تحلیل و شبیهسازی لیزرهای نقطه کوانتومی گسیل از سطح با کاواک عمودی با در نظر گرفتن اثر تزریق نوری

مرضيه مروج' ، عباس ظريفكار '

^۱ کارشناسی ارشد برق الکترونیک، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر ،دانشگاه شیراز m.moravvej@shirazu.ac.ir ^۲دانشیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه شیراز

تاریخ دریافت : ۱۳۹۵/۰۳/۲۰ تاریخ پذیرش :۱۳۹۵/۰۷/۰۳

چکيده

در این مقاله، برای نخستین بار مشخصات دینامیکی لیزرهای نقطه کوانتومی گسیل از سطح با کاواک عمودی در شرایط قفل شلگی تزریق نوری به صورت تئوری بررسی شده است. با استفاده از معادلات نرخ توصیف کننده دینامیک الکترون و حفره به طور جداگانه، در ناحیه سدی GaAs لا یه خیسی و ترازهای مجزای نقاط کوانتومی به صورت جفت شده با معادله حرارت، دینامیک روشن شدن، پاسخ سیگنال کوچک و سیگنال بزرگ لیزر قبل از تزریق نوری به صورت عددی شبیه-سازی شده است. با اضافه کردن معادلات دامنه و فاز میدان لیزر پیرو به معادلات نرخ لیزر نقطه کوانتومی گسیل از سطح با کاواک عمودی ، مشخصات دینامیکی لیزر تزریق شده نوری محاسبه می گردد. نشان داده می شود که در نتیجه تزریق نوری، رفتار دینامیکی متفاوت الکترون و حفره همگام شده، فرکانس مدولاسیون افزایش یافته، چرپ لیزر به مقارا قابل توجهی کاهش می یابد و لیزر عملکرد مطلوبی در فرکانس های تکرار بیشتر از فرکانس نوسانات واهلشی (حدود ۲۲

كليدواژه

نقطه کوانتومی، لیزر گسیل از سطح با کاواک عمودی، پاسخ مدولاسیون، تزریق نوری

مقدمه

لیزرهای گسیل از سطح با کاواک عمودی (VCSELs) بهدلیل کاربردهای مختلف آنها در زمینههایی مانند مخابرات نوری، پردازش سیگنال نوری و اتصالات داخلی نوری بسیار مورد توجه قرار دارند. در مقایسه با لیزرهای گسیل از لبه، VCSELs دارای مزایایی همچون: فراهم آوردن یک لکه نورانی دقیق با راندمان خوب کوپل به فیبرهای نوری، عملکرد تک مودی، هندسه مناسب جهت مجتمع سازی در آرایههای دو بعدی، هزینه ساخت کمتر، پرتوی خروجی با واگرایی کم و امکان آزمایش روی سطح ویفر میباشند. ویژگیهای منحصر به فرد ساختارهای نقطه کوانتومی(QD)، بهویژه بهره ماده و بهره تفاضلی بالا، مشخصات دینامیکی و پایداری حرارتی لیزر نیم رسانا را بهبود می بخشند. ازاینرو، INAs/GaAs QD-VCSELs به عنوان یک گزینه مناسب برای شبکههای فوتونیک پیشرفته در ناحیه طول موجی ۱۳۰۰

نانومتر مورد توجه قرار دارند. به منظور دستیابی به عملکرد تک مدی و انحصار الکتریکی و نوری از یک روزنه اکسیدی در -QD VCSELs استفاده می شود. اثر خودگرمایی در QD-VCSELs اساساً در نتیجه روزنه اکسیدی کوچک و محدودیت ضعیف حفره-ها در نقاط کوانتومی می باشد و یکی از دلایل مهم کاهش کارایی لیزر است [۱، ۲، ۳]. حداکثر پهنای باند مدولاسیون در -QD VCSELs محدود به ۵/۳ مگاهرتز است که براساس یافتهای مراجع [۲، ۳] علت این امر اثر خودگرمایی به دنبال افزایش جریان تزریقی به لیزر میباشد. یکی از عوامل محدود کننده پاسخ فركانسی لیزرهای نقطه كوانتومی، عدمهمگامی میان دینامیک الكترون و حفره است. علت عدمهمگامی میان دینامیک حاملها اختلاف زمان واهلش الكترون و حفره می باشد: زمان قرار گرفتن الکترون در نقطه کوانتومی و زمان واهلش بین باندی، در حدود چند پیکو ثانیه میباشد در حالیکه این مقیاس زمانی برای حفره-ها بسیار سریعتر بوده و در حدود ۰/۱ پیکو ثانیه می باشد [۴]. ديناميك متفاوت حاملها باعث مي شود كه ليزر نقطه كوانتومي

Vertical Cavity Surface Emitting Laser

عملکرد خوبی در فرکانسهای تکرار بالاتر از فرکانس نوسانات واهلشی ۱۲ گیگاهرتز نداشته باشد.

کاربردهای مخابراتی با سرعت بالا نیازمند لیزرهای نیم رسانا با کارایی بالا میباشند. قفل شدگی تزریق نوری روشی کارآمد برای بهبود عملکرد لیزرهای نیم رسانا مستقیما مدوله شده است. افزایش نوسانات واهلشی، افزایش پهنای باند، کاهش نویز شدت نسبی و کاهش چرپ لیزر ازجمله مزایای تزریق نوری است که سبب بهبود سیستمهای مخابراتی می گردد [۵].

نتایج مرجع [۵] نشان میدهند که در نتیجه تزریق نوری، دینامیک حاملها در نقاطکوانتومی همگام شده، فرکانس مدولاسیون افزایش یافته و لیزر عملکرد مطلوبی در فرکانس تکرار ۲۰ گیگاهرتز از خود نشان میدهد.

در این مقاله برای نخستین بار به بررسی دینامیک متفاوت حامل-ها و تأثیر آن بر پاسخ مدولاسیون QD-VCSEL پرداخته می شود، همچنین بهبود مشخصات دینامیکی لیزر در نتیجه تزریق نوری مورد بررسی قرار می گیرد.

در ادامه این مقاله مبانی فیزیکی و معادلات حاکم بر -QD VCSEL در شرایط تزریق نوری بیان شده است. در بخش سوم به تحلیل نتایج عددی حاصل از شبیه سازی پرداخته شده و در بخش چهارم نتیجه گیری مقاله بیان شده است.

مدلسازي تئوري

ساختار شماتیکی VCSEL با نقاط کوانتومی InAs/GaAs د شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. تصویر شماتیک از QD-VCSEL با طول موج انتشاری ۱/۳ μm [۱]

اتصالهای فلزی در بالای آینههای DBR نوع p و در پایین بستر نوع n قرار دارند. ۲۲ جفت آینـه DBR نـوع q (بـا چگالی³⁻cm) نوع n قرار دارند. ۲۲ جفت آینه DBR نوع n (با چگالی ۲۰۱۸ (۲۰۱۰ (۲۰۱۰ – ۵۵) و ۳۳ جفت آینه DBR نوع n (با چگالی ۲۰۵۶ مار) با استفاده از لایه نشانی تناوبی RaAs/AlogGao با لا و پایین ناحیه فعال شکل گرفتهاند. ناحیه فعال لیزر شامل ۱۰ لایه از نقاط کوانتومی InAs/GaAs میباشد. نقاط کوانتومی خود سامان یافته InAs به طور مستقیم بر روی GaAs رشد داده شـده-اند. سپس لایهای از GaAs بر روی InGaAs رشد داده می شـده.

یک لایه AlAs به ضخامت ۱۲ نانو متر بین آینههای DBR نوع p و ناحیه فعال به منظور شکلدهی یک پنجره اکسیدی بـه منظـور انحصار جریان تزریقی و مدهای نوری لایهنشانی شده است [۱].

معادلات نرخ

ساختار سیستم تزریق نوری قفل شده شامل لیزر اصلی و لیزر QD-VCSEL پیرو توصیف شده در قسمت قبل، در شکل ۲ نشان داده شده است. نور تزریق شده از لیزر اصلی به طور پیوسته با نور لیزر پیرو ترکیب شده و باعث تغییر میدان داخلی لیزر پیرو می-گردد. در نتیجه طول موج پیرو مدام در حال تغییر به سمت طول موج اصلی است تا زمانی که با آن برابر شود، در این شرایط قفل شدگی فاز و فرکانس اتفاق میافتد [۶].



شکل ۲. ساختار سیستم تزریق نوری قفل شده [۶]

معادلات نرخ توصيف كننده ديناميك حاملها و فوتون -QD به صورت روابط (۱) تا (۶) بيان مي شوند [۱].

$$\frac{dN_B}{dt} = \frac{J}{qb} + \frac{1}{t_{ewb}} \frac{g_w f_w}{b/n} (1 - f_B) - \left(\frac{1}{t_{bw}} + \frac{1}{t_{rB}}\right) N_B \quad (1)$$

$$\frac{df_w}{dt} = \frac{(1 - f_w)}{g_w} \frac{N_B b}{n t_{bw}} - \frac{f_w}{t_{ewb}} + \frac{2p_2 \rho}{g_w} Es_{2w} f_2 (1 - f_w) \\
-R_w 2 f_w (1 - f_2) - \frac{f_w}{t_{rw}}$$
(Y)

$$\frac{df_2}{dt} = \frac{g_w}{2p_2\rho} R_w {}_2f_w \left(1 - f_2\right) - Es_{2w} f_2 \left(1 - f_w\right) + \frac{p_1}{p_2} Es_{12} f_1 \left(1 - f_2\right) - R_{21} f_2 \left(1 - f_1\right) - \frac{f_2}{t_{r_2}}$$
(7)

$$\frac{df_1}{dt} = \left[\frac{p_1}{p_2} R_{21} f_2 (1-f_1) - E s_{12} f_1 (1-f_2)\right] + \left[\frac{p_0}{p_1} E s_{01} f_0 (1-f_1) - R_{10} f_1 (1-f_0)\right] - \frac{f_1}{t_{r_1}}$$
(f)

$$\frac{df_0}{dt} = \left\lfloor \frac{p_1}{p_0} R_{10} f_1 (1 - f_0) - E s_{01} f_0 (1 - f_1) \right\rfloor - \frac{f_0}{t_{r0}} - \frac{1}{2p_0 n S_a \rho} \frac{v_g g_{max} (f_{0e} - f_{0h} - 1) S}{1 + \varepsilon S}$$
(δ)

$$t_{ewb} = L_w \left[\frac{2\pi m^*}{K_B T} \right]^{1/2} exp\left(\frac{E_{bw}}{K_B T} \right)$$
(17)

که در آن L_w ، E_{bw} و m^* ، L_w به ترتیب عرض لایه خیسی، جرم مؤثر و سد مؤثر انرژی میباشند. نرخ واهلش حامل در نقطه کوانتومی از رابطه (۱۳) قابل محاسبه است.

$$R_{ij}\left(i \neq j\right) = A_{ij} + C_{ij}N_w \tag{17}$$

در رابطه (۱۳)، i, j = 0,1,2,w بیانگر تراز پایه، نخستین تراز برانگیخته، دومین تراز برانگیخته و کمترین سطح انرژی در چاه کوانتومی است. A_{ij} و C_{ij} به ترتیب معرف ضریب واهلش از طریق فونون و اوژه بین ترازهای *ن*ام و *ز*ام هستند. W_w چگالی حاملها در لایه خیسی است و به صورت رابطه (۱۴) تعریف می-شود.

$$N_{w} = \frac{I}{L_{w}} \frac{m^{*} K_{B} \left(I - exp \left(-E_{bw} / K_{B}T \right) \right)}{\pi \hbar^{2}} f_{w}$$

$$\equiv \frac{g_{w}}{L_{w}} f_{w}$$
(14)

تأثیر دما بر واهلش از طریق فونون به صورت رابطه (۱۵) بیان میشود.

$$A_{ij} = F_{ij} \left\{ \left[exp\left(\frac{E_{ph}}{K_B T}\right) - 1 \right]^{-1} + 1 \right\}^n$$
 (1 Δ)

که در آن F_{ij} بیانگر نرخ پر شدن تراز ز*ا*م در دمای صفر کلوین است. *n* تعداد فونونها و E_{ph} انرژی فونون است، که انرژی فونونهای نوری در چاه کوانتومی در حدود ۲۹/۶ meV و در نقاط کوانتومی InAs در حدود ۳۱/۹ meV می باشد. مقادیر *i*A و *زر* مطابق با مقادیر موجود در مرجع [۱] است. با فرض تعادل شبه-فرمی، یک رایطه نمایی بین نرخ واهلش و نرخ فرار حاملها وجود دارد. نرخ فرار حاملها از تراز *i*ام نقطه کوانتومی به لایه خیسی از رابطه (۱۶) بهدست میآید.

$$Es_{iw} = \left[\frac{g_w}{2p_i \rho} exp\left(-\frac{E_{iw}}{K_B T}\right)\right] R_{wi}$$
(19)

نرخ فرار حاملها در گذارهای بینباندی به صورت رابطه (۱۷) بیان میشود.

$$Es_{ij} = \frac{p_j}{p_i} exp\left(-\frac{E_{ij}}{K_B T}\right) R_{ji}$$
(1Y)

که در آن (*P*,*p*,*i*(*i*=0,1,2) و *ii* به ترتیب بیانگر تبهگنی تراز-های نقطه کوانتومی، چگالی سطحی نقطه کوانتومی، اختلاف انرژی بین لایه خیسی و ترازهای نقطه کوانتومی و اختلاف انرژی بین ترازهای نقطه کوانتومی میباشند. مقادیر *ii* و *ii* مطابق با مقادیر مرجع [۱] است. در رابطههای(۵) و (۶)، *v* و *g* به

$$\frac{dS}{dt} = \left(\frac{\Gamma v_g g_{max} \left(f_{0e} - f_{0h} - 1\right)}{1 + \varepsilon S} - \frac{1}{t_p}\right) S \tag{(5)}$$

در شرایط تزریق نوری OIL-QD-VCSEL، معادلات دامنه و فاز میدان لیزر پیرو، روابط (۷) و (۸)، همراه با معادلات نرخ -QD VCSEL (معادلات (۱) تا (۵)) در نظر گرفته می شوند[۷].

$$\frac{dS}{dt} = \left(\frac{\Gamma v_g g_{max} \left(f_{0e} - f_{0h} - 1\right)}{1 + \varepsilon S} - \frac{1}{t_p}\right) S$$

$$+2K_c \sqrt{S_{inj}S} \cos \phi$$
(Y)

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{\alpha}{2} \left(\frac{\Gamma v_g g_{max} \left(f_{0e} - f_{0h} - 1 \right)}{1 + \varepsilon S} - \frac{1}{t_p} \right) - \Delta \omega_{inj} - K_c \sqrt{\frac{S_{inj}}{S}} \sin \phi$$
(A)

 $f_i(i = B, w, 0, 1, 2)$ $S_i(i = B, w, 0, 1, 2)$ خیسی، تراز پایه، اولین و دومین تراز برانگیخته است. N_B سدی، تعداد فوتون، و n به ترتیب معرف چگالی حامل در ناحیه سدی، تعداد فوتون، و تعداد لایههای نقطه کوانتومی می باشند. همچنین l, p و d به ترتیب چگالی جریان تزریق شده، بار الکترون و ضخامت سد GaAs هستند. در معادلات آورده شده (0,1,2 پایه، اولین و طول عمر حاملها در ناحیه سدی، خیسی، تراز پایه، اولین و دومین تراز برانگیخته است. مدت زمان انتقال حاملها از لایه پوشاننده به لایه خیسی با استفاده از رابطه (۹) به دست می آید.

$$t_r = \frac{L_s}{2D_{e,h}} \tag{9}$$

که در آن L_s ناصله ناحیه پوشاننده تا لایه خیسی است، $D_{e,h}$ نفرذ الکترون و حفره بوده و از رابطه انیشتین ضریب نفوذ الکترون و حفره بوده و از رابطه انیشتین $D_{e,h}=(K_BT)\mu_{e,h}$ قابل محاسبه میباشد. K_B میاشد. ثابت بولتزمان، دما و تحریکپذیری الکترون و حفره هستند. تحریکپذیری الکترون و حفره در GaAs به صورت رابطههای (۱۰) و (۱۱) محاسبه می شوند.

$$u_h = 380 \left(\frac{300}{T}\right)^{2.1}$$
 (1.)

$$\mu_e = 7200 \left(\frac{300}{T}\right)^{2.1} \tag{11}$$

زمان انتقال حامل ها از ناحیه پوشاننده به لایه خیسی در مجموع از رابطه t_c از t_c بهدست می آید که t_c زمان قرار گرفتن حاملها در چاه کوانتومی است و در محاسبات ۰/۳ پیکوثانیه در نظر گرفته شده است. زمان انتشار حرارتی حاملها در لایه خیسی به صورت رابطه (۱۲) تعریف می شود.

Wetting layer

ترتیب سرعت گروه و بهره بیشینه مدی هستند. بهره بیشینه مدی به صورت رابطه (۱۸) تعریف میشود.

$$g_{max} = \frac{hq}{cn_r m_0 \varepsilon_0} \frac{\left|P_{cv}\right|^2}{m_0 E_L} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \left(\frac{2.35}{F_{in}}\right) \frac{n\rho}{l_c} \tag{1}$$

که در آن c سرعت نور و F_{in} مقدار پهنای کامل نصف بیشینه پهنشدگی غیرهمگن نقاط کوانتومی میباشند. در حالیکه V_a حجم تمام نقاط کوانتومی و T ضریب تمرکز نوری کاواک است، حجم $\varepsilon = \varepsilon_m \Gamma / V_a$ رابطه (۱۹) بهدست میآید.

$$\varepsilon_m = \frac{\hbar q}{n_r^2 m_0 \varepsilon_0} \frac{\left| P_{cv} \right|^2}{m_0 E_L} \frac{1}{F_{ho}} t_p \tag{19}$$

که در آن \mathcal{E}_h m, \mathcal{E}_h m, \mathcal{E}_h مقدار پهنای کامل نصف بیشینه پهنشدگی همگن نقاط کوانتومی، ضریب شکست ناحیه فعال، ضریب گذردهی فضای آزاد، جرم آزاد الکترون و ثابت پلانک کاهشیافته هستند. P_{cv} نیز ماتریس انتقال است و برای نقاط کوانتومی InAs به صورت $2m_{o}E_{L}$ تقریبزده می شود. p طول عمر فوتون است و به صورت رابطه (۲۰) محاسبه می شود.

$$t_p = \frac{1}{v_g g_{th}} \tag{(Y \cdot)}$$

که gih بهره آستانه مدی لیزر است و به صورت رابطه (۲۱) تعریف میشود.

$$g_{th} = \frac{A + (1/l_c)\log(1/\sqrt{R})}{\Gamma_r}$$
(Y1)

 α ضریب متوسط جذب، l طول کاواک و r ضریب تمرکز نوری نسبی لیزر است و $R_{I}R=R_{I}$ که R_{I} و R_{I} بهترتیب ضریب انعکاس آینههای DBR بالایی و پایینی هستند. در رابطه (۶)، S تعداد فوتون لیزر پیرو قبل از تزریق نوری است. در رابطه (۷)، S تعداد فوتون لیزر بعد از تزریق نوری، S_{Inf} تعداد فوتون تزریق شده، ϕ اختلاف فاز میان لیزر اصلی و پیرو و K_{c} ضریب کوپل شدگی میان لیزر اصلی و پیرو است و از رابطه (۲۲) به دست میآید.

$$K_c = \frac{v_g}{2l_c} \frac{(1-R)}{\sqrt{R}} \tag{(YY)}$$

در رابطه (۷)، α ضریب افزایش خط و $\Delta \omega_{inj}$ اختلاف فرکانس میان لیزر اصلی و پیرو است. f_{0e} و f_{0e} به ترتیب احتمال حضور الکترون و حفره در تراز پایه می باشند. این معادلات سپس با معادلات حرارت که در قسمت بعد به آنها پرداخته خواهد شد به صورت کوپل حل می شوند.

معادلات حرارت

در لیزرهای نیم رسانا منبع اصلی حرارت، ناحیه فعال لیزر است، جایی که بازترکیب غیرتابشی حاملها و جذب گسیل خودبهخودی سبب ایجاد حرارت میشوند. منبع مهم دیگر تولید حرارت در لیزرهای گسیل از سطح با کاواک عمودی، گرمایش ژولی است که در نتیجه مقاومت سری نسبتاً زیاد آینههای DBR نوع p می اشد [۸] و به صورت رابطه (۲۳) محاسبه می شود.

$$Q_J(J) = \left(\frac{JS_a}{S_p}\right)^2 \rho_p + \left(\frac{JS_a}{S_n}\right)^2 \rho_n \tag{77}$$

 S_n و S_p ، S_a در آن J چگالی جریان تزریق شده است. S_a و S_p ، q و r و به ترتیب بیانگر مساحت ناحیه فعال، مساحت اتصال نوع q و مساحت اتصال نوع n هستند. ρ_n و ρ_n نیز به ترتیب مقاومت DBR نوع q و n می اشند. چگالی حرارتی در ناحیه فعال نیز به صورت رابطه (۲۴) بیان می شود.

$$Q_a(J) = \frac{V(T,r)(1-\eta_{sp}f_{sp})}{nd_D}.$$

$$\left\{J_{th}(T) + \left[J - J_{th}(T)\right](1-\eta_{QD})\right\}$$
(Yf)

که d_D ضخامت هر لایه نقطه کوانتمی، η_{sp} بازده کوانتومی خودبهخودی، f_{sp} عامل فرار تابشی خودبهخودی است. η_{QD} بازده کوانتومی داخلی QD-VCSEL است و از رابطه (۲۵) محاسبه می شود.

$$\eta_{QD} = \frac{\sum_{i=0}^{2} n_i}{n_B + n_w + \sum_{i=0}^{2} n_i}$$
(7Δ)

که در آن n_i و n_b بهترتیب بیانگر چگالی سطحی حامل در لایه خیسی، ترازهای نقطه کوانتمی و ناحیه سدی هستند و با استفاده از رابطههای (۲۶) تا (۲۷) تعریف می شوند.

$$n_{w} = ng_{w}f_{w} \tag{(79)}$$

$$n_i = 2np_i \rho f_i \tag{YY}$$

$$n_B = \frac{1}{t_{bw}^{-1} + t_{rB}^{-1}} \left(\frac{J}{q} + \frac{ng_w f_w}{t_{ewb}} \right) \tag{YA}$$

از: V(T,r) ولتاژ در مرکز ناحیه فعال لیزر بوده و عبارتست از

$$V(T,r) = \frac{2K_BT}{q} \left(\ln \frac{J}{J_s} + \frac{r_o}{r_{o1}} \right)$$
(Y9)

که r_o و r_o بهترتیب بیانگر شعاع پنجره اکسیدی و شعاع افزاره هستند. J_s نیز چگالی جریان اشباع معکوس است. تغییرات زمانی دما در راستای شعاعی در ناحیه فعال لیزر با استفاده از معادله هدایت گرمایی (۳۰) بهدست میآید.

www.SID.ir

$$\frac{1}{K_{i}}\frac{\partial T\left(r,t\right)}{\partial t} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[r\frac{\partial T\left(r,t\right)}{\partial r}\right] + \frac{1}{\lambda_{i}}Q\left(J,r,T\right) \qquad (\mathbf{\tilde{r}}\cdot)$$

که در آن λ_i ، K_i و t بهترتیب بیانگر ضریب نفوذ حرارتی، رسانایی مؤثر حرارتی، شعاع و زمان میباشند.پارامترهای فیزیکی و ساختاری استفاده شده در این مقاله مطابق با مقادیر مرجع [۱] میباشد.

بحث و بررسی نتایج

به منظور بررسی تأثیر تزریق نوری بر مشخصات QD-VCSEL، نخست، پاسخ لیزر قبل از تزریق نوری به روش خودسازگار از حل معادلات نرخ (۱) تا (۶) به صورت جفتشده با معادلات حرارت (۲۳) تا (۳۰) بهدست آورده شده است. در این مقاله، از ترکیب روش تفاضل محدود برای حل معادلات حرارت و روش رانگ-کوتا جهت شبیه سازی QD-VCSEL استفاده شده است. پاسخ لیزر بعد از تزریق نوری از حل معادلات نرخ (۱) تا (۵)، (۷) و (۸) به صورت جفت شده با معادلات حرارت، مطابق روندنمای شکل ۳، بهدست می آید. پارامترهای لازم برای شبیه سازیها از مراجع [۱]، [۵] و [۷] گرفته شده اند.



شکل۳. الگوریتم حل معادلات نرخ حامل و فوتون و معادلهی حرارت به صورت کوپل با یکدیگر

آنالیز پایداری

بەمنظور بەدست آوردن ناحيه قفل شدگی يايدار، انشعاب محلی QD-VCSEL، انشعاب هیف (Hopf) و انشعاب گره-زینی (SN)، در صفحه $(R_{ini},\Delta\omega_{ini})$ ، بررسی شده است. منحنی انشعاب از طريق تجزيه و تحليل مقدار ويژه حول نقاط تعادل (نقاط ثابت) معادلات نرخ مربوط به لیزر نقطه کوانتومی گسیل از سطح با کاواک عمودی تزریق شده نوری(OIL-QD-VCSEL) ترسیم می گردد. اگر یک مقدار ویژه تنها و حقیقی از محور موهومی در صفحه مختلط عبور کند انشعاب SN و در صورتیکه یک جفت مقدار ويژه مختلط مزدوج از محور موهومي عبور كند انشعاب Hopf رخ مىدهد [٩]. در اين مقاله تجزيه و تحليل انشعاب با استفاده از تکنیک امتداد عددی پیوسته و با بکارگیری بسته نرم-افزاری Matcont انجام گرفته است. منحنی انشعاب SN و Nopf مربوط به OIL-QD-VCSEL به ازای $J_{th} = 1/\Delta J_{th}$ در شکل ۴ نشان داده شده است. انشعاب مربوط به نقاط پایدار انشعاب فوق بحراني (خطوط ضخيم) و انشعاب مربوط به نقاط ناپایدار انشعاب زیر بحرانی (خطوط نازک) نامیده می شود. ناحیه قفل شدگی پایدار بین شاخههای فوق بحرانی (خطوط ضخیم) قرار گرفته است. چنانکه از شکل ۴ مشخص است با افزایش نسبت تزریق نوری، ناحیه پایدار نیز افزایش یافته و ناتنظیمی فرکانسی در محدوده وسیعتری میتواند تغییر کند. بهدست آوردن محدوده قفل شدگی وسیعتر با توجه به ناتنظیمی فرکانسی امکان دستیابی به فرکانس تشدید بالاتری را فراهم می آورد. در نمودار انشعاب،ZH محل برخورد منحنی SN و Hopf می باشد که در آن انشعاب از فوق بحرانی (زیر بحرانی) به زیر بحرانی (فوق بحرانی) در امتداد هر دو منحنی تغییر میکند. درنقطه C^۵ دو شاخه از منحنی SN بر هم مماس شده و مقدار ویژه در این نقطه صفر مى باشد.

ديناميک روشن شدن

روش تحلیل بیان شده در بخش قبل، ما را قادر به شبیه سازی دینامیک روشن شدن QD-VCSEL می سازد. با توجه به مدل استفاده شده برای لیزر، رفتار گذرای هر دو حامل، الکترون و حفره، در شکل ۵ نشان داده شده است. تصویر فازی مربوط به فرآیند روشن شدن حاملهای QD-VCSEL قبل از تزریق نوری در صفحه (*foe*, *foh*) نیز در نمودار الحاقی قسمت (a) در شکل ۵ بهازای جریان *J*_{th} (*J*_{th} (*J*_{th} (*J*_{th})

- Saddle-Node
- Zero-Hopf ²
 - Cusp



شکل ۵ دینامیک گذرای روشن شدن الکترون و حفره قبل ازتزریق نوری در اولین تراز برانگیخته نقطه کوانتومی

در این تصویر نشان داده می شود که دینامیک روشن شدن از یک خط راست که مطابق با رفتار هماهنگ الکترون و حفره می باشد منحرف شده و در عوض با طی مسیری مجعد در یک نقطه ثابت که مطابق با حالت پایدار است، پایان می یابد.

هر دو این اثرات یعنی مقیاسهای زمانی متفاوت دینامیک الکترون و حفره و اختلاف انرژی جداسازی ترازهای محدود شده، پیامدهایی بر چگالی نسبی الکترون و حفره و مشخصات دینامیکی آنها دارد و سبب نشان دادن رفتاری نامتقارن از سوی حاملها میشود. که البته این محدودیتها در QD-VCSELs با توجه به ویژگیهای ساختاری آن و در نتیجه بالاتر بودن حرارت در این نوع لیزرها [۱، ۳، ۸]تأثیر گذارتر خواهند بود.

هر چند که نرخ انتقال حفرهها از لایه خیسی به نقاط کوانتومی و نرخ واهلش آنها در نقاط کوانتومی بیشتر از الکترونها میباشد، در عوض نرخ انتقال تابشی آنها نیز در مقایسه با الکترونها زیادتر بوده و این امر باعث طول عمر پراکندگی کمتر حفرهها

می گردد. از اینرو، حفرهها در نقاط کوانتومی نسبت به تغییرات دینامیکی واکنش آهستهتری نسبت به الکترونها از خود نشان میدهند. بهعلاوه، اختلاف میان مقدار ماکزیمم طی نوسانات واهلشی و مقدار حالت پایدار، در حفرهها بیشتر از الکترونها می-باشد. در صورتیکه در حالت پایدار، بسیاری از نقاط کوانتومی بوسیله الکترونها اشغال شدهاند، احتمال حضور حفرهها در نقاط کوانتومی کمتر از ۱۵/۵ است. در نمودار الحاقی قسمت (b) در شکل ۵ خط سیر فرآیند روشن شدن حاملها در صفحه شکل ۵ خط سیر فرآیند روشن شدن حاملها در معاوتی را برای الکترون و حفره نشان میدهد. بیشتر بودن محدوده دینامیکی حفرهها باعث میشود که مسیر مارپیچی پهنتری نسبت به الکترونها داشته باشند. در شکل ۵ به وضوح عدم هماهنگی میان الکترون و حفره مشاهده میشود.

در شکل ۶ پاسخ گذرای روشن شدن الکترون و حفره بعد از تزریق نوری بهازای جریان ۲/۵ (Jbias=۱/۵ و نسبت تزریق ۰/۱ نشان داده شده است و به روشنی مشخص است که چگونه این تکنیک بر همگامسازی حاملها تأثیر می گذارد.

در نتیجه تزریق نوری نرخ واهلش حاملها در نقاط کوانتومی به دنبال افزایش چگالی حاملها در لایه خیسی افزایش مییابد. همانگونه که از شکل ۶ مشخص است، محدوده دینامیکی الکترون و حفره نسبت به وضعیت قبل از تزریق نوری قابل مقایسه شده و دینامیک روشن شدن الکترون و حفره در تصویر فازی رسم شده در صفحه (foe, foh) خط مستقیمی را طی می کند. همچنین رفتار (foe,h, nph) خط مساقیمی را طی می کند. همچنین رفتار به طور کامل از بین رفته و مطابق نمودارهای الحاقی در شکل ۶، رفتاری مشابهی از خود نشان میدهند.



شکل ۶. دینامیک گذرای روشن شدن الکترون و حفره بعد ازتزریق نوری در اولین تراز برانگیخته نقطه کوانتومی

پاسخ الکترون و حفره در لایه خیسی، ترازهای نقطـه کوانتـومی و فوتـــون خروجـــی بـــه پـــالس جریــان ورودی

نانو ثانیه،
$$J = J_{dc} + J_0 exp \left[- \left(\frac{t - t_0}{T_0} \right)^4 \right]$$

۲₀=۵/۲ نانوثانیه و جریان بایاس ۳*J_{th} می*باشد، قبل و بعد از تزریق نوری در شکلهای ۲ تا ۱۱ نشان داده شده است.

زمانیکه ترازهای فعال نقط ه کوانتومی به آرامی تخلیه شوند، حاملهای اضافی نمیتوانند به چاه کوانتومی پرشده تزریق شوند، که در نتیجه زمان تأخیری حدود چند نانوثانیه ایجاد میشود و سبب عدمهمگامی پالس جریان ورودی و چگالی حاملها و فوتون خروجی لیزر می گردد. زمان تأخیر ایجاد شده وابستگی غیرخطی زیادی به نرخ پراکندگی و چگالی حاملها در چاه کوانتومی دارد که با افزایش چگالی حاملها در این ناحیه کاهش مییابد.

تزریق نوری با افزایش چگالی حاملهای چاه کوانتومی، نرخ واهلش حاملها در نقاط کوانتومی را افزایش داده و باعث کاهش زمان برخاستن و به دنبال آن حذف تأخیر زمانی ایجاد شده می-گردد که در نتیجه آن نیز پالسهای جریان ورودی و فوتون خروجی مطابق شکل ۱۱ به شدت همگام میشوند.

همانطور که از شکلهای ۷ تا ۱۰ مشخص است نوسانات و جهش مشاهده در احتمال اشغال الکترون ها در نقطه و چاه کوانتومی، در نتیجه عدم همگامی الکترون و حفره ناشی از نرخ پراکندگی متفاوت آنها، که البته در تراز پایه به بیشترین مقدار خود می سد، بر اثر تزریق نوری به طور کامل از بین می ود. همچنین بهبود در رفتار دینامیکی حفرهها نیز کاملاً مشخص است هرچند که عدم همگامی میان حفرهها و پالس جریان ورودی از الکترونها کمتر می باشد. رفتار های مشاهده شده در شکلهای ۷ تا ۱۱ با نتایج ارائه شده در مرجع [۵] همخوانی دارند.



نورى



شکل ۸ دینامیک الف) حفره ب) الکترون در دومین تراز برانگیخته قبل و بعد از تزریق نوری



شکل ۹. دینامیک الف) حفره ب) الکترون در اولین تراز برانگیخته قبل و بعد از تزریق نوری





شکل ۱۱. دینامیک فوتون خروجی الف) بدون تزریق نوری ب) با تزریق نوری

پاسخ مدولاسیون سیگنال کوچک

QD-VCSEL به صورت تابعی از جریان بایاس و با در نظر گرفتن اثر به صورت تابعی از جریان بایاس و با در نظر گرفتن اثر خودگرمایی محاسبه شده است. برای محاسبه پاسخ مدولاسیون سیگنال کوچک لیزر، جریانی با شکل موج سیگنال کوچک لیزر، جریانی با شکل موج ($I_s = I_b U(t) + I_s U(t-t_0)$ ، به لیزر اعمال میشود که در آن ای تابع پله واحد و $I_b = (I)$ ، به لیزر اعمال میشود که در آن اغتشاش پله کوچک ($I_s > I_s$) برای شبیه سازی رفتار دینامیکی اغتشاش پله کوچک ($I_s < I_b$) برای شبیه سازی رفتار دینامیکی اغتشاش در QD-VCSEL است. طول پله جریان باید به اندازه کافی طولانی باشد تا پس از فروکش کردن پاسخ گذرای لیزر، پله اغتشاش در ناحیه خطی اعمال شود.

شکل ۱۲ پهنای باند Bb –۳ لیزر را به صورت تابعی از ریشه دوم جریان تزریقی، $^{0.5}(\mathrm{J-J_{th}})^{0.5}$ ، نشان می دهد. در جریان های بایاس کم، پهنای باند لیزر متناسب با چگالی جریان افزایش می یابد، اما زمانیکه $^{0.5}(\mathrm{J-J_{th}})$ برابر با $^{1-1}$ ۷ می گردد، پاسخ فرکانسی نزولی شده و بیشینه فرکانس مدولاسیون لیزر به ۵/۳ گیگا هرتز محدود می شود. با افزایش چگالی جریان در بخش نزولی نمودار، دمای ناحیه فعال لیزر افزایش یافته و نرخ واهلش حاملها در نقاط کوانتومی به دلیل اثر تنگنای فونون در نتیجه افزایش دمای ناحیه فعال لیزر کاهش می یابد. بنابراین، با توجه به اصل طرد پائولی زمان جابه جایی حاملها از لایه خیسی به تراز-های انرژی حالت پایه افزایش یافته، لذا بیشینه پاسخ فرکانسی لیزر نیز کاهش می یابد [۳].



به طور معمول، پهنای باند مدولاسیون و فرکانس تشدید یک لیزر توسط نرخ انتقال حاملها مشخص می شود. در صورتیکه چگالی حاملها در چاه کوانتومی زیاد باشد زمان انتقال حاملها در نقطه کوانتومی بسیار سریعتر از زمان انتقال آنها از چاه کوانتمی به نقطه کوانتومی خواهد بود. هر چند که، چگالی زیاد حاملها در چاه کوانتومی مستلزم افزایش جریان بایاس است و این امر نیز منجر به افزایش دمای ناحیه فعال و در نتیجه کاهش پهنای باند QD-VCSEL می گردد. اما در شرایط تزریق نوری و با چگالی جریانی نزدیک به جریان آستانه، نرخ انتقال حاملهای القایی زیادشده، فرکانس تشدید افزایشیافته و به دنبال آن پهنای باند QD-VCSEL بهبود مىيابد. ليزر اصلى با تزريق نور به جاى افزایش جریان بایاس، چگالی حاملهای زیادی را در نقاط کوانتومی لیزر پیرو فراهم می آورد و لذا از افزایش دمای -QD VCSEL به دلیل پدیده خودگرمایی درنتیجه جریانهای بایاس زیاد که باعث محدودیت عملکرد لیزر می گردد، جلوگیری می کند. شکل ۱۳ تأثیر تزریق نوری بر پاسخ مدولاسیون QD-VCSEL به ازای نسبتهای مختلف تزریق را در شرایط ناتنظیمی فرکانسی صفر، یعنی شرایطی که فرکانس لیزر اصلی و پیرو یکسان است، نشان میدهد. مطابق شکل، در نسبت تزریق کم پاسخ لیزر زیر-میرا و همراه با قله تشدید بالا است و در نرخ تزریق بالا لیزر پاسخ یهن اند و صافی را از خود نشان می دهد به طوریکه در نسبت تزریق ۵، پهنای باند لیزر ۹/۴ گیگاهرتز است یعنی حدود ۳/۷ برابر بیشتر از پهنای باند لیزر تنها، بدون تزریق نوری، (۲/۵۵ گیگا هرتز) میباشد.



شکل ۱۳. پاسخ مدولاسیون QD-VCSEL به ازای نسبتهای مختلف تزریق در $\Delta \omega_{ini}=0$

شکل ۱۴ تأثیر ناتنظیمی فرکانسی را بر پاسخ مدولاسیون لیزر نشان میدهد. میزان ناتنظیمی با توجه به نمودار انشعاب و در ناحیه قفل شدگی پایدار انتخاب شده است. در ناتنظیمی فرکانسی منفی یعنی حالتی که در آن فرکانس لیزر اصلی کمتر از فرکانس لیزر پیرو است، پاسخ مدولاسیون OIL-QD-VCSEL فوق میرا و بدون قله تشدید می باشد. در حالیکه در ناتنظیمی صفر پاسخ لیزر

99

پهنباند و صاف بوده و برای استفاده در ارتباطات دوربرد پهنباند و با سرعت بالا مناسب میباشد [۱۰].



برای ناتنظیمی مثبت پاسخ مدولاسیون لیزر، فرکانس تشدید و همچنین قله تشدید بیشتری از خود نشان میدهد بهطوری که در اختلاف فرکانس ۷ گیگا هرتز یهنای باند لیزر ۹ گیگاهرتز می-باشد. بهعلاوه، یک فرورفتگی قبل از فرکانس تشدید مشاهده می-شود. در ناتنظیمی فرکانسی بالا اگرچه فرکانس تشدید افزایش می یابد ولی این فرورفتگی که یک عامل محدود کننده پهنای باند لیزر است نیز افزایش می یابد. همانطور که از نتایج شبیه سازی پاسخ سیگنال کوچک لیزر مشخص است با استفاده از تکنیک تزریق نوری در جریان بایاسی نزدیک به جریان آستانه یعنی -*I* ۱/۵٬۸ پهنای باندی در حدود ۹ گیگا هرتز به دستآمد، در حالی که حداکثر پهنای باند QD-VCSEL در حالت بدون تزریق نوری در ۷ برابر جریان آستانه و محدود به ۵/۳ گیگا هرتز می باشد. بر اساس مرجع [11]، افزایش فرکانس تشدید در لیزر نیم رسانا OIL ناشی از برهمکنش میان میدان قفل شده تزریقی و میدان تشديد جابجا شده كاواك است، در حاليكه نوسانات واهلشي در ليزرهاى بدون تزريق نور در نتيجه بر همكنش ميان حاملها و فوتونها مىباشد. در حالت تزريق نورى، نرخ انتقال تابشى حامل-ها اساساً توسط نسبت تزريق نور و ناتنظيمي فركانسي بين ليزر-های اصلی و پیرو مشخص می شود. بنابراین با تنظیم نسبت تزريق و اختلاف فركانس ميان ليزر اصلى و QD-VCSEL مى توان به پاسخ مدولاسيون مطلوب دست يافت.

پاسخ مدولاسیون سیگنال بزرگ

پاسخ سیگنال بزرگ لیزر نیم رسانا، میزان توانایی لیزر را جهت انتقال دادههای دیجیتال مشخص میکند. پاسخ زمانی چگالی حاملها در لایه خیسی، احتمال حضور حاملها در تراز پایه، اولین و دومین تراز برانگیخته، و فوتون خروجی QD-VCSEL به

یک دنباله باینری شبه تصادفی (PRBS) الکتریکی به طول (۱-۲/۱) بیت با چگالی جریان بایاس متغیر بین دو مقدار ۲/۱ و ۲/۱ و نرخ بیت ۶ گیگاهرتز قبل و بعد از تزریق نوری با نسبت تزریق برابر با ۱، در شکلهای ۱۵ و ۱۶ نشان داده شدهاند. نتایج شبیه-سازی نشان میدهند که روند تغییرات چگالی الکترونها در تراز-های نقطه کوانتومی و چاه کوانتومی همچنین فوتون خروجی با شکل موج مربعی سیگنال ورودی همگام نیستند. علت این رفتار عدمهمگامی دینامیک الکترون در نقاط کوانتومی و چاه کوانتومی میباشد [۵]. بعد از تزریق نوری انتقال القایی سریع در نقاط کوانتومی غالب بوده و همگامسازی بین حاملها اتفاق میافتد. انتیجه همگامی میان الکترون و حفره بهوضوح در شکل ۱۶ مشاهده میشود. همزمانی بین دینامیک الکترون و حفره با افزایش نسبت تزریق نور افزایش مییابد.



شکل۱۵. دینامیک الکترون در چاه و نقطه کوانتومی و دینامیک فوتون خروجی در QD-VCSEL



شکل ۱۶. دینامیک الکترون در چاه و نقطه کوانتومی و دینامیک فوتون خروجی در OIL-QD-VCSEL

Pseudo Random Binary Sequence (PRBS) ⁷

در شکل های ۱۷ و ۱۸ نمودار چشمی مربوط به QD-VCSEL برای دو سطح مختلف جریان (۱*J*th تا ۲*J*th و ۲*J*th تا ۵*J*th) و برای سه فرکانس تکرار پالس متفاوت (۲/۵، ۴ و ۶ گیگاهرتز) شبیه-سازی شده است.



شکل ۱۸. نمودار چشمی برای جریان بایاس متغیر بین ۳*J*th و ۵*J*h به ازای سه مقدار مختلف فرکانس تکرار ۲/۵، ۴ و ۶ گیگا هرتز

با مقایسه پاسخ QD-VCSEL به سطوح مختلف جریان می توان نتیجه گرفت که استفاده از جریان ورودی بیشتر، سبب بهبود

نمودار الگوی چشم لیزر میگردد. بر اساس مرجع [۱۲]، این بهبود در رفتار لیزر مربوط به کاهش پیکهای نوسانات واهلشی و در نتیجه کاهش جهشهای مشاهده شده در نمودار چشمی و همچنین افزایش فرکانس نوسانات واهلشی و به دنبال آن جابجایی پاسخ مدولاسیون به سمت فرکانسهای بالاتر در نتیجه افزایش جریان میباشد. نکته اخیر نشان میدهد که رابطه نزدیکی بین پاسخ مدولاسیون سیگنال بزرگ و سیگنال کوچک لیزر وجود دارد و معمولاً حداکثر نرخ بیت مدولاسیون سیگنال بزرگ تابعی از پهنای باند HD-۳ پاسخ سیگنال کوچک لیزر است.

به طوری که فرکانس قطع QD-VCSEL، که مربوط به فرکانس نوسانات واهلشی آن و حدود ۵/۳ گیگاهرتز است سبب محدود شدن پاسخ مدولاسیون سیگنال بزرگ لیزر و نزدیکی چشمها در فرکانس های تکرار بالاتر از ۶ گیگا هرتز می گردد.

این محدودیت را میتوان با افزایش چگالی جریان ورودی بهبود بخشید، اما بر اساس مدل الکتریکی – حرارتی بکار رفته برای QD-VCSEL، با افزایش بیشتر چگالی جریان ورودی دمای ناحیه فعال لیزر افزایش یافته که این امر نیز منجر به کاهش فرکانس نوسانات واهلشی و در نتیجه کاهش پهنای باند لیزر میگردد. بنابراین با توجه به مدل استفاده شده برای QD-VCSEL و در نظر گرفتن اثر خود گرمایی مصالحهای بین افزایش جریان و در نتیجه افزایش حرارت و کاهش فرکانس تشدید لیزر وجود دارد. تیها)، با فرکانس تکرار پالس ۶ گیگاهرتز و نمودارهای چشمی در سببت تزریق ۵ و به ازای فرکانسهای تکرار ۱۲، ۱۸ و ۲۲ گیگا-مرتز رسم شده است. همانگونه که از نمودارها مشخص است تزریق نوری باعث شده که محاکرد مطلوبی را در فرکانسهای ۱۲ و ۱۸ گیگا هرتز از خود نشان دهد.

چنانکه در شکل ۱۹ نشان داده شده است نمودار چشمی تنها در فرکانس تکرار ۲۲ گیگا هرتز شروع به خراب شدن میکند. زمان صعود با افزایش فرکانس تکرار زیاد میشود و این بدان معناست که برای نسبت تزریق داده شده فرکانس تشدید افزایش یافته حدود ۲۲ گیگا هرتز میباشد. مقایسه تأثیر تزریق نوری بر رفتار حاملها و نمودارهای چشمی نشان میدهد که همزمانی دینامیک حاملها کارایی QD-VCSEL را به شکل قابل توجهی بهبود می-بخشد. نتایج به دست آمده، با رفتار مشاهده شده به طور تجربی در مرجع [۱۳] مطابقت نشان می دهد.

چرپ لیزر

در شبکههای فیبر نوری دیجیتال، نرخ بیت زیاد (سرعت ارسال بالا) و مسافت طولانی انتقال داده (بدون تقویت کننده) به صورت همزمان همیشه مورد درخواست بوده است. اما به دلیل فیزیک حاکم بر انتقال نور مدوله شده از طریق فیبر نوری و عواملی مانند

چرپ فرکانسی، امکان دستیابی به نرخ بیت بالا و مسافت طولانی در زمان یکسان در لیزرهای مستقیماً مدوله شده وجود ندارد [۱۴].



شکل ۱۹: نمودار چشمی در حالت بدون تزریق نور در فرکانس تکرار ۶ گیگاهرتز و در حالت تزریق نوری با نسبت تزریق ۵ و به ازای فرکانسهای تکرار ۱۸، ۱۸ و ۲۲ گیگا هرتز

قفل شدگی تزریق نوری قادر است که چرپ فرکانسی را در لیزرهای با مدولاسیون مستقیم کاهش دهد [۱۵] و در نتیجه باعث بهبود عملکرد لیزر شود و با توجه به اینکه هر دو لیزر اصلی و پیرو میتوانند با قطعات الکترونیکی یکسان بدون مصرف توان بالا راهاندازی شوند این امر طراحی مدارات را تا حد زیادی ساده کرده و از این رو سبب کاهش هزینه ماژول فرستنده می-گردد. در شکل ۲۰، چرپ فرکانسی در QD-VCSEL و در -OLL است. همانطور که در شکل ۲۰ دیده میشود با افزایش نسبت ترریق چرپ لیزرکاهش یافته به طوریکه در نسبت تزریق ۸ و ۱۱ ، چرپ فرکانسی به ۲۹/۰ و ۲۶/۰ گیگا هرتز میرسد که کاهش قابل ملاحظهای را نشان میدهد.



شکل ۲۰. چرپ فرکانسی در QD-VCSEL و OIL-QD-VCSEL به ازای نسبت-های مختلف تزریق نوری

نتيجهگيري

در این مقاله با حل عددی معادلات نرخ توصیف شده برای -OIL QD-VCSEL به صورت تئوری تأثیر تزریق نوری بر دینامیک روشن شدن، پاسخ سیگنال کوچک و سیگنال بزرگ الکترونها و حفرهها در نقاط كوانتومي و لايه خيسي QD-VCSEL و بر فوتون خروجی لیزر بررسی شد. در غیاب تزریق نوری، مشخصات ديناميكي QD-VCSEL تحت تأثير ديناميك متفاوت الكترون و حفره قرار دارد. تزریق نوری باعث همگامسازی رفتار حاملها در نقاط كوانتومى و لايه خيسى مى گردد. با بررسى پاسخ سيگنال کوچک لیزر نشان داده شد که در نتیجه تزریق نوری نرخ انتقال حاملهای القایی زیاد شده، فرکانس تشدید افزایش یافته و در نتیجه پهنای باند QD-VCSEL بهبود می ابد. بطوریکه در جریان بایاس مشابه، پهنای باند لیزر تزریقشده نوری تقریباً ۴ برابر پهنای باند لیزر تنها میباشد. در اثر تزریق نوری، در پاسخ سیگنال بزرگ QD-VCSEL، پالسهای چگالی جریان بایاس و چگالی حاملها و تعداد فوتون خروجي با توان كافي به شدت همگام مي-شوند، زمان صعود کاهش مییابد و در نتیجه تأخیر زمانی میان پالسهای جریان ورودی و فوتون خروجی عملاً حذف میشود. به دلیل همگامسازی دینامیک حاملها در نقاط کوانتومی، عملکرد OIL-QD-VCSEL با توجه به نمودارهای چشمی رسم شده برای سیگنال PRBS الکتریکی به ازای فرکانسهای تکرار ۱۲، ۱۸ و ۲۲ گیگاهرتز نسبت به QD-VCSEL با حداکثر فرکانس تکرار ۶ گیگاهرتز بهطور قابل ملاحظهای بهبود می یابد. باز بودن کامل چشمهای نمودار چشمی که مطابق با عملکرد مطلوب -QD VCSEL در فرکانس تکرار ۱۸ گیگا هرتز است، به تدریج در فرکانس ۲۲ گیگاهرتز کاهش یافته و چشم ها کم کم به هم

نزدیک میشوند. همچنین نشان داده شد که تزریق نوری سبب کاهش چرپ فرکانسی شده به طوری که چرپ QD-VCSEL از ۳/۱۳ گیگاهرتز در شرایط بدون تزریق نوری به ۲/۱۴۰گیگاهرتز در حالت تزریق شده میرسد. ثابت شد که تزریق نوری سطح بالایی از چگالی حاملها را در نقاط کوانتومی حتی به ازای چگالی جریانهای بایاس نزدیک به جریان آستانه فراهم میآورد که در نتیجه آن QD-VCSEL را از چگالی جریان بایاس زیاد که منجر به پدیده خودگرمایی و کاهش عملکرد لیزر می گردد، بی نیاز می-سازد.

مراجع

- [8] C. Z. Tong, D. W. Xu, S. F. Yoon, Y. Ding and W. J. Fan, "Temperature characteristics of 1.3µm p-doped InAs-GaAs quantum-dot vertical cavity surface-emitting lasers," IEEE Journal Selected Topics Quantum Electronics, vol. 15, no. 3, pp. 743-748, 2009.
- [9] C. Wang, F. Grillot, and J. Even, "Impacts of carrier capture and relaxation rates on the modulation response of injection-locked quantum dot lasers," Proc. of SPIE, vol. 8619, pp. 861908-1–861908-8, 2013.
- [10] C. Wang, M. E. Chaibi, H. Huang, D.Erasme, P. Poole, J. Even and F. Grillot, "Frequencydependent linewidth enhancement factor of optical injection-locked quantum dot/dash lasers," Optic Express, vol. 23, no. 17, pp. 21761-21770, 2015.
- [11] A. Murakami, K. Kawashima, and K. Atsuki, "Cavity resonance shift and bandwidth enhancement in semiconductor lasers with strong light injection," IEEE Journal Quantum Electron., vol. 39, no. 10, pp. 1196-1204, 2003.
- [12] K. Lüdge, R. Aust, G. Fiol, M. Stubenrauch, D. Arsenijević and D. Bimberge, "Large-Signal response of semiconductor quantum-dot lasers," IEEE Journal Quantum Electronics, vol. 46, no. 12, pp. 1755-1762, 2010.
- [13] P. C. Peng, H. C. Kuo, W. K. Tsai, Y. H. Chang, C. T. Lin, S. Chi, and S. C. Wang, "Dynamic characteristics of long-wavelength quantum dot vertical-cavity surface-emitting lasers with light injection," Opt. Express, vol. 14, no. 7, pp. 2944-2449, 2006.
- [14] T. L. Koch, J. E. Bowers, "Nature of wavelength chirping in directly modulated semiconductor lasers," Electronic Letters, vol. 20, no. 25, pp. 1038-1040, 2007.
- [15] C. Chang, L. Chrostowski, and C. J. Chang-Hasnain, "Injection locking of VCSELs," IEEE Journal Selected Topics Quantum Electronics, vol. 9, no. 5, pp. 1386-1393, 2003.

- D. W. Xu, S. F. Yoon and C. Z. Tong, "Selfconsistent analysis of carrier confinement and output power in 1.3-µm InAs–GaAs quantumdot VCSELs," IEEE Journal Quantum Electronics, vol. 44, no. 9, pp. 879-885, 2008.
- [2] P. Peng, G. Lin, H. Kuo, Ch. Yeh, J. Liu, Ch. Lin, J. Chen, S. Chi, J. Chi, Sh. Wang, "Dynamic characteristics and linewidth enhancement factor of quantum-dot verticalcavity surface-emitting lasers," IEEE Journal SelectedTopics Quantum Electronics, vol. 15, no. 3, pp. 844-849, 2009.
- [3] H. Abbaspour, V. Ahmadi and M. H. Yavari, "Analysis of qd vcsel dynamic characteristics considering homogeneous and inhomogeneous broadening," IEEE Journal Selected Topics Quantum Electronics, vol. 17, no. 5, pp. 1327-1333, 2011.
- [4] M. Giovannini and M. Rossetti, "Time-domain traveling wave model of quantum dot DFB lasers," IEEE Journal Selected Topics Quantum Electronics, vol. 17, no. 5, pp. 1318-1326, 2011.
- [5] Y. Ben Ezra, B. I. Lembrikov, "Synchronized carrier dynamics in quantum dot-in-a-well (QWWELL) laser under an optical injection," IEEE Journal Selected Topics Quantum Electronics, vol. 19, no. 15, pp. 1901508-1– 1901508-8, 2013.
- [6] I. P. Kaminow, T. Li, A. E. Willner, Optical Fiber Telecommunications V A: Components and Subsystems, Fifth Edition, Academic Press, 2008.
- [7] E. K. Lau, L. J. Wong, M. C. Wu, "Enhanced modulation characteristics of optical injectionlocked lasers: a tutorial ," *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, vol. 15, no. 3, pp. 618-633, 2009.