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 رفتار سیگنال بزرگ VCSEL با ساختار هدایت شونده با ضریب شکست

رامین اسدی[۱]، نسرین دخت باطنی پور[۲]

[۱] دانشگاه آزاد اسلامی، واحد دماوند، گروه الکترونیک، دماوند ، ایران، ایمیل: asadi_۲۴@yahoo.com

[۲] دانشگاه آزاد اسلامی، واحد دماوند، گروه الکترونیک، دماوند ، ایران، ایمیل: batenipour_nd @srbiau.ac.ir

**چکیده – در این مقاله، رفتار سیگنال بزرگ (دینامیک) لیزر نیمرسانای تابش از سطح با کاواک عمودی (*VCSEL*) به روش عددی تفاضل محدود در حوزه زمان بررسی شده است. ناحیه فعال لیزر موردنظر شامل سه چاه کوانتومی است که بین دو لایه *DBR* نوع *n* و *p* قرار محدود شده است. پنجره اکسیدی و هدایت با ضریب شکست از مزیت‌های این لیزر است که باعث افزایش جریان و بهبود عملکرد تک مد لیزر خواهد شد. رفتار زمانی-مکانی تراکم حامل‌ها، توزیع میدان نوری و بهره این ساختار بررسی شده است. بروز لکه تاریک (*SHB*) از پدیده‌های مهم در رفتار سیگنال بزرگ *VCSEL* است که در این مقاله مورد مطالعه قرار گرفته است.**

کلید واژه- لیزر تابش از سطح با کاواک عمودی، روش عددی تفاضل محدود، مطالعه رفتار دینامیک لیزر.

# Analysis of dynamic of an index-guided VCSEL

Ramin Asadi [۱], Nasrindokht Batenipour[۲]

[۱] Department of Electrical Engineering, Damavand Branch, Islamic Azad University, Damavand, Iran. Email: asadi_۲۴@yahoo.com

[۲] Department of Electrical Engineering, Damavand Branch, Islamic Azad University, Damavand, Iran. Email: batenipour_nd @srbiau.ac.ir

Abstract- In this paper, we use a numerical finite difference method for studying vertical cavity surface emitting lasers (VCSEL) in dynamic operation. The quantum-well active layer is sandwiched between two n-type and p-type Bragg reflectors, which provide optical feedback for lasing. An oxide aperture and index guiding structure are promising properties of VCSEL that results increasing and stable single-mode operation. Time and space behavior of carrier concentration, optical field normalized intensity and gain are investigated. The effect of SHB on VCSEL dynamic parameters is illustrated.

Keywords: Vertical cavity surface emitting lasers, Finite difference method, Analysis of laser dynamic properties.

[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-30 ]



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

## ۱- مقدمه

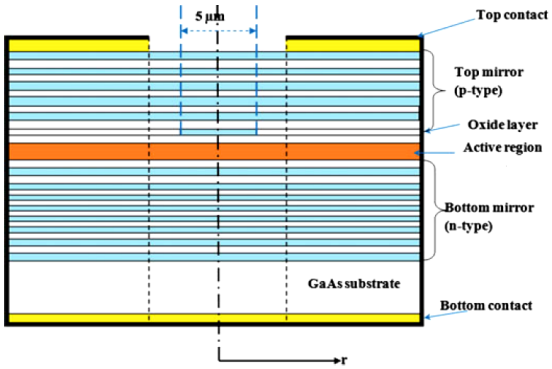
لیزر نیمرسانای تابش از سطح با کاواک عمودی (VCSEL[۱]) به دلیل بازده بالا، ابعاد فشرده، قیمت کم و کاربردی بودن برای محدوده وسیعی از طول موجها بسیار مورد توجه قرار دارد. VCSELها بدلیل مزایای زیادی که دارند، در زمینه‌های زیادی از جمله مخابرات نوری، چاپگرها و حافظه‌های نوری مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۱و۲]. بزرگترین مشکل این نوع لیزرها مهار مدهای عرضی آنهاست که این مشکل برای طول موجهای کوتاه برطرف شده ولی برای طول موجهای بلند همچنان بصورت چالشی بزرگ وجود دارد. ناحیه فعال VCSEL یک نیمرسانای نازک با بهره‌ی نوری پایین است که برای افزایش بهره نور خروجی بین دو لایه‌ی آینه‌ای با بازتاب بالا محدود شده است. ناحیه فعال معمولا یک یا چند چاه کوانتومی است که بهره‌ی پایینی دارند. ضریب بازتاب بالای آینه‌های DBR[۲] در بالا و پایین ناحیه فعال، بهره‌ی بالای مودهای نوری را تضمین می‌کند [۳]. جریان آستانه کم، اندازه کوچک، انحصار نوری و الکتریکی مناسب و ضریب انعکاس بالای آینه‌های DBR از جمله مشخصه‌های سیگنال کوچک (ایستا) ایده‌آل VCSEL هستند. برای رسیدن به این اهداف ساختارهای VCSEL متعددی در مقالات مختلف ارائه شده است [۳و۴]. با توجه به مزیت-های VCSEL هدایت با ضریب شکست بر VCSEL هدایت با بهره، در این مقاله از ساختار ارائه شده در مرجع [۵] که دارای یک لایه اکسیدی در بالا و پایین ناحیه فعال است، استفاده شده است.

پدیده‌های الکتریکی، نوری و حرارتی در VCSEL با هم برهم‌کنش دارند. بنابراین برای مدلسازی VCSEL نیازمند مدلی جامع برای در نظر گرفتن تاثیر متقابل پدیده‌های فیزیکی مختلف هستیم [۶ و ۷]. در جامع‌ترین مدلی که تاکنون در مقالات ارائه شده است [۵]، با استفاده از روش تفاضل محدود و در نظر گرفتن وابستگی بهره غیرخطی ناحیه فعال به حامل، با روش خودسازگار معادلات الکتریکی-نوری-حرارتی لیزر حل شده‌اند. بروز لکه تاریک (SHB[۳]) از پدیده‌های مهم در بررسی رفتار سیگنال بزرگ VCSEL است. با افزایش جریان بایاس لیزر به مقادیر بالای آستانه، به دلیل توزیع غیریکنواخت حامل در کاواک و تولید تعداد زیاد فوتون تعداد حامل‌ها بطور ناگهانی کاهش می‌یابد. این پدیده را SHB تعریف می‌کنند [۸].

این مقاله متشکل از بخش‌های زیر است: در بخش دوم، شماتیک ساختار لیزر و اصول عملکرد آن ارائه شده است. در بخش سوم، تئوری مدلسازی معادلات حاکم بر VCSEL ارائه شده‌اند. در بخش چهارم نتایج شبیه‌سازی ارائه و بررسی گردیده است. و در انتها نتیجه‌گیری کلی مقاله در بخش پنجم ارائه شده است.

## ۲- ساختار و اصول عملکرد VCSEL

شکل ۱ شماتیک برش عرضی VCSEL مورد در شبیه-سازی را نشان می‌دهد. ناحیه فعال لیزر شامل سه چاه کوانتومی با ترکیب $Al_{0.3}Ga_{0.7}As/GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ است که پهنای چاه (GaAs) ۱۰ نانومتر و پهنای سد ($Al_{0.3}Ga_{0.7}As$) ۷ نانومتر می‌باشد. برای هدایت با ضریب شکست دو لایه اکسید ($Al_{0.98}Ga_{0.02}As$) به ضخامت ۴۰ نانومتر به فاصله ۳۰ نانومتری بالا و پایین ناحیه فعال در نظر گرفته شده‌اند. آینه‌های DBR نیز با ترکیب لایه‌های $AlAs/ Al_{0.16}Ga_{0.84}As$ بطور تناوبی در بالا (نوع p با ۱۹/۵ پریود) و پایین (نوع n با ۲۷/۵ پریود) با ضریب بازتاب ۹۹/۹ درصد قرار دارند. طیف انعکاس لیزر موردنظر برای طول موج ۸۵۰ نانومتر و FWHM حدود ۱۲/۶ پیکومتر طراحی شده است.




شکل ۱: شماتیک ساختار VCSEL با هدایت ضریب شکست [۵]

## ۳- مدلسازی

پدیده‌های الکتریکی-نوی-حرارتی دارای تاثیر متقابل هستند که این موضوع پیچیدگی‌های محاسبات را برای VCSEL بیشتر می‌کند. معادلات نرخ حامل (مدل

[۱] Vertical cavity surface emitting laser
[۲] Distributed Bragg Reflector
[۳] Spectral hole burning

[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-30 ]

الکتریکی)، موج (مدل نوری) و توزیع حرارت (مدل حرارتی) را با استفاده از یک الگوریتم شبه سه‌بعدی در یک مدل جامع بصورت خودسازگار حل می‌کنیم.

در مدل الکتریکی فرض می‌کنیم که توزیع چگالی حامل در راستای z در ناحیه فعال یکنواخت است. معادله نفوذ برای محاسبه توزیع شعاعی حامل‌ها در ناحیه فعال بصورت زیر است [۹]:

$$D_n \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial N(r,t)}{\partial r}\right)-\frac{N(r,t)}{\tau_s}-g(N(r,t))\frac{P_a|E_t(r,t)|^2}{h\nu} + \frac{I(r,t)}{qd}=\frac{\partial N(r,t)}{\partial t} \quad (1)$$

که $D_n$ ضریب نفوذ الکترون، $\tau_s$ طول عمر حامل، $P_a$ متوسط توان نوری در کاواک، $|E_t(r,t)|^2$ مشتق میدان نوری نرمالیزه، $h$ ثابت پلانک، $\nu$ فرکانس لیزر، I(r) توزیع چگالی جریان تزریقی به ناحیه فعال، q بار الکترون و d ضخامت ناحیه فعال هستند. طیف بهره ساختار چاه کوانتومی $g(N(r,t))$ برای چگالی حامل‌های مختلف برای مد TE با رابطه زیر بیان می‌شود:

$$g(E)=\frac{e^2h}{2\pi m_0^2 n_r \varepsilon_0 c E_i}\times \sum_J\sum_n \int_{E_g+E_{Cn}+E_{Vn}^J}^{\infty}\rho^J(E)M_J^2(E)(f_{Cn}-f_{Vn}^J)L(E)dE \quad (2)$$

که $E_i$ انرژی فوتون، $E_g$ شکاف انرژی، $E_{Cn}$ تراز انرژی الکترون، m. جرم الکترون آزاد، $n_r$ ضریب شکست، ε. گذردهی فضای آزاد، c سرعت نور، $\rho^J(E)$ چگالی حالت کاهش یافته، M(E) المان ماتریس دوقطبی، L(E) تابع لورنتزین، $f_{Cn}$ و $f_{Vn}^J$ توابع فرمی نوار هدایت و نوار ظرفیت هستند. زیرنویس J نشان‌دهنده حفره‌ی سنگین یا سبک است. تابع مشتق میدان نوری نرمالیزه ($|E_t(r,t)|^2$) برای همه مدهای عمودی کاواک $\varphi_t(r)$ با معادله زیر بیان می‌شود:

$$|E_t(r,t)|^2=\frac{|\varphi_t(r)|^2}{\frac{1}{2s}\int_{-\infty}^{\infty}|\varphi_t(r)|^2dr} \quad (3)$$

که s در این رابطه شعاع پنجره اکسید است.

توزیع جریان و ولتاژ در ساختار وابسته به توزیع میدان نوری است که به ساختار افزاره، مواد سازنده، شرایط عملکرد و ... بستگی دارد. در اینجا برای سادگی محاسبات توزیع جریان را بصورت زیر در نظر می‌گیریم [۱۰]:

$$I(r,t)=\begin{cases} I_0(t) & r\le s \\ I_0(t)\,exp(-(r-s)/r_0) & r\ge s \end{cases} \quad (4)$$

که .r ثابت پخش‌شدگی جریان در ناحیه فعال زیر اکسید است.

معادله میدان از معادلات ماکسول پیروی می‌کند. ثابت دی‌الکتریک نیز طبق رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\cong n_r^2+jn_r g(N(r,t))/k_0 \quad (5)$$

در این رابطه .k ثابت انتشار خلا است. با توجه به اینکه در این مقاله تاثیر حرارت بر عملکرد لیزر بررسی نمی‌شود، لذا ار معدلات حرارت چشم پوشی کرده‌ایم.

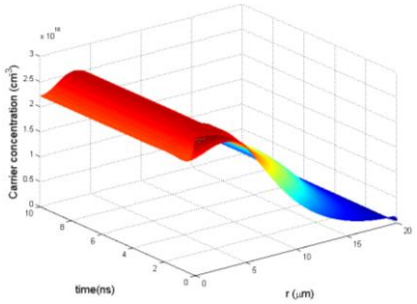
## ۴- بررسی نتایج حاصل از شبیه‌سازی

پارامترهای مورد استفاده در شبیه‌سازی از مرجع [۵] استخراج شده است. مقدار شعاع پنجره اکسید ۵ میکرومتر و ثابت پخش‌شدگی جریان ۴ میکرومتر (انحصار ضعیف) است و از مدل تقریب خطی برای بهره چاه کوانتومی استفاده شده است. برای بررسی رفتار سیگنال بزرگ VCSEL ابتدا لیزر را با جریان آستانه راه‌اندازی کرده، سپس با یک جریان پله‌ای با دامنه ۱/۵ برابر جریان آستانه آنرا مدوله می‌کنیم.

شکل ۲ رفتار زمانی-مکانی تراکم حامل‌ها را نشان می‌دهد. از آنجا که در این حالت ثابت پخش‌شدگی جریان بالا است، نفوذ جریان به خارج از ناحیه مرکزی فعال (r=۰) با گذشت زمان بیشتر شده و تراکم حامل‌ها در نواحی دور از مرکز بیشتر از صفر خواهد بود. زمان نشست برای این حالت ۳ نانوثانیه است. طبق شکل شدت پدیده SHB (که ناشی از عدم یکنواختی تراکم حامل‌هاست) با دور شدن از مرکز ناحیه فعال بدلیل کاهش شدت جریان تزریقی کمتر خواهد شد.

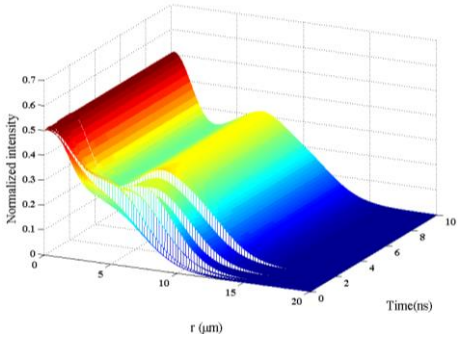
شکل ۳ پاسخ گذرای شدت موج را نشان می‌دهد. نکته مهم در این شکل ظهور مدهای عرضی با گذر زمان است. به دلیل امکان نفوذ جریان به نواحی زیر پنجره اکسید در

[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-30 ]



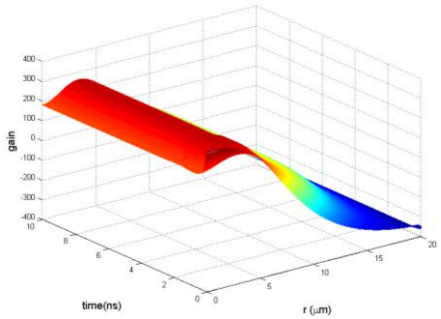

شکل ۲: رفتار زمانی-مکانی تراکم حامل‌ها

ناحیه فعال، با افزایش زمان امکان ظهور مدهای عرضی بالاتر بیشتر می‌شود. با اعمال جریان پله‌ای به لیزر بهره مدهای عرضی افزایش می‌یابد (شدت پاسخ پله در مرکز کاهش و در کناره‌ها افزایش می‌یابد) و بهره مدهای عرضی با مرتبه بالاتر به میزان آستانه می‌رسد و با گذشت زمان ظهور پیدا می‌کنند. افزایش شدت پاسخ پله در کناره‌ها به مفهوم افزایش تلفات است.




شکل ۳: رفتار زمانی-مکانی توزیع میدان نوری با مدولاسیون جریان پله

شکل ۴ نیز رفتار زمانی-مکانی بهره چاه کوانتومی را نشان می‌دهد. بدلیل ریزش شدید حامل‌ها و شدت گرفتن پدیده SHB ناشی از عدم یکنواختی در توزیع حامل‌ها بازده نور خروجی و در نتیجه بهره چاه کوانتومی کاهش خواهد یافت. با گذشت زمان و فاصله گرفتن از مرکز ناحیه فعال، تراکم حامل‌ها کاهش یافته و درنتیجه بهره نیز کاهش می‌یابد.




شکل ۴: رفتار زمانی-مکانی بهره چاه کوانتومی

## ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله ساختار VCSEL با پنجره اکسیدی (هدایت با ضریب شکست) برای حالت انحصار جریان ضعیف و پهنای پنجره ۵ میکرومتر شبیه‌سازی شد. با استفاده از مدل جامع الکتریکی-نوری-حرارتی رفتار سیگنال بزرگ VCSEL را بررسی گردید. رفتار زمانی-مکانی تراکم حامل‌ها، توزیع میدان نوری و بهره با استفاده از مدل تقریب خطی بررسی شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان داد که پدیده‌ی SHB تراکم حامل‌ها و بهره را بدلیل عدم یکنواختی حامل‌ها شدیدا کاهش می‌دهد. همچنین مشاهده شد با گذشت زمان مدهای عرضی مرتبه بالاتر تقویت شده و ظهور پیدا کرد.

## مراجع


[۱] Yu S. F., Analysis and design of vertical cavity surface emitting lasers for self-sustained pulsation operation, **IEEE J. Quantum Electron.** ۳٤(۱۹۹۸) ٤۹۷–۵۰۵.

[۲] Gao J., An analytical method to determine small-signal model parameters for vertical-cavity surface emitting Lasers, **J. Lightwave Technol.** ۲۸(۲۰۱۰) ۱۳۳۲–۱۳۳۷.

[۳] Li H., Iga K., Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser Devices, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, ۲۰۰۳.

[٤] Mulet Pol J., Semiconductor Laser Dynamics: Compound-cavity, polarization and transverse modes, Phd dissertation, Universitat de les Illes Balears, ۲۰۰۲.

[۵] Aghaeipour M., Ahmadi V., Darabi E., The effects of carrier dependent nonlinear gain on quantum well VCSEL characteristics, **Opt. Quant. Electron** ٤۵ (۲۰۱۳) ۱۱۵–۱۲٦.

[٦] Zhang H., Mrozynski G., Analysis of transverse mode competition of VCSELs based on a spatially independent model, **IEEE J. Quantum Electron.** ٤۰ (۲۰۰٤) ۱۸–۲٤.

[۷] Liu Y., Simulating the modulation response of vertical cavity surface emitting lasers, Phd dissertation, university of Science and Technology of China, ۱۹۹۸.

[۸] Man W. M., Yu S. F., Comprehensive modeling of diffused quantum-well vertical-cavity surface-emitting lasers, **IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.** ٤ (۱۹۹۸) ۷۱۵–۷۲۲.

[۹] S. F. Yu, Analysis and design of vertical cavity surface emitting lasers, John Wiley &Sons, Hoboken, New Jersey, ۲۰۰۳.

[۱۰] Zhao Y.G., McInerney J.G., Transverse-mode control of vertical-cavity surface emitting lasers, **IEEE J. Quantum Electron.** ۳۲ (۱۹۹٦) ۱۹۵۰–۱۹۵۸.


[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-30 ]