

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

قلی زاده ، مهدی؛حسینی، سیدابراهیم^۱

^۱گروه 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 بعدی 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,Mahdi¹; Hosseini, Seyed Ebrahim²

^{1,2} 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.

کم است. همین مشخصه باعث شده است که تونل فت‌ها جایگزین

مقدمه

مناسبی برای ماسفت‌ها در طراحی مدارات با توان پایین باشند. شکل ۱ ساختار یک تونل فت نوع-n-با دو گیت متقاضن 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[۳-۶]

با کوچکتر شدن ابعاد ماسفت‌ها، توان اتلافی به علت افزایش جریان نشستی به یک چالش اساسی تبدیل شده است. یکی از مهمترین دلایل افزایش جریان نشستی در ماسفت‌ها محدود بودن شبکه زیر آستانه‌ی آنها به مقدار 60mV/dec است[۱]. در سال‌های اخیر ترانزیستورهای تونلی (تونل فت‌ها) 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

$$\text{معادله بالا طبق [۷] به صورت زیر حل می‌شود}$$

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

که u_L و u_R حل دو بعدی (۲) هستند و $v(x)$ حل یک بعدی (۲) در جهت عمود بر کanal است. اگر اختلاف تابع کار فلز گیت و کanal ϕ_{GC} و ولتاژ گیت V_{GS} باشد، پتانسیل کanal 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 و c_1 طبق [۷] بدست می‌آیند. برای بدست آوردن میدان الکتریکی در جهت کanal از (۴) نسبت به y مشتق می‌گیریم. بنابراین میدان افقی داخل کanal 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 تونل فت باید ابتدا میزان تولید تونل زنی حامل‌ها را در ناحیه اتصال سورس-کanal بدست بیاوریم. رابطه میزان تولید تونل زنی برای مواد با شکاف گافغیر مستقیم همانند سیلیکان طبق [۸] به صورت زیر است

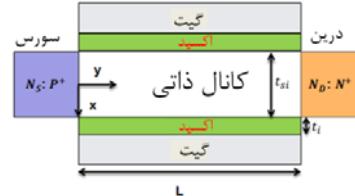
$$G_{BTBT} = A E^{2.5} \exp\left(-\frac{B}{E}\right) \quad (۶)$$

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، (x, y, z) 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 کanal به صورت تحلیلی بدست آمده ولی مشخصه جریان به صورت عددی محاسبه شده است.

در [۶] بدون بدست آوردن پتانسیل داخلکanal و با استفاده از روش Landuar



شکل ۱: ساختار یک تونل فت دو گیتی متقارن

رابطه‌ای 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. بعضی دیگر از مقالات با حل یک بعدی پتانسیل داخل کanal روابطی برای جریان ارائه شده است همانند [۵].

در این مقاله یک مدل تحلیلی دو بعدی جامع برای یک تونل فت با دو گیت متقارن ارائه شده است. در این مدل پتانسیل داخل کanal 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

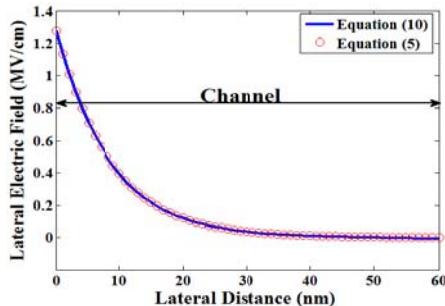
برای بدست پتانسیل داخل کanal معادله پواسن را حل می‌کنیم

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

که در آن q بار الکترون، ϵ_{si} ضریب گذردهی سیلیکان، n چگالی بار-های متحرک و ψ پتانسیل کanal می‌باشد.

برای حل معادله پواسن در تونل فت‌ها، بارهای متحرک داخل کanal قابل صرفنظر هستند. زیرا میدان الکتریکی قوی در اتصال سورس کanal بار-های متحرک را سمت درین جایجا می‌کند و تجمع آنها در داخل کanal کم است. بنابراین معادله (۱) به صورت معادله زیر کاهش می‌یابد

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



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

با جایگذاری (۱۱) در (۶) بدست می‌آید

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

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

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

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

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

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

بنابراین (۷) به صورت زیر تبدیل می‌شود

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

که w عرض کانال است که همانند شبیه سازی $1\mu\text{m}$ 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 $\cosh(\pi y/\lambda_1)$ در مقابل $\cosh(\pi(L-y)/\lambda_1)$ می‌توان صرفنظر کرد. دیگر ساده سازی‌هایی که می‌توان بکار برد به صورت زیر است

$$\cosh(\pi(L-y)/\lambda_1) \approx \frac{1}{2} \exp(\pi(L-y)/\lambda_1) \quad (18)$$

$$\sinh(\pi L/\lambda_1) \approx \frac{1}{2} \exp(\pi L/\lambda_1). \quad (19)$$

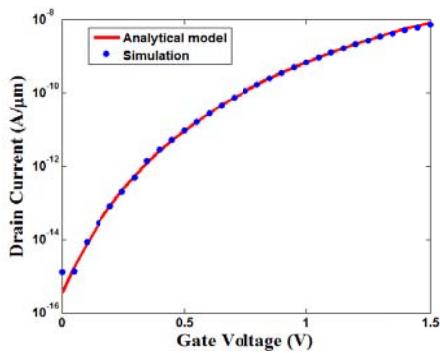
بنابراین رابطه ساده شده میدان الکتریکی افقی به صورت زیر خواهد شد

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

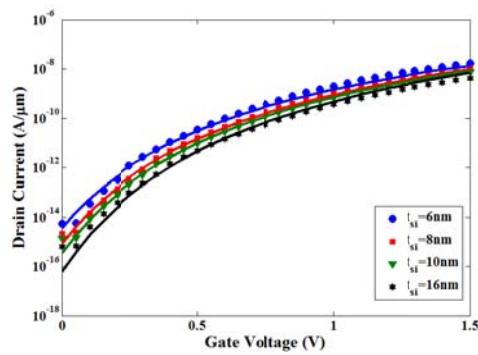
در شکل ۲ روابط (۱۰) و (۵) برای یک تونل فلت با طول کانال 60nm ، ضخامت بدنه 16nm در ولتاژ گیت و درین 1V و 0.5V با هم مقایسه شده است که صحت تقریب‌های بکاربرده شده را نشان می‌دهد. همانطور که شکل نشان می‌دهد رابطه (۱۰) نزدیکی خوبی با (۵) دارد به خصوص در سمت سورس، جایی که تونل زنی انجام می‌شود. E_y در جهت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

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

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 تیزتر 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 ۰.۵V برای حل تحلیلی و شبیه سازی.



شکل ۴: مشخصه جریان درین بر حسب ولتاژ گیت در ولتاژ درین ۰.۵V برای حل تحلیلی و شبیه سازی در ضخامت های بدن مختلف. در این شکل خطوطاً نتایج شبیه سازی و سیمبلها شبیه سازی هستند.

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

مقایسه مدل تحلیلی با شبیه سازی

در این قسمت نتایج بدست آمده از مدل تحلیلی را با نتایج حاصل از شبیه سازی مقایسه می‌کیم. 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 $N_s = 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ طبق [۱۰] برابرند با $S = 4 \times 10^{14} \text{ cm}^{-0.5} \text{ V}^{-2.5}$. $A = 1.9 \text{ MV/cm}$. 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 صحبت بیشتر مدل، مشخصه 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 تونل فلت دو گیتی ارائه شد. در این مدل ابتدا پتانسیل داخل کanal به صورت دو بعدی حل شد و از روی آن میدان داخل کanal 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 پارامتر های مختلف ترانزیستور داخل شده است. که این باعث دید بهتری برای بهینه سازی عملکرد و همچنین استفاده از آن در تحلیل مدار می شود. نتایج حاصل از مقایسه مدل با شبیه سازی دقت مدل را اثبات می کنند.

- [1] K. Boucart and A. M. Ionescu, "Double-gate tunnel FET with high-k 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. Puers, 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.