

**Uniwersytet Warszawski**

---

Wydział Fizyki

ZAKŁAD OPTYKI INFORMACYJNEJ



**PRACA DOKTORSKA**

**MARCIN STOLAREK**

**FOTNONIKA, PLAZMONIKA MEEP**

PROMOTOR:

dr hab. Rafał Kotyński

Warszawa2014



## **OŚWIADCZENIE AUTORA PRACY**

OŚWIADCZAM, ŚWIADOMY ODPOWIEDZIALNOŚCI KARNEJ ZA POŚWIADCZENIE NIEPRAWDY, ŻE NINIEJSZĄ PRACĘ DYPLOMOWĄ WYKONAŁEM OSOBIŚCIE I SAMODZIELNIE, I NIE KORZYSTAŁEM ZE ŹRÓDEŁ INNYCH NIŻ WYMIENIONE W PRACY.

.....

PODPIS

**University of Warsaw**

---

Faculty of Physics

INFORMATION OPTICS DEPARTMENT



**PHD IN PHISICS**

**MARCIN STOLAREK**

**FOTONICS, PLASMONICS MEEP**

SUPERVISOR:

Rafał Kotyński Ph.D

Warsaw 2014

Serdecznie dziękuję ...

## Spis treści

<b>1. Wstęp</b> .....	6
1.1. State of the art.....	7
1.2. Cele i tezy pracy .....	7
1.3. Podział pracy .....	7
<b>2. Modelowanie własności podfaliowych struktur fotonicznych</b> .....	8
2.1. Metody numeryczne .....	9
2.1.1. Metody macierzowe .....	9
2.1.2. FDTD .....	9
2.2. Modele materiałowe .....	9
2.3. Model efektywny .....	9
<b>3. Siatki metalowe do kształtowania fali elektromagnetycznej w THz</b> ....	11
3.1. Wprowadzenie .....	12
3.2. Antena THz - siatka dyfrakcyjna + podkład.....	12
3.3. Transmisja jedno kierunkowa.....	15
3.4. Soczewka dyfrakcyjna z transmisją jedno kierunkową .....	15
<b>4. PML</b> .....	17
4.1. Wprowadzenie .....	18
4.2. PML ze struktury warstwowej.....	18
4.3. core shell pml?.....	18
<b>5. Bezdyfrakcyjna propagacja światła w wielowarstwach metaliczno-dielektrycznych</b> .....	20

---

5.1. Podstawowe pojęcia Optyki Foruierowskiej .....	22
5.2. Własności materiałowe w zakresie widzialnym .....	22
5.2.1. Model Lorenza-Drudego.....	23
5.3. Wielowarstwy z bezdyfrkacyjną propagacją światła .....	23
5.4. Nadrozdzielczy pryzmat.....	23
5.5. Analiza chropowatości.....	23
5.6. Bardziej złożone struktury składane wielowarstw .....	23

## **1. Wstep**



## **1.1. State of the art**

## **1.2. Cele i tezy pracy**

## **1.3. Podział pracy**

## **2. Modelowanie własności podfalowych struktur fotonicznych**

## **2.1. Metody numeryczne**

### **2.1.1. Metody macierzowe**

### **2.1.2. FDTD**

Przykładowe rozwiązania: fala zanikająca, plazmon, fala propagująca?

## **2.2. Modele materiałowe**

## **2.3. Model efektywny**

## Bibliografia

- [Smith et al.(2000)] Smith, Padilla, Vier, Nemat-Nasser, and Schultz] D. R. Smith, Willie J. Padilla, D. C. Vier, S. C. Nemat-Nasser, and S. Schultz. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity. *Phys. Rev. Lett.*, 84:4184–4187, May 2000. doi: 10.1103/PhysRevLett.84.4184. URL <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.84.4184>.
- [Veselago(1968)] Victor Georgievich Veselago. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of  $\epsilon$  and  $\mu$ . *Physics-Uspekhi*, 10(4): 509–514, 1968.

### **3. Siatki metalowe do kształtowania fali elektromagnetycznej w THz**

## 3.1. Wprowadzenie

Własności materiałowe w zakresie THz  
Projekt "Detektor promieniowanie THz"  
Nadzwyczajna transmisja przez szczeliny

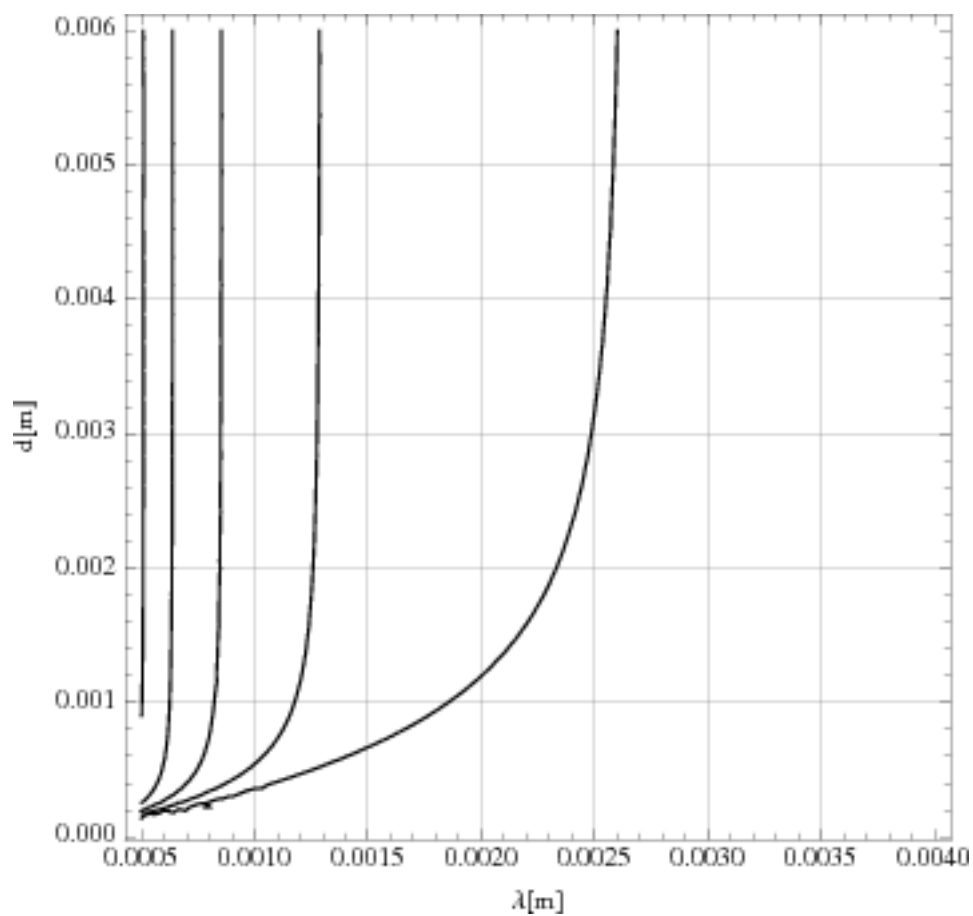
## 3.2. Antena THz - siatka dyfrakcyjna + podkład

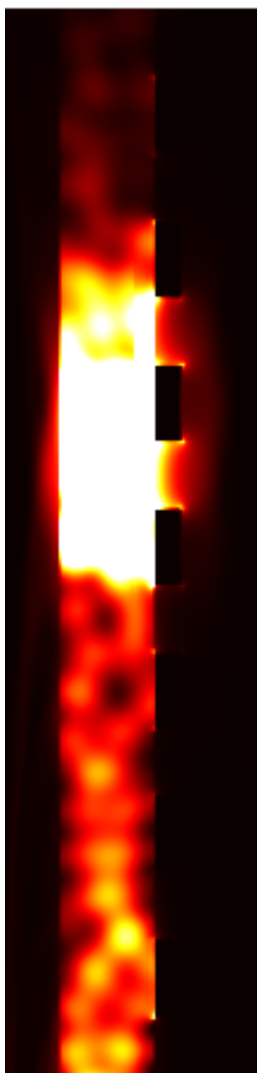
Bazując na pracach numerycznych na jednowymiarowych siatkach dyfrakcyjnych pozwalających na wzbudzenie modów falowodowych w podkładach z GaAs przeanalizowane zostało działanie analogicznych falowodów zbudowanych z siatek koncentrycznych.

Bazując na analitycznym rozwiązaniu problemu wzbudzania modów falowodowych w podkładzie dielektrycznym (przy założeniu nieskończonych wymiarów w kierunku propagacji wewnątrz falowodu) sporządzono wykres przedstawiający zależność okresu siatki pozwalającej na wzbudzenie modu falowodowego od długości fali w próżni promieniowania padającego na układ.

Wielosc galezi wynika z faktu, ze dla krotszych dlugosci fali rozpatrywany podklad ma charakter wielomodowy. Pojedyncze rozwiazanie powyzej dlugosci fali rownej 3mm, wskazuje nam poczatek zakresu jednomodowego.

Dla weryfikacji mozliwosci dzialania zaprojektowanych falowodow, przeprowadzono symulacje FDTD we wspolrzecznych cylindrycznych. Symulacje potwierdzily mozliwosc wykorzystanie powyzzszych siatek zarowno przy oswietleniu ukkladu polaryzacja radialna jak i liniowa. Ponizej przedstawiony rysunek opisuje sytuacje w ktorej struktura z GaAs o rozmiarach 10x10mm pokryta siatka dyfrakcyjna o okresie 538  $\mu\text{m}$  i otworach 250 $\mu\text{m}$  (wspolczynnik wypelnienia ok. 0.53) zostala oswietlona promieniowaniem o dlugosci fali 2.52 mm. W przypadku prezentowanej symulacji siatka miala grubosc 10 $\mu\text{m}$ , w kolejnych symulacjach potwierdzono jednak, ze grubosc siatki nie ma kluczowego zanczenia pod warunkiem zapewnienia nie przezroczystosci siatki. Efekt koncentracji pola przy zblizaniu sie







do srodka struktury wynika ze zmniejszania sie elementu objetosciowego wraz ze zblizeniem do osi symetrii.

### **3.3. Transmisja jedno kierunkowa**

### **3.4. Soczewka dyfrakcyjna z transmisją jedno kierunkową**

## Bibliografia

- [Smith et al.(2000)Smith, Padilla, Vier, Nemat-Nasser, and Schultz] D. R. Smith, Willie J. Padilla, D. C. Vier, S. C. Nemat-Nasser, and S. Schultz. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity. *Phys. Rev. Lett.*, 84:4184–4187, May 2000. doi: 10.1103/PhysRevLett.84.4184. URL <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.84.4184>.
- [Veselago(1968)] Victor Georgievich Veselago. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of  $\epsilon$  and  $\mu$ . *Physics-Uspekhi*, 10(4): 509–514, 1968.

## **4. PML**

## **4.1. Wprowadzenie**

Koncepcje PML

Zastosowania numeryczne i fizyczne

## **4.2. PML ze struktury warstwowej**

## **4.3. core shell pml?**

## Bibliografia

- [Smith et al.(2000)] Smith, Padilla, Vier, Nemat-Nasser, and Schultz] D. R. Smith, Willie J. Padilla, D. C. Vier, S. C. Nemat-Nasser, and S. Schultz. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity. *Phys. Rev. Lett.*, 84:4184–4187, May 2000. doi: 10.1103/PhysRevLett.84.4184. URL <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.84.4184>.
- [Veselago(1968)] Victor Georgievich Veselago. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of  $\epsilon$  and  $\mu$ . *Physics-Uspekhi*, 10(4): 509–514, 1968.

## **5. Bezdyfrakcyjna propagacja światła w wielo- warstwach metaliczno-dielektrycznych**

Każdy element układu optycznego możemy wyrazić jako układ filtrujący częstotliwość i częstotliwości przestrzenne oświetlającego ten układ źródła. Poniższy rozdział poświęcony jest modelowaniu działania wielowarstw metaliczno-dielektrycznych wykorzystywanych do budowy elementów optycznych o zaprojektowanych właściwościach filtrowania częstotliwości przestrzennych. W przeciwieństwie do przestrzeni swobodnej, będącej filtrem dolnoprzepustowym, mogą one charakteryzować się również transmisją wysokich częstotliwości przestrzennych, które w przestrzeni swobodnej mają charakter fal ewanescentnych. Wykorzystanie układów tego typu umożliwia konstrukcję elementów optycznych działających poza klasycznym ograniczeniem dyfrakcyjnym.

Złamanie ograniczenia dyfrakcyjnego możliwe jest dzięki zastosowaniu materiałów charakteryzujących się ujemnym załamaniem światła, rozumianym jako załamanie pod kątem skierowanym przeciwnie niż wynikałoby to z Prawa Snelliusa. Materiały takie w odniesieniu do przywołanej klasycznej formuły optyki geometrycznej muszą charakteryzować się ujemnym współczynnikiem załamania światła. Korzystając z elektrodynamiki klasycznej opisywanej równaniami Maxwella wiemy, że współczynnik załamania związany jest z przenikalnością elektryczną i magnetyczną ośrodka:  $n = \pm\sqrt{\epsilon\mu}$ . Wybór dodatniej gałęzi pierwiastka jest więc konwencjonalny i musi być dostosowany do sytuacji fizycznej. Ujemna wartość współczynnika załamania światła jest równoważna ze zmianą kierunku prędkości fazowej, której zwrot jest zgodny ze zwrotem wektora falowego. Pierwszą propozycją definicji ośrodków o ujemnym współczynniku załamania była ujemna wartość iloczynu skalarnego wektora Poyntinga i wektora falowego  $\vec{P} \cdot \vec{k} < 0$  podana przez Victora Vesselago [Veselago(1968)]. Ze względu na tę własność materiały takie nazywane są lewoskrętnymi (ang. left-handed) gdyż w stosunku do do iloczynu  $\vec{E} \times \vec{H}$  nie ma zastosowania reguła prawej dłoni, a przeciwna - lewej.

Materiały lewoskrętne muszą charakteryzować się ujemnymi wartościami  $\epsilon$  i  $\mu$  dla tego samego zakresu częstotliwości. Materiały takie nie były do tej pory obserwowane w przyrodzie, eksperymentalnie dowiedziono jednak możliwość sztucznego wytworzenia metamateriałów o takich właściwościach [Smith et al.(2000) Smith, Padilla, Vier, Nemat-Nasser, and Schultz] przy pomocy SSR(ang split-ring resonator).

Język używany do opisu działania analizowanych struktur warstwowych wywodzi się z Optyki Fourierowskiej w której podstawowym pojęciem są układy LSI (ang. Linear shift-invariant systems). Opisywane struktury spełniają warunki tego typu układów - nie wykazują własności nieliniowych, oraz są niezmiennicze ze względu na przesunięcia. Wykorzystanie formalizmu Optyki Fourierowskiej umożliwia analityczną ocenę wyników symulacji numerycznych, oraz wprowadza spójny zestaw pojęć wykorzystywanych do opisu rozważanych układów.

## 5.1. Podstawowe pojęcia Optyki Fourierowskiej

## 5.2. Własności materiałowe w zakresie widzialnym

Omawiane w niniejszym rozdziale zjawiska wykorzystują zakresy długości fali w których materiały charakteryzują się nietypowymi własnościami. Istnienie takich zakresów spektralnych wynika ze zjawiska dyspersji czasowej materiałów. Zjawisko dyspersji jest przejawem występowania ładunków elektrycznych w budowie materii. Cząstki posiadające ładunek elektryczny jak elektrony lub jony, wprowadzane są w drgania pod wpływem fali elektromagnetycznej. Przez co stają się one źródłem promieniowania elektromagnetycznego modyfikującego fale propagującą się w ośrodku. Ze względu na występowanie częstości własnych drgań cząstek ośrodka zjawiska dyspersyjne mają charakter rezonansowy.

Poniższy rozdział poświęcony jest analizie zjawisk w zakresie optycznym w którym podatność magnetyczna materiałów jest zanedbywalnie mała, w związku z czym przyjmuje się  $\mu(\omega) = \text{const}$ . Przenikalność elektryczna materiałów wykazuje jednak zmienność również dla widma optycznego. W stosunku do dielektryków z powodzeniem stosuje się model Lorenza-Lorenza, a wartość  $\varepsilon$  w prezentowanych zastosowaniach może być traktowana jako stała. Bardziej skomplikowane podejście jest jednak wymagane w przypadku metali, dla których  $\varepsilon(\omega)$  w omawianej części spektrum ma charakter rezonansowy i musi być opisywana przy pomocy modelu Lorenza-Drudego.

W poniższym paragrafie pomijamy uwzględnienie wpływu wektora falowego na wartości  $\varepsilon$  i  $\mu$ . W ogólności  $\varepsilon(\omega, \vec{k})$  jest to funkcją zarówno częstotliwości



jak i wektora falowego, co należy rozumieć jako zależność indukcji elektrycznej  $D(\vec{t}, r)$  nie tylko od wzbudzenia w poprzedzającej chwili czasu  $t'$ , ale również od wzbudzenia fali elektromagnetycznej w otoczeniu  $\vec{r}'$ . Ze względu na zależność od otoczenia ta klasa zjawisk nazywana jest nielokalnymi. Wpływu otoczenia na stan polaryzacji  $\vec{P}$  nie można pomijać gdy zmienność pola elektromagnetycznego jest znacząca w porównaniu z drogą swobodną elektronów w ośrodku.

### **5.2.1. Model Lorenza-Drudego**

Własności materiałowe w tym modelu opisywane są przez

## **5.3. Wielowarstwy z bezdyfrakcyjną propagacją światła**

## **5.4. Nadrozdzielczy pryzmat**

## **5.5. Analiza chropowatości**

## **5.6. Bardziej złożone struktury składane wielowarstw**

## Bibliografia

- [Smith et al.(2000)] Smith, Padilla, Vier, Nemat-Nasser, and Schultz] D. R. Smith, Willie J. Padilla, D. C. Vier, S. C. Nemat-Nasser, and S. Schultz. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity. *Phys. Rev. Lett.*, 84:4184–4187, May 2000. doi: 10.1103/PhysRevLett.84.4184. URL <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.84.4184>.
- [Veselago(1968)] Victor Georgievich Veselago. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of  $\epsilon$  and  $\mu$ . *Physics-Uspekhi*, 10(4): 509–514, 1968.