بسم الله الرحمن الرحيم

٢٧٣٢١

دانشگاه تربیت مدرس
دانشکده فنی و مهندسی

رساله دکتری مهندسی برق (الکترونیک)

تحلیل انتقال الکترون در ترانزیستور MESFET با روش مونت‌کارلو

کامیار ثقفی

۱4669

استاد راهنما:
دکتر محمدکاظم مروج‌فرشی

استاد مشاور:
دکتر وحید احمدی

تابستان ۱۳۷۸

۲۷۳۲۱

مرکز اطلاعات و مدارک علمی ایران
تقدیمی مدارک

۱۳۷۸ /۱۰/ ۲۵

دانشگاه تربیت مدرس

تاییدیه هیات داوران

آقای **کامیار ثقفی** رساله دکتری **۲۴** واحدی خود را با عنوان **تحلیل انتقال الکترون در ترانزیستور** MESFET **با روش مونت کارلو** در تاریخ **۷۸/۶/۲۹** ارائه کردند. اعضای هیات داوران نسخه نهائی این رساله را از نظر فرم و محتوی تایید و پذیرش آنرا برای تکمیل درجه دکتری مهندسی **برق** باگرایش **الکترونیک** پیشنهاد می‌کنند. ۲۰ب۶

اعضای هیات داوران	نام و نام خانوادگی	امضاء
۱ـ استاد راهنما:	آقای دکتر محمدکاظم مروج	
۲ـ استادان مشاور:	آقای دکتر وحید احمدی	
	—	
۴ـ استادان ممتحن:	آقای دکتر حکاک	
	آقای دکتر نبوی	
	آقای دکتر روئین تن	
	آقای دکتر فائز	
۴ـ مدیر گروه: (یا نماینده گروه تخصصی)	آقای دکتر نبوی	

این نسخه به عنوان نسخه نهایی پایان‌نامه/رساله مورد تأیید است.
امضای استاد راهنما:

بسمه‌تعالی

آیین‌نامه چاپ پایان‌نامه (رساله)های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرّس

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان‌نامه(رساله)های تحصیلی دانشجویان دانشگاه تربیت مدرّس، مبیّن بخشی از فعالیتهای علمی ـ پژوهشی دانشگاه است بنابراین به منظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه، دانش‌آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می‌شوند:

مادّه ۱ در صورت اقدام به چاپ رساله‌ی خود، مراتب را قبلاً به طور کتبی به« دفتر نشر آثار علمی» دانشگاه اطلاع دهد.

مادّه ۲ در صفحه سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه)، عبارت ذیل را چاپ کند:

«کتاب حاضر، حاصل رسالهٔ دکتری نگارنده در رشتهٔ برق ـ الکترونیک است که در سال ۱۳۷۸ در دانشکدهٔ فنی و مهندسی دانشگاه تربیت مدرّس به راهنمایی جناب آقای دکتر محمد کاظم مروّج‌فرشی و مشاورهٔ جناب آقای دکتر وحید احمدی از آن دفاع شده‌است.»

مادّه ۳ به منظور جبران بخشی از هزینه‌های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت چاپ) را به «دفتر نشر آثار علمی» دانشگاه اهداء کند. دانشگاه می‌تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر در معرض فروش قرار دهد.

مادّه ۴ در صورت عدم رعایت مادّه ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ‌شده را به عنوان خسارت به دانشگاه تربیت مدرّس، تأدیه کند.

مادّه ۵ دانشجو تعهد و قبول می‌کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می‌تواند خسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالبه و وصول کند. به علاوه به دانشگاه حق می‌دهد به منظور استیفای حقوق خود، از طریق دادگاه، معادل وجه مذکور در مادّه ۴ را از محل توقیف کتابهای عرضه‌شدهٔ نگارنده برای فروش، تأمین نماید.

مادّه ۶ اینجانب کامیار ثقفی دانشجوی رشته برق ـ الکترونیک مقطع دکتری تعهد فوق و ضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می‌شوم.

نام و نام‌خانوادگی: کامیار ثقفی

تاریخ و امضا: ۱۳۷۸/۶/۲۹

تقدیم به همسرم ...

بی تردید رساله حاضر حاصل مساعدت همه معلمینی است که در مقاطع مختلف تحصیلی راهنمای من بوده‌اند. لذا به حکم قدرشناسی در این مجال از همه آن بزرگواران تقدیر می‌شود.

به انجام رسیدن این رساله مرهون راهنمائی‌ها و حمایت‌های جناب آقای دکتر مروج به عنوان استاد راهنمای این رساله بوده‌است. علاوه بر ارتباط علمی، وجود رابطه معنوی با ایشان برطرف کننده بسیاری از مشکلاتی بود که نوعا می‌توانست در مقاطعی از زمان به‌طور جدی مانع پیشرفت انجام رساله شود.

از جناب آقای دکتر وحید احمدی استاد مشاور این رساله نیز برای دقت نظر و مساعدتهای ایشان در تمام مراحل اجرای این رساله قدردانی می‌کنم.

همچنین از اعضای محترم هیئت داوران جناب آقای دکتر غلام‌حسین روئین‌تن، جناب آقای دکتر رحیم فائز، جناب آقای دکتر محمد حکاک و جناب آقای دکتر عبدالرضا نبوی که با صرف وقت و با حوصله بسیار در تدوین هر چه بهتر این رساله مرا یاری کرده‌اند، تقدیر و تشکر می‌کنم.

چکیده

در این رساله انتقال الکترون در ترانزیستور مسفت (MESFET) با استفاده از روش مونت کارلو تحلیل شده‌است. به دلیل مشابهت ساختار دیود n^+-i-n^+ از جنس GaAs با ساختار ترانزیستور مسفت، در ابتدا این دیود شبیه‌سازی شده‌است. اثرات تغییر ولتاژ آند، دما و طول کانال در مشخصه‌های انتقال این دیود بررسی و نشان داده شده‌است کاهش طول کانال باعث می‌شود رفتار انتقال حامل بیشتر بالستیک شود. با قرار دادن کاتد از جنس AlGaAs به جای GaAs شاهد افزایش متوسط سرعت حامل در مجاورت کاتد در ناحیه فعال خواهیم بود. همچنین نشان داده شده‌است که با افزایش درصد مولی Al متوسط سرعت در طرف آند در کانال کاهش می‌یابد. تعمیم شبیه‌سازی به دو بعد از دیگر کارهای انجام گرفته در این دیود می‌باشد.

در ترانزیستور مسفت چهار ساختار مسفت معمولی، مسفت با لایه کم غلظت در طرف درین(LDD MESFET)، مسفت با سورس از جنس AlGaAs و مسفت با سورس AlGaAs به همراه لایه کم غلظت در طرف درین شبیه‌سازی شده‌اند. با مقایسه این چهار ساختار نشان داده شده‌است که مسفت با سورس AlGaAs به همراه لایه کم غلظت در طرف درین دارای متوسط سرعت بیشتر و در سراسر کانال یکنواخت‌تر است. با استفاده از توزیع ناخالصی دلتاگونه، امکان افزایش ناپیوستگی در محل فصل مشترک سورس و کانال بدون افزایش درصد مولی فراهم آمده‌است که منجر به معرفی یک ترانزیستور جدید به نام δ -doped LDD HMESFET شده‌است.

ضرورت ملایم بودن تغییرات بار در گره‌های مش در روش ذره-مش منجر به معرفی یک روش جدید در تخصیص بار به نام WNGP شده‌است.

از مقایسه شبیه‌سازی‌های انجام گرفته در ترانزیستورهای مسفت ساخته شده از جنس GaAs، InGaAs و InP ، نشان داده شده‌است که ترانزیستورهای مسفت از جنس InGaAs، متوسط سرعت

بالاتری در سراسر کانال دارند. با قرار دادن سورس از جنس InP بـه جـای InGaAs در مسـفت از جنس InGaAs روی پایه InP، ساختار جدیدی معرفی شده‌است که دارای بهترین مشخصه سـرعت در سراسر کانال است.

برای اعمال تبهگنی به ترانزیسـتور مسـفت، روش لاگلـی- فـری(Lugli-Ferry) اسـتفاده شده‌اسـت. ضعف این روش در میدانهای ضعیف مورد توجه قرار گرفته و در حـالتی کـه میـدان در دو جـهت مؤلفه دارد، با ارائه یک روش اصلاحی، اشکال روش لاگلی- فری برطرف شده‌است.

با وارد کردن پراکندگی از الکترون- پلاسمون و الکترون- الکترون به شبیه‌سازی، اثر برهـم کنـش الکترون- الکترون در مشـخصه‌های انتقـال بررسـی شده‌اسـت. بـرای سـرعت دادن بـه محاسـبات مربوط به پراکندگـی از الکـترون- الکـترون، روش ذره- ذره- ذره- مـش (P^3M) بـه کـار گرفتـه شده‌است.

عنوان	صفحه
فهرست مطالب	۱

فصل اول مقدمه	۴
فصل دوم فرآیندهای پراکندگی	۹
۲-۱ مقدمه	۱۰
۲-۲ پراکندگی از ناخالصی‌های یونیزه شده	۱۰
۲-۳ پراکندگی از فونونها	۱۲
۲-۳-۱ تعریف فونون	۱۲
۲-۳-۲ پراکندگی از فونونهای صوتی	۱۳
۲-۳-۳ پراکندگی از فونونهای نوری قطبی	۱۳
۲-۳-۴ پراکندگی از فونونهای نوری غیرقطبی	۱۵
۲-۴ پراکندگی ناشی از برهم کنش الکترون – الکترون	۱۶
۲-۴-۱ برهم کنش الکترون – الکترون	۱۶
۲-۴-۲ برهم کنش الکترون – پلاسمون	۱۶
فصل سوم روش مونت کارلو	۱۸
۳-۱ مقدمه	۱۹
۳-۲ روش تک ذره مونت کارلو	۱۹
۳-۲-۱ زمان حرکت آزاد	۲۰
۳-۲-۲ انتخاب فرآیند پراکندگی	۲۲
۳-۲-۳ تعیین وضعیت جدید بردار موج	۲۲
۳-۲-۳-۱ پراکندگی از ناخالصی‌های یونیزه شده	۲۴
۳-۲-۳-۲ پراکندگی از فونونهای صوتی	۲۴
۳-۲-۳-۳ پراکندگی از فونونهای نوری غیر قطبی	۲۴
۳-۲-۳-۴ پراکندگی از فونونهای نوری قطبی	۲۵
۳-۲-۳-۵ پراکندگی الکترون – الکترون	۲۶
۳-۲-۴ اصلاح دستگاه مختصات	۲۶
۳-۲-۵ اثرات غیر سهمی بودن نوار انرژی	۲۸
۳-۳ روش دسته جمعی مونت کارلو	۳۱

۳-۴ شبیه‌سازی مونت کارلو در ادوات نیمه هادی ۳۲
۳-۴-۱ شرایط مرزی ۳۴
۳-۴-۱-۱ شرایط مرزی برای پتانسیل ۳۴
۳-۴-۱-۲ شرایط مرزی برای روش دسته جمعی مونت کارلو ۳۴
۳-۴-۲ گسسته‌سازی ناحیه شبیه‌سازی ۳۵
۳-۴-۳ تعیین پله‌های زمانی ۳۶
۳-۴-۴ ابر ذره ۳۶
۳-۴-۵ روش ذره – مش (PM) ۳۷
۳-۴-۵-۱ تخصیص ذرات به گره‌های مش ۳۸
۳-۴-۵-۱-۱ روش NGP در یک بعد ۳۸
۳-۴-۵-۱-۲ روش CIC در یک بعد ۳۹
۳-۴-۵-۱-۳ روش NGP در دو بعد ۳۹
۳-۴-۵-۱-۴ روش CIC در دو بعد ۴۰
۳-۴-۵-۲ حل معادله پواسن ۴۱
۳-۴-۵-۲-۱ روش تفاضل متناهی در یک بعد ۴۱
۳-۴-۵-۲-۲ روش تفاضل متناهی در دو بعد ۴۲
۳-۴-۵-۳ روشهای عددی حل معادله پواسن ۴۳
فصل چهارم شبیه سازی دیود n^+-i-n^+ ۴۶
۴-۱ مقدمه ۴۷
۴-۲ طرح مسئله ۴۸
۴-۳ اثر ولتاژ اعمالی ۵۳
۴-۴ اثر طول کانال ۵۶
۴-۵ اثر درجه حرارت ۵۷
۴-۶ اثر تغییر ماده در کاتد ۵۹
۴-۶-۱ اثر تغییر ولتاژ آند ۶۴
۴-۶-۲ اثر تغییر درصد مولی Al ۶۵
۴-۶-۳ اثر تغییر طول کانال ۶۸
فصل پنجم شبیه سازی ترانزیستور مسفت (MESFET) ۷۰
۵-۱ مقدمه ۷۱

۵-۲ ترانزیستورهای مسفت معمولی از جنس GaAs ۷۲

۵-۳ روش WNGP برای تخصیص بار ۷۹

۵-۴ ترانزیستور مسفت با لایه کم غلظت در درین LDD MESFET ۸۵

۵-۵ ترانزیستور مسفت با ساختار چند لایه (HMESFET) ۹۲

۵-۶ ترانزیستور مسفت با ساختار چند لایه به همراه LDD (LDD-HMESFET) ۹۶

۵-۷ ترانزیستور δ-doped LDD HMESFET ۹۸

۵-۸ ترانزیستور مسفت معمولی از جنس InGaAs ۱۰۳

۵-۹ ترانزیستور مسفت InP ۱۱۰

۵-۱۰ اثرات تبهگنی ۱۱۴

۵-۱۰-۱ اصلاح روش LF در میدان ضعیف ۱۲۲

۵-۱۰-۲ اصلاح روش BT ۱۲۶

۵-۱۱ اعمال تبهگنی به ترانزیستور مسفت معمولی ۱۲۹

۵-۱۲ تاثیر برهم‌کنش الکترون-الکترون ۱۳۱

۵-۱۲-۱ روش گسسته‌سازی مکانی ۱۳۲

۵-۱۲-۲ بررسی پراکندگی الکترون- الکترون در مسفت GaAs ۱۳۳

۵-۱۳ ترانزیستور مسفت $In_{.53}Ga_{.47}As$ با سورس InP ۱۳۷

فصل ششم نتیجه‌گیری و پیشنهادها ۱۴۰

۶-۱ نتیجه‌گیری ۱۴۱

۶-۲ پیشنهادهایی برای ادامه تحقیق ۱۴۵

ضمیمه ۱ : ثابتهای فیزیکی ۱۴۸

ضمیمه ۲ : پارامترهای مواد ۱۴۹

ضمیمه ۳ : روش‌های حل معادله پواسن ۱۵۳

ضمیمه ۴ : اتصال شاتکی ۱۶۱

ضمیمه ۵ : محدودیتهای پیاده‌سازی پراکندگی الکترون-الکترون ۱۶۳

مراجع ۱۶۴

واژه‌نامه ۱۷۸

فصل اول

مقدمه

روشهای شبیه‌سازی در قطعات الکترونیکی و بطور کلی ادوات نیمه هادی متناسب با پیشرفت فن‌آوری و ضرورت کاهش خطا، روزبروز گسترش یافته و امروزه با محدوده وسیعی از روشهای شبیه‌سازی مواجه هستیم. انتخاب هر یک از این روشها به مشخصات فیزیکی قطعه مورد بررسی بستگی دارد. روشهایی مانند رانش- نفوذ و هیدرودینامیک در بخشهایی مبتنی بر روابط تحلیلی هستند و برای اعمال به همه ادوات قابل استفاده نیستند. از جمله روشهایی که برای شبیه‌سازی ادوات تا ابعاد زیر میکرون مجاز است روش مونت کارلو است. نام مونت کارلو برای این روش به وسیله فرمی دانشمند ایتالیایی زمانی که روی بمب اتم کار می‌کرد ابداع شده‌است. او از اعداد تصادفی برای تعیین جهت نوترون تولید شده ناشی از شکافت هسته‌ای استفاده کرد. کروساوا (Kurosawa) در سال ۱۹۶۶ از اعداد تصادفی برای تحلیل انتقال الکترون داغ استفاده نمود[۱] . بوردمان (Boardman) نیز در سال ۱۹۶۸ با استفاده از روش مونت کارلو سرعت رانش الکترون را برحسب میدان الکتریکی درGaAs بدست آورد [۲] . در سال ۱۹۷۱ نیز لبول (Lebwohl) و پرایس (Price) ترکیبی از مدل رانش- نفوذ و مونت کارلو را ارائه کردند[۳] . اولین شبیه‌سازی روی ادوات نیمه هادی در سال ۱۹۷۴ توسط هاکنی (Hockney) انجام شد [۴] . شبیه‌سازی مونت کارلو به لحاظ زمان بسیار طولانی مورد نیاز تا مدتها به عنوان یک روش علمی پر هزینه و بدون کارآیی مطرح بود. از اواسط دهه هشتاد میلادی این روش با اقبال مواجه شد و به سرعت عمومیت یافت و به عنوان یک ابزار بسیار مهم تحقیقاتی به‌کار گرفته شد. بطوریکه امروزه در تحلیل رفتار بدنه نیمه هادی‌ها [۵-۱۴] ، ادواتی نظیر دیود n^+in^+ [۱۵-۲۵]، ترانزیستورهای ماسفت (MOSFET) [۲۶-۴۹] ، مادفت (MODFET) [۵۰-۵۵] ، انواع ترانزیستورهای دوقطبی [۵۶-۶۵] و مسفت (MESFET)[۶۶-۹۷] بطور وسیع مورد استفاده قرار می‌گیرند.

در این رساله تحلیل انتقال الکترون در ترانزیستور مسفت با استفاده از روش مونت کارلو بررسی شده‌است. یکی از اهداف این رساله بررسی مشخصه‌های انتقال و ارائه تحلیل‌هایی است که رفتار

این ترانزیستور را به‌طور کیفی توصیف کند. از جمله نیازهای یک تحلیل صحیح، داشتن مدلی دقیق است. لحاظ کردن پدیده‌های مهم فیزیکی درشبیه‌سازی به‌منظور دستیابی به یک مدل دقیق نیز از دیگر اهداف این رساله است. در نظر گرفتن اثرات تبهگنی و برهم‌کنش الکترون-الکترون فرضیه‌های اولیه این تحقیق بوده‌اند. بهبود مدلهای ریاضی موجود برای اعمال فرضیه‌های فوق به روش مونت کارلو بخشی از جنبه‌های جدید این رساله تلقی می‌شود. اثرات تغییر در مواد تشکیل دهنده این ترانزیستور و همچنین تغییر در ساختار آن با هدف بهبود مشخصه‌های انتقال یکی دیگر از اهداف این تحقیق بوده‌است.

برای درک روش مونت‌کارلو اطلاعاتی نظیر ساختار نوار انرژی، ارتعاشهای شبکه کریستالی (فونونها)، انتقال الکترون و برهم کنش بین آنها و شبکه کریستالی مورد نیاز است. فصل دوم به انواع فرآیندهای پراکندگی اختصاص یافته‌است. در این فصل به آن دسته از فرآیندهایی اشاره شده که در ادوات مرکب مانند GaAs اهمیت دارند و از ذکر بقیه فرآیندها صرفنظر شده‌است. پارامترهای مورد نیاز در روابط این فصل برای موادی نظیر GaAs، AlGaAs، InGaAs و InP در جداول ضمیمه ۲ آورده شده‌است. در فصل سوم اجزای اصلی یک برنامه شبیه‌ساز مونت کارلو توصیف گردیده‌است. در این فصل ابتدا روش تک ذره مونت کارلو توضیح داده شده، در ادامه اثرات غیر سهمی بودن نوار انرژی روی فرآیندهای پراکندگی بیان گردیده و سپس روش دسته جمعی مونت کارلو و وجه تمایز آن با روش تک ذره توصیف شده‌است. آخرین بخش در این فصل به بیان شبیه‌سازی مونت کارلو در ادوات نیمه هادی اختصاص یافته‌است. اعمال شرایط مرزی، روش ذره- مش و روشهای حل معادله پواسن از اهم مطالب این بخش می‌باشد. در ضمیمه ۳ جزئیات بیشتری از حل معادله پواسن آورده شده‌است.

به عنوان نقطه آغازین در شبیه‌سازی ادوات، در فصل چهارم به شبیه‌سازی دیود n^+in^+ از جنس GaAs پرداخته شده‌است. در این رساله افزایش سرعت حاملها در ادوات به عنوان محوری‌ترین

موضوع در بهبود مشخصه‌های انتقال ادوات مورد توجه قرار گرفته‌است. در این فصل ابتدا اثرات ولتاژ اعمالی، تغییر در طول کانال، تغییرات درجه حرارت بررسی شده و سپس ناحیه کاتد با AlGaAs جایگزین و اثرات این جابجایی در مشخصه‌های انتقال دیود تحلیل شده‌است. استفاده از کاتد AlGaAs به عنوان یک نمونه اولیه تلقی شده و مبنایی برای شبیه‌سازیهای ترانزیستور مسفت قرار می‌گیرد. شایان ذکر است که شبیه‌سازی در این دیود با هدف توصیف فیزیکی دقیقتر علاوه بر حالت یک بعدی در حالت دو بعدی نیز صورت پذیرفته است.

فصل پنجم با شبیه‌سازی یک ترانزیستور مسفت معمولی از جنس GaAs آغاز شده‌است. در بخش آغازین به بررسی مشخصه‌های مختلف این ترانزیستور پرداخته و در هر مورد توصیف فیزیکی مورد نیاز آورده شده‌است. در واقع مدل ارائه شده در این بخش نمونه اولیه مورد نیاز برای مقایسه با مدلهای دقیقتر در شبیه‌سازی است. ارائه یک مدل جدید برای تخصیص بار که یکی از مراحل مهم شبیه‌سازی مونت کارلو می‌باشد عنوان بخش بعدی است. در این بخش ارجحیت مدل ارائه شده به لحاظ تحلیلی و عددی نسبت به مدلهای مرسوم بیان می‌شود. در این رساله تغییر در ساختار ترانزیستورمسفت با هدف بهبود مشخصه‌های انتقال در این ترانزیستور مورد توجه قرار گرفته و این تغییرات مرحله به مرحله تحلیل شده‌است. در اولین گام با هدف کاهش اثرات ناخواسته میدان الکتریکی از یک لایه LDD در طرف درین این ترانزیستور استفاده شده و نتایج حاصل از شبیه‌سازی چنین ساختاری با مسفت معمولی مقایسه گردیده است. مشابه با آنچه که در مورد دیودهای n^+-i-n^+ بیان شد، مسفت با سورس AlGaAs عنوان بخش دیگری از این فصل است. اضافه نمودن لایه LDD به ترانزیستور فوق ساختاری را نتیجه می‌دهد که به لحاظ مشخصه‌های انتقال از سه ساختار قبلی رفتار بهتری دارد.

استفاده از ناخالصی دلتا(δ-doping) با هدف تنظیم ناپیوستگی موجود در محل فصل مشترک دو ماده با شکاف انرژی متفاوت در ادامه این فصل بررسی شده و منجر به معرفی یک ساختار جدید