

Katedra Teorii Pola, Układów Elektronicznych i Optoelektroniki
Wydział Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów
Politechnika Wroclawska

Autoreferat

Karol Krzempek

Spis treści

1. Imię i nazwisko	3
2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.....	3
3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych/ artystycznych.....	3
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 2022 r. poz. 574 z późn. zm.).....	3
4.1 Uzasadnienie podjęcia tematyki badawczej i celu badawczego.....	5
4.2 Omówienie osiągniętych wyników prac badawczych.....	11
4.2.1 Fototermiczna detekcja gazów bazująca na heterodynowym odczycie sygnału spektroskopowego.....	11
4.2.2 Układy fototermicznej detekcji gazów z wykorzystaniem antyrezonansowych włókien światłowodowych,	25
4.2.3 Fototermiczna detekcja gazów z wykorzystaniem rezonatorów kwarcowych oraz antyrezonansowych włókien światłowodowych	29
4.3 Podsumowanie.....	32
5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo – badawczych	32
5.1 Działalność naukowa przed uzyskaniem stopnia doktora	32
5.2 Działalność naukowa po uzyskaniu stopnia doktora	34
5.3 Lista publikacji naukowych spoza cyklu omówionego w punkcie 4.2.....	35
5.3.1 Publikacje z listy JCR przed uzyskaniem stopnia doktora	35
5.3.2 Publikacje z listy JCR po uzyskaniu stopnia doktora	36
5.3.3 Publikacje konferencyjne po uzyskaniu stopnia doktora.....	38
5.4 Udział w projektach badawczych.....	41
6. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową realizowaną w więcej niż jednej uczelni lub instytucji naukowej, w szczególności zagranicznej.....	44
7. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę	45
7.1 Wyróżnienia, nagrody, stypendia	45
7.2 Osiągnięcia organizacyjne.....	46
7.3 Osiągnięcia dydaktyczne	46
7.4 Wyróżnienia publikacji.....	47
8. Dane bibliometryczne	47

1. Imię i nazwisko

Karol Krzempek

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej

22.06.2016 Doktor nauk technicznych
Politechnika Wroclawska
Dyscyplina: Telekomunikacja
Tytuł rozprawy: „*Nieliniowa konwersja optycznego grzebienia częstotliwości z pasma telekomunikacyjnego w zakres średniej podczerwieni*”
(promotor: prof. dr hab. inż. Krzysztof M. Abramski)

14.07.2010 Magister Inżynier
Politechnika Wroclawska
Kierunek: Elektronika i Telekomunikacja
Tytuł pracy: „*Optymalizacja lasera światłowodowego bazującego na włóknach fotonicznych utrzymujących polaryzację*”
(promotor: prof. dr hab. Elżbieta Bereś-Pawlik)

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych/ artystycznych

10.2021 – obecnie Politechnika Wroclawska, Wydział Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów
Stanowisko: adiunkt badawczy

10.2016 – 09.2021 Politechnika Wroclawska, Wydział Elektroniki
Stanowisko: adiunkt badawczy

02.2013 – 09.2016 Politechnika Wroclawska, Wydział Elektroniki,
Stanowisko: asystent naukowy

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 2022 r. poz. 574 z późn. zm.).

Osiągnięciem naukowym wynikającym art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2022 r. poz. 574 z późn. zm.) w obszarze dyscypliny *automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne* jest cykl powiązanych tematycznie artykułów naukowych pt.:

Wykorzystanie efektu fototermicznego w laserowej detekcji gazów

Cykl publikacji stanowiący podstawę ubiegania się o stopień doktora habilitowanego składa się z 10 artykułów w czasopismach indeksowanych w bazie JCR o sumarycznym współczynniku wpływu **IF = 47,069 *** oraz sumarycznej punktacji **MEiN₂₀₂₂ 1250**.

Publikacje cyklu:

- [H1] **Karol Krzempek**, G. Dudzik, K. Abramski, G. Wysocki, P. Jaworski, M. Nikodem, "Heterodyne interferometric signal retrieval in photoacoustic spectroscopy," *Optics Express* **26**(2), 1125–1132 (2018). **IF₂₀₂₁ = 3,833; 140 pkt MEiN₂₀₂₂**
- [H2] **Karol Krzempek**, A. Hudzikowski, A. Głuszek, G. Dudzik, K. Abramski, G. Wysocki, M. Nikodem, "Multi-pass cell-assisted photoacoustic/photothermal spectroscopy of gases using quantum cascade laser excitation and heterodyne interferometric signal detection," *Applied Physics B* **124**(5), 1–6 (2018). **IF₂₀₂₁ = 2,171; 70 pkt MEiN₂₀₂₂**
- [H3] G. Dudzik, **Karol Krzempek**, K. Abramski, G. Wysocki, "Solid-state laser intra-cavity photothermal gas sensor," *Sensors and Actuators B: Chemical* **328**, 129072 (2021). **IF₂₀₂₁ = 9,221; 140 pkt MEiN₂₀₂₂**
- [H4] **Karol Krzempek**, G. Dudzik, K. Abramski, "Photothermal spectroscopy of CO₂ in an intracavity mode-locked fiber laser configuration," *Optics Express* **26**(22), 28861–28871 (2018). **IF₂₀₂₁ = 3,833; 140 pkt MEiN₂₀₂₂**
- [H5] **Karol Krzempek**, P. Jaworski, P. Bojęś, P. Koziół, "Photothermal gas detection using a mode-locked laser signal readout," *Journal of Lightwave Technology* **40**(13), 4436–4442 (2022). **IF₂₀₂₁ = 4,439; 140 pkt MEiN₂₀₂₂**
- [H6] **Karol Krzempek**, "Sensitive mid-infrared photothermal gas detection enhanced by self-heterodyne harmonic amplification of a mode-locked fiber laser probe," *Optics Express* **30**(17), 31354–31366 (2022). **IF₂₀₂₁ = 3,833; 140 pkt MEiN₂₀₂₂**
- [H7] **Karol Krzempek**, P. Jaworski, P. Koziół, W. Belardi, "Antiresonant hollow core fiber-assisted photothermal spectroscopy of nitric oxide at 5.26 μm with parts-per-billion sensitivity," *Sensors and Actuators B: Chemical* **345**, 130374 (2021). **IF₂₀₂₁ = 9,221; 140 pkt MEiN₂₀₂₂**
- [H8] **Karol Krzempek**, "Part-per-billion level photothermal nitric oxide detection at 5.26 μm using antiresonant hollow-core fiber-based heterodyne interferometry," *Optics Express* **29**(20), 32568–32579 (2021). **IF₂₀₂₁ = 3,833; 140 pkt MEiN₂₀₂₂**
- [H9] P. Bojęś, P. Pokryszka, P. Jaworski, F. Yu, D. Wu, **Karol Krzempek**, "Quartz-Enhanced Photothermal Spectroscopy-Based Methane Detection in an Anti-Resonant Hollow-Core Fiber," *Sensors* **22**(15), 5504 (2022). **IF₂₀₂₁ = 3,847; 100 pkt MEiN₂₀₂₂**
- [H10] **Karol Krzempek**, "A review of photothermal detection techniques for gas sensing applications," *Applied Sciences* **9**(14), 2826 (2019). **IF₂₀₂₁ = 2,838; 100 pkt MEiN₂₀₂₂**

Bezpośrednio z cyklem publikacji związany jest również patent krajowy.

Patenty bezpośrednio związane z cyklem:

- [P1] Krzysztof Abramski, Grzegorz Dudzik, **Karol Krzempek**, Michał P. Nikodem, „Laserowy detektor gazów oraz sposób detekcji gazów” Zgłoszenie numer 426146; Patent przyznany w 2020 r.

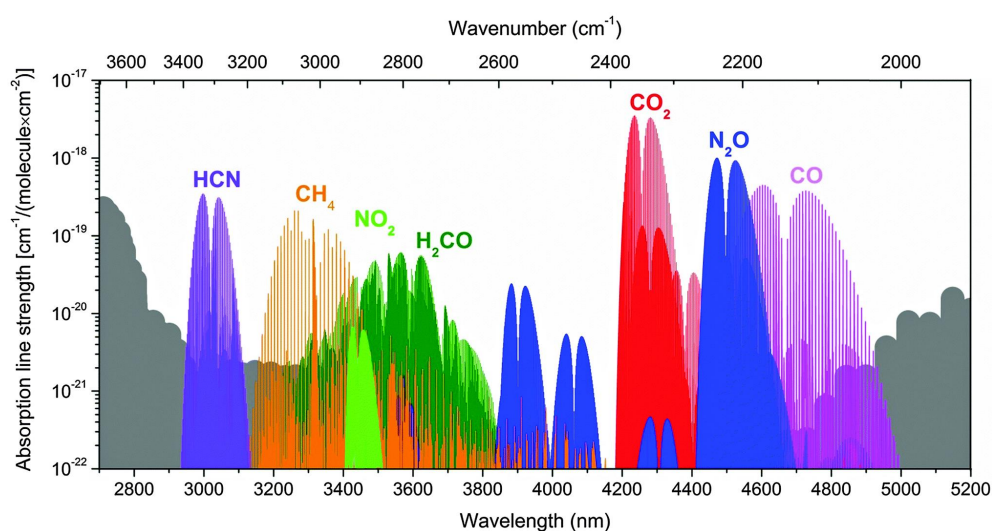
* współczynnik Impact Factor podano zgodnie z najnowszą informacją z bazy Journal Citation Reports.

Kopie publikacji stanowią załącznik nr 5 („Kopie publikacji wchodzących w skład osiągnięcia naukowego”), natomiast oświadczenia współautorów zamieszczone są w załączniku nr 6 („Oświadczenia o współautorstwie publikacji z cyklu”).

4.1 Uzasadnienie podjęcia tematyki badawczej i celu badawczego

Precyzyjne oraz niezawodne wykrywanie związków lotnych jest obecnie niezbędne między innymi w: przemyśle, ochronie środowiska, zastosowaniach militarnych, medycynie i wielu innych obszarach życia codziennego. Rozwój metod wykrywania śladowych stężeń wybranych gazów jest nieustający i podyktowany rosnącym zapotrzebowaniem, również w aplikacjach poza-laboratoryjnych¹.

Jedną z technik pozwalających na szybkie, selektywne oraz nieinwazyjne pomiary koncentracji wielu związków w fazie lotnej jest spektroskopia laserowa. Metody analizy składu próbek gazów bazujące na wykorzystaniu promieniowania koherentnego stały się obiektem zainteresowania naukowców już niedługo po wynalezieniu pierwszego lasera. Jednakże, prawdziwy rozkwit metod laserowej spektroskopii gazów rozpoczął się wraz z opracowaniem oraz wdrożeniem niezawodnych, kompaktowych źródeł promieniowania z pasma średniej podczerwieni – m. in. kwantowych laserów kaskadowych². Wiąże się to z faktem, iż w tym zakresie odnaleźć można szereg pasm absorpcyjnych wielu molekuł, co ilustruje Rys. 1.



Rys. 1. Linie absorpcyjne wybranych molekuł w paśmie 3 μm – 5,2 μm ³.

Linie gazów w paśmie średniej podczerwieni cechują się z reguły większą absorpcją w porównaniu do linii występujących w bliskiej podczerwieni oraz zazwyczaj są wąskie spektralnie, przez co odpowiednio zaprojektowany laserowy czujnik gazu jest w stanie selektywnie i z dużą precyzją wykrywać molekuły istotne z aplikacyjnego punktu widzenia. Laserowa spektroskopia gazów w wielu aspektach stanowi alternatywne rozwiązanie dla klasycznych metod, jak spektroskopia mas, czy chromatografia gazowa, zarówno w kwestii miniaturyzacji samych czujników, optymalizacji kosztów ich budowy, jak również możliwości realizowania pomiarów w trybie zdalnym.

Podstawowa, optyczna metoda detekcji gazów bazuje na analizie stopnia absorpcji promieniowania laserowego (A) na określonym odcinku drogi optycznej (L). Zależność tą opisuje prawo Lamberta-Beera:

$$A = 1 - e^{-\sigma(\omega) \cdot L \cdot C} \quad (1)$$

gdzie C to koncentracja molekuły w mierzonej próbce, $\sigma(\omega)$ to współczynnik absorpcji (ang. absorption cross section), $\omega = 2\pi f$, gdzie f to częstotliwość fali optycznej. Współczynnik $\sigma(\omega)$ można wyznaczyć w

¹ Du, Z., Zhang, S., Li, J., Gao, N. & Tong, K. Mid-Infrared Tunable Laser-Based Broadband Fingerprint Absorption Spectroscopy for Trace Gas Sensing: A Review. *Applied Sciences* 9, 338 (2019).

² Henderson, B. et al. Laser spectroscopy for breath analysis: towards clinical implementation. *Appl. Phys. B* 124, 161 (2018).

³ M. Vainio and L. Halonen. Mid-infrared optical parametric oscillators and frequency combs for molecular spectroscopy. *Phys Chem Chem Phys*, 18(6):4266–94 (2016).

oparciu o np. dostępne bazy spektroskopowe takie jak HITRAN. Posiadając informację o długości drogi interakcji laser – gaz oraz o wynikowym współczynniku absorpcji, można wyznaczyć koncentrację danej molekuly. Do klasycznych metod laserowej analizy stężenia gazów należy między innymi technika TDLAS (ang. Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy), gdzie długość fali lasera przestrajana jest w zakresie spektralnym występowania wybranej linii absorpcyjnej. Uzyskanie dużej precyzji pomiarowej w układach bazujących na technice TDLAS wymaga zazwyczaj stosowania algorytmów, które odejmują tło pomiarowe (ang. baseline) oraz dopasowują zarejestrowany sygnał do sygnału wzorcowego⁴.

Rozwinięciem techniki TDLAS jest metoda bazująca na dodatkowej, szybkiej modulacji długości fali lasera pomiarowego (f_0 - zazwyczaj kilka do kilkadziesiąt kHz) – WMS (ang. Wavelength Modulation Spectroscopy). W wyniku absorpcji wiązki laserowej wywołanej przez cząsteczki gazu w sygnale detektora (mierzącego natężenie wiązki lasera po przejściu przez gaz) zaobserwować można szereg harmonicznym o częstotliwościach będących wielokrotnością f_0 . Analiza tego sygnału pod kątem amplitudy poszczególnych harmonicznym niesie szereg zalet w porównaniu do metody TDLAS, jednakże zazwyczaj wymaga zastosowania nanowoltomierzy fazoczułych, lub bloku akwizycji sygnału realizującego szybką transformację Fouriera⁵. Przy zastosowaniu referencyjnej komórki z gazem w technice WMS nie ma konieczności rejestrowania pełnego kształtu wybranej linii absorpcyjnej w celu wykonania prawidłowego pomiaru. Warto natomiast podkreślić, iż technika WMS nie jest odporna na losowe zmiany amplitudy sygnału optycznego trafiającego na detektor, tym samym czujniki te wymagają okresowej kalibracji lub implementowania algorytmów kompensujących, aby zapewnić poprawność pomiarów⁶. Odpowiednie zaprojektowanie układu optycznego czujników bazujących na technikach TDLAS jak i WMS jest kluczowe w celu osiągnięcia wysokich czułości oraz długoterminowej powtarzalności pomiarów. Zgodnie z równaniem Lamberta-Beera, amplituda rejestrowanego sygnału spektroskopowego skaluje się wraz z długością interakcji laser-gaz, tym samym w stacjonarnych czujnikach stosuje się zazwyczaj tzw. wieloodbiciowe komórki absorpcyjne, w których wiązka pomiarowa wielokrotnie przechodzi przez mierzoną próbkę gazu, zanim zostanie skupiona na detektorze. Duża liczba elementów optyki objętościowej w takich układach skutkuje powstaniem sinusoidalnego tła na sygnale pomiarowym (ang. fringe). Z uwagi na fakt, iż faza tych zmian nie jest stała, wpływ tego efektu jest również widoczny w przypadku układów, gdzie długość fali lasera pomiarowego jest stabilizowana na punkt maksymalnej absorpcji gazu. Zastosowanie elementów pokrytych powłokami antyrefleksyjnymi oraz unikanie konfiguracji, w których powierzchnie optyczne tworzą układy płasko-równoległe ogranicza ten negatywny efekt, jednakże charakterystyczne tło w większości przypadków stanowi o ostatecznym limicie detekcji czujnika.

Do często stosowanych metod laserowej detekcji gazów zaliczyć można również techniki CRDS (ang. Cavity Ring-Down Spectroscopy), CEAS (ang. Cavity Enhanced Absorption Spectroscopy), ICOS (ang. Integrated Cavity Output Spectroscopy), czy zaawansowane rozwinięcie NICE-OHMS (ang. Noise-immune cavity-enhanced optical heterodyne molecular spectroscopy)⁷. W tych konfiguracjach promieniowanie laserowe wprowadzane jest najczęściej do wnęki rezonansowej typu Fabry-Perot (FP) o dużej dobroci (ang. Finesse), gdzie droga interakcji z gazem zostaje zwielokrotniona (w zależności od użytych zwierciadeł, nawet do dziesiątek kilometrów). Techniki te zazwyczaj wyznaczają granicę czułości detekcji gazów na danych liniach absorpcyjnych, jednakże, kosztem skomplikowanego układu optycznego, a w niektórych konfiguracjach również rozbudowanych metod stabilizacji długości fali

⁴ Li, J., Yu, B., Zhao, W. & Chen, W. A Review of Signal Enhancement and Noise Reduction Techniques for Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy. *Applied Spectroscopy Reviews* 49, 666–691 (2014).

⁵ Cui, R. et al. Highly sensitive and selective CO sensor using a 2.33 μm diode laser and wavelength modulation spectroscopy. *Opt. Express*, OE 26, 24318–24328 (2018).

⁶ Upadhyay, A. et al. A New RAM Normalized 1f-WMS Technique for the Measurement of Gas Parameters in Harsh Environments and a Comparison With 2f/1f. *IEEE Photonics Journal* 10, 1–11 (2018).

⁷ Axner, O., Ehlers, P., Foltynowicz, A., Silander, I. & Wang, J. NICE-OHMS—Frequency Modulation Cavity-Enhanced Spectroscopy—Principles and Performance. in *Cavity-Enhanced Spectroscopy and Sensing* (eds. Gagliardi, G. & Loock, H.-P.) 211–251 (Springer, 2014).

laserów lub wnęki FP⁸. Zastosowane w tych metodach rezonatory FP bazują na kosztownych zwierciadłach o dużym współczynniku odbicia. Tym samym, w celu uniknięcia znacznego pogorszenia czułości tych układów w wyniku zanieczyszczenia oraz degradacji powłok refleksyjnych, ich eksploatacja wymaga sterylnych warunków pracy. Z powyższych powodów, czujniki gazów wykorzystujące wrażliwe mechanicznie i termicznie wnęki są jedynie w nielicznych przypadkach stosowane w warunkach poza-laboratoryjnych.

Kolejną, interesującą techniką detekcji gazów jest metoda CLaDS (ang. Chirped laser Dispersion Spectroscopy). W metodzie tej koncentrację mierzonego gazu wyznacza się poprzez analizę zmiany współczynnika dyspersji, która występuje w okolicach linii absorpcyjnych gazów, tym samym minimalizując negatywny wpływ losowych fluktuacji amplitudy sygnału optycznego na detektorze⁹. W metodzie detekcji CLaDS dyspersję gazu (bezpośrednio zależną od jego koncentracji), próbkuje się wykorzystując najczęściej dwie fale optyczne, różniące się częstotliwością optyczną o wartość Ω . Analiza sygnału elektrycznego fotodetektora, na którym skupione są te wiązki, ujawnia zdudnienie w dziedzinie RF, na częstotliwości Ω . Zmiana fazy fali optycznej, będąca skutkiem charakterystyki dyspersji wokół linii absorpcyjnej powodować będzie modulację fazy tego zdudnienia, niosąc tym samym informację o wartości koncentracji mierzonego gazu. Z uwagi na częstotliwościowy charakter pomiaru, metoda CLaDS zaliczana jest do technik pomiaru wysoce odpornych na losowe zmiany amplitudy sygnału docierającego do detektora. Niemniej, uzyskanie największych czułości tego typu układów wymaga zastosowania częstotliwości Ω o wartościach zbliżonych do szerokości mierzonej linii absorpcyjnej¹⁰. Tym samym, pomiar gazów w ciśnieniu atmosferycznym, czy wyższym, wiąże się z koniecznością stosowania modulacji wiązki lasera pomiarowego z częstotliwością rzędu gigaherców. Obecnie na rynku nie są dostępne szybkie, elektro-optyczne modulatory amplitudy lub fazy na zakres średniej podczerwieni, a komercyjne modulatory akusto-optyczne są kosztowne i cechują się niewielką częstotliwością modulacji (Ω około 40 MHz), co przekłada się na niższą amplitudę sygnałów spektroskopowych rejestrowanych w czujnikach bazujących na technice CLaDS. Odpowiednią modulację można również uzyskać poprzez modulowanie prądu zasilającego laser, lecz metoda ta wymaga stosowania dużej mocy sygnału RF i jest trudna do zaimplementowania w przypadku większości konstrukcji komercyjnych laserów typu QCL. Ponadto, pozyskanie informacji o dewiacji fazy zdudnienia, a tym samym koncentracji mierzonego gazu wymaga demodulacji sygnału detektora na częstotliwości Ω . Dotychczas opublikowane prace w głównej mierze bazowały na demodulacji realizowanej przy użyciu zaawansowanej oraz kosztownej aparatury, tj. analizatora widma RF¹¹. Tym samym, na obecną chwilę, jest to metoda w większości stosowana w aplikacjach laboratoryjnych.

W przypadku realizowania pomiaru z wykorzystaniem laserów emitujących promieniowanie w paśmie średniej podczerwieni, wspólnym mankamentem wyżej wymienionych technik jest konieczność zastosowania w układzie detektora czułego na ten zakres spektralny. Detektor musi cechować się niskimi szumami, a w przypadku technik CLaDS, również szerokim pasmem częstotliwościowym – optymalnie rzędu kilku gigaherców. Pomimo ogromnego rozwoju technologicznego w każdej dziedzinie techniki, detektory średniej podczerwieni w dalszym ciągu pozostają komponentami kosztownymi, które do uzyskania dużej czułości i małych szumów wymagają niskich temperatur pracy. Ponadto, najczęściej stosowane detektory bazujące na strukturach typu MCT (ang. mercury cadmium telluride) wymagają stosowania rtęci w procesie produkcji.

⁸ Zhou, Y. et al. Laser frequency stabilization based on a universal sub-Doppler NICE-OHMS instrumentation for the potential application in atmospheric lidar. *Atmospheric Measurement Techniques* 12, 1807–1814 (2019).

⁹ Nikodem, M. Chirped laser dispersion spectroscopy for laser-based hydrogen sulfide detection in open-path conditions. *Opt. Express*, OE 24, A878–A884 (2016).

¹⁰ Wysocki, G. & Weidmann, D. Molecular dispersion spectroscopy for chemical sensing using chirped mid-infrared quantum cascade laser. *Opt. Express* 18, 26123 (2010).

¹¹ Nikodem, M., Plant, G., Wang, Z., Prucnal, P. & Wysocki, G. Chirped lasers dispersion spectroscopy implemented with single- and dual-sideband electro-optical modulators. *Optics Express* 21, 14649–14655 (2013).

Jedną z metod detekcji gazów, która eliminuje konieczność stosowania drogich detektorów na pasmo średniej podczerwieni jest technika bazująca na efekcie fotoakustycznym – PAS (ang. Photoacoustic Spectroscopy) oraz jej rozwinięcie – QEPAS (ang. Quartz Enhanced Photoacoustic Spectroscopy). W układach PAS molekuly wzbudzane są z wykorzystaniem lasera o częstotliwości optycznej pokrywającej się z liniami absorpcyjnymi mierzonych gazów. Część zaabsorbowanej energii powoduje podgrzanie gazu wzdłuż propagującej się wiązki lasera, efektem czego jest lokalna zmiana ciśnienia, gęstości oraz współczynnika załamania gazu¹². Jeśli amplituda lasera lub jego długość fali modulowana jest periodycznie (np. przebiegiem sinusoidalnym), efekt fotoakustyczny skutkować będzie generowaniem lokalnej, periodycznej zmiany ciśnienia, która propagować się będzie jako fala akustyczna. W technice PAS mierzy się amplitudę fali akustycznej, która bezpośrednio zależy m. in. od koncentracji gazu (zależna jest również od parametrów lasera wzbudzającego – tj. jego amplitudy, częstotliwości modulacji, średnicy wiązki, etc.). W klasycznych układach detektorów PAS stosuje się najczęściej czułe mikrofony lub układy MEMS (ang. microelectromechanical system) w celu parametryzowania generowanych fal akustycznych. Najbardziej rozpowszechnioną modyfikacją techniki PAS jest metoda QEPAS. W tej metodzie fala akustyczna wykrywana jest z wykorzystaniem rezonatora kwarcowego¹³. Modulowana wiązka laserowa skupiana jest pomiędzy płytkami rezonatora (ang. prongs), a wynikowa fala akustyczna wzbudza rezonator, generując mierzalne napięcie na jego elektrodach. Wysoka czułość techniki QEPAS wynika między innymi z dobroci rezonatorów kwarcowych (ang. Q-factor), co przekłada się na selektywność mierzonego sygnału. Metody PAS i QEPAS pozwalają na wykorzystanie laserów pracujących w pasmie średniej podczerwieni, tym samym zapewniając dostęp do silnych linii absorpcyjnych gazów, jednocześnie nie wymagając kosztownych detektorów na ten zakres spektralny – rolę detektorów pełnią tutaj elementy wykrywające amplitudę fali akustycznej. Metody fotoakustyczne posiadają również szereg ograniczeń. Czujniki te pracują zazwyczaj w obniżonym ciśnieniu, a rezonatory kwarcowe pozbawione ochronnej obudowy ulegają stopniowej degradacji. Ponadto, czujniki bazujące na komercyjnie dostępnych rezonatorach kwarcowych pracują na częstotliwościach rzędu dziesiątek kiloherców (najczęściej używa się elementu o rezonansie $f_{\text{rez}} = 32,768 \text{ kHz}$), czego efektem jest znacznie niższa amplituda generowanej fali z uwagi na ograniczony czas relaksacji molekuł gazu¹⁴.

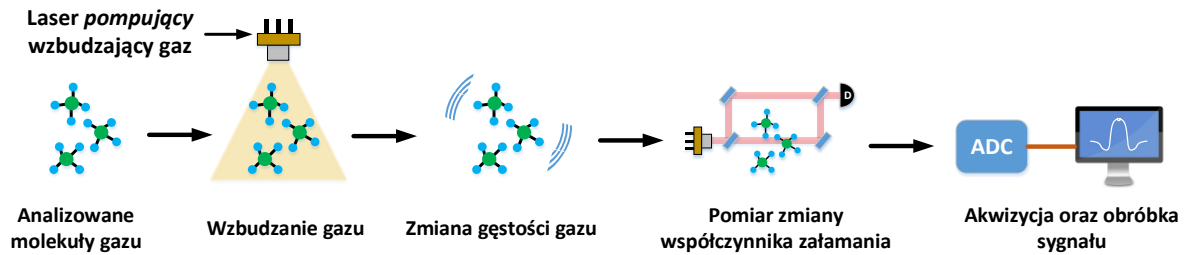
W trakcie doktoratu, jak również po uzyskaniu stopnia doktora, w pracach laboratoryjnych zajmowałem się między innymi rozwijaniem technik detekcji śladowych stężeń gazów, bazujących na metodach absorpcyjnych, jak również dyspersyjnych. Zidentyfikowałem problemy tych technik, co zmotywowało mnie do podjęcia prac eksperymentalnych nad nowymi układami czujników gazów, bazującymi na efektach fototermicznych, które pozbawione są krytycznych wad wyżej wymienionych metod.

Metoda fototermicznej (FT) detekcji gazów bazuje na tym samym efekcie fizycznym, co w omawianych powyżej technikach PAS oraz QEPAS. W czujnikach FT mierzonym parametrem nie jest fala akustyczna, lecz indukowana zmiana współczynnika załamania gazu, będąca konsekwencją lokalnego wzbudzenia gazu, a tym samym modulacji jego gęstości. Idea detekcji bazująca na efekcie FT indukowanym w gazie została podsumowana na Rys. 2. W układach FT, podobnie jak w czujnikach PAS i QEPAS, mierzone molekuly należy wzbudzić. W tym celu wykorzystuje się najczęściej źródło laserowe, zwane laserem *pompującym* (ang. *pump*). Długość fali lasera *pompującego* dobiera się tak, aby pokrywała się z liniami absorpcyjnymi molekuł, które mają być wykrywane. Laser *pompujący* oświetla molekuly gazu, celem wyindukowania lokalnej zmiany jego gęstości, której efektem jest również zmiana współczynnika załamania (WZ) gazu.

¹² Bialkowski, S. E., Astrath, N. G. C. & Proskurnin, M. A. *Photothermal Spectroscopy Methods*. (John Wiley & Sons, 2019).

¹³ Ma, Y. Recent Advances in QEPAS and QEPTS Based Trace Gas Sensing: A Review. *Frontiers in Physics* 8, (2020).

¹⁴ Zheng, H. et al. Quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy exploiting a fast and wideband electro-mechanical light modulator. *Opt. Express*, OE 28, 27966–27973 (2020).



Rys. 2. Idea fototermicznej detekcji gazów przy wykorzystaniu źródeł laserowych.

Tak jak w przypadku techniki PAS, długość fali lasera *pompującego* najczęściej moduluje się przebiegami sinusoidalnymi oraz, jeśli to konieczne, przestępują przez wybraną linię absorpcyjną, w celu zarejestrowania pełnej charakterystyki widma absorpcyjnego. Z uwagi na fakt, iż wartość indukowanej zmiany WZ jest niewielka, układy czujników FT typowo wykorzystują drugi, niezależny laser (zwany *próbkującym*) oraz układy interferometrów w celu rejestrowania amplitudy tych zmian. Klasycznie są to interferometry typu Fabry-Perot lub Mach-Zehnder. Fala *próbkująca* propagująca się we wzbudzonym gazie doświadcza indukowanej zmiany WZ, a tym samym modulowana jest jej faza, którą następnie z dużą dokładnością rejestruje interferometr. Wartość zmiany WZ można wyznaczyć bazując na prawie Gladstone'a – Dale'a¹⁵, które wiąże zależność bezwzględnego WZ światła dla danego ośrodka od gęstości tego ośrodka. Prawo zakłada, iż względne spowolnienie prędkości światła w porównaniu z próżnią jest wprost proporcjonalne do liczby, masywności i koncentracji atomów ośrodka materialnego (w tym wypadku gazu), w którym fala się rozchodzi. Uwzględnić należy również współczynniki charakterystyczne danego gazu oraz parametry lasera *pompującego*. Parametry *pompy* są szczególnie istotne, jako że wartości te mają zasadniczy wpływ na amplitudę rejestrowanego sygnału, a jednocześnie mogą być w pewnym zakresie optymalizowane. Równanie wiążące wszystkie powyższe zależności przedstawiono poniżej¹⁶:

$$\Delta n = \frac{(n - 1)}{T_0} \cdot \frac{\alpha P_{exc}}{4A\rho C_p f}, \quad (2)$$

Δn – indukowana zmiana współczynnika załamania gazu

n – współczynnik załamania gazu

T_0 – temperatura odniesienia gazu

α – współczynnik absorpcji gazu

P_{exc} – moc lasera *pompującego*

A – pole powierzchni wiązki *pompującej*

C_p – ciepło właściwe gazu

ρ – gęstość gazu

f – częstotliwość modulacji lasera *pompującego*

Dla przykładu, zmianę fazy w czujniku wykorzystującym interferometr FP, można w uproszczeniu wyrazić następującym równaniem (3):

$$\Delta\phi = k\alpha(\lambda_{pompa})CLP_{pompa} \quad (3)$$

C – koncentracja gazu

$\alpha(\lambda_{pompa})$ – współczynnik absorpcji gazu na długości fali λ_{pompa}

L – długość rezonatora FP

P_{pompa} – moc lasera *pompującego*

k – parametr charakterystyczny dla gazu oraz lasera *pompującego*

¹⁵ Mandarino, J. A. The Gladstone-Dale relationship; Part I, Derivation of new constants. The Canadian Mineralogist 14, 498–502 (1976).

¹⁶ Sedlacek, A. J. Real-time detection of ambient aerosols using photothermal interferometry: Folded Jamin interferometer. Review of Scientific Instruments 77, 064903 (2006).

Warto w tym miejscu zwrócić uwagę na najistotniejszą zaletę FT techniki detekcji, która związana jest z niebezpośrednim charakterem pomiaru – możliwość całkowitego odseparowania części czujnika odpowiedzialnej za wzbudzenie gazu oraz części odpowiedzialnej za pomiar zmian WZ gazu. Tym samym, podobnie jak w przypadku metod PAS czy QEPAS, w układach FT detekcji gazów można stosować lasery *pompujące* emitujące promieniowanie w średniej podczerwieni, czy nawet w paśmie teraherców, zapewniając dostęp do silnych linii absorpcyjnych gazów, podczas gdy rejestrowanie indukowanych modulacji WZ może być realizowane z wykorzystaniem relatywnie tanich laserów, detektorów oraz komponentów optycznych z pasma bliskiej podczerwieni (np. pasma telekomunikacyjnego - 1550 nm). Ponadto, metody detekcji FT oferują dużą elastyczność co do doboru metody pomiaru sygnału spektroskopowego zakodowanego w zmianach WZ. Układy detekcji FT można zatem projektować oraz konstruować pod docelową aplikację, biorąc pod uwagę aktualnie posiadane komponenty optyczne i aparaturę. Co więcej, przy odpowiedniej konfiguracji interferometru, amplitudę zmian WZ można zakodować bezpośrednio w dewiacji częstotliwości, np. stosując heterodynową konfigurację interferometru, tym samym, w dużej mierze, uniezależnić się od losowych zmian amplitudy sygnału optycznego docierającego do detektora oraz ograniczyć występowanie tła pomiarowego. Te cechy sprawiają, iż metody FT detekcji gazów łączą najważniejsze zalety układów PAS i CLaDS, a jednocześnie są pozbawione ich kluczowych wad.

Pierwsze układy FT detekcji gazów zostały zaprezentowane już w latach 80. ubiegłego wieku i cechowały się dużą detekcyjnością - nawet pojedynczych części na miliard, kosztem zastosowania w układzie *pompy* o mocy 20 W¹⁷. Jednakże, z uwagi na ówczesny stan rozwoju technologii laserowej, optyki oraz układów akwizycji sygnałów, czujniki gazów wykorzystujące efekty FT nie były w centrum zainteresowania badaczy, którzy w dużej mierze skupili się na rozwijaniu metod TDLAS, WMS, a później również PAS i QEPAS. Wraz z postępem technologii, układy FT detekcji gazów są obecnie intensywnie rozwijaną dziedziną laserowych czujników gazów, co zaobserwować można po rosnącej liczbie publikacji, które pojawiają się również w czasopiśmie o dużym impact factor¹⁸.

W 2017 roku rozpocząłem prace teoretyczne oraz eksperymentalne, których celem było lepsze zrozumienie podstaw fizycznych techniki FT detekcji gazów oraz opracowanie nowych konfiguracji pomiarowych, pozwalających na uzyskanie wysokich czułości, przy zachowaniu niewielkich wymiarów oraz stopnia skomplikowania czujników. Jak zostało wykazane w cyklu publikacji będących podstawą niniejszego wniosku, mój wkład w rozwój tej ciekawej metody detekcji zaowocował opracowaniem przeze mnie nie tylko szeregu konstrukcji unikatowych na skalę światową, lecz również nowych metod ekstrakcji sygnału spektroskopowego. Osiągnięcia te dokumentują oryginalny i znaczący wkład w istniejący stan wiedzy w tematyce laserowej spektroskopii gazów, a zatem stanowią mój autorski wkład w rozwój dyscypliny naukowej. Uzyskane wyniki zostały opublikowane w cyklu artykułów stanowiących rozprawę habilitacyjną i są szczegółowo omówione w dalszej części niniejszego autoreferatu.

Postawione cele badawcze można zebrać w trzy główne nurty, które realizowałem równolegle:

- 1) fototermiczna detekcja gazów bazująca na heterodynowym odczycie sygnału spektroskopowego,
- 2) układy fototermicznej detekcji gazów z wykorzystaniem antyrezonansowych włókien światłowodowych,
- 3) fototermiczna detekcja gazów z wykorzystaniem rezonatorów kwarcowych oraz antyrezonansowych włókien światłowodowych.

Mój oryginalny wkład w rozwój dyscypliny naukowej automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne (AEEIT) obejmuje rozwój nowych technik laserowej detekcji gazów, w tym

¹⁷ Davis, C. C. & Petuchowski, S. J. Phase fluctuation optical heterodyne spectroscopy of gases. *Appl. Opt.*, AO 20, 2539–2554 (1981).

¹⁸ Zhao, P. et al. Mode-phase-difference photothermal spectroscopy for gas detection with an anti-resonant hollow-core optical fiber. *Nat Commun* 11, 847 (2020).

analizę teoretyczną, prace eksperymentalne, jak i opracowanie nowych metod akwizycji i obróbki sygnałów spektroskopowych. Oryginalne osiągnięcia naukowe rozszerzające obecny stan wiedzy to,,, m.in.:

- zaproponowanie nowych konfiguracji fototermicznych czujników gazów,
- realizacja fototermicznego czujnika gazu z wieloodbiciową komórką absorpcyjną,
- zaprezentowanie miniaturowego, fototermicznego czujnika gazu na bazie lasera na ciele stałym,
- opracowanie nowej metody fototermicznej detekcji gazów z wykorzystaniem laserów z synchronizacją modów w konfiguracji rezonatora pierścieniowego oraz liniowego,
- zaproponowanie autorskiej metody detekcji zmian współczynnika gazu przy wykorzystaniu efektu samo-heterodynowania zdudnień lasera z synchronizacją modów,
- wykorzystanie antyrezonansowych włókien światłowodowych na zakres średniej podczerwieni jako miniaturowych komórek absorpcyjnych w układach czujników fototermicznych,
- opracowanie układu wykorzystującego połączenie zalet włókien antyrezonansowych oraz rezonatorów kwarcowych do zastosowań w fototermicznej detekcji gazów.

4.2 Omówienie osiągniętych wyników prac badawczych

Cykl powiązanych tematycznie prac jest efektem badań nad układami detektorów gazów wykorzystujących efekt fototermiczny, które habilitant przeprowadził w latach 2017 – 2022.

4.2.1 Fototermiczna detekcja gazów bazująca na heterodynowym odczycie sygnału spektroskopowego

Pierwszą pozycją cyklu jest praca:

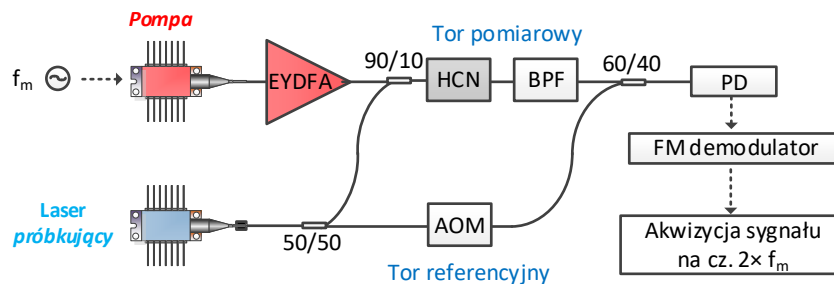
[H1] **Karol Krzempek**, G. Dudzik, K. Abramski, G. Wysocki, P. Jaworski, and M. Nikodem, "Heterodyne interferometric signal retrieval in photoacoustic spectroscopy," *Optics Express* **26(2)**, 1125–1132 (2018). **IF₂₀₂₁ = 3,833**

W tytule pracy pojawia się odniesienie do techniki detekcji fotoakustycznej z uwagi na fakt, iż obie metody są powiązane ze sobą efektem fizycznym, który jednocześnie, jako efekt modulacji gęstości gazu, generuje falę akustyczną, jak i zmienia WZ gazu. Jednakże, odniesienie do efektu fototermicznego pojawia się już w abstrakcie oraz efekt ten jest podstawą opisanych w pracy wyników eksperymentalnych. W kolejnych pracach cyklu stosowano już określenie „photothermal”.

Eksperymenty opisane w pracy [H1] miały na celu poznanie podstaw fizycznych efektu FT oraz zademonstrowanie kilku nowych konfiguracji czujników gazów. W pracy [H1] przedstawiono pierwszą na świecie demonstrację układu, w którym do detekcji efektu FT wykorzystano układ heterodynowego interferometru typu Mach-Zehnder, bazującego na ogólnodostępnych oraz łatwych w użyciu komponentach światłowodowych z pasma telekomunikacyjnego - 1550 nm. W dotychczas opublikowanych konfiguracjach wykorzystywano przede wszystkim interferometrię w konfiguracji homodynowej. Układy homodynowych interferometrów typowo wymagają aktywnej, precyzyjnej stabilizacji interferometru w celu zapewnienia długoterminowej powtarzalności pomiarów. Realizowane jest to zazwyczaj z wykorzystaniem piezoceramicznych elementów - do poruszania lustra lub rozciągania światłowodu¹⁹. Ponadto, w takiej konfiguracji, sygnał spektroskopowy zakodowany jest w zmianach amplitudy promieniowania wyciekającego z interferometru, przez co czujnik podatny

¹⁹ Li, Z., Wang, Z., Yang, F., Jin, W. & Ren, W. Mid-infrared fiber-optic photothermal interferometry. *Opt. Lett.*, OL 42, 3718–3721 (2017).

jest na szum będący wynikiem np. drgań mechanicznych, czy długoterminowego dryftu termicznego. Czujniki zademonstrowane w pracy [H1] wykorzystują heterodynową konfigurację interferometru Macha-Zehndera oraz modulator akusto-optyczny w celu przesunięcia częstotliwości optycznej ramienia referencyjnego o 40 MHz. Schemat jednego z układów przedstawiono na Rys. 3.



Rys. 3. Schemat jednego z układów eksperymentalnych opisanych w pracy [H1]. f_m – częstotliwość modulacji, EYDFA – wzmacniacz światłowodowy, 50/10 i 90/10 i 60/40 – sprzęgacze światłowodowe, HCN – komórka światłowodowa z cyjanowodorem, BPF – filtr pasmowo – przepustowy dla lasera próbkującego, PD – fotodioda, AOM – modulator akusto-optyczny $\Omega = 40$ MHz.

Dzięki zastosowaniu konfiguracji heterodynowego interferometru, w elektrycznym sygnale fotodiody obserwowano zdudnienie na częstotliwości $\Omega = 40$ MHz (tożsamej z częstotliwością z modulatora akusto-optycznego). W opracowanym układzie mierzony gaz umieszczony był w ramieniu pomiarowym interferometru, gdzie wzbudzany był przez laser *pompujący*. Tym samym, jakiegokolwiek modulacja długości ramienia pomiarowego wynikająca z indukowania efektu FT zostaje „zakodowana” jako dewiacja częstotliwości zdudnienia $\Omega = 40$ MHz. Ekstrakcja użytecznego sygnału spektroskopowego realizowana była przez prostą demodulację częstotliwości tego zdudnienia. Efektem zastosowania unikanej konfiguracji interferometru jest uniezależnienie amplitudy rejestrowanego sygnału spektroskopowego od intensywności promieniowania padającego na detektor, tym samym odseparowanie się od głównych źródeł szumu obserwowanych w homodynowych w układach czujników fototermicznych.

Praca [H1] opisuje łącznie cztery niezależne eksperymentalne demonstracje wykorzystania heterodynowej konfiguracji układu interferometrycznego do detekcji gazów przy wykorzystaniu efektu FT. W pracy przebadano wpływ zarówno impulsowego wzbudzenia gazu (z wykorzystaniem modulatora przestrzennego), jak również przy zastosowaniu ciągłej wiązki *pompującej*. Dwa pierwsze opisane w pracy eksperymenty przedstawiały wstępne badania, w których lasery *próbkujący* jak i *pompujący* pracowały w pasmie $1,55 \mu\text{m}$. Detekowany gaz (cyjanowódor, HCN) zamknięty był w światłowodowej komórce absorpcyjnej. Dalsza część pracy opisuje dwie niezależne konfiguracje, w których efekt FT indukowany był w powietrzu (w otwartej przestrzeni). Tutaj część mierzająca zmiany WZ wykorzystywała heterodynowy interferometr światłowodowy, a układ *pompy* bazował na światłowodowym źródle o długości fali $\sim 2 \mu\text{m}$, który wzbudzał dwutlenek węgla (CO_2). Ostatni z eksperymentów opisanych w pracy [H1] przedstawia układ, który umożliwił „trójwymiarową” lokalizację miejsca występowania gazu w torze pomiarowym, co również stanowiło pierwszą na świecie demonstrację czujnika FT w takiej konfiguracji. W pracy [H1] eksperymentalnie potwierdzono między innymi zależność pomiędzy mocą optyczną lasera *pompującego* a amplitudą rejestrowanego sygnału fototermicznego, wynikającą z równania (1).

Praca [H1] skupiała się głównie na eksperymentalnym zweryfikowaniu możliwych kierunków rozwoju układów fototermicznych. Z punktu widzenia praktycznej aplikacji FT czujnik gazów powinien cechować się relatywnie nieskomplikowaną budową (optymalnie w oparciu o niekosztowne oraz dostępne komercyjnie komponenty), minimalną liczbą elementów optyki objętościowej oraz brakiem konieczności aktywnej stabilizacji interferometru. Możliwość osiągnięcia tych celów została eksperymentalnie potwierdzona w pracy.

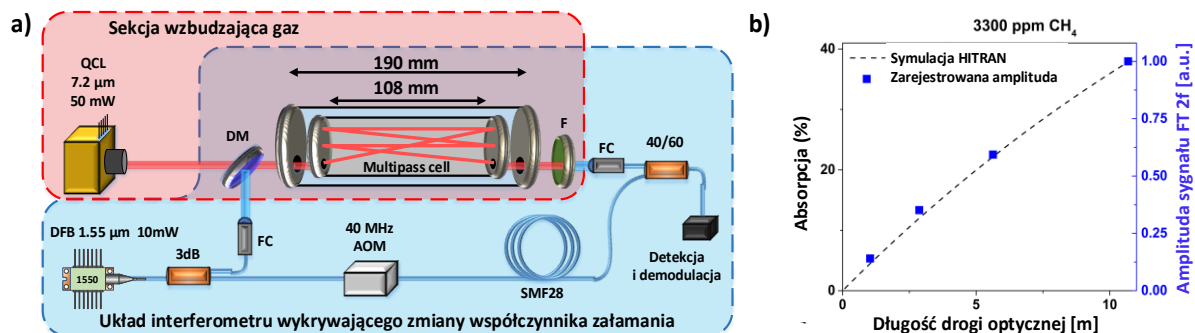
Przeprowadzone eksperymenty nie tylko pozwoliły na poznanie podstaw FT detekcji gazów oraz wyznaczenie kierunków dalszego rozwijania tej metody detekcji, lecz stanowiły również istotny wkład w rozwój tej dziedziny na świecie.

Mój wkład w powstanie pracy [H1] polegał na zaplanowaniu badań (wraz z M. Nikodemem), budowie układów eksperymentalnych (wraz z M. Nikodemem), przeprowadzeniu eksperymentów (wraz z M. Nikodemem), zebraniu oraz analizie wyników (wraz z M. Nikodemem), a także przygotowaniu manuskryptu (wraz z M. Nikodemem). Swój udział procentowy w powstaniu pracy [H1] szacuję na 40 %.

Efektem preliminarnych prac eksperymentalnych opisanych w publikacji [H1] było zidentyfikowanie problemów związanych z realizacją pomiarów w konfiguracjach czujników wykorzystujących efekt fototermiczny oraz możliwych metod zwiększenia amplitudy rejestrowanego sygnału, np. poprzez zwiększenie mocy lasera *pompującego* lub wydłużenie drogi interakcji laser-gaz. Kontynuacją tych eksperymentów było przeprowadzenie prac badawczych opisanych w pracy [H2].

[H2] **Karol Krzempke**, A. Hudzikowski, A. Głuszek, G. Dudzik, K. Abramski, G. Wysocki, and M. Nikodem, "Multi-pass cell-assisted photoacoustic/photothermal spectroscopy of gases using quantum cascade laser excitation and heterodyne interferometric signal detection," *Applied Physics B* **124**(5), 1–6 (2018). **IF₂₀₂₁ = 2,171**

Praca [H2] poświęcona jest pierwszej na świecie demonstracji czujnika gazów wykorzystującego wieloodbiciową komórkę absorpcyjną w celu zwiększenia rejestrowanego sygnału fototermicznego. Prace eksperymentalne zrealizowane zostały w trakcie mojego stażu na Uniwersytecie Princeton, gdzie prowadziłem badania nad nowatorskimi układami czujników gazów. Schemat czujnika z pracy [H2] przedstawiono na rysunku Rys. 4a.



Rys. 4. (a) - Schemat układu eksperymentalnego. QCL – laser kaskadowy QCL, DM – zwierciadło dichroiczne, F – optyczny filtr dolnoprzepustowy, FC – kolimator światłowodowy, 3 dB i 40/60 – sprzęgacz światłowodowy, DFB – laser 1550 nm, AOM – modulator akusto-optyczny, SMF28 – światłowód typu SMF28. (b) – wykres przedstawiający wpływ wydłużenia drogi interakcji laser-gaz na amplitudę rejestrowanego sygnału fototermicznego.

Idea wykorzystania wieloodbiciowej komórki absorpcyjnej w układzie FT czujnika gazu została zaproponowana jako kontynuacja preliminarnych eksperymentów opisanych w pracy [H1], w której to wykazano zależność amplitudy zmiany WZ gazu od drogi interakcji laser-gaz oraz amplitudy lasera *pompującego*. Z uwagi na fakt, iż zwiększanie mocy optycznej lasera *pompującego* nie zawsze jest możliwe ze względu na docelową aplikację (np. wynikające z konieczności ograniczenia maksymalnej mocy pobieranej przez urządzenie), przeanalizowano alternatywne rozwiązanie, polegające na wydłużeniu drogi interakcji laser-gaz. W trakcie realizacji badań w pracy [H1], gdzie wiązka *pompująca* i *próbkująca* propagowała się na 25 cm odcinku otwartej przestrzeni, zaobserwowałem, iż amplituda rejestrowanego sygnału FT krytycznie zależy od poprawności zjustowania obu tych wiązek laserowych – największy sygnał obserwowany jest przy idealnym przekryciu obu wiązek na całej drodze

pomiarowej. W związku z powyższym ograniczeniem, wydłużenie drogi optycznej obwarowane jest ograniczeniami, z których dwa największe to: utrudniona weryfikacja kolinearności obu wiązek, oraz najczęściej, różna ich rozbieżność.

W pracy [H2] zaproponowano unikalną konfigurację czujnika FT, w którym zastosowanie WKA nie tylko zwielokrotniło drogę interakcji laser-gaz (co skutkowało rejestrowaniem znacznie wyższych poziomów sygnałów FT), lecz jednocześnie pozwalało na prostą weryfikację poprawności kolinearnego przekrycia wiązki *pompującej* oraz *próbkującej*. Większość WKA wymaga wprowadzenia pomiarowej wiązki laserowej pod ściśle określonym kątem względem jej osi optycznej. Ta cecha, która w fazie zestawiania układów jest uciążliwa, implikuje dużą zaletę w przypadku zastosowania WKA w konfiguracji czujnika FT - pozwala na jednoznaczny weryfikację poprawności kolinearnego przekrycia obu wiązek biorących udział w pomiarze (jeśli obie wiązki widoczne są na wyjściu WKA, oznacza to, że z dużym prawdopodobieństwem są poprawnie przekryte). Prace eksperymentalne obejmowały dwie niezależne konfiguracje bazujące na komórkach typu Herriott oraz White. Do WKA wprowadzano mierzoną próbkę gazu oraz sprzęgano wiązkę *pompującą* i *próbkującą*. Jak wykazano w pracy [H2], amplitudę rejestrowanego sygnału FT można zwielokrotnić poprzez zastosowanie odpowiedniej WKA (Rys 4b).

Drugim zasadniczym osiągnięciem opisanym w pracy [H2] jest eksperymentalne zademonstrowanie możliwości wykonywania pomiarów gazów przy wykorzystaniu największej zalety układów FT – tj. odseparowania części układu, która wzbudza gaz od części układu odpowiedzialnej za rejestrowanie zmian WZ. W eksperymentach, laserem *pompującym* był kwantowy laser typu QCL, wzbudzający cząsteczki metanu (CH_4) na długości fali $\sim 7,2 \mu\text{m}$. Heterodynowy interferometr rejestrujący indukowaną modulację WZ pracował natomiast na długości fali $1,55 \mu\text{m}$. Konsekwencją takiej konfiguracji jest ograniczenie kosztów zestawienia czujnika, jak również możliwość stosowania tanich detektorów na bliską podczerwień, w tym wypadku na bazie arsenku indowo-galowego (ang. InGaAs).

Praca [H2] stanowi istotny wkład w rozwój dziedziny z uwagi na opracowanie nowej konfiguracji FT czujnika, bazującej na WKA oraz weryfikacji możliwości wykorzystania nieskomplikowanego interferometru światłowodowego, pracującego w paśmie 1550 nm, do pomiaru zmian WZ indukowanych laserem z pasma średniej podczerwieni.

Mój wkład w powstanie pracy [H2] polegał na pozyskaniu finansowania (wspólnie z M. Nikodemem), zaplanowaniu badań (wspólnie z M. Nikodemem), budowie układu eksperymentalnego opisanego na rysunku 1 w pracy (wspólnie z G. Dudzikiem), budowie układu eksperymentalnego opisanego na rysunku 2 w pracy (wspólnie z G. Dudzikiem, A. Hudzikowskim, A. Głuszkim), przeprowadzeniu eksperymentów (wspólnie z A. Hudzikowskim, A. Głuszkim oraz G. Dudzikiem), analizie wyników (wspólnie z M. Nikodemem), obróbce wyników pomiarów (wspólnie z M. Nikodemem), oraz przygotowaniu manuskryptu (wspólnie z M. Nikodemem). Swój udział procentowy w powstanie pracy [H2] szacuję na 40 %.

Prace badawcze opisane w publikacji [H2] pozwoliły na potwierdzenie założeń fototermicznej detekcji gazów w kilku nowych konfiguracjach. Poza efektem publikacyjnym oraz poznawczym, uzyskane wyniki stały się podstawą do przygotowania wniosku o ochronę patentową opracowanych konfiguracji, którego byłem głównym redaktorem. W roku 2021 przyznano krajowy patent na opracowane rozwiązania [P1].

Badania nad elementarnymi konfiguracjami układów czujników FT opisane w pracach [H1] oraz [H2] pozwoliły mi na określenie głównych zalet oraz wad tej nieszablonowej metody detekcji gazów i przeanalizowanie możliwych kierunków dalszego rozwoju tych czujników.

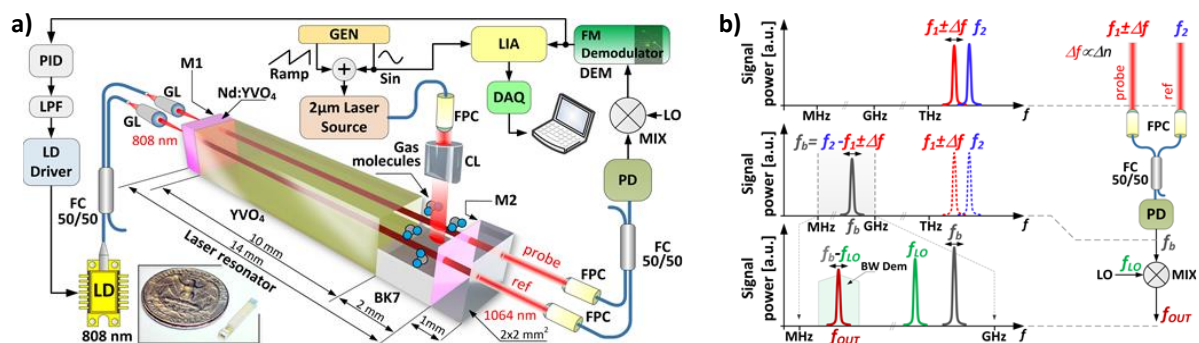
Określiłem kilka kluczowych problemów konstrukcyjnych oraz związanych z metodami akwizycji sygnałów spektroskopowych, które należało rozwiązać, w celu poprawy detekcyjności czujników FT.

Podstawowym, eksperymentalnie wykazanym ograniczeniem tych czujników jest wartość modulacji WZ gazu, będąca następstwem indukowania efektu FT (zazwyczaj około $\Delta_n=1\cdot 10^{-7}$), co implikuje stosowanie czułych metod ekstrakcji użytecznego sygnału spektroskopowego. Ponadto, zgodnie z równaniem (1), wielkość obserwowanej modulacji WZ zależy w dużym stopniu od parametrów lasera *pompującego*, w tym od jego mocy, średnicy wiązki, częstotliwości modulacji, jak również od idealnego przekrycia wiązki *pompującej* i *próbkującej*. Zidentyfikowanie ograniczeń oraz ich eksperymentalna weryfikacja w trakcie przeprowadzonych przeze mnie badań opisanych w publikacjach [H1] i [H2] pozwoliły mi na określenie dwóch głównych obszarów badawczych, które skutkowałyby dalszym rozwojem technik fototermicznej detekcji gazów. W pierwszym obszarze badawczym skupiałem się na opracowaniu nowatorskich metod ekstrakcji i analizy sygnałów spektroskopowych oraz ulepszonych konfiguracji FT czujników gazów. Równolegle, w drugim obszarze badawczym podjąłem próby zmaksymalizowania amplitudy zmian WZ indukowanych z wykorzystaniem efektu FT.

Kolejną pracą cyklu jest:

[H3] G. Dudzik, **Karol Krzempek**, K. Abramski, and G. Wysocki, "Solid-state laser intra-cavity photothermal gas sensor," *Sensors and Actuators B: Chemical* **328**, 129072 (2021). IF₂₀₂₁ = **9,221**

W publikacji [H3] opisano zupełnie nową metodę analizy indukowanych FT zmian WZ gazów – z wykorzystaniem autorskiej konfiguracji lasera na ciele stałym. Jest to pierwsza, i na obecną chwilę jedyna demonstracja FT czujnika gazów w tej konfiguracji. Układ przedstawiono na Rys. 5a.



Rys. 5. (a) - Schemat układu czujnika z pracy [H3]. PID – kontroler typu PID, LPF – filtr dolnoprzepustowy, LD Driver – kontroler lasera, LD – dioda laserowa 808 nm, GL; FPC – kolimator, M1;M2 – zwierciadła lasera, CL – soczewka cylindryczna, GEN – generator funkcyjny, LIA – nanowoltomierz selektywny, DAQ – karta akwizycji, LO – lokalny oscylator, PD – fotodioda, FC – sprzęgacz światłowodowy, MIX – mikser RF. (b) – idea heterodynowej detekcji zmiany współczynnika załamania gazu poprzez analizę zmiany częstotliwości optycznej lasera.

Układ opisany w pracy [H3] jest dopracowaną konfiguracją, która przeszła szereg modyfikacji w celu poprawy stabilności, detekcyjności oraz ograniczenia stopnia skomplikowania. Zasadniczą częścią układu jest pompowany optycznie laser na ciele stałym, który od podstaw został zaprojektowany oraz wykonany na Politechnice Wrocławskiej. Jest to laser bazujący na kryształach domieszkowanym neodymem, pompowanym laserem 808 nm, który emituje na długość fali ~ 1064 nm. W odróżnieniu od standardowych konfiguracji, laser opisany w pracy [H3] posiada istotną modyfikację, w której pomiędzy kryształ YVO_4 (ang. yttrium orthovanadate) a kryształ z powłoką częściowo odbijającą, stanowiącą zwierciadło wyjściowe lasera (M2), wklejono dystans ze szkła typu BK7. Taka konfiguracja pozwala na uzyskanie wnęki wewnątrz rezonatora lasera. W tym obszarze rezonująca wiązka wyprowadzana jest na dystansie 2 mm w wolną przestrzeń (poza kryształy). Wnęka ta stanowi mikrokómkę gazową wewnątrz rezonatora, którą następnie wypełniano próbką gazu. Wzbudzenie gazu w tym obszarze poprzez zastosowanie zewnętrznego lasera *pompującego* wywoływało efekt FT oraz lokalną zmianę WZ, a tym samym zmianę długości optycznej rezonatora lasera, co obserwowane było jako przesunięcie długości fali emisji.

Dzięki unikatowej konfiguracji, zaprojektowany czujnik wykorzystuje podstawowe prawa fizyczne warunkujące pracę lasera – powiązanie długości fali emisji lasera z drogą optyczną wewnątrz jego rezonatora. Częstotliwość rezonansową ν_q lasera bazującego na rezonatorze liniowym opisuje zależność:

$$\nu_q = q \cdot \nu_{FSR} \quad (4)$$

Gdzie, $q = 2Lo/\lambda$ – oznacza rząd modu podłużnego rezonatora. Dla lasera z pracy [H3] $\lambda = 1064$ nm, więc $q \approx 47940$. $\nu_{FSR} = c/2Lo$ oznacza odstęp pomiędzy modami podłużnymi lasera, Lo – droga optyczna rezonatora, c – prędkość światła w próżni. Rezonator lasera w pracy [H3], składał się z czterech sekcji o różnych współczynnikach załamania, a drogę optyczną w jego wnętrzu opisuje równanie:

$$L_o = n_1L_1 + n_2L_2 + n'_3L_3 + n_3L_4 \quad (5)$$

gdzie n_1 i L_1 to WZ (1.9573) i długość (2 mm) kryształu Nd:YVO4, n_2 i L_2 to WZ (1.9589) i długość (10 mm) kryształu YVO4. n'_3 i L_3 to WZ gazu wzbudzonego i długość (1,5 mm) w mikro-komórce gazowej wewnątrz rezonatora. n_3 i L_4 to WZ gazu niewzbudzonego oraz długość (0,5 mm). Indukowana fototermicznie zmiana częstotliwości lasera (Δn), wynosi:

$$\Delta \nu_n = \frac{\partial \nu_q}{\partial n_3}, \Delta n. \quad (6)$$

Równanie (1) przyjmuje więc postać:

$$\Delta \nu_n = \frac{\partial \nu_q}{\partial n_3}, \Delta n = \frac{\partial \frac{qc}{2L_o}}{\partial n_3}, \Delta n = \frac{-qc}{2L_o^2} L_3 \Delta n = \frac{-qcL_3(n_3 - 1)\alpha P_{exc}}{8L_o^2 T_0 A \rho C_p f}, \quad (7)$$

Dzięki temu, poprzez odpowiednią konfigurację lasera na ciele stałym, indukowane FT zmiany WZ gazu są bezpośrednio „zakodowane” w zmianach częstotliwości optycznej emitowanej przez ten laser. W skonstruowanym układzie, jako laser *pompujący* gaz zastosowano skonstruowany przeze mnie wzmacniacz światłowodowy, bazujący na włóknie domieszkowanym tulem, co pozwoliło na przeprowadzenie eksperymentów z detekcją CO₂ na długości fali ~2003 nm. Z uwagi na fakt, iż amplituda indukowanego efektu FT jest mała, zasadniczym wyzwaniem w zaproponowanej metodzie okazało się czułe i niezawodne wykrywanie zmian $\Delta \nu_n$. W celu rozwiązania problemu zaproponowano konfigurację dwuwiązkową mikro-lasera oraz technikę detekcji heterodynowej. Jak można zaobserwować na schemacie Rys. 5a, w rezonatorze wzbudzone są niezależnie dwie akcje laserowe, poprzez doprowadzenie wiązki pompującej o długości fali 808 nm do kryształu w dwa odseparowane obszary rezonatora. Dzięki temu, z pojedynczej struktury emitowane są dwie wiązki lasera o częstotliwościach optycznych f_1 i f_2 , przy czym tylko jedna wiązka (f_1) doświadcza indukowanej zmiany WZ (Δf), poprzez selektywne naświetlanie laserem *pompującym* obszaru, w którym wiązka lasera f_1 pokonuje odcinek w wolnej przestrzeni, wypełniony próbką gazu. Następnie obie wiązki ($f_1 + \Delta f$ i f_2) zdudniane są ze sobą na fotodiodzie w celu uzyskania sygnału heterodynowania oraz przeniesienia zmian częstotliwości optycznych w dziedzinę częstotliwości radiowych, których detekcja jest nieskomplikowana (idea heterodynowej detekcji wyjaśniona została na rysunku Rys. 5b). Z uwagi na fakt, iż obie wiązki generowane są w jednej strukturze, oraz wiązka pompująca dostarczana była jednego źródła laserowego, a podział odbywał się z wykorzystaniem sprzęgacza światłowodowego, układ cechował się szumami o dwa rzędy niższymi w stosunku do konfiguracji preliminarnych, w których wykorzystywano dwa oddzielne mikro-lasery, z których jeden służył za lokalny oscylator. Ekstrakcja sygnału spektroskopowego odbywała się przez demodulację sygnału elektrycznego pochodzącego z fotodiody, a dalsza obróbka przebiegała z wykorzystaniem nanowoltomierza fazoczułego.

Opracowana oraz opatentowana konstrukcja czujnika pozwalała na zakodowanie sygnału spektroskopowego bezpośrednio w dewiacji częstotliwości zdudnienia lasera f_1 oraz f_2 , co jest niezwykle pożądane nie tylko w technikach laserowej spektroskopii gazów, lecz w każdej dziedzinie metrologii. Wywodzi się to z faktu, iż częstotliwość jest parametrem fizycznym, który obecnie możemy mierzyć z nieporównaną precyzją i jest on niewrażliwy na wiele źródeł szumu²⁰. Czujnik opisany w pracy [H3] cechował się miniaturyzacją (rezonator o wymiarach 14x2x2mm³) oraz czułością porównywalną z układami klasycznych spektrometrów gazów o znacznie dłuższych drogach interakcji laser-gaz - 350 części na miliard dla uśredniania 100 s²¹. W układzie zastosowano również zaproponowaną przeze mnie, autorską metodę minimalizowania wpływu szumu będącego następstwem zastosowania wielomodowego lasera pompującego – ang. speckle noise. W tym celu laser pompujący kryształ modulowano amplitudowo (głębokość modulacji 5%) z częstotliwością 50 kHz, co ograniczyło szumy czujnika ponad dwukrotnie.

W pracy [H3] wykazano, iż FT detekcja gazów możliwa jest w konfiguracji wewnątrz-rezonatorowej, przy wykorzystaniu miniaturowych laserów na ciele stałym. Odpowiednio zaprojektowany czujnik w takiej konfiguracji pozwala na bezpośrednie zakodowanie sygnału spektroskopowego w dewiacji częstotliwości, co przekłada się na znaczną poprawę detekcyjności oraz uproszczenie procesu ekstrakcji sygnału spektroskopowego. Efektem pracy [H3] jest opracowanie zupełnie nowej metody detekcji gazów oraz zademonstrowanie nowej konfiguracji fototermicznych czujników gazów unikatowej na skalę światową, co stanowi istotny wkład w rozwój dziedziny. Konstrukctorem, projektantem oraz wykonawcą mikrolasera w układzie czujnika z pracy [H3] jest dr Grzegorz Dudzik, który w dalszym ciągu rozwija tę tematykę w nowych, autorskich konfiguracjach.

Mój wkład w powstanie pracy [H3] polegał na pozyskaniu finansowania, zaplanowaniu badań (wspólnie z G. Dudzikiem), budowie układu eksperymentalnego (wspólnie z G. Dudzikiem), przeprowadzeniu eksperymentów (wspólnie z G. Dudzikiem), opracowaniu i budowie układu stabilizacji i uśredniania szumu częstotliwościowego lasera na ciele stałym, zaprojektowaniu i budowie lasera pompującego gaz, opracowaniu i budowie układu formowania oraz sprzęgania wiązki pompującej, zebraniu oraz analizie wyników (wspólnie z G. Dudzikiem), oraz przygotowaniu manuskryptu (wspólnie z G. Dudzikiem). Swój udział procentowy w powstanie pracy [H3] szacuję na 30 %.

Aplikacyjny charakter prowadzonych przeze mnie badań oraz eksperymentalne potwierdzenie tezy, iż przy odpowiedniej konstrukcji czujnika, sygnał fototermiczny można zakodować w dewiacji częstotliwości, zmotywowały mnie do dalszego rozwijania tego obszaru badawczego. Za główny cel postawiłem sobie uproszczenie konstrukcji czujników, przy jednoczesnym zachowaniu dużej ich detekcyjności. Idea wewnątrzwnętkowej fototermicznej detekcji gazów została rozwinięta w kolejnych pracach, gdzie wykorzystałem moje naukowe doświadczenie z dwóch niezależnych obszarów badawczych: konstruowania oraz optymalizowania układów światłowodowych laserów z synchronizacją modów oraz konstruowania laserowych czujników gazów.

Pierwsza tego typu konfiguracja przedstawiona została w pracy [H4], w której opisałem analitycznie oraz zademonstrowałem eksperymentalnie zupełnie nową metodę detekcji śladowych stężeń gazów.

[H4] **Karol Krzempek**, G. Dudzik, and K. Abramski, "Photothermal spectroscopy of CO₂ in an intracavity mode-locked fiber laser configuration," *Optics Express* **26**(22), 28861–28871 (2018).

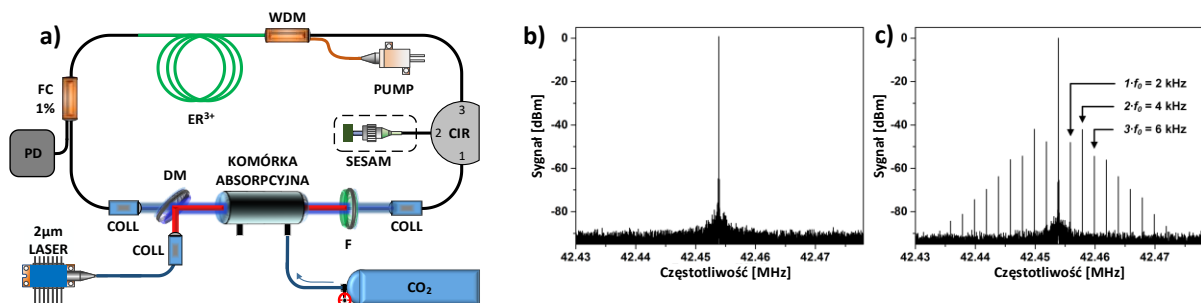
IF₂₀₂₁ = 3,833

²⁰ Hänsch, T. W. Nobel Lecture: Passion for precision. *Rev. Mod. Phys.* 78, 1297–1309 (2006).

²¹ Wojtas, J., Bielecki, Z., Stacewicz, T., Mikołajczyk, J. & Nowakowski, M. Ultrasensitive laser spectroscopy for breath analysis. *Opto-Electronics Review* 20, (2012).

W trakcie prac eksperymentalnych opisanych w publikacjach [H1], [H2] i [H3] zidentyfikowałem podstawowe problemy oraz ograniczenia obecnie stosowanych technik ekstrakcji sygnału fototermicznego. Typowe konfiguracje interferometrów FP oraz MZ wykorzystywane w FT czujnikach gazów wymagają aktywnej stabilizacji, np. poprzez zastosowanie przetworników piezoceramicznych, a sygnał spektroskopowy zakodowany jest w amplitudzie sygnału rejestrowanego przez fotodetektor. Natomiast konfiguracje bazujące na układach heterodynowych interferometrów wymagają stosowania np. akustooptycznych modulatorów (jako przesuwników częstotliwości). Układy mikroczujników w konfiguracji opisanej w pracy [H3] wymagają natomiast pętli sprzężenia zwrotnego sterującej mocą pompującą kryształ, tak aby demodulowane zdudnienie pokrywało się z pasmem demodulatora. Mając na uwadze powyższe ograniczenia, rozpocząłem prace nad opracowaniem i skonstruowaniem układu FT czujnika, bazującego na nowym, całkowicie odmiennym mechanizmie ekstrakcji informacji o modulacji WZ gazu. W pracy [H4] przedstawiłem pierwszą na świecie demonstrację układu, w którym zmiana WZ indukowana efektem FT rejestrowana jest przez wykorzystanie lasera z pasywną synchronizacją modów.

Lasery impulsowe, które działają na zasadzie synchronizacji modów (ang. mode-locked, ML) charakteryzują się szczególnymi parametrami emitowanej wiązki laserowej. We wnętrzu typowego lasera ML występują tysiące, lub setki tysięcy zsynchronizowanych ze sobą modów podłużnych. W efekcie, laser generuje krótkie impulsy laserowe (zazwyczaj rzędu pikosekund lub femtosekund), a widmo elektryczne obserwowane na analizatorze RF zawiera ciąg zdudnień²². Pierwsze zdudnienie obserwowane jest na częstotliwości bezpośrednio wynikającej z długości optycznej rezonatora, zgodnie z zależnością $f_{rep} = c/Ln$, gdzie L to długość rezonatora (w tym przypadku w konfiguracji rezonatora pierścieniowego), n to współczynnika załamania, którego doświadcza wiązka propagująca się w tym rezonatorze, c to prędkość światła w próżni. Kolejne zdudnienia są harmonicznymi częstotliwości f_{rep} . Czujnik zaprojektowany przeze mnie wykorzystuje tę unikalną własność laserów typu ML do wykrywania indukowanych zmian WZ. Schemat czujnika przedstawiono na rysunku Rys. 6a.



Rys. 6. (a) - schemat fototermicznego czujnika gazu z odczytem zmian współczynnika załamania przy wykorzystaniu lasera z pasywną synchronizacją modów. PD - fotodioda, FC - sprzęgacz światłowodowy 99/1%, Er^{3+} - światłowód domieszkowany erbem, WDM - multiplekser z podziałem długości fali, PUMP - laser 980 nm, CIR - cyrkulator światłowodowy, SESAM – nasycalne zwierciadło typu SESAM, COLL - kolimator światłowodowy, F - filtr, DM - lustro dichroiczne. Komórka absorpcyjna o długości 10 cm. Widmo sygnału fotodetektora obserwowane w okolicy $f_{rep} = 42,45$ MHz, dla przypadku lasera pompującego odstrojonego poza linię CO_2 - (b), oraz dostrojonego do linii absorpcyjnej - (c).

Głównym elementem czujnika jest nieskomplikowany światłowodowy laser z rezonatorem pierścieniowym, w którym pasywną synchronizację modów wymusiłem poprzez zastosowanie komercyjnego nasycalnego zwierciadła typu SESAM, które wklejone było bezpośrednio na ferulę światłowodową (koszt około 100 euro). Laser zawiera ośrodek aktywny w postaci włókna domieszkowanego jonami erbu, które pompowane jest jednomodową diodą laserową o długości fali 980 nm. W układzie zastosowałem cyrkulator, który gwarantuje jednokierunkową propagację w rezonatorze oraz pozwala w wygodny sposób włączyć do układu zwierciadło SESAM.

²² Hofer, M., Ober, M. H., Haberl, F. & Fermann, M. E. Characterization of ultrashort pulse formation in passively mode-locked fiber lasers. IEEE Journal of Quantum Electronics 28, 720–728 (1992).

Część wiązki (1%) jest wyprowadzana poza rezonator sprzęgaczem w celu analizy parametrów pracy lasera, przy wykorzystaniu fotodiody (zwykła fotodioda InGaAs). Rezonator lasera jest wykonany w całości w technologii światłowodowej, poza jednym odcinkiem, w którym wiązkę wyprowadzono poza włókno z wykorzystaniem dwóch kolimatorów. W tej sekcji umieszczona została 10 cm komórka absorpcyjna, przez którą płynęła mierzona próbka gazu. Czułość detekcji układu przebadano z wykorzystaniem referencyjnych mieszanek CO₂ w azocie. Gaz wzbudzany był przez skonstruowane przeze mnie przestrajalne źródło laserowe o długości fali ~ 2003 nm, którego emisja pokrywała się z linią R18 (pasma $2\nu_1 + \nu_3$) CO₂. Maksymalna moc wyjściowa lasera wynosiła 100 mW. Laser *pompujący* był modulowany przebiegiem sinusoidalnym $f_0 = 2$ kHz, w celu uproszczenia obróbki sygnału spektroskopowego. Idea wykrywania gazu w tej konfiguracji czujnika polega na wykorzystaniu bezpośredniej zależności pomiędzy częstotliwością repetycji lasera ML a długością drogi optycznej w jego rezonatorze: $f_{rep} = c/Ln$. Ponieważ mierzona próbka gazu znajduje się wewnątrz rezonatora lasera, zmiana WZ indukowana efektem FT powoduje dewiację f_{rep} , którą można wyraźnie zaobserwować w widmie sygnału fotodetektora (Rys. 6c), w postaci dodatkowych wstęg bocznych wokół nośnej, odpowiadających częstotliwości modulacji lasera *pompującego* oraz kolejnych harmonicznych ($m \cdot f_0$). Ekstrakcja użytecznego sygnału spektroskopowego sprowadzała się w tym przypadku do zdemodulowania sygnału fotodetektora na częstotliwości 42,45 MHz (analogowym demodulatorem FM) oraz analizy sygnału elektrycznego z wykorzystaniem nanowoltomierza selektywnego, jak w przypadku klasycznych układów WMS. Porównanie charakterystyk przedstawionych na wykresach na Rys. 6 eksperymentalnie potwierdza kolejną zaletę stosowania FT techniki detekcji gazów – brak tła pomiarowego. Jak widać na wykresie Rys. 6b, jeśli w komórce nie ma gazu lub jeśli laser *pompujący* jest odstrojony poza linię absorpcyjną gazu (czyli nie występuje modulacja WZ gazu), układ nie rejestruje pasożytniczego tła czy szumu (brak wstęg bocznych na częstotliwościach $f_{rep} \pm m \cdot f_0$). Warto zaznaczyć, iż laser ML, skonstruowałem na bazie niekosztownych oraz komercyjnie dostępnych komponentów światłowodowych utrzymujących polaryzację, dzięki temu, po włączeniu lasera o długości fali 980 nm synchronizacja modów występowała samoczynnie (tzw. self-starting mode-lockng). Tym samym układ czujnika nie wymaga żadnych dodatkowych czynności przez przystąpieniem do pomiarów. Z uwagi na fakt, iż moje prace badawcze zakończyły się odkryciem zupełnie nowej metody pomiaru gazów oraz oryginalną konfiguracją czujnika, w publikacji [H4] zawarłem obszerną analizę skonstruowanego czujnika. Umieściłem w niej szczegółowy opis metody oraz w pełni scharakteryzowałem wpływ parametrów lasera *pompującego* (m .in. częstotliwość modulacji, głębokość modulacji, moc optyczna) na amplitudę rejestrowanego sygnału fototermicznego. W pracy wyznaczyłem również limit detekcji układu, który, pomimo zastosowania bardzo krótkiej drogi interakcji laser-gaz (10 cm), wyniósł 10 części na milion dla czasu uśredniania 100 s.

Opracowanie nowej metody detekcji gazów możliwe było wyłącznie poprzez połączenie mojego doświadczenia z zakresu laserowej detekcji gazów oraz wiedzy z zakresu projektowania, budowy oraz uruchamiania laserów z synchronizacją modów, które nabyłem w trakcie doktoratu oraz realizacji wielu projektów badawczych. Opisany w pracy układ przedstawia innowacyjne podejście do problemu próbkowania sygnału spektroskopowego będącego konsekwencją indukowania efektu FT. Zrealizowane prace stanowiły podstawę do dalszego rozwijania mojego autorskiego pomysłu, a liczba cytowań świadczy o realnym wkładzie w rozwój dziedziny czujników gazów.

Najistotniejszym wynikiem badań przedstawionych w pracy [H4] był wniosek, że zastosowanie odpowiedniej konfiguracji lasera z pasywną synchronizacją modów w połączeniu z technologią światłowodową, pozwala na nieskomplikowane zakodowanie użytecznego sygnału spektroskopowego bezpośrednio w dewiacji częstotliwości – bez konieczności wykorzystania np. drogich przesuwników częstotliwości, czy budowania mikrolaserów na ciele stałym. Ponadto, udowodniłem, iż ekstrakcja użytecznego sygnału spektroskopowego jest procesem nieskomplikowanym, wymagającym standardowej demodulacji FM oraz klasycznej detekcji fazoczułej, często stosowanej w czujnikach gazów bazujących na technice WMS.

Dzięki temu, czujnik staje się wysoce niewrażliwy na losowe zmiany amplitudy promieniowania docierającego do detektora, a analiza sygnału spektroskopowego może odbywać się przy wykorzystaniu dobrze poznanych oraz udoskonalonych metod oraz narzędzi.

Czujnik opisany w pracy [H4] posiada wiele usprawnień w porównaniu zarówno do układów z prac [H1], [H2] oraz [H3], jak również do czujników gazów bazujących na efekcie FT opublikowanych przez inne grupy badawcze. W efekcie realizacji badań nad układem [H4]:

- zaproponowałem nową metodę detekcji gazów, umożliwiającą zakodowanie sygnału spektroskopowego w częstotliwości,
- w pracy wykazałem, iż analiza FT sygnałów spektroskopowych zakodowanych w dewiacji częstotliwości może być realizowana poprzez zastosowanie dedykowanego demodulatora, tym samym omijając konieczność stosowania zaawansowanej aparatury,
- unikatowa konfiguracja bazująca na wykorzystaniu lasera z pasywną synchronizacją modów pozwoliła na uproszczenie konstrukcji czujnika oraz wyeliminowanie konieczności stosowania modulatora akusto optycznego w celu uzyskania częstotliwościowego odczytu sygnału,
- zaproponowana konfiguracja czujnika jest uniwersalna i pozwala na pomiar dowolnego gazu, poprzez wymianę optyki sprzęgającej wiązki oraz lasera *pompującego*.

Powyższe osiągnięcia stanowią o istotnym wkładzie prac habilitanta w rozwój dziedziny.

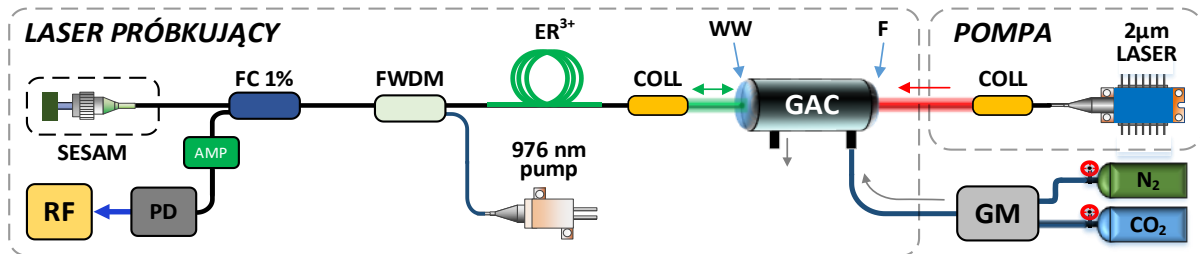
Mój wkład w powstanie pracy [H4] polegał na zainicjowaniu nowego wątku badawczego, opracowaniu nowej metody detekcji gazów, opracowaniu hipotezy badawczej, pozyskaniu finansowania, zaplanowaniu badań, budowie układu eksperymentalnego, przeprowadzeniu eksperymentów, analizie wyników oraz przygotowaniu manuskryptu. Swój udział procentowy w powstanie pracy [H4] szacuję na 90 %.

W trakcie realizacji eksperymentów opisanych w pracy [H4] zauważyłem kluczową wadę tego typu konfiguracji, wynikającą z konieczności stosowania pierścieniowego układu rezonatora lasera z synchronizacją modów. Proces sprzęgania wiązki *pompującej* do komórki absorpcyjnej oraz kolinearne przekrywanie jej z wiązką *miarową* oscylującą w rezonatorze był czasochłonny, a zmiana lasera *pompującego* wymagała najczęściej wymiany zwierciadła dichroicznego, które sprzęgało obie wiązki. Problem ten został przeze mnie rozwiązany w kolejnej, ulepszonej konfiguracji czujnika opisanej w pracy [H5], w której przedstawiłem pierwszą na świecie demonstrację czujnika fototermicznego bazującego na liniowej konfiguracji lasera z synchronizacją modów.

[H5] **Karol Krzempek**, P. Jaworski, P. Bojęś, and P. Kozioł, "Photothermal gas detection using a mode-locked laser signal readout," *Journal of Lightwave Technology* **40**(13), 4436–4442 (2022).
IF₂₀₂₁ = 4,439

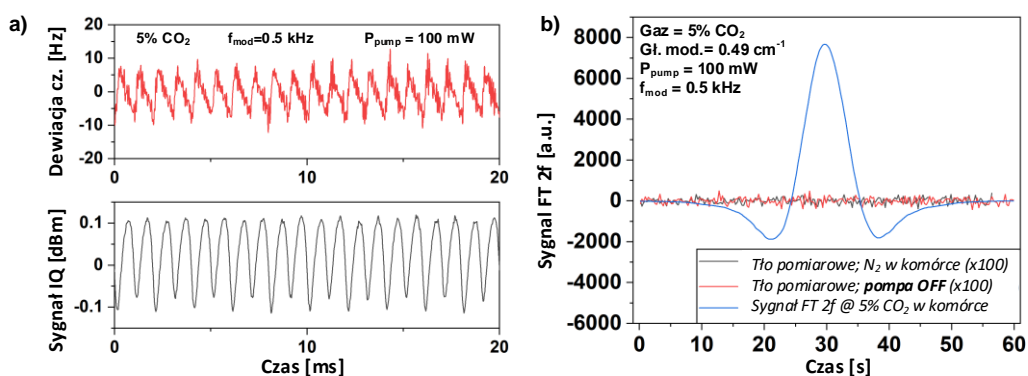
Moje prace skupiły się na opracowaniu oraz skonstruowaniu nowego czujnika gazu, który wyróżniałby się uproszczoną konstrukcją. Znaczną część czasu poświęciłem również na zmodyfikowanie metod obróbki FT sygnałów spektroskopowych (zastosowanie demodulacji IQ), czego efektem jest poprawa detekcyjności. W pracy [H5] opisałem jest pierwszą na świecie demonstrację czujnika gazu wykorzystującego liniowy układ lasera typu ML oraz efekty FT. Konfigurację przedstawiono na schemacie Rys. 7. Głównym elementem układu jest laser z pasywną synchronizacją modów w konfiguracji rezonatora liniowego. Konstrukcja układu lasera *próbkującego* jest mniej skomplikowana w porównaniu do układu z pracy [H4]. W konstrukcji wykorzystałem część elementów z poprzedniego czujnika (zwierciadło SESAM, włókno aktywne, fotodetektor, sprzęgacz) oraz ten sam laser *pompujący*, co pozwoliło mi na bezpośrednie porównanie parametrów obu układów. W tym czujniku, laser *pompujący* wprowadzany jest do komórki absorpcyjnej przez filtr (F), przeciwbieżnie do rezonującej wiązki lasera ML (filtr posiadał duże odbicie dla fali 1560 nm oraz niewielkie straty dla fali 2 μm).

Z uwagi na liniowy rezonator lasera ML, częstotliwość repetycji można wyznaczyć równaniem $f_{rep} = c/2Ln$, a jej zmianę, będącą efektem modulacji WZ gazu jako $\Delta f = -(c\Delta n)/(2Ln^2)$. Prostsza konstrukcja lasera ML bezpośrednio przełożyła się na mniejszy szum układu, co w połączeniu z zaimplementowaniem przez mnie nową metody analizy sygnału dewiacji częstotliwości zaowocowało uzyskaniem 15 razy lepszego limitu detekcji, w porównaniu do układu opisanego w pracy [H4].



Rys. 7. Schemat fototermicznego czujnika gazu bazującego na laserze z synchronizacją modów z liniowym rezonatorem. RF – analizator widma RF, PD – fotodiody, FC – sprzęgacz światłowodowy 99/1%, Er^{3+} – światłowod domieszkowany erbem, FWDM – multiplexer z podziałem długości fali, PUMP – laser 976 nm, AMP – wzmacniacz RF, SESAM – nasycalne zwierciadło typu SESAM, COLL – kolimator światłowodowy, F – filtr, WW – okno z materiału BK7, GM – mieszacz gazów, GAC – komórka absorpcyjna o długości 20 cm.

Limit detekcji wyniósł 6,2 ppmv oraz 636 ppbv, dla czasów uśredniania odpowiednio 1 s i 100 s, a liniowość pomiaru koncentracji gazu wyniosła $R^2 = 0,997$. Pracę [H5] uzupełniłem o pełną analizę wpływu parametrów pompy na amplitudę rejestrowanego sygnału (głębokość modulacji, częstotliwość modulacji, moc optyczna) oraz eksperymentalnie potwierdziłem zysk z zastosowania odmiennej metody ekstrakcji sygnału spektroskopowego – demodulacji IQ, w porównaniu do demodulacji FM (zastosowanej w pracy [H4]). W celu usprawnienia procesu demodulacji, uproszczenia realizacji pomiarów i zapewnienia ich powtarzalności, stworzyłem w środowisku LabView kompletne narzędzie do analizy sygnałów FT, które odpowiedzialne było za komunikację z analizatorem widma RF (Rohde-Schwarz, FSV3000) oraz pobieranie danych o zdemodulowanym sygnale w formie cyfrowej, w celu dalszej obróbki na komputerze stacjonarnym. Okazało się to kluczowe do opracowania nowej metody detekcji gazów, opisanej w kolejnej pracy [H6]. Czujnik z pracy [H5] został również przebadany przez mnie pod kątem występowania tła pomiarowego, które pojawia się w większości klasycznych metod laserowej detekcji gazów, np. w technikach TDLAS i WMS²³. Wyniki pomiarów przedstawione są na Rys. 8.



Rys. 8. (a) – Porównanie sygnału zdemodulowanego z wykorzystaniem demodulatora FM (górny wykres) oraz demodulatora IQ (dolny wykres). (b) – wykres przedstawiający zarejestrowany sygnał FT 2f oraz tło pomiarowe czujnika.

²³ Wang, Z., Fu, P. & Chao, X. Laser Absorption Sensing Systems: Challenges, Modeling, and Design Optimization. Applied Sciences 9, 2723 (2019).

Poprzez odpowiednie zaprojektowanie czujnika oraz zastosowanie częstotliwościowej metody analizy sygnału spektroskopowego, w układzie nie występuje tło pomiarowe. Dzięki temu, skonstruowany czujnik umożliwia bardzo długie uśrednianie sygnału, co udowodniłem eksperymentalnie w pracy [H5], uzyskując limit detekcji 111 części na miliard (ppbv) dla czasu uśredniania równego 1000 s.

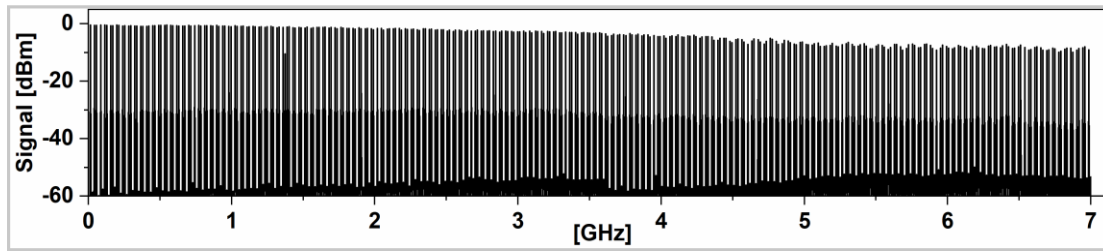
Nowa konfiguracja czujnika z pracy [H5] okazała się nie tylko bardziej czuła, mniej skomplikowana w budowie oraz bardziej kompaktowa, lecz wymagała wykorzystania mniejszej liczby komponentów światłowodowych do jego budowy. Ponadto, zastosowanie liniowego układu rezonatora skutkuje znacznym uproszczeniem procedury justowania wiązki lasera *pompującego* kolinearnie względem wiązki *próbkującej* (wiązki lasera z synchronizacją modów). W porównaniu do pracy [H4], układ w pracy [H5] posiada również wyraźnie wyodrębnione zasadnicze części układu – pomiarową oraz wzbudzającą. Jest to znaczący postęp w stosunku do poprzedniej konfiguracji, w którym zmiana mierzonego gazu wymagała ingerencji w układ lasera z synchronizacją modów, co stanowi o oryginalnym i istotnym wkładzie w rozwój dziedziny.

Mój wkład w powstanie pracy [H5] polegał na opracowaniu hipotezy badawczej, opracowaniu nowej konfiguracji czujnika gazów, pozyskaniu finansowania, zaplanowaniu badań, budowie układu eksperymentalnego, przeprowadzeniu eksperymentów, analizie wyników oraz przygotowaniu manuskryptu. Swój udział procentowy w powstaniu pracy [H4] szacuję na 85 %.

Największym problemem w układzie opisanym w pracy [H5] okazało się dobranie odpowiedniego elementu optycznego, który pozwalałby na wprowadzanie promieniowania lasera *pompującego* z niskimi stratami, jednocześnie zapewniając możliwie duże odbicie dla rezonującego promieniowania lasera *próbkującego*. W układzie tym zastosowałem optyczny filtr górnoprzepustowy. Element przepuszczał około 90% wiązki lasera *pompującego* o długości fali 2 μm , a dla fali 1560 nm posiadał odbicie około 80%. Taka konfiguracja umożliwiała pomiar gazów posiadających widma absorpcyjne jedynie w paśmie od około 1,8 μm do 2,5 μm , znacząco ograniczając wszechstronność układu. W kolejnej pracy rozwiązałem ten problem, oraz dodatkowo zaproponowałem nową metodę demodulacji sygnału, która przełożyła się na polepszenie detekcyjności czujnika.

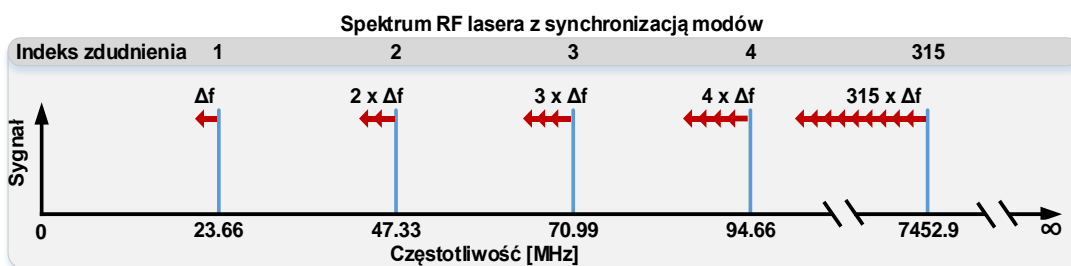
[H6] **Karol Krzempek**, "Sensitive mid-infrared photothermal gas detection enhanced by self-heterodyne harmonic amplification of a mode-locked fiber laser probe," *Optics Express* **30**(17), 31354–31366 (2022). **IF₂₀₂₁ = 3,833**

W trakcie realizacji badań nad układami opisanymi w pracach [H4] i [H5], poczyniłem ważną obserwację, która stanowiła podstawę do opracowania oraz eksperymentalnego zweryfikowania nowej metody FT detekcji gazów przy wykorzystaniu laserów z synchronizacją modów. Nowa metoda została przeze mnie nazwana Self Heterodyne Harmonic Amplification (SHHA) i polega na analizie wyższych harmonicznym zduńnięć lasera typu ML, w celu zwielokrotnienia czułości czujników gazów bazujących na tej unikalnej metodzie pomiaru. Odkrycie oraz aplikacyjne zastosowanie przeze mnie tej metody możliwe było dzięki swoistej własności laserów ML, która jest bezpośrednią konsekwencją koegzystencji tysięcy zsynchronizowanych ze sobą modów podłużnych w ich wnętrzu. W efekcie, w widmie elektrycznym fotodiody analizującej promieniowanie odsprężane z wnętrza odnaleźć można ciąg zduńnięć - charakterystyczny grzebień częstotliwości. Widmo RF zarejestrowane dla lasera z pracy [H6] przedstawiono na Rys. 9.



Rys. 9. Widmo RF zarejestrowane dla lasera typu ML wykorzystanego w FT czujniku gazów w pracy [H6].

Odstęp międzymodowy (oraz repetycja lasera) zależy od drogi optycznej rezonatora, zgodnie z przytoczonym wcześniej równaniem: $f_{rep} = c/2Ln$. W zaproponowanej przeze mnie metodzie SHHA kluczowy jest jednakże wpływ drogi optycznej rezonatora na częstotliwość kolejnych harmonicznych, w odróżnieniu od podejścia stosowanego w pracach [H4] i [H5], gdzie demodulowany był sygnał pierwszej harmonicznej. Ideę działania metody SHHA zobrazowano na rysunku Rys. 10.

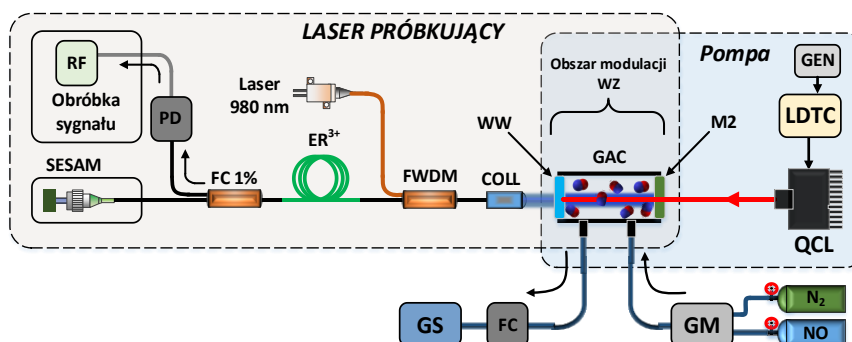


Rys. 10. Idea działania metody detekcji SHHA.

Z moich obserwacji poczynionych w trakcie realizacji eksperymentów z czujnikami gazów bazującymi na laserach typu ML wynikało, iż indukowana FT zmiana WZ wewnątrz takiego lasera ma wpływ również na kolejne zdudnienia lasera ML, a amplituda tej zmiany jest iloczynem zmiany obserwowanej na pierwszej harmonicznej oraz indeksu zdudnienia (H), co opisuje poniższe równanie:

$$\Delta f_{harm} = -H \frac{\Delta n \cdot c}{2L \cdot n^2} \quad (8)$$

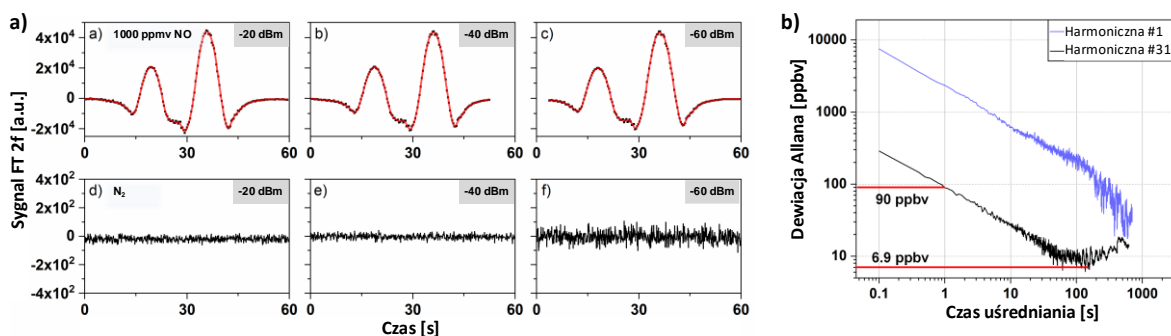
Zgodnie z tą zależnością, dziewiąta częstotliwość obserwowana np. na setnej harmonicznej ma stukrotnie większą amplitudę niż obserwowana na pierwszej harmonicznej (f_{rep}). W czujniku z pracy [H6] częścią zasadniczą jest układ lasera z pasywną synchronizacją modów z liniowym rezonatorem, w układzie podobnym do eksperymentu z pracy [H5]. Schemat czujnika przedstawiono na Rys. 11.



Rys. 11. Schemat układu FT czujnika gazu bazującego na laserze z pasywną synchronizacją modów. RF – analizator widma RF, PD – fotodetektor, SESAM – nasycalne zwierciadło typu SESAM, FC1% – sprzęgacz światłowodowy, Er³⁺ - światłowód domieszkowany erbem, FWDM - multiplexer z podziałem długości fali, COLL - kolimator, WW – okienko z BK7, M2 – okienko CaF₂, GM – mieszacz gazów, GAC - komórka absorpcyjna o długości 20 cm, FC – kontroler przepływu gazu, GS – pługiczka gazowa, QCL – kwantowy laser kaskadowy na 5,26 μm. GEN – generator funkcyjny, LDTC – sterownik lasera.

W układzie eksperymentalnym z pracy [H6] optyczny filtr górnoprzepustowy zastąpiłem okienkiem o grubości 1 mm, wykonanym z fluorku wapnia (ang. calcium fluoride, CaF_2) z naniesionym zwierciadłem dielektrycznym na zakres fali $\sim 1,55 \mu\text{m}$ (M2). Zastosowanie tego elementu pozwoliło mi na uzyskanie dużego odbicia wymaganego dla stabilnej pracy lasera ML, jednocześnie pozwalając na sprzężanie do komórki absorpcyjnej wiązki *pompującej* o długościach fali z zakresu od $1,6 \mu\text{m}$ do $9 \mu\text{m}$. W tym czujniku, jako laser pompujący zastosowałem kwantowy laser kaskadowy, który pozwalał na wzbudzenie oraz pomiar tlenku azotu (NO) na długości fali $5,26 \mu\text{m}$.

W pracy [H6] szczegółowo przebadłem jedną z najważniejszych cech autorskich konstrukcji czujników – niewrażliwość czujnika na losowe zmiany amplitudy sygnału fotodetektora. Eksperymentalna weryfikacja przedstawiona jest na serii wykresów na Rys. 12a.



Rys. 12. (a) – Seria pomiarów weryfikująca niewrażliwość opracowanej metody detekcji gazów na losowe zmiany amplitudy sygnału fotodetektora. Obniżenie poziomu sygnału elektrycznego z -20 dBm do -60 dBm nie miało wpływu na rejestrowany sygnał spektroskopowy. (b) – poprawa limitu detekcji czujnika poprzez zastosowanie metody SHHA zobrazowana na wykresie dewiacji Allana.

W pracy [H6] przeanalizowałem również korelację pomiędzy amplitudą rejestrowanego sygnału FT oraz szumu czujnika a indeksem harmonicznej f_{rep} lasera ML, na której demodulowany jest sygnał spektroskopowy oraz zawarłem obszerną analizę procesu optymalizacji parametrów pracy czujnika w celu uzyskania najwyższego poziomu sygnału fototermicznego. Poza zaproponowaniem nowego sposobu ekstrakcji sygnałów, w układzie z pracy [H6] zmianie uległa również metoda detekcji dewiacji częstotliwości zdudnień. Zamiast demodulacji IQ wykorzystałem w tym czujniku detekcję modulacji fazy, która przełożyła się na osiągnięcie lepszych limitów detekcji nowej konfiguracji czujnika.

Jak wykazałem w pracy [H6], zastosowanie nowej metody SHHA do ekstrakcji FT sygnału spektroskopowego pozwoliło na uzyskanie limitu detekcji o 22 razy lepszego w porównaniu do metody bazującej na analizę dewiacji częstotliwości pierwszej harmonicznej lasera ML, rozwijanej przeze mnie w pracach [H4] i [H5]. Limit detekcji wyniósł 6,9 ppbv dla czasu uśredniania 136 s (różnica zobrazowana jest na wykresie na Rys. 12b). Warto tutaj zwrócić uwagę na fakt, iż zastosowanie nowej metody nie wymaga żadnej ingerencji w konstrukcję czujnika FT, a uzyskanie lepszych detekcyjności możliwe było poprzez odpowiednią modyfikację układu demodulacji oraz autorskiego oprogramowania użytego do obliczania szybkiej transformaty Fouriera i obróbki sygnałów spektroskopowych.

Opracowana przeze mnie modyfikacja układu pozwoliła tym samym w pełni wykorzystać najważniejsze cechy FT czujników gazów:

- możliwość realizacji pomiarów w kilku zakresach spektralnych przy wykorzystaniu uniwersalnej konstrukcji czujnika,
- możliwość odseparowania części pomiarowej układu od części wzbudzającej gaz,
- możliwość zakodowania sygnału spektroskopowego w dewiacji częstotliwości.

Eksperymenty opisane w pracach [H4]-[H6] dokumentują nowe metody detekcji gazów oraz autorskie konfiguracje habilitanta. Efektem stopniowego rozwijania tej metody jest konfiguracja czujnika, który wykorzystuje wszystkie największe zalety FT czujników gazów. Jego najważniejsze cechy to:

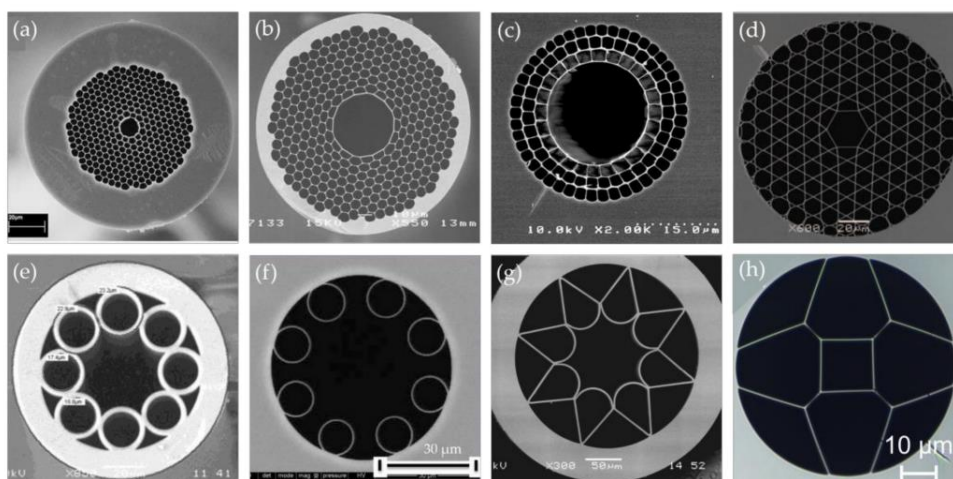
- duża czułość (limit detekcji 6,9 ppbv przy wykorzystaniu komórki absorpcyjnej o długości zaledwie 20 cm),
- możliwość detekcji dowolnego gazu o liniach absorpcyjnych z zakresu 1 μm do 9 μm ,
- relatywnie nieskomplikowana konstrukcja wykorzystująca ogólnodostępne komponenty światłowodowe,
- wykorzystanie detektora typu InGaAs oraz wyeliminowanie konieczności stosowania komórki wieloodbiciowej, co ogranicza koszty zestawienia czujnika.

Prace habilitanta opisane w pracach [H4]-[H6] wyznaczają zupełnie nowy kierunek rozwoju laserowych metod detekcji gazów przy zastosowaniu efektów fototermicznych, tym samym stanowią istotny wkład w rozwój dziedziny nauki. Dalsze prace nad poprawą czułości FT czujników bazujących na laserach ML skupiać się będą na użyciu stabilnych wzorców częstotliwości (zarówno RF, jak i optycznych). Opracowana przez habilitanta metoda detekcji gazów umożliwi tym samym pełne wykorzystanie potencjału światłowodowych laserów z synchronizacją modów, oraz pozwoli na aplikacyjne zastosowanie infrastruktury polskiego wzorca częstotliwości, która powstaje obecnie w ramach Narodowego Laboratorium Fotoniki i Technologii Kwantowych.

4.2.2 Układy fototermicznej detekcji gazów z wykorzystaniem antyrezonansowych włókien światłowodowych,

Prace analityczno – eksperymentalne opisane w tej części skupiały się na rozwiązaniu drugiego największego ograniczenia FT czujników gazów – optymalizacji przekrycia wiązki *pompującej* oraz *wzbudzającej*. Poniższe prace dokumentują wkład habilitanta w rozwój fototermicznych czujników gazów wykorzystujących nowe typy włókien światłowodowych z rdzeniem powietrznym w roli kompaktowych komórek absorpcyjnych. Jak zostało wykazane przeze mnie eksperymentalnie, opracowanie nowych konfiguracji, które umożliwiają zastosowanie włókien z rdzeniem powietrznym okazało się kluczowe w celu poprawy detekcyjności czujników gazów bazujących na efektach fototermicznych.

Włókna światłowodowe z rdzeniem powietrznym (ang. Hollow Core Fiber, HCF) prowadzą promieniowanie wewnątrz pustego rdzenia, wykorzystując szereg efektów fizycznych, m. in. takich jak fotoniczna przerwa wzbroniona czy efekt Bragga. W ciągu ostatnich dwóch dekad opracowano wiele różnych włókien typu HCF, z których część przedstawiono na Rys. 13.



Rys. 13. Zdjęcia SEM różnych typów włókien światłowodowych z rdzeniem powietrznym²⁴. (a) – włókno z fotoniczną przerwą wzbronioną, (b) - włókno typu HCF na zakres średniej podczerwieni, (c) – włókno bazujące na efekcie Bragga, (d) – włókno Kagome, (e) – (h) – włókna antyrezonansowe o różnej budowie płaszczka.

²⁴ Yu, R., Chen, Y., Shui, L. & Xiao, L. Hollow-Core Photonic Crystal Fiber Gas Sensing. Sensors 20, 2996 (2020).

Średnica rdzenia powietrznego światłowodów typu HCF może wynosić od kilku do kilkuset mikrometrów, w zależności od mechanizmu prowadzenia wiązki oraz transmitowanej długości fali. Przy zastosowaniu odpowiedniej technologii, rdzeń powietrzny można w nieskomplikowany sposób napełnić próbką gazu, dzięki czemu propagująca się w takim światłowodzie wiązka laserowa może oddziaływać z mierzonymi cząsteczkami na całej długości światłowodu, tworząc kompaktową komórkę absorpcyjną. Stosując dłuższe odcinki światłowodów typu HCF można z powodzeniem zastąpić wieloodbiciowe komórki absorpcyjne, jednocześnie ograniczając objętość mierzonego gazu do zaledwie mikrolitrów²⁵.

W roku 2018 zainicjowałem prace nad nowym wątkiem badawczym na Politechnice Wrocławskiej, mianowicie nad badaniem możliwości wykorzystania światłowodów typu HCF w czułej detekcji gazów z wykorzystaniem spektroskopii laserowej. Z uwagi na brak komercyjnie dostępnych włókien HCF na zakres spektralny średniej podczerwieni rozpocząłem współpracę z firmą GloPhotonics (Francja). W efekcie współpracy firma dostarczyła prototypowe włókno typu Kagome, które pomimo stosunkowo dużych strat, wykorzystałem w moich eksperymentach, w roli światłowodowej komórki absorpcyjnej. Wyniki prac zostały opublikowane, i wnioskuje po liczbie cytowań, cieszą się dużym zainteresowaniem grona naukowego [B10],[B11]. Podczas realizacji tych prac eksperymentalnych zidentyfikowałem dwa główne ograniczenia będące konsekwencją stosowania komercyjnie dostępnych włókien typu HCF. Pierwszym jest wąskie pasmo transmisji, ograniczające zakres pracy czujników do długości fali $< 3,6 \mu\text{m}$. Drugim ograniczeniem jest wielomodowa transmisja, przez co zastosowanie takich włókien jako komórki absorpcyjnej w układach czujników typu WMS lub TDLAS wymaga stabilnych, laboratoryjnych warunków, ze względu na szum pojawiający się od zdudnień międzymodowych.

Prawdziwą rewolucję w tej dziedzinie przyniosło opracowanie nowych typów włókien z rdzeniem powietrznym, tzw. antyrezonansowych włókien fonicznych (ang. Antiresonant Hollow Core Fiber, ARHCF), które przy odpowiedniej konfiguracji kapilar pozwalają na transmitowanie promieniowania z pasma średniej podczerwieni. Wynika to z faktu, iż we włóknach ARHCF mechanizm prowadzenia wiązki znacząco odbiega od mechanizmu wykorzystanego w klasycznych włóknach HCF i polega na efekcie anty-rezonansu (ang. Antiresonant reflective optical waveguide, ARROW)²⁶. Ścianki kapilar tworzących strukturę włókna stanowią dla propagującej się wewnątrz wiązki mikrorezonatory FP. Długości fali pokrywające się z rezonansem FP sprzęgają się więc do szklanych kapilar, dalej do płaszcza, gdzie są tłumione. Długości fali nie będące w rezonansie z FP kapilar są „uwięzione” wewnątrz rdzenia powietrznego i propagują się z niewielkimi stratami. W konsekwencji, prowadzona wiązka posiada bardzo małe przekrycie ze strukturą formującą rdzeń powietrzny (szklanymi kapilarami - płaszczem). Dzięki temu, włókna ARHCF można wyciągać np. ze szkła krzemionkowego, a poprawne zaprojektowanie struktury zapewniają transmisję promieniowania nawet z pasma średniej podczerwieni, przy relatywnie niskich stratach (poniżej pojedynczych dB na metr dla długości fali $\sim 6 \mu\text{m}$ ²⁷).

Naturalną kontynuacją moich prac nad układami czujników gazów były próby integrowania włókien typu ARHCF jako komórek absorpcyjnych w układach laserowych czujników gazów, w tym układów fototermicznych. Z uwagi na fakt, iż włókna ARHCF na zakres $> 3 \mu\text{m}$ nie były dostępne komercyjnie w czasie realizacji eksperymentów, kontynuacja prac badawczych wymagała nawiązania ścisłej współpracy z zagranicznymi ośrodkami, które posiadają wiedzę w zakresie projektowania oraz wyciągania włókien typu ARHCF.

²⁵ Jaworski, P. et al. Sub parts-per-billion detection of ethane in a 30-meters long mid-IR Antiresonant Hollow-Core Fiber. *Optics & Laser Technology* 147, 107638 (2022).

²⁶ Renversez, G., Boyer, P. & Sagrini, A. Antiresonant reflecting optical waveguide microstructured fibers revisited: a new analysis based on leaky mode coupling. *Opt. Express*, OE 14, 5682–5687 (2006).

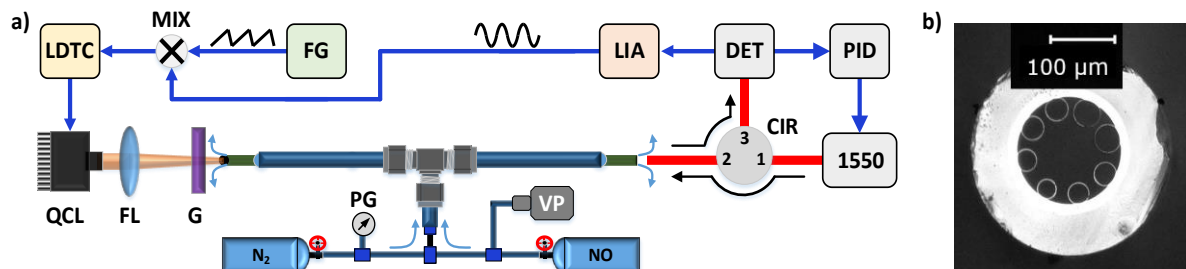
²⁷ Deng, A. & Chang, W. Geometrical Scaling of Antiresonant Hollow-Core Fibers for Mid-Infrared Beam Delivery. *Crystals* 11, 420 (2021).

W 2019 roku, wraz z dr Piotrem Jaworskim nawiązałem współpracę z jednostkami badawczymi z Francji (Uniwersytet w Lille) oraz z Chin (Shanghai Institute of Fine Optics and Mechanics). Efektem są międzynarodowe projekty badawcze [P1], [P6], [P9], w ramach których partnerzy dostarczali włókna o parametrach niezbędnych do prowadzenia pionierskich prac nad układami laserowych czujników gazów, w tym również nad czujnikami wykorzystującymi efekt FT. Rezultatem realizowanych projektów oraz międzynarodowej współpracy jest opracowanie przeze mnie serii unikatowych układów czujników gazów, które stanowią istotny wkład w rozwój laserowej spektroskopii gazów. Wśród opublikowanych prac odnaleźć można konfiguracje, w których zademonstrowałem połączenie włókien typu ARHCF oraz metod fototermicznej detekcji gazów.

Kolejną pracą z cyklu habilitacyjnego jest:

[H7] **Karol Krzemppek**, P. Jaworski, P. Kozioł, and W. Belardi, "Antiresonant hollow core fiber-assisted photothermal spectroscopy of nitric oxide at 5.26 μm with parts-per-billion sensitivity," *Sensors and Actuators B: Chemical* **345**, 130374 (2021). IF₂₀₂₁ = **9,221**

W pracy [H7] zademonstrowałem pierwszy na świecie fototermiczny czujnik gazu bazujący na włóknie typu ARHCF, który umożliwiał wykrywanie gazów o liniach absorpcyjnych powyżej 4,5 μm . Schemat skonstruowanego czujnika NO przedstawiono na rysunku Rys. 14a.



Rys. 14. (a) - schemat czujnika FT z komórką absorpcyjną na bazie włókna ARHCF. LDTC – kontroler lasera, G – okienko germanowe, QCL – laser kaskadowy, FL – soczewka, MIX – mikser RF, FG – generator funkcyjny, PG – odczyt ciśnienia, LIA – wzmacniacz fazoczuły, DET – fotodetektor, PID – kontroler PID, CIR – cyrkulator światłowodowy, VP – pompa, 1550 – światłowodowy laser DFB o długości fali 1550 nm. (b) - Przekrój włókna ARHCF zastosowanego w eksperymencie.

Komórkę absorpcyjną stanowiło w tym eksperymencie włókno ARHCF o długości 25 cm, które dostarczone zostało przez partnerów z Uniwersytetu w Lille. Włókno było napełniane mierzoną próbką gazu przy zastosowaniu autorskiego rozwiązania łączącego laserową mikroobróbkę oraz komercyjnie dostępne elementy Swagelok®. Część czujnika odpowiedzialna za próbkowanie skonstruowana była jako interferometr FP, przy wykorzystaniu ogólnodostępnych i tanich komponentów światłowodowych. Laserem *próbkującym* (sprzęganym do wnętrza FP) był standardowy laser DFB o długości fali 1550 nm. Ponadto, w układzie wykorzystałem metodę wprowadzania promieniowania *próbkującego* do komórki z pominięciem optyki objętościowej, przy wykorzystaniu tzw. Butt-coupling, co okazało się kluczowe w celu osiągnięcia rekordowych limitów detekcji przy zapewnieniu bardzo krótkiej drogi interakcji laser-gaz oraz niewielkiego stopnia skomplikowania czujnika. Metoda ta pozwoliła mi na zbudowanie rezonatora FP w oparciu o odbicie Fresnela na płasko ściętej końcówce światłowodu SMF28 oraz na okienku z germanu, przez które od drugiego końca wprowadzałem promieniowanie *wzbudzające*. Dzięki temu, włókno ARHCF można było w nieskomplikowany sposób napełnić gazem oraz jednocześnie propagowała się w nim wiązka *wzbudzająca* gaz oraz wiązka laserowa *próbkująca* zmiany WZ indukowane efektem FT. Wiązka opuszczająca rezonator FP była zbierana tym samym światłowodem SMF28 i kierowana do fotodiody typu InGaAs, która analizowała jej amplitudę. Wzbudzenie gazu wewnątrz włókna ARHCF modulowało jego WZ, a tym samym drogę optyczną wewnątrz rezonatora FP, co bezpośrednio przekładało się na zmiany intensywności promieniowania rejestrowane przez fotodiodę. Układ wymagał aktywnej stabilizacji rezonatora FP w celu zapewnienia powtarzalności pomiarów oraz długoterminowej stabilności.

W literaturze stabilizacja realizowana jest zazwyczaj poprzez umieszczenie jednego zwierciadła na przetworniku piezoceramicznym (PZT), sterowanym sygnałem błędu²⁸. Rozwiązanie to posiada szereg ograniczeń (koszt, ograniczone pasmo, konieczność stosowania ruchomych elementów, etc.). Podczas prac eksperymentalnych nad układem [H7] za dodatkowy cel postawiłem sobie rozwiązanie powyższego ograniczenia. W zaprojektowanym czujniku wykorzystałem metodę polegającą na stabilizacji długości fali lasera *próbkującego* do wnęki rezonatora FP (a nie wnęki FP do lasera), co znacznie uprościło konstrukcję oraz zapewniało większą stabilność układu przy napełnianiu włókna ARHCF gazem. Zastosowane włókno typu ARHCF umożliwiło transmisję promieniowania z zakresu średniej podczerwieni, aż do długości fali $\sim 6 \mu\text{m}$. Dzięki temu, czujnik umożliwiał m. in. detekcję NO na długości fali $5,26 \mu\text{m}$, tym samym, potwierdziłem najważniejszą zaletę układów fototermicznych – zdolność realizowania pomiarów gazów posiadających silne linie absorpcyjne w paśmie średniej podczerwieni, przy wykorzystaniu prostych i tanich interferometrów próbkujących zmiany WZ gazu. Podobnie jak w poprzednich eksperymentach, długość fali lasera *pompującego* modulowana była przebiegiem sinusoidalnym, aby zastosować fazoczułą detekcję sygnału spektroskopowego.

Jak zademonstrowałem w pracy [H7], zastosowanie włókna ARHCF jako komórki absorpcyjnej rozwiązało największy mankament układów czujników FT, wynikający z konieczności uzyskania długiej drogi interakcji laser-gaz, jednoczesnego utrzymania idealnego przekrycia wiązki *próbkującej* z wiązką *pomiarową* oraz zachowania małych przekrojów tych wiązek. Pole modowe zastosowanego włókna ARHCF wynosi około $80 \mu\text{m}$, co pozwala na uzyskanie dużej gęstości mocy lasera *wzbudzającego* na całej długości interakcji laser-gaz, jednocześnie ograniczając do minimum optykę objętościową. Praca ta stanowi istotny wkład w rozwój dziedziny czujników FT, m.in. z uwagi na:

- pierwszą na świecie demonstrację czujnika FT wykorzystującego włókno z rdzeniem powietrznym jako komórkę absorpcyjną, który umożliwiał pomiar gazów z liniami absorpcyjnymi powyżej długości fali $4,5 \mu\text{m}$,
- zaproponowanie konfiguracji czujnika ograniczającej liczbę komponentów optyki objętościowej poprzez zastosowanie tzw. Butt-coupling wiązki *próbkującej*,
- wykazanie, iż interferometr FP próbkujący zmiany WZ w tego typu czujnikach FT można aktywnie stabilizować z wykorzystaniem pętli sprzężenia zwrotnego sterującego długością fali lasera *próbkującego*,
- opracowanie metod nieskomplikowanego napełniania światłowodowej komórki absorpcyjnej poprzez wykorzystanie komercyjnych komponentów oraz mikroobrobki laserowej,
- wykazanie, iż odpowiednio zaprojektowane włókna ARHCF pozwalają na prowadzenie promieniowania z pasma bliskiej podczerwieni, jak i średniej podczerwieni, przez co konstruowane czujniki mogą w pełni wykorzystać metodę FT detekcji gazów, która pozwala na odseparowanie sekcji *wzbudzającej* od sekcji *próbkującej*.

Praca [H7] zawiera analizę teoretyczną oraz eksperymentalną, m. in.: stabilności interferometru na zmienne warunki ciśnienia gazu, wpływu parametrów lasera *wzbudzającego* na amplitudę rejestrowanego sygnału FT, czy rejestrowanego tła pomiarowego. Przeanalizowałem również liniowość czujnika oraz jego długoterminową stabilność. Limit detekcji NO dla tego czujnika wyniósł 11 ppbv dla 144 s uśredniania.

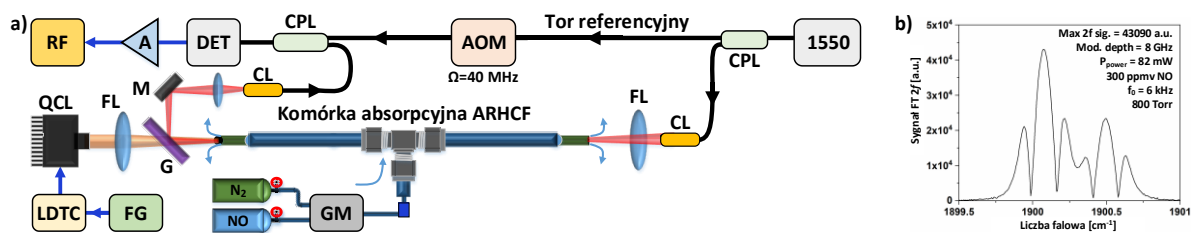
Mój wkład w powstanie pracy [H7] polegał na zainicjowaniu nowego wątku badawczego, opracowaniu hipotezy badawczej, opracowaniu nowej konfiguracji czujnika gazów, pozyskaniu finansowania (wraz z P. Jaworskim), zaplanowaniu badań, budowie układu eksperymentalnego, przeprowadzeniu eksperymentów, analizie wyników oraz przygotowaniu manuskryptu. Swój udział procentowy w powstanie pracy [H7] szacuję na 85 %.

²⁸ Bao, H. et al. Modeling and performance evaluation of in-line Fabry-Perot photothermal gas sensors with hollow-core optical fibers. Opt. Express, OE 28, 5423–5435 (2020).

W trakcie realizacji wyżej opisanych prac zauważyłem, iż odpowiednia modyfikacja układu *próbującego* powinna umożliwić zakodowanie sygnału spektroskopowego w częstotliwości, co jak wykazałem w poprzednich pracach cyklu, powinno przełożyć się na znacznie wyższe detekcyjności czujników. Efekty tych prac badawczych opisałem w publikacji [H8].

[H8] **Karol Krzemppek**, "Part-per-billion level photothermal nitric oxide detection at 5.26 μm using antiresonant hollow-core fiber-based heterodyne interferometry," *Optics Express* **29**(20), 32568–32579 (2021). IF₂₀₂₁ = 3,833

Jest to pierwsza demonstracja wykorzystania częstotliwościowego odczytu FT sygnału spektroskopowego w czujniku wykorzystującym włókno ARHCF do detekcji gazów w paśmie powyżej 4,5 μm . Prace badawcze nad usprawnioną wersją czujnika rozpocząłem od zaprojektowania oraz skonstruowania układu heterodynowego interferometru Macha-Zehndera, bazującego na ogólnodostępnych komponentach światłowodowych. Schemat układu przedstawiono na Rys. 15a.



Rys. 15. (a) - schemat czujnika z heterodynowym odczytem FT sygnału spektroskopowego oraz komórką absorpcyjną na bazie włókna ARHCF. LDTC – kontroler lasera, G – okienko germanowe, QCL – laser kaskadowy, FL – soczewka, M – zwierciadło, FG – generator funkcyjny, GM – mieszacz gazów, RF – analizator widma RF, A – wzmacniacz RF, DET – fotodetektor, AOM – modulator akusto-optyczny, 1550 – światłowodowy laser DFB o długości fali 1550 nm, CPL – sprzęgacz światłowodowy, CL – kolimator. (b) - zarejestrowany sygnał spektroskopowy FT 2f.

W tym czujniku promieniowanie lasera *próbującego* (standardowy laser DFB o długości fali 1550 nm) jest dzielone sprzęgaczem CPL na dwa tory: referencyjny oraz pomiarowy. Wiązka pomiarowa interferometru sprzęgana była do włókna ARHCF służącego w tym układzie jako komórka absorpcyjna. Na wyjściu włókna ARHCF wiązka zbierana była kolimatorem oraz doprowadzana do sprzęgacza światłowodowego (CPL). Częstotliwość wiązki w ramieniu *referencyjnym* interferometru przesunięta była o 40 MHz przy wykorzystaniu modulatora akustooptycznego, a następnie również trafiała do sprzęgacza CPL. Dzięki temu, w sygnale elektrycznym z detektora (DET, fotodiody typu InGaAs) widoczne było zdudnienie na częstotliwości 40 MHz, a indukowana FT zmiana drogi optycznej w ramieniu *pomiarowym* interferometru bezpośrednio przekładała się na dewiację częstotliwości tego zdudnienia. Prosta demodulacja sygnału na nośnej 40 MHz pozwalała na ekstrakcję sygnału spektroskopowego i dalszą obróbkę przy wykorzystaniu autorskiego oprogramowania napisanego w języku LabView. Przeprowadzone eksperymenty wykazały, iż modyfikacja interferometru umożliwiająca częstotliwościowy odczyt zmian WZ okazała się kluczowa w celu poprawy detekcyjności FT czujników gazów bazujących na włóknach typu ARHCF. Czujnik cechował się dobrą liniowością pomiaru ($R^2=0,9989$) oraz limitem detekcji 1,78 ppbv przy 100 s uśredniania, co jest wynikiem prawie o rząd lepszym w stosunku do układu opisanego w pracy [H7]. Na obecną chwilę jest to rekord na skalę światową dla FT czujników bazujących na światłowodowych komórkach absorpcyjnych oraz umożliwiających pomiar gazów w paśmie średniej podczerwieni, w paśmie powyżej 4,5 μm .

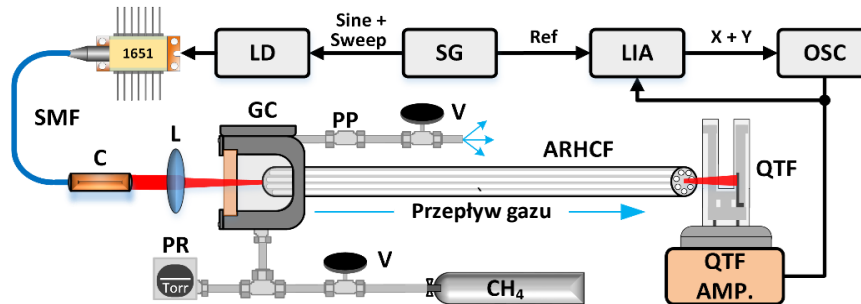
4.2.3 Fototermiczna detekcja gazów z wykorzystaniem rezonatorów kwarcowych oraz antyrezonansowych włókien światłowodowych

W roku 2021 zainicjowałem prace nad nowym wątkiem badawczym w mojej Grupie badawczej – badaniem technik fototermicznej detekcji gazów, która wykorzystuje rezonatory kwarcowe w roli czułych detektorów promieniowania laserowego oraz komórek absorpcyjnych bazujących na włóknach ARHCF.

Pierwsze wyniki eksperymentów opisano w pracy [H9].

[H9] P. Bojęś, P. Pokryszka, P. Jaworski, F. Yu, D. Wu, **Karol Krzempek**, "Quartz-Enhanced Photoacoustic Spectroscopy-Based Methane Detection in an Anti-Resonant Hollow-Core Fiber," *Sensors* **22**(15), 5504 (2022). IF₂₀₂₁ = **3,847**

W pracy [H9] zademonstrowano czujnik, który łączył wszystkie zalety stosowania włókien typu ARHCF jako komórek absorpcyjnych oraz wykorzystywał efekt FT indukowany w rezonatorze kwarcowym do detekcji sygnału spektroskopowego. Schemat układu przedstawiono na Rys. 16.



Rys. 16. Schemat FT czujnika gazów wykorzystującego rezonator kwarcowy jako detektor promieniowania laserowego. SMF – włókno światłowodowe typu SMF28, C – kolimator, L – soczewka, GC – komórka gazowa, 1651 – laser o długości fali 1651 nm, LD – kontroler lasera, SG – generator funkcyjny, LIA – nanowoltomierz fazoczuły, OSC – oscyloskop, QTF – rezonator kwarcowy, AMP – wzmacniacz, V – zawór, PP – zawór wyrównujący ciśnienie, PR – odczyt ciśnienia.

Głównym celem badań było opracowanie konfiguracji czujnika gazu o uproszczonej konstrukcji. W układzie mierzona próbka gazu wprowadzana była do włókna ARHCF o długości 95 cm, a przepływ gazu zapewniony był przez nadciśnienie na jednym z jego końców (800 Torr). Do włókna sprzęgano również wiązkę lasera typu DFB, którego emisja pokrywała się linią absorpcyjną metanu na długości fali 1651 nm. Wiązka opuszczająca światłowód drugim końcem oświetlała konkretnie wybrany punkt na powierzchni rezonatora kwarcowego. Idea działania układu polega tutaj na wykorzystaniu efektu fototermicznego generowanego w strukturze rezonatora kwarcowego. Wiązka oświetlająca rezonator kwarcowy jest częściowo absorbowana przez kwarc, powodując jego lokalne podgrzanie oraz odkształcenie. Wartość tej zmiany zależna jest m.in. od mocy optycznej lasera oraz od długości fali (z uwagi na charakterystykę absorpcji kwarcu). Odkształcenie rezonatora indukowane efektem FT można zaobserwować jako wygenerowane napięcie na jego elektrodach. Kunst tej metody polega na wykorzystaniu charakterystyki rezonansowej rezonatora kwarcowego, która z uwagi na bardzo dużą dobroć (ang. Q-factor) pozwala m. in. na ograniczenie wpływu szumów tła na pomiar²⁹.

Prace eksperymentalne skupiły się na zaprojektowaniu konfiguracji, która umożliwiła by wykorzystanie taniego, zegarkowego rezonatora kwarcowego o częstotliwości rezonansowej $f_{rez} = 32,744$ kHz (zmierzone po zdjęciu obudowy). Długość fali lasera pomiarowego modulowana była przebiegiem sinusoidalnym o częstotliwości równej połowie częstotliwości rezonansowej rezonatora kwarcowego - $f_{rez}/2 = 16,372$ kHz. Pozwoliło to na wykorzystanie techniki detekcji WMS, gdzie analizowana jest amplituda drugiej harmonicznej sygnału. Uzyskanie limitu detekcji CH₄ poziomie 220 ppbv przy czasie uśredniania 100 s było możliwe dzięki zaprojektowaniu, skonstruowaniu oraz wieloetapowej optymalizacji dedykowanego układu wzmacniacza, który zbierał sygnał elektryczny z rezonatora kwarcowego, poddawał go wzmacnieniu oraz filtrowaniu. W pracy [H9] przedstawiono konfigurację, która w pełni wykorzystywała charakterystyczną cechę włókien typu ARHCF – bardzo małą aperturę numeryczną (rzędu 0,02 dla długości fali pomiarowej). Tym samym, czujnik zaprojektowano tak, aby wyeliminować konieczność stosowania optyki objętościowej niezbędnej w tradycyjnych konfiguracjach do odpowiedniego uformowania wiązki padającej na powierzchnię

²⁹ Patimisco, P., Scamarcio, G., Tittel, F. K. & Spagnolo, V. Quartz-Enhanced Photoacoustic Spectroscopy: A Review. *Sensors* (Basel) **14**, 6165–6206 (2014).

detektora. Praca zawiera również pełną analizę wpływu parametrów lasera pomiarowego na amplitudę rejestrowanego sygnału spektroskopowego oraz przebadano liniowość czujnika ($R^2=0,997$). Eksperymentalnie potwierdzono również, iż przepływ mierzonego gazu bezpośrednio w pobliżu rezonatora kwarcowego nie ma negatywnego efektu na amplitudę rejestrowanego sygnału spektroskopowego, szumy czujnika czy jego długoterminową stabilność.

Efektom pracy [H9] jest potwierdzenie szeregu zalet wynikających z umiejętnego połączenia cech FT detekcji gazów, rezonatorów kwarcowych oraz włóknem typu ARHCF, z których ograniczenie objętości próbkowanego gazu oraz możliwość wyeliminowania z układu części optyki objętościowej oraz fotodiody stanowi o potencjale aplikacyjnym skonstruowanego czujnika oraz istotnym wkładzie w rozwój dziedziny.

Mój wkład w powstanie pracy [H9] polegał na zainicjowaniu nowego wątku badawczego, pozyskaniu finansowania (wraz z P. Jaworskim), zaplanowaniu badań, budowie układu eksperymentalnego (wraz z P. Bojęsiem), nadzorowaniu prac eksperymentalnych, analizie wyników, oraz przygotowaniu manuskryptu. Swoją udział procentowy w powstanie pracy [H9] szacuję na 50 %.

Ostatnią pracą z cyklu jest artykuł przeglądowy [H10].

[H10] **Karol Krzempek**, "A review of photothermal detection techniques for gas sensing applications," *Applied Sciences* **9**(14), 2826 (2019). **IF₂₀₂₁ = 2,838**

W artykule szczegółowo opisałem fizyczne podstawy fototermicznej detekcji gazów oraz przedstawiłem kluczowe metody akwizycji sygnałów spektroskopowych w czujnikach wykorzystujących ten efekt. W przeanalizowałem szereg opublikowanych konfiguracji FT czujników gazów oraz porównałem ich detekcyjności, wady oraz zalety. Praca stanowi zbiór wiedzy na temat FT detekcji gazów, przez co jest ona często cytowana przez naukowców pracujących nad tego typu czujnikami.

Artykuł przeglądowy [H10] stanowi również rozdział w książce, której byłem edytorem [K1].

[K1] Y. Ma, A. Vicet, and **Karol Krzempek (Ed.)**, *State-of-the-Art Laser Gas Sensing Technologies* (MDPI, 2020), 10(2), p. 433. **ISBN 978-3-03928-398-9**.

Ponadto, praca [H2] została wyróżniona i opublikowana jako rozdział w książce [K2].

[K2] A. Lennikov, R. L. Voti, K. Kochan, **Karol Krzempek**, Y. Shimizu, E. G. de S. Román, *Application of Optical Fiber Technology* (Scientific Research Publishing, 2018).

W trakcie realizacji badań nad fototermicznymi układami czujników gazów wygłosiłem również trzy wykłady zaproszone, przybliżające tematykę fototermicznej detekcji gazów, w tym dwa na międzynarodowych konferencjach [Z1] – [Z3].

[Z1] "Photothermal gas detection techniques", *Mirsens* 5, 6 lipca 2022 r., Wrocław, Polska.

[Z2] "Laser gas spectroscopy utilizing antiresonant hollow-core fibers", SAFESIDE Project Workshop, 1 lutego 2022 r. Konferencja w trybie online.

[Z3] „Nowe aspekty laserowej detekcji gazów”, XII Sympozjum Techniki Laserowej, 25-27 września 2018 r., Jastarnia, Polska.

Większość wyników eksperymentów została ponadto upowszechniona na międzynarodowych konferencjach naukowych, czego efektem są publikacje pokonferencyjne indeksowane na liście JCR – [C2], [C6], [C7], [C8], [C9], [C21], [C25], [C30], [C35], [C37].

4.3 Podsumowanie

Prace badawcze składające się na cykl skupiały się na opracowaniu nowych konfiguracji fototermicznych czujników gazów oraz na rozwijaniu nieszablonowych metod ekstrakcji sygnału spektroskopowego z modulacji współczynnika załamania gazów. Za główny cel postawiłem sobie opracowanie czułych oraz uniwersalnych detektorów, których konstrukcja pozwala na pomiar gazów posiadających widma absorpcyjne w średniej lub bliskiej podczerwieni, jednocześnie wykorzystujących do próbkowania indukowanych zmian WZ konfiguracje interferometrów bazujące na relatywnie tanich i ogólnodostępnych komponentach światłowodowych z pasma telekomunikacyjnego. Jak wykazałem w cyklu, poprawnie zaprojektowane oraz zoptymalizowane układy czujników FT są nie tylko czułe oraz cechują się dobrą liniowością pomiaru, lecz pozwalają również na wyeliminowanie z układu detektorów na średnią podczerwień oraz komórek wieloodbiciowych - zazwyczaj najdroższych elementów składowych klasycznych laserowych czujników gazów. Opracowanie oraz optymalizacja szeregu unikatowych konfiguracji laserowych czujników gazów opisanych w pracach z cyklu wymagała wiedzy z kilku niezależnych dziedzin techniki, w tym z zakresu:

- projektowania układów optycznych oraz laserowych czujników gazów,
- konstruowania oraz optymalizacji interferometrów typu FP czy MZ,
- stabilizacji laserów,
- analizy rozkładu ciśnienia oraz przepływu gazów we włóknach z rdzeniem powietrznym, oraz opracowania efektywnych metod wprowadzania próbek gazów do ich wnętrza,
- budowy elektronicznych układów akwizycji sygnałów spektroskopowych oraz implementowania algorytmów obróbki tych sygnałów,
- programowania (w tym automatyzacji procesu pobierania sygnałów rejestrowanych komercyjną aparaturą pomiarową),
- budowy oraz optymalizacji światłowodowych laserów z pasywną synchronizacją modów.

Prace habilitanta skutkowały rozwiązaniem szeregu problemów fizycznych, konstrukcyjnych oraz natury elektronicznej, które w dużej mierze ograniczały zarówno detekcyjność, jak i wszechstronność układów fototermicznej detekcji gazów. Dużym osiągnięciem naukowym było opracowanie metod efektywnego wykorzystania nowych typów włókien światłowodowych z rdzeniem powietrznym w układach FT detekcji gazów, czy opracowanie nowej metody detekcji gazów z wykorzystaniem laserów z synchronizacją modów. Wśród opublikowanych prac odnaleźć można demonstracje unikatowych na skalę światową konfiguracji czujników, prace dokumentujące zupełnie nowe metody pomiaru gazów jak również ustanawiające rekordy limitów detekcji. Opisane w cyklu publikacje są efektem zainicjowania przez habilitanta nowych wątków badawczych, których realizacja wymagała nawiązania bliskiej współpracy z wiodącymi zagranicznymi ośrodkami badawczymi.

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo – badawczych

5.1 Działalność naukowa przed uzyskaniem stopnia doktora

Swoją pracę naukową rozpocząłem 2010 roku, wraz z rozpoczęciem doktoratu, którego promotorem był prof. Krzysztof Abramski. Głównym celem mojego doktoratu było opracowanie metod generowania optycznych grzebieni częstotliwości w paśmie średniej podczerwieni, przy wykorzystaniu efektów nieliniowych. Prowadzone przeze mnie prace stanowiły nowy obszar badawczy w Grupie prof. Abramskiego. Realizacja doktoratu wymagała zarówno opracowania dedykowanych układów światłowodowych laserów z synchronizacją modów pajacujących w paśmie bliskiej podczerwieni (1550 nm), wzmacniaczy promieniowania ciągłego oraz impulsowego z pasma ~1060 nm oraz ~1550 nm, jak również układów konwersji częstotliwości optycznych, bazujących na nieliniowych kryształach niobianu litu. Budowa nowego laboratorium, które umożliwiłoby generowanie promieniowania w paśmie średniej podczerwieni oraz jego charakteryzowanie, możliwa była dzięki pozyskaniu

finansowania w konkursie Opus (Narodowe Centrum Nauki) na badania nad unikatowymi konfiguracjami dwuczęstotliwościowych wzmacniaczy światłowodowych [P12]. Byłem głównym redaktorem wniosku o finansowanie oraz głównym wykonawcą projektu. W trakcie realizacji doktoratu oraz w/w projektu opracowałem szereg nowych konfiguracji źródeł laserowych, a wyniki eksperymentalne zostały opublikowane w czasopismach z listy JCR. Wyróżnić tutaj można:

- laser bazujący na włóknie erbowo-iterbowym typu Double-Clad z pasywną synchronizacją modów z rekordową harmoniczną częstotliwością repetycji, wynoszącą powyżej 10 GHz [A1],
- pierwszą na świecie demonstrację źródła średniej podczerwieni bazującego na efekcie nieliniowym i wzmacniaczu dwuczęstotliwościowym oraz jego użycie w detekcji gazów [A5],
- laser w konfiguracji całkowicie światłowodowej, który cechował się z rekordową częstotliwością repetycji (205 MHz) oraz impulsami o czasie trwania poniżej 100 fs [A6],
- pierwszą na świecie demonstrację źródła średniej podczerwieni bazującego na efekcie nieliniowym i wzmacniaczu dwuczęstotliwościowym w konfiguracji włókien utrzymujących polaryzację [A10],
- pierwszą na świecie demonstrację impulsowego źródła średniej podczerwieni bazującego na wzmacniaczu dwuczęstotliwościowym i efektach nieliniowych [A15].

Już na wczesnym etapie realizacji doktoratu zauważyłem ogromny potencjał laserowych metod detekcji śladowych stężeń gazów, co zmotywowało mnie do odbycia dwóch trzymiesięcznych staży w grupie prof. Franka Tittel'a, na Rice University w Houston, w trakcie których poznałem podstawy laserowej detekcji gazów oraz brałem udział w opracowaniu dwóch nowych konfiguracji czujników etanu [A3], [A4]. Efektem moich staży są nie tylko publikacje w czasopismach z listy JCR, lecz również założenie i prowadzenie laboratorium laserowych metod detekcji gazów, które na późniejszym etapie mojej kariery naukowej przerodziło się w Grupę Laserowej Spektroskopii Gazów, której jestem obecnie kierownikiem. Dalsze prace eksperymentalne obejmowały pierwszą na świecie demonstrację detekcji CLaDS przy wykorzystaniu moich autorskich konfiguracji wzmacniaczy dwuczęstotliwościowych [A12]. W trakcie realizacji doktoratu mój dorobek naukowy został doceniony przez panel Ekspertów oceniających wnioski w konkursie Luwentus Plus, dzięki czemu otrzymałem grant, a tym samym środki na doposażenie mojego laboratorium oraz dalsze prace nad laserowymi czujnikami gazów [P3].

W trakcie realizacji doktoratu brałem również udział w pracach badawczych nad unikatowymi konfiguracjami laserów światłowodowych. Wyróżnić można tutaj:

- laser, w którym pasywną synchronizację modów uzyskano przez zastosowanie ciekłokrystalicznych elementów do kontroli polaryzacji rezonującej wiązki [A11],
- światłowodowe lasery, w których synchronizację modów uzyskano poprzez zastosowanie grafenu jako nasycalnego absorbera [A2], [A8], [A9],
- układy wzmacniaczy światłowodowych w konfiguracji Chirped pulse amplification [A7], [A14],
- generowanie promieniowania superciąętego (ang. supercontinuum), przy wykorzystaniu światłowodów nieliniowych [A13].

W trakcie prac nad doktoratem, przeprowadziłem również szereg eksperymentów z laserami impulsowymi, w których poprzez odpowiednią konstrukcję rezonatora oraz precyzyjne dobranie jego dyspersji, możliwe było wymuszenie pasywnej synchronizacji modów w reżimie rezonansu solitonów dyssypujących (ang. Dissipative Soliton Resonance; DSR), a tym samym generowanie impulsów o energiach rzędu mikrodżuli, bezpośrednio z wnętrza. Wyniki opublikowano w pracy [A16].

W rezultacie badań nad pracą doktorską, w latach 2011 – 2015 opublikowałem łącznie 16 prac w czasopismach naukowych z listy JCR, oraz wygłosiłem wiele prezentacji na międzynarodowych konferencjach naukowych. W trakcie realizacji doktoratu byłem czynnie zaangażowany w realizację szeregu projektów badawczych ([P13], [P14], [P15]), oraz byłem laureatem licznych, prestiżowych nagród i wyróżnień wynikających z prowadzenia pracy naukowej

(m.in. dwukrotne stypendium START z Fundacji na Rzecz Nauki Polskiej, stypendium Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego dla wybitnych młodych naukowców). Pracę doktorską obroniłem z wyróżnieniem w dniu 8. czerwca 2016 r. (data publicznej obrony).

5.2 Działalność naukowa po uzyskaniu stopnia doktora

Po uzyskaniu stopnia doktora kontynuowałem prace nad układami laserów pracujących w reżimie DSR oraz laserowymi czujnikami gazów.

W zakresie badań nad laserami światłowodowymi moje eksperymenty skupiały się na opracowaniu nowych konfiguracji wzmacniaczy oraz laserów. W 2018 roku otrzymałem finansowanie w ramach konkursu MINIATURA2 na badania nad laserami impulsowymi z pasma 1 μm , pracującymi w reżimie DSR [P4]. Wśród moich największych osiągnięć badawczych nad źródłami laserowymi wyróżnić można:

- opracowanie kompaktowego lasera DSR z pasma 1550 nm o rekordowej energii impulsów – 6,5 μJ [B1],
- pracę, w której przeanalizowałem wpływ dyspersji wewnątrz rezonatora laserów DSR na parametry generowanych impulsów [B2],
- pierwszą demonstrację lasera DSR pracującego w konfiguracji figure-9, która cechuje się uproszczoną konstrukcją rezonatora [B4],
- pierwszą na świecie demonstrację lasera DSR z pasma 1550 nm o dużej energii impulsów, w konfiguracji bazującej na włóknach utrzymujących polaryzację [B7].

Prace nad tymi niezwykle ciekawymi konfiguracjami prowadzone są obecnie w ramach grantu Sonata, którego jestem kierownikiem [P2]. W ramach projektu rozwijam metody aktywnej stabilizacji parametrów laserów DSR oraz konfiguracje nieliniowej konwersji częstotliwości wykorzystujące impulsy generowane z tych laserów.

Wśród innych prac badawczych habilitanta nad laserami wymienić należy:

- pierwszą na świecie demonstrację wzmacniacza dwuczęstotliwościowego w konfiguracji CPA oraz eksperymentalną demonstrację wykorzystania wzmocnionego promieniowania w układach nieliniowej konwersji częstotliwości [B3],
- demonstrację stabilizowanego, optycznego grzebienia częstotliwości w paśmie 7 – 9 μm [B12],
- pierwszą na świecie demonstrację fototermicznej stabilizacji długości fali lasera na ciele stałym [B9],
- pracę dokumentującą kompaktową komórkę absorpcyjną [B16],

W roku 2016 oraz 2017 odbyłem również staże na Uniwersytecie Princeton, w Princeton, USA. Moja praca naukowa w grupie kierowanej przez prof. Gerarda Wysockiego skupiała się na rozwijaniu nowych technik laserowej detekcji gazów, w tym wykorzystujących efekty FT.

Z uwagi na aplikacyjny charakter moich prac eksperymentalnych oraz widząc duży potencjał wdrożeniowy, po uzyskaniu stopnia doktora skupiałem się głównie na rozwijaniu mojego laboratorium laserowej spektroskopii gazów, czego efektem było m. in. uzyskanie 5 międzynarodowych grantów na badania w ramach konkursów Narodowego Centrum Nauki oraz Narodowego Centrum Badań i Rozwoju. Byłem głównym redaktorem wszystkich wniosków konkursowych, które zostały zakwalifikowane do finansowania [P1], [P5], [P6], [P9], [P11]. W projektach tych pełniłem funkcję Głównego Wykonawcy lub Kierownika [P1]. Finansowanie nie tylko przełożyło się na doposażenie laboratorium w niezbędną aparaturę, lecz również zagwarantowało zacieśnienie współpracy z wiodącymi ośrodkami badawczymi z Chin, Francji, Belgii oraz Stanów Zjednoczonych, które okazały się kluczowe w rozwijaniu nowych technik laserowej detekcji gazów.

Efektom prac nad układami czułych laserowych detektorów gazów jest szereg publikacji oraz prezentacji na międzynarodowych konferencjach naukowych, z których wyróżnić należy:

- pierwszą na świecie demonstrację czujnika CLaDS wykorzystującego źródło średniej podczerwieni w konfiguracji całkowicie światłowodowej [B5],
- demonstrację zdalnego czujnika metanu bazującego na całkowicie światłowodowym źródle średniej podczerwieni [B6],
- czujnik siarkowodoru wykorzystujący laser typu QCL oraz wieloodbiciową komórkę absorpcyjną [B8],
- zastosowanie źródła laserowego z pracy [B12] w układzie spektrometru Fourierowskiego, do precyzyjnej lokalizacji linii absorpcyjnych tlenku azotu w paśmie 7,8 μm [B15],
- zastosowanie źródła laserowego z pracy [B12] do precyzyjnego wyznaczenia pozycji linii absorpcyjnych metanu w paśmie 7,7 μm [B20],
- demonstrację szerokopasmowego źródła optycznych grzebieni częstotliwości w paśmie 3,4 μm oraz jego zastosowania do detekcji węglowodorów [B18].

Do największych osiągnięć badawczych habilitanta w okresie po uzyskaniu stopnia doktora, będących bezpośrednim efektem zainicjowania międzynarodowej współpracy, jest cykl publikacji dokumentujących unikatowe konfiguracje laserowych czujników gazów, wykorzystujących światłowody typu ARHCF:

- pierwsza na świecie demonstracja czujnika metanu na wykorzystującego technikę detekcji WMS, włókno typu Kagome oraz laser o długości fali 3,4 μm [B10],
- pierwsza świecie demonstracja czujnika metanu na wykorzystującego technikę detekcji CLaDS, włókno typu Kagome oraz laser o długości fali 3,4 μm [B11],
- pierwszą demonstrację detektora bazującego na włóknie typu ARHCF, który umożliwił pomiar dwutlenku węgla oraz metanu, odpowiednio w paśmie bliskiej oraz średniej podczerwieni [B13]
- pierwsza na świecie demonstracja laserowego czujnika gazu wykorzystującego komórkę absorpcyjną na bazie włókna ARHCF zdolnego do detekcji molekuł posiadających widma absorpcyjne powyżej 4,5 μm [B14],
- demonstrację metod wytwarzania mikro-kanalów we włóknach typu ARHCF z wykorzystaniem femtosekundowych impulsów [B17],
- pracę opisującą rozkład ciśnienia oraz przepływy gazów we włóknach typu ARHCF [B19],
- pierwszą na świecie demonstrację laserowego czujnika gazów wykorzystującego technikę detekcji CLaDS oraz włókno typu ARHCF jako miniaturową komórkę absorpcyjną do detekcji gazów w paśmie 3,4 μm [B21],
- demonstrację laserowego czujnika gazów wykorzystującego włókno typu ARHCF o długości 30 metrów jako miniaturową komórkę absorpcyjną [B22].

Poza wyżej wymienionymi, w latach 2016 – 2022 zaangażowany byłem jako Główny Wykonawca do realizacji trzech innych projektów badawczych, w których rozwijane były źródła laserowe do zastosowań aplikacyjnych [P7], [P8], [P10].

5.3 Lista publikacji naukowych spoza cyklu omówionego w punkcie 4.2

5.3.1 Publikacje z listy JCR przed uzyskaniem stopnia doktora

- [A1] G. Sobon, **Karol Krzempek**, P. Kaczmarek, K. M. Abramski, M. Nikodem, "10 GHz passive harmonic mode-locking in Er–Yb double-clad fiber laser," *Optics Communications* 284(18), 4203–4206 (2011).
- [A2] J. Sotor, G. Sobon, **Karol Krzempek**, K. M. Abramski, "Fundamental and harmonic mode-locking in erbium-doped fiber laser based on graphene saturable absorber," *Optics communications* 285(13–14), 3174–3178 (2012).

- [A3] **Karol Krzempek**, R. Lewicki, L. Nähle, M. Fischer, J. Koeth, S. Belahsene, Y. Rouillard, L. Worschech, F. K. Tittel, "Continuous wave, distributed feedback diode laser based sensor for trace-gas detection of ethane," *Applied Physics B* 106(2), 251–255 (2012).
- [A4] **Karol Krzempek**, M. Jahjah, R. Lewicki, P. Stefański, S. So, D. Thomazy, F. K. Tittel, "CW DFB RT diode laser-based sensor for trace-gas detection of ethane using a novel compact multipass gas absorption cell," *Applied Physics B* 112(4), 461–465 (2013).
- [A5] **Karol Krzempek**, G. Sobon, K. M. Abramski, "DFG-based mid-IR generation using a compact dual-wavelength all-fiber amplifier for laser spectroscopy applications," *Optics express* 21(17), 20023–20031 (2013).
- [A6] **Karol Krzempek**, G. Sobon, P. Kaczmarek, K. M. Abramski, "A sub-100 fs stretched-pulse 205 MHz repetition rate passively mode-locked Er-doped all-fiber laser," *Laser Physics Letters* 10(10), 105103 (2013).
- [A7] G. Sobon, **Karol Krzempek**, P. Kaczmarek, K. M. Abramski, "An eye-safe, high-repetition rate single-mode femtosecond chirped pulse amplification system at 1560 nm," *Laser Physics* 23(7), 075104 (2013).
- [A8] G. Sobon, J. Sotor, I. Pasternak, **Karol Krzempek**, W. Strupinski, K. M. Abramski, "A tunable, linearly polarized Er-fiber laser mode-locked by graphene/PMMA composite," *Laser Physics* 23(12), 125101 (2013).
- [A9] G. Sobon, J. Sotor, I. Pasternak, W. Strupinski, **Karol Krzempek**, P. Kaczmarek, K. M. Abramski, "Chirped pulse amplification of a femtosecond Er-doped fiber laser mode-locked by a graphene saturable absorber," *Laser Physics Letters* 10(3), 035104 (2013).
- [A10] **Karol Krzempek**, G. Sobon, J. Sotor, G. Dudzik, K. M. Abramski, "Widely tunable, all-polarization maintaining, monolithic mid-infrared radiation source based on differential frequency generation in PPLN crystal," *Laser Physics Letters* 11(10), 105103 (2014).
- [A11] M. Nikodem, **Karol Krzempek**, K. Zygadlo, G. Dudzik, A. Waz, K. Abramski, K. Komorowska, "Intracavity polarization control in mode-locked Er-doped fibre lasers using liquid crystals," *Opto-Electronics Review* 22(2), 113–117 (2014).
- [A12] M. Nikodem, **Karol Krzempek**, R. Karwat, G. Dudzik, K. Abramski, G. Wysocki, "Chirped laser dispersion spectroscopy with differential frequency generation source," *Optics Letters* 39(15), 4420–4423 (2014).
- [A13] G. Sobon, M. Klimczak, J. Sotor, **Karol Krzempek**, D. Pysz, R. Stepien, T. Martynkien, K. M. Abramski, R. Buczynski, "Infrared supercontinuum generation in soft-glass photonic crystal fibers pumped at 1560 nm," *Optical Materials Express* 4(1), 7–15 (2014).
- [A14] G. Sobon, **Karol Krzempek**, J. Tarka, J. Sotor, "Compact, all-PM fiber-CPA system based on a chirped volume Bragg grating," *Laser Physics* 26(1), 015106 (2015).
- [A15] **Karol Krzempek**, G. Sobon, J. Sotor, K. M. Abramski, "Fully-integrated dual-wavelength all-fiber source for mode-locked square-shaped mid-IR pulse generation via DFG in PPLN," *Optics Express* 23(25), 32080–32086 (2015).
- [A16] **Karol Krzempek**, "Dissipative soliton resonances in all-fiber Er-Yb double clad figure-8 laser," *Optics Express* 23(24), 30651–30656 (2015).

5.3.2 Publikacje z listy JCR po uzyskaniu stopnia doktora

- [B1] **Karol Krzempek**, K. Abramski, "6.5 μ J pulses from a compact dissipative soliton resonance mode-locked erbium–ytterbium double clad (DC) laser," *Laser Physics Letters* 14(1), 015101 (2016).
- [B2] **Karol Krzempek**, K. Abramski, "Dissipative soliton resonance mode-locked double clad Er: Yb laser at different values of anomalous dispersion," *Optics Express* 24(20), 22379–22386 (2016).

- [B3] **Karol Krzempek**, G. Sobon, J. Sotor, K. Abramski, "A dual-wavelength amplifier that enables the simultaneous chirped-pulse amplification of femtosecond 1562 nm pulses and continuous wave 1064 nm radiation for applications in difference frequency generation," *Laser Physics Letters* 13(10), 105107 (2016).
- [B4] **Karol Krzempek**, J. Sotor, K. Abramski, "Compact all-fiber figure-9 dissipative soliton resonance mode-locked double-clad Er: Yb laser," *Optics letters* 41(21), 4995–4998 (2016).
- [B5] **Karol Krzempek**, K. M. Abramski, M. Nikodem, "All-fiber mid-infrared difference frequency generation source and its application to molecular dispersion spectroscopy," *Laser Physics Letters* 14(9), 095702 (2017).
- [B6] **Karol Krzempek**, G. Dudzik, A. Hudzikowski, A. Gluszek, K. Abramski, "Highly-efficient fully-fiberized mid-infrared differential frequency generation source and its application to laser spectroscopy," *Opto-Electronics Review* 25(4), 269–274 (2017).
- [B7] **Karol Krzempek**, D. Tomaszewska, K. M. Abramski, "Dissipative soliton resonance mode-locked all-polarization-maintaining double clad Er: Yb fiber laser," *Optics express* 25(21), 24853–24860 (2017).
- [B8] M. Nikodem, **Karol Krzempek**, D. Stachowiak, G. Wysocki, "Quantum cascade laser-based analyzer for hydrogen sulfide detection at sub-parts-per-million levels," *Optical Engineering* 57(1), 011019 (2017).
- [B9] G. Dudzik, **Karol Krzempek**, K. M. Abramski, "Photothermal-induced frequency stabilization of a solid-state monolithic Nd: YVO4 laser," *Laser Physics Letters* 15(10), 105002 (2018).
- [B10] M. Nikodem, **Karol Krzempek**, G. Dudzik, K. Abramski, "Hollow core fiber-assisted absorption spectroscopy of methane at 3.4 μm ," *Optics Express* 26(17), 21843–21848 (2018).
- [B11] **Karol Krzempek**, K. Abramski, M. Nikodem, "Kagome hollow core fiber-based mid-infrared dispersion spectroscopy of methane at sub-ppm levels," *Sensors* 19(15), 3352 (2019).
- [B12] **Karol Krzempek**, D. Tomaszewska, A. Głuszek, T. Martynkien, P. Mergo, J. Sotor, A. Foltynowicz, G. Soboń, "Stabilized all-fiber source for generation of tunable broadband fCEO-free mid-IR frequency comb in the 7–9 μm range," *Optics Express* 27(26), 37435–37445 (2019).
- [B13] P. Jaworski, P. Koziół, **Karol Krzempek**, D. Wu, F. Yu, P. Bojęś, G. Dudzik, M. Liao, K. Abramski, J. Knight, "Antiresonant hollow-core fiber-based dual gas sensor for detection of methane and carbon dioxide in the near-and mid-infrared regions," *Sensors* 20(14), 3813 (2020).
- [B14] P. Jaworski, **Karol Krzempek**, G. Dudzik, P. J. Sazio, W. Belardi, "Nitrous oxide detection at 5.26 μm with a compound glass antiresonant hollow-core optical fiber," *Optics letters* 45(6), 1326–1329 (2020).
- [B15] A. Hjältén, M. Germann, **Karol Krzempek**, A. Hudzikowski, A. Głuszek, D. Tomaszewska, G. Soboń, A. Foltynowicz, "Optical frequency comb Fourier transform spectroscopy of 14N216O at 7.8 μm ," *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* 271, 107734 (2021).
- [B16] A. Hudzikowski, A. Głuszek, **Karol Krzempek**, J. Sotor, "Compact, spherical mirror-based dense astigmatic-like pattern multipass cell design aided by a genetic algorithm," *Optics Express* 29(16), 26127–26136 (2021).
- [B17] P. Koziół, P. Jaworski, **Karol Krzempek**, V. Hoppe, G. Dudzik, F. Yu, D. Wu, M. Liao, J. Knight, K. Abramski, "Fabrication of Microchannels in a Nodeless Antiresonant Hollow-Core Fiber Using Femtosecond Laser Pulses," *Sensors* 21(22), 7591 (2021).

- [B18] **Karol Krzempek**, D. Tomaszewska, A. Foltynowicz, G. Sobon, "Fiber-based optical frequency comb at 3.3 μm for broadband spectroscopy of hydrocarbons," *Chinese Optics Letters* 19(8), 081406 (2021).
- [B19] P. Bojęś, P. Jaworski, **Karol Krzempek**, Z. Malecha, F. Yu, D. Wu, P. Koziół, G. Dudzik, M. Liao, K. Abramski, "Experimental and numerical analysis of gas flow in nodeless antiresonant hollow-core fibers for optimization of laser gas spectroscopy sensors," *Optics & Laser Technology* 152, 108157 (2022).
- [B20] M. Germann, A. Hjältén, V. Boudon, C. Richard, **Karol Krzempek**, A. Hudzikowski, A. Głuszek, G. Soboń, A. Foltynowicz, "A methane line list with sub-MHz accuracy in the 1250 to 1380 cm^{-1} range from optical frequency comb Fourier transform spectroscopy," *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* 108252 (2022).
- [B21] P. Jaworski, **Karol Krzempek**, P. Bojęś, D. Wu, F. Yu, "Mid-IR antiresonant hollow-core fiber based chirped laser dispersion spectroscopy of ethane with parts per trillion sensitivity," *Optics & Laser Technology* 156, 108539 (2022).
- [B22] P. Jaworski, **Karol Krzempek**, P. Koziół, D. Wu, F. Yu, P. Bojęś, G. Dudzik, M. Liao, J. Knight, K. Abramski, "Sub parts-per-billion detection of ethane in a 30-meters long mid-IR Antiresonant Hollow-Core Fiber," *Optics & Laser Technology* 147, 107638 (2022).

5.3.3 Publikacje konferencyjne po uzyskaniu stopnia doktora

Poniżej przedstawiono listę publikacji konferencyjnych indeksowanych w bazie Web of Science.

- [C1] **Karol Krzempek**, D. Tomaszewska-Rolla, A. Głuszek, A. Hudzikowski, M. Krakowski, A. Hjältén, M. Germann, A. Foltynowicz, G. Soboń, "Compact fiber-based mid-infrared frequency comb sources," in *Mid-Infrared Coherent Sources* (Optica Publishing Group, 2022), p. MW6C. 1.
- [C2] **Karol Krzempek**, P. Jaworski, P. Bojęś, P. Koziół, G. Dudzik, V. Hoppe, W. Belardi, "Antiresonant hollow core fiber-based photothermal interferometry of Nitric Oxide at 5.26 μm with parts-per-billion sensitivity," in *CLEO: Science and Innovations* (Optica Publishing Group, 2022), p. SF3F. 7.
- [C3] P. Jaworski, **Karol Krzempek**, P. E. Koziol, P. Bojęś, G. Dudzik, D. Wu, F. Yu, M. Liao, K. M. Abramski, "Wavelength modulation spectroscopy of ethane at sub parts-per-billion-by-volume level using a 30-meters long mid-IR antiresonant hollow-core fiber," in *Optical Sensing and Detection VII* (SPIE, 2022).
- [C4] P. Jaworski, **Karol Krzempek**, P. Bojes, D. Wu, F. Yu, "Mid-IR antiresonant hollow-core fiber assisted molecular dispersion spectroscopy of ethane with parts-per-trillion by volume sensitivity," in *Photonic Fiber and Crystal Devices: Advances in Materials and Innovations in Device Applications XVI* (SPIE, 2022), 12229.
- [C5] M. Germann, A. Hjältén, V. Boudon, C. Richard, **Karol Krzempek**, A. Hudzikowski, A. Głuszek, G. Soboń, A. Foltynowicz, "An Accurate Methane Line List in the 7.2–8.0 μm Range from Comb-Based Fourier Transform Spectroscopy," in *CLEO: Science and Innovations* (Optica Publishing Group, 2022), p. SM3F. 6.
- [C6] P. Bojes, P. Pokryszka, P. Jaworski, Y. Ma, P. Koziol, G. Dudzik, F. Yu, D. Wu, **Karol Krzempek**, "Methane and acetylene detection in an antiresonant hollow-core fiber using quartz-enhanced photothermal spectroscopy technique," in *Photonic Fiber and Crystal Devices: Advances in Materials and Innovations in Device Applications XVI* (SPIE, 2022), p. PC1222901.

- [C7] **Karol Krzempek**, P. Koziół, P. Jaworski, G. Dudzik, V. Hoppe, W. Belardi, "Detection of Nitric Oxide at 5.26 μm using antiresonant hollow core fiber-assisted photothermal interferometry," in *Optics and Photonics for Sensing the Environment* (Optical Society of America, 2021), p. JW2A. 17.
- [C8] **Karol Krzempek**, P. Koziół, P. Jaworski, G. Dudzik, W. Belardi, "Antiresonant Hollow Core Fiber-assisted Photothermal Spectroscopy of Nitric Oxide at 5.26 μm ," in *The European Conference on Lasers and Electro-Optics* (Optical Society of America, 2021), p. ch_p_1.
- [C9] **Karol Krzempek**, P. Koziół, P. Jaworski, G. Dudzik, W. Belardi, "Antiresonant hollow core fiber-based photothermal gas sensor of nitric oxide at 5.26 μm ," in *Photonic Fiber and Crystal Devices: Advances in Materials and Innovations in Device Applications XV* (SPIE, 2021), 11826, p. 118260J.
- [C10] P. Koziół, P. Jaworski, **Karol Krzempek**, V. Hoppe, G. Dudzik, F. Yu, D. Wu, M. Liao, K. Abramski, "Laser processing of microchannels in an antiresonant hollow-core fiber," in *Advanced Solid State Lasers* (Optical Society of America, 2021), p. JM3A. 58.
- [C11] P. E. Koziół, P. Jaworski, F. Yu, **Karol Krzempek**, D. Wu, G. Dudzik, V. Hoppe, M. Liao, K. M. Abramski, "Femtosecond laser processing of microchannels in antiresonant hollow-core fiber for laser-based gas sensing in the mid-infrared," in *Micro-Structured and Specialty Optical Fibres VII* (SPIE, 2021), 11773, p. 117730A.
- [C12] P. Jaworski, **Karol Krzempek**, P. Koziół, G. Dudzik, D. Wu, F. Yu, M. Liao, K. Abramski, "Antiresonant hollow-core fiber-assisted mid-IR hydrocarbons gas sensor," in *Photonic Fiber and Crystal Devices: Advances in Materials and Innovations in Device Applications XV* (SPIE, 2021), 11826, p. 118260I.
- [C13] P. Jaworski, G. Dudzik, P. J. Sazio, W. Belardi, **Karol Krzempek**, "Laser-based nitric oxide detection at 5.26 μm using Antiresonant Hollow-Core Fiber," in *Optical Fiber Communication Conference* (Optica Publishing Group, 2021), p. Th1A. 13.
- [C14] P. Jaworski, G. Dudzik, P. Koziół, P. J. Sazio, W. Belardi, **Karol Krzempek**, "Borosilicate Antiresonant Hollow-Core Fiber-assisted spectroscopy of nitric oxide in the Mid-IR," in *Optics and Photonics for Sensing the Environment* (Optical Society of America, 2021), p. JW2A. 6.
- [C15] Hjältén, M. Germann, I. Sadiék, C. Lu, F. S. Vieira, **Karol Krzempek**, A. Hudzikowski, A. Głuszek, D. Tomaszewska, M. Stuhr, "Fourier transform spectroscopy using difference frequency generation comb sources at 3.3 μm and 7.8 μm ," in *Optical Sensors* (Optical Society of America, 2021), p. JT4D. 3.
- [C16] Hjältén, M. Germann, C. Lu, F. Senna Vieira, A. Foltynowicz, I. Sadiék, M. Stuhr, **Karol Krzempek**, A. Hudzikowski, A. Głuszek, "High-Resolution Comb-Based Fourier Transform Spectroscopy in the 3.3 μm and 7.8 μm Range," in *2021 International Symposium on Molecular Spectroscopy (Virtual): June 21-25 (2021)*.
- [C17] Hjältén, M. Germann, **Karol Krzempek**, A. Hudzikowski, A. Głuszek, D. Tomaszewska, G. Soboń, A. Foltynowicz, "Precision Measurements of $^{14}\text{N}_2^{16}\text{O}$ Using a Comb-Based Fourier Transform Spectrometer at 7.8 μm ," in *2021 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)* (IEEE, 2021), pp. 1–2.
- [C18] M. Germann, A. Hjältén, **Karol Krzempek**, A. Hudzikowski, A. Głuszek, D. Tomaszewska, G. Soboń, A. Foltynowicz, "Frequency Comb Fourier Transform Spectroscopy at 8 μm Using a Compact Difference Frequency Generation Source," in *European Quantum Electronics Conference* (Optica Publishing Group, 2021), p. ed_1_4.

- [C19] Foltynowicz, G. Sobon, D. Tomaszewska-Rolla, A. Hjältén, M. Germann, **Karol Krzempek**, R. Lindberg, V. Pasiskevicius, "High-resolution Comb-based Fourier Transform Spectroscopy In The 3.3 μm And 7.8 μm Range," in International Symposium on Molecular Spectroscopy (2021).
- [C20] G. Dudzik, N. Stalmach, **Karol Krzempek**, P. Jaworski, P. Koziół, W. Belardi, "Antiresonant hollow core fiber-assisted differential absorption spectroscopy of gas molecules," in Photonic Fiber and Crystal Devices: Advances in Materials and Innovations in Device Applications XV (SPIE, 2021), 11826, p. 118260K.
- [C21] G. Dudzik, **Karol Krzempek**, P. Jaworski, P. Koziół, "Solid-State Laser Intra-Cavity Photothermal Sensor of Nitric Oxide in the mid-IR Region," in Optical Sensors (Optical Society of America, 2021), p. JW2A. 29.
- [C22] P. Bojęś, **Karol Krzempek**, P. Jaworski, P. Koziół, Z. Malecha, G. Dudzik, F. Yu, D. Wu, K. Malecha, M. Liao, "Modelling of pressure-driven gas flow in a nodeless Anti-Resonant Hollow Core Fiber for laser absorption spectroscopy," in The European Conference on Lasers and Electro-Optics (Optica Publishing Group, 2021), p. ch_12_4.
- [C23] P. Bojęś, P. Jaworski, **Karol Krzempek**, Z. Malecha, P. Koziół, G. Dudzik, F. Yu, M. Liao, D. Wu, K. Abramski, "Simulations of pressure-driven gas flow in a nodeless antiresonant hollow-core fiber for laser absorption spectroscopy applications," in Advanced Sensor Systems and Applications XI (SPIE, 2021), 11901, p. 1190119.
- [C24] **Karol Krzempek**, D. Tomaszewska, A. Głuszek, A. Hudzikowski, T. Martynkien, P. Mergo, J. Sotor, A. Foltynowicz, G. Soboń, "Mid-infrared frequency comb covering the 6.5–9 μm range with active output power stabilization," in Mid-Infrared Coherent Sources (Optica Publishing Group, 2020), p. MW3C. 3.
- [C25] **Karol Krzempek**, P. Koziół, G. Dudzik, P. Jaworski, P. Bojęś, K. Abramski, "Photothermal Gas Sensor in a Linear Cavity Mode-locked Fiber Laser Configuration," in Optical Sensors (Optica Publishing Group, 2020), p. SM2B. 2.
- [C26] P. Koziół, P. Jaworski, F. Yu, **Karol Krzempek**, D. Wu, G. Dudzik, M. Liao, K. Abramski, "Microdrilling of channels in antiresonant hollow-core fiber using femtosecond laser pulses," in Laser Applications Conference (Optical Society of America, 2020), p. JTh2A. 3.
- [C27] P. Jaworski, F. Yu, P. Bojęś, D. Wu, P. Koziół, G. Dudzik, K. Abramski, M. Liao, **Karol Krzempek**, "Dual-band Antiresonant Hollow-Core Fiber for Multiple Gas Detection in the Near-and Mid-IR," in Optical Sensors (Optical Society of America, 2020), p. SM2B. 3.
- [C28] P. Jaworski, F. Yu, P. Bojęś, D. Wu, P. Koziół, G. Dudzik, K. Abramski, M. Liao, **Karol Krzempek**, "Antiresonant Hollow-Core Fiber for Multiple Gas Detection in the Mid-IR," in CLEO: Science and Innovations (Optical Society of America, 2020), p. JTu2G. 33.
- [C29] P. Jaworski, **Karol Krzempek**, F. Yu, P. Koziół, G. Dudzik, D. Wu, P. Bojęś, P. J. Sazio, W. Belardi, M. Liao, "Antiresonant Hollow-Core Fibers for efficient gas molecules detection in the Near-and Mid-Infrared spectral bands," in Specialty Optical Fibers (Optica Publishing Group, 2020), p. SoW1H. 3.
- [C30] G. Dudzik, **Karol Krzempek**, P. Jaworski, P. Koziół, P. Bojęś, K. M. Abramski, "Photothermal Gas Sensing Inside a Monolithic Diode-Pumped Solid-State Laser Resonator," in Optical Sensors (Optical Society of America, 2020), p. SM1E. 6.
- [C31] **Karol Krzempek**, A. Głuszek, D. Tomaszewska, T. Martynkien, P. Mergo, J. Sotor, G. Soboń, "All-Fiber Source for Generation of Tunable Broadband f CEO-Free Mid-IR Pulses for Laser Spectroscopy Applications," in 2019 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC) (IEEE, 2019), pp. 1–1.

- [C32] Hudzikowski, A. Głuszek, **Karol Krzempek**, J. Sotor, "Spherical mirrors based compact multipass cell with dense astigmatic-like spot pattern," in CLEO: Applications and Technology (Optical Society of America, 2019), p. AF2K. 8.
- [C33] Hudzikowski, A. Głuszek, **Karol Krzempek**, J. Sotor, "Adjustable optical path length compact spherical mirrors multipass cell optimized with genetic algorithm," in The European Conference on Lasers and Electro-Optics (Optical Society of America, 2019), p. ch_p_25.
- [C34] G. Dudzik, **Karol Krzempek**, K. M. Abramski, "Comparison of Nd: YVO4-based monolithic microchip laser resonators for single-frequency stable, CW diode-pumped laser sources," in The European Conference on Lasers and Electro-Optics (Optical Society of America, 2019), p. ca_p_23.
- [C35] G. Dudzik, K. Abramski, **Karol Krzempek**, "Photothermal Gas Detection of CO₂ in an Intracavity Solid-State Laser Configuration," in 2019 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC) (IEEE, 2019), pp. 1–1.
- [C36] M. Nikodem, D. Stachowiak, **Karol Krzempek**, G. Wysocki, "Laser-based hydrogen sulfide detection using near-and mid-infrared sources," in Optics and Photonics for Energy and the Environment (Optical Society of America, 2017), p. EM2B. 4.
- [C37] **Karol Krzempek**, G. Dudzik, M. Nikodem, G. Wysocki, K. Abramski, "Photothermal detection of NO molecules using a 5.2 μm quantum cascade laser and a simple fiber-based interferometer," in The European Conference on Lasers and Electro-Optics (Optical Society of America, 2017), p. CH_P_27.
- [C38] Głuszek, A. Hudzikowski, **Karol Krzempek**, K. M. Abramski, F. K. Tittel, "Low energy consumption, compact setup for isotopic analysis of methane at 3007.95 cm⁻¹ and 3008.39 cm⁻¹ using room-temperature CW interband cascade laser (ICL)," in The European Conference on Lasers and Electro-Optics (Optical Society of America, 2017), p. CH_P_6.
- [C39] G. Dudzik, **Karol Krzempek**, K. M. Abramski, "Photothermal-induced frequency stabilization of Nd: YVO4/Er-Glass solid state microchip laser with auxiliary 1.55 μm signal," in The European Conference on Lasers and Electro-Optics (Optica Publishing Group, 2017), p. CA_P_35.
- [C40] Siwicki, M. Klimczak, G. Soboń, **Karol Krzempek**, K. M. Abramski, R. Buczyński, "Towards compact coherent and broadband all-normal mid-infrared supercontinuum source," in Nonlinear Photonics (Optica Publishing Group, 2016), p. NM3A. 5.
- [C41] P. Jaworski, G. Dudzik, **Karol Krzempek**, K. Abramski, A. Waz, M. Nikodem, "Gas sensing with Chirped Laser Dispersion Spectroscopy in a single-frequency beam configuration and a multipass cell," in CLEO: Science and Innovations (Optical Society of America, 2016), p. STu3H.

5.4 Udział w projektach badawczych

W trakcie doktoratu oraz po uzyskaniu stopnia doktora brałem czynny udział w 15 projektach badawczych jako Kierownik, Główny Wykonawca lub Wykonawca. Jestem również autorem lub głównym redaktorem 8 wniosków o finansowanie badań.

- [P1] Rodzaj grantu: Międzynarodowy projekt badawczy, konkurs wielostronny M-ERA.NET Call 2019. Symbol: GADEIRE, nr projektu 2019/01/Y/ST7/00088.
Tytuł: Gas absorption sensors development for environment based on novel mid-infrared hollow fibers with enhanced functional design/Funkcjonalne światłowody mikrostrukturalne na zakres średniej podczerwieni do zastosowań w laserowych czujnikach gazów na potrzeby ochrony środowiska.
Rola: **Kierownik projektu** po stronie polskiej, **autor wniosku projektowego**.

Instytucja finansująca: Narodowe Centrum Nauki (NCN, Polska), Agence National de Recherche (ANR, Francja), SPW (Belgia).

- [P2] Rodzaj grantu: projekt badawczy, konkurs SONATA 15. Nr projektu 2019/35/D/ST7/04436.
Tytuł: Całkowicie światłowodowe, zsynchronizowane źródła mikrozdulowych impulsów laserowych – badania nad możliwością zastosowania w układach nieliniowej generacji częstotliwości optycznych.
Rola: **Kierownik projektu, autor wniosku projektowego.** Instytucja finansująca: Narodowe Centrum Nauki (NCN, Polska).
- [P3] Rodzaj granu: projekt badawczy, konkurs Iuventus Plus. Nr projektu IP2014021773.
Tytuł: Przesztralne całkiwicie swiatłowodowe źródeł promieniowania w paśmie średniej podczerwieni do zastosowań w spektroskopii laserowej.
Rola: **Kierownik projektu, autor wniosku projektowego.**
Instytucja finansująca: Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.
- [P4] Rodzaj grantu: Działanie naukowe, Konkurs Miniatura-2, Nr projektu 2018/02/X/ST7/01792.
Tytuł: Światłowodowe źródła wysokoenergetycznych impulsów w paśmie 1 μm
Rola: **Kierownik projektu, autor wniosku projektowego.**
Instytucja finansująca: Narodowe Centrum Nauki (NCN, Polska).
- [P5] Rodzaj grantu: międzynarodowy projekt badawczo-rozwojowy, II polsko-chiński konkurs bilateralny, Symbol: HiSensTech, nr projektu WPC2/HiSensTech/2021.
Tytuł: Development of key Technologies and equipment for Dynamic Early Warning and Emergency Prevention – Control of H2S Leakage Risk in Petrochemical Production Area/Rozwój nowych technologii wczesnego ostrzegania, zapobiegania oraz kontroli wycieków siarkowodoru na terenach rafinerijnych.
Rola: **Główny wykonawca, współautor wniosku projektowego.**
Projekt realizowany we współpracy z Xi'an University of Science and Technology, China National Petroleum Company (Research Institute of Safety and Environmental Protection, CNPC), China Petroleum and Chemical Corporation (Sinopec Corp.).
Instytucja finansująca: Narodowe Centrum Badań i Rozwoju (NCBiR, Polska), Ministerstwo Nauki i Technologii Chińskiej Republiki Ludowej (MOST, Chiny).
- [P6] Rodzaj grantu: międzynarodowy projekt badawczy, SHENG 1 – I konkurs na polsko-chińskie projekty badawcze. Symbol: LaSensFiber, nr projektu UMO-2018/30/Q/ST3/00809.
Tytuł: Ultra-low-loss hollow-core fibers for ultra-high-sensitive gas sensing and MID-IR laser sources /Niskostratne włókna antyrezonansowe na zakres średniej podczerwieni - badania możliwości zastosowania w laserach gazowych oraz laserowej detekcji gazów.
Rola: **Główny wykonawca, współautor wniosku projektowego**
Projekt realizowany we współpracy z Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences (SIOM), Centre for Photonics and Photonic Materials (CPPM), University of Bath.
Instytucja finansująca: Narodowe Centrum Nauki (NCN, Polska), National Natural Science Foundation of China (NSFC, Chiny).
- [P7] Rodzaj grantu: projekt infrastrukturalny, badawczy, NLPQT, Symbol: NLPQT, nr projektu POIR.04.02.00-00-B003/18-00.
Tytuł: NLPQT – Narodowe Laboratorium Fotoniki i Technologii Kwantowych
Rola: **Główny wykonawca**
Projekt realizowany we współpracy z Uniwersytet Warszawski, Instytut Chemii Fizycznej PAN, Politechnika Śląska, Politechnika Wrocławska – Katedra Optyki i Fotoniki, Instytut

Chemii Bioorganicznej PAN – Poznańskie Centrum Superkomputerowo-Sieciowe,
Uniwersytet Marii Curie Skłodowskiej w Lublinie, Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu.
Instytucja finansująca: Ośrodek Przetwarzania Informacji (OPI, Polska).

- [P8] Rodzaj grantu: projekt badawczy, program First TEAM, nr proj. POIR.04.04.00-00-434D/17-01.
Tytuł: Fiber-based mid-infrared frequency combs for laser spectroscopy and environmental monitoring.
Rola: **Główny wykonawca**
Projekt realizowany we współpracy z Umea Universitet (Szwecja), Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu (Polska), Princeton University (USA).
Instytucja finansująca: Fundacja na rzecz Nauki Polskiej (FNP).
- [P9] Rodzaj grantu: projekt badawczy, program NAWA, nr projektu PPI/APM/2018/1/00031/U/001.
Tytuł: Akademickie Partnerstwa Międzynarodowe Politechniki Wrocławskiej.
Rola: **Główny wykonawca, współautor wniosku projektowego**
Projekt realizowany we współpracy z Princeton University (USA), Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences (SIOM).
Instytucja finansująca: Narodowa Agencja Wymiany Akademickiej (NAWA).
- [P10] Rodzaj grantu: projekt badawczo-rozwojowy, konkurs TANGO, Symbol:, nr projektu TANGO1/266345/NCBR//2015.
Tytuł: Opracowanie, optymalizacja i integracja jednoczęstotliwościowego lasera sygnałowego pracującego na długości fali 1064 nm ze wzmacniaczem światłowodowym średniej mocy.
Rola: **Główny wykonawca**
Instytucja finansująca: Narodowe Centrum Badań i Rozwoju (NCBiR, Polska).
- [P11] Rodzaj grantu: projekt badawczy, Symbol: UMO-2014/14/M/ST7/00866
Tytuł: Fototermałne rezonansowe zjawiska w gazach – badanie właściwości i opracowanie nowych optycznych metod detekcyjnych.
Rola: **Główny wykonawca, współautor wniosku projektowego**
Instytucja finansująca: Narodowe Centrum Nauki (NCN, Polska).
- [P12] Rodzaj grantu: projekt badawczy, Symbol: UMO-2012/07/B/ST7/01476
Tytuł: Generacja promieniowania z zakresu średniej podczerwieni z wykorzystaniem nowatorskich dwuczęstotliwościowych źródeł laserowych.
Rola: **Główny wykonawca, współautor wniosku projektowego**
Instytucja finansująca: Narodowe Centrum Nauki (NCN, Polska).
- [P13] Rodzaj grantu: projekt badawczy, Symbol: GRAFTECH/ NCBR/ 04/04/2012
Tytuł: Ultraszybkie lasery światłowodowe na bazie grafenu.
Rola: **Wykonawca**
Instytucja finansująca: Narodowe Centrum Badań i Rozwoju (NCBiR, Polska).
- [P14] Rodzaj grantu: projekt badawczy, Symbol: POIG.01.01.02-02-002/08.
Tytuł: Lasery i wzmacniacze światłowodowe.
Rola: **Główny wykonawca**
Instytucja finansująca: Narodowe Centrum Badań i Rozwoju (NCBiR, Polska).

- [P15] Rodzaj grantu: projekt badawczy, Symbol POIG.01.01.02-02-002/08.
 Tytuł: Opracowanie i rozwój nowatorskiej techniki wielopunktowego monitorowania laserowo–światłowodowego na potrzeby ochrony środowiska przed hałasem i wibracjami.
 Rola: **Wykonawca**
 Instytucja finansująca: Fundusze EOG.

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

W okresie przed uzyskaniem stopnia doktora odbyłem dwa dwumiesięczne staże w laboratorium laserowej spektroskopii gazów na Rice University, Rice, USA, gdzie rozwijałem metody detekcji gazów przy wykorzystaniu laserów typu ICL oraz nowatorskich, miniaturowych komórek wieloodbiciowych. Efektem staży naukowych są publikacje [A3], [A4], a zdobyta wiedza pozwoliła mi na zainicjowanie na Wydziale nowego wątku badawczego – laserowej detekcji gazów.

W okresie po uzyskaniu stopnia doktora znacząca część moich prac badawczych realizowana była w ramach ścisłej współpracy z zagranicznymi ośrodkami badawczymi oraz uczelniami. Szczegółowy opis zamieszczono poniżej.

W okresie od czerwca 2016 do lipca 2016 oraz czerwcu 2017 odbyłem staże w laboratorium laserowej spektroskopii gazów na Princeton University, Princeton, Stany Zjednoczone, gdzie rozwijałem metody laserowej detekcji gazów, w tym metody detekcji FT. Bezpośrednim efektem stażów są publikacje w czasopiśmie - [H2], [H3], [B8], oraz dwie publikacje w materiałach pokonferencyjnych indeksowanych na liście JCR – [C36], [C37]. Poza efektem publikacyjnym, który ma wpływ w rozwój dziedziny, moja aktywność naukowa w tym ośrodku badawczym zaowocowała uzyskaniem projektu NAWA [P9], w ramach którego prowadzone były wspólne badania nad laserowymi czujnikami gazów.

W roku 2018 zainicjowałem na Politechnice Wrocławskiej nowy wątek badawczy, dotyczący laserowej detekcji gazów z wykorzystaniem światłowodów z rdzeniem powietrznym. Z uwagi na brak komercyjnie dostępnych włókien zdolnych do transmitowania promieniowania z zakresu średniej podczerwieni, realizacja badań wymagała ode mnie nawiązania współpracy z firmą GLO Photonics z Francji, która udostępniła prototyp włókna do badań. Efektem współpracy są dwie publikacje – [B10] oraz [B11].

W roku 2019 wraz z dr. Piotrem Jaworskim zainicjowałem nowy wątek badawczy na Politechnice Wrocławskiej, dotyczący laserowej detekcji gazów z wykorzystaniem światłowodów typu ARHCF. W tamtym okresie włókna ARHCF na zakres średniej podczerwieni nie były dostępne komercyjnie, a projektowaniem oraz wyciąganiem prototypowych odcinków zajmowało się zaledwie kilka ośrodków badawczych na świecie. Realizacja pionierskich eksperymentów była możliwa dzięki nawiązaniu ścisłej współpracy z Uniwersytetem w Lille (Francja) oraz z Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics (SIOM) w Szanghaju (Chiny). Partnerzy projektują oraz wyciągają nowe typy włókien z rdzeniem powietrznym, które następnie wykorzystywane są w konstruowanych przez habilitanta układach laserowej detekcji gazów. Wraz z partnerami z SIOM w okresie 2019 – 2022 realizowany był międzynarodowy projekt NAWA [P9], w ramach którego prowadzone były wspólne badania nad integracją światłowodowych komórek absorpcyjnych w laserowych czujnikach gazów. Wyniki opublikowane zostały w pracach [B13] oraz [B17].

Międzynarodowa aktywność naukowa zaowocowała powstaniem **9** publikacji w czasopiśmie z IF oraz **18** publikacjami w materiałach pokonferencyjnych indeksowanych na liście JCR: [H3], [H7], [H9], [B13], [B14], [B17], [B19], [B21], [B22], [C2-C4], [C6-C14], [C20], [C22], [C23], [C26-C29].

Największym efektem nawiązania w/w współpracy są dwa międzynarodowe projekty [P1], [P5] oraz [P6], dzięki którym powstały konsorcja badawcze umożliwiające ścisłą kolaborację pomiędzy jednostkami badawczymi z Francji oraz Chin.

Habilitant jest Kierownikiem projektu [P1] oraz Głównym Wykonawcą w projekcie [P6]. Wraz z dr. Piotrem Jaworskim, habilitant był głównym inicjatorem nawiązania międzynarodowej współpracy oraz głównym redaktorem wniosków projektowych.

W ramach projektu [P1], zawiązano również konsorcjum z dwiema jednostkami badawczymi, które na swoim koncie mają dziesiątki międzynarodowych oraz projektów aplikacyjnych w dziedzinie fotoniki:

- centrum badań i innowacji technologicznych Multitel (Belgia) – w zakresie wykorzystania przestrajalnych źródeł typu OPO w laserowych czujnikach gazów,
- jednostka badawcza LaserSpec (Belgia) – w zakresie wykorzystania szerokoprzestrajalnych źródeł typu OPO i DFG w układach laserowych czujników gazów.

Część prac analityczno-eksperymentalnych nad układami czujników gazów wykorzystującymi włókna ARHCF prowadzona była we współpracy z prof. Jonathanem Knightem z University of Bath, Bath, Wielka Brytania, światowym ekspertem w zakresie włókien z rdzeniem powietrznym. Efektem współpracy są publikacje [B13], [B17] oraz [B22].

W 2021 roku Grupa Laserowej Spektroskopii Gazów otrzymała międzynarodowy grant badawczo-rozwojowy, finansowany w ramach II polsko-chińskiego konkursu bilateralnego, finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju po stronie polskiej, oraz przez Ministerstwo Nauki i Technologii Chińskiej Republiki Ludowej, po stronie chińskiej. Realizacja projektu możliwa była dzięki utworzeniu konsorcjum z Xi'an University of Science and Technology oraz chińskimi gigantami petrochemicznymi China National Petroleum Company (Research Institute of Safety and Environmental Protection, CNPC), China Petroleum and Chemical Corporation (Sinopec Corp.). Celem projektu jest opracowanie technologii wczesnego ostrzegania, zapobiegania oraz kontroli wycieków siarkowodoru na terenach rafinerijnych. Finansowanie umożliwiło zacieśnienie współpracy oraz wymianę wiedzy z ośrodkami badawczymi w Chinach, oraz otwiera realną perspektywę na komercjalizację opracowanych technologii w Chińskim przemyśle.

W okresie po doktoracie habilitant rozwijał również źródła promieniowania koherentnego do zastosowań w laserowej spektroskopii gazów. Większość tych prac zrealizowana była w ramach projektu FIRST TEAM (FNP), gdzie pełniłem funkcję Głównego Wykonawcy. Projekt realizowany był we współpracy z Grupą badawczą prof. Aleksandry Foltynowicz na Uniwersytecie Umea, w Szwecji, oraz Grupą dra hab. Piotra Masłowskiego z UMK w Toruniu. Efektem projektu są 4 publikacje oraz 7 publikacji w materiałach pokonferencyjnych indeksowanych na liście JCR: [B12], [B15], [B18], [B20], [C1], [C5], [C16-C19], [C24].

Wszystkie opisane powyżej współpracy są w dalszym ciągu aktywne oraz corocznie przynoszą efekty w postaci publikacji w czasopismach z listy JCR.

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

7.1 Wyróżnienia, nagrody, stypendia

2022

- Miejsce w rankingu **World's TOP 2% Scientists**.

2021

- Miejsce w rankingu **World's TOP 2% Scientists**.
- Stypendium Rektora Politechniki Wrocławskiej za wybitne osiągnięcia w kategorii Aktywności projektowo-wdrożeniowej.
- Laureat programu SECUNDUS na Politechnice Wrocławskiej (dla autorów najwyżej punktowanych publikacji naukowych w dyscyplinie).

2020

- Laureat programu SECUNDUS na Politechnice Wrocławskiej (dla autorów najwyżej punktowanych publikacji naukowych w dyscyplinie).

2017

- Stypendium Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego dla wybitnych młodych naukowców.

2015

- Stypendium START z Fundacji na rzecz Nauki Polskiej - Stypendium dla wybitnych młodych uczonych na początku kariery naukowej.

2014

- Stypendium START z Fundacji na rzecz Nauki Polskiej - Stypendium dla wybitnych młodych uczonych na początku kariery naukowej.
- Stypendium im. Maxa Borna przeznaczone dla wybitnych doktorantów wrocławskiego środowiska naukowego.
- Stypendium doktoranckie Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego za wybitne osiągnięcia naukowe.

2013

- Stypendium GRANT PLUS z Urzędu Marszałkowskiego Województwa Dolnośląskiego.
- Stypendium doktoranckie Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego za wybitne osiągnięcia naukowe.
- Nagroda Rektora Politechniki Wrocławskiej za wybitne osiągnięcia naukowe.
- Stypendium dla najlepszych doktorantów (Politechnika Wrocławska).

7.2 Osiągnięcia organizacyjne

Za największe swoje osiągnięcie organizacyjne habilitant uważa samodzielne zainicjowanie w Katedrze Teorii Pola Układów Elektronicznych oraz Optoelektroniki wątków badawczych poświęconych rozwijaniu laserowych metod detekcji gazów. W efekcie czego, na wydziale Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów, PWr, habilitant założył Grupę Laserowej Spektroskopii Gazów, której jest obecnie Kierownikiem.

Ponadto, w okresie po doktoracie habilitant był:

- dwukrotnym Edytorem Pomocniczym w czasopiśmie Sensors, MDPI (IF = 3,847),
- dwukrotnym Edytorem Pomocniczym w czasopiśmie Frontiers in Physics (IF = 3,56),
- aktywnym recenzentem w czasopismach o wysokim IF, m.in. Nature Communications, Photoacoustics, Sensors and Actuators B:Chemical, Grupy Optica Publishing (łącznie 46 recenzji).

7.3 Osiągnięcia dydaktyczne

Po uzyskaniu stopnia doktora, moje stanowiska na Politechnice Wrocławskiej obejmowały wyłącznie obowiązki naukowe. Pomimo formalnego braku obowiązków dydaktycznych, wśród moich osiągnięć w tym obszarze wyróżnić można:

- pełnienie funkcji promotora pomocniczego w czterech przewodach doktorskich,
- pełnienie funkcji promotora trzech prac magisterskich oraz jednej pracy inżynierskiej,
- współprowadzenie wykładów w latach 2020 – 2021,
- popularyzowanie nauki poprzez organizację zajęć dydaktycznych w ramach XXI Dolnośląskiego Festiwalu Nauki na PWr.

7.4 Wyróżnienia publikacji

- Praca [B20], pt. „Antiresonant hollow-core fiber-based dual gas sensor for detection of methane and carbon dioxide in the near-and mid-infrared regions," Sensors 20(14), 3813 (2020), została wyróżniona w "Editor's Choice Articles".

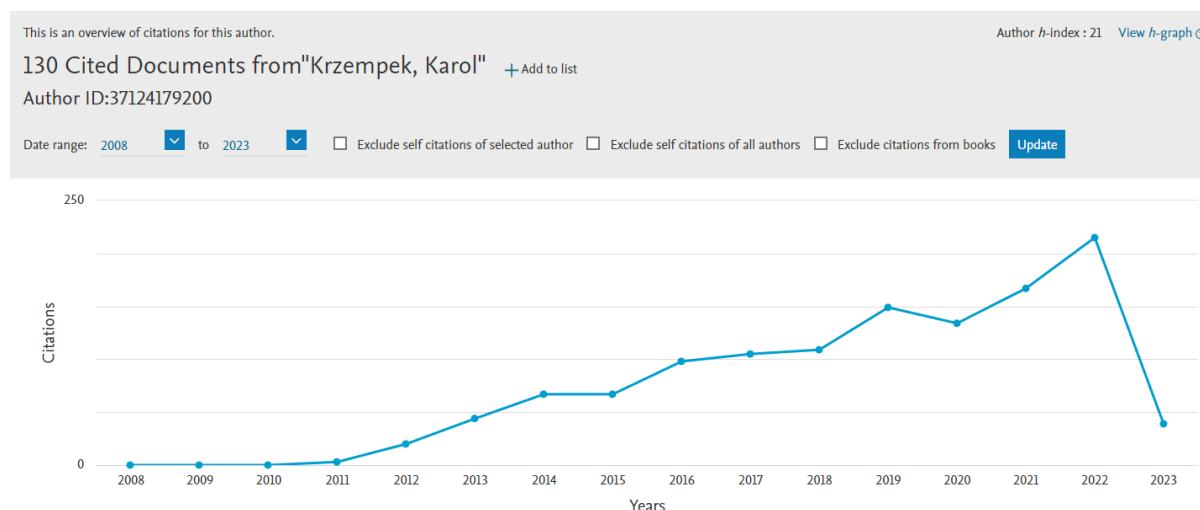
8. Dane bibliometryczne

Dane aktualne na dzień 15.02.2023.

Liczba publikacji w czasopismach z listy JCR: **49**, w tym **31** opisujących zagadnienia związane ze spektroskopią laserową.

Liczba publikacji w czasopismach z listy JCR po złożeniu pracy doktorskiej: **33**, w tym **27** opisujących zagadnienia związane ze spektroskopią laserową.

Sumaryczny Impact Factor:	158,344
Przed złożeniem pracy doktorskiej:	38,582
Po złożeniu pracy doktorskiej:	119,762
Indeks Hirscha (wg Google Scholar):	21
Indeks Hirscha (wg Web of Science):	21
Całkowita liczba cytowań (wg Google Scholar)	1354
Liczba cytowań (wg Web of Science)	1217
Liczba cytowań bez autocytowań (wg Web of Science):	997



Rys. 17. Zrzut ekranu z bazy Web of Science.