

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد

خانم فاطمه کشاورز پایان نامه ۶ واحدی خود را با عنوان تحلیل تقویت کننده نوری نیمه

هادی نقطه کوانتومی با کاواک عمودی در تاریخ ۱۳۹۰/۱۱/۸ ارائه کردند.

اعضای هیات داوران نسخه نهایی این پایان نامه را از نظر فرم و محتوا تایید کرده، پذیرش آنرا

برای اخذ درجه کارشناسی ارشد الکترونیک پیشنهاد می کنند.

عضو هیات داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضا
استاد راهنما	دکتر وحید احمدی	استاد	
استاد ناظر	دکتر محمد کاظم مروج فرشی	استاد	
استاد ناظر	دکتر داوود فتحی	استادیار	
استاد ناظر	دکتر فاطمه شهنشانی	استادیار	
مدیر گروه (یا نماینده گروه تخصصی)	دکتر محمد کاظم مروج فرشی	استاد	

### 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 ۱: 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 ۲: 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 برق - الکترونیک است که در سال ۱۳۹۰ در دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی جناب آقای دکتر وحید احمدی از آن دفاع شده است.»

ماده ۳: 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 ۴: در صورت عدم رعایت ماده ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ شده رابه عنوان خسارت به دانشگاه تربیت مدرس، تأدیه کند.

ماده ۵: 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 ۴ را از محل توقیف کتابهای عرضه شده نگارنده برای فروش، تامین نماید.

ماده ۶: اینجانب فاطمه کشاورز دانشجوی رشته برق - الکترونیک مقطع کارشناسی ارشد تعهد فوق و ضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می شوم.

نام و نام خانوادگی: فاطمه کشاورز

تاریخ و امضا: 

۹۱،۲،۲

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

**مقدمه:** با عنایت به سیاستهای پژوهشی 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 هیات علمی، دانشجویان، دانش آموختگان و دیگر همکاران طرح، در مورد نتایج پژوهشهای علمی که تحت عناوین پایان نامه، رساله و طرحهای تحقیقاتی که با هماهنگی دانشگاه انجام شده است، موارد ذیل را رعایت نمایند:

**ماده ۱-** حقوق مادی و معنوی پایان نامهها / رسالههای مصوب دانشگاه متعلق به دانشگاه است و هرگونه بهره‌برداری از آن باید با ذکر نام دانشگاه و رعایت آیین نامهها و دستورالعملهای مصوب دانشگاه باشد.

**ماده ۲-** انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان نامه/ رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی باید به نام دانشگاه بوده و استاد راهنما مسئول مکاتبات مقاله باشد.

**تبصره:** در مقالاتی که پس از دانش آموختگی بصورت ترکیبی از اطلاعات جدید و نتایج حاصل از پایان نامه/ رساله نیز منتشر می‌شود نیز باید نام دانشگاه درج شود.

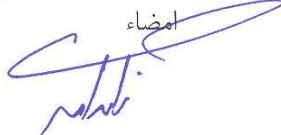
**ماده ۳-** انتشار کتاب حاصل از نتایج پایان نامه / رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی دانشگاه باید با مجوز کتبی صادره از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه و بر اساس آئین نامه های مصوب انجام می‌شود.

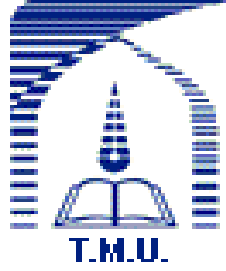
**ماده ۴-** ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه در جشنواره‌های ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی که حاصل نتایج مستخرج از پایان نامه/ رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی دانشگاه باید با هماهنگی استاد راهنما یا مجری طرح از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه انجام گیرد.

**ماده ۵-** این دستورالعمل در ۵ ماده و یک تبصره در تاریخ ۱۳۸۴/۴/۲۵ در شورای پژوهشی دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب لازم الاجرا است و هرگونه تخلف از مفاد این دستورالعمل، از طریق مراجع قانونی قابل پیگیری می‌شود.

نام و نام خانوادگی مطالعه نشاء در

امضاء





دانشگاه تربیت مدرس  
دانشکده فنی و مهندسی

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی برق-الکترونیک

**تحلیل تقویت کننده نوری نیمه هادی نقطه کوانتومی با کاواک عمودی**

**(QD-VCSOA)**

**فاطمه کشاورز**

**استاد راهنما:**

**جناب آقای دکتر وحید احمدی**

**زمستان ۱۳۹۰**

تقدیم به  
خانواده عزیزم

## تشکر و قدردانی

(فَإِنْ خِفْتُمْ فَرِجَالًا أَوْ رُكْبَانًا فَإِذَا أَمِنْتُمْ فَأَدْكُرُوا اللَّهَ كَمَا عَلَّمَكُم مَّا لَمْ تَكُونُوا تَعْلَمُونَ)

پس اگر بیم داشتید پیاده یا سواره [نماز کنید] و چون ایمن شدید خدا را یاد کنید که آنچه نمی دانستید به شما آموخت.

(قرآن کریم - سوره بقره - آیه ۲۳۹)

من لم یشکر المنعم من المخلوقین لم یشکر الله عز و جل.

( عیون اخبار الرضا جلد ۲ صفحه ۲۴ )

این پژوهش با راهنمایی های استاد بزرگوار، جناب آقای دکتر احمدی صورت پذیرفته که صبورانه در تمامی مراحل تحقیق مرا یاری کردند و بدین وسیله از ایشان تشکر و قدردانی می نمایم. همچنین از جناب آقای دکتر مروج که با بیان نکات ارزشمند مسیر این پژوهش را کوتاهتر کردند نیز تشکر می کنم.

از جناب آقای دکتر یآوری، جناب آقای مهندس پهلوان و جناب آقای مهندس خرمی که همواره پاسخگوی سوالات من بودند، نیز کمال تشکر و امتنان را دارم.

فاطمه کشاورز

دی ماه ۱۳۹۰

این پایان نامه با حمایت مالی مرکز تحقیقات مخابرات ایران (ITRC) انجام شده است.  
بدین وسیله از حمایت‌های این مرکز سپاسگزاری می‌شود.



## چکیده

استفاده از نقطه کوانتومی<sup>۱</sup> در ناحیه فعال تقویت کننده موجب می‌شود که کارایی تقویت کننده بهبود یابد. در این پایان نامه، رفتار دینامیک و استاتیک QD-VCSSOA به روش عددی حل معادلات نرخ با الگوریتم رانگ-کوتا مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. ناحیه فعال این تقویت کننده شامل ۱۵ لایه از نقاط کوانتومی خود سامان یافته ناهمگون  $In_{1-x}Ga_xAs/GaAs$  با در نظر گرفتن ترازهای پایه و برانگیخته و لایه وتینگ است. مدل کامل QD VCSSOA شامل مدل سازی کاواک و مدل سازی خصوصیات اپتیکی ماده است. در [19] برای اولین بار، رفتار خطی QD-VCSSOA بررسی شده است. در این پایان نامه به بررسی بعضی از اثرات غیر خطی پرداخته‌ایم. به بررسی مدلاسیون فاز خودی<sup>۲</sup> (SPM) در حوزه فمتوثانیه و پیکوثانیه پرداخته‌ایم. با انجام آزمایش پمپ-پروب در حالتی که عرض پالس دو سیگنال برابر با 1ps باشد در زمان تأخیر 1ps- فشرده‌گی پالس خروجی پروب با بهره 9dB در  $\Delta\lambda = 15\text{ pm}$  بدست آمد. همچنین با عرض پالس 5ps در زمان تأخیر 5ps- با بهره 16dB و عرض پالس 15ps در زمان تأخیر 14ps- با بهره 15.5dB در  $\Delta\lambda = 15\text{ pm}$  نیز فشرده‌گی پالس را بدست آوردیم.

با اعمال دو سیگنال به تقویت کننده و با استفاده از تکنیک پمپ -پروب، مدلاسیون تداخلی بهره<sup>۳</sup> (XGM) بررسی شده است و اثر پارامترهای پهن شدگی ناهمگن<sup>۴</sup>، چگالی نقاط کوانتومی، توان پمپ و اختلاف دو طول موج پمپ و پروب بر روی راندمان مدلاسیون بررسی شده است. بیشترین راندمان بدون اثر الگو برای پالس ورودی با نرخ بیت  $160\text{Gb/s}$  و عرض پالس 2ps با توان 150mW در چگالی سطحی  $N_D = 6 \times 10^{10}\text{ cm}^{-2}$  و پهن شدگی ناهمگن 20meV، طول موج پمپ برابر با 1300nm و طول موج پروب برابر با 1299.99nm بدست آمد که مقدار آن برابر با ۰.۶۵ است.

همچنین با استفاده از تکنیک پمپ-پروب فمتو ثانیه و رابطه نفوذپذیری، زمان بازیابی<sup>۵</sup> بهره و فاز، تغییرات ضریب شکست و ضریب بهبود عرض خط<sup>۶</sup> (LEF)، در این افزاره تحلیل و اثر پارامترهای ذکر شده بر روی این مشخصه ها بررسی شده است. زمان بازیابی کمتر از اپیکو ثانیه بدست آمده است که نشان می‌دهد این افزاره می‌تواند درحوزه مخابرات نوری در کاربردهای فوق سریع مورد استفاده قرار گیرد. بیشترین مقدار LEF برابر با  $1.87 \times 10^{-3}$  است که مربوط به پهن شدگی ناهمگن  $N_D = 5 \times 10^{10}\text{ cm}^{-2}$ ، 40meV و جریان های بیشتر از 5mA است.

کلید واژه: تقویت کننده نوری نیمه‌هادی با کاواک عمودی، نقطه کوانتومی خودسامان یافته، مدلاسیون تداخلی بهره، مدلاسیون خودی فاز، دینامیک فوق سریع.

<sup>1</sup> Quantum dot

<sup>2</sup> Self-phase modulation

<sup>3</sup> Cross gain modulation

<sup>4</sup> Inhomogeneous broadening

<sup>5</sup> Recovery time

<sup>6</sup> Line width enhancement factor

## فهرست مطالب

ج	فهرست جدول‌ها	.....
د	فهرست شکل‌ها	.....
<b>1</b>	<b>فصل 1- مقدمه</b>	.....
1	1-1- پیشگفتار	.....
1	2-1- تقویت کننده نوری نیمه هادی نانوساختار به عنوان یک راه حل برای سرعت بالا	.....
2	3-1- رشد نقاط کوانتومی	.....
2	4-1- آشنایی با VC SOA و مزایای آن	.....
5	1-5- مروری بر کارهای دیگران	.....
<b>7</b>	<b>فصل 2- مفاهیم پایه در بررسی رفتار غیر خطی</b>	.....
7	1-2- پهن شدگی ناهمگن بهره	.....
7	2-2- توان اشباع $P_{sat}$	.....
8	3-2- XGM	.....
8	4-2- زمان بازیابی	.....
9	5-2- LEF	.....
10	1-5-2- تسخیر حامل توسط QD ها از لایه وتینگ	.....
11	2-5-2- واهلش حامل به تراز پایه QD	.....
<b>12</b>	<b>فصل 3- فیزیک و ساختار QD-VC SOA</b>	.....
12	1-3- مقدمه	.....
12	2-3- مدل سازی QD VC SOA	.....
12	1-2-3- مدل سازی کاواک عمودی	.....
19	2-2-3- خصوصیات اپتیکی ماده QD	.....
23	3-2-3- ترکیب دو مدل	.....
24	3-3- روش حل معادلات نرخ	.....
29	4-3- نتایج شبیه سازی در حالت استاتیک	.....
<b>39</b>	<b>فصل 4- بررسی رفتار دینامیکی QD-VC SOA</b>	.....
39	1-4- مقدمه	.....
39	2-4- دینامیک های بهره	.....
41	1-2-4- دینامیک های میان بانندی بهره	.....
41	2-2-4- دینامیک های درون بانندی بهره	.....
42	4-3- بررسی SPM	.....

46	.....	تکنیک پمپ-پروپ	4-4
53	.....	بررسی XGM	5-4
54	.....	نتایج شبیه سازی XGM	1-5-4
61	.....	بررسی رفتار دینامیک فوق سریع QD-VCISOAs	6-4
61	.....	مدل سازی تغییرات فاز و بهره	1-6-4
62	.....	شبیه سازی رفتار دینامیک فوق سریع QD-VCISOAs	2-6-4
63	.....	نتایج شبیه سازی عددی	3-6-4
74	.....	نتیجه گیری و پیشنهادات	5
74	.....	نتیجه گیری	1-5
76	.....	پیشنهادات برای ادامه کار	2-5
77	.....	مراجع	
79	.....	واژه نامه فارسی به انگلیسی	
81	.....	واژه نامه انگلیسی به فارسی	

## فهرست جدول‌ها

عنوان	صفحه
جدول 1-1: خواص ساختاری و نوری نقاط کوانتومی مورد استفاده در ناحیه فعال لیزر و تقویت کننده نیمه هادی [3].....	3
جدول 1-3: لیست پارامترهای استفاده شده در شبیه سازی [19].....	27
جدول 1-4: انرژی‌های متناظر با کاهش بهره مشخص شده در شکل 4-29 برای سه مقدار پهن شدگی ناهمگن.....	67

## فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل 1-2: (الف) کاواک تقویت کننده نوری موج رونده (ب) کاواک تقویت کننده نوری فابری-پرو.....	3
شکل 1-1: ویژگی ساختاری نقاط کوانتومی پشته ای مورد استفاده در ناحیه فعال لیزر و تقویت کننده نیمه هادی [3].....	3
شکل 1-2: (a) شماتیک یک نقطه کوانتومی ایده آل (b) یک سیستم واقعی شامل پهن شدگی ناهمگن ( $E_{GS}$ انرژی تراز پایه، $E_{ES}$ انرژی تراز برانگیخته، $E_c$ پائین باند هدایت است.) [21].....	7
شکل 2-2: [.....]	8
شکل 2-3: مروری بردینامیک های انتقال حامل و واهلش آن در QD [23].....	10
شکل 1-3: مدهای کاری VCSOA (a) مد انعکاس. (b) مد انتقال [5].....	13
شکل 2-3: ساختار VCSOA به همراه شماتیک ساده کاواک [24].....	17
شکل 3-3: سه ناحیه جذب، تقویت کنندگی و لیزینگ QD-VCSOA.....	19
شکل 4-3: پهن شدگی همگن و ناهمگن بهنجار شده در QD-VCSOA.....	21
شکل 3-5: نمودار انرژی یک QD [19].....	21
شکل 3-6: تغییرات زمانی $\tau_{qe0}$ .....	29
شکل 3-7: تغییرات زمانی $\tau_{eg0}$ .....	30
شکل 3-8: تغییرات زمانی $\tau_{eq0}$ .....	30
شکل 3-9: تغییرات زمانی $\tau_{ge0}$ .....	31
شکل 3-10: تغییرات زمانی $\tau_{qr}$ .....	32
شکل 3-11: احتمال حضور حامل در تراز پایه بر حسب انرژی QD ها.....	32
شکل 3-12: بهره تقویت کننده در مد انعکاس برای ساختار $3 \times 5$ به ازای سه مقدار مختلف چگالی سطحی نقاط کوانتومی.....	33
شکل 3-13: بهره تقویت کننده در مد انعکاس برای ساختاری با $N_D = 5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ در جریان $20 \text{ mA}$ برای دو طراحی $1 \times 15$ و $3 \times 5$ .....	34
شکل 3-14: وابستگی جریان آستانه ساختار $3 \times 5$ به چگالی نقاط کوانتومی. افزاره هایی با $N_D < 6.1 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ [19].....	35
شکل 3-15: احتمال حضور حامل در تراز پایه بر حسب جریان برای ساختار $3 \times 5$ با $\text{cm}^{-2}$ $N_D = 5 \times 10^{10}$ و توان ورودی $P_{in} = 0 \text{ dBm}$ .....	35
شکل 3-16: بهره تقویت کننده در مد انعکاس بر حسب جریان در ساختار $3 \times 5$ با $\text{cm}^{-2}$ $N_D = 5 \times 10^{10}$ و توان ورودی $P_{in} = 0 \text{ dBm}$ .....	36
شکل 3-17: بهره تقویت کننده در مد انعکاس برای ساختار $3 \times 5$ در جریانهای مختلف.....	37

- شکل 3-18: بهره تقویت کننده در مد انعکاس در ساختار  $3 \times 5$  برای پهن شدگی ناهمگن مختلف..... 37
- شکل 3-19: بهره بر حسب طول موج برای سه پهن شدگی ناهمگن..... 38
- شکل 4-1: تغییرات زمانی توزیع چگالی حامل آزاد در باند هدایت القا شده توسط یک پالس نوری کوتاه [29]..... 40
- شکل 4-2: بهره مودی بر حسب زمان (a) دینامیک درون باندهی (b) دینامیک میان باندهی [29]..... 41
- شکل 4-3: خروجی پروب به ازای عرض پالس ورودی کمتر و مساوی با 1ps..... 43
- شکل 4-4: خروجی پروب به ازای عرض پالس ورودی 5، 10 و 30ps..... 44
- شکل 4-5: خروجی پروب به ازای عرض پالس ورودی 50، 80 و 100ps..... 44
- شکل 4-6: نسبت عرض پالس خروجی به عرض پالس ورودی..... 45
- شکل 4-7: شیفیت زمانی پیک توان خروجی..... 46
- شکل 4-8: خروجی پروب در نتیجه تداخل با پمپ به ازای تأخیر زمانی های مختلف..... 47
- شکل 4-9: خروجی پروب در زمان تأخیر صفر پیکوثانیه به ازای انرژی پمپ مختلف..... 47
- شکل 4-10: خروجی پروب در زمان تأخیر صفر پیکوثانیه به ازای اختلاف فرکانسی مختلف..... 48
- شکل 4-11: نسبت پهنای پالس خروجی پروب به پهنای ورودی آن..... 49
- شکل 4-12: تغییرات بهره پروب به ازای سه اختلاف فرکانسی..... 49
- شکل 4-13: پالس ورودی و خروجی بهنجار شده پروب در زمان تأخیر 1ps..... 50
- شکل 4-14: نسبت پهنای پالس خروجی پروب به پهنای ورودی آن..... 50
- شکل 4-15: تغییرات بهره پروب به ازای سه اختلاف فرکانسی..... 51
- شکل 4-16: پالس ورودی و خروجی بهنجار شده پروب در زمان تأخیر 5ps..... 51
- شکل 4-17: نسبت پهنای پالس خروجی پروب به پهنای ورودی آن..... 52
- شکل 4-18: تغییرات بهره پروب به ازای سه اختلاف فرکانسی..... 52
- شکل 4-19: پالس ورودی و خروجی بهنجار شده پروب در زمان تأخیر 14ps..... 53
- شکل 4-20: شبیه سازی XGM (a) سیگنال خروجی پروب (b) سیگنال خروجی پمپ (c) سیگنال ورودی پمپ و پروب..... 55
- شکل 4-21: بهره سیگنال پروب بر حسب زمان برای سه توان مختلف پمپ..... 56
- شکل 4-22: توان خروجی پروب..... 56
- شکل 4-23: توان خروجی پمپ..... 57
- شکل 4-24: راندمان XGM بر حسب توان پمپ..... 57
- شکل 4-25: راندمان XGM بر حسب اختلاف دو طول موج پمپ و پروب از یکدیگر ( $\Delta\lambda = \lambda_{pump} - \lambda_{probe}$ )..... 58
- شکل 4-26: اثر پهن شدگی ناهمگن بر روی راندمان XGM در توان های مختلف..... 59
- شکل 4-27: اثر افزایش چگالی سطحی نقاط کوانتومی بر روی راندمان XGM در توان های مختلف... 60
- شکل 4-28: خروجی پروب برای دو چگالی سطحی..... 60
- شکل 4-29: بهره کاهشی بر حسب انرژی به ازای پهن شدگی ناهمگن 20meV، 30meV و 40meV..... 63

- شکل 4-30: تغییرات خروجی پروب در چند اختلاف زمانی نسبت به سیگنال پمپ. .... 64
- شکل 4-31: تغییرات زمانی بهره بر حسب زمان تأخیر پمپ-پروب به ازای پهن شدگی ناهمگن  $20\text{meV}$ ،  $30\text{meV}$  و  $40\text{meV}$ . .... 64
- شکل 4-32: تغییرات زمانی ضریب شکست بر حسب زمان تأخیر پمپ-پروب برای سه پهن شدگی ناهمگن. .... 65
- شکل 4-33: تغییرات زمانی فاز بر حسب زمان تأخیر پمپ-پروب به ازای سه پهن شدگی ناهمگن. .... 66
- شکل 4-34: تغییرات زمانی LEF بر حسب زمان تأخیر پمپ-پروب به ازای سه پهن شدگی ناهمگن. .... 67
- شکل 4-35: تغییرات زمانی بهره بر حسب زمان تأخیر پمپ-پروب به ازای انرژی‌های  $E_{ref}$  ،  $0.2E_{ref}$  و  $0.04E_{ref}$  برای پهن شدگی ناهمگن  $40\text{meV}$ . .... 68
- شکل 4-36: تغییرات زمانی فاز بر حسب زمان تأخیر پمپ-پروب به ازای انرژی‌های مختلف پمپ. .... 69
- شکل 4-37: تغییرات زمانی LEF بر حسب زمان تأخیر پمپ-پروب به ازای انرژی‌های مختلف. .... 69
- شکل 4-38: تغییرات زمانی LEF بر حسب پهن شدگی ناهمگن نقاط کوانتومی به ازای سه انرژی پمپ. .... 70
- شکل 4-39: تغییرات زمانی بهره بر حسب زمان تأخیر پمپ-پروب به ازای جریان‌های تزریقی مختلف. .... 71
- شکل 4-40: تغییرات زمانی فاز بر حسب زمان تأخیر پمپ-پروب به ازای جریان‌های تزریقی مختلف. .... 72
- شکل 4-41: تغییرات زمانی ضریب شکست بر حسب زمان تأخیر پمپ-پروب به ازای جریان‌های مختلف. .... 72
- شکل 4-42: تغییرات زمانی LEF بر حسب زمان تأخیر پمپ-پروب به ازای جریان‌های تزریقی مختلف. .... 73

## فصل 1- مقدمه

### 1-1- پیشگفتار

امروزه توجه به افزاره هایی که ماده فعال آنها نقطه کوانتومی است، بیشتر شده است و این ناشی از عملکرد بهتر این افزاره ها نسبت به افزاره های مبتنی بر چاه کوانتومی است. جریان آستانه کمتر، بهره تفاضلی بالاتر و ضریب بهبود عرض خط کمتر، نمونه ای از ویژگی های خاص افزاره های مبتنی بر نقاط کوانتومی است. این ویژگی ها در نتیجه تحدید سه بعدی حامل در یک نقطه کوانتومی است که موجب می شود چگالی حالات در یک نقطه کوانتومی ایده آل تابعی دلتا شکل باشد. با ظهور رشد خودسامان یافته نقاط کوانتومی<sup>1</sup> بر اساس مد استرانسکی-کراستانو (S-K)، به کارگیری نقاط کوانتومی در تقویت کننده یا لیزرها امکان پذیر شده است. در نقاط کوانتومی خودسامان یافته، شکل و اندازه QD ها یکسان نیست. این نوسانات در اندازه QD، پهن شدگی ناهمگن را القا می کند که موجب می شود ماکزیمم بهره مدی نسبت به حالتی که ناحیه فعال از QD ایده آل تشکیل شده است، کمتر باشد.

غیر خطی های نوری در محیط فعال QD، از جمله موضوعاتی است که بسیار مورد توجه است. غیر خطی های نوری مانند مدلاسیون تداخلی بهره و تداخل چهار موج<sup>2</sup> (FWM)، می تواند در مبدل طول موج و پردازش سیگنال نوری به کار گرفته شود. ترازهای گسسته شبه اتمی و دینامیک خاص واهلش حامل، غیرخطی های نوری محیط QD را در مقایسه با محیط فعال چاه کوانتومی و بالک، اصلاح می کند. گزارشات تئوری و تجربی متعددی وجود دارد که نشان می دهد ناحیه فعال غیر خطی QD می تواند برای کاربردهای فوق سریع و بدون اثر الگو<sup>3</sup> مورد استفاده قرار گیرد. از جمله این کاربردهای گزارش شده می توان به مبدل طول موج با استفاده از XGM و مبدل طول موج فوق سریع بوسیله FWM اشاره کرد [۱].

### 1-2- تقویت کننده نوری نیمه هادی نانوساختار به عنوان یک راه حل برای سرعت بالا

در دهه اخیر، تقویت کننده نوری نقطه کوانتومی<sup>4</sup> (QD-SOA)، پاسخی است برای حل مشکلات متداول تقویت کننده هایی که ماده فعال آنها سرعت کمی دارد. QD-SOA در ناحیه فعال خود یک یا چند لایه نانومتری متشکل از جزیره های به قطر ۵ تا ۲۰ نانومتر است و اندرکنش مکانیکی-کوانتومی شبه اتمی با نور دارد. به دلیل ساختار مکانیکی-کوانتومی، این تقویت کننده ها ۱۰ تا ۱۰۰ برابر نسبت به ماده های چاه کوانتومی و بالک سریعتر هستند.

<sup>1</sup> Self-assembled quantum dots

<sup>2</sup> Four wave mixing

<sup>3</sup> Pattern effect

<sup>4</sup> Quantum dot semiconductor optical amplifiers



### 3-1- رشد نقاط کوانتومی

با استفاده از روش S-K برای رشد نقاط کوانتومی، امکان به کارگیری نقاط کوانتومی به عنوان ماده فعال در تقویت کننده ها و لیزرها ایجاد شده است. رشد نقاط در این روش به صورت خود سامان یافته است و اندازه و شکل نقاط کوانتومی یکسان نیست. در عمل برای یکسان سازی ابعاد نقاط کوانتومی و افزایش بر هم کنش میان الکترونهای تحدید شده در نقاط کوانتومی و میدان الکترومغناطیسی نور، چند لایه از نقاط کوانتومی بر روی یکدیگر رشد داده می شوند و به اصطلاح تشکیل پشته<sup>1</sup> را می دهند. فرآیند پشته سازی موجب متوسط گیری از ابعاد نقاط در جهت عمودی و یکسان سازی آنها می شود و از طرفی با افزایش لایه های پشته، بهره نوری افزایش می یابد[۲].

در فرآیند پشته سازی، نحوه سامان یابی نقاط کوانتومی شدیداً به ضخامت لایه واسط GaAs بین نقاط کوانتومی InAs بستگی دارد. این موضوع در شکل 1-1 نشان داده شده است. هنگامیکه ضخامت واسط بیشتر از 10nm باشد جزیره های هر لایه بدون هیچ ارتباطی با لایه دیگر شکل می گیرند ولی در صورتیکه ضخامت لایه واسط کمتر از 10nm و بیشتر از ارتفاع نقاط S-K معمولی h (حدود ۳ تا ۵ نانومتر) باشد، نقاط لایه بالایی دلیل میدان کرنشی ایجاد شده توسط لایه پایینی در راستای نقاط لایه پایینی سامان می یابند. در حقیقت کرنش لایه بستر مانند بذر برای لایه بالایی عمل می کند. در صورتیکه ضخامت لایه واسط به کمتر از h مثلاً در حدود چند تک لایه اتمی کاهش یابد، نقاط کوانتومی در جهت عمودی با یکدیگر تماس پیدا می کنند و روی هم به طور واحد تشکیل یک نقطه کوانتومی استوانه ای را می دهند. در جدول 1-1 ویژگی های مختلف نقاط کوانتومی با یکدیگر مقایسه شده اند[۳].

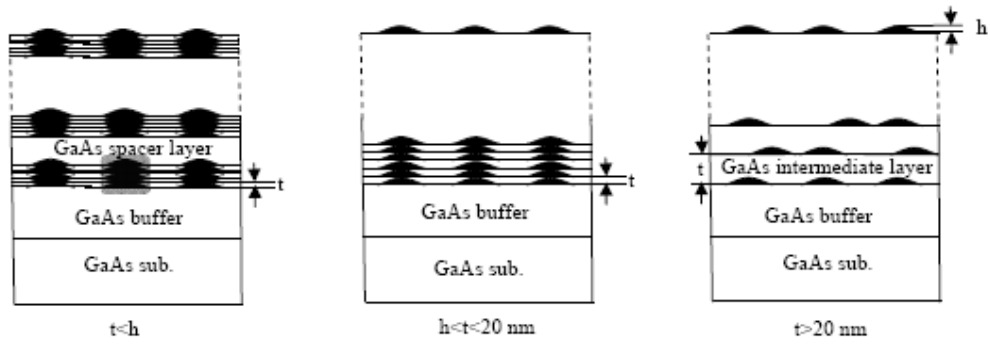
### 4-1- آشنایی با VC SOA و مزایای آن

به طور کلی تقویت کننده نوری نیمه هادی از نظر شکل هندسی کاواک به دو فرم کلی تقسیم می شود: تقویت کننده فابری-پرو<sup>۲</sup> و تقویت کننده موج رونده<sup>۳</sup>. در تقویت کننده نوری موج رونده، میزان انعکاس سطوح صفر است (سطوح پوشش ضد انعکاس دارند) و سیگنال هیچگونه انعکاسی از سطوح ورودی و خروجی نخواهد داشت. طول کاواک این تقویت کننده بزرگ است و معمولاً در محدوده چند صد میکرومتر تا چند میلی متر است تا کاواک بتواند بهره کافی را تولید کند. در شکل 1-2 (الف) کاواک تقویت کننده نوری موج رونده نشان داده شده است.

<sup>1</sup> Stack

<sup>2</sup> Fabry-Perot

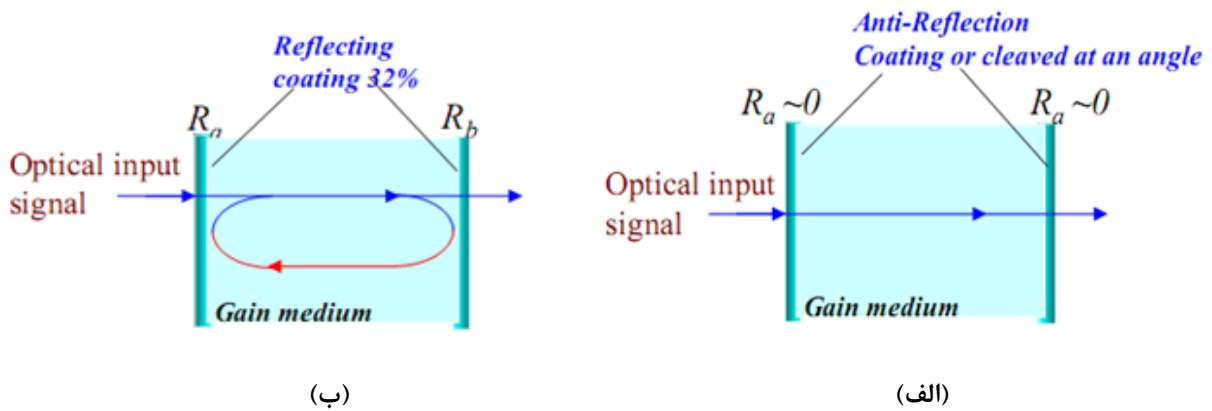
<sup>3</sup> Travelling wave



شکل 1-1: ویژگی ساختاری نقاط کوانتومی پشته ای مورد استفاده در ناحیه فعال لیزر و تقویت کننده نیمه هادی [3].

جدول 1-1: خواص ساختاری و نوری نقاط کوانتومی مورد استفاده در ناحیه فعال لیزر و تقویت کننده نیمه هادی [3].

ساختار نقاط	نقطه کوانتومی S-K	نقاط کوانتومی پشته شده	نقطه کوانتومی استوانه ای	
	FWHM طیف فوتولومینسانس	۹۰ meV	۲۵ meV	۴۰ meV
	راندهمان فوتولومینسانس	خوب	ضعیف	خوب
	چگالی سطحی نقاط کوانتومی	۴۰%	۴۰%	۴۰%
		$> 1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$	$> 1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$	$> 1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$
	طول موج (در ۳۰۰ K)	۱.۱ $\mu\text{m}$	۱.۲ $\mu\text{m}$	$> 1.2 \mu\text{m}$



شکل 1-2: (الف) کاواک تقویت کننده نوری موج رونده (ب) کاواک تقویت کننده نوری فابری-پرو.

در تقویت کننده های فابری-پرو، سطوح دارای انعکاس است و میزان انعکاس مرتبط با طول کاواک و تولید بهره مورد نظر است. این انعکاس با استفاده از آینه ها ایجاد می شود. آینه ها از لایه هایی متشکل از ماده هایی با ضریب شکست کم و زیاد تشکیل می شود. این پشته های آینه به نام منعکس کننده های براگ توزیع شده یا همان DBR<sup>1</sup> ها معرفی می شوند. ماکزیمم مقدار انعکاس DBRها از رابطه (1-1) بدست می آید:

$$R = \frac{(1 - qap^{m-1})^2}{(1 + qap^{m-1})^2} \left( 1 - \frac{q\alpha\lambda}{n_H(1 - p^2)} \right) \quad (1-1)$$

که در آن  $q$ ،  $a$  و  $p$  نسبت های ضریب شکست هستند که برای محیط ورودی، آینه و خروجی مشخص می شوند و مقادیر آنها کمتر از یک است. ضریب  $q$  نسبت ضریب شکست محیط ورودی (محیط تابش نور) و ضریب شکست اولین بخش DBR است. ضریب  $a$  نسبت ضریب شکست محیط خروجی به ضریب شکست آخرین بخش DBR است. ضریب  $p$  نسبت ضریب شکست های کمتر به ضریب شکست بالاتر DBR است. تعداد لایه های آینه (نه پریودها) برابر با  $m$  است.  $n_H$  بالاترین ضریب شکست ماده DBR است. طول موج در فضای آزاد با  $\lambda$  و تلفات جذب در آینه ها نیز با  $\alpha$  مشخص شده اند [4]. میزان انعکاس آینه ها برای تقویت کننده های با طول کوچک (عموماً چند میکرومتر) زیاد است تا بتواند بهره کافی را تولید کند. شکل 1-2 (ب) کاواک تقویت کننده فابری-پرو را نشان می دهد.

VCSSOA<sup>2</sup> ها ساختاری شبیه به فابری-پرو دارند اما کاواک آنها به صورت عمودی است. تقویت کننده نوری نیمه هادی با کاواک عمودی افزاره هایی هستند که مزایای ویژه ای نسبت به تقویت کننده های in-plane برای استفاده در حوزه مخابرات نوری دارند. از جمله این مزایا می توان به راندمان بالای کوپلینگ به فیبر نوری (عدد نویز کمتر)، بهره مستقل از پلاریزاسیون، مصرف پایین توان، حجم فعال کوچک، مجتمع سازی به صورت آرایه دوبعدی و تست روی ویفر اشاره کرد. علاوه بر این ها، خصوصیات غیر خطی نوری VCSSOAها موجب شده است که این افزاره ها محدوده وسیعی از کاربردها از سوئیچ های نوری و مسیریاب ها در مخابرات نوری تا اینترکانکت نوری، پردازش سیگنال های نوری و مؤلفه های نور کند را پوشش دهند. بهره تک گذر<sup>3</sup> ( $G_s$ ) در VCSSOA کم است و به همین دلیل در این افزاره از فیدبک ایجاد شده توسط آینه هایی با انعکاس بالا برای افزایش بهره استفاده می شود. استفاده از فیدبک موجب محدود شدن پهنای باند بهره به پهنای خط مد فابری-پرو می شود که عموماً کمتر از 1 نانومتر است [5].

<sup>1</sup> Distributed Bragg reflector

<sup>2</sup> Vertical cavity semiconductor optical amplifier

<sup>3</sup> Single pass gain

## 1-5- مروری بر کارهای دیگران

اولین VCISOA در سال ۱۹۹۱ توسط مؤسسه تکنولوژی توکیو ارائه شد [5]. در سال ۱۹۹۴ Tombling و همکاران عملکرد VCISOA را پیش بینی و معادلات حاکم بر آن را مطابق با معادلات فابری-پرو استخراج کردند [6]. در سال ۲۰۰۱ Piprek و همکاران طراحی و آنالیز VCISOA را انجام دادند و مشخصه های استاتیک بهره و پهنای باند را بهینه کردند [7]. Bjorlin و همکاران نیز این تقویت کننده را مورد بررسی قرار دادند [8]. اثر غیر خطی دو پایداری اپتیکی<sup>۱</sup> (OB) و کاربردهای آن مثل سوئیچ تمام نوری و بازیابی کننده های سیگنال توسط Sanchez به صورت تجربی و تئوری بررسی شده است [9] و [10]. Wen و همکاران توانستند با استفاده از دو پایداری اپتیکی گیت AND را با VCISOA پیاده سازی کنند [11]. Marino و همکاران به بررسی اثر XGM به صورت تجربی در VCISOA پرداختند [12]. Kaplan و همکاران با استفاده از دو پایداری اپتیکی یک فلیپ فلاپ بر اساس VCISOA طراحی کردند [13].

اثرات غیر خطی در QD-SOA ها نیز بسیار مورد توجه بوده و هست. Kim و همکاران با بررسی کامل زمان بازیابی بهره و فاز و تغییرات زمانی LEF، وابستگی این پارامترها را با مشخصه های ساختاری تقویت کننده نقطه کوانتومی مثل پهن شدگی ناهمگن<sup>۲</sup> و دوپینگ تحلیل کردند [14]. Zilkie و همکاران دینامیک حامل را در تقویت کننده های نقطه کوانتومی و چاه کوانتومی بررسی کردند [15]. Borri به بررسی SHB<sup>۳</sup> و CH<sup>۴</sup> در تقویت کننده های نقطه کوانتومی پرداخت [16].

همچنین Kim و همکاران به بررسی XGM فوق سریع در QD-SOA پرداختند و Uskov نشان داد که می توان با جریان تزریقی قوی، XGM فوق سریع بدون اثر الگو را در QD-SOA مشاهده کرد [17] و [18].

در سال ۲۰۰۸ برای اولین بار تقویت کننده نوری نیمه هادی نقطه کوانتومی با کاواک عمودی (QD-VCISOA) توسط Vasileiadis و همکاران ارائه شد. ماده فعال این تقویت کننده InGaAs/GaAs و طول موج کاری آن  $1.3\mu m$  است [19]. این گروه به بررسی مشخصه های استاتیک تقویت کننده پرداختند و اثرات غیرخطی و دینامیک تقویت کننده تا کنون بررسی نشده است.

با توجه به اینکه بسیاری از کاربردهای تقویت کننده های نوری در حوزه مخابرات نوری مبتنی بر اثرات غیر خطی است، در این پایان نامه به بررسی دینامیک و بعضی از اثرات غیرخطی در این تقویت کننده خواهیم پرداخت. در فصل ۲ به مفاهیم پایه در بررسی رفتار غیر خطی اشاره می شود. در فصل ۳ مدل سازی ساختار QD-VCISOA شامل مدل سازی کاواک عمودی و مدل سازی ماده نقطه کوانتومی به طور کامل بررسی می شود و در نهایت با ترکیب این دو مدل و حل معادلات حاکم بر این ساختار،

<sup>1</sup> Optical bistability

<sup>2</sup> Inhomogeneous broadening

<sup>3</sup> Spectral hole burning

<sup>4</sup> Carrier heating