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 پراکندگی حامل- حامل و پراکندگی اوژه بر عملکرد لیزر نقطه کوانتومی

محمدرضا شفیعی[۱]، محمدحسن یاوری[۲]

[۱]دانشجوی کارشناسی ارشد برق- الکترونیک، دانشگاه شاهد، mr.shafiee@shahed.ac.ir

[۲]استادیار دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شاهد، mh.yavari@shahed.ac.ir

در این مقاله عملکرد لیزر نیمه هادی نقطه کوانتومی با لحاظ کردن اثرات پراکندگی اوژه در معادلات نرخ توصیف کننده ی استاتیک و دینامیک لیزر مدلسازی و تحلیل شده است. تاثیر پراکندگی اوژه بر مشخصه پاسخ مدولاسیون و پاسخ گذرای لیزر نقطه کوانتومی و همچنین تاثیر تغییر چگالی جریان الکتریکی بر مشخصه ی پراکندگی الکترون تحلیل شده است. طبق نتایج حاصل از شبیه سازی میزان پراکندگی اوژه با افزایش چگالی جریان الکتریکی نسبت مستقیم دارد، همچنین با افزایش پراکندگی اوژه پهنای باند مدولاسیون و فرکانس نوسانات واهلشی افزایش می یابند. نتایج تطابق خوبی با نتایج تجربی نشان می دهند.

کلید واژه- پاسخ مدولاسیون، پراکندگی، دیود لیزری، نقطه کوانتومی

Modeling the Carrier-Carrier and Auger Scattering on the Performance of Quantum Dot Lasers

M.R. Shafiee[۱], M. H. Yavari[۲]

[۱]Msc.Student of Electronics, Shahed University, mr.shafiee@shahed.ac.ir

[۲]Assistant Professor, Faculty of Engineering, Shahed university, mh.yavari@shahed.ac.ir

In this paper, the effect of Auger scattering on the performance of semiconductor Quantum Dot Laser (QDL) is modeled. Variety of input and output scattering processes of carriers on the QDL performance is studied. The effect of varying the electrical current density on the Auger scattered carriers is investigated. Also, the scattering effect on the transient response and modulation response of quantum dot laser is analyzed. Results show that Auger relaxation is directly proportional to the electrical current density and also, the modulation bandwidth is destroyed by increasing Auger scattering. Results are in agreement with the experiment.

Laser diode, Modulation Response, Quantum Dot, Scattering

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-08-19]

۱- مقدمه

متداولترین روش در تحلیل رفتار پیچیده ی لیزر نقطه ی کوانتومی استفاده از مدل معادلات نرخ (REM) چگالی حامل های الکترون و حفره می باشد [۴-۱]. در لیزر نقطه کوانتومی ناحیه ی فعال از نقاط کوانتومی خود سامان یافته تشکیل می شود؛ بطوریکه نقاط کوانتومی بر روی لایه ی وتینگ شکل می گیرند. لایه ی وتینگ نظیر چاه کوانتومی دو بعدی با حالت های انرژی شبه پیوسته رفتار می کند [۳]. تبادل حامل بین لایه ی وتینگ و حالت های گسسته ی نقاط کوانتومی، عامل اصلی در تعیین دینامیک لیزر نقطه کوانتومی می باشد، به طوریکه فرآیند به دام افتادن حامل از لایه ی وتینگ به داخل حالت های گسسته و همچنین فرآیند واهلش حامل بین حالت های گسسته، کلیدی ترین عامل در تعیین رفتار دینامیک لیزر می باشد. بنابر این در مقایسه با لیزر های چاه کوانتومی دو فرآیند مذکور عامل اصلی تفاوت رفتار دینامیک لیزر چاه کوانتومی و لیزرنقطه ی کوانتومی می باشد.

۲- معادلات نرخ حامل و فوتون

ساختار لیزر نقطه کوانتومی و نوار انرژی هدایت و ظرفیت برای دو نقطه ی کوانتومی در شکل (۲) و (۳) آورده شده است[۶]. با توجه به شرایط رشد، تمامی نقاط کوانتومی بر روی لایه ی وتینگ قرار دارند و از طریق این لایه با یکدیگر در ارتباط هستند[۴-۲]، لذا ابتدا حامل ها از طریق جریان الکتریکی به داخل لایه ی وتینگ تزریق می شوند و سپس از لایه ی وتینگ در سطوح نقاط کوانتومی آرامش می یابند[۷-۵]. به عبارت دیگر لایه ی دو بعدی وتینگ به صورت چاه کوانتومی، حامل های نقاط کوانتومی را تامین می کند. معادلات نرخ توصیف کننده دینامیک حامل و فوتون در ساختار لیزر نقطه ی کوانتومی به صورت زیر تعریف می شوند[۷]:

$$\dot{n}_e = -\frac{1}{\tau_e} n_e + S_e^{in} N^{QD} - R_{ind}(n_e, n_h) - R_{sp}(n_e, n_h) \quad (۱)$$

$$\dot{n}_h = -\frac{1}{\tau_h} n_h + S_h^{in} N^{QD} - R_{ind}(n_e, n_h) - R_{sp}(n_e, n_h) \quad (۲)$$

$$\dot{w}_e = \frac{j(t)}{e_0} + \frac{n_e}{\tau_e}\frac{N^{WL}}{N^{QD}} - S_e^{in} N^{WL} - \tilde{R}_{sp}(w_e, w_h) \quad (۳)$$

$$\dot{w}_h = \frac{j(t)}{e_0} + \frac{n_h}{\tau_h}\frac{N^{WL}}{N^{QD}} - S_h^{in} N^{WL} - \tilde{R}_{sp}(w_e, w_h) \quad (۴)$$

$$\dot{w}_{ph} = -2kn_{ph} + \Gamma R_{ind}(n_e, \mathrm{n}_h) + \beta R_{sp}(n_e, \mathrm{n}_h) \quad (۵)$$

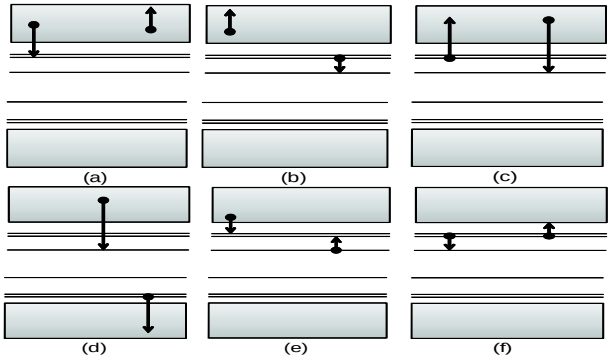
در معادلات فوق، فرآیند های بازترکیب و جذب با پارامتر خطی R_{ind} مدل شده است، که برابر $R_{ind}(n_e, n_h, n_{ph}) = \mathrm{WA}(n_e + n_h - N^{\mathrm{QD}})\, n_{ph}$ خواهد بود. نرخ گسیل خود به خودی با R_{sp} بیان می شود، که مقدار آن به صورت $R_{sp}(w_e, w_h) = (\mathrm{W}/N^{\mathrm{QD}})\, n_e\, n_h$ تعریف می شود. همچنین میزان نرخ بازترکیب های خود به خودی با عبارت $\tilde{R}_{sp}(w_e, w_h) = B^s w_e w_h$ لحاظ شده است که در این رابطه، B^s ضریب بازترکیب لبه به لبه می باشد. در معادله ی (۵)، j برابر چگالی جریان الکتریکی و e. مقدار بار الکترون است[۹-۸]. در این رابطه ضریب گسیل خود به خودی با β و همچنین ضریب تحدید نوری با Γ نمایش داده شده است. مقدار هریک از پارامتر های معادلات نرخ، در جدول (۱) آورده شده است[۹].

جدول۱: پارامتر های معادلات نرخ حامل و فوتون [۹]

symbol	value	symbol	value
K	۰,۱۲ $ps^{-۱}$	β	۵e-۶
Γ	۰,۰۰۱۱	W	۱,۳ $ns^{-۱}$
A	۴e-۵ $cm^{۲}$	T	۳۰۰ K
N^{QD}	۱e۱۰ $cm^{-۲}$	μ	۰,۲۸e. nm
N^{WL}	۲e۱۳ $cm^{-۲}$	B^s	۸۵۰ $ns^{-۱}$ $nm^{۲}$

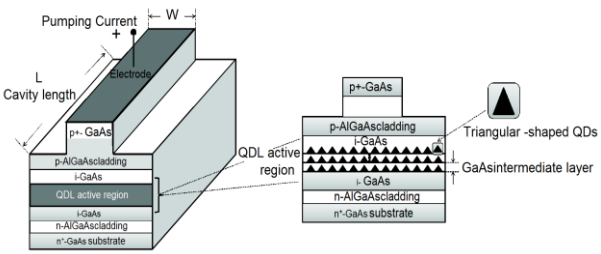
۳- فرآیند های پراکندگی

با توجه به گذار حامل ها بین لایه وتینگ و سطوح انرژی نقاط کوانتومی، فرآیند های پراکندگی به پنج دسته ی فرآیند به دام افتادن الکترون، فرآیند واهلش الکترون، فرآیند واهلش ترکیبی، فرآیند به دام افتادن و واهلش حامل با کمک حامل های نقطه کوانتومی تقسیم بندی می شوند؛ که در شکل (۱) آورده شده است[۱۰].

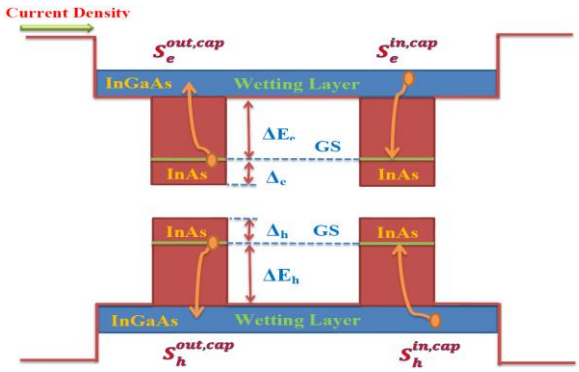


شکل۱: انواع فرآیندهای پراکندگی حامل

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-08-19]



شکل۲: لیزر نیمه هادی فابری-پرو با ساختار ناهمگون دوگانه و محیط فعال تشکیل شده از نقاط کوانتومی خود سامان یافته



شکل۳:ساختار نوار انرژی هدایت و ظرفیت برای دو نقطه ی کوانتومی

۴- پراکندگی ورودی و خروجی

پراکندگی های اوژه با استفاده از روابط حاصل شده از نتایج تجربی معادلات (۶) الی (۹) محاسبه شده است[۸]. نسبت چگالی حفره های لایه وتینگ به چگالی الکترون ها(w_h / w_e) با پارامتر g_c نشان داده شده است. در معادلات پراکندگی زیر، چگالی الکترون(w_e) و چگالی حفره(w_h) بر حسب $10^{11} cm^{-2}$ است. مقدار هریک از پارامتر های معادلات پراکندگی در جدول (۲) آورده شده است.

$$S_e^{in}(w_e) = A\left(\frac{1}{1+e^{(38-w_e)/5.4}}\right)\left(\frac{e^{(38-w_e)/B}}{1+e^{(38-w_e)/B}}\right) + C.e^{-2(w_e-124.5)^2/(29.6)^2} \quad (۶)$$

$$S_e^{out}(w_e) = (1-e^{(1-w_e)/2})^{0.9} e^{-(w_e)^2/B} + e^{(1.73-w_e)/C} + A.e^{-(w_e-27.5)^2/137.8} \quad (۷)$$

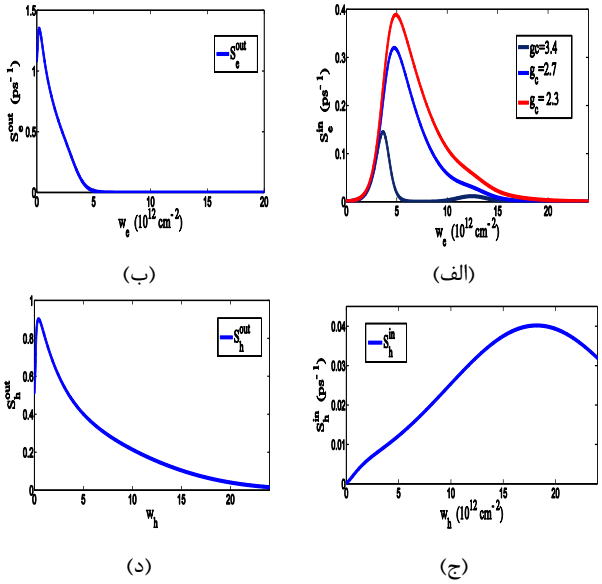
$$S_h^{in}(w_h) = \tanh(B.w_h)\frac{A}{C\sqrt{\pi/2}} e^{-2(w_h-182)^2/C^2} \quad (۸)$$

$$S_h^{out}(w_h) = A(1-e^{-(w_h-1.2)/1.7})^{0.7} e^{-(w_h)^2/18854} + e^{-(w_h-B)/26.4} \quad (۹)$$

جدول۲: پارامتر های فرآیندهای پراکندگی[۸]

	A	B	C
S_e^{in}	$0.715+0.6g_c-0.19g_c^2$	$-6.9+40.5g_c-11g_c^2$	0.0116
S_e^{out}	0.1154	$963-153g_c$	$12.4-5.35g_c+0.718g_c^2$
S_h^{in}	$8+0.228g_c$	$0.096-0.0095g_c$	171
S_h^{out}	$0.2823+0.0201g_c$	$-0.9-3g_c$	-

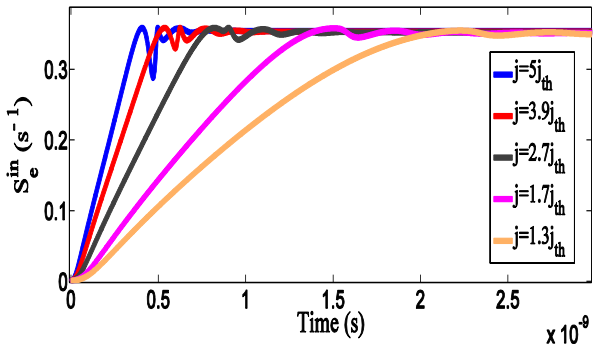
مشخصه ی پراکندگی ورودی و خروجی، الکترون و حفره لیزر نقطه کوانتومی در شکل(۴) آورده شده است. همان طور که مشاهده می شود، میزان پراکندگی حامل ها با مقدار g_c نسبت عکس دارد، بدین نحو که با کاهش مقدار g_c ، میزان پراکندگی حامل ها افزایش می یابد. از روابط پراکندگی فوق در معادلات نرخ استفاده شده است، بدین ترتیب پارامتر g_c و اثر پراکندگی اوژه در عملکرد لیزر نقطه کوانتومی لحاظ می شود.



شکل۴: پراکندگی اوژه لیزر نقطه کوانتومی الف) ورودی الکترون، ب)خروجی الکترون، ج)ورودی حفره، د)خروجی حفره

۵- اثر چگالی جریان بر پراکندگی ورودی الکترون

تاثیر چگالی جریان های الکتریکی متفاوت بر روی مشخصه ی پراکندگی ورودی الکترون در شکل (۵) آورده شده است. طبق نتایج بدست آمده مشاهده می شود که، میزان پراکندگی ورودی الکترون با افزایش چگالی جریان الکتریکی نسبت مستقیم دارد.

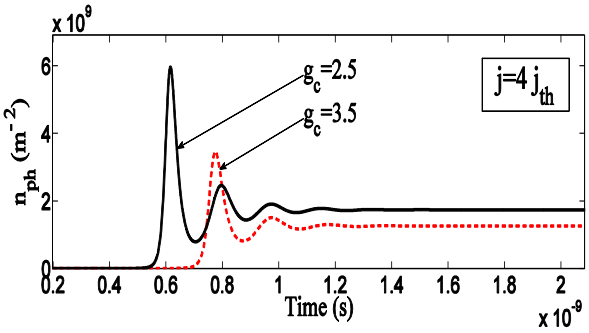


[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-08-19]

شکل۵: تاثیر تغییر چگالی جریان الکتریکی بر مشخصه ی پراکندگی الکترون

۶- وابستگی پاسخ گذرا به پراکندگی اوژه

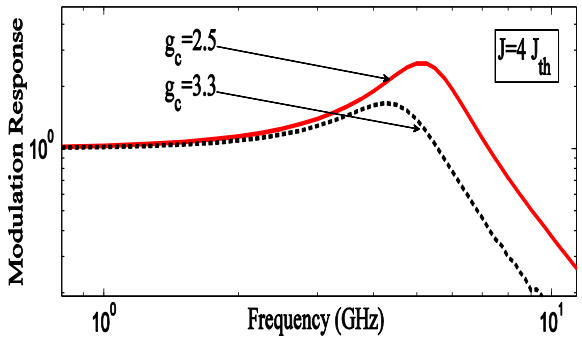
در شکل (۶) مشخصه گذرای چگالی فوتون خروجی لیزر به ازای مقادیر پراکندگی g_c = ۲٫۵ و g_c = ۳٫۵ آورده شده است. همان طور که از نتایج مشاهده می شود، هرچه پراکندگی اوژه در لیزر نقطه ی کوانتومی بیشتر باشد، دامنه ی نوسانات گذرای چگالی فوتون خروجی و فرکانس نوسانات واهلشی (f_{RO}) افزایش یافته و لیزر سریع تر به حالت پایدار خواهد رسید.



شکل۶: مشخصه گذرای چگالی فوتون خروجی لیزر

۷- وابستگی پاسخ مدولاسیون به پراکندگی اوژه

با توجه به اینکه لیزر پس از بایاس شدن به صورت خطی عمل می کند، می توان طبق تئوری سیستم های LTI پاسخ مدولاسیون لیرز را محاسبه کرد[۱-۵]. نتایج حاصل از شبیه سازی در شکل(۷) آورده شده است. همان طور که مشاهده می شود، با کاهش مقدار g_c پهنای باند مدولاسیون لیزر افزایش می یابد. با توجه به اینکه g_c با پراکندگی اوژه نسبت عکس دارد، لذا با افزایش میزان پراکندگی اوژه، پهنای باند مدولاسیون لیزر و همچنین ماکزیموم فرکانس مدولاسیون نیز افزایش می یابد.



شکل۷: مشخصه پاسخ مدولاسیون

۸- نتیجه گیری

طبق نتایج حاصل از شبیه سازی مشاهده شد، با افزایش میزان پراکندگی اوژه، پهنای باند مدولاسیون لیزر و همچنین ماکزیموم فرکانس مدولاسیون افزایش می یابد. میزان پراکندگی اوژه با افزایش چگالی جریان الکتریکی نسبت مستقیم دارد. افزایش پراکندگی اوژه در لیزر نقطه کوانتومی موجب افزایش دامنه ی نوسانات گذرای چگالی فوتون خروجی و فرکانس نوسانات واهلشی می گردد به عبارت دیگر افزایش پراکندگی اوژه باعث می شود، لیزر نقطه کوانتومی سریع تر به حالت پایدار برسد.

مراجع

[۱] M. Sugawara, *Self-Assembled InGaAs/GaAs Quantum Dots*, Semiconductors and Semimetals, M. Sugawara, Ed. San Diego, CA: Academic, ۱۹۹۹, vol. ٦۰.

[۲] M. Grundmann, Nano-Optoelectronics, Concepts, Physics and Devices. New York: Springer, ۲۰۰۲.

[۳] D. Bimberg, M. Grundmann, and N. N. Ledenstov, *Quantum Dot Heterostructures*. Hoboken, NJ: Wiley, ۱۹۹۹.

[٤] S. L. Chuang, *Physics of Photonic Devices*, New York: Wiley, ۲۰۰۹.

[٥] M. H. Yavari and V. Ahmadi, " Circuit level implementation of semiconductor self assembled quantum dot laser," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. ۱٥, no. ۳, pp. ۷۷٤-۷۷۹, ۲۰۰۹.

[٦] M. H. Yavari and V. Ahmadi, " Effects of carrier relaxation and homogeneous broadening on dynamic and modulation behavior of self-assembled quantum dot laser," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. ۱۷, no. ٥, pp. ۱۱٥۳-۱۱٥۷, ۲۰۱۱.

[۷] H. Abbaspour, V. Ahmadi and M. H. Yavari, " Analysis of QD VCSEL dynamic characteristics considering homogeneous and inhomogeneous broadening," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, , vol. ۱۷, no. ٥, pp. ۱۳۲۷-۱۳۳۳, ۲۰۱۱.

[۸] K. Ludge et all, " Turn- on dynamics and modulation response in semiconductor quantum dot laser", *Physical review B*, vol. ۷۸, pp. ۳٥۳۱٦-۳٥۳۲٦, ۲۰۰۸.

[۹] K. Ludge and Eckehard Schöll, " Quantum-dot lasers—desynchronized nonlinear dynamics of electrons and holes", *IEEE JQE*, VOL. ٤٥, NO. ۱۱, pp. ۱۳۹٦-۱٤۰۳, ۲۰۰۹.

[۱۰] T. R. Nielsen, P. Gartner, and F. Jahnke, "Many- body theory of carrier capture and relaxation in semiconductor quantum-dot lasers", *Phys. Rev. B*, ٦۹, ۲۰۰

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-08-19]