

Warszawa, 30 sierpnia 2021 r.

Prof. dr hab. Wojciech Szuszkiewicz
Instytut Nauk Fizycznych
Kolegium Nauk Przyrodniczych
Uniwersytetu Rzeszowskiego
ul. Profesora Stanisława Pigonia 1
35-310 Rzeszów
szusz@ifpan.edu.pl

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Dmitriy'a Yavorskiy'ego
pt.: „Wzbudzenia dwuwymiarowej plazmy elektronowej w strukturach
półprzewodnikowych - detekcja oraz emisja promieniowania THz”**

Spektroskopia THz jest działem badań wywodzącym się historycznie z badań właściwości materiałów w obszarze spektralnym średniej i dalekiej podczerwieni, które służyły początkowo do zdobywania wiedzy dotyczącej głównie dynamiki sieci krystalicznej oraz zjawisk związanych z obecnością swobodnych nośników ładunku w kryształach. Prowadzenie badań doświadczalnych we wspomnianej części widma promieniowania elektromagnetycznego napotyka na szereg trudności, nieznanym np. osobom specjalizującym się w badaniach optycznych w obszarze widzialnym. Należą do nich przykładowo: brak materiałów mogących spełniać w szerokim zakresie widmowym rolę okienek kriostatów optycznych, filtrów optycznych czy polaryzatorów, małe natężenie promieniowania ze źródeł o widmie ciągłym typu globar czy wysokociśnieniowa lampa rtęciowa, problemy z szerokopasmową, efektywną detekcją promieniowania w obszarze spektralnym obejmującym długości fal aż do granicy pomiędzy podczerwienią a mikrofalami. Istniejące, nieliczne, intensywne źródła promieniowania monochromatycznego w omawianym zakresie (karcinotrony i lasery molekularne) nie umożliwiają oczywiście prowadzenia badań wymagających korzystania z widma ciągłego itd. Pod koniec XX w. rozpoczęto badania nad emisją i absorpcją promieniowania THz związanych z dwuwymiarowym gazem elektronowym (2DEG) w tranzystorach polowych i innych strukturach półprzewodnikowych. Od szeregu lat tematyka ta z powodzeniem rozwijana była m.in. we Francji, a później także w Uniwersytecie Warszawskim czy ostatnio w Instytucie Wysokich Ciśnień PAN.

Należy zauważyć, że w miarę zmniejszania energii czy wzrostu długości fali promieniowania coraz bardziej ograniczona jest znajomość właściwości fizycznych materiałów użytych do wytworzenia ważnych elementów samej aparatury pomiarowej, wzrasta także poziom szumu w stosunku do zazwyczaj i tak niewielkiego natężenia poszukiwanego sygnału. Niezależnie w opisanej sytuacji wzrastają trudności przy interpretacji wyników badań doświadczalnych związane z koniecznością wzięcia pod uwagę możliwego wpływu niepożądanych i często trudno kontrolowanych, dodatkowych zjawisk. Wszystkie wymienione okoliczności powodują, że prowadzenie badań doświadczalnych w zakresie spektroskopii THz niewątpliwie jest zajęciem trudnym, a dodatkowo zarówno czasowo jak i pracochłonnym.

Przydatność promieniowania terahercowego nie ogranicza się wyłącznie do prowadzenia badań wybranych właściwości materii skondensowanej i ma ono szereg ważnych zastosowań. Ponieważ promieniowanie to jest zupełnie bezpieczne dla tkanek żywego organizmu, więc wykorzystywane jest ono w obrazowaniu medycznym, w szczególności umożliwia detekcję nowotworów. Pozwala ono także na detekcję oraz identyfikację materiałów wybuchowych oraz ukrytej broni, wliczając w to zdalne badanie zawartości kopert i paczek papierowych, badanie materiałów gazowych itd. Pojawiają się kolejne doniesienia o zastosowaniach promieniowania terahercowego. Przykładowo dosłownie kilka dni temu (19.08.2021) w nowoutworzonym czasopiśmie naukowym z grupy Science o nazwie Ultrafast Science poinformowano o wykorzystaniu tego promieniowania do kompresji niezwykle krótkich impulsów elektronowych (tzw. zgęstków albo w jęz. angielskim bunch'y) i do konstrukcji ultraszybkiego dyfraktometru elektronowego w niemieckim ośrodku badawczym DESY. Przyrząd ten umożliwia obserwację szczegółów procesów zachodzących w czasie krótszym od 200 fs.

Rozprawa doktorska pana mgr. Dmitriy'a Javorskiy'ego dotyczy problemów emisji oraz detekcji promieniowania THz związanych ze wzbudzeniami w 2DEG, czyli plazmonami, w strukturach półprzewodnikowych. Zdecydowanie należy uznać, że tematyka rozprawy doktorskiej związana jest wprawdzie z wybranymi, ale budzącymi aktualnie zainteresowanie fizyków problemami, a jak już wspomniano, z eksperymentalnego punktu widzenia realizacja omawianych w rozprawie badań nie należy do najłatwiejszych.

Przedstawiona do recenzji, obszerna rozprawa zawiera 145 stron. Po „Wprowadzeniu” zawierającym szereg specjalistycznych informacji niezbędnych do zapoznania się z tematyką badań część druga, „Układy doświadczalne”, opisuje nie tylko same układy, ale również metody postępowania w celu obserwacji wybranych zjawisk oraz prezentuje dużą ilość szczegółów eksperymentalnych. Kolejne części od trzeciej do piątej poświęcone są kolejno emisji promieniowania THz z tranzystorów polowych, emisji z heterostruktur GaAs/GaAlAs oraz detekcji promieniowania THz. Oddzielną część szóstą autor rozprawy poświęcił badaniom charakteryzującym właściwości detektora InSb, a po niej następuje podsumowanie otrzymanych w rozprawie wyników. Rozprawa zawiera jeszcze pełniący rolę dodatku rozdział „Elektronolitografia”, szczegółowo omawiający przygotowanie próbek GaAs oraz CdTe tą metodą, a w końcu bogatą „Bibliografię” obejmującą 148 pozycji. Wyniki uzyskane w trakcie przygotowywania rozprawy ukazały się w sumie w pięciu wieloautorskich artykułach w języku angielskim, opublikowanych w czasopismach, umieszczonych na tzw. liście filadelfijskiej oraz dwóch artykułów w materiałach międzynarodowych konferencji naukowych.

Przechodząc do merytorycznej oceny zaprezentowanych w pracy wyników należy przed wszystkim zauważyć, że zawiera ona wielką liczbę różnych danych doświadczalnych. Skrupulatna i często pomysłowa analiza tych danych, wymagająca czasem także zaprojektowania i przeprowadzenia dodatkowych testów doprowadziła pana mgr. D. Yavorskiy'ego do otrzymania kilku ważnych rezultatów. Po pierwsze opracował on metodę pomiaru oraz przedstawił najbardziej prawdopodobną interpretację wyników uzyskanych w trakcie pomiaru emisji promieniowania THz z heterostruktur GaAs/AlGaAs. Obserwowane promieniowanie charakteryzowało się bardzo małą intensywnością, co wymagało skonstruowania oddzielnego układu pomiarowego, występowało ono w obszarze energii istotnie niższych, niż opisywane dotychczas w literaturze emisja promieniowania z tego typu

struktury. Zaproponowany przez autora rozprawy mechanizm generacji tego promieniowania, czyli jonizacja zderzeniowa płytkich domieszek znajdujących się poza obszarem studni kwantowej to koncepcja oryginalna. Pan mgr D. Yavorskiy przedstawił także oparty na dobrej znajomości odnośnej literatury szacunek możliwej energii generowanego w opisany sposób promieniowania. Ilościowa zgodność przewidywanej oraz obserwowanej energii promieniowania THz jest silnym argumentem za przyjęciem przedstawionej w rozprawie hipotezy.

Po drugie nowym wynikiem jest określenie liniowej polaryzacji magnetoplazmonu będącego wynikiem sprzężenia dwóch rodzajów wzbudzeń w gazie elektronowym w obecności zewnętrznego pola magnetycznego, a mianowicie rezonansu cyklotronowego i plazmonu. W literaturze brak było dotychczas informacji zarówno o możliwych metodach badania takiego zjawiska, jak i o ewentualnych wynikach takich prac. W celu uzyskania takiego rezultatu autor rozprawy zaproponował, wytworzył i zbadał właściwości fizyczne odpowiednio zmodyfikowanych struktur. Niezależnie od znaczącej wagi uzyskanego wyniku doświadczalnego za bardzo istotny uważam fakt, że autor zaproponował również samą metodę określania polaryzacji magnetoplazmonu, która może być w przyszłości wykorzystywana także przez innych badaczy w trakcie analizowania właściwości różnych struktur czy użytych do ich wytworzenia materiałów półprzewodnikowych. Należy dodać, że autor dążąc do osiągnięcia zaplanowanego celu musiał wykonać szereg dodatkowych badań charakteryzujących właściwości fizyczne wybranych elementów układu pomiarowego.

Niezwykle istotnym, dodatkowym, wartościowym wynikiem uzyskanym w trakcie przygotowywania rozprawy doktorskiej jest odkrycie istotnego ograniczenia w zakresie prawidłowego działania detektora InSb, stosowanego od dawna do analizy spektralnej widm promieniowania THz, ustalenie przyczyn tego ograniczenia i zaproponowanie modyfikacji układu detekcyjnego gwarantującej prawidłowość otrzymywanych widm. Dzięki wprowadzonym zmianom autor rozprawy był w stanie przebadać widma promieniowania emitowanego przez komercyjne tranzystory polowe. Ustalenie właściwego sposobu stosowania detektora InSb do prowadzenia pomiarów widm promieniowania jest niewątpliwie wartościowym wkładem w rozwój techniki badawczej w omawianej dziedzinie.

Na osobne podkreślenie zasługuje fakt, że w celu przeprowadzenia zaplanowanych w rozprawie badań autor korzystał z szeregu układów i technik pomiarowych, a kilka z tych układów zaprojektował i skonstruował osobiście. Jest to sytuacja rzadko dzisiaj spotykana w trakcie przygotowywania rozpraw doktorskich.

Jeśli chodzi o nieco słabszą stronę prezentowanej rozprawy, to oprócz kilku drobniejszych zastrzeżeń zamieszczonych w dalszej części recenzji uwagę zwraca przede wszystkim znacznie ograniczona ilościowa interpretacja obserwowanych zjawisk. Pojawiające się w rozprawie, nieliczne wzory są w większości przypadków ogólnymi wzorami podręcznikowymi. Prezentowana interpretacja oparta jest w dużej mierze na przedstawieniu argumentów jakościowych, popierających stawianą tezę czy wykluczających możliwość występowania innych, konkurencyjnych procesów znanych z literatury. Oczywistym jest, że w przypadku stosunkowo nowej, trudnej i uprawianej przez niezbyt szerokie grono osób dziedziny badań szczegółowej, ścisły opis teoretyczny wybranych zjawisk nie jest dostępny i istnieje nadal szereg niewiadomych. Faktem jest także, że w tekście opisu uzyskiwanych wyników autor często wplata informacje o przeprowadzonych

szacowaniach o charakterze ilościowym, opartych na dobrej znajomości odnośnej literatury, tym nie mniej taka forma rozprawy doktorskiej z dziedziny fizyki nie jest często spotykana.

Sam układ rozprawy jest w zasadzie prawidłowy, ale np. informacje dotyczące układów doświadczalnych znajdziemy nie tylko w przewidzianej do tego części drugiej oraz w części szóstej poświęconej badaniu właściwości detektora InSb, ale także w częściach od trzeciej do piątej, dotyczących formalnie omówienia otrzymanych rezultatów doświadczalnych oraz wynikających z nich wniosków. Przy tak obszernym i niekiedy aż nazbyt szczegółowym tekście rozprawy należało poświęcić na początku przynajmniej pół strony na podanie ogólnych informacji o promieniowaniu THz i jego zastosowaniach. Autor nie wyjaśnia także od razu na początku powodów wyboru badanych materiałów półprzewodnikowych, a w każdym razie nie znajdziemy ich przed opisem prowadzonych badań i uzyskanych rezultatów. W samej Warszawie istnieje w różnych instytucjach szereg aparatur technologicznych umożliwiających otrzymywanie wysokiej jakości struktur półprzewodnikowych z szerokiej gamy materiałów. Omówienie kryteriów, które muszą spełniać analizowane przez autora struktury byłoby interesującym uzupełnieniem części merytorycznej rozprawy. Skrupulatny czytelnik doszuka się wprawdzie wybranych danych tego typu w dalszych częściach rozprawy, ale ze względu na dużą liczbę informacji zawartych w rozprawie nie zwracają one należytej uwagi.

Pomimo zastosowanego formatowania tekstu rozprawy jest on dosyć długi i przy standardowo używanym sformatowaniu zdecydowanie przekroczyłby 200 stron. Duża część tekstu poświęcona jest chronologicznemu omówieniu szczegółów postępowania autora w trakcie prowadzenia omówionych w rozprawie badań. W szeregu przypadków jest on zbyt drobiazgowy tym bardziej, że służy do opisu najprostszych wykonywanych operacji i z tego powodu formalnie przypomina szczegółową instrukcję obsługi dowolnego urządzenia. Z drugiej strony należy przyznać, że uważna lektura całości tekstu umożliwia prześledzenie sposobu rozumowania autora, jego sposób podejścia do rozwiązywania pojawiających się problemów doświadczalnych, wyciągania wniosków z kolejno otrzymywanych wyników i stawiania nowych pytań. Przeprowadzenie powyższej analizy wskazuje na dobre opanowanie reguł działalności naukowej przez autora rozprawy. Dodatkowo wybrane fragmenty rozprawy mogłyby być wartościową pomocą przy szkoleniu magistrantów czy doktorantów debiutujących w dziedzinie doświadczalnej fizyki ciała stałego.

Widoczny jest wysiłek autora w dobre przygotowanie tekstu rozprawy od strony edytorskiej. Tekst nie zawiera żadnych literówek, napisany jest ładnym językiem i czyta się go dobrze, co jest cechą istotną rozprawy, gdyż język polski nie jest językiem rodzimym autora. Z drugiej strony autor nie ustrzegł się od stosowania w tekście szeregu słów czy wyrażeń żargonowych, szczególnie dotyczących technologii otrzymywania badanych materiałów i prowadzenia szeregu procesów w celu uzyskania próbek przydatnych do wykonywania zaplanowanych badań. Wielokrotnie występujące w tekście żargonowe określenia, np. „stopowanie trawienia”, „niebramkowy plazmon” czy „wyhodowana struktura”, niewątpliwie stosowane powszechnie w laboratoriach nie powinny pojawiać się w tekstach rozpraw. Dodatkowo autor używa szeregu terminów w języku angielskim, nie oznaczając tego w tekście i nie podając polskich odpowiedników nawet wtedy, gdy są znane i powszechnie używane. Przykładami takich nazw są: „cap layer”, „spacer”, „scriber”, „proximity effect”, „lift-off” itp. Omawiając sam tekst rozprawy należy jeszcze wspomnieć,

że korzystając z rozbudowanego spisu treści i szukając początku wybranego rozdziału czy paragrafu na stronie o numerze „n” znajdziemy go już wcześniej, na stronie o numerze „n-2”.

Reasumując przedstawioną do recenzji rozprawę doktorską oceniam wysoko pomimo szeregu uwag krytycznych, z których większość dotyczy sposobu prezentacji uzyskanych rezultatów. Doktorant wykazał zarówno bardzo dobrą znajomość stosowanych technik eksperymentalnych, jak i znajomość związanej z jego badaniami literatury. Prowadząc opisane w rozprawie badania udowodnił, że jest zdolnym, pomysłowym i bardzo pracowitym eksperymentatorem. Autor rozprawy potrafił także nie tylko uogólnić wnioski ze swoich badań, ale również zaproponować metodologię postępowania przy badaniu zarówno emisji, jak i detekcji promieniowania THz z użyciem struktur przewodnikowych. Uważam to za cenne osiągnięcie autora. Bardzo istotną wartość z punktu widzenia zarówno dotychczas przeprowadzonych, jak i przyszłych badań emisji promieniowania THz stanowi także ustalenie zasady i zakresu poprawnego działania rezonansowego detektora InSb strojonego polem magnetycznym.

Wniosek końcowy

Przedstawiona rozprawa doktorska pana mgr. Dmitriy'a Yavorskiy'ego spełnia kryteria określone w art. 16 ustawy z dnia 14.03.2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach w zakresie sztuki wraz z późniejszymi zmianami oraz zwyczajowe wymogi stawiane rozprawom doktorskim i w związku z powyższym wnioskuję o dopuszczenie jej do publicznej obrony. Jednocześnie biorąc głównie pod uwagę znacznie wykraczający poza przeciętną poziom badań o charakterze doświadczalnym składam wniosek o wyróżnienie rozprawy pana mgr. D. Yavorskiy'ego.

