

به نام خدا

ترانزیستور های نانو لوله ای

گردآوری

سید ابوالفضل احمدمیری

کلمات کلیدی

ترانزیستور، نانو لوله ای، *MOSFET*

چکیده

استفاده از ماسفت به خاطر رشدی بود که در کوچک کردن سایز تراشه داشت که در حال حاضر تقریباً به ۰/۱ میکرون رسیده است ولی به خاطر پدیدار شدن اثرهای کوانتومی محدودیت هایی در کاهش بیشتر سایز آنها به وجود آمده است. در همین راستا تحقیقاتی صورت گرفته است که به دادن روش های جدیدی برای ساختن ترانزیستورها در مقیاس های کوچک می پردازد



فصل اول

کلیاتی در مورد ترانزیستورهای نانولوله ای کربنی

۱. کلیاتی در مورد ترانزیستورهای نانولوله ای کربنی (CNFET):^۱

در چهل سال گذشته ماسفت اساس و پایه ی ساختن تراشه های الکترونیکی برای وسیله های محاسباتی بوده است. استفاده از ماسفت به خاطر رشدی بود که در کوچک کردن سایز تراشه داشت که در حال حاضر تقریباً به ۰/۱ میکرون رسیده است ولی به خاطر پدیدار شدن اثرهای کوانتومی محدودیت هایی در کاهش بیشتر سایز آنها به وجود آمده است. در همین راستا تحقیقاتی صورت گرفته است که به دادن روش های جدیدی برای ساختن ترانزیستورها در مقیاس های کوچک می پردازد که بعد آنها در حد چند ده نانومتر است که این برگرفته از علمی است که به آن نانو تکنولوژی می گویند. برخلاف ماسفت های امروزی که بر پایه ی حرکت توده ای از الکترون ها در ماده رفتار می کنند وسیله های جدید از پدیده های مکانیک کوانتومی در مقیاس نانو پیروی می کنند که دیگر طبیعت گسسته الکترون در آن قابل چشم پوشی نیست.

این وسیله ها چگونه هستند؟ عملکرد آنها چگونه است؟ سوال هایی است که قبل از هر چیز مطرح می شود. در پاسخ به این سوالات وسیله ها را به این سه قسمت تقسیم می کنیم.

۱. ترانزیستورهای نانولوله ای کربنی

۲. وسیله های تک الکترونی

۳. وسیله های الکترونیک مولکولی

وسيله ی اولی که موضوع بحث ما می باشد و بعداً به صورت مشروحی به آن خواهیم پرداخت شبیه به ماسفت های امروزی می باشد که تفاوت آنها در ابعاد ماده ای است که از آن ساخته می شوند. در حالی که وسیله های دومی و سومی هر دو از اثرهای کوانتومی بهره می گیرند و در ساخت هم کاملاً با ماسفت متفاوت هستند. برای درک بهتر در قسمت بعدی قبل از اینکه به توضیح در مورد ترانزیستورهای نانولوله ای کربنی بپردازیم به شرح مختصری از عملکرد ماسفت و مشکلات پیش روی آن می پردازیم.

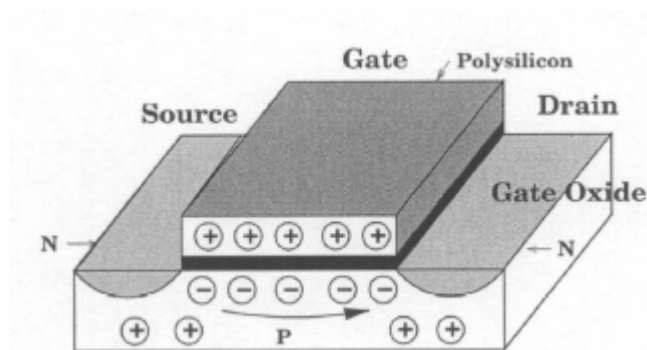
¹ Carbon Nanotube Field Effect Transistors

۱-۱. ماسفت در مقیاس نانو

در مدار های دیجیتال ترانزیستور همانند یک سوئیچ عمل می کند که شدت جریان عبوری از کانال آن باتوجه به حالت ترمینال گیت کنترل می شود که شرایطی را ایجاد می کند که یا وسیله روشن است (جریان از کانال عبور می کند) یا وسیله خاموش است (جریان از کانال عبور نمی - کند). اگر برای کنترل جریان کانال از جریان گیت استفاده شود ترانزیستور یک ترانزیستور دوقطبی است و اگر از ولتاژ گیت برای کنترل جریان استفاده شود آن گاه یک ترانزیستور اثر میدانی می باشد که به طور عمده در مدارهای امروزی مورد استفاده قرار می گیرد در این قسمت اصول کاری وسیله را برای بررسی مشکلات کوچک کردن ماسفت به کمتر از 0.1 میکرون را بیان می کنیم.

۱-۱-۱. ساختار و عملکرد ماسفت

ماسفت یک وسیله ی سه ترمیناله است با ترمینال های سورس و درین و گیت که ساختار آن در شکل (۱) نشان داده شده است . ماسفت روی یک لایه ی کریستالی از سیلیکون ساخته شده است . سیلیکون خالص یک هادی ضعیف است پس برای بالا بردن هدایت آن ناخالصی هایی در آن تزویج می شود همانند بور یا آرسنیک که یک سری بارهای مثبت یا منفی اضافی در سیلیکون ایجاد می کنند. که در حالت تزویجی نوع n شامل الکترون های اضافی و تزویجی نوع p شامل حفره های اضافی می باشد همانگونه که در شکل (۱) نشان داده شده است یک ماسفت نوع n یک کانال نوع n بین ناحیه ی سورس و درین که خیلی زیاد دوپینگ شده اند ایجاد می کند . ورودی گیت به صورت یک الکتروود فلزی که از کانال توسط یک عایق اکسیدی جدا شده است نشان داده می شود با تغییر ولتاژ گیت میدان الکتریکی کانال تغییر می کند در نتیجه باعث تغییر حامل ها در کانال و در نهایت تغییر شار جریان عبوری از کانال می شود .



شکل (۱)

وقتی که ولتاژ گیت پایین می آید کانال شامل حامل بارهای منفی کمی می شود و جریان کمی جاری خواهد شد و اگر ولتاژ گیت بالا رود حامل های زیادتری به ناحیه ی زیرین گیت جذب می شوند و کانال به صورت ازاد هدایت می کند پس ماسفت به صورت یک وسیله ی دوحالته بین روشن و خاموش عمل می کند . تکنولوژی مدارهای مجتمع درسه دهه ی گذشته مبتنی بر اصول ساده مقیاس بندی پیشرفت بالایی داشت ماسفت ها می توانستند در ابعاد کوچکتری از طول و عرض سیم ها و ترانزیستورها ساخته شوند بر اساس پارامتری که آن را سایز ویژه مدار می نامند . سایز ویژه عرض هادی (سیم) که روی تراشه ساخته می شود است . سایز ویژه به صورت پیوسته در طول چند دهه کاهش یافته است و متناسب با آن طول و عرض سیم ها و ترانزیستورهای مدار کاهش یافته است . به خاطر رقابت گروه های صنعتی- تحقیقی زیادی می خواهند که سایز ویژه را بیش از این کاهش دهند و تکنولوژی ساخت ماسفت که *CMOS* می باشد را گسترش دهند که این تکنولوژی تکیه گاه اصلی صنعت در چند دهه ی اخیر بوده است و روی آن سرمایه گذاری زیادی شده است . ولی ساخت ترانزیستورهایی مثلاً با سایز ویژه $n = 25$ مشکلاتی را به همراه داشته است که در زیر به بیان آن ها می پردازیم.

۱-۱-۲. مشکلات ماسفت

۱- میدان های الکتریکی بالا : ولتاژ منبع با کاهش طول کانال نمی تواند کم شود (در زیر توضیح داده شده است) و به خاطر همین مقیاس کم طول کانال شدت میدان الکتریکی در سرتاسر کانال افزایش می یابد . برای وسیله ای به طور مثال با طول $0.1 \mu m$ میدان اکسید به 1 Mv/cm خواهد رسید و میدان در سلیسیوم از 5 Mv/cm تجاوز خواهد کرد . این میدان ها با کم شدن طول کانال در ابعاد نانو خیلی افزایش می یابد . این میدان های بزرگ دو پیامد مخرب را به همراه دارد اول اینکه جریان های نشتی بالایی را تولید می کند که باعث تنزل پیدا کردن وسیله خواهد شد و دوم اینکه در بدترین حالت باعث شکست بهمنی می شود که می تواند موج جریان بزرگی را تولید کند که به وسیله زیان برساند.

۲ - ولتاژ آستانه و منبع: همان طور که از قبل دیدیم ما مایلیم که با کاهش مقیاس ماسفت ولتاژ گیت را نیز کاهش دهیم تا میدان های بزرگی ایجاد نکند. ولی نمی توان ولتاژ آستانه را خیلی پایین در نظر گرفت علت آن مصرف توان حالت ساکن است یعنی توانی که توسط وسیله در حالت دائمی مصرف می شود زیرا دیگر در این حالت جریان به طور کامل قطع نمی شود و ایجاد یک جریان نشتی می کند . توان عمده ای که در این حالت مصرف می شود به علت جریان نشتی است که از میان وسیله عبور می

کند. برای کاهش دادن آن ولتاژ آستانه را باید بالا نگه داشت که باز هم تاوان زیادی را در پی دارد که علاوه بر میدان های بالا که گفته شد حالت نامشخصی است که برای وسیله ایجاد می شود هنگامیکه نه روشن است و نه خاموش. گذشته از این ها نویز مارجین و اثرات القایی نا مطلوبی را در پی خواهد داشت که همه ی این ها اندازه ی ولتاژ را به یک مشکل بحرانی تبدیل می کند.

۳- تاخیرهای به هم پیوستن: کاهش عرض سیم باعث افزایش مقاومت شده و از این رو تاخیر را افزایش می دهد. به هم پیوستن این تاخیرها باعث می شود که در کل به صورت فوق العاده ای در مقایسه با تاخیرهای گیت تاخیرهای ما زیاده تر شود. می دانیم که هدف از مقیاس بندی فقط افزایش چگالی تراشه نیست بلکه برای افزایش سرعت نیز می باشد ولی در این شرایط وسیله با اینکه کوچکتر شده است ولی نمی تواند سریعتر عمل کند.

۴- اتلاف گرما: ترانزیستورها انرژی هایشان را در بخش های مقاومتی به صورت گرما تلف می کنند که اگر این گرما به صورت صحیحی از هم پاشیده نشود می تواند حالت *hot stop* را به وجود آورد که در این حالت ماده زیاد گرم شده و وسیله بد عمل می کند یا حتی آسیب می بیند.

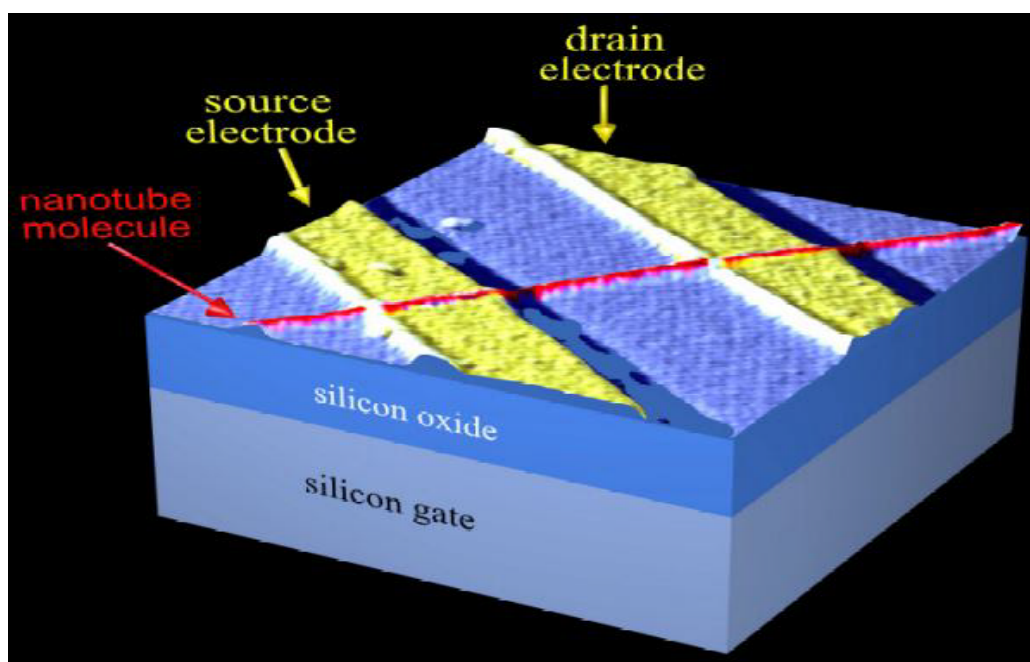
۵- انقباض لایه های اکسید گیت: برای یک وسیله باتکنولوژی *CMOS* با $0.1 \mu m$ میکرون و $1.5V$ به یک ضخامت 30 \AA نیاز است که این تقریباً برابر است با ده لایه از اتم های سیلیکون. با چنین لایه اکسید نازکی تونل مکانیک کوانتومی رخ می دهد و این موجب نشتی از میان گیت می شود و به همین خاطر کاهش دادن ضخامت اکسید گیت از مقداری معین امکان پذیر نمی باشد. مانعی که ذکر شد به علت روش های دوپینگ ناکارآمد و شروع اثر های کوانتومی بود.

صنعت تلاش می کند که وسیله ای بسازد که اثر های کوانتومی را محاسبه می کند که نظراتی همچون سیلیکون روی عایق با استفاده از *sic* به جای سیلیسیوم متعارف برای ساخت ماسفت.

۱-۲. ترانزیستورهای نانولوله ای کربنی

یک ترانزیستور نانولوله ای کربنی شبیه به یک ماسفت است که در آن از گیت برای کنترل شار جریان با تغییر دادن میدان داخل کانال استفاده می کند ابداعی که در این روش هست مکانیزمی است که برای انتقال الکترون از سورس به درین به کار برده می شود و همچنین میدان در آن کانال باید توسط الکتروود گیت کنترل شود. این وسیله ها دارای ساختار لوله مانندی هستند که به عنوان نانولوله ای کربنی شناخته شده است به جای کانال که در ماسفت استفاده می شود همان طور که در شکل (۲)

می بینید. این نوع ترانزیستورها در مقایسه با ماسفت های سیلیکونی خیلی کوچک ترند. این بخش در مورد پایه و اساس فیزیکی یک نانولوله ی کربنی (CN)^۱ توضیح خواهیم داد و نقش آن را در یک ترانزیستور نانولوله ای کربنی.



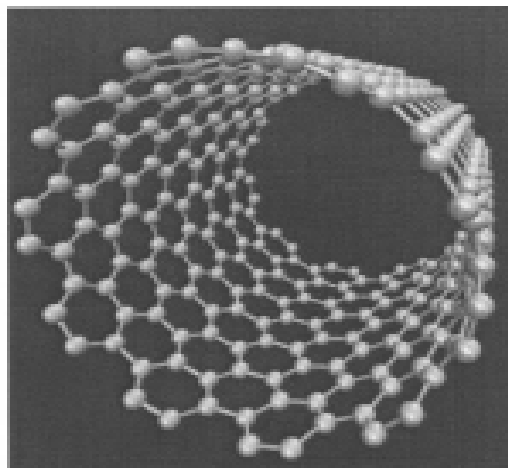
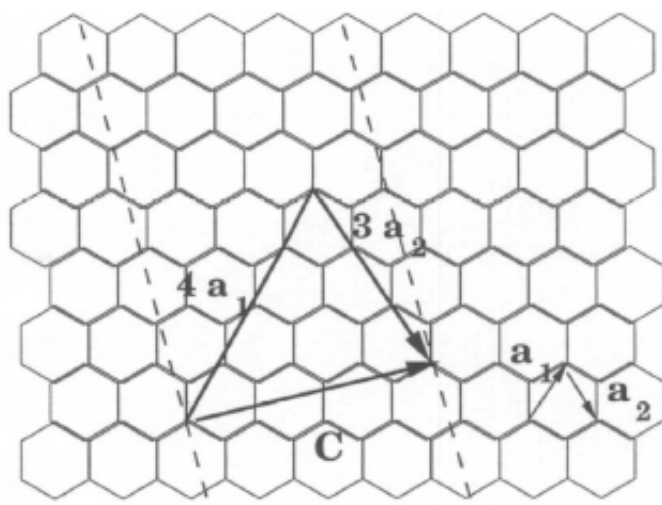
شکل (۲)

۱-۲-۱. پایه فیزیکی نانولوله ی کربنی

یک نانولوله کربنی یک صفحه ی جمع کرده استوانه ای است که از یک تک لایه اتم های گرافیت که به صورت شش گوش مرتب شده اند تشکیل شده است ساختار آن در شکل (۳) نشان داده شده است. به طور کلی این شبکه می تواند به صورت شش گوشه ای یا پنج گوشه ای وجود داشته باشد که ساختار شش گوشه ای قدرت کشش بیشتر و خاصیت ارتجاعی بزرگتری را به ما می دهد. نانولوله ها محکم هستند و هنگامیکه خم یا فشرده می شوند به حالت ابتدایی خود جهش می یابند. این نانولوله های کربنی گرما را به صورت موثری انتقال می دهند از این رو در مدارها چون می توانند سریع خنک کنند مفید می باشند. خاصیت هدایت الکتریکی آن ها تقریباً منحصر بفرد است ضمناً اولین نانولوله کربنی در اوایل سال ۱۹۹۰ به وجود آمد و انرژی گپ آن ها شدیداً به قطر دایره اش بستگی دارد یعنی $E_g = 1/d$. آن ها به صورت فلز یا نیمه هادی وابسته به اینکه چگونه ترسیم شوند وجود دارند. ما بخش های اساسی مفید ولی کم از نانولوله ها را که در فهم آن ها به ما کمک می کرد را بیان کردیم.

^۱ Carbon Nanotube

نانولوله ی باز کرده در شکل (۳) را که نشان داده است رادر نظر بگیرید دو بردار سلول واحد a_1 و a_2 تعریف شده اند.



شکل (۳)

بردار دیگری در شکل نشان داده شده است که به بردار کایرال^۱ معروف است که بیانگر برداری است که از یک انتهای لوله به طرف دیگر در جهتی که لوله پیچیده شده است که طبق رابطه ی زیر نشان داده شده است. $\vec{C} = n\vec{a}_1 + m\vec{a}_2$ که (n, m) اعداد صحیحی هستند که نانولوله را توصیف می کنند به صورت نانولوله. برای مثال نانولوله ی نشان داده شده در شکل (۳) یک نانولوله ی $(4, 3)$ می باشد اگر در طول بردار C نشان داده شده پیچیده شود.

برای تشخیص بین نانولوله های فلزی و نیمه هادی از یک قاعده ساده استفاده می کنیم. اگر $n-m$ بر ۳ تقسیم پذیر باشد پس نانولوله فلزی است و اگر $n-m$ بر ۳ تقسیم پذیر نباشد پس نانولوله یک نیمه هادی است. نانولوله ها به صورت تک دیواره ای $(SWNT)$ یا اینکه $(MWNT)$ چند دیواره ای ساخته می شوند. نانولوله های چند دیواره ای شامل نانولوله های تک دیواره ای هستند که به روی هم پیچیده شده اند و هر دو نوع آن ها برای ساختن ترانزیستورهای نانولوله ای کربنی استفاده می شود.

¹ Chiral

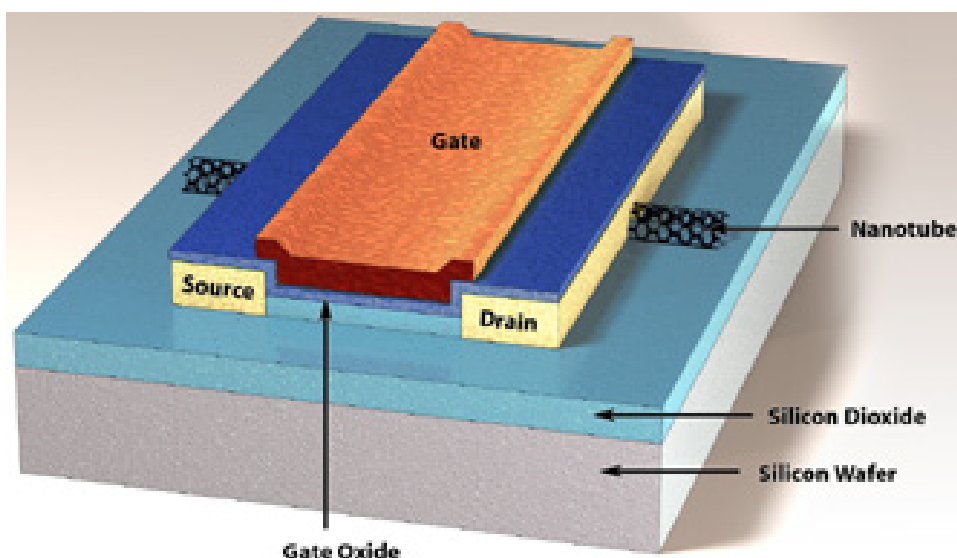
² Single Wall Nano Tube

³ Multie Wall Nano Tube

۱-۲-۲. اساس ترانزیستورهای نانولوله ای کربنی

به ظاهر یک ترانزیستورهای نانولوله ای کربنی شبیه به ماسفت است به طوری که هر دو از سه بخش سورس و درین و گیت تشکیل شده است اما در ترانزیستورهای نانولوله ای کربنی یک نانولوله ی کربنی بین سورس و درین به عنوان کانال استفاده شده است. گیت میدان سرتاسر نانولوله را کنترل می کند و این میدان موجب تغییر چگالی حامل ها روی سطح نانولوله شده بدین وسیله جریان جاری شده از سورس به درین را کنترل می کند. ترانزیستورهای نانولوله ای کربنی تولید شده اولیه از الکترودهای طلائی ساخته می شدند و گیت قرار می گرفت در هر دو گوشه یا زیر نانولوله که توسط یک لایه عایق از گیت جدا می شد. مشکل این نوع طراحی این بود که نانو لوله در معرض هوا قرار می گرفت و خاصیتی را ایجاد می کرد (که در پاراگراف بعد می بینیم) که لوله می توانست فقط به عنوان یک ترانزیستور نوع p عمل کند و همچنین اکسید گیت هم ضخیم می شد تا بتواند عایق را بوجود آورد که این مانعی بود برای کاهش سائز. نانولوله کربنی به صورت طبیعی هنگامیکه در معرض هوا قرار می گیرند از نوع p می باشند. این بدان علت است که با ترکیب اکسیژن در هوا سطح انرژی فرمی در محل تماس را به نزدیکی باند والانس شیفتمی دهد. این خود باعث می شود که حفره ها یک سد کوچکتري نسبت به الکترون ها ببینند و بدین علت در میان وسیله سریعتر از الکترون قادر به حرکت هستند.

ترانزیستورهای نانولوله ای کربنی نسل دوم پیشرفت مهمی داشته و همان طور که در شکل (۴) نشان داده شده است گیت در بالای لوله قرار داده شده است و این خود نانولوله را از تماس هوا عایق بندی می کند و ظرفیت خازنی را هم روی هم رفته کاهش می دهد. برای طراحی مدارهای مجتمع ما به ماسفت های نوع n و p همراه هم نیاز داریم. این عمل به دو طریق انجام می شود گداختگی و دوپینگ. گداختگی فرایندی از گرم کردن نانولوله تا دمای $450^{\circ}C$ در محیط نیتروژن و برای چند ثانیه می باشد. این فرایند باعث رانده شدن اکسیژن جذب شده توسط نانولوله می شود و بنابراین سطح انرژی فرمی را به طرف باند هدایت شیفتمی دهد و در نتیجه سد دیده شده توسط الکترون ها کاهش می یابد پس الکترون ها به صورت آزادتری نسبت به حفره ها هدایت می کنند و نانولوله به صورت یک وسیله نوع n رفتار می کند.



شکل (۴)

روش دیگر برای تبدیل یک نانولوله ی نوع p به n دوپینگ می باشد . در این حالت نانولوله با یک الکترون دهنده همانند پتاسیم دوپینگ می شود . الکترون های اضافه شده قدرت سد را کاهش می دهند و موجب می شود که الکترون ها بتوانند از میان سد تونل زده و وسیله به صورت یک نوع n عمل کند. اگر چه ما در تبدیل نوع p به نوع n موفق شدیم ولی در معرض هوا قرار گرفتن نانولوله باعث می شود که نانولوله دوباره به نوع p باز گردانده شود . از این لحاظ ضروری است که نانولوله ها پوشیده شوند تا در نوع n باقی بمانند و این هست دلیلی که چرا ترانزیستورهای نانولوله ای کربنی نسل دوم بیشتر مفید هستند که در فصل دوم این تبدیل ها را با نمایش سطوح انرژی هایشان به صورت مشروح توضیح خواهیم داد.

۱-۲-۳. ساخت

ترانزیستورهای نانولوله ای کربنی رویایی بودند که در آزمایشگاه ده سال قبل ساخته شدند اما مانع واقعی که بر سر راه بود نداشتن تکنولوژی قادر به مجتمع سازی مدارها باشد . مشکل این بود که نانولوله ها به طور خودکار در موقعیت صحیح قرار نمی گرفتند و این که نانولوله های قرار گرفته شده در موقعیت صحیح فلز یا نیمه هادی می باشد؟ تا اینکه در شرکت *IBM* با یک روشی که تخریب مفید نامیده می شود این مشکل را بر طرف کرد . در این روش نانولوله های چند دیواره ای با نانولوله های فلزی و نیمه هادی روی هم پیچیده می شوند و اگر یک نانولوله فلزی نیاز باشد با روش هایی شیمیایی

نوع نیمه هادی تخریب می شود در این روش نوع و موقعیت نانولوله ها در مدار برای مدت طولانی باقی نمی ماند.

فصل دوم

انواع ترانزیستورهای نانولوله ای کربنی (نوع n و p و دو قطبی) و نمایش سطوح انرژی آن ها

۲. انواع ترانزیستورهای نانولوله ای کربنی (نوع n و p و دو قطبی) و نمایش سطوح

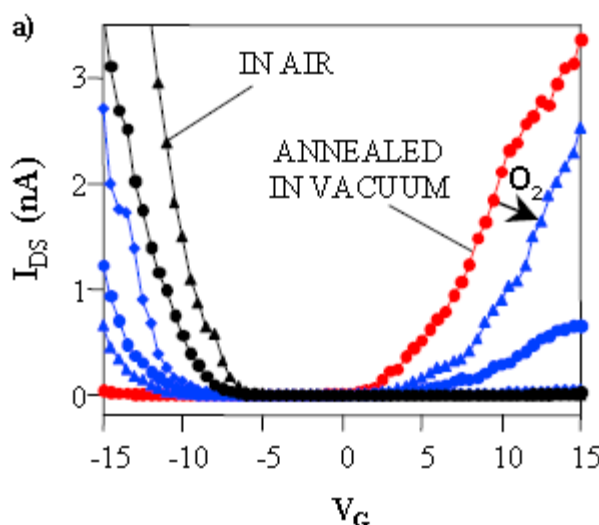
انرژی آن ها

همان طور که در فصل قبل توضیح دادیم یک ترانزیستور نانولوله ای کربنی از دو نوع گیت--پایین و گیت--بالا تشکیل شده است که ما در اینجا نوع گیت پایین آن را در حالت های مختلف بررسی خواهیم کرد. چنان که در فصل قبل هم گفتیم یک ترانزیستور نانولوله ای کربنی وقتی که در تماس با هوا قرار بگیرد به خاطر ترکیب نانولوله با اکسیژن سطح انرژی فرمی آن به باند والانس نزدیک شده و به کانال نوع p تبدیل می گردد و فقط در این حالت حفره ها می توانند روی سطح نانولوله هدایت پیدا کنند.

ما برای ساختن یک مدار مجتمع به هر دو نوع n و p نیاز داریم پس باید به دنبال روش هایی بود که بتوانیم نوع n یک ترانزیستور نانولوله ای کربنی را بسازیم. روش هایی که تا به حال پیشنهاد شده که توضیح مختصری از آن در فصل قبل داده شد. ۱- گداختگی ۲- افزایش ناخالصی می باشد. که در زیر بخش های این فصل به توضیحاتی در مورد آن ها و چگونگی تغییر سطوح انرژی هایشان می پردازیم

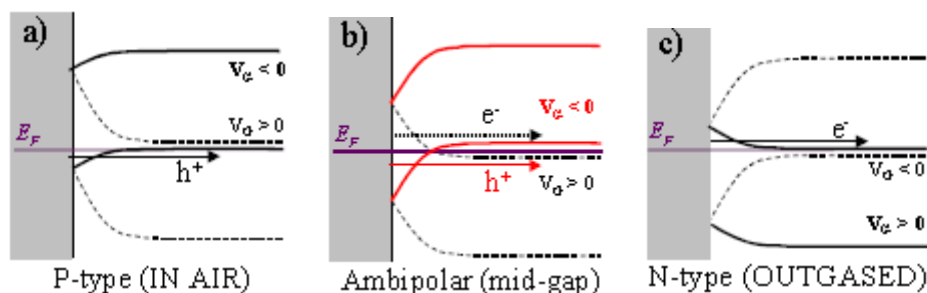
۲-۱. گداختگی و ترانزیستورهای نانولوله ای کربنی (n و p و دو قطبی)

با گرم کردن نانولوله در دمای $450^{\circ}C$ در فضای نیتروژن باعث می شویم که اکسیژن های جذب شده توسط نانولوله از آن خارج شده واز نوع p به نوع n تبدیل شود که این تبدیل یک تبدیل برگشت پذیر است و نانولوله می تواند با گرفتن اکسیژن به نوع p باز گردانده شود این تبدیل و بازگشت آن در شکل (۵) نشان داده شده است.



شکل (۵)

همان طور که ملاحظه می کنید در ابتدا نانولوله از نوع p بوده و نمودارهای مشکی نشان دهنده ی رابطه ی بین جریان درین و ولتاژ گیت - سورس می باشد که مشابه به همین نمودار برای ماسفت نوع p می باشد و حفره ها فقط در V_G کمتر از صفر باعث ایجاد جریان شده و ترانزیستور وصل می شود. با گداخته شدن به نمودار قرمز رنگ تبدیل می شود که مشابه ماسفت نوع n است که بیانگر این است که در V_G بزرگتر از صفر ترانزیستور وصل شده و هدایت می کند و فقط الکترون ها در این حالت عامل هدایت می باشند. نمودارهای ابی رنگ بیانگر حالتی مابین نوع p و n است و وقتی این حالت اتفاق می افتد که نانولوله از نوع n به نوع p با گرفتن دوباره اکسیژن در حال تبدیل است در این حالت هم الکترون ها و هم حفره ها می توانند به عنوان حامل استفاده شوند که در ولتاژهای گیت منفی حفره ها و در ولتاژهای گیت بزرگتر از صفر الکترون ها به عنوان حامل عمل می کنند. که در این حالت به ترانزیستورهای نانولوله ای کربنی دو قطبی تبدیل می شود.



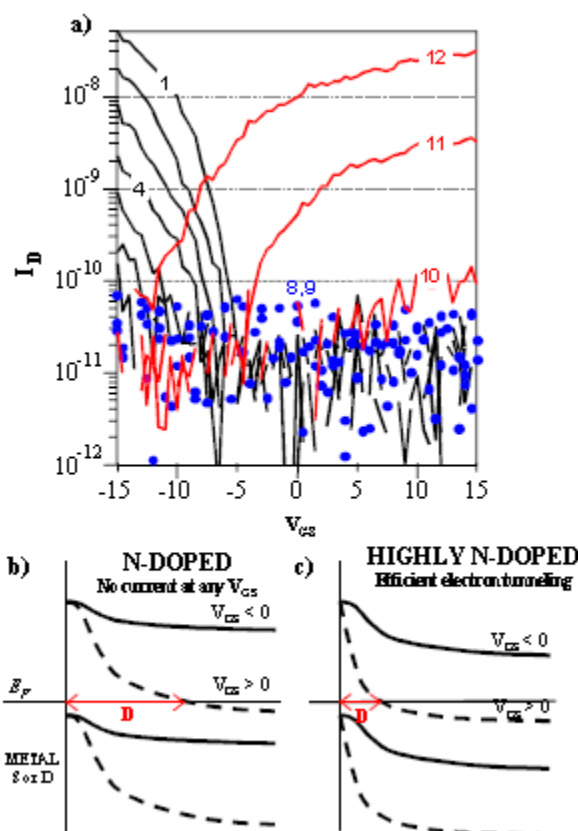
شکل (۶)

برای توضیح چگونگی تغییر سطوح انرژی آن به این نکته باید اشاره کرد که وقتی نانولوله ای به فلز متصل می شود در محل تماس آن ها یک سد شاتکی ایجاد می شود که تغییرات آن را در هر سه نوع ترانزیستور در زیر توضیح می دهیم. همان طور که در شکل (۶-a) می بینید برای ترانزیستور نوع p وقتی که ولتاژ گیت مقدار منفی داشته باشد باعث حرکت حفره به روی سطح نانولوله شده و همان گونه که در شکل هم می بینید ارتفاع برای حفره کم است و حفره ها می توانند از سد به راحتی عبور کنند. اما در حالتی که ولتاژ گیت مثبت باشد باعث ایجاد میدان در سطح نانولوله شده که حفره ها روی سطح نانولوله از بین رفته و دیگر هدایتی نخواهیم داشت. تغییرات ترانزیستورهای نوع n در شکل (۶-b) نشان داده شده است در این ترانزیستور فقط الکترون ها وجود دارند و ولتاژهای گیت بزرگتر از صفر به

سطح نانولوله آمده و سد کوچکی را مطابق شکل پیش رو دارند که به راحتی از آن عبور کرده و هدایت می کنند ولی در ولتاژهای گیت منفی الکترون ها روی سطح از بین رفته و ترانزیستور قطع می شود در حالت میانی یعنی ترانزیستور دو قطبی نانولوله شامل هم الکترون و هم حفره است و مطابق شکل (c-6) با ولتاژهای گیت بزرگتر از صفر ارتفاع سد برای الکترون ها کم و موجب هدایت الکترون ها می شود مثل یک ترانزیستور نوع n و در حالت ولتاژ منفی حفره ها هدایت می کند پس آن را دو قطبی می نامند.

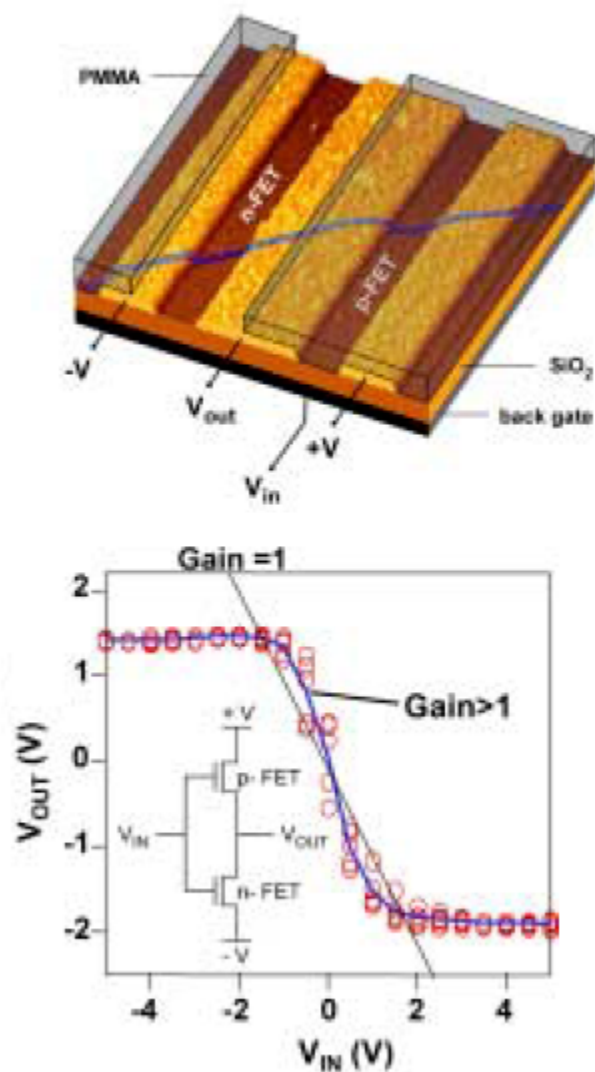
۲-۲. افزایش ناخالصی و ترانزیستورهای نانولوله ای کربنی (p و n)

همانطور که در بخش قبل دیدیم افزایش اکسیژن به نانولوله باعث ترکیب آن با نانولوله شده و این موجب تغییر سطح فرمی نانولوله و دوپینگ حفره ها در نانولوله شد که در روش قبل از گداختگی و در اینجا از افزایش ناخالصی برای تبدیل نوع n به p استفاده می کنیم . در این روش ما یک اتم دهنده را مانند پتاسیم به نانولوله اضافه می کنیم (نه ترکیب مثل اکسیژن) و این افزایش ناخالصی باعث افزایش الکترون ها روی سطح نانولوله می شود و در این حالت بر عکس حالت قبل (گداختگی) دیگر ارتفاع سد شاتکی باگداختگی برای الکترون ها کاهش پیدا نمی کند بلکه در این حالت عرض سد پتانسیل کاهش می یابد و باعث عمل تونل زنی از بین سد خواهد شد. این تبدیل را در شکل (c-7) مشاهده خواهیم کرد و می بینیم که دیگر در اینجا از حالت دو قطبی خبری نیست زیرا پروسه افزایش ناخالصی اضافه کردن به جرم نانولوله است و در حالت گداختگی ترکیب اکسیژن با نانولوله است و این دو پروسه کاملاً متفاوت است . دو تفاوت بین این دو حالت وجود دارد. ۱- در پتاسیم دوپینگ شده به نانولوله ولتاژ آستانه (V_T) به سمت ولتاژ منفی میل می کند که این شیفیت در آزمایش گداختگی دیده نمی شود (به شکل (a-7) توجه شود) ۲- نبود مرحله ی میانی در روش افزایش ناخالصی که توضیح داده شد (به شکل (a-7) توجه شود) . اما برای بررسی سطوح انرژی به شکل (b-7) توجه کنید که همانگونه که گفتیم سد شاتکی دیگر تغییر نمی کند و فقط با افزایش ناخالصی عرض آن کمتر شده و در ولتاژهای گیت مثبت عمل تونل زنی و هدایت انجام می شود .



شکل (۷): نمودار قرمز با افزایش ناخالصی و مشکی بدون ناخالصی و ای دو قطبی

در اینجا ما این دو روش را برای ساختن ترانزیستور نوع n یاد گرفتیم و حال یکی از کاربردهای آن را مورد بررسی قرار می دهیم . در کل ما می خواهیم که یک مدار مجتمع را با استفاده از این ترانزیستور ها بسازیم و برای ساخت مدارهای مجتمع هم به ترانزیستورهای نوع n و p احتیاج داریم و چگونگی ارتباط دهی آنها . یک مثال ساده که در شکل (۸) نشان داده شده است یک گیت NOT است که با در کنار هم قرار دادن یک ترانزیستور نوع p و n آن را به وجود آورده ایم و اجرایی شدن آن را در شکل (۸) می توانیم مشاهده کنیم در بالای این شکل یک نانولوله ی کربنی تک دیواره ای روی الکترودهای طلایی گذاشته شده است . در ابتدا هر وسیله با یک غشای پلیمری $PMMA$ می پوشانیم سپس پنجره ای در $PMMA$ با استفاده از لیتوگرافی باز می کنیم و در اخر پتاسیم را به آن دوپینگ می کنیم تا بتوانیم نانولوله ای که توسط $PMMA$ محافظت نشده را به نوع n تبدیل کنیم در حالیکه قسمتی که با $PMMA$ پوشانده شده است در حالت p باقی می ماند و این ساختار یک گیت NOT را به وجود می آورد.



شکل (۸)

همانگونه که در قبل توضیح داده شد نانولوله های نوع n پس از ترکیب مجدد با اکسیژن به حالت نوع p بر می گردند که برای جلوگیری از این کار یک هندسه ی جدید برای ترانزیستورها پیشنهاد می شود که در شکل (۴) آن را دیدیم در این حالت گیت در بالای نانولوله قرار دارد و مانع از ترکیب مجدد آن با اکسیژن می شود.

فصل سوم

ترانزیستور نانو لوله ای با طراحی جدید و قطبیت تنظیم پذیر

۳. ترانزیستور نانو لوله ای با طراحی جدید و قطبیت تنظیم پذیر

در این فصل با یک ترانزیستور نانولوله ای با هندسه ی جدیدی آشنا میشویم که قطبیت آن ها را توسط ایجاد میدان های الکترواستاتیکی و دو پینگ شیمیایی تنظیم می کنیم که این طراحی کوچکترین شیب معکوس گزارش شده را دارست که این با ترکیب حالت الکترواستاتیکی و دوپینگ شیمیایی به وجود می آید که به طور مفصل در زیر توضیح خواهیم داد.

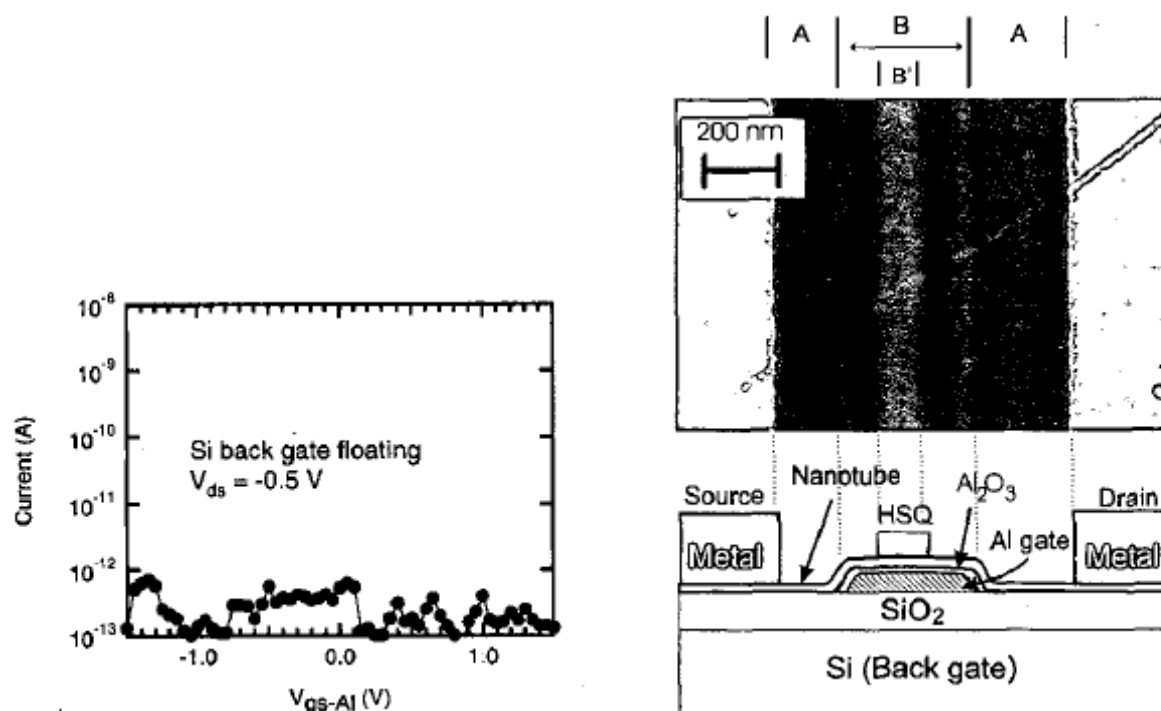
۳-۱. ترانزیستور نانو لوله ای دو گیتی

در این جا یک ترانزیستور نانو لوله ای را در نظر می گیریم که نانو لوله ی آن خاصیت دو قطبی را برای ترانزیستور ایجاد می کند که این رفتار دو قطبی را در شکل (۵) دیدیم که قبلا در مورد آن توضیح دادیم. در طراحی مدارهای مجتمع این نوع ترانزیستور های دو قطبی استفاده ای ندارند و ما مایل هستیم که آن ها را به نوع n یا p خالص تبدیل کنیم که در اینجا این کار را، هندسه جدیدی که در شکل (۹) نشان داده شده است انجام می دهد که تفاوت آن با یک ترانزیستوری با گیت پایین در آن است که از دو گیت تشکیل شده است که یک گیت اضافی (AL) در زیر نانولوله بین محل تماس بین درین و سورس قرار داده شده است. در این طراحی گیت ورودی ما گیت AL هست که میدان های الکتریکی در طول B از نانولوله را که در شکل نشان داده شده، کنترل می کند و عمل سوئیچینگ را انجام می دهد. در حالی که سد های شاتکی بین فلز و نانو لوله توسط گیت سیلیسیوم کنترل می شود. لایه ی HSQ که روی نانو لوله قرار داده شده در ناحیه B' به خاطر جلوگیری از در معرض قرار گرفتن نانو لوله از اثر دوپینگ شیمیایی می باشد که استفاده ی آن را در بخش های بعدی توضیح خواهیم داد.

۳-۱-۱. اثر میدان های گیت AL

میدان های ایجاد شده توسط گیت AL روی ارتفاع سد های شاتکی در محل تماس نانولوله و فلز تاثیر نمی گذارد و برای نشان دادن آن به شکل (۱۰) توجه کنید که در این شکل جریان اندازه گیری شده بر حسب V_{gs-AL} هنگامیکه ولتاژ گیت si (V_{gs-si}) شناور است نشان داده شده است که به راحتی می توان فهمید که وسیله ما همیشه خاموش است. با جریان در سطح نويز که این استقلال سد شاتکی

را از ولتاژ گیت-سورس نشان می دهد که این نتیجه بعداً مشخص می کند که ترانزیستور ها به صورت یک ترانزیستور *bulk switch* می تواند عمل کند.

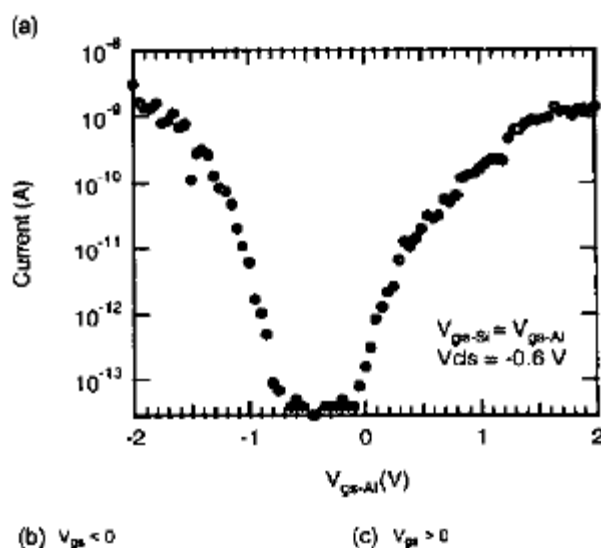


شکل (۱۰)

شکل (۹)

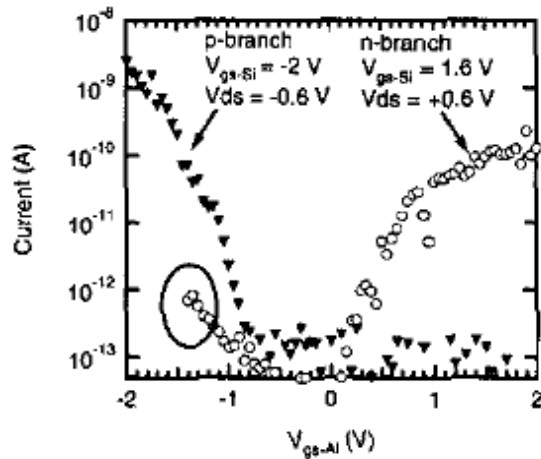
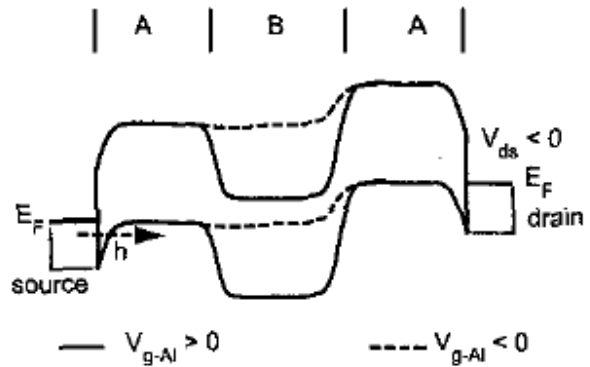
۳-۱-۲. بررسی اثر های میدان های الکتریکی

در اینجا ما برای حذف کردن خاصیت دوقطبی ترانزیستور از اثر های میدان الکتریکی (خاصیت های الکترواستاتیکی) استفاده می کنیم تا یک ترانزیستوری با قطبیت تنظیم پذیر را بدست آوریم. در ابتدا تغییرات جریان ترانزیستور را در هنگامیکه ولتاژ گیت ها با هم برابر هستند ($V_{gs-AL} = V_{gs-si}$) را بر حسب این ولتاژ ها در شکل (۱۱) مشاهده می کنیم که کاملاً مشابه به خاصیت یک ترانزیستور گیت-پایین دوقطبی است که ساختار باند های آن در شکل (۶) نشان داده شده است که چگونگی تغییرات آن در فصل قبل توضیح داده شد.

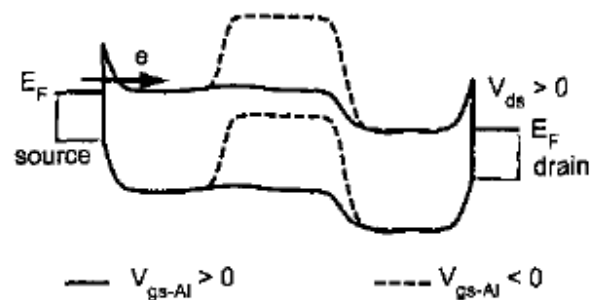


شکل (۱۱)

در این طراحی جدید ما برای تک جهت کردن قطبیت از این تکنیک استفاده می کنیم که برای $V_{gs-si} < 0$ ترانزیستور حالت نوع p را به خود می گیرد و در این حالت فقط حفره ها باعث هدایت می شوند. پس V_{gs-si} را همیشه در حالت منفی قرار دهیم ما توانستیم که ترانزیستور را به یک وسیله تک قطبی تبدیل کنیم ولی مشکلی که در اینجاست چگونگی کنترل جریان توسط ولتاژ گیت است که در این طراحی ولتاژ گیت ورودی را به گیت AL وصل می کنیم و جریان را کنترل می کنیم تغییرات باند انرژی این تکنیک در شکل (۱۲) نشان داده شده است و همان طور برای نوع n که با قرار دادن همیشگی $V_{gs-si} > 0$ ترانزیستور را تک قطبی نوع n تبدیل کرده و جریان آن توسط ولتاژ گیت AL که تاثیری هم روی سد شاتکی ندارد کنترل می شود و این را می توان به صورت تغییرات سطح پله وسطی کنترل کرد. نمودار نشان داده شده در شکل (۱۳) رابطه جریان بر حسب ولتاژ گیت AL را در دو حالت $V_{gs-si} = -2, 1.6$ نشان می دهد که نشان دهنده ی تک قطبی نوع p و n به ترتیب می باشد که این اولین کنترل قطبیت ترانزیستور های نانو لوله ای کربنی با استفاده از خاصیت الکترواستاتیکی گیت می باشد.

(a) $V_{gs-Si} < 0$ (p/i/p)

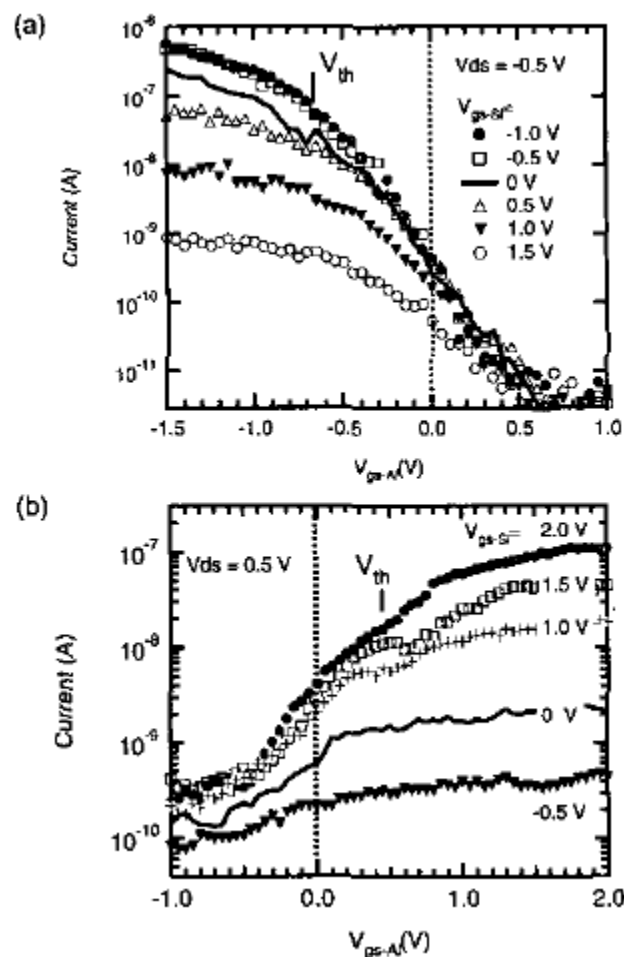
شکل (۱۳)

(b) $V_{gs-Si} > 0$ (n/i/n)

شکل (۱۲)

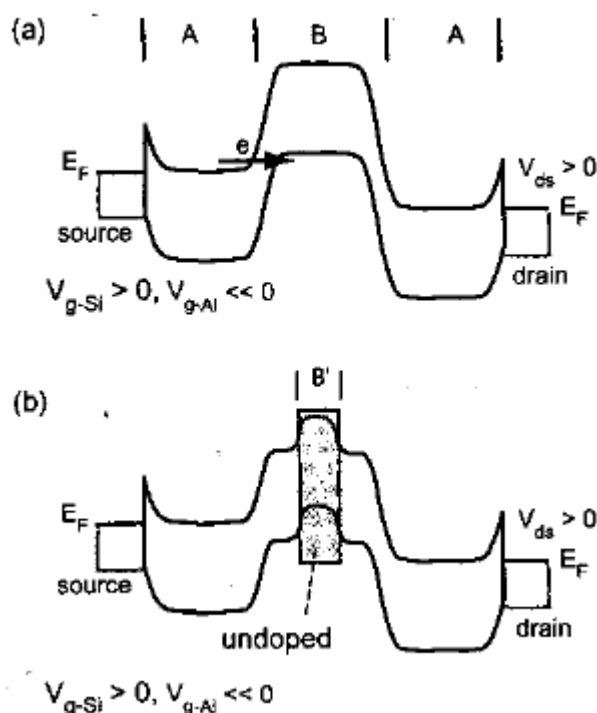
۳-۱-۳. اثر های دوپینگ شیمیایی

در حقیقت در این حالت می توان نقش گیت سیلیسیوم را با دوپینگ شیمیایی صحیح جایگزین کرد. استفاده از دوپینگ شیمیایی در ناحیه A موجب می شود که وسیله بتواند با $V_{gs-si} = 0$ و یا حتی بدون حضور گیت سیلیسیوم هم عمل کند که این خود برای کاربرد های فرکانس بالا، برای مینیم کردن خازن های پارازیتی ضروری است. در اینجا ما از PEI برای دوپینگ شیمیایی استفاده می کنیم. می دانیم که نانولوله به خاطر ترکیب با اکسیژن در حالت معمولی از نوع p بوده که این مربوط به پروسه ساخت آن می شود.



شکل (۱۴)

همان طوری که در شکل (۱۴-a) می بینیم رابطه ی بین جریان درین و ولتاژ $V_{gs-si} > 0$ از نوع p می باشد. با دوپینگ PEI همانطور که در فصل های قبل توضیح داده شد نانولوله به نوع n تبدیل می شود که این را در شکل (۱۴-b) می توانیم ببینیم که این برای جایگزینی اثر دوپینگ شیمیایی با اثر الکترواستاتیکی در تک قطبی کردن ترانزیستور ها به کار می رود.



شکل (۱۵)

همچنین آن باعث بهبود عملکرد ترانزیستور در حالت خاموش می شود طبق شکل (۱۵-a) برای یک ترانزیستور نانولوله ای دو گیتی بدون دوپینگ شیمیایی حالت خاموش وسیله می تواند به علت تونل زنی باند به باند از بین برود و همانگونه که با ناحیه ی دایره ای در شکل (۱۳) نشان داده شده است که این جریان تونل زنی با دوپینگ که در حالت قبل توضیح داده شد می تواند خوابانده شود طبق شکل (۱۵-b) و وجود HSQ که موجب می شود ناحیه B' تحت تاثیر دوپینگ قرار نگیرد یک حالت $n/i/p$ یا $p/i/p$ را در طول نانولوله ایجاد می کند که i بیانگر دوپینگ کمتر می باشد و این باعث تثبیت ولتاژ V_T در ولتاژی خاص می شود زیرا بدون وجود آن با افزایش دوپینگ V_T کم می شود زیرا ارتفاع مانع سر راه آن کم می شود ولی وقتی که HSQ وجود داشته باشد با افزایش ناخالصی عمل تونل زنی را از بین می برد (با پایین آوردن پله) که در شکل (۱۵-b) مشخص است ولی در ناحیه B' ارتفاع ثابت می ماند که این ثابت بودن ارتفاع موجب می شود V_T هم ثابت بماند.