



بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و ششمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۸ تا ۱۰ بهمن ماه ۱۳۹۲ - دانشگاه صنعتی شیراز



آشکارساز نقطه کوانتومی مبتنی بر تیغه بلور فوتونی برای گستره مادون قرمز میانی

علیرضا مبینی، وحید احمدی و فاطمه تقیان

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت مدرس.

چکیده - در این مقاله آشکارساز نقطه کوانتومی *InAs/GaAs* مبتنی بر تیغه بلور فوتونی برای گستره مادون قرمز میانی طراحی می‌شود. لایه فعال در کاواک بلور فوتونی با مود تشدیدی در $2/9$ میکرومتر قرار می‌گیرد. تابع دی‌الکتریک نقطه کوانتومی با مدل چند قطبی لورنتس وارد معادلات ماکسول شده و معادلات با روش تفاضل متناهی در حوزه زمان سه بعدی حل می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که برهمکنش نور-ماده در این مود تقویت شده و طیف جذب برای این مود با پهنای کامل در نصف بیشینه برابر 0.87 میکرومتر، تا 8 برابر سایر طول موجها افزایش می‌یابد.

کلید واژه- آشکارساز، بلور فوتونی، روش FDTD، نقطه کوانتومی، مادون قرمز.

Quantum Dot Photodetector Based on Photonic Crystal Slab in Mid Infrared Range

Alireza Mobini, Vahid Ahmadi*, Fatemeh Taghian

Faculty of Electrical and Computer Engineering, Tarbiat Modares University

Abstract- In this paper we design *InAs/GaAs* QDs photodetector based on photonic crystal (PhC) slab for mid infrared (IR) range. The active layer is located in PhC cavity with resonant mode of $2.9\mu\text{m}$. QDs dielectric function using Lorentz dispersion is inserted to Maxwell equations and then equations solved with 3 dimensional finite difference time domain method. Results show light-matter interaction at this mode and absorption spectrum for this mode with full width at half maximum of $0.87\mu\text{m}$, increase up to 8 times compared with other wavelengths.

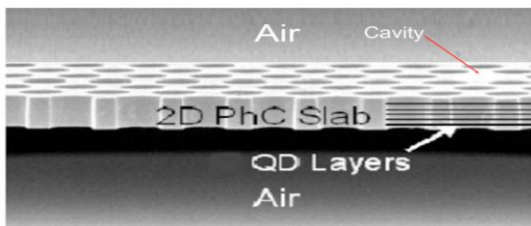
Keywords: Photodetector, Photonic crystal, FDTD, Quantum Dot, Infrared.

۱- مقدمه

در کاواک آثار نور-ماده افزایش می‌یابد. کاواک فوتون‌ها را در خود نگاه می‌دارد. این فوتون‌ها بعد از چندین حرکت رفت و برگشت اگر جذب نشده باشند میرا می‌شوند. استفاده از بلور فوتونی منجر به افزایش ضریب آشکارسازی و بازده تبدیل و کاهش جریان تاریک می‌شود [۱۰-۱۲]. کاهش جریان تاریک امکان می‌دهد افزاره در دماهای نزدیک اتاق کار کند [۹-۱۳]. در این مقاله ساختار تیغه بلور فوتونی برای آشکار سازی نور در طول موج ۲/۹ میکرومتر طراحی می‌شود. با استفاده از روش تفاضل متناهی در حوزه زمان سه بعدی^۸ (3D-FDTD) پاسخ طیف جذب در ساختار بلور فوتونی نقص‌دار مورد بررسی قرار می‌گیرد. از مدل لورنتس برای وارد کردن تابع دی-الکتریک وابسته به فرکانس لایه نقطه کوانتومی InAs/GaAs به معادلات ماکسول استفاده می‌شود. جذب در مود تشدید کاواک تا ۸ برابر نسبت به سایر مودها افزایش می‌یابد.

۲- ساختار و روش شبیه سازی

شکل (۱) نمای ساختار آشکار ساز شامل لایه‌های جاذب و الگوی بلور فوتونی را نشان می‌دهد. ناحیه فعال شامل چندین لایه متناوب از نقطه کوانتومی‌های n-doped شده از جنس InAs/GaAs است. هر لایه فعال بین لایه‌هایی از n-GaAs با ضخامت چند صد آنگستروم ساندویچ می‌شود. بلور فوتونی دارای ساختار مثلثی با سوراخ‌های هوا است که با معمولاً با روش لیتوگرافی باریکه الکترونی^۹ (EBL) ایجاد می‌شوند. الگوی بلور فوتونی تا انتهای ضخامت ساختار در جهت عمودی ادامه پیدا می‌کند. بطوریکه قسمتی از ماده جاذب در اثر ایجاد همین سوراخ‌ها از بین می‌رود. تیغه بلور فوتونی نور را برای انتشار در دو جهت عمودی و افقی محدود می‌کند. در جهت عمودی نور با سازوکار بازتابش کلی محدود می‌شود.



شکل ۱: نمای ساختار آشکار ساز مادون قرمز نقطه کوانتومی. لایه‌های فعال نقطه کوانتومی در بین سایر لایه‌ها قرار می‌گیرد

8-Finite Difference Frequency Domain (FDTD)
9- Electron Beam Lithography (EBL)

آشکارسازهای مادون قرمز دارای کاربردهای صنعتی و فناوری زیادی هستند. کاربردهای معمول آنها شامل دیده بانی محیط [۱، ۲]، تشخیص شیمیایی و بیولوژیکی ترکیبات [۳]، تصویربرداری حرارتی، دید در شب، تشخیص ناهنجاری و مخابرات فضای آزاد است [۴-۵]. از گذشته تا کنون تکنولوژی‌های مختلفی مانند ترکیبات مرکوری-کادمیم-تلوراید^۱ (MCT)، ساختارهای مبتنی بر چاه-کوانتومی^۲ و ساختارهای مبتنی بر نقطه کوانتومی^۳ برای ساخت این آشکارسازها استفاده شده است. آشکارسازهای مادون قرمز نقطه کوانتومی^۴ (QDIP) پیشرفت سریعی داشته‌است و اثرات و ساختارهای مختلفی مانند ساختارهای تشدیدگر، آینه‌های براگ^۵، و بویژه بلور فوتونی^۶ برای تغییر مشخصات آنها استفاده شده است. بلورهای فوتونی ساختارهایی هستند که ضریب شکست آنها در یک، دو و یا سه بعد بطور متناوب با دوره تناوبی در حدود طول موج نور تغییر می‌کند. این تناوب در ضریب شکست باعث بوجود آمدن شکاف یا گاف نوار فوتونی^۷ (PBG) در نمودار نوار می‌شود که ویژگی بارز بلورهای فوتونی است. [۶-۷]. از مودهای لبه‌ای منتج از این نوارها که دارای اثرات سرعت گروه پایین هستند برای تغییر در بهره لیزری و جذب لایه فعال استفاده می‌شود. تحقیقات زیادی در مورد مشخصات ساختارهای بلور فوتونی با PBG که منجر به لیزرهایی با توان آستانه پایین می‌شوند، انجام شده‌است [۸، ۹]. از بلور فوتونی در ساختار آشکار ساز برای ایجاد تحدید در صفحه افقی و نیز بعنوان یک کوپل کننده توری شکل برای تبدیل نور عمودی به نور در صفحه استفاده می‌شود. به دلیل محصور شدگی بیشتر فوتون‌ها

- 1- Mercury-Cadmium-Telluride (MCT)
- 2-Quantum Well (QW)
- 3-Quantum Dot (QD)
- 4-Quantum Dot Infrared Photodetector (QDIP)
- 5 -Distributed Brag Reflection (DBR)
- 6 - Photonic Crystal (PC)
- 7- Photonic Band Gap (PBG)

بدی (3D-FDTD) حل می‌شود. در این روش معادلات ماکسول به شش معادله‌ای زده‌ای مانند معادله (۳) تجزیه می‌شود. از الگوریتم Yee برای مش‌بندی استفاده می‌کنیم که میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی بصورت درهم تنیده قرار بگیرند و منطبق نباشند.

$$\epsilon_0 \epsilon_r \frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} \quad (3)$$

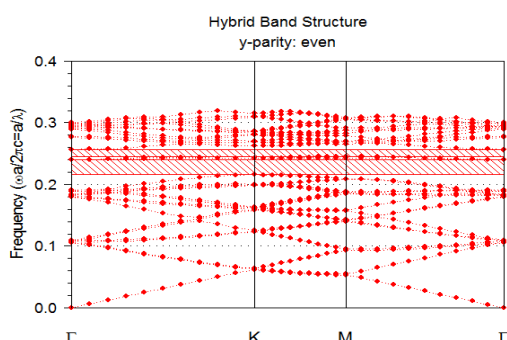
مقدار مانیتورهای افقی و عمودی بطور جداگانه محاسبه شده و سپس مقدار جذب از اختلاف دو حالتی که ضریب جذب صفر و غیر صفر باشد محاسبه می‌شود.

۳- نتایج شبیه‌سازی

شکل (۲) ساختار نوار محاسبه شده برای بلور فوتونی با ثابت شبکه برابر ۷۱۰ نانومتر و نسبت شعاع به ثابت شبکه برابر ۰/۲۵ را نمایش می‌دهد.

آنطور که شکل (۲) نشان می‌دهد یک مود تشدیدی در

ساختار در محدوده $\lambda_0 = \frac{a}{0.245}$ وجود دارد که تقریباً برابر ۲/۹ میکرومتر می‌شود و دقیقاً در محدوده طیف جذب نقطه کوانتومی هاست. این مود در داخل کاواک تقویت شده و برهمکنش نور-ماده بشدت افزایش می‌یابد که باعث جذب افزایش یافته می‌شود. مقدار توان مانیتورها با استفاده از رابطه (۲) برای طول‌موج‌های مختلف برای چهار مانیتور افقی محاسبه و در شکل (۳) نشان داده شده است. طبق شکل (۳) هر مانیتور توان دارای بیشینه‌ای در مود تقویت شده کاواک یعنی ۲/۹ میکرومتر است. بهمین ترتیب با استفاده از رابطه (۲) برای



شکل ۲: ساختار نوار محاسبه شده برای تیغه کاواک بلور فوتونی سه بعدی با کاواک تشدیدی برای $a = 710nm$ و $r/a = 0.25$.

در جهت افقی عدد موج K_{\parallel} باید شرایط بلاخ را برآورده کند. در این شرایط مقدار فرکانس نور بصورت زیر بدست می‌آید:

$$\omega = c \sqrt{K_{\perp}^2 + K_{\parallel}^2} \quad (1)$$

در این حالت مودهای زوج شبه TE و مود های فرد شبه TM نامیده می‌شود.

یک سوراخ در وسط برای ایجاد کاواک بلور فوتونی حذف شده‌است. بعلت وجود کاواک تشدیدگر در ساختار تقارن در هر دو جهت از بین می‌رود و دیگر نمی‌توان از شرایط بلاخ برای هر سلول براحتی استفاده کرد و باید برای شبیه سازی از ابر سلول استفاده شود. در این ساختار ثابت شبکه برابر ۷۱۰ نانومتر و نسبت شعاع به ثابت شبکه برابر ۰/۲۵ است.

۲-۱ نحوه شبیه‌سازی ساختار آشکار ساز

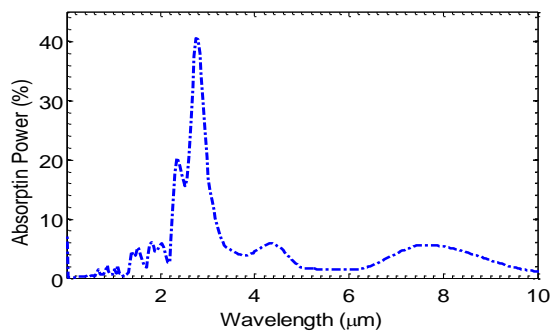
مبتنی بر تیغه بلور فوتونی

برای بررسی انتشار موج در ساختار نشان داده شده در شکل (۱) منبع نوری در بالای ساختار اعمال می‌شود. در دو طرف ساختار در بالا و پایین هوا قرار گرفته است. برای حذف بازتابش موج و برگشت آن به ناحیه شبیه‌سازی در هر طرف ساختار در راستاهای x و y ۱۰ خانه PML در نظر گرفته می‌شود.

برای محاسبه جذب از مقدار انتگرال بردار پوینتینگ در محل مانیتور استفاده می‌کنیم. مقدار انتگرال بردار پوینتینگ از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$S(t) = \text{Re} \left[\int_A [E(t) \times H^*(t)] dA \right] \quad (2)$$

که در آن A صفحه مانیتوری است که مقدار توان در آن محاسبه می‌شود. مقدار توان متوسط از میان‌گیری از این کمیت در کل زمان شبیه‌سازی در حوزه فوریه بدست می‌آید. چهار مانیتور P_S, P_N, P_W, P_E برای اندازه‌گیری توان در صفحه افقی در چهار طرف ساختار قرار می‌گیرد که میزان توان نور خروجی در راستای افقی را نشان می‌دهد. بهمین ترتیب مانیتورهایی نیز در راستای عمودی در بالا و پایین ساختار قرار می‌گیرد. عبارت‌های P_B و P_T بترتیب مقدار مانیتورهای بالا و پایین را نشان می‌دهد. معادلات با استفاده از روش تفاضل متناهی در زمان سه



شکل ۵: مقدار توان جذب شده در آشکارساز مادون قرمز نقطه-کوانتومی مبتنی بر ساختار تیغه بلور فوتونی.

افزایش توان جذب شده در مود تشدید کاواک را نشان می‌دهد. از این ساختار می‌توان برای تنظیم بیشینه جذب آشکارساز مادون قرمز در گستره دلخواه استفاده کرد.

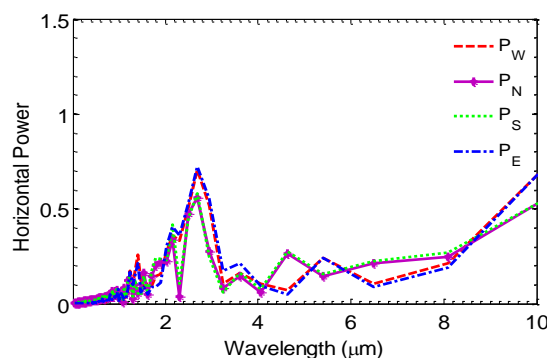
مراجع

- [1] S. Pal, K. B. Ozanyan, and H. McCann, A spectroscopic study for detection of carbon-monoxide using mid-infrared techniques for single-pass measurement, in **Journal of Physics: Conference Series**, pp. 012020, 2007
- [2] U. Willer, M. Saraji, A. Khorsandi, P. Geiser, and W. Schade, *Near- and mid-infrared laser monitoring of industrial processes, environment and security applications*, **Optics and lasers in engineering**, vol. 44, pp. 699-710, 2006.
- [3] C. Balaras and A. Argiriou, *Infrared thermography for building diagnostics*, **J. of Energy and buildings**, vol. 34, pp. 171-183, 2002.
- [4] D. Manolakis and G. Shaw, *Detection algorithms for hyperspectral imaging applications*, **Signal Processing Magazine, IEEE**, vol. 19, pp. 29-43, 2002.
- [5] P. Norton, *Third-generation sensors for night vision*, in **Congress on Optics and Optoelectronics**, pp. 59571Z-59571Z-15, 2005.
- [6] S. G. Johnson and J. D. Joannopoulos, *Photonic crystals: the road from theory to practice*: Springer, 2002.
- [7] K. Yasumoto, *Electromagnetic theory and applications for photonic crystals*: CRC press, 2010.
- [8] K. Sakoda, Enhanced light amplification due to group-velocity anomaly peculiar to two- and three-dimensional photonic crystals, **Optics express**, vol. 4, pp. 167-176, 1999.
- [9] K. Sakoda, K. Ohtaka, and T. Ueta, Low-threshold laser oscillation due to group-velocity anomaly peculiar to two- and three-dimensional photonic crystals, **Optics express**, vol. 4, pp. 481-489, 1999.
- [10] M. C. Hegg, M. P. Horning, and L. Y. Lin, *A nano-scale quantum dot photodetector by self-assembly*, in **Proc. of SPIE 2005**, pp. 10-18.
- [11] K. T. Posani, V. Tripathi, S. Annamalai, S. Krishna, R. Perahia, O. Crisafulli, and O. Painter, *Quantum dot photonic crystal detectors*, in **Proc. Integrated Optoelectronic Devices 2006**, pp. 612906-612906.
- [12] K. Posani et al, Nanoscale quantum dot infrared sensors with photonic crystal cavity, **Applied physics letters**, vol. 88, pp. 151104-151104-3, 2006.
- [13] H. Yang et al, *Characteristics of Photonic Crystal Cavity Based Infrared Photodetectors*, **LEOS 2007**, 20th Annual Meeting of the IEEE, 2007, pp. 36-37.

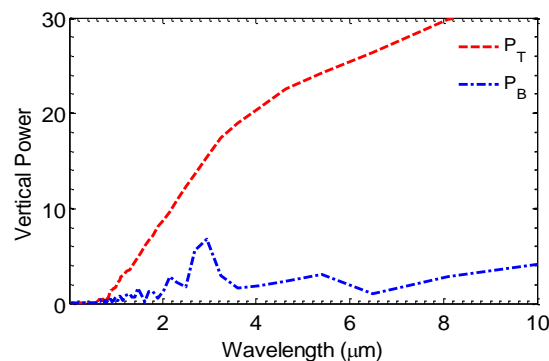
طول موج‌های مختلف مقدار توان برای دو مانیتور عمودی بالا و پایین محاسبه و در شکل (۴) نشان داده شده است. توانی که از مانیتور پایین خارج می‌شود نیز دارای بیشینه-ای در $2/9$ میکرومتر است. زیرا مولفه‌های تشکیل بردار پوینتینگ در جهت عمودی، مولفه‌های افقی هستند که توسط کاواک در مود خاص تقویت شده‌اند. توان جذب شده توسط لایه نقطه کوانتومی از اختلاف مقدار مانیتور-های توان قابل محاسبه است. این محاسبه انجام و در شکل (۵) نشان داده شده است. توان جذب شده دارای بیشینه‌ای در طول موج $2/9$ میکرومتر با پهنای کامل نصف بیشینه‌ای برابر $0/78$ میکرومتر است. مقدار جذب توان در این مود تا ۸ برابر نسبت به سایر طول موج‌ها افزایش یافته است. سرعت گروه پایین مود کاواک باعث برهمکنش و جذب موثر در این طول موج می‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از بلور فوتونی با کاواک تشدید ساختاری برای آشکارساز مادون قرمز نقطه کوانتومی در طول موج $2/9$ میکرومتر طراحی شد. معادلات ماکسول با روش 3D-FDTD حل شده و مقدار توان انتشاری در راستای افقی و عمودی محاسبه و تحلیل شد. نتایج



شکل ۳: مقدار توان در مانیتورهای افقی P_E , P_W , P_N و P_S .



شکل ۴: مقدار توان در مانیتورهای بالا و پایین P_B و P_T .