

اللهم صل على محمد
والآل محمد

دانشکده علوم پایه

گروه فیزیک

(فوتونیک)

شبیه سازی اثر **p-doping** و اثر واهلش مستقیم بر عملکرد
لیزرهای نقطه کوانتومی

از:

سمانه غلامحسینی

استاد راهنما:

دکتر اسفندیار رجایی

شهریور ۱۳۹۲

تقدیم بابوسه بردستان پدرم

به او که عالم‌ز به من آموخت تا چگونه در عرصه‌ی زندگی، ایستادگی را تجربه کنم...

تقدیم به مهربان فرشته‌ی زندگی ام، مادر... .

دریای بی‌کران فداکاری و عشق... که وجودم همه برایش رنج است و وجودش همه برایم مهر

تقدیم به مهدم خوب محطه‌ی ایتم، شیما

که رنگ شادی ایتم شد و سنگ صبور هستی ایتم... حضورش همواره لبریزم می‌کند از شوق...

تقدیم به تکیه‌گاه کوچک زندگی ام، علی

که لحظات ناب باور توانستن و جسارت خواستنم می‌یون حضور سبز او است...

و تقدیم به شهدای گرانقدر هسته‌ی... .

هر انسان در زندگی اش دو معلم دارد: روزگار و آموزگار

اولی به بهای زندگی ات، و دومی به بهای زندگی اش...

سزاوار است، از استاد با کمالات و شایسته‌ام، جناب آقای دکتر اسفندیار رجایی که در کمال سعه‌ی صدر، با حسن خلق و فروتنی از هیچ کمکی در این عرصه بر من دریغ ننمودند و زحمت راهنمایی این پایان نامه را بر عهده داشتند، کمال تشکر و قدردانی را داشته باشم. همچنین از اساتید گرانقدرم جناب آقای دکتر سعید باطبی و جناب آقای دکتر حمیدرضا مشایخی که در سمت ممتحن زحمت مطالعه و داوری این پایان نامه را متقبل شدند بی‌نهایت سپاسگزارم. جا دارد از خانواده و دوستانم بخصوص ندا انوری عزیز که در تمام این مسیر یاور و همراهم بود، صمیمانه تشکر کنم.

سمانه غلامحسینی، شهریور ۹۲

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
د	فهرست جدول ها
ذ	فهرست شکل ها
س	چکیده فارسی
ش	چکیده انگلیسی
۱	مقدمه
۴	فصل اول: ساختار و ویژگی‌های لیزرهای نیمه رسانای نقطه کوانتومی
۵	۱-۱) لیزرهای نیمه رسانا
۶	۱-۲) هندسه ی کاواک نوری
۶	۱-۲-۱) لیزرهای لبه گسیلی (EEL)
۶	۱-۲-۱) لیزرهای گسیل سطحی کاواک قائم (VCSEL)
۷	۱-۳) لیزرهای نقطه کوانتومی
۸	۱-۴) چگالی حالت های نیمه رساناهای نانوساختار
۱۱	۱-۵) گذارهای تابشی
۱۱	۱-۶) گذارهای غیر تابشی
۱۱	۱-۶-۱) بازترکیب از طریق نقص و ناخالصی
۱۳	۱-۶-۱) بازترکیب از طریق سطح و سطوح میانی
۱۴	۱-۶-۱) بازترکیب به یاری فونون و اثر اوژه

۱۶	..... کرنش (۷-۱)
۱۷	..... ساختار نواری در نیمه رساناها (۸-۱)
۱۹	..... روش ساخت نقاط کوانتومی (۹-۱)
۱۹	..... QD های خودسامانی و روش رشد استرانسکی- کراستانو (۱-۹-۱)
۲۰	..... فاکتورهای محدود کننده‌ی عملکرد لیزرهای نقطه کوانتومی (۱۰-۱)
۲۲	فصل دوم: مشخصه های مدولاسیون لیزرهای نقطه کوانتومی
۲۳	..... (۱-۲) مدولاسیون لیزرهای نقطه کوانتومی
۲۳	..... (۲-۲) آنالیز سیگنال کوچک
۲۴	..... (۳-۲) فاکتور میرایی و K- فاکتور
۲۵	..... (۴-۲) پهنای نوار مدولاسیون
۲۵	..... (۵-۲) عوامل محدود کننده‌ی سرعت مدولاسیون
۲۷	..... (۶-۲) عوامل مؤثر بر افزایش سرعت مدولاسیون
۲۷	..... (۱-۶-۲) لیزردهی تراز برانگیخته
۲۷	..... (۲-۶-۲) تزریق تونلی
۲۸	..... p-doping (۳-۶-۲)
۲۹	..... (۷-۲) روش p-doping
۳۰	..... انواع p-doping (۸-۲)
۳۰	..... (۱-۸-۲) تزریق مدولاسیونی
۳۲	..... (۹-۲) تأثیر p-doping بر سرعت لیزرهای نقطه کوانتومی

۳۳	..... (۱۰-۲) دمای مشخصه (وابستگی دمایی به چگالی جریان آستانه)
۳۳	..... (۱۱-۲) تأثیر p-doping بر دسترسی به دمای مشخصه‌ی بالا
۳۵	..... (۱۲-۲) مدل جفت شدگی فوتون
۳۸	..... فصل سوم: معادلات آهنگ لیزرهای نقطه کوانتومی
۳۹	..... (۱-۳) مقدمه
۴۰	..... (۲-۳) لیزر نقطه کوانتومی با یک تراز لیزر دهنده
۴۰	..... (۳-۳) مطالعات تئوری و تجربی روی تابع پاسخ مدولاسیون
۴۱	..... (۴-۳) توصیف مدل عددی در لیزر نقطه کوانتومی InAs/InP با یک تراز لیزر دهنده
۴۴	..... (۵-۳) پاسخ های حالت پایا در لیزر نقطه کوانتومی InAs/InP با یک تراز لیزر دهنده
۴۴	..... (۱-۵-۳) چگالی حامل و چگالی فوتون بر حسب جریان تزریقی
۴۵	..... (۲-۵-۳) تأخیر روشن شدن
۴۶	..... (۶-۳) تابع پاسخ مدولاسیون برای لیزر نقطه کوانتومی InAs/InP با یک تراز لیزر دهنده
۴۸	..... (۷-۳) تحلیل تابش دوتایی در لیزرهای نقطه کوانتومی InAs-InP با طول موج $1.55 \mu\text{m}$
۴۹	..... (۸-۳) توصیف مدل عددی برای لیزر نقطه کوانتومی InAs/InP با دو تراز لیزر دهنده
۵۱	..... (۹-۳) معادلات آهنگ برای لیزر نقطه کوانتومی InAs/InP با دو تراز لیزر دهنده
۵۲	..... (۱۰-۳) تابع پاسخ مدولاسیون برای لیزر نقطه کوانتومی با تابش دوتایی
۵۵	..... (۱۱-۳) مدل لیزر p-doped با در نظر گرفتن همه‌ی مسیرهای واهلش
۵۶	..... (۱۲-۳) واهلش به یاری فونون و اثر اوژه
۵۶	..... (۱۳-۳) معادلات آهنگ برای لیزرهای نقطه کوانتومی p-doped شده‌ی چند لایه

۶۰	..... ۱۴-۳) تابع پاسخ فرکانسی لیزر نقطه کوانتومی p-doped شده‌ی چند لایه
۶۳	..... ۱۵-۳) احتمال اشغال در نقطه کوانتومی‌های p-doped شده
۶۴	..... ۱۶-۳) اثر p-doping بر پهنای نوار 3 dB
۶۷	..... ۱۷-۳) اثر دینامیک حامل و K-فاکتور بر پهنای نوار 3 dB
۶۸	..... ۱۸-۳) اثر تعداد لایه‌های QD بر پهنای نوار 3 dB
۶۹	فصل چهارم: شبیه سازی مشخصه های دینامیکی لیزر های نقطه کوانتومی
۷۰	..... پارامترهای استفاده شده
۷۲	..... ۱-۴) شبیه سازی مشخصه های دینامیکی لیزر نقطه کوانتومی یک تراز InAs/InP
۷۲	..... ۱-۱-۴) شبیه سازی چگالی حامل و چگالی فوتون بر حسب جریان تزریقی
۷۳	..... ۲-۱-۴) بررسی تابع پاسخ مدولاسیون لیزر نقطه کوانتومی یک تراز
۷۳	..... ۳-۱-۴) بررسی اثر دما بر مشخصه های لیزر نقطه کوانتومی یک تراز
۷۵	..... ۴-۱-۴) بررسی اثر چگالی نقاط کوانتومی بر مشخصه های لیزر نقطه کوانتومی یک تراز
۷۶	..... ۲-۴) شبیه سازی مشخصه های دینامیکی لیزر نقطه کوانتومی InAs/InP با دو تراز لیزر دهنده
۷۶	..... ۱-۲-۴) بررسی اثر زمان های واهلش آبخاری و مستقیم بر چگالی فوتون
۷۸	..... ۲-۲-۴) بررسی اثر زمان های واهلش آبخاری و مستقیم بر توان خروجی
۷۹	..... ۳-۲-۴) بررسی اثر دما بر مشخصه های لیزر نقطه کوانتومی با تابش دوتایی
۷۹	..... ۱-۳-۲-۴) اثر دما بر چگالی حامل و چگالی فوتون با در نظر گرفتن واهلش مستقیم
۸۰	..... ۲-۳-۲-۴) اثر دما بر توان خروجی با در نظر گرفتن واهلش مستقیم
۸۱	..... ۴-۲-۴) بررسی اثر چگالی نقاط کوانتومی بر مشخصه های لیزر نقطه کوانتومی با دو تراز لیزر دهنده
۸۱	..... ۱-۴-۲-۴) اثر چگالی نقاط کوانتومی بر چگالی حامل و چگالی فوتون با در نظر گرفتن واهلش مستقیم

۸۲	..... اثر چگالی نقاط کوانتومی بر توان خروجی با در نظر گرفتن واهلش مستقیم
۸۳	..... اثر اتلاف درونی (α_i) و اتلاف کلی (α) بر توان خروجی
۸۴	..... بررسی اثر طول کاواک بر توان خروجی لیزر نقطه کوانتومی با تابش دوتایی
۸۶	..... بررسی تابع پاسخ مدولاسیون لیزر نقطه کوانتومی با دو تراز لیزر دهنده
۸۶	..... اثر طول کاواک بر تابع پاسخ مدولاسیون لیزر نقطه کوانتومی با دو تراز لیزر دهنده
۸۷	..... اثر دما بر تابع پاسخ مدولاسیون لیزر نقطه کوانتومی با دو تراز لیزر دهنده
۸۹	..... شبیه سازی مشخصه های دینامیکی لیزر نقطه کوانتومی چند لایه‌ی InAs/GaAs
۸۹	..... اثر p-doping بر چگالی فوتون لیزر نقطه کوانتومی چند لایه
۹۰	..... اثر p-doping بر پهنای نوار مدولاسیون لیزر نقطه کوانتومی چند لایه
۹۱	..... اثر چگالی جریان تزریقی بر پهنای نوار مدولاسیون لیزر نقطه کوانتومی چند لایه‌ی p-doped
۹۴	..... فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهاد برای ادامه کار
۹۵	..... نتیجه گیری
۹۶	..... پیشنهاد برای ادامه کار
۹۷	..... مراجع
۱۰۳	..... پیوست

فهرست جدول ها

صفحه	عنوان
۶۹	جدول (۴-۱): پارامترهای مورد استفاده در شبیه سازی لیزر نقطه کوانتومی یک ترازى InAs/InP
۷۰	جدول (۴-۲): پارامترهای مورد استفاده در شبیه سازی لیزر نقطه کوانتومی دو ترازى InAs/InP
۷۱	جدول (۴-۳): پارامترهای مورد استفاده در شبیه سازی لیزر نقطه کوانتومی چند لایه با آرایش نوع InAs/GaAs p

فهرست شکل ها

صفحه	عنوان
۵	شکل (۱-۱): ساختار ناحیه‌ی فعال لیزرهای نیمه رسانای کوانتومی
۶	شکل (۲-۱): ساختار یک لیزر لبه گسیلی
۷	شکل (۳-۱): ساختار یک لیزر گسیل سطحی کاواک قائم
۸	شکل (۴-۱): ساختار یک لیزر نقطه کوانتومی با آلایش نوع p ناحیه‌ی فعال
۱۰	شکل (۵-۱): چگالی حالت ها بر حسب انرژی
۱۱	شکل (۶-۱): فرآیندهای جذب، گسیل خود به خودی و گسیل القایی
۱۲	شکل (۷-۱): بازترکیب از طریق نقص و ناخالصی
۱۴	شکل (۸-۱): نمودار بازترکیب از طریق سطح و سطوح میانی در یک نیمه رسانای نوع p
۱۵	شکل (۹-۱): بازترکیب اوژه در نیمه رساناهای III-V
۱۸	شکل (۱۰-۱): ساختار نوار انرژی در یک نیمه رسانای ذاتی
۱۹	شکل (۱۱-۱): ساختار نوار انرژی در یک نیمه رسانا با آلایش نوع p
۲۰	شکل (۱۲-۱): رشد QD های خودسامانی توسط روش S-K
۲۹	شکل (۱-۲): ساختار لیزر نقطه کوانتومی
۳۲	شکل (۲-۲): روش مدولاسیونی <i>p-doping</i>
۳۵	شکل (۳-۲): چگالی جریان آستانه و پهنای خط PL در QD های <i>p-doped</i> و <i>undoped</i> به صورت تابعی از دما
۳۶	شکل (۴-۲): تصویر مکانیسم جفت شدگی فوتون
۴۲	شکل (۱-۳): طرح مدل دینامیک حامل شامل واهلش مستقیم

- شکل (۲-۳): چگالی های حامل و فوتون بر حسب جریان تزریقی ۴۴
- شکل (۳-۳): منحنی تأخیر زمان روشن شدن به ازاء جریان های تزریقی مختلف ۴۵
- شکل (۴-۳): نمودار نمایش مدل دینامیک حامل با واهلش و فرار مستقیم ۴۹
- شکل (۵-۳): نمودار همه ی مسیرهای واهلش در یک سیستم QD ۵۵
- شکل (۶-۳): اثر آهنگ و مسیر واهلش بر احتمال اشغال الکترون و حالت پایه ی حفره ۶۳
- شکل (۷-۳): پهنای نوار 3 dB لیزر نقطه کوانتومی $1/3$ میکرومتری $InAs-GaAs$ بر حسب $(J_0 - J_{th})^{1/2}$ با مسیر واهلش مختلف و پهنای نوار 3 dB ماکزیمم بر حسب زمان واهلش ۶۵
- شکل (۸-۳): پهنای نوار 3 dB ماکزیمم بر حسب غلظت p -doping ۶۷
- شکل (۹-۳): تأثیر تعداد لایه ی QD بر وارونگی جمعیت آستانه (f_{th}) و پهنای نوار 3 dB ماکزیمم بر لیزر نقطه کوانتومی $1/3$ میکرومتری غیر آلانیده با مسیرهای واهلش مختلف ۶۸
- شکل (۱-۴): چگالی فوتون و حامل بر حسب جریان تزریقی ۷۲
- شکل (۲-۴): تابع پاسخ فرکانسی به ازاء جریان های تزریقی متفاوت ۷۳
- شکل (۳-۴): چگالی فوتون بر حسب جریان تزریقی و زمان به ازاء دماهای متفاوت ۷۴
- شکل (۴-۴): تابع پاسخ فرکانسی به ازاء دماهای متفاوت ۷۴
- شکل (۵-۴): اثر چگالی نقاط کوانتومی بر چگالی فوتون بر حسب جریان و تابع پاسخ فرکانسی لیزر نقطه کوانتومی یک تراز ۷۵
- شکل (۶-۴): چگالی فوتون بر حسب جریان تزریقی به ازاء زمان های واهلش متفاوت برای واهلش آبخاری تراز پایه، واهلش آبخاری تراز برانگیخته ، واهلش مستقیم تراز پایه و واهلش مستقیم تراز برانگیخته ۷۷
- شکل (۷-۴): توان خروجی بر حسب جریان تزریقی به ازاء زمان های واهلش آبخاری و مستقیم متفاوت ۷۸
- شکل (۸-۴): اثر دما بر چگالی حامل بر حسب جریان تزریقی و چگالی فوتون بر حسب زمان ۷۹
- شکل (۹-۴): توان خروجی بر حسب جریان تزریقی به ازاء دماهای متفاوت ۸۰
- شکل (۱۰-۴): اثر چگالی نقاط کوانتومی بر چگالی حامل بر حسب جریان تزریقی و چگالی فوتون بر حسب زمان ۸۱

- شکل (۴-۱۱): توان خروجی بر حسب جریان تزریقی به ازاء چگالی نقاط کوانتومی متفاوت ۸۲
- شکل (۴-۱۲): توان خروجی بر حسب جریان تزریقی به ازاء اتلاف درونی و اتلاف کلی متفاوت ۸۳
- شکل (۴-۱۳): توان خروجی بر حسب جریان تزریقی به ازاء طول کاواک های متفاوت ۸۴
- شکل (۴-۱۴): توان خروجی بر حسب طول کاواک به ازاء چگالی نقاط کوانتومی و اتلاف درونی متفاوت ۸۵
- شکل (۴-۱۵): توان خروجی بر حسب جریان تزریقی به ازاء ضریب بازتاب آینه ای متفاوت ۸۶
- شکل (۴-۱۶): اثر طول کاواک بر تابع پاسخ فرکانسی لیزر با تابش دوتایی برای تراز پایه و تراز برانگیخته ۸۷
- شکل (۴-۱۷): اثر دما بر تابع پاسخ فرکانسی لیزر با تابش دوتایی برای (الف): تراز پایه و (ب): تراز برانگیخته ۸۸
- شکل (۴-۱۸): اثر آرایش نوع p بر چگالی فوتون لیزر چند لایه ۹۰
- شکل (۴-۱۹): اثر p -doping بر تابع پاسخ فرکانسی لیزر نقطه کوانتومی چند لایه ۹۱
- شکل (۴-۲۰): اثر چگالی جریان تزریقی بر تابع پاسخ فرکانسی لیزر چند لایه p -doped و $undoped$ ۹۲

چکیده

بررسی اثر **p-doping** و اثر واهلش مستقیم بر عملکرد لیزرهای نقطه کوانتومی

سمانه غلامحسینی

در این پایان نامه، اثر آرایش نوع **p** و واهلش مستقیم را بر عملکرد لیزرهای نقطه کوانتومی مورد مطالعه قرار می‌دهیم. به این منظور، به ارائه‌ی مدل‌های لیزرهای نقطه کوانتومی در حالت‌هایی با یک تراز لیزر دهنده، دو تراز لیزر دهنده و مدل لیزر چند لایه‌ی **p-doped** شده پرداخته و معادلات آهنگ را بر اساس مدل‌های ارائه شده نوشته، و با استفاده از دستور رانگ-کوتای مرتبه چهار در نرم افزار متلب شبیه سازی می‌نماییم.

معادلات آهنگ لیزرهای نقطه کوانتومی با یک تراز لیزر دهنده و دو تراز لیزر دهنده‌ی **InAs/InP** را با در نظر گرفتن جمله‌ی واهلش و فرار مستقیم حل کرده ایم تا اثر واهلش مستقیم را بر چگالی فوتون، توان خروجی و پاسخ مدولاسیون این لیزرها بررسی کنیم. در واهلش مستقیم، حامل‌ها می‌توانند مستقیماً از لایه‌ی ترکنده به تراز پایه به دام انداخته شوند، که این می‌تواند تأثیر بسزایی بر عملکرد لیزرهای نقطه کوانتومی داشته باشد، برای بررسی این مزایا اثر دما، چگالی نقاط کوانتومی، طول کاواک و اتلاف درونی را بر کارایی لیزرهای با واهلش مستقیم مورد مطالعه قرار داده ایم.

یکی از عوامل مهم محدود کننده‌ی سرعت مدولاسیون لیزرهای نقطه کوانتومی، نزدیکی بیش از اندازه‌ی ترازهای حفره‌ها در نوار ظرفیت لیزر می‌باشد، که سبب تهی سازی این تراز از حفره در زمان باز ترکیب حامل‌ها می‌گردد و این اثر توسط تزریق حفره‌های اضافی با استفاده از **p-doping** جبران می‌شود. معادلات آهنگ لیزرهای نقطه کوانتومی چند لایه‌ی **InAs/GaAs** را با در نظر گرفتن حرکت حامل‌ها در سد پتانسیل و اثر واهلش اوژه برای همه‌ی مسیرهای واهلش نوشته و پاسخ مدولاسیون را به ازای افزایش غلظت آرایش و چگالی سطحی نقاط کوانتومی مورد بررسی قرار داده ایم.

کلید واژه‌ها: آرایش نوع **p**، پاسخ مدولاسیون، لیزرهای نقطه کوانتومی، واهلش مستقیم.

Abstract

Simulation of P-doping and influence of direct relaxation on performance of quantum dot lasers

Samaneh Gholamhosseini

In this thesis, we investigate the influences of p-doping and direct relaxation on performance of quantum dot lasers. For this aim, we introduce 3 models of quantum dot lasers with one-lasing-state, two-lasing-state and p-doped multilayer QD lasers. Based on these models, we write rate equations and simulate them in MATLAB software by using the fourth order Runge-Kutta method.

We solve the rate equations of one-lasing-state and two-lasing-state quantum dot lasers with concerning the direct relaxation and escape term in order to study the influence of direct relaxation on photon density, output power and modulation performance of these lasers. In direct relaxation, carriers can be captured from wetting layer to ground state directly, that can improve the performance of QD lasers. For study, we investigate the influence of temperature, quantum dot densities, cavity length and internal loss.

One of the major limitation of the modulation bandwidth of the quantum dot lasers is the high closely hole levels in valence band on QD lasers, that it can be solved with injection of extra holes using of p-doping. Rate equations of p-doped multilayer QD lasers have been calculated with taking into account the Auger relation for all path ways and also we have studied the influence of p-doping concentration and quantum dot densities on them.

Key Words: Direct relaxation, Modulation response, P-doping, Quantum dot lasers.

مقدمه



لیزرهای نیمه رسانا نوعی از لیزرها هستند که مستقیماً جریان الکتریکی را به فوتون‌ها تبدیل می‌کنند، و امروزه به دلیل اندازه‌ی کوچک، هزینه‌ی تولید کم و مصرف توان پایین به عنوان یک جزء اصلی از فرستنده‌های نوری در مخابرات فیبر نوری مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این لیزرها به ادوات دو قطبی که لیزر دیودها نیز نامیده می‌شوند، و ادوات یک قطبی که لیزرهای آبخاری نامیده می‌شوند طبقه بندی می‌شوند. لیزر دیودها متکی به گذارهای میان نواری بین حالت‌های انرژی نوار هدایت و نوار ظرفیت هستند، و لیزرهای آبخاری متشکل از یک ساختار درون نواری بوده و متکی به گذارهای درون زیر نواری هستند که تنها در بر گیرنده‌ی حالت‌های نوار هدایت هستند. هندسه‌ی کاواک نوری موجب در نظر گرفتن دو نوع عمده از لیزرهای نیمه رسانا می‌شود: لیزرهای لبه گسیلی و لیزرهای گسیل سطحی کاواک قائم. محدودیت کوانتومی ناحیه‌ی فعال نیز موجب طبقه بندی لیزرهای نیمه رسانا می‌شود. محدودیت در یک بعد منجر به لیزر چاه کوانتومی^۱، محدودیت در دو بعد منجر به لیزر سیم کوانتومی^۲ و محدودیت در سه بعد منجر به لیزر نقطه کوانتومی^۳ می‌شود.

در سال‌های اخیر لیزرهای نقطه کوانتومی به دلیل خواص امیدوار کننده‌ای از جمله چگالی جریان آستانه‌ی پایین، حساسیت دمایی پایین، پهنای نوار بالا و چرپ^۴ فرکانسی پایین به عنوان منابع لیزری نسل بعدی برای شبکه‌های مخابرات فیبر نوری توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند، و انتظار می‌رود لیزرهای با مدولاسیون مستقیم^۵ (DML) یک نقش مهم در لینک‌های مخابراتی نسل بعدی برای کاربردهای بدون نیاز به خنک کننده و عایق بندی ایفا کنند. با این حال، یکی از اشکالات عمده‌ی لیزرهای نقطه کوانتومی محدودیت پهنای نوار مدولاسیون است. به منظور بالا بردن مشخصه‌های مدولاسیون راه‌های مختلفی ارائه شده است، از جمله لیزردهی از تراز برانگیخته، تونل زنی تزریقی، و p-doping. تکنیک p-doping برای جبران فاصله‌ی نزدیک ترازهای حفره‌ها پیشنهاد شده است. حفره‌های اضافی از اشباع بهره با چگالی حامل جلوگیری می‌کنند، به همین منظور بهره‌ی حالت پایه‌ی ماکزیمم و بهره‌ی دیفرانسیلی افزایش می‌یابد. دمای مشخصه و پهنای نوار مدولاسیون لیزرهای نقطه کوانتومی می‌تواند بطور قابل توجهی توسط p-doping افزایش یابد.

¹.Quantum well

².Quantum wire

³.Quantum dot

⁴.chirp

⁵.directly modulated lasers

در فصل اول این پایان نامه با ساختار نواری لیزرهای نیمه رسانا، چگالی حالت ها و روش ساخت نقاط کوانتومی آشنا شده و انواع گذارهای تابشی و غیر تابشی آنها را بررسی کرده ایم.

در فصل دوم، به معرفی p-doping و تکنیک های ایجاد آن و همچنین تأثیر آن بر افزایش پهنای نوار مدولاسیون و سرعت لیزرهای نقطه کوانتومی پرداخته ایم.

در فصل سوم، معادلات آهنگ لیزرهای یک تراز و دو تراز را با در نظر گرفتن جمله ی واهلش مستقیم نوشته و تأثیر زمان های واهلش آبخاری و مستقیم را بر عملکرد لیزرهای نقطه کوانتومی مورد بررسی و مقایسه قرار داده ایم. در ادامه گامی فراتر نهاده و با در نظر گرفتن همه ی مسیرهای واهلش، معادلات آهنگ لیزرهای نقطه کوانتومی چند لایه را نوشته و با رفع نقایص موجود در شبیه سازی بسیاری از لیزرهای نقطه کوانتومی موجود، از جمله چشم پوشی از حرکت حامل ها در سد پتانسیل و واهلش به یاری فونون و اثر اوژه به طرز واقعی تری پاسخ فرکانسی لیزرهای نقطه کوانتومی را مورد مطالعه قرار داده و اثر p-doping را در این لیزرها بررسی کرده ایم.

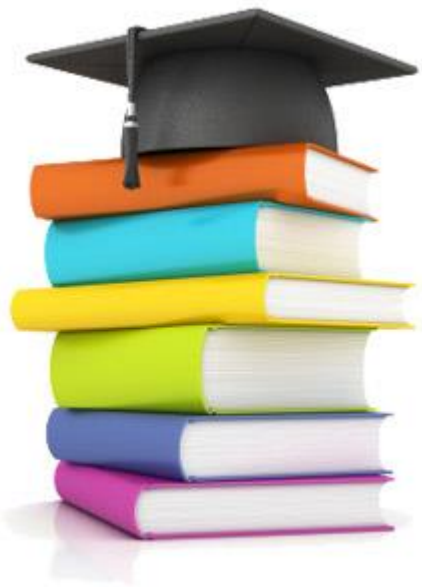
در فصل چهارم، با نوشتن معادلات آهنگ سه مدل پیشنهادی معرفی شده در فصل سوم در نرم افزار MATLAB و حل عددی آنها به کمک روش رانگ کوتای مرتبه ی چهارم به شبیه سازی مشخصه های لیزرهای نقطه کوانتومی مورد نظر پرداخته ایم.

در فصل پنجم، نتایج شبیه سازی های انجام شده بیان شده اند.

فصل اول

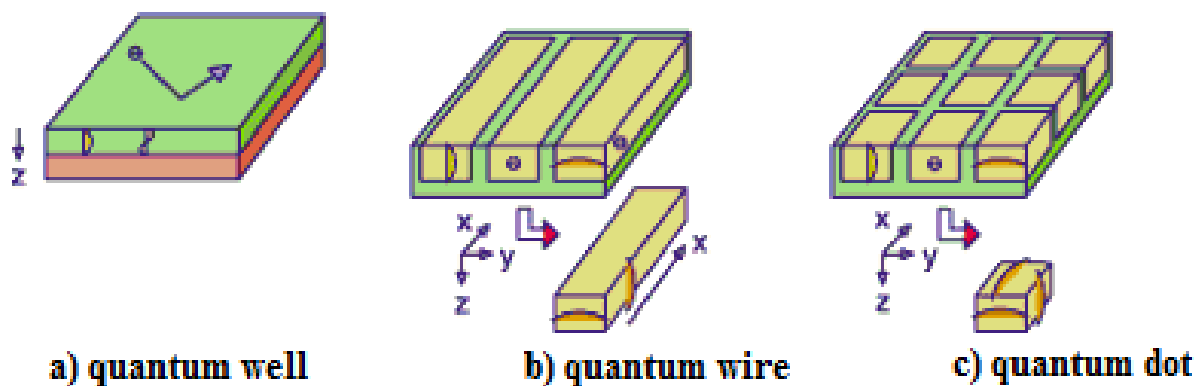
ساختار و ویژگی های لیزرهای نیمه

رسانای نقطه کوانتومی



(۱-۱) لیزرهای نیمه رسانا

هسته‌ی اصلی لیزرهای نیمه رسانا^۱ که به لیزر دیود یا لیزرهای تزریقی معروفند مبتنی بر پیوند نیم رساناها است. پیوند نیمه رساناها از نظر الکتریکی دو نقش اساسی تزریق حامل و محدود کردن حامل های تزریقی را ایفا می‌کند. نسل اول لیزرهای نیمه رسانا به آن دسته از ساختارها اطلاق می‌شود که مبتنی بر پیوندهای همگون هستند، چون در هر طرف پیوندگاه ماده‌ی نیمه رسانای یکسان با آلئیدگی های نوع n و نوع p می‌باشد. نسل دوم به آن دسته از ساختارها اطلاق می‌شود که مبتنی بر پیوند ناهمگون (SH) یا دو پیوند ناهمگون (DH) می‌باشند. نسل سوم، لیزرهای نیمه رسانای کوانتومی است که در آنها ضخامت ناحیه‌ی فعال چند ده آنگستروم است و موجب بروز اثرات کوانتومی می‌شود. محدودیت کوانتومی ناحیه‌ی فعال لیزر موجب طبقه بندی لیزرهای نیمه رسانا می‌شود. محدودیت در یک بعد منجر به لیزر چاه کوانتومی^۲ (QW)، محدودیت در دو بعد منجر به لیزر سیم کوانتومی^۳ (QWR) و محدودیت در سه بعد منجر به لیزر نقطه کوانتومی^۴ (QD) می‌شود. در شکل (۱-۱) ساختار ناحیه‌ی فعال این لیزرها را مشاهده می‌کنیم:



شکل (۱-۱): ساختار ناحیه‌ی فعال لیزرهای نیمه رسانای کوانتومی (a) چاه کوانتومی، (b) سیم کوانتومی، و (c) نقطه کوانتومی

^۱.semiconductor lasers

^۲.quantum well

^۳.quantum wire

^۴.quantum dot