

بسمه تعالی



سمینار درس نانو الکترونیک

ترانزیستورهای اثر میدانی با نانو لوله های کربنی

استاد راهنما: دکتر شهرام محمد نژاد

خردادماه ۹۵

# فهرست

روش های ساخت نانو لوله های کربنی

CNTFET با گیت بالا

مراحل ساخت CNTFET گیت دور نانولوله

مقایسه پارامترهای کلیدی ترانزیستورهای اثر میدان مبتنی بر نانولوله های کربنی با MOSFET bulk و UTSOI MOSFET

کاربرد: ساخت گیت NOT با CNTFET

مقدمه ای بر نانولوله های کربنی

CNTFET با گیت پشتی

CNTFET با گیت دور نانو لوله

مشکلات CNTFET

بررسی تئوری جریان درین در ترانزیستور اثر میدان نانولوله کربنی گیت

کاربرد CNTFET در سنسور گاز

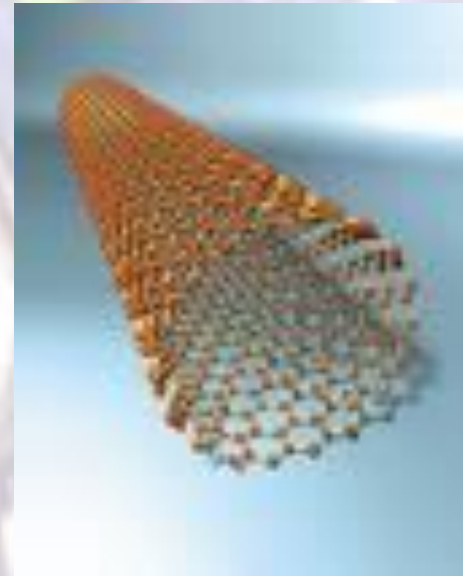
نتیجه گیری

# نانو لوله های کربنی

نانو لوله چند  
جداره



نانو لوله تک جداره



۱. اندازه بسیار کوچک
۲. قابلیت تحرک حامل ها بالاست
۳. انتقال حامل ها بصورت بالستیک صورت می گیرد

مزایای نانو لوله  
های کربنی

## روش های ساخت نانو لوله های کربنی

در این روش جریان بزرگی را از دو الکتروود کربنی در فضای حاوی ماده پلاسما عبور می دهند. که این امر منجر به ایجاد جرقه در شکاف بین دو الکتروود می شود. در این صورت بیش از ۳۰ درصد خاکستر تولید شده نانو لوله های کربنی هستند.

تخلیه الکتریکی  
پلاسما

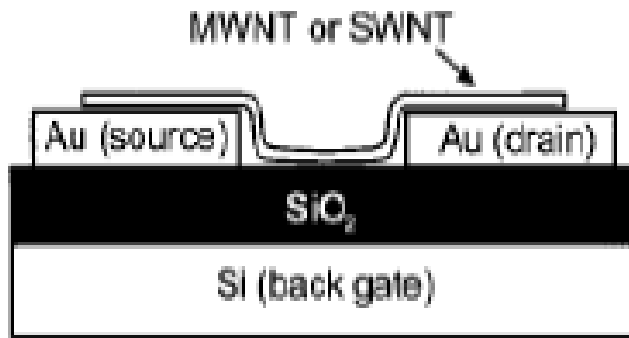
در این روش یک گاز حاوی کربن آن قدر گرم می شود تا ملکول های گاز شروع به تجزیه شدن، کنند. در این حالت یک زیرلایه در حضور کاتالیزگر در معرض گاز قرار می گیرد. اتم های کربن بر روی زیرلایه و در نزدیکی دانه بلور نیمه رسانا (seed) که از قبل بر روی زیر لایه قرار داده شده جمع می شوند و تا وقتی که زیرلایه در معرض گاز باشد رشد نانولوله های کربنی ادامه دارد

نشست شیمیایی  
بخار

این روش مشابه روش اول است با این تفاوت که در این روش از لیزر برای بمباران کردن یک هدف گرافیتی استفاده می شود. با تغییر دمای واکنش و میزان کاتالیزگرها می توان قطر نانو لوله تولید شده را کنترل کرد.

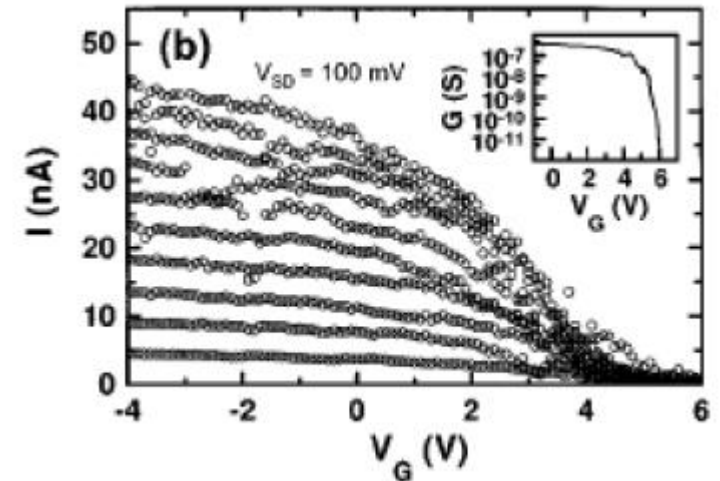
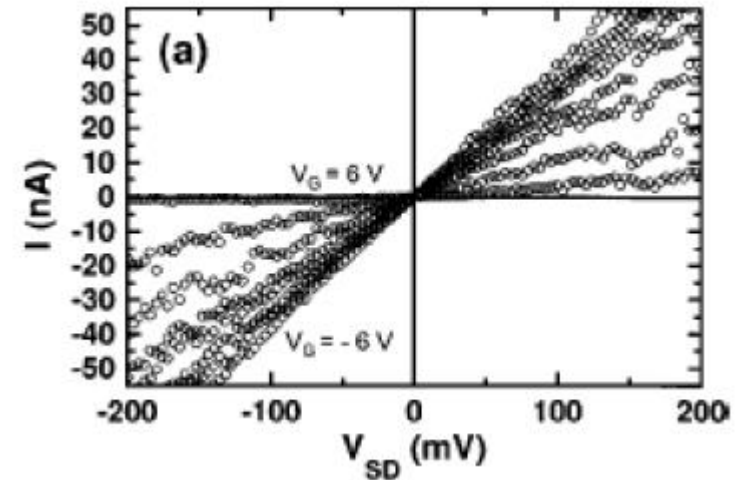
تبخیر لیزر

# ترانزیستور های اثر میدانی با نانولوله های کربنی با گیت پشتی

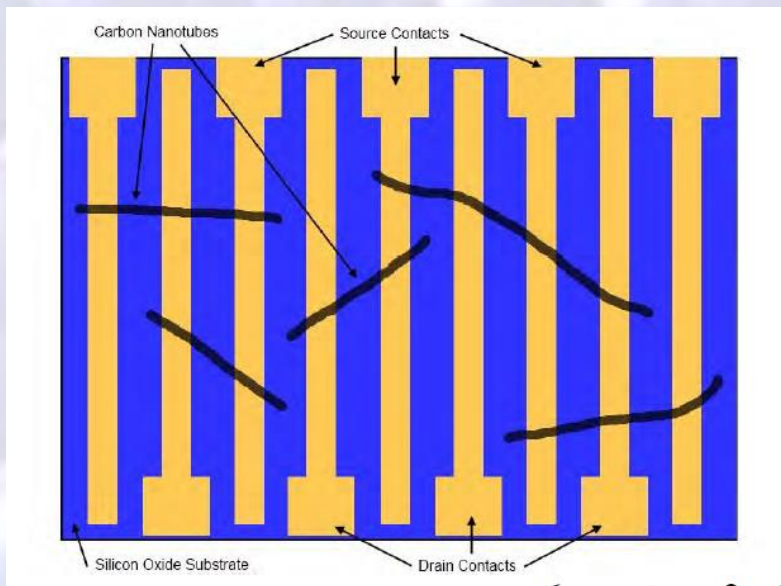


برای نمودار یک نمودار خطی است  
 در حالی که  $V_G$  با افزایش  $V_{SD}$  از صفر نمودار تبدیل به  
 یک منحنی غیر خطی می شود

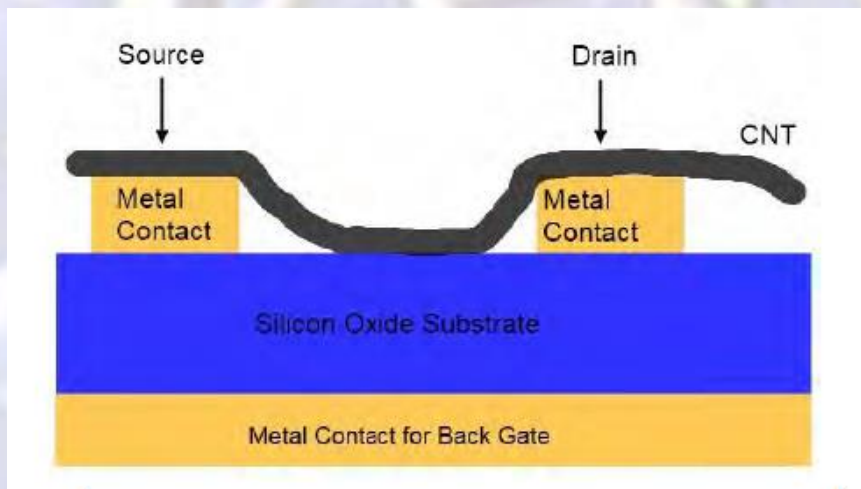
مشخصه انتقالی مانند ترانزیستور MOSFET نوع p است.





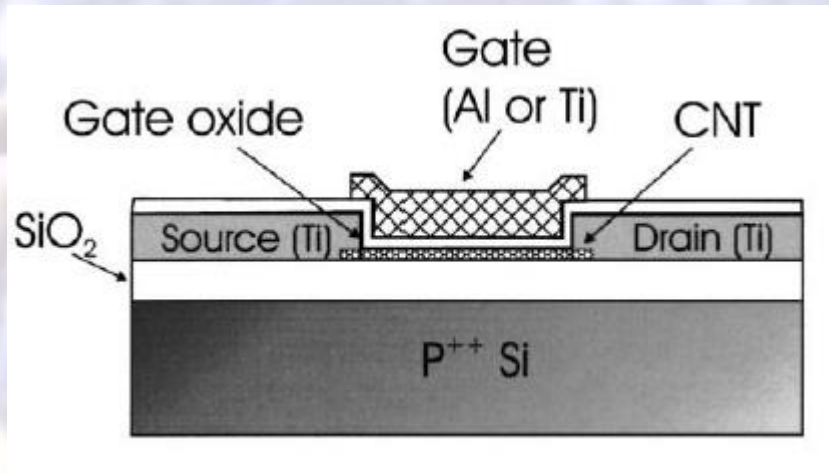


تمامی ترانزیستورهای روی یک ویفر بطور همزمان خاموش و روشن می شوند چون دارای گیت یکسان هستند.



ضخامت لایه اکسید زیاد است و از طرفی فرآیند تولید به گونه ای است که سطح تماس نانولوله کربنی با اکسید گیت کم بوده و برای خاموش روشن کردن قطعه با ولتاژ کم مشکل ایجاد می کند.

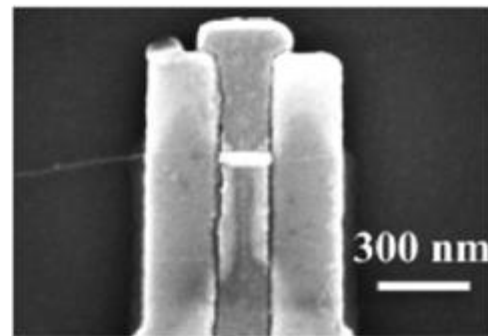
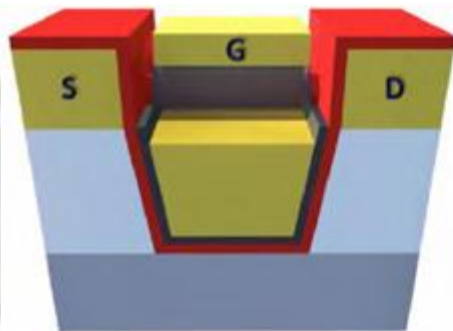
## ترانزیستور اثر میدانی با نانولوله کربنی با گیت بالا



در هندسه ترانزیستورهای گیت بالایی که اولین بار توسط Bachtold و همکارانش ارائه شده است، برای بهره بیشتر، نانولوله های کربنی به طور کامل درون عایق گیت قرار داده می شود. برخلاف ترانزیستورهای اثر میدان نانولوله کربنی گیت پشتی، می توان تعداد زیادی از این نوع ترانزیستور را روی یک ویفر ساخت، به دلیل اینکه گیت های هر یک به صورت مجزا می باشد. همچنین با توجه به ضخامت کم دی الکتریک گیت، میدان الکتریکی بزرگتری را می توان با یک ولتاژ کم روی نانولوله کربنی ایجاد کرد. با وجود روند ساخت پیچیده تر نسبت به ترانزیستورهای اثر میدان نانولوله کربنی گیت پشتی، مزایا فوق باعث می شوند که این نوع ترجیح داده شوند

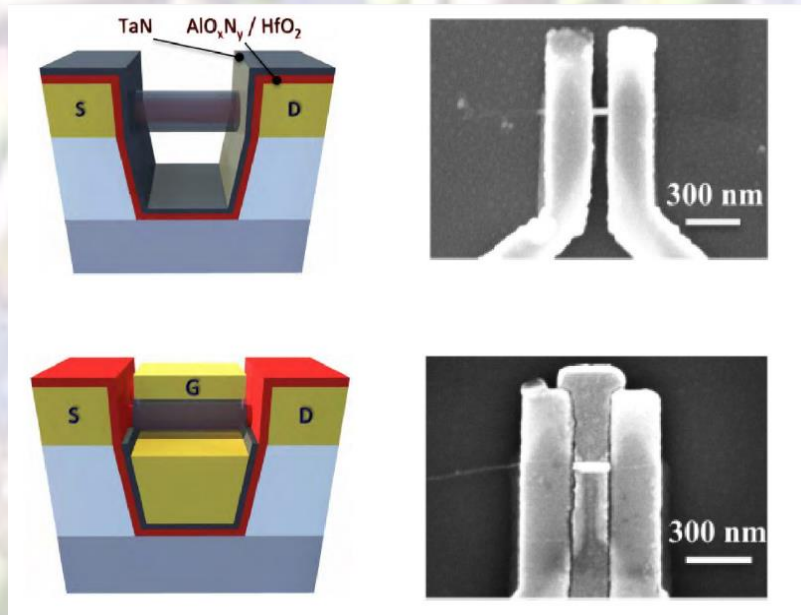
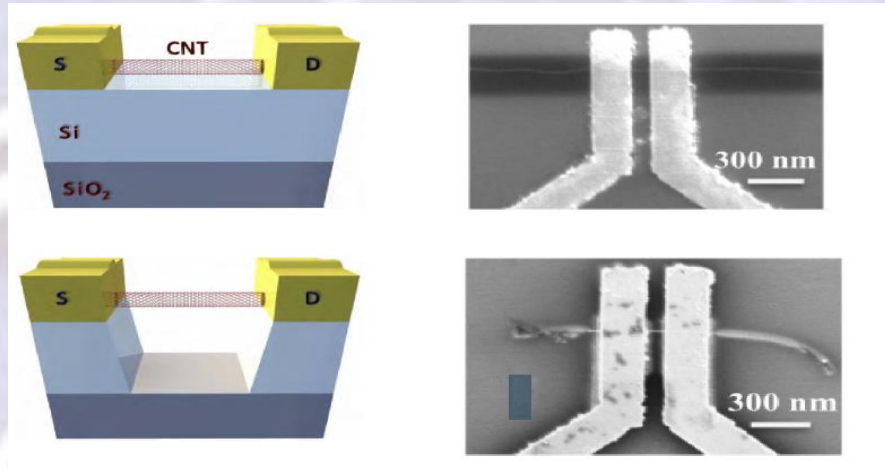
## ترانزیستورهای اثر میدان نانولوله های کربنی گیت دور نانولوله

قرار دادن گیت در اطراف و در تمام نانولوله که باعث بهبود عملکرد می شود ، در سال ۲۰۱۱ شناخته و توسعه داده شد. ابتدا نانولوله کربنی که دارای پوشش عایق است روی ویفر قرار داده می شود که اتصال فلزی سورس و درین در دو طرف آن قرار داده می شود، سپس برای مشخص کردن و جدا کردن ناحیه سورس و درین ، SiZ زیر نانولوله کربنی زایش کرد . این زایش کردن تا رسیدن به عایق بستر ادامه پیدا می کند . سپس با استفاده از موادی که ضریب دی الکتریک بالایی دارند ، عایق بین گیت و سورس و درین ایجاد شده و همچنین فلزی روی این عایق جهت اتصال بهتر فلز گیت به نانولوله کربنی قرار داده می شود.





# مراحل ساخت ترانزیستورهای اثر میدان نانولوله های کربنی گیت دور نانولوله



## مشکلات ترانزیستورهای اثرمیدانی با نانو لوله های کربنی

### تغییر پذیری در قطر نانولوله های کربنی

پروسه ساخت نانو لوله ها باعث شده است که در قطر لوله ها تغییر پذیری وجود داشته باشد که معمولا مقداری بین ۱ تا ۲ نانومتر داراست. با تغییر قطر نانولوله شکاف باند تغییر کرده و در نتیجه ولتاژ آستانه ترانزیستور و جریان ترانزیستور تغییر می کند

### نامرتبی در نانولوله ها

عدم وجود کنترل دقیق بروی موقعیت یابی CNTها در هنگام ساخت CNFET، باعث ایجاد نامنظمی در نانو لوله ها میشود. پیشرفتهای قابل ملاحظه ای برای ساخت CNFET به صورت مرتب صورت گرفته است و در حال حاضر کمتر از نیم درصد از نانولوله های ساخته شده روی بستر تک کریستال الماس نامنظم هستند. نانولوله های نامنظم ممکن است باعث ایجاد اتصال کوتاه بین خروجی و تغذیه شده

## مشکلات ترانزیستورهای اثرمیدانی با نانو لوله های کربنی

بین سورس و درین و نانولوله ها SB وجود اتصالات

اتصال بین نانو لوله های کربنی و فلزی که برای اتصال سورس و درین استفاده شده، در یک CNFET سد شاتکی (SB) را تشکیل میدهد. به وجود آمدن سدهای شاتکی در قسمت سورس و درین یک ترانزیستور باعث کاهش قابل ملاحظه‌ای در جریان درین ترانزیستور میشوند. بنابراین، برای کارایی عملیاتی بالاتر قطعات CNFET، فلزهای مناسبی نیاز است که بتوانند در محل اتصال سوری و درین استفاده شده و اتصال اهمی ایجاد کند.

رشد ناخواسته فلز در نانولوله ها

برای استفاده از CNTها به عنوان ماده کانال، نانو لوله های کربنی مورد نیاز است. نانولوله ها میتوانند خاصیت فلزی و یا نیمه هادی از خود نشان دهند. در حال حاضر، روش سنتزی برای نانولوله ها وجود ندارد که بتواند بصورت ۱۰۰ درصد لوله های نیمه هادی تولید کند. اگر لوله های کربنی خاصیت فلزی داشته باشند، از آنجاییکه بین درین و سورس اتصال کوتاه رخ میدهد، ترمینال گیت هیچ کنترلی بر روی کانال نمیتواند داشته باشد.

مقایسه پارامترهای کلیدی ترانزیستورهای اثر میدان مبتنی بر نانولوله  
 های کربنی با MOSFET bulk و UTSOI MOSFET

Bulk MOSFET	UTSOI MOSFET	CNFET گیت بالایی	پارامترهای کلیدی
85	51	261	طول گیت (nm)
8.4	8.5	85	ضخامت اکسید گیت (nm)
-0.1	-0.2	-0.5	$V_t$ (v)
265	650	2100	$I_{ON}$ (uA /um) ( $V_{ds} = V_{gs} - V_t = -1v$ )
500	9	150	$I_{OFF}$ (nA/um)
100	70	130	شیب زیر آستانه (mV/dec)
975	650	2321	ضریب هدایت (uS/um)

$$I_{DS} = \frac{2qKT}{\pi\hbar} [F_0\left(\frac{U_{SF}}{KT}\right) - F_0\left(\frac{U_{DF}}{KT}\right)]$$

$$N_D = \frac{1}{2} \int_{-} D(E) f(E - U_{DF}) dE$$

$$N_o = \frac{1}{2} \int_{-} D(E) f(E - E_F) dE$$

$$D(E) = D_0 \frac{E}{\sqrt{E^2 - (E_g/2)^2}} \theta(E - E_g/2)$$

$$U_{SF} = E_F - qV_{SC}$$

$$U_{DF} = E_F - qV_{SC} - qV_{DC}$$

$$V_{sc} = \frac{-Q_i + qN_s(V_{SC}) + qV_D(V_{SC}) - qN_o}{C_{\Sigma}}$$

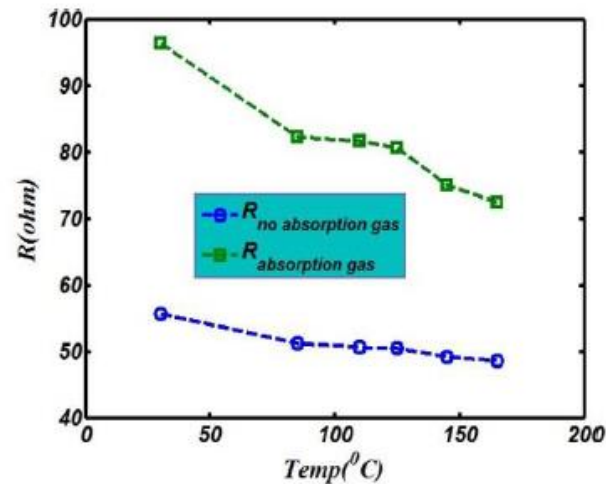
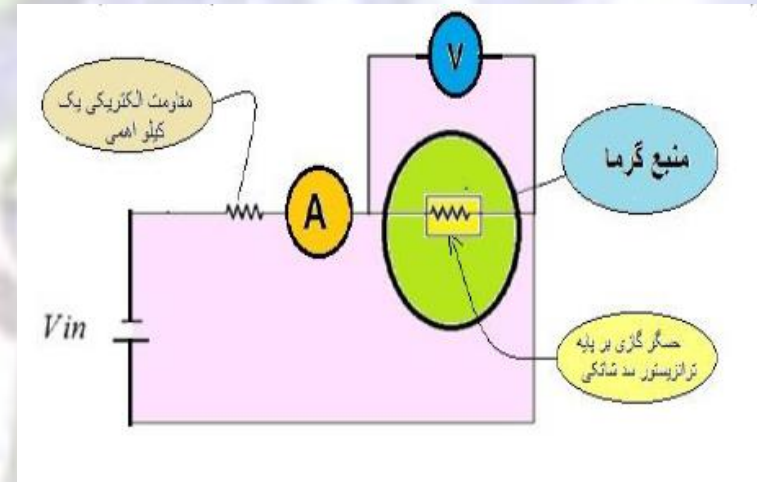
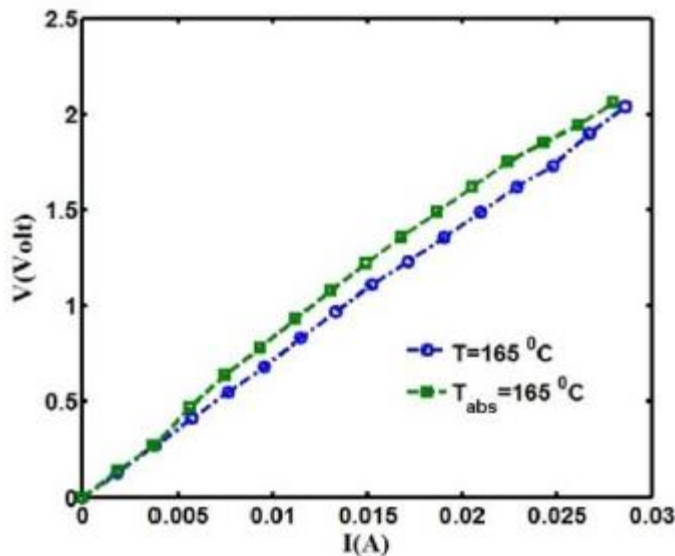
$$I_{DS} = \frac{2qKT}{\pi\hbar} [F_0\left(\frac{U_{SF}}{KT}\right) - F_0\left(\frac{U_{DF}}{KT}\right)]$$

است . زمانی که میدان الکتریکی اعمال شود ، نانولوله کربنی که بین سورس و درین قرار دارد شامل بار متحرک می شود . چگالی این بارها برای سورس  $N_s$  و برای درین  $N_D$  است و این چگالی را توسط احتمال توزیع فرمی دیراک تعیین می کنیم.



# استفاده از CNTFET برای ساخت حسگر گاز

قابلیت نانو لوله های کربن برای استفاده در حسگرهای گازی ناشی از توخالی بودن و بالا بودن سطح تماس آنها است. این سطح تماس متشکل از دیواره خارجی نانو لوله و قسمت های خالی میانی آن می باشد. جذب فیزیک - شیمیایی گازها در نانولوله ها باعث تغییر رسانش آنها می شود.



# کاربرد: ساخت گیت NOT با CNTFET

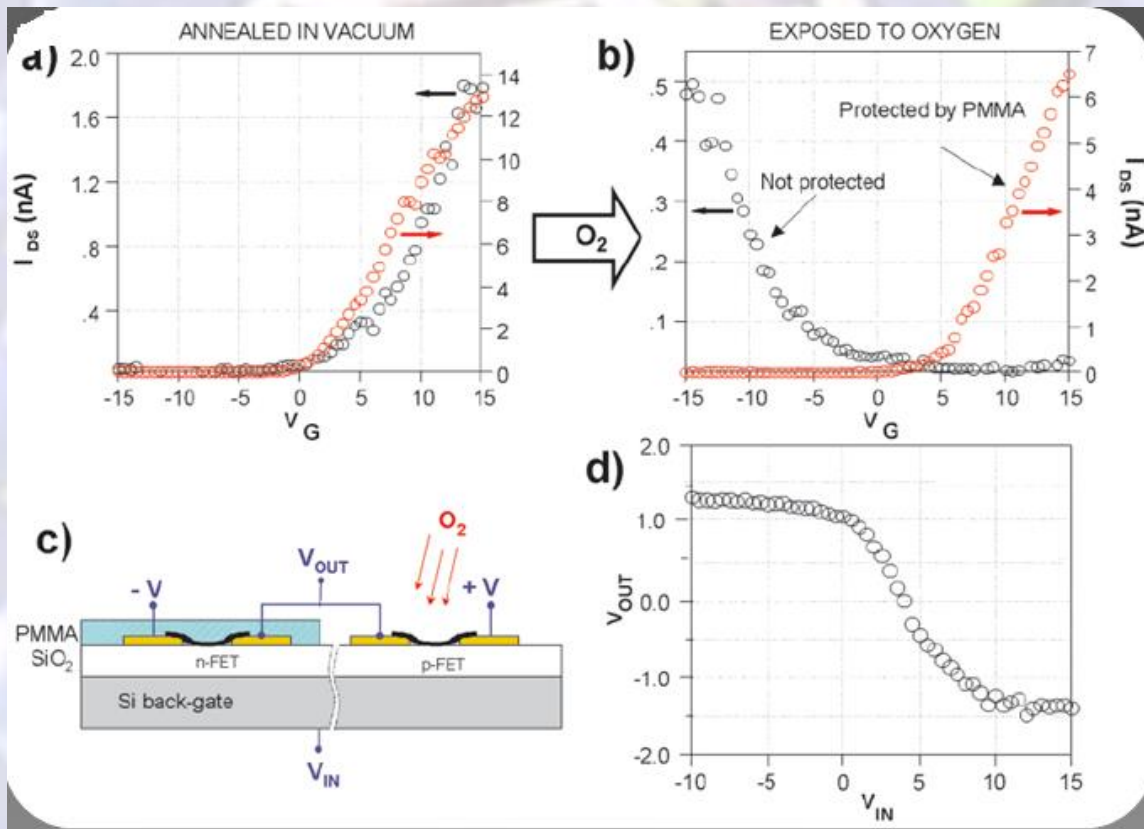
Derycke و همکاران در سال ۲۰۰۱ اولین اینورتر شبه CMOS را با استفاده از یک CNTFET نوع n و یک نوع p مطابق شکل زیر ساختند. در قسمت فوقانی ساختار یک نانولوله کربنی تک جداره ای روی الکترودهای طلائی گذاشته شده است.

## مراحل ساخت:

ابتدا CNTFET را در حالت خلا گذاخته کرده تا اکسیژن از نانولوله کربنی جدا شود

غشای پلیمر PMMA برای جلوگیری از ترکیب دوباره با اکسیژن بر روی ساختار کشیده می شود

سپس پنجره ای را در PMMA بجا استفاده از لیتوگرافی بمنظور برخورد مستقیم ماسفت با اکسیژن برای ایجاد نوع p به وجود می آوریم



با توجه به کاهش مقیاس قطعات نیمه هادی و مدارات مجتمع تا میزان محدوده نانومتر، صنعت نیمه هادی با چالشهای زیادی روبرو خواهد بود. کاهش مقیاس موجب اثرات بیشتر کانال کوتاه، کنترل کمتر گیت، افزایش نمایی جریانهای نشتی، تغییرات شدید فرآیند و چگالی های توان غیرقابل مدیریت میشود. در طی سه دهه اخیر کاهش مقیاس تکنولوژی CMOS سرعت بالایی داشته است اما ممکن است به زودی به دلیل افزایش اثرات کانال کوتاه و محدودیتهای اتلاف توان به پایان برسد. بنابراین تکنولوژیهای جایگزین برای ترانزیستورهای سیلیکون در حال کشف و بررسی میباشند. یک گزینه برای ترانزیستور به منظور داشتن امکان ادامه کاهش ابعاد و برای توسعه ساختارهای جدید، ترانزیستور اثر میدانی نانولوله کربن میباشد یکی از مطرحترین موضوعها در نانو تکنولوژی نانو لوله های کربنی هستند که در سالهای اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته اند و دلیل آن ابعاد بسیار کوچک ساختار منحصر به فرد و پتانسیل استفاده در بسیاری از تکنولوژیهاست

- [1] P. L. McEuen, M. S. Fuhrer, and Park Hongkun, "Single-walled carbon nanotube electronics," *IEEE Trans. on Nanotechnology*, vol 1, No. 1, pp. 78-85, 2002.
- [2] S. J. Tans, A. R. M. Verschueren, and C. Dekker, "Room-temperature transistor based on a single carbon nanotube," *Nature*, Vol. 393, p. 49-52, 1998.
- [3] R. Martel, T. Schmidt, H. R. Shea, T. Hertel, and P. Avouris, "Single- and multi-wall carbon nanotube field-effect transistors," *Applied Physics Letters*, Vol. 73, pp. 2447-2449, 1998.
- [4] J. Guo, M. Lundstrom, "Device Simulation of SWNT-FETs", edited by A. Javey, J. Kong, to appear in "Carbon Nanotube Electronics", Springer, 2007.
- [5] S. Heinze, J. Tersoff, R. Martel, V. Derycke, J. Appenzeller, and P. Avouris, "Carbon nanotubes as Schottky barrier transistors," *Physical Review Letters*, Vol. 89, No. 10, 106801, 2002.
- [6] A. Javey, R. Tu, D. B. Farmer, J. Guo, R. G. Gordon, and H. Dai, "High performance n-type carbon nanotube field-effect transistors with chemically doped contacts," *Nano Letters*, 2005.
- [7] S. Datta, "Nanoscale device modeling: the Green's function method," *Superlattices and Microstructures*, vol. 28, pp. 253-278, 2000.
- [8] S. Datta, *Quantum transport: atom to transistor*. Cambridge, UK; New York: Cambridge University Press, 2005.
- [9] M. Lundstrom, *Fundamentals of Carrier Transport*, 2<sup>nd</sup> Edition, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2000.
- [10] Carbon Nanotubes: Synthesis, Structure Properties and Applications, M. S Dresselhaus, G. Avouris, Ph. Eds, *Springer-Verlag*: Berlin, 2001.
- [11] Special issue on carbon nanotubes, *PhysicsWorld*, 13 (6), June 2000.



# بائسکر

