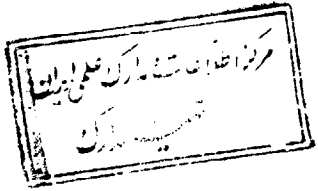


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

٣٤٩١٥

۱۰ / ۱۲ / ۱۳۷۹



طراحی و ساخت دیود شاتکی با نیمه هادی GaAs
توسط دستگاه MBE

012012

محمود سام کن

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

در رشته مهندسی برق - الکترونیک

استاد راهنما: دکتر سید احمد محدث کسائی

تابستان ۱۳۷۹

۳۴۶۷۵

چکیده:

در این پایان نامه گزارشی از ساخت و تست یک دیود شاتکی تولید شده با نیمه هادی GaAs توسط دستگاه روشستی پرتو ملکولی (MBE) ارائه میگردد.

جهت ساخت این دیود، بعد از رشد اپیتاکسی GaAs روی زیرلایه تک بلور با جهت (100) فلز آلومینیوم را در خلاء بسیار بالا روی لایه مذکور نشانده، تا پیوند شاتکی تشکیل گردد.

برای انجام تست ابتدا پروفایل ناخالصی، قابلیت تحرک و مقاومت مخصوص لایه n رشد داده شده را بدست آورده و پس از نشانیدن لایه آلومینیوم مشخصه I/V و C/V دیود را ترسیم و با برآزش منحنی‌های بدست آمده با روابط تئوری ضریب نزدیکی به ایده‌آل، جریان نشتی، خازن پیوند و مقاومت سری دیود را یافته و فرکانس قطع را محاسبه می‌کنیم.

در نهایت میتوان نشان داد که مقادیر بدست آمده با نتایج دیگران تطابق داشته و دیود رشد داده شده مشخصه های الکتریکی خوبی را در مقایسه با روشهای دیگر از خود نشان می‌دهد.

با تشکر از استاد گرانقدر، دکتر کسائی
که با راهنمایی‌های مفید خود، بنده را در
انجام این پروژه یاری دادند. امیدوارم که در
تمام مراحل زندگی موفق و مؤید باشند.

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۴-۱	پیش‌گفتار
۳۰-۵	فصل اول: تئوری دیود شاتکی و اصول کار
۵۴-۳۱	فصل دوم: رانشستی پرتو مولکولی (MBE)
۷۸-۵۵	فصل سوم: مشخصه نگاری الکتریکی
۱۰۵-۷۹	فصل چهارم: آزمایشات
۱۴۴-۱۰۶	فصل پنجم: پارامترهای مهم در رشد و مشخصه نگاری دیود شاتکی
۱۴۷-۱۴۵	فصل ششم: استنتاج
	مراجع

صفحه	عنوان شکل
فصل اول:	
۸	۱-۱ تراز فرمی اتصال فلز - نیمه‌هادی نوع n
۹	۱-۲ تراز فرمی اتصال فلز - نیمه‌هادی نوع p
۱۰	۱-۳ اعمال ولتاژ به سد شاتکی
۱۱	۱-۴ دیاگرام باند سد شاتکی رونشستی
۱۲	۱-۵ اثر حالت‌های سطحی در نیمه‌هادی‌های مختلف
۱۳	۱-۶ چهار روند انتقال جریان
۱۸	۱-۷ تونل زنی الکترون از نیمه‌هادی بسمت فلز
۱۹	۱-۸ تأثیر ولتاژ اعمالی روی نفوذ حاملها
۲۲	۱-۹ روش کاهش و یا افزایش ارتفاع سد
۲۳	۱-۱۰ ارتفاع سد موثر برحسب E
۲۴	۱-۱۱ فشار بخار عناصر برحسب درجه حرارت
۲۵	۱-۱۲ ساختار مختلف اتصال فلز-نیمه هادی
۲۷	۱-۱۳ مقاومت سری اتصال برحسب ولتاژ
۲۸	۱-۱۴ فرکانس قطع برحسب قطر اتصال و غلظت دوپنت
۲۹	۱-۱۵ مدار معادل سیگنال کوچک دیود شاتکی
فصل دوم:	
۳۴	۲-۱ شمای کلی سل دستگاه
۴۰	۲-۲ الگوهای میله‌ای روی صفحه فلورسانس
۴۲	۲-۳ بازسازیهای مختلف سطح برحسب درجه حرارت ذیرلایه و شار آرسنیک
۴۵	۲-۴ نوسانات الگوی RHEED در شارهای آرسنیک و درجه حرارت‌های مختلف
۴۷	۲-۵ بازسازی (2x8)
۴۸	۲-۶ نوسانات هنگام شروع رشد
۴۹	۲-۷ شدت نوسانات برحسب زوایای قطبی
۵۰	۲-۸ تغییرات شدید فاز نوسانات برحسب زاویه تابش
۵۱	۲-۹ نرخ رشد نرمالیزه برحسب درجه حرارت زیرلایه
۵۳	۲-۱۰ مدل‌های واکنش Ga با As ₂ و As ₄

فهرست تصاویر

صفحه	عنوان شکل
فصل سوم:	
۵۷	۳-۱ شمای کلی نمونه هال
۶۰	۳-۲ وابستگی ثابت هال با درجه حرارت
۶۴	۳-۳ قابلیت تحرک هال بر حسب $N_A + N_D$
۶۵	۳-۴ قابلیت تحرک بر حسب حرارت و مکانیزمهای پراکندگی
۶۶	۳-۵ چهارشکل نمونه هال
۶۹	۳-۶ اتصال نیمه‌هادی - الکتروولیت
۷۱	۳-۷ اعمال ولتاژ به اتصال نیمه‌هادی - الکتروولیت
۷۲	۳-۸ شمای کلی سلول الکتروشیمیایی
۷۴	۳-۹ مشخصه‌های I/V و C/V نیمه‌هادی نوع n
۷۵	۳-۱۰ مشخصه‌های I/V و C/V نیمه‌هادی نوع p
۷۷	۳-۱۱ مدار معادل اتصال نیمه‌هادی - الکتروولیت
فصل چهارم:	
۸۹	۴-۱ چگالی جریان بر حسب ولتاژ
۹۰	۴-۲ چگالی جریان بر حسب ارتفاع سد
۹۱	۴-۳ $1/C^2$ بر حسب ولتاژ اعمالی
۹۲	۴-۴ نیمه‌هادی با سطح دوپینگ عمیق و غیر عمیق
۹۳	۴-۵ $1/C$ بر حسب ولتاژ با فرکانسهای مختلف
۹۴	۴-۶ انرژی فعال ساز بر حسب جریان مستقیم
۹۷	۴-۷ جریان بر حسب ولتاژ
۹۸	۴-۸ خازن بر حسب ولتاژ
۹۹	۴-۹ خازن بر حسب ولتاژ
۱۰۰	۴-۱۰ لگاریتم غلظت ناخالصی بر حسب عمق
۱۰۱	۴-۱۱ لگاریتم غلظت ناخالصی بر حسب ناحیه تخلیه
فصل پنجم:	
۱۰۶	۵-۱ چگالی ترازها
۱۰۷	۵-۲ حالت‌های اشغال شده
۱۰۹	۵-۳ اتصال فلز-نیمه‌هادی با لایه میانی عایق
۱۱۱	۵-۴ اتصال فلز-نیمه‌هادی با لایه میانی اکسید
۱۱۳	۵-۵ چگالی جریان بر حسب ولتاژ
۱۱۴	۵-۶ چگالی جریان بر حسب ولتاژ

فهرست تصاویر

صفحه	عنوان شکل
۱۱۵	۵-۷ ارتفاع سد برحسب حرارت و ضخامت لایه میانی
۱۲۱	۵-۸ لگاریتم جریان برحسب ولتاژ
۱۲۵	۵-۹ تأثیر پارامترها بر مشخصه الکتریکی
۱۲۶	۵-۱۰ تأثیر پارامترها بر مشخصه الکتریکی اتصال شاتکی
۱۳۲	۵-۱۱ نوسانات الگوی RHEED
۱۳۶	۵-۱۲ مشخصه I/V و C^2/V
۱۳۷	۵-۱۳ مشخصه $\text{Log}(J_0/T^2)$ برحسب $1/T$
۱۳۸	۵-۱۴ صفحه Vicinal
۱۳۹	۵-۱۵ شدت پرتو برحسب زمان و درجه حرارت
۱۴۱	۵-۱۶ انرژی پتانسیل الکترون در فاصله X
۱۴۴	۵-۱۷ کاهش ارتفاع سد برحسب جذر نفوذ پذیری

فهرست جداول

صفحه	عنوان جدول
	پیشگفتار
۲	I مقایسه Si با GaAs
۴	II مقایسه MBE با سایر روشها
	فصل اول:
۱۵	۱-۱ مقدار \bar{A}/A^*
۲۰	۱-۲ سدهای شاتکی معمول برای نیمه‌هادی و فلزات مختلف
	فصل پنجم:
۱۲۲	۵-۱ تغییرات سد شاتکی
۱۲۹	۵-۲ مقدار ارتفاع سد و n برای سه نوع بازسازی

پیش گفتار:

در چند دهه اخیر نیمه هادی گالیم آرسناید (GaAs) در صنایع ساخت قطعات الکترونیکی و آزمایشگاههای مختلف دانشگاهی مورد توجه بوده است. این نیمه هادی در سال ۱۹۲۰ توسط Goldschmidt شناخته شده و شبکه Zinblende آن معرفی گردید. این ماده بشدت خواص مناسب خود را در صنعت نیمه هادی بروز داده و خود را بعنوان یکی از مواد مهم در این صنعت معرفی کرد. اگرچه نیمه هادی سیلیسیم عمده ترین ماده اولیه ساخت ادوات الکترونیکی بشمار رفته و بیش از نود درصد قطعات از این عنصر ارزشمند که در طبیعت نیز به وفور موجود است ساخته می شوند. لیکن برای برخی از سیستمهای الکترونیکی که مورد مصرف ویژه داشته و یا نیاز به قابلیت تحمل فرکانس زیادی (در حدود گیگاهرتز) داشته باشند نیمه هادی سیلیسیم کارائی لازم را ندارد. از اینرو نیمه هادیهای مرکب از عناصر ستونهای ۳ و ۵ جدول تناوبی همچون گالیم آرسناید و نظیر آنها مورد استفاده قرار می گیرد.

البته اولین سئوالی که به ذهن هر شخص می رسد این است که چرا گالیم آرسناید؟ این ماده به دلیل داشتن خواص الکتریکی مناسب مانند قابلیت تحرک بالا، امکان تولید نور و ... در صنعت الکترونیک جایگاه برتری دارد. اگر بخواهیم خواص این نیمه هادی با نیمه هادی سیلیکون را مقایسه کنیم می توان جدول زیر را ارائه داد. [24]

که هر کدام به نوبه خود عامل برتری این نیمه هادی خواهد بود. البته این نیمه هادی نسبت به Si معایبی نیز دارد که از آنها می توان به قابلیت تحرک کم حفره، مفید نبودن اکسید ذاتی GaAs، قیمت بالای ویفر، شکنندگی، قابلیت هدایت گرمایی کم و نویز بالا در فرکانسهای پائین اشاره کرد که این خواص نیز در تکنولوژی و انتخاب نیمه هادی برای محققین تعیین کننده است.

	GaAs	Si
Electron mobility ($N_D = 10^{17} \text{cm}^{-3}$)	4000	800 $\text{cm}^2/\text{V/s}$
Electron saturation velocity	1.4×10^7	$6.5 \times 10^6 \text{cm/s}$
Hole mobility ($N_A = 10^{17} \text{cm}^{-3}$)	250	350 $\text{cm}^2/\text{V/s}$
Dielectric constant	12.6	12
Intrinsic resistivity	10^9	$10^6 \Omega \cdot \text{cm}$
Energy gap	1.43 (direct)	1.12 eV (indirect)
Schottky barrier height	0.7 - 0.8	0.4 - 0.6V
Thermal conductivity	0.9	1.5 W/cm/K

جدول I

به دلایل ذکر شده در جدول فوق برای ساخت المانهای فرکانسی بالا از نیمه هادی GaAs استفاده می کنند. ما نیز در این پروژه برای ساخت دیود شاتکی از این ماده استفاده خواهیم کرد. این دیود که از اتصال یک فلز به نیمه هادی حاصل می شود ابتدا در سال ۱۸۷۴ شناخته شد و در سال ۱۹۳۸ شاتکی تئوری خود را در این زمینه ارائه داد که بر این اساس سدهای این اتصال به سد شاتکی معروف گردید. در این اتصال پارامترهای مهمی جهت بررسی عبور حاملها از این سد وجود دارد که از آنها میتوان به توابع کار مواد، وابستگی الکترون و پتانسیل اعمالی و ... اشاره نمود که هر کدام از آنها به تنهایی دقت و ظرافت خاصی را برای طراحی مناسب طلب می کند. تئوریهای نیز برای عبور الکترون از نیمه هادی به سمت فلز وجود دارد که شامل مدل گسیل ترمیونیکی و مدل دیفیوژن می باشد که در فصل یک به آن خواهیم پرداخت.

برای ساخت دیود ذکر شده که از ماده GaAs ساخته می شود باید از دستگاه MBE استفاده کرد. البته روشهای مختلف روشی وجود دارد که به دلایل ذکر شده در جدول زیر این روش بهترین است. در این فرآیند ذرات لازم برای رشد روی ویفر تبخیر شده و بر اثر انرژی جنبشی بصورت یک اشعه ملکولی بسمت زیر لایه حرکت می کنند. زیر لایه در یک خلاء نگه داشته شده و پرتوهای ملکولی به سطح آن برخورد می کنند.

بعنوان مثال در هنگام رشد لایه های AlGaAs روی بستر GaAs عناصر Al و Ga و As همراه با ناخالصی ها در سل هائی بطور جداگانه گرم می شوند. سپس پرتوهای ملکولی این عناصر پس از باز شدن شاتر به طرف سطح زیر لایه حرکت می کنند. سرعت برخورد این پرتوها با سطح به دقت قابل کنترل بوده و حاصل آن رشد بلورهایی با کیفیت بالا است. در این روش، تغییرات تیز نوع ناخالصی را می توان توسط سرعت عملکرد شاترها کاملاً کنترل کرد. در حالت ایده آل سرعت رشد لایه توسط این سیستم در حدود $1\mu/h$ است. این نرخ رشد توسط نوسانات گرفته شده از سیستم RHEED بر حسب زمان تعیین می گردد.

در این پایان نامه در فصل اول به تئوری دیود شاتکی که شامل انرژی ناحیه ممنوع و اصول کار آن می باشد می پردازیم. در فصل دوم سیستم MBE و روش رشد آن توضیح داده می شود، در فصل سوم تئوری و روشهای مختلف لازم برای مشخصه نگاری شامل اندازه گیری C-V و اثر هال بررسی می گردد. در فصل چهارم مراحل انجام این پروژه که شامل آماده سازی نمونه و رشد و مشخصه نگاری می باشد توصیف می شود. در فصل پنجم بحث پیرامون پارامترهای مختلف اعم از ثابت ریچاردسون، حالت های سطحی و فاکتورهای موثر بر مشخصه الکتریکی دیود شاتکی انجام می گیرد و در انتها نتیجه گیری ارائه خواهد شد.

	Mobility (77K)	Interface	Flexibility	Uniformity	Safety
Hydride VPE	200,000	60 Å	no Al and Sb alloys	fair	hydride toxicity
Chloride VPE	200,000	30 Å	Al and Sb alloys difficult	?	no big problem
LPE	200,000	100 Å	Al/In alloys impossible	poor	no problem
CBE	100,000	3 Å	all compounds	very good	toxicity
MOVPE	205,000	3 to 5 Å	all compounds	good	high toxicity
MBE	220,000	3 Å	few P compounds	very good	no problem

جدول II

فصل اول



تئوری دیود شاتکی

فصل اول: تئوری دیود شاتکی

مقدمه:

اولین بحث و بررسی روی اتصال فلز- نیمه هادی و خواص یکسوسازی در سال ۱۸۷۴ توسط Braun انجام گرفت و ارتباط این خاصیت را با وضعیت سطح و ولتاژ اعمالی ارائه کرد. در سال ۱۹۰۴ استفاده عملی از این اتصال شروع و بکار گرفته شد. سپس در سال ۱۹۳۱ ویلسون تئوری انتقال حاملهای نیمه هادی را براساس تئوری باند جامدها ارائه داد و آن را به این نوع اتصال ربط داد. چندین سال بعد در سال ۱۹۸۳ شاتکی، افزایش پتانسیل سد براساس بارهای پایدار در نیمه هادی را عنوان کرد که پس از عنوان این مطلب، سد مزبور بعنوان سد شاتکی نامگذاری شد. البته مدل تئوری مناسب دیگری نیز بعدها ارائه شد که به نام Mott نامیده شد. [1]

اصولاً، بسیاری از ویژگیهای مفید یک پیوند pn را میتوان بسادگی با تشکیل یک سد اتصال مناسب فلز - نیمه رسانا بدست آورد. عموماً این پیوند در یکسوسازهای بسیار سریع مفید می باشد که البته باید قادر به تشکیل اتصالات غیر یکسوساز (اهمی) نیز باشیم. بطریق دیگر می توان گفت که اصولاً برای خارج کردن یک الکترون از تراز فرمی به سطح خلاء انرژی $q\phi_m$ لازم است که برای مثال این مقدار برای سطوح بسیار تمیز $4/3 \text{ Al}$ الکترون ولت می باشد، وقتی این عمل با یک میدان الکتریکی اعمال شده از بیرون ترکیب شود، تابع کار موثر مقداری کاهش می باشد. این کاهش سد اثر شاتکی نامیده شده و این اصطلاح در مبحث سدهای پتانسیل بوجود آمده در اتصالات فلز- نیمه هادی استفاده میشود. بنابراین از اتصالات یکسوساز معمولاً بنام دیودهای شاتکی یاد می شود. در این بخش چگونگی بوجود آمدن این سدها را خواهیم دید که البته در ابتدا سدهای ایجاد شده در پیوندهای ایده آل فلز- نیمه رسانا را در نظر گرفته و سپس عوامل موثر در تغییر ارتفاع سد را بررسی می کنیم.