یازدهمین کنفرانس ملی فیزیک دانشگاه پیام نور (PNUPHY2021)

دانشگاه پیام نور تهران 19 و 20 آبانماه 1400

مدل سازی بلور فوتونیک یک بعدی به روش FDTD

نوشین داداش زاده گرگری
عضو هیات علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد ارس
noushindadashzadeh@yahoo.com
dadashzadeh@aras.iau.ir

کلید واژه: کریستال فوتونی، روش تفاضل محدود در حوزه فضا زمان

چکیده

در سال‌های اخیر، بسیاری از محققان علاقه خود را به تولید یک تراشه نوری فشرده با کارایی بالا نشان داده‌اند که کاربردهای مخابراتی مفیدی دارند. یکی از کاربردهای کریستالی فوتونیکی تکنولوژی فیلمهای نازک به عنوان وسائل اپتیکی است که فاکتورهای باکیفیت را در حجم کوچک نشان می‌دهند در این مقاله، از حفره‌های بلور فوتون با استفاده از روش تفاضل محدود در حوزه فضا زمان (FDTD) مدل‌سازی کرده‌ایم.

One-dimensional photonic crystal modeling by FDTD method

Noushin Dadashzadeh Gargari
Islamic azad university of aras
noushindadashzadeh@yahoo.com
dadashzadeh@aras.iau.ir

Abstract

In recent years, many researchers have shown their interest in producing a compact high-performance optical chip that is useful for most telecommunication applications. One of the solutions is by realising photonic crystal structures that exhibit high-quality factors in a small mode volume, V. We have modelled a photonic crystal cavity using finite-difference time-domain (FDTD) approach.

Keywords: photonic crystal ،finite-difference time-domain (FDTD)

مقدمه

اهمیت بالقوه اپتیک مجتمع تا سال 1968 کاملاً درک نشده بود. انتشار نور در لایه‌های نازک از آن زمان به‌طور گسترده پیشنهاد و توسعه یافته است [1]. اصطلاح اپتیک مجتمع به طیف گسترده ای از ساختارها مربوط می شود که در آن انتشار نور توسط یک فیلم نازک دی الکتریک یا نوارهایی از دی الکتریک کنترل می شود. محدوده فرکانس‌های لیزر موجود و انواع مواد مورد استفاده محدودیت‌های خود را دارند، در ابتدا لیزرهای گازی و لیزرهای حالت جامد به عنوان منابع نور در آزمایش‌های اولیه مورد استفاده قرار گرفتند. نیاز احتمالی به منابع بسیار کوچکتری وجود دارد که بتوان از آنها برای دستیابی به نیازهای اپتیک مجتمع به منظور ادغام با سایر برنامه ها استفاده کرد. اپتیک لایه نازک، در سال‌های اخیر، دستگاه‌های نیمه‌رسانا به دلیل ویژگی‌های مهم مرتبط با هدف مدارهای نوری مجتمع ، نقش عمده‌ای در تکامل اپتیک بازی کرده‌اند. در اوایل دهه 1960، تحقیق در مورد پدیده های لایه نازک به مسیری کلیدی برای توسعه ویژگی های موجبر پیچیده تر تبدیل شد. عمل هدایت لایه های مسطح در اتصالات p-n در سال 1963 توسط Yany و همکاران مشاهده و گزارش شد. [2]. نتیجه آنها متعاقباً توسط نلسون و راینهارت [3] در ارائه مدولاسیون نور از طریق اثر الکترواپتیک مورد استفاده قرار گرفت. اگرچه هیچ نگرانی در مورد مدار موجبر نوری وجود نداشت، اما این اثر تازه آغاز دوره جدید موجبرهای لایه نازک

مسطح بود. انتشار نور در لایه های نازک از آن زمان پیشنهاد و توسعه یافته است [4 -7]

مواد و روش ها

فرمول کلی انتشار تابش الکترومغناطیسی در یک محیط ناهمگن نوری غیر خطی با مشخصات دلخواه از مدولاسیون فضایی گذردهی را در نظر می گیریم.

$$\varepsilon(r,t,E)=\varepsilon_l(r)+4\pi\chi_{nl}(r,t,E)$$

این سیستم از معادلات ماکسول با بردارهای میدان الکتریکی $\vec{E}$ و مغناطیسی $\vec{H}$ برای محیط های غیر مغناطیسی با فرض عدم وجود بار آزاد به صورت زیر است.

$$\nabla\times\vec{E}=-\frac{\mu}{c}\frac{\partial\vec{H}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla\times\vec{H}=\frac{\varepsilon(x,y,z)}{c}\frac{\partial\vec{E}}{\partial t} \quad (2)$$

برای حالت غیر خطی کر مرتبه سوم حساسیت غیرخطی $\chi^{(3)}$ ، با در نظر گرفتن پاسخ زمانی حقیقی τ_{rel} از همبستگی متوسط بین بردار جابجایی الکتریکی $\vec{D}$ و میدان الکتریکی $\vec{E}$ خواهیم داشت:

$$\mathbf{D}(\mathbf{r},t)=\left[\varepsilon_{lin}(\mathbf{r})+4\pi\chi_{nl}(\mathbf{r},t,\mathbf{E})\right]\mathbf{E}(\mathbf{r},t) \quad (3)$$

$$\tau_{rel}\frac{\partial\chi_{nl}}{\partial t}+\chi_{nl}=\chi^{(3)}\mathbf{E}^2 \quad (4)$$

با استفاده از رابطه $t=\tilde{t}T$ و $x=\tilde{x}\lambda_0$ که در آن λ_0 طول موج نور در خلا $T=1/\nu$ دوره تناوب ، ν فرکانس انتشار نوسانات در ماده است.

سیستم معادلات 1-2 برای مدولاسیون مکانی یک بعدی ضریب شکست یا وابستگی مکانی یک بعدی ثابت دی الکتریک $\varepsilon = \varepsilon(x)$ می تواند به صورت زیر بازنویسی شوند

$$\frac{\partial H_z}{\partial\tilde{t}}=-\frac{\partial E_y}{\partial\tilde{x}} \quad (5)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial\tilde{t}}=-\frac{1}{\varepsilon(x)}\frac{\partial H_z}{\partial\tilde{x}} \quad (6)$$

$$\tilde{H}_z=H_z/E_0\ ,\ \tilde{E}_y=E_y/E_0\ ,\ \tilde{D}_y=D_y/E_0$$

که E_0 حداکثر دامنه پالس نوری در ورود به محیط غیر خطی است.

با توجه به روش FDTD معادلات دیفرانسیل بر اساس معادلات تفاضل محدود در حوزه فضا زمان:

$$\tilde{H}_z^{l+1/2}(i+1/2)=\tilde{H}_z^{l-1/2}(i+1/2)-\frac{\tilde{\Delta}t}{\tilde{\Delta}x}\left[\tilde{D}_y^l(i+1)-\tilde{D}_y^l(i)\right] \quad (7)$$

$$\tilde{D}_y^{l+1}(i)=\tilde{D}_y^l(i)-\frac{\tilde{\Delta}t}{\tilde{\Delta}x}\left[\tilde{H}_z^{l+1/2}(i+1/2)-\tilde{H}_z^{l+1/2}(i-1/2)\right] \quad (8)$$

که در این معادلات $\tilde{\Delta}x$ گام مکانی مختصات در طول شبکه $\tilde{x}$ است و $\tilde{\Delta}t$ گام زمانی شبکه است.

تابع زیر را در نظر می گیریم

$$F(\tilde{x},\tilde{t})=F(i\tilde{\Delta}x,l\tilde{\Delta}t)=F^l(i)$$

در محاسبات شرایط کوانتایی $\Delta t\le\Delta x/v$ در نظر گرفته شده است. یعنی که vسرعت نور در محیط است

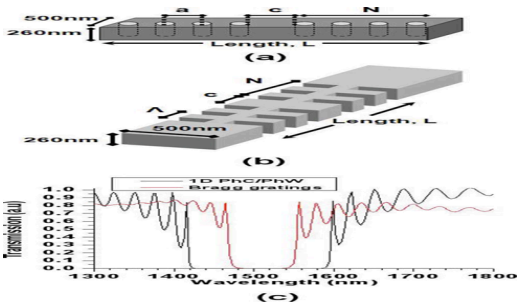
معادلات برای تعیین حساسیت غیر خطی از معادله به صورت تقریبی زیر است

$$\chi_{nl}^{l+1}(i)=\chi_{nl}^l(i)-\frac{\tilde{\Delta}tT}{\tau_{rel}}\chi_{nl}^l(i)+\frac{\tilde{\Delta}tT}{\tau_{rel}}\left[\chi^{(3)}E_0^2\right]\left(\tilde{E}_y^l\right)^2 \quad (9)$$

و برای پیدا کردن میدان الکتریکی در لحظه بعدی از معادله تقریب استفاده می شود

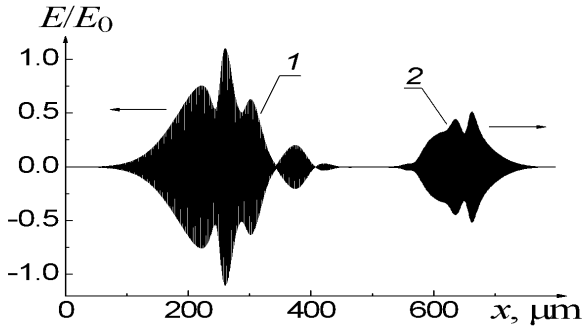
$$\tilde{E}_y^{l+1}(i)=\frac{\tilde{D}_y^{l+1}}{\varepsilon_{lin}(i)+4\pi\chi_{nl}^{l+1}(i)} \quad (10)$$

بنابراین حل عددی معادلات 7-10 به ما این اجازه را می دهد تا انتشار پالس نوری به شکل دلخواه و مدت زمان معین در یک محیط نوری ناهمگن با حالت غیرخطی کر انتشار یابد.



شکل 1. انواع مختلف موجبرهای میکرو کاواک (الف)موجبرهای یک بعدی با طول حفره (فاصله بین دو لبه سوراخ) c، فاصله تناوبی سوراخ (فاصله بین مرکز به مرکز (و a تعداد سوراخ‌های تناوبی، (ب) N موجبرهای توری براگ با طول حفره، c) c، (طیف های انتقال موجبرهای گریتینگ براگ یک بعدی این ساختار شامل یک ردیف سوراخ است که در عرض 500 نانومتر موجبرهای سیمی حفر شده است. این سوراخ ها به عنوان یک آینه تناوبی عمل می کنند که در آن نوری که به کریستال برخورد می کند یک شکاف باند ایجاد می کند که در آن انتشار نور در فرکانس خاصی ممنوع است. [5]

برای محاسبات دو بعدی FDTD، ضریب شکست متوسط n، یا ضریب موثر neff، موجبر تخت یک ماده به جای انکسار واقعی آن ماده خاص استفاده می شود. در این روش ضریب شکست در هر دو جهت انتشار عمودی و افقی موجبر تخت می باشد. شدت نور را در حالت هدایت، محصور شدن نور در داخل موجبر و شاخص موثر، neff را نشان می دهد. همچنین منطقه نشتی را نشان می دهد که در آن نور در داخل موجبر محدود نمی شود. این را می توان با اچ عمیق تر در روکش پایینی در حدود 20 تا 40 نانومتر بهبود داد، بنابراین میتوان تلفات پراکندگی را کاهش داد.



شکل2 نمودار مد حالت TE موجبر را نشان می دهد. اعماق حکاکی مختلف باعث تغییر ناگهانی ضریب شکست مؤثر ، در مرز هسته سیلیکونی و روکش سیلیسی (روکش پایین‌تر) می‌شود که در آن مقداری از نور به داخل روکش بازتاب شده است.

نتیجه‌گیری

مدل‌های نظری حفره‌های فوتونی با استفاده از شبیه سازی دامنه زمانی تفاضل محدود FDTD انجام شد. در قطبش TE ، طول موج های حدود 1550 نانومتر طراحی شده اند. فشردگی همراه با قابلیت بازتاب بالا و قابلیت تنظیم فعال، در مدارهای مجتمع که در آن عملکردهای متعددی بر روی یک تراشه انجام می‌شود، مناسب می‌سازد. از سوی دیگر، برای طراحی فیلترهای فشرده برای موقعیت‌های مالتی پلکسی، تقسیم طول موج درشت یا متراکم، برای سوئیچینگ با سرعت بالا و اپتیک غیر خطی مفید باشد. به عنوان مثال، رویکرد FDTD مورد استفاده در این مقاله تطابق قابل توجهی با نتیجه اندازه گیری شده نشان داده است، بنابراین می توان از آن به عنوان روشی برای به دست آوردن یک نتیجه اولیه قبل از ارائه طرح واقعی برای ساخت استفاده کرد.

مرجع ها

[1] Miller SE. Integrated optics: An introduction. Bell System Technical

Journal. 1969;48:2059-2070
2] Yariv A, Leite RCC. Dielectric-waveguide mode of light propagation in p-n junctions. Applied Physics Letters. 1963;2:55
[3] Nelson DF, Reinhardt FK. Light modulation by the electro optic effect in reverse-biased GaP p-n junction. Applied Physics Letters. 1964;5:148
[5] Nathan MI, Dumke WD, Burns G, Dill FH Jr, Lasher G. Stimulated emission of radiation from GaAs p-n junction. Applied Physics Letters. 1962; 1:6

6] Foresi JS, Villeneuve PR, Ferrera J, Thoen ER, Steinmeyer G, Fan S, et al. Photonic bandgap microcavities in optical waveguides. Nature. 1997;390: 143-145
[7] Lalanne P, Talneau A. Modal conversion with artificial materials for photonic-crystal waveguides. Optics Express. 2002;10:354-359