

Dr hab. Dorota A. Pawlak, prof. UW
ENSEMBLE³ Centre of Excellence
Wydział Chemii, Uniwersytet Warszawski
Łukasiewicz - Instytut Mikroelektroniki i Fotoniki

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Alessandro Pianelli pt.: „PHOTONIC ADVANCES IN HYPERBOLIC METAMATERIALS”

Rozprawa przedstawiona mi do recenzji wpisuje się w nurt badań poświęconych metamateriałom dla zastosowań optycznych prowadzonym na Wydziale Nowych Technologii i Chemii Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie. Praca powstała pod kierunkiem dr hab. inż. Janusza Parki, prof. WAT.

Niniejsza rozprawa dotyczy metamateriałów hiperbolicznych, w których część rzeczywista przenikalności elektrycznej w jednym kierunku ma wartość dodatnią a w drugim kierunku wartość ujemną, a co za tym idzie w jednym kierunku materiał wykazuje właściwości dielektryka a w kierunku prostopadłym właściwości metalu. Taka charakterystyka tych materiałów pozwoliła na wykazanie wielu nietypowych właściwości. Autor skupił się w pracy na wykazaniu, że hiperboliczne metamateriały są nową platformą, która może rozwiązać szereg wyzwań występujących w fotonice. Autor postawił sobie za cel: (i) Wybranie materiałów, które pozwalałyby na uzyskanie hiperbolicznego metamateriału w sposób tani i przystępny, (ii) wykonanie modelowania właściwości elektromagnetycznych wybranych materiałów w zakresie światła widzialnego i bliskiej podczerwieni, (iii) wykonanie cienkowarstwowych materiałów hiperbolicznych, (iv) charakteryzację powierzchni warstw dielektrycznych i metalicznych różnymi metodami, oraz (v) wykazanie i opisanie potencjalnych właściwości wykonanych materiałów. Autor skupił się na właściwościach, które wcześniej zostały opisane w literaturze, jako możliwe do uzyskania w materiałach hiperbolicznych, takich jak super-rozdzielczość, kanalizacja światła, wzmocnienie promieniowania dzięki dużej gęstości stanów, przestrajalne filtry, ultraszybkie przełączniki.

Praca zawiera logiczny całościowy ciąg od zaprojektowania odpowiednich materiałów, poprzez ich wykonanie oraz charakteryzację ich właściwości. Cele pracy zostały w pełni zrealizowane.

Praca napisana jest w języku angielskim, przedstawiona jest w ramach 6-ciu rozdziałów oraz 5 dodatków na 134 stronach i powołuje się na 152 pozycje literaturowe. W pracy znalazły się również bardzo pomocne wykazy tabel, rysunków, używanych symboli i skrótów oraz abstrakt w języku angielskim oraz polskim.

Rozdział pierwszy, czyli wstęp, wprowadza w tematykę metamateriałów, określa strukturę, cele i tezy pracy. Rozdział drugi w jasny i dokładny sposób, wprowadza w dziedzinę hiperbolicznych metamateriałów, które są tematem niniejszej pracy doktorskiej. W tym rozdziale omówione zostały teoria, otrzymywanie oraz charakteryzacja materiałów hiperbolicznych, materiały w reżimie przenikalności elektrycznej bliskiej zera (*ang.* ‘epsilon near zero’), jak również szereg właściwości oraz potencjalnych zastosowań materiałów hiperbolicznych takich, jak wzmocnienie emisji spontanicznej, powierzchniowe wzmocnienie rozpraszania ramanowskiego, czujniki o wysokiej czułości, jak też nieliniowe właściwości tych materiałów.

Rozdział trzeci dotyczy zastosowanych metod oraz aparatury pomiarowej do inżynierii czasów życia, wzmocnienia rozpraszania ramanowskiego oraz badania efektów nieliniowych w otrzymanych materiałach hiperbolicznych.

Kolejne dwa rozdziały zawierają oryginalne wyniki autora. Rozdział czwarty dotyczy warstwowego materiału hiperbolicznego Ag/TiO₂ dla którego zaprezentowane zostały wyniki modelowania oraz wyniki eksperymentalne dotyczące skrócenia czasów życia, wzmocnienia rozpraszania ramanowskiego, szybkiej dynamiki, efektu Purcella oraz kontroli właściwości tego materiału hiperbolicznego. Na rysunku 4.1a przedstawiona została przenikalność elektryczna dla otrzymanego materiału Ag/TiO₂. Łatwiej byłoby zrozumieć rysunek, gdyby wartość ‘zero’ dla skali reprezentującej $\text{Re}(\epsilon_{\parallel})$ oraz $\text{Re}(\epsilon_{\perp})$ były na tej samej wysokości.

Na rysunkach 4.4 oraz 4.5 autor wykazał skrócenie czasu życia barwnika – kumaryny 480, którą zostało domieszkowane przezroczyste tworzywo sztuczne – PMMA, w przypadku umiejscowienia tego materiału na materiale hiperbolicznym Ag/TiO₂ w porównaniu z umiejscowieniem tego materiału na podłożu szklanym. Autor zinterpretował skrócenie czasów życia jako wzmocnienie emisji spontanicznej takiego materiału. Jednakże w literaturze znane są przypadki gdy skrócenie czasu życia nie oznacza wzmocnienia emisji, a jej osłabienie. Istotny byłby tutaj komentarz autora jakie przesłanki pozwalają na taką interpretację skróconych czasów życia.

Skrócenie czasów życia τ_1 oraz τ_2 autor przypisał silnemu sprzężeniu (*ang.* ‘strong coupling’) barwnika na powierzchni materiału hiperbolicznego. Istotny byłby tutaj jednak komentarz jakie przesłanki skłaniają autora do takiej interpretacji, że skrócenie czasów życia ok. 1-4 razy jest efektem silnego sprzężenia.

W tabeli 4.2 oraz na rysunku 4.7 autor wykazał kilkukrotne wzmocnienie widma rozpraszania ramanowskiego w przypadku umieszczenia barwnika bezpośrednio na powierzchni materiału hiperbolicznego Ag/TiO₂ w porównaniu z umieszczeniem go na powierzchni szkła. Interesująca byłaby tutaj próba wytłumaczenia, dlaczego wyróżnia się jedna linia ramanowska, 612 cm⁻¹, dla której to wzmocnienie jest największe tj. 7-krotne w porównaniu ze wzmocnieniem innych linii, ok. 3.5-5-krotne.

Na rysunku 4.9 autor przedstawił odbicie i transmisję dla hiperbolicznego metamateriału TiN/ITO. Interesujący byłby tutaj komentarz autora odnośnie transmisji tych materiałów w obszarze przenikalności elektrycznej bliskiej zeru (mod ENZ). W pierwszym przypadku jest obserwowana transmisja, jednak nie jest ona wysoka, w drugim przypadku praktycznie brak jest transmisji. Nie jest też do końca zrozumiałe czy są to wyniki modelowania czy wyniki eksperymentalne. Istotne byłoby też podanie informacji na rysunku 4.9 pod jakim kątem były tutaj badane odbicie i transmisja.

W rozdziale 4.2.1.1 autor wykazał eksperymentalnie możliwość ultraszybkiego (ok. 100 fs) przełączania materiału z zachowującego się jak dielektryk do zachowującego się jak metal. Autor wykazał to w materiale TiN/ITO, jak również wykazał podobnie szybki powrót do właściwości dielektrycznych (ok. 200-300 fs). Interesujące byłoby tutaj wyjaśnienie dlaczego zaprezentowane

zmiany w transmisji mogą być zinterpretowane jako przejście z właściwości dielektrycznych do metalicznych i czy jest jakaś wartość graniczna tej zmiany, od której tak można te wyniki zinterpretować. Interesująca byłaby tutaj też interpretacja autora odnośnie dlaczego poziom transmisji nie wraca dokładnie do poziomu wyjściowego, oraz dlaczego w szczególności dotyczy to drugiego 'okna ENZ'. Niezbędnym wydaje się tutaj podanie informacji czy w przypadku drugiego 'okna ENZ' pomiar był wykonany pod kątem 70 stopni. Interesujące byłoby też porównanie wyników uzyskanych przez autora z innymi potencjalnymi przykładami takiego przełączania. Autor napisał, że uzyskane wyniki przełączania są znacznie lepsze niż te zaprezentowane w literaturze. Co było źródłem tego sukcesu? Co spowodowało uzyskanie tak dobrych wyników?

W podpisie pod rysunkiem rysunkiem 4.11 zabrakło wyjaśnienia czego dotyczy ultraszybkie przełączanie.

Na rysunku 4.14 autor przedstawił zmianę przenikalności dielektrycznej z długością fali dla materiału wykonanego z warstw ITO oraz warstw SiO₂. Interesujący byłby tutaj komentarz autora odnośnie właściwości tego metamateriału w dwóch różnych kierunkach, biorąc pod uwagę zupełnie inny charakter zaprezentowanych przenikalności.

W tabelach 4.3 oraz 4.4 autor wykazał, że metamateriał hiperboliczny zachowuje się jak tzw. supersoczewka (*ang.* 'Superlens'). Interesujący byłby komentarz autora skąd wynikają różnice w rozdzielczości soczewki przy różnych długościach fali. Istotne byłoby dodanie informacji, którego z badanych materiałów dotyczą te wyniki.

W rozdziale 4.3.3. autor wykazał silne nieliniowe zachowanie w wąskich zakresach długości fal dla metamateriału zawierającego warstwy ITO. Autor wykazał również zależność właściwości nieliniowych od koncentracji swobodnych nośników w warstwach ITO oraz możliwość przesuwania zakresu, w którym nieliniowe zachowanie jest obserwowane – właśnie poprzez zmianę koncentracji swobodnych nośników. Czy na rysunku 4.18 zabrakło części urojonej przenikalności elektrycznej dla kierunku równoległego?

Rozdział piąty dotyczy metamateriału hiperbolicznego wykonanego z grafenu. Autor skupia się na przełączalnych i rekonfigurowalnych reflektorach, mikrownęce Fabri-Perot, wysokiej rozdzielczości i elektrooptycznym przełączaniu. Autor między innymi wykazał, że zaprojektowany przez niego materiał zachowuje się jak selektywny reflektor kątowy zależny od polaryzacji operujący w zakresie średniej podczerwieni. Właściwości reflektora mogą być zmieniane poprzez zmianę liczby warstw grafenu, oraz zmianę potencjału chemicznego.

Na rysunku 5.1 autor zademonstrował zmianę właściwości metamateriału wykonanego z warstw grafenu, a w szczególności wpływ liczby warstw grafenu oraz potencjału chemicznego na odbicie materiału. Korzystny byłby komentarz autora odnośnie skąd zna wartości potencjału chemicznego. Czy zaprezentowane wyniki są wynikami eksperymentalnymi czy wynikami modelowania?

Korzystne byłoby skomentowanie dlaczego na rysunku 5.2 autor przedstawił tylko jedną krzywą dla $Re(\epsilon_{\perp})$. W rozdziale 5.2.1.2 autor wykazał, że zaprojektowana przez Niego struktura może pozwolić na wysoką rozdzielczość obrazowania, $\lambda/1600$. Interesujący byłby tutaj komentarz wyjaśniający dlaczego wysoką rozdzielczość autor mógł uzyskać dla $\lambda=2054$ nm, a nie dla $\lambda=1000$ nm skoro autor może przestrajać obszar kanalizacji światła.

W rozdziale szóstym autor podsumowuje wyniki badań oraz przedstawia dalsze perspektywy.

Praca doktorska Pana Alessandro Pianelli jest interesująca, zawiera dużo wyników badań zarówno eksperymentalnych jak i modelowania. Autor wykonał założone cele pracy. Praca jednak

zdecydowanie zyskałaby na czytelności i odbiorze, gdyby przed wydrukiem została sprawdzona przez specjalistę od języka angielskiego. Praca zawiera wiele pomyłek językowych oraz wiele literówek.

Pan mgr inż. Alessandro Pianelli jest współautorem 4 publikacji oraz 2 publikacji w druku. Wszystkie publikacje mają zasięg międzynarodowy. W trzech publikacjach pan Pianelli jest pierwszym autorem.

Przedstawiona do recenzji praca mgr inż. Alessandro Pianelli pt. „Photonic advances in hyperbolic metamaterials” spełnia wszystkie ustawowe wymagania stawiane rozprawom doktorskim. Wnoszę o jej przyjęcie oraz dopuszczenie do publicznej obrony.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Pawlak', with a stylized, cursive script.

Dorota A. Pawlak