w Al₂O₃:Cr monitorowany przez widmo linii R₁. Częstość pompowania mikrofalowego $f=59.8$ GHz, temperatura $T=1.8$ K, (a) 3D-widmo ODMR, (b) kontrast ODMR w funkcji pola magnetycznego dla poszczególnych przejść optycznych; (c) kontrast ODMR w funkcji energii emisji dla poszczególnych przejść spinowych.

Literatura

- [1] J. Wrachtrup, F. Jelezko J. Phys.: Condens. Matter 18 S807 (2006)
- [2] I. Aharonovich, D. Englund, M. Toth, Nature Photonics 10, 631–641 (2016)

Jednoczesna konwersja częstości i kształtowanie czasowo-widmowe impulsów pojedynczych fotonów

M. Mikołajczyk^{1, †}, A. Golestani^{1,2}, R. H. S. Bannerman³, J. C. Gates³, P. G. R. Smith³, M. Karpiński¹

¹ Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski, ul. Pasteura 5, 02-093 Warszawa

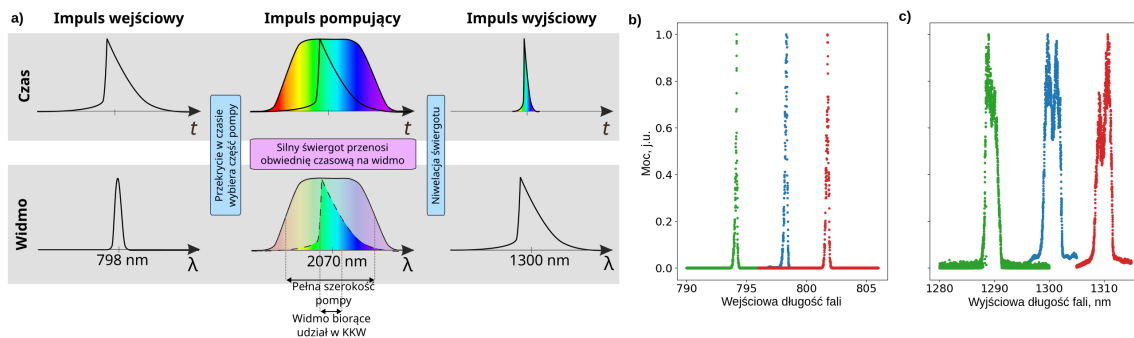
² Department of Electrical & Computer Engineering, University of Toronto, 10 King's College Road, Toronto, Kanada

³ Optoelectronics Research Centre, University of Southampton, Southampton SO17 1BJ, Wielka Brytania

†email: michal.mikolajczyk@fuw.edu.pl

Transmisję informacji kwantowej na duże odległości pomiędzy urządzeniami takimi jak źródła pojedynczych fotonów, pamięci kwantowe, czy atomowe przetworniki informacji kwantowej utrudniają rozbieżne parametry czasowo-widmowe fotonów emitowanych i pochłanianych przez takie urządzenia. Kwantowa konwersja częstości (KKC), tj. niskoszumowa nieliniowa optyczna konwersja częstości jest ugruntowaną metodą ujednolicania centralnej długości fali, jednakże nie rozwiązuje ona problemu rozbieżności szerokości spektralnych impulsów pojedynczych fotonów, a także ich czasów trwania sięgających od pikosekund do setek nanosekund.

W niniejszej pracy prezentujemy sprzęg kwantowy konwertujący impulsy o mocy pojedynczych fotonów jednocześnie korygując rozbieżności długości fali, szerokości widmowej i czasu trwania impulsów pomiędzy tymi typowymi dla kropek kwantowych (798 nm, 5 GHz, 150 ps) i standardowym kanałem telekomunikacji światłowodowej (1300 nm, 100 GHz, <25 ps). Sprzęg wykorzystuje nieliniową optyczną konwersję częstości z pomocą silnie świergoczącej pompy w istocie realizując nieliniową soczewkę czasową.



Rysunek 1: a) Konwersja impulsów. Impuls wejściowy ma wąskie widmo i długi czas trwania właściwy dla kropek kwantowych. GRC zachodzi tylko, gdy sygnał wejściowy i pompa przekrywają się w czasie. Silny świergot pompy skutkuje tym, że (1) tylko część widma pompy bierze udział w GRC, (2) obwiednia czasowa sygnału jest przeniesiona na widmo wyjściowe i (3) sygnał wyjściowy również jest świergoczący. b),c) Eksperymentalne poszerzenie widma.

Nasz konwerter wykorzystuje generację różnicy częstości (GRC) zachodzącą w kryształach nieliniowych niobianu litu. Pompa pochodzi z niestandardowego układu laser-wzmacniacz w którym femtosekundowe impulsy 2070 nm zostają rozciągnięte przez dedykowaną świergoczącą siatkę Bragga (ŚSB) o dyspersji 340 ps/nm. Impulsy o mocy pojedynczych fotonów na długości fali 798 nm oddziałują z pompą w kryształach i są konwertowane na 1300 nm i poszerzone widmowo. Impuls widmowy jest następnie skompresowany w czasie przez niwelację świergotu za pomocą ŚSB o dyspersji -800 ps/nm. Wyjątkową właściwością naszego konwertera jest zdolność jednoczesnej konwersji długości fali, szerokości widmowej i czasu trwania impulsu.

Skonwertowaliśmy impulsy o mocy pojedynczych fotonów o długości fali 798 nm, szerokości 5,2 GHz i czasie trwania 150 ps do standardowego kanału telekomunikacyjnego: 1300 nm, 35 GHz i 25 ps. Zmierzona wewnętrzna wydajność kwantowa konwersji wynosiła ponad 80%.

Używając naszego konwertera byliśmy w stanie skonwertować słabe impulsy światła spójnego podobne do emisji z kropek kwantowych do pasma telekomunikacyjnego O. Odpowiednio zmodyfikowana wersja konwertera mogłaby posłużyć do wydajnego sprzęgnięcia wyjścia kanału telekomunikacyjnego do pamięci kwantowej formując pełne łącze kwantowe, które mogłoby znaleźć zastosowanie np. w wymianie splątania. Dalszy rozwój mógłby pozwolić m.in. na zmianę wykładniczego profilu czasowego w Gaussowski. Zademonstrowaliśmy możliwość zastosowania KKC do złożonego kształtowania czasowo-widmowego: nasz sprzęg konwertuje częstość, kształtuje widmo oraz profil czasowy w jednym kroku.

Pomiar grupowania fotonów dla wielomodowego światła termicznego za pomocą obrazowania czasowego

F. Sońnicki^{1,2}, M. Mikołajczyk¹, S. Kapoor¹, J. Szuniewicz¹, D. B. Horoshko³, M. I. Kolobov³, M. Karpiński¹ †

¹Uniwersytet Warszawski, Wydział Fizyki, Pasteura 5, 02-093 Warszawa, Polska

²Paderborn University, Integrated Quantum Optics, Institute for Photonic Quantum Systems (PhoQS), Warburger Str. 100, 33098 Paderborn, Niemcy

³Univ. Lille, CNRS, UMR 8523 — PhLAM — Physique des Lasers Atomes et Molécules, F-59000 Lille, Francja

†email: michal.karpinski@fuw.edu.pl

Statystyka fotonów ma znaczenie zarówno w optyce klasycznej, jak i kwantowej, na przykład w kontekście zastosowań takich jak interferometria Hanbury’ego Browna i Twissa, czy obrazowanie duplikowane. Silne korelacje natężeniowe, niezbędne dla wydajnej realizacji tych efektów, obserwowane są dla jednomodowego światła termicznego. Korelacje te kwantyfikuje znormalizowana funkcja korelacji drugiego rzędu, $g^{(2)}(t)$. Jednomodowe światło termiczne wykazuje maksymalną wartość $g^{(2)}(0) = 2$. W praktyce, aby uzyskać tak wysoki poziom grupowania fotonów, niezbędne jest uzyskanie bardzo wysokiej rozdzielczości czasowej detekcji, krótszej niż czas koherencji źródła światła [1]. W przypadku źródeł szerokopasmowych widmowo, osiągnięcie tej rozdzielczości było szczególnie trudne, ponieważ wymagało zastosowania silnego filtrowania widmowego, które skutkowało odrzuceniem większości sygnału, co obniżało wydajność pomiarów.

Dotychczasowe pomiary wykorzystujące technologie o wysokiej rozdzielczości czasowej, takie jak kamery smugowe, nie były w stanie uzyskać pełnego grupowania fotonów w przypadku światła termicznego wielomodowego.

Aby rozwiązać ten problem, zastosowaliśmy technikę elektrooptycznego obrazowania czasowego. W ramach tego podejścia wykorzystaliśmy elektrooptyczną soczewkę czasową, która umożliwiła uzyskanie powiększenia czasowego o współczynniku powiększenia 520, co znacząco poprawiło rozdzielczość czasową pomiarów, osiągając wartość poniżej 3,4 ps szerokości połówkowej. Użyte powiększenie czasowe pozwoliło na uzyskanie wymaganej rozdzielczości czasowej w pomiarach $g^{(2)}(t)$, nawet w przypadku światła wielomodowego.

Źródłem światła termicznego był nierezonansowy spontaniczny parametryczny podział częstości w kryształach fosforanu tlenku tytanu i potasu z periodyczną inwersją domen nieliniowych, pompowany ultrakrótkimi impulsami laserowymi o centralnej długości fali 780 nm. Wartość liczby Schmidta, która opisuje liczbę modów, wynosiła od 1,02 (światła jednomodowe) do 1,68 (światła wielomodowe). Liczba modów kontrolowana była za pomocą układu kształtowania impulsów pompujących, wykorzystującego przestrzenny modulator fazy. Zastosowanie układu powiększenia czasowego, obejmującego włókno dyspersyjne, elektro-optyczną modulację fazy oraz światłowodową siatkę Bragga o zmiennym okresie, umożliwiło uzyskanie wysokiej rozdzielczości czasowej. Po powiększeniu czasowym sygnał kierowany był na dzielnik wiązki i wykrywany za pomocą dwóch detektorów pojedynczych fotonów. Sygnały detekcji były znakowane czasowo, co pozwoliło na pomiar funkcji $g^{(2)}(t)$. Zmierzona została wartość $g^{(2)}(0)$ bliska 2, nawet w przypadku światła termicznego wielomodowego.

Takie podejście otwiera nowe możliwości dla technik opartych na korelacjach intensywności, w dziedzinach takich jak astronomia czy optyka kwantowa, gdzie precyzyjne pomiary i kontrola koherencji światła mają kluczowe znaczenie.

Literatura

[1] L. Mandel, E. Wolf, *Optical Coherence and Quantum Optics*, Cambridge University Press, 1995.

Laserowa modyfikacja plazmonicznych nanokompozytów metaliczno-dielektrycznych

P. Nyga^{1†}, M. P. Nowak¹, M. Woszt¹, T. Wojciechowski², B. Bartosewicz¹, W. Ryzner¹, P. Wachulak¹

¹Institut Optoelektroniki, Wojskowa Akademia Techniczna, ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, Polska

²Institut Fizyki Polskiej Akademii Nauk, Aleja Lotników 32/46, 02-668 Warszawa, Polska

†email: piotr.nyga@wat.edu.pl

Nanokompozyty metaliczno-dielektryczne mogą być wytwarzane poprzez naprzemienne osadzanie cienkich warstw metalu i dielektryka techniką fizycznego osadzania z fazy gazowej. Gdy na podłożu dielektrycznym osadza się kilkunanometrową warstwę metalu, np. srebra, nie rośnie ona w sposób ciągły, a przyjmuje postać wyspowa – składa się z nanocząstek rozmieszczonych na podłożu w sposób nieuporządkowany [1,2]. Dobór parametrów procesu oraz grubości warstw umożliwia kontrolę właściwości transmisyjnych i odbiciowych wynikowego kompozytu [3,4]. Laserowa modyfikacja umożliwia precyzyjne zmiany właściwości optycznych nieuporządkowanych nanostruktur plazmonicznych [5–9]. Połączenie precyzyjnie monitorowanego wytwarzania i laserowej modyfikacji może pozwolić na nieosiągalną wcześniej kontrolę właściwości optycznych nanokompozytów metaliczno-dielektrycznych.

W pracy prezentujemy wytwarzanie, właściwości optyczne i laserową modyfikację plazmonicznych nanokompozytów metaliczno-dielektrycznych. Kompozyty wytworzyliśmy techniką fizycznego osadzania z fazy gazowej przy użyciu wiązki elektronów. Na szklanych podłożach osadziliśmy naprzemienne warstwy dielektryka i metalu. Przez dobór materiałów, grubości i ilości warstw uzyskaliśmy kompozyty o zróżnicowanych właściwościach optycznych, w tym o absorpcji w szerokim zakresie spektralnym. Kompozyty poddaliśmy modyfikacji impulsami lasera femtosekundowego (1030 nm, 210 fs, producent Fluence Sp. z o. o., model Jasper 20) sprzężonego ze skanerem galwanometrycznym. Uzyskaliśmy polaryzacyjnie selektywne zmiany koloru oraz generację struktur typu LIPSS (Laser Induced Periodic Surface Structures). Rozdzielczość modyfikacji zależy od rozmiaru i fluencji wiązki lasera.

Opracowana technika umożliwia kontrolę właściwości optycznych nanokompozytu. Może być zastosowana do wytwarzania fotonicznych powierzchni funkcjonalnych oraz druku miniaturowych lub makroskopowych zabezpieczeń.

Badania zostały sfinansowane przez Narodowe Centrum Nauki w ramach grantu 2024/53/B/ST11/04193.

Literatura

- [1] M. Liszewska, B. Budner, M. Norek, B. J. Jankiewicz, P. Nyga, *Beilstein J. Nanotechnol.* **10**, 1048 (2019).
- [2] P. Nyga, S. N. Chowdhury, Z. Kudyshev, M. D. Thoreson, A. V. Kildishev, V. M. Shalaev, A. Boltasseva, *Opt. Mater. Express* **9**, 1528 (2019).
- [3] M. D. Thoreson, J. Fang, A. V. Kildishev, L. J. Prokopeva, P. Nyga, U. K. Chettiar, V. M. Shalaev, V. P. Drachev, *J. Nanophotonics* **5**, 051513 (2011).
- [4] P. Nyga, S. Chmiel, M. Szczurek, M. Liszewska, M. Stefaniak, J. Firak, M. Michalska-Domanska, J. Mierczyk, M. Norek, 2016 18th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), Trento, Italy (2016).
- [5] A. S. Roberts, S. M. Novikov, Y. Yang, Y. Chen, S. Boroviks, J. Beermann, N. A. Mortensen, S. I. Bozhevolnyi, *ACS Nano* **13**, 71 (2019).
- [6] S. N. Chowdhury, J. Simon, M. P. Nowak, K. Pagadala, P. Nyga, C. Fruhling, E. G. Bravo, S. Maćkowski, V. M. Shalaev, A. V. Kildishev, A. Boltasseva, *Adv. Opt. Mater.* **12**, 2301678 (2023).
- [7] N. Dalloz, V. D. Le, M. Hebert, B. Eles, M. A. Flores Figueroa, C. Hubert, H. Ma, N. Sharma, F. Vocanson, S. Ayala, N. Destouches, *Adv. Mater.* **34**, 2104054 (2022).
- [8] X. Zhu, J. Engelberg, S. Remennik, B. Zhou, J. N. Pedersen, P. U. Jepsen, U. Levy, A. Kristensen, *Nano Lett.* **22**, 2786 (2022).
- [9] M. P. Nowak, B. Stępak, M. Pielach, Y. Stepanenko, T. Wojciechowski, B. Bartosewicz, U. Chodorow, M. Jakubaszek, P. Wachulak, P. Nyga, *Coatings* **14**, 1298 (2024).

Nieliniowe wiązki strukturyzowane w nematycznych ciekłych kryształach

Urszula A. Laudyn

Wydział Fizyki, Politechnika Warszawska, Koszykowa 75, 00-662 Warszawa
email: urszula.laudyn@pw.edu.pl

Wiązki strukturyzowane, takie jak wiry optyczne (ang. *optical vortices*) stanowią obecnie przedmiot intensywnych badań w fotonice i optyce nieliniowej. Ich unikalne właściwości otwierają drogę do szeregu potencjalnych zastosowań w mikromanipulacji, komunikacji optycznej czy przetwarzaniu informacji kwantowej. Szczególnie interesujące okazuje się badanie propagacji tego typu struktur w ośrodkach nieliniowych, takich jak nematyczne ciekłe kryształy (NCK) charakteryzujące się silną nieliniowością optyczną wynikającą ze zjawiska reorientacji anizotropowych molekuł w polu optycznym fali świetlnej. Nieliniowość reorientacyjna jest nieliniowością nielokalną, przy czym istnieje możliwość kontroli zarówno wielkości nieliniowości jak i jej nielokalności.

W prezentowanych badaniach skupiono się na eksperymentalnej analizie propagacji strukturyzowanych wiązek optycznych w nematycznych ciekłych kryształach, ze szczególnym uwzględnieniem tworzenia się samoogniskujących się wirów optycznych – tzw. nematikonów wirowych. Podstawowym celem było zrozumienie i potwierdzenie mechanizmów leżących u podłoża reorientacji molekuł NLC w obecności wiązki niosącej orbitalny moment pędu.

Kluczowym osiągnięciem jest wykazanie, że samoogniskujący się wir optyczny indukuje w analizowanym materiale strukturę, która odzwierciedla nie tylko profil intensywności wiązki, ale również ładunek topologiczny. W efekcie, orientacja molekuł ciekłokrystalicznych odpowiada topologii wiru, dzięki czemu jest ona trwałym „lokalnym zapisem” orbitalnego momentu pędu światła. Zjawisko to podkreśla unikalną cechę nematycznych ciekłych kryształów, polegającą na możliwości przenoszenia informacji o strukturze fazowej wiązki na stan ośrodka. Wykazane zostało, że wytwarzając soliton wirowy i wprowadzając tym samym torem wiązkę gaussowską małej mocy uzyskuje się nie tylko lokalizację wiązki gaussowskiej jak ma to miejsce przy wykorzystaniu „klasycznych” solitonów optycznych i wiązki małej mocy (w ogólności o innej długości fali) ale również obserwowane jest przekazanie orbitalnego momentu pędu, co powoduje, że wprowadzona wiązka gaussowska staje się również wirem optycznym.

Prezentowane badania przybliżają nas do pełniejszego wykorzystania potencjału struktur światła w sterowanych układach nieliniowych i stanowią krok w kierunku zaawansowanych, wielowymiarowych metod transmisji i obróbki informacji optycznej.

Produkcja i kalibracja instrumentów pomiarowych w GL Optic Polska

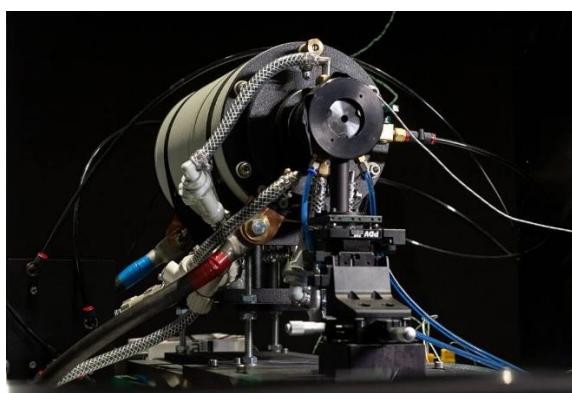
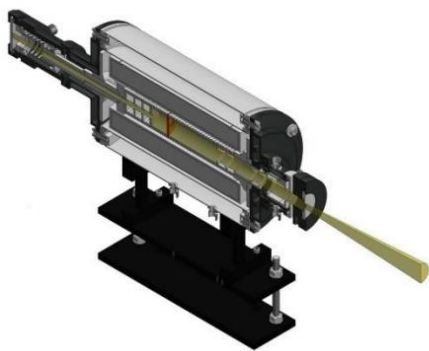
B. Skrzypiński^{1†}

¹GL Optic Polska Sp. z o.o., Poznańska 70, 62-040 Puszczykowo

†email: borys.skrzypinski@gloptic.com

GL Optic Polska Sp. z o.o. z siedzibą w Puszczykowie to polski producent instrumentów do pomiaru promieniowania optycznego w zakresie UV-VIS-NIR. W ofercie firmy znajdują się urządzenia takie jak spektrometry matrycowe, monochromatory, fotometry, radiometry, modułowe kamery luminancji ze zintegrowanymi spektrometrami, czy goniometry. Istotną część działalności firmy stanowią realizacje zamówień na niestandardowe systemy pomiarowe dla instytucji metrologicznych i przemysłu. Cechą wyróżniającą firmę jest posiadanie własnego Laboratorium badawczo-wzorcującego CARLO.

Laboratorium CARLO jako jedne z nielicznych prywatnych podmiotów w Europie posiada na wyposażeniu funkcjonalny model ciała doskonale czarnego, wykorzystywany jako wzorzec natężenia napromienienia rozpatrywanego w domenie widmowej. Częściowo zautomatyzowane stanowisko komparatora optycznego z podwójnym monochromatorem pozwala na tworzenie wzorców roboczych na własne potrzeby.



Rysunek 1: Przekrój modelu ciała doskonale czarnego wykorzystywanego w Laboratorium CARLO i jego praktyczna realizacja.

Podstawą łańcucha kalibracji wykonywanych w Laboratorium są wzorce weryfikowalne do PTB (niem. *Physikalisch-Technische Bundesanstalt*). Weryfikowalność łańcucha wzorcowania już teraz pozwala na czytelne wskazanie drogi do wzorca pierwotnego, zaś samo Laboratorium CARLO ubiega się o akredytację na wzorcowanie instrumentów pomiarowych w zakresie widmowego natężenia napromienienia.

Działalność Laboratorium, prócz działań komercyjnych, ukierunkowana jest także na współpracę z jednostkami badawczymi i środowiskiem akademickim celem rozwoju kompetencji, popularyzowania nauki i promowania optyki w Polsce i poza jej granicami.

Podziękowania i źródła finansowania

Laboratorium CARLO przy GL Optic Polska Sp. z o.o. powstało w ramach projektu "Utworzenie laboratorium wzorcowania optycznego i przeprowadzenie prac badawczo-rozwojowych nad opracowaniem realizacji wzorca promieniowania." realizowanego w ramach Wielkopolskiego Regionalnego Programu Operacyjnego na lata 2014 – 2020, programu Funduszy Europejskich.

Modułowa platforma kamer luminancji ze zintegrowany spektrometrem GL Opticam 4.x M SC rozwijana jest w ramach projektu „Opracowanie modułowej technologii pomiarów promieniowania optycznego w zastosowaniach laboratoryjnych i przemysłowych”. Projekt współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Inteligentny Rozwój. Projekt realizowany w ramach konkursu Narodowego Centrum Badań i Rozwoju: 6/1.1.1/2020 SS Duże/MSP/JN 4.

Technologia produkcji wielkoseryjnej preform i włókna światłowodowego

Michał Dłubek

Fibrain sp. z o.o., Zaczernie 190F, 36-062 Trzebowniko, Polska

Włókno światłowodowe jest podstawowym medium gwarantującym działanie współczesnej telekomunikacji. Mimo iż znana od lat, to technologia produkcji jest w dalszym ciągu trudna i elitarna. Dość wspomnieć, że w Europie jest jedynie kilka firm produkujących preformy i włókno telekomunikacyjne. Proces produkcji jest skomplikowany i wieloetapowy, a wiele z etapów trwa niemal dobę. Współczesne oczekiwania odbiorców w stosunku do jakości, powtarzalności i kosztów sprawiają, że produkcja masowa takiego włókna pozostawia ekstremalnie mało marginesu na błędy. Wykład przedstawi współczesną wielkoseryjną technologię produkcji preform i włókna telekomunikacyjnego, omawiając pokrótce etapy takie jak osadzanie sadzy szklanej, puryfikacja i konsolidacja czy też wyciąganie i dalsze przetwarzanie.

Dynamiczna kontrola koherencji przestrzennej wiązki przez superpozycję sieci punktów nieciągłości fazowych

P. Litwin¹, J. Wroński¹, K. Volke-Sepulveda², M. Szatkowski^{1, †},

¹ Katedra Optyki i Fotoniki, Wydział Podstawowych Problemów Techniki, Politechnika Wrocławska, Wyb. Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

² Instituto de Física, Universidad Nacional Autónoma de México, Cd. de México C.P. 04510, México

†email: mateusz.szatkowski@pwr.edu.pl

Koherencja jest uważana za jedną z najbardziej fundamentalnych właściwości światła. Odgrywa istotną rolę podczas badań zjawisk interferencji, analizy propagacji wiązki, czy badania relacji światła z materią. Istotnym jej przejawem jest koherencja przestrzenna, która opisuje korelację fazy między wybranymi punktami pola świetlnego. Kontrola koherencji przestrzennej wiązki odgrywa istotną rolę w zastosowaniach takich jak pułapkowanie optyczne [1], obrazowanie [2], czy komunikacja optyczna [3].

Najbardziej podstawową metodą kontroli koherencji przestrzennej jest zastosowanie rotującej matówki, która podczas obrotu generuje serię pól plamkowych o losowym rozkładzie fazy. Detektor o naturze całkującej uśrednia te obrazy w czasie, prowadząc do redukcji koherencji przestrzennej wiązki. Manipulacja stopniem koherencji polega na zmianie relacji pomiędzy rozmiarem wiązki na matówce, a jej ziarnistością [4].

Innym popularnym sposobem jest pogorszenie koherencji przestrzennej przez zwiększenie ilości modów przestrzennych generowanych przez laser (ang. degenerate cavity lasers). Odbywa się to poprzez mechaniczne rozjustowanie wnęki rezonansowej lasera lub wstawienie dodatkowych amplitudowych filtrów przestrzennych [5].

W niniejszej pracy prezentujemy nową metodę pozwalającą na w pełni dynamiczną kontrolę koherencji przestrzennej wiązki, która nie wymaga modyfikacji układu eksperymentalnego i jest realizowana w pełni cyfrowo.

Modyfikujemy pola świetlne z wykorzystaniem przestrzennego modulatora światła za pomocą którego wyświetlamy hologramy zawierające złożenie wielu sieci punktów nieciągłości fazowych o kontrolowanym stopniu uporządkowania i gęstości [6]. W ten sposób pośrednio imitujemy działanie rotującej matówki, jednocześnie wykorzystując możliwość koherentnej superpozycji amplitud zespolonych, obchodząc w ten sposób ograniczenia częstotliwości odświeżania przestrzennych modulatorów światła.

W pracy przedstawiamy zasady tworzenia hologramów, symulacje numeryczne oraz weryfikację eksperymentalną proponowanej metody pokazując różne formy kontroli parametrów koherencji przestrzennej i wskazując potencjalne obszary zastosowań.

Zaproponowane podejście umożliwia wykorzystanie koherencji przestrzennej jako dodatkowy stopień swobody strukturyzowania światła.

Podziękowania i źródła finansowania

Badania zostały sfinansowane w całości ze środków Narodowego Centrum Nauki, 2022/45/B/ST7/01234.

Literatura

- [1] J. Yu, Y. Xu, S. Lin, X. Zhu, G. Gbur, and Y. Cai, *Phys. Rev. A* **106**, 033511 (2022).
- [2] F. Dubois, M.-L. Novella Requena, C. Minetti, O. Monnom, and E. Istasse, *Appl. Opt.* **43**, 1131–1139 (2004).
- [3] Y. Li, J. Huang, W. Lin, S. Lian, H. Huang, Q. Quan, C. Wen, Z. Wu, Y. Xiao, and D. Deng, *Opt. Lett.* **50**, 2390–2393 (2025).
- [4] T. Stangner, H. Zhang, T. Dahlberg, K. Wiklund, and M. Andersson, *Appl. Opt.* **56**, 5427–5435 (2017).
- [5] Y. Eliezer, G. Qu, W. Yang, et al., *Light Sci. Appl.* **10**, 104 (2021).
- [6] G. Mellado-Villaseñor, A. Balbuena Ortega, and K. Volke-Sepúlveda, *J. Opt.* **26**, 115606 (2024).

Obrazowanie przez ośrodki rozpraszające dzięki wysokiej nieliniowości optycznej

P. Szczypkowski^{1, †}, A. Makowski¹, w. Zwoliński¹, K. Prorok², A. Bednarkiewicz², R. Łapkiewicz¹

¹ Instytut Fizyki Doświadczalnej, Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski, Pasteura 5, 02-093 Warszawa

² Instytut Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych Polskiej Akademii Nauk, Okólna 2, 50-422 Wrocław

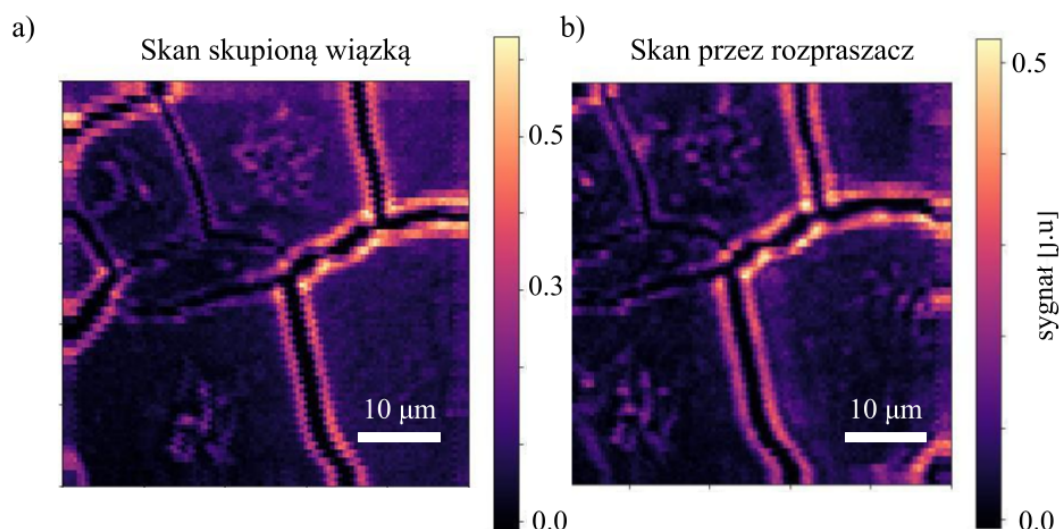
†email: Pawel.Szczypkowski@fuw.edu.pl

Obrazowanie przez warstwy rozpraszające stanowi jedno z kluczowych wyzwań we współczesnej optyce, szczególnie w kontekście obrazowania głęboko w tkankach biologicznych. Wraz ze wzrostem głębokości obrazowania, rozpraszanie światła zaczyna dominować, uniemożliwiając skuteczne działanie standardowych metod obrazowania.

W naszej pracy proponujemy nowatorskie podejście, łączące wysokie nieliniowości optyczne ze wzbudzeniem które powstaje po przepuszczeniu spójnego światła przez ośrodek rozpraszający (speckle). Losowy charakter speckli determinuje statystyczny rozkład intensywności poszczególnych ziaren [1]. Co istotne, w przypadku zastosowania materiału o silnie nieliniowej odpowiedzi – takiego jak nanocząstki lawinujące (Avalanching Nanoparticles [2]) – oświetlenie przez speckle prowadzi do powstania pojedynczego, subdyfrakcyjnego obaszru, który może być przesuwany po próbce.

Nasze symulacje oraz eksperymenty pokazują, że obrazy otrzymane przy użyciu oświetlenia specklami i skanowania nimi, nie różnią się od tych uzyskanych w zwykłym mikroskopie skanującym (Patrz Rysunek). Uzyskane wyniki podkreślają potencjał naszego podejścia w obrazowaniu głęboko w tkankach – przy zachowaniu wysokiej rozdzielczości w wymagających warunkach.

Poza mikroskopią, prezentowana metoda znajduje potencjalne zastosowania w obróbce materiałów, mikrochirurgii, czujnikach optycznych, terapii fotodynamicznej czy optogenetyce.



Rysunek 1: Porównanie wyników obrazowania dla próbki z nanocząstkami lawinującymi. (a) Obraz referencyjny uzyskany przy użyciu pojedynczego skupionego punktu wzbudzenia. (b) Obraz uzyskany z wykorzystaniem skanowania specklami. Speckle zostały wygenerowane za pomocą dyfuzora holograficznego, symulującego silnie rozpraszające medium.

Podziękowania i źródła finansowania

Chcemy wyrazić podziękowania za wsparcie finansowe: NCN (2023/49/N/ST7/04195, 2022/47/B/ST7/03465 oraz 2021/43/B/ST5/01244); FNP (projekt FIRST TEAM POIR.04.04.00-00-3004/17-00); Europejski Funduszu Rozwoju Regionalnego (POIR.04.04.00-00-3004/17-00); program HORYZONT EUROPA (FLORIN ID 101086142);

Literatura

- [1] J. W. Goodman, Speckle phenomena in optics: theory and applications. *Roberts and Company Publishers*, (2007)
- [2] C. Lee, et al "Giant nonlinear optical responses from photon-avalanching nanoparticles," *Nature*, vol. 589, (2021)

Nieinwazyjne obrazowanie przez dynamiczne rozpraszacze w reżimie zliczania pojedynczych fotonów

A. Makowski^{1,2}, W. Zwoliński¹, P. Szczypkowski¹, B. Gorzkowski¹, S. Gigan², R. Lapkiewicz^{1, †}

¹ Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski, Pasteura 5, 02-093 Warszawa, Polska

²Laboratoire Kastler Brossel, ENS-PSL Université, CNRS, Sorbonne Université, Collège de France, 24 rue Lhomond, Paryż 75005, Francja

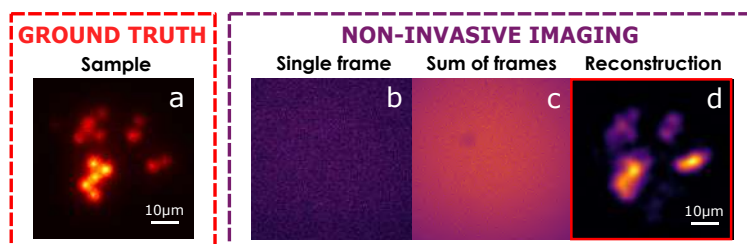
†email: radek.lapkiewicz@fuw.edu.pl

Rozpraszanie światła w złożonych ośrodkach, takich jak mgła czy tkanki biologiczne, stanowiło istotne wyzwanie w obrazowaniu biomedycznym, komunikacji, spektroskopii oraz innych technologiach optycznych i fotonicznych [1]. Tradycyjnie kontrolowanie rozpraszania światła w takich ośrodkach uważano za niemożliwe. Przełomowy eksperyment I. M. Vellekoopa i A. P. Moska [2] wykazał jednak, że możliwe jest ogniskowanie światła poprzez ośrodki rozpraszające, manipulując czołem fali przy użyciu modulatorów światła przestrzennego modulatora fazy. To odkrycie pogłębiło nasze zrozumienie ośrodków rozpraszających i otworzyło drogę do rozwoju nieinwazyjnych technik obrazowania [2, 3, 4, 5].

Pomimo postępu, szerokie zastosowanie nieinwazyjnych technik obrazowania pozostaje ograniczone, głównie ze względu na to, że pracują wyłącznie ze statycznymi rozpraszaczami. W obrazowaniu biologicznym *in vivo* dynamiczny charakter tkanek biologicznych wymaga metod zdolnych do radzenia sobie z czasowo zmiennym rozpraszaniem. Ponadto wiele istniejących metod wymaga wysokiego poziomu sygnału, co ogranicza ich praktyczne zastosowania. W przypadku szybko zmieniających się rozpraszaczy światło musi być rejestrowane w krótkim czasie, co prowadzi do niskich natężeń światła i dodatkowo utrudnia obrazowanie.

Aby sprostać tym wyzwaniom, przedstawiamy nieinwazyjną technikę obrazowania, która może działać w warunkach niskiej liczby fotonów i została specjalnie zaprojektowana do rozpraszania dynamicznego. Nasza metoda umożliwia odporną rekonstrukcję nawet wtedy, gdy pojedyncze klatki zawierają zbyt małą liczbę fotonów dla typowych metod (Rysunek 1b).

Zweryfikowaliśmy naszą metodę, wykorzystując mikroskopię fluorescencyjną szerokiego pola w niestandardowym układzie, który umożliwiał wstawienie dynamicznego rozpraszacza między obiektyw a próbkę. Użyliśmy próbki złożonej z $5\ \mu\text{m}$ fluorescencyjnych mikrosfer. Rysunek 1a przedstawia bezpośredni obraz bez rozpraszacza, natomiast Rysunek 1b pokazuje klatkę o czasie 21,8 ms z dynamicznym rozpraszaczem, zawierającą średnio 0,415 fotonu na piksel kamery. Rysunek 1c przedstawia sumę 4059 klatek, która nie zawiera informacji przestrzennych, ponieważ każda klatka była rejestrowana z inną realizacją rozpraszacza. Stosując naszą metodę uzyskaliśmy zrekonstruowany obraz przedstawiony na Rysunku 1d.



Rysunek 1: Obrazowanie fluorescencyjnych mikrokulek $5\ \mu\text{m}$ przez dynamiczny ośrodek: (a) Obraz próbki bez dyfuzora. (b) Klatka z kamery (21,8 ms) z dyfuzorem. (c) Suma 4059 klatek z obracającym się dyfuzorem. (d) Obraz zrekonstruowany algorytmem odzyskiwania fazy [?].

Podziękowania i źródła finansowania

Dziękujemy Anat Daniel za cenne uwagi. Praca była finansowana przez: Narodowe Centrum Nauki (granty 2023/49/N/ST7/04195 i 2022/47/B/ST7/03465); Fundację na rzecz Nauki Polskiej (projekt FIRST TEAM POIR.04.04.00-00-3004/17-00); Europejski Fundusz Rozwoju Regionalnego (POIR.04.04.00-00-3004/17-00); program HORYZONT EUROPA — działania Marii Skłodowskiej-Curie (projekt FLORIN 101086142);

Literatura

- [1] S. Yoon, et al. "Deep optical imaging within complex scattering media." *Nature Reviews Physics*, 2(3), 141–158 (2020).
- [2] I. M. Vellekoop and A. P. Mosk. "Focusing coherent light through opaque strongly scattering media." *Optics Letters*, 32(16), 2309–2311 (2007).
- [3] J. Bertolotti, et al. "Non-invasive imaging through opaque scattering layers." *Nature*, 491(7423), 232–234 (2012).
- [4] O. Katz, et al. "Non-invasive single-shot imaging through scattering layers and around corners via speckle correlations." *Nature Photonics*, 8(10), 784–790 (2014).
- [5] L. Zhu, et al. "Large field-of-view non-invasive imaging through scattering layers using fluctuating random illumination." *Nature Communications*, 13(1), 1447 (2022).

ŚRODA

2 LIPCA 2025

Nie taka daleka podczerwień – sięgając fal terahercowych

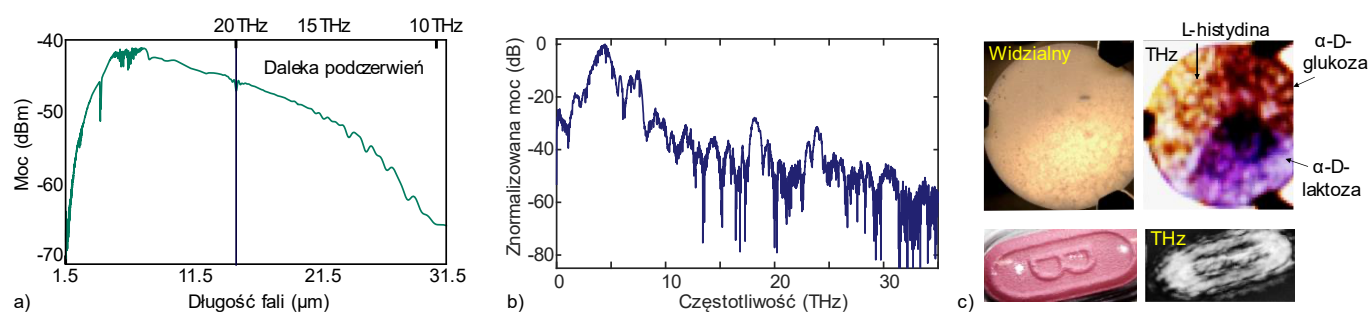
Ł. A. Sterczewski^{1,†}

¹ Grupa Elektroniki Laserowej i Światłowodowej, Wydział Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów, Politechnika Wroclawska, Wybrzeże Stanisława Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

†email: lukasz.sterczewski@pwr.edu.pl

Daleka podczerwień zwana jest również regionem fal terahercowych i obejmuje zakres długości fal elektromagnetycznych między 1000 μm a 15 μm , co odpowiada częstotliwościom optycznym od 300 GHz do 20 THz. Fale te coraz częściej stosuje się w badaniach nieniszczących, w wykrywaniu przemian fazowych farmaceutyków oraz w spektroskopii atmosferycznej. Niestety, pomimo dekad badań i rozwoju technologii, dostęp do tego fragmentu widma w temperaturze pokojowej jest nietrywialny i daleki od masowego użycia.

W trakcie wystąpienia zostaną omówione praktyczne techniki wytwarzania i detekcji ultra-szerokopasmowego promieniowania terahercowego o charakterze zarówno grzebieni częstotliwości, jak i termicznym. Rozwijane są one w ramach projektu TeraERC, którego misją jest stworzenie systemu spektroskopowego dalekiej podczerwieni opartego o źródła i detektory wielkości czipa kompatybilne z zasilaniem bateryjnym. Wizja takiego systemu, wykorzystującego miniaturowy emiter podczerwieni z małym poborem mocy, doczekała się już pierwszej realizacji [1] i oferuje pokrycie widmowe od bliskiej podczerwieni (1,5 μm /300 THz) do 30 μm /10 THz (Rys. 1a). Równolegle, rozwijane są techniki wykorzystujące kompaktowe źródła ultrakrótkich impulsów o telekomunikacyjnych długościach fali. Widma dalekiej podczerwieni wytwarzane przez organiczne kryształy nieliniowe są mierzone przy pomocy detektora InGaAs pracującego na długości fali 1,5 μm . Pokrywają one zakres 1–30 THz i już dzisiaj są ograniczone właściwościami materiałów optycznych w torze spektrometru (Rys. 1b).



Rysunek 1: Dostęp do regionu fal terahercowych przez (a) źródło termiczne [1], (b) organiczny kryształ nieliniowy PNPA [2]. (c) Przykładowe zastosowania obejmują obrazowanie farmaceutyków z przestrzennym rozkładem składników niewidocznym w zakresie widzialnym oraz badanie tabletek w oryginalnym opakowaniu [3].

Ostatnią, najmniej konwencjonalną techniką dostępu do regionu fal terahercowych jest nieliniowa konwersja częstotliwości w międzypasmowych laserach kaskadowych (ang. *interband cascade laser*, ICL) emitujących promieniowanie w zakresie średniej podczerwieni w temperaturze pokojowej. Duża wewnętrzna nieliniowość drugiego rzędu prowadzi do samo-podwojenia częstotliwości optycznej (wytwarzania drugiej harmonicznej) i oczekuje się, że może też posłużyć do wytwarzania częstotliwości różnicowej jeśli spełni się wymóg dopasowania fazowego. Takie źródła mogłyby potencjalnie zastąpić kriogeniczne terahercowe grzebienie częstotliwości oparte o kwantowe lasery kaskadowe (ang. *quantum cascade laser*, QCL). Wiadomo, że wielokolorowe źródła QCL z emisją w rejonie 3 THz znakomicie nadają się do obrazowania hiper- i multi-spektralnego materiałów farmaceutycznych (Rys. 1c), jednak temperatura pracy rzędu 30–40 K utrudnia ich wykorzystanie praktyczne.

Podziękowania i źródła finansowania

Ł. A. Sterczewski dziękuje za finansowanie Unii Europejskiej (ERC Starting Grant, TeraERC, 101117433). Wyrażone poglądy i opinie są wyłącznie poglądami autorów i niekoniecznie odzwierciedlają poglądy Unii Europejskiej lub Agencji Wykonawczej Europejskiej Rady ds. Badań Naukowych. Ani Unia Europejska, ani organ przyznający finansowanie nie ponoszą za nie odpowiedzialności. Autor dziękuje za możliwość korzystania z infrastruktury Narodowego Laboratorium Fotoniki i Technologii Kwantowych (NPLQT), która jest finansowana z Funduszy Europejskich w ramach Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój.

Literatura

1. J. Mnich, J. Kunsch, M. Budden, T. Gebert, M. Schossig, J. Sotor, and Ł. A. Sterczewski, *Opt. Express* **32**, 45801 (2024).
2. Ł. A. Sterczewski, J. Mnich, and J. Sotor, *Advanced Physics Research* **4**, 2400105 (2025).
3. Ł. A. Sterczewski, J. Westberg, Y. Yang, D. Burghoff, J. Reno, Q. Hu, and G. Wysocki, *Optica* **6**, 766 (2019).

Optymalizacja femtosekundowych impulsów laserowych z użyciem wybranych algorytmów metaheurystycznych

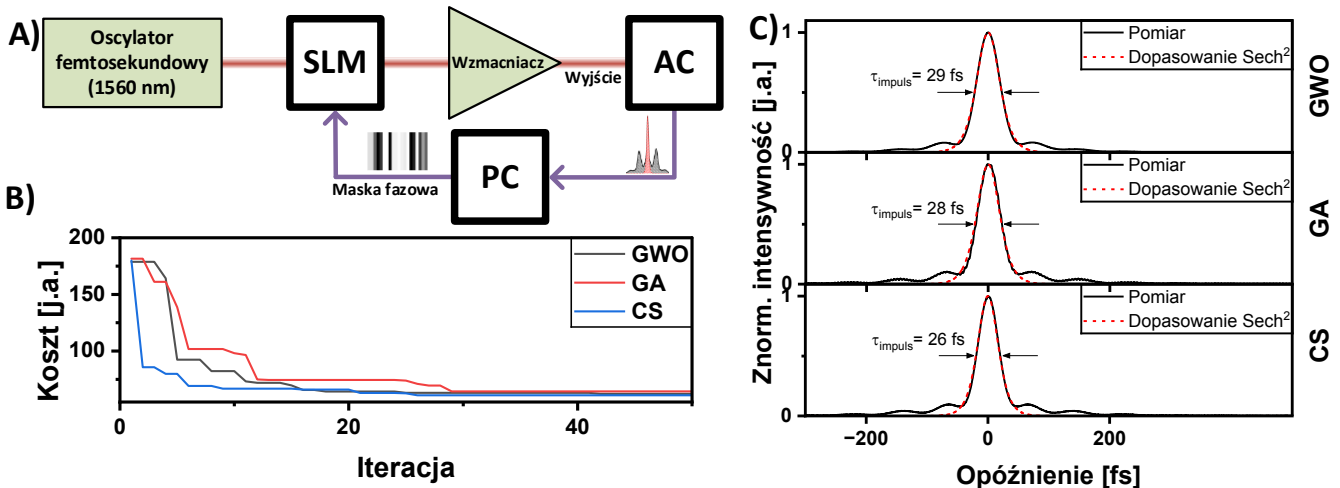
A. Kwaśny^{1, †}, M. Krakowski¹, G. Soboń¹

¹ Grupa Elektroniki Laserowej i Światłowodowej, Wydział Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów, Politechnika Wrocławska, Wybrzeże S. Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

†email: alicja.kwasny@pwr.edu.pl

Optymalizacja femtosekundowych laserów światłowodowych w celu wygenerowania najkrótszego impulsu jest skomplikowanym zadaniem – przez wiele parametrów ręczne znalezienie najlepszych ustawień może zająć wiele godzin. Jak wykazaliśmy w pracy [1], możliwa jest optymalizacja impulsów przy użyciu modulacji fazy spektralnej. W niniejszej pracy porównaliśmy trzy algorytmy uczenia maszynowego w optymalizacji ultrakrótkich impulsów: Algorytm Szarych Wilków (ang. Grey Wolf Algorithm, GWO), Algorytm Genetyczny (ang. Genetic Algorithm, GA) i Algorytm Szukających Kruków (ang. Crow Search, CS). Wszystkie z nich należą do kategorii algorytmów metaheurystycznych [2], szeroko stosowanych do rozwiązywania problemów inżynierskich, takich jak projektowanie komórek wieloprzejściowych [3]. Są to algorytmy uczenia maszynowego uczące się w czasie rzeczywistym, bez potrzeby wcześniejszego zbierania danych.

Rys. 1. przedstawia układ eksperymentalny, krzywe zbieżności, a także porównanie krzywych autokorelacji zoptymalizowanego impulsu dla każdego z algorytmów. Wiązka lasera femtosekundowego o czasie trwania ok. 560 fs została skierowana na przestrzenny modulator światła (ang. Spatial Light Modulator, SLM), który zmienia fazę spektralną za pomocą odpowiedniej maski. Następnie impuls był wzmacniony i skierowany do autokorelatora. Nieliniowe poszerzenie widma podczas wzmacniania pozwala na uzyskanie znacznie krótszego impulsu na wyjściu w porównaniu do impulsu początkowego. W eksperymencie matryca SLM została podzielona na 20 pionowych pasków, które były modulowane przez algorytmy. W takiej konfiguracji szerokość jednego paska odpowiada 1,8 nm szerokości spektralnej. Funkcja kosztu opisująca jakość impulsu uwzględnia wartość szerokości połówkowej oraz różnicę obszarów uzyskanego impulsu i obliczonego dopasowania. W ten sposób brany pod uwagę jest nie tylko czas trwania impulsu, ale także jego kształt. Wyniki pokazują, że wszystkie trzy algorytmy są odpowiednie dla takich problemów optymalizacyjnych, jednak algorytm CS najszybciej osiągnął minimum. Impuls zoptymalizowany tą metodą okazał się najkrótszy i miał najniższą wartość kosztu. Warto zauważyć, że algorytmy nie wymagają żadnego szkolenia przed rozpoczęciem działania i optymalizują kształt impulsu bez wiedzy o parametrach impulsu wejściowego lub parametrach wzmacniacza.



Rysunek 1: A) Schemat układu eksperymentalnego. AC – Autokorelator, PC – Komputer, SLM – Przestrzenny Modulator Światła B) Krzywa zbieżności, pokazująca wartość kosztu w zależności od iteracji. C) Porównanie krzywej autokorelacji (ACF, czarna linia) z krzywą dopasowania sech² (Fit, czerwona przerywana linia) dla testowanych algorytmów.

Podziękowania i źródła finansowania

Badania sfinansowano ze środków Narodowego Centrum Nauki w ramach projektu nr 2021/42/E/ST7/00111.

Literatura

- [1] M. Krakowski, A. Kwaśny, and G. Soboń, *Opt. Continuum* 3, 449 (2024).
- [2] K. Rajwar, K. Deep, and S. Das, *Artif Intell Rev* 56, 13187–13257 (2023).
- [3] A. Hudzikowski, A. Głuszec, K. Krzempek, and J. Sotor, *Opt. Express* 29, 26127 (2021).

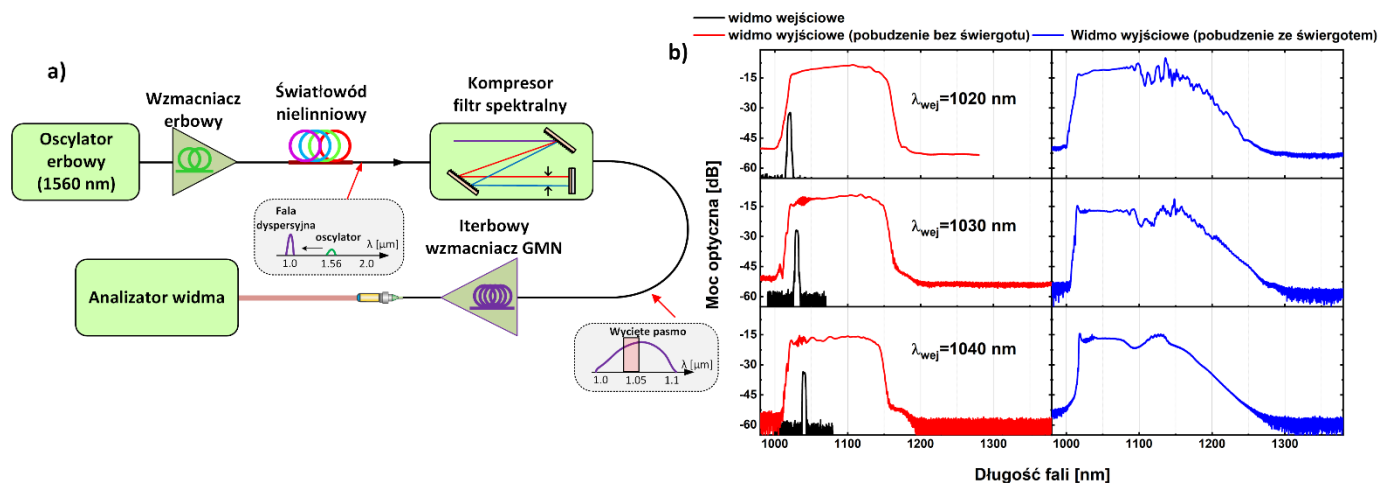
Wzmacnianie ultrakrótkich impulsów laserowych w nieliniowym reżimie zarządzania wzmocnieniem: analiza wpływu parametrów impulsu wejściowego

M. Krakowski[†], G. Sobóń¹

¹Laser & Fiber Electronics Group, Wydział Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów, Politechnika Wroclawska, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław
[†]email: mikolaj.krakowski@pwr.edu.pl

Lasery światłowodowe prezentują wiele zalet w porównaniu z laserami objętościowymi, w tym ich mniejszy rozmiar, łatwiejsze zarządzanie temperaturą, jakość wiązki i eliminację potrzeby justowania sytemu [1-2]. Wadą światłowodowych systemów laserowych jest wysoka nieliniowość, której konsekwencją są efekty nieliniowe, co z kolei ogranicza zakres ich możliwości w zastosowaniach wymagających dużej mocy. Obiecujące wyniki osiągnięto przy użyciu techniki CPA (ang. Chirped Pulse Amplification), lecz aktualnie wiodącą perspektywą jest tak zwane wzmacnianie w reżimie nieliniowego zarządzania wzmocnieniem GMN (ang. Gain Managed Nonlinear Amplification) [3]. W takim wzmacniaczu włókno aktywne jest znacznie dłuższe niż w konwencjonalnych wzmacniaczach światłowodowych, co pozwala impulsom przejść przez szereg reżimów: z nieliniowego, do samopodobnego i do GMN. Generacji reżimu GMN oparta jest na poszerzeniu widma impulsu w normalnym reżimie dyspersji.

W literaturze przedstawiono szereg zalet systemu GMN - wysoką moc wyjściową, szerokie spektrum optyczne impulsu wyjściowego i łatwość kompresji do <30 fs; jednak zaobserwowano również, że wzmacniacz jest silnie zależny od świergotu impulsu wejściowego [3]. W tym badaniu przeprowadzamy szczegółową analizę odpowiedzi wzmacniacza GMN w zależności od parametrów impulsu zasiewającego. Na Rys. 1. a) przedstawiono uproszczony schemat układu eksperymentalnego. System składa się z femtosekundowego oscylatora o długości fali 1560 nm, które po wzmocnieniu ulega przesunięciu widmowemu w kierunku krótszych długości fal w wysoce nieliniowym włóknie HNLF poprzez generację fali dyspersyjnej. Na wyjściu otrzymujemy widmo o długości 80 nm, obejmujące zakres od 1010 do 1090 nm. Z tego widma przy pomocy filtra wybrano 3 długości fali (1020, 1030, 1040) i 3 szerokości widma (8, 6 oraz 4 nm). Impulsy zostały wprowadzone do światłowodu dwupłaszczowego domieszkowanego iterbem (Coherent PLMA-YDF-10/125-VIII) o długości 3,4 m, pompowanego laserem o długości fali 976 nm i mocy 10W. Badano odpowiedź wzmacniacza (widmo impulsu wyjściowego) dla skompresowanych impulsów wejściowych oraz 2 rozciągniętych impulsów. Na rysunku 1. b) przedstawiono wybrane widma optyczne dla impulsów wejściowych o szerokości 4 nm, średnia moc każdego impulsu wynosiła 2 mW, zaprezentowane jest widmo dla impulsu skompresowanego oraz rozciągniętego w kompresorze.



Rysunek 1: a) uproszczony schemat systemu eksperymentalnego; b) wybrane widma optyczne zarejestrowane dla impulsu wejściowego oraz dla impulsu wyjściowego przy skompresowanym i rozciągniętym impulsie wejściowym.

Analizując widma wyjściowe wzmacniacza obserwujemy wysoką zależność odpowiedzi na parametry wejściowe. Dla impulsów skompresowanych na każdym paśmie osiągnięto widmo o podobnej szerokości, jednak dla długości 1020 pasmo wyjściowe jest najmniej zniekształcone. Dla impulsów nieskompresowanych zauważamy „wygładzenie” widma wraz ze wzrostem długości fali impulsu wejściowego. Badania zostały w całości sfinansowane przez Narodowe Centrum Nauki (NCN) w ramach grantu nr 2021/42/E/ST7/00111.

Literatura

- [1] N. Nishizawa, Jpn. J. Appl. Phys. **53**, , 090101 (2014).
- [2] M. E. Fermann and I. Hartl, Nat. Photonics **7**, 868–874 (2013)
- [3] P. Sidorenko, W. Fu, and F. Wise, Optica **6**, 1328–1333 (2019).

Światłowodowy laser femtosekundowy emitujący w zakresie 960 – 1025 nm do dwufotonowych okularów rozszerzonej rzeczywistości

D. Stachowiak^{1†}, Z. Łaszczych¹, J. Bogusławski¹, A. Hudzikowski¹, A. Gluszek¹, M. Marzejon^{2,3}, N. Czechowski^{2,3}, M. Grochalski^{2,3,4}, K. Komar^{2,3,4}, G. Soboń¹

¹ Wydział Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów, Politechnika Wrocławska, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

² Instytut Chemii Fizycznej Polskiej Akademii Nauk, Kasprzaka 44/52, 01-224 Warszawa

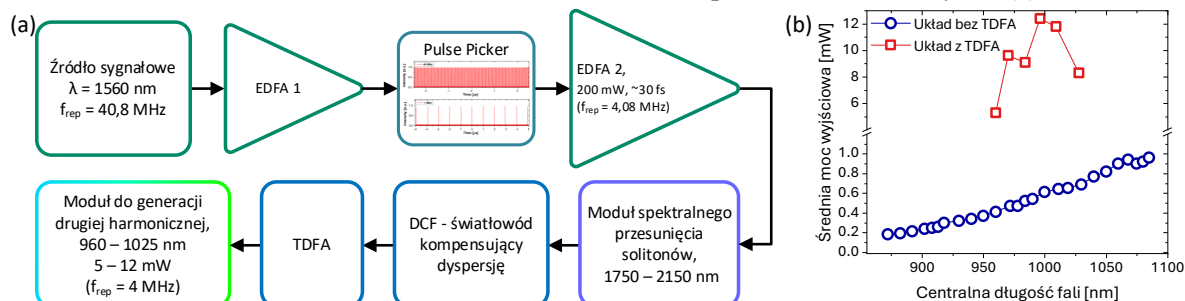
³ Międzynarodowe Centrum Badań Oka, Skierniewicka 10a, 01-230 Warszawa

⁴ Instytut Fizyki, Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej,

Uniwersytet Mikołaja Kopernika, Grudziądzka 5, 87-100 Toruń

†email: dorota.stachowiak@pwr.edu.pl

Prezentujemy światłowodowy laser femtosekundowy z możliwością przestrajania w zakresie długości fali od 960 do 1025 nm i o zredukowanej częstotliwości repetycji (f_{REP}) do 4 MHz. Parametry lasera zoptymalizowano dla zastosowania w badaniach wyświetlacza siatkówkowego wykorzystującego widzenie dwufotonowe (2PV, *two-photon vision*) do wyświetlania treści AR (*Augmented Reality*). Wykorzystane 2PV polega na postrzeganiu fal z zakresu podczerwieni jako bodźca barwnego o połowie krótszej długości fali, np. 1000 nm widzimy dwufotonowo jako światło zielone o długości fali ~ 500 nm. Pierwsza wersja lasera, pracującego w zakresie spektralnym od 872 - 1075 nm umożliwiła przeprowadzenie wstępnych badań nad 2PV u ludzi [1-3]. Średnia moc wyjściowa lasera (0,68 do 1,24 mW, przy $f_{REP} = 50$ MHz) podczas badań była ograniczana do bezpiecznego dla oka ludzkiego poziomu [1]. Odpowiadając na potrzeby badaczy z MCBO (Międzynarodowe Centrum Badań Oka), opracowaliśmy nowy układ lasera z 9-krotnie wyższą mocą wyjściową fundamentalnej $f_{REP} = 40$ MHz, oraz z możliwością obniżenia częstotliwości repetycji do 4 MHz. Laser ten wykorzystuje (tak jak w [1]) przesunięcie widma lasera erbowego w wyniku zjawiska nieliniowego (stymulowanego rozproszenia Ramana) w światłowodzie nieliniowym o anomalnej dyspersji i podwojenie częstotliwości za pomocą zjawiska generacji drugiej harmonicznej. Zmniejszenie częstotliwości repetycji jest funkcjonalnością, która pozwala na użycie wyższej mocy szczytowej przy tej samej średniej mocy ciągu impulsów (zwiększając czułość wzrokową), przy jednoczesnym zachowaniu reżimu bezpieczeństwa dla oka. Celem dalszego skalowania mocy do zastosowania lasera w badaniach dotyczących okularów AR zastosowano dodatkowy wzmacniacz tulowy (T DFA, *Thulium-doped fiber amplifier*), który umożliwia efektywne wzmocnienie solitonów ramanowskich. Schemat układu przedstawiono na Rys. 1 (a).



Rysunek 1: Schemat blokowy układu lasera (a) oraz wyjściowe moce średnie układu z i bez wzmacniacza T DFA (b)

Rys. 1 (b) pokazuje wynik pomiaru średniej mocy wyjściowej lasera dla różnych ustawień długości fali, w układzie bez T DFA oraz z T DFA. W przypadku użycia T DFA zakres przestrajania ulega zawężeniu (ze względu na pasmo wzmocnienia jonów tulu), jednakże możliwe jest uzyskanie od 12- do 23-krotnie wyższych mocy średnich w zakresie spektralnym 960 – 1025 nm (przy $f_{REP} = 4$ MHz). W referacie omówiona zostanie koncepcja zastosowania lasera w prototypie okularów AR z widzeniem dwufotonowym.

Podziękowania i źródła finansowania

Badania sfinansowano w ramach projektów Fundacji na rzecz Nauki Polskiej: First TEAM (First TEAM/2017-4/39), oraz Proof of Concept (FENG.02.07-IP.05-0233/23) współfinansowanego przez Unię Europejską ze środków 2. Priorytetu Programu Fundusze Europejskie dla Nowoczesnej Gospodarki 2021-2027 (FENG).

Literatura

[1] D. Stachowiak, et al., *Biomed. Opt. Express* **13**, 1899-1911 (2022).

[2] M. J. Marzejon, et al., *Biomed. Opt. Express* **14**, 2857-2872 (2023).

[3] M. Marzejon, et al., *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.*, **63** (7):2232 – F0440 (2022).

Femtosekundowy całkowicie światłowodowy laser generujący impulsy o centralnej długości fali 922 nm

Jan Szczepanek^{1,†}, Jacek Sobków^{1,2}, Tomasz Kardaś¹ i Yuriy Stepanenko^{1,2}

¹Fluence Sp. z o.o., ul. Kolejowa 5/7, 01-217 Warszawa

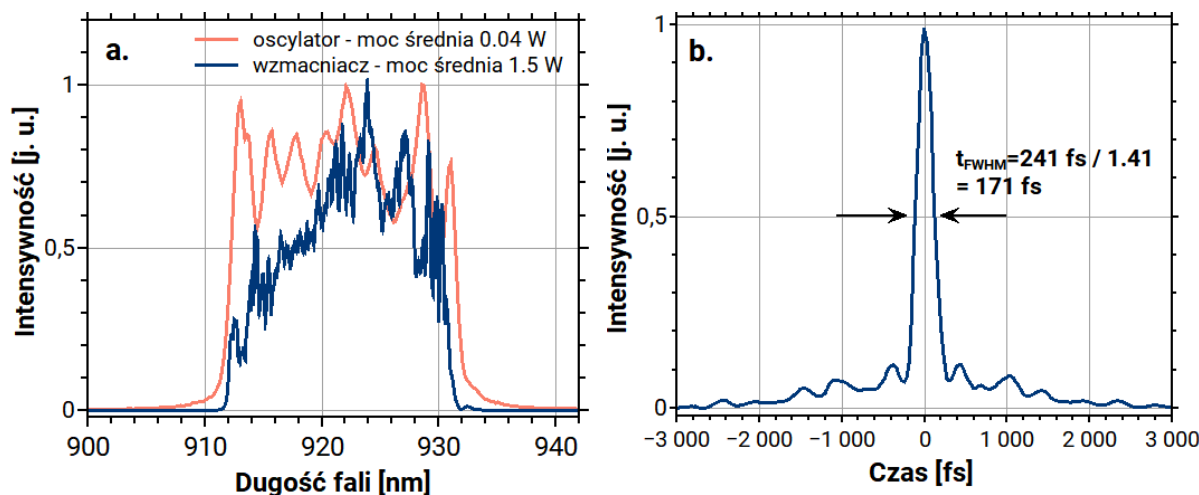
²Instytut Chemii Fizycznej Polskiej Akademii Nauk, ul. Kasprzaka 44/52, 01-224 Warszawa

†email: jszczepanek@fluence.pl

W mikroskopii wielofotonowej istotną potrzebą jest dostarczenie źródła ultrakrótkich impulsów laserowych, które znacząco zwiększają prawdopodobieństwo absorpcji promieniowania przez fluorofory w ognisku wiązki. Optymalną długością fali źródła jest 920 nm, ze względu na możliwość transmisji przez tkanki biologiczne oraz szeroką dostępność znaczników fluorescencyjnych. Jednakże, skonstruowanie źródła impulsów laserowych na długości fali 920 nm przy wykorzystaniu światłowodów aktywnych domieszkowanych jonami neodymu (Nd) stanowi wyzwanie z powodu konieczności eliminacji wzmocnienia na typowej dla neodymu długości fali 1064 nm.

W odpowiedzi na zdefiniowane powyżej zapotrzebowanie, opracowaliśmy całkowicie światłowodowe źródło impulsów, w którym zastosowano światłowody aktywne domieszkowane jonami Nd, pompowane diodami wielomodowymi o stabilizowanej długości fali 808 nm. Specjalnie dobrane światłowody aktywne charakteryzujące się strukturą współczynnika załamania typu „W”, która pozwala na supresję wzmocnienia promieniowania na długości fali 1064 nm [1], przy jednoczesnym utrzymaniu jednomodowej struktury przestrzennej wiązki i stabilnej polaryzacji dla centralnej długości fali impulsów 922 nm.

Uzyskane wyniki obejmują budowę całkowicie światłowodowego oscylatora femtosekundowego pracującego w reżimie normalnej dyspersji, generującego ultrakrótkie impulsy z dodatnim świergotem, o mocy średniej 40 mW i częstotliwości repetycji 21.27 MHz. Oscylator światłowodowy stanowił źródło impulsów dla kolejnego stopnia wzmocnienia. Skonstruowano wzmacniacz światłowodowy, który pozwolił na uzyskanie impulsów o mocy średniej 1.52 W, energii 726 nJ oraz połówkowym czasie trwania pomiaru autokorelacji po kompresji poniżej 200 fs. Według naszej wiedzy jest to pierwszy całkowicie światłowodowy system wykorzystujący źródło impulsów o jedynie normalnej dyspersji, którego parametry umożliwiły wykorzystanie w układzie do mikroskopii wielofotonowej.



Rysunek 1: a – widma całkowicie światłowodowego oscylatora oraz wzmacniacza o centralnej długości fali 922 nm, b – zmierzony przebieg autokorelacji impulsu ze wzmacniacza po kompresji, połówkowy czas trwania trwania autokorelacji 241 fs.

Podziękowania i źródła finansowania

Prace B+R realizowane w ramach projektu nr MAZOWSZE/0193/19 współfinansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Literatura

[1] K. Qian, H. Wang, M. Laroche, et al., “Mode-locked Nd-doped fiber laser at 930 nm,” *Opt. Lett.* 39(2), 267–270 (2014).

Sztuczne nasycalne absorbery wykorzystujące sprzęgacze 3x3 do światłowodowych ultraszybkich oscylatorów laserowych

M. Pielach^{1, †}, A. Jamrozik¹, K. Krupa¹, Y. Stepanenko¹

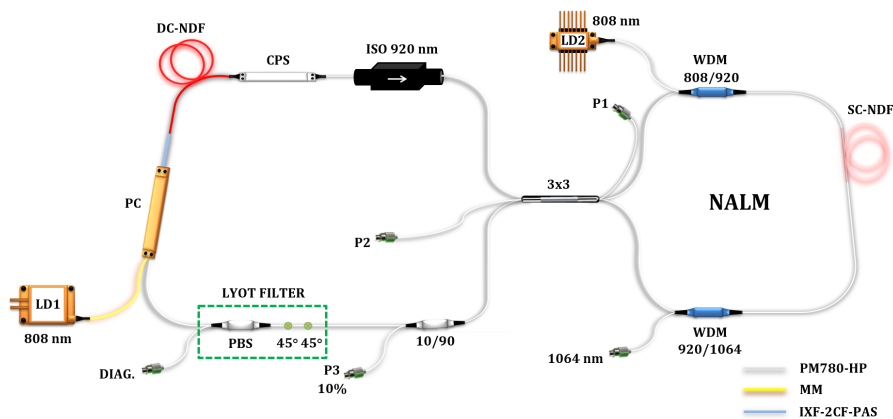
¹ Instytut Chemii Fizycznej Polskiej Akademii Nauk, Marcina Kasprzaka 44/52, 01-224 Warszawa, Polska

†email: mgpielach@ichf.edu.pl

Uzyskanie pracy impulsowej poprzez pasywną synchronizację modów podłużnych w oscylatorach światłowodowych wymaga zastosowania we wnętrzu lasera dodatkowego komponentu w postaci nasycalnego absorbera. Mnogość rozwiązań prowadzących do uzyskania pracy impulsowej stawia przed osobami budującymi lasery nie lada zagwozdkę: który rodzaj nasycalnego absorbera wybrać?

Rzeczywiste nasycalne absorbery degradują z biegiem czasu i mają skończony próg zniszczenia. Z tych przyczyn preferowane jest stosowanie tzw. sztucznych nasycalnych absorberów, które w odróżnieniu od rzeczywistych nie bazują na natywnych właściwościach materiałów, lecz na efektach nieliniowych. W niniejszej pracy opisujemy dwa rodzaje nieliniowych zwierciadeł pętlowych bazujących na sprzęgaczach 3x3. W odróżnieniu od układów zbudowanych ze standardowych sprzęgaczy 2x2, warianty wykorzystujące trzy porty pozwalają na uzyskanie przesunięcia fazowego równego $2\pi/3$. Przesunięcie krzywej transmisji w fazie pozwala na uzyskanie samoczynnej inicjacji pracy impulsowej, szczególnie pożądaną w zastosowaniach przemysłowych.

Równy stosunek podziału mocy sprzęgacza (33/33/33) narzuca konieczność wprowadzenia asymetrii do pętli. Prezentujemy możliwość wprowadzenia asymetrycznych strat, realizując po raz pierwszy układ nieliniowego optycznego stratnego zwierciadła pętlowego, który z powodzeniem zaimplementowano do całkowicie światłowodowego oscylatora laserowego wykorzystującego włókno domieszkowane jonami iterbu [1]. Drugi oscylator, którego schemat zaprezentowano na Rys. 1, to pierwszy na świecie układ, który w zakresie spektralnym z okolic 920-940 nm osiągniętym dzięki wykorzystaniu włókna domieszkowanego jonami neodymu, stosuje sprzęgacz 3x3 w wariacie nieliniowego wzmacniającego zwierciadła pętlowego [2]. Oba oscylatory są zbudowane wyłącznie z włókien utrzymujących stan polaryzacji i pozwalają na generację impulsów o energiach przekraczających 1 nJ, które mogą zostać skompresowane do setek femtosekund.



Rysunek 1: Schemat ultraszybkiego oscylatora laserowego. LD1, LD2 – diody laserowe (808 nm), PC – sprzęgacz pompy, SC/DC-NDP – jedno-/dwupłaszczyznowe włókno domieszkowane jonami neodymu, CPS – separator rezydualnego promieniowania pompy, ISO – izolator optyczny, 3x3 – sprzęgacz o stosunku podziału mocy 33/33/33, WDM – sprzęgacz multipleksujący, 10/90 – sprzęgacz o stosunku podziału mocy 10/90, PBS – polaryzacyjny dzielnik wiązki, P1, P2, P3 – porty wyjściowe.

Podziękowania i źródła finansowania

Badania były finansowane przez Fundację na rzecz Nauki Polskiej w ramach projektu TEAM-NET POIR.04.04.00-00-16ED/18.

Literatura

- [1] M. Pielach, A. Jamrozik, K. Krupa i Y. Stepanenko, "Self-starting mode-locking in an all-PM Yb-doped fiber laser oscillator enabled by a 3x3 nonlinear optical lossy loop mirror", *Optics Express* **31**, 42136-42149 (2023).
- [2] M. Pielach, A. Jamrozik, K. Krupa i Y. Stepanenko, "All-polarization-maintaining Nd-doped ultrafast fiber laser oscillator at 929 nm mode-locked via a 3x3 nonlinear amplifying loop mirror", *Optics Express* **32**, 31672-31682 (2024).

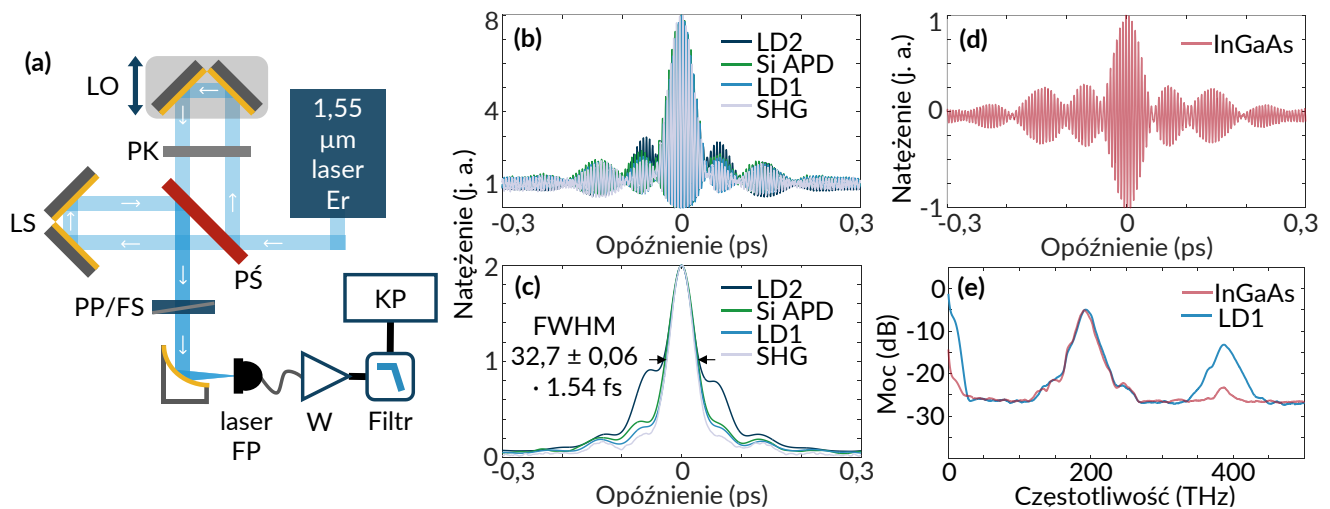
Interferometryczna charakteryzacja impulsów optycznych wykorzystująca diody laserowe Fabry-Pérot

Adrian F. Chlebowski^{1,†}, Jakub Mnich¹, Łukasz A. Sterczewski¹, Jarosław Z. Sotor¹

¹Grupa Elektroniki Laserowej i Światłowodowej, Wydział Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów, Politechnika Wroclawska, ul. Wybrzeże Stanisława Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

†email: adrian.chlebowski@pwr.edu.pl

Charakteryzacja czasu trwania i kształtu impulsów optycznych jest niezmiernie istotna w wielu praktycznych zastosowaniach jak np. ultraszybka spektroskopia czy procesy sterowane światłem. Konwencjonalne metody pomiaru wykorzystują nieliniowość drugiego rzędu w kryształach objętościowych do wytworzenia sygnału proporcjonalnego do kwadratu intensywności. Klasycznym przykładem jest zjawisko wytwarzania drugiej harmonicznej (SHG), jednak jest ono ograniczone przez wymagania dotyczące dopasowania fazowego i zgodności polaryzacji w kryształach. Podobną funkcjonalność można osiągnąć bez tych ograniczeń polegając na nieliniowości trzeciego rzędu w procesie absorpcji dwufotonowej (TPA) [1]. Szczególnie silny efekt TPA obserwuje się w diodach laserowych Fabry-Pérot (FP), jednak brak jest systematycznych badań co do ich właściwości dyspersyjnych, szcztkowej liniowej absorpcji i detekcyjności w układach nieliniowej interferometrii do charakteryzacji impulsów. Ta nisza motywuje nasze badania nad wykorzystaniem diodami FP z efektem TPA do wiarygodnej wolnej od zniekształceń charakteryzacji impulsów femtosekundowych, którą porównujemy z pomiarem wykonanym klasycznym autokorelatorem z wytwarzaniem drugiej harmonicznej w kryształach (Rys. 1).



Rysunek 1: (a) Interferometr Michelsona. LO – linia opóźniająca, PK – płytki kompensująca, LS – lustro stacjonarne, P/S – płytki światłdzielająca, PP – płytki półfalowa, FS – filtr szary, W – wzmacniacz, KP – karta pomiarowa (b, c) Autokorelacja interferometryczna i intensywności dla różnych detektorów TPA i komercyjnego autokorelatora. (d) Liniowa autokorelacja. (e) Jednoczesny pomiar liniowej i nieliniowej autokorelacji.

Autokorelacje uzyskane przy użyciu diody laserowej bazującej na InGaAsP (LD1, 1,3 μm długości fali emisji) w układzie interferometru Michelsona (Rys. 1a) pokrywają się z autokorelacją opartą na SHG (Rys. 1b), co dowodzi przydatności takich urządzeń do charakteryzacji impulsów fs przy długościach fal telekomunikacyjnych. Odchylenie występuje w przypadku krótkofalowej (~950 nm) LD2, opartej na AlGaAs, której dyspersja falowodowa wprowadza zniekształcenia impulsu. Właśnie dlatego wybór odpowiedniego detektora TPA ma fundamentalne znaczenie dla uzyskania wiarygodnej charakteryzacji impulsu. Dodatkowo odkryliśmy nową, wcześniej niezbadaną cechę tych urządzeń półprzewodnikowych, która umożliwia jednoczesny pomiar liniowej i nieliniowej interferometrycznej autokorelacji (Rys. 1b, 1d, 1e). Wbudowana fotodiody InGaAs, która nominalnie funkcjonuje jako monitorująca dla LD, może być wykorzystana do badania interferencji pierwszego rzędu (liniowej) wraz z kwadratową mierzona przez LD. Ta cecha ma duże znaczenie praktyczne w technikach do rekonstrukcji profilu czasowego impulsu.

Podziękowania i źródła finansowania

Badania zostały sfinansowane przez Narodowe Centrum Nauki (NCN) w ramach grantu nr 2022/45/B/ST7/03316. Prace są wspierane przez wykorzystanie infrastruktury Narodowego Laboratorium Fotoniki i Technologii Kwantowych (NPLQT), finansowanej z Funduszy Europejskich w ramach Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój.

Literatura

[1] J.M. Dudley, et al., Commercial Semiconductor Devices for Two Photon Absorption Autocorrelation of Ultrashort Light Pulses, Appl. Opt. 37 (1998) 8142. <https://doi.org/10.1364/AO.37.008142>.

Światłowody specjalne z nanodiamentami: od optomagnetyzacji do kształtowania optycznej odpowiedzi nieliniowej

**M. Klimczak^{1, †}, M. Mrózek², A. Filipkowski³, G. Stępniewski^{3,4}, P. Hänzi⁵, A. M. Heidt⁵, R. Bogdanowicz⁶,
A. Wojciechowski², W. Gawlik², R. Buczyński^{1,3}**

¹ Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski, ul. Pasteura 5, 02-093 Warszawa

² Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej, Uniwersytet Jagielloński, ul. prof. S. Łojasiewicza 11, 30-348 Kraków

³ Sieć Badawcza Łukasiewicz Instytut Mikroelektroniki i Fotoniki, al. Lotników 32/46, 02-668 Warszawa

⁴ Instytut Chemii Fizycznej, Polska Akademia Nauk, ul. Kasprzaka 44/52, 01-224 Warszawa

⁵ Institute of Applied Physics, University of Bern, Sidlerstrasse 5, 3012 Bern, Szwajcaria

⁶ Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki, Politechnika Gdańska, ul. Gabriela Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk

†email: mariusz.klimczak@fuw.edu.pl

Światłowody specjalne z nanodiamentami w objętości rdzenia optycznego to nowe materiały łączące zalety sensoryki wykorzystującej efekty kwantowe z możliwością wszechstronnego kształtowania właściwości propagacyjnych. Przedstawię nasze wyniki związane z integracją nanodiamentów zawierających defekty typu luka azotowa (centra barwne azot-wakancja) ze światłowodami, koncentrując się na pomiarach przestrzennych rozkładów pola magnetycznego a także na kształtowaniu optycznej odpowiedzi nieliniowej.

Rozpocznę od detekcji pola magnetycznego opartej na optycznie wykrywanym rezonansie magnetycznym (ODMR) oraz rezonansie zerowego pola (ZFR) za pomocą światłowodów domieszkowanych nanodiamentami. W strukturach tych osiągnęliśmy możliwość zbierania informacji przestrzennej o nieznanym polu magnetycznym pomimo przypadkowych orientacji poszczególnych nanodiamentów i tym samym centrów barwnych azot-wakancja w światłowodzie. Wykorzystanie zjawiska ZFR pozwoliło nam wyeliminować stosowanie zewnętrznego zaburzenia polaryzacji spinowej przez pole mikrofalowe, umożliwiając małoinwazyjne zbieranie informacji przestrzennej o makroskopowym źródle pola magnetycznego [1, 2].

Integracja nanocząstek w objętości szkła wpływa na strukturę jego przerwy energetycznej. Nieliniowe właściwości optyczne są z nią silnie powiązane poprzez warunki rezonansowe wynikające z przejść elektronowych [3]. Wykorzystując technologię wtryskiwania wspomaganego laserowo, zintegrowaliśmy nanodiamenty ze szkłem krzemionkowym, z którego wyciągaliśmy światłowody [4]. Włókna te wykazywały wyraźną zależność nieliniowego współczynnika załamania od długości fali. Zaobserwowaliśmy zwiększoną nieliniowość w zakresie długości fali około 1560 nm, natomiast w pobliżu 1050 nm nieliniowość wyraźnie zmalała, w porównaniu z analogicznymi, komercyjnymi światłowodami jednomodowymi. Możliwość kształtowania odpowiedzi nieliniowej światłowodu uzyskana w ten sposób otwiera perspektywy niezależnego ustalania dyspersji chromatycznej, kontroli dynamiki solitonów oraz skalowania częstotliwości pracy laserów femtosekundowych do zakresu GHz.

Podziękowania i źródła finansowania

Badania zrealizowane w ramach programu TEAM NET Fundacji na rzecz Nauki Polskiej, projekt POIR.04.04.00-00-1644/18, współfinansowanego przez Unię Europejską z Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.

Literatura

- [1] A. Filipkowski, M. Mrózek, G. Stępniewski, M. Ficek, D. Pysz, W. Gawlik, R. Buczyński, A. M. Wojciechowski, M. Klimczak, *Appl. Phys. Lett.* **124**, art. no. 231104 (2024).
- [2] M. Mrózek, A. Filipkowski, W. Gawlik, R. Buczyński, A. M. Wojciechowski, M. Klimczak, *arxiv*: **2409.05452** (2024).
- [3] M. Sheik-Bahae, D. J. Hagan, E. W. Van Stryland, *Phys. Rev. Lett.* **65**, 96 (1990).
- [4] G. Stępniewski, P. Hänzi, A. Filipkowski, M. Janik, M. Mrózek, Y. Stepanenko, R. Bogdanowicz, V. Romano, A. Heidt, R. Buczyński, M. Klimczak, *Carbon* **215**, 118465 (2023).

Ocena asymetrii biomechanicznej rogówki przy użyciu wielokanałowego SS-OCT

J. Milkiewicz^{1,2†}, D. Życka-Malesa^{1,2}, O. Cetinkaya^{1,2}, E. Mączyńska-Walkowiak⁴, P. Młyniuk⁵, I. Grulkowski⁴, B.J. Kałużny⁵, M. Wojtkowski^{1,2,4}, K. Karnowski^{1,2}

¹ Institute of Physical Chemistry, Polish Academy of Sciences, ul. Kasprzaka 44/52, Warsaw, Poland;

² International Center for Translational Eye Research, Ul. Skierniewicka 10A, 01-230 Warsaw, Poland;

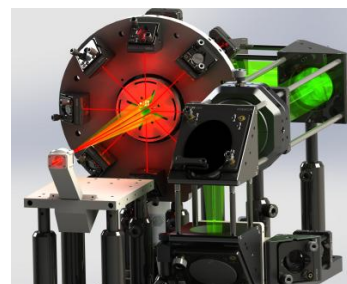
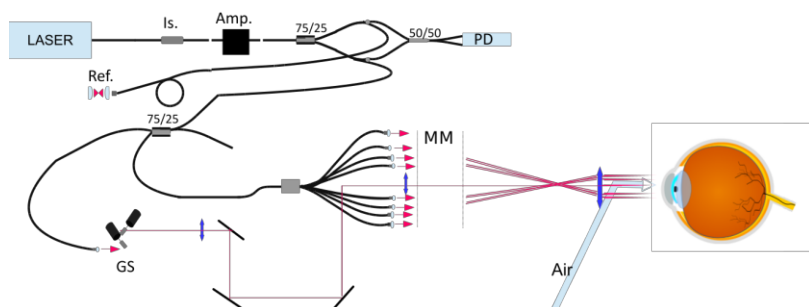
⁴ Institute of Physics, Nicolaus Copernicus University, ul. Grudziadzka 5, 87-100 Torun, Poland;

⁵ Department of Optometry, Collegium Medicum, Nicolaus Copernicus University, Bydgoszcz, Poland

†email: jmilkiewicz@ichf.edu.pl

Prezentowany przez nas prototyp wielowielowięzkowego SS-OCT (*Swept Source Optical Coherence Tomography*) został zaprojektowany w celu detekcji asymetrii biomechanicznych rogówki jakie występują min. w stożku rogówki. Metoda polega na bezkontaktowym odkształceniu rogówki wywołanym impulsem powietrza oraz monitorowaniu tego odkształcenia z wykorzystaniem pomiaru sygnału OCT w 9-ciu różnych punktach jednocześnie.

Możliwość obrazowania w wielu punktach jednocześnie osiągnięto stosując multipleksowanie przestrzenne po stronie układu obrazującego z dodatkowym kodowaniem głębokości po stronie detekcji OCT [1]. W celu zoptymalizowania możliwości takiego rozwiązania w układzie wykorzystujemy laser strojony o centralnej długości fali $\lambda_c=1300$ nm oraz ultraszybką kartę akwizycji. Schemat urządzenia został przedstawiony na rysunku 1. Ramię próbkujące systemu, dostarczające i zbierające światło, składa się z kaskady sprzęgaczy 2x2 i 1x8. Wyjścia sprzęgacza 1x8 skierowane są na układ lusterek pryzmatycznych (rys. 2), co pozwala na precyzyjne prowadzenie wiązek peryferyjnych do płaszczyzny obiektowej układu. Całość zintegrowana jest z komorą generującą impulsy powietrza.



Rys. 1: Schemat wielowięzkowego układu SS-OCT (MM-układ lusterek pryzmatycznych)

Rys.2: Wizualizacja 3D prototypu klinicznego

Optymalny rozkład punktów na rogówce został wyznaczony w oparciu o modelowanie numeryczne. Zakłada on jedną wiązkę w centrum rogówki oraz 8 wiązek peryferyjnych rozmieszczonych wzdłuż wybranych kierunków (kardynalne oraz między-kardynalne) na okręgu o promieniu 1.1 mm wokół wiązki centralnej. Amplitudy ugięć w każdym z tych punktów pozwalają wyznaczyć wypadkowy wektor asymetrii. Testy kliniczne pokazały, że długość tego wektora jest dobrym kandydatem na biomarker rozróżniający pacjentów ze stożkiem rogówki.

Aktualnie nasze prace ukierunkowane są na opracowanie tańszej, zminiaturyzowanej wersji urządzenia. Jednym z możliwych sposobów jest eliminacja centralnej wiązki skanowanej. W niniejszej pracy przedstawiono analizę wpływu wiązki centralnej na potencjał diagnostyczny metody. Badania przeprowadzone na 9-cio osobowej grupie wolontariuszy potwierdzają, że ewentualne pominięcie wiązki centralnej dla prototypu niskobudżetowego nie wpływa znacząco na dobowy rozrzut mierzonej wartości długości wektora asymetrii.

Podziękowania i źródła finansowania

Finansowane z programu MAB FENG, numer grantu FENG.02.01-IP.05-T005/23.

Literatura

[1] Chao Zhou, Aneesh Alex, Janarthanan Rasakanthan, and Yutao Ma, *Opt. Express* **21**, 19219-19227 (2013)

Obrazowanie siatkówki oka ludzkiego na poziomie komórkowym poprzez optymalizację stosunku sygnału do szumu w systemie STOC-T

M. Mikuła-Zdańkowska^{1,4,†}, D. Borycki^{1,2}, P. Węgrzyn^{1,2,3}, S. Tomczewski^{1,2}, M. Wojtkowski^{1,2}

¹Institut Chemii Fizycznej Polskiej Akademii Nauki, ul. Kasprzaka 44/52, 01-224 Warszawa, Polska

²Międzynarodowe Centrum Badań Oka – ICTER, ul. Skierniewicka 10a, 01-230 Warszawa, Polska

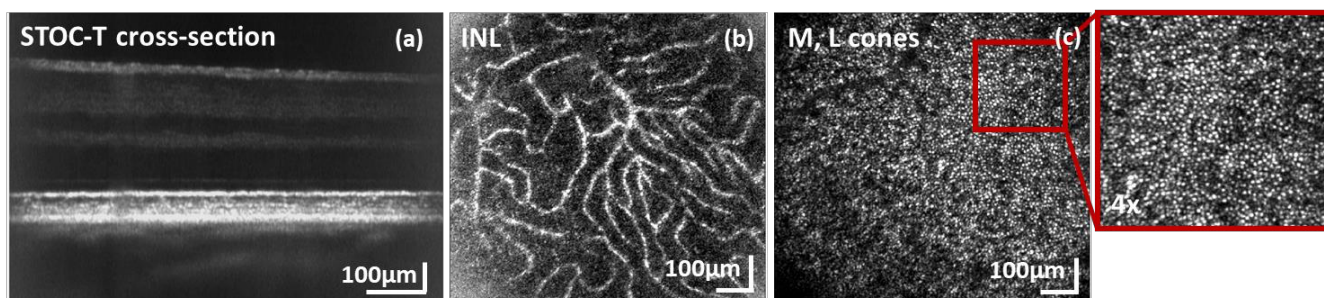
³Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski, ul. Pasteura 5, 02-093 Warszawa, Polska

†email: mmikula_zdankowska@ichf.edu.pl

Efektywność systemów tomografii optycznej (OCT) jest uzależniona od dwóch kluczowych parametrów: czułości i szybkości obrazowania. Czułość, która reprezentuje najniższy wykrywalny sygnał powyżej poziomu szumów, definiuje jakość systemu obrazowania OCT. W OCT wyróżnia się trzy główne rodzaje szumów: szum śrutowy $\sigma_{\text{śrut}}^2$, szum detektora $\sigma_{\text{detektor}}^2$ i szum względnej intensywności σ_{RIN}^2 [1], [2]. Technika tomografii optycznej z detekcją fourierowską, która umożliwia szybkie, nieinwazyjne, objętościowe obrazowanie struktur siatkówki *in vivo*, stanowi interesującą alternatywę dla istniejących metod OCT. Pełnoobrazowa tomografia optyczna z detekcją fourierowską umożliwia jednoczesne obrazowanie struktury siatkówki z dużą głębią ostrości w pełnym polu widzenia, bez użycia metody skanowania. Jednakże, źródło światła o wysokiej spójności przestrzennej sprawia, że metoda ta jest podatna na szumy obniżające jakość obrazowania. Aby rozwiązać to ograniczenie, zaproponowano nową technikę obrazowania nazwaną przestrzenno-czasową tomografią optyczną (STOC-T) [3, 4]. Technika ta redukuje szumy poprzez przestrzenno-czasowe uśrednianie światła docierającego z różnych poprzecznych elektromagnetycznych modów (TEM), tj. nieskorelowane TEM mogą być generowane poprzez propagację światła w długim, wielomodowym włóknie optycznym (MMF) [5]. Jednakże, MMF wprowadza do systemu dodatkowy szum modalny $\sigma_{\text{modalny}}^2$, który pojawia się, gdy spójne światło propaguje się przez MMF, tworząc charakterystyczny wzór szumu – plamki [6], który wynika z interferencji modów przestrzennych. Szum modalny ($\sigma_{\text{modalny}}^2$) stanowi czynnik pogarszający jakość rekonstrukcji obrazów w technice OCT:

$$\sigma_{\text{OCT}}^2 = \frac{1}{N} (\sigma_{\text{śrut}}^2 + \sigma_{\text{detektor}}^2 + \sigma_{\text{RIN}}^2 + \sigma_{\text{modalny}}^2).$$

Optymalna konfiguracja systemu powinna polegać na minimalizacji źródeł szumów innych niż szum śrutowy. Redukcja σ_{RIN}^2 oraz $\sigma_{\text{modalny}}^2$ jest możliwa dzięki metodzie podwójnej detekcji zrównoważonej [7], jednak wymaga to procedur kalibracyjnych w obu kanałach. W celu poprawy stosunku sygnału do szumu w metodzie STOC-T, proponujemy wykorzystanie deformowalnego zwierciadła w celu dynamicznej zmiany rozkładu intensywności oświetlenia w czasie, połączonego z techniką uśredniania numerycznego [8]. Zakładając, że uzyskana zostaje częściowa spójność przestrzenna w długim MMF, dodatkowa zmiana rozkładu przestrzennego szumu plamkowego, uzyskana dzięki dynamicznie zmieniającemu się elementowi umieszczonego przed sprzężeniem światła z MMF, skutkować będzie uśrednianiem wielu quasi-stacjonarnych, niespójnych realizacji szumu modalnego. W niniejszej pracy analizujemy wpływ wybranych warunków oświetlenia oraz amplitudowego uśredniania numerycznego na redukcję szumów wykazując, jak ich optymalizacja może poprawić stosunek sygnału do szumu. Opracowana modyfikacja zapewnia: zwiększoną rozdzielczość poprzeczną detekcji około 3 μm oraz zwiększony stosunek sygnału do szumu o $\sim 12\text{dB}$ poprzez zastosowanie zwierciadła deformowalnego (prędkość drgania $\sim 1.5\text{ MHz}$) na wejściu do systemu pomiarowego. Podejście to umożliwi obrazowanie *in vivo* z rozdzielczością komórkową w czasie krótszym niż 1 minuta. W niniejszej prezentacji przedstawione zostaną dane strukturalne z obrazowania *in vivo* siatkówki oka ludzkiego, zebrane za pomocą zmodyfikowanego układu STOC-T z dostosowanym protokołem pomiarowym.



Rysunek 1: Zarejestrowane warstwy siatkówki: (a) przekrojowy obraz wewnętrznej mikrostruktury (B-scan), (b) wewnętrzna warstwa jądrzasta siatkówki (INL), (c) czopki M i L z powiększoną strefą zainteresowania.

Literatura

- [1] A. M. Rollins and J. A. Izatt, *Opt. Lett.*, **24**, 21, (1999).
- [2] M. Choma, M. Sarunic, C. Yang, and J. Izatt, *Opt. Express*, **11**, 18, (2003).
- [3] M. Wojtkowski, P. Stremplewski, E. Auksorius, and D. Borycki, *Photonics Lett. Pol.*, **11**, 2, (2019).
- [4] E. Auksorius *et al.*, *iScience*, **25**, 12, (2022).
- [5] E. Auksorius *et al.*, *Opt. Lett.*, **47**, 4, (2022).
- [6] R. E. Epworth, “Modal noise - causes and cures.” *Laser Focus*, (1981).
- [7] A. Bradu and A. Gh. Podoleanu, *Opt. Express*, **20**, 16, (2012).
- [8] M. Mikuła-Zdańkowska, D. Borycki, P. Węgrzyn, K. Adomavičius, E. Auksorius, and M. Wojtkowski, *Biocybern. Biomed. Eng.*, **45**, 1, (2025).

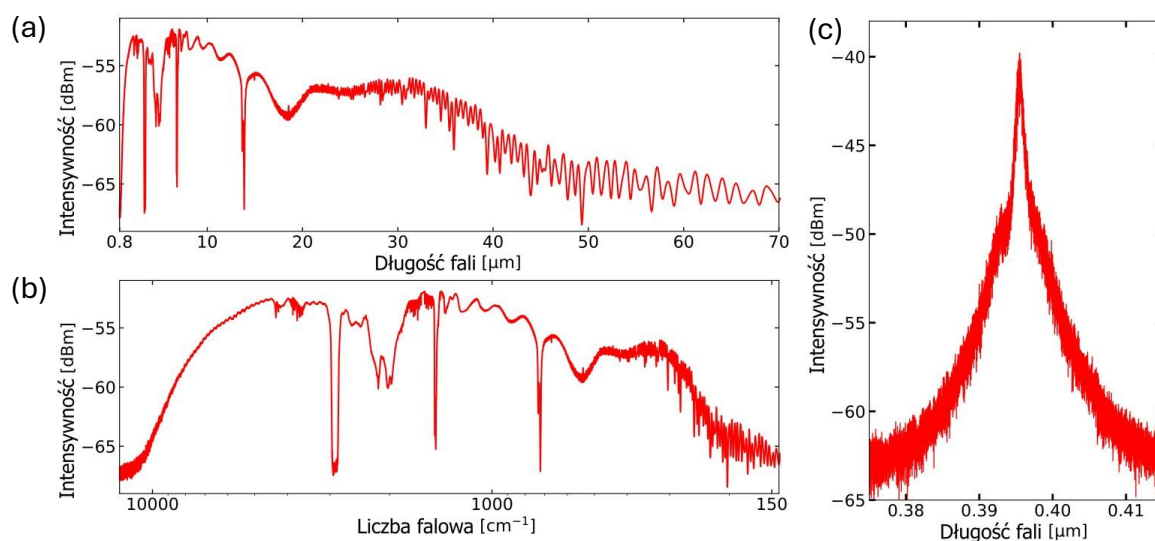
Ultra-szerokopasmowy spektrometr fourierowski z cienko-membranową detekcją piroelektryczną

Jakub Mnich[†], Grzegorz Gomółka, Jarosław Sotor, Łukasz A. Sterczewski

Grupa Elektroniki Laserowej i Światłowodowej, Wydział Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów, Politechnika Wrocławska, Wybrzeże Stanisława Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, Polska
[†]email: jakub.mnich@pwr.edu.pl

Spektroskopia fourierowska w podczerwieni (*ang.* FTIR – *Fourier-transform infrared spectroscopy*) jest dojrzałą technologią szeroko wykorzystywaną w nauce i przemyśle do ustalania składu chemicznego próbek substancji w każdym stanie skupienia. Rosnące znaczenie algorytmów do obróbki danych przystosowanych do pracy z dużymi zbiorami danych, np. szeroko pojętej sztucznej inteligencji czy analizy głównych komponentów składowych, sprawia, że atrakcyjne staje się zwiększenie dokładności modeli chemometrycznych poprzez wzbogacenie danych o inne obszary widma [1]. Niestety, aktualnie popularne typy spektrometrów FTIR oferują typowo spektralne zakresy dynamiczne rzędu pojedynczych dB dla długości fali powyżej $\sim 16 \mu\text{m}$ oraz poniżej $\sim 1 \mu\text{m}$, co utrudnia wykonywanie praktycznych pomiarów poza tymi granicami. Piroelektryczne detektory i płytki światłodzielnice bazujące na bromku potasu pozwalają sięgnąć do dłuższych fal, około $25 \mu\text{m}$, co okupione jest mniejszą szybkością i czułością pomiaru.

W odpowiedzi na te wyzwania, prezentujemy spektrometr FTIR, który wykorzystuje termiczne źródła promieniowania do pokrycia zakresu widmowego od $0,9$ do $50 \mu\text{m}$ (Rys. 1a) w stacjonarnej konfiguracji optycznej, co oznacza, że jego tor optyczny nie zawiera żadnych elementów przełączających bieg wiązki. W celu rozszerzenia użytecznego zakresu widmowego zastosowano złożenie dwóch źródeł termicznych o różnych temperaturach, czego efekt jest dobrze widoczny na Rys. 1b, gdzie z pominięciem absorpcji pochodzącej z okien komórki gazowej oraz rezonansu fononowego diamentu, widmowy zakres dynamiczny przekracza 10 dB od 300 do 8000 cm^{-1} ($\sim 33 - 1,2 \mu\text{m}$). Pokazujemy również, że w tym samym układzie detekcyjnym możliwy jest pomiar w nadfiolecie, jeśli w roli źródła zastosowany zostanie zewnętrzny laser (Rys. 1c).



Rysunek 1: Charakterystyka widmowa prezentowanego spektrometru fourierowskiego ze skalą osi X wyrażoną w μm (a) oraz cm^{-1} (b). Widmo zmierzonego tym samym instrumentem zewnętrznego lasera w nadfiolecie (c).

Rozwiązania techniczne umożliwiające rejestrację tak szerokiego widma z praktycznym zakresem dynamicznym stały się dostępne dopiero w ostatnim czasie [2]. Obejmują one: diamentowe płytki światłodzielnice, cienko-membranowe detektory piroelektryczne z tantalenu litu o detekcyjności powyżej 10^8 Jonesów oraz źródła termiczne z ceramicznym pokryciem mikroproszkowym o wysokiej emisyjności w dalekiej podczerwieni.

Podziękowania i źródła finansowania

J. Mnich, G. Gomółka i Ł. A. Sterczewski dziękują za finansowanie Unii Europejskiej (ERC Starting Grant, TeraERC, 101117433) i za możliwość korzystania z infrastruktury Narodowego Laboratorium Fotoniki i Technologii Kwantowych (NPLQT), finansowanej z Funduszy Europejskich w ramach Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój.

Literatura

- [1] Alamprese, C., Casale, M., Sinelli, N., et al., "Detection of minced beef adulteration with turkey meat by UV-vis, NIR and MIR spectroscopy," *LWT - Food Science and Technology* **53**, 225–232 (2013).
- [2] J. Mnich, J. Kunsch, M. Budden, T. Gebert, M. Schossig, J. Sotor, and Ł. A. Sterczewski, "Ultra-broadband room-temperature Fourier transform spectrometer with watt-level power consumption," *Opt. Express* **32**, 45801 (2024).

Ukryte deformacje obrazu w szerokokątnej goniometrii radiometrycznej

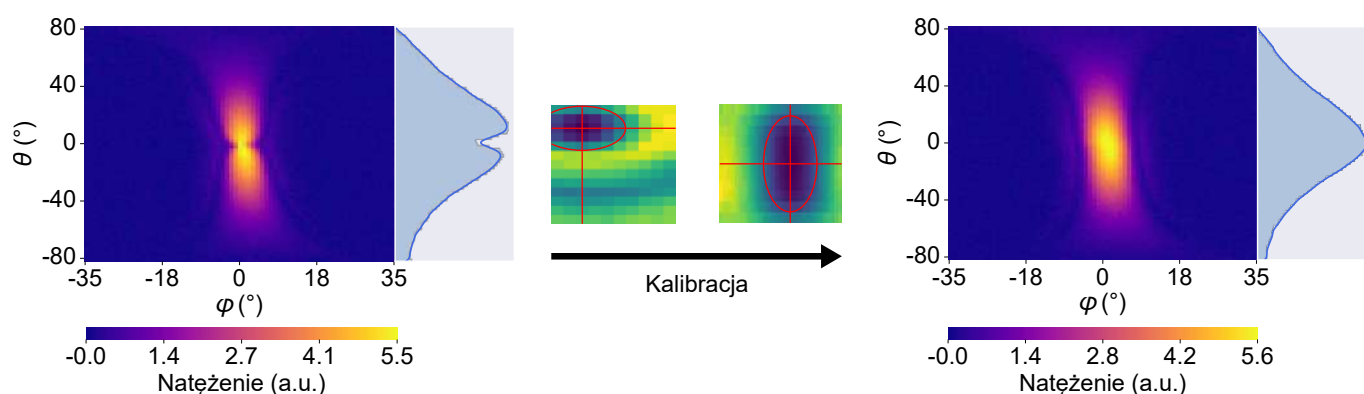
S. Łukasik [†], Ł. A. Sterczewski

Grupa Elektroniki Laserowej i Światłowodowej, Wydział Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów, Politechnika Wrocławska, Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

[†]email: sara.lukasik@pwr.edu.pl

Jedną z kluczowych charakterystyk laserów jest rozkład natężenia pola elektrycznego w przekroju poprzecznym wiązki. Jego znajomość ma fundamentalne znaczenie dla efektywnego sprzęgania do światłowodu, struktur fonicznych, czy też podstawowej diagnostyki modów optycznych rezonatora. Niestety, pomiar profilu wiązki w reżimie pola bliskiego, nie zawsze jest możliwy bez dodatkowych elementów zniekształcających jej kształt. Dzieje się tak szczególnie gdy laser ma dużą moc lub emituje krótkie długości fali. Pomiarzy w zakresie pola dalekiego wiążą się z kolei z potrzebą próbkowania powierzchni, nieraz przekraczających rozmiarem dostępne matryce kamer. Problem ten rozwiązuje goniometria radiometryczna. Umożliwia ona zbieranie punktów pomiarowych z półsfery otaczającej źródło światła przy pomocy jednopikselowego detektora, a tym samym pomiar właściwości silnie rozbieżnych wiązek [1], takich jak emitowane przez lasery półprzewodnikowe. Goniometr może zostać znacznie uproszczony dzięki umieszczeniu badanego źródła światła na jednym z obrotowych ramion, co pozwala zredukować ich liczbę do dwóch przy zachowaniu pełnego zakresu skanowanych kątów. Ta wygoda ma jednak swoją cenę. Taka konstrukcja wymaga szczególnie dokładnej kalibracji, ponieważ niepoprawne ustawienie geometrii nie może zostać później skompensowane przez manipulację ramionami. Obrazy tworzone przez źle ustawiony układ mogą sprawiać wrażenie poprawnych, ze względu na spójną strukturę. Znacząco utrudnia to kalibrację i w skrajnym przypadku może prowadzić to błędnych wniosków o modowej strukturze wiązki [2] (jak na Rys. 1).

W niniejszej pracy analizujemy deformacje będące wynikiem użycia uproszczonego goniometru radiometrycznego. Poprzez symulacje i doświadczenia, rozważamy korzyści z użycia dwóch różnych układów współrzędnych, w których goniometr może wykonywać pomiary. By zaradzić deformacjom, proponujemy autorską metodę kalibracji układu, wykorzystującą jego osiową symetrię i zależność wariancji pomiaru natężenia w punkcie początkowym od względnej dezorganizacji układu. Trwające badania mają na celu poprawne odzyskanie obrazu pola bliskiego z pola dalekiego z wykorzystaniem algorytmu rekonstrukcji fazy [1].



Rysunek 1: Wyniki pomiarów goniometrem przed i po kalibracji (odpowiednio po lewej i po prawej). Obraz wiązki przed kalibracją sugeruje pracę lasera na modzie poprzecznym wyższego rzędu. Głównym elementem wykorzystywanym do kalibracji są koncentryczne wzory tworzone podczas pomiarów wariancji punktu początkowego układu dla różnych odchyłeń od jego początkowego ustawienia (środek). Po zastosowaniu procedury, ujawnia się poprawny profil wiązki lasera pracującego na modzie podstawowym.

Podziękowania i źródła finansowania

S. Łukasik i Ł. A. Sterczewski dziękują za finansowanie Unii Europejskiej (ERC Starting Grant, TeraERC, 101117433). Wyrażone poglądy i opinie są wyłącznie poglądami autorów i niekoniecznie odzwierciedlają poglądy Unii Europejskiej lub Agencji Wykonawczej Europejskiej Rady ds. Badań Naukowych. Ani Unia Europejska, ani organ przyznający finansowanie nie ponoszą za nie odpowiedzialności.

Literatura

[1] J. Guttman and J. Fleischer, *Proc. SPIE* **4932**, 2003

[2] Photon Inc. (n.d.), *Technical Note No. B010306419*, retrieved January 25, 2025, from

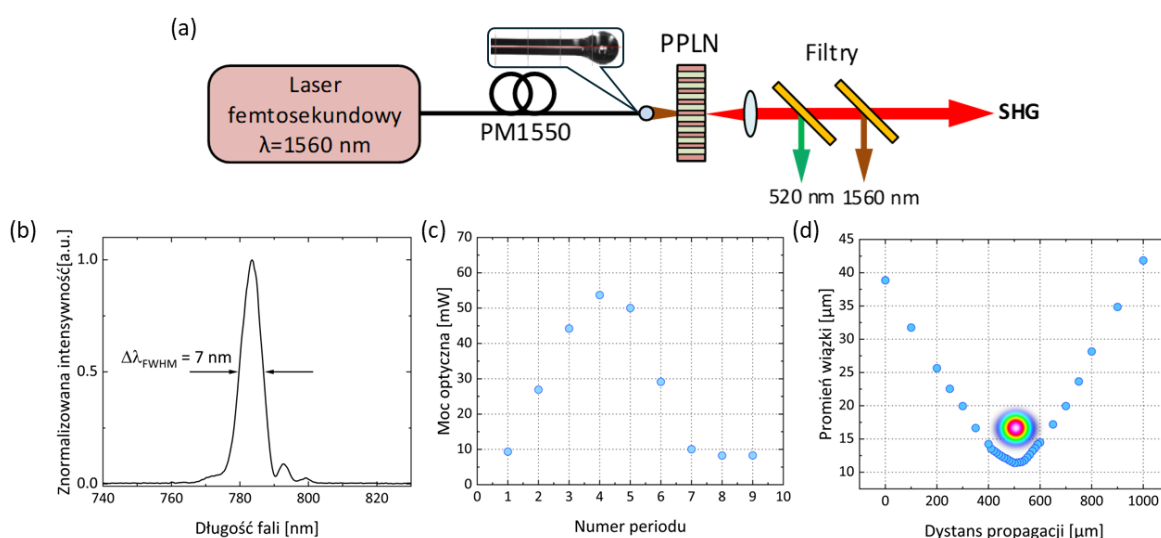
<https://www.photonicsonline.com/doc/goniometric-radiometer-alignment-0001>

Wykorzystanie mikrosoczewek światłowodowych do generacji drugiej harmonicznej w kryształach PPLN

S. Matczak^{1†}, D. Stachowiak¹, G. Soboń¹

¹Grupa Elektroniki Laserowej i Światłowodowej, Wydział Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów, Politechnika Wroclawska, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław
†email: szymon.matczak@pwr.edu.pl

Dynamiczny rozwój fotoniki stwarza potrzebę opracowywania technologii umożliwiających wytwarzanie niestandardowych komponentów światłowodowych. Przykładem takich rozwiązań są mikrosoczewki formowane bezpośrednio na końcu światłowodu. Umożliwiają one skupienie wiązki światła w zadanej odległości od czoła włókna, eliminując konieczność stosowania tradycyjnej optyki objętościowej. Dzięki temu możliwe jest konstruowanie bardziej kompaktowych układów fonicznych i zwiększenie sprawności sprzęgania światła z włókna do innych struktur, takich jak np. falowody [1]. W niniejszej pracy przedstawiamy koncepcję generowania drugiej harmonicznej z wykorzystaniem mikrosoczewek światłowodowych wytworzonych za pomocą systemu LDS (Large Diameter Splicing System). Opracowana przez nas technologia umożliwia wytworzenie mikrosoczewek z dostosowanymi do danej aplikacji parametrami wiązki, jak promień (R) oraz ogniskowa (f_L) [2].



Rysunek 1: (a) Układ eksperymentalny, (b) spektrum wiązki drugiej harmonicznej dla mikrosoczewki o $R = 11,4 \mu\text{m}$ i $f_L = 500 \mu\text{m}$, (c) pomiar mocy drugiej harmonicznej dla poszczególnego periodu, (d) pomiar profilu wiązki emitowanej z mikrosoczewki światłowodowej.

Układ eksperymentalny zilustrowano na Rys. 1. Źródłem sygnału był femtosekundowy laser światłowodowy emitujący impulsy o czasie trwania 37 fs, długości fali 1560 nm i mocy średniej 131 mW. Wyjście lasera zakończono mikrosoczewką na końcu światłowodu jednomodowego utrzymującego stan polaryzacji, która skupiała wiązkę bezpośrednio w kryształach nieliniowych typu PPLN (ang. Periodically Poled Lithium Niobate) o grubości 0,5 mm, gdzie zachodzi generacja drugiej harmonicznej (SHG, Second Harmonic Generation) (Rys. 1a). Zastosowane filtry separują składowe o długościach fali 1560 nm i 520 nm, co pozwala na uzyskanie wyjściowej wiązki w zakresie 770 – 800 nm (Rys. 1b). Użyty kryształ posiadał 9 struktur (tzw. periodów) o różnym dopasowaniu fazowym, umożliwiającym przestrajanie wyjściowego spektrum. Dla periodu 6 uzyskano 53,7 mW mocy optycznej co w stosunku do wejściowej mocy wynoszącej 131,4 mW przenosi się na 40,9% sprawności (Rys. 1c). Promień wiązki wychodzący z wytworzonej mikrosoczewki wynosił 11,4 μm przy ogniskowej równej 500 μm (Rys. 1d). Wyniki pracy potwierdzają, że wykorzystując mikrosoczewki wykonane systemem LDS możliwe jest efektywne generowanie drugiej harmonicznej z impulsów femtosekundowych, bez konieczności korzystania z optyki objętościowej.

Podziękowania i źródła finansowania

Badania finansowane w ramach projektów: LIDER (LIDER14/0070/2023), Narodowego Centrum Badań i Rozwoju, oraz Preludium BIS (2021/43/O/ST7/00757), Narodowego Centrum Nauki.

Literatura

- [1] L. Yang, et al., *Infrared Phys. Technol.* **122**, 104057 (2022).
- [2] S. Matczak, et al., *EPJ Web of Conferences* **307**, 02018 (2024).

Światłowodowe czujniki opto-elektrochemiczne dla zastosowań bioanalitycznych

M. Janik

Instytut Mikroelektroniki i Optoelektroniki, Politechnika Warszawska, Koszykowa 75, 00-662 Warszawa
email: monika.janik@pw.edu.pl

Rosnące potrzeby diagnostyczne, w tym rozwój metod umożliwiających analizę stanu zdrowia bezpośrednio w miejscu udzielania opieki medycznej (point-of-care, POC), wymagają projektowania selektywnych i czułych struktur czujnikowych zdolnych do pracy w złożonych matrycach biologicznych, takich jak np. krew. W odpowiedzi na te wyzwania światłowodowe czujniki optyczne stanowią obiecującą platformę pomiarową – łącząc wysoką czułość i odporność na zakłócenia z możliwością precyzyjnego dostosowania konstrukcji do specyficznych warunków pomiarowych. Ich kompaktowa forma oraz elastyczna architektura sprzyjają integracji z systemami mikroprzepływowymi, urządzeniami medycznymi (np. cewnikami, czy endoskopami) i przenośnymi układami detekcyjnymi. Dodatkowo, odporność na zakłócenia elektromagnetyczne, możliwość pracy w środowiskach agresywnych chemicznie i prowadzenia pomiarów zdalnych sprawiają, że czujniki te doskonale sprawdzają się w wymagających zastosowaniach – od analizy złożonych próbek biologicznych i środowiskowych po pomiary *in vivo*, gdzie kluczowe są stabilność, kompaktowość, biokompatybilność i czułość detekcji [1]. Jednym z kluczowych atutów światłowodowych czujników optycznych jest możliwość prowadzenia detekcji w sposób bezznaczykowy – bez konieczności stosowania znaczników chemicznych, enzymatycznych czy fluorescencyjnych. W tego typu rozwiązaniach sygnał generowany jest bezpośrednio w wyniku zmian właściwości fizykochemicznych warstwy powierzchniowej sensora, takich jak współczynnik załamania światła, grubość lub gęstość warstwy biologicznej powstałej w wyniku specyficznego wiązania analitu (targetowanego materiału) z receptorem [2]. Takie podejście umożliwia nie tylko szybką i ilościową identyfikację obecności analitu, ale także monitorowanie kinetyki oddziaływań w czasie rzeczywistym. Jednak ze względu na wysokie ryzyko wystąpienia niespecyficznych oddziaływań, zwłaszcza w złożonych próbkach takich jak np. krew, konieczne staje się rozszerzenie funkcjonalności czujników o dodatkowe mechanizmy walidacji sygnału.

W celu zwiększenia wiarygodności pomiaru i rozszerzenia zakresu uzyskiwanych informacji, jednym z kierunków rozwoju są struktury czujnikowe integrujące różne techniki detekcyjne. Takie podejście, stanowiące alternatywę dla złożonych systemów laboratoryjnych, umożliwia poszerzenie zakresu pomiarowego, krzyżową weryfikację wyników oraz ograniczenie ryzyka uzyskania sygnałów fałszywie pozytywnych lub negatywnych. Jest to szczególnie istotne w przypadku detekcji bezznaczykowej, w której sygnał generowany jest wyłącznie w wyniku specyficznego wiązania materiału biologicznego – analitu – z receptorem obecnym na powierzchni czujnika. Przykładem takiego rozwiązania są czujniki wielodomenowe, łączące domenę optyczną i elektrochemiczną (ECh) [1]. Techniki optyczne umożliwiają monitorowanie zmian współczynnika załamania światła, wynikających z tworzenia się warstwy biologicznej na powierzchni sensora. Pozwala to pośrednio oszacować grubość tej warstwy, ilość przyłączanego analitu oraz sposób jego wiązania. Z kolei pomiary ECh opierają się na analizie zmian transferu ładunku elektrycznego na granicy czujnik–badana próbka, co umożliwia określenie takich parametrów jak ładunek, sposób i orientacja wiązania analitu czy stopień wysycenia powierzchni.

W prezentowanej pracy omówione zostaną główne założenia oraz wyzwania towarzyszące projektowaniu światłowodowych struktur wielodomenowych, ze szczególnym uwzględnieniem możliwości integracji sensorów optycznych z domeną ECh. Przedstawione zostaną potencjalne zastosowania takich układów oraz korzyści wynikające z ich równoległej pracy – w tym możliwość zwiększenia ilości pozyskiwanych informacji, poprawy selektywności detekcji i weryfikacji sygnału. Zaprezentowane zostaną również wybrane przykłady eksperymentalne obrazujące sposób działania oraz zalety podejścia wielodomenowego w praktycznych zastosowaniach bioanalitycznych. Omawiane koncepcje stanowią podstawę do tworzenia zaawansowanych, zintegrowanych systemów czujnikowych do zastosowań w nowoczesnej bioanalizie i diagnostyce.

Podziękowania i źródła finansowania

Badania były finansowane ze środków Politechniki Warszawskiej w ramach Programu Inicjatywa Doskonałości – Uczelnia Badawcza (IDUB) – projekt LAB-TECH of Excellence II.

Literatura

- [1] K. Bartnik, M. Koba, and M. Śmietana, *Meas. J. Int. Meas. Confed.* **224**, 11 (2024)
- [2] H. K. Hunt and A. M. Armani, *Nanoscale* **2**, 9, 1544–1559 (2010)
- [3] M. Janik, M. Koba, M. Śmietana, *Trends in Analytical Chemistry* **178**, 117829 (2024).

CZWARTEK

3 LIPCA 2025

Szerokie pole widzenia i wysoka rozdzielczość: fourierowska mikroskopia ptychograficzna w badaniach organoidów mózgu

M. Krysa^{1,†}, M. Rogalski¹, P. Arcab¹, P. Gołowski², K. Kalinowski¹, M. Varshney³, B. Ahluwalia², P. Zdańkowski¹, M. Trusiak¹

¹Institut Mikromechaniki i Fotoniki, Wydział Mechatroniki, Politechnika Warszawska, ul. św. Andrzeja Boboli 8, 02-525 Warszawa.

²Department of Physics and Technology, UiT The Arctic University of Norway, Tromsø 9037, Norway

³The Systems Virology Lab, Division of Clinical Microbiology, Department of Laboratory Medicine, Karolinska Institutet, Huddinge, 141 52 Sweden

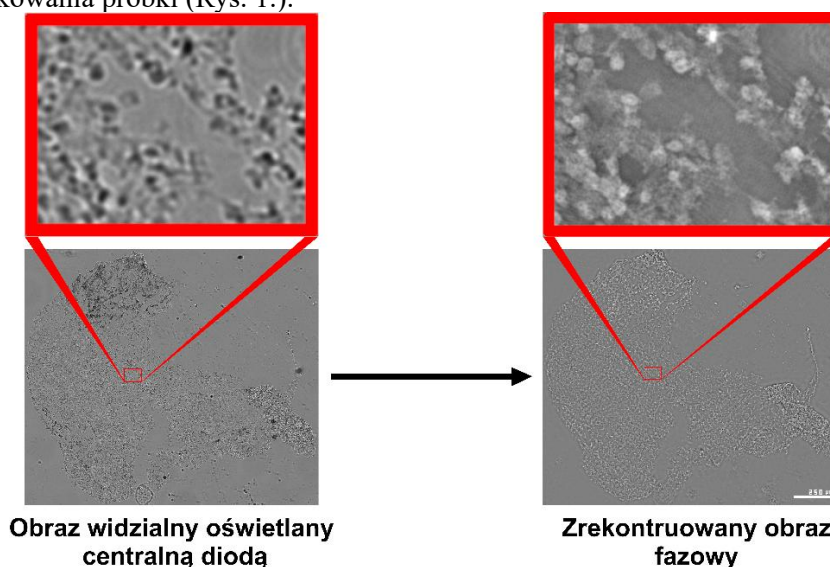
†email: mikolaj.krysa@pw.edu.pl

Organoidy mózgu (OM) są strukturami powstającymi w warunkach *in vitro* z komórek macierzystych. Ich ogromną przewagą nad hodowlą komórkową jest to, że strukturalnie i funkcjonalnie przypominają mózg, co umożliwia ich szerokie zastosowanie w badaniach neurobiologicznych [1, 2].

Złotym standardem do obrazowania OM jest mikroskopia fluorescencyjna. Umożliwia ona m.in. badanie rozmieszczenia przestrzennego różnych typów komórek. Ma ona jednak pewne ograniczenia – obejmuje swoim polem widzenia jedynie część obszaru organoidu i wymaga wyznakowania badanych struktur znacznikami fluorescencyjnymi.

Naszą propozycją na pokonanie tych ograniczeń jest zastosowanie fourierowskiej mikroskopii ptychograficznej (FPM). Technika ta umożliwia pominięcie obecnego w mikroskopii optycznej kompromisu pomiędzy polem widzenia poprzez syntezę wielu obrazów o niskiej rozdzielczości zarejestrowanych pod różnymi kątami oświetlenia. Synteza odbywa się przez algorytm, który rekonstruuje złożony obraz (amplitudę i fazę) o wysokiej rozdzielczości przestrzennej w szerokim polu widzenia [3].

W naszym badaniu zastosowaliśmy mikroskop z obiektywem o powiększeniu 4x i aperturze numerycznej 0.2. Zastosowanie FPM umożliwiło syntetyczne zwiększenie apertury numerycznej do ~ 0.6 (co jednocześnie zwiększyło rozdzielczość przestrzenną z $\sim 1.31 \mu\text{m}$ do $\sim 0.44 \mu\text{m}$) przy zachowaniu pełnego pola widzenia ($\sim 3.7 \text{ mm} \times 2,1 \text{ mm}$). W efekcie umożliwiło to obrazowanie całych organoidów na raz, z sub-komórkową rozdzielczością przestrzenną i bez konieczności znakowania próbki (Rys. 1).



Rysunek 1. Skrawek organoidu mózgu zobrazony za pomocą fourierowskiej mikroskopii ptychograficznej. Zarówno obraz widzialny jak i zrekonstruowany obraz fazowy ma pokazane zbliżenie na jeden z regionów w celu ukazania zwiększonej rozdzielczości przestrzennej. Zrekonstruowany obraz ma wartości fazy w zakresie -1.25 - 1.25 .

Źródło finansowania

Projekt nr WPC3/2022/47/INTENCITY/2024 finansowany przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach III konkursu na wspólne projekty badawcze w ramach współpracy polsko-chińskiej (2022)

Literatura

- [1] S. H. Kim and M. Y. Chang, *Int. J. Mol. Sci.*, vol. 24, no. 15, 2023, doi: 10.3390/ijms241512528.
- [2] Y. Aili, N. Maimaitiming, Z. Wang, and Y. Wang, *J. Cell. Mol. Med.*, vol. 28, no. 17, pp. 1–16, 2024, doi: 10.1111/jcmm.18560.
- [3] G. Zheng, C. Shen, S. Jiang, P. Song, and C. Yang, *Nat. Rev. Phys.*, vol. 3, no. 3, pp. 207–223, Feb. 2021, doi: 10.1038/s42254-021-00280-y.

Obrazowanie światłem nadfioletowym w mikroskopii bezsoczewkowej

P. Arcab^{1,†}, J. Dudek¹, E. Wdowiak¹, A. Chwastowicz^{2,3}, P. Zdańkowski¹, P. Matryba^{2,3,4}, G. Szewczyk⁵, M. Trusiak¹

¹Politechnika Warszawska, Wydział Mechatroniki, Instytut Mikromechaniki i Fotoniki, ul. św. A. Boboli 8, 02-525 Warszawa, Polska

²Warszawski Uniwersytet Medyczny, Katedra Immunologii, ul. Nielubowicza 5, 02-097 Warszawa, Polska

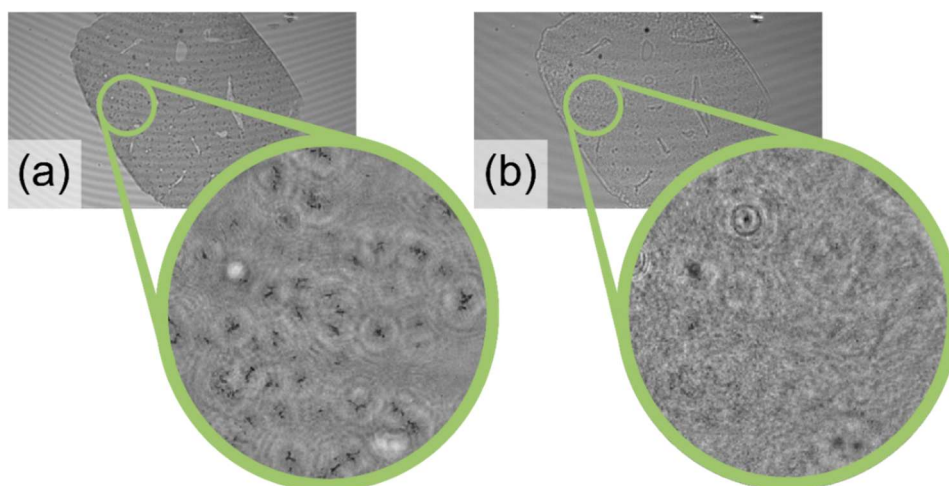
³Instytut Biologii Doświadczalnej im. Nenckiego PAN, Laboratorium Neurobiologii, BRAINCITY, ul. Pasteura 3, 02-093 Warszawa, Polska

⁴Narodowy Instytut Onkologii im. Marii Skłodowskiej-Curie, Oddział Radiologii 1, ul. Roentgena 5, 02-781 Warszawa, Polska

⁵Katedra Biofizyki, Wydział Biochemii, Biofizyki i Biotechnologii, Uniwersytet Jagielloński, ul. Rakowicka 27, 30-062 Kraków, Polska

†email: piotr.arcab.dokt@pw.edu.pl

Współczesna mikroskopia dąży do maksymalizacji pola widzenia przy jednoczesnym zachowaniu wysokiej rozdzielczości i minimalizacji kosztów. Coraz większe znaczenie w tym kontekście zyskują techniki cyfrowe, które otwierają nowe możliwości. Jednym z takich podejść jest cyfrowa holograficzna mikroskopia bezsoczewkowa – metoda pozwalająca na obrazowanie dużych obszarów z rozdzielczością ograniczoną głównie wymiarem piksela [1]. Choć światło nadfioletowe (UV) kojarzone jest głównie z zastosowaniami sterylizacyjnymi, stanowi również nieoczywiste, lecz obiecujące źródło informacji w obrazowaniu biologicznym. Dotychczasowe wykorzystanie światła UV w mikroskopii było ograniczane przez konieczność stosowania kosztownych soczewek kwarcowych i zwierciadeł, masywnych oraz często nieefektywnych obiektywów przystosowanych do pracy w zakresie UV, a także przez szkodliwe działanie tego promieniowania na żywe próbki. W prezentowanej pracy po raz pierwszy demonstrujemy możliwość zastosowania światła UV do obrazowania tkanek oraz innych próbek biologicznych w cyfrowej mikroskopii bezsoczewkowej. Dzięki swojej prostocie – układ składa się jedynie ze źródła światła, próbki oraz kamery – system jest nisko-kosztowy i łatwy do wdrożenia. Jednocześnie, dzięki właściwościom fizycznym samej metody holograficznej, możliwa jest rekonstrukcja obrazu nawet w warunkach skrajnego niedoświetlenia próbki [2], co otwiera drogę do obrazowania żywych komórek w zakresie UV. Co istotne, wykorzystanie światła UV pozwala nie tylko zbliżyć się do rozdzielczości w skali nanometrów, ale również uwidocznić struktury tkanek niewidocznych w świetle widzialnym (ze względu na pasma absorpcyjne zwiększające kontrast bez stosowania barwników) – jak pokazano na przykładzie tkanki wątroby (Rysunek 1).



Rysunek 1: Tkanka wątroby w immersji płynu oczyszczającego Ce3D, obrazowana w układzie mikroskopu bezsoczewkowego. (a) Wynik obrazowania w świetle ultrafioletowym. (b) Wynik obrazowania w dla długości fali wynoszącej 500 nm.

Podziękowania i źródła finansowania

Finansowane przez Unię Europejską (ERC Starting Grant, NaNoLens, Projekt 101117392). Poglądy i opinie wyrażone są jednak poglądami i opiniami wyłącznie autora(-ów) i niekoniecznie odzwierciedlają poglądy Unii Europejskiej lub Agencji Wykonawczej Europejskiej Rady ds. Badań Naukowych (ERCEA). Ani Unia Europejska, ani organ przyznający nie mogą ponosić za nie odpowiedzialności.

Literatura

- [1] A. Ozcan and E. McLeod, *Annual Review of Biomedical Engineering* **18**, 77 (2016).
[2] B. Mirecki, M. Rogalski, P. Arcab, et al., *Biomed. Opt. Express* **13**, 5667 (2022).

Metoda kalibracji dla bezsoczewkowej tomografii holograficznej

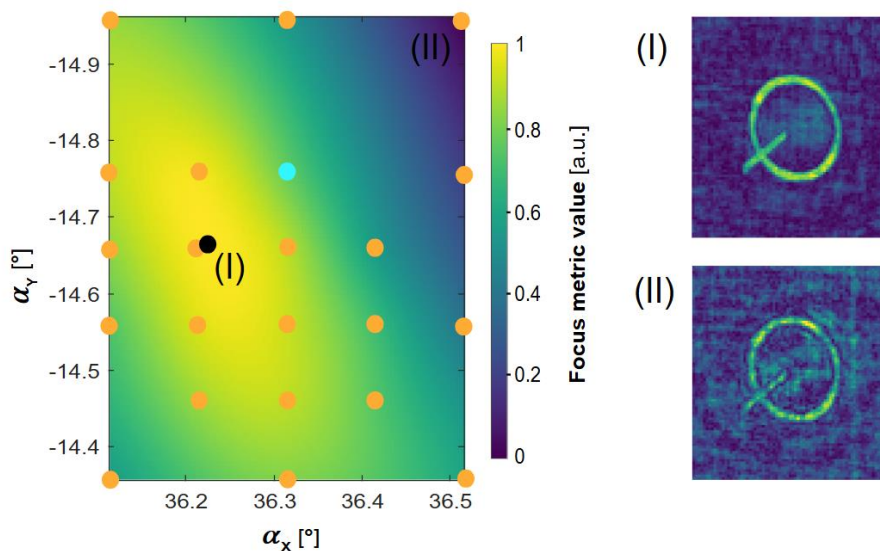
J.Dudek^{1,†}, M.Rogalski¹, P.Arcab¹, E.Wdowiak¹, J.Winnik¹, M.Trusiak¹

¹Politechnika Warszawska, Wydział Mechatroniki, Instytut Mikromechaniki i Fotoniki, ul. św. A. Boboli 8, 02-525 Warszawa, Polska

†email: juliadudekkontakt@gmail.com

Bezsoczewkowa mikroskopia holograficzna (BMH) to technika pozwalająca na bez-znacznikowe obrazowanie amplitudy oraz fazy próbki w dużym polu widzenia (rzędu nawet 100 mm²) przy jednoczesnym osiąganiu relatywnie wysokiej rozdzielczości przestrzennej (rzędu 1-2 μm). Kompaktowa, efektywna kosztowo i mechanicznie prosta konfiguracja układu eliminuje potrzebę stosowania tradycyjnych soczewek, co znacząco redukuje złożoność systemu optycznego, a także wpływ związanych z nim ograniczeń (aberracji, głębi ostrości) [1]. BMH znajduje już szerokie zastosowanie w dziedzinach takich jak biomedycyna, monitorowanie środowiska czy inżynieria materiałowa [2,3]. Jej potencjał można jeszcze bardziej zwiększyć poprzez rozszerzenie o obrazowanie trójwymiarowe (tomograficzne), analogicznie jak to ma miejsce w optycznej tomografii dyfrakcyjnej dla układów z soczewkami (z wykorzystaniem multipleksingu kątów oświetlenia do generacji sekwencji projekcji próbki).

Rekonstrukcja tomograficzna w konfiguracji bezsoczewkowej wiąże się z dodatkowymi wyzwaniami względem systemów soczewkowych, ponieważ obrazowanie próbki odbywa się poza płaszczyznę ostrości. Zatem kluczowe staje się precyzyjne wyznaczenie odległości przeogniskowania i kątów oświetlenia – nawet niewielkie błędy mogą prowadzić do rozmytych lub zdeformowanych rekonstrukcji. W niniejszej pracy przedstawiono praktyczną metodę kalibracji, opartą na automatycznym określaniu ostrości przy użyciu wariacji gradientu ciemnego pola [4]. Proponowane podejście upraszcza proces, ogranicza ryzyko błędów użytkownika i umożliwia uzyskanie wysokiej jakości rekonstrukcji nawet przy dużych kątach oświetlenia.



Rysunek 1: Mapa automatycznego określania ostrości (po lewej) oraz (I) widoczny element testu fazowego dla poprawnie wyznaczonej odległości przeogniskowania (II) ten sam element przedstawiony w nieostrości.

Podziękowania i źródła finansowania

Sfinansowane przez Unię Europejską (ERC, NaNoLens, Projekt 101117392). Przedstawione poglądy i opinie należą wyłącznie do autor(ów) i niekoniecznie odzwierciedlają stanowisko Unii Europejskiej ani Europejskiej Agencji Wykonawczej Rady ds. Badań Naukowych (ERCEA). Ani Unia Europejska, ani instytucja przyznająca fundusze nie ponoszą za nie odpowiedzialności.

Literatura

- [1] Wdowiak, E., Rogalski, M., Arcab, P. *et al.* Quantitative phase imaging verification in large field-of-view lensless holographic microscopy via two-photon 3D printing. *Sci Rep* **14**, 23611 (2024).
- [2] Wu, Y., & Ozcan, A. (2018). Lensless digital holographic microscopy and its applications in biomedicine and environmental monitoring. *Methods*, 136, 4–16.
- [3] Mudanyali, O., Bishara, W., & Ozcan, A. (2011). Lensfree super-resolution holographic microscopy using wetting films on a chip. *Optics Express*, 19(18), 17378–17389.
- [4] Trusiak, M., Picazo-Bueno, J.-A., Zdankowski, P., & Micó, V. (2020). DarkFocus: numerical autofocusing in digital in-line holographic microscopy using variance of computational dark-field gradient. *Optics and Lasers in Engineering*, 134, 106195.

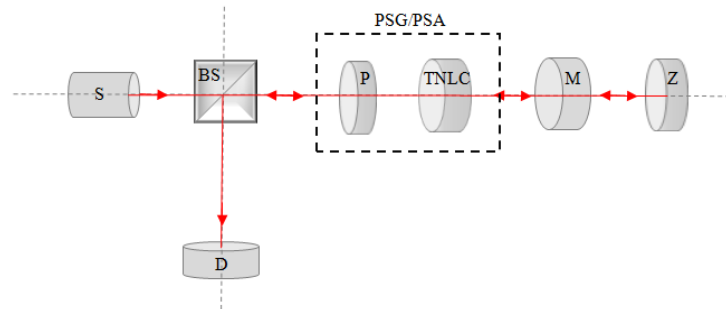
Doświadczalne potwierdzenie możliwości skonstruowania polarymetru podwójnego przejścia bazując na pojedynczym skręconym nematycznym ciekłym kryształach

M. Salamaga^{1,†}, W. A. Woźniak¹

¹Katedra Optyki i Fotoniki, Politechnika Wroclawska, Wybrzeże Stanisława Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

†email: monika.salamaga@pwr.edu.pl

Polarymetr podwójnego przejścia jest specyficznym rozwiązaniem w polarymetrii Muellera, ponieważ ten sam moduł jest wykorzystywany do syntezy (generator PSG) i analizy (analyzer PSA) różnych stanów polaryzacji światła. Wiązka dwukrotnie przechodzi przez badany ośrodek i PSG/PSA za sprawą odbicia od zwierciadła [1]. Natężenie światła jest rejestrowane za pomocą detektora (Rysunek 1). W proponowanym układzie do budowy PSG/PSA wykorzystuje się liniowy polaryzator i pojedynczy skręcony nematyczny ciekły kryształ (TNLC). TNLC jest interesującą alternatywą dla powszechnie wykorzystywanych w polarymetrii przesuwników ciekłokrystalicznych, ponieważ zmieniając przyłożone napięcie zmienia się polaryzacyjne właściwości jego wektorów własnych i wprowadzając różnicę faz [2]. Praktyczne możliwości generowania i analizowania różnych stanów polaryzacji światła przez układ polaryzatora i TNLC zależą od fizycznych parametrów komórki ciekłokrystalicznej i zmieniają się wraz z jej obrotem wokół osi o 180°. Oznacza to, że dla danego napięcia stan polaryzacji uzyskiwany w układzie generującym będzie inny niż w układzie analizującym.



Rysunek 1: Schemat układu pomiarowego: S – źródło światła, BS – kostka światłodzieląca, P – liniowy polaryzator, TNLC – skręcony nematyczny ciekły kryształ, M – badany ośrodek, Z – zwierciadło, D – detektor.

W oparciu o zmierzone stany polaryzacji światła, możliwe do uzyskania w tym układzie, tworzony jest model numeryczny, który poddawany jest optymalizacji. Ma to na celu ustalenie najlepszego zestawu generatorów i analizatorów, prowadzącego do zminimalizowania tzw. liczby warunkowej układu [3]. Liczba warunkowa dostarcza bowiem ilościowej informacji o odporności układu na szumy. Otrzymane w wyniku optymalizacji dane o kątach azymutu elementów układu i zestawie faz, które powinien wprowadzać TNLC są wykorzystywane podczas pomiarów.

Na podstawie uzyskanego z pomiarów zestawu wartości natężeń światła i formalizmu macierzy Muellera odtwarzane są informacje o właściwościach dwójłomnych badanego ośrodka (kącie azymutu i eliptyczności jego pierwszego wektora własnego oraz różnicy faz wprowadzanej między falami własnymi). Proponowany układ został zestawiony i skalibrowany, a jego działanie zostało przetestowane z wykorzystaniem próbek o znanych właściwościach.

Podziękowania i źródła finansowania

Badania były finansowane przez Narodowe Centrum Nauki w ramach projektu Preludium 20 (nr rej. 2021/41/N/ST7/03422).

Literatura

- [1] M. Sobczak, P. Kurzynowski, W. A. Woźniak, M. Owczarek, S. Drobczyński, "Polarimeter for measuring the properties of birefringent media in reflective mode", *Optics Express* **28** (1), 249-257 (2020).
- [2] M. Salamaga, W. A. Woźniak, "Analysis of the possibilities to generate and analyze different polarization states of light by twisted nematic liquid crystal", *Proc. SPIE* 12502 (2022).
- [3] K. M. Twietmeyer, R. A. Chipman, "Optimization of Mueller matrix polarimeters in the presence of error sources", *Optics Express* **16** (15), 11589 (2008).

Zintegrowane fotoniczne interrogatory nowej generacji do precyzyjnego monitorowania parametrów życiowych

Aleksandra Bieniek-Kaczorek¹, Stanisław Stopiński^{1,2,3}, Krzysztof Anders^{1,2,3}, Anna Jusza^{1,2},
Krzysztof Wojtiuk¹, Ryszard Piramidowicz^{1,2,3}

¹Instituto Mikroelektroniki i Optoelektroniki, Politechnika Warszawska, Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, Polska

²LightHouse Sp. z o.o., Stefczyka 34, 20-151 Lublin, Polska

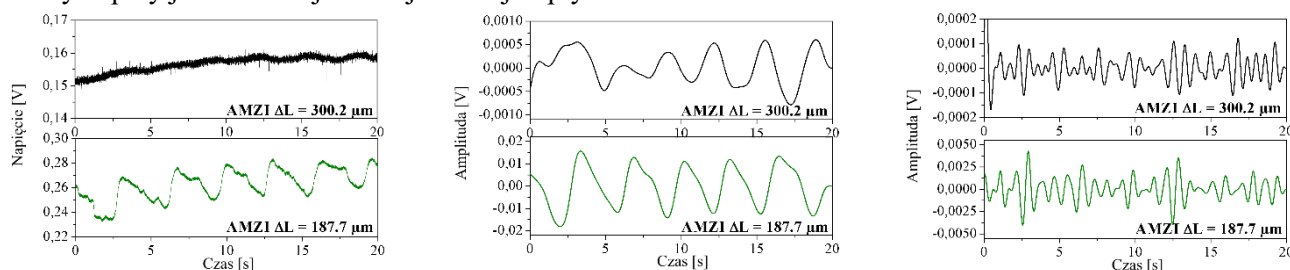
³VIGO Photonics S.A., Poznańska 129/133, 05-850 Ożarów Mazowiecki, Polska

email: aleksandra.bieniek@pw.edu.pl

Wykrywanie i analiza parametrów życiowych, takich jak tętno i częstość oddechów, zyskują na znaczeniu w dobie cyfrowych systemów monitorowania zdrowia. Rosnące zapotrzebowanie na ciągły monitoring funkcji życiowych przyczyniło się do rozwoju czujników o małych rozmiarach, przenośnych, energooszczędnych i ekonomicznych. Realizacja tych założeń wymaga miniaturyzacji wszystkich komponentów przy jednoczesnym zachowaniu odpowiednich parametrów użytkowych. Czujniki optyczne stanowią obiecującą odpowiedź na te wyzwania, oferując wysoką czułość oraz odporność na zakłócenia elektromagnetyczne [1]. W połączeniu z fotonicznymi układami scalonymi, stosowanymi między innymi jako interrogatory, zapewniają one dodatkowe korzyści, takie jak zmniejszone rozmiary i waga, łatwiejsza integracja z systemami optycznymi i elektronicznymi, niższe zużycie energii oraz ograniczone koszty produkcji i eksploatacji.

W niniejszej pracy zaprezentowano nowy układ fotonicznego interrogatora dla światłowodowych siatek Bragga (ang. fiber Bragg grating, FBG), z wykorzystaniem asymetrycznych interferometrów Mach-Zehndera (asymmetric Mach-Zehnder interferometer, AMZI), zaprojektowany jako specjalizowany układ fotoniki zintegrowanej (application-specific photonic integrated circuit, ASPIC). Zastosowany układ ASPIC zapewnia wysoką rozdzielczość spektralną, co przekłada się na zwiększoną czułość pomiarową. Struktury interferometrów AMZI o zróżnicowanym stopniu asymetrii pozwoliły na przeprowadzenie analizy porównawczej pod kątem czułości oraz zakresu spektralnego. Wpływ szumów został zredukowany dzięki zastosowaniu zaawansowanych technik filtracji.

Wyniki przedstawione na Rys. 1a ilustrują jednoczesny pomiar parametrów życiowych z wykorzystaniem różnych siatek Bragga zainstalowanych prostopadle względem siebie i analizowanych za pomocą układu interrogatora z AMZI o zróżnicowanym poziomie asymetrii (ΔL). Dane zostały przetworzone z zastosowaniem cyfrowego filtra Butterwortha w celu ekstrakcji informacji o częstości oddechów w zakresie 0,1 – 0,7 Hz (rys. 1b) oraz tętna w zakresie 1 – 2 Hz (rys. 1c). Filtracja sygnału umożliwiła dokładną detekcję monitorowanych parametrów życiowych przy jednoczesnej istotnej redukcji wpływu szumów.



a)

b)

c)

Rysunek 1: Przebiegi czasowe uzyskane za pomocą zintegrowanego układu fotonicznego interrogatora, (a) sygnał surowy, (b) sygnał przefiltrowany w celu ekstrakcji częstości oddechowej, (c) sygnał przefiltrowany w celu ekstrakcji tętna.

Opracowany system stanowi kompaktowe rozwiązanie przydatne do zastosowań w systemach klinicznych, przenośnych urządzeniach medycznych oraz potencjalnie w urządzeniach ubieralnych. Walidacja eksperymentalna potwierdziła zdolność układu do wykrywania zmian sygnału związanych z częstością oddechów i tętnem z wysoką rozdzielczością w warunkach rzeczywistych (lub im równoważnych).

Podziękowania i źródła finansowania

Badania zostały sfinansowane przez Politechnikę Warszawską w ramach programu Inicjatywa Doskonałości – Uczelnia Badawcza, projekt pt.: „Miniaturowe interrogatory w technologiach fotoniki zintegrowanej”.

Literatura

- [1] C. Massaroni, M. Zaltieri, D. Lo Presti, A. Nicolò, D. Tosi and E. Schena, "Fiber Bragg Grating Sensors for Cardiorespiratory Monitoring: A Review," *IEEE Sensors Journal*, vol. 21, no. 13, pp. 14069-14080 (2021).

Zaawansowane elementy foniczne na bazie azotku krzemu do zastosowań sensorycznych w zakresie VIS-NIR

M. Lelit^{1,2,†}, D. Drecka², L. Kozłowski^{1,2}, M. Słowikowski², B. Stonio^{1,2}, M. Juchniewicz², K. Pavlov², M. Filipiak², B. Michalak², M. Jarosik^{1,2}, S. Stopiński^{1,3,4}, K. Anders^{1,3,4}, R. Piramidowicz^{1,3,4}

¹Instituto Mikroelektroniki i Optoelektroniki, Politechnika Warszawska, Koszykowa 75, 00-662 Warszawa

²Centrum Zaawansowanych Materiałów i Technologii CEZAMAT, Politechnika Warszawska, Poleczki 19, 02-822 Warszawa

³VIGO Photonics S.A., Poznańska 129/133, 05-850 Ożarów Mazowiecki

⁴LightHouse Sp. z o.o., Stefczyka 34, 20-151 Lublin

†email: marcin.lelit@pw.edu.pl

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań nad zaawansowanymi komponentami fotoniki zintegrowanej w technologii azotku krzemu (SiN), zaprojektowanymi do zastosowań w selektywnych systemach sensorycznych o wysokiej czułości, działających na długościach fal 635 nm i 1550 nm. Platforma technologiczna SiN umożliwia realizację fonicznych układów scalonych (ang. photonic integrated circuits, PICs) operujących w zakresie widzialnym (VIS) i bliskiej podczerwieni (NIR). Jedną z kluczowych zalet platformy jest bardzo niska tłumienność światłowodów – nawet 0,55 dB/cm [1]. Dodatkowo, kompatybilność z technologią produkcji układów CMOS zapewnia skalowalność i potencjalną możliwość produkcji masowej [2]. Układy realizowane na platformie SiN, pracujące w zakresie VIS i NIR znajdują zastosowanie w systemach biomedycznych, ze względu na ograniczoną absorpcję światła przez wodę oraz możliwość stosowania znaczników fluorescencyjnych oraz w monitorowaniu stężenia prostych substancji chemicznych, takich jak zanieczyszczenia gazowe.

Poprawa czułości i selektywności układów PIC w technologii SiN stosowanych w detekcji prostych związków chemicznych i biosensoryce, jest realizowana poprzez zastosowanie, światłowodów szczelinowych oraz podfalowych (SWG) w zbudowanych z ich wykorzystaniem rezonatorów pierścieniowych (RRs). W światłowodach szczelinowych moc sygnału optycznego skoncentrowana jest w wąskim obszarze o niskim współczynniku załamania, który może zostać wypełniony analitem, co znacząco zwiększa oddziaływanie modu prowadzonego w światłowodzie z monitorowanym ośrodkiem. Światłowody SWG zostały zoptymalizowane pod kątem wnikania pola modowego w otaczający ośrodek (monitorowany gaz), co jest kluczowe dla osiągnięcia wysokiej czułości [3].

Badane struktury foniczne wytworzono na linii pilotażowej zlokalizowanej w CEZAMAT PW z użyciem technik litografii elektronowej oraz reaktywnego trawienia jonowego, co umożliwiło uzyskanie rozdzielczości rzędu pojedynczych nanometrów z wysoką powtarzalnością.

Charakteryzacja optyczna wytworzonych komponentów wykazała, że światłowody szczelinowe charakteryzują się tłumiennością na poziomie 4,3 dB/cm dla długości fali 635 nm oraz 3,7 dB/cm dla 1550 nm, w porównaniu do tłumienności poniżej 1,2 dB/cm i 0,7 dB/cm dla światłowodów głęboko trawionych, odpowiednio dla zakresu widzialnego i telekomunikacyjnego. W przypadku RRs wykorzystujących światłowody SWG, dla długości fali 635 nm uzyskano czułość na poziomie 120 nm/RIU, co czyni je odpowiednimi do zastosowań w zakresie światła widzialnego. RRs zbudowane na bazie światłowodów szczelinowych wykazywały czułość na poziomie 110 dB/RIU dla długości fali 1550 nm, co potwierdza ich użyteczność w systemach czujnikowych pracujących w zakresie bliskiej podczerwieni. Wstępne testy wskazują, że parametry opracowanych komponentów fonicznych spełniają wymagania selektywnych systemów czujnikowych, wykazując znaczną poprawę w zakresie czułości i selektywności w porównaniu do układów opartych na światłowodach o prostej geometrii rdzenia.

Podziękowania i źródła finansowania

Badania zostały sfinansowane przez: (POB FOTECH) przez Politechnikę Warszawską w ramach Inicjatywy Doskonałości: Uczelnia Badawcza (IDUB) nr umowy 1820/339/Z01/POB1/2021 oraz (YOUNG PW) przez Politechnikę Warszawską w ramach Inicjatywy Doskonałości: Uczelnia Badawcza (IDUB) nr umowy: CPR-IDUB/51/Z01/2024 oraz przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach programu LIDER XIV, numer projektu: LIDER14/0068/2023

Literatura

- [1] A. Kirill et al., *Optics Express* **31**, 16227-16242 (2023)
- [2] P. Muñoz, et al., *Sensors* **17**(9), 2088 (2017).
- [3] Q. Wilmart, et al., *Applied Science* **9**(2), 255 (2019).

Praktyczne pomiary fal milimetrowych przy pomocy atomów rydbergowskich

S. Borówka^{1,2,†}, W. Krokosz^{1,2}, J. Nowosielski^{1,2}, M. Mazelanik¹, W. Wasilewski^{1,2}, M. Parniak^{1,2}

¹ Centrum Kwantowych Technologii Optycznych, Centrum Nowych Technologii, Uniwersytet Warszawski, Banacha 2c, 02-097 Warszawa

² Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski, Pasteura 5, 02-093 Warszawa

†email: s.borowka@cent.uw.edu.pl

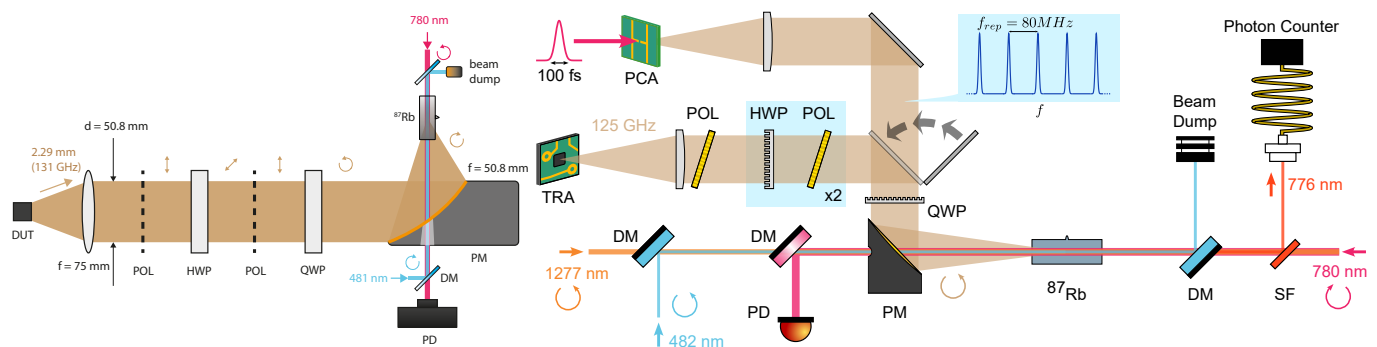
Falami milimetrowymi zwyczajowo określa się fale radiowe o długościach 10–1 mm, czyli częstotliwościach 30–300 GHz. Pomimo występowania licznych zastosowań fale milimetrowe do zarejestrowania wymagają precyzyjnie zaprojektowanych oraz wyjątkowo szybkich układów przetwarzania. Oba te aspekty przyczyniają się do wyjątkowo wysokich cen i niedoskonałych parametrów klasycznych urządzeń pracujących w tej dziedzinie fal radiowych, co powoduje, że warto szukać alternatywnych metod detekcji.

Pomocne może okazać się tutaj wykorzystanie atomów rydbergowskich. Atomy alkaliczne wzbudzone do wysokich stanów energetycznych (o głównej liczbie kwantowej $n > 15$), zwane atomami rydbergowskimi, wykazują wiele interesujących własności. Istotne jest, że przejścia pomiędzy różnymi stanami rydbergowskimi zachodzą za pośrednictwem fal milimetrowych, co umożliwia ich wykrywanie. Duże momenty dipolowe tych przejść powodują, że atomy rydbergowskie mogą być wyjątkowo czułe na te pola radiowe, a dobra teoretyczna znajomość struktury energetycznej atomów pozwala metrologicznie powiązać pomiary z jednostkami SI.

Pokazujemy tutaj dwa doświadczenia demonstrujące praktyczne zastosowania detektorów opartych na atomach rydbergowskich.

W pierwszym z nich używamy przejścia energetycznego dla 131 GHz do kalibracji radarowego układu scalonego zaprojektowanego do użycia w inteligentnych samochodach [1]. Wykorzystując dobrze znane momenty dipolowe pobliskiego przejścia rydbergowskiego, kalibrujemy pole elektryczne wytwarzane przez samochodowy radar oraz określamy częstotliwość jego pracy w układzie przedstawionym na Rysunku 1 (lewo). Przy okazji demonstrujemy, że dla fal milimetrowych możliwe jest wykonanie prostych elementów dyfrakcyjnych oraz metamateriałowych elementów polaryzacyjnych w technice druku 3D przy wykorzystaniu odpowiedniego filamentu, a propagacja fal milimetrowych może odbywać się w skolimowanej wiązce.

W drugim doświadczeniu obserwujemy sygnał wygenerowany z fotomiksera (anteny terahercowej) w układzie przedstawionym na Rysunku 1 (prawo) [2]. Okazuje się, że w typowym przypadku, gdy takie urządzenie wzbudzone jest laserem femtosekundowym, generowany przez nie sygnał ma postać grzebienia częstości w dziedzinie fal milimetrowych i terahercowych. Używając opracowanej przez nas metody konwersji mikrofalowo-optycznej przy wykorzystaniu mieszania fal w atomach rydbergowskich [3], demonstrujemy wykrywanie sygnału pochodzącego z pojedynczego zęba grzebienia częstości. Następnie używamy znajomości momentów dipolowych przejść atomowych do absolutnej kalibracji grzebienia.



Rysunek 1: (lewo) Szkic układu doświadczalnego pozwalającego na kalibrację samochodowego radaru fal milimetrowych. (prawo) Szkic układu pozwalającego na kalibrację fotomiksera (grzebienia częstości).

Literatura

- [1] S. Borówka, W. Krokosz, M. Mazelanik, W. Wasilewski, M. Parniak, *Phys. Rev. Applied* **22**, 034067 (2024).
- [2] W. Krokosz, J. Nowosielski, S. Borówka, M. Mazelanik, W. Wasilewski, M. Parniak, w przygotowaniu.
- [3] S. Borówka, U. Pylypenko, M. Mazelanik, M. Parniak, *Nat. Photon.* **18**, 32–38 (2024).

Kiedy dwie wiązki (podczerwone) są lepsze niż jedna – kontrolowanie emisji nanocząstek upkonwertujących domieszkowanych tulem

P. Rajchel-Mieldzioc¹, A. Bednarkiewicz², K. Prorok², P. Fita^{1, †}

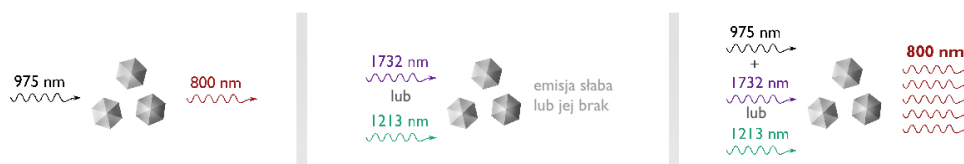
¹ Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski, Pasteura 5, 02-093 Warszawa

² Instytut Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych PAN, Okólna 2, 50-422 Wrocław

†email: fita@fuw.edu.pl

Nanocząstki upkonwertujące (UCNPs) to grupa materiałów luminescencyjnych zdolnych do absorpcji promieniowania o niższej energii (np. w zakresie bliskiej podczerwieni) i emisji fotonów o wyższej energii w zakresie widzialnym[1]. Zjawisko to zachodzi głównie poprzez transfer energii (*ETU*, *energy transfer upconversion*), w której fotony są absorbowane przez jony uczulacza (Yb^{3+}), po czym następuje przekazanie energii do jonów aktywatora (np. Tm^{3+} , Er^{3+})[2]. W standardowych podejściach wykorzystuje się pojedyncze źródło wzbudzenia – najczęściej laser 970-980 nm odpowiadający przejściu ${}^2F_{7/2} \rightarrow {}^2F_{5/2}$ w jonach iterbu – uczulacza. Prezentowane przez nas badania opierają się na *równoczesnym* zaangażowaniu dwóch kanałów wzbudzenia: pośredniego (przez uczulacz) oraz bezpośredniego (poprzez aktywator), realizowanego poprzez wzbudzenie nanocząstek domieszkowanych tulem (Tm^{3+}) za pomocą *dwóch* odpowiednio dobranych wiązek – wiązki 975 nm oraz przestrajalnej wiązki w zakresie 1050-1875 nm.

Przeprowadzona analiza spektroskopowa pozwoliła na identyfikację dwóch szerokich pasm absorpcji jonów tulu, z maksimum przy 1213 nm oraz 1732 nm. Wzbudzenie w tych zakresach, w połączeniu z wiązką 975 nm, skutkowało odkryciem nieoczekiwanie silnego wzmocnienia emisji przy 800 nm – prowadząc do jej pojawienia się z poziomu bliskiego zera lub zwiększenia intensywności nawet o ponad 1000% (względem sumy efektów uzyskiwanych przy osobnym użyciu każdej z wiązek). Zaobserwowane zjawisko, określone mianem emisji nadmiarowej, wskazuje na silną nieliniowość odpowiedzi fotofizycznej badanego układu.



Rysunek 1: Obrazowe przedstawienie idei kowzbudzenia nanocząstek domieszkowanych tulem za pomocą wiązki 975 nm i dodatkowej wiązki NIR – schemat pokazuje wpływ wybranych wzbudzeń laserowych na emisję 800 nm. Sama wiązka 975 nm wywołuje emisję (intensywność zależna od mocy), natomiast wybrane wiązki NIR (odpowiadające pasmom absorpcji opisanym w pracy) nie dają mierzalnego sygnału. Dopiero ich połączenie prowadzi do wyraźnego wzmocnienia emisji.

Co szczególnie istotne, opisany efekt umożliwił nam bezpośrednią wizualizację promieniowania NIR o długościach fali powyżej 1700 nm – zakresu poza czułością standardowych detektorów InGaAs. W eksperymentach tych, żadna z wiązek osobno nie generowała mierzalnej emisji, natomiast ich współdziałanie prowadziło do wyraźnego sygnału, co jednoznacznie wskazuje na synergiczny mechanizm pobudzenia. Taka właściwość otwiera nowe możliwości w konstrukcji układów logicznych (np. bramki AND) oraz sterowaniu światłem. Nasze wyniki stanowią dowód, iż przy odpowiednio dobranych długościach fal i konstrukcji nanocząstek (np. przez projektowanie dopasowanych pod zastosowanie struktur typu rdzeń-powłoka (*core-shell*)), kowzbudzenie może być skuteczną strategią do modulacji emisji – zarówno w zastosowaniach naukowych, jak i technologicznych.

Literatura

[1] F. Auzel, *Chemical Reviews* **104**, 139-174 (2004).

[2] M. Haase, H. Schäfer, *Angewandte Chemie International Edition* **50**, 5808-5829 (2011).

Oscylacyjna spektroskopia generacji sumy częstości w badaniach powierzchni błon komórkowych

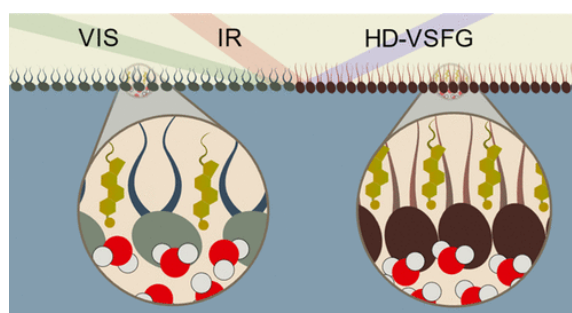
L. Piatkowski^{1†}, H. Orlikowska-Rzeźnik¹, J. Versluis², H. J. Bakker²

¹Wydział Inżynierii Materiałowej i Fizyki Technicznej, Instytut Fizyki, Politechnika Poznańska, 60-965 Poznań

²AMOLF, Ultrafast Spectroscopy, 1098 XG Amsterdam, Holandia

†email: lukasz.j.piatkowski@put.poznan.pl

Nanoskopowa warstwa wody, która bezpośrednio nawilża błony biologiczne, odgrywa kluczową rolę w utrzymaniu struktury komórkowej, regulacji procesów biochemicznych i zarządzaniu interakcjami międzycząsteczkowymi na powierzchni błony. Dlatego też poznanie struktury błony, w tym jej warstwy hydratacyjnej, jest niezbędne do zrozumienia procesów biochemicznych leżących u podstaw życia jakie znamy. Cholesterol jest jedną z podstawowych cząsteczek lipidowych w komórkach ssaków, modulujących zarówno strukturę, jak i dynamikę błon komórkowych, jednakże jego wpływ na strukturę wody hydratującej powierzchnię błony pozostawał dotychczas nieznany. Aby określić rolę cholesterolu w organizacji warstwy uwadniającej błony komórkowe zastosowaliśmy wibracyjną spektroskopię generacji sumy częstości z detekcją heterodynową (z ang. *Heterodyne-Detected Vibrational Sum-Frequency Generation*, HD-VSFG). Technika ta pozwala badać niezwykle cienkie warstwy molekularne, ponieważ suma częstości jest generowana jedynie gdy symetria układu jest złamana, np. na granicy faz. Technika ta dostarcza nie tylko widmo oscylacyjne cząsteczek – zastosowanie detekcji heterodynowej pozwala również pozyskać informacje o orientacji oscylujących dipoli względem płaszczyzny błony. Wpływ cholesterolu na charakterystykę hydratacji zbadaliśmy dla trzech głównych lipidów tworzących błony komórkowe: nienasyconej i nasyconej fosfatydylocholino (PC) oraz sfingomieliny (SM). Stwierdziliśmy, że w przypadku nienasyconego lipidu DOPC, cholesterol nie zmienia znacząco uporządkowania ogonów lipidowych i lokalnie zaburza uporządkowanie orientacyjne cząsteczek wody uwadniającej część hydrofilową DOPC. W przeciwieństwie do tego, dla nasyconych lipidów DPPC i SM, dodanie cholesterolu prowadzi do wyraźnie zwiększonego upakowania i uporządkowania hydrofobowych ogonów. Ponadto, po dodaniu cholesterolu orientacja cząsteczek wody uwadniającej hydrofilowe grupy funkcyjne tychże lipidów staje się silnie anizotropowa. Nasze badania ujawniły ważną i unikalną rolę cholesterolu w modulowaniu struktury wody biologicznej [1]. Efekt jest wyraźnie zależny od składu błony, a zatem przyczynia się do lateralnej heterogeniczności i potencjału dipolowego błony komórkowej. Otrzymane wyniki są ważne nie tylko w kontekście zrozumienia podstawowych procesów komórkowych, takich jak neurotransmisja, zapłodnienie, wnikanie wirusów, ale także z aplikacyjnego punktu widzenia (dostarczanie leków zamkniętych w liposomach, rozwój szczepionek opartych na nanocząstkach lipidowych, projektowanie bio-nanomateriałów).



Rysunek 1: Oscylacyjna spektroskopia generacji sumy częstości pozwala określić strukturę wody oraz zbadać oddziaływania woda-lipid-sterol na powierzchni modelowych błon komórkowych.

Podziękowania i źródła finansowania

Prace te zostały sfinansowane ze środków budżetowych przeznaczonych na naukę w latach 2019-2023 jako projekt badawczy w ramach programu „Diamentowy Grant” (nr decyzji 0042/DIA/2019/48). L.P. dziękuje za wsparcie finansowe Narodowego Centrum Nauki (Polska) w ramach projektu OPUS (nr 2020/37/B/ST4/01785).

Literatura

[1] Orlikowska-Rzeźnik et al., *Journal of the American Chemical Society* **146**, 13151-13162 (2024).

Zastosowanie spektroskopii fluorescencyjnej czasowo-rozdzielczej w diagnostyce medycznej

T. Wybranowski[†], J. Pyskir¹, M. Napiórkowska-Mastalerz¹, M. Bosek¹, M. Cyrankiewicz¹, B. Ziomkowska¹, S. Radzin¹, G. Przybylski², S. Kruszewski¹

¹Katedra Biofizyki, Wydział Farmaceutyczny, Collegium Medicum Uniwersytetu Mikołaja Kopernika, Jagiellońska 13, 85-067 Bydgoszcz

²Katedra Chorób Płuc, Nowotworów i Gruźlicy, Wydział Lekarski, Collegium Medicum Uniwersytetu Mikołaja Kopernika, Seminaryjna 1, 85-326 Bydgoszcz, Polska
†email: tomaszwybranowski@cm.umk.pl

Nasz zespół badawczy opracowuje optyczne, niewymagające znaczników i odczynników metody wczesnego wykrywania, stratyfikacji ryzyka oraz monitorowania chorób. Skupiamy się przede wszystkim na schorzeniach układu oddechowego, a w szczególności na zapaleniu płuc oraz raku płuca – dwóch chorobach charakteryzujących się wysoką śmiertelnością, trudną diagnostyką i nieprzewidywalnym przebiegiem. Mimo postępów w dziedzinie obrazowania i diagnostyki molekularnej, dostępne obecnie narzędzia często nie pozwalają na dostatecznie wczesne wykrycie zmian patologicznych ani nie zapewniają optymalnego prowadzenia terapii. W odpowiedzi na te wyzwania nasz zespół rozwija metody oparte na spektroskopii fluorescencyjnej czasowo-rozdzielczej (TRFS) oraz mikroskopii obrazowania czasu życia fluorescencji (FLIM). Techniki te umożliwiają wykrywanie w czasie zbliżonym do rzeczywistego subtelnych zmian biochemicznych zachodzących w próbkach krwi i tkanek, co jest możliwe dzięki obecności fluoroforów endogennych, takich jak protoporfiryna IX, NADH, FAD, produkty degradacji kolagenu oraz białka zawierające tryptofan (np. albumina). Zmiany w ich emisji są powiązane z określonymi procesami patologicznymi, takimi jak stres oksydacyjny, dysfunkcja mitochondrialna, przebudowa tkankowa oraz zaburzenia syntezy hemoglobiny i transportu tlenu. Na podstawie danych uzyskanych za pomocą TRFS udało się opracować wskaźniki prognostyczne pozwalające na ocenę ryzyka zgonu u pacjentów z pozaszpitalnym zapaleniem płuc o różnej etiologii (COVID-19 i bakteryjnej). Pacjenci z grupy wysokiego ryzyka mogą odnieść korzyść z bardziej intensywnej terapii wspomagającej lub wczesnej interwencji, takiej jak profilaktyczne zastosowanie leków immunosupresyjnych (np. glikokortykosteroidów), podczas gdy osoby z grupy niskiego ryzyka mogą uniknąć niepotrzebnych procedur diagnostycznych i leczniczych, ograniczając ryzyko działań ubocznych. Istotną zaletą naszej metody jest możliwość zastosowania bardzo niewielkiej objętości krwi do badania ostrego stanu zapalnego, co w praktyce umożliwia pobór próbek z opuszki palca. Otwiera to drogę do nieinwazyjnej, szybkiej diagnostyki, również poza szpitalem lub w warunkach ograniczonych zasobów. Taka procedura może być szczególnie przydatna w ocenie wczesnych stadiów stanu zapalnego oraz w monitorowaniu ryzyka sepsy. Wstępne dane wskazują ponadto, że rak płuca również wiąże się ze swoistymi zmianami w parametrach fluorescencyjnych, podobnymi do tych spotykanych w ciężkich infekcjach. Sugeruje to, że technika TRFS może znaleźć zastosowanie w różnicowaniu oraz monitorowaniu różnych procesów patologicznych obejmujących układ oddechowy. Wierzymy, że rozwój metod opartych na spektroskopii fluorescencyjnej czasowo-rozdzielczej może istotnie wesprzeć globalne działania na rzecz zwalczania epidemii zapaleń płuc, przyszłych kryzysów zdrowotnych związanych z układem oddechowym, a także przyczynić się do usprawnienia diagnostyki i terapii raka płuca.

Potencjał metod spektroskopowych w wykrywaniu mikroplastiku

**W. Szymska¹, P. Nowakowski¹, S. Herman², E. Wika³, M. Październy³, A. Wiszkony⁴, M. Wojcik⁵,
S. Drewniak⁶, P. Kałużyński⁶, M. Procek⁶, E. Maciak^{6†}, I. Zimoch⁷**

¹ Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny ul. B. Krzywoustego 2 44-100 Gliwice

² Politechnika Śląska, Wydział Chemiczny, ul. Ks. M. Strzody 9, 44-100 Gliwice

³ Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, ul. S. Konarskiego 18, 44-100 Gliwice

⁴ Politechnika Śląska, Wydział Automatyki, Elektroniki i Informatyki, ul. Akademicka 16 44-100 Gliwice

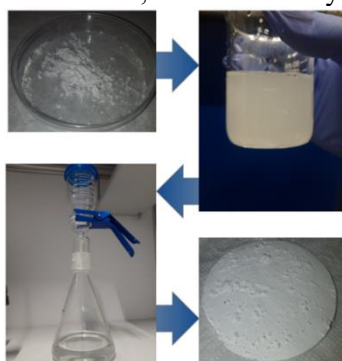
⁵ Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Biomedycznej, ul. Roosevelta 40, 41-800 Zabrze

⁶ Politechnika Śląska, Katedra Optoelektroniki, Wydział Elektryczny ul. B. Krzywoustego 2 44-100 Gliwice,

⁷ Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Katedra Inżynierii Wody i Ścieków, S. Konarskiego 18, 44-100 Gliwice

†e-mail: erwin.maciak@polsl.pl

Mikroplastiki stanowią poważne zagrożenie dla ekosystemów wodnych i zdrowia publicznego [1], a ich wszechobecność w wodzie pitnej oraz środowiskach naturalnych, a także wpływ jaki na nie wywołują nadal nie jest precyzyjnie oceniona. Skuteczna detekcja tych cząstek wciąż nie jest jednoznacznie określona i stanowi wyzwanie dla naukowców na całym świecie. Fotoniczne metody spektrometryczne, takie jak spektroskopia w podczerwieni z transformatą Fouriera (FT-IR), spektroskopia Ramana czy UV-Vis-NIR, oferują unikalne możliwości w tym zakresie, pozwalając na bezkontaktową analizę i precyzyjną charakterystykę mikroplastiku. W prezentacji zostanie omówiony potencjał optoelektroniki w wykrywaniu mikroplastiku, opierając się na wynikach badań dwóch interdyscyplinarnych projektów badawczych, prowadzonych przez młodych naukowców z różnych dziedzin. Pierwszy z nich koncentruje się na opracowaniu metod detekcji mikroplastiku w wodzie za pomocą zaawansowanych technik spektroskopowych oraz filtracji cząstek (Rysunek 1). Drugi skupia się na potencjalnej migracji nano- i mikroplastików pochodzących z coraz bardziej popularnych wydruków 3D do środowiska (Rysunek 2), a zarazem organizmów żywych [2]. Przeprowadzone badania pozwalają na ocenę użyteczności metod fotonicznych do wykrywania mikroplastiku, a ich rozwój ma realne znaczenie dla monitorowania czystości wód, wdrażania strategii ochrony środowiska, a także ochrony organizmów żywych.



Rysunek 1 Filtracja cząstek



Rysunek 2 Woda pozostała po procesie polimeryzacji

Podziękowania i źródła finansowania

W pracy wykorzystano urządzenia i infrastrukturę badawczą zapewnioną przez Katedrę Optoelektroniki Politechniki Śląskiej, która otrzymuje wsparcie w ramach projektu NLPQT - Krajowe Laboratorium Fotoniki i Technologii Kwantowych, POIR.04.02.00-00-B003/18.

Praca była współfinansowana przez: Badania Statutowe dla Katedry Optoelektroniki Politechniki Śląskiej (05/040/BK_25/2034) oraz Fundację Candela.

Literatura

- [1] A.A. Koelmans, N. H. Mohamed Nor, E. Hermsen, M. Kooi, S. M. Mintenig, J. De France *Water Research* **155**, (2019)
- [2] A.G. Rodríguez-Hernández, A. Chiodoni, S. Bocchini, R. Vazquez-Duhalt. *Environmental Pollution*, **267**, 115609 (2020)

Heterodynowa spektroskopia zaników z modów własnych wnęki optycznej

A. Cygan[†], S. Wójtewicz, H. Józwiak, G. Kowzan, N. Stolarczyk, K. Bielska, P. Wcisło, R. Ciuryło, D. Lisak

Instytut Fizyki, Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej, Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu,
Grudziądzka 5, 87-100 Toruń, Polska
[†]email: agata@fizyka.umk.pl

Spektroskopia zaników z wnęki optycznej (*cavity ring-down spectroscopy*, CRDS) jest jedną z najchętniej i najczęściej wybieranych metod detekcji śladowych ilości gazów. Jej potencjalnie wysoka rozdzielczość ma również zastosowanie w precyzyjnej metrologii gazów a także analizie kształtów linii widmowych ważnej z punktu widzenia badań atmosferycznych oraz fundamentalnych. Potencjał techniki CRDS wynika z jej prostoty – informacja o absorpcji gazu uzyskiwana jest w sposób bezpośredni i szybki z pomiaru czasu zaniku światła z wnęki optycznej. Chociaż precyzja CRDS jest bardzo wysoka (<0.01‰), to jej dokładność jest często limitowana do >5‰ głównie ze względu na nieliniowości w detekcji natężenia światła. Brak w CRDS informacji o częstotliwości zanikającego pola, wynikający z rejestracji natężenia światła, skutkuje ponadto błędnym przypisaniem zmierzonej absorpcji do częstotliwości wzbudzającego lasera zamiast wzbudzanego modu wnęki optycznej.

Błędy w pomiarach natężenia światła są zjawiskiem powszechnym i są obecne we wszystkich optycznych technikach spektroskopowych. Chcąc mierzyć niewielkie absorpcje światła z niepewnością lepszą niż 1‰, ważną w wielu zastosowaniach, zaproponowaliśmy zmianę w podejściu do detekcji natężenia światła w technice CRDS. Zamiast tradycyjnie rejestrować natężenie światła zanikającego z wnęki, zastosowaliśmy detekcję heterodynową zaniku światła z laserem, którego częstotliwość dowiązana została do jednego z modów wnęki. W wyniku transformacji Fouriera zmodulowanego częstotliwościowo zaniku, podejście to umożliwiło wydobycie pełnej informacji o częstotliwości zanikającego pola elektromagnetycznego modu wnęki. Precyzyjna kontrola częstotliwości lasera w układzie spektrometru pozwoliła następnie na pomiar dyspersyjnych przesunięć częstotliwości między modami wnęki a stąd na rejestrację dyspersyjnego widma badanego gazu. Główną zaletą heterodynowej techniki CRDS (*heterodyne cavity ring-down spectroscopy*, HCRDS) [1] jest jej szybkość i w pełni częstotliwościowy charakter gwarantujący najwyższą dokładność w pomiarach spektroskopowych [2,3], która zostanie zademonstrowana na przykładzie molekuł CO i HD. Ponadto swobodny wybór częstotliwości dudnień heterodynowych pozwala na taki wybór zakresu pasma detektora, w którym pomiary natężenia światła charakteryzują się najwyższą liniowością. Oprócz widma dyspersyjnego, metoda HCRDS umożliwia również jednoczesną rejestrację widma absorpcyjnego. Stwarza to unikalne warunki do pomiaru zespolonego współczynnika refrakcji badanego ośrodka gazowego. Metoda HCRDS, podobnie jak nasza inna technika, w której wykorzystuje się sygnały pompowania wnęki optycznej [4], nie wymaga skanowania częstotliwości lasera w małych krokach przez mody wnęki, dzięki czemu jest znacznie szybsza od pierwotnych technik spektroskopii położenia [5] i szerokości [6] modów wnęki. Ponadto może być łatwo zaimplementowana do szerokopasmowych pomiarów spektroskopowych z użyciem grzebieni częstotliwości optycznych jako źródła promieniowania [7].

Metoda HCRDS wykazuje wysoki potencjał w zakresie poprawy dokładności wielu dziedzin badań opartych na spektroskopii, takich jak podstawowe badania elektrodynamiki kwantowej w prostych układach molekularnych, teledetekcja atmosferyczna, metrologia stosunku izotopów, bezkontaktowa termometria i ustalanie pierwotnych wzorców gazów w oparciu o właściwości kwantowe cząsteczek.

Podziękowania i źródła finansowania

Projekt dofinansowany ze środków budżetu państwa, przyznanych przez Ministra Edukacji i Nauki w ramach programu Polska Metrologia II, projekt nr PM-II/SP/0011/2024/02.

Literatura

- [1] A. Cygan, S. Wójtewicz, H. Józwiak, G. Kowzan, N. Stolarczyk, K. Bielska, P. Wcisło, R. Ciuryło, D. Lisak, *Science Advances* **11**, eadp8556 (2025).
- [2] A. Cygan, P. Wcisło, S. Wójtewicz, G. Kowzan, M. Zaborowski, D. Charczun, K. Bielska, R. S. Trawiński, R. Ciuryło, P. Masłowski, D. Lisak, *Optics Express* **27**, 21811 (2019).
- [3] K. Bielska, A. A. Kyuberis, Z. D. Reed, G. Li, A. Cygan, R. Ciuryło, E. M. Adkins, L. Lodi, N. F. Zobov, V. Ebert, D. Lisak, J. T. Hodges, J. Tennyson, O. Polyansky, *Physical Review Letters* **129**, 1 (2022).
- [4] A. Cygan, A. J. Fleisher, R. Ciuryło, K. A. Gillis, J. T. Hodges, D. Lisak, *Communications Physics* **4**, 1 (2021).
- [5] A. Cygan, P. Wcisło, S. Wójtewicz, P. Masłowski, J. T. Hodges, R. Ciuryło, D. Lisak, *Optics Express* **23**, 14472 (2015).
- [6] A. Cygan, D. Lisak, P. Morzyński, M. Bober, M. Zawada, E. Pazderski, R. Ciuryło, *Optics Express* **21**, 29744 (2013).
- [7] D. Lisak, D. Charczun, A. Nishiyama, T. Voumard, T. Wildi, V. Brasch, T. Herr, A. J. Fleisher, J. T. Hodges, R. Ciuryło, A. Cygan, P. Masłowski, *Scientific Reports* **12**, 1 (2022).

Nanofotonika w badaniach podstawowych i stosowanych

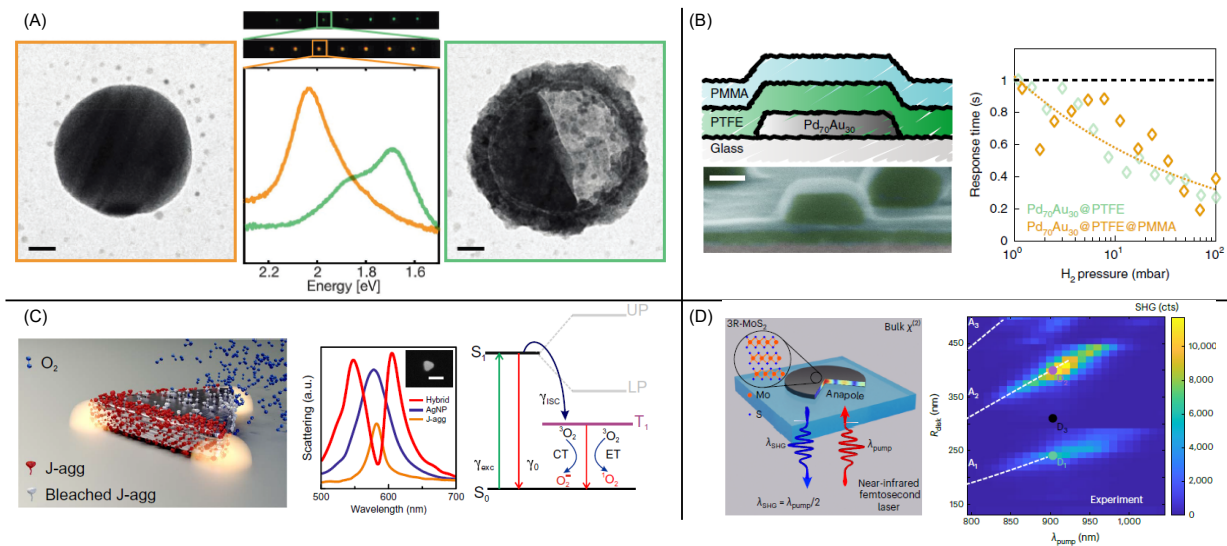
Tomasz J. Antosiewicz^{1,2,†}

¹ Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski, Pasteura 5, 02-093 Warszawa

² Department of Physics, Chalmers University of Technology, 412 96 Göteborg, Sweden

†email: tomasz.antosiewicz@fuw.edu.pl

Propagacja światła jest determinowana przestrzennym rozkładem materii oraz jej własnościami optycznymi, typowo wyrażonych przez współczynnik załamania lub przenikalność dielektryczna. Odpowiednie kształtowanie powyższych cech materii pozwala na prawie dowolną przestrzenną manipulację pola elektromagnetycznego, w tym kierunkowe rozpraszanie czy lokalizowanie pola w głęboko podfałowych obszarach. Podfałowa koncentracja pola prowadzi do dużego, lokalnego wzmocnienia natężenia pola, czego konsekwencją są silnie wzmocnione procesy fizyczne zależne od wartości tego pola elektrycznego. Przykłady obejmują wzmocnioną absorpcję światła, większą wydajność rozpraszania Ramana czy generacji sygnałów nieliniowych. Drugim aspektem jest możliwość kontroli *in situ* rozkładu pola elektrycznego przez dynamiczną modulację parametrów materiałowych czy jego przestrzennego rozkładu. Obydwa czynniki stanowią zatem podstawę fizyczną, która pozwala na zwrotną manipulację i poznawanie własności nanoświata, a przydatność optycznych nanostruktur do poznania świata w nanoskali jest nie do przecenienia.



Rysunek 1: (A) Pomiar *in situ* oksydacji nanocząstek miedzi pokazuje początkową zmianę gęstości metalu prowadzącą do pojawienia się wakancji i wzrostu obszarów bez miedzi [1]. (B) Nanocząstki wykonane ze stopu Pd₇₀Au₃₀ adsorbują i rozpuszczają w swoim wnętrzu wodór stanowiąc jedne z najdokładniejszych detektorów wodoru [2]. (C) Silne sprzężenie pomiędzy nanocząstkami plazmowymi a warstwą organicznych molekuł prowadzi do znacznego zmniejszenia wydajności procesu blaknięcia molekuł [3]. (D) Nanostruktury fotoniczne zrobione z 3R-MoS₂ pozwalają na bardzo silną koncentrację pola elektrycznego we swoim wnętrzu i pozwalają na zwiększenia o ponad trzy rzędy wielkości wydajności generacji drugiej harmonicznej [4].

Podziękowania i źródła finansowania

Badania są współfinansowane przez Narodowe Centrum Nauki w ramach projektu 2019/34/E/ST3/00359.

Literatura

- [1] S. Nilsson, D. Albinsson, T.J. Antosiewicz, J. Fritzsche, C. Langhammer, *Nanoscale* **11**, 20725 (2019).
- [2] F.A.A. Nugroho, I. Darmadi, L. Cusinato, A. Susarrey-Arce, et al. *Nat. Mater.* **18**, 489-495 (2019).
- [3] B. Munkhbat, M. Wersäll, D.G. Baranov, T.J. Antosiewicz, T. Shegai *Sci. Adv.* **4**, eaas9552 (2018).
- [4] G. Zograf, A.Y. Polyakov, M. Bancerek, T.J. Antosiewicz, B. Küçüköz, T.O. Shegai *Nat. Photon.* **18**, 751-757 (2024).

SESJA PLAKATOWA

Klasteryzacja danych hiperspektralnych w czasie rzeczywistym w mikroskopii wielofotonowej

Maciej Barna^{*a†}, Katarzyna Kunio^a, Jakub Bogusławski^a, Grzegorz Sobon^a

^a Grupa Elektroniki Laserowej i Światłowodowej, Wydział Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów, Politechnika Wrocławska, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, Polska

†email: maciej.barna@pwr.edu.pl

Hiperspektralna mikroskopia dwufotonowa jest popularną techniką obrazowania fluorescencyjnego, jednak możliwości wykorzystania jej poza warunkami laboratoryjnymi są ograniczone z powodu wysokich kosztów rejestratora widm. Z tego powodu opracowano uproszczoną wersję mikroskopu [1], która rejestruje dane bezpośrednio w postaci fazorowej [2], zastępując spektrometr dwoma filtrami optycznymi. Jednak istniejące metody analizy danych fazorowych nie pozwalają na przetwarzanie w czasie rzeczywistym. W niniejszej pracy przedstawiamy metodę, która znacząco przyspiesza analizę danych fluorescencyjnych przy jednoczesnym zachowaniu dokładności.

Jednym z głównych celów analizowania danych fluorescencyjnych jest klasteryzacja, polegająca na segmentacji obrazu na podstawie widm optycznych zarejestrowanych w poszczególnych pikselach. W przypadku danych przedstawionych w przestrzeni fazorowej, klasteryzacja odbywa się na podstawie współrzędnych fazorów spektralnych. Jedną z bardziej popularnych metod klasteryzacji jest algorytm k-średnich [3], który iteracyjnie grupuje dane, minimalizując sumę kwadratów odległości punktów od centrów klastrów. Metoda proponowana przez nas przyspiesza wyszukiwanie centrów klastrów poprzez analizę histogramu, a następnie grupuje punkty na wykresie fazorowym, wykorzystując algorytm ważenia odwrotnością odległości (ang. inverse distance weighting, IDW) [4].

Do porównania obu metod wykorzystano dane syntetyczne symulujące obecność dwóch fluoroforów w obrazie. Przykładowe widma wygenerowanych fluoroforów przedstawiono na Rys. 1a. Metody testowano dla różnych separacji spektralnych ($\Delta\lambda$) w zakresie od 20 do 80 nm; poniżej pokazano przykład dla $\Delta\lambda = 20$ nm. Rys. 1b prezentuje obraz referencyjny, w którym kolor pikseli oznacza dominujący fluorofor (pomarańczowy – fluorofor a, czerwony – fluorofor b). Wyniki klasteryzacji uzyskane metodą k-średnich i IDW przedstawiono odpowiednio na Rys. 1c i 1d.



Rysunek 1: **Dane syntetyczne i porównanie metod klasteryzacji** (a) przykładowe widma optyczne wygenerowanych fluoroforów, (b) syntetyczny obraz referencyjny, (c) wynik klasteryzacji metodą k-średnich, (d) oraz metodą IDW

Otrzymane wyniki pokazały, że zaproponowana metoda przyspiesza klasteryzację danych hiperspektralnych przy zachowaniu porównywalnej dokładności. Obie metody uzyskują dokładność na poziomie powyżej 95%, jednak metoda k-średnich potrzebuje od 2 do 3 sekund na uzyskanie wyników, podczas gdy IDW potrzebuje mniej niż 0.2 sekundy, co daje ponad 20-krotną redukcję czasu obliczeń. Redukcja czasu została umożliwiona poprzez zastąpienie iteracyjnego szukania centrów klastrów analizą histogramu. Zastosowanie metody pozwoli na wyświetlenie wyniku klasteryzacji w czasie rzeczywistym.

Podziękowania i źródła finansowania

Badania sfinansowano ze środków Narodowego Centrum Nauki w ramach projektu (2021/43/D/ST7/01126).

Literatura

- [1] N. Hedde, R. Cinco, L. Malacrida, A. Kamaid, E. Gratton, *Communications Biology* **4**(1), 501 (2021).
- [2] L. Malacrida, E. Gratton, D. M. Jameson, *Methods Appl. Fluoresc.* **3**, 047001 (2015)
- [3] J. Macqueen, *Berkeley Symp. on Math. Statist. and Prob.*, 281-297 (1967).
- [4] D.W.S. Wong, *International Encyclopedia of Geography: People, the Earth, Environment and Technology*, 1-7 (2017).

Wysokorozdzielcza spektroskopia pasma B tlenu do zastosowań w badaniach atmosfery ziemskiej

K. Bielska[†], J. Domysławska, S. Wójtewicz, R. Ciuryło, D. Lisak

Instytut Fizyki, Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej, Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu,
ul. Grudziądzka 5, 87-100 Toruń
[†]email: kbielska@umk.pl

W spektroskopii atmosfery ziemskiej szczególną rolę odgrywa widmo cząsteczki tlenu. Ze względu na stałą i niezależną od wysokości nad powierzchnią Ziemi zawartość procentową tlenu w atmosferze, jest ono wykorzystywane do określania profili temperatury i ciśnienia, oraz całkowitej ilości powietrza na drodze optycznej [1]. Z tego powodu dokładność referencyjnych parametrów kształtu linii widmowych tlenu bezpośrednio wpływa na pomiary stężeń gazów cieplarnianych, zanieczyszczeń powietrza i badania dynamiki procesów transferu energii w atmosferze. Spośród pasm absorpcyjnych tlenu, istotnych z punktu widzenia zdalnych obserwacji atmosferycznych, pasmo B ($b^1\Sigma_g^+(v=1) - X^3\Sigma_g^-(v=0)$) zlokalizowane w zakresie widmowym około 690 nm, jest drugim co do natężenia po paśmie A i charakteryzują je natężenia linii widmowych około 15 razy mniejsze niż w paśmie A. Pasma B jest wykorzystywane na przykład do poprawy spójności informacji o chmurach w misjach satelitarnych EPIC-DISCOVER [2] i ESA Sentinel 5&5P oraz do pomiaru wysokości warstwy aerozolu atmosferycznego nad obszarami pokrytymi roślinnością [3]. Użycie pasma B razem z innymi pasmami cząsteczki tlenu poprawia dokładność wyznaczenia fluorescencji chlorofilu indukowanej przez Słońce, uzyskiwanej z instrumentów GOME-2 i SCIAMACHY [4].

Parametry kształtu absorpcyjnych linii widmowych z pasma B tlenu zaburzonego powietrzem zostały wyznaczone po raz pierwszy z wysokim stosunkiem sygnału do szumu i przeanalizowane z uwzględnieniem szeregu subtelnych efektów zderzeniowych obserwowanych w badanych widmach [5]. Dostępne do tej pory dane oparte były o uproszczony modelowy kształt linii, opisywany profilem Voigta. Pochodziły one z pomiarów wykonanych z względnie niskim stosunkiem sygnału do szumu, niektóre były uzyskane z przeskalowania odpowiednich parametrów otrzymanych dla linii z pasma A. Pierwsze dane pochodzące z pomiarów przeprowadzonych w kontrolowanych warunkach laboratoryjnych, które umożliwiły osiągnięcie wysokiego stosunku sygnału do szumu, dotyczyły około 20 linii zmierzonych techniką spektroskopii strat we wnęcie (CRDS, ang. *cavity ring-down spectroscopy*), w trzech temperaturach (288 K, 296 K oraz 328 K), co umożliwiło doświadczalne określenie zależności parametrów kształtu linii od temperatury [5]. Analiza danych została przeprowadzona przy użyciu zależnego od prędkości profilu Nelkina-Ghataka (SDNGP), który uwzględnia zależność rozszerzenia i przesunięcia linii widmowej od prędkości absorbera oraz zwięźnienie linii wynikające ze zderzeń zmieniających jego prędkość.

Analiza zależności parametrów wyznaczonych w pracy [5] od liczby kwantowej całkowitego momentu pędu stanu dolnego, J'' , pozwoliła na interpolację wyników dla linii nieobjętych pomiarami i uzupełnienie parametrów dla przejść odpowiadających liczbie kwantowej J'' do wartości 18 w gałęzi P oraz 13 w gałęzi R [6]. Dane te zostaną umieszczone w spektroskopowej bazie danych HITRAN (ang. *high-resolution transmission molecular absorption database*) [7], która jest obecnie przygotowywana do publikacji w edycji 2024.

Literatura

- [1] V. H. Payne i in., *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **255**, 107217 (2020).
- [2] B. Yin i in., *Atmos. Meas. Tech.* **13**, 5259–5275 (2020).
- [3] X. Xu i in., *Atmos. Meas. Tech.* **12**, 3269–3288 (2019).
- [4] J. Joiner i in., *Atmos. Meas. Tech.* **9**, 3939–3967 (2016).
- [5] K. Bielska i in., *Spectrochim Acta A* **303**, 123185 (2023).
- [6] E. M. Adkins i in., “Oxygen Satellite Paper for HITRAN 2024”, w przygotowaniu.
- [7] I. E. Gordon i in., *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **277**, 107949 (2022).

Analiza działania soczewek refrakcyjnych Light Sword Lens[®] w widzeniu peryferyjnym.

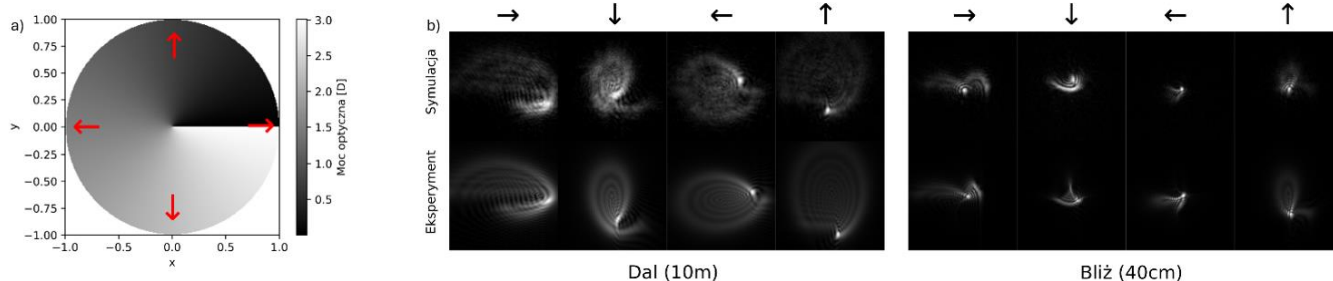
J. Bolek^{1,†}, K. Kakarenko¹, K. Petelczyc¹, A. Kołodziejczyk¹, J. Starobrat¹, Z. Jaroszewicz²

¹Wydział Fizyki, Politechnika Warszawska, Koszykowa 75, 00-662 Warszawa

²Instytut Łączności – Państwowy Instytut Badawczy, Szachowa 1, 04-894 Warszawa

†email: jan.bolek@pw.edu.pl

Soczewki Light Sword Lens[®] (LSL[®]) to refrakcyjne elementy optyczne zaprojektowane przez nasz zespół na Politechnice Warszawskiej [1]. Ich charakterystyczną cechą jest asymetryczny kształt oraz znacząco zwiększona głębokość ostrości przy wysokiej jakości obrazowania. Dlatego mogą one potencjalnie zrewolucjonizować chirurgię refrakcyjną i kompensację przeziopii, skutecznie zastępując utraconą akomodację, głębokość ostrości widzenia [2]. Dotychczas soczewki LSL[®] były testowane głównie w laboratorium optycznym w zakresie widzenia osiowego w małym zakresie kątów [3]. Przedstawione zostaną wyniki symulacji i rzeczywistego obrazowania LSL[®] w postaci odpowiedzi impulsowych (PSF), będących obrazami punktowych źródeł światła umieszczonych 7 stopni poza oś optyczną. W badaniach użyto refrakcyjnej soczewki LSL[®] o zakresie mocy optycznej (0-3D) wykonanej z PMMA w konfiguracji szkła kontaktowego oraz nowatorskiej metody akwizycji obrazu uwzględniającej krzywiznę siatkówki oka. Rzeczywiste promienie wpadające do oka nie przechodzą centralnie przez przednią jego powierzchnię lecz dopiero przez aperturę całego układu optycznego (tj. źrenicę oka). Z powodu asymetrycznego profilu modulacji elementu LSL[®] jakość obrazowania punktów przedmiotu zależy nie tylko od ich odległości od oka (ta zależność jest zminimalizowana), ale także położenia w polu widzenia. W eksperymencie wykorzystano układ optyczny odpowiadający modelowi oka skorygowanego za pomocą soczewki LSL[®]. Zakrzywioną powierzchnię siatkówki zrealizowano poprzez zastosowanie stolika obrotowego, na którym umieszczono matrycę kamery Basler daA3840-45um. Zmieniając położenie katowe punktu źródłowego jego obraz przesuwiał się. W celu utrzymania obrazu na obrysie sfery (siatkówce) kamera była obracana tak, żeby obraz zawsze znajdował się na środku matrycy, co odpowiada rejestrowaniu obrazu w płaszczyźnie stycznej do sfery w docelowym punkcie. Obrazowanie przez model tego układu optycznego zasympulowano także numerycznie.



Rysunek 1: a) rozkład mocy optycznej elementu LSL[®]; b) Wyniki symulacji i rzeczywiste obrazy źródeł punktowych dla widzenia dalekiego (10m) i bliskiego (40cm). Strzałki określają kierunek padania światła względem orientacji LSL[®] ułożonego na rogówce modelu oka.

Wyniki symulacji oraz rzeczywistego eksperymentu w postaci funkcji PSF zamieszczono na Rysunku 1. Wskazują one na silną zależność jakości obrazowania po korekcji soczewką LSL[®] od pozycji przedmiotów w obszarze widzenia peryferyjnego.

Podziękowania i źródła finansowania

Badania były finansowane przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach programu LIDER - LIDER/15/0061/L-9/17/NCBR/2018.

Literatura

- [1] A. Mira-Agudelo, W. Torres-Sepúlveda, J. F. Barrera, R. Henao, N. Błocki, K. Petelczyc, A. Kołodziejczyk, *Invest Ophthalmol Vis Sci.* **57**(15), 6870-6877 (2016).
- [2] K. Petelczyc, A. Byszewska, E. Chojnacka, Z. Jaroszewicz, K. Kakarenko, A. Mira-Agudelo, A. Ostrowska-Spaleniak, A. Składowska, A. Kołodziejczyk, M. Rękas, *PLOS ONE* **14**(2): e0211823 (2019).
- [3] K. Kakarenko, I. Ducin, K. Grabowiecki, Z. Jaroszewicz, A. Kołodziejczyk, A. Mira-Agudelo, K. Petelczyc, A. Składowska, M. Sypek, *Biomed. Opt. Express* **6**, 1738-1748 (2015).

Kompaktowy Fourierowski Mikroskop Ptychograficzny

M. Chlipała^{1,†}, M. Rogalski¹, P. Arcab¹, P. Zdańkowski¹

¹Wydział Mechatroniki, Politechnika Warszawska, Św. A. Boboli 8, 05-525 Warszawa

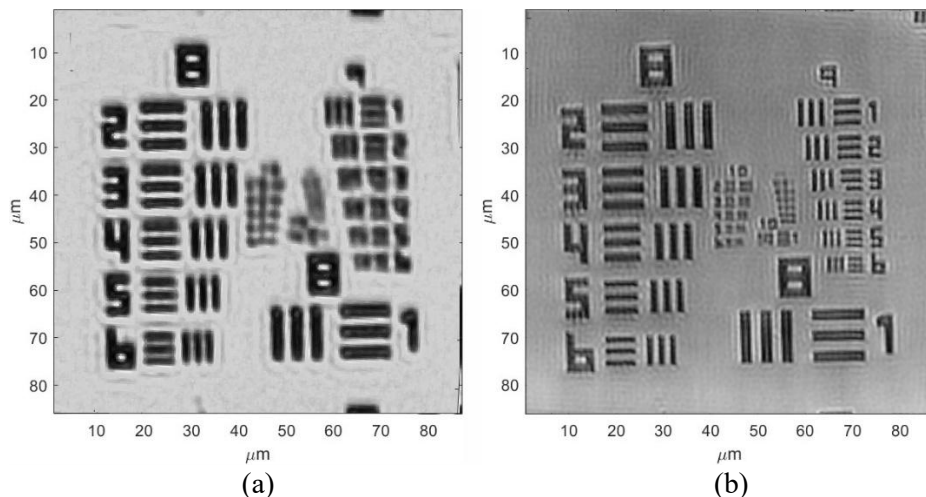
†email: maksymilian.chlipala@pw.edu.pl

Fourierowska mikroskopia ptychograficzna [1] to nowoczesna technika obliczeniowej mikroskopii, umożliwiająca uzyskanie obrazów o podwyższonej rozdzielczości przestrzennej poprzez syntetyzowanie apertury numerycznej (NA) z wielu obrazów zarejestrowanych przy różnym kącie padania oświetlenia. Metoda ta pozwala na uzyskanie dużego pola widzenia przy jednoczesnym zachowaniu submikronowej rozdzielczości, co czyni ją atrakcyjną w biologii, medycynie i materiałoznawstwie.

Kluczową rolę systemu pełni źródło światła. Zwykle jest to macierz LED lub inny mechanizm kierunkowego oświetlenia, który musi zapewniać kontrolowany kąt padania światła. Dotychczasowe rozwiązania obejmują zarówno statyczne matryce LED [2], jak i dynamiczne układy z modulacją fazy [3] czy cyfrowymi mikrolustrami [4]. Mimo wysokiej jakości rekonstrukcji, wiele z tych systemów cechuje się znacznymi rozmiarami, złożonością oraz trudnością integracji z kompaktowymi urządzeniami.

W odpowiedzi na rosnące zapotrzebowanie na miniaturowe systemy obrazowania opracowano i zbudowano kompaktowy system oświetlacza LED przeznaczony do zastosowań w Fourierowskiej mikroskopii ptychograficznej. Zaprojektowany system pozwala na szybkie przełączanie kierunku oświetlenia, minimalizując czas akwizycji, co jest szczególnie istotne przy obrazowaniu dynamicznych próbek. Kalibracja układu realizowana jest z wykorzystaniem prostej metody, bazującej na odwzorowaniu źródeł na kamerze.

W przeprowadzonych eksperymentach z użyciem obiektywu o powiększeniu $\times 10$ i aperturze numerycznej $NA = 0.25$ uzyskano rekonstrukcje obrazów odpowiadające efektywnemu $NA = 0.61$, co potwierdza skuteczność proponowanego rozwiązania. Oznacza to ponad dwukrotne zwiększenie rozdzielczości przestrzennej przy zachowaniu kompaktowej konstrukcji oświetlacza. Wyniki rekonstrukcji zamieszczone zostały na Rysunku 1.



Rysunek 1: Obraz amplitudowego testu USAF a) zarejestrowany z użyciem diody centralnej, b) zrekonstruowany z danych zarejestrowanych w zaproponowanym układzie.

Podziękowania i źródła finansowania

Niniejsza praca jest finansowana w ramach projektu Narodowego Centrum Badań i Rozwoju (LIDER14/0352/2023).

Literatura

- [1] Zheng, G., Horstmeyer, R. & Yang, C. *Nature Photonics*, 7, 739–745 (2013).
- [2] Zheng, G., Horstmeyer, R., Yang, C., *Nature Photonics* 7, 739–745, 2013.
- [3] Sun, J., Chen, Q., Zhang, J., Fan, Y., Zuo, C., *Optics Letters* 43, 3365–3368, 2018.
- [4] Kuang, C., Wang, T., Zhu, H., Liu, X., *Optics Express* 23, 26999–27010, 2015.

Mechanizmy depolaryzacji solitonów Ramana w dwójłomnych światłowodach fotonicznych

R. Cichowski¹, K. Stefańska^{1,2}, P. Mergo³, T. Martynkien¹, K. Tarnowski^{1, †}

¹ Katedra Optyki i Fotoniki, Politechnika Wrocławska, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

² Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne, UMR6303 CNRS-UBFC, 21000 Dijon, France

³ Pracownia Technologii Światłowodów, pl. Marii Curie-Skłodowskiej 3, 20-031 Lublin

†email: karol.tarnowski@pwr.edu.pl

Solitony Ramana to intensywne i ultrakrótkie impulsy świetlne, które ulegają samoczynnemu przesunięciu częstotliwości w światłowodach w reżimie dyspersji anomalnej. Solitony Ramana są wykorzystywane do opracowywania spektralnie przestrajalnych źródeł światła opartych na laserach światłowodowych i światłowodach. Pozycja spektralna solitonu może być dostrajana mocą lasera pompującego. Ogólnie rzecz biorąc, generowane światło zachowuje wysoki poziom czystości polaryzacji, gdy w układzie stosowane są włókna dwójłomne [1]. Jednak mechanizmy depolaryzacji nadal są obecne i - w pewnych warunkach - mogą zmniejszyć czystość polaryzacyjną [2]. Mechanizmy te to liniowe sprzężenie polaryzacyjne, nieliniowe sprzężenie polaryzacyjne i ortogonalne rozpraszanie Ramana. W prezentowanej pracy opracowaliśmy model numeryczny oparty na układzie sprzężonych nieliniowych równań Schrodingera uwzględniającym wspomniane efekty. Dodatkowo przeprowadzono eksperymentalną charakteryzację wygenerowanego solitonu i jego czystości polaryzacyjnej dla dwóch dwójłomnych światłowodów fotonicznych. W ten sposób zweryfikowaliśmy opracowany model porównując wyniki symulacji numerycznych z danymi eksperymentalnymi. Symulacje numeryczne pozwoliły uzyskać dodatkowy wgląd w dynamikę procesów nieliniowych, w szczególności poprzez obliczenie spektrogramów.

Podziękowania i źródła finansowania

Zaprezentowane wyniki zostały osiągnięte w ramach projektu wspieranego przez Narodowe Centrum Nauki (2018/30/E/ST7/00862).

Literatura

- [1] O. Szewczyk, P. Pala, K. L. Tarnowski, J. Olszewski, C. Lu, A. Foltynowicz, F. Senna Vieira, P. Mergo, J. Sotor, G. Sobon, and T. Martynkien, Dual-wavelength pumped highly birefringent microstructured silica fiber for widely tunable soliton self-frequency shift, *IEEE Journal of Lightwave Technology* **39(10)**, 3260-3268 (2021), DOI: 10.1109/JLT.2021.3057657.
- [2] K. Stefańska, S. Majchrowska, K. Gemza, G. Soboń, J. Sotor, P. Mergo, K. Tarnowski, and T. Martynkien, Soliton trapping and orthogonal Raman scattering in a birefringent photonic crystal fiber *Optics Letters* **47(16)**, 4183-4186 (2022), DOI: 10.1364/OL.463643.

Adaptacyjna metoda rekonstrukcji dla ptychografii Fourierowskiej oparta na konwolucyjnej sieci neuronowej

M. Cywińska^{1,†}, P. Zdańkowski¹

¹Politechnika Warszawska, Instytut Mikromechaniki i Fotoniki, ul. św. A. Boboli 8, 02-525 Warszawa, Polska
†email: maria.cywinska@pw.edu.pl

Fourierowska mikroskopia ptychograficzna [1] to technika obrazowania obliczeniowego, która pozwala na uzyskanie obrazów o wysokiej rozdzielczości i szerokim polu widzenia poprzez łączenie serii obrazów rejestrowanych dla różnych kątów oświetlenia. W metodzie tej obiekt jest wielokrotnie oświetlany falą płaską, przy czym dla każdej ekspozycji kąt padania światła jest inny. Odpowiada to przesunięciu okna w dziedzinie Fouriera, co umożliwia zebranie informacji o spektrum przestrzennym obiektu w sposób komplementarny. Podczas rejestracji obrazów detektor rejestruje jedynie amplitudę transformaty Fouriera mierzonego obiektu, natomiast informacja o fazie jest tracona. Dzięki temu, że kolejne obrazy zawierają częściowo pokrywające się fragmenty widma, możliwe jest iteracyjne odzyskanie brakujących danych. Wykorzystuje się do tego algorytmy rekonstrukcji, takie jak metody gradientowe [2], które stopniowo rekonstruuje zarówno amplitudę, jak i fazę obrazu w obu dziedzinach – Fouriera i przestrzennej. Ostatecznie, po pełnej rekonstrukcji spektrum przestrzennego, uzyskuje się obraz o znacznie wyższej rozdzielczości niż w przypadku pojedynczej ekspozycji, co pozwala przekroczyć ograniczenia wynikające z apertury numerycznej systemu optycznego.

Rozwiązania numeryczne oparte na sieciach neuronowych wkraczają we wszystkie dziedziny życia, w tym w metrologię optyczną [3]. Ciekawą alternatywą do klasycznych algorytmów rekonstrukcji dla ptychografii Fourierowskiej jest wykorzystanie konwolucyjnej sieci neuronowej [4]. Jest to nietypowe podejście, w którym poszukiwanym wynikiem nie jest wyjście sieci, a wagi warstwy konwolucyjnej, które zostają zoptymalizowane w procesie treningu. Trening sieci neuronowej opiera się na modelu matematycznym procesu obrazowania, który wyraża się wzorem:

$$I_n(x, y) = |O(x, y) * PSF_n(x, y)|^2, \quad (1)$$

gdzie $I_n(x, y)$ oznacza rejestrowany rozkład intensywności dla danego kąta, $O(x, y)$ obiekt mierzony, $PSF_n(x, y)$ funkcję rozmycia punktu dla danego kąta (ang. point spread function). Zbiór treningowy takiej sieci składa się zatem z obrazów rejestrowanych w układzie i odpowiadającym im funkcjom rozmycia punktu liczonym uwzględniając dany kąt oświetlenia. Proponowane rozwiązanie jest podejściem nienadzorowanym (ang. unsupervised) oraz opartym na fizyce (ang. physics-based). W oryginalnym rozwiązaniu zakłada się oświetlenie pod znanym kątem falą płaską pozbawioną aberracji. W niniejszej pracy proponujemy szereg rozwiązań optymalizujących algorytm pod kątem rzeczywistości eksperymentalnej (uwzględniające aberracje i oświetlenie falą sferyczną). Porównanie proponowanego podejścia optymalizacyjnego do algorytmu klasycznego zostało pokazane na rys. 1.



Rysunek 1: Porównanie klasycznej metody opartej o optymalizację gradientu i konwolucyjnej sieci neuronowej do rekonstrukcji danych dla ptychografii Fourierowskiej.

Podziękowania i źródła finansowania

Badania opisane w niniejszej publikacji są finansowane przez NCBR w ramach realizacji projektu LIDER14/0352/2023

Literatura

- [1] G. Zheng, R. Horstmeyer, C. Yang, *Nat. Photonics* 7, 739–745 (2013).
- [2] L. Tian, X. Li, K. Ramchandran, L. Waller, *Biomed. Opt. Express* 5, 2376–2389 (2014).
- [3] C. Zuo, J. Qian, S. Feng, W. Yin, Y. Li, P. Fan, J. Han, K. Qian, Q. Che, *Light: Science & Applications* 11, 39 (2022).
- [4] S. Jiang, K. Guo, J. Liao, G. Zheng, *Biomed. Opt. Express* 9, 3306–3319 (2018).

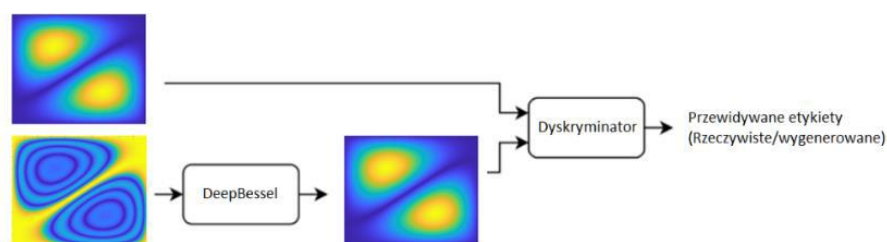
Wykorzystanie techniki generatywnej sieci przeciwstawnej (GAN) do zwiększenia dokładności predykcji dla mikroskopii interferencyjnej z uśrednianiem w czasie

W. Forjasz^{1, †}, M. Cywińska¹

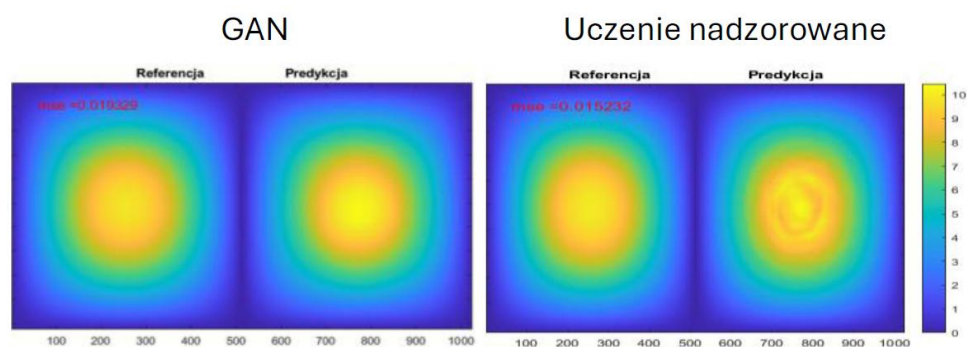
¹Politechnika Warszawska, Instytut Mikromechaniki i Fotoniki, ul. św. A. Boboli 8, 02-525 Warszawa, Polska

†email: wiktforjasz.stud@pw.edu.pl

Zastosowanie sieci neuronowych pozwala na precyzyjne rozwiązywanie złożonych problemów, w których analityczne określenie problemu odwrotnego może być skomplikowane lub niemożliwe. Z tego względu, zaobserwować można dynamiczny rozwój sieci neuronowych wraz z ich coraz szerszą aplikacją w różnych dziedzinach. W obszarze metrologii optycznej, konwolucyjne sieci neuronowe świetnie nadają się do rozwiązywania zagadnień związanych z analizą obrazów interferencyjnych. Przykładem, nad którym skupiamy się w ramach niniejszej pracy jest problem wyznaczenia rozkładu amplitudy drgań obiektu, zakodowanej w modulacji amplitudy obrazów interferencyjnych rejestrowanych techniką z uśrednianiem w czasie (ang. Temporal Averaging Interferometry, TAI) [1]. W technice TAI amplituda rejestrowanych interferogramów opisana jest funkcją Bessela, przez co klasyczne algorytmy, takie jak, metoda czasowej dyskretnej zmiany fazy (ang. temporal phase shifting, TPS) [2], czy jednoramkowa metoda spieralnej transformacji Hilberta (HST) [3], dopasowane do cosinusoidalnych zmian fazy, będą generować błędy. W przypadku uczenia głębokiego kluczowym aspektem poza odpowiednio zaprojektowaną architekturą sieci CNN oraz dobrze przygotowanym zbiorem treningowym, jest dobór metody nadzorowania uczenia. W przeprowadzonym badaniu porównano możliwości predykcyjne architektury sieci neuronowej DeepBessel [4] trenowanej standardową metodą uczenia nadzorowanego z techniką generatywnej sieci przeciwstawnej (ang. Generative Adversarial Network, GAN) [5]. Polega ona na koncepcji wykorzystania w procesie treningowym dwóch współpracujących sieci. Pierwsza generuje rozwiązanie dopasowane do konkretnego problemu (sieć generatora - w naszym przypadku jest to sieć DeepBessel). Druga sieć ma za zadanie rozróżnić wartości wzorcowe i wygenerowane (sieć dyskryminatora (rys. 1.)). Pracując w ten sposób obie sieci rywalizują ze sobą, w rezultacie poprawiając swoje zdolności predykcji.



Rysunek 1: Schemat przedstawiający zasadę działania metody GAN.



Rysunek 2: Porównanie metod uczenia.

Podziękowania i źródła finansowania

Niniejsza praca została sfinansowana przez NCN (PRELUDIUM 2021/41/N/ST7/04057) oraz Politechnikę Warszawską w ramach Inicjatywy Doskonałości: Uczelni Badawczej (YOUNG PW 504/04496/1143/45.010012)

Literatura

- [1] S. Petitgrand, R. Yahiaoui, A. Bosseboeuf and K. Danaie, *Proc. SPIE* 4400, 51-60 (2001)
- [2] K. Patorski, A. Styk, *Opt. Eng.* 45, 085602 (2006).
- [3] M. Trusiak, A. Styk, K. Patorski, *Opt. Lasers Eng.* 110, 100-112 (2018).
- [4] M. Cywińska, W. Forjasz, E. Wdowiak, M. Józwiak, A. Styk, M. Trusiak (w recenzji w *Optics and Lasers in Engineering*)
- [5] I. Goodfellow, J. Pouget-Abadie, M. Mirza, B. Xu, D. Warde-Farley, S. Ozair, A. Courville, Y. Bengio, *CACM* 63, 139 - 144 (2020).

Przepływ wsteczny (backflow) pojedynczych fotonów z orbitalnym momentem pędu

B. Ghosh¹, B. Gorzkowski¹, J. Lewandowski¹, A. Nomerotski^{2,3}, R. Łapkiewicz^{1, †}

¹ Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski, Ludwika Pasteura 5, 02-093 Warszawa

² Faculty of Nuclear Sciences and Physical Engineering, Czech Technical University in Prague, 115 19, Republika Czeska

³ Department of Electrical and Computer Engineering, Florida International University, Miami FL 33199, USA

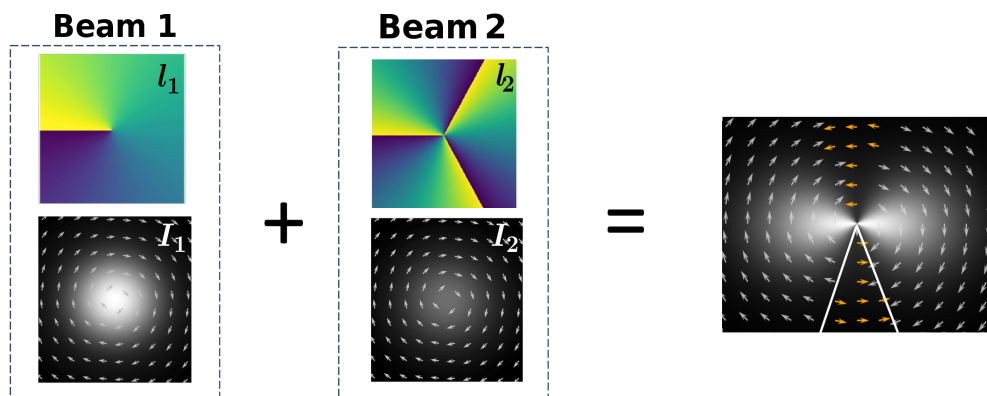
†email: radek.lapkiewicz@fuw.edu.pl

Zjawisko przepływu wstecznego (ang. backflow) było pierwotnie opisane w mechanice kwantowej: cząstka, której wszystkie składowe mają dodatni pęd, może lokalnie wykazywać przepływ w kierunku przeciwnym (tzn. prąd prawdopodobieństwa w kierunku przeciwnym do pędu)[1]. Efekt ten jest ściśle związany z tzw. superoscylacjami[2]. Są to przypadki, w których fala lokalnie oscyluje szybciej niż najwyższa częstotliwość obecna w jej widmie Fouriera. Dzięki temu powiązaniu możliwa stała się jego obserwacja również w ogólnych układach falowych, w szczególności w układach optycznych, zarówno klasycznych, jak i kwantowych.

W optyce przepływ wsteczny objawia się tym, że lokalny pęd światła, czyli nachylenie frontu falowego, może być skierowany w sposób nieintuicyjny, nawet jeśli globalnie fala ma jednoznacznie zdefiniowany kierunek. Efekty te można zaobserwować w superpozycjach wiązek światła[3], między innymi tych, które niosą orbitalny moment pędu (OAM)[4]. W takich przypadkach lokalna analiza kierunku propagacji ujawnia obszary, w których fala „cofa się” – czyli jej faza obraca się przeciwnie do ruchu wskazówek zegara – mimo że wszystkie fale z których się składa mają jedynie orbitalne momenty pędu w kierunku zgodne z kierunkiem ruchu wskazówek zegara.

Naszym celem jest zademonstrowanie tego efektu na poziomie pojedynczych fotonów. Korzystamy ze źródła pojedynczych fotonów opartego na procesie SPDC, modulatora fazy (SLM), który pozwala przygotować superpozycję dwóch stanów o dodatnim OAM, oraz sensora Shacka-Hartmanna, umożliwiającego precyzyjny pomiar lokalnego nachylenia frontu fali. W ten sposób można wyznaczyć kierunki lokalnej propagacji pojedynczych fotonów. Korzystamy również z kamery TimePix3, w której każdy piksel (o rozmiarze 55 μm) posiada niezależny licznik czasu, umożliwiającą znakowanie czasowe z dokładnością 1.56 ns; dzięki tej architekturze możliwa jest detekcja pojedynczych fotonów przy niskim poziomie szumu.

Wstępne eksperymenty potwierdziły możliwość pomiaru lokalnego pędu dla pojedynczych fotonów w czystych stanach OAM. Następny krok polega na pomiarze dla superpozycji takich stanów, w której powinien pojawić się przepływ wsteczny. Zaobserwowanie tego efektu stanowi jednak wyzwanie, gdyż przepływ wsteczny wiąże się fundamentalnie z utratą energii w obszarach, gdzie się pojawia, co oznacza konieczność uzyskania jak najwyższego stosunku sygnału do szumu.



Rysunek 1: Schematyczne przedstawienie nałożenia dwóch wiązek z dodatnimi orbitalnymi momentami pędu. Superpozycja takich wiązek posiada obszary w których wiązka obraca się w kierunku ujemnego orbitalnego momentu pędu.

Literatura

[1] A. J. Bracken and G. F. Melloy, “Probability backflow and a new dimensionless quantum number,” *J. Phys. A* **27**, 2197 (1994).

[2] Michael Berry et al 2019, *J. Opt.* **21**, 053002

[3] Y. Eliezer, T. Zacharias, and A. Bahabad, “Observation of optical backflow,” *Optica* **7**, 72–76 (2020).

[4] Bohnishikha Ghosh, Anat Daniel, Bernard Gorzkowski, and Radek Lapkiewicz, “Azimuthal backflow in light carrying orbital angular momentum,” *Optica* **10**, 1217-1222 (2023)

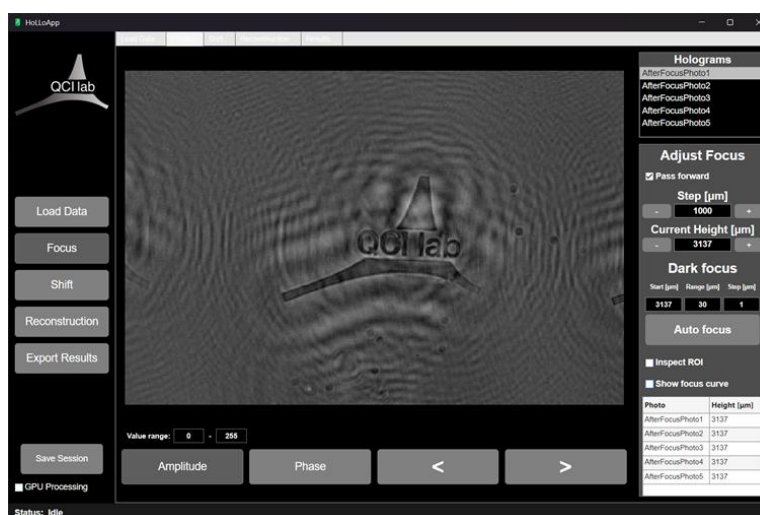
HoLLOApp: aplikacja przetwarzania danych dla bezsoczewkowej mikroskopii holograficznej

B. Górski†, M. Rogalski, E. Wdowiak, P. Arcab, K. Kalinowski, M. Trusiak‡

Wydział Mechatroniki, Politechnika Warszawska, św. Andrzeja Boboli 8, 02-525 Warszawa

email: bartosz.gorski2.dokt@pw.edu.pl† maciej.trusiak@pw.edu.pl‡

Bezsoczewkowa cyfrowa mikroskopia holograficzna (Lensless Digital Holographic Microscopy – LDHM) [1] jest techniką mikroskopii obliczeniowej, która nie wymaga stosowania znaczników fluorescencyjnych ani elementów optycznych pomiędzy próbką a sensorem. Dzięki temu umożliwia obrazowanie zarówno informacji fazowej, jak i amplitudowej próbki w szerokim polu widzenia. Przy minimalizacji odległości między próbką a sensorem możliwe jest uzyskanie pola widzenia niemal równego wymiarom matrycy kamery (przewyższające 100 mm²), przy zachowaniu relatywnie wysokiej rozdzielczości (około 1-2 μm). Dynamiczny rozwój tej technologii otwiera szerokie możliwości zastosowań w diagnostyce medycznej, badaniach biologicznych oraz aplikacjach przemysłowych, jednak wymaga również efektywnych narzędzi przetwarzania dużych ilości danych eksperymentalnych. Pomimo znacznego postępu technologicznego, główną barierą w powszechnej implementacji LDHM pozostaje brak uniwersalnych, intuicyjnych i wysokowydajnych aplikacji do przetwarzania oraz rekonstrukcji hologramów. W rezultacie potencjalny użytkownik często jest zmuszony do korzystania z rozproszonych narzędzi obliczeniowych, których integracja jest czasochłonna. Brakuje wygodnych aplikacji, które integrowałyby kluczowe algorytmy rekonstrukcji holograficznych i metody propagacji danych w przyjaznym dla użytkownika środowisku. W ramach niniejszej pracy przedstawiamy aplikację w środowisku MATLAB: HoLLOApp – wydajne narzędzie stworzone specjalnie z myślą o użytkownikach mikroskopów bezsoczewkowych. Aplikacja integruje istotne algorytmy rekonstrukcji holograficznej, takie jak metoda Gabora [2] oraz algorytm Gerchberga-Saxtona [3], jak również efektywne techniki propagacji w wolnej przestrzeni. HoLLOApp zapewnia użytkownikowi spójne środowisko do przetwarzania danych, które znacząco przyspiesza kalibrację układu oraz analizę danych eksperymentalnych, umożliwiając uzyskanie dokładnych wyników. Intuicyjny interfejs użytkownika, modułowa struktura kodu oraz elastyczność wprowadzania modyfikacji czynią aplikację uniwersalnym narzędziem, istotnie podnoszącym komfort oraz efektywność pracy zespołów badawczych zajmujących się cyfrową mikroskopią holograficzną. Aplikacja HoLLOApp została zweryfikowana na rzeczywistych danych eksperymentalnych, takich jak hologramy skrawków mysiego mózgu, skrawków mysiej wątroby oraz neuronów, potwierdzając swoje możliwości w zakresie szybkiej i precyzyjnej rekonstrukcji obrazów holograficznych. Stanowi ona krok naprzód w kierunku szerokiego wdrożenia LDHM w laboratoriach naukowych oraz aplikacjach przemysłowych.



Rysunek 1. Zrzut ekranu panelu „Focus” aplikacji HoLLOApp przedstawiający zbliżenie na próbkę z widocznym logo grupy naukowej autorów.

Źródło finansowania

Narodowe Centrum Badań i Rozwoju (LIDER14/0329/2023)

Literatura

[1] Ozcan, A., & McLeod, E. (2016). Lensless Imaging and Sensing. *Annual Review of Biomedical Engineering*, 18(1), 77-102.

[2] Gabor, D. (1948). A new microscopic principle. *Nature*, 161(4098), 777-778.

[3] Gerchberg, R. W., & Saxton, W. O. (1972). A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures. *Optik*, 35(2), 237-246.

Kolory bodźców dwufotonowych w wyświetlaczu siatkówkowym dla potrzeb rozszerzonej rzeczywistości

M. Grochalski^{1,2,3}, O. Kaczkoś^{1,2,4}, D. Rumiński¹, K. Komar^{1,2,3†}

¹Międzynarodowe Centrum Badań Oka, Skierniewicka 10A, 01-230 Warszawa, Polska

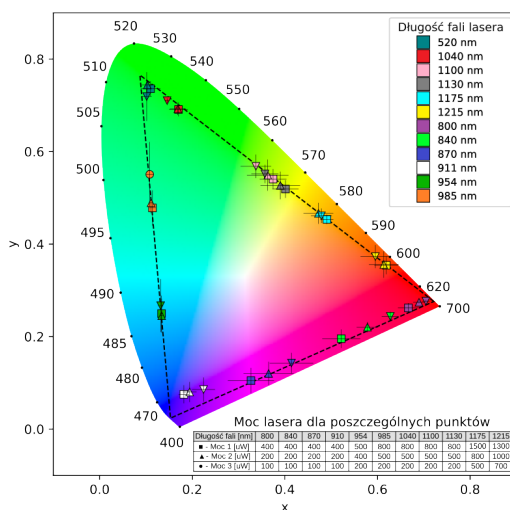
²Instytut Chemii Fizycznej PAN, Kasprzaka 44/52, 01-224 Warszawa,

³Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej, Uniwersytet Mikołaja Kopernika, Grudziądzka 5, 87-100 Toruń

⁴Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski, Pasteura 5, 02-093, Warszawa

†email: kkomar@fizyka.umk.pl

Dzięki zastosowaniu lasera impulsowego możliwe jest postrzeganie bodźców z zakresu podczerwieni za sprawą absorpcji dwufotonowej zachodzącej w pigmentach fotoreceptorów siatkówki. Zjawisko to nazywane jest widzeniem dwufotonowym. Kolory postrzegane w tym procesie odpowiadają mniej więcej połowie długości fali bodźca podczerwonego, ale obserwuje się pewne odstępstwa, które scharakteryzowano w ramach tego badania. Aby wyznaczyć barwę bodźca dwufotonowego, porównuje się go z bodźcem w zakresie światła widzialnego. Układ optyczny używany w tym eksperymencie umożliwia jednocześnie wyświetlanie obu bodźców (widzialnego i podczerwonego) obok siebie. Bodźce generowane są za pomocą skanerów galwanometrycznych, a każdy z nich ma kształt kwadratu o rozmiarze kątowym 1,6°. Bodziec widzialny tworzony jest przy użyciu trzech typów diod LED: czerwonej (655 nm), zielonej (520 nm) i niebieskiej (450 nm). Zadaniem uczestników było dopasowanie natężenia oświetlenia siatkówki poprzez zmianę prądu dla każdej diody, aby wypadkowy kolor bodźca odpowiadał barwie bodźca dwufotonowego. Dopasowanie kolorów przeprowadzono dla 11 długości fali z zakresu 800 – 1215 nm, przy trzech poziomach mocy oraz z udziałem 5 ochotników. Dopasowywano również bodźce 520 nm w celu sprawdzenia, w jakim stopniu intensywność wyświetlanego bodźca wpływa na zmianę odcienia dla wiązki podczerwonej w porównaniu z wiązką widzialną. Korzystając z funkcji dopasowywania koloru [1], widma dobranych kolorów umieszczono na standardowej paletce kolorów CIE 1931. Uśrednione wyniki przedstawiono na Rys. 1. Widoczna jest zmiana postrzeganej barwy wraz ze zmianą mocy, szczególnie wyraźna dla bodźców 840 oraz 870 nm. W tym zakresie zmienia się udział absorpcji jedno- i dwufotonowej, które mogą występować jednocześnie przy granicy widzialnego spektrum. Dodatkowo, zauważyć można przesunięcie w stronę dłuższych fal względem spodziewanej połowy długości fali dla bodźców 954 nm, 985 nm, 1040 nm i 1100 nm. Na szczególną uwagę zasługują wyniki dla bodźca 911 nm – każda z badanych osób dopasowała niewielką domieszkę światła zielonego, co może wskazywać na obecność żółtego komponentu wynikającego z fluorescencji lipofuscyny. Lepsze zrozumienie percepcji barw w widzeniu dwufotonowym może pogłębić wiedzę o tym zjawisku i znaleźć zastosowanie w rozwoju technologii rozszerzonej rzeczywistości (AR).



Rysunek 1: Uśrednione dopasowania barw na diagramie CIE 1931.

Podziękowania i źródła finansowania

Badania finansowano w ramach projektów: FENG.02.07-IP.05-0233/23 realizowanego w ramach działania Proof of Concept oraz FENG.02.01-IP.05-T005/23 realizowanego w ramach działania Międzynarodowe Agencji Badawcze (MAB FENG), Fundacji na rzecz Nauki Polskiej współfinansowanych przez Unię Europejską ze środków 2. Priorytetu Programu Fundusze Europejskie dla Nowoczesnej Gospodarki 2021-2027 (FENG).

Literatura

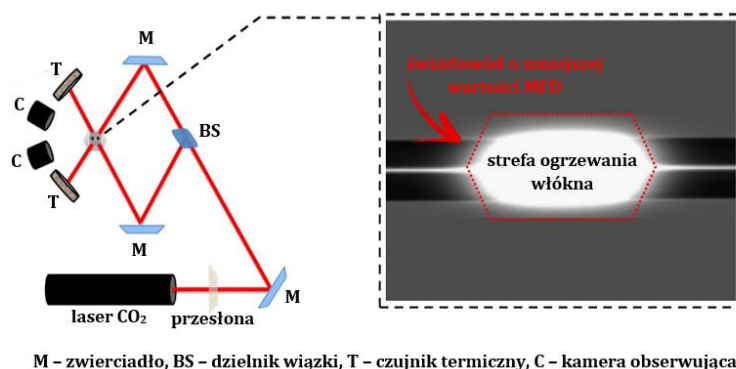
[1] Institute of Ophthalmology (University College London), "CIE 1931 2-deg, XYZ CMFs, CVRL Database," <http://www.cvrl.org/>

PANDAPTER PM - nowa jakość łączenia światłowodów optycznych utrzymujących stan polaryzacji

A. Jamrozik^{1,†}, M. Pielach^{1,†}, B. Fabjanowicz¹, K. Krupa¹, Y. Stepanenko^{1,†}

¹Institut Chemii Fizycznej Polskiej Akademii Nauk, ul. Kasprzaka 44/52, 01-224 Warszawa
†email: ajamrozik@ichf.edu.pl, mgpielach@ichf.edu.pl, stepanenko@ichf.edu.pl

Spawanie światłowodów optycznych to trwałe połączenie włókien, bez użycia dodatkowych elementów spajających. Celem jest stworzenie takiego połączenia, które zagwarantuje możliwie najniższe straty w transmisji sygnału optycznego. Proces spawania odgrywa kluczową rolę zarówno w zastosowaniach telekomunikacyjnych, jak również podczas konstrukcji układów laserów oraz wzmacniaczy zbudowanych całkowicie ze światłowodów. Pomimo zaawansowanej technologii światłowodowej wciąż istnieje szereg czynników, które wywołują różnice w tłumienności spawów. Jednym z nich jest konieczność spawania włókien o innych rozmiarach rdzenia, posiadających różną średnicę pola modu, opisywaną przez parametr MFD (ang. mode field diameter). Niedopasowanie MFD łączonych światłowodów stanowi podstawową przyczynę strat sygnału w miejscu spawu. Efekt ten można wyeliminować poprzez stworzenie adaptera pól modowych MFA (ang. mode field adapter). Ogrzewając w odpowiedni sposób światłowód posiadający mniejszą wartość MFD można wywołać poszerzenie jego rdzenia poprzez dyfuzję termiczną jonów domieszkujących, TEC (ang. thermally-expanded-core). Prawdziwe wyzwanie stanowi powiększenie rdzenia we włóknie o asymetrycznej geometrii, w szczególności w światłowodzie utrzymującym stan polaryzacji PM (ang. polarization-maintaining). Do tego typu włókien należy światłowód typu PANDA, w którym asymetria jest wprowadzona przez pręty naprężeniowe znajdujące się w strukturze płaszczka. Podczas tworzenia MFA dla tego rodzaju światłowodów należy zadbać, aby w trakcie ogrzewania włókna uniknąć deformacji prętów naprężeniowych, gdyż może to wpłynąć na jakość wiązki promieniowania i właściwości polaryzacyjne. Właśnie to zagadnienie podejmuje niniejsza praca, która opisuje metodę powiększenia rdzenia światłowodu utrzymującego stan polaryzacji, tak aby po zespawaniu go z włóknem o większym MFD zapewnić jak najmniejsze straty sygnału optycznego. Opracowano metodę ogrzewania włókna za pomocą lasera CO₂, która dzięki m.in. sprytnemu obracaniu światłowodu w trakcie procesu pozwala na szybkie powiększenie rdzenia przy jednoczesnym zachowaniu struktury prętów naprężeniowych [1]. Badania dotyczyły opracowania MFA dla różnych rodzajów komercyjnie dostępnych światłowodów utrzymujących stan polaryzacji typu PANDA, przykładowo dla włókien: PM980 oraz PLMA 14/125-UF, pozwalając na zmniejszenie strat o ponad 30% [2].



Rysunek 1: Poglądowy schemat układu do wytwarzania MFA.

Otrzymane wyniki wnoszą istotny wkład w rozwój oscylatorów i wzmacniaczy laserowych zbudowanych całkowicie z włókien utrzymujących stan polaryzacji. Dzięki zastosowaniu światłowodów PANDA takie lasery są odporne na zmienne warunki zewnętrzne, przez co znajdują zastosowanie w środowiskach przemysłowych.

Podziękowania i źródła finansowania

Badania były finansowane w ramach projektu NCN MINIATURA-5 2021/05/X/ST7/01330 oraz projektu FNP TEAM-NET No. POIR.04.04.00-00-16ED/18.

Literatura

- [1] A. Jamrozik, M. Pielach, K. Krupa, Y. Stepanenko "A method of fabrication of thermally expanded core in polarization maintaining optical fibre, polarization-maintaining optical fibre with a thermally expanded core, use thereof, a method of fabrication a mode-field adapter and a fibre mode-field adapter" EP23461575.5 (submitted 05.05.2023).
- [2] A. Jamrozik, M. Pielach, B. Fabjanowicz, K. Krupa, Y. Stepanenko, Optical Fiber Technology 104055 (2025).

Interferometr Linnika – praktyczne możliwości w QPI

M. Jóźwik^{1,†}, P. Zdańkowski, M. Cywińska, E. Wdowiak, M. Trusiak

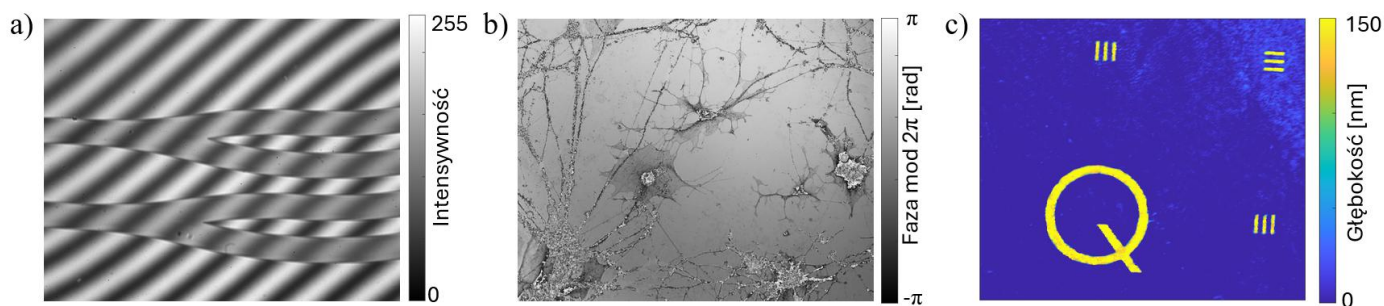
¹Wydział Mechatroniki, Politechnika Warszawska, ul. św. A. Boboli 8, 02-525 Warszawa

†email: michal.jozwik@pw.edu.pl

Ilościowa mikroskopia fazowa (QPI) [1] opiera swoje działanie na rejestracji i przetwarzaniu obrazów interferencyjnych/hologramów niosących informację o badanym obiekcie. W zależności od możliwości rejestracji i konfiguracji układu pomiarowego obraz lub seria obrazów jest poddawana dalszej demodulacji fazy z wykorzystaniem różnych technik analizy interferogramów: jednoramkowych (np. transformacji Fouriera (FT) [2]) lub wieloramkowych (np. czasowej dyskretnej zmiany fazy (TPS) [3]).

Interferometr Linnika jest jednym z klasycznych systemów metrologicznych do precyzyjnych, bezkontaktowych pomiarów topografii powierzchni obiektów technicznych, który ponownie zyskuje zainteresowanie [4]. Wyróżnia się on symetryczną budową ramion – w torze pomiarowym i referencyjnym znajdują się identyczne obiektywy mikroskopowe. Zapewnia to podobne warunki propagacji światła w obu ramionach i umożliwia pracę w dużych powiększeniach. Dodatkowo, dzięki swojej symetrii, zapewnia wyższą rozdzielczość przestrzenną w porównaniu do innych interferometrów [4]. Nie bez znaczenia jest też praktyczny aspekt: łatwa modyfikacja powiększenia poprzez zmianę pary obiektywów. Drugą istotną cechą jest możliwość zastosowania w nim źródeł światła o niskiej koherencji, (lampy halogenowe, diody LED), co przekłada się na zwiększony stosunek sygnału do szumu w rejestrowanych interferogramach (eliminuje problem plamkowania i interferencji niezwiązanych z badaną próbką) [6]. Symetryczna konstrukcja niweluje aberracje chromatyczne i w rezultacie pozwala na uzyskanie wysokiego kontrastu interferencji i minimalizację artefaktów. Zapewnia to wysoką globalną jakość wyników i nieosiągalną dla źródeł laserowych rozdzielczość poosiową pomiaru [7].

Niniejsza praca przedstawia własną konstrukcję interferometru Linnika opartą na źródle LED ($\lambda=635\text{nm}$, $\Delta\lambda=15\text{nm}$) i obiektywach NIKON PLAN APO $\lambda\text{D } 40\times/0.95$. Zaprezentowane wyniki demonstrują potencjał interferometru Linnika w ilościowej mikroskopii fazowej oraz jego praktyczne zastosowania w badaniu różnych powierzchni, od nanostruktur technicznych po komórki biologiczne. W odróżnieniu od klasycznych podejść QPI, interferometr Linnika pozwala na wysokorozdzielcze pomiary w trybie odbiciowym (dla pomiaru płaskiego obiektu referencyjnego bez filtracji danych: min-max w profilu = 8,5 nm, średnie arytmetyczne odchylenie od linii średniej = 1,19 nm) stając się konkurentem dla metod detekcji konfokalnej. Poza tym urządzenie służy jako eksperymentalna platforma testowa do prowadzenia pomiarów na trudnych obiektach i badań zastosowania zaawansowanych algorytmów przetwarzania obrazów prążkowych.



Rysunek 1: Przykładowe wyniki pomiarów: a) interferogram z pomiaru falowodów, b) faza mod 2π obiektu biologicznego, c) pomiar fazowego testu rozdzielczości (sekcja Q, 3,88 μm) o głębokości 140 nm.

Podziękowania i źródła finansowania

Projekt nr WPC3/2022/47/INTENCITY/2024 finansowany przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach III konkursu na wspólne projekty badawcze w ramach współpracy polsko-chińskiej (2022).

Literatura

- [1] T. L. Nguyen, S. Pradeep, R. L. Judson-Torres, J. Reed, M. A. Teitell, T. A. Zangle, *ACS Nano* **16** (8), 11516 (2022).
- [2] M. Takeda, H. Ina, S. Kobayashi, *J. Opt. Soc. Am.* **72**, 156 (1982).
- [3] R. Juarez-Salazar, C. Mendoza-Rodriguez, J.E. Hernandez-Beltran, C. Robledo-Sanchez, *Eur. J. Phys.* **39** (6), 065302 (2018).
- [4] S. V. Anishchik, M. Dantus, *J. Opt.* **26** 115602 (2024).
- [5] P. Kühnhold, W. Xie, P. Lehmann, *Proc. SPIE* 8788, 87882G (2013).
- [6] A. Ahmad, P. Gołowski, V. Dubey, M. Trusiak, B.S. Ahluwalia, *Scientific Reports* **14**, 9191 (2024).
- [7] M. Rogalski, M. Cywińska, A. Ahmad, K. Patorski, V. Micó, B.S. Ahluwalia, M. Trusiak, *Optics Letters* **47**, 5793 (2022).

Trajektorie wirów optycznych jako marker aberracji

Aleksandra K. Korzeniewska^{1, †}, Magdalena Łukowicz¹, Kamil Kalinowski¹, Karolina Gemza¹, Mateusz Szatkowski¹

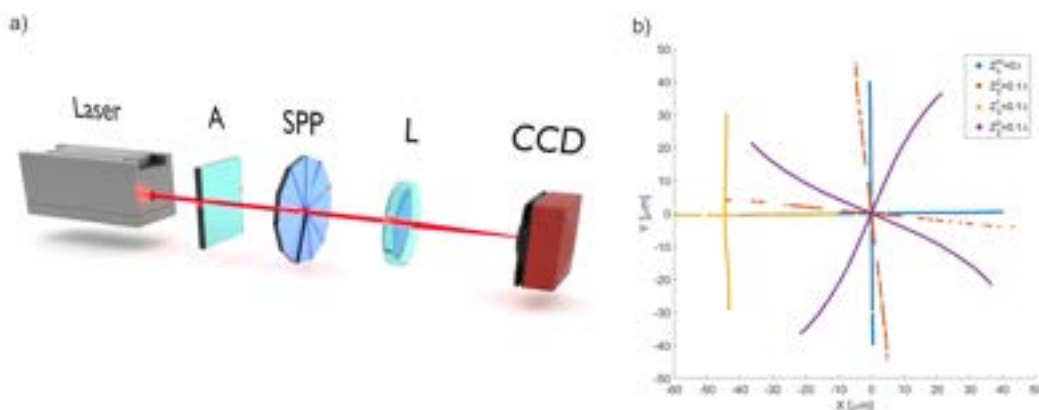
¹ Katedra Optyki i Fotoniki, Politechnika Wrocławska, Wyb. Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

†email: aleksandra.korzeniewska@pwr.edu.pl

Wir optyczny to termin określający punkt w polu optycznym, gdzie faza fali jest nieokreślona, a intensywność wiązki jest zerowa. Położenie punktu osobliwego podczas propagacji wiązki jest wrażliwe na zewnętrzne zaburzenia, co prowadzi do decentralizacji położenia wiru [1]. Trajektorią wiru nazywane jest przemieszczenie punktu nieciągłości fazowej w płaszczyźnie detektora przy przemieszczaniu elementu generującego wir [2]. Jak pokazano w [3] trajektorie wirów są obiektywną metodą oceny jakości wiązki. Każdy układ optyczny wyposażony w przestrzenny modulator światła lub matrycę mikrozwierciadeł ma możliwość oceny stanu wiązki stosując proponowaną metodę.

W naszej pracy przeprowadziliśmy numeryczną analizę wpływu poszczególnych aberracji (astygmatyzmu Z_2^2 , rozogniskowania Z_2^0 oraz komy Z_3^1) na trajektorie wirów. Układ pomiarowy przedstawiony jest na rys. 1a). Wiązka z aberracją wprowadzaną przez element A propaguje przez spiralną płytkę fazową SPP, która jest wysuwana poza oś optyczną układu w dwóch ortogonalnych kierunkach, prostopadle do kierunku propagacji wiązki. Badane było położenie punktu osobliwego na nieruchomym detektorze CCD. Rys. 1b) przedstawia wpływ badanych aberracji na rejestrowane trajektorie. W pracy powiązane zostały ilościowo unikalne cechy trajektorii z określonymi aberracjami.

Wykorzystując cechy rozogniskowania proponujemy system detekcji położenia ogniska. Opiera się on na analizie położenia punktu nieciągłości fazowej, który jest parametrem obiektywnym. Wiązka propagowała przez spiralną płytkę fazową SPP o stałym wysunięciu. Rejestrowana była trajektoria ciemnego promienia (położenie punktu nieciągłości wzdłuż osi optycznej) przez przemieszczanie detektora w pobliżu ogniska układu. Otrzymane wyniki numeryczne zostały potwierdzone w układzie eksperymentalnym.



Rysunek 1: a) Schemat układu do pomiaru trajektorii wiru optycznego: A - refrakcyjny element wprowadzający aberrację, SPP - spiralna płytkę fazową generująca wir, L - soczewka, CCD - detektor b) trajektorie wiru optycznego dla różnych aberracji przy przemieszczaniu płytki fazowej w dwóch ortogonalnych kierunkach prostopadle do kierunku propagacji wiązki.

Podziękowania i źródła finansowania

Badania zostały sfinansowane ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju, 0230/L-13/2022.

Literatura

- [1] A. Popiołek-Masajada, J. Masajada, M. Szatkowski, *Opt. Lasers Eng.* **105**, 201-208 (2018)
- [2] Ł. Płociniczak, A. Popiołek-Masajada, J. Masajada, and M. Szatkowski, *Appl. Opt.* **55**, B20-B27 (2016)
- [3] M. Szatkowski, A. Popiołek-Masajada, and J. Masajad, *Opt. Lasers Eng* **118**, 1-6 (2019)

Amplituda akomodacji dla widzenia dwufotonowego – zastosowanie w technologii rozszerzonej rzeczywistości

O. Kaczkoś^{1,2,3}, M. Grochalski^{1,2,4}, J. Pniewski³, M. Wojtkowski^{1,2}, K. Komar^{1,2,4†}

¹Międzynarodowe Centrum Badań Oka, Skierniewicka 10A, 01-230 Warszawa, Polska.

²Instytut Chemii Fizycznej Polskiej Akademii Nauk, Kasprzaka 44/52, 01-224 Warszawa, Polska.

³Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski, Pasteura 5, 02-093, Warszawa, Polska.

⁴Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej, Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu, Grudziądzka 5, 87-100 Toruń

†mail: kkomar@fizyka.umk.pl

Parametry akomodacji odgrywają kluczową rolę w jakości obrazu siatkówkowego, co ma szczególne znaczenie w kontekście wyświetlaczy siatkówkowych oraz technologii rozszerzonej rzeczywistości (AR, ang. *Augmented Reality*). Celem niniejszego badania była ocena amplitudy akomodacji oka dla widzenia dwufotonowego oraz zbadanie wpływu rozogniskowania na jakość obrazu. Otrzymane wyniki wskazują, że widzenie dwufotonowe charakteryzuje się wyższą amplitudą akomodacji, w porównaniu ze standardowym widzeniem jednofotonowym, co wpływa na większą tolerancję na rozogniskowanie i wskazuje potencjał zastosowania tego zjawiska w technologii AR.

Widzenie dwufotonowe jest zjawiskiem, w którym impulsowe światło laserowe z zakresu bliskiej podczerwieni jest postrzegane jako światło widzialne dzięki dwufotonowej absorpcji w pigmentach wzrokowych. Dwufotonowe bodźce wzrokowe są subiektywnie odbierane jako wyjątkowo wyraźne i ostre, co jest szczególnie istotne w kontekście zastosowania widzenia dwufotonowego w wyświetlaczach siatkówkowych i technologii AR. Jakość obrazu powstającego na siatkówce jest silnie warunkowana przez parametry akomodacji oka. Celem badania jest ocena amplitudy akomodacji oka dla widzenia dwufotonowego i ocena wpływu rozogniskowania na postrzegany obraz. W badaniu wzięło udział 10 zdrowych ochotników bez zdiagnozowanych patologii układu wzrokowego. W celu zmierzenia amplitudy akomodacji, wyświetlano literowy bodziec „E” o wielkości 0.2° poprzez szybkie skanowanie siatkówki impulsową wiązką laserową o długości fali 1040 nm w przypadku widzenia dwufotonowego oraz 520 nm w przypadku widzenia jednofotonowego, przy czym oba bodźce były postrzegane jako zielone. Obie wiązki były generowane przez laser femtosekundowy ($\tau_p=250$ fs, $F_{rep}=63$ MHz). Dzięki zastosowaniu metody dopasowania jasności, oba bodźce miały subiektywnie tę samą jasność [2]. Pomiar polegał na zwiększaniu bodźca do akomodacji, poprzez zwiększanie rozogniskowania z krokiem 0.5 D do momentu, kiedy uczestnik badania zaobserwuje subiektywne rozmycie bodźca. Dodatkowo badanie oceniało poziom rozogniskowania, przy którym uczestnik badania nie był w stanie poprawie rozpoznać orientacji prezentowanego optotypu. Otrzymane wartości amplitudy akomodacji były wyższe dla widzenia dwufotonowego: 4.0 ± 0.6 D w porównaniu do widzenia jednofotonowego: 2.7 ± 0.6 D. Próg rozpoznania optotypu nie różnił się istotnie pomiędzy widzeniem jedno- i dwufotonowym (odpowiednio $6,8 \text{ D} \pm 0,8 \text{ D}$ i $6,6 \text{ D} \pm 0,7 \text{ D}$). Uzyskane wyniki wskazują, że widzenie dwufotonowe charakteryzuje się wyższą amplitudą akomodacji, co pozwala na utrzymanie obrazu o dobrej jakości w szerszym zakresie rozogniskowania niż w przypadku widzenia jednofotonowego. Wyniki badań potwierdzają potencjał zastosowania zjawiska widzenia dwufotonowego w wyświetlaczach siatkówkowych i technologii AR.



Rysunek 1: Schemat przedstawiający wpływ rozogniskowania na postrzegane bodźce w widzeniu jednofotonowym (VIS) oraz dwufotonowym (IR).

Podziękowania

Badania finansowano w ramach projektów: FENG.02.07-IP.05-0233/23 realizowanego w ramach działania Proof of Concept oraz FENG.02.01-IP.05-T005/23 realizowanego w ramach działania Międzynarodowe Agencji Badawcze (MAB FENG), Fundacji na rzecz Nauki Polskiej współfinansowanych przez Unię Europejską ze środków 2. Priorytetu Programu Fundusze Europejskie dla Nowoczesnej Gospodarki 2021-2027 (FENG).

Literatura

[1] G. Palczewska et al., "Human infrared Vision is triggered by two-photon chromophore isomerization," *Proc Natl Acad Sci U S A*, vol. 111, no. 50, 2014.

[2] O. Kaczkoś et al., "Method for the determination of the luminance of two-photon vision stimuli," *Biomed. Opt. Express* 15, 5818-5830, 2024.

Splątanie i ściskanie kwantowe w układach trójkubitowych

J. K. Kalaga^{1,†}, J. Peřina Jr.²

¹ Zakład Optyki i Inżynierii Kwantowej, Instytut Fizyki, Uniwersytet Zielonogórski, ul. Szafrana 4a, 65-516 Zielona Góra, Polska

² Joint Laboratory of Optics, Faculty of Science, Palacký University, 17. listopadu 12, 771 46 Olomouc, Czech Republic

†email: j.kalaga@if.uz.zgora.pl

Możliwość tworzenia i manipulowania stanami kwantowymi jest szczególnie istotna dla rozwoju szeroko rozumianej teorii informacji kwantowej i jej zastosowań. Badania prowadzone nad technologiami kwantowymi wykorzystują m.in. takie zjawiska kwantowe jak superpozycja, splątanie czy ściskanie. Zarówno stany splątane, jak i stany ściśnięte, są zasobem w takich dziedzinach jak teleportacja kwantowa, metrologia kwantowa czy kwantowe przetwarzanie informacji. Dlatego powiązanie ze sobą różnych wielkości opisujących powyższe efekty wydaje się być kluczowe dla badań nad stanami kwantowymi.

W prezentowanym tu komunikacie koncentrujemy się na różnych rodzajach trójkubitowych stanów wykazujących niezerowe trójstronne splątanie. Stany takie, uwzględniając klasyfikację zaproponowaną przez Sabina i Garcíę-Alcaine w pracy [1], można podzielić na cztery kategorie. Dla wszystkich typów stanów z niezerowym trójstronnym splątaniem przedstawimy zależności pomiędzy miarami splątania i wielomodowego ściskania. Do badania korelacji kwantowych zastosowane zostały takie miary splątania jak zgodność (ang. concurrence) zdefiniowana przez Hilla i Woottersa [2,3] oraz ujemność (ang. negativity) – miara nieseparowalności wprowadzona przez Peresa i braci Horodeckich [4,5]. Natomiast do badania ściskania wykorzystane zostaną wariacje ściskania (ang. principal squeezing variances) [6,7]. Przedstawimy zależności pomiędzy tymi miarami, pozwalające na zidentyfikowanie stanów ściśniętych i powiązanie takich stanów z występowaniem splątania kwantowego.

Podziękowania i źródła finansowania

J.K.K. dziękuje za wsparcie Narodowego Centrum Nauki (NCN) w postaci programu MINIATURA8, nr projektu 2024/08/X/ST2/00753 pod nazwą „Określenie związku między miarami splątania kwantowego i ściskania kwantowego w układach trójkubitowych”.

Literatura

- [1] C. Sabín and G. Garcí­a-Alcaine, *Eur.Phys. J. D* **48**, 435–442 (2008).
- [2] S. Hill and W. K. Wootters, *Phys. Rev. Lett.* **78**, 5022–5025 (1997).
- [3] W. K. Wootters, *Phys. Rev. Lett.* **80**, 2245–2248 (1998).
- [4] A. Peres, *Phys. Rev. Lett.* **77**, 1413–1415 (1996).
- [5] M. Horodecki, P. Horodecki, R. Horodecki, *Phys. Lett. A* **223**, 1–8 (1996).
- [6] A. Lukš, V. Peřinová, J. Peřina, *Opt. Commun.* **67**, 149 (1988).
- [7] G. Ariunbold and J. Peřina, *Opt. Commun.* **176**, 149 (2000).

ClearAIM: opto-elektroniczna metoda do poklatkowej ilościowej oceny procesu oczyszczania tkanek

Kamil Kalinowski^{1,*,†}, Anna Chwastowicz^{2,3,~}, Piotr Arcab^{1,~}, Mikołaj Rogalski^{1,~}, Wiktoria Szymska¹, Emilia Wdowiak¹, Julianna Winnik¹, Piotr Zdańkowski¹, Michał Józwiak¹, Paweł Matryba^{2,3,4}, Maciej Trusiak¹

¹ Politechnika Warszawska, Wydział Mechatroniki, Instytut Mikromechaniki i Fotoniki, ul. Boboli 8, 02-525 Warszawa, Polska

² Warszawski Uniwersytet Medyczny, Zakład Immunologii, ul. Nielubowicza 5, 02-097 Warszawa, Polska

³ Instytut Biologii Doświadczalnej im. Nenckiego PAN, Pracownia Neurobiologii, BRAINCITY, ul. Pasteura 3, 02-093 Warszawa, Polska

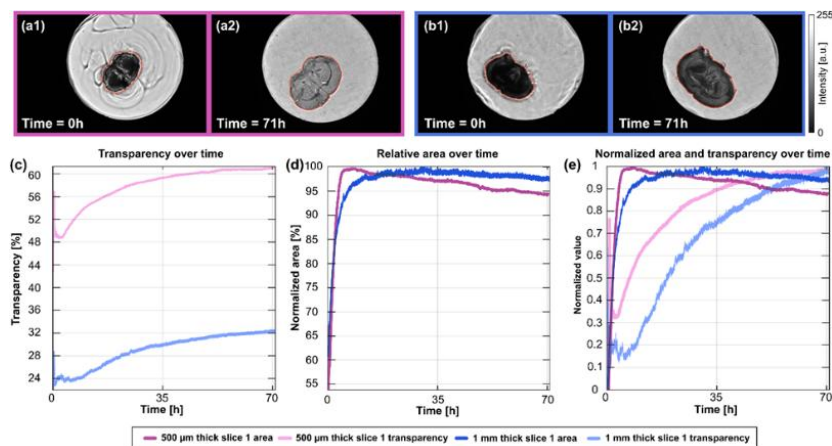
⁴ Narodowy Instytut Onkologii im. Marii Skłodowskiej-Curie – Państwowy Instytut Badawczy, Zakład Radiologii 1, ul. Roentgena 5, 02-781 Warszawa, Polska

~ współautorzy wnieśli równy wkład

†email: kamil.kalinowski2.dokt@pw.edu.pl

Techniki optycznego oczyszczania tkanek umożliwiają głębsze i bardziej szczegółowe obrazowanie struktur biologicznych np. mikroskopii fluorescencyjnej [1]. Redukcja rozpraszania światła pozwala uzyskać wyraźniejsze obrazy komórek w całych narządach lub ich skrawkach. Choć istnieje wiele protokołów i odczynników optycznego oczyszczania (np. CUBIC, iDISCO, CLARITY), proces zazwyczaj polega na pasywnej inkubacji, po której uznaje się próbkę za gotową do dalszych analiz [2]. Brakuje jednak narzędzi do obiektywnego, ilościowego śledzenia, czy i kiedy tkanka osiągnęła właściwą przejrzystość. Decyzje podejmowane są empirycznie, co prowadzi do nadmiernego oczyszczania lub niedostatecznej penetracji w dalszym obrazowaniu.

W tej pracy przedstawiamy ClearAIM – otwarty, nisko-kosztowy i łatwy w obsłudze system do automatycznego monitorowania procesu oczyszczania tkanek w czasie rzeczywistym. Łączy on segmentację obrazu (Segment Anything Model) z analizą zmian przezroczystości i morfologii próbki. Nasz wkład polegał nie tylko na wykorzystaniu SAM, ale także na opracowaniu adaptacyjnego mechanizmu optymalizacji jego działania – dzięki dynamicznemu dostosowywaniu punktów referencyjnych przy użyciu algorytmu k-means, osiągamy wysoką precyzję segmentacji mimo braku dodatkowego szkolenia modelu. Na przykładzie skrawków mózgu myszy (a – 500 μm , b – 1 mm) pokazaliśmy, że ClearAIM pozwala precyzyjnie określić moment maksymalnej przejrzystości, obserwować zmiany morfologiczne oraz zoptymalizować czas oczyszczania względem typu i grubości próbki (Rys. 1). System wyeliminował subiektywność, przyspieszył przebieg pracy i zwiększył powtarzalność obrazowań mikroskopowych.



Rysunek 1: Zmiany przezroczystości i powierzchni skrawków mózgu w trakcie 71 h oczyszczania. Obrazy (a1–a2) przedstawiają próbkę o grubości 500 μm , a obrazy (b1–b2) próbkę o grubości 1 mm, na początku i końcu procesu. Wykresy (c–e) ilustrują zmiany parametrów w czasie.

Źródła finansowania

Narodowe Centrum Badań i Rozwoju (LIDER14/0329/2023)

Literatura

- [1] P. Matryba, L. Kaczmarek, and J. Gołąb, Advances in Ex Situ Tissue Optical Clearing. *Laser Photonics Rev.* 13(8), 1800292 (2019).
- [2] H. Mai and D. Lu, Tissue clearing and its applications in human tissues: A review. *VIEW* 5(1), 20230046 (2024).

Sprzęgacz do światłowodu wielordzeniowego oparty na dyfrakcyjnych elementach optycznych wytworzony metodą dwufotonowej polimeryzacji

M. Kaluża[†], K. Pogorzelec, P. Lesiak

Wydział Fizyki, Politechnika Warszawska, Koszykowa 75, 00-662 Warszawa

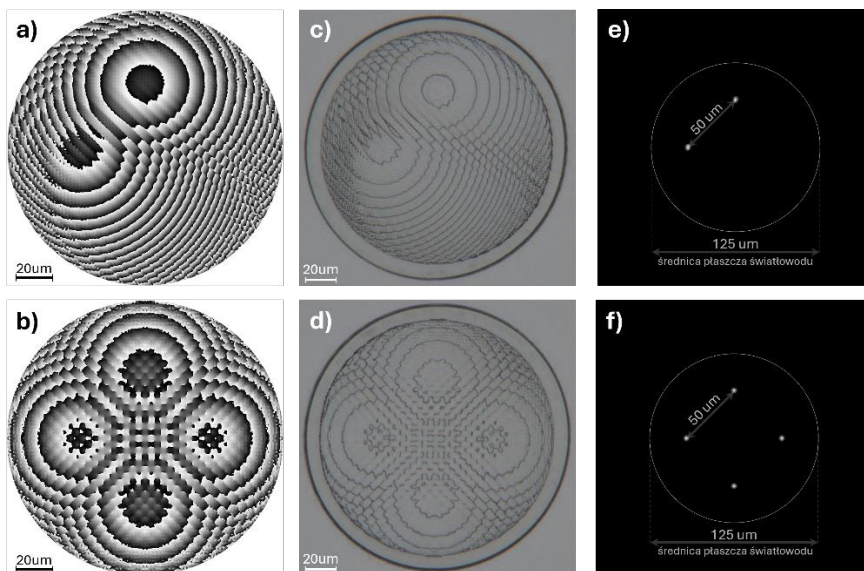
[†]email: mateusz.kaluza@pw.edu.pl

Sprzęgacze światłowodowe odgrywają kluczową rolę w nowoczesnych systemach optycznych, umożliwiając efektywne rozdzielanie, łączenie oraz przekierowywanie sygnałów w precyzyjny i kontrolowany sposób. Dzięki postępom w nanotechnologii możliwe jest miniaturyzowanie sprzęgaczy i dostosowanie ich do pracy w wymagających warunkach. Różne technologie umożliwiają dostosowanie sprzęgaczy do specyficznych potrzeb zaawansowanych systemów optycznych, w tym biosensorów opartych na sprzęgaczach światłowodowych [1].

Technologia dwufotonowej polimeryzacji (2PP) umożliwia precyzyjne wytwarzanie złożonych mikrostruktur, takich jak dyfrakcyjne elementy optyczne (DOE) [2]. DOE pozwalają na precyzyjne i dowolne kształtowanie wiązek optycznych, dostosowane do specyficznych wymagań danej aplikacji [3]. W niniejszej pracy przedstawiono innowacyjne podejście do projektowania i wytwarzania sprzęgaczy światłowodowych opartych na DOE, zaprojektowanych przy użyciu zmodyfikowanego algorytmu Gerchberga-Saxtona, co pozwoliło na stworzenie hologramów syntetycznych charakteryzujących się wysoką wydajnością dyfrakcyjną.

Przedstawione struktury umożliwiają przekierowanie wiązki z wyjścia światłowodu jednomodowego na dowolną kombinację rdzeni światłowodu czterordzeniowego. Struktury zaprojektowano dla długości fali 1550 nm, średnicy 150 μm i ogniskowej 150 μm . Wyniki symulacji numerycznych potwierdziły poprawność działania zaproponowanych struktur. Dzięki wysokiej rozdzielczości druku 2PP (rzędu 100 nm) DOE zostały precyzyjnie wytworzone na szklanym podłożu, a wstępne pomiary eksperymentalne wykazały ich poprawne działanie.

Na Rysunku 1a i 1b przedstawiono fazowe rozkłady zaprojektowanych DOE kierujących promieniowanie do dwóch i czterech ognisk odpowiadających pozycjom rdzeni światłowodu czterordzeniowego. Rysunki 1c i 1d pokazują zdjęcia struktur wytworzonych metodą 2PP, a Rysunki 1e i 1f prezentują wyniki symulacji numerycznych. W kolejnym etapie DOE zostaną wydrukowane na czołach światłowodów czterordzeniowych z użyciem stelaża zapewniającego precyzyjne pozycjonowanie w odległości ogniskowej, co umożliwi efektywne przekierowanie promieniowania do wybranego rdzenia i zapewni wysoką wydajność nowatorskiego sprzęgacza światłowodowego.



Rysunek 1: a) i b) Mapy fazowe zaprojektowanych DOE; c) i d) zdjęcia wydrukowanych struktur w technologii 2PP; e) i f) wyniki symulacji numerycznych ilustrujące ogniska w płaszczyźnie wejścia światłowodu czterordzeniowego.

Podziękowania i źródła finansowania

Badania były finansowane ze środków Politechniki Warszawskiej w ramach Programu Inicjatywa Doskonałości – Uczelnia Badawcza (IDUB).

Literatura

- [1] C. Leitão, S.O. Pereira, C. Marques, N. Cennamo, L. Zeni, M. Shaimerdenova, T. Ayupova and D. Tosi, *Biosensors* **12**, 575 (2022).
- [2] H. Wang, H. Wang, W. Zhang, and J.K.W. Yang, *ACS Nano* **14**, 10452 (2020).
- [3] S. Katz, N. Kaplan, and I. Grossinger, *Optik & Photonik* **13**, 83 (2018).

Manipulacja optyczna mikro- i nano- cząstkami w szczypcach optycznych

Paweł Karpinski^{1†},

¹Wydział Chemiczny, Politechnika Wrocławska, Wyb. Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

†email: pawel.karpinski@pwr.edu.pl

Szczepce optyczne zostały zapoczątkowane przez A. Ashkin'a w latach 70- i 80-tych^{1,2} i szybko zdobyły popularność w badaniach reologicznych i biologicznych.³ Pozwalają one na unieruchomienie mikro- i nano-cząstek przy użyciu silnie skupionej wiązki światła lasera. Siły działające na taką cząstkę są rzędu piconewtonów i pozwalają mierzyć siły tego samego rzędu z dużą dokładnością. Cząsteczka złapana szczypcami optycznymi nie jest jednak zupełnie nieruchoma, wykonuje ona ciągłe ruchy Browna ograniczone potencjałem pułapki optycznej. Jeśli dodatkowo zastosujemy wiązkę o odpowiedniej polaryzacji lub wiązkę wektorową to możemy wzbudzić dodatkowy ruch takiej cząsteczki wewnątrz pułapki. Stosując światła kołowo spolaryzowane, które ma spinowy moment pędu możemy uzyskać kręcenie się cząstki wokół własnej osi – rotację. Przy zastosowaniu wiązki wektorowej posiadającej orbitalny moment pędu, możemy obserwować krążenie cząstki po orbicie wiązki – rewolucję. Przekaz momentu pędu odbywa się przez absorpcję i rozplaszczanie światła i może być bardzo efektywny.

Tutaj pokażemy, że dla niewielkich cząstek silnie oddziałujących ze światłem np. rezonansowych nanocząstek złota i krzemu⁴⁻⁶ częstość rotacji może sięgać kilku kHz, a rewolucji kilkuset Hz w wodzie. To czyni takie cząstki najszybciej kręcącymi się obiektami w wodzie wytworzonymi przez człowieka.

Silne oddziaływanie ze światłem niesie też swoje konsekwencje w postaci znaczącej absorpcji światła i grzania się takich obiektów. Wzrost temperatury zmienia ich ruchy Browna i lepkość cieczy je otaczającej, a ponieważ to te cząsteczki są źródłem ciepła układ ten jest stanie termodynamicznie nierównowagowym. Ruch takich obiektów opisany jest teorią gorących ruchów Browna.^{7,8} Tutaj zaprezentujemy eksperymentalną weryfikację tej teorii.^{4,6} Pomiar temperatury w mikro- i nano-skali nie jest trywialnym. Pokażemy, że indukowany ruch (rotacje i rewolucję) można wykorzystać o pomiaru temperatury w otoczeniu pułapki cząstki. Dodatkowo wykorzystując termometrię opartą na pomiarach spektroskopowych można zmierzyć temperaturę samej cząstki.

Na koniec pokażemy, że używając kryształów domieszkowanych jonami ziem rzadkich można nie tylko grzać pułapki cząstki, ale również je chłodzić wykorzystując anty-Stokesowską luminescencję.^{9,10} Takie połączenie możliwości indukowania szybkiego ruchu cząstek wewnątrz szczypiec optycznych i ich jednoczesnego grzania i/lub chłodzenia stanowi świetną platformę umożliwiającą bardzo rozbudowane pomiary mikroreologiczne w funkcji temperatury. Umożliwia również obserwację zjawisk takich jak termoforeza i termoosmoza wokół optycznie podgrzewanych i chłodzonych cząstek.

Podziękowania i źródła finansowania

Chcielibyśmy podziękować Narodowemu Centrum Nauki za wsparcie finansowe w ramach projektów SONATA 2019/35/D/ST3/02272 i OPUS LAP 2020/39/I/ST3/01827.

Literatura

1. Ashkin, A. Acceleration and Trapping of Particles by Radiation Pressure. *Phys Rev Lett* **24**, 156–159 (1970).
2. Ashkin, A., Dziedzic, J. M., Bjorkholm, J. E. & Chu, S. Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles. *Opt. Lett.* **11**, 288–290 (1986).
3. Maragò, O. M., Jones, P. H., Gucciardi, P. G., Volpe, G. & Ferrari, A. C. Optical trapping and manipulation of nanostructures. *Nat Nanotechnol* **8**, 807–819 (2013).
4. Karpinski, P. Rotation and Revolution of Optically Trapped Gold Nanorods Induced by the Spin and Orbital Angular Momentum of a Laguerre–Gaussian Vortex Beam. *Adv Opt Mater* **10**, 2101592 (2022).
5. Karpinski, P., Jones, S., Andrén, D. & Käll, M. Counter-Propagating Optical Trapping of Resonant Nanoparticles Using a Uniaxial Crystal. *Laser Photon Rev* **12**, 1800139 (2018).
6. Karpinski, P., Jones, S., Šipová, H., Verre, R. & Käll, M. Optical Rotation and Thermometry of Laser Tweezed Silicon Nanorods. *Nano Lett* **20**, (2020).
7. Kroy, K. & Cichos, F. Hot brownian motion. in *Diffusive Spreading in Nature, Technology and Society* 127–145 (Springer International Publishing, 2017). doi:10.1007/978-3-319-67798-9_8.
8. Rings, D., Chakraborty, D. & Kroy, K. Rotational hot Brownian motion. *New J Phys* **14**, (2012).
9. Pringsheim, P. Zwei Bemerkungen über den Unterschied von Lumineszenz- und Temperaturstrahlung. *Zeitschrift für Physik* **57**, 739–746 (1929).
10. Sheik-Bahae, M. & Epstein, R. I. Laser cooling of solids. *Laser Photon Rev* **3**, 67–84 (2009).

Efekty izotopowe w optycznych przejściach zegarowych zaburzonych zderzeniami zimnych atomów

Bala R.¹, Linek A.¹, Witkowski M.¹, Żuchowski P.¹, Julienne P. S.², Zawada M.¹, Ciuryło R.^{1,†}

¹Institu Fizyki, Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej, Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu, Polska

²Joint Quantum Institute, University of Maryland and NIST, College Park, MD 20742, USA

†email: rciurylo@umk.pl

Obiektem naszych badań jest przejście zegarowe Hg [1] zaburzone przez elastyczne zderzenia z zimnymi atomami Rb, jako przykład demonstrujący zmienność zderzeniowej szerokości i przesunięcia linii zegarowej zależnych od masy zredukowanej zderzających się atomów. Układ eksperymentalny do badań ultrazimnych zderzeń Hg-Rb jest rozwijany i umożliwia uzyskanie podstawowych informacji dotyczących oddziaływań między atomowych oraz rozpraszania w zakresie ultrazimnych energii zderzeń [2, 3]. W naszych badaniach efektywne potencjały Borna-Oppenheimera były modelowane z wykorzystaniem wiodących dalekozasięgowych wyrażen van der Waalsa. Niestety, długości rozpraszania dla fali parcjalej s systemu Hg-Rb nie są jeszcze znane, a to one w głównej mierze determinują własności rozproszeniowe w przypadku ultraniskich energii zderzenia. Nie mniej jednak pokazaliśmy, jaki jest możliwy zakres zmienności zderzeniowej szerokości i przesunięcia linii, gdy ulega zmianie skład izotopowy zderzających się atomów a co za tym idzie ich masa zredukowana. Obliczenia zostały wykonane w zakresie temperatur od 1 nK do 1 K. Skonfrontowaliśmy w pełni kwantowe obliczenia rozproszeniowe [4] z przybliżeniem wykorzystującym długości rozpraszania w fali parcjalej s [5, 6] oraz przybliżeniem półklasycznym dla szerokości i przesunięcia linii [7]. Pokazaliśmy, że rezonanse kształtu dla wyższych fal parcjalnych [8] prowadzą do znaczącej zmienności zderzeniowej szerokości i przesunięcia linii w zależności od zredukowanej masy zderzających się atomów. Wskazaliśmy też możliwy wpływ zderzeń nieelastycznych na otrzymane wyniki.

Literatura

- [1] H. Hachisu, K. Miyagishi, S. G. Porsev, A. Derevianko, V. D. Ovsiannikov, V. G. Pal'chikov, M. Takamoto, H. Katori, *Phys. Rev. Lett.* 100, 053001 (2008).
- [2] M. Witkowski, B. Nagórny, R. Munoz-Rodriguez, R. Ciuryło, P. S. Żuchowski, S. Bylicki, M. Piotrowski, P. Morzyński, M. Zawada, *Opt. Express* 25, 3165 (2017).
- [3] M. Borkowski, R. Munoz Rodriguez, M. B. Kosicki, R. Ciuryło, P. S. Żuchowski, *Phys. Rev. A* 96, 063411 (2017).
- [4] P. S. Julienne, F. H. Mies, *Phys. Rev. A* 34, 3792 (1986).
- [5] P. J. Leo, P. S. Julienne, F. H. Mies, C. J. Williams, *Phys. Rev. Lett.* 86, 3743 (2001).
- [6] S. J. J. M. F. Kokkelmans, B. J. Verhaar, K. Gibble, D. J. Heinzen, *Phys. Rev. A* 56, R4389 (1997).
- [7] N. Allard, J. Kielkopf, *Rev. Mod. Phys.* 54, 1103 (1982).
- [8] B. Gao, *Phys. Rev. A* 62, 050702 (2000); 64, 010701, (2001).

Upkonwertujące Nanocząstki $\text{NaYF}_4:\text{Yb/Er}$ w strojonej Mikrownęce Planarnej

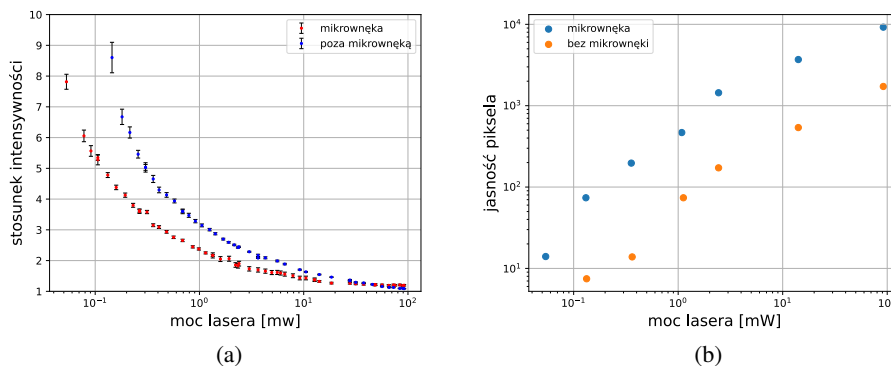
Tymoteusz Kędzior, Piotr Fita[†]

Wydział fizyki, Uniwersytet Warszawski, Ludwika Pasteura 5, 02-093 Warszawa

[†] email: piotr.fita@fuw.edu.pl

Upkonwersja jest nieliniowym zjawiskiem optycznym polegającym na sekwencyjnej absorpcji fotonów o niższej energii i emisji fotonów o wyższej energii. Głównym wyzwaniem związanym z praktycznym wykorzystaniem upkonwersji jest fakt, że zjawisko to wymaga dużej mocy pobudzenia, by mogło zachodzić wydajnie, jednak wykorzystywanie laserów dużej mocy na przykład w układach optoelektronicznych nie jest praktyczne. Tematem przedstawionej pracy jest propozycja możliwego rozwiązania tego problemu, jakim było umieszczenie upkonwertujących nanocząstek $\text{NaYF}_4:\text{Yb/Er}$ wewnątrz przestrajalnej mikrownęki optycznej oraz pobudzanie ich wiązką laserową o długości fali $\lambda = 973$ nm. Zbudowano układ doświadczalny, którego głównym elementem była przestrajalna mikrownęka planarna. Lustra wykorzystane przy konstrukcji mikrownęki posiadały wysoki współczynnik odbicia dla długości fali $\lambda = 973$ nm, dzięki czemu dla długości fali lasera pobudzającego możliwe było wystąpienie zjawiska rezonansu we wnętrzu. Jedno z lusterek było zamocowane na uchwycie posiadającym piezoelektryczne siłowniki, dzięki czemu możliwe było dokładne sterowanie długością wnęki tak, aby rezonans wystąpił dla długości fali pobudzającej. Kierując wiązkę lasera na mikrownękę oczekiwano, że intensywność promieniowania wewnątrz wnęki będzie większa niż poza nią.

Efekt wzmocnienia intensywności potwierdzono badając stosunki natężenia emisji upkonwertujących nanocząstek dla wybranych długości fali emisji. Zauważono, że stosunek dla wybranych długości fal zmienia się w zależności od zastosowanej mocy wiązki wzbudzającej. W celu potwierdzenia tego, że wewnątrz wnęki następuje wzmocnienie intensywności promieniowania zmierzono zależność stosunku intensywności emisji dla wybranych długości fali od mocy lasera wzbudzającego w dwóch przypadkach. W pierwszym zależność zmierzono umieszczając nanocząstki poza wnęką, natomiast w drugim nanocząstki były umieszczone we wnętrzu. Przykładowe zaobserwowane zależności przedstawiono na rys. 1 a). Dodatkowo potwierdzono wzmocnienie natężenia wiązki wzbudzającej wewnątrz wnęki rejestrując intensywność emisji w zależności od natężenia wzbudzenia za pomocą kamery fotograficznej i porównując jasność pikseli w przypadku, gdy nanocząstki były umieszczone we wnętrzu oraz poza nią rys. 1 b).



Rysunek 1: a) zależność stosunku intensywności emisji od mocy lasera wzbudzającego dla emisji na długościach fali 539,25 nm oraz 555,4 nm dla nanocząstek umieszczonych we wnętrzu oraz poza nią; b) zależność między jasnością pikseli zarejestrowaną na kamerze, a mocą lasera wzbudzającego, dla nanocząstek umieszczonych we wnętrzu oraz poza nią.

Badanie i optymalizacja możliwości przesyłu danych komunikacji laserowej FSO

K. Rosiński¹, L. Kmieciak^{1†}

¹AGH Skylink, Akademia Górniczo Hutnicza w Krakowie, al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

†email: lkmieciak@student.agh.edu.pl

Koło naukowe AGH Skylink zrzesza studentów zainteresowanych komunikacją i jej rozwojem w przestrzeni kosmicznej. Niniejsza prezentacja przedstawia postępy badań nad możliwościami przesyłu danych z wykorzystaniem technologii bezprzewodowej komunikacji optycznej. Celem interdyscyplinarnych prac członków koła jest opracowanie prototypów i dokładna analiza osiągnięć technologii FSO (free space optics).

W ramach projektu skonstruowano prosty układ nadajnika i odbiornika wykorzystujący modulację Włącz-Wyłącz (On-Off keying; OOK) jako medium do przesyłu danych w protokole UART i przeprowadzono analizę wydajności. Dodatkowo przeprowadzono kompleksowe badanie potencjału wykorzystania różnych rodzajów modulacji sygnałów cyfrowych, w tym PSK, DPSK, DQAM [1] i innych, w celu zwiększenia prędkości przesyłu danych. Uzyskane wyniki pozwalają na określenie możliwości wykorzystania FSO jako medium transmisyjnego dla sieci cyfrowych i komputerowych, oraz łączności satelitarnej.

Podczas prezentacji omówimy działanie prototypu, jego konstrukcje i osiągi, a także przedstawimy przegląd stanu wiedzy naukowej w zakresie modulacji sygnałów w bezprzewodowych sieciach optycznych [2-5]. Zaprezentujemy wyniki symulacji, projekt systemu o wyższej przepustowości danych i omówimy dalsze możliwości rozwoju technologii.

Literatura

- [1] M. R. Alam and S. Faruque, "Comparison of different modulation techniques for free space laser communication," 2015 IEEE International Conference on Electro/Information Technology (EIT), Dekalb, IL, USA, 2015, pp. 637-640, doi: 10.1109/EIT.2015.7293409.
- [2] Bibi S, Baig M, Qamar F, Shahzadi R. A comprehensive survey of free-space optical communication – modulation schemes, advantages, challenges and mitigations. *Journal of Optical Communications*. 2024;45(s1): s2373-s2385. doi: 10.1515/joc-2023-0265
- [3] R. Baiwa and P. Verma, "Performance Analysis of FSO System for Advanced Modulation Formats Under Different Weather Conditions," 2018 Second International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS), Madurai, India, 2018, pp. 1490-1495, doi: 10.1109/ICCONS.2018.8663090.
- [4] A. Bhowal and R. S. Kshetrimayum, "Advanced Optical Spatial Modulation Techniques for FSO Communication," in *IEEE Transactions on Communications*, vol. 69, no. 2, pp. 1163-1174, Feb. 2021, doi: 10.1109/TCOMM.2020.3035400.
- [5] Miglani, R., Charak, S., Kumar Arora, S., & Masud, M. (2018). A Review On FSO By Using Different Modulation Techniques. *International Journal of Engineering and Technology*, 7(3.8), 136-140. doi: 10.14419/ijet.v7i3.8.16848

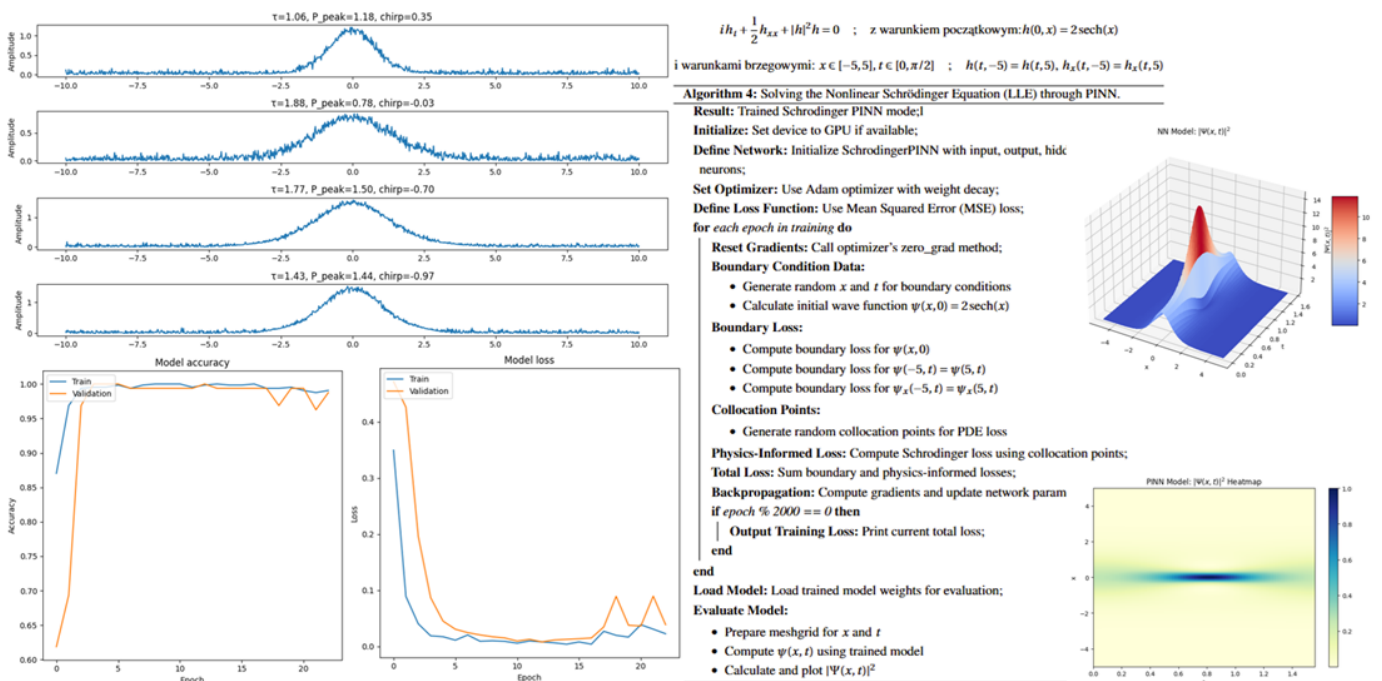
Klasyfikacja maszynowa solitonów jasnych w celu zwiększenia efektywności transmisji informacji kwantowej w protokole ślepych obliczeń kwantowych

Hubert Kołcz^{1 †}

¹ Wydział Fizyki, Politechnika Warszawska, Koszykowa 75, 00-662 Warszawa

† email: hubert.kolcz.dokt@pw.edu.pl

Bezpośrednią konsekwencją usunięcia szumu technicznego jest poprawa jakości sygnału. Ponieważ proces stabilizacji wymaga ciągłej adaptacji, kalibracja parametrów transmisji z wykorzystaniem metod uczenia maszynowego może okazać się niezbędna. Dynamikę mikrogrzebienia typowo modeluje się analitycznie za pomocą równania Lugiato-Lefevera, zakładając znajomość kluczowych parametrów lasera pompującego (moc pompy, polaryzacja) oraz wężki (współczynnik Q, dyspersja prędkości grupowej, współczynnik sprzężenia i efektywna nieliniowość). Przy ustalonej mocy pompy, formowanie grzebienia solitonowego jest w dużej mierze determinowane przez parametry wężki rezonansowej. Uzyskanie rozwiązania analitycznego zazwyczaj wymaga ręcznego wyodrębnienia tych wartości z liniowego widma transmisji. Proces ten wprowadza złożoność oraz nieuchronne błędy, szczególnie w przypadku wyższej dyspersji, krzyżowania się modów oraz współczynnika Q zależnego od długości fali. Co więcej, w przypadku wielomodowych wnek optycznych, takich jak rezonatory Fabry’ego-Perota, analityczne uchwycenie generacji grzebienia staje się trudniejsze ze względu na zwiększoną złożoność parametryczną. Dodatkową wadą tych symulacji są zmieniające się parametry sprzętowe w warunkach laboratoryjnych, które za każdym razem wymagają przeprogramowania algorytmu. Jednokrotne uruchomienie symulacji na komputerze osobistym może zająć nawet kilka godzin. To skłoniło do rozważenia metod wykorzystujących Physics-Informed Neural Networks, gdzie czas pojedynczego wywołania sieci – po jej wcześniejszym wytrenowaniu – ogranicza się do kilku minut. Mikrogrzebienie Kerra charakteryzują się koherentnie oscylującymi falami elektromagnetycznymi na wielu liniach spektralnych, z których każda zawiera miliony fotonów lub więcej. Dzięki zastosowaniu metod stabilizacji wykazują koherencję fazową między liniami spektralnymi, co skutkuje ich wysoką stabilnością. W rezultacie znajdują szerokie zastosowanie w metrologii, spektroskopii oraz inżynierii kwantowej. Szczególnym przypadkiem są jasne solitony, które dzięki swojej stabilności i odporności na zaburzenia stanowią obiecujące medium do przesyłania informacji kwantowej. Nawet przy osłabieniu mocy grzebienia poszczególne fotony zachowują swoją fazę spektralną oraz kształt impulsu czasowego, co czyni je odpowiednimi do wykorzystania w protokołach komunikacji kwantowej. W tym kontekście opracowano sieć neuronową służącą do klasyfikacji jasnych solitonów jako potencjalnych nośników informacji kwantowej w protokole BQC. Klasyfikator wykorzystuje właściwości impulsów w domenie częstotliwości – takie jak amplituda, faza, szerokość impulsu i jitter – aby ocenić ich zdolność do kodowania informacji kwantowej. Wynik tych badań przedstawia Rysunek 1.



Rysunek 1: Generowanie solitonów za pomocą syntetycznej dystrybucji Poissona i QPINNs oraz ich klasyfikacja.

Optyczna tomografia procesów kwantowych w ciepłych parach atomowych

M. Kopciuch^{1 †}, Y. Sun², A. Dezhang Fard^{2,3}, A. Miranowicz¹, S. Pustelny²

¹ Instytut Spintroniki i Informatyki Kwantowej, Wydział Fizyki i Astronomii, Uniwersytet Adama Mickiewicza, 61-614 Poznań

² Instytut Fizyki Mariana Smoluchowskiego, Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej, Uniwersytet Jagielloński,
30-348 Kraków

³ Szkoła Doktorska Nauk Ścisłych i Przyrodniczych, Uniwersytet Jagielloński, 30-348 Kraków

†email: marek.kopciuch@amu.edu.pl

Tomografia procesów kwantowych (*ang. Quantum Process Tomography*, QPT) stanowi jedno z kluczowych narzędzi służących do pełnej charakterystyki ewolucji układów kwantowych. Umożliwia nie tylko rewidowanie działania zadanej operacji kwantowej (np. bramki kwantowej), lecz także identyfikację mechanizmów relaksacji oraz struktury Hamiltonianu opisującego badany system. W mojej pracy przedstawiam realizację QPT w makroskopowej chmurze atomów rubidu (ok. 10^9 atomów) w temperaturze pokojowej.

Zastosowana metoda rekonstrukcji procesu opiera się na tomografii stanów kwantowych (*ang. Quantum State Tomography*, QST), realizowanej poprzez pomiar liniowego efektu Faradaya – śledząc skręcenie płaszczyzny polaryzacji wiązki światła próbkującego propagującego przez dany ośrodek [1, 2, 3]. W trakcie wystąpienia zaprezentuję implementację pełnej procedury QPT w układzie qutritu opartym na stanach podstawowych rubidu 87. Przedstawię, w jaki sposób ewolucja wybranych stanów początkowych umożliwia estymację procesów zachodzących w parach atomowych na przykładzie prostych bramek kwantowych. Zaprezentuję również metodę rekonstrukcji generatorów badanej ewolucji — zarówno niezależnych od czasu generatorów dysypacji, jak i Hamiltonianów oddziaływania z polami resztkowymi oraz zależnych od czasu Hamiltonianów sterujących ewolucją chmury atomowej.

Literatura

[1] M. Kopciuch, M. Smolis, A. Miranowicz, S. Pustelny, *Phys. Rev. A* **109**, 0324029 (2024).

[2] M. Piotrak, M. Kopciuch, A.D. Fard, M. Smolis, S. Pustelny, K. Korzekwa, *Quantum* **8**, 1459 (2024).

[3] M. Kopciuch, S. Pustelny, *Phys. Rev. A* **106**, 022406 (2022).

Prostowanie optyczne w nieliniowym kryształ MBI pobudzonym impulsami o telekomunikacyjnych długościach fali

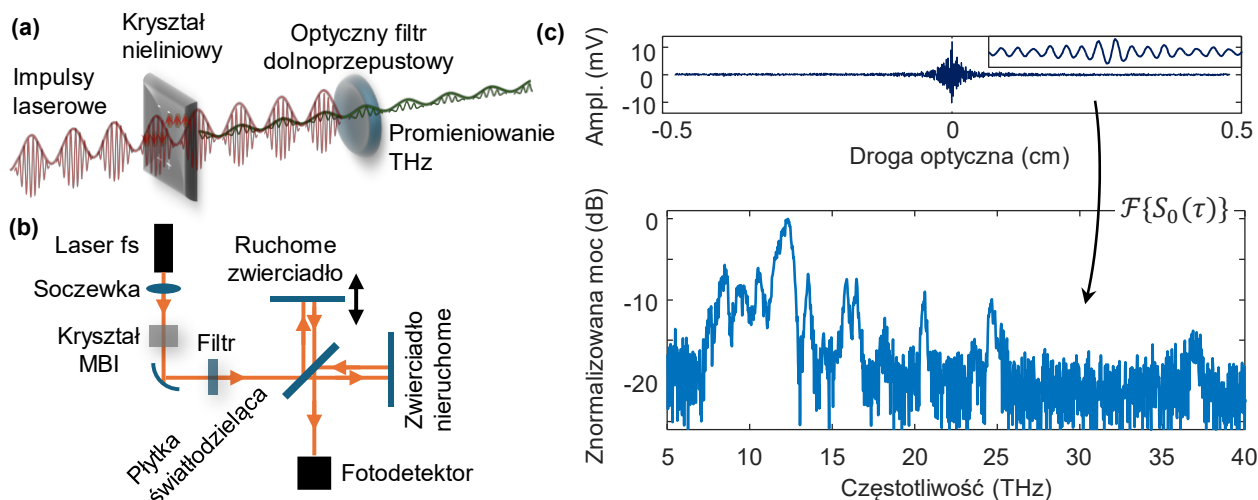
A. M. Kotulska¹, J. Mnich¹, W. Zhang², X. Zhang², Y. Wu², J. Sotor¹, Ł. A. Sterczewski^{1†}

¹Grupa Elektroniki Laserowej i Światłowodowej, Wydział Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów, Politechnika Wrocławska, Wybrzeże Wyspińskiego 27, 50-370 Wrocław

²State Key Laboratory of Crystal Materials, Tianjin Key Laboratory of Functional Crystal Materials, Institute of Functional Crystals, Tianjin University of Technology Tianjin 300384, China

†email: lukasz.sterczewski@pwr.edu.pl

Jedną z metod wytwarzania promieniowania z zakresu terahercowego (1–30 THz) jest pobudzenie medium o nieliniowej polaryzowalności (Rys. 1a) [1] przy pomocy ultrakrótkich impulsów laserowych. Szerokopasmowe promieniowanie wytwarzane w ten sposób ma duże znaczenie praktyczne, gdyż stosuje się je do optycznej identyfikacji minerałów, farmaceutyków i substancji psychoaktywnych. Chociaż technologicznie zakres 1–5 THz jest względnie dojrzały i pokryty przez półprzewodnikowe anteny fotoprzewodzące, wyższe częstotliwości (>6 THz) obejmujące unikalne linie absorpcyjne ciał stałych i gazów, sprawniej wytwarzane są przez nieliniowe kryształy organiczne [1]. Jednym z nich jest niedawno zaproponowany materiał MBI z rodziny jodków benzoidolu ($C_{24}H_{24}NOI$) [2], którego nieliniowe właściwości emisyjne w zakresie 2–20 THz zbadano w układzie dwóch przestrajalnych laserów o pracy quasi-ciągłej. Nie jest jednak pewne, jak takie medium odpowiada na pobudzenie impulsowe w procesie prostowania optycznego, gdzie istotną rolę pełnią procesy dynamiki molekularnej w skali femtosekundowej, w tym ramanowskie. By odpowiedzieć na to pytanie, oświetliliśmy kryształ MBI skupionym laserem o telekomunikacyjnej długości fali (1,5 μm) wytwarzającym 24 fs impulsy z repetycją 50 MHz. Emitowane przez kryształ promieniowanie THz w zakresie 6–40 THz zostało zmierzone spektrometrem Fouriera zoptymalizowanym na zakres średniej i dalekiej podczerwieni (Rys. 1b). Obserwujemy quasi-dyskretne widmo, z prominentnym pikiem emisji w okolicach 12 THz (25 μm). Rejon ten jest szczególnie istotny dla zastosowań geologicznych i mineralogicznych, a w szczególności do identyfikacji pochodnych chalkopirytu ($CuFeS_2$) [3]. W dodatku do dominującej częstotliwości (Rys. 1c), emisja pokrywa nieregularnie zakres 6–25 THz (50–12 μm).



Rys. 1: (a) Prostowanie optyczne w kryształ nieliniowym. (b). Spektrometr fourierowski do pomiaru widma THz. (c). Interferogram i widmo THz otrzymane przy pomocy nieliniowego kryształu MBI pobudzonym laserem fs.

Przyszłe badania skupią się na badaniu dynamiki emisji THz technikami czasowo rozdzielczymi oraz detekcji promieniowania z wykorzystaniem liniowego efektu Pockelsa w kryształach.

Podziękowania i źródła finansowania

A. Kotulska, J. Mnich, oraz Ł. A. Sterczewski potwierdzają finansowanie przez Unię Europejską (ERC Starting Grant, TeraERC, 101117433). Wyrażone poglądy i opinie są jednak wyłącznie poglądami autorów i niekoniecznie odzwierciedlają poglądy Unii Europejskiej lub Agencji Wykonawczej Europejskiej Rady ds. Ani Unia Europejska, ani organ przyznający grant nie ponoszą za nie odpowiedzialności. Ta praca jest wspierana przez wykorzystanie infrastruktury Narodowego Laboratorium Fotoniki i Technologii Kwantowych (NPLQT), która jest finansowana z Funduszy Europejskich w ramach Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój.

Literatura

- [1] X. Zhang, A. Shkurinov, Y. Zhang, *Nature Photonics* **11**, 16–18 (2017).
- [2] W. Zhang, Z. Wang, X. Zhang, Y. Wang, D. Xu, Z. Hu, J. Yao, Y. Wu, *Crystal Growth & Design* **22**, 5, 3311–3318 (2022).
- [3] S. Tippireddy, F. Azough, Vikram, A. Bhui, P. Chater, D. Kepaptsoglou, Q. Ramasse, R. Freer, R. Grau-Crespo, K. Biswas, P. Vaqueiro, A. V. Powell, *Journal of Materials Chemistry A* **10**, 23874–23885 (2022).

Monitorowanie hemodynamiki w siatkówce myszy za pomocą ultraszybkiej wolumetrycznej czasoprzestrzennej optycznej tomografii koherentnej (STOC-T).

Wiktor Kulesza^{a,b}, Maciej Wielgo^{a,b}, Piotr Węgrzyn^{a,b,c}, Sławomir Tomczewski^{a,b}, Katarzyna Kordecka^{a,b}, Anna Galińska^{a,b}, Bartłomiej Balamut^{a,b}, Egidijus Auksorius^d, Andrzej Foik^{a,b}, Maciej Wojtkowski^{a,b}, Dawid Borycki^{a,b}, Andrea Curatolo^{a,b, †}

^aInternational Centre for Translational Eye Research, Skierniewicka 10a, Warsaw, Poland

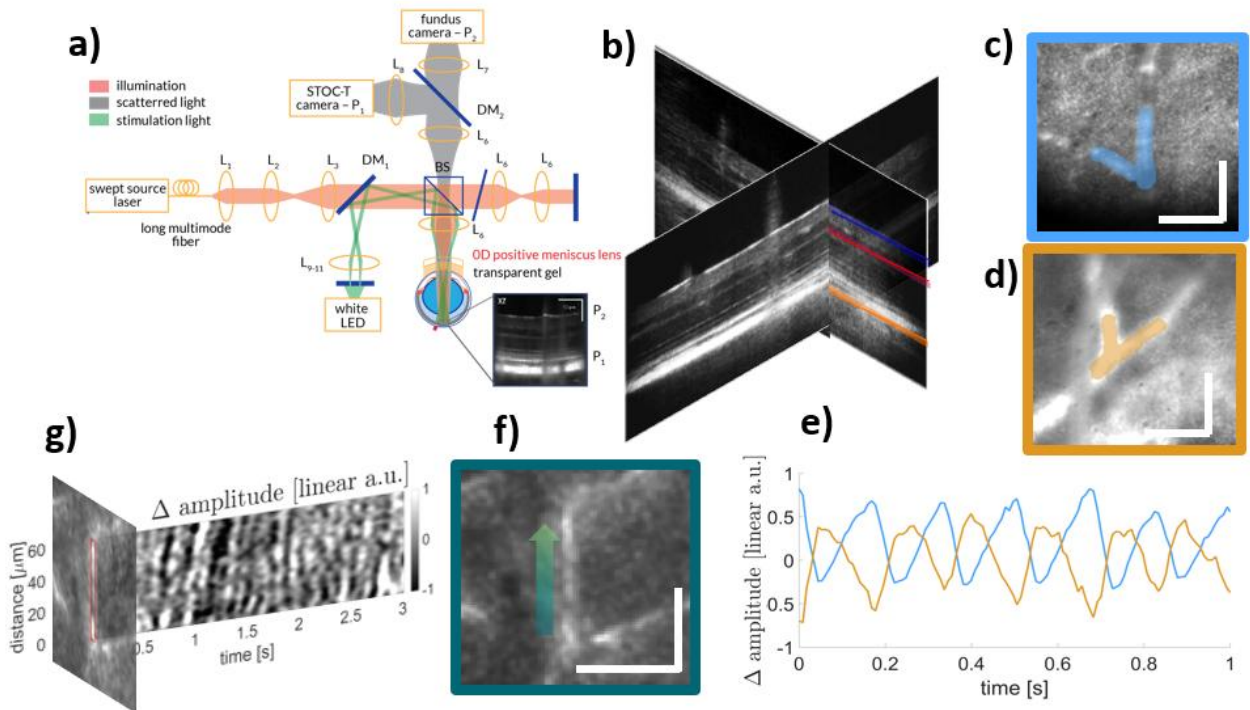
^bInstitute of Physical Chemistry PAS, Kasprzaka 44/52, Warsaw, Poland

^cFaculty of Physics, University of Warsaw, Pasteura 5, Warsaw, Poland

^dCenter for Physical Sciences and Technology (FTMC), Saulėtekio al. 3, Vilnius, Lithuania

†email: wkulesza@ichf.edu.pl

Retinopatia cukrzycowa i diagnostyka jaskry wymagają lepszych narzędzi, które umożliwią dokładne, nieinwazyjne monitorowanie *in vivo* oraz analizę hemodynamiki u pacjentów [1]. Niniejsza praca opisuje wykorzystanie systemu optycznego opartego na odmianie pełno-polowej tomografii optycznej w domenie Fouriera FD-FF-OCT — redukującej wpływ szumu (przesłuchów), umożliwiając analizę głębszych warstw oka myszy [2]. System OCT z detekcją fazy, w połączeniu z ultraszybkim pozyskiwaniem danych, umożliwia jednoczesne przetwarzanie sygnału intensywności i fazy. Obie metody pozwalają na wyodrębnienie parametrów hemodynamicznych, w tym tętna oraz propagacji fali tętna krwi, w różnych warstwach oka myszy albinosów typu dzikiego B6.



Rys. 1. a) Schemat optyczny systemu STOC-T dla myszy z funkcją regulacji płaszczyzny ogniskowania. b) Uzyskana objętość OCT z wybranymi, kolorystycznie zakodowanymi warstwami do analizy hemodynamiki. c–d, f) Obraz *en-face* wybranego obszaru (ROI) z warstwy włókien nerwowych siatkówki (NFL), warstwy nacyniówkowej oraz warstwy spłotowatej zewnętrznej (OPL). e) Zmiana amplitudy sygnału STOC-T w czasie, analizowana na przykładach warstw NFL c) oraz nacyniówki d). g) Widok zależności amplitudy od czasu w przekroju naczynia.

Literatura

- [1] I. Labounková, R. Labounek, R. Kolář, R. P. Tornow, C. F. Babbs, C. M. McClelland, B. R. Miller, and I. Nestražil, "Heart rate and age modulate retinal pulsatile patterns," *Communications Biology* **5**, 582 (2022).
- [2] E. Auksorius, D. Borycki, P. Węgrzyn, B. L. Sikorski, K. Lizewski, I. Zickiene, M. Rapolu, K. Adomavicius, S. Tomczewski, and M. Wojtkowski, "Spatio-temporal optical coherence tomography provides full thickness imaging of the chorioretinal complex," *iScience* **25**, 105513 (2022).]

Wpływ orientacji molekuł nematycznych ciekłych kryształów na nieliniową propagację wiązek Airy

M. Kwaśny[†], D.F. Hertzsch, A. B. Mazur, U. A. Laudyn

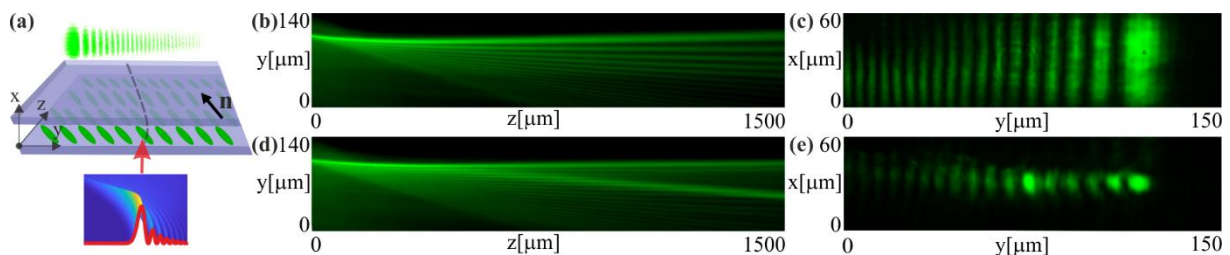
Wydział Fizyki, Politechnika Warszawska, Koszykowa 75, 00-662 Warszawa

[†]email: michal.kwasny@pw.edu.pl

Wiązki Airy reprezentują pierwszą eksperymentalnie zaobserwowaną klasę samoprzyspieszających fal optycznych [1], których ich istnienie zostało przewidziane na gruncie mechaniki kwantowej [2]. Ulegają one poszerzaniu dyfrakcyjnemu w trakcie propagacji, zachowując swój charakterystyczny rozkład natężenia na odległościach rzędu kilkunastu odległości Rayleigh'a, dla parametru związanego z szerokością odpowiadającej wiązce gaussowskiej.

W ramach przeprowadzonych badań eksperymentalnych zostaną zaprezentowane wyniki dotyczące nieliniowej propagacji jednowymiarowych wiązek Airy z wykorzystaniem nieliniowości reorientacyjnej, która jest charakterystycznym mechanizmem nieliniowości dla nematycznych ciekłych kryształów (NCK). Badania zostały przeprowadzone w komórkach ciekłokrystalicznych wypełnionych NCK 903, charakteryzującym się wartością dwójłomności $\Delta n \cong 0.08$ dla fali o długości $\lambda = 532\text{nm}$, zgodnie z konfiguracją przedstawioną schematycznie na rysunku 1(a). W przypadku liniowym, dla mocy optycznej $P = 1\text{mW}$, niewywołującej efektów nieliniowych, wiązka Airy propaguje się wzdłuż parabolicznej trajektorii, zachowując charakterystyczny rozkład natężenia, zarejestrowany w płaszczyźnie yz – rysunek (1b), jak również w płaszczyźnie xy , będącej płaszczyzną wyjściową komórki ciekłokrystalicznej – rysunek (1c). W przypadku większych natężeń wiązki, wskutek nieliniowej reorientacji molekuł, następuje ogniskowanie wiązki oraz generacja solitonu przestrzennego (ang. *off-shooting soliton*, OSS) – przedstawione na rysunkach 1(d,e) dla mocy optycznej $P = 20\text{mW}$. Na podstawie przeprowadzonej analizy wykazane zostało, że kierunek propagacji OSS jest w bardzo silnym stopniu zależny od mocy optycznej [3]. Ponadto, na zmianę kierunku propagacji solitonu przestrzennego ma wpływ również początkowego kierunku uporządkowania molekuł NCK. Obydwa zjawiska mogą się wzajemnie wzmacniać bądź kompensować.

Przeprowadzone badania eksperymentalne mają na celu lepsze zrozumienie zachowania wiązki Airy'ego w nieliniowych ośrodkach optycznych, których głównym mechanizmem nieliniowości jest zjawisko reorientacji molekuł wywołane polem optycznym o dużym natężeniu, oraz możliwości wykorzystania wiązek Airy w zaawansowanych strukturach fonicznych.



Rysunek 1: Propagacja wiązki Airy w nematycznym ciekłym kryształach: (a) schematycznie przedstawiona konfiguracja molekuł CK w komórce ciekłokrystalicznej, wraz z zaznaczeniem miejsca wprowadzenia wiązki; (b,c) propagacja wiązki Airy w przypadku liniowym ($P = 1\text{mW}$) oraz (d,e) propagacja wiązki solitonowej dla mocy wiązki $P = 20\text{mW}$ – widok w płaszczyźnie (b,d) yz oraz (c,e) xz , (dla $z = 1500\mu\text{m}$).

Podziękowania i źródła finansowania

Badania były finansowane przez (POB Technologie foniczne) ze środków Politechniki Warszawskiej w ramach Programu Inicjatywa Doskonałości – Uczelnia Badawcza (IDUB).

Literatura

- [1] G. A. Siviloglou, J. Broky, A. Dogariu, D. N. Christodoulides, *Phys. Rev. Lett.* **99**, 213901 (2007).
- [2] M. V. Berry, N. L. Balazs, *Am. J. Phys.* **47**, 264 (1979).
- [3] M. Kwaśny, D. F. Hertzsch, U. A. Laudyn, *Opt. Lett.* **49**, 5905-5908 (2024).

Układ trzech kubitów optycznych i łamanie nierówności Bella-CHSH

W. Leoński¹, J. K. Kalaga¹, J. Perina Jr.²

¹Instytut Fizyki, Uniwersytet Zielonogórski, Prof. Z. Szafrana 4a, 65-516 Zielona Góra

²Společná laborator optiky, Univerzita Palackého v Olomouci, 17. listopadu 50A, 772 07 Olomuniec, Czechy

†email: w.leonski@if.uz.zgora.pl

Zdolność do tworzenia i manipulowania stanami kwantowymi ma kluczowe znaczenie dla rozwoju kwantowej teorii informacji i jej praktycznych zastosowań. W tym kontekście nielocalne stany Bella odgrywają wyjątkową rolę, ponieważ są szeroko stosowane w komunikacji kwantowej, kryptografii kwantowej i obliczeniach kwantowych.

W tym komunikacie pracy analizujemy dwie rodziny stanów w układzie trzech oddziałujących kubitów optycznych w kontekście naruszenia nierówności Bella-CHSH. W tym celu wykorzystujemy wielkość wprowadzoną przez Horodeckiego et al. [1, 2] do badania łamania nierówności Bella-CHSH w podsystemach dwu-kubitowych. Ustalamy wzajemne relacje między parametrem nielokalności Bella a miarami splątania, takimi jak współbieżność [3, 4] i ujemność [5, 6]. Ponadto badamy wzajemne powiązania między parametrami nielokalności dla układów trój-kubitowych. W szczególności, wyprowadzamy formuły definiujące relacje między dwu-modowymi parametrami nielokalności i pokazujemy, że taki układ może generować zarówno optyczne kwantowe stany dwu-kubitowe, które naruszają nierówność Bella-CHSH jak i takie, które jej nie naruszają. Ponadto badamy powiązania między dwudzielną ujemnością, współbieżnością i parametrem nielokalności. Na koniec określamy granice tych wielkości gdy mamy do czynienia zarówno ze stanami, które zarówno naruszają, jak i nie naruszają nierówności Bella-CHSH.

Podziękowania i źródła finansowania

Autorzy dziękują grantowi Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego „Regionalna Inicjatywa Doskonałości” w latach 2019-2024, nr grantu RID/SP/0050/2024/1.

Literatura

- [1] R. Horodecki, P. Horodecki, and M. Horodecki, *Physics Letters A*, **200**, 340 (1995).
- [2] R. Horodecki, *Physics Letters A*, **210** (1996).
- [3] S. Hill and W. K. Wootters, *Phys. Rev. Lett.*, **78** (1997).
- [4] W. K. Wootters, *Phys. Rev. Lett.*, **80** (1998).
- [5] A. Peres, *Phys. Rev. Lett.*, **77** (1996).
- [6] M. Horodecki, P. Horodecki, and R. Horodecki, *Phys. Lett. A*, **223** (1996).

Pomiary wiązki o orbitalnym momencie pędu w reżimie niskiej liczby fotonów za pomocą kamery TimePix3

B. Ghosh¹, J. Lewandowski¹, B. Gorzkowski¹, A. Nomerotski^{2,3}, R. Łapkiewicz^{1, †}

¹ Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski, Pasteura 5, 02-093 Warszawa

² Faculty of Nuclear Sciences and Physical Engineering, Czech Technical University in Prague, 115 19, Republika Czeska

³ Department of Electrical and Computer Engineering, Florida International University, Miami FL 33199, USA

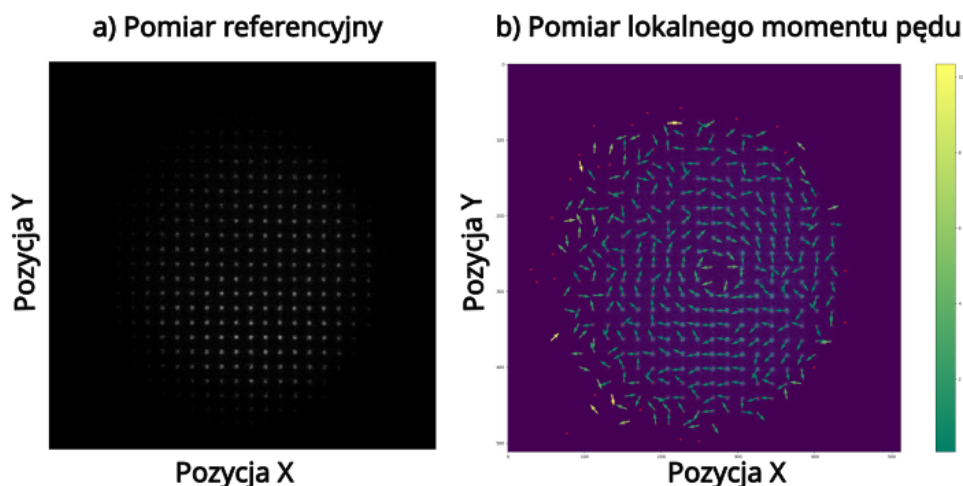
†email: radek.lapkiewicz@fuw.edu.pl

Wiązki światła niosące orbitalny moment pędu (OAM) charakteryzują się helikalnym frontem falowym. W ostatnich latach zaczęły powstawać źródła pojedynczych fotonów, które produkują fotony o niezerowy OAM [1]. W tej pracy przedstawiona jest metoda pomiaru frontu falowego wiązki pojedynczych fotonów. W tym celu zostało wykorzystane źródło obwieszczanych fotonów z spontanicznej parametrycznej konwersji w dół (SPDC) oraz kamera TimePix3 wraz z wzmacniaczem obrazu. Do nadania orbitalnego momentu pędu wiązce, wykorzystano przestrzenny modulator fazy (SLM), który zmieniał front falowy wiązki na wiązkę Gaussowską o helikalnej fazie. Do pomiaru frontu falowego użyto układu Shacka-Hartmanna. [2]

Wiązkę pojedynczych fotonów o częstości koincydencji na poziomie 3500 ± 500 Hz wysłano do układu, gdzie za pomocą SLM nadawano wiązce różne helikalne fazy. Lokalny moment pędu jest mierzony za pomocą macierzy mikrosoczewek, które próbują wiązkę. Na podstawie pomiarów referencji (pomiar wiązki bez nadanej helikalnej fazy) oraz pomiaru wiązki z orbitalnym momentem pędu, można wyznaczyć przesunięcia przestrzenne ognisk z mikrosoczewek, które odpowiadają za lokalny wektor falowy (który wyznacza lokalny OAM).

Dzięki wykorzystaniu kamery TimePix3, wykonano filtrowanie szumu na podstawie korelacji między sygnałem na chipie kamery, a sygnałem elektrycznym powstałym z pomiaru fotodiodą lawinową (APD) jednego z dwóch fotonów generowanych w procesie SPDC, który obwieszczał przybycie drugiego fotonu na chip kamery. W przypadku wcześniejszej kamery IsCMOS, pomiar wykonywany przy różnych czasach akwizycji – nawet do 72 godzin – nie pozwolił na wystarczające odróżnienie szumu od sygnału, uniemożliwiając wyznaczenie przesunięć ognisk mikrosoczewek między referencją a wiązką niosącą OAM, podczas gdy udany pomiar orbitalnego momentu pędu z kamerą TimePix3 trwał zaledwie 10 minut.

Referencja oraz zaobresowany orbitalny moment pędu jest przedstawiony na rysunku 1.



Rysunek 1: a) Pomiar wiązki pojedynczych fotonów o zerowym orbitalnym momencie pędu (referencja) po przejściu przez macierz mikrosoczewek b) Wyznaczone przesunięcia między referencją, a pomiarem wiązki pojedynczych fotonów z orbitalnym momentem pędu, pęd krąży wokół osi OAM.

Literatura

[1] Cuo Wu et al., *Science Advances* **8**, 2 (2022).

[2] B. Ghosh et al., *Optica* **10**, 1217-1222 (2023).

Spektroskopowe pomiary temperatury i koncentracji gazu z natężeń linii tlenu węgla

D. Lisak^{1,†}, V. D'Agostino^{1,2}, S. Wójtewicz¹, Y.-R. Xu^{1,3}, G. Kowzan¹, A. Cygan¹, M. Gibas⁴, P. Wcisło¹, S.-M. Hu³, R. Ciuryło¹, P. Masłowski¹, K. Bielska¹

¹ Instytut Fizyki, Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki, Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu, ul. Grudziądzka 5, 87-100 Toruń

² Department of Mathematics and Physics, Università degli Studi della Campania "Luigi Vanvitelli", Caserta, 81100, Italy

³ Hefei National Research Center of Physical Sciences at the Microscale, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

⁴ Główny Urząd Miar, Zakład Fizykochemii i Środowiska, Świętokrzyski Kampus Laboratoryjny Głównego Urzędu Miar
†email: dlistak@umk.pl

Po ustaleniu wartości stałej Boltzmana, k , w układzie jednostek SI, dokładne metody stosowane wcześniej do pomiaru k z energii cieplnej, kT , mogą być wykorzystane do pierwotnej termometrii. Dwie optyczne metody spektroskopowe, termometria dopplerowska (DBT) i termometria stosunku natężeń linii rowibracyjnych (LRT), są intensywnie rozwijane. Podczas gdy DBT uzyskała do tej pory najwyższą dokładność, LRT może być stosowana w znacznie większym zakresie ciśnień gazu.

Przedstawiamy pomiary temperatury, bazujące na LRT, wykorzystujące pasmo (3-0) cząsteczki CO i spektroskopię we wnęce optycznej o wysokiej finezji, w której obie osie widma są otrzymywane z obserwowanych częstotliwości rezonansów wnęki. Ta spektroskopia dyspersji modów wnęki (CMDs) [1,2] w pełni łączy widmo z pierwotnym wzorcem częstotliwości. Używając LRT z natężeniami linii obliczonymi *ab initio* [3], uzyskaliśmy niepewność temperatury 296 K wynoszącą 24 mK [4].

Spektroskopowa temperatura i absolutne natężenia linii umożliwiły zademonstrowanie w pełni optycznego, bezkontaktowego pomiaru koncentracji cząsteczek gazu z niepewnościami na poziomie promila przy ciśnieniach gazu od 50 Pa do 20 kPa.

Wykorzystując szerokopasmową spektroskopię pasma (1-0) cząsteczki CO w zakresie średniej podczerwieni, bazującą na grzebieniu częstotliwości optycznej i spektrometrze fourierowskim (FTS) o rozdzielczości subnominalnej [5], zademonstrowaliśmy pomiar temperatury w zakresie 290 – 333 K z niepewnością 0,1 K.

Dyskutujemy również obecne ograniczenia i perspektywy poprawy dokładności metod spektroskopii [6] jak i danych referencyjnych [7] dla optycznej termometrii i pomiaru ilości substancji.

Podziękowania i źródła finansowania

Projekt dofinansowany ze środków budżetu państwa, przyznanych przez Ministra Edukacji i Nauki w ramach programu Polska Metrologia II, projekt nr PM-II/SP/0011/2024/02. Badania dofinansowywane przez: Narodowe Centrum Nauki, projekty nr 2023/51/B/ST2/00427 i 2021/42/E/ST2/00152; projekt Europejskiego Partnerstwa w zakresie Metrologii „22IEM03 PriSpecTemp”.

Literatura

- [1] A. Cygan, P. Wcisło, S. Wójtewicz, P. Masłowski, J. T. Hodges, R. Ciuryło, D. Lisak, *Opt. Express* **23**, 14472 (2015).
- [2] A. Cygan, P. Wcisło, S. Wójtewicz, G. Kowzan, M. Zaborowski, D. Charczun, K. Bielska, R. S. Trawiński, R. Ciuryło, P. Masłowski, D. Lisak, *Opt. Express* **27**, 21810 (2019).
- [3] K. Bielska, A. A. Kyuberis, Z. D. Reed, G. Li, A. Cygan, R. Ciuryło, E. M. Adkins, L. Lodi, N. F. Zobov, V. Ebert, D. Lisak, J. T. Hodges, J. Tennyson, and O. L. Polyansky, *Phys. Rev. Lett.* **129**, 043002 (2022).
- [4] D. Lisak, V. D'Agostino, S. Wójtewicz, A. Cygan, M. Gibas, P. Wcisło, R. Ciuryło, K. Bielska, arXiv:2502.17660 [physics.optics] (2025).
- [5] A. Nishiyama, G. Kowzan, D. Charczun, R. Ciuryło, N. Coluccelli, P. Masłowski, *Measurement* **227**, 114273 (2024).
- [6] A. Cygan, S. Wójtewicz, H. Józwiak, G. Kowzan, N. Stolarczyk, K. Bielska, P. Wcisło, R. Ciuryło, D. Lisak, *Sci. Adv.* **11**, eadp8556 (2025).
- [7] J. T. Hodges, K. Bielska, M. Birk, R. Ciuryło, A. Cygan, V. D'Agostino, R. Guo, G. Li, J. S. Lim, D. Lisak, Z. Reed, G. Wagner, S. Wójtewicz, *Metrologia*, **62**, 08006 (2025).

Miniaturowy spektrometr na zakres mid-IR do zastosowań w systemach detekcji gazów

**F. Łabaj^{1,2†}, J. Kalwas¹, S. Stopiński^{1,2}, K. Anders^{1,2},
R. Ciechański¹, K. Machałowski¹, R. Piramidowicz^{1,2}**

¹VIGO Photonics S.A., ul. Poznańska 129/133, 05-850 Ożarów Mazowiecki, Polska

²Politechnika Warszawska, Instytut Mikroelektroniki i Optoelektroniki, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, Polska

†email: flabaj@vigo.com.pl

Miniaturyzacja spektrometrów, polegająca m.in. na znaczącej redukcji ich rozmiarów i masy, jak również zapotrzebowania energetycznego, przy zachowaniu podstawowych parametrów funkcjonalnych, takich jak czułość i specyficzności detekcji, jest kluczowa dla rozwoju sieci czujnikowych, urządzeń ubieralnych (*wearables*) czy autonomicznych platform mobilnych. Wykorzystanie spektrometrii w zakresie średniej podczerwieni (mid-IR, 2–20 μm [1]), w szczególności w tzw. zakresie daktyloskopowym, pozwala na szybkie i dokładne pomiary *in-situ*, bez konieczności dodatkowego transportu i przygotowywania próbek do analizy laboratoryjnej. Tego typu systemy czujników fotonicznych mogą zostać rozmieszczone w formie sieci pokrywającej duże obszary, pozwalając np. na szybką reakcję w przypadku wykrycia zanieczyszczeń środowiska. Realizacja systemów spektrometrycznych w tym zakresie spektralnym jest problematyczna w porównaniu do zakresów ultrafioletu (UV), widzialnego (VIS) czy bliskiej podczerwieni (NIR), z uwagi na konieczność wykorzystywania niestandardowych materiałów optycznych oraz komponentów optoelektronicznych.

W niniejszej pracy zostały przedstawione wyniki prac badawczych nad opracowaniem miniaturowego, przenośnego układu spektrometrycznego pracującego w zakresie 3–12 μm , służącego jako element składowy systemu detekcji gazów. Sercem układu jest spektralnie selektywny fotoniczny układ scalony (*photonic integrated circuit* - PIC), bazujący na platformie Ge-on-Si ([2]). Falowody wyjściowe fotonicznego układu scalonego są sprzęgnięte krawędziowo z linijką detektorów. W ramach prac przetestowane zostały dwa rodzaje odczytu, chłodzona 16-kanałowa linijka supersieciowych detektorów kaskadowych InAs/InAsSb [3] i niechłodzona 32-kanałowa linijka detektorów HgCdTe [4]. Sygnały z linijek były przetwarzane i zbierane za pomocą dedykowanego układu elektronicznego, składającego się z dwustopniowego wzmacniacza 16/32-kanałowego i multipleksowanego przetwornika analogowo-cyfrowego. Układ pozwala na detekcję obecności i stężenia badanego gazu na podstawie zmian sygnału na poszczególnych detektorach.

Układ PIC został zaprojektowany w dwóch konfiguracjach, w obu przypadkach zawierających (*arrayed waveguide grating*), pozwalających na pracę w dwóch zakresach spektralnych, obejmujących pasma absorpcyjne analizowanych gazów, tzn. 3–5 μm i 7–12 μm , dla gazów testowych - metanu (ok. 3,3 μm), formaldehydu (ok. 3,57 μm oraz acetaldehydu (ok. 9 μm).

Finansowanie

Prace zostały sfinansowane przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w projektach MIRPIC (TECHMATSTRATEG-III/0026/2019-00) i HyperPIC (FENG.02.10-IP.01-0005/23, IPCEI ME/CT).

Literatura

- [1] Smith JG (2011). Chapter 13 Mass Spectrometry and Infrared Spectroscopy in Organic chemistry (3rd ed.); Hodge T, Nemmers D, Klein J Eds.; New York, NY: McGraw-Hill. pp. 463–488
- [2] Photonic Integrated Circuits technologies for MIDIR (MIRPIC) <https://vigophotonics.com/about-us/rd-projects/techmatstrateg/>
- [3] J. Jureńczyk, Ł. Kubiszyn, K. Michalczewski, and J. Piotrowski, Commercialization readiness of HOT LWIR detectors based on InAs/InAs_{1-x}Sb_x T2SL at VIGO System SA in Physics and Simulation of Optoelectronic Devices XXIX, vol. 11680 (SPIE, 2021), pp. 202–210.
- [4] Multielement detectors and modules – MCT / InAsSb <https://vigophotonics.com/products/product-development/multielements-devices/>

Sensor frontu falowego z wykorzystaniem nieciągłości fazowych

M. Łukowicz^{†1}, A. Korzeniewska¹, K. Kalinowski¹, R. Porrás-Aguilar², M. Szatkowski¹

¹ Katedra Optyki i Fotoniki, Wydział Podstawowych Problemów Techniki, Politechnika Wroclawska, Wybrzeże Stanisława Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

² The University of North Carolina at Charlotte, Department of Physics and Optical Science, Charlotte, North Carolina, 28223, USA

[†]email: [magdalena.lukowicz@pwr.edu.pl](mailto:magdalenalukowicz@pwr.edu.pl)

W metrologii optycznej wyróżniamy dwa rodzaje urządzeń służących do pomiaru frontu falowego wiązki. Pierwsze z nich oparte są na pomiarze interferometrycznym [1], natomiast drugie analizują kąt nachylenia padającej fali. Jednym z najbardziej znanych przykładów drugiej grupy jest czujnik Shack'a-Hartmann'a [2], który wykorzystuje macierz mikrosoczewek do rekonstrukcji kształtu czoła fali poprzez analizę przemieszczenia każdego zogniskowanego poprzez mikrosoczewkę punktu, względem jego pozycji referencyjnej. Istotnym elementem tej metody jest precyzyjna lokalizacja zogniskowanych plamek, ponieważ wszelkie niedokładności mogą prowadzić do powstawania błędów fazowych.

W niniejszej pracy proponujemy zmianę geometrii wiązki próbującej front falowy na geometrię Laguerre'a-Gauss'a [3] bazując na architekturze sensora Shack'a-Hartmann'a. Wiązki Laguerre'a-Gauss'a zawierają nieciągłości fazowe, które wykazują wysoką wrażliwość na zaburzenia fazowe, co więcej stwarzają nowe możliwości lokalizacyjne analizujące położenie punktów nieciągłości fazowych.

Zaproponowana przez nas nowa metoda lokalizacyjna, wyznacza położenie tego punktu, korzystając z informacji a priori o istnieniu nieciągłości i tworząc pseudo-zespoloną amplitudę [4].

W pracy porównujemy skuteczność detekcji pozycji wiązki dla klasycznej wiązki gaussowskiej, lokalizowanej metodą ważonego środka ciężkości [5] oraz wiązki Laguerre'a-Gauss'a, której lokalizacja opiera się na zaproponowanej metodzie. Przeprowadzamy symulacje numeryczne, jak i weryfikację eksperymentalną, analizując skuteczność sensora w obecności kontrolowanego szumu śrutowego.

Podziękowania i źródła finansowania

Badania zostały sfinansowane ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju, 0230/L-13/2022.

Literatura

- [1] K. L. Baker, "Interferometric wavefront sensors for high contrast imaging," *Opt. Express* 14, 10970-10975 (2006).
- [2] A. Aghajani, F. D. Kashani, and M. Yousefi, "Laboratory study of aberration calculation in underwater turbulence using Shack-Hartmann wavefront sensor and Zernike polynomials," *Opt. Express* 32, 15978-15992 (2024).
- [3] G. J. Gbur, *Singular Optics* (1st ed.). CRC Press (2016).
- [4] M. Szatkowski, E. Burnecka, H. Dyla, and J. Masajada, "Optical vortex tracking algorithm based on the Laguerre-Gaussian transform," *Opt. Express* 30, 17451-17464 (2022).
- [5] J. Antonello, "Optimisation-based wavefront sensorless adaptive optics for microscopy," Ph.D. thesis, Delft University of Technology (2014).

Ultra-stabilna 2-fotonowo wzbudzana randomiczna akcja laserowa uzyskana dla organicznej pochodnej furanowej

K. Lupińska^{1†}, P.Fita², Yann Bretonnière³, Chantal Andraud³, Lech Sznitko¹

¹Katedra Optyki Materii Miękkiej, Wybrzeże Stanisława Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, Polska

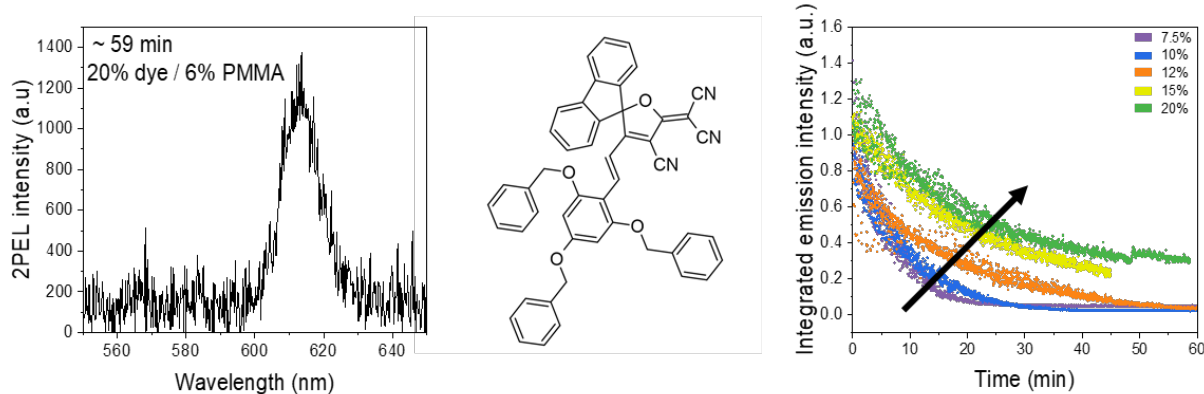
²Instytut Fizyki Eksperymentalnej, Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski, 02-093 Warszawa, Polska

³ENS de Lyon, CNRS UMR 5182, Laboratoire de Chimie, F69342, Lyon, Francja

†email: kamila.lupinska@pwr.edu.pl

Lasery barwnikowe, mimo swoich niewątpliwych zalet, takich jak stosunkowo niski koszt produkcji oraz szeroki zakres przestrajalności długości fali emisji, mają jedną istotną wadę – mogą bardzo szybko ulegać degradacji pod wpływem zewnętrznego źródła światła [1]. Choć obecnie dostępne są barwniki organiczne o wysokiej fotostabilności, najczęściej są one wzbudzane jednofotonowo [2]. Ze względu na to, że tylko niewielka liczba organicznych barwników laserowych nadaje się do wzbudzania w procesie wielofotonowym, ich zastosowanie jest naturalnie ograniczone w porównaniu do technik jednofotonowych. Dodatkowym utrudnieniem w użyteczności dwufotonowo wzbudzanych barwników organicznych jest ich szybka fotodegradacja. Wzbudzenie dwufotonowe wymaga użycia bardzo wysokiej mocy pomp, co negatywnie wpływa na stabilność układu i zwiększa jego podatność na uszkodzenia optyczne. Dlatego też znalezienie barwnika, który wykazuje wysoką fotostabilność przy wzbudzeniu dwufotonowym, jest kluczowe dla rozwoju laserów barwnikowych – na przykład w takich zastosowaniach, jak barwienie komórkowe czy terapia fotodynamiczna [3,4]. Zdolność do wzbudzania barwników za pomocą długości fali mieszczącej się w zakresie tzw. okna biologicznego pozwala zmniejszyć ryzyko uszkodzenia tkanek, a jednocześnie umożliwia głębszą ich penetrację.

Poniższa prezentacja przedstawia badania nad dwufotonowo wzbudzaną randomiczną akcją laserową (*ang. 2-Photon Excited Random Lasing, 2PE-RL*), uzyskaną dla różnych domieszek barwnika organicznego w polimerowym światłowodzie/quasi-swiatłowodzie planarnym wykonanym z polimetakrylanu metylu (PMMA). W ramach tych badań wyznaczono progi generacji 2PE-RL oraz przeprowadzono pomiary fotostabilności. Na zakończenie zaprezentowana zostanie próba połączenia efektu emisji wzmocnionej przez agregację (*ang. Aggregation-Induced Emission, AIE*) ze zwiększoną odpornością na fotodegradację.



Rysunek 1: Od lewej: 2-fotonowo wzbudzana randomiczna akcja laserowa po 59 min ciągłego naświetlania wiązką laserową $\lambda=800$ nm, $\sigma = 80$ mJ/cm², wzór strukturalny użytego barwnika laserowego, oraz zależność czasowa wpływu ilości domieszki w matrycy polimerowej na zjawisko fotodegradacji.

Podziękowania i źródła finansowania

Badania zostały współfinansowane przez Narodowe Centrum Nauki (2020/39/O/ST5/01865) oraz Narodową Agencję Wymiany Akademickiej (BPN/PRE/2022/1/00028).

Literatura

- [1] G.Shankarling, K. Jarag, *Resonance* **15(9)**: 804-818 (2010).
- [2] A. Szukalska, D. Zając, K.Cyprych, J. Myśliwiec, *Journal of Physical Chemistry C* **127(51)** (2023)
- [3] Y. Wang, Z. Duan, Z. Qiu, P. Zhang, J. Wu, D. Zhang, T. Xiang, *Scientific Reports* **7**: 8385 (2017)
- [4] L.Sznitko, J. Myśliwiec, A. Miniewicz, *Journal of Polymer Science Part B* **15(14)**: 951-974 (2015)

Mikroskopia obrazowania czasów życia fluorescencji z użyciem macierzy fotodiod lawinowych

A. Macioch¹ P.Szczypkowski¹, R.Łapkiewicz^{1, †},

¹ Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski, Pasteura 5, 02-093 Warszawa

†email: radek.lapkiewicz@fuw.edu.pl

Mikroskopia obrazowania fluorescencyjnego czasu życia (ang. Fluorescent Lifetime Imaging Microscopy – FLIM) to technologia pozwalająca na uzyskanie obrazów mikroskopowych w oparciu o fluorescencyjny czas życia cząsteczek próbki, otrzymany z analizy czasu emisji fotonów. Stałym wyzwaniem pozostaje konieczność akwizycji danych z dużą częstotliwością przy małej ilości fotonów docierających do detektora. Jednym z detektorów umożliwiających takie pomiary są matryce Single-photon avalanche diode (SPAD). Dzięki coraz większej rozdzielczości pozwalają one na uzyskiwanie obrazów próbek bez konieczności skanowania, co jest ważne w szczególności przy żywych próbkach [1]. Dodatkowo, użycie ogniskowania czasowego możliwego w przypadku wzbudzenia dwufotonowego, zamiast standardowego ogniskowania przestrzennego, pozwala na uzyskanie obrazów o rozdzielczości osiowej porównywalnej do układów z ogniskowaniem przestrzennym, przy prostszej konstrukcji układu i szybszym procesie uzyskiwania obrazu [2].

Planuję zbadać możliwości matryc SPAD jako bramkowanych czasowo detektorów w układach FLIM. Wykorzystam laser femtosekundowy, którego wiązkę zogniskuję czasowo, do wzbudzania próbki fluoroforu. Dokonam przeglądu dostępnej literatury opisującej dotychczasowe zastosowania detektorów SPAD w mikroskopii fluorescencyjnej. Kamery SPAD, dzięki postępującemu rozwojowi, mają szansę stać się preferowanym wyborem m.in. przy konstrukcji układów wykorzystujących technologię FLIM i wymagających najwyższej precyzji przy obrazowaniu w czasie rzeczywistym [3].

Literatura

- [1] Zickus, V., Wu, ML., Morimoto, K. et al. *Fluorescence lifetime imaging with a megapixel SPAD camera and neural network lifetime estimation*. *Sci Rep* **10**, 20986 (2020).
- [2] Oron D, Silberberg Y. *Temporal focusing microscopy*. *Cold Spring Harb Protoc.* 2015 Feb 2;2015(2):145-51.
- [3] Bruschini C, Homulle H, Antolovic IM, Burri S, Charbon E. *Single-photon avalanche diode imagers in biophotonics: review and outlook*. *Light Sci Appl.* 2019 Sep 18;8:87.

Spektroskopia fourierowska wysokiej rozdzielczości rzadkiego izotopologu tlenku węgla $^{12}\text{C}^{18}\text{O}$ oraz analiza deperturbacyjna stanu $A^1\Pi(v = 1 - 3)$

**M. I. Malicka^{1,†}, R. W. Field², S. Ryzner^{3,4}, A. Stasik^{3,4}, W. Ubachs⁵,
A. N. Heays⁶, N. de Oliveira⁷, W. Szajna³, R. Hakalla³**

¹Wydział Matematyki i Fizyki Stosowanej, Politechnika Rzeszowska, al. Powstańców Warszawy 8, 35-959 Rzeszów

²Department of Chemistry, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA02139 Stany Zjednoczone

³Laboratorium Spektroskopii Materiałów, Instytut Nauk Fizycznych, Uniwersytet Rzeszowski, ul. Pigonia 1, 35-310 Rzeszów

⁴Szkoła Doktorska Uniwersytetu Rzeszowskiego, al. Tadeusza Rejtana 16C, 35-959 Rzeszów

⁵Department of Physics and Astronomy, and LaserLaB, Vrije Universiteit, De Boelelaan 1081, 1081 HV Amsterdam, Holandia

⁶J. Heyrovský Institute of Physical Chemistry, Dolejškova 2155/3, 182 23 Praga 8, Czechy

⁷Synchrotron SOLEIL, Orme de Merisiers, St. Aubin, BP 48, F-91192 Gif sur Yvette Cedex, Francja

†email: m.malicka@prz.edu.pl

Zbadano strukturę rotacyjną poziomów oscylacyjnych $v = 1 - 3$ stanu elektronowego $A^1\Pi$ w rzadkim izotopologu $^{12}\text{C}^{18}\text{O}$. Analizę wykonano w oparciu o bogaty zestaw danych eksperymentalnych o wysokiej dokładności pochodzących z dwóch komplementarnych technik spektroskopii fourierowskiej. Wysokorozdzielcze, emisyjne pasma $B^1\Sigma^+ - A^1\Pi(0, 1), (1, 1), (0, 2), (0, 3)$ oraz $C^1\Sigma^+ - A^1\Pi(0, 1), (0, 2), (0, 3)$ zostały zarejestrowane w zakresie widzialnym przy użyciu spektrometru Fouriera Bruker IFS 125-HR w Zakładzie Badań Materiałowych i Spektroskopowych Instytutu Nauk Fizycznych Uniwersytetu Rzeszowskiego. Źródłem widm była chłodzona powietrzem lampa z katodą wnątkową wypełniona drażonym grafitem i statyczną mieszaniną cząsteczek tlenu $^{18}\text{O}_2$ i $^{16}\text{O}_2$. Pomiary położenia linii spektralnych zostały dokonane z dokładnością absolutną około $0,005\text{ cm}^{-1}$. Widma absorpcyjne $A^1\Pi(v = 1, 2, 3) \leftarrow X^1\Sigma^+(v = 0)$, $B^1\Sigma^+(v = 0, 1) \leftarrow X^1\Sigma^+(v = 0)$ oraz $C^1\Sigma^+(v = 0) \leftarrow X^1\Sigma^+(v = 0)$ $^{12}\text{C}^{18}\text{O}$ zostały zarejestrowane przy użyciu spektrometru próżniowego ultrafioletu z transformacją Fouriera w synchrotronie SOLEIL (St. Aubin, Francja), z dokładnością $0,03\text{ cm}^{-1}$.

Zestaw otrzymanych w ten sposób danych eksperymentalnych, włączonych do analizy, obejmował 1738 wysoko- rozdzielczych przejść pochodzących z 13 pasm. Dla każdego z poziomów oscylacyjnych $A^1\Pi(v = 1, 2, 3)$ wykonano pełny rachunek deperturbacyjny w programie GOPHER [1] w oparciu o Hamiltonian efektywny oraz metodę jednoczesnego rozliczania termów i stałych molekularnych. W rezultacie otrzymano precyzyjne wartości stałych molekularnych poziomów $A^1\Pi(v = 1 - 3)$ oraz ich perturbentów: $a^3\Sigma^+(v = 10, 12, 13)$, $e^3\Sigma^-(v = 4)$, $d^3\Delta(v = 7)$, $D^1\Delta(v = 1, 4)$ i $I^1\Sigma^-(v = 2, 3, 5)$, a także parametry sprzężenia spinowo-orbitalnego oraz oddziaływania rotacyjno- elektronowego typu L -uncoupling.

Wysoka precyzja pomiarów oraz przeprowadzona weryfikacja wszystkich perturbentów mogących mieć wpływ na poziom $A^1\Pi(v = 2)$, pozwoliła po raz pierwszy zidentyfikować i w pełni scharakteryzować pośrednie oddziaływania stanu $a^3\Pi$ ze stanem $A^1\Pi$ w izotopologu $^{12}\text{C}^{18}\text{O}$. Ponadto, wykryto dwie znaczące, pośrednie interakcje: (1) spinowo-orbitalne, spino-elektronowe i rotacyjno-elektronowe oddziaływania $a^3\Pi(v = 14) \sim e^3\Sigma^-(v = 6) \sim A^1\Pi(v = 3)$, gdzie poziomem przenoszącym te oddziaływania jest $e^3\Sigma^-(v = 6)$; oraz (2) oddziaływania spinowo-orbitalne $a^3\Sigma^+(v = 14) \sim A^1\Pi(v = 3) \sim e^3\Sigma^-(v = 6)$, gdzie pośrednikiem jest poziom $A^1\Pi(v = 3)$. Charakterystyka oddziaływań wewnątrz-molekularnych została wzbogacona również o podanie procentowego udziału charakteru $^1\Pi$ i $^3\Pi$ w zbadanych poziomach ro-wibronicznych. Wyznaczono również czynniki Francka- Condon oraz r -centroidy dla wszystkich zbadanych pasm oraz elektronowe niezmienniki izotopowe weryfikowanych oddziaływań wewnątrz-molekularnych.

Przeprowadzenie kompletnej analizy deperturbacyjnej poziomów $A^1\Pi(v = 1 - 3)$ pozwoliło na przedstawienie nowego oraz znacznie szerszego opisu kwantowo-mechanicznego rozległego i wielostanowo zaburzonego stanu $A^1\Pi$ w izotopologu $^{12}\text{C}^{18}\text{O}$ niż było to znane do tej pory w literaturze. Obecna praca jest kontynuacją badań nad precyzyjną analizą struktury energetycznej stanu $A^1\Pi$ w izotopologach tlenku węgla opracowywanych przez naszą grupę [2-5].

Literatura

- [1] C. Western, *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer* **186**, 221-242 (2017).
- [2] T. M. Trivikram, R. Hakalla, A. N. Heays, M. L. Niu, S. Scheidegger, E. J. Salumbides, N. de Oliveira, R. W. Field and W. Ubachs, *Molecular Physics* **115**, 3178-91 (2017).
- [3] M. I. Malicka, S. Ryzner, A. N. Heays, N. de Oliveira, R. W. Field, W. Ubachs and R. Hakalla, *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer* **255**, 107243 (2020).
- [4] M. I. Malicka, S. Ryzner, A. N. Heays, N. de Oliveira, R. W. Field, W. Ubachs and R. Hakalla, *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer* **273**, 107837 (2021).
- [5] M. I. Malicka, R. W. Field, S. Ryzner, A. Stasik, W. Ubachs, A. N. Heays, N. de Oliveira, W. Szajna and R. Hakalla, *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy* **312**, 124011 (2024).

Generowanie silnie skorelowanych stanów nieoddziałujących bozonów na potrzeby metrologii kwantowej

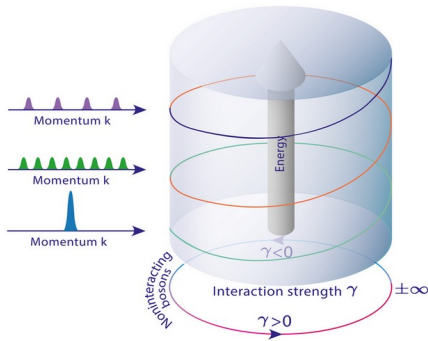
Maciej Marciniak^{1†}, Grigori E. Astrakharchik², Krzysztof Pawłowski¹, Bruno Juliá-Díaz³

¹Centrum Fizyki Teoretycznej Polskiej Akademii Nauk, Al. Lotników 32/46, 02-668 Warszawa, Polska

²Departament de Física, Universitat Politècnica de Catalunya, E-08034 Barcelona, Hiszpania

³Departament de Física Quàntica i Astrofísica, Facultat de Física, Universitat de Barcelona, 08028 Barcelona, Hiszpania

†email: mmarcinaik@cft.edu.pl



Rysunek 1: Schemat procesu pompowania topologicznego oraz wynikowy rozkład pędów atomów w układzie.

Mimo fundamentalnych różnic między bozonami a fermionami, istnieje układ fizyczny, w którym można je powiązać za pomocą eleganckiego odwzorowania. Połączenie to występuje w jednowymiarowym kwantowym układzie wielociałowym z krótkozasięgowymi oddziaływaniami modelowanymi za pomocą modelu Lieb-Linigera. W przypadku nieskończonego silnego odpychania między bozonami, tzw. granicy Tonksa-Girardeau'a lub fermionizacji, stany własne układu bozonów mogą zostać odwzorowane przez stany własne nieoddziałujących fermionów. Energie i korelacje oparte na gęstości są identyczne w obu układach. Podobieństwa te wynikają z silnego krótkozasięgowego odpychania, które uniemożliwia bozonowi zajmowanie tej samej pozycji co inny, co imituje efekt zakazu Pauliego dla fermionów. Kolejna osobliwość pojawia się, gdy znak siły oddziaływania zostaje gwałtownie odwrócony – z silnego odpychania do silnego przyciągania, na przykład poprzez wykorzystanie rezonansów Feshbacha. Stan bozonowy przechodzi wówczas do tzw. stanu super-Tonksa-Girardeau (sTG), który pozostaje metastabilny mimo silnego przyciągania między atomami, co zostało pokazane zarówno teoretycznie [1], jak i eksperymentalnie [2,3]. Jak pokazano w pracy [3], stan sTG może zostać wykorzystany do *pompowania* układu bozonów ze stanu podstawowego do stanów wzbudzonych, co przedstawiono schematycznie na Rys 1. W protokole tym, siła oddziaływania jest najpierw płynnie zwiększana od $g=0$ (nieoddziałujące bozony) aż do granicy fermionizacji. Następnie następuje nagłe przeskalowanie siły oddziaływania do wartości ujemnych, co przenosi gaz do metastabilnego reżimu sTG z $g \rightarrow -\infty$. Po tym następuje kolejny etap adiabaticznej dynamiki – płynny powrót siły oddziaływania do zera, kończący pierwszy cykl. Pomimo nagłych zmian interakcji, przejścia między stanami są ciągłe, prowadząc układ ku coraz wyższym stanom energetycznym.

W ramach niniejszego projektu pokazujemy, że pompownie może zostać użyte do osiągnięcia skorelowanych stanów nieoddziałujących bozonów. W szczególności, stany pojawiające się po n -tym cyklu pompownia składają się z pojedynczych bozonów obsadzających co $2n$ -ty poziom energetyczny aż do energii Fermiego pomnożonej przez $2n$. W szczególnym przypadku układu z periodycznymi warunkami brzegowymi, rozkład pędu tych stanów jest dokładnie taki sam jak dla nieoddziałujących fermionów, ale uwięzionych w układzie o $2n$ razy mniejszej długości – patrz Rys 1. Ich energia kinetyczna jest dokładnie n^2 razy większa niż w stanie podstawowym nieoddziałujących fermionów. W konsekwencji, również funkcja korelacji pierwszego rzędu tych nieoddziałujących stanów bozonowych na krótkich odległościach przypomina funkcję korelacji fermionów. Czyni to rzeczony stan interesującym kandydatem do zastosowania jako medium dla metrologii kwantowej.

Podziękowania i źródła finansowania

Badania finansowane są ze środków przyznanych w ramach grantu NCN Sonata BIS No. 2019/34/E/ST2/00289.

Literatura

- [1] G.E.Astrakharchik et al., Physical Review Letters 95, 19 (2005)
- [2] E. Haller et al., Science 325, 5945 (2009),
- [3] W.Kao et al., Science 371, 6526 (2021)

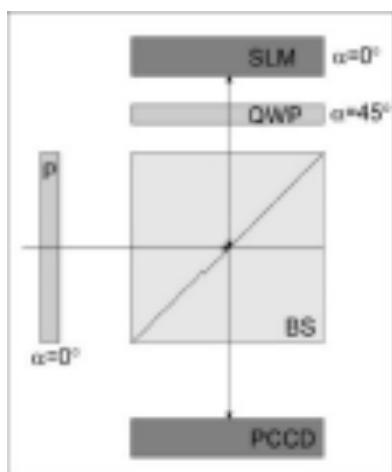
Wytwarzanie wiązek wektorowych o zmiennym rozkładzie polaryzacji światła przy pomocy przestrzennego modulatora światła

A. Popiołek-Masajada¹, P. Kurzynowski¹, J. Masajada^{1,†}, Przemysław Litwin¹

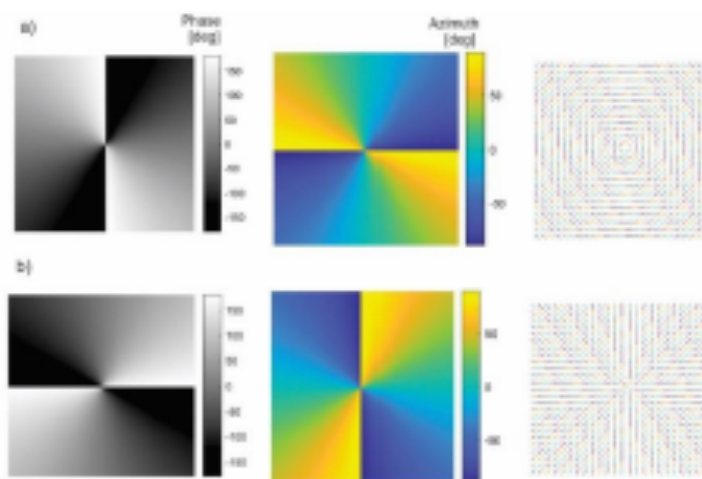
¹Katedra Optyki i Fotoniki, Wydział Podstawowych Problemów Techniki, Politechnika Wroclawska, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, Poland

[†]email: jan.masajada@pwr.edu.pl

Pole świetlne, w każdym punkcie jest opisywane poprzez trzy wielkości określające: amplitudę, fazę i stan polaryzacji. Polaryzacja jest jedną z ważniejszych cech światła i opisuje jego wektorowy charakter. Wraz z rozwojem technologii fotonicznych możliwym się stało strukturyzowanie wiązek świetlnych również poprzez wpisywanie w nie określonego rozkładu stanu polaryzacji. Proponujemy prosty układ optyczny (rys. 1), w którym różnica faz $\Delta\phi$ pomiędzy ortogonalnymi składowymi jest kodowana poprzez przestrzenny modulator światła (SLM). Wyświetlając na modulatorze zmienny rozkład $\Delta\phi$ (przykładowe mapy pokazano na rys. 2, lewa kolumna) można wytworzyć wiązki, w których stan polaryzacji jest kontrolowany w prosty sposób punkt po punkcie. Teoretyczne rozważania zostały zilustrowane formalizmem macierzy Muellera, zilustrowane na sferze Poincareg'o i dobrze potwierdzone w układzie eksperymentalnym.



Rysunek 1: Schemat układu optycznego



Rysunek 2 Przykładowe rozkłady stanów polaryzacji światła uzyskane w układzie na rys. 1 a) azymutalny, b) radialny. Od lewej- mapa fazowa wyświetlana na SLM, rozkład kąta azymutu i rozkład stanu polaryzacji

Literatura

- [1] I. Moreno et. al. Opt Express 20 (1), 364 (2011)
- [2] C. Alpmann et al., Scientific Reports 8076(2017)
- [3] R. Senthikumar et. al. International Journal of Optics, 2812803 (2020)

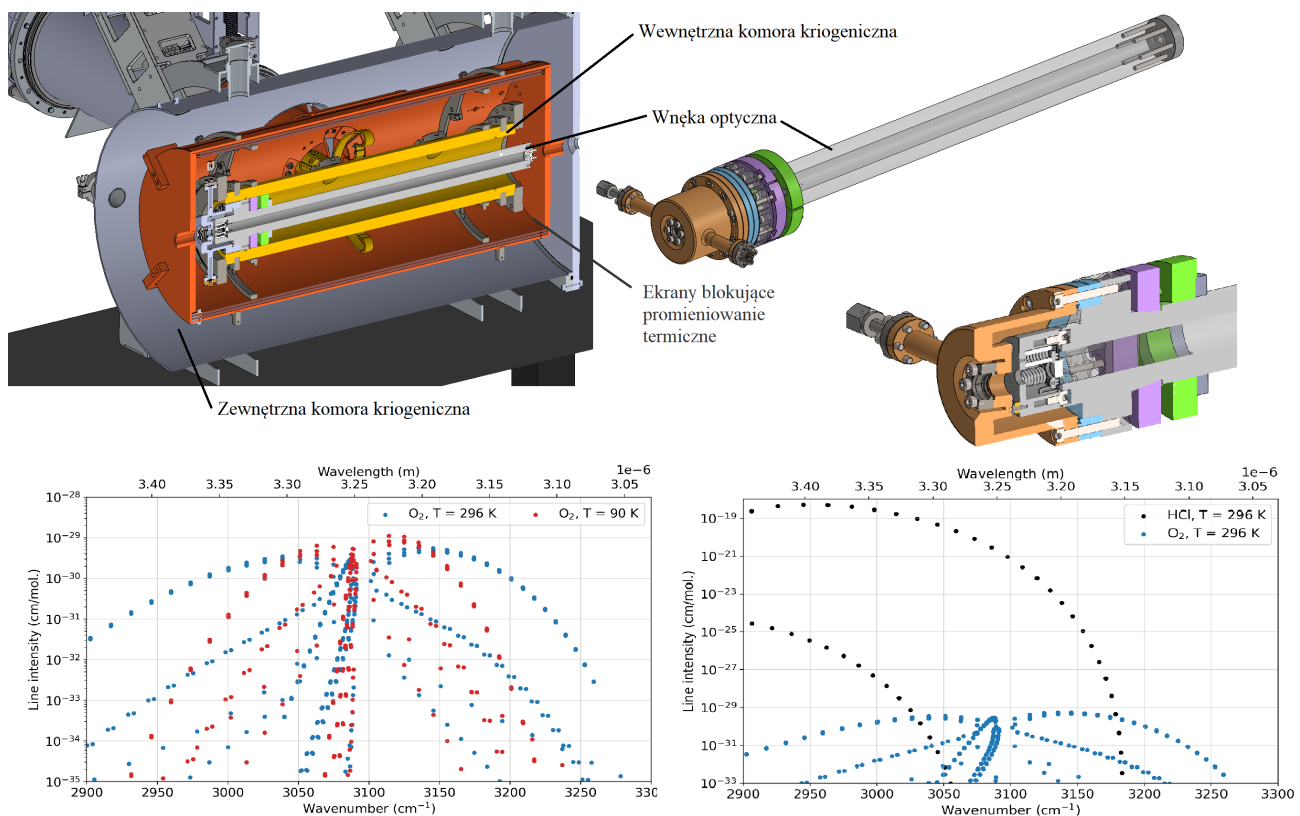
Spektroskopia w zakresie średniej podczerwieni w reżimie kriogenicznym

M. Milczarek, K. Stankiewicz, M. Makowski, M. Słowiński, K.L. Soltys, B. Bednarski, M. Narożnik, S. Wójtewicz, A. Cygan, G. Kowzan, P. Masłowski, M. Piwiński, D. Lisak, P. Wcisło[†]

Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej, Uniwersytet Mikołaja Kopernika, Grudziądzka 5, 87-100 Toruń
[†]email: piotr.wcislo@fizyka.umk.pl

Prezentujemy układ do spektroskopii strat we wnęce, który posłuży do zbadania przejść w paśmie 2-0 w tlenie molekularnym oraz 1-0 w HCl. Układ cechuje się tym, iż może w całości pracować w głębokim reżimie kriogenicznym (do 4 K) – chłodzona jest nie tylko próbka badanego gazu, lecz także cała wnęka wraz z lustrami i piezoelektrycznym elementem regulującym jej długość [1], zapewniając tym samym równowagę termodynamiczną. Dodatkowo budowa układu zapewnia izolację od wibracji zewnętrznych oraz wywołanych pracą kriochłodziarki (ang. cryocooler). Opisany powyżej układ został wykorzystany do zbadania przejścia 1-0 S(0) w wodrze molekularnym w temperaturach 4-20 K, zapewniając dokładność pomiaru energii przejścia rzędu 10^{-6}cm^{-1} [2].

W celu osiągnięcia średniej podczerwieni, w której to znajdują się interesujące nas przejścia, zastosowano optyczny parametryczny oscylator (OPO) który umożliwi osiągnięcie długości fali 3.2-3.4 μm przy mocy wiązki do 2 W. Z uwagi na chęć badania bardzo reaktywnych substancji, aby zapobiec degradacji układu, wnęka optyczna została wykonana z aluminium, które w kontakcie z O_2 ulega pasywacji, a powstała pasywna warstwa zabezpiecza przed HCl. W pierwszej kolejności chcemy zbadać przejścia w paśmie 2-0 w O_2 w temperaturze pokojowej, by następnie powtórzyć to w temperaturze 90 K, podobnie pasma 1-0 w HCl w temperaturze 188 K.



Rysunek 1: W lewym górnym rogu – przekrój układu; po prawej – wnęka z piezoelektrycznym elementem regulującym długość; poniżej (lewo) – wykres natężeń linii w O_2 [3] w temperaturze pokojowej i 90 K; po prawej – wykresy dla HCl [4] i O_2 w temperaturze pokojowej.

Literatura

- [1] M. Słowiński, et. al., Rev. Sci. Instrum. **93**, 115003 (2022)
- [2] K. Stankiewicz, et. al. <https://arxiv.org/abs/2502.12703>
- [3] M. Gancewski, et. al. JQSRT, **337**, 109395 (2025).
- [4] I.E. Gordon et. al. JQSRT, **277**, 107949 (2022).

Właściwości optyczne subfalowych struktur wytworzonych za pomocą druku 3D dla promieniowania terahercowego

A. Nieradka^{1,†}, M. Kaluza¹, A. Siemion¹

¹Wydział Fizyki, Politechnika Warszawska, Koszykowa 75, 00-662 Warszawa

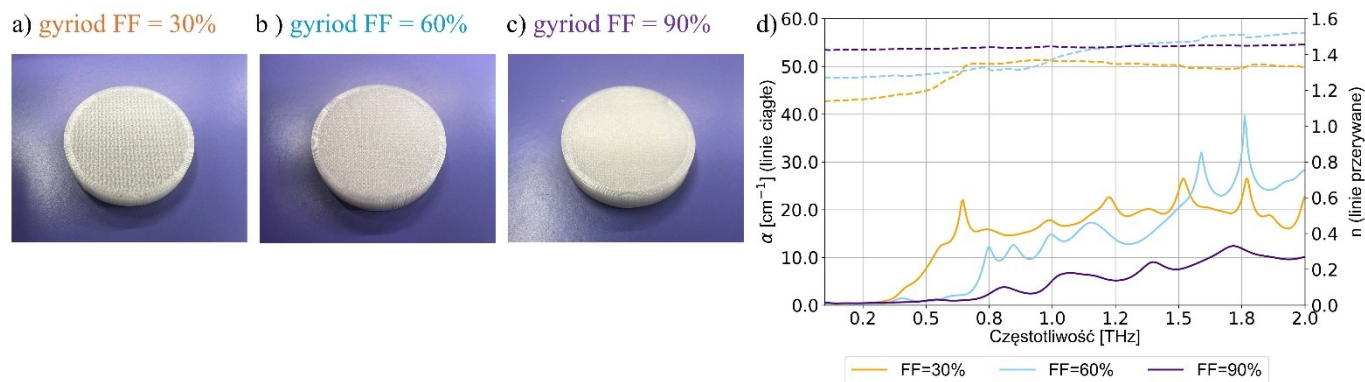
†email: adrianna.nieradka.dokt@pw.edu.pl

Badania nad promieniowaniem terahercowym (THz) znacząco rozwinęły się na przestrzeni ostatnich lat. Prace naukowe w dziedzinie technologii THz coraz częściej skupiają się na pasywnych dyfrakcyjnych elementach optycznych (DOE) służących do sterowania wiązkami THz [1]. Elementy te umożliwiają budowę wydajnych systemów optycznych, realizujących zadania takie jak multipleksacja i demultipleksacja sygnałów [2,3], wykazując duży potencjał do dalszego rozwoju w tej dziedzinie.

Przeprowadzone w tej pracy badania skupiają się na opracowaniu i eksperymentalnej weryfikacji złożonych subfalowych elementów optycznych, działających w zakresie promieniowania terahercowego. Badania obejmują analizę struktur o różnym kształcie wypełnienia i współczynniku wypełnienia (*ang. fill factor – FF*). Elementy zostały wytworzone z mało absorbującego materiału polimerowego, jakim jest cykliczny kopolimer olefinowy (COC), za pomocą technologii druku 3D i metody osadzania stopionego materiału (*ang. fused deposition modeling – FDM*), która zapewnia wysoką rozdzielczość druku, sięgającą nawet 0,1 mm.

W pracy przedstawiono pasywne elementy optyczne charakteryzujące się unikalnym podejściem projektowym pozwalającym na zmiany właściwości optycznych, takich jak współczynnik absorpcji i współczynnik załamania danej struktury poprzez zdefiniowanie jej geometrii i manipulację parametrem FF. Na Rysunku 1 przedstawiono i przeanalizowano jedną z czterech zaproponowanych geometrii komponentów z wypełnieniem typu gyroid, przy wartościach FF równych 30%, 60% i 90%. Wyniki eksperymentalne uzyskane metodą terahercowej spektroskopii w dziedzinie czasu (THz-TDS) [4], w zakresie częstotliwości od 0,1 do 2,0 THz, potwierdzają przewidywany spadek wartości współczynnika absorpcji wraz ze wzrostem parametru FF.

W kolejnym etapie badań planowane jest zaprojektowanie i realizacja zaawansowanych płaskich struktur dyfrakcyjnych o kodowaniu fazowym [5]. Struktury te będą posiadać stałą grubość i zostaną wytworzone z jednego nisko absorbującego materiału. Odpowiednio zaprojektowany rozkład przestrzenny struktur pozwoli na manipulację wiązką poprzez zmianę współczynnika załamania, co otworzy nowe możliwości w zakresie promieniowania THz.



Rysunek 1: Próbkki o geometrii typu gyrioid, wydrukowane w technologii druku 3D FDM z materiału COC: (a) próbka o FF = 30%, (b) próbka o FF = 60%, (c) próbka o FF = 90%. (d) właściwości optyczne wydrukowanych struktur: współczynnik absorpcji α (linie ciągłe) oraz współczynnik załamania n (linie przerywane) w zakresie promieniowania od 0,1 THz do 2,0 THz.

Literatura

- [1] A. Siemion, *Sensors*, **21**, 100 (2020).
- [2] M. Kaluza, P. Komorowski, M. Surma, A. Nieradka, P. Zagrajek, A. Siemion, *Optics and Lasers in Engineering*, **184**, 108606 (2025).
- [3] A. Faisal, H. Sareddeen, H. Dahrouj, T. Y. Al-Naffouri, M. S. Alouini, *IEEE Vehicular Technology Magazine*, **15**, 33-42 (2020).
- [4] J. Neu, C. A. Schmuttenmaer, *Journal of Applied Physics*, **124**, 23 (2018).
- [5] A. Siemion, *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, **40**, 477-499 (2019).

Zintegrowane foniczne układy nadawcze do komunikacji optycznej w wolnej przestrzeni

A. Pańnikowska¹†, K. Anders^{1,2,3}, Ł. Kustosz¹, M. Rojewski¹,
S. Stopiński^{1,2,3}, A. Jusza^{1,3}, R. Ciechański³, K. Machałowski³, M. Liebert³,
J. Kalwas³, P. Marchewka³, M. Abramowicz³, J. Jureńczyk³,
D. Pierścińska⁴, K. Pierściński⁴, R. Piramidowicz^{1,2,3}

¹ Politechnika Warszawska, Instytut Mikroelektroniki i Optoelektroniki, Koszykowa 75, 00-662 Warszawa

²VIGO Photonics S.A., Poznańska 129/133, 05-850 Ożarów Mazowiecki

³LightHouse Sp. z o.o., Stefczyka 34, 20-151 Lublin

⁴ Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Mikroelektroniki i Fotoniki, Al. Lotników 32/46, 02-668 Warszawa

†email: aleksandra.pasnikowska@pw.edu.pl

Rosnące zapotrzebowanie na rozwiązania komunikacyjne zapewniające zalety wysokich przepustowości, niezawodności i efektywności energetycznej jest stymulowane przez aplikacje wymagające intensywnego przetwarzania danych. Systemy komunikacji optycznej w wolnej przestrzeni (FSOC – ang. Free Space Optical Communication) stanowią jedną z potencjalnych ścieżek rozwojowych, szczególnie istotną w zastosowaniach, w których tradycyjne rozwiązania są trudne do wykorzystania, np. w terenie gęsto zurbanizowanym, w sytuacjach klęsk żywiołowych, czy w rozwiązaniach wojskowych, adresujących wymagania współczesnego pola walki. Szczególnie atrakcyjne wydaje się połączenie systemów FSOC z technologią fotoniki scalonej, zapewniającą rozwiązania kompaktowe, energooszczędne i zoptymalizowane kosztowo.

W niniejszej pracy zaprezentowano dwa demonstratory systemów FSOC bazujących na zintegrowanych układach fonicznych pracujących w zakresie spektralnym bliskiej podczerwieni (NIR, ~1550 nm) oraz średniej podczerwieni (MIR, 3–5 μm). Pierwszy z nich wykorzystuje foniczne układy scalone wykonane w technologii fosforku indu (InP), integrujące lasery DBR, modulatory elektroabsorpcyjne oraz multipleksery AWG (ang. arrayed waveguide gratings). Architektura układu umożliwia transmisję sygnałów w czterech kanałach z szybkością do 10 Gb/s (w pojedynczym kanale), co zostało potwierdzone pomiarami elementowej stopy błędu (BER – ang. bit error rate) i analizą diagramów oka.

Drugi demonstrator to heterogenicznie zintegrowany układ ASPIC na platformie MIRPIC z falowodami Ge-on-Si, impulsowymi laserami kaskadowymi (QCL – ang. quantum cascade laser) oraz supersieciowymi detektorami antymonkowymi. Praca w zakresie średniej podczerwieni zapewnia zwiększoną odporność sygnałów na efekty rozpraszania w atmosferze i mniej wrażliwym na trudne warunki pogodowe (jak np. deszcz).

Oba układy zostały zainstalowane w kompaktowych obudowach typu golden-box, co pozwoliło na przeprowadzenie badań parametrów transmisyjnych w warunkach laboratoryjnych i rzeczywistych oraz na porównanie i weryfikację obydwu rozwiązań.

Podziękowania i źródła finansowania

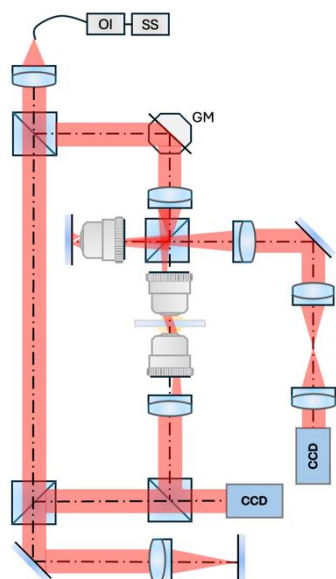
Praca dofinansowana przez Politechnikę Warszawską (Scientific Breakthrough-2 – POB Technologie foniczne) w ramach projektu „Układy fotoniki scalonej do zastosowań w systemach komunikacji w wolnej przestrzeni” oraz przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju (NCBR) w ramach konkursu FENG - 1. 1 „Układy fotoniki scalonej dla systemów komunikacji optycznej w wolnej przestrzeni (FSOC)” i w ramach strategicznego programu badań naukowych i prac rozwojowych „Nowoczesne technologie materiałowe” - TECHMATSTRATEG III, projekt aa, „Technologie układów fotoniki scalonej na zakres średniej podczerwieni (MIRPIC)”.

Multimodalny system do pomiaru rozkładu oraz gradientu współczynnika załamania z wykorzystaniem optycznej tomografii dyfrakcyjnej oraz koherencyjnej

A. Piekarska[†], A. Kuś, W. Krauze, M. Mazur, M. Kujawińska

Politechnika Warszawska, Instytut Mikromechaniki i Fotoniki, św. Andrzeja Boboli 8, 02-525 Warszawa

[†]email: aleksandra.piekarska.stud@pw.edu.pl



Rysunek 1: Schemat układu OCOT

W niniejszej pracy zaprezentowany został system łączący optyczną tomografię dyfrakcyjną oraz koherencyjną (OCOT) opierający się na pomiarze gradientu współczynnika załamania w odbiciu (OCT) i jego przestrzennego rozkładu w transmisji (ODT) [1]. Dzięki temu w systemie możliwe jest badanie próbek słabo rozpraszających, zgodnych z teorią ODT, jak również wykraczających poza to przybliżenie – w odbiciu, za pomocą polowej metody OCT ze źródłem przemiatającym.

Gałąź OCT pracuje w konfiguracji interferometru Linnika i wykorzystuje źródło światła, umożliwiające przemiatanie długością fali w zakresie długości fal 803-878nm. Z kolei gałąź ODT pracuje w konfiguracji interferometru Mach-Zehndera przy wykorzystaniu tego samego źródła w trybie pojedynczej długości fali. Ze względu na ograniczoną długość drogi koherencji zastosowano moduł wyrównujący drogi optyczne (Rys. 1). W przypadku techniki ODT zamiast skanowania długością fali wykonywane jest skanowanie kątowe wiązką oświetlającą.

W układzie zastosowano obiektywy Plan-Apochromat 40x/1.3 oraz dwie kamery o matrycy CMV4000 z pikselem 5,5 um.

Ponieważ w systemie możliwe jest badanie próbek zarówno mocno jak i słabo rozpraszających, opracowano również metodę wymiany immersji wokół obiektu badanego bez zmiany położenia próbki, co w przypadku niektórych obiektów pomiarowych umożliwia kontrolę rozpraszania (Rys. 2b).

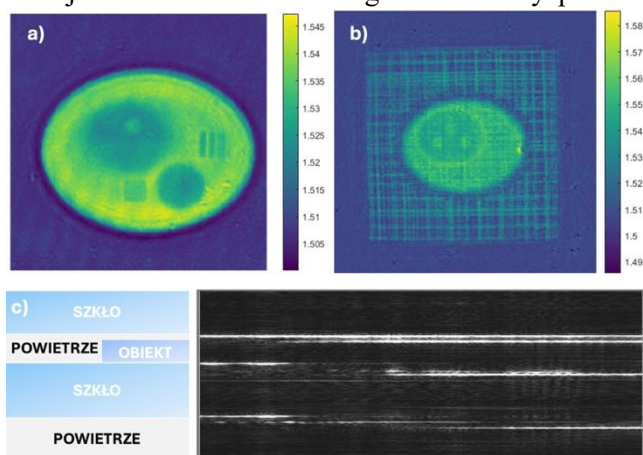
Z uwagi na fakt, iż podstawy teoretyczne obu technik wywodzą się ze wspólnego formalizmu, jakim jest twierdzenie Fouriera o dyfrakcji [2], możliwa jest dalsza integracja danych pozyskanych z systemu. Każda z technik pozwala zarejestrować inną część zespolonej amplitudy pola optycznego oddziałującego z próbką i wypełnić inny fragment widma częstości przestrzennych, co stwarza potencjał do ich komplementarnego wykorzystania. Użycie danych uzyskanych obiema metodami gwarantuje lepsze pokrycie widma, a tym samym – większą ilość informacji o obiekcie. W ramach dalszych prac planowane jest zastosowanie tego podejścia do rekonstrukcji wewnętrznej struktury obiektów biologicznych (komórki, tkanki), co może pozwolić na uzyskanie obrazów o podwyższonej rozdzielczości.

Podziękowania i źródła finansowania

Badania zostały sfinansowane przez POB Photonics of Warsaw University of Technology w ramach programu Inicjatywa Doskonałości: Uczelnia Badawcza (IDUB).

Literatura

- [1] Ossowski, P., Kuś, A., Krauze, W., Tamborski, S., Ziemczonok, M., Kuźbicki, Ł., Szkulmowski, M., Kujawińska, M. *Near-infrared, wavelength, and illumination scanning holographic tomography*, *Biomed. Opt. Express* **13**, 5971-5988 (2022)
- [2] Zhou, K. C., Qian, R., Dhalla, A.-H., Farsiu, S., & Izatt, J. A., *Unified k-space theory of optical coherence tomography*. *Advances in Optics and Photonics*, **13**(2), 462, (2021).
- [3] Krauze, W., Kuś, A., Ziemczonok, M. *3D scattering microphantom sample to assess quantitative accuracy in tomographic phase microscopy techniques*. *Sci Rep* **12**, 19586 (2022).



Rysunek 2: Wyniki rekonstrukcji pomiarów a) fantom komórki biologicznej, wytworzony w druku dwufotonowym [3] – pomiar ODT, b) fantom otoczony strukturami zwiększającymi rozpraszanie – pomiar ODT, c) struktura wielowarstwowa i jej rekonstrukcja – tryb OCT.

Obrazowanie mikroskopowe pomiędzy ośrodkami rozpraszającymi

M. Rogalski^{1†}, YS. Baek², HB. de Aguiar², S. Gigan², M. Trusiak¹

¹Institut Mikromechaniki i Fotoniki, Politechnika Warszawska, Św. A. Boboli 8., Warszawa 02-525, Polska

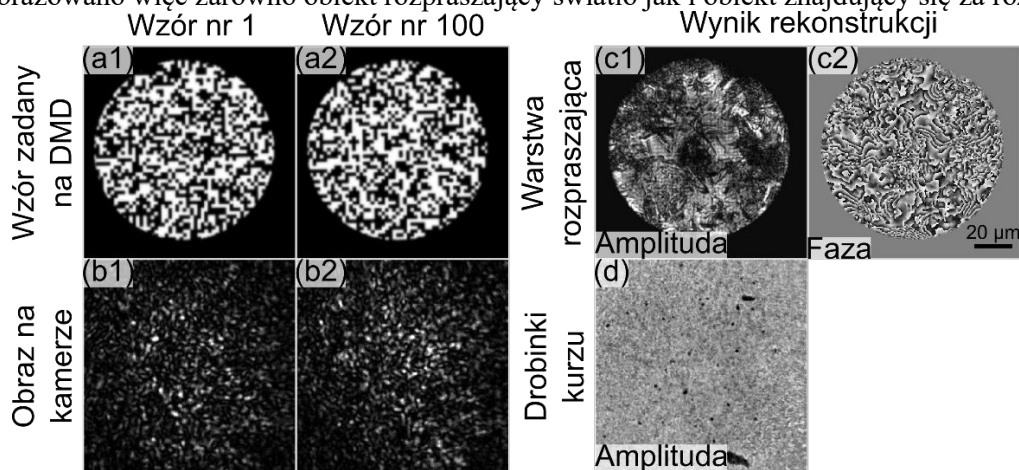
²Laboratoire Kastler Brossel, ENS–Université PSL, CNRS, Sorbonne Université, Collège de France, 24 Rue Lhomond, F-75005 Paris, France

†email: mikolaj.rogalski@pw.edu.pl

Mikroskopia optyczna jest techniką pozwalającą na zobrazowanie badanej próbki ze zwiększoną rozdzielczością i powiększeniem względem obrazowania ludzkim okiem. Jednym z największych wyzwań stojących obecnie przed obrazowaniem mikroskopowym jest obrazowanie obiektów znajdujących się wewnątrz ośrodków silnie rozpraszających światło (lub obiektów będących takimi ośrodkami). Spośród technik mikroskopowych umożliwiających obrazowanie takich obiektów można wymienić, m.in., optyczną tomografię koherencyjną (OCT) [1] czy mikroskopię dwufotonową [2]. Techniki te są jednak ograniczone, m.in., pod względem rozdzielczości obrazowania (OCT) czy konieczności znakowania fluorescencyjnego (mikroskopia dwufotonowa).

Wraz z rozwojem mocy obliczeniowej komputerów narodziła się nowa gałąź mikroskopii – mikroskopia obliczeniowa. Bazuje ona na wykorzystaniu zaawansowanych algorytmów w celu poprawy dokładności, kontrastu czy rozdzielczości obrazowania. Mikroskopia obliczeniowa zaczyna znajdować też zastosowanie do obrazowania wewnątrz ośrodków silnie rozpraszających [3].

Niniejsza praca przedstawia metodę pozwalającą na obrazowanie próbki znajdującej się za warstwą silnie rozpraszającą światło. W zaproponowanym układzie badaną próbką jest warstwa rozpraszająca – matowa szklana płytką wytworzona przy pomocy piaskowania. Próbka wstawiona jest około 250 μm poza płaszczyznę ostrości układu mikroskopu a następnie oświetlana przy pomocy 100 różnych wzorów wytworzonych przy pomocy matrycy DMD (Rys. 1(a)) oraz lasera ($\lambda = 532 \text{ nm}$). Zebrane obrazy zawierają tzw. wzory plamkowe, które pozornie wydają się nie zawierać żadnej wartościowej informacji (Rys. 1(b)). Wzory te wynikają jednak ściśle z wyświetlanych wzorów na matrycy DMD, zespolonego pola optycznego próbki, a także funkcji przenoszenia układu optycznego. Znając więc rozkład wyświetlanych wzorów oraz geometrię układu optycznego można w pełni odzyskać zespolone pole optyczne warstwy rozpraszającej (Rys. 1(c)) – w niniejszej pracy zostało to osiągnięte przy pomocy algorytmów rekonstrukcji ptychograficznej [4]. Co ciekawe, algorytm ten pozwala na zobrazowanie różnych płaszczyzn wewnątrz objętości próbki. Dla zebranych danych zrekonstruowano również płaszczyznę oddaloną o 88 μm od płaszczyzny ostrości zawierającą drobinki kurzu znajdujące się na jednym z elementów optycznych (Rys. 1(d)). W ten sposób zobrazowano więc zarówno obiekt rozpraszający światło jak i obiekt znajdujący się za rozpraszaczem.



Rysunek 1. Wzory zadane na DMD (a), zarejestrowane obrazy na kamerze (b), wynik rekonstrukcji warstwy rozpraszającej (c) oraz wynik rekonstrukcji warstwy obiektu (d)

Podziękowania i źródła finansowania

Praca była finansowana z projektu Narodowego Centrum Badań i Rozwoju (LIDER14/0329/2023)

Literatura

- [1] D. Huang, et al., *Science* 254, 1178 (1991).
- [2] F. Helmchen and W. Denk, *Nat. Methods* 2, 932 (2005).
- [3] O. Haim, J. Boger-Lombard, and O. Katz, *Nat. Photonics* 19, 44 (2025).
- [4] J. Rodenburg and A. Maiden, in *Springer Handbook of Microscopy*, P. W. Hawkes and J. C. H. Spence, eds. (Springer International Publishing, 2019), pp. 819–904.

Strategie identyfikacji pojedynczych niemigoczących sond luminescencyjnych na przykładzie nanocząstek NaYF₄:Yb³⁺, Er³⁺

N. Rybarczyk¹, M. Świąś¹, D. Horák², B. Krajnik^{1,†}

¹Katedra Fizyki Doświadczalnej, Wydział Podstawowych Problemów Techniki, Politechnika Wroclawska, Wybrzeże Stanisława Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

²Institute of Macromolecular Chemistry CAS, Heyrovského nám. 2 162 00 Prague 6. Czech Republic

†email: bartosz.krajnik@pwr.edu.pl

Nanocząstki wykazujące zjawisko wewnętrznej konwersji energii (UCNPs, *upconverting nanoparticles*), takie jak NaYF₄:Yb³⁺,Er³⁺, cechują się wyjątkową stabilnością fotofizyczną oraz niemigoczącym charakterem emisji, co czyni je obiecującymi sondami w zastosowaniach wymagających długotrwałego monitorowania. Z drugiej strony, brak migotania, charakterystyczny dla większości pojedynczych barwników organicznych i kropek kwantowych, utrudnia jednoznaczную identyfikację pojedynczych UCNPs np. podczas obrazowania za pomocą mikroskopii fluorescencyjnej szerokiego pola. Z tego względu, w celu poprawnego sklasyfikowania obserwowanych obiektów jako pojedynczych, niezbędne jest zastosowanie złożonych strategii analitycznych, opartych na kombinacji technik ilościowych i jakościowych.

Wykazano, że pojedyncze nanocząstki NaYF₄:Yb³⁺,Er³⁺ oraz ich agregaty charakteryzują się odmiennymi właściwościami optycznymi, co podkreśla znaczenie badań na poziomie pojedynczych nanocząstek [1]. W standardowym podejściu ich identyfikacja opiera się na korelacji obrazów fluorescencyjnych z danymi uzyskanymi za pomocą mikroskopii sił atomowych (AFM, *atomic force microscopy*), transmisyjnej mikroskopii elektronowej (TEM, *transmission electron microscopy*) oraz skaningowej mikroskopii elektronowej (SEM, *scanning electron microscopy*) [2].

Niniejsza praca przedstawia alternatywne podejście, które pozwala na rozróżnienie pojedynczych i zgrupowanych niemigoczących emiterów wyłącznie na podstawie analizy obrazów uzyskanych za pomocą mikroskopii fluorescencyjnej szerokiego pola, bez konieczności stosowania korelacji z technikami strukturalnymi. Zaproponowano strategię obejmującą analizę kształtu funkcji rozmycia plamki (PSF), ocenę wpływu rozcieńczenia i przestrzennego rozmieszczenia sond, a także badanie rozkładu natężenia luminescencji. W pracy przedstawiono zarówno wyniki eksperymentalne uzyskane na rzeczywistym układzie mikroskopowym, jak i symulacje numeryczne.

Uzyskane rezultaty pozwalają określić praktyczne warunki umożliwiające wiarygodną identyfikację pojedynczych niemigoczących emiterów, co ma istotne znaczenie dla optymalizacji i praktycznych zastosowań UCNPs np. nanotermometrii i obrazowaniu..

Podziękowania i źródła finansowania

Dziękujemy za wsparcie finansowe ze strony Narodowego Centrum Nauki (SONATA 16, grant nr 2020/39/D/ST5/03359).

Literatura

[1] S. Karmegam, M. Kolikkaje, S.D. George, J. Phys. Chem. C 128, 14709 (2024).

[2] J. Zhou, A.I. Chizhik, S. Chu, D. Jin, Nature 579, 41 (2020).

Wysokorozdzielcza spektroskopia Fouriera w zakresach VUV i Vis oraz rozszerzona analiza deperturbacyjna poziomu $A^1\Pi(v = 2)$ w izotopologu $^{13}\text{C}^{18}\text{O}$

S. Ryzner^{1,2,†}, A. Stasik^{1,2}, M. I. Malicka³, W. Szajna⁴, R. W. Field⁴, W. Ubachs⁵, K. F. Lai⁵, A. Pashov⁶, P. Jasik^{7,8}, J. E. Sienkiewicz^{7,9}, N. de Oliveira¹⁰, R. Hakalla¹

¹Laboratorium Spektroskopii Materiałów, Instytut Nauk Fizycznych, Uniwersytet Rzeszowski, Pigionia 1, 35-310 Rzeszów

²Szkoła Doktorska Uniwersytetu Rzeszowskiego, Uniwersytet Rzeszowski, Rejtana 16C, 35-959 Rzeszów

³Wydział Matematyki i Fizyki Stosowanej, Politechnika Rzeszowska, Powstańców Warszawy 8, 35-959 Rzeszów

⁴Department of Chemistry, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA02139 USA

⁵Department of Physics and Astronomy, and LaserLaB, Vrije Universiteit, De Boelelaan 1081, Amsterdam, Netherlands

⁶Faculty of Physics, Sofia University St. Kliment Ohridski, 5 James Bourchier Boulevard, 1164 Sofia, Bulgaria

⁷Wydział Fizyki Technicznej i Matematyki Stosowanej, Politechnika Gdańska, 80-233 Gdańsk

⁸Centrum BioTechMed, Politechnika Gdańska, 80-233 Gdańsk

⁹Centrum Materiałów Przyszłości, Politechnika Gdańska, 80-233 Gdańsk

¹⁰Synchrotron SOLEIL, Orme de Merisiers, St. Aubin, BP 48, F-91192 Gif sur Yvette Cedex, France

†email: sryzner@ur.edu.pl

Niniejsza praca przedstawia kompleksową analizę spektroskopową poziomu energetycznego $A^1\Pi(v = 2)$ w izotopologu $^{13}\text{C}^{18}\text{O}$. W celu realizacji tego zadania zastosowano dwie zaawansowane techniki spektroskopii Fouriera (FTS): (i) spektroskopię emisyjną w zakresie światła widzialnego (Vis) przy użyciu spektrometru Bruker IFS 125 HR znajdującego się na Uniwersytecie Rzeszowskim oraz (ii) spektroskopię absorpcyjną w zakresie próżniowego ultrafioletu (VUV) wykorzystującą spektrometr FT końcowej stacji wiązki DESIRS w synchrotronie SOLEIL (St. Aubin, Francja).

Rejestracje widm zostały przeprowadzone dla zakresów $66\,450 - 68\,450\text{ cm}^{-1}$ (VUV) oraz $19\,100 - 25\,000\text{ cm}^{-1}$ (Vis) osiągając dokładności pomiarowe około $0,04\text{ cm}^{-1}$ oraz $0,007\text{ cm}^{-1}$, odpowiednio. W sumie otrzymano i zanalizowano 787 przejść promienistych należących do pasm $A^1\Pi - X^1\Sigma^+(2, 0)$, $B^1\Sigma^+ - A^1\Pi(0, 2)$, $C^1\Sigma^+ - A^1\Pi(0, 2)$, $D^1\Delta - X^1\Sigma^+(3, 0)$, $a^3\Sigma^+ - X^1\Sigma^+(12, 0)$, $a^3\Pi - X^1\Sigma^+(13, 0)$, $d^3\Delta - X^1\Sigma^+(7, 0)$, $e^3\Sigma^- - X^1\Sigma^+(4, 0)$ oraz $I^1\Sigma^- - X^1\Sigma^+(3, 0)$. Dodatkowo dołączono 221 linii wcześniej opublikowanych przejść $B^1\Sigma^+ - X^1\Sigma^+(0, 0)$ oraz $C^1\Sigma^+ - X^1\Sigma^+(0, 0)$ Refs. [1,2], rozszerzając tym samym zbiór danych eksperymentalnych do 1008 linii spektralnych.

Analizę deperturbacyjną poziomu $A^1\Pi(v = 2)$ przeprowadzono w środowisku programu PGOPHER [3] wykorzystującego do symulacji efektywny Hamiltonian Browna oraz metodę jednoczesnego obliczania termów i stałych molekularnych. W wyniku analizy uzyskano 38 parametrów molekularnych oraz wyznaczono 429 termów ro-wibracyjnych stanów elektronowych objętych obecnymi badaniami. Zaobserwowano wyraźne ekstra-linie związane z poziomem $a^3\Pi(v = 13)$ w pasmach $A^1\Pi - X^1\Sigma^+(2, 0)$, $B^1\Sigma^+ - A^1\Pi(0, 2)$ oraz $C^1\Sigma^+ - A^1\Pi(0, 2)$. Jednocześnie wykazano, że bezpośredni wpływ poziomów $a^3\Pi(v = 13)$ oraz $a''^5\Pi(v = 0 - 2)$ na stan $A^1\Pi(v = 2)$ jest pomijalnie mały w granicach bieżących niepewności pomiarowych. Odkryto interferencję pomiędzy dwiema pośrednimi ścieżkami oddziaływania o symetrii e między poziomami $A^1\Pi(v = 2)$, $a^3\Pi(v = 13)$ oraz $e^3\Sigma^-(v = 4)$. Ponadto wykryto dwa pośrednie sprzężenia poziomów $a^3\Pi(v = 13)$ i $A^1\Pi(v = 2)$ z udziałem poziomów $d^3\Delta(v = 7)$ oraz $I^1\Sigma^-(v = 3)$ jako mediatorów.

Niniejsze rezultaty są częścią badań prowadzonych przez grupę naukową Laboratorium Spektroskopii Materiałów Instytutu Nauk Fizycznych Uniwersytetu Rzeszowskiego nad stanem elektronowym $A^1\Pi$ i jego oddziaływaniami w izotopologach tlenku węgla [1,2,4-6]. Obecna praca ma na celu dostarczenie precyzyjnych informacji na temat struktury energetycznej cząsteczki CO poprzez dokładne poznanie natury i jakości sprzężeń wewnątrz-molekularnych.

Literatura

- [1] R. Hakalla et al., *Molecular Physics* **117**, 79-96 (2019).
- [2] S. Ryzner et al., *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy* **279**, 121367 (2022).
- [3] C. Western, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* **186**, 221-242 (2017).
- [4] R. Hakalla et al., *Royal Society of Chemistry Advances* **6**, 31588-31606 (2016).
- [5] M.I. Malicka et al., *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy* **312**, 124011 (2024).
- [6] M.L. Niu et al., *Molecular Physics* **114**, 2857-2867 (2016).

Cząstki luminescencyjne konwertujące energię z niższej na wyższą w badaniach nad wolno parującymi mikrokroplami

Y. Shopa^{1†}, D. Jakubczyk², G. Derkachov², M. Kolwas², I. Kamińska², T. Wojciechowski²

¹Uniwersytet Kardynała Stefana Wyszyńskiego w Warszawie, ul. Dewajtis 5, 01-815 Warszawa

²Instytut Fizyki Polskiej Akademii Nauk, al. Lotników 32/46, 02-668 Warszawa

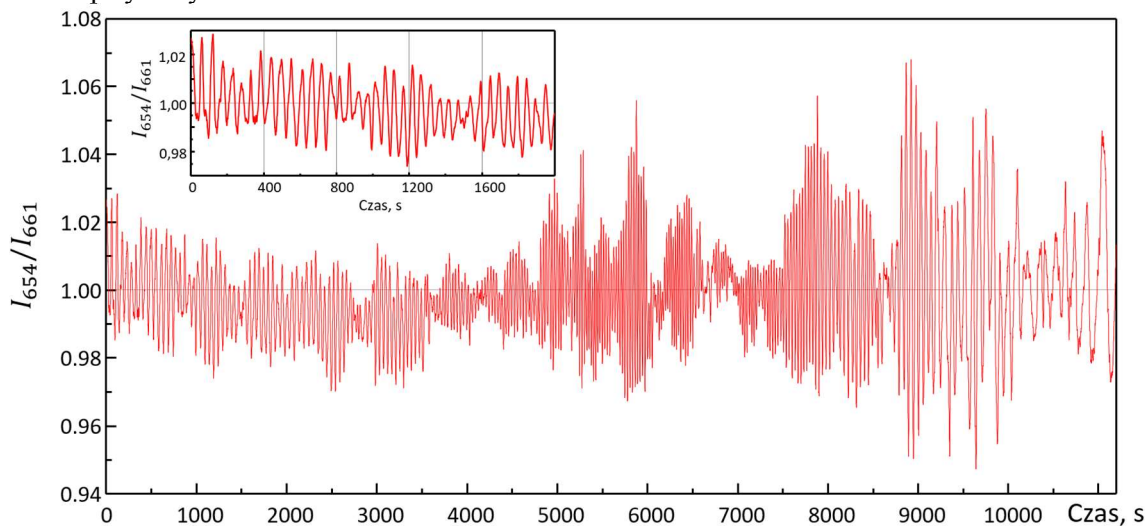
†email: i.shopa@uksw.edu.pl

Wolno parujące, naładowane mikrokrople (MK) zawiesiny cząstek luminescencyjnych (CL) o średnicy 500 nm, w glikolu dietylenowym, badano w liniowej elektrodynamicznej pułapce kwadrupolowej (LEPK). Mikrokrople o średnicy około 100 μm utrzymywano w LEPK przez kilka godzin w temperaturze pokojowej przy 30% wilgotności względnej. W celu wzbudzenia luminescencji, pojedyncze lewitujące MK oświetlano wzdłuż osi LEPK wiązką laserową o długości fali 805 nm i gęstości mocy ok. 50 W/mm². Przy takim wzbudzeniu cząstek Gd₂O₃:6% Er³⁺ zachodzi zjawisko konwersji energii „w górę”, prowadzące do intensywnej emisji zielonej i czerwonej na około dziesięciu liniach widmowych zlokalizowanych w widzialnej części widma. Linie te są przy tym znacznie oddalone od intensywnej linii wzbudzenia laserowego w zakresie bliskiej podczerwieni [1].

Z przygotowanej zawiesiny CL, o stężeniu masowym wynoszącym 2 mg/ml, za pomocą wtryskiwacza piezoelektrycznego wytwarzano naładowane MK, wykorzystując pole elektrod pierścieniowych. Lewitującą MK oświetlano także czerwoną diodą świecącą o mocy 1 W i przez mikroskop z kamerą cyfrową obserwowano jej cień. Umożliwiło to pomiar promienia z rozdzielczością ok. 1,0 μm /piksel, a także utrzymywanie MK w stabilnym w pionie położeniu, poprzez sterowanie napięciem stałym przyłożonym do dwóch elektrod poziomych. Podczas parowania kropli w pułapce częstotliwość napięcia przemiennego o amplitudzie 10 kV wymagała płynnego podnoszenia od 120 Hz do 300 Hz.

Do rejestracji widm luminescencji i rozpraszania wykorzystano spektrometr wysokiej czułości AvaSpec-HERO, wyposażony w chłodzony do 0°C detektor CCD, charakteryzujący się niskim poziomem szumów oraz możliwością szybkiej komunikacji z komputerem. Czas integracji spektrometru dobierano w zakresie od 0,2 do 2 s, co pozwalało na rejestrację widm w czasie rzeczywistym, nawet do kilku godzin.

Do tłumienia promieniowania lasera 805 nm o wysokiej intensywności, rozpraszanego przez MK, zastosowano filtr środkowozaporowy (OD > 6,0 przy 805 nm, o szerokości widmowej pasma blokowanego 34 nm). Dodatkowo światło zielonej diody laserowej (514 nm) oraz czerwonej diody LED (630 nm) wykorzystano jako linie odniesienia w zapisywanych widmach.



Rysunek 1: Zależność stosunku natężenia światła luminescencji od czasu dla linii widmowych o długości fali 654 nm i 661 nm I_{654}/I_{661} . Wstawka przedstawia początkowy fragment zależności czasowej (od 0 do 2000 s).

W ewolucji sygnałów luminescencji zaobserwowano cechy związane z modyfikacją modów pola światła w MK działającej jak sferyczna wnęka rezonansowa. Maksymalne wartości sygnałów wykazywały duże zróżnicowanie, jednak znormalizowany stosunek natężeń luminescencji dla dwóch bliskich linii widmowych ujawnia regularne oscylacje o charakterze dudnień (Rysunek 1). Nierównomierne zmiany okresu tego sygnału wiążą się z różną szybkością zmniejszania się średnicy kropli podczas jej parowania.

Literatura

- [1] Y. Shopa, M. Kolwas, I. Kamińska, G. Derkachov, K. Nyandey, T. Jakubczyk, T. Wojciechowski, A. Derkachowa, D. Jakubczyk, *JQSRT*, **296**:108439 (2023).

Badania aktywności optycznej fosforanu tytanu potasu i arsenianu tytanu potasu metodą zaawansowanej polarymetrii dwuwiaźkowej

Y. Shopa^{1,†}, M. Shopa²

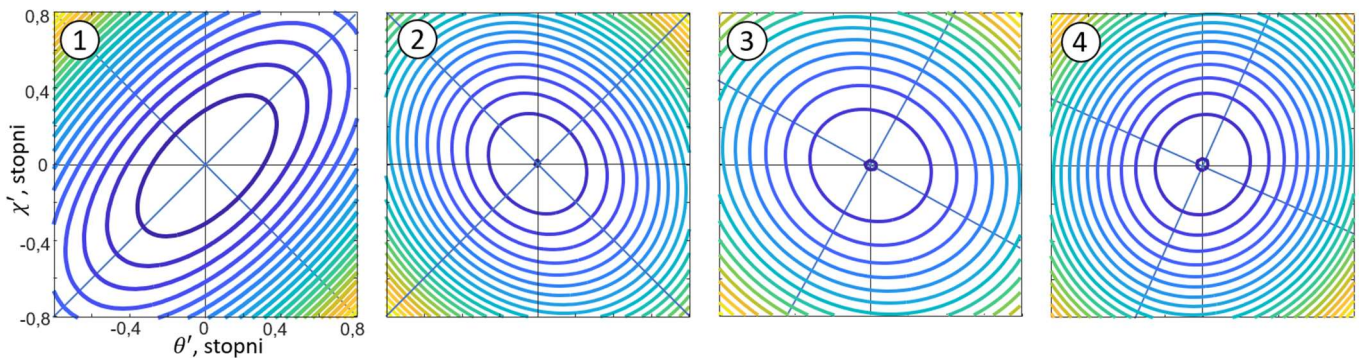
¹Uniwersytet Kardynała Stefana Wyszyńskiego w Warszawie, ul. Dewajtis 5, 01-815 Warszawa

²Wydział Fizyki Technicznej i Matematyki Stosowanej, Politechnika Gdańska, ul. Narutowicza 11/12

†email: i.shopa@uksw.edu.pl

Do pomiarów dwójłomności kołowej i aktywności optycznej w nieliniowych kryształach fosforanu tytanu potasu (KTP) i arsenianu tytanu potasu (KTA) zastosowano dwuwiaźkowy, uniwersalny polarymetr o wysokiej dokładności. Z właściwości symetrii wynika, że kryształy z rodziny KTP są aktywne optycznie, innymi słowy – oprócz dobrze znanej dwójłomności liniowej (DL) występuje również dwójłomność kołowa (DK), która jest zazwyczaj o kilka rzędów wielkości mniejsza i przejawia się jako aktywność optyczna (AO). Znaczną część pomiarów AO w obecności DL przeprowadzono za pomocą uniwersalnego polarymetru o wysokiej dokładności (HAUP) oraz jego modyfikacji [1, 2]. Interakcja światła z kryształami nieliniowymi nie może być w pełni opisana bez uwzględnienia anizotropii AO. Niewielkie zmiany czoła fali wywołane przez DK powinny być istotne przy obliczaniu kierunku dopasowania fazowego podczas generacji drugiej harmonicznej.

W układzie eksperymentalnym wykorzystano dwa jednomodowe lasery He-Ne o zbliżonych długościach fal – 594 i 633 nm. Pomiarów przeprowadzono dla dwóch orientacji kryształu, w kierunkach tworzących kąt 45 stopni względem osi krystalograficznych [100] i [010]. Przy opracowywaniu wyników pomiarów polarymetrycznych uwzględniono wielokrotne odbicia światła wewnątrz próbki kryształu. Wyniki analizowano przy użyciu funkcji transmisji optycznej $J(\theta', \chi')$ dla układu polaryzator–próbka–analyzer, a dwuwymiarowe mapy natężenia światła (Rysunek 1) umożliwiły określenie parametrów fazowych, eliptyczności fal własnych oraz błędów systematycznych.



Rysunek 1: Przekięcia powierzchni transmisji optycznej z płaszczyznami $J(\theta', \chi') = \text{const}$. Cztery wybrane 2D mapy natężenia światła otrzymane dla jednej z orientacji kryształu KTP, długości fal 594 nm (1, 3) i 633 nm (2, 4) oraz temperatur 342,5 K (1), 332,4 K (2), 307,6 K (3), 322,5 K (4). Kąty azymutu polaryzatora i analizatora są tutaj oznaczone odpowiednio jako θ' i χ' .

Stwierdzono, że wielokrotne odbicia światła w próbce istotnie wpływają na mierzone wartości charakterystyczne w precyzyjnej polarymetrii. Wymaga to modyfikacji podstawowych zależności, w związku z czym rośnie liczba parametrów, które należy uwzględnić, a standardowy schemat obróbki wyników typu HAUP staje się bardziej złożony. Dwuwiaźkowa metoda polarymetryczna umożliwiła uwzględnienie wpływu wielokrotnych odbić światła na podstawowe funkcje oraz pozwoliła obliczyć eliptyczność fal własnych na podstawie pomiaru tylko jednego charakterystycznego azymutu polaryzatora dla każdej długości fali oddzielnie. Zastosowanie dwóch długości fali pozwoliło również ograniczyć zakres zmian temperatury podczas pomiarów, który w przypadku konwencjonalnego HAUP z jedną długością fali może przekraczać 100 K, zwiększając ryzyko błędów systematycznych. Zgodnie z naszymi danymi, wartość rotacji optycznej dla kryształów KTP i KTA nie przekracza kilku stopni na milimetr (2,30 i 6,40 stopni/mm, odpowiednio), czyli znacznie mniejsze wartości niż te, które wcześniej podawano lub obliczano.

Literatura

- [1] M. Shopa, N. Ftomyn, Y. Shopa, *Opto-Electron. Rev.* **32** e152682 (2024).
- [2] M. Shopa, N. Ftomyn, Y. Shopa, *J. Appl. Cryst.* **56** 432–438 (2023).

Kształtowanie wiązek w terahercowych układach optycznych użytych do konkretnych zastosowań

M. Kaluża¹, M. Surma¹, P. Komorowski², A. Nieradka¹, A. Siemion^{1,†}

¹Wydział Fizyki, Politechnika Warszawska, Koszykowa 75, 00-662 Warszawa

² Instytut Optoelektroniki, Wojskowa Akademia Techniczna, gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa

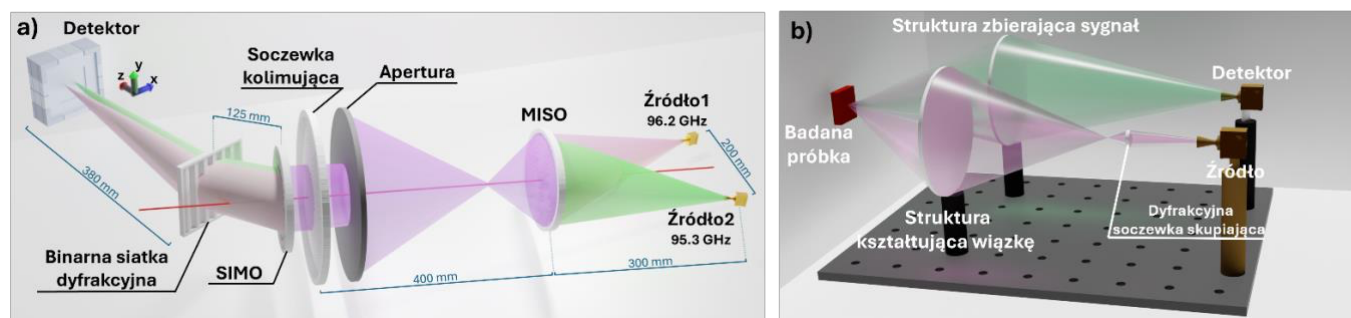
†email: agnieszka.siemion@pw.edu.pl

W ostatnich latach technologie terahercowe (THz) znajdują najbardziej obiecujące zastosowania w dziedzinach takich jak telekomunikacja czy diagnostyka medyczna [1,2]. Zastosowania te wymagają precyzyjnego kształtowania wiązek optycznych, co możliwe jest dzięki dedykowanym dyfrakcyjnym elementom optycznym (DOE), które umożliwiają formowanie THz frontów falowych i realizację zaawansowanych układów optycznych [3].

Projektowanie zaawansowanych DOE odbywa się przy użyciu algorytmów iteracyjnych oraz metod opartych na sieciach neuronowych, co umożliwia dowolne kształtowanie rozkładu natężenia i fazy sygnału THz [4]. Dzięki technologii druku przestrzennego, takich jak FDM (*ang. fused deposition modeling*) czy SLS (*selective laser sintering*), możliwe jest wytwarzanie DOE w wysokiej rozdzielczości względem długości fali THz. Wykorzystanie odpowiednich materiałów polimerowych zapewnia właściwości optyczne wytworzonych struktur porównywalne z komercyjnie dostępnymi soczewkami THz [5].

W niniejszej pracy przedstawiono THz układy optyczne, oparte na DOE, dedykowane konkretnym zastosowaniom w telekomunikacji i obrazowaniu biomedycznym. W pierwszym przypadku DOE realizują przestrzenną multipleksację i demultipleksację sygnałów THz w systemach typu MIMO (*ang. multiple-input multiple-output*). DOE łączą promieniowanie z wielu źródeł w pojedynczy kanał optyczny oraz separują je w wolnej przestrzeni, co zwiększa pojemność łączy telekomunikacyjnych. Połączenie funkcjonalności multipleksacji przestrzennej i częstotliwościowej umożliwia efektywne przesyłanie sygnałów w pojedynczym kanale optycznym nawet przy separacji spektralnej sygnałów rzędu 0,9 GHz [6]. Wdrożenie tego typu rozwiązań pozwoli na dalszy rozwój przyszłych technologii telekomunikacyjnych, takich jak sieci 6G. Schemat układu do multipleksacji i demultipleksacji przestrzennej promieniowania THz do zastosowań telekomunikacyjnych zaprezentowano na Rysunku 1a.

Inny projekt DOE posłużył do zbudowania systemu skanującego do diagnostyki medycznej, do obrazowania nowotworów skóry [7]. Technologia THz umożliwia bezinwazyjną analizę struktur tkankowych, co pozwala na wykrywanie zmian nowotworowych. Precyzyjna manipulacja wiązkami promieniowania THz za pomocą DOE gwarantuje optymalizację procesu obrazowania, zmniejszając rozmiary układu optycznego jednocześnie zachowując odpowiedni kontrast uzyskiwanych obrazów. Na Rysunku 1b zilustrowano schemat układu skanującego do obrazowania nowotworów skóry.



Rysunek 1: a) Schemat układu do multipleksacji i demultipleksacji przestrzennej promieniowania THz; b) schemat układu do obrazowania nowotworów skóry.

Literatura

- [1] A. Shafie, N. Yang, C. Han, J. M. Jornet, M. Juntti, and T. Kurner, *IEEE Network* **37**, 162 (2023).
- [2] Z. Yan, L.-G. Zhu, K. Meng, W. Huang, and Q. Shi, *Trends in Biotechnology* **40**, 816 (2022).
- [3] A. Siemion, *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves* **40**, 477 (2019).
- [4] P. Komorowski, M. Kurowska, M. Kaluza, P. Czerwińska, P. Zagrajek, and A. Siemion, *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology* **14**, 228 (2024).
- [5] M. Kaluza, M. Surma, P. Komorowski, M. Walczakowski, and A. Siemion, in *2022 47th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz)*, (2022).
- [6] M. Kaluza, P. Komorowski, A. Nieradka, P. Zagrajek, and A. Siemion, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, (2025), Early Access.
- [7] A. Siemion, P. Komorowski, M. Surma, I. Ducin, P. Sobotka, M. Walczakowski, and E. Czerwińska, *Optics Express* **28**, 715 (2020).

Demonstracja Fourier-domain Quantum Optical Coherence Tomography do szybkiego tomograficznego obrazowania kwantowego

Crislane de Brito^{1,†}, Sylwia Kolenderska¹, Piotr Kolenderski³

¹Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej, Uniwersytet Mikołaja Kopernika, Grudziądzka 5, 87-100 Toruń
†email: crislane.brito@umk.pl

Wykorzystując skorelowane widmowo pary fotonów zamiast klasycznego światła laserowego i detekcję koherencji zamiast detekcji intensywności światła, Quantum Optical Coherence Tomography (Q-OCT) przewyższa klasyczne OCT w kilku kategoriach eksperymentalnych. Zapewnia dwukrotnie lepszą rozdzielczość osiową przy tej samej szerokości pasma widmowego i jest odporna na dyspersję chromatyczną parzystego rzędu, w tym dyspersję prędkości grupowej odpowiedzialną za większość degradacji rozdzielczości osiowej w obrazach OCT. Q-OCT przeprowadzono w konfiguracji dziedzin czasu, w której jedna linia dwuwymiarowego obrazu jest pozyskiwana przez osiowe przesunięcie lustra w ramieniu referencyjnym interferometru i pomiar szybkości koherencji fotonów docierających do dwóch detektorów wrażliwych na pojedyncze fotony. Chociaż z powodzeniem wytwarza obrazy o podwójnej rozdzielczości i anulowanej dyspersji, jest nadal stosunkowo wolna i nie może konkurować ze swoim klasycznym odpowiednikiem. Tutaj eksperymentalnie demonstrujemy Q-OCT w nowej konfiguracji dziedzin Fouriera, teoretycznie zaproponowanej w 2020 r., w której lustro referencyjne jest nieruchome, a widma wspólne są pozyskiwane. Pokazujemy, że taka konfiguracja umożliwia szybsze pozyskiwanie obrazu niż konfiguracja domeny czasu, co stanowi krok naprzód w kierunku praktycznego i konkurencyjnego rozwiązania na arenie OCT. Omówiono ograniczenia nowego podejścia, porównując je z ograniczeniami zarówno podejścia domeny czasu, jak i tradycyjnego OCT.

Podziękowania i źródła finansowania

Autorzy potwierdzają wsparcie finansowe ze strony programu ramowego Unii Europejskiej w zakresie badań naukowych i innowacji Horyzont Europa, projektu SEQUOIA, na podstawie umowy o dotację nr 101070062.

Analiza MARVEL wysokorozdzielczych widm rowibronicznych $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$

S. Mahmoud¹, N. El-Kork¹, N. A. Elkher¹, M. Almehairbi², R. Al Abdallah³, **Aleksandra Stasik**^{4,5†}, R. Hakalla⁴, W. Ubachs⁶, R. W. Field⁷, N. de Oliveira⁸, W. Szajna⁴, S. Ryzner^{4,5}, M. I. Malicka⁹, T. Furtenbacher¹⁰, O. P. Yurchenko¹¹, S. N. Yurchenko¹¹, J. Tennyson¹¹

¹Wydział Fizyki, Uniwersytet Khalifa, Abu Zabi, Zjednoczone Emiraty Arabskie

²Wydział Chemii, Uniwersytet Khalifa, Abu Zabi, Zjednoczone Emiraty Arabskie

³Wydział Inżynierii Mechanicznej i Jądrowej, Uniwersytet Khalifa, Abu Zabi, Zjednoczone Emiraty Arabskie

⁴Laboratorium Spektroskopii Materiałów, Instytut Nauk Fizycznych, Uniwersytet Rzeszowski, al. Tadeusza Rejtana 16C, 35-959 Rzeszów, Polska

⁵Szkoła Doktorska Uniwersytetu Rzeszowskiego, Uniwersytet Rzeszowski, al. Tadeusza Rejtana 16C, 35-959 Rzeszów, Polska

⁶Wydział Fizyki i Astronomii oraz LaserLaB, Vrije Universiteit, De Boelelaan 1105, 1081 HV Amsterdam, Holandia

⁷Wydział Chemii, Massachusetts Institute of Technology, 77 Massachusetts Ave, Cambridge, MA 02139, USA

⁸Synchrotron SOLEIL, L'Orme des Merisiers, Départementale 128, 91190 Saint-Aubin, Francja

⁹Wydział Matematyki i Fizyki Stosowanej, Politechnika Rzeszowska, al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów, Polska

¹⁰Complex Chemical Systems Research Group HUN-REN-ELTE, ELTE TTK Kémiai Intézet, Pázmány Péter sétány 1/A, 1117 Budapeszt, Węgry,

¹¹ Wydział Fizyki i Astronomii, University College London, Gower Street, London WC1E 6BT, Wielka Brytania

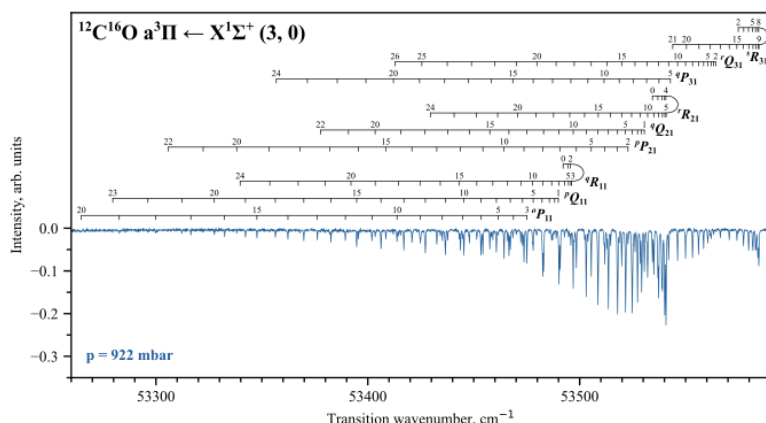
†email: aleksandrast@dokt.ur.edu.pl

Tlenek węgla (CO) jest jedną z kluczowych cząsteczek w badaniach atmosfery planet i egzoplanet oraz procesów zachodzących w przestrzeni kosmicznej. Precyzyjne wyznaczenie energii jego poziomów energetycznych oraz opisanie procesów nimi zarządzających ma fundamentalne znaczenie dla modelowania zjawisk i dynamiki obiektów astrofizycznych.

Badania prowadzone w Laboratorium Spektroskopii Materiałów (LSM) Instytutu Nauk Fizycznych są ukierunkowane na precyzyjne pomiary częstotliwości molekuł wykorzystywanych m.in. przez globalną bazę danych ExoMol. Wyniki naszych badań, 806 linii spektralnych progresji ($v' - 0$) systemu Camerona ($a^3\Pi - X^1\Sigma^+$), istotnie rozszerzyły te zasoby i dostarczyły informacji na temat struktury elektronowej i dynamiki molekuly tlenku węgla w zakresie systemów zabronionych regułami wyboru. Otrzymane widma otrzymano za pomocą spektroskopii absorpcyjnej w zakresie próżniowego ultrafioletu (VUV-FT) z wykorzystaniem spektrometru Fouriera zainstalowanego na linii DESIRS synchrotronu SOLEIL pod Paryżem.

W celu zbudowania bazy ExoMol dla molekuly CO zastosowano algorytm MARVEL (Measured Active Rotational-Vibrational Energy Levels), który umożliwia dokładne określenie poziomów energetycznych CO poprzez systematyczną analizę szerokiego zbioru danych eksperymentalnych. Wykorzystanie MARVEL pozwoliło na integrację wyników z 17 wcześniejszych badań, prowadząc do weryfikacji 5213 przejść ro-wibronicznych oraz wyznaczenia energii 2586 poziomów energetycznych obejmujących sześć najniższych położonych stanów elektronowych cząsteczki CO. Algorytm ten stanowi zaawansowane narzędzie umożliwiające unifikację danych spektroskopowych i ich spójną interpretację. Dzięki niemu będzie można wygenerować nieznane dotąd linie o wysokich rotacjach dla systemów będących przedmiotem obecnej pracy.

Przedstawione badania są wynikiem współpracy grupy fizyków molekularnych Uniwersytetu Rzeszowskiego z University College London (Wielka Brytania), Vrije Universiteit (Holandia), Massachusetts Institute of Technology (USA), Khalifa University (Zjednoczone Emiraty Arabskie), Synchrotron SOLEIL (Francja), Politechnika Rzeszowska, oraz HUN-REN-ELTE Complex Chemical Systems Research Group (Węgry).



Rys. 1. Widmo wysokiej rozdzielczości pasma ($3 - 0$) systemu Camerona ($a^3\Pi - X^1\Sigma^+$) molekuly $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$.

Wykorzystanie algorytmów wnioskowania Bayesowskiego w jednoramkowych interferometrycznych pomiarach nanometrowych struktur półprzewodnikowych

D. Suski^{1,†}, M. Cywińska², J. Winnik², P. Zdańkowski², M. Józwik², M. Trusiak^{2,†}

¹Institut Automatyki i Robotyki, Wydział Mechatroniki, Politechnika Warszawska,
ul. Św. Andrzeja Boboli 8, 02-525 Warszawa

²Institut Mikromechaniki i Fotoniki, Wydział Mechatroniki, Politechnika Warszawska,
ul. Św. Andrzeja Boboli 8, 02-525 Warszawa

†email: damian.suski@pw.edu.pl, maciej.trusiak@pw.edu.pl

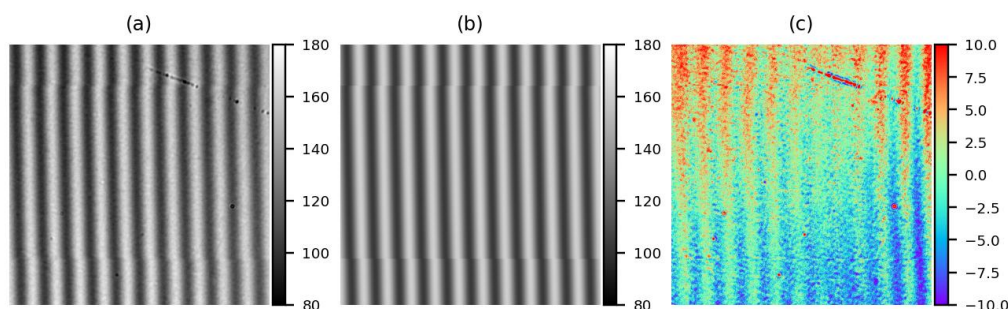
Nanometrologia stanowi kluczowe narzędzie w kontroli procesów produkcji struktur półprzewodnikowych. Techniki interferometrii o szerokim polu widzenia stanowią opłacalną, nieniszczącą metodę pomiarów geometrii takich struktur, tworząc atrakcyjną alternatywę dla tradycyjnych technik pomiarów takich jak mikroskopia sił atomowych czy mikroskopia elektronowa [1-3].

W ramach prowadzonych prac zaproponowano wykorzystanie algorytmów wnioskowania Bayesowskiego w pomiarach geometrii obiektów o rozmiarach rzędu nanometrów (np.: falowody), na podstawie pojedynczego interferogramu zarejestrowanego w szerokim polu widzenia. Takie podejście eliminuje konieczność stosowania w pomiarach czasochłonnego i kosztownego skanowania takiego jak w mikroskopii sił atomowych.

Wykorzystany algorytm wnioskowania Bayesowskiego wyznacza nie tylko optymalne wartości parametrów geometrycznych obiektu (np.: wysokość, szerokość, orientacja struktury schodkowej), ale także rozkłady prawdopodobieństwa tych parametrów [4,5]. Pozwala to na łatwą ocenę niepewności pomiarów i wyznaczenie przedziałów ufności pomiarów bezpośrednio na podstawie wyników działania algorytmu. Danymi wejściowymi dla zastosowanego algorytmu wnioskowania Bayesowskiego są model geometryczny obiektu wraz z zakładanymi tolerancjami (np.: wynikającymi z projektu struktury) oraz pojedynczy interferogram stanowiący wynik pomiaru. Wartość prawdopodobieństwa przypisywana wektorom parametrów zależy od stopnia dopasowania teoretycznego obrazu prążkowego generowanego przez obiekt o zadanych parametrach i zarejestrowanego obrazu prążkowego.

Dotychczasowe wyniki badań wskazują na wysoką czułość metody, odporność na szумы pomiarowe i inne błędy wynikające ze specyfiki pomiaru (np.: nieczystość optyki rejestrującej) oraz nieciągłości obrazu prążkowego, charakterystyczne dla schodkowych struktur półprzewodnikowych.

Na Rysunku 1 przedstawiono wyniki dopasowania obrazu prążkowego zarejestrowanego dla testowego obiektu schodkowego o certyfikowanej wysokości $15 \pm 1 \text{ nm}$. Optymalne wartości parametrów zostały obliczone jako średnie z rozkładów prawdopodobieństwa parametrów, wyznaczonych przez algorytm wnioskowania Bayesowskiego. Zmierzona wysokość schodka wynosi $14.89 \pm 0.14 \text{ nm}$ i mieści się w zadanej tolerancji.



Rysunek 1: Wyniki dopasowania obrazu prążkowego dla testowego obiektu schodkowego o certyfikowanej wysokości $15 \pm 1 \text{ nm}$ (a) zarejestrowany obraz prążkowy w skali szarości, (b) dopasowany obraz prążkowy w skali szarości, (c) mapa różnic pomiędzy dopasowanym a zarejestrowanym obrazem prążkowym.

Podziękowania i źródła finansowania

Źródło finansowania badań: Projekt Preludium BIS 2022/47/O/ST7/02360 finansowany przez Narodowe Centrum Nauki (Polska)

Literatura

- [1] W. Osten, R. Kowarschik, Y. Bai, *Light: Advanced Manufacturing* **3(4)** 627 (2022).
- [2] C. Zuo, J. Qian, S. Feng, W. Yin, Y. Li, P. Fan, J. Han, K. Qian, Q. Chen, *Light: Science & Applications* **11**, 39 (2022).
- [3] P. de Groot, *Advances in Optics and Photonics* **7**, 1 (2015).
- [4] E. Higson, W. Handley, M. Hobson, A. Lasenby, *Statistics and Computing* **29**, 891 (2018).
- [5] J.S. Speagle, arXiv:1904.02180 (2020).

Materiały wytwarzane metodą elektroprowadzenia dla optyki i fotoniki

L. Sznitko^{1,†}, A. Szukalska¹, K. Kołodzińska¹, M. Hancharova¹, Z. Korczak¹

¹Wydział Chemiczny, Politechnika Wrocławska, Wyb. Stanisława Wyspiańskiego, 50-370 Wrocław, Polska
†email: lech.sznitko@pwr.edu.pl

Elektroprowadzenie jest techniką wytwarzania włókien polimerowych w mikro- i nano-skali wykorzystującą do tego celu zjawisko elektrohydrodynamiczne. Jeśli do kapilary (zwanej dyszą lub emiterym), ze znajdującą się na jej końcu kroplą roztworu polimeru przyłożone zostanie odpowiednio wysokie napięcie, to dojdzie do jej deformacji w tzw. stożek Taylora. Na jego wierzchołku formowany jest wówczas jednorodny strumień roztworu, który w trakcie przemieszczania się wysycha, tworząc włókno polimerowe. Materiał w postaci pojedynczych włókien lub też całych włókien odbierany jest na metalowym kolektorze.

Technika elektroprowadzenia jest prosta w użyciu, tania i możliwa do stosowania na skalę przemysłową [1]. Ponadto, możliwość zmian parametrów procesowych sprawia, że materiały wytwarzane tą metodą mogą mieć różne rozmiary średnic, wahające się pomiędzy dziesiątkami nanometrów a dziesiątkami mikrometrów, i mogą przyjmować różne morfologie np. w postaci włókien jednorodnych, z koralikami, porowatych, w kształcie tasiemek, typu rdzeń-płaszcz, itd. Dodatkowo, zmiana parametrów procesu pozwala również na tworzenie aerozoli, które osiadają na kolektorze w formie polimerowych nanocząstek [2].

Łatwość funkcjonalizacji materiału wykorzystywanego w procesie elektroprowadzenia, możliwość uzyskiwania zjawiska światłowodzenia wewnątrz włókien oraz silne, wielokrotne rozpraszania światła od włókniny pozwala twierdzić, że materiały tego typu mogą stanowić ciekawe rozwiązania dla optyki i fotoniki [3].

Niniejsza prezentacja będzie dotyczyła badań prowadzonych nad zjawiskiem randomicznej akcji laserowej (RAL) i potencjalnego zastosowania luminescencyjnych włókien do konwersji koloru światła dla diod elektroluminescencyjnych. W przypadku badań nad RAL w prezentacji omówione zostaną wyniki uzyskiwane dla włókien hierarchicznych zdolnych do wzmacniania światła w różnych zakresach spektralnych, prowadzących do polichromatycznej akcji laserowej. Oprócz charakterystyk spektralnych omówione zostaną również charakterystyki kątowe emisji laserowej. W przypadku badań prowadzonych dla włókien mających współpracować z powszechnie używanymi diodami elektroluminescencyjnymi, omówione będą wyniki dotyczące charakterystyk kątowych rozpraszania światła od włókien polimerowych, wyniki badań nad zastosowaniem barwników o krótkim czasie życia fluorescencji i ich potencjalne zastosowanie w technologiach Li-Fi. Na koniec prezentacji, przedyskutowane zostaną potencjalne możliwości stosowania materiałów elektroprowadzonych w innych obszarach fotoniki i optyki, np. w optyce nieliniowej lub dla zastosowań sensorowych.

Podziękowania i źródła finansowania

Badania przedstawione w prezentacji sfinansowano w ramach projektu Narodowego Centrum Nauki o numerze 2021/41/B/ST5/01797.

Literatura

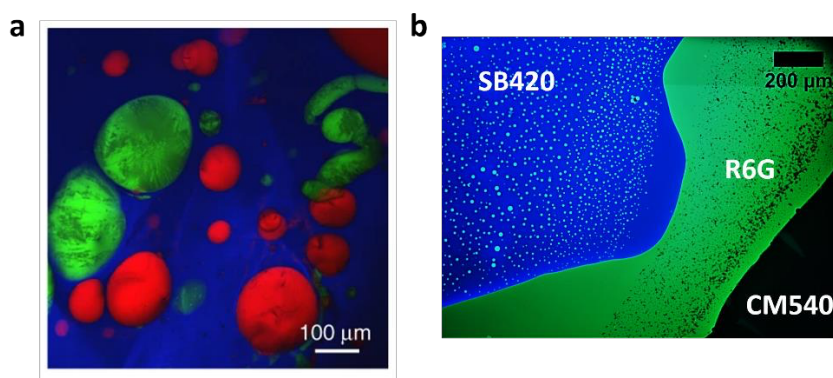
- [1] L. Persano, A. Camposeo, C. Tekmen, D. Pisignano, *Macromol. Mater. Eng.* **298**, 504–520 (2013).
- [2] S.J. Choi, L. Persano, A. Camposeo, J.S. Jang, W.T. Koo, S.J. Kim, H.J. Cho, I.D. Kim, and D. Pisignano, *Macromol. Mater. Eng.* **302**, 1600569 (2017).
- [3] L. Persano, A. Camposeo, D. Pisignano, *Prog. Polym. Sci.* **43**, 48–95 (2015).

Przestrzennie separowane barwniki w organicznych układach jako platforma do wielokolorowej, białej emisji i białego laserowania

A. Szukalska¹

¹ Katedra Optyki Materii Miękkiej, Wydział Chemiczny, wybrzeże Stanisława Wyspiańskiego 27, Politechnika Wroclawska, 50-370, Wrocław

Jednym z kluczowych wyzwań w uzyskiwaniu przestrzajalnej oraz białej emisji i laserowania pozostaje kontrolowane generowanie pożądanego koloru światła, w tym bieli odpowiadającej standardowi D65. Problem ten wynika głównie z niepożądanego transferu energii pomiędzy barwnikami, który jest często indukowany ich bliskim sąsiedztwem. W niniejszej pracy zaprezentowano potencjalne rozwiązanie tego zagadnienia poprzez zastosowanie przestrzennie rozdzielonych barwników laserowych emitujących w zakresie czerwonym, zielonym i niebieskim (RGB) w specjalnie zaprojektowanych układach organicznych [1-3]. Do realizacji tej koncepcji szczególnie dobrze nadają się ciekłe kryształy [2-3] oraz polimery [1], które umożliwiają tworzenie kompaktowych, funkcjonalnych struktur o wyjątkowej możliwości strojenia widmowego. Dzięki temu możliwe jest uzyskanie kolorów emisji zgodnych z przemysłowymi standardami barwy (sRGB, Adobe RGB czy DCI-P3). Randomiczne laserowanie (ang. *random lasing*) stanowi obiecującą strategię generacji białego światła laserowego. Poprzez wykorzystanie wielokrotnego rozpraszania światła w ośrodkach nieuporządkowanych, ułatwia ono na projektowanie elastycznych źródeł światła pozwalając na integrację wielu materiałów aktywnych naraz. Opracowane układy umożliwiają emisję białego światła o bardzo niskich odchyleniach współrzędnych chromatycznych względem iluminantów z serii D (w tym D65, D55 i D75), przewyższając dotychczas raportowane wartości dla systemów organicznych, hybrydowych i nieorganicznych. Dzięki ograniczeniu transferu energii uzyskano precyzyjną kontrolę nad emisją laserową. Przedstawione wyniki potwierdzają, że zaprojektowane systemy mają duży potencjał jako platforma dla nowej generacji laserów randomicznych. Proponowane rozwiązania mogą znaleźć zastosowanie m.in. w technologii Li-Fi, wyświetlaczach laserowych, czujnikach optycznych, przełącznikach i modulatorach, przybliżając komercjalizację w pełni przestrzajalnych laserów organicznych [4-5].



Rysunek 1: System organiczny do wielokolorowego i białego laserowania z zastosowaniem ciekłego kryształu (krople) i polimeru jako matrycy dla barwników RGB (a) oraz układ w pełni ciekły z separacją faz między ciekłym kryształem, cieczą jonową i wodą z selektywnie domieszkowanymi barwnikami RGB (b). Zdjęcia wykonane przy pomocy mikroskopii konfokalnej (a) i fluorescencyjnej (b)

Literatura

- [1] J. Phys. Chem. B 2025, 129, 9, 2514–2525
- [2] Light Sci.&Appl. 2020, 9, 19
- [3] Adv. Funct. Mater. 2024, 34, 36
- [4] J. Opt. Commun., 2018, 42, 1
- [5] Adv. Mater. 2021, 33, 37

Właściwości fluorescencyjne materiałów szklano-ceramicznych domieszkowanych jonami ziem rzadkich otrzymanych metodą laserowo indukowanej krystalizacji szkła tellurowo-germanowego

W. Talik^{1,2, †}, P. Zając³, M. Leśniak³, D. Dorosz³, W. Zawadzki¹, K. Dzierżęga¹

¹ Instytut Fizyki im. Mariana Smoluchowskiego, Uniwersytet Jagielloński, ul. prof. S. Łojasiewicza 11, 30-348 Kraków, Polska

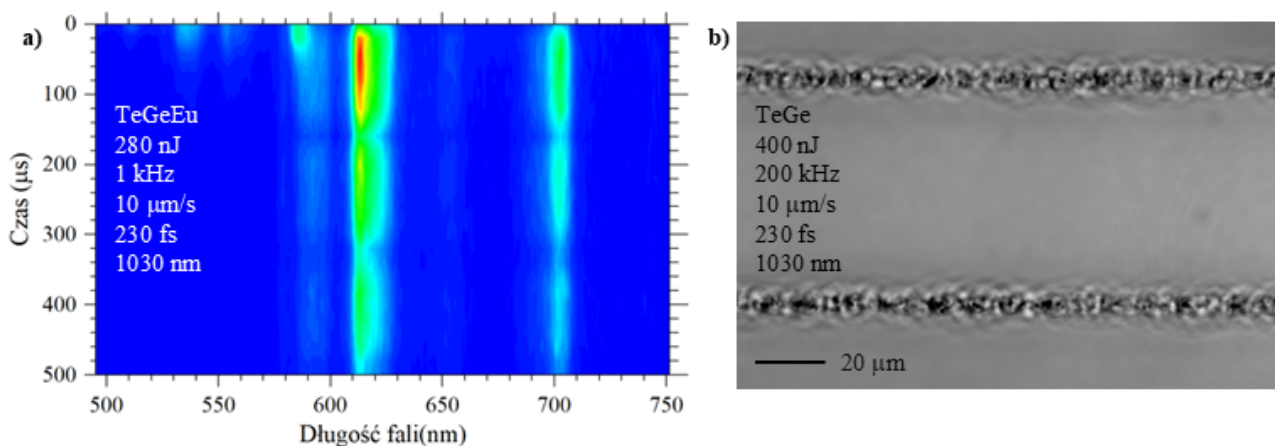
² Szkoła Doktorska Nauk Ścisłych i Przyrodniczych, Uniwersytet Jagielloński, ul. prof. S. Łojasiewicza 11, 30-348 Kraków

³ Akademia Górniczo Hutnicza, al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Polska

†email: wojciech.talik@doctoral.uj.edu.pl

Krystalizacja indukowana laserem femtosekundowym (fs) to skuteczna metoda umożliwiająca lokalną i selektywną krystalizację w objętości szkieł [1]. Obecne badania nad aktywnymi, transparentnymi materiałami szklano-ceramicznymi koncentrują się na szklach o transmisji powyżej bliskiej podczerwieni. Do takich szkieł należą szkła tellurowe i germanianowe, które wyróżniają się korzystnymi właściwościami optycznymi, takimi jak szeroki zakres transmisji (do 5 μm) oraz niska energia fononów – odpowiednio około 750 cm^{-1} i 900 cm^{-1} [2]. Parametry te sprzyjają redukcji przejść bezpromienistych jonów ziem rzadkich, co przekłada się na wzmocnienie właściwości luminescencyjnych i sprawia, że szkła domieszkowane tymi jonami stanowią perspektywiczny materiał do zastosowań w fotonice, optoelektronice oraz technologiach detekcji w zakresie średniej podczerwieni (mid-IR). Dodatkowo, wbudowanie jonów ziem rzadkich w strukturę fazy krystalicznej w materiałach szklano-ceramicznych z układu $\text{TeO}_2\text{-GeO}_2$ przyczynia się do dalszej poprawy właściwości luminescencyjnych szkła bazowego [3].

W niniejszej pracy zaprezentowano wyniki badań strukturalnych oraz właściwości fluorescencyjnych materiałów szklano-ceramicznych otrzymanych w wyniku laserowo indukowanej krystalizacji szkła z układu $\text{TeO}_2\text{-GeO}_2\text{-Ga}_2\text{O}_3\text{-ZnF}_2\text{-BaF}_2\text{-Na}_2\text{O}$ domieszkowanego jonami ziem rzadkich ($\text{RE} = \text{EuF}_3, \text{ErF}_3, \text{YbF}_3$). Proces krystalizacji realizowano z wykorzystaniem wiązki lasera femtosekundowego o czasie trwania impulsu 230 fs i długości fali 1030 nm. Wiązka była ogniskowana za pomocą obiektywu mikroskopowego ($\text{NA} = 0,25$) na głębokości około 100 μm pod powierzchnią próbki. W trakcie obróbki próbka była przemieszczana względem ogniska wiązki laserowej z prędkością rzędu 10 $\mu\text{m/s}$. Zostało potwierdzone, że dla szerokiego zakresu energii oraz częstotliwości impulsów lasera femtosekundowego możliwa jest krystalizacja fluorku baru (BaF_2) w objętości szkła, zarówno nie-, jak i zawierającego jony ziem rzadkich. Dodatkowo, na widmach Ramana linii szklano-ceramicznych zarejestrowano wzrost intensywności pasm odpowiadających drganiom wiązań Te-O-Te i Ge-O-Ge , co potwierdza zmiany w więźbie szkła po oddziaływaniu wiązki lasera. Ponadto zmierzone zostały widma fluorescencji wzbudzonej w obszarach modyfikowanych i nietraktowanych wiązką laserową oraz widma luminescencji konwersji w górę wzbudzonej impulsami lasera fs.



Rysunek 1: a) Ewolucja widma luminescencji wzbudzonej impulsami lasera femtosekundowego w szkle domieszkowanym jonami europu w czasie. b) Zdjęcie mikroskopowe przykładowych struktur wytworzonych w szkle niedomieszkowanym jonami ziem rzadkich podczas naświetlania impulsami lasera fs.

Literatura

- [1] S. D. McAnany, K. J. Veenhuizen, A. M. Kiss, J. Thieme, D. A. Nolan, B. G. Aitken, V. Dierolf, H. Jain, *Journal of Non-Crystalline Solids*, **551**, 120396 (2021).
- [2] M. Hongisto, A. Veber, Y. Petit, T. Cardinal, S. Danto, V. Jubera, L. Petit, *Materials*, **13**, 13 (2020).
- [3] W. Blanc, Y. G. Choi, X. Zhang, M. Nalin, K. A. Richardson, G. C. Righini, M. Ferrari, A. Jha, J. Massera, S. Jiang, J. Ballato, L. Petit, *Progress in Materials Science*, **134**, 101084 (2023).

Szerokopasmowa spektroskopia gazów w niskiej próżni z wykorzystaniem światłowodu antyrezonansowego z rdzeniem powietrznym i lasera Cr:ZnS

D. Tomaszewska-Rolla^{1,†}, P. Jaworski¹, D. Wu^{2,3}, F. Yu^{2,3}, O. Szewczyk¹, J. Sotor¹, M. Kowalczyk¹

¹Wydział Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów, Politechnika Wrocławska, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370, Wrocław

²Hangzhou Institute for Advanced Study, University of Chinese Academy of Sciences, Hangzhou 310024, Chiny

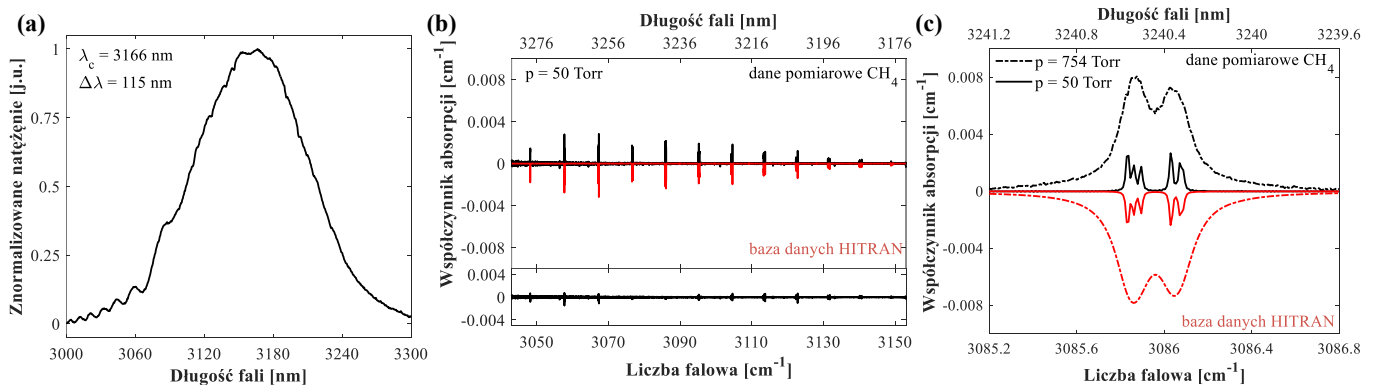
³Key Laboratory of Materials for High Power Laser, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,

Chinese Academy of Sciences, 201800 Shanghai, Chiny

†email: dorota-tomaszewska-rolla@pwr.edu.pl

Spektroskopia z użyciem optycznych grzebieni częstotliwości, dzięki wysokiej rozdzielczości i szerokiemu zakresowi spektralnemu pomiarów, pozwala na dokładny pomiar kształtu linii absorpcyjnych w szczególności w próżni, gdy linie nie są poszerzone ciśnieniowo. Aby zwiększyć detekcyjność takich układów wykorzystuje się komórki wieloprześciowe lub światłowody antyrezonansowe z rdzeniem powietrznym (ang. antiresonant hollow-core fibers, ARHCFs), których zastosowanie zostało już zaprezentowane zarówno ze źródłami wąsko- jak i szerokopasmowymi w bliskiej i średniej podczerwieni [1]. Niezbadanym jeszcze tematem jest szerokopasmowy pomiar linii absorpcyjnych gazów znajdujących się w niskiej próżni za pomocą światłowodu ARHCF.

Niniejsza praca przedstawia pierwszą demonstrację pomiarów linii absorpcyjnych gazów w niskiej próżni z wykorzystaniem optycznego grzebienia częstotliwości w średniej podczerwieni oraz samodzielnie wykonanego światłowodu antyrezonansowego z rdzeniem powietrznym. Źródłem promieniowania w eksperymencie był laser impulsowy Cr:ZnS [2], którego promieniowanie o długości fali 2,3 μm zostało przesunięte do 3,17 μm (Rys. 1(a)) za pomocą efektu samoprzesunięcia częstotliwości solitonu w światłowodzie fluorkowym typu ZBLAN (La Verre Fluoré, ZFG SM [2.2] 7.5/150) [3]. Wiązka światła była następnie sprzęgana do światłowodu antyrezonansowego o średnicy rdzenia 78 μm i długości 2,28 m, a widmo wyjściowe rejestrowano za pomocą spektrometru Fourierowskiego. Pomiary wykonano dla 200 ppmv metanu (CH_4) w dwóch ciśnieniach: 50 oraz 754 Torr. Rys. 1(b) przedstawia zmierzony współczynnik absorpcji CH_4 (czarna linia) porównany z modelem wykorzystującym rozkład Voigta i parametry linii z bazy HITRAN 2020 (czerwona linia) dla niskiego ciśnienia wraz z residuum dopasowania. Na Rys. 1(c) zaprezentowano współczynnik absorpcji w zakresie $\sim 3086 \text{ cm}^{-1}$ zmierzony zarówno w niskim jak i wysokim ciśnieniu (czarna ciągła i przerywana linia) wraz z modelem (czerwona linia).



Rysunek 1: (a) widmo solitonu generowanego w światłowodzie ZBLAN za pomocą lasera Cr:ZnS. (b) widmo absorpcyjne CH_4 w ciśnieniu 50 Torr zmierzone przy użyciu solitonu (kolor czarny) w porównaniu do widma z bazy danych HITRAN (kolor czerwony) wraz z residuum dopasowania w dolnym panelu. (c) zmierzone widmo absorpcyjne CH_4 (kolor czarny) w ciśnieniu 50 Torr (linia ciągła) i 754 Torr (linia przerywana) w porównaniu do widma z bazy danych HITRAN (kolor czerwony).

Podsumowując, zaprezentowano pierwszą demonstrację pomiarów spektroskopowych gazów w niskiej próżni wykonanych przy użyciu antyrezonansowego światłowodu z rdzeniem powietrznym oraz szerokopasmowego źródła promieniowania na bazie lasera Cr:ZnS przestrajanego spektralnie w światłowodzie ZBLAN.

Podziękowania i źródła finansowania

Badania sfinansowano dzięki grantom: 2022/47/B/ST7/00971, 2023/02/1/ST7/00006 (NCN), BPN/PPO/2022/1/00028/U/00001 (NAWA) oraz FENG.02.02-IP.05-0069/23 (FNP).

Literatura

- [1] D. Tomaszewska-Rolla et al., *Opt. Express* **32**(6), 10679–10689 (2024).
- [2] M. Kowalczyk et al., *Optica* **10**(6), 801-811 (2023).
- [3] O. Szewczyk et al., "Mid-infrared generation via Raman soliton self-frequency shift in fluoride fibers: a comparative study," *Optics Express*, artykuł zaakceptowany do publikacji.

μHOLLO: bezsoczewkowy mikroskop holograficzny do ilościowego obrazowania komórek i skrawków tkanek biologicznych

Maciej Trusiak^{1,†}, Emilia Wdowiak¹, Mikołaj Rogalski¹, Julianna Winnik¹, Paweł Matryba^{2,3,4}, Piotr Arcab¹, Anna Chwastowicz^{2,3}, Bartosz Górski¹, Kamil Kalinowski¹

¹ Politechnika Warszawska, Wydział Mechatroniki, Instytut Mikromechaniki i Fotoniki, ul. Boboli 8, 02-525 Warszawa, Polska

² Warszawski Uniwersytet Medyczny, Zakład Immunologii, ul. Nielubowicza 5, 02-097 Warszawa, Polska

³ Instytut Biologii Doświadczalnej im. Nenckiego PAN, Pracownia Neurobiologii, BRAINCITY, ul. Pasteura 3, 02-093 Warszawa, Polska

⁴ Narodowy Instytut Onkologii im. Marii Skłodowskiej-Curie – Państwowy Instytut Badawczy, Zakład Radiologii 1, ul. Roentgena 5, 02-781 Warszawa, Polska
†email: maciej.trusiak@pw.edu.pl

Holograficzne obrazowanie bezsoczewkowe stanowi nowoczesne podejście do mikroskopii optycznej, umożliwiające szybkie, nieniszczące oraz szerokopowierzchniowe (pole pomiarowe równe wymiarom matrycy sensora) badania struktur biologicznych łatwych w przygotowaniu (brak barwienia) i bez ograniczeń wynikających z użycia klasycznych elementów optycznych, takich jak obiektywy. Brak soczewek eliminuje typowe problemy związane z aberracjami, zawężonym polem widzenia czy ograniczoną głębią ostrości, a jednocześnie upraszcza konstrukcję układu i obniża jego koszt. Rekonstrukcja holograficzna prowadzi do uzyskania informacji o absorpcji (amplituda przepropagowanego numerycznie pola zespolonego) i refrakcji (faza pola zespolonego) światła wprowadzanych przez próbkę co pozwala na uzyskanie struktury np. rozkładu współczynnika załamania próbki (ilościowy kontrast fazowy). Cechy te są szczególnie pożądane w zastosowaniach biomedycznych, takich jak analiza skrawków histologicznych, fenotypowanie/śledzenie komórek czy monitorowanie procesów preparatyki próbek (np. optyczne oczyszczanie).

Zasadniczą trudność stanowi brak dostępnych rozwiązań technologicznych, które łączyłyby zalety obrazowania bezsoczewkowego z jakością i odpornością na artefakty wystarczającą do analizy rzeczywistych próbek biologicznych – często grubości rzędu setek mikrometrów, silnie rozpraszających światło. Klasyczna holografia cyfrowa, szczególnie w konfiguracji Gabora, jest wyjątkowo wrażliwa na wielokrotne rozpraszanie, co w praktyce ogranicza jej zastosowanie do bardzo cienkich lub optycznie jednorodnych próbek.

W odpowiedzi na te ograniczenia opracowano kompletny demonstrator mikroskopu bezsoczewkowego nowej generacji, integrujący źródła światła o starannie dobranej koherencji czasowo-przestrzennej (zakres VIS–NIR) z autorskimi algorytmami rekonstrukcji holograficznej, które uwzględniają efekty wielokrotnego rozpraszania światła. System został wyposażony w specjalizowaną aplikację umożliwiającą nie tylko akwizycję i rekonstrukcję danych, lecz także ich dalszą analizę ilościową (np., operacje morfologiczne i statystyczne). Pozytywnie potwierdzono funkcjonowanie systemu w warunkach rzeczywistych, na próbkach skrawków tkanek i komórek – zarówno żywych, jak i utrwalonych – podkreślając potencjał tej technologii w kontekście cyfrowej mikroskopii biomedycznej i diagnostyki ilościowej o wysokiej przepustowości, realizowanej bez konieczności barwienia ani intensywnej preparatyki.

Źródła finansowania

Narodowe Centrum Badań i Rozwoju (LIDER14/0329/2023).

Eksperymentalna weryfikacja opisu modelu nieliniowości współistniejących w nematicznych ciekłych kryształach

B. Klus[†], M. Kwaśny, M. A. Karpierz, U. A. Laudyn

Wydział Fizyki, Politechnika Warszawska, Koszykowa 75, 00-662 Warszawa

[†]email: bartlomiej.klus@pw.edu.pl

Nematiczne ciekłe kryształy (NCK) są substancjami złożonymi z anizotropowych molekuł najczęściej o wydłużonym kształcie. Właściwości optyczne tych materiałów takie, jak wartość współczynnika załamania oraz absorpcja promieniowania elektromagnetycznego dla liniowo spolaryzowanej wiązki światła zależą od kąta pomiędzy średnim kierunkiem ułożenia długich osi molekuł a kierunkiem polaryzacji. Na wartości parametrów optycznych wpływ mają również inne czynniki takie, w tym temperatura. Głównymi mechanizmami nieliniowości w NCK są nieliniowość reorientacyjna i termiczna. Pierwsza wynika z obrotu długich osi molekuł wywołanego polem elektrycznym fali świetlnej i ma charakter nasyceniowy – maksymalny wzrost współczynnika załamania jest ograniczony przez różnicę współczynników załamania nadzwyczajnego i zwyczajnego. Co istotne, ze względu na nasyceniowy i nielokalny charakter nie można jej opisać klasycznym modelem Kerra. Drugi mechanizm to nieliniowość termiczna, powstająca w wyniku optycznie indukowanego wzrostu temperatury spowodowanego absorpcją części energii wiązki. Konsekwencją zmiany temperatury są zmiany właściwości fizycznych ciekłego kryształu, które wpływają na propagację wiązki światła. Efekty termiczne mające wpływ na propagację wiązki można podzielić dwa rodzaje. Pierwszy z nich związany jest z bezpośrednią zmianą wartości współczynników załamania w funkcji temperatury, a zatem z natężeniem światła wywołującym te zmiany. Drugi, związany jest ze zmianą innych parametrów fizycznych ośrodka wywołanych zmianą temperatury np. wartości stałych elastyczności, co wpływa na reorientację ciekłego kryształu. Interakcja obu tych mechanizmów sprawia, że całkowita zmiana współczynnika załamania wywołana natężeniem wiązki światła nie jest prostą sumą efektów reorientacyjnego i termicznego. Przykładem takiego powiązania jest wpływ orientacji molekuł ciekłego kryształu na znak oraz wartość nieliniowości termicznej indukowanej wiązką światła. Prowadzi to do dwóch różnych przypadków, w których mechanizmy obu nieliniowości współdziałają ze sobą. W jednym z nich, obie nieliniowości prowadzą do wzrostu wartości współczynnika załamania, gdy zarówno nieliniowość reorientacyjna i termiczna są dodatnie. W drugim przypadku, ujemna nieliniowość termiczna osłabia efekty wywołane mechanizmem nieliniowości reorientacyjnej. A zatem, model nieliniowości współistniejących poza czystym wpływem mechanizmów nieliniowości reorientacyjnej i termicznej zawiera także wpływ efektów termiczno-reorientacyjnych i znacznie słabszych reorientacyjno-termicznych. Tego typu współistnienie nieliniowości nie było jak dotąd w pełni opisywane w kontekście ciekłych kryształów. W prezentowanej pracy przedstawiono model teoretyczny oraz wyniki eksperymentalne, które potwierdzają złożoną naturę nieliniowości w NCK, łącząc efekty reorientacyjne, termiczne i termiczno-reorientacyjne. Zaproponowane podejście umożliwia opis zmian wartości współczynnika załamania w szerokim zakresie natężeń światła oraz uwzględnia wzajemne sprzężenie mechanizmów odpowiedzialnych za reorientację i efekty termiczne. Prezentowane wyniki otwierają nowe możliwości w projektowaniu zaawansowanych układów fotonicznych z wykorzystaniem NCK oraz pogłębiają zrozumienie fundamentalnych procesów nieliniowych w anizotropowych ośrodkach optycznych.

Badanie wysoko rozpraszających obiektów techniką bezsoczewkowej cyfrowej mikroskopii holograficznej

E. Wdowiak^{1,†}, P. Arcab¹, P. Zdańkowski¹, M. Józwik¹, M. Trusiak¹

¹Politechnika Warszawska, Wydział Mechatroniki, Instytut Mikromechaniki i Fotoniki, ul. św. A. Boboli 8, 02-525 Warszawa, Polska

†email: emilia.wdowiak.dokt@pw.edu.pl

Bezsoczewkowa cyfrowa mikroskopia holograficzna (BCM_H) stanowi nieinwazyjne narzędzie do badania właściwości transparentnych obiektów biologicznych i technicznych [1]. Technika opiera się na holografii poosiowej zaproponowanej przez Dennisa Gabora [2] i wykorzystuje interferencję pomiędzy falami rozproszonymi przez próbkę, a nierozproszoną częścią fali oświetlającej.

W prezentowanym badaniu przedstawiono eksperymentalne warunki umożliwiające precyzyjne kontrolowanie poziomu rozpraszania światła. Wykorzystując próbki o znanej charakterystyce optycznej, odtworzono środowiska zbliżone do tych, które typowo występują w obrazowaniu biologicznym — takich jak tkanki, hodowle komórkowe czy materiały porowate. W tego typu próbkach rozpraszanie może wynikać zarówno z samej struktury badanego obiektu, jak i z rozpraszających właściwości medium immersyjnego.

Zastosowanie układu BCM_H w połączeniu z zaawansowanymi metodami numerycznej rekonstrukcji umożliwiło analizę wpływu narastającego poziomu rozpraszania na kluczowe parametry jakościowe obrazów: stosunek sygnału do szumu, dokładność odwzorowania fazy oraz rozdzielczość przestrzenną [3]. Wyniki badania ujawniły wyraźną zależność pomiędzy długością fali promieniowania oświetlającego, dystansem propagacji, a jakością obrazowania w warunkach podwyższonego rozpraszania.

W ramach ilościowej analizy porównano rekonstrukcje dla próbek o niskim i wysokim stopniu rozpraszania, opierając się na metrykach jakości obrazu oraz odniesieniu do warunków standardowych. Zaobserwowano wyraźny spadek dokładności odwzorowania struktur wraz ze wzrostem rozpraszania. Co istotne, standardowe algorytmy rekonstrukcyjne okazały się niewystarczające w silnie rozpraszających środowiskach [4], co wskazuje na konieczność opracowania bardziej zaawansowanych podejść — takich jak algorytmy uwzględniające rozpraszanie wielokrotne czy metody oparte na uczeniu maszynowym.

Zrozumienie wpływu rozpraszania na jakość obrazowania BCM_H ma fundamentalne znaczenie dla dalszego rozwoju tej techniki, szczególnie w zastosowaniach biomedycznych, gdzie próbki często cechuje wysoka złożoność optyczna. Przedstawione podejście stanowi istotny krok w kierunku poszerzenia możliwości BCM_H w obrazowaniu wymagających preparatów, jednocześnie wyznaczając kierunek dla tworzenia bardziej odpornych i adaptacyjnych metod rekonstrukcji obrazu.

Podziękowania i źródła finansowania

Praca finansowana ze środków projektu LIDER NCBR LIDER14/0329/2023.

Literatura

- [1] Wu, Y., & Ozcan, A. (2017). Lensless digital holographic microscopy and its applications in biomedicine and environmental monitoring. *Methods*, 136, 4–16.
- [2] Gabor, D. (1948). A new microscopic principle. *Nature*, 161(4098), 777–778.
- [3] Baek, Y., Lee, K., & Park, Y. (2018). High-resolution long-working-distance reference-free holographic microscopy exploiting speckle-correlation scattering matrix. *Physical Review Applied*, 10(2), 024053.
- [4] Tahir, W., Kamilov, U. S., & Tian, L. (2019). Holographic particle localization under multiple scattering. *Advanced Photonics*, 1(3), 036003.

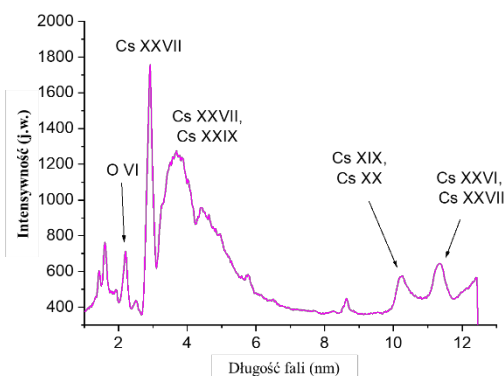
Lasero-plazmowe źródło promieniowania SXR oraz EUV na bazie tarczy typu MLT oraz związków jodu i cezu.

L. Węgrzyński[†], A. Bartnik, T. Fok, L. Osuchowski, H. Fiedorowicz, P.W. Wachulak

Instytut Optoelektroniki, Wojskowa Akademia Techniczna, ul. Gen S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa

[†]email: lukasz.wegrzynski@wat.edu.pl

Plazma laserowa wytworzona w wyniku oddziaływania impulsów laserowych wielkiej mocy z tarczą o odpowiednio dobranej gęstości jest w większości przypadków plazmą wysokotemperaturową. Promieniowanie emitowane z takiej plazmy znajduje się głównie w zakresie skrajnego nadfioletu EUV oraz miękkiego promieniowania rentgenowskiego SXR. Wykorzystanie plazmy laserowej jako źródła promieniowania znajduje swoje zastosowanie w wielu eksperymentach badawczych a także dla różnych procesów technologicznych, takich jak fotolitografia EUV/SXR, spektroskopia laserowa, mikroskopia rentgenowska czy też spektroskopia typu NEXAFS. Parametry wytwarzanej plazmy laserowej silnie zależą od wielu czynników takich jak gęstość tarczy laserowej, skład chemiczny a także intensywność promieniowania laserowego w ognisku, czas trwania impulsu τ oraz długość fali promieniowania laserowego λ . Rozwiązania techniczne wykorzystujące kompaktowe systemy do wytwarzania wysokotemperaturowej plazmy laserowej stanowią ciekawą alternatywę do badań wykorzystujących duże instalacje laserowe (np. FLASH) czy też potężne instalacje synchrotronowe, które z uwagi na swoje rozmiary są bardzo oblegane drogą w użytkowaniu. Jednym z takich kompaktowych rozwiązań są lasero-plazmowe źródła promieniowania SXR oraz EUV oparte na bazie podwójnej tarczy gazowej wykorzystującej ksenon a także tarcze o ograniczonej masie na bazie związków jodu oraz cezu, które są głównym tematem poniższego komunikatu konferencyjnego. Motywacją do podjęcia tematu badań nad nowym źródłem lasero-plazmowym była chęć optymalizacji dotychczasowego źródła ksenonowego, wykorzystywanego w laboratorium badawczym Instytutu Optoelektroniki Wojskowej Akademii Technicznej. Przeprowadzone dotychczas badania podstawowe potwierdziły słuszność stawianych też dotyczących możliwości opracowania takiego źródła o parametrach widmowych zbliżonych do źródeł ksenonowych. Przykładowe widmo promieniowania emitowanego przez plazmę CsI przedstawione zostało na poniższym rysunku (Rysunek 1). Opracowane źródło oraz jego parametry są w dalszym ciągu optymalizowane pod kątem wydajności oraz stabilności działania.



Rysunek 1: Widmo promieniowania plazmy wytwarzanej w tarczy aerozolowej z jodkiem cezu

W niniejszym komunikacie konferencyjnym przedstawione zostaną wyniki dotychczasowych prac badawczych związanych z opracowaniem nowego źródła lasero-plazmowego na bazie tarczy aerozolowej o ograniczonej masie oraz związków jodu i cezu. Zaprezentowana zostanie idea, zasada działania a także wyniki przeprowadzonych eksperymentów. Z uwagi na stosunkowo niskie koszty działania nowego rozwiązania, prezentowane źródło może w przyszłości zastąpić źródła na bazie tarcz gazowych opartych o ksenon oraz krypton. Prezentowane rozwiązanie oraz wyniki badań zostały w pełni zrealizowane w Instytucie Optoelektroniki Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie.

Podziękowania i źródła finansowania

Praca została dofinansowana przez Wojskową Akademię Techniczną w ramach projektu nr UGB 22-077.

WUTScope-FPM - fourierowski mikroskop ptychograficzny jako narzędzie do wysokorozdzielczego obrazowania biomedycznego w szerokim polu widzenia

M. Chlipała¹, P. Arcab¹, M. Cywińska¹, M. Stefaniuk², L. Stanaszek³, P. Zdańkowski^{1,†}

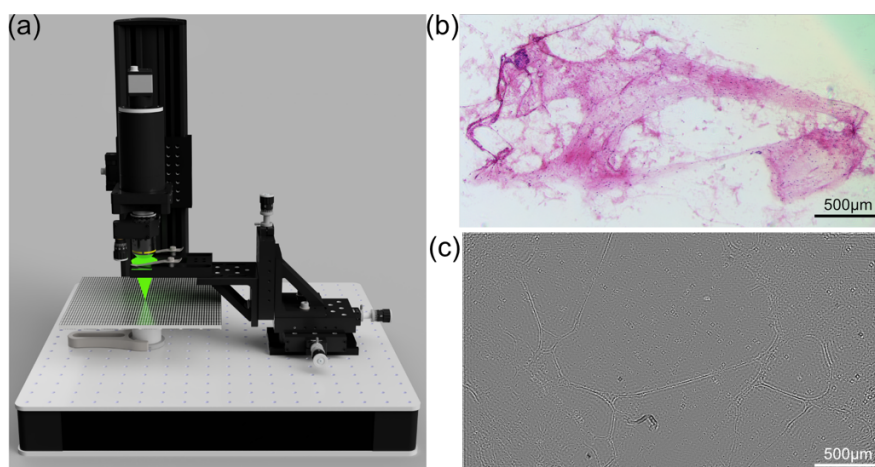
¹Instytut Mikromechaniki i Fotoniki, Wydział Mechatroniki, Politechnika Warszawska, Św. A. Boboli 8, 02-525 Warszawa

²Pracownia Neurobiologii, Instytut Biologii Doświadczalnej im. M. Nenckiego, Polska Akademia Nauk, Pasteura 3, 02-093 Warszawa

³Zakład Neurobiologii Naprawczej, Instytut Medycyny Doświadczalnej i Klinicznej im. M. Mossakowskiego, Polska Akademia Nauk, A. Pawińskiego 5, 02-106 Warszawa,

†email: piotr.zdankowski@pw.edu.pl

Fourierowska mikroskopia ptychograficzna (FPM) [1] jest techniką mikroskopii obliczeniowej, która wykorzystuje zróżnicowane kątoowo oświetlenie do zwiększenia rozdzielczości obrazowania. Wykorzystując technikę apertury syntetycznej w połączeniu z iteracyjnym algorytmem odzyskiwania fazy możliwa jest rekonstrukcja obrazu amplitudowego oraz fazowego o efektywnej apertury numerycznej znacznie wyższej niż apertura obiektywu. Dzięki tym cechom FPM stanowi obiecujące narzędzie do obrazowania biomedycznego, łącząc wysoką rozdzielczość z możliwością pomiaru fazy próbki, przy zachowaniu szerokiego pola widzenia. W pracy przedstawiono opracowany demonstrator mikroskopu WUTScope-FPM, wykorzystujący unikalny programowalny mikrowyświetlacz o wysokiej jasności w roli oświetlacza zamiast tradycyjnie stosowanych matrycy diod LED. Takie rozwiązanie umożliwia dynamiczne sterowanie oświetleniem pod różnymi kątami oraz automatyczną kalibrację bez konieczności stosowania mechanicznego przesuwu oświetlacza. Poprawna kalibracja jest kluczowym elementem układów FPM, ponieważ niepoprawne oszacowanie położenia wzorów oświetlających próbkę może prowadzić do artefaktów w rekonstrukcji ptychograficznej. Rekonstrukcja ptychograficzna jest wspierana algorytmem wykorzystującym konwolucyjne sieci neuronowe z nienadzorowanym procesem uczenia, w celu optymalizacji i redukcji liczby obrazów wymaganych do zarejestrowania (dwukrotne zmniejszenie liczby obrazów). Co więcej, WUTScope-FPM umożliwia rejestrację obrazów dla trzech długości fali (RGB), dzięki czemu można uzyskiwać kolorowe obrazy mikroskopowe oraz analizować próbkę w różnych zakresach widma. Opracowany system pozwala na obrazowania z efektywnym $NA = 0,78$ dla obiektywu 4x NA0.2, co oznacza znaczącą niemal czterokrotną poprawę zdolności rozdzielczej (rozdzielczość poprzeczna $<500\text{nm}$). Rejestracja pełnego zestawu danych potrzebnych do pełnej rekonstrukcji ptychograficznej trwa mniej niż 1s. System WUTScope-FPM jest wyposażony w przyjazny dla użytkownika interfejs graficzny (FPMapp [2]), i jego obsługa nie wymaga dużego doświadczenia z dziedziny optyki, z powodzeniem może być obsługiwany przez osoby z podstawową znajomością obsługi mikroskopów optycznych. Rys. 1 przedstawia schemat układu WUTScope-FPM wraz z przykładowymi rekonstrukcjami ptychograficznymi.



Rysunek 1: (a) Schemat poglądowy systemu WUTScope-FPM, (b) przykładowa rekonstrukcja ptychograficzna RGB, (c) rekonstrukcja ptychograficzna fazy komórek neuronowych.

Podziękowania i źródła finansowania

Badania opisane w niniejszej publikacji są finansowane przez NCBR w ramach realizacji projektu LIDER14/0352/2023

Literatura

- [1] G. Zheng, C. Shen, S. Jiang, et al. Nature Reviews Physics **3**, 207–223 (2021).
- [2] M. Rogalski, P. Zdańkowski, M. Trusiak, Bioinformatics, **37**, 20, (2021)

Detektory pojedynczych fotonów oparte o nadprzewodzące nanodrut

B. Żyliński^{1†}, G.Kornakov¹

¹Wydział Fizyki, Politechnika Warszawska, Koszykowa 75, 00-662 Warszawa

†email: blazej.zylinski.dokt@pw.edu.pl

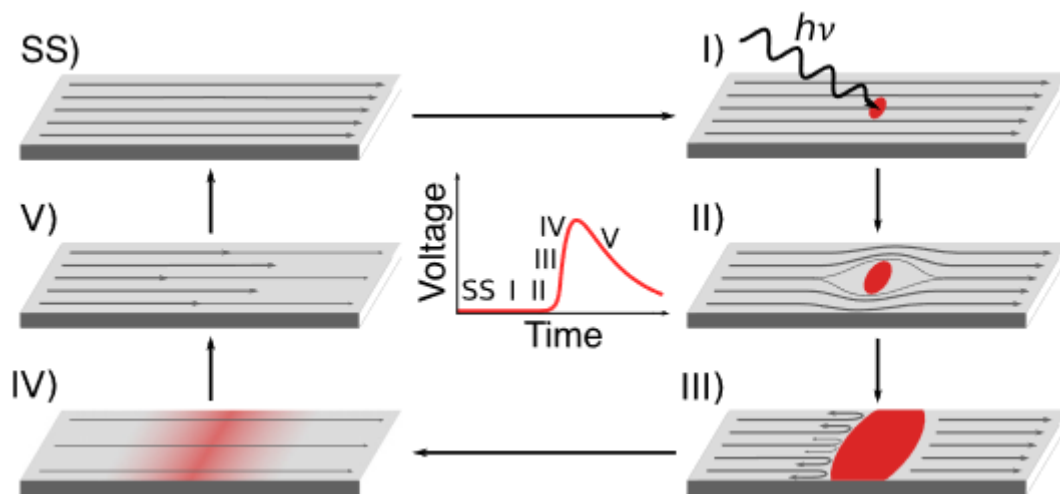
Detektory pojedynczych fotonów oparte o nadprzewodzące nanodrut (SNSPD, ang. *superconducting nanowire single-photon detectors*) po raz pierwszy opisano w 2001 roku [1,2]. Ich wyróżnikiem bardzo krótki czas odpowiedzi rzędu pikosekund [2]. Ostatnie dwie dekady cechuje dynamiczny rozwój tej technologii. SNSPD znajdują zastosowanie m.in. w dystrybucji klucza kwantowego, optyce kwantowej, komunikacji w głębokiej przestrzeni kosmicznej, obrazowaniu medycznym, systemach LIDAR, spektroskopii i teleskopach etc. [3-5]

Zasada działania detektora opiera się na tym, że foton padający na nanodrut znajdujący się w stanie nadprzewodzącym (tuż poniżej temperatury krytycznej) zakłóca ten stan (rys. 1). Skutkiem tego jest pojawienie się krótkotrwałego impulsu napięciowego, możliwego do zarejestrowania na zaciskach obwodu. Po detekcji nanodrut szybko powraca do stanu nadprzewodnictwa [3,4].

W ostatnich latach trwają intensywne prace nad detektorami wykorzystującymi materiał MgB_2 , co umożliwi pracę w temperaturze 20 K. To istotny postęp względem materiałów takich jak NbN, NbTiN, WSi czy MoSi, które wymagają chłodzenia poniżej 4,2 K [5].

SNSPD umożliwiają także tworzenie wielkoskalowych matryc, na bazie sprzężenia temperaturowego meandrów z nanodrutów, co pozwala na budowę kamer o rozdzielczości sięgającej 400 tys. pikseli [6,7].

W prezentowanym materiale przedstawiony zostanie przegląd aktualnego stanu badań nad SNSPD oraz omówione zostaną wybrane zagadnienia będące przedmiotem zainteresowania autorów, takie jak: interfejsy w temperaturach kriogenicznych, problemy skalowalności oraz nowe materiały stosowane w konstrukcji detektorów.



Rysunek 1: Zasada działania SNSPD w ujęciu makroskopowym [3].

Literatura

- [1] Semenov, A.D., Gol'tsman, G.N., Korneev, A.A. *Physica C: Superconductivity*. **351** (2001)
- [2] Gol'tsman, G.N. et al. *Applied Physics Letters*. **79(6)** (2001)
- [3] Zadeh I.E. et al. *Appl. Phys. Lett.* **118**, 190502 (2021)
- [4] Natarajan C.M. et al. *Supercond. Sci. Technol.* **25**, 063001 (2012)
- [5] Charaev, I., Batson, E.K., Cherednichenko, S. et al. *Nat Commun* **15**, 3973 (2024).
- [6] Oripov, B.G., Rampini, D.S., Allmaras, J. et al. *Nature* **622** (2023).
- [7] Allmaras J.P. et al. *Nano Lett.* **20(3)** (2020)

Stabilizacja częstotliwości obwiednia-nośna impulsów lasera Cr:ZnS

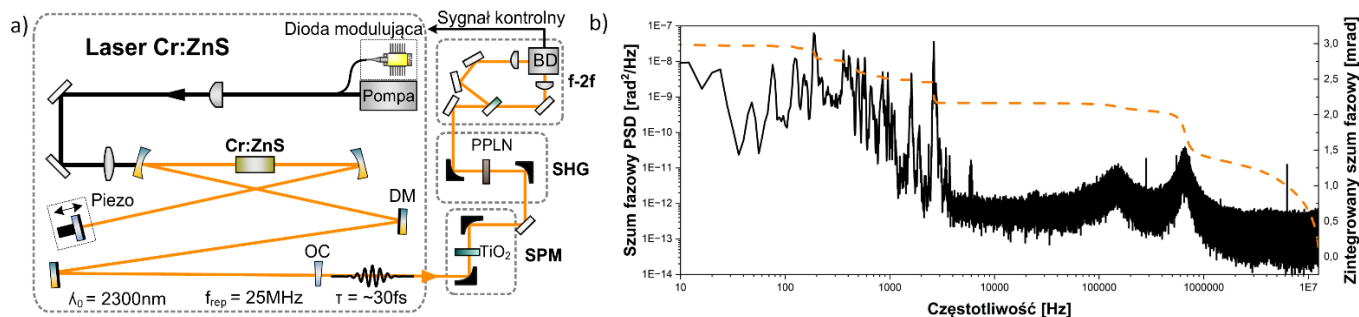
J. Jaworski, M. Kowalczyk[†]

Wydział Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów, Politechnika Wroclawska, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

[†]email: maciej.kowalczyk@pwr.edu.pl

Lasery ciała stałego, których ośrodkiem aktywnym są domieszkowane chromem (Cr) kryształy siarczku cynku (ZnS) lub selenku cynku (ZnSe) mogą generować ultrakrótkie impulsy laserowe o czasie trwania ~ 30 fs w zakresie spektralnym średniej podczerwieni ($\sim 2.3\mu\text{m}$) [1]. Lasery tego typu mogą być wykorzystywane np. w spektroskopii, gdzie często wymagana jest stabilizacja źródła do grzebienia częstotliwości. W tym przypadku kluczowa jest technologia stabilizacji częstotliwości obwiednia-nośna (f_{ceo}) generowanych impulsów. Zostało pokazane, że oscylatory Cr:ZnS/Se mogą być bardzo stabilne i charakteryzować się szumem fazowym f_{ceo} rzędu 5.9 mrad [2], a uzyskana stabilność lasera zależy głównie od wybranego źródła pompującego [2-4].

W tej pracy przedstawiamy eksperymentalny układ lasera Cr:ZnS z możliwością detekcji i stabilizacji f_{ceo} generowanych impulsów. Schemat układu przedstawia Rys. 1a. Sygnał z lasera jest poszerzany spektralnie w płytce wykonanej z TiO_2 . Detekcję f_{ceo} umożliwiło wykorzystanie interferometru typu $f-2f$ z generacją drugiej harmonicznej (SHG) w kryształach PPLN. Stabilizacja sygnału f_{ceo} została zrealizowana w pętli synchronizacji fazowej z użyciem regulatora PID poprzez modulację mocy lasera pompującego.



Rysunek 1: (a) Układ eksperymentalny wykorzystany do detekcji oraz stabilizacji częstotliwości obwiednia-nośna lasera Cr:ZnS (DM – zwierciadło dyspersyjne, OC – sprzęgacz wyjściowy, SPM – poszerzanie spektralne, SHG – generacja drugiej harmonicznej, BD – detektor zbalansowany); (b) Szum fazowy (linia ciągła) oraz zintegrowany szum fazowy (linia przerywana) lasera Cr:ZnS.

Fluktuacje częstotliwości obwiednia-nośna zostały zmierzone przy użyciu oddzielnego (*out-of-loop*), interferometru $f-2f$, wykorzystującego wiązkę lasera po poszerzeniu spektralnym. Wyniki pomiaru szumu fazowego przedstawia Rys. 2b. Otrzymano szum fazowy na poziomie 3 mrad zintegrowany w przedziale od 10 Hz do 12.5 MHz (częstotliwość Nyquista). Uzyskana stabilność lasera dwukrotnie poprawia najlepszy wcześniej prezentowany wynik dla laserów Cr:ZnS/Se [2]. Uzyskanie tak wysokiej stabilności było możliwe poprzez minimalizację fluktuacji amplitudowych lasera. To z kolei zostało zapewnione poprzez wykorzystanie ultra-niskoszumnego lasera pompującego na bazie erbowego wzmacniacza światłowodowego [5].

Podziękowania i źródła finansowania

Narodowa Agencja Wymiany Akademickiej (BPN/PPO/2022/1/00028); Max-Planck-Gesellschaft (Max Planck Partner Group Programme); Projekt „Ultrastabilne lasery impulsowe pokrywające zakres spektralny od bliskiej do dalekiej podczerwieni” jest realizowany w ramach działania First Team FNP współfinansowanego przez UE ze środków 2. Priorytetu Programu Fundusze Europejskie dla Nowoczesnej Gospodarki 2021–2027 (FENG).

Literatura

- [1] S. B. Mirov et al., “Frontiers of mid-IR lasers based on transition metal doped chalcogenides,” *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **24**, 1601829 (2018).
- [2] M. Kowalczyk et al., “Ultra-CEP-stable single-cycle pulses at 2.2 μm ,” *Optica* **10**, 801-811 (2023).
- [3] A. Barh et al., “High-power low-noise 2-GHz femtosecond laser oscillator at 2.4 μm ,” *Opt. Express* **30**, 5019–5025 (2022).
- [4] S. Vasilyev et al., “Ultra-Low Noise Cr:ZnS Laser Source for High Performance Dual Comb Spectroscopy,” in *CLEO 2024* (Optica Publishing Group, 2024), paper SM1H.4.
- [5] M. Kowalczyk et al., “SESAM-assisted Kerr-lens mode-locked Cr:ZnS laser,” *Opt. Lett.* **49**, 5184-5187 (2024)

Pomiar impulsów subnanometrowych z użyciem bezreferencyjnej interferometrii widmowej

K. Mielczarek^{1,†}, F. Sośnicki^{1,2}, M. Karpiński¹.

¹ Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski, Pasteura 5, 02-193 Warszawa

² Wydział Fizyki, Uniwersytet w Paderborn, Warburger Str. 100, 33-098 Paderborn, Niemcy

†email: km.mielczarek2@student.uw.edu.pl

Subnanometrowe impulsy pojedynczo-fotonowe o długościach od kilku do kilkudziesięciu pikosekund odgrywają ważną rolę w komunikacji kwantowej i w funkcjonowaniu detektorów kwantowych. Impulsy te są w dużym stopniu niewrażliwe na dyspersję i mogą być efektywnie absorbowane przez pamięci kwantowe. Również sieci kwantowe mogą polegać na pikosekundowych impulsów pojedynczo-fotonowych emitowanych przez kropki kwantowe, które to są dobrymi źródłami pojedynczych fotonów na żądanie. Jednakże wąskie pasmo widmowe takich impulsów sprawia, że ich pełna charakteryzacja staje się wyzwaniem. W niniejszej pracy weryfikujemy, czy interferometria fazy widmowej dla bezpośredniej charakteryzacji pola elektrycznego (z ang. SPIDER) może być użyta w tym celu. Chociaż docelowo pragniemy zrealizować nasze badania na świetle kwantowym, na razie skupiamy się na identyfikacji ograniczeń i zalet tej metody poprzez eksperymenty z klasycznymi impulsami o telekomunikacyjnej długości fali. Proponujemy wykorzystanie techniki Shaper-Assisted Collinear (SAC) SPIDER, by poprawić precyzję pomiaru.

SPIDER to powszechnie używana technika odzyskiwania fazy widmowej, opierająca się na interferencji dwóch kopii początkowego impulsu, z których jedna jest opóźniona w czasie, a druga przesunięta w widmie. Analiza interferogramu dostarcza informacje o tzw. fazie SPIDER-a, która to - efektywnie będąc pochodną fazy widmowej - umożliwia kompletną charakteryzację pola elektrycznego impulsu. Wierna charakteryzacja szerokopasmowych impulsów pojedynczo-fotonowych została przedstawiona w [1].

Przed przystąpieniem do pomiarów ze światłem kwantowym z powodzeniem zmierzaliśmy fazy widmowe impulsów klasycznych o szerokości 1.5 nm wyśrodkowanych na 1550 nm. Zidentyfikowaliśmy kilka wyzwań związanych z pomiarami wąskich widmowo impulsów. Mieszanie się modów polaryzacyjnych doprowadza do powstania preimpulsów o niskiej intensywności, które to wywołują szybkie oscylacje w fazie SPIDER-a. Pomiar węższych impulsów wymaga zmniejszenia wartości przesunięcia widmowego, co z kolei obniża amplitudę zmierzonej fazy SPIDER-a. Jako że wielkość zakłóceń pozostaje na stałym poziomie, stosunek sygnału do szumu zmniejsza się liniowo wraz z szerokością impulsu. Według naszego modelu teoretycznego to źródło zakłóceń jest kluczową przeszkodą w pomiarach impulsów wąskopasmowych. Kolejne wyzwanie wiąże się z długim przebiegiem czasowym impulsów subnanometrowych, co uniemożliwia odfiltrowanie preimpulsów i znacząco utrudnia nadanie jednorodnego przesunięcia widmowego.

Dodatkowo, problematyczny staje się precyzyjny pomiar przesunięcia widmowego, które osiąga wartości zbliżone do rozdzielczości spektrometrów. By sprostać temu wyzwaniu, proponujemy wykorzystanie techniki SAC SPIDER [2] - współliniowego SPIDER-a wspomaganego programowalnym filtrem optycznym. W tej metodzie opóźnienie czasowe jest uzyskiwane poprzez nadanie sinusoidalnego maski intensywności za pomocą filtra optycznego. Proponujemy, by upiec dwie pieczenie na jednym ogniu i ponadto wykorzystać filtr do nadania pewnej znanej fazy parabolicznej. Porównanie zmierzonej fazy SPIDER-a ze znanym sygnałem wejściowym umożliwia oszacowanie wartości przesunięcia widmowego z precyzją nieosiągalną w bezpośrednich pomiarach,

Głównym ograniczeniem SAC SPIDER-a jest uzyskanie odpowiednio dużego opóźnienia czasowego, które jednak nie doprowadzi do deformacji impulsu. W naszym układzie doświadczalnym byliśmy w stanie uzyskać wartość 40 ps, jednakże obecna technologia powinna umożliwić zwiększenie tej wartości pięciokrotnie. Pozwoliłoby to na charakteryzację bardzo wąskich impulsów pojedynczo-fotonowych, które są używane do zapisu informacji w standardowych pamięciach kwantowych [3]. Wciąż prowadzimy badania w tym zakresie, jednakże już jesteśmy przekonani, że SAC SPIDER może zaoferować także inne przewagi, takie jak: 1. Zmniejszoną o rząd wielkości amplitudę preimpulsów, jako że mody polaryzacyjne nie są już wykorzystywane. 2. Znaczne uproszczenie układu eksperymentalnego i automatyzację pomiarów. 3. Zwiększoną stabilność fazy w związku ze współliniowością całego układu.

Jesteśmy przekonani, że wraz z dodatkowymi usprawnieniami, elektro-optyczny SAC SPIDER ma szansę stać się użytecznym narzędziem do charakteryzacji wąskopasmowych impulsów pojedynczo-fotonowych.

Literatura

[1] A. O. C. Davis, V. Thiel, M. Karpiński, and B. J. Smith, *Phys. Rev. A* 98, 023840 (2018).

[2] B. von Vacano, T. Buckup, and M. Motzkus, *J. Opt. Soc. Am. B* 24, 1091-1100 (2007).

[3] S. Thomas et al., *Sci. Adv.* 10, eadi7346 (2024).

Transmisja częstotliwości optycznej na duże odległości z tłumieniem rezydualnego szumu fazowego

P. Krehlik¹, T. Kawalec², J. Dobosz³, M. Bober⁴, K. Turza⁵, Ł. Śliwczyński¹, Ł. Buczek¹, A. Węglarz²,
A. Wojciechowski², M. Semczuk³, C. Radzewicz³, P. Morzyński⁴, †, M. Zawada⁴, R. Ciuryło⁴

¹ Wydział Informatyki, Elektroniki i Telekomunikacji AGH, Akademia Górniczo-Hutnicza, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

² Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej, Uniwersytet Jagielloński, ul. Łojasiewicza 11, 30-348 Kraków

³ Instytut Fizyki Doświadczalnej, Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski, ul. Pasteura 5, 02-093 Warszawa

⁴ Instytut Fizyki, Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej, Uniwersytet Mikołaja Kopernika, ul. Grudziądzka 5, 87-100 Toruń

⁵ Poznańskie Centrum Superkomputerowo-Sieciowe, Polska Akademia Nauk, ul. Jana Pawła II 10, 61-139 Poznań

†email: pmorzynski@umk.pl

Łącza światłowodowe są obecnie najdokładniejszym sposobem przesyłania sygnałów częstotliwości optycznej na duże odległości, co umożliwi precyzyjne porównania zegarów optycznych między laboratoriami. Przedstawiamy system, który łączy krótkoterminową stabilność zapewnianą przez optyczną wnękę ULE z długoterminową stabilnością dostarczaną zdalnie poprzez łącze światłowodowe. W takiej konfiguracji wnęka eliminuje szybkie fluktuacje fazy typowe dla transmisji światłowodowej umożliwiając bezpośrednie wykorzystanie w precyzyjnych pomiarach. Rozwiązanie zostało przetestowane na światłowodowej pętli o długości 700 km, a obecnie jest wykorzystywane do porównań Polskiego Optycznego Zegara Atomowego z zegarami optycznymi w zagranicznych instytutach.

Podziękowania i źródła finansowania

Praca została zrealizowana dzięki finansowaniu Ministerstwa Edukacji i Nauki w ramach programu Polska Metrologia (grant nr PM/SP/0040/2021/1).

Elektrooptyczny grzebień częstotliwości z częstotliwością repetycją na żądanie – modelowanie i implementacja eksperymentalna

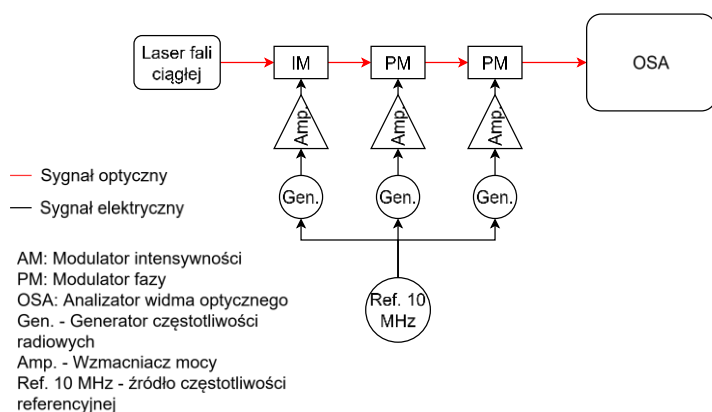
P. Sikora[†], L. Sterczewski, J. Sotor

Grupa Elektroniki Laserowej i Światłowodowej, Wydział Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów, Politechnika Wrocławska, Wybrzeże Stanisława Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, Polska
†email: patryk.sikora@pwr.edu.pl

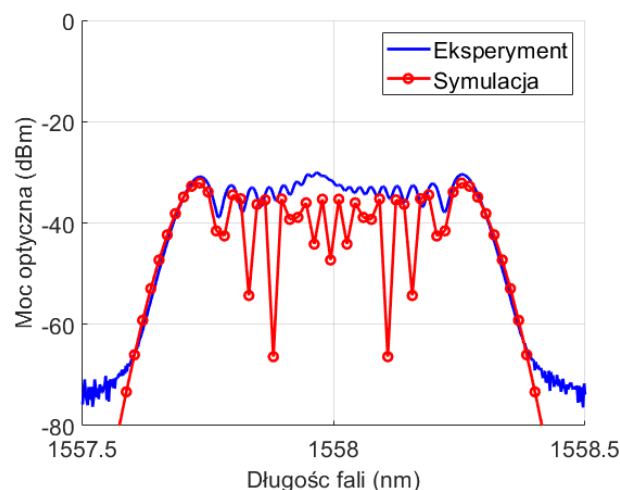
Optyczne grzebienie częstotliwości znajdują szerokie zastosowanie w spektroskopii, gdzie są używane do szerokopasmowych i wysokorozdzielczych pomiarów złożonych związków chemicznych i ich mieszanin [1]. Kolejnym zastosowaniem tych unikalnych źródeł optycznych jest charakteryzacja impulsów laserowych o arbitralnym kształcie przy pomocy techniki dwugrzebieniowej [2] przez wzajemne asynchroniczne próbkowanie.

W tej technice, do precyzyjnej charakteryzacji laserów impulsowych o nieznanym profilach czasowych jako źródło odniesienia należy wykorzystać laser cechujący się częstotliwością repetycji o niskim szumie fazowym. Charakteryzacja lasera z wykorzystaniem techniki dwugrzebieniowej wymaga również dostrojenia częstotliwości repetycji laserów tak, aby różniły się o ułamek promila do procenta (typowo sub-kHz do setek kHz). Zwykle realizowane jest to przez zmianę długości wnęki z laserów przy pomocy regulowanej linii opóźniającej.

Użycie takiej metody do zmiany częstotliwości repetycji ma istotne ograniczenia takie jak zakres przestrajania, fundamentalnie ograniczony parametrami mechanicznymi linii. Rozwiązaniem tego problemu jest modulacja lasera fali ciągłej kaskadą modulatorów o swobodnie definiowanej częstotliwości powtarzania. Prezentowane tu rozwiązanie pozwala na wytworzenie optycznego grzebienia częstotliwości z zakresem przestrajania częstotliwości repetycji 50–3000 MHz, z rozdzielczością 1 Hz, dzięki precyzyjnej kontroli amplitudy i fazy sygnału modulującego każdego z modulatorów. Dolne pasmo ograniczone jest przez pasmo generatora, natomiast górna częstotliwość ograniczona jest przez pasmo użytych modulatorów. Stałe przesunięcie fazowe między modulatorami zostało zapewnione poprzez zastosowanie generatora wzorcowego, który stanowi sygnał referencyjny dla indywidualnych generatorów częstotliwości radiowej sterujących jednym modulatorem naraz. Ponieważ szerokość wytworzonego widma jest bezpośrednio powiązana z amplitudą sygnału modulującego, w celu maksymalnego wysterowania modulatorów skonstruowano dedykowane szerokopasmowe wzmacniacze mocy częstotliwości radiowej. **Rysunek 1** przedstawia schemat blokowy konfiguracji elektrooptycznego grzebienia częstotliwości, natomiast **Rysunek 2** ilustruje porównanie widma optycznego otrzymanego na drodze symulacji z wynikami pomiarów eksperymentalnych. W wyniku eksperymentu dla częstotliwości modulującej 1 GHz uzyskano pasmo 0.6 nm składające się z 38 linii.



Rysunek 2 Schemat blokowy układu



Rysunek 1 Wykres porównawczy widma optycznego symulacji i eksperymentu

Literatura

- [1] Liu, M., Gray, R.M., Costa, L. et al. Mid-infrared cross-comb spectroscopy. *Nat Commun* 14, 1044 (2023).
- [2] S. Ghosh and G. Eisenstein, "Fast high-resolution measurement of an arbitrary optical pulse using dual-comb spectroscopy," *Phys. Rev. Appl.*, vol. 14, no. 1, p. 014061 (2020).
- [3] Q. Deng, K. Yin, J. Zhang, X. Zheng and T. Jiang, "A 200 MHz Compact Environmentally-Stable Mode-Locked Figure-9 Fiber Laser" *IEEE Photonics Journal*. PP. 1-1. 10.1109/JPHOT.2021.3095159 (2021).

Właściwości dyspersyjne światłowodu nanostrukturyzowanego NGRIN

G. Żegliński¹, E. Weinert-Rączka¹, E. Karbowniczek¹, Sz. Kostrubiec¹, P. Zieliński¹, R. Buczyński²

¹Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Elektryczny, Katedra Telekomunikacji i Fotoniki, ul. 26 Kwietnia 10, 71-126 Szczecin

²Uniwersytet Warszawski, Wydział Fizyki, Instytut Geofizyki, Zakład Fotoniki, ul. Pasteura 5, 02-933 Warszawa
email: grzegorz.zeglinski@zut.edu.pl

W pracy zostały przedstawione wyniki badań nanostrukturyzowanego światłowodu gradientowego NGRIN, który został zaprojektowany i wyprodukowany przez zespół prof. Ryszarda Buczyńskiego. Technologia przygotowania preformy z pręcików o różnych współczynnikach załamania oraz wytworzenia światłowodu o gradientowym profilu refrakcyjnym rdzenia opisano w pracy [1]. Prace [2-3] zawierają wstępne wyniki pomiarów transmisyjnych i dyspersyjnych krótkich odcinków włókna, które wskazują na możliwość dobrej współpracy z światłowodowymi liniami jednomodowymi.

Do prezentowanych obecnie wyników badań wykorzystano próbki o łącznej długości 500m. Praca zawiera wyniki wielofalowego pomiaru OTDR, ocenę dyspersji polaryzacyjnej w układzie interferencyjnym (rozkład różnicowego opóźnienia grupowego). Zbadana została wrażliwość temperaturowa włókna w zakresie -40°C...+80°C i wpływ temperatury na opóźnienia transmisyjne. Badania wykazały zdolność transmisyjną włókna do pracy w systemach DWDM o przepływności 10Gbit/s, 40Gbit/s, 100Gbit/s oraz 400Gbit/s.

Podziękowania i źródła finansowania

Praca została zrealizowana w ramach **MAESTRO 14** (UMO-2022/46/A/ST7/00238), finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki.

Literatura

- [1] A. Anuszkiewicz et al., "Fused silica optical fibers with graded index nanostructured core", *Sci. Rep.*, vol. 8, 2018
- [2] A. Anuszkiewicz, M. Bidus, A. Filipkowski, D. Pysz, M. Dlubek and R. Buczyński, "Experimental analysis of axial stress distribution in nanostructured core fused silica fibers", *Opt. Mater. Exp.*, vol. 9, no. 11, pp. 4370-4378, Nov. 2019.
- [3] R. Buczyński, M. Klimczak, T. Stefaniuk, R. Kasztelaniec, B. Siwicki, G. Stepniewski, J. Cimek, D. Pysz, and R. "Optical fibers with gradient index nanostructured core," *Opt. Express* 23(20), 25588–25596 (2015).

Opracowanie nowej metody diagnostycznej dla chorób Fabry'ego i Gauchera z wykorzystaniem światłowodowej spektroskopii w podczerwieni

**B. Mahlovanyi¹, N. Król¹, M. W. Trojanowski¹, A. Cromwell², A. Dobrovol'ska³, A. Koval'skiy², A. Luchechko,³
C. Boussard-Pledel⁴, B. Bureau⁴, A. Gala-Błądzińska¹, J. Cebulski¹, Y. Shpotyuk^{1,3,†}**

¹Instytut Nauk Fizycznych, Uniwersytet Rzeszowski, Pigoń 1, 35-310 Rzeszów

²Austin Peay State University, Clarksville, TN, USA,

³Ivan Franko National University of Lviv, Lviv, Ukraine

⁴University of Rennes, CNRS, ISCR [(Institut des Sciences Chimiques de Rennes)] – UMR 6226, 35000 Rennes, France

†email: yshpotyuk@ur.edu.pl

Choroby Fabry'ego i Gauchera należą do dziedzicznych lizosomalnych chorób spichrzeniowych, wynikających odpowiednio z niedoboru alfa-galaktozydazy oraz glukocerebrozydazy. Wczesna diagnoza ma kluczowe znaczenie dla skutecznego leczenia, jednak obecnie stosowane metody są często inwazyjne lub wymagają specjalistycznego zaplecza. Celem niniejszego badania było opracowanie nieinwazyjnej metody diagnostycznej opartej na spektroskopii fali ewaporującej w podczerwieni (FEWS) z wykorzystaniem nowatorskich światłowodów ze szkła chalkogenidowego.

Przebadano dwa typy światłowodów: TAS ($\text{Te}_{20}\text{As}_{30}\text{Se}_{50}$) oraz GT4-AgI15 ($(\text{Ge}_{21}\text{Te}_{79})_{85}\text{-(AgI}_{15})$). Widma absorpcyjne moczu zarejestrowano metodą FEWS i przeanalizowano z użyciem analizy głównych składowych (PCA). Uzyskano wyraźne rozdzielanie spektralne w zakresie 1000–1200 cm^{-1} , odpowiadające charakterystycznym modom drgań biomarkerów lyso-GB3 (choroba Fabry'ego) i lyso-GB1 (choroba Gauchera). Zidentyfikowano również obecność kluczowych markerów moczowych: kreatyniny, mocznika i kwasu moczowego.

Wyniki potwierdzają, że spektroskopia oparta na światłowodach chalkogenidowych stanowi obiecującą, szybką i nieinwazyjną metodę wykrywania chorób lizosomalnych, oferując realną alternatywę dla konwencjonalnych technik diagnostycznych.

Podziękowania i źródła finansowania

Niniejsze badania zostały przeprowadzone w ramach projektu IMPRESS-U, wspieranego przez NSF (grant nr OISE-2106457), NAWA (grant nr BPN/NSF/2023/1/00002/U/00001) oraz NAS (grant STCU nr 7112).

Analiza własności powłok soczewek okularowych

Jakub Stepaniak^{1,2,†}, Katarzyna Jachymek^{1,2}, Barbara Linek¹, Mirosław Łabuz¹, Patrycja Skala¹, Aleksandra Stasik^{1,2}, Andrzej Wal¹

¹Wydział Nauk Ścisłych i Technicznych Uniwersytetu Rzeszowskiego, al. Tadeusza Rejtana, 35-310 Rzeszów

²Koło Naukowe Fizyków Uniwersytetu Rzeszowskiego, al. Tadeusza Rejtana, 35-310 Rzeszów

†email: js111175@stud.ur.edu.pl

Celem niniejszego badania była analiza właściwości optycznych powłok uszlachetniających stosowanych w soczewkach okularowych. W eksperymencie wykorzystano spektrofotometr UV-VIS Cary 5000 oraz spektrometr siatkowy CCS 200 do pomiaru współczynnika transmitancji promieniowania elektromagnetycznego w zakresie bliskiego ultrafioletu oraz światła widzialnego. Badania przeprowadzono dla różnych kątów padania promieniowania względem geometrii soczewek, co pozwoliło na określenie zależności między tymi kątami, a właściwościami transmisyjnymi badanych soczewek.

Analiza uzyskanych widm transmitancji umożliwiła ocenę efektywności czterech typów powłok: standardowej warstwy antyrefleksyjnej, powłoki antyrefleksyjnej z dodatkowym utwardzeniem, warstwy dedykowanej kierowcom oraz powłoki o właściwościach hydrofobowych i oleofobowych. Wyniki badań wykazały istotne różnice w przepuszczalności promieniowania w zależności od rodzaju powłoki oraz kąta padania światła, co może mieć znaczenie dla komfortu widzenia oraz ochrony wzroku użytkowników soczewek okularowych [1-2].

Dodatkowo, w celu analizy struktury powierzchni powłok, wykonano zdjęcia mikroskopowe SEM oraz analizę EDS. Pomiarzy pozwoliły na ocenę jednorodności warstw oraz identyfikację składu pierwiastkowego mogącego wpływać na właściwości optyczne soczewek [3].

Uzyskane wyniki dostarczają istotnych informacji na temat efektywności różnych powłok uszlachetniających i ich wpływu na transmisję światła. Mogą one znaleźć zastosowanie w doskonaleniu procesów produkcji soczewek okularowych. Dalsze badania powinny uwzględniać trwałość powłok, ich odporność na czynniki środowiskowe oraz długoterminową stabilność właściwości optycznych.

Literatura

[1] Hecht E., Optyka, Wydawnictwo naukowe PWN, Warszawa 2016, 430-436,

[2] Linek B., Transmisja promieniowania świetlnego przez soczewki okularów przeciwsłonecznych, praca magisterska, Częstochowa 2021.

[3] Dobrzański L.A., Dobrzańska – Dankiewicz A.D., Obróbka powierzchni materiałów inżynierskich,