لیزر در پزشکی؛ ۱۳۹۸، دورهٔ ۱۶، شمارهٔ ٤، صفحات: ۲۴-۱۶.

مقاله پژوهشی

بررسی تنظیم‌پذیری لیزر حالت جامد $InP/In_xGa_{1-x}AsP$ برای کاربردهای پزشکی: تأثیر تغییر گاف نواری و اندازهٔ کاواک

علی عبداله زاده ضیابری

۱. استادیار، گروه فیزیک، واحد لاهیجان، دانشگاه آزاد اسلامی، لاهیجان، ایران

خلاصه

مقدمه: به‌دلیل بهبود پیوستهٔ فناوری لیزرهای دیودی، این‌گونه از لیزرها به گونهٔ فزاینده‌ای برای کاربردهای پزشکی در کانون توجه قرار گرفته‌اند. لیزرهای دیودی هم‌زمان تنظیم‌پذیری و توان گسیلشی بالا و اندازهٔ کوچک با قیمت به‌صرفه را ارائه می‌دهند. بنابراین، لیزرهای دیودی به گونهٔ فزاینده‌ای در کاربردهای مهمی همچون لیزر شبکیه‌ای پی‌آرپی، توموگرافی اپتیکی همدوس، تصویربرداری اپتیکی افشانده، تصویربرداری زمان عمر فلورسان و تصویربرداری تتراهرتز ترجیح داده شده‌اند. در این مقاله لیزر دیودی حالت جامد با ناحیهٔ اکتیو $InP/In_xGa_{1-x}AsP$ مورد بررسی قرار می‌گیرد. بازهٔ بینابی که این‌گونه از لیزرها در دسترس هستند به‌طور عمده به گاف نواری مادهٔ موجود در بخش فعال مربوط است. بنابراین در این پژوهش با تغییر درصد عناصر موجود در مادهٔ فعال، گاف نواری بهینه برای رسیدن به بیشینهٔ بهرهٔ لیزری به‌دست می‌آید. همچنین به‌منظور دست‌یابی به بهینه‌ترین مقادیر مشخصه‌های خروجی، تغییرات مشخصه‌های یادشده با ابعاد کاواک لیزری نیز بررسی می‌شوند.

روش بررسی: در این پژوهش یک مدل بهرهٔ اپتیکی وابسته به بسامد برای برآورد بیناب گسیلشی نور به‌کار می‌رود. این کار با کدنویسی در محیط برنامهٔ Silvaco ۲۰۱۴ انجام می‌پذیرد. برای این منظور: ۱- ساختار لیزر با کمک دستورات Atlas تعریف می‌شود، ۲- مدل های قطعه و بایاس اولیه تنظیم می‌گردد، ۳- ماژول LASER در Atlas فعال می‌شود، ۴- مش‌بندی فضا برای حل معادلهٔ موج هلمهولتز انجام می‌پذیرد، ۵- مدل‌های فیزیکی لیزر و پارامترهای وابسته مانند مدل بهرهٔ اپتیکی وابسته به بسامد تعریف می‌شوند و ۶- پارامترهای الکتریکی و اپتیکی لیزر محاسبه می‌شوند.

یافته‌ها: نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها نشان دادند که مشخصه‌های خروجی لیزر دیودی $InP/In_xGa_{1-x}AsP$ به‌شدت به تغییرات نسبت x و ابعاد کاواک لیزری حساس هستند. مشاهده گردید که با افزایش مقدار x و درنتیجه کاهش گاف انرژی، توان لیزری برحسب جریان بایاس افزایش پیدا نمود و بهرهٔ اپتیکی به‌ازای x=۲۵/۰ به بهینهٔ مقدار خود رسید.

همچنین رابطهٔ مستقیمی بین توان خروجی لیزر و ابعاد کاواک دیده شد درصورتی‌که بهرهٔ اپتیکی با افزایش طول کاواک کاهش محسوسی یافت. برآیند نتایج مشخص نمود که برای لیزر دیودی طراحی‌شده بهینهٔ مقادیر x و L به‌ترتیب برابر ۰/۲۵ و ۵۰ میکرون می‌باشند.

نتیجه‌گیری: در این مقاله تلاش گردید تا با بهینه‌سازی دو پارامتر نسبت عناصر In و Ga (x) و نیز ابعاد کاواک لیزری L که به‌عنوان مشدد لیزری عمل می‌کند، مشخصه‌های خروجی شامل توان گسیلیدهٔ لیزری، مشخصهٔ جریان-ولتاژ، بهرهٔ اپتیکی و چگالی فوتونی محاسبه گردند. محاسبه‌های صورت‌گرفته نشان می‌دهد که با انجام تنظیمات مؤثر برروی ساختار و پیکربندی لیزر حالت جامد $InP/In_xGa_{1-x}AsP$ امکان چیرگی بر معایبی مانند توان خروجی پایین‌تر نسبت به لیزرهای گازی، پهنای طیفی گسترده[1] و کار در رژیم چندمد[2] فراهم می‌شود. نتیجه این‌که به‌دلیل مزیت‌هایی ازجمله امکان پمپاژ به‌وسیلهٔ جریان الکتریکی، بازدهی بسیار بالا، ابعاد کوچک، سادگی اتصال به فیبرهای نوری و هزینهٔ بسیار پایین در قیاس با لیزرهای گازی، با انجام مهندسی برروی گاف نواری، زیرلایه و اندازهٔ کاواک از این گونه لیزرها می‌توان به‌طور گسترده در پزشکی، دندانپزشکی و سایر شاخه‌ها مانند جراحی پلاستیک استفاده نمود.

واژه‌های کلیدی: لیزر دیودی، گاف نواری، کاواک لیزری، توان لیزری، بهرهٔ اپتیکی، چگالی فوتونی

نویسندهٔ مسئول: علی عبداله زاده ضیابری، تلفن: ۰۹۱۲۳۳۸۲۵۰۳
پست الکترونیک: ali_abdolahzadeh@liau.ac.ir

1. Wide spectral width
2. Multimode regime

مقدمه

از نخستین نمایش لیزر ازسوی تیودور میمن (Theodore Maiman) در سال ۱۹۶۰ کاربردهای لیزر به‌شکل گسترده‌ای افزایش یافته است[۱]. با بهبود روش‌های تولید و نیز کارآیی، لیزرهای دیودی همچنان جذاب‌تر می‌شوند. به‌دلیل پمپاژ الکتریکی مستقیم، لیزرهای دیودی با فاصله کاراترین چشمه‌های نور در دسترس کنونی هستند[۲و۳]. با استوار بودن بر فن‌آوری تراشه می‌توان آن‌ها را در شمارگان بالا و در قیمت پایین تولید نمود. به‌دلیل جاگیری آن‌ها تنها در چند mm^3 آن‌ها را به‌عنوان دستگاه‌های لیزری با اندازهٔ کوچک مطرح می‌سازد. همهٔ این ویژگی‌ها پتانسیل به‌کارگیری از آن‌ها ازجمله کاربردهای زیست‌پزشکی را افزایش می‌دهد. کاربردهای تصویربرداری و تشخیصی، برای نمونهٔ توموگرافی همدوس اپتیکی، تصویربرداری زمان عمر فلورسان، تصویربرداری نوری افشانده، تصویربرداری THz، تصویربرداری لیزری داپلر یا بیناب‌نگاری رامان برای درمان‌های مستقیمی مانند Photocoagulation، Photo-dynamic therapy، بیومدولاسیون و زیست‌فعال‌سازی (Bioactivation). در مقایسه با لیزرهای محدود به گذارهای اتمی ویژه، لیزرهای دیودی بازهٔ طیفی گسترده‌تری را پوشش می‌دهند. بسته به نیمرساناهای ترکیبی مورد استفاده و درصد عناصر مورد استفاده در آن‌ها، طول‌موج‌های گسیلش برای نمونه در نیمرساناهای ترکیبی III-V از بخش آبی تا نزدیک فروسرخ (۴۰۰ نانومتر تا ۲ میکرومتر) را دربرمی‌گیرد. اگرچه در جریان‌های بالا، مدهای کناری بیناب به اندازهٔ کافی فریز می‌شوند، این امکان وجود دارد که کاربردهای لیزرهای دیودی به‌وسیلهٔ مشخصه‌های طیفی‌شان محدود گردد. در این موارد، پهنای باند گسیلشی را می‌توان برای نمونه با فیدبک ذاتی یا بیرونی باریک نمود. مورد دوم همچنین امکان تنظیم‌پذیری گسیلش تک-مد را برای روی چند ده نانومتر فراهم می‌نماید و افزون بر آن تنظیم‌پذیری را از راه تزریق جریان یا دمای لیزر ممکن می‌کند. علی‌رغم شمار طول‌موج‌هایی که با دیودهای لیزری می‌توان به آن‌ها دست یافت، توان برون‌دهی ممکن است کافی نباشد. افزون بر آن، دیگر طول‌موج‌ها، به‌ویژه در بخش دیدگانی، به‌دلیل نبود ساختارهای لیزری در دسترس ممکن است که دست‌یافتنی نباشند. یک گزینه برای دسترسی به این طول‌موج‌ها یا افزایش توان در بخش ویژه‌ای از بیناب، تبدیل بسامد غیرخطی است. دیگر راه حل‌ها پمپاژ اپتیکی لیزرهای نیم‌رسانا یا لیزرهای حالت جامد است. به‌دلیل برانگیزش اپتیکی، این لیزرها در قیاس با لیزرهای دیودی پمپاژشدهٔ

الکتریکی بازدهی اپتیکی کاهش‌یافته‌ای را نشان می‌دهند.

نیمه‌رسانای ترکیبی III-V آلیاژ سه‌گانه $In_xGa1_{1-x}As$ برای گسترش ابزار فوتونیکی و اپتوالکترونیکی کاربرد بسیاری دارد[۴]. نیمه‌رساناهای بر پایهٔ $In_xGa1_{1-x}As$ را می‌توان برای طراحی قطعات اپتیکی در بازهٔ طیفی ۰/۸۵-۳/۶۰ μm به‌کار برد[۵]. این آلیاژ را می‌توان با روش‌های رونشستی[1] مانند MOCVD و MBE تهیه نمود[۶و۷]. نیاز به دیودهای نورگسیل LEDs کارآ و لیزرهایی که بتوانند در سرتاسر بخش دیدگانی (مرئی) کار کنند و نیز پنجره‌های فیبر نوری در ۱/۳ و ۱/۵۵ میکرومتر پژوهش‌ها را به‌سوی نیمه‌رساناهای گاف مستقیم به‌عنوان مواد فعال پیش برده است. ازآنجاکه طول‌موج گسیلش یک نیمه‌رسانا به انرژی گاف آن بستگی دارد، پژوهش‌ها بر مهندسی مواد نوین که گاف نواریشان دارای انرژی‌های طراحی‌شده براساس نیاز مشتری است، متمرکز شده است. هنر مهندسی گاف نواری[2] به‌طور عمده بر دانش رشد کریستال استوار است. در رشددهی لایهٔ فعال لیزری، یک لایه با خلوص بسیار بالا برروی یک کریستال کپه‌ای به نام بستر یا زیرلایه نشانده می‌شود. سازگاری ساختاری مادهٔ فعال و زیرلایه شمار دررفتگی‌ها را در لایهٔ فعال کاهش می‌دهد اما، محدودیت‌هایی را بر گاف نواری اعمال می‌کند که می‌توان آن را به‌سادگی مهندسی نمود. در آلیاژ سه‌گانه $In_xGa1_{1-x}As$ که به‌ازای x=۵۳٪ با ساختار InP سازگار است، گاف نواری ۰/۷۵ eV (λ=۱/۶۵ μm) می‌باشد. فوتودیودهای $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ رشد داده‌شده برروی InP آشکارسازی ممتازی را در طول‌موج‌های ۱/۳ یا ۱/۵۵ μm نشان می‌دهند اما، برای ساختن یک گسیلنده در این طول‌موج، می‌باید گاف نواری را افزایش دهیم درحالی‌که به‌طور هم زمان شرط سازگاری ساختاری می باید حفظ گردد. این امکان از راه افزودن عنصر چهارمی مانند Al یا P به آلیاژ میسر می شود. در این مقاله با مهندسی گاف نواری به‌ازای مقادیر گوناگون x در ترکیب چهارگانه $In_xGa1_{1-x}AsP$ به‌عنوان مادهٔ فعال لیزر دیودی تلاش می‌گردد که مقدار بهینهٔ توان و بازده برای لیزر به‌منظور کاربردهای پزشکی به‌دست آید. همچنین تأثیر طول کاواک لیزری بر مشخصه‌های خروجی پیکربندی طراحی‌شده مورد بررسی قرار می‌گیرد. کارهای صورت‌گرفته از سوی دیگر پژوهشگران برروی این ساختار بیشتر بر روش‌های رشد کریستال و جزئیات فنی مربوط به آنالیز و مشخصه‌یابی استوار است. برای نمونه نانولیزر InP/InGaAs رشد داده‌شده برروی سیلیکون (۰۰۱) [۸] و لیزرهای InP/InGaAs nano-ridge رشد داده‌شده روی Si در دمای اتاق [۹] به‌دلیل وجود پارامترهای گوناگون اثرگذار بر خروجی لیزر یادشده، انجام شبیه‌سازی پیش از ساخت نمونه افزون بر صرفه‌جویی در وقت و هزینه، امکان طراحی و ساخت قطعه‌ای کارآتر با بازدهی بیشتر را ممکن می‌سازد.

1. Epitaxial methods
2. Bandgap engineering

تئوری و روش بررسی

در این مقاله برای طراحی و شبیه‌سازی لیزر دیودی گسیلندهٔ جانبی[3] فابری-پرو[4] InP/InGaAsP و محاسبهٔ پارامترهای خروجی از نرم‌افزار Silvaco نسخهٔ ۲۰۱۴ استفاده شده است. شبیه‌ساز Laser در ماژول Atlas نرم‌افزار Silvaco شبیه‌سازی الکتریکی و اپتیکی لیزرهای نیمه‌رسانا را انجام می‌دهد. شبیه‌ساز Laser همراه با شبیه‌ساز Blaze کار می‌کند و ۱- امکان حل معادلهٔ هلمهولتز برای محاسبهٔ مدهای اپتیکی، میدان آن‌ها و الگوهای شدت میدان را فراهم می‌کند، ۲- بهرهٔ اپتیکی وابسته به انرژی فوتونی و ترازهای شبه فرمی را محاسبه می‌کند، ۳- بازترکیب حامل‌ها مربوط به گسیل نور را برآورد می‌کند (یعنی همان گسیل برانگیخته)، ۴- معادله‌های نرخ فوتونی را برای محاسبهٔ چگالی فوتونی کیفی حل می‌نماید، ۵- توان برونداد نور لیزر را محاسبه می‌کند و مشخصهٔ جریان – ولتاژ را نمایش می‌دهد. برای شبیه‌سازی لیزر، معادله‌های پایه‌ای نیمه‌رسانا (معادله‌های ۱-۴) به‌طور خودسازگار همراه با یک معادلهٔ اپتیکی که توزیع شدت میدان اپتیکی را تعیین می‌کند، حل می‌شوند. معادلهٔ پواسون پتانسیل الکترواستاتیکی را به چگالی بار فضایی پیوند می‌دهد:

$$div(\varepsilon\nabla\psi) = -\rho \qquad (۱$$

در رابطهٔ بالا ψ پتانسیل الکتریکی، ε گذردهی الکتریکی و ρ چگالی بار هستند. میدان الکتریکی از روی گرادیان پتانسیل الکتریکی به‌دست می‌آید:

$$\vec{E} = -\nabla\psi \qquad (۲$$

معادله‌های پیوستگی برای الکترون‌ها و حفره‌ها به‌ترتیب به‌صورت زیر داده می‌شوند:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} div\vec{J}_n + G_n - R_n \qquad (۳$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{q} div\vec{J}_p + G_p - R_p \qquad (۴$$

n و p به‌ترتیب چگالی الکترون و حفره، J_n و J_p چگالی جریان الکترون و حفره، G_n و G_p نرخ تولید الکترون و حفره و R_n و R_p نرخ بازترکیب الکترون و حفره می‌باشند. شبیه‌ساز Laser از دستگاه مختصات زیر استفاده می‌کند:

- محور X عمود بر کاواک لیزر می‌باشد و در امتداد سطح قرار دارد (از چپ به راست).
- محور Y عمود بر کاواک لیزر می‌باشد و از سطح به جهت پایین امتداد دارد.
- محور Z در امتداد سطح کاواک می‌باشد.

3. Edge-emitting
4. Fabry-Perot

معادلات الکتریکی و اپتیکی در صفحهٔ XY یعنی عمود بر کاواک لیزر حل می‌شوند. روی‌هم‌رفته، مؤلفه‌های میدان الکترومغناطیسی در دستگاهی از معادلات به هم جفت‌شده هستند و با معادلهٔ برداری هلمهولتز داده می‌شوند:

$$\nabla \times \frac{1}{\varepsilon} \nabla \times \vec{H} = \frac{\omega^2}{c^2} \vec{H} \qquad (۵$$

با درنظر گرفتن اینکه موجبر لیزر در راستای Z همگن است، تنسور گذردهی دی‌الکتریک قطری می‌باشد و با فرض نامغناطیسی بودن ماده معادله به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

(۶

$$\frac{\partial^2 H_x}{\partial x^2} + \varepsilon_x \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{1}{\varepsilon_z}\frac{\partial H_x}{\partial y}\right) + \left(1 - \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_z}\right)\frac{\partial^2 H_z}{\partial x \partial y} - \varepsilon_y \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{1}{\varepsilon_z}\right)\frac{\partial H_y}{\partial x} + \frac{\omega^2}{c^2}\varepsilon_y H_x = \beta^2 H_x$$

(۷

$$\varepsilon_x \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{1}{\varepsilon_z}\frac{\partial H_y}{\partial x}\right) + \frac{\partial^2 H_y}{\partial y^2} + \left(1 - \frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_z}\right)\left(\frac{\partial^2 H_x}{\partial x \partial y}\right) - \varepsilon_x \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{1}{\varepsilon_z}\right)\frac{\partial H_x}{\partial y} + \frac{\omega^2}{c^2}\varepsilon_x H_y = \beta^2 H_y$$

مسئلهٔ بالا یک مسئلهٔ ویژهٔ مقداری مختلط غیرهرمیتی به‌ازای توان دوم ثابت انتشار β و ویژهٔ بردار $\xi = (H_x, H_y)$ می‌باشد. این دستگاه معادلات با روش المان محدود جداسازی می‌شود و با درنظرگرفتن ω به‌عنوان پارامتر با یک حل‌کنندهٔ ویژهٔ مقداری تکرارکننده حل می‌گردد. برای راه‌اندازی حل‌کنندهٔ برداری هلمهولتز برای شبیه‌سازی لیزر پارامتر V.HELM را بر روی دستورهای LASER و MODELS تنظیم می‌کنیم. شمار کل مدهای عرضی که می‌باید محاسبه شود با پارامتر NMODES تنظیم می‌شود. پس از حل معادلهٔ ویژهٔ مقداری، همهٔ دیگر مؤلفه‌های میدان اپتیکی به‌دست می‌آیند:

$$H_z = \frac{i}{\beta}\left(\frac{\partial H_x}{\partial x} + \frac{\partial H_y}{\partial y}\right) \qquad (۸$$

$$E_x = \frac{i}{\omega \varepsilon_{xx} \varepsilon_0}\left(\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z}\right) \qquad (۹$$

$$E_y = -\frac{i}{\omega \varepsilon_{yy} \varepsilon_0}\left(\frac{\partial H_z}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial z}\right) \qquad (۱۰$$

$$E_z = \frac{i}{\beta \varepsilon_{zz}}\left(\varepsilon_{xx}\frac{\partial E_x}{\partial x} + \varepsilon_{yy}\frac{\partial E_y}{\partial y}\right) \qquad (۱۱$$

شدت هر مد اپتیکی عرضی در این صورت با استفاده از عبارت زیر محاسبه می‌شود:

$$I_m(x,y) = \left(\left[\vec{E}_m \times \vec{H}_m^*\right] + \left[\vec{E}_m^* \times \vec{H}_m\right]\right).\hat{z} \qquad (۱۲$$

و برروی سطح بهنجاریده می‌گردد:

$$\int I_m(x,y)\, dS = 1 \qquad (۱۳$$

ضریب شکست مؤثر و ضریب جذب مؤثر در این صورت چنین به‌دست می‌آیند:

$$n_{eff,m} = \Re e[\beta_m] \frac{c}{\omega} \qquad (۱۴$$

$$\alpha_{eff,m} = 2\Im m[\beta_m] \qquad (۱۵$$

بازترکیب حامل‌ها مربوط به گسیل نور برانگیخته به‌صورت زیر مدل‌سازی می‌شود:

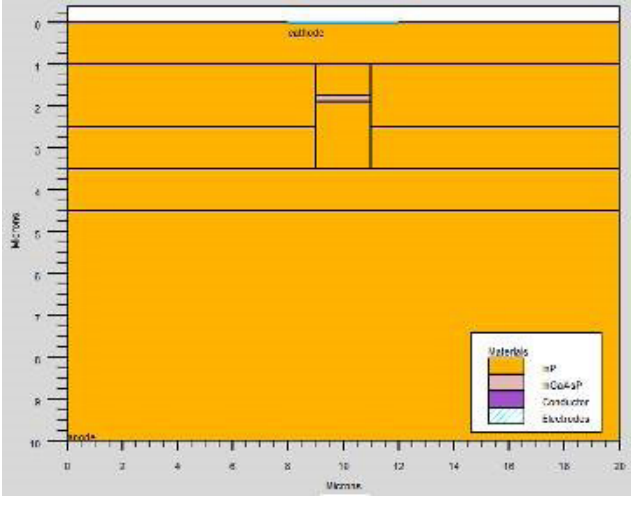
(۱۶

$$R_{ST}(x,y) = \sum_{j=x,y,z} \sum_m \frac{c}{n_{eff,m}} g_j(x,y) \Gamma_m^j(x,y).S_m$$

سیگمای دوم برروی همهٔ مدهای لیزری جمع می‌بندد. $g_j(x,y)$ در رابطهٔ بالا بهرهٔ موضعی برای میدان الکتریکی پلاریزه در راستای j است. $\Gamma_m^j(x,y)$ نیز عبارت‌است‌از:

$$\Gamma_m^j(x,y) = 2\Re e\left[n_j(x,y)\right] \frac{\left|E_m^j(x,y)\right|^2}{\int I_m(x,y).dS} \qquad (۱۷$$

بهرهٔ اپتیکی پارامتری است که مدل‌های الکتریکی و اپتیکی را به‌هم پیوند می‌دهد. بهرهٔ اپتیکی به ترازهای شبه‌فرمی بستگی دارد و به‌نوبهٔ خود بر گذردهی دی‌الکتریکی اثر می‌گذارد و از جفت‌شدگی میان آهنگ بازترکیب



شکل۱:نمایش پیکربندی واجزای گوناگون لیزر دیودی گسیلندهٔ جانبی فابری-پرو InP/InGaAsP.

حامل‌هـــای برانگیخته (RST) و چگالی فوتون‌ها (S) به‌دســـت می‌آید:

$$G_m = \sum_{j=x,y,z} \int\int g_j(x,y,\omega_m).\Gamma_m^j(x,y).dS \qquad (۱۸$$

بر پایهٔ رابطه‌های یادشـــدهٔ بالا، یک برنامهٔ کامپیوتری در محیط Atlas برنامهٔ Silvaco نوشته شد تا با آن بتوان تغییرات توان لیزر، بهرهٔ اپتیکی و چگالی فوتونـــی را با تغییر گاف نواری ناحیهٔ فعال لیزر بررســـی نمود. شـــکل ۱ نمایی از ساختار طراحی‌شده برای لیزر دیودی گسیلندهٔ جانبی فابری-پرو InP/InGaAsP را نمایش می‌دهد.

تغییرات گاف نواری ناحیهٔ فعال $In_xGa_{1-x}AsP$ در K۳۰۰ باتوجه به رابطهٔ زیر درنظر گرفته شد[۱۰]:

$$E_g(x) = ۱/۴۲۵ - ۱/۵۰۱x + ۰/۴۳۶x^۲ \qquad (۱۹$$

یافته‌ها

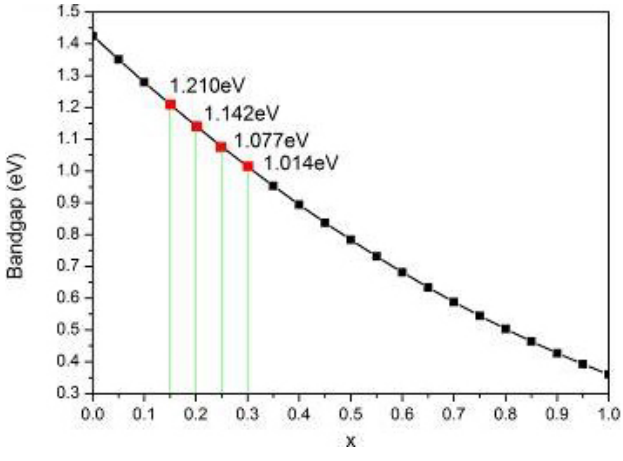
بررسی مشخصه‌های لیزر با تغییر گاف نواری مادهٔ فعال

در این بخش نخســـت تغییرات مشـــخصه‌های خروجی لیزر فابری-پرو InP/ $In_xGa1_{1-x}AsP$ بـــا طـــول ثابـــت کاواک[۵] ۵۰ میکـــرون را بـــه‌ازای مقادیـــر ۳۰و ۲۵، ۲۰، x=۱۵ بررســـی می‌نماییـــم. از روی معادلهٔ ۱۹ تغییرات گاف نواری $In_xGa1_{1-x}AsP$ برحســـب x در شکل ۲ نشـــان داده شده است. همان‌گونه که از شکل دیده می‌شود، با افزایش نســـبت ایندیوم In و کاهش درصد گالیوم Ga اندازهٔ گاف نواری ترکیب $In_xGa_{1-x}AsP$ کاهش می‌یابد.

در شکل ۳ توان کل گسیلیدهٔ لیزری به‌ازای مقادیر گوناگون x برحسب شـــارش جریان آستانه[۶] (جریان آند) نشـــان داده شده است. در دیودهای نورگســـیل LED جریان آســـتانه لحاظ نمی‌شـــود اما، در لیزرها مورد بحث قرار می‌گیرد. پیش از تابش نور به‌وســـیلهٔ لیزر، توان خروجی اندک اســـت. بنابراین تزریق جریان باید به مقدار جریان آســـتانه برسد تا لیزر شـــروع به‌کار کند. پیش از جریان آستانه، لیزر در مد LED کار می‌کند زیرا گســـیل نـــور رخ می‌دهد امـــا هنگامی‌که شـــارش از حد آســـتانه فراتر مـــی‌رود، گســـیل تقویت‌شـــده روی می‌دهد و لیـــزر کار می‌کند. از روی شـــکل ۳ دیـــده می‌شـــود کـــه اگرچـــه مقادیر جریان آســـتانه بـــه‌ازای مقادیر گوناگون x بســـیار کوچک اســـت اما، بیشـــترین جریان آســـتانه بـــه‌ازای x=۰/۱۵ و کمتریـــن مقـــدار آن بـــه‌ازای x=۰/۲۵ رخ می‌دهد. همچنین توان گســـیلیده در ناحیهٔ کار لیزر با افزایش x افزایش می‌یابد. همانند دیگـــر قطعات الکترونیکی و اپتوالکترونیکی، مشـــخصه جریان-ولتاژ یکی از مهم‌ترین شـــاخص‌های لیزرهای دیودی می‌باشـــد. شکل ۴ منحنی مشـــخصهٔ جریان-ولتاژ لیزر را به‌ازای مقادیر گوناگون x

5. Cavity

6. Threshold flow



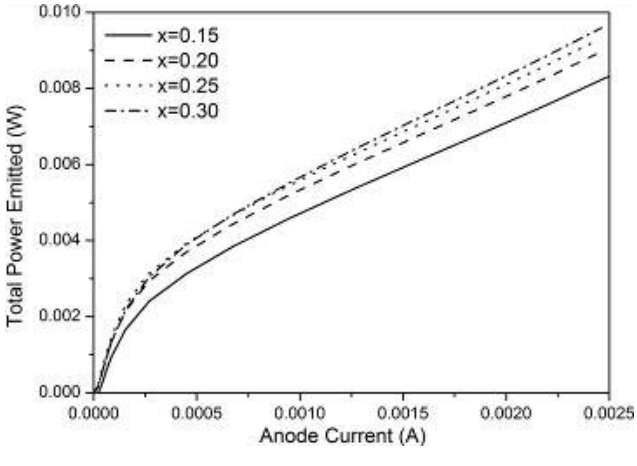
شکل۲: تغییرات گاف نواری $In_xGa_{1-x}AsP$ به‌ازای مقادیر گوناگون x. مقادیر گاف نواری به‌کار برده‌شده در محاسبه‌ها روی نمودار نشان داده شده‌اند

نمایش می‌دهد. مقاومت ســـری لیزر دیودی از روی شـــیب منحنی I-V بالاتر از ولتاژ کار[۷] تعیین می‌شود[۱۱].

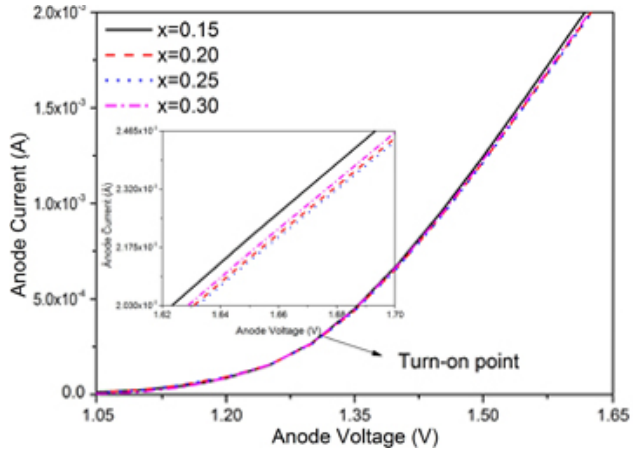
مقادیر بالای مقاومت ســـری می‌تواند یک عامل اصلی در خراب شـــدن دیود لیزری به‌شـــمار آید. ولتاژ کار پارامتر دیگری اســـت که می‌توان آن را از روی منحنی I-V به‌دســـت آورد و دلالت دارد بر طول‌موج عملیاتی لیزر دیودی. از روی شکل ۴ به‌طور کیفی آشکار است که ولتاژ کار به‌ازای x=۰/۱۵ بیشـــترین و بـــه‌ازای x=۰/۲۵ کمترین مقدار را دارا می‌باشـــد. ازسوی‌دیگر شیب نمودار با افزایش x کاهش می‌یابد. وارون شیب نمودار I-V بـــا مقاومت الکتریکی قطعه متناظر اســـت. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که بـــا افزایش درصد ایندیوم (x) مقاومت الکتریکی قطعه افزایش می‌یابد. اگرچه با توجه به اختلاف بســـیار اندک شیب منحنی‌ها بالاتر از نقطهٔ کار تفاوت در مقاومت‌ها ناچیز است.

بهـــرهٔ اپتیکی معیاری اســـت از میزان کمی تقویت نور به‌وســـیلهٔ قطعهٔ

7. Turn-on voltage



شکل۳: توان کل گسیلیدهٔ لیزر برحسب جریان اعمال‌شده به‌ازای مقادیر گوناگون x



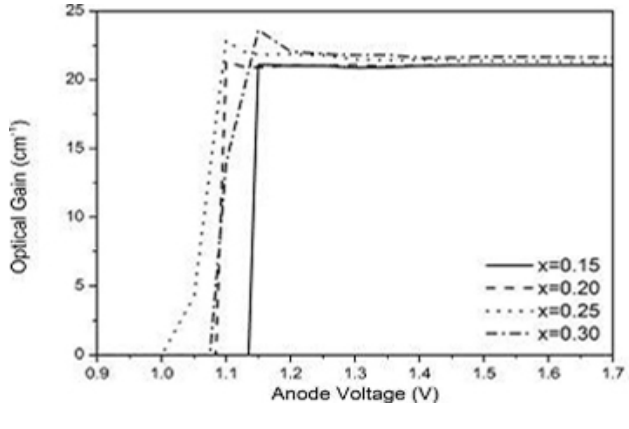
شکل۴: مشخصهٔ جریان-ولتاژ لیزر گسیلندهٔ جانبی فابری-پرو $In_xGa_{1-x}AsP$ به‌ازای مقادیر گوناگون x. داخل شکل نمودار با مقیاس بزرگ‌تر نشان داده شده است.

اپتیکی. بهرهٔ اپتیکی لیزری به چگالی الکترونی در ترازهای گوناگون بستگی دارد که آن هم به نوبهٔ خود به شدت‌های اپتیکی وابسته است. بهرهٔ اپتیکی محاسبه‌شده برحسب ولتاژ بایاس قطعه به‌ازای مقادیر گوناگون x در شکل ۵ نشان داده شده است. از روی شکل دیده می‌شود که کمترین بهرهٔ اپتیکی به x=۰/۱۵ مربوط می‌شود. ازسوی‌دیگر به‌ازای x=۰/۲۵ محل تقاطع نمودار با محور افقی (محور ولتاژ) کمترین مقدار را در مقایسه با دیگر مقادیر x نشان می‌دهد که گویای بهرهٔ اپتیکی مطلوب‌تر در مقایسه با دیگر حالت‌ها می‌باشد.

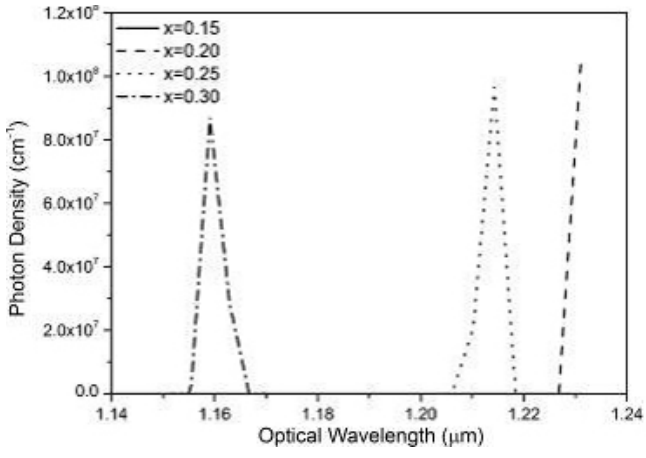
چگالی فوتون‌های تولیدشده برحسب طول‌موج در شکل ۶ نشان داده شده است. دیده می‌شود که با تغییر x طول‌موج کار لیزر کاهش یافته است. همچنین چگالی فوتونی با افزایش درصد In افت می‌کند.

بررسی کارکرد لیزر با تغییر ابعاد کاواک

کاواک (مشدد) های نوری یکی از بلوک‌های اصلی ساختمان لیزرها به‌شمار می‌آیند. یک لیزر به کاواکی نیاز دارد که در آن تابش لیزر به



شکل۵: تغییرات بهرهٔ اپتیکی برحسب ولتاژ بایاس به‌ازای مقادیر گوناگون x

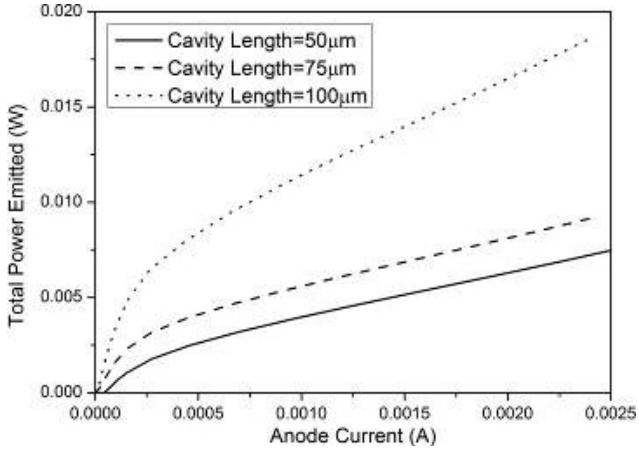


شکل۶: تغییرات چگالی فوتونی برحسب طول موج به‌ازای مقادیر گوناگون x

جریان می‌افتد و از بخش فعال گذر می‌کند تا اتلاف نوری جبران شود. هنگامی‌که محیط بهره[8] یک مادهٔ نیمه‌رسانا است، یک کاواک فابری-پرو را می‌توان به‌وسیلهٔ بازتابش‌های اپتیکی فرنل در میان صفحه‌های جداشدهٔ تراشه ایجاد نمود. درون کاواک موج‌های الکترومغناطیسی الگوهای موج ایستاده را شکل می‌دهند که دارای گره و شکم هستند. افزایش طول کاواک سبب کاهش اتلاف آیینه خواهد شد که این امر کاهش پهنای باریکه را در پی خواهد داشت. در این بخش با درنظر گرفتن x=۰/۲۵ پیامدهای تغییر طول کاواک (L) بر مشخصه‌های خروجی لیزر بررسی می‌شود. شکل ۷ توان کل گسیلیدهٔ لیزری به‌ازای مقادیر گوناگون L برحسب شارش جریان آستانه نشان داده شده است.

همان‌گونه‌که از شکل پیدا است، افزایش طول کاواک از ۵۰ میکرون به ۱۰۰ میکرون سبب افزایش توان گسیلیدهٔ لیزر گردیده است. همچنین می‌توان دید که با افزایش L جریان آستانه کاهش یافته است.

8. Gain medium



شکل۷: توان کل گسیلیدهٔ لیزر برحسب جریان اعمال‌شده به‌ازای مقادیر گوناگون L

شکل ۸ منحنی مشخصهٔ جریان-ولتاژ لیزر را به‌ازای مقادیر گوناگون L نمایش می‌دهد. از روی شکل آشکار است که ولتاژ کار به‌ازای L=۵۰μm بیشترین مقدار را دارا می‌باشد. ازسوی‌دیگر شیب نمودار با افزایش L کاهش یافته است که گویای افزایش مقاومت الکتریکی قطعه است.

بهرهٔ اپتیکی محاسبه‌شده برحسب ولتاژ بایاس قطعه به‌ازای مقادیر گوناگون L در شکل ۹ نشان داده شده است. از روی شکل دیده می‌شود که کمترین بهرهٔ اپتیکی به L=۱۰۰μm مربوط می‌شود. همچنین به‌ازای L=۵۰μm محل تقاطع نمودار با محور ولتاژ کمترین مقدار را در مقایسه با دیگر مقادیر L نشان می‌دهد.

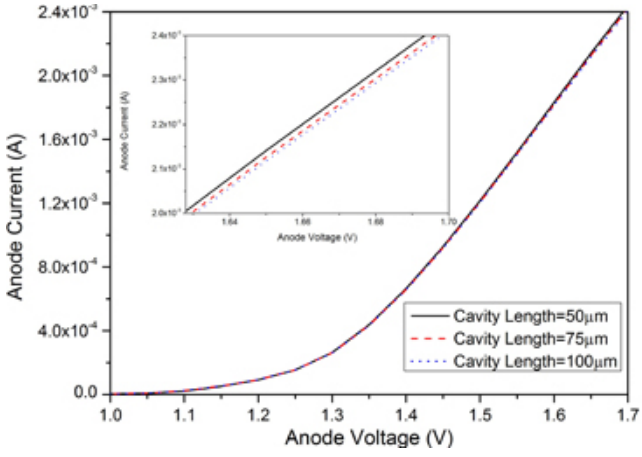
چگالی فوتون‌های تولیدشده برحسب طول‌موج اپتیکی به‌ازای مقادیر گوناگون طول کاواک در شکل ۹ نشان داده شده است. از روی شکل دیده می‌شود که با افزایش L طول‌موج کار لیزر افزایش یافته است. همچنین چگالی فوتونی به‌ازای L=۱۰۰μm بیشترین مقدار را دارد.

بحث و نتیجه‌گیری

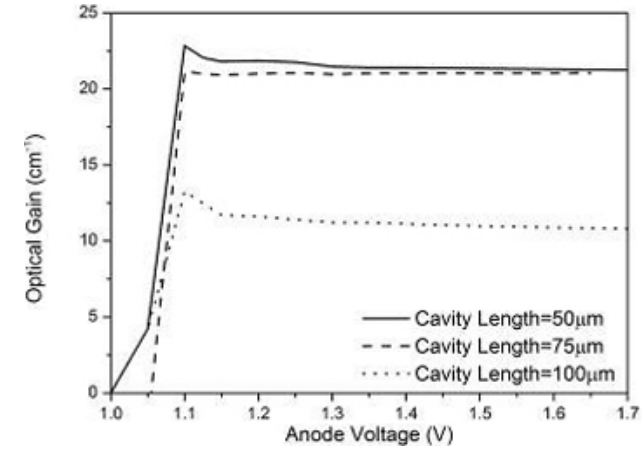
لیزرهای دیودی در سرتاسر طیف کاربردهای پزشکی گوناگونی را پوشش می‌دهند، از لیزرهای دیودی فرابنفش (۲۰۰ نانومتر) و بنفش مورد استفاده در استریلیزاسیون و برخی کارهای جراحی، درمان فوتودینامیک در طول‌موج مرئی (۶۹۰-۶۳۰ نانومتر) تا طول‌موج‌های بالاتر. کاربردهای زیبایی و آرایشی مانند برداشتن موهای زائد، جوان‌سازی پوست و برداشتن رگ‌های واریسی در بازهٔ طول‌موجی ۸۰۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر صورت می‌گیرد. افرون بر آن در این طول‌موج کاربردهایی در دندانپزشکی و درمان‌های جراحی وجود دارد. کاربردهای درمان پوست در ۱۴۷۰ نانومتر و نیز کاربردهای پزشکی بیشتر در ۱۵۵۰ نانومتر و ۱۹۴۰ تا ۲۲۰۰ نانومتر هم این لیست را کامل نمی‌کند و دامنهٔ کاربردهای این‌گونه از لیزرها روز به روز افزایش می‌یابد. در جدول ۱ نمونه‌هایی از کاربردهای پزشکی لیزرهای دیودی خلاصه شده‌اند. به‌طور کلی ناحیهٔ طیفی که لیزرهای حالت جامد پوشش می‌دهند از ۲۰۰nm تا ۳mm را دربرمی‌گیرد. اغلب لیزرهای دیودی در ناحیهٔ فروسرخ[9] نزدیک کار می‌کنند.

برای پوشش دادن بازهٔ طول‌موجی یادشده، نیمه‌رساناهای ترکیبی گوناگونی می‌باید به‌کار گرفته شوند. گزینش طول‌موج لیزری λ را می‌توان با تنظیم نسبت مواد در ترکیب مورد نظر انجام داد. در بازهٔ طیفی آبی تا سبز از مادهٔ ترکیبی $In_xAl_yGa_{1-x-y}N$ استفاده می‌شود[۱۲و۱۳]. دیودهای گسیلندهٔ قرمز بین ۶۱۵ نانومتر و ۷۵۰ نانومتر برپایهٔ $In_xAl_yGa_{1-x-y}P$ می‌باشند. بین ۶۷۰ تا ۸۹۰ نانومتر از $Al_xGa_{1-x}As_{1-y}P_y$ به‌عنوان لایهٔ فعال استفاده می‌شود. طول‌موج‌های بلندتر تا ۱/۲μm را می‌توان با به‌کارگیری $In_xGa_{1-x}As_yP_{1-y}$ یا $In_{1-x-y}Al_xGa_yAs$ رشدیافته بر بستر GaAs پوشش داد[۱۴و۱۵].

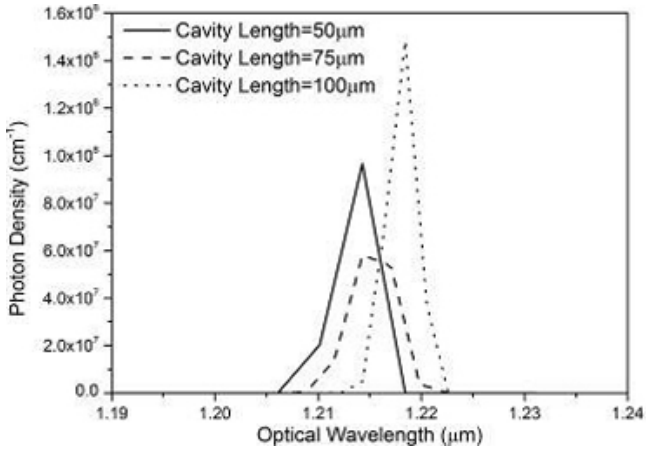
9. Near-Infrared



شکل۸: مشخصهٔ جریان-ولتاژ لیزر گسیلندهٔ جانبی فابری-پرو $In_xGa_{1-x}AsP$ به‌ازای مقادیر گوناگون طول کاواک. داخل شکل نمودار با مقیاس بزرگ‌تر نشان داده شده است.



شکل۹: تغییرات بهرهٔ اپتیکی برحسب ولتاژ بایاس به‌ازای مقادیر گوناگون طول کاواک



شکل۱۰: تغییرات چگالی فوتونی برحسب طول موج به‌ازای مقادیر گوناگون طول کاواک

با استفاده از بستر InP، دو ترکیب آخر می‌توانند طول‌موج‌های بلندتر تا ۲/۳μm را نیز پوشش دهند. پارامتر کلیدی در تغییر نسبت‌های مربوط به مواد ترکیبی یادشده گاف نواری لایهٔ فعال می‌باشد. درواقع، با تغییر مقادیر x و y هدف تغییر گاف نواری لایهٔ فعال است. بنابراین در این مقاله تلاش گردیده است تا با مهندسی گاف نواری لایهٔ فعال $In_xGa_{1-x}As_yP_{1-x}$: ۱- امکان پوشش‌دهی طول‌موج‌های بلندتر فراهم آید و ۲- مشخصه‌های خروجی لیزر طراحی‌شده بهینه گردند. همچنین به‌منظور دست‌یابی به بازهٔ طول‌موجی گسترده‌تر جهت پوشش نیازهای پزشکی یادشده در جدول ۱ لایهٔ مورد نظر برروی بستر InP قرار داده شده است.

در تلاش نخست، ابتدا تغییرات پارامترهای خروجی با نسبت x بررسی گردید. نتایج نشان داد که با افزایش درصد In (مقدار x) توان گسیلیدهٔ لیزری افزایش یافت. باتوجه به شکل ۲ مقادیر گاف نواری به‌ازای x=۰/۳۰ و x=۰/۱۵ به‌ترتیب ۱/۰۱۴eV و ۱/۲۱۰eV می‌باشد. توان اپتیکی با رابطهٔ زیر داده می‌شود:

$$P = h\nu\phi \qquad (۲۰$$

در این رابطه h ثابت پلانک، ν بسامد فوتون و ϕ شار فوتون‌های نشریافته (شمار فوتون‌ها بر یکای زمان) است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش x و کاهش گاف نواری لایهٔ فعال میزان شار فوتونی افزایش یافته است. ازسوی‌دیگر با افزایش طول کاواک از ۵۰ میکرون به ۱۰۰ میکرون توان اپتیکی روند افزایشی نشان داد. این روند را می‌توان به افزایش شار فوتونی در نتیجهٔ افزایش سطح مؤثر لایهٔ فعال نسبت داد.

نتایج تغییرات مربوط به نمودار مشخصهٔ جریان-ولتاژ I-V با x و طول کاواک L نشان داد که ولتاژ کار به‌ازای x=۰/۲۵ و L=۵۰μm کمترین مقدار را نشان می‌دهد. همچنین منحنی‌های مربوط به بهرهٔ اپتیکی و چگالی فوتونی نشان می‌دهند که انتخاب x=۰/۲۵ و L=۵۰μm برای لیزر دیودی $In_xGa_{1-x}As_yP_{1-y}$ رشدیافته بر بستر InP منجر به بهینهٔ مقادیر خروجی می‌گردند.

جدول۱: نمونهٔ کاربردهای پزشکی لیزرهای دیودی گوناگون

طول موج (نانومتر)	کاربرد پزشکی
۴۰۵	درمان فتودینامیکی
۶۳۰-۶۶۸،۶۵۲،۶۳۵	درمان فتودینامیکی
۶۸۹ ،۷۳۰	درمان فتودینامیکی دژنراسیون وابسته به سن ماکولا (ARMD) و لکه‌های پوستی مربوط به پیری
۱۰±۸۱۰	زیبایی، برداشتن مو، دندانپزشکی، جراحی، عروق، چشم‌پزشکی
۹۴۰	برداشتن رگ‌های واریسی، کاربردهای جراحی
۱۰±۹۸۰	دندانپزشکی، درمان پروستات، جراحی، چشم‌پزشکی
۱۰۶۴	برداشتن مو، برداشتن تاتو و خالکوبی
۱۲۱۰	لیپوساکشن
۱۳۲۰-۱۳۸۰	جراحی
۱۴۵۰-۱۴۷۰	درمان جوش و آکنه، جراحی
۱۸۵۰-۲۲۰۰	درمان جوش و آکنه، جایگزین لیزر تالیوم در جراحی

References:

1. Maiman TH. Stimulated optical radiation in Ruby. Nature. 1960; 187: 493–4.

2. Knigge A, Erbert G, Jonsson J, Pittroff W, Staske R, Sumpf B, Weyers M, Trankle G. Passively cooled 940 nm laser with 73% wall-plug efficiency at 70 W and 25/spl deg/C. Electron. Lett. 2005; 41: 250–1.

3. Kanskar M, Earles T, Goodnough T, Stiers E, Botez D, Mawst L. 73% CW power conversion efficiency at 50 W from 970 nm diode laser bars. Electron. Lett. 2005; 41: 245–7.

4. Asar T, Özçelik S, Özbay E. Structural and electrical characterizations of InxGa1-xAs/InP structures for infrared photodetector applications. J. Appl. Phys. 2014; 115: 104502.

5. Kaniewski J, Piotrowski J. InGaAs for infrared photodetectors. Phys. Technol., Opto-electron. Rev. 2004; 12(1): 139–48.

6. Schleeh J, Rodilla H, Wadefalk N, Nilsson P, Grahn J, Cryogenic noise performance of InGaAs/InAlAs HEMTs grown on InP and GaAs substrate. Solid-State Electron. 2014; 91: 74–7.

7. Yasuda Y, Koh S, Ikeda K, Kawaguchi H. Crystal growth of InGaAs/InAlAs quantum wells on InP(110) by MBE. J. Cryst. Growth. 2013; 364: 95–100.

8. Han Y, Ng WK, Xue Y, Li Q, Wong KS, Lau KM. Telecom InP/InGaAs array directly grown on (001) silicon-on-insulator. Optics Lett. 2019; 44(4): 767–70.

9. Han Y, Ng WK, Ma C, Li Q, Zhu S, Chan CCS, Ng KW, Lennon S, Taylor RA, Wong KS, Lau KM. Room-temperature InP/InGaAs nano-ridge lasers grown on Si and emitting at telecom bands. Optica. 2018; 5(8): 918–23.

10. Nahory RE, Pollack MA, Johnson Jr WD, Barns RL. Band gap versus composition and demonstration of Vegard's law for In1−xGaxAsyP1−y lattice matched to InP. Appl. Phys. Lett. 1978; 33: 659.

11. Gupta MC, Ballato J. Ed. Hand-book of Photonics. 2nd Edn. CRC Press, 2006: 9-4.

12. Vurgaftman I, Meyer JR, Ram-Mohan LR. Band Parameters for III-V compound semiconductors and their alloys. J. Appl. Phys. 2001; 89: 5815–75.

13. Kneissl M, Rass J, in: Weber H, Loosen P, Poprawe R. (eds.), Landolt-Bornstein – Laser Physics and Applications, Subvolume B: Laser Systems Part 3 (Springer, Berlin), 2006: 27–42.

14. Iga K. Surface-emitting laser-its birth and generation of new optoelectronics field. IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 2000; 6: 1201–15.

15. Wenzel H, in: Schulz W, Weber H, Poprawe R. (eds.), Landolt-Bornstein – Laser Physics and Applications, Subvolume B: Laser Systems Part 2 (Springer, Berlin), chap. 5.2, 2008; 163–83