

# SID



سرویس های ویژه



سرویس ترجمه تخصصی



کارگاه های آموزشی



بلاگ مرکز اطلاعات علمی



سامانه ویراستاری STES



فیلم های آموزشی

## کارگاه های آموزشی مرکز اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی

کارگاه آنلاین  
بررسی مقابله ای متون (مقدماتی)

کارگاه آنلاین  
پروپوزال نویسی و پایان نامه نویسی

کارگاه آنلاین آشنایی با پایگاه های اطلاعات علمی بین المللی و ترند های جستجو

## ارائه یک مدل تحلیلی دو بعدی برای مشخصه جریان درین-ولتاژ گیت در ترانزیستور تونلیدو گیتی

قلی زاده، مهدی؛ حسینی، سیدابراهیم<sup>۲</sup>

گروه برق دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

## چکیده

در این مقاله یک مدل تحلیلی دو بعدی برای ترانزیستورهای تونلی دو گیتی ارائه می‌شود. در مدل پیشنهادی با حل دو معادله پواسن در کانال یک رابطه برای میدان الکتریکی کانال بدست می‌آید. سپس با بکاربردن مدل Kane برای محاسبه میزان تونل زنی، یک رابطه برای جریان درین بر حسب ولتاژ گیت ارائه می‌شود. نتایج شبیه سازی دقت مدل تحلیلی را به خوبی نشان می‌دهند. در این مدل اثر تمامی ویژگی های ساختاری ترانزیستور در نظر گرفته شده است.

## A Two-Dimensional Analytical Model for Drain Current-Gate Voltage Characteristic of Double-Gate Tunnel FETs

Gholizadeh, Mahdi<sup>1</sup>; Hosseini, Seyed Ebrahim<sup>2</sup><sup>1,2</sup> Department of Electrical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad

## Abstract

*In this paper a two-dimensional (2-D) analytical model for double-gate (DG) tunnel FETs (TFETs) is presented. In the proposed model using 2-D solution of Poisson's equation in the channel, an expression for the channel electric field is derived. Then, by applying the Kane's model to calculate band-to-band tunneling (BTBT), an expression for the drain current as a function of the gate voltage is presented. The analytic model is in a good agreement with simulation results. In this model all the structural features are taken into account.*  
PACS No.

## مقدمه

کم است. همین مشخصه باعث شده است که تونل‌فت‌ها جایگزین مناسبی برای ماسفت‌ها در طراحی مدارات با توان پایین باشند. شکل ۱ ساختار یک تونل فت نوع-n با دو گیت متقارن را نشان می‌دهد. در این ساختار درین و سورس به ترتیب دارای ناخالصی نوع n و p هستند و کانال ذاتی در نظر گرفته می‌شود. به منظور بهینه سازی و درک بهتر عملکرد این ادوات، ارائه یک مدل تحلیلی امری اجتناب ناپذیر است. همچنین وجود یک رابطه ریاضی برای توصیف جریان ترانزیستور دید بهتری در طراحی مدار ایجاد می‌کند. تاکنون چندین کار تحلیلی بر روی تونل فت‌ها انجام شده است [۱-۳].

با کوچکتر شدن ابعاد ماسفت‌ها، توان اتلافی به علت افزایش جریان نشتی به یک چالش اساسی تبدیل شده است. یکی از مهمترین دلایل افزایش جریان نشتی در ماسفت‌ها محدود بودن شیب زیر آستانه‌ای آنها به مقدار 60mV/dec است [۱]. در سال‌های اخیر ترانزیستورهای تونلی (تونل‌فت‌ها) که تشکیل جریان در آنها بر اساس فرآیند تونل زنی است به عنوان جایگزین برای ماسفت‌ها بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۲]. از مزیت‌های مهم تونل فت‌ها تغییر عملکرد از حالت خاموش به روشن به ازای ولتاژ گیت کم و همچنین جریان حالت خاموش بسیار

معادله بالا طبق [۷] به صورت زیر حل می‌شود

$$\psi(x, y) = V(x) + u_L(x, y) + u_R(x, y) \quad (۳)$$

که  $u_L$  و  $u_R$  حل دو بعدی (۲) هستند و  $V(x)$  حل یک بعدی (۲) در جهت عمود بر کانال است. اگر اختلاف تابع کار فلز گیت و کانال  $\phi_{GC}$  و ولتاژ گیت  $V_{GS}$  باشد، پتانسیل کانال با در نظر گرفتن هارمونیک اول به صورت زیر است

$$\psi(x, y) = V_{GS} - \phi_{GC} + \cos(\pi x / \lambda_1) \times \left( \frac{b_1 \sinh(\pi(L-y)/\lambda_1) + c_1 \sinh(\pi y / \lambda_1)}{\sinh(\pi L / \lambda_1)} \right) \quad (۴)$$

که ثابت‌های  $b_1$ ،  $\lambda_1$  و  $c_1$  طبق [۷] بدست می‌آیند. برای بدست آوردن میدان الکتریکی در جهت کانال از (۴) نسبت به  $y$  مشتق می‌گیریم. بنابراین میدان افقی داخل کانال به صورت زیر می‌شود

$$E_y(x, y) = \left( -\frac{\pi}{\lambda_1} b_1 \frac{\cosh(\pi(L-y)/\lambda_1)}{\sinh(\pi L / \lambda_1)} + \frac{\pi}{\lambda_1} c_1 \frac{\cosh(\pi y / \lambda_1)}{\sinh(\pi L / \lambda_1)} \right) \times \cos(\pi x / \lambda_1) \quad (۵)$$

### مدل تحلیلی جریان

در این قسمت به ارائه یک مدل تحلیلی برای جریان می‌پردازیم. برای بدست آوردن جریان در یک تونل‌فت باید ابتدا میزان تولید تونل زنی حامل‌ها را در ناحیه اتصال سورس-کانال بدست بیاوریم. رابطه میزان تولید تونل زنی برای مواد با شکاف گاف غیر مستقیم همانند سیلیکان طبق [۸] به صورت زیر است

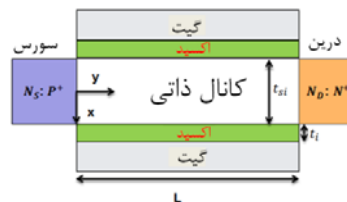
$$G_{BTBT} = A E^{2.5} \exp\left(-\frac{B}{E}\right) \quad (۶)$$

که  $A$  و  $B$  ضرایب ثابتی هستند و  $E$  میدان الکتریکی است. طبق [۳] میدان الکتریکی افقی باعث تونل زنی می‌شود بنابراین  $E$  در رابطه بالا میدان الکتریکی افقی،  $E_y(x, y)$  است. برای بدست آوردن جریان باید از رابطه میزان تولید تونل زنی روی ناحیه تونل زنی انتگرال گیری کنیم

$$I = q \int G_{BTBT} dV = q \iiint A E_y^{2.5} \exp\left(-\frac{B}{E_y}\right) dx dy dz \quad (۷)$$

[۵]. به عنوان نمونه در مرجع [۳] پتانسیل داخل کانال به صورت تحلیلی بدست آمده ولی مشخصه جریان به صورت عددی محاسبه شده است. در [۴] بدون بدست آوردن پتانسیل داخل کانال و با استفاده از روش

Landuar



شکل ۱: ساختار یک تونل‌فت دو گیتی متقارن

رابطه‌ایی برای جریان بدست آورده‌اند. در این مدل افت ولتاژ روی اکسید گیت با افزایش ولتاژ گیت به صورت خطی در نظر گرفته شده است. در صورتی که رابطه  $V_{GS}$  با افت ولتاژ در  $V_{GS}$  های کم به صورت خطی است ولی در  $V_{GS}$  های بالاتر از حالت خطی خارج می‌شود. در بعضی دیگر از مقالات با حل یک بعدی پتانسیل داخل کانال روابطی برای جریان ارائه شده است همانند [۵].

در این مقاله یک مدل تحلیلی دو بعدی جامع برای یک تونل‌فت با دو گیت متقارن ارائه شده است. در این مدل پتانسیل داخل کانال به صورت دو بعدی حل می‌شود و سپس با استفاده آن میدان الکتریکی بدست می‌آید. با داشتن میدان الکتریکی و استفاده از مدل Kane [۶] یک رابطه برای جریان درین بر حسب ولتاژ گیت محاسبه می‌شود. مقایسه بین مدل تحلیلی و نتایج شبیه سازی صحت آن را به خوبی نشان می‌دهد.

### محاسبه پتانسیل

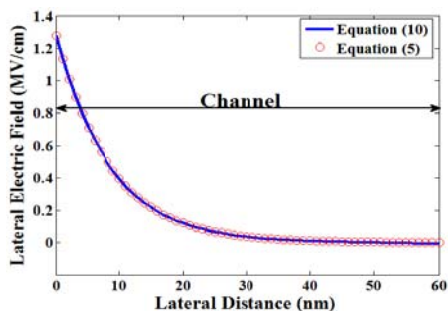
برای بدست پتانسیل داخل کانال معادله پواسن راحل می‌کنیم

$$(1) \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = \frac{q}{\epsilon_{si}} n$$

که در آن  $q$  بار الکترون،  $\epsilon_{si}$  ضریب گذردهی سیلیکان،  $n$  چگالی بار-های متحرک و  $\psi$  پتانسیل کانال می‌باشد.

برای حل معادله پواسن در تونل‌فت‌ها، بارهای متحرک داخل کانال قابل صرف نظر هستند. زیرا میدان الکتریکی قوی در اتصال سورس کانال بار-های متحرک را سمت درین جابجا می‌کند و تجمع آنها در داخل کانال کم است. بنابراین معادله (۱) به صورت معادله زیر کاهش می‌یابد

$$(2) \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = 0$$



شکل ۲: بررسی دقت معادله (۵) در مقایسه با (۱۰)

با جایگذاری (۱۱) در (۶)  $G_{BTBT}$  بدست می‌آید

$$G_{BTBT} = A \overline{E_y(y)}^{2.5} \exp\left(-\frac{B}{E_y(y)}\right) \quad (12)$$

برای محاسبه جریان باید از (۱۲) روی ناحیه تونل زنی طبق (۷) انتگرال بگیریم. با توجه به رفتار نمایی  $\overline{E_y}$  محاسبه انتگرال پیچیده می‌شود به همین منظور از معادل سازی زیر استفاده می‌کنیم

$$\exp\left(-\frac{B}{E_y(y)}\right) = k \exp(-m y) \quad (13)$$

در رابطه بالا تابع نمایی پیچیده در (۱۲) را با یک تابع نمایی ساده تر معادل کرده ایم که  $m$  و  $k$  به صورت زیر هستند

$$k = \exp\left(\frac{B t_{si}}{2N b_1 \sin\left(\frac{\pi t_{si}}{2\lambda_1}\right)}\right) \quad (14)$$

$$m = \frac{-\pi B t_{si}}{2N b_1 \sin\left(\frac{\pi t_{si}}{2\lambda_1}\right)} \quad (15)$$

بنابراین (۷) به صورت زیر تبدیل می‌شود

$$I = qA w \int_{-t_{si}/2}^{t_{si}/2} \int_0^L k \left(\frac{-2N b_1 \sin\left(\frac{\pi t_{si}}{2\lambda_1}\right)}{t_{si}}\right)^{2.5} \exp\left(-\left(2.5 \frac{\pi}{\lambda_1} + m\right) y\right) dy dx \quad (16)$$

که  $w$  عرض کانال است که همانند شبیه سازی  $1\mu m$  در نظر گرفته شده است. با حل انتگرال رابطه جریان به صورت زیر بدست می‌آید.

برای محاسبه جریان باید یک سری ساده سازی‌ها انجام شود. با توجه به اینکه تونل زنی در سمت سورس اتفاق می‌افتد و انتگرال گیری روی این ناحیه انجام می‌شود، بنابراین رابطه (۵) از  $\cosh(\pi y / \lambda_1)$  مقابل  $\cosh(\pi(L - y) / \lambda_1)$  می‌توان صرف نظر کرد. دیگر ساده سازی‌هایی که می‌توان بکار برد به صورت زیر است

$$\cosh(\pi(L - y) / \lambda_1) \cong \frac{1}{2} \exp(\pi(L - y) / \lambda_1) \quad (8)$$

$$\sinh(\pi L / \lambda_1) \cong \frac{1}{2} \exp(\pi L / \lambda_1) \quad (9)$$

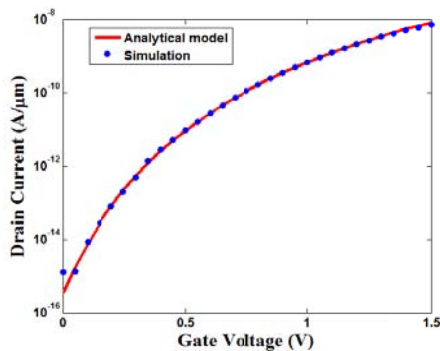
بنابراین رابطه ساده شده میدان الکتریکی افقی به صورت زیر خواهد شد

$$E_y(x, y) = -\frac{\pi}{\lambda_1} b_1 \exp\left(-\frac{\pi}{\lambda_1} y\right) \cos\left(\frac{\pi}{\lambda_1} x\right) \quad (10)$$

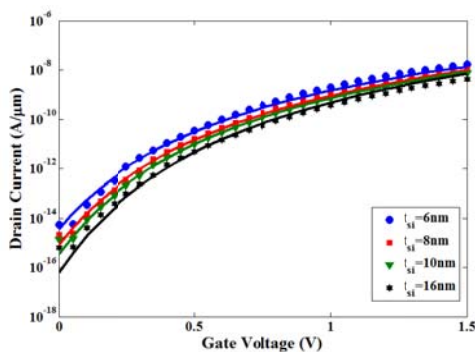
در شکل ۲ روابط (۱۰) و (۵) برای یک تونل‌فت با طول کانال  $60nm$  ضخامت بدنه  $16nm$  در ولتاژ گیت و درین  $1V$  و  $0.5V$  با هم مقایسه شده است که صحت تقریب‌های بکاربرده شده را نشان می‌دهد. همانطور که شکل نشان می‌دهد رابطه (۱۰) نزدیکی خوبی با (۵) دارد به خصوص در سمت سورس، جایی که تونل زنی انجام می‌شود.  $E_y$  در جهت عمود بر کانال به علت تاثیر ولتاژ گیت، تغییرات غیر یکنواختی دارد. به همین منظور از  $E_y$  در جهت  $x$  میانگین گیری می‌کنیم

$$\overline{E_y} = \frac{\int_{-t_{si}/2}^{t_{si}/2} E_y(x, y) dx}{t_{si}} = \frac{-2N b_1 \sin\left(\frac{\pi t_{si}}{2\lambda_1}\right)}{t_{si}} \exp\left(-\frac{\pi}{\lambda_1} y\right) \quad (11)$$

از ضریب مناسب سازی  $N$  به علت در نظر گرفتن هارمونیک اول در محاسبات، استفاده می‌شود. در نظر گرفتن هارمونیک اول تقریب خوبی برای توصیف پتانسیل در کانال است. از یک طرف هارمونیک‌های بالاتر منجر به توصیف یک توزیع تیز تر از پتانسیل در اتصال سورس-کانال می‌شوند [۳] که این مشخصه تیز باعث تاثیر روی میدان الکتریکی در این ناحیه می‌شود. اما از طرفی دیگر در نظر گرفتن هارمونیک‌های بالاتر محاسبات را پیچیده می‌کند به همین منظور از یک ضریب مناسب سازی در حل تحلیلی استفاده می‌شود.



شکل ۳: مشخصه جریان درین بر حسب ولتاژ گیت در ولتاژ درین 0.5V برای حل تحلیلی و شبیه سازی.



شکل ۴: مشخصه جریان درین بر حسب ولتاژ گیت در ولتاژ درین 0.5V برای حل تحلیلی و شبیه سازی در ضخامت های بدنه مختلف. در این شکل خطها نتایج شبیه سازی و سیمبل ها شبیه سازی هستند.

$$I = \frac{q A w k t_{si}}{2.5 \frac{\pi}{\lambda_1} + m} \left( \frac{-2 N b_1 \sin\left(\frac{\pi t_{si}}{2 \lambda_1}\right)}{t_{si}} \right)^{2.5} \quad (17)$$

## مقایسه مدل تحلیلی با شبیه سازی

در این قسمت نتایج بدست آمده از مدل تحلیلی را با نتایج حاصل از شبیه سازی مقایسه می‌کنیم. برای مقایسه ساختار مورد استفاده در [۹] را مورد بررسی قرار دادیم که دارای مشخصات به صورت زیر است.

$$t_{si} = 10 \text{ nm}, L = 50 \text{ nm}, t_i = 2 \text{ nm}, \epsilon_i = 3.9$$

میزان ناخالصی سورس و درین به ترتیب برابر است با  $N_D = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  و  $N_S = 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ . ثابت‌های A و B طبق [۱۰] برابرند با  $A = 4 \times 10^{14} \text{ cm}^{-0.5} \text{ V}^{-2.5} \text{ S}^{-1}$  و  $B = 1.9 \text{ MV/cm}$ . شکل ۳ منحنی تغییرات جریان درین بر حسب ولتاژ گیت-سورس را نشان می‌دهد. همانطور که از شکل مشخص است دقت خوبی بین نتایج تحلیلی و شبیه سازی وجود دارد. برای بررسی صحت بیشتر مدل، مشخصه  $I - V_{GS}$  را برای ضخامت‌های بدنه مختلف در شکل ۴ مقایسه کردیم که طبق شکل نزدیکی خوبی بین نتایج شبیه سازی و مدل تحلیلی وجود دارد.

## نتیجه گیری

در این مقاله یک مدل تحلیلی برای مشخصه جریان بر حسب ولتاژ گیت برای یک تونل‌فت دو گیتی ارائه شد. در این مدل ابتدا پتانسیل داخل کانال به صورت دو بعدی حل شد و از روی آن میدان داخل کانال را بدست آوردیم. سپس با استفاده از یک سری ساده سازی و معادل سازی یک رابطه برای جریان ترانزیستور بدست آمد. در این رابطه در عین سادگی، اثر تمامی پارامترهای مختلف ترانزیستور داخل شده است. که این باعث دید بهتری برای بهینه سازی عملکرد و همچنین استفاده از آن در تحلیل مدار می‌شود. نتایج حاصل از مقایسه مدل با شبیه سازی دقت مدل را اثبات می‌کنند.

- [1] K. Boucart and A. M. Ionescu, "Double-gate tunnel FET with high- $\kappa$  gate dielectric," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 54, no. 7, pp. 1725–1733, Jul. 2007.
- [2] L. Lattanzio, L. D. Micheilis and A. M. Ionescu, "Complementary germanium electron-hole bilayer tunnel FET for Sub-0.5-V Operation," *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 33, no. 2, pp. 167–169, Feb. 2012.
- [3] L. Liu, D. Mohata and S. Datta, "Scaling length theory of double-gate interband tunnel field-effect transistors," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 57, no. 4, pp. 827–834, Apr. 2010.
- [4] B. Bhushan, K. Nayak and V. R. Rao, "DC compact model for SOI tunnel field-effect transistors," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 59, no. 10, pp. 2635–2642, Oct. 2012.
- [5] A. Pan and C. O. Chui, "A quasi-analytical model for double-gate tunneling field-effect transistors," *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 33, no. 10, pp. 1468–1470 Oct. 2012.
- [6] E. O. Kane, "Zener tunneling in semiconductors," *J. Phys. Chem. Solids*, vol. 12, no. 2, pp. 181–188, Jan. 1960.
- [7] X. P. Liang and Y. Taur, "A 2-D analytical solution for SCEs in DG MOSFETs," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 51, no. 9, pp. 1385–1391, Sep. 2004.
- [8] K-H. Kao, A. S. Verhulst, W. G. Vandenberghe, B. Soree, G. Groeseneken and K. D. Meyer, "Direct and Indirect band-to-band tunneling in germanium-based TFETs," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 59, no. 2, pp. 292–301, Feb. 2012.
- [9] M. G. Bardon, H. P. Neves, R. Pueres, and C. V. Hoof, "Pseudo-two dimensional model for double-gate tunnel FETs considering the junctions depletion regions," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 57, no. 4, pp. 827–834, Apr. 2010.
- [10] ATLAS User's Manual, SILVACO, Inc. Santa Clara, CA, 2010.

# SID



سرویس های ویژه



سرویس ترجمه تخصصی



کارگاه های آموزشی



بلاگ مرکز اطلاعات علمی



سامانه ویراستاری STES



فیلم های آموزشی

## کارگاه های آموزشی مرکز اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی

توجه: بررسی مقاله ای متون (مقدماتی)

کارگاه آنلاین  
بررسی مقابله ای متون (مقدماتی)

PROPOSAL  
پروپوزال

توجه: پروپوزال نویسی و پایان نامه نویسی

کارگاه آنلاین  
پروپوزال نویسی و پایان نامه نویسی

ISI  
Scopus

توجه: آشنایی با پایگاه های اطلاعات علمی بین المللی و ترند های جستجو

کارگاه آنلاین آشنایی با پایگاه های اطلاعات علمی بین المللی و ترند های جستجو