

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده فیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد فیزیک

گرایش حالت جامد

بررسی خواص الکتریکی سیلیکون متخلخل و تاثیر آن بر عملکرد قطعات نیمرسانا (آشکارسازها با سد شاتکی)

استاد راهنما:

دکتر حسین عشقی

استاد مشاور:

دکتر فرشید رئیسی

عضو هیات علمی دانشکده برق دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

نگارش:

مریم محمدی

بهمن ۱۳۸۴

به مادرم

به خاطر گرمای دست هایش

و پدرم

برای حمایت هایش

تشکر و قدردانی

چون به کار خود فکر می کنم، دریای خوف موج می زند
و چون در کرم او می نگرم همتم سینه به اوج می زند.
قبل از هر چیز خداوند را به خاطر لطف و عنایت بی مثالش شکر گفته که حقیر را در زمره علم آموزان قرار داد
و سختی ها را بر من آسان نمود. بی شک بدون لطف و عنایت او،
حقیر را در طوفان حوادث یارای ایستادگی نبود.

اکنون که با تاییدات خداوند متعال دوره ای دیگر از تحصیل را پشت سر می گذارم و از آنجا که دست یابی به این
مهم در سایه محبت، فداکاری و بزرگواری عزیزانی میسر گردیده است که هر یک نقش به سزایی در رسیدن به این
مرحله داشته اند، هرچند واژه ها از بیان شکوه محبت و لطف این بزرگوارن عاجزند، لکن به رسم ادب لطفشان را ارج
نهاده و برخود واجب می دانم که از زحمات بی شائبه خانواده به خصوص مادر عزیزم، آبی لحظه هایم، آنکه دوشادوش
من در کلیه مراحل تحصیل، حقیر را با عشق و علاقه تشویق و حمایت می کنند، از صمیم قلب تشکر کرده و بر
دستانش بوسه زنم. سپس از آنجا که کلیه دستاوردهای این پایان نامه را مرهون راهنمایی های ارزنده استاد فرزانه و
بزرگوار **آقای دکتر حسین عشقی** که روحیه پژوهش را در این حقیر زنده کرد می باشم؛ لازم می دانم از ایشان به
خاطر رهنمودهای گهربار و صبر و حوصله فراوان در پاسخ به سئوالات و چشم پوشی از خطاها و درک شرایط حقیر در
طول این تحقیق، نهایت قدردانی و تشکر را به عمل آورده و به خاطر نواقصی که در طول کار داشتم از صمیم قلب
عذرخواهی نمایم. همچنین از استاد فرزانه **آقای دکتر فرشید رئیسی** که با نظرات کارگشا و حکیمانه خویش و در
اختیار قرار دادن منابع مورد نیاز در پیشبرد و تکمیل این پایان نامه نقش به سزایی داشتند، صمیمانه تشکر و
سپاسگذاری می نمایم. بدون شک به انجام رساندن این پایان نامه در سایه مساعدت و آموزشهای حکیمانه این
بزرگواران میسر گردیده است.

از هیات محترم داوران به خاطر قبول زحمت نقد و بررسی پایان نامه، کمال تشکر را دارم؛ مایه افتخار است که این
اثر در معرض داوری عالمانه آن بزرگواران قرار گرفته است. در انتها زحمات کلیه اساتید دانشکده فیزیک در مراحل
مختلف تحصیل را پاس داشته و مراتب تشکر قلبی خویش را از آموزش های حکیمانه شان تقدیم آن بزرگواران
می نمایم. امید که با استعانت از خداوند و ادامه دادن این راه بتوانم قدردانشان بوده و لبخند رضایت را بر لبانشان
بنشانم.

چکیده

در این پروژه پس از معرفی و بررسی سازوکارهای دخیل در ترابری حامل ها در اتصالات فلز/ Si غیر متخلخل در شرایط تاریکی و در بایاس مستقیم و وارون، به شناخت سازوکارهای یاد شده در دیودهای شاتکی فلز/ Si متخلخل در همان شرایط پرداختیم. داده های تجربی نشان می دهد که در اتصالات شاتکی فلز/ Si در شرایط بایاس وارون در نمونه نوع n غیر متخلخل عموماً رفتار مشخصه جریان- ولتاژ اشباعی است. لکن در نمونه های نوع p و n متخلخل این رفتار همواره غیر اشباعی است. گزارش های منتشر شده این رفتار غیر اشباعی را به فرایند گسیل گرما- یونی با ضرایب ایده آلی بزرگتر از ۱۰۰ نسبت داده اند. این ضرایب ایده آلی بزرگ به چگالی حالت های سطحی بالا در فصل مشترک پیوندگاه فلز/ Si متخلخل نسبت داده می شود. مقادیر ارتفاع سد شاتکی که از داده های جریان- ولتاژ در شرایط بایاس مستقیم به دست می آید حاکی از آن است که در اتصالات فلز/ Si متخلخل نوع n در حدود 0.5 eV و برای نوع p ، با توجه به جنس فلز اتصال بین $0.8-1.2$ الکترون ولت می باشد. از آنجا که برای بکارگیری دیودهای شاتکی در آشکارسازی تابش مادون قرمز، کوچکی ارتفاع سد شاتکی پارامتر مهمی است و با توجه به مقدار این ارتفاع در اتصالات سیلیساید ($PtSi$) با سیلیکون متخلخل نوع p ، که در حدود 0.12 eV می باشد، استفاده از این فلز در آشکارسازهای شاتکی مناسب تر است.

با مقایسه مشخصه های جریان- ولتاژ تحت تابش آشکارساز $Si/PtSi$ غیر متخلخل و متخلخل نوع p در شرایط بایاس وارون، مشخص می شود که مقیاس محور جریان از μA به mA افزایش می یابد. همچنین از مقایسه منحنی پاسخ در قطعه غیر متخلخل و متخلخل ملاحظه می شود که پاسخ نمونه متخلخل در ناحیه طول موجی $1/5$ الی 4 میکرومتر در حدود یک مرتبه بزرگی تغییر پیدا می کند. جالب توجه آنکه در طول موج های پایین تر از $1/5\text{ }\mu m$ پاسخ به شدت افزایش یافته به طوری که در طول موج $0.87\text{ }\mu m$ به حدود 1000 برابر می رسد. علاوه بر این در طول موج های بالاتر از طول موج قطع در نمونه های غیر متخلخل، منحنی پاسخ در نمونه متخلخل گسترش می یابد. به نظر ما ویژگی نخست می تواند ناشی از ناهمواری های سطح و همچنین افزایش جذب سیلیساید در اثر متخلخل سازی سیلیکون و دومین اثر حاصل فرایند تونل زنی حفره ها از داخل سد شاتکی باشد.

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
آ	تشکر و قدردانی
ب	چکیده
ج	فهرست مطالب
و	فهرست شکل ها
ی	فهرست جدول ها
۱	پیش گفتار

گفتار یکم - مروری بر مقالات

۳	۱-۱- تاریخچه سیلیکون متخلخل
۴	۲-۱- سیلیکون متخلخل چیست؟
۴	۱-۲-۱- تقسیم بندی سیلیکون متخلخل به لحاظ ابعاد
۵	۲-۲-۱- تقسیم بندی سیلیکون متخلخل به لحاظ شکل
۶	۳-۱- روش های متداول برای ساخت سیلیکون متخلخل
۹	۱-۳-۱- پارامترهای مؤثر در کیفیت سیلیکون متخلخل
۱۰	۴-۱- برخی ویژگیهای الکتریکی سیلیکون متخلخل
۱۰	۵-۱- چرا سیلیکون متخلخل؟
۱۲	۶-۱- سیلیکون متخلخل و کاربردهای آن
۱۳	مراجع

گفتار دوم - دیودهای شاتکی فلز - نیمرسانا

۱۵	مقدمه
----	-------------

۱۵	۱-۲- اتصال های شاتکی
۲۰	۲-۲- سازوکارهای انتقال جریان در دیودهای شاتکی فلز- نیمرسانا
۲۰	۱-۲-۲- گسیل گرما- یونی الکترون ها از بالای سد پتانسیل از سمت نیمرسانا به سمت فلز
۲۲	۲-۲-۲- تونل زنی کوانتومی از داخل سد
۲۴	۳-۲-۲- باز ترکیب درون تهی لایه
۲۵	۳-۲- عوامل انحراف مشخصه وارون از وضعیت ایده آل
۲۵	۱-۳-۲- وابستگی ارتفاع سد شاتکی به میدان الکتریکی
۲۶	۲-۳-۲- اثر تونل زنی
۲۶	۴-۲- سازوکارهای شکست پیوندگاه
۲۷	۱-۴-۲- شکست زبری
۲۷	۲-۴-۲- شکست بهمنی
۲۹	۵-۲- اثر انحنای پیوندگاه روی ولتاژ شکست
۳۰	۶-۲- اتصال های فلز- سیلیکون
۳۰	۷-۲- مختصری از ویژگی های سیلیکون
۳۰	۱-۷-۲- ساختار بلوری
۳۱	۲-۷-۲- وابستگی مقاومت ویژه زیرلایه به تراکم ناخالصی
۳۲	مراجع

گفتار سوم- آشکارسازهای نوری شاتکی

۳۴	مقدمه
۳۵	۱-۳- آشکارسازهای شاتکی فلز/ نیمرسانا
۳۶	۱-۱-۳- نحوه آشکارسازی در آشکارساز شاتکی $PtSi/Si$
۳۷	۲-۱-۳- طول موج قطع در آشکارساز شاتکی $PtSi/Si$
۳۸	۳-۱-۳- پاسخ در آشکارساز شاتکی $PtSi/Si$
۴۰	مراجع

گفتار چهارم- بررسی مشخصه $I-V$ دیودهای شاتکی حاصل از اتصال فلز با Si معمولی و متخلخل

۴۳	 مقدمه
۴۴	 ۱-۴- بررسی مشخصه $I-V$ دیودهای سد شاتکی فلز/ سیلیکون نوع n
۴۵	 ۱-۱-۴- مشخصه $I-V$ دیودهای شاتکی در شرایط بایاس مستقیم
۴۹	 ۲-۱-۴- مشخصه $I-V$ دیودهای شاتکی در شرایط بایاس وارون
۵۳	 ۲-۴- بررسی مشخصه $I-V$ دیودهای سد شاتکی فلز/ سیلیکون نوع p
۵۴	 ۱-۲-۴- مشخصه $I-V$ دیودهای شاتکی در شرایط بایاس مستقیم
۵۸	 ۲-۲-۴- مشخصه $I-V$ دیودهای شاتکی در شرایط بایاس وارون
۶۳	 ۳-۴- نتیجه گیری
۶۴	 مراجع

گفتار پنجم- بررسی تاثیر متخلخل سازی بر عملکرد آشکارساز $PtSi/Si$

۶۷	 مقدمه
۶۷	 ۱-۵- مشخصه $I-V$ آشکارساز $PtSi/p-Si$ تحت تابش
۶۸	 ۲-۵- بررسی مشخصه پاسخ در آشکارساز شاتکی $PtSi/p-Si$
۷۰	 ۱-۲-۵- بررسی کیفی عملکرد و علل افزایش پاسخ آشکارساز $Si/PtSi$ متخلخل نوع p
۷۳	 ۳-۵- نتیجه گیری
۷۴	 مراجع

فهرست شکل ها

شکل	صفحه
شکل ۱-۱- برشی از یک لایه سیلیکون متخلخل	۴
شکل ۲-۱- طرح ساده ای از سطح سیلیکون متخلخل	۵
شکل ۳-۱- اشکال گوناگون حفره های خورده شده از سمت چپ: استوانه ای، بطری، قیفی،.. سطح مقطع مربعی و مثلثی	۶
شکل ۴-۱- انواع محفظه های مورد استفاده در روش خوردگی الکتروشیمیایی: (الف) محفظه ساده، (ب) محفظه تکی، (ج) محفظه دوگانه	۷
شکل ۵-۱- طرح شماتیک محفظه مورد استفاده در روش (الف) خوردگی شیمیایی و (ب) تولید جریان داخلی توسط عناصر گالوانیک	۸
شکل ۶-۱- به ازای غلظت HF معین، افزایش چگالی جریان آنودایز سبب افزایش درصد تخلخل می شود	۹
شکل ۷-۱- پیک فوتولومینسانس سیلیکون متخلخل با افزایش درصد تخلخل به سمت انرژی های بالاتر جابجا می شود	۱۱
شکل ۱-۲- نوار انرژی فلز و نیمرسانای نوع n در شرایط تعادل گرمایی (الف): بدون اتصال و (ب) برقراری اتصال، تراز انرژی فرمی در دو ماده در یک سطح قرار گرفته است	۱۶
شکل ۲-۲- ارتفاع سد شاتکی فلز/ Si نوع n برحسب تابع کار فلز	۱۸
شکل ۳-۲- نمودار نوار انرژی فلز/ نیمرسانای نوع n و نوع p در (الف): تعادل گرمایی، (ب): بایاس مستقیم و (ج): بایاس وارون	۱۹
شکل ۴-۲- سازوکارهای ترابری حامل ها در دیودهای شاتکی	۲۰
شکل ۵-۲- گسیل گرما- یونی الکترون ها از بالای سد پتانسیل در شرایط (الف): تعادل گرمایی، (ب): بایاس مستقیم، (ج): بایاس وارون	۲۱

- شکل ۶-۲- طرح شماتیک سازوکار تونل زنی از طریق مراکز بازترکیب در تهی لایه در اتصال فلز/ نیمرسانای نوع n در بایاس مستقیم ۲۲
- شکل ۷-۲- اثر کاهش ارتفاع سد در بایاس خارجی. کاهش ارتفاع سد در بایاس مستقیم و وارون به ترتیب $\Delta\phi_F$ و $\Delta\phi_R$ است ۲۶
- شکل ۸-۲- اثر زبر در بایاس وارون. الکترون از طرف p به طرف n تونل زده است ۲۷
- شکل ۹-۲- طرح ساده ای نشان دهنده یونش برخوردی حامل ها ۲۸
- شکل ۱۰-۲- میزان یونش اندازه گیری شده برحسب میدان الکتریکی برای Si ۲۸
- شکل ۱۱-۲- لبه تیز در محل اتصال فلز- نیمرسانا ۲۹
- شکل ۱۲-۲- ولتاژ شکست برحسب تراکم ناخالصی برای پیوندگاه پله ای یکطرفه با شکل هندسی استوانه ای و کروی که در آن r_f شعاع انحنا پیوندگاه است ۲۹
- شکل ۱۳-۲- (الف) ساختار الماسی از دو شبکه fcc در هم فرورفته تشکیل شده است. (ب) آرایش چهاروجهی اتم ها در ساختار الماسی ۳۱
- شکل ۱۴-۲- مقاومت ویژه برحسب تراکم ناخالصی در Si ۳۱
- شکل ۱-۳- نوار انرژی آشکارساز $PtSi/p-Si$ ۳۵
- شکل ۲-۳- (الف): نحوه آشکارسازی در آشکارساز $PtSi/p-Si$ (ب): گسیل حفره های داغی که می توانند از سد شاتکی عبور کنند ۳۶
- شکل ۳-۳- طرح ساده ای از کسری از حامل ها در فضای اندازه حرکت که توانایی عبور از سد را دارند ۳۷
- شکل ۴-۳- طرح ساده شده کاواک نوری ۳۹
- شکل ۱-۴- نمودار تغییرات جریان برحسب تابعی از ولتاژ برای دیوهای شاتکی شماره ۱ و ۲ در جدول ۱-۴ ۴۵
- شکل ۲-۴- برگرفته از داده های شکل ۱-۴ به منظور تعیین ارتفاع سد شاتکی برای دیوهای شماره ۱ (مثلث) و شماره ۲ (مربع) در جدول ۱-۴ ۴۶
- شکل ۳-۴- مشخصه $I-V$ دیود شاتکی که از بازپخت آلیاژ $Al(Cu)$ با $PtSi$ (نمونه شماره ۱ در جدول ۱-۴) ساخته شده است. همانطور که پیداست شیب منحنی ها مستقل از دما است ۴۷

- شکل ۴-۴- مشخصه دیود شاتکی با Si متخلخل شماره ۱ در دمای اتاق. منحنی های خط چین نمایانگر انطباق نظریه گسیل گرما- یونی می باشد ۴۸
- شکل ۴-۵- مشخصه وارون دیود شاتکی ۲ و پیش بینی ترکیب سازوکار گسیل گرما- یونی و بازترکیب (خط چین) ۴۹
- شکل ۴-۶- مشخصه $I-V$ دیود شاتکی شماره ۱ جدول ۴-۱ که لایه فلزی آن با آلایژ $Al(Cu)$ آلائیده شده است. در ولتاژهای بزرگتر از $2/5V$ منحنی رفتار غیر اشباعی دارد ۵۰
- شکل ۴-۷- چگونگی به دست آوردن ثابت λ از روی منحنی های $\ln(I_r/V_r)$ بر حسب تابعی از $(V_D + V_r)^{-1/2}$ ۵۱
- شکل ۴-۸- تغییرات λ بر حسب تابعی از دما: مربع ها و خط چین به ترتیب نمایانگر نتایج محاسبات ما و مقادیر گزارش شده [۲] می باشد ۵۱
- شکل ۴-۹- مشخصه بایاس وارون دیود شاتکی (الف): شماره ۲ و (ب): شماره ۳ در دمای اتاق. منحنی خط چین نمایانگر انطباق در معادله (۲-۹) می باشد ۵۲
- شکل ۴-۱۰- مشخصه بایاس مستقیم دیود شاتکی (الف): نمونه شماره ۱ در جدول (۴-۶) در گستره دمایی ۹۰-۱۲۰ کلوین و (ب): نمونه های ۲، ۳، ۴ در دمای اتاق (در همین جدول). منحنی خط چین نمایانگر انطباق نظریه گسیل گرما- یونی می باشد ۵۵
- شکل ۴-۱۱- مشخصه بایاس مستقیم دیودهای شاتکی متخلخل (الف): شماره ۲ و (ب): شماره ۴ در دمای اتاق و (ج): شماره ۳. منحنی های خط چین نمایانگر انطباق نظریه گسیل گرما- یونی است. ۵۷
- شکل ۴-۱۲- مشخصه بایاس وارون نمونه (الف): شماره ۱ در گستره دمایی ۹۰-۱۲۰ کلوین و (ب): شماره ۵ در دمای اتاق ۵۹
- شکل ۴-۱۳- چگونگی به دست آوردن ثابت λ از روی منحنی های $\ln(I_r/V_r)$ بر حسب تابعی از $(V_D + V_r)^{-1/2}$. (الف): دیود شماره ۱ و (ب): دیود شماره ۵ ۶۰
- شکل ۴-۱۴- مشخصه وارون دیودهای شاتکی متخلخل ۱ و ۳. منحنی های خط چین نشان دهنده سازوکار TE است ۶۱
- شکل ۵-۱- مشخصه $I-V$ بایاس وارون آشکارساز $PtSi/p-Si$ در شرایط تاریکی و تحت تابش در دمای ۷۷ کلوین (الف): متخلخل و (ب) غیر متخلخل ۶۸

شکل ۵-۲- مشخصه پاسخ برحسب طول موج در دمای ۷۷ کلوین آشکارساز $Si / PtSi$ نوع p (الف): متخلخل و (ب): غیر متخلخل که در معادله فاولر به خوبی صدق کرده است..... ۶۹

شکل ۵-۳- برش عرضی آشکار سازی که در آن از Si (الف) غیر متخلخل و (ب) متخلخل استفاده شده است. توجه کنید که تعداد فوتون های تابشی برای هر دو قطعه یکسان است ۷۰

شکل ۵-۴- (الف) متخلخل کردن Si احتمال تزریق حفره های داغ را بیشتر می کند، (ب) طرح ساده ای نمایانگر کسری از حامل ها در فضای اندازه حرکت که توانایی عبور از سد را دارند ۷۲

شکل ۵-۵- حامل های داغ در فضای اندازه حرکت در تمام جهات قادرند از سد شاتکی عبور کنند. ۷۲

فهرست جدول ها

جدول	صفحه
جدول ۱-۱- تقسیم بندی سیلیکون متخلخل به لحاظ ابعادی	۵
جدول ۱-۲- تابع کار برخی از فلزات	۱۶
جدول ۲-۲- ارتفاع چند سد شاتکی بر حسب الکترون ولت	۱۷
جدول ۱-۴- برخی ویژگی های دیودهای فلز Si نوع n	۴۴
جدول ۲-۴- برخی ویژگی های دیودهای فلز Si متخلخل نوع n . مقادیر ذکر شده در داخل پرانتز در ستون درصد تخلخل پیش بینی ما مبتنی بر مطالب بخش ۱-۳-۱ است و مؤلف گزارشی در این مورد نداشته است	۴۴
جدول ۳-۴- مقادیر ضریب ایده آلی و ارتفاع سد محاسبه شده و مقادیر گزارش شده برای نمونه های غیر متخلخل جدول ۱-۴	۴۶
جدول ۴-۴- مقادیر محاسبه شده و گزارش شده (A) و تعداد مراکز تونل زنی در تهی لایه (R) .	۴۷
جدول ۵-۴- مقادیر ضریب ایده آلی و ارتفاع سد در دیود شاتکی با Si متخلخل	۴۸
جدول ۶-۴- برخی ویژگی های دیودهای فلز Si نوع p	۵۳
جدول ۷-۴- برخی ویژگی های دیودهای فلز Si متخلخل نوع p . مقادیر ذکر شده در داخل پرانتز در ستون درصد تخلخل پیش بینی ما مبتنی بر مطالب بخش ۱-۳-۱ است و مؤلف گزارشی در این مورد نداشته است	۵۴
جدول ۸-۴- مقادیر ضریب ایده آلی و ارتفاع سد محاسبه شده و مقادیر گزارش شده برای نمونه های غیر متخلخل جدول ۶-۴	۵۶
جدول ۹-۴- مقادیر ضریب ایده آلی و ارتفاع سد محاسبه شده و مقادیر گزارش شده برای نمونه های متخلخل جدول ۷-۴	۵۸
جدول ۱۰-۴- مقادیر ثابت λ محاسبه شده در دماهای مختلف برای دیود شماره ۱. همانطور که انتظار داریم با افزایش دما λ کوچکتر می شود	۶۱

جدول ۴-۱۱- مقادیر ضریب ایده آلی و ارتفاع سد محاسبه شده و مقادیر گزارش شده نمونه های

متخلخل جدول ۴-۷..... ۶۲

پیش گفتار

تا مدتها پس از ساخت سیلیکون متخلخل توسط اوهرلⁱ در سال ۱۹۵۶، تا سال ۱۹۹۰ که کنهامⁱⁱ PL ⁱⁱⁱ قویی از این ماده در دمای اتاق گزارش کرد این ماده به دست فراموشی سپرده شده بود. همین ویژگی و نیز ارزان بودن سیلیکون (نسبت به سایر نیمرساناها) سبب کاربرد وسیع آن در صنایع اپتوالکترونیک گردید. با بررسی هایی که روی این ماده انجام شد، مشخص گردید که ایجاد تخلخل در سطح سیلیکون به آن خصوصیات برجسته ای می دهد که تاثیر مستقیمی در کارایی برخی قطعات نظیر آشکارسازهای نوری در ناحیه مادون قرمز دارد. به دلیل پیچیده بودن ساختار سیلیکون متخلخل هنوز توصیف کامل و دقیقی از خواص الکتریکی یا اپتیکی آن در دست نیست. آنچه به ناشناخته ماندن این موضوع دامن می زند، قابلیت ساخت این ماده در ابعاد و همچنین ساختارهای متفاوت است.

از آنجا که در چند سال اخیر کاربرد سیلیکون متخلخل در آشکارسازهای شاتکی مورد توجه بسیاری قرار گرفته است، لذا در این پایان نامه پس از شناخت سازوکارهای دخیل در مشخصه جریان- ولتاژ دیودهای شاتکی فلز/ سیلیکون متخلخل در بایاس مستقیم و وارون در حالت تاریکی و تحت تابش، دلایلی برای افزایش پاسخ در آشکارسازهای شاتکی فلز/ سیلیکون متخلخل ارائه نموده ایم.

در گفتار اول به آشنایی با سیلیکون متخلخل و معرفی برخی ویژگی های ساختاری و الکتریکی آن پرداخته شده است. اتصالات شاتکی و سازوکارهای مؤثر در رسانندگی آنها موضوع بحث گفتار دوم است. در گفتار سوم نحوه عملکرد آشکارسازهای شاتکی را به اختصار مورد بررسی قرار داده ایم. در گفتار چهارم به تحلیل داده های تجربی گزارش شده در مقالات معتبر در خصوص سازوکارهای مؤثر در رسانندگی دیودهای شاتکی در حالت تاریکی پرداخته و در گفتار پنجم، مشخصه تحت تابش آشکارساز $Si/PtSi$ متخلخل نوع p را بررسی و راهکارهایی برای علل افزایش پاسخ آشکارساز مذکور نسبت به قطعات با سیلیکون غیر متخلخل ارائه نموده ایم.

Uhlerⁱ
Canhamⁱⁱ
Photoluminescenceⁱⁱⁱ

گفتار اول

مروری بر مقالات

- تاریخچه سیلیکون متخلخل
- سیلیکون متخلخل چیست؟
- روش های متداول برای ساخت سیلیکون متخلخل
- برخی ویژگیهای الکتریکی سیلیکون متخلخل
- چرا سیلیکون متخلخل؟
- سیلیکون متخلخل و کاربردهای آن

۱-۱- تاریخچه سیلیکون متخلخل

از سال ۱۹۵۶ که اوهلر بطور تصادفی سیلیکون متخلخل را مشاهده کرد بیش از پنجاه سال نمی گذرد [۱]. از آن زمان تلاش برای شناخت جنبه های مختلف این ماده آغاز گردید. بعدها ترنر موفق به ساخت نخستین لایه سیلیکون متخلخل شد [۲]. پیکرینگⁱ در سال ۱۹۸۴ برای نخستین بار موفق به مشاهده فوتولومینسانس این ماده در دمای $4/2K$ شد [۳]، ولی از آنجا که دمایی که در آن فوتولومینسانس دیده می شد بسیار پایین بود چندان مورد توجه محققان قرار نگرفت. در سال ۱۹۸۷ لهنمⁱⁱ و گوسلⁱⁱⁱ گاف نواری سیلیکون متخلخل را به روش اپتیکی تعیین نمودند؛ بر اساس گزارش آنها گاف نواری سیلیکون متخلخل بیش از $1/7\text{ eV}$ بود [۴].

کنهام از جمله محققانی است که در زمینه سیلیکون متخلخل تحقیقات فراوانی انجام داده و به نتایج متعدد و با ارزشی رسیده است. از جمله یافته های بزرگ وی که سبب وقوع انقلابی در سال ۱۹۹۰ در عرصه تکنولوژی سیلیکون متخلخل شد، گزارش فوتولومینسانس مرئی و قوی این ماده در دمای اتاق بود [۵]. چند سال بعد کنهام موفق شد ارتباط بین بیشینه شدت فوتولومینسانس سیلیکون متخلخل و ابعاد ستون های سیلیکونی را پیدا کند. وی گزارش کرد که با باریک تر شدن قطر ستون های سیلیکونی برجای مانده، بیشینه شدت فوتولومینسانس به سمت انرژی های بالاتر جابجا می شود [۶].

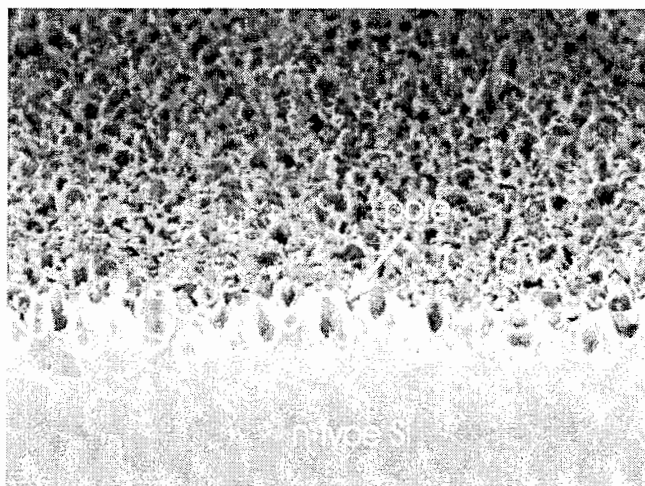
با وجود پیشرفت های بسیاری که در زمینه ساخت و کاربردهای سیلیکون متخلخل صورت گرفته است، هنوز جنبه های ناشناخته بسیاری از این ماده وجود دارد که به ساختار نامنظم آن مربوط می شود. از جمله مهم ترین آنها مستقیم یا غیر مستقیم بودن گاف نواری سیلیکون متخلخل است.

Pickeringⁱ
Lehmann, Goseleⁱⁱ

برخلاف انتظار گزارش‌هایی مبنی بر مستقیم بودن گاف نواری سیلیکون متخلخل وجود دارد [۶] ولی برخی از محققین هم سیلیکون متخلخل را ماده‌ای با گاف نواری غیر مستقیم دانسته‌اند [۶،۷].

۱-۲- سیلیکون متخلخل چیست؟

چنانچه سطح سیلیکون با موادی مانند HF و KOH و $NaOH$ در تماس باشد، خوردگی در سطح سیلیکون بوجود می‌آید. سیلیکونی که با روش‌های خوردگی به ساختاری اسفنجی شامل ستون‌های سیلیکونی و حفره‌های خورده شده تبدیل شده است، سیلیکون متخلخل نامیده می‌شود [۶]، (شکل ۱-۱). سیلیکون متخلخل با توجه به ابعاد و شکل حفره‌های خورده شده به اقسام گوناگونی تقسیم شده است که در ادامه این بخش به معرفی آنها خواهیم پرداخت.

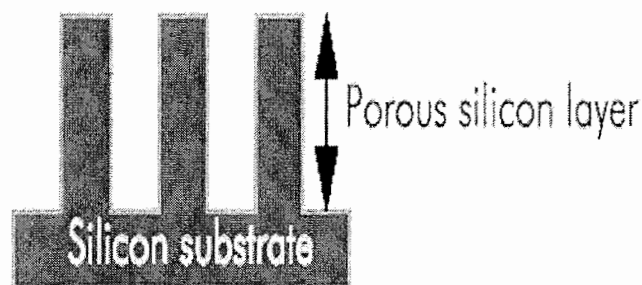


شکل ۱-۱- برشی از یک لایه سیلیکون متخلخل.

۱-۲-۱- تقسیم‌بندی سیلیکون متخلخل به لحاظ ابعاد

آنچه باعث تمایز سطح ناهموار و سطح متخلخل می‌شود، وجود حفره‌هایی است که ارتفاع آنها از ابعادشان بیشتر باشد، (شکل ۱-۲). سیلیکون متخلخل با توجه به ابعاد حفره‌های خورده شده به سه دسته تقسیم می‌شود که در جدول ۱-۱ آورده شده است. البته تعیین ابعاد خلل و فرج زمانی معنای دقیق دارد که شکل حفره‌ها کاملاً مشخص و تعریف شده باشد؛ این شرایط در مورد تخلخل ماکرومتر و گاهی اوقات مزومتر، تا حدی برقرار بوده ولی در مورد تخلخل میکرومتر، تعیین دقیق شکل خلل و

فرج ها به سادگی امکان پذیر نیست. باید خاطر نشان کرد که در بررسی سیلیکون متخلخل میکرومتری به دلیل ابعاد بسیار کوچک ستون های سیلیکونی باید اثرات کوانتومی را نیز در نظر گرفت [۶]. این موضوع در بزرگی گاف نواری سیلیکون متخلخل مؤثر است که در بخش ۱-۴ به آن پرداخته ایم.



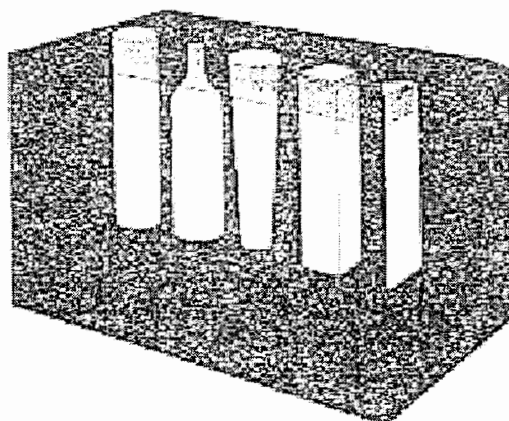
شکل ۱-۲- طرح ساده ای از سطح سیلیکون متخلخل.

جدول ۱-۱- تقسیم بندی سیلیکون متخلخل به لحاظ ابعادی [۶].

نوع حفره	پهنای حفره (nm)
میکرومتر	≤ 2
مزمتر	۲-۵۰
ماکرومتر	$50 \leq$

۱-۲-۲- تقسیم بندی سیلیکون متخلخل به لحاظ شکل

شکل ۱-۳ رایج ترین اشکال حفره ها را نشان می دهد. حفره ها می توانند به شکل استوانه ساده یا شاخه دار باشند. علاوه بر این خلل و فرج ها ممکن است دارای سطح مقطع مربعی یا مثلثی بوده و یا به شکل قیف و یا بطری باشند [۶].



شکل ۱-۳- اشکال گوناگون حفره های خورده شده از سمت چپ:
استوانه ای، بطری، قیفی، سطح مقطع مربعی و مثلثی [۶].

در عمل مشاهده شده است که شکل حفره ها به سمتگیری بلوری ویفر سیلیکون بستگی دارد. بعنوان مثال متخلخل سازی به روش خوردگی الکتروشیمیایی (بخش ۱-۳) ویفرهایی با سمتگیری (۱۰۰) به ایجاد حفره هایی با سطح مقطع مربعی و با سمتگیری (۱۱۱) به حفره هایی با سطح مقطع مثلثی می انجامد [۶].

۱-۳- روش های متداول برای ساخت سیلیکون متخلخل

از آنجا که در نمونه های مورد بررسی در این پروژه به روش های ساخت سیلیکون متخلخل نیز اشاره می شود، لذا برای آشنایی به معرفی آنها می پردازیم. روش های معمول برای تهیه سیلیکون متخلخل عبارتند از:

الف- خوردگی الکتروشیمیاییⁱ؛

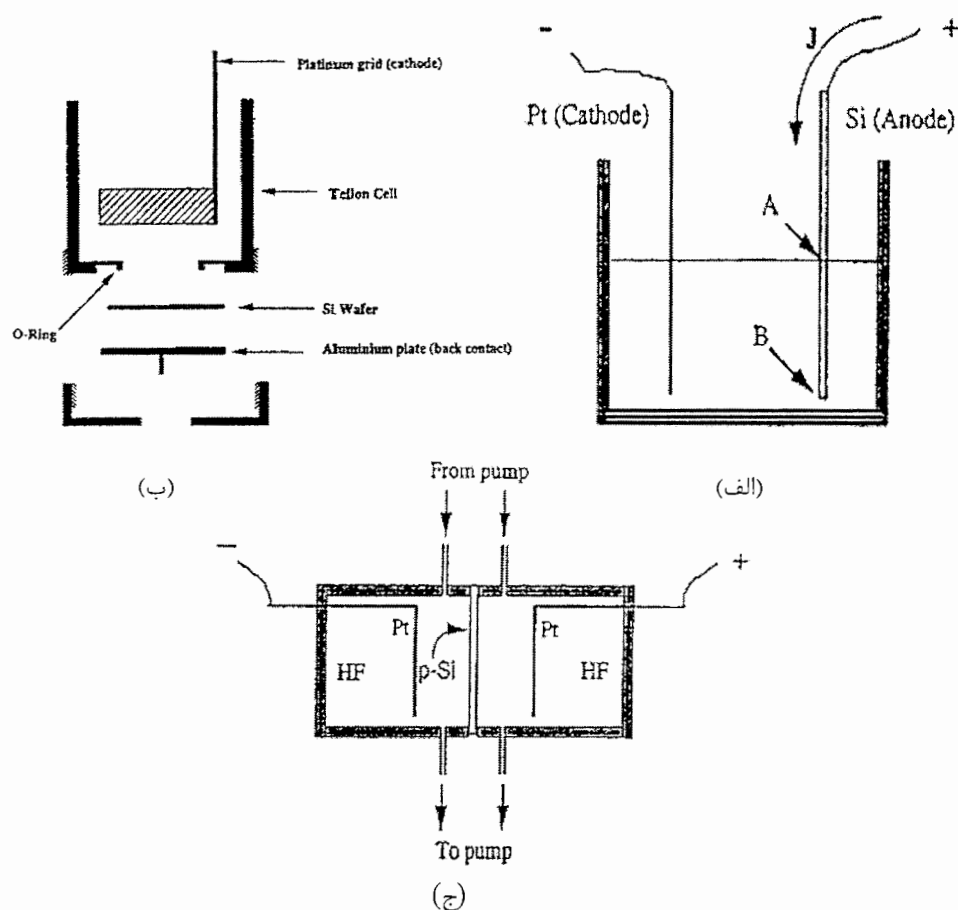
ب- خوردگی شیمیاییⁱⁱ؛

ج- تولید جریان داخلی توسط عناصر گالوانیک؛

(الف) روش خوردگی الکتروشیمیایی براساس تجزیه الکتروشیمیایی سیلیکون در محلول هایی است که جزء اصلی آنها HF می باشد. در این روش از ویفر سیلیکون به عنوان آند و پلاتین، یا هر فلزی که در مقابل HF مقاوم بوده و هادی جریان الکتریسیته نیز باشد، بعنوان کاتد استفاده

ⁱ Anodizing
ⁱⁱ Etching

می شود. از جمله مزایای این روش، تهیه لایه های سیلیکون متخلخل با ضخامت بیش از $100\ \mu m$ است. در این روش از سه نوع محفظه استفاده می شود: محفظه ساده، شکل ۱-۴-الف، محفظه تکی، شکل ۱-۴-ب، که در آن فلزی از سمت پشت ویفر به آن محکم شده است و محفظه دوگانه، شکل ۱-۴-ج، که محلول الکترولیت از سمت پشت با ویفر تماس دارد [۸۶].



شکل ۱-۴-انواع محفظه های مورد استفاده در روش خوردگی الکتروشیمیایی:

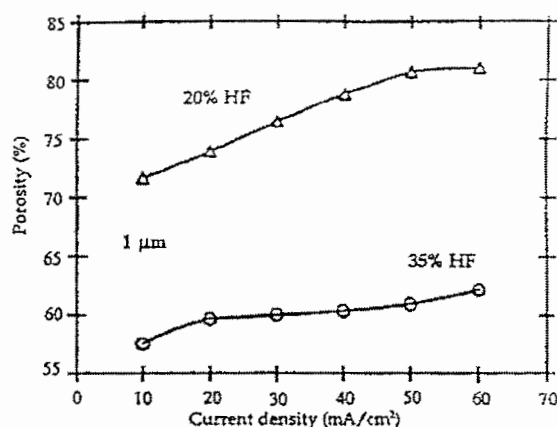
(الف) محفظه ساده، (ب) محفظه تکی، (ج) محفظه دوگانه [۶].

(ب) روش خوردگی شیمیایی براساس اکسید شدن سیلیکون در HNO_3 ، و برداشته شدن اکسید با HF است. شکل ۱-۵-الف محفظه مورد استفاده در این روش را نشان می دهد. این روش نیاز به عبور جریان الکتروسیسته نیست و به همین خاطر سرعت خوردگی در این روش پایین است. سادگی و

در ادامه به بررسی پارامترهای مؤثر در هر یک از روش های فوق پرداخته ایم.

۱-۳-۱- پارامترهای مؤثر در کیفیت رشد سیلیکون متخلخل در روش های مختلف

تجربه نشان داده است که تغییر چگالی جریان و زمان آنودایز در روش خوردگی الکتروشیمیایی روی درصد تخلخل اثر می گذارند. مشخص شده است که در یک غلظت HF ثابت، افزایش چگالی جریان آنودایز سبب افزایش درصد تخلخل می شود، (شکل ۶-۱). بطور مشابه افزایش زمان آنودایز نیز ضخامت لایه متخلخل را بیشتر می کند؛ زیرا سطح زیرلایه زمان بیشتری در معرض اسید خورنده واقع می شود [۶].



شکل ۶-۱- به ازای غلظت HF معین، افزایش چگالی جریان آنودایز سبب افزایش درصد تخلخل می شود [۶].

آزمایش های مختلف این نکته را به اثبات رسانده است که غلظت H_2O_2 (آب اکسیژنه)، اتانول و نیز استفاده از فلزات مختلف در روش تولید جریان داخلی توسط عناصر گالوانیک از جمله پارامترهای مؤثر می باشند. هر قدر غلظت H_2O_2 بیشتر باشد، درصد تخلخل و ابعاد آن بیشتر خواهد شد. با افزایش غلظت اتانول، ابعاد خلل و فرج کاهش یافته و لایه سیلیکون متخلخل بوجود آمده یکنواختی بیشتری خواهد داشت. چنانچه از فلزات مختلفی به عنوان عناصر گالوانیک استفاده شود، بدلیل تفاوت در پتانسیل داخلی ایجاد شده، جریان داخلی نیز یکسان نبوده و در نتیجه درصد تخلخل متفاوت خواهد بود. از طرفی با افزایش ضخامت فلز، جریان داخلی و درصد تخلخل افزایش خواهد یافت [۸].

نوع و آرایش زیرلایه و غلظت HF از جمله پارامترهایی هستند که در تمام روش های ساخت سیلیکون متخلخل مؤثرند. از آنجا که ایجاد خوردگی در سطح سیلیکون مستلزم تولید حفره می باشد، تهیه سیلیکون متخلخل از زیرلایه نوع p به مراتب ساده تر از زیرلایه نوع n است. به همین دلیل برای تسهیل در متخلخل نمودن سیلیکون نوع n معمولاً از تابش نیز استفاده می شود [۱۰]. افزایش میزان آرایش زیرلایه، باعث کاهش درصد تخلخل در زیرلایه نوع p و افزایش آن در زیرلایه نوع n می شود. افزایش غلظت اسید خورنده HF درصد تخلخل را کاهش می دهد [۶].

۴-۱- برخی ویژگی های الکتریکی سیلیکون متخلخل

ویژگی های الکتریکی سیلیکون متخلخل از قبیل رسانندگی و گاف نواری به شدت تحت تاثیر ساختار نامنظم و درصد تخلخل آن می باشد. همین مساله باعث شده است که نتوان یک مقدار مشخص به گاف نواری آن نسبت داد [۶]. یکی از روش های تعیین گاف نواری اندازه گیری طیف فوتولومینسانس (PL) می باشد. برای گاف نواری سیلیکون متخلخل مقادیر مختلف در گستره $1.3-2.2 \text{ eV}$ گزارش شده است [۶].

مقاومت ویژه سیلیکون متخلخل نسبت به سیلیکون غیر متخلخل بزرگتر می باشد. این امر حاکی از کاهش یافتن حامل های آزاد در این ماده است. پهن شدن گاف نواری به دلیل اثر حبس کوانتومیⁱ موجب می شود که تراکم حامل ها در یک دمای معین کاهش یابد، از طرفی به دلیل ساختار نامنظم سیلیکون متخلخل و وجود حالت های پذیرنده سطحی، احتمال به دام افتادن حامل ها نیز وجود دارد. مجموع این عوامل باعث کم شدن تعداد حامل های آزاد در ناحیه پوسته متخلخل می شود [۱۱، ۶].

تحرك الکترونی در سیلیکون متخلخل از مرتبه 10^{-4} تا $10^{-5} \text{ cm}^2/V.s$ می باشد که در مقایسه با مقدار آن در سیلیکون غیر متخلخل (که در Si نوع p و n به ترتیب 1500 و $500 \text{ cm}^2/V.s$ است.) [۱۲]، تقریباً 10^7 تا 10^8 برابر کوچکتر است [۱۳].

۵-۱- چرا سیلیکون متخلخل؟

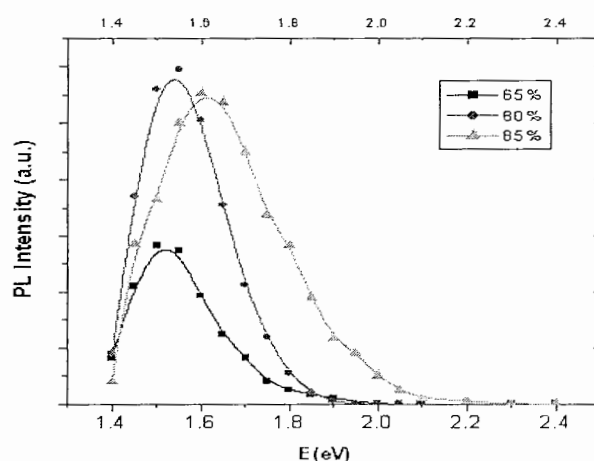
تاکنون به شناخت سیلیکون متخلخل و برخی از ویژگی های آن پرداختیم در ادامه می خواهیم بدانیم چرا استفاده از سیلیکون متخلخل مورد توجه محققان قرار گرفته است؟

قبلا اشاره کردیم که مشاهده های تجربی کنهام درباره فوتولومینسانس مرئی سیلیکون متخلخل آن را بعنوان ماده ای که می توان در صنعت اپتوالکترونیک از آن استفاده کرد مورد توجه قرار داد. ارزان بودن و سهولت متخلخل نمودن سیلیکون باعث رقابت آن با مواد اپتوالکترونیک می شد؛ پس از آن مشخص گردید که در اثر تابش نور فرابنفش به سیلیکون متخلخل، طیف گسیلی از آن در گستره طول موج های مرئی قرمز، سبز و آبی قرار می گیرد که با درصد تخلخل سیلیکون ارتباط مستقیم دارد؛ به گونه ای که با افزایش درصد تخلخل، قله فوتولومینسانس سیلیکون متخلخل به سمت انرژی های بالاتر جابجا می شود، (شکل ۷-۱). فوتولومینسانس سیلیکون متخلخل از نظر طول موج، به سه ناحیه تقسیم می شود [۶]:

الف- آبی، با طول موج $400-500\text{ nm}$

ب- قرمز، با طول موج $560-800\text{ nm}$

ج- مادون قرمز، با طول موج $900\text{ nm}-2\text{ }\mu\text{m}$



شکل ۷-۱- پیک فوتولومینسانس سیلیکون متخلخل با افزایش درصد تخلخل

به سمت انرژی های بالاتر جابجا می شود [۱۴].

از دیگر ویژگی های بارز سیلیکون متخلخل، می توان به نسبت سطح به حجم بالا، چسبندگی سطحی بالا [۹،۶] و میدان های الکتریکی قوی در نوک ستون های سیلیکونی [۱۵] اشاره کرد. در ادامه

خواهیم دید که هریک از ویژگی های فوق به کاربرد سیلیکون متخلخل در زمینه های گوناگونی انجامیده است.

۱-۶- سیلیکون متخلخل و کاربردهای آن

امروزه قابلیت های استفاده از سیلیکون متخلخل در عرصه های گوناگون آشکار شده است. از جمله کاربردهای این ماده در عرصه اپتوالکترونیک می توان به استفاده در دیودهای نورگسیل (LED) [۱۶]، آشکارسازهای مادون قرمز [۱۸، ۱۷، ۱۵] و موجبرها [۳] اشاره کرد که بهره گیری از سیلیکون متخلخل به ترتیب سبب کنترل طول موج نور خروجی با تغییر درصد خلل و فرج، افزایش کارایی کوانتومی، اتلاف توان انتقال کمتر و کنترل ضریب شکست با تغییر درصد تخلخل می شود. در زمینه کاربرد در دیودهای شاتکی در فصل چهارم و آشکارسازهای مادون قرمز در فصل پنجم با تفصیل بیشتری خواهیم پرداخت.

چسبندگی سطحی و نسبت سطح به حجم بالای سیلیکون متخلخل موجب کاربرد وسیع آن در ساخت حسگرهای گازی شده است [۹]. حسگرهایی که با سیلیکون متخلخل ساخته می شوند، در مقایسه با سایر حسگرها از زمان پاسخ کوتاه تری برخوردار بوده و در گستره دمایی وسیع تری قابل استفاده می باشند [۹، ۶]. از سیلیکون متخلخل در سلول های خورشیدی بعنوان لایه ضد بازتاب مناسب استفاده می شود [۱۹].

- 1- A.J.Uhlir,1956: *Electronic shaping of Germanium & Silicon, the Bell system technical journal*, 35, 333-347.
- 2- D.S.Turner, 1958: *Electropolishing Si in hydrofluoric acid solutions, j. electrochem. Soc.* 105(1), 402-408.
- 3- C.Pickering, M.I.J.Beale, D.J.Robbins, P.J.Pearson, R.Greef,1984, *j. phys. C(UK)*17,6536-52.
- ۴- رشید فریور، ۱۳۸۳، متخلخل سازی سیلیکون و لایه نشانی پلاتین بر روی سیلیکون متخلخل به منظور ساخت آشکارساز شاتکی، پایان نامه کارشناسی الکترونیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی.
- 5- L.T.Canham,1990, *Applied physics letters(USA)*57, 1046-48.
- 6- L.T.Canham, D.Malvern,1997: *Properties of porous silicon, INSPEC(UK)*.
- 7- N.Sankara Subramanian, R.Vivek Sabaapathy, R.Sriram, B.Santhi,2005: *Investigation on nanoporous Silicon for gas sensor applications, International conference on smart materials structures & systems, proceeding of ISSS,Bangalore,India.*
- 8- A.Splinter,2001: *New porous silicon formation technology using internal current generation with galvanic elements, sensors & actuators A*,92.
- 9- G.Marsh,2002: *Porous silicon a useful imperfection, Materialstoday.*
- 10- G.Algun, M.C.Arikan,1999: *An investigation of electrical properties of porous silicon, Tr. J. of phys.*23,789-797.
- 11- Z.Gaburro, N.Daldesso, L.Pavesi, *Porous silicon.*
- 12- S.M.Sze,1985: *Physics of semiconductor devises*,2th Ed,Wiley.
- 13- P.Rao, A.Schiff, L.Tsybeskev, P.M.Favchet,1996: *Electron time of flight measurements in porous silicon,Advances in microcrystalline & nanocrystalline semiconductors*,613-618.
- 14- J.Dain,2004: *SEM & HRTEM study of porous silicon relationship between fabrication morphology & Optical properties, Applied surface science*,238.
- 15- F.Raissi, N.A.Sheeni,2003: *Highly sensitive near IR detectors using n-type porous Silicon, Sensors & actuators A* 104,117-120
- 16- A.Richer, P.Steiner, F.Kozlowski, W.Long,1991,*IEEE electron device*12,691.
- 17- F.Raissi,2003: *A possible explanation for high quantum efficiency of PtSi/Porous Silicon Schottky detectors, IEEE transactions on electron device*,50(4),1134.
- 18- F.Raissi, M.Mohtashami Far,2002: *Highly sensitive PtSi/Porous silicon Schottky detector, IEEE sensors journals*2(5),476-81.
- 19- S.Strehle, D.Starti, A.Krothus, K.Grigoras, C.Levy Clement,1997, *Thin solid films(Switzerland)*297,291-5.

گفتار دوم

دیودهای شاتکی فلز - نیمرسانا

- مقدمه
- اتصال های شاتکی
- سازوکارهای انتقال جریان در دیودهای شاتکی فلز - نیمرسانا
- عوامل انحراف مشخصه وارون از وضعیت ایده آل
- سازوکارهای شکست پیوندگاه
- اثر انحنا پیوندگاه روی ولتاژ شکست
- اتصال های فلز- سیلیکون
- مختصری از ویژگی های سیلیکون

مقدمه

اتصال های فلز- نیمرسانا دسته ای از قطعات تک قطبی می باشند. در این قطعات فقط یک نوع حامل بطور غالب در روند رسانندگی شرکت دارد [۱]. اولین قطعه فلز- نیمرسانا (۱۹۰۴) به شکل یکسوکننده اتصال نقطه ای بود، بدین معنی که یک سیم فلزی نوک تیز با فشار به سطح یک نیمرسانا اتصال داده شده بود [۲]. پس از آن این قطعات کاربردهای بسیاری پیدا کردند. چنانچه اتصال فلز- نیمرسانا غیر یکسوکننده باشند، یعنی بدون توجه به قطبیت ولتاژ اعمال شده مقاومت ناچیزی داشته باشد، آن را اتصال اهمی گویند. اگر اتصال فلز- نیمرسانا خاصیت یکسوکنندگی داشته باشند، آن را اتصال های شاتکی می نامند. از اتصال های یکسوساز در مدارهایی که برای یکسوسازی به پاسخ سریع احتیاج دارند استفاده می شود [۳].

از آنجا که در این پروژه به بررسی ویژگی های الکتریکی و اپتیکی دیودهای شاتکی فلز / Si پرداخته ایم، لذا بحث خود را در این گفتار به شناخت هرچه بیشتر این اتصالات اختصاص داده ایم.

۱-۲- اتصال های شاتکی

پس از آنکه شاتکی و موت^۱ برای نخستین بار نحوه تشکیل سد پتانسیل بین فلز و نیمرسانا را توضیح داده و مدل هایی برای به دست آوردن ارتفاع سد و شکل آن ارائه کردند، اتصالات فلز- نیمرسانای یکسوساز، اتصالات شاتکی اطلاق شد [۵،۴].

شکل ۱-۲ نوار انرژی یک نیمرسانای نوع n و فلز را نشان می دهد. $q\phi_m$ و $q\phi_s$ به ترتیب تابع کار نیمرسانا و فلز می باشد. تابع کار به صورت اختلاف بین تراز انرژی فرمی (E_F) و تراز انرژی خلاء (E_0) تعریف می شود. بعبارت دیگر تابع کار، متوسط انرژی مورد نیاز برای جدا کردن الکترون از ماده است. ϕ ، الکترون خواهی نیمرسانا بوده و به صورت اختلاف انرژی تراز خلاء (E_0) و لبه نوار رسانش

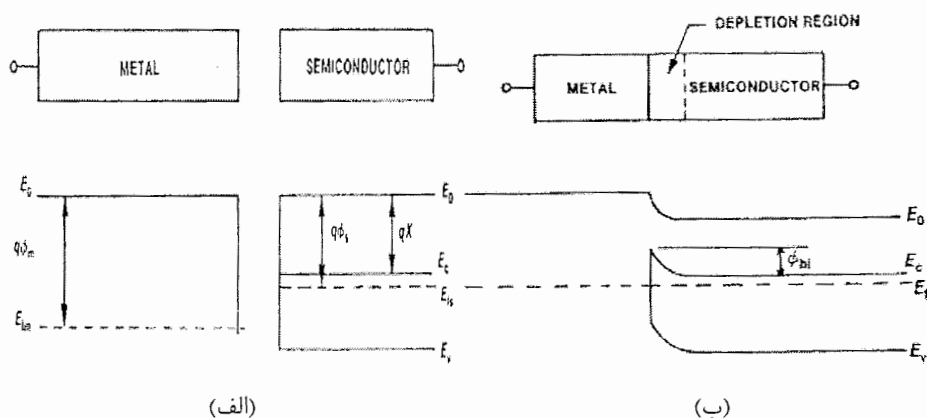
^۱ Schottky & Mott

تعریف می شود [۲]. الکترون خواهی برای هر ماده مقداری ثابت بوده و در مورد سیلیکون 4.01 eV است [۶]. جدول ۱-۲ تابع کار برخی از فلزات را نشان می دهد. تابع کار فلز معمولاً بین 2 eV تا 6 eV متغیر است [۲]. از آنجاکه مکان تراز فرمی در نیمرساناها به چگالی اتم های ناخالصی بستگی دارد، لذا تابع کار در نیمرساناها مقدار ثابتی نداشته و به تراکم ناخالصی بستگی دارد.

جدول ۱-۲ - تابع کار برخی از فلزات [۶].

Element	Ag	Al	Au	Ni	Pt
$\phi_m (V)$	۴/۲۶	۴/۲۸	۵/۱	۵/۱۵	۵/۶۵

هنگامی که فلز و نیمرسانا در حالت تعادل بوده و با یکدیگر اتصال ندارند، ترازهای انرژی آنها ثابت بوده و مکان تراز انرژی فرمی نیز متفاوت می باشد، شکل ۱-۲ الف. با برقراری اتصال در شرایط تعادل گرمایی تراز های فرمی در دو ماده در یک سطح قرار گرفته و از طرفی تراز خلا باید پیوسته باشد. از این دو التزام نوار انرژی منحصر به فردی برای اتصال فلز- نیمرسانا در حالت ایده آل به دست می آید، که مطابق شکل ۱-۲ ب می باشد.



شکل ۱-۲ - نوار انرژی فلز و نیمرسانای نوع n در شرایط تعادل گرمایی (الف): بدون اتصال و (ب) برقراری اتصال، تراز انرژی فرمی در دو ماده در یک سطح قرار گرفته است.

در این شرایط تعدادی از الکترون ها به طور خود به خودی از نیمرسانا به فلز منتقل شده و در سطح آن جمع می شوند. درعوض اتم های ناخالصی ای که الکترون های خود را از دست داده اند، بصورت مراکز بار فضایی مثبت در داخل نیمرسانا باقی می مانند که به تهی لایه موسوم است. جدا شدگی بارها باعث ایجاد میدان الکتریکی ای در تهی لایه می شود که مانع از حرکت بیشتر بارها از نیمرسانا به سمت فلز می شود. در این حالت ارتفاع سد $q\phi_{Bn}$ برابر اختلاف بین تابع کار فلز و الکترون خواهی نیمرسانا است:

$$q\phi_{Bn} = q(\phi_m - \chi) \quad (1-2)$$

برای اتصال فلز/ نیمرسانای نوع p ایده آل، ارتفاع سد شاتکی را می توان با روش مشابهی تعیین نمود:

$$q\phi_{Bp} = E_g - q(\phi_m - \chi) \quad (2-2)$$

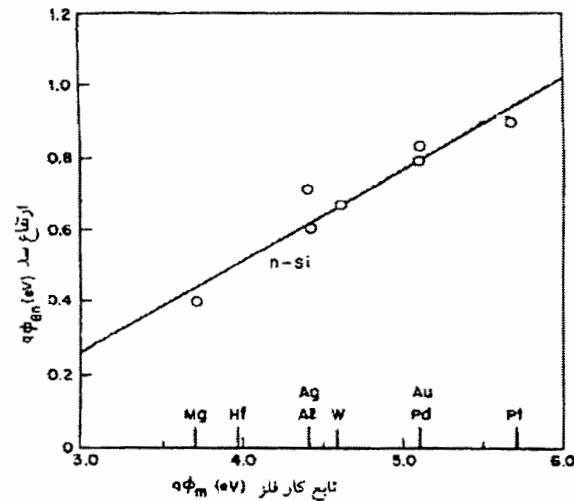
که در آن E_g اندازه گاف نواری نیمرسانا است. برای نیمرسانایی معین و برای هر فلز، انتظار می رود مجموع ارتفاع سد روی زیرلایه های نوع n و نوع p با گاف نواری برابر باشد [۱]:

$$q(\phi_{Bn} + \phi_{Bp}) = E_g \quad (3-2)$$

جدول ۲-۲ مقادیر ارتفاع سد شاتکی برخی از اتصالات فلزی را با Si نوع n و p نشان می دهد. از معادله (۱-۲) پیداست که ارتفاع سد شاتکی با افزایش تابع کار فلز افزایش می یابد؛ اما از آنجا که در دیود شاتکی واقعی، وجود حالت های پذیرنده در سطح نیمرسانا تعداد زیادی تراز انرژی ایجاد می کند که در گاف انرژی قرار دارند و می توانند نظیر دهنده ها یا پذیرنده ها عمل کرده و بر ارتفاع سد تاثیر بگذارند، وابستگی ارتفاع سد پتانسیل به تابع کار فلز به شدت پیش بینی شده در رابطه (۱-۲) نمی باشد [۶]. شکل ۲-۲ ارتفاع چند سد شاتکی را برحسب تابع کار فلز برای سیلیکون نوع n نشان می دهد.

جدول ۲-۲- ارتفاع چند سد شاتکی برحسب الکترون ولت [۷].

Schottky Metal	Al	Au	PtSi
$n-Si$	۰/۷	۰/۷۹	۰/۸۵
$p-Si$	۰/۸	۰/۲۵	۰/۲



شکل ۲-۲- ارتفاع سد شاتکی فلز / Si نوع n بر حسب تابع کار فلز [۱].

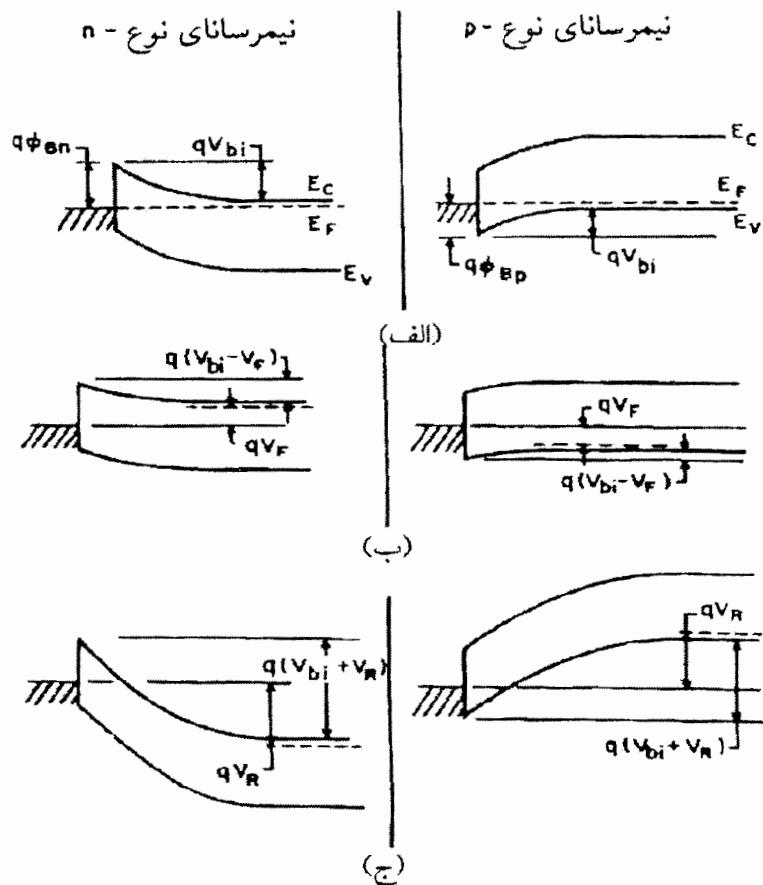
حال به بررسی نمودار نوار انرژی اتصالات شاتکی در شرایط اعمال بایاس خارجی می پردازیم. شکل ۳-۲ نمودار نوار انرژی اتصال فلز/ نیمرسانای نوع n و p را در شرایط تعادل گرمایی و در بایاس مستقیم و وارون نشان می دهد. در شرایط تعادل گرمایی و در مورد نیمرسانای نوع n ، شکل ۳-۲ الف، نشان دهنده ارتفاع سد شاتکی برای حامل ها از نیمرسانا به فلز می باشد که نسبت ارتفاع سد از فلز به نیمرسانا، ϕ_{Bn} ، به اندازه V_n (اختلاف تراز انرژی فرمی تا لبه نوار رسانش) کمتر است. یعنی:

$$\phi_{bi} = \phi_{Bn} - V_n \quad (۴-۲)$$

به طوری که:

$$V_n = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_C}{N_D} \right) \quad (۵-۲)$$

که در آن N_D و N_C به ترتیب چگالی مؤثر حالت ها در نوار رسانش و چگالی اتم های ناخالصی در نیمرسانا است. با اعمال بایاس مستقیم به دیود، شکل ۳-۲ ب، ارتفاع سد پتانسیل نسبت به تعادل گرمایی کاهش و در بایاس وارون، شکل ۳-۲ ج، افزایش می یابد. در مورد نیمرسانای نوع p نیز می توان به نتایج مشابهی رسید [۱].



شکل ۳-۲- نمودار نوار انرژی فلز/ نیمرسانای نوع n و نوع p در

(الف): تعادل گرمایی، (ب): بایاس مستقیم و (ج): بایاس وارون [۱].

نتایج اتصال فلز- نیمرسانا مشابه نتایج پیوندگاه پله ای یک طرفه می باشد. لذا در مورد اتصال

شاتکی روابط زیر برقرار است:

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{qN_D}(V_{bi} - V)} \quad (۶-۲)$$

$$\varepsilon_m = \sqrt{\frac{2qN_D}{\varepsilon_s}(V_{bi} - V)} = \frac{2(V_{bi} - V)}{W} \quad (۷-۲)$$

که ε_m بیشینه شدت میدان الکتریکی داخلی و W پهنای تهی لایه است. ولتاژ اعمال شده V در معادلات فوق در شرایط بایاس مستقیم و وارون به ترتیب مثبت و منفی لحاظ می شود. ε_s نیز ضریب

گذردهی نیمرسانا بوده و در مورد سیلیکون $\varepsilon_0 \times 11/9$ است [۱].

۲-۲- سازوکارهای انتقال جریان در دیودهای شاتکی فلز- نیمرسانا

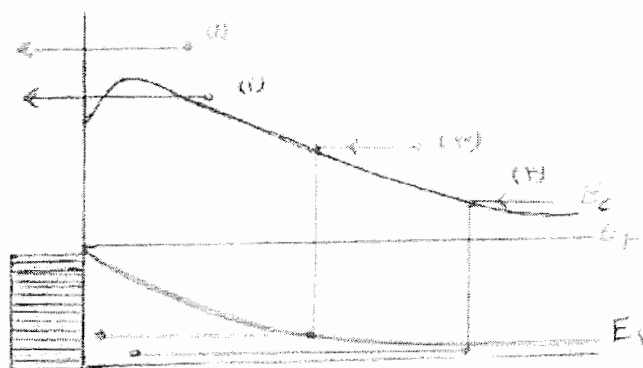
سازوکارهای مختلفی که در ترابری حامل ها در شرایط بایاس مستقیم در اتصالات فلز- نیمرسانا سهمیم اند در شکل ۲-۴ بصورت شماتیک نشان داده شده است. (در بایاس وارون جهت حرکت حامل ها معکوس است.) این سازوکارها عبارتند از [۸]:

(۱) گسیل گرما- یونی حامل ها از بالای سد پتانسیل؛

(۲) تونل زنی کوانتومی از داخل سد؛

(۳) بازترکیب در تهی لایه؛

(۴) بازترکیب در ناحیه خنثی یا تزریق حامل های اقلیت؛



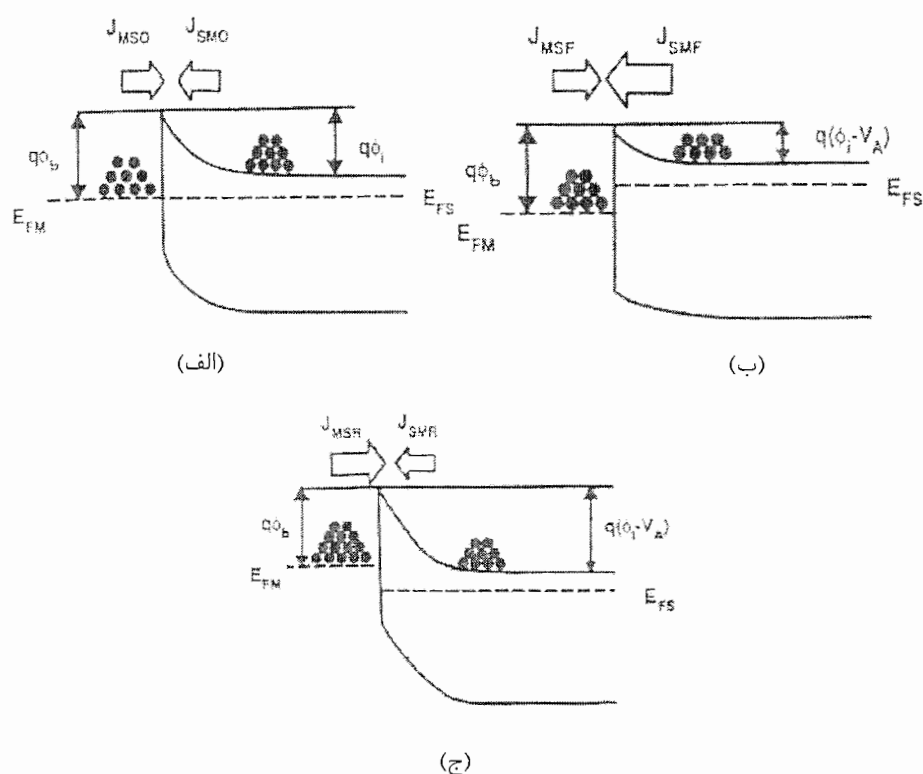
شکل ۲-۴- سازوکارهای ترابری حامل ها در دیودهای شاتکی [۹].

چنانچه سازوکار اول بیشترین سهم را در ترابری حامل ها برعهده داشته باشد، آن قطعه دیود شاتکی ایده آل نام دارد. سایر سازوکارها باعث انحراف رفتار دیود از وضعیت ایده آل می شوند. به دلیل آنکه در این پایان نامه به بررسی رسانندگی در دیودهایی پرداخته ایم که سه سازوکار اول در آنها غالب است، لذا در ادامه به بررسی مختصر آنها می پردازیم.

۲-۲-۱- گسیل گرما- یونی حاملها از بالای سد پتانسیل

از آنجا که دیودهای شاتکی با نیمرساناهای بطور متوسط آلایش یافته- مثلاً Si با $N_D \leq 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ در دماهای متوسط (۳۰۰ کلوین) عمل می کنند؛ لذا سازوکار غالب، گسیل

گرما-یونی^۱ (TE) حامل های اکثریت از بالای سد پتانسیل است [۱]. شکل ۵-۲ فرایند گسیل گرما-یونی را در شرایط تعادل گرمایی و اعمال بایاس خارجی نشان می دهد. در تعادل گرمایی (شکل ۵-۲-الف) جریان از نیمرسانا به فلز و بالعکس با هم برابر و مخالف یکدیگرند. بدین ترتیب جریان خالص صفر می شود.



شکل ۵-۲- گسیل گرما-یونی الکترون ها از بالای سد پتانسیل در شرایط

(الف): تعادل گرمایی، (ب): بایاس مستقیم، (ج): بایاس وارون [۱۰].

در حالت اعمال بایاس خارجی به پیوندگاه (شکل های ۵-۲-ب و ج) چگالی الکترون ها در سطح پیوندگاه فلز- نیمرسانا بعلا تغییر ارتفاع سد پتانسیل، تغییر می کند. بنابراین جریان خالص تحت بایاس برابر خواهد بود با [۱]:

$$I = I_s \left(e^{qV/kT} - 1 \right) \quad (۸-۲)$$

چنانچه فرایندهای دیگری نیز علاوه بر سازوکار گسیل گرما-یونی در ترابری حامل ها مؤثر باشند معادله (۸-۲) به صورت زیر در می آید [۱۵، ۱۴، ۱۳، ۱۲، ۱۱]:

$$I = I_s \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) \left(1 - \exp\left(-\frac{qV}{kT}\right)\right) \quad (9-2)$$

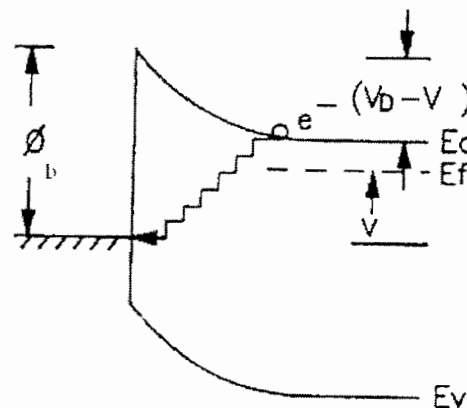
که در آن n ضریب ایده آلی بوده و مقدار آن وقتی گسیل گرما-یونی فرایند غالب در رسانندگی حامل ها باشد، یک خواهد بود. I_s جریان اشباع دیود بوده و با معادله زیر داده می شود:

$$I_s = A_{eff} A^* T^2 \exp\left(\frac{-q\phi_b}{kT}\right) \quad (10-2)$$

که در آن A^* به ضریب ریچاردسون (برحسب $A/K^2 cm^2$) موسوم بوده و با جرم مؤثر (m^*) در نیمرسانا متناسب است [۸]. مقدار این کمیت برای Si نوع n و p به ترتیب ۱۱۰ و ۳۲ می باشد [۱]. A_{eff} مساحت مؤثر دیود (برحسب cm^2) است. در عمل می توان از برون یابی منحنی داده های $I-V$ بایاس مستقیم (در $V=0$) I_s را به دست آورد و سپس به کمک معادله (۱۰-۲) ارتفاع سد شاتکی، ϕ_b ، را پیدا کرد.

۲-۲-۲- تونل زنی کوانتومی از داخل سد

حامل های بار علاوه بر فرایند گسیل گرما-یونی می توانند با تونل زنی نیز از سد شاتکی عبور کنند [۱]. برای این منظور آنها مسیرهای مختلفی را طی می کنند که یکی از آنها مسیر پلکانی شکل ۶-۲ است. این فرایند در بایاس مستقیم، تونل زنی از طریق مراکز بازترکیب در تهی لایه نام دارد.



شکل ۶-۲- طرح شماتیک سازوکار تونل زنی از طریق مراکز بازترکیب در

تهی لایه در اتصال فلز/نیمرسانای نوع n در بایاس مستقیم [۱۱].

در فرایند تونل زنی از طریق مراکز باز ترکیب در اتصال فلز/ نیم رسانای نوع n الکترون ها از طریق مجموعه ای از مراکز باز ترکیب نزدیک به هم از لبه نوار رسانش نیم رسانا به فلز تونل می زند، (شکل ۶-۲). در این سازوکار الکترون پس از هر بارتونل زنی، اندکی از انرژی خود را از دست داده و به حالت انرژی پایین تر سقوط می کند. سرانجام الکترون پس از طی یک مسیر پلکانی به فلز می رسد. ریبین^۱ رابطه زیر را برای جریان تونلی (I_{tu}) در شرایط بایاس مستقیم ارائه داده است [۱۱]:

$$I_{tu} = A_{eff} B_0 N_i e^{-(\alpha/\sqrt{R})(V_D - V)} \quad (۱۱-۲)$$

که در آن N_i ، چگالی مراکز گیر اندازی، K تعداد گام های تونلی مورد نیاز برای حرکت الکترون درون تهی لایه، V ولتاژ اعمالی و B_0 مقداری ثابت است. V_D و α نیز به ترتیب پتانسیل پخشی و ثابت کوانتومی می باشد که توسط روابط زیر مشخص می گردند:

$$V_D = \phi_b - \left(\frac{kT}{q} \right) \ln \left(\frac{N_C}{N_D} \right) \quad (۱۲-۲)$$

$$\alpha = (4/3\hbar) (m_n^* \varepsilon_s / N_D)^{1/2} \quad (۱۳-۲)$$

که در آن ϕ_b ، ارتفاع سد شاتکی و N_D چگالی اتم های دهنده یونیده شده است. با جایگذاری مقدار N_C از رابطه زیر:

$$N_C = 2 \left(2\pi m_n^* k / h^2 \right)^{3/2} T^{3/2} \quad (۱۴-۲)$$

که در آن h ثابت پلانک است، در رابطه (۱۲-۲) خواهیم داشت:

$$V_D = \phi_b - \left(\frac{kT}{q} \right) \ln \left[\frac{2}{N_D} \left(\frac{2\pi m_n^* k}{h^2} \right)^{3/2} T^{3/2} \right] \quad (۱۵-۲)$$

با گرفتن لگاریتم طبیعی از طرفین رابطه (۱۱-۲) داریم:

$$\ln I_{tu} = \left[\ln(A_{eff} B_0 N_i) - \frac{\alpha}{\sqrt{R}} \phi_b \right] + \frac{\alpha}{\sqrt{R}} \frac{k}{q} T \ln \left[\frac{2}{N_D} \left(\frac{2\pi m_n^* k}{h^2} \right)^{3/2} T^{3/2} \right] + \frac{\alpha}{\sqrt{R}} V \quad (۱۶-۲)$$

که می توان آن را به صورت ساده زیر نوشت:

$$\ln I_{tu} = M_0 + AV + BT' \quad (۱۷-۲)$$

که در آن T' ، M_0 ، A و B بصورت زیر تعریف می شوند:

$$T' = T \ln \left[\frac{2}{N_D} \left(\frac{2\pi m_n^* k}{h^2} \right)^{3/2} T^{3/2} \right] \quad (18-2)$$

$$M_0 = \ln(A_{eff} B_0 N_i) - \left(\frac{\alpha}{\sqrt{R}} \right) \phi_b \quad (19-2)$$

$$A = \frac{\alpha}{\sqrt{R}} \quad (20-2)$$

$$B = \left(\frac{\alpha}{\sqrt{R}} \right) \frac{k}{q} \quad (21-2)$$

در شرایط بایاس وارون نیز حامل ها علاوه بر سازوکار گسیل گرما- یونی می توانند از طریق تونل زنی زنی در جریان مشارکت نمایند. جریان ناشی از سازوکار تونل زنی زنی از رابطه زیر پیروی می کند[۱۱]:

$$I_r = A_{eff} C_0 V e^{-\lambda(I_D + I_r)^{-1/2}} \quad (22-2)$$

که در آن C_0 و λ مقادیر ثابت مثبت می باشند. V_D پتانسیل پخشی است که قبلا با معادله (۱۵-۲) معرفی شده است. اگر از طرفین رابطه (۲۲-۲) لگاریتم طبیعی گرفته شود، خواهیم داشت:

$$\ln \left(\frac{I_r}{V_r} \right) = \ln(A_{eff} C_0) - \lambda(V_D + V_r)^{-1/2} \quad (23-2)$$

از آنجا که $A_{eff} C_0$ ثابت است، ثابت λ از رابطه زیر بدست می آید:

$$\lambda = - \frac{d \ln \left(\frac{I_r}{V_r} \right)}{d(V_D + V_r)} \quad (24-4)$$

بنابراین اگر در یک دمای معین منحنی $\ln(I_r/V_r)$ برحسب $(V_D + V_r)^{-1/2}$ را رسم کنیم، می توان با پیدا کردن شیب منحنی در محدوده ولتاژهای بزرگ، مقدار ثابت λ را در آن دما بدست آوریم.

۲-۳-۲- بازترکیب درون تهی لایه

نخستین بار یو و اسنو^۱ (۱۹۶۸) به اهمیت بازترکیب در تهی لایه اشاره کرده و تئوری هایی در این زمینه ارائه نمودند[۱۶]. در حالت بدون اعمال بایاس آهنگ تولید گرمایی جفت های $e-h$ در تهی لایه با آهنگ بازترکیب آنها برابر است. در این وضعیت شرط خنثایی بار یعنی $np = n_i^2$ برقرار است؛ اما وقتی بایاسی اعمال می شود این شرط برقرار نبوده و یک مقدار خالص تولید یا بازترکیب،

^۱ Yu, Snow

بسته به اینکه چه بایاسی اعمال کرده ایم باقی خواهد ماند. بر اساس نظریه های شاکلی و رید و همچنین هال [۱۶]، مهم ترین مراکز بازترکیب در نیمرسانا در نزدیکی مرکز گاف نواری واقع است. جریانی که توسط تولید و بازترکیب در تهی لایه ایجاد می شود با رابطه زیر داده می شود [۲]:

$$I_r = I_{r0} \left(\exp \left(\frac{qV}{2kT} \right) - 1 \right) \quad (2-25)$$

که در آن:

$$I_{r0} = \frac{qA_{eff}n_iw}{2\tau} \quad (2-26)$$

که τ ، طول عمر حامل های اکثریت در تهی لایه، w پهنای تهی لایه و n_i تراکم حامل های ذاتی است. این جریان معمولاً با جریان گسیل گرما-یونی همراه بوده و می تواند به انحراف ضریب ایده آلی از مقدار یک منجر شود.

۲-۳- عوامل انحراف مشخصه $I-V$ بایاس وارون از وضعیت ایده آل

برطبق نظریه گسیل گرما-یونی، بزرگی جریان وارون دیود در حالت ایده آل از معادله (۲-۱۰) به دست می آید؛ ولی در بعضی موارد، همان طور که در گفتار چهارم خواهیم دید، عوامل متعددی سبب انحراف رفتار دیود از وضعیت ایده آل می شوند. در ادامه این بخش به معرفی این عوامل پرداخته ایم.

۲-۳-۱- وابستگی ارتفاع سد شاکلی به میدان الکتریکی

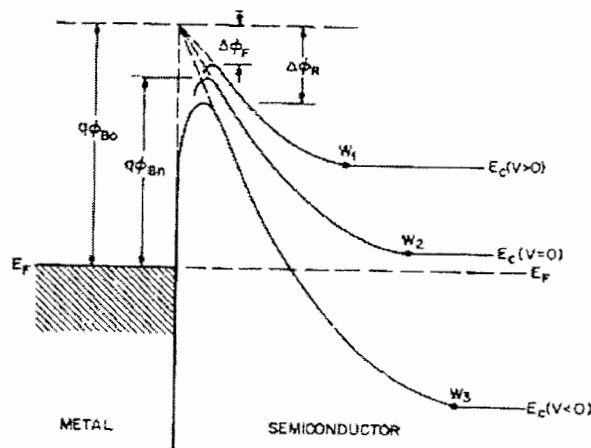
جریان اشباع معکوس I_s (معادله ۲-۱۰) در شرایطی صادق است که ارتفاع سد شاکلی ثابت باشد. چنانچه می دانیم ارتفاع سد شاکلی (ϕ_b) تحت تاثیر نیروی بار تصویری با افزایش بیشینه شدت میدان الکتریکی در سد (ϵ_{max}) کاهش می یابد [۱۷]. با توجه به متناسب بودن ϵ_{max} و V_r (ولتاژ بایاس وارون)، معادله (۲-۷)، با افزایش V_r جریان به اشباع نرسیده و متناسب با $\exp \left(\frac{\Delta\phi}{kT} \right)$ افزایش می یابد که $\Delta\phi$ همان کاهش ارتفاع سد به دلیل حضور میدان الکتریکی می باشد و برابر است با:

$$\Delta\phi = \left(\frac{q\epsilon_{ext}}{4\pi K\epsilon_0} \right)^{1/2} \quad (2-27)$$

که در آن K ثابت دی الکتریک نیمرسانا بوده و مقدار آن برای سیلیکون ۱۱/۹ است [۱]. بنابراین جریان اشباع، معادله (۲-۱۰)، به صورت زیر درمی آید:

$$I_s = A_{eff} A^* T^2 \exp\left(\frac{-q(\phi_b - \Delta\phi)}{kT}\right) \quad (2-28)$$

شکل ۲-۷ اثر کاهش ارتفاع سد شاتکی را در بایاس مستقیم و وارون تحت تاثیر نیروی بار تصویری نشان می دهد.



شکل ۲-۷- اثر کاهش ارتفاع سد در بایاس خارجی.

کاهش ارتفاع سد در بایاس مستقیم و وارون به ترتیب $\Delta\phi_F$ و $\Delta\phi_R$ است [۱].

۲-۳-۲- اثر تونل زنی

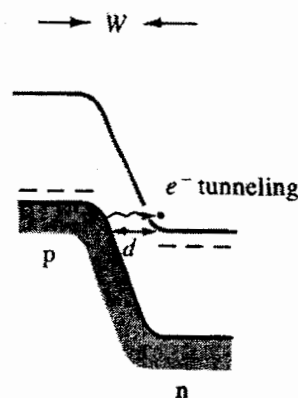
پدیده تونل زنی از داخل سد در بایاس وارون در مقایسه با بایاس مستقیم از اهمیت بیشتری برخوردار است. دلیل این مساله آنست که پهنای سد پتانسیل در ولتاژهای وارون نسبتاً بزرگ در انرژی های کمتر از ارتفاع سد برای تونل زنی الکترون ها از فلز به نیمرسانا به اندازه کافی باریک می شود. این پدیده بخصوص در مجاورت نقاط گوشه ای اتصال فلز/ نیمرسانا حائز اهمیت است؛ چون در این نقاط میدان الکتریکی بسیار بزرگ بوده و پهنای سد به شدت باریک می شود. در بخش ۲-۵ این موضوع را بیشتر توضیح خواهیم داد.

۲-۴- سازوکارهای شکست پیوندگاه

اگر ولتاژ وارون به اندازه کافی بزرگی به پیوندگاه اعمال شود، پیوندگاه به شکست می رسد و جریان بسیار بزرگی را هدایت می کند. دو سازوکار مهم شکست عبارتند از: اثر زرنر و تکثیر بهمنی [۱]. در این بخش به طور خلاصه به معرفی این فرایندها پرداخته ایم.

۲-۴-۱- شکست زنی

نظریه زنر در مورد شکست در سال ۱۹۳۴ ارائه شد. بر طبق آن اگر میدان الکتریکی قوی (از مرتبه $10^6 V/cm$ و بزرگتر) در راستای وارون به پیوندگاه اعمال شود، حامل ها به داخل سد شاتکی کشیده می شوند. این سازوکار کوانتومی تونل زنی نام دارد [۱۷]. شرط اساسی برای شکست زنی این است که انبوهی از حالت های اشغال شده توسط یک سد باریک و کم ارتفاع از انبوهی از حالت های اشغال نشده جدا شود، (شکل ۲-۸). این شرایط در پیوندگاه هایی رخ می دهد که در آنها عرض تهی لایه بسیار کوچک است. در ولتاژ وارون کمتر از $1V$ ، ممکن است پهنای تونل زنی، d ، برای شروع این فرایند خیلی بزرگ باشد، اما با افزایش ولتاژ وارون (تا چند ولت)، پهنای تونل زنی کاهش یافته و شکست زنی غالب می شود [۲]. بزرگی میدان الکتریکی بحرانی برای وقوع پدیده تونل زنی زنی ارتباط مستقیمی با تراکم ناخالصی در دیود دارد، لذا این نوع شکست بیشتر در پیوندگاه های با آلایش بالا اتفاق می افتد [۹].



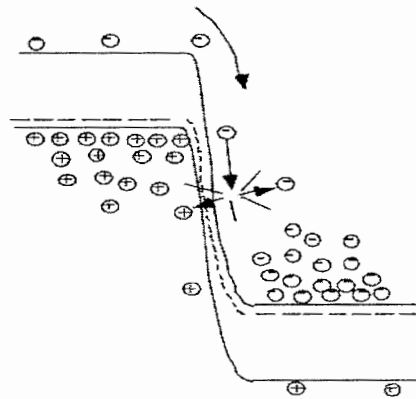
شکل ۲-۸- اثر زنر در بایاس وارون. الکترون از طرف p به طرف n تونل زده است [۲].

۲-۴-۲- شکست بهمنی

عدم توجه رفتار برخی دیودها به کمک نظریه زنر، مک آفی و مک کی^۱ را بر آن داشت تا نظریه جدیدی مبتنی بر تکثیر حامل ها ارائه دهند. این سازوکار در پیوندگاه های با آلایش متوسط رخ می دهد [۱]. این فرایند شامل یونش برخوردی اتم های میزبان با حامل های پر انرژی است. فرایند

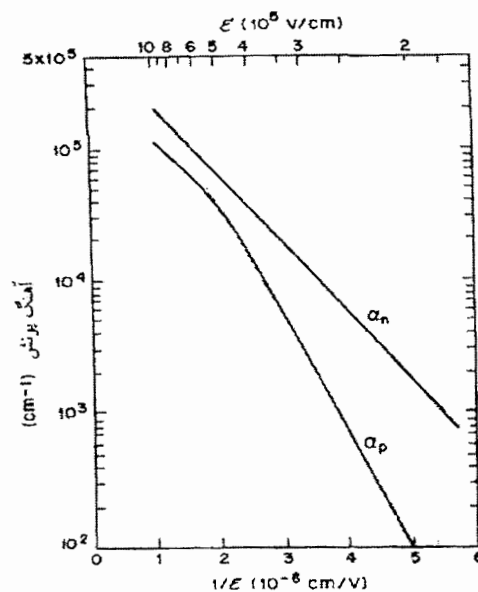
^۱ McAfee, McKay

تکثیر به این صورت است که حامل ها در میدان های الکتریکی بالا می توانند آنچنان شتابدار شوند که در اثر برخورد با اتم های شبکه پیوند آنها را شکسته و زوج های الکترون- حفره ایجاد کنند؛ زوج های الکترون- حفره تولید شده نیز به نوبه خود فرایند را ادامه داده و زوج های دیگری تولید می کنند. این فرایند در شکل ۹-۲ نشان داده شده است.



شکل ۹-۲- طرح ساده ای نشان دهنده یونش برخوردی حامل ها [۳].

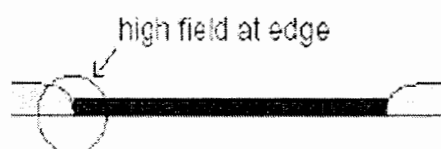
شکل ۱۰-۲ آهنگ یونش الکترون و حفره (α_n و α_p) را در مورد Si برحسب میدان الکتریکی نشان می دهد. پیداست که با افزایش میدان الکتریکی، میزان یونش حامل ها افزایش می یابد.



شکل ۱۰-۲- میزان یونش اندازه گیری شده برحسب میدان الکتریکی برای Si [۱].

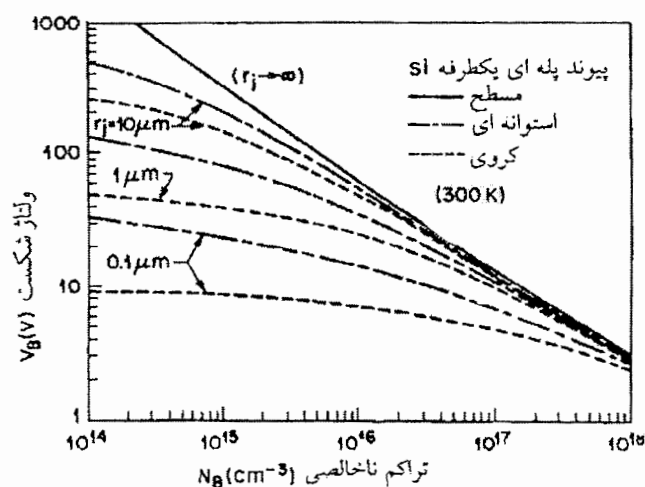
۵-۲- اثر انحنا پیوندگاه روی ولتاژ شکست

معمولا پیوندگاه فلز- نیمرسانا دارای ناحیه ای مسطح با لبه های تقریبا استوانه ای و نوک تیز است. اگر ماسکی که در لایه نشانی استفاده شده شامل گوشه های تیز باشد، گوشه پیوندگاه تقریبا کروی شکل خواهد بود [۱]، (شکل ۱۱-۲). از آنجا که نواحی کروی یا استوانه ای دارای شدت میدان بالاتری می باشند، لذا تعیین کننده ولتاژ شکست هستند.



شکل ۱۱-۲- لبه تیز در محل اتصال فلز- نیمرسانا.

در شکل ۱۲-۲ اثر انحنا پیوندگاه روی ولتاژ شکست برحسب تراکم ناخالصی برای پیوندگاه پله ای یکطرفه Si نشان داده شده است. خط پر مربوط به پیوندگاه مسطح است. پیداست که در پیوندگاه های کروی با تراکم ناخالصی پایین (10^{14} cm^{-3})، ضمن آنکه شعاع پیوندگاه (r_j) کوچکتر می شود، ولتاژ شکست بطور شدیدی کاهش می یابد [۱].



شکل ۱۲-۲- ولتاژ شکست برحسب تراکم ناخالصی برای پیوندگاه پله ای یکطرفه با شکل هندسی استوانه ای و کروی که در آن شعاع انحنا پیوندگاه است [۱].

۲-۶- اتصال های فلز- سیلیکون

از مدت ها پیش معلوم شده است که سیلیکون در دمای بازپخت مناسب با عناصر زیادی از جدول تناوبی واکنش داده و تشکیل سیلیساید می دهد [۲]. از زمان کشف این مواد دانشمندان زیادی روی بررسی خواص و کاربرد آنها مطالعه کردند. آلومینیم رایج ترین فلز مورد استفاده برای اتصال با سیلیکون می باشد [۱۸]. از مهم ترین ویژگی های سیلیسایدهای فلزی علاوه بر سهولت ساخت می توان به موارد زیر اشاره کرد:

الف- از آنجا که مقاومت الکتریکی آنها شبیه فلز است، لذا به عنوان اتصال فلزی استفاده می شوند.

ب- در دیودهای شاتکی بعنوان یکسوساز کاربرد دارند.

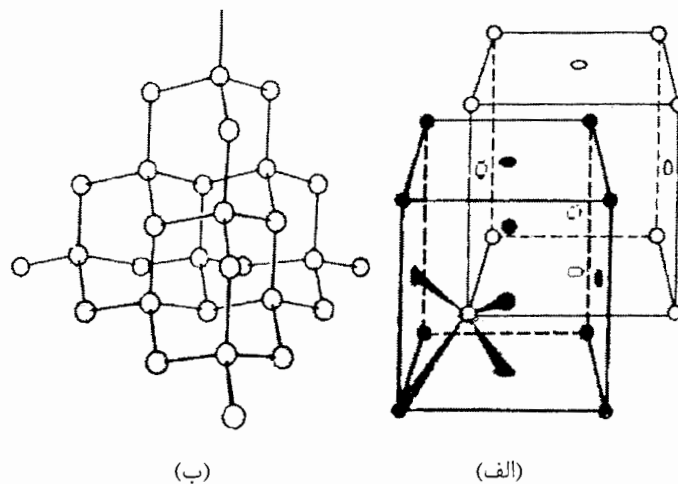
مهم ترین روش های ساخت سیلیساید عبارتند از: بازپخت کوره ای (*Furnace annealing*)، بازپخت با باریکه لیزر پیوسته (*CW Laser beam annealing*)، بازپخت با لیزر پالسی (*Pulsed Laser annealing*) و ترکیب اشعه- یون (*Ion-Beam Mixing*) [۲].

۲-۷- مختصری از ویژگی های سیلیکون

از آنجا که در این پروژه رفتار دیودهای شاتکی حاصل از اتصال Si با فلزات مختلف مورد توجه قرار گرفته است، لذا در این بخش به معرفی برخی از ویژگیهای این ماده می پردازیم که در گفتارهای بعد از آنها استفاده نموده ایم.

۲-۷-۱- ساختار بلوری

از نظر بلورشناسی سیلیکون دارای ساختار الماسی است. این ساختار را می توان به صورت دو شبکه *fcc* در هم رفته توصیف کرد که در امتداد قطر اصلی به اندازه ربع طول آن جابجا شده اند، شکل ۲-۱۳-الف. یک مدل مفید برای درک ساختار الماسی این است که هر اتم را در مرکز یک چهاروجهی تصور کنیم که چهار اتم بلافاصل آن در چهار گوشه آن چهار وجهی قرار دارند [۱۹]، شکل ۲-۱۳-ب.



شکل ۲-۱۳- (الف) ساختار الماسی از دو شبکه fcc در هم فرورفته تشکیل شده است.

(ب) آرایش چهاروجهی اتم ها در ساختار الماسی [۱۹].

سیلیکون، نیمرسانایی با گاف نواری غیر مستقیم می باشد که بزرگی آن در دمای اتاق

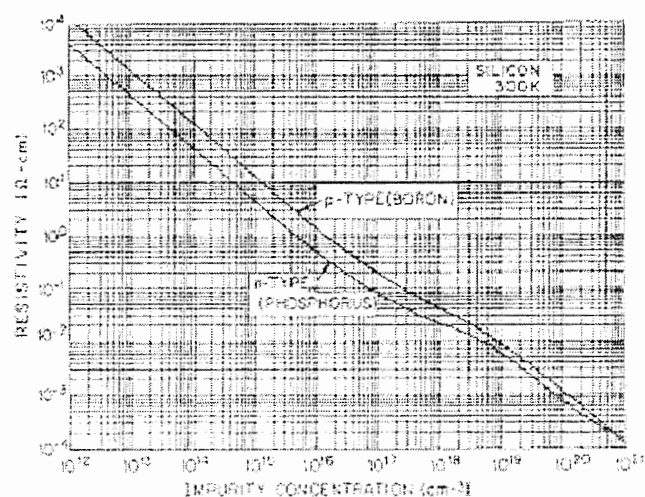
1.12 eV است [۱].

۲-۷-۲- وابستگی مقاومت ویژه زیرلایه به تراکم ناخالصی

چنانچه مقاومت ویژه لایه سیلیکون معلوم باشد، تراکم ناخالصی آن را می توان با استفاده از شکل

۲-۱۴ به دست آورد. در این شکل مقاومت ویژه اندازه گیری شده سیلیکون نوع p و n برحسب

تراکم ناخالصی در دمای اتاق نشان داده شده است.



شکل ۲-۱۴- مقاومت ویژه برحسب تراکم ناخالصی در Si [۱].

- 1- S.M.Sze, 1981: *Physics of semiconductor devices*, Wiley.
- 2- B.L.Sharma, 1984: *Metal semiconductor Schottky barrier junction & their application*, Plenum press, Newyork & London.
- 3- B.G.Streetman, 1990: *Solid state electronic device*, Third edition, Prentice-Hall.
- 4- W.Schottky, 1938, *Naturwissen schaften*, 26, 843.
- 5- N.F.Mott, 1938: *Note on the contact between a metal & an insulator or semiconductor*, *Proc.Camb.Phil. Soc.* 34, 568-572.
- ۶- رشید فریور، ۱۳۸۳: متخلخل سازی سیلیکون و لایه نشانی پلاتین بر روی سیلیکون به منظور ساخت آشکارساز شاتکی، پایان نامه کارشناسی الکترونیک، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی.
- ۷- نوید علایی شینی، ۱۳۸۱: ساخت آرایه آشکارساز PtSi و تصویربرداری با آن، پایان نامه کارشناسی ارشد الکترونیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- 8- E.H.Rhoderick, 1974: *Metal semiconductor contacts*, Institute of Phys. Conf., ser. No.22.
- ۹- منصور محتشمی فر، ۱۳۷۹، اثر سیلیکون متخلخل بر روی کارایی کوانتومی آشکارساز PtSi/Si، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر.
- 10- J.Liou, 1994: *Advanced semiconductor device physics & modeling*.
- 11- A.Bindal, R.Wachnik, W.Ma, 1990: *Observation of recombination cener- assisted current in Al(Cu) penetrated PtSi/Si Schottky diodes*, *J.Appl. Phys.* 68(12), 6259-6262.
- 12- D.B.Dimitrov, 1995: *Cyrrant-voltage characterization os porous silicon layers*, *Physical Review B*, 51(3), 1562-1566.
- 13- S.Karatas, 2005: *Comparision of electrical parameters of Zn/p-Si & Sn/p-Si Schottky barrier diodes*, *Solid state communication*, 135, 500-504.
- 14- M.Siad, A.Keffous, S.Mamma, Y.Belkacem, H.Menari, 2004: *Correlation between series resistance & parameters of Al/n-Si & Al/p-Si Schottky barrier*, *Appl. Surface sci.*, 236, 366-376.
- 15- M.Witmer, 1991: *Conduction mechanism in PtSi/Si Schottky diodes*, *Physical Review B*, 43(5), 4385-4895.
- 16- E.H.Rhoderick, Williams, 1988: *Metal semiconductors contacts*.
- ۱۷- ادوارد س. یانگ، ۱۳۷۰: *مبانی قطعات نیمرسانا، ناصر تجبر، چاپ اول، مرکز نشر دانشگاهی.*
- 18- J.J.Sparks, 1994: *Semiconductor devices*.
- ۱۹- اچ.ام.روزنبرگ، ۱۳۷۶: *فیزیک حالت جامد، حسین.عشقی، حسن.عزیزی، چاپ اول، مرکز نشر دانشگاهی.*
- 20- *Metal semiconductor contacts*, 2002, *Integrated microelectronic devices*, lecture 16.
- 21- C.David Todd, 1970: *Zener & avalanche diodes*.

گفتار سه

آشکارسازهای نوری شاتکی

- مقدمه
- آشکارسازهای شاتکی فلز/ نیمرسانا

مقدمه

بی تردید نخستین آشکارساز امواج نوری چشم انسان بوده است. در طی سالیان دراز تلاش بشر برای افزایش توانایی چشم در آشکارسازی به طراحی و ساخت وسایل اپتیکی نظیر تلسکوپ و تداخل سنج منجر شد [۱]. با وجود اینکه بیش از دویست سال پیش، ویلیام هرشل، ناحیه مادون قرمزⁱ (IR) را در طیف الکترومغناطیسی کشف کرد، ولی به دلیل محدودیت های تکنیکی و ناتوانی در توجیه پدیده های مرتبط، تا مدتها پیشرفت چندانی در عرصه آشکارسازی مخصوصا در گستره این طول موج ها، $0.7 \mu m < \lambda$ ، حاصل نشد. نخستین دستاوردها در این عرصه به زمان جنگ جهانی دوم برای کاربرد نظامیⁱ دید در شبⁱ بر می گردد [۲].

کار اصلی آشکارسازها، تعیین انرژی تابشی یک یا گستره ای از طول موج هاست. برای این منظور آنها باید سیگنالی تولید کنند که متناسب با مقدار انرژی جذب شده است. آشکارسازها با توجه به اینکه بر اساس تابش شار فوتون و یا با استفاده از ماده ای که ویژگی هایش به دما حساس است عمل کنند، به دو دسته آشکارسازهای نوری و آشکارسازهای حرارتی تقسیم می شوند. امروزه آشکارسازهای نوری فراوانی برای عملکرد در شرایط متفاوت ساخته شده اند. این آشکارسازها به طرق مختلفی تقسیم بندی شده اند که از آن جمله می توان به طیف امواجی که نسبت به آن حساس می باشند اشاره کرد.

در این گفتار به نحوه عملکرد آشکارسازهای شاتکی نوری مادون قرمز و معرفی برخی پارامترهای مرتبط با آن می پردازیم.

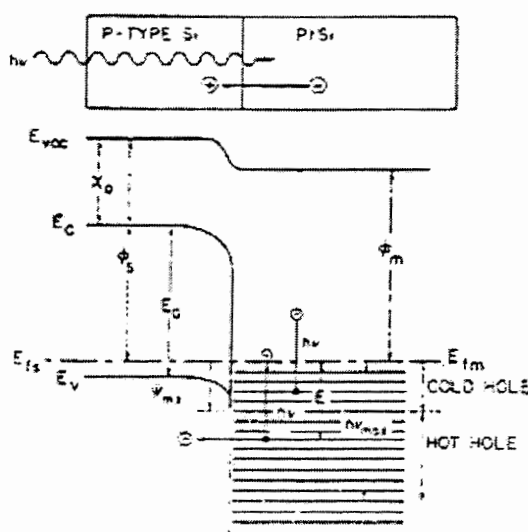
ⁱ Infrared

۳-۱- آشکارسازهای شاتکی فلز/ نیمرسانا

آشکارسازهای شاتکی در گستره طول موج های فرابنفش^۱، مرئی و مادون قرمز کاربرد دارند. فلزات مختلفی برای ساخت این قطعات به کار می روند که مهم ترین آنها پلاتین، پالادیم و ایریدیم است. از آنجا که ما در این پروژه علاقه مند به بررسی ویژگی های اپتیکی آشکارساز $PtSi/p-Si$ و تاثیر متخلخل سازی Si بر عملکرد این قطعه می باشیم، لذا توجه خود را در ادامه این گفتار به شناخت ساختار و فرایندهای مرتبط با آشکارسازی فوتون ها در این قطعه معطوف کرده ایم.

آشکارساز $PtSi/p-Si$ رایج ترین آشکارساز در ناحیه $3-5 \mu m$ می باشد [۲]. به دلیل کوتاه بودن ارتفاع سد شاتکی در این آشکارساز، $0.22 eV$ ، و افزایش قابلیت آن در آشکارسازی فوتون ها، از آن در دمای پایین (۷۷ کلوین) استفاده می شود.

نوار انرژی اتصال $PtSi/Si$ در شکل ۳-۱ نشان داده شده است. لایه سیلیساید مانند فلز رفتار می کند و اتصال $PtSi/Si$ شبیه اتصال فلز/ نیمرسانا بوده و خاصیت یکسوسازی نشان می دهد. آنچه باعث استفاده روزافزون از این آشکارساز شده، سادگی ساخت و ارزانی آن نسبت به دیگر آشکارسازها، قابلیت انطباق با مدارات مجتمع سیلیکونی، پایین بودن نویز، دمای ساخت پایین و یکسان بودن مشخصات آشکارسازها در تولید انبوه است [۳].



شکل ۳-۱- نوار انرژی آشکارساز $PtSi/p-Si$ [۴].

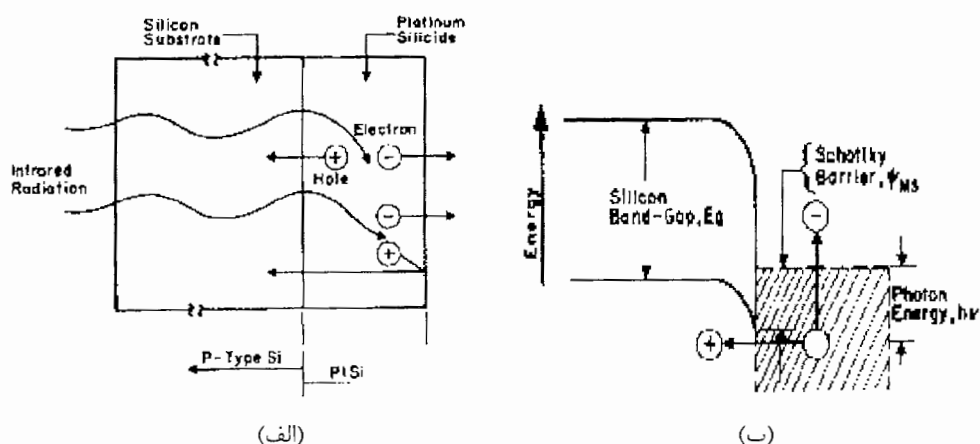
Ultraviolet^۱

۳-۱-۱- نحوه آشکارسازی در آشکارساز شاتکی PtSi/Si

دیود شاتکی PtSi/Si نخستین بار در سال ۱۹۷۳ برای آشکارسازی امواج λ ساخته شد [۴،۵]. آشکارساز PtSi/Si به دو صورت به کار برده می شود به این معنی که می توان فوتون ها را هم از سمت Si (پشت) و هم از سمت لایه سیلیساید (جلو) تاباند. شکل ۳-۲-الف چگونگی آشکارسازی در قطعه فوق را در شرایطی که فوتون ها از سمت پشت، یعنی از سمت Si تابانده شده اند، نشان داده است. آن تعداد از فوتون ها که انرژی کمتر از گاف نواری Si، 1.1 eV ، دارند (این مقدار در مورد Si متخلخل به طور متوسط 1.8 eV است [۷])، از آن عبور کرده و در لایه سیلیساید جذب و در آنجا باعث تولید حفره هایی در تراز های پایین تر از تراز فرمی می شوند (حفره های داغ). حفره های داغی که در مرز Si و سیلیساید تشکیل می شوند و قادرند از سد شاتکی عبور کنند، داخل Si تزریق می شوند. بنابراین به طور خلاصه می توان سه مرحله برای آشکارسازی فوتون ها در نظر گرفت: (الف) تحریک نوری، (ب) ترابرد و (ج) گسیل حامل ها از بالای سد شاتکی. چنانچه سازوکار گسیل حامل های داغ TE باشد، فوتون هایی آشکار می شوند که انرژی آنها به صورت زیر باشد:

$$\phi_b < h\nu < E_g \quad (۱-۳)$$

که در آن E_g و ϕ_b به ترتیب گاف نواری Si و ارتفاع سد شاتکی می باشد [۴،۲].

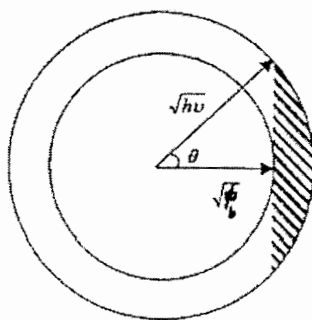


شکل ۳-۲- (الف): نحوه آشکارسازی در آشکارساز PtSi/p-Si

(ب): گسیل حفره های داغی که می توانند از سد شاتکی عبور کنند [۸].

به بیان دیگر کسری از حامل های داغ می توانند به داخل نیمرسانای Si تزریق شوند که مؤلفه عمودی اندازه حرکت آنها در فصل مشترک سیلیساید و Si برای غلبه بر سد شاتکی کافی باشد. حامل های داغی که چنین شرطی را دارا باشند در یک قطاع کروی در فضای اندازه حرکت قرار دارند، شکل ۳-۳، θ زاویه فضایی حفره هایی است که در این قطاع قرار دارند و بیشترین مقدار آن از رابطه زیر به دست می آید [۴]:

$$\theta = \cos^{-1} \left(\sqrt{\frac{\phi_b}{h\nu}} \right) = \cos^{-1} \left(\sqrt{\frac{\phi_b \lambda}{1.24}} \right) \quad (2-3)$$



شکل ۳-۳- طرح ساده ای از کسری از حامل ها در فضای اندازه حرکت که توانایی عبور از سد را دارند [۹].

رابطه (۱-۳) اساس تعریف کمیتی به نام طول موج قطع است که در بخش بعد به آن می پردازیم.

۳-۱-۲- طول موج قطع در آشکارساز شاتکی PtSi/Si

همان گونه که در بخش قبل توضیح داده شد، معادله (۱-۳)، توانایی گسیل حامل های تحریک شده از بالای سد به انرژی فوتون تابیده و ارتفاع سد شاتکی بستگی دارد. فوتون های تابیده بعد از جذب در لایه سیلیساید سبب تحریک حفره ها از حالت های پایینی تراز فرمی خواهند شد. حفره های تولید شده می توانند حرکت کرده و به ترازهای مجاز در نوار ظرفیت نیمرسانا گسیل شوند. جزئیات این فرایند در شکل ۱-۳ نشان داده شده است. چنانچه انرژی فوتون های تابیده شده کمتر از سد پتانسیل شاتکی باشد، حفره های تولید شده در لایه سیلیساید انرژی کافی برای عبور از بالای سد

را نخواهند داشت، شکل ۳-۲-ب، لذا تابش با طول موج های بالاتر از λ_e آشکار نخواهد شد. λ_e بعنوان طول موج قطع آشکارساز تعریف شده و از رابطه زیر به دست می آید:

$$\lambda_e(\mu m) = \frac{1.24}{\phi_s(eV)} \quad (3-4)$$

با در نظر گرفتن ارتفاع سد شاتکی برای آشکارساز $Si/PtSi$ نوع p و n (به ترتیب ۰/۲۲ و ۰/۸۶ الکترون ولت) و چنانچه سازوکار TE فرایند غالب در گسیل حامل های داغ باشد، طول موج قطع در این آشکارسازها به ترتیب $5/6 \mu m$ و $1/46 \mu m$ است [۴]. تکنیک های مختلفی برای افزایش طول موج قطع در آشکارسازها پیشنهاد شده است که همگی مبتنی بر کوچکتر کردن ارتفاع سد شاتکی هستند [۱۰]. بدیهی است در صورتی که فرایندهای دیگری از قبیل تونل زنی در تزریق حامل های داغ / از داخل سد شاتکی به لایه Si مؤثر باشند، آشکارسازی فوتون ها محدود به طول موج هایی که از معادله (۳-۲) به دست می آیند نخواهد بود. این موضوع در بخش ۵-۲ بررسی شده است.

۳-۱-۳- پاسخ در آشکارساز شاتکی $PtSi/Si$

یکی از مشخصه های مهم آشکارساز، پاسخ آن است که به صورت جریان خروجی به ازای واحد توان ورودی تعریف می شود:

$$R = \frac{I}{P} \quad (3-5)$$

که I و P به ترتیب جریان خروجی قطعه و توان منبع و R پاسخ برحسب A/W است [۱۱]. پاسخ آشکارسازهای شاتکی از رابطه فاولر به دست می آید [۱۲]:

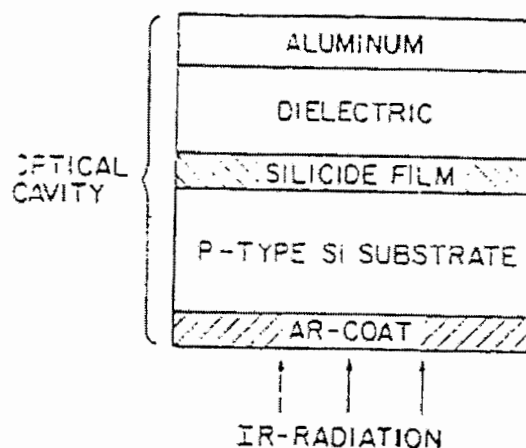
$$R = C_1 \left(1 - \frac{\phi_s \lambda}{1.24} \right)^2 \quad (3-6)$$

که در آن λ طول موج تابش $h\nu$ برحسب μm و C_1 ضریب بازده کوانتومی برحسب V^{-1} بوده و برای آشکارساز $PtSi/Si$ معمولاً $0/2-0/5 V^{-1}$ است [۱۱]. از معادله (۳-۶) پیداست که پاسخ آشکارساز به شدت به طول موج فوتون های تابشی وابسته است.

از آنجا که آشکارسازهای شاتکی در گستره $3-5 \mu m$ پاسخ بسیار کوچکی دارند ($10^{-4}-10^{-1} A/W$) [۱۴، ۱۳، ۱۰، ۸]، لذا روشهای مختلفی برای بهبود آن به کار گرفته شده است، که از آن جمله می توان به استفاده از ضخامت بهینه لایه سیلیساید و نیز کاواک نوری اشاره کرد. از نکات مهم

در هنگام لایه نشانی سیلیساید آن است که هر قدر این لایه ضخیم تر باشد احتمال جذب فوتون ها در آن افزایش یافته لکن تعداد برخوردهایی که حامل ها پیش از رسیدن به فصل مشترک متحمل می شوند افزایش می یابد که این مساله به کاهش پاسخ می انجامد. بنابراین چنانچه ضخامت لایه سیلیساید قابل مقایسه با مسافت آزاد میانگین حامل های داغ باشد، جریان نوری قطعه افزایش خواهد یافت [۴]. این مقدار برای آشکارساز $Si / PtSi$ معمولی $20-100 A^*$ گزارش شده است [۱۵].

روش دیگر برای بهبود پاسخ قطعه استفاده از کاواک نوری است که اجزای آن در شکل ۳-۴ نشان داده شده است.



شکل ۳-۴ - طرح ساده شده کاواک نوری [۴].

بطور کلی این ساختار به دلیل داشتن لایه ضد بازتاب و بویژه لایه آلومینیمی، که به عنوان آینه عمل کرده و در بازگرداندن فوتون های جذب نشده به لایه سیلیساید مؤثر است، احتمال جذب فوتون ها و در نتیجه پاسخ قطعه را افزایش خواهد داد [۴].

مراجع

- ۱- محمد هادی رئیس‌یان، ۱۳۸۲، آشکارسازهای نوری، سمینار کارشناسی ارشد.
- 2- P.N.Dennis, 1986, *photodetectors an introduction to current technology*.
- 3- F.Raissi, M.Mohtashami Far, 2002: *highly sensitive PtSi/Porous silicon Schottky detectors*, *IEEE sensors journal*, 2(5).
- ۴- منصور محتشمی فر، ۱۳۷۹، اثر سیلیکون متخلخل بر روی کارایی کوانتومی آشکارساز PtSi/Si، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر.
- 5- F.D.Shepherd, A.C.Yang, 1973: *Si Schottky retainsfor infrared imaging*, in *IEDM tech. Dig.*
- 6- F.D.Shepherd, 1994: *recent advances in platinum silicide IR focal plane arrays*, in *IEDM tech. Dig.*
- 7- J.T.Frederiksen, P.G.Melcher, E.Veje, 1998: *Electrical bandgap energy of porous Silicon & the band offsets at the porous silicon/C-Si heterojunction measured versus sample temperature*, *Physical Review B*, 58(12), 8020-8024.
- 8- E.L.Dereniak, R.E.Sampson, 1990: *IR detectors & focal plane arrays*, *Proceedings SPIE the international society for optical engineering*.
- 9- F.Raissi, 2003: *A possible explanation for high quantum efficiency of PtSi/Porous Silicon Schottky detectors*, *IEEE transactions on electron device*, 50(4), 1134.
- 10- S.Tohyama, 1995: *A high fill factor & progressive scan PtSi Schottky barrier IR-CCD image sensor using new wiring technology*, *IEEE transactions on electron device* 42(8).
- ۱۱- اسرافیل راثنی، ۱۳۷۶، طراحی و ساخت دیود شاتکی PtSi/Si، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید بهشتی.
- 12- J.Cohen, J.Vilms, R.J.Archer, 1968: *investigation of semiconductor Schottky barriers for optical detection & cathodic emission*, *Air force Cambridge Research Labs, report no.680651*.
- 13- N.Yutani: *1040*1040 element PtSi Schottky barrier IR image sensor*, *IEDM*(91-175).
- 14- B.Y.Tsaur, 1988. *Pt-Ir silicide Schottky barrier IR detectors*, *IEEE electron device letter* 9(2).
- 15- W.F.Kosonochy, H.Elabd, 1983: *Schottky barrier IR charge- coupled device focal plane array*, 27th *SPIE Intenationl Technical Symposium*, 443.
- 16- H.Elabd, W.F.Kosonochy, 1982: *Theory & measurement of photoresponse for thin film Pd2Si & PtSi IR Schottky barrier detectors with optical cavity*, *RCA Review*, 44.
- 17- W.F.Kosonochy, F.V.Shalleross, T.S.Villani, J.V.Gropp, 1985: *160*244 element PtSi Schottky barrier IR-CCD image sensor*, *IEEE transactions on electron device* 32(8).

- 18- *J.Silverman,1986, mat. Res. Soc. Symp. Proc.54.*
- 19- *W.A.Cabanski,1991, IR phys.32.*
- 20- *J.M.Mooney, J.Silverman,1985: The theory of hot electron photoemission in Schottky barrier IR detector, IEEE transactions on electron device ED32(1).*

گفتار چهارم

بررسی مشخصه $I-V$ دیودهای شاتکی حاصل از اتصال فلز با Si معمولی و متخلخل

- مقدمه
- بررسی مشخصه $I-V$ دیودهای سد شاتکی فلز/سیلیکون نوع n
- بررسی مشخصه $I-V$ دیودهای سد شاتکی فلز/سیلیکون نوع p
- نتیجه گیری

مقدمه

پیش از مشاهده لومینسانس قوی سیلیکون متخلخل، تلاش های زیادی برای شناخت خواص الکتریکی این ماده صرف شد؛ اما بعد از این کشف بزرگ اکثر مطالعات روی بررسی خواص اپتیکی آن ماده متمرکز گردید [۱]. با وجود پیشرفت های اساسی ای که در زمینه ساخت و کاربرد سیلیکون متخلخل در قطعات الکترونیکی و ایتوالکترونیکی صورت گرفته است، هنوز شناخت کاملی از خواص الکتریکی و اپتیکی این ماده در دست نیست. آنچه به ناشناخته ماندن خواص الکتریکی سیلیکون متخلخل دامن می زند، قابلیت ساخت آن در ابعاد (ماکرومتر-مزمومتر- میکرومتر) و شکل های ساختاری متفاوت (استوانه ای، قیفی، شاخه ای و...) است.

در این فصل ابتدا به بررسی سازوکارهای مؤثر در رسانندگی دیودهای شاتکی در اتصالات مربوط به فلزهای گوناگون، شامل سیلیساید ($PtSi$)، طلا (Au)، آلومینیم (Al) و رسانای شفاف اکسید ایندیوم قلع (ITO)، با زیرلایه Si در شرایط بایاس مستقیم و وارون می پردازیم. با توجه به اینکه یکی از اهداف ما از این بررسی ها شناخت سازوکارهای مؤثر ترابری حامل ها در شرایط بایاس وارون در آشکارسازهای مادون قرمز است که در گفتار پنجم به تشریح برخی داده های گزارش شده پرداخته شده، لذا لازم می آید نخست فرایندهای مؤثر در مشخصه $I-V$ این قطعات را در شرایط تاریکی بشناسیم. در ادامه ابتدا به بررسی رفتار دیودهای شاتکی با زیرلایه Si غیر متخلخل و سپس نمونه های متخلخل به ترتیب با رسانندگی نوع n و p می پردازیم. به منظور تسهیل در بیان مطالب آتی در مواردی که با Si متخلخل سروکار داشته باشیم به صراحت گفته خواهد شد، در غیر این صورت منظور ما از زیرلایه Si ، همان سیلیکون معمولی و بدون تخلخل خواهد بود.

۴-۱- بررسی مشخصه I-V دیودهای شاتکی فلز/ Si نوع n

در این بخش قصد داریم به تحلیل مشخصه $I-V$ دیودهای سد شاتکی فلز/ Si نوع n در بایاس مستقیم و بایاس وارون بپردازیم. مشخصات نمونه های بررسی شده برای زیرلایه Si، غیرمتخلخل و متخلخل به ترتیب در جداول ۴-۱ و ۴-۲ آمده است. (لازم به ذکر است که مقادیر گزارش نشده در این جداول ناشی از نامشخص بودن آنها در مقالات مربوطه می باشد).

جدول ۴-۱- برخی ویژگی های دیودهای فلز/ Si نوع n.

شماره	پژوهشگر	سمتگیری زیرلایه Si	تراکم آرایش زیرلایه (cm^{-3})	مساحت مؤثر دیود (cm^2)	فلز اتصال
۱	Bindal [۲]	-	2×10^{17}	2×10^{-6}	PtSi
۲	Witmer [۳]	(۱۰۰)	10^{15}	2×10^{-3}	PtSi

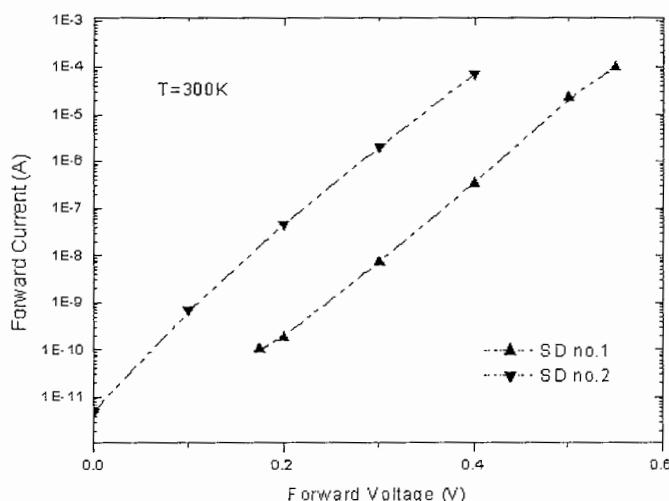
جدول ۴-۲- برخی ویژگی های دیودهای فلز/ Si متخلخل نوع n. مقادیر ذکر شده در داخل پرانتز در ستون درصد تخلخل پیش بینی ما مبتنی بر مطالب بخش ۱-۳-۱ است و مؤلف گزارشی در این مورد نداشته است.

شماره	پژوهشگر	سمتگیری زیرلایه Si	مقاومت ویژه زیرلایه (Ωcm)	مساحت مؤثر دیود (cm^2)	فلز اتصال	چگالی جریان در روش خوردگی الکتروشیمیایی (mA/cm^2)	درصد تخلخل
۱	Algun [۴]	(۱۱۱)	$0.006-0.015$	25×10^{-5}	Al	۵ ۳۰	۴۰٪ و ۶۰٪
۲	Oguro [۵]	(۱۱۱)	0.018	-	Au	۱۰۰	(۷۰٪)
۳	Raissi [۶]	(۱۰۰)	$10-33$	۲	PtSi	۵۰	۵۰٪

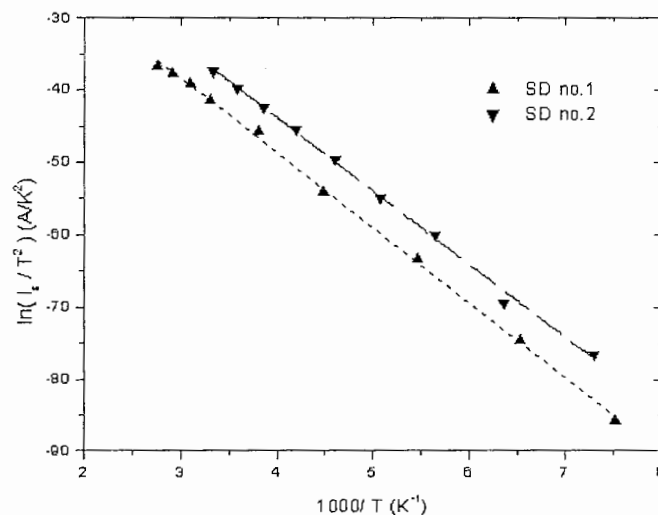
۴-۱-۱- مشخصه $I-V$ دیودهای شاتکی در شرایط بایاس مستقیم

الف) مشخصه $I-V$ دیودهای شاتکی با Si غیر متخلخل

گزارش ها نشان می دهد که گسیل گرما- یونی (TE) نقش مهمی در تحلیل رفتار مشخصه $I-V$ بایاس مستقیم دیودهای فلز/ Si معمولی بر عهده دارد [۲،۳]. شکل ۴-۱ مشخصه $I-V$ نمونه های ۱ و ۲ در جدول ۴-۱ را در شرایط بایاس مستقیم در دمای اتاق نشان می دهد. این داده ها که در یک نمودار نیم لگاریتمی رسم شده است، حاکی از تغییرات نمایی جریان با ولتاژ دارد. در این حالت می توان انتظار داشت که سازوکار TE ، معادله (۲-۹)، بتواند این رفتار را به خوبی توصیف کند. برای این منظور با رسم منحنی $\ln(I_s/T^2)$ برحسب $1000/T$ (شکل ۴-۲) و پیدا کردن شیب آنها $(q\phi_b/1000k)$ ، می توان با استفاده از روش انطباق کوچکترین مربعات ارتفاع سد شاتکی (ϕ_b) را به دست آورد. لازم به ذکر است که I_s از برون یابی مشخصه $I-V$ (در $V=0$) به دست می آید. مقدار ضریب ایده آلی را نیز از انطباق داده های شکل ۴-۱ در معادله (۲-۹) به دست آورده ایم. جدول ۴-۳ نتایج این محاسبات را نشان می دهد. به منظور تائید صحت محاسبات مقادیر گزارش شده نیز در جدول آمده است.



شکل ۴-۱- نمودار تغییرات جریان برحسب تابعی از ولتاژ برای دیودهای شاتکی شماره ۱ و ۲ در جدول ۴-۱، [۲،۳].



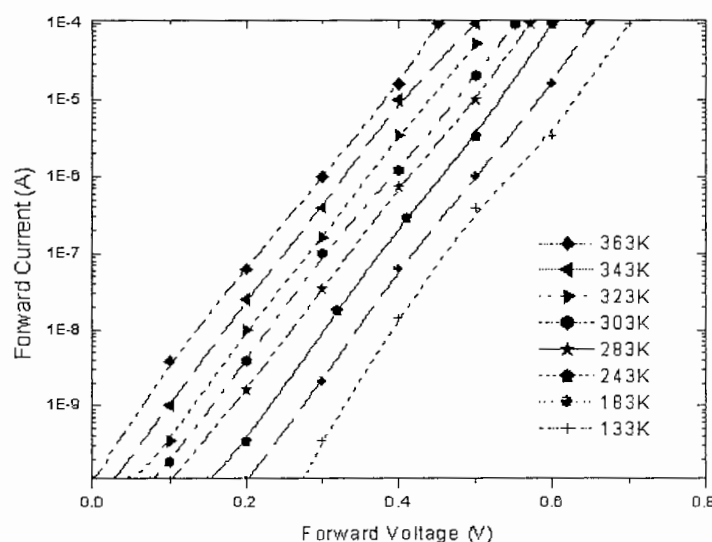
شکل ۲-۴- برگرفته از داده های شکل ۱-۴ به منظور تعیین ارتفاع سد شاتکی برای دیودهای ۱ و ۲ در جدول ۱-۴.

جدول ۳-۴- مقادیر ضریب ایده آلی و ارتفاع سد محاسبه شده و مقادیر گزارش شده برای نمونه های غیر متخلخل جدول ۱-۴.

نمونه	محاسبه شده		گزارش شده	
	n	$\phi_b (eV)$	n	$\phi_b (eV)$
۱	۱	۰/۸۹	۱/۰۲	۰/۸۸
۲	۱/۰۴	۰/۸۹	۱/۰۲	۰/۸۹

Bindal et.al. در یک نمونه دیود شاتکی خود با افزودن و بازپخت آلیاژ $Al(Cu)$ با لایه $PtSi$ به قطعه ای دست یافتند که مشخصه $I-V$ آن به ازای دماهای مختلف (۳۶۳-۱۳۳ کلوین) در شکل ۳-۴ نشان داده شده است. همانگونه که پیداست شیب مشخصه $I-V$ در این نمونه مستقل از دما است. این رفتار از ویژگی های جریان تونل زنی از طریق مراکز بازترکیب در تهی لایه، بخش ۲-۲-۲، می باشد. با توجه به معادله (۲-۱۷) در صورتی که هر یک از مجموعه داده های $I-V$ در یک دمای معین را که در شکل نشان داده شده است، به صورت تابعی از $\ln I_{III}$ برحسب ولتاژ مستقیم اعمالی (V_a) رسم نماییم، شیب آن با مقدار A متناظر خواهد بود. با تعیین این مقدار در دماهای گوناگون می توان A میانگین را به دست آورد. با اطلاع از این مقدار و در نظر گرفتن معادله (۲-۲۰) و معلوم

بودن مقدار ثابت کوانتومی α ، که برابر ۱۵۹ می باشد [۲]، می توان تعداد مراکز تونل زنی در تهی لایه (R) را به دست آورد. نتایج محاسبات ما و مقادیر گزارش شده در جدول ۴-۴ نشان داده شده است که حاکی از توافق بسیار خوب بین آنها می باشد. در ادامه به بررسی سازوکارهای مؤثر در رسانندگی بایاس مستقیم دیودهای فلز / Si متخلخل می پردازیم.



شکل ۴-۳- مشخصه $I-V$ دیود شاتکی که از بازپخت آلایژ $Al(Cu)$ با $PtSi$ (نمونه شماره ۱ در جدول ۴-۱) ساخته شده است. همانطور که پیداست شیب منحنی ها مستقل از دما است. [۲]

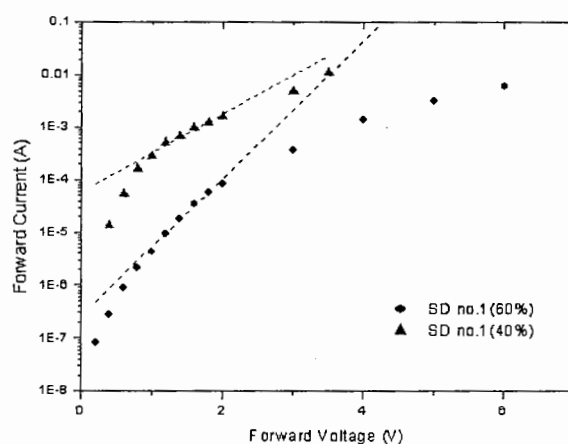
جدول ۴-۴- مقادیر محاسبه شده و گزارش شده (A) و تعداد مراکز تونل زنی در تهی لایه (R) .

	$A(A/V)$	R
محاسبه شده	۲۹/۶	۲۹
گزارش شده	۲۸	۳۲

ب) مشخصه $I-V$ دیودهای شاتکی با Si متخلخل

شکل ۴-۴ مشخصه $I-V$ قطعه شماره ۱، جدول ۴-۲، را در دمای اتاق نشان می دهد. بررسی های ما نشان می دهد که جریان گسیل گرما- یونی، معادله (۲-۹)، می تواند بیانگر رفتار

بخشی از تغییرات جریان-ولتاژ باشد. نتیجه محاسبات در شکل ۴-۴ به صورت خط چین، و مقادیر پارامترهای انطباق (n, ϕ_b) در جدول ۵-۴ آمده است. نکته جالب توجه در این محاسبات، بزرگی ضریب ایده آلی (۱۰-۳۰) است که در نمونه های با Si غیر متخلخل، همان گونه که در بخش قبل بررسی شد، مقداری بین ۱ تا ۲ است. بعلاوه گزارش های دیگری نیز مبنی بر بزرگ بودن ضریب ایده آلی (بزرگتر از ۱۰۰) در بایاس مستقیم وجود دارد [۵].



شکل ۴-۴- مشخصه دیود شاتکی با Si متخلخل شماره ۱ در دمای اتاق. منحنی های خط چین نمایانگر انطباق نظریه گسیل گرما-یونی می باشد.

جدول ۵-۴- مقادیر ضریب ایده آلی و ارتفاع سد در دیود شاتکی با Si متخلخل.

نمونه	محاسبه شده		گزارش شده	
	n	$\phi_b (eV)$	n	$\phi_b (eV)$
۱	۲۳-۴۰٪	۰/۴۶	۲۵-۳۰-۴۰٪	۰/۵۴-۰/۵۷
	۱۳-۶۰٪	۰/۶	۱۶-۲۲-۶۰٪	۰/۵۴-۰/۵۷

بزرگی ضریب ایده آلی به چگالی حالت های سطحی بالا در فصل مشترک پیوندگاه فلز/ Si

متخلخل نسبت داده شده است [۹،۸،۷،۴].

بحث فوق را می توان چنین خلاصه کرد که در دیودهای شاتکی با Si غیر متخلخل و متخلخل در شرایط بایاس مستقیم، سازوکار TE سهم عمده ترابری حامل ها را در محدوده ولتاژهای پایین بر عهده دارد. در حالت اتصال با Si غیر متخلخل ضریب ایده آلی مقداری بین ۱ الی ۲ داشته لکن در

اتصال با Si متخلخل این مقدار بسیار بزرگتر بوده و مقادیر بین ۱۰ تا ۱۰۰ برای آن گزارش شده است و ارتفاع سد شاتکی در این قطعات نیز حدود 0.5 eV می باشد؛ ضمناً بزرگی ضریب ایده آلی در اتصالات با Si متخلخل به چگالی حالت های سطحی در فصل مشترک پیوندگاه فلز/Si متخلخل نسبت داده می شود.

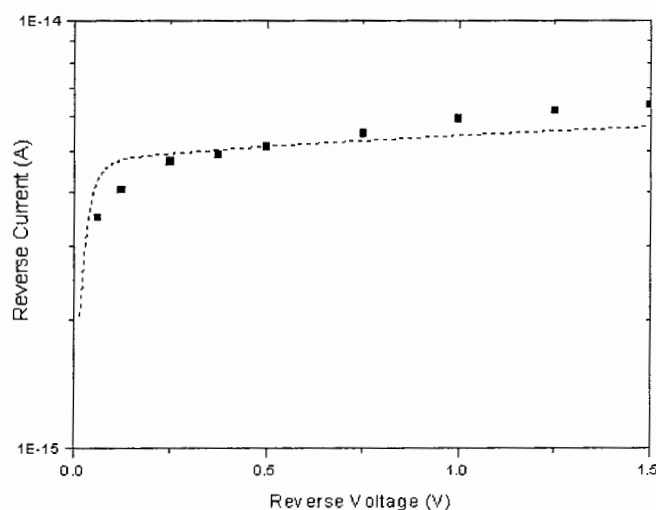
در ادامه بحث خود را به شناخت سازوکارهای مؤثر در بایاس وارون این دیودها اختصاص می دهیم.

۴-۱-۲- مشخصه $I-V$ دیودهای شاتکی در شرایط بایاس وارون

الف) مشخصه $I-V$ دیودهای شاتکی با Si غیر متخلخل

بررسی ها نشان می دهد که ترکیب سازوکارهای TE و بازترکیب نقش مهمی در تحلیل رفتار اشباعی بایاس وارون دیودهای شاتکی دارد. شکل ۴-۵ این رفتار را در قطعه شماره ۲ جدول ۴-۱ نشان می دهد. Witmer [۳] نشان داده است که ترکیب سازوکارهای TE و بازترکیب سهم عمده ای در انتقال حامل ها دارند. با قرار دادن معادله (۲-۲۸) در (۲-۸) و ترکیب آن با معادله (۲-۲۵) داریم:

$$I = I_T + I_R = A_{eff} A^* T^2 e^{\left(\frac{-q(\phi_b - \Delta\phi)}{kT}\right)} \left(e^{(-qV_r/kT)} - 1\right) + I_{r0} \left(e^{(-qV_r/12kT)} - 1\right) \quad (1-4)$$



شکل ۴-۵- مشخصه وارون دیود شاتکی ۲ [۳] و

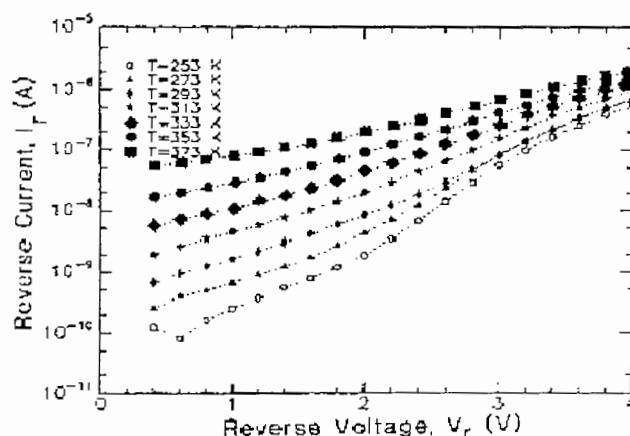
پیش بینی ترکیب سازوکار گسیل گرما-یونی و بازترکیب (خط چین).

محاسبات ما نشان می دهد که مقدار طول عمر حامل ها (τ) جهت انطباق داده های تجربی در معادله (۱-۴)، $5/5 \times 10^{-6} s$ است که با مقدار گزارش شده ($8/5 \times 10^{-6} s$) [۲]، توافق نسبتاً خوبی دارد، منحنی خط چین در شکل ۵-۴.

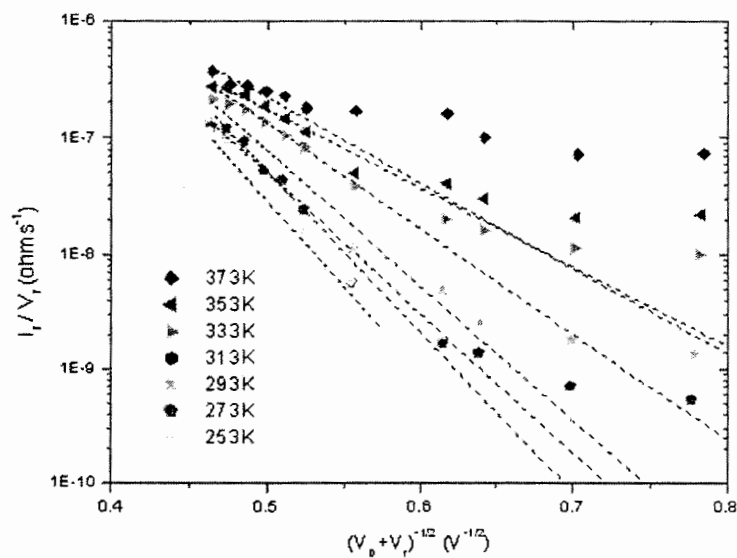
نتایج اندازه گیری *Bindal et.al.* در نمونه شماره ۱ (جدول ۱-۴) که لایه فلزی آن با ناخالصی $Al(Cu)$ آلائیده شده است، نشان می دهد که مشخصه $I-V$ قطعه در ولتاژهای بزرگتر از $2/5 V$ رفتاری غیر اشباعی دارد، شکل ۶-۴. وی این رفتار را در ولتاژهای بزرگتر از $2/5 V$ به تونل زنی زنی حامل ها از داخل سد نسبت داده است. با قرار دادن N_D برابر $2 \times 10^{17} cm^{-3}$ و m_n برابر $0.16 m_0$ در معادله (۱۵-۲) خواهیم داشت:

$$V_D = \phi_b - \left(\frac{kT}{q}\right) \ln(1.5 \times 10^{-3} T^{3/2}) \quad (2-4)$$

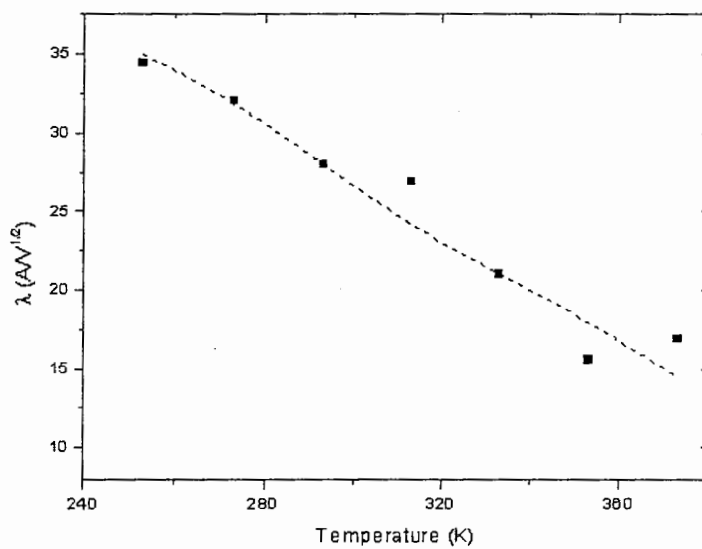
ϕ_b در این مورد $0.7 eV$ گزارش شده است [۲]. با ادامه دادن روندی که در بخش ۲-۲-۲ توضیح داده شد، می توان مقدار ثابت λ را در هر دما یافت. شکل ۷-۴ انطباق خطوط با شیب λ را بر منحنی های $\ln(I_r/V_r)$ بر حسب تابعی از $(V_D + V_r)^{-1/2}$ در چند دما نشان می دهد. شکل ۸-۴ چگونگی تغییرات ثابت λ را بر حسب تابعی از دما نشان می دهد که حاکی از توافق بسیار خوب بین نتایج محاسبات و مقادیر گزارش شده است. اکنون با شناخت از سازوکارهای مؤثر در رسانندگی بایاس وارون دیوهای فلز/ *Si* به بررسی ویژگی های دیود شاتکی با *Si* متخلخل می پردازیم.



شکل ۶-۴- مشخصه $I-V$ دیود شاتکی شماره ۱ جدول ۱-۴ که لایه فلزی آن با آلیاژ $Al(Cu)$ آلائیده شده است. در ولتاژهای بزرگتر از $2/5 V$ منحنی رفتار غیر اشباعی دارد [۲].



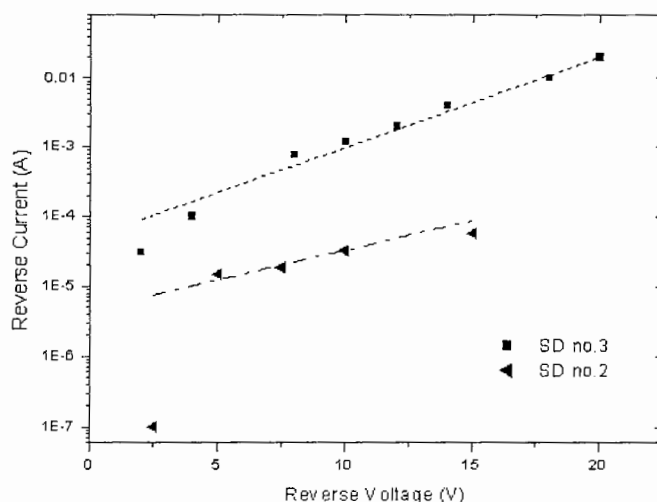
شکل ۷-۴- چگونگی به دست آوردن ثابت λ از روی منحنی های $\ln(I_r/V_r)$ بر حسب تابعی از $(V_D + V_r)^{-1/2}$.



شکل ۸-۴- تغییرات λ بر حسب تابعی از دما: مربع ها و خط چین به ترتیب نمایانگر نتایج محاسبات ما و مقادیر گزارش شده [۲] می باشد.

ب) مشخصه $I-V$ دیودهای شاتکی با Si متخلخل

برخلاف نمونه های غیرمتخلخل، دیودهای با Si متخلخل مورد بررسی ما در بایاس وارون رفتار اشباعی نداشته بلکه جریان با ولتاژ افزایش می یابد. به منظور شناخت هرچه بیشتر در این مورد به بررسی مشخصه $I-V$ نمونه های گزارش شده در جدول ۲-۴ در شرایط بایاس وارون می پردازیم. شکل ۹-۴ مشخصه $I-V$ بایاس وارون دیودهای شاتکی متخلخل شماره های ۲ و ۳، جدول ۲-۴، را در دمای اتاق نشان می دهد. همان طور که پیداست نمونه های متخلخل در مقایسه با اغلب نمونه های غیر متخلخل رفتار غیر اشباعی دارند. برای توضیح این رفتار *Oguro et. al.* از نظریه ای با فرمول بندینی نظیر سازوکار TE استفاده کرده اند، به طوری که مشابه بحث قبلی در مورد بایاس مستقیم، بخش ۴-۱-۱-ب، با مربوط کردن بزرگی ضریب ایده آلی به حالت های سطحی فصل مشترک به آن مقادیر بزرگ نسبت می دهند. منحنی های خط چین در شکل ۹-۴ نمایانگر انطباق معادله (۹-۲) است. نتایج حاصل از محاسبات ما به کمک انطباق به روش کوچکترین مربعات در مورد دیود شماره ۲ نشان می دهد که مقادیر n و ϕ_b به ترتیب ۱۹۷ و $0.198 eV$ است. لازم به ذکر است که مؤلف نیز ضریب ایده آلی بزرگتر از ۱۰۰ را گزارش کرده است. در مورد دیود شماره ۳ نیز این مقادیر به ترتیب ۱۲۹ و $0.17 eV$ به دست آمد.



شکل ۹-۴- مشخصه بایاس وارون دیود شاتکی شماره ۲ و ۳ [۶،۵] در دمای اتاق.

منحنی خط چین نمایانگر انطباق در معادله (۹-۲) می باشد.

این توجیه رفتار غیر اشباعی منحصر به فرد نبوده و دیگر پژوهشگران سازوکارهای دیگری را مسئول دانسته اند. به عنوان مثال *Raissiet.al.* سازوکار شکست بهمنی را مسئول این رفتار در قطعه خود، دیود شماره ۳، دانسته اند [۶].

خلاصه آنکه از بررسی مشخصه $I-V$ بایاس وارون در نمونه های غیر متخلخل مشخص می شود که چنانچه جریان غالب حامل ها ناشی از سازوکار TE و بازترکیب در تهی لایه باشد، مشخصه مزبور رفتار اشباعی نشان می دهد. یکی از فرایندهای ممکن در تفسیر رفتار غیر اشباعی فرایند تونل زنی زنی از داخل سد می باشد. در نمونه های متخلخل نیز غالباً مشخصه $I-V$ رفتار غیر اشباعی داشته و گزارش ها حاکی از آن است که سازوکار TE با ضرایب ایده آلی بزرگ (بالاتر از ۱۰۰) به خوبی داده های تجربی را توجیه می کند. البته سازوکار شکست بهمنی نیز دور از انتظار نمی باشد.

اکنون که با رفتار پیوندگاه های شاتکی با Si نوع n آشنا شدیم، به بررسی مشخصه $I-V$ دیوهای شاتکی حاصل از اتصال فلز با Si نوع p می پردازیم.

۲-۴- بررسی مشخصه $I-V$ دیوهای شاتکی فلز / Si نوع p

در این بخش قصد داریم به تحلیل مشخصه $I-V$ دیود های سد شاتکی فلز / Si نوع p غیر متخلخل و متخلخل در شرایط بایاس مستقیم و وارون پردازیم. برخی از ویژگی های نمونه های غیر متخلخل و متخلخلی که مورد بررسی قرار گرفته اند در جداول ۴-۶ و ۴-۷ آورده شده است.

جدول ۴-۶- برخی ویژگی های دیوهای فلز / Si نوع p .

شماره	پژوهشگر	سمتگیری زیرلایه Si	مقاومت ویژه زیرلایه (Ωcm)	مساحت مؤثر دیود (cm^2)	فلزاتصال
۱	<i>Pellegrini</i> [۱۰]	(۱۱۱)	۱۰-۲۰	$۱/۸۳ \times ۱۰^{-۲}$	$PtSi$
۲	<i>Xu</i> [۱۱]	(۱۱۱)	۶-۱۶	۰/۰۸	ITO
۳	<i>Karatas</i> [۱۲]	(۱۰۰)	۸۶۰	$۰/۷۷ \times ۱۰^{-۲}$	Sn, Zn
۴	<i>Siad</i> [۱۳]	(۱۱۱)	-	۰/۵	Al
۵	<i>Raissi</i> [۱۴]	(۱۰۰)	۱۳-۳۳	۲	$PtSi$

جدول ۷-۴- برخی ویژگی های دیودهای فلز / *Si* متخلخل نوع *p*. مقادیر ذکر شده در داخل پرانتز در ستون درصد تخلخل پیش بینی ما مبتنی بر مطالب بخش ۱-۳-۱ است و مؤلف گزارشی در این مورد نداشته است.

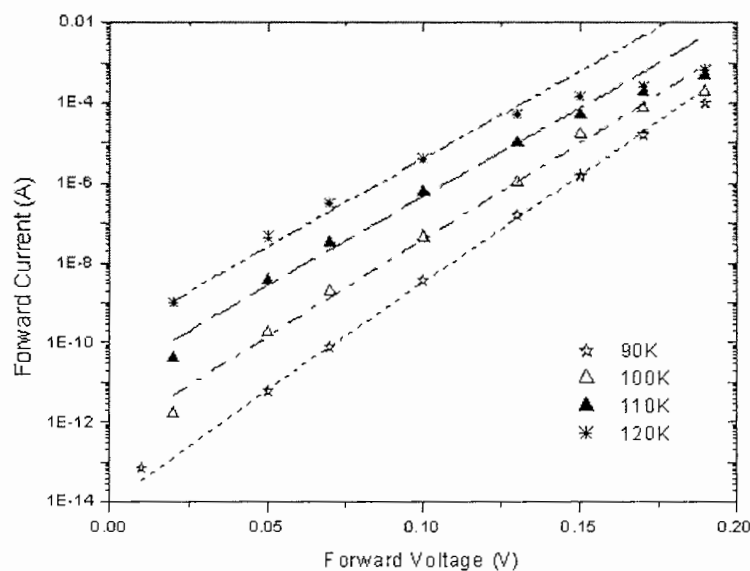
شماره	پژوهشگر	سمتگیری زیرلایه <i>Si</i>	مقاومت ویژه زیرلایه (Ωcm)	مساحت مؤثر دیود (cm^2)	فلز اتصال	روش ایجاد تخلخل/ چگالی جریان (mA/cm^2)	درصد تخلخل
۱	Dimitrov [۷]	(۱۱۱)	۵۰	-	<i>Al</i>	خوردگی الکتروشیمیایی/ ۱۵۰	(/۸۰)
۲	Xu [۱۱]	(۱۱۱)	۶-۱۶	۰/۰۸	<i>ITO</i>	خوردگی شیمیایی	-
۳	Raissi [۱۴]	(۱۰۰)	۱۳-۳۳	۲	<i>PtSi</i>	خوردگی الکتروشیمیایی/ ۵۰	٪۱۰ ٪۵۰
۴	Montes [۱۵]	(۱۰۰)	۶	-	<i>Au</i>	خوردگی الکتروشیمیایی/ ۲۰	٪۷۰

۴-۲-۱- مشخصه $I-V$ دیودهای شاتکی در شرایط بایاس مستقیم

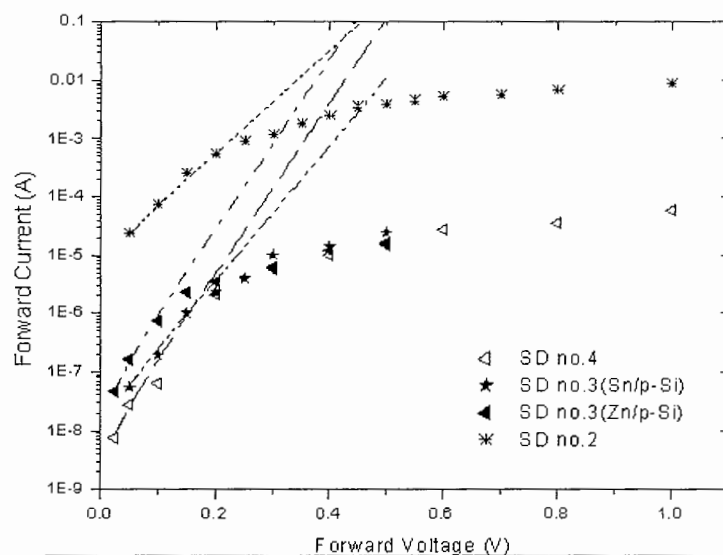
الف) مشخصه $I-V$ دیودهای شاتکی با *Si* غیر متخلخل

شکل ۴-۱۰- الف مشخصه $I-V$ بایاس مستقیم مربوط به دیودهای فلز / *Si* غیر متخلخل شماره ۱ (جدول ۴-۶) را در گستره دمایی ۹۰-۱۲۰ کلوین و شکل ۴-۱۰- ب نمونه های ۲، ۳ و ۴ (در همین جدول) را در دمای اتاق نشان می دهد. محاسبات ما مؤید آنست که در همه موارد جریان غالب ناشی از گسیل گرما-یونی حامل ها از بالای سد شاتکی، معادله (۲-۹)، است که به صورت منحنی های خط چین در شکل نشان داده شده است. مقادیر ضریب ایده آلی و ارتفاع سد شاتکی به عنوان پارامترهای انطباق در جدول ۴-۸ آورده شده است. مقایسه مقادیر به دست آمده و گزارش شده که حاکی از توافق بسیار خوبی است نشانگر صحت تحلیل نظری ماست. با توجه به این

محاسبات (جدول ۴-۸) ملاحظه می شود که مقادیر ضریب ایده آلی مشابه بحث قبلی در مورد نمونه های نوع n ، بخش ۴-۱-۱-الف، مقادیر ۱ تا ۲ داشته و ارتفاع سد شاتکی نیز بسته به نوع فلز از 0.3 eV تا 0.9 eV متغیر است.



(الف)



(ب)

شکل ۴-۱۰- مشخصه بایاس مستقیم دیود شاتکی (الف): نمونه شماره ۱ در جدول (۴-۶) در گستره دمایی ۹۰-۱۲۰

کلوین [۱۰] و (ب): نمونه های ۲، ۳، ۴ در دمای اتاق (در همین جدول) [۱۱، ۱۲، ۱۳].

منحنی خط چین نمایانگر انطباق نظریه گسیل گرما- یونی می باشد.

جدول ۴-۸- مقادیر ضریب ایده آلی و ارتفاع سد محاسبه شده و

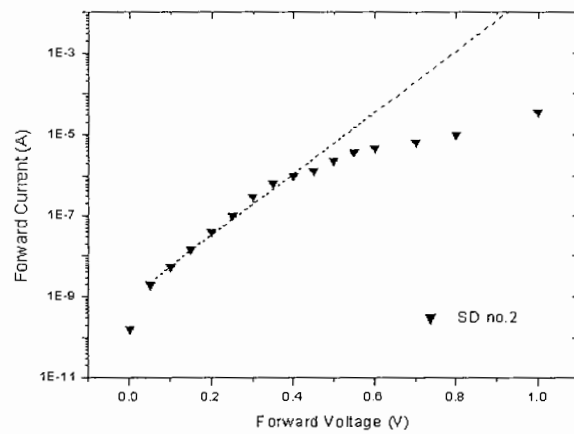
مقادیر گزارش شده برای نمونه های غیر متخلخل جدول ۴-۶.

نمونه		۱	۲	۳	۴
محاسبه شده	n	۱/۰۲	۱/۹	Zn ۱/۱۵	Sn ۱/۴۵
	$\phi_b(eV)$	۰/۳۲	۰/۶۲	۰/۷۲۵	۰/۷۴۱
گزارش شده	n	-	۱/۵	۱/۲۷	۱/۲۲
	$\phi_b(eV)$	۰/۲۹۲	-	۰/۷۲۵	۰/۷۳۲

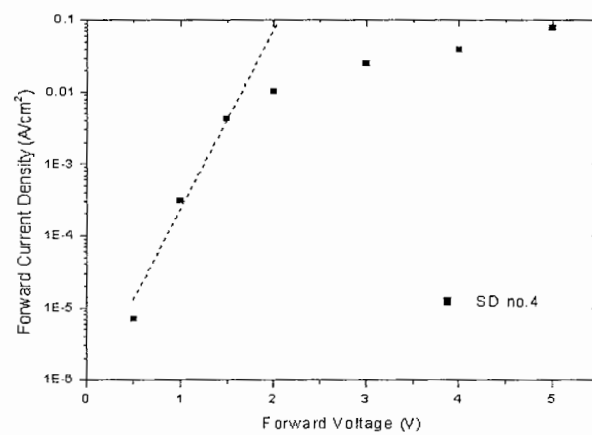
اکنون با شناخت از سازوکارهای مؤثر در رسانندگی بایاس مستقیم دیوهای فلز/ Si به بررسی ویژگی های دیوهای با Si متخلخل می پردازیم.

ب) مشخصه $I-V$ دیوهای شاتکی با Si متخلخل

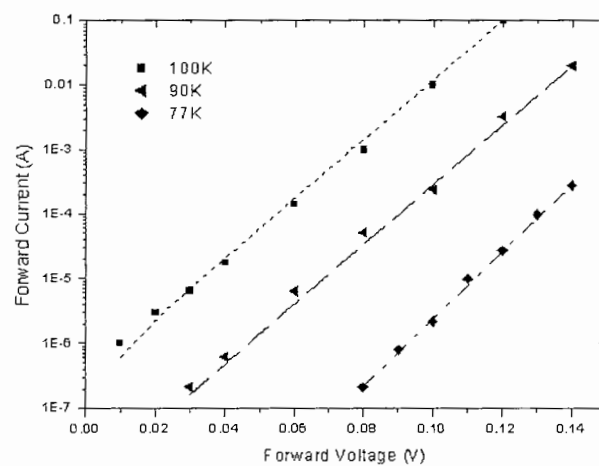
شکل های ۴-۱۱ مشخصه $I-V$ بایاس مستقیم دیوهای ۲، ۳ و ۴، جدول ۴-۷، را نشان می دهد. در مورد دیود شاتکی با Si متخلخل نوع p در شرایط بایاس مستقیم، سازوکار غالب به گسیل گرما-یونی، معادله (۲-۹)، نسبت داده شده است [۱۵، ۱۴، ۱۱، ۷]. نتیجه این نظریه در منحنی های خط چین در شکل ۴-۱۱، و مقادیر متناظر برای انطباق در مورد این قطعات در جدول ۴-۹ آمده است. همان گونه که از محدوده انطباق مربوط به ولتاژ اعمالی ملاحظه می شود، این فرایند نمونه های با اتصالات فلزی متفاوت در محدوده ولتاژهای اعمالی پایین (کمتر از $2V$) غالب است. با استفاده از این مجموعه داده ها می توان ارتفاع سد پتانسیل (ϕ_b) را، که کمیت مهمی در عملکرد آشکارسازهای مادون قرمز بوده و در گفتار پنجم مورد بررسی قرار گرفته اند، به دست آورد. با توجه به این محاسبات، (جدول ۴-۹)، ملاحظه می شود که بسته به جنس فلز اتصال، بزرگی ϕ_b از $0.12 eV$ تا $0.18 eV$ متغیر است. نکته جالب توجه در جدول ۴-۹ بزرگتر بودن ضریب ایده آلی (بین ۲ تا ۷) نسبت به دیوهای با Si معمولی است. بعلاوه گزارش های دیگری نیز مبنی بر بزرگ بودن ضریب ایده آلی در شرایط بایاس مستقیم وجود دارد [۱۸، ۱۷، ۱۶، ۹، ۷].



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۴-۱۱- مشخصه بایاس مستقیم دیودهای شاتکی متخلخل (الف): شماره ۲ [۱۱] و (ب): شماره ۴ [۱۵] در دمای اتاق و (ج): شماره ۳ با تخلخل ۵۰٪ [۱۴]. منحنی های خط چین نمایانگر انطباق نظریه گسیل گرما- یونی است.

جدول ۴-۹- مقادیر ضریب ایده آلی و ارتفاع سد محاسبه شده و

مقادیر گزارش شده برای نمونه های متخلخل جدول ۴-۷.

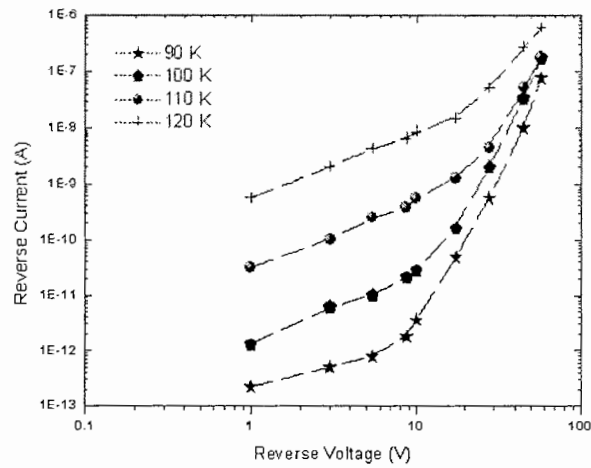
نمونه	محاسبه شده		گزارش شده	
	n	$\phi_b (eV)$	n	$\phi_b (eV)$
۲	۲/۲	۰/۸۵	۲/۱	-
۳	۱/۲	۰/۲۵	۱/۵	۰/۲۲
۴	۶/۷	۰/۷۵	۶/۷	-

به طور خلاصه می توان گفت که سازوکار TE سهم عمده ترابری حامل ها را در شرایط بایاس مستقیم در دیودهای شاتکی با Si غیر متخلخل و متخلخل نوع p بر عهده دارد. در حالت اتصال با Si غیر متخلخل ضریب ایده آلی مقداری بین ۱ الی ۲ داشته لکن در اتصال با Si متخلخل این مقدار بزرگتر بوده و مقادیر بین ۲ تا ۶ برای آن گزارش شده است؛ ضمناً ارتفاع سد شاتکی اتصالات اخیر با توجه به جنس اتصال فلزی ۰/۲ الی ۰/۸ الکترون ولت به دست می آید. در ادامه بحث خود را به شناخت سازوکارهای مؤثر در بایاس وارون دیودهای فلز/ Si اختصاص می دهیم.

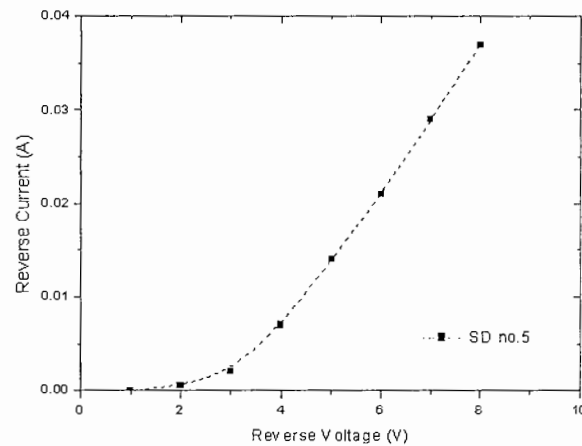
۴-۲-۲- مشخصه $I-V$ دیودهای شاتکی در شرایط بایاس وارون

الف) مشخصه $I-V$ دیودهای شاتکی با Si غیر متخلخل

شکل ۴-۱۲ مشخصه $I-V$ بایاس وارون دیودهای ۱ و ۵ (جدول ۴-۶) را نشان می دهد. پیداست که نمونه ۱ در $V_r > 10V$ و نمونه ۳ در $V_r > 2V$ رفتار غیراشباعی دارند. بررسی های ما مشخص کرده است که می توان برای توجیه رفتار مشخصه این دیودها در محدوده ولتاژهای مذکور از ایده تونل زنی زبری که در بخش ۴-۱-۲-الف، برای تحلیل رفتار غیر اشباعی دیودهای فلز/ Si غیر متخلخل نوع n استفاده شد، کمک بگیریم.



(الف)



(ب)

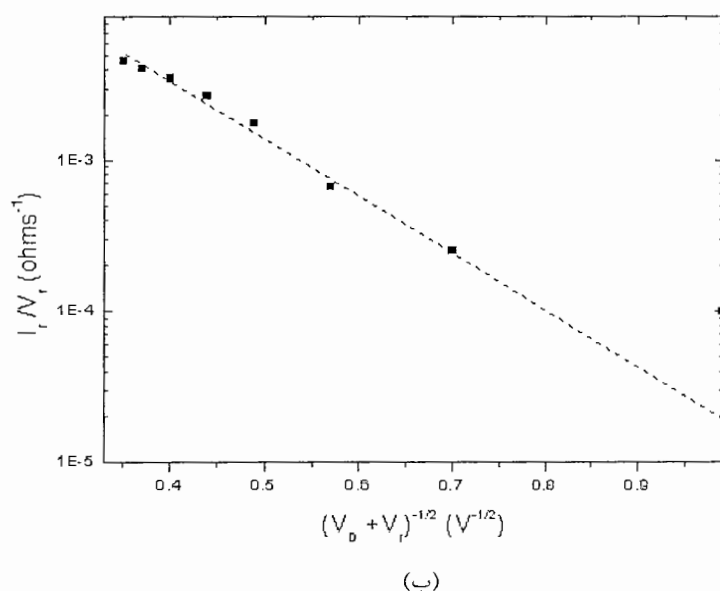
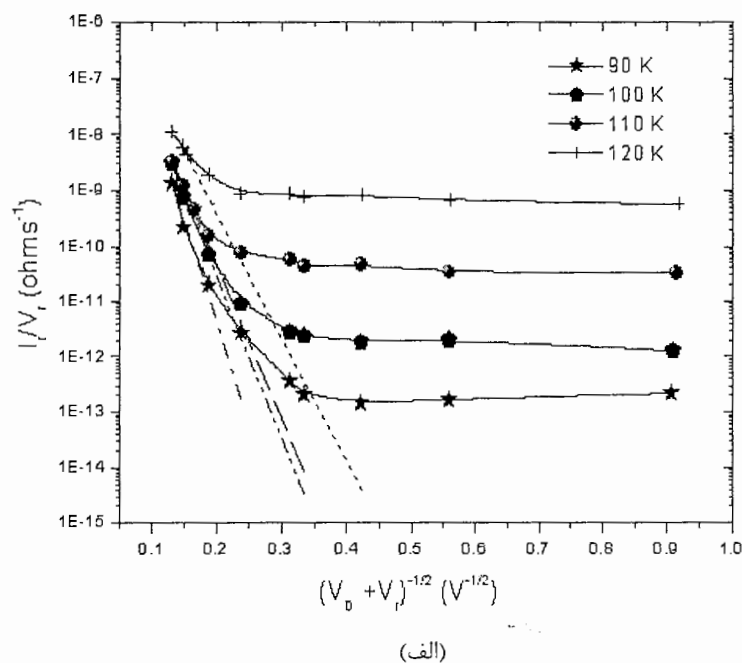
شکل ۴-۱۲- مشخصه بایاس وارون نمونه (الف): شماره ۱ در گستره دمایی ۹۰-۱۲۰ کلین و (ب): شماره ۵ در دمای اتاق [۱۴،۱۰].

با قرار دادن N_D برابر 10^{14} cm^{-3} و m_p^* برابر $0.55 m_0$ در معادله (۲-۱۵) خواهیم داشت:

$$V_D = \phi_b - \left(\frac{kT}{q} \right) \ln(19.604 T^{3/2}) \quad (3-4)$$

ارتفاع سد شاتکی برای نمونه های ۱ و ۵ به ترتیب 0.29 eV و 0.22 eV می باشد [۱۴،۱۰]. شکل ۴-۱۳ منحنی های $\ln(I_r/V_r)$ برحسب تابعی از $(V_D + V_r)^{-1/2}$ را برای دیودهای مزبور نشان می دهد. با پیدا کردن شیب خطوط مماس بر این منحنی ها می توان ثابت λ را به دست آورد. این

ثابت برای دیود شماره ۵ در دمای اتاق، در حدود ۹ به دست آمد. نتایج ما درباره تغییرات ثابت λ با دما در مورد نمونه ۱ در جدول ۴-۱۰ آمده است.



شکل ۴-۱۳- منحنی های $\ln(I_r/V_r)$ بر حسب تابعی از $(V_D + V_r)^{-1/2}$:

(الف): دیود شماره ۱ و (ب): دیود شماره ۵.

جدول ۴-۱۰- مقادیر ثابت λ محاسبه شده در دماهای مختلف برای دیود شماره ۱.

همانطور که انتظار داریم با افزایش دما λ کوچکتر می شود.

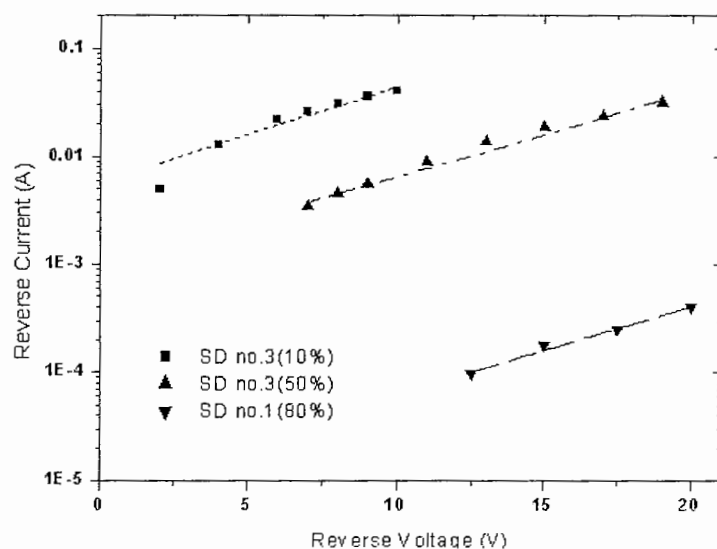
$T(K)$	۹۰	۱۰۰	۱۱۰	۱۲۰
$\lambda(A/V^{1/2})$	۸۵	۶۷	۶۳	۵۱

در ادامه توجه خود را به شناخت سازوکارهای مؤثر در رسانندگی بایاس وارون دیودهای

فلز / Si متخلخل معطوف می کنیم.

(ب) مشخصه $I-V$ دیودهای شاتکی با Si متخلخل

شکل ۴-۱۴ مشخصه $I-V$ بایاس وارون دیودهای شاتکی متخلخل ۱ و ۳، جدول ۴-۷، را در دمای اتاق نشان می دهد. در این مورد نیز مشابه دیودهای شاتکی فلز / Si متخلخل نوع n ، بخش ۴-۱-۲-ب، شاهد رفتار غیر اشباعی هستیم. لذا *Dimitrov* برای توجیه این رفتار از فرمول بندی سازوکار TE با ضرایب ایده آلی بزرگ، معادله (۲-۹)، استفاده کرده است [۷]. منحنی های خط چین در شکل ۴-۱۴ نمایانگر انطباق نظریه گسیل گرما-یونی می باشد. نتایج محاسبات ما درباره مقادیر ارتفاع سد شاتکی و ضریب ایده آلی و مقادیر گزارش شده در جدول ۴-۱۱ آورده شده است.



شکل ۴-۱۴- مشخصه وارون دیودهای شاتکی متخلخل ۱ و ۳ در دمای اتاق.

منحنی های خط چین نشان دهنده سازوکار TE است.

جدول ۴-۱۱- مقادیر ضریب ایده آلی و ارتفاع سد محاسبه شده و

مقادیر گزارش شده نمونه های متخلخل جدول ۴-۷.

نمونه	محاسبه شده		گزارش شده	
	n	$\phi_b (eV)$	n	$\phi_b (eV)$
۱	۲۰۷	۰/۵۵۵	۱۹۶	۰/۵۵۵
۳	٪۱۰ ۱۹۳	۰/۵۴	-	-
	٪۵۰ ۲۱۳	۰/۵۸		

افزایش ضریب ایده آلی با زیادتر شدن درصد تخلخل در نمونه شماره ۳ را می توان به دلیل افزایش چگالی حالت های سطحی در سطح Si متخلخل دانست. لازم به ذکر است که این توجیه رفتار غیر اشباعی منحصر به فرد نبوده و دیگر پژوهشگران سازوکارهای دیگری را مسئول دانسته اند. به عنوان مثال *Raissi et.al.* سازوکار شکست بهمنی را مسئول رفتار غیر اشباعی دیود شماره ۳ دانسته اند [۱۴].

بدین ترتیب بررسی های ما درباره مشخصه $I-V$ دیودهای شاتکی فلز/ Si نوع p حاکی از وجود رفتار غیر اشباعی در بایاس وارون این دیودها می باشد. درمورد نمونه های غیر متخلخل این رفتار به کمک سازوکار تونل زنی زنی از داخل سد و در مورد نمونه های متخلخل با استفاده از گسیل گرما- یونی حامل ها با ضرایب ایده آلی بزرگ (n) ۱۰۰ از بالای سد توجیه می شود. علاوه بر این، فرضیات دیگری نیز برای توجیه بزرگ بودن جریان الکتریکی بایاس وارون اتصال های شاتکی متصور است که از آن جمله می توان به تشکیل لایه وارونی در محل اتصال فلز با Si متخلخل [۸] و سازوکار شکست بهمنی به دلیل میدان های الکتریکی قوی [۱۴] اشاره کرد. اینکه حقیقتاً کدام یک از سازوکارهای قید شده سهم بیشتری در ترابری حامل ها در بایاس وارون نمونه های متخلخل به عهده دارد، مساله ایست که بررسی های بیشتری را طلب می کند.

۴-۳- نتیجه گیری

در اتصالات شاتکی فلز/ Si غیر متخلخل و متخلخل نوع n ، سازوکار TE سهم عمده ترابری حامل ها را در شرایط بایاس مستقیم و در محدوده ولتاژهای پایین بر عهده دارد. در حالت اتصال با Si غیر متخلخل ضریب ایده آلی مقداری بین ۱ الی ۱/۵ داشته، لکن در اتصال با Si متخلخل این مقدار بسیار بزرگتر و بین ۱۰ تا ۱۰۰ گزارش شده است. بزرگی ضریب ایده آلی به چگالی حالت های سطحی بالا در فصل مشترک پیوندگاه فلز/ Si متخلخل نسبت داده شده است.

درمورد اتصالات فلز با Si غیر متخلخل نوع n که به صورت وارون بایاس شده اند، چنانچه جریان غالب حامل ها ناشی از سازوکار گسیل گرما- یونی و بازترکیب در تهی لایه باشد، مشخصه رفتار اشباعی دارد. رفتار غیر اشباعی در این نمونه ها به کمک فرایند تونل زنی زنی از داخل سد توجیه می شود. نمونه های با Si متخلخل در این شرایط رفتاری غیر اشباعی دارند. برخی محققین این رفتار را به کمک سازوکار TE با ضرایب ایده آلی بزرگ (بالتر از ۱۰۰) توصیف کرده و برخی دیگر سازوکار شکست بهمنی را دخیل می دانند.

در دیودهای شاتکی با Si غیر متخلخل و متخلخل نوع p ، سازوکار TE جریان غالب حامل ها را در شرایط بایاس مستقیم بر عهده دارد. در حالت اتصال با Si غیر متخلخل ضریب ایده آلی مقداری بین ۱ الی ۲ داشته، لکن در اتصال با Si متخلخل این مقدار بزرگتر بوده و بین ۲ تا ۶ است. با توجه به کوچکی ارتفاع سد شاتکی در اتصال $Si/PtSi$ متخلخل نوع p (حدود 0.2 eV) از این دیود در قطعات آشکارساز تابش مادون قرمز استفاده می شود.

مشخصه $I-V$ بایاس وارون دیودهای شاتکی فلز/ Si غیر متخلخل و متخلخل نوع p رفتار غیر اشباعی دارند. درمورد نمونه های غیر متخلخل برای این رفتار در مقالات علتی ذکر نشده لکن ما از مقایسه با نمونه های نوع n آن را به سازوکار تونل زنی زنی از داخل سد نسبت داده ایم. در نمونه های متخلخل این رفتار با استفاده از سازوکار گسیل گرما- یونی حامل ها با ضرایب ایده آلی بزرگ ($n \approx 100$) توضیح داده می شود. علاوه بر این نظریات دیگری نیز برای توجیه این رفتار پیشنهاد شده است که از آن جمله می توان به شکل گیری لایه وارونی در محل اتصال فلز با Si و نیز وقوع پدیده شکست بهمنی به دلیل میدان های الکتریکی قوی در قسمت های نوک تیز اتصالات فصل مشترک اشاره کرد.

- 1- L.T.Canham, D.Malvern,1997: *properties of porous Silicon,INSPEC.*
- 2- A.Bindal, R.Wachnik, W.Ma,1990: *Observation of recombination center- assisted current in Al(Cu) penetrated PtSi/ Schottky diodes, J.Appl. Phys.*68(12),6259-6262.
- 3- M.Witmer,1991: *Conduction mechanism in PtSi/Si Schottky diodes, Physical Review B*,43(5),4385-4895.
- 4- G.Algun, M.C.Arikan,1999:*An investigation of electrical properties of porous Silicon,Tr.J. of Phys.*,23,789-797.
- 5- T.Oguro, H.Koyama, T.Ozaki, N.Koshida,1997: *Mechanism of visible electroluminescence from metal/ porous silicon/ n-Si devices, J. Appl. Phys*,81(3),1407-1412.
- 6- F.Raissi, N.A.Sheeni,2003: *Highly sensitive near IR detectors using n-type porous silicon, Sensors & actuators A*,104,117-120.
- 7- D.B.Dimitrov,1995: *Cyrrrent-voltage characterization os porous silicon layers, Physical Review B*,51(3),1562-1566
- 8- L.A.Balagurov, S.C.Bayliss, V.S.Kasatachkin, E.Petrova, B.Unal, D.G.Yarkin,2001: *Transport of carriers in metal/ porous Silicon/ C-Si devise structures based on oxidized porous Silicon, ,J. Appl. Phys.*90(9),4543-4548.
- 9- F.Namavar, P.Maruska, N.Kalkhoran,1992: *Visible electroluminescence from porous Silicon np heterojunctions diodes, Appl. Phys. Lett.*60(20),2514-2516.
- 10- P.W.Pellegrini, C.E.Ludington, M.M.Weeks,1990: *The dependence of Schottky barrier potential on substrate orientation in PtSi IR diodes, J. Appl. Phys.*,67(3),1417-1420.
- 11- J.Xu, A.J.Stechl,1995: *Stain-etched porous Silicon visible light emitting diodes,J.Vac. Sci. technol. B*,13(3),1221-1224.
- 12- S.Karatas,2005: *Comparision of electrical parameters of Zn/p-Si & Sn/p-Si Schottky barrier diodes, Solid state communication*,135,500-504.
- 13- M.Siad, A.Keffous, S.Mamma, Y.Belkacem, H.Menari,2004: *Correlation between series resistance & parameters of Al/n-Si & Al/p-Si Schottky barrier,Appl. Surface sci.*,236,366-376.
- 14- F.Raissi, M.Mohtashami Far,2002: *Highly sensitivePtSi/porous Silicon detectors, IEEE Sensors journal*,2(5),476-481.
- 15- L.Montes, R.Herino,2000: *Luminescence & structural properties with ZnSe intimate contact, Materials Science & EngineeringB*, 69-70,136-141.
- 16- M.Ben,1995,*Physical Review B(USA)*,49,2981-4.

- 17- L.Pavesi, M.Ceschini, G.Mariotto, E.Janghelini, O.Bisi,1994: *Spectroscopic investigation of electroluminescent porous Silicon*,*J. Appl. Phys.* 75(2),1118-1126.
- 18- N.Latic,1996, *J. Appl. Phys.*,80,5971.

گفتار پنجم

بررسی تاثیر متخلخل سازی بر عملکرد

آشکارساز شاتکی $PtSi / p - Si$

- مقدمه
- مشخصه $I-V$ آشکارساز $PtSi / p - Si$ تحت تابش
- بررسی مشخصه پاسخ در آشکارساز شاتکی $PtSi / p - Si$
- نتیجه گیری

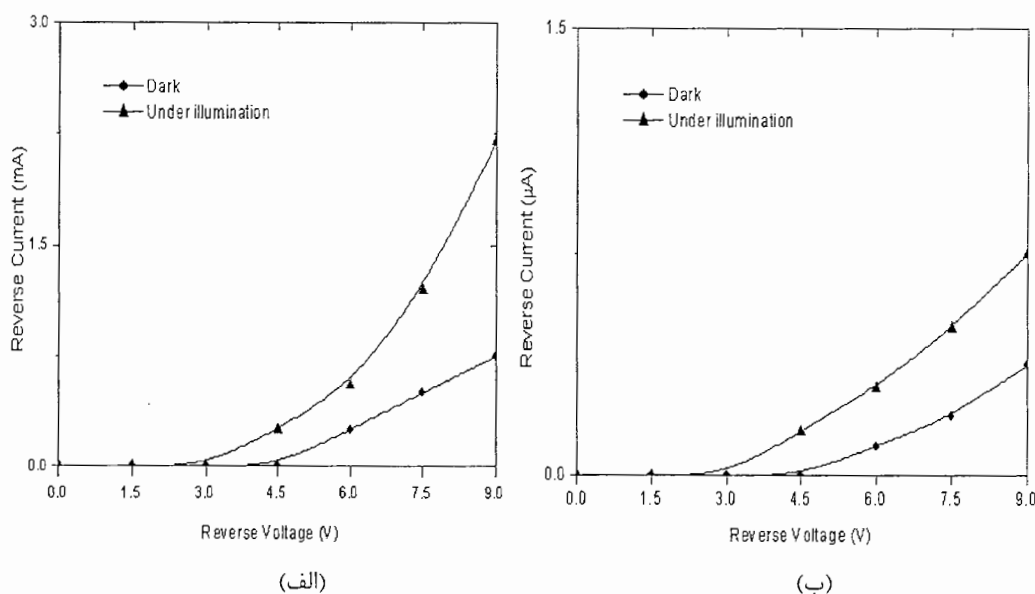
مقدمه

در گفتار قبل به تحلیل مشخصه $I-V$ دیوده‌های شاتکی اتصالات فلز/ Si غیر متخلخل و متخلخل در شرایط تاریکی پرداختیم، در این گفتار قصد داریم با وارد کردن اثر تابش در مشخصه $I-V$ اتصالات مذکور به تحلیل رفتار مشخصه پاسخ در آشکارسازهای شاتکی $Si/PtSi$ غیرمتخلخل و متخلخل پرداخته و تحلیل‌هایی کیفی برای توجیه علت تفاوت حساسیت این آشکارسازها را ارائه دهیم.

۱-۵- مشخصه $I-V$ آشکارساز $PtSi/p-Si$ تحت تابش

در این بخش به بررسی اثر تابش با طول موج معین روی مشخصه $I-V$ آشکارساز شاتکی $Si/PtSi$ غیر متخلخل و متخلخل نوع p می‌پردازیم. گزارش‌ها نشان می‌دهد که آشکارسازهایی که در آن از Si متخلخل استفاده شده در مقایسه با آشکارسازهای معمولی نسبت به تابش حساس‌ترند [۴,۳,۲,۱]. نمونه مورد بررسی در این بخش، آشکارساز شاتکی $Si/PtSi$ نوع p است که ویژگی نوع غیرمتخلخل و متخلخل آن به ترتیب در جداول ۴-۶ و ۴-۷ آورده شده است. همان گونه که در گفتار سوم توضیح داده شد، از آنجا که از این قطعه برای آشکارسازی در دمای پایین (۷۷ کلوین) استفاده می‌شود، لذا ما نیز توجه خود را به بررسی رفتار این قطعه در این دما معطوف کرده ایم.

شکل ۱-۵-الف و ب به ترتیب مشخصه $I-V$ بایاس وارون آشکارساز شاتکی $Si/PtSi$ متخلخل و غیرمتخلخل را در شرایط تاریکی و تحت تابش با طول موج $2\ \mu m$ ، در دمای ۷۷ کلوین نشان می‌دهد. با توجه به مقیاس انتخابی برای محور جریان در این شکل، پیداست که قطعه ای که در آن از Si متخلخل استفاده شده در اثر تابش جریان وارون بزرگتری (تقریباً ۱۰۰۰ برابر) را نسبت به نمونه مشابه با Si غیرمتخلخل عبور می‌دهد. این پدیده ناشی از افزایش پاسخ قطعه می‌باشد که در بخش ۲-۵ توضیح داده شده است.



شکل ۵-۱- مشخصه $I-V$ بایاس وارون آشکارساز $PtSi/p-Si$ در شرایط تاریکی و تحت تابش در دمای ۷۷ کلوین (الف): متخلخل و (ب) غیر متخلخل [۱].

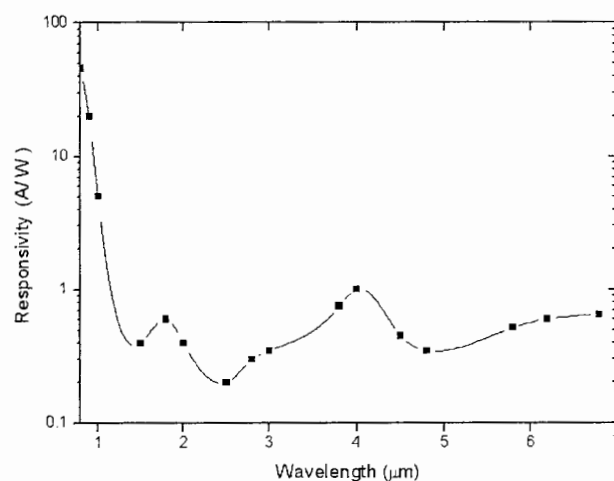
۵-۲- بررسی مشخصه پاسخ در آشکارساز شاتکی $PtSi/p-Si$

در این بخش نخست به مقایسه مشخصه پاسخ آشکارساز $Si/PtSi$ متخلخل نوع p (جدول ۴-۷) که مشخصه $I-V$ آن در بخش قبل ارائه شد، با آشکارساز $Si/PtSi$ غیرمتخلخل نوع p گزارش شده توسط *Tsaur et.al.* [۵] پرداخته، سپس در ادامه به توجیه کیفی افزایش پاسخ در قطعه متخلخل می پردازیم.

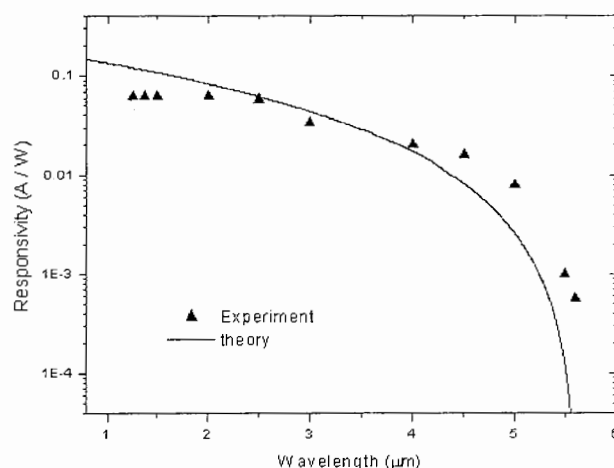
برای به دست آوردن پاسخ، قطعه مورد بررسی را به همراه آشکارسازهای Ge یا $InSb$ کالیبره در شرایط یکسانی از پشت (یعنی از سمت Si) تحت تابش (در طول موج معین) قرار داده، سپس با داشتن اختلاف جریان آشکارساز کالیبره (در شرایط تابش نسبت به تاریکی) و معلوم بودن پاسخ آن، با استفاده از معادله (۳-۵)، توان منبع را به دست می آورند. با قرار دادن توان منبع و اختلاف جریان نمونه مورد نظر (نسبت به حالت تاریکی) در معادله (۳-۵)، پاسخ قطعه به دست می آید [۱].

شکل ۵-۲-الف و ب به ترتیب مشخصه پاسخ قطعه متخلخل در ولتاژ وارون $10V$ [۳]، و داده های تجربی مربوط به آشکارساز $Si/PtSi$ غیرمتخلخل نوع p [۵] را که به ازای ضریب C_1 برابر $0.12 V^{-1}$ (که در بخش ۳-۱-۳ اشاره شد) و ارتفاع سد شاتکی $0.22 eV$ (اتصال $PtSi/p-Si$) به خوبی در

رابطه فاولر، معادله (۳-۶)، منطبق گردیده است نشان می دهد. با مقایسه پاسخ قطعه متخلخل و غیرمتخلخل دو نکته قابل توجه است: (۱) تغییرات پاسخ قطعه متخلخل از رابطه فاولر، که در نمونه های غیر متخلخل صادق است، پیروی نکرده خصوصا در $\lambda < 1.5 \mu m$ شاهد افزایش بسیار سریع پاسخ می باشیم؛ به طوری که به ازای طول موج $0.87 \mu m$ مقدار پاسخ نسبت به مقدار نظری، شکل ۵-۲-ب، در حدود ۱۰۰۰ برابر افزایش پیدا کرده است. این افزایش احتمالا می تواند ناشی از جذب بیشتر فوتون ها در لایه سیلیساید باشد که منجر به تولید حامل های بیشتری می شود. البته تایید این گفته نیاز به بررسی های تجربی بیشتر دارد.



(الف)



(ب)

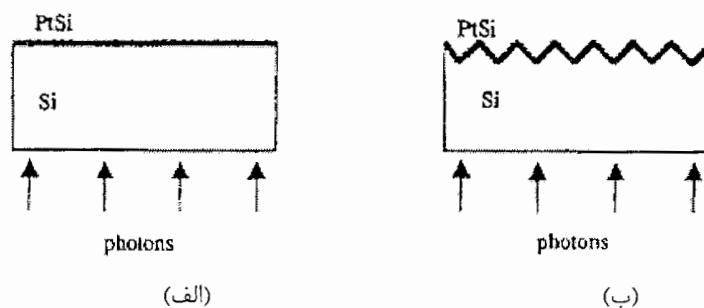
شکل ۵-۲-ب- مشخصه پاسخ بر حسب طول موج در دمای ۷۷ کلوین آشکارساز $Si / PtSi$ نوع p

(الف): متخلخل [۳] و (ب): غیر متخلخل که در معادله فاولر به خوبی صدق کرده است [۵].

(۲) در طول موج های بالاتر از $5/6 \mu m$ ، طول موج قطع (بخش ۳-۱-۲)، پاسخ همچنان قابل ملاحظه است. برای این مساله و همچنین افزایش پاسخ در قطعه متخلخل، در ادامه تفسیرهایی ارائه کرده ایم.

۵-۲-۱- بررسی کیفی عملکرد و علل افزایش پاسخ آشکارساز $Si/PtSi$ متخلخل نوع p

پدیده هایی چون شکست بهمنی و تونل زنی زبری می توانند از جمله فرایندهای دخیل در عملکرد قطعات متخلخل باشند. علاوه بر این متخلخل نمودن Si ممکن است به طرق مختلفی در افزایش پاسخ در آشکارسازهای شاتکی اثر بگذارد. آشکار است که مهم ترین تفاوتی که سطح متخلخل نسبت به سطح هموار دارد، افزایش ناهمواری های سطح آن است (شکل ۵-۳). در ادامه این بخش به بررسی بیشتر این عوامل می پردازیم.



شکل ۵-۳- برش عرضی آشکارسازی که در آن از Si (الف) غیر متخلخل و (ب) متخلخل استفاده شده است. توجه کنید که تعداد فوتون های تابشی برای هر دو قطعه یکسان است [۱].

(الف) پدیده تونل زنی

در بخش ۲-۴ شرح دادیم که شرط اساسی وقوع فرایند شکست زبری و تکثیر بهمنی وجود میدان الکتریکی بالا در محل پیوندگاه است. فرضیه محتمل این است که متخلخل کردن Si سبب افزایش میدان الکتریکی در بخش های نوک تیز اتصال $PtSi/Si$ شده و تا جایی تشدید شود که با خم کردن نوار انرژی (که پهنای تونل زنی را کم می کند)، احتمال وقوع تونل زنی را افزایش دهد. فرایند تونل زنی در آشکارسازهای متخلخل حتی حامل های کم انرژی را قادر می سازد که از داخل سد عبور کرده و وارد Si شوند. بنابراین در اثر این فرایند آشکارسازی به فوتون هایی که انرژی شان بزرگتر از سد باشد، محدود نخواهد بود. بنابراین به نظر می رسد که فرایند تونل زنی

مسئول گسترش مشخصه پاسخ آشکارساز $Si / PtSi$ متخلخل در طول موج های بزرگتر از طول موج قطع، $5/6 \mu m$ ، باشد، شکل ۵-۲-الف.

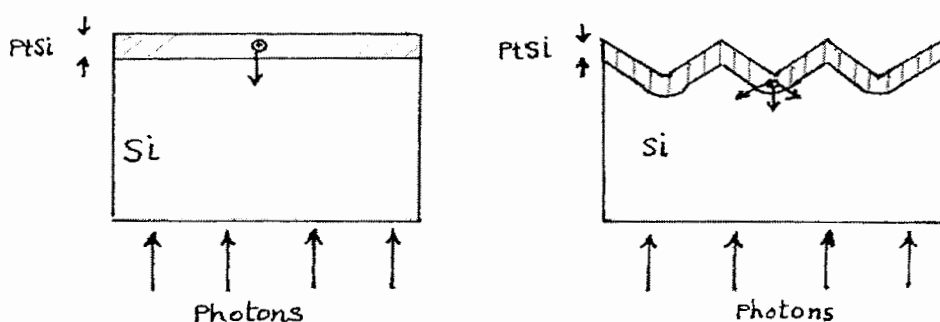
(ب) افزایش ناهمواری های سطحی

ایجاد تخلخل در سطح Si به افزایش ناهمواری های سطحی سیلیساید منجر می شود. تاثیر این پدیده در افزایش پاسخ آشکارساز را می توان به موارد زیر نسبت داد:

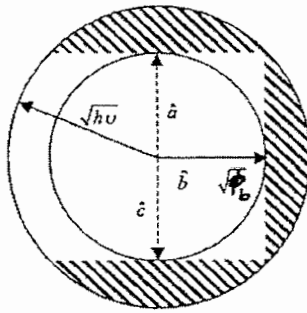
۱- افزایش احتمال عبور حفره های داغ در جهت های مختلف از سیلیساید به Si ؛

۲- جذب فوتون ها در کاواک های حاصل از خلل و فرج ها در لایه سیلیساید.

همانطور که در بخش ۱-۱-۳ شرح دادیم، کسری از حامل های داغ می توانند به داخل نیم رسانای Si تزریق شوند که مؤلفه عمودی اندازه حرکت آنها در فصل مشترک سیلیساید و Si برای غلبه بر سد شاتکی کافی باشد، شکل ۳-۳. در آشکارساز $Si / PtSi$ متخلخل، حفره های داغ برای رسیدن به Si ، با توجه به شکل ۴-۵-الف، سطوح متعددی در جهات مختلف پیش روی دارند و در صورتی که مؤلفه عمودی اندازه حرکت آنها بر هر یک از سطوح، از ارتفاع سد شاتکی بیشتر باشد، امکان تزریق را به داخل Si پیدا می کنند. بنابراین تعداد حفره های داغی که برآورنده چنین شرطی هستند به جای یک قطاع در یک جهت، چندین قطاع را در جهات مختلف شامل خواهند شد، شکل ۵-۴-ب.



(الف)

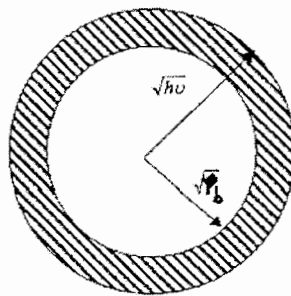


(ب)

شکل ۵-۴- (الف) متخلخل کردن Si احتمال تزریق حفره های داغ را بیشتر می کند،

(ب) طرح ساده ای نمایانگر کسری از حامل ها در فضای اندازه حرکت که توانایی عبور از سد را دارند [۱].

در حالت حدی، با کوچکتر شدن ابعاد خلل و فرج ها و افزایش تعداد و جهت گیری سطوح لایه سیلیساید، تغییرات زاویه فضایی θ تمام جهات را در بر خواهد گرفت. بنابراین فرایند آشکارسازی به تعداد قطاع های زیادی مربوط می شود که می توان آنها را به صورت یک پوسته کروی، ناحیه سایه خورده در شکل ۵-۵، در نظر گرفت [۶،۱].



شکل ۵-۵- حامل های داغ در فضای اندازه حرکت در تمام جهات قادرند از سد شاتکی عبور کنند [۱].

علاوه بر افزایش احتمال عبور حفره های داغ بیشتر، وجود خلل و فرج ها به تشکیل کاواک هایی با ابعاد میکرومتری و در بعضی موارد کوچکتر می انجامد، همان گونه که در بخش ۳-۱-۳ توضیح داده شد، استفاده از کاواک نوری در آشکارسازها، راهی برای افزایش جذب فوتون ها در لایه سیلیساید است. تشکیل کاواک های نوری باعث بازتاب های مکرر فوتون ها از دیواره های کاواک شده و این سرانجام به افزایش احتمال گیر افتادن (جذب) آنها در لایه سیلیساید می انجامد.

در مجموع هریک از عواملی که در این گفتار بررسی شد ممکن است به تنهایی یا همراه با سازوکارهای دیگر سبب بهبود پاسخ قطعه متخلخل شود. اینکه کدام فرایند نقش بیشتری بر عهده دارد، مساله ایست که برای پاسخ به آن باید اثر پارامترهای مختلفی از جمله درصد تخلخل، شکل خلل و فرج و برآورد اندازه میدان الکتریکی در نقاط نوک تیز و... را در نظر گرفت. لذا شناخت همه جانبه این موضوع امری بسیار پیچیده بوده و نیاز به بررسی های بیشتری دارد.

۵-۳- نتیجه گیری

مقایسه مشخصه های جریان-ولتاژ تحت تابش آشکارساز $Si/PtSi$ غیر متخلخل و متخلخل نوع p در شرایط بایاس وارون، حاکی از افزایش مقیاس محور جریان از μA به mA است. همچنین بررسی مشخصه پاسخ در قطعه غیر متخلخل و متخلخل نشان می دهد که پاسخ نمونه متخلخل از رابطه فاولر، که در قطعات غیرمتخلخل صادق است، پیروی نکرده و در ناحیه طول موجی $1/5$ الی 4 میکرومتر در حدود یک مرتبه بزرگی تغییر پیدا می کند. جالب آنکه در طول موج های پایین تر از $1/5 \mu m$ پاسخ به شدت افزایش یافته به طوری که در طول موج $0/87 \mu m$ به حدود 1000 برابر می رسد. همچنین پاسخ در قطعه متخلخل در طول موج های بالاتر از طول موج قطع در نمونه های غیر متخلخل، همچنان قابل ملاحظه است. به نظر ما ویژگی نخست می تواند ناشی از ناهمواری های سطح و همچنین افزایش جذب سیلیساید در اثر متخلخل سازی سیلیکون و دومین اثر حاصل فرایند تونل زنی حفره ها از داخل سد شاتکی باشد.

تاثیر ناهمواری های سطحی سیلیساید در افزایش پاسخ را می توان به افزایش احتمال عبور حفره های داغ در جهات مختلف از این لایه به Si و نیز افزایش جذب فوتون ها در کواک های به وجود آمده در لایه سیلیساید نسبت داد. ازطرفی افزایش میدان الکتریکی در بخش های نوک تیز پیوندگاه ممکن است تا جایی تشدید شود که با خم کردن نوار انرژی (که پهنای تونل زنی را کم می کند) احتمال وقوع تونل زنی را افزایش دهد. این فرایند سبب می شود که حفره هایی که به لایه Si تزریق می شوند لزوما انرژی ای بزرگتر از ارتفاع سد شاتکی نداشته باشند. این امر می تواند دلیلی بر گسترش مشخصه پاسخ در طول موج های بالاتر از λ_e باشد.

مراجع

- 1 -F.Raissi,2003, *A possible explanation for high quantum efficiency of PtSi/Porous silicon Schottky detectors*,IEEE transactions on electron device,50(4),1134.
- 2-F.Raissi,M.Abrishamian, T.Emadi,2004, *Single electron effect in PtSi/Porous silicon Schottky jonctions*,IEEE transactions on electron device.
- 3- F.Raissi, M.Mohtashami Far 2002, *Highly sensitive PtSi/Porous silicon Schottky detectors*,IEEE sensors journal2(5),476-481.
- 4- S.Dhar, S.Chakrabarti,2000.*large photoresponse of CdO/Porous silicon diodes*,semicond. Sci. technol.15,L39-L40.
- 5- B.Y.Tsaur, M.M.Weeks, P.W.Pellegrini,1988: *Pt-Ir silicide Schottky-Barrier IR detectors*, IEEE Electron device letters,9(2),100-103.
- ۶- منصور محتشمی فر، ۱۳۷۹، اثر سیلیکون متخلخل بر روی کارایی کوانتومی آشکارساز PtSi/Si، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر.

Abstract

In this thesis we have studied the various transport mechanisms which are involved in metal/ Si(porous and regular) Schottky diodes in forward and reverse bias(FB & RB), also in dark and illumination conditions. The experimental data shows in n-type regular RB the I-V characteristic has a standard behavior, while it is not the case in n and p-type porous substrates. This has been formulated using thermionic emission(TE) with an ideality factor bigger than 100. These figures have been related to the high surface density at the metal/ porous Si interface. Our analysis of the FB data shows the Schottky barrier height(ϕ_b) in metal/ porous Si(n) is about 0.5eV and for metal/ porous Si(p), depending on the kind of the metal, it is a value between 0.2-0.8 eV. Due to the fact that for Schottky diode infrared detectors a smaller barrier height is more preferable and efficient, and with PtSi as the metal contact, we have the least height (0.2 eV), it is the best choice for this purpose.

A comparison of I-V characteristics of PtSi/ Si(p-type) for regular and porous conditions under illumination shows when the substrate is porous the I- axis scale changes from μA to mA. Also their responsivity in porous samples increase by about one order of magnitude between 1.5-4 μm . Beyond this wavelength range some interesting phenomena happens. (1) below 1.5 μm responsivity increases sharply, so that at 0.87 μm it reaches a value about 3 orders of magnitude bigger than a regular substrate, (2) responsivity extends even more the cut- off wavelength(λ_c) in regular samples. We expect the former effect is due to the surface roughness, as well as more absorption in PtSi layer because of Si porosity; and the later effect is due to the hole tunneling through the Schottky barrier.



Physics Department
Shahrood University of Technology

***Study of Electrical Properties of Porous Silicon
and it's Effect on the Operation of Semiconductor
Devices(Detectors with Schottky Barrier)***

By:

Maryam Mohammadi

*Submitted in Partial Fulfilment
Of the Requirements
For Degree of
Master of Science
in*

Solid State Physics

Under Supervision of:

**Dr. Hosein Eshghi
Dr. Farshid Raissi**

February 2006