

Poza tablicą Mendelejewa: Metamateriały, czyli inżynieria materiałowa przyszłości

Metamateriały to wytworzone w laboratoriach sztuczne struktury o cechach niespotykanych w naturze. Ich unikalne właściwości nie wynikają bezpośrednio z właściwości użytych materiałów, lecz w głównym stopniu są wynikiem ustrukturyzowania. Metamateriały są zwykle ułożone w powtarzające się wzory. Precyzyjnie zaprojektowany kształt, geometria, rozmiar, orientacja i ułożenie nadaje im właściwości zdolne do manipulowania falami elektromagnetycznymi poprzez blokowanie, pochłanianie, wzmacnianie lub uginanie fal. W przypadku metamateriałów optycznych warunkiem koniecznym jest jedynie to, aby pojedynczy element składowy struktury był znacząco mniejszy od długości fali światła, dla której została zaprojektowana struktura. Tylko w takim przypadku metamateriały oddziałują ze światłem w sposób efektywny, tzn. jak jednorodny ośrodek o pewnych wypadkowych własnościach. Metamateriały pozwalają wykraczać poza prawa znane z klasycznej optyki i dzięki temu pozwalają uzyskać efekty niemożliwe do osiągnięcia za pomocą konwencjonalnych elementów optycznych.

Jako pierwszą pracę naukową, dotyczącą koncepcji metamateriałów, powszechnie uznaje się artykuł teoretyczny, opublikowany w latach 60. XX wieku, przez rosyjskiego fizyka Wiktora Veselago. Badacz ten jako pierwszy zadał sobie pytanie, co by było, gdyby istniały materiały optyczne o ujemnym współczynniku załamania? W życiu codziennym ta pozornie mało znacząca zmiana miałaby istotny wpływ na nasz sposób postrzegania rzeczywistości, gdyż zjawiska optyczne, do których jesteśmy przyzwyczajeni, stałyby się mylące. Przykładowo, patrząc na ołówek zanurzony w metamateriale o ujemnym współczynniku załamania, widzielibyśmy jego dolny koniec nad powierzchnią cieczy. Ryba pływająca w cieczy o ujemnym współczynniku załamania wydawałaby się przemieszczać nad powierzchnią cieczy, podobnie jak cała zawartość zbiornika. Soczewka wypukła, wykonana z metamateriału o ujemnym współczynniku załamania, rozpraszałaby światło, wklęśła zaś skupiała, czyli na odwrót, niż w przypadku zwykłych soczewek.

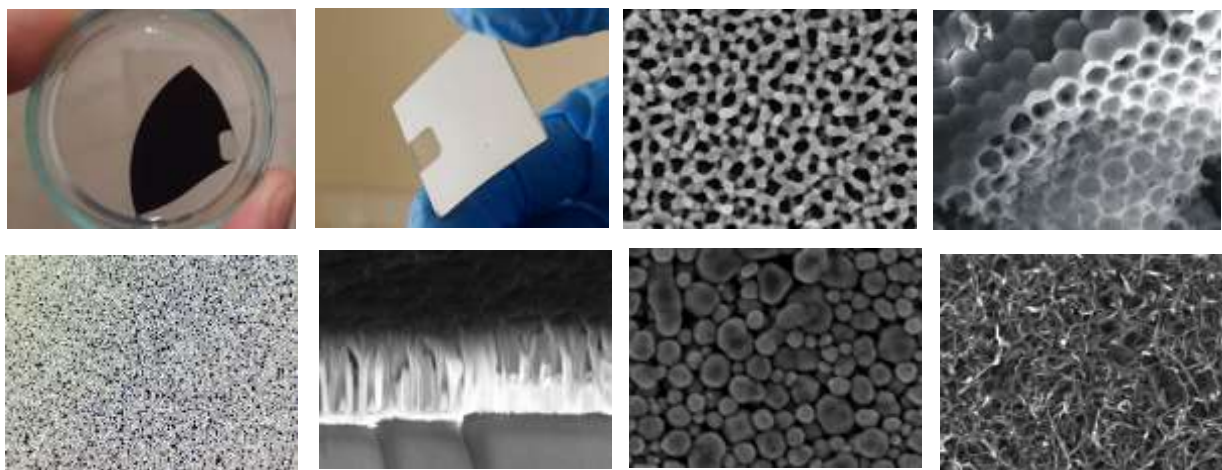
Wiktor Veselago wykazał, że jeśli przenikalność elektryczna ϵ i przenikalność magnetyczna μ są ujemne, to współczynnik załamania n także musi być ujemny. Ów ośrodek o ujemnym współczynniku załamania określany jest w literaturze naukowej jako tzw. materiał lewoskrętny. Nazwa odnosi się do tego, że pole elektryczne (E), natężenie magnetyczne (H) i wektor propagacji (k) są powiązane regułą lewej ręki. Ujemna wartość ϵ lub μ oznacza również, że elektrony, które są wewnątrz ośrodka, poruszają się w przeciwną stronę, niż zwrot działającej na nie siły wytworzonej przez pole elektryczne i magnetyczne. Oczywiście wszystkie znane i badane w czasach Veselago materiały pochodzenia naturalnego charakteryzowały się dodatnim współczynnikiem przenikalności, a zatem dodatnim współczynnikiem załamania. Wydawało się więc, skądinąd słusznie, że materiały o ujemnym współczynniku załamania nie mogą naturalnie występować w przyrodzie.

Dopiero pod koniec lat 90. XX i w pierwszej dekadzie XXI wieku anglosascy fizycy John Pendry i David Smith wrócili do idei Wiktora Veselago i z sukcesem przekuli teorię w praktykę, demonstrując sposób wykonania lewoskrętnego metamateriału. W roku 1998 skonstruowali oni materiał, który posiadał ujemną wartość przenikalności elektrycznej, przy czym pozwalał na transmisję fal elektromagnetycznych dla zakresu mikrofal. Miał on postać trójwymiarowej sieci cienkich drutów wolframowych, która wykazywały cechy podobne do plazmy o małej gęstości. Rok później ta sama grupa przedstawiła koncepcję struktury z ujemną przenikalnością magnetyczną, która zbudowana była z cienkich arkuszy metalu, uformowanych w kształt zawijającego się walca (ang. swiss rolls). Oświetlenie struktury falą elektromagnetyczną powodowało wzbudzenie

prądów w układzie i sprawiało, że każdy cylinder działał jak obwód rezonansowy dla wybranej z góry długości fali. W efekcie generowane było pole magnetyczne prostopadłe do pola magnetycznego fali, a cała struktura efektywnie zachowywała się jak materiał o ujemnej wartości przenikalności magnetycznej. Stąd był już tylko krok do materiału o ujemnym współczynniku załamania światła i demonstracji obrazowania z wykorzystaniem metamateriałów lewoskrętnych. Po sukcesach Pendry'ego i Smitha prace nad uzyskaniem i wykorzystaniem metamateriałów o ujemnej wartości współczynnika załamania były kontynuowane i rozwijane przez kolejne grupy naukowców z całego świata.

Badania nad metamateriałami są interdyscyplinarne i obejmują szereg dziedzin nauki, takich jak nanooptyka, plazmonika, inżynieria materiałowa, fotonika czy optoelektronika. Ponieważ idea metamateriałów może być wykorzystana nie tylko do modyfikowania elektromagnetycznych właściwości materiałów, ale również elastycznych czy akustycznych, znajdują one szerokie zastosowanie w takich obszarach jak filtry optyczne, elementy obrazujące, absorbery, komunikacja, konwertery polaryzacji, urządzenia medyczne, czujniki, systemy pozyskiwania energii słonecznej, a nawet mogą być wykorzystane do ekranowania budynków przed trzęsieniami ziemi.

W Instytucie Geofizyki FUW Tomasz Stefaniuk wraz z zespołem prowadzi intensywne badania nad nanostrukturyzowanymi optycznymi materiałami funkcjonalnymi, które wpisują się w przedstawiony wyżej nurt badań nad metamateriałami. Zespół zajmuje się zarówno modelowaniem komputerowym, jak i wytwarzaniem oraz charakteryzacją nanostruktur. Współpracuje ściśle z grupą badawczą Piotra Wróbla, zajmującą się projektowaniem, modelowaniem, wytwarzaniem oraz charakteryzacją nanostruktur plazmonicznych oraz rozwojem nowych technik wytwarzania i charakteryzacji tych nanostruktur do zastosowań m.in. w fotonice, fotowoltaice czy bioczujujach.



Rys. 1. Różnego rodzaju mikro i nano struktury opracowane w grupie badawczej
Materiały funkcjonalne

Najnowsze badania Tomasza Stefaniuka nad metamateriałami, w ramach projektu “Inteligentne materiały pasywne zdolne do grzania lub chłodzenia do temperatur odmiennych od otoczenia bez dodatkowego zasilania” mają doprowadzić do opracowania nowego typu materiału strukturalnego, którego charakterystyka emisyjności/absorpcyjności może być strojona, w zależności od bieżących potrzeb. Za tymi hasłami kryje się możliwość utrzymania lub zmiany temperatury danego obiektu, bez konieczności dostarczania energii elektrycznej, a jedynie wykorzystując naturalnie występujące przepływy ciepła. Co istotne, odpowiednio zaprojektowany

metamateriał mógłby nawet osiągać temperatury niższe od otoczenia, dając możliwość chłodzenia bez dodatkowych nakładów energii. W sposób znaczący mogłoby to przyczynić się do redukcji emisyjności CO₂ ze spalania paliw kopalnych, a nawet do osiągnięcia zeroemisyjności, co jest niezwykle istotne, w obliczu współczesnych wyzwań klimatycznych i cywilizacyjnych.

Aby dokładniej wytłumaczyć założenia projektu, należy zacząć od wyjaśnienia podstawowych zagadnień związanych z transferem ciepła. Choć istnieją naturalne procesy pozwalające na regulację temperatury, to z uwagi na fakt, że przepływ ciepła zawsze odbywa się od ciała o temperaturze wyższej do ciała o temperaturze niższej, schłodzenie obiektu do temperatur poniżej temperatury odbiornika ciepła wymaga nakładu energii i wykorzystania specjalnego układu, np. z wykorzystującego sprężarkę powietrza. Istnieje jednak idealny odbiornik ciepła, który ma temperaturę bliską -270C i praktycznie nieskończoną pojemność cieplną. To przestrzeń kosmiczna. Żeby jednak wykorzystać jej potencjał, transport ciepła pomiędzy chłodzonym obiektem a przestrzenią kosmiczną musiałby odbywać się przez promieniowanie cieplne (radiacyjnie), emitowane w zakresie długości fal dla których ziemską atmosferę jest przezroczysta (m.in. pasmo 8-13 μm). Jednocześnie, aby urządzenie chłodziło również w dzień, jego własności optyczne w zakresie widzialnym powinny być tak zaprojektowane, aby bezpośrednie promieniowanie słoneczne nie powodowało jego nagrzewania. Choć równoczesne spełnienie wszystkich powyższych warunków wydawało się do tej pory nieosiągalne, to dzięki postępowi, jaki dokonał się w naukach materiałowych, a zwłaszcza udoskonaleniu procesów nano i micro strukturyzacji, możliwe było wykonanie pierwszych prototypów takich urządzeń. Wykazano, że bez żadnych nakładów energetycznych i przy największym bezpośrednim nasłonecznieniu można uzyskać temperatury do kilkudziesięciu stopni niższe od temperatury otoczenia.

Projekt badawczy dr. Tomasza Stefaniuka odnosi się bezpośrednio do powyższych wyników, ale również idzie o krok dalej. Dzięki zaproponowanej możliwości strojenia charakterystyki emisyjności/absorpcyjności materiału, możliwe będzie dostosowanie jego własności do aktualnego zapotrzebowania. Przykładowo zimą kluczowym problemem nie jest chłodzenie, lecz ogrzewanie obiektów. Zatem idealnym rozwiązaniem byłby materiał, którego tryby pracy można byłoby płynnie zmieniać pod wpływem zewnętrznego bodźca. Czyli latem ustrukturyzowany metamateriał działałby jako pasywne urządzenie do chłodzenia radiacyjnego, które w warunkach bezpośredniego nasłonecznienia jest zdolne do osiągania temperatur poniżej otoczenia, nie wymagając przy tym źródła zasilania. Zimą zaś ten sam metamateriał zbierałby energię słoneczną, aby ogrzać obiekt do temperatur wyższych od otoczenia, jednocześnie minimalizując straty ciepła.

Wykonany w ramach projektu materiał strukturalny będzie różnił się od obecnie stosowanych urządzeń do chłodzenia radiacyjnego nie tylko liczbą dostępnych funkcji, ale także geometrią, materiałami konstrukcyjnymi i mechanizmem przełączania. Planowane w projekcie prace numeryczne pozwolą zwiększyć zrozumienie mechanizmu sprzężenia pomiędzy właściwościami optycznymi, termicznymi i mechanicznymi. Z kolei prace eksperymentalne dostarczą wiedzy na temat zależnych od temperatury stałych optycznych powszechnie stosowanych polimerów i innych związków. Udana realizacja tego projektu mogłaby doprowadzić do rozwoju nowej generacji inteligentnych systemów zarządzania bilansem termicznym.

Konsultacja naukowa:
dr Tomasz Stefaniuk

Referencje:

https://www.youtube.com/watch?v=sR-B_F_pk8A
http://fizyka.net.pl/aktualnosci/aktualnosci_no6.html
<https://naukawpolsce.pl/aktualnosci/news%2C87045%2Cmetamaterialy-znajduja-coraz-wiecej-zastosowan.html>
https://www.fuw.edu.pl/~szczytko/NT/Sprawozdania2007/Ula_Laudyn_Metamaterialy_na_niew_idzialnosc.pdf
<https://www.fuw.edu.pl/~rosiek/proseminarium/makuta-metamaterialy.pdf>
<https://www.igf.fuw.edu.pl/pl/projects/research-groups/materialy-funkcjonalne/>
<https://www.igf.fuw.edu.pl/pl/projects/research-groups/plazmonika/>

Publikacje:

V. G. Veselago, "The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of epsilon and mu", Soviet Phys. Usp. 10, 509-514 (1968)
J. B. Pendry, D. R. Smith, "Reversing light: Negative refraction", Phys. Today, (2003)
D. R. Smith, J. B. Pendry, M. C. K. Wiltshire, "Metamaterials and negative refractive index," Science, 305, 788 – 792 (2004)
J. B. Pendry, "Negative refraction", Contemporary Phys., 45, 191-202 (2004)
J. B. Pendry, "Manipulating the near field with metamaterials", Opt.&Phot. News, (2004)