

۱۴۱۲۳۱

دانشگاه گیلان

دانشکده علوم پایه

گروه فیزیک

(گرایش فتونیک)

بررسی دینامیک واهلش حامل در لیزرهای نقطه کوانتومی

از:

میثم کشیری

استاد راهنما
دکتر اسفندیار رجایی

استاد راهنما:

۱۳۸۹/۷/۳

۳

دکتر اسفندیار رجایی



تیر ۸۸

۱۴۱۶۳۱

با کمال احترام ؛

تقدیم به خانواده‌ام

تشکر و قدردانی

حمد و سپاس خداوند بزرگ را که همواره مرا مورد الطاف خود قرار داده و در راه کسب دانش به من گامی استوار و پشتوانه‌ای محکم همچون خانواده‌ام عطا فرمود.

از استاد گرانقدرم جناب آقای دکتر رجایی که مرا با شیوه صحیح تحقیقات علمی آشنا نمودند و همواره مرا در انجام این پایان‌نامه یاری رساندند، صمیمانه سپاسگزاری می‌نمایم. همچنین از جناب آقای دکتر فرجامی و جناب آقای دکتر باطبی که با سعه صدر، زحمت داوری این پایان‌نامه را متقبل شدند و جناب آقای دکتر پناهی نماینده محترم تحصیلات تکمیلی دانشگاه، صمیمانه تشکر می‌کنم. همچنین از کلیه دوستان عزیزم به خاطر یاری بی‌دریغشان در طی دوران تحصیل، صمیمانه سپاسگزاری می‌کنم.

صفحه	عنوان
3	چکیده فارسی
3	چکیده انگلیسی
1	مقدمه
3	فصل اول: بررسی ساختار و عملکرد لیزرهای نیمه‌رسانای نقطه کوانتومی
4	1-1- مقدمه
4	2-1- ساختارهای نیمه‌رسانای نانوکوانتومی
6	3-1- ساختار نوار انرژی نیمه‌رساناها
8	1-3-1- ساختار نوار انرژی لیزرهای نیمه‌رسانای نقطه کوانتومی
10	4-1- ساختار لیزرهای نیمه‌رسانای نقطه کوانتومی
11	5-1- اثر محدودیت کوانتومی
13	6-1- ساخت
13	1-6-1- روش‌های ساخت لیزرهای نقطه کوانتومی خودسامانی
15	2-6-1- تشکیل نقاط کوانتومی در روش استرانسکی - کراستانو (SK)
17	7-1- فاکتورهای محدود کننده عملکرد لیزرهای نقطه کوانتومی
18	8-1- تکنیک‌های طراحی لیزرهای نقطه کوانتومی
18	1-8-1- لیزر سطح گسیلی کاواک قائم نقطه کوانتومی
19	2-8-1- لیزرهای نقطه کوانتومی ستونی
23	3-8-1- لیزر نقطه کوانتومی تنگ چیده شده
26	فصل دوم: فیزیک و عملکرد لیزرهای نیمه‌رسانای نقطه کوانتومی
27	1-2- گذارهای تشعشی
28	2-2- واژگونی جمعیت
28	3-2- اصول عملکرد لیزرهای نیمه‌رسانا
29	4-2- کاواک لیزر و محدودیت نوری
29	5-2- مشخصه‌های قطعه لیزر دیود
31	6-2- بهره اپتیکی و رابطه آن با آستانه لیزر
34	7-2- فرآیندهای بازترکیب
35	1-7-2- بازترکیب‌های غیرتابشی
36	8-2- بهره و آستانه
39	9-2- تابع توزیع حامل
41	10-2- دمای مشخصه
42	11-2- مشخصه‌های آستانه یک نقطه کوانتومی ایده‌آل
45	12-2- جنبه‌های ویژه آرایه QD حقیقی تشکیل شده توسط خودسامانی
45	1-12-2- چگالی حالت‌های آرایه‌های QD خودسامانی

۴۷	۱۳-۲- حالت‌های برانگیخته شده
۴۷	۱-۱۳-۲- گذار لیزری حالت پایه به برانگیخته
۴۹	۱۴-۲- مشخصه بهره - جریان
۵۰	۱۵-۲- بیان‌های تحلیل برای رابطه بهره - جریان در لیزرهای QD خودسامانی
۵۰	۱-۱۵-۲- اثر پهن‌شدگی غیرهمگن
۵۳	۲-۱۵-۲- اثر لایه ترکنده (WL) و ماتریس
۵۶	۳-۱۵-۲- اثر حالت‌های برانگیخته
۵۸	۱۶-۲- گذار لیزردهی حالت پایه به برانگیخته
۶۰	۱۷-۲- مزیت‌های لیزرهای نقطه کوانتومی
۶۰	۱۸-۲- واهلش حامل در نقطه‌های کوانتومی
۶۰	۱-۱۸-۲- اثر تنگنای فونون
۶۲	۱۹-۲- مدل واهلش حامل در نقطه‌های کوانتومی
۶۳	۲۰-۲- غیرهمسانی نقاط کوانتومی
۶۵	۲۱-۲- اثر پهن‌شدگی ناهمگن روی بهره
۶۸	فصل سوم: اثر دینامیک واهلش حامل بر عملکرد لیزر
۶۹	۱-۳- مقدمه
۶۹	۲-۳- معادلات آهنگ
۷۱	۳-۳- تولید و بازترکیب حامل‌ها در ناحیه فعال
۷۳	۴-۳- تولید فوتون‌های خودبخودی
۷۳	۵-۳- تولید فوتون و اتلاف در کاواک‌های لیزری
۷۶	۶-۳- بهره حالت ایستا یا آستانه
۸۰	۷-۳- ویژگی‌های اساسی مشخصه‌های توان - جریان
۸۲	۸-۳- اثر دینامیک واهلش حامل روی عملکرد لیزر
۸۸	۹-۳- پدیده لیزردهی دوحالتی در لیزرهای نقطه کوانتومی
۸۹	۱۰-۳- مدل معادله آهنگ
۹۳	فصل چهارم: شبیه‌سازی مشخصه‌های لیزرهای نقطه کوانتومی خودسامانی InGaAs/GaAs
۹۴	۱-۴- شبیه‌سازی عملکرد لیزرهای نقطه کوانتومی خود سامانی InGaAs/GaAs
۹۴	۲-۴- بررسی اثر دینامیک واهلش حامل‌ها
۹۶	۱-۲-۴- بررسی اثر پوشش نقاط کوانتومی
۱۰۲	۲-۲-۴- ماکزیمم توان خروجی بر حسب زمان واهلش به نقاط کوانتومی
۱۰۷	۳-۴- لیزردهی دوحالتی در لیزرهای نقطه کوانتومی خودسامانی
۱۱۰	۲-۳-۴- مقایسه لیزردهی در حالت پایا و رفتار گذرا
۱۱۶	۴-۳-۴- اثر طول عمر واهلش بین ترازهای بر احتمال اشغال الکترونی لایه ویتینگ
۱۱۷	۵-۳-۴- اثر طول عمر واهلش بین ترازهای بر احتمال اشغال الکترونی حالت پایه
۱۱۸	۶-۳-۴- اثر طول عمر واهلش بین ترازهای بر احتمال اشغال الکترونی حالت برانگیخته

۱۱۹	۷-۳-۴. اثر طول عمر واهلش بین ترازى بر کارآيى کواتمى ديفرانسىلى خارجى تراز پایه
۱۲۱	۴-۴. نتیجه گیری
۱۲۳	۵-۴. پیشنهادات برای ادامه کار
۱۲۴	مراجع
۱۲۶	پیوست (الف)
۱۳۸	پیوست (ب)

- شکل (۱-۱): نمودار انرژی بر حسب بردار موج برای یک نیمه‌رسانای با گاف مستقیم برای نوارهای رسانش و ظرفیت. ۷
- شکل (۲-۱): طرحواره (الف) سطح مقطع و (ب) نوار انرژی لیزر نقطه کوانتومی نوعی. ۸
- شکل (۳-۱): نمای کلی سطح مقطع. ۹
- شکل (۴-۱): نمای لیزر نقطه کوانتومی با کاواک لبه گسیل شامل ساختار نقطه کوانتومی سه‌چینه‌ای. ۱۰
- شکل (۵-۱): طرحواره نانو ساختارهای کوانتومی و چگالی حالت‌های آنها. ۱۲
- شکل (۶-۱): (الف) نمای سطحی، (ب) سطح مقطع تصاویر گرفته شده با میکروسکوپ. ۱۶
- شکل (۷-۱): حالت‌های الکترونی و مدهای فوتونی در میکروکاواک VCSEL های نقطه کوانتومی. ۱۹
- شکل (۸-۱): نمای ساختار VCSEL نقطه کوانتومی با لایه فعال شامل ۱۰ دوره لایه‌های نقطه کوانتومی $In_{0.5}Ga_{0.5}As$. ۲۰
- شکل (۹-۱): تصویر سطح مقطعی TEM ساختار نقطه کوانتومی ستونی. ۲۰
- شکل (۱۰-۱): مشخصه‌های توان خروجی - جریان لیزر نقطه کوانتومی ستونی. ۲۱
- شکل (۱۱-۱): طیف PL اندازه‌گیری شده نقاط کوانتومی ستونی و طیف PL نقاط کوانتومی تک لایه رشد یافته در روش SK. ۲۲
- شکل (۱۲-۱): (الف) تصویر سطح مقطعی TEM، (ب) طرحواره ساختار نقطه کوانتومی تنگ چیده شده. ۲۴
- شکل (۱۳-۱): طیف فوتولیمینسنس (PL) ساختار نقطه کوانتومی تنگ چیده شده در $4/3^{\circ}K$ (منحنی جامد) و طیف PL نقطه کوانتومی معمولی بدون جفت‌شدگی الکترونی (منحنی خط چین). ۲۵
- شکل (۱-۲): ترازهای انرژی (الف) حالت برانگیخته و ناپایدار یک اتم، (ب) گسیل خودبه‌خودی، (ج) گسیل القایی. ۲۷
- شکل (۲-۲): انتشار نور و شدت آن در فازهای مختلف چرخه رفت و برگشت در کاواک‌های فابری-پرو. ۳۲
- شکل (۳-۲): وابستگی بهره به چگالی جریان. ۳۴
- شکل (۴-۲): پیش‌بینی تئوری تابع توزیع حامل برای سه دمای متفاوت. ۳۹
- شکل (۵-۲): توزیع حامل برای جریان‌های تزریقی متفاوت $0.5-2/5 e/\tau$ بر نقطه کوانتومی مشابه شکل (۱-۲). ۴۰
- شکل (۶-۲): طیف بهره (در واحدهای ماکزیمم بهره مدی، g^{max}). ۴۱
- شکل (۷-۲): وابستگی بهره اپتیکی به چگالی جریان. ۴۴
- شکل (۸-۲): چگالی حالت‌های آرایه QD خودسامانی. ۴۷
- شکل (۹-۲): وابستگی بهره و جریان برای تراز پایه آرایه QD ایده‌آل و همچنین برای (دو زیر نوار پایه و برانگیخته اولی) یک آرایه خودسامانی. ۴۸
- شکل (۱۰-۲): وابستگی تجربی چگالی جریان آستانه و طول موج لیزردهی بهره آستانه برای لیزرهای $InAs/InGaAs$ QD. ۴۸
- شکل (۱۱-۲): رابطه تجربی بین بهره مدی و چگالی جریان. ۵۰
- شکل (۱۲-۲): چگالی حالت‌های پهن‌شدگی ناهمگن آرایه‌های QD خودسامانی. ۵۱
- شکل (۱۳-۲): وابستگی چگالی جریان آستانه به اتلاف اپتیکی. ۵۶
- شکل (۱۴-۲): تحول چگالی جریان وابسته به بهره با افزایش اثر حالت‌های انرژی بالاتر. ۵۸
- شکل (۱۵-۲): جمعیت تمام حالت‌های درگیر در سیستم الکترونی آرایه QD خودسامانی. ۵۹
- شکل (۱۶-۲): نمای تنگنا فونون. زیر ترازهای مجزا در نقاط کوانتومی. ۶۱
- شکل (۱۷-۲): دو مرحله واهلش حامل در نقاط کوانتومی. ۶۲
- شکل (۱۸-۲): نمای دو فرآیند واهلش حامل از تراز پیوسته. ۶۳

- شکل (۱۹-۲): پهن‌شدگی ناهمگن انرژی گذار اپتیکی و پهن شدن طیف بهره به خاطر اندازه‌های متفاوت نقاط کوانتومی. ۶۴
- شکل (۲۰-۲): طیف بهره مدی برای پر شدن تعادلی نقاط کوانتومی. ۶۶
- شکل (۱-۳): نمایش طرحوار لیزرهای مسطح و کاواک عمودی. ۷۴
- شکل (۲-۳): سطح مقطع کاواک لیزر نوعی. ۷۷
- شکل (۳-۳): نمایش توان خروجی بر حسب جریان تزریقی برای یک دیود لیزر. ۸۱
- شکل (۴-۳): نمودار انرژی نوار هدایت ناحیه فعال لیزر، نقطه کوانتومی و فرآیند واهلش حامل‌ها درون حالت پایه نقاط کوانتومی. ۸۳
- شکل (۵-۳): برهمکنش بین فوتون‌های مد کاواک و حامل‌ها در نقاط کوانتومی از طریق پخش‌شدگی همگن بهره اپتیکی. ۸۴
- شکل (۶-۳): نمودار انرژی ناحیه فعال لیزر نقطه کوانتومی و فرآیند گیراندازی، گریز و واهلش بین ترازهای. ۸۸
- شکل (۷-۳): نمودار انرژی ناحیه فعال لیزر نقطه کوانتومی و گیراندازی حامل، گریز، واهلش بین ترازهای و فرآیند بازترکیب. ۹۰
- شکل (۱-۴): توان خروجی حسب جریان تزریقی برای مقادیر مختلف زمان‌های واهلش در زمان‌های بازترکیب. ۹۵
- شکل (۲-۴): مشخصه توان خروجی لیزر بر حسب جریان تزریقی برای پوشش‌های مختلف نقاط کوانتومی در زمان‌های بازترکیب $\tau_{gr} = 3ns$, $\tau_r = 2/8ns$ در زمان‌های واهلش مختلف. ۹۷
- شکل (۳-۴): مشخصه توان خروجی لیزر بر حسب جریان تزریقی برای پوشش‌های مختلف نقاط کوانتومی در زمان‌های بازترکیب $\tau_{gr} = 0/8ns$, $\tau_r = 2/8ns$ در زمان‌های واهلش مختلف. ۹۹
- شکل (۴-۴): مشخصه توان خروجی لیزر بر حسب جریان تزریقی برای پوشش‌های مختلف نقاط کوانتومی در زمان‌های بازترکیب $\tau_{gr} = 0/8ns$, $\tau_r = 0/8ns$ در زمان‌های واهلش مختلف. ۱۰۱
- شکل (۵-۴): بیشینه توان خروجی بر حسب زمان واهلش برای پوشش‌های مختلف نقاط کوانتومی در $\Gamma_0 = 10meV$. ۱۰۲
- شکل (۶-۴): بیشینه توان خروجی بر حسب زمان واهلش برای مقادیر پوشش‌های مختلف در $\Gamma_0 = 20MeV$. ۱۰۳
- شکل (۷-۴): بیشینه توان خروجی بر حسب زمان واهلش برای مقادیر پوشش‌های مختلف در $\Gamma_0 = 30MeV$. ۱۰۳
- شکل (۸-۴): بیشینه توان خروجی بر حسب زمان واهلش برای طول کاواکهای مختلف. ۱۰۴
- شکل (۹-۴): بیشینه توان خروجی بر حسب زمان واهلش برای زمانهای بازترکیب در چاه کوانتومی متفاوت. ۱۰۶
- شکل (۱۰-۴): پهنای باند ۳dB به صورت تابعی از زمان واهلش τ_0 برای مقادیر مختلف پوشش نقاط کوانتومی. ۱۰۶
- شکل (۱۱-۴): نتایج محاسبه شده در حالت پایا برای قطعه به طول ۲mm در زمان واهلش بین ترازهای $\tau_0 = 8ps$. ۱۰۸
- شکل (۱۲-۴): توان خروجی لیزردهی ES و GS به صورت تابعی از چگالی جریان تزریقی برای طول کاواک ۳mm. ۱۰۹
- شکل (۱۳-۴): رفتار گذرای محاسبه شده در $j = 1/5 j_{th}$. ۱۱۱
- شکل (۱۴-۴): رفتار گذرای محاسبه شده در $j = 2 j_{th}$. ۱۱۱
- شکل (۱۵-۴): رفتار گذرای محاسبه شده در $j = 2/5 j_{th}$. ۱۱۲
- شکل (۱۶-۴): اثر طول عمر واهلش بین ترازهای بر چگالی جریان لیزردهی حالت پایه برای دو طول کاواک مختلف لیزر $L = 3mm$ و $L = 0mm$. ۱۱۳
- شکل (۱۷-۴): تأثیر طول عمر واهلش بین ترازهای بر نسبت چگالی جریان آستانه لیزردهی تراز برانگیخته روی چگالی جریان آستانه لیزردهی تراز پایه. ۱۱۴
- شکل (۱۸-۴): نسبت جریان آستانه لیزردهی حالت برانگیخته و حالت پایه به طول کاواک لیزر برای زمان واهلش بین ترازهای ۱۰ps. ۱۱۵
- شکل (۱۹-۴): نسبت چگالی جریان آستانه لیزردهی ES به چگالی جریان آستانه لیزردهی GS به طول کاواک برای زمان‌های واهلش بین ترازهای مختلف. ۱۱۵

شکل (۲۰-۴): اثر طول عمر واهلش بین ترازى بر احتمال اشغال الکترون در لایه ویتینگ $l=3mm$ برای ۱۱۶

$$\tau_{relaxn}^{E \rightarrow G} = 2, 10, 30, 50 \text{ ps}$$

شکل (۲۱-۴): اثر طول عمر واهلش بین ترازى بر احتمال اشغال الکترون حالت پایه برای طول کاواک $l=3mm$ و ۱۱۷

$$\tau_{relaxn}^{E \rightarrow G} = 2, 10, 30, 50 \text{ ps}$$

شکل (۲۲-۴): اثر طول عمر واهلش بین ترازى بر احتمال اشغال الکترونى حالت برانگیخته برای $l=3mm$ و ۱۱۸

$$\tau_{relaxn}^{E \rightarrow G} = 2, 10, 30, 50 \text{ ps}$$

شکل (۲۳-۴): کارآیى کوانتمى دیفرانسیلى خارجى لیزردهى حالت پایه به صورت تابعى از طول عمر واهلش بین ترازى. ۱۱۹

فهرست جدول‌ها

صفحه	عنوان
۹۴	جدول (۱-۴): پارامترهای مورد استفاده در شبیه‌سازی بخش (۲-۴).
۱۲۰	جدول (۲-۴): پارامترهای مورد استفاده در شبیه‌سازی بخش (۳-۴).

در این تحقیق، ساختار لیزرهای نقطه کوانتومی، فیزیک، روش‌های ساخت و مشخصه‌های این نوع لیزرها، همچنین فاکتورهای محدودکننده عملکرد این نوع لیزرها و تکنولوژی‌های کلیدی برای بهبود عملکرد آنها بیان می‌شوند. با حل معادلات آهنگ لیزر نقطه کوانتومی InGaAs/GaAs مشخصه‌های نور-جریان آن شبیه‌سازی شده و اثر پارامترهای مختلف بر عملکرد این نوع لیزرها در جهت بهینه‌سازی عملکرد این نوع لیزرها بررسی شده‌اند. ما نشان می‌دهیم که افزایش زمان واهلش حامل‌ها به نقاط کوانتومی باعث افت مشخصه‌های استاتیکی از قبیل توان خروجی و کارایی کوانتومی دیفرانسیلی خارجی می‌شود. همچنین جریان آستانه مورد نیاز برای لیزردهی افزایش می‌یابد. همچنین کاهش طول عمر بازترکیب در چاه کوانتومی جریان آستانه لیزردهی را افزایش می‌دهد.

ملاحظه می‌کنیم که پوشش آستانه‌ای برای شروع لیزردهی ضروری است. همچنین با حل معادلات آهنگ لیزر نقطه کوانتومی InGaAs/GaAs پدیده لیزردهی دوحالتی در این نوع لیزرها هم در حالت پایا و هم در گذرا مورد بررسی قرار گرفته است و اثر طول عمر واهلش بین ترازهای لیزرهای نقطه کوانتومی مورد بحث قرار گرفته است. نشان می‌دهیم که افزایش زمان واهلش بین ترازها، موجب افزایش جریان آستانه لیزردهی حالت پایه می‌شود. همچنین نشان می‌دهیم واهلش بین ترازهای کندتر به چگالی جریان آستانه لیزردهی حالت برانگیخته پایین‌تر و توان خروجی اشباع شده لیزردهی حالت پایه رهنمون می‌کند. نشان می‌دهیم که واهلش بین ترازهای سریع به احتمال اشغال پایین‌تر در تراز برانگیخته و لایه ویتینگ و احتمال اشغال بالاتر در تراز پایه منجر می‌شود. همچنین نشان می‌دهیم که برای زمان واهلش بین ترازهای بزرگ در جریان‌های بالاتر از چگالی جریان اشباع، احتمال اشغال الکترون در لایه ویتینگ، تراز پایه و تراز برانگیخته، تقریباً از طول عمر واهلش بین ترازهای مستقل می‌شود.

کلید واژه: لیزرهای نقطه کوانتومی، زمان واهلش، معادلات آهنگ، لیزردهی دوحالتی، شبیه‌سازی.

Abstract

Study of carrier relaxation dynamics in quantum dot laser.
Meysam kashiri

In this study, quantum dots (QD) laser structures, physics, fabrication methods, and characteristics of these lasers, limiting factors and key technologies for improvements of their performance are also presented. We solve the rate equations of self-assembled InGaAs/GaAs QD laser and simulate the light-current characteristics. We show the increase in relaxation time result in degradation of the static-characteristics of mentioned QD laser such as output power, external quantum efficiency.

The threshold current increase as the relaxation lifetime increases and recombination lifetimes decrease. We consider threshold coverage of dots is necessary to start lasing. We consider the optimal cavity length and optimal coverage of dots is necessary for improvements the performance of QD laser. We investigated the double-state lasing performance of quantum dot lasers. Calculated result show that the GS threshold current increases with the increase of intraband relaxation life time. We show that slower intraband relaxation leads to lower ES lasing threshold density and Gs lasing saturated output power. We show fast relaxation rate between the discrete states in QD laser results in lower WL and ES occupation probability and higher GS occupation probability. We show that the WL,ES and GS occupation probability will become nearly independent of intraband relaxation lifetime above the saturated current density.

Key Word: quantum dot laser, relaxation time, rate equation, double-state lasing, simulation.

ظهور ادوات مبتنی بر اجزای فعال اندازه نانومتری، عصر نانو الکترونیک و نانوفوتونیک را حائز اهمیت ساخته است. در بین چنین اجزایی، ساختارهای چندگانه با بعد پایین همانند چاه‌های کوانتومی، سیم‌های کوانتومی و نقاط کوانتومی به طور قابل ملاحظه‌ای اهمیت یافته‌اند. محدودیت کوانتومی در ساختارهای چندگانه با بعد پایین، ویژگی‌های اساسی یک بلور نیمه‌رسانا را شدیداً بهبود می‌بخشد. در یک چاه کوانتومی حامل‌ها به طور فضایی در جهت عرضی محدود می‌شوند و آزادانه در صفحه آن حرکت می‌کنند. در یک سیم کوانتومی حامل‌ها در دو جهت عرضی محدود می‌شوند و آزادانه در طول آن حرکت می‌کنند. بنابراین طیف انرژی حامل‌ها در هر دو مورد چاه و سیم کوانتومی، درون زیرنوارهای پهن حالت‌های مجاز پیوسته است و بدین لحاظ از نظر کیفی فرق چندانی با بلور حجمی ندارند.

در نقاط کوانتومی حامل‌ها به صورت سه بعدی محدود می‌شوند و بهبود ویژگی‌های الکترونی بسیار اساسی‌تر و شدیدتر است و ترازهای انرژی مجزا هستند به همین علت نقاط کوانتومی به عنوان ابراتم‌ها^۱ یا اتم‌های مصنوعی^۲ خوانده می‌شوند. یک نقطه کوانتومی با اندازه معمولی (چند نانومتر یا چند ده نانومتر) دربرگیرنده چند هزار یا چند ده هزار اتم است.

لیزر نیمه‌رسانا یکی از ابزارهای اساسی اپتوالکترونیک پیشرفته است. سال‌ها پیش پیشنهاد شد که با کاهش ابعاد ناحیه فعال می‌توان به طور چشمگیری عملکرد لیزری را به سبب اثر اندازه کوانتومی بهبود بخشید. این ایده کلی ابتدا در لیزرهای چاه کوانتومی به کار رفت و امروزه لیزرهای چاه کوانتومی به جای لیزرهای حجمی در اکثر کاربردهای تجاری جایگزین شده‌اند. در مورد لیزرهای دارای بعد پایین‌تر همانند سیم کوانتومی و نقطه کوانتومی توسعه و پیشرفت بیشتری مورد انتظار است. با باریک شدن چگالی حالت‌ها در این نوع لیزرها، تعداد حالت‌های کمتری برای رسیدن به شفافیت ناحیه فعال و لیزردهی، نیاز به پر شدن دارند. در نتیجه هم جریان شفافیت و هم جریان آستانه کاهش می‌یابند و نیز وابستگی دمایی‌شان کمتر می‌شود.

لیزرهای نقطه کوانتومی طبقه جدیدی از لیزر دایودها را تشکیل می‌دهند که به طور اساسی مشخصه‌های کاربردی وسیعی را نوید می‌دهند. استفاده از نقاط کوانتومی به عنوان محیط فعال در لیزرها یک نمونه برجسته از نانو تکنولوژی مورد استفاده در ادوات با ویژگی تجاری بالا می‌باشد. [۱ و ۲ و ۳]

هدف این پایان‌نامه مطالعه و بررسی نقش پارامترهای مؤثر در عملکرد لیزرهای نقطه کوانتومی، از جمله بررسی دینامیک و اهلس حامل‌ها در این نوع لیزرها بوده است. بدین منظور در فصل اول ساختار لیزرهای نقطه کوانتومی، عوامل محدود کننده

¹ Super atoms

² Artificial atoms

عملکرد این نوع لیزرها، روش ساخت و بعضی از تکنیک‌های طراحی این نوع لیزرها بیان می‌شود. در فصل دوم فیزیک و مشخصه‌های عملکرد لیزرهای نقطه کوانتومی بیان می‌شوند. سپس در فصل سوم با توصیف معادلات آهنگ حاکم بر عملکرد لیزر نقطه کوانتومی، اثر دینامیک واهلش حامل‌ها بر روی عملکرد لیزر مورد بررسی قرار گرفته همچنین پدیده لیزردهی دوحالتی در این نوع لیزرها بیان می‌شود. سرانجام در فصل چهارم، با حل معادلات آهنگ لیزر نقطه کوانتومی $InGaAs/GaAs$ و شبیه‌سازی مشخصه‌های دینامیکی و استاتیکی آن، تأثیر عوامل مختلف در بهینه‌سازی عملکرد آن مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین با حل معادلات آهنگ لیزر نقطه کوانتومی $InGaAs/GaAs$ با استفاده از روش‌های عددی، پدیده لیزردهی دوحالتی و اثر واهلش بین ترازهای کارایی لیزردهی دوحالتی در این نوع لیزرها مورد بررسی قرار گرفته است و در پایان خلاصه نتایج ارائه می‌شود.

فصل اول:

**بررسی ساختار
لیزرهای نیمه رسانای
نقطه کوانتومی**

۱-۱- مقدمه

یکی از بزرگترین دستاوردهای مهم در عصر جدید، ظهور لیزر نیمه‌رسانا بوده است. مزیت‌های عالی در ساختار لیزرهای نیمه‌رسانا منجر به کاربردهای وسیعی در اپتوالکترونیک گردیده است و مواد جدید در حال گشایش نواحی طول موجی جدیدی هستند. زمینه تحقیق در لیزرهای نیمه‌رسانای با بعد پایین بسیار زیاد و پرتکاپو است و در آینده ممکن است شگفتی‌های بیشتری به وجود آید.

لیزرهای نیمه‌رسانا، منابع فوتونی مناسبی برای کاربردهای گوناگون همچون ارتباطات فیبر نوری، پردازش سیگنالی، ذخیره اطلاعات نوری، ارتباطات سیار، سی‌دی پلیرها، چاپگرها و تشخیص‌های پزشکی و غیره می‌باشد. کاهش ابعاد ایجاد شده توسط محصورشدگی حامل‌ها در نیمه‌رساناها منجر به تغییر اساسی در رفتار حامل‌ها می‌شود. این رفتار می‌تواند با کاهش ابعاد محیطی حامل‌ها از یک چاه کوانتومی دو بعدی به یک سیم کوانتومی یک بعدی و در نهایت به یک نقطه کوانتومی صفر بعدی توسعه یابد که منجر به ساختارهای نیمه‌رسانای مقیاس نانومتری با کیفیت بالا می‌شود. به خاطر اثرهای اندازه کوانتومی که شدیداً طیف انرژی حامل‌های مقید را در ابعاد کاهش یافته تغییر می‌دهد و انرژی جمعیت مورد نیاز برای عمل لیزردهی هنگامی که محیط بهره رسانا از حجیم به مقیاس نانومتری تغییر می‌کند به طور مؤثرتری اتفاق می‌افتد. در نتیجه لیزرهای نیمه‌رسانای ساخته شده با محیط فعال نانومتری همانند لیزرهای سیم کوانتومی و نقطه کوانتومی ویژگی‌های بالایی مانند گستره طیفی بزرگ، بهره اپتیکی بالا، جریان آستانه پایین، طیف گسیلی باریک‌تر و حساسیت دمایی پایین‌تر را نشان می‌دهد که به طور قابل توجهی عملکرد لیزر را توسعه می‌دهد [۱].

۱-۲- ساختارهای نیمه‌رسانای نانو کوانتومی

تحقیقات بر روی ساختارهای نیمه‌رسانای نانو کوانتومی با کشف ابرشبکه‌ها^۱ به وسیله‌ی اساکي^۲ و تسو^۳ (۱۹۷۰م و ۱۹۶۹م) با مشاهده اثرات کوانتومی در ساختارهای دوره‌ای یک‌بعدی با لایه‌های متناوب مختلف آغاز شد. ضخامت این لایه‌ها خیلی کمتر از مسافت آزاد میانگین الکترون بود. این ساختار دوره‌ای ابرشبکه نیمه‌رسانا نامیده شد و از آن پس تولید و طراحی نیمه‌رساناهای چند لایه‌ای با خواص الکترونیکی و اپتیکی مطلوب گسترش یافت و ساختارهای غیرهمجنس با بعد پایین

^۱ Super lattice

^۲ Esaki

^۳ Tsu

همانند چاه‌های کوانتومی، سیم‌های کوانتومی و نقاط کوانتومی به طور قابل ملاحظه‌ای اهمیت یافتند. محصورشدگی کوانتومی در ساختارهای غیرهمجنس با بعد پایین ویژگی‌های اساسی یک بلور نیمه‌رسانا را شدیداً بهبود می‌بخشد. در نیمه‌رساناهای چاه‌های کوانتومی یک لایه نیمه‌رسانای نازک در بین مواد مختلف، از طریق پیوندگاه‌های غیرهمجنس احاطه می‌شود و حرکت الکترون به صفحه لایه نازک دو بعدی محصور می‌شود. این محدودیت سبب ایجاد خواص اپتیکی جدیدی می‌شود که آن را از ساختار کپه‌ای ممتاز می‌کند. از جمله این خواص می‌توان به نوسان اکسیتونی قوی قابل مشاهده حتی در دمای اتاق، طیف بهره مختص چگالی حالت‌های شبه‌پله‌ای، جذب اپتیکی، غیرخطیت اپتیکی بزرگ، و جایجایی انرژی القا شده توسط نوسان میدان الکتریکی (اثر اشتارک محصور شده کوانتومی) اشاره کرد. بهبود ویژگی‌های بلور نیمه‌رسانا منجر به ساخت وسایل اپتیکی جدید همانند لیزرهای چاه کوانتومی و مدولاتورهای نوری سرعت بالا شد. این ادوات در سیستم‌های مخابرات نوری و ذخیره نوری اطلاعات به طور گسترده‌ای به کار گرفته شده‌اند. برای بهبود بیشتر ادوات اپتیکی ساختارهای چند بعدی محصور شده کوانتومی از قبیل سیم‌های کوانتومی و نقطه‌های کوانتومی مورد انتظار هستند.

نقاط کوانتومی (QD) از چندین دهه پیش به منظور مطالعه اثرهای محدودیت‌های حامل‌ها مورد توجه فیزیکدانان، شیمیادان‌ها و مهندسان مواد بوده است. کار تئوری درباره کاربرد نقاط کوانتومی در لیزرهای نیمه‌رسانا از اوایل دهه ۱۹۸۰ آغاز شد. در ابتدا برتری‌هایی همچون عملکرد آستانه پایین، پایداری دمایی بالا و فرکانس مدولاسیون بالا در مقایسه با لیزرهای چاه کوانتومی انتظار می‌رفت. به عنوان یک نتیجه از محدودیت کوانتومی در هر سه بعد، طیف انرژی الکترون‌ها و حفره‌ها در نقاط کوانتومی مجزا می‌باشد. گذارهای بین ترازهای الکترون و حفره در نقاط کوانتومی با گذارهای بین ترازهای دقیقاً مجزای اتم‌های منفرد قابل مقایسه می‌باشد. به همین دلیل QDها به عنوان یک طبقه جدید از موادی با انرژی‌های حالت‌های شبه‌اتمی تنظیم‌پذیر (از طریق تغییر دادن ترکیب و اندازه) به طور مصنوعی ساخته شده‌اند که موجب توجه و علاقه زیادی گردیده‌اند.

لیزر نقطه کوانتومی برای اولین بار توسط آراکاو و ساکاکي در سال ۱۹۸۲ پیشنهاد شد. آنها نشان دادند که چگالی جریان آستانه چنین لیزری باید مستقل از دما باشد. این ویژگی مستقیماً به حضور حالت‌های انرژی بالاتر که می‌توانند به طریق گرمایی جمعیت‌دار شوند مربوط می‌شود. همچنین کاهش بعد مواد موجب تغییر چگالی حالت‌ها می‌شود و در نتیجه طیف گذار اپتیکی باریک‌تر شده و برهم‌کنش ماده - نور بسیار مؤثر می‌شود.

پس از پیشنهاد آراکاو و ساکاکي، تلاش‌های زیادی برای رشد کریستالی روی زیرلایه‌های ماسک شده یا حک شده انجام شد. به هر حال، کریستال‌های ساخته شده به وسیله این فرآیندهای مصنوعی، مشکلات ساختاری از قبیل اندازه بزرگ برای تولید اثرات کوانتومی قابل مشاهده و کیفیت کریستالی پایین در سطوح داخلی دارند.

در حدود سال ۱۹۹۰م با تشکیل نقطه‌های کوانتومی خودسامانی در طی فرآیندهای رشد به شدت کرنش یافته روآرایی پرتو مولکولی و روآرایی فاز بخار فلز آلی پیشرفت بزرگی ایجاد شد و نقطه‌های کوانتومی با چگالی حالت‌های شبه اتمی و کیفیت بالای مناسب برای ابزارهای اپتیکی و عملکرد لیزر نقطه کوانتومی در دمای اتاق به دست آمد [۴].

۱-۳- ساختار نوار انرژی نیمه‌رساناها

در ساختارهای نیمه‌رسانا به جای تابع موج الکترون اتم، از تابع موج الکترون در بلور صحبت می‌شود، بنابراین از ترازهای انرژی تک‌اتم‌ها نیز نمی‌توان حرفی زد. در نیمه‌رساناها به جای تراز انرژی از نوار انرژی که مجموعه‌ای از ترازهای انرژی خیلی نزدیک به هم است، صحبت می‌شود. توصیف دقیق ساختار نواری به محاسبات عددی پیچیده‌ای احتیاج دارد. برای محاسبه ساختار نواری باید معادله شرودینگر را برای الکترون‌ها و حفره‌ها در دو نوار رسانش و ظرفیت حل کرد. یک تقریب مرسوم که برای ساختار نواری نیمه‌رساناها با گاف نواری مستقیم به کار می‌رود مدل نوار سهموی است. در این مدل رابطه پاشندگی، که رابطه بین انرژی (E) و بردار موج (K) الکترون و حفره است، به صورت یک سهمی فرض می‌شود. شکل (۱-۱)، نمودار انرژی بر حسب موج برای نیمه‌رسانای با گاف نواری مستقیم را نشان می‌دهد.

انرژی الکترون و حفره در این نوارها با روابط زیر به دست می‌آیند:

$$E_c = \frac{\hbar^2 K^2}{2m_c^*} \quad (1-1)$$

$$E_v = \frac{\hbar^2 K^2}{2m_v^*}$$

و m_c^* و m_v^* جرم مؤثر الکترون و حفره و K اندازه بردار موج است.

همان‌طور که در شکل (۱-۱) مشاهده می‌شود، مدل نواری واقعی، برای نیمه‌رسانای ترکیبات III-V با گاف نواری مستقیم،

مدل چهار نواری است. در این مدل نوار ظرفیت با سه زیر نوار توصیف می‌شود که عبارتند از [۵]:

نوار حفره‌های سنگین^۱

نوار حفره‌های سبک^۲

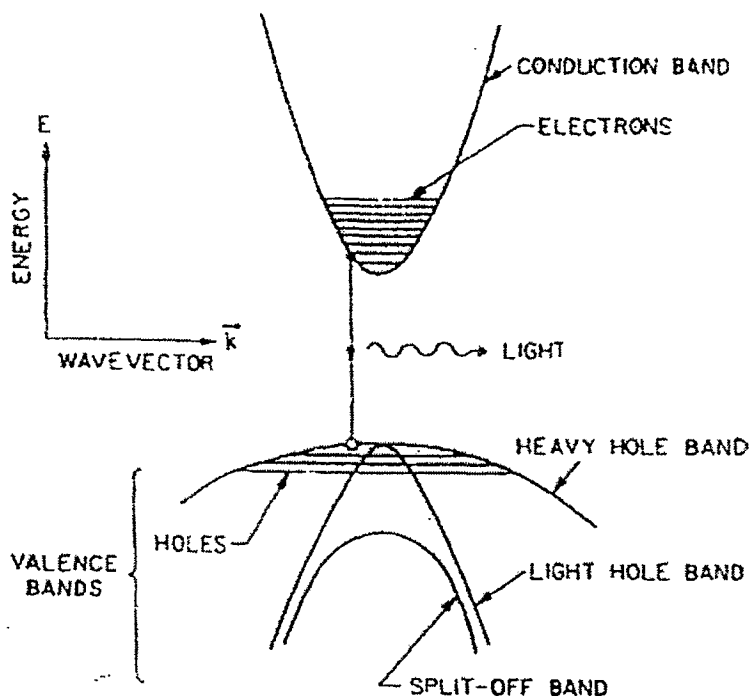
نوار شکافتی اسپین^۳

^۱ Heavy hole band [hh]

^۲ Light hole band [lh]

^۳ Spin-split-off band [so]

علت وجود این سه نوار به واسطه جرم‌های مؤثر مختلف حفره‌ها است. با توجه به شکل (۱-۱) مشاهده می‌شود که نوارهای حفره‌های سنگین و سبک در $K=0$ تپه‌گن هستند در صورتی که نوار شکافتگی اسپین به اندازه انرژی شکافتگی Δ^1 از آنها فاصله دارد.



شکل (۱-۱): نمودار انرژی بر حسب بردار موج برای یک نیمه‌رسانای با گاف مستقیم برای نوارهای رسانش و ظرفیت [۵].

از آنجایی که انرژی Δ در مقایسه با انرژی گرمایی $K_B T$ بزرگتر است، لذا نوار شکافتگی اسپین پر از الکترون بوده و حفره‌ای در آن وجود ندارد. بنابراین در اکثر محاسبات از این نوار صرف‌نظر می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که شعاع انحنا نوار حفره‌های سنگین بیشتر از دو نوار دیگر است. به همین علت جرم مؤثر حفره‌های این نوار از دو نوار دیگر بیشتر است. جرم مؤثر با رابطه زیر تعریف می‌شود [۶]:

$$m^* = \frac{\hbar^2}{d^2 E / dK^2} \quad (2-1)$$

مشتق دوم یک تابع با شعاع انحنا آن نسبت معکوس دارد. لذا هر چه جرم مؤثر بزرگتر باشد شعاع انحنا بزرگتر می‌شود.

¹ Split off energy