

مدلسازی رفتار الکتریکی و شبیه سازی میدانی افزاره خود تعریف گسیل میدانی ساخته شده با

نانولوله های کربنی با روش حل معادلات حاکم بر آن

کوهسرخ، جواد^۱؛ عبدی، یاسر^{۱،۲}؛ مهاجرزاده، شمس الدین^۱ و رابرتسون، مایکل^۳

^۱آزمایشگاه لایه نازک، دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه تهران، انتهای خیابان کارگر شمالی، تهران

^۲گروه فیزیک، دانشگاه تهران، انتهای خیابان کارگر شمالی، تهران

^۳گروه فیزیک، دانشگاه آکادیا، کانادا

چکیده

یکی از مشکلات عمده در ساخت افزاره های نانومتری کنترل پذیری پایین این افزاره ها، چه در مراحل ساخت و چه در مراحل اندازه گیری است، لذا در این مقاله با حل تحلیلی معادلات حاکم بر افزاره ساخته شده با نانولوله های کربنی توانستیم شرایط مناسب جهت ساخت آن را فراهم کنیم و رفتار آن را با توجه به مدل که ارائه خواهد شد، بهینه سازی کنیم. مسأله مهمی که وجود دارد رفتار کوانتومی جالبی است که افزاره های نانومتری در این ابعاد از خود نشان می دهند.

Modulation of the electrical behavior and electric field simulation of Self-Defined Field Emission Nanotube-Based Device

Koohsorkhi, Javad¹; Abdi, Yaser^{1,2}; Mohajezadeh, Shamsoddin¹; Robertson, Michel³

¹Thin Film Laboratory, ECE Department, Tehran University

²Physics Department, Tehran University, Tehran

³Physics Department, Acadia University, Canada

Abstract

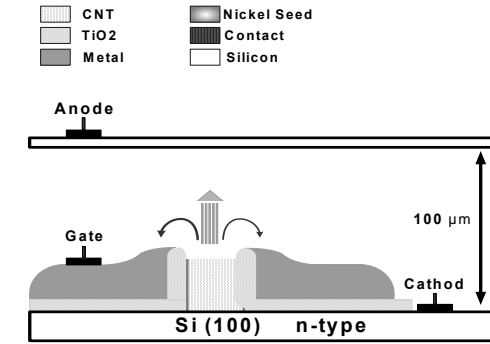
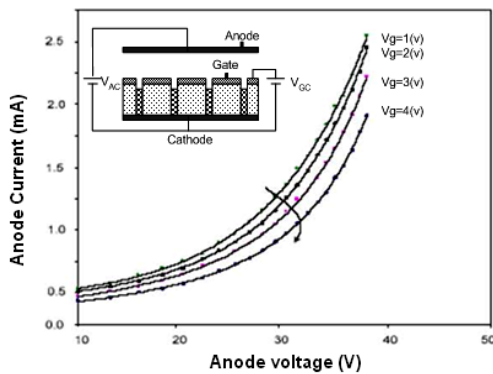
The main concern about the fabrication process of nano-devices is unreliability of mechanism and characterizations of devices in the nanometric region. In this paper, we analytically solved the Poisson's equation for the fabricated nanotube-based device. The proper conditions for this device is found and optimized. Furthermore, the effect of gate voltage on the emission current is shown. There is an excellent quantum behavior for this device in the nanometric region.

PACS No. 84

نانولوله ها را اندازه گیری کنند [۱]. ساختاری که این گروه استفاده کرده اند شامل زیر لایه ای از نانولوله ها که به فاصله چندین میکرون از آند قرار دارد. یک گروه تحقیقاتی دیگر با استفاده از روش کنترلی دریچه، موفق به ساخت باریکه الکترونی قابل کنترلی تا رنج چندین میکرون شدند [۲]. ساختاری که ما در این مقاله به آن می پردازیم ساختار ترانزیستور خود تعریف گسیل- میدانی است [۳] که از پیچیدگی نسبتاً زیادی برخوردار است که رفتار الکتریکی آن را با حل معادلات حاکم بر آن مدل کردیم و عملکرد ترانزیستور را با شبیه سازی میدانی بررسی کردیم.

مقدمه

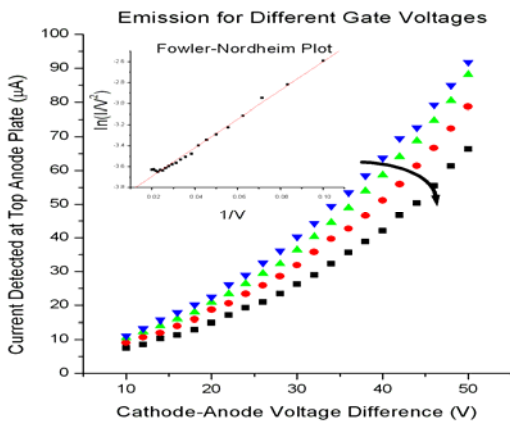
پیشرفت چشمگیر نانوله های کربنی از همان ابتدا، در زمینه های مختلف تحقیقاتی و صنعتی مشاهده می شود. بالغ بر چندین هزار مرکز تحقیقاتی در جستجوی کشف خواص و کاربرد نانولوله های کربنی می باشند. نانولوله ها در سال ۱۹۹۹ به طور قابل توجهی وارد حوزه تحقیقاتی الکترونیک شدند که شاهد کاربردهای جالبی در زمینه های ساخت افزاره های گسیل میدانی و صفحات نمایشی گسیل بالا می باشیم. یکی از مهمترین کاربردهای نانولوله ها بررسی گسیل الکترونی از نوک آنها، در زمینه های گسیل میدانی است. گروه تحقیقاتی N. de Jonge با استفاده از مدل تونل زنی فولر-نوردهایم موفق شدند که چگالی جریان گسیلی از



شکل ۱: شماتیکی از ترانزیستور خود تعریف گسیل میدانی

شبیه سازی خطوط میدان الکتریکی و مدلسازی افزاره

با توجه به طرح شماتیک ساختار ترانزیستور گسیل میدانی در شکل ۱ می توان گفت که الکترون بعد از گسیل از نوک نانولوله ها تحت تأثیر میدان حاصل از دریچه و آند قرار می گیرد. به علت روشن شدن مطلب، خطوط میدان را با استفاده از نرم افزار Flex PDE3 رسم کردیم. با توجه به خطوط میدان می توان گفت که الکترونها دقیقاً بعد از گسیل تحت تأثیر این میدان قرار خواهند گرفت و شکل واقعی باریکه متناسب با میدان دریچه تغییر خواهد کرد. شکل ۲ نشان می دهد که بر اساس الکتروپدینامیک کلاسیک، خطوط میدان در اطراف نانولوله نسبت به دیگر نقاط، از شدت بیشتری برخوردار است. لذا میدان قوی در اطراف نانولوله ها باعث خواهد شد که گسیل الکترونی از نوک نانولوله ها به خوبی صورت گیرد. در ادامه با استفاده از حل معادلات این ساختار، توانستیم رفتار ترانزیستور را مدلسازی کنیم. با استفاده از فرمول گسیل الکترونی از سطوح فلزی فویلر-نوردهایم [۱] می توان گسیل الکترونی از نوک نانولوله ها را با توجه به نتایج تجربی به صورت فرمول بسته ای وابسته به پتانسیل و ضخامت اکسید به دست آورد.



شکل ۳: نمودار بالایی: نتایج تجربی جریان گسیلی از نانولوله ها

نمودار پایینی: نتایج مدلسازی جریان گسیلی را با ولتاژهای دریچه مختلف بین ۴ تا ۱ ولت را نشان می دهد.

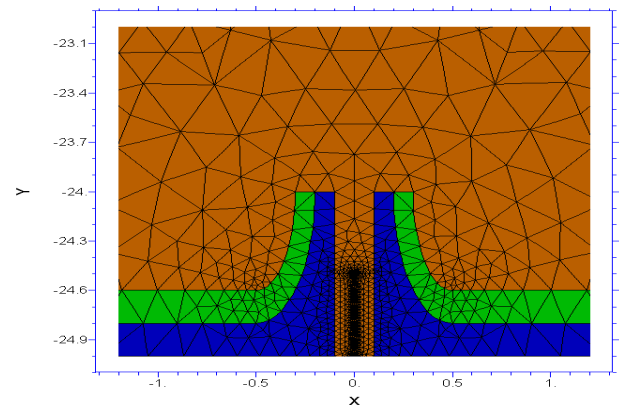
چگالی جریان گسیلی را می توان به این صورت نوشت:

$$J = 1.54 \times 10^{-6} \times \frac{F^2}{(\Phi/e)} \times \exp\left(\frac{-6.83 \times 10^9 \times (\Phi/e)^{3/2}}{F}\right) \text{ (A/m}^2\text{)} \quad (1)$$

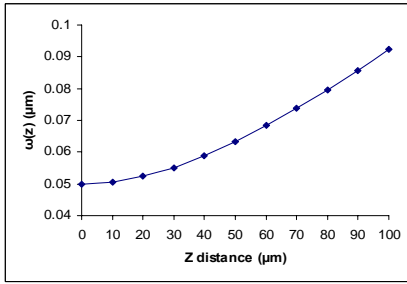
رابطه ۱ چگالی جریان گسیلی از نوک نانولوله ها را می دهد، که در آن Φ تابع کار نانولوله و برابر با $4/9$ الکترون ولت است و میدان الکتریکی F را می توان به شکل زیر نوشت:

$$F = \gamma \frac{V_g}{t} \quad (2)$$

که در آن γ ضریب وابسته به شکل نانولوله است که از روی نتایج تجربی به دست می آید. معادله ۱ جریان گسیلی از نوک نانولوله ها را به صورت تابعی از میدان آند-کاتد نشان می دهد. شکل ۳ همخوانی خوب نتایج مدلسازی با نتایج تجربی را نشان می دهد. برای مدلسازی تأثیر پتانسیل الکتریکی دریچه روی جریان گسیلی ابتدا تغییر شکل باریکه الکترونی را از ابتدای گسیل آن از نوک نانولوله تا رسیدن به آند بررسی می کنیم.



شکل ۲: توزیع فضایی خطوط میدان الکتریکی



شکل ۵: پهن شدگی باریکه الکترونی بر حسب فاصله از روزنه در درجه در ولتاژ ثابت آند معادل ۱۰۰ ولت

حدوداً ۲ برابر می شود. برای به دست آوردن ω_0 می توان از رابطه ۶ نسبت به ω_0 مشتق گرفت:

$$\frac{d\omega_z}{d\omega_0} = \sqrt{1 + \frac{\lambda^2 z^2}{\pi^2 \omega_0^4}} + \frac{\omega_0 \left(\frac{1}{2} \right) \left(\frac{\lambda^2 z^2}{\pi^2} \right) \left(\frac{-4}{\omega_0^5} \right)}{\sqrt{1 + \frac{\lambda^2 z^2}{\pi^2 \omega_0^4}}} \quad (7)$$

با صفر قرار دادن رابطه ۷ می توان پهنای را به صورت زیر نوشت:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{\lambda z}{\pi}} \quad (8)$$

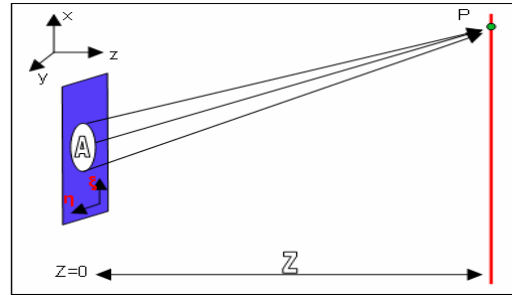
که در آن λ طول موج الکترونها هنگام عبور از روزنه و Z فاصله روزنه تا آند که معادل ۲۰۰ میکرون است. طول موجی که الکترون در اثر میدان آند و درجه پیدا می کند با استفاده از فرمول دوبردی ۰/۱۲۳ نانومتر به دست می آید. لذا می توان مقدار اولیه پهنای را به این صورت به دست آورد:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1.32 \times 10^{-10} \times 200 \times 10^{-6}}{\pi}} \approx 9 \times 10^{-8} m \quad (9)$$

که این مقدار ۱۰٪ با مقداری که در شبیه سازی میدان استفاده کرده ایم کمتر است که مقدار قابل قبولی است.

تأثیر ولتاژ درجه روی چگالی جریان گسیلی

با توجه به شکل ۶-الف می توان معادله لاپلاس را برای یک سیستم الکتروستاتیکی که شامل سه صفحه رسانا است، حل کرد. مسأله را به این صورت در نظر می گیریم که فرض می کنیم میدان الکتریکی در نقاط دور از روزنه یکنواخت باشد (شکل ب-۶) البته این مطلب به خاطر کوچک بودن قطر روزنه در مقایسه با ابعاد صفحات و فاصله آنها، تقریب خوبی است. شرایط مرزی حاکم بر این سیستم شامل شرایط آمیخته دریکله و نیومن است.



شکل ۴: پراکنندگی موج الکترونی از روزنه درجه در اثر میدانهای الکتریکی

با توجه به نظریه گسیل الکترونی و پراکنندگی نور از روزنه ریز می توان توزیع فضایی بار و مقطع باریکه الکترونی را به این صورت نوشت:

$$J = 1.5 \times 10^9 \times \exp(-\rho^2 / \omega_0^2) (mA/m^2) \quad (3)$$

$$A(\rho) = A_0 e^{-\rho^2 / \omega_0^2}$$

که در آن ω_0 پهنای اولیه باریکه حین خروج از درجه است و ρ فاصله از مرکز باریکه است. ضریب چگالی جریان از طریق نرمالیزاسیون جریان بر طبق نتایج تجربی به دست آمده است. پهنای باریکه بعد از خارج شدن از درجه ترانزیستور، تحت تأثیر میدان الکتریکی پهن می شود، که این نکته را می توان از توزیع میدان در ناحیه بین درجه و آند استنباط کرد (شکل ۲). برای بررسی این موضوع می توان با استفاده از نظریه پراش امواج از سوراخ ریز و با در نظر گرفتن خواص موجی الکترون، دامنه موج پراشیده را به صورت زیر نوشت [۴]:

$$u(\rho, z) = \frac{i}{\lambda} \iint_A 2\pi\rho \times A(\rho) \times e^{-ikr} d\rho / r \quad (4)$$

که در آن A سطح روزنه و $A(\rho)$ دامنه توزیع موج در فضا است. با توجه به شکل می توان r را به این صورت نوشت:

$$r = ((z^2 + (\rho - \rho')^2)^{1/2}) = z \left(1 - \frac{(\rho - \rho')^2}{2z^2} \right) \approx z \quad (5)$$

با قرار دادن r در رابطه ۴ و بعد از ساده سازی می توان دامنه موج را به این صورت نوشت:

$$u(\rho, z) \approx \frac{2\pi i}{\lambda z} e^{-ikz} \iint_A e^{\frac{ik(\rho - \rho')^2}{2z}} \rho' d\rho' = \dots \dots \dots$$

$$= \frac{i\pi}{\lambda} \frac{2\omega_0^2}{2z + ik\omega_0^2} \exp\left[-ik\left[z + \frac{\rho^2}{2z(1 + \pi^2 \omega_0^4 / \lambda^2 z^2)}\right]\right] \times \exp\left[-\frac{\rho^2}{\omega^2(z)}\right] \quad (6)$$

$$\omega^2(z) = \omega_0^2 \left(1 + \lambda^2 z^2 / \pi^2 \omega_0^4 \right)$$

$\omega(z)$ به صورت تابعی از z ، پهنای باریکه را نشان می دهد. شکل ۵ نشان می دهد که باریکه هنگامی که به آند می رسد پهنای آن

در نتیجه افزایش این ولتاژ باعث خواهد شد که تمام الکترونها وارد دریچه شده و به این ترتیب ترانزیستور به حالت خاموش در آید. شعاع روزنه که الکترونها از آنجا خارج می شوند، ۲۰۰ نانومتر است و پهنای اولیه باریکه الکترونی در حدود ۱۰۰ نانومتر است. با در نظر گرفتن این پارامترها فرمول بسته ای برای جریان گسیلی وابسته به ولتاژ دریچه به دست می آید که به این شکل است:

$$I = 1.4 \times 10^{-3} \times \exp \left\{ 1 - \left[\left(1 - \frac{2.85 \times 10^2 V_g}{t} \right) (2.65 \times 10^2) \right]^2 \right\} (A) \quad (10)$$

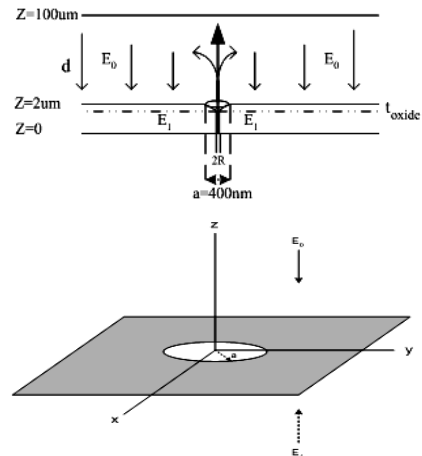
که در آن t ضخامت اکسید دریچه و V_g ولتاژ دریچه است. شکل ۷ نتایج تجربی [۳] و تئوری را نشان می دهد که درست بودن مدل استفاده شده را تأیید می کند. همانطور که در شکل مشاهده می شود، با افزایش ضخامت اکسید تأثیر ولتاژ دریچه روی جریان گسیلی بیشتر خواهد شد که کاملاً منطقی است.

نتیجه گیری

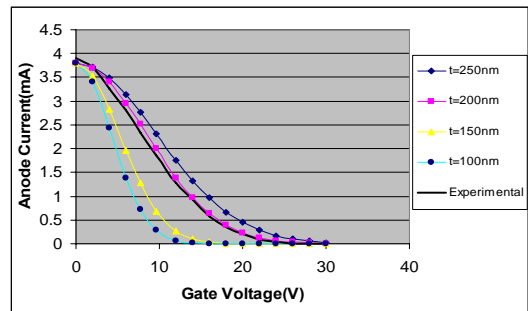
با افزایش میدان الکتریکی حاصل از آند، چگالی جریان گسیلی و پهنای باریکه الکترونی گسیل شده، افزایش خواهد یافت. همچنین با افزایش ولتاژ منفی دریچه، پهنای باریکه به نصف مقدار اولیه کاهش خواهد یافت که از این افزاره می توان برای لیتوگرافی نانومتری استفاده کرد و شرایط مناسب ساخت باریکه را برای رسیدن به ابعاد نانومتری را با این مدلسازی به دست آورد.

مرجع ها

[۱] N. de Jonge, M. Allieux, M. Doytcheva et al., Characterization of the field emission properties of individual thin carbon nanotubes, *Appl. Phys. Lett.* **85**, (2004), 1607.
 [۲] M. A. Guillorn, X. Yang, A. V. Melechko et al., Vertically Aligned carbon nanofiber-based field emission electron sources with an integrated focusing electrode, *J. Vac. Sci. Technol. B.* **22**, (2004) 35.
 [۳] J. Koohsorkhi, H. Hosseinzadegan, S. Mohajerzadeh, E. Asl. Soleimani and E. Arzi. "PECVD-grown carbon nanotubes on silicon substrates suitable for realization of field-emission devices" *journal of Fullerenes Nanotubes and Carbon Nanostructures*, **13**, n SUPPL. 1, (2005), 355-364
 [۴] P. R. Bevington and D. K. Robinson, *Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences* (McGraw Hill Inc., New York, 1969).



شکل ۶: الف: طرح واری از ترانزیستور ب: نمایش میدان الکتریکی در ناحیه بالا و پایین روزنه که E_0 مربوط به آند و E_1 مربوط به ولتاژهای آند و دریچه



شکل ۷: نتایج تئوری و تجربی تأثیر ولتاژ دریچه روی جریان گسیلی

رابطه ۱ چگالی جریان گسیلی را برحسب ولتاژ آند نشان می دهد. با توجه به رابطه ۱ و شکل ۳ و با در نظر گرفتن ولتاژ ثابت ۶۰ ولت برای آند، جریان گسیلی ترانزیستور معادل ۳/۵ میلی آمپر خواهد شد که با استفاده از این مقدار و شکل گاوسی باریکه الکترونی (رابطه ۳)، می توان تأثیر ولتاژ دریچه را به این ترتیب بیان کرد: باریکه الکترونی در هنگام عبور از روزنه تحت تأثیر ولتاژ دریچه متمرکز یا پهن خواهد شد. در اینجا برای متمرکز کردن باریکه از ولتاژ منفی و برای خاموش کردن ترانزیستور از ولتاژ مثبت استفاده کردیم. در نظر داشته باشیم که برای کاهش جریان نشتی دریچه بهتر است برای خاموش کردن ترانزیستور نیز، علاوه بر متمرکز کردن باریکه، از ولتاژ منفی برای دریچه استفاده کنیم. ولی در اینجا برای مدل سازی رفتار الکتریکی ترانزیستور از ولتاژ مثبت دریچه و جهت متمرکز کردن از ولتاژ منفی استفاده کرده ایم. با اعمال ولتاژ مثبت به دریچه که در $z=2\mu\text{m}$ قرار دارد (شکل ۶)، باریکه الکترونی به سمت صفحه دریچه کشیده خواهند شد،