



[www.mohandesyar.com](http://www.mohandesyar.com)

عنوان

سنسورهای هوشمند  
**نانو سنسورها**

## سیستمهای هوشمند - نانو سنسورها

### نویسنده اول

طاهره السادات حسینی  
دانشکده فنی دکتر شریعتی - تهران  
گروه مهندسی برق - الکترونیک  
۰۹۱۲۳۳۵۱۴۱۲

[t686\\_hosseini@yahoo.com](mailto:t686_hosseini@yahoo.com)

### نویسنده دوم

فاطمه جمالو  
دانشکده فنی دکتر شریعتی - تهران  
گروه مهندسی برق - الکترونیک  
۷۳۳۹۹۲۴

[Fatemeh\\_jamaloo@yahoo.com](mailto:Fatemeh_jamaloo@yahoo.com)

**چکیده:** این مقاله، پس از معرفی و بررسی اجمالی شبکه سنسورهای هوشمند، به بیان تأثیرات و کاربرد تکنولوژی نانو در بسط و گسترش سیستم ها و سنسورهای هوشمند پرداخته و با معرفی نانوتیوبها به عنوان ابزاری قدرتمند و مناسب جهت طراحی و ساخت انواع سیستمها، امکان کاربرد وسیع و متنوع آنها را در همه زمینه ها به خصوص صنعت الکترونیک مطرح کرده است. در پایان، با ذکر چند نمونه از کاربردهای نانوتکنولوژی و نانوتیوبها در ساخت سنسورها و قطعات مهم الکترونیکی مانند ترانزیستورها، اهمیت و چگونگی تأثیر این علم در الکترونیک و نیز انواع سیستم ها و سنسورهای هوشمند بیان شده است.

**کلمات کلیدی:** سنسورهای هوشمند، نانو تکنولوژی، نانو سنسورها، نانوتیوب های کربن، نانوترانزیستورها.

**۱. مقدمه:** امروزه، هوشمند سازی سیستمها و قابلیت تصمیم گیری آنها مطابق با شرایط و تغییرات محیط، از مهمترین اهداف تحقیقات و تلاشها محسوب می شود. این میان، بهره گیری از علوم جدید و به خصوص الهام گیری از طبیعت به عنوان بزرگترین سیستم هوشمند، به عنوان ابزاری قدرتمند که همه علوم را تحت الشعاع قرار داده است، مورد توجه و اهمیت ویژه می باشد. علم نانو با ایجاد ارتباط میان تکنولوژی و کوچکترین اجزای تشکیل دهنده مواد، یعنی مولکولها و اتمها، توانسته است تحولی بزرگ در پیشبرد این مسیر ایجاد کند. به این ترتیب هوشمند سازی سیستمها با استفاده از مولکولها و اتمها، علاوه بر کوچک سازی سیستمها، قابلیتهای فراوانی را برای سیستم به وجود می آورد. در حال حاضر سیستمها و سنسورهایی که بطور کامل بر پایه دانش نانو طراحی و ساخته شده باشند چندان زیاد و متداول نمی باشد و با وجود پیشرفتهایی که در این زمینه حاصل شده و نیز پیش بینی قابلیتها و تواناییهای نانوتکنولوژی در همه زمینه ها، می توان گفت که بهره گیری از آن هنوز در مراحل اولیه خود به سر می برد. حمل و نقل (زمینی، دریایی، هوایی و فضایی)، ارتباطات (با سیم، بی سیم، نوری و RF)، ساختمانها و تأسیسات (منازل، ادارات و کارخانه ها)، پزشکی، دفاع و امنیت ملی و کلیه شاخه های رباتیک، با ورود نانوتکنولوژی، شاهد تحولات فراوانی خواهند بود. در این مقاله سعی شده است تا با بیان قابلیتها و امکانات علم نانو، تأثیر آن را در بهبود و گسترش انواع سیستمها و

سنسورهای هوشمند بررسی کنیم و نمونه هایی چند از انواع پیشرفته و کاربردهای این علم را در زمینه های مختلف، به خصوص صنعت الکترونیک بیان کنیم.

**۲. شرح مقاله :** با توجه به گسترش روزافزون علم و پیشرفت تکنولوژی و احساس نیاز بیشتر به سیستم های هوشمندتر و دقیق تر، سنسورهایی که در سیستمها و شبکه های سنسور به کار برده می شوند، باید عاملیت و کارکرد بیشتر و مناسبتری در جمع آوری اطلاعات و انتقال آنها داشته باشند. با توسعه سنسورهای قدیمی و رویکرد علم به ساخت سنسورهایی با قابلیت های پیشرفته یادگیری و انطباق پذیری، شبکه های سنسوری بوجود آمد که قادر به تغییر شکل، شرح و تفسیر اطلاعات، ترکیب اطلاعات رسیده از چندین سنسور و بررسی و تأیید آنها می باشند، از همین رو این سنسورها، سنسورهای هوشمند ( intelligent sensors ) نامیده می شوند.

پارامترهای عملکرد یک سیستم سنسور هوشمند، بطور خلاصه به صورت زیر بیان می باشد :

هماهنگی و سازش پذیری با محیط، پردازش اطلاعات رسیده از محیط، ارتباط بین اجزای سیستم و سنسورها ، مجتمع سازی قابلیت های این سیستم ها در سطح یک تراشه، ارزیابی و تأیید صحت اطلاعات رسیده و در نهایت ترکیب اطلاعات و تصمیم گیری. اینک به توضیحی مختصر در مورد هر یک از پارامترهای مربوط به یک سیستم سنسور هوشمند می پردازیم :

- **هماهنگی و سازش پذیری با محیط ( Compensation )**: این قابلیت، این امکان را به سیستم می دهد که با شناسایی تغییرات محیط، اقدام به پاسخگویی مناسب نماید. در واقع، یک سنسور هوشمند، باید قادر به تشخیص تغییرات بدون نیاز به واسطه، تنظیم خودکار ( self-calibration ) و تطبیق خودکار ( self-adaptation ) خود با تغییرات محیط باشد.

هر یک از سنسورها با ارزیابی مجموعه اطلاعات دریافتی خود و مقایسه آن با اطلاعات رسیده از سایر سنسورها، تغییرات حاصله را تشخیص داده و درستی یا عدم صحت آنها را بررسی می کند. این فرآیند، چگونگی قرار گرفتن سنسورها در شبکه و موقعیت و وضعیت آنها را در بر می گیرد.

- **پردازش اطلاعات ( Information processing )**: منظور از پردازش اطلاعات در شبکه سنسورهای هوشمند، فهم و تفسیر مجموع اطلاعات رسیده و افزایش کارایی سیستم از طریق اصلاح مشخصه های سیگنال های اطلاعات، کاهش و تعدیل سازی اطلاعات، شناسایی و ردیابی اتفاقات و در نهایت تصمیم گیری بر اساس پردازش صورت گرفته می باشد.

- **ارتباطات شبکه ( Communications )**: ترکیب و اتصال اجزا و قسمتهای مختلف یک سیستم سنسور هوشمند، از روابط و قوانین استاندارد شده و روشهای منطقی پیروی می کند. از جمله محدودیتهای موجود در سیستم های قدیمی تر، پیچیدگی، انعطاف پذیری و همچنین هزینه آنها بود، اما، بهره مندی از تبدیلات سطحی ( transducer interface ) و استفاده از روابط و قوانین خاص در زمینه ارتباطات میان اجزا، باعث غلبه بر این محدودیت ها و ایجاد کارایی بیشتر و مطمئن تر سیستم های سنسور هوشمند شده است.

- **مجتمع سازی ( Integration )**: این مرحله شامل جمع آوری کلیه قابلیت ها و ویژگی های سنسورهای هوشمند، از جمله sense محیط و عملیاتهای حاصل از آن، در سطح یک تراشه می باشد. برای این منظور می توان از سیستم های میکرو الکترو مکانیک ( MEMS )، نانو تکنولوژی و بایوتکنولوژی بهره برد. می توان برای توضیح عملکرد چنین سیستمی در سطح یک تراشه، از یک ساختار لایه ای استفاده کرد. به این ترتیب که، لایه زیرین مسئولیت

پردازش سیگنالها، لایه میانی پردازش اطلاعات و لایه بیرونی وظیفه پردازش دانسته ها و برقراری ارتباطات اجزای سیستم را بر عهده دارد.

– **بررسی و معتبر سازی اطلاعات ( Validation )**: هدف از این مرحله، جلوگیری و اجتناب از عوامل و تداخلات خطرناکی است که در نتیجه انتشار اطلاعات نادرست در سیستم، به وجود می آیند. این امر، با آنچه که ممکن است در یک سنسور تنها اتفاق بیافتد متفاوت است. تصمیماتی که ممکن است یک سیستم کنترلی بر اساس اطلاعات و داده های نادرست اتخاذ کند، می تواند منجر به رفتارهایی پیش بینی نشده و یا حتی خطای کلی سیستم و عدم کارایی صحیح و مناسب آن شود.

برای غلبه بر چنین خطاهایی، می توان از شبکه های سنسور گسترده تر و متراکم تر استفاده کرد. به این ترتیب، با افزایش تعداد سنسورهای دخیل در امر دریافت و انتقال اطلاعات، می توان خطای ناشی از انتشار اطلاعات نادرست را کاهش داد و کارایی سیستم را به میزان قابل توجهی افزایش داد. بررسی و معتبر سازی اطلاعات به دو طریق می تواند صورت گیرد: بررسی آنالیزی و بررسی سخت افزاری. در بررسی آنالیزی، رابطه استاتیکی و دینامیکی میان سنسورها و عملکرد آنها، با استفاده از یک مدل ریاضی بررسی شده و مقدار قابل پذیرشی برای آن تعیین می شود. با افزایش تعداد سنسورها و پیچیدگی مدل، نرخ محاسبات صورت گرفته از طریق این روش افزایش می یابد و به همین دلیل استفاده از این روش چندان مناسب به نظر نمی آید. در بررسی سخت افزاری، با استفاده از سنسورهای بیشتر، آن دسته از داده ها و اطلاعاتی که بین اغلب سنسورهای موجود در شبکه مشابه و مشترک می باشد، انتخاب می شود. گاه مشاهده شده است که وجود تعداد زیادی سنسور در یک سیستم، اثرات زیان آوری را برای محیط به دنبال داشته و به همین دلیل این روش نیز عملی نمی باشد.

یک راه پیشنهاد شده برای تداخل بین نیاز شبکه سنسورهای هوشمند در زمینه بررسی و معتبر سازی اطلاعات، اتصال سنسور هوشمند به سیستمهایی ویژه است که وظیفه استدلال و استنباط راه حل را بر عهده دارند.

– **ترکیب اطلاعات و داده ها ( Data fusion )**: این مرحله شامل تکنیک ها و روش هایی است که با استفاده از آنها، اطلاعات رسیده از سنسورهای گوناگون با هم ترکیب شده و سیستم نسبت به انتقال اطلاعات مناسب و مورد نظر، میان سنسورها اطمینان حاصل می کند.

## ۲-۱. استفاده از تکنولوژی نانو در گسترش سنسورهای هوشمند

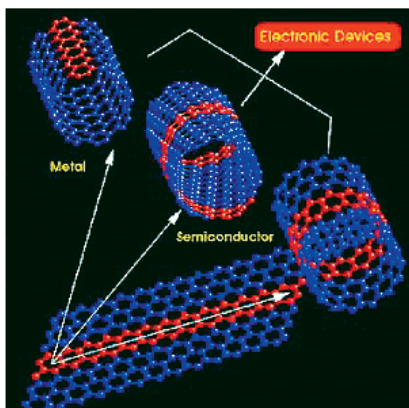
**مقدمه ای بر علم نانو تکنولوژی:** نانوتکنولوژی، توانمندی تولید مواد، ابزارها و سیستم های جدید با در دست گرفتن کنترل در سطوح مولکولی و اتمی و استفاده از خواصی است که در آن سطوح ظاهر می شوند. نانوتکنولوژی، تغییر بنیانی مسیری است که در آینده، موجب ساخت مواد و ابزارها و سیستم های کاربردی و هوشمند خواهد شد. امکان سنتز بلوک های ساختمانی در ابعاد نانو با اندازه و ترکیبی کاملاً کنترل شده و سپس چیدن آنها در ساختارهای بزرگتر، که دارای خواص و کارکرد منحصر بفرد باشند، انقلابی در مواد و فرآیندهای تولید آنها ایجاد کرده است. از مزایای علم نانو تکنولوژی، تولید مواد سبکتر، محکم تر، قابل برنامه ریزی، ارزانتر و بکارگیری کارخانجات مولکولی یا خوشه ای با قابلیت مونتاژ مواد در سطح نانو، می باشد. ظهور علم نانو تکنولوژی، همه زمینه ها و شاخه های علمی از قبیل صنعت، پزشکی، انرژی و محیط زیست، هوا و فضا، امنیت ملی و همچنین الکترونیک را تحت تداخل قرار داده است به گونه ای که دانشمندان، آینده جهان را مبتنی بر علم نانوتکنولوژی می دانند و از همین رو سرمایه گذاریهای کلانی جهت گسترش و پیشبرد این علم در کشورهای پیشرفته جهان صورت گرفته است.

## ۲-۲. کاربرد نانوتکنولوژی در صنعت الکترونیک:

کمترین تاثیر تکنولوژی نانو بر صنعت الکترونیک، امکان ذخیره سازی اطلاعات در مقیاس های فوق العاده کوچک، با

ظرفیتی در حد هزار برابر بیشتر از قابلیت های ذخیره سازی متداول و پیاده شدن ابزارهای ابر محاسباتی در ابعادهای کوچک ( در حد یک ساعت مچی ) می باشد. تاکنون موفقیتهایی در زمینه امکان ذخیره سازی اطلاعات در حدود یک ترابیت در هر اینچ مربع حاصل شده است که بعنوان مثال ذخیره سازی ۵۰ عدد DVD، یا حتی بیشتر، را در یک هارد دیسک با ابعاد یک کارت اعتباری ممکن می سازد. همچنین ساخت تراشه ها در اندازه های فوق العاده کوچک در حدود ۳۲ تا ۹۰ نانومتر و تولید دیسک های نوری ۱۰۰۰ گیگا بایتی در ابعاد نانو، از دیگر دستاوردهای علم نانو در الکترونیک می باشد. در واقع می توان گفت که تکنولوژی نانو، پیچیدگی های سیستم ها را از آنها بیرون کشیده و در داخل خود مواد قرار می دهد.

## ۲-۳. نانوتیوبهای کربن



شکل ۱. نانوتیوبهای کربن می توانند شکل های گوناگون داشته باشند و بسته به ساختار اتمی خود، دارای هر دو خاصیت فلزی یا نیمه هادی می باشند.

یکی از موفقیتهای عمده در زمینه بهره گیری از علم نانو، ساخت و تولید نانوتیوبهای کربن ( CNTS ) می باشد. نانوتیوبها، استوانه های توخالی بسیار نازکی می باشند که از اتمهای کربن ساخته شده اند. این ساختارها در دو نوع نانوتیوبهای تک جداره ( Singel-walled CNTS ) و نانوتیوبهای چند جداره ( Multi-walled CNTS ) می باشند. نانو تیوبهای تک جداره دارای این ویژگی هستند که می توانند اشکال هندسی گوناگونی اختیار کنند. (شکل ۱) همچنین، بسته به نحوه چینش اتمهای کربن و جهت گیری آنها در نانوتیوبها، این ساختارها می توانند دارای خاصیت فلزی و یا نیمه هادی باشند. ویژگی های خاص نانو تیوبها و همچنین قابلیت آنها برای رشد و شکل پذیری در موقعیتها و مکان های گوناگون، باعث شده است تا این نانو ساختارها، به عنوان ابزاری مناسب، جهت استفاده در الکترونیک و

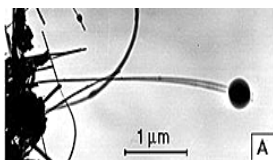
گسترش سنسورها، مورد توجه و اهمیت قرار گیرند. بعنوان مثال، نانوتیوبها می توانند برای ساخت نانو ترانزیستورهای اثر میدان در الکترونیک، و یا بعنوان حسگرهای بیولوژیکی در سنسورها به کار برده شوند.

## ۲-۴. نانو سنسورها :

از آنجا که عملکرد اغلب سنسورهای شیمیایی، بیولوژیکی و همچنین سنسورهای فیزیکی ه به فعل و انفعالات موجود در سطح مولکول ها و اتمها بستگی دارد، علم نانو تکنولوژی می تواند کاربرد وسیعی در طراحی سنسورهای جدید و افزایش قابلیت های آنها داشته باشد. با آغاز روند کوچک سازی و روی آوردن صنعت و تکنولوژی به طراحی و ساخت سیستم هایی با مقیاس کوچکتر، تکنولوژی میکرو پایه گذاری شد و با ادامه این روند و رویکرد روز به روز علم به طبیعت، تکنولوژی نانو مطرح و ایجاد شد.

به این ترتیب، با ایجاد همگرایی میان نانوتکنولوژی، بیوتکنولوژی و تکنولوژی اطلاعات، پیشرفت هایی در زمینه طراحی و ساخت سنسورهایی با اندازه کوچکتر، وزن کمتر، کم مصرف تر، تخصصی تر و دارای حساسیت بیشتر، صورت گرفت.

آنچه که نانوتکنولوژی را ابزاری مناسب برای برآوردن نیازهای شبکه سنسورهای هوشمند می گرداند، امکان برهمکنش میان مجموعه کوچکی از مولکول ها، پردازش و انتقال اطلاعات توسط الکترون ها و ذخیره اطلاعات در ساختارهایی با مقیاس نانو می باشد. به این ترتیب، می توان تمام قابلیت ها و پارامترهای یک شبکه سنسور هوشمند را، که در ابتدای مقاله به آنها اشاره شد، در سیستمی با ابعاد نانو پیاده سازی کرد. در اغلب سیستم ها و سنسورهایی که از تکنولوژی نانو بهره می برند، از نانوتیوبها استفاده شده است که متداولترین و پرکاربردترین آنها، نانوتیوبهای کربن می باشند. تکنولوژی ساخت نانو سنسورها با استفاده از این ساختارهای نانو، در حال توسعه و پیشرفت می باشد. به منظور آشنایی بیشتر با نانوسنسورها و روشن شدن میزان اهمیت بکارگیری علم نانو و نانوتیوبها در ساخت گسترش سنسورها و سیستم ها مختلف، در این بخش به معرفی و بررسی اجمالی چند نمونه از پیشرفت های صورت گرفته در زمینه استفاده از نانوتیوبها در ساخت سنسورهای گوناگون می پردازیم.



شکل ۲. ذره متصل شده به انتهای نانوتیوب، باعث تغییر فرکانس تشدید نانوتیوب می شود.

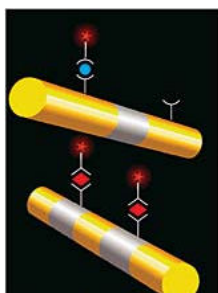
#### ۲-۴-۱. سنسورهای فیزیکی (Physical sensors): نمونه ای از یک

سنسور فیزیکی که با استفاده از خواص ویژه الکتریکی و مکانیکی نانوتیوب ساخته شده است، نوعی سنسور وزن می باشد که با استفاده از آن می توان جرم ذرات بسیار ریز را اندازه گیری کرد و تاکنون کوچکترین نوع خود در جهان محسوب می شود (شکل ۲) نحوه عملکرد این سنسور به این ترتیب است که یک ذره بسیار ریز در ابعاد نانو به انتهای نانوتیوب متصل می شود و با اعمال بار الکتریکی به ذره، نانوتیوب شروع به نوسان می کند.

با اندازه گیری فرکانس تشدید نوسانات نانوتیوب و مقایسه آن با فرکانس تشدید آن قبل از اتصال ذره و سپس محاسبه تغییرات این فرکانسها، می توان مقدار و جرم ذره مورد نظر را بدست آورد. به این ترتیب با استفاده از این روش می توان جرم یک بایو مولکول واحد را به تنهایی اندازه گیری کرد.

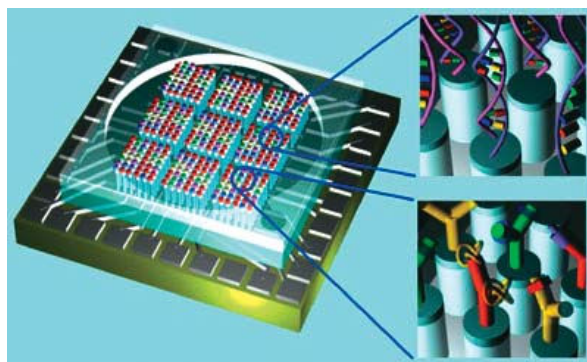
#### ۲-۴-۲. بایو سنسورها (Biosensors): بایو سنسورها، سنسورهایی هستند که از مولکولهای زنده مانند DNA ها

ی آنتی بادیها تشکیل شده اند و برای شناسایی مولکولهای پیچیده بدن انسان و یا کاربردهای دیگر مورد استفاده قرار می گیرند. یک، از روشهای تشخیص، بایو مولکولها، ساخت و بکارگیری نانو بارکدها می باشد. نانو بارکدها میله های ای با طول ۵۰ نانومتر تا ۵ میکرون می باشند که با تبدیل تدریجی الکتروشیمیایی یونهای فلز در یک قالب آلومینی بوجود می آیند. نانوبارکدها می توانند بوسیله نهادهایی مانند آنتی بادیها پوشانده شوند و برای تشخیص مولکولهای پیچیده مورد استفاده قرار می گیرند (شکل ۳)



شکل ۳. نانو بارکدها - DNA و بایو مولکولهای دیگر، می توانند با استفاده آنتی بادیهای کدشده بوسیله نانوبارکدها، شناسایی شوند.

روش دیگری که در مرکز تحقیقات ناسا مورد آزمایش قرار گرفت، به این صورت است که میلیونها نانوتیوب با ضخامتی حدود ۵۰-۳۰ نانومتر، که با قرار داده شدن در محلولی از نوع خاصی DNA، آغشته به آن شده اند، بصورت عمودی بر روی یک تراشه قرار می گیرند (شکل ۴) با قرار دادن تراشه در محلول مورد تجزیه ای که حاوی آن نوع خاص از DNA باشد، مولکولهای DNA به انتهای نانوتیوب متصل می شوند و باعث افزایش رسانایی الکتریکی آن می شوند. بدین ترتیب با استفاده از این روش، می توان مولکولهای DNA موجود در یک ماده مورد تجزیه را شناسایی کرد.



شکل ۴. نانوتیوبهای کربن بر روی سطح یک تراشه سیلیکونی رشد می کنند. مولکولهای DNA به انتهای نانوتیوبها متصل می شوند و برای شناسایی نوع خاصی از DNA در یک ماده مورد تجزیه، استفاده می شود.

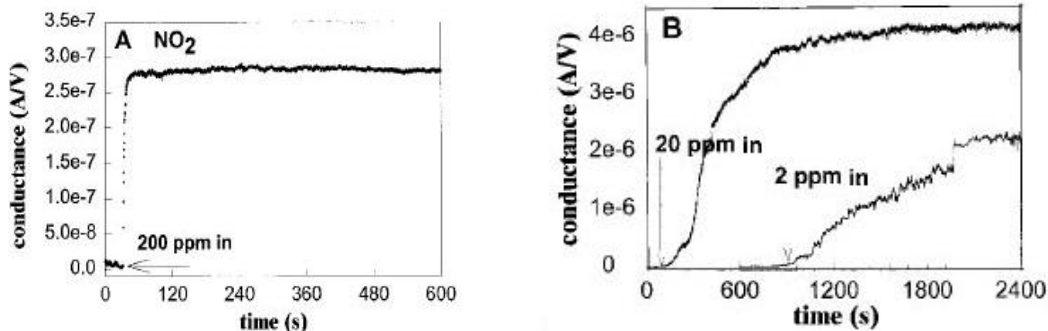
۲-۴-۳. **سنسورهای شیمیایی (Chemical sensors):** در سالهای اخیر، انواع گوناگونی از سنسورهای گاز با استفاده از نانو تیوبهای تک جداره تشریح شده است. این سنسورها ابزاری مناسب با حساسیت بالا، مصرف کم، و قیمت پایین تر برای تجزیه و تحلیل های شیمیایی می باشند و با توسعه بیشتر این نانوسنسورها، می توان از آنها، علاوه بر گازها و مواد فرار، برای آنالیز مواد در سطح مایعات نیز استفاده کرد. سنسورهای هیدروژن بهره مند از نانوتیوبهای تیتانیوم، سنسورهای گازی  $\text{NO}_2$  و  $\text{NH}_3$  و دیگر سنسورهای گازی، نمونه هایی از سنسورهای شیمیایی مبتنی بر نانوتیوبها می باشند.

یک سنسور الکترو شیمیایی نمونه، از نانوتیوبهایی تشکیل شده که دو الکترود بعنوان مبدل در دو سمت آن قرار می گیرد و در نتیجه امکان تشکیل یک مدار بسته الکترونیکی را فراهم می آورد. در اثر برهم کنش میان نانوتیوبها و مولکولهای گاز، ترکیب و پیکر بندی الکترونها در حسگرها، که دارای ساختار نانو می باشند، تغییر می کند و منجر به ایجاد تغییراتی در سیگنالهای الکترونیکی مانند جریان یا ولتاژ می شود. با اندازه گیری تغییرات ایجاد شده در میزان هدایت و رسانایی نانوتیوبها، می توان غلظت و شدت گاز یا گونه شیمیایی مورد آزمایش را بدست آورد. (شکل ۳)

عکس العمل این سنسور در مجاورت با گازها و مواد گوناگون، متفاوت است. بعنوان مثال، هنگامیکه این سنسور در غلظتهای مختلفی از گازهای  $\text{NO}_2$  و  $\text{NH}_3$  مورد آزمایش قرار گرفت، مشخص شد که اولاً، شناسایی مولکولهای گازی هر یک از گونه های مورد آزمایش، در غلظتهای متفاوت صورت گرفته است و ثانیاً، تغییر ایجاد شده در مقاومت سنسور، در مجاورت با هر یک از آنها، متفاوت بوده است بدین معنی که مقاومت سنسور در مجاورت با  $\text{NO}_2$  کاهش و در مجاورت با  $\text{NH}_3$  افزایش می یابد. این تغییرات وابسته در مقاومت سنسور، توانهای متفاوتی را برای سنسور جهت شناسایی و تشخیص مولکولهای گازی ایجاد می کند. مزیت این سنسورهای نانوتیوب به سنسورهای متداول گازی، پاسخ سریع آنها در دمای اتاق است.

عملکرد این سنسور می تواند با تغییر فاصله میان الکترودها یا در واقع ولتاژ الکتریکی اعمال شده به نانوتیوب، و نیز تغییر مقدار و چگالی نانوتیوب قرار گرفته بین دو الکترود، تنظیم شود. با استفاده از تغییر ولتاژ گیت اعمالی به نانو

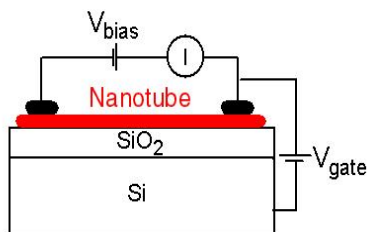
تیوب، می توان، با توجه به ویژگی خاص نانوتیوب در امکان داشتن هر دو خاصیت رسانایی و نارسنایی، که قبلا به آن اشاره شد، نانوتیوب را در حالت اولیه هدایت و یا عایق، تنظیم کرد. علاوه بر سنسورهای گازی  $\text{NO}_2$  و  $\text{NH}_3$ ، سنسورهای نانوتیوب گازی دیگری نیز جهت تشخیص و شناسایی گونه های گازی مختلف طراحی شده است. از جمله این سنسورها، سنسور گاز متان  $\text{CH}_4$ ، استون  $\text{CH}_3\text{COCH}_3$ ، بنزین و تولوئن می باشد.



شکل ۵. پاسخ الکتریکی یک نانوتیوب تک جداره به مولکولهای  $\text{NO}_2$ . همانطور که مشاهده می شود، تغییر در رسانایی، نانوتیوبها بر حسب زمان، به غلظت و شدت جریان گاز بستگی دارد.

## ۲-۵. نانوترانزیستورها

نانوتیوبها، به دلیل دارا بودن خواص الکترونیکی خاص، که تلویحا به آن اشاره شد، ابزار بسیار مناسبی برای ساخت و وسایل و سیستم های مولکولی جدید می باشد. خواص الکترونیکی نانوتیوبها، بر خلاف نیمه هادی ها، بیشتر از آنکه به میزان ناخالصی موجود در آنها بستگی داشته باشد، به شکل هندسی آنها وابسته است. همانطور که در توضیحات مربوط به نانوتیوبها ذکر شد، نانوتیوبهای تک جداره، می توانند شکل های هندسی گوناگون اختیار کنند. این ویژگی سبب استفاده گسترده این ساختارها در ساخت وسایل الکترونیکی، به خصوص ترانزیستورها می شود. در حال حاضر، سریع ترین ترانزیستور جهان با استفاده از تکنولوژی نانو و نانوتیوبها طراحی و ساخته شده است که سرعت نظری آن هزار

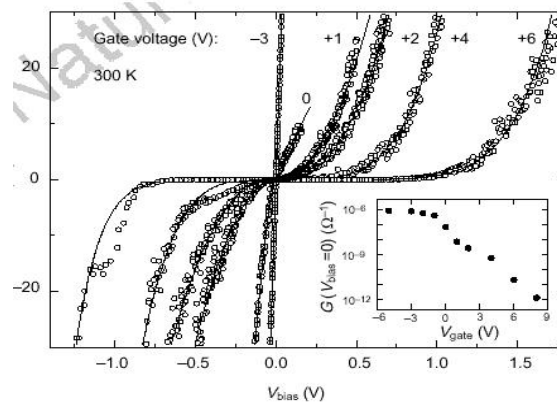


شکل ۷. طرح شماتیک یک نانو ترانزیستور

برابر بیشتر از سرعت رایانه های جدید برآورد می شود. در این ترانزیستور، یک نانوتیوب تک جداره با خاصیت نیمه هادی، بین دو الکترود طلا قرار گرفته است. (شکل ۴) اعمال ولتاژ به الکترود گیت، باعث می شود که نانوتیوب از حالت هدایت، به حالت عایق سوئیچ شود، (شکل ۵) ترانزیستورهای معمولی دارای سه ترمینال شامل الکترودهای سورس، درین و گیت می باشند که الکترود گیت، چگالی الکترون ها را در ناحیه کروی ترانزیستور که از مواد نیمه رسانا ساخته می شود، کنترل می کند. چنانچه چگالی الکترون بالا باشد، جریان از سورس به درین می رود و اگر چگالی پایین باشد، جریانی برقرار نمی شود.



این خاصیت سبب می‌شود تا ترانزیستور همانند سوئیچ تبدیل عمل نماید. در این طرح، نانوتیوب میان الکترودهای درین و سورس قرار می‌گیرد. با تغییر ولتاژ گیت، مشخص شد مدار مورد آزمایش، با فرکانس ۲/۶ گیگا هرتز کار می‌کند، در نتیجه زمان قطع و وصل جریان در حدود ۰/۱ نانو ثانیه می‌شود که حاکی از سرعت بسیار بالای این ترانزیستور می‌باشد. پیش بینی می‌شود که با ادامه تلاشها و ارتقاء ترانزیستور مورد بحث، عملکرد ترانزیستور، حتی در دمای اتاق، و فرکانسهای بسیار بالاتر، در حدود ۱۰۱۲ هرتز (ترا هرتز)، یعنی ۱۰۰۰ برابر سرعت کامپیوترهای جدید، ممکن شود.



شکل ۸. منحنی جریان - ولتاژ مربوط به عملکرد ترانزیستور نانو تیوب در ولتاژهای گیت مختلف

نتیجه حاصل، که ناشی از قابلیت‌های ویژه نانوتیوبها می‌باشد، گامی مهم در تلاش برای تولید اجزاء نانوالکترونیک است که می‌تواند جایگزین سیلیکون در کاربردهای الکترونیکی متعدد شود. ابزار و وسایل زیادی با استفاده از برقراری اتصال میان نانوتیوبهای دارای خواص فلزی و نانوتیوبهای دارای خواص نیمه هادی می‌توان ساخت. همچنان موانع زیادی، چه در سطح تئوری و چه در سطح عملی، برای تحقق ابزار، وسایل و سیستمهای دارای مقیاس نانو وجود دارد. اما بر اساس قوانین عملی، با ترکیب نانوتیوبهای مختلف و اعمال ولتاژ به آنها، می‌توان ساخت حوزه وسیعی از اجزای الکترونیکی از قبیل سیمهای نانو، وسایل دو قطبی، دیودها و ترانزیستورهای اثر میدان را مجسم کرد.

### ۳. نتیجه گیری

نانوتکنولوژی، قادر به اصلاح و بهبود قابلیت های سنسورها و گسترش انواع جدیدی از آنها می‌باشد. با وجود پیشرفت هایی که صورت گرفته است، همچنان دستیابی به همه امکانات و قابلیت های علم نانو و استفاده از آنها، تلاش و کار بسیار می‌طلبد. از میان چالشهای موجود، کاهش هر چه بیشتر قیمت مواد و وسایل، افزایش قابلیت اطمینان آنها و امکان مجتمع سازی و بسته بندی آنها به صورت مفید، توجه بیشتری را به خود جلب کرده است. با اینحال، ساخت تجهیزات و سیستمهای نانو و بهره گیری از نانوتکنولوژی در زمینه های گوناگون آغاز شده است و توسعه و پیشرفت رو به روز آن، آینده روشنی را رقم خواهد زد.

### ۴. مراجع

- [1] Sharon Smith, Lockheed Martin Corp. David J. Nagel, The George Washington University, Nanotechnology-Enabled Sensors: Possibilities, Realities, and Applications, *Sensors*, November 2003
- [2] Nanotechnology toward DNA electronics Kawai, T.; Microprocesses and Nanotechnology Conference, 2001, International, 31 Oct.-2 Nov. 2001 page(s): 74

- [3]<http://sensornetworks.net.au/intsens.html>
- [4]<http://ipn2.epfl.ch/CHBU/NTapplications1.htm>
- [5] <http://www.nasa.gov/centers/ames/research/technology-onepagers/gas-detection.html>
- [6]<http://www.spacedaily.com/news/nanotech-04zzzzm.html>
- [7]  
[http://www.industryanalystreporter.com/T2/Analyst\\_Research/ResearchAnnouncementsDetails.asp?Newsid=5053](http://www.industryanalystreporter.com/T2/Analyst_Research/ResearchAnnouncementsDetails.asp?Newsid=5053)