



دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر
گروه مهندسی برق و الکترونیک

پایان نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی برق - الکترونیک

عنوان

طراحی و تحلیل لیزرهای چند طول موج

استاد راهنما

دکتر علی رستمی

استاد مشاور

دکتر ضیالالدین دائی کوزه کنانی

پژوهشگر

مهدی نوری

به نام خدا

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
I,II	مقدمه
	فصل اول: بررسی منابع
۱	۱-۱-۱- مقدمه
۳	۲-۱-۱- مهندسی کوانتوم
۵	۱-۲-۱- اصول اساسی لیزرهای QC
۱۰	۳-۲-۱- معادلات نرخ
۱۲	۳-۲-۱- استخراج بهره
۱۹	۴-۲-۱- خلاصه نتایج موجود
۲۱	۵-۲-۱- ناحیه فعال
۲۲	۶-۲-۱- رشد
۲۳	۷-۲-۱- مراحل ساخت
۲۴	۸-۲-۱- کاربردها
۲۵	۹-۲-۱- حوزه های کاری جدید
۲۶	۱۰-۲-۱- طول موج کوتاه
۲۷	۱۱-۲-۱- فرار به حالت های پیوسته
۳۰	۱۲-۲-۱- شفافیت سد تزریق
۳۱	۳-۱- موجبر
۳۴	۴-۱- معادلات نرخ لیزرهای QC و روش حل خودسازگار
۴۱	۱-۵-۱- بررسی طرح های مختلف لیزر QC
۴۴	۲-۵-۱- طرح وارونگی جمعیت از طریق یک چاه کوانتومی
۴۴	۳-۵-۱- طرح ناحیه فعال با ابر شبکه
۴۵	۴-۵-۱- طرح ناحیه فعال Bound-To-Continuum
۴۶	۵-۵-۱- ناحیه فعال با تک چاه کوانتوم
۴۷	۶-۱- ناحیه تزریق لیزر QC
۴۷	۱-۷-۱- دینامیک پراکندگی حامل در لیزرهای QC
۴۸	۲-۷-۱- پراکندگی توسط LO-Phonon

۵۱	۳-۷-۱- پراکندگی الکترون-الکترون
۵۵	۸-۱- لیزرهای QC دو طول موج و چند طول موج

..... فصل دوم: مواد و روشها

۵۷	۱-۲- مقدمه
۵۷	۲-۲- حل معادله شرودینگر
۵۸	۱-۲-۲- چاه مربعی بی نهایت
۶۱	۲-۲-۲- چاه مربعی محدود متقارن و نامتقارن
۶۵	۳-۲- آنالیز ساختار بانندی
۶۹	۴-۲- روش محاسبات
۶۹	۱-۴-۲- روش عددی تفاضلات محدود
۷۱	۲-۴-۲- حل عددی معادله شرودینگر به روش تفاضلات محدود
۷۳	۵-۲- مدل حل معادلات شرودینگر - پواسن
۸۱	۶-۲- طراحی ناحیه فعال
۸۳	۷-۲- محاسبه عنصر ماتریس دو قطبی
۸۴	۸-۲- محاسبه بهره در ساختار QCL
۹۰	فصل سوم: نتایج و بحث
۹۲	منابع مورد استفاده

فهرست شکلها

صفحه	عنوان
۳	شکل ۱-۱: روند تاریخی لیزرهای QCL
۴	شکل ۱-۲: روند تفهیم و تحقق مکانیک کوانتومی
۶	شکل ۱-۳: لیزرهای نیمه هادی معمولی و خاصیت Nonparabolicity باندها
۶	شکل ۱-۴: خواص لیزرهای QC تک قطبی و حالت آبشاری
۷	شکل ۱-۵: شماتیک نحوه کار لیزرهای QC
۹	شکل ۱-۶: یک و نیم پرپوداز نواحی فعال و تزریق لیزرهای QC
۱۲	شکل ۱-۷: تفاوت انرژی بین e_2 و بالاترین سطح انرژی ناحیه تزریق
۱۶	شکل ۱-۸: شماتیک قطعه مورد استفاده جهت محاسبه بهره
۲۰	شکل ۱-۹: منحنی L-I لیزرهای نیمه هادی در دماهای متفاوت
۲۱	شکل ۱-۱۰: پاسخ مدولاسیون برای فرکانس های بالا و جریان های متفاوت
۲۴	شکل ۱-۱۱-a: مراحل ساخت لیزر QC
۲۴	شکل ۱-۱۱-b: ابعاد لیزر QC
۲۶	شکل ۱-۱۲: لیزر QC با مواد مختلف
۲۷	شکل ۱-۱۳: ثابت های شبکه مواد مختلف
۲۸	شکل ۱-۱۴: شماتیک فرار حامل ها به حالت های پیوسته
۲۹	شکل ۱-۱۵: نرخ جریان در ناحیه فعال به جریان نشتی به حالت های پیوسته در اثر حرارت
۳۱	شکل ۱-۱۶: حالت های تفکیک شده دو چاه کوانتومی کوپل شده
۳۳	شکل ۱-۱۷: ساختار موجبر برای لیزر QC

- شکل ۱۸-۱: لیزر سه ترازه ۳۵
- شکل ۱۹-۱: حالت های محاسبه شده یک لیزر QC در ناحیه های مختلف ۳۷
- شکل ۲۰-۱: پراکنش حامل ها در یک لیزر QC ۹ حالت ۳۷
- شکل ۲۱-۱: نتایج حل عددی حامل ها بر حسب تکرار ۳۹
- شکل ۲۲-۱: پراکندگی بین دره های Γ -L ۴۱
- شکل ۲۳-۱: گذارهای قطری و عمودی برای لیزرهای QC با سه چاه و دو چاه کوانتومی ۴۲
- شکل ۲۴-۱: لیزر QC با ناحیه فعال چهار چاه کوانتومی ۴۳
- شکل ۲۵-۱: ایجاد وارونگی جمعیت با ناحیه فعال تک چاه کوانتومی ۴۴
- شکل ۲۶-۱: وارونگی جمعیت با ناحیه فعال ابرشبکه ای ۴۵
- شکل ۲۷-۱: ناحیه فعال Bound-To-Continuum ۴۶
- شکل ۲۸-۱: ایجاد وارونگی جمعیت در تک چاه کوانتومی و در فضای K_{xy} ۴۶
- شکل ۲۹-۱: شماتیک پراکندگی های مختلف ۴۸
- شکل ۳۰-۱: زمان های پراکندگی LO-Phonon ۵۱
- شکل ۳۱-۱: مکانیزم های پرکندگی e-e ۵۱
- شکل ۳۲-۱: روابط برداری ممنوع ها ۵۴
- شکل ۳۳-۱: شماتیک لیزرهای تک طول موج و تحقق لیزرهای چند طول موج براساس ساختار QC ۵۶
- شکل ۱a-۲: چاه مربعی نامتقارن با عرض L و ارتفاعهای متفاوت ۶۳
- شکل ۱b-۲: پروسه انرژی آزمایشی جهت آنالیز ساختار باندها ۶۸
- شکل ۲-۲: ساختار پتانسیل باند هدایت، ترازهای انرژی و توابع موج برای چاه $80 A^\circ$ و سد های $100 A^\circ$ با دوپینگ $1 \times 10^{18} 1/cm^3$ در سد ها و $1 \times 10^{14} 1/cm^3$ در ناحیه چاه ۷۶

- شکل ۳-۲: ساختار پتانسیل باند هدایت، ترازهای انرژی و توابع موج برای چاه $80 A^\circ$ و سد های $100 A^\circ$ با دوپینگ $2 \times 10^{18} 1/cm^3$ در سدها و $1 \times 10^{14} 1/cm^3$ در ناحیه چاه
۷۶
- شکل ۴-۲: ساختار پتانسیل باند هدایت و ترازهای انرژی برای چند چاه کوانتومی $40 A^\circ$ و سد های $100 A^\circ$ با دوپینگ $5 \times 10^{17} 1/cm^3$ در سدها و $1 \times 10^{14} 1/cm^3$ در ناحیه چاه
۷۷
- شکل ۵-۲: ناحیه فعال لیزر QC طراحی شده
۷۸
- شکل ۶-۲: ساختار QCL معرفی شده برای ارائه دو طول موج
۸۰
- شکل ۷-۲: طرح اولیه ناحیه فعال برای لیزینگ در دو طول موج
۸۲
- شکل ۸-۲: ضرایب گین بدست آمده برای دو طول موج ناحیه فعال
۸۵
- شکل ۹-۲: توان نور خروجی بر حسب جریان ورودی
۸۹

فهرست جدولها

صفحه

عنوان

۸۱

جدول ۱-۲: زمانهای گذار مابین ترازهای مختلف

چنانچه می دانیم اکثر ادوات اپتوالکترونیکی موجود بر اساس گذارهای بین بانندی می باشند، ولی در سال های اخیر گذارهای بین زیرباند در مواد نیمه هادی شدیداً مورد توجه محققان و صنعت واقع شده است. در گذارهای بین باند اکثر پارامترهای قطعه اپتوالکترونیکی طراحی شده به انرژی باند گاف ماده استفاده شده وابسته است ولی در ادوات جدید به راحتی با تغییر ابعاد اندازه پهنای چاه کوانتومی و با استفاده از مواد مختلف می توانیم به نتایج مشابهی برسیم که این خود یکی از نکات قوت چنین گذارها در ساختارهای جدید می باشد. طراحی لیزرهای نیمه هادی چند طول موج بر اساس گذارهای بین زیر باند نیز یکی از مباحث داغ روز است که توسط گروه های مطالعاتی متعدد مورد پیگیری است.

لیزرهای چند طول موج برای کاربردهائی همچون حسگرها و استفاده در سیستم های WDM دارای پتانسیل می باشند. این نوع منابع بدلیل اقتصادی بودن، منابعی موثر در افزایش قابلیت های سیستم های WDM به شمار می روند.

روش های گوناگونی برای داشتن همزمان چند طول موج در خروجی یک لیزر وجود دارد. لیزرهای چند طول موج مبتنی بر اثر Raman، لیزرهای چند طول موج با بهره گیری از SOAها و لیزرهای چند طول موج فیبر دوپ شده با Erbium نمونه ای از این لیزرها می باشند.

بسیاری از سیستم ها مانند اتم ها و مولکول ها در یک حالت گاز مانند، قادر به تشعشع همزمان چندین طول موج می باشند اما آنچه لیزرهای نیمه هادی را به تمام این سیستم ها برتری می بخشد، تک رنگ بودن این لیزرها بدلیل امکان گسسته سازی حالت های انرژی در این ساختارها است. اما مشکلی که در لیزرهای نیمه هادی برای دستیابی به خروجی چند طول موج وجود دارد، استفاده از مواد مختلف در ناحیه فعال این لیزرها با انرژی های گاف متفاوت برای دسترسی به چند طول موج است که مشکلاتی مانند Pumping مواد مختلف و نیز جذب طول موج های کوتاه را بدنبال دارد. البته برای هر کدام از این مشکلات راه حل های متفاوتی مانند جداسازی نواحی تشدید Resonator و ارائه شده است.

اولین لیزر نیمه هادی که می توانست در چند طول موج و با تفکیک بالای طول موج ها نوسان کند در سال ۱۹۹۸ در آزمایشگاه های Bell ساخته شد. ساخت این لیزر توسط روش MBE و با استفاده از لایه های متناوب AlInAs و GaInAs صورت پذیرفت که قادر بود در چند طول موج و تنها با تغییر ضخامت لایه ها نوسان کند. چنانچه می دانیم در لیزرهای نیمه هادی رایج طول موج منتشره در آنها وابسته به خواص شیمیائی مواد استفاده شده در ساختار آنها میباشد. بنابراین از این لحاظ لیزرهائی که با تغییر ضخامت لایه هایشان طول موج منتشره تغییر می کند عملکردی کاملاً متفاوت با ساختارهای نیمه هادی

رایج دارند. از جمله خواص و کاربردهای این لیزرها می توان به Environment Monitoring و Trace Gas Analysis اشاره کرد. این لیزرها که در این پایان نامه به بررسی ساختار آنها و ارائه ایده ای نو برای تابش دو طول موج با نسبت طول موجی دو برابر خواهیم پرداخت، با نام لیزرهای آبخاری یا Quantum Cascade Laser شناخته می شوند.

به خاطر توانائی نوسان همزمان چند طول موج، این لیزرها گزینه هائی مناسب برای تکنیک های طیف سنجی تفاضلی بکار رونده در سنجش میزان آلودگی محیط و نیز تکنیک های تشخیص طبی می باشند. به عنوان نمونه یک لیزر دو طول موج ویژگی استفاده در سیستم های سنجش کننده با حساسیت بالا را دارا می باشد و از طول موج دوم آن بعنوان یک طول موج مرجع استفاده می شود. نمایشگرهای رنگی و چاپ رنگی نوری از دیگر کاربردهای این لیزر می باشند.

بدلیل طراحی این لیزرها و عملکرد آنها در محدوده $1\sim 1000\mu\text{m}$ بویژه در محدوده Mid-IR (طول موج های $3\sim 15\mu\text{m}$) و با توجه به اینکه بیشترین باند جذب مولکول های گاز در این محدوده صورت می پذیرد، این لیزرها گزینه های فوق العاده مناسبی برای سنجش میزان گازها هستند. قابل ذکر است QCLها تنها لیزرهای نیمه هادی می باشند که قادر به عملکرد در حوزه Mid-IR در دمای اتاق و حتی بالاتر هستند و از سنجش مولکولهای گاز در میان یک میلیارد دیگر PPT برخوردار می باشند در حالیکه این دقت برای سایر لیزرها از مرتبه چند مولکول در میان میلیون مولکول دیگر PPM است. در حالت عملکرد پالسی در دمای اتاق و دماهای بالاتر، نیازی به فرآیند خنک سازی (همانند استفاده از نیتروژن مایع) در این لیزرها به مانند لیزرهای نیمه هادی عادی احساس نمی شود.

توان خروجی این نیز از توان های 0.1Watt تا توان های بالاتر از 1Watt در سال های اخیر در حال افزایش بوده بطوریکه آخرین گزارش از توان این لیزرها، توان 1.3Watt در طول موج $9.8\mu\text{m}$ در دمای اتاق و توان 4Watt در دمای 80k توسط محققان دانشگاه Northwestern در سال 2008 گزارش گردیده است.

۱-۱- مقدمه

قبل از اختراع دیود لیزری، لیزر نیمه هادی بر اساس گذارهای بین ترازهای Landau در میدانهای مغناطیسی قوی توسط Lax در سال ۱۹۶۰ پیشنهاد شده بود. این اولین پیشنهاد لیزر نیمه هادی بود که در آن گذار^۱ نوری مابین حالت‌های یک باند مشابه (هدایت یا ظرفیت) بعوض بازترکیب جفت الکترون - حفره در عرض باند ممنوعه اتفاق می افتد. ایده لیزر تک قطبی (تک حاملی) بعد از اولین پیشنهاد آن توسط Lax از ذهن ها پاک شده بود و دو سال بعد از آن اولین دیود لیزری براساس باز ترکیب جهت الکترون - حفره ارائه شد. این شاهکار تمامی توجهات انجمن های نیمه هادی را بسمت لیزرهای باند ممنوعه^۲ سوق داد، و رقابتی برای ارائه اولین لیزر دیود موج پیوسته CW که در دمای اتاق عمل می کرد شروع شد.

مسابقه در سال ۱۹۷۰ زمانی که اولین لیزر موج پیوسته با ساختار ناهمگن AlGaAs / GaAs ارائه شد، تمام شد. تلاش جهت بهبود عملکرد دیودهای لیزری و توسعه تکنولوژی ترانزیستوری عناصر گروه III-V، تغییرات بزرگ در تکنیک های لایه نشانی^۳ جهت رشد لایه های نیمه هادی نازک و تولید ساختارهایی با مفهوم دو بعدی مثل چاه های کوانتوم^۴ و لایه های معکوس را بوجود آورد. در واقع زمانی که دیودهای لیزری به حد کمال تکنولوژیکی خود رسیده بودند، Esaki و Tsu مقاله اصلی خودشان را که درمورد مفهوم ابرشبکه (Superlattice) بود چاپ کردند (در سال ۱۹۷۰). یک سال بعد Kazarinov و Suris (۱۹۷۱) پیشنهاد کردند که بهره نوری میتواند با استفاده از گذارهای بین دو حالت ساختار دو بعدی در یک ابرشبکه بایاس شده توسط یک میدان الکتریکی خارجی بدست آید. این ساختار و مفهوم در مقایسه با سایر لیزرهای نیمه هادی زمان خود خیلی تازه بود و مفهوم قطعه تک قطبی (تک حامل) را که در آن گذار های نوری بطور کامل توسط پهنای چاه و مواد سد^۵ و بدون در نظر گرفتن انرژی باند ممنوعه مربوطه مهندسی و کنترل می شدند معرفی شد. سالها بعد، پس از نمایش اولین لیزر آبشاری Quantum Cascade Laser (QCL) در یک کنفرانسی، Capasso با افتخار اظهار کرد که لیزرهای QC بالاخره ما را از قید باند ممنوعه آزاد کرد.

به آسانی نمی توان قضاوت کرد اگر ساختار Kazarinov و Suris واقعا بتواند بهره نوری از خود نشان بدهد مگر احتمالا به دو دلیل:

1- Transition
2 - Bandgap
3 - Epitaxial
4 - Quantum wells
5 Barrier

دلیل اول مربوط است به فقدان منابع^۱ الکترون هایی، که حامل ها را به هر ناحیه فعال مربوط به ساختار آبخاری^۲ تزریق می کرد. بدون منبع لازم است الکترونها از اتصالات آورده شوند که این هم باعث میشود ساختار بصورت الکتريکی بدلیل تشکیل نواحی بارهای فضایی، ناپایدار شود (چنانچه خواهیم دید به این منابع در طرح های فعلی ناحیه تزریق اطلاق میشود).

دلیل دوم از فقدان ناحیه ای است که الکترون های با انرژی بالا میتواند بدون برگشت به حالت های قبلی^۳ انباشته شوند. بعبارت دیگر ساختار پیشنهاد شده توسط Kazarinov و Suris شامل ناحیه تزریق^۴ نبود و چنانچه می دانیم امروزه این قسمت بعنوان یک بخش اساسی یک لیزر QC می باشد. تا ۱۵ سال بعد از اولین پیشنهاد، هیچگونه پیشرفتی در جهت تحقق لیزر تک قطبی صورت نگرفت. در اواخر دهه ۱۹۸۰ و اوایل دهه ۱۹۹۰ محققان روی اثر تونل زنی حامل ها کار می کردند. در عرض چند سال توسط چندین پیشنهاد مشخص شد که چگونه شرط وارونگی جمعیت^۵ با استفاده از گذارهای بین بانندی در ابرشبهه ها یا چاههای کوانتومی کوپل شده می تواند بدست آید. البته این پیشنهادها بطور واقعی اجرا نشد.

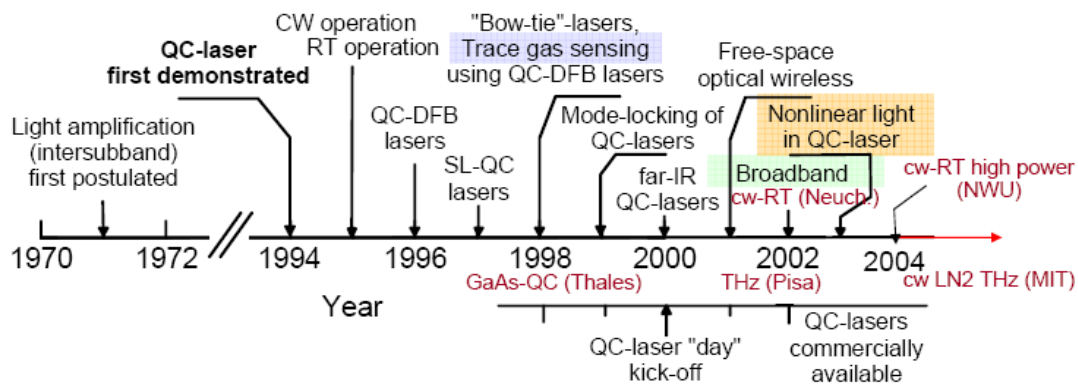
Capasso در سال ۱۹۸۸ در آزمایشگاه بل Bell روی تونل زنی حامل ها کار می کرد و همان سال وی مقاله ای را ارائه و به چاپ رساند که در آن وی یک لیزر تک قطبی بر اساس ساختار ابر شبکه پیشنهاد داده بود. در واقع او کار روی اندر کنش نور با گذارهای زیرباند را در دهه ۱۹۹۰ شروع کرد که در این دهه Sirtori گروه خودش را جهت مطالعه روی ویژگی های خطی و غیر خطی نوری این گذارها در سال ۲۰۰۰ ملحق کرد. پروژه لیزر واقعا شتاب زیادی یک سال بعد از ملحق شدن Faist به گروه Capasso گرفت. در عرض دو سال و اندی بعد از ورود وی در ۱۴ ژانویه ۱۹۹۴، Faist عملکرد لیزری با طول موج $4.3\mu\text{m}$ در لیزر زیر باند را مشاهده کرد و لیزر آبخاری (Quantum Cascade) متولد شد. نتایج اصلی ماهها بعد در علم منتشر شد. جالب است که دقت کنید در محدوده Mid Infrared ($3\mu\text{m} < \lambda < 15\mu\text{m}$) عملا مشاهده الکترو لومینانس پیش بینی شده است. این مربوط است به مشکلات ذاتی مشاهده انتشار خود بخودی از یک الکترون در زیر باند تحریک شده که بازدهی تشعشعی نزدیک به 10^{-5} دارد. پس از چندین سال بعد از اولین نمایش کارایی لیزرهای QC بطور چشمگیری بهبود یافت. در سال ۱۹۹۶ عملکرد بالای دمای اتاق در حالت کاری بصورت پالسی بدست آمد و محدوده طول موج بلند فعلا تا $300\mu\text{m}$ گسترش یافته است. لیزرهای QC در طول موجهای $3\mu\text{m} \sim 15\mu\text{m}$ و در دمای اتاق بصورت موج پیوسته CW و با چند صد

1- Reservoirs
 2- Cascade
 3- Backfillingf
 4- Injector
 5 - Population inversion

میلی وات بصورت معمولی عمل می کنند. در دمای پایین مفهوم لیزرهای QC به محدوده تراهرتز گسترش یافته است و رنج کلی طول موج در محدوده $300\mu\text{m} \sim 3.5\mu\text{m}$ نشان داده شده است.

در فاصله زمانی مابین ارائه اولین لیزر و لیزر موجود چندین مقاله توسط گروههای متفاوت ارائه شده است. قبل از جمع بندی این مقدمه تاریخی تعدادی از نوآوریهای موجود را که نقش مهمی در این حوزه ایفا می کنند، بیان می کنیم. بترتیب تاریخی، در سال ۱۹۹۸ لیزر QC با ساختار غیرهمگن و بر اساس GaAs و در آزمایشگاه Thomson ارائه شد. در سال ۲۰۰۲ لیزرهای QC تراهرتز در Scuola تحقیق داده شد و در همان سال در دانشگاه Neuchâtel اولین لیزر موج پیوسته CW که در دمای اتاق کار می کرد ارائه شد. در سال ۲۰۰۴ قطعاتی که با توان بالا در دمای اتاق کار می کردند ارائه شدند. در حال حاضر روی مطالب باقی مانده زیر در مورد لیزرهای QC بحث می شود قطعاتی با طول موجهای کمتر $\lambda < 3\mu\text{m}$ که در این حالت ترکیبات مواد غیر هم جنس کمتر استفاده شده مثل GaN یا ترکیبات سرب استفاده می شود. استفاده از ساختارهای یک بعدی و صفر بعدی جهت تحقق لیزرهای QC بر اساس سیم کوانتومی QW یا نقطه کوانتومی QD، بهبود Wall plug efficiency و درک و تفسیر مساله اشباع بهره که پیک توان خروجی را محدود می کند.

تقریباً تمامی این وقایع مشهور تاریخی مربوط به رشد لیزر QC در شکل ۱-۱ به تصویر کشیده است

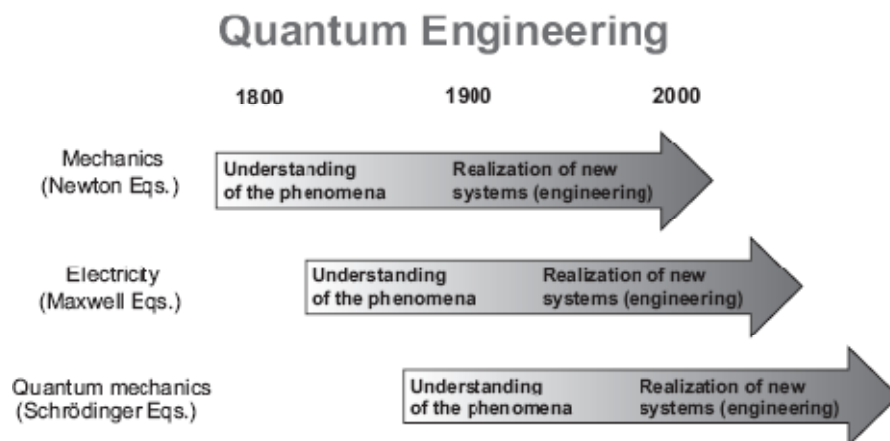


شکل ۱-۱: روند تاریخی لیزرهای QCL

۱-۱-۲- مهندسی کوانتوم

در قرن اخیر سر و کار مهندسانی که با مواد فشرده سر و کار دارند مثل الکترونیک، اپتو الکترونیک و در حالت کلی برای علم مواد، اکثراً در ارتباط با دستکاری ویژگیها و خواص مواد که بطور مستقیم از شیمی

اجزاء اصلی بدست می آیند، بود. مهندسی کوانتوم شکل ۱-۲ با پیوند های شیمیایی بین اتم ها سر و کاری ندارد بلکه مهندسی کوانتوم احتمال کنترل ویژگی های مواد را با تعریف سایز (اندازه) توزیع فضایی اجزاء سازنده را در سطح نانو و مستقل از طبیعت رفتار و خواص شیمیایی آنها مطالعه می کند. خواص نهایی این رده جدید از مواد مستقیماً از تعریف دوباره خواص توپولوژیکی (مکانی) در سطح اتمی بدست می آید و می تواند با نتایج مشابه روی ترکیبات مختلف مواد اعمال شود. از این لحاظ نانو تکنولوژیها نتیجه مستقیم مهندسی کوانتوم هستند. لیزر QC یک مثال عالی از اینکه چطور مهندسی کوانتوم می تواند جهت درک کردن کارایی و بازده قطعات و ساطع کننده ها در رنج Mid-Infrared استفاده شود، می باشد. در این قطعات عملکرد بر اساس خواص فیزیکی مواد سازنده نمی باشد بلکه این مدل از شکل گیری بصورت لایه های پی در پی ساختار غیرهمگن بدست می آید.



شکل ۱-۲: روند تفهیم و تحقق مکانیک کوانتومی

مهندسی کوانتوم که با پیشرفت های اخیر در تکنیک های رشد لایه نشانی مرتبط می باشد به شخص اجازه می دهد با پتانسیل های ساختگی کریستال نیمه هادی با توابع موج و ترازهای انرژی الکترونیکی دلخواه در ارتباط باشد. این روش اساس اصلاح و تغییر خواص نوری و انتقال^۱ نیمه هادی است و راههایی را برای مواد

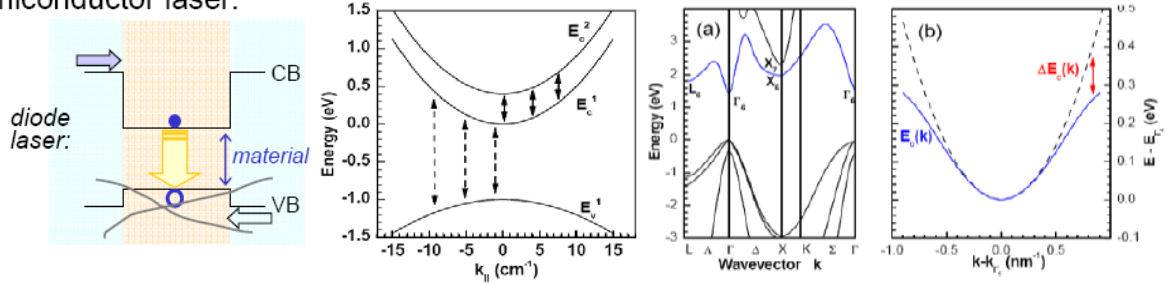
مصنوعی و تولید و ایجاد قطعات مفید باز کرده است. یک مثال قابل توجه از این مفهوم، لیزرهای تراهرتز QC است که در آن با وارد کردن کمتر از 2% از اتم های Al در داخل کریستال GaAs، یک قسمت از نیمه هادی توده ای Bulk را طوری تغییر می دهیم که بصورت لیزر Far-IR عمل بکند. یک جنبه مهم دیگر لیزرهای QC که به مهندسی کوانتوم مرتبط است عبارتست از اینکه عملکرد این قطعه اساسا مستقل از مواد استفاده شده در ساختار نیمه هادی است. امروزه لیزرهای QC با استفاده از ترکیبات GaInAs/AlInAs/InP برای لیزرهای رنج Mid-IR، GaAs/AlGaAs/GaAs برای لیزرهای تراهرتز، از ساختار AlSb/InAs//InAs یا AlSb/InAs//GaSb برای کاربردهای موج کوتاه مناسب هستند ارائه شده اند. نکته جالب اینست که برای این سه ترکیب یاد شده برای مثال لیزرهای QC با طول موج $10\mu\text{m}$ ساخته شده اند، ثابت می کنند که طول موج منتشر شده کلا از گذارهای ذاتی مواد سازنده مستقل است. این یک ویژگی منحصر بفرد است و هیچ لیزر دیگری این ویژگی را ندارد.

۱-۲-۱- اصول اساسی لیزرهای QC

۱-۱-۲-۱ Unipolarity and Cascading

لیزرهای نیمه هادی مثل لیزرهای چاه کوانتومی QW، بر اساس گذارهای بین باندهای انرژی عمل می کنند که در آن الکترون ها به باند هدایت و حفره ها به باند ظرفیت لایه فعال توسط بایاس مستقیم پیوند P-N تزریق می شوند و از باز ترکیب آنها در عرض باند ممنوعه مواد نور منتشر می کنند. این انرژی باند ممنوعه طول موج نور منتشر شده را مشخص خواهد کرد (شکل ۳-۱). علاوه بر آن بعلت اینکه جمعیت الکترونها و حفره ها بطور وسیع در باندهای ظرفیت و هدایت مطابق با آمار فرمی^۱ توزیع شده اند و این باعث می شود طیف بهره کاملا پهن گردد و پهنای آن وابسته به انرژی گرمایی است.

Conventional semiconductor laser:



شکل ۱-۳: لیزرهای نیمه هادی معمولی و خاصیت Nonparabolicity باندها

لیزر زیرباند^۱ تک قطبی یا لیزر QC از لحاظ اصول اساسی با لیزرهای دیودی متفاوت است. تمام اختلافها در نتیجه دو ویژگی منحصر بفرد لیزرهای QC می باشد و این لیزرها را از منتشر کننده های نور نیمه هادی معمولی مجزا ساخته است. این ویژگیها عبارتند از تک قطبی^۲ (الکترون تنها یا حفره تنها) و طرح آبخاری^۳ باز گردانی^۴ الکترون. این دو ویژگی بصورت شماتیک در شکل ۱-۴ نشان داده شده مستقل اند و بطور کاملا مجزا نیز می توانند استفاده شوند.

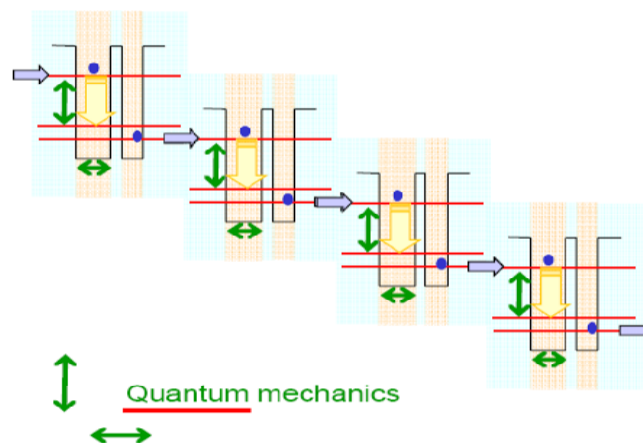


شکل ۱-۴: خواص لیزرهای QC تک قطبی و حالت آبخاری

- 1 - Subband
- 2- Unipolarity
- 3 - Cascading
- 4 - Recycling

برای مثال در سال ۱۹۹۷، Garcia لیزر بین بانندی آبخاری را در طول موج 830 nm ~ را ارائه کرده در حالیکه Gmachl یک لیزر زیرباندی را بدون طرح آبخاری ارائه کرده است.

تک قطبی در لیزرهای QC نتیجه گذارهای نوری است که مابین حالت های باند ظرفیت روی می دهد. این گذارها عموماً بعنوان گذارهای زیر بانندی مشخص می شوند. حالات شروع و پایانی در باند ظرفیت هستند و بنابراین انحنا یکسان و برابری را در فضای معکوس دارند (شکل ۳-۱). اگر حالت غیر سهموی باندها را در نظر نگیریم، چگالی کل حالت ها (DOS) خیلی تیز می باشند یعنی تقریباً مشابه حالت گذارهای اتمی. در مقایسه با گذارهای بانندی، پهنای باند بهره تنها بصورت غیر مستقیم به دمای ناشی از فرآیندهای تصادم و اثرات many body وابسته است. بعلاوه برای این قطعات طول موج منتشره به پهنای باند ممنوعه مواد سازنده وابسته نیست اما می تواند با تغییر پهنای لایه ها تنظیم شود. بالاترین انرژی فوتون قابل دسترس نهایتاً توسط ناپیوستگی مواد سازنده باند هدایت ΔE_c بدست می آید در صورتیکه از جنبه طول موج بلند هیچ محدودیتی اساسی از لحاظ ساخت قطعات QC که در طول موجهای Far-IR نور منتشر بکند وجود ندارد. ویژگی اساسی دیگر لیزرهای QC طرح آبخاری چند طبقه است که بوسیله آن الکترون هایی که در هر زمان در بهره و انتشار نور شرکت می کنند و از پیرودی به پیرودی دیگر بازگردانی می شوند. بنابراین هر الکترون تزریق شده بالای آستانه اصولاً می تواند بتعداد N_p فوتون لیزری تولید بکند که N_p تعداد پله ها است این باعث خواهد شد که $1 \gg \eta_q$ و بنابراین توان نوری خروجی خیلی بالا تولید شود، چون می دانیم هر دو مقدار مذکور متناسب با N_p است (شکل ۵-۱).



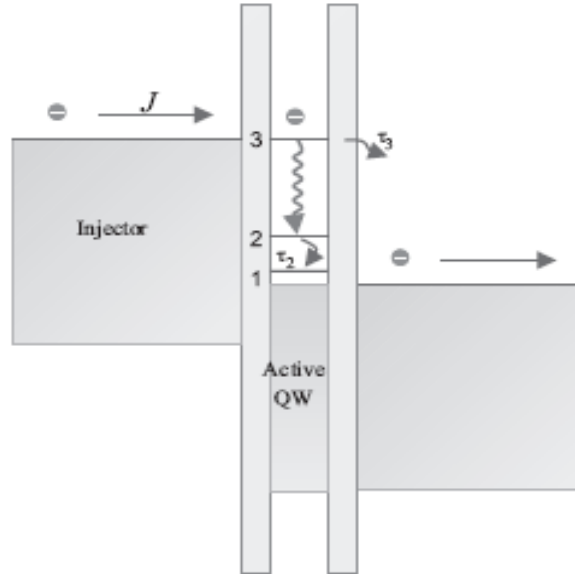
شکل ۵-۱: شماتیک نحوه کار لیزرهای QC

۱-۲-۱-۲- قوانین رسیدن به وارونگی جمعیت در زیر باند

در یک لیزر QC یک پریود ناحیه فعال می تواند با یک سیستم سه ترازه همچنانچه در شکل ۶-۱ نشان داده شده تقریب زده می شود. نقش ناحیه تزریق انتقال الکترونها از حالت e_1 (حالت پایه لیزر در این ساختار) به حالت e_3 (حالت تحریک لیزر در این ساختار) در پریود بعدی می باشد. بهره زیرباند نتیجه وارونگی جمعیت ما بین e_2 و e_3 است. یک پارامتر مهم برای عملکرد لیزر QC راندمان تزریق η_i است که بصورت نرخ جریان تزریق شده در حالت e_3 به کل جریان تعریف می شود:

$$\eta_i = \frac{J_3}{J} \quad (1-1)$$

در حالت ایده آل $\eta_i = 1$ است. انحراف از این مقدار یا بدلیل فعالیت حرارتی از ناحیه تزریق به حالت های پیوسته^۱ است و یا بدلیل تحریک به حالت های بالا و یا تزریق مستقیم الکترون ها از ناحیه تزریق به حالت های پایین e_2 و e_1 است. مکانیزم اول بوسیله طراحی مناسب ناحیه فعال و با بکارگیری سدهای پتانسیل با انرژی بالاتر می تواند حذف شود. مکانیزم دوم می تواند با استفاده از اعمال چاه کوانتومی باریک بعد از سد پتانسیل تزریق بهبود داده شود که این عمل باعث افزایش کوپلینگ با حالت e_3 اما کاهش کوپلینگ با e_2 و e_1 می شود.



شکل ۱-۶: یک و نیم پروباز نواحی فعال و تزریق لیزرهای QC

اگر τ_3 کل زمان عمر الکترونها در حالت e_3 باشد چگالی حالت پایدار الکترون در این حالت توسط رابطه ۱-۲ داده می شود:

$$n_3 = \frac{\eta_i J}{e} \tau_3 \quad (1-2)$$

اگر فرض کنیم حالت e_2 تنها از طریق پراکندگی^۱ مستقیم الکترون ها از حالت e_3 اشغال میشود چگالی الکترون براحتی توسط رابطه زیر داده میشود:

$$n_2 = n_3 \frac{\tau_2}{\tau_{32}} \quad (1-3)$$

که τ_{32} میانگین زمانی پراکندگی از e_3 به e_2 و τ_2 زمان عمر الکترونها در حالت e_2 است.

در این شکل (۱-۶) وارونگی جمعیت تفسیر می شود.

$$n_3 - n_2 = \frac{\eta_{ij}}{e} \tau_3 \left(1 - \frac{\tau_2}{\tau_{32}} \right) \quad (1-4)$$

در اکثر حالت های غیر مطلوب که جریان تمام الکترونها مرتب از e_3 به e_2 می آید (بهتر است بگوییم n_2 بالاترین مقدار خود را دارد. $(\tau_3 = \tau_{32})$ ،

$$n_2 = \frac{\tau_2 \eta_{ij}}{e} \quad (1-5)$$

و

$$n_3 - n_2 = \frac{\eta_{ij}}{e} (\tau_3 - \tau_2) \quad (1-6)$$

اگر $\tau_3 > \tau_2$ باشد وارونگی جمعیت و بهره نوری برای هر چگالی جریان بدست خواهد آمد. یک روش رسیدن به τ_2 کوتاهتر استفاده از طرح سه حالت با گذار تشدید از e_2 به e_1 با انرژی LO-Phonon می باشد. این یک ویژگی بسیار عالی از لیزرهای QC می باشد. هیچ آستانه ای برای وارونگی جمعیت وجود ندارد و بهره از اولین جریان الکترون وجود دارد. بعنوان نتیجه چگالی جریان آستانه بطور مستقیم متناسب با تلفات کاواک نوری است و به شرط شفافیت^۱ مربوط است. بنابراین موضوع مهم برای دسترسی به آستانه کم در لیزر QC کاهش تلفات نوری است هم با استفاده از موجبرهای با تلفات کم و هم با استفاده از long device های (2 ~ 4 mm) جهت کاهش مهم تلفات آینه.

۱-۲-۲- معادلات نرخ (Rate Equations)

تعیین دقیق جمعیت حالت ماندگار در دو حالت e_2 و e_3 در گذار نوری زیر باند عموماً سراسر است و آسان نیست. آن از توزیع شبه تعادل جمعیت کل الکترونها در ناحیه اکتیو که شامل مکانیزم های مختلف