

Dr hab. Jan Masajada
Katedra Optyki i Fotoniki
Politechnika Wrocławska
Wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław

Wrocław 24 .06.2019

RECENZJA

**Rozprawy doktorskiej
mgr inż. Jarosława Bomby**

Struktury antyrefleksyjne dla promieniowania terahercowego wykonane w technologii druku 3D

Rozprawa doktorska mgr inż. Jarosława Bomby ma charakter technologiczny. Prace nad nową technologią wymagają łączenia wielu wątków, w jedną funkcjonalną całość. Poszczególne wątki zwykle nie niosą w sobie elementu nowości, ale złożone w całość dają nową jakość w postaci nowego urządzenia czy technologii. Stwarza to również swoiste problemy dla piszącego rozprawę doktorską jak również dla jej recenzenta. Piszący rozprawę musi opisać poszczególne wątki w sposób, który z jednej strony dobrze wprowadza w zagadnienia związane z zasadniczym tematem rozprawy, a z drugiej strony musi rozsądnie dobierać zamieszczone informacje tak aby rozprawa miała objętość nie przekraczającą przyjętych zwyczajowo norm. W przypadku przedstawionej rozprawy doktorant musiał uwzględnić elementy teorii: fakturowanych warstw antyodblaskowych, metod numerycznych do modelowania struktur dyfrakcyjnych, spektroskopii terahercowej, druku 3D. Wszystkie te elementy składają się na końcowy produkt jakim są fakturowane warstwy antyodblaskowe dla optyki pracującej w zakresie terahertzów. Jednocześnie autor bierze na siebie zadanie jasnego przedstawienia własnych osiągnięć w wymienionych wyżej obszarach, których złożenie, czyli projekt techniczny i symulacje, wykonawstwo, budowa układu pomiarowego oraz testy wykonanych struktur dadzą efekt zapowiedziany w tezach pracy. Mając na uwadze złożony charakter przedstawionej pracy przedstawiam poniżej jej szczegółową ocenę.

Wstęp

We wstępie autor przedstawia uzasadnienie podjętych badań, oraz formułując tezę rozprawy. Określa również własne doświadczenia w zakresie techniki terahertzowej, oraz listę publikacji związanych z rozprawą. Lista zwiera 8 pozycji w tym cztery w renomowanych czasopismach: jedna w Nanoscale (IF 7.23), jedna w Optics Express (IF 3.35) i dwie w Optics Letters (IF 3.14). Przedstawione dane literaturowe stanowią mocną stronę rozprawy

Rozdział 1

Rozdział 1 przedstawia stan wiedzy oraz krótkie omówienie teorii stojącej za stosowaną przez doktoranta technologią. Krótko omówione są stosowane obecnie struktury antyodbiciowe dla zakresu THz, jak również samo promieniowanie THz i jego najważniejsze zastosowania. Następnie autor omawia podstawy teorii warstw antyodbiciowych i ich klasyfikację. Więcej uwagi poświęca warstwom złożonym z komórek w kształcie piramid, które są stosowane w projektowanych przez niego warstwach.

Należałoby tu dodać uwagę, że warunek (1) jest spełniony dla światła padającego normalnie na warstwę.

Materiał został przedstawiony w sposób oszczędny, ale nie budzi istotnych zastrzeżeń.

Rozdział 2.

Rozdział 2 zawiera opis układu eksperymentalnego do charakteryzacji badanych struktur antyodblaskowych. Układ został skonstruowany przez doktoranta. Opis zaczyna się od krótkiego wprowadzenia teoretycznego do zagadnienia generacji i detekcji promieniowania w zakresie THz. Następnie doktorant przedstawia ogólny schemat spektroskopu THz w dziedzinie czasu, aby w kolejnym kroku przejść do opisu własnego układu eksperymentalnego. Autor zamieścił schemat układu pracującego w trybie wiązki przechodzącej i odbitej, jak również ogólny algorytm programu, który nim steruje.

Rozdział 3.

W rozdziale trzecim przedstawiony jest projekt warstw antyodblaskowych oraz wyniki symulacji numerycznych działania zaprojektowanych struktur. Autor wykonał projekt warstw w geometrii piramid w wersji jedno i dwustronnej. Struktury zostały zaprojektowane zgodnie ze wskazaniem z pracy Southwella [44-46] odnoszącej się do zakresu optycznego. W zasadzie czytelnik staje tu przed faktem dokonanym, to znaczy brak jest wyraźnego uzasadnienia dlaczego właśnie takie warstwy. Częściowo można sobie to uzasadnienie dopowiedzieć z części 1.1 rozprawy, ale autor tak podstawowe informacje powinien zawrzeć w części poświęconej własnemu projektowi warstw.

Symulacje zostały przeprowadzone z użyciem komercyjnego pakietu „FDTD Solutions”, firmy Lumerical. Program działa w oparciu o metodę różnic skończonych w dziedzinie czasu (metoda FDTD). Po krótkim wprowadzeniu do metody FDTD, autor przedstawia wyniki obliczeń dla warstw jedno i dwustronnych oraz dla płaskiej płytki referencyjnej. W szczególności zbadana została: zależność wartości sygnału odbitego w funkcji częstotliwości w przedziale 0.1-0.3THz, zależność wartości sygnału odbitego od kąta padania z rozbiem dla polaryzacji TE i TM, zależność wartości sygnału przechodzącego od kąta padania z rozbiem dla polaryzacji TE i TM oraz zależność wartości sygnału odbitego i przechodzącego od grubości podkładu próbki. Na koniec autor przebadał działanie warstwy antyrefleksyjnej naniesionej na powierzchnię soczewki.

Przedstawione symulacje numeryczne wskazują, że zaprojektowane warstwy będą poprawiać pracę układów optyki THz, tzn. ograniczać niepożądane odbicia. Przedstawione wyniki nie budzą wątpliwości jednak pozwolę sobie na sformułowanie następujących uwag:

- w opisie wzoru (20) czas został zamieniony z przestrzenią
- brak w tekście odniesienia do serii rysunków zamieszczonych w dodatku 3.
- rysunek 37a autor pisze: „... obserwujemy całkowite wewnętrzne odbicie...”, które wskazuje pomarańczowa strzałka. Prawdę mówiąc ja tam nic nie widzę. Ślady jakiegoś efektu dostrzegam na rysunku 37b. Przy tak słabych efektach może warto byłoby zastosować skalę logarymiczną.
- na rysunku 50 niewiele co widać. Ponownie przydałaby się skala logarymiczna. Muszę tu stwierdzić, że dobór palety kolorów na wielu rysunkach jest po prostu nieszczęśliwy.
- rysunek 53. Co dokładnie oznacza pominięcie grubości podkładu? Rysunek sugeruje, że fala rozchodzi się wewnątrz podkładu przez pewną jego grubość.
- rysunek 56 podaje wymiary soczewki, konsekwentnie zwymiarowany powinien być rysunek 57, pokazując przynajmniej odległość między źródłem a strukturą.

Rozdział 4

W rozdziale 4 autor omawia wytworzenie zaprojektowanych struktur. Rozdział zaczyna się od krótkiego wstępu do technologii druku 3D, a szczególnie użytej w dalszej części pracy metody SLS. Struktury zostały wydrukowane na polimerze o handlowym oznaczeniu PA12. Wybór materiału podyktowany był jego korzystnymi cechami fizycznymi. Zdjęcia pokazują, że struktury zostały wykonane z zadowalającą precyzją do pracy w zakresie THz.

Rozdział 5

Rozdział 5 poświęcony jest przedstawieniu wyników testów wytworzonych struktur antyrefleksyjnych. Struktury zmierzone zostały w opisanym wcześniej układzie spektrometru THz. Pomiaru zaczynają się od płaskiej płytki referencyjnej. Kluczowy jest tu rysunek 70, który

pokazuje zgodność przebiegu oscylacji wyznaczonego z modelu teoretycznego, numerycznego i z pomiarów. Niezgodności amplitudowe związane są z brakiem efektów tłumienności w modelach teoretycznych oraz niedopasowaniem mocy źródła w poszczególnych modelach.

Pomiary struktur jedno i dwustronnych (np. Tabela 3) wskazują na efektywne tłumienie odbić szczególnie dla struktury dwustronnej dla kąta padania bliskiego kątowni 45° (zgodnie z wymogami projektu).

W kolejnym kroku zmierzone zostały wartości natężenia sygnału przechodzącego. Przetworzone wyniki wskazują na wzrost natężenia wiązki przechodzącej przy zastosowaniu warstw antyrefleksyjnych, szczególnie dla zakresu 0.2THz, dla którego natężenie sygnału wzrosło odpowiednio o 15% dla struktur jednostronnych i o 24% dla struktur dwustronnych.

Podsumowanie

Doktorant z powodzeniem przeszedł cały ciąg technologiczny związany z projektem struktur antyodbiciowych w zakresie THz, od projektu, poprzez testy numeryczne, wykonanie i testy wykonanych struktur. Tak szeroki front prac wymaga łączenia wielu umiejętności ale daje również najpełniejszy wgląd w badaną technologię. W podsumowaniu pracy brakuje mi uwag dotyczących perspektyw rozszerzenia zaproponowanej technologii poza obecny zakres sąsiedztwa 0.2THz. Brak jest również porównania efektywności wykonanych struktur z innymi rozwiązaniami. Zdaję sobie sprawę, że istotną zaletą jest tu elastyczna technologia druku 3D, nie mniej krótkie omówienie zalet i wad konkurencyjnych rozwiązań dałoby czytelnikowi podstawę do szerszego porównania.

Konkluzja

Biorąc pod uwagę powyższe stwierdzam, że przedstawiona rozprawa doktorska, w świetle obowiązującej ustawy o tytule naukowym i stopniach naukowych, spełnia wynikające z tejże ustawy kryteria i może być podstawą do ubiegania się o stopień doktora nauk fizycznych. Wnoszę o dopuszczenie rozprawy do obrony publicznej

