

Łódź 31 stycznia 2026

dr hab. inż. Michał Wasiak, prof. uczelni
Politechnika Łódzka
Instytut Fizyki
Wydział Fizyki Technicznej, Informatyki i Matematyki Stosowanej
ul. Wólczńska 217-221, 93-005 Łódź

Recenzja rozprawy doktorskiej pt.
Detektory podczerwieni z plazmonicznym wzmocnieniem absorpcji

Autor rozprawy: Andrzej Janaszek
Promotor: dr hab. Rafał Kotyński
Promotor pomocniczy: dr Piotr Wróbel

W recenzowanej rozprawie doktorskiej analizowane jest zagadnienie zwiększenia absorpcji promieniowania w wysokotemperaturowych detektorach podczerwieni z powierzchniami InAs/InAsSb za pomocą podfałowych siatek dyfrakcyjnych umieszczonych na powierzchni detektora. Praca powstała w ramach programu *Doktorat wdrożeniowy* we współpracy z firmą VIGO Photonics SA.

W rozprawie przedstawione są wyniki zarówno symulacyjne jak i eksperymentalne. To oczywiście jest wielką zaletą badań jako takich, ale sposób ich opisania w pracy uważam za niewłaściwy i mylący. Co prawda autor w *Podsumowaniu* (czyli na samym końcu) pisze (ogólnie), które z przedstawionych badań przeprowadził sam, a które wykonane były przez inne osoby, ale uważam to za dalece niewystarczające. Na początku pracy, w *Streszczeniu*, pisze, że symulacje metodą PWAM zostały wykonane *w ramach pracy* (czyli można by przypuszczać – przez niego), zaś w *Podsumowaniu* stwierdza, że jedynie symulacje metodą FDTD wykonał samodzielnie. W *Streszczeniu* prace eksperymentalne (które, jak dowiadujemy się na końcu, wykonali inni ludzie) poprzedzone są określeniem *wytworzono i scharakteryzowano*. ... Czytelnik ma pełne prawo uznać, że oznacza to czynności wykonane przez doktoranta. Wszystko to powoduje, że bardzo trudno jest w trakcie lektury śledzić, które z opisywanych rzeczy są wkładem doktoranta, a które nie. W kwestii oceny pracy jest to istotna trudność.

Nie zarzucam autorowi w najmniejszym stopniu nieuczciwości – na końcu pracy jest napisane, które wyniki są jego autorskim osiągnięciem (choć nieco nieprecyzyjnie, bo coś to znaczy *zaprojektował wszystkie eksperymenty realizowane w ramach pracy?*). Przedstawione wyniki współpracowników są fundamentalnie ważne dla całości badań, więc absolutnie nie krytykuję tego, że zostały tu przedstawione. Moim zdaniem po prostu autor powinien był za każdym razem, kiedy opisywał nieswoje wyniki (pomiar, wytwarzane urządzenia) wyraźnie napisać, że nie on tę pracę wykonał.

Tekst rozprawy zorganizowany jest w następujący sposób. Najpierw autor omawia tło swoich badań, czyli ogólnie detektory podczerwieni różnych rodzajów, a także materiały ważne w kontekście fotonowych detektorów podczerwieni. W rozdziale 2.2 przedstawione są pewne rozważania i wzory. Muszę powiedzieć, że nie wszystko zrozumiałem. Brakuje na pewno schematu elektrycznego, który autor zapewne ma w głowie, ale mnie jest trudno go odtworzyć. Jak na przykład należy rozumieć (i z czym wiązać?) *rezystancję szeregową* R_{ser} wspomnianą na stronach 15 i 16? Wydaje mi się, że nie rozumiem tego

chyba prostego określania, bo opis do rysunku 4b sugeruje że dla diody i tej rezystancji zarówno prąd (ale który z dwóch występujących w tym rozdziale: I_{ph} czy I_s ?) jak i napięcie mają być jednakowe (ponieważ ich charakterystyki prądowe-napięciowe mają się przecinać). Przy wzorze (4) napisane jest, że R_{ser} tworzy z diodą dzielnik napięciowy. To istotnie pasuje do połączenia szeregowego, ale wzór (4) opisuje działanie dzielnika prądowego. Czyli znowu mam wrażenie, że R_{ser} z diodą jest połączone jednocześnie szeregowo i równolegle.

Dalej przedstawione są sposoby zwiększania natężenia pola optycznego, w szczególności te, które wykorzystują efekty plazmonowo-polaritytonowe. W kolejnym rozdziale autor przedstawia opisane w literaturze konstrukcje detektorów, w których zastosowano różne typy modyfikacji powierzchni w celu poprawy ich parametrów. Przedstawione konstrukcje są bardzo różnorodne – widać, że autor orientuje się w temacie, ale żałuje, że nie opatrzył opisów jakimiś schematami. Bez nich opisy konstrukcji były dla mnie momentami trudne do zrozumienia, zwłaszcza że jest ich sporo.

Wymienione powyżej części pracy stanowią wstęp do opisu oryginalnych prac zrealizowanych w ramach doktoratu. Dalej następuje opis dwóch projektów struktur detektorów, o których autor pisze: *podejmuję [ich] realizację*. Nie wiem, niestety, co to znaczy. Czy autor zaprojektował je? Nawet jeśli tak, to zapewne nie od podstaw.

W rozdziale 5 następuje opis metod teoretycznych (numerycznych: FDTD i PWAM) oraz pomiarowych wykorzystanych w pracy. Przy opisie spektrometru fourierowskiego dowiadujemy się, że rozdzielczość pomiarów spektralnych wynosi 16 cm^{-1} . Jako że wszystkie widma przedstawiane dalej w pracy pokazane są w funkcji długości fali, dobrze byłoby przeliczyć tę wartość na zakres długości fali w jakimś charakterystycznym miejscu.

Rozdział 6 zawiera opis wyników uzyskanych w projekcie. Najpierw dostajemy wyniki badań nad strukturami i próbkami w pewnym sensie kalibracyjnymi. Między innymi mamy ciekawe porównanie wyników symulacji i pomiarów dla testowych próbek, w których różne siatki metaliczne zostały położone na podłożach. Jeśli dobrze rozumiem, to dla struktury o rozmiarze otworów $1,5\text{ }\mu\text{m} \times 1,5\text{ }\mu\text{m}$ zostały przeprowadzone tylko symulacje dla oświetlania od spodu, a wytworzoną strukturę (o otworach $1,1\text{ }\mu\text{m} \times 1,1\text{ }\mu\text{m}$) oświetlano od góry. Symulacje rzeczywistego przypadku są dość szczątkowe i nie pokrywają zmierzonych przypadków. Na str. 60 autor stwierdza *Wysoka zgodność danych pomiarowych z przeprowadzonymi symulacjami stanowi pozytywną weryfikację przyjętych modeli i metod numerycznych*. Istotnie, pod względem pozycji pików i dołków widma zmierzone i symulowane pokazane na rys. 32 (po lewej) wyglądają nadzwyczaj podobnie. Jednak nie można nie zauważyć, że dla fal krótszych niż około $7\text{ }\mu\text{m}$ sygnał zmierzony jest około cztery razy niższy, niż przewidują symulacje. Podobna sytuacja powtarza się dalej – na rys. 52. Wypadałoby jakoś wytłumaczyć, czemu mimo to autor uważa, że model dobrze opisuje rzeczywistą strukturę. Zwłaszcza że mamy tylko jedną krzywą symulacyjną wobec bardzo wielu zmierzonych. Przy okazji muszę wypomnieć autorowi, że tak narysował wykres na rys. 32, że krzywej pomiarowej odpowiadającej krzywej symulowanej praktycznie nie widać. Zastanawia mnie, czemu większość symulacji dotyczy innego przypadku (inny rozmiar otworów i kierunek oświetlania) niż pomiary. Domyślałbym się, że najpierw powstały symulacje, a potem struktura, która nie całkiem się udała, ale trudno mi zrozumieć, jak okres wykonanej struktury może różnić się od projektu o ponad $1/3$. I czemu odwrócono kierunek oświetlania?

Opis pomiarów elipsometrycznych pozostawił we mnie niedosyt. Nie wiem, jak formalnie przeprowadzone było dopasowywanie współczynników załamania (to jest jego części rzeczywistej i urojonej) do, jak rozumiem, dwóch krzywych na raz: ψ i Δ . Jaka

wartość była minimalizowana? Bez tej wiedzy znajomość wartości średniego błędu kwadratowego, którego autor używa jako argumentu w pewnej analizie, niewiele mi mówi. Dodatkowo, jeśli dobrze rozumiem, takie dopasowanie przeprowadzone było dla pięciu kątów padania wiązki (niestety tylko się domyślam, bo nie jest wyjaśnione, czym są kąty podane na rys. 41). Jak wypadło porównanie tych wyników? Współczynnik załamania jest kluczowym parametrem w kontekście tematyki doktoratu, a elipsometria nie jest bardzo obiektywną metodą, w przypadku gdy próbka jest wielowarstwowa, więc warto jest wiedzieć dokładnie, jakie liczby zostały wyznaczone.

Od strony 78 zaczyna się opis wyników dla docelowych przyrządów, to jest detektorów z siatkami. Najogólniej rzecz ujmując mamy dwa rodzaje detektorów. Pierwszy to detektor fotowoltaiczny, oświetlany przez podłoże, z siatką w postaci otworów w warstwie metalu. Drugi to polaryzowany (w założeniu) detektor nBn, w którym w większości przypadków siatka ma postać wysp metalowych (czyli jest negatywem poprzedniej). Ten drugi oświetlany jest od strony siatki. Detektory pierwszego typu były montowane epi-down do podłoża krzemowego na indowych kolumnach tudzież na warstwie kleju (czy wtedy kolumny indowe też były używane?). To jest niepokojąca sytuacja, ponieważ w symulacjach te elementy nie są brane pod uwagę. Na str. 91 autor to zauważa, i mówi, że wpływ kleju został wykluczony dzięki porównaniu wyników dla struktur z klejem i bez kleju. To oczywiście ważna informacja, ale nie wiemy nic o wpływie płytki krzemowej, która jest obecna w obu przypadkach. Na wynikach symulacji widać, że pole optyczne przenika na ponad 1 μm poniżej siatki (dalej wykresy się ucinają). Czy możliwe jest, że podłoże krzemowe oddziałuje z tym promieniowaniem?

Ta zasadnicza część pracy zawiera bardzo dużo wyników uzyskanych dla wielu różnych wariantów dwóch podstawowych typów urządzeń. Muszę przyznać, że gubię się w tym. Sądzę, że to głównie (lub jedynie) moja wina – szybko zaczynają mi się mylić wersje, o których czytam. Pojawia się też stwierdzenie (na str. 93) *Detektor ten [nBn] przeznaczony był do oświetlania od góry (tj. od strony osadzonej struktury), jego powierzchnia metalizacja miała zatem formę pierścienia*. Na zdjęciach i schematach widzę na powierzchni detektora same prostokąty. Czy chodzi o dolną elektrodę w kształcie (w dużym przybliżeniu) podkowy (np. na rys. 78)? Nawet jeśli tak, to nie jest to pierścień – więc nie jestem pewny.

Na pewno warto było opisać wszystkie warianty struktur. Ktoś, kto będzie w tej pracy poszukiwał konkretnych informacji, zwłaszcza mając w głowie własne projekty, na pewno doceni szczegółowość tej części pracy.

Mimo wielu prób i zachęających wyników symulacji siatka na powierzchni detektora pierwszego typu (fotowoltaicznego oświetlanego przed podłoże) w praktyce (w analizowanych urządzeniach) nie spełniła pokładanych w niej nadziei. To nie zmienia faktu, że przedstawione badania są, jak sądzę, bardzo wartościowe. Naukowiec nie może oczekiwać, że wszystkie (czy nawet duża część) jego prób zakończy się sukcesem, a nieudane próby też mają zazwyczaj dużą wartość poznawczą.

Druga konfiguracja detektora (czyli nBn) okazała się bardziej podatna na wysiłki doktoranta. W przypadku siatek o okresach do około 3 μm wzmocnienie pola optycznego zaobserwowano w niewłaściwym obszarze widma. Wytworzenie siatek o większym okresie pozwoliło lepiej zestroić ten rezonans z absorpcją w absorberze. W efekcie udało się uzyskać znaczącą poprawę wykrywalności urządzenia. Myślę, że to bardzo zasłużony sukces.

W kwestii języka i techniki pisania pracy mam kilka uwag. W pracy oczywiście można znaleźć trochę błędów gramatycznych i ortograficznych (zwłaszcza w kwestii stawiania przecinków), ale większość z nich traktuję wyrozumiale – literówki czy błędy wynikające z przeredagowywania zdań i pozostawienia resztek poprzedniej wersji zawsze

się trafia w dostatecznie długim tekście. Gorzej jest z błędami popełnianymi regularnie. Zapewne pod wpływem ortografii angielskiej autor uparcie powtarza błąd ortograficzny pisząc, przy odwoływaniu się do numerowanych rysunków i tabel, słowa *rysunek* czy też *tabela* dużymi literami. Czterokrotnie pojawia się stwierdzenie typu *przedstawione jest na Rysunek 20*. Raz mógłbym zrozumieć, ale dlaczego forma *na rysunku* nie pojawiła się ani razu? Wypomnę też stwierdzenia ... *rezystu dedykowanego do elektronolitografii* (str. 45), *przyrządy oparto o cienkie absorbery* (str. 109). Na str. 70 wartości koncentracji podano bez jednostki. Cytowane są też parę razy strony internetowe (bez podania nawet daty dostępu), w tym pozycja [118] – artykuł z Wikipedii. To nie powinno było się wydarzyć.

Rysunki w pracy często są niezbyt czytelne lub po prostu niezbyt ładne. Na ogół z powodu zbyt małej rozdzielczości lub rozmiaru liter (np. rysunki 5, 14, 18, 20, 21, 41, 73, 84 i większość wykresów od 41 do 49). Na większości map z wynikami symulacji FDTD skala kolorów ma osobliwą podziałkę. Sporo jest błędów typograficznych. Często symbole nie są pisane kursywą, choć powinny. Z drugiej strony czasem jednostki pisane są kursywą (zwłaszcza litera μ w znaczeniu *mikro*). Z niewiadomych powodów autor daje odstęp między symbolem a znakami interpunkcyjnymi. Litera 'x' używana jest parokrotnie jako symbol mnożenia. Podpisy tabel pisane są pod nimi zamiast nad nimi. Nie pochwalam również używania oznaczeń $\sin^{-1}$ i $\tan^{-1}$ zamiast *arcsin* i *arctg*. Anglicyzmem jest zapewne też używanie słowa *równanie* jako synonimu słowa *wzór* czy też *równość* oraz symbolu 'tan' dla tangensa. Z nieznanym mi powodów nie jest stosowane przenoszenie wyrazów. Przez to niejednokrotnie widzimy ogromne spacje, które bardzo źle wyglądają. Myślę, że znaczna część tych błędów wynika z tego, że autor użył niewłaściwego narzędzia do pisania pracy, zwłaszcza biorąc pod uwagę, że zawiera ona sporo wzorów i symboli.

Pozwolę sobie sformułować parę dodatkowych szczegółowych pytań, na które chętnie poznam odpowiedź:

1. Poprosiłbym o uzasadnienie stwierdzenia ze str. 24: *W przypadku soczewki hiperhemisferycznej, czyli mającej kształt ponad połowy sfery, promieniowanie pierwotnie skupione na powierzchni optycznej A_o w wyniku przejścia przez powierzchnię soczewki ogniskowane jest na powierzchni A_e mniejszej o czynnik n^4 , gdzie n jest współczynnikiem załamania materiału soczewki.*
2. Implikacja przedstawiona pod wzorem (30) na str. 26 jest nieprawdziwa. Można znaleźć takie dwie liczby k_d i k_m o dodatniej części rzeczywistej oraz liczby $\varepsilon_d, \varepsilon_m$ również o dodatniej części rzeczywistej spełniające równość (30). Na przykład

$$\begin{aligned} k_d &= \frac{1}{2} - i & k_m &= \frac{1}{2} + i \\ \varepsilon_d &= \frac{3}{4} + i & \varepsilon_m &= \frac{5}{4} \end{aligned}$$

Nawet część urojona obu przenikalności jest nieujemna, co zapewne jest niepodanym wprost wymogiem. Jaki istotny warunek został pominięty w tej implikacji? Lub, jeśli jest ona po prostu fałszywa, jakie dodatkowe możliwości z tego wynikają?

3. Czym jest *elektrostatyczny charakter fali*? Na str. 38 czytamy *Przy zaniedbywalnym tłumieniu wektor falowy dąży wówczas do nieskończoności a prędkość grupowa do zera, przez co fala w tym rejonie uzyskuje elektrostatyczny charakter i nazywana jest plazmonem powierzchniowym.*
4. Na str. 41 pada stwierdzenie: *Jeśli zadana geometria symulacji ma symetrię lustrzaną, można dodatkowo zastosować warunki symetryczne lub antysymetryczne, co ogranicza zasoby obliczeniowe nawet czterokrotnie.* Otóż w ogólności nie można. Widać to choćby po tym,

że, jak sądzę z powodu przyjęcia tego założenia, autor nie symulował metodą FDTD (w rozdziale 6.1 i chyba nigdzie) innych niż zerowy kątów padania. Generalnie symetria równania różniczkowego nie musi się przenosić na symetrię jego rozwiązania. Czy znamy jakąś charakterystykę tych zagubionych rozwiązań?

5. Czemu piki plazmoniczny i falowodowy (na przykład na rys. 56) powinny tak znacząco różnić się szerokością?
6. Co to jest *absorptancja*?

Mgr Andrzej Janaszek jest pierwszym autorem dwóch publikacji w recenzowanych czasopismach (*Opto-Electronics Review* i *Optics Express*). Uważam również, że jego rozprawa doktorska spełnia wymogi ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* i wnioskuję, by Rada Naukowa Dyscypliny Nauki Fizyczne Uniwersytetu Warszawskiego dopuściła mgra Andrzeja Janaszka do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Dodatkowo wnoszę o wyróżnienie tej rozprawy. Przedstawię dwa powody. Po pierwsze badania w niej przedstawione to, moim zdaniem, fizyka par excellence – wykorzystywanie modeli matematycznych do przewidywania wyników pomiarów i eksperymentalna weryfikacja efektów. Efekty, których te dociekania dotyczą, są niebanalne, nieintuicyjne, więc przekonanie się, czy da się je zaobserwować jest bardzo ciekawe. Po drugie jest to doktorat wdrożeniowy. Wydaje mi się, że badania doktoranta znakomicie, jak rzadko które, spełniają założenia tego programu.

