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

طراحی و تحلیل لیزر تابنده عمود بر سطح کاواک تک مود مبتنی بر کریستال نوری

نجمه عباسیان، مریم پورمحی‌آبادی

دانشکده مهندسی برق، دانشگاه شهید باهنر کرمان

ایمیل: najme.abasian@yahoo.com

چکیده- لیزرهای تابنده عمود بر سطح کاواک (وکسل) به عنوان یک منبع نوری برای ارتباطات نوری کوتاه برد و کم هزینه، مورد توجه قرار گرفته اند. در این مقاله با استفاده از تحلیل عددی *FDTD* نشان می دهیم استفاده از ساختار کریستال نوری در لیزرهای وکسل باعث افزایش توان نوری و تک مود بودن، در طیف وسیعی از طول موج‌ها می‌شود. همچنین با بکارگیری روزنه اکسید در ساختار وکسل کریستال نوری، می توان به میزان حذف مود جانبی *SMSR* ≈ ۴۰*dB* دست یافت. به منظور حذف مودهای اضافی و تک مود شدن طیف نوری طرح جدیدی که در آن شعاع حفره های حلقه داخلی در الگوی کریستال نوری به نصف کاهش داده می شود، ارائه گردید که در نتیجه طیف نوری خروجی بهتری با میزان *SMSR* ≈ ۶۰*dB* بدست آمد. نتایج نشان از برتری این طرح نسبت به سایر طرحهای موجود دارد.

کلید واژه- تک مود، کریستال نوری، لیزر تابنده عمود برسطح کاواک (وکسل)، میزان حذف مود جانبی.

Design and Analysis of Single Mode Photonic Crystal Vertical Cavity Surface Emitting Laser

Najme Abbasian, Maryam Pourmahyabadi

Department of Electrical Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Iran

Abstract - Vertical Cavity Surface Emitting Laser (VCSEL) as a light source for short-range optical communication with the lowest cost is recently considered. Using the photonic crystal structure in VCSELs provides single-mode operation over a wide wavelength range along with high output power. In this paper, these influences are investigated by Finite Difference Time Domain (FDTD) method. It is also shown, the output spectrum will be improved and the side mode suppression ratio will be increased (SMSR) (≈۴۰dB) by using an optimized oxide aperture in photonic crystal VCSEL. In order to eliminate the sided modes and provide the single-mode operation, a novel design in which the air-holes radius of the inner ring of the optical crystal structure is reduced by half, is presented. The achieved result (SMSR ≈۶۰dB) revealed the superior performance of the proposed photonic crystal VCSEL in comparison to the other existing VCSELs.

Keywords: Single mode, Photonic crystal, Side mode suppression ratio, Vertical cavity surface emitting laser.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-07-02]

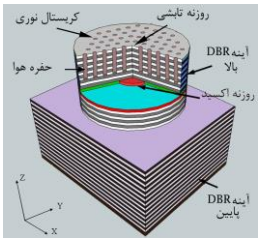
این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

۱- مقدمه

یکی از ادوات اصلی مورد استفاده در مخابرات نوری کوتاه برد، لیزرهای وکسل می‌باشند. لیزر وکسل دارای مزیت‌هایی از جمله تک مود بودن طیف خروجی، سرعت مدولاسیون بالا، پرتو خروجی دایروی با زاویه واگرایی کوچک، در نتیجه بازده‌ی تزویج به فیبر بالا، قیمت بسیار پایین و اندازه‌ی کوچک است [۵-۱]. وکسل‌ها به طور ذاتی به صورت تک مود طولی منتشر می شوند، اما یک سری مودهای جانبی نیز وجود دارد، که به دلیل کوتاه بودن طول کاواک ایجاد می شوند [۶]. راه‌های زیادی برای رسیدن به عملکرد تک مودی وکسل‌ها تاکنون گزارش شده است: از جمله استفاده از روزنه اکسید و روزنه کاشت که نیازمند چگالی جریان زیاد می‌باشد، ترکیب روزنه‌های اکسیدی و روزنه‌های کاشتی، افزایش طول کاواک نوری و استفاده از کریستال نوری می‌باشد. استفاده از حفره‌های هوای متناوب بر روی آینه‌های براگ (DBR[۱]) لیزر وکسل کمک می‌کند که به خروجی تک مودتری دست یابیم. ویژگی‌های لیزر وکسل، آن را برای بسیاری از کاربردها از جمله مخابرات نوری کوتاه برد، اتصالات نوری، ذخیره‌ی اطلاعات نوری، حسگرهای ردیابی گاز وغیره مناسب می‌سازد [۱۰-۷]. در این مقاله تأثیر استفاده از کریستال نوری بر عملکرد تک مودی لیزر وکسل، تأثیر بکارگیری روزنه اکسید در پایین‌ترین لایه آینه‌های براگ بالایی، بهینه سازی ساختار جهت بهبود عملکرد تک مودی طیف خروجی لیزر وکسل کریستال نوری مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

۲- ساختار طرح پیشنهادی

لیزر وکسل متشکل از سه قسمت عمده می‌باشد که عبارتند از: آینه‌های براگ پایین، ناحیه فعال و آینه‌های براگ بالا. ناحیه فعال در بین دو دسته آینه، موسوم به آینه‌های براگ بالا و پایین قرار گرفته‌اند [۱۱]. در این نوع لیزر، تعداد آینه‌های براگ بالا از آینه‌های براگ پایین بیشتر می‌باشد اما بازتاب پذیری کمتری دارند. در ساختار لیزر وکسل برخلاف بقیه لیزرها نور به طور عمود بر لایه فعال، انتشار می یابد. بنابراین بهره فقط در مسافت کوتاهی تقویت می شود، لذا از آینه‌های براگ در بالا و پایین ناحیه فعال استفاده می‌شود. در شکل ۱ نمای کلی ساختار لیزر وکسل کریستال نوری نشان داده شده است.



شکل۱ نمای سه بعدی لیزر وکسل کریستال نوری

در ساختار لیزر وکسل کریستال نوری پیشنهادی، جنس لایه های متناوب آینه براگ از $Al._{/16}Ga._{/84}As/Al._{/92}Ga._{/08}As$ است که به صورت متناوب در بالا و پایین ناحیه فعال قرار گرفته اند. کریستال نوری در آینه‌های براگ بالایی به فرم یک شبکه شش ضلعی با حفره‌های هوا و یک نقص در مرکز آن، قرار گرفته است. نسبت b/a (b قطر حفره‌ها و a فاصله بین مراکز حفره‌ها یا ثابت شبکه) برابر ۰/۵ و ثابت شبکه ۰/۴μm و قطر حفره‌های هوا ۰/۲μm است. عمق حفره‌ها ۱/۸μm است و قطر روزنه تابشی(d) ۰/۶μm است.

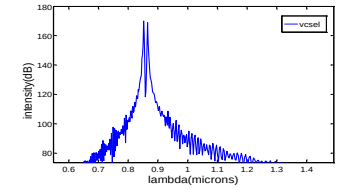
۳- نتایج شبیه سازی

در این تحقیق، جهت بررسی ویژگیهای ساختار، از نرم-افزار FDTD سه بعدی شبیه استفاده شده است. در روش FDTD، پنجره محاسباتی به شبکه‌های مستطیلی تبدیل شده و مؤلفه‌های میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی بر روی این شبکه گسسته‌سازی شده و با حل فرم تفاضلی معادلات کرل ماکسول، محاسبه می‌شوند. درشبیه‌سازی، یک منبع موج صفحه‌ای در ناحیه فعال قرار داده می‌شود. طیف خروجی را می‌توان با قرار دادن مانیتور در مسیر عبور نور در آینه‌های براگ بالا، بدست آورد.

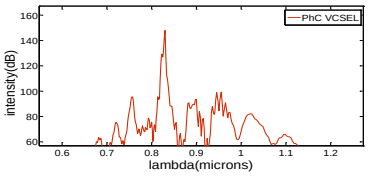
در این بخش ابتدا، مقایسه‌ای بین عملکرد لیزر وکسل معمولی و لیزر وکسل کریستال نوری صورت می‌گیرد. سپس به بررسی تأثیر شعاع روزنه اکسید برروی عملکرد تک مودی طیف سیگنال نوری خروجی در لیزر وکسل کریستال نوری پرداخته می‌شود. شکل ۲ طیف خروجی لیزر وکسل معمولی، طیف خروجی لیزر وکسل کریستال نوری و قیاس بین توان نوری لیزر وکسل معمولی و لیزر کریستال نوری را نشان می دهد که حاکی از افزایش قابل توجه مقدار توان نوری لیزر وکسل مبتنی بر کریستال نوری است.

[۱] Distributed Bragg Reflector

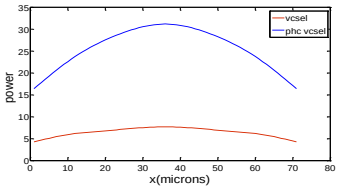
[Downloaded from opsi.ir on 2026-07-02]



(الف)



(ب)

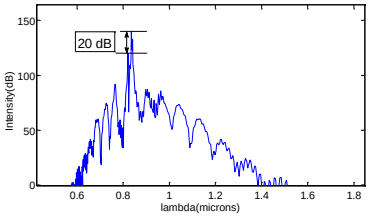


(ج)

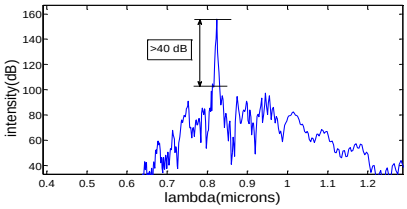
شکل ۲ الف) طیف نوری خروجی لیزر وکسل معمولی ب) طیف نوری خروجی لیزر وکسل مبتنی کریستال نوری ج) مقایسه توان نوری لیزر وکسل و لیزر وکسل کریستال نوری

در لیزرهای وکسل اولیه، به دلیل عبور جریان از کل ناحیه فعال، جریان آستانه و توان مصرفی بالا است. در نتیجه با افزایش دما، کارآیی لیزر افت قابل توجهی بهمراه داشت. برای کاهش جریان آستانه و بهبود بازدهی لیزر، جریان ورودی را به یک ناحیه محدود می‌کنیم. کوچک بودن محل عبور جریان به تک مود بودن طیف خروجی نیز کمک می‌کند. بنابراین با ترکیب دو روش استفاده از کریستال نوری و استفاده از روزنه اکسید، عملکرد لیزر بهبود می‌یابد [۱۲]. برای انتخاب اندازه قطر روزنه اکسید (D) پارامترهای محدودیت‌ها وجود دارد. کوچکتر بودن شعاع روزنه اکسید، تلفات بر روی حفره‌ها را کاهش می‌دهد و نور کمتری کاواک را ترک کرده و به سمت حفره‌های هوا می‌رود. در نتیجه با جریان آستانه کمتر، خروجی تک مودتری بدست می‌آید [۱۴]. از طرفی قطر روزنه اکسید باید از قطر روزنه تابشی بزرگتر باشد تا مطمئن شویم مود تابشی کاملا توسط کریستال نوری محاصره شده است. قطر روزنه اکسید بایستی به صورت D>۲a-b باشد تا منجر به بهبود تک مودی گردد.

در ساختار پیشنهادی اول، پارامترهای ساختار [۱۲] را بهینه کرده و با انتخاب قطر مناسب ۱/۲ µm برای روزنه اکسید در پایین ترین لایه آینه براگ بالایی، طیف خروجی با SMSR بالا بدست می‌آید. شکل ۳ طیف خروجی لیزر وکسل کریستال نوری را در حالت بدون استفاده از روزنه اکسید را نشان می‌دهد. در این حالت میزان SMSR در حدود ۳۰dB است. شکل ۴ طیف خروجی را در حالتی که در روزنه اکسید ساختار لیزر وکسل کریستال نوری بکار رفته است، را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود وجود روزنه اکسید به میزان تک مود بودن کمک می‌کند و مقدار SMSR را به بالای ۴۰dB افزایش می‌دهد. زیرا در این حالت، لایه اکسید به صورت یک عایق الکتریکی عمل کرده و به دلیل داشتن ضریب شکست کوچک، در ضریب شکست محلی تغییر ایجاد کرده و باعث تحدید بیشتر فوتونها و درنتیجه بهبود SMSR می‌شود.



شکل ۳. طیف سیگنال خروجی لیزر وکسل کریستال نوری در حالت بدون استفاده از روزنه اکسید



شکل۴. طیف سیگنال خروجی لیزر وکسل کریستال نوری در حالت استفاده از روزنه اکسید با Ro=۰/۶ µm

در ساختار پیشنهادی دوم، برای بهبود بیشتر در طیف سیگنال خروجی، الگوی کریستال نوری را تغییر داده و با حذف بسیاری از مودهای اضافی که در شکل ۴ دیده می‌شود، به خروجی تک مودتری دست می یابیم. بدین منظور قطر حفره‌های حلقه داخلی الگوی کریستال نوری را کاهش می دهیم. با بررسی مقادیر مختلف، بهترین مقدار برای اندازه قطر این حفره‌ها، نصف قطر حفره حلقه-های بیرونی بدست آمده است. همچنین، فرکانس موج نوری را می‌توان با تغییر شعاع حفره‌های داخلی، اندکی تغییر داد. نمودار این ساختار و طیف خروجی مربوط به آن در شکل ۵ نشان داده شده است.

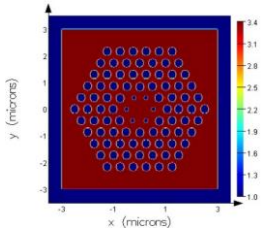
با توجه به نتایج بدست آمده، عملکرد تک مودی خروجی نسبت به حالت قبل بهبود می‌یابد و مودهای اضافی کمتر می‌شود و مقدار SMSR نزدیک به ۶۰dB می رسد.

طرحهای گوناگونی وجود دارد که از روزنه اکسید در ساختار وکسل کریستال نوری استفاده کرده‌اند. در جدول ۱ میزان SMSR بدست آمده از طرح‌های پیشین و طرح‌های پیشنهادی، مقایسه گردیده است. با توجه به

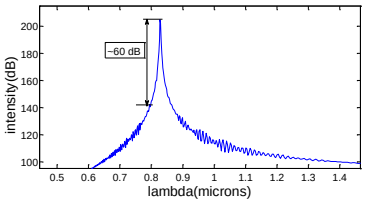
[Downloaded from opsi.ir on 2026-07-02]

نتایج جدول می بینیم که در طرحهای پیشنهادی، پارامتر SMSR به میزان قابل توجهی افزایش یافته است.

بدین ترتیب در این تحقیق، ابتدا با بکارگیری کریستال نوری طیف خروجی از حالت چند مود خارج شد (شکل۲)، یعنی در این حالت مودهای جانبی دارای توان بسیارکمتر نسبت به مود پایه هستند. سپس با استفاده از روزنه اکسید در ساختار وکسل کریستال نوری و بهینه سازی قطر آن، فاصله مود پایه با اولین مود جانبی را افزایش دادیم. نهایتا با تغییر الگوی کریستال نوری، این فاصله را بیشتر و طیف خروجی را بهبود دادیم.



(الف)



(ب)

شکل۵ الف) سطح مقطع وکسل کریستال نوری با یک حلقه داخلی با قطر ۰/۱ μm ب) طیف نوری خروجی

جدول ۱: مقایسه SMSR طرحهای پیشین و طرحهای پیشنهادی

مرجع	معیار SMSR(dB)
مرجع [۱۳]	۳۰
مرجع [۱۵]	۳۰
مرجع [۱۲]	۳۰
مرجع [۱۶]	۳۵
ساختار پیشنهادی اول	**۴۰**
ساختار پیشنهادی دوم	**۶۰**

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله نشان دادیم استفاده از کریستال نوری در عملکرد تک مودی و میزان توان نوری خروجی لیزر وکسل موثر است. سپس با بکارگیری روزنه اکسید، میزان SMSR را به ۴۰dB افزایش دادیم، اما هنوز مودهای جانبی زیادی در کنار مود اصلی وجود دارد. به منظور حذف آنها در الگوی کریستال نوری تغییر ایجاد کرده و قطر حلقه داخلی نصف قطر حلقه‌های بیرونی در نظر گرفته شد. بدین ترتیب در این حالت مقدار SMSR به ۶۰dB افزایش یافت و مودهای اضافی بسیاری حذف شد.

مراجع

[۱] D. S. Song, S. H. Kim, H. G. Park, C. K. Kim, and Y. H. Lee, " *Single-fundamental-mode photonic-crystal vertical-cavity surface-emitting lasers*," **Appl. Phys**. Lett. ۸۰, (۲۰۰۲), ۳۹۰۱-۳۹۰۳.

[۲] A. J. Danner, J. J. Raftery, P. O. Leisher, and K. D. Choquette, "*Single mode photonic crystal vertical cavity lasers*," **Appl. Phys**. Lett. ۸۸, (۲۰۰۶), ۱۱۱٤-۱۱۱٦.

[۳] C. Chen, P. O. Leisher, C. Long, D. M. Grasso, and K. D. Choquette, "*High Speed Electro-Absorption Modulation of Composite Resonator Vertical Cavity Laser*," **IET Optoelectron**., ۳, (۲۰۰۹), ۹۳-۹۹.

[٤] M.S. Alias, S. Shaari, P.K. Choudhury, S.M. Mitani, "Highly confined and continuous *single-mode operation of self-align photonic crystal oxide VCSEL*" **Laser Phys**.۱۹ (۲۰۰۹).

[٥] A.J. Danner, T.S. Kim and K.D. Choquette" *Single fundamental mode photonic crystal vertical cavity laser with improved output power*" **Electronics Letters** ۱۷th March (۲۰۰٥).

[٦] K. D. Choquette, D. F. Siriani, A. M. Kasten, M. P. Tan, J. D. Sulkin, P. O. Leisher, J. J. Raftery and A. J. Danner, "*Single mode photonic crystal vertical cavity surface emitting lasers*," **Advances in Optical Technologies**, *(*۲۰۱۲).

[۷] S. Matsuo, K. Takeda, T. Sato, M. Notomi, A. Shinya, Nozaki, H. Taniyama, K. Hasebe, and T. Kakitsuka, in **European Conference and Exhibition on Optical Commu-nication**, Optical Society of America, (۲۰۱۲).

[۸] A. V. Krishnamoorthy, K. W. Goossen, W. Jan, X. Zheng, R.Ho, G. Li, R. Rozier, F. Liu, D. Patil, J. Lexau, H. Schwetman,D. Feng, M. Asghari, T. Pinguet, and J. Cunningham, IEEE J. Sel. Top. **Quantum Electron**. ۱۷, ۳٥۷, (۲۰۱۱).

[۹] M. Mansuripur and G. Sincerbox" *Principles and techniques of optical data storage*", **Proc. IEEE** ۸٥, ۱۷۸۰, (۱۹۹۷).

[۱۰] B. G. Griffin, A. Arbabi, A. M. Kasten, K. D. Choquette and L. L. Goddard, *"Hydrogen detection using a functionalized photonic crystal vertical cavity laser*," **Quantum Electronics**, **IEEE Journal** of, vol. ٤٨, (۲۰۱۲), ۱٦۰-۱٦۸.

[۱۱] T. Czyszanowski, M. Dems, R. P. Sarzala, K. Panajotov and K. D. Choquette, "*Photonic Crystal VCSELs: Detailed Comparison of Experimental and Theoretical Spectral Characteristics*," **Selected Topics in Quantum Electronics**, **IEEE Journal** of, vol. ۱۹, (۲۰۱۳), ۱-۸.

[۱۲] P. S. Ivanov, P.J. Heard, M.J. Cryan, and J. M. Rorison, "*Comparative Study of Mode Control in ertical-Cavity Surface-Emitting Lasers with Photonic Crystal and Micropillar Etch"*, **IEEE Journal of Quantum Electronics,**, *٤۷(۹), (۲۰۱۱).*

[۱۳] P. O. Leisher, J. D. Sulkin, and Kent D. Choquette, "Parametric Study of Proton-Implanted Photonic Crystal Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers", **IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics,** ۱۳(٥), (۲۰۰۷).

[۱٤] T. Czyszanowski, R.P. Sarzała, Ł.Piskorski, M.aciej Dems, M. Wasiak, W. Nakwaski, S. Member, IEEE, and K. Panajotov, "*Comparison of Usability of Oxide Apertures and Photonic Crystals Used to Create Radial Optical Confinements in ٦٥۰-nm GaInP VCSELs*", **IEEE Journal of Quantum Electronics,** ٤۳(۱۱), ۲۰۰۷.

[۱٥] A. J. Danner, T. S. Kim, and K. D. Choquette, "Single fundamental mode photonic crystal vertical cavity laser with improved output power," **Electron. Letters**, ٤۱, (۲۰۰٥), ۳۲٥–۳۲٦.

[۱٦] M.S. Alias, S. Shaari, "Analysis of single-mode condition and high-order modes discrimination in photonic crystal VCSEL", **Proc. Optical Fiber Comm. Conf**., (۲۰۱۲).

[Downloaded from opsi.ir on 2026-07-02]