بسم الله الرحمن الرحيم

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

دانشگاه ملایر

دانشکده علوم پایه- گروه فیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد فیزیک (گرایش حالت جامد)

حل عددی معادلات آهنگ لیزر نقطه کوانتومی نانوکاواک بلور فوتونیکی

به وسیله ی:

مهشید حبیبی

استاد راهنما:

دکتر مسعود رضوانی جلال

شهریور ۱۳۹۲

ما حصل آموخته‌هایم را تقدیم می‌کنم به آنان که مهر آسمانی‌شان آرام بخش آلام زمینی‌ام است

به استوارترین تکیه‌گاهم، دستان پرمهر پدرم

به بهربان‌ترین زندگیم، چشمه‌ی جوشان محبت مادرم

که هرچه آموخته‌ام در مکتب عشق شما آموخته‌ام که هر چشم به قطره‌ای از دریای بی‌کران مهربانی‌تان را

سپاس نتوانم بگویم.

امروز هستی‌ام به امید شماست و فردا کلید باغ بهشتم رضای شما

آوردی گرهان رنگ‌تر از این ارزان نداشتم تا به خاک پایتان نثار کنم، باشد که حاصل تلاشم

زیرم گونه غبار خستگی‌تان را بزداید.

بوسه بر دستان پرمهرتان

تقدیر و تشکر

ای را که پایانی نداند، در ستودن او بمانند و شمارندگان، شمردن نعمت های او ندانند و کوشندگان، حق او را گزاردن سلام و درود بر بندگان او، و خاندان پاک او، طاهران معصوم، بر آنان که وجودمان وامدار وجودشان است؛ و نفرین پیوسته بر دشمنان ایشان تا روز رستاخیز...

با سپاس بیکران از پدر عزیزم، و آنان که وجودشان تاج افتخاری است بر وجودم، چرا که این دو وجود پس از پروردگار مایه هستی ام بوده و ستم را گر فته تا قدم در این وادی پرفراز و نشیب را به من آموختند آموزگارانی که برایم زندگی، بودن و انسان بودن را معنا کردند.

بدون شک جایگاه و منزلت معلم، اجل از آن است که در مقام قدردانی از زحمات بی شائبه ی او، با زبان قاصر و دست ناتوان اما از ته قلب بتوانیم که بتوانیم تجلیل از معلم، سپاس از انسانی است که هدف و غایت آفرینش را تا حین مرگ و سلامت امانت هایی را که به دستش سپرده اند، تضمین؛ بر حسب وظیفه و از باب "تشکر از مخلوق" تشکر از خالق هم تشکر الله عز و جل "تشکر شایسته از اهتمالات و فرهیخته؛ جناب آقای دکتر محمود رضوانی جلال که در کمال صبر، با حسن خلق بی نظیر و همکاری در این عرصه بر من دریغ ننمودند از حمت راهنمایی این رساله را بر عهده گرفتند.

نام خانوادگی دانشجو: حبیبی نام: مهشید
عنوان پایان نامه: حل عددی معادلات آهنگ لیزر نقطه کوانتومی نانوکاواک بلور فوتونیکی
استاد راهنما: دکتر مسعود رضوانی جلال استاد مشاور: ----
مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد رشته: فیزیک گرایش: حالت جامد دانشگاه ملایر-گروه: فیزیک تاریخ فارغ التحصیلی: شهریور ۱۳۹۲ تعداد صفحات:۱۱۶
کلید واژه: نقطه کوانتومی، لیزر نقطه کوانتومی، بلور فوتونیکی، نانوکاواک بلور فوتونیکی، معادلات آهنگ، پراکندگی اوژه.

چکیده

در این پایان نامه، در فصل اول و دوم با بیان ویژگی‌های نقاط کوانتومی و نانوکاواک‌های بلور فوتونیکی بر اهمیت جفت‌شدگی نقاط کوانتومی به نانوکاواک‌های بلور فوتونیکی برای منابع لیزری تأکید می‌شود. در فصل سوم با استفاده از معادلات آهنگ حاکم بر این نوع لیزرها به بررسی دینامیک آنها پرداخته می‌شود. معادلات آهنگ پدیده شناختی، معادلات آهنگ متداولی هستند که برای این نوع لیزرها استفاده می‌شوند. این معادلات آهنگ به درستی رفتار حالت پایای لیزر را نشان می‌دهند ولی در توجیه رفتار گذرای لیزر در لحظه شروع فرآیند لیزری درست عمل نمی‌کنند. برای درک دینامیک این نوع لیزرها به یک توصیف میکروسکوپی نیاز است. بررسی دقیق فرآیندهای میکروسکوپی در لایه مرطوب و نقطه کوانتومی نشان می‌دهد که پراکندگی غیر خطی اوژه بار-بار و وابستگی آنها به چگالی حامل‌های بار نقش

مهمی در شروع فرآیند لیزری بازی می‌کند. از این رو، با در نظر گرفتن معادلات آهنگی که این پراکندگی‌های اوژه را به طور غیر خطی و برای هر دو نوع حامل‌های بار به طور مجزا در نظر می‌گیرند، به بررسی رفتار حالت گذرا در لحظه شروع پرداخته می‌شود. در فصل چهارم مدل بهره خطی به بهره نمایی تغییر پیدا می‌کند، پالس جریان تزریقی تغییر داده می‌شود و نمودارهای حالت گذرای آن یک بار دیگر ترسیم می‌شوند. نمودارهای چشمی آنها نیز ترسیم می‌گردند. سپس کار اصلی که در این پایان نامه انجام می‌شود این است که از دمش مستقیم نقاط کوانتومی به جای لایه مرطوب استفاده می‌شود و رفتار گذرا و حالت پایای آن بررسی می‌شود و مشاهده می‌شود که چگالی فوتون آن افزایش یافته و همینطور جریان آستانه آن کاهش می‌یابد که می‌توان نتیجه گرفت از این طریق می‌توان بازده مطلوب‌تری به دست آورد. در نهایت تأثیر نانوکاواک‌های بلور فوتونیکی با افزایش فاکتور محبوس سازی در لیزرهای نقطه کوانتومی در نظر گرفته می‌شود که در این صورت هم مشاهده می‌شود با افزایش فاکتور محبوس سازی چگالی فوتون افزایش می‌یابد. در نهایت در فصل پنجم به نتیجه‌گیری و پیشنهادهای ادامه کار پرداخته می‌شود.

فهرست مطالب

عنوان صفحه

فصل اول ۱

نقاط کوانتومی و لیزرهای نقطه کوانتومی ۱

۱-۱) مقدمه ۲

۱-۲) تاریخچه مطالعه نقاط کوانتومی ۲

۱-۳) تعریف نقاط کوانتومی ٤

۱-٤) محبوس سازی کوانتومی ٤

۱-۵) کوانتش اندازه و چگالی حالات ٦

۱-٦) خصوصیات اپتیکی نقاط کوانتومی ۸

۱-۷) روش‌های ساخت نقاط کوانتومی ۱۰

۱-۷-۱) رشد استرانسکی-کراستانو (S-K) ۱۱

۱-۷-۲) رشد همبافته پرتو مولکولی ۱۳

۱-۷-۳) انباشت بخار شیمیایی آلی-فلزی ۱۳

۱-۷-٤) رشد همبافته پرتو شیمیایی ۱٤

۱-۸) کاربردهای نقاط کوانتومی ۱٤

۱-۸-۱) نشانگرهای بیولوژیکی ۱٤

۱-۸-۲) دیودهای نوری سفید ۱۵
۱-۸-۳) مولدهای انرژی خورشیدی ۱۵
۱-۸-٤) عناصر مدارهای نوری ۱٦
۱-۹) لیزرهای نقطه کوانتومی ۱٦
۱-۱۰) برتری‌های لیزرهای نقطه کوانتومی ۲۰
۱-۱۰-۱) تنظیم طول موج ۲۰
۱-۱۰-۲) بهره بالاتر ۲۰
۱-۱۰-۳) حجم کوچک ۲۱
۱-۱۰-٤) پایداری دمایی ۲۲
۱-۱۱) انواع مختلفی از لیزرهای نقطه کوانتومی ۲٤
۱-۱۱-۱) لیزرهای نقطه کوانتومی سرعت بالا ۲٤
۱-۱۱-۱-۱) لیزرهای نقطه کوانتومی بر پایه InP ۲٤
۱-۱۱-۱-۲) لیزرهای نقطه کوانتومی قفل شدگی-مد ۲٤
۱-۱۱-۲) لیزرهای نقطه کوانتومی توان بالا ۲۵
۱-۱۱-۲-۱) لیزرهای نقطه کوانتومی برای منابع دمش بدون خنک کننده ۲۵
۱-۱۱-۲-۲) لیزرهای مخروطی تک مد ۲۵
فصل دوم ۲۷
بلورهای فوتونیکی و کاواک‌های بلور فوتونیکی ۲۷
۲-۱) درآمدی بر بلورهای فوتونیکی ۲۸
۲-۲) تاریخچه تحقیق در مورد بلورهای فوتونیکی ۳۰
۲-۲) تعریف بلور فوتونیکی ۳۲

۲-۳) فیلم بس لایه‌ای، بلور فوتونیکی یک بعدی ۳۲
۲-٤) منشأ گاف‌های نواری فوتونیکی ۳٤
۲-٤) بلورهای فوتونیکی دو بعدی ۳۸
۲-٥) تیغه‌های بلور فوتونیکی ٤۱
۲-٦) وابستگی هندسی خصوصیات بلورهای فوتونیکی ٤۲
۲-٦-۱) تأثیر اندازه حفره ٤۳
۲-٦-۲) تأثیر ضریب شکست محیط ٤٤
۲-٦-۳) تاثیر ضریب شکست تیغه ٤٥
۲-۷) بلورهای فوتونیکی سه بعدی ٤٥
۲-۷) کاواک‌های بلور فوتونیکی و لیزرها ٤۹
۲-۸) کاربردهای کاواک‌های بلور فوتونیکی ٥۲
۲-۸-۱) لیزرهای آستانه پایین ٥۲
۲-۸-۲) آزمایش‌های الکترودینامیک کوانتومی کاواک ٥۲
۲-۸-۳) حسگرهای بیو-شیمیایی/ آشکار سازی تک مولکول ٥۳
۲-۸-٤) صافی‌های قطره کانال برای کاربردهای راه دور ٥۳
۲-۸-٥) لیزرهای دمای اتاق ٥۳
فصل سوم ٥٤
معادلات آهنگ لیزرهای نقطه کوانتومی نانوکاواک بلور فوتونیکی ٥٤
۳-۱) مقدمه ٥٥
۳-۲) لیزر ٥۷
۳-۲-۱) اصول عملکرد لیزر نیمرسانا ٥۷

۳-۲-۲) پیوندگاه p-n ۵۹
۳-۲-۳) گسیل خود به خودی و القایی ٦۰
۳-۲-٤) لیزر دیودی ٦۲
۳-۳) معادلات آهنگ لیزرهای دیودی ٦۲
۳-٤) تعریف لیزر نقطه کوانتومی نانوکاواک بلور فوتونیکی ٦۹
۳-۵) معادلات آهنگ ٦۹
۳-۵-۱) معادلات آهنگ سه متغیره ساده (پدیده شناختی) ۷۰
۳-۵-۲) معادلات آهنگ پنج متغیره میکروسکوپیکی غیر خطی ۷۱
۳-٦) فرآیندهای پراکندگی اوژه ۷٤
۳-۷) شبیه سازی حالت گذرا و پایا ۸۱
۳-۷-۱) شبیه سازی حالت گذرا ۸۱
۳-۷-۲) شبیه سازی حالت پایا ۸۳
۳-۸) نمودار چگالی فوتون بر حسب چگالی الکترون در نقطه کوانتومی ۸٦
فصل چهارم ۸۷
توسعه معادلات آهنگ لیزرهای نقطه کوانتومی نانوکاواک بلور فوتونیکی ۸۷
٤-۱) مقدمه ۸۸
٤-۲) استفاده از بهره نمایی در معادلات آهنگ ۹۰
٤-۳) استفاده از جریان دمش دو پله‌ای برای مشاهده نوسان‌های واهلشی ۹۲
٤-٤) ترسیم نمودار چشمی ۹۲
٤-۵) دمش مستقیم نقاط کوانتومی ۹٤
٤-٦) افزایش فاکتور محبوس سازی ۹٦

فصل پنجم ۹۹
نتیجه‌گیری و پیشنهادها ۹۹
۵-۱) نتیجه‌گیری ۱۰۰
۵-۲) پیشنهادها ۱۰۳
۵-۲-۱) استفاده از بهره نمایی برای مشاهده اشباع حالت پایا ۱۰۳
۵-۲-۲) بررسی علت عدم مشاهده جهش‌های اضافی در سطح پایین الگوی چشمی ۱۰۳
۵-۲-۳) مشاهده فرو افت بعد از پایایی چگالی‌ها ۱۰۳
۵-۲-٤) مشاهده افزایش چگالی فوتون با افزایش ضریب گسیل خود به خودی ۱۰٤
۵-۲-۵) مقایسه این مشاهدات با داده‌های تجربی ۱۰٤
پیوست ۱۰۵
پیوست ۱) برنامه نوشته شده برای حل معادلات آهنگ داده شده با رابطه ۳-۱۵. ..... ۱۰۵
مراجع ۱۰۹

فهرست جدول‌ها

جدول ۳- ۱: کمیت‌های فیزیکی استفاده شده در شبیه سازی معادلات رابطه ۳- ۱۵. ..... ۸۱

جدول ۳- ۲: کمیت‌های استفاده شده در ترسیم معادلات رابطه ۳- ۱۳. ..... ۸۶

فهرست شکل‌ها

شکل ۱- ۱: ترازهای انرژی نیمرسانای کپه‌ای، نقطه کوانتومی، و مولکول.....۵
شکل ۱- ۲: چگالی حالات تغییر شکل‌های بلوری تحت درجه‌های مختلفی از محبوس‌سازی.
.....۸
شکل ۱- ۳: وابستگی طیف گسیل به اندازه و نوع مواد چندین ترکیب از نقاط کوانتومی.....۱۰
شکل ۱- ٤: ارائه طرح‌وار قدم به قدم شکل گیری جزیره استرانسکی-کراستانو به علت عدم مطابقت شبکه.....۱۲
شکل ۱- ۵: طیف بهره ماده محاسبه شده برای نقطه کوانتومی، سیم کوانتومی، چاه کوانتومی و ماده کپه‌ای $Ga_{0.47}In_{0.53}As/InP$ در دمای K ۳۰۰.....۲۱
شکل ۱- ٦: قله بهره بر حسب چگالی جریان محاسبه شده برای ماده کپه‌ای، فیلم کوانتومی، سیم کوانتومی، و جعبه کوانتومی (نقطه کوانتومی) در دمای K ۳۰۰ .....۲۲
شکل ۱- ۷: مقایسه وابستگی دمایی بین لیزر نقطه کوانتومی و لیزر چاه کوانتومی، دایره‌ها لیزر نقطه کوانتومی و مربع‌ها لیزر چاه کوانتومی را نشان می‌دهند.....۲۳

شکل ۲- ۱: فیلم بس لایه‌ای یک بلور فوتونیکی یک بعدی. فیلم شامل لایه‌های متناوب مواد با ثابت‌های دی‌الکتریک متفاوت است، که به اندازه a از هم فاصله دارند.....۳۳
شکل ۲- ۲: ساختارهای نواری فوتونیکی برای انتشار در راستای محور برای سه فیلم بس لایه‌ای متفاوت که هر سه فیلم، لایه‌هایی با پهنای a ۰/۵ دارند نشان داده شده است.....۳٤
شکل ۲- ۳: نمایش طرح‌وار مدهای مرتبط با پایین‌ترین گاف نواری. a) میدان الکتریکی نوار ۱، b) میدان الکتریکی نوار ۲، c) چگالی انرژی موضعی نوار ۱، d) چگالی انرژی موضعی نوار ۲.....۳۷

شکل ۲- ٤: ساختار نواری فوتونیکی یک فیلم بس لایه‌ای با ثابت شبکه a و لایه‌های متناوب با پهناهای متفاوت. پهنای لایه ε=۰/۱۳ برابر a ۰/۲ و پهنای لایه ε=۱ برابر a ۰/۸ می‌باشد. ۳۸

شکل ۲- ٥: یک بلور فوتونیکی دو بعدی. این ماده، شبکه مربعی از ستون‌های دی الکتریک با شعاع r و ثابت دی الکتریک ε می‌باشد. ماده در راستای z همگن است و در راستای x و y با ثابت شبکه a متناوب است. ۳۹

شکل ۲- ٦: نمودار نواری برای بلورهای فوتونیکی a) آرایشی از میله‌های دی‌الکتریک در هوا، b) آرایشی از حفره‌های هوا در دی‌الکتریک. ٤۰

شکل۲- ۷: a) ارائه طرح وار از بلور فوتونیکی. b) خط نور (خط سیاه ثابت) و مخروط نور (ناحیه خاکستری) قرار گرفته در نمودار پراکندگی از شبکه مربعی بلور فوتونیکی مسطح. ٤۱

شکل ۲- ۸: مکان گاف نوار به عنوان تابعی از اندازه نسبی حفره (r/a) و ضخامت نسبی تیغه. a) مکان‌های لبه‌های نوار نشان داده شده‌اند: بالا لایه دی‌الکتریک با دایره‌های پر، و پایین لایه هوا با مربع‌های باز. b) پهنای گاف نوار برای هندسه‌های مختلف. ٤۳

شکل۲- ۹: وابستگی لبه نوار دی‌الکتریک و نوار هوا به ضریب شکست محیط (n_{env}) اطراف تیغه بلورهای فوتونیکی مسطح برای r/a=۰/۳ و r/a=۰/٤ ٤٤

شکل ۲- ۱۰: ساختار نوار فوتونیکی برای پایین‌ترین نوارهای یابلونوویت. ٤٦

شکل ۲- ۱۱: ساختار نوار فوتونیکی برای پایین‌ترین نوارهای چوب کپه‌ای. ٤۷

شکل ۲- ۱۲: ساختار نواری برای پایین‌ترین نوارهای اوپال معکوس. ٤۹

شکل ۲- ۱۳: شکل توزیع مدهای هدایت شده در بلور فوتونیکی مسطح شبکه مثلثی (r/a=۰/۳). نمایه‌های مد برای یکی از ترکیبات میدان E در نوار دی‌الکتریک و هوا نشان داده شده است. ۵۱

شکل ۳- ۱: اصول عملکرد لیزر نیمرسانا. ۵۹

شکل ۳- ۲: a) ساختار نواری لیزر نیمرسانای پیوندگاه p-n با ولتاژ صفر، (b) اعمال ولتاژ به پیوندگاه. ۶۰
شکل ۳- ۳: گسیل خود به خودی. ۶۱
شکل ۳- ٤: گسیل القایی. ۶۱
شکل ۳- ٥: مخزن با تغذیه و نشت دائم به عنوان یک نمونه آموزشی از ناحیه فعال دو ساختاری که در آن تزریق جریان برای تولید حامل و نیز بازترکیب تابشی و غیر تابشی نشان داده شده است. ٦٤
شکل ۳- ٦: نمایش طرح واره‌ای از لیزرهای کاواک-عمودی و درون-صفحه توضیح دهنده حجم‌های ناحیه فعال (قسمت هاشور خورده) و کاواک (درون خط‌های تیره). ٦٦
شکل ۳- ۷: نمایش تعریف بهره در بخش کوچکی از ماده بهره با جمله‌هایی که افزایش در تعداد فوتون را نشان می‌دهد. ٦٨
شکل ۳- ۸: ساختار نواری در محیط فعال لیزر نقطه کوانتومی. ۷۳
شکل ۳- ۹: a) طرح ساختار نقطه کوانتومی-لایه مرطوب نشان دهنده دستگیری الکترون اوژه درون حالت نقطه کوانتومی متناظر (متناظر با آهنگ پراکندگی-داخلی S_e^{in})، b) دستگیری حفره اوژه درون یک حالت نقطه کوانتومی (S_h^{in})، C) منحنی ثابت و تیره آهنگ پراکندگی-داخلی بر حسب چگالی حامل در لایه مرطوب برای الکترون‌ها با و بدون فرآیندهای حفره-الکترون مخلوط، به ترتیب، d) همانند c، آهنگ پراکندگی-داخلی بر حسب چگالی حامل در لایه مرطوب برای حفره‌ها. ۷٦
شکل ۳- ۱۰: آهنگ‌های پراکندگی کولمب برای الکترون‌ها و حفره‌ها بر حسب چگالی لایه مرطوب برای g_c های مختلف. ۸۰
شکل ۳- ۱۱: وابستگی زمانی چگالی الکترون‌ها و حفره‌ها در نقطه کوانتومی، بالا، چگالی الکترون‌ها و حفره‌ها در لایه مرطوب، وسط، و چگالی فوتون‌ها، پایین، در لحظه شروع فرآیند لیزری. ۸۲

شکل ۳- ۱۲: چگالی حالت پایای الکترون‌ها و حفره‌ها در نقطه کوانتومی، بالا، چگالی حالت پایای الکترون‌ها و حفره‌ها در لایه مرطوب، وسط، و چگالی حالت پایای فوتون‌ها، پایین، بر حسب جریان دمش.....۸٤
شکل ۳- ۱۳: چگالی حامل‌های بار در نقطه کوانتومی، بالا، و چگالی فوتون‌ها در حالت پایا بر حسب آهنگ دمش.....۸۵
شکل ۳- ۱٤: دینامیک شروع n_{ph} برحسب n_e.....۸٦

شکل ٤- ۱: چگالی‌های الکترون و حفره در لایه مرطوب و نقطه کوانتومی و چگالی فوتون بر حسب زمان در لحظه شروع فرآیند لیزری.....۹۱
شکل ٤- ۲: وابستگی زمانی چگالی فوتون با استفاده از جریان دمش دو پله‌ای. ۹۲
شکل ٤- ۳: پالس جریان تصادفی برای بررسی و ترسیم نمودار الگوی چشمی.....۹۳
شکل ٤- ٤: نمودار الگو چشمی یک لیزر نقطه کوانتومی.....۹٤
شکل ٤- ۵: مقایسه چگالی‌های الکترون و حفره در لایه مرطوب و نقطه کوانتومی و چگالی فوتون بر حسب زمان در لحظه شروع فرآیند لیزری برای جریان دمش نقاط کوانتومی و لایه مرطوب.....۹۵
شکل ٤- ٦: مقایسه چگالی‌های الکترون و حفره در لایه مرطوب و نقطه کوانتومی و چگالی فوتون در حالت پایا در لحظه شروع فرآیند لیزری برای جریان دمش نقاط کوانتومی و لایه مرطوب.....۹۷
شکل ٤- ۷: وابستگی زمانی چگالی الکترون‌ها و حفره‌ها در نقطه کوانتومی و لایه مرطوب با افزایش فاکتور محبوس سازی و در جریان دمش مستقیم نقاط کوانتومی، و مقایسه چگالی فوتون‌ها، پایین، در لحظه شروع فرآیند لیزری در حالت افزایش فاکتور محبوس سازی برای جریان دمش مستقیم نقاط کوانتومی و لایه مرطوب ۹۷
شکل ٤-۸: چگالی الکترون‌ها و حفره‌ها در نقطه کوانتومی و لایه مرطوب با افزایش فاکتور محبوس سازی و در جریان دمش مستقیم نقاط کوانتومی در حالت پایا، و مقایسه چگالی

فوتون‌ها، پایین، در لحظه شروع فرآیند لیزری در حالت پایا در حالت افزایش فاکتور محبوس سازی برای جریان دمش مستقیم نقاط کوانتومی و لایه مرطوب.....۹۸

فصل اول

نقاط کوانتومی و لیزرهای نقطه کوانتومی

۱-۱) مقدمه

در نیمرساناها همه چیز روز به روز کوچک‌تر می شوند. امروزه نقاط کوانتومی[۱] کوچک‌ترین نانو مواد در دسترس هستند. به دلیل پیشرفت در رشد نانو ساختارها، فیزیک حالت جامد مطالعه نقاط کوانتومی را شروع کرده است. نقاط کوانتومی فرصتی برای بررسی دینامیک حامل در رژیم اندازه محدود است. به علت محبوس سازی[۲] و ساختار انرژی کوانتیده[۳]، این مواد مرکز فعالیت تعداد زیادی از ابزارهای اپتیکی و الکتریکی شده‌اند. تغییرات در اندازه، خصوصیات تعداد زیادی از مواد را تغییر می‌دهد، مانند خصوصیات اپتیکی و الکتریکی که آنها را از نیمرسانای کپه‌ای[۴] متفاوت می سازد. از این رو نقاط کوانتومی نیمرسانا نقش مهمی در طراحی ابزارها و تکنیک‌های جدید بازی می‌کنند [۱].

۱-۲) تاریخچه مطالعه نقاط کوانتومی

پیشینه تاریخی مطالعه نقاط کوانتومی از لایه‌های ضخیم نانومتری که چاه‌های کوانتومی[۵] نامیده می‌شوند در سال ۱۹۷۰ آغاز شد. در چاه‌های کوانتومی حامل‌های بار (الکترون‌ها و حفره‌ها) در لایه ضخیم نانومتری از چاه‌ها، که گاف نوارشان کوچک‌تر از لایه‌های سد اطرافش

---

[۱] Quantum Dots
[۲] Qunfinement
[۳] Quantized
[۴] Bulk
[۵] Quantum Well

بود به دام می‌افتند. تغییرات گاف نوار به وسیله تغییر ترکیب مواد نیمرسانای مرکب به دست آمد [۲].

مطالعه اثر اندازه کوانتومی در لایه‌های نازک مواد، بخش عظیمی از تحقیقات را فرا گرفته است. در سال ۱۹۷۰ ایساکی و تسو[۱] ساخت ابر شبکه[۲] نیمرسانا را به وسیله لایه‌های نازک نیمرسانا با ضخامت نانومتر با گاف نوارهای متداول ارائه دادند. آنها خصوصیات ترابرد ابر شبکه‌های چاه کوانتومی را مورد مطالعه قرار دادند. در سال ۱۹۷٤ دینگل[۳] برای اولین بار کوانتش انرژی را در چاه‌های کوانتومی مشاهده کرد. در حال حاضر خصوصیات چاه کوانتومی به خوبی بررسی شده‌اند و ابزارهای چاه کوانتومی بسیاری تولید شده‌اند و سال‌ها است که استفاده می‌شوند.

در سال ۱۹۸۰ رشد سریع در تکنولوژی ساخت، محبوس سازی الکترون‌ها را در دو بعد ممکن ساخت که به عنوان سیم‌های کوانتومی نامیده شده‌اند. سپس کوانتش کامل حرکت آزاد الکترون به وسیله به دام افتادن آنها در سه بعد انجام شد، که در ساختارها به عنوان نقاط کوانتومی شناخته شدند. نقاط کوانتومی اولین بار به وسیله رید و همکارانش[٤] در سال ۱۹۸۸ کشف شد [٤،۳].

از آنجایی که تلاش‌های وسیعی برای پیشرفت تکنیک‌های رشد مانند رشد همبافت پرتو مولکولی[۵]، همبافت فاز بخار آلی فلزی[٦] که قادر به مطالعه ساختارهای نیمرسانا در کوچک‌ترین ترین ابعاد هستند، انجام شد دستیابی به تک لایه اتمی مادامی که ساختارهای نیمرسانا با خلوص بالا هستند را ممکن ساخت. پیشرفت کوانتش اندازه[۷] در یک، دو و سه جهت به دست آمده منجر به رشد موفق ساختارهای دو بعدی، یک بعدی و صفر بعدی شد. امروزه کوانتش اندازه در ساختارهای ابعاد پایین به خصوصیت اساسی ساختارهای ابعاد پایین منجر شده است. نقاط کوانتومی نیمرسانا که نانو ساختارهای نهایی را بهبود می‌بخشند، به وسیله

---

[۱] L. Esaki and R. Tsu
[۲] Superlattice
[۳] R. Dingle
[۴] M. Reed and et al
[۵] Molecular Beam Epitaxy
[٦] Metal Organic Vapour Phase Epitaxy
[۷] Size Quantization