

jak fonemy w ludzkim języku – czyli podstawowe elementy dźwiękowe, z których składają się bardziej złożone komunikaty. Badania wskazują, że kaszaloty używają różnych sekwencji dźwięków w kontekstach społecznych, co sugeruje, że ich system komunikacji ma cechy podobne do języka. Dzięki hipotezie, że percepcja walenia jest inna niż ludzka, uznano, że przerwy w dźwiękach, w ramach konkretnych kodów, uniemożliwiają nam „usłyszenie” tego, co odbierają wieloryby. Badacze wycięli zatem przerwy między kliknięciami i powstały dźwięki przypominające nasze samogłoski „a” oraz „i”. W takiej „przyspieszonej” formie sygnał nadawany przez kaszalota można spisywać ze słuchu, bowiem zmienia się z szeregu kliknięć w ciąg wyraźnie odróżnialnych głosek.

W ramach badań CETI 8 lipca 2023 roku o godzinie 9:30 płynący w łodzi badacze zauważyli zgromadzenie 11 wielorybów z grupy zwanej „Unit A”. Grupa ta wywodzi się z dwóch linii. Osobniki obu klanów przez dłuższy czas znajdowały się w jednym skupisku, co u niespokrewnionych ze sobą blisko zwierząt jest nietypowe. Zwykle poruszają się i polują oddzielnie, rzadko wchodząc w fizyczny kontakt. Po upływie półtorej godziny w wodzie pojawiła się krew i pokazał się ogon rodzącego się właśnie kaszalota. To krytyczny moment, osesek ma ujemną pływerność, lecz nie ma umiejętności pływania, jego płetwa ogonowa nie jest w pełni rozprostowana. Po trwającym 34 minuty porodzie, natychmiast po uwolnieniu oseska z dróg rodnych matki, zwierzęta grupowo stworzyły platformę z własnych ciał i wypchnęły nowonarodzonego na powierzchnię, aby mógł wziąć pierwszy oddech. Przez kolejne 3 godziny zachowanie grupy było nagrywane przez dwa drony.

Badacze mieli ogromne szczęście. Ostatni opis Porodu kaszalotów pochodzi z roku 1986. Teraz całość została

dokładnie zarejestrowana, a dane posłużyły za materiał do analizy przez sztuczną inteligencję. Naukowcy zidentyfikowali imiennie osobniki i określili orientację ich ciał. Nowonarodzonego utrzymywały na powierzchni przede wszystkim cztery samice, z czego dwie to matka i ciotka, ale dwie pochodziły z innej linii. Pozostałe zwierzęta stanowiły wsparcie, wchodząc niekiedy w rolę podtrzymujących, zapewniały także bezpieczeństwo młodych z grupy i monitorowanie otoczenia. Przez długą część wydarzenia w bliskiej okolicy znajdował się także spokrewniony z jedną z linii samiec. Tak grupa, ściśle współpracując przez kilka godzin, przyjęła na świat nowego członka społeczności.

To pierwszy tak dokładnie opisany przypadek narodzin u wielorybów. Jednocześnie zarejestrowano wszystkie głosy wydawane przez zwierzęta. Analiza dźwięków wykazała częste używanie kodów, które służą identyfikacji kaszalotów z tego rejonu świata, towarzyszących zabiegom pielęgnacyjnym, służącym tworzeniu i utrwalaniu więzi społecznych oraz sygnałów typowych dla tej konkretnie grupy A kaszalotów.

Kiedy czytam o odkrywaniu tajemnic wielkich, inteligentnych istot zamieszkujących głębin oceanów, wzruszam się. I czuję ulgę, że nie tylko zabijamy – ale wciąż jakaś lepsza część człowieczeństwa szuka dróg porozumienia, także z istotami innego gatunku. Tylko co my im powiemy, kiedy w końcu nauczymy się ich mowy?

Marta FIKUS-KRYŃSKA

Korzystałam z:

Alaa Maalouf i wsp. Cooperation by non-kin during birth underpins sperm whale social complexity. Science (2026) DOI: 10.1126/science.ady9280

Yaniv Aluma i wsp. Description of a collaborative sperm whale birth and shifts in coda vocal styles during key events. Scientific Reports (2026).DOI: 10.1038/s41598-025-27438-3

Metamateriały – od pomysłu do pierwszych realizacji

* Wydział Nowych Technologii i Chemii,
Wojskowa Akademia Techniczna

*Paweł PERKOWSKI**

W dwóch poprzednich artykułach (Δ_{23}^6 i Δ_{23}^{10}) pokazaliśmy, że w określonych warunkach (odpowiednia pulsacja pola pomiarowego ω) możemy zmierzyć ujemną przenikalność elektryczną materiału wypełniającego kondensator (Δ_{23}^6) lub ujemną przenikalność magnetyczną materiału wypełniającego solenoid (Δ_{23}^{10}), mimo że w rzeczywistości wartości obu przenikalności są dodatnie. Ujemne wartości obu przenikalności nie są więc rezultatem fizycznych właściwości badanego materiału, lecz wynikają ze szczególnego „opakowania”, w którym znajduje się badany materiał. Efekt ten występuje, gdy wypełnionemu badanym materiałem kondensatorowi towarzyszy indukcyjność, którą określiliśmy jako „pasożytnicza”, lub gdy wypełnionej badanym materiałem cewce towarzyszy analogiczna pojemność pasożytnicza. Wobec istnienia w badanym układzie jednocześnie cewki i kondensatora układ może znaleźć się w rezonansie.

Pojawienie się rezonansu w tych układach prowadzi do tego, że przy zmianie pulsacji sygnału mierzonego w pobliżu pulsacji rezonansowej obwód będzie zmieniał swój charakter z pojemnościowego na indukcyjny i vice versa.



Ideowo ten przypadek jest podobny do zjawiska rezonansu prądów i rezonansu napięć w obwodach LC .

Z analizy przeprowadzonej w artykułach Δ_{23}^6 i Δ_{23}^{10} wiemy, że w szeregowym połączeniu cewki i kondensatora dla niskich pulsacji ω (niskiej częstości zmian napięcia na źródle) obwód taki zachowuje się jak pojemność (napięcie odkłada się głównie na kondensatorze). Czyli jeżeli będziemy nasz obwód analizować przez pryzmat jego właściwości pojemnościowych, to w wyniku pomiaru dostaniemy dodatnią wartość przenikalności elektrycznej materiału umieszczonego w kondensatorze. Dla wysokich pulsacji wymuszenia obwód ma charakter indukcyjny (napięcie odkłada się głównie na cewce). Wówczas w standardowym pomiarze otrzymalibyśmy ujemną wartość przenikalności elektrycznej materiału umieszczonego w kondensatorze (Δ_{23}^6). Podobną sytuację możemy zaobserwować w połączeniu równoległym kondensatora i cewki. Dla niskich pulsacji ω obwód ma charakter indukcyjny (prąd płynie głównie przez cewkę). Czyli próba wyznaczenia przenikalności magnetycznej materiału umieszczonego w cewce da nam wartość dodatnią. Natomiast dla wysokich pulsacji wymuszenia obwód ma charakter pojemnościowy (prąd płynie głównie przez pojemność). Wówczas w standardowym pomiarze otrzymalibyśmy ujemną wartość przenikalności magnetycznej materiału umieszczonego w cewce (Δ_{23}^{10}).

Przypadki analizowane w obu artykułach (Δ_{23}^6 i Δ_{23}^{10}) dotyczą ujemnych wartości przenikalności elektrycznej lub magnetycznej zmierzonych w elementach dyskretnych. Powstaje zatem pytanie: Czy w naturze występują materiały, które wykazywałyby ujemne wartości obu lub jednej przenikalności dla fali elektromagnetycznej przechodzącej przez te materiały? Generalnie odpowiedź brzmi: „nie”, ale jest jeden wyjątek związany nierozzerwalnie z obecnością elektronów swobodnych w metalach. Metale w okolicy tzw. pulsacji plazmowej ω_p (leży ona w nadfiolecie) zmieniają znak przenikalności elektrycznej. Jest to pulsacja oscylacji własnych gazów elektronów swobodnych. Poniżej tej częstotliwości ($\omega < \omega_p$) elektrony swobodne nadążają (bez zwłoki) za oscylacjami pola elektrycznego (składowej fali elektromagnetycznej). W wyniku tego nadążania metale odbijają idealnie światło. W tym przypadku metale mają bardzo dużą dodatnią przenikalność elektryczną. Powyżej pulsacji plazmowej ($\omega > \omega_p$) elektrony swobodne nie nadążają za zmianami pola elektrycznego w fali elektromagnetycznej. W efekcie metale w nadfiolecie przestają odbijać fale elektromagnetyczne.

Pulsacja jest nazywana również częstością kolową. Pulsacja plazmowa to naturalna częstość, z jaką elektrony w plazmie zaczynają wspólnie oscylować wokół swojego położenia równowagi, gdy zostaną lekko przesunięte względem dodatnio naładowanych jonów.

W tym miejscu należy podkreślić, że poza metalami powyżej pulsacji plazmowej nie stwierdzono w przyrodzie występowania materiałów, które mogłyby się charakteryzować ujemnymi przenikalnościami: elektryczną i/lub magnetyczną.

Wiktor Wiesiełago [A] pod koniec lat 60. XX wieku zaproponował stworzenie materiału posiadającego ujemne przenikalności, choć lepiej może należałoby mówić „struktury”, która będzie miała w sobie w sposób sztuczny stworzone i rozmieszczone elementy mogące spełniać rolę cewek, kondensatorów i elementów przewodzących. Te struktury byłyby rozmieszczone periodycznie w jakiejś osnowie i oddziaływałyby z falami elektromagnetycznymi o różnych pulsacjach. Dla szczególnych pulsacji fala elektromagnetyczna mogłaby wywoływać w strukturach rozmieszczonych

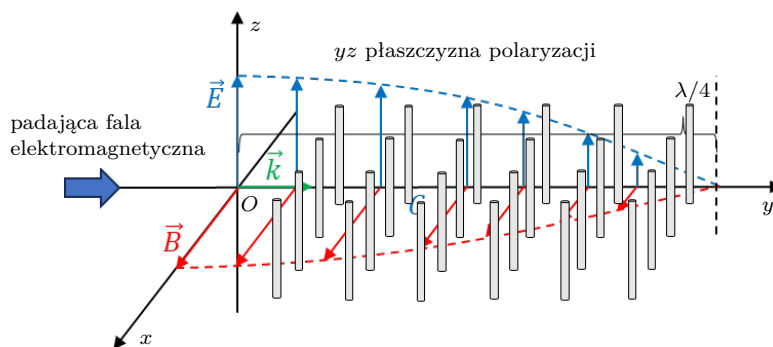
w tym materiale rezonanse doprowadzające do rejestracji ujemnych przenikalności. Materiały o takich własnościach nazwano *metamateriałami*.

Choć dzisiaj wiemy o różnych typach metamateriałów i metapowierzchni, skupimy się dalej na pierwotnym pomysśle Wiktora Wiesiełago. O metamateriałach mówilibyśmy być może jako o ciekawostce naukowej, gdyby nie fizyczne realizacje tych materiałów. W tym kontekście wymienić należy prace:

- Johna Pendry’ego i współpracowników (1996) o możliwości stworzenia materiałów/struktur wykazujących ujemną przenikalność elektryczną [B],
- Johna Pendry’ego i współpracowników (1999) o możliwości stworzenia materiałów/struktur wykazujących ujemną przenikalność magnetyczną [C],
- Davida Smitha i współpracowników (2000) o możliwości realizacji materiałów/struktur wykazujących jednocześnie ujemne przenikalności: elektryczną i magnetyczną [D].

Tego typu materiały właściwiej jest nazywać materiałami hybrydowymi, ponieważ składają się z osnowy dielektrycznej (osnową może być także próżnia/powietrze) i struktury periodycznej. W przypadku struktury dyskretnych źródeł energii (dla zakresu radiowego) jest zmienne napięcie (pole elektryczne) ze źródła zasilania, o czym można przeczytać w Δ_{23}^6 i Δ_{23}^{10} . Gdy materiał hybrydowy (metamateriał) oświetlimy falą elektromagnetyczną, to na zachowanie tych struktur powinny wpływać obie składowe tej fali (pola elektryczne oraz magnetyczne). Okazuje się, że gdy w przestrzeni odpowiednio (w zależności od polaryzacji fali elektromagnetycznej) umieścimy obwody składające się z elementu pojemnościowego, elementu indukcyjnego oraz elementu przewodzącego (specjalnie nie piszemy tu „kondensatora” ani „cewki”, bo to są struktury, które na pierwszy rzut oka nie wyglądają jak zwykły kondensator czy cewka), wówczas fala elektromagnetyczna będzie oddziaływała z tymi strukturami. W tym kontekście metamateriały są z definicji anizotropowe dla fali elektromagnetycznej, ponieważ oddziaływanie zależy od polaryzacji fali.

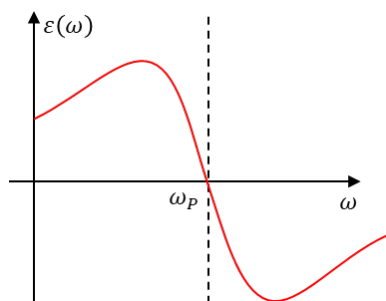
Możemy podejrzewać, że, jak to opisano w Δ_{23}^6 i Δ_{23}^{10} , uzyskanie efektywnej ujemnej przenikalności elektrycznej oraz magnetycznej wymaga zastosowania dwóch różnych struktur. Jedną byłaby odpowiedzialna za ujemną przenikalność elektryczną, a drugą za ujemną przenikalność magnetyczną. Ponadto z punktu widzenia fali elektromagnetycznej ośrodek taki powinien być ciągły i jednorodny. W przypadku klasycznego materiału atomy czy cząsteczki budujące ten ośrodek są małe w stosunku do długości fali światła, które przechodzi przez ośrodek – więc ośrodek jest dla tego światła ciągły. W przypadku metamateriałów elementy budujące ten ośrodek oraz okres ich powtarzalności muszą być również małe w stosunku do długości oddziałującej z nimi fali – tak żeby fala odczuwała ten ośrodek jako ciągły.



Rys. 1. Płaska fala elektromagnetyczna rozchodzi się wzdłuż osi Oy i jest scharakteryzowana wektorem falowym $\vec{k}$. Drgania pola elektrycznego $\vec{E}$ zachodzą wzdłuż osi Oz . Kierunek wektora pola magnetycznego $\vec{B}$ jest równoległy do osi Ox . Powtarzające się pręciki metalowe są równoległe do pola elektrycznego. Długość fali propagującej się jest wyraźnie większa od rozmiaru elementu ($a \ll \lambda$), przez który przechodzi i z którym oddziałuje

Struktura pierwsza musi korzystać z pola elektrycznego, wpływając na efektywnie obserwowaną ujemną przenikalność elektryczną. Pendry wiedział, że metale mają bardzo dużą przenikalność elektryczną i powyżej pulsacji plazmowej zmieniają znak przenikalności elektrycznej na ujemny. Zaproponował w 1996 roku strukturę [B], którą można by było określić „rozrzedzonym metalem”. Składa się ona (rys. 1) z pręcików metalicznych o średnicy d rozmieszczonych regularnie na kwadratowej sieci o stałej a . W ten sposób zyskał dwa efekty: obniżył wyraźnie wartość przenikalności elektrycznej (w stosunku do ciągłego metalu)

oraz obniżył pulsację plazmową do zakresu mikrofalowego (z nadfioletu). Ponieważ, jak pamiętamy, długości λ fali elektromagnetycznej z zakresu mikrofalowego są rzędu centymetrów, więc nietrudno było stworzyć takie powtarzające się struktury o wymiarach około jednego centymetra (w [B] przyjęto $a \approx 0,5$ cm). Został więc spełniony warunek $a \ll \lambda$. Poprzez dobór wymiarów (a i d) tej struktury Pendry mógł w pewnym zakresie stroić pulsację plazmową ω_P (pulsację inwersji znaku przenikalności elektrycznej) oraz wartość (amplitudę) przenikalności elektrycznej ε .

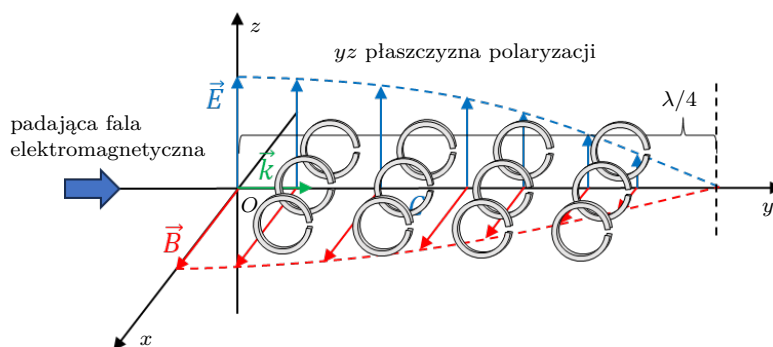


Rys. 2. Efektywna przenikalność elektryczna ε struktury pręcikowej w funkcji pulsacji fali elektromagnetycznej. ω_P to pulsacja inwersji znaku przenikalności elektrycznej

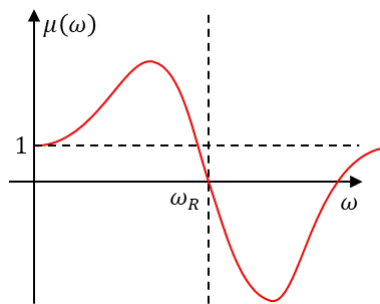
Pendry otrzymał materiał hybrydowy, którego przenikalność elektryczna ε zmieniała się w funkcji pulsacji ω , jak na rysunku 2.

Zauważmy, że struktura zaproponowana w [B] nie wpływa na pole magnetyczne, ponieważ indukcja pola magnetycznego $\vec{B}$ (w fali elektromagnetycznej) jest prostopadła do pręcików. Stąd zaproponowana struktura „rozrzedzonego metalu” nie prowadzi do efektywnej ujemnej przenikalności magnetycznej. Aby uzyskać oddziaływanie pola magnetycznego fali elektromagnetycznej ze strukturą metamateriału, Pendry w 1999 roku zaproponował nową strukturę. Składa się ona z rezonatorów w postaci rozciętych obwodów kołowych prostopadłych do pola magnetycznego (rys. 3).

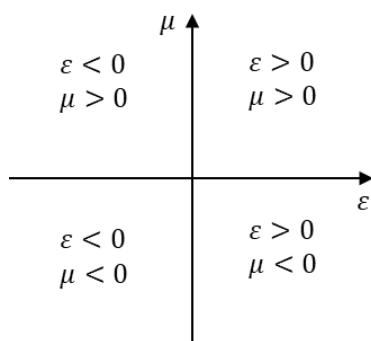
W rzeczywistości w pracy Pendry’ego [C] to nie były przecięte pierścienie, lecz przecięte walce przewodzące, ale dla wygody możemy je sprowadzić do przeciętych obwodów kołowych. Dzięki takiemu rozwiązaniu element indukcyjny (pierścienie) może czerpać energię ze zmiennego pola magnetycznego (wykorzystując prawo indukcji Faradaya). Przecięcie tego obwodu utworzyło zaimprovizowany kondensator. Połączenie obwodu kołowego z kondensatorem



Rys. 3. Płaska fala elektromagnetyczna rozchodzi się wzdłuż osi Oy i jest opisana wektorem falowym $\vec{k}$. Kierunek drgań wektora pola magnetycznego $\vec{B}$ jest zgodny z osią Ox . Wektor pola elektrycznego $\vec{E}$ jest równoległy do osi Oz . Powierzchnie elementów indukcyjnych są prostopadłe do osi Ox . Długość fali λ propagującej się jest wyraźnie większa od elementu ($a, b \ll \lambda$), przez który przechodzi i z którym oddziałuje



Rys. 4. Efektywna przenikalność magnetyczna μ struktury przeciętych obwodów kołowych w funkcji pulsacji fali elektromagnetycznej. ω_R to pulsacja inwersji znaku przenikalności magnetycznej



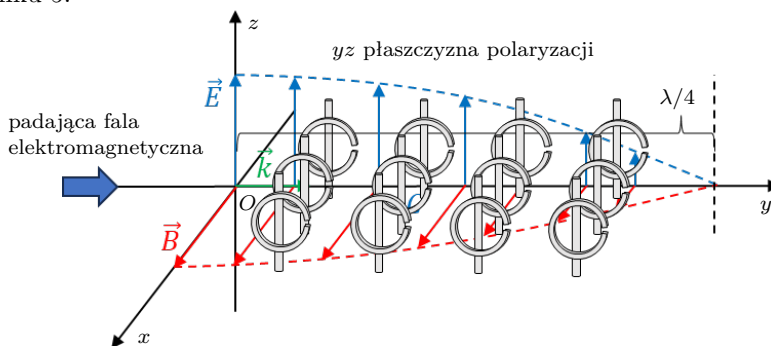
Rys. 6. Podział materiałów ze względu na wartości obu przenikalności. Jeżeli tak dobierzemy parametry struktur, że $\omega_R < \omega_P$, to dla niskich pulsacji ($\omega < \omega_R$) metamateriał zaproponowany przez Smitha będzie charakteryzował się zestawem dodatnich przenikalności $\epsilon > 0$ i $\mu > 0$, dla średnich pulsacji ($\omega_R < \omega < \omega_P$) $\epsilon > 0$ i $\mu < 0$, a dla wysokich pulsacji ($\omega > \omega_P$) ($\epsilon < 0$ i $\mu < 0$). Jeżeli parametry struktur dobierzemy tak, że $\omega_P < \omega_R$, to dla niskich pulsacji ($\omega < \omega_P$) metamateriał Smitha będzie charakteryzował się zestawem dodatnich przenikalności $\epsilon > 0$ i $\mu > 0$, dla średnich pulsacji ($\omega_P < \omega < \omega_R$) $\epsilon < 0$ i $\mu > 0$, a dla wysokich pulsacji ($\omega > \omega_R$) obie przenikalności będą ujemne ($\epsilon < 0$ i $\mu < 0$).

Autor dziękuje profesorowi Januszowi Parce za dyskusje nad tematyką artykułu.

stanowi obwód rezonansowy. Taki rezonator charakteryzuje się pulsacją rezonansową ω_R . Na właściwości rezonansowe wpływ mają rozmiary struktury, a przede wszystkim średnica obwodów d , szerokość przecięcia a pierścienia, a także odległości b pomiędzy pierścieniami. Pole magnetyczne fali elektromagnetycznej oddziałuje z układem rezonansowym tak, że dla niskich pulsacji (poniżej ω_R) daje przenikalność magnetyczną dodatnią, a dla wysokich pulsacji (powyżej ω_R) daje przenikalność początkowo ujemną, a potem dodatnią, ale mniejszą od jeden (rys. 4).

Zauważmy, że struktura zaproponowana w [C] nie wpływa na pole elektryczne, stąd ta struktura nie prowadzi do ujemnych wartości efektywnej przenikalności elektrycznej.

Rok po publikacji Pendry'ego ukazała się publikacja Smitha [D] łącząca w jednym materiale obie struktury. Taki metamateriał jest przedstawiony na rysunku 5.



Rys. 5. Płaska fala elektromagnetyczna rozchodzi się wzdłuż osi Oy i jest opisana wektorem falowym $\vec{k}$. Kierunek drgań wektora pola magnetycznego $\vec{B}$ jest zgodny z osią Ox i prostopadły do powierzchni elementów indukcyjnych. Wektor pola elektrycznego $\vec{E}$ jest równoległy do osi Oz i równoległy do pręcików, w których ma wywołać prądy przepolaryzowania. Długość fali λ propagującej się jest wyraźnie większa od rozmiarów elementów w obu strukturach, przez które przechodzi i z którymi oddziałuje

Obie podstruktury (osobno pręciki i osobno przerwane pierścienie) są od siebie niezależne. Możemy niezależnie zmieniać ich wymiary i w rezultacie stroić pulsacje: plazmową (ω_P) i rezonansową (ω_R). Poprzez odpowiedni dobór wymiarów obu struktur możemy więc otrzymać różne znaki obu przenikalności. Potencjalne kombinacje przenikalności w materiałach przedstawia rysunek 6. W pierwszej ćwiartce znajdują się materiały, rzec by można, „klasyczne”, dla których obie przenikalności są dodatnie. Te materiały (gdy założymy, że nie pochłaniają światła) są przezroczyste (współczynnik załamania jest rzeczywisty i dodatni). W drugiej ćwiartce są materiały metaliczne – powyżej pulsacji plazmowej oraz metamateriały zawierające rezonatory z przerwanymi pierścieniami – też powyżej pulsacji rezonansowej. Tego typu metamateriały nie są przezroczyste (współczynnik załamania jest urojony). W trzeciej ćwiartce są metamateriały, które charakteryzują się ujemnymi wartościami obu przenikalności. Ich struktura wymaga obecności zarówno struktur pierścieniowych, jak i pręcikowych. Te metamateriały są przezroczyste, ale różnią się od tych z ćwiartki pierwszej. Różnica tkwi we współczynniku załamania: współczynnik załamania jest rzeczywisty i ujemny. Natomiast w czwartej ćwiartce umieszczone są metamateriały o dodatniej przenikalności elektrycznej i ujemnej przenikalności magnetycznej. Tego typu metamateriały nie są przezroczyste (współczynnik załamania jest urojony).

Literatura:

- [A] V.G. Veselago, „The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of epsilon and mu”, Sov. Phys. Usp. **10**, 509–18 (1968).
- [B] J.B. Pendry, A.J. Holden, W.J. Stewart, I. Youngs, „Extremely Low Frequency Plasmons in Metallic Mesostructures”, Phys. Rev. Lett. **76**, 4773 (1996).
- [C] J.B. Pendry, A.J. Holden, D.J. Robbins, W.J. Stewart, „Magnetism from Conductors and Enhanced Nonlinear Phenomena”, IEEE Trans. Microw. Theory Tech. **47** 2075–84 (1999).
- [D] D.R. Smith, W.J. Padilla, D.C. Vier, S.C. Nemat-Nasser, S. Schultz, „Composite Medium with Simultaneously Negative Permeability and Permittivity”, Phys. Rev. Lett. **84**, 4184 (2000).