

Prof. dr hab. Tadeusz Stacewicz
Instytut Fizyki Doświadczalnej
Wydział Fizyki
Uniwersytetu Warszawskiego
02-093 Warszawa, ul. Pasteura 5

Recenzja pracy doktorskiej mgr. inż. Arkadiusza Hudzikowskiego pt.

Wieloprześciowe komórki odbiciowe do zastosowań w spektroskopii laserowej i do spektralnego poszerzania ultrakrótkich impulsów światła

Spektroskopia absorpcyjna jest ważną częścią optyki. Zasady nią rządzące opisywane były już od pierwszej połowy 18 wieku. Znane są dzisiaj pod postacią prawa Bourgera – Lamberta – Beera. Mówi ono, że różnica logarytmów dziesiętnych natężenia światła wprowadzonego do ośrodka absorbującego (I_0) i na wyjściu tej próbki (I), czyli absorbancja, jest proporcjonalna do koncentracji absorbera, długości drogi optycznej i przekroju czynnego na absorpcję opisującego własności badanej materii. Prawo to pozwala wyznaczać gęstość cząstek absorbujących w badanym ośrodku. Ta możliwość sprawia, że ten rodzaj spektroskopii jest bardzo ważną dziedziną dla wielu gałęzi nauki, przemysłu, medycyny, ochrony środowiska i innych. Jednak, aby móc precyzyjnie wyznaczać absorbancję, konieczne jest, by zmierzone wartości I_0 oraz I istotnie różniły się między sobą. Utrudnia to możliwość pomiaru absorbancji poniżej wartości 10^{-4} w typowych układach laboratoryjnych z komórkami o długości mierzonej w centymetrach. Powodowało, że do niedawna spektroskopia absorpcyjna miała ograniczone zastosowanie w badaniach gazów występujących w niewielkich koncentracjach – tzw. gazów resztkowych.

Istotna zmiana nastąpiła wskutek rozwoju komórek wieloprześciowych (od końca lat 30-tych ub. wieku), w których dzięki wielokrotnym odbiciom promieniowania od wbudowanych w nie lusterek można uzyskać długości dróg światła rzędu kilkudziesięciu, a nawet kilkuset metrów, przy zachowaniu kompaktowości konstrukcji. Wieloprześciowe komórki odbiciowe odgrywają obecnie dużą rolę w absorpcyjnej spektroskopii laserowej, a technika ta zaliczana jest to metod ultraczułych.

Poprawne zaprojektowanie kompaktowej komórki wieloprześciowej jest rzeczą złożoną, a różne podejścia w tej dziedzinie są rezultatem współczesnych problemów optyki instrumentalnej. W ramach działań przedstawionych w recenzowanej tutaj pracy doktorskiej mgr inż. Arkadiusz Hudzikowski zaproponował nowe rozwiązania. Opisał podstawowe rodzaje komórek wieloprześciowych wraz z metodami ich symulacji i przykładami obliczeń parametrów ich konstrukcji. W tym celu opracował odpowiednie oprogramowanie umożliwiające symulację i optymalizację tych urządzeń. W tym *software* wykorzystał

nowoczesne podejścia, jak algorytm genetyczny. W rezultacie skonstruował komórkę o 24 – metrowej drodze optycznej (L) i objętości $V = 80 \text{ cm}^3$ ^{1/}. Charakteryzuje się ona najlepszym znanym do tej pory w literaturze stosunkiem $L/V = 30 \text{ cm}^{-2}$. Można tylko żałować, że autor nie opracował tego programu w zwartej formie i nie udostępnił go wszystkim zainteresowanym, choćby w postaci publikacji w jednym z czasopism do tego przeznaczonych, jak *Computer Physics Communications*, w którym przewiduje się – poza drukiem artykułu – rozpowszechnianie *software* z jednego z serwerów za pomocą internetu.

Komórka została wykorzystana do budowy sensora gazów. Wykorzystano go do detekcji ditlenku węgla o czułości granicznej 0,4 ppm oraz do spektroskopowego układu wykrywającego stężenia cząstek metanu o różnym składzie izotopowym, co umożliwiałoby rozpoznanie źródeł emisji tego związku. W tej dziedzinie autor osiągnął wynik najlepszy z pośród prezentowanych dotychczas w literaturze. Symulowane było też użycie tych komórek w spektroskopii fotothermalnej i fotoakustycznej - tej ostatniej wykorzystującej kamerton kwarcowy (QEPAS).

Komórki wieloprzejsiowe znajdują także zastosowanie w spektralnym poszerzaniu ultrakrótkich impulsów światła w gazach. Wydłużenie drogi oddziaływania promieniowania z ośrodkiem zwiększa efektywność tej metody. W pracy opisano proces poszerzania widma uzupełniając go metodami kompresji impulsu. Następnie zbudowano układ doświadczalny, w którym użyto specjalnie zaprojektowanej komórki wieloprzejsiowej, za pomocą której badano poszerzanie widma impulsów z użyciem argonu, kryptonu i ksenonu. Impulsy były potem kompresowane przez dwa lub trzy (w zależności od potrzeb) kompresory zwierciadlane. Uzyskano skrócenie czasu trwania impulsu laserowego z 280 do 31 fs. Jest to wynik porównywalny z najlepszymi światowymi osiągnięciami.

Mimo bardzo starannego opracowania dysertacji, autor nie uniknął błędów i uchybień. Do wad pracy zaliczyłbym to, że zupełnie nie porusza się w niej problemu nakładania się odbitych wiązek promieniowania, do którego może dochodzić w komórce wieloprzejsiowej. Zjawisko to wskutek interferencji prowadzi do spektralnej modulacji jej współczynnika transmisji, co – w przypadku niezastosowania odpowiednich środków – znacząco zmniejsza dokładność pomiaru widm absorpcji, a przez to i czułość sensorów gazów reszkowych.

Szkoda, że omawiając spektroskopię z modulacją długości fali (str. 17) autor nie zamieścił w pracy ścisłej matematycznej analizy sygnału rejestrowanego przez fotodetektor przy przechodzeniu wiązki lasera przez komórkę absorpcyjną. Analiza fourierowska wykazałaby, że amplitudy jego kolejnych harmonicznych są tylko w przybliżeniu proporcjonalne do odpowiednich pochodnych kształtu linii absorpcyjnej, a to wymagałoby dyskusji warunków eksperymentu.

Poza tym:

str. 12, od góry – wyrażenie *Absorpcja określonej długości fali elektromagnetycznej przez cząsteczki gazu* ma charakter żargonowy i jest na pograniczu poprawności, bo absorpcja – to jednak zawsze absorpcja promieniowania;

str. 12 – nie ma zgody na takie zdanie: *.....przekrój czynny na absorpcję, który zależy od widma absorpcyjnego danej molekuly w funkcji długości fali, a więc jest ściśle związany ze*

^{1/} Autor ma także w dorobku komórkę „lepszą” o współczynniku $L/V = 29,75 \text{ cm}^{-2}$.

źródłem laserowym i detektorem. Przekrój czynny na absorpcję nie jest związany ani z laserem ani z detektorem. Jest parametrem związanym jedynie z konkretnym przejściem kwantowym w danym obiekcie oddziałującym z promieniowaniem, i poza wielkościami kwantowo-mechanicznymi opisującymi to przejście zależy jedynie od warunków, w których dany obiekt się znajduje, jak: ciśnienie, temperatura i inne;

str. 16 – można mieć wątpliwości do stwierdzenia *źródło laserowe musi charakteryzować się stabilnym w czasie poziomem mocy.* Dobrze jest, jeżeli w eksperymencie użyte jest stabilne źródło światła, ale nie jest to warunek krytyczny, gdyż zgodnie z prawem Bourgera – Lamberta – Beera przy pomiarze absorpcji, czy to w spektroskopii jednoprzejściowej czy wieloprzejściowej, należy dokonywać monitorowania mocy światła wprowadzonego do badanej próbki;

str. 17 – w równaniu 2.3 Δv oraz i_o nie są głębokościami modulacji lecz amplitudami modulacji. Głębokość modulacji definiuje się jako stosunek tych amplitud do wartości średnich wielkości modulowanych (w tym wypadku odpowiednio v oraz I_o);

str. 18 – nieprawdą jest, że spektroskopia fotoakustyczna charakteryzuje się *bardzo krótką drogą absorpcji.* Absorpcja, jako zjawisko liniowe, następuje wzdłuż całej drogi biegu światła przez komórkę fotoakustyczną. Fala dźwiękowa powstaje w próbce też wzdłuż całej tej drogi. Zazwyczaj komórka absorpcyjna jest jednocześnie rezonatorem akustycznym. Powstała fala sprzęga się z nim i to właśnie rozmiary rezonatora określają drogę absorpcji. A rezonator buduje się tak, by strzałka stojącej fali akustycznej znajdowała się koło mikrofonu;

str. 19, rys. 2.8 - jego trzecia część jest błędna. O ile zanik sygnału we wnętrzu CRDS jest przedstawiony poprawnie za pomocą funkcji zależnej od czasu jak $\exp(-t/\tau)$ (dla $t > t_0$), to wzrost sygnału w dowolnym układzie rezonansowym przy jego zasilaniu (dla $t < t_0$) powinien być przedstawiony z użyciem funkcji rosnącej asymptotycznie, jak $1 - \exp(-t/\tau)$. Tymczasem wykreślono tam zależność, której wzrost (pochodna) zwiększa się w czasie;

str. 20 – szkoda, że w opisie spektroskopii strat we wnętrzu optycznej nie pojawił się końcowy wzór pozwalający wyznaczać koncentrację cząstek absorbera w funkcji przekroju czynnego i czasów zaniku promieniowania w rezonatorze;

str. 120 – o jakiej symetrii wibracyjnej mówi autor w przypadku gazów szlachetnych? Znając wiele podręczników ze spektroskopii atomowej stwierdzam, że w obiektach tych oscylacje w ogóle nie są rozważane.

W kilku przypadkach użyte zostało określenie *poszerzanie impulsu* bez zaznaczenia, że chodzi o poszerzanie widma impulsu.

Poza tymi wadami redakcja pracy jest bardzo staranna, rysunki są przejrzyste i dobrze opracowane. Można mieć jedynie uwagę do rys. 7.8, gdzie niewłaściwy dobór kolorów linii utrudnia odcyfrowanie widm cząstek metanu o różnym składzie izotopowym.

Język dysertacji jest niestety obciążony wyrażeniami żargonowymi powstałymi (jak to niejednokrotnie bywa) w obrębie laboratorium, w którym wykonywano pracę. Tu i ówdzie spotyka się niewłaściwe użycie słowa „ilość” zamiast „liczba” lub niepotrzebne posługiwanie się wyrazami pochodzenia obcego (*limit, interakcja* i inne), gdy istnieją polskie odpowiedniki, w języku nauki powszechnie stosowane. Drobne usterki gramatyczne lub interpunkcyjne są do pominięcia.

Niewłaściwe natomiast jest użycie pojęcia *izotopy metanu*. Wyraz *izotop* jest zdefiniowany tylko dla atomów pierwiastków chemicznych różniących się liczbą neutronów w jądrze. Wobec związków chemicznych tego samego rodzaju zawierających różne izotopy tego samego pierwiastka powinno się stosować nazwę *związki o różnym składzie izotopowym*^{2/}.

Wymienione powyżej błędy, nieścisłości, czy też niedociągnięcia nie obniżają, według mnie, wartości dysertacji, którą oceniam jako znakomitą. Opisane w rozprawie osiągnięcia doktoranta mogłyby wystarczyć dla dwóch prac doktorskich: jednej na temat wykorzystania komórek wieloprześciowych do spektroskopii i detekcji gazów, a drugiej dotyczącej zastosowania tychże komórek do poszerzania widma laserowych impulsów ultrakrótkich.

Wyniki badań związanych z doktoratem opublikowane zostały w trzech recenzowanych czasopismach z listy filadelfijskiej, a opracowanie komórki wieloprześciowej nowego typu jest przedmiotem zgłoszenia patentowego. Ponad to A. Hudzikowski przedstawił swoje osiągnięcia w postaci 6 referatów na konferencjach krajowych i zagranicznych. Jest on także współautorem 10 innych artykułów naukowych i 8 referatów konferencyjnych.

Podsumowując stwierdzam, że mgr inż. Arkadiusz Hudzikowski jest wyróżniającym się kandydatem do stopnia doktora o znakomitych osiągnięciach. Wykazał, że jest młodym naukowcem o dużej samodzielności. Poza szeroką wiedzą z optyki dowiódł świetnego opanowania sztuki programowania, a także nowoczesnego konstruowania aparatury naukowej i niezbędnych do tego układów elektronicznych. Sama dysertacja A. Hudzikowskiego jest ciekawa, nowatorska, pożyteczna i ma dużą wartość naukową. Dotyczy aktualnych problemów współczesnej spektroskopii laserowej, a osiągnięte wyniki mają też istotne znaczenie dla rozwoju technik optycznych stosowanych również w innych dziedzinach, jak przemysł, medycyna, czy choćby ochrony środowiska. Wymienione powyżej uchybienia i błędy nie obniżają mojej bardzo dobrej oceny pracy. Stwierdzam, że rozprawa pt. *Wieloprześciowe komórki odbiciowe do zastosowań w spektroskopii laserowej i do spektralnego poszerzania ultrakrótkich impulsów światła* spełnia z nawiązką warunki określone w ustawie o stopniach naukowych.

Wnioskuje nie tylko o dopuszczenie tej pracy do dalszych etapów przewodu doktorskiego. Składam też wniosek o wyróżnienie rozprawy za nowatorskość naukową, znakomity poziom merytoryczny oraz techniczny i bogaty materiał naukowy, który jest cenny dla wszystkich zajmujących się spektroskopią z użyciem komórek wieloprześciowych i problemami pokrewnymi z tematem rozprawy.


prof. dr hab. Tadeusz Stacewicz

^{2/} Kwestia ta wynika choćby przy okazji egzaminów maturalnych z chemii w roku 2018.