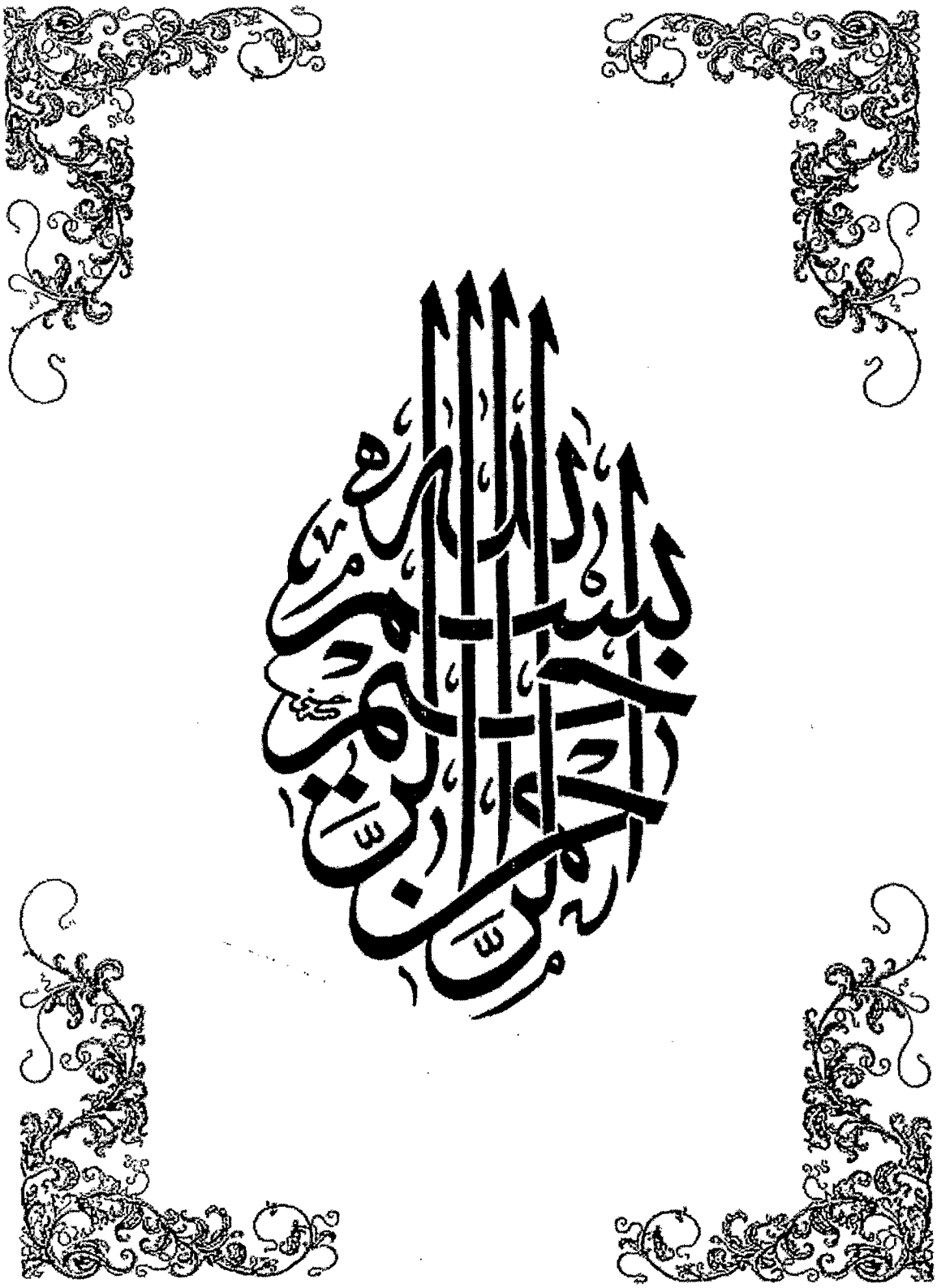

١٠٧٩٧٥

۸۷/۱/۱۰۱۶۹۰
۸۷/۱۰/۲۱

دانشگاه گیلان
دانشکده علوم پایه
گروه فیزیک
گرایش فوتونیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

مطالعه بهره لیزرهای نیمه‌رسانای نقطه‌کوانتمی

از:

داوود قدسی نهری

۱۳۸۷ /۱۰/ ۱۳

اساتید راهنما:

دکتر اسفندیار رجائی
دکتر وحید احمدی

مرداد ۸۷

۱۰۷۹۷۵

تقدیم

تقدیم به یگانه هستی، گل سر سبد آفرینش، و امید دلها آقا امام زمان (عج)

و تقدیم به پدر و مادر و خانواده مهربانم

و تقدیم به تمامی پویندگان راه علم و دانش

تقدیر و تشکر

خدایا چنان کن سرانجام کار

تو خشنود باشی و ما رستگار

حمد و ستایش مخصوص پروردگاری است که آفریننده خوبیهاست. از پدر و مادر عزیزم و خانواده مهربانم که یاری کننده من بوده‌اند بسیار سپاسگزارم. از اساتید محترم راهنما جناب آقای دکتر وحید احمدی و جناب آقای دکتر اسفندیار رجائی، همچنین از جناب آقای دکتر محمد حسن یاوری که مرا در انجام این رساله هدایت کردند بسیار متشکرم. از اساتید محترمی که به من علم آموختند، کمال تشکر را دارم، از جناب آقای دکتر حمید رضا مشایخی و جناب آقای دکتر صابر فرجامی شایسته که زحمت داوری این رساله را پذیرفتند، سپاسگزارم. همچنین از تمامی دوستانی که در انجام این رساله به من کمک کردند، صمیمانه تشکر می‌نمایم.

فهرست مطالب

	عنوان	صفحه
	چکیده فارسی	ش
	چکیده انگلیسی	ص
	مقدمه	۱

فصل اول:

ساختار لیزرهای نیمه‌رسانای نقطه‌کوانتمی

۱-۱	مقدمه	٤
۱-۲	ساختارهای نیمه‌رسانای غیرهمجنس	٥
۱-۳	پیوندهای نیمه‌رسانا	۷
۱-٤	انواع لیزرهای نیمه‌رسانا	۱۰
۱-٤-۱	لیزرهای نیمه‌رسانای غیرهمجنس دو گانه از لحاظ ضخامت لایه فعّال	۱۰
۱-٥	ساختار نوار انرژی نیمه‌رساناها	۱۱
۱-٥-۱	ساختار نوار انرژی لیزرهای نیمه‌رسانای نقطه‌کوانتمی	۱۳
۱-٦	ساختار لیزرهای نیمه‌رسانای نقطه‌کوانتمی	۱٥
۱-۷	حالتهای الکترونیکی نیمه‌رساناهای نانو ساختار	۱٦
۱-۷-۱	مواد حجمی	۱۸
۱-۷-۲	چاه‌کوانتمی	۱۹
۱-۷-۳	سیم‌کوانتمی	۲۰
۱-۷-٤	نقطه‌کوانتمی	۲۱
۱-۸	ساخت	۲۲
۱-۸-۱	روشهای ساخت لیزرهای نقطه‌کوانتمی خودسامانی	۲۳
۱-۸-۲	تشکیل نقاط‌کوانتمی در روش استرانسکی- کراستانو	۲٥
۱-۹	مشخصه‌های ساختاری لیزرهای نقطه‌کوانتمی	۲٦
۱-۹-۱	الکترولومینسنس	۲٦
۱-۹-۲	فوتولمینسنس	۲۸
۱-۱۰	فاکتورهای محدود کننده عملکرد لیزر نقطه‌کوانتمی	۳۰
۱-۱۱	تکنیکهای کلیدی برای عصر جدید	۳۲

	عنوان	صفحه
۱-۱۱-۱	*لیزرهای نقطه‌کوانتمی تنگ چیده شده*	۳۲
۱-۱۱-۲	*لیزرهای نقطه‌کوانتمی ستونی*	۳۵
۱-۱۱-۳	*لیزر گسیل سطح کاواک عمودی نقطه‌کوانتمی*	۳۸

فصل دوم:
فیزیک لیزرهای نیمه‌رسانای نقطه‌کوانتمی

۲-۱	مقدمه	۴۲
۲-۲	اصول عملکرد لیزرهای نیمه‌رسانا	۴۲
۲-۲-۱	*فرایندهای بازترکیب*	۴۳
۲-۲-۱-۱	*بازترکیبهای غیر تابشی*	۴۴
۲-۲-۲	*انواع فرایندهای اپتیکی*	۴۵
۲-۲-۲-۱	*گسیل خودبخودی*	۴۶
۲-۲-۲-۲	*گسیل القایی*	۴۶
۲-۲-۲-۳	*جذب*	۴۶
۲-۲-۳	*آستانه لیزری*	۴۶
۲-۲-۴	*شرط گسیل القایی*	۴۷
۲-۳	*خواص اساسی لیزرهای نقطه‌کوانتمی ایده‌ال*	۴۸
۲-۴	*مزایای لیزرهای نقطه‌کوانتمی*	۵۲
۲-۵	*تئوری اساسی لیزرهای نقطه‌کوانتمی*	۵۳
۲-۵-۱	*فاکتور محدودیت اپتیکی*	۵۳
۲-۵-۲	*بهره و آستانه*	۵۴
۲-۵-۳	*دمای مشخصه*	۵۵
۲-۵-۴	*تابع توزیع حامل*	۵۶
۲-۵-۵	*جریان آستانه*	۵۹
۲-۵-۶	*طیف لیزری*	۶۱
۲-۵-۷	*مشخصه‌های دینامیکی*	۶۳
۲-۵-۸	*واهلش حامل در نقاط کوانتمی*	۶۴
۲-۵-۹	مدل واهلش حامل در نقاط کوانتمی	۶۵

	عنوان	صفحه
۲-۵-۱۰	سازوکارهای وافازی قطبش در نقاط کوانتمی	٦٨
۲-٦	غیر همسانی نقاط‌کوانتمی	٦٨
۲-٦-۱	اثر پهن شدگی ناهمگن روی بهره	۷۰
۲-٦-۲	*اثر پهن شدگی ناهمگن روی چگالی جریان آستانه*	۷۲
۲-۷	*ویژگیهای لیزر نقطه‌کوانتمی*	۷٤

فصل سوم:

معادلات آهنگ لیزرهای نیمه‌رسانای نقطه‌کوانتمی

۳- ۱	*تولید و بازترکیب حاملها در ناحیه فعال*	۸۱
۳- ۲	*تولید فوتونهای خودبخودی*	۸۲
۳- ۳	*تولید فوتون و اتلاف در کاواکهای لیزری*	۸۳
۳- ٤	*بهره حالت ایستا یا آستانه*	۸٦
۳- ٥	*ویژگیهای اساسی منحنی توان ـ جریان*	۹۰
۳- ٦	*تحلیل حالت ایستای معادلات آهنگ*	۹۲
۳- ۷	*جوابهای حالت ایستا چند مدی*	۹۷
۳- ۸	*تحلیل دیفرانسیلی معادلات آهنگ*	۹۸
۳- ۹	*اختلال سیگنال بزرگ: تحلیل عددی معادلات آهنگ چند مدی*	۱۰۰
۳- ۱۰	*روش رانگ- کوتا مرتبه چهار*	۱۰۲
۳- ۱۱	*پاسخ گذرا سیگنال بزرگ*	۱۰۵
۳- ۱۲	*بهره اپتیکی خطی*	۱۰٦
۳- ۱۳	*معادلات آهنگ لیزر نقطه کوانتمی*	۱۰۸
۳- ۱٤	*معادلات آهنگ لیزر نقطه کوانتمی در حالت ایده‌ال با در نظر گرفتن بهره غیر خطی*	۱۱۲
۳- ۱۵	*معادلات آهنگ لیزر نقطه کوانتمی با در نظر گرفتن بهره غیر خطی و گریز حرارتی حاملها*	۱۱۳
۳- ۱۵-۱	*گریز حرارتی حاملها از نقاط کوانتمی*	۱۱۳
۳- ۱۵-۲	*بهره اپتیکی غیر خطی*	۱۱۳

فصل چهارم:

شبیه‌سازی مشخصه‌های لیزر نقطه کوانتمی InGaAs/GaAs خودسامانی

	عنوان	صفحه
٤-١	شبیه‌سازی عملکرد لیزر نقطه کوانتمی InGaAs\GaAs خودسامانی در حالت ایده‌ال	١١٦
٤-١-١	بررسی اثر دینامیک واهلش حاملها	١١٧
٤-١-٢	بررسی اثر پوشش نقاط کوانتمی	١١٩
٤-٢	شبیه‌سازی عملکرد لیزر نقطه کوانتمی InGaAs/GaAs خودسامانی در حالت واقعی با بهره خطی	١٢٤
٤-٢-١	شبیه‌سازی طیف نور-گسیل	١٢٦
٤-٢-٢	شبیه‌سازی طیف بهره-گسیل	١٢٩
٤-٢-٣	شبیه‌سازی پاسخ گذرا سیگنال بزرگ	١٣١
٤-٣	شبیه‌سازی عملکرد لیزر نقطه کوانتمی InGaAs/GaAs خودسامانی واقعی با بهره کل	١٣٨
٤-٣-١	شبیه‌سازی طیف بهره-گسیل	١٣٨
٤-٣-٢	شبیه‌سازی پاسخ گذرا سیگنال بزرگ	١٤١
٤-٣-٣	شبیه‌سازی طیف نور-گسیل	١٤٣
٤-٤	شبیه‌سازی عملکرد لیزر نقطه کوانتمی InGaAs/GaAs خودسامانی واقعی با در نظر گرفتن بهره کل و گریز حرارتی حاملها از نقاط کوانتمی	١٤٦
٤-٤-١	شبیه‌سازی طیف نور-گسیل	١٤٦
٤-٤-٢	شبیه‌سازی مشخصه‌های دینامیکی	١٤٧
٤-٤-٣	بررسی اثر تنگنا فونون و پهن‌شدگی ناهمگن	١٤٨
٤-٤-٤	بررسی اثر تغییر زمانهای بازترکیب	١٥٠
٤-٤-٥	شبیه‌سازی پاسخ فرکانسی	١٥٢
٤-٥	شبیه‌سازی مشخصه‌های نور-جریان لیزر نقطه کوانتمی InGaAs/GaAs خودسامانی در حالت واقعی با بهره خطی	١٥٤
٤-٥-١	بررسی اثر پهن‌شدگی همگن	١٥٤
٤-٥-٢	بررسی اثر پهن‌شدگی ناهمگن	١٥٧
٤-٥-٣	بررسی اثر دینامیک واهلش حامل	١٥٧
٤-٥-٣-١	بررسی اثر پهن‌شدگی ناهمگن	١٦١
٤-٥-٤	بررسی اثر پوشش نقاط کوانتمی	١٦٢
	فصل پنجم:	١٦٤
	نتیجه‌گیری و پیشنهادات	

عنوان	صفحه
نتیجه‌گیری	۱۶۵
پیشنهادات	۱۶۹
مراجع	۱۷۰
پیوست (الف)	۱۷۳
پیوست (ب)	۱۸۵
پیوست (پ)	۱۸۸
پیوست (ج)	۱۹۷

فهرست جداول

عنوان	صفحه
جدول (٤- ١) پارامترهای مورد استفاده در شبیه‌سازی عملکرد لیزر نقطه کوانتمی *InGaAs/GaAs* خودسامانی در حالت در ایده‌ال	١١٦
جدول (٤-٢) پارامترهای مورد استفاده در شبیه‌سازی عملکرد لیزر نقطه کوانتمی *InGaAs/GaAs* خودسامانی در حالت واقعی	١٢٥

فهرست اشکال

عنوان | صفحه

شکل(۱-۱) نمایش شماتیک ساختار همجنس، و غیرهمجنس دو گانه ۷

شکل(۱-۲) ساختار نوار انرژی یک پیوند p-n در بایاس صفر، بایاس مستقیم، و چگالی الکترونها و حفره‌ها در بایاس مستقیم ۸

شکل(۱-۳) ساختار نوار انرژی یک پیوند غیر همجنس دو گانه در بایاس صفر، بایاس مستقیم، و ناپیوستگی گاف نواری ۹

شکل(۱-٤) نمودار انرژی بر حسب بردار موج برای یک نیمرسانای با گاف مستقیم برای نوارهای رسانش و ظرفیت ۱۲

شکل(۱-۵) طرحواره سطح مقطع و نوار انرژی لیزر نقطه کوانتمی نوعی ۱۳

شکل(۱-٦) نمای کلّی سطح مقطع انرژی نوار هدایت لیزر نقطه کوانتمی $In(Ga)As$-$GaAs$ نوعی و ضریب شکست لایه‌های مربوطه، و میدان اپتیکی در جهت جانبی ۱٤

شکل(۱-۷) نمای لیزر نقطه کوانتمی با کاواک لبه گسیل شامل ساختار نقطه‌کوانتمی سه چینه‌ای ۱٦

شکل(۱-۸) طرحواره نانوساختارهای کوانتمی و چگالی حالتهای آنها ۱۷

شکل(۱-۹) طیف جذب اپتیکی در ۷۷ K چاه‌کوانتمی کرنش‌یافته، و طیف فوتولمینسنس نقاط‌کوانتمی $InGaAs/GaAs$ در ۵ K ۲۲

شکل(۱-۱۰) نمای سطحی و سطح مقطع تصاویر گرفته شده با میکروسکوپ الکترون عبوری از ساختار نقطه‌کوانتمی سه چینه‌ای ۲٦

شکل(۱-۱۱) طیف الکترولومینسنس برای جریانهای تزریقی متفاوت ۲۷

شکل(۱-۱۲) طیف فوتولمینسنس در ۳۰۰ K برای ساختار نقطه‌کوانتمی سه چینه‌ای ۲۸

شکل(۱-۱۳) اثر اندازه نقطه‌کوانتمی روی حالتهای برانگیخته الکترون و حفره ۲۹

شکل(۱-۱٤) تصویر سطح مقطعی TEM ، و طرحواره ساختار نقطه‌کوانتمی تنگ چیده شده ۳۳

شکل(۱-۱۵) طیف PL ساختار نقطه‌کوانتمی تنگ چیده شده در ٤/۲ K، همراه با طیف PL نقطه‌کوانتمی معمولی بدون جفت‌شدگی الکترونیکی ۳٤

شکل(۱-۱٦) تصویر سطح مقطعی TEM ساختار نقطه‌کوانتمی ستونی ۳٦

شکل(۱-۱۷) مشخصه‌های توان خروجی- جریان لیزر نقطه‌کوانتمی ستونی ۳۷

شکل(۱-۱۸) طیف PL اندازه‌گیری شده نقاط‌کوانتمی ستونی در ۳۰۰ K همراه با طیف PL نقاط‌کوانتمی تک لایه رشد یافته در روش SK ۳۸

شکل(۱-۱۹) حالتهای الکترونی و مدهای فوتونی در میکروکاواک $VCSEL$ نقطه‌کوانتمی ۳۹

عنوان | صفحه

شکل(۱-۲۰) نمای ساختار $VCSEL$ نقطه‌کوانتمی با ۱۷ لایه فعّال شامل ۱۰ دوره لایه‌های نقطه‌کوانتمی $In_{0.5}Ga_{0.5}As$ ٤٠

شکل(۲-۱) طرحواره چگالی حالتها در نوار هدایت و نوار ظرفیت برای یک لیزرساختار غیرهمجنس دوگانه حجمی، چاه‌کوانتمی، سیم‌کوانتمی و نقطه‌کوانتمی ٤٩

شکل(۲-۲) چگالی حالتها و طیف بهره برای ابعاد مختلف ناحیه فعّال ٥٠

شکل(۲-۳) طیف بهره محاسبه شده در $۳۰۰\,K$ برای ساختارهای نقطه‌کوانتمی ایده‌ال، سیم‌کوانتمی، چاه‌کوانتمی، و حجمی ٥١

شکل(۲-٤) بهره پیک محاسبه شده بر حسب تابعی از چگالی جریان برای چهار نوع لیزر با ناحیه فعّال نقطه‌کوانتمی، سیم‌کوانتمی، چاه‌کوانتمی، و حجمی ٥٢

شکل(۲-٥) پیش‌بینی تئوری تابع توزیع حامل برای سه دمای متفاوت ٥٧

شکل(۲-٦) توزیع حامل برای جریانهای تزریقی متفاوت τ/۲/۵e-۰/۱۵، بر نقطه‌کوانتمی برای مجموعه نقاط‌کوانتمی در دو دمای متفاوت $۷۷\,K$ و $۳۰۰\,K$ ٥٨

شکل(۲-۷) طیف بهره (در واحدهای ماکزیمم بهره مدی ، g^{max} ، گذار حالت پایه) برای جریانهای تزریقی متفاوت τ/۲/۵e-۰/۱۵ بر نقطه‌کوانتمی در دو دمای $۷۷\,K$ و $۳۰۰\,K$ ٥٩

شکل(۲-۸) وابستگی تئوری چگالی جریان آستانه به پوشش سطحی نقاط‌کوانتمی ٥٩

شکل(۲-۹) طیف بهره اشباع مجموعه نقاط‌کوانتمی، چگالی جریان آستانه و طول موج لیزردهی بر حسب اتلافهای کلی و ماکزیمم بهره گذار حالت پایه ٦١

شکل(۲-۱۰) طیف لیزری برای جریانهای تزریقی متفاوت (در واحدهای جریان آستانه) برای پهن‌شدگی ناهمگن $\Gamma_0 = ۲۰meV$ و پهن‌شدگی همگن $\Gamma = 0meV$ و $\Gamma = ۲۰meV$ ٦٢

شکل(۲-۱۱) نمای تنگنا فونون ٦٥

شکل(۲-۱۲) دو مرحله واهلش حامل در نقاط‌کوانتمی، واهلش از ترازهای پیوسته و واهلش در بین ترازهای مجزای نقاط‌کوانتمی ٦٦

شکل(۲-۱۳) نمای دو فرآیند واهلش حامل از ترازهای پیوسته، فرآیند چند فونونی و فرآیند اوژه ٦٧

شکل(۲-۱٤) فرآیندهای وافازی در نقاط‌کوانتمی ٦٨

شکل(۲-۱٥) پهن شدگی ناهمگن انرژی گذار اپتیکی و در نتیجه پهن شدن طیف بهره به خاطر اندازه های متفاوت نقاط کوانتمی ٦٩

شکل(۲-۱٦) طیف بهره مدی برای پر شدن تعادلی نقاط‌کوانتمی ٧١

شکل(۲-۱۷) طرحواره نوار انرژی لیزر نقطه‌کوانتمی ٧٣

شکل(۲-۱۸) چگالی جریان آستانه بر حسب مربع ریشه میانگین تغییرات نسبی اندازه نقاط‌کوانتمی ٧٤

عنوان	صفحه

شکل(۲-۱۹) وابستگی چگالی جریان آستانه به طول کاواک برای لیزرهای با تعداد متفاوتی از لایه‌های نقاط‌کوانتمی و انعکاسهای سطح متفاوت ۷۵

شکل(۲-۲۰) مشخصه‌های توان خروجی بر حسب جریان برای لیزر نقطه‌کوانتمی تحت شرط موج پیوسته ۷۶

شکل(۲-۲۱) رفتار طول موجی لیزرهای نقطه‌کوانتمی با پارامترهای ساختاری متفاوت ۷۷

شکل(۲-۲۲) رابطه بین طول موج لیزردهی و بهره آستانه برای تک لایه نقطه‌کوانتمی ۷۸

شکل(۲-۲۳) پیچ خوردگی بزرگ در مشخصه‌های نور- جریان لیزر نقطه‌کوانتمی ۷۹

شکل(۳-۱) نمایش طرحوار لیزرهای مسطح و کاواک عمودی، نشاندهنده حجمهای فعال و کاواک ۸۴

شکل(۳-۲) سطح مقطع کاواک لیزر نوعی ۸۷

شکل(۳-۳) نمایش توان خروجی بر حسب جریان تزریقی برای یک دیود لیزر ۹۱

شکل(۳-۴) مشخصه نور- جریان در دو اندازه جانبی متفاوت سه لیزر گسیل سطح کاواک عمودی و یک لیزر مسطح چاه کوانتمی ۹۵

شکل(۳-۵) مشخصه نور- جریان روی یک مقیاس خطی، بهره مادی و چگالی حامل- جریان برای لیزر مسطح ۹۶

شکل(۳-۶) مشخصه نور- چگالی جریان برای سه مد متفاوت در لیزر چاه کوانتمی مسطح ۹۸

شکل(۳-۷) اختلال سیگنال بزرگ لیزر مسطح InGaAs/GaAs چاه کوانتمی ۱۰۲

شکل(۳-۸) اختلال سیگنال بزرگ یک کاواک لیزر کوچک با استفاده از پارامترهای VCSEL ۱۰۲

شکل(۳-۹) نمایش روش رانگ- کوتا مرتبه چهار، انتگرال گیری عددی یک تابع ۱۰۴

شکل(۳-۱۰) جریان پله‌ای ورودی به صورت تابعی از زمان، خروجی نور دیود لیزر بر سطح آینه به صورت تابعی از زمان، و چگالی حامل نوار هدایت وظرفیت به صورت تابعی از زمان ۱۰۵

شکل(۳-۱۱) دیاگرام انرژی نوار هدایت ناحیه فعال لیزر نقطه‌کوانتمی و فرایند واهلش حاملها درون حالت پایه نقاط کوانتمی ۱۰۸

شکل(۳-۱۲) برهمکنش بین فوتونهای مد کاواک و حاملها در نقاط کوانتمی از طریق پهن شدگی همگن بهره اپتیکی ۱۱۰

شکل(۴-۱) توان خروجی بر حسب جریان تزریقی برای مقادیر مختلف زمانهای بازترکیب و واهلش به نقاط کوانتمی ۱۱۷

شکل(۴-۲) توان خروجی بر حسب جریان تزریقی برای زمانهای متفاوت زمانهای بازترکیب و واهلش به نقاط کوانتمی محاسبه شده با روش عددی گوس- نیوتن ۱۱۸

شکل(۴-۳) توان خروجی بر حسب جریان تزریقی برای مقادیر مختلف ضریب پوشش نقاط کوانتمی در $\tau_0 = ۱۰ps$ و $\tau_0 = ۱۰۰ps$ برای طول‌عمرهای بازترکیب $\tau_{qr} = ۳\,ns$ ، $\tau_r = \tau_{spon} = ۲/۸\,ns$ ۱۲۰

شکل(۴-۴) توان خروجی بر حسب جریان تزریقی برای مقادیر مختلف ضریب پوشش نقاط کوانتمی در $\tau_0 = ۱۰ps$ و $\tau_0 = ۱۰۰ps$ برای طول‌عمرهای بازترکیب $\tau_{qr} = ۰/۵\,ns$ ، $\tau_r = \tau_{spon} = ۲/۸\,ns$ ۱۲۲

عنوان	صفحه
شکل(٤-٥) ماکزیمم توان خروجی بر حسب زمان واهلش به نقاط کوانتمی در تمام پهنا در نصف ماکزیمم $\Gamma_0 = ۱۰meV$، $\Gamma_0 = ۲۰meV$، و $\Gamma_0 = ۳۰meV$، برای پوششهای مختلف نقاط کوانتمی	۱۲٤
شکل(٤-٦) طیف نور - گسیل برای تمام پهنا در نصف ماکزیمم پهن‌شدگی همگن متفاوت	۱۲٦
شکل(٤-۷) طیف نور گسیل در $۸۰K$ کلوین، $۱٦۰K$ کلوین، و $۲۹۸K$	۱۲۸
شکل(٤-۸) طیف بهره-گسیل برای تمام پهنا در نصف ماکزیمم پهن‌شدگی همگن متفاوت	۱۲۹
شکل(٤-۹) طیف بهره-گسیل برای $\hbar\gamma_{cv} = ۳meV$، و $\hbar\gamma_{cv} = ۵meV$	۱۳۰
شکل(٤-۱۰) مشخصه‌های دینامیکی شبیه‌سازی شده تعداد حاملهای گروه مرکزی در جریانهای تزریقی متفاوت برای مقادیر مختلف پهن‌شدگی همگن	۱۳۲
شکل(٤-۱۱) نمایش دیگری از مشخصه‌های دینامیکی شبیه‌سازی شده تعداد حاملهای گروه مرکزی در همان جریانها و مقادیر پهن‌شدگی همگن شکل (٤-۱۰)	۱۳۳
شکل(٤-۱۲) مشخصه‌های دینامیکی شبیه‌سازی شده تعداد فوتونهای مد مرکزی در جریانهای تزریقی متفاوت برای مقادیر مختلف پهن‌شدگی همگن	۱۳٤
شکل(٤-۱۳) نمایش دیگری از مشخصه‌های دینامیکی شبیه‌سازی شده تعداد فوتونهای مد مرکزی در همان جریانها و مقادیر پهن‌شدگی همگن شکل (٤-۱۲)	۱۳۵
شکل(٤-۱٤) تحول زمانی تعداد فوتونها در جریان $۲mA$ برای $\hbar\gamma_{cv} = ۷meV$	۱۳۷
شکل(٤-۱۵) مشخصه بهره ـ گسیل با مقادیر قبلی پهن‌شدگی همگن برای جریانهای تزریقی متفاوت با در نظر گرفتن بهره کل	۱۳۹
شکل(٤-۱٦) کاهش بهره کل نسبت به بهره خطی برای $\hbar\gamma_{cv} = ۵meV$ و جریانهای $۵,۱۰mA$	۱٤۰
شکل(٤-۱۷) طیف بهره-گسیل برای $\hbar\gamma_{cv} = ۳meV$، و $\hbar\gamma_{cv} = ۵meV$ با در نظر گرفتن بهره کل	۱٤۰
شکل(٤-۱۸) مشخصه دینامیکی تعداد حاملهای گروه مرکزی در جریانهای مختلف برای $\hbar\gamma_{cv} = ۰/۱meV$	۱٤۱
شکل(٤-۱۹) مشخصه دینامیکی تعداد فوتونهای مد مرکزی در $\hbar\gamma_{cv} = ۵, ۷, ۱۰meV$ با در نظر گرفتن بهره کل	۱٤۲
شکل(٤-۲۰) مشخصه دینامیکی تعداد فوتونهای مدهای مختلف در تمام پهنا در نصف ماکزیمم پهن‌شدگی همگن برابر با تمام پهنا در نصف ماکزیمم پهن‌شدگی ناهمگن	۱٤۳
شکل(٤-۲۱) طیف نور ـ گسیل شبیه‌سازی شده با در نظر گرفتن بهره کل، در جریانهای متفاوت برای مقادیر مختلف $\hbar\gamma_{cv}$	۱٤٤
شکل(٤-۲۲) کاهش توان خروجی در حالتی که بهره کل را در نظر بگیریم نسبت به حالت بهره خطی برای جریانهای $۵,۱۰mA$	۱٤۵
شکل(٤-۲۳) منحنی نور ـ گسیل برای سه دمای $۸۰K$ ($\hbar\gamma_{cv} = ۰/۱meV$)، $۱٦۰K$ ($\hbar\gamma_{cv} = ۵meV$) و $۲۹۸K$ ($\hbar\gamma_{cv} = ۱۰meV$)	۱٤٦

عنوان	صفحه
شکل(٤-٢٤) منحنی نور-گسیل با و بدون در نظر گرفتن گریز حرارتی حاملها از نقاط کوانتمی برای عملکرد دمای اطاق لیزر مورد بررسی در $10\,mA$ و $5\,mA$	١٤٧
شکل(٤-٢٥) مشخصه دینامیکی تعداد حامل و فوتون مد مرکزی در دمای $298\,K$	١٤٧
شکل(٤-٢٦) ماکزیمم دامنه نوسان واهلشی و تعداد حامل حالت ایستا با و بدون در نظر گرفتن گریز حرارتی حاملها از نقاط کوانتمی	١٤٨
شکل(٤-٢٧) طیف نور- گسیل محاسبه شده در زمانهای واهلش $\tau_0 = 1,10,100,300,500\,ps$ در $\Gamma_0 = 10\,meV$، $\Gamma_0 = 20\,meV$، $\Gamma_0 = 40\,meV$ و $\Gamma_0 = 60\,meV$	١٤٩
شکل(٤-٢٨) مشخصه نور ـ گسیل برای $\tau_r = 2/8\,ns$، $\tau_{qr} = 0/5\,ns$ و $\tau_r = 0/5\,ns$، $\tau_{qr} = 0/5\,ns$	١٥٠
شکل(٤-٢٩) مشخصه نور ـ گسیل برای زمانهای بازترکیب متفاوت (۱) $\tau_r = 2/8\,ns$، $\tau_{qr} = 3\,ns$ و (۲) $\tau_r = 2/8\,ns$، $\tau_{qr} = 0/5\,ns$	١٥١
شکل(٤-٣٠) مشخصه‌های دینامیکی تعداد حامل و فوتون مد مرکزی برای $\tau_r = 2/8\,ns$، $\tau_{qr} = 0/5\,ns$ و $\tau_r = 0/5\,ns$، $\tau_{qr} = 0/5\,ns$	١٥١
شکل(٤-٣١) مشخصه‌های دینامیکی تعداد حاملها و فوتونها برای زمانهای بازترکیب متفاوت (۱) $\tau_r = 2/8\,ns$، $\tau_{qr} = 3\,ns$ و (۲) $\tau_r = 2/8\,ns$، $\tau_{qr} = 0/5\,ns$	١٥٢
شکل(٤-٣٢) پاسخ فرکانسی عملکرد دمای اطاق لیزر مورد بررسی در جریانهای متفاوت	١٥٣
شکل(٤-٣٣) پاسخ فرکانسی برای مقادیر مختلف پهن‌شدگی همگن در $I = 5\,mA$ و $I = 10\,mA$	١٥٣
شکل(٤-٣٤) توان خروجی بر حسب جریان تزریقی برای $\hbar\Gamma_{cv} = 0/1,1\,meV$	١٥٤
شکل(٤-٣٥) مشخصه نور-جریان تجربی تحت شرط موج پیوسته در دو دمای $80\,K$ و $298\,K$	١٥٥
شکل(٤-٣٦) مشخصه نور ـ جریان برای $\hbar\gamma_{cv} = 0/1,1,2,2/5,4/5\,meV$، $\hbar\gamma_{cv} = 0/1,1,3,4,4/5,5\,meV$، $\hbar\gamma_{cv} = 2,4/5,5,\ 5/5,6/5\,meV$ و $\hbar\gamma_{cv} = 5,\ 7,\ 10,\ 20\ meV$ در تمام پهنا در نصف ماکزیمم پهن‌شدگی ناهمگن $\Gamma_0 = 20\,meV$	١٥٦
شکل(٤-٣٧) مشخصه نور ـ جریان برای $\hbar\gamma_{cv} = 7,\ 10,\ 15,\ 20\ meV$ در $\Gamma_0 = 30\ meV$ و $\hbar\gamma_{cv} = 8,\ 10\ meV$ در $\Gamma_0 = 40\ meV$	١٥٧
شکل(٤-٣٨) مشخصه نور ـ جریان برای زمانهای واهلش متفاوت در زمانهای بازترکیب $\tau_r = 2/8\,ns$، $\tau_{qr} = 3\,ns$ و $\tau_r = 2/8\,ns$، $\tau_{qr} = 0/5\,ns$ و $\tau_r = 0/5\,ns$، $\tau_{qr} = 0/5\,ns$	١٥٨
شکل(٤-٣٩) مشخصه نور ـ جریان برای زمانهای واهلش متفاوت در زمانهای بازترکیب $\tau_r = 2/8\,ns$، $\tau_{qr} = 3\,ns$ و $\tau_r = 2/8\,ns$، $\tau_{qr} = 0/5\,ns$ و $\tau_r = 0/5\,ns$، $\tau_{qr} = 0/5\,ns$ تا جریان $100\,mA$	١٥٩

شکل(٤-٤٠) مشخصه بهره ـ جریان برای زمانهای واهلش متفاوت در زمانهای بازترکیب $\tau_r = ۲/۸\,ns$، ۱٦۰
$\tau_{qr} = ۰/۵\,ns$ ،$\tau_r = ۰/۵\,ns$ و $\tau_{qr} = ۰/۵\,ns$ ،$\tau_r = ۲/۸\,ns$ و $\tau_{qr} = ۳\,ns$

شکل(٤-٤١) مشخصه نور- جریان برای لیزر مورد بررسی عمل کننده در دمای اطاق در زمانهای بازترکیب ۱٦۱
$\tau_r = ۲/۸\,ns$، و $\tau_{qr} = ۳\,ns$ و تمام پهنا در نصف ماکزیمم پهن شدگی ناهمگن
$\Gamma_0 = ٤۰meV$

شکل(٤-٤٢) مشخصه نور- جریان برای تمام پهنا در نصف ماکزیمم پهن‌شدگی همگن و ناهمگن $۲۰meV$، ۱٦۲
زمانهای بازترکیب $\tau_r = ۲/۸\,ns$، و $\tau_{qr} = ۳\,ns$ و زمان واهلش $۱۰ps$ برای پوششهای متفاوت

چکیده:

مطالعه بهره لیزرهای نیمه‌رسانای نقطه‌کوانتمی

داوود قدسی نهری

در این تحقیق، ساختار نوار انرژی نقاط کوانتمی، ساختار لیزرهای نقطه‌کوانتمی، فیزیک، روشهای ساخت، و مشخصه‌های این لیزرها، همچنین، محدودیتها و تکنولوژیهای کلیدی برای بهبود عملکرد آنها بیان می‌شوند. معادلات آهنگ توصیف کننده عملکرد لیزرهای نقطه‌کوانتمی بدست می‌ایند. با استفاده از روشهای تحلیلی و عددی، معادلات آهنگ لیزر نقطه‌کوانتمی InGaAs/GaAs خودسامانی در حالت ایده‌ال حل شده و مشخصه‌های نور–جریان آن شبیه‌سازی می‌شوند. ما نشان می‌دهیم که پدیده تنگنا فونون و کاهش طول عمرهای بازترکیب در چاه و نقاط کوانتمی موجب افت مشخصه‌های استاتیکی لیزر مورد بررسی می‌شوند. همچنین، معادلات آهنگ لیزر نقطه کوانتمی فوق در حالت واقعی و با در نظر گرفتن بهره خطی حل می‌شوند و مشخصه‌های استاتیکی و دینامیکی لیزر نقطه کوانتمی فوق شبیه‌سازی شده و نشان می‌دهیم که افزایش پهن‌شدگی همگن بهره اپتیکی تا جاییکه پهن‌شدگی همگن و ناهمگن با یکدیگر برابر شوند منجر به بهبود مشخصه‌های استاتیکی نور–گسیل و بهره–گسیل لیزر مورد بررسی می‌شود. افزایش جریان تزریقی موجب بهبود مشخصه‌های استاتیکی و دینامیکی می‌گردد. افزایش پهن‌شدگی همگن منجر به افزایش تاخیر شروع و جریان آستانه تابش لیزری می‌شود. همچنین، افزایش پهن‌شدگی همگن به بیش از پهن‌شدگی ناهمگن، افزایش پهن‌شدگی ناهمگن و پوشش نقاط کوانتمی موجب افت مشخصه‌های استاتیکی می‌شوند. افزایش طول عمر واهلش به نقاط کوانتمی و کاهش طول عمر بازترکیب در لایه وتینگ منجر به کاهش بهره دیفرانسیلی می‌شود. با حل معادلات آهنگ لیزر نقطه کوانتمی فوق در حالت واقعی و با در نظر گرفتن بهره کل، نشان می‌دهیم که بر خلاف مورد قبل به خاطر اشباع بهره، لیزردهی تک مد وجود ندارد. سرانجام پارامتر مربوط به گریز حرارتی حاملها از نقاط‌کوانتمی را نیز در معادلات آهنگ وارد کرده و نشان می‌دهیم که افزایش پهن‌شدگی ناهمگن منجر به پهن شدن طیف لیزری می‌شود. همچنین، پاسخ فرکانسی لیزر فوق را شبیه‌سازی کرده و نشان می‌دهیم که افزایش جریان تزریقی و کاهش پهن‌شدگی همگن منجر به افزایش فرکانس نوسان واهلشی و پهنای باند مدولاسیون می‌شوند.

کلید واژه: لیزرهای نیمه‌رسانای نقطه‌کوانتمی، بهره، شبیه‌سازی

Abstract:

Study of the gain of semiconductor quantum dot lasers

Davoud Ghodsi Nahri

In this study, quantum dots (QDs) band-structure, QD laser structures, physics, fabrication methods, and characteristics of these lasers, limiting factors and key technologies for improvement of their performance are also presented. The rate equations that describe the QD lasers performance are derived. Using analytic and numeric methods, we solve the rate equations of self-assembled InGaAs/GaAs QD laser in an ideal state and simulate the light-current characteristics. We show the phonon-bottleneck effect, and reduction of the recombination lifetimes in the quantum well and QDs result in degradation of the static-characteristics of the mentioned QD laser. Using fourth-order Runge-Kutta method, we solve the rate equations of the mentioned QD laser in an actual state with considering the linear gain. We simulate the static and dynamic characteristics of the mentioned QD laser and show increasing the homogeneous broadening of the optical gain until it becomes equal to the inhomogeneous broadening results in improvement of the static-characteristics of light-emission and gain-emission. Increasing the injected current results in improvement of the static and dynamic-characteristics. Threshold current and turn-on delay increase as the homogeneous broadening increases. Exceeding the homogeneous broadening from inhomogeneous broadening, increasing the inhomogeneous broadening and QDs coverage as well result in degradation of the static-characteristics. The differential gain decreases as the relaxation lifetime increases and the recombination lifetimes decrease. Solving the rate equations of the mentioned QD laser in the actual state and with considering the total gain, we show due to the gain saturation, there is not single mode lasing unlike previous case. Finally, we introduce a factor in the rate equations that it relates to the thermal carrier escape from QDs and show the lasing modes number increases as the inhomogeneous broadening increases. We also simulate the frequency response of the mentioned QD laser and show increasing the injected current and reducing the homogeneous broadening result in increasing the relaxation oscillation frequency, and modulation bandwidth.

Key words: Quantum Dot Semiconductor Lasers, Gain, Simulation

مقدمه

ظهور وسایل مبتنی بر اجزاء فعال اندازه نانومتری، عصر نانوالکترونیک و نانوفوتونیک را آغاز کرده است. در بین چنین اجزائی، ساختارهای غیرهمجنس با بعد پایین، همانند چاههای کوانتمی، سیمهای کوانتمی، و نقاط کوانتمی، به‌طور قابل ملاحظه‌ای اهمیت یافته‌اند. محصورشدگی کوانتمی در ساختارهای غیرهمجنس با بعد پایین، ویژگی‌های اساسی یک بلور نیمه‌رسانا را شدیداً بهبود می‌بخشد. در چاههای کوانتمی، حاملها به طور فضایی در یک جهت عرضی محصور شده‌اند و آزادانه در صفحه چاه کوانتمی حرکت می‌کنند. در سیم کوانتمی، حاملها در دو جهت عرضی محصور شده‌اند و آزادانه در طول آن حرکت می‌کنند. بنابراین، طیف انرژی حامل در هر دو چاه و سیم کوانتمی، درون زیر نوارهای پهن حالتهای مجاز پیوسته است و از این نظر، آنها به طور کیفی از طیف انرژی حامل در کریستال حجمی (توده‌ای) متفاوت نیستند.

در نقاط کوانتمی، حاملها، در سه بعد محصور می‌شوند و بهبود ویژگیهای الکترونی بسیار اساسی‌تر و شدیدتر است. درنتیجه در نقاط کوانتمی، ترازهای انرژی، مجزا هستند و گذارهای بین ترازهای(زیرترازهای) الکترون و حفره، با گذارهای بین ترازهای دقیقاً مجزای اتمهای منفرد، قابل‌مقایسه می‌باشند به این دلیل، نقاط کوانتمی را «ابر اتم‌ها»[1] یا «اتم‌های مصنوعی»[2] نیز می‌نامند. یک نقطه کوانتمی با اندازه نوعی چند تا چند ده نانومتر، شامل چند هزار تا چند ده هزار اتم است. نقاط کوانتمی، به صورت دسته‌ای از مواد ساخت انسان با انرژی‌های حالتهای شبه اتمی تنظیم پذیر (از طریق تغییر دادن ترکیب و اندازه) به طور مصنوعی ساخته شده‌اند، که موجب توجه و علاقه زیادی گردیده‌اند.

لیزر نیمه‌رسانا، ابزار اساسی اپتوالکترونیک پیشرفته و فوتونیک است. سالها پیش، پیشنهاد شد که با کاهش ابعاد ناحیه فعال، می‌توان به‌طور چشمگیری، عملکرد لیزری را به سبب اثر اندازه کوانتمی، بهبود بخشید. این ایده کلی، در ابتدا در لیزرهای چاه‌کوانتمی به‌کار رفت و امروزه لیزرهای چاه‌کوانتمی، به‌جای لیزرهای حجمی در اکثر کاربردهای تجاری، جایگزین شده‌اند. برای لیزرهای دارای بعد پایینتر، همانند سیم‌کوانتمی و نقطه‌کوانتمی، توسعه و پیشرفت بیشتری مورد انتظار است. در مورد لیزرهای سیم‌کوانتمی و نقطه‌کوانتمی، ابتدا این ایده به‌صورت تئوری، تحلیل و بررسی شد. به‌سبب چگالی حالتهای پیوسته درداخل زیرنوارهای مجاز، می‌توان با استفاده از چاه‌کوانتمی و سیم‌کوانتمی به‌عنوان یک محیط فعال برای گذارهای اپتیکی القائی، تنها مشخصه‌های قطعه را در مقایسه با آنها در قطعات حجمی، پیشرفت و بهبود داد.

---

[1] Superatoms
[2] Artificial atoms

لیزر نیمه‌رسانای نقطه کوانتمی، دسته جدیدی از لیزرهای تزریقی است که بهبود اساسی در مشخصه‌های عملکردی را فراهم می‌کند. استفاده از نقاط کوانتمی به عنوان محیط فعال در لیزرهای تزریقی، مثال مهیج نانو تکنولوژی به کار رفته در ابزارهای جالب توجه تجاری است [۱ و۲و۳] .

هدف این پایان‌نامه، مطالعه بهره و شبیه سازی مشخصه‌های لیزرهای نقط کوانتمی است. بدین منظور در فصل اول، ساختار نوار انرژی و چگالی حالات نقاط کوانتمی، ساختار لیزرهای نقطه‌کوانتمی، روشهای ساخت، و عوامل محدود کننده عملکرد این لیزرها، همچنین، تکنولوژیهای کلیدی برای بهبود عملکرد آنها بیان می‌شوند. در فصل دوم، فیزیک و مشخصه‌های لیزرهای نقطه کوانتمی بیان می‌شوند. سپس، در فصل سوم، تحلیل حالت ایستا و تحلیل عددی معادلاتت آهنگ، روش حل عددی رانگ–کوتا مرتبه چهار، و همچنین، معادلات آهنگ حاکم بر عملکرد لیزر نقطه‌کوانتمی توصیف می‌گردند. سرانجام در فصل چهارم، با استفاده از روشهای تحلیلی و عددی، معادلات آهنگ لیزر نقطه کوانتمی InGaAs/GaAs خودسامانی شامل نقاط کوانتمی استوانه‌ای شکل حل شده و مشخصه‌های دینامیکی و استاتیکی آن شبیه سازی می‌شوند. همچنین، اثر پارامترهای مختلف بر عملکرد لیزر نقطه‌کوانتمی مورد بررسی قرار می‌گیرند و سرانجام در فصل پنجم، خلاصه نتایج شبیه‌سازیها ارائه می‌شوند.