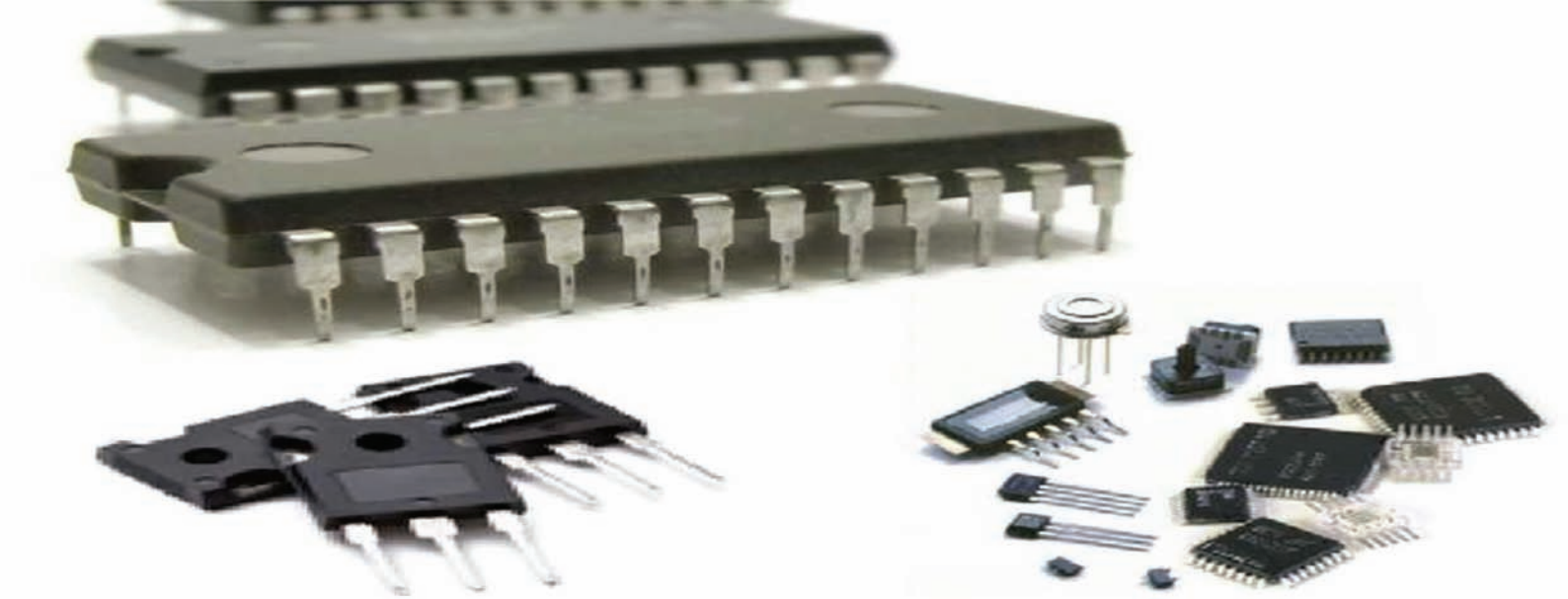


تاثیر گیت دوم بر عملکرد فرکانس بالای ترانزیستور با تحرک الکترونی بالا AlGaN/GaN

زینب جلالی/دانش آموخته کارشناسی ارشد/ گروه مهندسی برق/ دانشگاه آزاد اسلامی واحد خوی/ Ara.zeynab@yahoo.com
سید رضا حسینی/ استادیار/ گروه مهندسی برق/دانشگاه آزاد اسلامی واحد خوی/ hosseini@iaukhoy.ac.ir

چکیده

ترانزیستورهای با تحرک الکترونی بالا(HEMT) افزاره‌های الکترونیکی مهمی برای ساختارهای سرعت بالا به شمار می‌روند. در این مقاله، به بررسی مشخصه‌های الکتریکی ساختار AlGaN/GaN HEMT پرداخته شده و میزان تاثیر گیت دوم بر اثرات کانال کوتاه و عملکرد فرکانس بالای افزاره مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. تمامی شبیه‌سازی‌ها توسط نرم‌افزار دو بعدی سیلواکو انجام گرفته است. مقدار ولتاژ آستانه، جریان حالت روشن، حالت خاموش و شیب زیر آستانه بررسی شد. مشخص گردید با افزایش تعداد گیت اثرات کانال کوتاه به دلیل افزایش کنترل گیت بر کانال به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. همچنین پارامترهای فرکانس بالا شامل ترارسانایی، خازن گیت و فرکانس قطع بالا محاسبه شد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد فرکانس قطع بالا در افزاره دو گیتی(DG) بیشتر از فرکانس قطع بالا در افزاره یک گیتی (SG) است. از این‌رو ساختار دو گیتی برای کاربردهای فرکانس بالا افزاره مناسب‌تری می‌باشد.

کلمات کلیدی: ترانزیستور با تحرک الکترونی بالا، اثرات کانال کوتاه، خازن گیت، ترا رسانایی، فرکانس قطع بالا

The impact of the second gate on high frequency performance of AlGaN/GaN HEMT

Zeinab Jalali/Graduated in master degree/ Department of Electrical Engineering/ Khoy Branch/ Islamic Azad University
Reza Hosseini/ Assistant Professor/ Department of Electrical Engineering/ Khoy Branch/ Islamic Azad University

ABSTRACT

High Electron Mobility Transistors (HEMTs) are the promising devices for high speed structures. In this paper, the electrical characteristics of AlGaN/GaN HEMT have been investigated. The impact of the second gate on the short channel effects (SCEs) and the high frequency performance of presented structure has been analyzed. All simulations were carried out using 2-D Silvaco software. The threshold voltage, on-state current, off-state current, subthreshold swing have been evaluated. It was shown that SCEs on state current, off state current, subthreshold swing have been evaluated. It was shown that Siftware. The thresignificantly decrease with increasing the number of gates because of the better control of gate in double gate (DG) structure. Also, the high frequency parameters (transconductance, gate capacitance and cut-off frequency) have been calculated. The results show that the cut-off frequency in double gate (DG) structure is more than that of single gate (SG) structure. Therefore, the DG structure is more suitable device for high frequency applications.

Keywords: **High electron mobility transistor, Short channel effects, gate capacitance, transconductance, high cut-off frequency**

[Downloaded from kiaeee.ir on 2026-10-23]

۱-مقدمه

ترانزیستورهای با تحرک الکترونی بالا (HEMT) که بر پایه Al-GaN/GaN ساخته می‌شوند دارای کاربرد بسیار زیادی در ولتاژها و توان‌های بالا می‌باشند زیرا گالیم نیترایـد دارای میدان الکتریکی شکست و شکاف انرژی بالایی است[۱-۳]. همچنین در این ساختارها به علت تفاوت زیاد در شکاف انرژی دو ماده یک ناپیوستگی بزرگ در نوار هدایت ایجاد می‌شود که این ناپیوستگی مثل یک چاه کوانتومی رفتار می‌کند که باعث تشکیل گاز الکترونی دو بعدی در این چاه می‌شود. در میان ساختارهای ارایه شده، ساختارهای نامتجانس نیتریدی به علت داشتن ناپیوستگی نوار هدایت بزرگ و نیز دارا بودن قطبش خود به خودی و قطبش پیزوالکتریکی مورد توجه بسیاری قرار گرفته‌اند[۴-۶]. به عبارت دیگر، استفاده از GaN/AlGaN در ساخت این ترانزیستورها، باعث افزایش قالبیت حرکت و سرعت حامل‌ها می‌گردد. این ترانزیستورها به دلیل ویژگی‌های الکتریکی خاص خود گزینه بسیار خوبی برای نسل‌های آینده تقویت‌کننده‌های توان بالا و فرکانس بالا هستند[۷-۸].

کوچک‌تر شدن طول گیت و وارد شدن به حوزه چند صد نانومتر منجر به پدیدار شدن اثرات نامطلوب کانال کوتاه می‌شود. دلیل پدیدار شدن این اثرات، عدم کنترل مناسب گیت بر روی کانال و افزایش تاثیر میدان درین، در حالت‌های خاموش و روشن می‌باشد[۹]. اثرات کانال کوتاه در حالت خاموش باعث تغییر ولتاژ آستانه، افزایش شیب زیر آستانه و افزایش اثر DIBL می‌شوند[۱۰]. اثرات کانال کوتاه در حالت روشن باعث تضعیف کارکرد فرکانس بالای افزاره می‌گردند. بنابراین ارایه روش‌ها و ساختارهایی برای کاهش اثرات کانال کوتاه امری ضروری به نظر می‌رسد. در سال‌های اخیر استفاده از ساختارهای چند گیتی با کنترل گیت بالا بر روی کانال در نتیجه اثرات کانال کوتاه پایین، به طور وسیعی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است[۱۱-۱۵]. در این مقاله یک ساختار دو گیتی(DG) ترانزیستور با تحرک بالای الکترونی AlGaN/GaN ارایه می‌شود. مشخصه‌های الکتریکی ساختار ارایه شده بررسی شده و با مشخصه‌های ساختار معمول یک گیتی(SG) مقایسه می‌شود. همچنین در این مقاله، نسبت جریان روشن به خاموش، شیب زیر آستانه، ترا رسانایی، خازن گیت و در نهایت فرکانس قطع بالا برای هر دو ساختار بدست خواهد آمد.

۲-ساختار افزاره‌های ارایه شده

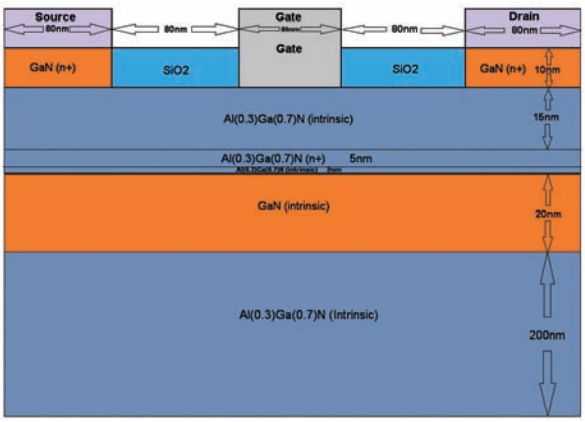
۲-۱-ساختار ترانزیستور با تحرک الکترونی بالا AlGaN/GaN یک گیتی

همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده است، در ساختار یک گیتی، ماده GaN با تزریق ناخالصی نوع n به اندازه 10^{19} cm^{-3}، به‌عنوان Cap Layer با ضخامت ۱۰ نانومتر استفاده شده است تا پیوندهای اهمی مناسبی برای اتصالات سورس و درین ایجاد شود. لایه $Al_{0.3}Ga_{0.7}N$ با ضخامت ۱۵نانومتر و به صورت نیمه هادی ذاتی برای جلوگیری از اثرات هدایت موازی لحاظ شده است. پایین تر از آن، یک لایه جدا کننده از جنس $Al_{0.3}Ga_{0.7}N$ با تزریق ناخالصی 10^{19} cm^{-3} نوع n، برای تامین الکترون‌های اضافی مورد نیاز کانال، در نظر گرفته شده است. گاز الکترون دو بعدی در ناحیه GaN ذاتی با ضخامت ۲۰ نانومتر تشکیل می‌شود. لایه $Al_{0.3}Ga_{0.7}N$ جداکننده، که بین کانال و لایه با ناخالصی بالا قرار گرفته است، نقش مهمی در کم کردن فعل و انفعالات کولنی بین الکترون‌های نفوذ کرده در کانال و اتم‌های دهنده تزریق شده در لایه با ناخالصی بالا، ایفا می‌کند.

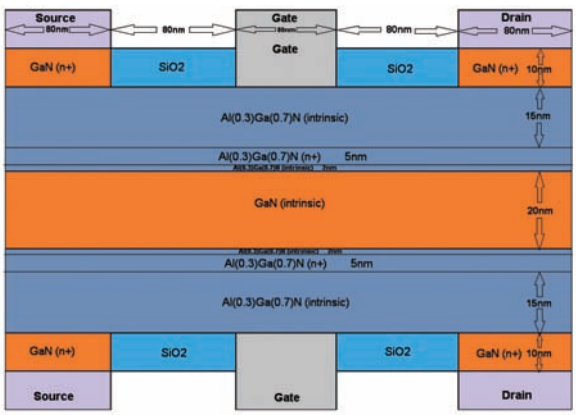
درپایین لایه GaN ذاتی، یک لایه بافر ۲۰۰ نانومتر برای مجزا کردن کانال از تاثیرات بستر، استفاده شده است.

۲-۲- ساختار ترانزیستور با تحرک الکترونی بالا AlGaN/GaN دو گیتی

لایه‌های ساختار دوگیتی مشابه لایه‌های استفاده شده در ساختار یک گیتی است، با این تفاوت که در ساختار دو گیتی لایه بافر ۲۰۰نانومتری حذف شده است ولایه‌های بعدی تا گیت دوم، به‌صورت متقارن، مشابه لایه‌های پیاده شده تا گیت اول می‌باشد (شکل ۲).



شکل ۱: ساختار ترانزیستور AlGaN/GaN HEMT یک گیتی



شکل ۲: ساختار ترانزیستور AlGaN/GaN HEMT دوگیتی

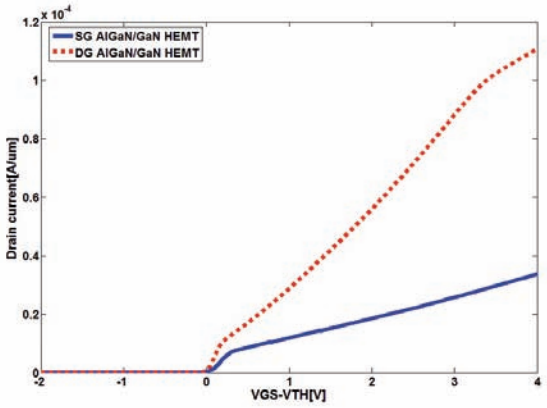
۳- نتایج شبیه‌سازی

تمام شبیه‌سازی‌ها با استفاده از نرم افزار سیلواکو در محیط اطلس انجام گرفته است[۱۶]. مدل فرمی دیراک بدون یونیزاسیون برخوردی لحاظ شده است. به دلیل تراکم ناخالصی بالا در کانال از مدل باریک شدگی شکاف انرژی (BGN) و مدل شاکلی رید هال (SRH) به‌منظور مدل‌سازی اثر تله و مشکلات شبکه استفاده شده است.[۱۷-۱۸]. همچنین در شبیه‌سازی‌ها، از مدل‌های مربوط به قابلیت حرکت حامل‌ها، مدل وابسته به غلظت (CONMON) و مدل وابسته به میدان (FLDMOB) در نظر گرفته شده است.

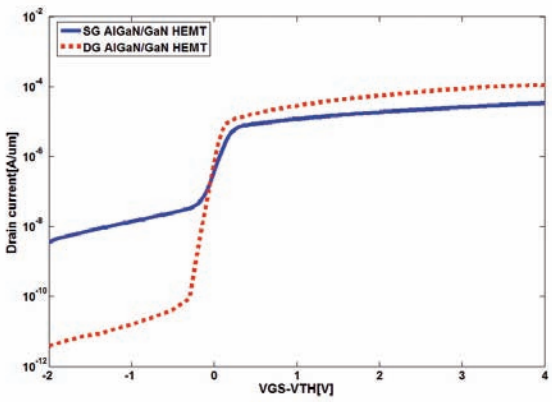
در شکل (۳) نمودار جریان درین بر حسب ولتاژ گیت ساختار دو گیتی و یک گیتی مشاهده می‌شود. مشخصه‌های الکتریکی ساختارهای ارایه شده که از نمودار شکل (۴) می‌توان استخراج نمود، در جدول(۱) اشاره شده است. آنچه از جدول مشخص است ولتاژ

[Downloaded from kiaeee.ir on 2026-10-23]

آستانه ساختار یک گیتی کمتر از ساختار دو گیتی است. همچنین در جدول(۱) جریان حالت روشن و حالت خاموش ساختارهای ارایه شده، مورد بررسی قرار گرفته است.



الف



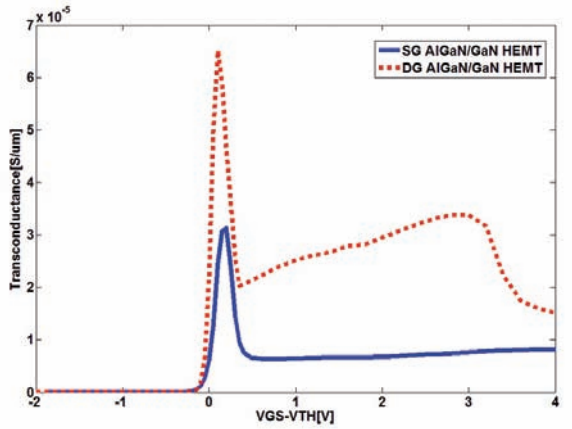
ب

شکل ۳: نمودار جریان-ولتاژ ترانزیستورهای با تحرک بالای الکترونی AlGaN/ GaN یک گیتی و دو گیتی در ولتاژ درین ۶ ولت الف) خطی ب)لگاریتمی

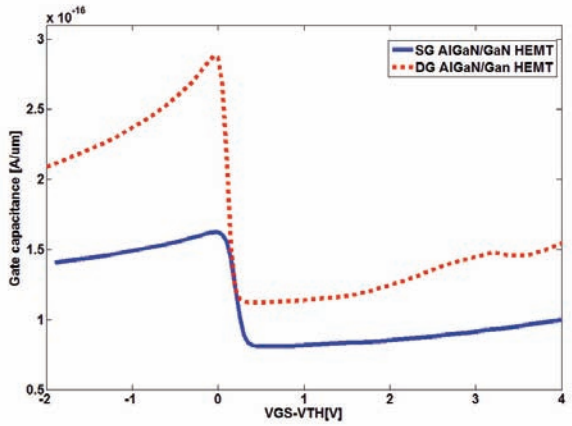
جریان حالت روشن مقدار جریان درین است که در VGS-VTH=4V، VDS=6V و جریان حالت خاموش مقدار جریان درین است که در VGS-VTH=-2V، VDS=6V بدست می‌آید[۱۹]. همان‌طور که در جدول (۱) مشاهده می‌شود شیب زیر آستانه در ساختار یک گیتی بیشتر ازساختار دو گیتی است از این‌رو می‌توان جریان حالت خاموش بالایی انتظار داشت. جریان حالت روشن در ساختار دو گیتی بیشتر و جریان حالت خاموش کمتر از ساختار یک گیتی است. پس در ساختار دو گیتی نسبت جریان روشن به جریان خاموش بالاتری بدست می‌آید. می‌توان نتیجه گرفت وجود گیت دوم به دلیل افزایش کنترل گیت بر روی کانال، باعث کاهش اثرات کانال کوتاه شده است. یکی از مهمترین پارامترها در ارزیابی کاربردهای آنالوگ یک افزاره، مقدار ترارسانایی می‌باشد که از مشتق‌گیری جریان درین نسبت به ولتاژ گیت - سورس در یک ولتاژ درین ثابت محاسبه می‌شود. ترارسانایی میزان تقویت صورت گرفته توسط افزاره می‌باشد. بیشتر بودن ترارسانایی به منزله تقویت موثرتر و مناسب‌تر برای کاربردهای آنالوگ می‌باشد. در شکل (۴) نمودار تراسانایی بر حسب ولتاژ موثر گیت نشان داده شده است. در ولتاژهای پایین، مقدار ترارسانایی کوچک بوده و با افزایش ولتاژ موثر افزایش می‌یابد. با ادامه افزایش ولتاژ، ترارسانایی به دلیل کاهش قابلیت حرکت الکترون‌ها کاهش می‌یابد. همان‌طورکه در شکل نشان داده شده است ترارسانایی ساختار دو گیتی بیشتر از ساختار یک گیتی است.

جدول۱: نتایج حاصل از شبیه‌سازی ساختارهای ارایه شده

	ساختار یک گیتی	ساختار دو گیتی
ولتاژ آستانه[V]	-۳/۱	-۱/۶
جریان حالت روشن(I_{ON})[A/um]	۳/۳۷×۱۰$^{-۵}$	۱/۱۰×۱۰$^{-۴}$
جریان حالت خاموش(I_{OFF}) [A/um]	۲/۶۲×۱۰$^{-۹}$	۳/۹۶×۱۰$^{-۱۲}$
I_{ON}/I_{OFF}	۱/۲۸×۱۰^{۴}	۲/۷۷×۱۰^{۷}
شیب زیر آستانه[V/dec]	۰/۱۵۶	۰/۰۹۱



شکل۴: ترارسانایی ترانزیستورهای با تحرک بالای الکترونی AlGaN/GaN یک گیتی و دو گیتی در ولتاژ درین ۶ ولت



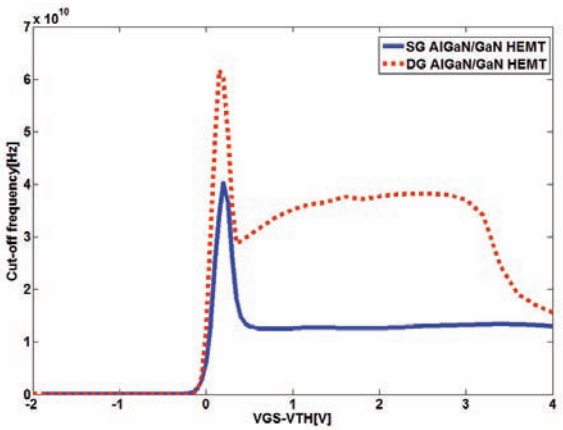
شکل۵:خازن گیت بر حسب ولتاژ موثر در ترانزیستورهای با تحرک بالای الکترونی AlGaN/GaN یک گیتی و دو گیتی در ولتاژ درین ۶ ولت

خازن گیت(Cgg) یکی دیگر از پارامترهای مهم در ارزیابی عملکرد فرکانس بالای افزاره می‌باشد. خازن گیت شامل خازن گیت با کانال به‌علاوه خازن گیت با سورس/ درین است. خازن گیت بر حسب ولتاژ موثر گیت در شکل(۵) رسم شده است. همان‌طورکه از شکل واضح

[Downloaded from kiaeee.ir on 2026-10-23]

است مقدار خازن گیت در ساختار دو گیتی بیشتر از ساختار یک گیتی است. این افزایش در مقدار خازن به دلیل وجود یک گیت دوم در ساختار دو گیتی است.

در بررسی عملکرد فرکانس بالا، اصلی‌ترین پارامتر ارزیابی، فرکانس قطع بالای افزاره می‌باشد. فرکانس قطع بالا فرکانسی است که در آن بهره جریان یک می‌شود که با استفاده از رابطه $f_T = gm / 2\pi C_{gg}$ [۸] حاصل می‌شود. از شکل (۶) می‌توان نتیجه گرفت فرکانس قطع بالا با افزایش ولتاژ موثر افزایش می‌یابد. دلیل آن هم افزایش در مقدار ترارسانایی است. پس از کمی افزایش در یک ولتاژ معین به دلیل کاهش ترارسانایی که آن هم ناشی از کاهش قابلیت حرکت الکترون‌ها است، فرکانس قطع شروع به افت می‌کند. همان‌طورکه از شکل (۶) واضح است علی‌رغم زیاد بودن مقدار خازن گیت در افزاره دو گیتی، به دلیل بالا بودن مقدار ترا رسانایی، فرکانس قطع بیشتر از افزاره یک گیتی است. ماکزیمم فرکانس قطع ۶۲ گیگاهرتز در ولتاژ موثر ۰.۱۶ ولت در افزاره دو گیتی و به‌طور مشابه ماکزیمم فرکانس قطع ۴۰ گیگاهرتز در ولتاژ موثر ۰.۲ ولت در افزاره یک گیتی بدست می‌آید.



شکل۶: فرکانس قطع بالای ترانزیستورهای با تحرک بالای الکترونی AlGaN/GaN یک گیتی و دو گیتی در ولتاژ درین ۶ ولت

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله مشخصه‌های الکتریکی ترانزیستور با تحرک بالای الکترون AlGaN/GaN یک گیتی و دوگیتی مورد بررسی قرار گرفت. مشخص گردید با افزایش تعداد گیت به دلیل کنترل بهتر گیت بر روی کانال، اثرات کانال کوتاه به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. همچنین عملکرد فرکانس بالای افزاره‌های ارایه شده، تحلیل و ارزیابی شد. ترارسانایی بالا، خازن گیت بالا و فرکانس قطع بالا در ساختار دو گیتی بدست آمد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت ساختار دو گیتی، اثرات کانال کوتاه کوچک‌تر و فرکانس قطع بالاتری نسبت به افزاره یک گیتی دارد.

مراجع

[1]I. Saidi, Y. Cordier, M. Chmielowska, H. Maaref, "Thermal effects in AlGaN/GaN/Si high electron mobility transistors,"Solid-State Electronics, Vol. 61, No. 1, pp. 1-6, 2011.

[2]M. K Chattopadhyay and S. Tokekar, "Thermal model for dc characteristics of AlGaN/GaN HEMT including self-heating effect and non-linear polarization", Microelectronic Jornal., Vol. 39, No. 10, pp. 1181-1188, 2008.

[3]R. K. Tyagi, A. Ahlawat, M. Pandey, "An analytical two-dimensional model for AlGaN/GaN HEMT with polarization effects for high power applications,"Microelectronic Journal., Vol. 38, No. 8-9, pp. 877-883, Aug. 2007.

[4]X. Ma, J. Huang, J. Fang, W. Deng, "A compact model of the reverse gate-leakage current in GaN-based HEMTs"Solid State Electronics, Vol.126, pp.10-13, 2016.

[5]Li. Wang, and et al. "Modeling the back gate effect of AlGaN/GaN HEMTs."Journal of computational electronics, Vol.13, No.4, pp. 872-876, 2014

[6]S. Zafar, A. Kashif, N. Aktar, N. Bhatti, and Imran. "Designing of double gate HEMT in TCAD for THZ applications" Proc. Int. Conf. on Applied Sciences & Technology. Islamabad, Pakistan, 2013.

[7]M. Juncai, Z. Jincheng, X. Junshuai, L. Zhiyu, L. Ziyang, X. Xiaoyong, and H. Yue,"Characteristics of AlGaN/GaN/AlGaN double heterojunction HEMTs with an improved breakdown voltage,"Journal ofSemiconductors, Vol. 33, No. 1, pp. 14002-14006, 2012.

[8]Ch. Tsou, H. Kang, Y. Lian, and S.H. Hsu. "AlGaN/GaN HEMTs on Silicon with hybrid schottky- ohmic drain for RF application"IEEE Trans. on Electron Device, Vol. 63, No. 11, pp. 4218-4225, 2016

[9]M. Alsharef, M. Christiansen, R. Granzner, E. Ture, R. Quay, O, Ambacher, F. Schwierz "RF Performance of TrigateGaN HEMTs" IEEE Transaction on electron Device, Vol. 63, No. 11, pp. 4255-4261, 2016.

[10]R. Akis, N. Faralli,D. K. Ferry,S. M. Goodnick,K. A. Phatak,M. Saraniti, " Ballistic Transport in InP-Based HEMTs" IEEE Trans. on Electron Device, Vol. 56, No. 12, pp. 2935-2944, 2009.

[11]H. Sun, K. Boon Lee, Li. Yuan, W. Wang, S. Selvaraj, G. Lo "Theoretical study of short channel effect in highly scaled GaN HEMTs," in Proc. IEEE Int. Symp. Radio, Freq. Integr. Technol. (RFIT),pp. 204–206, 2012.

[12]O. BreitschädelL. Kley, H. Gräbeldinger, J. T. Hsieh, B. Kuhn, F. Scholz, H. Schweizer "Short-channel effects in AlGAN/GaN HEMTs," Material Science Engineering B, Vol. 3, No. 1–3, pp. 238–240, 2001.

[13]C.-Y. Chen and Y.-R. Wu, "Studying the short channel effect in the scaling of the AlGaN/GaN nanowire transistors," J. Appl. Phys., Vol. 113, No. 21, pp. 214501, 2013.

[14]R. Hosseini, M. Fathipour, R. Faez, "Quantum simulation study of gate-all-around (GAA) silicon nanowire transistor and double gate metal oxide semiconductor field effect transistor (DG MOSFET)" International journal of the physical science, Vol. 7, No. 28, pp. 5054-5061, 2012.

[15]Ch. Sahu, J. Singh, P.N. Kondekar, "Electrical characteristics and short channel performance comparison of different gate junctionless transistors"International Conference on Control, Automation, Robotics and Embedded Systems (CARE), 2013.

[16]Silvaco Int. ATLAS Users Manual. Device simulation Software, Silvaco International (Santa Clara, CA, 2016).

[17]Lide, D.R., CRC Handbook on Chemistry and Physics, 89th edn. pp. 12–114. Taylor & Francis, London , 2008

[18]W. Hansch, Th. Vogelsang, R. Kircher, and M. Orlowski, Carrier transport near the Si/SiO2 interface of a MOSFET Solid State Electronics, Vol.32, pp.839-849, 1989

[19]Kh. Alam, and M. Abdullah" Effects of Dielectric Constant on the Performance of a Gate All Around InAs Nanowire Transistor" IEEE Trans. On Nanotechnology, Vol. 11, No. 1, pp.82-87, 2012.

***

[Downloaded from kiaeee.ir on 2026-10-23]