

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

1. Wstęp.....	7
1.1. State of the art.....	8
1.2. Cele i tezy pracy	8
1.3. Podział pracy	8
2. Modelowanie własności podfalowych struktur fotonicznych.....	9
2.1. Metody numeryczne	10
2.1.1. Metody macierzowe	10
2.1.2. FDTD	10
2.2. Modele materiałowe	10
2.3. Model efektywny	10
3. Siatki metalowe do kształtowania fali elektromagnetycznej w THz	12
3.1. Wprowadzenie	13
3.2. Antena THz - siatka dyfrakcyjna + podkład.....	13
3.3. Transmisja jedno kierunkowa.....	16
3.4. Soczewka dyfrakcyjna z transmisją jedno kierunkową	16
4. PML.....	18
4.1. Wprowadzenie	19
4.2. PML ze struktury warstwowej.....	19
4.3. core shell pml?.....	19
5. Bezdyfrakcyjna propagacja światła w wielowarstwach metaliczno- dielektrycznych	21

5.1.	Własności materialowe w zakresie widzialnym	23
5.1.1.	Model Lorenza	23
5.2.	wielowarstwy z bezdyfrakcyjną propagacją światła	23
5.3.	nadrozdzielczy pryzmat	23
5.4.	analiza chropowatości	23
5.5.	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 ϵ and μ . *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

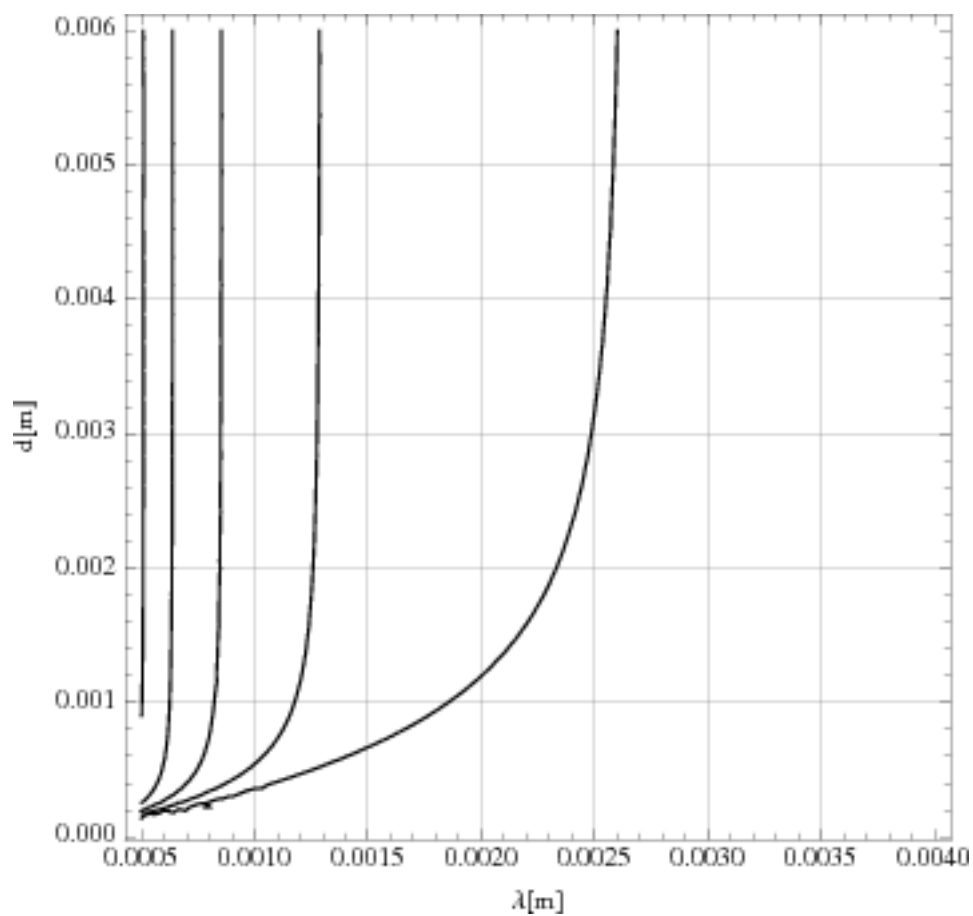
3.2. Antena THz - siatka dyfrakcyjna + podkład

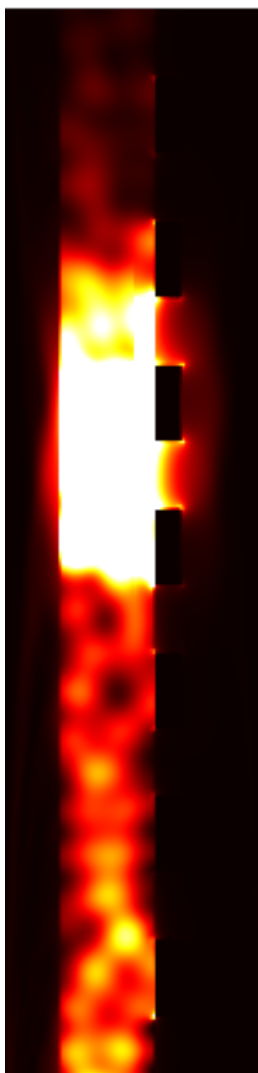
Bazując na pracach numerycznych na jednowymiarowych siatkach dyfrakcyjnych pozwalających na wzbudzenie modów falowodowych w podkładach z GaAs przeanalizowane zostało działanie analogicznych falowodów zbudowanych z siatek koncentrycznych.

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 μm i otworach 250 μm (wspolczynnik wypelnienia ok. 0.53) zostala oswietlona promieniowaniem o dlugosci fali 2.52 mm. W przypadku prezentowanej symulacji siatka miala grubosc 10 μm , 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 ϵ and μ . *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 ϵ and μ . *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 częstości przestrzenne oświetlającego ten układ źródła. Poniższy rozdział poświęcony jest modelowaniu działania wielowarstw metaliczno-dielektrynych wykorzystywanych do budowy elementów optycznych o zaprojektowanych właściwościach filtrowania częstości przestrzennych. W przeciwieństwie do przestrzeni swobodnej, będącej filtrem dolnoprzepustowym, mogą one charakteryzować się również transmisją wysokich częstości 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 $\vec{P}\vec{k} < 0$ 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 ϵ i μ 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. Własności materiałowe w zakresie widzialnym

Zjawiska omawiane w tym rozdziale są ściśle związane z wykorzystaniem zakresów długości fali elektromagnetycznej dla których stosowane materiały wykazują specyficzne własności. Na wykresie 5.1 przedstawiono zależność zespolonego współczynnika przenikalności dielektrycznej od długości fali, na podstawie danych z [??]

5.1.1. Model Lorenza

Własności materiałowe w tym modelu opisywane są przez

5.2. wielowarstwy z bezdyfrakcyjną propagacją światła

5.3. nadrozdzielczy pryzmat

5.4. analiza chropowatości

5.5. 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 ϵ and μ . *Physics-Uspekhi*, 10(4): 509–514, 1968.