



UNIwersytet JAGIELLOŃSKI
W KRAKOWIE

Szymon Pustelny
Zakład Fotoniki
Instytut Fizyki
Uniwersytet Jagielloński
Łojasiewicza 11, 30-348 Kraków
Tel: +48 12 663 4691
E-mail: pustelny@uj.edu.pl

Kraków, 23 czerwca 2024

Recenzja rozprawy doktorskiej Pana Grzegorza Gomółki zatytułowanej „Laserowa spektroskopia gazów z użyciem antyrezonansowych światłowodów z pustym rdzeniem oraz detekcji heterodynowej”

Praca zatytułowana „Laserowa spektroskopia gazów z użyciem antyrezonansowych światłowodów z pustym rdzeniem oraz detekcji heterodynowej”, której autorem jest Pan mgr inż. Grzegorz Gomółka, poświęcona jest badaniom widmowym gazów, które zostały umieszczone w specjalnych „komórkach” spektralnych, którymi są światłowody mikrostrukturalne. Ponieważ tematyka światłowodów wypełnionych gazami nie jest mi obca, lektura rozprawy była interesująca i stanowiła ciekawe uzupełnienie mojej dotychczasowej wiedzy.

Praca przedstawia ciekawe, wewnętrznie spójne i prowadzone z niebywałą skrupulatnością badania doświadczalne, które w przyszłości mogą stanowić podstawę konstrukcji czułych sensorów gazów, w tym gazów niebezpiecznych i łatwopalnych. Praca, jak przystało na pracę stworzoną na politechnice, zawiera bardzo rzetelną analizę techniczną tematu, a sam Autor nie przechodzi nad jakimkolwiek zagadnieniem pobieżnie, ale stara się stawiać pytania, które dotyczą analizowanego tematu i obserwowanych zależności. Powodowało to wielokrotnie, że na pojawiające mi się podczas lektury rozprawy pytania, często znajdowałem odpowiedź w jej dalszej części. Choć, co tu dużo pisać, było to czasem frustrujące („Miałem takie świetne pytanie!”), to jednak pokazuje, że Doktorant rzeczywiście starał się jak najlepiej zrozumieć analizowane przez siebie zagadnienia.

Struktura pracy składa się z dwóch zasadniczych części. Pierwsza, stosunkowo krótka część poświęcona jest wprowadzeniu do zagadnienia. Doktorant podaje w niej podstawowe wiadomości teoretyczne dotyczące spektroskopii gazów oraz właściwości obserwowanych sygnałów. Znajdziemy w niej m.in. informacje o strukturze i profilach linii widmowych gazów molekularnych. Znajdziemy również wprowadzenie w zagadnienia laserowej spektroskopii absorpcyjnej gazów. W tym fragmencie uzyskamy m.in. podstawowe informacje o znanych technikach spektroskopii absorpcyjnej, które Doktorant klasyfikuje jako bezpośrednią spektroskopię absorpcyjną oraz techniki modulacyjne. W obu przypadkach tłumaczy on charakter obserwowanych sygnałów oraz modeluje pewne podstawowe charakterystyki sygnałów spektroskopowych. Opis metod modulacyjnych stanowi również punkt wyjścia do rozważań nad techniką detekcji fazoczułej, którą Pan Gomółka wykorzystuje w swoich badaniach. W końcu, w części tej omówiono światłowody antyrezonansowe, które wykorzystywał Autor w swoich badaniach. Światłowody te opisane zostały nie tylko z punktu widzenia ich właściwości, ale również nieco szerzej w kontekście badań, w których innego typu światłowody mikrostrukturalne wykorzystywane były w badaniach spektroskopowych gazów. Przy tej okazji nasunęło mi się (z ciekawości) pytanie. Jedną z ważnych zalet fonicznych światłowodów mikrostrukturalnych jest możliwość kształtowania ich dyspersji, co pozwoliło m.in. na konstrukcję grzebieni laserowych. **Czy światłowody antyrezonansowe mogą mieć również kształtowaną dyspersję, a jeśli tak to do jakiego stopnia da się to zrobić?**



UNIwersytet Jagielloński
w Krakowie

Szymon Pustelny
Zakład Fotoniki
Instytut Fizyki
Uniwersytet Jagielloński
Łojasiewicza 11, 30-348 Kraków
Tel: +48 12 663 4691
E-mail: pustelny@uj.edu.pl

Zasadniczą część pracy stanowi opis badań doświadczalnych Doktoranta. Badania te tworzą bardzo logiczną całość, w której opisuje On najpierw badania prostsze, a potem coraz bardziej skomplikowane. Dzięki temu stopniowo zwiększa się złożoność analizowanych zagadnień, mimo że jak zauważa sam Doktorant, wcale nie oddaje to chronologicznej kolejności prowadzonych przez niego badań.

Koncepcyjnie najprostsza jest część, w której do badań spektroskopowych wykorzystywany jest metan wypełniający pusty rdzeń światłowodu antyrezonansowego. W tym przypadku gaz mierzony był przez bezpośredni pomiar absorpcji światła w światłowodzie. W części tej Autor analizuje m.in. zależność współczynnika absorpcji metanu we włóknie w funkcji stężenia, wykazując nieliniową relację pomiędzy tymi wielkościami. Zależność ta jest konsekwencją faktu, że dla silnej absorpcji załamuje się liniowa zależność między oboma wielkościami (wychodzimy poza pierwszy rząd rozwinięcia w szereg Taylora).

Ponieważ w mojej dotychczasowej pracy prowadziłem badania z gazami silnie reaktywnymi chemicznie, w badaniach tych pojawiał się problem wypełniania gazów, chemisorpcji itd. Dlatego chciałbym zapytać Doktoranta o ten problem w jego badaniach. W szczególności interesuje mnie **czy parametry włókna zmieniały się z czasem czy też były stałe nawet podczas wielotygodniowych pomiarów?** Degradowanie parametrów włókna ma oczywiście ogromne znaczenie z punktu widzenia potencjalnych ich zastosowań praktycznych. Drugie pytanie dotyczy pary wodnej, ponieważ w moich badaniach para wodna była czynnikiem, który miał ogromny wpływ na pomiary. Dlatego chciałem zapytać **czy rzeczywiście jej potencjalna obecność w światłowodzie nie ma wpływu na uzyskiwane wyniki ilościowe?** Czy jest możliwe, że anomalia w wielodniowym pomiarze, którego wyniki zaprezentowano w pracy, jest związana właśnie ze zmianą parametrów włókna wywołaną przez parę wodną?

Jednym z ważnych osiągnięć uzyskanych przez Pana Gomółkę podczas realizacji doktoratu jest opracowanie przez niego specjalnego sprzęgacza światłowodowego, który pozwala na swobodne wprowadzenie gazów do wnętrza światłowodu. W praktyce, zagadnienie to jest blisko związane z problemem czasu wypełniania światłowodu gazem oraz istnienia gradientu koncentracji gazu w światłowodzie. W przypadku dłuższych, tj. kilkumetrowych włókien, czas wypełniania światłowodów był dużo dłuższy, a i w samym światłowodzie mogło dochodzić do pojawienia się gradientu koncentracji gazu. Gradient taki może mieć wpływ na uzyskiwane sygnały i prowadzić do przekłamań w wynikach ilościowych dotyczących stężeń gazu we włóknie. Z drugiej jednak strony, długie włókna pozwalają na dłuższą drogę oddziaływania światła z gazem, a co za tym idzie na osiągnięcie większej czułości pomiarów. W rozwiązaniu opracowanym w ramach realizacji pracy, Pan Gomółka zaproponował specjalne sprzęgacze światłowodowe, które mogą być wypełniane gazem, dzięki czemu gaz ten może wchodzić do wnętrza światłowodu. Co więcej, zaproponował On także zastąpienie jednego długiego włókna szeregiem krótszych włókien, co zdecydowanie skraca czas odpowiedzi układu na zmieniające się warunki doświadczalne. Jedynym ograniczeniem dowolnej skalowalności tego rozwiązania są straty, do których dochodzi podczas sprzęgania światła do światłowodu. Straty te są jednak na tyle niewielkie, że możliwe jest wykorzystanie kilku połączonych szeregowo sprzęgaczy i w ten sposób skrócenie czasu wypełniania przy jednoczesnym zachowaniu wysokiego poziomu czułości.

Podczas lektury rozdziału poświęconego spektroskopii w komórkach na bazie światłowodów antyrezonansowych natrafiamy w końcu na opis wpływu propagacji modów wyższych rzędów na obserwowane widma. Mody takie, cechują się innymi stałymi propagacji. Oznacza to, że na długości światłowodu, może dochodzić do powstawania interferencji, która moduluje natężenie światła



UNIwersytet JAGIELLOŃSKI
W KRAKOWIE

Szymon Pustelny
Zakład Fotoniki
Instytut Fizyki
Uniwersytet Jagielloński
Łojasiewicza 11, 30-348 Kraków
Tel: +48 12 663 4691
E-mail: pustelny@uj.edu.pl

transmitowanego przez światłowód. Samo natężenie tej międzymodowej interferencji zależy będzie od długości fali światła, co objawia się zmodulowaniem tła absorpcyjnego obserwowanego w widmie. Rozwiązaniem zaproponowanym przez Doktoranta jest pobudzenie tylko modu podstawowego czy to przez odpowiednie dopasowanie pola modowego światłowodu antyrezonansowego i światłowodu sprzęgającego, czy też przez odpowiednie zagięcie światłowodu. Z uwagi na fakt, że mody wyższych rzędów są „słabiej” prowadzone, zagięcie światłowodu może powodować odsprężenie tych modów do płaszcza (ich silne tłumienie), co w pracy przedstawione jest w sposób doświadczalny. Dodatkowo, Doktorant przeprowadził serię symulacji numerycznych dotyczących propagacji światła w światłowodzie. Co ciekawe, symulowane pola modowe pokazują pewne asymetrie, co sprowokowało mnie do pytania **czy symulacje przeprowadzane były w oparciu o zdjęcia z mikroskopu elektronowego tak, że uwzględniały one niedokładności kapilar antyrezonansowych na krawędzie płaszcza i rdzenia?** To tłumaczyłoby niesymetryczny kształt. Możliwe jest również i to, że te asymetrie są skutkiem skończonej precyzji metody elementów skończonych. W pracy nie znalazłem jednak odpowiedzi na to pytanie.

Kolejną część pracy stanowi opis badań przy pomocy technik dyspersyjnych oraz technik interferencyjno-modulacyjnych. U podstaw tych technik stoi interferencja dwóch wiązek o znacząco różnych częstotliwościach oraz pomiar fazy lub amplitudy obserwowanego sygnału zduńień tych wiązek. Z punktu widzenia spektroskopii dyspersyjnej ważne jest, że zazwyczaj pomiar różnicy fazy wyindukowanej podczas propagacji światła w gazie może dawać dużo większą czułość na obecność określonego gazu (stoi to np. u podstaw różnych technik mikroskopowych). W przypadku badań prowadzonych przez Doktoranta, nie było to jednak prawdą, co prawdopodobnie wynikało z tego, że obserwował on gaz w pobliżu przejść. Jednocześnie to co nie budzi wątpliwości w przypadku wyższości metod dyspersyjnych zaprezentowanych w pracy, to możliwość lepszej kalibracji sygnałów oferowana przez liniową zależność pomiędzy zmianą sygnału dudnień a stężeniem badanego gazu. W zaprezentowanych w pracy wynikach wyraźnie widać, że metoda absorpcyjna cechuje się nieliniową zależnością tych dwóch parametrów, co wymaga jej kalibracji.

Z punktu widzenia pomiarów sygnałów interferencyjnych i opisanej w pracy metody niezmiernie istotne jest, aby obie interferujące ze sobą wiązki były spójne. W rozwiązaniu zaproponowanym przez Autora warunek ten spełniony był przez dyfrakcję światła na modulatorze akustooptycznym. W przypadku ugięcia światła na modulatorze kolejne rzędy dyfrakcji różnią się od siebie o częstotliwość akustyczną fali pobudzającej kryształ, ale jednocześnie są ze sobą spójne. W badaniach opisanych w pracy wykorzystano do tego zerowy i pierwszy rząd ugięcia na kryształach, które to wiązki następnie kierowane są do dwóch ramion interferometru albo pierwszy rząd dyfrakcji wtedy, gdy wiązka światła laserowego dzielona jest w zintegrowanym układzie światłowodowym jeszcze przed modulatorem akustooptycznym.

Moje doświadczenia pracy z interferometrami czy to tymi w wolnej przestrzeni, czy też tymi bazującymi na światłowodach sugerują, że poważnym problemem takich układów są dryfy długości ramion interferometru (drogi optycznej), które powodują fluktuacje fazy obserwowanego sygnału. W szczególności za takie dryfy odpowiedzialne mogą być ruchy powietrza czy też zmiany termiczne warunków propagacji światła w światłowodzie. Dlatego nie do końca zrozumiałem w jaki sposób Doktorant ograniczył ten problem w swoich badaniach. Z tego powodu chciałem poprosić o przedyskutowanie **czy rzeczywiście problem powolnego dryfu fazy sygnału nie istniał lub jak został ograniczony?** Prawdę powiedziawszy uważam, że to, że jednak dryf stanowił problem uwidacznia się na wariancji Allana, którą Doktorant zaprezentował w pracy, manifestując się poprzez poprawę czułości techniki wraz z wydłużaniem czasu pomiaru.



UNIwersytet Jagielloński
w Krakowie

Szymon Pustelny
Zakład Fotoniki
Instytut Fizyki
Uniwersytet Jagielloński
Łojasiewicza 11, 30-348 Kraków
Tel: +48 12 663 4691
E-mail: pustelny@uj.edu.pl

Bardzo ciekawym przykładem badań zaprezentowanych w pracy są badania spektroskopii fototermałnej. U podstaw tej techniki leży fakt, że zmiana temperatury gazu ma wpływ na zmianę jego parametrów fizycznych, w tym współczynnika załamania. Zmiana tego współczynnika, wykrywana metodami optycznymi, służyć może nie tylko jako informacja o obecności danego gazu, ale również jako technika pomiaru jego stężenia. Podczas doktoratu, Doktorant prowadził tego typu pomiary w układzie interferometru, którego jedno z ramion stanowił światłowód antyrezonansowy wypełniony gazem. W eksperymencie, oprócz tradycyjnego oświetlenia światłowodu wiązką światła wykorzystywanego do spektroskopii, był on również oświetlany dodatkową wiązką światła, której zadaniem było podgrzanie gazu. W ten sposób zmianie ulegała koncentracja, a dalej również współczynnik załamania gazu, co było obserwowane technikami spektroskopii dyspersyjnej.

Twórczym rozwinięciem techniki spektroskopii fototermałnej z przemiatanym źródłem światła monochromatycznego były opisane przez Doktoranta pomiary przy pomocy grzebienia częstości wykorzystujące spektrometr fourierowski. O ile w tym przypadku sam pomiar gazów nie był prowadzony w światłowodzie tylko w wieloprześciowej komórce spektralnej, o tyle, wykorzystanie grzebienia częstości, pozwalało na jednoczesną obserwację szerokiego zakresu spektralnego (ponad 100 cm^{-1}). Dzięki przemiataniu długości jednego z ramion interferometru Michelsona, w który początkowo wprowadzane było światło, umożliwiało pobudzanie ośrodka na różnych częstotliwościach i w konsekwencji rekonstrukcję tego widma badanego gazu. Był to bardzo elegancki przykład pomiarów widma gazu w dużym zakresie spektralnym.

Jedną z rzeczy, której zabrakło mi w pracy jest syntetyczne porównanie parametrów oraz zalet i wad opisanych technik (czułość, rozdzielczość spektralna, czas pomiaru). Mam świadomość, że porównanie takie nie musi być łatwe, ale chciałbym mimo wszystko namówić Doktoranta do **zaprezentowanie takiego podsumowania podczas obrony**. To czy zdecyduje się „pofantazjować” o miniaturyzacji czy komercjalizacji jego badań, pozostawiam już jego decyzji, choć nie ukrywam, że i to byłoby interesujące.

Lektura rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Gomółki sprawiła mi dużą przyjemność. Prezentowany materiał był ciekawy i przejrzysty, co pozwoliło mi na zdobycie nowych wiadomości. Poza wartością merytoryczną, na szczególną uwagę zasługuje nienaganny język polski, którym posługuje się Doktorant (proszę mi wierzyć, nie jest to w dzisiejszych czasach normą) i minimalna liczba uwag edytorskich (to jest już bardzo rzadkie), które, nota bene, dotyczą w głównej mierze interpunkcji i jako takie mogą zawsze podlegać dyskusji.

Podsumowując, uważam, że **rozprawa doktorska Pana Grzegorza Gomółki spełnia wszystkie formalne i zwyczajowe warunki stawiane przed tego typu pracami i wnoszę do dopuszczenie Pana Grzegorza Gomółki do dalszych etapów przewodu doktorskiego**.

Ponadto, biorąc pod uwagę jakość zaprezentowanego materiału oraz liczbę artykułów naukowych, których jest On autorem, w tym w szczególności pierwszym autorem, **wnoszę o wyróżnienie pracy jego rozprawy doktorskiej**.

Z wyrazami szacunku,

Szymon Pustelny