

## طراحی و شبیه‌سازی حسگر گاز در ابعاد نانو با تاثیر شارژ پلاسما و تکنیک الکترواستاتیک

علی صداقت<sup>۱</sup>، علیرضا رحمانی<sup>۲</sup>، علیرضا شکری<sup>۳</sup>، مینا امیرمزلقانی<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه تربیت‌دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

۲- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه تربیت‌دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

۳- استادیار، گروه الکترونیک، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه تربیت‌دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

### خلاصه

سنسورهای تشخیصی در بسیاری از صنایع مورد استفاده قرار می‌گیرند. یکی از انواع این سنسورها حسگرهای گازی است که کاربرد فراوانی در صنایع شیمیایی، پزشکی و ... دارند. در این مقاله حسگرهای گازی بر مبنای آشکارسازی گاز آمونیاک با تغییر در تابع کار فلز کاتالیزوری گیت بر پایه ساختار نانو سیم و نانو لوله با ساختار FET طراحی و شبیه‌سازی شده است. طرح اول ترانزیستور نانوسیم عمودی، طرح دوم ترانزیستور نانوسیم استوانه‌ای و طرح سوم ترانزیستور نانولوله هستند که جریان روشن، جریان خاموش، نسبت جریان‌های روشن به خاموش، حساسیت خاموش و زمان پاسخ هر یک به عنوان یک حسگر گاز مورد دقت قرار گرفته است. کاهش ۶۰ درصدی جریان روشن و ۸۴ درصدی جریان خاموش و ۲٫۵ برابر شدن نسبت جریان روشن به خاموش و همچنین افزایش حساسیت خاموش در ساختار لوله‌ای نسبت به طرح نانوسیم عمودی مشاهده می‌گردد.

**کلمات کلیدی:** نانوسیم، نانو حسگر، حسگر گاز، آمونیاک

### ۱. مقدمه

سنسورهای تشخیصی در بسیاری از موارد مورد استفاده قرار می‌گیرند. یکی از انواع این سنسورها حسگرهای گازی هستند که کاربرد فراوانی در صنایع شیمیایی، پزشکی، محیط‌زیست، صنایع خودروسازی و ... دارند. با استفاده از نانوسیم به عنوان حسگر گاز می‌توان به تشخیص گاز در غلظت‌های پایین با دقت بالایی رسید. ساختارهای نانو دارای ویژگی‌های شگفت‌آوری هستند که افزایش نسبت سطح به حجم یکی از دلایل این خواص است [1]. با انتشار گاز بر روی حسگر و با تغییر تابع کار فلز گیت جریان‌های روشن و خاموش و ولتاژ آستانه تغییر کرده که می‌توان از این موارد به عنوان پارامترهای تشخیص استفاده کرد.

<sup>1</sup>Corresponding author: تهران، ایران، دانشگاه تربیت‌دبیر شهید رجایی، دانشکده مهندسی برق

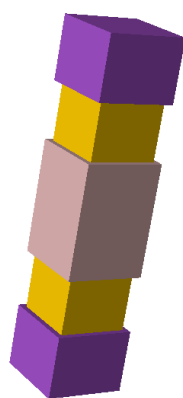
در این مقاله در بخش ساختار، ساختار نانوسیم عمودی بیان شده و دو طرح پیشنهادی ترانزیستور نانوسیم استوانه‌ای و ترانزیستور نانولوله، در ادامه آن آورده می‌شوند. در بخش روابط، روابط و تأثیر گاز بر تابع کار فلز گیت مورد بررسی قرار می‌گیرند و در بخش چهارم به مقایسه سه ساختار از نظر جریان‌های روشن و خاموش و نسبت آن‌ها و همچنین حساسیت خاموش پرداخته می‌شود. در این مطالعه از نرم‌افزار سیلواکو برای شبیه‌سازی استفاده شده است و برای سه ساختار مختلف پارامترها بررسی و نتیجه‌گیری بر مبنای آن‌ها انجام گرفته است.

## ۲. ساختار

در این بخش با بیان سه ساختار پارامترهای جریان، حساسیت و زمان پاسخ بررسی می‌شوند. در مورد پارامترهای قطعه، طول سورس و درین هر کدام ۲۰ نانومتر و طول کانال نیز ۲۰ نانومتر است. فلز کاتالیزوری گیت، فلز کبالت انتخاب شده است که دارای ضخامت یک نانومتر است. از ایندیم گالیم روی اکسید IGZO به‌عنوان ماده اصلی نانولوله با دوپینگ ذاتی  $10^{15}$  بر سانتی‌متر و با ضخامت ۱۰ نانومتر استفاده شده است و از هافنیم اکسید به‌عنوان دی‌الکترونیک با ضخامت ۱/۱ نانومتر استفاده شده است. ولتاژ درین سورس در حالت روشن برابر با ۱ ولت و ولتاژ گیت سورس ۱/۵ ولت است.

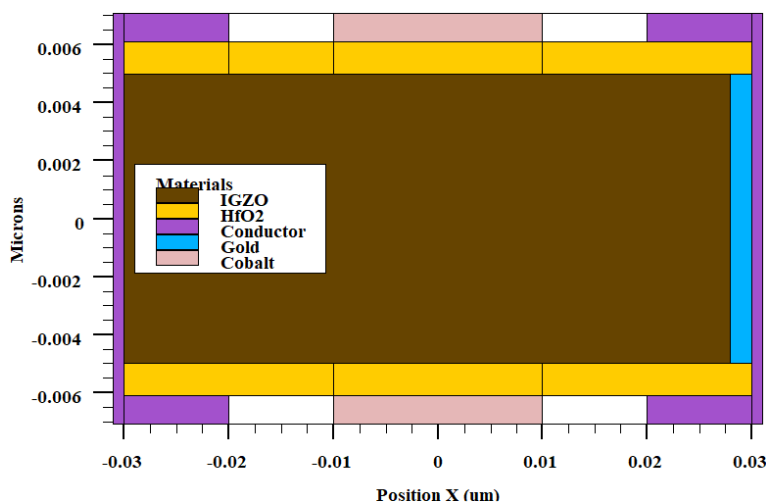
در شکل ۱ ساختار ترانزیستور عمودی نشان داده شده است که سمت درین با تکنیک الکترواستاتیک و در سمت سورس با تکنیک پلاسما شارژ با انتخاب تابع کار مناسب برای سمت سورس دوپینگ انجام می‌گیرد. شکل ۱- الف نمای سه‌بعدی قطعه و شکل ۱- ب نمای دوبعدی را نشان می‌دهد. [2]

از مدل‌های  $srh$ ,  $conmob$ ,  $fldmob$  در این شبیه‌سازی استفاده شده است.



Materials:  
Cobalt  
Gold  
Conductor  
HfO2  
IGZO

الف



ب

شکل ۱ نانوسیم عمودی

## ۱.۲. تغییرات ایجاد شده بر ساختار نانوسیم عمودی:

برای افزایش بازده و کاهش مصرف و کاهش توان، طرح‌های زیر بیان می‌گردد، در ابتدا پارامترها بیان شده و در ادامه ساختارها آورده می‌شوند.

## ۱.۱.۲ پارامتر

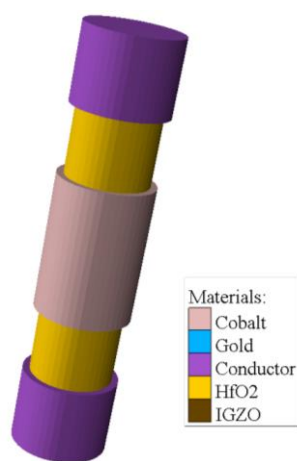
در جدول ۱ ابعاد برای دو طرح ارائه شده آمده است: طول کانال، طول سورس و طول درین برابر ۲۰ نانومتر و فاصله فلز گیت با الکتروود سورس و درین ۱۰ نانومتر و شعاع ۵ نانومتر است. ضخامت عایق گیت ۱/۱ نانومتر و از جنس هافنیم اکسید است.

جدول ۱ پارامترهای ساختارها

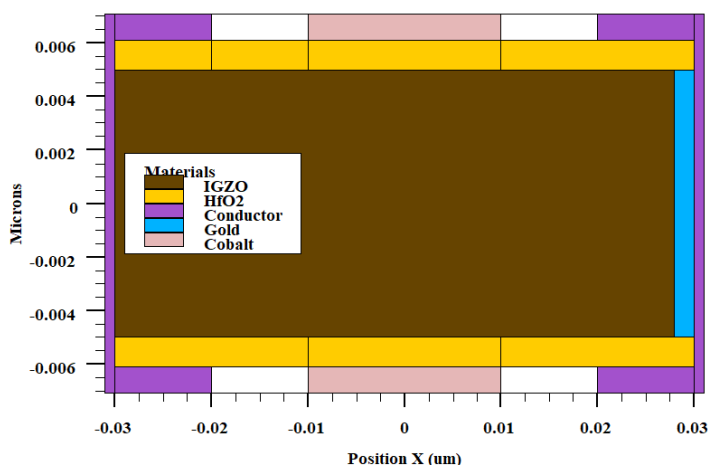
20nm	طول کانال
5nm	شعاع کانال
10nm	ضخامت فاصله دهنده
1.1nm	ضخامت اکسید گیت
1e15 /cm3	دوپینگ
1v	ولتاژ درین
5meV	تابع کار فلز گیت
3.9meV	تابع کار فلز سورس

## ۲.۱.۲ ساختار استوانه‌ای

در شکل ۲ سطح مقطع شکل ۱ تغییر کرده و برای کاهش تلفات از مقطع دایره‌ای برای قطعه استفاده شده است. در شکل ۲-الف نمای سه‌بعدی و شکل ۲-ب نمای دوبعدی ساختار استوانه‌ای نمایش داده شده است. ماده اصلی نانوسیم از ایندیم گالیم روی اکسید است که ساختاری مصنوعی و دارای موبیلیتی بالایی است. [2]



الف



ب

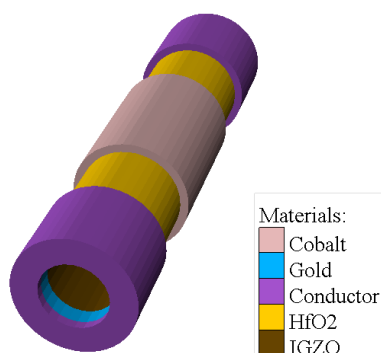
شکل ۲ نانوسیم استوانه‌ای



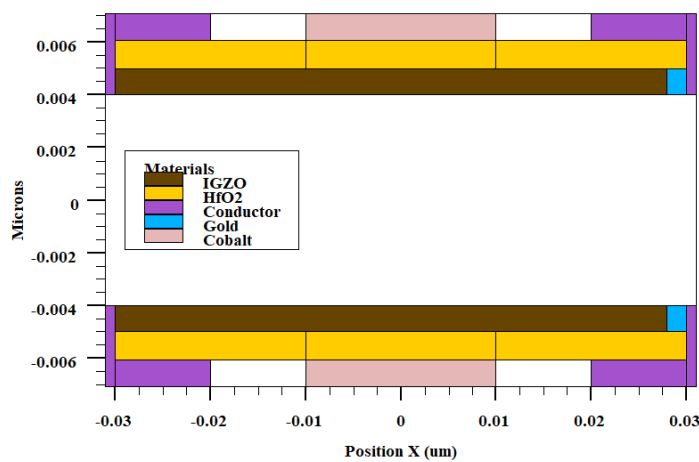
## ۳.۱.۲ ساختار لوله ای

در شکل ۳ علاوه بر تغییر مقطع، استوانه ای به شعاع ۴ نانومتر برای افزایش حساسیت و کاهش جریان های روشن و خاموش از قطعه خارج شده است.

شکل ۳- الف نمای سه بعدی و شکل ۳- ب نمای دوبعدی ساختار لوله ای را نشان می دهد که دارای شعاع داخلی ۴ نانومتر شعاع بیرونی ۵ نانومتر است.



الف



ب

شکل ۳ نمای دو بعدی ساختارهای عمودی و استوانه ای

## ۳. روابط

کبالت که واکنش پذیری خوبی با گاز آمونیاک دارد به عنوان فلز کاتالیزوری گیت انتخاب شده است؛ با واکنش گاز آمونیاک با فلز کاتالیزوری گیت تابع کار فلز با توجه به معادله (۱) تغییر می کند: [3]

$$\Delta\phi_m = cont - \left(\frac{RT}{4F}\right) \ln P \quad (1)$$

که R ثابت گاز، P فشار جزئی، F ثابت فرادی و  $\Delta\Phi$  تغییرات تابع کار بر اثر واکنش مولکول های گاز با فلز کاتالیزوری گیت است.

تغییرات در تابع کار باعث تغییر در ولتاژ باند تخت با رابطه (۲) می گردد: [4]

$$V_{fb} = \phi_m - \phi_s \pm \Delta\phi_m \quad (2)$$

که  $\Phi_m$  تابع کار فلز،  $\Phi_s$  تابع کار نیمه هادی و  $V_{fb}$  ولتاژ باند تخت می باشد.  
با تغییر ولتاژ باند تخت ولتاژ آستانه و جریان زیر آستانه تغییر می کند: [4] , [3]

$$V_{th} = V_{fb} + \varphi_{smin-th} - \frac{\lambda_q N_a}{4\epsilon_{si}} \left(1 - \frac{t_{si}^2}{\lambda}\right) - 2\sqrt{AB} \left(1 - \frac{t_{si}^2}{\lambda}\right) \quad (3)$$

که  $V_{fb}$  ولتاژ باندتخت و  $\varphi_{smin-th}$  تابع کار و  $\epsilon_{si}$  ضریب گذردهی سیلیکون و  $t_{si}$  ضخامت فیلم سیلیکونی است. A و B با معادلات (۴) و (۵) محاسبه می شوند:

$$A = \frac{(V_{bi} + \phi)(1 - e^{-kL}) + V_{ds}}{2\sinh(KL)} \quad (4)$$

$$B = \frac{(V_{bi} + \phi)(e^{-kL} - 1) - V_{ds}}{2\sinh(KL)} \quad (5)$$

که  $V_{bi}$  ولتاژ سطح داخلی و  $\phi$  پتانسیل دوبعدی و  $V_{ds}$  ولتاژ درین سورس می باشد.

$$I_{subthreshold} = I_0 \left[ e^{\frac{V_{gs} - V_{th}}{nV_T}} \right] \left[ 1 - e^{-\frac{V_{ds}}{V_T}} \right] \quad (6)$$

که  $V_{gs}$  ولتاژ گیت سورس و  $V_{th}$  ولتاژ آستانه و  $V_{ds}$  ولتاژ درین سورس  $V_T$  ولتاژ گرمایی است.

$$I_0 = \frac{W\mu_n C_{ox} V_T^2 e^{1.8}}{L} \quad (7)$$

$$V_T = \frac{kT}{q} \quad (8)$$

که  $W$  پهنای ترانزیستور،  $\mu_n$  تحرک پذیری الکترون،  $C_{ox}$  ظرفیت خازنی عایق،  $V_T$  ولتاژ گرمایی و  $L$  طول ترانزیستور است.

با بررسی جریان های روشن و خاموش با معادله (۹) حساسیت خاموش محاسبه می شود: [3]

$$S_{I_{OFF}} = \frac{I_{OFF(Before\ gas\ adsorption)}}{I_{OFF(After\ gas\ adsorption)}} \quad (9)$$

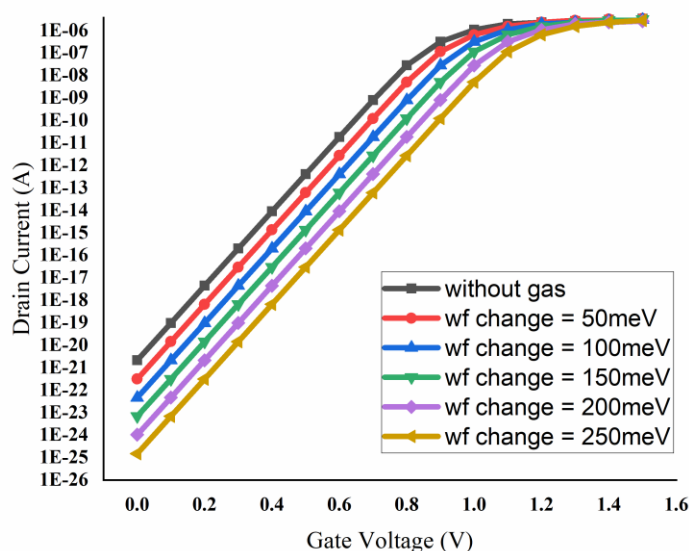
که در صورت جریان خاموش قبل از انتشار گاز و در مخرج جریان خاموش بعد از انتشار گاز، موردنظر است.

#### ۴. تحلیل داده ها

برآثر واکنش گاز آمونیاک با فلز کاتالیزوری گیت بر اساس فرمول های بیان شده در بخش روابط، تابع کار تغییر کرده و باعث تغییرات در جریان های روشن و خاموش و ولتاژ آستانه می شود و از این پارامترها می توان برای تعیین حساست و تشخیص گاز استفاده کرد.

در شکل ۴ تغییرات جریان بر اساس تغییر ولتاژ گیت سورس برای ساختار ترانزیستور عمودی با غلظت هایی معادل تغییر ۵۰ meV، ۱۰۰ meV، ۱۵۰ meV، ۲۰۰ meV، ۲۵۰ meV در تابع کار فلز گیت و حالت بدون حضور گاز نشان داده شده است.

در جدول ۲ جریان های روشن و خاموش برای هر سه ساختار بیان شده محاسبه شده و این تغییرات برای تغییر تابع کار 50meV در ردیف دوم برای هر ساختار محاسبه شده است و نمودارهای تغییرات جریان روشن و خاموش و نسبت آن ها در ادامه آمده است.



شکل ۴ تغییرات نمودار جریان ولتاژ در نانوسیم عمودی برای حالت بدون تزریق گاز و تزریقی با غلظت معادل تغییر 50meV در تابع کار فلز گیت

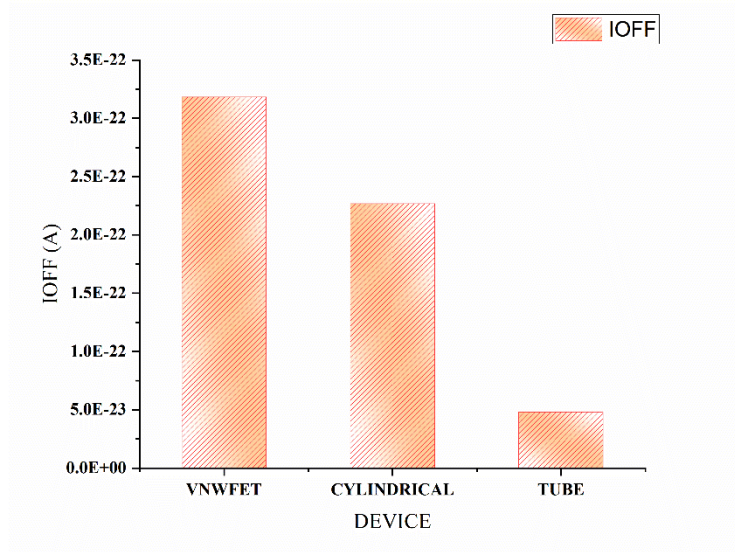
جدول ۲ تغییرات جریان روشن و خاموش در سه ساختار مطرح شده برای حالت بدون تزریق گاز و تزریقی با غلظت معادل تغییر 50meV در تابع کار فلز گیت

Stoff	$I_{on}/I_{off}$	$I_{on}(A/\mu m)$	$I_{off}(A/\mu m)$	change	device
-	3/553E+14	5/482E-07	1/5430E-21	Without gas	Cylindrical fet
6/796	1/598E+15	3/628E-07	2/270E-22	$\Delta wf=50$	
-	5/048E+14	1/087E-06	2/153E-21	Without gas	VNWfet
6/763	2/061E+15	6/564E-07	3/183E-22	$\Delta wf=50$	
-	1/298E+15	4/309E-07	3/318E-22	Without gas	TUBE
6/886	5/541E+15	2/670E-07	4/818E-23	$\Delta wf=50$	

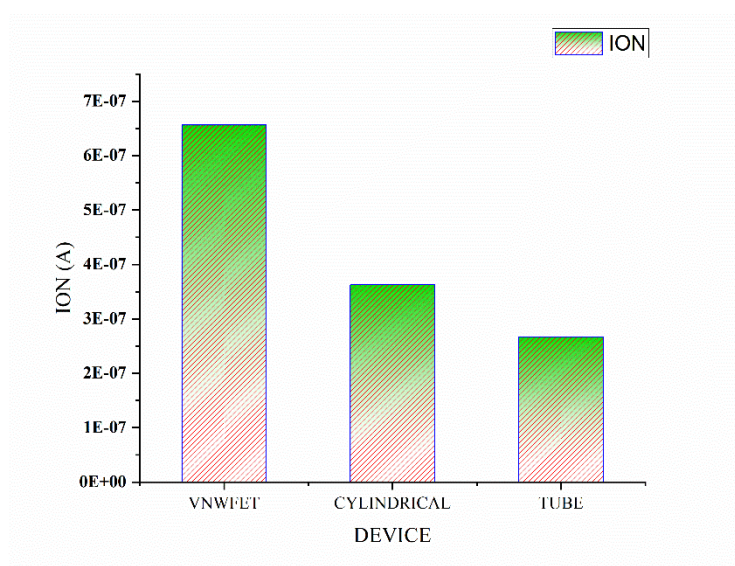


در شکل ۵ تغییر جریان خاموش در سه ساختار مطرح شده نشان داده شده است. جریان خاموش در ساختار عمودی بیشترین میزان را دارد و بعد از آن ساختار استوانه‌ای با ۲۸ درصد کاهش و ساختار لوله‌ای با ۸۴ درصد کاهش کمترین جریان خاموش و در نتیجه کمترین توان تلف شده را در ساختار لوله‌ای مشاهده می‌شود.

در شکل ۶ تغییر جریان روشن در سه ساختار بیان شده نشان داده شده است. جریان روشن در ساختار ترانزیستور عمودی از دو ساختار دیگر بیشتر بوده و بعد از آن ساختار ترانزیستور استوانه‌ای با ۴۹ درصد کاهش و ساختار لوله‌ای با ۶۰ درصد کاهش مشاهده می‌شود. در این سه مدل، ساختار لوله‌ای به علت جریان روشن کمتر، مصرف پایین‌تری را ارائه خواهد داد.



شکل ۵ تغییر جریان روشن در سه ساختار طرح شده

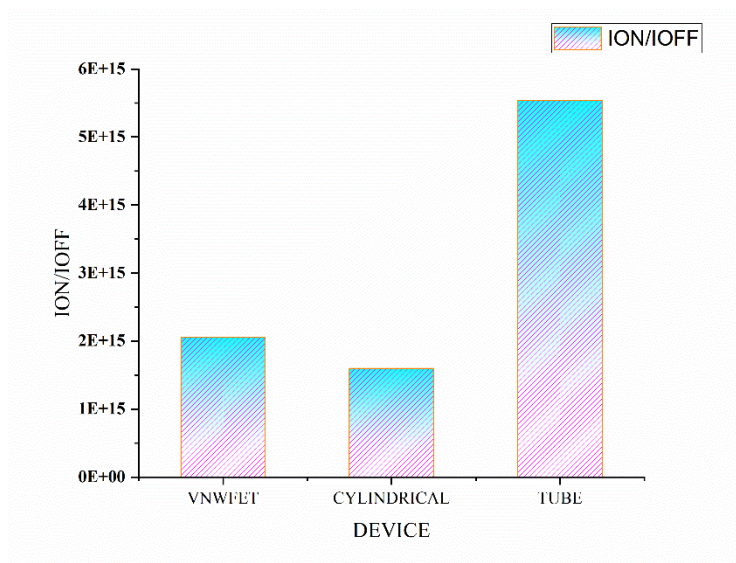


شکل ۶ تغییرات جریان روشن

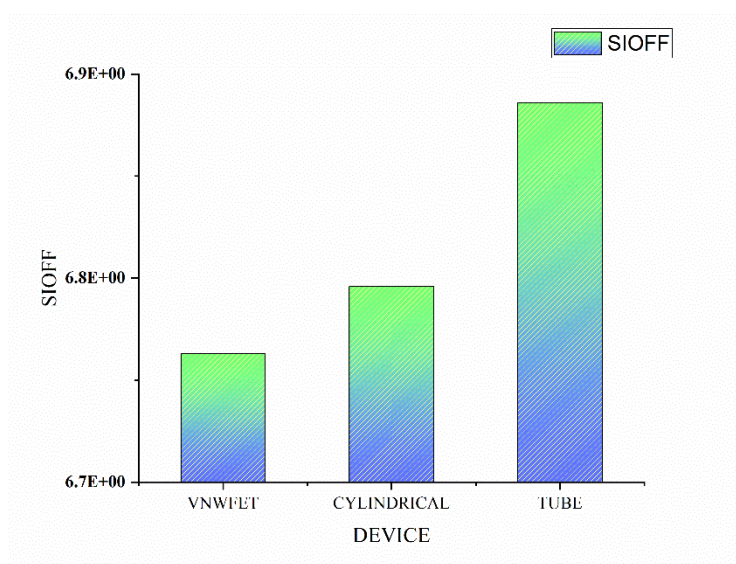
در شکل ۷ نسبت تغییر جریان روشن به خاموش نمایش داده شده است. در ساختار استوانه‌ای نسبت جریان روشن به

خاموش کمترین مقدار بوده و در ساختار لوله ای نسبت جریان روشن به خاموش نسبت به دو ساختار دیگر بیشتر بوده و افزایش بازده را نشان می دهد.

در شکل ۸ تغییر حساسیت خاموش در سه ساختار بررسی شده است. در ساختار ترانزیستور عمودی حساسیت کمترین مقدار را در بین ساختارها دارا است. اما ساختار لوله ای دارای بالاترین حساسیت است. لازم به یادآوری است این نسبت با تغییرات ۵۰ meV بررسی شده است.



شکل ۷ نسبت جریان روشن به خاموش در سه ساختار مطرح شده

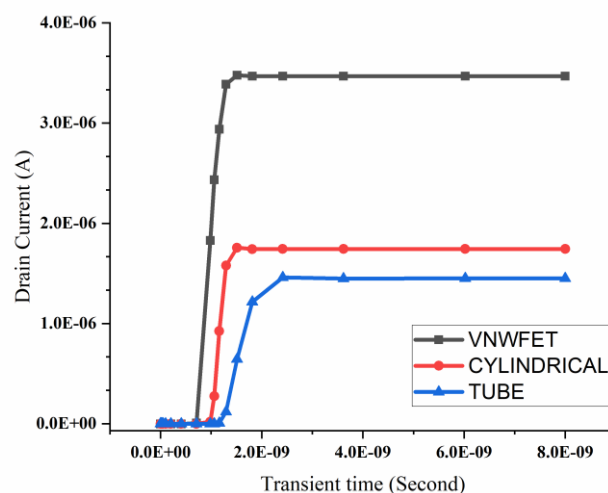


شکل ۸ تغییر حساسیت خاموش در ساختارهای تعریف شده

در شکل ۹ تغییرات جریان درین نسبت به زمان در غلظت متناسب با تغییر تابع کار برابر با ۵۰ meV مشاهده می شود.



از شکل ۶ کاهش در جریان روشن نمایش داده شده بود که در این شکل نیز این تغییر مشاهده می‌شود. علاوه بر تغییر جریان روشن و کاهش آن در ساختار لوله‌ای، کاهش زمان روشن و افزایش حساسیت نمایش داده می‌شود.



شکل ۹ تغییرات جریان در زمان

### نتیجه‌گیری

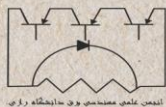
در این مقاله سه طرح بررسی شد. طرح اول ترانزیستور نانوسیم عمودی، طرح دوم ترانزیستور نانوسیم استوانه‌ای و طرح سوم ترانزیستور نانولوله بودند که جریان روشن، جریان خاموش، نسبت جریان‌های روشن به خاموش، حساسیت خاموش و زمان پاسخ هر یک به عنوان یک حسگر گاز مورد دقت قرار گرفت.

از فلز گیت کاتالیزوری کبالت برای تشخیص گاز آمونیاک در این بررسی استفاده شد. بعد از واکنش مولکول‌های گاز با فلز گیت تابع کار فلز تغییر کرده و با تغییر بر ولتاژ باند تخت باعث تغییر ولتاژ آستانه و جریان زیر آستانه می‌شود. با تحلیل‌های انجام گرفته نتایج زیر حاصل گردید:

حساسیت خاموش در ساختار لوله‌ای بیشترین مقدار و بعد از آن در ساختار استوانه‌ای و در ساختار عمودی کمترین مقدار را دارد. جریان روشن در ساختار استوانه‌ای و ساختار لوله‌ای به ترتیب ۴۹ و ۶۰ درصد و جریان خاموش در ساختار استوانه‌ای و ساختار لوله‌ای به ترتیب ۲۸ و ۸۴ درصد کاهش یافته است. نسبت جریان روشن به خاموش در ساختار استوانه‌ای ۲۹ درصد کاهش اما و در ساختار لوله‌ای ۲/۵ برابر شده است. کاهش جریان‌های روشن و خاموش باعث کاهش مصرف و کاهش تلفات شده و افزایش نسبت جریان‌های روشن به خاموش در ساختار لوله‌ای باعث افزایش بازده می‌گردد.

### مراجع

- [1] NSTC (U.S. National Science and Technology Council), "National Nanotechnology Initiative: The Initiative and Its Implementation Plan", Washington.
- [2] Jayaswal, N., Raman, A., Kumar, N., & Singh, S. (2019). Design and analysis of electrostatic-charge plasma based dopingless IGZO vertical nanowire FET for ammonia gas sensing. *Superlattices and Microstructures*, 125, 256-270.



مجمع کنفرانس ملی دانشجویی  
مهندسی برق ایران



- [3] Gautam, R., Saxena, M., Gupta, R. S., & Gupta, M. (2013). Gate-all-around nanowire MOSFET with catalytic metal gate for gas sensing applications. IEEE transactions on nanotechnology, 12(6), 939-944.
- [4] Butzen, P. F., & Ribas, R. P. (2006). Leakage current in sub-micrometer cmos gates. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1-28.