

dr hab. Andriy Serebryannikov
Zakład Fizyki Nanomateriałów
Instytut Spintroniki i Informacji Kwantowej
Wydział Fizyki i Astronomii
Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu

Recenzja pracy doktorskiej
pana mgra Andrzeja Janaszka
pt. „*Detektory podczerwieni z plazmonicznym wzmocnieniem absorpcji*”

Praca doktorska mgra Andrzeja Janaszka została wykonana na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego pod kierunkiem dra hab. Rafała Kotyńskiego, dra Piotra Wróbla oraz prof. dra hab. Józefa Piotrowskiego we współpracy z VIGO Photonics S.A. w ramach programu „Doktorat wdrożeniowy”.

Praca doktorska jest poświęcona badaniu detektorów podczerwieni ze wzmocnieniem absorpcji dzięki efektom polarytonów plazmonowych, wnęk optycznych i fal w falowodach planarnych. Badania numeryczne i eksperymentalne wykonane były dla dwóch podstawowych kształtów umożliwiających efekty plazmoniczne: pierwszy z matrycą otworów podfalowych w metalu a drugi z matrycą metalicznych nanowysp. Większość wyników otrzymanych w pracy doktorskiej przedstawiono w czterech publikacjach, które ukazały się w renomowanych czasopismach i wydaniach naukowych. W tych publikacjach mgr Andrzej Janaszek jest pierwszym autorem.

Rozprawa doktorska składa się ze streszczenia i 8 rozdziałów. Rozdział pierwszy przedstawia krótki wstęp. Rozdział drugi jest poświęcony wyjaśnieniu rodzajów, właściwości i problemów fotonowych detektorów podczerwieni, a także materiałom dla ich wytwarzania. W rozdziale trzecim przedstawiono sposoby wzmocnienia pola elektromagnetycznego. Rozdział czwarty jest poświęcony przeglądowi literatury o detektorach podczerwieni ze wzmocnieniem absorpcji i projektów detektorów realizowanych w pracy doktorskiej. W rozdziale piątym przedstawiono metody symulacji numerycznych i wytwarzania detektorów oraz również metody charakteryzacji materiałów i struktur. Rozdział szósty poświęcono wynikom symulacji i pomiarów wykonanych przez autora pracy dla detektorów obu kształtów. Rozdział siódmy przedstawia krótkie podsumowanie. Rozdział ósmy zawiera bibliografię.

Niestety autor nie ustrzegł się błędów. Na przykład, nie jest jasne, gdzie w tekście były wspomniane rys. 31 i rys. 37. Na str. 94 wspomniano rysunek 5, ale wygląda na to, że powinien być wspomniany inny rysunek. Nie podano źródeł, z których pochodzi część wzorów, np. wzory (2-7 ,82). Wydaje się, że wzór (83) duplikuje wzór (53).

Rozdziały 1-5 wprowadzają do tematyki absorberów ze wzmocnioną absorpcją i odpowiednie podejścia numeryczne i eksperymentalne. Te rozdziały zostały napisane w sposób dość zwięzły, zawierając wyjaśnienie podstawowych pojęć.

Rozdział 1 pt. *Wstęp* dobrze opisuje cel i strukturę pracy doktorskiej, oraz oczekiwane znaczenie uzyskanych wyników. Wyjaśniono, że emisja promieniowania w zakresie podczerwieni ma różne zastosowania, takie jak np.: pomiary temperatury, wykrywanie usterek i ocena termoizolacji.

Rozdział 2 pt. *Detektory podczerwieni* jest dobrym wprowadzeniem do tego tematu. Zawiera podrozdziały poświęcone rodzajom i właściwościom detektorów podczerwieni (str. 10-18), problemom fotonicznych detektorów (str. 19) i wykorzystywanym materiałom (str. 20-22). Na str. 9 przedstawiono widmo transmisji przez atmosferę w zakresie widzialnym i podczerwonym, z wskazaniem zakresu absorpcji poszczególnych gazów. W ładny sposób omówione zostały podstawowe rodzaje detektorów podczerwieni: fotorezystory, fotodiody i detektory nBn. Dalej wyjaśniono poszczególne właściwości detektorów, jak czułość czy szumy, a także rolę wzmacniaczy transimpedancyjnych i problemów fotonicznych detektorów podczerwieni. Ważną częścią tego rozdziału jest dobre wprowadzenie do materiałów wykorzystywanych do wytwarzania fotonowych detektorów podczerwieni. Moim zdaniem, ta część jest napisana bardzo ładnie, ale mogłoby być korzystnym by krótko przedyskutować optyczne charakterystyki tych materiałów.

Rozdział 3 pt. *Sposoby wzmocnienia pola elektromagnetycznego* stanowi bardzo dobre wprowadzenie do tego tematu. Przedstawiono wgląd w klasyczne sposoby wzmocnienia, do których należą zwierciadło i soczewka immersyjna (str. 23), ale główną uwagę zwrócono na powierzchniowe plazmony-polarytony (str. 24-30), oraz na wnękę optyczną (str. 30-31) i mody falowodu optycznego (str. 32-33). Dla siatek z otworami warto byłoby wspomnieć przełomową pracę prof. Pendryego ze współautorami pt. *Mimicking Surface Plasmons with Structured Surfaces*, która pojawiła się w wysoko renomowanym czasopiśmie *Science* w roku 2004 [*Science*, 305 (5685), s. 847-848], a także ich wysokocytowaną pracę pt. *Surfaces with holes in them: new plasmonic metamaterials* [*Journal of optics A: Pure and applied optics*, 7(2), S97], która została opublikowana w roku 2005. Wśród wymienionych sposobów wzmocnienia pola, które mają albo mogą mieć stosunek do tematów wzmocnienia pola i absorpcji, oraz również detektorów, brakuje zlokalizowanych rezonansów opartych na plazmonach powierzchniowych (ang. *Localized Surface Plasmon Resonances*), a także rezonansów typu Mie w dielektrycznych rezonatorach i podfalowych rezonansów w kwasi-planarnych rezonatorach metalicznych (np. typu *split ring*).

Rozdział 4 pt. *Detektory podczerwieni ze wzmocnieniem absorpcji* zawiera przegląd literatury poświęconej tym detektorom (s. 34-37), a także opis podstawowych cech projektów realizowanych w tej pracy (s. 38-39). Przykłady z literatury są dość dobrze dobrane, ale odnoszę wrażenie, że 2-3 schematy mogłyby pomóc w przedstawieniu informacji o wykorzystanych procesach fizycznych w sposób bardziej bezpośredni i przystępny. Poza tym, podczas przeglądania poszczególnych artykułów warto byłoby powiedzieć więcej o scenariuszach fizycznych, które prowadzą do pożądanych cech absorpcji. Chociaż struktury w tej pracy zaprojektowano dla zastosowań czujnikowych, literatura z szerszej dziedziny absorberów, w tym opartych na metamateriałach czy metapowierzchniach, mogłaby dostarczyć cennego wglądu w podejścia teoretyczne i metody projektowania, oraz zrozumienie obserwowanych cech fizycznych. Na przykład warto byłoby wspomnieć o możliwym zastosowaniu teorii interferencji i dopasowaniu impedancji (ang. *Impedance Matching*). Ta informacja mogłaby być podana i w innych

rozdziałach, np. w rozdziale 2 lub 5. W czwartym rozdziale przedstawiono także opis podstawowych cech realizowanych projektów: detektora fotowoltaicznego z matrycą otworów podfaliowych wykorzystywanego przy oświetleniu od spodu i detektora nBn z wysokodomieszkowanym półprzewodnikiem N++ i matrycą metalicznych nanowysp przy oświetleniu z góry. Dobre schematy detektorów obu kształtów podano na rys. 12.

Rozdział 5 pt. *Metody* poświęcono numerycznym i eksperymentalnym metodom, które były wykorzystane w tej pracy. Ten rozdział zawiera podrozdziały 5.1 pt. *Symulacje* (str. 40-43), 5.2 pt. *Wytwarzanie detektorów podczerwieni* (str. 44-47), 5.3 pt. *Charakteryzacja materiałów i struktur* (str. 44-49) i 5.4 pt. *Charakteryzacja detektorów podczerwieni* (str. 50-53). Do symulacji procesów falowych w układach fonicznych opisywanych równaniami Maxwella wykorzystano oprogramowanie Lumerical w oparciu o metodę różnic skończonych (ang. *Finite-difference time-domain – FDTD*). Także wykorzystana była metoda admitancyjna dla fal płaskich (ang. *Plane wave admittance method – PWAM*), która uwzględnia wielowarstwowość układów fonicznych. Te metody dobrze opisano w pracy, a ich wybór odpowiada jej celom. Dalej przedstawiono jest ładne wprowadzenie do metod wykorzystanych do wytwarzania detektorów, w tym do metod epitaksji z wiązek molekularnych i litografii. Słusznie podkreślono różnicę między fotolitografią i litografią elektronową, ale nie wskazano, jakie kryteria są dorzeczne przy wyborze jednej z tych dwóch metod litograficznych. Na przykład wytwarzanie z pomocą fotolitografii prawdopodobnie potrzebuje mniej środków. Montaż struktur także jest dobrze opisany. Podrozdział 5.3 jest ładnym wprowadzeniem do metody elipsometrii wykorzystanej do pomiarów widm transmisji i odbicia. Podrozdział 5.4 poświęcono metodzie pomiarów charakterystyk prądowo-napięciowych z pomocą charakteryzatora zbudowanego w VIGO Photonics. Na str. 53 wyjaśniono, że rozdzielczość 0.5 cm-1 nie jest potrzebna przy pomiarach. Jednak byłoby korzystnym wskazać, jaka dokładność byłaby wystarczająca w tym przypadku i dlaczego.

Wszystkie wyniki pracy doktorskiej mgra Andrzeja Janaszka przedstawiono w Rozdziale 6 pt. *Wyniki*. Ten rozdział jest napisany bardzo ładnie. Podrozdziały 6.1-6.4 poświęcono pomiarom elipsometrycznym materiałów oraz symulacjom numerycznym i pomiarom matryc otworów podfaliowych w metalu na podłożu dielektrycznym lub na heterostrukturze półprzewodnikowej. Podrozdział 6.5 poświęcono wynikom dla detektorów zawierających matrycę otworów. Podrozdział 6.6 poświęcono wynikom dla detektorów zawierających matrycę metalicznych nanowysp i wysokodomieszkowaną warstwę N++.

Na rys. 24 pozostaje niewyjaśnionym, czy przedstawiona wielkość jest współczynnikiem amplitudowym, czy intensywnością (transmitancja, reflektancja). Wyrażna transmisja dla przypadków 45 : -45 i -45 : 45 na str. 62 nie jest niespodzianką, jeśli wspomnieć o planarnych metamateriałach. Przechodząca i/lub odbita fala z polaryzacją krzyżową pojawia się, jeśli mamy niezerowe i porównywalne składowe prądu na krawędzi otworów lub komponentach rezonatorów podfaliowych dla obu kierunków x i y . To odpowiada przypadkom 45 : -45 i -45 : 45, ale nie odpowiada przypadkom 0 : 90 i 90 : 0. Pożądanym byłoby przeprowadzenie symulacji dla struktur pełnoskalowych lub przynajmniej struktur o większej skali (np. zawierających 10 na 10 komórek, z których każda ma trochę inne rozmiary), aby oszacować możliwy wpływ niedoskonałości wytwarzania na uzyskaną funkcjonalność.

Wyniki pomiarów elipsometrycznych dla oddzielnych warstw i matryc otworów podfaliowych przedstawiono na str. 68-77. Warto tu zauważyć dobre dopasowanie modelu elipsometrycznego do wyników pomiarów, oraz również dobrą zbieżność między symulacjami i

pomiarami. Na str. 74 byłoby przydatnym wyjaśnić, dlaczego mierzono transmisję tylko dla padania prostopadłego, podczas gdy odbicie mierzono dla różnych kątów padania. Na rys. 48 i rys. 50 lepiej byłoby wykorzystać termin *Pomiar* zamiast *Intensywność*. Wyniki symulacji i pomiarów dla wytworzonych detektorów z matrycą otworów przedstawiono na str. 78-91. Wzmocnienie absorpcji było przewidywane na podstawie symulacji, ale niestety nie zaobserwowano wzmocnienia czułości w eksperymencie. Chociaż nie osiągnięto oczekiwanej czułości prądowej, uzyskane wyniki stanowią dobry punkt wyjścia dla kolejnych etapów badań detektorów pierwszego kształtu w ramach tego programu badawczego. Wyniki symulacji i pomiarów dla wytworzonych detektorów drugiego kształtu, które są oparte na matrycach nanowysp i wysokodomieszkowanych warstwach N++, przedstawiono na str. 92-110. Wykonane symulacje wskazują na wzmocnienie absorpcji i czułości. Zaobserwowano wzrost czułości prądowej w eksperymencie i dobrą zbieżność z wynikami symulacji. Na rys. 76 przedstawiono porównanie wyników pomiarów dla oświetlenia z przodu i od tyłu, co umożliwia porównanie z koncepcjami i wynikami dla absorberów opartych na metamateriałach. Na rys. 90 obserwuje się dobrą zbieżność w wynikach czułości dla nanowysp różnego rozmiaru. Największa czułość zaobserwowana na rys. 90 stanowi 0.6 A/W (w przypadku bez zasilania). Największa czułość zaobserwowana w wynikach pracy stanowi 2.3 A/W (w przypadku z zasilaniem, rys. 95).

Byłoby dobrze wyjaśnić, w jaki sposób obliczono/zmierzono absorpcję przedstawioną na rys. 73, 76, 77 (str. 92, str. 95, str. 96). Analiza udziału wszystkich części konstrukcyjnych złożonej struktury w wynikającej absorpcji i analiza bilansu energetycznego mogłyby być bardzo dobrym uzupełnieniem przedstawionych wyników. Rola powierzchniowych polarytonów plazmonowych pozostaje do końca niejasna w przypadku detektorów drugiego kształtu, które zawierają matrycę nanowysp. Jeśli zostało wyjaśnione, że wzmocnienie pochodzi głównie z efektów rezonansów wnękowych/falowodowych, to należałoby także zbadać, jaką rolę odgrywa, zależnie od projektu, matryca otworów lub matryca metalicznych nanowysp. Mogłoby być dorzecznym nieznacznie przekształcić nazwę pracy, żeby uwzględnić rolę efektów nieplazmonicznych.

Rozdział 7 przedstawia dobrze napisane podsumowanie. Byłoby dobrze wskazać w tym rozdziale, jakie plany badań detektorów podczzerwieni w najbliższej perspektywie ma Kandydat. Zostaje niejasnym, czy planuje Kandydat wyjaśnienie przyczyn, przez które nie obserwuje się wzrostu czułości w przypadku detektorów z matrycą otworów podwałowych. Należałoby zwrócić większą uwagę na wpływ, jaki prezentowane wyniki mogą wywrzeć na dany obszar badań.

Rozdział 8 stanowi bibliografia. Pozycje bibliograficzne zostały dobrane adekwatnie do omawianej tematyki. Jej dobór pokazuje bardzo dobre rozeznanie kandydata w aktualnym stanie badań w odpowiednim obszarze. Jedyna uwaga odnosi się do błędów redakcyjnych w spisie literatury. Mianowicie, w poz. [5,7,11,17,23,39-42,60,62-64,72,75,78-82,84-86,88,90-92,96,97,101,103-105,107,108,115,126,128] brakuje numeru artykułu lub (poprawnego) zakresu stron. W poz. [5,85] musi być wskazany numer tomu. W poz. [32] nazwa i numer rozdziału, zakres stron i autorzy są wskazane niepoprawnie. Nie jest jasne, co znaczy * w poz. [30]. W poz. [51] nie wskazano nazwy czasopisma i zakresu stron. Wygląda na to, że nazwy w poz. [54,117,118,120] potrzebują korekty.

Moim zdaniem pan mgr Andrzej Janaszek uzyskał szereg bardzo interesujących wyników, które zostały opublikowane w dobrych czasopismach naukowych. Te wyniki opisano w pracy doktorskiej w ładny sposób. Jestem przekonany, że przedstawione wyniki badań stanowią istotny wkład w rozwój fizyki, w szczególności w aktualnie szybko rozwijające się obszary fotoniki,

plazmoniki i inżynierii optycznej. Wykonane badania oraz również podane w pracy wyjaśnienie udziału Kandydata w tych badaniach zdecydowanie wskazują na wysokie kompetencje mgra Andrzeja Janaszka i jego zdolności potrzebnych dla samodzielnej pracy naukowej, a dość bogaty naukowy dorobek Kandydata wskazuje na to, że jest on dojrzałym naukowcem.

Podsumowując, z przekonaniem stwierdzam, że przedstawiona praca doktorska spełnia wszystkie wymogi Ustawy *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* z dnia 20 lipca 2018 roku stawiane rozprawom doktorskim. Wnoszę o dopuszczenie mgra Andrzeja Janaszka do dalszych etapów przewodu doktorskiego. Ponieważ wysoka wartość naukowa zaprezentowanych badań jest potwierdzona pierwszo-autorskimi publikacjami w renomowanych wydaniach i czasopismach naukowych, oraz, że praca Kandydata wskazana w bibliografii w poz. 129 ukazała się również w renomowanym czasopiśmie *Optics Express* 19 listopada 2025 r., wnoszę o wyróżnienie pracy doktorskiej pana mgra Andrzeja Janaszka.



Andriy Serebryannikov