

# طراحی ترانزیستور با قابلیت تحرک الکترون بالا با پیوند ناهمگون GaN/AIGaN با گیت پستی و لایه جدا کننده ذاتی

دکتر زهیر کردرستمی<sup>۱</sup> دکتر کورش حسنی<sup>۲</sup> آناهیتا قادری<sup>۳</sup>

۱- دانشیار- دانشکده مهندسی برق- الکترونیک- دانشگاه صنعتی شیراز- شیراز- ایران  
[kordrostami@sutech.ac.ir](mailto:kordrostami@sutech.ac.ir)

۲- استادیار- دانشکده مهندسی برق- الکترونیک- دانشگاه صنعتی شیراز- شیراز- ایران  
[hassanli@sutech.ac.ir](mailto:hassanli@sutech.ac.ir)

۳- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد- دانشکده مهندسی برق- الکترونیک- دانشگاه صنعتی شیراز- شیراز- ایران  
[anahita.ghaderi@gmail.com](mailto:anahita.ghaderi@gmail.com)

**چکیده:** در این مقاله، ترانزیستوری با قابلیت تحرک الکترون بالا (HEMT) با استفاده از پیوند ناهمگون GaN/AIGaN با لایه جدا کننده ذاتی و گیت پستی پیشنهاد گردیده است. اثر گیت پستی و لایه جدا کننده ذاتی GaN بر رفتار DC و AC ترانزیستور مورد مطالعه قرار گرفته است. پارامترهای عملکرد مانند جریان درین، هدایت انتقالی، فرکانس قطع، حداکثر فرکانس نوسان، سویینگ زیر آستانه و DIBL برای همه طراحی ها محاسبه شده است. پارامترهای مذکور بین ساختارهای تک گیتی و دوگیتی پیشنهادی مقایسه شده است که حاکی از بهبود رفتار ترانزیستور با اضافه شدن گیت پستی است. همچنین اثر اضافه نمودن لایه جدا کننده ذاتی بر پارامترهای ترانزیستور دو گیتی پیشنهادی بررسی گردیده است. محاسبه پاسخ فرکانسی نشان می دهد فرکانس قطع HEMT دو گیتی پیشنهادی برابر با ۲۷۲ است که نسبت به مقدار ۱۳۲ GHz مربوط به ساختار دو گیتی بدون لایه جدا کننده بهبود قابل ملاحظه ای یافته است. نتایج نشان می دهد، اضافه نمودن گیت پستی و لایه جدا کننده ذاتی هر دو باعث بهبود مشخصات DC و AC در HEMT می شوند.

**واژه‌های کلیدی:** GaN, HEMT، پیوند ناهمگون، گیت پستی، لایه جدا کننده ذاتی

**نوع مقاله:** پژوهشی

**DOI:** 10.29252/jiaeee.18.4.67

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۸/۹/۲۱

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۹/۰۶/۲۹

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۹/۷/۳۰

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر زهیر کردرستمی

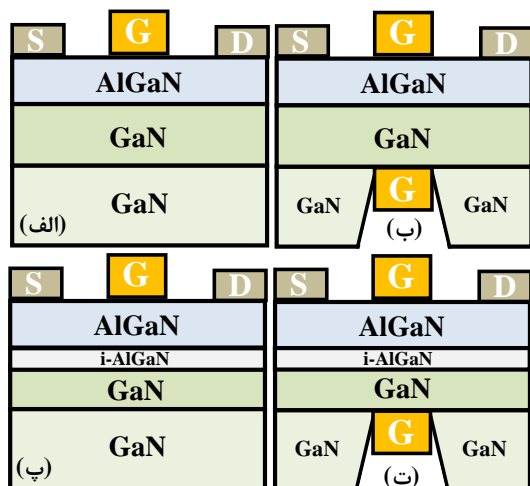
نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - شیراز - بلوار مدرس - دانشگاه صنعتی شیراز - دانشکده مهندسی برق- الکترونیک

## ۱- مقدمه

اثر طراحی ارائه شده بر پارامترهای ترانزیستور، علاوه بر پاسخ فرکانسی پارامترهایی مانند هدایت انتقالی، کاهش سد با درین تحریک شده (DIBL) و مشخصه شیب زیر آستانه (SS) نیز محاسبه گردیده و با ساختارهای ساده مقایسه شده اند. نتایج شبیه‌سازی بهبود رفتار فرکانس بالای این ترانزیستورها را تایید می‌کنند.

## ۲- ساختارهای HEMT پیشنهادی

ترانزیستورهای HEMT مورد مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است. شکل ۱-الف ساختار HEMT تک گیتی ساده مبتنی بر پیوند ناهمگون GaN/AlGaIn را نشان می‌دهد. در این ترانزیستور از یک پیوند ناهمگون GaN/AlGaIn جهت ایجاد گاز الکترون دو بعدی (2DEG) استفاده گردیده است. در شکل ۱-ب گیت پستی به ساختار ترانزیستور اضافه گردیده است. ساختارهای الف و ب در [۱۹] مورد مطالعه قرار گرفته اند. ساختارهای پیشنهادی این مقاله در شکل‌های ۱-پ و ۱-ت نشان داده شده است. در ساختار HEMT پیشنهادی در



شکل (۱): طراحی‌های ترانزیستور HEMT مورد مطالعه. شکل‌های (ت) و (پ) ساختارهای پیشنهادی مقاله را نشان می‌دهند

شکل ۱-پ، گیت در بالا قرار دارد و بین لایه‌های GaN و لایه بافر AlGaIn که آلاینده (Dope) شده است، یک لایه ذاتی نازک از جنس AlGaIn قرار داده شده است که آن را لایه جدا کننده (Spacer) می‌نامیم. در HEMT پیشنهادی در شکل ۱-ت به ترانزیستور هم گیت پستی اضافه گردیده است و هم لایه جدا کننده ذاتی. این طراحی به عنوان یک HEMT با عملکرد بالا در این مقاله پیشنهاد می‌گردد.

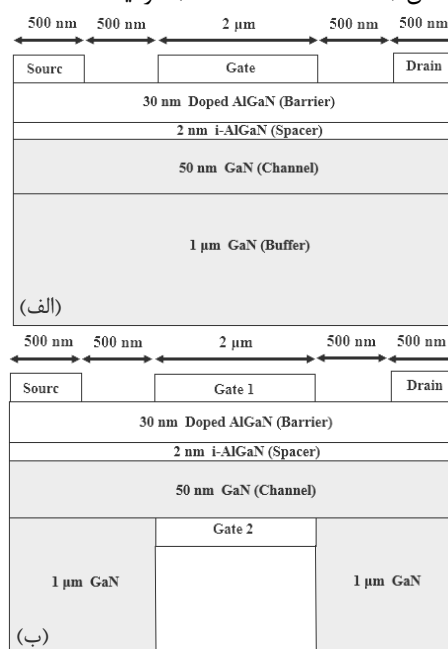
وجود لایه‌ی Spacer برای کمتر کردن برهمکنش‌های کولمبی بین الکترون‌های نفوذ کرده در ناحیه‌ی کانال و ناخالصی‌های یونیزه شده در ناحیه‌ی سد شاتکی در نظر گرفته شده است. وجود این لایه باعث بهبود مشخصه‌های ترانزیستور مانند منحنی جریان-ولتاژ و هدایت انتقالی می‌شود.

بهبود مشخصات ترانزیستورها همواره مورد توجه پژوهشگران مهندسی برق-الکترونیک بوده است [۴-۱]. ترانزیستورهای اثر میدانی (FETs) رایج، برای ارائه رفتار مناسب در کاربردهای با فرکانس بالا، کم نویز و با چگالی توان بالا باید با طول کانال خیلی کوتاه ساخته شوند تا بیشتر حامل‌های بار از پراش (scattering) ناخالصی‌ها در امان بمانند و در نتیجه عملکرد ترانزیستور بهبود یابد. اینگونه کاربردها همچنین به هدایت انتقالی بزرگ و جریان اشباع بالایی نیاز دارند که باید با آلیس‌های (doping) سنگین ایجاد شود. مواد با گاف انرژی بزرگ مانند GaN، می‌توانند ویژگی‌هایی بهتر از سیلیکن ارائه دهند [۵]. از جمله آنها می‌توان به میدان الکتریکی شکست بزرگتر، سرعت رانشی بیشتر حامل‌ها، هدایت گرمایی بیشتر و قابلیت تحرک (mobility) بالاتر حامل‌ها اشاره نمود [۶، ۱]. گالیم نیتراید (GaN) به عنوان ماده‌ای با گاف انرژی بزرگ (۳/۴ eV) در ساخت لیزر بنفش کاربرد دارد. همچنین به دلیل عدم حساسیت در مقابل تشعشعات یونی GaN برای استفاده در سلول‌های خورشیدی ماهواره‌ها مناسب است. به دلیل توانایی کار در دماهای بالا و در ولتاژهای بالا در تقویت‌کننده‌های قدرت در فرکانس‌های میکروویو و همچنین در کاربردهای تراهرتز (THz) می‌توان از GaN استفاده نمود [7]. علاوه بر اینها، GaN مقاومت حالت روشن کمتری دارد. ویژگی‌های ذکر شده در بالا باعث شده استفاده از GaN در طراحی و ساخت ترانزیستورهای با قابلیت تحرک بالا (HEMT) بسیار مورد توجه قرار بگیرد. یک HEMT مبتنی بر GaN می‌تواند سرعت اشباع الکترونی در حد  $2 \times 10^7$  cm/s و ولتاژ شکستی تا ۶۰۰ ولت داشته باشد [۸]. ترانزیستورهای با قابلیت تحرک بالا از پیوند ناهمگون استفاده می‌کنند که بین دو ماده با گاف‌های انرژی متفاوت به وجود می‌آید و در آن الکترون‌ها در یک چاه پتانسیل محدود می‌شوند تا از پراش ناخالصی‌ها رها شوند. این باعث افزایش سرعت سوئیچینگ این ترانزیستورها می‌گردد [۹]. طراحی‌های ارائه شده برای HEMT‌های مبتنی بر GaN از پیوند ناهمگون مبتنی بر AlGaIn/GaN استفاده می‌کنند و برای کاربردهای فرکانس بالا (میکروویو و تراهرتز) و توان بالا مناسب هستند [۱۰، ۱۱]. ترانزیستورهای با قابلیت تحرک بالا مبتنی بر GaN در حال حاضر مورد توجه زیادی قرار دارند و تحقیقات جهت بهبود مشخصات آنها ادامه دارد. از جمله موضوعات جدید مورد پژوهش در این ترانزیستورها می‌توان به ایجاد اتصال اهمی مناسب [۱۲]، عایق بندی گیت [۸]، مطالعه زیرلایه‌های ساخته شده از مواد مختلف از جمله ترکیبات کربن [۱۳] (این مطالعات در مورد سیلیکن هم انجام می‌گردد [۱۴])، افزایش ولتاژ شکست [۱۵، ۱۶] و یافتن راهکارهای افزایش فرکانس و بهبود پارامترهای DC و AC اشاره نمود [۱۷-۲۰]. در این مقاله جهت افزایش فرکانس قطع و افزایش حداکثر فرکانس نوسان طراحی‌های مناسبی پیشنهاد گردیده است. جهت بررسی جامع

در ادامه، ابتدا ساختارهای پیشنهادی با لایه جدا کننده ذاتی (تک گیتی و دو گیتی) با هم مقایسه می‌شوند. مشخصه‌های مهمی مانند منحنی جریان-ولتاژ، هدایت انتقالی، فرکانس قطع بهره جریان واحد و حداکثر فرکانس نوسان رسم می‌گردند تا اثر افزودن گیت پشتی و عملکرد بهتر HEMT دو گیتی نسبت به تک گیتی آشکار شود. همچنین اثر کاهش طول گیت بر مشخصه‌های ترانزیستور بررسی خواهد شد. سپس ساختار دو گیتی پیشنهادی با ساختار دو گیتی ساده (بدون لایه جدا کننده) مقایسه می‌شود تا تاثیر اضافه شدن لایه جدا کننده بر پارامترهای ترانزیستور نشان داده شود.

## ۱-۲- ابعاد ترانزیستورها در شبیه سازی

برای اطلاع از ابعاد شبیه سازی و اندازه ضخامت لایه‌ها، طراحی‌های انجام شده برای ساختارهای پیشنهادی با وجود لایه جدا کننده ذاتی در شکل ۲ نشان داده شده است. در این شکل، ساختار کلی ترانزیستورهای تک گیتی و دو گیتی بعد از افزودن لایه جدا کننده ذاتی نشان داده شده است. شبیه سازی‌ها در نرم‌افزار سیلوکو توسط شبیه‌ساز اطلس (SILVACO-ATLAS) گردیده است.



شکل (۲): ابعاد شبیه سازی و اندازه ضخامت لایه‌ها

همانگونه که مشاهده می‌شود، لایه‌های بافر و کانال از جنس GaN هستند و ناحیه کانال به ضخامت ۵۰ نانومتر بر روی لایه بافر قرار گرفته است. بالاترین لایه ترانزیستورها، لایه سد شاتکی (Barrier) به ضخامت ۳۰ نانومتر است که از جنس AlGaIn بوده و با چگالی ناخالصی  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  آلاینده شده است. در ساختار پیشنهادی بین کانال و لایه سد شاتکی، لایه‌ای به ضخامت ۲ نانومتر از جنس ذاتی AlGaIn قرار گرفته که آن را لایه جدا کننده می‌نامیم. برای اینکه اتصالات درین و سورس از مقاومت اهمی خوبی برخوردار باشند،

جدول (۱): ضخامت و چگالی ناخالصی لایه‌های HEMT

لایه	ماده	ضخامت	چگالی ناخالصی
Barrier	$\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$	30 nm	$1e18 \text{ (cm}^{-3}\text{)}$
Spacer	$\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$	2 nm	-
Channel	GaN	50 nm	-
Buffer	GaN	1000 nm	-

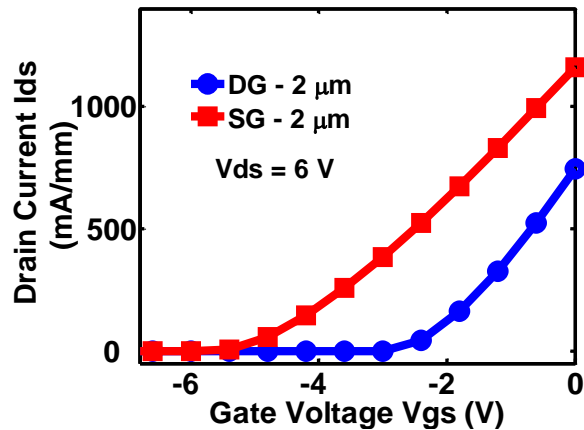
جدول (۲): مشخصات مواد استفاده شده

	$\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$	GaN
$E_g$ (eV)	3.77	3.43
Chi (eV)	4.08	4.31
$N_C$ (per cc)	$2.64e18$	$2.24e18$
$N_V$ (per cc)	$2.08e19$	$2.51e19$
Thermal Velocities		
$V_n$ (cm/s)	$2.47e7$	$2.61e7$
$V_p$ (cm/s)	$1.24e7$	$1.17e7$
Saturation Velocities		
$V_{sat n}$ (cm/s)	$1.12e7$	$1.91e7$
$V_{sat p}$ (cm/s)	$1e6$	$1e6$

پیوند ناهمگون بین AlGaIn و GaN باعث می‌شود یک چاه کوانتومی در نزدیکی پیوند تشکیل شود و زمانی که الکترون‌ها از ماده‌ی با شکاف انرژی بالاتر (AlGaIn) با شکاف انرژی  $3/77 \text{ eV}$  وارد ماده‌ی با شکاف انرژی پایین‌تر (GaN) با شکاف انرژی  $3/43 \text{ eV}$  می‌شوند، در دام بیفتند. با انتخاب مناسب مواد و چگالی ناخالصی اعمالی، ناحیه‌ی گاز الکترونی دو بعدی در نزدیکی مرز پیوند دو ماده و در ناحیه‌ی کانال تشکیل می‌شود. با حبس شدن الکترون‌ها در ناحیه‌ی کانال به دلیل شکاف انرژی پایین GaN، ناحیه کانال می‌تواند فاقد ناخالصی باشد و همین امر دلیل بیشتر بودن سرعت این نوع ترانزیستورها نسبت به ترانزیستورهای دیگر مانند MOS می‌باشد. دلیل استفاده از لایه‌ی بافر، ایزوله کردن ترانزیستور از اثرات زیرلایه است.

### ۳- مقایسه ترانزیستورهای تک گیتی و دو گیتی پیشنهادی (اثر افزودن گیت پشتی)

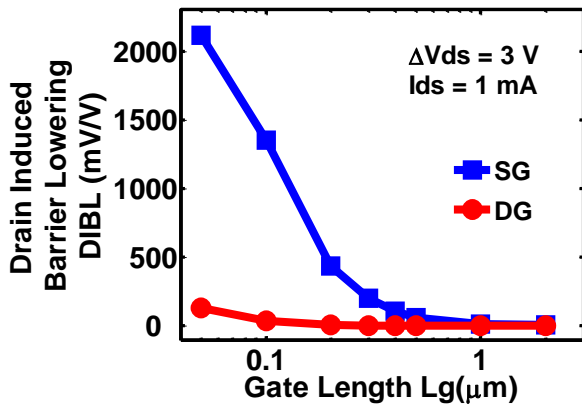
برای درک بهتر تمایز دو منحنی جریان-ولتاژ و هدایت انتقالی در ساختارهای تک گیتی و دو گیتی، شکل ۳ و ۴ مقایسه بین این دو ساختار را نشان می‌دهد. این نتایج به ازای ولتاژ درین-سورس برابر ۶ ولت ( $V_{DS} = 6\text{ V}$ ) برای دو ساختار تک گیتی و دو گیتی با طول گیت برابر ۲ میکرومتر به دست آمده‌اند.



شکل (۳): جریان های درین بر حسب ولتاژ گیت-سورس

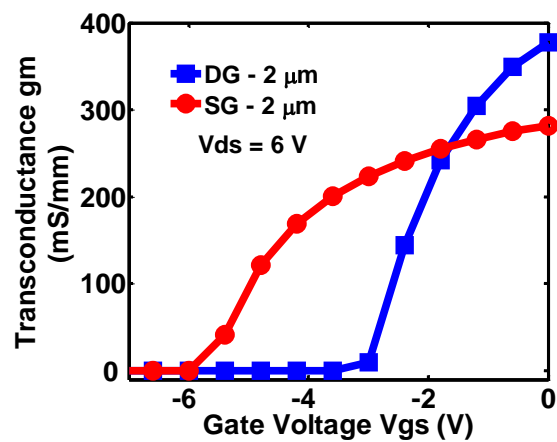
کاهش طول گیت باعث بروز اثرات کانال کوتاه می‌شود. این اثرات مانند تغییرات ولتاژ آستانه، افزایش نشت گیت، کاهش هدایت انتقالی ( $g_m$ ) بیشتر در طول گیت‌های کمتر از ۱۰۰ نانومتر خود را نشان می‌دهند. لذا ترانزیستورهای با طول گیت کمتر از ۱۰۰ نانومتر با محدودیت‌های مانند کاهش هدایت انتقالی روبرو هستند. دلیل این کاهش، بر هم خوردن نسبت ابعاد کانال ( $L_g/a$ ) می‌باشد که در اینجا  $a$  فاصله عمودی بین گیت تا کانال می‌باشد. کاهش هدایت انتقالی منجر به کاهش بهره ولتاژ بی‌باری ( $g_m/g_d$ ) و در نتیجه کاهش حداکثر فرکانس نوسان ادوات HEMT می‌شود. حال برای بررسی اثرات کانال کوتاه، طول گیت دو ساختار معرفی شده را کاهش می‌دهیم. از جمله مهم‌ترین اثرات کانال کوتاه می‌توان از مشخصه کاهش سد با درین تحریک شده (DIBL) و مشخصه شیب زیر آستانه (SS) نام برد. کاهش طول گیت باعث افزایش بهره و توان خروجی ترانزیستور می‌شود. حداقل مقدار طول گیت توسط یکی از دو اثر کانال کوتاه کاهش سد با درین تحریک شده و شیب زیر آستانه محدود می‌شود.

در شکل ۵ منحنی مشخصه کاهش سد با درین تحریک شده برای ساختار تک گیتی و دو گیتی نشان داده شده است. منحنی زیر به ازای جریان درین برابر ۱ میلی‌آمپر و تفاضل ولتاژ درین-سورس برابر ۳ ولت ( $V_{DS} = 3\text{ V}$ ) رسم شده است. مشاهده می‌شود که با کاهش طول گیت در ساختار تک گیتی، مقدار DIBL به صورت قابل توجهی



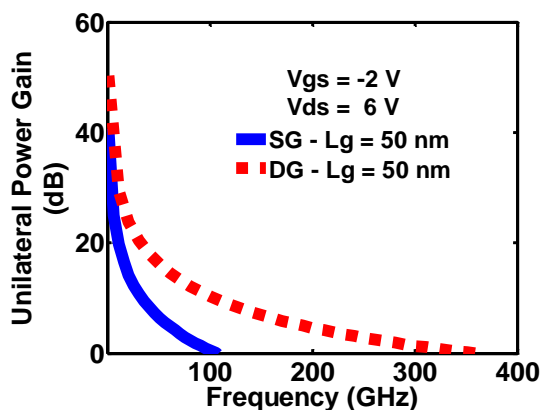
شکل (۵): مقایسه (DIBL) برای ساختار تک گیتی و دو گیتی

افزایش می‌یابد که مطلوب نیست. در مقابل مقدار DIBL در ساختار دو گیتی مقدار بسیار پایین و مطلوبی دارد. کاهش سد با درین تحریک شده به ازای طول گیت ۵۰ نانومتر، در حالت تک گیتی برابر ۲۱۱۴ mV/V و در حالت دو گیتی برابر ۱۳۰ mV/V است. مشخصه شیب زیر آستانه برای دو ساختار فوق نیز به ازای ولتاژ درین-سورس برابر ۲/۵ ولت در شکل ۶ آورده شده است. ملاحظه می‌شود که مشخصه شیب زیر آستانه نیز در حالت تک گیتی مطلوب نبوده و دارای مقدار بسیار بالایی است. در همین حال، ساختار دو گیتی دارای مشخصه شیب زیر آستانه بسیار پایین‌تری نسبت به ساختار تک گیتی است. در طول گیت ۵۰ نانومتر، شیب زیر آستانه برای ساختار تک گیتی برابر با ۲۸/۵ mV/dec و برای ساختار دو گیتی برابر با ۸۳۶/۵ mV/dec



شکل (۴): هدایت انتقالی بر حسب ولتاژ گیت-سورس

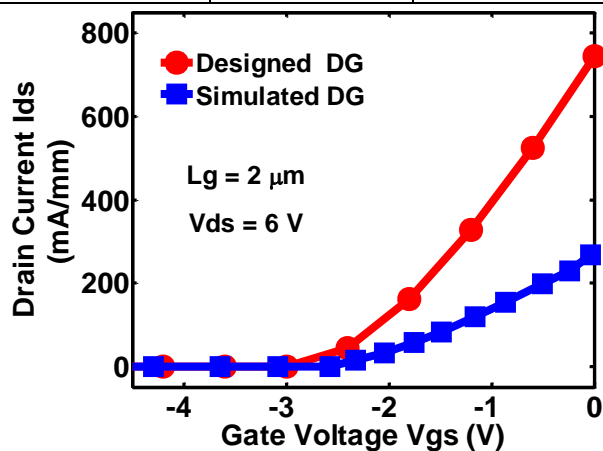
مقدار جریان در منحنی فوق، در بیشترین حالت به ازای ولتاژ گیت-سورس برابر صفر ولت بوده و برابر ۴۹۳ mA/mm است. همچنین بیشترین مقدار هدایت انتقالی به ازای ولتاژ درین ۶ ولت، در بازه تغییرات ولتاژ گیت-سورس از ۷- ولت تا صفر ولت، در ولتاژ صفر ولت بوده و برابر ۳۷۸ mS/mm است. ملاحظه می‌شود که مقدار جریان درین در حالت دو گیتی کاهش یافته است و مقدار ولتاژ آستانه در طراحی دو گیتی مثبت تر شده است که با نتایج ارائه شده در [۱۹] مطابقت دارد. اما مقدار هدایت انتقالی به دلیل تسلط کامل گیت به کانال ترانزیستور افزایش یافته است. لذا می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از دو گیت باعث افزایش هدایت انتقالی می‌گردد.



شکل (۸): مقایسه حداکثر فرکانس نوسان برای ساختار تک گیتی و دو گیتی با طول گیت ۵۰ نانومتر

جدول (۳): مقایسه پارامترهای ساختار تک گیتی و ساختار دو گیتی با طول گیت ۵۰ نانومتر

پارامتر	تک گیتی با طول گیت ۵۰ نانومتر	دو گیتی با طول گیت ۵۰ نانومتر
فرکانس قطع بهره جریان واحد	۸۱ GHz	۲۷۲ GHz
حداکثر فرکانس نوسان	۱۰۶ GHz	۳۶۰ GHz
DIBL	۲۱۱۴ mV/V	۱۳۰ mV/V
شیب زیرآستانه	۸۲۶/۵ mV/dec	۲۸/۵ mV/dec



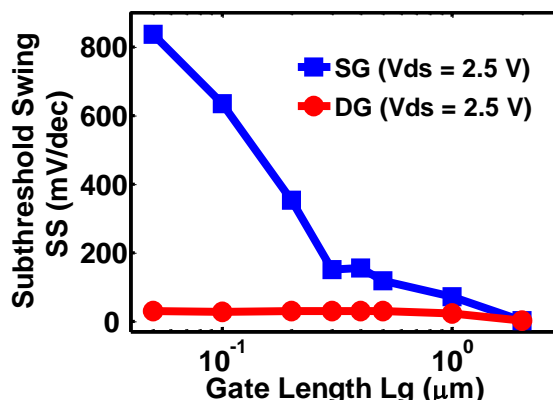
شکل (۹): مقایسه منحنی  $I_{D^*}V_{GS}$  بین دو ساختارهای دو گیتی پیشنهادی و ساده

#### ۴- مقایسه ساختار پیشنهادی با ساختار ساده (اثر افزودن لایه جدا کننده ذاتی)

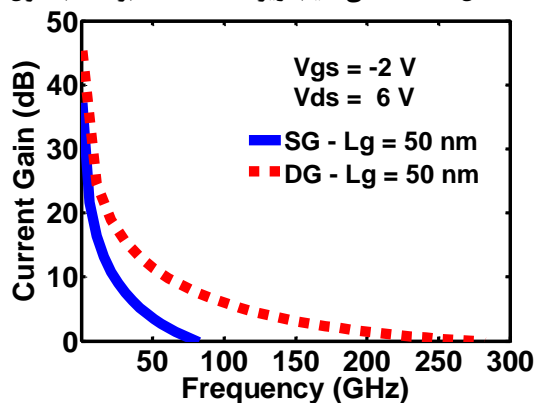
در این قسمت ساختار HEMT دارای گیت پشتی (ترانزیستور دو گیتی) و مجهز به لایه جدا کننده ذاتی به عنوان یک طراحی با مشخصات بهبود یافته پیشنهاد گردیده است (شکل ۱-ت). تفاوت این ساختار با ساختار تک گیتی در حکاکی لایه‌ی بافر تا لایه کانال برای قرار دادن الکتروود گیت دوم می‌باشد. به دلیل حکاکی لایه‌ی بافر،

می‌باشند. با توجه به شبیه‌سازی‌های انجام شده، مشخص می‌شود که ساختار دو گیتی، پارامترهای هدایت انتقالی، کاهش سد با درین تحریک شده و شیب زیر آستانه را بهبود قابل توجهی می‌بخشد.

از پارامترهای مهم ترانزیستورهای HEMT فرکانس قطع بهره جریان واحد ( $f_T$ ) و حداکثر فرکانس نوسان ( $f_{max}$ ) می‌باشند. شکل‌های ۷ و ۸ به ترتیب مشخصه‌های فرکانس قطع بهره جریان واحد و حداکثر فرکانس نوسان به ازای طول گیت ۵۰ نانومتر برای ساختار تک گیتی و دو گیتی را نشان می‌دهند. در شبیه‌سازی‌های مربوط به مشخصه‌های  $f_{max}$  و  $f_T$  ولتاژ درین-سورس، ۶ ولت ( $V_{DS} = 6 V$ ) و ولتاژ گیت-



شکل (۶): منحنی شیب زیر آستانه (SS) بر حسب طول گیت

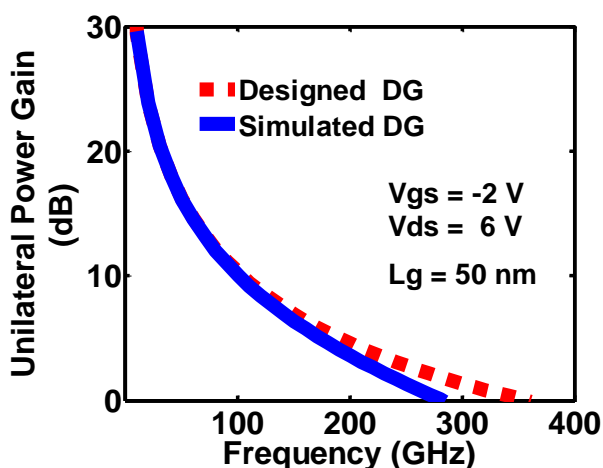


شکل (۷): مقایسه فرکانس قطع بهره جریان واحد برای ساختار تک گیتی و دو گیتی با طول گیت ۵۰ نانومتر

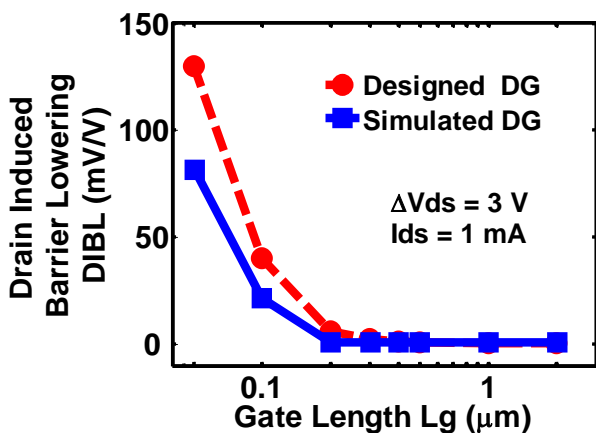
سورس، ۲- ولت ( $V_{GS} = -2 V$ ) انتخاب شده است. ملاحظه می‌شود که در هر دو مشخصه‌ی فوق، فرکانس کاری ترانزیستور برای ساختار دو گیتی بسیار بیشتر از ساختار تک گیتی است. فرکانس قطع بهره جریان واحد در ساختار تک گیتی برابر ۸۱ مگا هرتز و در ساختار دو گیتی برابر ۲۷۲ مگا هرتز است که نشان از افزایش بیش از سه برابری دارد. همچنین حداکثر فرکانس نوسان در ساختار تک گیتی برابر ۱۰۶ مگا هرتز و در ساختار دو گیتی برابر ۳۶۰ مگا هرتز است. در جدول ۳ مقایسه‌ای بین دو ساختار معرفی شده در این تحقیق صورت گرفته است.

می‌شود که در مورد هر دو پارامتر فرکانس قطع بهره جریان واحد و حداکثر فرکانس نوسان، ساختار طراحی شده دارای مقادیر بسیار مطلوب‌تری می‌باشد.

از جمله مهم‌ترین اثرات کانال کوتاه، مشخصه کاهش سد با درین تحریک شده و مشخصه شیب زیر آستانه می‌باشند که این دو مشخصه برای ساختار پیشنهادی و ساختار ساده به ترتیب در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ با یکدیگر مقایسه شده‌اند.



شکل (۱۲): مقایسه مشخصه توان-بهره و حداکثر فرکانس نوسان بین دو ساختارهای دو گیتی پیشنهادی و ساده

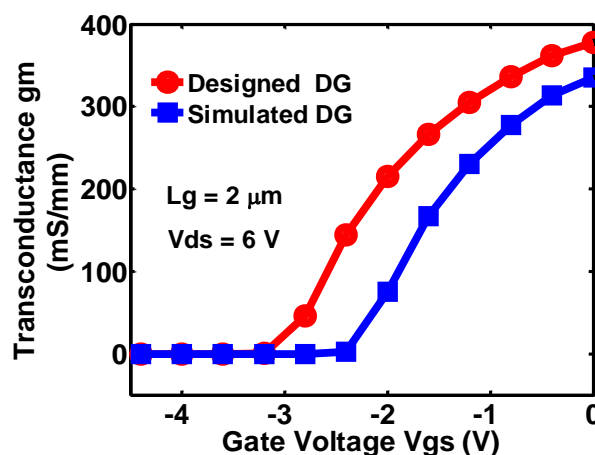


شکل (۱۳): کاهش سد با درین تحریک شده (DIBL) برای ساختار دو گیتی پیشنهادی و ساده

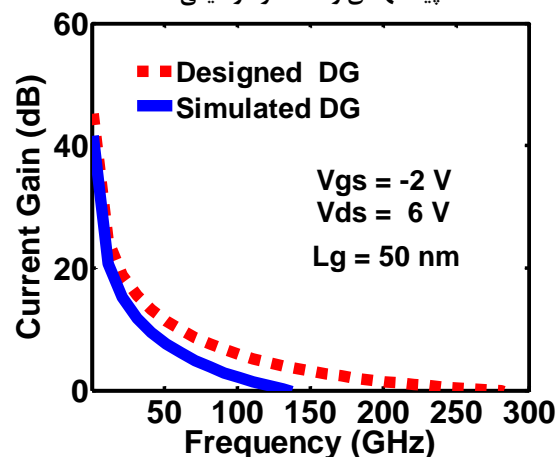
از شکل ۱۳ واضح است که به ازای طول گیت کمتر از ۲۰۰ نانومتر، مقدار DIBL برای ساختار دو گیتی طراحی شده بیشتر از ساختار دو گیتی معرفی شده در [۱۹] می‌باشد. در مقابل، همان‌گونه که در شکل ۱۴ نیز مشخص است، مقدار منحنی شیب زیر آستانه برای ساختار دو گیتی طراحی شده به طور چشمگیری کاهش یافته و به حالت ایده‌آل نزدیک‌تر شده است.

در جدول ۴ مشخصه‌های ساختار دو گیتی پیشنهادی و ساختار دو گیتی ساده با هم مقایسه شده‌اند. همانطور که در جدول ۴ نشان داده شده است، جز DIBL که مقدار آن در ساختار طراحی شده اندکی از

توزیع چگالی ناخالصی با ساختار تک گیتی متفاوت است. ساختار دو گیتی طراحی شده مشابه ساختار گزارش شده در [۱۹] (که از این به بعد آن را ساختار دو گیتی ساده می‌نامیم) بوده و تفاوت آن در اضافه شدن لایه‌ی Spacer و همچنین افزایش چگالی ناخالصی در لایه‌ی سد پتانسیل می‌باشد. منحنی جریان درین و منحنی هدایت انتقالی بر حسب ولتاژ گیت-سورس برای ساختارهای دو گیتی پیشنهادی و ساختار ساده به ازای ولتاژ درین-سورس برابر ۶ ولت و طول گیت ۲ میکرومتر به ترتیب در شکل‌های ۹ و ۱۰ آورده شده‌اند.



شکل (۱۰): مقایسه منحنی  $g_m-V_{GS}$  بین دو ساختار دو گیتی پیشنهادی و ساختار دو گیتی ساده



شکل (۱۱): مقایسه مشخصه‌های فرکانسی و فرکانس قطع بهره جریان واحد بین ساختارهای دو گیتی پیشنهادی و دو گیتی ساده

در هر دو شکل ۹ و ۱۰ ملاحظه می‌شود که مشخصه‌های ساختار دو گیتی طراحی شده نسبت به ساختار دو گیتی ساده افزایش قابل توجهی یافته‌اند. در شکل ۱۱ مشخصه‌های فرکانسی دو ترانزیستور مورد مقایسه محاسبه و رسم گردیده است. با توجه به پاسخ فرکانسی های رسم شده می‌توان مقدار  $f_T$  را محاسبه نمود. در شکل ۱۲ مقدار توان-بهره بر حسب فرکانس رسم گردیده است. مقدار حداکثر فرکانس نوسان ( $f_{max}$ ) از روی این شکل برای این دو ساختار قابل محاسبه است. از مقایسه مشخصه‌های فرکانسی دو ساختار فوق، مشاهده

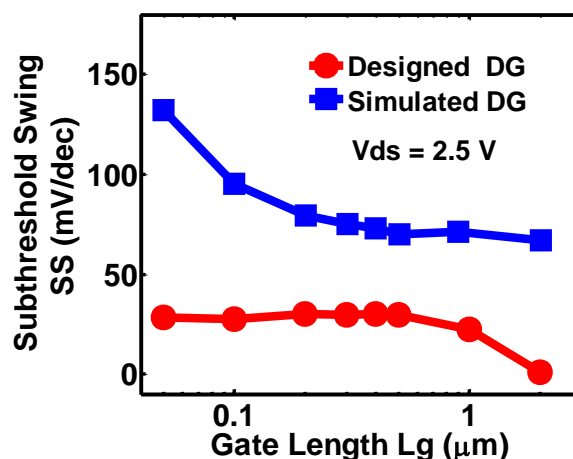
Discrete Field Plate AlGaIn/GaN HEMT لایه جداکننده AlGaIn	$L_g=800$ nm, $g_m=270$ mS/mm, $f_T=20$ GHz	[25]
p-GaN AlGaIn/GaN HEMT لایه جداکننده AlGaIn	$L_g=250$ nm, $g_m=330$ mS/mm, $f_T=45$ GHz	[26]
AlGaIn جداکننده	$L_{g1}=50$ nm, $g_{m1}=290$ mS/mm, $f_{T1}=81$ GHz, $f_{max1}=106$ GHz	This work
	$L_{g2}=50$ nm, $g_{m2}=290$ mS/mm, $f_{T2}=272$ GHz, $f_{max2}=360$ GHz	

همچنین در جدول ۵، مقایسه ای بین کارهای انجام شده بر روی HEMT با لایه جدا کننده و نتایج این مقاله انجام شده است که نشان می دهد طراحی انجام شده در این مقاله در بهبود رفتار ترانزیستور کاملا موثر بوده است. مهمترین مزیت ساختارهای پیشنهادی که باعث بهبود رفتار ترانزیستور گردیده است استفاده از لایه جداکننده ذاتی و گیت پشتی می باشد. همچنین جنس و ضخامت لایه جداکننده و مقادیر ناخالصی های افزوده شده در بهبود مشخصات آن تاثیرگذار بوده اند.

### ۵- نتیجه گیری

با تغییر در طراحی HEMT با پیوند ناهمگون GaN/AlGaIn و اضافه نمودن گیت پشتی و لایه جدا کننده ذاتی مشخصات AC, DC و کانال کوتاه ترانزیستور بهبود داده شد. مقایسه نتایج طوری انجام گردید که ثابت نمود هر کدام از تغییرات انجام شده به تنهایی باعث افزایش هدایت انتقالی، فرکانس قطع، فرکانس حداکثر نوسان و کاهش شیب زیر آستانه گردیده است. مقدار جریان درین در ساختار دو گیتی نسبت به تک گیتی (هر دو دارای لایه جدا کننده) کاهش یافته است و مقدار ولتاژ آستانه در طراحی دو گیتی مثبت تر شده است. افزودن لایه جدا کننده به طراحی دو گیتی علاوه بر بهبود همه پارامترهای ذکر شده جریان را نیز افزایش داده است. برای طول های گیت بیش از ۱۰۰ نانومتر DIBL ساختار دو گیتی پیشنهادی و ساختار دو گیتی ساده تقریبا با هم برابر هستند اما در طول های گیت زیر ۱۰۰ نانومتر DIBL برای ساختار ساده بیشتر می شود. نتایج نشان می دهد، در مجموع، طراحی های پیشنهادی در بهبود مشخصات ترانزیستور موفق بوده اند و می توان از آنها در سایر انواع HEMT نیز استفاده نمود.

ساختار ساده بیشتر است، بقیه مشخصه ها افزایش چشمگیری داشته اند، به طوری که طبق جدول ۴، جریان درین، هدایت انتقالی، فرکانس قطع بهره جریان واحد و حداکثر فرکانس نوسان به ترتیب برابر ۸۵٪، ۱۳٪، ۱۰۶٪، ۲۸٪ افزایش یافته و منحنی شیب زیر آستانه ۷۹٪ کاهش یافته است. لذا مشخصه های ترانزیستور دو گیتی پیشنهادی نسبت به مشخصه های ساختار ساده گزارش شده در [۱۹] بهبود قابل توجهی یافته اند.



شکل (۱۴): منحنی شیب زیر آستانه (SS) برای ساختارهای دو گیتی پیشنهادی و ساده

جدول (۴): مقایسه پارامترهای طراحی دو گیتی پیشنهادی با ساختار دو گیتی ساده

پارامتر	طول گیت	دو گیتی طراحی شده	دو گیتی مقاله مرجع [۱۹]
جریان درین $V_{DS}=6V$ و $V_{GS}=0V$	۲ $\mu m$	۴۹۳ mA/mm	۲۶۷ mA/mm
هدایت انتقالی $V_{DS}=6V$ و $V_{GS}=0V$	۲ $\mu m$	۳۷۸ mS/mm	۳۳۵ mS/mm
فرکانس قطع بهره جریان واحد	۵۰ nm	۲۷۲ GHz	۱۳۲ GHz
حداکثر فرکانس نوسان	۵۰ nm	۳۶۰ GHz	۲۸۲ GHz
DIBL	۵۰ nm	۱۳۰ mV/m	۸۱/۵ mV/m
منحنی شیب زیر آستانه	۵۰ nm	۲۸/۵ mV/dec	۱۳۲ mV/dec

### مراجع

- [1] P. aliparast and A. farhadi, "Design of X Band High Power Amplifier MMIC Based on AlGaIn/GaN HEMT," jiaeee, vol. 16, no. 2, pp. 37-45, 2019.
- [2] A. Mir and M. Miralae, "Modeling and Simulation of a Molecular Single-Electron Transistor", jiaeee, vol. 16, no. 2, pp. 65-75, 2019.
- [3] M. J. hejazifar and S. A. Sedigh Ziabari, "Investigation of Effect of Channel Impurity Halo and its Concentration Slope in the Linear Halo Lightly Doped Drain and Source CNTFET", jiaeee, vol. 15, no. 2, pp. 17-23, 2018.
- [4] A. Naderi and M. Ghodrati, "Novel Carbon Nanotube Field Effect Transistor with Lightly Doped channel and

جدول (۵): مقایسه پارامترهای HEMT های دارای لایه جداکننده

HEMT مشخصات	پارامترهای گزارش شده	مرجع
GaN/AlGaIn HEMT لایه جداکننده AlN	$L_g=700$ nm, $g_m(max)=200$ mS/mm $L_g=600$ nm, $f_T(max)=19$ GHz	[21]
GaN/AlN MIS-HEMT لایه جداکننده GaIn	$L_g=100$ $\mu m$ , $g_m=266.67$ mS/mm, $f_T=47$ GHz, $f_{max}=81$ GHz	[22]
GaN/AlN HEMT لایه جداکننده GaIn	$L_g=150$ nm, $f_T=56$ GHz, $f_{max}=130$ GHz $L_g=15$ nm, $g_m=201$ mS/mm	[23]
GaN/AlGaIn HEMT لایه جداکننده AlN	$L_g=30$ nm, $f_T=210$ GHz $L_g=130$ nm, $f_T=95.76$ GHz $L_g=150$ nm, $f_T=83$ GHz $L_g=30$ nm, $f_T=275$ GHz, $f_{max}=16$ GHz	[24]

- [21] A. Mohanbabu, N. Anbuselvan, N. Mohankumar, D. Godwinraj, C.K. Sarkar, "Modeling of sheet carrier density and microwave frequency characteristics in Spacer based AlGaIn/GaN HEMT devices", *Solid-State Electronics*, vol. 91, pp. 44-52, 2014.
- [22] Nidhi et al., " $f_T$  and  $f_{MAX}$  of 47 and 81 GHz, Respectively, on N-Polar GaN/AlN MIS-HEMT", *IEEE Electron Device Letters*, vol. 30, no. 6, pp. 599-601, 2009.
- [23] Nidhi et al., "N-Polar GaN/AlN MIS-HEMT for Ka-Band Power Applications", *IEEE Electron Device Letters*, vol. 31, no. 12, pp. 1437-1439, 2010.
- [24] Nidhi, S. Dasgupta, J. Lu, J. S. Speck and U. K. Mishra, "Scaled Self-Aligned N-Polar GaN/AlGaIn MIS-HEMTs With  $f_T$  of 275 GHz", *IEEE Electron Device Letters*, vol. 33, no. 7, pp. 961-963, 2012.
- [25] A.S. Augustine Fletcher, D. Nirmal, J. Ajayan, L. Arivazhagan, "Analysis of AlGaIn/GaN HEMT using discrete field plate technique for high power and high frequency applications", *International Journal of Electronics and Communications*, vol. 99, pp. 325-330, 2019.
- [26] L. Arivazhagan, D. Nirmal, D. Godfrey, J. Ajayan, P. Prajooon, A.S. Augustine Fletcher, A. Amir Anton Jone, J.S. Raj Kumar, "Improved RF and DC performance in AlGaIn/GaN HEMT by P-type doping in GaN buffer for millimetre-wave applications", *International Journal of Electronics and Communications*, vol. 108, pp. 189-194, 2019.
- Dual Section Dielectric", *jiaeee*, vol. 15, no. 2, pp. 9-16, 2018.
- [5] F. Bajelan, A. Yazdanpanah, R. Faez, and G. Darvish, "Investigation Performance of p-type Junctionless Field Effect Transistors with InGaP, InP and Si Channel Materials", *jiaeee*, vol. 15, no. 2, pp. 1-7, 2018.
- [6] S. Zhu et al., "Novel High-Energy-Efficiency AlGaIn/GaN HEMT with High Gate and Multi-Recessed Buffer", *Micromachines*, vol. 10, no. 7, pp. 444, 2019.
- [7] H. Chandrasekar et al., "Buffer-Induced Current Collapse in GaN HEMTs on Highly Resistive Si Substrates", *IEEE Electron Device Letters*, vol. 39, no. 10, pp. 1556-1559, 2018.
- [8] T. Hashizume, K. Nishiguchi, S. Kaneki, J. Kuzmik, and Z. Yatabe, "State of the art on gate insulation and surface passivation for GaN-based power HEMTs", *Materials Science in Semiconductor Processing*, vol. 78, pp. 85-95, 2018/05/01/ 2018.
- [9] X. Long, W. Liang, Z. Jun, and G. Chen, "A Normalized Quantitative Method for GaN HEMT Turn-ON Overvoltage Modeling and Suppressing", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 66, no. 4, pp. 2766-2775, 2019.
- [10] T. J. Flack, B. N. Pushpakaran, and S. B. Bayne, "GaN Technology for Power Electronic Applications: A Review", *Journal of Electronic Materials*, vol. 45, no. 6, pp. 2673-2682, 2016.
- [11] A. S. A. Fletcher and D. Nirmal, "A survey of Gallium Nitride HEMT for RF and high power applications", *Superlattices and Microstructures*, vol. 109, pp. 519-537, 2017.
- [12] C. D. Vazquez-Colon, D. C. Look, E. Heller, J. S. Cetnar, and A. A. Ayon, Simple ohmic contact formation in HEMT structures: application to AlGaIn/GaN (SPIE OPTO). SPIE, 2019.
- [13] H. Sun et al., "Temperature-Dependent Thermal Resistance of GaN-on-Diamond HEMT Wafers", *IEEE Electron Device Letters*, vol. 37, no. 5, pp. 621-624, 2016.
- [14] Z. Sepehri and A. Daghighi, "Analytical Threshold Voltage Computations for 22 nm Silicon-on-Diamond MOSFET Incorporating a Second Oxide Layer", *jiaeee*, vol. 16, no. 2, pp. 57-64, 2019.
- [15] A. Hickman et al., "High Breakdown Voltage in RF AlN/GaN/AlN Quantum Well HEMTs", *IEEE Electron Device Letters*, vol. 40, no. 8, pp. 1293-1296, 2019.
- [16] O. S. Koksaldi et al., "N-Polar GaN HEMTs Exhibiting Record Breakdown Voltage Over 2000 V and Low Dynamic On-Resistance", *IEEE Electron Device Letters*, vol. 39, no. 7, pp. 1014-1017, 2018.
- [17] N. Badawi, O. Hilt, E. Bahat-Treidel, J. Böcker, J. Würfl, and S. Dieckerhoff, "Investigation of the Dynamic On-State Resistance of 600 V Normally-Off and Normally-On GaN HEMTs", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 52, no. 6, pp. 4955-4964, 2016.
- [18] M. Alsharef et al., "RF Performance of Trigate GaN HEMTs", *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 63, no. 11, pp. 4255-4261, 2016.
- [19] L. Wang et al., "Modeling the back gate effects of AlGaIn/GaN HEMTs", *Journal of Computational Electronics*, vol. 13, no. 4, pp. 872-876, 2014.
- [20] S. K. Swain, S. M. Biswal, U. Nanda, D. S. Patro, S. K. Nayak, and B. Biswal, "Impact of p-GaN Gate Length on Performance of AlGaIn/GaN Normally-off HEMT Devices," in *Microelectronics, Electromagnetics and Telecommunications*, G. Panda, S. C. Satapathy, B. Biswal, and R. Bansal, Eds., 2019: Springer Singapore, pp. 803-809.