

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

مرضیه مروج<sup>۱</sup>، عباس ظریفکار<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد برق الکترونیک، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه شیراز، m.moravvej@shirazu.ac.ir

<sup>۲</sup> دانشیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه شیراز

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

### چکیده

در این مقاله، برای نخستین بار مشخصات دینامیکی لیزرهای نقطه کوانتومی گسیل از سطح با کاواک عمودی در شرایط قفل‌شدگی تزریق نوری به صورت تئوری بررسی شده است. با استفاده از معادلات نرخ توصیف‌کننده دینامیک الکترون و حفره به طور جداگانه، در ناحیه سدی GaAs، لا به 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 شبیه‌سازی 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 تزریق‌شده نوری محاسبه می‌گردد. نشان داده می‌شود که در نتیجه تزریق نوری، رفتار دینامیکی متفاوت الکترون و حفره همگام‌شده، فرکانس مدولاسیون افزایش یافته، چرپ لیزر به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد و لیزر عملکرد مطلوبی در فرکانس‌های تکرار بیشتر از فرکانس نوسانات واهلشی (حدود ۲۲ گیگاهرتز) از خود نشان می‌دهد.

### کلیدواژه

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

### مقدمه

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 می‌شود. اثر خودگرمایی در QD-VCSELS اساساً در نتیجه روزنه اکسیدی کوچک و محدودیت ضعیف حفره-ها در نقاط کوانتومی می‌باشد 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 یافته‌های مراجع [۲، ۳] علت این امر اثر خودگرمایی به دنبال افزایش جریان تزریقی به لیزر می‌باشد. یکی از عوامل محدود کننده پاسخ فرکانسی لیزرهای نقطه کوانتومی، عدم همگامی میان دینامیک الکترون و حفره است. علت عدم همگامی میان دینامیک حامل‌ها اختلاف زمان واهلش الکترون و حفره می‌باشد: 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 می‌باشد [۴]. دینامیک متفاوت حامل‌ها باعث می‌شود که لیزر نقطه کوانتومی

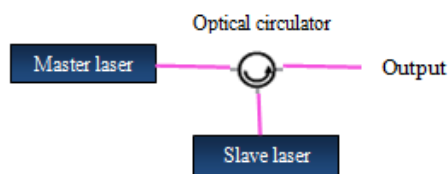
لیزرهای گسیل از سطح با کاواک عمودی (VCSELS) به دلیل کاربردهای مختلف آن‌ها در زمینه‌هایی مانند مخابرات نوری، پردازش سیگنال نوری و اتصالات داخلی نوری بسیار مورد توجه قرار دارند. در مقایسه با لیزرهای گسیل از لبه، VCSELS دارای مزایایی همچون: فراهم آوردن یک لکه نورانی دقیق با راندمان خوب کوپل به فیبرهای نوری، 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 می‌بخشند. از این رو، InAs/GaAs QD-VCSELS به عنوان یک گزینه مناسب برای شبکه‌های فوتونیک پیشرفته در ناحیه طول موجی ۱۳۰۰

<sup>۱</sup> Vertical Cavity Surface Emitting Laser

یک لایه AlAs به ضخامت ۱۲ نانو متر بین آینه‌های DBR نوع p و ناحیه فعال به منظور شکل‌دهی یک پنجره اکسیدی به منظور 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 می‌گردد. 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 توصیف کننده دینامیک حامل‌ها و فوتون QD-VCSEL به صورت روابط (۱) تا (۶) بیان می‌شوند [۱].

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

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

$$\frac{df_2}{dt} = \frac{g_w}{2p_2 \rho} R_w 2f_w (1-f_2) - E s_{2w} f_2 (1-f_w) + \frac{p_1}{p_2} E s_{12} f_1 (1-f_2) - R_{21} f_2 (1-f_1) - \frac{f_2}{t_{r2}} \quad (3)$$

$$\frac{df_1}{dt} = \left[ \frac{p_1}{p_2} R_{21} f_2 (1-f_1) - E s_{12} f_1 (1-f_2) \right] + \left[ \frac{p_0}{p_1} E s_{01} f_0 (1-f_1) - R_{10} f_1 (1-f_0) \right] - \frac{f_1}{t_{r1}} \quad (4)$$

$$\frac{df_0}{dt} = \left[ \frac{p_1}{p_0} R_{10} f_1 (1-f_0) - E s_{01} f_0 (1-f_1) \right] - \frac{f_0}{t_{r0}} - \frac{1}{2p_0 n S_a \rho} \frac{v_g g_{max} (f_{0e} - f_{0h} - 1) S}{1 + \epsilon S} \quad (5)$$

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. قفل‌شدگی تزریق نوری روشی کارآمد برای بهبود عملکرد لیزرهای نیم رسانا مستقیماً مدوله شده است. افزایش نوسانات واهلشی، افزایش پهنای باند، کاهش نویز شدت نسبی و کاهش چرپ لیزر از جمله مزایای تزریق نوری است که سبب بهبود سیستم‌های مخابراتی می‌گردد [۵].

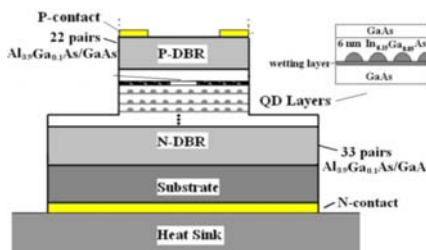
نتایج مرجع [۵] نشان می‌دهند که در نتیجه تزریق نوری، دینامیک حامل‌ها در نقاط کوانتومی همگام شده، فرکانس مدولاسیون افزایش یافته و لیزر عملکرد مطلوبی در فرکانس تکرار ۲۰ گیگاهرتز از خود نشان می‌دهد.

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

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 شبیه‌سازی پرداخته شده و در بخش چهارم نتیجه‌گیری مقاله بیان شده است.

### مدل سازی تئوری

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



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

اتصال‌های فلزی در بالای آینه‌های DBR نوع p و در پایین بستری قرار دارند. ۲۲ جفت آینه DBR نوع p (با چگالی  $cm^{-3}$  و  $5 \times 10^{17}$ ) و ۳۳ جفت آینه DBR نوع n (با چگالی  $cm^{-3}$  و  $1 \times 10^{18}$ ) با استفاده از لایه نشانی تناوبی GaAs/Al<sub>0.9</sub>Ga<sub>0.1</sub>As به ترتیب در بالا 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 شده و با لایه‌ای از In<sub>0.15</sub>Ga<sub>0.85</sub>As به ضخامت ۶ نانومتر پوشانده شده‌اند. سپس لایه‌ای از GaAs بر روی InGaAs رشد داده می‌شود.

$$t_{ewb} = L_w \left[ \frac{2\pi m^*}{K_B T} \right]^{1/2} \exp\left(\frac{E_{bw}}{K_B T}\right) \quad (12)$$

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

$$R_{ij} (i \neq j) = A_{ij} + C_{ij} N_w \quad (13)$$

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 اوزه بین ترازهای نام و نام هستند.  $N_w$  چگالی حامل‌ها در لایه خرسی است و به صورت رابطه (۱۴) تعریف می‌شود.

$$N_w = \frac{1}{L_w} \frac{m^* K_B (1 - \exp(-E_{bw} / K_B T))}{\pi \hbar^2} f_w \quad (14)$$

$$\equiv \frac{g_w}{L_w} f_w$$

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

$$A_{ij} = F_{ij} \left\{ \left[ \exp\left(\frac{E_{ph}}{K_B T}\right) - 1 \right]^{-1} + 1 \right\}^n \quad (15)$$

که در آن  $F_{ij}$  بیانگر نرخ پر شدن تراز نام در دمای صفر کلون است.  $n$  تعداد فونون‌ها و  $E_{ph}$  انرژی فونون است، که انرژی فونون‌های نوری در چاه کوانتومی در حدود  $29/6 \text{ meV}$  و در نقاط کوانتومی InAs در حدود  $31/9 \text{ meV}$  می‌باشد. مقادیر  $A_{ij}$  و  $C_{ij}$  مطابق با مقادیر موجود در مرجع [۱] است. با فرض تعادل شبه-فرمی، یک رابطه نمایی بین نرخ واهلش و نرخ فرار حامل‌ها وجود دارد. نرخ فرار حامل‌ها از تراز نام نقطه کوانتومی به لایه خرسی از رابطه (۱۶) به دست می‌آید.

$$E s_{iw} = \left[ \frac{g_w}{2p_i \rho} \exp\left(-\frac{E_{iw}}{K_B T}\right) \right] R_{wi} \quad (16)$$

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

$$E s_{ij} = \frac{p_j}{p_i} \exp\left(-\frac{E_{ij}}{K_B T}\right) R_{ji} \quad (17)$$

که در آن  $E_{ij}$  و  $E_{iw}$ ،  $\rho$ ،  $p_i (i=0, 1, 2)$  به ترتیب بیانگر تهنگی تراز-های نقطه کوانتومی، چگالی سطحی نقطه کوانتومی، اختلاف انرژی بین لایه خرسی و ترازهای نقطه کوانتومی و اختلاف انرژی بین ترازهای نقطه کوانتومی می‌باشند. مقادیر  $E_{ij}$  و  $E_{iw}$  مطابق با مقادیر مرجع [۱] است. در رابطه‌های (۵) و (۶)،  $v_g$  و  $g_{max}$  به

$$\frac{dS}{dt} = \left( \frac{\Gamma v_g g_{max} (f_{0e} - f_{0h} - 1)}{1 + \varepsilon S} - \frac{1}{t_p} \right) S \quad (6)$$

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 می‌شوند [۷].

$$\frac{dS}{dt} = \left( \frac{\Gamma v_g g_{max} (f_{0e} - f_{0h} - 1)}{1 + \varepsilon S} - \frac{1}{t_p} \right) S + 2K_c \sqrt{S_{inj} S} \cos \phi \quad (7)$$

$$\frac{d\phi}{dt} = \alpha \left( \frac{\Gamma v_g g_{max} (f_{0e} - f_{0h} - 1)}{1 + \varepsilon S} - \frac{1}{t_p} \right) - \Delta \omega_{inj} - K_c \sqrt{\frac{S_{inj}}{S}} \sin \phi \quad (8)$$

$f_i (i = B, w, 0, 1, 2)$  بیانگر احتمال حضور حامل در لایه سدی، خرسی، تراز پایه، اولین و دومین تراز برانگیخته است.  $S$ ،  $N_B$  و  $n$  به ترتیب معرف چگالی حامل در ناحیه سدی، تعداد فوتون، و تعداد لایه‌های نقطه کوانتومی می‌باشند. همچنین  $J$ ،  $q$  و  $b$  به ترتیب چگالی جریان تزریق شده، بار الکترون و ضخامت سد GaAs هستند. در معادلات آورده شده  $t_{ri} (i = B, w, 0, 1, 2)$  طول عمر حامل‌ها در ناحیه سدی، خرسی، تراز پایه، اولین و دومین تراز برانگیخته است. مدت زمان انتقال حامل‌ها از لایه پوشاننده به لایه خرسی با استفاده از رابطه (۹) به دست می‌آید.

$$t_r = \frac{L_s^2}{2D_{e,h}} \quad (9)$$

که در آن  $L_s$  فاصله ناحیه پوشاننده تا لایه خرسی است،  $D_{e,h}$  ضریب نفوذ الکترون و حفره بوده و از رابطه انیشتین  $D_{e,h} = (K_B T) \mu_{e,h}$  قابل محاسبه می‌باشد.  $T$ ،  $K_B$  و  $\mu_{e,h}$  به ترتیب ثابت بولتزمن، دما و تحرک‌پذیری الکترون و حفره هستند. تحرک‌پذیری الکترون و حفره در GaAs به صورت رابطه‌های (۱۰) و (۱۱) محاسبه می‌شوند.

$$\mu_h = 380 \left( \frac{300}{T} \right)^{2.1} \quad (10)$$

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

زمان انتقال حامل‌ها از ناحیه پوشاننده به لایه خرسی در مجموع از رابطه  $t_{bw} = t_r + t_c$  به دست می‌آید که  $t_c$  زمان قرار گرفتن حامل‌ها در چاه کوانتومی است و در محاسبات  $0.13$  پیکوثانیه در نظر گرفته شده است. زمان انتشار حرارتی حامل‌ها در لایه خرسی به صورت رابطه (۱۲) تعریف می‌شود.

Wetting layer <sup>۲</sup>

### معادلات حرارت

در لیزرهای نیم رسانا منبع اصلی حرارت، ناحیه فعال لیزر است، جایی که باز ترکیب 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  $p$  می‌باشد [۸] و به صورت رابطه (۲۳) محاسبه می‌شود.

$$Q_J(J) = \left(\frac{JS_a}{S_p}\right)^2 \rho_p + \left(\frac{JS_a}{S_n}\right)^2 \rho_n \quad (23)$$

که در آن  $J$  چگالی جریان تزریق شده است.  $S_a$ ،  $S_p$  و  $S_n$  به ترتیب بیانگر مساحت ناحیه فعال، مساحت اتصال نوع  $p$  و مساحت اتصال نوع  $n$  هستند.  $\rho_n$  و  $\rho_p$  نیز به ترتیب مقاومت DBR نوع  $p$  و  $n$  می‌باشند. چگالی حرارتی در ناحیه فعال نیز به صورت رابطه (۲۴) بیان می‌شود.

$$Q_a(J) = \frac{V(T,r)(1-\eta_{sp}f_{sp})}{nd_D} \left\{ J_{th}(T) + [J - J_{th}(T)](1-\eta_{QD}) \right\} \quad (24)$$

که  $d_D$  ضخامت هر لایه نقطه کوانتومی،  $\eta_{sp}$  بازده کوانتومی خودبه‌خودی،  $f_{sp}$  عامل فرار تابشی خودبه‌خودی است.  $\eta_{QD}$  بازده کوانتومی داخلی QD-VCSEL است و از رابطه (۲۵) محاسبه می‌شود.

$$\eta_{QD} = \frac{\sum_{i=0}^2 n_i}{n_B + n_w + \sum_{i=0}^2 n_i} \quad (25)$$

که در آن  $n_B$  و  $n_i$ ،  $n_w$  به ترتیب بیانگر چگالی سطحی حامل در لایه خیسی، ترازهای نقطه کوانتومی و ناحیه سدی هستند و با استفاده از رابطه‌های (۲۶) تا (۲۷) تعریف می‌شوند.

$$n_w = n g_w f_w \quad (26)$$

$$n_i = 2np_i \rho f_i \quad (27)$$

$$n_B = \frac{1}{t_{bw}^{-1} + t_{rb}^{-1}} \left( \frac{J}{q} + \frac{n g_w f_w}{t_{ewb}} \right) \quad (28)$$

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

$$V(T,r) = \frac{2K_B T}{q} \left( \ln \frac{J}{J_s} + \frac{r_0}{r_{01}} \right) \quad (29)$$

که  $r_0$  و  $r_{01}$  به ترتیب 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) به دست می‌آید.

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

$$g_{max} = \frac{hq}{cn_r m_0 \epsilon_0} \frac{|P_{cv}|^2}{m_0 E_L} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \left( \frac{2.35}{F_m} \right) \frac{n\rho}{l_c} \quad (18)$$

که در آن  $c$  سرعت نور و  $F_m$  مقدار پهنای کامل نصف بیشینه پهن‌شدگی غیرهمگن نقاط کوانتومی می‌باشند. در حالیکه  $V_a$  حجم تمام نقاط کوانتومی و  $\Gamma$  ضریب تمرکز نوری کاواک است،  $\epsilon = \epsilon_m \Gamma / V_a$ ، که در آن  $\epsilon_m$  ضریب بهره غیرخطی است و از رابطه (۱۹) به دست می‌آید.

$$\epsilon_m = \frac{\hbar q}{n_r^2 m_0 \epsilon_0} \frac{|P_{cv}|^2}{m_0 E_L} \frac{1}{F_{ho}} t_p \quad (19)$$

که در آن  $\epsilon_m$ ،  $m$  و  $\hbar$  به ترتیب بیانگر مقدار پهنای کامل نصف بیشینه پهن‌شدگی همگن نقاط کوانتومی، ضریب شکست ناحیه فعال، ضریب گذردهی فضای آزاد، جرم آزاد الکترون و ثابت پلانک کاهش یافته هستند.  $P_{cv}$  نیز ماتریس انتقال است و برای نقاط کوانتومی InAs به صورت  $2m_0 E_L$  تقریب زده می‌شود.  $t_p$  طول عمر فوتون است و به صورت رابطه (۲۰) محاسبه می‌شود.

$$t_p = \frac{1}{v_g g_{th}} \quad (20)$$

که  $g_{th}$  بهره آستانه مدی لیزر است و به صورت رابطه (۲۱) تعریف می‌شود.

$$g_{th} = \frac{A + (1/l_c) \log(1/\sqrt{R})}{\Gamma_r} \quad (21)$$

$\alpha$  ضریب متوسط جذب،  $l_c$  طول کاواک و  $\Gamma_r$  ضریب تمرکز نوری نسبی لیزر است و  $R = R_l R_B$ ، که  $R_l$  و  $R_B$  به ترتیب 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،  $S_{inj}$  تعداد فوتون تزریق شده،  $\phi$  اختلاف فاز میان لیزر اصلی و پیرو و  $K_c$  ضریب کوپل‌شدگی میان لیزر اصلی و پیرو است و از رابطه (۲۲) به دست می‌آید.

$$K_c = \frac{v_g (1-R)}{2l_c \sqrt{R}} \quad (22)$$

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

### آنالیز پایداری

به منظور به دست آوردن ناحیه قفل‌شدگی پایدار، انشعاب محلی QD-VCSEL، انشعاب هیف (Hopf) و انشعاب گره-زینی (SN)، در صفحه  $(R_{inj}, \Delta\omega_{inj})$ ، بررسی شده است. منحنی انشعاب از طریق تجزیه و تحلیل مقدار ویژه 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 می‌گردد. اگر یک مقدار ویژه تنها و حقیقی از محور موهومی در صفحه مختلط عبور کند انشعاب SN و در صورتیکه یک جفت مقدار ویژه مختلط مزدوج از محور موهومی عبور کند انشعاب Hopf رخ می‌دهد [۹]. در این مقاله تجزیه و تحلیل انشعاب با استفاده از تکنیک امتداد عددی پیوسته و با بکارگیری بسته نرم-افزاری Matcont انجام گرفته است. منحنی انشعاب SN و Hopf مربوط به OIL-QD-VCSEL به ازای  $J_{th} = 1/5$  و  $J_{bias} = 0.16$  در شکل ۴ نشان داده شده است. انشعاب مربوط به نقاط پایدار انشعاب فوق بحرانی (خطوط ضخیم) و انشعاب مربوط به نقاط ناپایدار انشعاب زیر بحرانی (خطوط نازک) نامیده می‌شود. ناحیه قفل‌شدگی 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 نانتظیمی فرکانسی در محدوده وسیعتری می‌تواند تغییر کند. به دست آوردن محدوده قفل‌شدگی وسیعتر با توجه به نانتظیمی فرکانسی امکان دستیابی به فرکانس تشدید بالاتری را فراهم می‌آورد. در نمودار انشعاب، ZH محل برخورد منحنی SN و Hopf می‌باشد که در آن انشعاب از فوق بحرانی (زیر بحرانی) به زیر بحرانی (فوق بحرانی) در امتداد هر دو منحنی تغییر می‌کند. در نقطه  $C^5$  دو شاخه از منحنی SN بر هم مماس شده و مقدار ویژه در این نقطه صفر می‌باشد.

### دینامیک روشن شدن

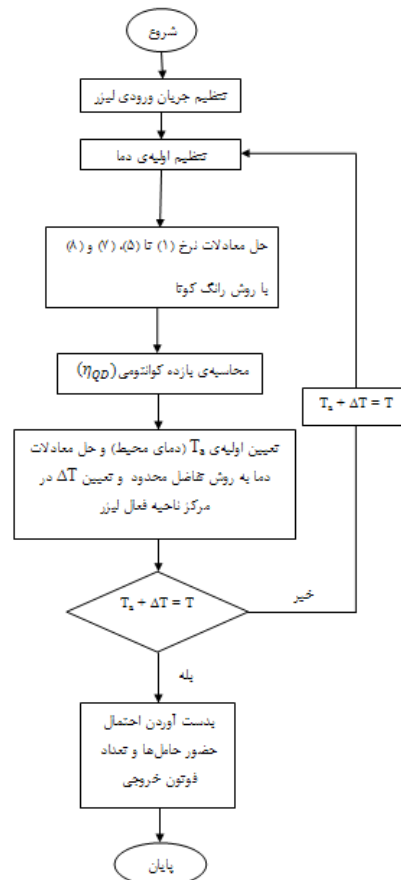
روش تحلیل بیان شده در بخش قبل، ما را قادر به شبیه‌سازی دینامیک روشن شدن QD-VCSEL می‌سازد. با توجه به مدل استفاده شده برای لیزر، رفتار گذرای هر دو حامل، الکترون و حفره، در شکل ۵ نشان داده شده است. تصویر فازی مربوط به فرآیند روشن شدن حامل‌های QD-VCSEL قبل از تزریق نوری در صفحه  $(f_{0e}, f_{0h})$  نیز در نمودار الحاقی قسمت (a) در شکل ۵ به ازای جریان  $J_{th} = 1/5$  رسم شده است.

$$\frac{1}{K_i} \frac{\partial T(r,t)}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \frac{\partial T(r,t)}{\partial r} \right] + \frac{1}{\lambda_i} Q(J,r,T) \quad (30)$$

که در آن  $K_i$ ،  $\lambda_i$  و  $r$  به ترتیب 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) به دست آورده شده است. در این مقاله، از ترکیب روش تفاضل محدود برای حل معادلات حرارت و روش رانگ-کوتا جهت شبیه‌سازی 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، به دست می‌آید. پارامترهای لازم برای شبیه‌سازیها از مراجع [۱]، [۵] و [۷] گرفته شده اند.



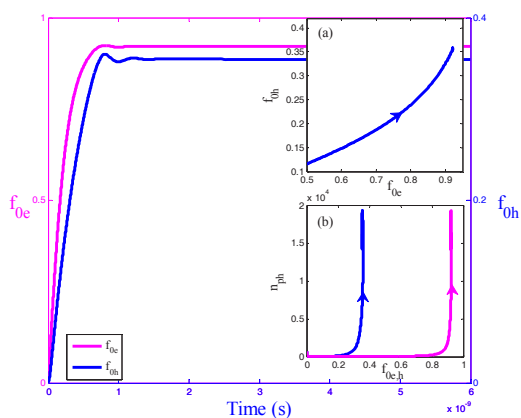
شکل ۳. الگوریتم حل معادلات نرخ حامل و فوتون و معادله‌ی حرارت به صورت کوپل با یکدیگر

<sup>۳</sup> Saddle-Node  
<sup>۴</sup> Zero-Hopf  
<sup>۵</sup> Cusp

می‌گردد. از اینرو، حفره‌ها در نقاط کوانتومی نسبت به تغییرات دینامیکی واکنش آهسته‌تری نسبت به الکترون‌ها از خود نشان می‌دهند. به علاوه، اختلاف میان مقدار ماکزیمم طی نوسانات و اهلهشی و مقدار حالت پایدار، در حفره‌ها بیشتر از الکترون‌ها می‌باشد. در صورتیکه در حالت پایدار، بسیاری از نقاط کوانتومی بوسیله الکترون‌ها اشغال شده‌اند، احتمال حضور حفره‌ها در نقاط کوانتومی کمتر از  $0/5$  است. در نمودار الحاقی قسمت (b) در شکل ۵ خط سیر فرآیند روشن شدن حامل‌ها در صفحه  $(f_{0e,h}, n_{ph})$  رسم شده است که این نمودار رفتار متفاوتی 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.

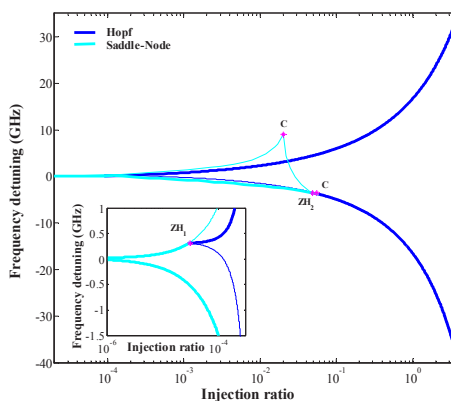
در شکل ۶ پاسخ گذرای روشن شدن الکترون و حفره بعد از تزریق نوری به‌ازای جریان  $J_{bias} = 1/5 J_{th}$  و نسبت تزریق  $0/1$  نشان داده شده است و به روشنی مشخص است که چگونه این تکنیک بر همگام‌سازی حامل‌ها تأثیر می‌گذارد.

در نتیجه تزریق نوری نرخ واهلهش حامل‌ها در نقاط کوانتومی به دنبال افزایش چگالی حامل‌ها در لایه خسی می‌آید. 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  $(f_{0e}, f_{0h})$  خط مستقیمی را طی می‌کند. همچنین رفتار متفاوت الکترون و حفره قبل از تزریق نوری در صفحه  $(f_{0e,h}, n_{ph})$  به طور کامل از بین رفته و مطابق نمودارهای الحاقی در شکل ۶، رفتاری مشابهی از خود نشان می‌دهند.

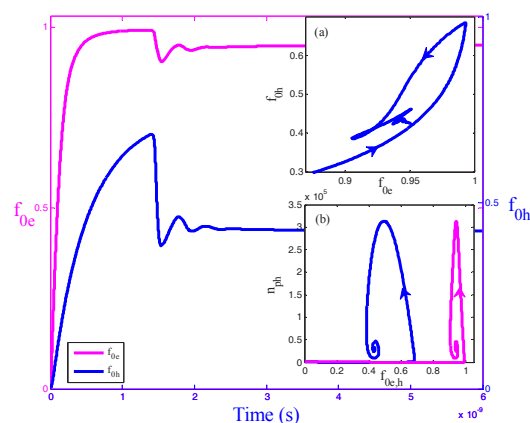


شکل ۶ دینامیک گذرای روشن شدن الکترون و حفره بعد از تزریق نوری در اولین تراز برانگیخته نقطه کوانتومی

پاسخ الکترون و حفره در لایه خسی، ترازهای نقطه کوانتومی و فوتون خروجی به پالس جریان ورودی



شکل ۴. نمودار انشعاب به صورت تابعی از ناتنظیمی فرکانسی و نسبت تزریق نوری در  $J_{bias} = 1/5 J_{th}$  و  $\alpha = 0/6$

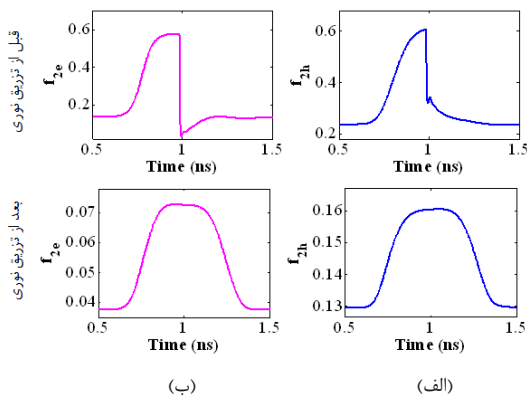


شکل ۵. دینامیک گذرای روشن شدن الکترون و حفره قبل از تزریق نوری در اولین تراز برانگیخته نقطه کوانتومی

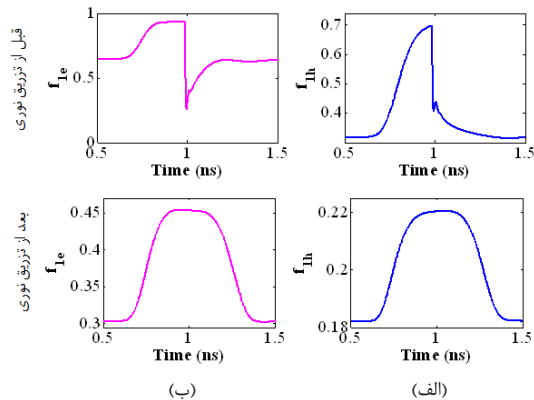
در این تصویر نشان داده می‌شود که دینامیک روشن شدن از یک خط راست که مطابق با رفتار هماهنگ الکترون و حفره می‌باشد منحرف شده و در عوض با طی مسیری معقد در یک نقطه ثابت که مطابق با حالت پایدار است، پایان می‌یابد.

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.

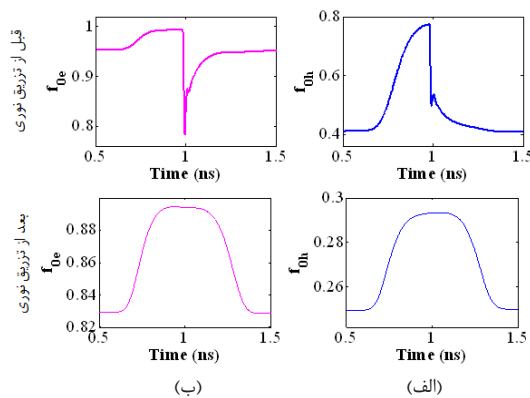
هر چند که نرخ انتقال حفره‌ها از لایه خسی به نقاط کوانتومی و نرخ واهلهش آن‌ها در نقاط کوانتومی بیشتر از الکترون‌ها می‌باشد، در عوض نرخ انتقال تابشی آن‌ها نیز در مقایسه با الکترون‌ها زیادتر بوده و این امر باعث طول عمر پراکندگی کمتر حفره‌ها



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



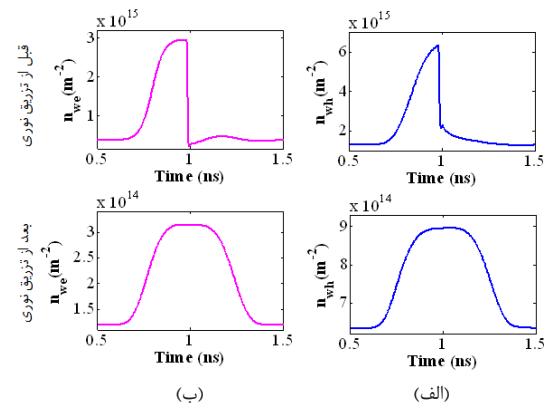
شکل ۱۰. دینامیک الف) حفره ب) الکترون در تراز پایه قبل و بعد از تزریق نوری

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

توزیع نوری در شکل‌های ۷ تا ۱۱ نشان داده شده است. زمانیکه ترازهای فعال نقطه کوانتومی به آرامی تخلیه شوند، حامل‌های اضافی نمی‌توانند به چاه کوانتومی پر شده تزریق شوند، که در نتیجه زمان تأخیری حدود چند نانوثانیه ایجاد می‌شود و سبب عدم همگامی پالس جریان ورودی و چگالی حامل‌ها و فوتون خروجی لیزر می‌گردد. 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.

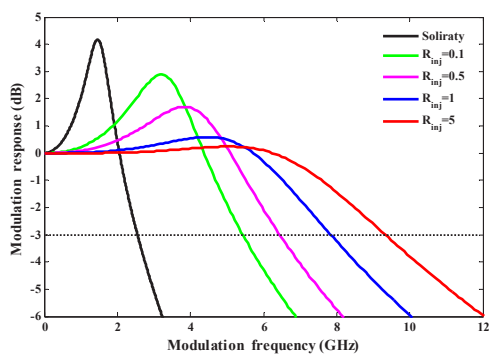
تزریق نوری با افزایش چگالی حامل‌های چاه کوانتومی، نرخ واهلس حامل‌ها در نقاط کوانتومی را افزایش داده و باعث کاهش زمان برخاستن و به دنبال آن حذف تأخیر زمانی ایجاد شده می‌گردد که در نتیجه آن نیز پالس‌های جریان ورودی و فوتون خروجی مطابق شکل ۱۱ به شدت همگام می‌شوند.

همانطور که از شکل‌های ۷ تا ۱۰ مشخص است نوسانات و جهش مشاهده شده در احتمال اشغال الکترون‌ها 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 می‌رسد، بر اثر تزریق نوری به طور کامل از بین می‌رود. همچنین بهبود در رفتار دینامیکی حفره‌ها نیز کاملاً مشخص است هرچند که عدم همگامی میان حفره‌ها و پالس جریان ورودی از الکترون‌ها کمتر می‌باشد. رفتارهای مشاهده شده در شکل‌های ۷ تا ۱۱ با نتایج ارائه شده در مرجع [۵] همخوانی دارند.



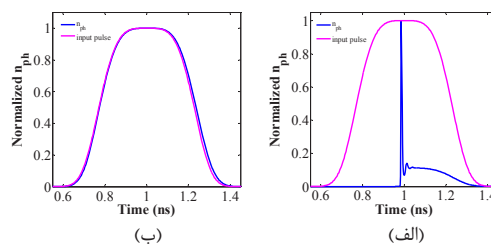
شکل ۷. دینامیک الف) حفره ب) الکترون در لایه خسی قبل و بعد از تزریق نوری

به طور معمول، پهنای باند مدولاسیون و فرکانس تشدید یک لیزر توسط نرخ انتقال حامل‌ها مشخص می‌شود. در صورتیکه چگالی حامل‌ها در چاه کوانتومی زیاد باشد زمان انتقال حامل‌ها در نقطه کوانتومی بسیار سریعتر از زمان انتقال آنها از چاه کوانتومی 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 می‌گردد. اما در شرایط تزریق نوری و با چگالی جریانی نزدیک به جریان آستانه، نرخ انتقال حامل‌های القایی زیاد شده، فرکانس تشدید افزایش یافته و به دنبال آن پهنای باند QD-VCSEL بهبود می‌یابد. لیزر اصلی با تزریق نور به جای افزایش جریان بایاس، چگالی حامل‌های زیادی را در نقاط کوانتومی لیزر پیرو فراهم می‌آورد و لذا از افزایش دمای QD-VCSEL به دلیل پدیده خودگرمایی در نتیجه جریان‌های بایاس زیاد که باعث محدودیت عملکرد لیزر می‌گردد، جلوگیری می‌کند. شکل ۱۳ تأثیر تزریق نوری بر پاسخ مدولاسیون QD-VCSEL به ازای نسبت‌های مختلف تزریق را در شرایط نانتظیمی 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 پهن‌بند و صافی را از خود نشان می‌دهد 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 گیگاهرتز) می‌باشد.



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

شکل ۱۴ تأثیر نانتظیمی فرکانسی را بر پاسخ مدولاسیون لیزر نشان می‌دهد. میزان نانتظیمی با توجه به نمودار انشعاب و در ناحیه قفل‌شدگی پایدار انتخاب شده است. در نانتظیمی فرکانسی منفی یعنی حالتی که در آن فرکانس لیزر اصلی کمتر از فرکانس لیزر پیرو است، پاسخ مدولاسیون OIL-QD-VCSEL فوق‌میرا و بدون قله تشدید می‌باشد. درحالی‌که در نانتظیمی صفر پاسخ لیزر

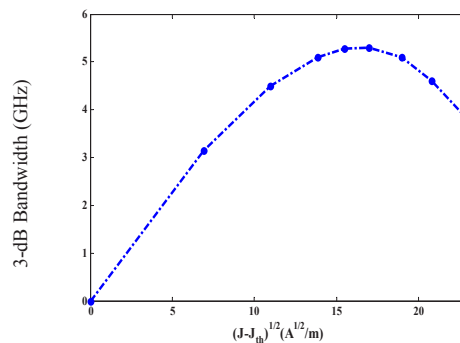


شکل ۱۱. دینامیک فوتون خروجی (الف) بدون تزریق نوری (ب) با تزریق نوری

### پاسخ مدولاسیون سیگنال کوچک

در این قسمت پاسخ مدولاسیون سیگنال کوچک QD-VCSEL 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  $U(t) = I_b U(t) + I_s U(t - t_0)$  به لیزر اعمال می‌شود که در آن  $I_s$  تابع پله واحد و  $I_b$  جریان بایاس است. همچنین  $I_s$  یک اغتشاش پله کوچک ( $I_s \ll I_{th}$ ) برای شبیه‌سازی رفتار دینامیکی 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.

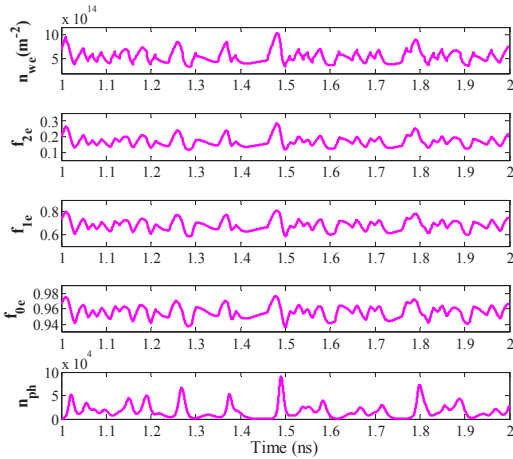
شکل ۱۲ پهنای باند ۳-dB لیزر را به صورت تابعی از ریشه دوم جریان تزریقی،  $(J - J_{th})^{0.5}$ ، نشان می‌دهد. در جریان‌های بایاس کم، پهنای باند لیزر متناسب با چگالی جریان افزایش می‌یابد، اما زمانیکه  $(J - J_{th})^{0.5}$  برابر با  $17 \text{ A}^{0.5} \text{ cm}^{-1}$  می‌گردد، پاسخ فرکانسی نزولی شده و بیشینه فرکانس مدولاسیون لیزر به  $5/3$  گیگاهرتز محدود می‌شود. 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 فوتون در نتیجه افزایش دمای ناحیه فعال لیزر کاهش می‌یابد. بنابراین، با توجه به اصل طرد پائولی زمان جابه‌جایی حامل‌ها از لایه خسیسی به تراز-های انرژی حالت پایه افزایش یافته، لذا بیشینه پاسخ فرکانسی لیزر نیز کاهش می‌یابد [۳].



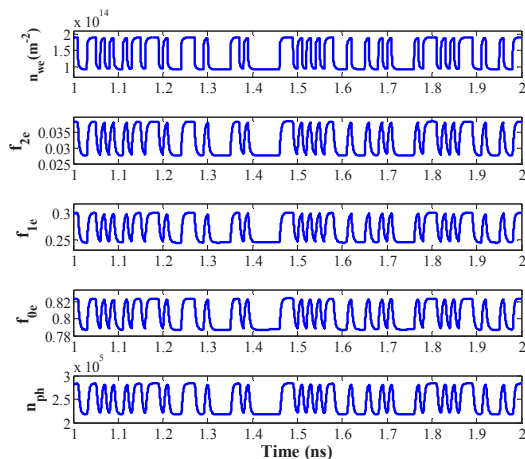
شکل ۱۲. پهنای باند QD-VCSEL بر حسب  $(J - J_{th})^{0.5}$



یک دنباله باینری شبه تصادفی (PRBS) الکتریکی به طول (۱- $3J_{th}$ ) بیت با چگالی جریان بایاس متغیر بین دو مقدار  $1J_{th}$  و  $3J_{th}$  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 عدم همگامی 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. نتیجه همگامی میان الکترون و حفره به‌وضوح در شکل ۱۶ مشاهده می‌شود. همزمانی بین دینامیک الکترون و حفره با افزایش نسبت تزریق نور افزایش می‌یابد.

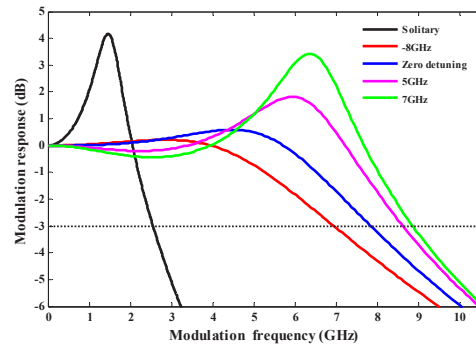


شکل ۱۵. دینامیک الکترون در چاه و نقطه کوانتومی و دینامیک فوتون خروجی در QD-VCSEL



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

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



شکل ۱۴. پاسخ مدولاسیون QD-VCSEL به ازای نانتظیمی مختلف در نسبت تزریق ۱ و  $J=1/5 J_{th}$

برای نانتظیمی مثبت پاسخ مدولاسیون لیزر، فرکانس تشدید و همچنین قله تشدید بیشتری از خود نشان می‌دهد به‌طوری که در اختلاف فرکانس ۷ گیگا هرتز پهنای باند لیزر ۹ گیگاهرتز می‌باشد. به‌علاوه، یک فرورفتگی قبل از فرکانس تشدید مشاهده می‌شود. در نانتظیمی فرکانسی بالا اگرچه فرکانس تشدید افزایش می‌یابد ولی این فرورفتگی که یک عامل محدودکننده پهنای باند لیزر است نیز افزایش می‌یابد. همانطور که از نتایج شبیه‌سازی پاسخ سیگنال کوچک لیزر مشخص است با استفاده از تکنیک تزریق نوری در جریان بایاسی نزدیک به جریان آستانه یعنی  $J=1/5 J_{th}$  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  $5/3$  گیگا هرتز می‌باشد. بر اساس مرجع [۱۱]، افزایش فرکانس تشدید در لیزر نیم رسانا OIL ناشی از برهمکنش میان میدان قفل شده تزریقی و میدان تشدید جایجا شده کاواک است، در حالیکه نوسانات واهلشی در لیزرهای بدون تزریق نور در نتیجه بر همکنش میان حامل‌ها و فوتون‌ها می‌باشد. در حالت تزریق نوری، نرخ انتقال تابشی حامل‌ها اساساً توسط نسبت تزریق نور و نانتظیمی فرکانسی بین لیزر-های اصلی و پیرو مشخص می‌شود. بنابراین با تنظیم نسبت تزریق و اختلاف فرکانس میان لیزر اصلی و QD-VCSEL می‌توان به پاسخ مدولاسیون مطلوب دست یافت.

### 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 خسی، احتمال حضور حامل‌ها در تراز پایه، اولین و دومین تراز برانگیخته، و فوتون خروجی QD-VCSEL به

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 ۳-dB 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 فرکانس‌های تکرار بالاتر از ۶ گیگاهرتز می‌گردد.

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.

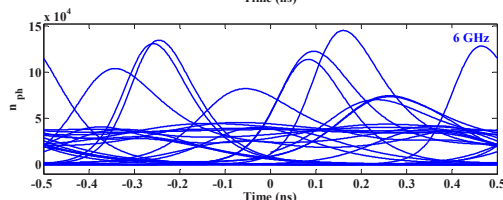
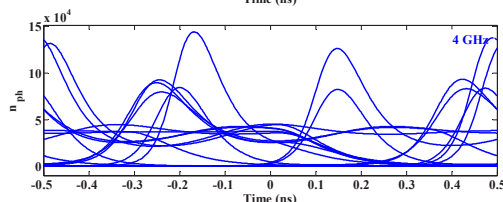
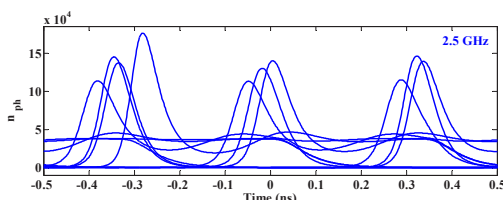
در شکل ۱۹ نمودار چشمی لیزر در حالت بدون تزریق نور (لیزر تنها)، با فرکانس تکرار پالس ۶ گیگاهرتز و نمودارهای چشمی در نسبت تزریق ۵ و به ازای فرکانس‌های تکرار ۱۲، ۱۸ و ۲۲ گیگا-هرتز رسم شده است. همانگونه که از نمودارها مشخص است تزریق نوری باعث شده که QD-VCSEL عملکرد مطلوبی را در فرکانس‌های ۱۲ و ۱۸ گیگا هرتز 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 می‌بخشد. نتایج به دست آمده، با رفتار مشاهده شده به طور تجربی در مرجع [۱۳] مطابقت نشان می‌دهد.

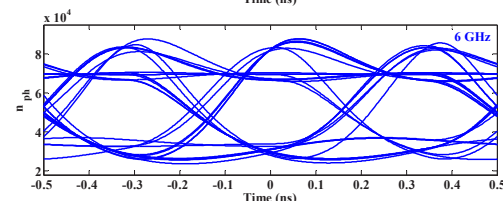
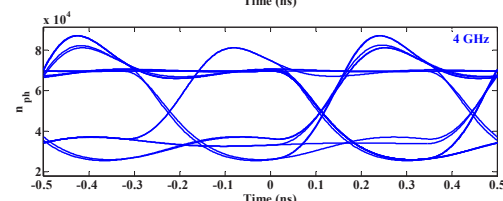
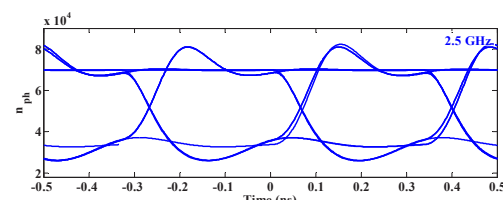
### چرپ لیزر

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

در شکل های ۱۷ و ۱۸ نمودار چشمی مربوط به QD-VCSEL برای دو سطح مختلف جریان ( $1J_{th}$  تا  $3J_{th}$  و  $3J_{th}$  تا  $5J_{th}$ ) و برای سه فرکانس تکرار پالس متفاوت (۴، ۲/۵ و ۶ گیگاهرتز) شبیه سازی شده است.

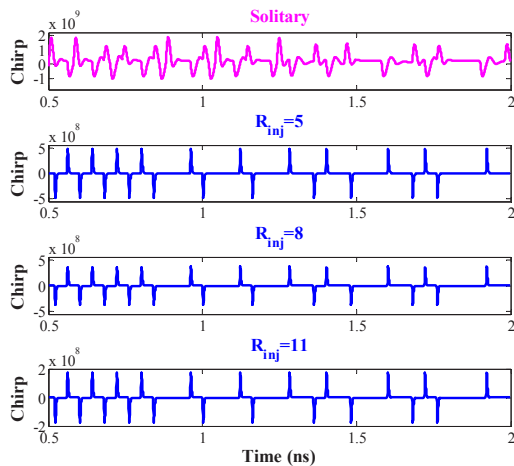


شکل ۱۷. نمودار چشمی برای جریان بایاس متغیر بین  $1J_{th}$  و  $3J_{th}$  به ازای سه مقدار مختلف فرکانس تکرار ۴، ۲/۵ و ۶ گیگاهرتز



شکل ۱۸. نمودار چشمی برای جریان بایاس متغیر بین  $3J_{th}$  و  $5J_{th}$  به ازای سه مقدار مختلف فرکانس تکرار ۴، ۲/۵ و ۶ گیگاهرتز

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

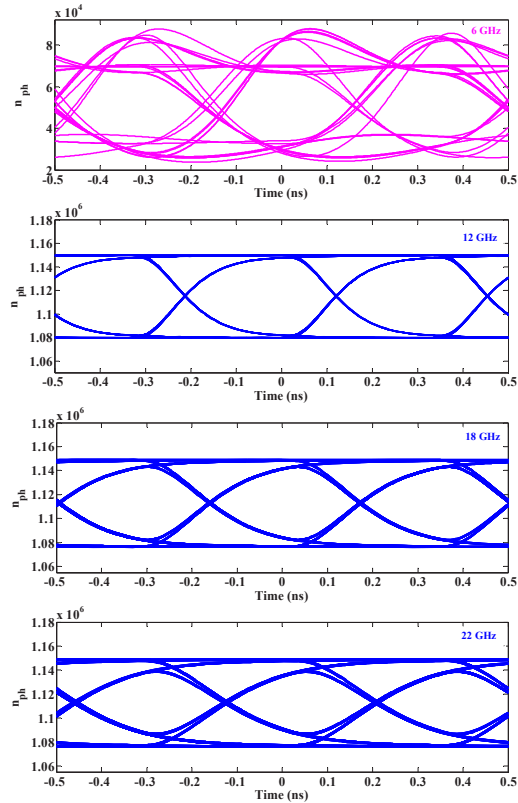


شکل ۲۰. چرپ فرکانسی در QD-VCSEL و OIL-QD-VCSEL به ازای نسبت‌های مختلف تزریق نوری

### نتیجه‌گیری

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 کوانتومی و لایه خیسی QD-VCSEL و بر فوتون خروجی لیزر بررسی شد. در غیاب تزریق نوری، مشخصات دینامیکی QD-VCSEL تحت تأثیر دینامیک متفاوت الکترون و حفره قرار دارد. تزریق نوری باعث همگام‌سازی رفتار حامل‌ها در نقاط کوانتومی و لایه خیسی می‌گردد. با بررسی پاسخ سیگنال 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 می‌یابد. 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 خروجی با توان کافی به شدت همگام می‌شوند، 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 ۱۸، ۲۲ و ۲۲ گیگاهرتز نسبت به QD-VCSEL با حداکثر فرکانس تکرار ۶ گیگاهرتز به‌طور قابل ملاحظه‌ای بهبود می‌یابد. باز بودن کامل چشم‌های نمودار چشمی که مطابق با عملکرد مطلوب QD-VCSEL در فرکانس تکرار ۱۸ گیگاهرتز است، به تدریج در فرکانس ۲۲ گیگاهرتز کاهش یافته و چشم‌ها کم‌کم به هم

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، ۱۲ و ۲۲ گیگاهرتز

قفل‌شدگی 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 می‌گردد. در شکل ۲۰، چرپ فرکانسی در QD-VCSEL و در OIL-QD-VCSEL به ازای نسبت‌های مختلف تزریق نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۲۰ دیده می‌شود با افزایش نسبت تزریق چرپ لیزر کاهش یافته به‌طوری‌که در نسبت تزریق ۸ و ۱۱، چرپ فرکانسی به ۰/۷۴ و ۰/۳۴ گیگا هرتز می‌رسد که کاهش قابل ملاحظه‌ای را نشان می‌دهد.

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 ۰/۳۴ گیگاهرتز 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 می‌گردد، بی‌نیاز می‌سازد.

## مراجع

- [8] C. Z. Tong, D. W. Xu, S. F. Yoon, Y. Ding and W. J. Fan, "Temperature characteristics of 1.3- $\mu$ m 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, "Frequency-dependent 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.
- [1] D. W. Xu, S. F. Yoon and C. Z. Tong, "Self-consistent analysis of carrier confinement and output power in 1.3- $\mu$ m InAs-GaAs quantum-dot 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 vertical-cavity surface-emitting lasers," *IEEE Journal Selected Topics 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 (QWELL) 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 injection-locked lasers: a tutorial," *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, vol. 15, no. 3, pp. 618-633, 2009.