بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده علوم

گروه فیزیک

پایان‌نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد در رشته فیزیک گرایش حالت جامد

موضوع:

شبیه سازی نانوترانزیستورهای شاتکی گرافن

نگارش:

سپیده لیلاسی مرند

استاد راهنما :

دکتر محمد تقی احمدی

تاریخ:

شهریور ۹۳

حق جاپ وتکثیر مطالب این پایان نامه برای دانشگاه ارومیه محفوظ است.

- **تقدیم**

بهترین‌های زندگانی‌ام

پدربزرگوار

و

مادرمهربانم

این پایان‌نامه حاصل سال‌های درس خواندن و زحمات من است و در مقابل سال‌ها زحمات شما برای من قطره‌ای از دریاست. این قطره‌ی کوچک را، تقدیم دریای بی‌کران دستان پر مهر شما می‌کنم و دستتان را می‌بوسم.

- **تقدیر و تشکر**

از دست و زبان که بر آید کز عهده‌ی شکرش به در آید

استاد راهنمای ارجمندم: جناب آقای دکتر محمد تقی احمدی

بیاد دارم روزی را که برای اولین بار، کار پایان‌نامه راشروع کردم. هیچ نمی‌دانستم. استاد ارجمندم، امروز دوباره تکرار می‌کنم که هیچ نمی دانم، و هر چه که یاد گرفتم به خاطر الطاف بی کران **خداوند**

و راهنمایی های شما بود.

از **خداوند** به خاطر الطاف بی کرانش بر من

و از شما به خاطر تمامی راهنمایی‌هایتان

سپاسگزارم.

سپیده لیلاسی

شهریورماه ۹۳.

عنوان مقاله‌ای که از این پایان‌نامه استخراج شد :

Simulation Study on Graphene Nanoribbon based Field Effect Transistors.

محل ارئه :

2014 IEEE International Student Conference 5th June 2014/ Universiti Putra Malays.

فهرست

عنوان **صفحه**

چکیده ۱
مقدمه ۲
فصل اول : آشنایی با ترانزیستور ۳
۱-۱ قبل از اختراع ترانزیستور ٤
۱ -۱- ۱ لامپ خلاء ٤
۱-۱-۲ اساس کار لامپ‌های خلاء دوقطبی ٤
۱-۱-۳ اساس کار لامپ‌های خلاء سه‌قطبی (تریود) ٥
۱-۱-٤ معایب لامپ‌ها ٥
۱-۲ ناکارآمدی لامپ خلاء و اختراع ترانزیستور ٦
۱-۲-۱ تاریخچه‌ی اختراع ترانزیستور ٦
۱-۲-۲ انواع تراتزیستورها ٦
۱-۳ آشنایی با فیزیک حالت جامد ۷
۱-۳-۱ تئوری نواری ۷
۱-۳-۲ رسانش الکتریکی در مدل ساختار نواری ۸
۱-۳-۳ برخی ویژگی های نیمه رساناها ۹
۱-۳-٤ آلایش نیمه رسانا ۱۰
۱-٤ ترانزیستور ماسفت ۱۲
۱-٤-۱ ساختار ترانزیستور MOS ۱۳
۱-٤-۲ عملکرد ترانزیستور MOS ۱٤
۱-٤-۳ ترانزیستور MOS به عنوان کلید ۱٥
۱-٤-٤ بررسی منحنی جریان-ولتاژ ترانزیستور MOS ۱٥
۱-٥ ترانزیستورشاتکی ۱۷
۱-٥-۱ دیود شاتکی ۱۷
۱-٥-۲ تعریف ترانزیستور شاتکی ۱۸
۱-٥-۳ ارتفاع سد شاتکی ۱۸
۱-٦ کوچکتر کردن ترانزیستورها و چالش‌های پیشرو ۲۱
فصل دوم: گرافن و نانو ریبون گرافنی ۲۳
۲-۱ مقدمه‌ای درباره‌ی کشف گرافن ۲٤

عنوان **صفحه**

۲-۲ ساختار گرافن ۲۵
۲-۳ روش‌های ساخت گرافن ۲۶
۲-٤ ویژگی‌های گرافن ۲۷
۲-۵ شبکه‌ی گرافن ۲۸
۲-٦ گاف انرژی در گرافن ۳۱
۲-۷ نانوریبون‌های گرافنی ۳۲
۲-۸ روش‌های تولید نانوریبون‌های گرافنی ۳۲
۲-۹ ساختار الکترونیکی نانوریبون‌های گرافنی ۳۳
۲-۱۰ بررسی ویژگی‌های یک ترانزیستور اثر میدان نانوریبون گرافنی ۳٤
فصل سوم : آشنایی با نرم‌افزار ATK و روش شبیه‌سازی ۳٦
۳-۱ مقدمه ای درباره‌ی نرم‌افزار ATK ۳۷
۳-۲ نظریه‌ی تابعی چگالی ۳۸
۳ -۲-۱ تعریف نظریه‌ی تابعی چگالی ۳۸
۳ -۲-۲ فرمول بندی نظریه‌ی تابعی چگالی ۳۹
۳-۳ تعریف هندسه‌ی یک دستگاه در ATK ٤۱
۳-٤ شبیه‌سازی یک ترانزیستور نانو مقیاس بوسیله‌ی نرم افزار ATK ٤۱
۳-۵ معرفی قسمت‌های مختلف نرم افزار ٤۲
۳-٦ روش شبیه سازی ٤۳
۳-٦-۱ ساختن ساختار مورد نظر در Builder ٤۳
۳-٦-۲ انجام دادن محاسبات در Script Generator ٤۷
۳-٦-۳ اجرای برنامه در Job Manager ٤۹
۳-٦-٤ مشاهده‌ی نتایج ۵۰
فصل چهارم : منحنی‌های جریان ولتاژ ترانزیستور شبیه سازی شده ۵۲
٤-۱ مقدمه ۵۳
٤-۲ معرفی پارامترهای مربوط به ترانزیستور شبیه‌سازی شده ۵٤
٤-۳ مقایسه‌ی نمودار جریان ولتاژ ترانزیستور a-z-a با روش DFT در سه ولتاژ گیت مختلف ۵۵
٤-٤ مقایسه‌ی نمودار جریان ولتاژ ترانزیستور a-z-a با روش DFT در سه ولتاژ الکترود مختلف ۵۷
٤-۵ مقایسه‌ی نمودار جریان ولتاژ ترانزیستور a-z-a با روش DFT در سه طول کانال متفاوت ۵۹
٤-٦ مقایسه‌ی نمودار جریان ولتاژ ترانزیستور a-z-a با روش DFT در سه عرض الکترود مختلف ٦۱
نتیجه‌گیری ٦۳
پیشنهاد ٦٤
پیوست ٦۵
مراجع ۷٦

فهرست اشکال

عنوان **صفحه**

شکل ۱-۱ تصویر تعدادی لامپ خلاء ٤
شکل ۱-۲ تصویر تعدادی ترانزیستور ٦
شکل ۱-۳ نحوه قرارگیری ترازها، نوارها و گاف انرژی ۷
شکل ۱-٤ نحوه قرارگیری ترازها، نوارها و گاف انرژی در یک جسم رسانا ۸
شکل ۱-۵ نحوه قرارگیری ترازها، نوارها و گاف انرژی در یک جسم نارسانا ۸
شکل ۱-٦ نحوه قرارگیری ترازها، نوارها و گاف انرژی در یک جسم نیمه‌رسانا ۹
شکل ۱-۷ آلایش سیلیسیوم با ارسنیک ۱۱
شکل ۱-۸ ساختار نواری سیلیسیوم آلایش شده با آرسنیک ۱۱
شکل ۱-۹ آلایش سیلیسیوم با بور ۱۲
شکل ۱-۱۰ ساختار نواری سیلیسیوم آلایش شده با بور ۱۲
شکل ۱-۱۱ ساختار یک ترانزیستورNMOS ۱۳
شکل ۱-۱۲ یک ترانزیستور NMOS متصل به منبع ولتاژ ۱٤
شکل ۱-۱۳در اثر پدیده‌ی القای الکتریکی، حفره‌های موجود در زیربنای نوع p از زیر سطح گیت رانده می‌شوند و یون‌های منفی به جای می‌ماند ۱٤
شکل ۱-۱٤ عملکرد ترانزیستور MOS به عنوان کلید ۱۵
شکل ۱-۱۵ نمودار جریان درین برحسب ولتاژ سورس- درین ۱٦
شکل ۱-۱٦ علامت اختصاری ماسفت نوع ارتقایی ۱٦
شکل ۱-۱۷ نمایش نواحی اشباع و تریود ۱۷
شکل ۱-۱۸ ارتفاع سد شاتکی ۱۹
شکل ۱-۱۹موقعیت ترازهای انرژی در فلز و نیمه‌هادی ۲۰
شکل ۱-۲۰ پتانسیل پیوند و پهنای ناحیه‌ی تخلیه ۲۱
شکل ۱-۲۱ در فصل مشترک‌های واقعی فلز-نیمه‌هادی تعداد زیادی از ترازهای انرژی فصل مشترک در شکاف انرژی وجود دارد ۲۱
شکل ۱-۲۲ تغییرات اندازه و تعداد ترانزیستورهای موجود در یک تراشه با گذشت زمان ۲۱
شکل ۱-۲۳ روند رو به رشد قطعات الکترونیکی، لامپ خلاء← ترانزیستور سیلیکونی← ترانزیستور گرافنی ۲۲
شکل ۲-۱ آلوتروپ‌های کربن ۲۵
شکل ۲-۲ شبکه‌ی وارون گرافن ۲۸
شکل ۲-۳ شبکه‌ی حقیقی گرافن ۲۸
شکل ۲-٤ ساختار باندی گرافن ۳۰
شکل ۲-۵ نانوریبون‌های گرافنی ۳۲

شکل ۲-٦ نانوریبون نوع آرمچیر و زیگزاگ ۳۳
شکل ۲-۷ باز کردن نانوتیوپ و تبدیل شدن به نانوریبون ۳۳
شکل ۲-۸ نانوتیوپ و نانوریبون نوع آرمچیر ۳٤
شکل ۲-۹ نانوتیوپ و نانوریبون نوع زیگزاگ ۳٤
شکل۲-۱۰ اتصال‌های مختلف بین نانوریبون‌ها ۳٤
شکل ۲-۱۱ترانزیستور اثر میدان گرافن نانوریبون ۳٤
شکل ۲-۱۲ نمودار جریان-ولتاژ ۳۵
شکل ۳-۱ نرم‌افزار ATK ۳۷
شکل۳ -۲هندسه‌ی یک دستگاه در ATK ٤۱
شکل۳- ۳ نانوریبون z شکل که در بالای یک گیت فلزی قرار دارد ٤۱
شکل ۳-٤ پنجره‌ی اصلی نرم‌افزار ATK ٤۲
شکل ۳-۵ یکی از مهمترین قسمت‌های نرم‌افزارATK ٤۲
شکل۳-٦ صفحه‌ی مربوط به پارامترهای نانوریبون شبیه سازی شده ٤۳
شکل۳-۷ افزایش طول نانوریبون ٤۳
شکل ۳-۸ چرخاندن منطقه‌ی مرکزی به اندازه‌ی ۳۰ درجه ٤٤
شکل۳-۹ اتصال منطقه‌ی مرکزی به الکترود سمت چپ ٤٤
شکل ۳-۱۰اتصال سه قسمت به هم‌دیگر ٤۵
شکل ۳-۱۱ نمایش اتم‌هایی که به هم متصل می‌شوند با جزئیات بیشتر ٤۵
شکل۳ -۱۲ اضافه کردن الکترودهای الحاقی ٤٦
شکل ۳-۱۳ اضافه کردن گیت ٤٦
شکل ۳-۱٤ترانزیستور شبیه‌سازی شده ٤۷
شکل۳-۱۵ انجام محاسبات در Script Generator ٤۸
شکل۳-۱٦ صفحه‌ی New Calculator ٤۸
شکل۳-۱۷صفحه‌ی مربوط به IV Curve ٤۹
شکل۳-۱۹ فرآیند اجرای برنامه ۵۰
شکل ۳-۲۰ انتقال ساختار شبیه سازی شده به صفحه‌ی اصلی ۵۰
شکل ۳-۲۱ صفحه‌ی نمایش منحنیIV ۵۱
شکل ۳-۲۲ منحنی جریان ولتاژ متقارن ۵۱
شکل ٤-۱ الف،ترانزیستور سیلیکونی ۵۳
شکل ٤-۱ب، ترانزیستور شبیه‌سازی شده با نانوریبون گرافنی ۵۳
شکل ٤-۲ ترانزیستور نوع a-z-a ۵۵
شکل ٤-۳ الف، ولتاژ گیت ۰,۱ v ۵۵
شکل ٤-۳ ب، ولتاژ گیت ۰,۲ v ۵۵
شکل ٤-۳ ج، ولتاژ گیت ۰,۳ v ۵۵
شکل ٤-٤ مقایسه‌ی نمودار جریان ولتاژ ترانزیستور a-z-a با روش DFT در سه ولتاژ گیت مختلف ۵٦

شکل ٤-٥ ترانزیستور نوع a-z-a ٥٧
شکل ٤-٦ الف، ولتاژ الکترود راست ١v ٥٧
شکل ٤-٦ب، ولتاژ الکترود راست ٢ v ٥٧
شکل ٤-٦ج، ولتاژ الکترود راست ٣ v ٥٧
شکل ٤-٧ مقایسه‌ی نمودار جریان ولتاژ ترانزیستور a-z-a با روش DFT در سه ولتاژ الکترود مختلف..... ٥٨
شکل ٤-٨ الف،ترانزیستور باطول کانال ٣ ..... ٥٩
شکل ٤-٨ ب،ترانزیستور باطول کانال ٦ ..... ٥٩
شکل ٤-٨ ج،ترانزیستور باطول کانال ٩ ..... ٥٩
شکل ٤-٩ الف،نمودار IV برای طول کانال ٣ ..... ٥٩
شکل ٤-٩ب،نمودار IV برای طول کانال٦ ..... ٥٩
شکل ٤-٩ج،نمودار IV برای طول کانال٩ ..... ٥٩
شکل ٤-١٠مقایسه‌ی نمودار جریان ولتاژ ترانزیستور a-z-a با روش DFT در سه طول کانال مختلف..... ٦٠
شکل ٤-١١ الف،عرض الکترود ٣ ..... ٦١
شکل ٤-١١ ب،عرض الکترود٦ ..... ٦١
شکل ٤-١١ ج،عرض ٦١
شکل ٤-١٢ الف،نمودار IV برای عرض کانال ٣ ..... ٦١
شکل ٤-١٢ ب،نمودار IV برای عرض کانال ٦ ..... ٦١
شکل ٤-١٢ ج،نمودار IV برای عرض کانال ٩ ..... ٦١
شکل ٤-١٣ مقایسه‌ی نمودار جریان ولتاژ ترانزیستور a-z-a با روش DFT در سه عرض الکترود مختلف.... ٦٢

چکیده

ترانزیستورها یکی از مهم‌ترین قطعات در ساختارهای الکترونیکی هستند. کوچکتر کردن ترانزیستورهای سیلیکونی از نظر اندازه‌ی آن‌ها به حد نصاب خود رسیده است.

مواد با پایه‌ی کربنی، به خاطر ویژگی‌های الکتریکی جالبی که دارند، مورد توجه تحقیقات علمی قرار گرفته‌اند.گرافن یکی از آلوتروپ‌های کربن است، که از گرافیت تک لایه تشکیل شده است و ساختاری دو بعدی دارد. این ماده برای اولین بار، در سال ۲۰۰٤ در دانشگاه منچستر، توسط آندره گایم و کنستانتین نوولسف کشف شد. گرافن به علت عدم وجود باند گپ، ماده‌ی مناسبی برای ساختارهای ترانزیستوری نیست. برای حل این مشکل می‌توانیم از نانوریبون‌های گرافنی استفاده کنیم. نانوریبون‌های گرافنی دارای باند گپی هستند که مقدار این باند گپ رابطه‌ی معکوسی با عرض نانوریبون دارد. خواص الکترونیکی در نانوریبون‌ها به جهت و عرض نانوریبون وابسته است.

در این پایان‌نامه نانو ترانزیستوری شبیه سازی می‌شود، که از نانوریبون z شکل تشکیل یافته، و بالای یک دی‌الکتریک قرار گرفته، و توسط یک گیت فلزی کنترل می‌شود. سیستم مورد نظر از اتصال فلز- نیمه‌رسانا تشکیل شده و شامل سه منطقه است. با اعمال پتانسیل گیت به منطقه‌ی مرکزی، سیستم مشابه یک ترانزیستور اثر میدان عمل می‌کند. در این تحقیق منحنی‌های جریان ولتاژ سیستم شبیه سازی شده، مورد بررسی قرار گرفت. شبیه سازی‌ها در این تحقیق با نرم‌افزار ATK (Atomistix ToolKit) انجام شده است.

با توجه به این که تکنیک‌های ساخت این نوع از ترانزیستورها در مراحل ابتدایی خود می‌باشد، شبیه سازی روش مهمی برای ارزیابی عملکرد سیستم می‌باشد.

کلمات کلیدی :

ترانزیستور- نانوریبون گرافنی- نرم افزار ATK- منحنی جریان برحسب ولتاژ.

مقدمه

ترانزیستور یکی از مهم‌ترین قطعات الکترونیکی است، که ساخت آن تحول عظیمی در فرآورده‌های الکترونیکی ایجاد کرد، قبل از اختراع ترانزیستور، از لامپ‌های خلاء بزرگ و پرمصرف استفاده می‌شد. ترانزیستور از ادوارات حالت‌جامد است که از مواد نیمه‌رسانایی مانند سیلسیوم و ژرمانیوم ساخته می‌شود. ساخت ترانزیستورهای کوچک‌تر همواره از نیازهای انسان بوده‌است، چرا که سرعت پردازشگرها رابطه‌ی مستقیمی با تعداد ترانزیستورهای آن دارد. با کاهش اندازه ترانزیستور، تعداد بیشتری از آن بر روی یک سطح جای می‌گیرد و این باعث افزایش سرعت پردازشگرهای اطلاعات در مدارهای الکترونیکی و کاهش اندازه آن‌ها می‌شود. گوردون مور پیش‌بینی کرد که ابعاد ترانزیستورهای مدارهای مجتمع هر ۱۸ ماه نصف می‌شود. البته این قانون را می‌توان به گونه‌ای دیگر نیز بیان کرد، در این بیان جدید تعداد ترانزیستورهای مدارهای مجتمع هر دو سال تقریبا دو برابر می‌شود [۱]. با کوچک‌تر شدن ترانزیستورها نیاز به جایگزینی مناسب برای سیلیکون احساس می‌شود، زیرا این ماده دارای محدودیت است و نمی‌توان با آن ترانزیستور را از حدی کوچک‌تر کرد. بنابراین برای ادامه‌ی رشد صنعت الکترونیک باید به فکر فناوری‌های جایگزین بود.

کشف گرافن در سال ۲۰۰٤ انقلاب بزرگی در جهان ایجاد کرد [۲]. این ماده دارای ویژگی‌های منحصر به فرد بسیاری مانند: شفافیت بالا، رسانایی بیشتر از مس، سبک و انعطاف‌پذیر بودن و...است که این ویژگی‌ها گرافن را به یک ابر ماده، و رقیبی جدی، در برابر سیلیکون برای استفاده در صنعت الکترونیک تبدیل کرده است. البته گرافن فاقد باند گپ بوده و گزینه‌ی مناسبی برای ساخت ترانزیستور نمی‌باشد. برای حل این مشکل می‌توان از نانو ریبون‌های گرافنی بهره‌جست[۳]. نانوریبون‌های گرافنی براساس چینش اتم‌های لبه، به دو نوع زیگزاگ و آرمچیر تقسیم می‌شوند [٤]. نانوریبون‌های گرافنی ممکن است فلز یا نیمه‌رسانا باشند، برای مثال سیستم برای $N = 3m + 2$ فلزی است در حالی که برای $N = 3m$ و $N=3m+1$ نیمه‌رسانا می‌باشد [۵].

در فصل اول این پایان نامه به معرفی ترانزیستور و نحوه عملکرد آن پرداخته‌ایم. در فصل دوم به ویژگی‌های گرافن اشاره می‌شود، در ادامه نانوریبون‌های گرافنی را که باریکه‌ای از گرافن با عرض کم هستند [٦] را به عنوان ماده‌ای با گاف انرژی، و جایگزینی جدید برای سیلیکون معرفی می‌کنیم. در فصل سوم به معرفی نرم‌افزار ATK می‌پردازیم و روش شبیه‌سازی یک نانوترانزیستور Z شکل که تمامی قسمت‌های آن از نانوریبون‌های آرمیچر و زیگزاگ تشکیل شده است را یاد می‌گیریم و با اعمال دی‌الکتریک و گیت فلزی بر زیر این ساختار و با استفاده از روش DFT منحنی‌های جریان- ولتاژ قطعه‌ای پیشنهادی را استخراج می‌کنیم.

در فصل چهارم به بررسی نمودارهای جریان-ولتاژ ترانزیستور گرافنی، با روشDFT در ولتاژهای گیت مختلف، در ولتاژهای الکترود متفاوت، در طول کانال مختلف و در طول الکترود متفاوت می‌پردازیم.

فصل اول

آشنایی با ترانزیستور

۱–۱ قبل از اختراع ترانزیستور

۱–۱–۱ لامپ خلاء

کلمه‌ی الکترونیک از الکترون گرفته شده است. الکترونیک علم بررسی خواص الکترون‌ها و روش‌های کنترل و استفاده از آن‌هاست. الکترونیک جزو علومی است که در اوایل قرن بیستم پایه‌گذاری شده است. اما بسیاری از دستگاه‌هایی که از طریق جریان الکتریکی کار می‌کنند، قبل از قرن بیستم کشف شده‌اند. گسیل گرما یونی و جریان‌الکتریکی حاصل از آن در خلاء اساس تعداد بسیار زیادی از وسایل الکترونی است که کاربرد گسترده‌ای در مهندسی و زندگی روزمره پیدا کرده‌اند، که لامپ خلا ء (لامپ رادیو) و لامپ اشعه‌ی کاتدی دو نوع از لامپ‌های الکترونی است. کشف لامپ خلاء[1] دوقطبی یا دیود به وسیله‌ی جی‌ای‌فلمینگ[2] و لامپ‌خلاء سه‌قطبی یا تریود به وسیله‌ی لی‌دوفورست[3]، علم الکترونیک را پایه گذاری کرد [۷].

شکل ۱–۱ تصویر تعدادی لامپ خلاء.

۱–۱–۲ اساس کار لامپ‌های خلاء دوقطبی

لامپ‌های دوقطبی ساده‌ترین نوع لامپ‌های خلاء اند. آن‌ها از حبابی تشکیل شده‌اند که هوای داخل آن خارج شده‌است. به همین جهت به آن‌ها لامپ خلاء می‌گویند. داخل این حباب، دو فلز به نام‌های کاتد[4] و آند[5] وجود دارد. کاتد رشته سیمی است که وقتی گرم می شود، الکترون‌های آن آزادانه و با سرعت به حرکت در می‌آیند، به گونه‌ای که می‌توانند از آن خارج شوند. آند یک صفحه فلزی ساده است که در مقابل کاتد قرار دارد. اگر آند را به قطب مثبت باتری و کاتد را به قطب منفی آن وصل کنیم، آند دارای بار مثبت خواهد شد. قطب مثبت بار منفی را جذب می‌کند. بنابراین، آند الکترون‌هایی را که با گرم شدن کاتد از آن خارج می‌شوند را جذب می‌کند و الکترون‌ها به سوی آند حرکت می‌کنند. الکترون‌ها نمی‌توانند در هوا حرکت کنند، به همین جهت هوای داخل لامپ تخلیه شده است. حرکت الکترون‌ها از کاتد به آند، باعث تولید جریان الکتریکی در مدار می‌شود. حال اگر قطب مثبت باتری را به کاتد و قطب منفی آن را به آند وصل کنیم، در این صورت آند دارای بار منفی خواهد شد. می‌دانیم که بارهای منفی یکدیگر را دفع

[1] - Vacuum tube
[2] - John Ambrose Fleming
[3] - Lee De Forest
[4] - Cathode
[5] - Anode

می‌کنند، بنابراین الکترون‌هایی که از کاتد خارج می‌شوند، توسط آند جذب نمی‌شوند، بلکه از آن رانده می‌شوند و در اطراف کاتد باقی می‌مانند. به همین جهت در این وضعیت جریانی به وجود نمی‌آید.

پس لامپ دوقطبی دارای ساختمان ساده‌ای است. فقط هنگامی که آند به قطب مثبت وصل می‌شود، الکترون‌ها می‌توانند از مدار عبور کنند. ولی وقتی آند را به قطب منفی وصل می‌کنیم الکترون‌ها نمی‌توانند در مدار جاری شوند. از لامپ‌های دوقطبی برای یک‌طرفه کردن جریان برق استفاده می‌شود. به همین جهت آن‌ها را یک‌سو کننده[6] نیز می‌نامند [۸].

۱-۱-۳ اساس کار لامپ‌های خلاء سه‌قطبی (تریود)

لامپ‌های تریود به عنوان تقویت‌کننده[7] و یا نوسان‌ساز[8] در مدارهای الکترونیکی به کار می‌رفتند. از این لامپ‌ها برای کنترل جریان الکترون‌ها استفاده می‌شود. ساختمان آن‌ها مانند لامپ دوقطبی است با این تفاوت که یک شبکه فلزی بین کاتد و آند قرار گرفته است. اگر این شبکه هیچ ولتاژی نداشته باشد، لامپ درست مانند لامپ دوقطبی عمل می‌کند، یعنی الکترون‌ها از کاتد خارج و به آند انتقال می‌یابند. ولی اگر به شبکه فلزی کمی بار منفی داده شود، الکترون‌هایی که از کاتد خارج می‌شوند به وسیله شبکه دفع خواهند شد. به این ترتیب تعداد الکترون‌هایی که به آند می‌رسد، کاهش خواهد یافت. بنابراین جریان‌الکتریکی مدار نیز کاهش می‌یابد. از آنجا که شبکه خیلی به کاتد نزدیک است، می‌تواند تاثیر زیادی بر روی الکترون‌ها داشته باشد. در واقع بار منفی کوچکی که به شبکه داده می‌شود، می‌تواند الکترون‌هایی را که بین کاتد و آند جریان دارند را به میزان زیادی کنترل کند. اگر کمی بار مثبت به شبکه فلزی داده شود، درست عکس حالت قبل، شبکه کمک می کند که آند الکترون‌های بیشتری را جذب کند. بنابراین جریان الکترون‌ها از کاتد به آند افزایش می‌یابد. اگر بار مثبت شبکه کمی افزایش یابد، جریان الکترون‌ها از کاتد به آند به مقدار بسیار زیادی افزایش خواهد یافت. می‌بینید که وقتی ولتاژ شبکه را کمی تغییر می‌دهیم، جریان به مقدار زیادی تغییر می‌کند. بنابراین اگر بار مثبت شبکه را کمی بیشتر کنیم جریان چندین بار بزرگ می‌شود. پس از لامپ سه‌قطبی می‌توان برای تقویت جریان‌های ضعیف استفاده کرد. اگر آند یک لامپ سه قطبی به شبکه لامپ سه قطبی دیگری متصل شود، جریان خیلی بیشتر تقویت خواهد شد [۸].

۱-۱-۴معایب لامپ‌ها

یک عیب عمده این لامپ‌ها، احتیاج به یک عنصر گرم‌کننده به نام فیلامان بود که باعث می‌شد، توان مصرفی لامپ و در نتیجه وسیله مزبور زیاد بوده، ایجاد حرارت نماید و شروع کار دستگاه پس از روشن کردن آن‌ها نباشد. همچنین از معایب دیگر آنها می‌توان به حجم زیاد، شکننده بودن و گرانی اشاره نمود.

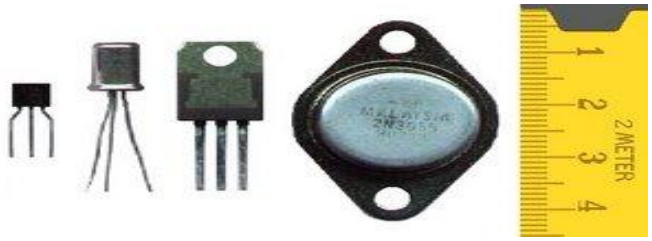
---

[6] - Rectifier
[7] - Amplifier
[8] - Oscillator

۱-۲ ناکارآمدی لامپ خلاء و اختراع ترانزیستور

۱-۲-۱ تاریخچه‌ی اختراع ترانزیستور

اولین الگوی پیشنهادی ترانزیستور اثرمیدان در سال ۱۹۲۵ در کانادا توسط فیزیکدانی به نام جولیوس لیلینفلد[۹] ارائه شد، اما او هیچ مقاله‌ای در باره قطعه‌اش چاپ نکرد. در سال ۱۹۳٤ یک فیزیکدان آلمانی به نام دکتر اسکار هیل[۱۰] ترانزیستور اثر میدان، مشابه‌ی را به ثبت رساند. ۲۳ دسامبر ۱۹٤۷ در ازمایشگاه بل، جان باردن[۱۱]، والتر بارتین[۱۲] به رهبری ویلیام شاکلی[۱۳] در ایالات متحده آزمایشی ترتیب دادند و مشاهده کردند که وقتی اتصال دو نقطه‌ی طلا بر ژرمانیوم اعمال می شود، سیگنال خروجی به دست آمده از سینال ورودی قوی تر است، و به این ترتیب اولین ترانزیستور اتصال نقطه‌ای کشف شد [۹]. اصطلاح ترانزیستور برای اولین بار توسط جان ر. پیرس[۱٤] مطرح شد، که از ترکیب دو کلمه، انتقال[۱۵] و مقاومت[۱٦] ترکیب شده است [۱۰]. در سال ۱۹۵٦ از شاکلی، باردن و براتین بخاطر تحقیقاتشان در مورد نیمه هادی‌ها و کشف اثر ترانزیستور با جایزه نوبل فیزیک قدردانی شد [۱۱].



شکل ۱-۲ تصویر تعدادی ترانزیستور.

۱-۲-۲ انواع تراتزیستورها

دو دسته مهم از ترانزیستورها ترانزیستور دوقطبی پیوندی[۱۷](BJT) و ترانزیستور اثر میدان [۱۸](FET) هستند. ترانزیستورهای اثر میدان نیز خود به دو دسته‌ی ترانزیستور پیوند اثر میدانی[۱۹](JFET) وماسفت‌ها[۲۰] (MOSFET) تقسیم می‌شوند. با توجه به استفاده از ترانزیستور ماسفت در این تحقیق، در ادامه به بررسی ویژگی‌های این نوع از ترانزیستور خواهیم پرداخت. به همین منظور ابتدا به ساختار های حالت جامد می‌پردازیم.

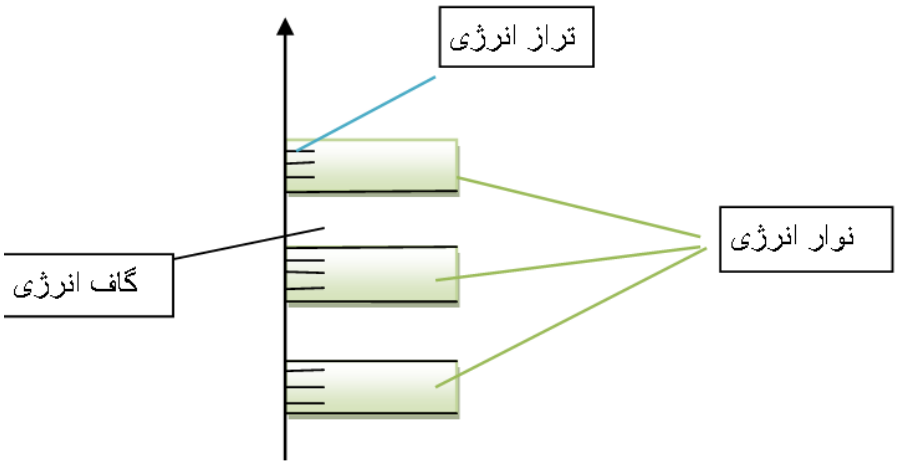
---

9 - Julius Edgar Lilienfeld
10 - Oskar Heil
11 - John Bardeen
12 - Walter Brattain
13 - William Shockley
14 - John R. Pierce
15 - Transfer
16 - Resistor
17 - Bipolar Junction Transistors
18 - Field Effect Transistors
19 - Junction Field Effect Transistors
20 - Metal Oxide SemiConductor Field Effect Transistor

۱-۳ آشنایی با فیزیک حالت جامد

۱-۳-۱ تئوری نواری

ترازهای انرژی الکترون‌ها در جسم جامد، مانند ترازهای انرژی الکترون‌ها در یک اتم، مقدارهایی گسسته‌اند. ترازهای انرژی الکترون‌ها در جسم جامد، نوارهای مشخصی را تشکیل می‌دهند. هر نوار انرژی شامل تعداد بسیار زیادی ترازهای گسسته است که از نظر مقدار انرژی بسیار به هم نزدیک‌اند. تفاوت انرژی برخی نوارها بسیار زیاد است. یعنی بین آخرین تراز انرژی نوار پایین با اولین تراز انرژی نوار بالا، اختلاف انرژی زیادی وجود دارد. در این فاصله هیچ تراز انرژی وجود ندارد، یعنی الکترون‌ها در این فاصله نمی‌توانند قرار بگیرند. این ناحیه را ناحیه‌ی ممنوع یا گاف انرژی[۲۱] می‌گوییم.



شکل ۱-۳ نحوه قرارگیری ترازها، نوارها و گاف انرژی.

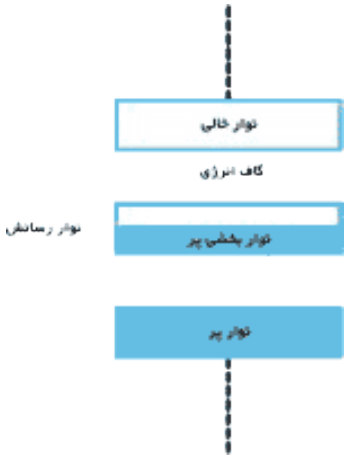
در جسم جامد الکترون‌ها با جذب انرژی می‌توانند از تراز انرژی پایین‌تر به تراز انرژی بالاتر در همان نوار منتقل شوند. اما برای تغییر تراز انرژی از یک نوار به نوار بالاتر، انرژی بسیار زیادی لازم است که در شرایط معمولی، اتفاق نمی‌افتد. بنابراین گذار الکترون از یک تراز انرژی به تراز انرژی دیگر، تنها در صورتی انجام می‌شود که نوار نیمه‌پر باشد؛ چون الکترون‌ها فقط می‌توانند به ترازهای انرژی بالاتر در همان نوار گذار کنند و گذار از یک نوار به نوار بالاتر امکان‌پذیر نیست. از آنجاییکه الکترون‌های موجود در نوارهای پر، امکان گذار از یک تراز انرژی به تراز انرژی بالاتر را ندارند، بنابراین سهمی در رسانایی الکتریکی ندارند. به بیان دیگر تنها الکترون‌هایی که در نوارهای نیمه‌پر قرار دارند و امکان گذار از یک تراز انرژی به تراز انرژی بالاتری در همان نوار را دارند، در رسانایی الکتریکی جسم جامد نقش دارند [۱۲].

[21] - Band gap

۱-۳-۲ رسانش الکتریکی در مدل ساختار نواری

الف) ساختار نواری اجسام رسانا

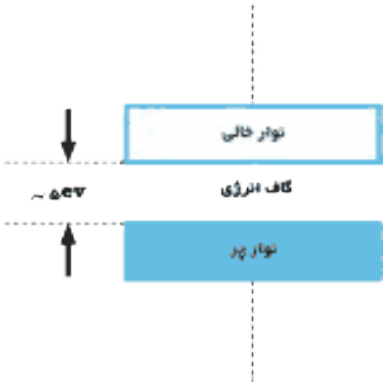
اگر در ساختار نواری جسم جامد، نوار نیمه‌پر وجود داشته باشد، آن جسم رسانا است. زیرا الکترون‌های نوار نیمه‌پر به آسانی و تحت تاثیر اختلاف پتانسیل الکتریکی که دو سر رسانا اعمال می‌شود، می‌توانند تراز انرژی خود را تغییر دهند و در رسانایی الکتریکی شرکت کنند. این الکترون‌ها را الکترون‌های رسانش و نوار نیمه‌پر را نوار رسانش می‌گوییم. پس مشخصه‌ی اصلی رساناها، وجود نوار نیمه‌پر در ساختار نواری آن‌ها است (شکل ۱-٤) .



شکل ۱-٤ نحوه قرارگیری ترازها، نوارها و گاف انرژی در یک جسم رسانا.

ب) ساختار نواری اجسام نارسانا

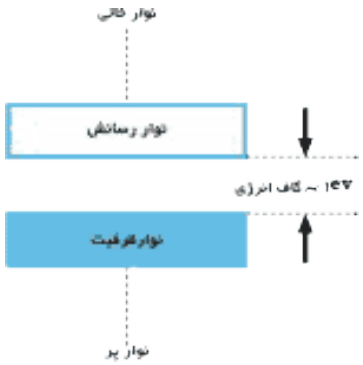
در ساختار نواری جامدات نارسانا، نوار نیمه‌پر وجود ندارد. گاف انرژی در جامدات نارسانا بسیار بزرگ است و بنابراین هیچ الکترونی نمی‌تواند از نوار پر به نوار خالی گذار کرده و موجب رسانایی الکتریکی شود. در این مواد رسانایی الکتریکی انجام نمی‌شود .



شکل ۱-۵ نحوه قرارگیری ترازها، نوارها و گاف انرژی در یک جسم نارسانا.

پ) ساختار نواری اجسام نیمه‌رسانا

در ساختار نواری جامدات نیمه‌رسانا، همانند نارسانا، نوار نیمه‌پر وجود ندارد. اما گاف انرژی در نیمه‌رساناها بسیار کمتر از نارساناها است. در نیمه‌رسانا، بالاترین نوار پر را نوار ظرفیت و پایین‌ترین نوار خالی را نوار رسانش می‌گوییم. کوچک بودن گاف انرژی در جامدات نیمه رسانا موجب می‌شود که تعدادی از الکترون‌های نوار ظرفیت حتی در دمای اتاق برانگیخته شده، به نوار رسانش بروند و در رسانایی الکتریکی شرکت کنند. با افزایش دما، الکترون‌های بیشتری امکان گذار از نوار ظرفیت به نوار رسانش می‌یابند و بنابراین رسانایی الکتریکی بیشتر می‌شود [۱۳] .



شکل ۱-٦ نحوه قرارگیری ترازها، نوارها و گاف انرژی در یک جسم نیمه‌رسانا.

۱-۳-۳برخی ویژگی های نیمه رساناها

همانطور که می‌دانیم افزایش دما موجب افزایش مقاومت ویژه‌ی الکتریکی مواد رسانا می‌شود. آزمایش نشان می‌دهد، برخلاف رسانا، در نیمه‌رسانا افزایش دما موجب کاهش مقاومت ویژه‌ی الکتریکی نیمه‌رسانا می‌شود. توجیه این پدیده در نیمه‌رسانا تنها با استفاده از نظریه‌ی نواری امکان‌پذیر است. در دماهای پایین نوار ظرفیت[۲۲] نیمه‌رسانا کاملا پر از الکترون و نوار رسانش[۲۳] کاملا خالی از الکترون است. از این رو نوار ظرفیت در رسانش نقشی ندارد، بنابراین در دماهای پایین، نیمه‌رسانا مشابه نارسانا رفتار می‌کند. با افزایش دما در نیمه‌رسانا، تعدادی از الکترون‌های نوار ظرفیت به نوار رسانش گذار می‌کنند. بدین ترتیب هم الکترون‌هایی که در نوار رسانش قرار می‌گیرند، موجب رسانایی الکتریکی می‌شوند و هم تعدادی تراز خالی در نوار ظرفیت ایجاد می‌شود. با گذار الکترون از نوار ظرفیت به نوار رسانش، تعدادی جای خالی الکترون در نوار ظرفیت ایجاد می‌شود. جای خالی الکترون در نوار ظرفیت را حفره می‌گوییم. حالا با ایجاد این جاهای خالی در نوار ظرفیت، الکترون‌های این نوار هم می‌توانند گذار انجام دهند و از تراز انرژی پایین‌تر به تراز انرژی بالاتر بروند. این مسئله موجب رسانایی الکتریکی می‌شود [١٤].

[22] - Conduction band
[23] - Valence band

۱-۳-۴ آلایش[۲۴] نیمه‌رسانا

نیمه‌رسانایی را که ناخالصی نداشته باشد، نیمه‌رسانای ذاتی می‌گوییم. در نیمه‌رسانای ذاتی تعداد الکترون‌های موجود در نوار رسانش با تعداد حفره‌های موجود در نوار ظرفیت با هم برابرند.

همان‌طور که متوجه شدیم با افزایش دما می‌توان تعداد حاملان بار الکتریکی و در نتیجه رسانایی الکتریکی را در مواد نیمه‌رسانا افزایش داد. علاوه بر افزایش دما، با اضافه کردن مقادیر کمی ناخالصی به ماده‌ی نیمه‌رسانا نیز می‌توان تعداد حاملان بار الکتریکی را به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش داد. منظور از ناخالصی، اتم‌های غیرهم‌جنس با اتم‌های نیمه‌رسانا است. به عمل اضافه کردن ناخالصی به نیمه‌رسانا، "آلایش نیمه‌رسانا" می‌گوییم و نیمه‌رسانایی را که به آن اتم‌های ناخالصی اضافه شده است، نیمه‌رسانای غیرذاتی می‌نامند. با افزودن ناخالصی به نیمه‌رسانا، مقاومت ویژه‌ی الکتریکی آن کاهش می‌یابد و در نتیجه رسانایی الکتریکی نیمه‌رسانا به صورت قابل توجهی بیشتر می‌شود.

آلایش نیمه‌رسانا به دو روش مختلف انجام می شود. روش اول آن است که اتم ناخالصی، یک الکترون ظرفیت بیشتر از اتم های نیمه- رسانای ذاتی داشته باشد و روش دوم ان است که اتم ناخالصی، یک الکترون ظرفیت کمتر از اتم های نیمه رسانای ذاتی داشته باشد.نیمه- رسانایی که به روش اول آلایش یافته باشد، نیمه رسانای نوع n و نیمه رسانایی که به روش دوم آلایش یافته باشد نیمه رسانای نوع p می‌نامند.

برای مثال سیلسیوم[۲۵] و ژرمانیم[۲۶] دو ماده ی نیمه‌رسانا هستند که معمولا در قطعه‌های الکترونیکی به کار می روند. اتم‌های هر دوی این عنصرها، هر یک چهار الکترون ظرفیت دارند. حال اگر در هر یک از این نیمه‌رساناها به جای یکی از اتم ها یک اتم ناخالصی پنج یا سه ظرفیتی وارد کنیم، نیمه‌رسانا را آلاییده‌ایم، و به ترتیب نیمه‌رسانای غیر ذاتی نوع n یا p به دست آورده ایم.

الف – نیمرسانای نوع n :

فرض کنیم که به نیمه‌رسانایی از جنس سیلسیوم یک اتم ناخالصی پنج ظرفیتی (آرسنیک) وارد کنیم. همان‌گونه که در شکل ۱-٦ نشان داده شده است، چهار تا از الکترون های ظرفیت اتم آرسنیک در پیوند بین این اتم و اتم‌های سیلسیوم همسایه شرکت می‌کنند.این چهار الکترون به جای الکترون‌های اتم سیلسیوم ترازهای انرژی را در نوار ظرفیت اشغال می‌کنند.

[24] - Doping
[25] - Silicon
[26] - Germanium