dr hab. Eryk Wolarz, prof. PP
Zakład Mikro- i Nanostruktur
Instytut Badań Materiałowych i Inżynierii Kwantowej
Wydział Inżynierii Materiałowej i Fizyki Technicznej
Politechnika Poznańska
ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań
e-mail: eryk.wolarz@put.poznan.pl
tel.: +48 616653167

Poznań, 3 luty 2024 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. inż. Karola Sielezina pt. „Aktywne właściwości wybranych struktur metamateriałów hiperbolicznych w zakresie VIS oraz IR"

Rozprawa doktorska mgr. inż. Karola Sielezina pt. „Aktywne właściwości wybranych struktur metamateriałów hiperbolicznych w zakresie VIS oraz IR" została napisana w Zakładzie Fizyki i Technologii Kryształów Instytutu Fizyki Technicznej na Wydziale Nowych Technologii i Chemii Wojskowej Akademii Technicznej im. Jarosława Dąbrowskiego w Warszawie. Promotorem rozprawy jest prof. dr hab. inż. Janusz Parka, a promotorem pomocniczym dr inż. Rafał Kowerdziej. Rozprawa doktorska została przygotowana w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria materiałowa zgodnie z wymaganiami ustawy z dnia 20 lipca 20218 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2023 r., poz. 742 z późn. zm.).

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr. inż. Karola Sielezina ma formę pracy pisemnej, która stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego dotyczącego właściwości metamateriałów hiperbolicznych i ich wpływu na powierzchniowo wzmocnione rozpraszanie światła przez molekuły i wzmocnioną emisję. Badane w ramach pracy doktorskiej metamateriały charakteryzują się jednoosiową anizotropią przenikalności elektrycznej. Są one metamateriałami hiperbolicznymi typu I, których składowe zdiagonalizowanego tensora przenikalności elektrycznej ε_{xx} i ε_{yy} są dodatnie, a składowa ε_{zz} ujemna lub metamateriałami hiperbolicznymi typu II, dla których występuje odwrotna zależność, tzn. składowe ε_{xx} i ε_{yy} są ujemne, a składowa ε_{zz} dodatnia. Rozprawa doktorska liczy łącznie 180 stron, na których przedstawiono w formie tekstu, wzorów matematycznych, rysunków poglądowych, tabel, wykresów i diagramów wybrane zagadnienia związane z badanymi strukturami oraz wyniki symulacji numerycznych i eksperymentów. Zasadnicza część rozprawy składa się z sześciu rozdziałów, w tym ze wstępu, następnie rozdziału, w którym przedstawiono aktualny stan badań metamateriałów hiperbolicznych i w kolejności – rozdziału o metodach numerycznych stosowanych w analizie właściwości transmisyjnych i odbiciowych metamateriałów, a następnie obszernego rozdziału dotyczącego ogólnie stosowanych metod wytwarzania metamateriałów hiperbolicznych, zawierającego także wyniki badań autora rozprawy w tym zakresie. Kolejny rozdział zawiera omówienie eksperymentów dotyczących powierzchniowo wzmocnionego rozpraszania i wzmocnionej emisji molekuł barwników osadzonych na powierzchni wielowarstwowego materiału hiperbolicznego. Ostatni rozdział rozprawy stanowi podsumowanie wyników badań omówionych w poprzedzających rozdziałach i zasadniczo nie wnosi nowych treści. Ważną częścią rozprawy doktorskiej jest bardzo obszerny, liczący 200 pozycji spis literatury dotyczącej głównie metamateriałów hiperbolicznych. W rozprawie znajduje się także lista publikacji i wystąpień konferencyjnych jej autora. Na początku rozprawy znajduje się streszczenie wraz z jego tłumaczeniem na język angielski. Bardzo przydatny jest wykaz skrótów i symboli używanych w rozprawie.

We wstępie rozprawy autor wyjaśnia, czym są metamateriały, w szczególności metamateriały zbudowane w oparciu o rezonatory pierścieniowe z rozcięciem i cienkie pręty metalowe (SRR-TW) oraz metamateriały hiperboliczne (HMMs) tworzone przez układ warstw metalowych i dielektrycznych

lub metalowych prętów zanurzonych w materiale dielektrycznym. Metamateriały typu SRR-TW były pierwszymi wytworzonymi i badanymi strukturami metamateriałowymi. Metamateriały hiperboliczne (HMMs) zaczęto badać później. Jak wspomniano, są one przedmiotem niniejszej rozprawy doktorskiej. We wstępie autor rozprawy przedstawia w skrócie rozwój badań metamateriałów hiperbolicznych i wskazuje na swoją motywację do włączenia się w ten nurt. Stwierdza m.in., że dla metamateriałów hiperbolicznych, ze względu na ich wyjątkowe właściwości fizyczne występują unikalne efekty elektrooptyczne, które mogą znaleźć zastosowanie w urządzeniach fotonicznych. Na podstawie analizy różnych wyników dotyczących materiałów hiperbolicznych prezentowanych w literaturze autor rozprawy sformułował oryginalną tezę. Cytując, brzmi ona następująco: „Unikalne właściwości materiałów 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". W związku z tą tezą autor rozprawy określił siedem celów badawczych. Pierwszym z nich było wytypowanie na podstawie przeglądu literatury metamateriałów hiperbolicznych, które potencjalnie mogą być wykorzystane do zbadania efektu powierzchniowo wzmocnionego rozpraszania barwnika i wzmocnionej emisji, a następnie wykonanie obliczeń numerycznych pozwalających określić ich parametry elektromagnetyczne. Kolejnym etapem było wytypowanie odpowiednich materiałów do wytworzenia struktur metamateriałowych oraz barwników odpowiednich do sprawdzenia efektu wzmocnienia rozpraszania i emisji, a następnie wytworzenie wybranych metamateriałów hiperbolicznych i ocenę ich jakości z wykorzystaniem różnych dostępnych metod badawczych. W dalszej kolejności należało wytworzyć warstwę barwnika na powierzchni metamateriału, wykonać przetworniki z takich struktur i przeprowadzić pomiary powierzchniowo wzmocnionego rozpraszania Ramana (SERS) i powierzchniowo wzmocnionej emisji. Do wytworzenia wielowarstwowych metamateriałów hiperbolicznych wybrano materiały będące dobrymi przewodnikami prądu elektrycznego – srebro, glin, azotek tytanu i zdefektowany tlenek indowo-galowo-cynkowy, a także materiały dielektryczne – ditlenek krzemu i ditlenek hafnu. Wykorzystanymi w badaniach powierzchniowo wzmocnionego rozpraszania i wzmocnionej emisji barwnikiem była rodamina B i odpowiednio dobrana mieszanina ciekłokrystaliczna charakteryzująca się absorpcją i fluorescencją w zakresie UV-Vis.

W rozdziale drugim autor rozprawy omówił szczegółowo kryterium anizotropii efektywnej przenikalności elektrycznej wielowarstwowych metamateriałów, które służy za podstawę do klasyfikowania tych struktur jako metamateriały hiperboliczne typu I lub typu II. Autor przedstawił i omówił przykłady wielu różnych metamateriałów, które charakteryzują się hiperbolicznością w określonych zakresach częstotliwości pola elektrycznego, w zależności od wymiarów tworzących je struktur i przenikalności elektrycznej użytych do ich wytworzenia materiałów. Posłużył się w tym celu licznymi źródłami literaturowymi, które dotyczą matamateriałów hiperbolicznych. Obszerny wykaz publikacji dotyczący tej tematyki, przygotowany przez autora rozprawy, wskazuje, że doktorant gruntownie zapoznał się z aktualnymi osiągnięciami naukowo-inżynierskimi w zakresie realizowanej pracy doktorskiej. Ważnymi zagadnieniami teoretycznymi mającymi bezpośredni związek ze wzmocnieniem rozpraszania i emisji, omówionymi w tym rozdziale, są zagadnienia dotyczące gęstości stanów fotonicznych i generacji plazmonów powierzchniowych. Przedstawiony został także problem oddziaływania wielowarstwowego metamateriału hiperbolicznego z molekułami barwnika i wpływu tego oddziaływania na emisję spontaniczną. Omówiono dwa możliwe przypadki tego odziaływania – oddziaływanie typu foersterowskiego i odziaływanie typu dexterowskiego, a także współczynnik wzmocnienia Purcella dla emisji spontanicznej molekuł barwnika umieszczonego w pobliżu warstwowego metamateriału hiperbolicznego. Zakres omówionych w tym rozdziale zagadnień teoretycznych należy uznać za odpowiedni i wystarczający do interpretacji powierzchniowo wzmocnionego rozpraszania światła przez molekuły barwnika i powierzchniowo wzmocnionej emisji w

wyniku odziaływania z fotonowo-fononowymi wzbudzeniami w skonstruowanym w ramach pracy doktorskiej przetworniku. Podstawowym elementem tego przetwornika jest wielowarstwowy (metalowo-dielektryczny) metamateriał hiperboliczny z naniesioną na jego powierzchnię warstwą barwnika lub mieszaniny ciekłokrystalicznej.

W rozdziale trzecim autor rozprawy przedstawił skrótowo metody numeryczne, metodę macierzy przejścia i metodę macierzy rozpraszania, które wykorzystywał w pracy doktorskiej do obliczenia transmisji, odbicia i pochłaniania elektromagnetycznych fal płaskich padających na powierzchnię wielowarstwowego metamateriału hiperbolicznego. Metody te pozwalają powiązać ze sobą eksperymentalne wartości współczynników transmisji, odbicia i pochłaniania z efektywnymi parametrami elektromagnetycznymi metamateriału hiperbolicznego, takimi jak przenikalności elektryczna i magnetyczna lub współczynnik załamania i impedancja falowa. W rozdziale tym przedstawiono również podstawy metodę różnic skończonych w dziedzinie czasu (FDTD), którą można zastosować do bezpośredniego obliczenia parametrów elektromagnetycznych metamateriału hiperbolicznego w oparciu o wstępnie zdefiniowany jego model. W tym przypadku autor rozprawy wykorzystywał komercyjny pakiet programistyczny Lumerical. Zamieszczenie w rozprawie doktorskiej ogólnych informacji dotyczących zastosowanych metod numerycznych jest w pełni uzasadnione.

Rozdział czwarty, dotyczący wytwarzania wielowarstwowych metamateriałów hiperbolicznych, stanowi ważną część rozprawy i liczy 54 strony. Na początku tego rozdziału autor rozprawy omówił szczegółowo szereg różnych problemów, które występują przy doborze odpowiednich materiałów do wytworzenia struktur metamateriałowych o pożądanych właściwościach elektromagnetycznych. W przypadku przewodników istotnymi parametrami są transmisja, przenikalność elektryczna, przewodnictwo elektryczne, ruchliwość nośników, straty związane z przejściami międzypasmowymi i częstotliwość plazmowa. Problem mogą w tym przypadku stanowić duże straty związane z przewodnictwem elektrycznym i znaczna ujemna wartość stałej dielektrycznej, która powinna mieć porównywalną wartość bezwzględną z dodatnią stałą dielektryczną materiałów użytych do wytworzenia warstw dielektrycznych. Materiały dielektryczne powinny w tym przypadku charakteryzować się znaczną przezroczystością, a także dużym współczynnikiem załamania dla fal elektromagnetycznych w zakresie Vis i IR. Autor rozprawy omówił właściwości różnych grup materiałów przewodzących, w tym przewodników i półprzewodników, oraz dielektryków. Na podstawie dokonanego przeglądu materiałów pod kątem ich wykorzystania do wytworzenia wielowarstwowych metamateriałów hiperbolicznych, autor rozprawy stwierdził, że ze wszystkich rozważanych materiałów plazmonicznych najlepsze właściwości w całym zakresie spektralnym (Vis, IR) posiadają metale – srebro i złoto. Alternatywę w ograniczonym zakresie spektralnym (Vis) mogą stanowić azotki metali. Można również rozważać wykorzystanie przewodzących materiałów tlenkowych, a także grafenu, jednakże ograniczeniem są tutaj problemy technologiczne. W odniesieniu do tej części rozprawy należy stwierdzić, że zawiera ona bogaty zasób wiedzy na temat materiałów przydatnych do wytwarzania metamateriałów hiperbolicznych i jednocześnie wskazuje na dużą wiedzę autora w tym zakresie.

Przy wyborze materiałów do badań w ramach pracy doktorskiej, oprócz korzystnych parametrów materiałowych, istotne znaczenie miały także czynniki, takie jak ogólna dostępność danych materiałowych dla pełnego zakresu widmowego, a także koszty związane z pozyskaniem określonych materiałów. Z tego powodu badania zostały ograniczone do metamateriałów hiperbolicznych zawierających naprzemiennie ułożone warstwy metalowe i dielektryczne. Wstępne obliczenia numeryczne reflektancji, transmitancji i absorbancji oraz efektywnej przenikalności elektrycznej wykonano dla szerszej grupy struktur wielowarstwowych. W szczególności były to struktury wielowarstwowe grafen/ditlenek krzemu, glin/ditlenek hafnu, srebro/ditlenek krzemu,

złoto/tlenek indowo-cynowy, tlenek indowo-cynowy/ditlenek krzemu, pentatlenek ditantalu/ditlenek krzemu. Przeprowadzone obliczenia numeryczne pozwoliły stwierdzić, że pierwszych pięć z wymienionych struktur metamateriałowych charakteryzuje się hiperbolicznością w określonych zakresach długości fali, natomiast dla struktury pentatlenek ditantalu/ditlenek krzemu takiej właściwości nie obserwuje się. Otrzymane rezultaty uwiarygodnia fakt, że identyczne wyniki uzyskano stosując niezależnie dwie metody obliczeniowe – metodę macierzy przejścia i metodę różnic skończonych w dziedzinie czasu.

W dalszej części rozdziału czwartego autor rozprawy konsekwentnie omawia zagadnienia związane technologią wykonania wybranych metamateriałów hiperbolicznych. Prezentuje w szczególności różne metody stosowane do wytwarzania struktur plazmonicznych oraz szczegółowo opisuje proces technologiczny stosowany do wytwarzania wybranych uprzednio wielowarstwowych metamateriałów. Cienkie warstwy wytwarzano w tym przypadku metodą pulsacyjnego napylania magnetronowego oraz metodą fizycznego osadzania z fazy gazowej (PVD). Wytwarzanie warstw realizowano w trzech różnych laboratoriach badawczych. Wytworzone wielowarstwowe metamateriały hiperboliczne zostały zbadane pod kątem ich właściwości spektralnych transmitancji i reflektancji w zakresie Vis-NIR, a także w zakresie do 2500 nm z wykorzystaniem metody elipsometrycznej. Zbadano również strukturę powierzchni wytwarzanych warstw metodą mikroskopii sił atomowych. Przeprowadzone badania wytworzonych struktur wielowarstwowych potwierdziły zadowalającą jakość otrzymanych metamateriałów hiperbolicznych, a także jakościową zgodność widm transmisyjno-odbiciowych uzyskanych eksperymentalnie z widmami otrzymanymi z obliczeń numerycznych. Przedstawione w rozdziale czwartym działania prowadzące do wytworzenia metamateriałów hiperbolicznych zostały opisane w sposób w pełni wyczerpujący i konsekwentny. Jakość i wartość naukowa przedstawionych wyników nie budzi zastrzeżeń.

W rozdziale piątym autor przedstawił wyniki badań, które są bezpośrednio związane z postawioną we wstępie rozprawy tezą. Teza ta, dla przypomnienia, dotyczy zastosowania wielowarstwowych metamateriałów hiperbolicznych do wzmocnienia emisji molekuł barwników umieszczonych na ich powierzchni. W pierwszej części tego rozdziału przedstawione zostały wyniki obliczeń numerycznych współczynnika wzmocnienia Purcella dla dipola elektrycznego, który jest traktowany jako model molekuły barwnika z indukowanym elektrycznym momentem dipolowym. Rozpatrywano przypadki różnych położeń i różnych orientacji osi dipola względem warstw metamateriału. W szczególności zbadano sytuacje, w których dipol jest umieszczony na powierzchni metamateriału, a także gdy znajduje się w warstwach dielektrycznych wewnątrz metamateriału, przy czym oś dipola jest albo równoległa albo prostopadła do warstw. Z obliczeń numerycznych dla dipola umieszczonego na zewnętrznej warstwie metamateriału, którą jest warstwa przewodnika, wynika, że w przypadku gdy oś dipola jest skierowana prostopadle do powierzchni metamateriału, współczynnik wzmocnienia jest znacznie większy niż gdy oś dipola jest równoległa do tej powierzchni. Uzyskany wynik obliczeń może wskazywać na znacznie silniejsze sprzężenie dipola z polem elektromagnetycznym plazmonów powierzchniowych w przypadku gdy jego oś jest ustawiona prostopadle do powierzchni niż gdy jest do niej równoległa. Na podstawie obliczeń numerycznych dla metamateriałów hiperbolicznych o różnej liczbie warstw stwierdzono również, że współczynnik wzmocnienia Purcella może osiągać znaczne wartości. Chociaż wyniki obliczeń numerycznych dla idealnego dipola elektrycznego mogą się istotnie różnić od realnej sytuacji, w której mamy do czynienia z molekułami to, jak to zauważa autor rozprawy, mogą one stanowić istotną wskazówkę przy planowaniu eksperymentów z tego typu układami. W odniesieniu do przeprowadzonych przez autora rozprawy obliczeń numerycznych układów dipol-wielowarstwowy metamateriał hiperboliczny należy zauważyć, że uzyskane wartości współczynnika wzmocnienia Purcella dla dipoli umieszczonych w różnych warstwach wewnątrz metamateriału nie wskazują na występowanie specyficznej regularności

w powiązaniu z kolejnością warstw, w których są umieszczone. Być może obliczenia numeryczne dla dipoli umieszczonych we wszystkich warstwach dielektrycznych wyjaśniłyby ten problem, ale autor nie przedstawił odpowiednich wyników.

W następnej części rozdziału autor rozprawy przedstawił i omówił swoje badania eksperymentalne dotyczące efektu wzmocnienia rozpraszania ramanowskiego i emisji w układach barwnik-wielowarstwowy metamateriał hiperboliczny. Do badania wybrał dwa rodzaje molekuł charakteryzujących się absorpcją i fluorescencją w zakresie UV-Vis: typowy barwnik organiczny – rodaminę B oraz mieszaninę ciekłokrystaliczną, której składnikami są związki organiczne posiadające w strukturze grupę tiocyjankową, należące do szeregów homologicznych izotiocyjanobifenyli (nBT) i 4-(trans-4'-n-alkilocykloheksylo)izotiocyjanobenzenów (nCHBT). Właściwości absorpcyjne i fluorescencyjne rodaminy B są powszechnie znane, więc jest zrozumiałe, że autor nie skomentował tego problemu w rozprawie, jednak w przypadku mieszaniny ciekłokrystalicznej niezbędne są dodatkowe wyjaśnienia. W pracy (tabela 4) są zamieszczone widma absorpcji i fluorescencji dla tej mieszaniny, ale opis osi rzędnych na wykresach jest całkowicie niejasny. Co mianowicie oznacza opis „Intensywność emisji ($x10^6$)" na rysunku po lewej stronie, a co „Intensywność" na rysunku po prawej stronie?

Dla zbadania wzmocnionego powierzchniowo rozpraszania Ramana i wzmocnionej powierzchniowo emisji (fluorescencji) przez wielowarstwowe metamateriały hiperboliczne przygotowano trzy różniące się rzędem wielkości stężenia roztwory rodaminy B w etanolu, a następnie nakroplono roztwory na powierzchnie metamateriałów. Po odparowaniu rozpuszczalnika próbka była gotowa do badań. Jak należy rozumieć (autor tego nie wyjaśnił), kolejne próbki różniły się między sobą ilością naniesionego na jednostkę powierzchni barwnika o rząd wielkości. Podobną procedurę zastosowano w przypadku mieszaniny ciekłokrystalicznej, z tym że rozpuszczalnikiem był toluen. Badania SERS wykonano dla metamateriałów hiperbolicznych składających się z różnej liczby warstw srebra i ditlenku krzemu o grubości 20 nm (n = 1, 5, 10, 20), przy czym zewnętrzna warstwa ditlenku krzemu miała grubość 10 nm. W przypadku rodaminy B zarejestrowano widma tylko dla najgrubszej warstwy barwnika i zaobserwowano wzrost intensywności rozpraszania wraz ze wzrostem liczby warstw tworzących metamateriał. W przypadku mieszaniny ciekłokrystalicznej dla najgrubszej warstwy ciekłego kryształu intensywność rozpraszania była niezależna o liczby warstw tworzących metamateriał. Taki sam wynik uzyskano dla mieszaniny ciekłokrystalicznej osadzonej na metamateriałach wytworzonych z przewodzących warstw z azotku tytanu, zdefektowanego tlenku indowo-galowo-cynkowego i glinu w układzie z dielektryczną warstwą z ditlenku hafnu. Autor prezentuje również wykresy przedstawiające zależność intensywności rozpraszania ramanowskiego od grubości warstwy barwnikowej (rysunki 81–83), ale w kontekście postawionej we wstępie tezy pracy doktorskiej nie mają one istotnego znaczenia. Pewne znaczenie w kontekście wyboru najbardziej odpowiedniego materiału przewodzącego na warstwy przewodzące w metamateriale, umożliwiającego możliwie największe wzmocnienie rozpraszania, mogą mieć wykresy przedstawione na rysunkach (84 i 85), jednak wyniki te są niejednoznaczne. W konsekwencji, eksperymenty SERS wykazały jedynie wpływ liczby warstw metamateriału wytworzonego z warstw srebra i ditlenku krzemu na wzmocnienie intensywności rozpraszania ramanowskiego rodaminy B, co oczywiście jest ważnym wynikiem potwierdzającym tezę pracy doktorskiej.

Badania eksperymentalne wzmocnionej powierzchniowo emisji fluorescencyjnej wykonano zarówno dla rodaminy B, jak i mieszaniny ciekłokrystalicznej na powierzchniach metamateriałów składających się z różnej liczby warstw srebra i ditlenku krzemu. W przypadku najgrubszej warstwy rodaminy B osadzonej na metamateriale posiadającym grubszą, dwudziestonanometrową, zewnętrzną warstwę ditlenku krzemu zaobserwowano zwiększanie się intensywności emisji wraz ze zwiększaniem

liczby warstw metamateriału. Taką samą zależność zaobserwowano dla rodaminy B w przypadku gdy zewnętrzna warstwa ditlenku krzemu była dwa razy cieńsza (na rysunku 87b niewłaściwie oznaczono widma). Dane dotyczące zależności intensywności emisji od grubości warstwy barwnika, przedstawione na rysunku 87d, podobnie jak w przypadku SERS, nie mają znaczenia dla uzasadnienia tezy pracy doktorskiej. Badania eksperymentalne wzmocnionej powierzchniowo emisji fluorescencyjnej dla mieszaniny ciekłokrystalicznej dały podobny wynik dotyczący zależności intensywności emisji od liczby warstw tworzących metamateriał jak w przypadku rodaminy B. Wyniki przedstawiono na rysunku 88. Podobnie jak poprzednio, wyniki dotyczące zależności intensywności emisji od grubości warstwy (rysunek 89) nie mają znaczenia dla uzasadnienia tezy pracy doktorskiej, a ich wytłumaczenie może być trywialne. Autor przeprowadził także badania wzmocnienia emisji mieszaniny ciekłokrystalicznej osadzonej na powierzchni metamateriałów identycznych jak w metodzie SERS, zawierających warstwy dielektryczne z ditlenku hafnu. W tych badaniach również zaobserwowano taką samą jak w pozostałych eksperymentach zależność między intensywnością emisji a liczbą warstw w metamateriale. Z przeprowadzonych eksperymentów wynika wniosek ogólny, że zwiększenie liczby warstw tworzących metamateriał hiperboliczny powoduje zwiększenie intensywności powierzchniowo wzmocnionego rozpraszania światła przez barwnik oraz jego emisji. Tym samym wniosek ten stanowi uzasadnienie dla postawionej we wstępie pracy tezy.

Podsumowując, autor rozprawy wykonał bardzo dużą pracę, zapoznając się z różnymi zagadnieniami fizycznymi i technologicznymi dotyczącymi metamateriałów hiperbolicznych, co wykazał omawiając je w sposób bardzo obszerny i szczegółowy. Należy także zwrócić uwagę na duży wkład autora rozprawy w zaprojektowanie struktur metamateriałowych z wykorzystaniem metod numerycznych i ich wytworzenie. Kluczowe znaczenie miało przeprowadzenie przez autora rozprawy eksperymentów potwierdzających wpływ struktury metamateriału hiperbolicznego na intensywność rozpraszania światła i emisji przez molekuły osadzone na jego powierzchni. W stosunku do części eksperymentalnej recenzent pracy sformułował pewne uwagi, do których, jak przypuszcza, autor się ustosunkuje. W rozprawie zauważono pewne błędy stylistyczne i inne usterki, jednak nie umniejszają one wartości samej pracy, którą recenzent ocenia bardzo wysoko. Należy także zwrócić uwagę, że autor rozprawy jest współautorem dwunastu, jak wynika z załączonej listy, publikacji naukowych i konferencyjnych, w większości dotyczących tematyki niniejszej rozprawy.

W konkluzji stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Karola Sielezina stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego dotyczącego właściwości metamateriałów hiperbolicznych i ich wpływu na powierzchniowo wzmocnione rozpraszanie światła przez molekuły i wzmocnioną emisję, a tym samym spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim w ustawie z dnia 20 lipca 20218 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2023 r., poz. 742 z późn. zm.) i wnoszę do Rady Dyscypliny Naukowej „Inżynieria Materiałowa" w Wojskowej Akademii Technicznej im. Jarosława Dąbrowskiego o jej dopuszczenie do publicznej obrony.