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

مدلسازی لیزر نیمه هادی مخابراتی نقطه کوانتومی با مد قفل شده ی غیر فعال

جواد رحیمی[۱] ، وحید احمدی[۱*] و محمد حسن یاوری[۲]

[۱]دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، کدپستی: ۱۴۱۱۵۱۱۱

[۲]دانشگاه شاهد، دانشکده فنی و مهندسی، کد پستی: ۳۳۱۹۱۱۸۶۵۱

در این مقاله عملکرد لیزر نقطه کوانتومی با مد قفل شده ی غیرفعال به روش تفاضل محدود موج رونده مدل سازی و تحلیل شده است. ساختار مورد بررسی در این تحقیق یک لیزر فابری-پرو می باشد که از دو بخش تقویت کننده با بایاس مستقیم و جاذب اشباع شدنی با بایاس معکوس تشکیل شده است. به منظور توصیف دینامیک افزاره، از حل معادله موج رونده ی کوپل شده با معادلات نرخ نقاط کوانتومی در دو بخش مجزا بهره خواهیم برد و سپس تاثیر ولتاژ منفی اعمالی به قسمت جاذب را بر عملکرد افزاره مورد بررسی قرار خواهیم داد. نتایج نشان می دهد که با افزایش ولتاژ منفی جاذب، عرض زمانی پالس های خروجی کاهش و توان پالس ها افزایش می یابد.

کلید واژه- تفاضل محدود موج رونده، جاذب اشباع شدنی، لیزر نقطه کوانتومی با مد قفل شده ی غیرفعال

Modeling of Semiconductor Quantum Dot Passively Mode Locked Laser for optical communication application

Javad Rahimi[۱], Vahid Ahmadi[۱*], and Mohammad Hasan Yavari[۲]

[۱]Tarbiat Modares University, Faculty of Electrical and Computer Engineering, Zip code:۱۴۱۱۵۱۱۱

[۲]Shahed University, Faculty of Engineering, Zip code:۳۳۱۹۱۱۸۶۵۱

Abstract- In this paper, a passively quantum dot mode-locked laser (QD-MLL) has been analyzed based on the rigorous numerical model. The structure is a Fabry-Perot laser consisting of a reverse-biased saturable absorber and a forward-biased amplifying section. In order to describe the dynamic behavior of the laser, we use traveling wave equations coupled to quantum dot rate equations. Also, we investigate the effect of negative voltage applied to the absorber section on the mode locking performance of the laser. Results show that by increasing the negative voltage applied to the saturable absorber, the output pulse duration is decreased and output power is increased.

Keywords: Finite difference traveling wave, passively quantum dot mode-locked laser, saturable absorber

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-31]

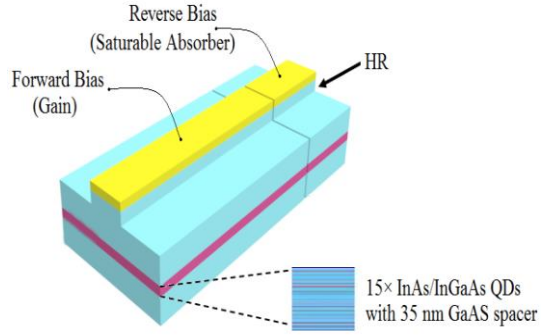
این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

۱- مقدمه

از دیدگاه تئوری و شبیه سازی، روش های مختلفی برای تحلیل رفتار پچیده ی لیزرهای نقطه کوانتومی با مد قفل شده به کار برده می شود. روش تفاضل محدود موج رونده (FDTW) و همچنین روش معادلات دیفرانسیلی تاخیری (DDE) از جمله روش هایی می باشند که ضمن به دست دادن تحلیل مناسب و دقیق، بیشترین تطابق را با نتایج تجربی و عملی دارند[۳-۱]. روش تفاضل محدود موج رونده مبتنی بر حل مستقیم معادله موج رونده مرتبه اول یک بعدی با روش تفاضل محدود می باشد که روش تحلیلی مناسبی برای لیزرهای فابری-پرو به حساب می آید. در این روش معادلات موج حاکم بر سیر زمانی میدان الکتریکی در درون کاواک لیزر با عبارت های مناسب مربوط به تابش خود به خودی نقاط کوانتومی و همچنین معادلات نرخ توصیف کننده تبادل حامل ها در ترازهای گسسته نقاط کوانتومی، با هم کوپل می شوند و سپس در هر بخش طولی افزاره، به صورت کوپل شده معادلات مربوطه حل می شوند[۵-۴].

۲- معادلات میدان و نرخ حامل

در این بخش ساختار مورد نظر را بررسی خواهیم کرد و معادلات میدان و نرخ حاکم بر عملکرد افزاره را تشریح می کنیم. در شکل(۱) ساختار یک لیزر نیمه هادی نقطه کوانتومی با مدقفل شده نشان داده شده است. در این ساختار یک لیزر نقطه کوانتومی با مد قفل شده ی دوبخشی را بررسی می کنیم که متشکل از یک جاذب اشباع شونده با بایاس معکوس و بخش تقویت کننده(بهره) با بایاس مستقیم می باشد.



شکل ۱: لیزر نقطه کوانتومی با مد قفل شده غیرفعال، متشکل از قسمت بهره با بایاس مستقیم و جاذب اشباع شدنی با بایاس معکوس.

انتشار طولی مد عرضی میدان الکتریکی در کاواک لیزر را می توان به صورت معادله متشکل از دو موج رونده رو به جلو و رو به عقب به صورت زیر توصیف کرد[۴]:

$$\frac{\partial}{\partial t}E^{\pm}=\frac{c_0}{n_{gr}}(\mp\frac{\partial}{\partial z}-\mathrm{i}\,\beta)\mathrm{E}^{\pm}+F_{sp}^{\pm} \qquad (۱)$$

برای حل معادله اخیر از شرایط مرزی بازتابی در دو آینه لیزر استفاده می کنیم. بنابراین در $Z=0$ و $Z=L$، که L طول افزاره در جهت محور Z می باشد داریم[۴]:

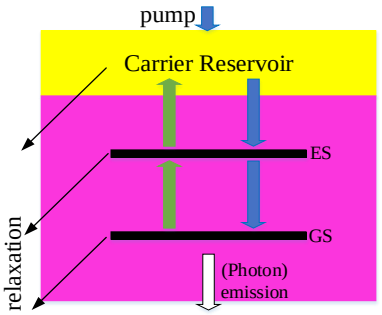
$$E^{+}(0,\mathrm{t})=\mathrm{r}_0\,E^{-}(0,t),\mathrm{E}^{-}(\mathrm{L},\mathrm{t})=\mathrm{r}_L\,E^{+}(\mathrm{L},\mathrm{t}) \qquad (۲)$$

که در آن r_0 و r_L ضرایب انعکاس آینه های کاواک لیزر به ترتیب در $Z=0$ و $Z=L$ می باشند. در معادلات فوق E^{+} و E^{-} بیان گر دامنه ی میدان نوری کند تغییر امواج رونده رو به جلو و رو به عقب می باشند که در حالت کلی متغیرهایی مختلط هستند. همچنین $F^{\pm}$ معادل نویز مربوط به تابش خود به خودی، C_0 و n_{gr} به ترتیب توصیف کننده سرعت نور و ضریب شکست گروه می باشند[۷-۶]. در این رابطه β نشان دهنده ی ثابت انتشار مربوط به امواج رونده در کاواک لیزر می باشد که با فرض عملکرد لیزشی لیزر تنها در تراز پایه، رابطه ی ثابت انتشار به صورت زیر تعریف می شود[۴]:

$$\beta=\beta(\mathrm{n}_{gs}(\mathrm{z},\mathrm{t}),\mathrm{z})=\delta-\mathrm{i}\frac{\alpha}{2}+\frac{(\mathrm{i}-\alpha_H)}{2}g'(2\,\mathrm{n}_{gs}-1) \qquad (۳)$$

در این رابطه، δ، α، α_H و g' به ترتیب بیانگر ناکوکی استاتیکی از طول موج مرجع، جذب داخلی، ضریب بهبود پهنای خط(ضریب هانری) و بهره دیفرانسیلی موثر می باشند. در رابطه (۳)، n_{gs} احتمال اشغال تراز پایه نقاط کوانتومی می باشد که از طریق معادلات نرخ، تبادل حامل بین تراز گسسته برانگیخته(n_{es}) و لایه وتینگ(n_{cr}) را توصیف می کنند. از آن جائیکه افزاره مورد نظر از دو بخش جذب کننده و تقویت کننده تشکیل شده است، با توجه به شرایط بایاس دو دسته معادله نرخ برای هر قسمت خواهیم داشت. بنابراین به منظور توصیف تبادل حامل بین لایه وتینگ، تراز برانگیخته و تراز پایه نقاط کوانتومی در نواحی بهره و جاذب از روابط زیر با توجه به شکل های (۱) تا (۳) استفاده خواهیم کرد[۴]:

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-31]



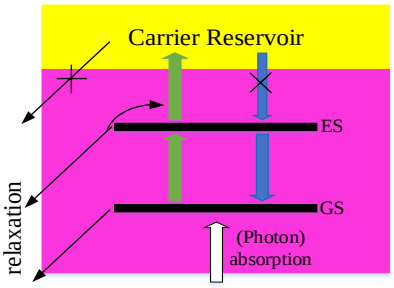
شکل۲: توصیف شماتیکی گذار حامل در ناحیه بهره.

$$\frac{d}{dt}n_{gs}(z,t) = -\frac{n_{gs}}{\tau_{gs}} + 2R_{es,gs} - R_{st}(n_{gs},E)$$

$$\frac{d}{dt}n_{es}(z,t) = -\frac{n_{es}}{\tau_{es}} - R_{es,gs} + R_{cr,es}$$

$$\frac{d}{dt}n_{cr}(z,t) = \frac{I(z)}{e\theta_I} - \frac{n_{cr}}{\tau_{cr}} - 4R_{cr,es} \qquad (۴)$$

در قسمت جذب کننده، با توجه به شکل زیر معادلات نرخ را می نویسیم[۴]:



شکل۳: توصیف شماتیکی گذار حامل در ناحیه جاذب.

$$\frac{d}{dt}n_{gs}(z,t) = -\frac{n_{gs}}{\tau_{gs}} + 2R_{es,gs} - R_{st}(n_{gs},E)$$

$$\frac{d}{dt}n_{es}(z,t) = -\frac{n_{es}}{\tau_{es\to cr}} - 2R_{es,gs} \qquad (۵)$$

در روابط مربوط به معادلات نرخ در قسمت جذب کننده با بایاس معکوس، فرض شده است که از لایه وتینگ به تراز برانگیخته نقاط کوانتومی گذاری نداریم($\tau^{-1}_{cr\to es}=0$). در معادلات نوشته شده، R_{st} بیانگر نرخ بازترکیب برانگیخته می باشد که به صورت زیر تعریف می شود[۴]:

$$R_{st}(n_{gs},E) = \frac{1}{\theta_E}\sum_{v=\pm} E^{v^*}(g'(2n_{gs}-1))E^{v} \qquad (۶)$$

به همین ترتیب روابط زیر را برای بازترکیب حامل ها خواهیم داشت[۴]:

$$R_{es,gs}(n_{es},n_{gs}) = \frac{n_{es}(1-n_{gs})}{\tau_{es\to gs}} - \frac{n_{gs}(1-n_{es})}{2\tau_{gs\to es}}$$

$$R_{cr,es}(n_{cr},n_{es}) = \frac{n_{cr}(1-n_{es})}{4\tau_{cr\to es}} - \frac{n_{es}}{\tau_{es\to cr}} \qquad (۷)$$

در تمامی روابط فوق $\tau^{-1}_{a\to b}$ و τ^{-1}_{a} بیانگر زمان واهلش خود به خودی و نرخ گذار بین لایه وتینگ، تراز برانگیخته و تراز پایه نقاط کوانتومی در قسمت های بهره و جذب کننده می باشند($a,b\in\{cr,es,gs\}$). همچنین e بار الکترون و $I(z)$ جریان تزریقی به افزاره می باشد که رابطه زیر را برای آن خواهیم داشت[۴]:

$$I_G = I(z)\big|z\in[l_{SA},L], I_{SA} = I(z)\big|z\in[0,l_{SA}] = 0 \qquad (۸)$$

مقادیر برخی دیگر از پارامترهای به کار رفته شده در روابط فوق در جدول (۱) داده شده اند:

جدول۱: پارامترهای مورد استفاده در شبیه سازی [۴]

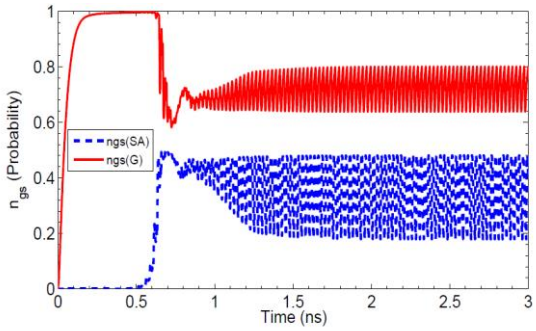
symbol	value	symbol	value
λ_0	$1.3\mu m$	τ_{cr}	$1ns$
n_{gr}	3.75	$\tau_{es\to gs}$	$2ps$
L	$1mm$	$\tau_{gs\to es}$	$5ps$
l_{SA}	$100\mu m$	$\tau_{cr\to es}(G)$	$5ps$
δ	0	$\tau^{-1}{}_{cr\to es}(SA)$	0
α	$5cm^{-1}$	$\tau_{es\to cr}(G)$	$80ps$
α_H	2	$\tau_{es\to cr}(SA)$	$18e^{\frac{u}{2}}ps$
$g'(SA)$	$200cm^{-1}$	θ_I	$9.36.10^6$
$g'(G)$	$40cm^{-1}$	θ_E	$239ps$
τ_{gs}	$1ns$	r_0	$\sqrt{0.95}$
τ_{es}	$1ns$	r_L	$\sqrt{0.3}$

۳- بررسی تاثیر ولتاژ معکوس بر عملکرد لیزر

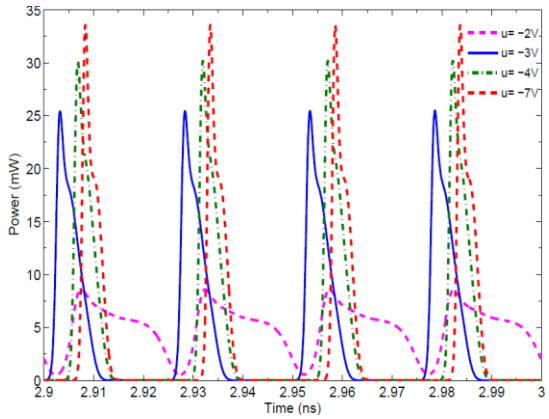
یکی از مهم ترین پارامترهای مربوط به عملکرد لیزرهای نیمه رسانای با مد قفل شده ی غیرفعال، ولتاژ منفی (U) اعمالی به جاذب اشباع شونده می باشد. به عبارت دیگر با توجه به روابط مربوط به معادلات نرخ حامل در قسمت جاذب و جدول(۱)، زمان واهلش حامل از حالت برانگیخته به لایه وتینگ ($\tau_{es\to cr}$) با ولتاژ معکوس اعمالی

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-31]

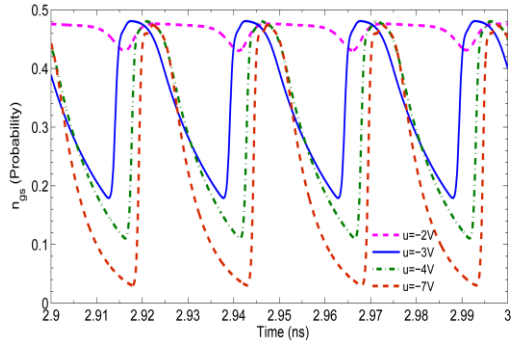
وابستگی نمایی دارد. در شکل (۴) تغییرات چگالی حامل بخش های بهره و جاذب آورده شده است. همانطور که از نتایج شبیه سازی نشان داده شده در شکل های (۵) و (۶) پیداست، قدرمطلق تغییرات ولتاژ معکوس در جاذب با عرض زمانی پالس های خروجی نسبت معکوس و با دامنه توان خروجی نسبت مستقیم دارد. به عبارت دیگر با افزایش ولتاژ معکوس، زمان واهلش حامل از حالت برانگیخته به لایه وتینگ کاهش می یابد و در نتیجه با تسریع زمان اشباع و خالی شدن جاذب، مقدار میانگین احتمال اشغال تراز پایه در جاذب کاهش می یابد که این پدیده سبب افزایش قدرت جذب کنندگی جاذب می شود. بنابراین در خروجی لیزر مجموعه مدهای هم فازتری خواهیم داشت که ضمن کاهش محسوس عرض پالس ها، دامنه توان خروجی را نیز افزایش داده است.



شکل۴: چگالی حامل ها در جریان ۸۰ میلی آمپر و ولتاژ ۳- ولت، ngs(SA) و ngs(G) به ترتیب بیانگر چگالی حامل ها در قسمت جاذب و بهره می باشند.



شکل ۵: توان خروجی پالس ها در جریان ۸۰ میلی آمپر و ولتاژهای اعمالی مختلف.



شکل ۶: چگالی حامل ها در قسمت جاذب در جریان ۸۰ میلی آمپر و ولتاژهای اعمالی مختلف.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله ساختار لیزر نقطه کوانتومی با مد قفل شده ی غیرفعال با استفاده از روش تفاضل محدود موج رونده مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است و تاثیر ولتاژ منفی اعمالی بر عملکرد پالسی لیزر گزارش شده است. همانطور که از نتایج شبیه سازی پیداست، با افزایش ولتاژمنفی بخش جاذب از ۲- ولت به ۷- ولت، به دلیل سریع تر شدن پاسخ زمانی جاذب اشباع شدنی پالس هایی با عرض زمانی کمتر در خروجی لیزر خواهیم داشت که اثر مدهای قفل شده ی مربوط به گروههای دیگر نیز با نسبت مستقیم تضعیف شده است. همچنین به دلیل هم فازی تر بودن مدهای خروجی لیزر، دامنه توان خروجی تا حدود ۲۵ میلی وات افزایش یافته است.

مراجع

[۱] J. Ming Liu, *Photonic Devices*, Cambridge University Press, ۲۰۰۵.

[۲] M. Rossetti, P.bardella, I. Montrosset, *Time-Domain Travelling-Wave Model for Quantum Dot Passively Mode-Locked Lasers* , **IEEE Journal of Quantum Electronics** ,vol. ۱۹, no. ٤, ۲۰۱۲.

[۳] M. Rossetti, P.bardella, I. Montrosset, *Modeling Passive Mode-Locking in Quantum Dot Lasers: A Comparison Between a Finite-Difference Traveling-Wave Model and a Delayed Differential Equation Approach* , **IEEE Journal of Quantum Electronics** , vol.٤٧, no.٥, ۲۰۱۱.

[٤] M. Radziunas, A.Vladimirov, E. A. Viktorov, D. Bimberg, *Pulse broadening in quantum-dot Mode-Locked semiconductor lasers simulation, analysis, and experiments*, **IEEE Journal of Quantum Electronics**, vol. ٤٧, no. ٧, ۲۰۱۱.

[٥] E. U. Rafailov, M. A. Cataluna, W. Sibbett, *Mode-locked quantum-dot lasers*, **Nature Photonics** .۱, ۳۹٥ - ٤۰۱, ۲۰۰۷.

[٦] H.J. Wunsche, M. Radziunas, S. Bauer, O. Brox, B. Sartorius, *Modeling of Mode Control and Noise in Self-Pulsating PhaseCOMB Lasers*, **IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics,**vol. ۹, no. ۳, ۲۰۰۳.
John E. Carroll, J. Whiteaway, D.Plumb, *Distributed feedback semiconductor lasers*, Institution of Electrical Engineers, ۱۹۹۸ .

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-31]