بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و ششمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۸ تا ۱۰ بهمن ماه۱۳۹۲ - 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 به‌دلیل کوچک بودن سامانه‌ی لیزری، بالا بودن بهره‌ی لیزری، جریان آستانه‌ی اندک و پایداری حرارتی بالا بسیار مورد توجه قرارگرفته‌اند. خروجی این لیزرها، پرتوهائی 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-آرسنایید، تلاش شده است با استفاده از نرم‌افزارهای متلب و زیمکس و نیز با کمک نظریه‌ی موجبرها، سامانه‌ی مناسبی برای داشتن پرتوهائی متقارن‌تر طراحی شود. برای این سامانه، موجبری با ابعاد ۲ × ۱/۵ μm^2 ، خروجی نسبتاً متقارنی تولید خواهد کرد.

کلید واژه- پرتوی آستیگمات، لیزر نقطه‌ی کوانتومی ایندیوم- آرسنایید، 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

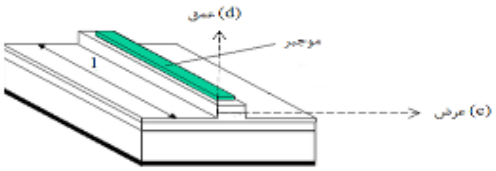
Abstract- These days, quantum dot lasers become more interesting because of their small laser set, high laser efficiency, low threshold current and high thermal stability. The extracted beam profile of these lasers is astigmatic and so some of their applications may be limited. Although, by utilizing 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*2 μm^2 can produce, more or less, a symmetrical beam.

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05]

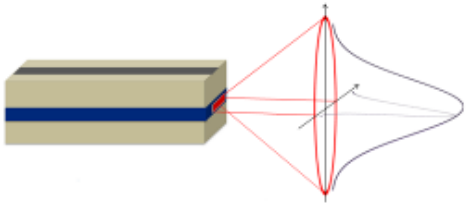
۱- مقدمه

نخستین نمونه‌ی لیزر نیم‌رسانا در سال ۱۹۶۲ ساخته‌شد[۱]. در این دسته لیزرها، مواد نیم‌رسانا عمدتاً با گاف نواری مستقیم، به عنوان محیط فعال مورد استفاده قرار می‌گیرند[۱]. نخستین نمونه‌های ساخته‌شده به اصطلاح هم‌پیوند[۱] خوانده می‌شدند که با توجه محدودیت‌های آن‌ها، لیزرها با ساختار نامتجانس[۲] معرفی شدند[۲و۱] که در آن‌ها محیط فعال در میان مواد دیگری با گاف نواری بزرگ‌تر قرار می‌گرفت. به دنبال افزودن کارائی 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 نقطه-ی کوانتومی به جهت انتخاب مدهای عرضی و طولی دلخواه، عموما 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، نمونه-های کپه‌ای و یا نقاط کوانتومی، واگرائی زیاد پرتو و متفاوت بودن میزان واگرائی 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 پرتوئی با مقطع بیضوی است. این ویژگی در برخی موارد استفاده از این دسته لیزرها را محدود می‌کند.

عمدتا 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 ایندیوم-آرسنایدبه 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-کیرشهف، تلاش کرده‌ایم ابعاد موجبر سوار شده بر روی محیط فعال را به گونه‌ای تغییر دهیم که خروجی لیزر به حالت متقارن نزدیک‌تر شود.

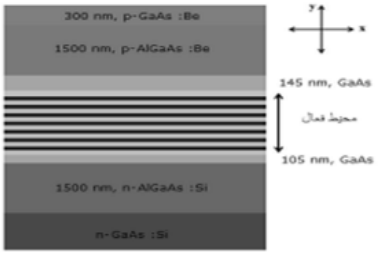
۲- محیط فعال لیزر نقطه‌ی کوانتومی ایندیوم-آرسنایدبا توجه به کاربرد نورفروسرخ نزدیک[۶] در علوم مخابرات، نقاط کوانتومی ایندیوم-آرسنایدرا به عنوان محیط فعال لیزر انتخاب کردیم. با استفاده از نقاط کوانتومی کروی-شکل با قطر ۲ نانومتر، طول موج گسیل شده حدود ۱ میکرومتر خواهد بود که برای استفاده در مخابرات سودمند خواهدبود[۴]. برای محصورسازی کاراتر نقاط کوانتومی به لحاظ الکتریکی و نوری، آن‌ها را بر روی چاه-های کوانتومی قرار می‌دهند و به طرح حاصل نقطه در چاه[۷] می‌گویند[۵و۱]. از طرفی به جهت افزایش کارائی 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 درنظر گرفتیم در شکل (۳)

---

[۱] Homojunction
[۲] Heterostructure
[۳] Quantum dot lasers
[۴] Quantum confinement effects
[۵] Tunability
[۶] Near-infrared
[۷] Dot-in-a-well

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05]

صورت کلی لیزر مورد پژوهش نشان داده‌شده‌است. نوع لایه‌های انتخاب شده با توجه به محصورسازی بهتر نوری و الکتریکی و هم‌چنین توافق بهتر ساختارهای بلوری مواد صورت گرفته‌است. 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 نقطه‌ی کوانتومی بررسی شده در این پژوهش[۵]. محیط فعال شامل ۷ لایه نقاط کوانتومی ایندیوم-آرسانید نشانده شده در چاه کوانتومی ایندیوم-گالیوم-آرسناید است.

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

$$f = \frac{qc}{2nl} \qquad (۱)$$

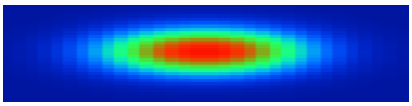
که در آن n، ضریب شکست محیط فعال،c، سرعت نور در خلأ، q، عددی صحیح و مثبت و l، طول مشدد است. در مورد لیزرهای نقطه‌ی کوانتومی، از آنجا که به صورت مونولیتیک[۱] ساخته می‌شوند، این طول عملاً به عنوان طول محیط فعال در نظر گرفته می‌شود. با درنظرگرفتن نخستین مد لیزکننده و ضریب‌شکست ۳٫۵۱ برای ایندیوم-آرسناید، 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، عموما 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] ویا DFB[۳] مورد استفاده قرار می‌گیرد[۵و۲و۱]. از دیگر روش‌ها، استفاده از موجبرهاست که نه تنها موجب استخراج مد طولی دلخواه می‌شود بلکه در تعیین مد عرضی نیز تاثیر بسزائی دارد[۵و۳و۲و۱]. 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 با استفاده از روزنه‌هائی درون مشدد انجام می‌شود. در مورد لیزرهای نقطه‌ی 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 ۰٫۵میکرومتر در نظر گرفتیم. در این حالت خروجی لیزر، پرتوئی با ویژگی‌های زیر خواهد بود:

$$w_T = 5\mu m \qquad w_L = 26\mu m$$
$$\Theta_T = 1rad \qquad \Theta_L = 0.08rad$$

w_L و w_T و Θ_L و Θ_T، به ترتیب قطرها و زوایای واگرائی پرتوی خروجی در راستای انتشار و عمود بر آن هستند.

در شکل (۴) پرتوی خروجی شبیه‌سازی شده توسط نرم-افزار زیمکس، نشان داده‌شده است.



شکل ۴: نمایه‌ی عرضی پرتوی خروجی لیزر نقطه‌ی کوانتومی مورد بررسی. حضور یک پرتو با مقطع بیضوی 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]:

$$(\frac{\partial^2}{\partial x^2}+\frac{\partial^2}{\partial y^2}+\frac{\partial^2}{\partial z^2})\varepsilon(x,y,z)+k_0^2 n^2(x,y,z)\varepsilon(x,y,z)=0 \qquad (۲)$$

[۱] Monolithic

[۲] Distributed Bragg Reflector

[۳] Distributed Feedback Laser

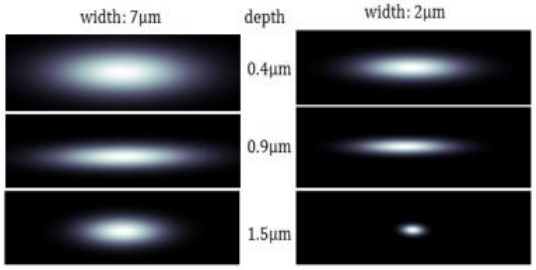
[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05]

که در آن k_0 بردار موج منتشر شده در خلأ است. در مورد لیزر مورد بررسی، ضریب‌شکست تنها در راستای y وابستگی نشان می‌دهد(شکل۳). با استفاده از انتگرال پراشی فرنل-کیرشهف، توزیع شدت میدان دور پرتوی خروجی لیزر در راستاهای x و y در مکان R به صورت زیر محاسبه می‌شود[۲و۱]:

$$|E_x|^2 = \frac{\cos^2(\Theta_x)}{\lambda_0^2 R^2} \times \left| \int_{-\infty}^{\infty} E_{0x}(x,y) \exp(ik_0 x \sin(\Theta_x)) dx \right|^2 \quad (۳)$$

$$|E_y|^2 = \frac{\cos^2(\Theta_y)}{\lambda_0^2 R^2} \times \left| \int_{-\infty}^{\infty} E_{0y}(x,y) \exp(ik_0 y \sin(\Theta_y)) dy \right|^2$$

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 واگرائی 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 درنظرگرفتن عمق-های ۰٫۴ میکرون، ۰٫۹ میکرون و ۱٫۵ میکرون، و با توجه به این نکته که در میدان دور برای زوایای واگرائی 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 موجبرهائی با عمق‌ها و عرض‌های مختلف.

۳- نتیجه‌گیری

در این پژوهش با بررسی ابعاد موجبر قراردادهشده بر روی محیط فعال لیزر نقطه‌ی کوانتومی ایندیوم-آرسناید و هم-چنین با محاسبه و حل انتگرال پراشی فرنل-کیرشهف برای این لیزر، نمایه‌های عرضی پرتوی خروجی را در حالات مختلف، با موجبرهائی 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 واگرائی 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 واگرائی 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 واگرائی 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 زوایه‌های واگرائی آن در راستاهای x و y به یک‌دیگر، پرتوی خروجی متقارن‌تر خواهد بود. نتایج بدست آمده در این پژوهش با روش دنبال‌شده، با نمونه‌ی شبیه‌سازی‌شده توسط نرم‌افزار اپتیویو[۱][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 Charactristic: 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.

۱. Optiwave.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05]