

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr inż. Piotra Bojęsia

zatyulowanej:

Wykorzystanie światłowodowych włókien antyrezonansowych w układach laserowej spektroskopii gazów

I. Informacje ogólne

Zakres tematyczny pracy obejmuje tematykę napełniania włókien ARHCF próbką gazową oraz budowę i charakteryzację pomiarową wielu różnych układów spektroskopii laserowej gazów, wykorzystujących takie włókna. Istotnym celem autora jest projektowanie i badanie układów pracujących jednocześnie w dwu zakresach spektralnych: bliskiej i średniej podczerwieni.

Taki obszar i cel badań jest ciekawy i bardzo aktualny, gdyż łączy postęp w zakresie nowych konstrukcji światłowodów dziurowych z rosnącym praktycznym zapotrzebowaniem na układy spektrometrii gazów, w tym gazów cieplarnianych w atmosferze. Warto zaznaczyć, że ze względu na mnogość renomowanych ośrodków zajmujących się podobną tematyką, jej podjęcie oznacza aktywne włączenie się w obszar badań naznaczony silną konkurencją podejmujących ją ośrodków.

Doktorant sformułował następujące tezy badawcze:

- Komórki absorpcyjne bazujące na światłowodach antyrezonansowych z pustym rdzeniem pozwalają na jednoczesną detekcję gazów w bliskiej i średniej podczerwieni.
- Metody numeryczne pozwalają na precyzyjne modelowanie dynamiki przepływu gazów we włóknach typu ARHCF.
- Komórki absorpcyjne bazujące na światłowodach antyrezonansowych z pustym rdzeniem mogą stanowić alternatywę do objętościowych komórek wieloodbiciowych w układach spektroskopowych pracujących w zakresie średniej podczerwieni.
- Włókna ARHCF mogą być wykorzystane w układach laserowej spektroskopii gazów korzystających z różnych technik pomiarowych.

Przedstawione w pracy wątki badawcze i konstrukcyjne były realizowane zespołowo, w większości w ramach projektów badawczych finansowanych przez NCN. Należy podkreślić, że jest to całkowicie naturalne wobec rozległości tematycznej i obszerności opisywanych pac. Indywidualny wkład autora rozprawy w pracach prowadzonych zespołowo został rzetelnie rozgraniczony i opisany, między innymi w podsumowaniu rozprawy. Ogólnie, autor wskazuje swój dominujący wkład w badaniach dotyczących napełniania włókien i jego modelowania, oraz istotną, a w niektórych przypadkach wiodącą rolę w projektowaniu i konstrukcji systemów pomiarowych wykorzystujących włókna ARHCF oraz ich charakterystyki.

Doktorant wskazuje współautorstwo siedmiu publikacji w czasopismach z listy JRC, oraz sześciu prezentacji konferencyjnych, jako związanych bezpośrednio z tematyką rozprawy. W trzech publikacjach z listy JRC doktorant jest autorem wiodącym.

Przedłożona praca wpisuje się w dyscyplinę automatyki, elektroniki, elektrotechniki i technologii kosmicznych, warto jednakże pozytywnie odnotować jej znaczącą interdyscyplinarność.

II. Struktura rozprawy

Przedłożona do oceny rozprawa liczy 167 stron i składa się z czterech zasadniczych rozdziałów. Rozdział 1 jest wyczerpującym wprowadzeniem w zagadnienia spektroskopii absorpcyjnej gazów. Rozdział 2 przedstawia przegląd i podstawy teoretyczne metod pomiarowych stosowanych w spektroskopii gazów. Obydwa te rozdziały stanowią solidne wdrożenie czytelnika w zagadnienia poruszane w dalszej części rozprawy. Rozdział 3 poświęcony jest problematyce napełniania światłowodu badanym gazem, zarówno na drodze dyfuzji jak i przepływu wymuszonego. W szczególności badane jest napełnianie światłowodów z dedykowanymi otworami w zewnętrznym płaszczu. Rozdział 4 przedstawia wyniki obszernych prac eksperymentalnych związanych z budową i charakteryzacją układów spektroskopii opartych na włóknach ARHCF, przy wykorzystaniu trzech różnych konfiguracji (metod) pomiarowych. Pracę zamykają: podsumowanie, bibliografia, wykaz osiągnięć autora i streszczenie. Bibliografia zawiera 368 pozycji, stanowiących wyczerpujący zbiór istotnych i aktualnych prac dotyczących poruszanych zagadnień.

Należy podkreślić wyróżniającą się jakość pracy w aspekcie stylistycznym i edycyjnym. Niezręczności czy niedociągnięcia w tym zakresie są naprawdę śladowe.

Oceniając strukturę przedłożonej rozprawy, należy stwierdzić, że jest ona poprawna i bardzo klarowna.

III. Ocena wartości merytorycznej rozprawy

Nakreślonym przez autora celem pracy było opracowanie laserowych czujników gazów w oparciu o światłowód ARHCF pełniący rolę komórki absorpcyjnej, analiza metod napełniania włókna badanym gazem, oraz zademonstrowanie i przebadanie czujników wykorzystujących różne metody pomiarowe. Założono, że czujniki te będą mogły pracować w bliskiej i średniej podczerwieni. W mojej ocenie cele te zostały zrealizowane.

Na szczególne podkreślenie zasługuje rozległość i złożoność prac eksperymentalnych, które czasem trudno jest uwypuklić w treści rozprawy, jednakże moim zdaniem świadczą one o bardzo wysokich kompetencjach badawczych i konstruktorskich doktoranta, a także o jego determinacji w realizacji ambitnych celów naukowych i inżynierskich.

W szczególności do wymiernych osiągnięć doktoranta należy zaliczyć:

- przeprowadzenie dogłębnych analiz napełniania światłowodowych komórek absorpcyjnych opartych na bezwężłowych światłowodach ARHCF, zarówno na poziomie zależności teoretycznych, jak też symulacji oraz pomiarów dynamiki napełniania w kilku układach eksperymentalnych,
- osiągnięcie spektakularnego zwiększenia szybkości napełniania dyfuzyjnego poprzez zastosowanie odpowiedniej perforacji zewnętrznego płaszcza włókna,
- praktyczną realizację i charakteryzację wielu wariantów czujników bazujących na trzech różnych metodach pomiarowych, w sześciu różnych konfiguracjach,
- zademonstrowanie jednoczesnej detekcji linii absorpcyjnych w dwu zakresach spektralnych.

Autor sformułował cztery tezy swojej pracy (które przytaczam we wcześniejszej

części recenzji). Tezy te można uznać za udowodnione, jednakże moje wątpliwości budzi ogólnikowość sformułowania dwu ostatnich tez.

Mimo pewnych zastrzeżeń i wątpliwości wymienionych poniżej, uważam, że przedstawione w rozprawie osiągnięcia stanowią spójną i wartościową całość, oraz że **cel pracy został osiągnięty**.

IV. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

A. Uwagi o charakterze ogólnym

1. Druga i trzecia teza rozprawy sformułowane są tak ogólnie i „elastycznie”, że niesposób sobie wyobrazić negatywny wynik ich weryfikacji. To, że światłowód dziurowy da się napełnić gazem, i dowolną sensowną metodą zmierzyć powstałą zmianę absorpcji światła, jest raczej oczywiste. Wydaje się, że jeżeli tezy zostały nieco niefortunnie sformułowane na wczesnym etapie pracy, można się było do nich odnieść bardziej „twórczo”, np. przyjąć, że „mogą stanowić alternatywę” (teza 3) oznacza „umożliwiają poprawę parametrów”, lub „pozwalają zbudować tańszy detektor”, lub w jakikolwiek podobny sposób doprecyzować ogólnikowe sformułowanie „stanowią alternatywę”.
2. Ponieważ autor wielokrotnie odnosi się do docelowego pomiaru stężenia gazów w realnej atmosferze (ochrona środowiska, detekcja gazów cieplarnianych, odniesienia do stężenia metanu we Wrocławiu), pewien niedosyt budzi fakt, że wszystkie eksperymenty prowadzone były w sterylnych warunkach laboratoryjnych, i używano wyłącznie gazów z butli o zapewne bardzo wysokiej czystości. Zdaniem recenzenta bardzo dużą wartość miałyby zademonstrowanie niezawodnej pracy zbudowanych czujników przy napełnieniu ich zwykłym powietrzem atmosferycznym, zawierającym wiele gazów, parę wodną, pyły itp.
3. Jak rozumiem, stężenie poszukiwanego gazu określa się poprzez pomiar absorpcji dla jednej częstotliwości optycznej (lub wąskiego zakresu częstotliwości). Nasuwa to klasyczne w sensoryce pytanie: czy takiego samego efektu absorpcji nie może spowodować inny czynnik niż poszukiwany gaz. Czy zatem było rozważane ryzyko czułości skrośnych i czy można je wykluczyć, lub sformułować jakieś wymagania zmniejszające takie ryzyko, jak np. wymagania na bezwzględną dokładność (stabilność) długości fali użytych laserów?
4. Autor wielokrotnie podkreśla ekstremalnie niską objętość gazu potrzebną do wypełnienia włókna sensorycznego. Wydaje się to nieco demagogiczne, gdyż rzeczywista objętość kompletnego układu pomiarowego jest niewątpliwie znacznie większa niż samego włókna, prawdopodobnie o całe rzędy wielkości.
5. Autor deklaruje, że budowane przez niego czujniki są szerokopasmowe, tzn. umożliwiają pomiar linii absorpcyjnych w bliskiej i średniej podczerwieni. Tymczasem wydaje się raczej, że oferują one względnie szerokie okno pomiarowe w średniej podczerwieni, i bardzo wąskie okno w bliskiej podczerwieni, które w dodatku jest „nieoptymalizowane pod kątem jednomodowego prowadzenia światła”. W praktyce jest zatem chyba raczej tak, że udaje się dobrać włókno do detekcji dwu konkretnych gazów (lub dwa gazy do detekcji w konkretnym włóknie). Dlatego zapewne w układach opisanych w Rozdziale 4 wykorzystywano dwa różne włókna, zależnie od gazu, jaki ma być wykrywany.

B. Istotniejsze uwagi szczegółowe

1. Autor słusznie wskazuje, że zdolność detekcyjna systemu pomiarowego jest ograniczona przez szумы. Jednakże dla wiarygodnego pomiaru małych stężeń kluczową rolę ma też offset (błąd zera) systemu, możliwość jego korekty i jego (lepsz a lub gorsza) stałość w czasie.

Sprawy te nie zostały naświetlone w rozprawie. Przedstawione w pracy charakterystyki przetwarzania opracowanych czujników [np. rys. 77(b), 88(b), 100(b)] wydają się zaczynać idealnie w początku układu współrzędnych. Czy to oznacza, że offset został usunięty, czy też w ogóle go nie było?

2. Doktorant w kilku miejscach przedstawia dewiacje Allana, i na podstawie ich przebiegu określa optymalny czas pomiaru. Nasuwa się tu elementarne pytanie: jeżeli np. optymalny czas pomiaru wynosi 15 s, to co będzie potem? Czy jeżeli po 15 s zakończymy pomiar, i zaraz potem rozpoczniemy kolejną rejestrację (kolejny pomiar), to czy drugi wynik będzie równie dobry jak pierwszy, czy przeciwnie, będzie gorszy (mniej wiarygodny)? Jeżeli będzie gorszy, to co trzeba zrobić, by przyrząd odzyskał pierwotne parametry?

3. Nie jest jasne, jak ma się używane przed autorem pojęcie *minimum detection limit* do bardziej fundamentalnego w metrologii pojęcia niepewności pomiarowej. Określenie limitu detekcji przedstawione na str. 37 jest niejednoznaczne: pojawia się tam zarówno sugestia, że dotyczy on możliwości określenia „bezwzględnej wartości stężenia gazu”, jak i możliwość wykrycia „zmiany stężenia”.

4. Na rys. 27 autor przedstawia wyniki symulacji, w której widać ewidentny dryft sygnału rejestrowanego mimo założonej stałej koncentracji badanego gazu. Z kolei na rys. 86 widać offset sygnału w realnym układzie. Na rys. 84 z kolei, w pierwszej części wykresu offset jest widoczny, w drugiej go nie ma. Oba te zjawiska (offset i dryft) mają fundamentalny wpływ na realną użyteczność proponowanych czujników, a nie są nigdzie w pracy analizowane.

5. Powyższe rozterki recenzenta wynikają zapewne po części z tego, że w pracy nie opisano chyba nigdzie pełnego procesu uzyskiwania ostatecznego wyniku pomiaru. Na przedstawionych przez autora rysunkach sygnały z detektorów lub wzmacniaczy fazoczułych „giną we wnętrznościach” komputera, i nie wiadomo, jak na ich podstawie powstaje finalny wynik pomiaru. Przykładowo, czy np. software (lub jego operator) jakoś szacuje/koryguje offset systemu pomiarowego? Jeżeli w trakcie pomiaru dokonuje się przestrajania lasera (skanowania linii absorpcyjnej), to na jakim etapie dokonuje się uśredniania? Co autor rozumie przez „próbkiowanie” sygnału?

6. Autor bardzo niejednoznacznie używa pojęcia „sygnał”. Przykładowo, na rys. 79 nie widać, jaki (gdzie) sygnał jest rejestrowany, na rys. 80 autor sugeruje, że „sygnałem” jest napięcie (składowa zmienna napięcia?) na wyjściu wzmacniacza QTF, na rys. 85(a) sygnałem jest zapewne amplituda sygnału występującego na wyjściu wzmacniacza QTF (uzyskana na wyjściu wzmacniacza fazoczułego?), a sygnałem na rys. 85(b) jest zapewne wartość maksymalna (???) sygnału z rys. 85(a). Czyli zapewne „sygnał” w rozumieniu rys. 85(b) nie jest bezpośrednio obserwowanym sygnałem w jakimś punkcie układu, lecz raczej wynikiem procesu pomiarowego (przetwarzania danych). Uwaga ta wiąże się z poprzednią, gdyż niejasne używanie słowa „sygnał” pogłębia fundamentalną niejasność odnośnie tego, jak powstaje finalny wynik pomiaru stężenia badanego gazu.

7. W pracy 120 razy pojawia się słowo optymalny/optymalizacja. W przypadku zjawisk, które opisane są wiarygodnymi modelami matematycznymi (a do takich należą wykorzystywane w pracy metody spektroskopii laserowej) najbardziej „naukową”, czyli ogólną i obiektywną metodą optymalizacji jest minimalizacja odpowiednio sformułowanej funkcji celu. Oczywiście, w przypadku, gdy model jest bardzo skomplikowany, lub zawiera trudne do określenia parametry, lub nie uwzględnia istotnych zjawisk zachodzących w realnym urządzeniu, wszyscy stosujemy mniej rygorystyczne metody „optymalizacji”. Jednakże

w pracy naukowej dalej oczekiwana jest refleksja, czy taka optymalizacja jest wiarygodna. Jeżeli przykładowo w danej metodzie detekcji wynik nie powinien (w rozsądnym zakresie) zależeć od częstotliwości modulacji, a autor twierdzi, że optymalna częstotliwość modulacji wynosi 1 kHz (dla detekcji CH_4), albo 2,1 kHz dla CO_2 (str. 95), i zostawia to bez komentarza, to to brzmi niewiarygodnie. Podobnie, na str. 102 optymalna częstotliwość modulacji określona jest jako 7,2 kHz na podstawie bardzo wątpliwego minimum na wykresie z rys. 73(a), znów bez komentarza czy refleksji.

Recenzent nie rozumie też sformułowań: „optymalizacja metod napełniania”, „optymalizacja wymiany gazowej”, „optymalizacja procesu projektowania”, „optymalny stopień generacji częstotliwości różnicowej”, „optymalna odpowiedź harmoniczna”, „nieoptymalizowany pod względem jednomodowego prowadzenia światła”, „punkt optymalnej odpowiedzi rezonatora”, optymalizacja i charakteryzacja źródła laserowego”, itp. Prawdopodobnie w wielu z powyższych przykładów przymiotnik „optymalne” oznacza dla autora „poprawione w stosunku do sytuacji początkowej” a nie „najlepsze z możliwych”, co jest definicją słownikową pojęcia „optymalne”. Niekiedy nasuwa się też wrażenie, że autor posługuje się w sposób wysoce niekonkretny przymiotnikiem optymalne/nieoptymalne nie w celu wyjaśnienia czegoś, tylko raczej ominięcia pojawiającego się problemu.

8. Stwierdzenie, że światłowód jest „nieoptymalizowany pod względem jednomodowego prowadzenia światła” prawdopodobnie jest eufemizmem służącym do uniknięcia sformułowania, że w zakresie bliskiej podczerwieni światłowód ten po prostu nie spełnia warunku propagacji jednomodowej. Ponieważ ma to zapewne wpływ na deklarowaną w pierwszej tezie możliwość pracy w bliskiej podczerwieni, sprawa powinna być starannie zbadana i obszernie skomentowana. Recenzent pragnie tu przypomnieć, że celem doktoratu nie jest osiągnięcie maksymalnie pozytywnych wyników, tylko maksymalnie rzetelne zbadanie zagadnienia naukowego. Dlatego ewentualne wyraźne wskazanie ograniczeń deklarowanej wcześniej możliwości pomiarów w bliskiej podczerwieni nie byłoby dla doktoranta żadną ujmą.

9. Na rys. 30 autor zaznacza *explicite* fakt powolnego „skanowania” częstotliwości lasera wokół linii absorpcyjnej (f_{ramp}), a na rys. 35 (dotyczącym innej metody) takiej składowej nie ma. Tu, i w wielu innych miejscach pracy, czytelnikowi trudno jest się zorientować, czy skanowanie (f_{ramp}) jest integralną (czy może opcjonalną) częścią danej procedury pomiarowej. Niejasność w tej sprawie prowadzi do fundamentalnej wątpliwości czytelnika, jak właściwie określana jest zmiana absorpcji pod wpływem danego gazu.

C. Uwagi szczegółowe mniejszej wagi

1. Czy wzór (2.8) nie jest wzorem przybliżonym? Można się spodziewać, że w rzeczywistości pojawiają się też kolejne harmoniczne sygnału modulującego.
2. Zależność (2.20) sugeruje, że prostym sposobem zwiększania uzyskanego sygnału jest zmniejszanie (do zera?) częstotliwości modulacji, co jest na tyle dziwne, że wymaga komentarza. Ponadto nie wyjaśniono znaczenia zmiennej P_{ac} .
3. W komentarzu pod zależnością (3.3) autor napisał: „Jak widać, zmiana koncentracji stężenia w czasie jest odwrotnie proporcjonalna do kwadratu odległości od punktu emisji gazu.” Zdaniem recenzenta jest to stwierdzenie nieuzasadnione.
4. W rozdziale 3.2.1 pojawia się pojęcie czasu napełniania. Ponieważ proces dyfuzyjnego napełniania jest zapewne asymptotyczny, czas napełniania jest pojęciem umownym, które wymaga definicji.
5. Tytuł rozdziału 3.4.7: „Wpływ modelu przepływu na dynamikę napełniania” wydaje się

niefortunny - model przepływu nie ma wpływu na realny przepływ, tylko na jakość jego modelowania.

6. W rozdziale 4.1.1.3 autor stwierdza, że optymalna głębokość modulacji powinna wynosić $2,2 \cdot \text{FWHM}$ linii absorpcyjnej, po czym dokonuje pomiarowej optymalizacji i porównania jej z symulowaną wartością optymalną. Schemat logiczny tych działań jest niejasny. Co autor chce osiągnąć? Nie jest też jasne, co to jest „profil 2f”, oraz „jak najdokładniejsze odtworzenie optymalnego profilu 2f względem danych eksperymentalnych.”?

7. Nie jest jasne przesłanie rys. 77(a). Sygnał zarejestrowany przy różnych stężeniach gazu jest tu zestawiony z krzywą opisaną „Sym. opt. 2f-WSM”. W komentarzu do rysunku pojawia się pojęcie „zasymulowany optymalny kształt”, a w podpisie do rysunku - „dopasowany zamodelowany przebieg 2-fWMS”. Podobna sytuacja występuje na rys. 85(a) i 100(a).

8. Autor stosuje współczynnik determinacji R^2 jako miarę liniowości czujnika, zmieniając zresztą dyskretnie jego nazwę na „współczynnik liniowości”. Ponieważ współczynnik determinacji ma w statystyce zasadniczo inną interpretację, warto by skomentować jego zastosowanie do oceny liniowości czujnika.

9. Nie jest jasne, co kryje się pod enigmatycznymi sformułowaniami „nieliniowy profil absorpcji rezonatora kwarcowego” i „nieliniowy profil zmian mocy wyjściowej podczas przestrajania długości fali” (str. 126).

10. Na str. 129 znajduje się sugestia, że intensywność światła modulowano modulatorem EOM. Przeważnie pod skrótem EOM rozumie się elektro-optyczny modulator fazy. Czy zatem chodzi tu o modulator Macha-Zehndera?

V. Podsumowanie

Podsumowując, należy stwierdzić, że praca, mimo wskazanych uchybień, jest ciekawa i wartościowa naukowo, oraz że autor wykazał dobre przygotowanie teoretyczne i umiejętność prowadzenia kreatywnej pracy naukowej oraz projektowej. **Uważam, że przedłożona rozprawa w pełni spełnia wymagania określone przez Ustawę o stopniach i tytule naukowym oraz wnoszę o jej dopuszczenie do publicznej obrony.**

dr hab. inż. Przemysław Krehlik