

اللهم اغفر لي



بسمه تعالی


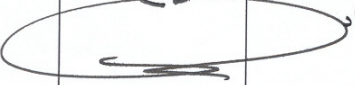



## تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از پایان نامه

آقای سعید پهلوان پایان نامه ۹ واحدی خود را با عنوان مدلسازی و آنالیز انتشار

پالس های پیکو ثانیه در تقویت کننده نوری نقطه کوانتومی در تاریخ

۱۳۸۹/۴/۱۴ ارائه کردند.

اعضای هیات داوران نسخه نهایی این پایان نامه را از نظر فرم و محتوا تایید کرده و پذیرش آنرا برای تکمیل درجه کارشناسی ارشد مهندسی برق و کامپیوتر - الکترونیک پیشنهاد می کنند.

امضا	رتبه علمی	نام و نام خانوادگی	عضو هیات داوران
	استاد	دکتر وحید احمدی	استاد راهنما
	استاد	دکتر محمد کاظم مروج فرشی	استاد ناظر
	استاد	دکتر احسان اله کبیر	استاد ناظر
	دانشیار	دکتر رحیم فائز	استاد ناظر
	استاد	دکتر محمد کاظم مروج فرشی	مدیر گروه (یا نماینده گروه تخصصی)



## آیین‌نامه حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهش‌های علمی دانشگاه تربیت مدرس

**مقدمه:** با عنایت به سیاست‌های پژوهشی و فناوری دانشگاه در راستای تحقق عدالت و کرامت انسانها که لازمه شکوفایی علمی و فنی است و رعایت حقوق مادی و معنوی دانشگاه و پژوهشگران، لازم است اعضای هیأت علمی، دانشجویان، دانش‌آموختگان و دیگر همکاران طرح، در مورد نتایج پژوهش‌های علمی که تحت عناوین پایان‌نامه، رساله و طرح‌های تحقیقاتی با هماهنگی دانشگاه انجام شده است، موارد زیر را رعایت نمایند:

ماده 1- حق نشر و تکثیر پایان‌نامه/ رساله و درآمدهای حاصل از آنها متعلق به دانشگاه می باشد ولی حقوق معنوی پدید آورندگان محفوظ خواهد بود.

ماده 2- انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان‌نامه/ رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی باید به نام دانشگاه بوده و با تایید استاد راهنمای اصلی، یکی از اساتید راهنما، مشاور و یا دانشجو مسئول مکاتبات مقاله باشد. ولی مسئولیت علمی مقاله مستخرج از پایان‌نامه و رساله به عهده اساتید راهنما و دانشجو می باشد. تبصره: در مقالاتی که پس از دانش‌آموختگی بصورت ترکیبی از اطلاعات جدید و نتایج حاصل از پایان‌نامه/ رساله نیز منتشر می‌شود نیز باید نام دانشگاه درج شود.

ماده 3- انتشار کتاب، نرم افزار و یا آثار ویژه (اثری هنری مانند فیلم، عکس، نقاشی و نمایشنامه) حاصل از نتایج پایان‌نامه/ رساله و تمامی طرح‌های تحقیقاتی کلیه واحدهای دانشگاه اعم از دانشکده‌ها، مراکز تحقیقاتی، پژوهشکده‌ها، پارک علم و فناوری و دیگر واحدها باید با مجوز کتبی صادره از معاونت پژوهشی دانشگاه و براساس آئین‌نامه‌های مصوب انجام شود. ماده 4- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه یافته‌ها در جشنواره‌های ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی که حاصل نتایج مستخرج از پایان‌نامه/ رساله و تمامی طرح‌های تحقیقاتی دانشگاه باید با هماهنگی استاد راهنما یا مجری طرح از طریق معاونت پژوهشی دانشگاه انجام گیرد.

ماده 5- این آیین‌نامه در 5 ماده و یک تبصره در تاریخ 87/4/1 شورای پژوهشی و در تاریخ 87/4/23 در هیأت رئیسه دانشگاه به تایید رسید و در جلسه مورخ 87/7/15 شورای دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب در شورای دانشگاه لازم‌الاجرا است.

«اینجانب سعید پهلوان دانشجوی رشته مهندسی برق- الکترونیک ورودی سال تحصیلی 81 مقطع کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر متعهد می شوم کلیه نکات مندرج در آئین‌نامه حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهش‌های علمی دانشگاه تربیت مدرس را در انتشار یافته‌های علمی مستخرج از پایان‌نامه/ رساله تحصیلی خود رعایت نمایم. در صورت تخلف از مفاد آئین‌نامه فوق‌الاشعار به دانشگاه وکالت و نمایندگی می‌دهم که از طرف اینجانب نسبت به لغو امتیاز اختراع بنام بنده و یا هر گونه امتیاز دیگر و تغییر آن به نام دانشگاه اقدام نماید. ضمناً نسبت به جبران فوری ضرر و زیان حاصله بر اساس برآورد دانشگاه اقدام خواهم نمود و بدینوسیله حق هر گونه اعتراض را از خود سلب نمودم»

امضا: .....  
تاریخ: ..... ۱۹

## آیین نامه چاپ پایان نامه (رساله) های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان نامه (رساله) های تحصیلی دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس، مبین بخشی از فعالیتهای علمی - پژوهشی دانشگاه است بنابراین به منظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه، دانش آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می شوند:

ماده 1: در صورت اقدام به چاپ پایان نامه (رساله) ی خود، مراتب را قبلاً به طور کتبی به «دفتر نشر آثار علمی» دانشگاه اطلاع دهد.

ماده 2: در صفحه سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه) عبارت ذیل را چاپ کند:

«کتاب حاضر، حاصل پایان نامه کارشناسی ارشد/ رساله دکتری نگارنده در رشته  
دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی سرکار  
در دانشکده

خانم/جناب آقای دکتر ، مشاوره سرکار خانم/جناب آقای دکتر و

مشاوره سرکار خانم/جناب آقای دکتر از آن دفاع شده است.»

ماده 3: به منظور جبران بخشی از هزینه های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت چاپ) را به «دفتر نشر آثار علمی» دانشگاه اهدا کند. دانشگاه می تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر در معرض فروش قرار دهد.

ماده 4: در صورت عدم رعایت ماده 3، 50% بهای شمارگان چاپ شده را به عنوان خسارت به دانشگاه تربیت مدرس، تأدیه کند.

ماده 5: دانشجو تعهد و قبول می کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می تواند خسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالبه و وصول کند؛ به علاوه به دانشگاه حق می دهد به منظور استیفای حقوق خود، از طریق دادگاه، معادل وجه مذکور در ماده 4 را از محل توقیف کتابهای عرضه شده نگارنده برای فروش، تامین نماید.

ماده 6: اینجانب سعید پهلوان دانشجوی رشته مهندسی برق - الکترونیک مقطع کارشناسی ارشد تعهد فوق و ضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می شوم.

نام و نام خانوادگی: سعید پهلوان  
تاریخ و امضا: سعید پهلوان  
۱۹، ۱۰، ۰۵



دانشگاه تربیت مدرس

دانشکده فنی و مهندسی

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی برق - الکترونیک

مدل سازی و تحلیل انتشار پالس های پیکو ثانیه در تقویت کننده نوری نقطه کوانتومی

سعید پهلوان

استاد راهنما:

آقای دکتر وحید احمدی

تابستان 1389

تقدیم به پدر و مادر بزرگوام که آموختن را ارزشم ساختند...

## تشر و قدر دانی

پژوهش حاضر با استمداد از بزرگوارانی صورت پذیرفته که تشر از ایشان را بر خود لازم می دانم. نخست، جناب آقای دکتر وحید احمدی که نظارت دقیق و راهنمایی های دلسوزانه ایشان موجب ارتقاء علمی این پژوهش شد. همچنین، جناب آقای دکتر محمد حسن یآوری که مباحثات طولانی با ایشان موجب هموار تر شدن و کوتاه تر شدن مسیر انجام پژوهش شد. و نیز والدین بزرگوار و خواهر و برادر عزیزم که دست و زبانم از عهده شکرشان بر نمی آید.

## چکیده

تقویت کننده های نقطه کوانتومی به دلیل داشتن چگالی حالات به شکل توابع ضربه از کارایی بسیار بهتری نسبت به تقویت کننده های بالک و یا چاه کوانتومی برخوردارند. بعد از ظهور لیزر های نقطه کوانتومی InAs/GaAs خود سامان شونده که طول موج لیزینگ آنها بیشتر از 1.3 میکرومتر است مطالعات بسیاری برای تحقق کارکرد مورد انتظار آنها انجام گرفته است. فیزیک تقویت کننده های نوری نقطه کوانتومی با معادلات نرخ حاکم بر چگالی حامل ها در تراز های پایه، برانگیخته، بالایی، لایه wetting و همچنین چگالی فوتون ها بیان می گردد. برای شبیه سازی تقویت کننده باید دستگاه معادلات دیفرانسیل شامل چند صد معادله که مجهولات آن توأمان به زمان و مکان وابستگی دارند را با روش های عددی حل کنیم.

برای شبیه سازی تقویت کننده، طول آن را به چندین قسمت مساوی تقسیم و چگالی حامل ها و فوتون ها را در هر قسمت مستقل از مکان فرض کرده ایم. با تقسیم پالس به تکه های زمانی و حل عددی معادلات در هر قسمت به طور جداگانه قادر به شبیه سازی عبور پالس از تقویت کننده خواهیم بود. نتایج شبیه سازی از تطابق قابل قبولی با نتایج مرجع اصلی این پروژه [29] برخوردار است. در این پروژه عرض پالس ها در محدوده 10 ps با توان ماکسیمم در محدوده 40 mW و چگالی جریان بین  $1 \text{ kA/cm}^2$  تا  $16 \text{ kA/cm}^2$  در نظر گرفته شده است. بهره نوری در این شرایط در محدوده 250 تا 500 در هر سانتی متر تغییر می کند. تأثیر پارامتر های مختلف مانند جریان، دما و پهن شدگی های همگن و غیر همگن بر انتشار پالس مطالعه شده اند. همچنین به دلیل نحوه مدلسازی تقویت کننده، توانستیم تا برای اولین بار انتشار دو سیگنال در تقویت کننده در جهت های یکسان و متفاوت و تأثیر آنها بر یکدیگر را نیز مورد بررسی قرار دهیم.

**کلید واژه:** تقویت کننده نوری نقطه کوانتومی، انتشار پالس



## فهرست مطالب

۱.....	فهرست اشکال
۴.....	فهرست جداول
۵.....	فصل ۱- مروری بر تحقیقات انجام شده در تقویت کننده های نوری نقطه کوانتومی
5	-1-1 مقدمه
6.....	-2-1 رشد نقاط کوانتومی
10.....	-3-1 ساختار الکترونیکی نقاط کوانتومی
14.....	-4-1 لیزر ها و تقویت کننده های نقطه کوانتومی
16.....	-5-1 مزایای استفاده از نقاط کوانتومی
18.....	-6-1 طراحی پروفایل بهره
19.....	-7-1 پاسخ فوق سریع بهره
20.....	-8-1 عرض باند
21.....	-9-1 کیفیت شکل موج در ناحیه اشباع بهره
25.....	-10-1 باز تولید کننده های سیگنال
29.....	-11-1 عدم حساسیت به قطبش
۳۳.....	فصل ۲- فیزیک و ساختار تقویت کننده های نوری نقطه کوانتومی
34.....	-1-2 ساختار باند انرژی و گروه بندی نقطه های کوانتومی
36.....	-2-2 معادلات نرخ چگالی حامل ها
39.....	-3-2 معادلات نرخ چگالی فوتون ها
39.....	-4-2 محاسبه نرخ های واهلش
41.....	-5-2 نحوه مدلسازی تقویت کننده
۴۵.....	فصل ۳- عبور پالس از تقویت کننده نوری نقطه کوانتومی
45.....	-1-3 عبور پالس واحد از تقویت کننده نوری نقطه کوانتومی
63.....	-2-3 شبیه سازی تقویت کننده نوری با دو سیگنال
64.....	-1-2-3 انتشار دو سیگنال در جهت یکسان
69.....	-2-2-3 اعمال سیگنال از دو طرف
80.....	-3-3 ورود پالس ها با اختلاف زمانی
۸۵.....	فصل ۴- نتیجه گیری و پیشنهادات
85.....	-1-4 نتیجه گیری
86.....	-2-4 پیشنهادات

۸۷.....	فهرست مراجع
۹۰.....	واژه نامه فارسی به انگلیسی
۹۲.....	واژه نامه انگلیسی به فارسی

## فهرست اشکال

- شکل 1-1. نمای ساده ای از چاه کوانتومی (سمت چپ) و سیم کوانتومی (سمت راست).....6
- شکل 1-2. درجه آزادی حرکت حامل ها در سیم های کوانتومی برابر یک است.....7
- شکل 1-3. نمای ساده ای از یک نقطه کوانتومی. درجه آزادی حرکت حامل ها برابر صفر است.....7
- شکل 1-4. نمای ساده ای از سه مدل رشد FM، VW و SK (سمت چپ) و دیاگرام فازی آنها. محور افقی بر حسب عدم تطابق شبکه و محور عمودی تعداد تک لایه های نشانده شده است. در نواحی R1، R2 و R3 همان طور که در اشکال داخلی نشان داده شده است رشد جزایر ناپایدار است و از نظم خاصی پیروی نمی کند [1].....8
- شکل 1-5. تصاویر TEM از بالا (سمت چپ) و از کنار (سمت راست) نقاط کوانتومی InP روی GaAs. نقاط ردیف بالایی در 500 درجه سانتی گراد رشد داده شده و روی آنها پوشانده شده است در حالیکه نقاط ردیف پایین پس از رشد در 500 درجه سانتی گراد به مدت 120 ثانیه در 450 درجه نگاه داشته شده و در همین دما پوشانده شده اند.....10
- شکل 1-6. نمای کناری (بالا) و نمودار نوار انرژی (پایین) نقاط کوانتومی. در قسمت بالایی نقطه کوانتومی و لایه wetting به رنگ تیره و با حرف A و ماده میزبان به رنگ روشن و با حرف B نشان داده شده اند. نوار انرژی بر حسب x در امتداد خط چین نشان داده شده در قسمت بالایی در قسمت پایین شکل رسم شده است.....11
- شکل 1-7. ساختار و تابع چگالی حالات چاه، سیم و نقطه کوانتومی.....12
- شکل 1-8. شدت تابش بر حسب انرژی فوتون برای نقاط کوانتومی InAs/GaAs نشان داده شده در شکل 1-5. خطوط کامل مربوط به نقاط رشد داده شده در 500 درجه و پوشانده شده در 450 درجه و خطوط نقطه چین مربوط به نقاط رشد داده و پوشانده شده در 500 درجه می باشند.....13
- شکل 1-9. تاریخچه کاهش جریان آستانه لیزرها [10].....15
- شکل 1-10. شماتیک یک لیزر یا تقویت کننده نقطه کوانتومی InGaAs/GaAs با ساختار موجبر p-i-n.....17
- شکل 1-11. نمای بهره محیط نقطه کوانتومی. در این شکل فقط انتقال تراز پایه در نظر گرفته شده است.....19
- شکل 1-12. نمایش پاسخ بهره فوق سریع در محیط های نقطه کوانتومی. در سمت راست تفاوت این ساختارها با ساختار های سنتی نمایش داده شده است.....20
- شکل 1-13. وابستگی بهره، رقم نویز و توان اشباع به طول موج. نواحی با رنگ روشن بهره بزرگتر از 20 dB، رقم نویز کوچکتر از 7 dB و توان اشباع بزرگتر از 19 dBm را توأمان فراهم می کنند. این اعداد برای نواحی به رنگ تیره به ترتیب برابر 25، 5 و 19 است [20].....22
- شکل 1-14. مقایسه عرض باند انواع مختلف تقویت کننده های نوری [20].....22
- شکل 1-15. خصوصیات اشباع بهره و کیفیت شکل موج تقویت شده در تقویت کننده های نوری نقطه کوانتومی (بالا) و چاه کوانتومی (پایین).....23
- شکل 1-16. نرخ خطای بیت و دیاگرام های چشمی برای ساختار های چاه و نقطه کوانتومی.....24
- شکل 1-17. مقایسه توان خروجی انواع مختلف تقویت کننده های نوری.....24
- شکل 1-18. فشرده سازی نویز سطح یک با استفاده از تقویت کننده نوری نقطه کوانتومی (چپ) و چاه کوانتومی (راست).....26
- شکل 1-19. دیاگرام چشمی سیگنال ورودی با فرکانس 40 گیگاهرتز بر ثانیه (چپ) و سیگنال خروجی تقویت کننده نقطه کوانتومی (وسط) و تقویت کننده چاه کوانتومی (راست). هر دو تقویت کننده در 2.5 dB اشباع بهره به کار گرفته شده اند.....26
- شکل 1-20. بهبود عدد Q در تقویت کننده نوری نقطه کوانتومی [21].....27

شکل 21-1. مشخصات نرخ خطای بیت و بهبود حساسیت گیرنده با به کار گیری تقویت کننده نقطه کوانتومی [22]..... 28

شکل 22-1. ساختار های مختلف سنتی تمام نوری باز تولید کننده ها. از بالا به پایین: 1- اشباع بهره [12] 2- ساختار XPM [13] 3- ساختار ماخ-زندر متقارن [14] 4- ساختار تداخل سنج غیرخطی فوق سریع [15]..... 28

شکل 23-1. چپ: دیاگرام چشمی سیگنال 10 گیگا بیت در ثانیه پس از عبور از جذب کننده قابل اشباع که بین 0 و 3 ولت به صورت معکوس بایاس شده و تابع انتقال غیر خطی تقویت کننده نوری همراه با این جذب کننده. راست: تغییر حاصل در توزیع نویز اندازه گیری شده در مرکز زمان بیت..... 29

شکل 24-1. کنترل قطبش بهره با استفاده از روی هم نشانی لایه های نقاط کوانتومی InAs روی GaAs [27]..... 31

شکل 25-1. تابش یکسان دو نوع قطبش در تمامی محدوده طول موج با استفاده از روی هم نشانی لایه های نقاط کوانتومی InAs با فواصل InGaAsP [21]..... 31

شکل 26-1. طیف بهره تقویت کننده های نقطه کوانتومی. از بالا به پایین: 1- نقاط کوانتومی استاندارد SK 2- 22 لایه از نقاط کوانتومی با فواصل 2 تک لایه 3- 22 لایه از نقاط کوانتومی با فواصل 2.5 تک لایه [22]..... 32

شکل 27-1. نسبت بهره TM/TE بر حسب چگالی جریان و بر حسب نسبت وجوه در چگالی جریان  $100 \text{ A/cm}^2$  [28]..... 32

شکل 1-2. ساختار باند هدایت نقاط کوانتومی. ثابت های زمانی نشان داده در شکل در ادامه گزارش محاسبه شده اند..... 35

شکل 1-3. تغییرات بهره تقویت کننده با ورود پالس 40 میلی وات به پهنای 10 پیکو ثانیه به ازای جریانهای متفاوت..... 46

شکل 2-3. تغییرات بهره تقویت کننده با ورود پالس 40 میلی وات به پهنای 10 پیکو ثانیه به ازای جریانهای متفاوت که در مقاله گروه سوگوارا آمده است [29]..... 46

شکل 3-3. تغییرات بهره تقویت کننده در چگالی جریان  $1 \text{ kA/cm}^2$  به ازای توان های ورودی متفاوت..... 47

شکل 4-3. تغییرات بهره تقویت کننده در چگالی جریان  $8 \text{ kA/cm}^2$  به ازای توان های ورودی متفاوت..... 48

شکل 5-3. عدم تغییر خروجی برنامه با دو برابر کردن تعداد گروه ها..... 49

شکل 6-3. خروجی برنامه در چگالی جریان  $1 \text{ kA/cm}^2$  به ازای تعداد تقسیمات متفاوت..... 50

شکل 7-3. بهره گروه های نقاط کوانتومی در چگالی جریان  $1 \text{ kA/cm}^2$  به ازای پهن شدگی های غیر همگن متفاوت..... 51

شکل 8-3. بهره خروجی تقویت کننده در چگالی جریان  $1 \text{ kA/cm}^2$  به ازای پهن شدگی های غیر همگن متفاوت..... 52

شکل 9-3. بهره خروجی تقویت کننده در چگالی جریان  $8 \text{ kA/cm}^2$  به ازای پهن شدگی های غیر همگن متفاوت..... 53

شکل 10-3. بهره خروجی تقویت کننده در چگالی جریان  $1 \text{ kA/cm}^2$  به ازای پهن شدگی های همگن متفاوت..... 54

شکل 11-3. احتمال پر بودن گروه های نقاط کوانتومی در مرکز تقویت کننده در چگالی جریان  $16 \text{ kA/cm}^2$ ..... 55

شکل 12-3 - تغییر بهره تقویت کننده برای سیگنال 1 mW در چگالی جریان  $1 \text{ kA/cm}^2$  با تغییر چگالی نقاط کوانتومی..... 56

شکل 13-3 - تغییر بهره در جریان  $1 \text{ kA/cm}^2$  و سیگنال 40 mW با تغییر تبهگنی تراز ها..... 58

شکل 14-3 - افزایش بهره تقویت کننده در جریان  $1 \text{ kA/cm}^2$  و سیگنال 40 mW با افزایش تبهگنی تراز پایه..... 59

شکل 15-3 - مقایسه بهره برای پالس 40 mW در چگالی جریان  $1 \text{ kA/cm}^2$  برای دماهای متفاوت..... 60

شکل 16-3 - اشباع بهره در تقویت کننده نوری نقطه کوانتومی..... 61

شکل 17-3. کاهش بهره تقویت کننده با افزایش توان سیگنال ورودی..... 62

شکل 18-3. بهره تقویت کننده برای سیگنال پیوسته (خط ممتد) و پالس (خط چین) در عبور از یک جهت با توانهای 40 mW..... 63

- شکل 19-3. بهره تقویت کننده برای سیگنال پیوسته (خط ممتد) و پالس (خط چین) در عبور از یک جهت با توانهای 80 mW.....66
- شکل 20-3. بهره تقویت کننده برای سیگنال پیوسته (خط ممتد) و پالس (خط چین) در عبور از یک جهت با توانهای 40 mW.....67
- شکل 21-3. بهره تقویت کننده برای سیگنال پیوسته (خط ممتد) و پالس (خط چین) در عبور از یک جهت با توانهای 40 mW.....68
- شکل 22-3. سیگنال های خروجی از تقویت کننده نقطه کوانتومی در شرایط شکل 21-3. در این شکل مفهوم XGM به خوبی دیده می شود.....69
- شکل 23-3. بهره تقویت کننده برای پالس اعمال شده در جهت مخالف سیگنال پیوسته. شکل بهره پالس با شکل بهره در حالت انتشار در جهت یکسان کاملاً متفاوت است.....70
- شکل 24-3. شکل پالس خروجی در شرایط شکل 23-3.....73
- شکل 25-3. بهره تقویت کننده برای پالس های اعمال شده در جهت مخالف سیگنال پیوسته که انرژی فوتون آن برابر انرژی رزونانس تراز پایه در گروه مرکزی نقاط کوانتومی است.....74
- شکل 26-3. بهره تقویت کننده برای یکی از پالس ها در حالت اعمال دو پالس در جهت مخالف.....75
- شکل 27-3. شکل پالس خروجی دوم ( $E_{\text{photon}} = E_{0cv} - 3 \text{ meV}$ ) از تقویت کننده در حالت اعمال دو پالس در جهت مخالف.....77
- شکل 28-3. بهره برای دو پالس با اختلاف انرژی نسبتاً زیاد. تأثیر دو پالس بر روی یکدیگر کاهش یافته است.....77
- شکل 29-3. تخلیه نقاط کوانتومی در دو سوی تقویت کننده در ابتدای اعمال پالس ها.....78
- شکل 30-3. تخلیه نقاط کوانتومی در نقطه میانی تقویت کننده و در زمانهای میانی.....79
- شکل 31-3. احتمال پر بودن نقاط کوانتومی در دو سوی تقویت کننده در زمانهای پایانی.....80
- شکل 32-3. شکل خروجی پالس اول. انرژی فوتون این پالس برابر انرژی رزونانس تراز پایه در گروه مرکزی در نظر گرفته شده است. انرژی فوتون پالس دوم 3 میلی اکترون-ولت کمتر در نظر گرفته شده است.....81
- شکل 33-3. شکل خروجی پالس دوم در شرایط شکل 32-3.....82
- شکل 34-3. شکل خروجی پالس دوم که با 10 پیکو ثانیه اختلاف زمانی با پالس اول به تقویت کننده وارد شده است.....82
- شکل 35-3. شکل پالس خروجی با توان 1 mW که پس از خروج پالس 40 میلی واتی به تقویت کننده اعمال شده است.....83

## فهرست جداول

- جدول 1-1. درجه آزادی حامل ها در سیستم های مختلف ادوات نوری.....6
- جدول 1-2. مقادیر و توضیحات پارامتر های برنامه.....42

# فصل 1 - مروری بر تحقیقات انجام شده در تقویت کننده های نوری

## نقطه کوانتومی

### 1-1 - مقدمه

این حقیقت که کاهش ابعاد حرکت الکترونها و حفره ها در اثر محدود کردن آنها، به تولید افزاره های بهتر می انجامد در الکترونیک نوری به عنوان یک اصل پذیرفته شده است. این عمل اولین بار با محدود کردن حامل های بار در یک نوار نازک نیمه هادی با گاف انرژی<sup>1</sup> کوچک تر در میان یک نیمه هادی با گاف انرژی بزرگتر انجام گرفت. به کار گیری این ساختار که چاه کوانتومی<sup>2</sup> نامیده شد منجر به تولید ادوات نوری با مشخصه های بهتر شد. پس از آن محدود سازی ابعاد حرکت حامل های بار با تولید سیم های کوانتومی<sup>3</sup> و در نهایت نقطه های کوانتومی<sup>4</sup> ادامه یافت.

در یک چاه کوانتومی حرکت حامل ها در یک بعد محدود شده است و درجه آزادی آنها برابر 2 است. این در حالیست که در سیم کوانتومی با اعمال محدودیت در دو بعد، درجه آزادی حامل ها به یک بعد کاهش یافته است. در نقطه های کوانتومی حرکت حامل ها در هر سه بعد محدود شده و درجه آزادی برابر صفر است. جدول 1 انواع ساختار های نیمه هادی ها را بر اساس درجه محدودیت و آزادی طبقه بندی می کند. همان طور که انتظار داریم مجموع درجه محدودیت و درجه آزادی در همه ساختار ها برابر 3 است. شکل 1-1 نمای ساده ای از یک چاه کوانتومی و یک سیم کوانتومی را نشان می دهد. گاف انرژی نیمه هادی سفید رنگ از گاف انرژی نیمه هادی تیره رنگ کوچکتر است. در شکل 1-2 به وضوح نشان داده شده است که درجه آزادی حرکت حامل ها در سیم های کوانتومی برابر یک است (در اینجا در جهت  $y$ ). با استفاده از تقریب جرم مؤثر حرکت در جهت محور  $z$  را می توان با رابطه (1) بیان کرد:

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

<sup>1</sup> - Band Gap

<sup>2</sup> - Quantum Well

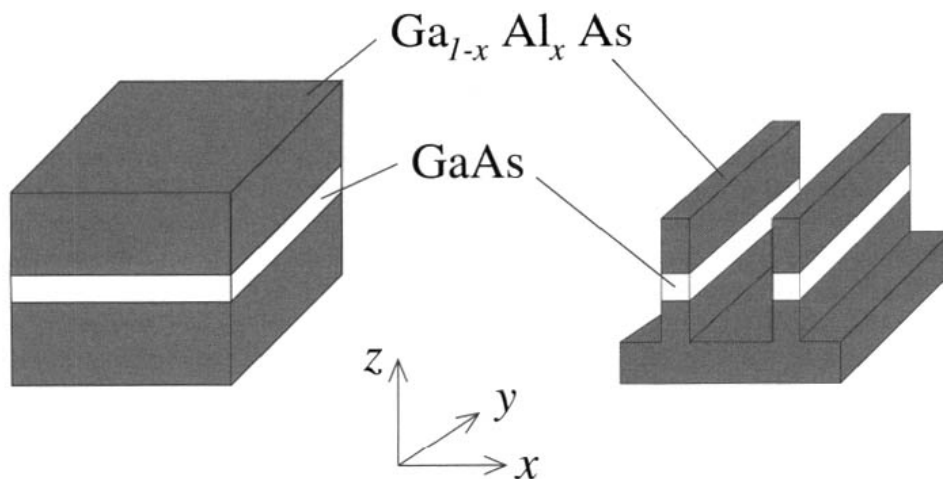
<sup>3</sup> - Quantum Wire

<sup>4</sup> - Quantum Dot

سیستم	درجه محدودیت	درجه آزادی
بدنه <sup>1</sup>	0	3
چاه کوانتومی	1	2
سیم کوانتومی	2	1
نقطه کوانتومی	3	0

جدول 1-1. درجه آزادی حامل ها در سیستم های مختلف ادوات نوری

همان طور که اشاره کردیم در نقطه های کوانتومی حرکت حامل ها در هر سه بعد محدود شده است. شکل 1-3 نمای ساده ای از یک نقطه کوانتومی را نشان می دهد. همان طور که می بینیم حامل بار از هر سه جهت کاملاً محدود شده و درجه آزادی برابر صفر است.



شکل 1-1. نمای ساده ای از چاه کوانتومی (سمت چپ) و سیم کوانتومی (سمت راست)

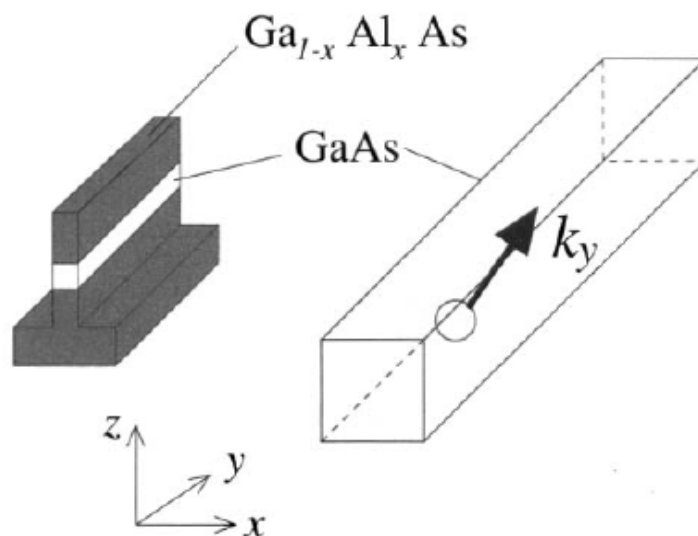
## 2-1 - رشد نقاط کوانتومی

رشد Heteroepitaxial نیمه هادیها (رشد یک نیمه هادی روی یک نیمه هادی متفاوت) همان طور که در شکل 1-4 نمایش داده شده است در سه نوع مختلف اتفاق می افتد. نوع اول عبارت است از رشد لایه به لایه یا رشد Frank-van der Merwe که اختصاراً روش FM نامیده می شود. نوع دوم عبارت

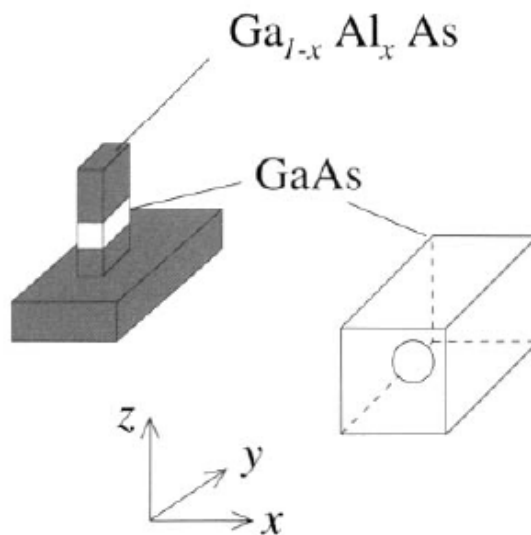
<sup>1</sup> - Bulk



است از رشد جزیره ای یا روش Volmer-Weber که اختصاراً روش VW نامیده می شود و در نهایت نوع سوم عبارت است از رشد لایه لایه همراه با رشد جزیره ای یا رشد Stranski-Krastanov که اختصاراً روش SK خوانده می شود. نوع رشد حاصله متأثر از انرژی های سطوح و تفاوت ثوابت شبکه های لایه اپی<sup>1</sup> و زیرلایه<sup>2</sup> است [1,2]. به بیان ساده، رشد لایه به لایه یا FM وقتی اتفاق می افتد که



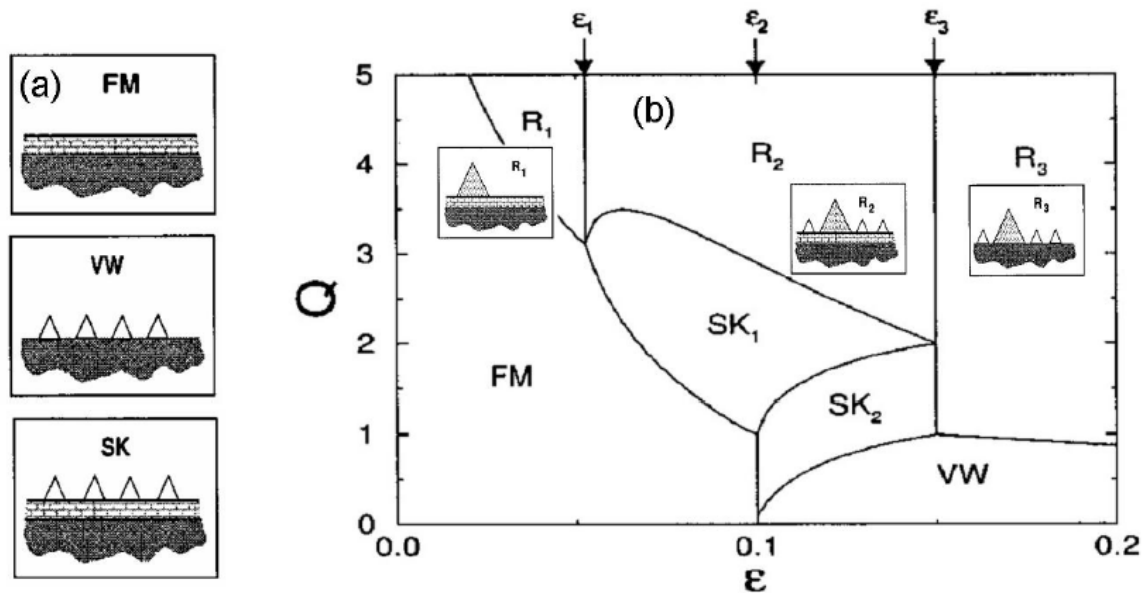
شکل 1-2. درجه آزادی حرکت حامل ها در سیم های کوانتومی برابر یک است.



شکل 1-3. نمای ساده ای از یک نقطه کوانتومی. درجه آزادی حرکت حامل ها برابر صفر است.

<sup>1</sup> - Epilayer  
<sup>2</sup> - Substrate

شبکه زیرلایه و شبکه اپی با یکدیگر تطابق داشته باشند. در صورتی که این دو شبکه با یکدیگر بسیار متفاوت باشند شرایط برای رشد لایه به لایه فراهم نبوده و لایه اپی روی زیر لایه به جزایر جداگانه تقسیم می شود و در واقع مدل رشد دوم یعنی رشد VW اتفاق می افتد. رشد SK وقتی اتفاق می افتد که دو شبکه با یکدیگر یکسان نیستند اما تفاوت آنها نسبت به حالت دوم کمتر است. در این حالت لایه اپی تا چند تک لایه روی زیر لایه می نشیند اما پس از آن به دلیل بالا رفتن فشار<sup>1</sup> مانند حالت دوم به جزایر مجزا تقسیم می شود. به این مدل رشد، رشد خود سامانی<sup>2</sup> می گویند چرا که جزایر یا همان نقاط کوانتومی به صورت خود به خودی سامان می یابند. شکل 4-1 نمونه ای از یک دیاگرام فازی برای شرایط مورد نیاز برای حصول هر کدام از سه نوع رشد ذکر شده را نشان می دهد. این دیاگرام نشان می دهد که تحت شرایط معلوم و معین جزایر خود سامان شده نقاط کوانتومی تشکیل خواهند شد (نواحی SK1 و SK2). اما در صورتی که در نواحی R1، R2 و R3 یا بشیم یا نقاط کوانتومی هرگز تشکیل نخواهند شد و یا نقاط تشکیل شده متراکم نخواهند بود.



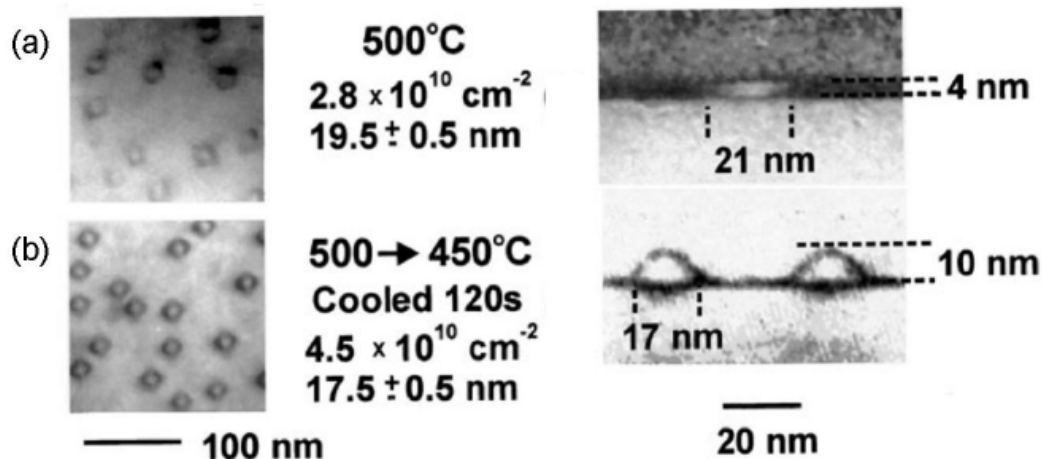
شکل 4-1. نمای ساده ای از سه مدل رشد FM، VW و SK (سمت چپ) و دیاگرام فازی آنها. محور افقی بر حسب عدم تطابق شبکه و محور عمودی تعداد تک لایه های نشانده شده است. در نواحی R1، R2 و R3 همان طور که در اشکال داخلی نشان داده شده است رشد جزایر ناپایدار است و از نظم خاصی پیروی نمی کند [1].

<sup>1</sup> - Strain  
<sup>2</sup> - Self Assembly

آنچه در طول روند تشکیل نقاط کوانتومی در روش SK اتفاق می افتد به این قرار است که ابتدا رشد لایه اپی در روش FM آغاز می شود. در این حالت در واقع لایه اپی به صورت مسطح روی زیر لایه می نشیند و اصطلاحاً زیر لایه را خیس می کند. اما این شرایط چندان دوام نمی آورد و در واقع پس از نشستن تنها چند تک لایه فشار روی لایه اپی بالا می رود و اتمها برای آزاد کردن این فشار در جزایر جداگانه گرد هم می آیند و تشکیل نقاط کوانتومی می دهند. نتیجه نهایی عبارت است از مجموعه ای از نقاط کوانتومی که بر روی یک لایه خیس کننده یا همان Wetting Layer تشکیل شده اند. نقاط کوانتومی تشکیل شده در این روش معمولاً هرمی شکل بوده و دارای ابعاد عرضی بین 15 تا 30 نانومتر و ارتفاع 3 تا 10 نانومتر هستند. چگالی سطحی این نقاط نیز بین  $10^8$  تا  $10^{11}$  نقطه در سانتی متر مربع متغیر است. اندازه نقاط کوانتومی با کنترل مقدار ماده لایه نشانی شده، کنترل ترکیب ماده لایه نشانی شده (که میزان فشار را تعیین می کند)، و تغییر شرایط رشد مانند دما و زمان رشد در بازه محدودی قابل کنترل است.

مشخصه دیگری که در تولید ادوات مبتنی بر نقاط کوانتومی اهمیت به سزایی دارد توزیع اندازه نقاط است که تعیین کننده همگن بودن خواص الکترونیکی آنهاست. پهن شدگی در تابع توزیع اندازه نقاط کوانتومی از خصوصیات غیر قابل اجتناب نقاط تولید شده در فرآیند خود سامانی است اما میزان این پهن شدگی وابسته به شرایط رشد است. بنابر این چالش موجود در رشد دادن نقاط کوانتومی عبارت است از فراهم کردن پارامترهای مناسب برای لایه اپی و شرایط رشد به گونه ای که ابعاد نقاط کوانتومی، چگالی سطحی آنها و پهن شدگی اندازه آنها به میزان مطلوب باشد. شکل 5-1 تصاویر TEM<sup>1</sup> نمونه ای از نقاط کوانتومی از جنس InP را نشان می دهد که به روش SK روی زیر لایه GaAs نشانده شده اند [3]. این شکل نشان می دهد که چگونه شرایط رشد نقاط بر روی اندازه و چگالی سطحی آنها مؤثر است. روش SK را می توان همچنین برای تولید نقاط کوانتومی InGaAs روی GaAs، InP روی GaP، Ge روی Si

<sup>1</sup> - Transmission Electron Microscopy



شکل 5-1. تصاویر TEM از بالا (سمت چپ) و از کنار (سمت راست) نقاط کوانتومی InP روی GaAs. نقاط ردیف بالایی در 500 درجه سانتی گراد رشد داده شده و روی آنها پوشانده شده است در حالیکه نقاط ردیف پایین پس از رشد در 500 درجه سانتی گراد به مدت 120 ثانیه در 450 درجه نگاه داشته شده و در همین دما پوشانده شده اند [3]. و نقاط InP روی InGaAsP به کار گرفت. مسئله ای که روش SK را برای تولید نقاط کوانتومی بسیار جذاب می کند این است که این روش با تکنیک های سنتی مانند <sup>1</sup>MBE، <sup>2</sup>MOCVD و یا <sup>3</sup>CBE با استفاده از دستگاه های سنتی رشد امکان پذیر است. مزایای دیگر این روش عبارتند از:

- 1- روش SK یک روش بدون ماسک است و بی نیاز از فرآیند های پیچیده فوتولیتوگرافی است.
- 2- در این روش، رشد چگالی بالایی از نقاط کوانتومی با یکنواختی مناسبی از نظر اندازه و ترکیب نقاط تنها در یک مرحله لایه نشانی امکان پذیر است.
- 3- بعد از رشد نقاط کوانتومی، لایه نشانی ماده زیر لایه به آسانی امکان پذیر است. این مزیت امکان تولید ادوات متنوع نوری جهت افزایش تعامل با نور موجود در افزاره را به دست می دهد.

### 3-1 - ساختار الکترونیکی نقاط کوانتومی

ساختار الکترونیکی نقاط کوانتومی که تعیین کننده چگونگی تعامل کوانتوم الکترونیکی این نقاط با نور است با توجه به توزیع فضایی پتانسیل محدود کننده حامل ها تعیین می شود. ماده سازنده نقاط

<sup>1</sup> - Molecular Beam Epitaxy

<sup>2</sup> - Metal Organic Chemical Vapor Deposition

<sup>3</sup> - Chemical Beam Epitaxy