

## **RECENZJA**

pracy doktorskiej mgr inż. Dariusza Przybylskiego  
zatytułowanej

### ***Zastosowanie kryształów fotonicznych do kontroli pola elektromagnetycznego w strukturach optoelektronicznych***

#### **1. Podstawa prawna**

Niniejsza recenzja powstała na prośbę Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Wrocławskiej, zgodnie z uchwałą z dnia 12 lipca 2021r i przekazaną mi pismem z dnia 16 lipca 2021, podpisanym przez Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika, Pana prof. dr hab. Andrzeja Dziedzica.

#### **2. Krytyczny opis pracy**

Kryształy fotoniczne pojawiły się w literaturze naukowej na początku lat dziewięćdziesiątych. Są to układy materiałowe charakteryzujące się periodycznym rozkładem współczynnika załamania, o okresowości przestrzennej porównywalnej z długością fal elektromagnetycznych z określonego przedziału widma. Podstawowe właściwości kryształów fotonicznych wiążą się z występowaniem tzw. przerwy fotonicznej - pasma częstotliwości zabronionych, w analogii do występującej w naturalnych kryształach przerwy energetycznej dla elektronów. Ta koncepcja teoretyczna z dziedziny teorii fal elektromagnetycznych bardzo szybko zyskała wymiar praktyczny i obecnie jest to jedna z najsilniej rozwijanych gałęzi fotoniki. Problemy, które ograniczają szerokie zastosowania kryształów fotonicznych wynikają z aktualnych możliwości technologicznych. Uzyskanie w pełni powtarzalnych struktur fotonicznych, zwłaszcza trójwymiarowych, jest w dalszym ciągu możliwe tylko na poziomie specjalistycznych laboratoriów naukowych. Pojawiające się przy tym błędy kształtu elementów periodycznych, wynikające z ograniczeń stosowanych technologii, w istotny sposób wpływają na właściwości optyczne otrzymany struktur. Badania realnych, nie idealnych, struktur fotonicznych, uwzględniające błędy kształtów elementów periodycznych, są w związku z tym jednym z ważniejszych problemów badawczych stojących w dziedzinie kryształów fotonicznych. W tej aktualnej tematyce mieści się praca doktorska mgr inż. Dariusza Przybylskiego, dotycząca projektowania, analizy numerycznej i pomiarów wybranych przyrządów optoelektronicznych, wykorzystujących w swoim działaniu realne fotoniczne kryształy planarne.

Przedmiotem badań naukowych Doktoranta są planarne kryształy fotoniczne, mające pełnić w układach optoelektronicznych rolę warstwy antyrefleksyjnej. Obecność warstwy antyrefleksyjnej ma wpływać na poprawę działania struktur optoelektronicznych, zwiększając ilość energii elektromagnetycznej i jej rozkład w obszarze aktywnym przyrządów półprzewodnikowych. Nowością naukową pracy są również badania wpływu błędów kształtu

elementów struktury periodycznej, związanych z ich procesem wytwarzania, na właściwości optyczne tych struktur.

Analizowana w pracy konfiguracja kryształu fotonicznego nie jest typowa. Zwykle wykorzystuje się układy, w których pojawia się fotoniczna przerwa wzbroniona. Aby planarny kryształ fotoniczny, o dwuwymiarowej periodyczności współczynnika załamania działał dla wybranych długości fal jak materiał o fotonicznej przerwie wzbronionej, fala elektromagnetyczna padająca na kryształ powinna posiadać składową wektora falowego równoległą do jego płaszczyzny. Taką sytuację obserwujemy we włóknach optycznych PCF (*Photonic Crystal Fibers*) z fotoniczną przerwą wzbronioną. Dla struktur optyki zintegrowanej wykorzystujących planarne kryształy fotoniczne, wektor falowy fali leży w płaszczyźnie periodycznych zmian współczynnika załamania. Rozważana w pracy konfiguracja z falą elektromagnetyczną padającą prostopadłe do powierzchni planarnego kryształu fotonicznego działa jak dwuwymiarowa siatka dyfrakcyjna. Po przejściu fali przez układ elementów struktury periodycznej, obserwuje się w materiale litym efekty ugięcia i interferencji. Autor wyznacza, wynikający z tych efektów, przestrzenny rozkład energii, optymalizując go w celu zwiększenia sprawności działania wybranych przyrządów półprzewodnikowych.

Opiniowana praca zajmuje 149 stron i składa się z 9 rozdziałów i bibliografii zawierającej 136 pozycji, przede wszystkim artykułów w czasopismach naukowych oraz kilku monografiach.

We wstępie przedstawiony został cel i zakres pracy oraz podano krótki konspekt rozprawy doktorskiej. W tym miejscu została również sformułowana główna teza pracy doktorskiej - *Kontrola pola elektromagnetycznego, za pomocą kryształu fotonicznego, umożliwia poprawę parametrów związanych z efektywnością struktury optoelektronicznej*. Jest to sformułowanie bardzo ogólne, które wymaga moim zdaniem doprecyzowania. Kontrola pola elektromagnetycznego oznacza dla mnie ciągły, bieżący wpływ na rozkład pola w strukturze optoelektronicznej. Warstwa antyrefleksyjna wykonana w konfiguracji planarnego kryształu fotonicznego wpływa na ilość energii dostarczanej do struktury optoelektronicznej i jej rozkład w sposób statyczny. Może lepszym sformułowaniem byłoby zastąpienie słowa *kontrola* określeniem *optymalizacja rozkładu pola elektromagnetycznego*.

W rozdziale drugim dokonano przeglądu właściwości kryształów fotonicznych. Formowanie się fotonicznej przerwy wzbronionej Autor przedstawia na przykładzie analizy jednowymiarowego kryształu fotonicznego, stanowiącego periodyczny układ warstw dielektrycznych. Brakuje mi w tym miejscu bardziej ogólnego spojrzenia na właściwości kryształów fotonicznych, zwłaszcza analizowanej w pracy konfiguracji planarnej. Myślę tutaj o równaniach pozwalających wyznaczyć związki dyspersyjne dla fotonów oraz fotoniczne diagramy pasmowe, wykorzystujące nomenklaturę znaną z pasmowej teorii ciał stałych - pojęcia przestrzeni odwrotnej, stref Brillouina, czy funkcji falowych Blocha.

Następnie Doktorant przedstawia wybrane zastosowania kryształów fotonicznych, zwracając szczególną uwagę na najważniejszy, z punktu widzenia rozprawy doktorskiej, zakres zastosowania kryształów fotonicznych - w układach fotodetektorów, emiterów i ogniw słonecznych.

W kolejnym punkcie Autor umiejętnie opisuje podstawowe metody wytwarzania struktur periodycznych w konfiguracji 2D – technikę trawienia zogniskowaną wiązką jonów FIB (*Focused Ion Beam*), elektronolitografię połączoną z suchym trawieniem RIE (*Reactive Ion Etching*) oraz litografię interferencyjną, zwracając uwagę na zalety i wady każdej z nich.

W rozdziale trzecim omówiono zagadnienia modelowania kryształów fotonicznych. Przedstawiono podstawy matematyczne wykorzystywanej w rozprawie metody numerycznej.

Jest to szeroko stosowana w elektromagnetyzmie metoda różnic skończonych w dziedzinie czasu FDTD (ang. *Finite-Difference Time-Domain*), która zastępuje różniczkową postać wektorowych równań Maxwella różnicami skończonymi. Doktorant wykorzystuje w tym celu profesjonalne oprogramowanie Lumerical FDTD, kanadyjskiej firmy Lumerical. Wyjściowa konfiguracja obszaru roboczego oraz lokalizacja tzw. *monitorów*, dla których przedstawia się wyznaczone wartości rozkładu gęstości energii pola elektromagnetycznego wynikają, jak sądzę, z interfejsu stosowanego oprogramowania.

Analizowane struktury periodyczne, osadzone na warstwie krzemu o grubości 2  $\mu\text{m}$ , składają się z układu nanocylindrów lub nanootworów, rozmieszczonych w konfiguracji sieci kwadratowej. Wartości stałych sieci, średnicy oraz wysokości nanocylindrów i głębokości nanootworów zostały podane przez Doktoranta bez uzasadnienia. Autor nie podaje informacji o zakładanych w analizie numerycznej parametrach optycznych krzemu, takich jak współczynniki załamania w funkcji długości fali i współczynniki ekstynkcji dla badanego zakresu długości fal. Brak jest również informacji o źródle literaturowym wykorzystywanych danych.

Płaska fala elektromagnetyczna, padająca na strukturę fotoniczną prostopadle do jej płaszczyzny, zmienia swoją długość w zakresie 300-1200 nm. Po przejściu fali przez układ nanootworów lub nanocylindrów obserwuje się w materiale litym efekty ugięcia i interferencji fali elektromagnetycznej. Autor wyznacza wynikający z tych efektów przestrzenny rozkład wartości wektora Poytinga, proporcjonalny do wartości gęstości energii fali (wielkości skalarnej). Być może warto się zastanowić nad zastosowaniem w tym przypadku skalarnego modelu fali elektromagnetycznej.

Elementem nowości naukowej jest uwzględnienie przez Doktoranta błędów kształtu elementów struktury periodycznej, związanych z ich procesem wytwarzania. Kształt rzeczywisty elementów struktury periodycznej uwzględnia redepozycję materiału trawionego i pochylenie zboczy. Jest on wyznaczony przez Autora w oparciu o analizę obrazów mikroskopowych struktur wykonanych techniką trawienia wiązką jonów w podłożu krzemowym.

W rozdziale czwartym przedstawiono wartościowe wyniki analiz numerycznych dotyczące wpływu błędów kształtu kryształu fotonicznego na rozkład pola elektromagnetycznego w warstwie półprzewodnikowej. Obliczenia wykonano dla struktury idealnej, struktur, w których występował jeden rodzaj błędów kształtów (redepozycja lub pochylenie) oraz dla struktury rzeczywistej. Obliczenia dotyczyły fali o ustalonej długości, padającej prostopadle do płaszczyzny kryształu fotonicznego. Z przeprowadzonych analiz numerycznych wynika, że zasadniczy wpływ na rozkład pola elektromagnetycznego wynikającego z dyfrakcji w kryształach rzeczywistych, w stosunku do idealnego, ma pochylenie zboczy, przy czym wpływ ten jest istotniejszy dla kryształu fotonicznego zbudowanego z elementów w kształcie nanocylindrów. Również w tym rozdziale Autor przedstawia, bardzo lakonicznie, ideę zastąpienia dyfrakcji na dwuwymiarowej strukturze fotonicznej dyfrakcją na układzie jednowymiarowych siatek dyfrakcyjnych o zmiennej szerokości szczelin. Prosiłbym Doktoranta o bardziej szczegółowe wyjaśnienie tej koncepcji w trakcie obrony.

Rozdział piąty jest kontynuacją badań charakterystyk planarnego kryształu fotonicznego pełniącego rolę warstwy antyrefleksyjnej. Płaszczyznę do rejestrowania odbicia promieniowania od struktury kryształu fotonicznego zlokalizowano nad źródłem promieniowania. Natomiast płaszczyznę rejestrującą transmisję promieniowania przez kryształ fotoniczny umieszczono pomiędzy strukturą fotoniczną a warstwą krzemową (tuż pod warstwą fotoniczną). Znajac wartości składowych pola elektromagnetycznego Autor wyznacza strumień energii fali przez te powierzchnie oraz współczynniki odbicia i transmisji. Wyniki obliczeń, przeprowadzone dla sieci periodycznej nanocylindrów i nanootworów odniesiono do wartości

współczynników odbicia i transmisji warstwy krzemowej o odpowiednio dobranej grubości. Nowością naukową pracy są badania wpływu błędów kształtu na wartości współczynników odbicia i transmisji. Obliczenia przeprowadzono dla zakresu promieniowania 300-1200 nm. Z analiz numerycznych wynika, że współczynniki odbicia i transmisji dla struktury periodycznej składającej się z nanootworów są znacznie mniej podatne na błędy kształtu, a współczynnik odbicia dla fal o długości powyżej 400nm osiąga wartości mniejsze o kilkanaście procent od współczynnika odbicia od płaskiej powierzchni krzemu.

W rozdziale tym Doktorant przedstawia również interesujące wyniki badań charakterystyk dyspersyjnych dla polaryzacji TE i TM oraz analizę wpływu błędów kształtu na foniczną przerwę wzbronioną. Jak pokazują obliczenia, bardzo wąska przerwa wzbroniona występuje jedynie dla idealnego kryształu planarnego zbudowanego z nanocylindrów, pomimo że struktura charakteryzuje się znacznym kontrastem dielektrycznym. Być może jest to kwestia odpowiedniego wyboru geometrii. W tego typu strukturach obserwujemy często wyraźną przerwę foniczną dla jednej polaryzacji i jej brak dla drugiej. Może warto by było przedstawić charakterystyki dyspersyjne dla struktury z nanocylindrami osobno dla polaryzacji TE i polaryzacji TM.

Nie jest jednak dla mnie jasne, jaką metodą są wyznaczone charakterystyki dyspersyjne - czy jest to w dalszym ciągu metoda FDTD, czy też typowa dla tego rodzaju obliczeń metoda oparta na zagadnieniu własnym dla fotonów? Podany w pracy opis jest opisem bardzo technicznym i odnosi się do algorytmu wykorzystywanego programu. W przypadku metody FDTD wektor falowy fali elektromagnetycznej powinien być prostopadły do elementów periodycznych struktury. Ważny jest również rozmiar przestrzenny padającej fali, który nie powinien przekraczać niewielkiego rozmiaru poprzecznego (120nm) fonicznego kryształu planarnego. Oczekuję od Doktoranta wyjaśnienie tych kwestii podczas obrony.

W rozdziale szóstym, ważnym dla zakładanych celów naukowych pracy, przedstawiono wpływ parametrów struktury fonicznej na rozkład mocy optycznej w warstwie. Celem tych badań była optymalizacja rozkładu energii fali elektromagnetycznej w warstwie półprzewodnika w taki sposób, aby w obszarze najistotniejszym z punktu widzenia działania przyrządu półprzewodnikowego występowała optymalna ilość energii. W tym celu Autor definiuje tzw. *funkcję generacji optycznej*, wielkość określającą ilość nośników, jakie są generowane w wybranej warstwie materiału w jednostce czasu w wyniku absorpcji fotonów. Zakłada przy tym, cytując (str.93), że *wszystkie fotony docierające do danego obszaru warstwy zostaną zaabsorbowane przez elektrony znajdujące się na powłoce walencyjnej*. Jednak gdyby tak było, to w kolejnych warstwach, leżących poniżej, nie obserwowalibyśmy fotonów. Należałoby raczej stwierdzić, że ilość wzbudzonych elektronów jest proporcjonalna do ilości fotonów docierających do wybranej warstwy ośrodka w jednostce czasu i wiąże się ze współczynnikiem absorpcji ośrodka.

Następnie Autor analizuje generację elektronów dla struktury półprzewodnikowej *p-i-n* o zakładanej geometrii, wyznaczając sumaryczne wartości ilości generowanych nośników osobno dla obszaru *p*, obszaru samoistnego *i* oraz obszaru *n* złącza półprzewodnikowego. Obliczenia, przeprowadzone dla wybranej geometrii realnego kryształu fonicznego, wykazały destrukcyjny wpływ błędów kształtu, a zwłaszcza pochylenia zboczy, na wielkość generacji nośników prądu.

W dalszej części tego rozdziału przedstawiono analizę wpływu zmian parametrów idealnej struktury fonicznej, takich jak stała sieci, średnica oraz wysokość nanocylindrów i głębokość nanootworów, na rozkład mocy optycznej w warstwie. Wartościowym wynikiem tych badań jest powiązanie całkowitej ilości energii fali elektromagnetycznej w warstwie samoistnej, proporcjonalnej do ilości generowanych optycznie elektronów, z parametrami geometrycznymi kryształu fonicznego. Okazuje się, że optymalna z punktu widzenia działania struktury *p-i-n*

geometria kryształu fonicznego nie musi odpowiadać optymalnej geometrii dla warstwy antyrefleksyjnej. Szkoda jednak, że Autor skoncentrował się w tych badaniach wyłącznie na strukturze idealnej i nie uwzględnił w analizach błędów kształtu, a zwłaszcza wpływu pochylenia zboczy elementów periodycznych. Być może optymalne parametry dla realnego kryształu fonicznego z błędami kształtu byłyby inne niż parametry optymalne wybrane dla kryształu idealnego.

Celem badań przedstawionych w rozdziale siódmym była próba eksperymentalnej weryfikacji wyników obliczeń numerycznych przedstawionych we wcześniejszych rozdziałach pracy, które dotyczyły optymalizacji pracy fotodetektorów i ogniw słonecznych. Jako przykład wykorzystano ogniwo słoneczne na bazie arsenku galu. Stosując metodykę opisaną w rozdziałach 4 - 5, którą przeniesiono na nowy materiał półprzewodnikowy, zoptymalizowano strukturę foniczną opartą na arsenku galu, wybierając geometrię najlepszą dla warstwy antyrefleksyjnej i najlepszą dla rozkładu energii elektromagnetycznej w obszarze pracy fotodetektora. Na tej podstawie zaprojektowano i wykonano techniką trawienia zogniskowaną wiązką jonów FIB dwie planarne struktury periodyczne osadzone bezpośrednio na badanych elementach półprzewodnikowych. Pierwsza z nich odpowiadała geometrii o najmniejszym współczynniku odbicia, a druga geometrii o optymalnym rozkładzie pola elektromagnetycznego. Pomiary charakterystyk prądowo-napięciowych obu struktur wykonano przy dyskretnym pobudzeniu optycznym ogniwa słonecznego falą o wybranej długości 830 nm. Oba ogniwa słoneczne z planarnym kryształem fonicznym na powierzchni górnej pogorszyły swoje parametry elektryczne. Zdaniem Doktoranta technika trawienia zogniskowaną wiązką jonów mogła naruszyć obszar złącza, co w efekcie wpłynęło na obniżenie wartości uzyskiwanych parametrów elektrycznych. Wykonano również pomiary odbicia promieniowania od powierzchni kryształów fonicznych dla obu badanych struktur, które wykazały bardzo dobrą zgodność wyników eksperymentalnych z obliczeniami numerycznymi.

Badania przedstawione w rozdziale ósmym dotyczą optoelektronicznych elementów półprzewodnikowych ze studniami kwantowymi, dla których lokalizacja energii elektromagnetycznej w wąskim obszarze studni kwantowych ma zasadnicze znaczenie dla sprawności działania przyrządu. Rozważono konfigurację z klasyczną warstwą antyrefleksyjną, strukturę bez takiej warstwy oraz strukturę z planarnym kryształem fonicznym. Analizy numeryczne wykazały, że dla odpowiednio dobranej geometrii planarnego kryształu fonicznego zbudowanego z nanootworów obserwuje się koncentrację energii pola w warstwie półprzewodnikowej ze studniami kwantowymi i poprawę parametrów elektrycznych struktury optoelektronicznej.

Pracę zamyka podsumowanie, w którym Autor przedstawia najważniejsze wyniki i wnioski wyciągnięte na podstawie przeprowadzonych badań numerycznych i pomiarowych oraz informację na temat kierunków przyszłych prac badawczych.

### **3. Uwagi merytoryczne**

Podczas lektury opiniowanej pracy nasunęło mi się szereg uwag i wątpliwości. O tych bardziej ogólnych wspominałem w krytycznym opisie pracy. Poniżej przedstawiam uwagi i pytania szczegółowe w porządku, w jakim się pojawiały:

- Z czego wynikają wartości wektora Poytinga przedstawione na charakterystykach 4.3, 4.5, 4.5a,b i 4.6 a,b, opisujących rozkład energii pola elektromagnetycznego w obszarze warstwy krzemowej?

- Analizując wyniki przedstawione na Rys.5.2 dla kryształu z nanootworami zaskakuje duża wartość współczynnika absorpcji dla struktur, w których występował jeden rodzaj błędu kształtów (26.1% dla pochylenia oraz 29.2% dla redepozycji), w stosunku do wartości współczynnika absorpcji w strukturze realnej, uwzględniającej oba czynniki błędu kształtu, która wynosiła 7.2%. Proszę o wyjaśnienie tego wyniku.
- Autor nie uzasadnił przyjętych w pracy opisów osi dla wartości wektora falowego w charakterystykach dyspersyjnych podanych na Rys.5.6 i 5.7. Brak jest również informacji o ich związku z kierunkami krystalograficznymi badanego planarnego kryształu fotonicznego.
- Doktorant nie wyjaśnił dostatecznie jasno jak wyznaczana jest, wprowadzona w pracy, wartość względna generacji optycznej, wykorzystywana do opisu energii elektromagnetycznej i ilości generowanych nośników w poszczególnych obszarach struktury *p-i-n* (rozdział 6). Czy następuje tutaj całkowanie po objętości i co oznacza termin *referencyjna warstwa krzemowa*? Wydaje się również, że ilość zaabsorbowanych fotonów, związana ze współczynnikiem absorpcji, zależęć powinna od rodzaju materiału półprzewodnikowego struktury *p-i-n*. Proszę o wyjaśnienie tych kwestii podczas obrony.
- W pracy ograniczono się do analizy sieci kwadratowej. Czy Doktorant rozważał, przynajmniej wstępnie, zastosowanie innej konfiguracji kryształu planarnego - np. sieci trójkątnej. Jest to wprawdzie konfiguracja wrażliwa na polaryzację padającej fali, ale być może powstające w wyniku dyfrakcji rozkłady energii fali w warstwie aktywnej półprzewodnika byłyby korzystniejsze dla poprawy parametrów elektrycznych badanych struktur półprzewodnikowych.

#### 4. Uwagi redakcyjne

W pracy zauważyłem sporo błędów językowych. Nie ma potrzeby w tym miejscu je przytaczać. Poniżej wymieniam tylko błędy redakcyjne istotne dla zrozumienia treści pracy:

- Rozdział 5 - niekonsekwentne oznaczenia polaryzacji – w jednym podrozdziale jest to polaryzacja liniowa S i P, w innym TE i TM.
- Podane w tabeli 5.1 wartości fotonicznej przerwy wzbronionej są wartościami znormalizowanymi (bezwymiarowymi), chociaż Autor podaje wymiar 1/s.
- Zdefiniowana przez Doktoranta funkcja  $g(f)$ , nazwana funkcją generacji optycznej, jest ilością fotonów o częstotliwości  $f$  przechodzących przez powierzchnię warstwy w jednostce czasu. Wymiar tej wielkości to  $\frac{1}{s}$ , a nie  $\frac{1}{m^3 \cdot s}$  jak podaje Autor.
- Opis przyrządów PIN pojawia się na stronie 104, chociaż wcześniej Autor analizuje strukturę *p-i-n*, poczynając od strony 94.
- Rys.7.2 dotyczący optymalizacji parametrów kryształu – w części (a) dla współczynnika odbicia i w części (b) dotyczącej wartości względnej generacji te same wartości średnic nanootworów są w różny sposób oznaczane. Ponadto na obu charakterystykach pojawiają się również inne wartości średnic nanootworów, co utrudnia analizę wyników obliczeń.

## 5. Podsumowanie recenzji i wniosek końcowy

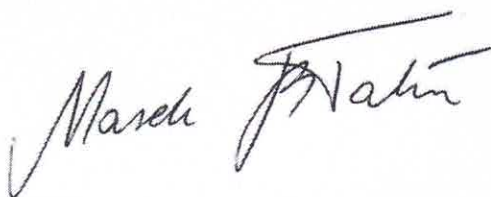
Przedstawione uwagi merytoryczne nie wpływają istotnie na ogólną, pozytywną, ocenę przedstawionej mi do recenzji pracy.

Do najważniejszych osiągnięć naukowych opiniowanej rozprawy doktorskiej zaliczam:

- Kompleksowe badania wybranych konfiguracji planarnych kryształów fonicznych, pełniących w układach optoelektronicznych rolę warstwy antyrefleksyjnej, która wpływa na poprawę działania struktur optoelektronicznych, zwiększając ilość energii elektromagnetycznej i jej rozkład w obszarze aktywnym przyrządów półprzewodnikowych.
- Analizę wpływu błędów kształtu elementów planarnej struktury periodycznej, związanych z ich procesem wytwarzania, na właściwości optyczne kryształu fonicznego – współczynnik odbicia, rozkład energii pola wewnątrz warstwy półprzewodnikowej, właściwości dyspersyjne i foniczną przerwę wzbronioną.
- Opracowanie koncepcji wykorzystania planarnych kryształów fonicznych do poprawy parametrów elektrycznych wybranych przyrządów optoelektronicznych m.in struktury p-i-n i elementów półprzewodnikowych ze studniami kwantowymi, dla których lokalizacja energii elektromagnetycznej w określonym obszarze struktury ma zasadniczy wpływ na ilość generowanych nośników.

Podsumowując, stwierdzam, że mgr inż. Dariusz Przybylski wykazał się umiejętnością formułowania i rozwiązywania zagadnień badawczych, a także wyciągania wniosków z prowadzonych badań. Autor wykazał się umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Przedstawione wyniki analiz teoretycznych i badań eksperymentalnych przekonują mnie o jego szerokiej wiedzy w zakresie właściwości fizycznych i technologii planarnych kryształów fonicznych.

**Reasumując - stwierdzam, że przedłożona rozprawa doktorska autorstwa pana mgr inż. Dariusza Przybylskiego spełnia wymagania ustawowe, określone w ustawie z dnia 3 lipca 2018 r. – Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce, (Dz. U. 30.08.2018r. Poz. 1669) oraz wnioskuję o jej przyjęcie, a także dopuszczenie do publicznej obrony.**



Dr hab. Marek Błahut