

Wrocław, 17 grudnia 2024

Dr inż. Łukasz Sterczewski
Politechnika Wrocławska,
Wydział Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów
Wybrzeże Wyspiańskiego 27,
50-370, Wrocław

Załącznik nr 3

do wniosku z dnia 17 grudnia 2024

o przeprowadzenie postępowania w sprawie nadania stopnia
doktora habilitowanego w dziedzinie Nauk Inżynieryjno-Tech-
nicznych w dyscyplinie Automatyka, Elektronika, Elektrotech-
nika i Technologie Kosmiczne

Autoreferat z uwzględnieniem osiągnięć:

**„Grzebień częstotliwości optycznej wytwarzane przez lasery
półprzewodnikowe i światłowodowe: właściwości widmowe
i czasowe”**

oraz

**„Nowe techniki spektroskopii i obrazowania wykorzystujące
niestabilizowane grzebień częstotliwości optycznej”**

Spis treści

1. Imię i nazwisko	3
2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe lub artystyczne – z podaniem podmiotu nadającego stopień, roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej	3
3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych.	3
Narracyjny opis kariery naukowej	4
4. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.). Omówienie to winno dotyczyć merytorycznego ujęcia przedmiotowych osiągnięć, jak i w sposób precyzyjny określać indywidualny wkład w ich powstanie, w przypadku, gdy dane osiągnięcie jest dziełem współautorskim, z uwzględnieniem możliwości wskazywania dorobku z okresu całej kariery zawodowej.	6
Osiągnięcie I: – monotematyczny cykl publikacji.....	7
4.1 Uzasadnienie podjęcia tematyki badawczej i celu badawczego (Osiągnięcie I)	8
4.2 Omówienie osiągniętych wyników prac badawczych (Osiągnięcie I)	16
Osiągnięcie II – monotematyczny cykl publikacji	23
4.3 Uzasadnienie podjęcia tematyki badawczej i celu badawczego (Osiągnięcie II)	24
4.4 Omówienie osiągniętych wyników prac badawczych (Osiągnięcie II)	25
5. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, szczególności zagranicznej.....	35
6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę.....	38
7. Oprócz kwestii wymienionych w pkt. 1-6, wnioskodawca może podać inne informacje, ważne z jego punktu widzenia, dotyczące jego kariery zawodowej.	40

1. Imię i nazwisko.

Łukasz Antoni Sterczewski

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe lub artystyczne – z podaniem podmiotu nadającego stopień, roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej**► Politechnika Wrocławska, Wydział Elektroniki**

Wrocław

1/10/2014 – 11/7/2018

Doktorat w dziedzinie nauk technicznych, dyscyplina: telekomunikacja

Rozprawa: *"Signal processing in terahertz and mid-infrared spectroscopy with frequency combs"* (obroniona z wyróżnieniem), Data obrony: 10/07/2018. Promotorzy: prof. Edward Plinski (WUST) & prof. Gerard Wysocki (Princeton University).

► Politechnika Wrocławska, Wydział Elektroniki

Wrocław,

1/2/2013 – 17/7/2014

Magister inżynier elektronik

Specjalność: Advanced Applied Electronics (studia po angielsku).

► Politechnika Wrocławska, Wydział Elektroniki

Wrocław

1/10/2009 – 22/1/2013

Inżynier automatyk

Specjalność: Komputerowe Sieci Sterowania

3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych.**► Politechnika Wrocławska, Wydział Elektroniki, Wydział Elektroniki, Mikrosystemów i Fotoniki**

Wrocław

26/2/2021 – teraz

Adiunkt naukowo-badawczy / badawczo-dydaktyczny

TEMATYKA: Wspomagana obliczeniowo spektroskopia molekularna wykorzystująca optyczne grzebienie częstotliwości, generacja fali terahercowej, lasery ICL i QCL

► California Institute of Technology, Division of Chemistry and Chemical Engineering

Pasadena CA, USA

1/9/2020 – 24/2/2021

Wizytujący badacz

na miejscu, zdalnie do 2023

TEMATYKA: Molekularna spektroskopia optyczna w grupie prof. Mitchio Okumury.

► NASA Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Microdevices Laboratory

Pasadena CA, USA

25/2/2019 – 24/2/2021

Stażysta podoktorski NASA Postdoctoral Program (NPP)

TEMATYKA: Spektroskopia optyczna do zastosowań kosmicznych wykorzystująca grzebienie częstotliwości optyczne wytwarzane przez międzypasmowe lasery kaskadowe.

► Politechnika Wrocławska, Wydział Elektroniki,

Wrocław

1/9/2018 – 22/2/2019

Stażysta podoktorski (post-dok)

TEMATYKA: Niestabilizowana spektroskopia dwu-grzebieniowa.

► Princeton University, Department of Electrical Engineering

Princeton NJ, USA

1/10/2015 – 31/3/2018

Wizytujący doktorant w grupie prof. Gerarda Wysockiego Laser Sensing Group (PULSE)

TEMATYKA: Spektroskopia dwugrzebieniowa w średniej i dalekiej podczerwieni wykorzystująca kwantowe i międzypasmowe lasery kaskadowe (QCL/ICL); współprowadzenie zajęć z *Selected Topics in Optics and Optical Electronics*.

► NASA Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Microdevices Laboratory

Pasadena CA, USA

5/6/2017 – 25/8/2017

Stażysta-doktorant pod przewodnictwem Dra Mahmooda Bagheri

TEMATYKA: Pasywna synchronizacja modów we wnękach międzypasmowych laserów kaskadowych (ICL).

► Politechnika Wrocławska, Wydział Elektroniki

Wrocław

1/10/2014 – 11/7/2018

Asystent/doktorant pod promotorstwem prof. Edward Plińskiego

TEMATYKA: Nowe techniki przetwarzania sygnałów w spektroskopii terahercowej; dydaktyka (*Elektryczność i magnetyzm, Podstawy programowania*).

Narracyjny opis kariery naukowej

W pracy badawczo rozwojowej jestem zaangażowany na Politechnice Wrocławskiej od czasu rozpoczęcia studiów magisterskich w 2013 roku. Główną tematyką moich badań są sposoby wytwarzania i detekcji spójnego promieniowania laserowego w zakresie średniej podczerwieni i terahercowym. Moje badania obejmują zarówno konwencjonalne źródła światłowodowe, które pracę w zakresie fal dłuższych uzyskują dzięki technikom nieliniowej konwersji częstotliwości, jak również zminiaturyzowane półprzewodnikowe emitery, które pracę szerokopasmowego grzebienia częstotliwości optycznej uzyskują natywnie w tym rejonie. Równolegle, rozwijam niekonwencjonalne techniki spektroskopowe dostosowane do parametrów pracy każdej z tych platform.

W latach 2013–2015 prowadziłem badania w Laboratorium Techniki Terahercowej pod promotorstwem prof. Edwarda Plińskiego, gdzie pracowałem nad spektroskopią THz w zastosowaniach farmaceutycznych. Rozwinąłem autorski układ modulacji anteny fotonoprzewodzącej do poprawy właściwości szumowych, zbudowałem dedykowany system

do badania termicznej dekompozycji molekuł chemicznych obserwowanej spektrometrem THz oraz zaimplementowałem algorytm ślepej separacji źródeł spektralnych bazujący na modelu Bayesa. Każdy z tych pomysłów został ujęty w odpowiedniej publikacji z Listy Filadelfijskiej.

W 2015 roku otrzymałem zaproszenie do kontynuacji rozprawy doktorskiej na Uniwersytecie Princeton w Stanach Zjednoczonych w ramach projektu DARPA SCOUT („*Spectral combs from the UV to the THz*”). W latach 2015–2018 pracowałem tam pod promotorstwem prof. Gerarda Wysockiego nad fizyką i zastosowaniami spektroskopowymi międzypasmowych- i kwantowych laserów kaskadowych w trybie grzebieni częstotliwości optycznych. Jako pierwsza grupa na świecie, zademonstrowaliśmy spektroskopię dwugrzebieniową z wykorzystaniem międzypasmowych laserów kaskadowych (ICL, interband cascade laser). To niezwykle źródło emituje dziesiątki równoodległych zębów w rejonie drgań węgiel-wodór ($3\text{ }\mu\text{m}$ długości fali) przy poborze mocy ułamka wata. Te właściwości lasera ICL zadecydowały o jego wyborze do przestrajalnego spektrometru laserowego (TLS – *tunable laser spectrometer*) w ramach misji łazika Curiosity prowadzonej przez NASA. Pionierskie eksperymenty w tym zakresie prowadzone przeze mnie na Princeton zostały dostrzeżone przez Laboratorium Napędu Odrzutowego NASA (Jet Propulsion Laboratory), gdzie zostałem zaproszony na trzymiesięczny staż naukowy w 2017 roku jako jeden z kilku nie-obywateli USA. Tam, pod przewodnictwem Dra Mahmooda Bagheri’ego charakteryzowałem właściwości dyspersji opóźnienia grupowego w tych strukturach. Po powrocie ze stażu w JPL, na Princeton kontynuowałem prace związane ze spektroskopią wykorzystującą kwantowe lasery kaskadowe w zakresie fal THz do zastosowań szybkiej detekcji gazów i farmaceutycznych. Na ten etap pobytu w Princeton, pozyskałem finansowanie z Fundacji Kościuszkowskiej.

W marcu 2018 roku wróciłem do Polski. Po obronie doktoratu, dołączyłem do Grupy Elektroniki Laserowej i Światłowodowej kierowanej przez dr hab. inż. Jarosława Sotora, w której w trakcie półrocznego stażu podoktorskiego prowadziłem badania nad cyfrową korekcją fazową w niestabilizowanej spektroskopii dwugrzebieniowej. Zbudowany przeze mnie laser światłowodowy z multipleksacją polaryzacji generował dwa wzajemnie koherentne grzebienie częstotliwości optycznej. Rozwinięty przeze mnie algorytm korekcji fazowej umożliwił pomiary molekuł chemicznych (cyjanowodoru) z rozdzielczością zębów grzebienia (140 MHz) mimo zupełnie niestabilizowanej pracy [HB3]. Moje metody korekcji fazowej, rozwinięte na Princeton i PWr okazały się być na tyle uniwersalne, że można było je zdalnie przenieść na inny kontynent. We współpracy z prof. Minoshimą (ale już w 2022 roku), pokazaliśmy możliwość niestabilizowanej spektroskopii z laserami iterbowymi rozwijanymi w jej grupie [NP3, NP4].

W lutym 2019 roku, otrzymawszy prestiżowe stypendium *Universities Space Research Association* (USRA) na badania na laserami międzypasmowymi laserami kaskadowymi,

powróciłem do laboratorium NASA JPL by odbyć tam dwuletni staż podoktorski. Badałem tam możliwość wykorzystania laserów ICL jako szybkich fotodetektorów z GHz częstotliwościami pracy, co zaowocowało eksperymentem (wyróżnionym przez edytora czasopisma *Applied Physics Letters*) pokazującym możliwość przeprowadzania spektroskopii dwugrzebieniowej w średniej podczerwieni w temperaturze pokojowej na bazie dokładnie tego samego materiału półprzewodnikowego: zarówno źródło, jak i fotodetektor pochodziły z tego samego wafla [HA6]. To rozwiązanie ma duży potencjał na w pełni zminiaturyzowane spektrometry szerokopasmowe zasilane z baterii. W dodatku do aspektu aplikacyjnego, zająłem się fizyką laserów półprzewodnikowych. Odtworzyłem profil emisji grzebieni częstotliwości emisji w diodowych laserach półprzewodnikowych bazujących na antymonku galu [HA5, HA2]. Pokazałem też pierwsze grzebienie diodowe na długościach fali 2 i 3 μm , z czego te ostatnie zaowocowały publikacją w czasopiśmie *Laser & Photonics Reviews* [HA2].

Na powrót do Polski w 2021 roku pozyskałem finansowanie z programu stypendialnego Komisji Europejskiej Marii Skłodowskiej-Curie, projekt “Computationally-Enhanced Molecular Sensing using Optical Frequency Combs (CEMoS-OFC)”. Rezultatem prac badawczych jest między innymi nowatorska technika obrazowania dynamiki solitonów optycznych powstających w oscylatorach laserowych opublikowana w czasopiśmie *Nature Communications* [HB2]. Umożliwia ona prostą diagnostykę źródeł impulsowych pod kątem emisji paczek impulsów, które typowo mogą być niezauważone ze względu na ograniczenia klasycznych instrumentów diagnostycznych jak autokorelatory. Dodatkowo, znosi ona wymóg dopasowania polaryzacji wejściowej do kryształu oraz wykazuje się dużą elastycznością długości fal.

Brałem również czynny udział w projekcie infrastrukturalnym Narodowego Laboratorium Technologii Fotonicznych i Kwantowych (NLPQT). Zbudowałem od podstaw Laboratorium Optoelektroniki Terahercowej, które dzisiaj umożliwia pionierskie badania nad emisją fali THz z organicznych kryształów nieliniowych i struktur półprzewodnikowych.

Połączenie wysokosprawnej emisji średniej podczerwieni z nieliniowością międzypasmowych laserów kaskadowych zostało docenione przez agencję ERC, która w październiku 2023 roku przyznała mi pierwszy na Politechnice i jeden z 2 w kraju grantów ERC Starting Grant. Na badania otrzymałem 1,5 miliona Euro na okres 5 lat. Emisja i detekcja fali THz pobudzana laserami ICL będzie stanowiła obszar moich badań w najbliższym czasie.

4. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.). Omówienie to winno dotyczyć merytorycznego ujęcia przedmiotowych osiągnięć, jak i w sposób precyzyjny określać indywidualny wkład w ich powstanie, w przypadku, gdy dane osiągnięcie jest dziełem współautorskim, z uwzględnieniem możliwości wskazywania dorobku z okresu całej kariery zawodowej.

Osiągnięcie I: – monotematyczny cykl publikacji

„Grzebień częstotliwości optycznej wytwarzane przez lasery półprzewodnikowe i światłowodowe: właściwości widmowe i czasowe”

Publikacje wchodzące w skład osiągnięcia naukowego (odwrócona chronologia)

- [HA1] J. Boguslawski, L. A. Sterczewski, D. Stachowiak, and G. Sobon, "Intracavity filtering in SESAM mode-locked fiber lasers: soliton effects and noise performance," *Optics Express* **31**, 27667-27676 (2023), IF = 3,80. Dodatkowo udostępniłem kod do symulacji: <https://dx.doi.org/10.6084/m9.figshare.25055657>. **Punktacja MNiSW: 140.**
- [HA2] L. A. Sterczewski, M. Fradet, C. Frez, S. Forouhar, and M. Bagheri, "Battery-operated mid-infrared diode laser frequency combs," *Laser & Photonics Reviews* **16**, 2200224 (2022), IF = 10,95. **Punktacja MNiSW: 200.**
- [HA3] M. Kowalczyk, L. A. Sterczewski, X. Zhang, V. Petrov, and J. Sotor, "Dual-dispersion-regime dual-comb mode-locked laser," *Optics Letters* **47**, 1762–1765 (2022), IF = 3,78. Kod: <https://dx.doi.org/10.6084/m9.figshare.25055684>. **Punktacja MNiSW: 140.**
- [HA4] L. A. Sterczewski, M. Bagheri, C. Frez, C. L. Canedy, I. Vurgaftman, M. Kim, C. S. Kim, C. D. Merritt, W. W. Bewley and J. R. Meyer, "Interband cascade laser frequency combs (invited review)," *Journal of Physics Photonics* **3**, 042003 (2021), IF = 3,88. **Punktacja MNiSW: 20.**
- [HA5] L. A. Sterczewski, C. Frez, S. Forouhar, D. Burghoff, and M. Bagheri, "Frequency-modulated diode laser frequency combs at 2 μm wavelength," *APL Photonics* **5**, 076111 (2020) [**Artykuł opisany przez popularnonaukowy portal AIP Scilight**], [**Artykuł na okładce czasopisma**], IF = 4,86. **Punktacja MNiSW: 100.**
- [HA6] L. A. Sterczewski, M. Bagheri, C. Frez, C. L. Canedy, I. Vurgaftman, and J. R. Meyer, "Mid-infrared dual-comb spectroscopy with room-temperature bi-functional interband cascade lasers and detectors," *Applied Physics Letters* **116**, 141102 (2020) [**Artykuł wyróżniony przez edytora**], [**Artykuł opisany przez popularnonaukowy portal AIP Scilight**], IF = 3,60. **Punktacja MNiSW: 100.**
- [HA7] L. A. Sterczewski, M. Bagheri, C. Frez, C. L. Canedy, I. Vurgaftman, M. Kim, C. S. Kim, C. D. Merritt, W. W. Bewley, and J. R. Meyer, "Near-infrared frequency comb generation in mid-infrared interband cascade lasers," *Optics Letters* **44**, 5828-5831 (2019) IF = 3,71. **Punktacja MNiSW: 140.**

Techniczny opis wkładu autorskiego znajduje się w Załączniku nr 4 w punkcie 2.1 (Wykaz osiągnięć naukowych albo artystycznych, stanowiących znaczny wkład w rozwój określonej dyscypliny). W niniejszym punkcie omówiony zostanie kontekst naukowy i całościowe znaczenie indywidualnych publikacji stanowiących cykl.

	Impact Factor	Punktacja MNiSW	Rola autora	Liczba cytowań (WOS)
[HA1]	3,80	140	Drugi współautor	4
[HA2]	10,95	200	Wiodący i korespondencyjny	5
[HA3]	3,78	140	Drugi współautor	1

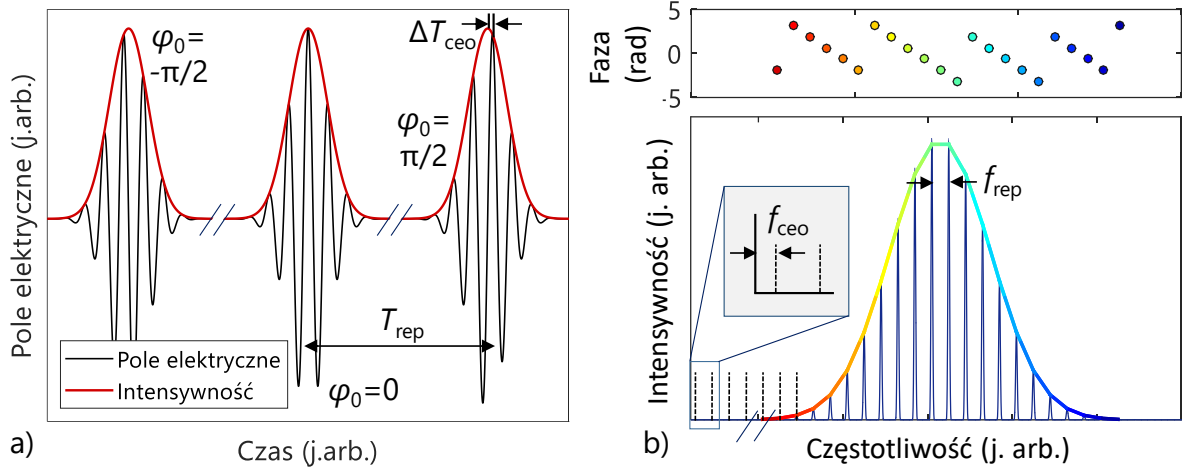
[HA4]	3,88	10 (50% z 20 za artykuł recenzyjny)	Wiodący	15
[HA5]	4,86	100	Wiodący i korespondencyjny	20
[HA6]	3,60	100	Wiodący i korespondencyjny	28
[HA7]	3,71	140	Wiodący	5
Σ	34,58	830		78

4.1 Uzasadnienie podjęcia tematyki badawczej i celu badawczego (Osiągnięcie I)

Wynalezienie lasera przez Theodora Maimana w 1960 roku [1] zapoczątkowało nową erę w fizyce. Dzięki kierunkowej emisji spójnego czasowo i przestrzennie światła uzyskano możliwość badania materii w niespotykanej wcześniej skali zarówno pod kątem rozmiarów fizycznych, jak i mocy pobudzenia. Szereg nagród Nobla z fizyki przyznanych w ostatnim półwieczu zawdzięcza się wynalazkowi Maimana i wyteżonym pracom Charlesa Townesa, Nicolaya Basova i Aleksandra Prokhorova, którzy za opis teoretyczny lasera otrzymali tę prestiżową nagrodę w 1964 roku. Wśród przełomowych odkryć uhonorowanych Noblem, związanych z tym przełomowym źródłem światła, można wymienić holografię (Dennis Gabor, 1971), spektroskopię laserową (Nicolaas Bloembergen i Arthur Leonard Schawlow, 1981), chłodzenie optyczne i pułapkowanie atomów (Steven Chu, Claude Cohen-Tannoudji i William D. Phillips, 1997), czy niezwykle popularny grzebień częstotliwości optycznej (John L. Hall i Theodor W. Hänsch, 2005). Lista ta jest niekompletna, gdyż pomija inne ważne techniki wykorzystujące lasery, jak na przykład szczypce optyczne (Arthur Ashkin, 2018), jednak ma ona na celu zarysowanie przełomowej roli lasera we współczesnej fizyce.

W środowisku optycznym dużym uznaniem cieszy się technika grzebieni częstotliwości optycznych ze względu na liczne zastosowania spektroskopowe. W porównaniu z pierwotną koncepcją lasera jako wąskopasmowego, a nawet monochromatycznego źródła światła, łączy ona szerokopasmową naturę niespójnych źródeł termicznych z dużą drogą koherencji i dobrymi właściwościami kolimacyjnymi lasera. Grzebień częstotliwości optycznej to źródło promieniowania laserowego, w którym mody podłużne rezonatora, zwane zębami grzebienia, są równoodległe. Zamiast odstępu modalnego (ang. *free spectral range*, FSR) podyktowanego dyspersją prędkości grupowej wnęki laserowej, jak w przypadku pasywnych rezonatorów Fabry-Pérot, równoodległość gwarantowana jest przez istnienie nieliniowego mechanizmu synchronizacji modów podłużnych.

Klasyczne grzebień częstotliwości optycznej uzyskiwane były przez wykorzystanie nieliniowego zjawiska nasycalnej absorpcji [2], które faworyzuje emisję światła w postaci równoodległych w czasie impulsów ze względu na nieliniową transmisję optyczną materiału (medium) w funkcji intensywności światła. Ten proces fizyczny chętnie wykorzystuje się w laserach światłowodowych i niektórych laserach realizowanych przy pomocy optyki objętościowej do wytwarzania impulsów piko- i femtosekundowych. Dzięki



Rys. 1. Profil czasowy (a) oraz widmowy (b) lasera z synchronizacją modów podłużnych. Liniowa faza widmowa odpowiada zerowemu opóźnieniu grupowemu, co oznacza, że mody pracują w fazie. W rezultacie, uzyskiwana jest praca impulsowa. Adaptacja z opracowania własnego [3].

mechanizmowi synchronizacji (którym może być też soczewkowanie Kerra w laserach na ciele stałym), częstotliwość optyczna każdego modu podłużnego lasera może być w dowolnej chwili opisana równaniem grzebienia:

$$f_n(t) = f_{\text{ceo}}(t) + n f_{\text{rep}}(t), \quad (1)$$

co oznacza, że zaledwie 2 częstotliwości mikrofalowe definiują każdą częstotliwość optyczną emitowaną przez takie źródła. Wówczas mody podłużne przyjmują nazwę *zębów grzebienia*. Częstotliwość powtarzania impulsów (repetycji) f_{rep} jest zdefiniowana przez prędkość grupową v_g i długość rezonatora L (tutaj dla uproszczenia liniowego zakończonego zwierciadłami półprzepuszczalnymi),

$$\frac{1}{f_{\text{rep}}} = T_{\text{rep}} = \frac{2L}{v_g}. \quad (2)$$

Mniej oczywista jest interpretacja częstotliwości obwiednia nośna f_{ceo} , która wynika z różnicy prędkości fazowej i grupowej impulsu propagującego we wnęce laserowej. Fizycznym skutkiem f_{ceo} jest fakt, że faza φ_0 dla lokalnego maksimum intensywności pola elektrycznego (obwiedni) ewoluuje – każdy kolejny impuls ma inną fazę w maksimum intensywności w porównaniu z poprzednimi (dla $f_{\text{ceo}} \neq k f_{\text{rep}}$, $k \in \mathbb{Z}$). W literaturze nosi ona nazwę fazy obwiednia nośna (CEP – *carrier envelope phase*). To właśnie jej zmiana $\Delta\varphi_{\text{ceo}}$ od impulsu do impulsu skutkuje powstaniem f_{ceo} według relacji

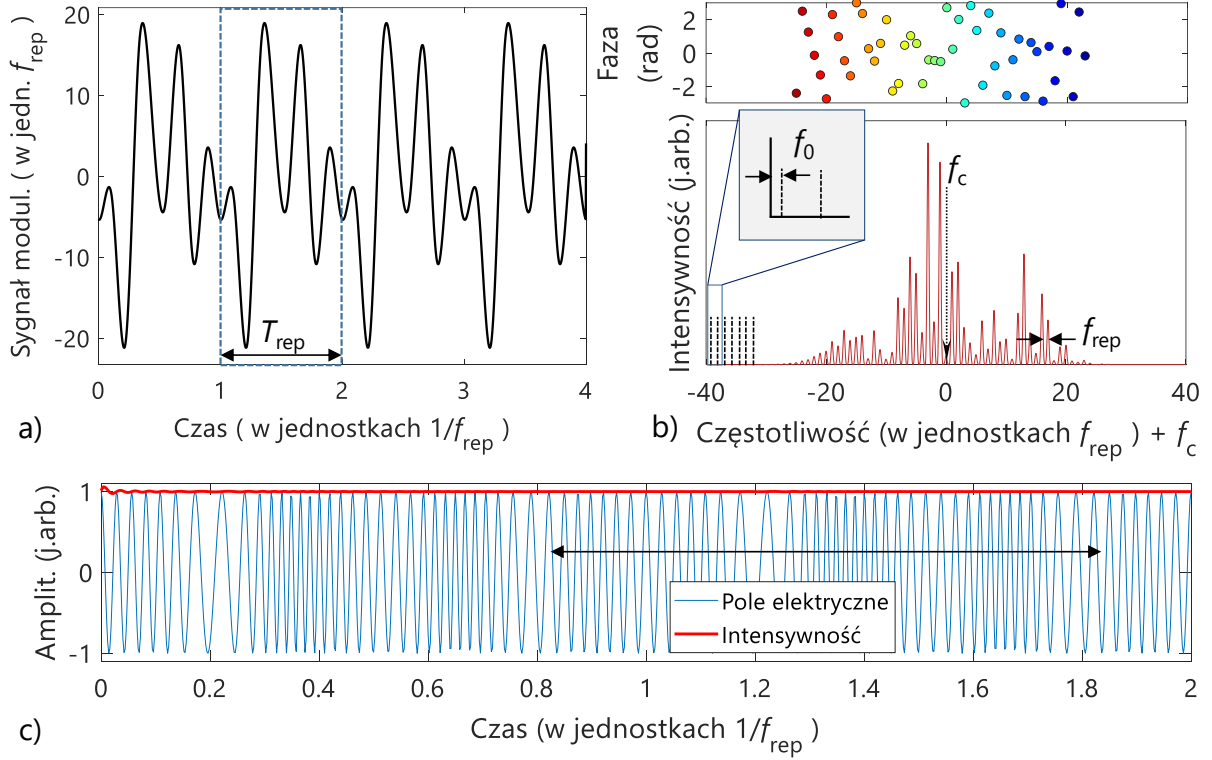
$$f_{\text{ceo}} = \frac{\Delta\varphi_{\text{ceo}} \bmod 2\pi}{2\pi} f_{\text{rep}}, \quad (3)$$

która w dziedzinie częstotliwości przesuwa wszystkie zęby grzebienia względem wielokrotności f_{rep} o wspólną częstotliwość f_{ceo} . Schematyczny profil czasowy i charaktery-

styki widmowe zaprezentowano na **Rys. 1**, gdzie **Rys. 1a)** pokazuje zmianę fazy obwiednia-nośna, a **Rys. 1b)** przedstawia widmo amplitudowe i fazowe z zaznaczeniem f_{ceo} .

W niektórych kręgach naukowych, sam fakt synchronizacji faz modów podłużnych to warunek niewystarczający, by spełnić definicję grzebienia. Grzebieniem częstotliwości nazywane jest tylko takie źródło, w którym zarówno f_{rep} jak i f_{ceo} są stabilizowane przez odpowiednie pętle synchronizacji fazowej, jak zaproponowano przez Ursulę Keller i współpracowników w 1999 roku [4]. Mimo upływu lat, wymyślona przez nią technika interferometrii $f-2f$ wymagana do pomiaru i kontroli f_{ceo} stanowi duże wyzwanie eksperymentalne. O ile pomiar f_{rep} jest zadaniem niemalże trywialnym, gdyż fotodetektor natywnie mierzy zarówno ją, jak i jej harmoniczne, o tyle częstotliwości f_{ceo} nie można uzyskać bezpośrednio. Do jej pomiaru, wymagane są duże moce szczytowe (a zatem obecność impulsów), poszerzenie spektralne w nieliniowym medium oraz wytworzenie drugiej harmonicznej w procesie nieliniowym drugiego rzędu. W wielu układach o większych (GHz) częstotliwości repetycji i pracujących na nietypowych długościach fali poza klasycznymi 1 μm i 1,5 μm jest ona prawie niemożliwa do spełnienia. W szczególności dotyczy to nowej generacji zintegrowanych źródeł grzebieni częstotliwości wielkości czipa o małych mocach szczytowych i braku emisji impulsowej.

W mojej pracy badawczej dowodziłem na wiele sposobów, że zarówno generacja impulsów, jak i eksperymentalnie złożona stabilizacja grzebieni nie są wymagane do szeregu aplikacji takich jak szerokopasmowa spektroskopia optyczna. Sam fakt ustalenia niezmiennącej się w czasie zależności fazowej między wszystkimi modami podłużnymi wystarcza do nazwania źródła grzebieniem częstotliwości optycznej. Nawet jeśli faza optyczna fluktuuje w ograniczonym zakresie, ale w sposób jednakowy dla wszystkich zębów, może być ona śledzona i korygowana cyfrowo podczas pomiaru. Znaczenie praktyczne tych założeń jest duże w kontekście półprzewodnikowych grzebieni częstotliwości, których właściwości czasowo-spektralne stanowią istotny element osiągnięcia I. Wykazałem, że liniowy świergot (ang. *chirp*) emitowany natywnie przez elektrycznie pompowane lasery półprzewodnikowe w trybie samo-modulacji częstotliwości (FM) utrzymuje właściwości grzebieni częstotliwości optycznych i pozwala na ich szerokie zastosowanie do precyzyjnych pomiarów spektroskopowych (MHz precyzja, dokładność rzędu 100 MHz) oraz obrazowania hiperspektralnego w zakresie średniej i dalekiej podczerwieni. Należy tu podkreślić, że mimo dowodów teoretycznych i eksperymentalnych, półprzewodnikowe grzebienie FM są dalej nieakceptowane przez wiele środowisk laserowych. Właśnie dlatego stanowią tak atrakcyjny temat badawczy. Doświadczenie zdobyte przy badaniu tych trudnych emiterów szerokopasmowego promieniowania laserowego pozwoliło mi również przeprowadzić analizę zjawisk w laserach impulsowych i zbadać właściwości czasowo-spektralnych w różnych typach niestabilizowanych grzebieni częstotliwości, co łącznie stanowi Osiągnięcie I.



Rys. 2. Grzebień częstotliwości uzyskany przez okresową modulację fazy o losowej częstotliwości chwilowej (z ograniczeniem pasma). (a) Sygnał modulujący proporcjonalny do chwilowej częstotliwości. (b) Widmo fazowe i amplitudowe sygnału optycznego. (c) Pole elektryczne i jego intensywność. Symulacja wg własnego kodu rozwiniętego na potrzeby pozycji [3].

Rozpatrzmy źródło laserowe, w którym chwilowa częstotliwość optyczna $f(t) = f_c + f_{\Delta} x_m(t)$ zmienia się w sposób losowy (ograniczony pasmowo w związku z dynamiką medium). Laser taki ma pole elektryczne opisane równaniem modulacji częstotliwości (FM – *frequency modulation*):

$$E(t) = E_0 \cos \left(2\pi f_c t + 2\pi f_{\Delta} \int_0^t x_m(\tau) d\tau \right), \quad (4)$$

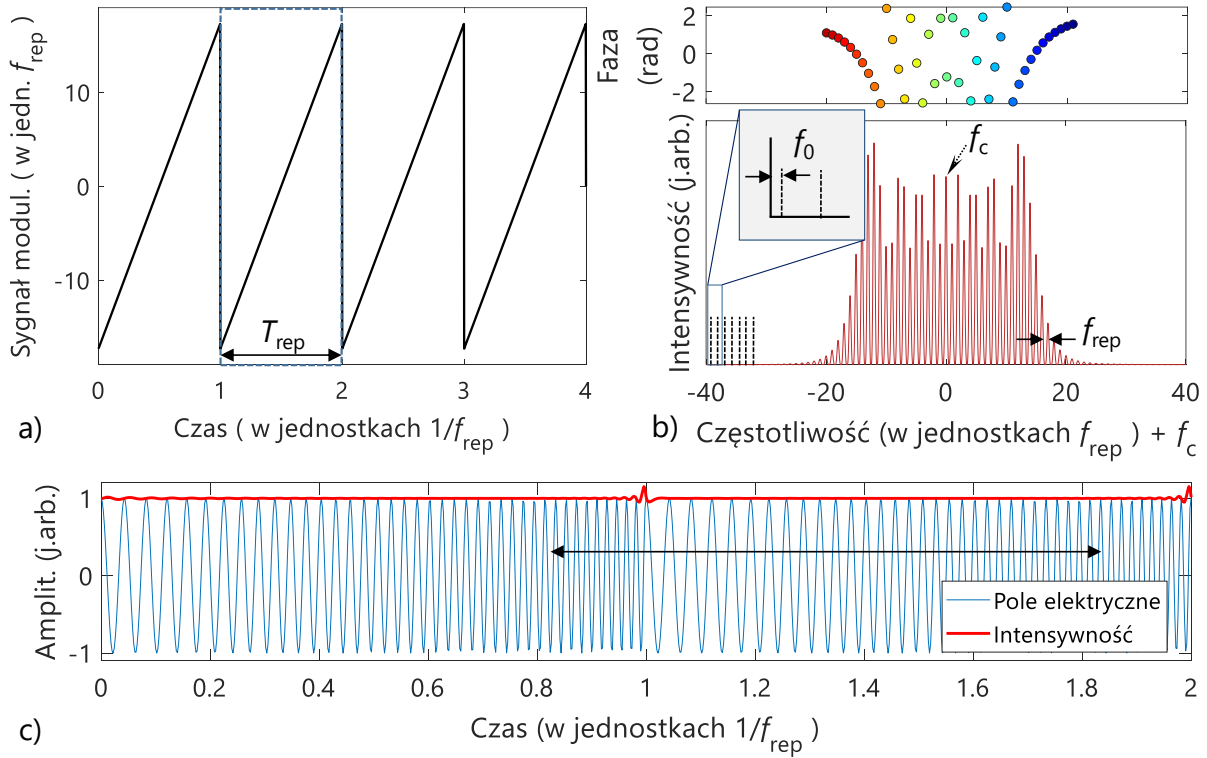
gdzie x_m to sygnał modulujący ograniczony w zakresie $[-1,1]$, dewiacja częstotliwości $f_{\Delta} = m f_{\text{rep}}$, m to współczynnik modulacji częstotliwości, a f_c to częstotliwość nośna. Czemu odpowiada takie źródło? To laser, w którym zamiast nasycalnej absorpcji, występuje zjawisko nasycalnego wzmocnienia. Prowadzi ono do pracy FM o niemalże stałej chwilowej intensywności. Taki model został opracowany przez J. Khurgina i współpracowników [5] do opisu pracy kwantowego lasera kaskadowego (ang. QCL – *quantum cascade laser*) jako grzebień częstotliwości optycznej [6]. Jak pokazano na **Rys. 2**, fluktuująca chwilowa częstotliwość optyczna może prowadzić do emisji równoodległych zębów spełniających równanie grzebienia częstotliwości optycznych pod jednym warunkiem: proces samo-modulacji musi mieć charakter okresowy (powtarzalny). W laserach półprzewodnikowych warunkowane jest to czasem obiegu wnęki ($1/f_{\text{rep}}$). Jak pokazuje

Rys. 2b, chociaż nieregularne pod kątem intensywności modalnej, widmo optyczne posiada równoodległe linie o dobrze zdefiniowanych odstępach (f_{rep}) oraz częstotliwości przesunięcia (offsetu) $f_0 = f_{\text{ceo}}$. Celowo unika się nazywania jej częstotliwością obwiednia nośna, ponieważ brak impulsów uniemożliwia wyodrębnienie maksimum obwiedni. Niemniej jednak, matematycznie zależność pozostaje identyczna.

Mimo, że fazy w takim grzebieniu nie są zsynchronizowane, utrzymanie ich zależności przez dłuższy (teoretycznie nieskończony) czas prowadzi do okresowej modulacji częstotliwości i pracę z niemalże stałą intensywnością chwilową ze strukturą widmową grzebienia. Takie konkluzje do dzisiaj stanowią przedmiot intensywnych debat. W 2018 roku, M. Singleton z grupy prof. Jerome’a Faista z ETH wykazał, że zamiast losowej modulacji, lasery kaskadowe emitują liniowy świergot [7]. Wynika to z faktu że medium lasera QCL nie ma zdolności magazynowania energii przez czas obiegu wnęki, jak to jest w światłowodowych włóknach domieszkowanych erbem, czy laserach międzypasmowych. Czas życia w stanie górnym (ang. *upper state lifetime*) jest zbyt krótki (rzędu ps) w porównaniu z czasem obiegu wnęki (10–100 ps), by umożliwić pasywną synchronizację modów i emisję impulsową. W konsekwencji, laser QCL (Fabry-Perot o odpowiednio kontrolowanej dyspersji prędkości grupowej) pracuje niczym szybko-przestrzajany laser jednomodowy, który prawie liniowo zmienia swoją chwilową częstotliwość. Dzięki temu, że proces ma charakter okresowy, emisja przyjmuje proces dyskretnych modów grzebienia częstotliwości, jak pokazano na **Rys. 3**. Należy zaznaczyć, że modulacja z GHz szybkościami prowadząca do grzebienia ma charakter samo-startujący i nie wymaga doprowadzenia zewnętrznego sygnału z generatora mikrofalowego.

W mojej pracy badawczej dotyczącej Osiągnięcia I, badałem właściwości czasowo-częstotliwościowe laserów, których dynamika jest znacząco wolniejsza, niż laserów QCL, a mianowicie laserów międzypasmowych (ICL, ang. *interband cascade laser*) oraz laserów diodowych na studniach kwantowych. Mimo, iż teoria sugeruje ich nanosekundową dynamikę, w laserach tych istnieje szybki komponent, który prowadzi do emisji identycznej, jak w laserach QCL.

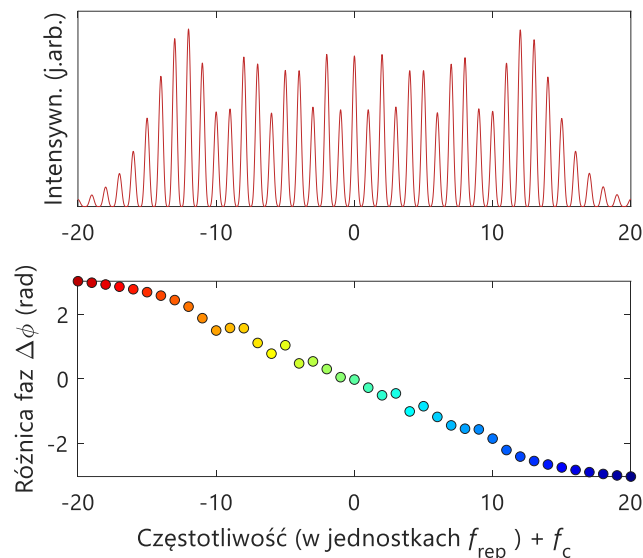
Prace teoretyczne D. Burghoffa [8] oraz N. Opacaka [9] opublikowane w ubiegłych 4 latach wykazały istnienie tak zwanych ekstendonów (solitonów optycznych, których potencjał ma charakter fazowy, a nie amplitudowy – rozwiązaniem zmodyfikowanego równania Schroedingera jest wówczas pole elektryczne o parabolicznie zmieniającej się fazie, czyli liniowy świergot). Warunkiem otrzymania grzebienia częstotliwości w laserach półprzewodnikowych jest praca wielomodowa wskutek przestrzennego wypalania dziur (SHB – *spatial hole burning*) oraz mieszanie czterofalowe (FWM – *four wave mixing*), które jest odpowiedzialne za wyrównanie odległości międzymodowej. W dziedzinie czasu, odpowiada to liniowemu przemiataniu częstotliwości (parabolicznej fazie widmowej). Innymi słowy, laser dobiera swoje parametry pracy (charakter emisji) celem minimalizacji fluktuacji intensywności przez utrzymanie zębów po przeciwnych



Rys. 3. Grzebień częstotliwości uzyskany przez okresową modulację fazy o liniowo zmieniającej się częstotliwości chwilowej. (a) Sygnał modulujący proporcjonalny do chwilowej częstotliwości. (b) Widmo fazowe i amplitudowe sygnału optycznego. (c) Pole elektryczne i jego intensywność. W porównaniu z losową modulacją, widoczne są oscylacje amplitudy pola elektrycznego przy zmianie kierunku przemiatania częstotliwości. Symulacja wg własnego kodu rozwiniętego na potrzeby pozycji [3].

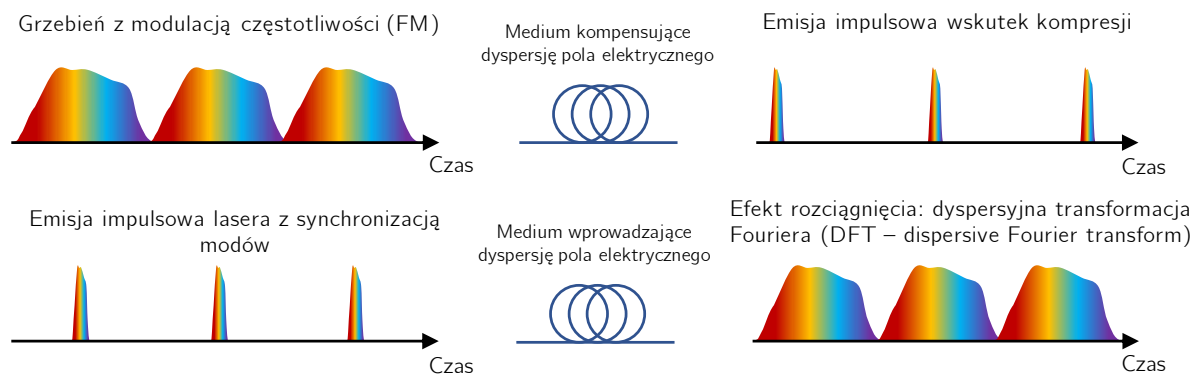
stronach widma w przeciwfazie [10]. W ten sposób, laser spełnia zasadę wariacyjną – optymalizuje on swoje parametry pracy do uzyskania optimum energetycznego [11]. Dobrze widoczne jest to na **Rys. 4**, gdzie pokazano różnicę faz między zębami w trybie liniowego przemiatania częstotliwości (analiza danych z **Rys. 3**). Fakt, że zęby po przeciwnych stronach widma oscylują w przeciwfazie oznacza wzajemne znoszenie się fluktuacji intensywności i pracę z niemal stałą jej wartością. Lasery półprzewodnikowe bez nasycalnych absorberów z nieliniowością trzeciego rzędu $\chi^{(3)}$ (prowadzącą do mieszania czterofalowego) mają charakter nasycalnego wzmocnienia w obecności przestrzennego wypalania dziur (gdy pracują na wielu modach podłużnych i każdy z nich konkuruje o wzmocnienie). Praca w pewnym regionie wzmocnienia wysyca je i zmusza laser do zmiany emitowanej częstotliwości celem podtrzymania akcji laserowej. Właśnie tego typu profile fazowe (jak na **Rys. 4**) uzyskałem w laserach, w których spodziewano się emisji impulsowej [HA6].

Istnieje pewna ciekawa analogia pomiędzy laserami z modulacją częstotliwości oraz dyspersyjną transformacją Fouriera (DFT – *dispersive Fourier transform*) [12]. Służy ona jako pośredni dowód na to, że nie charakter modulacji (impulsowa AM, jak w laserach



Rys. 4. Różnica faz optycznych $\Delta\phi$ zestawiona z widmem optycznym dla grzebienia o liniowo przemiatanej częstotliwości chwilowej. Widmo fazowe (różnicy faz między zębami) pokrywa zakres $-\pi$ do $+\pi$, co oznacza, że zęby grzebienia po przeciwnych stronach widma oscylują w przeciwfazie. W ten sposób minimalizuje się fluktuacje amplitudy – laser pracuje z prawie stałą chwilową intensywnością jak laser fali ciągłej (cw, ang. *continuous wave*).

światłowodowych, albo FM w półprzewodnikowych) decyduje o pracy grzebieniowej. Zilustrowane jest to na **Rys. 5**.



Rys. 5. Analogia pomiędzy grzebieniem z modulacją częstotliwości (FM) skompresowanym w medium dyspersyjnym, jak światłowod, a grzebieniem emitującym impulsy z modulacją amplitudy (AM). Emisja impulsowa z oscylatora może być rozciągnięta w medium dyspersyjnym do ekstremalnych wartości (niemalże 100% współczynnika wypełnienia przy wielometrowych długościach światłowodu) korzystając z DFT. Natywny profil czasowy z lasera o charakterze FM jest identyczny z impulsowym emitorem po przejściu przez medium dyspersyjne. Zarówno w jednym, jak i drugim przypadku, fazy międzymodowe ulegają zmianie, lecz pozostają niezmiennie w funkcji czasu. Dlatego charakter grzebienia pozostaje nienaruszony.

Analiza tego typu zjawisk (i pochodnych) przedstawiona jest w publikacjach [HA2] i [HA4-HA7]. W pracy [HA3] badałem właściwości szumu fazowego lasera na ciele stałym pracującym jednocześnie z dwoma impulsami o skrajnie różnych czasach trwania, a tym samym współczynnikach wypełnienia. Chronologicznie ostatnia praca [HA1] porusza tematykę właściwości widmowych lasera solitonowego z wewnątrzwnętkowym filtrem optycznym, który prowadzi do powstania fali dyspersyjnej interferującej z widmem pochodzenia impulsowego. Wszystkie te prace składają się na cykl publikacji, stanowiący podstawę osiągnięcia I zatytułowanego „Grzebień częstotliwości optycznej wytwarzane przez lasery półprzewodnikowe i światłowodowe: właściwości widmowe i czasowe”.

Mój oryginalny wkład w rozwój dyscypliny naukowej automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne (AEEiT) obejmuje w **Osiągnięciu I** badania mechanizmów kształtowania widma i ultraszybkiej dynamiki niestabilizowanych grzebieni częstotliwości optycznych z modulacją częstotliwości (FM) i amplitudy (AM). W szczególności w osiągnięciu widoczny jest aspekt technologii kosmicznych, ponieważ 5 z 7 prac jest z afiliacją Laboratorium Napędu Odrzutowego (NASA Jet Propulsion Laboratory). Prace dotyczyły nowego, niezbadanego wcześniej trybu pracy grzebieniowej międzypasmowego lasera kaskadowego (ICL), który habilitant zademonstrował w 2017 roku [N4]. Zamiast jednomodowego lasera ICL stanowiącego kluczowy element przestrajalnego spektrometru laserowego w łaziku Curiosity, w przyszłości będzie można wykorzystać dwa grzebienie ICL do pomiaru złożonych molekuł organicznych. Wynika to nie tylko z niewielkiego poboru mocy laserów ICL (<1 W), ale również ich odporności na promieniowanie kosmiczne.

Oryginalne osiągnięcia naukowe rozszerzające stan wiedzy to:

- Opracowanie modelu do kształtowania właściwości widmowych w laserach światłowodowych z wykorzystaniem wewnątrzwnętkowego filtra optycznego.
- Zaprezentowanie grzebieni częstotliwości na bazie diodowych laserów półprzewodnikowych (studnie kwantowe typu I) z zasilaniem baterijnym w zakresie bliskiej i średniej podczerwieni. Badania nad ultraszybką dynamiką tych źródeł.
- Analiza właściwości szumowych laserów dwugrzebieniowych z modulacją amplitudy (impulsowych) w różnych reżimach dyspersyjnych (normalna / anomalna)
- Demonstracja właściwości nieliniowych (generacja drugiej harmonicznej) w laserach ICL jako mechanizmu kształtowania widma w rejonach oddzielonych o oktawę optyczną.
- Zaproponowanie wycieku modu optycznego (ang. *modal leakage*), jako mechanizmu kształtowania widma wzmocnienia i dyspersji w laserach diodowych i międzypasmowych.

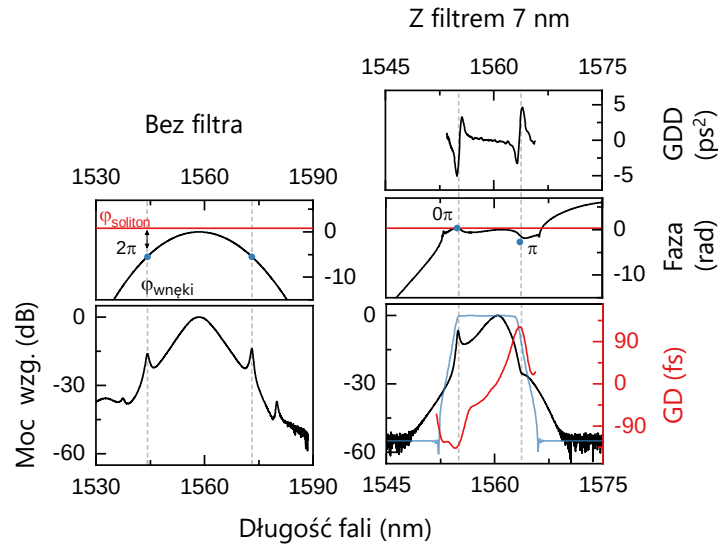
4.2 Omówienie osiągniętych wyników prac badawczych (Osiągnięcie I)

Cykl powiązanych tematycznie prac zatytułowany „Grzebień częstotliwości optycznej wytwarzane przez lasery półprzewodnikowe i światłowodowe: właściwości widmowe i czasowe” jest efektem badań naukowych, które habilitant przeprowadził w latach 2019–2023 w trzech jednostkach naukowych: Wydział Elektroniki Politechniki Wrocławskiej, NASA Jet Propulsion Laboratory, USA oraz Division of Chemistry and Chemical Engineering, California Institute of Technology.

W pracy [HA1] habilitant zaproponował model numeryczny do przewidywania położenia piku emisyjnego fali dyspersyjnej w światłowodowych oscylatorach z arbitralnie ukształtowanym filtrem optycznym umieszczonym wewnątrz wnęki laserowej. Tu należy zaznaczyć, że zagadnienie filtrowania dotyczy to nie tylko filtrów jako komponentów wytwarzanych do celów telekomunikacyjnych, ale również pasożytniczych (niepożądanych) wąskopasmowych właściwości filtrujących niektórych nasycalnych absorberów (np. SESAM). Niestabilizowany światłowodowy laser z pasywną synchronizacją modów generujący solitony optyczne jest chętnie wykorzystywany jako źródło zasiewające (ang. *seed*) do wzmacniaczy i układów nieliniowej konwersji częstotliwości na potrzeby szerokopasmowej spektroskopii optycznej. Takie źródła mają, niestety, pewne niepożądane właściwości. Ze względu na różne ośrodki propagacji solitonu o różnej dyspersji i stratach (włókno aktywne, włókno pasywne, sprzęgacz, nasycalny absorber), soliton ulega periodycznym zmianom czasu trwania, co skutkuje emisją nadmiarowej energii w postaci optycznej fali dyspersyjnej o właściwościach zbliżonych do fali quasi-ciągłej. Czas zaniku takiej fali zbliżony jest do kilkudziesięciu pikosekund (w przeciwieństwie do sub-pikosekundowego impulsu optycznego), a jej obecność widoczna jest w widmie jako prominentne piki emisyjne (lub absorpcyjne), które pogarszają właściwości szumowe oscylatora. Wydawałoby się, że włożenie filtra do wnęki pozwoli je wyfiltrować, jednak efekt jest przeciwny do zamierzonego. Widać to na **Rys. 6**.

W pracy habilitant przeanalizował (i zasymulował) filtrację dla kilku różnych szerokości filtracji oraz zasymulował właściwości dyspersyjne filtrów o arbitralnych kształtach (Gauss, Lorentz, Planck-taper) wykorzystując relacje Kramersa-Kroniga. Ponadto habilitant opracował oprogramowanie do numerycznego całkowania szumu fazowego do celów porównawczych. W pracy wykazano, że mimo pogarszania właściwości widmowych, filtracja wewnątrzwnękowa zmniejsza zintegrowany szum fazowy i amplitudowy. Praca opublikowana w sierpniu 2023 roku doczekała się już 5 zagranicznych cytowań. Stanowi ona istotny wkład w rozwój dziedziny ponieważ pozwala na aprioryczne przewidywanie właściwości widmowych oscylatora, który wskutek dalszej stabilizacji staje się grzebieniem częstotliwości optycznych.

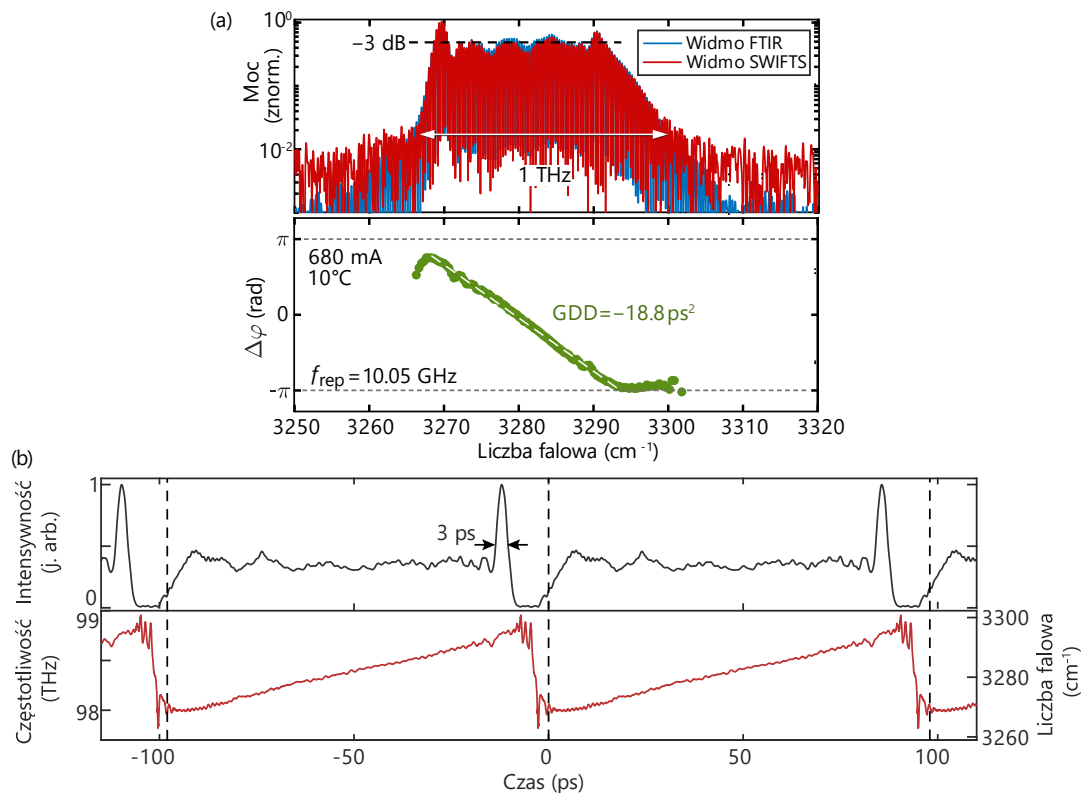
W pracy [HA2] habilitant zademonstrował pierwsze na świecie grzebień na bazie półprzewodnikowych laserów diodowych pracujące w zakresie średniej podczerwieni (3 μm). Ich unikalność polega na tym, że emitują one natywnie w regionie widmowym,



Rys. 6. Powstawanie pików fali dyspersyjnych (pionowa linia przerywana) w światłowodowym oscylatorze laserowym bez elementu filtrującego wewnątrz wneki warunkowane jest dopasowaniem fazowym (wielokrotność 2π) między fazą solitonu, a fazą optyczną wneki laserowej. W przypadku filtrów optycznych (ciągła niebieska linia), gwałtowne opadanie charakterystyki poza pasmem przepustowym indukuje dyspersję wyższego rzędu (oscylujące GDD – *group delay dispersion*, dyspersja opóźnienia grupowego / *group delay*, GD), która moduluje paraboliczną fazę wneki. Obserwuje się zarówno pik emisyjny z powodu konstruktywnej interferencji (zgodność faz), jak i tłumienie (destruktywna interferencja) ze względu na przesunięcie fazy wynoszące π . Zależności fazowe w przypadku filtrów otrzymano numerycznie z relacji Kramersa-Kroniga. Rysunek zaadaptowany z [HA1].

który tradycyjnie dostępny jest nieliniową konwersję częstotliwości. Ważne cechy tej platformy fotonicznej to praca przy zasilaniu bateryjnym, relatywnie płaskie widmo optyczne (750 GHz 3-dB), i częstotliwość repetycji rzędu 10 GHz. Habilitant wykazał zdolność niestabilizowanych grzebieni diodowych do spektroskopii dwugrzebieniowej oraz klasycznej spektrometrii fourierowskiej [HB1]. Prace były realizowane w trakcie stażu podoktorskiego w Laboratorium Napędu Odrzutowego NASA (Jet Propulsion Laboratory) w Pasadenie w USA, a następnie kontynuowanie na Politechnice Wrocławskiej. Charakteryzacja techniką interferometrii mikrofalowej (SWIFTS – *Shifted Wave Interference Fourier Transform Spectroscopy*) pokazana jest na Rys. 7.

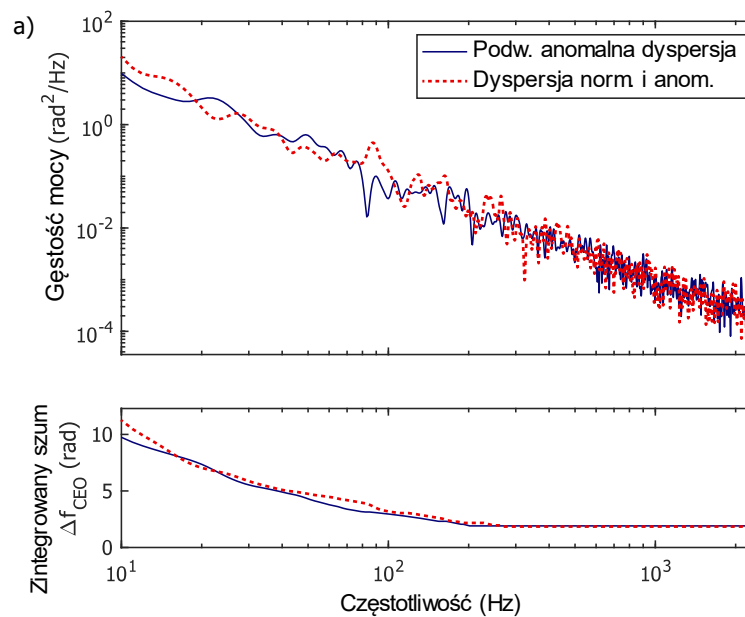
W pracy zaproponowano dwa istotne mechanizmy fizyczne odpowiadające za pracę laserów diodowych na bazie antymonku galu (GaSb) jako grzebieni częstotliwości FM. Pierwszym jest przestrzenne wypalanie dziur (SHB – *spatial hole burning*), które w tym materiale jest kłopotliwe do uzyskania dla fal krótkich (2 μm) [HA5], lecz łatwiejsze do spełnienia dla fal o połowę dłuższych (3 μm). Gdy laser pracuje jako wielomodowy dzięki SHB, mieszanie czterofalowe wymusza pracę wszystkich modów podłużnych z jednakowymi odległościami. Aby to umożliwić, krytyczna jest umiarkowana dyspersja



Rys. 7. (a) Zgodność widma optycznego odzyskanego z sygnału mikrofalowego (SWIFTS) z widmem optycznym (FTIR). (b) Rekonstrukcja chwilowej intensywności i częstotliwości dowodząca pracy z liniowym przemiataniem (świergotem) – FM. Rysunek zaadaptowano z [HA2].

(choć wcale niezerowa). W laserach tych powinno obserwować się silnie dodatnią dyspersję materiałową i falowodową, jednak zjawisko wycieku modu optycznego (ang. *modal leakage*) z powodu niedostatecznie grubej warstwy płaszcza (ang. *clad layer*) skutkuje powstaniem pasożytniczego, pionowego rezonatora Fabry-Perot. Ten z kolei, lokalnie kompensuje dyspersję w niektórych regionach widmowych ze względu na warunek rezonansu. To właśnie ten mechanizm kompensacji dyspersji (zmniejszający ją lokalnie do wartości $500 \text{ fs}^2/\text{mm}$ zamiast nominalnej $\sim 2000 \text{ fs}^2/\text{mm}$) okazał się być fundamentalny dla grzebieniowej pracy laserów diodowych na tej długości fali. Zwiększenie temperatury lasera o kilkanaście stopni, skutkująca przesunięciem maksimum wzmocnienia do rejonu fal dłuższych, wymusza pracę w rejonie o większej dyspersji, gdzie emisja grzebienia charakteryzuje się zwiększonym szumem fazowym.

Praca stanowi istotny wkład w rozwój dziedziny, ponieważ tłumaczy złożone mechanizmy fizyczne ultraszybkiej dynamiki w laserach diodowych w zakresie widmowym atrakcyjnym dla spektroskopii i bezprzewodowej komunikacji optycznej. Publikacja [HA2] ukazała się z prestiżowym czasopiśmie *Laser & Photonics Reviews* (IF = 10,95, 200 pkt MNSiW) i została umieszczona na okładce styczniowego wydania. Habilitant odegrał tam rolę pomysłodawcy badań, autora głównego i korespondencyjnego. Na te badania pozyskał również finansowanie w drodze konkursu.



Rys. 8. (a) Porównanie właściwości szumu różnicy częstotliwości obwiednia nośna w laserze dwugrzebieniowym o impulsach generowanych w reżimie anomalnej dyspersji dla obu impulsów (niebieska ciągła linia) oraz dla różnych reżimów dyspersyjnych (czerwona przerywana linia). Rysunek zaadaptowany z [HA3].

W pracy [HA3] habilitant podjął problem analizy szumu fazowego w laserach dwugrzebieniowych bezpośrednio z interferogramu radiowego (sygnału elektrycznego w technice dwugrzebieniowej). Przedmiotem analizy był niekonwencjonalny laser na ciele stałym (opracowanym przez Dra Macieja Kowalczyka z Politechniki Wrocławskiej), którego ortogonalne polaryzacyjnie niestabilizowane grzebienie częstotliwości wytwarzane były w różnych reżimach dyspersyjnych (normalna i anomalna). Na potrzeby analizy takiego źródła, habilitant rozwinął narzędzie do odzyskiwania fluktuacji fazy obwiednia-nośna i jitteru okresu obiegu wnęki. W dodatku do przeglądu literaturowego laserów dwugrzebieniowych, opracował on dokument pomocniczy (ang. *supplemental document*), w którym wykazano, że nie ma istotnych różnic w szumie fazowym częstotliwości obwiednia-nośna (CEO) między laserem z parą impulsów generowaną w trybie anomalnym, a parą w różnych reżimach dyspersyjnych. Istotna różnica dotyczy jednak jitteru (fluktuacji okresu), który jest mniejszy dla lasera w dyspersji anomalnej dla obu polaryzacji (108 fs vs 330 fs). Charakterystyka szumowa CEO pokazana jest na **Rys. 8**.

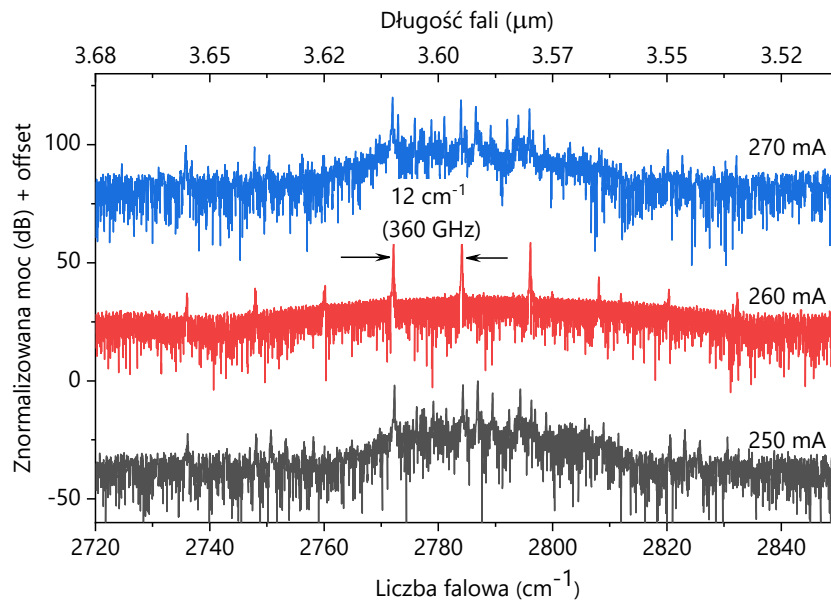
Kod do pomiaru wspomnianych charakterystyk szumowych został umieszczony w domenie publicznej. Praca stanowi istotny wkład w rozwój dziedziny, ponieważ wykazuje znaczenie reżimu dyspersyjnego dla pracy dwugrzebieniowych laserów na ciele stałym. Takie chętnie stosowane są do pomiarów optycznych techniką asynchronicznego próbkowania optycznego, np. z wykorzystaniem fotoprzewodzących anten terahercowych. Praca w reżimie czysto anomalnym dla obu polaryzacji ma przewagę nad reżimem mieszanym pod kątem niższego jitteru, co skutkuje zwiększoną krótkoterminową precyzją pomiaru spektroskopowego.

W pracy [HA4] habilitant podjął się napisania pierwszego artykułu przeglądowego (na zaproszenie wydawnictwa American Institute of Physics, AIP) dotyczącego półprzewodnikowych grzebieni częstotliwości na bazie międzypasmowych laserów kaskadowych (ICL). Chociaż czasopismo jest skromnie punktowane na liście MNiSW (20 pkt), doczekało się już współczynnika *impact factor* równego 3,8, a sama praca była już cytowana 24 razy. Należy tu jednak podkreślić, że w przeciwieństwie do typowego artykułu recenzyjnego (za który Rozporządzenie Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 22 lutego 2019 r. w sprawie ewaluacji jakości działalności naukowej przyznaje 50% punktów i tak też jest to tutaj zinterpretowane), opartego głównie o materiały innych naukowców i już opublikowane, habilitant umieścił tam wiele nowych, nigdy wcześniej niepublikowanych materiałów dotyczących harmonicznej pracy grzebieni ICL, w tym dowód na równoodległość linii z wykorzystaniem techniki multi-heterodynowej.

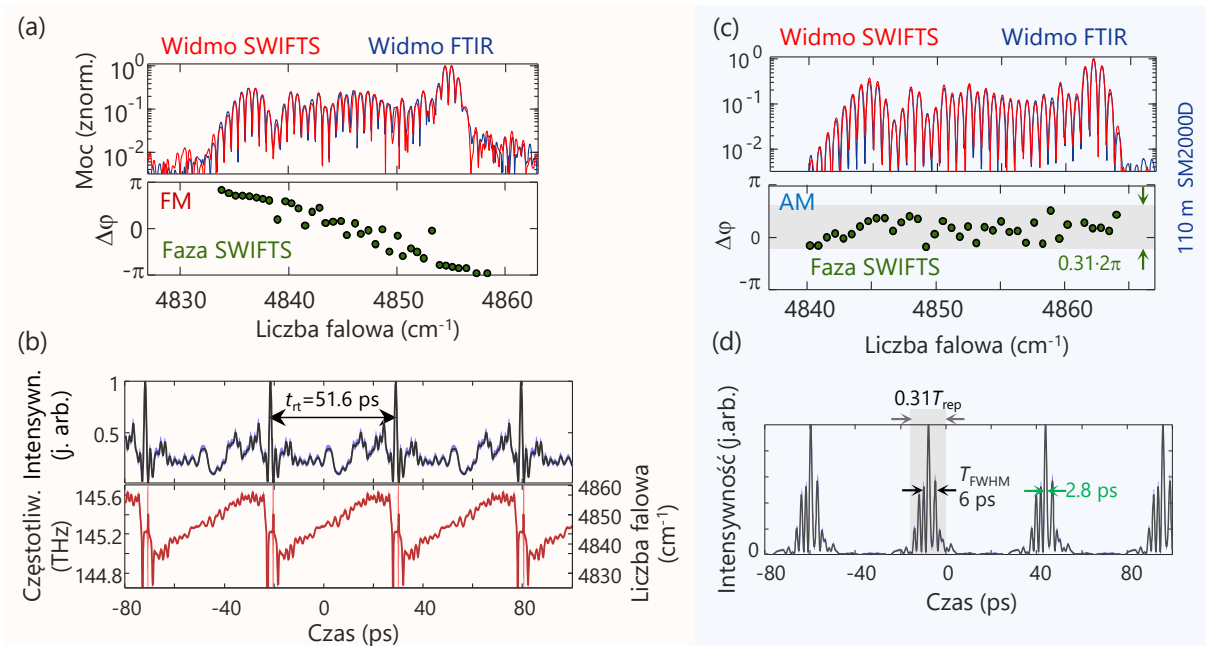
Mechanizm pracy harmonicznej w międzypasmowych laserach kaskadowych warunkowany jest między innymi obecnością silnego sprzężenia optycznego (ang. *optical feedback*), na które większość laserów półprzewodnikowych jest bardzo czuła. Chociaż harmoniczna emisja może być wzbudzana odbiciem od zewnętrznej wnęki optycznej, w laserach ICL prawdopodobnie spowodowana jest ona pasożytniczą wnęką związaną ze wspomnianym wcześniej wyciekem modu optycznego wewnątrz struktury półprzewodnikowej. Substrat GaSb posiada współczynnik załamania większy od efektywnego współczynnika modowego (ang. *effective modal index*), co skutkuje naturalną skłonnością do „wyciągania” modu optycznego z obszaru aktywnego. Niedostatecznie grube warstwy falowodowe (płaszcz) powodują powstanie interferometrycznej modulacji widma z okresem rzędu 300–450 GHz ($10\text{--}15\text{ cm}^{-1}$) [NP5] wskutek interferencji w kierunku wzrostu warstw lasera. Na to zjawisko można też spojrzeć jako szczególny przypadek sprzężenia optycznego, jednak wewnątrzwnękowego.

Przykład takiej harmonicznej pracy jest pokazany na **Rys. 9**. Odstęp międzyzębowy 360 cm^{-1} oznacza pracę lasera na 37 harmonicznej. Taka częstotliwość repetycji, wypadająca w zakresie terahercowym (THz), jest atrakcyjna dla przyszłych systemów telekomunikacyjnych 6G. Może być ona elektrycznie modulowana celem zakodowania informacji, a konwersja do zakresu THz powinna być możliwa dzięki wykorzystaniu nieliniowości drugiego rzędu w strukturze [HA7]. To właśnie zagadnienie stanowi obecnie obszar badań habilitanta w ramach otrzymanego przez niego grantu ERC.

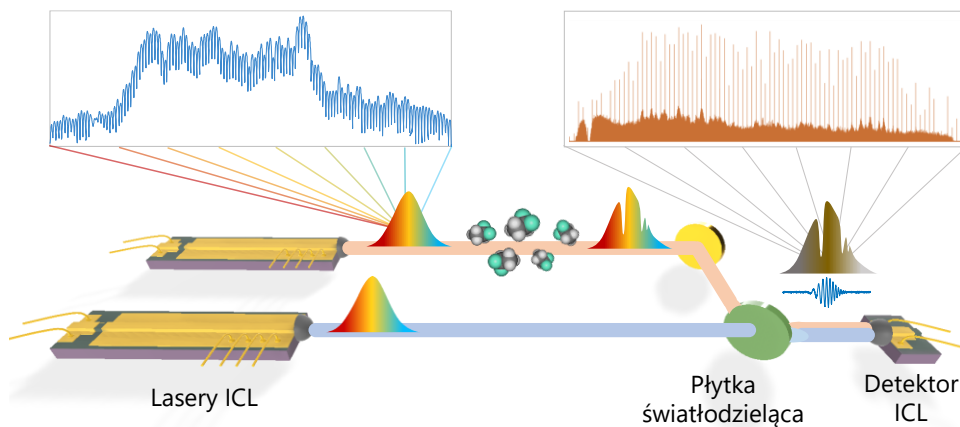
W pracy [HA5] habilitant zademonstrował grzebienie diodowe w zakresie bliskiej podczerwieni ($2\text{ }\mu\text{m}$), których charakter emisji (FM vs AM) może być kształtowany przy pomocy zewnętrznego kompensatora dyspersji, na przykład światłowodu. W dodatku do charakteryzacji mikrofalowej emisji FM analogicznej, jak w [HA2], przeprowadzono eksperyment pomiaru widma próbki techniką spektroskopii dwugrzebieniowej (ang.



Rys. 9. Szerokopasmowy harmoniczny grzebień częstotliwości ICL. Rysunek zaadaptowany z [HA4] pokazuje przejście ze stanu rzadko występujących modów optycznych do czysto harmonicznej pracy.



Rys. 10. Kompresja emisji zmodulowanego częstotliwościowo grzebienia z lasera diodowego w 100 m światłowodu SM2000D. Dyspersja (głównie drugiego rzędu) wprowadzana przez medium umożliwia otrzymanie impulsów o szerokości połówkowej wynoszącej 6 ps, z sub-impulsami długimi na 2,8 ps. Rysunek zaadaptowany z [HA5]. (a) Widmo SWIFTS i FTIR wraz z różnicą faz modów dla przypadku nieskompresowanego / FM, (b) Rekonstrukcja chwilowej intensywności i częstotliwości. (c) Widmo amplitudowe i fazowe po kompresji. W widmie fazowym widoczna jest dyspersja wyższych rzędów objawiająca się fluktuacjami. (d) Rekonstrukcja chwilowej intensywności z widocznymi impulsami.



Rys. 10. Bi-funkcjonalność laserów ICL (zdolność do pracy jako źródło laserowe i szybki fotodetektor). Rysunek zmodyfikowany z materiałów prasowych dotyczących [HA6] pokazuje widmo w spektroskopii dwugrzebieniowej przeprowadzanej z wykorzystaniem pary laserów i detektora w temperaturze pokojowej. (Adaptacja własnego rysunku umieszczonego na: <https://doi.org/10.1063/10.0001121>, licencja CC-BY).

dual-comb), co dowodzi użyteczności takich laserów do zastosowań praktycznych w systemach spektroskopowych.

W pracach [HA6] i [HA7] habilitant wykazał kolejne, niezbadane wcześniej funkcjonalności półprzewodnikowych grzebieni częstotliwości. [HA6] pokazuje możliwość pomiaru sygnału elektrycznego i jego widma powstającego wskutek interakcji zmodulowanego światła emitowanego przez dwa niezależne grzebienie diodowe z wykorzystaniem innego lasera ICL. Oznacza to, że dokładnie ta sama struktura jest bi-funkcjonalna: może ona pełnić funkcję zarówno lasera, jak i detektora. To otwiera możliwość integracji szerokopasmowych (1 THz) spektrometrów optycznych wysokiej rozdzielczości (MHz) bez żadnych części ruchomych na tym samym czipie, który pracuje w temperaturze pokojowej. Artykuł ten został wyróżniony przez edytora czasopisma *Applied Physics Letters* i został opisany w notce prasowej portalu AIP Scilight, skąd pochodzi Rys. 10.

W [HA7] habilitant wykazał nieoczekiwaną emisję grzebienia ICL w bliskiej podczerwieni (w dodatku do natywnej na $3.6\ \mu\text{m}$). Pokazał, że podatność nieliniowa drugiego rzędu medium lasera (najprawdopodobniej GaSb w warstwach falowodowych, a konkretnie SCL – *separate confinement layer*) odpowiedzialna jest za nieliniową konwersję częstotliwości. Przeprowadzono tam dowód spektroskopowy na to, że emisja jest prawdziwa, a nie wynika z artefaktu nieliniowości użytego fotodetektora. Ponieważ para wodna w bliskiej podczerwieni (na $1.8\ \mu\text{m}$) ma charakterystyczne linie absorpcyjne, które nie występują na długości fali pompy ($3.6\ \mu\text{m}$), selektywna absorpcja światła przez nią dowodzi emisji w dwóch regionach widmowych jednocześnie. Dodatkowym argumentem potwierdzającym tę tezę jest potwierdzona eksperymentalnie ortogonalność polaryzacji promieniowania średniej (TE) i bliskiej (TM) podczerwieni.

Podsumowując, główne osiągnięcia naukowe cyklu prac [HA1] – [HA7] dotyczą zbadania właściwości widmowych i czasowych źródeł laserowych o charakterze grzebieni częstotliwości optycznych i opisanie zjawisk, które odpowiadają za ich kształtowanie. Użyte wyniki pozwolą innym badaczom modelować i potencjalnie na nie wpływać zarówno w przypadku laserów zarówno światłowodowych, jak i półprzewodnikowych. Dzięki bi-funkcjonalności tych ostatnich, wizja zintegrowanych szerokopasmowych spektrometrów optycznych o płaskiej charakterystyce widmowej jest coraz bliższa realizacji. Ponadto, badanie właściwości czasowych (np. świergot, ang. *chirp*) jest fundamentalne dla optymalnego wykorzystania rozdzielczości pionowej przetworników analogowo-cyfrowych (ADC) do spektroskopii. Lasery o charakterze impulsowym wytwarzają sygnały interferencyjne o dużej różnicy między maksimum interferencyjnym, a sygnałem zaniku swobodnej precesji (ang. *free induction decay*, *FID*), co prowadzi to do nieefektywnego wykorzystania rozdzielczości pionowej ADC. Problem ten eliminowany jest przez wykorzystanie laserów o liniowo przestrajanej częstotliwości, jakimi są grzebienie diodowe i ICL, gdzie sygnał interferencyjny ma prawie stałą intensywność w czasie. Dla takich przebiegów lepiej wykorzystuje się zakres dynamiczny przetwornika, co ostatecznie poprawia stosunek sygnału do szumu sygnałów spektroskopowych mierzonych techniką dwugrzebieniową.

Osiągnięcie II – monotematyczny cykl publikacji

„Nowe techniki spektroskopii i obrazowania wykorzystujące niestabilizowane grzebienie częstotliwości optycznej”

Publikacje wchodzące w skład osiągnięcia naukowego (odwrócona chronologia)

- [HB1] [L. A. Sterczewski](#), and M. Bagheri, "Sub-nominal resolution Fourier transform spectrometry with chip-based combs," *Laser & Photonics Reviews* **18**, 2300724 (2024), IF = 11,00, [Punktacja MNiSW = 200](#).
- [HB2] L. A. Sterczewski, and J. Sotor, "Two-photon imaging of soliton dynamics," *Nature Communications* **14**, 3339 (2023), IF = 17,69, [Punktacja MNiSW = 200](#).
- [HB3] [L. A. Sterczewski](#), A. Przewłoka, W. Kaszub, and J. Sotor, "Computational Doppler-limited dual-comb spectroscopy with a free-running all-fiber laser," *APL Photonics*, **4**, 116102 (2019) [[Artykuł wyróżniony przez edytora](#)], IF = 4,86, [Punktacja MNiSW = 100](#).
- [HB4] [L. A. Sterczewski](#)*, T.-L. Chen*, D. C. Ober, C. R. Markus, C. L. Canedy, I. Vurgaftman, C. Frez, J. R. Meyer, M. Okumura, and M. Bagheri, "Cavity-enhanced Vernier spectroscopy with a chip-scale mid-infrared frequency comb," *ACS Photonics* **9**, 994–1001 (2022), [[Artykuł na okładce czasopisma](#)], IF = 7,53, [Punktacja MNiSW = 140](#).
- [HB5] M. Kowalczyk, [L. A. Sterczewski](#), X. Zhang, V. Petrov, Z. Wang, and J. Sotor, "Dual-comb femtosecond solid-state laser with inherent polarization-multiplexing," *Laser & Photonics Reviews* **15**, 2000441 (2021), [[Artykuł na okładce czasopisma](#)], IF = 13,14, [Punktacja MNiSW = 200](#).
- [HB6] [L. A. Sterczewski](#) and M. Bagheri, "Subsampling dual-comb spectroscopy," *Optics Letters* **45**, 4895–4898 (2020), IF = 3,71, [Punktacja MNiSW = 140](#).
- [HB7] [L. A. Sterczewski](#)*, J. Westberg*, Y. Yang, D. Burghoff, J. Reno, Q. Hu, and G. Wysocki, "Terahertz spectroscopy of gas mixtures with dual quantum cascade laser

frequency combs," *ACS Photonics* **7**, 1082-1087 (2020), IF = 6,86, [Punktacja MNiSW = 140](#).

- [HB8] [L. A. Sterczewski](#), J. Westberg, Y. Yang, D. Burghoff, J. Reno, Q. Hu, and G. Wysocki, "Terahertz hyperspectral imaging with dual chip-scale combs," *Optica*, **6**, 766-771 (2019). [[Artykuł opisany przez portale ScienceDaily i Photonics Online](#)], IF = 9,78, [Punktacja MNiSW = 200](#).

Techniczny opis wkładu autorskiego znajduje się w Załączniku nr 4 w punkcie 2.2 (Wykaz osiągnięć naukowych albo artystycznych, stanowiących znaczny wkład w rozwój określonej dyscypliny). W niniejszym punkcie omówiony zostanie kontekst naukowy i całościowe znaczenie indywidualnych publikacji stanowiących cykl.

	Impact Factor	Punktacja MNSiW	Rola autora	Liczba cytowań (WOS)
[HB1]	11,00	200	Wiodący i korespondencyjny	1
[HB2]	17,69	200	Wiodący i korespondencyjny	2
[HB3]	4,86	100	Wiodący i korespondencyjny	33
[HB4]	7,53	140	Wiodący i korespondencyjny	7
[HB5]	13,14	200	Drugi współautor	20
[HB6]	3,71	140	Wiodący	5
[HB7]	6,86	140	Wiodący	31
[HB8]	9,78	200	Wiodący	60
Σ	74,57	1320		159

4.3 Uzasadnienie podjęcia tematyki badawczej i celu badawczego (Osiągnięcie II)

Ortodoksyjne podejście niektórych grup naukowych do spektroskopii z niestabilizowanymi grzebieniami częstotliwości i postrzeganie ich jako nienadających się do zastosowania w wymagających pomiarach stanowi jedno ze źródeł motywacji do podjęcia tematyki przez habilitanta.

Badania prowadzone w latach 2018–2024 miały na celu opracowanie nowych technik spektroskopowych bardziej tolerancyjnych wobec źródeł, w których faza i częstotliwość optyczna fluktuuje w skali czasowej pomiaru. Jest to istotne w kontekście zastosowań grzebieni częstotliwości do monitorowania środowiska, czy badania próbek farmaceutycznych. W ramach Osiągnięcia II zatytułowanego „[Nowe techniki spektroskopii i obrazowania wykorzystujące niestabilizowane grzebienie częstotliwości optycznej](#)”, habilitant rozszerzył stan wiedzy w dyscyplinie naukowej automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne (AEEiT) o:

- Opracowanie techniki wysokorozdzielczej spektroskopii Fourierowskiej z niestabilizowanym grzebieniem częstotliwości. Autorski algorytm sub-nominalnej rozdzielczości umożliwia przeprowadzanie pomiarów optycznych z rozdzielczością kilkuset do 1000× większą niż wynikająca z ograniczenia przesuwu linii opóźniającej. Przy milimetrowej różnicy dróg optycznych, zaprezentowano rozdzielczość

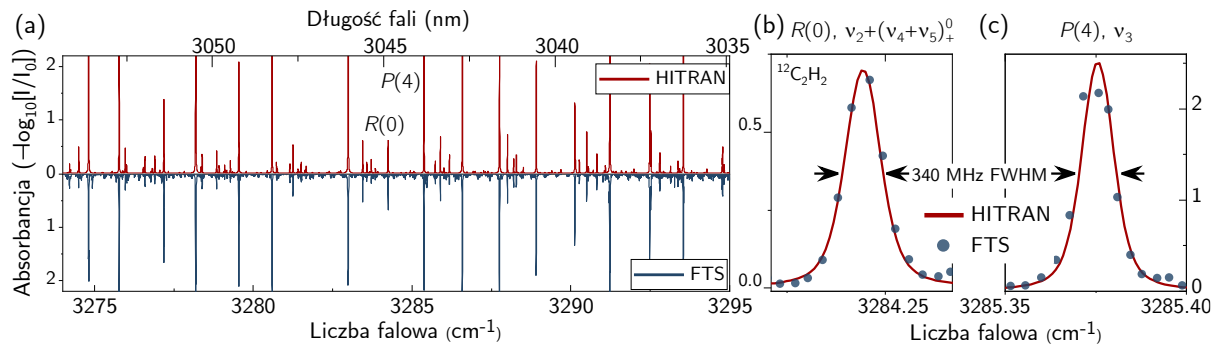
dziesiątek MHz, która odpowiadałaby metrom przesuwu zwierciadła w interferometrze.

- Opracowanie i demonstrację dwufotonowego obrazowania solitonów optycznych na bazie techniki dwugrzebieniowej (ang. *dual-comb*). Technika umożliwia przeprowadzania nieliniowej spektroskopii bez wymogu zgodności długości fal i o dużej tolerancji na efekt aliasingu. Dzięki technice, przeprowadzono badania zjawisk solitonów związanych i deszczu solitonów przy pomocy całkowicie niestabilizowanych źródeł.
- Opracowanie i demonstrację lasera dwugrzebieniowego z multipleksacją polaryzacji o dużej częstotliwości repetycji wraz z nowatorskim algorytmem korekcji fazowej umożliwiającym pomiary widma optycznego molekuł poszerzonych Dopplerowsko (rozdzielczość zębów / pm rozdzielczość w zakresie telekomunikacyjnym). Pomysł zaadaptowano też do laserów iterbowych w laboratorium prof. Minoshimy w Japonii [NP3]. Metoda została również wykorzystana do lasera na ciele stałym w pracy [HB3]. Dzięki niej, możliwe było scharakteryzowanie szumu fazowego i udowodnienie użyteczności spektroskopowej źródła.
- Zaproponowanie i eksperymentalną weryfikację techniki Verniera do przeprowadzenia spektroskopii optycznej poszerzonej wewnątrz z selektywną filtracją zębów grzebienia półprzewodnikowego. Metoda znosi wymóg stosowania szybkiego detektora w zakresie średniej podczerwieni. Zamiast dwóch grzebieni, technika wymaga tylko jednego.
- Modelowanie i demonstracja eksperymentalna techniki sub-samplingu (próbkiowania poniżej częstotliwości Nyquista) do kompresji widma radiowego w technice dwugrzebieniowej (*dual-comb*). Metoda zmniejsza wymagania sprzętowe względem przetworników analogowo-cyfrowych do zastosowań spektroskopowych.
- Pierwsze demonstracje obrazowania spektroskopowego (hiperspektralnego) z niestabilizowanymi grzebieniami częstotliwości na bazie terahercowych kwantowych laserów kaskadowych (THz-QCL). Wykazano użyteczność pionierskiej technologii dla zastosowań farmakologicznych oraz pomiarów dynamiki reakcji chemicznych.

4.4 Omówienie osiągniętych wyników prac badawczych (Osiągnięcie II)

Cykl powiązanych tematycznie prac jest efektem badań naukowych, które habilitant przeprowadził w latach 2019–2023.

W pracy [HB1] opracował on i zaimplementował metodę do przeprowadzania wysoko-rozdzielczej (30 MHz, ograniczone szerokością linii emisyjnej lasera) spektroskopii fourierowskiej z wykorzystaniem interferometrów o krótkiej (milimetrowej) różnicy



Rys. 11. Spektroskopia z sub-nominalną rozdzielczością z wykorzystaniem grzebieni diodowych na studniach kwantowych typu I o częstotliwości repetycji $f_{\text{rep}}=10$ GHz. Zmierzono widmo acetyleny ($^{12}\text{C}_2\text{H}_2$) pod ciśnieniem 10 Torr przy pomocy interferometru Michelsona o nominalnej rozdzielczości 10 GHz (3 cm różnicy dróg optycznych). 100 pomiarów próbkujących widmo z ostępem f_{rep} zostało złożonych do jednego pomiaru wysokorozdzielczego. Rysunek zaadaptowany z [HB1].

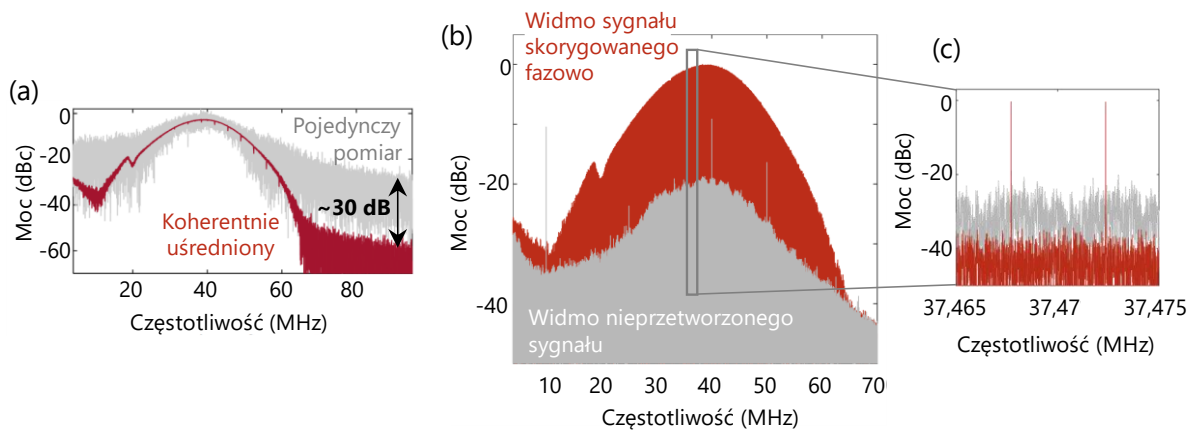
dróg optycznych. Wymyślona przeze niego metoda (inspirowana pracami dra hab. Piotra Masłowskiego z UMK [13]) polega na usuwaniu wpływu linii instrumentalnej (funkcji sinc) przez manipulację fazową interferogramu (a zatem punktami, dla których liczona jest transformata Fouriera) tak, aby prążki widmowe były położone na przecięciach z zerem funkcji sinc. W przeciwieństwie do poprzednich prac (w tym [13]), autorska metoda polega nie tylko na korekcji i ponownym próbkowaniu interferogramu, gdy znane są częstotliwości f_{rep} i f_0 . W pracy habilitant rozwiązał problem *estymacji* tego ostatniego, gdy znana jest częstotliwość f_{rep} , którą można zmierzyć bezpośrednio z sygnału elektrycznego pojawiającego się na elektrodach lasera. Rozwiązuje to dwa problemy o dużym znaczeniu praktycznym. Pierwszy dotyczy faktu, że bezpośredni pomiar częstotliwości f_0 źródeł półprzewodnikowych jest niepraktyczny, jeśli nie niemożliwy do przeprowadzania. Wynika to z faktu, że lasery półprzewodnikowe w średniej podczerwieni przeważnie nie emitują impulsów, a uzyskiwane w nich moce szczytowe są małe. Widmo takich laserów nie daje się nieliniowo poszerzyć i skonwertować do fal krótkich w technice interferometrii f-2f. Drugi rozwiązany problem to miniaturyzacja spektrometru. Do uzyskania rozdzielczości optycznej 30 MHz klasyczny spektrometr fourierowski potrzebuje różnicy dróg optycznych wynoszącej 10 m, co przekłada się na 5 m przesuwu ruchomego ramienia lub 2,5 m dla konfiguracji z dwoma retroreflektorami. Technika spektroskopii z sub-nominalną rozdzielczością wykorzystująca odpowiednie źródła o częstotliwości repetycji 10 GHz (grzebiene ICL i diodowe) pozwala uzyskać taką samą rozdzielczość przy zaledwie 30 mm różnicy dróg optycznych, co wymaga 7,5 mm przesuwu w konfiguracji dwustronnie odbijającego ruchomego ramienia interferometru. Taka odległość łatwo osiągalna jest dla miniaturowych mechanizmów przesuwających wykorzystujących stopy piezoelektryczne, co kwalifikuje opracowaną metodologię do budowy przyszłych miniaturowych spektrometrów do zastosowań kosmicznych, gdzie każdy gram wagi ma wysoką cenę. Należy tu jeszcze podkreślić, że praca [HB1] wymagała od habilitanta nie tylko opracowania metodologii

numerycznej, ale też montażu odpowiednich źródeł laserowych i wybrania próbek gazowych do eksperymentu. Przykładowe widmo uzyskane tą techniką pokazane jest na **Rys. 11** (z publikacji w *Laser & Photonics Reviews*). Warto nadmienić, że zaproponowana technika wysokorozdzielczej spektroskopii Fourierowskiej jest kompatybilna z istniejącymi spektrometrami FTIR bez żadnej ingerencji w układ optyczny. Ponadto, nie jest wymagana żadna stabilizacja częstotliwości źródła laserowego, co mocno upraszcza układ pomiarowy.

Praca [HB2] opublikowana w czasopiśmie *Nature Communications* stanowi adaptację techniki dwugrzebieniowej do problemu diagnostyki laserów impulsowych. Wspomniana wcześniej spektroskopia fourierowska na bazie interferometru Michelsona służy między innymi do charakteryzacji impulsów laserowych. Ważną różnicą jest jednak fakt, że do tego celu wykorzystuje się detekcję sygnału drugiej harmonicznej generowanej w kryształach (która powstaje głównie gdy impulsy nachodzą na siebie w czasie) lub zjawisko absorpcji dwufotonowej w półprzewodnikach. Takie urządzenia, zwane autokorelatorami optycznymi pozwalają na pomiar czasu trwania impulsu rzędu femtosekund, lecz mają one pewne istotne ograniczenia. Pierwsze dotyczy wymogu poprawnego ustawienia polaryzacji wejściowej wiązki laserowej względem orientacji kryształu nieliniowego. Drugie związane jest z zakresem skanowanego opóźnienia, które jest liniową funkcją długości ruchomego ramienia interferometru. Typowe autokorelatory optyczne mają zakres skanowania nie dłuższy niż kilkadziesiąt ps. Wyjątkowe modele oferują zakres rzędu setek ps, który stanowi procent okresu obiegu wnęki lasera (10 ns przy $f_{\text{rep}} = 100$ MHz). Wreszcie trzecie ograniczenie to szybkość pomiaru, która dla najszybszych instrumentów wynosi kilka Hz.

Chociaż takie autokorelatory wystarczają do laboratoryjnej charakteryzacji czasu trwania impulsu w dłuższej skali czasowej, tracą one informację o bogatej dynamice impulsu laserowego w reżimach niestabilnej pracy. Przykładem mogą być tzw. molekuły solitonowe [14], [15], czyli stany związane solitonów optycznych w postaci dwóch lub więcej współpropagujących impulsów laserowych przypadających na jeden obieg wnęki. Chociaż mają one potencjalne zastosowanie w przyszłych pamięciach kwantowych lub telekomunikacji do kodowania wielu symboli jednocześnie, z punktu widzenia aplikacji w spektroskopii lub nieliniowej konwersji częstotliwości, ich obecność jest niepożądana. Dodatkową trudnością jest fakt, że molekuły solitonowe mogą być luźno związane z odstępami między sobą rzędu ns. Oznacza to, że mogą być niezauważone przez standardowe autokorelatory optyczne lub w ramach typowej diagnostyki laboratoryjnej z wykorzystaniem optycznego lub mikrofalowego analizatora widma.

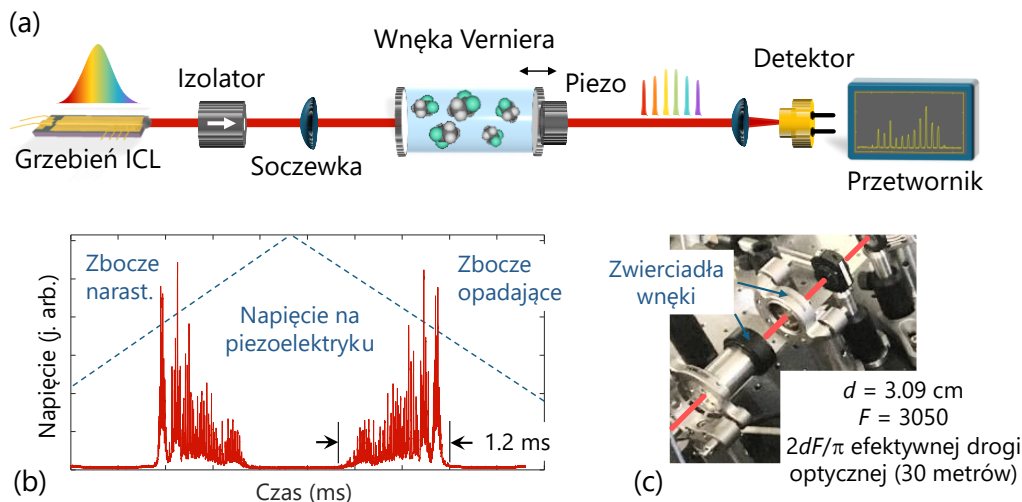
Rozwiązaniem powyższych problemów jest nieczuła na polaryzację i długość fali technika dwufotonowego obrazowania solitonów optycznych z częstotliwościami odświeżania rzędu 100 kHz, którą habilitant opisał w publikacji [HB2]. Technika zastępuje ruch mechanicznej linii opóźniającej asynchroniczną interakcją na dwufotonowym detektorze



Rys. 12. Skuteczność korekcji fazowej w zastosowaniu do światłowodowego lasera dwugrzebieniowego z multipleksacją polaryzacji. (a) Widmo pojedynczego pomiaru i uśrednionego przez 200 ms. (b) Widmo całego interferogramu radiowego zebranego przez oscyloskop wraz z powiększonym fragmentem dwóch zębów (c). Widać rozmycie linii (szare widmo) spowodowane niestabilnością lasera, które jest cyfrowo zniwelowane (czerwone widmo. Rysunek zaadaptowany z [HB3].

półprzewodnikowym (laserze diodowym). Innymi słowy jest to rodzaj nieliniowej interferometrii dwugrzebieniowej (*dual-comb* [16]) zwany techniką korelacji krzyżowej intensywności. W publikacji [HB2] pokazano obrazowanie dynamiki niestabilnych molekuł czteroatomowych (kwadrupletu solitonowego) oraz stabilnych molekuł trójatomowych. Habilitant opracował model matematyczny tłumaczący dlaczego metoda może pracować powyżej klasycznego limitu częstotliwości próbkowania Nyquista.

Kolejnym krokiem w kierunku praktycznej spektroskopii molekularnej z wykorzystaniem niestabilizowanych grzebieni częstotliwości jest publikacja [HB3], gdzie habilitant opisał metodę cyfrowej korekcji fazowej dostosowanej do źródeł impulsów laserowych generowanych asynchronicznie we wspólnej wnęcie zwanych laserami dwugrzebieniowymi [17]. W publikacji opisane jest takie źródło całkowicie światłowodowe o wysokiej (>140 MHz) częstotliwości repetycji z multipleksacją polaryzacji. W takim laserze różnica czasu obiegu wnęki jest możliwa dzięki zastosowaniu krótkiego odcinka dwójłomnego światłowodu zachowującego polaryzację (PM, *polarization maintaining*), którego oś szybka i wolna mają różne współczynniki załamania, a tym samym różne efektywne drogi optyczne. Wytwarzanie dwóch grzebieni w jednej wnęcie zapewnia wysoką koherencję wzajemną. Oznacza to, że chociaż indywidualnie każdy z nich doświadcza MHz fluktuacji częstotliwości optycznej, w skali ms fluktuują względem siebie o mniej niż kHz. To pozwala na cyfrowe śledzenie takich zmian poprzez oszacowanie zmian f_{rep} i f_0 bezpośrednio z mierzonego interferogramu, a następnie korekcję fazy i zniwelowanie niestabilności częstotliwości. W efekcie możliwe jest prowadzenie pomiarów spektroskopowych z rozdzielczością zębów optycznych w układzie całkowicie niestabilizowanym. **Rys. 12,** pokazuje przykładowe widma demonstrujące skuteczność cyfrowej korekcji,



Rys. 13. Rozdzielona modowo spektroskopia Verniera. (a) Układ eksperymentalny, w którym grzebień częstotliwości emitowany przez laser ICL jest selektywnie filtrowany przez wnękę optyczną o wysokiej finezji. (b) Widmo lasera zmierzone bez absorbera w przypadku, gdy przetwornik piezoelektryczny wnęki optycznej jest skanowany sygnałem trójkątnym. (c) Zdjęcie wnęki optycznej z parametrami. Rysunek jest zmodyfikowany względem źródłowej publikacji [HB4].

gdzie panel (a) przedstawia widma pojedynczej ramki i koherentnie uśrednionego interferogramu, a panel (b) przedstawia analizę z rozdzielczością zębów z całego przebiegu. W publikacji [HB3] wykazano, że metoda to nie tylko cyfrowa manipulacja, ale użyteczna technika do wymagającej spektroskopii molekularnej w reżimie poszerzenia dopplerowskiego w niskim ciśnieniu, gdy linie absorpcyjne gazów mają setki MHz szerokości.

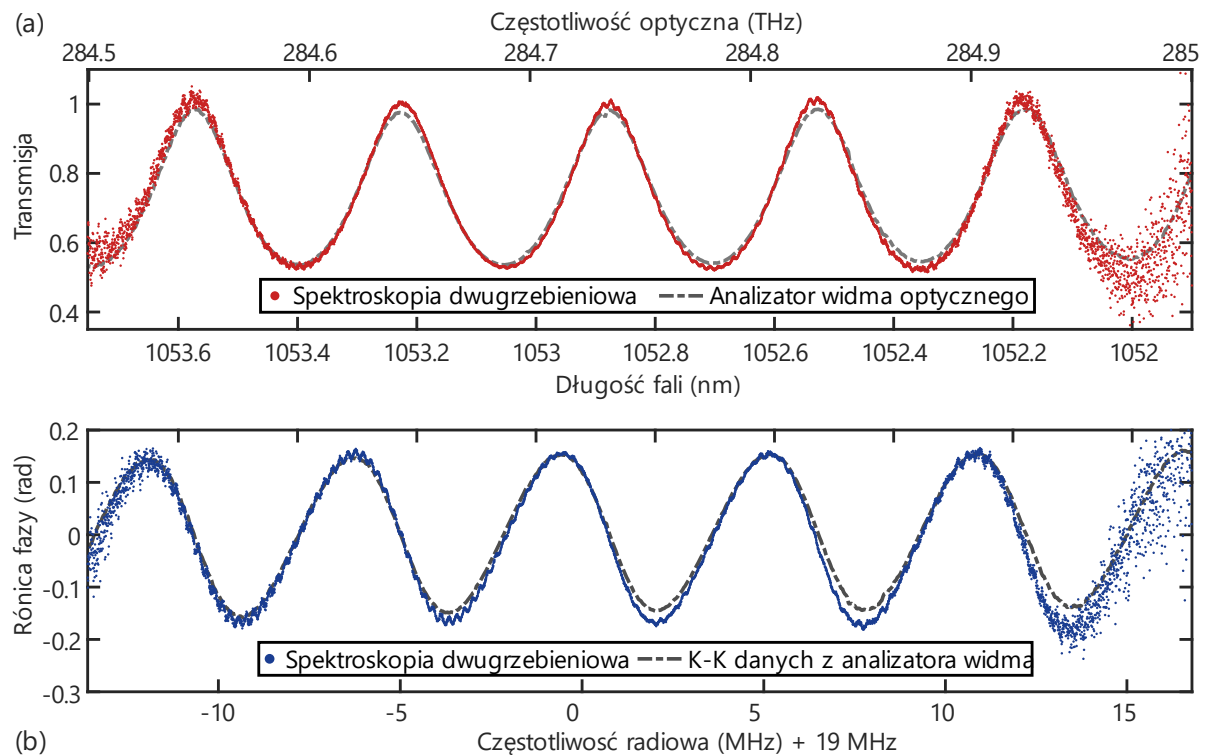
W pracy [HB4] habilitant opisał metodę do rozdzielania zębów niestabilizowanego grzebienia częstotliwości emitowanego przez międzypasmowy laser kaskadowy (ICL). Praca była realizowana we współpracy z badaczami z Division of Chemistry and Chemical Engineering, California Institute of Technology w trakcie stażu podoktorskiego NASA. W pracy habilitant rozwiązał istotny problem praktyczny ograniczający zastosowanie grzebieni ICL na szerszą skalę. Do rozdzielania zębów emitowanych przez półprzewodnikowe grzebienie częstotliwości wykorzystuje się typowo szybkie detektory podczerwieni, których opracowywanie jest złożone technologicznie. Ponadto, akwizycja danych pomiarowych w technikach heterodynowych, jak dwugrzebieniowa, wymaga szybkich przetworników analogowo-cyfrowych o GHz pasmach. Dzięki wykorzystaniu techniki Verniera o rozdzielczości modowej (**Rys. 13a**), możliwe jest zastosowanie wolnych (kHz–MHz pasma) detektorów i łatwo dostępnych wysokorozdzielczych przetworników o szybkościach próbkowania rzędu MS/s. Zewnętrzna, kompaktowa wnękę optyczną, opracowana na potrzeby eksperymentu (**Rys. 13c**), umożliwiła selektywną filtrację jednego zęba grzebienia naraz. Mimo małej odległości między zwierciadłami wnęki (~ 3 cm), uzyskano efektywną drogę interakcji z próbką gazową 30 m. Poprzez przestrajanie długości wnęki kryształem piezoelektrycznym, odtwarza się całe

widmo grzebienia (**Rys. 13b**), które jest mierzone przez jednopikselowy fotodetektor. Taka prosta liniowa geometria zwiększa szansę na wykorzystanie tej topologii do przyszłych wysokoczułych szerokopasmowych i wysokorozdzielczych spektrometrów optycznych.

Praca [**HB4**] została umieszczona na okładce marcowego wydania czasopisma *ACS Photonics* w 2022 roku. Habilitant był autorem tej grafiki. Zaproponowana technika została wykorzystana do całkowicie niestabilizowanej spektroskopii szerokopasmowej wysokiej rozdzielczości w średniej podczerwieni. Drobne fluktuacje częstotliwości lasera zostały skompensowane cyfrowo algorytmem korekcji fazowej, który habilitant rozwinął na potrzeby eksperymentu.

Praca [**HB5**] stanowi dalsze rozwinięcie wątku spektroskopii z wykorzystaniem niestabilizowanych grzebieni częstotliwości optycznej. Habilitant zaangażowany był (zdalnie z USA) w charakteryzację właściwości szumowych lasera dwugrzebieniowego (zbudowanego przez Dr. Macieja Kowalczyka) i udowodnienie jego kompatybilności z technikami korekcji fazowych z rozdzielczością zębów optycznych (tutaj 78 MHz). Na potrzeby eksperymentu, habilitant rozwinął numeryczny warsztat do nieliniowego mieszania częstotliwości elektrycznych i odzyskiwania chwilowej fazy i częstotliwości różnicowej. Dzięki niemu, możliwa była demonstracja unikalnego lasera dwugrzebieniowego z multipleksacją polaryzacji w aktywnym kryształcie optycznym. Ortogonalnie polaryzacyjnie niestabilizowane grzebienie częstotliwości wytwarzane we wnętrzu posiadały różne częstotliwości repetycji ze względu na dwójłomność kryształu aktywnego: $\text{Yb:Ca}_3\text{NbGa}_3\text{Si}_2\text{O}_{14}$ (*calcium niobium gallium silicate*; Yb:CNGS). Dzięki tej różnicy, wypadającej w zakresie kilkuset Hz, możliwe było przeprowadzenie pomiarów optycznych techniką dwugrzebieniowej na długości fali ok. 1053 nm w paśmie ~ 1.8 nm (ok. 500 GHz). Metoda cyfrowej korekcji fazowej wykorzystana w publikacji została tylko nieznacznie zmodyfikowana względem referencyjnej publikacji [**HB3**], co dowodzi uniwersalności metody stanowiącej podstawę osiągnięcia II (w dodatku do nieujętych tutaj [**NP4**]). Przykładowe widmo zmierzone przy pomocy takiego lasera w czasie 1 s pokazane jest na **Rys. 14**.

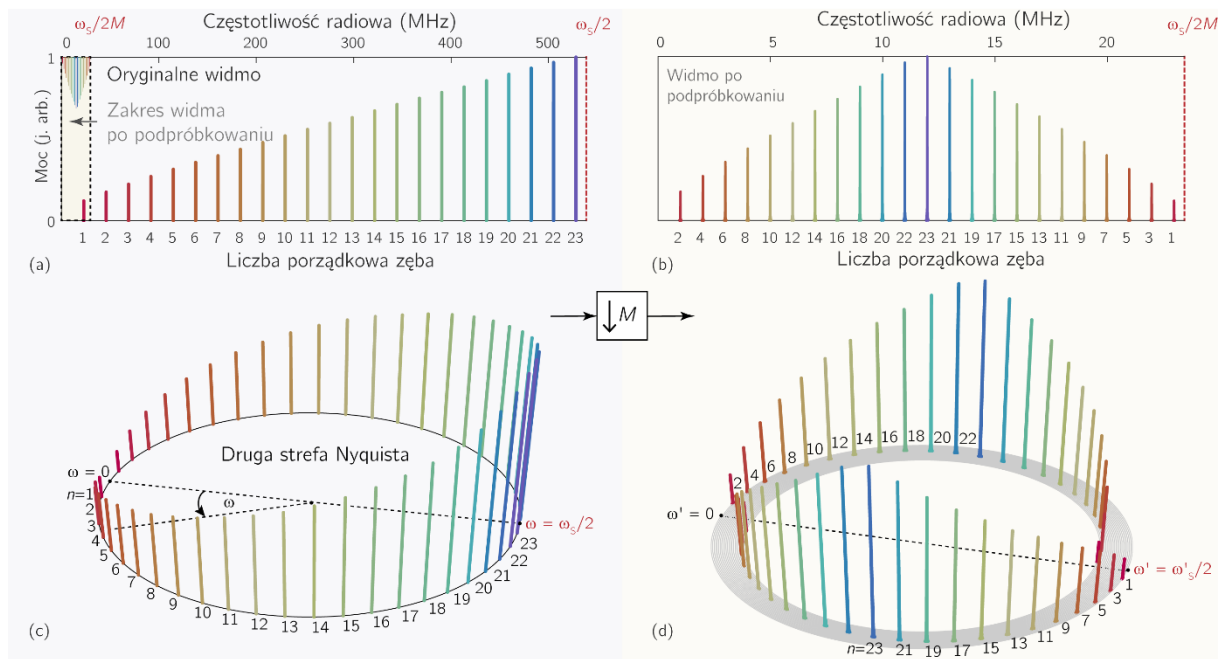
Publikacja [**HB6**] stanowi kolejny ważny krok w kierunku upowszechnienia spektroskopii z wykorzystaniem miniaturowych grzebieni częstotliwości optycznych. Jednym ze wspomnianych wcześniej ograniczeń jest wymóg stosowania detektorów podczerwieni o GHz pasmach elektrycznych wraz z dużymi szybkości próbkowania analogowo-cyfrowego rzędu GS/s. To ostatnie wymaganie może być częściowo zniesione jeśli zauważy się, że radiowe widmo w spektroskopii dwugrzebieniowej ma charakter rzadki, tj. produkty heterodyny zajmują szerokie pasmo elektryczne, ale pomiędzy nimi występują duże przerwy. Dzięki technice próbkowania poniżej częstotliwości Nyquista (ang. *sub-sampling*, podpróbkowanie), możliwe jest wielokrotne zmniejszenie częstotliwości próbkowania, a tym samym zapotrzebowanie na moc obliczeniową w spektrometrze. Habilitant pokazał eksperymentalne 7-krotne zmniejszenie częstotliwości próbkowania



Rys. 14. Widmo etalonu optycznego wykonanego z topionej krzemionki (szkła kwarcowego) uzyskane z wykorzystaniem niestabilizowanego spektrometru dwugrzebieniowego z publikacji [HB5]. (a) Widmo transmisyjne wraz z pomiarem przy pomocy analizatora widma optycznego. (b) Widmo dyspersyjne wraz z pomiarem otrzymanym przez numeryczną transformację Kramersa-Kroniga widma transmisyjnego. Ilustracja zaadaptowana z publikacji [HB5].

z 3.2 GS/s do ~ 450 MS/s umożliwiające odtworzenie oryginalnego widma. Koncept zawijania stref Nyquista i kompresji widmowej pokazany jest na **Rys. 15**.

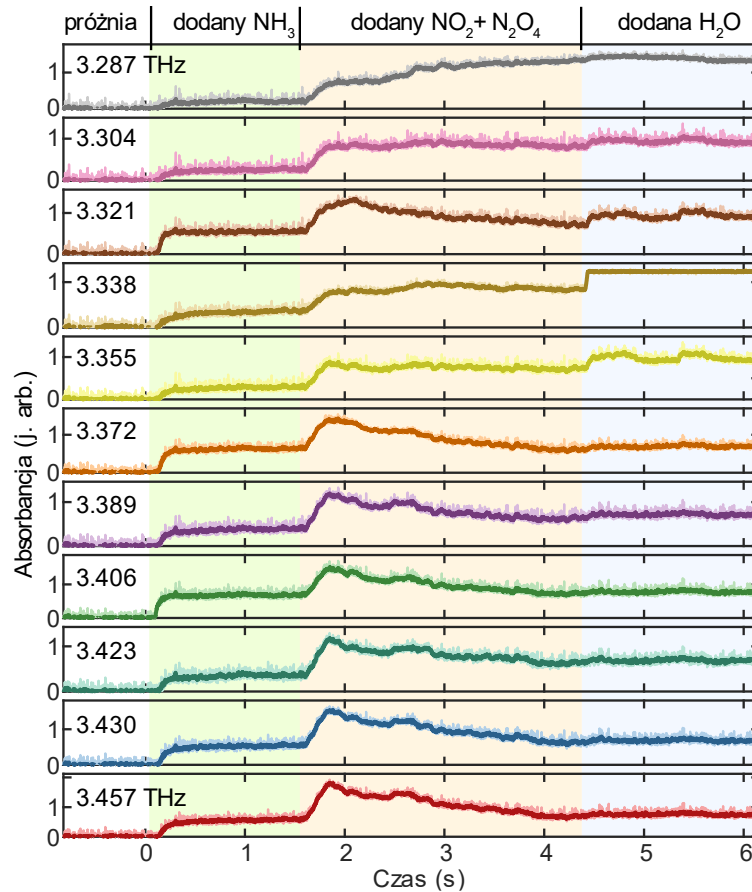
Publikacja [HB7], w której habilitant odgrywa wiodącą rolę wraz z drem Jonasem Westbergiem, prezentuje wykorzystanie niestabilizowanych kwantowych laserów kaskadowych emitujących grzebienie częstotliwości optycznych zakresie THz, do spektroskopii molekularnej mieszanin gazów. Para źródeł zamkniętych w próżniowym kriostacie współprojektowanym przez Habilitanta, została użyta do szerokopasmowej (180 GHz) spektroskopii molekularnej z rozdzielczością czasową 1 ms. W eksperymencie, stopniowo wprowadzano do kuwety gazowej składniki mieszaniny gazów: amoniak, dwutlenek azotu (który występuje w równowadze chemicznej z tetratlenkiem diazotu) oraz parę wodną. W publikacji wykazano możliwość śledzenia dynamiki czasowej widma mieszanin rzędu 20 ms. Jednoczesny pomiar widma molekularnego na 11 terahercowych częstotliwościach optycznych oddalonych o ~ 17 GHz stanowił pionierski eksperyment zrealizowany we współpracy z naukowcami z Massachusetts Institute of Technology (MIT) oraz Princeton University w USA. Praca ukazała się w czasopiśmie ACS Photonics. Transmitancja rozdzielona modowo przedstawiona jest na **Rys. 16**.



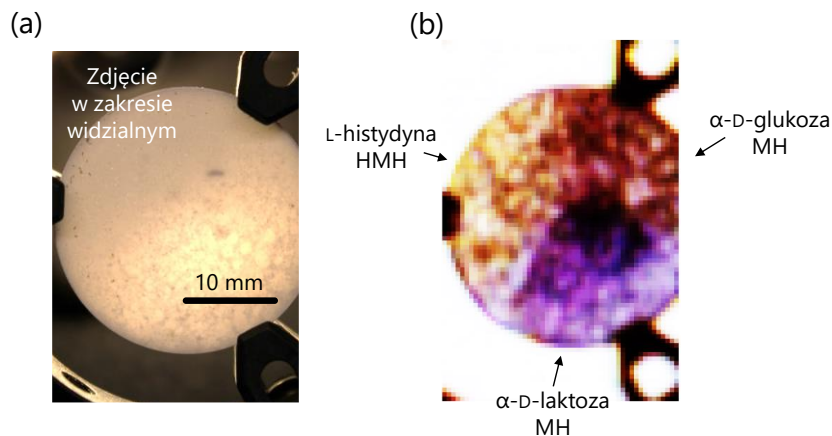
Rys. 15. Podpróbkowanie jako metoda kompresji widma optycznego w spektroskopii dwugrzebieniowej. (a) Oryginalne widmo optyczne o liniowo rosnących intensywnościach linii kodowane w dziedzinie radiowej. (b) Widmo po 23-krotnym zmniejszeniu częstotliwości próbkowania. (c) Kołowa (cykliczna) reprezentacja widma, które jest symetryczne względem linii $\omega_s/2$. (d) Pod-próbkowanie widma, które odpowiada 23-krotnemu zawijaniu zębów grzebienia niczym w rulonie (cewce) przypominające pióropusz indyjski. Kolejne zwoje dodają jedno pióro naraz na unikalnej częstotliwości radiowej. Chociaż zmienia się kolejność zębów w mapowaniu, informacja przez nie niesiona nie ulega zniekształceniu, a widmo zajmuje wielokrotnie mniejsze pasmo elektryczne.

Ostatnia z prac uwzględnionych w Osiągnięciu II dotyczy wykorzystania THz grzebieni częstotliwości emitowanych przez kwantowe lasery terahercowe do obrazowania próbek farmaceutycznych. W publikacji [HB8], w której habilitant odgrywa wiodącą rolę, wykazano możliwość selektywnej identyfikacji przestrzennej składników syntetycznej próbki farmaceutycznej złożonej z wypełniaczy: monohydratu glukozy i laktozy oraz L-histydyny (aminokwasu białkowego), jak pokazano na **Rys. 17**. Praca zrealizowana we współpracy z naukowcami z MIT i Princeton została opublikowana w prestiżowym czasopiśmie *Optica* (200 pkt MNiSW, IF=9.78) oraz opisana przez kilka serwisów popularnonaukowych, jak ScienceDaily, czy Photonics Online. W przeciągu 5 lat była cytowana ponad 60 razy (wg. Web of Science).

Podsumowując, prace [HB1]–[HB8] istotnie przyczyniają się do rozwoju „Nowych technik spektroskopii i obrazowania wykorzystujących niestabilizowane grzebienie częstotliwości optycznej”. W ciągu najbliższych lat można spodziewać się pierwszych, prawdziwie zintegrowanych spektrometrów wykorzystujących pionierskie struktury



Rys. 16. Spektroskopia dwugrzebieniowa z zakresie THz wykorzystująca grzebień częstotliwości optycznej na bazie kwantowych laserów kaskadowych (QCL). W eksperymencie stopniowo dodawano składniki mieszaniny, od amoniaku (NH_3) po ditlenek azotu (NO_2) wraz z tetratlenkiem diazotu (N_2O_4), aż po parę wodną (H_2O). Rysunek zaadaptowany z [HB7].



Rys. 17. Obrazowanie hiperspektralne w zakresie THz. (a) Zdjęcie trzystrefowej próbki farmaceutycznej w świetle widzialnym. (b) Obraz THz mierzony na 11 częstotliwościach jednocześnie, spośród których wybrano 3 do wytworzenia obrazu kompozytowego (RGB). Materiał opublikowany w [HB8].

fotoniczne umożliwiające interakcję światła prowadzonego przez falowody z molekułami w stanie gazowym [18] lub ciekłym. Do praktycznych zastosowań w monitorowaniu środowiska lub procesów przemysłowych, takie instrumenty będą potrzebowały nowatorskich technik pomiaru widma analogicznych, jak rozwinięte przez habilitanta w **Osiągnięciu II**.

W nieodległej przyszłości można też oczekiwać miniaturyzacji spektrometrów fourierskich, które wysoką rozdzielczość pomiaru będą zawdzięczać nie długiej drodze optycznej, ale dyskretnej strukturze widmowej miniaturowych grzebieni częstotliwości optycznej. Dziedzina ta stanowi obiekt intensywnych badań grup na całym świecie, co zapowiada szereg innowacji pod kątem pomiaru widma zarówno wzdłuż określonej drogi optycznej, jak i rozdzielonego przestrzennie mierzonego w krótkich odstępach czasu.

Źródła:

- [1] T. H. Maiman, “Stimulated optical radiation in ruby,” 1960.
- [2] R. W. Boyd, *Nonlinear optics*. Academic press, 2003.
- [3] L. A. Sterczewski, “Signal processing in terahertz and mid-infrared spectroscopy with frequency combs,” PhD Thesis, Wrocław University of Science and Technology, 2018. Available: http://www.dbc.wroc.pl/Content/44121/sterczewski_signal_PhD.pdf
- [4] H. R. Telle, G. Steinmeyer, A. E. Dunlop, J. Stenger, D. H. Sutter, and U. Keller, “Carrier-envelope offset phase control: A novel concept for absolute optical frequency measurement and ultrashort pulse generation,” *Applied Physics B*, vol. 69, no. 4, pp. 327–332, 1999.
- [5] J. B. Khurgin, Y. Dikmelik, A. Hugi, and J. Faist, “Coherent frequency combs produced by self frequency modulation in quantum cascade lasers,” *Applied Physics Letters*, vol. 104, no. 8, p. 081118, 2014.
- [6] A. Hugi, G. Villares, S. Blaser, H. C. Liu, and J. Faist, “Mid-infrared frequency comb based on a quantum cascade laser,” *Nature*, vol. 492, no. 7428, pp. 229–233, Dec. 2012.
- [7] M. Singleton, P. Jouy, M. Beck, and J. Faist, “Evidence of linear chirp in mid-infrared quantum cascade lasers,” *Optica, OPTICA*, vol. 5, no. 8, pp. 948–953, Aug. 2018.
- [8] D. Burghoff, “Unraveling the origin of frequency modulated combs using active cavity mean-field theory,” *Optica*, vol. 7, no. 12, p. 1781, Dec. 2020.
- [9] N. Opačak and B. Schwarz, “Theory of frequency modulated combs in lasers with spatial hole burning, dispersion and Kerr,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 123, no. 24, p. 243902, Dec. 2019.
- [10] J. Hillbrand, D. Auth, M. Piccardo, N. Opačak, E. Gornik, G. Strasser, F. Capasso, S. Breuer, and B. Schwarz, “In-Phase and Anti-Phase Synchronization in a Laser Frequency Comb,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 124, no. 2, p. 023901, Jan. 2020.
- [11] M. Piccardo, P. Chevalier, B. Schwarz, D. Kazakov, Y. Wang, A. Belyanin, and F. Capasso, “Frequency-Modulated Combs Obey a Variational Principle,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 122, no. 25, p. 253901, Jun. 2019.

- [12] K. Goda and B. Jalali, “Dispersive Fourier transformation for fast continuous single-shot measurements,” *Nature Photon*, vol. 7, no. 2, pp. 102–112, Feb. 2013.
- [13] P. Maslowski, K. F. Lee, A. C. Johansson, A. Khodabakhsh, G. Kowzan, L. Rutkowski, A. A. Mills, C. Mohr, J. Jiang, M. E. Fermann, and A. Foltynowicz, “Surpassing the path-limited resolution of Fourier-transform spectrometry with frequency combs,” *Phys. Rev. A*, vol. 93, no. 2, p. 021802, Feb. 2016.
- [14] B. A. Malomed, “Bound solitons in the nonlinear Schroedinger–Ginzburg-Landau equation,” *Phys. Rev. A*, vol. 44, no. 10, pp. 6954–6957, Nov. 1991.
- [15] A. Hause, H. Hartwig, B. Seifert, H. Stolz, M. Böhm, and F. Mitschke, “Phase structure of soliton molecules,” *Phys. Rev. A*, vol. 75, no. 6, p. 063836, Jun. 2007.
- [16] I. Coddington, N. Newbury, and W. Swann, “Dual-comb spectroscopy,” *Optica*, vol. 3, no. 4, p. 414, Apr. 2016.
- [17] R. Liao, H. Tian, W. Liu, R. Li, Y. Song, and M. Hu, “Dual-comb generation from a single laser source: principles and spectroscopic applications towards mid-IR—A review,” *J. Phys. Photonics*, vol. 2, no. 4, p. 042006, Sep. 2020.
- [18] H. D. Yallem, M. Vlk, A. Datta, S. Alberti, R. A. Zakoldaev, J. Høvik, A. Aksnes, and J. Jágerská, “Sub-ppm methane detection with mid-infrared slot waveguides,” *ACS photonics*, vol. 10, no. 12, pp. 4282–4289, 2023.

5. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, szczególności zagranicznej.

► Przed uzyskaniem stopnia naukowego doktora nauk technicznych pracowałem w 2 jednostkach zagranicznych w USA przez okres 2,5 roku. W szczególności były to:

A) Uniwersytet Princeton, NJ, USA w okresie 1 października 2015 – 31 marca 2018. Staż naukowy odbyty tam w ramach stypendium Dziekana Szkoły Doktorskiej Princeton (2015–2017) oraz grantu badawczego Fundacji Kościuszkowskiej (2017–2018) zaoferował szeregiem publikacji afiliowanych w zagranicznej instytucji (wraz z polską afiliacją PWr).

- [N1] J. Westberg*, L. A. Sterczewski*, F. Kapsalidis, Y. Bidaux, J. M. Wolf, M. Beck, J. Faist, and G. Wysocki, "Dual-comb spectroscopy using plasmon-enhanced-waveguide dispersion-compensated quantum cascade lasers," *Optics Letters* **43**, 4522-4525 (2018), IF = 3,86.
- [N4] L. A. Sterczewski*, J. Westberg*, C. L. Patrick, C. S. Kim, M. Kim, C. L. Canedy, W. W. Bewley, C. D. Merritt, I. Vurgaftman, J. R. Meyer, and G. Wysocki, "Multiheterodyne spectroscopy using interband cascade lasers," *Optical Engineering* **57**, 011014 (2018), IF = 1,28.
- [N5] J. Westberg*, L. A. Sterczewski*, and G. Wysocki, "Mid-infrared multiheterodyne spectroscopy with phase-locked quantum cascade lasers," *Applied Physics Letters* **110**, 141108 (2017), IF = 3,50.

- [N6] [L. A. Sterczewski](#)^{*}, J. Westberg^{*}, and G. Wysocki, "Molecular dispersion spectroscopy based on Fabry-Pérot quantum cascade lasers," *Optics Letters* **42**, 243-246 (2017), IF = 2,99.
- [N8] [L. A. Sterczewski](#), J. Westberg, and G. Wysocki, "Tuning properties of mid-infrared Fabry-Pérot quantum cascade lasers for multiheterodyne spectroscopy," *Photonics Letters of Poland* **8**, 113–115 (2016), IF = 0,38.

W powyższych pracach pełniłem rolę wiodącego autora (albo wiodącego współautora). We wszystkich artykułach brałem udział w budowie układu, pomiarach, analizie danych, tworzeniu rysunków i redakcji tekstu.

Po obronie doktoratu, rozwinąłem nowe wątki nieujęte w rozprawie, które zaowocowały kolejnymi publikacjami z pobytu w Princeton:

- [HB7] [L. A. Sterczewski](#)^{*}, J. Westberg^{*}, Y. Yang, D. Burghoff, J. Reno, Q. Hu, and G. Wysocki, "Terahertz spectroscopy of gas mixtures with dual quantum cascade laser frequency combs," *ACS Photonics* **7**, 1082-1087 (2020), IF = 6,86.
- [HB8] [L. A. Sterczewski](#), J. Westberg, Y. Yang, D. Burghoff, J. Reno, Q. Hu, and G. Wysocki, "Terahertz hyperspectral imaging with dual chip-scale combs," *Optica*, **6**, 766-771 (2019). [[Artykuł opisany przez portale ScienceDaily i Photonics Online](#)], IF = 9,78.

B) NASA Jet Propulsion Laboratory, USA (Pasadena, CA) w okresie 1.06.2017 – 25.08.2018. Podczas studiów doktoranckich realizowanych częściowo w USA (prof. Gerard Wysocki z Princeton pełnił rolę współpromotora), uzyskałem jako jeden z kilku obcokrajowców możliwość odbywania letniego stażu naukowego w NASA Jet Propulsion Laboratory w USA. Pobyt ten zaowocował następującą publikacją afiliowaną w zagranicznej jednostce:

- [N2] M. Bagheri, C. Frez, [L. A. Sterczewski](#), I. Gruidin, M. Fradet, I. Vurgaftman, C. L. Canedy, W. W. Bewley, C. D. Merritt, C. S. Kim, M. Kim, and J. R. Meyer, "Passively mode-locked interband cascade optical frequency combs," *Scientific Reports* **8**, 3322 (2018), IF = 4,01.

► Po uzyskaniu stopnia naukowego doktora nauk technicznych, pracowałem w 2 zagranicznych jednostkach naukowych przez okres 2 lat. W szczególności są to:

C) NASA Jet Propulsion Laboratory, USA (Pasadena, CA) w okresie 25.02.2019 – 24.02.2021. W przeciągu kilku miesięcy po obronie doktoratu, otrzymałem w drodze międzynarodowego konkursu dwuletnie stypendium na staż podoktorski w Laboratorium Napędu Odrzutowego NASA (Jet Propulsion Laboratory) na Kalifornijskim Instytucie Technologicznym (Caltech). Realizowałem tam badania nad fizyką i zastosowaniami spektroskopowymi półprzewodnikowych laserów średniej podczerwieni. Wynikami stażu podoktorskiego są następujące publikacje:

- [HA2] [L. A. Sterczewski](#), M. Fradet, C. Frez, S. Forouhar, and M. Bagheri, "Battery-operated mid-infrared diode laser frequency combs," *Laser & Photonics Reviews* **16**, 2200224 (2022), IF = 10,95.
- [HA4] [L. A. Sterczewski](#), M. Bagheri, C. Frez, C. L. Canedy, I. Vurgaftman, M. Kim, C. S. Kim, C. D. Merritt, W. W. Bewley and J. R. Meyer, "Interband cascade laser frequency combs (invited review)," *Journal of Physics Photonics* **3**, 042003 (2021), IF = 3,88.
- [HA5] [L. A. Sterczewski](#), C. Frez, S. Forouhar, D. Burghoff, and M. Bagheri, "Frequency-modulated diode laser frequency combs at 2 μm wavelength," *APL Photonics* **5**, 076111 (2020) [[Artykuł opisany przez popularnonaukowy portal AIP Scilight](#)], [[Artykuł na okładce czasopisma](#)], IF = 4,86.
- [HA6] [L. A. Sterczewski](#), M. Bagheri, C. Frez, C. L. Canedy, I. Vurgaftman, and J. R. Meyer, "Mid-infrared dual-comb spectroscopy with room-temperature bi-functional interband cascade lasers and detectors," *Applied Physics Letters* **116**, 141102 (2020) [[Artykuł wyróżniony przez edytora](#)], [[Artykuł opisany przez popularnonaukowy portal AIP Scilight](#)], IF = 3,60.
- [HA7] [L. A. Sterczewski](#), M. Bagheri, C. Frez, C. L. Canedy, I. Vurgaftman, M. Kim, C. S. Kim, C. D. Merritt, W. W. Bewley, and J. R. Meyer, "Near-infrared frequency comb generation in mid-infrared interband cascade lasers," *Optics Letters* **44**, 5828-5831 (2019) IF = 3,71.
- [HB1] [L. A. Sterczewski](#), and M. Bagheri, "Sub-nominal resolution Fourier transform spectrometry with chip-based combs," *Laser & Photonics Reviews* **18**, 2300724 (2024), IF = 11,00.

D) California Institute of Technology, Division of Chemistry and Chemical Engineering w okresie 1.09.2020 do 24.02.2021. Celem ograniczenia skutków restrykcji w dostępie do Laboratorium JPL NASA, zostałem przyjęty do grupy prof. Mitchio Okumury na Wydziale Chemii i Inżynierii Chemicznej na Kalifornijskim Instytucie Technologicznym (Caltech). Prowadziłem tam badania nad spektroskopią Verniera z wykorzystaniem grzebieni częstotliwości optycznych. Wynikiem prac w tym laboratorium jest następująca publikacja:

- [HB4] [L. A. Sterczewski*](#), T.-L. Chen*, D. C. Ober, C. R. Markus, C. L. Canedy, I. Vurgaftman, C. Frez, J. R. Meyer, M. Okumura, and M. Bagheri, "Cavity-enhanced Vernier spectroscopy with a chip-scale mid-infrared frequency comb," *ACS Photonics* **9**, 994–1001 (2022), [[Artykuł na okładce czasopisma](#)], IF = 7,53.

Pozostały dorobek naukowy związany jest z moją aktywnością na PWr w ramach Grupy Elektroniki Laserowej i Światłowodowej na Wydziale Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów (dawniej jako Wydział Elektroniki).

6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę.

Doświadczenie dydaktyczne:

1. Prowadzenie laboratorium *Metody transmisji danych* – wymagające trzygodzinne laboratorium z 5 równoległymi układami eksperymentalnymi. Okres: semestr letni 2023/2024.
2. Prowadzenie laboratorium *Electronics* w języku angielskim. Okres: semestr letni 2023/2024.
3. Współprowadzenie zajęć laboratoryjnych podczas realizacji studiów doktorskich w latach 2014–2015 (na Wydziale Elektroniki Politechniki Wrocławskiej):
 - *Podstawy Programowania*
 - *Elektryczność i Magnetyzm*
4. Współprowadzenie laboratorium *Selected Topics in Optics and Optical Electronics* na Princeton University, Princeton NJ, USA.
5. Mentoring naukowy doktoranta Division of Chemistry and Chemical Engineering na Kalifornijskim Uniwersytecie Technologicznym (Caltech) (Dr. Douglas Ober) w trakcie pobytu naukowego na JPL.
6. Prowadzenie wykładu w języku angielskim w ramach przedmiotu *New Approaches to Electronics & Photonics* (12 h w semestrze letnim począwszy od roku akademickiego 2021/2022). Dzięki temu wykładowi, pozyskałem magistranta oraz obecnego doktoranta do zespołu (jestem jego promotorem pomocniczym, promotor główny: dr hab. inż. Jarosław Sotor).
7. Wsparcie merytoryczne doktorantów i dyplomantów prowadzących badania w Katedrze.
8. Promotorstwo 1 pracy magisterskiej (mgr inż. Adrian Chlebowski) i 1 pracy inżynierskiej (inż. Szymon Trepka)
9. Pełnienie roli promotora pomocniczego od roku akademickiego 2022/2023 dla 3 doktorantów: mgr inż. Jakuba Mnicha, mgr inż. Patryka Sikory i mgr inż. Adriana Chlebowskiego.
10. Opieka naukowa nad stażystką podoktorską (post-doc), Panią dr Agatą Kotulską oraz drem Grzegorzem Gomółką zatrudnionymi w projekcie ERC habilitanta.
11. Opieka nad aplikantką o grant ERC dr inż. Anną Siekierką. Brałem udział w procesie redakcji jej wniosku, edycji, przygotowywaniu prezentacji i jako panelista. Kandydatka odbyła rozmowę finałową.
12. Opieka naukowa nad stażystką z Uniwersytetu Warszawskiego, Panią Sarą Łukasik, która otrzymała możliwość pracy nad projektem ERC w trakcie wakacyjnego stażu w prestiżowym programie Fundacji Candela „Rezonatory”. Płatne staże przyznawane są w drodze otwartego konkursu.

Popularyzacja nauki – pokazy i wykłady:

1. Popularnonaukowy wykład inaugurujący rok akademicki 2023/2024 na Wydziale Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów: „Lasery półprzewodnikowe jako grzebienie częstotliwości optycznych” zaprezentowany przed studentami, nauczycielami akademickimi i personelem administracyjnym dnia 11 października 2023.

2. Opracowanie i wygłoszenie wykładu popularnonaukowego „Czy istnieje życie w kosmosie” prezentowanego w Liceum Ogólnokształcącym w Warszawie (wrzesień 2022) oraz w Żmigrodzie (grudzień 2022).
3. Wywiad dla Działu Promocji PWR w ramach akcji „Odkryj Swoją Przyszłość” zachęcającej do rekrutacji na studia (maj 2021). Wywiad „Do czego przydają się miniaturowe lasery w kosmosie?”
4. Prowadzenie pokazów naukowych grających cewek Tesli i urządzeń wysokiego napięcia dla szkół podstawowych i liceum w latach 2006–2013, łącznie około 10 wystąpień.

Działalność na rzecz środowiska naukowego – mentoring w grantach ERC i Marii Skłodowskiej-Curie, zaproszone prezentacje na konferencjach poświęconych pisaniu grantów

1. „What was key in the preparation of the TeraERC Project? The Physical Sciences and Engineering panel” Akademia ERC (ERC Academy), Kraków, 17 czerwca 2024, Horyzontalny Punkt Kontaktowy.
2. „Jak pisać wnioski o granty ERC? – doświadczenie laureata grantu ERC?” prezentacja w ramach konferencji Granty ERC – droga od przygotowania do pozyskania, Gdańsk, 24 maja 2024.
3. „How to write a successful MSCA PF project proposal”, EU Green Network Meeting (online), 21 maja 2024.
4. „Good research practices – ERC grant writing”, Białystok, 21 listopada 2023, prezentacja dla Horyzontalnego Punktu Kontaktowego.
5. „Jak zdobyć ERC Starting Grant?” – Seminarium wyjazdowe stowarzyszenia Academia Iuvenum zrzeszającego młodych naukowców na Politechnice Wrocławskiej, 21 października 2023, Polanica Zdrój.
6. Prezentacja w ramach warsztatów z pisania grantów ERC: „Jak przygotować prezentację w konkursie o grant ERC?”, Kraków, 7 września 2023, Horyzontalny Punkt Kontaktowy.

Popularyzacja nauki – wywiady:

- Wywiad w Radiu Naukowym (Podcast, prowadząca Karolina Głowacka) w dniu 2024-03-18. „Fale terahercowe – technologia wkracza w kolejny zakres spektrum” ([podcast](#))
- Wywiad w Radiu Wrocław (prowadzący Leszek Mordarski) w dniu 2023-09-21. Tematy: ścieżka kariery do grantu ERC.
- "Urządzenia terahercowe w kieszeni? Prestiżowy grant na miniaturyzację technologii", Politechnika Wrocławska, Youtube, Date: 2023-09-05. ([link](#))
- "Do czego przydają się miniaturowe lasery w kosmosie?", Politechnika Wrocławska, Youtube, Data: 2021-05-26. ([link](#))
- "Polscy naukowcy pracujący w NASA. „Większość z nas nie zamieniłaby tego na nic innego”", Dzień Dobry TVN, TVN (Discovery) Poland, Data: 2020-03-14. ([link](#))
- "Łukasz Sterczewski's early interest in building things led him to his current work", Optical Society of America, OSA Stories, Data: 2018-08-21. ([Part 1](#)) ([Part 2](#)) ([Part 3](#))

Doświadczenie organizacyjne:

1. Budowa Laboratorium Optoelektroniki Terahercowej. Opracowanie 5 pionierskich spektrometrów terahercowych opartych o anteny fotoprzewodzące, organiczne kryształy nieliniowe i kwantowe lasery kaskadowe. Laboratorium służy jako miejsce zdobycia pierwszego projektu ERC na Uczelni.
2. Budowa ultra-szerokopasmowego spektrometru fourierowskiego do charakteryzacji właściwości optycznych próbek krystalicznych na potrzeby badania nowych nieliniowych kryształów organicznych hodowanych przez Instytut Zaawansowanych Materiałów Politechniki Wrocławskiej.
3. Członek Komisji ds. Badań i Współpracy z Gospodarką na Wydziale Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów. Rezultatem pracy w Komisji jest opracowanie (wraz z innymi zaangażowanymi) regulaminu projakościowego programu „Granty na Granty” mającego na celu wsparcie badań wstępnych do wniosków konkursowych o projekty naukowe.
4. Kierowanie 2 europejskimi projektami naukowymi, w tym ERC. W ramach działalności projektowej, pozyskanie dwóch nowych pracowników z zewnątrz i zatrudnienie już istniejącego do projektu.

7. Oprócz kwestii wymienionych w pkt. 1-6, wnioskodawca może podać inne informacje, ważne z jego punktu widzenia, dotyczące jego kariery zawodowej.

Ważność podejmowanej przeze mnie tematyki jest odzwierciedlona przez względnie duże zainteresowanie mediów naukowych i popularnonaukowych. Informacja o moich badaniach ukazała się m. in. w tygodniku Wprost, Gazecie Polskiej, National Geographic, czy Forum Akademickim. Moje badania opisywane też były przez naukowe portale internetowe takie jak American Institute of Physics (AIP) Scilight (dwukrotnie), czy Science Daily. Wymieniony wcześniej godzinny podcast w Radiu Naukowym doczekał się już 60 tysięcy wyświetleń. Moje publikacje są też chętnie wybierane do wizualizacji na okładce. Taką możliwość otrzymałem już czterokrotnie, w tym dla czasopisma APL Photonics, Laser & Photonics Reviews i ACS Photonics.

Wywiady dla portal internetowych i gazet

- „Polacy zapisali się w historii NASA. Nadal biorą udział w podboju kosmosu”, Wprost, Data: 2024-04-24. ([wywiad](#))
- "TeraERC: o motywacji do przygotowania grantu, trudnych początkach oraz inspiracji w dążeniu do realizacji marzeń naukowych.", HPK, Serwis RP, Data: 2023-12-09. ([wywiad](#))
- "NPP Alumni of 3 months, 1 year and 4 years share newsworthy knowledge", NASA Postdoctoral Program (NPP) Quarterly Newsletter Volume 5, Issue 2, pp. 4, Data: 2021-07-01. ([wywiad](#)) ([pełna wersja](#))
- "It's close to the stars from WUST", Wrocław University of Science & Technology, University News, Data: 2020-01-13. ([EN](#)) ([PL](#))

- "Wrocławski naukowiec w Ameryce", Gazeta Polska Codziennie (2525), Data: 2020-01-08. ([PL](#))

Media o moich badaniach i osiągnięciach

- "Prestiżowe granty dla polskich inżynierów. Dostaną 3 mln euro na supernowoczesne badania" [in Polish], National Geographic, Data: 2023-09. ([Nat. Geo.](#))
- "Prestigious ERC grant for our scientist" [in EN & PL], WUST, Data: 2023-09. ([WUST EN](#)) ([WUST PL](#))
- "Naukowcy z PWR opracowali nową metodologię diagnostyki laserów impulsowych", Forum Akademickie, Data: 2023-06. ([Forum Akademickie](#))
- "Publikacja o solitonach w „Nature Communications”. Jej autorami są naukowcy z W12", WUST, Data: 2023-06. ([WUST/PWR](#))
- "Optical frequency combs operating at 2 μm wavelength are used for dual-comb spectroscopy", AIP Scilight, Data: 2020-07. ([AIP Scilight](#))
- "An interband cascade platform permits on-chip mid-infrared dual-comb spectroscopy", AIP Scilight, Data: 2020-04. ([AIP Scilight](#))
- "Terahertz Imaging System on a Chip Offers Speed and Portability", Photonics Spectra, Date: 2019-10. ([PhotonicsMedia](#))
- "Closing the terahertz gap: Tiny laser is an important step toward new sensors", ScienceDaily, Data: 2019-07-24. ([ScienceDaily](#))
- "Miniature Laser Crucial for Development of New Medical Sensors", AZoOptics, Data: 2019-07-25. ([AZoOptics](#))
- "Innovative tiny laser has potential uses in drug quality control, medical diagnosis, airplane safety", Princeton University, Data: 2019-07-24. ([Princeton](#))

Różne (okładki czasopism naukowych)

- Nasz artykuł w *Laser & Photonics Reviews* jest na okładce wydania styczniowego 2023 ([okładka](#)). Zaprojektowałem ją i stworzyłem w programie Blender.
- Nasz artykuł w ACS Photonics trafił na okładkę marcowego wydania 2022 ([okładka](#)). Zaprojektowałem ją i stworzyłem w programie Blender.
- Nasz artykuł w *Laser & Photonics Reviews* jest na okładce wydania sierpniowego 2021 ([okładka](#)). Opracowałem koncepcję graficzną.
- Wydanie lipcowe 2020 czasopisma APL Photonics ma mój artykuł o grzebieniach częstotliwości na 2 μm długości fali na okładce: ([okładka](#)).

Zrealizowane oryginalne osiągnięcia projektowe i technologiczne

Opracowanie technologii cyfrowej korekcji fazowej sygnału z grzebieni częstotliwości optycznych

- L. A. Sterczewski*, J. Westberg*, and G. Wysocki, "Fast computational phase and timing correction for multiheterodyne spectroscopy," US Patent 11,015,975 (2021), International Patent Application, WO 2018/213286 A1 (2018).
- L. A. Sterczewski*, J. Westberg*, and G. Wysocki, "Fast computational phase and timing correction for multiheterodyne spectroscopy," US Patent 11,499,867 (2022).

Opracowanie techniki spektroskopii fourierowskiej z sub-nominalną rozdzielczością dla grzebieni częstotliwości optycznej wielkości czipa, gdzie wykrywanie częstotliwości obwiednia-nośna (CEO) jest praktycznie niewykonalne.

- Zgłoszenie patentowe USA (Caltech): M. Bagheri, L. A. Sterczewski, “Chip-Based Fourier Transform Spectrometry with Comb-Enhanced Resolution”, CIT-8906-P2, data: 25/10/2022.

Nagrody i stypendia

Nagrody:

1. “Secundus” and “Primus” za najlepsze publikacje z afiliacją Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, listopad 2020, czerwiec 2021, kwiecień 2022, kwiecień 2023, kwiecień 2024.
2. “Best Student Paper” na konferencji SPIE Photonics West - Terahertz, RF, Millimeter, and Submillimeter-Wave Technology and Applications IX, San Francisco, USA, 2016.
3. “Young Scientist Award” na konferencji Advanced Fiber Lasers (AFL2024), Changsha, Chiny, 2024.

Stypendia:

1. Stypendium dla Wybitnych Młodych Naukowców przyznawane przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego, grudzień 2020; Okres: 3 lata.
2. Stypendium START Fundacji Nauki Polskiej (FNP), maj 2018; Czas trwania: 1 rok.
3. Stypendium Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego za znaczące osiągnięcia dla doktorantów, grudzień 2017. Okres: 1 rok.
4. Fellowship: NASA Jet Propulsion Laboratory Graduate Fellowship Program na badania nad międzypasmowymi laserami kaskadowymi, Pasadena CA, USA, maj 2017. Czas: 3 miesiące.
5. Stypendium Funduszu Własnego PWr, przyznane trzykrotnie: w marcu i listopadzie 2016 oraz w listopadzie 2017.

Współpraca naukowa

(wszystkie zwięźczone wspólnymi artykułami w ciągu ostatnich 4 lat):

► Dr Jerry Meyer, Dr Igor Vurgaftman, Optical Sciences Division, Naval Research Laboratory, Washington, DC 20375, USA, TEMAT: Fizyka grzebieni częstotliwości optycznych wytwarzanych we wnękach międzypasmowych laserów kaskadowych,

► Prof. Mitchio Okumura, Division of Chemistry and Chemical Engineering, California Institute of Technology, Pasadena CA, 91125, USA, TEMAT: Międzypasmowe lasery kaskadowe wytwarzające grzebienie częstotliwości optycznej w zastosowaniach do chemii fizycznej.

► Dr Mahmood Bagheri, NASA Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, CA 91109, USA. TEMAT: Fizyka i technologia laserów półprzewodnikowych w zakresie średniej podczerwieni,

► **Dr David Burghoff, Department of Electrical Engineering, UT Austin at Texas, USA, TEMAT:** Kwantowe lasery kaskadowe w zakresie THz wytwarzające grzebień częstotliwości optycznej,

► **Prof. Kaoru Minoshima, Graduate School of Informatics and Engineering, The University of Electro-Communications, Tokyo 182-8585, Japonia, TEMAT:** Niestabilizowana spektroskopia dwugrzebieniowa.

■ Współpraca z sektorem gospodarczym

1. Pozyskanie finansowania w ramach współpracy z firmą wytwarzającą lasery femtosekundowe (Mode-Locked Technology Sp. z o. o.). Konkurs: XI polsko-tajwański konkurs Narodowego Centrum Badań i Rozwoju i National Science and Technology Council, Taiwan, Tytuł projektu: “RaVeMuSA – Radial Velocity Measurements using Synthesizable Astrocombs”, („Pomiary prędkości radialnej z wykorzystaniem syntezywalnych grzebieni częstotliwości do zastosowań astronomicznych”). **Rola:** autor pomysłu i kierownik projektu (PI) strony polskiej.
2. Wspólne opracowywanie nowego typu fotodetektorów piroelektrycznych do detekcji światła w zakresie od widzialnego do dalekiej podczerwieni z firmą Laser Components Germany GmbH, Gewerbegebiet III, Werner-von-Siemens-Straße 15, 82140 Olching, Niemcy.
3. Wspólne opracowywanie i charakteryzacja nowego typu emiterów ceramicznych podczerwieni do spektroskopii Fourierowskiej w zakresie średniej i dalekiej podczerwieni w temperaturze pokojowej z firmą Infrasolid GmbH, Gostritzer Str. 61, 01217 Dresden, Niemcy.

Współpraca z w. w. partnerami potwierdzona jest dodatkowo zgłoszeniami na konferencję Photonics West 2024 oraz CLEO 2024 USA:

1. J. Kunsch, S. Baliga, M. Budden, T. Gebert, L. Sterczewski, M. Schossig, T. Olsen, J. Mnich, J. Sotor, “Uncooled IR and THz detection based on thin LiTaO₃ pyroelectric detectors paves the way for growth in infrared spectroscopy”, Paper 12893-30, SPIE Photonics West 2024. (<https://dx.doi.org/10.1117/12.3000861>)
2. J. Mnich, M. Suster, J. Kunsch, M. Budden, T. Gebert, M. Schossig, J. Sotor, and L. A. Sterczewski, “Room-Temperature Fourier Transform Spectrometer Covering the Spectral Range from 2 to 30 μm and Beyond”, zaprezentowane jako prezentacja ustna na konferencji CLEO 2024 w Charlotte, NC, USA, paper AF3I.1.

Zwieńczona jest ona również publikacją naukową, w której habilitant ma rolę kierownika (PI & senior author)

1. J. Mnich, J. Kunsch, M. Budden, T. Gebert, M. Schossig, J. Sotor, and L. A. Sterczewski, “Ultra-broadband room-temperature Fourier transform spectrometer with watt-level power consumption”, *Optics Express* **32**, pp. 45801-45815 (2024) <https://doi.org/10.1364/OE.541395>

Pozyskane finansowanie

1. XI polsko-tajwański konkurs Narodowego Centrum Badań i Rozwoju i National Science and Technology Council, Taiwan, „RaVeMuSA – Radial Velocity Measurements using Synthesizable Astrocombs”, („Pomiary prędkości radialnej z wykorzystaniem syntezowalnych grzebień częstotliwości do zastosowań astronomicznych”), kwota: 300 000 EUR dla polskiej strony przez Mode-Locked Technology Sp. z o.o.
2. European Research Council (ERC) Starting Grant. “TeraERC – Chip-Based Room-Temperature Terahertz Frequency Comb Spectrometers”, Kwota: 1.5 M€ (ok. 6 600 000 PLN)
3. Premia na Horyzoncie 2 - CEMoS-OFC – “Computationally enhanced molecular sensing using optical frequency combs (CEMoS-OFC)”, Czas trwania: 2 lata, przyznane przez MEiN) na wsparcie finansowe i poszerzenie tematyczne projektu Marii Skłodowskiej-Curie. Kwota: ~138 263 PLN.
4. Marie Skłodowska-Curie Fellowship, “Computationally enhanced molecular sensing using optical frequency combs (CEMoS-OFC)”, Czas trwania: 2 lata, Grudzień 2021. Finansowane przez Unię Europejską (Horizon 2020), Kwota 149 625.60 €.
5. Staż doktorski: NASA Postdoctoral Program (NPP) at the NASA Jet Propulsion Laboratory, California, USA, Październik 2018; Czas trwania: 2 lata. Tytuł: „*Interband Cascade Optical Frequency Comb Spectroscopy of C-H bonds*”, Kwota: ~\$180 000.
6. Projekt badawczy/stypendium: The Kosciuszko Foundation Grant for the academic year 2017/18 for research in the United States (Princeton University), Maj 2017. Czas trwania: 6 miesięcy. Tytuł: “*Non-destructive evaluation of pharmaceuticals degradation and counterfeit using dual-comb terahertz spectroscopy*”. Kwota: \$18 000.
7. Grant: “Młoda Kadra” współfinansowany przez MNiSW, Tytuł: “*Advanced SCADA system applied to THz techniques*” and “*Wysokorozdzielcza niestabilizowana spektroskopia laserowa wykorzystująca lasery światłowodowe*”. Okres: 1 rok. Przyznane dwukrotnie: w 2014 i 2018, Kwota: ~15 000 PLN każdorazowo. ROLA: Kierownik.
8. Grant na podróż do Thirty Meter Telescope Workshop (TMT) na Hawajach. USA, Styczeń 2020, Przełożony ze względu na pandemię, Kwota: ~\$2000.

.....
(podpis wnioskodawcy)