

## اثر تونل زنی تزریقی بر پاسخ مدولاسیون لیزرهای نقطه کوانتومی

یاسین یکتای کیا، اسفندیار رجایی و زهرا دانش

گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه گیلان، رشت

پست الکترونیکی: hanif\_hadipour@guilan.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۳۹۱/۸/۲۷؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۲/۱۱/۱۹)

### چکیده

در این مقاله مشخصه‌های پهنای نوار مدولاسیون لیزر نقطه کوانتومی InGaAs/GaAs به صورت نظری مورد بررسی قرار گرفته است. شبیه‌سازی‌ها با استفاده از روش رانگ کوتا مرتبه چهارم انجام گرفته است. اثر طول عمر واهلش حامل‌ها، دما، چگالی جریان بر مشخصه‌های لیزرهای نیمه رسانای نقطه کوانتومی تزریق تونلی (TIL)<sup>۱</sup> و بدون تزریق تونلی (CL)<sup>۲</sup> بررسی شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که تزریق تونلی در لیزرهای نقطه کوانتومی موجب افزایش پهنای نوار مدولاسیون می‌شود که برای استفاده در سیستم‌های مخابرات فیبر نوری بسیار مفید است.

**واژه‌های کلیدی:** لیزر نقطه کوانتومی، تونل زنی تزریقی، تأخیر زمان روشن شدن، پهنای نوار مدولاسیون، طول عمر واهلش حامل‌ها، چگالی جریان

### ۱. مقدمه

می‌شوند. به طور کلی محدودیت کوانتومی در لیزرهای نیمه رسانا موجب بروز اثرات کوانتومی شده که منجر به بهینگی هر چه بهتر عملکرد لیزر می‌گردد. این نوع لیزرها اجزای کلیدی بسیاری از دستگاه‌های مورد استفاده در مخابرات نوری، خواندن و ذخیره دیسک‌های فشرده با ظرفیت بالا، قطعات کامپیوتری، لینک‌های ارتباطی در شبکه کامپیوتری، چاپگر لیزری، ادوات پزشکی و ادوات نظامی است. یکی از مهم‌ترین لیزرهای نیمه رسانای، لیزر نقطه کوانتومی InGaAs/GaAs است. لیزرهای نیمه رسانای نقطه کوانتومی به سبب داشتن چگالی جریان آستانه پایین‌تر، عملکرد با وابستگی دمایی پایین [۱]، پهنای فرکانسی بالا [۲]، نوفه فرکانسی پایین، بهره اپتیکی بالا با طیف بهره

محدودیت‌های کوانتومی ناحیه فعال لیزر باعث می‌شود تا لیزرهای نیمه رسانا به سه گروه مهم تقسیم شوند. محدودیت در یک، دو و سه بعد به ترتیب موجب لیزر چاه کوانتومی<sup>۳</sup>، سیم کوانتومی<sup>۴</sup> و لیزر نقطه کوانتومی<sup>۵</sup> می‌شود. در محدودیت از نوع چاه کوانتومی حامل‌ها آزادند تا در صفحه حرکت کنند. در مورد سیم کوانتومی حامل‌ها تنها در امتداد محور سیم قادر به حرکت می‌باشند. در نقطه کوانتومی حامل‌ها در سه جهت محدود

۱. Tunneling injection laser

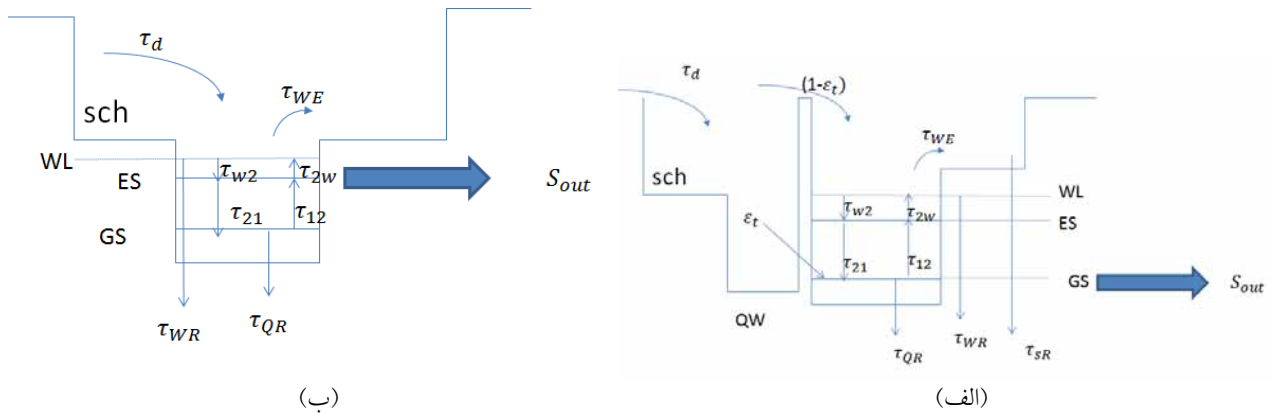
۲. Conventional laser

۳. Quantum well

۴. Quantum wire

۵. Quantum dot

۶. Chirp



شکل ۱. (الف) مدل نوار انرژی لیزر نقطه کوانتومی با تونل زنی و (ب) مدل نوار انرژی لیزر نقطه کوانتومی بدون تونل زنی [۹].

شود طول عمر واهلش حامل‌ها خیلی کمتر از نانو ثانیه می‌رسند، اما در مواردی این واهلش حامل‌ها تحت تأثیر تگنای فونون قرار می‌گیرند، که موجب طولانی‌تر شدن طول عمر واهلش می‌گردد. این طول عمر طولانی که قابل مقایسه با طول عمرهای بازترکیب غیر تابشی حامل است به طور عمده کارایی تابشی را کاهش می‌دهد، زیرا کسری از حامل‌ها در مسیرشان به تراز پایه از طریق کانال‌های غیر تابشی از بین می‌روند، به طوری که ترازهای مجزا در نقطه کوانتومی ممکن است مانع واهلش کسری از حامل‌ها به سمت تراز پایه شود. بنابراین بهترین روش برای از بین بردن این مشکلات، استفاده از روش تونل زنی تزریقی است که به طور چشم‌گیری در لیزرهای نقطه کوانتومی موفقیت آمیز بوده است. که بازترکیب اوزه پایین‌تر، کاهش زیاد وابستگی دمایی و پهنای نوار مدولاسیون بیشتر را ایجاد می‌کند [۶-۸].

## ۲. نظریه

مدل نوار انرژی لیزر نقطه کوانتومی تزریقی تونلی (TIL) در شکل ۱ (الف) نشان داده شده است. مدل نوار انرژی برای حالتی که تونل زنی تزریقی وجود ندارد یعنی  $\epsilon_t = 0$  است در شکل ۱ (ب) نشان داده شده است که مدل یک لیزر نقطه کوانتومی معمولی (CL) را نشان می‌دهد [۹].

در مدل نوار انرژی لیزر نقطه کوانتومی با تونل زنی تزریقی فرض شده است که نقاط کوانتومی دارای یک چاه کوانتومی

متقارن نسبت به لیزرهای سیم کوانتومی و چاه کوانتومی برتری ویژه‌ای دارند، که این برتری ناشی از تابع چگالی حالت‌های نقطه کوانتومی است که در حالت ایده‌آل به صورت شبه دلتایی است. برای بهبود عملکرد لیزرهای نقطه کوانتومی باید توجه زیادی به بررسی دینامیک حامل‌ها در ناحیه فعال این نوع لیزرها گردد. عامل‌هایی از قبیل دما، زمان واهلش حامل‌ها و چگالی جریان آستانه نقش مهمی در پهنای نوار فرکانسی دارد [۳]. یکی از مهم‌ترین روش‌ها برای بهینه‌سازی این عامل‌ها استفاده از تزریق تونلی الکترون‌هاست. زیرا زمان واهلش حفره‌ها خیلی خیلی سریع‌تر از زمان واهلش الکترون‌هاست، از این رو دینامیک بازترکیب الکترون‌ها و حفره‌ها به طور عمده با الکترون‌ها تعیین می‌شود [۴]. همان‌طور که بیان شد طول عمر واهلش حامل‌ها یکی از عامل‌های مهم در پهنای نوار فرکانسی است. فرآیند واهلش حامل‌ها در نقاط کوانتومی در دو مرحله صورت می‌گیرد. یکی واهلش حامل‌ها از تراز انرژی پیوسته یا بالاتر (SCH)<sup>۱</sup> به ترازهای مجزای نقطه کوانتومی و دیگری واهلش بین ترازهای نقطه کوانتومی می‌باشد. این دو مورد می‌تواند به واسطه کمبود فونون که برای برآورد قاعده پایستگی انرژی مورد نیاز است به طور چشمگیر کند شود. کند شدن این فرآیند مربوط به مسئله تگنای فونون است [۵]. با مطالعات نظری بر روی طول عمر واهلش حامل‌ها این نتیجه به دست می‌آید که اگر شرایط بقای انرژی به صورت کاملاً ایده‌آل برقرار

۱. Separate Confinement Heterostructure

الکترون از ES به GS،  $\tau_{12}$  زمان فرار از GS به ES،  $\tau_{1R}$  و  $\tau_{2R}$  طول عمر تابش خودبه‌خودی در GS و ES،  $N_Q$  چگالی نقاط کوانتومی و  $L_W$  ضخامت لایه مؤثر ناحیه WL است. پاسخ مدولاسیون سیگنال کوچک لیزر را می‌توان با قرار دادن روابط زیر در معادلات آهنگ به دست آورد.

$$J = J_0 + \Delta J \times e^{j\omega t},$$

$$N_S = N_{S0} + \Delta N_S \times e^{j\omega t},$$

$$N_W = N_{W0} + \Delta N_{W0} \times e^{j\omega t},$$

$$S_1 = S_1^0 + \Delta S_1 \times e^{j\omega t},$$

$$f = f_0 + \Delta f \times e^{j\omega t},$$

$$h = h_0 + \Delta h \times e^{j\omega t},$$

که در آنها جمله‌ها با اندیس صفر مقادیر حالت پایا را نشان می‌دهند و جمله‌هایی که با  $w$  و  $\Delta$  نوشته شده‌اند به ترتیب فرکانس زاویه‌ای و دامنه سیگنال کوچک هستند. با انجام عملیات ریاضی، پاسخ فرکانسی سیگنال کوچک TIL عبارت است از:

$$\frac{\Delta S_1}{\Delta J} = \frac{\tau_p \omega_r^2 A_t}{\omega_r^2 - \omega^2 + j\omega \left( \gamma_t - \left( \frac{h_0}{\tau_{21}} + \frac{1-h_0}{\tau_{12}} \right) H_g - \Psi \right)} \quad (6)$$

پهنای نوار مدولاسیون به صورت  $f_{3dB}$  نشان داده می‌شود. فرکانسی است که به ازای آن تابع پاسخ فرکانسی به 3 dB افت می‌کند. برای به دست آوردن  $f_{3dB}$  لازم است، مربع قدر مطلق تابع پاسخ را برابر 1/2 قرار دهیم و رابطه  $|\Delta S / \Delta J|^2 = 1/2$  را برای  $w$  حل کنیم. به طوری که پهنای نوار مدولاسیون به صورت زیر به دست می‌آید [۹]

$$f_{3dB} = \left( \frac{1}{2\pi^2 \sqrt{2}} \right) \times \sqrt{\left( 2\omega_r^2 + \gamma_t^2 \right) + \sqrt{\left( 2\omega_r^2 + \gamma_t^2 \right)^2 + 4\omega_r^4 \left( 2\tau_p^2 A_t^2 - 1 \right)}}$$

$\gamma_t$  عامل میرایی مؤثر<sup>۳</sup> است. جمله‌های  $\omega_r$ ،  $A_t$ ،  $\gamma_t$ ،  $H_g$ ،  $\Psi$  در ضمیمه معرفی شده‌اند.

### ۳. نتایج و بررسی‌ها

با استفاده از معادلات فوق و پارامترهای جدول ۱ شبیه‌سازی‌های زیر انجام گرفته است.

تزریقی (QW) و یک لایه سد نازک هستند. از طریق جریان تزریقی I، حامل‌ها ابتدا به SCH و بعد به QW تزریق می‌شوند و از آنجا با احتمال  $\varepsilon_t$  به تراز پایه نقطه کوانتومی (GS)<sup>۱</sup> تونل می‌زنند و در بازترکیب القایی شرکت می‌کنند. کسر دیگر از حامل‌ها با احتمال  $(1-\varepsilon_t)$  از بالای سد عبور کرده و از طریق WL<sup>۲</sup> به درون نقطه کوانتومی واهلیده می‌شوند و در بازترکیب القایی شرکت می‌کنند. معادلات آهنگ به کار گرفته شده عبارتند از [۹]:

$$\frac{\partial N_s}{\partial t} = \frac{J}{eL_s} - \varepsilon_t \frac{N_s}{\tau_t} (1-f) - (1-\varepsilon_t) \frac{N_s}{\tau_d}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial N_w}{\partial t} = (1-\varepsilon_t) \frac{N_s L_s}{\tau_t L_w} - \frac{N_w}{\tau_{w2}} (1-h) + \frac{N_w}{\tau_{2w}} h - \frac{N_w}{\tau_{wr}}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (N_Q h) = \frac{N_w}{\tau_{w2}} (1-h) - \frac{N_w}{\tau_{2w}} h - \frac{N_Q}{\tau_{21}} (1-f) h + \frac{N_Q}{\tau_{12}} (1-h) f - \frac{N_Q}{\tau_{2R}} h, \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (N_Q f) = \frac{N_s L_s \varepsilon_t}{\tau_t L_w} (1-f) - \frac{N_Q}{\tau_{1R}} f^2 - v_g g_1 (2f-1) S_1 + \frac{N_Q}{\tau_{21}} (1-f) h - \frac{N_Q}{\tau_{12}} (1-h) f, \quad (4)$$

$$\frac{\partial S_1}{\partial t} = \Gamma v_g g_1 (2f-1) S_1 - \frac{S_1}{\tau_p} + \frac{2\beta f N_B}{\tau_{2R}}. \quad (5)$$

در معادلات فوق:  $N_s$  و  $N_w$  به ترتیب چگالی الکترون در SCH و WL هستند و  $S_1$  چگالی فوتون حاصل از GS می‌باشد.  $h$  احتمال اشغال الکترون در تراز ES است.  $f$  احتمال اشغال الکترون در GS می‌باشد.  $J$  چگالی جریان آستانه است.  $e$  بار الکترون،  $t$  زمان،  $L_s$  ضخامت لایه SCH،  $V_g$  سرعت گروه،  $g_1$  بهره دیفرانسیلی بیشینه در تراز GS،  $\tau_p$  طول عمر فوتون،  $\tau_t$  طول عمر تونل زنی و  $\tau_d$  طول عمر پخش در SCH است.  $\tau_{W2}$  طول عمر واهلش الکترون از WL به ES است.  $\tau_{2W}$  زمان فرار الکترون از ES به WL است.  $\tau_{WR}$  طول عمر تابش خودبه‌خودی در WL است.  $\tau_{21}$  طول عمر واهلش

۱. Ground State

۲. Wetting Layer

۳. Effective damping factor

جدول ۱. پارامترهای استفاده شده در شبیه‌سازی‌ها می‌باشد [۹].

e	بار الکترون	$1,6 \times 10^{-19}$
$\epsilon_t$	احتمال تونل زنی	0,95
$N_Q$	چگالی سطحی نقاط کوانتومی	$2,5 \times 10^{23} \text{ m}^{-3}$
k	ثابت بولتزمن	$1,381 \times 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}}$
$V_g$	سرعت گروه	$8,57 \times 10^7 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
$\beta$	بتا	$10^{-5}$
$\tau_{w2}$	طول عمر واهلش الکترون از WL به ES	$10^{-12} \text{ s}$
$\tau_{2W}$	زمان فرار الکترون از ES به WL	$\tau_{w2} \exp\left(\frac{\Delta E_{w2}}{k \text{ tem}}\right)$
$\tau_{1R}$	طول عمر تابش خودبه‌خودی در GS	$0,7 \times 10^{-9} \text{ s}$
$\tau_{2R}$	طول عمر تابش خودبه‌خودی در ES	$0,7 \times 10^{-9} \text{ s}$
$\tau_{wR}$	طول عمر تابش خودبه‌خودی در WL	$0,7 \times 10^{-9} \text{ s}$
$\tau_{21}$	طول عمر واهلش الکترون از ES به GS	$8 \times 10^{-12} \text{ s}$
$\tau_{12}$	زمان فرار الکترون از GS به ES	$\tau_{21} \exp\left(\frac{\Delta E_{21}}{k \text{ tem}}\right)$
$\tau_d$	طول عمر پخش در SCH	$0,5 \times 10^{-12} \text{ s}$
$\Delta E_{w2}$	اختلاف تراز انرژی بین ES, WL	40 meV
$\Delta E_{21}$	اختلاف تراز انرژی بین GS و ES	50 meV
$\tau_p$	طول عمر فوتون در GS	$12 \times 10^{-12} \text{ s}$
$\Gamma g_1$	بهره مدی	$1400 \text{ m}^{-1}$
$L_s$	ضخامت لایه SCH	$10^{-9} \text{ m}$
$L_w$	ضخامت لایه wl	$10^{-9} \text{ m}$

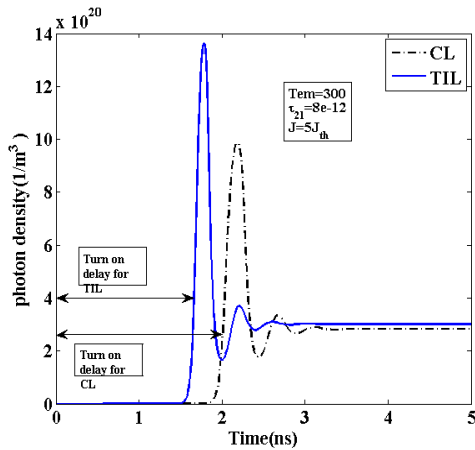
### ۱.۳ چگالی فوتون-چگالی جریان

در شکل ۲ ملاحظه می‌شود که اگرچه تزریق تونلی، کاهش چشم‌گیری در چگالی جریان آستانه به وجود نمی‌آورد، اما موجب افزایش (بهبود) شیب مشخصه نور-جریان یا کارایی شیب می‌شود. زیرا در لیزر دهی از طریق تزریق تونلی حامل‌ها به طور مستقیم به تراز پایه (QD) تونل می‌زنند و چگالی فوتون بیشتری را به وجود می‌آورند. در حالی که در لیزر دهی از طریق CL حامل‌ها از ترازهای انرژی بالاتر به تراز پایه می‌رسند و در ضمن واهلش به تراز پایه بخشی از انرژی آنها به صورت فوتون از بین می‌رود و زمان نسبتاً بیشتری را برای رسیدن به

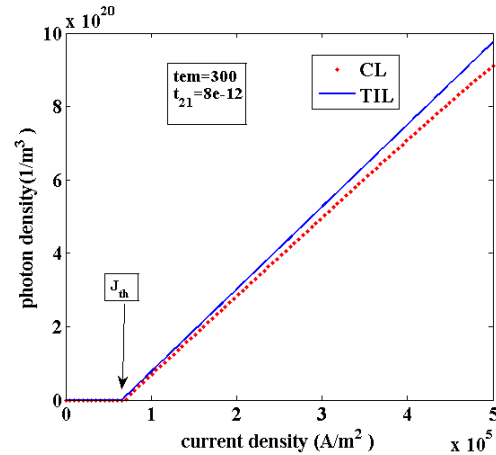
تراز پایه (QD) سپری می‌کنند بنابراین چگالی فوتون حاصل از آنها نسبت به TIL کمتر می‌باشد.

### ۲.۳ چگالی فوتون-زمان

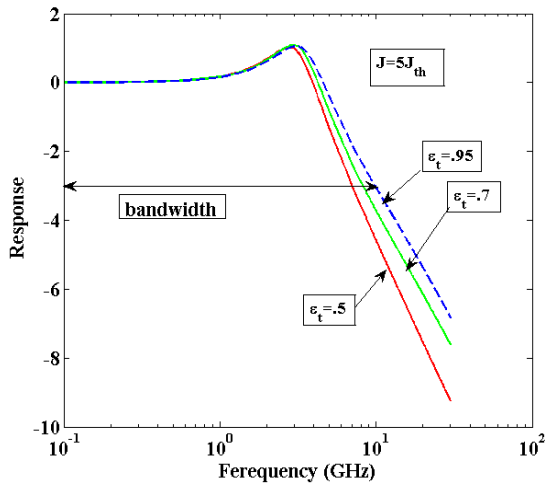
ملاحظه می‌شود که نوسان واهلش TIL بیشتر از CL است و در حالت پایا چگالی فوتونی TIL و CL چندان فرقی ندارد ولی زمان تأخیر روشن شدن TIL کمتر از CL است. چون در TIL از طریق جریان تزریقی حامل‌ها مستقیماً به GS تزریق می‌شوند و سریع‌تر از طریق بازترکیب القایی ایجاد فوتون می‌کنند و موجب کاهش زمان تأخیر روشن شدن می‌شود اما در CL



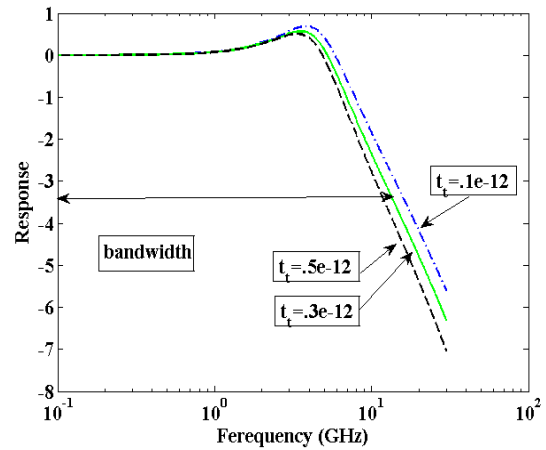
شکل ۱. چگالی فوتون بر حسب زمان به ازای یک چگالی جریان ثابت برای دو حالت CL و TIL.



شکل ۲. چگالی فوتون بر حسب چگالی جریان برای دو حالت مختلف CL و TIL.



شکل ۳. تابع پاسخ مدولاسیون به ازای  $\epsilon_t$  های مختلف.



شکل ۴. تابع پاسخ فرکانسی برای حالت TIL به ازای زمانهای مختلف تونل زنی ( $\tau_t$ ).

ایجاد فوتون می کنند و فرصت کافی تزریق از بالای سد را ندارند و در نتیجه پهنای نوار مدولاسیون افزایش پیدا می کند.

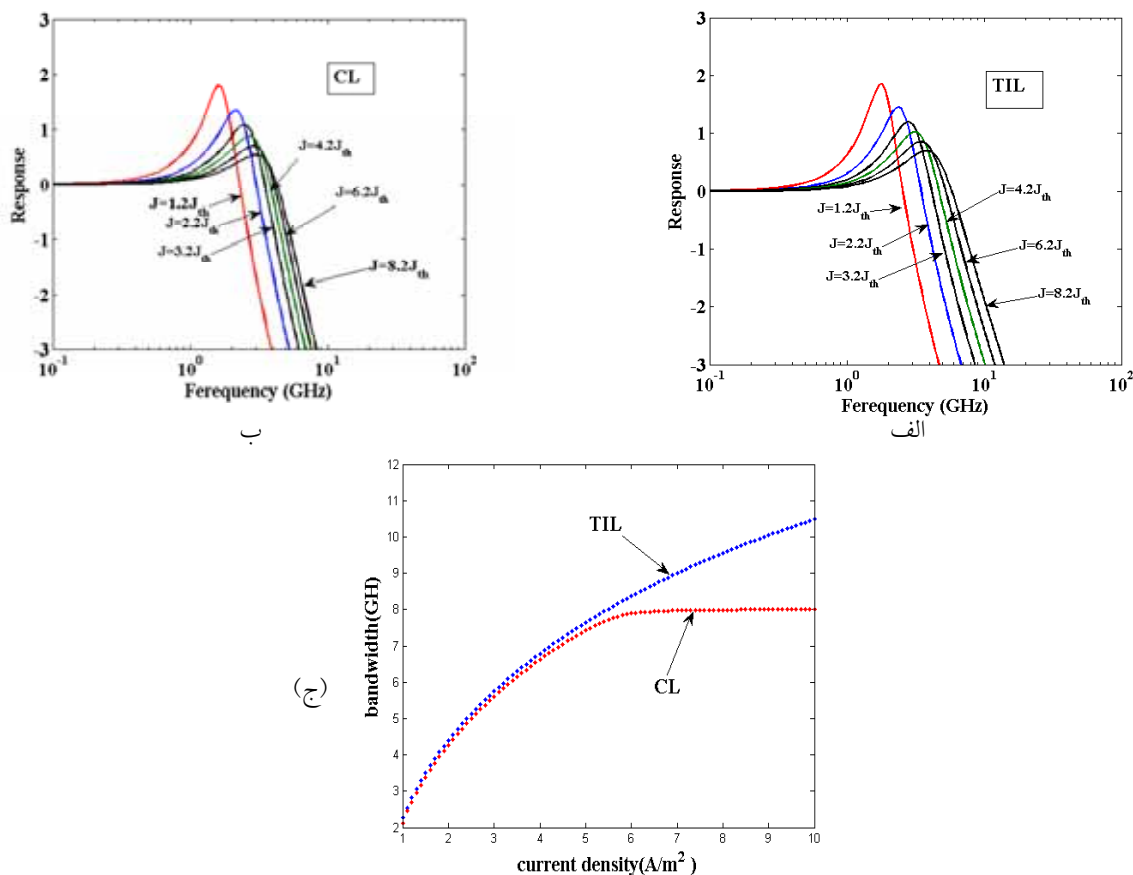
### ۳.۴. تابع پاسخ مدولاسیون به ازای $\epsilon_t$ های مختلف

ملاحظه می شود که افزایش تابع احتمال تونل زنی ( $\epsilon_t$ ) موجب افزایش پهنای نوار مدولاسیون می شود. چون با افزایش  $\epsilon_t$  احتمال تونل زنی از چاه تزریقی به GS نقطه کوانتومی بیشتر می شود و حامل های کمتری از بالای سد به QD تزریق می شوند. طبق رابطه (۷) پهنای نوار مدولاسیون

حامل ها از طریق ترازهای WL و ES با زمان های واهلش مربوطه به GS می رسند و کسری از آنها در حین واهلش از طریق بازترکیب غیر تابشی از بین می رود و در نتیجه زمان تأخیر روشن شدن بیشتر می شود و چگالی فوتون نیز کاهش می یابد.

### ۳.۳. تابع پاسخ مدولاسیون به ازای زمان های مختلف تونل زنی

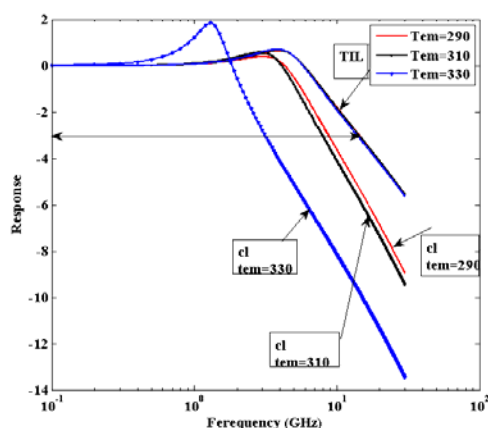
مشاهده می شود که کاهش زمان تونل زنی موجب افزایش پهنای نوار مدولاسیون می شود. زیرا با کاهش زمان تونل زنی، حامل ها هر چه سریع تر از چاه تزریقی به حالت پایه QD تونل می زنند و



شکل ۶. (الف) تابع پاسخ مدولاسیون برای TIL به ازای چگالی جریان‌های مختلف، (ب) تابع پاسخ مدولاسیون برای CL به ازای چگالی جریان‌های مختلف، (ج) پهنای نوار مدولاسیون TIL و CL بر حسب چگالی جریان.

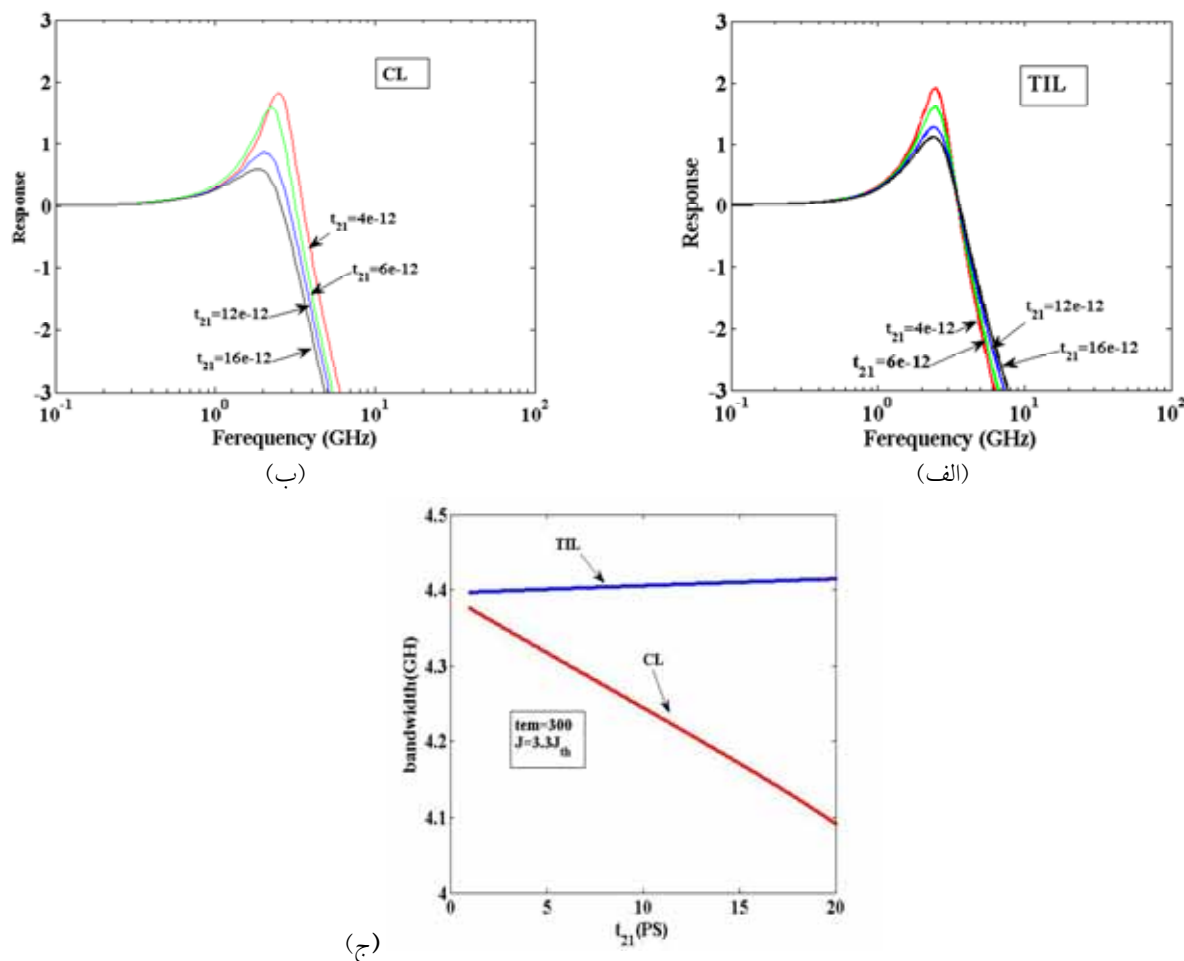
۳.۵. تابع پاسخ مدولاسیون به ازای چگالی جریان‌های مختلف در شکل‌های ۶ مشاهده می‌شود که با افزایش چگالی جریان تزریقی دامنه قله تشدید کاهش می‌یابد و فرکانس تشدید و پهنای نوار مدولاسیون افزایش می‌یابد. زیرا افزایش چگالی جریان تزریقی موجب افزایش چگالی فوتون می‌شود که منجر به افزایش فرکانس تشدید ( $W_r$ ) و عامل میرایی ( $\gamma$ ) می‌گردد. افزایش عامل میرایی موجب کاهش دامنه قله تشدید شده و یک عامل محدود کننده پهنای نوار مدولاسیون می‌شود. اما همان‌طور که در شکل‌های ۶ مشاهده می‌گردد اثر عامل میرایی در CL بیشتر از TIL است.

۳.۶. تابع پاسخ به ازای دماهای مختلف از شکل ۷ مشاهده می‌شود که پهنای نوار مدولاسیون TIL تقریباً مستقل از دما است و پهنای نوار مدولاسیون CL وابسته به دما



شکل ۷. تابع پاسخ مدولاسیون به ازای دماهای مختلف برای TIL و CL.

به فرکانس تشدید بستگی دارد از طرفی فرکانس تشدید به چگالی فوتون وابسته است. در نتیجه با زیاد شدن چگالی فوتون‌های حاصل از طریق تونل زنی پهنای نوار مدولاسیون افزایش می‌یابد.



شکل ۸. (الف) پاسخ مدولاسیون به ازای زمان‌های واهلش  $t_{21}$  متفاوت برای TIL، (ب) پاسخ مدولاسیون به ازای زمان‌های واهلش  $t_{21}$  متفاوت برای CL، (ج) پهنای نوار مدولاسیون به ازای زمان‌های واهلش متفاوت.

۳.۷. تابع پاسخ مدولاسیون به ازای زمان‌های واهلش مختلف از شکل‌های ۸ ملاحظه می‌شود که در TIL با افزایش  $t_{21}$  پهنای نوار مدولاسیون اندکی افزایش می‌یابد و در CL افزایش  $t_{21}$  موجب کاهش چشم‌گیر پهنای نوار مدولاسیون می‌شود. زیرا در TIL اکثر حامل‌ها از طریق تونل زنی به GS می‌روند که به  $t_{21}$  وابسته نیستند، و مقدار خیلی کم از بالای سد به QD تزریق می‌شود و به GS واهلیده می‌شوند. این مقدارهای کم وابسته به  $t_{21}$  هستند و با افزایش  $t_{21}$  این مقدار کم، دیرتر به GS می‌رسند و GS حامل‌های بیشتری را از طریق تونل زنی دریافت می‌کند و افزایش در پهنای نوار مدولاسیون TIL را به وجود می‌آورند. در حالی که در CL همه حامل‌ها از طریق WL به QD تزریق می‌شوند و بعد از طریق ES به GS واهلیده

است و با افزایش دما کاهش می‌یابد. زیرا در TIL از طریق جریان تزریقی حامل‌های داغ ابتدا در چاه تزریقی (QW) گیر اندازی می‌شوند و بعد از آنجا به حالت پایه QD تونل می‌زنند. به طوری که این فرآیند سریع دمای حامل مؤثر را کاهش می‌دهد و در TIL وابستگی دمایی خیلی اندک می‌شود. در حالی که در CL حامل‌های داغ ابتدا به WL تزریق می‌شوند و بعد از طریق ترازهای انرژی بالاتر به تراز پایه واهلیده می‌شوند. به طوری که یک فرآیند کند به وجود می‌آید که موجب تجمع حامل‌ها در ترازهای انرژی بالاتر می‌شود و ضمن واهلش، بخشی از انرژی آنها ایجاد فونون می‌کنند. در نتیجه دمای قطعه بالا رفته و حساسیت دمایی به وجود می‌آید.

است، پهنای نوار مدولاسیون برای TIL تقریباً مستقل از زمان واهلش ( $\tau_{21}$ ) است اما برای CL، پهنای نوار نسبت به زمان واهلش تغییرات زیادی از خود نشان می‌دهد. افزایش بیشتر عامل میرایی موجب کاهش دامنه قله تشدید و محدود شدن پهنای نوار مدولاسیون می‌شود از این رو اثر افزایش عامل میرایی در TIL کمتر است.

#### ۴. نتیجه‌گیری

از مقایسه پارامترهای مختلف نسبت به لیزرهای CL و TIL نتیجه می‌گیریم که، تزریق تونلی در لیزرهای QD موجب افزایش کارایی شیب که منجر به افزایش کارایی دیفرانسیلی و کاهش تأخیر روشن شدن لیزر، افزایش پهنای نوار مدولاسیون و کاهش وابستگی دمایی لیزر می‌شود. به عبارت دیگر ایجاد تزریق تونلی در یک لیزر نقطه کوانتومی منجر به ارتقاء بهینگی عملکرد لیزر در انتقال داده‌ها می‌شود.

#### ۵. ضمیمه

عبارت‌های استفاده شده در رابطه‌های ۶ و ۷ عبارتند از [۹]:

$$f_0 = \frac{1}{2\Gamma v_g g_1 \tau_p}, \quad (9)$$

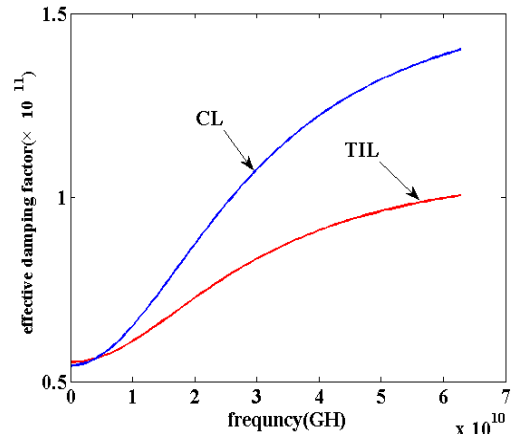
$$h_0 = \frac{\frac{\tau_{21} N_{s0}}{\tau_d N_Q} (1 - \varepsilon_t) + \frac{\tau_{21} f_0}{\tau_{12}} - \frac{N_{w0}}{N_Q} \frac{\tau_{21}}{\tau_{wR}}}{\frac{\tau_{21} f_0}{\tau_{12}} + 1 - f_0}, \quad (10)$$

$$N_{w0} = \frac{N_{s0} L_s}{\tau_d L_w} \left( \frac{1 - \varepsilon_t}{\frac{1 - h_0}{\tau_{w2}} - \frac{h_0}{\tau_{2w}} + \frac{1}{\tau_{wR}}} \right), \quad (11)$$

$$N_{s0} = \frac{J_0}{q L_s} \left( \frac{\varepsilon_t}{\tau_t} (1 - f_0) + \frac{1 - \varepsilon_t}{\tau_d} \right)^{-1}, \quad (12)$$

$$s_1^0 = \frac{N_Q}{v_g g_1 (-1 + 2f_0)} \left( \frac{\varepsilon_t N_{s0} L_s}{N_Q \tau_t L_d} (1 - f_0) + \frac{h_0 (1 - f_0)}{\tau_{21}} - \frac{(1 - h_0) f_0}{\tau_{12}} - \frac{f_0^2}{\tau_{1R}} \right), \quad (13)$$

$$\omega_r^2 = \frac{2v_g g_1 s_1^0}{\tau_p N_Q} \quad (14)$$



شکل ۹. عامل میرایی مؤثر ( $\Omega$ ) بر حسب فرکانس برای CL و TIL.

می‌شوند و متحمل زمان واهلش  $\tau_{21}$  می‌شوند و در نتیجه افزایش  $\tau_{21}$  موجب می‌شود که حامل‌ها دیرتر به GS برسند و چگالی فوتون حاصل از GS کاهش می‌یابد و منجر به کاهش پهنای نوار مدولاسیون می‌شود.

#### ۳. اثر عامل میرایی

یکی از مهم‌ترین عواملی که عملکرد پاسخ فرکانسی لیزر نیمه رسانا را تحت تأثیر قرار می‌دهد، عامل میرایی است. رابطه عامل میرایی برای لیزرهای از نوع TIL به صورت رابطه زیر است [۹]

$$\gamma_t = - \left( \frac{h_0}{\tau_{21}} + \frac{1 - h_0}{\tau_{12}} \right) + \gamma_t,$$

که در آن  $H_g$  و  $\gamma_t$  به صورت زیر تعریف می‌شود

$$H_g = \left( \frac{1 - f_0}{\tau_{21}} + \frac{f_0}{\tau_{12}} \right) \times \left( j\omega + \frac{1 - f_0}{\tau_{21}} + \frac{f_0}{\tau_{12}} \right)^{-1},$$

$$\gamma_t = \frac{h_0}{\tau_{21}} + \frac{1 - h_0}{\tau_{12}} + \frac{2f_0}{\tau_{1R}} + \frac{2v_g g_1 s_1^0}{N_Q} + \frac{\varepsilon_t N_{s0}}{\tau_t N_Q}.$$

در لیزرهای CL رابطه عامل میرایی مانند رابطه TIL است با این تفاوت که در آن  $\varepsilon_t = 0$  است طبق رابطه نوشته شده برای عامل میرایی، این عامل به زمان واهلش وابسته است. اما همان‌طور که از شکل ۹ مشاهده می‌شود با افزایش فرکانس مدولاسیون، عامل میرایی مؤثر برای TIL، افزایش کمی دارد ولی برای CL به مقدار بیشتری افزایش می‌آید. همان‌طور که در شکل‌های ۸ نشان داده شده



$$\tilde{\tau}_t = \frac{L_d \tau_t}{L_s}, \quad (17)$$

$$\tilde{\tau}_d = \frac{L_d \tau_d}{L_s}, \quad (18)$$

#### قدردانی

با تشکر از جناب آقای علی رضا فالی که در بخش شبیه‌سازی معادلات با نویسندگان این مقاله همکاری کرده‌اند.

$$\Psi = \frac{\varepsilon_t N_{s0}}{\tilde{\tau} N_Q} \left( \frac{(1-\varepsilon_t) H_g + (1-f_0) \varepsilon_t}{j\omega \tau_t + (1-f_0) \varepsilon_t + (1-\varepsilon_t) \frac{\tau_t}{\tau_d}} \right), \quad (15)$$

$$A_t(\omega) = \frac{(1-f_0) \varepsilon_t}{j\omega \tilde{\tau}_t + (1-f_0) + (1-f_0) \frac{\varepsilon_t \tilde{\tau}_t}{\tau_t} + \frac{\tilde{\tau}_t}{\tau_d} (1-\varepsilon_t)} + \frac{(1-\varepsilon_t) H_g}{j\omega \tilde{\tau}_d + (1-f_0) \frac{\varepsilon_t \tilde{\tau}_d}{\tau_t} + (1-\varepsilon_t) \frac{\tilde{\tau}_d}{\tau_d}}, \quad (16)$$

#### مراجع

1. L V Asryan and S Luryi, *Solid State Electronics* **47** (2003) 205.
2. O Qasaimeh, *Appl. IEEE* **79** (2003) 1956.
3. D Klotzkin and P Bhattacharya, *Lightwave Technol.* **17** (1999) 1634.
4. G park, O B Shchekin, D L Huffcker, and D G Deppe, *IEEE Photon Technol Lett.* **13** (2000) 230.
5. D S Han and L V Asryan, *IEEE, Journal of Lightwave Technology* **27** (2005) 24.
6. P Bhattacharya and S Ghosh, *IEEE, Quantum Electron.* **39** (2003) 4253.
7. S Chuang and N Holonyak, *Appl. Phys. Lett.* **80** (2002) 1270.
8. S Ghosh, P Bhattacharya, J Urayama, Z K Wu, T Norris, and K Kamath, *CLEO 02 Technical Digest* **1** (2002) 543.
9. O Qasaimeh and H Khanfar, *IEEE, Proc. Optoelectron.* **151** (2004) 3.



Iranian Journal of Physics Research, Vol. 13, No. 4, 2014

## Effect of tunneling injection on the modulation response of quantum dot lasers

Y Yekta kiya, E Rajaei, and Z Danesh

Department of Physics, Faculty of Science, University of Guilan, Rasht, Iran

(Received 17 November 2012 ; in final form 8 February 2014)

### Abstract

In this paper, modulation bandwidth characteristics of InGaAs/GaAs quantum dot (QD) laser were theoretically investigated. Simulation was done by using the fourth order Runge-Kutta method. Effect of carrier relaxation life time, temperature and current density on characteristics of tunneling injection QD laser (TIL) and conventional QD laser (CL) were analyzed. Results showed that tunneling injection in QD laser increases the modulation bandwidth indicating that it is very useful for using in the fiber optic communication systems.

**Keywords:** quantum dot laser, tunneling injection, turn on delay, modulation bandwidth, carrier relaxation life time, current density

For full article, refer to the Persian section