

دانشکده فنی شهید شمسی پور

دانشگاه فنی و حرفه ای

پایان نامه دوره کارشناسی مهندسی الکترونیک

عنوان پروژه:

مدارهای مجتمع با نانوترانزیستور

استاد پروژه:

مهندس رجایی

دانشجو:

اسدالله امینی

فروردین ۱۳۹۱



اکنون که با لطف و عنایت الهی موفق به اتمام این مجموعه شدم از زحمات استاد گرانقدر جناب

آقای مهندس رجایی که مرا در گردآوری این مجموعه یاری نموده اند کمال قدردانی و سپاس را

دارم و از خدای متعال توفیقات روز افزون ایشان را خواستارم. همچنین جا دارد از کلیه دوستانی

که مرا در انجام این پایان نامه یاری کرده اند سپاسگذاری نمایم.

چکیده:

پروژه کارشناسی که ملاحظه می کنید در زمینه ساخت مدارات مجتمع با نانو ترانزیستورها می باشد که در این پروژه به اصول کار و تجزیه و تحلیل قسمت های مختلف فرایند ساخت و همچنین چالش های پیش روی پژوهشگران و غول های صنعت الکترونیک پرداخته شده است. و همچنین در پایان نیز به بررسی برخی از مقالات لاتین در زمینه نانوسیم های سیلیکونی، الکترونیک وجوه وابسته، نانوسیم های تحت پیشرو، نانو ترانزیستورهای فلزی و هیدرو - کسپلاسیون و سطح پرداخته شده است.

مقدمه	۱
فصل ۱: پیشگفتار	۲
۱.۱ فیزیک حالت جامد و دیود	۳
۱.۲ رسانا، نارسانا و نیمه رسانا در نظریه‌ی نواری	۱۰
۱.۳ مواد نیمه رسانا، انواع و ویژگی ها	۱۲
۱.۴ دیود	۲۰
فصل ۲: آشنایی با ساختار و عملکرد ترانزیستورها و ترانزیستورهای نسل جدید	۲۶
۲.۱ مقدمه	۲۷
۲.۲ ترانزیستور دوقطبی (BJT)	۳۴
۲.۳ ترانزیستورهای با اثر میدان	۴۰
۲.۴ ترانزیستورهای کوچک و کوچکتر می شوند	۵۲
۲.۵ ساخت نانو ترانزیستورهای فلزی	۵۶
فصل ۳: فناوری ساخت مدارهای مجتمع	۷۰
۳.۱ مقدمه	۷۱
۳.۲ ملاحظات کلی فرایند ساخت مدارهای مجتمع	۷۲
فصل ۴: چالش‌های فناوری نانو برای ساخت مدارهای مجتمع	۸۷
۴.۱ مقدمه	۸۸

۴.۲	چالش اصلی.....	۸۹
۴.۳	نانوالکترونیک و چالش های کوانتومی.....	۹۳
۴.۴	اتصالات میانی مدار های مجتمع، چالشی دیگر برای نانو الکترونیک.....	۹۸

فصل ۵: الکترونیک وجوه وابسته و خواصی از نانوسیم های سیلیکونی.....

۵.۱	مقدمه.....	۱۰۴
۵.۲	نانوسیم های نیمه هادی.....	۱۰۵
۵.۳	اثر غیر فعال سازی سطحی در المانهای نانوسیم-مستقر.....	۱۱۴
۵.۴	مرور کلی.....	۱۱۹

فصل ۶: الکترونیک وجوه وابسته، خواصی از سیلیکون نشش ضلعی، نانوسیم های**تحت پیشرو، هیدروکسیلاسیون و سطح و بازسازی.....**

۶.۱	مقدمه.....	۱۲۲
۶.۲	روش شناسی.....	۱۲۴
۶.۳	نتایج و بحث ها.....	۱۲۶
۶.۴	نتیجه گیری.....	۱۴۰
۶.۵	خلاصه فصل ۵ و ۶ و کارهای آینده.....	۱۴۱

منابع و مأخذ.....

۱۴۴

فهرست جداول و نمودارها

جدول ۱-۱: مقاومت ویژه ی الکتریکی چند ماده در دمای اتاق بر حسب اهم متر..... ۵

شکل ۱-۱: نحوه قرارگیری ترازها، نوارها و گاف انرژی..... ۸

شکل ۱-۲: نحوه قرارگیری ترازها، نوارها و گاف انرژی در یک جسم رسانا..... ۱۰

شکل ۱-۳: نحوه قرارگیری ترازها، نوارها و گاف انرژی در یک جسم نارسانا..... ۱۱

شکل ۱-۴: نحوه قرارگیری ترازها، نوارها و گاف انرژی در یک جسم نیمه رسانا..... ۱۲

شکل ۱-۵: ساختار نواری یک جسم نیمه رسانا..... ۱۴

شکل ۱-۶: آلایش سیلیسیوم با ارسنیک..... ۱۷

شکل ۱-۷: ساختار نواری سیلیسیوم آلایش شده با ارسنیک..... ۱۷

شکل ۱-۸: آلایش سیلیسیوم با بور..... ۱۸

شکل ۱-۹: ساختار نواری سیلیسیوم آلایش شده با بور..... ۱۹

شکل ۱-۱۰: یک پیوند p-n..... ۲۱

شکل ۱-۱۱: میدان الکتریکی- بار منفی خلاف جهت میدان و بار مثبت همجهت میدان حرکت

می کند جهت میدان الکتریکی با بردارهای آبی مشخص شده است..... ۲۲

- شکل ۱-۱۲: ایجاد ناحیه تهی و جهت میدان الکتریکی داخلی..... ۲۳
- شکل ۱-۱۳: اتصال منبع ولتاژ الکتریکی به یک پیوند P-N به صورتی که پایانه مثبت به P و پایانه منفی به N متصل است..... ۲۴
- شکل ۱-۱۴: اتصال منبع ولتاژ الکتریکی به یک پیوند P-N به صورتی که پایانه مثبت به N و پایانه منفی به p متصل است..... ۲۴
- شکل ۱-۱۵: یک دیود واقعی که از یک پیوند P-N تشکیل شده است..... ۲۵
- شکل ۲-۱: موج آشکار سازی به دلیل فاصله تضعیف می شد و فقط به وسیله هدست قابل شنود بود..... ۳۱
- شکل ۲-۲: اثر ادیسون و گرایش ذرات سیاه در لامپ حبابی..... ۳۲
- شکل ۲-۳: نماد و شماتیک پیوندها در ترانزیستورهای BJT..... ۳۵
- شکل ۲-۴: نمایش نسبت تقریبی لایه های ترانزیستور..... ۳۶
- شکل ۲-۵: الکترون های عبوری از بیس و کلکتور..... ۳۷
- شکل ۲-۶: چگونگی ساختار ترانزیستور JFET، Nکانال و p کانال..... ۴۲
- شکل ۲-۷: روش عملکرد پایه ای JFET..... ۴۳
- شکل ۲-۸: منحنی مشخصه خروجی و علامت های اختصاری JFET کانال n و p..... ۴۴
- شکل ۲-۹: ساختار یک ترانزیستور NMOS..... ۴۶
- شکل ۲-۱۰: ساختار یک ترانزیستور PMOS..... ۴۷
- شکل ۲-۱۱: یک ترانزیستور NMOS متصل به منبع ولتاژ..... ۴۷

- شکل ۱۲-۲: در اثر پدیده‌ی القای الکتریکی، حفره‌های موجود در زیربنای نوع p از زیر سطح گیت رانده می‌شوند و یون‌های منفی به جای می‌ماند..... ۴۸
- شکل ۱۳-۲: با افزایش ولتاژ گیت به تدریج تعدادی از الکترون‌های آزاد که در ناحیه‌ی سورس قرار دارند به محدوده‌ی زیر اکسید گیت وارد می‌شوند..... ۴۹
- شکل ۱۴-۲: اگر ولتاژ گیت به اندازه‌ی کافی منفی شود، یک لایه‌ی وارون از حفره‌ها در زیر لایه‌ی اکسید تشکیل می‌شود..... ۴۹
- شکل ۱۵-۲: (a) علامت اختصاری MOSFET با کانال تشکیل شونده n، (b) علامت اختصاری MOSFET با کانال تشکیل شونده p..... ۵۰
- شکل ۱۶-۲: (a) منحنی مشخصه خروجی و (b) منحنی مشخصه انتقالی ترانزیستور MOS با کانال تشکیل شونده n..... ۵۱
- شکل ۱۷-۲: (a) منحنی مشخصه خروجی و (b) منحنی مشخصه انتقالی ترانزیستور MOS با کانال تشکیل شونده p..... ۵۱
- شکل ۱۸-۲: مقایسه‌ی قانون مور و تعداد ترانزیستورهای CPU از سال ۱۹۷۱ تا ۲۰۰۸..... ۵۲
- شکل ۱۹-۲: اصول عملکرد ترانزیستور اثر میدان فلزی..... ۵۸
- شکل ۲۰-۲: اصول عملکرد ترانزیستور شاخه-Y فلزی..... ۵۹
- شکل ۲۱-۲: فرایند ساخت نانوترانزیستورهای فلزی..... ۶۰
- شکل ۲۲-۲: تصویر SME از یک ترانزیستور فلزی نقره ای و همتراز به پدهای تماس طلا را نشان می دهد..... ۶۱
- شکل ۲۳-۲: تصویر SEM گرفته شده در بزرگ نمایی $66,080\times$ تاثیر اثر سایه ناشی از تبخیر..... ۶۵

دوگانه از طلا و Nic را نشان می دهد.

شکل ۲-۲۴: تصویر SEM گرفته شده در بزرگ نمایی $150,000\times$ یک ترانزیستور فلزی

شاخه-Y در SiN با عرض درین - سورس ۲۷ نانومتر را نشان می دهد..... ۶۶

شکل ۲-۲۵: تصویر SEM گرفته شده در بزرگ نمایی $280,000\times$ ترانزیستور اثر میدان

فلزی نقره ای در کوارتز با عرض کانال درین - سورس ۲۰ نانومتر را نشان می دهد..... ۶۸

شکل ۳-۱: نمای بالایی و کناری یک ترانزیستور NMOS و یک ترانزیستور PMOS..... ۷۲

شکل ۳-۲: سمت راست: سیلیکون نوع p و سمت چپ: سیلیکون نوع n..... ۷۴

شکل ۳-۳: نمای یک بالایی و کناری یک ترانزیستور NMOS و یک ترانزیستور PMOS..... ۷۶

شکل ۳-۴: ۵ لایه‌ی مختلف ترانزیستورهای شکل (۳-۳)..... ۷۶

شکل ۳-۵: چگونگی انتقال يك لایه از چینش به ویفر..... ۷۸

شکل ۳-۶: نمای بالایی و کناری یک ترانزیستور NMOS و یک ترانزیستور PMOS و ۵ لایه

مختلف آن..... ۸۲

شکل ۳-۷: میزان آرایش با شدت و طول عملیات کاشت معین می‌شود و عمق ناحیه آلایده با

انرژی پرتو تنظیم می‌شود..... ۸۳

شکل ۳-۸: جهت پرتوی کاشت با محور کریستال..... ۸۴

شکل ۴-۱: طیف امواج الکترومغناطیس که نور مرئی بخش کوچکی از آن است..... ۹۰

شکل ۴-۲: آزمایش یانگ برای اثبات رفتار موجی نور..... ۹۱

شکل ۴-۳: نمایی از یک تفسیر کوانتومی از اتم هیدروژن..... ۹۴

شکل ۴-۴: تخلیه بار الکتریکی بین ابر و زمین..... ۹۶

شکل ۵- ۴: نوک "میکروسکوپ تونل زنی روبشی" بر اساس پدیده‌ی تونل زدن الکترون‌ها کار

می‌کند..... ۹۶

شکل ۶- ۴: برای اتصال آجرها در یک ساختمان به مصالح ساختمانی دیگری نظیر شن و ماسه و سیمان نیاز داریم. برای برقراری اتصالات ترانزیستورها هم به سیم‌های فلزی که خواص

رسانایی الکتریکی دارند، احتیاج است..... ۹۸

شکل ۷- ۴: پژوهشگران راه حل کاهش پیچیدگی اتصالات میانی را در فرآیند طراحی و سپس فرآیند ساخت، در چند لایه کردن اتصالات میانی یافتند (الف- تصویر شماتیک و ب- تصویر واقعی)..... ۹۹

شکل ۸- ۴: از آنجاییکه نانو لوله‌های کربنی تک جداره (SWCNTs) و نانو لوله‌های کربنی چندجداره (MWCNTs) توانایی رسانایی جریان الکتریکی با چگالی زیاد را دارند، به صورت خاص می‌توانند به عنوان اتصالات میانی مدارات الکتریکی مجتمع مورد استفاده قرار بگیرند..... ۱۰۱

شکل ۱- ۵: (الف) میکروسکوپ الکترونی پویشی سطح مقطع از نانوسیم های ژرمانیومی رشد کرده رونشستی (اپی تکسی) بر روی بستر سیلیکون (۱۱۱) از ۴۰ نانومتر طلا کلونیدی رسوب دهی شده با استفاده از روش افزایشی HF است.

عمدتاً نمایش نانوسیم های ژرمانیومی عمودی از طول و قطر یکنواخت. (ب) طرح مشاهده میکروسکوپ الکترونی پویشی از نمودار (الف) نشان داسه تای دیگر (۱۱۱) جهت رشد (الحاق) بزرگ نمایی از نانو سیم های ژرمانیومی عمودی (نوار در مقیاس ۱۰۰ نانومتر است). (ج)

دو مرحله مقطع دمایی به رشد نانوسیم های ژرمانیومی در (الف) و (ب) استفاده شده است..... ۱۰۹

شکل ۲- ۵: سامانه سنتز تبخیر حرارتی نانوسیم ژرمانیومی..... ۱۱۰

شکل ۳- ۵: (الف) تصاویر میکروسکوپ الکترونی انتقالی (TEM) از رشد نانوسیم های سیلیکونی ۳.۸ نانومتر در امتداد جهت ۱۱۰، (ج) تصویر سطح مقطع میکروسکوپ الکترونی انتقالی دقت بالا (HRTEM)، و اشکال تعادل برای نانوسیم (ب) و (د)، سطح مقطع

- نانوسیم توسط ساختار ولف پیش بینی شده است. مقیاس میله ها ۵ نانومتر هستند. نانوسیم های سیلیکونی پراکنده شده در اپی تکسی (رونشست) با یک میکروتومی به ضخامت ۵۰ نانومتر و سپس به شبکه های میکروسکوپ ca برش داده شده اند. انتقال الکترونی انتقال داده شده است..... ۱۱۲
- شکل ۴-۵:** تصویر میکروسکوپ تونلی پویشی (STM) و نمای شماتیکی از یک نانوسیم..... ۱۱۳
- سیلیکونی با یک وجوه سیلیکونی (۰۰۱) جهت کریستالوگرافی نشان داده شده است. (الف) جریان ثابت تصویر میکروسکوپ تونل زنی پویشی از یک نانوسیم سیلیکونی در یک بستر HOPG. محور سیم ها در امتداد جهت [۱۱۰] است (ب) نمای شماتیکی از مرحله دی هیدروکسید (Dihydride) بر روی سیلیکون (۰۰۱) است.
- بترتیب دایره های آبی بزرگ و قرمز نشان دهنده اتم های سیلیکون و هیدروژن در مرحله (فاز) دی هیدروکسید است. دایره های کوچک آبی متناظر با اتم سیلیکون بر روی لایه های زیرین است، (ج) نمای شماتیکی از یک نانوسیم سیلیکونی که با چهار نوع وجوه (۱۱۱) و دو نوع وجوه (۰۰۱) محدود شده است. محور سیم ها در امتداد جهت (۱۱۰) است.
- شکل ۵-۵:** طرح های کارکردی نانوسیم های ژرمانیومی با استفاده از واکنش Grignard..... ۱۱۵
- (پایین) و Alkanethiol (بالا) را نشان می دهد.
- شکل ۶-۵:** تصوی TEM با وضوح بالا از (الف) سطح نانوسیم ژرمانیوم پرورده نشده که اکسید غیر یکنواخت و پوشش کربن دار و نانوسیم های ژرمانیومی با (ب) پوشش سولفید، (ج) خاتمه دهی کلرید، (د) و خاتمه دهی تک لایه hexyl پیوند کووالانسی نشان داده شده است..... ۱۱۶
- شکل ۷-۵:** تصویر SEM از یک المان که شامل شش کانال نانوسیم است. عرض مسطح و ضخامت از هر نانوسیم بترتیب ۷۰ نانومتر و ۹۰ نانومتر است، ویژگی های انتقال از یک عامل قطعه در محیط های خشک و مرطوب است..... ۱۱۸
- شکل ۸-۵:** کارکردی از نانوسیم پلی-سیلیکون برای آشکارسازی دوپامین (dopamine) توسط ترانزیستورهای اثر میدانی نانوسیمی پلی-سیلیکون. تصویر شماتیک از نانوسیم پلی-سیلیکون اصلاح سطحی نشان داده شده است..... ۱۱۸

شکل ۱-۶: سطح مقطع از دو نوع از نانوسیم های سیلیکونی اینجا پس از آرامش مورد مطالعه قرار گرفته است. ساختار چپ بعنوان نانوسیم ۱ و دیگری نانوسیم ۲ با بازسازی سطحی همانطور که در متن اشاره شده است. نانوسیم ها در امتداد جهت [۱۱۰] می باشند.

پسوند A و B بترتیب دلالت بر وجوه نوع (۱۱۱) و نوع (۰۰۱) است. توپ فیروزه ای نشان دهنده اتم سیلیکون و توپ خاکستری نشان دهنده اتم هیدروژن است..... ۱۲۴

شکل ۲-۶: ساختار cis (بالا) و Trans (پایین) از گروه های هیدروکسیل در وجوه (۰۰۱) از NW1B-4OH پس از آرامش ساختاری است. توپ های فیروزه ای، قرمز و خاکستری به ترتیب نماینده اتم های، سیلیکون، اکسیژن و هیدروژن هستند..... ۱۲۷

جدول ۱-۶: محاسبه انرژی تشکیل شده، باند انرژی برای همه سامانه ها ۱۲۹

شکل ۳-۶: ساختار باند الکترونیکی و شکاف باند از نانوسیم های سیلیکونی مختلف است..... ۱۲۹

سطوح فرمی همه در وسط از باند شکاف هستند. نقاط K در امتداد نمونه برداری شده T-X هستند.

جدول ۲-۶: تغییرات در باند شکاف الکترونیکی (Eg) با توجه به بازسازی سطحی برای نانوسیم هایی با قطر های مختلف می باشد..... ۱۳۰

جدول ۳-۶: نسبت محاسبه از جرم موثر برای الکترون (me^*) و حفره (mh^*) به جرمی از الکترون آزاد m برای همه سامانه ها می باشد..... ۱۳۲

شکل ۴-۶: HOMO تابع موج مداری (اوربیتال) (از همان مقدار خط تراز ۰.۰۴۵) در ارتباط با سامانه های مختلف نانوسیم. توپ فیروزه ای، قرمز، و خاکستری بترتیب نشان دهنده سیلیکون، اکسیژن، و اتم هیدروژن هستند..... ۱۳۴

شکل ۵-۶: نمودار PDOS برای اتم هیدروژن (زرد جامد)، اکسیژن (فیروزه ای جامد)، و سیلیکون (سیاه و سفید نقطه ای)، بر روی وجوه (۱۱۱)، اتم هیدروژن (سبز جامد) و سیلیکون (خط تیره آبی) بر روی وجوه (۰۰۱) و اتم سیلیکون (قرمز جامد) در اطراف مرکز برای NW1A-4OH..... ۱۳۵

شکل ۶-۶: PDOS از اتم های سیلیکون بر روی وجوه سطحی (۰۰۱) (خط آبی)، وجوه سطحی

(۱۱۱) (خط سیاه نقطه ای)، و در اطراف مرکز (رنگ قرمز جامد) برای نانوسیم ۲ ،

۱۳۸..... NW2B-4OH و NW2A-4OH

شکل ۶-۷: PDOS از اتم های سیلیکون بر روی وجوه سطحی (۰۰۱) (خط آبی)، وجوه سطحی

(۱۱۱) (خط سیاه نقطه ای)، و در اطراف مرکز (رنگ قرمز جامد) برای نانوسیم ۱ ،

۱۳۹..... NW1B-4OH و NW1A-4)H

ریزپردازنده ها به صورت یک جزء لاینفک در بسیاری از محصولات که ما هرروزه از آنها استفاده می کنیم درآمده اند، مانند تلویزیون، اسباب بازی ها، رادیو، کامپیوترها و هر چیزی که فکرش را کنید. ولی این ترانزیستورها هستند که اجزای اصلی ریزپردازنده ها را تشکیل میدهند.

درپایین ترین سطح خود ، ممکن است ترانزیستورها به نظر ساده برسند. اما تولید آن ها عملاً به سال های سال تحقیقات کشنده نیاز داشته است. تا پیش از ترانزیستورها ، کامپیوترها به لامپ های خلاء و کلید های مکانیکی متکی بودند. در سال ۱۹۵۸ تعدادی مهندس (که یکی از آن ها به نام رابرت نويس ، بعداً پایه گذار شرکت اینتل شد) دست به دست هم دادند تا ۲ ترانزیستور را روی یک قطعه بلور سیلیکون بکارند و اولین مدار مجتمع را بسازند؛ چیزی که به ساخت ریزپردازنده منجر شد. و هم اکنون نیز پژوهشگران و غول های صنعت الکترونیک بیکار ننشسته اند و روز به روز به دنبال کشف و ساخت ترانزیستورهای نوع و در ابعاد کوچکتر می باشند چراکه با کاهش ابعاد ترانزیستورها می توان تعداد بیشتری ترانزیستور درون مدارات مجتمع قرار داد و این خود باعث افزایش سرعت و حافظه مدارات مجتمع می شود.

ترانزیستورها در واقع کلیدهای قطع و وصل برق در ابعاد مینیاتوری هستند. اگر ریزپردازنده را یک «ساختمان» در نظر بگیرید ، ترانزیستورها، حکم آجری را دارند که برای بنای این ساختمان باید روی هم گذاشته شوند.

درست همانند یک کلید ساده ی چراغ ، ترانزیستورها در دو حالت کار می کنند: حالت وصل، و حالت قطع. این حالت قطع یا وصل ، یا خاموش و روشن ترانزیستورهاست که امکان پردازش اطلاعات را فراهم می سازد .

فصل اول

((پیش گفتار))

((آشنایی با فیزیک حالت جامد و دیود))

۱.۱ فیزیک حالت جامد

۱.۱.۱ مقدمه

مشاهده‌ی پدیده‌های جدید در اوایل قرن بیستم میلادی و عدم توجیه این پدیده‌ها با قوانین فیزیک آن روز، موجب شد تا دانشمندان برخی نظریه های مرسوم فیزیک را دوباره بررسی کنند. نتیجه‌ی این اتفاقات، ظهور دو نظریه‌ی مهم و بنیادی در فیزیک به نام نظریه‌ی نسبیت و نظریه‌ی کوانتوم است. یکی از این مشاهدات، پدیده‌ی رسانایی الکتریکی در جامدات بود. دانشمندان می‌توانستند بخش‌هایی از این پدیده را با استفاده از نظریه‌های فیزیک کلاسیک توجیه کنند؛ اما آزمایشات جدید، آنها را با وقایعی روبرو کرد که با قوانین قبلی قابل پیش‌بینی و توجیه نبودند.

برای توجیه پدیده‌ی رسانایی الکتریکی در جامدات، دیگر نظریه‌ی کلاسیک الکترون آزاد پاسخگو نیست و نظریه‌ی نواری، که مبتنی بر فیزیک کوانتوم است، برای تفسیر این پدیده استفاده می‌شود. در اینجا اندکی درباره‌ی این نظریه صحبت می‌کنیم و با ساختار نواری جامدات رسانا، نارسانا و نیمه‌رسانا آشنا می‌شویم. در ادامه درباره‌ی برخی ویژگی‌های مواد نیمه‌رسانا و یک ویژگی بسیار جالب نیمه رسانا صحبت می‌کنیم. این ویژگی اساس کار بسیاری از قطعات الکترونیکی است که ما در رایانه، تلفن همراه، حافظه و ... از آنها استفاده می‌کنیم. که آن ویژگی با اتصال دو نوع نیمه‌رسانای n و p و تشکیل پیوند p-n، که قطعه‌ای حاصل می‌شود که از یک سو جریان الکتریکی را عبور می‌دهد و از سوی دیگر نه! این قطعه را دیود می‌نامیم.

همانطور که می دانیم اتم از دو بخش اصلی به نام هسته و ابر الکترونی پیرامون هسته تشکیل شده است. الکترون ها اطراف هسته در حال حرکت اند و توسط نیروی جاذبهی الکتروستاتیکی که بین هسته و الکترون ها موجود است، در قید جاذبهی هسته ای اتم قرار دارند. حال اگر الکترون یا الکترون هایی در اتم موجود باشند که بتوانند خود را از قید جاذبهی الکتروستاتیکی هسته رها کنند و آزادانه حرکت کنند، الکترون های آزاد نامیده می شوند. از آنجایی که الکترون ها دارای بار الکتریکی منفی هستند، با حرکت خود موجب انتقال بار الکتریکی می شوند. از این رو مواد جامدی را که دارای الکترون آزاد هستند، رسانا یا هادی الکتریکی می گوئیم چرا که الکترون ها می توانند درون آنها جابهجا شوند. از سویی دیگر اگر هیچ الکترونی در اتم نتواند خود را از قید جاذبهی الکتروستاتیکی هسته ای اتم رها کند، دیگر عاملی برای انتقال بار الکتریکی وجود ندارد و آن ماده، نارسانا یا عایق الکتریکی نامیده می شود.

مقاومت ویژهی الکتریکی به بیان ساده یعنی میزان مقاومت مقدار معینی از یک مادهی خاص در مقابل رسانایی الکتریکی. مقاومت ویژهی الکتریکی در مواد گوناگون متفاوت است و در مورد هر ماده عدد ویژه ای است. مثلا مقاومت ویژهی الکتریکی نقره، که یک رسانای خوب محسوب می شود، $10^{-8} * 1.6$ اهم متر است و مقاومت ویژهی الکتریکی تفلون، که یک نارسانای قوی است، 10^{14} اهم متر است. (توجه کنید که چه تفاوت زیادی دارند!) در جدول ۱-۱ مقاومت ویژهی الکتریکی برخی مواد در دمای اتاق (۲۷ درجهی سانتی گراد) داده شده است.

جدول ۱-۱ مقاومت ویژه ی الکتریکی چند ماده در دمای اتاق بر حسب اهم متر

نام ماده	مقاومت ویژه ی الکتریکی (اهم متر)
نقره	$1.6 * 10^{-8}$
مس	$1.7 * 10^{-8}$
آلومینیوم	$2.8 * 10^{-8}$
آهن	$10 * 10^{-8}$
ژرمانیوم	$4.6 * 10^{-1}$
سیلیسیوم	100 - 1000
شیشه	$10^{10} - 10^{14}$
تفلون	10^{14}

همانطور که در جدول ۱-۱ نیز مشخص است، رساناها دارای مقاومت ویژه ی الکتریکی بسیار کم و نارساناها دارای مقاومت ویژه ی الکتریکی بسیار زیاد هستند. با دقت در این جدول به موادی مانند سیلیسیوم و ژرمانیوم برمی خوریم که مقاومت ویژه ی الکتریکی آنها بین مقاومت ویژه ی الکتریکی رساناها و نارساناها است. این مواد را که مقاومت ویژه ی الکتریکی آنها نه شبیه رساناها و نه شبیه نارساناها است، نیمه رسانا یا نیمه هادی می گوئیم.

همه ی آنچه تاکنون گفته شد مطابق آن چیزی است که در فیزیک کلاسیک بیان می شود. همانطور که می بینیم فیزیک کلاسیک می تواند تفاوت بین رسانا و نارسانا را با بیانی ساده و به خوبی مشخص کند؛ اما آیا می داند که چرا رسانایی الکتریکی در رساناهای گوناگون متفاوت است؟ چرا الماس و گرافیت که هر دو از عنصر کربن تشکیل شده اند، یکی نارسانا و دیگری رسانا است؟ چرا مقاومت ویژه ی الکتریکی رساناها با افزایش دما بیشتر می شود، اما مقاومت ویژه ی الکتریکی نیمه رساناها همانطور که در آزمایش هم دیده می شود با افزایش دما، کمتر می شود؟ و ... اینها چند نمونه از پدیده هایی است که در فیزیک کلاسیک بدون پاسخ می ماند.

۱.۱.۳ یک نظریه‌ی جدید!

- .
- .
- .

نظریه‌ی نواری؟!!

همانطور که می‌دانیم الکترون‌ها در مدارهای معینی که هر یک انرژی ویژه‌ای دارند، در اطراف هسته‌ی اتم حرکت می‌کنند. این مقدار انرژی را تراز انرژی آن مدار می‌گوییم. به هر یک از این مدارها و تراز انرژی وابسته به آن، یک حالت کوانتومی برای الکترون‌های آن اتم می‌گوییم. در یک اتم الکترون‌ها ابتدا ترازهای پایین‌تر انرژی را پر می‌کنند. به بیان دیگر حالت‌های کوانتومی در هر اتم از تراز پایین به بالا توسط الکترون‌های آن اتم اشغال می‌شود. (این ماجرا مشابه آن است که شما درون یک کاسه تعدادی تیله بریزید، واضح است که تیله‌هایی که ابتدا می‌ریزید در ته کاسه قرار می‌گیرند و تیله‌های بعدی به تدریج روی تیله‌های پایینی می‌ایستند.)

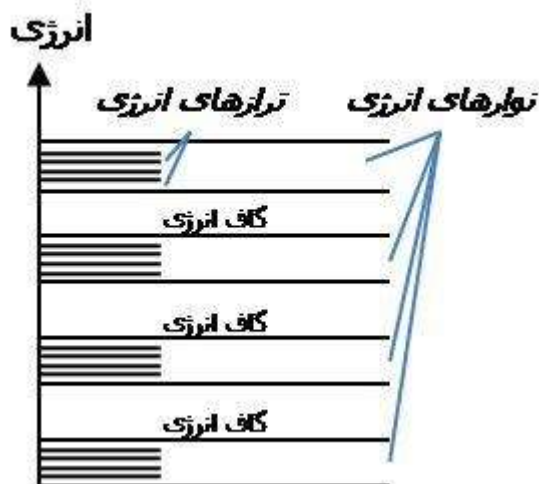
هنگامی که همه‌ی الکترون‌ها به ترتیب ترازهای انرژی را از پایین به بالا پر می‌کنند، می‌گوییم اتم در حالت پایه‌ی خود قرار دارد. از طرف دیگر، الکترون می‌تواند با جذب مقداری انرژی، تراز خود را ترک کند و به تراز بالاتری که خالی است برود که در این حالت می‌گوییم اتم برانگیخته شده است. مقدار این انرژی دقیقاً برابر مقدار اختلاف انرژی دو تراز است. خُب، آنچه تاکنون بیان شد مربوط به یک اتم تنها بود. اما در اجسام جامد که متشکل از تعداد بسیار زیادی اتم است، ترازهای انرژی الکترون‌ها چگونه‌اند؟ پاسخ این پرسش همان چیزی است که به آن

نظریه‌ی نواری می‌گوییم و مبتنی بر اصول مکانیک کوانتوم است. (ادامه‌ی ماجرا را با دقت بیشتری بخوانید!)

در جسم جامد به جای یک اتم، با مجموعه‌ای از اتم‌های نزدیک به هم سر و کار داریم. بنابراین دیگر فقط با یک هسته (با بار مثبت) و تعدادی الکترون (با بار منفی) که اطراف هسته‌ی اتم حرکت می‌کند، روبرو نیستیم؛ بلکه اکنون تعداد بسیار زیادی الکترون هستند که تحت تاثیر نیروهای حاصل از تمام هسته‌های مثبت قرار دارند. دانشمندان مدت‌های طولانی این مسئله‌ی بسیار پیچیده را بررسی کردند تا بالاخره نتایج زیر را بدست آورند:

ترازهای انرژی الکترون‌ها در جسم جامد، مانند ترازهای انرژی الکترون‌ها در یک اتم، مقدار انرژی ویژه‌ای دارند. ترازهای انرژی الکترون‌ها در جسم جامد، مانند ترازهای انرژی الکترون‌ها در یک اتم، مقدارهایی گسسته‌اند. (یعنی ترازهای انرژی الکترون‌ها در جسم جامد هر مقداری نمی‌تواند باشد و فقط مقادیر خاصی هست. بنابراین می‌گوییم این مقدار پیوسته نیست و گسسته است. به این نوع کمیت‌ها در مکانیک کوانتومی، کمیت کوانتیده گفته می‌شود). هر تراز انرژی تنها توسط یک الکترون می‌تواند پر شود. (در بعضی کتاب‌ها می‌گویند هر تراز انرژی توسط دو الکترون با اسپین مخالف پر می‌شود. البته این دو، متناقض هم نیستند و فقط بیان‌ها در مورد تراز انرژی با یکدیگر متفاوت است!). و مهم‌تر از همه اینکه 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 الکترون ها در این فاصله نمی توانند قرار بگیرند. این ناحیه را ناحیه ممنوع یا گاف انرژی می گوئیم (شکل ۱-۱).



شکل ۱-۱: نحوه قرارگیری ترازها، نوارها و گاف انرژی

با توجه به این توضیحات، به نظر شما الکترون ها چگونه در جسم جامد توزیع می شوند؟ در جسم جامد الکترون ها به ترتیب از پایین ترین تراز انرژی در پایین ترین نوار توزیع می شوند. از آنجایی که در هر تراز انرژی فقط یک الکترون می تواند قرار بگیرد، ترازهای انرژی به ترتیب توسط الکترون ها پر می شوند تا یک نوار انرژی کاملاً پر شود. الکترون های بعدی در ترازهای انرژی نوار بالاتر قرار می گیرند و این ماجرا ادامه می یابد تا تمامی الکترون ها در ترازهای انرژی جا بگیرند. بدین ترتیب آخرین نوار انرژی یا کاملاً از الکترون پر است و یا نیمه پر است. واضح است نوارهای انرژی پایین تر همگی پر هستند و نوارهای انرژی بالاتر همگی خالی هستند.

همانطور که بیان شد در یک اتم الکترون ها می توانند با جذب مقداری انرژی، که دقیقاً برابر اختلاف دو تراز انرژی است، از یک تراز انرژی پایین تر به تراز انرژی بالاتر بروند. در جسم جامد هم الکترون ها با جذب انرژی می توانند از تراز انرژی پایین تر 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 آنجایی که 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. دقت کنید وقتی می‌گوییم الکترون از یک تراز انرژی به تراز انرژی بالاتری رفته، منظور افزایش سطح انرژی الکترون است، نه حرکت فیزیکی! (یعنی تلاش نکنید زیر میکروسکوپ دنبال ترازاها و نوارهای انرژی بگردید!!!).

الف) ساختار نواری اجسام رسانا

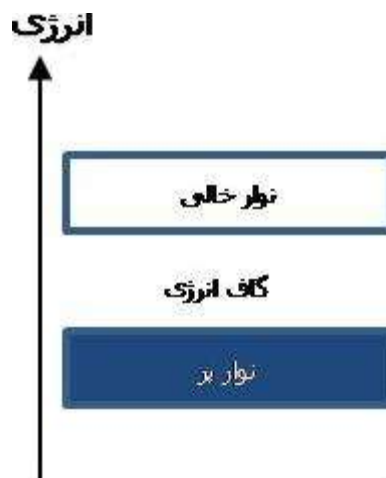
اگر در ساختار نواری جسم جامد، نوار نیمه‌پُر وجود داشته باشد، آن جسم رسانا است. زیرا الکترون‌های نوار نیمه‌پُر به آسانی و تحت تاثیر اختلاف پتانسیل الکتریکی که دو سر رسانا اعمال می‌شود، می‌توانند تراز انرژی خود را تغییر دهند و در رسانایی الکتریکی شرکت کنند. این الکترون‌ها را الکترون‌های رسانش و نوار نیمه‌پُر را نوار رسانش می‌گوییم. پس مشخصه‌ی اصلی رساناها، وجود نوار نیمه‌پُر در ساختار نواری آنها است (شکل ۱-۲).



شکل ۱-۲: نحوه قرارگیری ترازها، نوارها و گاف انرژی در یک جسم رسانا

ب) ساختار نواری اجسام نارسانا

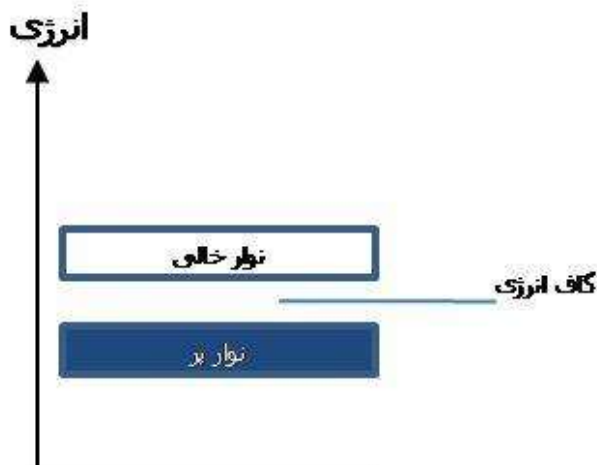
در ساختار نواری جامدات نارسانا، نوار نیمه‌پُر وجود ندارد. گاف انرژی در جامدات نارسانا بسیار بزرگ است و بنابراین هیچ الکترونی نمی‌تواند از نوار پر به نوار خالی گذار کرده و موجب رسانایی الکتریکی شود. در این مواد رسانایی الکتریکی انجام نمی‌شود (شکل ۱-۳).



شکل ۳-۱: 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 نیمه‌رسانا 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 (شکل ۴-۱).



شکل ۴-۱: نحوه قرارگیری ترازها، نوارها و گاف انرژی در یک جسم نیمه‌رسانا

۱.۳ مواد نیمه رسانا، انواع و ویژگی ها

۱.۳.۱ مقدمه

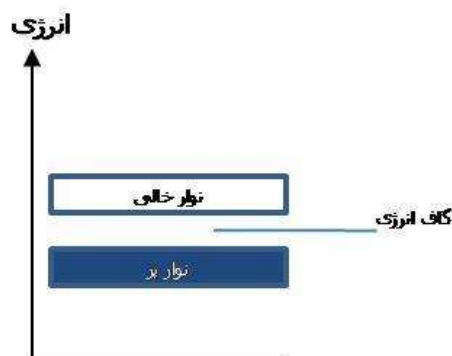
گفتیم برای توجیه پدیده‌ی رسانایی الکتریکی در جامدات، دیگر نظریه‌ی کلاسیک الکترون آزاد پاسخگو نیست و نظریه‌ی نواری، که مبتنی بر فیزیک کوانتوم است، برای تفسیر این پدیده استفاده می‌شود. در قسمت قبل اندکی درباره‌ی این نظریه صحبت کردیم و با ساختار نواری جامدات رسانا، نارسانا و نیمه‌رسانا آشنا شدیم. در ادامه مطلب قبلی، در اینجا درباره‌ی برخی ویژگی‌های مواد نیمه‌رسانا سخن می‌گوییم.

۱.۳.۲ برخی ویژگی‌های نیمه‌رساناها

یکی از ویژگی‌های جالب مواد نیمه‌رسانا، که آنها را از مواد رسانا متمایز می‌کند، چگونگی تغییر مقاومت ویژه‌ی الکتریکی آنها با تغییرات دما است. همانطور که می‌دانیم افزایش دما موجب افزایش مقاومت ویژه‌ی الکتریکی مواد رسانا می‌شود. علت این پدیده نیز افزایش تعداد و شدت برخورد الکترون‌های آزاد با اتم‌های در حال نوسان در جسم رسانا است. با افزایش دما، جنبش ذرات تشکیل دهنده‌ی جسم بیشتر می‌شود و بنابراین تعداد و شدت برخورد الکترون‌های آزاد با

اتم‌های جسم افزایش می‌یابد. یعنی الکترون‌ها که حاملان بار الکتریکی در جسم جامد رسانا هستند، برای انتقال بار الکتریکی با موانع بیشتری برخورد می‌کنند و در نتیجه رسانایی الکتریکی جسم کاهش می‌یابد. آزمایش نشان می‌دهد، برخلاف رسانا، در نیمه رسانا افزایش دما موجب کاهش مقاومت ویژه‌ی الکتریکی نیمه‌رسانا می‌شود. توجیه این پدیده در نیمه‌رسانا تنها با استفاده از نظریه‌ی نواری امکان‌پذیر است.

در تصویر ۵-۱ ساختار نواری یک نیمه‌رسانا نشان داده شده است. همان‌گونه که در تصویر می‌بینیم در دماهای پایین نوار ظرفیت نیمه‌رسانا کاملاً پر از الکترون و نوار رسانش کاملاً خالی از الکترون است. از این رو نه نوار ظرفیت در رسانش نقشی دارد (چون نوار کاملاً پر است و هیچ الکترونی امکان‌گذار درون نوار را ندارد) و نه در نوار رسانش الکترونی هست تا موجب رسانایی الکتریکی شود. بنابراین در دماهای پایین، نیمه‌رسانا مشابه نارسانا رفتار می‌کند. با افزایش دما، 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. از این رو امکان‌گذار برای الکترون‌های نوار ظرفیت نیز (در همان نوار) فراهم می‌شود. به بیان دیگر، در این حالت هم نوار رسانش در رسانایی الکتریکی نقش دارد و هم نوار ظرفیت. به همین ترتیب با افزایش دما هم تعداد الکترون‌های نوار رسانش بیشتر می‌شود و هم ترازهای خالی نوار ظرفیت افزایش می‌یابد. این مسئله سبب افزایش رسانایی الکتریکی نیمه‌رسانا می‌شود. اما مسئله به همین جا ختم نمی‌شود.



شکل ۱-۵: ساختار نواری یک جسم نیمه‌رسانا

آزمایش‌های گوناگون نشان می‌دهد که مقدار جریان الکتریکی در نیمه‌رسانا بیشتر از آن است که فقط با عبور الکترون‌ها ایجاد شده باشد. این پدیده ایده‌ی وجود ذرات دیگری را به عنوان حامل بار الکتریکی مطرح می‌کند. به عبارت دیگر ما تا کنون فقط الکترون‌ها را به عنوان حاملان بار الکتریکی در نظر می‌گرفتیم، اما آزمایش‌های دقیق‌تر نشان می‌دهد ذراتی با بار مثبت و هم‌جرم الکترون نیز در رسانایی الکتریکی نیمه‌رساناها نقش دارند. این اتفاق با استفاده از نظریه‌ی نواری این چنین توجیه می‌شود؛ در نیمه‌رسانا علاوه بر الکترون‌هایی که در نوار رسانش قرار می‌گیرند و در رسانایی الکتریکی نقش دارند، جای خالی ایجاد شده در نوار ظرفیت نیز (که به دلیل گذار الکترون‌ها به نوار رسانش تشکیل شده)، موجب رسانایی الکتریکی 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.

گذار الکترون از تراز اولیه‌ی خود به تراز خالی، مشابه آن است که بگوییم حفره از تراز بالاتر به تراز اولیه‌ی الکترون گذار کرده است. بنابراین به جای آن‌که بگوییم الکترون درون نوار ظرفیت

گذار کرده است، می‌گوییم حفره تراز خود را تغییر داده است. در واقع زیاد بودن تعداد الکترون‌ها، بررسی گذار آن‌ها را دشوار می‌کند؛ اما چون تعداد حفره‌ها کم است، در نظر گرفتن آنها ساده‌تر است. نکته دیگری که باید به آن اشاره کرد، نحوه تعیین بار حفره‌های نوار ظرفیت است. از آنجایی که حفره‌ها، برخلاف الکترون‌ها، از تراز بالاتر به تراز پایین‌تر گذار می‌کنند؛ قرارداد می‌کنیم که بار آنها را مثبت در نظر بگیریم. پس در نیمه‌رسانا دو نوع حامل بار الکتریکی داریم؛ یکی الکترون‌های نوار رسانش و دیگری حفره‌های نوار ظرفیت.

۱.۳.۳ آرایش 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، "آرایش 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.

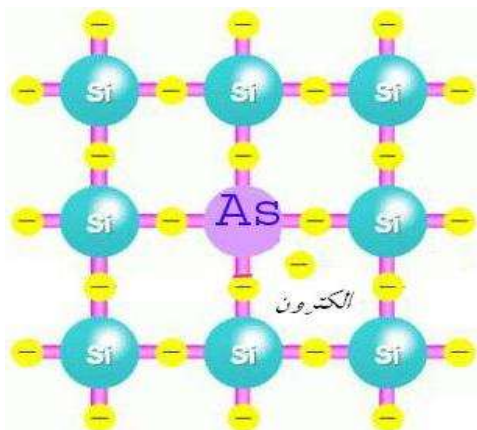
آرایش نیمه‌رسانا به دو روش مختلف انجام می‌شود. یک روش آن است که اتم ناخالصی یک الکترون ظرفیت بیشتر از اتم‌های نیمه‌رسانای ذاتی داشته باشد و روش دیگر آن است که اتم

ناخالصی یک الکترون ظرفیت کمتر از اتم‌های نیمه‌رسانای ذاتی داشته باشد. به عنوان مثال دو نیمه‌رسانای معروف که در بسیاری از قطعات الکترونیکی استفاده می‌شوند، عناصر سیلیسیوم (Si) و ژرمانیوم (Ge) هستند که هر دو چهار الکترون ظرفیت دارند. با اضافه کردن مقادیری ناخالصی از جنس فسفر (P) یا آرسنیک (As) که دارای پنج الکترون ظرفیت هستند به سیلیسیوم یا ژرمانیوم، نیمه‌رسانا را به روش اول آرایش کرده‌ایم. همچنین با افزودن مقادیری ناخالصی از جنس بور (B) یا آلومینیوم (Al) که دارای سه الکترون ظرفیت هستند به سیلیسیوم یا ژرمانیوم، نیمه‌رسانا را به روش دوم آرایش کرده‌ایم.

نیمه‌رسانایی را که به روش اول آراییده می‌شود، یعنی اتم ناخالصی یک الکترون ظرفیت بیشتر از اتم نیمه‌رسانا داشته باشد، نیمه‌رسانای نوع N می‌گوییم و نیمه‌رسانایی را که به روش دوم آراییده می‌شود، یعنی اتم ناخالصی یک الکترون ظرفیت کمتر از اتم نیمه‌رسانا داشته باشد، نیمه‌رسانای نوع P می‌گوییم.

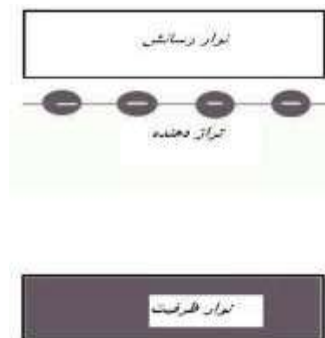
الف) نیمه‌رسانای نوع N

با افزودن مقادیر کمی ناخالصی از جنس یک اتم پنج ظرفیتی مانند آرسنیک به نیمه‌رسانای سیلیسیوم که دارای چهار الکترون ظرفیت هست، نیمه‌رسانای نوع N تشکیل می‌شود. همان‌گونه که در شکل ۶-۱ مشاهده می‌کنیم، چهارتا از الکترون‌های ظرفیت اتم آرسنیک با اتم‌های سیلیسیوم همسایه پیوند تشکیل می‌دهند و در واقع این چهار الکترون به جای الکترون‌های اتم سیلیسیوم، نوار ظرفیت را پر می‌کنند.



شکل ۶-۱: آرایش سیلیسیوم با آرسنیک

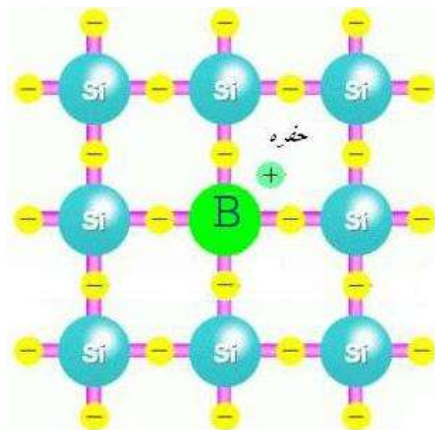
با ورود ناخالصی به نیمه‌رسانا، ساختار نواری نیز تغییر می‌کند و یک تراز انرژی به نام "تراز دهنده" در فاصله‌ی بسیار کمی، زیر نوار رسانش تشکیل می‌شود که الکترون پنجم اتم آرسنیک در آن قرار می‌گیرد (شکل ۶-۱). چون فاصله‌ی این تراز از نوار رسانش بسیار کم است، الکترون‌های موجود در آن با جذب مقدار کمی انرژی وارد نوار رسانش می‌شوند و در رسانایی الکتریکی شرکت می‌کنند. اتم‌های ناخالصی را که یک الکترون اضافی به نوار رسانش می‌دهند، "ناخالصی دهنده" می‌نامیم. همان‌طور که متوجه شدیم در این نوع نیمه‌رسانا حاملان بار الکتریکی بیشتر از نوع الکترون‌های نوار رسانش هستند و از آنجایی که الکترون‌ها دارای بار الکتریکی منفی (**negative**) هستند، این نوع نیمه‌رسانا را نیمه‌رسانای نوع N می‌نامیم.



شکل ۶-۱: ساختار نواری سیلیسیوم آرایش شده با آرسنیک

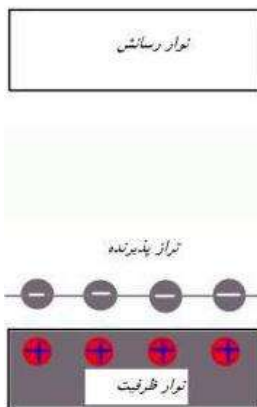
(ب) نیمه‌رسانای نوع P

اگر به نیمه رسانایی از جنس سیلیسیوم مقادیر کمی ناخالصی از یک اتم سه ظرفیتی مانند بور اضافه کنیم، مطابق آنچه در شکل ۸-۱ مشاهده می‌کنیم، سه الکترون اتم بور با اتم‌های سیلیسیوم همسایه پیوند تشکیل می‌دهند. برای تکمیل شدن پیوند، الکترون‌های موجود در نوار ظرفیت نیمه‌رسانا، جای یک الکترون ناقص را پر می‌کنند تا پیوند کامل شود. بدین ترتیب یک حفره‌ی اضافی در نوار ظرفیت نیمه‌رسانا تشکیل می‌شود.



شکل ۸-۱: آرایش سیلیسیوم با بور

در این نوع آرایش، برخلاف نوع قبل، تراز انرژی به نام "تراز پذیرنده" در فاصله‌ی کمی بالای نوار ظرفیت نیمه‌رسانا تشکیل می‌شود؛ به‌گونه‌ای که الکترون‌ها با جذب مقدار کمی انرژی و به منظور کامل کردن پیوند اتمی، به این تراز گذار می‌کنند و موجب تشکیل حفره‌های اضافی در نوار ظرفیت نیمه‌رسانا می‌شوند. این نوع اتم‌های ناخالصی را که یک الکترون اضافی از نوار ظرفیت می‌گیرند، "ناخالصی پذیرنده" می‌نامیم. از آنجایی که حاملان بار الکتریکی در این نوع نیمه‌رسانا بیشتر از نوع حفره‌های نوار ظرفیت و با بار الکتریکی مثبت (**positive**) هستند، این نوع نیمه‌رسانا را نیمه‌رسانای نوع **P** می‌نامیم.



شکل ۹-۱: ساختار نواری سیلیسیوم آلیش شده با بور

به منظور درک بیشتر اهمیت آلیش نیمه‌رسانا و تاثیر آن بر میزان رسانایی الکتریکی نیمه‌رسانا یک مثال ذکر می‌کنیم. در هر سانتی‌متر مکعب از نیمه‌رسانای ذاتی سیلیسیوم تقریباً 10^{10} حامل بار الکتریکی وجود دارد. با افزودن تعداد 10^{15} ناخالصی از جنس اتم آنتیموان (Sb) که یک اتم پنج ظرفیتی است، نیمه رسانای نوع N تشکیل می‌شود. با این روش مقاومت ویژه الکتریکی نیمه‌رسانا از $10^6 * 2$ اهم سانتی‌متر به 5 اهم سانتی‌متر کاهش می‌یابد. به بیان دیگر با افزودن مقادیری ناخالصی به نیمه‌رسانا، مقاومت ویژه الکتریکی نیمه‌رسانای غیرذاتی تشکیل شده به اندازه 10^4 * برابر کاهش می‌یابد، که مقدار قابل ملاحظه‌ای است.

۱.۴ دیود چیست و چگونه کار می کنند؟

۱.۴.۱ مقدمه

اکنون در ادامه ی مباحث قبل می‌خواهیم درباره‌ی یک ویژگی بسیار جالب نیمه رسانا صحبت کنیم. این ویژگی اساس کار بسیاری از قطعات الکترونیکی است که ما در رایانه، تلفن همراه، حافظه و ... از آن‌ها استفاده می‌کنیم.

۱.۴.۲ یک ماجرای جالب

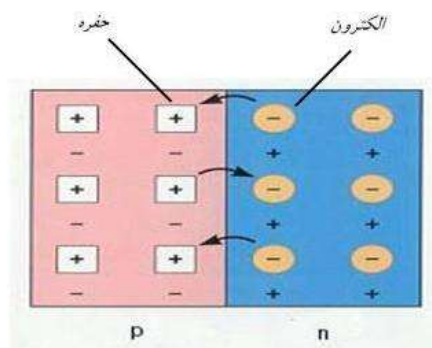
- .
- .
- .

لطفا وارد نشوید!

اگر یک نیمه رسانای نوع N را به یک نیمه رسانای نوع P متصل کنیم، قطعه ای حاصل می‌شود که آن را پیوند $P-N$ می‌گوییم. پیوند $P-N$ ویژگی جالب توجهی دارد که شنیدن آن خالی از لطف نیست.

همانگونه که می‌دانیم حامل های اکثریت در نیمه رسانای نوع N از جنس الکترون‌های آزاد و در نیمه رسانای نوع P از جنس حفره های آزاد هستند. در اثر اتصال این دو نیمه رسانا به یکدیگر، تعدادی از الکترون‌های نیمه رسانای نوع N به سمت نیمه رسانای نوع P می‌روند و تعدادی از حفره های نیمه رسانای نوع P به سمت نیمه رسانای نوع N منتقل می‌شوند. علت این انتقال پدیده- ای به نام نفوذ است که ما بارها آن را پیرامون خود مشاهده کردیم. پدیده نفوذ، یعنی انتقال خودبخودی ذرات از جایی که تعدادشان بیشتر است به جایی که تعدادشان کمتر است مانند انتقال

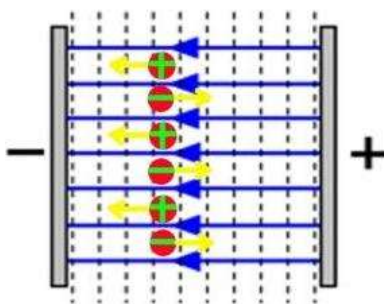
قطره های جوهر در آب از جایی که تعدادشان بیشتر است به جایی که تعدادشان کمتر است می باشد. هنگام اتصال دو قطعه ی نیمه رسانای نوع N و P به یکدیگر، تعدادی از الکترون ها که در نیمه رسانای نوع N حامل اکثریت هستند، در اثر پدیده ی نفوذ به سمت نیمه رسانای نوع P می روند. همچنین تعدادی از حفره ها که در نیمه رسانای نوع P حامل اکثریت هستند نیز در اثر پدیده ی نفوذ به سمت نیمه رسانای نوع N می روند.



شکل ۱۰-۱: یک پیوند p-n

به شکل ۱۰-۱ نگاه کنید. در اثر انتقال الکترون ها از N به P ، تعدادی از اتم های نیمه رسانا در سمت N که یک الکترون خود را از دست داده اند، به یونی با بار مثبت تبدیل می شوند. همچنین به صورت برعکس، در اثر انتقال حفره ها از P به N ، تعدادی از اتم های نیمه رسانا در سمت P که یک حفره از دست داده اند، به یونی با بار منفی تبدیل می شوند. می دانیم که بر خلاف الکترون ها و حفره ها که می توانند آزادانه حرکت کنند، یون ها در جای خود ثابت می مانند و حرکت نمی کنند. الکترون های آزاد و حفره های آزاد که از دو طرف می آیند با یکدیگر ترکیب می شوند و اثر هم را خنثی می کنند. بنابراین تعداد حاملان بار الکتریکی، که همان الکترون ها و حفره ها هستند، در این ناحیه کم می شود. این ناحیه را که تعداد حاملان بار الکتریکی در آن بسیار کم است، ناحیه ی تهی می گوئیم. فضایی که پیرامون اجسام باردار الکتریکی شکل می گیرد و در این فضا به اجسام

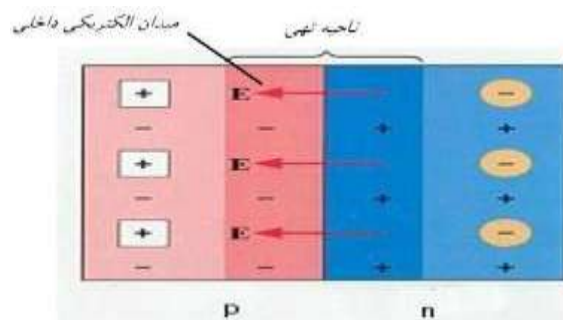
دیگر نیروی جاذبه یا دافعه الکتریکی وارد می‌شود را میدان الکتریکی می‌گوییم. قرار می‌گذاریم (قرارداد می‌کنیم) که جهت میدان الکتریکی از بار مثبت به سمت بار منفی باشد. اگر جسمی باردار درون میدان الکتریکی قرار گیرد، از بار همانم خود دفع شده و به بار ناهمنام خود جذب می‌شود. این سبب می‌شود که اجسام با بار مثبت درون میدان الکتریکی همجهت میدان (به سمت بار منفی) حرکت کنند و اجسام با بار منفی، خلاف جهت میدان (به سمت بار مثبت) حرکت کنند.



شکل ۱-۱: میدان الکتریکی- بار منفی خلاف جهت میدان و بار مثبت همجهت میدان حرکت می‌کند. جهت میدان الکتریکی با بردارهای آبی مشخص شده است.

همان‌گونه که بیان کردیم در اثر پدیده‌ی نفوذ، حامل‌های اکثریت بار الکتریکی از هر دو طرف به سمت یکدیگر حرکت می‌کنند و اثر هم را خنثی می‌کنند. بنابراین یون‌های ثابت با بار مثبت در سمت N و یون‌های ثابت با بار منفی در سمت P باقی می‌ماند. این ناحیه را ناحیه ی تهی نامیدیم. ناحیه ی تهی دارای عرض محدودی است. زیرا در اثر وجود یون‌های ثابت مثبت و منفی در طرفین آن، یک میدان الکتریکی داخلی در ناحیه‌ی تهی به وجود می‌آید. از آنجاییکه جهت میدان الکتریکی از مثبت به منفی است، پس جهت این میدان داخلی از سمت یون‌های مثبت به سمت یون‌های منفی است، یعنی از N به P. وجود این میدان الکتریکی داخلی، مانع ادامه ی نفوذ الکترون‌های آزاد به سمت P و حفره‌های آزاد به سمت N می‌شود (زیرا الکترون‌ها بار الکتریکی منفی دارند و به صورت خودبخودی خلاف جهت میدان الکتریکی حرکت می‌کنند. همچنین حفره

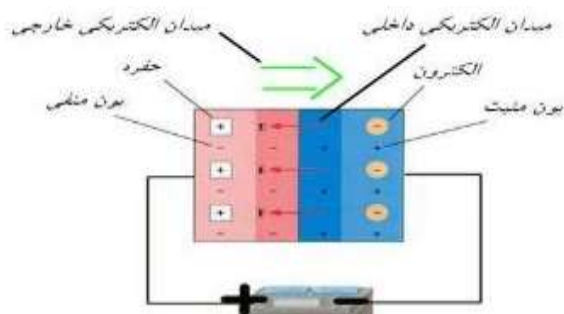
ها بار الکتریکی مثبت دارند و به صورت خودبخودی هم جهت میدان الکتریکی حرکت می کنند).
شکل ۱-۱۲ را ببینید.



شکل ۱-۱۲: ایجاد ناحیه تهی و جهت میدان الکتریکی داخلی

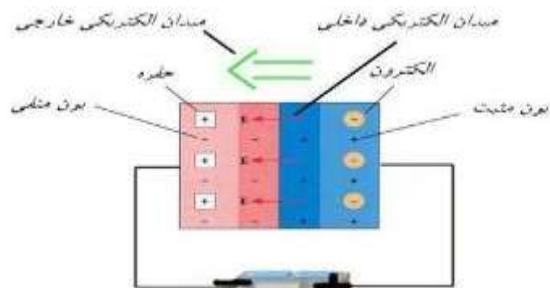
بنابراین نفوذ الکترون های آزاد و حفره های آزاد تا جایی ادامه می یابد که میدان الکتریکی داخلی دیگر اجازه ی نفوذ حاملان بار را ندهد. در این هنگام عرض ناحیه ی تهی دیگر بیشتر نمی شود و تقریباً ثابت می ماند. این ویژگی جالب سبب می شود که هرگاه پیوند P-N در مدار الکتریکی قرار بگیرد، جریان الکتریکی را فقط از یک سو عبور دهد. در واقع الکترون ها از یک سو اجازه ی عبور دارند و از سوی دیگر اجازه ی عبور ندارند! همان گونه که بیان کردیم میدان الکتریکی داخلی در ناحیه ی تهی پیوند P-N ، مانع از ادامه ی نفوذ حاملان بار الکتریکی در دو طرف می شود و بنابراین جریان الکتریکی نمی تواند از آن عبور کند. اکنون اگر یک میدان الکتریکی قوی تر از میدان الکتریکی داخلی و خلاف جهت آن، به دو طرف پیوند P-N اعمال کنیم، اثر میدان داخلی از بین می رود و در اثر این میدان الکترون های آزاد می توانند منتقل شوند. برای این کار کافی است پایانه ی مثبت منبع ولتاژ (نظیر یک باتری) را به سمت P و پایانه ی منفی منبع ولتاژ را به سمت N متصل کنیم. در پیوندهای P-N که از ماده نیمه رسانای سیلیسیوم ساخته می شوند و در قطعات الکترونیکی استفاده می شود، برای غلبه بر میدان الکتریکی داخلی، تقریباً ولتاژ ۰/۷ ولت کافی است. بنابراین با این کار الکترون های آزاد می توانند هم جهت میدان

الکتريکی داخلی (در واقع خلاف جهت میدان الکتريکی خارجی که بزرگتر است) حرکت کنند و موجب رسانش الکتريکی شوند (شکل ۱۳-۱).



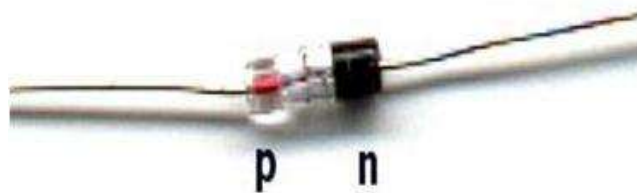
شکل ۱۳-۱: اتصال منبع ولتاژ الکتريکی به یک پیوند P-N به صورتی که پایانه مثبت به P و پایانه منفی به N متصل است.

اما اگر جهت پایانه های باتری را برعکس متصل کنیم، یعنی پایانه ی منفی را به P و پایانه ی مثبت را به N اتصال دهیم، میدان الکتريکی خارجی هم جهت میدان الکتريکی داخلی ایجاد می-شود و جریان الکتريکی برقرار نمی-شود (شکل ۱۴-۱).



شکل ۱۴-۱: اتصال منبع ولتاژ الکتريکی به یک پیوند P-N به صورتی که پایانه مثبت به N و پایانه منفی به P متصل است.

در الکترونیک به قطعه ای که دارای یک پیوند P-N هست، دیود می-گوییم. در شکل ۱۵-۱ یک دیود واقعی را مشاهده می-کنیم.



شکل ۱-۵: یک دیود واقعی که از یک پیوند P-N تشکیل شده است.

فصل دوم

((آشنایی با ساختار و عملکرد ترانزیستورها و

ترانزیستورهای نسل جدید))

در مطالب قبلی به صورت مختصر با فیزیک حالت جامد آشنا شدیم. نظریه‌ی نواری را به منظور توجیه پدیده‌ی رسانایی جامدات آموختیم، با نیمه‌رسانا و ویژگی‌های متمایز آن و همچنین مفهوم آلایش نیمه‌رسانا با عناصر دیگر آشنا شدیم. و همچنین مشاهده کردیم که با اتصال دو نوع نیمه‌رسانای N و P و تشکیل پیوند P-N ، قطعه‌ای حاصل می‌شود که از یک سو جریان الکتریکی را عبور می‌دهد و از سوی دیگر نه !! این قطعه را دیود نامیدیم.

پس از آشنایی مقدماتی با مفاهیم بیان شده در مطالب قبل، اکنون می‌توانیم درباره‌ی مهم‌ترین عنصر مدارات الکترونیکی یعنی ترانزیستور صحبت کنیم. اهمیت ترانزیستور در مدارات الکترونیکی همانند اهمیت آجر در ساختن یک ساختمان است!!! به بیان دیگر، همان‌طور که آجر جزء اساسی در ساختن یک ساختمان است، ترانزیستور نیز جزء اصلی ساختن یک مدار الکترونیکی است. ترانزیستور دارای انواع گوناگونی است که مهم‌ترین آن BJT و MOSFET نام دارد. کاربرد MOSFET در مدارهای الکترونیکی امروزی بسیار بیشتر از BJT است، برای اختصار این نوع ترانزیستور را، ترانزیستور MOS می‌نامیم.

در سال ۱۹۵۸ میلادی اولین مدار مجتمع الکترونیکی ساخته شد. یک مدار مجتمع شامل تعداد زیادی ترانزیستور و البته تعدادی قطعه‌ی دیگر الکترونیکی است و معمولاً برای انجام کار خاصی طراحی و ساخته می‌شود. در بسیاری از وسایلی که ما امروزه در زندگی استفاده می‌کنیم، مدارهای مجتمع الکترونیکی جزئی اصلی و مهم هستند. رایانه‌ها، خودروها، تلفن‌های همراه و ثابت و بسیاری قطعات دیگر همگی دارای مدارهای مجتمع هستند، که راجب فرایند ساخت و چالش‌های ساخت مدارات مجتمع در فصل ۳ بطور مختصر صحبت خواهیم کرد.

۲.۱.۱ تاریخچه ترانزیستور

ترانزیستور در سال ۱۹۴۷ در آزمایشگاه های بل هنگام تحقیق برای تقویت کننده های بهتر و یافتن جایگزینی بهتر برای رله های مکانیکی اختراع شد. لوله های خلاء، صوت و موسیقی را در نیمه اول قرن بیستم تقویت کرده بودند اما توان زیادی مصرف می کردند و سریعاً می سوختند. شبکه های تلفن نیز به صدها هزار رله مکانیکی برای اتصال مدارات به همدیگر نیاز داشتند تا شبکه بتواند سرپا بایستد و چون این رله ها مکانیکی بودند لازم بود برای عملکرد مطلوب همیشه تمیز باشند. در نتیجه نگه داری و سرویس آنها مشکل و پر هزینه بود. با ظهور ترانزیستور قیمت ها نسبت به زمان استفاده از لامپ خلاء شکسته شد و بهبودی زیادی در کیفیت شبکه های تلفن حاصل گردید.

۲.۱.۲ ترانزیستور چگونه کار می کند؟

ترانزیستور کاربرد های زیادی دارد اما دو کاربرد پایه ای آن به عنوان سوئیچ و استفاده در مدولاسیون است که کاربرد دومی بیشتر به عنوان تقویت کننده مورد نظر است. این دو کاربرد ترانزیستور را می توان اینگونه توضیح داد: سوئیچ همان کلید است مثل کلید چراغ خواب اتاقان که دارای دو حالت روشن و خاموش است. کاربرد ترانزیستور هم بعنوان سوئیچ به همین صورت است. اما کاربرد تقویت کنندگی آن را می توان بدین صورت توضیح داد: چراغ خواب نور کمی دارد اما اگر بتوان این نور را چنان زیاد کرد که تمام اتاق را روشن کند آنوقت عمل تقویت کنندگی صورت گرفته است. فرق بین سوئیچینگ به وسیله ترانزیستور و به وسیله کلید برق! سرعت بسیار زیاد ترانزیستور است که می توان گاهی آن را در مقایسه با کلید آبی در نظر گرفت (صد ها هزار برابر و شاید میلیونها بار سریعتر). و اینکه ترانزیستور را می توان به دیگر منابع الکترونیکی متصل کرد مثلاً به میکروفن به منبع سیگنال و حتی به یک ترانزیستور دیگر و ترانزیستور از عناصری به نام نیمه هادی مانند سیلیکون و ژرمانیوم ساخته می شود نیمه هادی ها

جریان الکتریسیته رانستاً خوب (امانه به اندازه ای خوب که رسانا خوانده شوند مانند مس و آلومنیوم و تقریباً بد اما نه به اندازه ای که عایق نامگذاری شوند مانند شیشه) هدایت می کنند به همین دلیل به آنها نیمه هادی می گویند که در قسمت های قبل به طور مختصر در مورد آنها توضیح داده شد. عمل جادویی که ترانزیستور می تواند انجام دهد این است که می تواند مقدار هادی بودن خود را تغییر دهد. هنگامی که لازم است یک هادی باشد می تواند هدایت خوبی داشته باشد و هنگامی که لازم است تا به عنوان عایق عمل کند جریان بسیار کمی را از خود عبور میدهد که می توان آن را ناچیز شمرد.

۲.۱.۳ ترانزیستورها چه کاری انجام می دهند؟

در میکرو چیپ های امروزی، که حاوی میلیونها ترانزیستور هستند که در الگو یا طرح مخصوصی چیده شده اند خروجی تقویت شده ی یک ترانزیستور به ورودی ترانزیستور دیگر داده می شود تا آن هم عمل تقویت کنندگی را بر روی ورودی انجام دهد و به همین ترتیب ادامه می یابد که نتیجه یک خروجی تقویت شده و پر توان می باشد. چنین میکروچیپی می تواند سیگنالی بسیار ضعیفی را از آنتن بگیرد و یک صوت قوی و چهار کاناله را تحویل دهد. با ساختن چیپ ها در طراحی های مختلف می توان تایمرهایی برای ساعت یا سنسورهایی برای نشان دادن درجه حرارت و یا کنترل کننده چرخ های ماشین تا قفل نشوند (سیستم ABS) ساخت.

میتوان ترانزیستورها را در آرایشی دیگر در داخل چیپ قرارداد (طراحی متفاوت) و پروسورهای منطقی و محاسباتی را ساخت که باعث می شوند تا ماشین حسابها محاسبه و کامپیوترها پردازش کننده و یا شبکه هایی را برای انتقال مکالمات تلفنی ساخت و یا سیستم هایی را ساخت که بتوانند صدا و تصویر را انتقال دهند. می توان ترانزیستورها را در بسته هایی چید که به آنها گیت های منطقی می گویند و می توانند دو عدد ۱ و ۱ را با هم جمع کنند و یا می توان آنها را در آرایشی

خاص قرار داد تا کارهای بسیار بزرگی را با استفاده از سرعت سوئیچینگ - ۱۰۰ میلیون بار برثانیه و بیشتر خود انجام دهند.

البته کار به همین جا ختم نمی شود مداراتی که در چندین سال گذشته برای انجام عملی خاص به وسیله ترانزیستورها بر روی بورد ها بسته می شود امروزه به مدد طراحی کامپیوتری و تکنیک مدارات مجتمع بر روی یک آی سی هزاران ترانزیستور و سیم کشی های مربوطه و تمام قطعات الکترونیکی لازم قرار داده می شود. شاید بتوان گفت که حجم مدارات هزاران بار کاهش یافته است. بر همین مقیاس امروزه می توان گفت که ترانزیستور مجانی است (۱ دلار تقسیم بر یک میلیون ترانزیستور) و ترانزیستورهای داخل مدارات مجتمع واقعاً قابل اطمینان هستند. چیزی که باعث می شود که ترانزیستورها روزبه روز پیشرفت می کنند و بهتر و ارزانتر می شوند این است که به مدد تحقیقات، نیمه هادی ها روزبه روز بهتر و کاربردی تر می شوند (در فصل ۶ و ۵ به مواردی در این زمینه پرداخته خواهد شد).

و این چیزی است که آزمایشگاه های بل برای آن تحقیق می کند. دانشمندان این مرکز تحقیقاتی، امروزه می دانند که چگونه نیمه هادی ها را اتم به اتم به صورت مجازی، از منابع سرشاری که مادر بی دریغ طبیعت در دسترس ما قرار داده است، به وسیله تکنیک های لایه بندی بسازند. این چیزی است که می توان آن را جادو نامید. بنابراین، ترانزیستور وسیله الکترونیکی شگفت انگیزی است که مجازاً دیده نمی شود اما زندگی ما را کاملاً و برای همیشه تغییر داده است.

۲.۱.۴ اختراع رادیو

در سال ۱۸۹۵ Guglielmo Marconi یک مهندس و مخترع ایتالیایی، تکنولوژی جدیدی را که

به وسیله نیکولا تسلا ابداع شده بود را بوسیله فرستادن سیگنال رادیویی فرا تر از یک مایل عملی ساخت بدین ترتیب ارتباطات بی سیم متولد شد اما موانع زیادی برای همه گیر شدن این تکنولوژی وجود داشت.

۱- مشکل آشکار سازی:

اولین و مهمترین مشکل آشکار سازی بود. امواج رادیویی که حامل اطلاعات بودند بایستی بدون سیم انتقال می یافتند اما مشکلی که وجود داشت این بود که رسیورها می بایست سیگنال حاوی اطلاعات را تشخیص می دادند.

کشف یک فیزیکدان آلمانی با نام **Ferdinand Braun** ابزاری برای حل این مسئله شد. **Braun** کشف کرده بود که شیشه می تواند جریان را در یک جهت آن هم در یک شرایط مشخص از خود عبور دهد. این مشاهده یکسو سازی نام نهاده شد. **Braun** و دیگران این کشف را برای ساختن آشکار ساز درگیرنده های رادیویی به کار بردند. عملکرد یکسو سازی باعث می شود که کریستال موج حامل را از قسمت سیگنال حاوی اطلاعات تشخیص دهد.

۲- تقویت:



شکل ۱-۲: موج آشکار سازی به دلیل فاصله تضعیف می شد و فقط به وسیله هدست قابل شنود بود. مجموعه های کریستالی فقط زمانی کار می کردند که موج رادیویی برای آشکار سازی به اندازه کافی قوی بود. اما امواج بر اثر فاصله ضعیف می شدند و توان خود را از دست می دادند. حتی در صورتی که موج آشکار سازی هم می شد اپراتور فقط به وسیله **headset** قادر به شنیدن

سیگنال پخش شده از دستگاه بود(شکل ۱-۲). بنابراین برای اینکه آن تکنولوژی جدید(ارتباط بی

سیم) کاربردی شود و با بلندی صدای خوبی نیز پخش شود نیاز به یک تقویت کننده بود.

۳- لامپ های خلاء یکسو ساز:



شکل ۲-۲: اثر ادیسون و گرایش ذرات سیاه در لامپ حبابی

گام اول برای حل این مشکل توسط **John Ambrose Fleming** برداشته شد. **John** یک فیزیکدان

انگلیسی بود که برای بهبود دریافت سیگنالهای بیسیم تحقیق می کرد.

بر اساس تحقیقات او بر روی "اثر ادیسون" (گرایش ذرات سیاه برای سیاه کردن سطح داخلی

لامپ حبابی در نتیجه عبور جریان در یک جهت)، فلمینگ سیستم گیرنده رادیویی را با لامپ

حبابی که دارای دو الکتروود بود مجهز کرد. در نتیجه این اصلاح لامپ حبابی، الکترونها از کاتود

به آنود جریان پیدا می کردند. به محض اینکه جریان از الکتروود منفی به الکتروود مثبت در داخل

حباب جاری می شد، نوسان سیگنال ورودی در جهت جریان قابل آشکار شدن یکسو می گردید.

۴- تقویت کنندگی لامپ خلاء:

گام بعدی که در این زمینه برداشته شد اختراع یک آمریکایی با نام **Lee De Forest** بود این

اختراع او یک نوآوری بود که در لامپ خلاء فلمینگ انجام داد. این نوآوری اضافه کردن الکتروود

سوم بود. این الکتروود شبکه ای ازسیم های کوچک بود که که کاتود را احاطه کرده بودند. پتانسیل منفی این الکتروود، جریان الکتروود ها را ازکاتود به آنود کنترل می کرد. با کاهش پتانسیل منفی الکتروود میزان جاری شدن الکتروونها از داخل حباب افزایش می یافت به این ترتیب یک تقویت کننده جریان ساخته شد.

مقایسه ترانزیستورها با لامپ های خلاء

خصوصیات لامپ های خلاء

- ۱- حجم زیاد
- ۲- عمر کوتاه (شکستن لامپ و عمر کوتاه فیلامان)
- ۳- پروسه ساخت مشکل و عدم قابلیت حمل و نقل
- ۴- قیمت بالا و مصرف توان بالا
- ۵- تولید حرارت زیاد و **Warming up Time**
- ۶- عدم توانایی استفاده از کارایی ابزارهای نرم افزاری

خصوصیات ترانزیستورها

- ۱- حجم کم و عمر مناسب (**Solid State**)
- ۲- پروسه ساخت آن نسبتاً آسان است
- ۳- قابلیت حمل و نقل (**Portability**)
- ۴- قیمت و مصرف توان پایین
- ۵- قابلیت تولید انبوه و ساخت ICها و مدل کردن حالت های فیزیکی
- ۶- سرعت بالا و قابلیت کار در فرکانس های بالا

۲.۲ ترانزیستور دوقطبی (BJT)

۲.۲.۱ مقدمه

ترانزیستور یک قطعه الکترونیکی فعال بوده و از ترکیب سه قطعه نیمه هادی نوع n و p بدست می آید که از تزریق حاملین بار اقلیت در یک پیوند با گرایش مستقیم استفاده می کند و دارای سه پایه به نامهای بیس (B)، امیتر (E) و کلکتور (C) می باشد و چون در این قطعه اثر الکترونها و حفره ها هر دو مهم است، به آن یک ترانزیستور دوقطبی گفته می شود. عصر نوین الکترونیک نیمه رساناها با اختراع ترانزیستور دو قطبی در 1948 توسط باردین، براتاین و شاکلی در آزمایشگاه های تلفن بل آغاز شد. این قطعه به همراه همتای اثر میدانی خود تأثیر شگفتی روی تقریباً تمام حوزه های زندگی نوین گذاشته است.

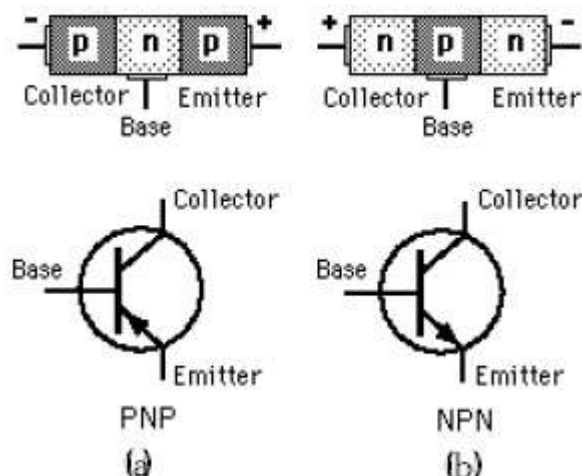
۲.۲.۲ انواع ترانزیستور BJT

npn

شامل سه لایه نیم هادی که دو لایه کناری از نوع p و لایه میانی از نوع n است که در شکل ۲-۳(a) نشان داده شده است و مزیت اصلی آن در تشریح عملکرد ترانزیستور این است که جهت جاری شدن حفره ها با جهت جریان یکی است.

npn

شامل سه لایه نیم هادی که دو لایه کناری از نوع n و لایه میانی از نوع p است. پس از درک ایده های اساسی برای قطعه npn می توان به سادگی آنها را به ترانزیستور پر کاربردتر npn مربوط ساخت شکل ۲-۳(b).

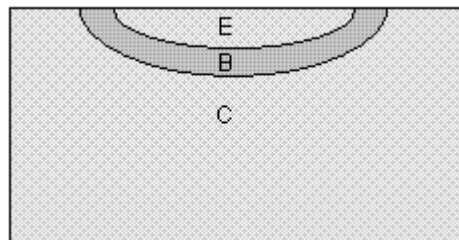


شکل ۲-۳: نماد و شماتیک پیوندها در ترانزیستورهای BJT

۲.۲.۳ ساختمان ترانزیستور BJT

ترانزیستور دارای دو پیوندگاه است. یکی بین امیتر و بیس و دیگری بین بیس و کلکتور. به همین دلیل ترانزیستور شبیه دو دیود است. دیود سمت چپ را دیود بیس-امیتر یا صرفاً دیود امیتر و دیود سمت راست را دیود کلکتور-بیس یا دیود کلکتور می‌نامیم. میزان ناخالصی ناحیه وسط به مراتب کمتر از دو ناحیه جانبی است. این کاهش ناخالصی باعث کم شدن هدایت و بالعکس باعث زیاد شدن مقاومت این ناحیه می‌گردد.

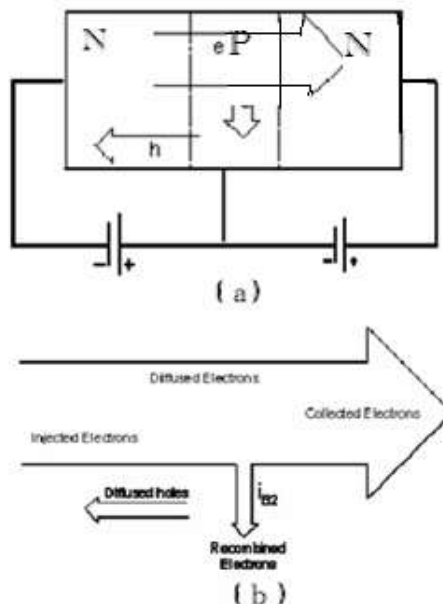
امیتر که شدیداً آلاینده شده، نقش گسیل و یاتزریق الکترون به درون بیس را به عهده دارد. بیس بسیار نازک ساخته شده و آرایش آن ضعیف است و لذا بیشتر الکترون های تزریق شده از امیتر را به کلکتور عبور می‌دهد. میزان آرایش کلکتور کمتر از میزان آرایش شدید امیتر و بیشتر از آرایش ضعیف بیس است و کلکتور الکترون ها را از بیس جمع‌آوری می‌کند (شکل ۲-۴).



شکل ۲-۴: نمایش نسبت تقریبی لایه های ترانزیستور

۲.۲.۴ طرز کار ترانزیستور BJT

طرز کار ترانزیستور را با استفاده از نوع npn مورد بررسی قرار می‌دهیم. طرز کار pnp هم دقیقاً مشابه npn خواهد بود، به شرط اینکه الکترونها و حفره‌ها با یکدیگر عوض شوند. در نوع npn به علت تغذیه مستقیم دیود امیتر ناحیه تهی کم عرض می‌شود، در نتیجه حاملهای اکثریت یعنی الکترونها از ماده n به ماده p هجوم می‌آورند. حال اگر دیود بیس-کلکتور را به حالت معکوس تغذیه نمائیم، دیود کلکتور به علت بایاس معکوس عریض‌تر می‌شود. الکترونهای جاری شده به ناحیه p در دو جهت جاری می‌شوند، بخشی از آنها از پیوندگاه کلکتور عبور کرده، به ناحیه کلکتور می‌رسند و تعدادی از آنها با حفره‌های بیس باز ترکیب شده و به عنوان الکترونهای ظرفیت به سوی پایه خارجی بیس روانه می‌شوند، این مولفه بسیار کوچک است (شکل ۲-۵).



شکل ۵-۲: الکترون های عبوری از بیس و کلکتور

۲.۲.۵ نحوه اتصال ترانزیستورها

۱- اتصال بیس مشترک

در این اتصال پایه بیس بین هر دو بخش ورودی و خروجی مدار مشترک است. جهت های انتخابی برای جریان شاخه ها جهت قراردادی جریان در همان جهت حفره ها می شود.

۲- اتصال امیتر مشترک

مدار امیتر مشترک بیشتر از سایر روشها در مدارهای الکترونیکی کاربرد دارد و مداری است که در آن امیتر بین بیس و کلکتور مشترک است. این مدار دارای امپدانس ورودی کم بوده، ولی امپدانس خروجی مدار بالا می باشد.

۳- اتصال کلکتور مشترک

اتصال کلکتور مشترک برای تطبیق امپدانس در مدار بکار می‌رود، زیرا برعکس حالت قبلی دارای امپدانس ورودی زیاد و امپدانس خروجی پائین است. اتصال کلکتور مشترک غالباً به همراه مقاومتی بین امیتر زمین به نام مقاومت بار بسته می‌شود.

۲.۲.۶ چگونگی کارکرد ترانزیستور ها و نقش ترانزیستور در مدارات مجتمع ؟

ریزپردازنده ها به صورت یک جزء لاینفک در بسیاری از محصولات که ما هرروزه از آنها استفاده می کنیم درآمده اند ، مانند تلویزیون، اسباب بازی ها، رادیو، و البته کامپیوترها . ولی این ترانزیستورها هستند که اجزای اصلی ریزپردازنده ها را تشکیل می دهند .

در پایین ترین سطح خود ، ممکن است ترانزیستورها به نظر ساده برسند. اما تولید آن ها عملاً به سال های سال تحقیقات کشنده نیاز داشته است. تا پیش از ترانزیستورها ، کامپیوترها به لامپ های خلاء و کلید های مکانیکی متکی بودند. در سال ۱۹۵۸ تعدادی مهندس (که یکی از آن ها به نام رابرت نويس ، بعداً پایه گذار شرکت اینتل شد) دست به دست هم دادند تا ۲ ترانزیستور را روی یک قطعه بلور سیلیکون بکارند و اولین مدار مجتمع را بسازند؛ چیزی که به ساخت ریزپردازنده منجر شد .

ترانزیستورها در واقع کلیدهای قطع و وصل برق در ابعاد مینیاتوری هستند . اگر ریزپردازنده را یک «ساختمان» در نظر بگیرید ، ترانزیستورها، حکم آجری را دارند که برای بنای این ساختمان باید روی هم گذاشته شوند.

درست همانند یک کلید ساده ی چراغ ، ترانزیستورها در دو حالت کار می کنند: حالت وصل، و حالت قطع. این حالت قطع یا وصل ، یا خاموش و روشن ترانزیستورهاست که امکان پردازش اطلاعات را فراهم می سازد.

یک کلید ساده ی برقی چطور کار می کند ؟

تنها چیزی که کامپیوترها از آن سردر می آورند ، سیگنال های الکتریکی است که قطع و وصل می شوند . برای درک بهتر ترانزیستورها، لازم است بفهمید که یک مدار قطع و وصل الکترونیکی چه طور کار می کند. مدارات قطع و وصل الکترونیکی از اجزای مختلفی تشکیل می شود. یکی ، مسیر جریان است که جریان الکتریکی عموماً از طریق یک سیم در آن گردش می کند.

دیگری ، خود کلید یا سویچ است؛ وسیله ای که گردش جریان الکتریکی را شروع و متوقف می کند، آن هم یا با بازگذاشتن مسیر جریان یا مسدود کردن آن. ترانزیستورها هیچ قطعه ی متحرکی ندارند و تنها با علایم الکتریکی قطع و وصل می شوند. قطع و وصل شدن ترانزیستورها، کار ریزپردازنده ها را میسر می سازد.

۲.۳ ترانزیستورهای با اثر میدان

۲.۳.۱ مقدمه

ترانزیستورهای معمولی که به دلیل ساختار فیزیکی شان دو پیوندی یا **BJT** نامیده می شوند، عناصری کنترل شده با جریان هستند؛ یعنی، جریان بیس ترانزیستور، جریان کلکتور آنها را کنترل می کند. برای برقراری جریان در اتصال کلکتور، باید جریان بیس به اندازه ای برسد که ناحیه تخلیه شده یا سد پتانسیل پیوند((بیس-امیتر)) کاملاً شکسته شود. وجود جریان ورودی زیاد، باعث می شود که مقاومت ورودی ترانزیستورهای دو پیوندی نسبتاً کم باشد و حتی در آرایش کلکتور مشترک که بیشترین مقدار مقاومت ورودی را به وجود می آورد، از چند صد هزار اهم تجاوز نکند. لذا وقتی می خواهیم سیگنال منبعی را که مقاومت داخلی بسیار زیادی(مثلاً حدود چند مگا اهم) دارد تقویت کنیم، استفاده از این ترانزیستورها به دلیل مقاومت ورودی کم آنها، در ساختن طبقه ی اول تقویت کننده، مناسب نیست. همچنین برای این که دستگاه های اندازه گیری مانند ولت متر و اسیلوسکوپ از مدار مورد اندازه گیری، جریان زیادی نکشند، باید مقاومت ورودی خیلی زیادی داشته باشند.

در گذشته به علت استفاده از تقویت کننده های لامپ خلاء، در این گونه موارد مشکل چندانی پیش نمی آمد. حجم و سنگینی زیاد دستگاه های لامپی، ولتاژ تغذیه ی چند صد ولتی، مصرف انرژی زیاد، نیاز به داشتن فیلامان، کاهش راندمان و عمر کوتاه لامپ ها، مدت ها ذهن پژوهشگران الکترونیک را به ساختن قطعات نیمه هادی با خواص الکتریکی مشابه خواص لامپ ها مشغول ساخته بود. سرانجام حاصل تلاش آنان به اختراع ترانزیستور اثر میدان انجامید. ساختمان ترانزیستورهای اثر میدان از ترانزیستورهای دو پیوندی ساده تر است و مقاومت ورودی آنها

بسیار زیاد و در حدود 1M تا 1000M اهم است. این قطعات عنصری کنترل شده با ولتاژ هستند و در ساخت آن ها فقط از دو نوع نیمه هادی استفاده می شود. به همین علت، به ترانزیستورهای تک پیوندی یا یک قطبی نیز مشهورند. ترانزیستورهای اثر میدان در دو نوع متفاوت ساخته می شوند که در یک نوع از روش نفوذی و در نوع دیگر از خاصیت خازنی لایه ها استفاده می شود. در مطالب گذشته در مورد نیمه هادی ها و ترانزیستور **BJT** مطالبی گفته شد. در ادامه نیاز است که کمی مطالب مقدماتی در مورد ترانزیستورهای اثر میدانی یا فِت ها (**FET**) که نقش اساسی و لاینفک در ساخت مدارات مجتمع را دارا می باشند ارائه کنیم. همانگونه که از نام این المان مشخص است، پایه کنترلی آن جریانی مصرف نمی کند و تنها با اعمال ولتاژ و ایجاد میدان درون نیمه هادی ، جریان عبوری از **FET** کنترل می شود. به همین دلیل ورودی این مدار هیچ گونه اثر بارگذاری بر روی طبقات تقویت قبلی نمی گذارد و امپدانس بسیار بالایی دارد.

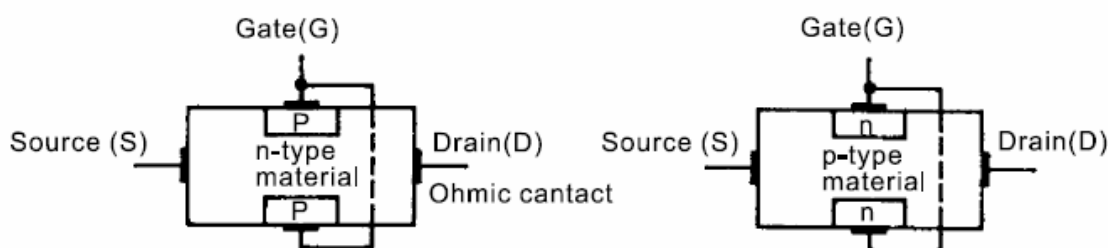
۲.۳.۲ ساختار و طرز کار ترانزیستور اثر میدانی ^۱JFET

ساختار ترانزیستور همانطور که در شکل زیر ملاحظه می کنید از یک میله سیلیسیم که کمی ناخالصی نوع n به آن افزوده شده باشد در نظر بگیرید. این میله درست مانند یک مقاومت عمل می کند که مقدار آن به میزان ناخالصی افزوده شده، سطح مقطع و طول میله بستگی دارد. با اتصال یک منبع ولتاژ انتهای میله را که الکترون ها از آن خارج می شوند را درجه یا درین و انتهای دیگر میله را که الکترون ها به آن وارد می شوند منبع یا سورس نام گذاری می کنیم. اگر مقاومت این میله تغییر کند، میزان جریانی که به ازای یک ولتاژ ثابت از آن عبور می کند نیز

^۱ Junction Field Effect Transistor

تغییر خواهد کرد. تغییر مقاومت میله با تغییر طول، سطح مقطع و میزان ناخالصی آن امکان پذیر است. از این سه متغیر تنها سطح مقطع موثر میله را می توان با استفاده از روش الکتریکی به کنترل درآورد.

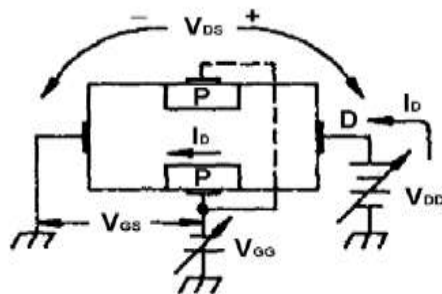
اگر در قسمتی از این میله یکه عنصر سه ظرفیتی مانند ایندیم را آنقدر نفوذ دهیم که یک ناحیه نوع **p** با غلظتی بیش از ناحیه ی **n** تشکیل شود، یک پیوند **pn** به وجود می آید. در این حالت ناحیه **n** کانال نامیده می شود چنانچه یک سیم به نیمه هادی نوع **p** وصل کنیم و این اتصال را دروازه یا گیت بنامیم، یک عنصر سه پایه حاصل می شود که به ترانزیستور اثر میدان پیوندی معروف است. مراحل ساخت ترانزیستور **JFET** با کانال **p** نیز مانند مراحل بالا می باشد (شکل ۶-۲).



شکل ۶-۲: چگونگی ساختار ترانزیستور **JFET**، کانال **n** و کانال **p**

برای بررسی عملکرد ابتدا یک ولتاژ قابل تنظیم به درین و سورس به طوری که درین از سورس مثبت تر باشد اعمال می کنیم. اعمال این ولتاژ باعث می شود که پیوند **pn** در گرایش معکوس قرار گیرد و ناحیه تهی شده از حامل های جریان در داخل کانال بیشتر نفوذ کند. با افزایش ولتاژ ناحیه تهی نیز افزایش میابد و سر انجام کانال را مسدود می کند، تا زمانی که کانال به حداکثر گرفتگی نرسیده است افزایش **V_{ds}** افزایش متناسب جریان درین را به همراه دارد اما با تنگ شدن کانال افزایش **V_{ds}** در جریان درین تغییر محسوسی به وجود نمی آورد و این امر طبیعی است؛

زیرا با افزایش V_{ds} لایه تهی از حامل های جریان در سطح کانال باز هم بیشتر افزایش می یابد و این موجب افزایش مقاومت کانال می شود به طوری که همواره نسبت ولتاژ درین- سورس به مقاومت کانال ثابت می ماند. ولتاژی را که به گرفتگی کانال منجر می شود ولتاژ بحرانی V_p می گویند. در این حالت جریان **FET** به حداکثر مقدار که جریان اشباع درین- سورس نامیده می شود می رسد. اکنون چنانچه پیوند **pn** را با اعمال یک ولتاژ به دو سر گیت و سورس در گرایش معکوس قرار دهیم، هرگونه افزایش در میزان این ولتاژ، گسترش سریعتر لایه ی تهی از حامل های جریان در سطح کانال را به همراه دارد و موجب افزایش مقاومت کانال و کاهش جریان درین می شود. مقدار V_{GS} که جریان درین را به صفر می رساند، ولتاژ آستانه^۲ یا قطع نامیده می شود و با $V_{GS(off)}$ نشان داده می شود. در ترانزیستورهای **JFET** ولتاژ آستانه تقریباً با ولتاژ بحرانی برابر است.



شکل ۷-۲: روش عملکرد پایه ای **JFET**

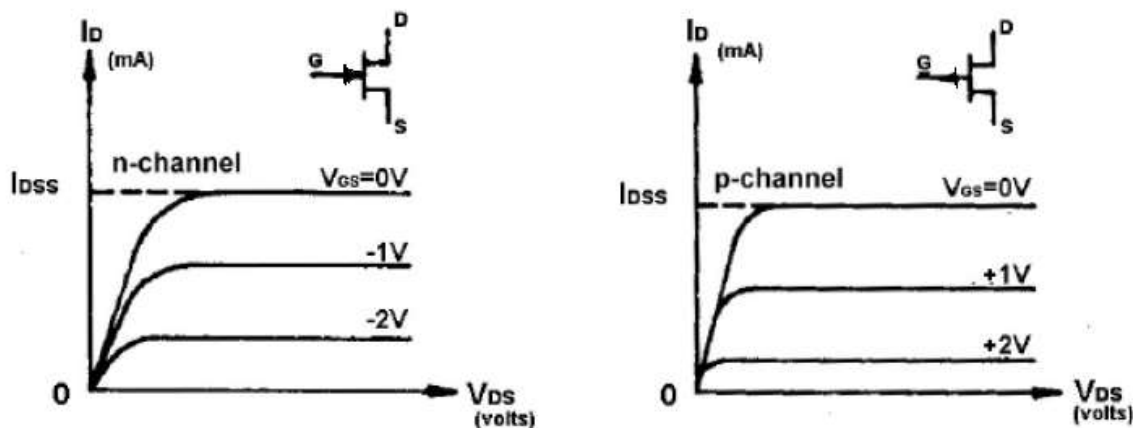
ترانزیستور با اثر میدان پیوندی کانال **p** هم ساخته می شود. این ترانزیستور نیز مانند ترانزیستور با کانال **n** عمل می کند و تنها تفاوتی که با آن دارد، در علامت ولتاژ درین- سورس و گیت-

^۲ Pinch Off Voltage

^۳ Source Cut Off Voltage

سورس است که برعکس نوع n اعمال می شود. منحنی مشخصه JFET ها در شکل ۸-۲ آمده است. JFET ها معمولاً بسیار حساس بوده و حتی با الکتریسیته ساکن بدن نیز تحریک می گردند

به همین دلیل نسبت به نویز بسیار حساس هستند.



شکل ۸-۲: منحنی مشخصه خروجی و علامت های اختصاری JFET کانال n و p

۲.۳.۳ ساختار و عملکرد ترانزیستورهای MOSFET^۴

مقدمه

چون در ترانزیستور JFET جریان نشتی پیوند گیت- سورس با افزایش دمای محیط افزایش می یابد، ترانزیستور نسبت به حرارت ناپایدار است و مقاومت ورودی آن در اثر گرما به مقدار زیادی کاهش می یابد. برای افزایش این مقاومت، می توان از ترانزیستور اثر میدان با گیت عایق شده^۵ استفاده کرد. در این ترانزیستور گیت با یک لایه اکسید سیلیکون از کانال جدا می شود و هیچ جریانی از گیت عبور نمی کند. لذا مقاومت ورودی آن فوق العاده افزایش می یابد. این ترانزیستور

^۴ Insulated Gate Field Effect Transistor

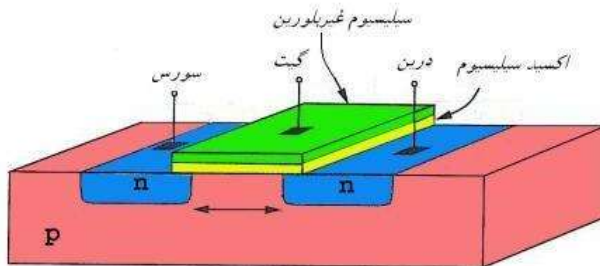
^۵ Metal-Oxide Semiconductor Field Effect Transistor

رایبشتر به نام **MOSFET** (ترانزیستور اثر میدانی اکسید فلزی نیمه هادی) می شناسند. نامی که از ساختار فیزیکی آن برگرفته شده است. یکی از اساسی ترین مزیت های ماسفت ها نویز کمتر آنها در مدار است.

الف: ساختار ترانزیستور MOSFET

ترانزیستورهای **MOSFET** به دو دسته تهی شونده و تشکیل شونده تقسیم می شوند و هر یک شامل دو نوع **N** کانال و **P** کانال می باشند که ما در اینجا به دلیل اهمیت ترانزیستورهای نوع تشکیل شونده به بررسی این نوع از ترانزیستور می پردازیم. برای اختصار این نوع ترانزیستور را، ترانزیستور **MOS** می نامیم. ترانزیستور **MOS** دارای دو نوع گوناگون است. یکی **NMOS** و دیگری **PMOS** نام دارد. در ترانزیستور **NMOS** الکترون های آزاد حامل بار الکتریکی هستند و در ترانزیستور **PMOS** حفره های آزاد حامل بار الکتریکی می باشند. ابتدا ساختار ترانزیستور **NMOS** را شرح می دهیم. سپس با استفاده از تشابهات موجود، ساختار ترانزیستور **PMOS** را نیز بیان می کنیم.

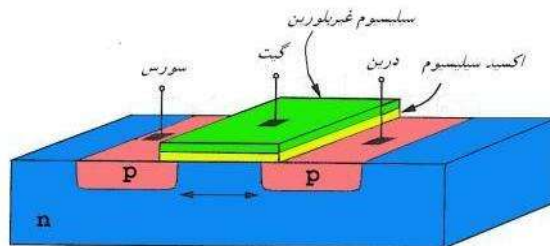
در شکل ۹-۲ ساختاریک ترانزیستور **NMOS** را مشاهده می کنیم. همانطور که در شکل ۹-۲ می بینیم ترانزیستور **NMOS** از سه ناحیه تشکیل شده است. هر سه ناحیه بر روی یک بدنه بنا شده است. در ترانزیستور **NMOS** ، بدنه از جنس نیمه رسانای نوع **P** است. بر روی بدنه قطعه ای قرار گرفته که شامل دو ناحیه ی نیمه رسانای نوع **N** است. این ناحیه ها با فاصله ی معینی از یکدیگر قرار گرفته اند و بین آنها، نیمه رسانای نوع **P** قرار دارد.



شکل ۹-۲: ساختار یک ترانزیستور NMOS

جنس ترانزیستور NMOS ، مانند بسیاری از قطعات الکترونیکی دیگر، از عنصر سیلیسیوم (Si) است که با افزودن ناخالصی از عناصر سه ظرفیتی و پنج ظرفیتی به ترتیب به نیمه رسانای نوع P و نوع N آلوده می‌شود. بر روی نیمه‌رسانای نوع P که در بین دو ناحیه‌ی N قرار دارد، یک لایه‌ی نازک از اکسید سیلیسیوم (SiO_2) قرار گرفته که ماده‌ای نارسانا است. یک لایه‌ی رسانا (که در گذشته از جنس فلز بوده و در فناوری جدید از جنس سیلیسیوم غیربلورین است) نیز بر روی لایه‌ی نازک اکسید قرار دارد. بدنه‌ی ترانزیستور NMOS را زیربنا یا بدنه می‌نامیم. یکی از ناحیه‌های نیمه‌رسانای نوع N را درین (Drain) و دیگری را سورس (Source) می‌گوییم. لایه‌ی رسانای روی اکسید را هم گیت (Gate) می‌نامیم.

در شکل ۱۰-۲ یک ترانزیستور PMOS را مشاهده می‌کنیم. همان‌طور که در شکل ۱۰-۲ می‌بینیم ترانزیستور PMOS بر روی زیربنایی از جنس نیمه‌رسانای نوع N ، بنا شده است. ترانزیستور PMOS از دو ناحیه‌ی نیمه‌رسانای نوع P تشکیل شده که با فاصله‌ی معینی از یکدیگر قرار دارند. این دو ناحیه را درین و سورس می‌نامیم. در بین دو ناحیه‌ی درین و سورس، ناحیه‌ای از جنس نیمه‌رسانای نوع N قرار دارد. مشابه ترانزیستور NMOS ، در ترانزیستور PMOS نیز بر روی ناحیه‌ی بین سورس و درین، یک لایه‌ی نازک از اکسید سیلیسیوم قرار دارد. بر روی این لایه‌ی اکسید، یک لایه‌ی رسانا از جنس سیلیسیوم غیربلورین وجود دارد که آن را گیت می‌نامیم.

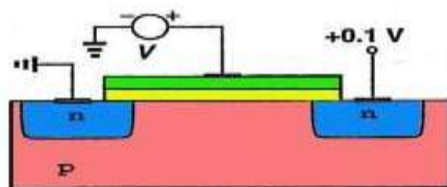


شکل ۱۰-۲: ساختار یک ترانزیستور PMOS

توجه کنید که هر دو ترانزیستور NMOS و PMOS، نسبت به سورس و درین ساختار متقارنی دارند. در هر دو ترانزیستور طول گیت را در امتداد مسیر بین سورس و درین است، طول کانال و راستای عمود بر آن را پهنای کانال می‌نامیم.

ب: عملکرد ترانزیستور MOS

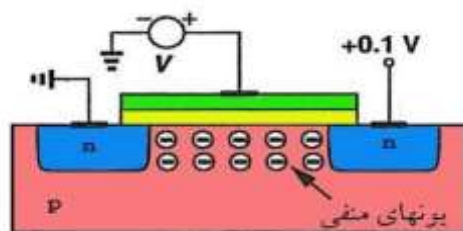
در این بخش نیز ابتدا عملکرد ترانزیستور NMOS را شرح می‌دهیم. و سپس به طور مشابه عملکرد ترانزیستور PMOS را از روی آن شرح خواهیم داد. بسیار خوب، یک ترانزیستور NMOS را در نظر می‌گیریم که مطابق شکل ۱۱-۲ به منبع ولتاژ متصل شده است (گیت را به پتانسیل مثبت متصل می‌کنیم. همچنین درین را به پتانسیل مثبت و سورس را به زمین متصل می‌کنیم).



شکل ۱۱-۲: یک ترانزیستور NMOS متصل به منبع ولتاژ

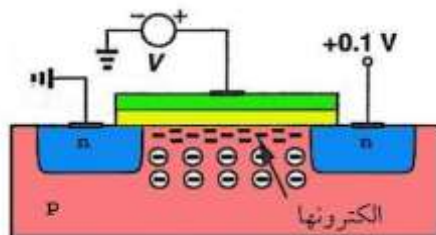
همان‌طور که در شکل ۱۱-۲ مشاهده می‌کنیم با افزایش ولتاژ پایانه‌ی گیت، بار مثبت در این پایانه تجمع می‌کند (در واقع بار مثبت به دلیل اتصال به پایانه‌ی مثبت منبع ولتاژ، در گیت جمع می‌شود). به دلیل وجود یک لایه‌ی اکسید که نارسانای الکتریکی است، بار در محل گیت باقی

می ماند و جمع می شود. در اثر پدیده ی القای الکتریکی، حفره های موجود در زیربنای نوع p ، که دارای بار مثبت هستند، از زیر سطح گیت رانده می شوند و یون های منفی به جای می ماند (شکل ۲-۱۲ را ببینید). این ناحیه را که تعدادی از حامل های بار الکتریکی از آن رانده شده است، ناحیه ی تهی می نامیم.



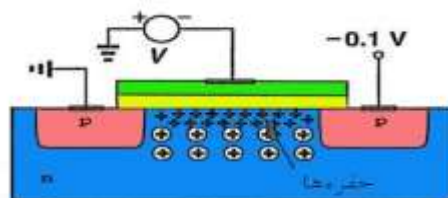
شکل ۲-۱۲: در اثر پدیده ی القای الکتریکی، حفره های موجود در زیربنای نوع p از زیر سطح گیت رانده می شوند و یون های منفی به جای می ماند.

تا کنون و تحت این شرایط هیچ جریان الکتریکی به وجود نیامده است. زیرا مسیر بین سورس و درین به اندازه ی کافی دارای حامل بار الکتریکی نیست. با افزایش ولتاژ گیت به تدریج تعدادی از الکترون های آزاد که در ناحیه ی سورس قرار دارند به محدوده ی زیر اکسید گیت وارد می شوند (دلیل این اتفاق آن است که ولتاژ گیت و همچنین درین مثبت است و بار الکترون ها منفی است). بنابراین با افزایش ولتاژ مثبت، الکترون ها به دلیل نیروی جاذبه ی الکتریکی تمایل پیدا می کنند که به سمت درین حرکت کنند). چنانچه ولتاژ گیت را باز هم بیشتر کنیم، با توجه به اینکه ولتاژ درین نیز مثبت (شکل ۲-۱۱) است و الکترون ها را به سمت خود جذب می کند، الکترون های آزاد از سورس به درین منتقل می شوند و جریان الکتریکی ایجاد می شود. به این ترتیب یک کانال یا مسیر از حامل های بار الکتریکی، که در این جا از نوع الکترون های آزاد است، بین سورس و درین و زیر لایه ی نازک اکسید، تشکیل می شود (شکل ۲-۱۳). در این حالت می گوئیم ترانزیستور روشن است. مقدار ولتاژ گیت را که به ازای آن این اتفاق می افتد، ولتاژ آستانه می نامیم.



شکل ۱۳-۲: با افزایش ولتاژ گیت به تدریج تعدادی از الکترون های آزاد که در ناحیهی سورس قرار دارند به محدودهی زیر اکسید گیت وارد می شوند.

عملکرد ترانزیستور PMOS و پدیدهی روشن شدن در آن مشابه ترانزیستور NMOS است، با این تفاوت که همهی ولتاژها معکوس می شود. همان طور که در شکل ۱۴-۲ مشاهده می کنیم، اگر ولتاژ گیت به اندازهی کافی منفی شود، لایه ای وارون حالت قبل (شکل ۱۳-۲) در زیر لایه ی اکسید تشکیل می شود. این لایه که شامل حامل های بار الکتریکی از نوع حفره های آزاد است، برای برقراری جریان الکتریکی مسیری بین درین و سورس فراهم می کند.

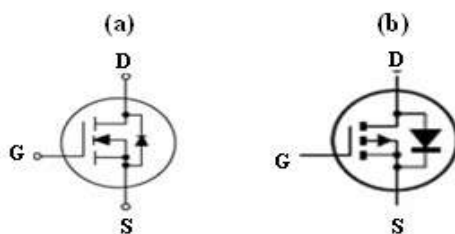


شکل ۱۴-۲: اگر ولتاژ گیت به اندازهی کافی منفی شود، یک لایه ی وارون از حفره ها در زیر لایه ی اکسید تشکیل می شود.

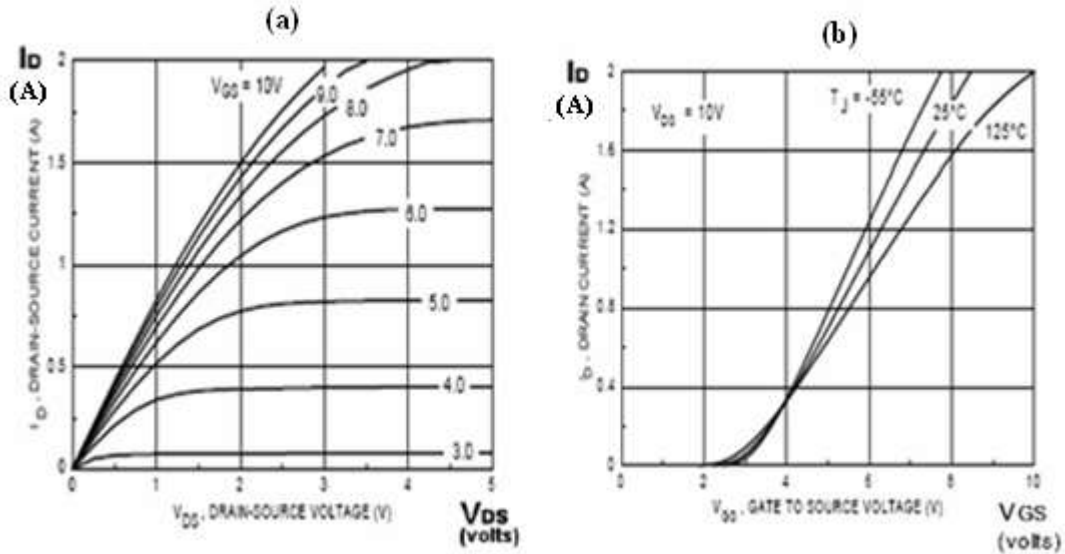
ترانزیستور MOS به عنوان کلید

همان طور که گفتیم پدیدهی روشن شدن ترانزیستور NMOS و PMOS یک پدیدهی تدریجی است. در ترانزیستور NMOS اگر ولتاژ گیت بالا باشد، سورس و درین به یکدیگر متصل هستند و اگر ولتاژ گیت پایین باشد، سورس و درین از یکدیگر جدا هستند. این پدیده مشابه عملکرد یک کلید است. همان گونه که اگر کلید را در یک جهت فشار دهیم، لامپ روشن می شود و اگر در

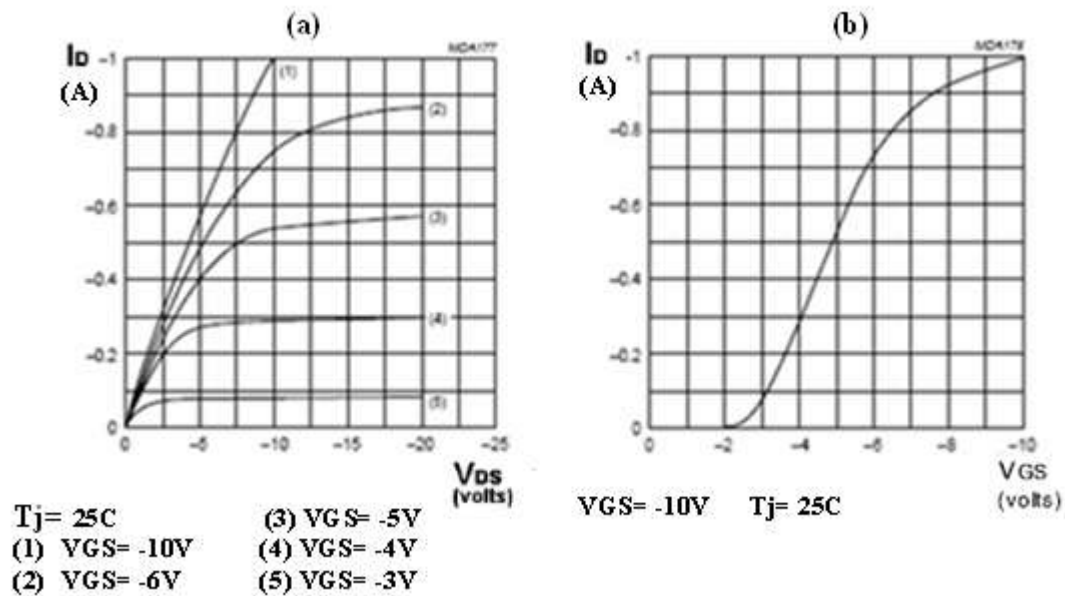
جهت دیگر فشار دهم لامپ خاموش می شود. در ترانزیستور PMOS اگر ولتاژ گیت پایین باشد، سورس و درین به یکدیگر متصل هستند و اگر ولتاژ گیت بالا باشد، سورس و درین از یکدیگر جدا هستند. می بینیم که عملکرد ترانزیستور NMOS و PMOS به عنوان کلید دقیقاً برعکس یکدیگر است. عملکرد ترانزیستور MOS به عنوان کلید، ویژگی بسیار مهمی است که اساس ساخت صدها مدار الکترونیکی پیچیده و حافظه ها است. در مطالب بعدی به صورت ملموس تر و کاربردی تر، مختصری از اهمیت ترانزیستورها را خواهیم گفت. نشانه های مداری ترانزیستورهای MOS (شکل ۱۵-۲) و منحنی مشخصه های آن (شکل ۱۶-۲ و ۱۷-۲) نشان داده شده است که عملکرد ترانزیستور را با توجه به توضیحات داده شده می توان از روی منحنی ها مشاهده کرد.



شکل ۱۵-۲: (a) علامت اختصاری MOSFET با کانال تشکیل شونده n، (b) علامت اختصاری MOSFET با کانال تشکیل شونده p



شکل ۱۶-۲: (a) منحنی مشخصه خروجی و (b) منحنی مشخصه انتقالی ترانزیستور MOS با کانال تشکیل شونده n.

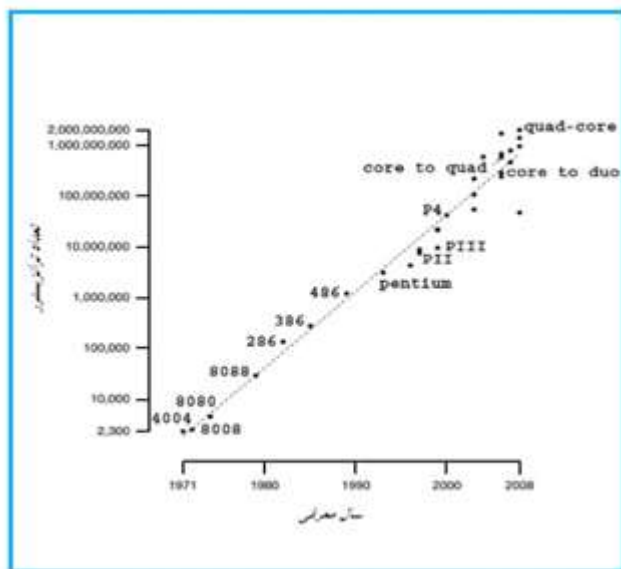


شکل ۱۷-۲: (a) منحنی مشخصه خروجی و (b) منحنی مشخصه انتقالی ترانزیستور MOS با کانال تشکیل شونده p.

۲.۴ ترانزیستورها کوچک و کوچکتر می شوند

قانون مور

به شکل (۲-۱۸) نگاه کنید. در این تصویر نموداری آمده که در آن، تعداد ترانزیستورهای واحد پردازشگر مرکزی رایانه بر محور عمودی و سال تولید آن بر محور افقی نشان داده شده است. پیش‌بینی مور با یک خطچین مورب رسم شده و اعداد واقعی با نقطه نمایش داده شده‌اند. بدین ترتیب می‌توان ملاحظه کرد که پیش‌بینی قانون مور تا چه اندازه به واقعیت نزدیک است. توجه کنید که در تصویر (۲-۱۸)، به منظور پرهیز از پیچیدگی، نام تمامی انواع CPU نوشته نشده است. (CPU یا واحد پردازشگر مرکزی، مخفف واژه‌ی Central Processing Unit است. این بخش اصلی‌ترین و مهم‌ترین قسمت یک رایانه است. CPU به منزله‌ی مغز رایانه انجام عملیات پردازشی، منطقی، ریاضی و کنترلی را بر عهده دارد. به بیان دیگر همه‌ی کارهای رایانه توسط واحد پردازشگر مرکزی مدیریت و کنترل می‌شود).



شکل ۲-۱۸: مقایسه‌ی قانون مور و تعداد ترانزیستورهای CPU از سال ۱۹۷۱ تا ۲۰۰۸. در این تصویر قانون مور به صورت خطچین نشان داده شده است.

چرا ترانزیستور بیشتر ؟

-
-
-

چرا ترانزیستور کوچکتر !؟

گفتیم مور پیش‌بینی کرد که تعداد ترانزیستورهای مدارهای مجتمع هر دو سال تقریباً دو برابر می‌شود. البته این قانون مور را می‌توان به گونه‌ای دیگر نیز بیان کرد؛ در این بیان جدید هر دو سال ابعاد ترانزیستورهای موجود در مدارهای الکترونیکی تقریباً نصف می‌شود. اما به نظر شما چرا سازندگان مدارهای مجتمع به دنبال قرار دادن تعداد بیشتری ترانزیستور در یک مدار مجتمع هستند؟ یا به بیان دیگر، چرا سازندگان مدارهای مجتمع به دنبال کوچکتر کردن ابعاد ترانزیستور هستند؟ آیا این کار مزیتی دارد؟

همان گونه که قبلاً در مطالب «آشنایی با ساختار و نحوه عملکرد ترانزیستور» به صورت مفصل شرح دادیم، ترانزیستورها از طریق الکترون‌های آزاد یا حفره‌های آزاد مسیر رسانش الکتریکی را برقرار می‌کنند. ما از این ویژگی ترانزیستور که مشابه یک کلید است، استفاده می‌کنیم و مدارهای الکترونیکی را طراحی می‌کنیم و می‌سازیم. هر چه تعداد ترانزیستورها در مدارات مجتمع بیشتر باشد، یا به بیان دیگر هر چه ترانزیستورها کوچکتر باشند، الکترون‌ها و حفره‌های آزاد برای رسانش الکتریکی مسیر کمتری را می‌پیمایند و این یعنی سرعت پردازش اطلاعات بیشتر می‌شود.

همچنین همان طور که بیان کردیم، واحدهای حافظه‌ها نظیر **RAM** ، **ROM** ، **FLASH** و ... همگی از ترانزیستور ساخته شده است. بنابراین هر چه تعداد ترانزیستورها در مدارهای مجتمع بیشتر شود، اندازه حافظه‌ها نیز بیشتر می‌شود. به همین جهت است که سرعت واحد پردازشگر

مرکزی در رایانه‌ها مرتب افزایش می‌یابد. تا چند سال پیش سرعت رایانه‌ها حداکثر چند صد مگا هرتز بود، در حالی که امروزه سرعت رایانه‌ها به چند گیگا هرتز رسیده است و مرتب نیز در حال افزایش است. یا این‌که اندازه‌ی ظاهری حافظه‌ها تغییری نمی‌کند و حتی در مواردی کوچکتر هم می‌شود، اما میزان حافظه‌ی آن‌ها به سرعت در حال افزایش است. اکنون ممکن است این پرسش در ذهن شما شکل بگیرد که چرا با این همه مزایا، از همان ابتدا ترانزیستورهایی با ابعاد کوچک نساختیم؟ چرا دانشمندان تقریباً هر دو سال، ابعاد ترانزیستور را نصف می‌کنند؟ پاسخ این پرسش ساده است. در اواخر دهه‌ی ۶۰ میلادی که برای اولین بار از ترانزیستور برای ساخت مدارهای مجتمع استفاده شد، فناوری ساخت آن‌ها در ابعاد کوچک موجود نبود. در واقع دانشمندان به تدریج و با استفاده از روش‌های نوین و فنون خاصی توانستند ابعاد ترانزیستورها را کوچک کنند و این کوچک شدن همچنان ادامه دارد.

چقدر کوچک‌تر؟!

ابعاد ترانزیستور را معمولاً با طول کانال ترانزیستور، یعنی فاصله‌ی بین سورس و درین مشخص می‌کنند. طول کانال ترانزیستور تا چند سال پیش حدود 0.25 میکرومتر بود. این طول سپس به 0.18 میکرومتر و پس از آن به 90 نانومتر کاهش یافت، یعنی کمتر از 100 نانومتر. از این مرحله، ترانزیستور در حوزه مورد نظر فناوری‌نانو قرار می‌گیرد. در مدارهای مجتمع امروزی طول کانال ترانزیستور حدود 45 نانومتر است.

پیش‌بینی می‌شود تا سال 2013 میلادی ترانزیستورهایی با طول کانال 32 نانومتر در مدارهای مجتمع مورد استفاده قرار بگیرند. همچنین برآوردها نشان می‌دهد طول کانال ترانزیستورها در سل 2016 میلادی به 22 نانومتر برسد. همان‌طور که ملاحظه می‌کنیم، ابعاد ترانزیستور مرتب

کوچک و کوچکتر می شود و نقش فناوری نانو در الکترونیک بیش از پیش مهم جلوه می کند. البته ماجرا به این سادگی هم نیست. رسیدن به ابعاد کوچکی که بیان شد، نیازمند حل مسائل و مشکلات بسیاری است. همان گونه که می دانیم، زمانی که از ابعاد چند ده نانومتر صحبت می کنیم، با تعداد محدودی اتم سر و کار داریم. اندازهی اتم سیلیسیوم که عنصر اصلی در ساخت مدارهای الکترونیکی امروزی است، حدود 0.2 نانومتر است. اگر فاصلهی مربوط به پیوند اتمی را هم در نظر بگیریم، می بینیم که در این ابعاد مطرح شده برای طول کانال، کار بسیار دشواری را پیش رو داریم. چرا که کار با چند ده اتم، مسائل پیش بینی نشدهی بسیاری به دنبال خواهد داشت. در واقع در این ابعاد اتفاقاتی می افتد که در ابعاد بزرگتر به سادگی قابل صرف نظر کردن است. ولی اکنون نمی توان از آن چشم پوشی کرد. این مشکلات را مسائل کوانتومی می گوئیم (در بخش های بعدی چالش های کوانتومی را بررسی خواهیم کرد).

مشکل دیگر، فناوری ساخت ترانزیستور در این ابعاد است. فنون و ابزارهای ساخت مدارهای مجتمع باید تغییرات اساسی بیابند. در این راه باید ابداعات و خلاقیت های زیادی انجام گیرد تا دسترسی به آن چه پیش بینی شده، امکان پذیر شود. برای اینکه بتوانیم در این باره دقیق تر صحبت کنیم، لازم است ابتدا با فناوری ساخت مدارهای مجتمع الکترونیکی آشنا شویم. ما در سری مطالب بعدی دربارهی فناوری ساخت مدارهای مجتمع بیشتر صحبت می کنیم.

۲.۵ ساخت نانو ترانزیستورهای فلزی

چکیده- مطالعات تحقیقاتی گسترده ای در زمینه مقیاس بندی کردن اندازه ترانزیستور برای چگالی فوق العاده بالا مدارات مجتمع در طول سه دهه گذشته اختصاص داده شده است.

پیشنهاد آن بوده است که برای کوچکترین مقیاس ممکن از کانال ترانزیستور MOS، یک کانال هدایت نزدیک به یک فلز لازم است. این نوع از ترانزیستورها با کنترل جریان الکترون ها از میان کانال باریک عمل می کنند. در ساخت نانو ترانزیستورهای فلزی، به یک فرایند لیتوگرافی پرتو الکترونی به ساخت سازه ها در مقیاس زیر ۳۰ نانومتر با استفاده از نانو سیم های نقره ای در زیر لایه سیلیکون توسعه شده است.

فن گذشتن مجرد نور دهی خط لیتوگرافی پرتو الکترونی برای تعریف الگوهایی به کار ساختار ترانزیستورهای کوچک با ابعادی به عنوان ۲۰ نانومتر است. در این مقاله جزئیات و تکنیک های ساخت از نانو ترانزیستورهای فلزی است.

عامل محدود برای خط زیر ۳۰ نانومتر به استفاده از ساختارهای EBL⁶ همچنین بعنوان اثر شارژ مواد عایق، اثرات مجاورت، و گذشتن مجرد نوردهی مورد بحث قرار گرفته است.

۲.۵.۱ مقدمه:

به منظور ساخت دستگاه های فوق العاده کوچک فراتر از لبه لیتوگرافی نوری برای ده سال آینده، نوع جدیدی از دستگاه های الکترونیکی تحقیق و بررسی شده اند. نانو ترانزیستورهای فلزی ساختار ترانزیستوری هستند که از یک لایه فلز با ابعادی زیر ۳۰ نانومتر ساخته شده اند. مزیت اصلی یک ترانزیستور فلزی بیش از موسفت ها است، و آن این است که در ابعادهای کوچک و ساختارهای

ساده که نیاز کمتری به مراحل ساخت دارد می باشد.

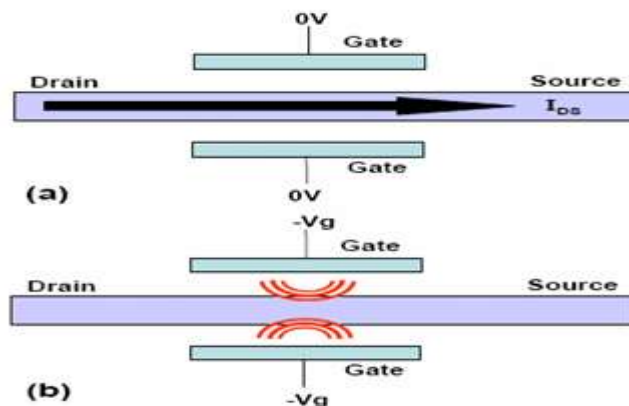
⁶ Electron Beam Lithography

ساختار یک بعدی ترانزیستورهای فلزی اجازه استفاده از تکنولوژی **nanoimprint** در مدت ساخت سریع و مقرون به صرفه را می دهد. در نوع دوم ترانزیستورهای فلزی، ساخت آن، اثر میدانی و **Y-branch** (شاخه) ترانزیستورهای فلزی بررسی شده است.

اثر میدان ترانزیستورهای فلزی مشابه موسفت های نوع تهی شونده عمل می کند. جریان از درین به سورس با اعمال ولتاژ طرف گیت کنترل می شود. بر خلاف ترانزیستورهای موس معمولی، کانال سورس- درین نانو ترانزیستورهای فلزی از نانو سیم های فلزی ساخته شده اند. با این حال، کانال همچنین می تواند از مواد نیمه هادی ساخته شود. عامل اصلی اثر میدان ترانزیستورهای فلزی را می توان در شکل ۱۹-۲ نشان داد.

با بایاس کانال درین- سورس، ترانزیستور روشن (کلید وصل) است و به عنوان سیم هدایت زمانی که ولتاژ طرف گیت اعمال میشود عمل میکند، همانطور که در شکل ۱۹-۲ (الف) نشان داده شده است. به هر حال، هنگامی که یک ولتاژ منفی به طرف گیت اعمال می شود، میدان الکتریکی آن الکترون ها را که از عبور از نانو سیم راه اندازی خواهد شد دفع می کند و از جریانی که می خواهد در کانال جاری شود مخالفت میکند، همانطور که در شکل ۱۹-۲ (ب) نشان داده شده است. پیش بینی آن است که جریان سوئیچینگ صفر هنگامی رخ خواهد داد که قطری از نانو سیم بسته است که به معنای مسیر آزاد الکترون است. در این مرحله، با توجه به این واقیت که قطر نانو سیم ساخته شده با استفاده از لیتوگرافی پرتو الکترونی در سراسر ۲۰ نانومتر است، تنها یک افزایش مقاومت، زمانی انتظار می رود که ولتاژ به گیت اعمال شده است.

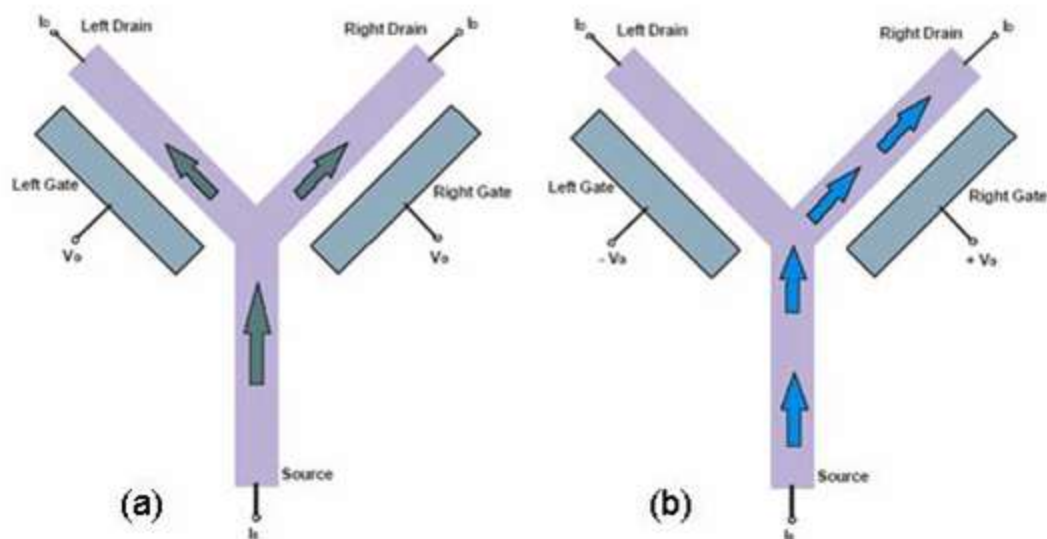
با این حال، اطلاعات ارزشمندی در مورد مکانیزم هدایت در نانو سیم های فلزی استنباط خواهد شد که در فهم ماهیت جریان حامل و در بهینه سازی طراحی و عملکرد ترانزیستور کمک خواهد کرد.



شکل ۱۹-۲: اصول عملکرد ترانزیستور اثر میدان فلزی

ترانزیستور شاخه-Y فلزی بر اساس طراحی سوئیچ شاخه-Y توسط J.J.Wesstrom در سال ۱۹۹۹ ساخته شده است.

در طراحی سوئیچ شاخه-Y، دو شاخه درین از سورس وجود دارد ، و دو طرف گیت ها در کنار هریک از درین ، همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است قرار دارد. هنگامی که ولتاژی به گیت ها اعمال نمی شود، از طریق هر دو درین ها جریان آزادانه جاری خواهد شد، همانطور که در شکل ۲۰-۲(الف) نشان داده شده است. عملیات سوئیچینگ ترانزیستور را می توان با آن چه که به عنوان عملیات پوش پول شناخته شده است انجام داد. یک طرف گیت ولتاژ مثبت اعمال خواهد شد در حالی که به گیت دیگر ولتاژ منفی اعمال شده است، میدان مثبت جریان را به جاری شدن تقویت میکند در حالی که میدان منفی آن را تضعیف خواهد کرد. هنگام اعمال ولتاژ به طرف گیت، جریان از طریق درینی که در کنار گیتی که ولتاژ مثبت به آن اعمال شده است جاری خواهد شد، همانطور که در شکل ۲۰-۲(ب) نشان داده شده است. طرح شاخه-Y نیز می تواند برای تقویت سیگنال ها مورد استفاده قرار گیرد. فرمان قطع توسط الکترون های هر درین، اختلاف ولتاژ بین تقویت شده ورودی است، که نتایج یک اختلاف ولتاژ بزرگتر بین شاخه ها است.

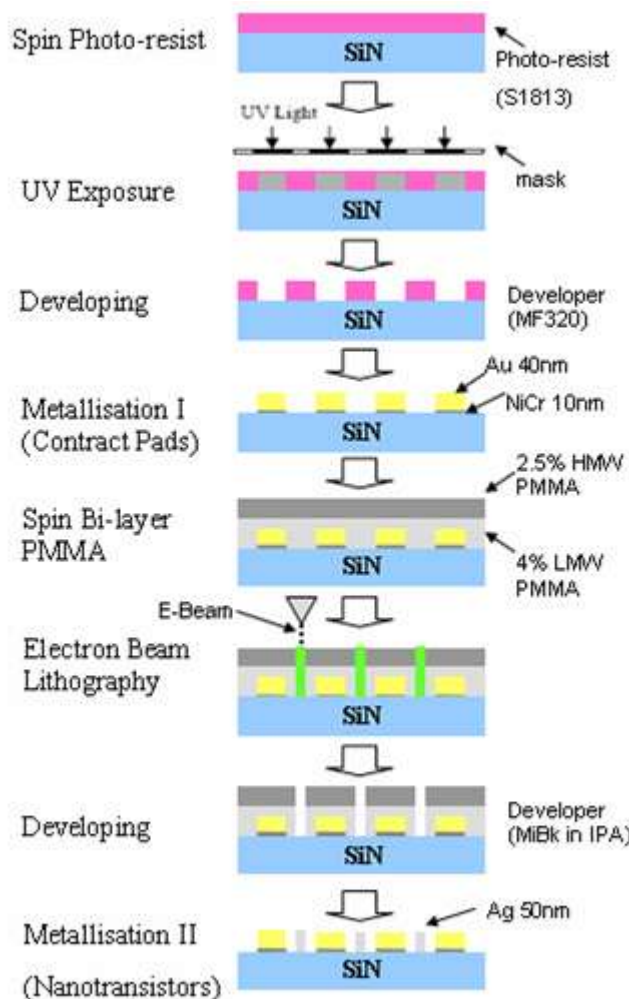


شکل ۲۰-۲: اصول عملکرد ترانزیستور شاخه-Y فلزی

۲.۵.۲ تکنیک تولید

در سال ۲۰۰۴ K.Hess و S.V.Rotkin پیشنهاد ساخت ترانزیستورهای اثر میدانی (MOSFET) را داشتند، که در آن کانال بین درین و سورس از نانو لوله های کربنی فلزی ساخته شده بود. با این حال، فرایند ساخت در ترانزیستورهای نانو لوله ی فلزی پیچیده است، پیچیدگی بیشتر و بازده ای کم می باشد. یک فرایند ساخت بسیار ساده برای ساخت نانو ترانزیستورهای فلزی با نانوسیم ها این است که کانال درین و سورس توسعه داده شود.

با توجه به ساختار فلزی و یک بعدی این المان می توان در زمان سریع تکنیک **Nanoimprint** و تولید انبوه را به کار گرفت. شکل ۲۱-۲ فرایند ساخت نانو ترانزیستور فلزی را نشان می دهد.



شکل ۲۱-۲: فرایند ساخت نانوترانزیستورهای فلزی

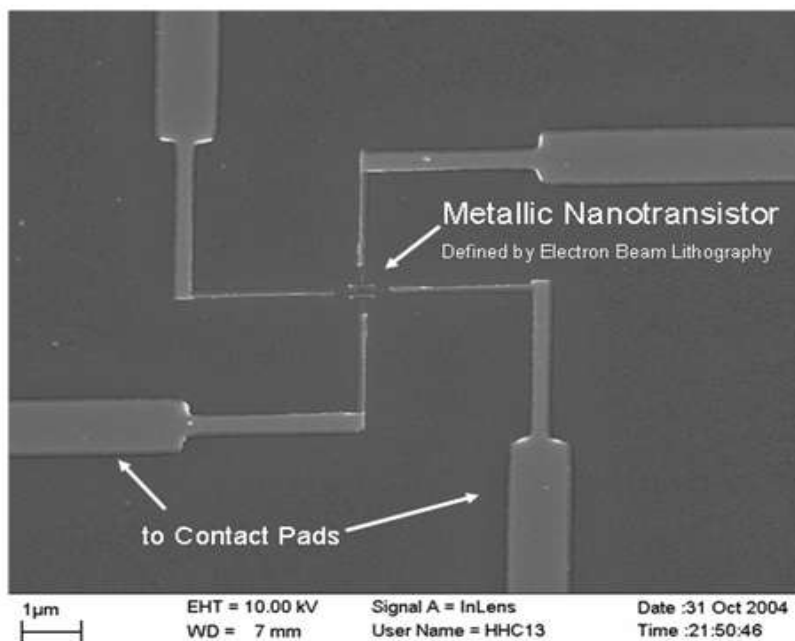
نانو ترانزیستورهای فلزی ساخته شده از نانو سیم هایی که ساخته شده اند روی ماده عایق ساز از زیر لایه سیلکون **SiN-coated (Si)** به مطمئن ساختن هدایت فقط از طریق سیم فلزی می باشند . کلید تکنیک های ساخت که استفاده شده برای ایجاد این نوع از نانوترانزیستورهای فلزی شامل رسوب فلز، فتولیتوگرافی، لیتوگرافی پرتاب الکترون، بلند کردن فلز (**metal lift-off**) و واکنش زدایش یونی است.

سه مرحله اصلی برای ساخت ترانزیستورهای فلزی عبارتند از:

ایجاد لایه تضعیف (پد) تماس، الگودهی لیتوگرافی پرتو الکترونی از نانوسیم، و فلز پوشانی (metallisation) می باشند.

الف : ایجاد پدهای تماس

شکل ۲-۲۲ تصویر SME⁷ (میکروسکوپ الکترونی پوششی) از یک ترانزیستور فلزی نقره ای (خصوصیات متوسط) اتصال به مجموعه ای از آهنگ های تماس پد طلا را نشان می دهد.



شکل ۲-۲۲: تصویر SME از یک ترانزیستور فلزی نقره ای و همتراز به پدهای تماس طلا را نشان می دهد. طلا با ضخامت فناوری ۴۰ نانومتر و ۱۰ نانومتر از NiCr بر روی عایق زیر لایه SiN به شکل پد تماس طلا که تسهیل اتصالات الکتریکی و مشخصات برای المان است تبخیر حرارتی شده است. فرایند فوتولیتوگرافی برای ساخت پد تماس با استفاده از ماسک همتراز ساز MA6 انجام شده و یک فتورزیست مثبت مورد استفاده قرار گرفت. طلا ماده ایده آل برای ساخت پدهای تماس به دلیل

⁷ Scanning Electron Microscope

رسانایی بالا و مقاومت در برابر اکسیداسیون است. یکی دیگر از مزیت های استفاده از طلا به علت آن است که سرعت انتشار بالایی از الکترون های ثانویه است که به ویژه برای همترازی لیتوگرافی پرتوالکترونی مناسب است. هنگامی که لیتوگرافی پرتو الکترونی انجام می شود پدهای تماس طلا بیشتر گرایش به قابل رویت با میکروسکوپ الکترونی پویشی (SEM) می باشند. اجازه همترازی بسیار دقیق بین الگو نانو ترانزیستور و پدهای تماس را می دهد. فلز پوشانی خارج با استفاده از بخارساز حرارتی و یک لایه نازک از NiCr به پیش رسوب دهی به افزایش چسبندگی بین زیر لایه SiN و لایه طلا انجام شده است.

ب: الگودهی EBL و فلز پوشانی (Metallisation)

تولیدهای موفق نانو ترانزیستورهای فلزی نیاز به تنظیم دقیق، انتقال الگو با رزولوشن بالا، توسعه ی که حفظ الگو، و فلز پوشانی موفق با Lift-off خوب است. یکی از تکنیک هایی که بطور گسترده برای ساخت المان های فوق العاده کوچک استفاده می شود لیتوگرافی پرتوالکترونی است. بر خلاف روش لیتوگرافی نوری ، لیتوگرافی پرتوالکترونی قادر به ایجاد ویژگیهای زیر ۲۰ نانو متر بر روی مقاومت کردن حساس الکترون می باشد.

عملاً، رزولوشن لیتوگرافی پرتوالکترونی توسط اندازه نقطه پرتو (باریکه) محدود نمی شود، اما با ابرالکترونی ثانویه در مدت نوردهی مقاومت حساس الکترون ایجاد می شود. برای ساخت نانو ترانزیستورهای فلزی به عنوان یک مقاومت کردن EBL بکار گرفتن پلی متیل متاکریلایت (PMMA) مثبت بوده است.

و طرح دو لایه PMMA (لایه حفاظتی برای ساخت دیسک های ویدیویی نوری) برای ایجاد زیر برش مقطع برای Lift-off فلز نیز مثبت بوده است. لایه پایین با استفاده از 4wt روکش چرخشی داده شده است، درصد محلول از حل کردن وزن ملکولی (120k) پایین PMMA در کلر

هیدروکربور (chloro benzen) است و روکش چرخشی لایه بالا از یک غلظت ۲.۵ درصد از وزن ملکولی (۹۹۶) بالا PMMA حل شده در xylene استفاده شده است.

۳۰ دقیقه پیش نوردی پخت ۱۸۵ درجه سانتی گراد پیرو عمل کردن کارایی از هر لایه است. دستگاه لیتوگرافی پرتوی الکترونی RITH-150 برای نوشتن و هماهنگ کردن الگوهای ترانزیستور با پدهای تماس مورد استفاده قرار گرفته است. پرتو ولتاژ ۱۰ کیلو ولت و دیافراگم ۳۰ میکرومتر مورد استفاده قرار گرفته است. باتوجه به دقت بالای لیزر مرحله تداخل سنجشی مقیاس میکرومتر همتراز کنند بین الگوهای نانو ترانزیستور و پدهای تماس طلا در زیر لایه را می توان به سادگی با دستگاه ذکر شده بدست آورد.

الگوهای اصلی از ترانزیستورهای فلزی با استفاده از L-Edit طراحی شده بودند. در L-Edit بهترین بخش ترانزیستورها از جمله نانو سیم ها و گیت بین سورس و درین می توان فقط با استفاده از بلوک های مستطیلی با فاصله یابی از ۲۰ نانومتر تا ۱۰۰ نانومتر تنظیم شوند. نتایج نوردی نشان داده اند که استفاده از بلوک های مستطیلی باعث ساخت عرض خط شده اند و این ساختارهای ریز به دلیل اثر مجاورتی بسیار گسترده تر از حد انتظار شده اند. اثر مجاورت یک نتیجه از پس پراکنش الکترون ها است که منجر به افشای مساحت از مقاومت کردن بیرونی از مساحت مورد نظر است.

اثر مجاورت حتی واضح تر است در این مورد با توجه به این واقعیت که مساحت مستطیل با آشکارسازی یک سری از خطوط مسیر تنها در لیتوگرافی پرتو الکترونی تشکیل شده است. برای حل این مشکل ویرایشگر GDS-2 در سیستم RAITH-150 برای طراحی بهترین ساختار ترانزیستور از جمله ساخت کانال درین و سورس با پهنای ۲۰ نانومتر به کار گرفته شده است، ۸۰۰ نانومتر نانو سیم طولانی و الکتروود گیت که ۲۰ نانومتر عرض و جدا شده از کانالهای شکاف ۴۰

نانومتر است هستند.

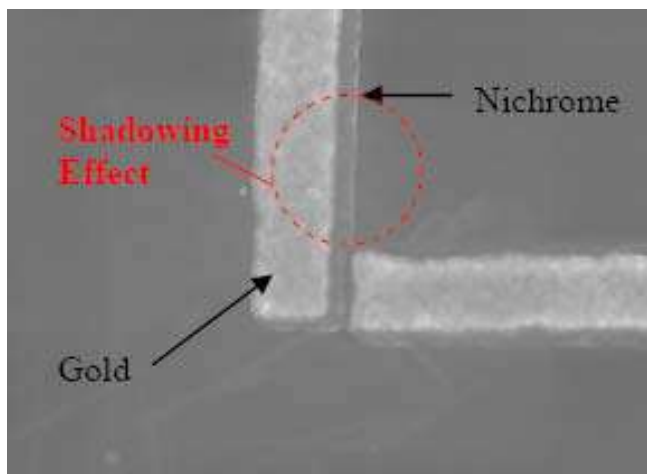
با استفاده از این نرم افزار CAD (طراحی به وسیله کامپیوتر)، از جمله ساختارهای نانوسیم می توان یک خط عبور در لیتوگرافی پرتو الکترونی تعریف کرد. عرض خط را می توان با دوز واقعی محاسبه شده در RAITH-150 کنترل کرد. این اجازه را می دهد تا خط های زیر ۳۰ نانومتر و سازه های که به راحتی در PMMA با دوز خط از حدود ۵۰۰ پی سی برسانتی متر است بدست آورد. این متد نوشته شده است به نتایج بسیار بهتری نسبت به اسکن پرتو با استفاده از طرح چند خط که در آن اثرات مجاورت غالب و تنزل رزولوشن داده شده است.

هنگامی که الگوهای ترانزیستور در مقاومت کردن تعریف شده، فلز پوشانی و Lift-off انجام شده است. انتخاب فلز پوشانی می تواند اثرات قوی بر کارکرد و عملکرد دستگاه گذارد. به طور کلی، ماده فلز پوشانی باید خاصیت الکتریکی خوبی، چسبندگی سطحی قوی، و حداقل واکنش مواد شیمیایی مورد استفاده در فرایند ساخت را داشته باشد. تبخیر و پراکندن دو فرایند مشترک برای فلز پوشانی است. اگرچه زمان پردازش سریع جانبی و در دمای پایین محیط زیست ارائه می دهد، آن ایده ال برای فلز پوشانی از الگوهای در مقیاس نانو با توجه به اثر سایه (کاهش توان) نیست.

۲.۵.۳ نتایج و بحث ها

طلا مناسب ترین ماده برای ساخت نانوترانزیستورهای فلزی با توجه به هدایت آلی و چسبندگی قوی خود برای پدهای (لایه های تضعیف) تماس در نظر گرفته شده است. با این حال ، مانند بسیاری از فلزات رسانایی بالا ، آنها از چسبندگی ضعیف به ماده های عایق مانند مواد SiN را

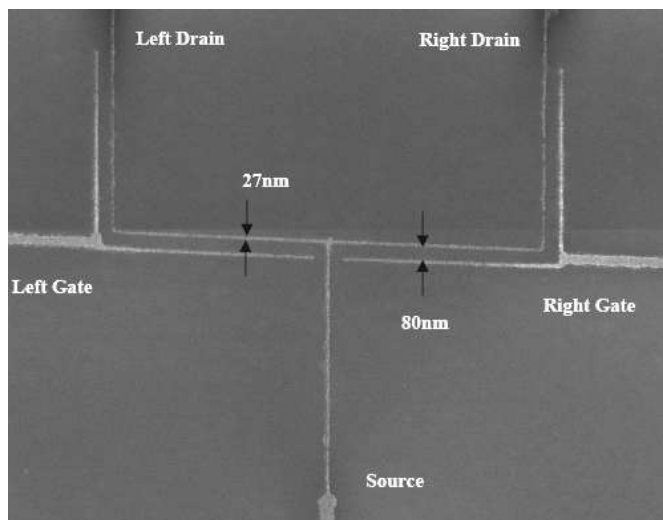
تشکیل می دهند. به منظور فلز پوشانی نانوترانزیستورها با طلا، باید یک لایه نازک از تیتانیوم پیش رسوب دهی شود تا به ترقی دادن چسبندگی بین طلا و بسترانجامد. برای آزمایش، رسوب ازدو لایه فلز می توان در اثر سایه بیشتر برالگو نانو مقیاس نتیجه گرفت، تولید متمایز یا قطعات فلزی گم شده بر روی المان بعد از بلند کردن(Lift-off)، همانطور که در شکل ۲۳-۲ نشان داده شده است.



شکل ۲۳-۲: تصویر SEM گرفته شده در بزرگ نمایی X ۰۸۰،۶۶ تاثیر اثر سایه ناشی از تبخیر دوگانه از طلا و Nic نشان می دهد.

به عنوان یک نتیجه، طلا به عنوان مواد نامناسب برای این المان در نظر گرفته شده است. فلزات دیگر مانند پلادیوم، نقره، آلومینیوم، طلا برای فلز پوشانی ای المان آزموده شده اند. در میان این فلزها، نقره ثابت کرده است که ماده بسیار عالی از لحاظ سهولت تبخیر و Lift-off است.

شکل ۲۴-۲ تصویر اسکن میکروسکوپ الکترونی از ترانزیستور فلزی نقره ای شاخه- Y را نشان می دهد.



شکل ۲۴-۲: تصویر SEM گرفته شده در بزرگ نمایی $19X$ ، 150 یک ترانزیستور فلزی شاخه-Y در SiN با عرض درین - سورس 27 نانومتر را نشان می دهد.

در طول نوردهی پرتو E (باریکه E)، اثر مجاورت ناشی از تحمیل پراکندگی الکترونی یک محدودیت شدید بر روی رزولوشن فضایی نهایی قابل دسترسی توسط لیتوگرافی پرتو E بوجود آورده است. برخی از بخش هایی از لایه پایین PMMA ناخواسته با توجه به اثر مجاورت آشکار (نوردهی) شده بودند. برای حل این مشکل، عرض 20 نانومتر گیت ها با خط های عبور تنها که کوتاه تر ساخته شده بودند (طول 400 نانومتر) به منظور اجتناب از مشکلات برش زیرین شدید به علت مجاورت خود به عرض لبه اتصال 100 نانومتر و به منظور کاهش تداخل میدان با ولتاژ گیت تعریف شده است.

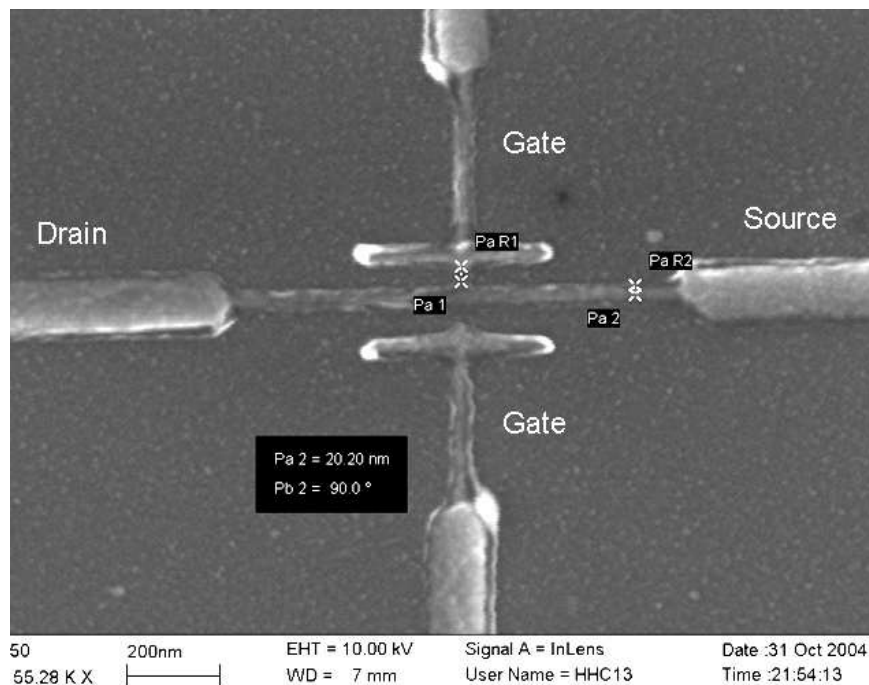
یکی از چالش اصلی درحالی که الگوبندی ساختار نانو ترانزیستور با لیتوگرافی پرتو الکترونی است مواجه می شوند، شارژ سطحی بوده است. مشکل شارژ سطحی ناشی از استفاده مواد عایق بعنوان بستر یا عدم وجود قطعات فلزی است که می تواند شارژ را که داخل مقاومت پس از نوردهی (آشکار سازی) پرتو E باقی مانده است مصرف کند. اثر شارژ سطحی در مدت لیتوگرافی پرتو الکترونی با استفاده از یک بستر سیلیکون با یک لایه نازک 200 نانومتر از SiN کاهش

می یابد. کمک به تخلیه از پرتو الکترون از طریق بستر سیلیکون، روش دیگر این است که با استفاده از یک ویفر کامل ۲۰۰ میلی متر به عنوان زیر لایه برای افزایش منطقه تحت پوشش توسط پدهای تماس فلز به منظور تسهیل ساخت تراکم بالاتر از ترانزیستورها روی یک تراشه منفرد است.

یکی دیگر از راه حل ها آن است که تا حدود زیادی مشکل شارژ سطحی قبل از ایجاد پد تماس پیش رسوب دهی از ۱۰ نانومتر تنگستن بر روی زیر لایه به حداقل برسد. پیش رسوب دهی از تنگستن بر روی بستر با استفاده از پراکندن DC انجام می شود.

برای این ساختار، نیاز به زدایش پلاسما به حذف لایه تنگستن پس از فلز پوشانی و فرایند **Lift-off** کامل شده است. این روش موثرترین و بهترین ترانزیستور اثر میدان فلزی اثبات کرده است، حتی در بستر کوارتز با یک عرض کانال درین و سورس ۲۰.۲ نانومتر ساخته شده است.

شکل ۲-۲۵ تصویراسکن میکروسکوپ الکترونی از ترانزیستور نانوسیم فلزی سیم های نقره ای به عرض ۲۰.۲ نانومتر با بکارگیری یک لایه پیش رسوب دهی از تنگستن با ضخامت ۱۰ نانومتر بر روی بستر عایق بسیار که از کوارتز ساخته شده را نشان می دهد.



شکل ۲-۲۵: تصویر SEM گرفته شده در بزرگ نمایی $55\times$ ، $280\times$ ترانزیستور اثرمیدان فلزی نقره ای در کوارتز با عرض کانال درین - سورس ۲۰ نانومتر را نشان می دهد.

۲.۵.۴ نتیجه گیری:

به منظور پاسخگویی به تقاضا برای کوچک شدن مدام ترانزیستورهای MOS، نوع جدیدی از ترانزیستور باید مورد بررسی قرار گیرد. نانو ترانزیستورهای فلزی با ابعاد زیر ۳۰ نانومتر نوید کاندیدهای هستند که ممکن است جایگزین ترانزیستورهای MOS فعلی در نظر گرفته شوند. در طول ساخت نانوترانزیستور فلزی، با اثرات مجاورت و شارژ سطحی مواجه شده اند، که استفاده از یک لایه تنگستن قبل از ایجاد پدهای تماس تا حد زیادی اثر شارژ سطحی در مواد عایق در طول فرایند لیتوگرافی پرتو الکترونی به حداقل رسانده است. در این عملکرد ترانزیستور اثرمیدانی فلزی و ترانزیستور شاخه-Y بر روی ماده عایق با موفقیت با استفاده از لیتوگرافی پرتو الکترونی ساخته شده اند. عرض حداقل درین - سورس ۲۰.۲۰ نانومتر از ترانزیستور اثرمیدانی ساخته شده از نقره را بدست آورد. خواص الکتریکی و آزمایش برای این المان در کنار انجام شد. این ترانزیستورهای فلزی به خوبی برای تولید انبوه با توجه به

ساختار ایده آل خود در سطح واحد برای هزینه پایین تکنیک ساخت مانند لیتوگرافی **nanoimprint**

مناسب هستند.

فصل سوم

((فناوری ساخت مدارات مجتمع))

در مطالب قبل با مفاهیم اولیه و پایه‌ی نانوالکترونیک آشنا شدیم. از فیزیک حالت جامد با تاکید بر نیمه‌رساناها گفتیم. همچنین، از ساختار ترانزیستور و چگونگی عملکرد آن مطالبی را بیان کردیم. و نیز همراه با بیان مثال، به اهمیت نقش ترانزیستور در مدارهای مجتمع پرداختیم. در قسمت قبل با بیان قانون مور گفتیم که از زمان ساخت اولین ترانزیستور، دانشمندان فیزیک الکترونیک به دنبال کوچکتر کردن ابعاد ترانزیستور، یا به بیان دیگر، زیادترکردن تعداد ترانزیستور در فضای ثابت بوده‌اند. همان‌طور که در آنجا بیان شد، نتیجه‌ی این امر افزایش سرعت پردازنده‌ها و نیز افزایش حجم حافظه‌ها است. در پایان مطالب قبل این پرسش مطرح شد که با وجود چنین مزایایی که در کوچکتر کردن ابعاد ترانزیستور است، چرا از ابتدا ترانزیستورها در ابعاد بسیار کوچک تولید نشدند؟ یعنی چرا به تدریج به سمت فناوری های کوچکتر حرکت می‌کنیم؟ در پاسخ به این پرسش بیان کردیم که حرکت به سمت فناوری های کوچک مقیاس نظیر فناوری نانو محدودیت‌هایی دارد. برای این که با محدودیت‌های ساخت ترانزیستورها در مقیاس نانو بیشتر آشنا شویم، ابتدا باید با فناوری ساخت ترانزیستورها در مدارهای مجتمع آشنا شویم. در این قسمت راجع به فناوری ساخت مدارهای مجتمع سخن خواهیم گفت.

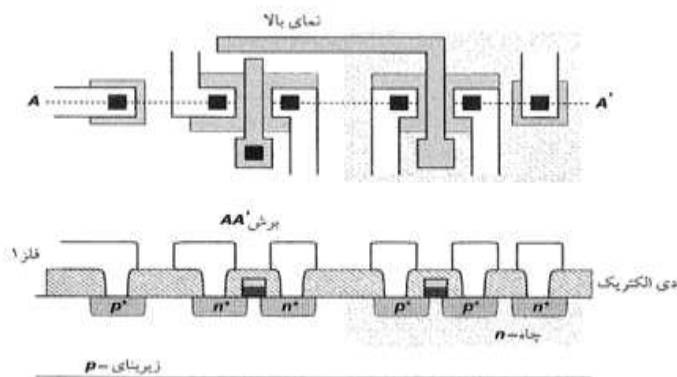
دقت کنید که منظور ما از مدار مجتمع، یک مدار الکترونیکی است که حداقل از ده‌ها ترانزیستور تشکیل شده است. پردازشگر مرکزی رایانه (CPU) ، انواع حافظه‌ها (نظیر RAM, ROM, FLASH MEMORY و ...) مدارهای کوچک الکترونیکی که در انواع وسایل الکترونیکی نظیر تلویزیون، یخچال، کنترل از راه دور خودروها، گوشی تلفن همراه، مایکروویو، پخش‌کننده‌های فیلم و موسیقی و ... وجود دارد، همگی نمونه‌هایی از مدار مجتمع یا به اختصار IC⁸ است.

⁸ Integrated Circuit

از آن جایی که در اینجا قرار است راجع به فناوری ساخت ترانزیستورهای NMOS و PMOS صحبت کنیم، پیشنهاد می‌کنم چنانچه ساختار این ترانزیستورها را فراموش کرده‌اید، مطالب قبل را مرور کنید. مدارهای الکترونیکی را که از ترانزیستورهای NMOS و PMOS به صورت مکمل استفاده می‌کنند، مدارهای CMOS⁹ می‌گوییم. امروزه اغلب مدارهای الکترونیک مجتمع با فناوری CMOS ساخته می‌شوند.

۳.۲ ملاحظات کلی فرآیند ساخت

قبل از آن که به صورت جزئی و دقیق، فرآیند ساخت مدارهای مجتمع را بررسی کنیم، خوب است که ساختمان ساده‌ی ترانزیستورهای NMOS و PMOS را در نظر بگیریم و گام‌های لازم برای ساخت را پیش‌بینی کنیم. در شکل (۳-۱) نمای کناری و بالایی یک ترانزیستور NMOS و یک ترانزیستور PMOS نشان داده شده است.



شکل ۳-۱: نمای بالایی و کناری یک ترانزیستور NMOS و یک ترانزیستور PMOS

همان‌طور که در شکل (۳-۱) مشخص است، هر دو ترانزیستور بر روی یک بدنه‌ی p- ساخته می‌شوند. بر روی این بدنه‌ی اصلی، چاه‌های n-، نواحی سورس و درین، عایق گیت، پلی‌سیلیکون، زیربنا، اتصالات فلزی ساخته می‌شود. (علامت - در p- و n- یعنی غلظت

⁹ Complementary Metal Oxide Semiconductor

ناخالصی درون سیلیسیوم کم است. در واقع؛ همان طور که در قسمت های اول گفتیم به منظور ساخت نیمه رسانای نوع n و p ، مقداری ناخالصی به نیمه رسانای سیلیسیوم اضافه می کنیم).

فناوری های پیشرفتهی ساخت CMOS دارای بیش از ۲۰۰ مرحله است، اما برای منظور ما، می توانیم نگاهی به زنجیرهی ترکیبی از عملیات زیر بیندازیم:

1. پردازش ویفر برای تولید یک زیربنا از نوع مناسب. ویفر همان مادهی آغازین فرآیند ساخت است. زیربنا نیز همان زیربنایی که همهی ترانزیستورها بر روی آن ساخته می شوند. جنس ویفر از عنصر سیلیسیوم به همراه مقداری ناخالصی است.

2. لیتوگرافی نوری برای تعریف دقیق هر ناحیه.

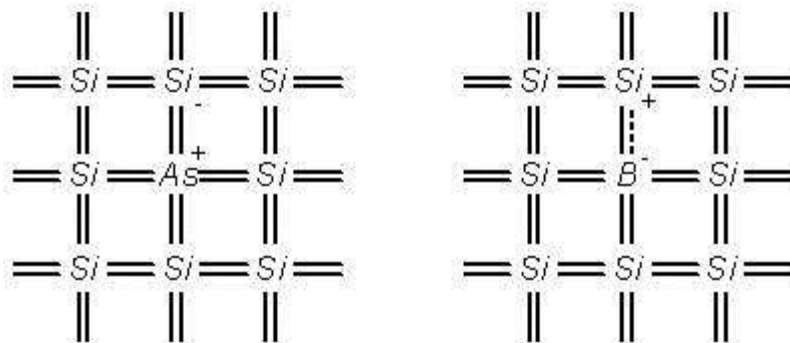
3. اکسیداسیون، لایه نشانی و کاشت یونی برای افزودن مواد لازم به ویفر.

4. زدایش جهت زدودن مواد زائد از ویفر.

بسیاری از این گامها نیاز به عملیات حرارتی دارند. یعنی ویفر باید یک چرخهی حرارتی را در یک کوره بگذراند.

گام اول: پردازش ویفر

در فناوری CMOS ، ویفر اولیه باید با کیفیت بسیار بالایی تولید شود. به این منظور، سیلیسیوم یا همان سیلیکون، به صورت جامد بلورین رشد داده می شود. بلور باید به گونه ای رشد یابد که دارای کمترین نقص بلوری باشد و نیز از درجهی خلوص بسیار بالایی نیز برخوردار باشد. یعنی اتم های ناخالصی در آن بسیار کم باشد. (جامدات بلورین دسته ای از جامدات هستند که در آنها اتم ها یا مولکول به صورت شبکه های منظم و تکراری در کنار یکدیگر قرار گرفته اند).



شکل ۲-۳: سمت راست: سیلیکون نوع p و سمت چپ: سیلیکون نوع n

پس از ساخت ویفر باید به آن ناخالصی موردنظر با مقدار و نوع مناسب اضافه شود تا زیربنای P- با ویژگیهای موردنظر تولید شود شکل ۲-۳ برای ساخت ویفر با چنین ویژگیهایی از روشی که به روش چوکرالسکی موسوم است، استفاده می‌شود. در این روش، یک دانه‌ی بلور در سیلیکون مذاب رو برده می‌شود و سپس به تدریج در حالی که می‌چرخد بیرون کشیده می‌شود. در نتیجه‌ی این عملیات، شمش بزرگ استوانه‌ای و بلوری از سیلیکون درست می‌شود که می‌توان آن را به قرص‌های نازک سیلیکون برش داد. قطر ویفرسیلیکون بین ۱۰ تا ۳۰ سانتی متر و طول آن ۱ متر است و رنگ آن نیز خاکستری فولادی است.

پس از برش، ضخامت هر قرص سیلیکون بین ۴۰۰ میکرومتر تا ۶۰۰ میکرومتر می‌شود. سپس ویفرها ساییده و به صورت شیمیایی پاک می‌شوند تا بدین ترتیب خرابی‌های سطحی که در هنگام برش به وجود آمده بر طرف شود. اکنون ویفر برای انجام مراحل بعدی آماده است.

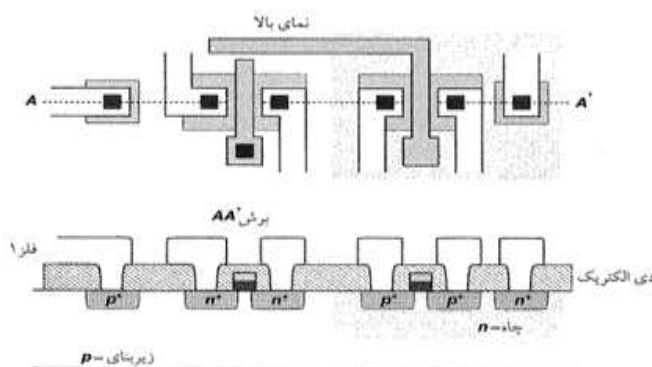
گام دوم: لیتوگرافی نوری

در قسمت قبل آموختیم که فرآیند ساخت مدار مجتمع را می‌توان در چهار گام خلاصه کرد. گام اول را که عبارت است از پردازش ویفر برای تولید یک زیر بنای مناسب، که در مطالب قبل به اختصار توضیح دادیم. در ادامه، به گام دوم که لیتوگرافی نوری است می‌پردازیم. لیتوگرافی

نوری^{۱۰} یا به اختصار لیتوگرافی، فرآیندی شبیه عکاسی است. در این فرآیند، نور یا پرتوهای الکترومغناطیس دیگر نظیر پرتوی فرابنفش (UV) با عبور از یک الگو یا ماسک به سطح ویفری که درگام قبل تهیه شده، برخورد می کند، و بدین ترتیب الگویی را که بر روی ماسک طراحی شده به سطح ویفر منتقل می کند. در این مقاله با جزئیات فرآیند لیتوگرافی نوری بیشتر آشنا می شویم.

لیتوگرافی نوری

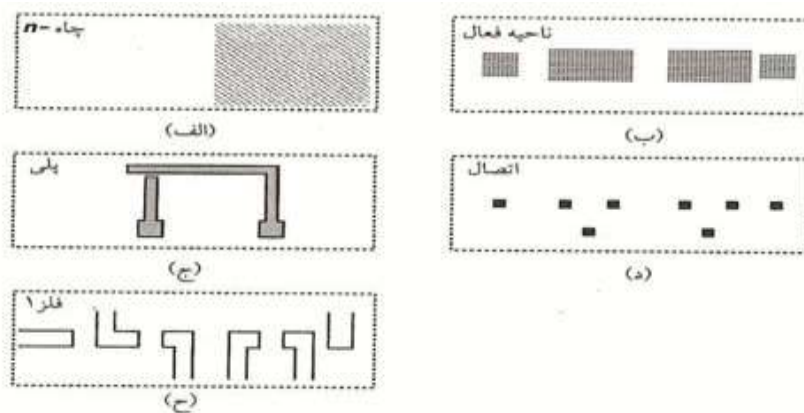
لیتوگرافی نوری اولین قدم در انتقال اطلاعات مربوط به الگوی مدار بر روی ویفر است. همانطور که در نمای بالایی در شکل ۳-۳ می بینید، ترانزیستور شامل چند ضلعی هایی است که نمایانگر لایه های مختلف هستند نظیر چاه n ، نواحی سورس و درین، پلی سیلیکون، اتصالات و لایه های فلزی.



شکل ۳-۳: نمای یک بالایی و کناری یک ترانزیستور NMOS و یک ترانزیستور PMOS

برای ساخت، ترانزیستورها را به این لایه های مختلف تجزیه می کنیم. برای مثال چپینش شکل ۳-۳ را می توان به صورت ۵ لایه ای مختلف که در شکل ۴-۳ نشان داده شده است در نظر گرفت. هر کدام از آنها باید با دقت بسیار بالا روی ویفر ایجاد شوند.

در شکل ۳-۴ منظور از ناحیه n - ، ناحیه ای است که ترانزیستور PMOS قرار است روی آن ساخته شود. همچنین، منظور از ناحیه ای فعال، نواحی سورس و درین و سوراخ های n و P هستند.



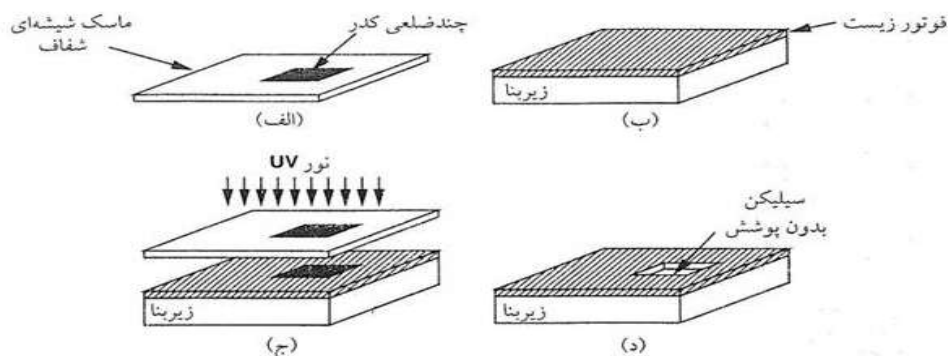
شکل ۳-۴: ۵ لایه ای مختلف ترانزیستورهای شکل (۳-۳)

برای این که دریا بیم چگونه یک لایه از چینش به ویفر منتقل می شود، الگوی چاه n در شکل ۳-۴ (الف) را بعنوان مثال در نظر بگیرید. این الگو ابتدا بر روی یک ماسک شیشه ای شفاف به وسیله یک پرتوی الکترونی که دقیقاً کنترل شده است، نوشته می شود. (شکل ۳-۵ الف را ببینید). همین طور مطابق شکل ۳-۵ (ب)، قبل از انتقال الگو از شیشه به سطح ویفر، سطح ویفر نیز با یک لایه نازک از ماده ای به نام فوتورزیست پوشانده می شود. فوتورزیست^{۱۱} ماده ای است که میزان حلالیت آن با تابش نور تغییر می کند (یعنی با تابش نور نرم یا سخت می شود). بعد از آن، ماسک

بالای ویفر قرار می گیرد و الگو با تابش پرتوی فرابنفش روی ویفر منتقل می شود. (شکل ۳-۵ ج) را ببینید) فوتورزیست در نواحی ای که تحت تابش پرتوی فرابنفش قرار گرفته سفت شده در زیر مستطیل سیاه نرم باقی می ماند (یعنی ناحیه ای مستطیلی روی شیشه چون تحت تاثیر نور قرار نمی گیرد بر روی ویفر ایجاد می شود). سپس ویفر در یک زداینده قرار می گیرد که نواحی نرم فوتورزیست را حل می کند و سطح سیلیکون را بدون پوشش می سازد. حال میتوان یک چاه n - را

¹¹ Photo Resist

در این ناحیه درست کرد (دقت کنید ما هنوز چاه n را درست نکرده‌ایم، بلکه جای آن را آماده کرده‌ایم. در مطالب بعدی نحوه‌ی درست کردن چاه n را بیان خواهیم کرد). به مجموعه‌ی این فرایندها، زنجیره‌ی لیتوگرافی نوری می‌گوییم.



شکل ۳-۵: چگونگی انتقال يك لایه از چينش به ویفر

به طور خلاصه، زنجیره‌ی مربوط به لیتوگرافی در هر لایه شامل يك ماسك و سه مرحله پردازش است که عبارت است از:

1. پوشاندن ویفر با فوتورزیست

2. تنظیم ماسك روی ویفر و تابش نور

3. زدودن فوتورزیست ظاهر شده

بنابراین، مثال شکل (۳-۴) حداقل به ۵ ماسك و در نتیجه ۱۵ زنجیره‌ی لیتوگرافی نیاز دارد. باید خاطر نشان کرد که دو نوع فوتورزیست در فرآیند لیتوگرافی به کار می‌رود: فوتورزیست منفی در نواحی که نور به آن تابیده می‌شود، سفت می‌شود. در حالی که فوتورزیست مثبت در نواحی که نور به آن نخورده، سفت می‌شود. همان‌طور که بعدتر خواهیم دید، در فرآیند ساخت مدارهای مجتمع از هر دو نوع فوتورزیست استفاده می‌شود.

تعداد ماسک های يك فرآیند تاثیر چشمگیری بر هزینه کلی ساخت دارد، که در نهایت بر قیمت تراشه هم تاثیر می گذارد. دو دلیل بر این امر وجود دارد: هر ماسک چند هزار دلار قیمت دارد و به دلیل دقت لازم، لیتوگرافی فرآیند کند و گرانی است. در حقیقت فناوری CMOS به دلیل تعداد نسبتاً پایین ماسک ها، در حدود ۷، در ابتدا مورد توجه واقع شد. اگر چه در فرآیندهای جدید CMOS این تعداد به ۲۵ می رسد و کل هزینه ماسک ها بالاتر از ۲۰۰ هزار دلار است، قیمت هر IC باز هم پایین است. زیرا هم تعداد ترانزیستورها بر واحد سطح و هم اندازه ی ویفر به طور پیوسته افزایش یافته است.

فرآیند لیتوگرافی نوری مشابه فرآیندی است که در عکاسی بر روی فیلم عکاسی اتفاق می افتد. برای آن که با لیتوگرافی نوری بیشتر آشنا شوید، آزمایش ساده ی زیر را انجام دهید.

يك آزمایش ساده

مواد و وسایل مورد نیاز

يك كاغذ سفید A4 یا يك قطعه پارچه ی سفید تقریباً در همین ابعاد، يك بخاری روشن، مقداری فویل آلومینیومی، يك عدد قیچی.

شرح آزمایش:

ابتدا شعله ی بخاری را کم کنید، سپس کاغذ سفید یا پارچه ی سفید را بر روی بخاری قرار دهید. به گونه ای که شیارهای روی بخاری را بپوشاند. مراقب باشید که کاغذ یا پارچه آتش نگیرد. پس از حدود يك دقیقه کاغذ را بردارید و با دقت نگاه کنید. مشاهده می شود که تصویر شیارهای بخاری بر روی کاغذ منتقل شده است. اگر بخواهید، می توانید تصاویر دلخواه خود را با استفاده از قیچی

بر روی فویل آلومینیومی ببرید. سپس این تصاویر را با همین روش بر روی صفحه‌ی کاغذی منتقل کنید.

پس از انجام مرحله‌ی لیتوگرافی، قرص سیلیسیومی آماده‌ی انجام گام‌های بعدی است. گام‌های بعدی اکسیداسیون، کاشت یونی، لایه‌نشانی و زُدایش مواد زائد می باشند.

گام سوم و چهارم: اکسیداسیون، لایه‌نشانی و کاشت یونی برای افزودن مواد لازم به ویفر و زُدایش جهت زدودن مواد زائد از ویفر

در دو گام قبلی راجع به فرآیند ساخت مدار مجتمع با استفاده از فناوری CMOS سخن گفتیم. همان طور که بیان کردیم، در گام اول به آماده‌سازی و پردازش ویفر می‌پردازیم و سپس در گام دوم، ویفر سیلیسیومی را با استفاده از فرآیندی به نام لیتوگرافی نوری به محدوده‌های موردنظر برای ساخت مدار مجتمع تقسیم می‌کنیم. در واقع، لیتوگرافی روشی است که ما با استفاده از آن لایه‌های مختلف یک مدار مجتمع را می‌سازیم. پس از لیتوگرافی مراحل اکسیداسیون، کاشت یونی، لایه‌نشانی و زُدایش نیز برای ساخت مدار مجتمع انجام می‌شود

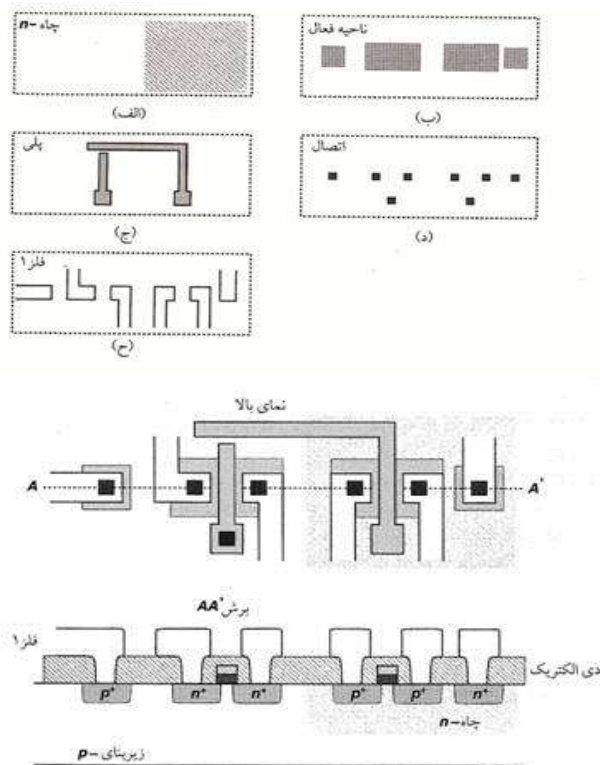
1. اکسیداسیون

ویژگی منحصر به فرد سیلیکون آن است که به ما امکان می‌دهد تا یک لایه‌ی بسیار یکنواخت اکسید روی سطح آن ایجاد کنیم تا بتوان لایه‌های اکسید گیت را با ضخامت چند ده انگستروم (فقط چند لایه‌ی اتمی) با آن ساخت. این ویژگی سیلیکون به علت آن است که اکسید سیلیکون هنگامی که ساخته می‌شود دارای نقص بلوری کمی است. دی‌اکسید سیلیکون علاوه بر آن که به صورت عایق گیت به کار می‌رود، می‌تواند به صورت پوشش محافظ در بسیاری از مراحل ساخت عمل کند. همچنین در قسمت‌های بین ترانزیستورها یک لایه‌ی ضخیم SiO_2 که اکسیداسیون (FOX) نامیده

می‌شود، رشد می‌دهند تا سیم‌های فلزی اتصال که در گام‌های بعدی ایجاد می‌کنند، روی آن ساخته شود. دی‌اکسید سیلیکون با قرار دادن سیلیکون بدون پوشش در یک محیط اکسید کننده مثل اکسیژن با دمایی در حدود ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد رشد داده می‌شود. در واقع؛ قسمت‌هایی را که می‌خواهند از دی‌اکسید سیلیکون پوشش دهند با استفاده از فرآیند لیتوگرافی، مشخص می‌کنند و سپس IC را در محیط اکسید کننده قرار می‌دهند. بدین ترتیب فقط قسمت‌هایی که با استفاده از لیتوگرافی فاقد پوشش هستند، اکسید می‌شوند.

2. کاشت یونی

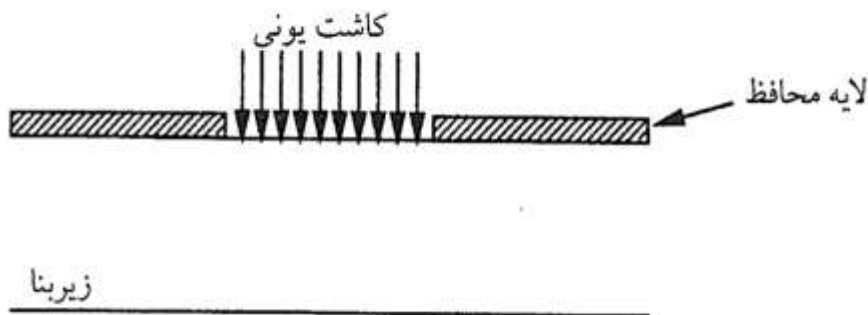
در بسیاری از مراحل ساخت، باید آلاینده‌ها (همان ناخالصی‌هایی که به دلیل تغییر خواص نیمه‌رسانا به آن اضافه می‌کنیم) به طور انتخابی وارد ویفر شوند. برای مثال، بعد از تکمیل زنجیره لیتوگرافی در شکل (۶-۳)، چاه n با افزودن آلاینده به ناحیه‌ی بدون پوشش تشکیل می‌شود. به طور مشابه نواحی سورس و درین ترانزیستورها نیز نیاز به افزودن انتخابی آلاینده به ویفر دارند.



شکل ۳-۶ نمای یک بالایی و کناری یک ترانزیستور NMOS و یک ترانزیستور PMOS و

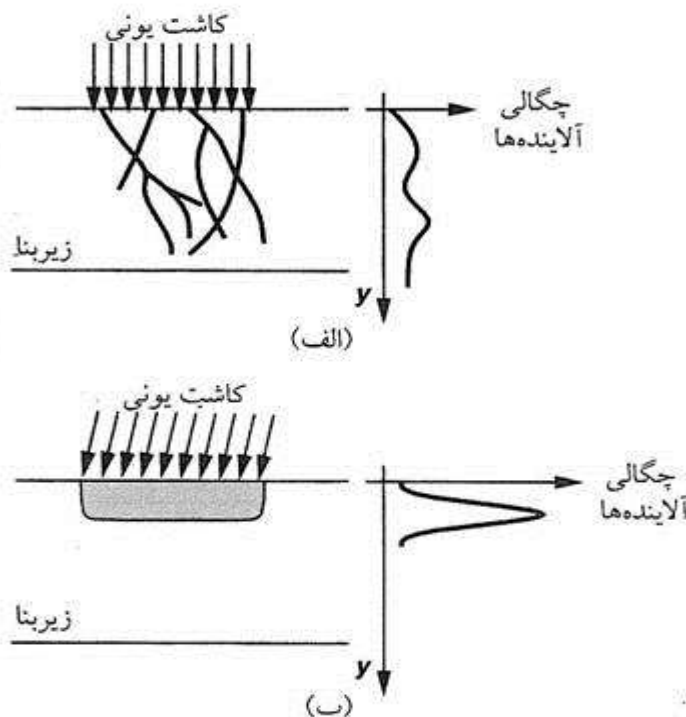
۵ لایه‌ی مختلف آن.

رایج‌ترین روش افزودن آلاینده روش «کاشت یونی» است که به وسیله‌ی آن اتم‌های آلاینده به صورت یک پرتوی متمرکز پر انرژی شتاب داده می‌شود و به سطح ویفر برخورد کرده و در نواحی بدون پوشش نفوذ می‌کند. (شکل ۳-۷ را ببینید) میزان آرایش با شدت و طول عملیات کاشت معین می‌شود و عمق ناحیه‌ی آلاییده با انرژی پرتو تنظیم می‌شود.



شکل ۳-۷: میزان آرایش با شدت و طول عملیات کاشت معین می‌شود و عمق ناحیه‌ی آلییده با انرژی پرتو تنظیم می‌شود.

کاشت یونی باعث تخریب قابل ملاحظه‌ی شبکه‌بلوری سیلیکون می‌شود. به همین دلیل، ویفر بعد از این فرآیند باید به مدت ۱۵ تا ۳۰ دقیقه تا دمای تقریبی ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد گرم شود تا اجازه دهد که پیوندهای شبکه دوباره شکل بگیرند. این عملیات، تابکاری نامیده می‌شود. تابکاری ویفر یک بار و آن هم بعد از آن که همه‌ی نواحی کاشته شدند انجام می‌شود. یک پدیده‌ی جالب در کاشت یونی، کانال زدن است. همان طور که در شکل (۸-۳ الف) نشان داده شده است، اگر جهت پرتوی کاشت با محور کریستال در یک جهت باشد، یون‌ها تا عمق بسیار زیادی در داخل ویفر نفوذ می‌کنند. برای همین منظور دستگاه تابنده‌ی پرتو (یا ویفر) را به اندازه‌ی ۷ تا ۹ درجه کج می‌کنند. (شکل ۸-۳ ب را ببینید).



شکل ۸-۳: جهت پرتوی کاشت با محور کریستال

۳. لایه نشانی و زدایش

همان طور که از ساختار ترانزیستورها و مدار مجتمع نتیجه می‌شود، ساخت مدار مجتمع نیاز به نشاندن مواد مختلفی نظیر پلی‌سیلیکون دارد. یک روش رایج برای تشکیل پلی‌سیلیکون روی لایه‌های ضخیم عایق، روش لایه‌نشانی با بخار شیمیایی (CVD¹²) است، که در آن ویفرها در یک کوره شامل گازی که مواد مطلوب را از طریق واکنش شیمیایی ایجاد می‌کند، قرار می‌گیرند. در فرآیندهای جدید، CVD در فشار پایین انجام می‌شود تا یکنواختی بیشتری به دست آید. زدایش مواد نیز یک گام حیاتی است. برای مثال پنجره‌های اتصال با ابعاد خیلی کوچک مثل ۰/۳ میکرومتر در ۰/۳ میکرومتر و عمق نسبتاً زیاد مثل ۲ میکرومتر باید با دقت بالایی زدوده شود. بسته به سرعت، دقت و قابلیت انتخاب لازم در مرحله‌ی زدایش و نوع ماده‌ای که باید زدوده شود،

¹² Chemical Vapor Deposition

یکی از این روش ها را می توان به کار برد:

1. زدایش تر: یعنی ویفر در یک مایع شیمیایی قرار می گیرد. (دقت کمی دارد)
2. زدایش با پلاسما: که در آن ویفر با گاز پلاسما بمباران می شود. (دقت بالایی دارد)
3. زدایش با یون و اکنش دهنده: که در آن یون های تولید شده در گاز، ویفر را بمباران می کنند.

۴. فرآیندهای انتهایی

همین که ترانزیستورهای پایه ساخته شدند، ویفرها باید بعد از آن یک فرآیند انتهایی بگذرانند. زنجیره ای که عمدتاً ارتباطات الکتریکی مختلف روی تراشه را از طریق سیم و اتصال فلزی برقرار می کند.

یکی از این فرآیندهای نهایی، ایجاد اتصال روی پلی سیلیکون و نواحی فعال (منظور سورس، درین و نواحی $n+$ و $p+$ است) می باشد. این کار ابتدا با پوشاندن ویفر با یک لایه ی نسبتاً ضخیم (0.3 تا 0.5 میکرومتر) از اکسید و پس از آن اجرای زنجیره ی لیتوگرافی انجام می شود. سپس سوراخ های اتصال با زدایش پلاسما به وجود می آیند. بعد از ایجاد پنجره های اتصال، اولین لایه از ارتباط فلزی که فلز ۱ نامیده می شود روی کل ویفر نشانده می شود. لایه ی فلزی از جنس آلومینیوم یا مس است. یک رشته عملیات لیتوگرافی بعد از آن انجام می شود و لایه ی فلزی به طور انتخابی زدوده می شود. از آن جایی که تعداد ترانزیستورها در فناوری های جدید بسیار زیادتر شده، برای اتصالات میانی مدارات مجتمع بیش از یک لایه ی فلز لازم است. در واقع پیچیدگی اتصالات این قدر زیاد است که با یک لایه نمی توان اتصالات را انجام داد. در حال حاضر اتصالات میانی فلزی در هفت لایه انجام می شود. سطوح بالاتر اتصال فلزی نیز با استفاده از همین روند ساخته

می‌شوند. برای هر لایه‌ی اضافی فلزی، دو ماسک لازم است. یکی برای سوراخ‌های اتصال و دیگری برای خود اتصالات فلزی.

آخرین مرحله در فرآیند انتهایی، پوشاندن ویفر با یک لایه‌ی شیشه یا غیر فعال است که سطح را از خطرات ناشی از حمل و نقل مکانیکی و برش مصون می‌دارد. بعد از یک رشته عملیات لیتوگرافی، شیشه فقط از قسمت‌هایی که روی پایه‌ی اتصال قرار دارد، باز شده و امکان اتصال با دنیای بیرون را فراهم می‌کند.

در قسمت بعدی راجع به چالش‌های فرآیند ساخت مدار مجتمع در مقیاس نانو سخن می‌گوییم. همچنین خلاقیت‌ها و ابتکاراتی که به منظور حل این چالش‌ها انجام شده را بیان می‌کنیم.

فصل چهارم

((چالش های فناوری نانو برای ساخت مدارهای

مجتمع))

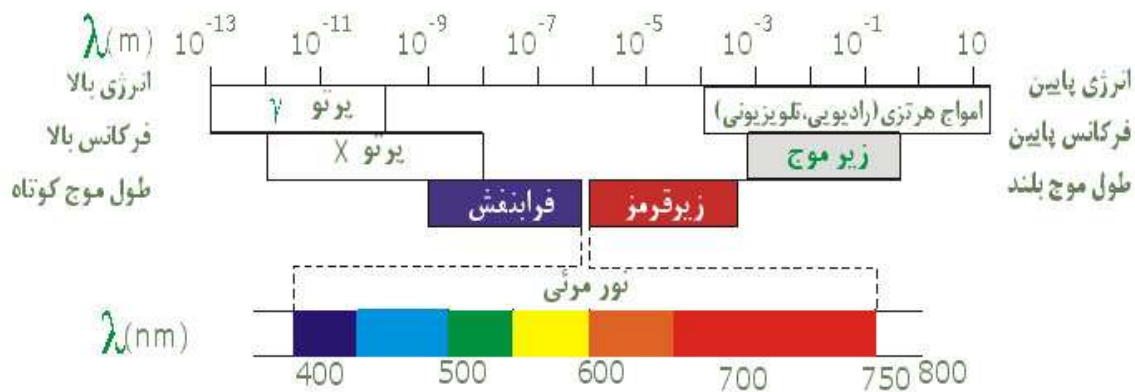
در ۳۰ سال گذشته، مدارهای مجتمع از ساختارهای کمسرعت با پیچیدگی کم، به سیستم‌های پرسرعت و پیچیده که شامل تعداد بی‌شماری مدار الکترونیکی می‌باشد، توسعه یافته است. همان‌طور که در مطالب قبلی متوجه شدیم با کاهش ابعاد ترانزیستورها در مدارهای الکترونیکی و افزایش تعداد آن‌ها در یکای سطح، سرعت مدارهای الکترونیکی به صورت قابل‌توجهی افزایش می‌یابد و به دنبال آن گستره‌ی بازدهی و سودمندی آن‌ها تحول چشمگیری می‌یابد. همچنین، توانایی ذخیره‌ی اطلاعات درون حافظه‌ها در حجم معین نیز زیاد می‌شود. در این میان «گوردون مور» موفق به کشف یک قانون تجربی شد که در صنعت الکترونیک بسیار مورد توجه قرار گرفت. او بیان کرد که تقریباً در هر دو سال، ابعاد ترانزیستورها در مدارهای الکترونیکی نصف می‌شود و یا به بیان دیگر در هر دو سال تعداد ترانزیستورهای موجود در یکای سطح یک مدار الکترونیکی دو برابر می‌شود.

اکنون این پرسش مطرح می‌شود که با وجود مزایای بسیار فناوری در ابعاد کوچکتر، چرا انتقال فناوری به نسل‌های کوچکتر هر دو سال اتفاق می‌افتد؟ یعنی چرا از همان ابتدا سراغ فناوری‌های کوچک مقیاس نرفتیم؟ ما در اینجا به همین موضوع می‌پردازیم. در واقع؛ می‌خواهیم بگوییم که ورود به فناوری کوچک مقیاس یا همان فناوری نانو چالش‌ها و مسائلی را پیش رو دارد که اکنون بخشی از این چالش‌ها حل شده، اما چالش‌ها و مسائل بسیاری همچنان حل نشده باقی مانده و محدودیت‌های بی‌شماری فرا روی دانشمندان و شرکت‌های عظیم فعال در حوزه‌ی صنایع الکترونیک قرار دارد. ورود به دنیای نانو الکترونیک اگر چه مزایا و محاسن بسیاری دارد اما مستلزم مقابله با محدودیت‌های بسیاری نیز می‌باشد.

همانطور که در قسمت های ساخت مدار مجتمع ملاحظه شد، شگرد اصلی در ساخت مدارهای الکترونیکی استفاده از روش لیتوگرافی نوری است. در واقع علت رشد سریع صنعت الکترونیک نیز همین شیوهی ساده، اما بسیار پرکاربرد بود که امکان ساخت تعداد بی شماری ترانزیستور را در مدت زمان کم، ممکن می سازد. برای کوچکتر کردن ابعاد ترانزیستورها لازم بود ماسک هایی با ابعاد کوچکتر تهیه شود تا با تاباندن پرتوهای نور بر این ماسک ها، قسمت های گوناگون مدارهای الکترونیکی بر روی ویفر سیلیکونی ساخته شود. ساخت ماسک های کوچکتر با استفاده از پرتوهای الکترونی اگر چه بسیار گران و پرهزینه بود اما امکان پذیر می نمود؛ لیکن چالش اصلی رفتار پرتوهای نور در ابعاد کوچک بود. در واقع پرتوهای نور در ابعاد کوچک، رفتار دیگری در مقایسه با ابعاد بزرگ از خود نشان می دادند و این مسئله کار ساختن مدارهای نانو مقیاس را دشوار می کرد.

۴.۲.۱ رفتار موجی نور

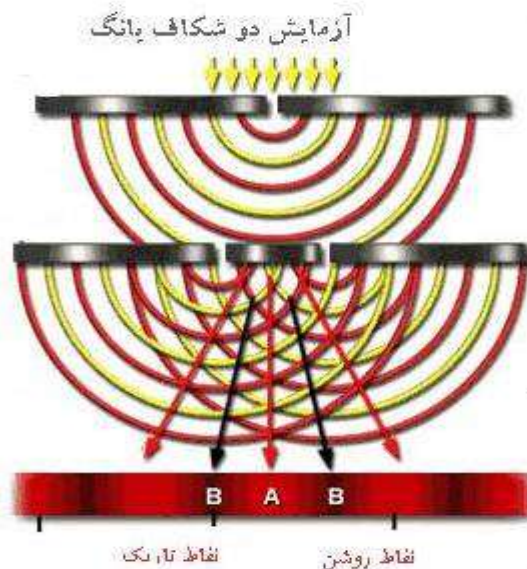
همانطور که می دانید امروزه دانشمندان معتقدند ماهیت نور از نوع امواج الکترومغناطیس است که دارای طیف وسیعی است که از پرتوهای رادیویی با سطح انرژی کم و طول موج زیاد شروع می شود و به پرتوهای گاما با سطح انرژی زیاد و طول موج کم می انجامد. نور مرئی بخش کوچکی از طیف امواج الکترومغناطیس را در بر می گیرد. در شکل (۱- ۴) طیف امواج الکترومغناطیس را مشاهده می کنید.



شکل ۱- ۴: طیف امواج الکترومغناطیس که نور مرئی بخش کوچکی از آن است.

اما قبل از این که رفتار موجی نور از سوی دانشمندان پذیرفته شود، نظریه‌ی ذره‌ای بودن نور مورد توجه و پذیرش دانشمندان بود. در قرن هفدهم میلادی، نیوتن نور را متشکل از ذرات ریزی می‌دانست که از منبع نور جدا می‌شوند. یعنی او برای نور خاصیت ذره‌ای قائل بود. اگر چه در همان زمان افرادی هم بودند که نور را موجی تصور می‌کردند، اما نظریه‌ی نیوتن نظریه‌ی غالب بود. تا این که در اوایل قرن نوزدهم یانگ و فرنل هر کدام با انجام آزمایش‌هایی، موجی بودن نور را ثابت کردند.

یانگ مقابل یک منبع نورانی، روزنه‌ای (S) قرار داد که مانند یک چشمه‌ی نور عمل می‌کند. در مقابل این روزنه صفحه‌ای گذاشت که روی آن دو روزنه‌ی S1 و S2 به فاصله‌ی کمی از هم قرار گرفته بودند. فاصله‌ی روزنه‌های S1 و S2 از روزنه‌ی S یکسان بود، یعنی روزنه‌ی S روی محور تقارن دو روزنه‌ی S1 و S2 قرار می‌گرفت. در مقابل این دو روزنه هم پرده‌ای برای تشکیل تصویر جای داده شد. تصویری که روی پرده تشکیل شد مشابه شکل (۲- ۴) بود.



شکل ۲- ۴: آزمایش یانگ برای اثبات رفتار موجی نور

آن چه در شکل (۲- ۴) مشاهده می‌شود، تشکیل نوارهای روشن و تیره بر روی پرده است که تنها با پذیرفتن رفتار موجی نور قابل توضیح است. چرا که وجود نوارهای روشن و تیره بر روی پرده را به هیچ طریق نمی‌توان با رفتار ذره‌ای نور توضیح داد. اگر رفتار نور ذره‌ای می‌بود، باید شدت نور در فضای روبروی دو روزنه‌ی S_1 و S_2 بیشینه بود و با دور شدن از آن، شدت نور کاهش می‌یافت (و نه به صورت نوارهای روشن و تیره).

اکنون دانشمندان معتقدند نور در مواردی رفتار ذره‌ای و در مواردی رفتار موجی دارد. یکی از مواردی که نور رفتار موجی نشان می‌دهد، هنگام عبور از دو روزنه‌ی بسیار کوچک که در مجاورت یکدیگر قرار دارند است.

۴.۲.۲ نانولیتوگرافی نوری

همان‌طور که بیان کردیم، برای ساخت ترانزیستورهای کوچکتر باید از ماسک‌های کوچکتر هم استفاده شود. اما مشکل اصلی این بود که هنگامی که پرتوهای نور از روزنه‌های این ماسک‌ها

عبور می‌کردند تا به ویفر سیلیکونی برخورد کنند و ناحیه‌ی مورد نظر ترانزیستور را بسازند، رفتار موجی نور به شدت ظاهر می‌شد و مانع تشکیل درست نواحی مورد نظر بر روی ویفر می‌شد.

برای کم کردن اثر رفتار موجی نور، شگردهای گوناگونی در صنایع الکترونیک استفاده می‌شود. یک راه استفاده از پرتوهای فرابنفش با طول موج کمتر از نور مرئی است (طول موج نور مرئی بین ۴۰۰ تا ۷۰۰ نانومتر است و برای ساخت ترانزیستورهای با ابعاد نانومتری به شدت رفتار موجی نشان می‌دهد). البته پرتوهای فرابنفش به دلیل سطح انرژی بالا، هم به سرعت ماسک را از بین می‌برد، و هم نمی‌توان ویفر سیلیکونی را مدت زیادی در معرض تابش آن قرار داد. راه دیگر برای کاهش اثر رفتاری موجی نور، انجام لیتوگرافی نوری در محیط مایع است. این تکنیک نیز تا حدودی رفتار موجی نور را کم اثرتر می‌کند. البته می‌توان به جای استفاده از پرتوهای نور از پرتوهای الکترونی هم استفاده کرد، اما این کار هم بسیار گران است و هم کندتر از لیتوگرافی نوری است و استفاده از آن در مقیاس صنعتی مقرون به صرفه نیست.

اکنون دانشمندان و مهندسين الکترونیک به دنبال کشف تکنیک‌ها و شگردهایی هستند که با استفاده از آن، بتوانند رفتار موجی نور را در ابعاد کوچک کاهش دهند. بدین ترتیب می‌توانیم منتظر ساخت ترانزیستورهایی در ابعاد کوچکتر و در مقیاس صنعتی با استفاده از فناوری نانو باشیم.

۴.۳.۱ مقدمه

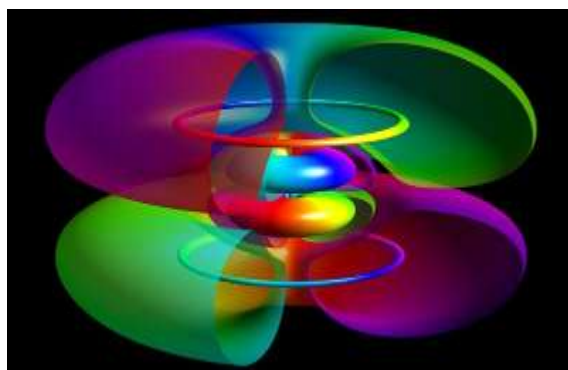
دنارد و همکارانش در مقاله‌ای که در سال ۱۹۷۴ میلادی منتشر کردند به پتانسیل بالای ترانزیستورهای MOS در کوچک شدن پی بردند. آن‌ها پیش‌بینی کردند که با کوچک شدن ابعاد ترانزیستورها، سرعت آن‌ها افزایش و تلفات توان یا همان انرژی مصرفی آن‌ها کاهش می‌یابد. همچنین اکنون می‌دانیم که کاهش ابعاد ترانزیستورها، موجب افزایش ظرفیت حافظه‌ها در همان ابعاد قبلی نیز می‌شود. (البته در سال ۱۹۷۴ هنوز کسی به ابعاد زیر ۱۰۰ نانومتر یعنی محدوده‌ی مربوط به فناوری نانو فکر نمی‌کرد. ابعاد ترانزیستور در آن سال‌ها بیش از ۰/۴ میکرون یعنی ۴۰۰ نانومتر بود).

ملاحظه می‌کنیم که با وجود مزایایی که در کوچک کردن ابعاد ترانزیستورها در مدارهای مجتمع متصور بود، اما این امر به سادگی میسر نبود و با محدودیت‌های گسترده‌ای روبرو بود. بخشی از این محدودیت‌ها به فناوری ساخت مدارهای مجتمع مربوط می‌شود که درباره‌ی آن در قسمت قبل اشاراتی کردیم. همان‌طور که در آنجا گفتیم رفتار موجی نور در ابعاد کوچک، محدودیت‌هایی را در ساخت ترانزیستورها به روش لیتوگرافی نوری ایجاد می‌کند. اما بخشی از محدودیت‌های ورود به ابعاد کوچک و مخصوصاً ابعاد زیر ۱۰۰ نانومتر، به اتفاقات پیش‌بینی شده و پیش‌بینی نشده‌ای باز می‌گشت که ناشی از رفتار اتم‌ها در ابعاد کوچک است. ما این محدودیت‌ها را چالش‌های کوانتومی می‌نامیم و در اینجا بیش‌تر راجع به این چالش‌ها صحبت می‌کنیم.

۴.۳.۲ رفتار اتم‌ها در ابعاد کوچک

مطالعه راجع به چگونگی ساختار اتم پیشینه‌ی طولانی دارد. اما می‌توان گفت تامسون اولین فردی بود که یک نظریه‌ی علمی راجع به ساختار اتم مطرح کرد. پس از او افراد دیگری با رفع اشکالات و تکمیل نواقص نظریه‌ی او دانش ما را راجع به ساختار اتم گسترده‌تر کردند. بور و رادرفورد دو نفر از این افراد هستند که با انجام آزمایش‌هایی نظریات قبلی را تکمیل کردند. اما هر کدام از این نظریات نیز با چالش‌هایی روبرو بودند و در توجیه برخی پدیده‌ها با محدودیت‌هایی روبرو بودند. با ورود نظریات گوناگون به حوزه‌ی ساختار اتم، نظریات قبلی بسیار متحول و دگرگون شد به گونه‌ای که اکنون نظریه‌ی کوانتومی راجع به ساختار اتم از مقبولیت بیشتری برخوردار است.

طبق نظریه‌ی کوانتومی، شعاع اتم محدوده‌ای اطراف آن است که احتمال حضور الکترون در آن بسیار زیاد (تقریباً ۱۰۰ درصد) است. همان طور که ملاحظه می‌کنید، می‌گوییم احتمال حضور الکترون! این عدم اطمینان مطابق اصل عدم قطعیت که از اصول مورد پذیرش نظریه‌ی کوانتوم است، می‌باشد.



شکل ۳- ۴: نمایی از یک تفسیر کوانتومی از اتم هیدروژن

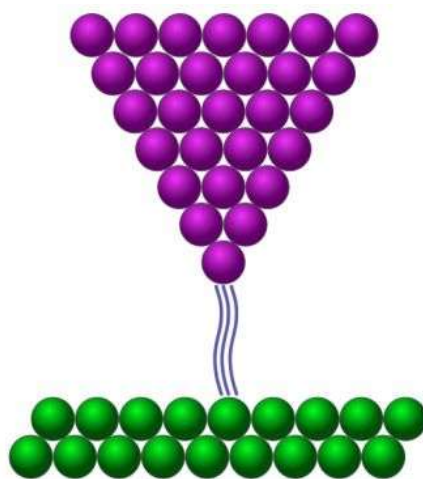
با کوچک شدن ابعاد ترانزیستور و ورود به محدوده‌ی زیر ۱۰۰ نانومتر، رفتار تک تک اتم‌ها به تدریج قابل توجه و مهم می‌شود. با توجه به ابعاد اتم سیلیسیوم که حدود $1/46$ آنگستروم ($0/146$ نانومتر) است و با در نظر گرفتن فاصله‌ی پیوندهای بین اتمی به این نتیجه می‌رسیم که هنگامی که در ابعاد زیر ۱۰۰ نانومتر قرار داریم، تنها با چند ده اتم سیلیسیوم سر و کار داریم. کم شدن تعداد اتم‌های سیلیسیوم در ترانزیستور موجب می‌شود که مسئله‌ی نقص بلوری به یک چالش جدی تبدیل شود. چرا که اندکی نقص بلوری چه ناشی از اتم‌های سیلیسیوم و چه ناشی از اتم‌های ناخالصی که به سیلیسیوم افزوده شده، موجب تغییرات بسیار در رفتار الکتریکی ترانزیستور خواهد شد و ترانزیستور را از کاربری مورد نظر خارج می‌کند.

با کوچک کردن تمامی ابعاد افقی و عمودی ترانزیستور، چگالی بار الکتریکی در نواحی گوناگون ترانزیستور افزایش می‌یابد یا به بیان دیگر تعداد بار الکتریکی در یکای سطح ترانزیستور زیاد می‌شود. این اتفاق دو پیامد منفی دارد: اولاً با افزایش چگالی بار الکتریکی امکان تخلیه‌ی بار الکتریکی از نواحی عایق ترانزیستور افزایش می‌یابد و این اتفاق موجب آسیب رسیدن به ترانزیستور و خرابی آن می‌شود. (این اتفاق مشابه تخلیه‌ی بار الکتریکی اضافی بین ابر و زمین در پدیده‌ی آذرخش یا صاعقه است که موجب یونیزه شدن مولکول‌های هوا به یون‌های منفی و مثبت می‌شود).



شکل ۴- ۴: تخلیه بار الکتریکی بین ابر و زمین

ثانیاً با افزایش چگالی بار الکتریکی، ممکن است الکترون‌ها تحت تاثیر نیروهای رانشی یا ربایشی که هم اکنون مقدار آن افزایش یافته، از محدوده‌ی شعاع یک اتم خارج شوند و به محدوده‌ی شعاع اتم مجاور وارد شوند. این اتفاق را در فیزیک کوانتوم، تونل زدن می‌گویند. تونل زدن الکترون از یک اتم به اتم مجاور، پدیده‌ای است که در ابعاد کوچک بین الکترون‌ها بسیار اتفاق می‌افتد. این پدیده اساس کار بعضی قطعات الکترونیکی و بعضی نانوسکوپ‌ها هم هست.



شکل ۵- ۴: نوک "میکروسکوپ تونل‌زنی روبشی" بر اساس پدیده‌ی تونل زدن الکترون‌ها کار می‌کند

اما در ترانزستور این پدیده، پدیده‌ی مفیدی نیست، چرا که تونل زدن الکترون از یک اتم به اتم مجاور ممکن است همچنان ادامه یابد و یک جریان الکتریکی را موجب شود. این جریان

الکتریکی اگر چه ممکن است بسیار کوچک باشد اما چون ناخواسته و پیش‌بینی نشده می‌باشد، همچون یک مسیر نشستی برای جریان الکتریکی رفتار می‌کند و موجب تغییر رفتار الکتریکی ترانزیستور می‌شود.

۴.۳.۴ نتیجه

کوچک کردن ترانزیستورها و ورود به ابعاد زیر ۱۰۰ نانومتر (محدوده‌ی عملکرد فناوری نانو) اگر چه مزایای بسیاری دارد اما با چالش‌های گوناگونی روبرو است. ما در قسمت قبل به برخی چالش‌های مربوط به فناوری ساخت مدارات الکترونیکی در این ابعاد اشاره کردیم و در اینجا نیز برخی چالش‌های فرا روی دانشمندان و مهندسين الکترونیک را در این امر بیان کردیم. علاوه بر چالش‌های بیان شده، مسائل و دشواری‌های دیگری نیز وجود دارد که درک آن‌ها مستلزم کنکاش عمیق‌تر این دانش است. این دشواری‌ها و چالش‌ها موضوع پژوهش‌های بسیاری است که دانشمندان و غول‌های صنعت الکترونیک در پی حل آن‌ها هستند.

۴.۴ اتصالات میانی مدارهای مجتمع، چالشی دیگر برای نانو الکترونیک

۴.۴.۱ مقدمه

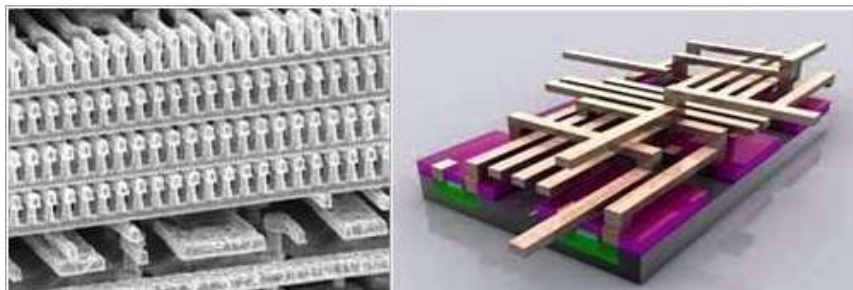
همان طور که می‌دانیم مدارهای مجتمع امروزی از تعداد بسیار زیادی ترانزیستور تشکیل می‌شوند. نقش ترانزیستور در ساخت مدارهای مجتمع همانند نقش آجر در بنای یک ساختمان است. یعنی همان گونه که بنای یک ساختمان با کنار هم قرار گرفتن تعداد بسیار زیادی آجر انجام می‌پذیرد، ساخت یک مدار مجتمع نیز با اتصال تعداد بسیار زیادی (مثلاً چند میلیون!) ترانزیستور انجام می‌گیرد. به همان ترتیب که برای اتصال آجرها در یک ساختمان به مصالح ساختمانی دیگری نظیر شن و ماسه و سیمان نیاز داریم، برای برقراری اتصالات ترانزیستورها هم به سیم‌های فلزی که خواص رسانایی الکتریکی دارند، احتیاج است. سیم‌های فلزی که اتصالات داخلی ترانزیستورها را برقرار می‌کنند، اتصالات میانی یا interconnects می‌نامیم.



شکل ۶-۴: برای اتصال آجرها در یک ساختمان به مصالح ساختمانی دیگری نظیر شن و ماسه و سیمان نیاز داریم. برای برقراری اتصالات ترانزیستورها هم به سیم‌های فلزی که خواص رسانایی الکتریکی دارند، احتیاج است.

در اولین نسل‌های مدارهای مجتمع به دلیل بزرگی ابعاد ترانزیستورها و تبعاً تعداد کم ترانزیستورها در مدار مجتمع، اتصالات میانی از پیچیدگی بسیاری برخوردار نبودند. اما به تدریج با کوچکتر شدن ابعاد ترانزیستورها و افزایش تعداد آن‌ها در مدارهای مجتمع، اتصالات میانی آن‌ها نیز بیش‌تر شد و نقش آن‌ها در طراحی مدارهای مجتمع بیش از گذشته با اهمیت گردید. پیچیدگی،

گسترده‌گی و افزایش تعداد اتصالات میانی به تدریج تا آن جا پیش رفت که پژوهشگران را با چالش جدی در طراحی و ساخت مدارهای مجتمع روبرو ساخت. پژوهشگران راه حل کاهش پیچیدگی اتصالات میانی را در فرآیند طراحی و سپس فرآیند ساخت، در چند لایه کردن اتصالات میانی یافتند. یعنی آن‌ها سعی می‌کردند همه‌ی اتصالات میانی را در یک لایه قرار ندهند، بلکه در بیش از یک لایه طراحی کنند و بسازند. بدین ترتیب در حالی که مدارهای مجتمع در سال ۱۹۸۵ فقط شامل یک لایه اتصالات میانی بودند، در سال ۲۰۰۰ تعداد لایه‌های اتصالات میانی فلزی به عدد ۵ رسید و هم اکنون در فناوری‌های جدید تعداد لایه‌های اتصالات میانی بیش از ۱۲ می‌باشد.



شکل ۷- ۴: پژوهشگران راه حل کاهش پیچیدگی اتصالات میانی را در فرآیند طراحی و سپس فرآیند ساخت، در چند لایه کردن اتصالات میانی یافتند (الف- تصویر شماتیک و ب- تصویر واقعی)

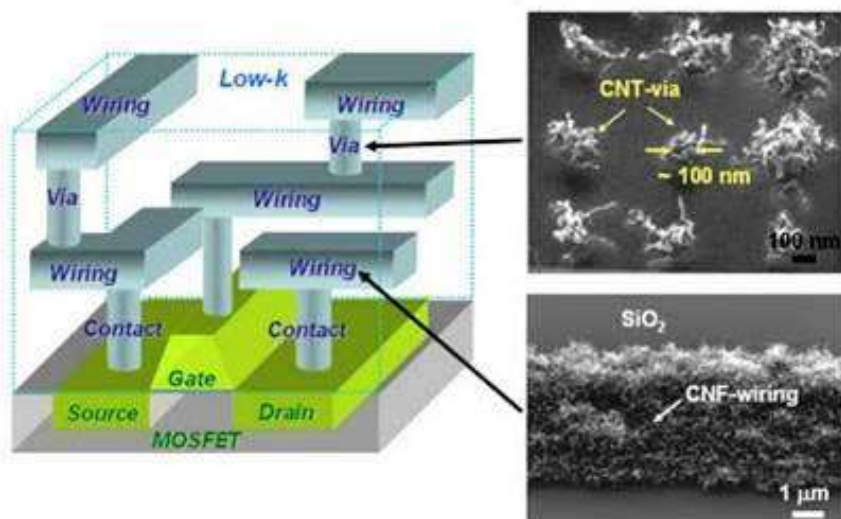
لذا از آن جایی که عملکرد مدارهای مجتمع پیشرفته‌ی امروزی به کیفیت اتصالات میانی بسیار وابسته است، فرآیند طراحی و ساخت اتصالات میانی جایگاه مهم و خاصی را در صنعت ساخت مدارهای الکترونیکی مجتمع پیدا کرد.

در فناوری امروزی، اتصالات میانی معمولاً از فلز مس (Cu) ساخته می‌شود. طول این اتصالات در یک مدار مجتمع به دلیل زیاد بودن تعداد ترانزیستورها، به کیلومترها می‌رسد! در گذشته اتصالات میانی را از فلز آلومینیوم (Al) می‌ساختند اما آلومینیوم در فناوری‌های امروزی در دمای بالای فرآیند ساخت، ذوب می‌شود. بنابراین امروزه استفاده از مس جایگزین استفاده از آلومینیوم شده است. به منظور پرهیز از افزایش مقاومت الکتریکی اتصالات میانی و نیز رعایت مسائل دیگر، قطر این اتصالات را نمی‌توان از حد معینی کوچکتر کرد. کوچک کردن قطر اتصالات میانی موجب افزایش مقاومت الکتریکی اتصالات میانی فلزی و بنابراین افزایش دمای مدار مجتمع می‌شود که اتفاق خوبی نیست. چرا که این افزایش دما، موجب ذوب شدن یا حتی تبخیر شدن اتصالات میانی می‌شود. البته در شرایط فعلی هم مقاومت الکتریکی اتصالات میانی موجب مصرف توان الکتریکی زیادی در مدار مجتمع می‌شود که این هم اتفاق خوبی نیست. مشکلات و مسائل اتصالات میانی فلزی با حرکت به سمت فناوری‌های کوچکتر، مخصوصاً فناوری نانو، بیشتر می‌شود و پژوهشگران الکترونیک را برای حل این مسائل به فکر فرو می‌برد.

۴.۴.۳ نانو لوله‌های کربنی، یک جایگزین مناسب؟!!

نانو لوله‌های کربنی بسته به کایرالیته‌شان، دارای خواص نیمه‌رسانایی یا رسانایی هستند. تفاوت در میزان رسانایی الکتریکی نانولوله‌های کربنی به راحتی از خواص صفحه‌ی گرافنی به دست می‌آید. دانشمندان نشان دادند که هر گاه در نانو لوله‌ی (n,m) ، رابطه‌ی $n=m$ یا $n-m=3i$ برقرار باشد، به طوری که در آن i یک عدد صحیح و (n,m) بردار تعریف کننده‌ی نانو لوله است، آن گاه نانو لوله دارای خواص فلزی خواهد شد. میزان مقاومت الکتریکی نانو لوله‌های کربنی هم از طریق قوانین مکانیک کوانتومی به دست می‌آید و مستقل از طول نانو لوله است.

نانو لوله های کربنی که خواص رسانایی دارند، جریان الکتریکی را بهتر از فلزات عبور می دهند. هنگامی که الکترون ها در فلز حرکت می کنند مقداری مقاومت الکتریکی در برابر حرکت آنها وجود دارد. این مقاومت هنگامی اتفاق می افتد که الکترون ها به طور تصادفی با اتم های فلزی برخورد می کنند. اما هنگامی که الکترون ها از یک نانولوله ی کربنی عبور می کند، بدون هر گونه برخورد با اتم های کانال عبور می کنند. این حرکت کوانتومی الکترون ها را در نانو لوله های کربنی، در اصطلاح انتقال بالستیک می گوئیم.



شکل ۸- ۴: از آن جایی که نانو لوله های کربنی تک جداره (SWCNTs) و نانو لوله های کربنی چند جداره (MWCNTs) توانایی رسانایی جریان الکتریکی با چگالی زیاد را دارند، به صورت خاص می توانند به عنوان اتصالات میانی مدارات الکتریکی مجتمع مورد استفاده قرار بگیرند.

از آن جایی که نانو لوله های کربنی تک جداره (SWCNTs) و نانو لوله های کربنی چند جداره (MWCNTs) توانایی رسانایی جریان الکتریکی با چگالی زیاد را دارند، به صورت خاص می توانند به عنوان اتصالات میانی مدارات الکتریکی مجتمع مورد استفاده قرار بگیرند. هم اکنون پژوهش های بسیاری برای این منظور انجام شده است و در حال انجام است که به نتایج مورد پذیرشی نیز رسیده اند. مخصوصاً استفاده از نانو لوله های کربنی در اتصالات میانی کوتاه بسیار

مورد توجه قرار گرفته است. با توجه به این که حدود ۷۰ درصد توان الکتریکی مدارهای مجتمع در اتصالات میانی مصرف می شود و بخش قابل توجهی از این توان در اتصالات میانی کوتاه مورد مصرف قرار می گیرد، با جایگزین کردن اتصالات میانی فلزی با نانو لوله های کربنی می توان مصرف توان الکتریکی را نیز در مدارهای الکتریکی مجتمع کاهش داد.

۴.۴.۴ نتیجه

هم اکنون پژوهشگران الکترونیک، پژوهش های بسیاری را برای بررسی جایگزینی اتصالات میانی فلزی با نانو لوله های کربنی انجام می دهند. در همین راستا بررسی خواص الکتریکی نانو لوله های کربنی تک جداره و چند جداره نیز با سرعت بسیاری در حال انجام است. شاید بتوان گفت مهم ترین چالش در این جایگزینی، ساخت نانو لوله های کربنی استاندارد است. خواص نانو لوله های کربنی بسیار متاثر از فرآیند ساخت است و آن چه اندیشه ی پژوهشگران را مشغول و تلاش آنان را معطوف به خود کرده، تلاش به منظور کنترل بهینه ی خواص نانو لوله های کربنی در فرآیند ساخت است. همچنین تصفیه ی نانو لوله های کربنی از ناخالصی هایی که هنگام فرآیند ساخت، در آن رشد می کند، نیز بسیار مورد توجه قرار دارد. در فصل بعد به نانوسیم های نیمه هادی که در مقایسه با نانولوله های کربنی نشان دهنده توسعه های اخیر در زمینه ی المانهای در مقیاس نانو و بیشتر طیف قابل ملاحظه ای از خواص شیمیایی که منجر به کاربردهای عملی تر و روش های سازماندهی تر است پرداخته خواهد شد.

فصل پنجم

((الکترونیک وجوه وابسته

خواصی از نانوسیم های سیلیکونی))

۵.۱ چکیده:

اثراتی از بازسازی سطحی و هیدروکسیلاسیون مترقی بر روی خواص الکترونیکی از نانوسیم های

های سیلیکونی شش ضلعی [۱۱۰] توسط محاسبات **ab** از همان ابتدا در درون نظریه تابع چگالی

مورد بررسی قرار می گیرد.

تغییرات چگالی هیدروکسیلاسیون مترقی از حالت بسته به ماکزیم باندظرفیت منجر به کاهش کلی در شکاف باند است. اندازه کاهش شکاف باند در فاست(وجوه) وابسته است به آنجاکه گروه هیدروکسیل متصل است. درحالی که کاهش بالا درشکاف باند (۱۰ درصد) مشاهده شده است ، برای هیدروکسیلاسیون بر روی وجوه های(۱۱۱)، برای وجوه های (۰۰۱) کاهش بیشتر است که بیان کردن آن (۲۱ درصد) که تنها زمانی که یک بازسازی(۳×۱) وجود دارد. کاهش درشکاف باند بطورکلی از یک شیفت شعاع نامرکز در موقعیتی از چگالی شارژ ناشی از HOMO همراه است. این نتایج به نشان دادن تاثیر بازسازی سطحی گروه های پایان دهی شده بر روی خواص الکترونیکی از نانوسیمهای سیلیکونی است که استفاده از این مواد برای حسگرهای زیستی و کاربرد های ترانزیستور مهم هستند. به منظور سنتز (ترکیب کردن) نانوسیم های سیلیکونی، این پایان نامه نیز به بررسی نانوذرات طلا سیترات تثبیت شده خود سازمانده بر روی سطوح آمینه خاتمه داده شده پرداخته است. رسوب دهی نانو ذرات طلا سیترات تثبیت شده بر روی سطوح سیلیکونی خاتمه داده شده هیدروژنی با تغییر PH شده است. هر دو روش رسوب کلوئیدی طلا را نشان می دهد.

۵.۲ نانوسیم های نیمه هادی:

نانوسیم های نیمه هادی به دلیل ویژگیهای مهم خود از قبیل نسبت سطح بزرگ به حجم، انتقال بالای تحرک پذیری، و ساختار باند موزون، دقت و تازگی بدست آورده اند. یک نانوسیم سیلیکونی می توان به عنوان سیلیکون توده ای محدود شده در یک بعد با غیرفعال سازی شیمیایی بر روی سطح ملاحظه کرد.

خواص نانوسیم های نیمه هادی همیشه با خواصی از مواد نیمه هادی که با آنها ساخته می شوند تعیین شده اند. مواد نیمه هادی گوناگون، مانند سیلیکون، ژرمانیوم، آرسنیدگالیم، و نیتريدگالیم، که دارای خواص مختلف الکترونیکی و نوری اند، ممکن است در یک کاربرد متنوع تکنولوژیکی استفاده بالقوه داشته باشند. نانوسیم های نیمه هادی در مقایسه با نانولوله های کربنی نشان دهنده توسعه های اخیر در زمینه ی المانهای در مقیاس نانو و بیشترطیف قابل ملاحظه ای از خواص شیمیایی که منجر به کاربردهای عملی تر و روش های سازماندهی تر است. به ویژه سیلیکون و المانهای نانوسیم پایه ای ژرمانیوم بسیار برای کاربردهای الکترونیکی و دیگر کاربردها به دلیل سازگاری خود با موجود بودن تکنولوژی مدار مجتمع CMOS مطلوب هستند.

پیشرفت کنترل نانوسیم در پیکربندی از پیش تعیین شده برای ساخت المان سودمند خواهد بود. پیشرفت های اخیر در سنتز کردن (ترکیب کردن) نانوسیم بطور خلاصه در بخش زیر بررسی خواهد شد. همچنین ساختار ملکولی نانوسیم های سیلیکونی تجربی (آزمایشی) که توسط محققان دیگر مورد مطالعه قرار گرفته است نیز بحث می شود.

۵.۲.۱ سنتز نانوسیم:

سنتز (ترکیب) نانوسیم های نیمه هادی در یک نانوفناوری ضربه ای قوی ساخته شده است. برای تحقق نانو ساختارهای یک بعد (1D) روشهای مختلف استفاده شده است. روش رشد بخار مایع جامد

(¹³VLS) که بطور گسترده استفاده می شود موفق به تولید نانوسیم های سیلیکونی و نانوسیم های ژرمانیومی در مقادیر زیاد بوده است.

با وجود بیش از ۴۰ سال مطالعه، بسیاری از جنبه های رشد VLS به خوبی درک نمی شود. از سال ۱۹۹۷، روشهای نوین مانند لیزر به کمک لایه نشانی با بخار شیمیایی، به کمک اکسید ، لایه نشانی با بخار شیمیایی کاتالیز فلز پرتو ملکولی روشست (اپی تکسی) ، و پرتو شیمیایی روشست توسعه یافته است. با این حال، چنانکه ساخت نانو ساختارهای نیمه هادی مورد نظریک بعدی(1D) با ساختار اتمی به خوبی کنترل شده است هنوز یک مسئله مشکل ساز است.

رشد نانوسیم های سیلیکونی با استفاده از خوشه فلز (طلا بطور گسترده استفاده می شود) بعنوان یک حلال (کاتالیزور) می توان توسط دیگرام فازی مربوط به فلز سیلیکون توضیح داده شود. بطور کلی با افزایش مقدار انحلال و چگالش بخار سیلیکون، سیلیکون و طلا از یک آلیاژ و مایع تشکیل شده اند. حجمی از قطره آلیاژ را افزایش و کنتراست (تضاد) عنصری را کاهش. به عنوان متمرکز ساختن افزایش سیلیکون در قطره کوچک آلیاژ، هسته از نانوسیم آغاز می شود. هنگامی که هسته سیلیکونی نانوکریستال در روابط مایع - جامد، تبلور (کریستالیزشن) در فصل مشترک شروع به تشکیل نانوسیم ها می شود.

برای یک فرایند رشد پایدار VLS، رشد گونه های نانوسیم در قطره کوچک مایع باید در تعادل باقی بماند. تعدادی از اتم های منتقل شده از فاز بخار به قطره کوچک در هر واحد زمان برابر است با تبدیل از مایع به فاز کریستال.

یک مزیت از VLS رسوب دهی الگو شده (نمونه) از ذرات کاتالیزور که منجر به الگودهی

نانوسیم ها شده است . همچنین آن فراهم می کند روش موثری برای بدست آوردن اندازه یکنواخت نانوسیم ها از قطر نانوسیم ها توسط قطری از ذرات کاتالیزور تعیین شده . یانگ و همکاران ، نشان داده اند که کنترل دقیق قطر از نانوسیم ها تنها با توضیح اندازه ذرات دانه (تک بلور نیمه رسانا برای رشد بلور بزرگ) محدود شده است. الگو (نمونه) کاتالیزور طلا می تواند توسط تبخیر، رسوب دهی فلز، فتولیتوگرافی، و یا شکل گیری نانو خوشه تشکیل شده باشد. لایه (فیلم) نازک طلا، با این حال کنترل خوب قطر با توجه به تفکیک کردن تصادفی لایه در دمای واکنش فراهم نیست، و استفاده از فتولیتوگرافی به تعیین کردن موقعیت از کاتالیزور که نسبتاً گران است.

نانوذرات کلونیدی روش های مناسبی هستند برای مونتاژ و رشد نانو مواد به دلیل اندازه کنترل شده خود، شکل، ترکیب و ویژگیهای (عملکردهای) سطحی برای ترکیب کردن نانوذرت ها. یک محلول آب دار کلونیدی از نانو ذرات طلا است که معمولاً توسط کاهش HAuCl_4 با سیترات سدیم تهیه شده است.

عدم تحرک نانوذرات طلا کلونیدی بر روی یک بستر سیلیکون می توان متعلق به زمانی که برهمکنش خاص الکترواستاتیکی از طلا باردار نانوذرات با عملکرد یک تک لایه خاتمه داده شده آمین بر روی سطح اصلاح شده سیلیکون دانست.

تک لایه آمینه خاتمه داده شده ارائه می کند بستر باردار مثبت و اجازه می دهد تا برای رسوبدهی طلا باردار منفی کلونیدی موثر باشد. یانگ و همکاران، نشان داده اند که یک محلول کلونیدی مناسب می تواند مورد استفاده قرار گیرد به رشد (پیشرفت) همتراز شده عمودی، با تک متفرق کننده آرایه نانوسیم سیلیکونی مطابق با رویکرد VLS-CVD.

و با تغییر غلظت از محلول کلونیدی، چگالی دانه بر روی سطح بستر نیز می توان کنترل شود.

چاپیدی و همکاران توسعه یک روش پیوند زدن آزاد به رسوب دهی تثبیت شده سیترات کلونیدی

طلا بر روی اکسید آزاد بسترسیلیکون با اسیدی کردن محلول کلونیدی طلا با HF یا HCl ،

مانع از تشکیل اکسید و اجازه تا برای رشد رونشستی (اپی تکسی) از نانوسیم ها را دادند. شکل

۵-۱ (الف) تصویر اسکن میکروسکوپ الکترونی از آرایه نانوسیم ژرمانیومی را نشان می دهد.

همتراز شده عمودی نانوسیم های ژرمانیومی با قطر و طول رشد یافته یکنواخت با پیروی کردن

از رویکرد پیوند زدن آزاد با یک فرایند دمایی دو مرحله ای بدون نیاز به دمای بالا به ترقی دادن

رشد رونشستی کنترل می شود.

رشد رونشستی از نانو سیم های نیمه هادی عمودی یک مسیر برای بدست آوردن آرایه همتراز

شده و سازمان یافته شده از نانوسیم ها است. همانطور که در شکل ۵-۱ (ج) نشان داده شده است،

دمای رشد بسیار پایین تر از ۴۰۰ درجه سانتی گراد است، که برای پس مجتمع سازی از المان نانو

سیم بسیار امید بخش است. محققان به این نتیجه رسیده اند که دمای بالا لازم است برای تشکیل

یک نانو سیم ژرمانیومی کیفیت بالا / ژرمانیوم فصل مشترک (وسط مدار) که برای شروع رشد

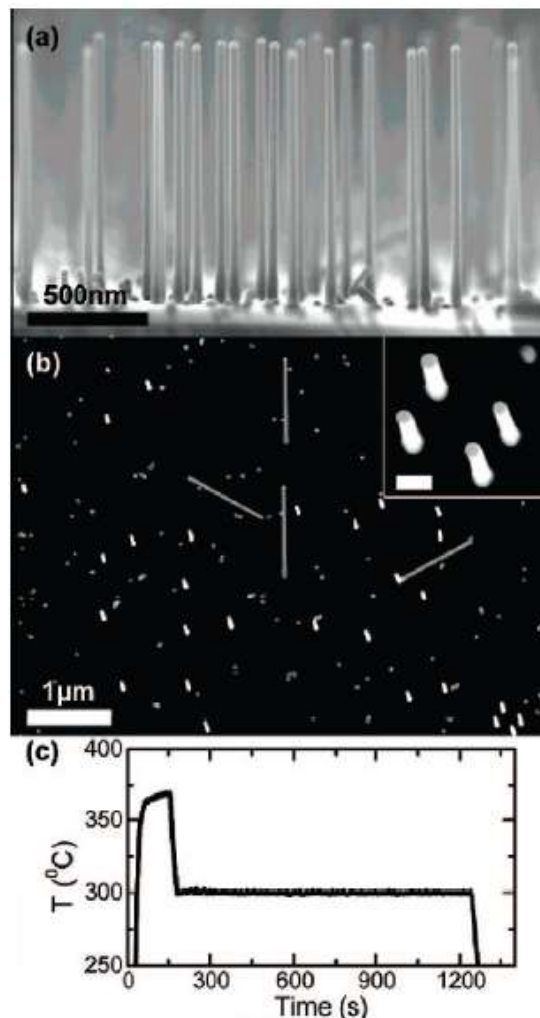
رونشستی نانوسیم ضروری است. با این حال درجه حرارت بالا برای پس از رشد نانوسیم مورد

نیاز نیست. علاوه بر این، از منحنی تغییر نانو سیم می توان با استفاده از این روش رشد اجتناب

کرد. سنتز موفق از چگالی بالا و خلوص از تک کریستال یکنواخت نانوسیم های ژرمانیومی از

طریق تبخیر ساده حرارتی از پودر ژرمانیوم توسط گروه های پژوهشی متعددی گزارش شده

است.

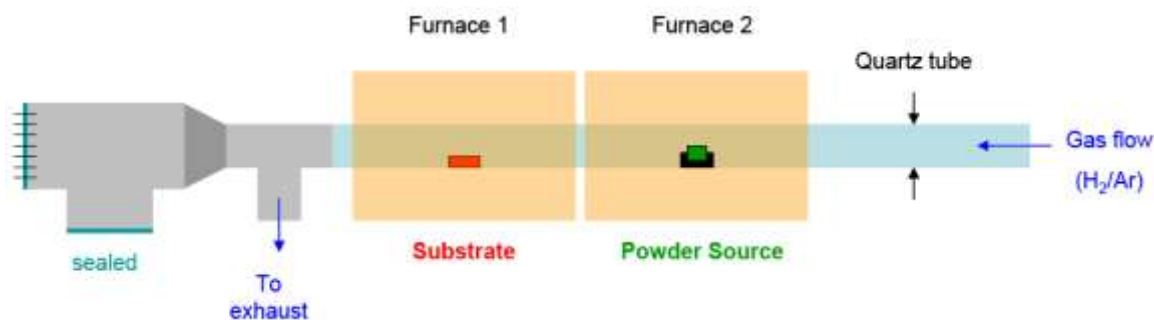


شکل ۱-۵: (الف) میکروسکوپ الکترونی پویشی سطح مقطع از نانوسیم های ژرمانیومی رشد کرده رونشستی (اپی تکسی) بر روی بستر سیلیکون (۱۱۱) از ۴۰ نانومتر طلا کلونیدی رسوبدهی شده با استفاده از روش افزایشی HF است. عمدتاً نمایش نانوسیم های ژرمانیومی عمودی از طول و قطر یکنواخت. (ب) طرح مشاهده میکرو سکوپ الکترونی پویشی از نمودار (الف) نشان دادن سه تای دیگر (۱۱۱) جهت رشد (الحاق) بزرگ نمایی از نانوسیمهای ژرمانیومی عمود (نوار در مقیاس ۱۰۰ نانومتر است). (ج) دو مرحله مقطع دمایی به رشد نانوسیمهای ژرمانیومی در (الف) و (ب) استفاده شده است.

یو و همکاران، توسعه داده اند دو کوره سامانه تبخیر حرارتی که در آن منبع درجه حرارت تبخیر و درجه حرارت رشد نانوسیم بطور جداگانه کنترل می شوند، همانطور که در شکل ۲-۵ نشان داده شده است.

مقدار زیادی از نانوسیم های ژرمانیومی تک کریستالی، سنتز شده اند و یک محصول بالا از نانو سیم مستقیم با یکنواختی نسبتاً خوب قطر در محدوده دمایی بین ۴۵۰ و ۶۰۰ درجه سانتی گراد بدست آمده است. در مقایسه با روش های دیگر مانند لایه نشانی با بخار شیمیایی و فرسایش لیزری، تبخیر ساده حرارتی از منبع پودر استفاده می کند که یک راه اندازی واکنش بسیار ساده تر و مواد بی خطر و گاز های مانند SiH_4 و GeH_4 است.

سامانه کوره ما در حال ایجاد برای رشد نانوسیم که کاملاً شبیه به شکل ۲- ۵ است هستند.



شکل ۲- ۵: سامانه سنتز تبخیر حرارتی نانوسیم ژرمانیومی

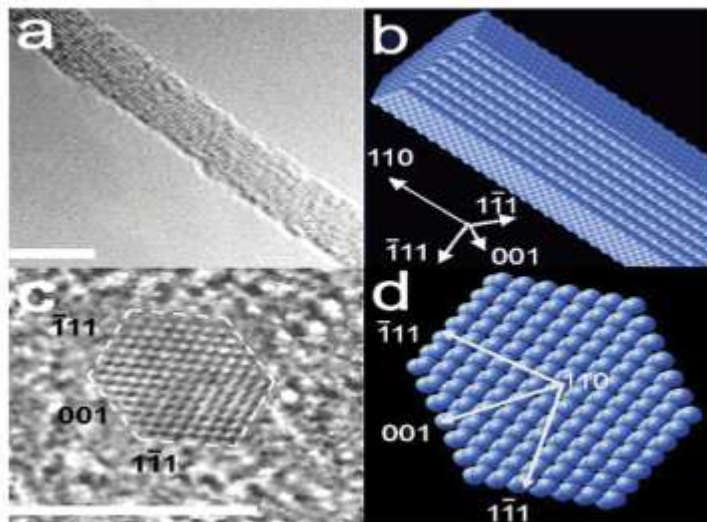
۵.۲.۲ ساختار نانوسیم:

برای رشد VLS، به دلیل حضور از یک کاتالیزور طلا در نوک نانوسیم ها، انرژی های سطحی و فصل مشترک نقش های مهمی برای هسته و جهت رشد از اندازه های مختلف از نانوسیم ها بازی می کنند. لیبر و همکارانش کشف کرده اند که با استفاده از سیلان (SiH_4) بعنوان یک واکنش دهنده بخار-فاز، نانوسیم های سیلیکونی را با قطرهای کوچک بین ۳ و ۱۰ نانومتر به امتداد رشد جهت (۱۱۰) ترجیح می دهند. این مطابق با نتایج گزارش شده توسط محققان دیگر است. با این حال، یک گزارش بسیار جدید توسط گروه تحقیقاتی نتایج متضاد با استفاده از منبع مختلف واکنش

دهنده Si_2H_6 نشان داده اند، که در آن طول میلی متری نانوسیم های سیلیکونی با قطرهایی از ۸۰-۲۰ نانومتر ترجیحاً امتداد رشد جهت (۱۱۰) مستقل از قطر است. باور آن بود که توسط سرعت بالای تجزیه کاتالیزور از Si_2H_6 منجر به یک سرعت رشد سریعتر باعث شود.

اشمیت و همکاران، پیشنهاد یک مدل مبنی بر انرژی بین مایع و جامد و سطح انرژی سیلیکون کردند. اعتقاد بر این است که رشد نانوسیم توسط حالت مینیموم از سامانه کل انرژی از نانوسیم تحریک شده است. از آنجا که نسبت سطح به حجم بالاست و انرژی کریستال توده ای مستقل از جهت نانوسیم است، تنها انرژی های فصل مشترک و سطح نیاز است در نظر گرفته شود. نانوسیم ها ترجیحاً رشد می کنند در جهت به حداقل رساندن انرژی کل سطحی و فصل مشترک خود.

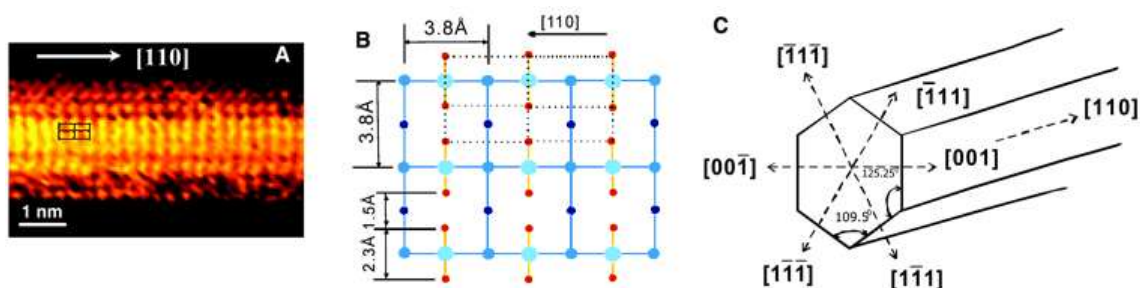
تصویر میکروسکوپ الکترونی انتقالی دقت بالا ($^{14}\text{HRTEM}$) تایید کرده که فصل مشترک {۱۱۱} دارای کمترین انرژی بین مایع و جامد است. در نتیجه وجوه جانبی سطوح انرژی مطلوب تری با انرژیهای سطحی پایین هستند.



شکل ۳- ۵: (الف) تصاویر میکروسکوپ الکترونی انتقالی (^{15}TEM) از رشد نانوسیمهای سیلیکونی ۳.۸ نانومتر در امتداد جهت ۱۱۰، (ج) تصویر سطح مقطع (مقطع عرضی) میکروسکوپ الکترونی انتقالی دقت بالا (HRTEM)، و اشکال تعادل برای نانوسیم (ب) و (د)، سطح مقطع نانوسیم توسط ساختار ولف پیش بینی شده است. مقیاس میله ها ۵ نانومتر هستند. نانوسیم های سیلیکونی پراکنده شده در اپی تکسی (رونشست) با یک میکروتومی به ضخامت ۵۰ نانومتر و سپس به شبکه های میکروسکوپ ca برش داده شده اند. انتقال الکترونی انتقال داده شده است.

شکل ۳- ۵ مطالعات میکروسکوپ انتقال الکترونی دقت بالا از یک نانوسیم سیلیکونی که در امتداد رشد جهت [۱۱۰] را نشان می دهد. تصویر سطح مقطع (مقطع عرضی) نشان می دهد که نانوسیم یک سطح مقطع شش ضلعی که با جوجه متناظر به انرژی آزاد پایین (۱۱۱) و صفحه های (۱۱۰) به خوبی توسعه داده شده است داشته است. ساخت مقیاس ملکولی نانوسیم سیلیکونی در فصل ۶ از این پایان نامه که مبنی بر این تجزیه و تحلیل تجربی است وجود دارد یک ساختار وجهی مشابه (شکل ۴- ۵) از نانوسیم های سیلیکونی قطر کوچک پس از **HF-treatment** (رفتار بسامد بالا) نیز با اسکن میکروسکوپ تونل زنی توسط لی و همکاران اش مورد مطالعه قرار گرفته است. آنها دریافتند که سطح سیلیکون (۰۰۱) خاتمه دهی شده است با دی هیدرواکسید (dihydride) متقارن (SiH₂) و اتصال های سیلیکون- هیدروژن جهت عمودی به محور نانوسیم ها هستند. این

گزارش تجربی تنها در روی ساختار اتصال از نانوسیم است. با این حال، در سیلیکون توده ای، سطح سیلیکون (۰۰۱) اشباع شده هیدروژن معمولاً تحت یک بازسازی 2×1 است. همچنین مشاهده شد که سطح اشباع شده می تواند شامل از یک مرحله (فاز) 3×1 که مربوط به تکرار متناوب تک هیدروکسید و دی هیدروکسید واحد باشد.



شکل ۴-۵: تصویر میکروسکوپ تونلی پویشی (^{16}STM) و نمای شماتیکی از یک نانوسیم سیلیکونی با یک وجوه سیلیکونی (۰۰۱) جهت کریستالوگرافی نشان داده شده است. (الف) جریان ثابت تصویر میکروسکوپ تونلی زنی پویشی از یک نانوسیم سیلیکونی در یک بستر HOPG. محور سیمها در امتداد جهت $[110]$ است (ب) نمای شماتیکی از مرحله (فاز) دی هیدروکسید (Dihydride) بر روی سیلیکون (۰۰۱) است. برترتیب دایره های آبی بزرگ و قرمز نشان دهنده اتمهای سیلیکون و هیدروژن در مرحله (فاز) دی هیدروکسید است. دایره های کوچک آبی متناظر با اتم سیلیکون بر روی لایه های زیرین است، (ج) نمای شماتیکی از یک نانوسیم سیلیکونی که با چهار نوع وجوه (۱۱۱) و دو نوع وجوه (۰۰۱) محدود شده است. محور سیمها در امتداد جهت (۱۱۰) است.

نوع گروه های هیدروکسیل نقش مهمی در بسیاری از فرایندهای مربوطه تکنولوژیکی بازی میکنند. تشکیل هیدروکسیل بر روی سطح سیلیکون می تواند به آماده سازی برای یک سطح ایده آل برای رسوب دهی لایه اتمی از دی الکتریک اکسید فلزی بر اساس واکنش تبادل لیگاند مهم باشد. همچنین حضور هیدروکسیل سطحی توانا میسازد الگودهی از یک مولکول اورگانیک چند منظوره را، در نتیجه از احتمال چند هندسه جذبی اجتناب می کند. این از توجه ویژه در اصلاح سطحی برای

کاربردهای سنسورهای زیستی است. هیدروکسیلاسیون جزئی از سطح تمیز سیلیکون (۰۰۱) را می توان به سادگی با نوردهی مستقیم به آب بدست آورد، در حالی که هیدروکسیلاسیون کامل از سطح تمیز سیلیکون (۰۰۱) هنوز بصورت استوار به اثبات نرسیده است.

مورفولوژی (ریختارشناسی) سطحی از ترکیب کردن نانوسیم ها با ساختار کریستالی خود تحت تاثیر عملکرد المان نانوسیم به عنوان یک نتیجه از اثر آن بر روی خواص الکترونیکی است، که در جزئیات فصل ۶ خطاب خواهد شد.

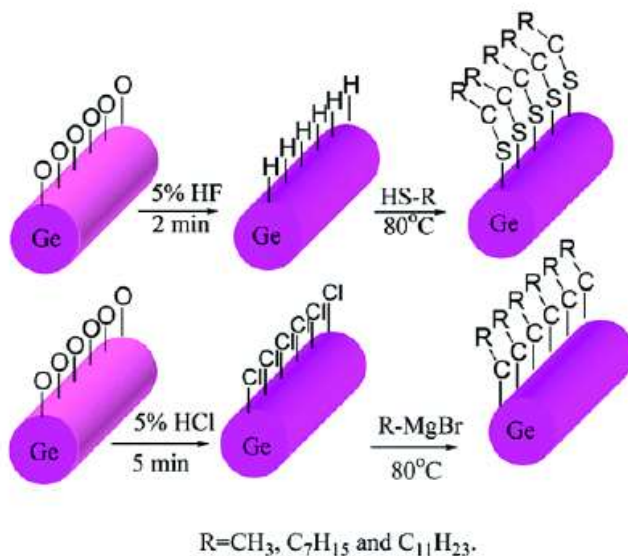
۵.۳ اثر غیر فعال سازی سطحی در المانهای نانوسیم-مستقر

المانهای نانوی مستقر بر ساختار نانوسیم ها اخیراً توجه زیادی را به خود جلب کرده اند، زیرا تهیه کردن انعطاف پذیری مهم نانوسیم در خواص الکترونیکی آنها است. برای مثال، نانوسیم هایی با خواص الکتریکی متفاوت می توان از طریق انتخاب مناسب مواد نیمه هادی تولید کرد. نشان داده شده است که نانوسیم های سیلیکونی می تواند به آغشتن موفقیت آمیز با اضافه کردن پیش ماده های واکنش بورن (B) و یا فسفر (P) به منبع بخار به ایجاد تغییر در خواص الکتریکی انجامد. ویژگی در ویژگی در رفتار نوع P یا نوع N مشاهده شد. انواع دیگر از ویژگیهای الکتریکی نانوسیم ها را می توان توسط اصلاح سطح آنها بدست آورد. نواحی سطحی بالا از نانوسیم ها نشان می دهد که اثرات سطحی می تواند نقش غالب در تعیین خواص فیزیکی خود ایفا کند. مشاهده شده که خواص الکتریکی از المان های نانوسیم می تواند تحت تاثیر انواع سطح مختلف از جمله ملکولهای جذب شده از محیط زیست باشد.

مرحله اول از اثر سطحی اکسیداسیون می باشد. به منظور استراتژی اثرات غیر فعال سازی سطحی از نانوسیمها، فرایند اکسیداسیون اصولی باید فهمیده شود. سیلیکون مهمترین ماده در صنعت نیمه هادی است. اکسید SiO_2 آن است که از نظر شیمیایی و پایداری الکترونی و سطح آن می توانست

بصورت شیمیایی با انواع گونه های اورگانیکی غیرفعال سازی شده باشد. با این حال ، شیمی سطحی از ژرمانیوم به دلیل حلالیت آب از GeO_2 و عدم وجود از اکسید پایدار بسیار پیچیده بوده است. از این رو بسیار مهم است برای نانوسیم های ژرمانیومی به توسعه روشهای غیرفعال سازی شیمیایی قوی در قبال اکسیداسیون. تلاش زیادی به تازگی به مطالعه شیمی سطحی مانند رشد دادن و نوردی هوا نانوسیم های ژرمانیومی ایجاد شده است.

دای و همکاران اش بکارگرفتند زنجیره طولانی واکنش $alkylthiol$ و $Grignard$ به بررسی کارکرد نانوسیم های ژرمانیومی، همانطور که در شکل ۵-۵ نشان داده شده است.

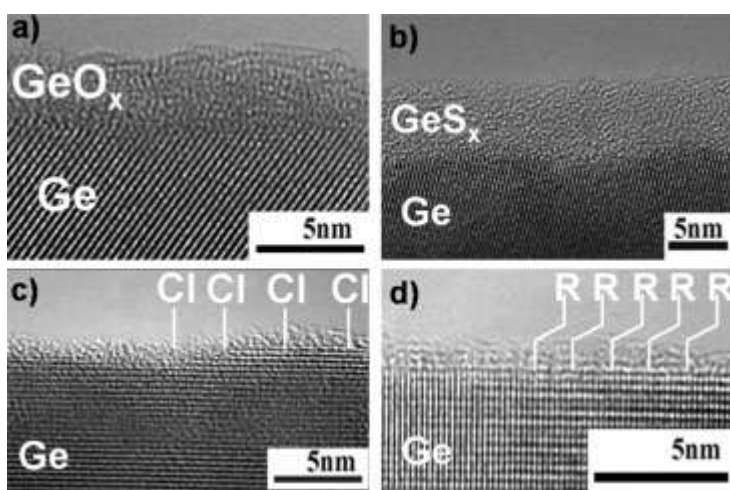


شکل ۵-۵: طرحهای کارکردی نانوسیمهای ژرمانیومی با استفاده از واکنش $Grignard$ (پایین) و $Alkanethiol$ (بالا) را نشان می دهد.

حذف اکسید محلی و غیرفعال سازی H - (واکنش آلکیلتویل) یا Cl - (واکنش گریگنارد) رامی توان با HF (بسامدبالا) رقیق شده یا رفتار HCl (هیدروکلراید) بدست آورد.

استراتژی های مختلف برای اصلاح شیمیایی سطح های نانوسیم، مانند اکسیداسیون مرطوب و خشک، سولفی داسیون، تک لایه ارگانیکی و در غیرفعال سازی محل تیول ($situ thiol$)، نیز توسط

محققان دیگر بررسی شده است. سطوح نانو ساختار با استفاده از تکنیک های سطحی، مانند طیف نمایی فتوالکترون اشعه ایکس و همچنین میکروسکوپ الکترونی تصویربرداری با وضوح بالا مشخص شده اند (شکل ۶-۵). نانوسیمهای مورد مطالعه در مرجع [۱۵] همچنین به نمایش گذاشته شده جهت رشد (۱۱۰) و توسط { ۱۱۱ } و { ۱۰۰ } مشخص شده است، به تازگی بطور تجربی توسط میکروسکوپ انتقال الکترونی دقت بالا سطح مقطع که در بالا مورد بحث قرار گرفت تایید شده است.

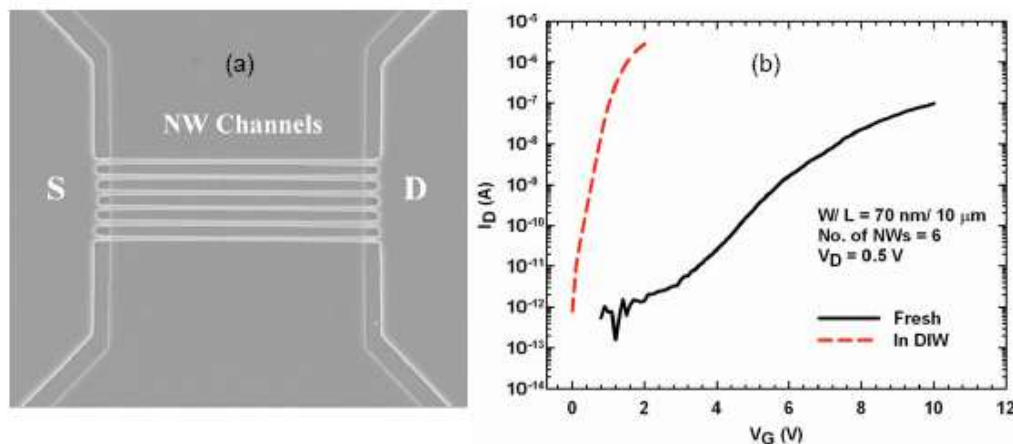


شکل ۶-۵: تصوی TEM با وضوح بالا از (الف) سطح نانوسیم ژرمانیوم پرورده نشده که اکسید غیریکنواخت و پوشش کربن دار و نانوسیم های ژرمانیومی (باب) پوشش سولفید، (ج) خاتمه دهی کلرید، (د) و خاتمه دهی تک لایه hexyl پیوند کووالانسی نشان داده شده است.

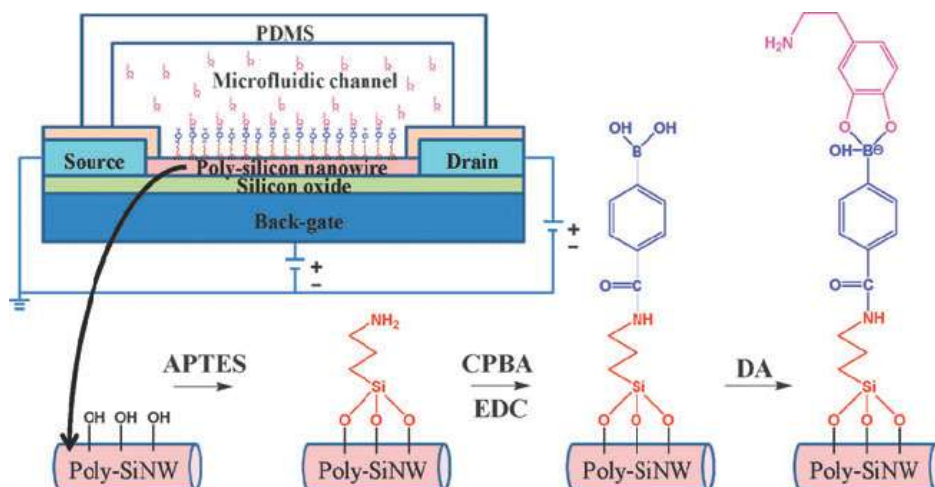
ترانزیستورهای اثر میدانی ساخته شده از نانوسیم های آلیبده نشان داده شده است. کویی و همکاران، گزارش کرده اند که ترانزیستورهای اثر میدان نانوسیمی پس از اصلاح سطحی نشان داده شده توسط یک افزایش منظم از اندازه در هر دوی ترانسپانسی و تحرک در مقایسه با ترانزیستورهای اثر میدانی اکسید فلزی متعارف، که نشان می دهد که بسیاری از خواص الکتریکی از المانهای نانو سیم - مستقر با تعداد بزرگی از حالت های سطحی تعیین شده اند. علاوه بر این، نانوسیم ها همچنین

پتانسیل بزرگی به عنوان عنصری برای کاربردهای سنسور دارند. سنسورهای نانوسیم - مستقر ارائه دادند حساسیت استثنایی به دلیل تاثیر زیادی از اثرات سطحی بر خواص الکتریکی، درحالی که اصلاح سطحی دستکاری با قابلیت انتخاب خود باعث می شود. برای مثال، هوانگ و همکاران دریافتند که عملکرد نانوسیم های پلی-سیلیکونی رامیتوان به میزان قابل توجهی با اثرات غیرفعال سازی آب بالا برد، که باعث جذب مواد برای حس کنندگی است زیرا هزینه های کم و سازگاری آن با بسترهای گوناگون است. شکل ۷-۵ (الف) تصویراسکن میکروسکوپ الکترونی از المان نانو سیم را نشان می دهد.

نویسندگان براین باور بودند که در محیطهای مرطوب (آب DI) فراوانی H^+ و یا OH^- ممکن است نفوذ کردن به داخل مرزدانه و خاتمه در اتصالاتی آویزان و در نتیجه بهبود چشمگیر عملکرد دستگاه است (شکل ۷-۵ (ب)). به منظور تشخیص بیولوژیکی در مرجع [۱۷]، سطح نانوسیمهای پلی-سیلیکون اصلاح شده است، همان طور که در شکل ۵-۸ نشان داده شده است. تا حدودی مکانیزم انتقال در حسگرهای زیستی نانوسیم به عملیاتی از ترانزیستورهای اثر میدان نانوسیمی شبیه است. تغییر سیگنال الکتریکی از ترانزیستورهای اثر میدان نانوسیمی ممکن است مقداری از مولکول هایی از بهره ثابت شده را بر روی سطح نانو سیم منعکس کند.



شکل ۷-۵: تصویر SEM از یک المان که شامل شش کانال نانوسیم است. عرض سطح و ضخامت ازهرنانوسیم بترتیب ۷۰ نانومتر و ۹۰ نانومتر است، ویژگی های انتقال از یک عامل قطعه در محیط های خشک و مرطوب است.



شکل ۸-۵: کارکردی از نانوسیم پلی-سیلیکون برای آشکارسازی دوپامین (dopamine) توسط ترانزیستورهای اثر میدانی نانوسیمی پلی-سیلیکون. تصویر شماتیک از نانوسیم پلی-سیلیکون اصلاح سطحی نشان داده شده است.

المان های فتوولتائیک نانوسیم-مستقر نیز به تازگی بررسی شده اند. پیل های خورشیدی نانوسیم های سیلیکونی از ساختارهای هم محور از نوع-p / ذاتی / نوع-N (p-i-n) با موفقیت توسط لیبر و همکاران ساخته شده است.

نویسندگان پیشنهاد کرده بودند که در کاربردهای پیل های خورشیدی نانوسیم، غیرفعال سازی سطحی نانوسیم و مرزهای دانه می تواند به طور قابل توجهی کاهش فرایند بازترکیب در نتیجه بهبود عملکرد نانوسیم فتوولتائیک شود. نقش حالت های سطحی در خواص الکترونیکی از نانوسیم ها نیاز به مورد بررسی بیشتر است.

اصلاح سطحی بطور بالقوه می تواند برای مهندسی خواص الکترونیکی مانند شکاف نوار (شکاف باند) و حرکت های حامل استفاده شود. با این حال، آزمایش ها بر روی اصلاح سطحی نانوسیم های نیمه هادی بسیار کم است. برای کاربردهای المان مانند ترانزیستور اثر میدانی نانوسیمی و سنسورها، خواص سطحی نانوسیم ها باید درک و کنترل شود. بنابراین بررسی دقیق شیمی سطحی از نانوسیم ها و کشف مسیرهای شیمیایی غیرفعال سازی مختلف برای درک و کنترل رفتار المان ارزشمند است.

۵.۴ مرور کلی:

در بخش دوم [۱۷]، مجله مقاله ای منتشر شده است که درباره نانو بحث می کند (Nano Letters)، که مطالعه نظری از خواص الکترونیکی از نانوسیم های سیلیکونی می باشد. در این پایان نامه، ما از پکج SIESTA برای انجام محاسبات ab از همان ابتدا در درون نظریه تابعی چگالی استفاده کرده ایم. این کار به بررسی ضربه (برخورد) از هیدروکسیلاسیون در وجوه مختلف از نانوسیم های سیلیکونی بر روی خواص الکترونیکی مانند شکاف باند ، جرم موثر، چگالی از حالت ها پرداخته است . بازسازی سطحی بر روی وجوه سیلیکون (۰۰۱) نیز در نظر گرفته شده است. با استفاده از مدل نانوسیم بینهایت بلند با سطح مقطع شش ضلعی که مبتنی بر داده تجربی قبلی گزارش شده ، سیلیکون هیدروکسیل در محیط های مختلف مورد آزمایش قرار گرفته است. ما با علم شیمی نشان دادیم که از پایان دهی سطحی می توان ساختار الکترونیکی داخلی از نانوسیم ها را تغییر داد.

فصل ششم

الکترونیک وجوه وابسته

خواصی از سیلیکون شش ضلعی

نانوسیم های تحت پیشرو

هیدروکسیلاسیون و سطح

بازسازی

۶.۱ مقدمه:

نانوسیم های سیلیکونی امیدوارکننده برای کاربردهای الکترونیکی از قبیل ترانزیستور، المان های فتو ولتایی، تولید برق ترموالکتریکی، و حسگر زیستی با توجه به خواص خود از قبیل نسبت سطح به حجم بزرگ (^{17}SVR)، انتقال حامل بالا تحرک پذیری، و ساختار باند قابل تنظیم که در بخش عمده ای وجود ندارد تبدیل شدند. بعنوان سامانه مواد شبه یک بعدی، نانوسیم های سیلیکونی ارائه و نمایش خواص یکتای الکترونیکی و نوری با توجه به اثرات تحدید(حبس) کوانتومی ناشی از سطح مقطع نانومقیاس خود می دهند. بعنوان مثال، یک شکاف مستقیم محاسبه شده است برای

¹⁷ Surface-to-Volume Ratio

نانوسیم ها [۱۱۰] با سطح مقطع شش ضلعی با قطری تا ۷ نانو متر، پدیده ای که برای استفاده از نانوسیم های سیلیکونی در کاربردهای اپتوالکترونیکی قول داده شده است. درحالی که این خواص، کریستالی، و جهت هسته نانوسیم که بطور عمده توسط قطر تعیین شده اند، آنها می توانند به شدت تحت تاثیر خواص سطحی از جمله نقص های سطحی و اتصال های پایان دهی شده سطحی قرار گیرند. بطور کلی، سطوح نانوسیم های سیلیکونی و نانوکریستال برای کنترل و کاهش اتصال های معلق سطحی اصلاح شده هستند که می توان سطح های الکترونیکی را در داخل شکاف باند معرفی کرد. به عنوان مثال، تیان و همکاران، نشان داده اند که ولتاژ مدار باز و بهره از المان فتوولتایی نانوسیم های سیلیکونی می توان بالا برد. با غیرفعال سازی مناسب از سطح نانوسیم و مرزهای دانه با توجه به فرونشانی فرایندهای باز ترکیبی. علاوه بر این، بهبود چشمگیر در تحرک پذیری حامل، ولتاژ آستانه، و ثباتی از المان نانوسیم پلی-سیلیکونی در شرایط محیطی مرطوب در درجه اول به اثرات غیرفعال سازی سطحی H^+ و/یا OH^- استفاده شده است.

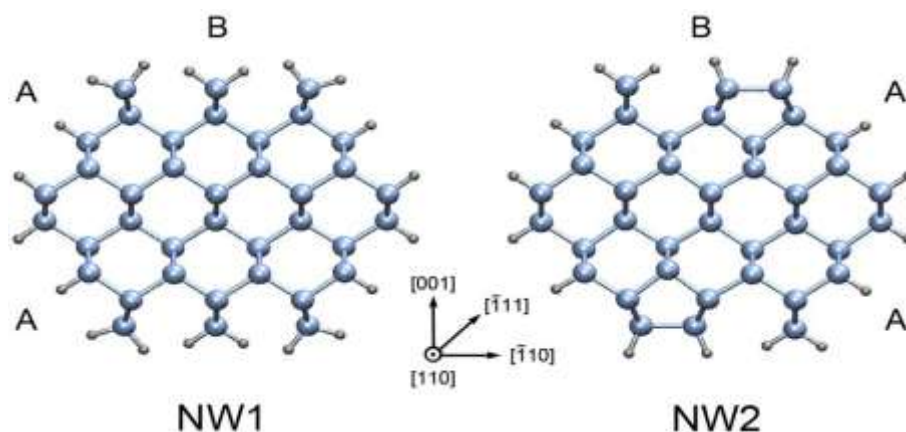
بسیاری از محاسبات نظری تا به امروز به بررسی تاثیرات از قطر ها و جهت گیری کریستالی بر روی خواص الکترونیکی از نانوسیم های سیلیکونی با استفاده از ab از همان ابتدای نظریه تابع چگالی (DFT^{18}) انجام شده است.

این محاسبات نظریه تابع چگالی با اطمینان پیش بینی کرده است که بعنوان قطر نانوکریستالی و نانوسیم های سیلیکونی کاهش می یابد، تحدید کوانتومی منجر به افزایش کلی در شکاف باند می شود. به طور خاص، شکاف باند از نانوسیم های سیلیکونی با مقیاس خطی با نسبت سطح به حجم برای سطح مقطع های نانوسیم مختلف نشان داده شده است. از سوی دیگر، نشان داده شده است که برهمکنش از گروه های پایندهی شده سطحی با لبه باند ظرفیت با رقابت کردن در

¹⁸ Density Functional Theory

برابر تحدید(حبس) کوانتومی می تواند القا کاهش در شکاف باند باشد. مطالعات نظری اخیر در غیرفعال سازی سطحی متمرکز شده است در اثری از انواع مختلف مواد شیمیایی و پوشش دهی سطحی خود بر ساختار الکترونیکی از نانوسیم های سیلیکونی. اثر از گروه های پایان دهی سطحی بر ساختار الکترونیکی می توان برای وجوه مختلف از نانوسیم های سیلیکونی، و نقش وجوه مختلف در تنظیم خواص الکترونیکی که هنوز مشخص نیست تغییر داد. به تازگی، آن نشان داده شده است که اتصال از رایکال NH_2 به وجوه مختلف می تواند کمک های مختلفی به چگالی از حالات، که کمک می کند تا در انتخاب وجوه مناسب برای ساخت سنسور های نانوسیم های سیلیکونی باشد.

در این مقاله، ما با استفاده از حالتی از فن محاسبات اصل اولیه به منظور بررسی اثری از هیدروکسیلاسیون پیش رونده در (۱۱۱) و وجوه نانوسیم های سیلیکونی (۰۰۱) و چگونگی ویژگی های الکترونیکی که تحت تاثیر با مورفولوژی وجوه هستند می پردازیم. گروه های هیدروکسیل در سطح مدلهای مهم برای تکنولوژی فرایندهای مربوطه از جمله سطوح نانوسیم های سیلیکونی اکسید شده هستند و می تواند مورد استفاده برای آماده سازی سطح ایده آل برای رسوب دهی لایه اتمی دی الکتریک اکسید فلزی، مبنی بر واکنش تعویض لیگاند باشند. بسیاری از مطالعات نظری از هیدروکسیلاسیون نانو کریستال سیلیکون که داشته اند در سال های گذشته گزارش شده است. در این جا ما قطر کوچک نانوسیمهای سیلیکونی [۱۱۰] که نمایش داده شده اند در نظر می گیریم که با توجه به توسعه از سطوح انرژی پایین تر مانند (۱۱۱) و (۰۰۱) ترجیح داده می شود. ما همچنین بازسازی سطحی در صفحه های (۰۰۱) کشف کرده ایم. حساسیت از وجوه مختلف به هیدروکسیلاسیون نشان داده شده است که به حضوری از بازسازی سطحی وابسته است.

۶.۲ روش شناسی¹⁹

شکل ۱-۶: سطح مقطع از دو نوع از نانوسیم های سیلیکونی اینجا پس از آرامش مورد مطالعه قرار گرفته است. ساختار چپ بعنوان نانوسیم ۱ و دیگری نانوسیم ۲ با بازسازی سطحی همانطور که در متن اشاره شده است. نانوسیم ها در امتداد جهت $[110]$ می باشند. پسوند A و B بترتیب دلالت بر وجوه نوع (111) و نوع (001) است. توپ فیروزه ای نشان دهنده اتم سیلیکون و توپ خاکستری نشان دهنده اتم هیدروژن است.

ساختار نانوسیم های سیلیکونی در امتداد جهت $[110]$ با سطح مقطع شش ضلعی و قطرهایی در حدود ۱.۷ نانومتر که بصورت تجربی مشاهده شده اند ساخته شده است.

مرجع [۱۸] پیش بینی کرده است که سیم های شش ضلعی راه اندازی پایدار شده در حدود قطر ۱.۲ نانومتر که نزدیک به یک مقدار گزارش شده تجربی اخیر در حدود ۳ نانومتر است. هر یک از نانوسیم ها شامل چهار وجوه نوع (111) و دو وجوه نوع (001) که صفحه های انرژی آزاد کم برای محور رشد (110) هستند. در وجوه نوع (111) ، هر اتم سیلیکون به تک اتم هیدروژن پیوند دارد. برای وجوه (001) ، دو ساختار سطحی به منظور مطالعه اثرات از بازسازی سطحی (001) در نظر گرفته شده است.

نوع اول ساختار دی هیدروکسید متقارن SiH_2 (برچسب نانوسیم ۱) است که در آن دو اتم

هیدروژن به یک اتم سیلیکون اتصال می کنند (شکل ۱-۶). نوع دیگر (اشاره به نانوسیم ۲) شامل بازسازی سطحی (شکل ۱-۶) دروجه (۰۰۱) که در آن یک جفت از اتم های هیدروژن در هروجه (۰۰۱) حذف و افزون یک اتم سیلیکون - اتصال سیلیکونی تشکیل شده است هستند. این اصلاح به عنوان یک بازسازی سطحی (۱×۲) که به خوبی برای سطوح سیلیکون توده ای (۰۰۱) مورد مطالعه قرار گرفته ارجاع شده است. از آنجا که یک دی هیدروکسید چپ بر روی هر وجه (۰۰۱) وجود دارد، سطوح بازسازی (۰۰۱) یک ساختار (۱×۳) شده است که برای سطح سیلیکون توده ای (۰۰۱) توسط میکروسکوپ تونلی پویشی (STM) مشاهده شده است.

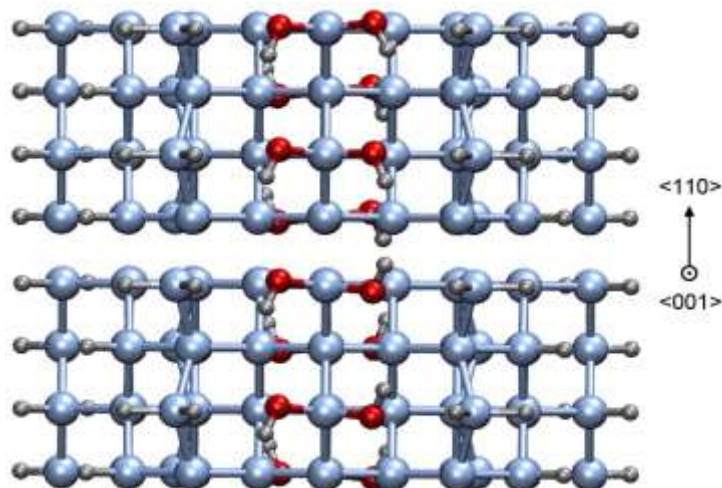
برای هر دو ساختارهای سطحی، ما نخست مطالعه نانوسیم با غیرفعالسازی H-کامل، به دنبال معرفی تدریجی هیدروکسیل (OH-) در روی وجه (۰۰۱) یا (۱۱۱) داریم. ما با استفاده از پسوند A به تفکیک کردن غیرفعال سازی OH- بر روی وجه نوع (۱۱۱) و استفاده پسوند B برای غیرفعال سازی OH بر روی وجه نوع (۰۰۱) داریم. بعنوان مثال، NW2A-4OH است نانوسیمی با بازسازی سطحی که در آنجا چهار اتصال هیدروژن بر روی وجه (۱۱۱) از یک پیل واحد (سلول واحد) توسط OH جایگزین شده است. محاسبات در این کار در چهارچوب AB از همان ابتدا نظریه تابع چگالی مطابق تقریب چگالی محلی انجام شده است. ما دو تا § که اساس قطبی شده با مجموعه شبه پتانسیل ساخته شده با استفاده از طرح ترویلیرمارتینس استفاده کرده ایم. آرامش ساختاری انجام شد با استفاده از حداقل شیب (گرادیان) مزدوج شده بطوریکه نیرو در هر اتم کمتر از ۰.۰۴ eV/A است. فاصله بین نانوسیم و تصاویر آن در حدود 18*A است که به اندازه کافی برای جلوگیری از هر گونه برهمکنش بین تصاویر نانوسیم است. قطع (فرکانس قطع) برای یکپارچه سازی شبکه ۲۰۰ الکترون ولت گرفته شده است.

ناحیه بریلوین نمونه برداری شده بود با Monkhorst-Pack نقطه K در طول محور نانوسیم

برای محاسبه چگالی الکترونیکی از حالات (20^{DOS})، نمونه ناحیه بریلوین در ۱۱ نقطه K افزایش یافته بود.

۶.۳ نتایج و بحث ها:

شکل ۱-۶ طرحی از نانوسیم های سیلیکونی پس از آرامش را نشان می دهد، بازنمایی یک پیکربندی bulklik با توجه به لایه غیرفعال سازی H. با توجه به برهمکنش قوی بین دی هیدروکسیدهای مجاور در وجوه (۰۰۱) از مقوله نانوسیم ۱، دفع یکدیگر دی هیدروکسید و کمی چرخش به سمت وجوه (۱۱۱) در ساختار آرام همانطور که در شکل ۱-۶ نشان داده شده است. در ساختار آرام شده از نانوسیم ۲، دی هیدروکسید تنها در وجه (۰۰۱) نمی چرخد به دلیل بازسازی (3×1) بر روی سطح، ما همچنین دریافتیم که اتصال های O-H در وجوه (۰۰۱) از آنکه بر روی (۰۰۱) و از آنکه بر روی وجوه (۱۱۱) است متفاوت خواهد بود. شکل ۲-۶ دو گروه هیدروکسیل اتصال به یک اتم سیلیکون تنها را در وجه (۰۰۱) از NW1B-4OH را نشان می دهد. هر دو ساختار cis و Trans می تواند در وجوه (۰۰۱) بدون بازسازی مشاهده شود، در حالی که گروه های هیدروکسیل در وجوه های (۱۱۱) متقارن هستند و در صفحه سطح مقطع از نانوسیم قرار گرفته اند. در مقابل در مقوله نانوسیم ۲ به دلیل جدایی بزرگتر H-H در وجوه (۰۰۱)، گروه های هیدروکسیل در همان سطح مقطع از نانوسیم هستند.



شکل ۶-۲: ساختار cis (بالا) و Trans (پایین) از گروه های هیدروکسیل در جوجه (۰۰۱) از NW1B-4O پس از آرامش ساختاری است. توپ های فیروزه ای، قرمز و خاکستری بترتیب نماینده اتم های سیلیکون، اکسیژن و هیدروژن هستند.

تشکیل انرژی از سامانه نانوسیم را می توان با رابطه زیر محاسبه کرد.

۶-۱

$$E_{form} = E_{tot}(wire) - \sum_{i=Si,O,H}^{\infty} N_i \mu_i$$

که در آن E_{tot} انرژی کل نانوسیم است، i نشان دهنده انواع مختلف، و U_i پتانسیل شیمیایی مربوطه از انواع است.

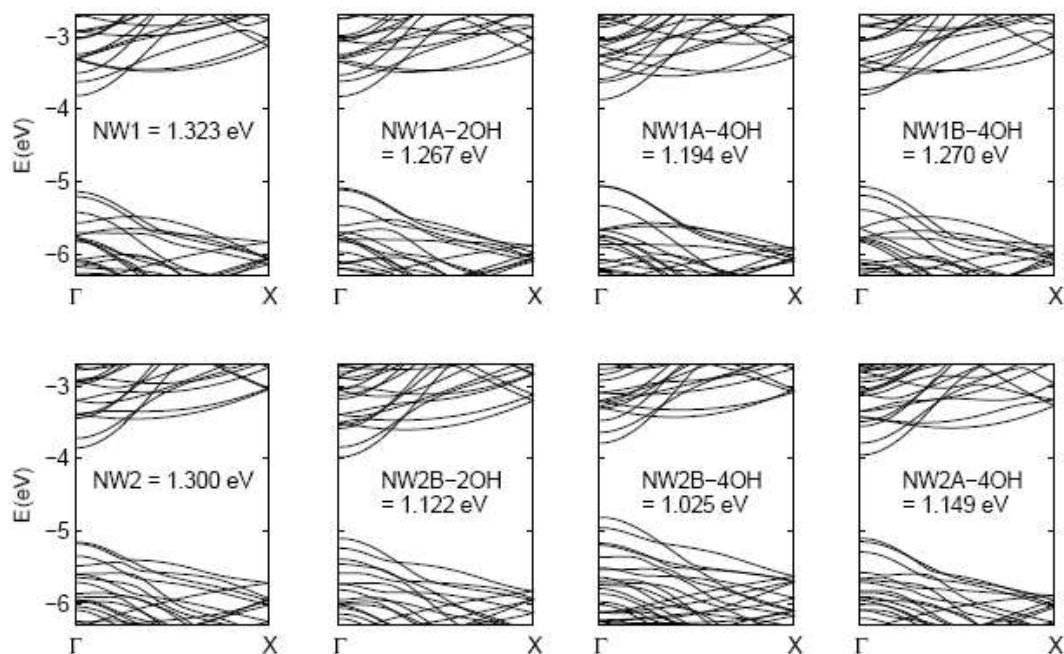
پتانسیل شیمیایی سیلیکون از سیلیکون توده ای گرفته شده است، و پتانسیل شیمیایی هیدروژن و اکسیژن بترتیب از هیدروژن و اکسیژن مولکولی استخراج شده است. برای تحلیل انرژی تشکیل شده (نگاه کنید به جدول ۶-۱) نشان میدهد که نانوسیم غیرفعال ساز H شبه پایدار هستند که چنانکه با

انرژی شکل گیری مثبت خود را نشان داده اند. ساختار سطح بازسازی (نانوسیم ۲) نسبت به نانوسیم ۱ با اختلاف انرژی ۰.۶۷۸ الکترون ولت با توجه به جدایی بزرگتر از اتم های هیدروژن بر روی ساختار پایدارتر است. همچنین می توانیم ببینیم که هر دو ساختار نانوسیم یک کاهش یکنوایی انرژی تشکیل شده را بعنوان تعدادی از افزایش رادیکال های OH نشان می دهد، مستلزم آنکه هیدروکسیل یک فرایند مطلوب پر انرژی است. جالب توجه است، ما فهمیدیم به همان تعدادی از گروه های OH، نتایج هیدروکسیلاسیون بر روی وجوه نوع (۰۰۱) در انرژی پایین تری از آنکه بر روی وجوه نوع (۱۱۱) است. این را می توان به وضوح از انرژی تشکیل شده از NW1A-4OH و NW1B-4OH مشاهده کرد. این مورد همچنین برای سطوح بازسازی نانوسیم نشان می دهد که هیدروکسیلاسیون بر وجوه نوع (۰۰۱) بیشتر پایدار و پر انرژی است. (نگاه کنید به NW2B-4OH و NW2A-4OH).

جدول ۱-۶: محاسبه انرژی تشکیل شده، باند انرژی برای همه سامانه ها

system	E_{form} (eV)	CB (eV)	VB (eV)	ΔE_g (%)
NW1	5.512	-3.819	-5.142	
NW1A-2OH	-25.038	-3.827	-5.094	-4.23
NW1A-4OH	-55.578	-3.870	-5.064	-9.76
NW1B-2OH	-25.447	-3.809	-5.101	-2.37
NW1B-4OH	-57.708	-3.807	-5.077	-4.15
NW2	4.834	-3.856	-5.156	
NW2A-2OH	-25.732	-3.878	-5.113	-5.03
NW2A-4OH	-56.356	-3.955	-5.104	-11.58
NW2B-2OH	-25.866	-3.983	-5.105	-13.69
NW2B-4OH	-57.436	-3.788	-4.813	-21.18

تغییرات E_g (درصد) تغییر در شکاف انرژی در مقایسه با سیستم های اصلی (نانوسیم ۱ و نانوسیم ۲) با غیرفعال سازی اصلی (نانوسیم ۱ و نانوسیم ۲) با غیرفعال سازی هیدروژنی کامل است.



شکل ۳-۶: ساختار باند الکترونیکی و شکاف باند از نانوسیمهای سیلیکونی مختلف است. سطوح فرمی همه در وسط از باند شکاف هستند. نقاط K در امتداد نمونه برداری شده $T-X$ هستند.

جدول ۲-۶: تغییرات در باند شکاف الکترونیکی (E_g) با توجه به بازسازی سطحی برای

نانوسیم هایی با قطر های مختلف می باشد.

D (nm)	E_g (eV)	E_g' (eV)	ΔE_g (%)
1.4	1.402	1.356	-3.28
1.7 ^b	1.323	1.300	-1.74
2.6	1.102	1.128	2.36

E_g' شکاف باند مربوطه پس از بازسازی سطحی است؛ تغییرات E_g (درصد) تغییر در شکاف انرژی در مقایسه با ساختار قبل از بازسازی سطحی است. نانوسیم با قطر ۱.۷ نانومتر مربوط به نانو سیم ۱ در شکل ۱-۶ نشان داده شده است.

در این گزارش، شکاف باند مستقیم در تمام محاسبات دیده می شود (شکل ۳-۶)، به عنوان پیک باند ظرفیت و حداقل از باند هدایت در نقاط T هستند. شکاف باندا برای نانوسیم یک (۱.۳۲۳۱ الکترون ولت) و برای نانوسیم ۲ (۱.۳۰۰۲ الکترون ولت) که مشابه نتایجی از نانوسیمهای سیلیکونی هیدروژنه (جامد) گزارش شده در مرجع [۹] بدست آمده است. کمترین شکاف باند در NW2B-40H که ۱.۰۲۴۸ الکترون ولت است یافت می شود. همانطور که در مرجع [۱۱] مورد بحث شده، اگرچه محاسبات تقریب چگالی محلی (LDA) - نظریه تابع چگالی (DFT) تخمین پایین تر شکاف باند از نانوسیم های [۱۱۰] است، گرایش در شکاف باند هنوز هم می توان به درستی پیش بینی کرد. با مقایسه شکاف باند از گروه نانوسیم ۱ و از گروه نانوسیم ۲، ما می توانیم ببینیم که القاییدن بازسازی سطحی (۰۰۱) یک انتقال قرمز در شکاف باند، که مشاهده تجربی در نانوذرات سیلیکونی شده است. با این حال، مرجع [۱۲] نشان داده که بازسازی سطحی (۰۰۱) منجر به شکاف باند بزرگتر با توجه بزرگتر با توجه به کاهش اندکی در اندازه موثر است. برای تحقیق بیشتر اثر بازسازی سطحی در شکاف باند، ما تغییر در شکاف باند برای دو نانوسیم سیلیکونی با سطح مقطع شش ضلعی اما نسبت های سطح به حجم و قطر های مختلف محاسبه کرده ایم. همانطور که در جدول ۲-۶ برای نانوسیم

سیلیکونی با قطری در حدود ۲.۶ نانومتر نشان داده شده است ، تغییر در شکاف باند با توجه به بازسازی سطحی بزرگتر از ۲.۳۶ درصد است. در مقابل، برای نانوسیم سیلیکونی با قطری در حدود ۱.۴ نانومتر (به عنوان مثال، کوچکتر از نانوسیم فعلی مان)، یک انتقال قرمز قویتر مشاهده شده است: شکاف باند با ۳.۲۸ درصد بعد از بازسازی سطحی کاهش می یابد. براساس این نتایج، ما نتیجه گرفتیم که تاثیر بازسازی سطحی بر روی شکاف باند به اندازه وابسته است، که اختلاف را در مرجع [۱۲] توضیح می دهد. به طور کلی هیدروکسیلاسیون را شکاف انرژی در مقایسه با غیرفعال سازی H کاهش می دهد. همانطور که در شکل ۳-۶ نشان داده شده است، تغییر در انرژی ماکزیمم از باند ظرفیت قابل توجه تر در مقایسه با تغییر در حداقل باند هدایت است. برای NW1A-4OH ، NW1A-2OH و نانوسیم ۲، ماکزیمم باند ظرفیت دوم درست زیر یکی از اولین قرار گرفته است. با مقایسه نانوسیم اول، NW1A-2OH، و NW1A-4OH، می توان مشاهده کرد که کاهش در مقادیر شکاف باند به عنوان پوشش دهی سطحی از افزایش OH قابل توجه تر می شود. شکاف باند از NW1A-2OH با ۴.۲۳ درصد کاهش می یابد در حالی که برای NW1A-4OH با ۹.۹۶ درصد کاهش می یابد. با این حال اثر غیرفعال سازی OH بر روی وجوه نوع (۰۰۱) از آن که در وجوه نوع (۱۱۱) است متفاوت است. از آنجا که NW1A-4OH و NW1B-4OH به همان تعداد از اتم ها را داشته اند ما می توانیم آنها را بطور مستقیم با نانوسیم ۱ مقایسه کنیم.

شکاف انرژی تنها کاهش داده شده است با ۴.۱۵ درصد با چهار OH اتصال شده بر روی وجوه (۰۰۱) ، در حالی که غیرفعال سازی بر روی وجوه (۱۱۱) با همان مقدار از فشرده شدن OH که شکاف انرژی با ۹.۷۶ درصد که بیشتر از دو برابر بزرگتر است کاهش داده شده است. در مقابل، همان تجزیه و تحلیل در نانوسیم ۲ نشان می دهد که بازسازی وجوه (۰۰۱) به نظر فعال تر در

اصلاح شکاف باند است.

شکاف باند از NW2B-4OH با ۲۱.۱۸ درصد با توجه به نانوسیم ۲ کاهش می یابد. این نتایج نشان می دهد که اثر هیدروکسیلاسیون به شدت وابسته به وجوه است که برای طراحی و پیاده سازی سنسورهای زیستی و شیمیایی براساس نانوسیم ها با توجه به این واقعیت که چگالی از حامل ها در تغییرات نمایی نانوسیم ها با یک تغییر در شکاف باند بسیار مهم هستند.

جدول ۳-۶: نسبت محاسبه از جرم موثر برای الکترون (m_e^*) و حفره (m_h^*) به جرمی از الکترون آزاد m برای همه سامانه ها می باشد.

system	m_e^*/m	m_h^*/m
NW1	0.1260	0.1614
NW1A-2OH	0.1265	0.1649
NW1A-4OH	0.1270	0.1656
NW1B-2OH	0.1244	0.1584
NW1B-4OH	0.1247	0.1545
NW2	0.1191	0.1785
NW2A-2OH	0.1194	0.1703
NW2A-4OH	0.1203	0.1560
NW2B-2OH	0.1186	0.1613
NW2B-4OH	0.1197	0.1634

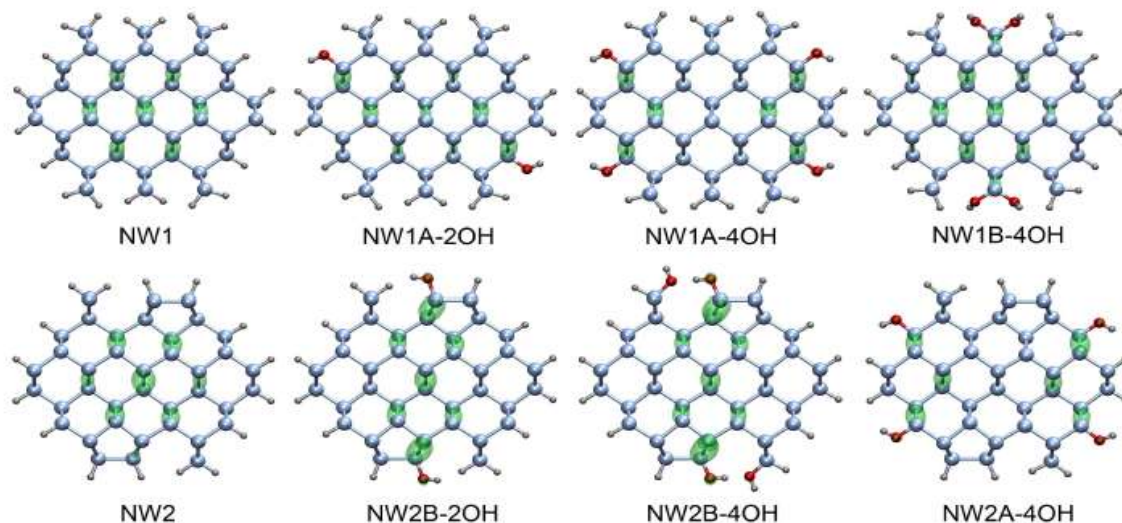
جدول ۳-۶ خلاصه جرم های (توده های) موثر مربوط به نانوسیم های مختلف است. جرم های موثر از حفره ها و الکترون ها بترتیب بطور مستقیم از انحنا باند هدایت و باند ظرفیت مشخص شده اند. جرم های موثر محاسبه شده از نانوسیم ۱ و نانوسیم ۲ که تنها غیرفعال سازی شده با هیدروژن و به خوبی مطابقت با نتایج گزارش شده در مرجع [۱۶] هستند. همانطور که انتظار می رفت، تغییر در ساختار باند الکترونیکی منجر به تغییر در جرم های موثر است. آن پیدا کرده است که برای هر دو گروه نانوسیم ۱ و نانوسیم ۲ جرم های موثر از افزایش اندک الکترون چنانکه OH معرفی شده برای

وجوه نوع (۱۱۱) باشد) نانوسیم ۱ و نانوسیم ۲ در جدول ۳-۶). در مقابل، هیدروکسیلاسیون بر روی وجوه (۰۰۱) کاهش جرم های موثر برای هر دوی الکترون ها و حفره ها دارد. با این حال، این روند در تغییر از جرم های موثر در نانوسیم های سیلیکونی با بازسازی سطحی مشاهده نشد (مقوله نانوسیم ۲ در جدول ۳-۶).

نتایج ما نشان می دهد که جرم های موثر از الکترون ها در مقوله نانوسیم ۲ معمولاً کوچکتر از آن از نانوسیم ۱ هستند، در حالی که جرم های موثر از حفره ها بزرگتر در مقایسه با گروه نانوسیم ۱ هستند. پس از این که ساختار به طور کامل آرام شد توسط روش LDA-DFT، مدارهای مولکولی در سطحی از تئوری B3LYP/6-31G(d) با استفاده از بسته گاوسی ۰۳ محاسبه شده بودند. نشان داده شده است که حضور گروه های هیدروکسیل در سطوح نانوسیم Delocizes (غیر موضعی) بالاترین مدارهای (اوربیتالهای) مولکولی اشغالی ($^{21}\text{HOMO}$)، در حالی که پایین ترین مدارهای مولکولی اشغال نشده ($^{22}\text{LUMO}$) باقی ماندن بسیار در مرکزی از نانوسیم موضعی است (در اینجا نشان داده نشده است). شکل ۴-۶، HOMO از نانوسیم ۱ و نانوسیم ۲ را بدون هیدروکسیلاسیون نشان می دهد. توضیح شارژ بطور کلی در سراسر اتصال های سیلیکون-سیلیکون در امتداد محور نانوسیم ها هستند. هنگامی که نانوسیم به طور کامل با هیدروژن غیرفعال سازی شده، HOMO بیشتر متمرکز شده است در داخل از نانوسیم. همانطور که غیرفعال سازی OH بر روی وجوه نوع (۱۱۱) از هر دو نوع نانوسیم ها افزایش می یابد، چگالی های HOMO گسترده به سطح و بیشتر نسبت به گروه های هیدروکسیل است.

²¹ Highest Occupied Molecular Orbitals

²² Lowest Unoccupied Molecular Orbitals



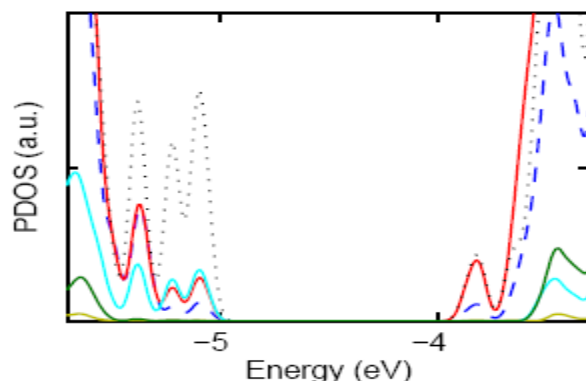
شکل ۴-۶: HOMO تابع موج مداری (اوربیتال) (از همان مقدار خط تراز ۰.۰۴۵) در ارتباط با سامانه های مختلف نانوسیم. توپ فیروزه ای، قرمز، و خاکستری بترتیب نشان دهنده سیلیکون، اکسیژن، واتم هیدروژن هستند.

باین حال، هیدروکسیلاسیون بر روی وجوه (۰۰۱) نتایج مختلف برای نانوسیم ۱ و نانوسیم ۲ نشان می دهد. در حالی که برای هیدروکسیلاسیون نانوسیم ۱ HOMO تغییرات مهمی نداشت، برای نانوسیم ۲ گروه های هیدروکسیلاسیون جابه جا کردن حالت های HOMO نسبت به سطح داشتند.

در NW1B-4OH یک هم بخشی بزرگی در اطراف مرکزی از نانوسیم باقی میماند و حالت های سطحی القاشده کوچک هستند. توجه داشته باشید که ماهیت نامتقارن از چگالی های HOMO برای NW1B-4OH با توجه به ساختارهای ترانس و سیز بر روی وجوه (۰۰۱) است.

در NW2B-2OH/4OH، اگرچه اوربیتال (مدار) داخلی باقی مانده، هم بخشی قابل توجه ای از سایت های غیرفعال سازی نیز در سطوح بازسازی شده وجود دارد. تفاوت با توجه به ساختار سطحی مختلف از وجوه (۰۰۱) باید باشد. ما می توانیم نتیجه گیری کنیم که اثر مشترک در هر دو مقوله نانوسیم ۱ و نانوسیم ۲ با توجه به اصلاح سطحی مشاهده شده است که هیدروکسیلاسیون بر روی وجوه (۰۰۱) در اطراف HOMO از مرکز سیم تغییر نمی کند، در حالی که غیرفعال سازی OH در وجوه های (۱۱۱) می تواند شیفیت قابل توجه ای از HOMO را از مرکز به مجاورت

نزدیکی از جایگاه های غیرفعال سازی را دهد. این می تواند تغییر در ساختار باند الکترونیکی را توضیح دهد. حالت های سطحی القایی توسط غیرفعال سازی OH باعث تغییرات قابل توجه ای در 24 VBM در نقاط T می شود، در حالی که 23 CBM نسبتاً پایدار هستند.



شکل ۵-۶: نمودار PDOS برای اتم هیدروژن (زرد جامد)، اکسیژن (فیروزه ای جامد)، و سیلیکون (سیاه و سفید نقطه ای)، بر روی وجوه (۱۱۱)، اتم هیدروژن (سبز جامد) و سیلیکون (خط تیره آبی) بر روی وجوه (۰۰۱) و اتم سیلیکون (قرمز جامد) در اطراف مرکز برای NW1A-4OH.

به منظور درکی از اثر هیدروکسیلاسیون در ساختار باند الکترونیکی، ما همچنین چگالی جزئی از حالات (PDOS) را بررسی می کنیم. مجموع چگالی از حالات (DOS) الکترونیکی داخل هم بخشی اتم جزئی از انواع مختلف و اتم هایی در جایگاهها مختلف تجزیه شده اند. منحنی PDOS با تعداد کل از اتم های بهنجار (نرمالیزه) شده یک پهن کردن گاوسی از ۰.۰۵ الکترون ولت استفاده شده است. هم بخشی PDOS از گروه های پایان دهی (H,O) و دو نوع از اتم سیلیکون (یکی بر روی سطوح و یکی اطراف مرکز) شکل می گیرد، NW1A-4OH که در شکل ۵-۶ نمایش داده شده است. همانطور که در رفرنس [۱۳] گزارش شده حالات سطحی از نانوسیم های سیلیکونی مرتبط تر در شکل گیری از VBM به نظر می رسد. هم بخشی اصلی به نزدیکی DOS ماکزیمم باند ظرفیت (VBM) از اتم های سیلیکونی در جایگاه های هیدروکسیل (در این مورد

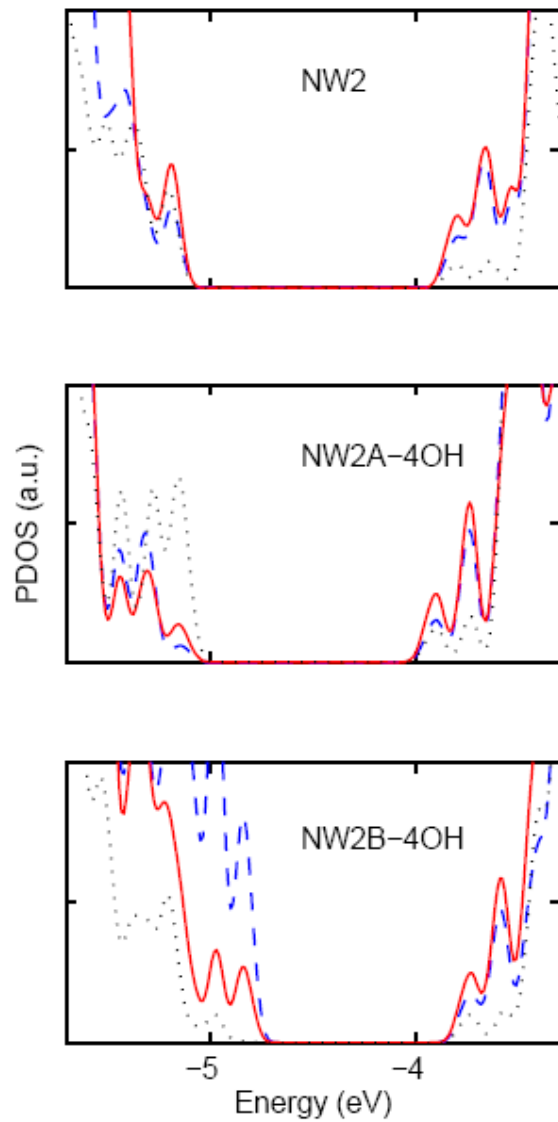
²³ Conduction Band Minima

²⁴ Valence Band Maxima

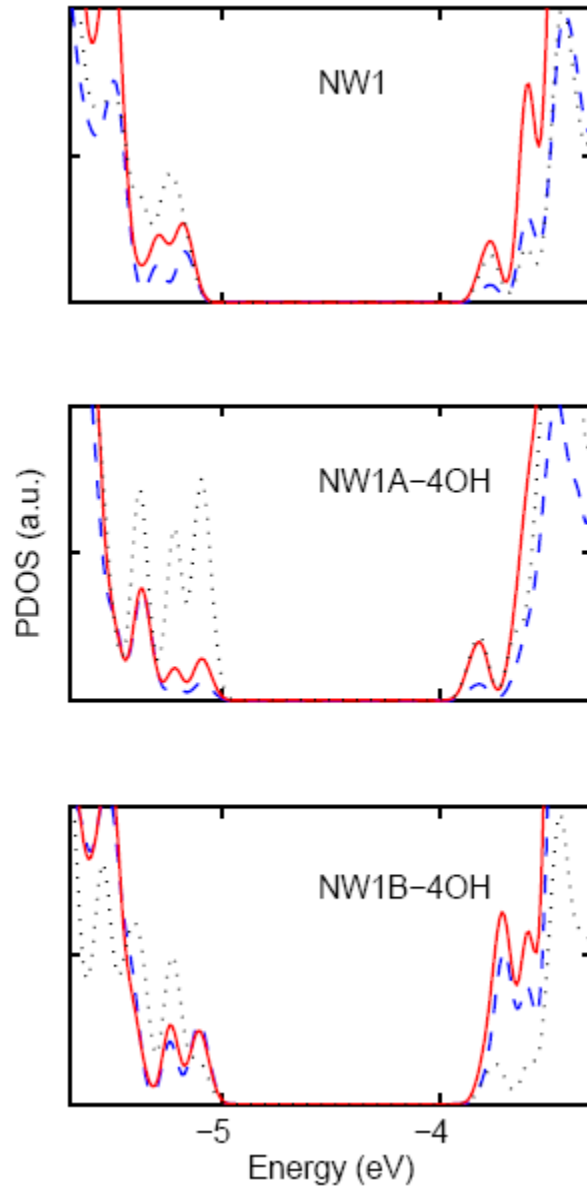
بر روی وجوه های (۱۱۱) ، چنانکه می توان در شکل ۵-۶ مقایسه پیک اول از نمودار PDOS از اتم های مختلف را دید. دو هم بخشی دیگر، هر چند در سطح پایین تر، از اتم اکسیژن در جایگاه هیدروکسیل و در اطراف اتم سیلیکون مرکز هستند. با این حال، هم بخشی از اتم سیلیکون بر روی وجوه باهیچ گروه هیدروکسیل (به عنوان مثال، وجوه (۰۰۱) در این مورد) و اتم های هیدروژن که نسبتاً کوچک هستند. اثرات مشابه در NW2A-4OH و NW2B-4OH نیز مشاهده شده است. از آنجا که ما می دانیم اتم های سیلیکون یک نقش مهمی در DOS بازی می کنند، ماسپس نمودار PDOS از اتم های سیلیکون در جایگاه های (سایت های) مختلف برای هر دو مقوله نانوسیم ۱ و نانوسیم ۲ استخراج کرده ایم. سه نمودار در شکل ۶-۶ بترتیب برای NW2A-4OH و NW2B-4OH هستند. برای نانوسیم ۲ با تک هیدروژن غیرفعال سازی، هم بخشی از اتم های سیلیکون در روی وجوه (۰۰۱) و (۱۱۱) و اطراف مرکزسیم به نزدیکی DOS به لبه های باند ظرفیت بسیار مشابه هستند.

برای NW2B-4OH که هیدروکسیل در روی وجوه نوع (۰۰۱) جذب شده است ، هم بخشی به لبه باند ظرفیت از اتم های سیلیکون در روی وجوه (۱۱۱) که در حدود سه زمان بزرگتر است غالب است. هنگامی که هیدروکسیل در وجوه نوع (۱۱۱) (NW2A-4OH) جذب شده هستند، مشارکت اتم های سیلیکون در روی وجوه (۱۱۱) بیشتر است. این با آن واقعیت که حرکت چگالیهای HOMO به سمت جایگاه های هیدروکسیل است سازگار است. برای حالات نزدیک CBM، هم بخشی از اتم های مرکزی همیشه غالب بوده. اما تفاوت قابل توجهی در میان اتم های سیلیکون از این سه جایگاه وجود ندارد. شکل ۷-۶ تجزیه و تحلیل مشابه PDOS برای نانوسیم ها از گروه

نانوسیم ۱ نشان می دهد. در مقابل با گروه نانوسیم ۲ ، که در هر دو بازسازی وجوه مونوهیدراته (۱۱۱) و (۰۰۱) هم بخشی قابل توجهی به لبه باند داشته، در وجوه مونوهیدراته (۱۱۱) از نانوسیم ۱ به نظر از وجوه متقارن (۰۰۱) فعالیت می رسد. هیدروکسیلاسیون بر روی وجوه متقارن (۰۰۱) از نانوسیم ۱ نزدیک حالات **VBM** ایجاد نمی شود. با این تفاوت باید با توجه به تغییر در مورفولوژی وجوه (۰۰۱) به صورت چگالی **HOMO** مشاهده شده باشد.



شکل ۶-۶: PDOS از اتمهای سیلیکون بر روی وجوه سطحی (۰۰۱) (خط آبی)، وجوه سطحی (۱۱۱) (خط سیاه نقطه ای)، و در اطراف مرکز (رنگ قرمز جامد) برای نانوسیم ۲، NW2B-4OH، و NW2A-4OH.



شکل ۶-۷: PDOS از اتم های سیلیکون بر روی وجوه سطحی (۰۰۱) (خط آبی)، وجوه سطحی (۱۱۱) (خط سیاه نقطه ای)، و در اطراف مرکز (رنگ قرمز جامد) برای نانوسیم ۱، NW1A-4OH، و NW1B-4OH.

در نتیجه، ما اثری از هیدروکسیل و بازسازی سطحی بر روی خواص الکترونیکی از نانوسیم های سیلیکونی از جمله شکاف باند، جرم موثر، و چگالی از حالات (states) را بررسی کردیم. در مقابل به اثرات تحدید (حبس)، اندازه از شکاف باند توسط افزایش مقداری از گروه های هیدروکسیل بر روی سطوح کاهش می یابد. بیشتر بیان کردن کاهش در شکاف باند (تقریباً ۱۰ درصد) برای گروه های هیدروکسیل در روی وجوه (۱۱۱) در مقایسه با آنها در روی وجوه (۰۰۱) (تقریباً ۴ درصد) است، وقتی که بازسازی وجود ندارد. اما برای نانوسیم ها با وجوه بازسازی (۰۰۱)، کاهش در شکاف باند در حدود ۲۱ درصد می تواند برای هیدروکسیلاسیون در روی سطوح بازسازی شده مشاهده شده باشد. یک کاهش در شکاف باند از این نانوسیم ها توسط یک جنبش کلی از چگالی ها شارژ ناشی از HOMO از مرکز نانوسیم به سمت سطح همراه است. در حالی که جرم های موثر برای الکترون ها و حفره ها بر هیدروکسیلاسیون تغییر قابل توجهی انجام نخواهد داد، القابیدن بازسازی یک کاهش کوچک در جرم (توده) موثر الکترون ها و یک افزایش کوچک در جرم از حفره ها است. تجزیه و تحلیل PDOS برای نانوسیم های هیدروکسید شده همچنین نشان می دهد که هم بخشی از اتم های سیلیکون سطحی در روی هر دو وجوه (۰۰۱) و یا (۱۱۱) چگالی از گراگرد حالات VBM غالب خواهد بود. حساسیت از چگالی از حالات برای هیدروکسیلاسیون در وجوه (۱۱۱) برای نانوسیمها با بدون بازسازی سطحی بیان شده است، در حالی که این بیشتر برای هیدروکسیلاسیون در سطوح بازسازی شده (۰۰۱) بیان شده است. این نتایج برای درک اثری از خاتمه دهی سطحی بر روی خواص الکترونیکی از نانوسیم ها مهم هستند و می توانند برای طراحی از سنسورهای نانوسیم و بهینه سازی شیمی سطحی برای ترانزیستورهای نانوسیم سیلیکونی استفاده شوند.

وعده استفاده از نانوسیم ها به دلیل کاربردهای بالقوه در نانوالکترونیک داده شده است، و همچنین به دلیل خواص نوری و الکترونیکی نانوسیم ها را می توان از طریق اندازه، ترکیب مواد، و مورفولوژی سطحی مهندسی کرد. مطالعات نظری از خواص مواد ممکن است منجر به کاربردهای جدید قطعه شود، مانند مهندسی شکاف باند برای طراحی قطعه.

در فصل ۶ ساختارهای سطحی از نانوسیم های سیلیکونی و چگونگی اثرات اصلاح سطحی خواص الکترونیکی آن مطرح شده است. ما مشاهده کرده ایم یک تغییر قابل توجه ای در شکاف باند که نتیجه از طریق یک تغییر بسیار بالایی در رسانایی خواهد بود چنانچه از نانوسیم به ساخت یک سنسور یا یک ترانزیستور استفاده شود. رسانایی متناسب با تعدادی از حامل ها و تحرک پذیری است. بر اساس توضیح ماکسول و بولتزمن ، چگالی از حامل ها متناسب است با $\exp(-E_g/2KT)$ ، که پیش بینی های یک تغییر نمایی در رسانایی با یک تغییر در شکاف باند می باشد. ساخت یک سنسور یا یک ترانزیستور در مقیاس مولکولی نیاز به کنترل دقیق از ساختارهای الکترونیکی می باشد. بنابراین انتظار می رود که تغییر در شکاف باند بر ویژگی های قطعه نانوالکترونیکی تاثیر خواهد داشت. مشاهده اصلاحات (تغییرات) از شکاف باند در نقاط نانو -سیم های سیلیکونی به امکان روش جدیدی برای طراحی قطعات نانوالکترونیکی گشته است. به دنبال کار در فصل ۶ ، اگرچه ما در این پایان نامه بر روی نانوسیم های سیلیکونی متمرکز شدیم، کار بیشتری می توان به توسعه دادن مطالعه نظری متداول مان به کشف کردن ساختارهای نانوسیم و مواد جالب دیگر انجام داد. به تازگی، گروه های تجربی مختلف ساختار ناهمگون شعاعی و محوری نانوسیم ساخته شده در یک رویکرد پایین - بالا را گزارش داده اند. از این ساختارها انتظار می رود که کاربردهای بالقوه ای در نانوالکترونیک و نانواینتیک داشته باشند. به خصوص، ساختارهای هسته - چند پوسته از ساختارهای ناهمگون نانوسیم شعاعی که توانا

-سازای خواص فسق مشترک جدید و معرفی عملکرد منحصر به فرد الکترونیکی و فتونیکی. برای مثال، باند انرژی لاین بالا در فسق مشترک ژرمانیوم و سیلیکون از ژرمانیوم / سیلیکون پوسته / هسته نانوسیم ها منجر به تحقق عملکرد بالا ترانزیستورهای اثر میدان نانوسیمی کانال-P می شود. مطالعات نظری از اثرات غیر فعال سازی سطحی همچنین مهم خواهد بود برای کشف در فیزیک اساسی و نتایج طراحی از قطعات نانوسیم ساختار ناهمگون از آنجا که ماهیت ناحیه - سطحی - بالا باقی می ماند. مدل مورد استفاده در فصل ۲ به راحتی میتواند به یک ساختار ناهمگون نانوسیم ژرمانیوم/سیلیکون پوسته/ هسته منتقل شود.

در کنار تئوری، محققان به تازگی کرنش(استرین) به عنوان یک روش برای مهندسی خواص الکترونیکی از نانوسیم های سیلیکونی بررسی کرده اند. آنها اثراتی از کرنش را در روی خواص الکترونیکی از قطر کوچک نانوسیمهای سیلیکونی و استفاده از **ab** از همان ابتدای محاسبات **DFT** مورد مطالعه قرار داده اند. آنها نشان دادند که ساختارهای باند می تواند دستکاری شود برای شکاف باند مستقیم با استفاده از کرنش شبکه. نتایج ما نشان می دهد که هیدروکسیلاسیون در روی سطح نانوسیم فشرده کردن شکاف باند و حفظ کردن ماهیت مستقیم - شکاف که می تواند راحت تر برای کنترل در طول ساخت قطعه باشد. علاوه بر این، همان طور که در محاسبات ما نشان داده شده است، حضور گروه های هیدروکسیل در روی وجوه نوع(۱۱۱) باعث می شود که حالات **HOMO** گسترده به سطح درحالی که بسیاری از حالات **LUMO** در مرکز از نانوسیم متمرکز شده و باقی بماند. این نشان می دهد که با کنترل مورفولوژی سطح از نانوسیم سیلیکونی، مکان حالت های نزدیک شکاف (**VBM** و **CBM**) می تواند به طور موثر از هم جدا و از این رو آن را امکان پذیر می سازد به شارژهای جداگانه، که برای کاربرد عملی از پیل های خورشیدی که ارزشمند است.

منابع و مآخذ

1- S. V. Rotkin and K. Hess

Principles of metallic field effect Transistor

2- Jan-Olof J. Wesstrom

Self-Gating effect in the electron Y-branch Switch

3- S. Y. Chou, P. R. Krauss, and P. J. Renstrom,

Nanoimprint lithography

4- M. M. Alkaisi, R. J. Blakie, S. J. McNab

Low temperature nanoimprint lithography using silicon nitride molds

5- O. L. Krivanek, N. Dellby, and A. R. Lupini

Toward sub-9 electron beams

6- M. J. Rooks, S. Wind, P. McEuen, and D. E. Prober

Fabrication of 30- nm-scale structures for electron transport studies using a polymethylmethacrylate bilayer resist

7- M. C. Colton

Thin film microelectronic components on semiconductors

8- M. T. Bohr

Nanotechnology goals and challenges for electronic applications IEEE. Trans. Nanotech. 1, pp. 58-62, 2002.

1- www.iranmedar.com

2- www.aftab.ir

3- www.daneshnameh.roshd.ir

4- www.tebyan.net

5- www.ir.com

6- www.microchip.com

7- www.nanoclub.ir

Chapter 5

[1] Wanger, R. S.; Ellis, W. C. Appl. Phys. Lett. 1964, 4, 89.

[2] Morales, A. M.; Lieber, C. M. Science 1998, 279, 208.

[3] Wang, N.; Zhang, Y. F.; Tang, Y. H.; Lee, C. S.; Lee, S. T. Appl.

Phys.Lett.1998, 73, 3902.

[4] Wu, Z. H.; Mei, X. Y.; Kim, D.; Blumin, M.; Ruda, H. E. Appl.

Phys.Lett.2002,81,5177.

[5] Bjork, M. T.; Ohlsson, B. J.; Sass, T.; Persson, A. I.; Thelander, C.; .

Magnusson, M. H.; Deppert, K.; Wallenberg, L. R.; Samuelson, L.; Appl. Phys.

Lett. 2002, 80, 1058.

[6] Hochbaum, A. I., Fan, R.; He, R.; Yang, P. Nano Lett. 2005, 5, 457.

[7] Cui, Y.; Zhong, Z; Wang, D; Wang, W. U.; Lieber, C. M. Nano Lett. 2003, 3, 149.

[8] Jin, S.; Whang, D. M.; McAlpine, M. C.; Friedman, R. S.; Wu, Y.; Lieber, C. M.

Nano Lett. 2004, 4, 915.

- [9] Zheng, G. F.; Lu, W.; Jin, S.; Lieber, C. M. *Adv. Mater.* **2004**, *16*, 1890.
- [10] Wu, Y.; Cui, Y.; Huynh, L.; Barrelet, C. J.; Bell, D. C.; Lieber, C. M. *Nano Lett.* **2004**, *4*, 433.
- [11] *Colloids and colloid assemblies : synthesis, modification, organization, and utilization of colloid particles*; Caruso, F., Ed.; Wiley-VCH: Weinheim, Germany, **2004**.
- [12] Frens, G. *Nature Phys. Sci.* **1973**, *241*, 20.
- [13] Woodruff, J. H.; Ratchford, J. B.; Goldthorpe, I. A.; McIntyre, P. C.; Chidsey, C. E. D. *Nano Lett.* **2007**, *7*, 1637.
- [14] Adhikari, H.; Marshall, A. F.; Chidsey, C. E. D.; and, McIntyre, P. C. *Nano Lett.* **2006**, *6*, 318.
- [15] Greytak, A. B.; Lauhon, L. J.; Gudixsen, M. S.; Lieber, C. M. *Appl. Phys. Lett.* **2004**, *84*, 4176.
- [16] Lin, C. H.; Hsiao, C. Y.; Hung, C. H.; Lo, Y. R.; Lee, C. C.; Su, C. J.; Lin, H. C.; Ko, F. H.; Huang, T. Y.; Yang, Y. S. *Chem. Commun.* **2008**, 5749.
- [17] Yan, J. A.; Yang, L.; Chou, M. Y. *Phys. Rev. B* **2007**, *76*, 115319.

Chapter 6

- [1] Cui, Y.; Zhong, Z.; Wang, D.; Wang, W. U.; Lieber, C. M. *Nano Lett.* **2003**, *3*, 149. Colli, A.; Fasoli, A.; Beecher, P.; Servati, P.; Pisana, S.; Fu, Y.; Flewitt, A.
-

- J.; Milne, W. I.; Robertson, J.; Ducati, C.; De Franceschi, S.; Hofmann, S.; Ferrari, A. C. J. Appl. Phys. 2007, 102, 034302.**
- [2] **Tian, B.; Zheng, X.; Kempa, T. J.; Fang, Y.; Yu, N.; Yu, G.; Huang, J.; Lieber, C. M. Nature (London) 2007, 449, 885.**
- [3] **Lin, M. C.; Chu, C. J.; Tsai, L. C.; Lin, H. Y.; Wu, C. S.; Wu, T. P.; Wu, Y. N.; Shieh, D. B.; Su, Y. W.; Chen, C. D. Nano Lett. 2007, 7, 3656.**
- [4] **Yao, D.; Zhang, G.; Li, B. Nano Lett. 2008, 8, 4557.**
- [5] **Lin, H. C.; Su, C. J.; Hsiao, C. Y.; Yang, Y. S.; Huang, T. Y. Appl. Phys. Lett. 2007, 91, 202113. Appl.**
- [6] **Ng, M. F.; Zhou, L.; Yang, S. W.; Sim, L. Y.; Tan, V. B. C.; Wu, P. Phys. ReV. B2007, 76, 155435.**
- [7] **Aradi, B.; Ramos, L. E.; Deak, P.; Kohler, Th.; Bechstedt, F.; Zhang, R. Q.; Frauenheim, Th. Phys. ReV. B 2007, 76, 035305.**
- [8] **Vo, T.; Williamson, A. J.; Galli, G. Phys. ReV. B 2006, 74, 045116.**
- [9] **Singh, A. K.; Kumar, V.; Note, R.; Kawazoe, Y. Nano Lett. 2006, 6, 920.**
- [10] **Zhang, R. Q.; Lifshitz, Y.; Ma, D. D. D.; Zhao, Y. L.; Frauenheim, T.; Lee, S. T.; Tong, S. Y. J. Chem. Phys. 2005, 123, 144703.**
- [11] **Nolan, M.; O'Callaghan, S.; Fagas, G.; Greer, J. C.; Frauenheim, T. Nano Lett. 2007, 7, 34.**
- [12] **Leu, P. W.; Shan, B.; Cho, K. Phys. ReV. B 2006, 73, 195320.**
- [13] **Leao, C. R.; Fazzio, A.; da Silva, A. J. R. Nano Lett. 2007, 7, 1172.**
-

[14] Boland, J. J. Surf. Sci. 1992, 261, 17.

[15] Yan, J. A.; Yang, L.; Chou, M. Y. Phys. Rev. B 2007, 76, 115319.

[16] Xu, X. and Servati, P. Nano Lett. 2009, 9, 1999.

[17] Hong, K. H.; Kim, J.; Lee, S. H.; Shin, J. K. Nano Lett. 2008, 8, 1335.

[18] Leu, P. W.; Svizhenko, A.; Cho, K. Phys. Rev. B 2008, 77, 235305.
