

دانشگاه یزد

دانشکده‌ی فیزیک

پایان‌نامه

برای دریافت درجه‌ی کارشناسی ارشد

فیزیک حالت جامد

مطالعه‌ی جریان دررو در ماسفت‌های کانال کوتاه دو

دروازه‌ای

استاد راهنما: دکتر قاسم انصاری‌پور

استاد مشاور: دکتر محمدعلی صادق‌زاده

پژوهش و نگارش: سمیه دشتی

اسفند ۹۰

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

تقدیم به

پدر و مادر عزیزم، دو خورشید همیشه تابان زندگیم

و

همسر عزیزم که در این راه، همسفرم بود

مشکر و قدردانی

سپاس با تمام وجودم پروردگار مهربان را که بی یاری او هیچ تلاشی به بار نمی نشیند.

صمیمانه، مشکر خود را به استاد راهنمای ارجمندم، جناب آقای دکتر قاسم انصاری پور تقدیم می کنم که مرا از راهنمایی های خود بهره مند ساختند و از هیچ کمک و مساعدتی دریغ نفرمودند.

در پایان از پدر و مادر عزیز و همسر مهربانم که مشوق من در این مسیر بودند تقدیر و تشکر می نمایم.

چکیده

در طی سال ها، تکنولوژی ماسفت رشد صنعت نیمرساناها را به خوبی اداره کرده است کوچک کردن اندازه این قطعه که عملکرد و قابلیت آن را بالا می برد. همیشه یک مسئله مهم و اساسی در زمینه این تکنولوژی بوده است. این مسئله همواره با چالش های زیادی رو به رو بوده که روند رشد ماسفت ها با مشکل روبه رو کرده است.

برای رفع این چالش ها چندین قطعه برای جایگزین کردن با ماسفت های معمولی پیشنهاد شد که یکی از آنها ماسفت های دو دروازه ای است. ماسفت دو دروازه ای به علت کنترل بسیار خوب آثار کانال کوتاه قابلیت مقیاس پذیری بهتری نسبت به ماسفت های معمولی دارند.

در این پایان نامه مشخصات جریان-ولتاژ ماسفت های کانال کوتاه دو دروازه ای با طول های مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است. در ابتدا جریان زیر آستانه ای این قطعات برای طول های کانال ۱۰۰ و ۵۰ و ۲۰ نانومتر محاسبه و نتایج حاصل از آن ارائه شده است. همچنین نمودار جریان-ولتاژ، ضریب رسانایی کانال و ضریب رسانایی متقابل با استفاده از دو مدل متفاوت برای قطعاتی با طول کانال های مختلف محاسبه و رسم نموده ایم و سپس نتایج حاصل از دو مدل را با هم مقایسه نموده ایم و نشان دادیم که دو مدل برای طول کانال های بالای ۱۰۰ نانومتر انطباق قابل توجهی دارند. اما برای طول کانال های کوچکتر نتایج آنها اندکی متفاوت است. به همین دلیل نتایج هر یک از دو مدل را برای طول کانال ۲۰ نانومتر با مدل یک ماسفت بالستیکی مقایسه نموده ایم و نشان داده ایم که هر دو مدل نتایج نزدیک به نتایج مدل بالستیکی ارائه می دهند و حتی در بعضی از مقادیر ولتاژ دروازه نتایج کاملاً یکسانی دارند. در نهایت مدلی که همخوانی بیشتری با مدل بالستیک داشت را به عنوان مدل برتر معرفی نمودیم.

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فصل اول معرفی ترانزیستور اثر میدان فلز اکسید نیم رسانا.....	۱
۱-۱) معرفی ماسفت.....	۳
۱-۲) ساختمان ماسفت.....	۳
۱-۳) اصول عملیات.....	۴
۱-۴) ناحیه‌ی خطی و ناحیه‌ی اشباع.....	۷
۱-۵) ولتاژ آستانه.....	۸
۱-۶) ناحیه‌ی زیرآستانه.....	۹
۱-۷) ضریب رسانایی کانال و ضریب رسانایی متقابل.....	۱۰
۱-۸) انواع ماسفت‌ها.....	۱۰
۱-۹) آثار کانال کوتاه.....	۱۲
۱-۹-۱) اثر مدولاسیون طول کانال.....	۱۳
۱-۹-۲) کاهش ولتاژ آستانه.....	۱۴
۱-۹-۳) کاهش سد پتانسیل دررو.....	۱۴
۱-۱۰) ماسفت بالستیکی.....	۱۵
۱-۱۱) مقیاس پذیری ماسفت‌ها.....	۱۵
۱-۱۱-۱) انواع ماسفت‌های دو دروازه‌ای.....	۱۶
۱-۱۱-۲) مدهای عملیات.....	۱۷
۱-۱۱-۳) محاسن ماسفت‌های دو دروازه‌ای.....	۱۸
۱-۱۱-۴) ساختارهای ماسفت دو دروازه‌ای.....	۲۰
فصل دوم: فرمول‌بندی نظری.....	۲۳
مقدمه.....	۲۵
۱-۲) مدل جریان دررو در ناحیه‌ی زیرآستانه.....	۲۶

۲۷.....	مدل کلی جریان دررو (اصلاح نشده)
۲۸.....	مدل کلی (۱-۲-۲)
۲۸.....	اثر مدولاسیون طول کانال (۲-۲-۲)
۲۹.....	مدل کلی جریان دررو (اصلاح شده)
۲۹.....	یک اصلاح تجربی (۱-۳-۲)
۳۰.....	تحرك میدان پایین (۲-۳-۲)
۳۱.....	اثر تزریق حامل (۳-۳-۲)
۳۲.....	آثار میدان دوبعدی (۴-۳-۲)
۳۲.....	مدولاسیون پهنای نمونه (۱-۴-۳-۲)
۳۳.....	فاکتور ایده آل سازی شیب زیرآستانه (۲-۴-۳-۲)
۳۴.....	اثر DIBL در ناحیه ی بالای آستانه (۳-۴-۳-۲)
۳۵.....	حل معادله ی جریان ورودی (۴-۲)
۳۸.....	مدل دوم (۵-۲)
۳۹.....	مدل ماسفت بالیستیکی (۶-۲)
۴۱.....	فصل سوم: محاسبات و نتایج
۴۳.....	مقدمه
۴۴.....	نمودار جریان زیرآستانه برای یک ماسفت دو دروازه ای متقارن (۱-۳)
۵۲.....	محاسبه مشخصات جریان - ولتاژ با استفاده از مدل اصلاح نشده (۲-۳)
۴۵.....	مشخصات جریان ولتاژ، برای قطعه با طول کانال $L=100\text{nm}$ (۱-۲-۳)
۴۸.....	مشخصات جریان ولتاژ برای قطعه با طول کانال $L=200\text{nm}$ (۲-۲-۳)
۵۱.....	مقایسه ی مشخصات جریان - ولتاژ برای طول کانال 100nm و $L=200\text{nm}$ (۳-۲-۳)
۵۴.....	محاسبه مشخصات جریان ولتاژ با استفاده از مدل اصلاح شده (۳-۳)
۵۴.....	بررسی تحرك میدان پایین (۱-۳-۳)
۵۵.....	مشخصات جریان ولتاژ برای قطعه با طول کانال $L=30\text{nm}$ (۲-۳-۳)

۵۸.....	۳-۳-۳	مشخصات جریان ولتاژ برای قطعه با طول کانال $L=50\text{nm}$
۶۱...۶۱	۴-۳	محاسبه مشخصات جریان - ولتاژ یک ماسفت دو دروازه ای با استفاده از مدل دوم
۶۱.....	۱-۴-۳	مشخصات جریان ولتاژ برای قطعه با طول کانال $L=40\text{nm}$
۶۴.....	۲-۴-۳	مشخصات جریان ولتاژ برای قطعه با طول کانال $L=150\text{nm}$
۶۶.....	۵-۳	مقایسه مدل اصلی (اصلاح شده) با مدل دوم برای طول کانال‌های مختلف
۶۹.....	۶-۳	محاسبه مشخصات جریان - ولتاژ با استفاده از مدل بالستیکی
۷۲.....	۷-۳	مقایسه مدل‌های ارائه شده با مدل بالستیکی
۷۱.....	۱-۷-۳	مقایسه‌ی مدل اصلی با مدل بالستیکی
۷۳.....	۲-۷-۳	مقایسه‌ی مدل دوم با مدل بالستیکی
۷۴.....	۸-۳	نتیجه‌گیری
۷۶.....		فهرست منابع
۸۰.....		چکیده‌ی انگلیسی

فصل اول

معرفی ترانزیستور اثر میدان فلز-اکسید-نیم رسانا

۱-۱) معرفی ماسفت

ترانزیستور اثر میدان فلز- اکسید- نیمرسانا (ماسفت)^۱ مهم‌ترین قطعه برای مدارهای مجتمع با مقیاس خیلی بزرگ نظیر ریزپردازشگرها و حافظه‌های نیمرسانایی می‌باشد. اولین ماسفت در سال ۱۹۶۰ با استفاده از زمینه سیلیسیوم به طور گرمایی اکسیدشده ساخته شده است [۱]. این قطعه، طول کانالی بیش از ۲۰ میکرومتر و ضخامت اکسید دروازه‌ای بیشتر از 1000 \AA داشت. اگرچه ماسفت‌های کنونی به طور قابل ملاحظه‌ای طبقه‌بندی شده‌اند؛ اما انتخاب سیلیسیوم و اکسید سیلیسیوم به طور گرمایی رشد یافته که در اولین ماسفت مورد استفاده قرار گرفت به صورت مهم‌ترین ترکیب باقی مانده است.

۱-۲) ساختمان ماسفت

ماسفت، یک قطعه چهارپایانه است که شامل چشمه^۲، دررو^۳، دروازه^۴ و بستر^۵ می‌باشد. وقتی به دررو نسبت به چشمه ولتاژ اعمال شود، الکترون‌ها از چشمه به دررو جاری می‌شوند. اتصال فلز به اکسید، دروازه نامیده می‌شود. ماسفت‌ها شامل دو نوع کانال^۶ n و کانال p می‌باشند. اگر بستر، نیمرسانای نوع p، و چشمه و دررو دو ناحیه‌ی n+ باشند؛ قطعه یک ماسفت کانال n است؛ ولی اگر بستر، نیمرسانای نوع n، و چشمه و دررو دو ناحیه‌ی p+ باشند؛ قطعه، یک ماسفت کانال p است. هر دو ماسفت کانال n و کانال p کاربردهای زیادی دارند؛ ولی نوع کانال n، به دلیل بیشتر بودن تحرک^۷ الکترون در مقایسه با تحرک حفره در لایه سیلیکون، عموماً ترجیح داده می‌شود. چشم‌اندازی از یک ماسفت کانال n در شکل (۱-۱) نشان داده شده است.

پارامترهای اساسی قطعه عبارتند از:

۱ Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor(MOSFET)

۲ source

۳ drain

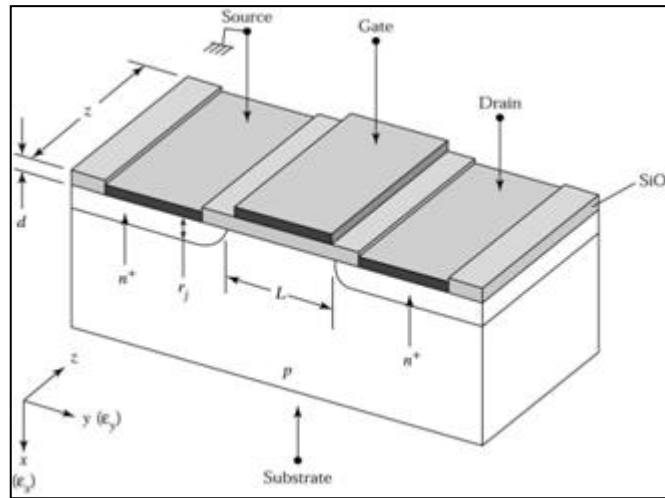
۴ gate

۵ substrate

۶ channel

۷ mobility

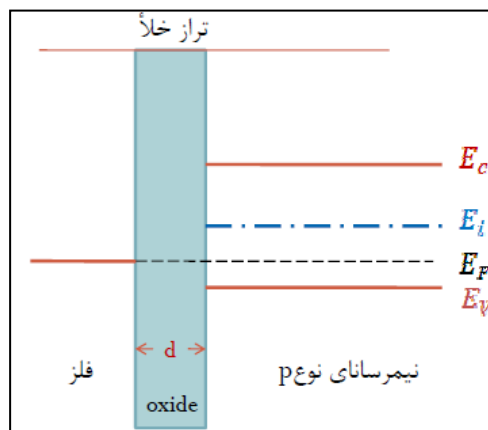
طول کانال L که فاصله‌ی بین دو پیوندگاه $n^+ - p$ فلز گونه می‌باشد، پهنای کانال Z ، ضخامت اکسید d ، عمق پیوندگاه r_j و آلایش زمینه N_A هستند.



شکل (۱-۱). نمایی از یک ماسفت کانال n

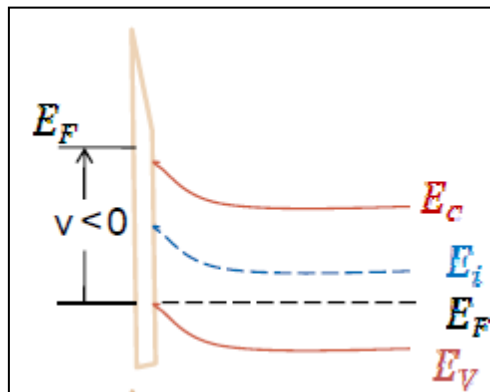
(۳-۱) اصول عملیات

وقتی که هنوز هیچ ولتاژی به قطعه اعمال نشده نوارهای انرژی تخت هستند. این حالت در شکل (۲-۱) نشان داده شده است.



شکل (۲-۱). نمودار نوار انرژی ماسفت در حالت $V=0V$

وقتی قطعه با ولتاژ مثبت یا منفی بایاس شود؛ ممکن است سه حالت در سطح نیمرسانا به وجود آید. وقتی ولتاژ منفی ($v < 0$) به دروازه اعمال شود؛ نظیر آن چه در سمت چپ شکل (۳-۱) نشان داده شده است؛ نوارهای نزدیک سطح نیمرسانا به طرف بالا خم می‌شوند.



شکل (۳-۱). نمودار نوار انرژی در حالت انبارش

برای ماسفت ایده‌آل، بدون توجه به مقدار ولتاژ اعمال شده هیچ جریانی در قطعه جاری نمی‌شود و بدین ترتیب تراز فرمی در نیمرسانا ثابت خواهد ماند. چگالی حامل در نیمرسانا طبق رابطه (۱-۱) به اختلاف انرژی $E_i - E_F$ بستگی دارد. [۱]

$$P_p = n_i e^{(E_i - E_F) / KT} \quad (1-1)$$

در رابطه (۱-۱) چگالی حفره، n_i تراکم حامل ذاتی، K ثابت بولتزمن و T دما می‌باشد. خمش رو به بالای نوارهای انرژی در سطح نیمرسانا موجب افزایشی در اختلاف انرژی $E_i - E_F$ می‌شود که به نوبه‌ی خود به تراکمی افزوده، تجمعی از حفره‌ها در نزدیک سطح اکسید نیمرسانا منجر می‌شود. این امر حالت انبارش نامیده می‌شود [۱].

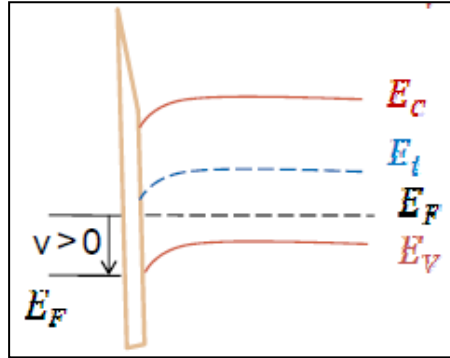
وقتی ولتاژ مثبت کوچکی ($v > 0$) به قطعه اعمال می‌شود؛ مطابق شکل (۴-۱) نوارهای انرژی به طرف پایین خم می‌شوند و حامل‌های اکثریت (حفره‌ها) تخلیه می‌شوند. این وضع حالت تهی (تخلیه) نامیده می‌شود. بار فضایی در واحد مساحت Q_{sc} در نیمرسانا به وسیله بار ناحیه تخلیه^۱ به دست می‌آید.

^۱ depletion region

$$Q_{sc} = -qN_A W$$

(۲-۱)

در این رابطه W پهنای ناحیه تهی سطح است.

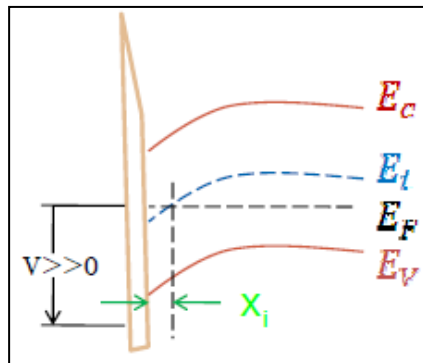


شکل (۴-۱). نمودار نوار انرژی در حالت تخلیه

وقتی پتانسیل مثبت بزرگتری اعمال شود؛ نوارها بیشتر به پایین خم می‌شوند؛ (شکل (۵-۱)) به طوری که تراز ذاتی E_i تراز فرمی را در سطح قطع می‌کند. تراکم الکترونی مطابق رابطه (۳-۱) به طور نمایی به اختلاف پتانسیل انرژی $E_F - E_i$ بستگی دارد. [۱]

$$n_p = n_i e^{(E_F - E_i) / kT} \quad (۱-۳)$$

در موقعیت نشان داده شده در شکل (۵-۱)، $(E_F - E_i) > 0$ است؛ بنابراین تراکم الکترونی n_p در سطح بزرگتر از n_i است و تراکم حفره که از معادله (۱-۱) به دست می‌آید کمتر از n_i می‌شود؛ یعنی تعداد الکترون‌ها (حامل‌های اقلیت) در سطح بزرگتر از تعداد حفره‌ها (حامل‌های اکثریت) است؛ بدین ترتیب سطح وارونه می‌شود. این وضعیت حالت وارونی نامیده می‌شود. در شکل (۵-۱) پهنای وارونی با x_i نشان داده شده است. مقدار x_i همیشه خیلی کوچکتر از پهنای لایه تهی سطح است.



شکل (۵-۱). نمودار نوار انرژی در حالت وارونی