بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده علوم پایه

گروه فیزیک

رساله دکتری

بهینه سازی ساختار لیزرهای نیمه رسانای گسیل سطحی کاواک قائم برای ارتباطات فیبر نوری

از:

زهرا دانش کفترودی

استاد راهنما:

دکتر اسفندیار رجایی

اسفند 89

تقدیم به خانواده ام

به نام خدا

حال که با استعانت از ایزد یکتا توفیق تدوین این پایان نامه را یافته ام، بر خود واجب می دانم از تمامی عزیزانی که در طی انجام این پژوهش از یاری و راهنمایی شان بهره مند گشته ام تشکر و قدر دانی نمایم.

در ابتدا صمیمیانه ترین تقدیرها و آرزوها تقدیم به خانواده عزیزم که همواره مشوق و حامی من در روزهای سخت زندگی ام بوده اند.

از استاد راهنمای گرانقدرم آقای دکتر رجایی که با صبوری مرا راهنمایی نموده و در پیشبرد این پایان نامه از هیچ تلاشی دریغ ننموده اند کمال تشکر را دارم.

از جناب آقای دکتر جعفر جهان پناه از دانشگاه تربیت معلم که زحمت بازخوانی این مجموعه را به عهده داشتند بسیار سپاسگزارم.

از داوران محترم آقایان دکتر صابر فرجامی شایسته و دکتر حمید رضا مشایخی استادان دانشگاه گیلان که زحمت تصحیح پایان نامه ام را به عهده داشتند و همچنین نماینده تحصیلات تکمیلی جناب آقای دکتر شهروز سعیدی، کمال تشکر و قدردانی را می نمایم.

در نهایت از تمامی کسانی که در طول این دوره از مصاحبت و همفکری شان استفاده نمودم صمیمانه تشکر می کنم.

فهرست مطالب

عنوان.....**صفحه**

چکیده فارسی ..... ک

چکیده انگلیسی ..... ل

فصل اول

مقدمه 2

فصل دوم

بررسی ساختار و عملکرد لیزر نیمه رسانا

مقدمه 6

2-1 مواد لیزر 6

2-1-1- لیزرهای مبتنی بر GaAs 7

2-1-2- لیزرهای مبتنی بر InP 8

2-1-3 – لیزرهای مبتنی بر ZnSe 8

2-1-4- لیزرهای مبتنی بر GaN 8

2-2- انواع لیزر 9

2-3 ساختار لیز ر 9

2-3-1- لیزر گسیل لبه ای 9

2-3-2- طراحی ساختار در جهت عمود بر صفحه پیوندگاه 11

2-3-2-1- پیوندگاه همگون 11

2-3-2-2- پیوندگاه ناهمگون 11

عنوان ..... **صفحه**

2-3-3- لیزر چاه کوانتومی 12

2-3-4- طراحی ساختار در جهت موازی با صفحه پیوندگاه 13

2-3-4-1- ساختار بهره راهنمایی شده 13

2-3-4-2- ساختار شاخص راهنمایی شده 14

2-3-5- لیزر دیود توان بالا 15

2-3-5-1- لیزر تک مدی 15

2-3-5-2- آرایه چند مدی 16

2-3-5-3-2- میله دیودی 16

2-3-6- لیزر گسیل سطحی 16

2-3-6-1- لیزر گسیل سطحی با جفت کننده شبکه توری 17

2-3-7- لیزر آبشاری کوانتومی 18

2-3-7-1- لیزر آبشاری کوانتومی نوع n 18

2-3-7-2- لیزر Ge آلائیده شده نوع- p 19

2-4 اساس عملکرد لیزرهای نیمه رسانا 21

2-4-1- گسیل و جذب 21

2-4-2- عناصر اصلی در لیزرهای نیمه رساناها 22

2-4-2-1- کاواک فابری پرو 22

2-4-2-2- پیوندگاه p-n 23

2-4-2-3- ساختارهای ناهمگون دوگانه 24

2-5- بهره آستانه 25

2-5-1- شرط تشدید 26

2-5-2- شرط بهره 26

2-6- کارایی تابشی 27

2-6-1- کارآیی شیب 28

2-6-2- کارآیی کوانتومی دیفرانسیلی خارجی 28

عنوان.....صفحه

2-6-3-نسبت توان خروجی از رخها.....29

2-7- مشخصه های نور- جریان.....30

2-7-1- معادلات آهنگ 30

2-7-2- چگالی جریان آستانه.....35

2-7-3- مشخصه نور- جریان در عملکرد موج پیوسته 35

2-7-3-1- بدون جفت شدگی گسیل خودبخودی به مد لیزر دهی.....35

2-7-3-2- با جفت شدگی گسیل خودبخودی به مد لیزردهی 36

2-8 مشخصه ولتاژ- جریان.....39

2-9-کاربردهای لیزر نیمه رسانا.....40

فصل سوم

لیزرهای کاواک قائم گسیل سطحی

مقدمه 42

3-2 ساختار قطعه 43

3-3 انواع VCSELها 45

3- 4 کاربرد VCSELها.....56

3-5 VCSELهای طول موج بلند 60

3- 6 پیشرفتهای VCSEL های طول موج بلند.....66

3-6-1- ادوات مبتنی بر زیر لایه GaAS 66

3-6-2- ادوات مبتنی بر زیر لایه InP.....67

3-6-2-1 ادواتی با DBR های دی الکتریک.....67

3-6-2-2 - ادواتی با DBR هایWafer- Bonded 67

3-6-2-3 - ساختارهای تماماً برآراستی.....68

3-7 تاریخچه قطعه 69

عنوان ..... **صفحه**

فصل چهارم

مدلسازی

مقدمه 74

4-1 شبیه سازی الکتریکی 75

4-1-1- باز ترکیب الکترون- حفره 77

4-1-1-1- بازترکیبهای تابشی 78

4-1-1-2- باز ترکیبهای غیرتابشی 79

4-1-2- تولید حاملها 81

4-1-2-2- جذب فوتون 81

4-1-2-3- یونیزاسیون برخورد 81

4-1-2-4- تونل زنی نوار به نوار 82

4-2- مدل سازی اپتیکی 82

4-2-1- معادلات ماکسول 84

4-2-2- موجهای تخت 84

4-2-3- امواج تخت در فصل مشترکها 85

4-2-4- ساختارهای چندلایه 88

4-2-5- معادلات موج هلم- هولتز 90

4-3- شبیه سازی حرارتی 91

4-3-1- تولید گرما 92

4-3-1-1- گرمای ژول 92

4-3-1-2- گرمای بازترکیب 92

4-3-1-3- گرمای تامسون 93

4-3-1-4- گرمای جذب اپتیکی 93

4-3-2- مقاومت حرارتی 94

4-4- نوارهای انرژی الکترونی 94

عنوان ..... **صفحه**

4-4-1- موجهای الکترونی 94

4-5- ساختار نواری الکترونی: روش $\vec{K}.\vec{P}$ 96

4-5-1- مدل دو نواری 96

4-5-2- تاثیرات کرنش بر ساختار نواری 98

4-5-3- مدلهای سه و چهار نواری 99

4-5-4- چاه های کوانتومی 100

4-6- تولید فوتون 101

4-6-1- عناصر ماتریس گذار 103

4-6-2- پهن شدگی انرژی گذار 104

4-7- تاثیرات کرنش عملکرد لیزر نیمه رسانا 105

4-8- شرایط مرزی 106

4-8-1 شرایط مرزی در شبیه سازی الکتریکی 106

4-8-2 شرایط مرزی در شبیه سازی اپتیکی 106

4-8-3- شرایط مرزی در شبیه سازی حرارتی 107

4-9- پارامترهای مادی 107

4-9-1- تحرک حامل ها 107

4-9-2- ضریب جذب نوار- به نوار 108

4-9-3- ضریب شکست 110

4-9-4- ضریب باز ترکیب اوژه 111

4-9-5- افست نواری 111

4-9-6- بازبهنجارش گاف نواری 111

4-9-7 زمان پراکندگی درون نواری 112

4-9-8- طول عمر باز ترکیب ناشی از نا خالصی ها 112

4-9-9- ضریب رسانندگی حرارتی آئینه های براگ 112

عنوان ..... **صفحه**

فصل پنجم

شبیه سازی و نتیجه گیری .....

مقدمه 115

5-1 نتایج شبیه سازی 115

5-1-1- موج ایستاده 116

5-1-2- مُد عملکرد 118

5-1-3-طیف بهره و طول موج خروجی 118

5-1-4 – چگالی جریان های تزریقی 119

5-1-4-1 چگالی جریان تزریقی الکترون ها 119

5-1-4-2 چگالی جریان تزریقی حفره ها 121

5-1-5- تراکم حامل ها در ناحیه فعال 123

5-1-5-1- چگالی الکترون ها 123

5-1-5-2- چگالی حفره ها 128

5-1-6- بازترکیبها 132

5-1-6-1 باز ترکیب القایی 132

5-1-6-2 باز ترکیب اوژه 137

5-1-6-3 باز ترکیب خودبخودی 139

5-1-6-4 باز ترکیب ناشی از ناخالصی ها 140

5-1-7 – آنالیز حرارتی 142

5-1-7 – 1 – توزیع دما 142

5-1-7 – 2 – منابع گرمایش 144

5-1-7 – 2-1 – گرمای ژول 144

5-1-7 – 2-2 – گرمای باز ترکیب 145

5-1-7 – 2-3 – گرمای جذب اپتیکی 146

عنوان ..... **صفحه**

5-1-7 – 2-4 – گرمای تابشی 147

5-1-7 – 2-5 – گرمای تامسون 148

5-1-7 – 2-6 – گرمای پلتیه 150

5-1-8- بهره 151

5-1-9- تغییرات شدت موج اپتیکی در لایه های مختلف قطعه 153

5-1-10- جریان نشتی 154

5-2 بهینه سازی 157

5-2-1- لایه های متوقف کننده 157

5-2-2- بهینه سازی آلایش لایه های ساختار 162

5-2-3- بهینه سازی ساختار نواری 165

5-3 نتیجه گیری 167

5-4 پیشنهاد کار برای آینده 169

مرجع ها 171

پیوست 181

فهرست شکل ها

عنوان.....صفحه

شکل (2-1) دو مثال از محدودیت جانبی جریان لیزر در لیزر نیمه رسانا 10

شکل (2-2) ساختار لیزربهره راهنمایی شده 14

شکل (2-3) دو مثال از ساختار لیزر شاخص راهنمایی شده 14

شکل(2-4) لیزر نیمه رسانای آرایه ای 16

شکل (2-5) (الف) دیود لیزر گسیل لبه ای معمولی 17

(ب) دیود لیزر گسیل سطحی با جفت کننده شبکه توری 17

شکل (2-6) نمودار انرژی برحسب مکان در طول محور لیزر آبشاری 18

کوانتومی نوع - n

شکل (2-7) نمودار تراز انرژی لیزر ژرمانیوم آلائیده شده نوع -p 20

شکل (2-8) آرایش تقویت کننده – نوسان کننده برای لیزر Ge آلائیده 20

شکل (2-9) گذارهای تابشی و غیر تابشی در لیزرهای نیمه رسانا (الف) گسیل خودبخودی

(ب) گسیل القایی (ج) جذب 21

شکل(2-10) دیود لیزر فابری- پرو 22

شکل(2-11) پیوندگاه p-n در لیزرهای نیمه رسانا 23

شکل(2-12) تزریق حامل ها در پیوندگاهp-n تحت بایاس مستقیم 23

شکل (2-13) (الف) انرژی الکترون ها (ب) ضریب شکست برای ساختار ناهمگون دوتایی 24

شکل(2-14) توزیع شدت نوری در موجبر نوری 26

شکل (2-15) نمودار توان نوری برحسب جریان لیزرهای نیمه رسانا..... 28

شکل(2-16) شدت نورهای داخلی و خارجی لیزر فابری-پرو 29

شکل (2-17) ضریب محدودیت نوری بر حسب ضخامت لایه فعال به ازای کسرهای مولی مختلف Al برای ساختارهای

ناهمگون دوتایی $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$..... 34

شکل (2-18) چگالی جریان آستانه برحسب تابعی از ضخامت لایه فعال 34

عنوان.....**صفحه**

شکل(2-19) (الف) چگالی حامل و (ب) چگالی فوتون ها بر حسب تغییرات چگالی جریان با چشم پوشی از جفت شدگی گسیل خودبخودی به مد لیزر دهی 36

شکل(2-20) چگالی حامل و فوتون بر حسب چگالی جریان همراه به جفت شدگی گسیل خودبخودی به مد لیزر دهی 37

شکل(2-21)) تغییرات توان بر حسب جریان به ازای دماهای مختلف در عملکرد پالسی 37

شکل (2-22) انواع فرآیند باز ترکیب اوژه(الف) CHSH (ب) CHCC..... 38

شکل(2-23)) فرآیند جذب در (الف) نوار حفره سنگین (ب) تراز پذیرنده 39

شکل(3-1) ساختار یک VCSEL (سمت چپ) و یک لیزر گسیل لبه ای(سمت راست)..... 43

شکل (3-2)VCSEL بهره- هدایت شده 45

شکل(3-3) VCSEL بمباران یونی شده 46

شکل(3-4) VCSEL گسیلنده پایین با Etched-mesa..... 47

شکل(3-5) دو ترکیب ممکن از VCSELهای air-posted..... 48

شکل (3-6) VCSELبمباران-پروتونی..... 49

شکل (3-7) یک VCSEL را با ساختار ناهمگون دفن شده 50

شکل (3-8)VCSEL با دریچه اکسیدی..... 50

در شکل(3-9) VCSEL با موجبر با موجبر تدریجا باریک شده 52

شکل(3-10) یک پیکربندی ممکن ازVCSEL پاد هدایت..... 53

شکل(3-11) ضریب شکست متناظر در طول جهت عرضی 53

شکل (3-12) VCSEL با ساختار ناهمگون دفن شده (سمت چپ) و VCSEL با ساختار پیوندگاه تونلی(سمت راست) 53

شکل(3-13) VCSEL با کاواک خارجی..... 54

شکل(3-14) VCSEL با کریستالهای فوتونی 55

شکل(3-15)VCSEL با سطح برجسته 56

شکل (3-16 میان اتصالات فضای آزاد موازی همراه با آرایه ای از VCSEL ها و آرایه ای از آشکارسازهای یکپارچه شده با میکرو لنزها 58

عنوان..... صفحه

شکل(3-17)) طرح پیشنهادی از لینک اطلاعات نوری تسهیم گری تقسیم طول موج همراه با
آرایه ای از VCSEL های یکپارچه شده بعنوان فرستنده چند طول موجی.....59
شکل (3-18) مشخصه های بازتابندگی DBR های مرکب 63
شکل (3-19) ضرایب رسانندگی حرارتی ترکیبات نیمه رسانای مختلف جور شده بر روی InP.....65
شکل (3-20)VCSEL با طول موج خروجی 1550 نانومتر 69
شکل (3-21)VCSEL با طول موج خروجی 1305 نانومتر 70
شکل (3-22) ساختار لایه های نهایی 71
شکل(3-23) نمودار توان و ولتاژ بر حسب جریان به ازای دماهای مختلف عملکرد 72
شکل (3-24) طیف توزیع شدت قطعه.....72
شکل (4-1) مکانیزم های اصلی بازترکیب در یک نیمه رسانا.....78
شکل (4-2) مکانیزمهای تولید زوج الکترون و حفره در نیمه رساناها 81
شکل (4-3) میدان الکترومغناطیسی عرضی رونده در محورz.....85
شکل (4-4) عمق نفوذ و جا بجایی فاز.....87
شکل (4-5)موجهای عبوری و بازتابیده در فصل مشترکهای موازی.....88
شکل (4-6) نمایشی از توابع الکترونیکی درون یک کریستال (الف) پتانسیل در طول محور اتمها
(ب) توابع موج الکترون آزاد (ج) ضریب دامنه تابع بلاخ با دوره شبکه (د) تابع بلاخ..... 95
شکل (4-7) ترازهای انرژی، توابع موج ،پاشندگی انرژی و چگالی حالتها در چاههای کوانتومی.....101
شکل (4-8) بهره (الف) مواد حجمی (ب) مواد چاه کوانتومی.....103
شکل (4-9) انواع مختلف جذب در نوارهای نیمه سانا 109
شکل (4-10) طیف PL چاههای کوانتومی خط توپر نشان دهنده اندازه گیریها و خط چین نتایج
شبیه سازی 111
شکل (5-1) نمودارهای توان-جریان و ولتاژ-جریان تئوری (خط چین) و تجربی(خط) در دما های
زمینه مختلف 115
شکل (5-2) شکل طرح موج ایستاده و موقعیت چاه های کوانتومی نسبت به آن.....116
شکل (5-3) ساختار نواری قطعه نزدیک جریان آستانه در دمای 20°C 117
شکل (5-4) شکل موج ایستاده و موقعیت پیوندگاه تونلی نسبت به آن 117

عنوان..... صفحه

شکل (5-5) توزیع دو بعدی شدت نور سطحی (خطوط پر مایل) نیمی از قطعه بر حسب ابعاد آن
در دمای محیط $20^{\circ}C$ 118
شکل (5-6) طیف بهره ناحیه فعال بر حسب طول موج (در شکل طول موج کاواک نیز مشخص شده است).....119
شکل (5-7) توزیع چگالی جریان طولی الکترون ها بر حسب ابعاد قطعه در جریان آستانه و
دمای محیط $20^{\circ}C$ رنگ های مختلف نشان دهنده چگالی جریان خاصی هستند که با توجه به نمونه
کنار شکل تغییر می کنند.....119
شکل (5-8) توزیع چگالی جریان قائم الکترون ها بر حسب ابعاد قطعه در جریان آستانه و
دمای محیط $20^{\circ}C$ 120
شکل (5-9) توزیع چگالی جریان طولی الکترون ها بر حسب ابعاد قطعه در جریان 6 میلی آمپر
و دمای محیط $20^{\circ}C$ 120
شکل (5-10) توزیع چگالی جریان قائم الکترون ها بر حسب ابعاد قطعه در جریان 6 میلی آمپر و
دمای محیط $20^{\circ}C$ 121
شکل (5-11) توزیع چگالی جریان طولی حفره ها بر حسب ابعاد قطعه در جریان آستانه و
دمای محیط $20^{\circ}C$ 121
شکل (5-12) توزیع چگالی جریان قائم حفره ها بر حسب ابعاد قطعه در جریان آستانه و
دمای محیط $20^{\circ}C$ 122
شکل (5-13) توزیع چگالی جریان طولی حفره ها بر حسب ابعاد قطعه در جریان 6 میلی آمپر و
دمای محیط $20^{\circ}C$ 122
شکل (5- 14) توزیع چگالی جریان قائم حفره ها بر حسب ابعاد قطعه در جریان 6 میلی آمپر و
دمای محیط $20^{\circ}C$ 123
شکل (5- 15) توزیع دو بعدی تراکم الکترون ها در ناحیه فعال (چاه های کوانتومی) بر حسب
ابعاد قطعه نزدیک به جریان آستانه و دمای محیط $20^{\circ}C$ 124
شکل (5- 16) توزیع سه بعدی تراکم الکترون ها در ناحیه فعال (چاه های کوانتومی) بر حسب ابعاد قطعه
نزدیک به جریان آستانه و دمای محیط $20^{\circ}C$ 124
شکل (5- 17) توزیع دو بعدی تراکم الکترون ها در ناحیه فعال (چاه های کوانتومی) بر حسب ابعاد قطعه
در جریان 6 میلی آمپر و دمای محیط $20^{\circ}C$ 125

عنوان..... صفحه

شکل (5- 18) توزیع سه بعدی تراکم الکترون ها در ناحیه فعال (چاه های کوانتومی) بر حسب
ابعاد قطعه در جریان 6 میلی آمپر و دمای محیط $20\ ^{\circ}C$ 126
شکل (5- 19) اندازه چگالی جریان کلی عبوری از ناحیه فعال (چاه های کوانتومی) بر حسب
ابعاد قطعه در جریان 6 میلی آمپر و دمای محیط $20\ ^{\circ}C$ 127
شکل (5-20) توزیع سه بعدی تراکم الکترون ها در ناحیه فعال (چاه های کوانتومی) بر حسب
ابعاد قطعه در جریان 6 میلی آمپر و دمای محیط $60\ ^{\circ}C$ 127
شکل (5-21) جریان عبوری کلی از قطعه بر حسب ارتفاع و شعاع آن
(پیکان های موجود در شکل نشان دهنده چگونگی عبور جریان تزریقی در قطعه هستند) 128
شکل (5-22) تغییر چگالی حفره ها بر حسب ارتفاع قطعه نزدیک به محور لیزر (قسمت های مرکزی) 128
شکل (5-23) توزیع دو بعدی تراکم حفره ها در ناحیه فعال (چاه های کوانتومی) بر حسب
ابعاد قطعه نزدیک به جریان آستانه و دمای محیط $20\ ^{\circ}C$ 129
شکل (5-24) توزیع سه بعدی تراکم حفره ها در ناحیه فعال (چاه های کوانتومی) بر حسب
ابعاد قطعه نزدیک به جریان آستانه و دمای محیط $20\ ^{\circ}C$ 129
شکل (5-25) چگالی دو بعدی حفره ها در ناحیه فعال (چاه های کوانتومی) بر حسب
ابعاد قطعه در جریان 6 میلی آمپر و دمای محیط $20\ ^{\circ}C$ 130
شکل (5-26)چگالی سه بعدی حفره ها در ناحیه فعال (چاه های کوانتومی) بر حسب
ابعاد قطعه در جریان 6 میلی آمپر و دمای محیط $20\ ^{\circ}C$ 131
شکل (5-27) تراکم و چگالی جریان حفره ها بر حسب شعاع قطعه در آخرین چاه کوانتومی 131
شکل (5-28) چگالی سه بعدی حفره ها در ناحیه فعال (چاه های کوانتومی) بر حسب
ابعاد قطعه در جریان 6 میلی آمپر و دمای محیط $60\ ^{\circ}C$ 132
شکل(5-29) آهنگ گسیل القایی در چاه های کوانتومی بر حسب
ابعاد قطعه نزدیک به آستانه و دمای $20\ ^{\circ}C$ 133
شکل (5-30) آهنگ گسیل القایی در ناحیه فعال (چاه های کوانتومی) بر حسب
ابعاد قطعه نزدیک در جریان 6 میلی آمپر و دمای محیط $20\ ^{\circ}C$ 133

عنوان.....صفحه

شکل (5-31) آهنگ گسیل القایی در ناحیه فعال (چاه های کوانتومی) بر حسب
ابعاد قطعه نزدیک به آستانه و دمای محیط $60\ ^{\circ}C$.....134
شکل (5-32) آهنگ گسیل القایی در ناحیه فعال (چاه های کوانتومی) بر حسب
ابعاد قطعه در جریان 6 میلی آمپر و دمای محیط $60\ ^{\circ}C$ 135
شکل (5-33) بهره مدی در ناحیه فعال (چاه های کوانتومی) بر حسب
ابعاد قطعه در جریان آستانه و دمای محیط $20\ ^{\circ}C$.....135
شکل (5-34) بهره مدی در ناحیه فعال (چاه های کوانتومی) بر حسب ابعاد
قطعه در جریان 6 میلی آمپر و دمای محیط $20\ ^{\circ}C$ 136
شکل (5-35) بهره مدی در ناحیه فعال (چاه های کوانتومی) بر حسب
ابعاد قطعه در جریان 6 میلی آمپر و دمای محیط $60\ ^{\circ}C$.....137
شکل(5-36) آهنگ باز ترکیب اوژه در ناحیه فعال (چاه های کوانتومی) بر حسب
ابعاد قطعه در جریان آستانه و دمای محیط $20\ ^{\circ}C$.....137
شکل(5-37) آهنگ باز ترکیب اوژه در ناحیه فعال (چاه های کوانتومی) بر حسب
ابعاد قطعه در جریان 6 میلی آمپر و دمای محیط $20\ ^{\circ}C$.....138
شکل (5-38) آهنگ بازترکیب اوژه در ناحیه فعال (چاه های کوانتومی) بر حسب ابعاد قطعه
در جریان 6 میلی آمپر و دمای محیط $60\ ^{\circ}C$.....139
شکل (5-39) آهنگ بازترکیب خودبخودی در ناحیه فعال (چاه های کوانتومی) بر حسب
ابعاد قطعه در جریان آستانه و دمای محیط $20\ ^{\circ}C$.....139
شکل (5-40) آهنگ باز ترکیب خودبخودی در ناحیه فعال (چاه های کوانتومی) بر حسب
ابعاد قطعه در جریان 6 میلی آمپر و دمای محیط $20\ ^{\circ}C$.....140
شکل (5-41) آهنگ باز ترکیب خودبخودی در ناحیه فعال (چاه های کوانتومی) بر حسب ابعاد
قطعه در جریان 6 میلی آمپر و در دمای محیط $60\ ^{\circ}C$.....141
شکل (5-42) آهنگ باز ترکیب ناشی از ناخالصی ها در ناحیه فعال (چاه های کوانتومی) بر حسب ا
بعاد قطعه در جریان آستانه و دمای محیط $20\ ^{\circ}C$.....141
شکل (5-43) آهنگ باز ترکیب ناشی از ناخالصی ها در ناحیه فعال (چاه های کوانتومی) بر حسب
ابعاد قطعه در جریان 6 میلی آمپر و در دمای محیط $60\ ^{\circ}C$.....141

عنوان.....صفحه

شکل(5-44) آهنگ باز ترکیب ناشی از ناخالصی ها در ناحیه فعال (چاه های کوانتومی) برحسب
ابعاد قطعه در جریان 6 میلی آمپر و در دمای محیط $60^{\circ}C$.....143
شکل (5-45) توزیع دمای قطعه بر حسب ابعاد آن در دمای محیط $20^{\circ}C$.....143
شکل (5-46) توزیع دمای قطعه بر حسب ابعاد آن در دمای محیط $60^{\circ}C$.....144
شکل(5-47) توان گرمایی بر حسب ارتفاع قطعه در بیشینه توان (جریان 6 میلی آمپر)..... 145
شکل (5-48) گرمای ژول بر حسب ابعاد قطعه در جریان آستانه (1/7 میلی آمپر).....145
شکل (5-49) گرمای ژول بر حسب ابعاد قطعه در توان بیشینه (جریان 6 میلی آمپر) 145
شکل (5-50) گرمای بازترکیب در چاه های کوانتومی بر حسب ابعاد
قطعه در جریان آستانه (1/7 میلی آمپر).....146
شکل (5-51) گرمای بازترکیب در چاه های کوانتومی بر حسب
ابعاد قطعه در توان بیشینه (جریان 6 میلی آمپر)146
شکل (5-52) گرمای جذب اپتیکی در چاه های کوانتومی بر حسب
ابعاد قطعه در جریان آستانه (1/7 میلی آمپر)..... 147
شکل (5-53) گرمای جذب اپتیکی در چاه های کوانتومی بر حسب ابعاد
قطعه در توان بیشینه (جریان 6 میلی آمپر)..... 147
شکل (5-54) گرمای تابشی در چاه های کوانتومی بر حسب
ابعاد قطعه در جریان آستانه (1/7 میلی آمپر).....148
شکل (5-55) گرمای تابشی در چاه های کوانتومی بر حسب
ابعاد قطعه در توان بیشینه (جریان 6 میلی آمپر).....148
شکل (5-56) گرمای تامسون در چاه های کوانتومی بر حسب ابعاد
قطعه در جریان آستانه (1/7 میلی آمپر) 149
شکل (5-57) گرمای تامسون در چاه های کوانتومی بر حسب ابعاد
قطعه در توان بیشینه (جریان 6 میلی آمپر).....149
شکل(5-58) گرمای پلتیه بر حسب ابعاد قطعه در جریان آستانه (1/7 میلی آمپر)..... 150
شکل(5-59) گرمای پلتیه بر حسب ابعاد قطعه در توان بیشینه (جریان 6میلی آمپر).....150

عنوان.....صفحه

شکل (5-60) طیف بهره ناحیه فعال در دمای محیط $20^{\circ}C$ با تراکم
حامل های مختلف (تغییرات تراکم برای هر نمودار از پایین به بالا % 0.66 است).....151
شکل (5-61) طیف بهره ناحیه فعال در دمای محیط $60^{\circ}C$ با تراکم
حامل های مختلف (تغییرات تراکم از پایین به بالا % 0.66 است).....151
شکل (5-62) پیک بهره ناحیه فعال بر حسب چگالی حامل در دما های محیط مختلف.....152
شکل (5-63) پیک بهره ناحیه فعال بر حسب چگالی جریان در دما های محیط مختلف.....152
شکل (5-64) زیر نوار های انرژی ظرفیت چاه های کوانتومی 153
شکل (5-65) شدت موج اپتیکی بهنجار شده در دو بعد.....153
شکل (5-66) شدت موج اپتیکی بهنجار شده در سه بعد.....154
شکل(5-67) تزریق و نشت حامل ها.....154
شکل (5-68) شکل (5-68) چگالی جریان قائم الکترون ها و حفره ها بر حسب
ارتفاع قطعه در دمای محیط $20^{\circ}C$.....155
شکل (5-69) چگالی الکترون ها در ناحیه فعال (چا های کوانتومی) در جریان آستانه (خط پر)
و جریان 6 میلی آمپر (خط چین) 156
شکل (5-70) چگالی جریان قائم الکترون ها در جریان آستانه و6 میلی آمپر در
دماهای محیط $20^{\circ}C$(خط چین) و $60^{\circ}C$ (خط توپر).....156
شکل (5-71) ساختار نواری با لایه متوقف کننده (AlInAs).....157
شکل (5-72) نمودار های توان- جریان شبیه سازی شده برای ضخامت های
مختلف لایه متوقف کننده.....158
شکل (5-73) چگالی الکترون ها در ناحیه فعال (چاه های کوانتومی) برای ضخامت های
مختلف لایه متوقف کننده.....158
شکل (5-74) آهنگ گسیل القایی در ناحیه فعال (چاه های کوانتومی) برای ضخامت های
مختلف لایه متوقف کننده.....159
شکل (5-75) آهنگ باز ترکیب اوژه در ناحیه فعال (چاه های کوانتومی) برای ضخامت های
مختلف لایه متوقف کننده.....159
شکل (5-76) نمودارهای توان- جریان شبیه سازی شده برای افست های مختلف لایه متوقف کننده.....160

شکل (5-77) چگالی الکترون ها در ناحیه فعال (چاه های کوانتومی) برای افست های
مختلف لایه متوقف کننده 169
عنوان.....**صفحه**
شکل (5-78) آهنگ گسیل القایی در ناحیه فعال (چاه های کوانتومی) برای
افست های مختلف لایه متوقف کننده..... 160
شکل (5-79) آهنگ باز ترکیب اوژه در ناحیه فعال (چاه های کوانتومی) برای
ص
افست های مختلف لایه متوقف کننده..... 161
شکل (5-80) نمودارهای توان- جریان برای آلایش های(10^{17} cm^{-3}×) مختلف لایه متوقف کننده 161
شکل(5-81) نمودارهای توان- جریان برای افزایش آلایش (10^{18} cm^{-3}×) لایه تماس 162
شکل (5-82) نمودارهای توان- جریان شبیه سازی شده با آلایشهای (10^{19} cm^{-3}×) مختلف
نوع n پیوندگاه تونلی..... 163
شکل(5-83) نمودارهای توان- جریان شبیه سازی شده با آلایشهای (10^{20} cm^{-3}×) مختلف
نوع p پیوندگاه تونلی..... 163
شکل(5-84) نمودار توان جریان با تمام بهینه سازیهای مطرح شده (نقطه چین نتیجه شبیه سازی) 163
شکل (5-85) چگالی الکترونها در ناحیه فعال (چاه های کوانتومی) برای ساختار بهینه شده
(نقطه چین) و ساختار ابتدایی (خط پر) 164
شکل (5-86) آهنگ بازترکیب القایی در ناحیه فعال (چاه های کوانتومی) برای ساختار بهینه شده
(نقطه چین) و ساختار ابتدایی (خط پر)..... 164
شکل (5-87) آهنگ بازترکیب اوژه در ناحیه فعال (چاه های کوانتومی) برای ساختار بهینه شده (نقطه چین)
و ساختار ابتدایی (خط پر)..... 164
شکل (5-88) چگالی جریان قائم الکترونی در ساختاری با GRIN– SCH خطی
(خط چین) وSCH (خط تو پر)..... 165
شکل (5-89) نمودارهای توان- جریان با GRIN– SCH خطی (خط تو پر) و با SCH (خط چین)..... 166
شکل (5-90) چگالی الکترون ها در ناحیه فعال (چاه های کوانتومی) در ساختارهایی
با GRIN– SCH خطی(خط توپر) و SCH (خط چین)..... 166
شکل (5-91) آهنگ باز ترکیب القایی ناحیه فعال (چاه های کوانتومی) ساختارهایی
با GRIN– SCH خطی (خط چین) و SCH (خط توپر)..... 166