



دانشگاه شاهرود

دانشکده مهندسی

گروه برق

پایان نامه کارشناسی

گرایش: الکترونیک

عنوان:

بررسی ساختار، عملکرد و کاربردهای ترانزیستورهای با قابلیت تحرک بالای

الکترون (HEMT)

استاد راهنما: دکتر نیره قبادی

نگارش: راضیه صدری

آبان ماه ۹۵

# تقديم

## مايان نامہ کارسناسی

# پ دروماذ غر نو د لسوزم

# آزمايشگاه پروژہ برق

# سپاسگزاری

در این جانشین سپاس از خداوند مهربان و ممتعال،

از استاد گرانقدرم سرکار خانم دکتر قبادی

به خاطر کمک، راهنمایی‌های ارزشمندشان و هم‌چنین

گروه برق دانشکده فنی دانشگاه زنجان

تقدیر و تشکر می‌نمایم.

## چکیده

در این پروژه به بررسی ترانزیستورهای با قابلیت تحرک بالای الکترون ها (HEMT) می پردازیم. ترانزیستور هایی که متشکل از دو ساختار نامتجانس با دو شکاف انرژی متفاوت هستند و همین سبب افزایش قابلیت تحرک بالای الکترون ها و در نتیجه سرعت بالای آن برای استفاده در فرکانس های بالا، نویز کم و بهره بالا می گردد. ابتدا در فصل اول به معرفی و تاریخچه استفاده از این ترانزیستورها می پردازیم و سپس در فصل دوم تئوری این ترانزیستورها، چگونگی ساختار، اجزا، شکل گیری آن ها و مکانیزم عملکرد کوانتومی این ترانزیستورها را مورد تجزیه و تحلیل قرار می دهیم. در فصل سوم به بررسی خواص و ساختار انواع ترانزیستورهای HEMT ساخته شده پرداخته و به مقایسه ی آن ها با هم نیز نگاهی خواهیم داشت. در فصل چهارم نوع خاصی از ترانزیستورهای HEMT از ترکیبات AlGaN/GaN را بررسی کرده و به مزایا، معایب خواص و ساختار نیمه هادی گالیوم نیترا ت پرداخته و مشخصه های آن را بررسی خواهیم کرد و در نهایت در فصل پنجم نگاهی به زمینه های تحقیقاتی پیرامون انواع ترانزیستورهای HEMT و بهترین دستاورد های آن ها خواهیم کرد و به بینشی درباره ی آینده این تکنولوژی خواهیم رسید.

**کلید واژگان:** ترانزیستور HEMT ، قابلیت تحرک الکترون ، ترکیبات AlGaN/GaN.

فهرست مطالب

| عنوان   | صفحه |
|---|------|
| <b>فصل اول: مقدمه</b> .....   | ۱    |
| مقدمه .....   | ۲    |
| <b>فصل دوم: ساختار ترانزیستورهای HEMT</b> .....                         | ۷    |
| ۱-۲- مقدمه .....  | ۸    |
| ۲-۲- معرفی ترانزیستورهای HEMT .....                                     | ۸    |
| ۳-۲- معرفی کانال و ناحیه 2DEG .....                                     | ۱۱   |
| ۴-۲- تعریف یونیزه کردن گازهای الکترونی .....                            | ۱۲   |
| ۵-۲- اتصال فلزی- نیمه‌هادی در HEMT .....                                | ۱۴   |
| ۶-۲- پارامترهای عملیاتی در HEMT .....                                   | ۱۵   |
| ۷-۲- نتیجه‌گیری .....   | ۱۶   |
| <b>فصل سوم: انواع ترانزیستورهای HEMT</b> .....                          | ۱۷   |
| ۱-۳- مقدمه .....  | ۱۸   |
| ۲-۳- مقایسه انواع ترانزیستورهای HEMT برپایه ساختار مواد سازنده .....    | ۱۸   |
| ۱-۲-۳- بررسی و مقایسه‌ی خواص انواع مواد سازنده ترانزیستورهای HEMT ..... | ۱۸   |
| ۲-۲-۳- اثرات دما .....  | ۲۲   |
| ۳-۲-۳- اعوجاج در انواع HEMT .....                                       | ۲۳   |
| ۴-۲-۳- ترانزیستورهای HEMT بر پایه InAs .....                            | ۲۵   |
| ۳-۳- انواع دیگری از خانواده HEMT .....                                  | ۲۷   |
| ۱-۳-۳- AlGaAs/InGaAs pHEMT .....  | ۲۷   |
| ۲-۳-۳- InGaP/InGaAs PHEMT .....   | ۲۹   |
| ۳-۳-۳- mHEMT .....  | ۳۲   |
| ۴-۳- کاربردهای انواع ترانزیستورهای HEMT .....                           | ۳۳   |
| ۵-۳- نتیجه‌گیری .....   | ۳۵   |
| <b>فصل چهارم: بررسی AIGaN/GaN HEMT</b> .....                            | ۳۶   |
| ۱-۴- مقدمه .....  | ۳۷   |
| ۲-۴- مزایای استفاده از GaN در ترانزیستورهای HEMT .....                  | ۳۸   |
| ۳-۴- معایب GaN .....  | ۴۱   |
| ۴-۴- مدل‌های تحلیل برای ادوات AIGaN/GaN HEMT .....                      | ۴۲   |
| ۵-۴- ساختار کریستالی GaN .....  | ۴۷   |

|    |   |
|----|---|
| ۴۹ | اثر عوامل مختلف بر چگالی گاز دویعدی الکترون AlGaIn/GaN.....       |
| ۵۰ | اثر تغییر چگالی ناخالصی.....                                      |
| ۵۲ | اثر ضخامت لایه‌ی AlGaIn.....                                      |
| ۵۴ | اثر تغییر درصد Al.....  |
| ۵۵ | اثر تغییرات در سطح.....   |
| ۵۶ | بررسی روش زیاد کردن ولتاژ شکست.....                               |
| ۵۹ | نتیجه‌گیری.....   |
| ۶۰ | <b>فصل پنجم: زمینه‌های تحقیقاتی و آخرین دستاوردها.....</b>        |
| ۶۱ | ۱-۵- مقدمه.....   |
| ۶۱ | ۲-۵- زمینه‌های تحقیقاتی برای انواع ترانزیستورهای HEMT.....        |
| ۶۱ | ۱-۲-۵- زمینه‌های تحقیقاتی برای ترانزیستورهای بر پایه‌ی GaN.....   |
| ۶۳ | ۲-۲-۵- زمینه‌های تحقیقاتی برای ترانزیستورهای بر پایه‌ی GaAs.....  |
| ۶۳ | ۳-۲-۵- زمینه‌های تحقیقاتی برای ترانزیستورهای بر پایه‌ی InP.....   |
| ۶۴ | ۴-۲-۵- زمینه‌های تحقیقاتی برای ترانزیستورهای بر پایه‌ی pHEMT..... |
| ۶۴ | ۵-۲-۵- زمینه‌های تحقیقاتی برای ترانزیستورهای بر پایه‌ی mHEMT..... |
| ۶۵ | ۳-۵- آخرین دستاوردها.....   |
| ۶۶ | ۴-۵- نتیجه‌گیری.....  |
| ۶۷ | <b>فصل ششم: نتیجه‌گیری.....</b>                                   |
| ۶۹ | <b>مراجع.....</b>   |

## فهرست جدول ها

### صفحه

### عنوان

جدول ۱-۳ مقایسه انواع مواد سازندهی ترانزیستورهای HEMT از لحاظ خواص الکتریکی ..... ۱۹

جدول ۲-۳ مقایسهی مقدار پارامترهای مهم در تکنولوژیهای مختلف و دماهای متفاوت ..... ۲۵

جدول ۳-۳ نام و ضخامت لایههای مختلف تشکیل دهندهی یک ترانزیستور InAs/AISb HEMT ..... ۲۶

جدول ۴-۱ پارامترهای مختلف مؤثر در کارایی توان و فرکانسی مواد گوناگون متداول در صنعت

نیمه هادی ..... ۴۰

جدول ۴-۲ معیار شکستگی جانسون مربوط به مواد مهم و پر کاربرد در صنعت نیمه هادی ..... ۴۱

| عنوان   | صفحه |
|---|------|
| شکل ۱-۱ شکاف باند مهم ترین نیمه هادی ها در برابر پارامتر های شبکه                 | ۵    |
| شکل ۱-۲ نمودار انرژی باند برای نیمه هادی های با نوار شکاف (I) عریض و باریک (II)   | ۶    |
| شکل ۲-۱ یک نمونه ترانزیستور HEMT [۸]  | ۹    |
| شکل ۲-۲ نمودار جریان درین برحسب ولتاژ درین- سورس [۸]                              | ۱۰   |
| شکل ۲-۳ افزایش چگالی الکترون در نسبت های مولی مختلف آلومینیوم [۸]                 | ۱۲   |
| شکل ۲-۷ تغییر پهنای کانال با تغییر بایاس گیت                                      | ۱۵   |
| شکل ۲-۸ دیاگرام انرژی در یک HEMT مبتنی بر GaN/AlGaN نشان داده شده است [۸]         | ۱۶   |
| شکل ۳-۱ مدل ترانزیستورهای HEMT در حالت های (a) خاموش و (b) روشن                   | ۱۹   |
| شکل ۳-۲ اتصال HEMT به صورت سری  | ۲۰   |
| شکل ۳-۳ اتصال HEMT به صورت موازی  | ۲۰   |
| شکل ۳-۴ تلفات برحسب ولتاژ گیت اتصال سری   | ۲۱   |
| شکل ۳-۵ تلفات برحسب ولتاژ اتصال موازی   | ۲۱   |
| شکل ۳-۶ پارامتر IL برحسب مقدار توان ورودی   | ۲۱   |
| شکل ۳-۷ پارامتر IL برحسب مقدار توان ورودی   | ۲۱   |
| شکل ۳-۸ نمودار تغییرات فرکانس قطع HEMT های بر پایه GaN و GaAs در دماهای مختلف     | ۲۲   |
| شکل ۳-۹ نمودار پارامترهای IL و ISO با توجه به تغییرات توان در GaN                 | ۲۳   |
| پارامترهای IL و ISO با توجه به تغییرات توان در GaAs                               | ۲۳   |
| شکل ۳-۱۱ نمودار IP3 برحسب فرکانس برای تکنولوژی های GaN, GaAs, InP                 | ۲۴   |
| شکل ۳-۱۲ نمونه ای یک ترانزیستور pHEMT و نحوه قرار گرفته لایه های مختلف روی یکدیگر | ۲۷   |
| شکل ۳-۱۳ دیاگرام انرژی ترانزیستور pHEMT در دو حالت تکی و دوتایی                   | ۲۸   |
| شکل ۳-۱۴ یک double heterjunction pHEMT  | ۲۹   |
| شکل ۳-۱۵ نحوه قرار گرفتن لایه های مختلف در InGaP/InGaAs pHEMT                     | ۳۰   |
| شکل ۳-۱۶ دیاگرام انرژی InGaP/InGaAs pHEMT   | ۳۰   |
| شکل ۳-۱۷ ضخامت لایه های تشکیل دهنده InGaP-InGaAs pHEMT                            | ۳۱   |
| شکل ۳-۱۸ نمودار ولتاژ درین- سورس برحسب جریان درین در InGaP-InGaAs pHEMT           | ۳۱   |
| شکل ۳-۱۹ نمونه ای یک ترانزیستور mHEMT   | ۳۲   |
| شکل ۳-۲۰ نمونه سیگنال کوچک ترانزیستور همت   | ۳۳   |
| شکل ۳-۲۱ شکل سیگنال کوچک ترانزیستور مبتنی بر HEMT                                 | ۳۳   |
| شکل ۴-۱ مزایای GaN  | ۴۱   |
| شکل ۴-۲ نمایی از ساختار ترانزیستور مورد مطالعه                                    | ۴۳   |
| شکل ۴-۳ ساختار کریستالی شش ضلعی GaN   | ۴۸   |



شکل ۴-۴ قطبیدگی در پیوند نامتجانس AlGaIn/GaN ..... ۴۹

شکل ۴-۵ بارهای ایجادشده در اثر دوقطبی نقطه ای و پیزوالکتریک و همچنین بارناخالصی یونیزه شده. .... ۵۰

شکل ۴-۶ (الف) میدان الکتریکی (ب) چگالی ناخالصی، چگالی الکترون و چگالی حفره در چگالی ناخالصی  $5 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$  ..... ۵۱

شکل ۴-۷ (الف) میدان الکتریکی (ب) چگالی ناخالصی، چگالی الکترون و چگالی حفره در چگالی ناخالصی  $4 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$  ..... ۵۲

شکل ۴-۸ چگالی سطحی الکترون نزدیک مرز AlGaIn و GaN (کانال)، چگالی سطحی الکترون داخل AlGaIn (موازی)، جمع این دو چگالی (کل) برحسب چگالی ناخالصی در AlGaIn ..... ۵۲

شکل ۴-۹ (الف) میدان الکتریکی (ب) چگالی ناخالصی و چگالی حفره (ج) سطح هدایت و سطح فرمی الکترون برای AlGaIn با ضخامت ۸nm، ..... ۵۳

شکل ۴-۱۰ چگالی سطحی الکترون برحسب ضخامت AlGaIn برای چگالی ناخالصی های مختلف ..... ۵۴

شکل ۴-۱۱ چگالی سطحی الکترون برحسب درصد Al برای چگالی ناخالصی های مختلف ..... ۵۴

شکل ۴-۱۲ (الف) میدان الکتریکی، (ب) چگالی ناخالصی، چگالی الکترون و چگالی حفره، (ج) سطح هدایت و سطح فرمی الکترون برای سطح بالا با بارهای دوقطبی صفر درصد خنثی شده. .... ۵۶

شکل ۴-۱۳ (الف) میدان الکتریکی، (ب) چگالی ناخالصی و چگالی الکترون (ج) سطح هدایت و سطح فرمی الکترون برای سطح بالا با بارهای دوقطبی ۱۰۰ درصد خنثی شده. .... ۵۷

شکل ۴-۱۴ چگالی سطحی الکترون نزدیک مرز AlGaIn و GaN (کانال)، چگالی سطحی الکترون داخل AlGaIn (موازی) و جمع این دو چگالی (کل) برحسب خنثی شدن سطح بالا. .... ۵۸

شکل ۴-۱۵ میدان الکتریکی در (الف) زیر گیت (ب) چگالی داخل گاز دوبعدی برای حالت های گیت معمولی با ولتاژ اعمالی ۳۰ ولت و گیت گاما شکل با ولتاژ اعمالی ۶۰ ولت ..... ۵۹



## مقدمه

از نظر قابلیت های هدایت الکتریکی اجسام را می توان به سه دسته هادی، نیمه هادی و عایق ها تقسیم نمود. هادی ها عناصری هستند که جریان الکتریکی به راحتی از خود عبور می دهند. نیمه هادی ها هدایت الکتریکی کمتری نسبت به هادی ها دارند، که قابل کنترل است و در نهایت عایق ها اجسامی هستند که در میدان های الکتریکی معمولی، جریان الکتریکی را از خود عبور نمی دهند. ساختار نوار های انرژی جامدات شامل نوار هدایت<sup>۱</sup>، نوار ظرفیت<sup>۲</sup> و شکاف انرژی<sup>۳</sup> بین آن ها می باشد. نوار هدایت، حاوی الکترون های آزاد است که وابستگی کمی به هسته ی اتم دارند، شکاف انرژی محدوده ای است که هیچ الکترونی را در بر نمی گیرد و نوار ظرفیت شامل الکترون هایی است که در پیوند ها شرکت دارند. قطعات نیمه هادی ترکیبات الکترونیکی هستند خواص الکترونیکی مواد نیمه هادی را نشان می دهند، همانند نیمه هادی سیلیکون<sup>۴</sup>، ژرمانیوم<sup>۵</sup>، گالیوم نیتريد<sup>۶</sup> و گالیوم آرسنیک<sup>۷</sup> که جایگزین قطعات ترمیونیکی در بیشتر کاربردها می باشند. هدایت نیمه هادی توسط میدان الکتریکی و میدان مغناطیسی کنترل می شود [۲]. هدایت جریان در نیمه هادی توسط الکترون های آزاد و حفره ها اتفاق می افتد که حامل های بار نامیده می شوند. مواد نیمه هادی توسط ناخالصی ها اداره می شوند که با افزایش ناخالصی تعداد الکترون های آزاد و حفره ها افزایش می یابد [۲ و ۳]. نیمه هادی ترکیبی در ترانزیستورها، سلول های خورشیدی، دیودهای نوری و مدارات مجتمع<sup>۸</sup> آنالوگ و دیجیتال استفاده می شوند زیرا سرعت قطعه را افزایش می دهند. تفاوت مواد نیمه هادی در پهنای شکاف انرژی، قابلیت تحرک الکترون<sup>۹</sup>، رنج دمایی کارکرد و ... می باشد [۴ و ۵].

با پیشرفت روزافزون علم الکترونیک و کاربرد گسترده آن در زمینه های گوناگون، نیاز به قطعات الکترونیک با کارکردهای متنوع بیش از پیش احساس می شود.

یکی از بخش های بسیار مهم در زمینه ادوات الکترونیکی ساخت ترانزیستورهای اثر میدان (MOSFET)<sup>۱۰</sup> می باشد. گسترش روزافزون استفاده از ترانزیستورهای اثر میدان و کاربردهای بسیار گسترده ی آن ها در ساخت مدارات مجتمع به دلیل مزیت های فراوان آن ها سبب شده است که طراحی و بهبود پارامترهای

1 - Conduction Band

2 - Valence Band

3 - Band Gap

4 - Silicon

5 - Germanium

6 - Gallium Nitride

7 - Gallium Arsenide

8 - Integrated Circuits (IC)

9 - electron mobility

10 - Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor

MOSFET برای کاربردهای مختلف همواره از چالش‌های مهم پیش روی الکترونیک باشد. ترانزیستورهای MOSFET به دلیل شکل ساخت و مواد به کار رفته در ساخت آن و موارد دیگر برای کار در فرکانس‌های خیلی زیاد مناسب نیست.

یکی از انواع ترانزیستورهای اثر میدانی ترانزیستورهای با تحرک الکترونی بالا<sup>۱</sup> می‌باشد که ترانزیستورهای اثر میدانی با ساختار نامتجانس<sup>۲</sup> و یا ترانزیستورهای اثر میدانی مدولاسیون-آلاییده<sup>۳</sup> نیز نامیده می‌شود. این ترانزیستورها نه تنها برای کاربردهای فرکانس بالا بسیار مناسب هستند بلکه برای کاربردهای با نویز کم و مصرف توان پایین هم بهترین گزینه می‌باشند. ترانزیستورهای HEMT قادرند تا در فرکانس‌های بالاتر از ترانزیستورهای معمولی و تا فرکانس‌های موج میلی‌متری کار کنند. هدف از ساخت HEMT ها، استفاده از آن‌ها در کاربردهای فرکانس بالا از قبیل تلفن‌های همراه، تجهیزات رادار، مدار مجتمع ماکروویو یکپارچه<sup>۴</sup>، گیرنده‌های تلویزیون‌های ماهواره‌ای، رادیو نجوم<sup>۵</sup>، گیرنده‌های ماهواره‌ای پخش مستقیم<sup>۶</sup> سیستم‌های جنگ الکترونیک از قبیل رادار و رادیو نجوم و اصولاً هر برنامه‌ای که در آن بهره‌ی<sup>۷</sup> بالا و نویز کم در فرکانس‌های بالا مورد نیاز است استفاده می‌گردد.

ترانزیستورهای HEMT که جزء ساختارهای نامتجانس اند، در رادارهای نظامی و مخابرات ماهواره‌ای به علت دارا بودن سرعت بالا و فرکانس بالا فوق‌العاده مفید می‌باشند. به همین منظور ساختارهای نامتجانس متعددی مانند آلومینیوم گالیوم آرسنید/گالیوم آرسنید<sup>۸</sup> آلومینیوم گالیوم نیتريد/گالیوم نیتريد<sup>۹</sup> آلومینیوم گالیوم آرسنید/ایندیوم گالیوم آرسنید<sup>۱۰</sup> مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته‌اند.

در این ساختارها به علت تفاوت زیاد شکاف انرژی دو ماده یک ناپیوستگی بزرگ در نوار هدایت ایجاد می‌شود که این ناپیوستگی مثل یک چاه کوانتومی<sup>۱۱</sup> رفتار می‌کند که امکان تشکیل گاز الکترونی دوبعدی<sup>۱۲</sup> در این چاه وجود دارد.

1 - High Electron Mobility (HEMT)

2 - Heterostructure FET (HEFT)

3 - Modulation- Doped FET (MODFET)

4 - Monolithic Microwave Integrated Circuit (MMIC)

5 - Radio Astronomy

6 - Direct- Broadcast Satellite (DBS)

7 - Gain

8 - Aluminum Gallium Arsenide/Gallium Nitride

9 - Aluminum Gallium Nitride/Gallium Nitride

10 - Aluminum Gallium Arsenide/Indium Gallium Arsenide

11 - Quantum Well

12 - 2 Dimensional Electron Gas (2DEG)

از میان این ساختارها، ساختارهای نامتجانس نیتريدی به علت داشتن ناپيوستگي، باند هدايت بزرگ و نيز دارا بودن قطبش خودبه خودی<sup>۱</sup> و قطبش پيزوالکتریکي<sup>۲</sup> مورد توجه بسياری قرار گرفته اند. در ساخت ترانزیستورهای HEMT عمدتاً از GaAs و AlGaAs استفاده می شود که قابليت تحرک<sup>۳</sup> الکترون بیشتری نسبت به سيلیکون دارند. البته بر اساس کاربردهایی که این ترانزیستورها دارند در ساخت آنها از مواد دیگری نيز استفاده می شود مانند اينديم فسفايد<sup>۴</sup> که در فرکانس های بالا کارایی بهتری دارند و GaN که به دليل کارایی بالا در سیستم های توان بالا<sup>۵</sup> در سال های اخير بیشتر مورد توجه قرار گرفته اند.

HEMT ها امروزه در فرکانس های بالاتر از ۶۰۰ گیگاهرتز مورد استفاده قرار گرفته اند که نشان داده شده است در آینده در فرکانس های بالاتر از یک تراهرتز از آنها می توان استفاده کرد. این موضوع اهميت کار و تحقيق بر روی آنها را دوچندان می کند. در واقع ما با موضوعی روبرو هستيم که علاوه بر کاربردهای وسيع در صنايع تجاری و نظامی و ... تقريباً نوظهور بوده و در حال پيشرفت است و حجم گسترده ای از تحقيقات را به خود اختصاص داده است. بنابراین ورود به این حوزه و شناخت و آشنایی هر چه بیشتر با آن بسيار مهم بوده و زمينه ای کارهای تحقيقاتی پيچيده در این حوزه فراهم می کند.

HEMT ها انواع گوناگونی دارند. شبه ترانزیستور تحرک بالا<sup>۶</sup> یکی از مهم ترین انواع HEMT ها می باشد. ترانزیستور تحرک بالای دگرديس<sup>۷</sup> نوع دیگری از HEMT ها هستند که در آنها برای دادن لایه های مواد مختلف با ثابت شبکه ای<sup>۸</sup> متفاوت از بافر استفاده می کنند. ترانزیستورهای HEMT بر اساس GaN هم از ادواتی هستند که برای توان و فرکانس های بالا در کاربردهای کم نویز و توان بالا نيز مورد استفاده قرار می گیرد. از جمله جذابیت های آنها چگالی جریان درین بالا و ولتاژ شکست<sup>۹</sup> بالا و همچنين سرعت اشباع بالا می باشد که به همین دليل از آنها در مخابرات فضایی و مخابرات سیستم های راداری استفاده می شود. ادوات بر اساس GaN همچنين برای گیرنده های با نویز کم و بدون مرحله ی محدودکننده استفاده می شوند که این به خاطر شکاف انرژی بزرگ GaN و قابليت نویز کم در مدارات فرکانس رادیویی<sup>۱۰</sup> بر اساس GaN است.

1 - Spontaneous Polarization

2 - Pizo electric Polarization

3 - Mobility

4 - Indium Phosphide

5 - High Power

6 - pseudomorphic HEMT (pHEMT)

7 - Metamorphic HEMT (mHEMT)

8 - Lattice Constant

9 - Breakdown Voltage

10 - Radio Frequency (RF)

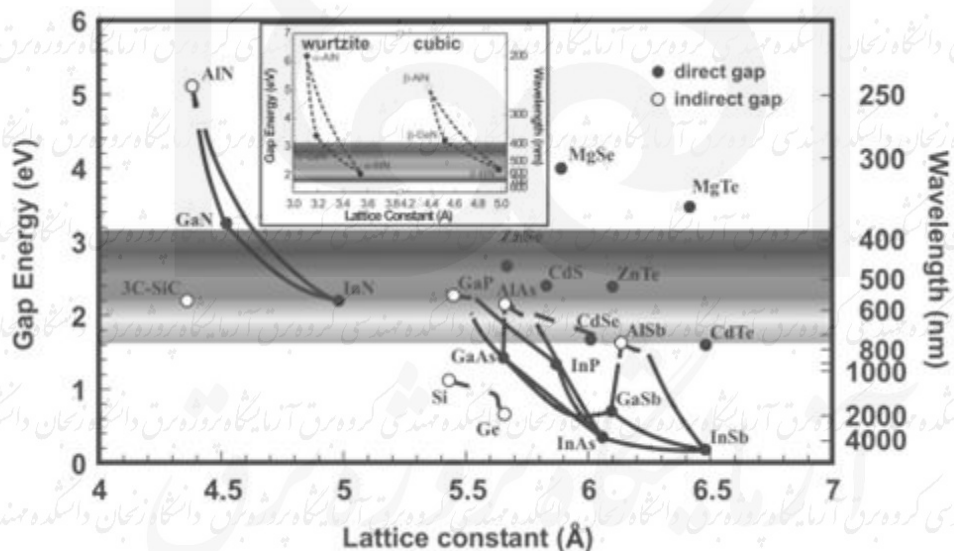
توسعه HEMT سال‌های زیادی به طول انجامید. زمان زیادی از شکل‌گیری ترانزیستورهای اثر میدان<sup>۱</sup> دانشگاه زنجان

به‌عنوان یک قطعه استاندارد نگذشته بود که HEMT وارد بازار شد. قابلیت تحرک حامل‌ها در HEMT ابتدا در سال ۱۹۶۹ کشف شد. اما تا سال ۱۹۸۰ که اولین وسایل آزمایشگاهی جهت آزمایش آخرین طراحی‌های RF در دسترس قرار گرفت، مورد استفاده قرار نگرفتند. طی همان سال هم استفاده از این ترانزیستور شروع شد، اما با توجه به قیمت بسیار بالای آن در ابتدا، مشخصاً استفاده از آن هم محدود بود [۶]. حال با کاهش اندکی از قیمت این ترانزیستور شاهد استفاده گسترده از آن در ارتباطات راه دور متحرک<sup>۲</sup> و شاخه‌های مختلف مخابرات و بسیاری دیگر از طراحی‌های RF هستیم.

جهان امروز به دلیل مزایایی بسیار زیاد HEMT، در تسخیر این ترانزیستور قرار گرفته است. موادی مانند ایندیوم فسفراید یا (InP) امتیازاتی مانند کارکرد در فرکانس و قدرت بالا را برای این ترانزیستور فراهم کرده‌اند.

فناوری‌هایی مثل بی‌سیم<sup>۳</sup> و مخابرات فرکانس را از ۹۰۰ مگاهرتز به فراتر از ۵۰ گیگاهرتز افزایش دادند و برای ساخت وسایلی با عملکرد عالی و قیمت مناسب در این فرکانس‌ها به مواد جدیدی احتیاج داریم. نیمه‌هادی‌هایی با شکاف انرژی بزرگ پتانسیل پاسخ‌گویی به این نیاز ما را دارند. نیتريد های عناصر گروه

۳ دارای شکاف انرژی مستقیم وسیعی می‌باشد این مقدار از ۰/۹eV برای ایندیوم نیتريد (InN) تا ۳/۴eV برای گالیوم نیتريد (GaN) و تا ۶/۲eV برای آلومینیوم نیتريد (AlN) متغیر است [۶].



شکل ۱-۱ شکاف انرژی مهم ترین نیمه هادی ها در برابر پارامتر های شبکه

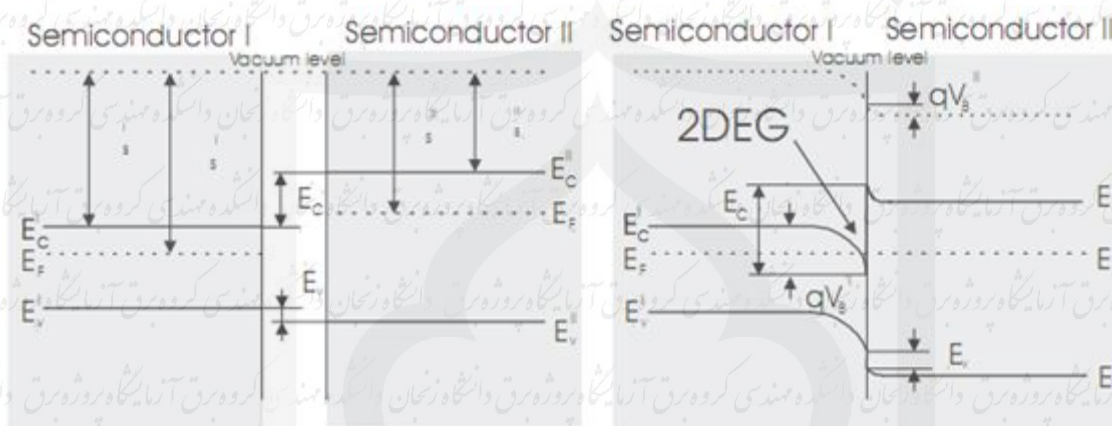
<sup>1</sup> - Field Effect Transistors (FET)

<sup>2</sup> - Mobile Telecommunications

<sup>3</sup> - Wireless

به دلیل این شکاف انرژی وسیع و پیوند پر قدرت آن‌ها، این مواد برای کارکردهای مذکور بسیار مناسب هستند؛ همچنین این مواد قادر به تولید نور ماوراءبنفش و نور مادون سرخ هستند؛ این مواد عموماً در وسایلی مثل ال ای دی GaN<sup>۱</sup> و GaN HEMT و لیزر GaN<sup>۲</sup> و ترانزیستور دوقطبی ناهمگون گالیوم نیترا<sup>۳</sup> و ترانزیستور دوقطبی گیت عایق<sup>۴</sup> استفاده می‌شوند.

ساختار نامشابه در HEMT اساس کارکرد آن می‌باشد؛ یک ساختار نامتجانس یا پیوند نامشابه بین دو نیمه‌هادی با شکاف انرژی متفاوت ( $E_g$ )، نفوذپذیری الکتریکی متفاوت ( $\epsilon_s$ )، تابع کار متفاوت ( $q\phi_s$ ) و وابستگی الکترونی متفاوت ( $\chi_s$ ) شکل می‌گیرد. در شکل زیر ساختار نوار انرژی دو نوع نیمه‌هادی بر اساس شکل اتصال آمده است:



شکل ۱-۲ نمودار نوار انرژی برای نیمه‌هادی‌های با شکاف انرژی عریض (I) و باریک (II)

بعد از متصل کردن نیمه‌هادی با شکاف انرژی بزرگ با نیمه‌هادی دارای شکاف انرژی کوچک یک ناپیوستگی در نوار هدایت و نوار ظرفیت پدیدار می‌شود. ناپیوستگی در نوار هدایت یک چاه کوانتومی

سه‌ضلعی ایجاد می‌کند و نزدیک مرز اتصال در قسمت زیرین گازهای الکترونی دوبعدی شکل می‌گیرد. وقتی نیمه‌هادی با شکاف انرژی بزرگ به شدت ناخالص می‌شود، الکترون‌ها از اتم خود (اتم‌های دهنده<sup>۵</sup>) جدا می‌شوند. جدایی الکترون‌ها از اتم‌هایشان به شدت باعث کاهش پراکندگی<sup>۶</sup> کولنی شده و بدین

ترتیب منجر به قابلیت حرکت بالا و سرعت اشباع بالا در کانال می‌شود.

1 - GaN LED  
 2 - GaN Laser  
 3 - GaN Heterojunction Bipolar Transistor (GaN HBT)  
 4 - Insulated-gate Bipolar Transistor (IGBT)  
 5 - donor atoms  
 6 - Scattering

دانشجویان محترم:

جهت دسترسی به متن کامل پایان نامه‌ها به کتابخانه دانشکده مهندسی و یا آزمایشگاه پروژه گروه برق مراجعه فرمایید.



# پایان نامه کارشناسی

## فصل ششم

### نتیجه گیری

در این پژوهش، عملکرد سیستم‌های انرژی‌های تجدیدپذیر در مناطق مختلف با توجه به تغییرات اقلیمی و نیازهای انرژی، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصله نشان می‌دهد که استفاده از سیستم‌های انرژی‌های تجدیدپذیر می‌تواند به کاهش مصرف انرژی و کاهش آلودگی محیط‌زیست منجر شود. همچنین، با توجه به تغییرات اقلیمی، استفاده از سیستم‌های انرژی‌های تجدیدپذیر می‌تواند به افزایش امنیت انرژی و کاهش وابستگی به منابع انرژی فسیلی منجر شود. در ادامه، با توجه به تغییرات اقلیمی، استفاده از سیستم‌های انرژی‌های تجدیدپذیر می‌تواند به کاهش مصرف انرژی و کاهش آلودگی محیط‌زیست منجر شود. همچنین، با توجه به تغییرات اقلیمی، استفاده از سیستم‌های انرژی‌های تجدیدپذیر می‌تواند به افزایش امنیت انرژی و کاهش وابستگی به منابع انرژی فسیلی منجر شود.

دانشگاه زنجان دانشکده مهندسی گروه برق آزمایشگاه پژوهش برق دانشگاه زنجان دانشکده مهندسی گروه برق آزمایشگاه پژوهش برق دانشگاه زنجان دانشکده مهندسی گروه برق آزمایشگاه پژوهش برق دانشگاه زنجان دانشکده مهندسی گروه برق آزمایشگاه پژوهش برق دانشگاه زنجان

در این پایان نامه سعی بر این بود که با استفاده از تحقیقات انجام شده، پایان نامه ها و مقالات و کتب به بررسی یکی از موضوعات مهم حوزه الکترونیک یعنی ترانزیستورهای HEMT پرداخته شود. شناخت هر چه بهتر این تکنولوژی و فرصت‌های تحقیقاتی پیش رو در این زمینه به ما در فهم هر چه بهتر کمک کرده و راه‌های پیشرفت در این زمینه را پیش روی ما می‌گذارد، در راستای این اهداف شناخت کامل و چگونگی ساختار و فرآیند عملکرد و تحقیقات انجام شده، الزامی است. همان‌طور که در این پایان نامه سعی شد تا به طور مختصر با مقدمه ای به معرفی ترانزیستورهای HEMT پرداخته و سپس ساختار ترانزیستور مورد نظر مطالعه شود و پس از بررسی انواع مختلف HEMT و کاربرد های آن ها، نوع خاص  $\text{AlGaIn/GaN}$  مورد مطالعه قرار گیرد و در نهایت به آخرین دستاورد ها و زمینه های مطالعاتی پیش رو پرداخته شود، تا نقشه حرکت در مسیر صحیح برای پیشرفت در این زمینه مشخص گردد.



دانشگاه زنجان دانشکده مهندسی گروه برق آزمایشگاه پژوهش برق دانشگاه زنجان دانشکده مهندسی گروه برق آزمایشگاه پژوهش برق دانشگاه زنجان دانشکده مهندسی گروه برق آزمایشگاه پژوهش برق دانشگاه زنجان دانشکده مهندسی گروه برق آزمایشگاه پژوهش برق دانشگاه زنجان

دانشگاه زنجان دانشکده مهندسی گروه برق آزمایشگاه پژوهش برق دانشگاه زنجان دانشکده مهندسی گروه برق آزمایشگاه پژوهش برق دانشگاه زنجان دانشکده مهندسی گروه برق آزمایشگاه پژوهش برق دانشگاه زنجان دانشکده مهندسی گروه برق آزمایشگاه پژوهش برق دانشگاه زنجان

دانشگاه زنجان دانشکده مهندسی گروه برق آزمایشگاه پژوهش برق دانشگاه زنجان دانشکده مهندسی گروه برق آزمایشگاه پژوهش برق دانشگاه زنجان دانشکده مهندسی گروه برق آزمایشگاه پژوهش برق دانشگاه زنجان دانشکده مهندسی گروه برق آزمایشگاه پژوهش برق دانشگاه زنجان

دانشگاه زنجان دانشکده مهندسی گروه برق آزمایشگاه پژوهش برق دانشگاه زنجان دانشکده مهندسی گروه برق آزمایشگاه پژوهش برق دانشگاه زنجان دانشکده مهندسی گروه برق آزمایشگاه پژوهش برق دانشگاه زنجان دانشکده مهندسی گروه برق آزمایشگاه پژوهش برق دانشگاه زنجان

دانشگاه زنجان دانشکده مهندسی گروه برق آزمایشگاه پژوهش برق دانشگاه زنجان دانشکده مهندسی گروه برق آزمایشگاه پژوهش برق دانشگاه زنجان دانشکده مهندسی گروه برق آزمایشگاه پژوهش برق دانشگاه زنجان دانشکده مهندسی گروه برق آزمایشگاه پژوهش برق دانشگاه زنجان





[10] فائز، رحیم، محی الدین سرایلو، و مهدی یار سرایلو، بررسی تغییرات ارتفاع سد شاتکی بر روی

مشخصات ترانزیستور InAs/AlSb HEMT، دوازدهمین اجلاس دانشجویی مهندسی برق، تبریز، دانشگاه

آزاد اسلامی واحد تبریز، ۱۳۸۸

[11] Wikipedia, High-electron-mobility transistor, [http://en.wikipedia.org/wiki/High-electron-mobility\\_transistor](http://en.wikipedia.org/wiki/High-electron-mobility_transistor), 3 June 2013

[12] Skywords, Compound Semiconductors: Process Flow, Process Integration, Devices and Testing, Ravi Ramanathan, 2010.

[13] Download Book, MICROWAVE SEMICONDUCTOR TECHNOLOGIES 13. THE InGaP PSEUDOMORPHIC PDF, <http://download.ebooks6.com/MICROWAVE-SEMICONDUCTOR-TECHNOLOGIES-13.-THE-InGaP-PSEUDOMORPHIC-pdf-e8980.pdf>, 2010.

[14] Eimers, Karl P. "2-D modeling of GaN HEMTs incorporating the piezoelectric effect." PhD diss., Monterey, California. Naval Postgraduate School, 2001.

[15] Furuta, K., N. Nakamura, X. Q. Shen, M. Shimizu, T. Kitamura, K. Nakamura, and H. Okumura. "Growth of GaN-HEMT structures using super lattice quasi-AlGaIn alloy barriers on vicinal SiC substrates by rf-MBE." *Journal of Crystal Growth* 301 (2007): 437-441.

[16] Bernardini, Fabio, Vincenzo Fiorentini, and David Vanderbilt. "Spontaneous polarization and piezoelectric constants of III-V nitrides." *Physical Review B* 56, no. 16 (1997): R10024.

[17] Wagner, J-M., and F. Bechstedt. "Properties of strained wurtzite GaN and AlN: Ab initio studies." *Physical Review B* 66, no. 11 (2002): 115202.

- دانشگاه زنجان دانشکده مهندسی گروه برق آزمایشگاه پژوهش برق دانشگاه زنجان دانشکده مهندسی گروه برق آزمایشگاه پژوهش برق دانشگاه زنجان دانشکده مهندسی گروه برق آزمایشگاه پژوهش برق دانشگاه زنجان
- [18] Chandra Prakash and R.K.Chanhar: Analyses of 2-DEG Characteristics in GaN .HEMT with Graded AlGaIn and Si Isolation from Substrate, VSRD-IJEECE, Vol.2(9), 1-5,2012.
- [19] Mishra, Umesh K., Primit Parikh, and Yi-Feng Wu. "AlGaIn/GaN HEMTs-an overview of device operation and applications." *PROCEEDINGS-IEEE* 90, no. 6 (2002): 1022-1031.
- [20] فائز، رحیم، شبیه سازی گاز دوبعدی در AlGaIn/GaN HEMT و بررسی ولتاژ شکست آن، فصلنامه علمی و پژوهشی شریف، شماره ی سی و هشتم، ص ۳-۹، تابستان ۱۳۸۶.
- [21] Shinohara, K., A. Corrion, D. Regan, I. Milosavljevic, D. Brown, S. Burnham, P. J. Willadsen et al. "220GHz f<sub>T</sub> and 400GHz f<sub>max</sub> in 40-nm GaN DH-HEMTs with re-grown ohmic." In *Electron Devices Meeting (IEDM), 2010 IEEE International*, pp. 30-1. IEEE, 2010.
- [22] Kim, Minki, Young-Hwan Choi, Jiyong Lim, Young-Shil Kim, Ogyun Seok, and Min-Koo Han. "High breakdown voltage AlGaIn/GaN HEMTs employing recessed gate edge structure." In *Proc. CS MANTECH conference*, pp. 237-240. 2010.
- [23] Xing, Huili, Y. Dora, A. Chini, S. Heikman, S. Keller, and U. K. Mishra. "High breakdown voltage AlGaIn-GaN HEMTs achieved by multiple field plates." *IEEE Electron Device Letters* 25, no. 4 (2004): 161-163.
- [24] Palacios, T., A. Chakraborty, S. Rajan, C. Poblenz, S. Keller, S. P. DenBaars, J. S. Speck, and U. K. Mishra. "High-power AlGaIn/GaN HEMTs for Ka-band applications." *IEEE Electron Device Letters* 26, no. 11 (2005): 781-783.
- [25] Yamanaka, K., K. Mori, K. Iyomasa, H. Ohtsuka, H. Noto, M. Nakayama, Y. Kamo, and Y. Isota. "C-band GaN HEMT power amplifier with 220W output power." In *2007 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium*, pp. 1251-1254. IEEE, 2007.
- [26] Lai, R., X. B. Mei, W. R. Deal, W. Yoshida, Y. M. Kim, P. H. Liu, J. Lee et al. "Sub 50 nm InP HEMT device with f<sub>max</sub> greater than 1 THz." In *2007 IEEE International Electron Devices Meeting*, pp. 609-611. IEEE, 2007.

[27] Kim, D-H., P. Chen, T-W. Kim, M. Urteaga, and B. Brar. "L g= 100 nm InAs PHEMTs on InP substrate with record high frequency response." *Electronics letters* 48, no. 21 (2012): 1352-1353.

[28] Kim, Dae-Hyun, and Jesús A. Del Alamo. "30-nm InAs PHEMTs With and." *IEEE Electron Device Letters* 31, no. 8 (2010): 806-808.

[29] Gardes, C. Inst. d'Electron. de Microelectron. et de Nanotechnol. (IEMN), Univ. Lille I, Villeneuve d'Ascq, France Bagumako, S.M. ; Desplanque, L. ; Wichmann, N. ; Bollaert, S. ; Danneville, F. ; Wallart, X. ; Roelens, Y. , 120nm AlSb/InAs HEMT without gate recess: 290GHz fT and 335GHz fmax , IEEE ELECTRON DEVICE LETTERS , 19-23 May 2013 , 1-2.

[30] Kim, Dae-Hyun, Berinder Brar, and Jesús A. Del Alamo. "fT= 688 GHz and fmax= 800 GHz in Lg= 40 nm In0.7Ga0.3As MHEMTs with gm\_max > 2.7 mS/μm." In *Proc. IEDM*, pp. 13-6. 2011.