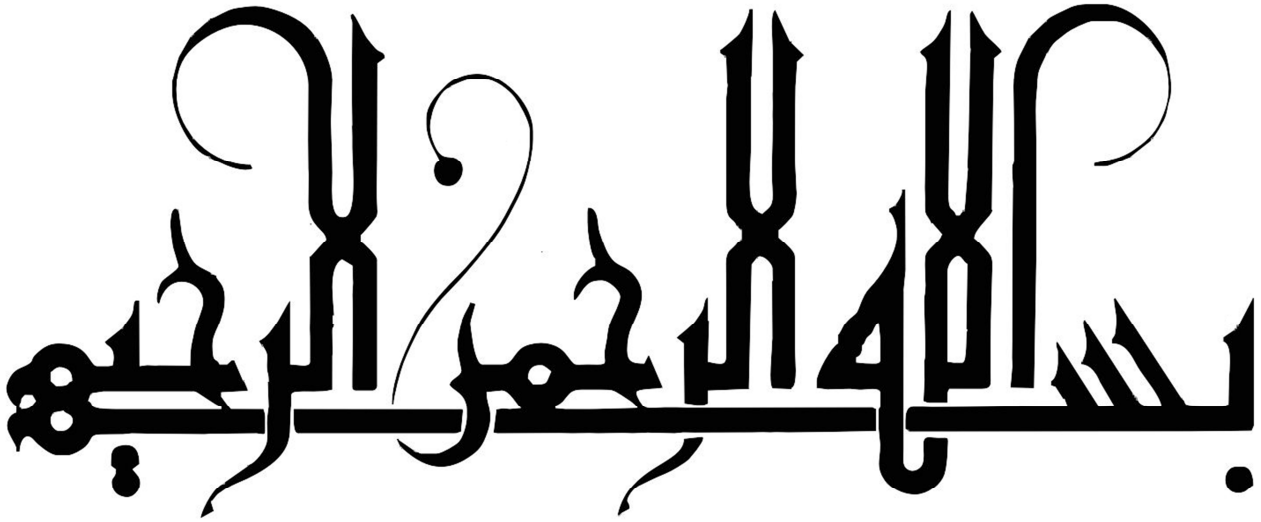

بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه سمنان

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

پایان نامه کارشناسی ارشد برق الکترونیک

# بهبود مشخصات ترانزیستورهای اثر میدان فلز نیمه هادی گالیم آرسنایید

دانشجو:

امیرحسین امین بیدختی

استاد راهنما:

دکتر علی اصغر اروجی

شهریور ۱۳۹۰

**تقدیم به آنان که آفتاب مهرشان درآستانه قلبم همیشه پابرجاست:**

**پدر فداکارم، تکیه گاه زمینی ام**

**مادر مهربانم، مشعل فروزان زندگیم**

**و**

**مادربزرگ عزیزم**

**بودنتان تاج افتخاریست بر سرم و نامتان دلیلیست بر بودنم**

**و پس از پروردگار مایه هستی ام می باشید،**

**وجودم برایتان همه رنج بود و وجودتان برایم همه مهر،**

**توانتان رفت تا به توانایی برسم و مویتان سفید گشت تا رویم سپید بماند.**

**فرم تایید انجام اصلاحات مربوط به پایان نامه**
**کارشناسی ارشد**

**مدیر تحصیلات تکمیلی دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر**

احتراما

بدینوسیله تایید می گردد که اصلاحات مورد نظر (مندرج در صورتجلسه دفاعیه پایان نامه) در رساله کارشناسی ارشد

خانم / آقای دانشجوی رشته

تحت عنوان :

---

---

که در تاریخ دفاع نموده ، در متن لحاظ گردیده است .

| | | |
|---|---|---|
| ۱. آقای | استاد راهنما | محل امضاء |
| ۲. آقای | استاد مشاور | محل امضاء |
| ۳. آقای | استاد داور | محل امضاء |
| ۴. آقای | استاد داور | محل امضاء |
| ۵. آقای | استاد داور | محل امضاء |

بسمه تعالی

اینجانب ---------- متعهد می شوم که محتوای علمی این نوشتار با عنوان

---

که به عنوان پایان نامه کارشناسی / کارشناسی ارشد رشته ----------

گرایش ---------- به گروه مهندسی ----------

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه سمنان ارائه شده ، دارای اصالت پژوهشی بوده و حاصل فعالیت های علمی اینجانب می باشد .

در صورتی که خلاف ادعای فوق در هر زمانی محرز شود ، کلیه حقوق معنوی متعلق به این پایان نامه از اینجانب سلب شده و موارد قانونی مترتب به آن نیز از طرف مراجع ذیربط قابل پیگیری است .

نام و نام خانوادگی

شماره دانشجویی امضاء

**چکیده:**

این پایان نامه به بررسی و آنالیز مشخصات ترانزیستورهای اثر میدان فلز نیمه هادی و ارائه چندین ساختار نوین برای آنها می پردازد. با توجه به اهمیت ترانزیستورهای قدرت و کاربرد گسترده آنها در علوم مختلف از جمله در تجهیزات نظامی، در تمام ساختارهای ارائه شده سعی بر آن است که تا حد ممکن مشخصات توانی و فرکانسی ترانزیستور را بطور همزمان افزایش دهیم. ابتدا مسفتی از جنس گالیم آرسناید مورد مطالعه قرار گرفته است که در آن از تکنولوژی ناحیه دریفت چند گودی و ناحیه ای با ناخالصی p استفاده شده است. این ساختار عمدتا برای بهبود مشخصات فرکانسی ترانزیستور می باشد. در ساختار بهینه سازی شده بعدی از ساختاری متناوب از لایه های بدون ناخالصی در کانال بهره گرفته شده است که این ساختار متناوب سبب بهبود توزیع میدان در کانال و افزایش مشخصات فرکانسی مسفت می گردد. سپس مسفتی با گیت پله ای ارائه می گردد که شکل جدید گیت موجب بهبود توان و پارامترهای فرکانسی مسفت می شود. پس از آن ساختاری نوین متشکل از روش های صفحه میدان و ناحیه دریفت چند گودی ارائه می گردد که در آن ولتاژ شکست، حداکثر فرکانس نوسان و حداکثر بهره موجود بهبود قابل توجهی دارند. در نهایت، مسفت با لایه ای بدون ناخالصی در ناحیه کانال مطرح گردیده و مشخصات DC و فرکانسی آن مورد تحلیل قرار می گیرد.

*کلید واژه ها:* مسفت، گالیم آرسناید، کاربرد نظامی، فرکانس بالا، توان بالا، ولتاژ شکست.

## فهرست مطالب


| عنوان | | صفحه |
|---|---|---|
| **مقدمه** | | |
| | مقدمه | ۴ |
| | مشخصات ترانزیستور های اثر میدان فلز- نیمه هادی | ۵ |
| **فصل اول: مسفت گالیم آرسناید** | | |
| ۱-۱ | مقدمه | ۱۱ |
| ۱-۲ | بررسی مشخصات مسفت | ۱۱ |
| ۱-۳ | روش های بهبود مشخصات مسفت | ۱۵ |
| ۱-۴ | ساختار گالیم آرسناید | ۱۸ |
| ۱-۵ | ساخت کریستال گالیم آرسناید | ۲۰ |
| ۱-۶ | ساخت نیمه هادی نوع N و P | ۲۱ |
| ۱-۷ | تکنولوژی گالیم آرسناید | ۲۲ |
| ۱-۸ | کاربردهای گالیم آرسناید | ۲۳ |
| ۱-۹ | انواع قطعات گالیم آرسناید | ۲۴ |
| ۱-۱۰ | خلاصه و نتیجه گیری | ۲۵ |
| **فصل دوم: ترانزیستور اثر میدان فلز نیمه هادی گالیم آرسناید با ناحیهٔ دریفت چند گودی و ناحیه با ناخالصی P** | | |
| ۲-۱ | مقدمه | ۲۷ |
| ۲-۲ | ساختار ترانزیستور | ۲۸ |
| ۲-۳ | مشخصات DC | ۳۱ |
| ۲-۴ | مشخصه فرکانسی | ۳۳ |
| ۲-۵ | خلاصه و نتیجه گیری | ۳۴ |
| **فصل سوم: ترانزیستور اثر میدان فلز نیمه هادی گالیم آرسناید با استفاده از ساختاری متناوب از لایه های بدون ناخالصی در کانال** | | |
| ۳-۱ | مقدمه | ۳۷ |
| ۳-۲ | ساختار ترانزیستور و روش شبیه سازی | ۳۷ |
| ۳-۳ | نتایج و مباحث | ۳۹ |
| ۳-۴ | خلاصه و نتیجه گیری | ۴۱ |

**فصل چهارم: ترانزیستور اثر میدان فلز نیمه هادی با ناحیه تخلیه اصلاح شده برای کاربردهای توان بالا و فرکانس بالا**

۴-۱ مقدمه ۴۴
۴-۲ ساختمان ترانزیستور پیشنهادی و شبیه سازی انجام شده ۴۵
۴-۳ بحث و نتیجه گیری ۴۷
۴-۴ خلاصه و نتیجه گیری ۵۶

**فصل پنجم: ترانزیستور اثر میدان فلز نیمه هادی با ساختار دو گودی و ناحیهٔ بدون ناخالصی**

۵-۱ مقدمه ۵۸
۵-۲ ساختار مسفت دو گودی با ناحیهٔ بدون ناخالصی ۵۹
۵-۳ تکنیک ایجاد ناحیه تورفتگی در ناحیه دسترسی به درین ۶۱
۵-۴ بهینه سازی ابعاد و موقعیت لایه بدون ناخالصی ۶۷
۵-۵ خلاصه و نتیجه گیری ۶۹

**فصل ششم: ترانزیستور اثر میدان فلز نیمه هادی با صفحه میدان و ناحیه دریفت چند گودی**

۶-۱ مقدمه ۷۲
۶-۲ ساختار ترانزیستور پیشنهادی ۷۳
۶-۳ نتایج و مباحث ۷۵
۶-۴ خلاصه و نتیجه گیری ۸۰

**نتیجه گیری و پیشنهادات**

نتیجه گیری وپیشنهادات ۸۲

**مراجع** ۸۳

**مقالات مستخرج از پایان نامه** ۸۸

**در اینجا برخود لازم می دانم از استاد ارجمندم جناب آقای دکتر علی اصغر اروجی به خاطر تمام آنچه از ایشان آموختم قدردانی کنم. اشتیاق و دلسوزی های ایشان در امر آموزش، علاقه به گرایش الکترونیک و همچنین انگیزه ادامه تحصیل را در من دوچندان نمود. موفقیت روز افزون ایشان و خانواده گرامی شان را از خداوند متعال مسئلت دارم.**

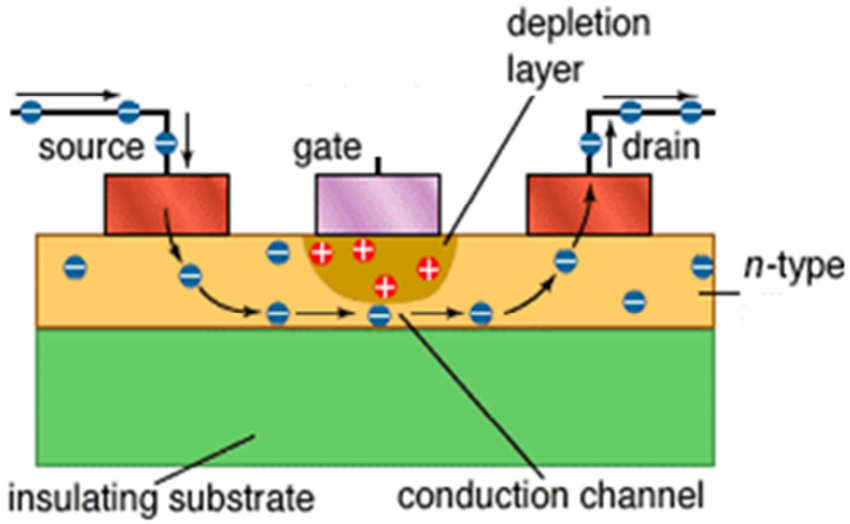
**از آقایان دکتر پرویز کشاورزی و دکتر پژمان رضایی نیز به جهت مطالعه و داوری این پایان نامه کمال تشکر و قدردانی را دارم.**

# مقدمه

**مقدمه**

ترانزیستور های اثر میدان فلز- نیمه هادی[۱] و ترانزیستور های اثر میدان اتصالی[۲]، ترانزیستور هایی مهم برای سرعت های بالا، تقویت کننده های نویزکم، مبدل های آنالوگ به دیجیتال و دیجیتال به آنالوگ می باشند. ترانزیستور های اثر میدان[۳]، جزء مهم ترین وسایل الکترونیکی در تکنولوژی های امروزی ادوات نیمه هادی می باشند. تطبیق پذیری فراوان این وسایل به همراه قابلیت اطمینان بالا و بازده زیاد، سبب افزایش کاربرد آنها گردیده است و به خصوص در مدارات میکروویو بسیار مورد استفاده قرار می گیرند [۱,۲]. ساختمان بسیار دقیق اسیلوسکوپ و تجهیزات فوق حساس و دقیق صنعتی و نظامی ترانزیستوری است.

در این ترانزیستور ها از موادی مانند گالیم آرسناید، ایندیم فسفات و ایندیم گالیم آرسناید که دارای خواص انتقالی مناسبی می باشند، استفاده می شود. همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، این ترانزیستور ها شامل یک کانال فعال می باشند که در آنها الکترون ها ازسوی سورس به سمت درین جاری می گردند.




شکل ۱ ساختار مسفت و نمایش مسیر جاری شدن الکترون ها

۱ Metal Semiconductor Field Effect Transistor (مسفت)

۲ Junction Field Effect Transistor (JFET)

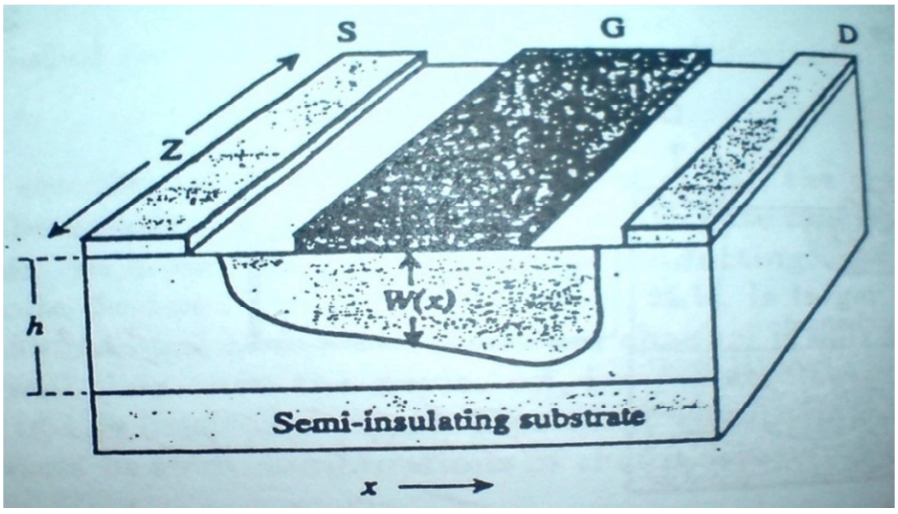
۳ Field Effect Transistor (FET)

یک نکته مهم در رابطه با این ترانزیستور ها، ایزوله نمودن گیت از شارش جریان کانال می باشد. اگر گیت از کانال به خوبی ایزوله نگردد، جریان زیادی کشیده می شود و بنابراین بهره این ترانزیستور پایین می آید. ایزوله نمودن گیت به راه های مختلفی انجام می شود، اگر گیت از کانال بوسیله اکسید ایزوله شود ترانزیستور های اثر میدان فلز- اکسید- نیمه هادی[۴]، اگر با اتصال p-n در بایاس معکوس ایزوله گردد JFET و اگر بوسیله سد شاتکی از هم ایزوله گردند، مسفت نامیده می شود.

برای آنکه گیت و کانال به خوبی از هم ایزوله گردند باید از موادی استفاده نماییم که دارای باند ممنوعه بزرگی باشند، در غیر اینصورت جریان زیادی بین گیت و کانال خواهیم داشت [۱].

## مشخصات ترانزیستور های اثر میدان فلز- نیمه هادی

شکل ۲ نشان دهنده نمای سه بعدی از ساختار مسفت می باشد. زیربنا[۵] که در قسمت زیرین JFET یا مسفت قرار دارد از یک ماده با هدایت انتقالی کم و مقاومت زیاد تشکیل شده است و بر روی آن یک ناحیه از نیمه هادی نوع n رشد داده شده است تا کانال هدایت ایجاد گردد. در FET ها، گیت با تغییر عرض ناحیه تخلیه، میزان هدایت کانال را تغییر می دهد [۳].




شکل ۲ نمایی از MESFET که W(x) پهنای ناحیه تخلیه می باشد.

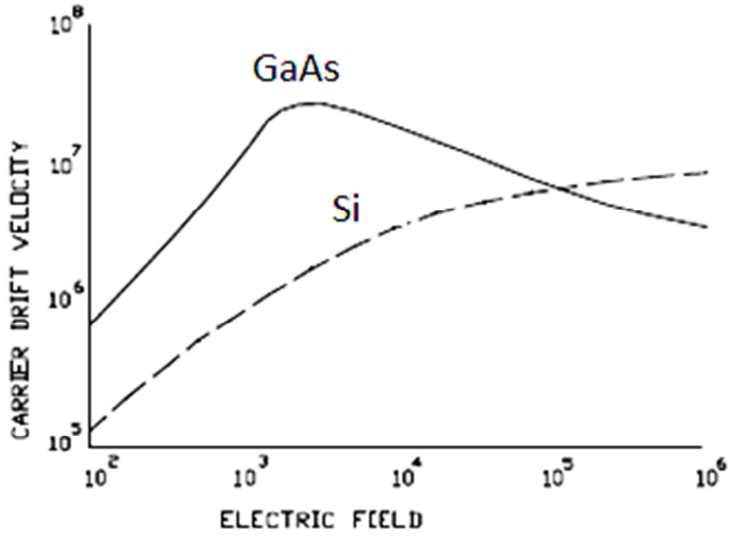
۱ Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor (ماسفت)

۲ Substrate

رابطه عرض ناحیه تخلیه بصورت زیر می باشد:

$$W(X)=[\frac{2\in[V(x)+V_{bi}-V_{GS}]}{eNd}]^{\frac{1}{2}} \quad , \quad W(L)<h \qquad (1)$$

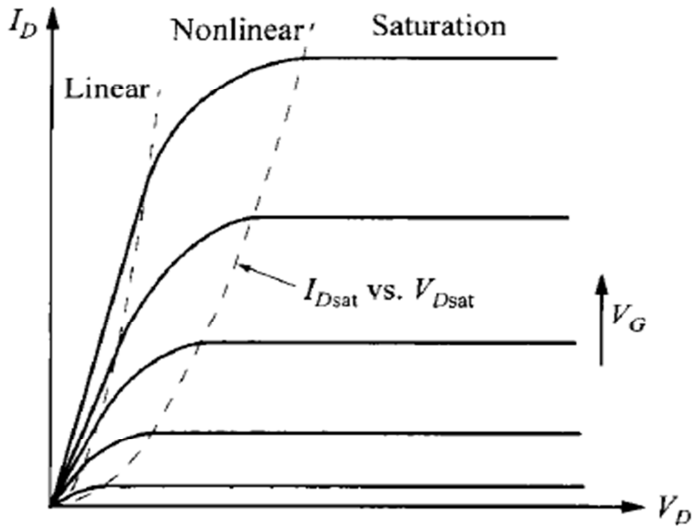
W(X) عرض ناحیه تخلیه، h پهنای کانال، h-w(x) دهانه و V(x) ولتاژ کانال می باشند. با توجه به شکل ۳ مشاهده می شود که سرعت الکترون در سیلیسیم نسبت به شدت میدان به طور یکنواخت افزایش می یابد، درصورتی که درگالیم آرسناید سرعت نسبت به میدان، فراتر از سیلیسیم افزیش می یابد و به اوج می رسد و سپس کاهش می یابد تا اینکه در نهایت به یک مقدار اشباع می رسد. تاثیر این حالت این است که جریان درگالیم آرسناید در میدان الکتریکی نسبتا کم به اشباع می رسد [۳,۱].




شکل ۳ نمودار سرعت بر حسب میدان الکتریکی برای گالیم آرسناید وسیلیسیم

جریان در مسفت با دهانه کانال کنترل می شود و هرچه ولتاژ گیت افزایش یابد، نمودار ولتاژ درین بر حسب جریان درین نیز بالاتر خواهد رفت. این نمودار شامل سه محدوده خطی، غیر خطی و اشباع می باشد که در شکل ۴ نمایش داده شده است. در مشخصه جریان درین بر حسب ولتاژ درین– سورس، در صورتی که ولتاژ درین- سورس مقادیر کوچکی داشته باشد منحنی به صورت خطی خواهد بود و با افزایش ولتاژ درین – سورس منحنی به صورت نمایی در می آید که در نهایت به اشباع می رود. در

بررسی ها می توان اثر عرض ترانزیستور (بعد سوم که از نمای مستقیم و دو بعدی مشاهده نمی شود) را برای رسیدن به سطح جریان مشخص در نظر گرفت.




شکل ۴ نمودار جریان درین بر حسب ولتاژ درین

الکترون های گالیم آرسناید در مقایسه با سیلیسیم دارای تحرک زیاد تری می باشند. بنابراین در طراحی ترانزیستورهای سرعت بالا، استفاده از گالیم آرسناید مناسب تر از سیلیسیم می باشد و ادوات گالیم آرسناید مسفت به عنوان تقویت کننده های فرکانس بالا توانایی خود را نشان داده اند. اگر قصد داریم مدارهای با سرعت بالا داشته باشیم باید طول گیت مسفت را کاهش دهیم. در طول های گیت کوچک، میدان بزرگ الکتریکی ایجاد شده در کانال باعث می شود که سرعت الکترون ها بسیار زیاد شود و این افزایش سرعت اکثرا با تغییر در مشخصه های قطعه که به اثر کانال کوتاه مشهور است همراه می باشد. برای کاهش این اثر می توان از اضافه کردن یک لایه P مخفی در زیر کانال هدایت استفاده نمود.

امروزه راهکارهای متعددی در صنایع نیمه هادی وجود دارد که همزمان منجر به تحولهای سریع در کاربرد نیمه هادی ها می شوند .افزایش بودجه های تحقیق و توسعه، کاهش پروسه تولید علم و سرعت بخشیدن به فرایند بررسی مشخصات و ساخت نیمه هادیها با استفاده از مدل سازی و شبیه

سازی مهمترین این راهکارها هستند .همچنین رقابت موجود بین سازندگان نیمه هادیها از حوزه فناوری و ساخت به سمت طراحی و معماری ساخت تمایل یافته است .این امر موجب شده تا مدل سازی و شبیه سازی با رایانه برای موفقیت در بازار به شدت افزایش یابد. شبیه سازی رایانه ای مزایای بسیار زیادی دارد، از جمله :

- عیب یابی سریع مشکلات
- درک عمیق و وسیع موضوع
- دید دقیق در مسایل بسیار پیچیده
- کاهش زمان چرخه تولید
- کاهش زمان رسیدن تولید به بازار

به خصوص شبیه سازی رایانه ای در کاهش خطا های طراحی و ساخت و تولید درست در اولین مرتبه ساخت و در نتیجه کاهش زمان تولید بسیار موثر است. از این رو شبیه سازی برای رسیدن به اهداف تعریف شده فناوری بسیار مهم و حیاتی است.

در فصل اول ابتدا به بررسی مشخصات مسفت و ماده گالیم آرسناید می پردازیم و روش های بهبود مشخصات مسفت بیان شده و ساختار کریستالی گالیم آرسناید و کاربرد های این ماده در صنعت و تکنولوژی مورد بررسی قرار می گیرند. سپس در فصل دوم ساختاری نوین از گالیم آرسناید مسفت ارائه گردیده که در آن از تکنولوژی ناحیه دریفت چند گودی و ناحیه با ناخالصی P استفاده شده است. چگونگی بهبود مشخصات فرکانسی این ساختار در این فصل مورد تحلیل قرار گرفته است. در فصل بعد، بهبود توزیع میدان الکتریکی و پارامترهای فرکانسی مسفت با استفاده از ساختاری متناوب از لایه های بدون ناخالصی در کانال ترانزیستور مورد تحلیل قرار می گیرد. در فصل چهارم ساختاری متفاوت از مسفت با گیت چند تکه ای که به حالت پلی ای می باشد ارائه می گردد که این ساختار، تمام پارامترهای DC و فرکانسی ترانزیستور را تحت تاثیر قرار می دهد. ترکیب استفاده از روش های صفحه میدان و ایجاد ناحیه دریفت چند گودی در ساختار مسفت، در فصل پنجم مطرح گردیده است که ساختار جدید از مزیت های هر دو تکنیک سود می برد. در فصل ششم ساختاری نوین از مسفت با اعمال لایه ای بدون ناخالصی در ناحیه کانال و بین گیت و درین مورد بررسی قرار میگیرد که این

ساختار نسبت به ساختارهای معمولی مسفت، بهبودهای قابل توجهی دارد. در نهایت، نتیجه گیری های مهم این پایان نامه و پیشنهادهای مفید برای کار در آینده بیان شده اند.

# فصل اول

## مسفت گالیم آرسناید

## ۱-۱ مقدمه

متخصصان فیزیک حالت جامد سالهاست که استفاده از نیمه هادی دیگری چون گالیم آرسناید را به جای سیلیسیم مطرح کرده اند. قابلیتهای ویژه و منحصر به فرد گالیم آرسناید در زمینه مقاومت بالا در برابر شکسته شدن سد الکترونی، اثربخشی فوق العاده در زمینه تابش، جذب و تابش کم نظیر امواج بلند رادیویی، سرعت تغیر وضعیت بسیار بالا و پایداری هنگام فعالیت در فرکانس های بالا موجب شده که متخصصان این حوزه توجه زیادی به این ساختار داشته باشند [۳۱,۲۳,۲۱,۱۴,۲]. سیلیسیم ارزان قیمت مورد استفاده در قطعات الکترونیکی را میتوان به موجودی پر سر و صدا تشبیه کرد که در عین انجام وظایف خود، سر و صدای بسیاری برپا میکند، در حالیکه گالیم آرسناید به شبیه کسی است که سرش به کار خود گرم است و آشوب و سر و صدا در برنامه کاریاش جایی ندارند. البته فراوانی سیلیسیم، مراحل ساخت آسان تر و سرعت جابجایی حفره در آن موجب شده که گالیم آرسناید همچنان کمتر مورد استفاده قرار گیرد. خصوصیات گالیم آرسناید در زمینه تبدیل جریان الکتریکی به فوتون، توجه سازندگان لایه اول پانل نمایشگرهای LCD را به خود جلب کرده است، زیرا این ماده نسبت به سلولهای سیلیسیم توان بالاتری داشته و انرژی کمتری مصرف میکند. به عنوان مثال تمام سلول های خورشیدی روبات های مریخ نورد که توسط ناسا برای کاوش به مریخ ارسال شده اند، از گالیم آرسناید با ترکیب مشخصی از آلیاژ آلومینیوم تشکیل شده اند.

## ۱-۲ بررسی مشخصات مسفت

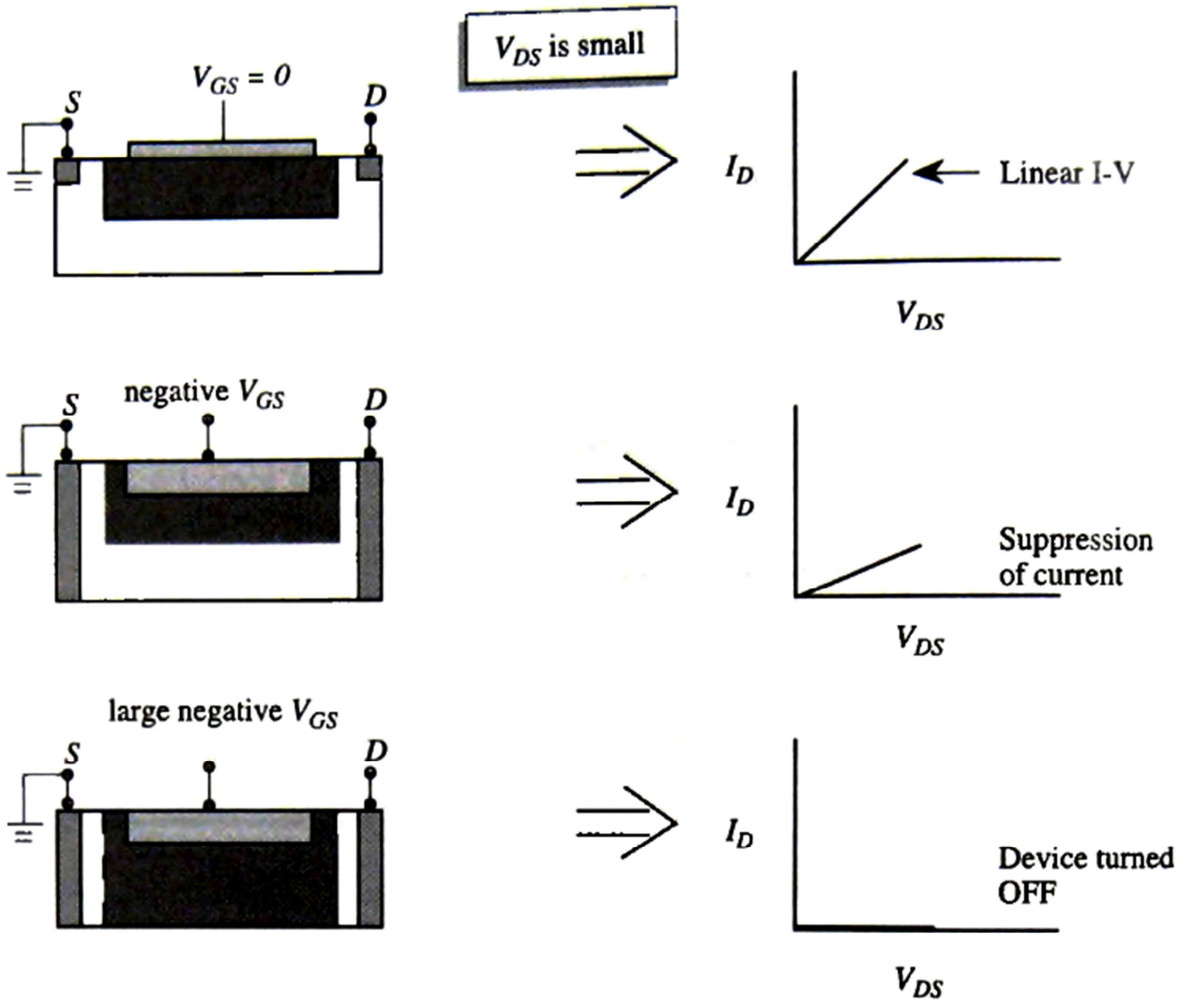
ناحیه تخلیه بین گیت و کانال ایجاد می گردد. در صورتی که ولتاژ درین- سورس ( $V_{DS}$ ) کم باشد با افزایش ولتاژ گیت در سمت منفی، ناحیه تخلیه بزرگتر می شود و بنابراین جریان کانال کم می گردد تا این که در نهایت، کانال به حالت تنگنا[۱] می رسد و جریان کانال برابر صفر می گردد که این امر در شکل (۱-۱) نمایش داده شده است.

حال اگر ولتاژ گیت مقدار ثابتی باشد و در این حالت ولتاژ بین درین و سورس را در جهت مثبت افزایش دهیم (سورس متصل به زمین می باشد، بنابراین برای افزایش $V_{DS}$ باید ولتاژ درین را افزایش دهیم)، ناحیه تخلیه بزرگ تر می گردد و به سمت درین کشیده می شود تا این که در نهایت، کانال به حالت تنگنا می

[۱] Pinch Off

رسد و جریان درین به اشباع می رود. در کانال نوع n، ولتاژ گیت منفی و در کانال نوع p، ولتاژ گیت مثبت سبب ایجاد حالت تنگنا می گردد.

در صورتی که بایاس برقرار نباشد و $V_{DS}$ برابر صفر باشد، ناحیه تخلیه در زیر گیت به صورت یکنواخت خواهد بود. هر چه ولتاژ گیت در این حالت منفی تر می شود، ناحیه تخلیه به سمت کانال فعال نفوذ بیشتر می نماید و بزرگ تر می شود تا آن که در نهایت کل کانال را ناحیه تخلیه فرامی گیرد، بنابراین با افزایش ولتاژ گیت در سمت منفی، از میزان بارهای هدایت کانال کاسته می شود تا آن که در نهایت کانال به حالت تنگنا می رسد.




شکل (۱- ۱) مسفت یا JFET با در نظر گرفتن ولتاژ درین- سورس کوچک. شکل اول حالتی است که ولتاژ گیت صفر می باشد و دهانه کانال، بزرگ می باشد. شکل دوم حالتی است که ولتاژ گیت، منفی می باشد و دهانه کانال کم شده است. شکل سوم حالتی است که ولتاژ گیت یک عدد منفی بزرگ می باشد و کانال به حالت تنگنا رفته است [۳].

با افزودن ولتاژ درین، ناحیه تخلیه به سمت درین کشیده می شود و بزرگ تر می شود و اگر ولتاژ درین خیلی زیاد گردد، کانال به سمت حالت تنگنا در سمت درین پیش می رود و جریان نیز به اشباع خواهد رفت، در نهایت ترانزیستور به حالت شکست می رود و جریان زیادی در آن جاری خواهد شد. وقتی کانال به حالت تنگنا می رسد، هیچ بار متحرکی در آن نیست و جریان رو به صفر می رود.

هر چه بایاس درین افزایش می یابد، ترانزیستور به حالت تنگنا در نزدیکی درین و لبه گیت نزدیک تر می شود و قبل از آن که حالت تنگنا رخ دهد، دهانه کانال شروع به کوچک شدن می نماید و جریان ثابت باقی می ماند و تجمع حامل ها n(x) افزایش یافته، V(x) سرعت در نزدیکی درین و لبه گیت افزایش می یابد. از آن جایی که سرعت تا سرعت اشباع بیشتر نمی تواند افزایش یابد، بنابراین n(x) نیز تا مقدارمشخصی افزایش می یابد و در یک جایی، n(x) ثابت می گردد و جریان نیز ثابت می ماند [۲]. بنابراین یک محیط تجمع یافته از حامل ها درست در زیر درین و نزدیک به لبه گیت خواهیم داشت. در این ناحیه n(x) کمتر از مقدار ناخالصی در آن ناحیه می باشد و یک ناحیه تخلیه ای در آنجا خواهیم داشت. ایجاد یک لایه تجمع یافته در زیر گیت و نزدیک درین ، سبب ایجاد شار جریان ثابتی حتی بعد از تنگنا می شود.

برای طراحی ترانزیستور های سرعت های بالا، باید کانال ترانزیستور از نوع n باشد. در ضمن می دانیم مسفت ها به دو دسته مسفت افزایشی و مسفت تخلیه ای تقسیم بندی می گردند که برای داشتن مسفت سرعت بالا، نوع افزایشی مناسب می باشد [۳,۱]. نمودار جریان درین بر حسب ولتاژ گیت برای این دو نوع مسفت در شکل (۱-۲) نمایش داده شده است.

سورس و درین به صورت اتصالات اهمی می باشند و گیت از سد شاتکی تشکیل شده است و به صورت یک سد شاتکی می باشد.

موبیلیتی به شدت، عملکرد مسفت را تحت تاثیر قرار می دهد. در محاسبات مربوط به موبیلیتی، برای آن که موبیلیتی به شدت میدان وابسته نباشد، محاسبات باید بر اساس اطلاعات مربوط به منطقه خطی مشخصه خروجی FET انجام گیرد. با در نظر گرفتن $V_{DS}$ کم و محاسبه $g_m$ در این ناحیه، موبیلیتی ناشی از شدت میدان کم $(\mu_d)$ از این رابطه بدست می آید:

$$\mu_d = \frac{g_m}{C}\frac{L_G^2}{V_{DS}}\frac{1}{(1-\frac{R_{GS}+R_{DG}}{R_{GS}+R_{DG}+R_C})^2} \qquad (۱-۱)$$