بیست و یکمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و هفتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۲۳ تا ۲۵ دی ماه ۱۳۹۳، دانشگاه شهید بهشتی

مطالعه تزویج نوری تنظیم پذیر حرارتی مابین موجبر نیمه‌رسانای بلور فوتونی و بلور فوتونی مدرج دو بعدی

سمیه اسکویی عبدل[۱]؛ جمال بروستانی[۱]

[۱] گروه فیزیک حالت جامد و الکترونیک، دانشکده فیزیک دانشگاه تبریز ، تبریز

در این کار، تزویج نوری موجبر بلور فوتونی نیمه‌رسانا با بلورفوتونی مدرج دارای تغییرات تدریجی ثابت شبکه را بررسی می‌کنیم. با استفاده از روش محاسباتی تفاضلات متناهی در حوزه‌ی زمان بازده تزویج را در دماهای مختلف یک نیمرسانای ذاتی بدست می‌آوریم. موجبر بلور فوتونی از جایگزین کردن تک میله‌ی آلومینا به ایندیم آنتیموان ساخته شده است. محاسبات تنظیم پذیری حرارتی مناسبی را در بازده تزویج نشان میدهد و با افزایش دما، بازده بهبود می یابد.

کلید واژه- بلور فوتونی، بلور فوتونی مدرج، تزویج‌گر، روش تفاضلات محدود در بازه‌ی زمانی، موجبر بلور فوتونی.

The study of thermal tunable coupling between a semiconducting photonic crystal waveguide and graded index photonic crystal

Somayeh Oskooi [1]; Jamal Barvestani [1]

[1] Department of solid state physics & electronic, Faculty of Physics, University of Tabriz, Tabriz

In this work, we study the light coupling between semiconducting photonic crystal waveguide and graded index photonic crystal. Using the finite difference time domain method, we evaluate the coupling efficiency at various temperatures for an intrinsic semiconductor. Photonic crystal waveguide is constructed by replacing one row of alumina rods by InSb rods. Calculation shows a proper thermal tunability of coupling efficiency and the efficiency is improved by increasing the temperature.

Keywords: Photonic crystal, graded index photonic crystal, Coupler, Finite Difference Time Domain, Photonic crystal Waveguide

[Downloaded from opsi.ir on 2026-07-29]

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

۱- مقدمه

در سالهای اخیر بلورهای فوتونی به خاطر خواص جالبشان در کنترل انتشار نور در مقیاس طول موج، بسیار مورد توجه بوده است[۱]. موجبرهای بلور فوتونی(PCW[1])، که از ایجاد یک نقص خطی در بلور فوتونی بدست می‌آید، از اهمیت زیادی در مدارات مجتمع فوتونی برخوردار است. یکی از مشکلات اصلی در این راستا، عدم تزویج مناسب بین مد خروجی سایر مدارات و موجبر بلور فوتونی می‌باشد که مربوط به تفاوت مقیاس آنهاست. بنابراین دستیابی به تلفات پایین تزویج چالش بزرگی در بحث بلور فوتونی می‌باشد. می‌توان با استفاده از تزویج‌گرهای بلور فوتونی مدرج بازده تزویج را تا حدی بهبود بخشید. چندین ساختارهای بلور فوتونی مدرج (GRIN PC[2]) جهت تحقق تزویج در سالهای پیش ارائه شده از جمله: بلور فوتونی مدرج دارای تغییرات تدریجی ضریب شکست[۲]، بلور فوتونی مدرج دارای تغییرات تدریجی شعاع [۳]. اما ساخت بلور فوتونی مدرج با تغییر شعاع میله‌ها به دقت زیاد و با تغییر ضریب شکست به مواد بیشتری نیاز خواهد داشت. در این مطالعه شعاع و ضریب شکست ثابت می‌باشد و ثابت شبکه به طور تدریجی تغییر می‌کند. با استفاده از این تزویج‌گر، تزویج میان امواج نور و موجبر بلور فوتونی نیمه‌رسانا را در تغییرات دمایی مطالعه خواهیم کرد.

۲- روش محاسبات شبیه‌سازی

تفاضل متناهی در حوزه زمان که به صورت خلاصه از آن با نام FDTD یاد می‌کنند، روش مورد استفاده در این کار می‌باشد. الگوریتم تفاضل متناهی در حوزه زمان اولین بار توسط یی[3] در سال ۱۹۶۶ ایجاد شد. در روش FDTD[4] که روش پیاده‌سازی شده در این پروژه می‌باشد، ساختار مورد نظر به شبکه‌ای مربعی تقسیم بندی شده و تقریب پله‌ای برای پارامترهای محیط در نظر گرفته می شود. همچنین میدان‌های الکترومغناطیسی گسسته سازی شده و معادلات ماکسول با تقریب تفاضلی آنها جایگزین و میدان‌های الکترومغناطیسی در طول زمان محاسبه می‌شوند. این روش به صورت شرطی پایدار است و عموماً مشکل همگرایی ندارد. این روش نیاز به منابع محاسباتی و حافظه‌ی بالایی مخصوصاً در سه بعد دارد.

مهم‌ترین نکته در این روش, شبیه‌سازی انتشار امواج در فضای سلول محاسباتی به فضای بینهایت برای نزدیک شدن حل عددی به واقعیت فیزیکی مسأله است. که در این مورد از شرط مرز جاذب با نامPML استفاده می‌شود. از سال ۱۹۹۴ فعالیت قابل توجهی در این زمینه به وجود آمده است که این امر مدیون کار اولیه‌ای است که برنگر در معرفی مواد جاذب بسیار موثر برای شرط مرزی جاذب نموده است .ابتکار برنگر در این است که امواج تخت با هر زاویه تابش و نوع قطبش و فرکانس با این ماده در مرز کاملاً مطابق می‌باشند. وی با اضافه کردن درجات آزادی بیشتری که از تجزیه‌ی میدانها به دو مؤلفه به‌دست می‌آید، توانست اینکار را انجام دهد. بنابراین در یکPML ایده‌آل نباید هیچ موج بازتابیده‌ای باقی بماند.

۳- شکل ساختار

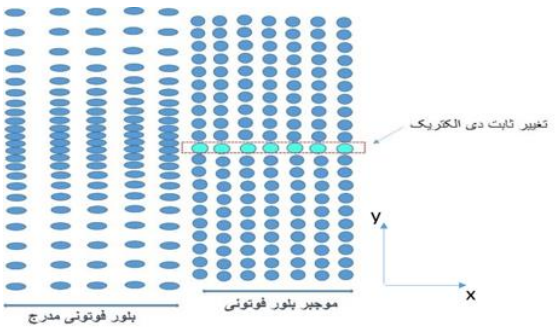
موجبر بلور فوتونی مورد بررسی در این بخش متشکل از شبکه‌ی مربعی از میله‌های آلومینا با ثابت دی‌الکتریک (ε=۹/۶۱) و شعاع ۰/۲۲a در زمینه‌ی هوا با ثابت دی‌الکتریک (ε=۱) می‌باشد. که ثابت شبکه‌ی آن a=۳۰μm بوده و شامل ۱۱ لایه در جهت x و ۲۹ لایه در جهت y می‌باشد. برای ایجاد موجبر یک ردیف از جنس میله‌ها را به ایندیم آنتیموان تغییر داده‌ایم. ثابت دی‌الکتریک نیمه‌رساناها با تغییرات دمایی، تغییر می‌کند. در این بخش از طریق تغییرات دمایی بازده تزویج بین این موجبر بلور فوتونی و نوری با پهنای ۱۰a را بوسیله تزویج‌گر بلور فوتونی مدرج دارای تغییرات تدریجی ثابت شبکه را مورد بررسی قرار می‌دهیم. تزویج‌گر دارای شبکه‌ی مربعی از میله‌های آلومینا با ثابت دی‌الکتریک (ε=۹/۶۱) و شعاع ۰/۲۲aدر زمینه‌ی هوا (ε=۱) می‌باشد. که ثابت شبکه‌ی آن در جهت y دارای تغییرات تدریجی بوده و در جهت x ثابت و برابر a می‌باشد. این بلور به صورت نمادین در

---

[1] Photonic Crystal Waveguide
[2] Graded Index Photonic Crystal
[3] Yee
[4] Finite Difference Time Domain

[Downloaded from opsi.ir on 2026-07-29]

شکل ۱ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ثابت شبکه در مرکز ساختار دارای کمترین مقدار (۰/۳۷۵a) و در لبه‌ها دارای بیشترین مقدار (۱/۴a) است. گام افزایشی ثابت شبکه برابر با ۰/۱۵a در نظر گرفته شده است. این تزویج‌گر شامل ۷ لایه در جهت x و ۲۸ لایه در جهت y می‌باشد. همچنین در مرزهای سیستم ۱۲ لایه PML استفاده شده است.



شکل ۱- تصویری نمادین از ساختار تزویج نوری متشکل از PCW و GRIN PC

۴- تئوری

جهت مطالعه‌ی تنظیم پذیری دمایی بازده تزویج، از معادله‌ی هلمهولتز میدان الکتریکی شروع می‌کنیم. معادله‌ی موج میدان الکتریکی به صورت زیر می‌باشد:

$$\nabla\times[\nabla\times E(\mathbf{r})]=(\frac{\omega}{c})^2\varepsilon(\omega)\,\mathbf{E}(\mathbf{r}) \qquad (۱)$$

در رابطه فوق ω فرکانس ، c سرعت نور و $\varepsilon(\omega)$ تابع دی الکتریک محیط است. تابعیت $\varepsilon(\omega)$ در رابطه‌ی زیر داده می‌شود[۵].

$$\varepsilon(\omega)=\varepsilon_s\left(1-\frac{\omega_p{}^2(T)}{\omega^2}\right) \qquad (۲)$$

در این رابطه ε_s ضریب استاتیک و $\omega_p(T)$ فرکانس پلاسمایی می‌باشد، فرکانس پلاسمایی با توجه به رابطه‌ی زیر به شدت وابسته به دما می‌باشد.

$$\omega_p(T)=\left(\frac{N(T)e^2}{\varepsilon_s\varepsilon_0 m^*}\right) \qquad (۳)$$

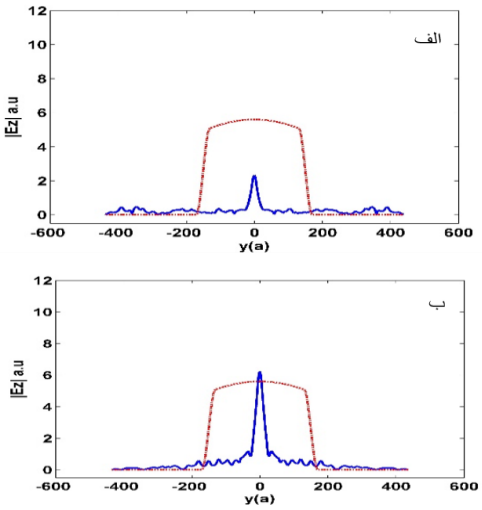
در اینجا چگالی حاملین ذاتی برای ایندیم آنتیموان به صورت زیر داده می‌شود[۶]:

$$N(T)=5.76*10^{20}.T^{3/2}\exp(-\frac{0.26}{2k_BT}) \qquad (۴)$$

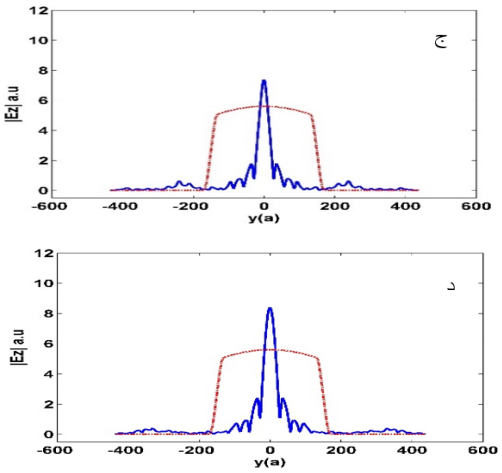
e بار الکتریکی الکترون‌ها، $m^*=$ ۰/۰۱۵m جرم مؤثر حاملین آزاد، e_0 گذردهی خلاء، K_B ثابت بولتزمن، T دما در کلوین می‌باشد. برای ایندیم آنتیموان $\varepsilon_s=$ ۱۷/۷۱ است.

۵- نتایج شبیه‌سازی

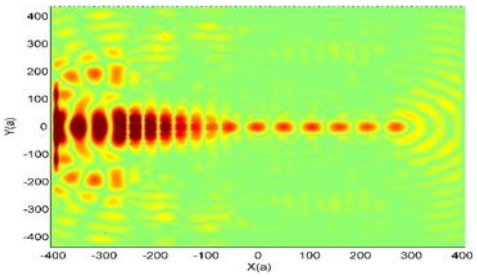
با استفاده از روش ابر سلول بر مبنای بسط موج تخت، مدهای موجبری در بلور فوتونی دو بعدی با تقارن شبکه مربعی و هندسه‌ی میله‌های دایروی را محاسبه کرده‌ایم. فرکانس نرمالیزه ($\frac{\omega a}{2\pi c}$) ۰/۳۸ (ω=۲۲/۳۸THz) مد نقص موجبر بلور فوتونی می‌باشد. همچنین این مد با استناد به مرجع [۴] پس از این که از داخل ساختار بلور فوتونی مدرج عبور می‌کند، به تدریج حالت جمع شدگی پیدا می‌کند و کانونی می‌شود و از طریق موجبر هدایت می‌شود. یک منبع نور با پالس گاوسی با پهنای ۱۰a در سمت چپ تزویج‌گر قرار دادیم. حال با تغییر دما، می‌توان فرکانس پلاسمایی و در نتیجه ثابت دی‌الکتریک نقص خطی را تغییر داد. شایان ذکر است که این تغییرات دمایی در فرکانس تراهرتز ثابت دی‌الکتریک آلومینا را تغییر نمی‌دهد. بنابراین به‌جز نقص خطی بقیه‌ی ساختار ضریب دی الکتریک ثابتی خواهند داشت. شکل ۱ نمایشی از اندازه‌ی شدت میدان الکتریکیِ نور ورودی به ساختار و نور خروجی از موجبر در دماهای مختلف می‌باشد.



[Downloaded from opsi.ir on 2026-07-29]

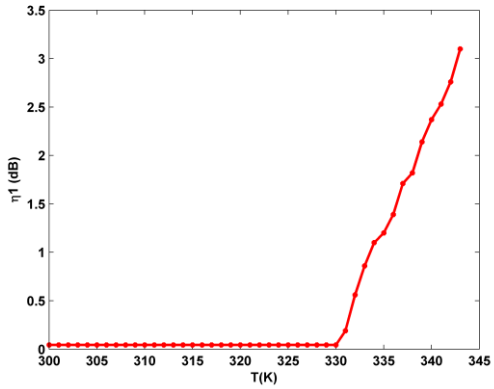


شکل ۱- شدت میدان الکتریکی نور ورودی(خط‌چین قرمز) و در خروجی موجبر(خط آبی) در دماهای الف)۳۳۱ ب)۳۳۵ ج)۳۳۹ د)۳۴۲/۸۰۵ کلوین



شکل ۳- نمودار توزیع فضایی میدان مربوط به تزویج‌گر بلور فوتونی مدرج با تغییرات تدریجی ثابت شبکه در دمای۳۴۲/۸۰۵ کلوین

بازده تزویج در حالتهای مختلف در جدول ۱ لیست شده است(η_1: نسبت شدت نور خروجی به نور ورودی، η_2: شدت نور خروجی در حضور موجبر نسبت به حالت عادی)[۴].



شکل ۴- تغییرات میزان بازده تزویج نور برای دماهای مختلف

جدول ۱ بازده تزویج در دماهای مختلف

T (K)	$\eta_1 = \frac{\int \lvert Ez\rvert^2_{PCW+GRIN}}{\int \lvert Ez\rvert^2_{GRIN}}$	$\eta_2 = \frac{\int \lvert Ez\rvert^2_{PCW+GRIN(output)}}{\int \lvert Ez\rvert^2_{PCW+GRIN(input)}}$
۳۳۰	۰/۰۴۲۵(dB)	٪۰/۴
۳۳۱	۰/۱۹(dB)	٪۱/۸
۳۳۲	۰/۵۶(dB)	٪۵/۴۳
۳۳۳	۰/۸۶(dB)	٪۸/۳۷
۳۳۴	۱/۱۶(dB)	٪۱۱/۱۷
۳۳۵	۱/۲(dB)	٪۱۱/۷۰
۳۳۶	۱/۳۹(dB)	٪۱۳/۳۸
۳۳۷	۱/۷۱(dB)	٪۱۶/۵۳
۳۳۸	۱/۸۲(dB)	٪۱۷/۵۴
۳۳۹	۲/۱۴(dB)	٪۲۰/۶۷
۳۴۰	۲/۳۷(dB)	٪۲۲/۸۱
۳۴۱	۲/۵۳(dB)	٪۲۴/۴۱
۳۴۲	۲/۷۶(dB)	٪۲۶/۶۰
۳۴۲/۸	۳/۱(dB)	٪۳۰/۱

با توجه به نمودار بالا، بیشینه‌ی بازده تزویج برای دمای K° ۳۴۲/۸ اتفاق می افتد و در این دما شدت میدان الکتریکی نیز بیشترین مقدار خود را دارد.

۶- نتیجه‌گیری

تغییرات دمایی تزویج نوری بین یک موجبر نیمرسانای بلور فوتونی و بلور فوتونی مدرج بررسی شد. نتایج نشان می دهد که بازده تزویج در چنین سیستم هایی می تواند بصورت حرارتی بعد از ساخت وسیله تنظیم گردد.

مراجع

[1] S. John, *Strong localization of photons in certain disordered dielectric super-lattices*, **Phys. Rev. Lett**. 58 (1987)

[2] H. Kurt and D. S. Citrin. *A Novel Optical Coupler Design With Graded-Index Photonic Crystals*. **IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS**, 19, 19, (2007)

[3] H. T. Chien, C. C. Chen, *Waveguide coupler formed by a Graded Photonic Crystal*. **JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY** (2009)

[4] A. O. Cakmak, E. Colak, H. Caglayan, H. Kurt, and E. Ozbay. *High efficiency of graded index photonic crystal as an input coupler*. **J. Appl. Phys.** 105, 10370 (2009)

[5] P. Halevi, F. Ramos-Mendieta, **Phys. Rev. Lett.** 85 (9) 1875 (2000).

[6] H. C. Hung, C. J. Wu, and S. J. Chang**, Journal of Appl. Phys**., 110, 093110 (2011).

[Downloaded from opsi.ir on 2026-07-29]