

بررسی تنظیم‌پذیری لیزر حالت جامد $\text{InP}/\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{AsP}$ برای کاربردهای پزشکی: تأثیر تغییر گاف نواری و اندازه کاواک

خلاصه

علی عبدالله زاده ضیابری

مقدمه: به دلیل بهبود پیوسته فناوری لیزرهای دیودی، این گونه از لیزرها به گونه فزاینده‌ای برای کاربردهای پزشکی در کانون توجه قرار گرفته‌اند. لیزرهای دیودی هم‌زمان تنظیم‌پذیری و توان گسیلشی بالا و اندازه کوچک با قیمت به صرفه را ارائه می‌دهند. بنابراین، لیزرهای دیودی به گونه فزاینده‌ای در کاربردهای مهمی همچون لیزر شبکیه‌ای پی‌آرپی، توموگرافی اپتیکی همدوس، تصویربرداری اپتیکی افشاننده، تصویربرداری زمان عمر فلورسان و تصویربرداری تترارترز ترجیح داده شده‌اند. در این مقاله لیزر دیودی حالت جامد با ناحیه اکتیو $\text{InP}/\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{AsP}$ مورد بررسی قرار می‌گیرد. بازه بینایی که این گونه از لیزرها در دسترس هستند به طور عمده به گاف نواری ماده موجود در بخش فعال مربوط است. بنابراین در این پژوهش با تغییر درصد عناصر موجود در ماده فعال، گاف نواری بهینه برای رسیدن به بیشینه بهره لیزری به دست می‌آید. همچنین به منظور دستیابی به بهینه‌ترین مقادیر مشخصه‌های خروجی، تغییرات مشخصه‌های یادشده با ابعاد کاواک لیزری نیز بررسی می‌شوند.

روش بررسی: در این پژوهش یک مدل بهره اپتیکی وابسته به بسامد برای برآورد بیناب گسیلشی نور به کار می‌رود. این کار با کدنویسی در محیط برنامه ۲۰۱۴ Silvacو 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- مش بندی فضا برای حل معادله موج هلمهولتز انجام می‌پذیرد، ۵- مدل های فیزیکی لیزر و پارامترهای وابسته مانند مدل بهره 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 $\text{InP}/\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{AsP}$ به شدت به تغییرات نسبت x و ابعاد کاواک لیزری حساس هستند. مشاهده گردید که با افزایش مقدار x و در نتیجه کاهش گاف انرژی، توان لیزری برحسب جریان بایاس افزایش پیدا نمود و بهره اپتیکی به ازای $x=25/0$ به بهینه مقدار خود رسید.

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

همچنین رابطه مستقیمی بین توان خروجی لیزر و ابعاد کاواک دیده شد در صورتی که بهره اپتیکی با افزایش طول کاواک کاهش محسوسی یافت. برآیند نتایج مشخص نمود که برای لیزر دیودی طراحی شده بهینه مقادیر X و L به ترتیب برابر $0/25$ و 50 میکرون می باشند. **نتیجه گیری:** در این مقاله تلاش گردید تا با بهینه سازی دو پارامتر نسبت عناصر In و Ga (x) و نیز ابعاد کاواک لیزری L که به عنوان مشدد لیزری عمل می کند، مشخصه های خروجی شامل توان گسیلیده لیزری، مشخصه جریان-ولتاژ، بهره اپتیکی و چگالی فوتونی محاسبه گردند. محاسبه های صورت گرفته نشان می دهد که با انجام تنظیمات مؤثر بر روی ساختار و پیکربندی لیزر حالت جامد $InP/In_xGa_{1-x}AsP$ امکان چیرگی بر معایبی مانند توان خروجی پایین تر نسبت به لیزرهای گازی، پهنای طیفی گسترده^۱ و کار در رژیم چندمد^۲ فراهم می شود. نتیجه این که به دلیل مزیت هایی از جمله امکان پمپاژ به وسیله جریان الکتریکی، بازدهی بسیار بالا، ابعاد کوچک، سادگی اتصال به فیبرهای نوری و هزینه بسیار پایین در قیاس با لیزرهای گازی، با انجام مهندسی بر روی گاف نواری، زیرلایه و اندازه کاواک از این گونه لیزرها می توان به طور گسترده در پزشکی، دندانپزشکی و سایر شاخه ها مانند جراحی پلاستیک استفاده نمود.

واژه های کلیدی: لیزر دیودی، گاف نواری، کاواک لیزری، توان لیزری، بهره اپتیکی، چگالی فوتونی

نویسنده مسئول: علی عبدالله زاده ضیابری، تلفن: ۰۹۱۳۳۳۸۲۵۰۳
پست الکترونیک: ali_abdolahzadeh@liau.ac.ir

1. Wide spectral width
2. Multimode regime

مقدمه

از نخستین نمایش لیزر از سوی تیودور میمن (Theodore Maiman) در سال ۱۹۶۰ کاربردهای لیزر به شکل گسترده ای افزایش یافته است [۱]. با بهبود روش های تولید و نیز کارایی، لیزرهای دیودی همچنان جذاب تر می شوند. به دلیل پمپاژ الکتریکی مستقیم، لیزرهای دیودی با فاصله کارترین چشمه های نور در دسترس کنونی هستند [۳ و ۲]. با استوار بودن بر فن آوری تراشه می توان آن ها را در شمارگان بالا و در قیمت پایین تولید نمود. به دلیل جاگیری آن ها تنها در چند mm^3 آن ها را به عنوان دستگاه های لیزری با اندازه کوچک مطرح می سازد. همه این ویژگی ها پتانسیل به کارگیری از آن ها از جمله کاربردهای زیست پزشکی را افزایش می دهد. کاربردهای تصویربرداری و تشخیصی، برای نمونه توموگرافی همدوس اپتیکی، تصویربرداری زمان عمر فلورسان، تصویربرداری نوری افشانده، تصویربرداری THz، تصویربرداری لیزری داپلر یا بیناب نگاری رامان برای درمان های مستقیمی مانند Photocoagulation، Photo-dynamic therapy، بیومدولاسیون و زیست فعال سازی (Bioactivation). در مقایسه با لیزرهای محدود به گذارهای اتمی ویژه، لیزرهای دیودی بازه طیفی گسترده تری را پوشش می دهند. بسته

به نیم رساناهای ترکیبی مورد استفاده و درصد عناصر مورد استفاده در آن ها، طول موج های گسیلش برای نمونه در نیم رساناهای ترکیبی III-V از بخش آبی تا نزدیک فروسرخ (400 نانومتر تا 2 میکرومتر) را در بر می گیرد. اگرچه در جریان های بالا، مدهای کناری بیناب به اندازه کافی فریز می شوند، این امکان وجود دارد که کاربردهای لیزرهای دیودی به وسیله مشخصه های طیفی شان محدود گردد. در این موارد، پهنای باند گسیلشی را می توان برای نمونه با فیدبک ذاتی یا بیرونی باریک نمود. مورد دوم همچنین امکان تنظیم پذیری گسیلش تک-مد را برای روی چند ده نانومتر فراهم می نماید و افزون بر آن تنظیم پذیری را از راه تزریق جریان یا دمای لیزر ممکن می کند. علی رغم شمار طول موج هایی که با دیودهای لیزری می توان به آن ها دست یافت، توان برون دهی ممکن است کافی نباشد. افزون بر آن، دیگر طول موج ها، به ویژه در بخش دیدگانی، به دلیل نبود ساختارهای لیزری در دسترس ممکن است که دست یافتنی نباشند. یک گزینه برای دسترسی به این طول موج ها یا افزایش توان در بخش ویژه ای از بیناب، تبدیل بسامد غیرخطی است. دیگر راه حل ها پمپاژ اپتیکی لیزرهای نیم رسانا یا لیزرهای حالت جامد است. به دلیل برانگیزش اپتیکی، این لیزرها در قیاس با لیزرهای دیودی پمپاژ شده

تئوری و روش بررسی

در این مقاله برای طراحی و شبیه‌سازی لیزر دیودی گسیلنده جانبی^۳ فابری-پرو^۴ InP/InGaAsP و محاسبه پارامترهای خروجی از نرم‌افزار Silvaco نسخه 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 کار می‌کند و ۱- امکان حل معادله هلمهولتز برای محاسبه مدهای اپتیکی، میدان آن‌ها و الگوهای شدت میدان را فراهم می‌کند، ۲- بهره اپتیکی وابسته به انرژی فوتونی و ترازهای شبه فرمی را محاسبه می‌کند، ۳- باز ترکیب حامل‌ها مربوط به گسیل نور را برآورد می‌کند (یعنی همان گسیل برانگیخته)، ۴- معادله‌های نرخ فوتونی را برای محاسبه چگالی فوتونی کیفی حل می‌نماید، ۵- توان برون‌داد نور لیزر را محاسبه می‌کند و مشخصه جریان - ولتاژ را نمایش می‌دهد. برای شبیه‌سازی لیزر، معادله‌های پایه‌ای نیمه‌رسانا (معادله‌های ۱-۴) به‌طور خودسازگار همراه با یک معادله اپتیکی که توزیع شدت میدان اپتیکی را تعیین می‌کند، حل می‌شوند. معادله پواسون پتانسیل الکترواستاتیکی را به چگالی بار فضایی پیوند می‌دهد:

$$\text{div}(\epsilon \nabla \psi) = -\rho \quad (1)$$

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

$$\vec{E} = -\nabla \psi \quad (2)$$

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

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} \text{div} \vec{J}_n + G_n - R_n \quad (3)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{q} \text{div} \vec{J}_p + G_p - R_p \quad (4)$$

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 باز ترکیب 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.

الکتریکی بازدهی اپتیکی کاهش‌یافته‌ای را نشان می‌دهند.

نیمه‌رسانای ترکیبی III-V آلیاژ سه‌گانه $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ برای گسترش ابزار فوتونیک و اپتوالکترونیک کاربرد بسیاری دارد [۴]. نیمه‌رساناهای بر پایه $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ را می‌توان برای طراحی قطعات اپتیکی در بازه طیفی $0.85\text{--}1.6\text{ }\mu\text{m}$ به کار برد [۵]. این آلیاژ را می‌توان با روش‌های رونشستی^۱ مانند MOCVD و MBE تهیه نمود [۶]. نیاز به دیودهای نورگسیل LEDs کارآ و لیزرهایی که بتوانند در سرتاسر بخش دیدگانی (مرئی) کار کنند و نیز پنجره‌های فیبر نوری در 1.3 و 1.55 میکرومتر پژوهش‌ها را به‌سوی نیمه‌رساناهای گاف مستقیم به‌عنوان مواد فعال پیش برده است. از آنجا که طول موج گسیل 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^۲ به‌طور عمده بر دانش رشد کریستال استوار است. در رشددهی لایه فعال لیزری، یک لایه به خلوص بسیار بالا بر روی یک کریستال کپه‌ای به نام بستر یا زیرلایه نشاند می‌شود. سازگاری ساختاری ماده فعال و زیرلایه شمار در رفتگی‌ها را در لایه فعال کاهش می‌دهد اما، محدودیت‌هایی را بر گاف نواری اعمال می‌کند که می‌توان آن را به‌سادگی مهندسی نمود. در آلیاژ سه‌گانه $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ که به‌ازای $x=53\%$ با ساختار InP سازگار است، گاف نواری 0.75 eV ($\lambda=1.65\text{ }\mu\text{m}$) می‌باشد. فوتودیودهای $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ رشد داده‌شده بر روی InP آشکارسازی ممتازی را در طول موج‌های 1.3 یا $1.55\text{ }\mu\text{m}$ نشان می‌دهند اما، برای ساختن یک گسیلنده در این طول موج، می‌باید گاف نواری را افزایش دهیم درحالی‌که به‌طور هم زمان شرط سازگاری ساختاری می‌باید حفظ گردد. این امکان از راه افزودن عنصر چهارمی مانند Al یا P به آلیاژ میسر می‌شود. در این مقاله با مهندسی گاف نواری به‌ازای مقادیر گوناگون x در ترکیب چهارگانه $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{AsP}$ به‌عنوان ماده فعال لیزر دیودی تلاش می‌گردد که مقدار بهینه 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 بر روی این ساختار بیشتر بر روش‌های رشد کریستال و جزئیات فنی مربوط به آنالیز و مشخصه‌یابی استوار است. برای نمونه نانولیزر InP/InGaAs رشد داده‌شده بر روی سیلیکون (۰۰۱) [۸] و لیزرهای $\text{InP/InGaAs nano-ridge}$ 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

3. Edge-emitting

4. Fabry-Perot

با استفاده از عبارت زیر محاسبه می‌شود:

$$I_m(x, y) = \left([\vec{E}_m \times \vec{H}_m^*] + [\vec{E}_m^* \times \vec{H}_m] \right) \cdot \hat{z} \quad (12)$$

و بر روی سطح بهنجاریده می‌گردد:

$$\int I_m(x, y) dS = 1 \quad (13)$$

ضریب شکست مؤثر و ضریب جذب مؤثر در این صورت چنین به دست می‌آیند:

$$n_{eff,m} = \Re[\beta_m] \frac{c}{\omega} \quad (14)$$

$$\alpha_{eff,m} = 2\Im[\beta_m] \quad (15)$$

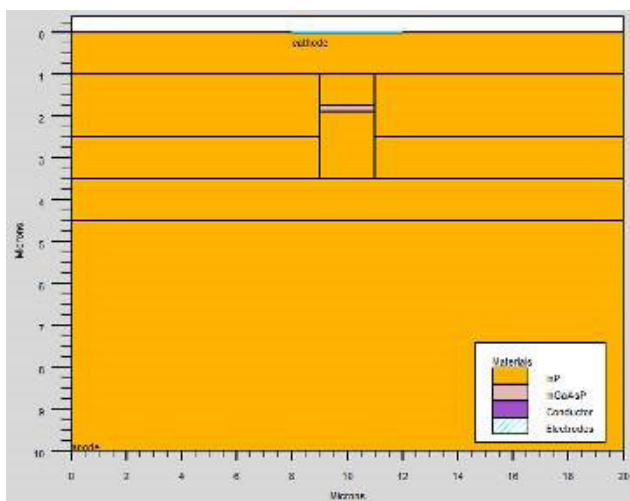
باز ترکیب حامل‌ها مربوط به گسیل نور برانگیخته به صورت زیر مدل‌سازی می‌شود:

$$R_{ST}(x, y) = \sum_{j=x,y,z} \sum_m \frac{c}{n_{eff,m}} g_j(x, y) \Gamma_m^j(x, y) S_m \quad (16)$$

سیگمای دوم بر روی همه مدهای لیزری جمع می‌بندد. $g_j(x, y)$ در رابطه بالا بهره موضعی برای میدان الکتریکی پلاریزه در راستای j است. $\Gamma_m^j(x, y)$ نیز عبارت است از:

$$\Gamma_m^j(x, y) = 2\Re[n_j(x, y)] \frac{|E_m^j(x, y)|^2}{\int I_m(x, y) dS} \quad (17)$$

بهره اپتیکی پارامتری است که مدل‌های الکتریکی و اپتیکی را به هم پیوند می‌دهد. بهره اپتیکی به ترازهای شبه‌فرمی بستگی دارد و به نوبه خود بر گذردهی دی‌الکتریکی اثر می‌گذارد و از جفت‌شدگی میان آهنگ باز ترکیب



شکل ۱: نمایش پیکربندی و اجزای گوناگون لیزر دیودی گسیلنده جانبی فابری-پرو InP/InGaAsP.

معادلات الکتریکی و اپتیکی در صفحه XY یعنی عمود بر کاواک لیزر حل می‌شوند. روی هم رفته، مؤلفه‌های میدان الکترومغناطیسی در دستگاهی از معادلات به هم جفت شده هستند و با معادله برداری هلمهولتز داده می‌شوند:

$$\nabla \times \frac{1}{\epsilon} \nabla \times \vec{H} = \frac{\omega^2}{c^2} \vec{H} \quad (5)$$

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

$$\frac{\partial^2 H_x}{\partial x^2} + \epsilon_x \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\epsilon_z} \frac{\partial H_x}{\partial y} \right) + \left(1 - \frac{\epsilon_y}{\epsilon_z} \right) \frac{\partial^2 H_x}{\partial x \partial y} - \epsilon_y \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\epsilon_z} \right) \frac{\partial H_x}{\partial x} + \frac{\omega^2}{c^2} \epsilon_y H_x = \beta^2 H_x \quad (6)$$

$$\epsilon_x \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\epsilon_z} \frac{\partial H_y}{\partial x} \right) + \frac{\partial^2 H_y}{\partial y^2} + \left(1 - \frac{\epsilon_x}{\epsilon_z} \right) \left(\frac{\partial^2 H_y}{\partial x \partial y} \right) - \epsilon_x \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\epsilon_z} \right) \frac{\partial H_y}{\partial y} + \frac{\omega^2}{c^2} \epsilon_x H_y = \beta^2 H_y \quad (7)$$

مسئله بالا یک مسئله ویژه مقدری مختلط غیرهرمیتی به‌ازای توان دوم ثابت انتشار β و ویژه بردار $\xi = (H_x, H_y)$ می‌باشد. این دستگاه معادلات با روش المان محدود جداسازی می‌شود و با در نظر گرفتن ω به عنوان پارامتر با یک حل کننده ویژه مقدری تکرار کننده حل می‌گردد. برای راه‌اندازی حل کننده 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 معادله ویژه مقدری، همه دیگر مؤلفه‌های میدان اپتیکی به دست می‌آیند:

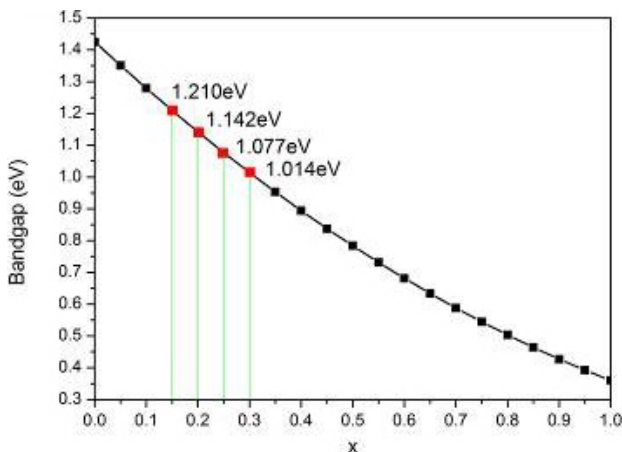
$$H_z = \frac{i}{\beta} \left(\frac{\partial H_x}{\partial x} + \frac{\partial H_y}{\partial y} \right) \quad (8)$$

$$E_x = \frac{i}{\omega \epsilon_{xx} \epsilon_0} \left(\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} \right) \quad (9)$$

$$E_y = -\frac{i}{\omega \epsilon_{yy} \epsilon_0} \left(\frac{\partial H_z}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial z} \right) \quad (10)$$

$$E_z = \frac{i}{\beta \epsilon_{zz}} \left(\epsilon_{xx} \frac{\partial E_x}{\partial x} + \epsilon_{yy} \frac{\partial E_y}{\partial y} \right) \quad (11)$$

شدت هر مد اپتیکی عرضی در این صورت



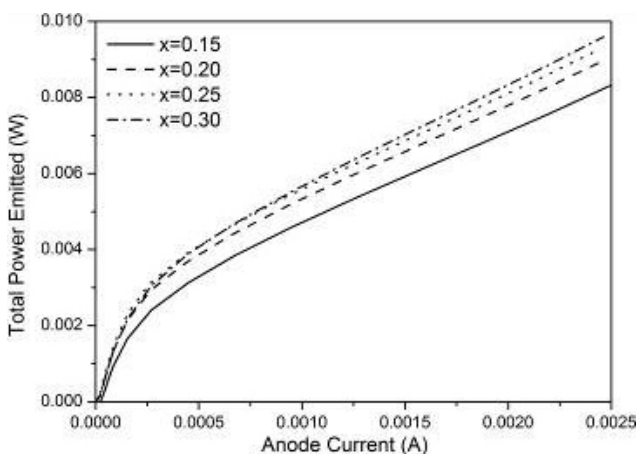
شکل ۲: تغییرات گاف نواری $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{AsP}$ به‌ازای مقادیر گوناگون x . مقادیر گاف نواری به‌کار برده‌شده در محاسبات روی نمودار نشان داده شده‌اند

نمایش می‌دهد. مقاومت سری لیزر دیودی از روی شیب منحنی $I-V$ بالاتر از ولتاژ کار^۷ تعیین می‌شود [۱۱].

مقادیر بالای مقاومت سری می‌تواند یک عامل اصلی در خراب شدن دیود لیزری به‌شمار آید. ولتاژ کار پارامتر دیگری است که می‌توان آن را از روی منحنی $I-V$ به‌دست آورد و دلالت دارد بر طول‌موج عملیاتی لیزر دیودی. از روی شکل ۴ به‌طور کیفی آشکار است که ولتاژ کار به‌ازای $x=0.15$ بیشترین و به‌ازای $x=0.25$ کمترین مقدار را دارا می‌باشد. از سوی دیگر شیب نمودار با افزایش x کاهش می‌یابد. وارون شیب نمودار $I-V$ با مقاومت الکتریکی قطعه متناظر است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش درصد ایندیوم (x) مقاومت الکتریکی قطعه افزایش می‌یابد. اگرچه با توجه به اختلاف بسیار اندک شیب منحنی‌ها بالاتر از نقطه کار تفاوت در مقاومت‌ها ناچیز است.

بهره اِپتیکی معیاری است از میزان کمی تقویت نور به‌وسیله قطعه

7. Turn-on voltage



شکل ۳: توان کل گسیلیده لیزر برحسب جریان اعمال‌شده به‌ازای مقادیر گوناگون x

حامل‌های برانگیخته (RST) و چگالی فوتون‌ها (S) به‌دست می‌آید:

$$G_m = \sum_{j=x,y,z} \int \int g_j(x,y,\omega_m) \Gamma_m^j(x,y) dS \quad (18)$$

بر پایه رابطه‌های یادشده بالا، یک برنامه کامپیوتری در محیط Atlas برنامه Silvaco نوشته شد تا با آن بتوان تغییرات توان لیزر، بهره اِپتیکی و چگالی فوتونی را با تغییر گاف نواری ناحیه فعال لیزر بررسی نمود. شکل ۱ نمایشی از ساختار طراحی‌شده برای لیزر دیودی گسیلنده جانبی فابری-پرو $\text{InP}/\text{InGaAsP}$ را نمایش می‌دهد.

تغییرات گاف نواری ناحیه فعال $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{AsP}$ در K_{300} با توجه به رابطه زیر در نظر گرفته شد [۱۰]:

$$E_g(x) = 1/425 - 1/50 \cdot x + 0/436x^2 \quad (19)$$

یافته‌ها

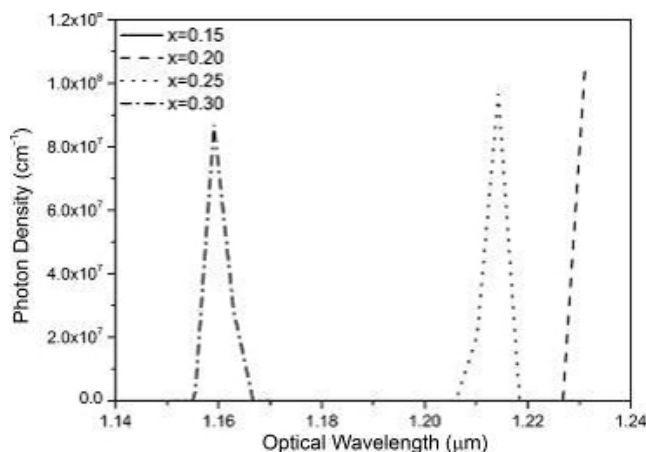
بررسی مشخصه‌های لیزر با تغییر گاف نواری ماده فعال

در این بخش نخست تغییرات مشخصه‌های خروجی لیزر فابری-پرو $\text{InP}/\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{AsP}$ با طول ثابت کاواک^۵ ۵۰ میکرون را به‌ازای مقادیر ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ بررسی می‌نماییم. از روی معادله ۱۹ تغییرات گاف نواری $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{AsP}$ برحسب x در شکل ۲ نشان داده شده است. همان‌گونه که از شکل دیده می‌شود، با افزایش نسبت ایندیوم In و کاهش درصد گالیوم Ga اندازه گاف نواری ترکیب $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{AsP}$ کاهش می‌یابد.

در شکل ۳ توان کل گسیلیده لیزری به‌ازای مقادیر گوناگون x برحسب شارش جریان آستانه^۶ (جریان آند) نشان داده شده است. در دیودهای نورگسیل LED جریان آستانه لحاظ نمی‌شود اما، در لیزرها مورد بحث قرار می‌گیرد. پیش از تابش نور به‌وسیله لیزر، توان خروجی اندک است. بنابراین تزریق جریان باید به مقدار جریان آستانه برسد تا لیزر شروع به کار کند. پیش از جریان آستانه، لیزر در مد LED کار می‌کند زیرا گسیل نور رخ می‌دهد اما هنگامی که شارش از حد آستانه فراتر می‌رود، گسیل تقویت‌شده روی می‌دهد و لیزر کار می‌کند. از روی شکل ۳ دیده می‌شود که اگرچه مقادیر جریان آستانه به‌ازای مقادیر گوناگون x بسیار کوچک است اما، بیشترین جریان آستانه به‌ازای $x=0.15$ و کمترین مقدار آن به‌ازای $x=0.25$ رخ می‌دهد. همچنین توان گسیلیده در ناحیه کار لیزر با افزایش x افزایش می‌یابد. همانند دیگر قطعات الکترونیکی و اپتوالکترونیکی، مشخصه جریان-ولتاژ یکی از مهم‌ترین شاخص‌های لیزرهای دیودی می‌باشد. شکل ۴ منحنی مشخصه جریان-ولتاژ لیزر را به‌ازای مقادیر گوناگون x

5. Cavity

6. Threshold flow

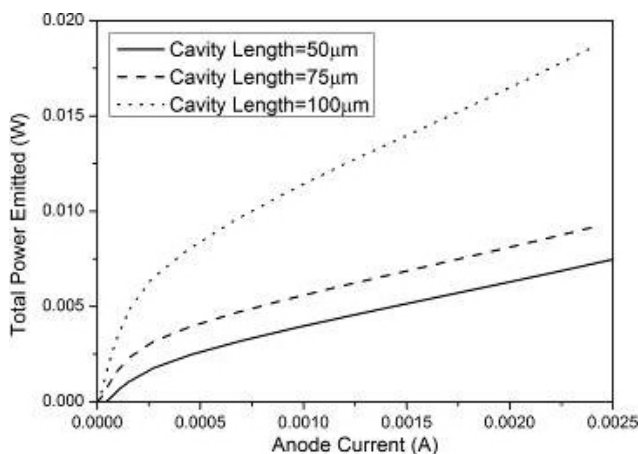


شکل ۶: تغییرات چگالی فوتونی برحسب طول موج به ازای مقادیر گوناگون x

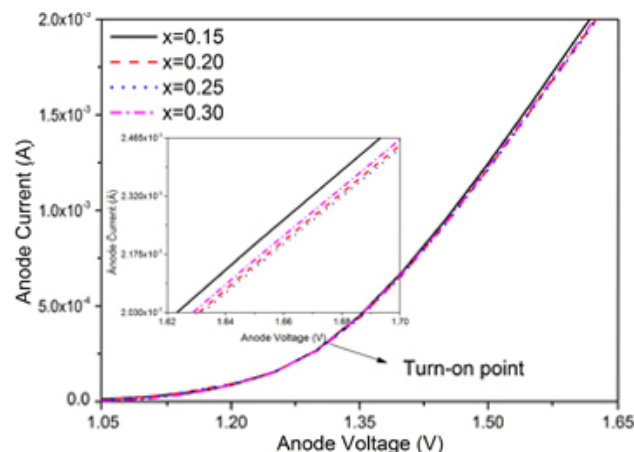
جریان می‌افتد و از بخش فعال گذر می‌کند تا اتلاف نوری جبران شود. هنگامی که محیط بهره^۸ یک ماده نیمه‌رسانا است، یک کاواک فابری-پرو را می‌توان به وسیله بازتابش‌های اپتیکی فرنل در میان صفحه‌های جدا شده تراشه ایجاد نمود. درون کاواک موج‌های الکترومغناطیسی الگوهای موج ایستاده را شکل می‌دهند که دارای گره و شکم هستند. افزایش طول کاواک سبب کاهش اتلاف آینه خواهد شد که این امر کاهش پهنای باریکه را در پی خواهد داشت. در این بخش با در نظر گرفتن $x=0.25$ پیامدهای تغییر طول کاواک (L) بر مشخصه‌های خروجی لیزر بررسی می‌شود. شکل ۷ توان کل گسیلیده لیزری به ازای مقادیر گوناگون L برحسب شارش جریان آستانه نشان داده شده است.

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

8. Gain medium



شکل ۷: توان کل گسیلیده لیزر برحسب جریان اعمال شده به ازای مقادیر گوناگون L



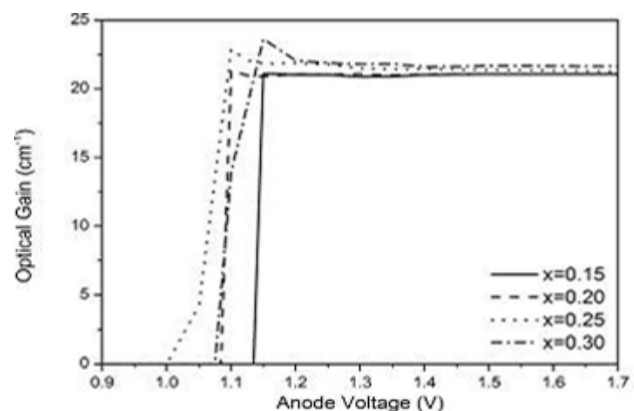
شکل ۸: مشخصه جریان-ولتاژ لیزر گسیلنده جانبی فابری-پرو $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{AsP}$ به ازای مقادیر گوناگون x . داخل شکل نمودار با مقیاس بزرگ‌تر نشان داده شده است.

اپتیکی. بهره اپتیکی لیزری به چگالی الکترونی در ترازهای گوناگون بستگی دارد که آن هم به نوبه خود به شدت‌های اپتیکی وابسته است. بهره اپتیکی محاسبه شده برحسب ولتاژ بایاس قطعه به ازای مقادیر گوناگون x در شکل ۵ نشان داده شده است. از روی شکل دیده می‌شود که کمترین بهره اپتیکی به $x=0.15$ مربوط می‌شود. از سوی دیگر به ازای $x=0.25$ محل تقاطع نمودار با محور افقی (محور ولتاژ) کمترین مقدار را در مقایسه با دیگر مقادیر x نشان می‌دهد که گویای بهره اپتیکی مطلوب‌تر در مقایسه با دیگر حالت‌ها می‌باشد.

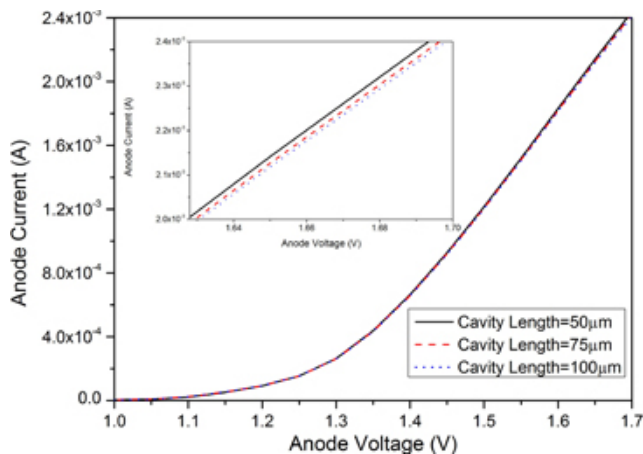
چگالی فوتون‌های تولید شده برحسب طول موج در شکل ۶ نشان داده شده است. دیده می‌شود که با تغییر x طول موج کار لیزر کاهش یافته است. همچنین چگالی فوتونی با افزایش درصد In افت می‌کند.

بررسی کارکرد لیزر با تغییر ابعاد کاواک

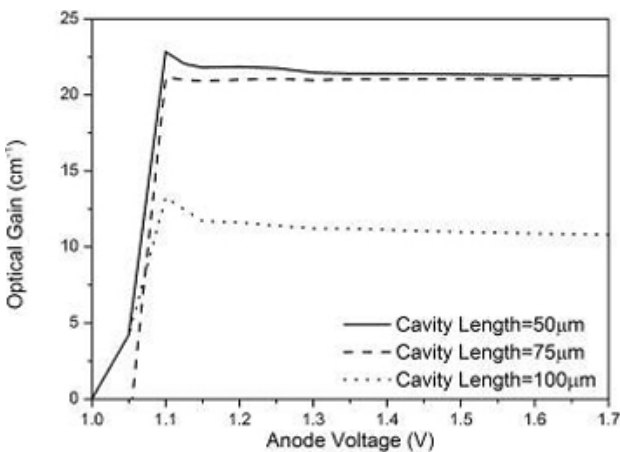
کاواک (مشدد) های نوری یکی از بلوک‌های اصلی ساختمان لیزرها به شمار می‌آیند. یک لیزر به کاواکی نیاز دارد که در آن تابش لیزر به



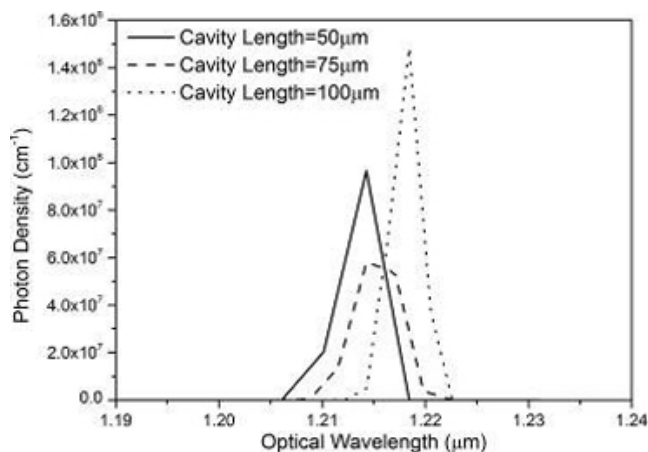
شکل ۹: تغییرات بهره اپتیکی برحسب ولتاژ بایاس به ازای مقادیر گوناگون x



شکل ۸: مشخصه جریان-ولتاژ لیزر گسیلنده جانبی فابری-پرو $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{AsP}$ به‌ازای مقادیر گوناگون طول کاواک. داخل شکل نمودار با مقیاس بزرگ‌تر نشان داده شده است.



شکل ۹: تغییرات بهره اپتیکی برحسب ولتاژ بایاس به‌ازای مقادیر گوناگون طول کاواک



شکل ۱۰: تغییرات چگالی فوتونی برحسب طول موج به‌ازای مقادیر گوناگون طول کاواک

شکل ۸ منحنی مشخصه جریان-ولتاژ لیزر را به‌ازای مقادیر گوناگون L نمایش می‌دهد. از روی شکل آشکار است که ولتاژ کار به‌ازای $L=50\mu\text{m}$ بیشترین مقدار را دارا می‌باشد. از سوی دیگر شیب نمودار با افزایش L کاهش یافته است که گویای افزایش مقاومت الکتریکی قطعه است.

بهره اپتیکی محاسبه‌شده برحسب ولتاژ بایاس قطعه به‌ازای مقادیر گوناگون L در شکل ۹ نشان داده شده است. از روی شکل دیده می‌شود که کمترین بهره اپتیکی به $L=100\mu\text{m}$ مربوط می‌شود. همچنین به‌ازای $L=50\mu\text{m}$ محل تقاطع نمودار با محور ولتاژ کمترین مقدار را در مقایسه با دیگر مقادیر L نشان می‌دهد.

چگالی فوتون‌های تولیدشده برحسب طول موج اپتیکی به‌ازای مقادیر گوناگون طول کاواک در شکل ۹ نشان داده شده است. از روی شکل دیده می‌شود که با افزایش L طول موج کار لیزر افزایش یافته است. همچنین چگالی فوتونی به‌ازای $L=100\mu\text{m}$ 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 استرلیزاسیون و برخی کارهای جراحی، درمان فوتودینامیک در طول موج مرئی (۶۹۰-۶۳۰ نانومتر) تا طول موج‌های بالاتر. کاربردهای زیبایی و آرایشی مانند برداشتن موهای زائد، جوان‌سازی پوست و برداشتن رگ‌های واریسی در بازه طول موجی ۸۰۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر صورت می‌گیرد. افزون بر آن در این طول موج 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 دامنه کاربردهای این گونه از لیزرها روز به روز افزایش می‌یابد. در جدول ۱ نمونه‌هایی از کاربردهای پزشکی لیزرهای دیودی خلاصه شده‌اند. به‌طور کلی ناحیه طیفی که لیزرهای حالت جامد پوشش می‌دهند از ۲۰۰ nm تا ۳ mm را دربرمی‌گیرد. اغلب لیزرهای دیودی در ناحیه فروسرخ^۹ نزدیک کار می‌کنند.

برای پوشش دادن بازه طول موجی یادشده، نیمه‌رساناهای ترکیبی گوناگونی می‌باید به‌کار گرفته شوند. گزینش طول موج لیزری λ را می‌توان با تنظیم نسبت مواد در ترکیب مورد نظر انجام داد. در بازه طیفی آبی تا سبز از ماده ترکیبی $\text{In}_x\text{Al}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{N}$ استفاده می‌شود [۱۲ و ۱۳]. دیودهای گسیلنده قرمز بین ۶۱۵ نانومتر و ۷۵۰ نانومتر برپایه $\text{In}_x\text{Al}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{P}$ می‌باشند. بین ۶۷۰ تا ۸۹۰ نانومتر از $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{P}_y$ به‌عنوان لایه فعال استفاده می‌شود. طول موج‌های بلندتر تا $1.2\mu\text{m}$ را می‌توان به‌کارگیری $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ یا $\text{In}_{1-x-y}\text{Al}_x\text{-Ga}_y\text{As}$ رشدیافته بر بستر GaAs پوشش داد [۱۴ و ۱۵].

9. Near-Infrared

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 لایه فعال میزان شار فوتونی افزایش یافته است. ازسوی دیگر 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 نتیجه افزایش سطح مؤثر لایه فعال نسبت داد.

نتایج تغییرات مربوط به نمودار مشخصه جریان-ولتاژ $I-V$ با x و طول کاواک L نشان داد که ولتاژ کار به‌ازای $x=0.25$ و $L=50\mu m$ کمترین مقدار را نشان می‌دهد. همچنین منحنی‌های مربوط به بهره اپتیکی و چگالی فوتونی نشان می‌دهند که انتخاب $x=0.25$ و $L=50\mu m$ برای لیزر دیودی $In_xGa_{1-x}As_yP_{1-y}$ رشدیافته بر بستر InP منجر به بهینه مقادیر خروجی می‌گردند.

با استفاده از بستر InP ، دو ترکیب آخر می‌توانند طول‌موج‌های بلندتر تا $2/3\mu m$ را نیز پوشش دهند. پارامتر کلیدی در تغییر نسبت‌های مربوط به مواد ترکیبی یادشده گاف نواری لایه فعال می‌باشد. درواقع، با تغییر مقادیر x و y هدف تغییر گاف نواری لایه فعال است. بنابراین در این مقاله تلاش گردیده است تا با مهندسی گاف نواری لایه فعال $In_xGa_{1-x}As_yP_{1-y}$: ۱- امکان پوشش‌دهی طول‌موج‌های بلندتر فراهم آید و ۲- مشخصه‌های خروجی لیزر طراحی‌شده بهینه گردند. همچنین به‌منظور دستیابی به بازه طول‌موجی گسترده‌تر جهت پوشش نیازهای پزشکی یادشده در جدول ۱ لایه مورد نظر بر روی 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 گسیلیده لیزری افزایش یافت. با توجه به شکل ۲ مقادیر گاف نواری به‌ازای $x=0.30$ و $x=0.15$ به‌ترتیب $1.14eV$ و $1.21eV$ می‌باشد. توان اپتیکی با رابطه زیر داده می‌شود:

$$P = h\nu\phi \quad (20)$$

جدول ۱: نمونه کاربردهای پزشکی لیزرهای دیودی گوناگون

طول موج (نانومتر)	کاربرد پزشکی
۴۰۵	درمان فتودینامیکی
۶۳۵-۶۶۸, ۶۵۲, ۶۳۵	درمان فتودینامیکی
۶۸۹, ۷۳۰	درمان فتودینامیکی دژنراسیون وابسته به سن ماکولا (ARMD) و لکه‌های پوستی مربوط به پیری
10 ± 10	زیبایی، برداشتن مو، دندانپزشکی، جراحی، عروق، چشم‌پزشکی
۹۴۰	برداشتن رگ‌های واریسی، کاربردهای جراحی
10 ± 980	دندانپزشکی، درمان پروستات، جراحی، چشم‌پزشکی
۱۰۶۴	برداشتن مو، برداشتن تاتو و خالکوبی
۱۲۱۰	لیپوساکشن
۱۳۸۰-۱۳۲۰	جراحی
۱۴۷۰-۱۴۵۰	درمان جوش و آکنه، جراحی
۲۳۰۰-۱۸۵۰	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 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$ structures for infrared photodetector applications. *J. Appl. Phys.* 2014; 115: 104502.
5. Kaniewski J, Piotrowski J. InGaAs for infrared photodetectors. *Phys. Technol., Optoelectron. Rev.* 2004; 12(1): 139–48.
6. Schlee 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 nanoridge 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 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ 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