



بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و ششمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۸ تا ۱۰ بهمن ماه ۱۳۹۲ - دانشگاه صنعتی شیراز



بررسی تغییرات نمایه‌ی عرضی پرتوی لیزر نقطه‌ی کوانتومی InAs با تغییر ابعاد موجبر

مرتضی زرگر شوشتری و شهرزاد پارسا

گروه فیزیک، دانشگاه شهید چمران اهواز

چکیده - امروزه لیزرهای نقطه‌ی کوانتومی به دلیل کوچک بودن سامانه‌ی لیزری، بالا بودن بهره‌ی لیزری، جریان آستانه‌ی اندک و پایداری حرارتی بالا بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. خروجی این لیزرها، پرتوهایی آستیگمات هستند که در بسیاری موارد استفاده از آنها را محدود می‌کند. اگرچه می‌توان با کمک عدسی‌های استوانه‌ای این مشکل را برطرف کرد، ولی استفاده از عناصر نوری در برابر پرتوی خروجی، باعث اتلاف شدت پرتو می‌شود. در این پژوهش، ضمن بررسی لیزر نقطه‌ی کوانتومی ایندیوم-آرسناید، تلاش شده است با استفاده از نرم‌افزارهای متلب و زیمکس و نیز با کمک نظریه‌ی موجبرها، سامانه‌ی مناسبی برای داشتن پرتوهایی متقارن تر طراحی شود. برای این سامانه، موجبری با ابعاد $2 \times 1.5 \mu\text{m}^2$ ، خروجی نسبتاً متقارنی تولید خواهد کرد.

کلید واژه - پرتوی آستیگمات، لیزر نقطه‌ی کوانتومی ایندیوم-آرسناید، نرم‌افزار زیمکس، نرم‌افزار متلب

Investigation of Changes in InAs Quantum Dot Laser Transverse Profile by Varying the Dimensions of Waveguide

Morteza Zargar Shoushtari and Shahrzad Parsa

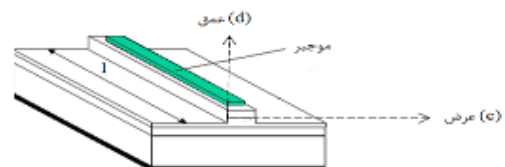
Department of Physics, Shahid Chamran University of Ahwaz

Abstract- These days, quantum dot lasers become more interesting because of their small laser set, high laser efficiency, low threshold current and high thermal stability. The extracted beam profile of these lasers is astigmatic and so some of their applications may be limited. Although, by utilizing cylindrical lenses this problem would be solved, but the intensity may be lost. In this study, while investigating InAs quantum dot laser, it is tried to design appropriate waveguides to extract more symmetrical beams by using Matlab and ZeMax software and also by utilizing waveguide theory. For this system, a waveguide with dimensions of $1.5 \times 2 \mu\text{m}^2$ can produce, more or less, a symmetrical beam.

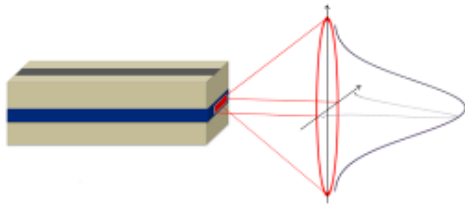
Keywords: Astigmatic beam, InAs Quantum dot laser, Matlab, ZeMax

۱- مقدمه

نخستین نمونه‌ی لیزر نیم‌رسانا در سال ۱۹۶۲ ساخته شد [۱]. در این دسته لیزرها، مواد نیم‌رسانا عمدتاً با گاف نواری مستقیم، به عنوان محیط فعال مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱]. نخستین نمونه‌های ساخته شده به اصطلاح هم‌پیوند^۱ خوانده می‌شدند که با توجه محدودیت‌های آن‌ها، لیزرها با ساختار نامتجانس^۲ معرفی شدند [۱ و ۲] که در آن‌ها محیط فعال در میان مواد دیگری با گاف نواری بزرگ‌تر قرار می‌گرفت. به دنبال افزودن کارایی لیزرهای نیم‌رسانا، لیزرهای نقطه‌ی کوانتومی^۳ معرفی شدند. در این دسته لیزرها، کاهش ابعاد محیط فعال و ظهور اثرات محصورسازی کوانتومی^۴، قابلیت‌های جدیدی برای این لیزرها نسبت به نمونه‌های کپه‌ای آن‌ها ارائه می‌کنند [۱]. چگالی جریان آستانه‌ی پائین، پایداری حرارتی بالا، کوک‌پذیری^۵ طول موج خروجی (توسط تغییر ابعاد و شکل نقاط) و حمل آسان سیستم لیزر از جمله ویژگی‌های این دسته لیزرهاست. در لیزرهای نقطه‌ی کوانتومی به جهت انتخاب مدهای عرضی و طولی دلخواه، عموماً از موجبرها استفاده می‌کنند [۳] (شکل (۱)). انتخاب نوع ماده‌ی سازنده‌ی موجبر و نیز ابعاد آن، عرض c و عمق d، نقش مهمی در ویژگی‌های پرتوی خروجی خواهند داشت.



شکل ۱: صورت کلی یک لیزر نیم‌رسانا همراه با موجبر از ویژگی‌های پرتوی خروجی از لیزرهای نیم‌رسانا، نمونه‌های کپه‌ای و یا نقاط کوانتومی، واگرایی زیاد پرتو و متفاوت بودن میزان واگرایی آن در راستاهای عمود بر جهت انتشار و موازی با جهت انتشار است [۱] به گونه‌ای که منجر به انتشار پرتو با مقطع بیضوی می‌شود، شکل (۲).



شکل ۲: خروجی یک لیزر نیم‌رسانا پرتویی با مقطع بیضوی است. این ویژگی در برخی موارد استفاده از این دسته لیزرها را محدود می‌کند. عمدتاً تلاش می‌شود این عدم تقارن در نمایه‌ی عرضی پرتو کمینه شود [۱]. استفاده از عدسی‌های استوانه‌ای مناسب از جمله‌ی این روش‌ها هستند. اما، استفاده از هر عنصر نوری خارجی در برابر پرتوی منتشر شده، موجب اتلاف بخشی از شدت پرتو می‌شود.

در این پژوهش، با انتخاب نقاط کوانتومی ایندیم-آرسناید به عنوان محیط فعال لیزر، شبیه‌سازی محیط فعال توسط نرم‌افزارهای متلب و زی‌مکس، که نرم‌افزاری قدرتمند در زمینه‌ی طراحی و شبیه‌سازی سامانه‌های نوری است، و با استفاده از تئوری موجبرها و حل انتگرال‌های پراشی فرنل-کیرشف، تلاش کرده‌ایم ابعاد موجبر سوار شده بر روی محیط فعال را به گونه‌ای تغییر دهیم که خروجی لیزر به حالت متقارن نزدیک‌تر شود.

۲- محیط فعال لیزر نقطه‌ی کوانتومی ایندیم-آرسناید

با توجه به کاربرد نورفروسرخ نزدیک^۶ در علوم مخابرات، نقاط کوانتومی ایندیم-آرسناید را به عنوان محیط فعال لیزر انتخاب کردیم. با استفاده از نقاط کوانتومی کروی-شکل با قطر ۲ نانومتر، طول موج گسیل شده حدود ۱ میکرومتر خواهد بود که برای استفاده در مخابرات سودمند خواهد بود [۴]. برای محصورسازی کارا تر نقاط کوانتومی به لحاظ الکتریکی و نوری، آن‌ها را بر روی چاه‌های کوانتومی قرار می‌دهند و به طرح حاصل نقطه در چاه^۷ می‌گویند [۱ و ۵]. از طرفی به جهت افزایش کارایی سیستم لیزر و نیز افزایش شدت پرتوی خروجی، محیط فعال را شامل چندین لایه‌ی نقطه در چاه می‌سازند. انتخاب بهینه‌ی تعداد لایه‌ها، تاثیر مهمی در خروجی لیزر دارد. در این پژوهش تعداد لایه‌ها را، به منظور انجام سریع‌تر محاسبات، ۷ عدد در نظر گرفتیم در شکل (۳)

^۶ Near-infrared
^۷ Dot-in-a-well

^۱ Homojunction
^۲ Heterostructure
^۳ Quantum dot lasers
^۴ Quantum confinement effects
^۵ Tunability

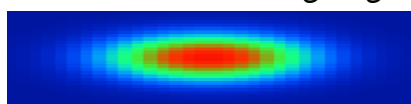
DFB^۳ مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۵ و ۱۶]. از دیگر روش‌ها، استفاده از موجبرهاست که نه تنها موجب استخراج مد طولی دلخواه می‌شود بلکه در تعیین مد عرضی نیز تاثیر بسزائی دارد [۱۵ و ۱۶]. به منظور استخراج تک مد عرضی، همانند آنچه در سایر لیزرها انجام می‌شود، تلاش می‌شود میزان اتلاف را برای سایر مدها افزایش داد. این کار در مورد سایر لیزرها با استفاده از روزنه‌هایی درون مشدد انجام می‌شود. در مورد لیزرهای نقطه‌ای کوانتومی، از موجبرها استفاده می‌کنند. با تغییر عمق و عرض موجبر نشانده شده، می‌توان مد(های) مورد نظر را استخراج کرد. در ادامه به بررسی این روش می‌پردازیم.

نخست محیط فعال لیزر مورد نظر را توسط نرم‌افزار زیمکس، به صورتی آرایه‌ای از دیودها، شبیه‌سازی کردیم. در این شبیه‌سازی محیط فعال را شامل ۷ لایه، ضخامت و طول هر لایه‌ی گسیلنده را به ترتیب ۱ میکرومتر و ۵۲ میکرومتر و جدائی میان لایه‌ها را ۰/۵ میکرومتر در نظر گرفتیم. در این حالت خروجی لیزر، پرتویی با ویژگی‌های زیر خواهد بود:

$$w_T = 5 \mu m \quad w_L = 26 \mu m$$

$$\Theta_T = 1 \text{ rad} \quad \Theta_L = 0.08 \text{ rad}$$

w_T و w_L و Θ_T و Θ_L ، به ترتیب قطرهای و زوایای واگرایی پرتوی خروجی در راستای انتشار و عمود بر آن هستند. در شکل (۴) پرتوی خروجی شبیه‌سازی شده توسط نرم-افزار زیمکس، نشان داده شده است.

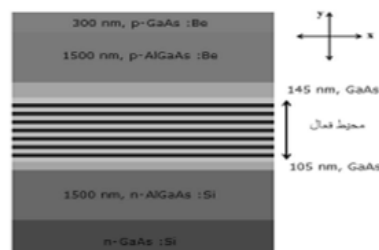


شکل ۴: نمایی عرضی پرتوی خروجی لیزر نقطه‌ای کوانتومی مورد بررسی. حضور یک پرتو با مقطع بیضی آشکار است.

بررسی را با قراردادن موجبری از جنس AlGaAs بر روی محیط فعال دنبال می‌کنیم. با توجه به ابعاد محیط فعال و همچنین فرکانس دلخواه در این آزمایش، عمق‌ها و عرض‌های مختلفی را انتخاب کردیم. دامنه‌ی میدان الکتریکی در محیطی با ضریب شکست $n(x, y, z)$ توسط معادله‌ی هلمهولتز به صورت زیر محاسبه می‌شود [۱]:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \epsilon(x, y, z) + k_0^2 n^2(x, y, z) \epsilon(x, y, z) = 0 \quad (2)$$

صورت کلی لیزر مورد پژوهش نشان داده شده است. نوع لایه‌های انتخاب شده با توجه به محصورسازی بهتر نوری و الکتریکی و همچنین توافق بهتر ساختارهای بلوری مواد صورت گرفته است. میزان ضخامت آن‌ها نیز با توجه به شرایط و محدودیت‌های آزمایش و نیز تلاش برای بهینه کردن محصورسازی‌های نوری و الکتریکی انجام می‌شود. در این پژوهش هدف ما بررسی اثر تغییر عمق و عرض موجبر سوار شده بر روی محیط فعال، بر روی نمایه‌ی عرضی پرتوی خروجی است، لذا این موارد را به صورت پیش‌فرض در نظر گرفتیم.



شکل ۳: صورت کلی لیزر نقطه‌ای کوانتومی بررسی شده در این پژوهش [۵]. محیط فعال شامل ۷ لایه نقاط کوانتومی ایندیوم-آرسناید نشانده شده در چاه کوانتومی ایندیوم-گالیوم-آرسناید است.

رابطه‌ی فرکانس تشدیدشده در محیط فعال لیزر، به صورت زیر نوشته می‌شود [۱]:

$$f = \frac{qc}{2nl} \quad (1)$$

که در آن n ، ضریب شکست محیط فعال، c ، سرعت نور در خلأ، q ، عددی صحیح و مثبت و l ، طول مشدد است. در مورد لیزرهای نقطه‌ای کوانتومی، از آنجا که به صورت مونولیتیک^۱ ساخته می‌شوند، این طول عملاً به عنوان طول محیط فعال در نظر گرفته می‌شود. با در نظر گرفتن نخستین مد لیزرکننده و ضریب شکست ۳/۵۱ برای ایندیوم-آرسناید، طول محیط فعال برای استخراج طول موج ۱ میکرون، در حدود ۰/۱۴ میکرون محاسبه می‌شود که طولی بسیار کوچک خواهد بود. به منظور مدیریت بهتر سیستم لیزری، عموماً این طول را بزرگتر در نظر می‌گیرند و با کمک ابزارهای دیگری تلاش می‌کنند به تک مد طولی دست پیدا کنند. از جمله‌ی این ابزارها، استفاده از توری‌های پراش است که به صورت DBR^۲ و یا

^۱ Monolithic

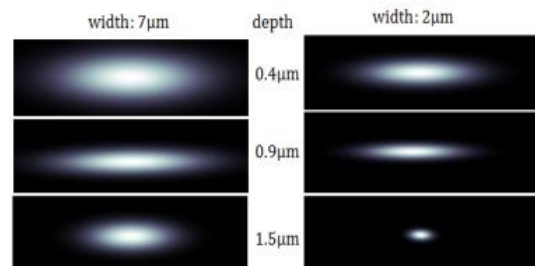
^۲ Distributed Bragg Reflector

^۳ Distributed Feedback Laser

که در آن k_0 بردار موج منتشر شده در خلأ است. در مورد لیزر مورد بررسی، ضریب شکست تنها در راستای y وابستگی نشان می‌دهد (شکل ۳). با استفاده از انتگرال پراشی فرنل-کیرشلف، توزیع شدت میدان دور پرتوی خروجی لیزر در راستاهای x و y در مکان R به صورت زیر محاسبه می‌شود [۱۲]:

$$|E_x|^2 = \frac{\cos^2(\Theta_x)}{\lambda_0^2 R^2} \times \left| \int_{-\infty}^{\infty} E_{0x}(x, y) \exp(ik_0 x \sin(\Theta_x)) dx \right|^2 \quad (3)$$

که در آن $E_{0x}(x, y)$ و $E_{0y}(x, y)$ میدان‌های الکتریکی بر روی صفحه‌ی خروجی لیزر به ترتیب در راستاهای x و y هستند و λ_0 طول موج پرتوی منتشر شده در خلأ است. بسته به ابعاد موجبر، زاویه‌های واگرایی پرتوی خروجی متفاوت و در نتیجه نمایه‌ی عرضی پرتو نیز متفاوت خواهد بود. با در نظر گرفتن ابعاد عرضی موجبر به صورت ۲ میکرون و ۷ میکرون و نیز با در نظر گرفتن عمق-های ۰/۴ میکرون، ۰/۹ میکرون و ۱/۵ میکرون، و با توجه به این نکته که در میدان دور برای زوایای واگرایی در راستای x و y ، به ترتیب می‌توان نوشت: $\Theta_x \approx \frac{\lambda_0}{c}$ و $\Theta_y \approx \frac{\lambda_0}{d}$ [۱]، نمایه‌ی خروجی پرتو با استفاده از نرم-افزار متلب به صورت شکل (۵) شبیه‌سازی می‌شود.



شکل ۵: نمایه‌ی عرضی پرتوی خروجی لیزر شامل موجبرهایی با عمق‌ها و عرض‌های مختلف.

۳- نتیجه‌گیری

در این پژوهش با بررسی ابعاد موجبر قرارداد شده بر روی محیط فعال لیزر نقطه‌ی کوانتومی ایندیوم-آرسناید و هم-چنین با محاسبه و حل انتگرال پراشی فرنل-کیرشلف

برای این لیزر، نمایه‌های عرضی پرتوی خروجی را در حالات مختلف، با موجبرهایی با عمق‌ها و طول‌های مختلف، بدست آوردیم. همان‌گونه که پیش‌تر نیز اشاره شد، خروجی این دسته لیزرها مقطعی بیضوی دارد و برای از بین بردن این ابیراهی باید تلاش شود به گونه‌ای میزان واگرایی پرتو در راستاهای موازی و عمود بر راستای انتشار با یکدیگر برابر شود. همان‌گونه که از شکل (۵) پیداست، هراندازه ابعاد عمق و عرض موجبر انتخابی به یکدیگر نزدیک‌تر باشند، پرتو به حالت متقارن نزدیک‌تر خواهد شد. در این بررسی با عرض ۷ میکرون، در عمق ۱/۵ میکرون پرتو متقارن‌تر خواهد بود. در این حالت زاویه‌ی واگرایی پرتو در راستای x به مقدار ۰/۱۴ رادیان و در راستای y ، ۰/۷ رادیان خواهد بود. با انتخاب عرض ۲ میکرومتر، موجبر با عمق ۱/۵ میکرون پرتوی متقارن‌تری را تولید می‌کند. در این حالت میزان زاویه‌های واگرایی پرتوی خروجی در راستای x و y به ترتیب به میزان ۰/۵ رادیان و ۰/۷ رادیان محاسبه می‌شود. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، هرچند در حالت دوم قطر پرتوی خروجی کوچک‌تر خواهد بود ولی با توجه به نزدیک‌تر بودن میزان زاویه‌های واگرایی آن در راستاهای x و y به یکدیگر، پرتوی خروجی متقارن‌تر خواهد بود. نتایج بدست آمده در این پژوهش با روش دنبال‌شده، با نمونه‌ی شبیه‌سازی شده توسط نرم‌افزار اپتیویو [۵]، هم‌خوانی خوبی دارد.

سپاسگزاری

بدین‌وسیله از دانشگاه شهیدچمران اهواز برای حمایت‌های انجام‌گرفته، تشکر و قدردانی می‌شود.

مراجع

- [1] Diehl, Ronald, *Higher Power Diode Lasers*, Springer, 2000.
- [2] Ledenstov, N.N, et all, *Quantum Dot Heterostructure Laser*, **IEEE Journal of Quantum Electronics**, 6, 3, 2000
- [3] Banerjee, Animesh, et.all, Ridge waveguide InGaN/GaN quantum dot edge emitting visible lasers, **Physica Status Solidi (c)**, 10, 5, 2013.
- [4] Pal, D, et.all, Quantum Dot Size Variation and Its Impact on Emission and Absorption Characteristic: An Experimental and Theoretical Modeling Investigation, **Japanese Journal of Applied Physics**, 41, 2A, 2002.
- [5] Nabanja, Sheila, *Design and Fabrication of Quantum Dot Lasers*, Master's Thesis, **Massachusetts Institute of Technology**, 2008.