

Michał Nikodem

Wniosek z dnia 17.10.2017 roku o przeprowadzenie postępowania habilitacyjnego
w dziedzinie NAUK FIZYCZNYCH w dyscyplinie FIZYKA

Załącznik 2

Autoreferat

wraz z informacją o osiągnięciach naukowych, listą publikacji,
współpracy z innymi organizacjami, działalności popularyzującej naukę,
w języku polskim

N. Nikodem

1. Imię i nazwisko

Michał Nikodem

2. Posiadane stopnie naukowe – z podaniem nazwy i roku ich uzyskania oraz tytułu pracy

2007: magister inżynier, Wydział Elektroniki Politechniki Wrocławskiej (kierunek Elektronika i Telekomunikacja). Tytuł pracy: *Generacja grzebień częstotliwości z laserów światłowodowych z synchronizacją modów*. Promotor: prof. Krzysztof Abramski.

2010: doktor, Instytut Telekomunikacji, Teleinformatyki i Akustyki Politechniki Wrocławskiej (dziedzina: Nauki Techniczne, zakres: Telekomunikacja). Tytuł pracy: *Stabilne spektralnie grzebień częstotliwości optycznych w trzecim oknie telekomunikacyjnym*. Promotor: prof. Krzysztof Abramski.

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

01.07.2009 do 30.09.2009	staż, Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu, Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej;
01.06.2010 do 31.07.2010	starszy referent inżyniersko-techniczny, Politechnika Wroclawska, Wydział Elektroniki;
01.08.2010 do 30.11.2012	Postdoctoral Research Fellow (staż podoktorski), Electrical Engineering Department, Princeton University (USA);
od 01.12.2012	kierownik Laboratorium Laserowych Systemów Pomiarowych, Wrocławskie Centrum Badań EIT+.
od 01.10.2017	adiunkt naukowo-dydaktyczny w Katedrze Optyki i Fotoniki, Wydział Podstawowych Problemów Techniki, Politechnika Wroclawska.

4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 ze zm.):

Jako osiągnięcie naukowe wynikające z ustawy wskazuję monotematyczny cykl publikacji pt: **Laserowa spektroskopia molekularna z wykorzystaniem zjawiska dyspersji w pobliżu linii absorpcyjnych i jej zastosowania do detekcji śladowych stężeń gazów**

W skład osiągnięcia wchodzi następujące publikacje:

- [1] **M. Nikodem**, D. Weidmann, C. Smith, G. Wysocki, Signal-to-noise ratio in chirped laser dispersion spectroscopy, *Optics Express* 20, 644-653 (2012).
Impact factor: 3.546.
- [2] **M. Nikodem**, D. Weidmann, G. Wysocki, Chirped laser dispersion spectroscopy with harmonic detection of molecular spectra, *Applied Physics B* 109, 477-483 (2012).
Impact factor: 1.782.
- [3] **M. Nikodem**, G. Wysocki, Measuring optically thick molecular samples using chirped laser dispersion spectroscopy, *Optics Letters* 38, 3834-3837 (2013).
Impact factor: 3.179.

- [4] **M. Nikodem** and G. Wysocki, Chirped laser dispersion spectroscopy for remote open-path trace-gas sensing, *Sensors* 12, 16466-16481 (2012).
Impact factor: 1.953.
- [5] **M. Nikodem**, Chirped lasers dispersion spectroscopy implemented with an electro-optical intensity modulator – signal strength and shapes under different experimental conditions, *Optics Express* 23, 8227-8234 (2015).
Impact factor: 3.148.
- [6] **M. Nikodem**, G. Plant, D. Sonnenfroh, G. Wysocki, Open-path sensor for atmospheric methane based on chirped laser dispersion spectroscopy, *Applied Physics B* 119, 3-9 (2014).
Impact factor: 1.856.
- [7] G. Plant, **M. Nikodem** P. Mulhall, R. Varner, D. Sonnenfroh, Wysocki, Field test of a remote multi-path CLaDS methane sensor, *Sensors* 15, 21315-21326 (2015).
Impact factor: 2.033.
- [8] **M. Nikodem**, Chirped laser dispersion spectroscopy for laser-based hydrogen sulfide detection in open-path conditions, *Optics Express* 24, A878-A884 (2016).
Impact factor: 3.307.
- [9] **M. Nikodem**, K. Krzempek, R. Karwat, G. Dudzik, K. Abramski, G. Wysocki, Chirped laser dispersion spectroscopy with DFG source, *Optics Letters* 39, 4420-4423 (2014).
Impact factor: 3.292.
- [10] **M. Nikodem**, Chirped laser dispersion spectroscopy with parametric down-conversion for open-path gas sensing, *Optical Engineering* 55, 044103 (2016).
Impact factor: 1.082.
- [11] **M. Nikodem**, G. Wysocki, Differential optical dispersion spectroscopy, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* 23, Article 9000405, (2017).
Impact factor: 3.971 (przyjęto IF za rok 2016).

Spektroskopia laserowa to niezwykle wygodne i użyteczne narzędzie umożliwiające identyfikację oraz precyzyjny pomiar stężenia związków chemicznych, w szczególności w fazie lotnej. W odróżnieniu od innych technik pomiaru, które standardowo wymagają pomieszczeń laboratoryjnych (spektrometria mas czy chromatografia gazowa), systemy detekcyjne wykorzystujące źródła laserowe mogą być z powodzeniem stosowane poza laboratorium. Metody laserowe mają ponadto minimalne wymagania odnośnie przygotowania próbki, umożliwiając wykonywanie pomiarów w krótkim czasie, zarówno w sposób zdalny jak i punktowy.

Szczególnie duże zainteresowanie budzi laserowa detekcja w bliskiej lub średniej podczerwieni (długości fali od 1 do kilkunastu μm). Jej zaletą jest obecność w tym zakresie linii absorpcyjnych związanych z rotacyjno-wibracyjnymi wzbudzeniami większości molekuł. Linie te są zwykle stosunkowo wąskie (szerokość połówkowa poniżej 10 GHz dla ciśnienia atmosferycznego), co pozwala na niezwykle selektywną identyfikację poszczególnych związków nawet w przypadku, gdy znajdują się one w złożonej mieszaninie. Zaletą bliskiej i średniej podczerwieni jest także dostępność półprzewodnikowych źródeł laserowych: diod laserowych oraz laserów kaskadowych (ang. *Quantum Cascade Lasers*, QCLs oraz *Interband Cascade Lasers*, ICLs). Zastosowanie laserów z rezonatorami typu DFB (ang. *Distributed Feed-Back*) pozwala na uzyskanie pracy jednoczęstotliwościowej, niezbędnej do detekcji śladowych stężeń gazów.

Najprostsza metoda laserowej detekcji stężenia gazu polega na pomiarze stopnia absorpcji w przybliżeniu monochromatycznego promieniowania o określonej długości fali na dobrze zdefiniowanej drodze optycznej L . W takiej sytuacji absorpcja opisana jest zależnością Lamberta-Beera:

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

gdzie N to koncentracja molekuly, $\sigma(\omega)$ to współczynnik absorpcji (ang. *absorption cross section*), $\omega = 2\pi f$, gdzie f to częstotliwość fali elektromagnetycznej. Z powyższego równania wynika, że przy określonej drodze optycznej L oraz przy znanym współczynniku absorpcji $\sigma(\omega)$ (zwykle określony jest on doświadczalnie lub na podstawie ogólnodostępnych baz spektroskopowych, np. HITRAN¹ lub bazy udostępnianej przez Pacific Northwest National Laboratories, PNNL) pomiar stopnia absorpcji umożliwia określenie stężenia molekuly w badanej próbce gazu. W praktycznych realizacjach tej koncepcji zwykle wykorzystuje się źródła półprzewodnikowe, w których piłokształtna modulacja prądu prowadzi do przestrajania długości emitowanej fali (ang. *Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy*, TDLAS). Pomiar natężenia światła po przejściu przez badaną próbkę gazu umożliwia zarejestrowanie pełnego kształtu linii absorpcyjnej. Dalsza obróbka sygnału (polegająca zwykle na dopasowaniu zmierzonego widma do właściwego modelu) pozwala na określenie parametrów badanej próbki gazu, takich jak stężenie określonej molekuly, temperatura lub ciśnienie. Technika TDLAS jest powszechnie stosowana, również w rozwiązaniach komercyjnych², głównie ze względu na swoją prostotę i teoretyczny brak konieczności kalibracji. Jednak w praktyce, w większości przypadków, taka kalibracja jest wymagana, co związane jest z faktem, że w technice TDLAS wielkością bezpośrednio mierzona jest natężenia światła, a mierzone widmo absorpcyjne posiada tło. Fluktuacje tego tła oraz wszelkiego rodzaju szum amplitudowy w znaczący sposób mogą pogarszać dokładność pomiaru. Sporym wyzwaniem jest także pomiar w warunkach ciśnienia atmosferycznego, gdy zakres przestrajania długości fali lasera jest niewiele większy od szerokości połówkowej linii absorpcyjnej. W takiej sytuacji rejestracja tła (niezbędna w dopasowaniu modelu do mierzonego widma) jest praktycznie niemożliwa. Problem ten można rozwiązać stosując technikę WMS³ (ang. *Wavelength Modulation Spectroscopy*), w której przestrajanie w zakresie szerokości połówkowej linii jest wystarczające do uzyskania maksymalnej amplitudy sygnału. W WMS długość fali modulowana jest sygnałem sinusoidalnym. Interakcja światła z linią absorpcyjną prowadzi do powstania w mierzonym sygnale składowych harmonicznych, z których druga harmoniczna osiąga maksymalną amplitudę na środku linii. Amplituda drugiej harmonicznej jest proporcjonalna do głębokości linii absorpcyjnej, co umożliwia, zwykle po wykonaniu kalibracji mieszaną o znanym składzie, określenie stężenia badanego związku. WMS pozwala na efektywną eliminację szumów i uzyskanie stosunkowo dużej czułości pomiaru. Sporym wyzwaniem jest natomiast osiągnięcie dobrej dokładności. Także w tym przypadku wynika to z dwóch faktów: mierzony sygnał zazwyczaj posiada tło oraz jego amplituda w sposób bezpośredni zależy od natężenia światła docierającego do detektora.

W ostatnich 30 latach pojawiło się kilka nowych metod detekcji gazów. W technice QEPAS⁴ (ang. *Quartz Enhanced Photo-Acoustic Spectroscopy*) absorpcja modulowanego światła generuje falę akustyczną, która wykrywana jest za pomocą kwarcowego kamertonu pełniącego rolę mikrofonu. Jest to bardzo czuła metoda, wymaga jednak pracy w warunkach obniżonego ciśnienia, a mierzony sygnał

¹ <http://hitran.iao.ru/>

² J. B. McManus, D. D. Nelson, M. S. Zahniser, Design and performance of a dual-laser instrument for multiple isotopologues of carbon dioxide and water, *Opt. Express* 23, 6569-6586 (2015).

³ S. Schilt, L. Thévenaz, P. Robert, Wavelength modulation spectroscopy: combined frequency and intensity laser modulation, *Appl. Opt.* 42, 6728-6738 (2003).

⁴ A. A. Kosterev, Yu. A. Bakhrkin, R. F. Curl, F. K. Tittel, Quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy, *Opt. Lett.* 27, 1902-1904 (2002).

znacząco zależy od wilgotności badanej próbki gazu. To prowadzi do problemów z długoterminową stabilnością układu, a uzyskanie dużej dokładności wymaga częstej kalibracji, co może być wyzwaniem przy pracy w warunkach polowych. Metody CRDS (ang. *Cavity Ring-Down Spectroscopy*), CEAS (ang. *Cavity Enhanced Absorption Spectroscopy*), czy ICOS (ang. *Integrated Cavity Output Spectroscopy*) wykorzystują wnęki rezonansowe o dużej dobroci (finesse)⁵ umożliwiające uzyskanie w stosunkowo prosty sposób toru optycznego o długości ponad 10 km. Zgodnie z równaniem (1) takie wydłużenie drogi optycznej pozwala na uzyskanie znacznej absorpcji nawet w przypadku śladowych ilości badanej molekuly. Jednak ze względu na konieczność stosowania wnęk rezonansowych z lustrami o dużym współczynniku odbicia (zwykle powyżej 99.99%), techniki te rzadko są stosowane w pomiarach w wolnej przestrzeni (co także oznacza brak możliwości detekcji zdalnej), a stopniowa degradacja powierzchni lusterek przekłada się bezpośrednio na spadek czułości układu.

Nowe metody pomiarowe rozwijane w ostatnich kilku dekadach miały na celu przede wszystkim zwiększenie czułości pomiaru, a także uproszczenie układów pomiarowych poprzez zastąpienie złożonych źródeł światła (lasery gazowe lub barwnikowe) laserami półprzewodnikowymi (pierwsze lasery QCL i ICL zostały zaprezentowane w połowie lat 90.) Wyzwaniem wciąż jednak pozostaje efektywne stosowanie spektroskopii laserowej w detekcji zdalnej, gdzie możliwość okresowej kalibracji jest utrudniona (czasami wręcz niemożliwa), a dokładność pomiaru silnie zależy od fluktuacji mocy optycznej docierającej do detektora. Jedną z nowych metod, które koncentruje się na tym właśnie problemie jest CLaDS (ang. *Chirped Laser Dispersion Spectroscopy*), zaprezentowana po raz pierwszy w 2010 roku⁶. W przeciwieństwie do większości technik spektroskopowych, metoda ta wykorzystuje do określenia stężenia badanego związku nie pomiar absorpcji światła, ale dyspersji w pobliżu częstotliwości rezonansowej (linii absorpcyjnej).

Gdy częstotliwość padającej fali elektromagnetycznej zbliżona jest do częstotliwości rezonansowej molekuł badanego gazu, w wyniku interakcji z molekułami przechodząca przez gaz fala jest nie tylko absorbowana, ale zmianie ulega także jej faza. Oba zjawiska związane są z zespolonym współczynnikiem załamania $\tilde{n}(\omega)$:

$$\tilde{n}(\omega) = n(\omega) - i\alpha(\omega), \quad (2)$$

gdzie $\alpha(\omega) = \sigma(\omega)L$. Część rzeczywista i urojona $\tilde{n}(\omega)$ (odpowiadające za, odpowiednio, współczynnik załamania i absorpcję) powiązane są ze sobą relacją Kramersa-Kroniga:

$$n(\omega) = 1 + \frac{c}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\alpha(\omega')}{\omega'^2 - \omega^2} d\omega'. \quad (3)$$

Detekcję gazów można więc zrealizować zarówno poprzez pomiar mocy jak i zmiany fazy światła o określonej długości fali przechodzącej przez próbkę gazu (jest to odpowiednio pomiar widma absorpcyjnego lub dyspersji). Ponadto, w oparciu o zależność (3), wszelkie analizy wykorzystujące modelowanie widm absorpcyjnych mogą być z powodzeniem stosowane także w przypadku pomiarów dyspersji.

W laserowej spektroskopii dla potrzeb detekcji stężeń gazów najczęściej wykorzystywany jest pomiar absorpcji. Wynika to z faktu, że jest on stosunkowo prosty w realizacji – natężenie światła można bowiem łatwo zmierzyć np. za pomocą detektora półprzewodnikowego. Technika CLaDS pozwala

⁵ G. Gagliardi, H.-P. Looock (ed.), *Cavity-Enhanced Spectroscopy and Sensing*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg (2014).

⁶ G. Wysocki, D. Weidmann, *Molecular dispersion spectroscopy for chemical sensing using chirped mid-infrared quantum cascade laser*, *Opt. Express* 18, 26123-26140 (2010).

jednak na stosunkowo prosty pomiar także widma dyspersyjnego wykorzystując do tego celu (przynajmniej) dwie fale elektromagnetyczne różniące się częstotliwością o Ω (zwykle od kilkudziesięciu MHz do kilku GHz). Obie fale propagują się przez badaną próbkę gazu, a następnie są skupiane na detektorze półprzewodnikowym, na którego wyjściu pojawia się sygnał zdudnień o częstotliwości Ω . Gdy fale te są jednocześnie przestrajane, zmiana współczynnika załamania w pobliżu linii absorpcyjnej powoduje zmianę fazy tego zdudnienia w czasie, co w konsekwencji może być zaobserwowane jako modulacja częstotliwości zdudnienia wokół Ω . Informacja spektroskopowa zawarta jest więc w dewiacji częstotliwości i może być zmierzona przy użyciu standardowej demodulacji FM, powszechnie stosowanej w technice radiowej. Te cechy odróżniają CLaDS od innych metod, w których do pomiaru stężenia gazów również wykorzystuje się zmianę współczynnika załamania światła w pobliżu linii absorpcyjnych. Na przykład w spektroskopii FM⁷ pomiar dyspersji wciąż jest realizowany poprzez pomiar natężenia światła, natomiast technika NICE-OHMS⁸ (ang. *Noise Immune Cavity Enhanced Optical Heterodyne Molecular Spectroscopy*) oraz spektroskopia wykorzystująca grzebienie częstotliwości optycznych⁹ są niezwykle złożone i drogie w realizacji, co znacznie ogranicza ich praktyczne stosowanie w warunkach polowych.

W 2010 roku rozpocząłem prace, których celem było lepsze zrozumienie podstaw fizycznych techniki CLaDS, demonstracja jej właściwości oraz opracowanie konfiguracji układów pomiarowych pozwalających na jej rozwinięcie z etapu eksperymentów laboratoryjnych w stronę praktycznych zastosowań. Prace te doprowadziły do rozwiązania szeregu problemów fizycznych związanych m.in. z redukcją szumów, czy efektywnym pomiarem linii rezonansowych poszerzonych ciśnieniowo. Uzyskane wyniki zostały opublikowane w cyklu artykułów stanowiących rozprawę habilitacyjną i są szczegółowo omówione w dalszej części niniejszego autoreferatu.

Pierwszą pozycją w cyklu jest praca

[1] **M. Nikodem**, D. Weidmann, C. Smith, G. Wysocki, Signal-to-noise ratio in chirped laser dispersion spectroscopy, *Optics Express* 20, 644-653 (2012),

która poświęcona jest analizie wpływu szybkości przestrajania długości fali na stosunek sygnału do szumu (SNR) w technice CLaDS.

Dewiacja częstotliwości mierzona w metodzie CLaDS jest wynikiem zmiany fazy zdudnienia w trakcie przestrajania długości fali lasera przez linię absorcyjną. Ponieważ częstotliwość jest pochodną fazy po czasie, wartość mierzonego sygnału może być efektywnie zwiększona poprzez zastosowanie szybszego przestrajania. Jednak z punktu widzenia czułości pomiaru równie istotnym parametrem co amplituda sygnału jest poziom szumów. W pracy [1] przeprowadzona została analiza, w wyniku której zaproponowany został model opisujący zależność pomiędzy stosunkiem sygnału do szumu, a szybkością przestrajania. Szybsze przestrajanie pozwala na zarejestrowanie w tym samym czasie, a następnie uśrednienie, większej liczby widm. To, przy założeniu, że mamy do czynienia z szumem białym, skutkuje poprawą SNR. Jednak z drugiej strony, szybsza akwizycja wymusza także zwiększenia pasma demodulacji sygnału. Cechą demodulacji FM jest natomiast kwadratowa zależność szumu od pasma. Dodatkowo, każdy element w układzie może w niewielkim stopniu

⁷ G. Bjorklund, M. Levenson, W. Lenth, C. Ortiz, Frequency modulation (FM) spectroscopy, *Appl. Phys. B* 32, 145-152 (1983).

⁸ F. M. Schmidt, A. Foltynowicz, W. Ma, O. Axner, Fiber-laser-based noise-immune cavity-enhanced optical heterodyne molecular spectrometry for Doppler-broadened detection of C₂H₂ in the parts per trillion range, *J. Opt. Soc. Am. B* 24, 1392-1405 (2007).

⁹ I. Coddington, W. C. Swann, N. R. Newbury, Coherent Multiheterodyne Spectroscopy Using Stabilized Optical Frequency Combs, *Phys. Rev. Lett.* 100, 013902 (2008).

rozpraszać i odbijać światło. Nawet przy zastosowaniu pokryw antyrefleksyjnych oraz przy skośnym ustawianiu elementów te odbicia i rozproszenia prowadzą do powstania niepożądanych rezonatorów Fabry-Perot, które w wyjściowym widmie tworzą charakterystyczny sygnał pochodzący od prążków interferencyjnych. Jakiegokolwiek zmiany mechanicznie w układzie (np. dryft w wyniku zmian temperatury) powodują przesuwanie się prążków interferencyjnych, co w efekcie prowadzi do problemów z długoterminową stabilnością układu pomiarowego. Z tego powodu prążki interferencyjne mogą być traktowane jako jedna ze składowych szumu, której amplituda jest (podobnie jak właściwy sygnał pochodzący od linii rezonansowej badanej molekuly) proporcjonalna do szybkości przestrajania długości fali lasera. Zaproponowany model został zweryfikowany w oparciu o serię badań, w których wykorzystano laser kaskadowy typu DFB pracujący na długości fali około 5.2 μm . W wyniku przeprowadzonych eksperymentów wykazano, że dla układu, w którym obecne są niepożądane prążki interferencyjne, istnieje szybkość przestrajania dla której SNR osiąga wartość maksymalną. W takich warunkach szybsze przestrajanie doprowadzi jedynie do pogorszenia stosunku sygnału do szumu.

W pracy [1] zidentyfikowano również niepożądane odbicia pomiędzy wejściową i wyjściową płaszczyzną modulatora akusto-optycznego, jako główne źródło szumu w zbudowanym układzie. Modulatory tego typu pracujące w średniej podczerwieni wykonane są z germanu, materiału o wysokim współczynniku załamania, co w połączeniu z niewielkim kątem Bragga prowadzi do powstawania etalonu. W pracy [1] zaproponowano również metodę umożliwiającą efektywne uśrednienie i w konsekwencji redukcję amplitudy tego niepożądanego sygnału prążkowego.

Mój wkład w powstanie pracy [1] polegał na zaplanowaniu badań, budowie układu (przy udziale C. Smitha), przeprowadzeniu eksperymentów, analizie wyników (wspólnie z G. Wysockim i D. Weidmannem) oraz przygotowaniu manuskryptu (wspólnie z pozostałymi autorami). Swój udział procentowy w powstanie pracy [1] szacuję na 70%.

Najistotniejszym wynikiem badań przedstawionych w pracy [1] był wniosek, że w przypadku układu o niewielkiej amplitudzie prążków interferencyjnych, szum w technice CLaDS zależy przede wszystkim od pasma demodulacji sygnału z detektora. Konsekwencją tej tezy było zaproponowanie nowego sposobu generowania i wykrywania sygnału, który został szczegółowo opisany w drugiej pracy cyklu:

[2] **M. Nikodem**, D. Weidmann, G. Wysocki, Chirped laser dispersion spectroscopy with harmonic detection of molecular spectra, Applied Physics B 109, 477-483 (2012).

W zaproponowanej metodzie generacja sygnału jest wynikiem sinusoidalnego przestrajania długości fali lasera w pobliżu linii rezonansowej molekuly z częstotliwością f_m . W konsekwencji sygnał zdudnień jest zmodulowany częstotliwościami będącymi całkowitą wielokrotnością f_m . Po przeprowadzeniu procesu demodulacji każda z tych składowych może być z łatwością odfiltrowana. Z punktu widzenia pomiaru stężenia gazu największe znaczenie ma składowa $2 \times f_m$, która osiąga maksimum na środku linii rezonansowej, a jej amplituda jest wprost proporcjonalna do poszukiwanego stężenia.

W pracy [2] nowa metoda generacji i detekcji sygnału w technice CLaDS została opisana analitycznie oraz zademonstrowana eksperymentalnie. W tym celu zbudowany został układ wykorzystujący laser kaskadowy typu DFB generujący promieniowanie w pobliżu długości fali 4.53 μm . Przeprowadzone eksperymenty wykazały, że zaproponowana metoda zachowuje najważniejszą cechę techniki CLaDS, którą jest brak zależności pomiędzy mocą docierającą do detektora, a amplitudą mierzonego sygnału. Wynika to z faktu, że użyteczny sygnał zakodowany jest w częstotliwości sygnału zdudnień, a nie w amplitudzie. Dodatkowo, nowy sposób generacji i detekcji sygnału ma niezwykle ważne właściwości, kluczowe w perspektywie dalszego rozwoju metody CLaDS. Sygnał zakodowany

w składowej $2 \times f_m$ nie posiada tła, które mogłoby być wynikiem różnych dróg optycznych promieni opuszczających modulator akusto-optyczny. Ponadto, pozwala na analizę sygnału jedynie na środku linii rezonansowej, bez konieczności rejestracji pełnego widma. To skutkuje bardziej efektywnym uśrednianiem sygnału i w konsekwencji większą czułością pomiaru. Dodatkowo, w celu uzyskania maksymalnej amplitudy, nowa technika wymaga przestrajania długości fali na poziomie szerokości połówkowej linii rezonansowej. Jest to istotne szczególnie w przypadku pomiarów w wolnej przestrzeni, gdzie poszerzone ciśnieniowo linie mogą osiągać szerokość kilku GHz.

Laser wykorzystywany w przedstawionych w [2] eksperymentach umożliwił badanie najsilniejszych linii podtlenku azotu (N_2O), związku uważanego za jeden z najgroźniejszych gazów cieplarnianych. Dla zbudowanego układu oszacowany został limit detekcji na poziomie poniżej $100 \text{ ppb} \times m \times \text{Hz}^{-1/2}$ (przy ciśnieniu gazu 300 Torr; ppb – cząstek na miliard, ang. *parts per billion*). Jest to wynik, który daje perspektywę na zastosowanie opracowanej metody detekcji w pomiarach połowych (stężenie N_2O w powietrzu wynosi zwykle od 300 do 400 ppb). Co istotne, został on osiągnięty pomimo stosowania modulatora akusto-optyczny pracującego z częstotliwością Ω wynoszącą zaledwie 50 MHz. Wartość ta jest znacznie mniejsza niż szerokość połówkowa badanej linii rezonansowej, co skutkuje spadkiem amplitudy mierzonego sygnału. Niestety, przesuwniki częstotliwości pracujące w średniej podczerwieni i oferujące wyższe częstotliwości nie są dostępne.

Zaproponowanie nowej techniki generacji i detekcji sygnału okazało się kluczowe dla rozwoju metody CLaDS w kierunku praktycznych zastosowań do detekcji śladowych stężeń gazów. Metoda ta została również objęta ochroną patentową na terenie Stanów Zjednoczonych (patent US 13/453,499, data publikacji 5.05.2015), a w 2015 roku licencja została sprzedana firmie Tiger Optics.

Mój wkład w powstanie pracy [2] polegał na zaproponowaniu wykorzystania w CLaDS modulacji długości fali sygnałem sinusoidalnym (wspólnie z G. Wysockim), zaplanowaniu badań, budowie układu, przeprowadzeniu eksperymentów w laboratorium, analizie wyników (wspólnie z pozostałymi autorami) oraz przygotowaniu manuskryptu (wspólnie z pozostałymi autorami). Swój udział procentowy w powstaniu pracy [2] szacuję na 60%.

Analiza właściwości nowej techniki pomiarowej oraz wpływu parametrów układu pomiarowego na uzyskiwane sygnały została rozszerzona w trzeciej pracy cyklu:

[3] **M. Nikodem**, G. Wysocki, Measuring optically thick molecular samples using chirped laser dispersion spectroscopy, *Optics Letters* 38, 3834-3837 (2013).

Praca ta poświęcona jest pomiarom linii rezonansowych o dużej szczytowej absorpcji. Stosowanie w takich warunkach standardowych metod bazujących na pomiarze absorpcji światła jest utrudnione, a często nawet niemożliwe (z praktycznego punktu widzenia). Wynika to z faktu, że związek pomiędzy absorpcją światła i stężeniem molekuly nie jest liniowy. Taki charakter w przybliżeniu zachowany jest jedynie dla linii o szczytowej absorpcji na poziomie do około 10%. Ograniczenie to nie dotyczy jednak metod, które do określenia stężenia wykorzystują pomiar współczynnika załamania lub dyspersji w pobliżu linii rezonansowej.

W pracy [3] ta cecha techniki CLaDS została zademonstrowana, ponownie z wykorzystaniem lasera kaskadowego emitującego promieniowanie o długości fali $4.53 \mu\text{m}$. Zmieniając stężenie podtlenku azotu w zakresie od kilku do kilku tysięcy ppm (cząstek na milion, ang. *parts per million*), uzyskana została szczytowa absorpcja na środku linii rezonansowej od ułamków procenta do ponad 99 % (dla toru optycznego o długości 15 cm). Pomiar z wykorzystaniem zaproponowanej techniki w całym tym zakresie stężeń dał liniową odpowiedź ze współczynnikiem determinacji R^2 wynoszącym aż 0.999996. W eksperymentach przedstawionych w pracy [3] wykazano więc, że wykorzystując technikę CLaDS możliwy jest pomiar stężenia z zakresem dynamiki wynoszącym ponad 5 rzędów

wielkości, w stosunkowo prostym układzie i bez konieczności stosowania zaawansowanej analizy sygnału, czy skanowania pełnej linii spektralnej.

Mój wkład w powstanie pracy [3] polegał na zaplanowaniu badań (wspólnie z G. Wysockim), budowie układu, przeprowadzeniu eksperymentów, analizie wyników oraz przygotowaniu manuskryptu (wspólnie z G. Wysockim). Swój udział procentowy w powstanie pracy [3] szacuję na 70%.

W czwartej pracy cyklu:

[4] **M. Nikodem**, G. Wysocki, Chirped laser dispersion spectroscopy for remote open-path trace-gas sensing, *Sensors* 12, 16466-16481 (2012)

opisane zostało praktyczne zastosowanie systemu wykorzystującego technikę CLaDS do detekcji stężenia podtlenku azotu w atmosferze. Układ został skonfigurowany do pracy zdalnej, w której wiązka laserowa wysyłana była w stronę oddalonego retro reflektora, a powracające światło było skupione za pomocą teleskopu na detektorze. Taka konfiguracja pozwoliła wydłużyć tor optyczny bez konieczności stosowania komórek odbić wielokrotnych, które w pracy w wolnej przestrzeni są podatne na dryfty i mogą prowadzić do powstania niepożądanych etalonów. W przedstawionym systemie została ponadto zaimplementowana dodatkowa modulacja, która umożliwiła prowadzenie dokładnych pomiarów pomimo obecności w układzie modulatora generującego silne prążki interferencyjne.

Zbudowany system pomiarowy został scharakteryzowany i skalibrowany w laboratorium, a następnie przewieziony w miejsce pomiaru na terenie kampusu Uniwersytetu Maryland. Tam spędził 5 dni, w czasie których zaobserwowano subtelne zmiany stężenia N_2O , każdorazowo następujące po opadach deszczu. Zależność ta jest spodziewana, gdyż emisja podtlenku azotu jest wynikiem procesów zachodzących w glebie, których intensywność wzrasta pod wpływem wilgoci. Co ważne, czujnik wykorzystujący technikę CLaDS okazał się niezwykle stabilny i odporny na warunki zewnętrzne. Poziom obserwowanych szumów był identyczny z pomiarami wykonywanymi w laboratorium. Czujnik pracował prawidłowo także w trudnych warunkach zewnętrznych: w czasie deszczu, w obecności mgły oraz rosy pokrywającej powierzchnię retro reflektora. Obserwowane spadki mocy optycznej docierającej do detektora zwiększały jedynie poziom szumów, nie wpływały natomiast na amplitudę sygnału. Dzięki temu do uzyskania informacji o stężeniu N_2O , nie była potrzebna specjalna obróbka sygnału, ani żadna analiza spektralna. Jednorazowa kalibracja wykonana przed cyklem pomiarowym była wystarczająca do uzyskania wymaganej dokładności. Wyniki zaprezentowane w pracy [4] dowiodły zalet techniki dyspersyjnej, w stosunku do metod bazujących na pomiarze absorpcji światła, w szczególności braku zależności amplitudy mierzonego sygnału od poziomu mocy optycznej docierającej do detektora.

Mój wkład w powstanie pracy [4] polegał na zaplanowaniu badań (wspólnie z G. Wysockim), budowie układu, przeprowadzeniu eksperymentów w laboratorium oraz w warunkach polowych, analizie wyników (wspólnie z G. Wysockim) oraz przygotowaniu manuskryptu (wspólnie z G. Wysockim). Swój udział procentowy w powstanie pracy [4] szacuję na 70%.

Układ wykorzystywany w pracach [1-4] wykorzystywał modulator akusto-optyczny do wytworzenia wiązki o częstotliwości przesuniętej o wartość Ω . Rozwiązanie to, choć skuteczne, miało istotne wady. Dwie wiązki opuszczające modulator (zerowy i pierwszy rząd dyfrakcji) poruszają się w różnych kierunkach, co wymaga zastosowania układu lusterek do połączenia ich w jedną wiązkę pomiarową. Równie istotny jest fakt, że to właśnie modulator okazał się źródłem największych szumów w układzie. Ponadto, dostępne modulatory akusto-optyczne pracujące w średniej podczerwieni mają ograniczoną częstotliwość pracy Ω , znacznie mniejszą niż szerokość połówkowa

mierzonych linii rezonansowych. To skutkuje pracą układu w nieoptymalnych warunkach i znacznie zmniejsza amplitudę mierzonego sygnału. Chęć eliminacji tych wad doprowadziła do kolejnego kroku w rozwoju metody CLaDS. Było nim zastąpienie modulatora akusto-optycznego elektro-optycznym modulatorem natężenia światła. Układ tego typu został poddany szczegółowej analizie teoretycznej oraz był zbadany eksperymentalnie, a wyniki przedstawione są w piątej pracy cyklu:

[5] **M. Nikodem**, Chirped lasers dispersion spectroscopy implemented with an electro-optical intensity modulator – signal strength and shapes under different experimental conditions, *Optics Express* 23, 8227-8234 (2015).

W układzie z modulatorem natężenia światła wiązka pomiarowa jest wytwarzana za pomocą komercyjnie dostępnych modulatorów przeznaczonych do zastosowań w optycznych sieciach transmisyjnych. Są to urządzenia z wejściem i wyjściem sprzęgniętym ze światłowodem i umożliwiające modulację fali elektromagnetycznej z maksymalnymi częstotliwościami Ω znacznie przekraczającymi 1 GHz. W najprostszej konfiguracji modulator wytwarza dwie wstęgi boczne oddalone od częstotliwości nośnej o $\pm \Omega$. Tak powstałe trzy fale po przejściu przez próbkę są skupiane na detektorze generując na jego wyjściu sygnał zdudnień o częstotliwości Ω .

W pracy [5] szczegółowej analizie, zarówno teoretycznej jak i eksperymentalnej, został poddany wpływ sposobu sterowania modulatora na kształt i amplitudę uzyskiwanych sygnałów. W tym celu wykorzystano laser diodowy pracujący w paśmie 1.55 μm oraz linię absorpcyjną cyjanowodoru (gaz zamknięty był w szklanej komórce o długości 16.5 cm). Wykazano, że punkt pracy modulatora oraz moc sygnału, który go steruje, w znaczący sposób wpływają na mierzony poziom sygnału CLaDS. Uzyskanie dużej dokładności pomiaru oraz stabilności długookresowej wymaga więc kontroli i stabilizacji punktu pracy modulatora. Ważnym elementem pracy [6] było też rozbudowanie wcześniejszego modelu numerycznego, który posłużył do lepszego zrozumienia przyczyn zależności sygnału CLaDS od sposobu w jaki sterowany jest modulator.

Zastosowania światłowodowego modulatora natężenia światła znacząco uprościło budowę systemu pomiarowego lecz jednocześnie ograniczyło jego stosowanie dla fal w bliskiej podczerwieni. Zakres ten wciąż jednak umożliwia czułą detekcję wielu związków istotnych z punktu widzenia ochrony środowiska lub bezpieczeństwa. Temu zagadnieniu poświęcone zostały trzy kolejne prace cyklu, w których skupiono się na demonstracji praktycznych aspektów techniki CLaDS i jej potencjalnych zastosowań. W szóstej pracy

[6] **M. Nikodem**, G. Plant, D. Sonnenfroh, G. Wysocki, Open-path sensor for atmospheric methane based on chirped laser dispersion spectroscopy, *Applied Physics B* 119, 3-9 (2014)

omówiono układ wykorzystujący technikę CLaDS ze światłowodowym modulatorem natężenia światła oraz z diodą laserową pracującą na długości fali w pobliżu 1653 nm, umożliwiającą pomiar stężenia metanu (CH_4). System ten został zbudowany w formie pozwalającej na jego transport poza laboratorium. Zastosowanie lustra umieszczonego na uchwycie sterowanym mechanicznie umożliwiło wykonanie pomiaru w konfiguracji zdalnej z wykorzystaniem jednego lub kilku retro reflektorów. W badaniach wykazano, że poziom mocy optycznej docierającej do detektora nie ma wpływu na amplitudę mierzonego sygnału. Oszacowano także czułość układu na poziomie $1 \text{ ppm} \times \text{m} \times \text{Hz}^{-1/2}$ oraz jego stabilność, określając maksymalny dryft (przy założeniu braku okresowej kalibracji) na poziomie $700 \text{ ppb} \times \text{m}$. Przy założeniu toru optycznego o długości powyżej 20 metrów wartość ta jest wystarczająca do prowadzenia pomiarów stężenia metanu w atmosferze, gdzie typowe dzienne wahania wynoszą od około 1.7 do kilku ppm. W pracy przedstawiono także wynik testu, w którym

opracowany układ bazujący na technice CLaDS został porównany z komercyjnie dostępnym systemem do zdalnej detekcji metanu RMLD (ang. *Remote Methane Leak Detector*).

Mój wkład w powstanie pracy [6] polegał na zaplanowaniu badań (wspólnie z G. Wysockim), budowie układu i przeprowadzeniu eksperymentów (przy udziale G. Plant), analizie wyników (wspólnie z G. Wysockim) oraz przygotowaniu manuskryptu (wspólnie z pozostałymi autorami). Swoją udział procentowy w powstaniu pracy [6] szacuję na 55%.

Układ opisany w pracy [6] został w kolejnym kroku zaadoptowany do autonomicznej pracy na terenie stacji pomiarowej Sallie's Fen w Barrington (NH), nadzorowanej przez Uniwersytet New Hampshire. Budowa i działanie tego systemu zostało przedstawione w siódmej pracy cyklu:

[7] G. Plant, **M. Nikodem** P. Mulhall, R. Varner, D. Sonnenfroh, G. Wysocki, Field test of a remote multi-path CLaDS methane sensor, *Sensors* 15, 21315-21326 (2015).

Ze względu na trudne warunki środowiskowe (duże wahania temperatury, duża wilgotność, częste opady deszczu) układ został umieszczony w specjalistycznej, klimatyzowanej obudowie. Mechanicznie sterowane lustro umożliwiało kierowanie wiązki pomiarowej w kierunku sześciu retro reflektorów umieszczonych wokół czujnika. Sterowanie systemem obejmowało m.in. dedykowany algorytm pozwalający na automatyczne przełączanie się pomiędzy kolejnymi retro reflektorami. Temperatura pracy diody laserowej została zmniejszona o około 20 stopni, co zaowocowało emisją na długości fali około 1651 nm. W oparciu o model numeryczny wykazano bowiem, że w porównaniu z linią na długości fali 1653 nm, linia rezonansowa na długości fali 1651 nm charakteryzuje się mniejszym wpływem zmian wilgotności powietrza na mierzoną amplitudę sygnału.

System pomiarowy został umieszczony w centralnym punkcie badanego obszaru, a wiązka pomiarowa poruszała się na wysokości około 2 metrów. W pracy wykazano, że dzięki zastosowaniu sześciu retro reflektorów możliwe jest nie tylko określenie stężenia metanu, ale także jego zmian wewnątrz analizowanego obszaru. Wyraźnie widoczne były też dzienne zmiany w stężeniu metanu, od około 1.8 ppm w ciągu dnia do około 2.5 ppm w nocy. Wyniki te były zbieżne z wynikami uzyskanymi przez komercyjne urządzenie dostarczone przez firmę Aerodyne Research. Urządzenie to analizowało próbki gazu zasysane z komór rozmieszczonych na badanym terenie, umieszczonych bezpośrednio nad ziemią.

Przeprowadzone badania wykazały, że system bazujący na technice CLaDS i skonfigurowany do pracy zdalnej może być z powodzeniem stosowany w pomiarach długoterminowych, także w warunkach, w których brak jest możliwości efektywnej okresowej kalibracji.

Mój wkład w powstanie pracy [7] polegał na zaplanowaniu badań (wspólnie z pozostałymi autorami), budowie układu wstępnego, udziale w przeprowadzeniu eksperymentów (wspólnie z pozostałymi autorami), udziale w analizie wyników (wspólnie z G. Plant i G. Wysockim) oraz udziale w przygotowaniu manuskryptu (wspólnie z pozostałymi autorami). Swoją udział procentowy w powstaniu pracy [7] szacuję na 15%.

Kolejna, ósma praca cyklu poświęcona jest wykorzystaniu techniki CLaDS do detekcji stężenia siarkowodoru:

[8] **M. Nikodem**, Chirped laser dispersion spectroscopy for laser-based hydrogen sulfide detection in open-path conditions, *Optics Express* 24, A878-A884 (2016).

Siarkowódor (H_2S) jest nieorganicznym związkem chemicznym, bezbarwnym, łatwopalnym i wybuchowym, o charakterystycznym, nieprzyjemnym zapachu. Szczególną cechą siarkowodoru jest jego silna toksyczność, porównywalna z np. cyjanowodorem lub tlenkiem węgla. Zgodnie

z obowiązującymi normami i przepisami dopuszczalne stężenie siarkowodoru w powietrzu w miejscu pracy nie powinno przekraczać poziomu 7 do 10 ppm. Stąd też system do detekcji siarkowodoru powinien charakteryzować się zarówno czułością, jak i dokładnością na poziomie 1 ppm. Uzyskanie tych parametrów w przypadku detekcji optycznej w wolnej przestrzeni (czyli bez konieczności stosowania pomp i regulatorów ciśnienia) jest sporym wyzwaniem. Wynika to przede wszystkim z faktu, że w otoczeniu linii siarkowodoru zazwyczaj występują linie absorpcyjne innych związków, przede wszystkim pary wodnej, metanu lub dwutlenku węgla. Długość fali w okolicy 1574.5 nm jest jedną z nielicznych, które dają nadzieję na dużą selektywność pomiaru. Uzyskanie wystarczającej dokładności wymaga jednak ograniczenia wpływu linii absorpcyjnych dwutlenku węgla, które znajdują się blisko linii siarkowodoru.

W pracy [8] przedstawiono układ do pomiaru stężenia H₂S za pomocą techniki CLaDS oraz przy wykorzystaniu absorpcyjnej metody WMS. Wykazano, że zastosowanie CLaDS daje większe możliwości uniknięcia wpływu zmian stężenia CO₂ na pomiar siarkowodoru. Uzyskanie wysokiej selektywności wymaga dobrania odpowiednich parametrów: częstotliwości Ω oraz głębokości sinusoidalnej modulacji długości fali. Dokonano także pomiaru czułości zbudowanego układu uzyskując wynik na poziomie 2 ppm (dla toru optycznego w formie komórki odbić wielokrotnych o długości 18 m i czasów uśredniania około 80 sekund). Przedstawione eksperymenty zostały przeprowadzone w układzie, w którym źródłem był laser przestrajalny Santec TSL-510 o stosunkowo niewielkim zakresie modulacji długości fali. Na podstawie analizy w oparciu o model numeryczny możemy przewidzieć, że zastosowanie źródła w postaci diody laserowej DFB oraz zmodyfikowanej konfiguracji komórki odbić wielokrotnych (wykorzystywane lustra umożliwiają zwiększenie długości toru do ponad 30 metrów) może skutkować nawet ośmiokrotną poprawą czułości.

Dostępne światłowodowe modulatory natężenia mogą pracować w tzw. trzecim oknie telekomunikacyjnym (od około 1500 do około 1700 nm). W ostatnich latach stopniowo pojawiają się też wersje przeznaczone na pasmo wokół 2 μ m. Jednak z punktu widzenia detekcji gazów znacznie istotniejszy jest region powyżej 3 μ m, w którym molekuly mają swoje najsilniejsze pasma rotacyjno-wibracyjne. W szczególności, zakres od 3.0 do 3.5 μ m pozwala na pomiar stężenia węglowodorów – metanu, etanu, propanu, acetyleny, etenu i innych. Dzięki współpracy z zespołem profesora Krzysztofa Abramskiego z Politechniki Wrocławskiej zbudowany został system detekcyjny, który umożliwia wykonanie spektroskopii z użyciem techniki CLaDS w okolicach długości fali 3.39 μ m, w oparciu o zmieszanie fal 1064 nm oraz 1550 nm i generację częstotliwości różnicowej w kryształach nieliniowym typu PPLN (ang. *Periodically Poled Lithium Niobate*). Układ ten został przedstawiony w dziewiątej pracy cyklu:

[9] **M. Nikodem**, K. Krzempek, R. Karwat, G. Dudzik, K. Abramski, G. Wysocki, Chirped laser dispersion spectroscopy with DFG source, *Optics Letters* 39, 4420-4423 (2014).

W opisanym systemie detekcja za pomocą techniki CLaDS była możliwa dzięki umieszczeniu światłowodowego modulatora natężenia w torze optycznym dla długości fali 1550 nm. Wygenerowane w ten sposób trzy fale (nośna i dwie wstęgi boczne), po zmieszanu z promieniowaniem o długości 1064 nm, transformowane są w zakres spektralny \sim 3.39 μ m, w którym znajdują się silne linie absorpcyjne metanu. Dzięki zastosowaniu wzmacniaczy światłowodowych (w torach optycznych obu fal, 1550 i 1064 nm) moc optyczna uzyskana na wyjściu kryształu nieliniowego wynosiła około 100 μ W i była wystarczająca do detekcji metanu w wolnej przestrzeni. W pracy przedstawione zostały wyniki pomiaru oraz oszacowana została czułość układu wynosząca około 50 ppb \times m \times Hz^{-1/2}. Jest to wartość ponad 10-krotnie lepsza w porównaniu z systemem pracującym w bliskiej podczerwieni. Taka czułość pozwala na wykonywanie pomiarów niewielkich

zmian stężenia metanu w atmosferze, nawet przy zastosowaniu stosunkowo krótkiego toru optycznego (kilkadziesiąt cm).

Mój wkład w powstanie pracy [9] polegał na zaplanowaniu badań, przeprowadzeniu eksperymentów (wspólnie z K. Krzmpkiem), analizie wyników wraz z modelowaniem numerycznym oraz na przygotowaniu manuskryptu (przy udziale pozostałych autorów). Swoją udział procentowy w powstanie pracy [9] szacuję na 55%.

We wszystkich dotychczas omówionych pracach do demodulacji FM sygnału zdudnień wykorzystywany był analizator widma elektrycznego (Tektronix serii RSA6000 lub Rohde&Schwarz FSV7), który umożliwiał przeprowadzenie demodulacji bezpośrednio na częstotliwości Ω . Z praktycznego punktu widzenia byłoby niezwykle korzystne zastąpienie dużych i stosunkowo drogich analizatorów prostymi układami do akwizycji danych. Jednak przy częstotliwościach Ω osiągających wartości na poziomie 1 GHz i powyżej, taka zamiana nie jest prosta w realizacji. Tematyka ta została podjęta i opisana w kolejnej, dziesiątej pracy cyklu. Przedstawiono w niej metodę, która umożliwi stosowanie dużych wartości Ω (~1 GHz), przy jednoczesnej demodulacji na niższych częstotliwościach (od kilku do kilkudziesięciu MHz).

[10] **M. Nikodem**, Chirped laser dispersion spectroscopy with parametric down-conversion for open-path gas sensing, *Optical Engineering* 55 (2016).

W pracy tej wykorzystana została dioda laserowa DFB pracująca na długości fali 1651 nm. Szybki światłowodowy modulator natężenia generował wstęgi boczne, oddalone od nośnej o częstotliwość $\Omega = 1$ GHz. Po przejściu przez badaną próbkę (metan zamknięty w szklanej komórce) wiązka była skupiana na fotodiodzie, zasilanej napięciem stałym z dodatkowym sygnałem sinusoidalnym o częstotliwości Ω_0 . W ten sposób fotodioda pracowała jednocześnie jako mieszacz, na którego wyjściu pojawiał się sygnał o częstotliwości $\Omega_{\Delta} = |\Omega - \Omega_0|$. W konsekwencji sygnał CLaDS był otrzymywany poprzez demodulację FM na częstotliwości Ω_{Δ} . W pracy [10] w sposób eksperymentalny wykazano, że tak otrzymany sygnał ma identyczny kształt, amplitudę i stosunek sygnału do szumu, jak sygnał uzyskany w wyniku demodulacji bezpośrednio na częstotliwości Ω . Zaprezentowano także możliwość detekcji metanu obecnego w atmosferze przy torze optycznym wydłużonym do 18 metrów za pomocą komórki odbić wielokrotnych.

Możliwość demodulacji sygnału na praktycznie dowolnej częstotliwości (przy jednoczesnym zachowaniu generacji sygnału z odstępem częstotliwości Ω na poziomie szerokości linii rezonansowej) umożliwi zastąpienie drogich analizatorów widma elektrycznego znacznie prostszymi i tańszymi układami, np. przeznaczonymi do pracy w odbiornikach radiowych. Do demodulacji można także wykorzystać np. dostępne komercyjnie karty akwizycji danych (np. urządzenie Virtual Bench od National Instruments) sterowane za pomocą komputera z odpowiednim oprogramowaniem (np. w środowisku LabVIEW lub Matlab).

Wykorzystanie techniki dyspersyjnej do określania stężeń gazów nie tylko umożliwia uzyskanie niezawodnej pracy w warunkach polowych bez konieczności okresowej kalibracji, ale pozwala także na nowe konfiguracje pomiarowe, jakie nie są dostępne przy stosowaniu standardowych metod. Jedna z nich została przedstawiona w ostatniej, jedenastej pracy cyklu:

[11] **M. Nikodem**, G. Wysocki, Differential optical dispersion spectroscopy, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* 23, Article 9000405 (2017).

W pracy tej zaprezentowano możliwość zastosowania spektroskopii dyspersyjnej w detekcji różnicowej. W takiej konfiguracji sygnał będący wynikiem pomiaru jest proporcjonalny do różnicy stężeń badanej molekuly w dwóch próbkach umieszczonych w układzie. Co ważne, dzięki stosowaniu

techniki dyspersyjnej, bezpośrednia detekcja różnicy stężeń jest możliwa w wyniku jednorazowego i jednoczesnego pomiaru obu próbek. Jest to unikalna cecha i znaczna zaleta w stosunku do pomiarów absorpcyjnych, w przypadku których detekcja różnicowa wymaga wykonania dwóch niezależnych pomiarów, co zwykle prowadzi do dryftów w układzie i mniejsza dokładność pomiaru.

W badaniach przedstawionych w pracy [11] wykorzystany był laser kaskadowy pracujący na długości fali 4.53 μm . Zaprezentowano możliwość zastosowania pomiarów dyspersyjnych do bezpośredniej detekcji różnicy stężeń gazów w dwóch próbkach zawierających podtlenek azotu, bez konieczności pomiaru samych stężeń. Tego typu konfiguracja może być z powodzeniem wykorzystana w pomiarach stosunku stężeń izotopów, w których badana próbka musi być mierzona zawsze w odniesieniu do (drugiej) próbki referencyjnej. Ponadto pokazano, że detekcja różnicowa może być stosowana do selektywnej eliminacji linii rezonansowych występujących w rejestrowanych widmach. W ten sposób możliwe jest zmniejszenie interferencji pomiędzy mierzonym sygnałem oraz sygnałami pochodzącymi od innych gazów również obecnych w badanej próbce.

Mój wkład w powstanie pracy [11] polegał na zaproponowaniu wykorzystania techniki CLaDS do pomiaru różnicowego (wspólnie z G. Wysockim), przeprowadzeniu prac w laboratorium, analizie wyników i przygotowaniu manuskryptu (wspólnie z G. Wysockim). Swój udział procentowy w powstanie pracy [11] szacuję na 50%.

Podsumowując, prowadzone przeze mnie badania pozwoliły na przeniesienie nowej techniki detekcyjnej CLaDS z prostych eksperymentów laboratoryjnych do rzeczywistych układów pomiarowych, pracujących w warunkach polowych. Opracowana została metoda umożliwiająca detekcję śladowych stężeń gazów poprzez pomiar dyspersji współczynnika załamania w pobliżu molekularnych linii rezonansowych, która jest atrakcyjną alternatywą dla standardowych technik absorpcyjnych, szczególnie w przypadku pomiarów w wolnej przestrzeni oraz w konfiguracji zdalnej. W przedstawionym cyklu jedenastu publikacji zaprezentowane zostały kolejne kroki rozwoju techniki CLaDS, począwszy od eksperymentów, których celem było lepsze jej zrozumienie, poprzez demonstrację jej najważniejszych własności, zaproponowanie nowych rozwiązań układowych pozwalających na praktyczną demonstrację możliwości pomiaru śladowych stężeń gazów, aż po nowe konfiguracje pomiarowe, które nie są dostępne przy wykorzystaniu standardowych technik detekcyjnych. Wszystkie badania eksperymentalne wspomagane były analizą teoretyczną. Opracowane zostały modele numeryczne, które potwierdzały właściwe rozumienie obserwowanych procesów fizycznych oraz pozwalały na precyzyjną analizę rejestrowanych sygnałów. O potencjale przedstawionej techniki świadczą nie tylko liczne publikacje i prezentacje konferencyjne. Wyniki badań opisane w cyklu publikacji zaowocowały również dwoma patentami przyznanymi przez amerykańskie biuro patentowe, a w komercjalizację techniki CLaDS zaangażowane są firmy Tiger Optics (z USA) oraz Mirico (z Wielkiej Brytanii).

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo - badawczych

5.1. Dane bibliometryczne autora (na dzień 12.10.2017)

Liczba publikacji w czasopismach z Listy Filadelfijskiej:	27
Liczba publikacji w czasopismach z Listy Filadelfijskiej po doktoracie:	23
Sumaryczny Impact Factor:	70.469
Sumaryczny Impact Factor (publikacje po doktoracie):	63.021
Indeks Hirsha (wg Web of Science):	11
Całkowita liczba cytowań (wg Web of Science):	313
Bez autocytaowań:	220

5.2. Opis działalności naukowej przed uzyskaniem stopnia doktora

Swoją działalność naukową rozpocząłem w 2005 roku, jako student trzeciego roku na Wydziale Elektroniki Politechniki Wrocławskiej. Badania prowadzone w ramach działalności wydziałowego koła naukowego ukierunkowane były na modelowanie bezprzewodowych sieci czujników [B.1]. W 2007 roku rozpocząłem realizację pracy magisterskiej w Zakładzie Teorii Pola Elektromagnetycznego i Elektroniki Kwantowej, Instytutu Telekomunikacji, Teleinformatyki i Akustyki Politechniki Wrocławskiej. Badania prowadzone pod kierunkiem prof. Krzysztofa Abramskiego skupione były na opracowaniu nowych konfiguracji laserów światłowodowych pracujących w trybie synchronizacji modów (ang. *mode-locking*). W wyniku prowadzonych badań m.in. zbudowany został układ lasera światłowodowego z możliwością przestrajania częstotliwości powtarzania impulsów.

Po uzyskaniu tytułu magistra inżyniera kontynuowałem pracę naukową w tematyce laserów światłowodowych w ramach pracy doktorskiej, której promotorem był prof. Krzysztof Abramski. Głównym celem prowadzonych badań było opracowanie konstrukcji całkowicie światłowodowego lasera z dużą częstotliwością powtarzania impulsów. Prace te były w dużej mierze finansowane w ramach grantu KBN (N 515 029 32/2079). W wyniku prac badawczych zbudowany został układ o parametrach porównywalnych ze źródłami dostępnymi komercyjnie: osiągnięto częstotliwość repetycji powyżej 150 MHz oraz czas trwania impulsów poniżej 120 fs [A.3, B.8]. Dzięki całkowicie światłowodowej konstrukcji praca, układu była bardzo stabilna i powtarzalna. Dodatkowo, zaprezentowałem autorską metodę regulacji i stabilizacji częstotliwości repetycji za pomocą regulacji mocy pompującej włókno aktywne [D.3].

Wyniki badań prowadzonych przed uzyskaniem stopnia doktora zostały opublikowane w czterech pracach w czasopiśmie z tzw. Listy Filadelfijskiej [A.1-A.4], jednym czasopiśmie spoza Listy Filadelfijskiej oraz w dziewięciu publikacjach pokonferencyjnych indeksowanych w bazie Web of Science [B.1-B.8, D.3].

Dodatkowo, w czasie realizacji doktoratu odbyłem dwa staże. Pierwszy, trwający 3 miesiące, w grupie prof. Macieja Wojtkowskiego na Uniwersytecie Mikołaja Kopernika w Toruniu. W czasie stażu prowadziłem pracę nad nowym typem przestrajalnych źródeł laserowych dla optycznej tomografii optycznej. Następnie spędziłem 6 miesięcy w Menlo Systems GmbH, firmie mającej siedzibę w Martinsried (Niemcy), znanej z komercjalizacji nagrodzonej Nagrodą Nobla technologii optycznych grzebieni częstotliwości. W Menlo Systems zajmowałem się wykorzystaniem źródeł femtosekundowych w spektroskopii THz.

W maju 2010 roku zostałem zatrudniony na stanowisku starszego referenta inżynierjno-technicznego na Wydział Elektroniki Politechniki Wrocławskiej. W lipcu tego samego roku z wyróżnieniem obroniłem pracę doktorską.

5.3. Opis działalności naukowej po uzyskaniu stopnia doktora

W sierpniu 2010 roku rozpocząłem staż podoktorski na uniwersytecie w Princeton. Moja praca naukowa w grupie kierowanej przez prof. Gerarda Wysockiego skupiała się na opracowaniu nowych technik laserowych do detekcji śladowych stężeń gazów. Moim głównym obszarem zainteresowania była technika CLaDS, której rozwój został szczegółowo opisany w punkcie 4. Należy jednak dodać, że poza wcześniej wymienionymi publikacjami wchodzącymi w skład cyklu, uzyskane wyniki były też zaprezentowane w innych pracach, zarówno w czasopiśmie naukowych [C.2, C.3, C.5, C.11] jak i w publikacjach pokonferencyjnych [D.1, D.4, D.7, D.9, D.10, D.12]. Na szczególną uwagę zasługują prace [C.3] i [C.5]. W pierwszej z nich po raz pierwszy zaprezentowane zostało wykorzystanie światłowodowych modulatorów natężenie światła w technice CLaDS. W pracy tej zaprezentowano

wyniki badań z zastosowaniem dwóch typów modulatorów: standardowego, wytwarzającego dwie wstęgi boczne, oraz bardziej zaawansowanego modulatora podwójnego DPMZM (ang. *Dual-Parallel Mach-Zehnder Modulator*), który pozwala wytłumić jedną wstęgę boczną wytwarzając na wyjściu dwie fale oddalone o częstotliwość Ω . Obie konfiguracje zostały zbadane eksperymentalnie wykorzystując jako źródło diodę laserową DFB pracującą na długości fali 1554 nm oraz linię rezonansową cyjanowodoru (HCN). W obu przypadkach wykazano, że zastosowanie szybkich modulatorów natężenia pozwala uzyskać warunki pracy układu CLaDS, które gwarantują uzyskanie maksymalnej amplitudy sygnału. Ponadto zaprezentowano i wyjaśniono różnice pomiędzy sygnałami rejestrowanymi w układzie ze standardowym modulatorem natężenia oraz modulatorem podwójnym DPMZM. Dla obu układów otrzymano także dużą zgodność wyników z modelem numerycznym zaimplementowanym w środowisku Matlab. W pracy [C.5] zaprezentowano natomiast możliwość generacji sygnału CLaDS poprzez bezpośrednią modulację lasera kaskadowego. Badania te doprowadziły m.in. do pierwszych prób modulacji tych źródeł w zakresie od 50 do 1000 MHz oraz pozwoliły pokazać, że za pomocą bezpośredniej modulacji prądu zasilającego możliwe jest uzyskanie na ich wyjściu modulacji jednowstęgowej [C.7, D.11].

Prócz badań związanych z techniką CLaDS brałem też udział w rozwoju innych metod laserowej detekcji gazów. Byłem zaangażowany w budowę układów wykorzystujących efekt Faradaya (ang. *Faraday Rotation Spectroscopy*, FRS) do niezwykle czułej detekcji dwóch izotopów tlenu azotu [C.4, C.8, D.5, D.8]. Zbudowany system był m.in. wykorzystywany w klinice w Cleveland do badań nad metabolizmem azotu w ludzkim organizmie. Był też pokazany na wystawie towarzyszącej konferencji SPIE Photonics West w lutym 2014 roku. W czasie pobytu na Uniwersytecie w Princeton uczestniczyłem także w pracach nad układem typu TDLAS z laserem kaskadowym, który był wykorzystywany do pomiarów stężeń izotopów pary wodnej w powietrzu [D.6].

Ważnym elementem stażu podoktorskiego była współpraca z partnerami naukowymi oraz z przedsiębiorstwami. W swoich badaniach wykorzystywałem lasery kaskadowe pożyczane przez firmy Corning oraz Alpes Laser. Prace nad rozwojem techniki CLaDS prowadzone były we współpracy z Damienem Weidmanem z Rutherford Appleton Laboratory w Wielkiej Brytanii oraz z firmą Physical Science Inc. w ramach wspólnego projektu NSF (SECO, grant nr EEC-1128282). Testy układu do pomiaru N_2O realizowano we współpracy z grupą prof. Marca Zondlo z Civil and Environmental Engineering Department, Princeton University, natomiast testowanie układu do pomiaru izotopów tlenu azotu wykonywane było we współpracy z lekarzami z kliniki pulmonologicznej w szpitalu w Cleveland.

W grudniu 2012 roku zakończyłem staż podoktorski i zostałem zatrudniony we Wrocławskim Centrum Badań EIT+, gdzie wiosną 2013 roku utworzyłem laboratorium Laserowych Systemów Pomiarowych i zostałem jego kierownikiem. W ramach prowadzonych badań w dalszym ciągu rozwijałem technikę CLaDS, m.in. wykonałem demonstrację zdalnej detekcji w oparciu o pomiar światła rozproszonego [D.15]. Uzyskane wyniki zostały zamieszczone w trzech pracach cyklu [8-10] oraz w publikacjach konferencyjnych [D.14, D.15, D.17, D.19]. Ponadto, we współpracy z grupą kierowaną przez prof. Krzysztofa Abramskiego prowadziłem badania nad nowym, w pełni optycznym sposobem pomiaru sygnału w spektroskopii foto-akustycznej/foto-termalnej. Pierwsze wyniki zostały zaprezentowane w [D.16]. W ostatnich czterech latach zajmowałem się także wykorzystaniem techniki WMS w zdalnej i punktowej detekcji gazów niebezpiecznych, tzn. metanu i siarkowodoru [C.12, D.15, D.18, D.20]. Prace te doprowadziły do opracowania dwóch prototypowych systemów pomiarowych. Pierwszy z nich umożliwia zdalną detekcję wycieków metanu z odległości od kilku do ponad 40 metrów, w oparciu o pomiar światła rozproszonego. Drugi wykorzystuje komórkę odbić wielokrotnych i pozwala na pomiar stężenia metanu, siarkowodoru i dwutlenku węgla w próbce gazu zasysanej do urządzenia. Oba układy prototypowe zostały przetestowane w warunkach polowych i są na etapie komercjalizacji. W ramach pozostałej działalności naukowej angażowałem się także w prace

nad rozwojem układów laserów światłowodowych [C.1, C.6, D.2] oraz nad praktycznymi zastosowaniami materiałów ciekłokrystalicznych [C.9, C.10, D.13]. W swojej działalności aktywnie współpracuję z partnerami zarówno krajowymi jak i zagranicznymi, w szczególności z grupą na Politechnice Wrocławskiej kierowaną przez prof. Krzysztofa Abramskiego oraz z grupą prof. Gerarda Wysockiego z uniwersytetu w Princeton (gdzie od 2012 roku posiadam status Visiting Researcher). Od 1 października 2017 roku pracuję na stanowisku adiunkta naukowo-dydaktycznego w Katedrze Optyki i Fotoniki, na Wydziale Podstawowych Problemów Techniki Politechniki Wrocławskiej.

Podsumowując, po doktoracie opublikowałem 23 prace w czasopismach z tzw. Listy Filadelfijskiej, w 14 jestem pierwszym autorem. Jestem też współautorem 20 prac pokonferencyjnych indeksowanych w bazie Web of Science, dwóch patentów przyznanych przez amerykański urząd patentowy oraz jednego patentu przyznanego przez Urząd Patentowy RP. Wygłosiłem cztery referaty na otwartych seminariach w krajowych jednostkach naukowych oraz dwadzieścia siedem prezentacji na międzynarodowych i krajowych konferencjach tematycznych, w tym w czasie 44. Zjazdu Fizyków Polskich. Byłem/jestem kierownikiem trzech grantów badawczych: grantu w programie Homing Plus Fundacji na rzecz Nauki Polskiej, grantu w programie Lider Narodowego Centrum Badań i Rozwoju oraz grantu w programie Sonata Narodowego Centrum Nauki. Moja praca naukowa po doktoracie została doceniona m.in. przez Ministerstwo Nauki przyznaniem mi w 2014 roku stypendium dla wybitnych młodych naukowców.

5.4. Pozostałe publikacje (nie wchodzące w skład osiągnięcia wymienionego w punkcie 4)

Publikacje naukowe w czasopismach znajdujących się w bazie JRC przed uzyskaniem stopnia doktora:

- [A.1] **M. Nikodem**, A. Budnicki, G. Tomczyk, K. Abramski, Investigation of passively mode-locked erbium doped fiber ring laser due to nonlinear polarization rotation, Opto-Electronics Review 16, 123-127 (2008). Impact factor: 1.136.
Wkład: 70% (planowanie i prowadzenie prac w laboratorium, analiza wyników, przygotowanie manuskryptu).
- [A.2] **M. Nikodem**, E. Kluzniak, K. Abramski, Wavelength tunability and pulse duration control in frequency shifted feedback Er-doped fiber lasers, Opt. Express 17, 3299-3304 (2009). Impact factor: 3.278.
Wkład: 80% (planowanie i prowadzenie prac w laboratorium, analiza wyników, przygotowanie manuskryptu).
- [A.3] **M. Nikodem**, K. Abramski, 169 MHz repetition frequency all-fiber passively mode-locked erbium doped fiber laser, Optics Communications 283, 109-112 (2010). Impact factor: 1.517.
Wkład: 85% (planowanie i prowadzenie prac w laboratorium, analiza wyników, przygotowanie manuskryptu).
- [A.4] **M. Nikodem**, K. Abramski, Controlling the frequency of the frequency-shifted feedback fiber laser using injection-seeding technique, Optics Communications 283, 2202-2205 (2010). Impact factor: 1.517.
Wkład: 85% (planowanie i prowadzenie prac w laboratorium, analiza wyników, przygotowanie manuskryptu).

Publikacje konferencyjne przed uzyskaniem stopnia doktora (indeksowane w bazie Web of Science):

- [B.1] Z. Chaczko, R. Klempous, J. Nikodem, **M. Nikodem**, J. Rozenblit, Methods of sensors localization in wireless sensor networks, Proceedings of 14th Annual IEEE International Conference and Workshop on Engineering of computer-Based Systems, Pages: 145+ (2007).
Wkład: 20% (udział w opracowaniu modelu i przeprowadzeniu symulacji, udział w przygotowaniu manuskryptu).

- [B.2] **M. Nikodem**, G. Tomczyk, A. Budnicki, K. Abramski, Repetition frequency stability in passively mode-locked fiber ring laser, Proceedings of 2007 International Students and Young Scientists Workshop Photonics and Microsystems, Pages: 58-60 (2007).
Wkład: 80% (planowanie i prowadzenie prac w laboratorium, analiza wyników, przygotowanie manuskryptu).
- [B.3] **M. Nikodem**, G. Tomczyk, A. Budnicki, K. Abramski, Passively mode-locked EDF ring laser, Proceedings of 9th International Conference on Transparent Optical Networks, Vol. 4, Pages: 233-236 (2007).
Wkład: 70% (planowanie i prowadzenie prac w laboratorium, analiza wyników, przygotowanie manuskryptu).
- [B.4] **M. Nikodem**, H. Sergeant, P. Kaczmarek, K. Abramski, Actively mode-locked fiber laser using acousto-optic modulator, 16th Polish-Slovak-Czech Optical Conference on Wave and Quantum Aspects of Contemporary Optics, Proceedings of SPIE 7141 (2008).
Wkład: 70% (planowanie i prowadzenie prac w laboratorium, analiza wyników, przygotowanie manuskryptu).
- [B.5] A. Waz, P. Kaczmarek, **M. Nikodem**, K. Abramski, WDM optocommunication technology used for multipoint fibre vibrometry, 8th International Conference on Vibration Measurements by Laser Techniques, Proceedings of SPIE 7098 (2008).
Wkład: 5% (udział w analizie wyników, udział w przygotowaniu manuskryptu).
- [B.6] **M. Nikodem**, A. Waz, K. Abramski, Mode-locked fiber laser induced supercontinuum in telecommunication fiber, Proceedings of 10th International Conference on Transparent Optical Networks, Vol. 4, Pages: 338-341 (2008).
Wkład: 80% (planowanie i prowadzenie prac w laboratorium, analiza wyników, przygotowanie manuskryptu).
- [B.7] **M. Nikodem**, W. Zurawski, K. Abramski, Four-Wave Mixing in Non-Zero Dispersion Shifted Fibers, Proceedings of 10th International Conference on Transparent Optical Networks, Vol. 4, Pages: 342-345 (2008).
Wkład: 70% (planowanie i prowadzenie prac w laboratorium, analiza wyników, przygotowanie manuskryptu).
- [B.8] **M. Nikodem**, K. Abramski, High Repetition Frequency, Fundamentally Mode-Locked 111 fs All-Fiber Erbium Laser, Proceedings of 11th International Conference on Transparent Optical Networks, Vol. 1 and 2, Pages: 433-436 (2009).
Wkład: 85% (planowanie i prowadzenie prac w laboratorium, analiza wyników, przygotowanie manuskryptu).

Publikacje naukowe w czasopismach znajdujących się w bazie JRC po uzyskaniu stopnia doktora:

- [C.1] G. Sobon, K. Krzempek, P. Kaczmarek, K. Abramski, **M. Nikodem**, 10 GHz passive harmonic mode-locking in Er-Yb double-clad fiber laser, Optics Communication 284, 4203-4206 (2011). Impact factor: 1.486.
Wkład: 20% (zapropozowanie kierunku badań, udział w pierwszych testach, analizie wyników oraz w przygotowaniu manuskryptu).
- [C.2] **M. Nikodem**, G. Wysocki, Molecular dispersion spectroscopy – new capabilities in laser chemical sensing, Annals of the New York Academy of Sciences 1260, 101-111 (2012). Impact factor: 4.364.
Wkład: 60% (prowadzenie prac w laboratorium, analiza wyników, wspólne przygotowanie manuskryptu).

- [C.3] **M. Nikodem**, G. Plant, Z. Wang, P. Prucnal, G. Wysocki, Chirped lasers dispersion spectroscopy implemented with single- and dual-sideband electro-optical modulators, *Optics Express* 21, 14649-14655 (2013). Impact factor: 3.525.
Wkład: 60% (zapropozowanie wykorzystania modulatora natężenia światła w technice CLaDS, zaplanowanie badań, budowa układu i przeprowadzenie eksperymentów (przy udziale GP i ZW), analiza wyników (wspólnie z GP i GW) oraz przygotowanie manuskryptu (przy udziale pozostałych autorów)).
- [C.4] Y. Wang, **M. Nikodem**, G. Wysocki, Cryogen-free heterodyne-enhanced mid-infrared Faraday rotation spectrometer, *Optics Express* 21, 740-755 (2013). Impact factor: 3.525.
Wkład: 10% (udział w planowaniu i prowadzeniu prac w laboratorium oraz w analizie wyników, udział w przygotowaniu manuskryptu).
- [C.5] A. Hangauer, G. Spinner, **M. Nikodem**, G. Wysocki, Chirped laser dispersion spectroscopy using a directly modulated quantum cascade laser, *Applied Physics Letters* 103, 191107 (2013). Impact factor: 3.515.
Wkład: 25% (pierwsze testy z wykorzystaniem diody laserowej, udział w zaplanowaniu i prowadzeniu prac w laboratorium z wykorzystaniem lasera kaskadowego, udział w przygotowaniu manuskryptu).
- [C.6] **M. Nikodem**, K. Krzempek, K. Zygałdo, 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, 113-117 (2014). Impact factor: 1.452.
Wkład: 55% (zaplanowanie eksperymentów, prowadzenie prac w laboratorium, analiza danych, przygotowanie manuskryptu).
- [C.7] A. Hangauer, G. Spinner, **M. Nikodem**, G. Wysocki, High frequency modulation capabilities and quasi single-sideband emission from a quantum cascade laser, *Optics Express* 22, 23439-23455 (2014). Impact factor: 3.488.
Wkład: 15% (udział w zaplanowaniu i prowadzeniu prac w laboratorium, udział w przygotowaniu manuskryptu).
- [C.8] Y. Wang, **M. Nikodem**, E. Zhang, F. Cikach, J. Barnes, S. Comhair, R. Dweik, C. Kao, G. Wysocki, Shot-noise Limited Faraday Rotation Spectroscopy for Detection of Nitric Oxide Isotopes in Breath, Urine, and Blood, *Scientific Reports* 5, Article number: 9096 (2015). Impact factor: 5.228.
Wkład: 10% (udział w planowaniu i prowadzeniu prac w laboratorium, udział w przygotowaniu manuskryptu).
- [C.9] P. Słupski, **M. Nikodem**, L. Chai, K. Komorowska, Fabrication of multilevel resist patterns by using a liquid crystal mask, *Optical Engineering* 54, 115107 (2015). Impact factor: 0.984.
Wkład: 25% (udział w planowaniu i prowadzeniu prac w laboratorium, udział w przygotowaniu manuskryptu).
- [C.10] M. Czajkowski, J. Cybińska, M. Woźniak, P. Słupski, **M. Nikodem**, F. Granek, K. Komorowska, Incorporation of luminescent semiconductor nanoparticles into liquid crystal matrix, *Journal of Luminescence* 169, 850-856 (2016). Impact factor: 2.686.
Wkład: 5% (pomoc w prowadzeniu prac w laboratorium).
- [C.11] K. Krzempek, K. Abramski, **M. Nikodem**, All-fiber mid-infrared difference frequency generation source and its application to molecular dispersion spectroscopy, *Laser Physics Letters* 14, 095702 (2017). Impact factor: 2.537 (IF za rok 2016).
Wkład: 40% (planowanie i udział w prowadzeniu prac w laboratorium, analiza wyników, wspólne przygotowanie manuskryptu).
- [C.12] **M. Nikodem**, K. Krzempek, D. Stachowiak, G. Wysocki, Quantum cascade laser-based analyzer for hydrogen sulfide detection at sub-parts per million levels, *Optical Engineering* 57, 011019 (2017). Impact factor: 1.082 (IF za 2016 rok).
Wkład: 60% (planowanie i prowadzenie prac w laboratorium – razem z KK, analiza wyników, przygotowanie manuskryptu – z pozostałymi autorami).

Publikacje konferencyjne po uzyskaniu stopnia doktora (indeksowane w bazie Web of Science):

- [D.1] **M. Nikodem**, C. J. Smith, D. Weidmann, G. Wysocki, Chirped Laser Dispersion Spectroscopy with baseline-free 2nd harmonic detection, in CLEO:2011 - Laser Applications to Photonic Applications, OSA Technical Digest, paper CThT4 (2011).
Wkład: 60% (zaplanowanie eksperymentów, zaproponowanie metody pomiarowej, przeprowadzenie prac w laboratorium, analiza wyników, przygotowanie manuskryptu).
- [D.2] G. Sobon, K. Krzempek, **M. Nikodem**, P. Kaczmarek, K. Abramski, 10 GHz repetition rate passively mode-locked Er-Yb doped fiber laser," in CLEO:2011 - Laser Applications to Photonic Applications, OSA Technical Digest, paper CMBB2 (2011).
Wkład: 20% (zaproponowanie kierunku badań, udział w pierwszych testach, analizie wyników oraz w przygotowaniu manuskryptu).
- [D.3] **M. Nikodem**, K. Abramski, Er-fiber Laser Based Reference Frequency Standard for Ultra Dense WDM Networks, Proceedings of SPIE (Photonics West), Volume: 7914, Article Number: 79141X (2011).
Wkład: 85% (planowanie i prowadzenie prac w laboratorium, analiza wyników, przygotowanie manuskryptu).
- [D.4] **M. Nikodem**, C. Smith, D. Weidmann, G. Wysocki, Remote mid-infrared sensing using Chirped Laser Dispersion Spectroscopy, Proceedings of SPIE (Conference on Advanced Environmental, Chemical, and Biological Sensing Technologies VIII), Volume: 8024, Article Number: 80240F (2011).
Wkład: 60% (zaplanowanie eksperymentów, zaproponowanie metody pomiarowej, przeprowadzenie prac w laboratorium, analiza wyników, przygotowanie manuskryptu).
- [D.5] Y. Wang, **M. Nikodem**, J. Hoyne, G. Wysocki, Heterodyne-enhanced Faraday rotation spectrometer, Proceedings of SPIE (Photonics West), Volume: 8268, Article Number: 82682F (2012).
Wkład: 10% (udział w planowaniu i prowadzeniu prac w laboratorium oraz w analizie wyników, udział w przygotowaniu manuskryptu).
- [D.6] W. Wang, A. Michel, L. Wang, **M. Nikodem**, T. Tsai, M. Baeck, J. Smith, G. Wysocki, A Quantum Cascade Laser Spectrometer for Measurement of Water Vapor Isotopes in the Urban Environment," in Conference on Lasers and Electro-Optics 2012, OSA Technical Digest (online), paper AT3L.2 (2012).
Wkład: 10% (udział w planowaniu i prowadzeniu prac w laboratorium oraz w analizie wyników).
- [D.7] **M. Nikodem** G. Wysocki, Remote open-path sensing of nitrous oxide using Chirped Laser Dispersion Spectroscopy, in Conference on Lasers and Electro-Optics 2012, OSA Technical Digest, paper CM2F.1 (2012).
Wkład: 75% (zaplanowanie eksperymentów, zbudowanie układu pomiarowego, przeprowadzenie testów polowych, analiza wyników, przygotowanie manuskryptu).
- [D.8] Y. Wang, **M. Nikodem**, B. Brumfield, G. Wysocki, Compact Multi-pass Cell based Faraday Rotation Spectrometer for Nitric Oxide detection, in Conference on Lasers and Electro-Optics 2012, OSA Technical Digest, paper CW3B.2 (2012).
Wkład: 10% (udział w planowaniu i prowadzeniu prac w laboratorium oraz w analizie wyników, udział w przygotowaniu manuskryptu).
- [D.9] **M. Nikodem**, K. Krzempek, G. Plant, K. Abramski, G. Wysocki, Methane sensing at 3.4 μ m using Chirped Laser Dispersion Spectroscopy with DFG source, in 2013 Conference on Lasers and Electro-Optics - International Quantum Electronics Conference, OSA Technical Digest (online), paper CH_1_3 (2013).
Wkład: 60% (zaplanowanie eksperymentów, stworzenie programu do rejestracji i obróbki danych, przeprowadzenie prac w laboratorium, analiza wyników, przygotowanie manuskryptu).
- [D.10] A. Hangauer, G. Spinner, **M. Nikodem**, G. Wysocki, Chirped Laser Dispersion Spectroscopy with Directly Modulated Quantum Cascade Laser, in CLEO: 2013, OSA Technical Digest (online), paper CW1L.5 (2013).

- Wkład: 25% (pierwsze testy z wykorzystaniem diody laserowej, udział w zaplanowaniu i prowadzeniu prac w laboratorium z wykorzystaniem lasera kaskadowego, udział w przygotowaniu manuskryptu).*
- [D.11] A. Hangauer, G. Spinner, **M. Nikodem**, G. Wysocki, High-speed Modulation Characteristic of a Quantum Cascade Laser, in CLEO: 2013, OSA Technical Digest (online), paper CM1K.2 (2013).
Wkład: 15% (udział w zaplanowaniu i prowadzeniu prac w laboratorium, udział w przygotowaniu manuskryptu).
- [D.12] G. Plant, **M. Nikodem**, D. M. Sonnenfroh, G. Wysocki, Chirped Laser Dispersion Spectroscopy for Remote Sensing of Methane at 1.65 μ m - Analysis of System Performance, in CLEO: 2013, OSA Technical Digest (online), paper JW2A.79 (2013).
Wkład: 30% (zbudowanie układu pomiarowego i jego charakteryzacja).
- [D.13] K. Komorowska, K. Zygadlo, B. Cichy, **M. Nikodem**, Investigation of liquid crystal materials doped with quantum dots: properties and potential applications, Proceedings of SPIE (Photonics West), Volume: 8982, Article Number: 89820A (2014).
Wkład: 15% (pomoc w prowadzeniu prac w laboratorium, udział w przygotowaniu manuskryptu).
- [D.14] **M. Nikodem**, Recent developments in remote gas detection using molecular dispersion sensing, Proceedings of SPIE (19th Polish-Slovak-Czech Optical Conference on Wave and Quantum Aspects of Contemporary Optics), Volume: 9441 (2014).
- [D.15] **M. Nikodem**, Standoff detection of trace chemicals with laser dispersion spectrometer, Proceedings of SPIE (Advanced Environmental, Chemical, and Biological Sensing Technologies XII), Volume: 9486. Article Number: 94860M (2015).
- [D.16] K. Krzempek, **M. Nikodem**, K. Abramski, Photo-thermal Effects in Gases as a Method For Concentration Measurements, in CLEO: 2015, OSA Technical Digest (online), paper SM1O.7 (2015).
Wkład: 40% (zaplanowanie i udział w realizacji eksperymentów, analiza danych).
- [D.17] J. Wodecki, **M. Nikodem**, Analysis of signal amplitude in Chirped Laser Dispersion Spectroscopy, in CLEO: 2015, OSA Technical Digest (online), paper JTh2A.85 (2015).
Wkład: 90% (zaplanowanie i przeprowadzenie eksperymentów, analiza danych, przygotowanie manuskryptu).
- [D.18] P. Jaworski, D. Stachowiak, **M. Nikodem**, Standoff detection of gases using infrared laser spectroscopy, Proceedings of SPIE (Optical Sensing and Detection IV) Volume: 9899, Article Number: 98990Q (2016).
Wkład: 40% (zaplanowanie eksperymentów, analiza danych, udział w przygotowaniu manuskryptu).
- [D.19] P. Jaworski, G. Dudzik, K. Krzempek, K. Abramski, A. Waz, **M. Nikodem**, Gas sensing with Chirped Laser Dispersion Spectroscopy in a single-frequency beam configuration and a multi-pass cell, in Conference on Lasers and Electro-Optics, OSA Technical Digest (2016), paper STu3H.4 (2016).
Wkład: 30% (zaplanowanie i udział w realizacji eksperymentów, analiza danych, przygotowanie manuskryptu).
- [D.20] **M. Nikodem**, D. Stachowiak, P. Jaworski, Towards laser-based open-path detection of hydrogen sulfide, Proceedings of SPIE (20th Slovak-Czech-Polish Optical Conference on Wave and Quantum Aspects of Contemporary Optics) Volume: 10142, Article Number: 101420I (2106).
Wkład: 60% (zaplanowanie i realizacja eksperymentów, analiza danych, przygotowanie manuskryptu).

5.5. Wynalazki oraz wzory użytkowe i przemysłowe, które uzyskały ochronę i zostały wystawione na międzynarodowych lub krajowych wystawach lub targach

1. G. Wysocki, **M. Nikodem**, Chirp Modulation-Based Detection of Chirped Laser Molecular Dispersion Spectra, Patent US 13/453,499, data publikacji 5.05.2015.
Wkład: 60% (zapropozowanie metody, zbudowanie układu i przeprowadzenie eksperymentów, udział w przygotowaniu wniosku).

2. **M. Nikodem**, G. Wysocki, Optical Subtraction of Molecular Dispersion Signals Enabled by Differential Optical Dispersion Spectroscopy, Patent US 14/058,672, data publikacji 30.06.2015.
Wkład: 60% (zapropowanie metody, zbudowanie układu i przeprowadzenie eksperymentów, udział w przygotowaniu wniosku).
3. **M. Nikodem**, Sposób detekcji i lokalizacji gazu oraz układ realizujący ten sposób, patent, zgłoszenie do Urzędu Patentowego RP nr P.413908 z dnia 15.09.2015, data publikacji BUP 27.03.2017.

5.6. Kierowanie międzynarodowymi i krajowymi projektami badawczymi oraz udział w takich projektach

W roli kierownika:

1. Grant badawczy FNP, konkurs Homing Plus (nr umowy Homing Plus 2012-6/8)
Tytuł: *Opracowanie nowej techniki ultraczułej detekcji gazów i jej zastosowanie do monitorowania poziomu metanu w atmosferze*, okres realizacji: 2013-2015.
2. Grant badawczy NCBiR, konkurs LIDER (nr umowy LIDER/023/379/L-5/13/NCBR/2014)
Tytuł: *Systemy laserowej detekcji siarkowodoru dla zastosowań w przemyśle wydobywczym*, okres realizacji: 2015-2018.
3. Grant badawczy NCN, konkurs SONATA (nr umowy 2014/15/D/ST7/04898)
Tytuł: *Rozwój nowych technik wysokorozdzielczej spektroskopii laserowej w podczerwieni*, okres realizacji: 2016-2018.

W roli wykonawcy:

1. Grant badawczy KBN, nr N 515 029 32/2079, kierownik: prof. Krzysztof Abramski.
Tytuł: *Światłowodowy laser erbowy generujący stabilny „grzebień częstotliwości optycznych” w pasmie 1530–1580 nm*, okres realizacji: 2008-2010.
2. Grant badawczy NSF (USA), konkurs CAREER, nr 0954897, kierownik: prof. Gerard Wysocki.
Tytuł: *Coherent Mid-Infrared Molecular Dispersion Spectroscopy for Ultra-Sensitive Chemical Detection*, okres realizacji: 2010-2012.
3. Grant badawczy NSF (USA), konkurs ERC - Small Business, nr 1128282, kierownik: prof. Gerard Wysocki.
Tytuł: *Remote chemical sensing instrumentation based on chirped laser dispersion spectroscopy*, okres realizacji: 2011-2012.
4. Projekt POIG 01.01.02-02-002/08, kierownik projektu: Maciej Biernacki.
Tytuł: *Wykorzystanie nanotechnologii w nowoczesnych materiałach*, okres realizacji: 2013-2015.
5. Grant badawczy NCN (Harmonia), nr 2014/14/M/ST7/00866, kierownik: prof. Krzysztof Abramski.
Tytuł: *Fototermalne rezonansowe zjawiska w gazach – badanie właściwości i opracowanie nowych optycznych metod detekcyjnych*, okres realizacji: 2015-2018.

5.7. Udział w komitetach naukowych międzynarodowych konferencji tematycznych

- Członek komitetu naukowego konferencji Optics and Photonics Congress, Renewable Energy and the Environment Conference 2013 organizowanej przez Optical Society of America. 3-7 listopada 2013, Tuscon, USA;

- Członek komitetu naukowego konferencji CLEO 2016 (Science and Innovation, Active Optical Sensing) organizowanej przez Optical Society of America. 5-10 czerwca 2016, San Jose, USA;
- Członek komitetu naukowego konferencji CLEO 2017 (Science and Innovation, Active Optical Sensing) organizowanej przez Optical Society of America. 14-19 maja 2017, San Jose, USA;
- Członek komitetu naukowego konferencji CLEO 2018 (Science and Innovation, Active Optical Sensing) organizowanej przez Optical Society of America. 13-18 maja 2018, San Jose, USA.

5.8. Międzynarodowe i krajowe nagrody za działalność naukową

- Nagroda Dziekana Wydziału Elektroniki Politechniki Wrocławskiej (2007);
- Nagroda Rektora Politechniki Wrocławskiej (2007);
- Wyróżnienie w konkursie im. Adama Smolińskiego na najlepszą pracę magisterską w dziedzinie opto-elektroniki (2007);
- Druga nagroda w Innovation Forum, Princeton University (2012);
- Członek Rady Młodych Naukowców przy MNiSW (2013-2015);
- Nagroda Burgena od Academia Europaea (2013);
- Stypendium MNiSW dla młodych naukowców (2014-2017).

5.9. Wygłoszone referaty na międzynarodowych i krajowych konferencjach tematycznych

Referaty zaproszone i przeglądowe:

1. *New Opportunities in trace-gas sensing using differential optical dispersion spectroscopy (DODiS)*, prezentacja na IFPAC 2012, Baltimore, USA, 2012.
2. *Recent developments in gas sensing using laser-based dispersion spectroscopy*, prezentacja na Integrated Optics – Sensors, Sensing Structures and Methods, IOS'2017, Szczyrk, Polska, 2017.
3. *Spektroskopia laserowa w podczerwieni i jej zastosowania do detekcji śladowych stężeń gazów*, prezentacja na 44. Zjeździe Fizyków Polskich, Wrocław, Polska, 2017.

Referaty zwykłe:

4. *Repetition frequency stability in passively mode-locked fiber ring laser*, prezentacja na 2007 International Students and Young Scientists Workshop Photonics and Microsystems, Drezno Niemcy, 2007.
5. *Methods of sensors localization in wireless sensor networks*, prezentacja na 14th Annual IEEE International Conference and Workshop on Engineering of computer-Based Systems (ECBS), Tucson, USA, 2007.
6. *Actively mode-locked fiber laser using acousto-optic modulator*, prezentacja na 16th Polish-Slovak-Czech Optical Conference on Wave and Quantum Aspects of Contemporary Optics, Polanica Zdrój, 2008.
7. *High repetition frequency, fundamentally mode-locked 111 fs all-fiber erbium laser*, prezentacja na 11th International Conference on Transparent Optical Networks, Ponta Delgada, Portugalia, 2009.
8. *Remote mid-infrared sensing using chirped laser dispersion spectroscopy*, prezentacja na SPIE Defense, Security, and Sensing, Orlando, USA, 2011.
9. *Chirped laser dispersion spectroscopy with baseline-free 2nd harmonic detection*, prezentacja na CLEO 2011, Baltimore, USA, 2011.
10. *Open-path remote sensing of nitrous oxide using chirped laser dispersion spectroscopy*, prezentacja na FLAIR 2011, Munrau, Niemcy, 2011.

11. *Differential optical dispersion spectroscopy*, prezentacja na Laser Applications to Chemical, Security and Environmental Analysis (LACSEA), San Diego, USA, 2012.
12. *Chirped laser dispersion spectroscopy for remote sensing of methane*, prezentacja na Renewable Energy and the Environment Optics and Photonics Congress, OSA Technical Digest (2012), E2 conference, Eindhoven, Holandia, 2012.
13. *Differential optical dispersion spectroscopy for high accuracy trace-gas sensing*, prezentacja na MirSens 2, Wrocław, Polska, 2012.
14. *Detekcja gazów w oparciu o pomiar dyspersji w pobliżu częstotliwości rezonansowej badanej molekuly*, prezentacja na Polskiej Konferencji Optycznej 2013, Sandomierz, Polska, 2013.
15. *Methane sensing at 3.4um using Chirped Laser Dispersion Spectroscopy with DFG source*, prezentacja na CLEO/Europe-IQEC 2013, Monachium, Niemcy, 2013.
16. *Investigation of liquid crystal materials doped with quantum dots: properties and potential applications*, prezentacja na Photonics West, San Francisco, USA, 2014.
17. *Recent developments in remote gas detection using molecular dispersion sensing*, prezentacja na 19th Polish-Slovak-Czech Optical Conference on Wave and Quantum Aspects of Contemporary Optics, Wojanów, Polska, 2014.
18. *Chirped laser dispersion spectroscopy in dual side-band frequency-shifted-carrier arrangement*, prezentacja na Laser Applications to Chemical, Security and Environmental Analysis (LACSEA), Seattle, USA, 2014.
19. *Gas sensing using photo-thermal spectroscopy with coherent signal detection*, prezentacja na MirSens 3, Wurzburg, Niemcy, 2015.
20. *Towards laser-based open-path hydrogen sulfide detection*, prezentacja na Optics and Photonics for Energy & the Environment, Suzhou, Chiny, 2015.
21. *Photo-thermal effects in gases as a method for concentration measurements*, prezentacja na CLEO: Applications and Technology, San Jose, USA, 2015.
22. *Standoff detection of trace chemicals with laser dispersion spectrometer*, prezentacja na SPIE Defense, Security, and Sensing: Advanced Environmental, Chemical, and Biological Sensing Technologies XII, Baltimore, USA, 2015.
23. *Towards laser-based open-path detection of hydrogen sulfide*, prezentacja na 20th Slovak-Czech-Polish Optical Conference on Wave and Quantum Aspects of Contemporary Optics, Jasna, Słowacja, 2016.
24. *Gas sensing with Chirped Laser Dispersion Spectroscopy in a single-frequency beam configuration and a multi-pass cell*, prezentacja na CLEO: S&I, San Jose, USA, 2016.
25. *Photothermal spectroscopy of NO at 5.2um using Quantum Cascade Laser and near-infrared heterodyne-based detection*, prezentacja na Mirsens 4, Wrocław, Polska, 2017.
26. *Laser-based Gas Sensing of Multiple Samples using Multiplexing in Radio Frequency Domain*, prezentacja na CLEO/Europe-EQEC 2017, Monachium, Niemcy, 2017.
27. *Novel laser-based approach to gas detection and localization in multi-node fiber-based sensing networks*, prezentacja na 24th General Congress of International Commission for Optics, Tokio, Japonia, 2017.

5.10. Recenzowanie publikacji w czasopismach międzynarodowych i krajowych

W ostatnich 5 latach recenzowałem prace naukowe m.in. dla czasopism Optics Express, Optics Letters, Applied Physics B, Analytical Chemistry, ACS Photonics, Applied Optics, Optics and Laser Technology, Optica Applicata, Optics Communication (ponad 15 recenzji).

Jako członek komitetu naukowego konferencji CLEO: Science & Innovations w latach 2016 i 2017 recenzowałem również zgłoszenia na tę konferencję (ponad 50 prac w każdej z edycji).

6. Dorobek dydaktyczny i popularyzatorski oraz informacja o współpracy międzynarodowej habilitanta

Osiągnięcia dydaktyczne i w zakresie popularyzacji nauki:

Po zakończeniu doktoratu moje zatrudnienie było związane przede wszystkim z pracą naukową. Jednak pomimo formalnego braku obowiązków dydaktycznych byłem opiekunem dwóch studentów przygotowujących prace magisterskie (stypendyści w ramach grantu Homing Plus). Ponadto, od 2012 roku na Wydziale Elektroniki Politechniki Wrocławskiej prowadzę wykład w języku angielskim (16 godzin w semestrze letnim) pt. *New Approaches to Electronics and Telecommunication* dla studentów specjalności Advanced Applied Electronics (studia drugiego stopnia). Od 1 października 2017 roku jestem zatrudniony na Wydziale Podstawowych Problemów Techniki Politechniki Wrocławskiej na stanowisku adiunkta naukowo-dydaktycznego i prowadzę zajęcia z przedmiotów Pakiety Obliczeniowe oraz Optyka Instrumentalna (dla studentów drugiego i trzeciego roku studiów pierwszego stopnia na kierunkach Fizyka Techniczna i Optyka).

W zakresie popularyzacji nauki aktywnie uczestniczyłem m.in. w Dolnośląskim Festiwalu Nauki (wykład, 2013) oraz w Nocy Laboratoriów (pokaz układu do zdalnej detekcji metanu w 2015 oraz pokaz układu do punktowej detekcji gazów w 2017).

Staże w zagranicznych i krajowych ośrodkach naukowych lub akademickich:

- 2009 (3 miesiące): staż w grupie obrazowania biomedycznego na Wydziale Fizyki i Astronomii Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu;
- 2009 – 2010 (6 miesięcy): staż w Menlo Systems GmbH z siedzibą w Martinsried (Niemcy);
- 2010 – 2012 (28 miesięcy): staż podoktorski, Electrical Engineering Department, Princeton University (USA);
- Od grudnia 2012: Visiting Researcher Collaborator w Electrical Engineering Department, Princeton University (USA), w tym m.in. wizyty naukowe w 2013 (tydzień), 2015 (tydzień), 2016 (3 tygodnie), 2017 (tydzień).

Współpraca z krajowymi i międzynarodowymi ośrodkami badawczymi:

1. Gerard Wysocki i jego grupa na Princeton University, okres współpracy od 2010 roku. Rodzaj współpracy: staż podoktorski (2010-2012), wizyty badawcze (2013, 2015, 2016, 2017), wspólne badania, patenty i liczne publikacje.
2. Krzysztof Abramski i jego grupa na Politechnice Wrocławskiej, okres współpracy od 2010 roku. Rodzaj współpracy: wspólne prace, także w ramach projektów naukowych, wspólne badania i publikacje, prowadzenie zajęć dydaktycznych.
3. Physical Science Inc. (Andover, USA), okres współpracy od 2011 roku. Rodzaj współpracy: współpraca przy testach układu pomiarowego, wspólne badania i publikacje.
4. Damien Weidman (Rutherford Appleton Laboratory w Wielkiej Brytanii), okres współpracy od 2010 roku. Rodzaj współpracy: wspólne badania i publikacje.
5. Menlo Systems GmbH (Martinsried, Niemcy), okres współpracy od 2009 do 2010 roku. Rodzaj współpracy: staż.
6. Maciej Wojtkowski (Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu), okres współpracy od 2009. Rodzaj współpracy: staż, rola 'mentora' w ramach projektu Homing Plus.
7. Paweł Krzaczek (Katedra Energetyki i Środków Transportu, Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie), okres współpracy od 2017. Rodzaj współpracy: wspólne testy układu do detekcji gazów.