



Instytut Materiałów Zaawansowanych  
Wydział Chemiczny  
Politechnika Wrocławska  
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

**Prof. dr hab. inż. Andrzej Miniewicz**

Tel: +48 888571067,

[andrzej.miniewicz@pwr.edu.pl](mailto:andrzej.miniewicz@pwr.edu.pl),

[andrzejminiewicz1@gmail.com](mailto:andrzejminiewicz1@gmail.com)

Recenzja rozprawy doktorskiej  
Pana mgr Karola Sielezina

**pt. Aktywne właściwości wybranych struktur metamateriałów hiperbolicznych  
w zakresie VIS oraz IR**

Rozprawa doktorska Pana mgr Karola Sielezina, p.t. „Aktywne właściwości wybranych struktur metamateriałów hiperbolicznych w zakresie VIS oraz IR”, wykonana została na Wydziale Nowych Technologii i Chemii Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie. Rozprawa realizowana była w Instytucie Fizyki Technicznej i w Zakładzie Fizyki i Technologii Krysztalów a opiekunami naukowymi byli: Pan Prof. dr hab. inż. Janusz Parka – promotor oraz Pan dr inż. Rafał Kowerdziej - promotor pomocniczy. Tematyka przedstawionej do oceny rozprawy mieści się w nurtach nowoczesnych i zaawansowanych technologicznie badań materiałowych, inżynierii materiałowej oraz fotoniki. Rozprawa powstawała częściowo w ramach projektu *HYPERMAT – „Przestrajalne metamateriały hiperboliczne na potrzeby nowej generacji przyrządów fotonicznych”* we współpracy z Instytutem Fizyki PAN w Warszawie oraz Instytutami Optoelektroniki oraz Chemii WAT. Metamateriały to struktury zaprojektowane do unikalnego sposobu oddziaływania światła z materią, takiego, którego nie można uzyskać stosując konwencjonalne ośrodki optyczne: kruształy, szkła czy ciecze. W takich materiałach, zwanych również materiałami optycznie lewoskrętnymi, poprzez wyrafinowaną strukturę przestrzenną można uzyskać efektywne współczynniki załamania, które w pewnych obszarach częstotliwości przyjmują ujemne wartości. Ta osobliwość fizyczna otwiera nieznanie wcześniej możliwości wytwarzania supersoczewek, wzmacniaczy emisji światła, wysokowydajnych absorberów oraz różnego rodzaju miniaturowych sensorów i elementów optycznych nowej generacji. Ciekawą podgrupą metamateriałów

są super-struktury wytwarzane z cienkich naprzemiennych warstw izolatora oraz metali, półprzewodników lub innych ośrodków, w których występują powierzchniowe polarytony plazmonowe. W takich materiałach występuje jednoosiowa bardzo silna anizotropia przenikalności elektrycznej o topologii hiperbolicznej powierzchni izo-częstości, czyli hiperbolicznej dyspersji  $\omega = f(k)$  i stąd powstała nazwa „metamateriały kubiczne”. Rozprawa doktorska Pana mgr Karola Sielezina dotyczy metod wytwarzania metamateriałów kubicznych z różnych komponentów, symulacji ich właściwości optycznych i pomiarów wybranych unikalnych właściwości wzmacniania spontanicznej emisji światła czy powierzchniowo wzmacnianego rozpraszania Ramana związków organicznych. Mogę stwierdzić, że tematyka rozprawy jest bardzo nowoczesna i ambitna, gdyż mieści się doskonale w nurcie badań wielu wiodących ośrodków naukowych na świecie zajmujących się podobnymi zagadnieniami. Opisane w literaturze naukowej ciekawe wyniki badań dają nadzieję na zrewolucjonizowanie pewnych aspektów fotoniki i perspektywy zastosowań metamateriałów do budowy nowych, miniaturowych komponentów i urządzeń fotonicznych.

Na dorobek publikacyjny Pana mgr Karola Sielezina składa się 5 wieloautorskich publikacji naukowych umieszczonych na liście Journal Citation Reports. Publikacje te ukazały się w *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, (2017, 2 autorów), *Liquid Crystals*, (2018, 9 autorów), *Liquid Crystals*, (2019, K.S. pierwszy autor, 3 autorów), *Optics Express*, (2021, 6 autorów), *Scientific Reports*, (2022, 9 autorów). Ponadto trzy artykuły naukowe ukazały się w wyniku udziału doktoranta w konferencjach naukowych: XIV Konferencji Naukowej Technologia Elektronowa ELTE 2023, (2023, 5 autorów), *Proceeding of SPIE – The International Society for Optical Engineering, Metamaterials XIII*, (2022, 7 autorów) oraz 15th International Congress on Artificial Materials for Novel Wave Phenomena – *Metamaterials 2021*, (2021, 6 autorów). Doktorant jest pierwszym autorem tylko jednej publikacji w *Liquid Crystals* z 2019 roku. Oprócz wymienionych publikacji doktorant w latach 2017 – 2023 aktywnie uczestniczył w 16 konferencjach naukowych, jednakże nie podaje jakiego typu to było uczestnictwo w formie posteru czy wystąpienia ustnego. Siedem z tych konferencji odbywało się za granicą a pozostałe w Polsce. Zarówno aktywność publikacyjna doktoranta jak i liczne udziały w konferencjach naukowych bardzo dobrze świadczą o doktorancie. Z dostarczonych mi materiałów nie mogłem dowiedzieć się czy doktorant wnioskował o finansowanie swoich projektów naukowych oraz jaka jest aktualna liczba cytowań jego publikacji oraz współczynnik Hirsha? Mam nadzieję, że doktorant przedstawi te dane w czasie wystąpienia na obronie doktoratu.

Rozprawa doktorska Pana Sielezina jest obszerną monografią, gdyż liczy aż 180 stron, zawiera 7 tabel i 90 rysunków w większości wielosegmentowych. Spis literatury jest również obszerny licząc 200

pozycji literaturowych uzupełnionych spisem publikacji doktoranta oraz jego wystąpień konferencyjnych. Chciałbym też w tym miejscu zwrócić uwagę na staranną edycję rozprawy i jej przyjemną w odbiorze szatę graficzną. Mam pewne zastrzeżenia do poprawności języka, sposobu konstrukcji zdań i tłumaczeń terminów fizycznych z języka angielskiego na polski oraz pojawiających się gdzieś błędów.

Rozprawa podzielona jest na 7 rozdziałów: **1.** Wstęp (11-16), **2.** Metamateriały hiperboliczne i ich właściwości (17-44), **3.** Symulacje właściwości struktur metamateriałów hiperbolicznych (45-54), **4.** Sposoby wytwarzania struktur metamateriałów hiperbolicznych – dyskusja uzyskanych rezultatów (55-128), **5.** Oddziaływania fali elektromagnetycznej ze strukturami metamateriałów hiperbolicznych (129-160), **6.** Podsumowanie i wnioski końcowe (161-168) i **7.** Literatura (169-180). Oprócz tego na początku rozprawy znajduje się spis treści, streszczenia w języku polskim i angielskim oraz wykaz skrótów i symboli.

Problem badawczy obejmujący cel i zakres pracy został sformułowany na stronach 14 i 15. Tezą rozprawy jaką doktorant chciał udowodnić jest, cyt.: **„Unikalne właściwości metamateriałów hiperbolicznych, a w szczególności zwiększenie gęstości stanów fotonicznych na powierzchni, mogą być wykorzystane do wzmocnienia emisji materiału (barwnika stanowiącego emiter) umieszczonego na powierzchni struktury metamateriału hiperbolicznego.”**

Tak postawiona teza jest bardzo bezpieczna i została już w pracach naukowych sprawdzona dużo wcześniej, niemniej Autor rozprawy pokazał poprzez wytworzenie metamateriałów, symulacje ich właściwości i eksperymenty, że jest ona prawdziwa zarówno dla klasycznych metamateriałów jak i nowego typu, np. zawierających przekładkę grafenową. Hiperboliczne metamateriały umożliwiają bowiem, tzw., inżynierię gęstości stanów fotonicznych (PDOS). Dla tych struktur teoretycznie gęstość ta staje się nieskończenie duża gdyż objętość pomiędzy powierzchniami Fermiego się zwiększa, a „złota reguła Fermiego” stwierdza, że w takim przypadku czas życia emisji spontanicznej się skraca. Wzrost szybkości radiacyjnego zaniku emitera w wyniku gęstości stanów ośrodka HMM względem stanów energetycznych próżni, zwany czynnikiem Purcella był mierzony przez doktoranta dla rodminy B i ciekłego kryształu zawierającego barwnik czym potwierdził postawioną przez siebie tezę.

Do znaczących osiągnięć ocenianej rozprawy doktorskiej zaliczam: (i) wykonanie symulacji numerycznych dla wielu grup metamateriałów hiperbolicznych w postaci wielowarstwowych stosów warstw metalu i dielektryka, (ii) dokonanie przeglądu wielu materiałów wykazujących istnienie powierzchniowych polarytonów plazmonowych oraz zebranie ich istotnych właściwości optycznych i dielektrycznych: z grupy materiałów o ujemnych przenikalnościach elektrycznych: srebra (Ag), glinu (Al), tlenku cynowo-indowego (ITO), tlenku indowo-galowo-cynkowego (IGZO), azotku tytanu (TiN) i grafenu oraz izolatorów: ditlenku krzemu ( $\text{SiO}_2$ ) i ditlenku hafnu ( $\text{HfO}_2$ ); (iii) wytworzenie

kilkudziesięciu struktur metamateriałów hiperbolicznych oraz dokonanie ich charakteryzacji przy użyciu metody elipsometrii, mikroskopii sił atomowych, oraz zbadanie ich transmitancji, reflektancji oraz absorbcji w funkcji kąta padania światła na powierzchnię metamateriału; (iv) opanowanie programu Lumerical umożliwiającego przeliczenie właściwości znanych metamateriałów hiperbolicznych oraz policzenie nowych struktur metamateriałów metodą macierzy przejścia (TMM) oraz metodą różnic skończonych w dziedzinie czasu (FDTD); (v) dokonanie pomiarów wzmocnienia emisji rodaminy B oraz mieszaną ciekłokrystaliczną zawierającą barwnik fluorescencyjny i porównanie uzyskanych wyników w oparciu o symulację współczynnika Purcella; (vi) zmierzenie powierzchniowo wzmocnionego rozpraszania Ramana (SERS) dla barwnika na powierzchni struktur metamateriałów hiperbolicznych.

Z powyższego wyliczenia można się zorientować, jak dużo pracy wykonał doktorant i jak wielu technik badawczych i numerycznych musiał się nauczyć by dokonać poprawnej analizy wyników i przygotować publikacje naukowe. Zdaję sobie sprawę, że musiał on korzystać z aparatury ustawionej w różnych jednostkach naukowych, co zwykle generuje trudności jeśli chodzi o swobodny dostęp i poprawną analizę wyników. Nie wątpię jednak, że wkład pracy doktoranta był tu dominujący.

Najobszerniejszy, bo liczący 73 strony, jest rozdział 4. Sposoby wytwarzania struktur metamateriałów hiperbolicznych – dyskusja uzyskanych rezultatów, w którym Autor omówił w jaki sposób dobierał materiały badawcze oraz jak charakteryzował ich właściwości. W rozdziale tym doktorant przedstawił wyniki symulacji dla 6 struktur zbudowanych z różnych materiałów i o różnej liczbie dwuwarstw metal-izolator od  $N = 1$  do  $N=20$ . W tym rozdziale omówił również technologie otrzymywania metamateriałów hiperbolicznych i przedstawił wyniki pomiarów uzyskanych struktur metodami spektroskopii absorpcyjnej i odbiciowej, metodą elipsometryczną oraz badania topografii powierzchni metodą mikroskopii sił atomowych. O ile metody spektroskopowe dały dobry przegląd transmitancji, reflektancji i absorbcji wytworzonych struktur to metoda elipsometryczna nadawała się jedynie do pomiaru struktur z  $N=1$ . Dla struktur wielowarstwowych nie spełniła ona oczekiwań. Żałuję, że Autor nie zastanowił się głębiej dlaczego tak jest. Metoda mikroskopii sił atomowych (AFM) dała ciekawe obrazowanie topografii zewnętrznych struktur metamateriałów kubicznych dla struktury 20 nm Ag/20 nm SiO<sub>2</sub> w dwóch różnych skalach pomiarowych. Uzyskane topografie wskazują na silną anizotropię powierzchni (nie wiadomo co Autor badał czy powierzchnię srebra Ag czy SiO<sub>2</sub>) oraz sięgającą aż 16 nm chropowatość powierzchni. Jeśli tak jest w rzeczywistości, to modele symulacyjne zakładające chropowatość na poziomie mniejszym niż 0.5 nm mogą dawać wyniki dalekie od rzeczywistości. Co prawda we wnioskach na stronie 162 Doktorant napisał, że badano chropowatość powierzchni i jej jednorodność i nie zaobserwowano negatywnego zjawiska niejednorodności osadzonych materiałów określanego „nanowypami”. Żałuję, że nie pokazano wyników tych badań metodą AFM dla wszystkich

przygotowanych struktur i to z obu stron. **Chciałbym usłyszeć komentarz Autora na ten temat na obronie doktoratu.**

W rozdziale 5. Oddziaływania fali elektromagnetycznej ze strukturami metamateriałów hiperbolicznych, liczącym 31 stron, Autor zaprezentował funkcjonalne cechy wytworzonych przez siebie struktur. Przedstawił rezultaty symulacji współczynnika *Purcella* dla dipola molekularnego emitującego promieniowanie i umieszczonego równoległe lub prostopadłe do powierzchni struktury Ag/SiO<sub>2</sub> na jej wierzchniej warstwie. Pokazał on, że współczynniki wzmocnienia Purcella silnie zależą od pozycji dipola w strukturze, jego orientacji względem osi optycznej struktury i struktury modów wnęki rezonansowej czy gęstości stanów fotonowych. Te badania wnoszą dużo informacji do czego takie struktury mogą być przydatne i w jaki optymalny sposób trzeba sprzęgać je z różnymi cząsteczkami fluoryzującymi, kropkami kwantowymi czy luminezującymi białkami, np. GFP. Analiza wyników uzyskanych w tej części rozprawy bardzo mi się podobała. Jedynie trudno mi było zgodzić się z częścią tekstu na samej górze strony 135, gdzie Autor dyskutował rolę momentu dipolowego barwnika na uzyskane wartości czynnika wzmocnienia Purcella. Pragnę zauważyć, że przy absorpcji i emisji ważne są dipolowe momenty przejścia a nie trwałe momenty dipolowe wynikające z rozkładu ładunku. Trwały moment dipolowy nie wpływa istotnie na dipolowy moment przejścia, co więcej on nawet może być równy zeru. Również moment bezwładności cząsteczki nie gra tu roli przy założeniu, że barwnik znajduje się w matrycy sztywnej. W tym rozdziale Autor pokazuje również wyniki pomiarów współczynnika wzmocnienia dla procesu powierzchniowego wzmocnienia rozpraszania ramanowskiego (SERS). W materiałach plazmonicznych w których mogą się tworzyć silne koncentracje pola EM, tzw. „hot spots”, efekt SERS daje wzmocnienia intensywności pasm Ramana cząsteczki rzędu 10<sup>5</sup> a teoretycznie nawet 10<sup>9</sup>. Natomiast obserwowane wzmocnienia dla struktur HMM są rzędy wielkości mniejsze. Może wynika to z faktu, że natężenie pola na powierzchni jest dużo mniejsze dla HMM niż w przypadku warstwy nanocząstek metali ze spiczastymi końcówkami lub dla nanocząstek metali prawie stykających się ze sobą na powierzchni warstwy. Mam pytanie, czy położenie barwnika na warstwie metalicznej Ag nie dałoby większego wzmocnienia SERS niż położenie go na warstwie izolatora z warstwą Ag pod nim? W publikacji [199] wykazano, że o wzmocnieniu SERS decydują „hot spots” pomiędzy nanocząstkami Ag i przekładką z tlenku grafenu (GO) więc porównanie uzyskanych przez doktoranta wyników z wynikami w tej właśnie pracy nie jest trafne. **Chciałbym usłyszeć opinię doktoranta na ten temat.**

Moim zadaniem jest krytyczna lektura treści rozprawy w celu oceny samego dzieła, ale również w celu wyrobieniu sobie opinii o poziomie naukowym doktoranta - Autora dzieła naukowego - promującego Go do dalszej kariery zawodowej, w tym kariery naukowej. Czytając rozprawę zwracałem uwagę zarówno na uchybienia merytoryczne jak i techniczne. Było ich dość dużo, dlatego w mojej

recenzji odniosę się tylko do istotnych uwag krytycznych. Jednocześnie chciałbym zaznaczyć w tym miejscu, że w mojej pracy naukowej nigdy nie zajmowałem się metamateriałami ani metamateriałami kubicznymi więc niektóre z moich pytań lub komentarzy mogą wynikać z mojego niezrozumienia omawianych przez Autora trudnych zagadnień fizycznych, za co z góry przepraszam. Proszę Doktoranta by nie odpowiadał na obronie na wszystkie moje uwagi, będę całkowicie usatysfakcjonowany jak odpowie na moje pytania zapisane wytłuszczoną czcionką (naliczyłem dziewięć takich pytań w mojej recenzji).

1. Na stronie 11 napisano: „Zatem metamateriały można uznać za ośrodki efektywne czynne optycznie, podczas gdy kryształy fotoniczne nie mogą być za takie uznane.” To stwierdzenie jest dyskusyjne. Kryształy fotoniczne można łatwo zrobić jako materiały wykazujące nieliniowe efekty optyczne, zmieniające dyspersję współczynnika załamania, pułapujące światło, umożliwiające laserowanie, zapewniające przestrajalność odbijanej długości fali światła, np. w tzw. niebieskich fazach ciekłych kryształów za pomocą efektu Kerra, itd.
2. Na str. 12 napisano: „metamateriały SRR-TW (ang. *Split Ring Resonator – Thin Wires*) – to nanostruktury zbudowane z rozproszonych rezonatorów kołowych (SRR) i cienkich prętów metalicznych (TW)”, Ten opis jest mylący, to nie rozproszone rezonatory kołowe, tylko „split” tu znaczy "przecięte" i ułożone względem siebie w antyfazie. Mogą i są to również struktury niekoniecznie kołowe. Słowo „rozproszone” w tym zdaniu jest dla mnie niezrozumiałe.
3. Na stronie 18, znalazło się zdanie: „Jednym z najbardziej ekscytujących potencjalnych aplikacji hiperbolicznych metamateriałów jest opracowanie technologii umożliwiającej sprawienie wrażenia niewidzialności”. Mam uwagę do tekstu „sprawienie wrażenia niewidzialności”. Metamateriały nie sprawiają wrażenia niewidzialności, ich pewne geometryczne struktury umożliwiają faktyczną niewidzialność przedmiotu otoczonego nimi.
4. Opisując symbole w równaniu 1, napisano: „ $\epsilon_r$  oraz  $\mu_r$  oznaczają odpowiednio przenikalności elektryczną i magnetyczną ośrodka,” należało dodać, że są to wielkości względne a więc bez pomnożenia przez  $\epsilon_0$  oraz  $\mu_0$ .
5. Opis na str. 19 „przy czym  $\epsilon_{xx}=\epsilon_{yy}=\epsilon_{||}$  oraz  $\epsilon_{zz}=\epsilon_{\perp}$ , wymaga uzupełnienia, takie równości są prawdziwe jedynie dla materiałów jednoosiowych, bo ogólnie wszystkie trzy składowe tensora mogą być różne.
6. Na str. 20 doktorant napisał: „Zastosowanie teorii medium efektywnego (*Effective Medium Theory, EMT*)” w języku polskim słowa medium w sensie ośrodek raczej się nie używa, więc powinno być: teoria efektywnego ośrodka. Opis wielkości pod równaniami (5) i (6) jest niepełny,  $\rho$  to czynnik wypełnienia struktury metalem, a  $d_m$  i  $d_d$  to sumaryczne grubości warstw metalu i dielektryka.

7. Na str. 23 rysunek 6, to kopia rysunku z publikacji [2], czy nie powinno się w takim wypadku pisać rysunek zaadaptowany z publikacji [2], za zgodą wydawnictwa Springer? Ta uwaga dotyczy także innych kopiowanych z publikacji rysunków, które nie mają podziękowania wydawnictwu dla zgody na ich upublicznianie.
8. Na stronie 34 Autor napisał: „zjawiska kwantowe, odpowiedzialne za generację powierzchniowych plazmonów-polarytonów”. Polaryton to kwazi cząstka typu foton plus jakieś wzbudzenie w materiale, może więc być polaryton plazmonowy, magnonowy, ekscytonowy, fononowy, itd.. W całej rozprawie ta i podobne kalki z języka angielskiego się powtarzają.
9. Na stronie 36 we wzorze (15) brakuje liczby  $\pi$ .
10. Ostatnie zdanie rozpoczynające się na stronie 36, jest dla mnie niezrozumiałe: „Zwiększenie dostępnych kanałów radiacyjnych dla spontanicznej emisji fotonów powoduje, że w bliskim sąsiedztwie struktury HMM moc dipola jest całkowicie skoncentrowana w dużym wektorze fali przestrzennej, co powoduje, że struktura HMM przekształca fale zanikające do rozprzestrzeniania się, a absorpcja wpływa w ten sposób na efektywność sprzężenia emitowanych fotonów ze względu na nieskończoną długość propagacji w metamateriale, co może powodować wzrost wydajności kwantowej. Całkowity czas żywotności takiego emitera ( $\Gamma_{całkowity}$ )...”. Mam wrażenie, że Autor tłumacząc różne skomplikowane terminy z języka angielskiego, nie dokonał wysiłku by poprawnie opisać to w języku polskim. Nazwanie wielkości  $\Gamma_{całkowity}$  czasem żywotności emitera, jest błędem bo ta wielkość oznacza szybkość emisji, a czas życia stanu wzbudzonego jest dokładnie odwrotnie proporcjonalny do tej wielkości. Niestety, ten pojęciowy galimatias ciągnie się przez wiele rozdziałów w pracy. **Dlatego na obronie chciałbym by doktorant ustosunkował się do tej kwestii i wyjaśnił jak rozumie opisywane zjawisko.**
11. Rys. 13 na stronie 41 jest zbyt uproszczony by dobrze oddać Försterowski bezradiacyjny transfer energii (FRET). Widma donora i akceptora w rzeczywistości nakładają się tylko w pewnym obszarze. Emisja z akceptora leży zawsze po stronie niższych energii niż emisja z donora. Ten rysunek tego nie pokazuje dokładnie, bo jest zbyt uproszczony.
12. Opis do równania (21) na stronie 41 jest trochę niepoprawny, gdyż wielkości występujące w tym wzorze to nie wskaźniki emisji w próżni i w środowisku lecz odpowiednie szybkości emisji (*emission rates*). A na kolejnej stronie opis „ $\mu^-$  stanowi przejściowy moment dipolowy” powinien być zastąpiony przez dipolowy moment przejścia. Dalej czytamy: „Rozpatrując wnękę rezonansową, w której znajduje się dipol wraz z emiterem,” mam pytanie czy dipol i emiter to dwa różne twory fizyczne? **Będę prosił o odpowiedź na obronie w tej sprawie.**

13. Zdanie na stronie 42 zaraz po wzorze (25) „Pomimo rezonansowych czynników związanych z poszczególnymi efektami takimi jak SPP, struktury HMMs” jest źle przetłumaczone z publikacji [129] i powinno mieć brzmienie „Pomimo niskich czynników dobroci Q dla SPP i HMM”.  
Przy opisie Metody Macierzy Przejścia używa się wzorów (28) i (29) gdzie występują przenikalności elektryczne i magnetyczne warstw izolatorów i metali. **Moje pytanie dotyczy problemu jakie wartości przenikalności wybierać w obliczeniach numerycznych gdy grubości struktur są rzędu 10 nm? Wiadomym jest, że makroskopowe wielkości jakimi są przenikalności wraz z grubością warstwy szybko zmniejszają się.**
14. We wzorze (31) na stronie (45) jest błąd, pod pierwiastkiem zamiast jednego  $\epsilon_\alpha$  powinno być  $\mu_\alpha$ .
15. Wzór (35) na stronie (46) nie uwzględnia rozpraszania światła. Czynniki z ujemną fazą może być ekstremalnie małe, co w obliczeniach może sprawić duże problemy w rozwiązaniu i porównywaniu wyników z eksperymentem.
16. Na stronie 47 omawiając metodę FDTD napisano „za pomocą sprzężonej formy równań loków *Maxwella*,” . Co to są loki Maxwella, czy być może chodzi o operator rotacji na wektorze „curl”? Definicja tensora efektywnej przenikalności elektrycznej (38) na stronie 49 nie zgadza się z opisem osi na rys. 17.
17. Na stronie 52 rozpoczyna się podrozdział 3.3 Parametry rozproszenia – podsumowanie, w rozdziale tym o trochę mylącym tytule, Autor omówił metodę Scattering Matrix Method (SMM), czyli metodę macierzy rozpraszania. Ta metoda jest ulepszoną wersją metody macierzy przejścia. **Czy Autor używał tej metody dla któregoś z liczonych przez siebie metamateriałów i jeśli tak, czy porównał wyniki obliczeń z wynikami uzyskanymi metodą macierzy przejścia (TMM)?**
18. W podpisie do rysunku 21 na stronie 62 znalazło się stwierdzenie o kierunku porządkującego pola magnetycznego. Nie rozumiem, przecież na tym rysunku nie ma ciekłych kryształów?
19. Na stronie 71 znajduje się podrozdział dotyczący grafenu. Ten wybór materiału jest dla mnie wątpliwy z powodów praktycznych. Jeśli płatek grafenu styka się z metalem lub izolatorem jak to jest w HMM, momentalnie traci swoje właściwości i pojawia się energetyczna przerwa wzbroniona. Nie można więc spodziewać się jego unikalnych właściwości w takich strukturach, między innymi silnie maleje ruchliwość elektronów w warstwie. Nie spodziewam się zgodności symulacji przedstawioną metodą z eksperymentem.
20. Na stronie 67, jest zdanie odnoszące się do rys. 26, „Na rys. 26 zestawiono kompleksowe porównanie innych parametrów charakteryzujących wydajność materiałów plazmowych – szerokości granicznej SPP ( $L_w$ ), długości propagacji ( $D_w$ ),” O ile dobrze rozumiem pojęcie długość propagacji plazmonu powierzchniowego to parametr  $L_w$  określany jako szerokość graniczna SPP jest mi nieznanym a nie ma jego wyjaśnienia w tekście. **Proszę o stosowne wyjaśnienie na obronie.**



21. We wzorze (66) na stronie 77 tłumaczącym model Drudego, Autor napisał, że  $\Gamma$  to czas relaksacji. W tym wzorze  $\Gamma$  to czynnik tłumienia i musi być wyrażony w takich samych jednostkach jak częstość kołowa  $\omega$ , a więc musi mieć wymiar rad/s. Nie można  $\Gamma$  wprost nazwać czasem relaksacji, który zwykle podaje się w sekundach.
22. Na rys. 77 widmo Ramana z proszku rodaminy B jest znacznie bogatsze od teoretycznego, czy nie wynika to z zanieczyszczenia RB? W takich sytuacjach zawsze warto podać producenta tego barwnika i czystość, ewentualnie sposób dodatkowego oczyszczania. Pasma przy  $619\text{ cm}^{-1}$  jest bardzo silne a w widmie teoretycznym prawie go nie widać.
23. Na stronie 137 Autor opisuje właściwości mieszaniny ciekłokrystalicznej LC PET 5S 2091, wiemy, że wykazuje ona luminescencję z maksimum przy 520 nm ale nie podano czy ta luminescencja pochodzi od domieszki barwnika (jakiego) czy też od samej cząsteczki LC. Jakie tekstury ciekłego kryształu powstawały na powierzchni struktur HMM i czy można je było kontrolować.  
**Chciałbym usłyszeć odpowiedź na ten temat na obronie.**
24. Na stronie 159 napisano: „Warto zauważyć, że metoda ta potwierdziła zachodzący zgodnie z mechanizmem *Förstera* rezonansowy transfer energii. Potwierdza to zarejestrowanie sygnału w widmie SERS dla struktur Ag/SiO<sub>2</sub>, które posiadały grubość wierzchniej warstwy SiO<sub>2</sub> wynoszącą 10 nm oraz brak sygnału w widmie SERS dla analogicznych struktur HMMs wykonanych z warstw Ag/SiO<sub>2</sub>, jednakże o grubości wierzchniej warstwy SiO<sub>2</sub> wynoszącej 20 nm.” **Proszę określić pomiędzy jakimi dwoma systemami ten mechanizm FRET zachodził?** Tego wniosku nie rozumiem.

Na tym kończę moje uwagi i krytyczne komentarze, które mają charakter dyskusji akademickiej i nie zmieniają całkowitej wysokiej wartości dzieła naukowego jakim jest ta rozprawa oraz jej wysokiej mojej oceny. Mogą one być wskazówką, co powinno być uzupełnione bądź wytłumaczone lepiej by praca ta była czytelniejsza i jeszcze bardziej wartościowa. Pomiarów różnych wielkości fizycznych i ich interpretacja wykonane w czasie trwania doktoratu świadczą o dojrzałości naukowej i szerokim spektrum doświadczenia zdobytego przez Autora rozprawy i stanowią dobrą podstawę do Jego dalszego naukowego rozwoju.

**Stwierdzam, że rozprawa doktorska Pana mgr Karola Sielezina jest dziełem oryginalnym, wartościowym a uzyskane wyniki stanowią istotny i wartościowy wkład w rozwój fizyki i inżynierii materiałowej metamateriałów hiperbolicznych do zastosowań w optoelektronice i fotonice.**

**Ponadto, stwierdzam, że recenzowana rozprawa jak i pokaźny dorobek naukowy jej Autora spełniają warunki przewidziane ustawą o tytułach i stopniach naukowych oraz normy akademickie**

**dla prac doktorskich. Wnoszę do Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Wojskowej Akademii Technicznej im. Jarosława Dąbrowskiego w Warszawie o dopuszczenie Pan mgr Karola Sielezina do dalszych etapów przewodu doktorskiego.**

Andrzej Miniewicz

Wrocław, dn. 5.01.2024 r.

**Wybrane uwagi techniczne do tekstu rozprawy, które nie podlegają mojej formalnej ocenie a mogą przydać się doktorantowi w Jego przyszłej pracy naukowej:**

Str. 10: jest: (*Reactive Ion Etching*) technika jonów reaktywnych, powinno być: technika trawienia jonami reaktywnymi; jest: (*Scattering Matrix Method*) metoda macierzy rozpraszającej, powinno być: metoda macierzy rozpraszania; jest: (*Surface Plasmon-Polariton*) powierzchniowy plazmon-polaryton, powinno być: powierzchniowy polaryton plazmonowy; jest: (*Split Ring Resonator*) rozproszony rezonator kołowy, powinno być: rozszczepiony rezonator kołowy;

Str. 16: Na stronie 16 napisano: „ciekłe kryształy ze względu na dobrą przenikalność elektryczną oraz wysoką dwójłomność i anizotropię optyczną są dobrymi materiałami umożliwiającymi modulację fal elektromagnetycznych.” Czy przenikalność elektryczna może być opisywana jako dobra lub zła?

Str. 24, Autor chyba niepotrzebnie tłumaczy z języka polskiego na angielski takie słowa, jak barwnik – dye, polimer – polymer, ciekły kryształ – liquid crystal, i wiele innych.

Str. 35, napisano „Proces ten wymaga analizy charakterystyk dyspersyjnych wektora falowego w metamateriałach (rys. 3, str. 23)” . Rys. 3 nie znajduje się na str. 23 ani nie pokazuje zależności dyspersji wektora falowego, jak to napisano w tekście.

Str. 39, napisano „Ponadto poprzez ekscytację” po polsku używa się słowa „wzbudzenie”.

Str. 50, Pierwsze zdanie na stronie 50 jest urwane w połowie.

Str. 56, napisano „Jednakże w rzeczywistości metale mają zwykle przenikalności rzędu stokrotnie większego w zakresie optycznym.” To nie jest zdanie poprawnie skonstruowane i nie niesie rzetelnej informacji, czy mam rozumieć, że współczynnik załamania metalu np. srebra w zakresie optycznym (np. widzialnym) jest 100 razy większy od współczynnika dla szkła = 1.5, czyli = 150?

Str. 60, Czy wykres przedstawiony na Rys. 20 przygotował Autor samodzielnie czy jest to kopia rysunku z jakiejś publikacji lub książki? Jeśli kopia to koniecznie trzeba podać referencję.

Str. 71, opisując właściwości grafenu napisano, że jedną z jego unikalnych cech jest: „, zależność napięcia od przewodności warstwy”. Może czegoś nie rozumiem, ale wydaje mi się, że powinno być na odwrót.

Str. 77, Autor napisał: „ $\omega_p$  – częstotliwość plazmowa,” a powinno być częstość plazmowa. Ten sam błąd pojawia się wielokrotnie w monografii.

Str. 100, Autor napisał: „Warto zwrócić uwagę na charakterystyczny podobny przebieg składowych charakteryzujący „fano-rezonans”.” powinno być rezonans Fano, gdyż to nazwisko uczonego Ugo Fano.

Str. 135, rys. 76: W cząsteczce rodaminy B na rys.76 a) brakuje grup metylowych po lewej i prawej stronie.

Str. 167, ostatnie ważne zdanie nie jest dla mnie zrozumiałe, powinno być przeredagowane, a ostatnie zdanie na str. 168 jest niedokończone.