



پژوهشکده فیزیک کاربردی و ستاره شناسی

گروه فوتونیک - الکترونیک

پایان نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته فوتونیک - الکترونیک

عنوان

مدلسازی ترانزیستور لیزری بر پایه نانوساختارهای نیتريدی

استاد راهنما

دکتر اصغر عسگری

استاد مشاور

دکتر سعید شجاعی

پژوهشگر

محسن قهرمانی سالیانه

تیر ماه ۸۹

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

تقدیم به:

آسمانی ترین مادر، یاس کبود مدینه،

زهرای مرضیه (سلام الله علیه)

و تقدیم به روح پاک مادرم که زهرایی زیستن را به من آموخت

برخود لازم می دانم نهایت تشکر و قدردانی خود را از مرحومه مادرم که همواره مشوق من در ادامه تحصیل بودند و از پدر بزرگووارم که تکیه گاه من هستند ابراز دارم .

همچنین از :

همسر عزیز و مهربانم که بیشتر سختی پایان نامه بر دوش ایشان بود و بی شک بدون فداکاری ایشان پایان نامه به اتمام نمی رسید.

دکتر اصغر عسگری که راهنمایی این پایان نامه را به عهده داشتند.

دکتر سعید شجایی که مشاوره این پایان نامه را به عهده داشتند.

دکتر مسعود شیرمحمدی که دانش لیزر ام را مدیون ایشان ام همچنین در تدریس و سخت کوشی الگوی من است.

دکتر حسن کاتوزیان که مرا با ترانزیستور لیزری آشنا کرد.

و از همه دوستان و هم ورودی هایم به خصوص مهندس علی اصغر خرمی و مهندس ابراهیم سالاری به خاطر همه خوبیها و کمک هایشان در طول دو سال،

نهایت تشکر را دارم .

| | |
|--|-----------|
| نام خانوادگی: قهرمانی سالیانه | نام: محسن |
| عنوان پایان‌نامه: مدل‌سازی ترانزیستور لیزری بر پایه نانو ساختارهای نیتریدی | |
| استاد راهنما: دکتر اصغر عسگری استاد مشاور: دکتر سعید شجاعی | |
| مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد رشته: فوتونیک گرایش: الکترونیک دانشگاه: تبریز دانشکده: پژوهشکده فیزیک کاربردی و ستاره‌شناسی تاریخ فارغ‌التحصیلی: تیر ماه ۸۹ تعداد صفحه: ۱۰۷ | |
| کلید واژه‌ها: نانو ساختارهای نیتریدی - ترانزیستور لیزری - گیر اندازی کوانتومی - لیزرهای چاه کوانتومی | |
| چکیده | |
| <p>هدف این پایان‌نامه مدل‌سازی ترانزیستور لیزری با استفاده از ساختار چاه کوانتومی $InGaN / GaN$ و با تاکید بر مطالعه کمیات میکروسکوپیکی آنها می باشد .</p> <p>ترانزیستورهای لیزری TL ادوات اپتوالکترونیکی هستند که در آنها ، در یک ترانزیستور دوقطبی ساختار نامتجانس HBT با به کارگیری نانو ساختارهای چاه کوانتومی در بیس و ایجاد کاواک نوری ، می توان علاوه بر تقویت سیگنال الکتریکی ، سیگنال نوری هم‌دوس نیز ایجاد کرد . این قطعه ی اپتوالکترونیکی قادر است به طور همزمان سیگنال های الکتریکی و نوری (لیزری) را با سرعتی در حدود ۱۰ تا ۱۰۰ گیگا بایت بر ثانیه مدوله کند .</p> <p>ما در این پایان نامه ضمن معرفی ترانزیستور لیزری مواد نیتریدی، با در نظر گرفتن اثرات قطبش خود به خودی و پیزو الکتریک برای ساختار مورد بحث و با استفاده از روش تفاضلات متناهی به عنوان روش حل عددی دقیق، کمیت های میکروسکوپیکی مورد نیاز برای مدل‌سازی ترانزیستورهای لیزری را به دست آورده ایم. در قسمت نهایی این پایان نامه حالت پایا و حالت گذرای ترانزیستور لیزری بدون در نظر گرفتن تاثیرات بیس و همچنین با در نظر گرفتن تاثیرات بیس را تحلیل کردیم. برای این منظور، در مدل‌سازی ترانزیستور لیزری اثر گیر اندازی الکترون در یک ساختار چاه کوانتومی تعبیه شده در بیس و اثرات بیس ترانزیستور بر ترابرد حاملین، وارد معادلات آهنگ مربوط به لیزر زایی می شوند . معادلات آهنگ به روش عددی حل می شوند . همچنین مدولاسیون فرکانس بالای ترانزیستور لیزری در تقریب سیگنال کوچک بررسی شده است .</p> | |

فهرست مطالب

| | |
|---|----|
| مقدمه | ۱۲ |
| فصل ۱- بررسی منابع (پایه‌های نظری و پیشینه پژوهش) | ۱۴ |
| ۱-۱- اتصالات نیم‌رسانا : | ۱۴ |
| ۲-۱- ساختارهای نامتجانس | ۱۵ |
| ۳-۱- نانو ساختارهای نیم رسانا | ۱۸ |
| ۱-۳-۱- ساختار چاه کوانتومی | ۱۸ |
| ۱-۳-۱-۱ چاه های کوانتومی نوع اول و نوع دوم : | ۱۹ |
| ۱-۳-۱-۲ محاسبه چگالی حامل ها در چاه کوانتومی | ۲۲ |
| ۲-۳-۱- ساختار سیم کوانتومی | ۲۶ |
| ۳-۳-۱- ساختار نقطه کوانتومی | ۲۸ |
| ۴-۱- ترانزیستور دو قطبی | ۲۹ |
| ۱-۴-۱- ناحیه کار ترانزیستورها | ۳۱ |
| ۲-۴-۱- نحوه اتصال ترانزیستورها | ۳۲ |

| | |
|----|--|
| ۳۴ | ۱-۴-۳- کاربرد ترانزیستور..... |
| ۳۴ | ۱-۴-۴- ترانزیستور دوقطبی ساختار نامتجانس |
| ۳۶ | ۱-۵-۵- دیود های لیزری |
| ۳۶ | ۱-۵-۱- مقدمه |
| ۳۷ | ۱-۵-۲- گسیل القایی |
| ۳۹ | ۱-۵-۳- تجمع معکوس |
| ۴۰ | ۱-۵-۴- همدوسی فضایی |
| ۴۰ | ۱-۵-۵- همدوس زمانی |
| ۴۰ | ۱-۵-۶- جهت‌مندی |
| ۴۱ | ۱-۴- دیود لیزری نیم رسانا |
| ۴۳ | ۱-۶-۱- تجمع معکوس در لیزرهای نیم رسانا |
| ۴۳ | ۱-۶-۲- لیزرهای ساختار نامتجانس |
| ۴۶ | ۱-۷- لیزر چاه کوانتومی |
| ۴۸ | ۱-۸- ترانزیستور لیزری |
| ۵۲ | فصل ۲- مبانی و روش ها |
| ۵۲ | مقدمه |

- ۲- ۱- روش تفاضلات متناهی ۵۲
- ۲- ۲- روش رانگ کوتای مرتبه ی چهارم ۵۶
- ۲- ۳- مواد نیتزیدی ۶۰
- ۲- ۳- ۱- ساختار بلوری ۶۰
- ۲- ۳- ۲- خواص مواد نیتزیدی ۶۳
- ۲- ۳- ۳- قطبش خود بخودی ۶۴
- ۲- ۳- ۴- قطبش پیزوالکتریکی ۶۵
- ۲- ۳- ۵- محاسبه اثرات پیزوالکتریک ۶۶
- ۲- ۴- ترانزیستور لیزری ۷۲
- ۲- ۴- ۱- مدلسازی ترانزیستور لیزری ۷۳
- ۲- ۴- ۲- معادلات نرخ ترانزیستور لیزری ۷۵
- ۲- ۴- ۳- تحلیل حالت ایستا ترانزیستور لیزری ۷۷
- ۲- ۴- ۴- تحلیل AC سیگنال کوچک و مدولاسیون فرکانس بالای ترانزیستور لیزری ۷۹
- فصل سوم: بحث و نتایج ۸۲
- ۳- ۱- مقدمه ۸۲
- ۳- ۲- نتایج شبیه سازی چاه کوانتومی بدون اعمال میدان های قطبشی ۸۴

- ۳-۳ - نتایج شبیه سازی چاه کوانتومی با در نظر اعمال میدان های قطبشی ۸۶
- ۳-۴ - زمان گسیل خود به خودی در چاه کوانتومی ۸۸
- ۳-۵ - تحلیل ترانزیستور لیزری ۹۲
- ۳-۵-۱ - تحلیل حالت پایا (مشخصه های DC) ۹۲
- ۳-۵-۲ - تحلیل حالت گذرا در غیاب تاثیرات بیس (مشخصه های AC) ۹۵
- ۳-۵-۳ - تحلیل حالت گذرا با در نظر گرفتن تاثیرات بیس (مشخصه های AC) ۹۷
- ۳-۵-۴ - مدولاسیون فرکانس بالای ترانزیستور لیزری در تقریب سیگنال کوچک ۱۰۰
- ۳-۶ - نتیجه گیری ۱۰۲
- ۱۰۴
- مراجع



فهرست اشکال و جداول فصل ۱

- شکل ۱-۱- دو نیم رسانای نوع n و p قبل و بعد از اتصال ۱۴
- شکل ۲-۱- پیوند $p-n$ در حالت غیر تعادلی تحت اعمال بایاس مستقیم ۱۵
- شکل ۳-۱- مشخصه ی جریان - ولتاژ ، پیوند $p-n$ ۱۵
- شکل ۴-۱- دو نوع ساختار نامتجانس که از اتصال نامتجانس دو ماده A, B تشکیل شده است ۱۷
- شکل ۵-۱- ساختار نامتجانس دو گانه ۱۷
- شکل ۶-۱- ساختارهای کوانتومی ساخته شده از دو ماده A, B ۱۸
- شکل ۷-۱- پروفایل بانندی یک چاه کوانتومی به عرض L و ارتفاع V_b ۱۹
- شکل ۸-۱- (a) شکل هندسی چاه کوانتومی . (b) دیگر ترازهای انرژی برای الکترون و حفره درون چاه کوانتومی (c) پروفایل بانندی ترازهای درون چاه کوانتومی ۱۹
- شکل ۹-۱- چاه کوانتومی نوع اول ۲۰
- شکل ۱۰-۱- چاه کوانتومی نوع دوم (نمونه اول) ۲۰
- شکل ۱۱-۱- چگالی حالت ها در یک چاه کوانتومی ۲۳
- شکل ۱۲-۱- چگالی حالت های حفره های سبک و سنگین و الکترون در یک چاه کوانتومی ۲۵

- شکل ۱-۱۳- توابع موج برای چاه پتانسیل به عرض L ۲۵
- شکل ۱-۱۴- نمودار چگالی حالتها برای الکترون های دو بعدی در چاه کوانتومی ۲۶
- شکل ۱-۱۵- چگالی حالت ها برای ساختار چاه کوانتومی (خط های پر رنگ) و جسم کپه ای (نقطه چین). ۲۷
- شکل ۱-۱۶- نمودار چگالی حالتها برای الکترون های دو بعدی در چاه کوانتومی ۲۹
- شکل ۱-۱۷- نمودار چگالی حالتها برای الکترونهای صفر بعدی در نقاط کوانتومی ۳۰
- شکل ۱-۱۸- ترانزیستور دو قطبی نوع $p-n-p$ تحت بایاس مستقیم پیوند امیتر - بیس و بایاس معکوس پیوند کلکتور - بیس (نحوه بایاس مستقیم ترانزیستور) ۳۰
- شکل ۱-۱۹- پروفایل بانندی BJT نوع $n-p-n$ قبل از اعمال بایاس ۳۰
- شکل ۱-۲۰- پروفایل بانندی BJT نوع $n-p-n$ تحت بایاس در ناحیه فعال ۳۳
- شکل ۱-۲۱- مدار معادل اتصال بیس مشترک ۳۳
- شکل ۱-۲۲- ساختار شماتیک HBT ، $AlGaAs/GaAs$ ۳۵
- شکل ۱-۲۳- ترانزیستور دو قطبی نوع $p-n-p$ تحت بایاس مستقیم پیوند امیتر - بیس و بایاس معکوس پیوند کلکتور - بیس (نحوه بایاس مستقیم ترانزیستور) ۳۵
- شکل ۱-۲۴- پروفایل بانندی ترانزیستور دو قطبی ساختار نامتجانس ۳۵
- شکل ۱-۲۵- شار الکترونی تزریقی و باز تابشی در اتصال امیتر - بیس و همچنین جمع آوری شار الکترونی و شار باز تزریقی در اتصال بیس - کلکتور ۳۶

- شکل ۱-۲۶ شکل شماتیک جذب ، گسیل خود به خود و گسیل القایی ۳۸
- شکل ۱-۲۷ پروفایل بانندی دیود لیزر و ایجاد تجمع معکوس بر اثر اعمال بایاس مستقیم ۴۴
- شکل ۱-۲۸ - لیزر ساختار نامتجانس دوگانه در حالت تعادل و همچنین تحت بایاس مستقیم ۴۵
- شکل ۱-۲۹ پروفایل بانندی و چگالی حامل ها در (a) لیزر ساختار نامتجانس یگانه ۴۵
- و (b) لیزر ساختار نامتجانس دوگانه ۴۵
- شکل ۱-۳۰ محصور سازی حامل ها و نور در لیزرهای ساختار نامتجانس دوگانه ۴۶
- شکل ۱-۳۱ - پروفایل بانندی و چگالی حالت ها در لیزر چاه کوانتومی ۴۶
- شکل ۱-۳۲- محصور سازی حامل ها و نور در لیزرهای چاه کوانتومی ۴۷
- شکل ۱-۳۳- ساختار کلی ترانزیستور لیزری ۴۸

فهرست اشکال و جداول فصل ۲

- شکل ۲-۱- مقایسه ساختار باند دو ساختار سولفید روی و ورتسایت ۶۱
- شکل ۲-۲- ساختار ورتسایت ۶۱
- شکل ۲-۳- ساختار شماتیک کریستال GaN (a) - نما و (b) Ga -نما ۶۲
- شکل ۲-۴- نامگذاری در تقارن شش گوش ۶۲
- شکل ۲-۵- گاف انرژی نیم رساناهای نیتریدی بر حسب ثابت های شبکه آنها ۶۴

- شکل ۲-۶- جهت قطبش خود به خودی در کریستال GaN در حالت Ga -نما ۶۵
- جدول ۲-۱- مقادیر قطبش خود به خودی برای مواد نیتریدی GaN, InN, AlN ۶۵
- جدول ۲-۲- متوسط ثابتهای فیزیکی انتخابی برای مواد نیتریدی GaN, InN, AlN ۶۹
- شکل ۲-۷- مدار معادل سیگنال الکتریکی و نوری ترانزیستور لیزری ۷۳
- شکل ۲-۸- شکل شماتیک ترانزیستور لیزری ۷۳
- شکل ۲-۹- مدل کنترل بار برای ناحیه بیس ترانزیستور لیزری تحت بایاس مستقیم ۷۴
- دیود امیتر - بیس و بایاس معکوس دیود کلکتور - بیس ۷۴

فهرست اشکال و جداول فصل ۳

- شکل ۳-۱- شکل شماتیک ترانزیستور لیزری بکار رفته در این پایان نامه ۸۳
- جدول ۳-۱ - ساختار ترانزیستور لیزری چاه کوانتومی ۸۳
- شکل ۳-۲- توابع موج حالت پایه برای الکترونها در چاه کوانتومی با عرض 10nm ۸۵
- شکل ۳-۳- توابع موج اولین حالت برانگیخته برای الکترونها در چاه کوانتومی با عرض 10nm ۸۵
- شکل ۳-۴- تابع موج حالت پایه برای الکترونها در چاه کوانتومی با در نظر گرفتن اثرات قطبشی ۸۶
- شکل ۳-۵- تابع موج اولین حالت برانگیخته برای الکترونها در چاه کوانتومی با در نظر گرفتن اثرات قطبشی ۸۷

- شکل ۳-۶- تابع موج حالت پایه برای حفره ها در چاه کوانتومی با در نظر گرفتن اثرات قطبشی ۸۷
- شکل ۳-۷- تابع موج اولین حالت برانگیخته برای حفره ها در چاه کوانتومی ۸۹
- با در نظر گرفتن اثرات قطبشی
- شکل ۳-۸- وابستگی دما زمان گسیل خود به خودی در چاه کوانتومی ۹۱
- شکل ۳-۹- وابستگی دما زمان گسیل خود به خودی چاه کوانتومی در ۹۱
- دماهای نزدیک دمای اتاق
- شکل ۳-۱۰- تغییرات چگالی جریان آستانه ترانزیستور لیزری بر حسب زمان گسیل ۹۳
- خود به خود در چاه کوانتومی و زمان گیر اندازی الکترون در چاه کوانتومی
- شکل ۳-۱۱- تغییرات چگالی جریان آستانه ترانزیستور لیزری بر حسب زمان گسیل ۹۳
- خود به خود در چاه کوانتومی و طول عمر الکترون در بیس
- شکل ۳-۱۲- تغییرات چگالی جریان آستانه ترانزیستور لیزری بر حسب زمان گسیل ۹۴
- خود به خود در چاه کوانتومی و چگالی الکترون ها در حالت پایا
- شکل ۳-۱۳- وابستگی چگالی فوتون های ترانزیستور لیزری به نسبت چگالی جریان ۹۴
- تزریقی به چگالی جریان آستانه لیزر زایی .
- شکل ۳-۱۴- وابستگی زمانی چگالی الکترون ها ترانزیستور لیزری در غیاب تاثیرات بیس ۹۵
- شکل ۳-۱۵- وابستگی زمانی چگالی فوتون ها ترانزیستور لیزری در غیاب تاثیرات بیس ۹۶
- میدان الکتريکی ، در چاه کوانتومی دوگانه متقارن
- شکل ۳-۱۶- وابستگی زمانی چگالی بار بیس ترانزیستور لیزری ، ۹۷
- شکل ۳-۱۷- وابستگی زمانی چگالی الکترون ها ترانزیستور لیزری ۹۸
- شکل ۳-۱۸- وابستگی زمانی چگالی فوتون ها ترانزیستور لیزری ۹۹

- شکل ۳-۱۹- پاسخ مدولاسیون ترانزیستور لیزری بر حسب فرکانس ۱۰۰
- شکل ۳-۲۰- قسمت حقیقی و موهومی پاسخ مدولاسیون ترانزیستور لیزری بر حسب فرکانس ۱۰۱
- شکل ۳-۲۱- پاسخ مدولاسیون ترانزیستور لیزری بر حسب فرکانس با افزایش جریان تزریقی ۱۰۲

در سال های اخیر نانوساختارهای (چاه کوانتومی ، نقاط کوانتومی و سیم های کوانتومی) به علت خواص تراپردی ، الکتریکی ، نوری و ... بسیار عالی و همچنین اندازه ی کوچک آنها بسیار مورد توجه محققان فیزیک حالت جامد ، الکترونیک و فوتونیک قرار گرفته است. امروزه نانوساختارهای نیتربیدی به علت های مختلف از جمله گاف انرژی مستقیم ، پهن بودن گاف انرژی ، رسانندگی حرارتی خوب ، سرعت الکترونی بالای آنها و ... کاربردهای فراوانی در ادوات الکترونیکی ، فوتونیک و الکترونیک نوری یافته است . که از این میان می توان در ادوات الکترونیک به " HBT ها ، FET ها ، MOSFET ها و ... " در ادوات فوتونیک به " دیودهای نوری آبی و سبز ، آشکارسازهای مختلف از مادون قرمز تا ماوراءبنفش ، LED و LD مرئی و ماوراء بنفش و ... " اشاره کرد . خواص عالی نانو ساختارهای نیتربیدی (از جمله GaN/AlGaN) باعث شده ادواتی که از این مواد ساخته می شود دارای مزیت هایی از جمله ولتاژشکست بالا ، ایجاد نویز کمتر ، پایداری حرارتی خوب و کاربرد در دماهای بالا و ... باشند .

اولین قطعه ی پردازنده اطلاعات در الکترونیک حالت جامد (ترانزیستور) در سال ۱۹۴۸ توسط جان باردین و والتر بریتمن کشف شد . در این قطعه که ترانزیستور دوقطبی نام گرفت جریان بیس کلید عملکرد و کنترل کننده جریان خروجی محسوب می شود . همچنین اولین دیود لیزری نیز در سال ۱۹۶۲ تولید شد . در نتیجه ترانزیستور بیش از ۶۰ سال و دیودهای لیزری بیش از ۴۰ سال است که مورد استفاده قرار گرفته است . بعد از اختراع دیود لیزری ، نیاز به قطعه ای مشابه ترانزیستور برای ادوات نوری بعنوان پایه ای ترین عنصر پردازنده اطلاعات در فوتونیک و الکترونیک نوری احساس شد به همین دلیل مطالعات و تحقیقات زیادی روی چنین قطعه ای آغاز شد . بطوری که حدوداً در سال ۱۹۸۰ یک گروه تحقیقاتی در انستیتو تکنولوژی کالیفرنیا موفق به ساخت قطعه ای آزمایشگاهی شدند که آنرا Trans Laser نامیدند . در این قطعه یک ترانزیستور به وسیله یک سیم رابط با دیود لیزری مجتمع شده بود به طوری که می توانست در خروجی هر دو سیگنال الکتریکی و نوری را داشته باشیم اما مشکل بزرگ این قطعه این بود که دو سیگنال خروجی هم زمان نبودند.

تحقیقات ادامه داشت تا اینکه محققان در سال ۱۹۹۲ موفق به طراحی و ساخت یک ترانزیستور دو قطبی از جنس InGaAs شدند که از خود نور گسیل می کرد . اما این ترانزیستور نیز در دمای های خیلی پایین و نزدیک به دمای نیتروژن مایع کار می کرد .

در اوایل قرن ۲۱ ساخت و توسعه ی ترانزیستورهای دو قطبی ساختار نامتجانس HBT از جنس InP/ InGaAs ، باعث به وجود آمدن ادوات با سرعت و فرکانس بالا شد . به طوری که HBT پر سرعت ایندیومی زمینه را فراهم کرد تا در سال ۲۰۰۶ اولین ترانزیستور لیزری که قادر بود در ورودی سیگنال الکتریکی را دریافت و در خروجی هر دو سیگنال الکتریکی و نوری گسیل دارد ، ساخته شود .

به طور خلاصه تا قبل از اختراع ترانزیستور لیزری در سال ۲۰۰۶ ، قطعه ای ساخته نشده بود که کار پردازش اطلاعات را در الکترونیک نوری و فوتونیک انجام دهد .

هدف از این پایان نامه تحلیل و مدلسازی ترانزیستور لیزری با استفاده از نانو ساختار نیتریدی (GaN/AlGaN) و همچنین ارائه ی یک مدل نظری برای تحلیل پارامترهای ترانزیستور لیزری جهت تحلیل کارکرد DC و AC این قطعه در سیگنال های کوچک می باشد .

فصل ۱- بررسی منابع (پایه‌های نظری و پیشینه پژوهش)

۱-۱- اتصالات نیمرسانا :

ادوات نیمرسانا وقتی می‌توانند مفید واقع شوند که به جای داشتن یک ترکیب شیمیایی یکنواخت

ترکیب غیریکنواختی داشته باشیم، که با تغییر مکان تغییر کند که برای این کار به پیوند ها نیاز داریم.

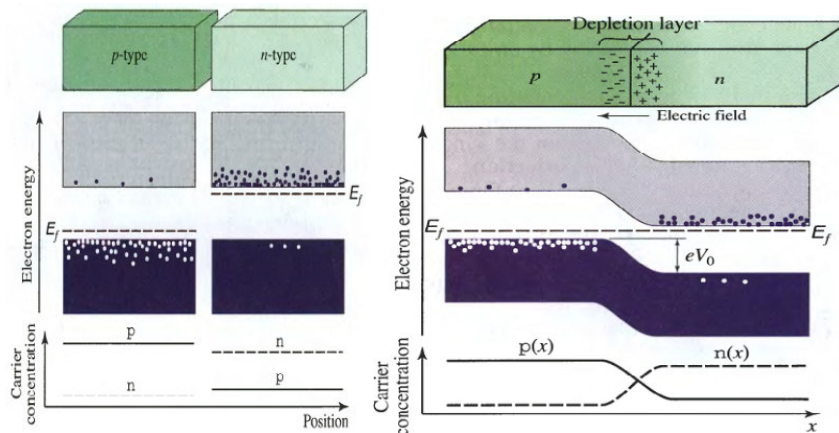
پیوند $p-n$ از اتصال دو نیمرسانا با آرایش مختلف نوع p و نوع n به وجود می‌آید. در شکل ۱-۱ اتصال دو

نیم رسانای نوع n و p قبل و بعد از اتصال این دو نوع نیم رسانا نشان می‌دهد. پیوند دارای دو لایه با آرایش نسبتاً

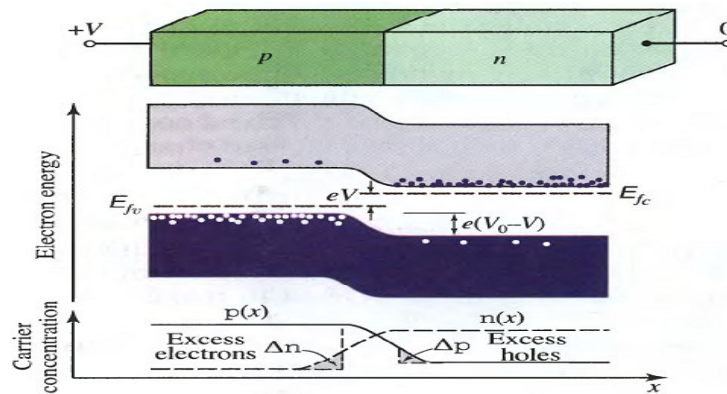
سنگین p, n می‌باشد. در پیوند گاه یک میدان داخلی قوی وجود دارد که موجب رانش حامل های تولیدی می

شود. در این دیود ها در بایاس مستقیم جریان نويز بزرگی وجود دارد ، پیوند $p-n$ خاصیت یکسو سازی دارد

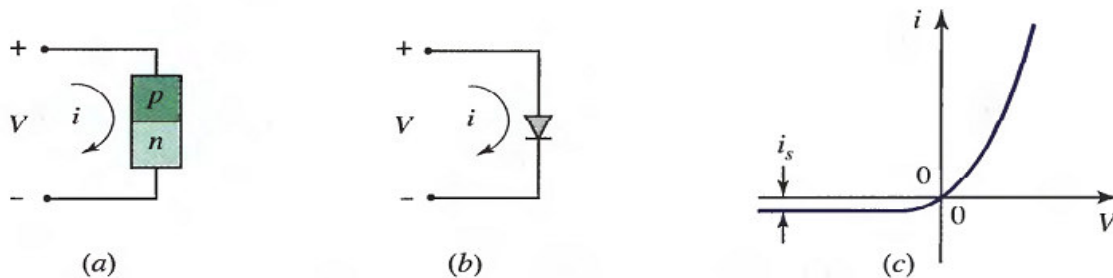
به طوری که می‌توان از آن برای ایجاد اثرات غیر خطی استفاده کرد. [۱]



شکل ۱-۱ - دو نیم رسانای نوع n و p قبل و بعد از اتصال [۱]



شکل ۱-۲، پیوند p-n در حالت غیر تعادلی تحت اعمال بایاس مستقیم [۱]



شکل ۱-۳- مشخصه ی جریان - ولتاژ ، پیوند p-n

بعد از اعمال میدان توسط بایاس مستقیم به پیوند p-n دیود از حالت تعادل خارج می شود در این حالت دو تراز شبه فرمی داریم که در شکل ۱-۲- نشان داده شده است. همچنین در شکل ۱-۳- مشخصه ی جریان - ولتاژ ، پیوند p-n را تحت بایاس مستقیم نشان می دهد.

۱-۲- ساختارهای نامتجانس^۱

اگر در یک ساختار نیمه رسانا دو ماده از دو جنس متفاوت کنار هم قرار داده شوند این ساختار را نامتجانس گویند. این تفاوت در ماده نیمه رسانا سبب گسستگی در نوار هدایت و ظرفیت ساختار کل می شود

^۱ Heterostructures

که در حدود چند صد میلی الکترون ولت یا بیشتر است. این شکافتگی اساس محدود شدن حامل‌ها در ساختارهای محدود کوانتومی است و لذا تاثیر شگرفی در خواص تراپردی حامل‌ها در سطح مشترک دو نیم رسانا دارد. ساختارهای نامتجانس از طریق روشهای لایه نشانی دقیقی همچون برآرایی باریکه ملکولی و لایه گذاری بخار شیمیایی فلز- ماده آلی ساخته می‌شوند. این روشها گرچه امکان ساخت لایه‌های فوق نازک با کیفیت عالی از نیمه رساناها را فراهم می‌کند ولی با این حال مرز بین دو ماده در یک ساختار نامتجانس مرز تیزی نیست و ضخامت این مرز بسته به روش ساخت قطعات مقادیر متفاوتی می‌تواند داشته باشد. اصطلاح فوق نازک به سیستمهایی اطلاق می‌شود که ضخامت آنها با شعاع بوهر اکسیتون ماده قابل قیاس باشد. ساختارهای نامتجانس بسته به کاربرد و مشخصات الکترونیکی مورد نیاز از اتصالات نیمه رسانا، فلز و یا عایق ساخته می‌شوند، و از این نظر بسیار متنوع هستند.

یکی دیگر از خواص مفید ساختارهای نامتجانس قابل کنترل بودن باند انرژی حامل‌ها است. وقتی دو ماده مختلف در اتصال با یکدیگر قرار می‌گیرند ترازهای هدایت و ظرفیت آنها درست مقابل هم نیستند و همین امر باعث شکافتگی در ترازهای هدایت و ظرفیت دو ماده می‌شود. این شکافتگی در حدود چند صد میلی الکترون ولت یا بیشتر است. این شکافتگی در ترازهای هدایت و ظرفیت دو ماده اساس محدود شدن حامل‌ها در ساختارهای محدود کوانتومی است. [۲]

همانطور که در شکل (۱-۴) نشان داده شده است دو نوع اتصال نامتجانس قابل اعمال است، در اتصال نوع I که در شکل نشان داده شده است تراز هدایت و ظرفیت ماده B بین ترازهای هدایت و ظرفیت ماده A واقع شده است. در صورتیکه در نوع II ترازهای هدایت و ظرفیت ماده B زیر ترازهای هدایت و ظرفیت ماده B است. تفاوت در نوع ساختار متجانس به تغییراتی در خواص فیزیکی می‌انجامد.