

دینامیک حاکم بر لیزر نیمرسانای نقطه کوانتومی با کاربرد در صنایع هوایی و مخابراتی

سید محسن ایزدیار^۱، محمد اسحاق نژاد^{۲*}، امین ترابی^۳

۱- استادیار، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری

۲- استادیار، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری

۳- استادیار، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری

(دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۹/۰۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۲۸)

چکیده: در این مقاله، شبیه‌سازی لیزر نقطه کوانتومی InAs/GaAs براساس مجموعه معادلات آهنگ برای حامل‌ها و فوتون‌ها در پنج تراز انرژی انجام می‌شود. دینامیک حامل‌ها و فوتون‌ها در لیزر نقطه کوانتومی مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد و مجموعه معادلات آهنگ برای حامل‌ها و فوتون‌ها، با استفاده از روش حل عددی رونگ- کوتای مرتبه‌ی چهارم حل می‌شوند. با توجه به کاربردهای گسترده لیزرهای نیمرسانا و به‌خصوص، لیزر نقطه کوانتومی در صنایع هوایی، شبیه‌سازی و مدل‌سازی این لیزر پیش از مرحله‌ی ساخت و تولید به منظور کاهش هزینه و زمان امری ضروری است. طول موج لیزر نقطه کوانتومی مورد بررسی در این مقاله، در دومین پنجره مخابراتی قرار دارد، بنابراین کاربردهای گسترده این لیزر را در مخابرات نوری، ارتباطات و فوتونیک در پی دارد. تحلیل داده‌های خروجی شبیه‌سازی نتایج ذیل را نشان می‌دهد: افزایش جریان تزریقی به محیط فعال لیزر، زمان روشن شدن و زمان پایداری سیستم را کاهش و قله توان و توان پایدار را افزایش می‌دهد. همچنین گسیل فوتون در هر تراز وقتی شروع می‌شود که تراز پایین‌تر آن به اشباع برسد. منحنی مشخصه P-I برای ترازهای پایه، برانگیخته‌ی اول و برانگیخته‌ی دوم به همراه توان خروجی لیزر ارائه می‌شوند. با مقایسه منحنی مشخصه‌ی P-I برای دو ساختار محیط فعال لیزر، مزایا و معایب وجود لایه سد در فرآیند ساخت لیزر نقطه کوانتومی مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

واژه‌های کلیدی: دینامیک حامل‌ها، شبیه‌سازی، کاربرد در صنایع هوایی، لیزر نقطه کوانتومی، مدل معادلات آهنگ

مقدمه

نقاط کوانتومی^۱ (QD) نوع جدیدی از نانوساختارهای نیمرسانا هستند که در آن‌ها حرکت حامل‌ها در هر سه بعد محدود شده است. این محدودیت در حرکت حامل‌ها باعث عدم پیوستگی در نمودار چگالی حالت‌های انرژی نیمرسانا می‌شود و منجر به حالت‌های انرژی گسسته و شبه‌دلتای دیراک در نقاط کوانتومی می‌شود. بنابراین، نقاط کوانتومی بسیار شبیه به اتم‌ها رفتار می‌کنند و به آن‌ها اتم‌های مصنوعی نیز گفته می‌شود. در اوایل دهه ۸۰، گزارشی از بهره‌ی بالای نقاط کوانتومی در مقایسه با دیگر مواد نیمرسانا مانند مواد بالک و چاه کوانتومی، یکی از عواملی شد که از QDها به‌عنوان محیط فعال لیزر استفاده شود. در ۱۹۸۶، آسادا بصورت تئوری بهره‌ی نوری ماده در QD را حدود 10^4 cm^{-1} نشان داد، مقداری که در مقایسه با نمونه‌ی چاه کوانتومی خیلی بیشتر بود [۱]. در ابتدای مطرح شدن این تئوری، تصور می‌شد که غیریکنواختی اندازه‌ی نقاط کوانتومی در فرآیند رشد می‌تواند خروجی نور لیزر را از بین ببرد. اما با اولین نمایش آزمایشگاهی لیزینگ در نقاط کوانتومی خود آراسته در سال ۱۹۹۴ این تصور از بین رفت [۲]. این آغاز راهی بود که منجر به پیشرفت لیزرهای نقطه کوانتومی در فناوری‌های مختلف شد.

لیزرهای نیمرسانا با نور ساطع شده در طول موج $1/3 \mu\text{m}$ به علت نیازهای خاص ارتباطات اپتیکی و تکنولوژی انتقال اطلاعات اهمیت زیادی پیدا کرده‌اند. این طول موج در پنجره دوم مخابراتی قرار دارد. از طرفی، ابعاد بسیار کوچک، وزن سبک و سختی مناسب لیزرهای نیمرسانا، امکان استفاده از آن‌ها به صورت مجتمع را فراهم می‌سازد. لیزرهای نیمرسانا همچنین قابلیت انتخاب و تنظیم طول موج و ایجاد توان‌های خروجی متنوعی را دارا هستند. این ویژگی‌ها می‌توانند کاربردهای نظامی متنوعی را به ارمغان بیاورند که شامل ارتباطات و مخابرات، هدایت موشک، شبیه‌سازی اسلحه برای اهداف آموزشی، نشانه‌گذاری/تنویر هدف و نشانه‌گیرهای هوشمند براساس ارسال پرتوی لیزر و آشکارسازی و تحلیل انعکاس آن توسط دوربین، هشدار سیم‌ضامن مین، مسافت‌یابی بواسطه‌ی واگرایی کم پرتو لیزر، اسلحه لیزری سبک، فیوزهای مجاورتی، نقشه‌برداری، هواشناسی و غیره هستند. علاوه بر این، می‌توان از لیزرهای نیمرسانا به‌عنوان منبع پمپاژ لیزرهای حالت جامد استفاده کرد، که این منجر به گستردگی بیشتر کاربرد لیزر نیمرسانا می‌شود [۳]. بین انواع مختلف لیزرهای نیمرسانا، لیزر QD می‌تواند این کاربردها را به نحو احسن پوشش دهد. به‌خصوص، لیزر QD نوع InAs/GaAs که دارای طول موج $1/3 \mu\text{m}$ است، می‌تواند بطور گسترده در مخابرات نوری استفاده شود و ویژگی‌های نوعی‌اش آن را متمایز ساخته است. با توجه به طول موج کاری لیزر نقطه کوانتومی InAs/GaAs در پنجره دوم مخابراتی و قابلیت جفت‌شدگی بالای این لیزر با فیبر نوری و نیز، انتشار نور با این طول موج در هوا با اتلاف پایین نور، می‌توان از آن به‌عنوان چشمه نوری مناسب جهت ارتباطات نوری دور-برد و نزدیک-برد استفاده کرد [۴]. از طرفی، نقاط کوانتومی قابلیت ایجاد چشمه‌های نوری تک فوتون را دارا هستند و این می‌تواند به انتقال اطلاعات حساس و طبقه‌بندی شده با امنیت بسیار بالا با کاربردهای هوایی منجر شود [۵]. به‌واسطه‌ی واگرایی کم پرتو لیزر نقطه کوانتومی رشد یافته با روش استرانسکی-کراستونوف [۶]، می‌توان به کاربردهای نظامی این لیزرها از جمله مسافت‌یابی دقیق، نشانه‌روی دقیق با نصب لیزر کم‌توان بر روی سلاح‌های سبک، نقشه برداری لیزری و غیره اشاره کرد [۷]. نسل جدید نقاط کوانتومی دارای پتانسیل بسیار قوی برای استفاده در صنایع نظامی و دفاعی هستند [۷-۱۲]، به‌طوری که بازار صنایع دفاعی نقاط کوانتومی در سال ۲۰۲۲ با رشد زیادی مواجه شد و افق روشنی را در برابر خود دید. انتظار می‌رود که اندازه‌ی بازار نقاط کوانتومی تا سال ۲۰۲۶ به ۸۶ میلیارد دلار برسد. این رقم در سال ۲۰۲۱ حدود ۴ میلیارد دلار بود [۹ و ۱۳]. نمونه‌ی اولیه‌ی دستگاه در این مقاله براساس لیزر QD نوع InAs/GaAs در ساختار نقاط - در - چاه^۲ (DWELL) شبیه‌سازی می‌شود [۴ و ۱۴].

¹ Quantum dots

² Dot-in-Well

در طول فرایند طراحی لیزر، مرحله‌ی ضروری و مهم، مدل‌سازی و شبیه‌سازی ویژگی‌های لیزینگ است. زیرا، برای ساخت بهینه‌ی یک دستگاه و به منظور کاهش هزینه و زمان، ابتدا دستگاه باید به صورت رایانه‌ای شبیه‌سازی و مدل‌سازی می‌شود تا نقاط ضعف و قوت طراحی پیش از ورود به مرحله‌ی ساخت مشخص شود. سپس، ساخت بهینه‌ی دستگاه با توجه به نتایج شبیه‌سازی انجام گیرد. مدل‌سازی لیزر نقطه کوانتومی ارائه شده در اینجا با استفاده از دستگاه معادلات آهنگ جفت‌شده برای چگالی حامل‌ها و فوتون‌ها انجام می‌گیرد. با استفاده از این شبیه‌سازی می‌توان رفتارهای مورد انتظار دستگاه واقعی را پیش‌بینی و آنها را در عمل پیاده‌سازی کرد. در این مقاله، محیط فعال لیزر نقطه کوانتومی InAs/GaAs شامل پنج تراز انرژی برای حامل‌های محصور می‌باشد، که شامل لایه سد^۱ SCH، لایه مرطوب^۲ (WL)، دو تراز انرژی برانگیخته و تراز انرژی پایه است. ترازهای انرژی مذکور با توجه به نوع فرآیند ساخت لیزر انتخاب شده‌اند تا تراز برانگیخته‌ی دوم را در فرآیند لیزینگ دخیل کنند. هرچه ابعاد نقطه کوانتومی بزرگتر باشد، تعداد تراز دخیل در لیزینگ بیشتر می‌شود [۱۵]. معادلات آهنگ انتخابی در این مقاله یکی از کامل‌ترین مدل‌سازی‌های انجام گرفته را در بین مقالات مختلف [۱۶ - ۱۹] ارائه می‌دهد. فرض می‌شود که همه‌ی QDها یکنواخت و دارای اندازه و شکل یکسان هستند. هر دو اثر پهن‌شدگی همگن و غیرهمگن^۳ نادیده گرفته می‌شود و طیف بهره خیلی باریک فرض می‌شود. معادلات آهنگ بوسیله‌ی روش عددی رونگ - کوتای مرتبه‌ی چهارم و استفاده از نرم افزار MATLAB حل می‌شوند [۲۰]. با حل معادلات آهنگ می‌توان دینامیک چگالی حامل‌ها و فوتون‌ها با زمان، رفتار روشن‌شدن لیزر، چگونگی تغییر توان خروجی لیزر با گذشت زمان و منحنی مشخصه‌ی $P-I^4$ را بدست آورد. همچنین می‌توان اثر تغییر پارامترهای مختلف لیزر بر این ویژگی‌ها را بررسی کرد. برای اولین بار، اثر حضور و عدم حضور لایه‌ی سد در رفتار لیزر مورد بررسی قرار می‌گیرد. این در مرحله ساخت به تصمیم‌گیری برای انتخاب روش رشد نقاط کوانتومی و چگونگی لایه‌نشانی محیط فعال لیزر کمک شایانی می‌کند.

مدل‌سازی

در ساده‌ترین شکل، مدل‌سازی لیزر با استفاده از معادلات آهنگ شامل نمایش سیستمی با حداقل دو معادله‌ی جفت‌شده است. یکی از آنها دینامیک چگالی حامل‌ها و دیگری دینامیک چگالی فوتون‌ها را تفسیر می‌کند. جفت‌شدگی با تعادل بین تعداد فوتون‌ها و حامل‌های درون کاواک معتبر می‌شود. به منظور سادگی، نرخ تزریق جریان ثابت در نظر گرفته می‌شود. بدین معنی که در هر واحد زمان، مقداری خیلی دقیق از الکترون‌ها به ناحیه‌ی فعال لیزر تزریق می‌شود. این فرآیند تزریق یا پمپاژ، تعداد جفت‌های الکترون - حفره را در دستگاه افزایش می‌دهد. در مواد نیم‌رسانا، این به معنی افزایش الکترون‌ها در نوار رسانش و حفره‌ها در نوار ظرفیت است. علاوه بر این پدیده، جذب فوتون در ماده‌ی نیم‌رسانا نیز تعداد جفت‌های الکترون-حفره را افزایش می‌دهد. از طرف دیگر، تعداد جفت‌های الکترون - حفره به‌وسیله‌ی فرآیندهای گسیل فوتون و بازترکیب غیرتابشی کاهش می‌یابند. مقصود از بازترکیب غیرتابشی، بازترکیبی بین یک الکترون در نوار رسانش و یک حفره در نوار ظرفیت است که قوانین گزینش را برآورده می‌کند ولی هیچ گسیل فوتونی مشاهده نمی‌شود. فرآیندهای گسیل فوتونی آن‌هایی هستند که به‌واسطه‌ی بازترکیب خودبه‌خودی و گسیل تحریک شده^۵، فوتون تولید کنند. همانطور که انتظار می‌رود، این فرآیندها روی هم رفته در افزایش یا کاهش تعداد حامل‌ها در بازه‌ی زمانی Δt نقش

¹ Separate Confinement Heterostructure

² Wetting Layer

³ Homogeneous and Inhomogeneous Broadening

⁴ Power versus Injection Current

⁵ Stimulated Emission

دارند، بسته به این که طول عمر تولید الکترون - حفره چه میزان بیشتر از طول عمر بازترکیب آن‌ها باشد. بنابراین، می‌توان تغییرات زمانی تعداد حامل‌ها را بصورت زیر نوشت:

$$\frac{dN}{dt} = (\text{بازترکیب خودبه‌خودی}) - (\text{بازترکیب غیر تابشی}) - (\text{گسیل تحریک شده}) - (\text{جذب تحریک شده}) + (\text{پمپاژ})$$

که N چگالی جمعیت حامل‌ها است. دقت داشته باشید که عبارت‌هایی با علامت مثبت، افزایش حامل و با علامت منفی، کاهش حامل را بیان می‌کنند.

برای تعداد فوتون‌ها، روش کاملاً مشابه است. از فرآیندهای مذکور باید در نظر داشت که فوتون‌هایی که بصورت تحریک‌شده گسیل می‌شوند و فرآیندهای بازترکیب خودبه‌خودی، در افزایش چگالی فوتون نقش دارند. زیرا این فرآیندها تولید نور در دستگاه را به عهده دارند، درحالی‌که فوتون‌های وارد شده در جذب تحریک‌شده اثر مخالف ایجاد می‌کنند و تعداد فوتون‌ها را در بازه‌ی زمانی Δt کاهش می‌دهند. علاوه بر جذب تحریک‌شده، اتلاف نوری ماده نیز چگالی فوتون‌ها را کاهش می‌دهد. این پارامتر بر حسب واحد cm^{-1} بیان می‌شود و بیان می‌کند چه تعداد فوتون، هنگامی که در هر سانتیمتر از کاواک انتشار می‌یابند و هنگامی که از آینه‌های انتهایی کاواک خارج می‌شوند، اتلاف می‌شوند. با استفاده از این پدیده‌ها، می‌توان معادله‌ای را برای تغییر تعداد فوتون‌ها نوشت:

$$\frac{dS}{dt} = (\text{بازترکیب خودبه‌خودی}) + (\text{اتلاف اپتیکی}) - (\text{گسیل تحریک شده}) + (\text{جذب تحریک شده})$$

که S ، چگالی جمعیت فوتون‌ها است. دقت داشته باشید که عبارت‌هایی با علامت مثبت، افزایش فوتون و با علامت منفی، کاهش فوتون را بیان می‌کنند.

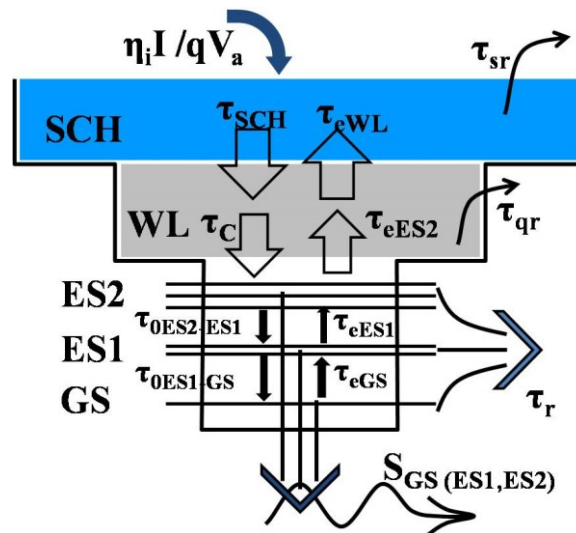
با توجه به فرآیند ساخت نقاط کوانتومی، ترازهای انرژی مجاز برای حامل‌ها در QD می‌تواند سه تراز، چهار تراز، پنج تراز انرژی و حتی ترازهای بیشتر باشد. در این مقاله، با توجه به فرآیند ساخت نقاط کوانتومی پنج تراز انرژی در فرآیند لیزینگ دخیل هستند [۱۵]، که عبارتند از: لایه‌ی سد SCH، لایه‌ی مرطوب WL، دومین تراز برانگیخته^۱ ES2، اولین تراز برانگیخته ES1 و تراز پایه^۲ GS. در شکل ۱، ترازهای انرژی محیط فعال لیزر نقطه کوانتومی در نوار رسانش نشان داده شده است. به‌عنوان نتیجه‌ای از انتخاب تقریب اکسیتونی برای توصیف اندرکنش بین حفره‌ها و الکترون‌ها، در نوار ظرفیت نیز، حامل‌ها می‌توانند در هر سه تراز GS و ES1 و ES2 باشند. این دلیل نشان دادن یکی از نوارها است، زیرا بر اساس تقریب اکسیتونی هر رویدادی که برای الکترون‌ها در نوار رسانش رخ می‌دهد برای حفره‌ها در نوار ظرفیت نیز اتفاق می‌افتد. در مباحث لیزرهای نیمرسانا و تقویت‌کننده‌های نوری نیمرسانا، پدیده‌های نشان داده‌شده در شکل ۱، اغلب توسط ثابت‌های زمانی در مدل‌سازی دخیل می‌شوند [۲۰-۲۲]. ثابت‌های زمانی هر گذار در معادلات آهنگ قرار داده می‌شوند و تعداد حامل‌هایی (یا فوتون‌هایی) را که در هر فرآیند در واحد زمان نقش دارند، بیان می‌کنند. مجموعه معادلات آهنگ با استفاده از روش حل عددی رونگ - کوتای مرتبه‌ی چهارم و در نرم افزار MATLAB به صورت عددی محاسبه می‌شوند. این اجازه می‌دهد که در طول زمان تعادل بین تولید و بازترکیب جفت‌های الکترون - حفره و تولید / جذب فوتون، به عبارتی، دینامیک حامل‌ها و فوتون‌ها مطالعه شود.

تاکنون روش‌های مختلفی برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی لیزرهای نقطه کوانتومی ارائه شده است. روش‌های مرسوم عبارت‌اند از: روش تحلیلی، مدل معادلات آهنگ، مدل پیاده‌سازی مداری، نرم‌افزارهای تجاری و شبکه‌های عصبی. در روش معادلات آهنگ که در مقاله حاضر استفاده شده است، دستگاه معادلات دیفرانسیل جفت‌شده باید به صورت عددی حل شوند. از روش‌های مرسوم حل دستگاه معادلات دیفرانسیل نیز می‌توان به روش‌های اوپلر و رونگ-کوتا در

¹ Excited State

² Ground State

مرتبه‌های مختلف اشاره کرد. روش حل عددی رونگ - کوتای مرتبه چهارم که در سال ۱۹۰۱ توسعه یافته است، یکی از بهترین روش‌های حل عددی دستگاه معادلات دیفرانسیل جفت‌شده است. بنابراین، این مقاله هیچ ادعایی در رابطه با نوآوری در شبیه‌سازی لیزر با روش رونگ-کوتا ندارد. زیر این روش به صورت کامل توسعه یافته است. نوآوری این مقاله مربوط به کامل بودن معادلات آهنگ توصیفی لیزر و نیز، اثر حضور یا عدم حضور لایه سد در عملکرد لیزر است. در ادامه، چگونگی تولید فوتون لیزری در محیط فعال لیزر شرح داده می‌شود.



شکل ۱- طرحواره ساده شده‌ی ترازهای انرژی نوار رسانش لیزر نقطه کوتومی InAs/GaAs

در ابتدا جریان به درون نوار SCH پمپاژ می‌شود که منجر به افزایش جفت‌های الکترون-حفره و در نتیجه چگالی حامل‌ها در نوار SCH می‌شود. حامل‌های تراز SCH در زمان τ_{SCH} به WL واهلش^۱ می‌کنند و در WL واهلش سریع دیگری را در زمان τ_c به تراز برانگیخته‌ی دوم ES₂ تجربه می‌کنند. اکثر حامل‌ها بوسیله ی ES₂ گرفته می‌شوند، بخشی از حامل‌ها در زمان τ_{qr} فروافت^۲ می‌کنند و WL حامل‌های فراری از ES₂ را با ثابت زمان τ_{eES2} می‌گیرد. فرآیندهایی که برای حامل‌ها در GS، ES₁ و ES₂ اتفاق می‌افتند، مشابه هستند. به همین دلیل، برای نمایش فقط ES₁ در نظر گرفته می‌شود. بخشی از حامل‌ها بوسیله ی واهلش از ES₂ به ES₁ می‌روند ($\tau_{0ES2-ES1}$) و بخش دیگری از حامل‌ها از ES₁ به GS واهلش می‌کنند ($\tau_{0ES1-GS}$). همچنین چند حامل که از GS فرار می‌کنند، توسط ES₁ گرفته می‌شوند (τ_{eGS}) و از طرف دیگر برخی از حامل‌های ES₁ به ES₂ فرار می‌کنند (τ_{eES1}). بخشی از حامل‌ها به سبب بازترکیب خودبه‌خودی و اثر اوژه^۳ فروافت می‌یابند (τ_r). باقیمانده‌ی حامل‌ها در بازترکیب تحریک‌شده شرکت می‌کنند و فوتون‌ها را تولید می‌کنند.

بر اساس تجزیه و تحلیل دینامیک حامل‌های درون QD، مدل عددی لیزر QD بر اساس معادلات آهنگ توسعه می‌یابد. مدل می‌تواند به دو بخش تقسیم شود: معادلات فوتون و معادلات حامل (الکترون). معادلات آهنگ مربوط به چگالی حامل‌ها در معادلات ۱ الی ۵ و معادلات آهنگ مربوط به چگالی فوتون‌ها در معادلات ۶ الی ۸ بیان می‌شوند:

$$\frac{dN_{SCH}}{dt} = \eta_i \frac{I}{qV_a} - \frac{N_{SCH}}{\tau_{SCH}} - \frac{N_{SCH}}{\tau_{sr}} + \frac{N_{WL}}{\tau_{eWL}} \quad \text{رابطه (۱)}$$

¹ Relaxation

² Decay

³ Auger Effect

$$\frac{dN_{WL}}{dt} = -\frac{N_{WL}}{\tau_{qr}} + \frac{N_{SCH}}{\tau_{SCH}} + \frac{N_{ES2}}{\tau_{eES2}} - \frac{N_{WL}}{\tau_{eWL}} - \frac{N_{WL}}{\tau_c} (1-f_{ES2}) \quad \text{رابطه ۲}$$

$$\begin{aligned} \frac{dN_{ES2}}{dt} = & -\frac{N_{ES2}}{\tau_r} - \Gamma v_g g_{ES2} (2f_{ES2} - 1) S_{ES2} - \frac{N_{ES2}}{\tau_{eES2}} + \frac{N_{WL}}{\tau_c} (1-f_{ES2}) \\ & - \frac{N_{ES2}}{\tau_{0ES2-ES1}} (1-f_{ES1}) + \frac{N_{ES1}}{\tau_{eES1}} (1-f_{ES2}) \end{aligned} \quad \text{رابطه ۳}$$

$$\begin{aligned} \frac{dN_{ES1}}{dt} = & -\frac{N_{ES1}}{\tau_r} - \Gamma v_g g_{ES1} (2f_{ES1} - 1) S_{ES1} + \frac{N_{GS}}{\tau_{eGS}} (1-f_{ES1}) - \frac{N_{ES1}}{\tau_{0ES1-GS}} (1-f_{GS}) \\ & + \frac{N_{ES2}}{\tau_{0ES2-ES1}} (1-f_{ES1}) - \frac{N_{ES1}}{\tau_{eES1}} (1-f_{ES2}) \end{aligned} \quad \text{رابطه ۴}$$

$$\frac{dN_{GS}}{dt} = -\frac{N_{GS}}{\tau_r} - \Gamma v_g g_{GS} (2f_{GS} - 1) S_{GS} - \frac{N_{GS}}{\tau_{eGS}} (1-f_{ES1}) + \frac{N_{ES1}}{\tau_{0ES1-GS}} (1-f_{GS}) \quad \text{رابطه ۵}$$

$$\frac{dS_{GS}}{dt} = -\frac{S_{GS}}{\tau_s} + \Gamma v_g g_{GS} (2f_{GS} - 1) S_{GS} + \beta_{sp} \frac{N_{GS}}{\tau_{sp}} \quad \text{رابطه ۶}$$

$$\frac{dS_{ES1}}{dt} = -\frac{S_{ES1}}{\tau_s} + \Gamma v_g g_{ES1} (2f_{ES1} - 1) S_{ES1} + \beta_{sp} \frac{N_{ES1}}{\tau_{sp}} \quad \text{رابطه ۷}$$

$$\frac{dS_{ES2}}{dt} = -\frac{S_{ES2}}{\tau_s} + \Gamma v_g g_{ES2} (2f_{ES2} - 1) S_{ES2} + \beta_{sp} \frac{N_{ES2}}{\tau_{sp}} \quad \text{رابطه ۸}$$

که S_{ES2} و S_{ES1} ، S_{GS} به ترتیب چگالی فوتون‌ها در تراز ES_2 ، ES_1 ، GS هستند. N_{WL} ، N_{ES2} ، N_{ES1} ، N_{GS} و N_{SCH} به ترتیب چگالی حامل‌ها در تراز ES_2 ، ES_1 ، GS ، WL و SCH را نشان می‌دهند. توجه داشته باشید که در مدل اکسیتونی فرض می‌شود که تعداد الکترون‌ها و حفره‌ها دقیقاً با هم برابرند. η_i نرخ تزریق جریان، I جریان تزریقی و q بار واحد است. نرخ تزریق جریان را ثابت در نظر می‌گیریم. همچنین فرض می‌کنیم که اندازه و شکل همه‌ی نقاط کوانتومی یکسان باشد.

به ترتیب آهنگ‌های فروافت حامل در WL ، ES_2 ، ES_1 ، GS و SCH $-\frac{N_{SCH}}{\tau_{sr}}$ و $-\frac{N_{WL}}{\tau_{qr}}$ ، $-\frac{N_{ES2}}{\tau_r}$ ، $-\frac{N_{ES1}}{\tau_r}$ ، $-\frac{N_{GS}}{\tau_r}$

و SCH هستند. $\frac{N_{SCH}}{\tau_{SCH}}$ آهنگ پخش حامل‌ها در ناحیه‌ی SCH و τ_{SCH} زمان پخش در SCH است. $\frac{N}{\tau_e} (1-f)$ در

ترازهای دخیل در لیزینگ، به معنی آهنگ فرار حامل از تراز جاری به تراز بالاتر است و τ_e زمان فرار حامل است.

$\frac{N_{WL}}{\tau_{eWL}}$ آهنگ فرار حامل از WL به SCH است. $\frac{N}{\tau_0} (1-f)$ و $-\frac{N}{\tau_0} (1-f)$ به ترتیب، آهنگ‌های واهلش حامل از

تراز بالاتر به تراز جاری و از تراز جاری به تراز پایین‌تر هستند و τ_0 زمان واهلش است. $-\frac{N_{WL}}{\tau_c} (1-f_{ES2})$ آهنگ

فروافت حامل از WL به ES_2 و τ_c زمان فروافت حامل است. $-\frac{S_{ES2}}{\tau_s}$ و $-\frac{S_{ES1}}{\tau_s}$ ، $-\frac{S_{GS}}{\tau_s}$ آهنگ فروافت فوتون در

تراز مربوطه هستند و τ_s طول عمر فوتون است. $\beta_{sp} \frac{N_{GS}}{\tau_{sp}}$ ، $\beta_{sp} \frac{N_{ES1}}{\tau_{sp}}$ و $\beta_{sp} \frac{N_{ES2}}{\tau_{sp}}$ آهنگ تولید فوتون به‌وسیله‌ی

باز ترکیب خودبه‌خودی در هر تراز هستند، β_{sp} ضریب جفت‌شدگی گسیل خودبه‌خودی^۱ و τ_{sp} زمان باز ترکیب خودبه‌خودی

¹ Spontaneous Emission Coupling Factor

است. $\Gamma v_g g_{ES2} (2f_{ES2} - 1) S_{ES2}$ و $\Gamma v_g g_{ES1} (2f_{ES1} - 1) S_{ES1}$ ، $\Gamma v_g g_{GS} (2f_{GS} - 1) S_{GS}$ ، آهنگ کاهش حامل به علت گسیل تحریک شده، به ترتیب در تراز GS، ES۱ و ES۲ هستند، Γ ضریب محدودیت اپتیکی^۱، v_g سرعت گروه و g بهره‌ی قله مواد است.

در انتقال حامل‌ها از یک تراز انرژی به تراز دیگر باید تاثیر اصل طرد پائولی نیز در نظر گرفته شود. f احتمال اشغال تراز ورودی است. بنابراین f_{GS} ، f_{ES1} و f_{ES2} به ترتیب احتمال‌های اشغال حامل در تراز GS، ES۱ و ES۲ هستند. احتمال اشغال f به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$f = \frac{N}{\mu N_D} \quad (\text{رابطه ۹})$$

که N چگالی حامل تراز جاری، N_D تعداد کل QDها، μ تبهگنی و μ_{GS} ، μ_{ES1} و μ_{ES2} به ترتیب تبهگنی GS، ES۱ و ES۲ هستند که مقادیر متناظرشان به ترتیب ۲، ۴ و ۶ است.

معادلات ۱-۸ شامل هشت متغیر وابسته به زمان می‌باشند که قابلیت حل به صورت تحلیلی را ندارند. می‌توان آن‌ها را با استفاده از روش رونگ - کوتای مرتبه‌ی چهارم به صورت عددی محاسبه کرد و با استفاده از تجزیه و تحلیل دینامیک حامل و فوتون در ترازهای مختلف، مشخصات لیزر از جمله، نوسان واهلشی چگالی حامل‌ها و فوتون‌ها، پاسخ لیزر به تزریق جریان پله‌ای، منحنی مشخصه‌ی P-I و رابطه‌ی بین زمان واهلش حامل به تراز پایه و زمان روشن شدن و توان قابل حصول را بدست آورد.

نتایج شبیه‌سازی

پس از حل دستگاه معادلات دیفرانسیل با روش رونگ - کوتای مرتبه‌ی چهارم و تحلیل و تفسیر داده‌های خروجی، نتایج ذیل حاصل می‌شوند. برخی از کمیت‌های مورد استفاده در شبیه‌سازی در جدول ۱ لیست می‌شوند. همچنین، ثابت‌های زمان مورد استفاده در مدل را در جدول ۲ می‌توان مشاهده کرد [۴، ۱۴ و ۲۰].

دینامیک حامل و فوتون

با حل معادلات (۱) تا (۸)، می‌توان رفتار دینامیکی چگالی حامل‌ها و فوتون‌ها و چگونگی تغییر آن با افزایش جریان تزریقی را در سه تراز انرژی دخیل در لیزینگ بدست آورد. این ترازها شامل تراز پایه، تراز برانگیخته‌ی اول و تراز برانگیخته‌ی دوم هستند. از آنجاییکه هر تراز انرژی جریان آستانه‌ی متفاوتی دارد و به ترتیب از تراز پایه تا برانگیخته‌ی دوم، جریان آستانه افزایش می‌یابد، چگالی‌های حامل و فوتون در هر سه تراز برای جریان‌های نزدیک آستانه و بالای آن ترسیم می‌شوند (شکل‌های ۲ الی ۴).

همانطور که در شکل‌های ۲ تا ۴ دیده می‌شود، چگالی حامل‌ها و فوتون‌ها برای هر سه تراز انرژی، بعد از نوسان واهلشی در شروع تزریق جریان به تعادل می‌رسند. نوسان واهلشی اثر متقابل بین پر شدن ترازهای انرژی GS، ES۱ و ES۲ با حامل‌ها و فوتون‌های تولید شده در کاواک را نشان می‌دهد، بنابراین به دینامیک حامل‌های درون نقاط مربوط می‌شود. در جریان‌های زیر آستانه نوسان واهلشی وجود ندارد و چگالی‌های فوتون هر تراز مقدار ناچیزی هستند. با افزایش جریان تزریقی چگالی فوتون افزایش می‌یابد و فرآیند لیزینگ در QD آغاز می‌شود. این افزایش تا جایی ادامه دارد که چگالی به مقداری ثابتی برسد و بعد از آن افزایش جریان تزریقی تغییری در چگالی فوتون ایجاد نمی‌کند. همچنین در بالای جریان آستانه، افزایش جریان تزریقی بر نوسان واهلشی چگالی حامل تاثیر می‌گذارد، اما بر روی مقدار پایدار چگالی حامل اثری ندارد و چگالی حامل در هر سه تراز، در یک مقدار ثابت باقی می‌ماند.

¹ Optical Confinement Factor

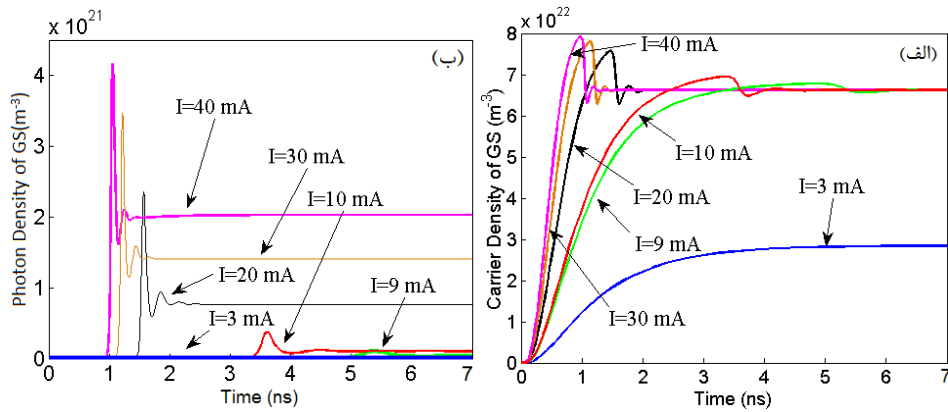
جدول ۱. برخی از پارامترهای مورد استفاده در شبیه‌سازی

ردیف	پارامتر	نماد	مقدار
۱	طول دستگاه	L	۱۰۰۰ μm
۲	پهنای ناحیه‌ی فعال	w	۴ μm
۳	فاکتور محبوس‌سازی اپتیکی	Γ	۰/۱
۴	ضریب شکست موثر	n_r	۳/۵
۵	اتلاف درونی	α_i	۲ cm^{-1}
۶	اتلاف آینه‌ها	α_m	۱۲ cm^{-1}
۷	اتلاف کل	α_t	$\alpha_i + \alpha_m$
۸	جرم سکون	m_0	$9/11 \times 10^{-38} \text{gr}$
۹	بازتابندگی آینه ورودی	R_1	۰/۳
۱۰	بازتابندگی آینه خروجی	R_2	۰/۹
۱۱	بهره‌ی قله GS	g_{GS}	$259/38 \times 10^{-4} \mu\text{m}^{-1}$
۱۲	بهره‌ی قله ES۱	g_{ES1}	$437/58 \times 10^{-4} \mu\text{m}^{-1}$
۱۳	بهره‌ی قله ES۲	g_{ES2}	$455/30 \times 10^{-4} \mu\text{m}^{-1}$
۱۴	تعداد کل QD	N_D	$4/3 \times 10^{22} \text{m}^{-3}$
۱۵	نرخ تزریق جریان	η_i	۰/۹
۱۶	گاف انرژی بین WL و ES۲	Δ_{WL-ES2}	۰/۰۱۲۸ eV
۱۷	گاف انرژی بین ES۱ و ES۲	$\Delta_{ES2-ES1}$	۰/۰۳۶۰ eV
۱۸	گاف انرژی بین GS و ES۱	Δ_{ES1-GS}	۰/۰۳۷۰ eV
۱۹	فاکتور گسیل خودبه‌خودی	β	10^{-7}
۲۰	سرعت گروه	v_g	$1/571 \times 10^7 \text{m/s}$
۲۱	انرژی حامل	$h\nu$	۰/۹۶۴۴ eV

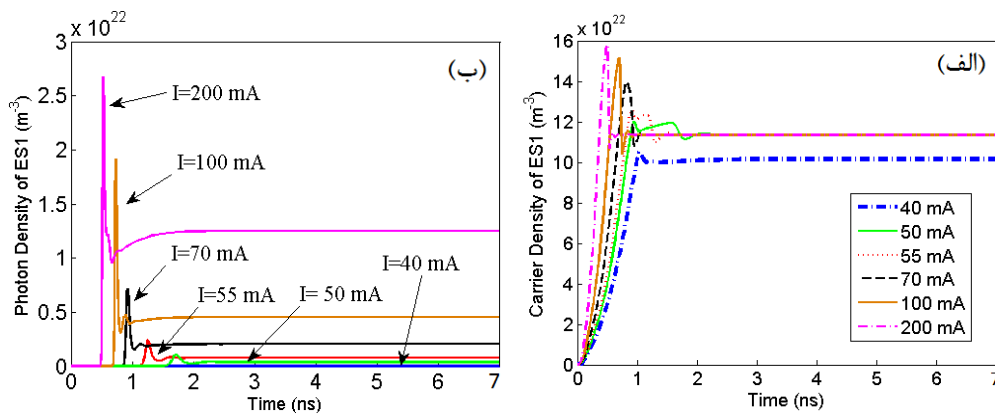
جدول ۲. ثابت‌های زمانی مورد استفاده در شبیه‌سازی

ردیف	پارامتر	نماد	مقدار
۱	زمان واهلش حامل از ES۲ به ES۱	$\tau_{0ES2-ES1}$	۲۵ ps
۲	زمان واهلش حامل از ES۱ به GS	$\tau_{0ES1-GS}$	۷۵ ps
۳	زمان واهلش حامل از WL به ES۲	τ_c	۲۵ ps
۴	زمان فروافت حامل در ترازهای دخیل در لیزینگ	τ_r	۱ ns
۵	زمان فرار حامل از GS	τ_{eGS}	۹ ns
۶	زمان فرار حامل از ES۱	τ_{eES1}	۱۰ ns
۷	زمان فرار حامل از ES۲	τ_{eES2}	۱۱ ns
۸	زمان فرار حامل از WL	τ_{eWL}	۳۰ ns
۹	زمان فروافت حامل در SCH	τ_{sr}	۰/۹ ns

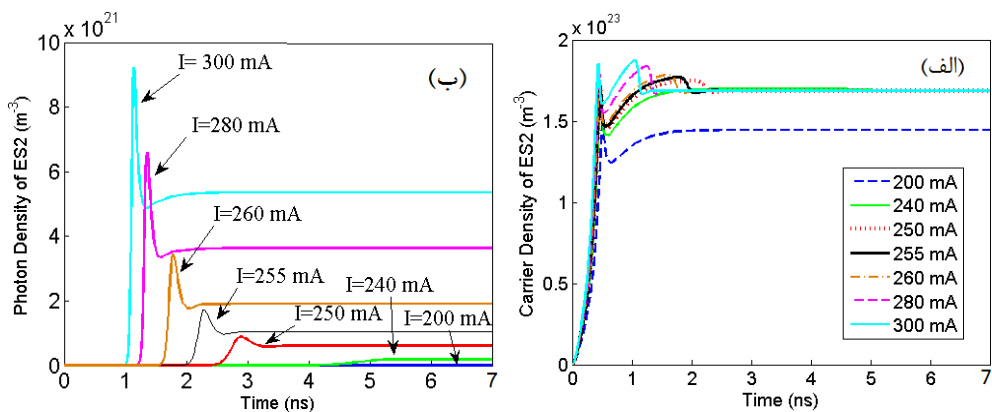
۰/۸ ns	τ_{qr}	زمان فروافت حامل در WL	۱۰
۲/۸ ns	τ_{sp}	زمان گسیل خودبه‌خودی	۱۱
۵۰۰ ps	τ_{SCH}	زمان پخش حامل در SCH	۱۲



شکل ۲- (الف) چگالی حامل در GS، (ب) چگالی فوتون در GS در حساب زمان در جریان‌های تزریقی ۳، ۹، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ میلی‌آمپر.



شکل ۳- (الف) چگالی حامل در ES1، (ب) چگالی فوتون در ES1 در حساب زمان در جریان‌های تزریقی ۴۰، ۵۰، ۵۵، ۷۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌آمپر.



شکل ۴- (الف) چگالی حامل در ES2، (ب) چگالی فوتون در ES2 در حساب زمان در جریان‌های تزریقی ۲۰۰، ۲۴۰، ۲۵۰، ۲۵۵، ۲۶۰، ۲۸۰ و ۳۰۰ میلی‌آمپر.

پاسخ لیزر به تزریق پله‌ای جریان

رابطه‌ی بین چگالی فوتون و توان خروجی لیزر بصورت زیر تعریف می‌شود:

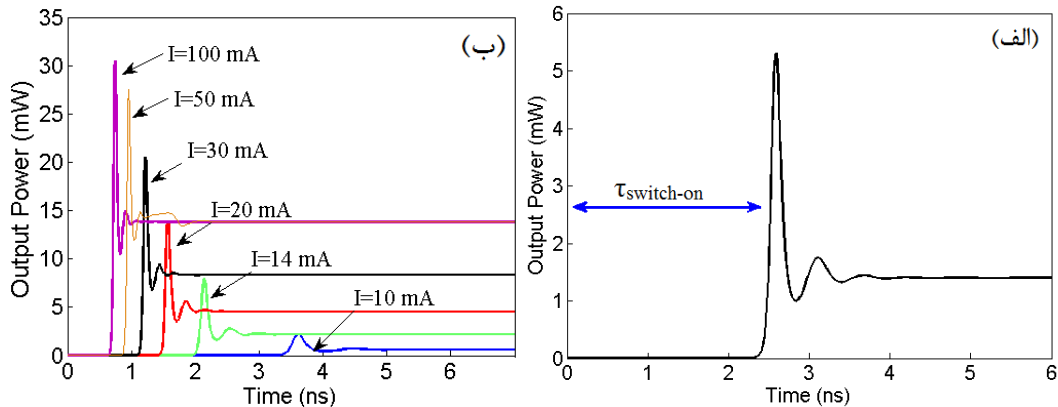
$$P_{out_GS(ES1,ES2)} = \frac{S_{GS(ES1,ES2)} h\nu}{\tau_s} \quad \text{رابطه ۱۰}$$

که $h\nu$ انرژی هر فوتون و τ_s طول عمر فوتون در کاواک است و از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$\tau_s^{-1} = \frac{c}{n_r} \left[\alpha + \frac{Ln\left(\frac{1}{R_1 R_2}\right)}{2L} \right] \quad \text{رابطه ۱۱}$$

که n_r ضریب شکست محیط و α اتلاف کل لیزر است که شامل دو بخش می‌باشد: اتلاف درونی ($\alpha_i = 2 \text{ cm}^{-1}$) و اتلاف آینه ($\alpha_m = 12 \text{ cm}^{-1}$). R_1 و R_2 بازتابندگی آینه ورودی و خروجی و L طول محیط فعال است.

حال می‌توان پاسخ لیزر به تزریق جریان و چگونگی تغییر آن با زمان، زمان روشن شدن و توان قابل حصول با افزایش جریان پله‌ای را نشان داد. زمان روشن شدن به زمانی گفته می‌شود که توان خروجی به نصف مقدار ماکزیمم برسد ($\tau_{switch-on}$). در شکل ۵(الف) توان خروجی برحسب زمان برای جریان تزریقی ۱۲ mA در تراز GS به تصویر کشیده شده است. همانطور که می‌توان دید، زمان روشن شدن لیزر حدود ۲/۳۲ ns است و لیزر بعد از مدت زمان ۴/۵ ns به حالت پایداری می‌رسد. به عبارتی می‌توان از یک شبیه‌ساز به طول ۶ ns اجتناب کرد. در شکل ۵(ب)، نحوه‌ی تغییر توان خروجی با افزایش جریان برای تراز GS در جریان‌های تزریقی مختلف نشان داده شده است. با توجه به نمودار، با افزایش جریان تزریقی، زمان روشن شدن و زمان پایداری لیزر کاهش می‌یابد و پیک توان و توان پایدار قابل حصول افزایش می‌یابد. در جریان‌های بیشتر از ۵۰ mW لیزر اشباع می‌شود، به عبارتی با افزایش جریان ورودی توان پایدار لیزر ثابت باقی می‌ماند، ولی زمان روشن شدن همچنان کاهش می‌یابد.

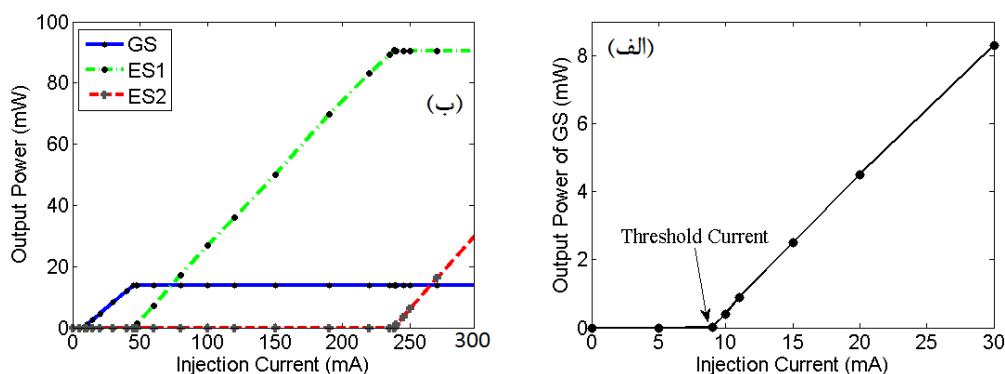


شکل ۵- توان خروجی لیزر برحسب زمان در GS (الف) برای جریان تزریقی ۱۲ mA (ب) برای جریان‌های تزریقی ۱۰، ۱۴، ۲۰، ۳۰، ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌آمپر.

منحنی مشخصه‌ی P-I

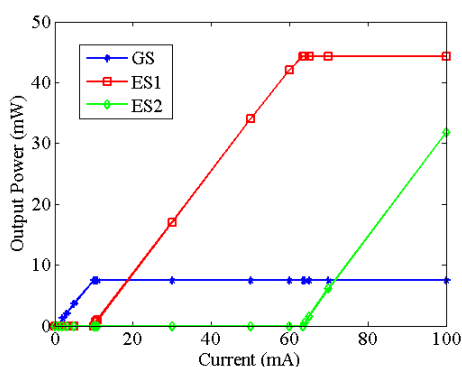
یکی از مهمترین و کاربردی‌ترین مشخصات لیزر، منحنی مشخصه‌ی P-I است. این منحنی توان پایدار لیزر را برحسب جریان تزریقی ثابت به محیط فعال لیزر می‌دهد. با استفاده از این منحنی می‌توان جریان آستانه لیزر و بازده انحرافی dP/dI یا بازده کوانتومی را بدست آورد. جریان آستانه مقدار جریانی است که نمودار در آن شروع به رفتار خطی

می‌کند. شکل ۶(الف) منحنی مشخصه P-I را برای تراز GS نشان می‌دهد. جریان آستانه در این حالت حدود ۹ mA است. بازده انحرافی نیز ۰/۴ می‌باشد، یعنی برای افزایش توانی به اندازه‌ی ۰/۴ mW به افزایش جریانی معادل ۱ mA نیاز است. شکل ۶(ب) منحنی مشخصه P-I را برای سه تراز انرژی دخیل در لیزینگ نشان می‌دهد. فرض می‌شود که انرژی فوتون در هر سه تراز یکسان است. همانطور که گفته شد برای برانگیخته کردن ترازهای انرژی بالاتر به جریان تزریقی بیشتری نیاز است. به همین دلیل جریان آستانه برای ترازهای انرژی بالاتر بیشتر است. همانطور که در شکل ۶(ب) دیده می‌شود، با شروع تزریق جریان، تراز GS شروع به گسیل فوتون می‌کند. وقتی خروجی GS اشباع می‌شود، تراز ES۱ شروع به گسیل فوتون می‌کند و وقتی خروجی ES۱ اشباع می‌شود، تراز ES۲ گسیل فوتون را آغاز می‌کند. به عبارتی، جریان آستانه‌ی هر تراز معادل جریان پایدار تراز پایین‌تر از خود است. جریان آستانه برای ترازهای GS، ES۱ و ES۲ به ترتیب ۹، ۴۵ و ۲۳۸ میلی آمپر است. البته باید در نظر داشت که جریان تزریقی بالا منجر به خرابی لیزر نشود.



شکل ۶- (الف) منحنی مشخصه P-I تراز GS. جریان آستانه ۹ mA است. (ب) منحنی مشخصه P-I برای ترازهای GS، ES۱ و ES۲.

در حالتی که فرآیند ساخت نقاط کوانتومی و محیط فعال لیزر به گونه‌ای باشد که لایه سد SCH در ترازهای انرژی ظاهر نشود [۱۴]، منحنی مشخصه P-I به صورت شکل ۷ تغییر می‌کند.



شکل ۷- منحنی مشخصه P-I برای ترازهای انرژی پایه، برانگیخته‌ی اول و برانگیخته‌ی دوم بدون در نظر گرفتن لایه سد SCH

با مقایسه‌ی شکل ۶(ب) و شکل ۷، مشاهده می‌شود که جریان‌های آستانه برای ترازهای انرژی لیزر مورد بحث، با در نظر گرفتن تراز SCH به مراتب بیشتر از همان لیزر بدون در نظر گرفتن این تراز است. علت این است که برای حالت بدون تراز SCH، حامل‌های تزریق شده مستقیماً به تراز WL می‌روند و از آنجا به واسطه‌ی واهلش سریع، به ترازهای دخیل در لیزینگ منتقل می‌شوند و در نتیجه به سبب فروافت کمتر، نیاز به جریان کمتری دارند تا به مرحله‌ی لیزینگ

برسند. اما در حالتی که تراز SCH وجود دارد، چون فروافت حامل در این تراز نیز اضافه می‌شود، جریان آستانه افزایش می‌یابد. همچنین اگر نمودارهای توان برحسب زمان ترازهای انرژی این دو حالت مقایسه شود، دیده می‌شود که زمان روشن شدن نیز برای حالت بدون تراز SCH کمتر است، که این به سبب انتقال سریع حامل‌ها به ترازهای دخیل در لیزینگ است. اما در عمل، وجود لایه سد SCH به منظور ساخت پایدارتر نقاط کوانتومی، ضروری است. لایه سد در نقش مخزن حامل عمل می‌کند و می‌تواند حامل‌های زیادی را در خود ذخیره کند. به همین منظور، تزریق جریان با بازدهی کمتر می‌تواند خروجی بیشتری داشته باشد. در نتیجه، مصرف توان الکتریکی دستگاه به شدت کاهش می‌یابد. این با هدف طراحی و ساخت لیزر بدون توان مصرفی همخوانی دارد.

در جدول ۱، مقایسه‌ای بین نتایج شبیه‌سازی حاضر و نتایج چند مقاله‌ی دیگر ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، افزایش تعداد ترازهای دخیل در لیزینگ منجر به افزایش زمان روشن شدن لیزر می‌شود.

جدول ۳ - مقایسه نتایج

توان پایداری GS	پیک توان GS	جریان آستانه GS	ترازهای انرژی	نقطه کوانتومی	ساختار محیط فعال	نویسنده
۱۴ mW	۳۰ mW	۹ mA	GS ES1 ES2 WL SCH	InAs/GaAs	کاواک مسطح DWELL	مقاله حاضر با SCH
۵۰ mW	۳۳۰ mW	۱۲ mA	GS ES1	-	کاواک مسطح	George A.P. The [۲۰]
۱۱۰ mW	-	۱۰ mA	GS ES1 ES2 WL	InAs/GaAs	کاواک مسطح DWELL	Shao-feng et. al. [۲۳]
۰.۵ mW	-	۴ mA	GS ES1 WL CS	InAs/GaAs	کاواک مسطح DWELL	Sugawara et. al. [۴]
-	-	۳ mA	GS WL SCH	InGaAs/GaAs	کاواک مسطح DWELL	Yavari et. al. [۲۴]

پیک توان و توان پایداری مربوط به تراز پایه نیز با افزایش تعداد ترازهای انرژی، کاهش می‌یابد. در نبود ترازهای انرژی بالاتر، تراز پایه اغلب حامل‌های تزریقی به محیط فعال لیزر را جمع می‌کند و بنابراین، تعداد فوتون لیزری بیشتری تولید می‌کند. بنابراین، توان تولیدی ناشی از آن بیشتر خواهد شد.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

نتیجه‌گیری

در این مقاله، مدل‌سازی و شبیه‌سازی لیزر نقطه کوانتومی InAs/GaAs براساس مجموعه معادلات آهنگ برای حامل‌ها و فوتون‌ها در پنج تراز انرژی انجام شد. با تجزیه و تحلیل دینامیک حامل‌ها و فوتون‌ها در لیزر نقطه کوانتومی و حل عددی مجموعه معادلات آهنگ برای حامل‌ها و فوتون‌ها، با استفاده از روش حل عددی رونگ- کوتای مرتبه‌ی

چهارم رفتار لیزر در پایخ به پارامترهای مختلف بررسی شد. کاربردهای متنوع لیزر نقطه کوانتومی در صنایع هوایی و نظامی بیان شد و نیاز مبرم به مدل‌سازی این دستگاه پیش از ساخت برای کاهش هزینه‌ها، زمان و ساخت بهینه دستگاه ذکر شد. همچنین، با توجه به قرارگیری طول موج لیزر نقطه کوانتومی مورد بررسی در این مقاله در دومین پنجره مخابراتی، کاربردهای گسترده این لیزر در مخابرات نوری، ارتباطات و فوتونیک مطرح شد. نشان داده شد که با افزایش جریان تزریقی به محیط فعال لیزر، زمان روشن شدن و زمان پایداری سیستم کاهش می‌یابد و قله توان و توان پایدار افزایش پیدا می‌کند. همچنین دیده شد که گسیل فوتون در هر تراز وقتی شروع می‌شود که تراز پایین‌تر آن به اشباع رسیده باشد. منحنی مشخصه P-I برای ترازهای پایه، برانگیخته‌ی اول و برانگیخته‌ی دوم به همراه توان خروجی لیزر ارائه شد. با مقایسه منحنی مشخصه‌ی P-I برای دو ساختار محیط فعال لیزر، مزایا و معایب وجود لایه سد در فرآیند ساخت لیزر نقطه کوانتومی مورد بحث و بررسی قرار گرفت.

پیشنهادها

۱. به منظور بررسی ویژگی‌های دیگر لیزر نقطه کوانتومی مانند مدولاسیون، طیف بهره و غیره، می‌توان مدل‌سازی را با در نظر گرفتن پهن‌شدگی همگن و غیرهمگن انجام داد.
۲. با بکارگیری موجبرهای غیر مسطح مانند کاواک مایکروپیلار، می‌توان مد کاری لیزر نقطه کوانتومی را بهینه‌تر کرد.

فهرست منابع

- [1] Asada, M., Miyamoto, Y. and Suematsu, Y., 1986. Gain and the threshold of three-dimensional quantum-box lasers. *IEEE Journal of quantum electronics*, 22(9), pp.1915-1921.
- [2] Ledentsov, N.N., Ustinov, V.M., Egorov, A.Y., Zhukov, A.E., Maksimov, M.V., Tabatadze, I.G. and Kop'ev, P.S., 1994. Optical properties of heterostructures with InGaAs-GaAs quantum clusters. *Semiconductors*, 28(8), pp.832-834.
- [3] Whittle, R.W.H., 1984. Semiconductor lasers in a military role. *Electronics and Power*, 30(9), pp.685-691.
- [4] Sugawara, M., Hatori, N., Ebe, H., Ishida, M., Arakawa, Y., Akiyama, T., Otsubo, K. and Nakata, Y., 2005. Modeling room-temperature lasing spectra of 1.3- μm self-assembled InAs/GaAs quantum-dot lasers: Homogeneous broadening of optical gain under current injection. *Journal of Applied Physics*, 97(4).
- [5] Arakawa, Y. and Holmes, M.J., 2020. Progress in quantum-dot single photon sources for quantum information technologies: A broad spectrum overview. *Applied Physics Reviews*, 7(2).
- [6] Bhattacharya, P., Ghosh, S. and Stiff-Roberts, A.D., 2004. Quantum dot opto-electronic devices. *Annu. Rev. Mater. Res.*, 34, pp.1-40.
- [7] Norman, J.C., Mirin, R.P. and Bowers, J.E., 2021. Quantum dot lasers—History and future prospects. *Journal of Vacuum Science & Technology A*, 39(2).
- [8] Shang, C., Wan, Y., Selvidge, J., Hughes, E., Herrick, R., Mukherjee, K., Duan, J., Grillot, F., Chow, W.W. and Bowers, J.E., 2021. Perspectives on advances in quantum dot lasers and integration with Si photonic integrated circuits. *ACS photonics*, 8(9), pp.2555-2566.
- [9] <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/quantum-dots-qd-market-694.html>
- [10] Stiff-Roberts, A.D., 2009. Quantum-dot infrared photodetectors: a review. *Journal of Nanophotonics*, 3(1), p.031607.
- [11] Tiwari, A., 2012. Military nanotechnology. *International Journal of Engineering Science and Advanced Technology*, 2(4), pp.825-830.
- [12] Henini, M., 2002. Quantum dot nanostructures. *Materials today*, 5(6), pp.48-53.
- [13] <https://medium.com/@aheadintel/quantum-dots-in-defense-application-cf713da9744d>
- [14] Lv, S.F., Montrosset, I., Gioannini, M., Song, S.Z. and Ma, J.W., 2011. Modeling and simulation of InAs/GaAs quantum dot lasers. *Optoelectronics Letters*, 7, pp.122-125.
- [15] Zhang, Z.Y., Jiang, Q. and Hogg, R.A., 2010. Simultaneous three-state lasing in quantum dot laser at room temperature. *Electronics letters*, 46(16), p.1.
- [16] Jung, H., Ahn, N. and Klimov, V.I., 2021. Prospects and challenges of colloidal quantum dot laser diodes. *Nature Photonics*, 15(9), pp.643-655.
- [17] Liu, Z., Hantschmann, C., Tang, M., Lu, Y., Park, J.S., Liao, M., Pan, S., Sanchez, A., Beanland, R., Martin, M. and Baron, T., 2019. Origin of defect tolerance in InAs/GaAs quantum dot lasers grown on silicon. *Journal of Lightwave Technology*, 38(2), pp.240-248.
- [18] Hantschmann, C., Vasil'Ev, P.P., Wonfor, A., Chen, S., Liao, M., Seeds, A.J., Liu, H., Penty, R.V. and White, I.H., 2018. Understanding the bandwidth limitations in monolithic 1.3 μm InAs/GaAs quantum dot lasers on silicon. *Journal of Lightwave Technology*, 37(3), pp.949-955.
- [19] Dogru, N., HS Duranoglu Tunc, and A. M. Al-Dabbagh. "Gain-switched short pulse generation from InAs-InP (1 1 3) B quantum dot laser excited state." *Optics & Laser Technology* 148 (2022): 107709.
- [20] George, A.P., 2009. How to simulate a semiconductor quantum dot laser: general description. *Revista Brasileira de Ensino de Fisica*, 31(2), pp.2302-8.

- [21] Izadyar, S.M., Razaghi, M. and Hassanzadeh, A., 2017. Quantum dot semiconductor optical amplifier: role of second excited state on ultrahigh bit-rate signal processing. *Applied Optics*, 56(12), pp.3599-3607.
- [22] Razaghi, M., Izadyar, S.M. and Madanifar, K.A., 2017, July. Investigation of amplified spontaneous emission in quantum dot semiconductor optical amplifier in presence of second excited state. In *2017 International Conference on Numerical Simulation of Optoelectronic Devices (NUSOD)* (pp. 37-38). IEEE.
- [23] Lv, Shao-feng, Ivo Montrosset, Mariangela Gioannini, Shu-zhong Song, and Jian-wei Ma. "Modeling and simulation of InAs/GaAs quantum dot lasers." *Optoelectronics Letters* 7 (2011): 122-125.
- [24] Yavari, Mohammad Hasan, and Vahid Ahmadi. "Circuit-level implementation of semiconductor self-assembled quantum dot laser." *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* 15, no. 3 (2009): 774-779.

Dynamics of quantum dot semiconductor laser with application in aviation and telecommunication industries

Abstract: In this paper, simulation of InAs/GaAs quantum dot laser is performed based on the set of rate equations for carriers and photons in five energy states. Carriers and photons dynamics are analyzed in a quantum dot laser and the set of rate equations for carriers and photons are solved using the 4th order Runge-Kutta numerical solution method. Considering the wide applications of semiconductor lasers and especially, quantum dot lasers in the aviation industry, simulation and modeling of this laser before the construction and production is essential to reduce cost and time. The wavelength of the quantum dot laser investigated in this paper is in the second telecommunication window, so it leads to wide applications of this laser in optical telecommunications, communications, and photonics. Due to the construction method, QDs are large and two excited states are considered in the simulation. These states are involved in the lasing. Carrier and photon dynamics, the P-I curve, and the effect of injection current on the performance of the laser are extracted numerically. It is shown that by increasing the injected current to the laser active layer, the turn-on time and stability time of the system decrease and the peak power and stable power increase. Also, photon emission in each level starts when the lower level reaches its saturation situation. P-I characteristic curve for ground, first excited, and second excited states along with laser output power are presented. By comparing the P-I characteristic curve for two laser active layer structures, the advantages and disadvantages of the existence of the barrier layer in the manufacturing process of the quantum dot laser are discussed. A comparison between various simulations of the QD laser is done too.

Keywords: Aviation industries application, Carrier dynamics, Quantum dot laser, Rate equation model, Simulation.