

به نام خداوند بسیار بخشنده و مهربان



شماره پایان نامه: ۹۲۴۰۲۰۱۸۳

دانشگاه شهید چمران اهواز

دانشکده مهندسی

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق

گرایش الکترونیک

عنوان :

تحلیل و شبیه‌سازی لیزر نیمه‌هادی بر اساس معادله‌های آهنگ الکترون-فوتون

استاد راهنما:

دکتر محمد سروش

اساتید مشاور:

دکتر محمد صبائیان

دکتر هومان کعبی

نگارنده :

افشین محمودیه چم پیری

مهرماه سال ۱۳۹۲

باسمه تعالی

دانشگاه شهید چمران اهواز

دانشکده مهندسی

(نتیجه ارزشیابی پایان نامه ارشد)

پایان نامه آقای افشین محمودیه چم پیری دانشجوی رشته مهندسی برق گرایش الکترونیک

دانشکده مهندسی

به شماره دانشجویی ۸۹۴۲۰۲۹

با عنوان :

تحلیل و شبیه‌سازی لیزر نیمه‌هادی بر اساس معادلات آهنگ حامل و فوتون

جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد در تاریخ ۱۳۹۲/۰۷/۳۰ توسط هیأت داوران مورد ارزشیابی قرار گرفت و با درجه بسیار خوب تصویب گردید.

امضاء	رتبه علمی	۱- اعضای هیأت داوران :	
.....	استادیار	دکتر محمد سروش	استاد راهنما
.....	استادیار	دکتر محمد صبائیان	استاد مشاور
.....	استادیار	دکتر هومان کعبی	استاد مشاور
.....	دانشیار	دکتر عبدالنبی کوثریان	استاد داور
.....	استادیار	دکتر یوسف صیفی کاویان	استاد داور
.....	دانشیار	دکتر علیرضا عصاره	نماینده تحصیلات تکمیلی
.....	استادیار	دکتر محمد سروش	۲- مدیر گروه
.....	استادیار	دکتر علی حقیقی	۳- معاون پژوهشی و تحصیلات تکمیلی دانشکده
.....	استاد	دکتر مسعود قربانپور نجف‌آبادی	۴- مدیر تحصیلات تکمیلی دانشگاه

تقدیم بہ

مادر مہربان و پدر بزرگوارم،

کہ با مہربانی پایان و لطف بی دریغ شان

ہموارہ مرار احیاءت کردہ اند۔

عنوان پایان نامه :		
تحلیل و شبیه‌سازی لیزر نیمه‌هادی بر اساس معادلات آهنگ حامل و فوتون		
استاد راهنما : دکتر محمد سروش		
اساتید مشاور:		
دکتر محمد صبائیان		
دکتر هومان کعبی		
گرایش : الکترونیک	رشته : مهندسی برق	درجه تحصیلی : کارشناسی ارشد
گروه : برق و الکترونیک	دانشکده : مهندسی	دانشگاه : شهید چمران اهواز
تاریخ فارغ التحصیلی : ۱۳۹۲/۰۷/۳۰		
تعداد صفحه : ۷۵		
کلید واژه ها : لیزر نیم‌رسانا، ساختار فرایپوند، InGaAsP-InP، شبیه‌سازی عدد، معادله‌های آهنگ، معادله‌های موج‌روند		
چکیده		
<p>در این پژوهش یک مدل حالت ماندگار به منظور توصیف تعامل الکترون-فوتون در لیزر نیم‌رسانا با ساختار فرایپوند InGaAsP-InP ارائه شده است. این مدل مبتنی بر معادله‌های آهنگ الکترون-فوتون است. نتایج با استفاده از یک الگوریتم تکرار عددی بر اساس روش تفاضل محدود محاسبه شده است. توان نور خروجی لیزر، بهره ماده، میدان‌های تابش خودبخودی و تحریکی و غلظت حامل‌های الکتریکی بر حسب ضخامت افزاره، طول کاواک، جریان بایاس و دمای محاسبه شد.</p>		

فهرست مطالب

۱	چکیده
	فصل اول: مقدمه و طرح مساله
۲	۱-۱ مقدمه
۲	۲-۱ اهمیت موضوع و ضرورت تحقیق
۴	۳-۱ اهداف و روش تحقیق
۴	۴-۱ ساختار پایان نامه
	فصل دوم: لیزر نیمرسانا
۵	۱-۲ مقدمه
۵	۲-۲ سازوکارها
۵	۱-۲-۲ تولید زوج الکترون-حفره بر اثر گرما
۶	۲-۲-۲ جذب فوتون
۷	۳-۲-۲ باز ترکیب حاملها
۷	۴-۲-۲ باز ترکیب نوری خودبخودی
۷	۵-۲-۲ باز ترکیب نوری تحریکی
۸	۶-۲-۲ باز ترکیب غیرنوری
۹	۷-۲-۲ وارونگی جمعیت
۱۰	۸-۲-۲ بهره ماده
۱۳	۳-۲ مبانی لیزر
۱۳	۱-۳-۲ نوسانگر فابری-پرو
۱۳	۲-۳-۲ بهره و جذب
۱۴	۳-۳-۲ تلفات کاواک
۱۴	۴-۳-۲ ضرایب راندمان
۱۵	۵-۳-۲ معادله‌های آهنگ تغییر الکترون-فوتون
۱۵	۶-۳-۲ آستانه
۱۵	۷-۳-۲ توان
۱۶	۸-۳-۲ توزیع طیفی
۱۷	۹-۳-۲ ساختار
۱۷	۱-۹-۳-۲ ساختار همپیوند
۱۸	۲-۹-۳-۲ ساختار فراپیوند
۲۰	۳-۹-۳-۲ ساختار چاه کوانتومی
۲۰	۴-۹-۳-۲ انتخاب ماده
۲۳	۴-۲ مروری بر پژوهش‌های پیشین
	فصل سوم: مدل‌سازی عددی
۲۵	۱-۳ مقدمه

۲۶	۲-۳ بهره ماده
۲۸	۳-۳ مدل مبتنی بر پایه معادله‌های آهنگ الکترون- فوتون
۲۸	۱-۳-۳ بهره و جذب
۲۸	۲-۳-۳ تلفات کاواک
۲۹	۳-۳-۳ ضرایب راندمان
۳۰	۴-۳-۳ معادله‌های آهنگ الکترون- فوتون
۳۰	۵-۳-۳ شرایط آستانه
۳۱	۶-۳-۳ توان نور لیزر
۳۱	۷-۳-۳ توزیع طیفی
۳۲	۴-۳ مدل مبتنی بر پایه معادله‌های موج‌رونده
۳۲	۱-۴-۳ معادله‌های مختلط موج‌رونده
۳۳	۲-۴-۳ شبیه‌سازی رفتار تابش خودبخودی
۳۴	۳-۴-۳ شبیه‌سازی رفتار تابش تحریکی
۳۶	۴-۴-۳ معادله آهنگ الکترون- فوتون
۳۷	۵-۴-۳ گسسته‌سازی مکانی
۳۹	۶-۴-۳ الگوریتم کلی
	فصل چهارم: نتایج شبیه سازی
۴۲	۱-۴ مقدمه
۴۲	۲-۴ ساختار افزاره
۴۴	۳-۴ محاسبه بهره ماده
۴۷	۴-۴ شبیه سازی معادله‌های آهنگ الکترون- فوتون
۵۱	۵-۴ شبیه سازی معادله‌های موج‌رونده
	فصل پنجم:
۵۸	۱-۵ نتیجه‌گیری
۵۹	۲-۵ پیشنهادها
۶۰	مقالات
۶۱	منابع

فهرست شکل‌ها

		فصل دوم
۵	انتقال الکترون از نوار ظرفیت به نوار رسانش و تولید زوج الکترون-حفره	شکل ۱-۲
۶	نمودار انرژی بر حسب اندازه حرکت به ازای الف) نیم‌رسانا با باند غیر مستقیم. ب) نیم‌رسانا با باند مستقیم	شکل ۲-۲
۶	انتقال الکترون از نوار ظرفیت به نوار رسانش و تولید زوج الکترون-حفره در اثر جذب فوتون	شکل ۳-۲
۷	گذار خودبخودی الکترون از نوار رسانش به نوار ظرفیت و تولید فوتون	شکل ۴-۲
۸	گذار تحریکی الکترون از نوار رسانش به نوار ظرفیت و تولید فوتون	شکل ۵-۲
۸	باز ترکیب غیرنوری شاکلی-رید-هال.	شکل ۶-۲
۸	گذار تحریکی الکترون از نوار رسانش به نوار ظرفیت و تولید فوتون.	شکل ۷-۲
۹	تراز انرژی در نیم‌رسانا الف) در حالت تعادل حرارتی ب) در حالت وارونگی جمعیت.	شکل ۸-۲
۱۰	بیشینه بهره ماده در نیم‌رسانا بر حسب چگالی حامل.	شکل ۹-۲
۱۲	بهره ماده در نیم‌رسانا بر حسب انرژی فوتون برای چگالی حامل‌های مختلف. جاهایی نمودار اندازه کمتر از صفر دارد، جذب (تلفات) و نواحی مثبت نمایانگر بهره هستند.	شکل ۱۰-۲
۱۲	بهره ماده نیم‌رسانا بر حسب انرژی فوتون برای دماهای مختلف	شکل ۱۱-۲
۱۳	مدل ساده کاواک فابری-پرو.	شکل ۱۲-۲
۱۷	فاصله مودهای کاواک لیزر و انطباق نمودار بهره با مودهای محتمل در کاواک.	شکل ۱۳-۲
۱۸	ساختار لیزر نیم‌رسانای تابش از لبه.	شکل ۱۴-۲
۱۸	تراز انرژی در اتصال p-n الف) در حالت تعادل بدون بایاس ب) به ازای بایاس مستقیم.	شکل ۱۵-۲
۱۹	گسترش مکانی نور لیزر در راستای عمود بر صفحه پیوند؛ الف) ساختار همپیوند؛ ب) ساختار فرایپیوند.	شکل ۱۶-۲
۱۹	نمایی از دیود لیزری فرایپیوند؛ الف) دیود در حالت تعادل حرارتی بدون اعمال بایاس؛ ب) دیود به‌ازای بایاس مستقیم	شکل ۱۷-۲
۲۰	جریان آستانه بر حسب ضخامت ناحیه فعال برای ساختارهای همپیوند و فرایپیوند.	شکل ۱۸-۲
۲۰	نمای برش عمودی لیزر چاه کوانتومی تابش از لبه.	شکل ۱۹-۲
۲۱	تغییر طیف نور تولید شده توسط ترکیب‌های نیم‌رسانا.	شکل ۲۰-۲
۲۱	تلفات فیبر نوری مبتنی بر سیلیکن بر حسب طول موج	شکل ۲۱-۲
		فصل سوم
۳۷	چگونگی تقسیم بندی طول افزاره به اجزای کوچکتر.	شکل ۱-۳

۳۸	موقعیت متغییرهای اصلی در ناحیه k ام.	شکل ۲-۳
۴۰	الگوریتم حل مدل لیزر نیم‌رسانا مبتنی بر معادله‌های موج رونده.	شکل ۳-۳
فصل چهارم		
۴۳	ساختار لیزر نیم‌رسانا ناهمگن با ناحیه فعال InGaAsP.	شکل ۱-۴
۴۴	مقایسه اندازه بهره نیم‌رسانا بر حسب طول موج در توده نیم‌رسانای InGaAsP برای (الف) نتایج شبیه‌سازی به ازای $n = 1/2 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$ و $T = 300^\circ \text{K}$ ؛ (ب) نتایج بدست آمده در شرایط مشابه [۱۳]	شکل ۲-۴
۴۵	اندازه بهره InGaAsP به ازای $n = 1/2 \times 10^{24}$ ، $1/5 \times 10^{24}$ ، $2 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$ در دمای $T = 300^\circ \text{K}$	شکل ۳-۴
۴۶	بهره ماده نیم‌رسانا بر حسب انرژی فوتون برای دماهای مختلف.	شکل ۴-۴
۴۶	بهره ماده بر حسب بسامد به ازای $n = 1.25 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$ (خط پر) و $n = 0.788 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$ (خط چین).	شکل ۵-۴
۴۷	توان نوری خروجی بر حسب جریان بایاس با استفاده از مدل معادله‌های آهنگ الکترون-فوتون فصل ۲-۳ (خط پر) و منبع [۹] (نقطه چین).	شکل ۶-۴
۴۸	راندمان کل بر حسب جریان بایاس با استفاده از مدل معادله‌های آهنگ الکترون-فوتون (خط پر) و منبع [۹] (نقطه چین).	شکل ۷-۴
۴۹	الف) توان نوری خروجی بر حسب جریان بایاس و ب) راندمان کل بر حسب جریان بایاس به ازای ضخامت‌های مختلف ناحیه فعال.	شکل ۸-۴
۵۰	الف) توان نوری خروجی بر حسب جریان بایاس و ب) راندمان کل بر حسب جریان بایاس به ازای طول‌های مختلف کاواک.	شکل ۹-۴
۵۱	مجموع توان نوری خروجی با روش موج‌رونده (خط چین) و با روش معادله‌های آهنگ الکترون-فوتون (نقطه چین).	شکل ۱۰-۴
۵۲	توان نور خروجی بر حسب طول کاواک.	شکل ۱۱-۴
۵۲	توان نور خروجی بر حسب ضخامت ناحیه فعال.	شکل ۱۲-۴
۵۳	توزیع طیفی نور خروجی بر حسب طول موج در جریان زیر آستانه.	شکل ۱۳-۴
۵۴	اندازه میدان‌های نوری خودبخودی (الف) و تحریکی (ب) موج رفت و بازگشت بر حسب طول افزاره در جریان زیر آستانه.	شکل ۱۴-۴
۵۵	اندازه میدان‌های نوری خودبخودی (الف) و تحریکی (ب) موج رفت و بازگشت بر حسب طول افزاره را در جریان بیشتر از آستانه نشان می‌دهد.	شکل ۱۵-۴
۵۶	تغییر توزیع طیف نور خروجی بر حسب طول موج را به ازای دمای الف) $T = 400 \text{ K}$ ، ب) $T = 300 \text{ K}$ و ج) $T = 77 \text{ K}$.	شکل ۱۶-۴

فهرست جدول‌ها

۴۳

پارامترهای شبیه‌سازی برای *InGaAsP*.

جدول ۱-۴

چکیده

در این پژوهش یک مدل حالت ماندگار به منظور توصیف تعامل الکترون-فوتون در لیزر نیم-رسانا با ساختار فرایپوند InGaAsP-InP ارائه شده است. این مدل مبتنی بر معادله‌های آهنگ الکترون-فوتون است. نتایج با استفاده از یک الگوریتم تکرار عددی بر اساس روش تفاضل محدود محاسبه شده است. توان نور خروجی لیزر، بهره ماده، میدان‌های تابش خودبخودی و تحریکی و غلظت حامل‌های الکتریکی بر حسب ضخامت افزاره، طول کاواک، جریان بیاس و دمای محاسبه شد.

فصل اول

مقدمه

۱-۱ مقدمه

وقتی برای نخستین بار در سال ۱۹۶۰ دانشمندان موفق به تولید نور لیزر^۱ شدند، هیچ ایده‌ای برای کاربردهای احتمالی آن نداشتند اما به دلیل ویژگی‌های استثنایی آن به خوبی می‌دانستند که این دستاورد به زودی در تمام شاخه‌های علوم و فناوری کاربرد پیدا خواهد کرد [۱].

طولی نکشید که لیزرهای مختلف برای کاربردهای متفاوت به وجود آمدند. با مطرح شدن امکان تولید تابش تحریکی در ۱۹۶۱ با استفاده از نیم‌رسانای GaAs لیزر نیم‌رسانا^۲ متولد شد [۲-۴]. رشد فناوری لیزر با پیدایش لیزر نیم‌رسانا به سرعت فزونی یافت. با پیشرفت فناوری تولید افزاره‌های نیم‌رسانا امکان ساخت لیزر با کیفیت بیشتر، راندمان بیشتر و قیمت کمتر بدست آمد [۵].

امروزه از لیزرهای نیم‌رسانا در خواندن و نوشتن داده بر روی دیسک‌های نوری فشرده مانند CD و DVD، ارسال داده با سرعت و پهنای باند زیاد در مخابرات فیبر نوری، چاپگرها، اسکنرهای سه بعدی، نمونه‌سازی سریع، اندازه‌گیری دقیق فاصله، حسگرهای صنعتی، تجهیزات تشخیص و درمان در پزشکی و دندانپزشکی و حتی وسایل بازی و سرگرمی نیز استفاده می‌شود. به این ترتیب لیزرهای نیم‌رسانا به بخش جدانشدنی زندگی انسان تبدیل شده‌اند به نحوی که اکنون یکی از پر فروش‌ترین افزاره‌های الکترونیکی به‌شمار می‌روند [۶]. به همین دلیل از نخستین روزهای کشف لیزر تا کنون مطالعه رفتار ساختارهای گوناگون و امکان استفاده از مواد مختلف به منظور رفع نیازهای موجود و بهینه‌سازی آن، همواره مورد توجه پژوهشگران بسیاری قرار داشته است. به این ترتیب پژوهش حاضر نیز در این راستا تعریف و انجام شده است.

۲-۱ اهمیت موضوع و ضرورت تحقیق

لیزر در واژه به معنای " تقویت نور از طریق گیسل اجباری تابش^۳ " است. لیزر از نظر ماهیت تفاوتی با نور عادی ندارد و تنها خواص فیزیکی، آن را از نورهای ایجاد شده توسط دیگر منابع

^۱ LASER

^۲ Semiconductor LASER

^۳ Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

متمایز می‌سازد. از جمله ویژگیهای لیزر می‌توان به انرژی، فاز، راستای انتشار و قطبیدگی^۱ یکسان بسته‌های فوتون خروجی اشاره کرد.

از نخستین روزهای بهره‌گیری از فناوری لیزر، به خواص ویژه آن پی برده شد. این خواص بستری عظیم برای کاربردهای وسیع این پدیده در علوم گوناگون به ویژه صنعت و پزشکی ایجاد کرده است. اندازه‌گیری‌های بسیار دقیق، ذخیره و بازپایی اطلاعات، مخابرات فیبر نوری و ... همگی از جمله کاربردهای ویژه لیزر هستند. در این میان لیزرهای نیم‌رسانا با داشتن خصوصیات زیر جایگاه ویژه‌ای را طی چند دهه اخیر بدست آورده اند [۱]:

- اندازه‌های بسیار کوچک (چند صد نانو متر)
- راندمان زیاد در مقایسه با لیزرهای دیگر (بیش از ۵۰ درصد)
- جریان مصرفی اندک (در حدود چند میلی آمپر)
- ولتاژ راه اندازی کم (در حدود چند ولت)

از جمله کاربردهای پر اهمیت لیزر استفاده از آن در عرصه مخابرات نوری است. لیزرهای نیم-رسانا علاوه بر داشتن مزایای گفته‌شده، دارای ویژگی‌های مطلوبی برای استفاده در بخش فرستنده در مخابرات فیبر نوری نیز می‌باشد. از جمله این خصوصیات می‌توان به موارد زیر می‌توان اشاره کرد [۷]:

- قابلیت مدولاسیون مستقیم از طریق تغییر مستقیم جریان راه اندازی
- راه اندازی و مدولاسیون با استفاده از مدارهای ترانزیستوری موجود
- آهنگ بالای انتقال داده‌ها (در حدود چند ده گیگاهرتز)
- امکان استفاده در مدارهای مجتمع نوری

پیشرفت‌های اخیر در فن‌آوری ساخت افزاره‌های نیم‌رسانا علاوه بر امکان تولید ساختارهای متنوع و بهینه برای استفاده در زمینه‌های گوناگون، تولید انبوه و کاهش هزینه تولید را به عنوان عوامل مهم در رشد این گونه از افزاره‌ها به همراه داشته است. پیشرفت فناوری و بهبود کیفیت نیم‌رساناها از یک سو و گسترش روز افزون کاربردهای خاص و عمومی این گونه از افزاره‌های نوری از سوی دیگر، اهمیت مطالعه و دستیابی به دانش فنی تولید افزاره‌ها لیزری را توجیه می‌کند.

از آنجایی که طراحی افزاره‌های نیم‌رسانا با آزمون و خطا توجیه‌پذیر نیست، بنابراین طراحان نیازمند ابزاری برای پیش‌بینی رفتار افزاره بر اساس متغیرهای طراحی پیش از ساخت هستند. یکی از ابزارهای کلیدی در امر طراحی و بهینه سازی افزاره‌های الکترونیکی، مدلسازی ریاضی رفتار

¹ Polarization

افزاره مورد نظر به ازای تغییر پارامترهای آن با استفاده از رایانه است. به این ترتیب نخستین گام در طراحی لیزر نیم‌رسانا دستیابی به ابزار شبیه‌سازی برای پیش‌بینی رفتار افزاره مورد نظر است.

۱-۳ اهداف و روش تحقیق

پژوهش حاضر به مطالعه و شبیه‌سازی رفتار لیزر نیم‌رسانا بر اساس معادله‌های آهنگ حامل و فوتون^۱ می‌پردازد. برای این منظور رفتار متقابل نور و غلظت حامل‌های الکتریکی^۲ در لیزرهای نیم‌رسانا مورد مطالعه قرار می‌گیرد؛ سپس مدل مناسبی برای توصیف رفتار لیزر انتخاب و بهینه‌سازی می‌شود. در ادامه با استفاده از روش‌های حل عددی رفتار افزاره مورد نظر شبیه‌سازی می‌شود. نتیجه این شبیه‌سازی شامل متغیرهای مهم در لیزر نیم‌رسانا است.

به این ترتیب با استفاده از این شبیه‌سازی می‌توان مواردی از قبیل جریان آستانه، طیف نور خروجی و راندمان را با در اختیار داشتن ویژگی‌های افزاره مورد نظر مانند ترکیب مواد سازنده و ابعاد به دست آورد. از این نتایج در طراحی و بهینه‌سازی منابع نور لیزر می‌توان استفاده کرد. نخست به بررسی مبانی تولید لیزر پرداخته می‌شود. پس از بررسی کیفی فرآیندهای تولید نور فرمول‌بندی مناسب برای هر کدام تبیین می‌شود. سپس روابط توصیف‌کننده فرآیندهای پیچیده‌تر در قالب معادله‌های آهنگ بیان خواهد شد.

در این پژوهش یک مدل مبتنی بر معادله‌های آهنگ الکترون-فوتون در لیزر نیم‌رسانا ارائه می‌شود. سپس مدل تکمیل یافته‌ای بر اساس رابطه‌های مختلط موج رونده پیشنهاد گردیده است. همچنین یک روندنمای عددی برای حل عددی مدل دوم در حالت پایدار^۳ مطرح می‌شود.

۱-۴ ساختار پایان نامه

ساختار پژوهش حاضر شامل پنج فصل است. فصل اول به تبیین اهمیت موضوع می‌پردازد. سپس اهداف و روش تحقیق پژوهش را ارائه می‌کند. در فصل دوم سازوکارهای فیزیکی مهم در ارتباط با کارکرد لیزر نیم‌رسانا بیان می‌شود سپس به مبانی اساسی در لیزر پرداخته می‌شود. در ادامه مروری مختصری بر پژوهش‌های پیشین ارائه می‌شود.

فصل سوم به مدلسازی رفتار لیزر نیم‌رسانا اختصاص یافته که دو مدل بر پایه رابطه‌های آهنگ الکترون-فوتون و رابطه‌های مختلط موج رونده ارائه شده است. فصل چهارم ضمن معرفی ساختار افزاره آزمون و بیان پارامترهای آن، نتایج شبیه‌سازی هر دو مدل را دربر خواهد داشت. در فصل پنجم به جمع‌بندی و نتیجه‌گیری پژوهش حاضر پرداخته می‌شود.

¹ Carrier-Photon Rate Equations

² Carrier Density

³ Steady State

فصل دوم

لیزر نیم‌رسانا

۱-۲ مقدمه

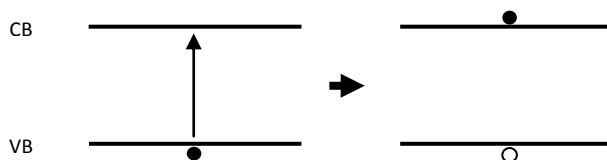
در این فصل به معرفی سازوکارهای^۱ فیزیکی حاکم در لیزر نیم‌رسانا پرداخته می‌شود. سپس خلاصه‌ای از مبانی لیزر به همراه مختصری از رابطه‌های حاکم در آن ارائه می‌شود. در ادامه به تشریح چند ساختار فیزیکی مهم و نحوه انتخاب نوع ماده پرداخته می‌شود. در پایان فصل مروری بر پژوهش‌های پیشین در مورد موضوع مورد بحث ارائه شده است.

۲-۲ سازوکارها

در این قسمت به معرفی سازوکارهای موثر در نور لیزر به طور خلاصه پرداخته می‌شود. در هر قسمت سعی شده علاوه بر بیان رابطه‌های حاکم بر فیزیک لیزر، از شماتیک‌ها و نمودارهای مختلف نیز برای بیان مطلب استفاده شود.

۱-۲-۲ تولید زوج الکترون-حفره بر اثر گرما^۲

انتقال الکترون از نوار ظرفیت^۳ به نوار رسانش^۴ باعث تولید یک زوج الکترون-حفره در ماده نیم‌رسانا می‌شود. این فرآیند ممکن است در اثر انرژی حرارتی شبکه به وجود آید. گرمای شبکه باعث شکسته شدن پیوندهای کوالانسی می‌شود و الکترون‌ها از نوار ظرفیت به نوار رسانش منتقل



شکل ۱-۲: انتقال الکترون از نوار ظرفیت به نوار رسانش و تولید زوج الکترون-حفره.

¹ Mechanisms

² Thermal Electron-Hole Generation

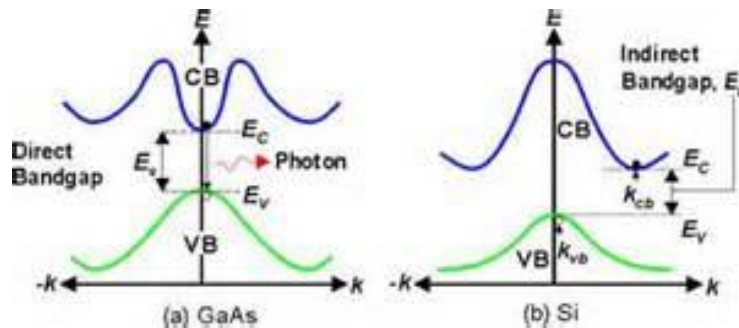
³ Valence Band

⁴ Conduction Band

می‌شوند. در حالت تعادل گرمایی آهنگ تولید با آهنگ بازترکیب حامل‌های الکتریکی در نیم‌رسانا برابر است. شکل ۲-۱ تولید حرارتی زوج الکترون-حفره را نشان می‌دهد.

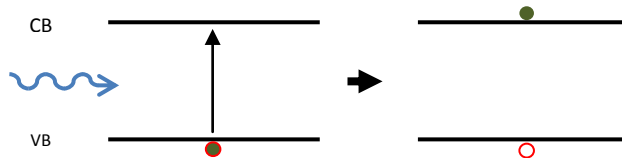
۲-۲-۲ جذب فوتون

در نیم‌رسانای باند مستقیم^۱ کمینه نوار رسانش هم‌راستا با بیشینه نوار ظرفیت است (شکل ۲-۱). اگر انرژی یک فوتون یعنی $E=hf$ (که در آن h ثابت پلانک و f بسامد فوتون است)، بیشتر از گاف انرژی نیم‌رسانا باشد انرژی فوتون باعث انتقال الکترون از نوار ظرفیت به نوار رسانش می‌شود (شکل ۲-۳). به این ترتیب جذب فوتون باعث تولید زوج الکترون-حفره می‌شود.



شکل ۲-۲: نمودار انرژی بر حسب اندازه حرکت به ازای الف) نیم‌رسانا با باند غیر مستقیم. ب) نیم‌رسانا با باند مستقیم.

در نیم‌رسانای باند غیرمستقیم^۲ (شکل ۲-۳ الف) بیشینه نوار ظرفیت هم‌راستا با کمینه نوار رسانش نیست. بر اساس قانون بقا اندازه حرکت^۳ برای انتقال الکترون از نوار ظرفیت به نوار رسانش در نیم‌رسانای باند غیرمستقیم علاوه بر انرژی E_g ، اندازه حرکت نیز باید به اندازه Δk تغییر کند. فوتون به تنهایی قادر به تامین Δk نیست. این انرژی باید توسط شبکه بلوری در تعامل با فونون‌ها تامین شود. به همین دلیل احتمال گذار الکترون از نوار ظرفیت به رسانش و در نتیجه تولید زوج الکترون-حفره در اثر جذب فوتون در نیم‌رسانا با باند غیر مستقیم کاهش می‌یابد.



شکل ۲-۳: انتقال الکترون از نوار ظرفیت به نوار رسانش و تولید زوج الکترون-حفره در اثر جذب فوتون.

¹ Direct Band

² Indirect Band

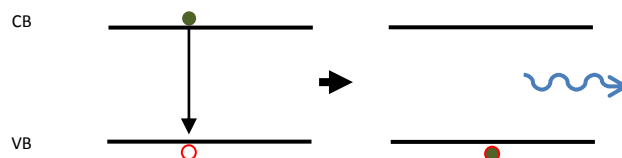
³ Momentum Conservation

۳-۲-۲ باز ترکیب حامل‌ها

انتقال الکترون از نوار رسانش به نوار ظرفیت و ترکیب شدن آن با یک حفره در نوار ظرفیت باز ترکیب نامیده می‌شود. انرژی ناشی از این گذار می‌تواند منجر به تابش فوتون شود. این تابش می‌تواند به طور خودبخودی^۱ یا ناشی از تحریک خارجی باشد. در غیر این صورت انرژی به گرما تبدیل می‌شود.

۴-۲-۲ باز ترکیب نوری خودبخودی

با پایان طول عمر^۲ الکترون، گذار خودبخودی آن از نوار رسانش به نوار ظرفیت رخ می‌دهد. این کاهش انرژی به صورت تابش فوتون با انرژی برابر گاف انرژی نیم‌رسانا رخ می‌دهد (شکل ۴-۲). فوتون تولید شده در اثر این فرآیند دارای فاز تصادفی^۳ خواهد بود و راستای انتشار فوتون تولید شده غیرقابل پیش‌بینی است. در این حالت فوتون‌های تولید شده در راستاهای مختلف با بازه بسامدی حول انرژی گاف منتشر می‌شوند.



شکل ۴-۲: گذار خودبخودی الکترون از نوار رسانش به نوار ظرفیت و تولید فوتون.

۵-۲-۲ باز ترکیب نوری تحریکی^۴

در شرایطی که خارج از حالت تعادل حرارتی، الکترونی در نوار رسانش حضور داشته باشد تابش فوتون با انرژی نزدیک به E_g می‌تواند سبب باز ترکیب نوری ناشی از تابش فوتون تحریکی شود. در این صورت فوتون تحریک کننده بدون تغییر عبور می‌کند و فوتون تولید شده توسط باز ترکیب نوری تحریکی با انرژی، فاز، راستای انتشار و قطبیدگی^۵ یکسان آن را همراهی می‌کند. شکل ۵-۲ باز ترکیب الکترون نوار رسانش با حفره نوار ظرفیت در اثر تحریک فوتون تابیده شده نشان می‌دهد.

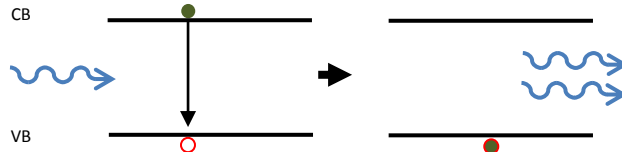
¹ Spontaneous Optical Recombination

² Life Time

³ Random Phase

⁴ Stimulated Optical Recombination

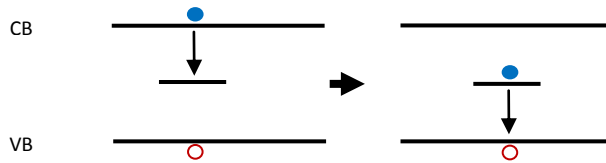
⁵ Polarization



شکل ۲-۵: گذار تحریکی الکترون از نوار رسانش به نوار ظرفیت و تولید فوتون.

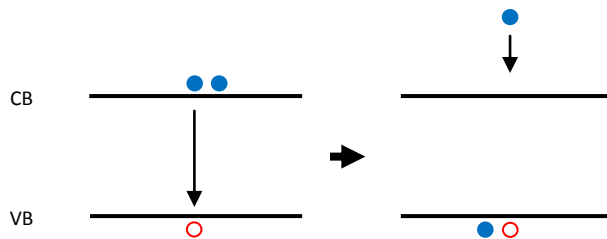
۶-۲-۲ باز ترکیب غیرنوری

دو گونه عمده از باز ترکیب‌های غیرنوری شاکلی-رید-هال^۱ (SRH) و اوژه^۲ هستند. باز ترکیب SRH در اثر وجود ترازهای تله^۳ ایجاد شده توسط ناخالصی یا نقص ساختاری شبکه^۴ ایجاد شود. در این فرآیند ترازهای تله در ناحیه ممنوع بین نوار رسانش و ظرفیت ایجاد می‌شوند. به این ترتیب الکترون در زمان گذار در این ترازها به دام می‌افتد و نمی‌تواند مستقیماً برانگیخته یا باز ترکیب شود. این فرآیند می‌تواند تغییر اندازه حرکت را در نیم‌رساناهای باند غیرمستقیم فراهم نماید به همین علت در این نوع نیم‌رساناها فرآیند غالب محسوب می‌شود (شکل ۲-۶).



شکل ۲-۶: باز ترکیب غیرنوری شاکلی-رید-هال.

در باز ترکیب اوژه انرژی ناشی از گذار الکترون به نوار ظرفیت به الکترون دیگری منتقل شده و باعث انتقال آن به نوار رسانش می‌شود. انرژی حامل جدید در نهایت تبدیل به انرژی حرارتی می‌شود. این سازوکار در نیم‌رساناهای با گاف انرژی کم غالب می‌شود (شکل ۲-۷).



شکل ۲-۷: گذار تحریکی الکترون از نوار رسانش به نوار ظرفیت و تولید فوتون.

¹ Shockley-Read-Hall

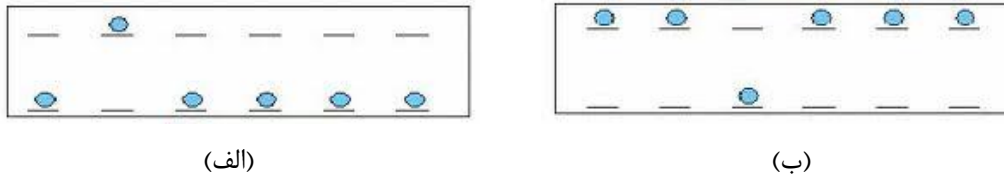
² Auger

³ Trap

⁴ Defect

۷-۲-۲ وارونگی جمعیت^۱

یکی دیگر از شرایط اساسی شروع فرآیند تقویت نوری در ناحیه فعال در لیزر نیم‌رسانا، برقراری وارونگی جمعیت است. برای برقراری این وضعیت باید تراکم الکترون‌ها در حالت تعادل در نوار رسانش بیشتر از تعداد آنها در نوار ظرفیت باشد [۸]. شکل ۲-۸ الکترون‌های موجود در باند ظرفیت و رسانش را در یک نیم‌رسانا در دو حالت تعادل حرارتی (الف) و وارونگی جمعیت (ب) نشان می‌دهد.



شکل ۲-۸: تراز انرژی در نیم‌رسانا (الف) در حالت تعادل حرارتی (ب) در حالت وارونگی جمعیت.

انتقال الکترون از ترازهایی با انرژی کمتر به ترازهایی با انرژی بیشتر یا فرایند پمپ کردن، در لیزر نیم‌رسانا توسط جریان الکتریکی انجام می‌شود. در این حالت جریان الکتریکی اعمال شده به افزاره لیزر به طور پیوسته الکترون‌ها را به نوار رسانش پمپ^۲ می‌کند. با ایجاد جمعیت وارون آهنگ باز ترکیب به شدت افزایش می‌یابد. در نیم‌رساناهای باند مستقیم بخش قابل توجهی از این فرآیند، باز ترکیب نوری خودبخودی خواهد بود. این فرآیند در دیودهای نور گسیل^۳ (LED) غالب است. تراکم الکترون‌ها در نوار ظرفیت و رسانش با استفاده از تابع توزیع احتمال فرمی-دیراک در نیم-رسانا قابل بررسی است [۸].

$$f_c(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_{fc}}{kT}\right)} \quad (1-2)$$

برای $E > E_{fc}$ و

$$f_v(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_{fv}}{kT}\right)} \quad (2-2)$$

در این رابطه E_{fv} و E_{fc} به ترتیب سطوح شبه‌فرمی رسانش و ظرفیت، K ثابت بولتزمن و T دما هستند. برای تامین وارونگی جمعیت باید احتمال حضور الکترون در باند رسانش F_c بیشتر از احتمال حضور آن در باند ظرفیت F_v باشد [۹] و اختلاف این دو تعیین کننده حداقل انرژی فوتون‌های تولید شده است.

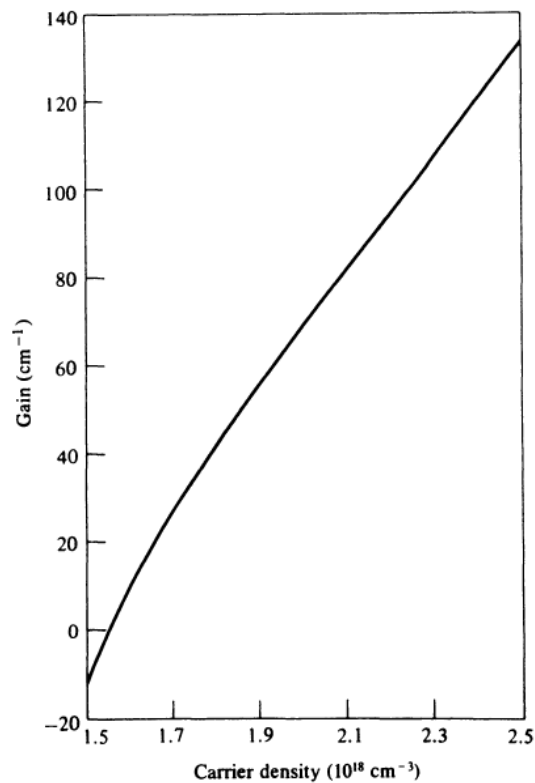
¹ Population Inversion

² Pump

³ Light Emitting Diode

۸-۲-۲ بهره ماده^۱

نیمرساناها در دمای اتاق در حالت وارونگی جمعیتی قرار ندارند. در این حالت تابش نور با انرژی بیشتر از انرژی گاف نیمرسانا می‌تواند توسط شبکه نیمرسانا جذب^۲ شود. با افزایش غلظت حامل‌های الکتریکی از طریق افزایش جریان الکتریکی تزریقی^۳، میزان جذب نور تابیده شده به نیمرسانا کاهش می‌یابد. با ادامه این روند فرایند جذب در ماده به صفر می‌رسد و در نتیجه ماده نسبت به نور عبوری شفاف^۴ می‌شود. چگالی حامل الکتریکی که به ازای آن شفافیت رخ می‌دهد چگالی شفافیت^۵ نامیده می‌شود. در صورتی که افزایش حامل الکتریکی ادامه یابد وارونگی جمعیت رخ می‌دهد که حاصل آن تقویت نور گذرنده از محیط می‌شود. به این ترتیب بهره ماده میزان تقویت نور گذرنده از ماده است (بخش مثبت نمودار در شکل ۹-۲) و میزان تضعیف نور جذب نوری نامیده می‌شود (بخش منفی نمودار در شکل ۹-۲).



شکل ۹-۲: بیشینه بهره ماده در نیمرسانا بر حسب چگالی حامل [۱۰].

-
- ¹ Material Gain
 - ² Optical Absorption
 - ³ Injected Current
 - ⁴ Transparent
 - ⁵ Transparency Density