دانشکده مهندسی
گروه برق

عنوان پایان‌نامه:

مدل‌سازی سیگنال کوچک ترانزیستور توان GaN HEMT جهت به‌کارگیری در تقویت‌کننده‌ی توان باند X

نگارنده:

سمانه نجفی

ارائه شده جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد در رشته

مهندسی برق گرایش الکترونیک

استاد راهنما:

دکتر مجتبی جودکی

استاد مشاور:

دکتر علی آذربر

اردیبهشت ۱۳۹۳

بسم الله الرحمن الرحیم

دانشکده مهندسی
گروه برق

عنوان پایان‌نامه:

مدل‌سازی سیگنال کوچک ترانزیستور توان GaN HEMT جهت به‌کارگیری در تقویت‌کننده‌ی توان باند X

نگارنده:

سمانه نجفی

ارائه شده جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد در رشته

مهندسی برق گرایش الکترونیک

استاد راهنما:

دکتر مجتبی جودکی

استاد مشاور:

دکتر علی آذربر

اردیبهشت ۱۳۹۳

تعهد نامه

مدل‌ســـازی ســـیگنال کوچک ترانزیســـتور توان GaN HEMT جهت به‌کارگیری در تقویت‌کننده‌ی توان باند X

اینجانب سمانه نجفی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته برق-الکترونیک دانشکده مهندسی برق دانشگاه فردوسی مشهد تحت راهنمایی دکتر مجتبی جودکی متعهد می شوم:

- **نتـــایج ارائـــه شـــده در این پـــایان نامه حاصـــل مطالعات علمی و عملی اینجانب بوده، مسئولیت صحت و اصالت مطالب مندرج را به طور کامل بر عهده می گیرم.**
- **در خصـــوص استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد نظر استناد شده است.**
- **مطالب مندرج در این پایان نامه را اینجانب یا فرد دیگری به منظور اخذ هیچ نوع مدرک یا امتیازی تاکنون به هیچ مرجعی تسلیم نکرده است.**
- **کلیه حقوق معنوی این اثر به دانشـــگاه فردوسی مشهد تعلق دارد. مقالات مستخرج از پایان نامه، ذیل نام دانشـــگاه فردوسی مشهد (Ferdowsi University of Mashhad) به چاپ خواهد رسید.**
- **حقوق معنوی تمام افرادی که در به دســـت آمدن نتایج اصلی پایان نامه تاثیر گذار بوده اند در مقالات مستخرج از رساله رعایت خواهد شد.**
- **در خصوص استفاده از موجودات زنده یا بافتهای آنها برای انجام پایان نامه، کلیه ضوابط و اصول اخلاقی مربوطه رعایت شده است.**

تاریخ

نام و امضاء دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصـــولات آن (مقالات مســـتخرج، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده) به دانشگاه فردوسی مشهد تعلق دارد و بدون اخذ اجازه کتبی از دانشگاه قابل واگذاری به شخص ثالث نیست.
- استفاده از اطلاعات و نتایج این پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نیست.

تائیدیه

گواهی می‌شود که این پایان‌نامه تاکنون برای احراز یک درجه علمی ارائه نشده است و تمامی مطالب آن به جز مواردی که نام مرجع آورده شده است، نتیجه کار پژوهشی دانشجو می‌باشد.

دانشجو: سمانه نجفی امضاء تاریخ

استاد راهنما: دکتر مجتبی جودکی امضاء تاریخ

استاد مشاور: دکتر علی آذربر امضاء تاریخ

بسمه تعالی

دانشگاه فردوسی مشهد

صورتجلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد

جلسه دفاع از پایان نامه خانم سمانه نجفی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته **مهندسی برق** گرایش الکترونیک در ساعت ۱۷:۰۰ روز شنبه، ۱۳ اردیبهشت در محل **کلاس** دانشکده مهندسی با حضور امضا کنندگان ذیل تشکیل گردید. پس از بررسی های لازم، هیأت داوران پایان نامه نامبرده را با نمره به عدد به حروف و با **درجه** مورد تأیید قرار داد.

عنوان رساله

مدل‌سازی سیگنال کوچک ترانزیستور توان GaN HEMT جهت به‌کارگیری در تقویت‌کننده‌ی توان باند X

هیئت داوران امضا

- **داور: دکتر سید ابراهیم حسینی**

  دانشیار گروه برق دانشگاه فردوسی مشهد

- **داور و نماینده تحصیلات تکمیلی: دکتر مهدی صابری**

  استادیار گروه برق دانشگاه فردوسی مشهد

- **استاد راهنما: دکتر مجتبی جودکی**

  دانشیار گروه برق دانشگاه فردوسی مشهد

- **استاد مشاور: دکتر علی آذربر**

  گروه تحقیقاتی شهید محلاتی

- **مدیر گروه: دکتر محمد میمندی نژاد**

  دانشیار گروه برق دانشگاه فردوسی مشهد

تشکر و قدردانی

قبل از همه سپاس فراوان از خداوندی که یاری فرمود تا پروژه‌ی حاضر به پایان برسد. بر خود لازم می‌دانم تا از زحمات بی دریغ، حمایت‌های با محبت و مجاهدت بی شائبه‌ی استاد دکتر مجتبی جودکی در راستای تربیت دانشجویان و تلاش در راه پیشرفت و اعتلای مملکت عزیز اسلامیان کمال تشکر خود را ابراز دارم.

و هم چنین با تشـــکر فراوان از آقایان دکتر Jaime Alberto Zamudio Flores و دکتر .Wilfred N Mwema که با صبر و حوصله پاسخگوی سوالات اینجانب بوده‌اند.

هم‌چنین از حمایت جناب آقای دکتر علی آذربر در راســـتای انجام این پایان نامه کمال تشـــکر و سپاس را دارم.

و به‌جاســـت که از حمایت‌ها و همراهی همســـرم جناب آقای دکتر محمد چهاردولی در به انجام رسیدن این پروژه سپاس ویژه داشته باشم.

تقدیم به:

پدر و مادر مهربانم

که همیشه پشتوانه‌ی مستحکمی برای تحصیل فرزندشان بوده اند

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

۱- فصل اول ۱

۱-۱ مدل سازی ترانزیستور ۳

۲- فصل دوم ۵

۲-۱ مقایسه ی ترانزیستور GaN HEMT با Si-LDMOS ۷

۲-۲ مقایسه ی ترانزیستور GaN و GaAs ۸

۲-۳ مقایسه ی HEMT و MESFET ۹

۲-۴ ساختار فیزیکی قطعات GaN HEMT ۱۰

۳- فصل سوم ۱۲

۳-۱ بررسی روش های مختلف مدل سازی GaN HEMT ۱۳

۳-۲ معرفی پارامترها مداری ۱۶

۳-۲-۱ خازن های غیرذاتی C_{pg} و C_{pd} ۱۶

۳-۲-۲ خازن C_{pgd} ۱۷

۳-۲-۳ خازن بین الکترود C_{pdi} ۱۷

۳-۲-۴ خازن بین الکترود C_{pgi} ۱۷

۳-۲-۵ خـا زن C_{gdi} ۱۷

۳-۳ استخراج پارامترهای غیرذاتی ۱۸

۳-۴ پارامترهای ذاتی ۲۴

۳-۵ محاسبه خطا ۲۶

۴- فصل چهارم ۲۹

۴-۱ پارامترهای پراکندگی ۲۹

۴-۲ اندازه گیری پارامترهای S ۳۰

۴-۳ کالیبراسیون ۳۱

۴-۳-۱ انواع خطاها ۳۳

۴-۳-۲ استانداردهای کالیبراسیون ۳۴

۴-۴ روشهای کالیبراسیون ۳۶

۵- فصل پنجم ۴۷

۵-۱ استخراج عناصر ذاتی وابسته به تغذیه ۵۰

۵-۲ مقایسه ی پارامترهای S شبیه سازی و اندازه گیری شده ۵۲

۶- فصل ششم ۵۴

۷- مراجع ۵۶

فهرست شکل‌ها

شکل ۱-۱: (الف)عناصر تقویت کننده ی توان(ب) و ساختار ساده و اولیه یک تقویت کننده[۱] ۲
شکل ۲-۱: مقایسه شماتیک تکنولوژی GaN با تکنولوژی GaAs موجود در سال ۲۰۰۲[۱۱]..... ۸
شکل ۲-۲: ساختار لایه ای GaN HEMT [۱] ۱۱
شکل ۳-۱: مدل مداری سیگنال کوچک ترانزیستور GaN HEMT [۳۳] ۱۵
شکل ۳-۲: نمای فیزیکی مدار معادل ترانزیستور GaN HEMT بدون خازن های غیرذاتی[۱]...۱۶
شکل ۳-۳: معادل فیزیکی خازن های C_{pgi}، C_{gdi} وC_{pdi} [1] ۱۷
شکل ۳-۴: مدار معادل GaN HEMT در ناحیه ی Cold Pinchoff و در فرکانس های پایین ... ۱۸
شکل ۳-۵: مدار معادل شبکه ی T ترانزیستور FET در شرایط Cold Pinchoff ۲۰
شـــکل ۳-۶: مدار معادل Cold Pinch off پس از deembed کردن C_{pg}، C_{pd} و C_{pgd} و نادیده گرفتن ضرایب تصحیح ۲۰
شکل ۳-۷: فلوچارت استخراج مقادیرمدل سیگنال کوچک[۳۳] ۲۲
شکل ۴-۱: محدوده فرکانسی بهینه برای استخراج پارامترهای مدل[۳۵] ۳۱
شکل ۴-۲: ساختار استاندارد تست on-wafer برای سیستم اندازه گیری باVNA [49]..... ۳۲
شکل ۴-۳: منبع خطاهای موجود در سیستم اندازهگیری پارامترهای S توسطVNA [56]..... ۳۳
شکل ۴-۴:ساختار تست SOLR [53] ۳۷
شکل ۴-۵:استانداردهای موجود در LRM [50] ۳۸
شکل ۴-۶: استانداردهای روش LRRM [50] ۴۰
شکل ۴-۷: استاندارهای موجود در TRL [50] ۴۱
شکل ۴-۸: بلوک دیاگرام و گراف سیگنالی استاندارد Line [46] ۴۲
شکل ۴-۹: بلوک دیاگرام و گراف سیگنالی استاندارد reflect [46] ۴۳
شکل ۴-۱۰: بلوک دیاگرام و گراف سیگنالی استاندارد Thru [46] ۴۳
شـکل ۵-۱: پارامترهای Y اندازه گیری شـده در ناحیه ی Cold pinch off جهت اسـتخراج خازن شاخه ها(C_{gso},C_{gdo},C_{dso}) ۴۸
شکل ۵-۲ : تخمین سلف های مدار با استفاده از اندازه گیری های Cold pinch off..... ۴۸
شـکل ۵-۳ : تخمین مقدار مقاومت های غیر ذاتی با اسـتفاده از اندازه گیری های Cold forward ۴۹
شکل ۵-۴: استخراج خازن ذاتی C_{gs} در ولتاژهای V_{ds}= 28 و V_{gs}=-1 ..... ۵۰
شکل ۵-۵ : استخراج خازن ذاتی C_{gd} در ولتاژهای cold pinch off ۵۰
شکل ۵-۶ : استخراجG_m در ولتاژهای V_{ds}= 28 و V_{gs} =-1 ..... ۵۱
شکل ۵-۷: استخراج خازن C_{ds} در ولتاژهایV_{ds}= 28 و V_{gs}=-1 ..... ۵۱

شکل ۵-۸: منحنی Smith پارامترهای S شبیه سازی و اندازه گیری شده در ولتاژهای Vgs =-4.9 و Vds=0 ..... ۵۲
شـکل ۵-۹: مقایسه ی پارامترهای S شبیه سازی شده و اندازه گیری شده، در Cold pinch off با استفاده از مقادیر اولیه ۵۳

فهرست جداول

جدول ۲-۱- مقایسه مواد مختلف برای ساخت ترانزیستورهای توان [۱۴] ۶
جدول ۴-۱- روشهای کالیبراسیون[۴۸], [۵۱], [۵۲] ۳۶
جدول ۵-۱- مقادیر عناصر مداری ترانزیستور GaN HEMT 3× 1.2 mm با استفاده از اندازه گیری های Cold pinch off و Cold forward ۴۹

چکیده

تکنولوژی ساخت قطعات نیمه هادی مایکروویو یکی از مهم‌ترین مسائل در طراحی مدارهای راداری و فرستنده‌های مخابراتی است. قطعات اکتیو مورد استفاده در این مدارها باید توانایی تولید سطوح بالایی از توان RF را در دماهای بالا داشته باشند. لذا هر ساله مطالعات بسیاری در راستای طراحی و مدل‌سازی قطعات توان صورت می‌گیرد.

موادی از قبیل GaN، GaAs، الماس[۱]، یاقوت کبود[۲] و SiC موارد پیشهادی برای ساخت قطعات توان هستد. اما در این بین تکنولوژی[۳]AlGaN/GaN HEMT به یکی از بهترین گزینه ها برای طراحی تقویت‌کننده‌های توان بالا و فرکانس بالا تبدیل شده است. قطعات ساخته شده با GaN به دلیل شکاف باند وسیع این ماده دارای ولتاژ شکست بالایی هستند، بنابراین ولتاژهای تغذیه بالا را به راحتی تحمل نموده و در کاربردهای توان بالا بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرد. یکی دیگر از مزایای مهم ترانزیستورهای GaN سرعت بالای اشباع آنها است، بنابراین می‌توان از این قطعات درمدارهای فرکانس بالا بهره برد. همچنین قابل ذکر است که ترانزیستورهای مذکور قابلیت کار در دماهای بالا را به دلیل وجود زیرلایه‌ایی از جنس SiC و مقاومت گرمایی کم ماده‌ی GaN دارا هستند.

اولین قدم جهت به‌کارگیری این قطعات در مدارها، استخراج مدل سیگنال کوچک آنها می‌باشد. مدل سیگنال کوچک بیان کننده‌ی عناصر پارازیتی ذاتی و غیر ذاتی وابسته به تغذیه است که در این پروژه به استخراج آن می‌پردازیم. ابتدا نگاه مختصری به تکنولوژی HEMT داشته و سپس مدل سیگنال کوچک ترانزیستور GaN HEMT با در نظر گرفتن تمام عناصر پارازیتی ارائه می‌شود. روند استخراج مدل سیگنال کوچک با جستجو در راستای یافتن بهترین مقدار خازن‌های غیرذاتی شروع می‌شود، سپس با جستجوی مقادیر سلف‌ها و مقاومت‌های غیرذاتی ادامه پیدا کرده و در نهایت مقادیر عناصر ذاتی وابسته به تغذیه استخراج می‌گردد.

مدار معادل مورد استفاده در این پروژه دارای ۲۲ عنصر پارازیتی است که شامل ۱۰ پارامتر ذاتی وابسته به تغذیه و ۱۲ عنصر غیرذاتی می‌باشد.

در انتها نیز صحت و دقت این روش با استفاده از مقایسه‌ی مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده‌ی یک ترانزیستور ۶ واتی GaN HEMT با عرض گیت ۱,۲ mm و تعداد گیت ۳ به اثبات رسیده است.

کلمات کلیدی: ۱- مدل‌سازی GaN HEMT ۲-مدل‌سازی سیگنال کوچک۳-GaN HEMT ۴- ترانزیستورهای توان ۵-کالیبراسیون۶- انواع روش‌های کالبیراسیون VNA

---

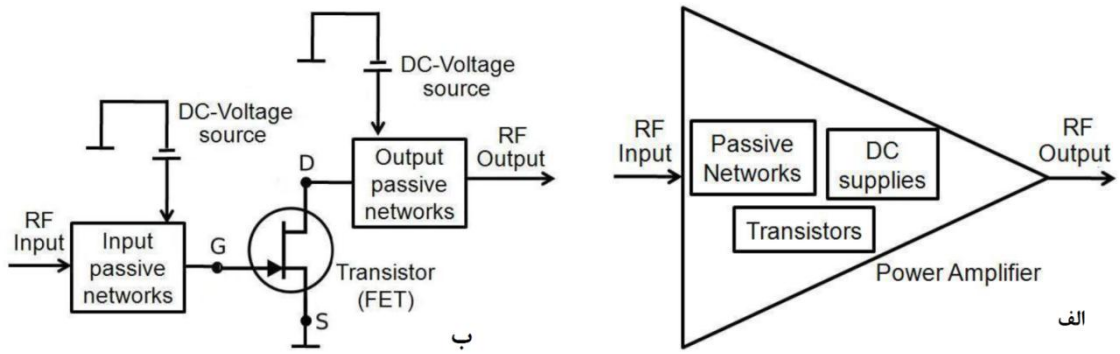
[۱] Diamond

[۲] Saphire

[۳]High Electron Mobility Transistors

فصل اول
مقدمه

تقویت کننده‌ی توان یکی از عناصر متداول و کلیدی سیستم‌های الکترونیکی بوده و وظیفه‌ی آن تقویت سیگنال ورودی و انتقال آن به خروجی است. شکل۱-۱ عناصر موجود در یک تقویت کننده‌ی توان و ساختاری ساده و ابتدایی از این نوع تقویت کننده‌ی توان را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۱: (الف)عناصر تقویت کننده ی توان(ب) و ساختار ساده و اولیه یک تقویت کننده[۱]

همان‌گونه که در شکل۱-۱ نشان داده شده است، ترانزیستور عنصر کلیدی و مهم مدار تقویت کننده‌ی توان می‌باشد. سیستم‌های الکترونیکی سالها از ترانزیستورهای اثر میدان (FET) برای تقویت سیگنال‌ها ورودی بهره برده‌اند. لذا در این شکل از یک نمونه ترانزیستور FET به عنوان عنصر تقویت کننده استفاده شده است.

نیمه‌هادی‌هایی با شکاف باند وسیع برای ساخت ترانزیستورهای توان گزینه‌ی مناسبی هستند، چرا که این شکاف باند بالا موجب می‌شود تا ترانزیستورها توانایی تحمل توان‌های بالا را داشته باشند. از این‌رو موادی مانند GaN، GaAs، الماس[۱]، یاقوت کبود[۲] و SiC موارد پیشنهادی برای ساخت ترانزیستورهای توان هستند[۲]–[۱۱].

[۱] Diamond
[۲] Saphire

مشـخصات فیزیکی این مواد اجازه‌ی بهره‌وری از این ترانزیستورها در کاربردهای فرکانس بالا، توان و دمای بالا را به طراحان می‌دهد که در فصل دوم به تفصیل توضیح داده می‌شود.

تکنولوژی HEMT[۱] ساختار جدیدی از ترانزیستورهای GaN را ارائه می‌دهد که در سال‌های اخیر بسـیار مورد توجه محققان و طراحان قرار گرفته اسـت. این تکنولوژی می‌تواند هزینه‌ی مدارهای مجتمع سـاخته شـده بر پایه‌ی GaN HEMT را کاهش داده و جایگزین مناسـبی برای ترانزیسـتورهای موجود مبتنی بر سـیلیکون باشـد[۱۲]. اما قابل ذکر اسـت که از ماده‌ی GaN برای ساختارهای MOS نمی‌توان بهره برد چرا که اکسـید این ماده در دسـترس نمی‌باشد. لذا از این ماده در ساختارهای HEMT استفاده می‌شود[۹].

۱-۱ مدل سازی ترانزیستور

طراحی تقویت‌کننده‌های توان بر اسـاس مدل‌های کامپیوتری صـورت می‌پذیرد، بنابراین استخراج مدل مداری برای استفاده از یک ترانزیستور در مدارهای تقویت کننده بسیار ضروری و لازم می‌باشد.

مدل‌سازی ترانزیستور در دو بخش (۱) سیگنال کوچک و (۲) سیگنال بزرگ صورت می‌پذیرد. از مدل‌سازی سیگنال کوچک تا هنگامی استفاده می‌شود که سیگنال اعمال شده دامنه‌ی کوچکی داشته و ترانزیستور از ناحیه‌ی خطی خارج نشود. آنالیز سیگنال بزرگ نیز زمانی انجام می‌شود که دامنه‌ی سیگنال اعمالی بزرگ بوده و در نتیجه‌ی آن ترانزیستور رفتار غیرخطی داشته باشد.

مدل سیگنال کوچک اولین قدم در مدل‌سازی ترانزیستور است. این مدل در اطراف نقطه‌ی کار بدست آمده و نشان دهنده‌ی عناصر پارازیتی ذاتی و غیر ذاتی ترانزیستور است و کاربردی اساسی در شبیه‌سازی‌های کامپیوتری دارد. همچنین در یکی از انواع مدل‌سازی سیگنال بزرگ با عنوان "تکنیک پایین- بالا"[۲]؛ با استخراج مدل سیگنال کوچک در تغذیه‌های مختلف مدل سیگنال بزرگ استخراج می‌شود. از این رو مدل سیگنال کوچک با دقت بالا نه تنها در شبیه‌سازی‌های مداری سیگنال کوچک مورد نظر است بلکه در مدل‌سازی سیگنال بزرگ نیز از اهمیت به سزایی برخوردار می‌باشد.

بسیاری از مدارهای الکترونیکی مانند گیرنده‌های رادیویی، مخابرات، و مدارهای پردازش سیگنال در حالت عادی و در یک تغذیه ثابت حامل سیگنال‌های AC با تغییرات بسیار اندک در زمان[۳] هستند. بنابراین

---

[۱] High Electron Mobility Transistors

[۲] bottom-up

[۳] Small time-varying (AC)signals

هر قطعه‌ی غیر خطی‌ای را می‌توان در نقاط تغذیه‌ی ثابت خطی در نظر گرفت، و از مدل سیگنال کوچک برای شیبه سازی آن بهره برد.

فصل دوم توصیفی از تکنولوژی و مشخصات انواع قطعات RF، کاربرد آنها با تمرکز بر ترانزیستور GaN HEMT، مزایا و معایب GaN و پارامترهای مهم در انتخاب ترانزیستورها را ارائه می‌دهد و در فصل سوم به معرفی و بررسی مدل AC سیگنال کوچک ترانزیستور و استخراج پارامترهای مدل پرداخته می‌شود. فصل چهارم به اندازه گیری‌های فرکانس بالا اختصاص داده شده است و مقدمات اندازه‌گیری فرکانس بالا و روش‌های مختلف کالیبراسیون تشریح شده است. روش استخراج مدل سیگنال کوچک که روی ترانزیستور مورد نظر اعمال گردیده در فصل چهارم تشریح شده است. در انتها نیز خلاصه ایی از آنچه در این پروژه انجام شده می‌شود.

۱-۲ هدف اصلی پروژه

هدف اصلی در این پروژه، بررسی و استخراج مدل سیگنال کوچک برای ترانزیستور سایز بزرگ ۶ واتGaN HEMT با عرض گیت۳×۱/۲ mm و تکنولوژی ۰/۲۵ µm در باند فرکانسی۲۰ GHZ – ۱MHz است، که طبق روش‌های مشروح در فصل سوم انجام می‌پذیرد و همچنین عملکرد و ساختار فیزیکی ترانزیستورهای GaN HEMT در فصل دوم مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

فصل دوم
ترانزیستورهای GaN HEMT

در این فصـــل فیزیک ترانزیســـتورهای GaN HEMT و خلاصـــه‌ایی از چگونگی عملکرد آنها و همچنین مقایسه‌ایی بین ترانزیستورهای مختلف توان ارائه می‌شود.

همانطور که می‌دانیم هرچه شـکاف باند (E_g) ترانزیستور بالاتر باشد توانایی تحمل توان‌های بالاتر را خواهد داشت، بنابراین بهترین گزینه برای ساخت ترانزیستورهای توان موادی هستند که شکاف باند بالا و در نتیجه میدان شـکست بالاتری داشته باشند. همچنین بهتر است تا میزان تحرک‌پذیری[۱] (μ)، سرعت اشـباع الکترون، هدایت گرمایی بالا و همچنین ثابت دی‌الکتریک (ε) پایین‌تری داشـته باشـد. در جدول ۲-۱ برخی از مشـخصـات فیزیکی مهم مواد مورد اسـتفاده در ترانزیسـتورهای توان (GaAs، Si، SiC و GaN) آورده شـده اسـت و مقایسـه‌ای بین پارامترهای ذکر شـده در مواد مختلف صورت گرفته است. بر مبنای مشـخصـات فوق‌الذکر شـاخصـی با عنوان نسبت BFOM[۲] در جدول ۲-۱ برای تمام مواد محاسبه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود این مقدار برای ماده‌ی GaN از همه بیشتر بوده و نشان دهنده‌ی این اسـت که ماده‌ی GaN انتخاب مناسـبی برای سـاخت ترانزیستورهای توان و سرعت بالا می‌باشد[۱], [۲], [۴], [۶], [۸]–[۱۰], [۱۳]–[۱۵].

[۱] Mobility

[۲] BFOM: Baliga’s figure of merit ($\mu*\varepsilon*Eg^3$)

جدول ۲-۱- مقایسه مواد مختلف برای ساخت ترانزیستورهای توان [۱۴]

	GaAs	*Si*	*H4-SiC*	*GaN*
شکاف باند (ev)	۱/۴۲	۱/۱۲	۳/۲	۳/۴
موبیلیتی الکترون در T=300k $[cm^2/V.s]$	۵۰۰۰	۱۳۰۰	۲۶۰	۱۵۰۰
سرعت اشباع الکترون $[10^7\ cm/s]$	۱	۱	۲	۲/۵
میدان شکست [MV/s]	۰/۴	۰/۳	۳/۵	۲
هدایت گرمایی [W/cm.K]	۰/۵	۱/۵	۳/۷	۱/۳
ثابت دی الکتریک	۱۲/۵	۱۱/۹	۱۰	۹/۵
نسبت BFOM	۹/۶	۱	۳/۱	۲۴/۶
بیشترین دما (°C)	۳۰۰	۳۰۰	۶۰۰	۷۰۰

یکی دیگر از ترانزیستورهایی که در مدارهای توان بالا بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرند قطعاتDMOS FET ها هستند که با توجه به جهت تشکیل کانال به دو دسته‌ی VDMOS[۱] و LDMOS[۲] تقسیم می‌شود. VDMOS (Vertical Double Diffiused MOS) فرم ویژه ایی از DMOS هاست که برای داشتن کانال در زیر سورس دو دیفیوژن روی آن انجام می‌شود. در ترانزیستورهای VDMOS ترانزیستور در زیر ساختار قرار دارد، در این نوع ترانزیستور جریان بصورت عمودی از درین به سورس گسترش می یابد. بنابراین اگر کانال به شکل عمودی تشکل شود و درین در پشت ساختمان ترانزیستور قرار گیرد ترانزیستور از نوع VDMOS و در غیر اینصورت یعنی تشکیل کانال بصورت افقی ترانزیستور LDMOS خوانده می‌شود[۱۶], [۱۷].

[۱] Vertically Diffused metal oxide semiconductor

[۲] Laterally Diffused Metal Oxide Semiconductor

۲-۱ مقایسه ی ترانزیستور GaN HEMT با Si-LDMOS

ترانزیستورهای LDMOS به طور گسترده در سیستم‌های مخابراتی کاربرد دارند و بهترین مقدار بازدهی به قیمت را برای این سیستم‌ها ارائه می‌دهد. اما ترانزیستورهای GaN در ابتدا فقط در مدارهایی با کاربردهای نظامی استفاده می‌شد که در سالهای اخیر طراحان مدارهای سیستم‌های مخابراتی و بیسیم علاقه‌ی بسیاری در به‌کارگیری این نوع قطعات در مدارها پیدا کرده اند[۸].

به‌عنوان اولین مقایسه باید اشاره کرد که ترانزیستورهای DMOS معمولا با سیلیکون (Si) ساخته می‌شوند؛ لذا یکی از ویژگی های مهم و منحصر به فرد آنها این است که تمام سیستم را می‌توان روی یک چیپ واحد پیاده سازی نمود (مثلا قسمت‌های دیجیتال و قسمت‌های توان بالا) و همچنین به‌راحتی می‌توان آنها را با CMOS ها روی یک سیستم یکسان و chip واحد نصب نمود[۱۶], [۱۷].

مزیت دیگر این ترانزیستورها قیمت نسبتا مناسب‌تر آنها نسبت به تکنولوژی GaN HEMT است، چرا که هزینه‌ی ساخت ترانزیستور با ماده‌ی سیلیکون کمتر از GaN می‌باشد[۱].

با این وجود پیش بینی می‌شود که GaN به‌دلیل ویژگی‌ها و مزایای بیشتری که دارد جایگزین LDMOS ها شود. این مزایا شامل فرکانس قطع(f_T) بالاتر، چگالی جریان بالاتر و در نتیجه توان خروجی بالاتر می‌باشد[۸]. اما در آینده‌ایی نه چندان دور بازدهی نسبتاً بالاتر، فرکانس کاری بالاتر و سایز کوچکتر ترانزیستورهای ساخته شده با تکنولوژی GaN HEMT در مقایسه با LDMOS ها قیمت نهایی آنها را کاهش خواهد داد.

ولتاژ شکست گزارش شده برای GaN تقریبا ۲ برابر LDMOS های گزارش شده است (GaN:450, LDMOS:200V) که این خود ۳ تا ۶ برابر مقادیر گزارش شده از قطعات GaAs است[۱].

ویژگی دیگر، ضریب هدایت گرمایی بالای ترانزیستورهای GaN HEMT است. در این ترانزیستورها غالبا از SiC به‌عنوان زیرلایه استفاده می‌شود که در مقایسه با Si که در LDMOS ها استفاده می‌شود هدایت گرمایی بیشتری دارد. این ویژگی باعث می‌شود تا از تغییرات دمایی کانال کاسته شده و بنابراین جریان درین و توان خیلی کمتر به دما وابسته باشد. اما استفاده از این ماده در مقایسه با Si هزینه‌ی بالاتری را به قیمت نهایی ترانزیستور تحمیل می‌کند[۱۴].

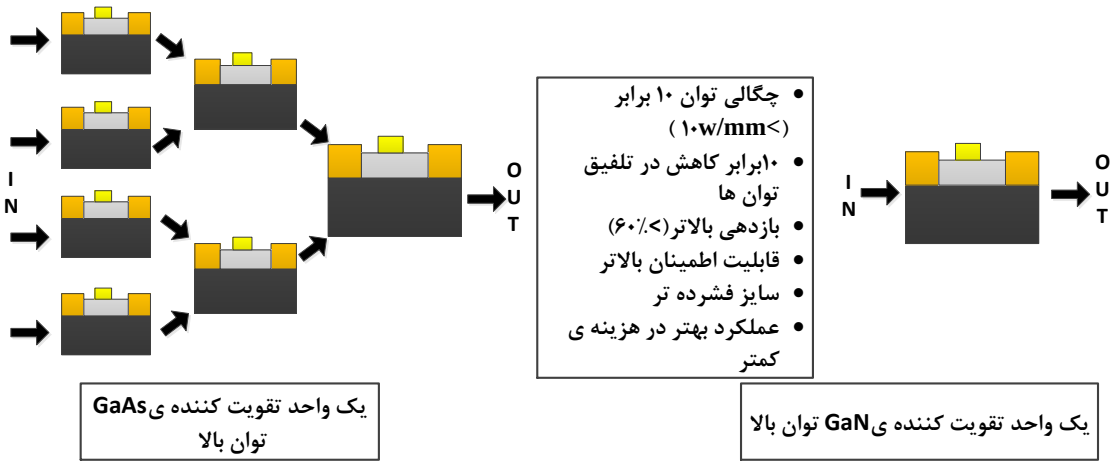
تکنولوژی GaN به‌دلیل مقدار کم خازنهای پارازیتی، فرکانس گذر بالاتر و ولتاژ شکست بالاتر برای PA[۱] های یک طرفه با بازدهی بالا (مخصوصا در کاربردهای بالاتر از ۲GHz) بسیار مناسب هستند[۸].

چگالی توان ترانزیستورهای GaN برای کاربردهای UMTS[۲] که حدود 2.5-5 w/mm گزارش داده شده است نیز تقریبا دو تا چهار برابر LDMOS ها و سه تا شش برابر GaAs است[۱۸].

مهم‌ترین عیب LDMOS ها افت بازدهی توان آنها در فرکانس‌های بالاتر از ۳GHz می‌باشد[۸].

۲-۲ مقایسه ی ترانزیستور GaN و GaAs

شکل ۲-۱ به‌صورت خلاصه مقایسه‌ای بین ترانزیستورهای GaN و GaAs را ارائه می‌دهد.



شکل ۲-۱: مقایسه شماتیک تکنولوژی GaN با تکنولوژی GaAs موجود در سال ۲۰۰۲[۱۱].

از نقطه نظر طراحان تقویت کننده، ترانزیستورهای HEMT مبتنی برGaN مزایای زیادی نسبت به تکنولوژی‌های دیگر از جمله GaAs دارند. همان‌گونه که در شکل ۲-۱ نیز اشاره شده است چگالی بالای توان خروجی این امکان را می‌دهد تا سایز قطعه در ازاء توان خروجی کوچکتر باشد. هم‌چنین

[۱] Power amplifier

[۲] Universal Mobile Telecommunications Systems