

Design and Numerical Analysis of the Photonic Structures

Projektowanie i analizy numeryczne struktur fotonicznych

Przemysław Struk, *Katedra Optoelektroniki, Politechnika Śląska w Gliwicach*
(06.07.2010, prof. dr hab. inż. Tadeusz Pustelny)

Abstract

In the following article the numerical research results on photonic structures with grating couplers and planar waveguide structures are introduced. In the first part of this publication the technical solutions for the introduction of e-m wave from visible range into planar waveguide structures of thickness $d_w=200-500nm$ are shown. The next part of the article covers numerical methods providing means of the light propagation analysis in both planar waveguide structures and photonic structures incorporating grating couplers. The following section of the article will focus on the introduction of FDTD method. The remaining part of the article covers research results from the photonic structures with grating couplers numerical. The numerical analysis were based on the FDTD method (*Finite-Difference Time-Domain method*). The numerical computations were carried out using *OptiFDTD 8.0* software. Numerical analysis concentrated on finding optimal depth of periods d_s where irradiated power is maximal for TE₀ modes and for grating period Λ .

Streszczenie

W niniejszym artykule przedstawione zostaną rezultaty badań numerycznych struktur fotonicznych ze sprzęgaczami siatkowymi oraz struktur falowodów planarnych. W pierwszej części publikacji zostaną przedstawione rozwiązania techniczne pozwalające na wprowadzania fali elektromagnetycznej z zakresu widzialnego do struktur planarnych, które posiadają grubość warstwy falowodowej na poziomie $d_w=200-500nm$. Następnie zostaną przedstawione metody numeryczne pozwalające na analizę propagacji światła w strukturach światłowodów planarnych jak również strukturach fotonicznych ze sprzęgaczami siatkowymi. W szczególności zostanie przedstawiona metoda różnic skończonych w domenie czasu

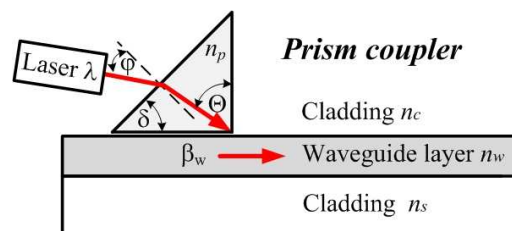
FDTD (*Finite Difference Time Domain method*). Ostatnią część publikacji stanowią będą rezultaty badań numerycznych struktur fotonicznych ze sprzęgaczami siatkowymi.

1. Wiadomości wstępne.

Wprowadzenie mocy optycznej z zakresu widzialnego do np. planarnej struktury światłowodowej wymaga rozwiązań przede wszystkim o dużej sprawności i powtarzalności. W praktyce wykorzystuje się głównie dwie metody wprowadzenia mocy optycznej do struktury falowodowej są to [1,2]:

- sprzęgacz pryzmatyczny,
- struktury fotoniczne ze sprzęgaczami siatkowymi.

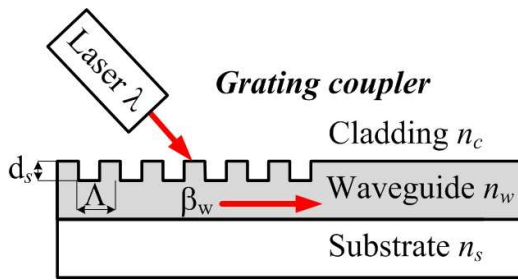
Wprowadzenie mocy optycznej z wykorzystaniem sprzęgacza pryzmatycznego wymaga zapewnienia kontaktu optycznego pomiędzy pryzmatem a warstwą falowodową wykorzystując układ mechaniczny. Pobudzenie modu falowodowego może nastąpić jeżeli składowe wektora falowego na kierunku propagacji w pryzmacie i warstwie falowodowej są identyczne i odpowiadają jednej z możliwych stałych propagacji w warstwie falowodowej. Kąt pod jakim następuje pobudzenie modu falowodowego nosi nazwę kąta synchronicznego [3]. Schemat ideowy sprzęgacza pryzmatycznego przedstawiony jest na Rys. 1



Rys. 1. Sprzęgacz pryzmatyczny.
Fig. 1 Prism coupler.

Rozwiązanie takie ma dwie podstawowe wady, pierwszą jest fakt, że całość jest strukturą trójwymiarową: - struktura falowodowa, pryzmat i układ mechaniczny. Powoduje to trudności z miniaturyzacją takiego rozwiązania. Drugą wadą jest fakt, że w celu pobudzenia warstwy falowodowej o dużej wartości współczynnika załamania n_w , współczynnik załamania pryzmatu n_p musi być większy. Jest to szczególnie istotne w przypadku badania struktur wykonanych z materiałów o dużym współczynniku załamania np. struktur falowodowych wykonanych w oparciu o półprzewodniki szerokoprzerwowe, których współczynnik załamania wynosi $n=2$.

Bardzo interesującym rozwiązaniem technicznym pozwalającym na wprowadzenie mocy optycznej do światłowodu planarnego są struktury fotoniczne ze sprzęgaczami siatkowymi. Struktury takie pozwalają na wprowadzenie mocy optycznej z zakresu widzialnego do- i ze światłowodu planarnego. Schemat struktury fotonicznej ze sprzęgaczami siatkowymi przedstawiony jest na Rys. 2.



Rys. 2 Sprzęgacz pryzmatyczny.
Fig. 2 Grating coupler

Wprowadzenie fali elektromagnetycznej do struktury z wykorzystaniem sprzęgacza siatkowego jest możliwe, gdy zostanie spełniony warunek [4].

$$\beta_w = \beta_c \cdot \sin(\theta) + m \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (1)$$

Gdzie: β_w , β_c stała propagacji odpowiednio w warstwie falowodowej, otoczeniu, m - rząd dyfrakcyjny, Λ - okres przestrzenny siatki.

Istotnym zagadnieniem są analizy modelowe i wybór metody numerycznej pozwalającej na optymalizację struktury fotonicznej ze sprzęgaczami siatkowymi. Propagacja światła w planarnych strukturach falowodowych może być z powodzeniem analizowana z wykorzystaniem między innymi metody propagacji wiązki BPM (*Beam Propagation Method*). Metoda ta pozwala na optymalizację struktur falowodowych w przypadku, gdy skok współczynnika załamania pomiędzy poszczególnymi warstwami nie jest duży oraz dla tzw. wiązek przyosiowych [5]. Modelowanie numeryczne struktur

fotonicznych ze sprzęgaczami siatkowymi należy przeprowadzić z wykorzystaniem metody pozwalającej na opis pola elektromagnetycznego w strukturze periodycznej. Jedną z metod pozwalających na optymalizację struktur fotonicznych ze sprzęgaczami siatkowymi jest metoda różnic skończonych w domenie czasu (*Finite Difference Time Domain method* FDTD). Metoda ta pozwala na optymalizację parametrów geometrycznych, takich jak tzw. okres przestrzenny siatki Λ , głębokość periodów d_s oraz współczynnik wypełnienia k_w .

Metoda różnic skończonych w domenie czasu FDTD opiera się na algorytmie opracowanym przez K. Yee w 1966 roku [6]. Mechanizm metody FDTD pozwala na rozwiązanie równań Maxwella w postaci czasowej i wykorzystuje centralny iloraz różnicowy [5] do obliczenia składowych pola E elektrycznego i H magnetycznego w tzw. węzłach siatki Yee. Podczas rozpatrywania struktur 2D analizowane są dwa tryby TE - Transverse Electric oraz TM - Transverse Magnetic. Poniżej przedstawiony zostanie sposób wyznaczenia składowych pola elektromagnetycznego dla trybu TE. Równania Maxwella dla takiego przypadku można zapisać [7,8]:

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{1}{\mu_0} \frac{\partial E_y}{\partial z}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon} \left(\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} \right), \quad (3)$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial t} = -\frac{1}{\mu_0} \frac{\partial E_y}{\partial x}. \quad (4)$$

Analiza propagacji pola elektromagnetycznego w modelowanej strukturze 2D wymaga dyskretyzacji przestrzennej polegającej na określeniu wielkości siatki dyskretyzacji Δx , Δz oraz kroku czasowego Δt . Należy przy tym pamiętać o konieczności zapewnienia warunku stabilności rozwiązań metody FDTD - warunek stabilności *Courant-Friedrichs-Lewy* (CFL) [7,8]:

$$\Delta t \leq \frac{1}{v} \cdot \left(\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta z^2} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (5)$$

$$\Delta x_{\min} \leq \frac{\lambda_{\min}}{10 \cdot n_{\max}} \quad \text{oraz} \quad \Delta z_{\min} \leq \frac{\lambda_{\min}}{10 \cdot n_{\max}} \quad (6)$$

Gdzie: Δx , Δz - rozmiar siatki obliczeniowej odpowiednio na osi x, z, n_{\max} - maksymalna wartość współczynnika załamania w modelowanej strukturze, λ_{\min} - najmniejsza długość fali, Δt - krok czasowy, v - prędkość światła w danym ośrodku.

Poszczególne składowe pola elektromagnetycznego w badanej strukturze fotonicznej analizowanej w 2D są obliczane według następujących równań [7,8]:

Składowa E_y

$$E_y^n(i, k) = E_y^{n-1}(i, k) + \frac{\Delta t \left[H_x^{n-\frac{1}{2}}\left(i, k + \frac{1}{2}\right) - H_x^{n-\frac{1}{2}}\left(i, k - \frac{1}{2}\right) \right]}{\varepsilon_0 \varepsilon_r \Delta z} \quad (7)$$

$$- \frac{\Delta t \left[H_z^{n-\frac{1}{2}}\left(i + \frac{1}{2}, k\right) - H_z^{n-\frac{1}{2}}\left(i - \frac{1}{2}, k\right) \right]}{\varepsilon_0 \varepsilon_r \Delta x}$$

Składowa H_x

$$H_x^{n+\frac{1}{2}}\left(i, k + \frac{1}{2}\right) = H_x^{n-\frac{1}{2}}\left(i, k + \frac{1}{2}\right) + \frac{\Delta t \left[E_y^n(i, k+1) - E_y^n(i, k) \right]}{\mu_0 \Delta z} \quad (8)$$

Składowa H_z

$$H_z^{n+\frac{1}{2}}\left(i + \frac{1}{2}, k\right) = H_x^{n-\frac{1}{2}}\left(i + \frac{1}{2}, k\right) - \frac{\Delta t \left[E_y^n(i+1, k) - E_y^n(i, k) \right]}{\mu_0 \Delta x} \quad (9)$$

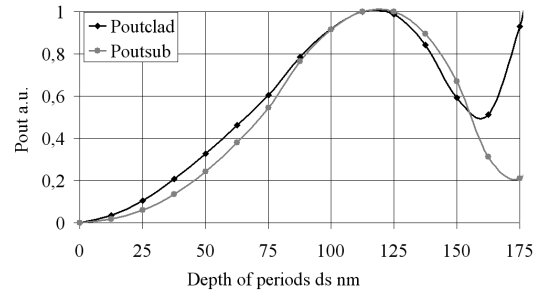
Analogicznie wyznaczane są składowe dla polaryzacji TM.

Dokonując dyskretyzacji przestrzennej należy z jednej strony mieć na uwadze warunek stabilności metody FDTD jak również zasoby komputerowe oraz czas obliczeń.

2. Rezultaty badań.

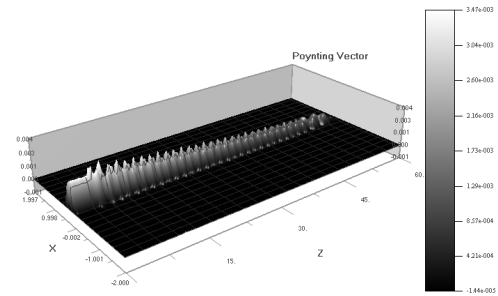
Celem przeprowadzonych badań numerycznych była optymalizacja efektywności wprowadzania i wyprowadzania mocy optycznej do i ze struktury fotonicznej w funkcji głębokości periodów sprzączacza siatkowego d_s . Badania numeryczne zostały przeprowadzone dla struktury fotonicznej o tzw. okresie przestrzennym siatki wynoszącym $\Lambda = 1,6 \mu m$ oraz grubości warstwy falowodowej równej $d_w = 500 nm$. Badana numerycznie struktura fotoniczna ze sprzączaczami siatkowymi charakteryzowała się współczynnikiem załamania: warstwy otoczenia $n_c = 1$, warstwy falowodowej $n_w = 2$ oraz podłoża $n_s = 1,45$. Analizy numeryczne zostały przeprowadzone dla długości fali $\lambda = 677 nm$, modelowaną strukturę pobudzano rozkładem pola modu TE₀. Schemat struktury fotonicznej i rozkład poszczególnych warstw przedstawiony jest na Rys. 2. Rezultaty przeprowadzonych badań numerycznych zostały przedstawione na charakterystyce mocy optycznej wypromieniowanej do warstwy otoczenia $P_{outclad}$ i podłoża P_{outsub} Rys. 3 (wartości unormowano

osobno dla mocy wypromieniowanej do warstwy pokrycia i podłoża).



Rys. 3. Moc optyczna P_{out} wypromieniowana do warstwy podłoża P_{out} i otoczenia w funkcji głębokości periodów sprzączacza siatkowego d_s .

Fig. 3. Power coupled into: cladding layer $P_{outclad}$, substrate layer P_{outsub} , as a function of periods depth d_s .



Rys. 4. Wektor Poyntinga.

Fig. 4. Poynting Vector.

Z przedstawionych badań numerycznych wynika, że dla struktury fotonicznej ze sprzączaczami siatkowymi o okresie przestrzennym siatki $\Lambda = 1,6 \mu m$ wraz ze wzrostem głębokości periodów sprzączacza siatkowego d_s rośnie moc optyczna wyprowadzona do otoczenia $P_{outclad}$ i podłoża P_{outsub} aż do osiągnięcia wartości maksymalnej. Największą efektywność struktura fotoniczna posiada dla głębokości periodów d_s na poziomie ok. $d_s = 112,5 nm$. Dalszy wzrost głębokości periodów sprzączacza siatkowego powoduje spadek mocy optycznej wyprowadzonej do warstwy otoczenia i podłoża a tym samym spadek efektywności wprowadzania i wyprowadzania mocy optycznej takiej struktury. Na Rys. 4 przedstawiony jest wektor Poyntinga na kierunku propagacji dla struktury fotonicznej charakteryzującej się głębokością periodów sprzączacza siatkowego wynoszącym $d_s = 112,5 nm$.

3. Podsumowanie.

Struktury fotoniczne ze sprzączaczami siatkowymi są bardzo atrakcyjnym rozwiązaniem technicznych pozwalającym na wprowadzanie i wyprowadzanie mocy optycznej do i ze struktury falowodowej. Badania numeryczne struktur fotonicznych z wykorzystaniem metody różnic skończonych w domenie czasu (*Finite Difference Time*

Domain method FDTD) dostarczają bezcennych danych pozwalających na wykonanie technologiczne powyższych struktur o najbardziej optymalnych parametrach geometrycznych, pozwala to na obniżenie kosztów wykonania i skrócenie czasu trwania badań eksperymentalnych. Przeprowadzone analizy numeryczne pokazują również możliwość zastosowania metody FDTD do analizy propagacji pola elektromagnetycznego powyższych strukturach fonicznych.

4. Literatura i dane autorów

1. Tadeusz Pustelny, Iwona Zielonka, Paweł Karasiński, Jan Jurusik, "Bragg's grating coupler in planar optical sol-gel waveguides" *Optica Applicata*, Vol. XXXIV, No. 4, 2004.
2. K. Gut „Composite optical waveguide structures” *J. Phys. IV France* 137 (2006) 87-90 EDP Sciences, Les Ulis.
3. Roman Rogoziński „Planarne struktury światłowodowe wytwarzane metodą wymiany jonowej w szkle” Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2007.
4. Marek Blahut "Wymiana jonowa w szkle i jej zastosowania w technologii wybranych elementów biernych optyki zintegrowanej" Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2002.
5. Yee K. "Numerical solution of initial boundary value problems involving maxwell's equations in isotropic media." *IEEE Transactions on* Volume 14, Issue 3, 1966, p. 02 – 307.
6. Kawano, Tsutomu Kito - "Introduction to Optical Waveguide Analysis: Solving Maxwell's Equation and the Schrödinger Equation Kenji" Wydawnictwo Wiley.
7. *OptiFDTD Technical Background and Tutorials - Finite Difference Time Domain Photonics Simulation Software*. Optiwave Systems Inc. Optiwave, 2008, p. 10-200.

Adres służbowy Autora:



Mgr inż. Przemysław Struk
Department of Optoelectronics
Faculty of Electrical Engineering
ul. Akademicka 10,
44-100 Gliwice
tel. +48 32 237-1208

email: Przemyslaw.Struk@polsl.pl