

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

دانشگاه تفرش

دانشکده فیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

ایجاد میکروساختار بر سطح سلول خورشیدی با

تابش لیزرایگزایمر ArF، بررسی مشخصه‌ی V-I

استاد راهنما:

دکتر پرویز پروین

دکتر حمید رضا دهقانپور

دانشجو:

صدیقه عبدالهی

۱۳۹۰

چکیده:

در این پایان‌نامه با تابش لیزر ایگزایمر ArF بر سطح سلول خورشیدی سیلیکونی و با ایجاد میکروساختار سطحی، تغییرات مشاهده شده در پارامترهای مختلف مورد بررسی قرار گرفته و در نهایت ملاحظه گردید بر میزان بازدهی سلول افزوده گردیده است. ابزار اصلی مورد استفاده لیزر ایگزایمر ArF است و در بررسی پارامترها از ابزاری نظیر (پراکندگی اشعه ایکس) EDAX، (میکروسکوپ الکترونی روبشی) SEM، (اسپکتروسکوپی مادون قرمز) ATR(FTIR) و همچنین اندازه‌گیری (ولتاژ- جریان) V-I بهره گرفته شده است. در نهایت با بررسی نتایج این نتیجه حاصل می‌شود که تغییر میکروساختار در سطح سلول ناشی از تابش لیزر، با در نظر داشتن تعداد پالس‌های لیزری برخوردی، بر میزان توان خروجی سلول خورشیدی افزایش یافته است.

کلمات کلیدی: سلول خورشیدی، لیزر ایگزایمر آرگون فلوئورید، پراکندگی اشعه ایکس، میکروسکوپ الکترونی روبشی، طیف‌سنجی مادون قرمز.

پیش گفتار

سلول‌های خورشیدی منبع تغذیه‌ی طولانی مدت را برای ماهواره‌ها فراهم می‌کنند. سلول خورشیدی می‌تواند جانشین مناسبی برای چشمه‌ی انرژی‌های معمول کنونی باشد، زیرا می‌تواند با بازده تبدیل خوب، نور خورشید را مستقیماً به الکتریسیته تبدیل کند که با بهای عملیاتی کم می‌تواند قدرت تقریباً دائمی را هم کند که واقعاً آلوده کننده هم نیست.

محدودیت منابع، افزایش جمعیت جهان و روند رو به رشد تولید گازهای گل‌خانه‌ای، اهمیت استفاده از انرژی پاک را روز به روز بیشتر و بیشتر کرده است. یکی از این انرژی‌های پاک که در بسیاری از مناطق جهان در دسترس است، انرژی خورشید می‌باشد. اگر بتوان سلول‌های خورشیدی ارزان‌تر تولید کرد، سریع‌تر می‌توان استفاده از این انرژی را در صنعت و بخش خانگی و در سطحی گسترده‌تر آغاز کرد.

سیلیسیوم نیمه‌رسانایی است که در حال حاضر از آن برای تولید سلول خورشیدی استفاده می‌شود و بارها و بارها برای هدف‌های مختلف و در میادین مختلف آزمایش گاهی، در معرض تابش اشعه لیزر قرار گرفته و با ایجاد میکروساختار بر سطح آن، تغییرات حاصله در پارامترهای فیزیکی و اپتیکی ماده مورد بررسی قرار گرفته است.

این مجموعه شامل سه فصل و نیز نتایج و پیوست می‌باشد. فصل اول با عنوان ایجاد میکروساختار منظم بر سطح سیلیکون و پلیمر با استفاده از لیزر ایگزایمر که با مقدمه‌ای درباره‌ی نیمه‌رساناها و سیلیکون آغاز می‌شود و با شرح تلاش‌های قبلی انجام گرفته در زمینه‌ی تابش لیزر بر سطح سیلیکون ادامه می‌یابد و در نهایت با توضیح چند مدل تشریحی و توجیهی مشاهدات صورت گرفته خاتمه می‌یابد. فصل دوم با عنوان سلول خورشیدی سیلیکونی، با مقدمه‌ای بر پیوندگاه $p-n$ آغاز شده و ساختار و عملکرد سلول خورشیدی معرفی می‌گردد. فصل سوم به تشریح کارهای آزمایش گاهی و نتایج حاصل از آن اختصاص دارد. پس از آن به نتیجه‌گیری پرداخته می‌شود. پیوست پایان‌نامه با عنوان پیوست به معرفی و توضیح ابزار و تکنیک‌های مورد استفاده در طی مراحل مختلف انجام آزمایش‌هایی صورت گرفته است.

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	فصل اول: اصلاح میکروساختار بر سطح سیلیکون
۱	۱-۱ مواد نیم‌رسانا.....
۲	۲-۱ تلاش‌های صورت گرفته در اصلاح ساختار سطح سیلیکون توسط تابش لیزر.....
۲	۱-۲-۱ پرتودهی سیلیکون توسط لیزر ایگزایمر ArF.....
۳	۳-۱ سازوکارهای ارائه شده در توجیه چگونگی ایجاد میکروساختار بر پایه‌ی مشاهدات آزمایشگاهی.....
۳	۱-۳-۱ علل ایجاد ساختار موج‌گونه.....
۴	۲-۳-۱ شکل‌گیری و رشد میکروستون و میکرومخروطی.....
۴	۳-۳-۱ تغییر شکل سطح سیلیکون در هوا.....
۴	۴-۳-۱ اثر اکسیژن بر اندازه و شکل میکروساختار.....
۴	۴-۱ مدل تشدید امواج سطحی.....
۷	فصل دوم: سلول خورشیدی سیلیکونی.....
۷	۱-۲ مقدمه‌ای بر پیوندگاه p-n به کار رفته در ابزار الکترونی.....
۱۱	۱-۱-۲ شارش جریان در یک سو.....
۱۲	۲-۲ سلول خورشیدی پیوندگاه p-n.....
۱۲	۱-۲-۲ عملکرد سلول خورشیدی.....
۱۵	۳-۲ بازده تبدیل.....
۱۷	فصل سوم: آزمایش‌ها و نتایج (ایجاد میکروساختار بر سطح سلول خورشیدی).....
۱۸	۱-۳ ایجاد میکروساختار سطح بر نمونه‌های ۴V توسط تابش لیزر ایگزایمر.....
۱۹	۱-۱-۳ تعیین مشخصه‌ی I-V و توان خروجی P.....

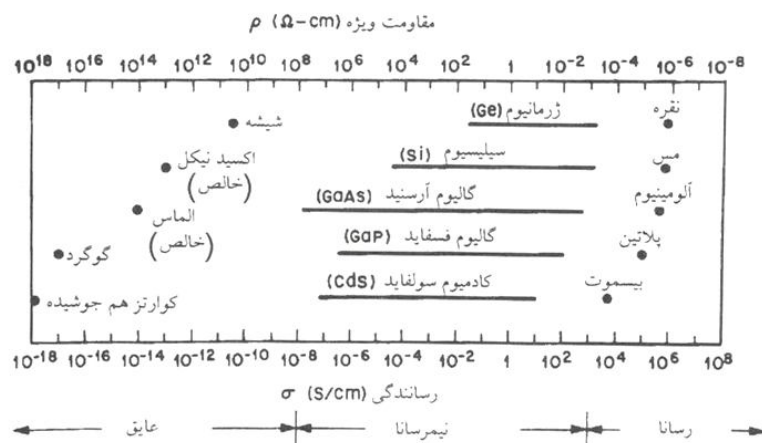
۲۳	..... SEM ۲-۱-۳ تصویر برداری به روش
۲۴	..... ۲-۳ ایجاد میکرساختار بر سطح نمونه‌های ۳V توسط تابش لیزر ایگزایمر
۲۴	..... ۱-۲-۳ تعیین مشخصه‌ی I-V در نمونه‌های ۳V و توان خروجی P آن‌ها
۲۷	..... ۲-۲-۳ تصویر برداری از نمونه‌های ۳V به روش SEM
۲۹	..... ۳-۲-۳ تصویر برداری SEM از نمونه‌های ۳V تحت زاویه‌ی ۴۵°
۳۱	..... ۳-۳ آنالیزهای EDS
۳۶	..... ۴-۳ آنالیز طیفی مادون قرمز
۴۳	..... نتیجه‌گیری و پیشنهادها
۴۵	..... پیوست
۴۶	..... ۱-۵ روش‌های میکروسکوپی
۴۶	..... ۱-۱-۵ میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM
۴۷	..... ۲-۱-۵ استفاده‌های عمومی
۴۸	..... ۳-۱-۵ نمونه‌هایی از کاربردها
۴۸	..... ۴-۱-۵ نمونه‌ها
۴۸	..... ۲-۵ روش‌های طیف‌سنجی
۵۰	..... ۱-۲-۵ طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز (FTIR)
۵۰	..... ۲-۲-۵ تئوری
۵۱	..... ۳-۲-۵ تجزیه کیفی
۵۲	..... ۴-۲-۵ کاربردها
۵۲	..... ۳-۵ آنالیز شیمیایی در میکروسکوپ الکترونی
۵۴	..... محدودیت‌ها

فصل اول

ایجاد میکروساختار منظم بر سطح سیلیکون و پلیمر با استفاده از لیزر ایگزایمر

1-1- مواد نیم رسانا:

مواد جامد در سه دسته‌ی نارساناها، نیم‌رساناها و رساناها طبقه بندی می‌شوند. شکل (1-1) رسانندگی الکتریکی σ (و مقاومت‌های ویژه مربوطه $\rho \equiv \frac{1}{\sigma}$) مربوط به مهم‌ترین مواد در هر سه گروه را نشان می‌دهد. نارساناها مانند شیشه و کوارتز دارای رسانندگی خیلی پایین، در حدود 10^{-18} تا 10^{-8} (S/cm) (زیمنس) می‌باشند. و رساناهایی نظیر آلومینیوم و نقره دارای رسانندگی بالا، به‌طور نمونه از $10^6 S/cm$ تا 10^4 هستند.



شکل (1-1): برد نوعی رسانندگی برای عایق‌ها، نیم‌رساناها و رساناها [1]

قبل از ترانزیستوردو قطبی در سال 1947، نیم‌رساناها فقط به عنوان قطعات دو- پایانه، نظیر صافی‌ها و دیودهای نوری مورد استفاده قرار می‌گرفتند. در اوایل دهه 1950، ژرمانیوم مهمترین ماده‌ی نیم‌رسانا بود. اما بعد ثابت شد که ژرمانیوم برای بسیاری از کاربردها مناسب نمی‌باشد، زیرا قطعات ژرمانیوم حتی در دماهایی که به‌طورمعتدل بالا می‌رود نشت جریان بالایی را نشان می‌دهند. به علاوه، اکسید ژرمانیوم در آب قابل حل می‌باشد و برای بسیاری از کاربردها مناسب نیست. از اوایل دهه‌ی 1960 به بعد سیلیکون به یک جانشین عملی تبدیل شده است. دلایل عمده‌ی استفاده‌ی کنونی ما از سیلیسیوم عبارتند از این‌که قطعات سیلیسیومی جریان نشت کمتری را نشان می‌دهند. و اکسید سیلیسیوم با کیفیت بالا را می‌توان به‌طور گرمایی رشد داد. در ضمن استفاده از سیلیسیوم به صرفه می‌باشد. سیلیکون بعد از اکسیژن از نظر فراوانی دومین ماده است و به شکل سیلیکا و سیلیکات‌ها 25٪ پوسته‌ی زمین را تشکیل می‌دهد. در حال حاضر سیلیکون یکی از عناصر جدول تناوبی است که به مقدار زیاد مورد مطالعه قرار گرفته و هنوزهم مطالعات زیادی در مورد آن در حال انجام است و فناوری سیلیسیوم تا کنون در بین تمام فناوری‌های نیم‌رسانایی پیشرفته‌ترین می‌باشد. [1]

بسیاری از نیم‌رساناهای غیر ذاتی نظیر گالیوم آرسنید دارای خواص الکتریکی و نوری هستند که سیلیکون به‌طور عادی فاقد آن‌هاست. عامل مهمی که سبب عدم کاربری سیلیکون عادی در کاربردهای اپتوالکترونیکی می‌شود، محدودیت جذب نور توسط این ماده است که خود ناشی از دو عامل است: [2]

- سیلیکون عادی در برابر ناحیه‌ی وسیعی از بیناب الکترومغناطیسی بازتابندگی بالایی دارد.
- گاف غیر مستقیم در حدود $1/07 \text{ eV}$ سیلیکون عادی را در برابر طول موج‌های بلندتر از $1/1 \mu\text{m}$ اساساً شفاف می‌سازد.

هر دو مورد یاد شده دامنه‌ی طول موج مفید، حساسیت و بازدهی قطعات اپتوالکترونیکی سیلیکون پایه را محدود می‌سازد. از آنجاییکه سیلیکون اهمیت بالایی در فناوری دارد، غلبه بر این موارد محدود کننده موضوع باز تحقیقاتی در چند ساله‌ی اخیر بوده است.

1-2-2- تلاش‌های صورت گرفته در اصلاح ساختار سطح سیلیکون توسط تابش لیزر:

در این بخش میکروساختار ناشی از پرتودهی سطح سیلیکون با پرتوهای لیزر تحت شرایط متفاوت بررسی گردیده است. خواص فیزیکی سیلیکون تحت تابش لیزر دستخوش تغییراتی می‌شود که این تغییرات در شرایط متفاوت آزمایش‌گاهی فشار گاز محیط، شدت اشعه‌ی لیزر و میزان تابش‌دهی مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

1-2-2-1- پرتودهی سیلیکون توسط لیزر اگزایمر ArF:

از جمله اقداماتی که در راستای ایجاد میکروساختار بر سطح سیلیکون صورت گرفته، با استفاده از تابش لیزر اگزایمر ArF است. آزمایش در مجاورت گاز SF_6 و در فشار ثابت با تابش تپ‌های مختلف انجام شده است.

هم‌چنین تغییر مورفولوژی سطحی سیلیکون پرتودهی شده با شاریدگی ثابت در فشارهای متفاوت گاز SF_6 مورد بررسی قرار گرفته و ملاحظه گردیده است که با افزایش فشار در بازه‌ی مشخصی میکرومخروطی‌های ایجاد شده تیزتر و بلندتر می‌گردند.

به طور کلی هندسه‌ی میکروساختار ایجاد شده قویاً به نوع گاز مجاور فرایند بستگی دارد. [2] تفاوت‌های مشاهده شده به طور خلاصه به شرح زیر می‌باشد:

- در صورتی که پرتوهای در خلأ صورت گیرد، عناصر میکروساختار پهن دارند.
- در مجاورت گاز SF_6 مخروطی‌های منظم پدید می‌آید.
- با افزایش فشار گاز پیوستگی میان هر مخروطی با مخروطی مجاور آن کاهش می‌یابد.
- با افزایش فشار ارتفاع مخروطها رشد کرده و میزان کاهش قطر آنها کاهش می‌یابد.

هم‌چنین خواص نوری سیلیکون با سطح میکروساختاری بررسی شده است. بهبود جذب تابش سیلیکون با سطح میکروساختاری به‌خصوصی در گاف نواری سیلیکون گزارش گردیده است. این افزایش جذب را می‌توان به افزایش تدریجی ارتفاع مخروطها نسبت داد که در آن برخی فوتون‌ها در برخورد متوالی با سطوح جانبی مخروطها، رفته‌رفته به درون حفره‌های میانی نفوذ کرده ضمن ازدست دادن انرژی خود، در تله‌های اپتیکی آن به دام افتاده و بازتاب نمی‌کنند. هم‌چنین تغییر جنس سطح به دلیل نفوذ عناصر دیگری هم‌چون گوگرد و یا فلئور به سطح سیلیکون می‌تواند عاملی برای افزایش جذب تابش در سطح سیلیکون باشد. [3]

1-3-3- سازوکارهای ارائه شده در توجیه چگونگی ایجاد میکروساختار بر پایه‌ی مشاهدات آزمایشگاهی:

وقتی که یک اشعه‌ی لیزر - پالسی بر سطح یک جامد برخورد می‌کند، چندین فرایند ممکن است اتفاق بیفتد که عبارت است از جذب، ذوب، تبخیر، جوش و تبخیر قابل انفجار ممکن که زمانی است که یک مایع به یک دمای نزدیک به دمای بحرانی می‌رسد. یک میکروساختار متناوب که طول موج مشخصی نزدیک به طول موج لیزر ورودی دارد، ممکن است رشد کند هم‌چنان که تعداد پالس‌های لیزری به‌طور پی در پی افزایش می‌یابد. این میکرو ساختار اساساً تحت اثرهای لیزری پایین ($\frac{J}{cm^2} < 1$) مشاهده می‌شود [4 و 5]. هم‌چنین یک نقشه‌ی سطحی موج مانند با طول موجی خیلی بیشتر از طول موج لیزر تصادفی مشاهده شده است [6]. در مورد ایجاد این الگوی موجی نظریه‌های متفاوتی بیان شده است. برخی امواج موئین را عامل ایجاد آن دانسته‌اند و برخی مدولاسیون فضایی فشار پلاسما که بر اثر کانونی بودن یا کانونی نبودن شارخ بخار در نقاط مختلف بر روی سطح سیلیکون ایجاد می‌شود را دلیل اصلی می‌دانند [7].

1-3-3-1- علل ایجاد ساختار موج گونه:

فشار در نواحی کاو بزرگتر از نواحی کوژ است. گرادیان فشار سطحی می‌تواند آشفته‌گی فشاری را بر روی نواحی کوژ و وکاو سطح ذوب شده توسط لیزر ایجاد می‌کند که سبب ایجاد ساختار موجی روی سطح می‌گردد. علت دیگری در این رابطه ذکر گردیده، اختلاف توزیع انرژی در سطح سیلیکون است که سبب حرکت سیلیکون مایع توسط گرادیان تنشی از نقاط گرم‌تر به نقاط سردتر می‌گردد [8]. امکان دیگری که برای خلق یک نقشه‌ی سطحی موج‌گونه در نظر گرفته‌اند، کندگی با خورش و

ساییدگی ترجیحی در مکان‌های گرم‌تر است. تشکیل این الگوهای موج‌گونه با دوره‌ی تناوب بالا، می‌تواند ناشی از ترکیبی از دو یا چند تا از این دلایل باشد که به آن‌ها در حد اشاره پرداخته شده است. اما مدل قابل استنادتری تحت عنوان مدل تشدید امواج سطحی در منبع [2و 37] آمده است.

1-3-2- شکل‌گیری و رشد میکروستون و میکرومخروطی:

راهکار فرسایش به تنهایی نمی‌تواند فرایند تشکیل ستون و مخروطی را شرح دهد زیرا این ساختارها بر فراز سطح اولیه شکل می‌گیرند. سیلیکون می‌بایستی از سطوح تحریک شده و حفره‌های سطحی به نوک مخروطی‌ها و یا ستون‌ها منتقل شود. از آن‌جایی که سیلیکون در اثر تابش ذوب می‌شود، این مسأله مطرح می‌شود که نقش ذوب چیست! برای مثال آیا نیروهای موینگی می‌تواند مایع را از کف حفره‌ها به سوی بالای ستون‌ها بکشاند؟ نتیجه‌ی گزارش ارائه شده این است که فرایند ذوب را نمی‌توان نادیده گرفت اما آن‌چه که باعث تغییرات مهم در میکروساختار می‌شود، فرایند خورش است. این فرایند در واقع سبب تولید گازی غنی از سیلیکون می‌شود که مایل است به‌طور ترجیحی در نواحی ذوب شده بنشیند. در واقع فرایند خورش در کنار فرایند بازنشستن شرایط تعادلی ایجاد می‌کند که می‌تواند رشد یا کاهش را در ارتفاع مخروطی‌ها باعث شود. [8]

اما مبدأ بیرون‌زدگی‌های جانبی مخروط‌ها چیست؟ گفته می‌شود شاید ارتباطی بین این بیرون‌زدگی‌ها با ناپایداری‌های تولید شده در مایع، ذرات پرتاب شده‌ی کوچک و یا خوشه‌هایی که بر سطح جامد یا بر جداره‌های مخروط‌ها می‌نشینند، وجود داشته باشد. این بیرون‌زدگی‌ها یقیناً بر اثر تابش لیزر ذوب می‌شوند و نقاط مذابی را بر سطح جانبی نسبتاً سرد مخروط‌ها ایجاد می‌کنند که محل ایده‌آلی برای جمع‌آوری مولکول‌ها و یا خوشه‌های غنی از سیلیکون موجود در گاز فوق اشباع اطراف مخروط‌هاست و این خود باعث رشد جانبی مخروط‌ها می‌شود. این بیرون‌زدگی‌ها به‌طور کامل ذوب می‌شوند چراکه تقریباً بر پرتو لیزر عمودند. تنش سطحی مایع نیز آن‌ها را کوچک نگه می‌دارد.

1-3-3- تغییر شکل سطح سیلیکون در هوا:

در تابش بر سطح سیلیکون با لیزر ایگزایمر در مجاورت هوا، مجموعه‌ای از میکروستون‌ها با سرهای گرد ایجاد می‌گردد. میکروستون‌های سیلیکونی هم‌چنان که تعداد پالس‌های لیزری افزایش می‌یابد، سریعاً شروع به رشد می‌کنند اما پس از رسیدن به طول معین روند رشد متوقف می‌گردد. افزایش تعداد ستون‌ها به‌طور ممتد تا شکل‌گیری یک جنگل چگال از میکروستون‌های سیلیکونی انجام می‌شود.

1-3-4- اثر اکسیژن بر اندازه و شکل میکروساختار:

مشاهده شده است که اثر تمرکز اکسیژن محیط تأثیر زیادی بر هندسه‌ی میکروستون‌ها دارد. زمانی که تابش لیزر در هوا یا در یک ترکیب گازی $O_2 - 5\% N_2$ صورت گیرد، ستون‌های هموار راست به‌دست می‌آید این در حالیست که در اکسیژن خالص ستون‌ها با گوی‌های خیلی ریز به صورت گچ اندود درمی‌آیند. [10]

مکانیزم رشد برای میکروستون‌های سیلیکونی به‌طور واضح از آنهایی که در مقابل سایش مقاومتند، متفاوتند زیرا رشد ستون‌ها به سمت بالای سطح است. بر اساس این نتایج بدیهی به‌نظر می‌رسد که میکروستون‌های سیلیکونی به‌یک‌باره شکل گرفته، به‌گونه‌ای رشد می‌کنند که مواد بر روی سرهایشان بازتخریب می‌شوند.

1-4-4- مدل تشدید امواج سطحی:

سطح مقطع لیزر ایگزایمر ناحیه‌ی مستطیلی شکل بر سطح سیلیکون را پوشش می‌دهد که در این ناحیه سیلیکون به حالت مذاب در می‌آید. پیرامون این ناحیه سیلیکون جامد وجود دارد. ضخامت ناحیه‌ی ذوب شده، به انرژی، طول موج و پهنای زمانی تپ لیزر و همچنین ضریب جذب و خواص انتقال گرمایی سیلیکون بستگی دارد. علاوه بر فرایند ذوب بر سطح سیلیکون مذاب، جابه‌جایی‌های مکانیکی واقع می‌گردد که منجر به ایجاد امواج مکانیکی سطحی می‌شود. این امواج در سطح منتشر شده تا به مرزهای ناحیه‌ی مذاب برسند که در این نواحی با π رادیان اختلاف فاز باز یافته و با امواج بازتابش نیافته ایجاد امواج ایستاده‌ی سطحی می‌کنند. پس از مدت زمان معینی فیلم مذاب با الگوی تشدیدی ایجاد شده در آن باز جامد می‌شود. این فرایند با تابش تپ‌های بعدی لیزر با ذوب مجدد سطح سیلیکون و تکرار فرایند به همراه افزایش دامنه‌ی الگوی تشدیدی ادامه می‌یابد. بر اثر واکنش‌های شیمیایی متعدد ایجاد ترکیبات شیمیایی فرار، عناصر تکرار شونده‌ی الگوی تشدیدی به صورت مخروط در می‌آیند. [2]

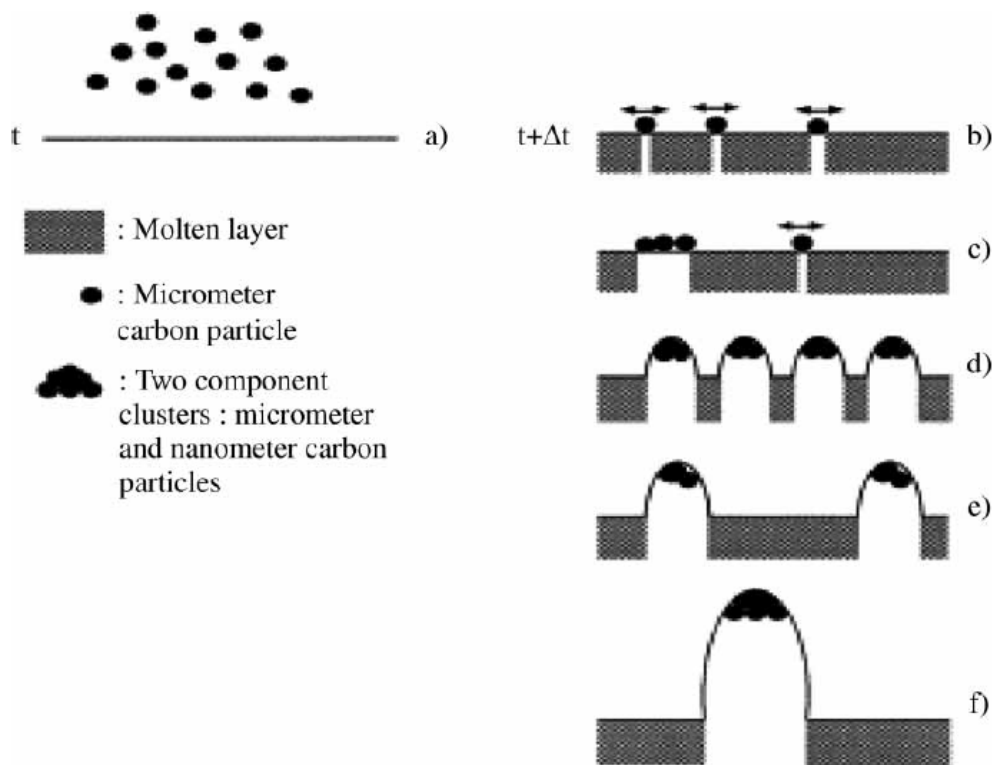
فرایند تابش لیزر بر پلیمرهای مختلف می‌تواند به چهار مرحله تقسیم شود. غیر سایشی ($F < F_{th}$)، مرحله‌ی قبل از سایش ($F \cong F_{th}$)، مرحله‌ی سایش آهسته ($F > F_{th}$) و مرحله‌ی سایش سریع ($F \gg F_{th}$) که در آن شاریدگی به‌طور قابل توجهی از مقدار معین F_{th} تجاوز می‌کند. برای پلیمرهای مختلف، شاریدگی F از $10^7 \frac{J}{cm^2}$ تا $10^8 \frac{J}{cm^2}$ برآورد شده است. برای ($F < F_{th}$) تغییر ملایمی در مورفولوژی سطحی اتفاق می‌افتد، این در حالی است که در مورد مرحله‌ی قبل از سایش، اصلاح سطحی دارای اهمیت می‌شود. در طی سایش آهسته، میکروساختاری کردن نسبتاً متفاوت از آن‌چه است که در پیش‌سایشی نمایان است. برای مثال، اثر KrF یا ArF بر روی پلی‌کربنات‌ها در شاریدگی‌های ضعیف به‌طور عمده به سخت‌شدگی ناشی از ارتباط متقاطع سطحی می‌انجامد. به‌علاوه سایش آهسته، خورش با یک سرعت سایش غیر ثابتی را آغاز می‌کند در حالی که سایش سریع به یک سرعت ثابت می‌انجامد. در طول موج‌های کوتاه‌تر ($\lambda \leq 200nm$)، شکست پیوندی ناشی از فرایند فوتوشیمیایی مورد توجه است. سایش UV با یک اشعه‌ی کانونی شده بزرگ‌تر از $10^7 \frac{W}{cm^2}$ بر پایه‌ی برهم‌کنش‌های فوتوشیمیایی و فوتوحرارتی اتفاق می‌افتد. [24]

سایش فوتونی UV ناشی از لیزرهای ایگزایمر به شکل‌گیری میکرومخروطی‌ها بر روی PC می‌انجامد. در اصل ساختار مخروطی بر روی سطح سایش یافته‌ی لیزری با شاریدگی‌های بین 20 تا $600 \frac{mJ}{cm^2}$ گسترش می‌یابد. میکروساختار در شاریدگی بزرگ‌تر از 600 ناپدید می‌گردد و سایش PC نمی‌تواند در کمتر از 20 اتفاق بیفتد. لیزرهای ArF حرارت بسیار بالایی روی سطح ایجاد می‌کنند که دلیل آن ضریب جذب خطی بالای آن‌ها در 193 nm است. میزان افزایش حرارت سطح پلیمر توسط معادله‌ی زیر تخمین زده می‌شود.

$$\Delta T \cong \frac{F_{th} (\pi \rho^3 c^3 \kappa t_p)^{-1/4}}{\sqrt{2} \left\{ \alpha^{-1} + 2 \left[\left(\frac{\kappa t_p}{\rho c} \right) p \right]^{1/2} \right\}^{1/2}} \quad (1-1)$$

در یک چنین دمایی، اتم‌های کربن از زنجیره‌ی پلیمر به خاطر پخش‌شدگی پلیمر جدا می‌شوند و آن‌ها می‌توانند به‌طور آزاد بر روی سطح حرکت کنند تا خوشه‌های کربنی را با اندازه‌ی نانومتر ایجاد کنند. پس از آن، انباشته شدن ذرات کربنی می‌تواند هم‌چون میادین تجمع برای میکروساختارهای شبهه مخروطی عمل کنند. بر این اساس لیزرهای ایگزایمر یک لایه‌ی ذوب شده‌ی بزرگ زیر لایه‌ی ساییده شده القا می‌کنند. سرعت جامد شدن پایین لایه‌ی ذوب شده باعث حرکت ذرات کربنی در کنار لایه‌ی ذوب شده شود. مدل پیشنهاد شده در شکل (3-24) به‌طور تجربی شرح داده شده است. برای اولین تپ سایشی (a)، ذرات

کربن با اندازه‌ی میکرومتر آزاد هستند تا به‌طور رندوم بر روی سطح سایش یافته حرکت کنند (b) و بنابراین انباشته می‌شوند و خوشه‌های سطحی را ایجاد می‌کنند (c). در این میان خوشه‌های کربنی با اندازه‌ی نانومتر در داخل لایه‌ی ذوب شده‌ی بزرگ پخش می‌شوند. پخش‌شدگی حرارت به افزایش شار ذرات کربن به سوی سطح می‌انجامد تا خوشه‌های کربنی بزرگ ایجاد کند. یعنی پخش‌شدگی سطحی رندوم ذرات میکرومتری به یک تهی‌سازی کربنی در بیرون از لایه‌های ذوب شده می‌انجامد (d). تجمع کربنی بزرگ و ذوب سطح میکروساختار پس از هر تپ لیزری می‌تواند سرانجام یک میکروساختار مخروطی ایجاد کند (e). این مکانیزم ادامه می‌یابد تا میکروساختارهای مخروطی کوچک را در لایه‌ی ذوب شده در اثر تابش لیزر تکرار شونده متراکم کند (f).



شکل (2-1): مراحل تغییرات انجام شده در سطح پلیمر پس از تابش لیزر [24]

فصل دوم

سلول خورشیدی سیلیکونی

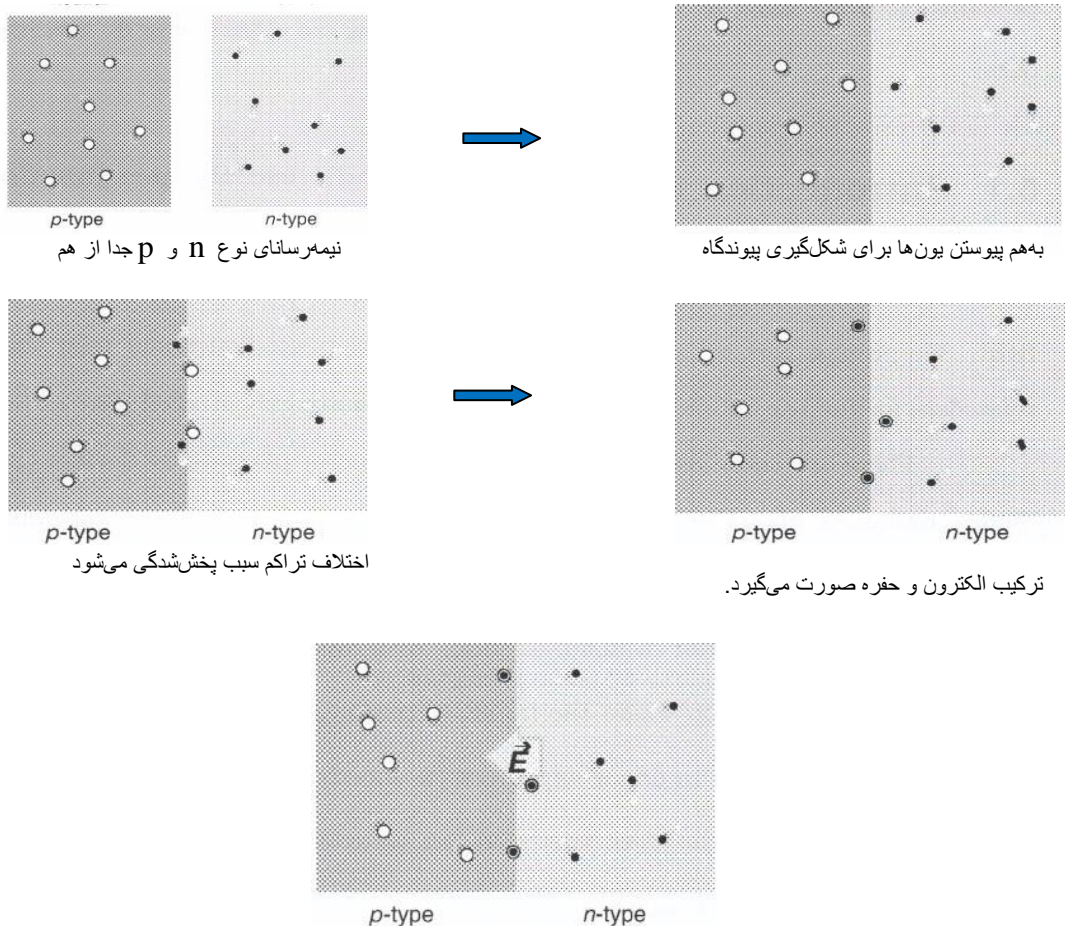
سلول‌های خورشیدی معمولاً از مواد نیمه‌رسانا، مخصوصاً سیلیسیوم ساخته می‌شود. هر اتم سیلیسیوم با چهار اتم دیگر پیوند برقرار می‌کند و بدین صورت، شکل کریستالی آن پدید می‌آید. در سلول‌های خورشیدی به سیلیسیوم مقداری ناخالصی اضافه می‌کنند. اگر اتم ناخالص پنج ظرفیتی باشد (اتم سیلیسیوم چهار ظرفیتی است) آن‌گاه در ارتباط با چهار اتم سیلیسیوم یک لایه‌ی آن بدون پیوند باقی می‌ماند (یک تک الکترون). به همین دلیل به آن سیلیسیوم نوع n (negative) می‌گویند. و همین‌طور اگر اتم ناخالص دارای ظرفیت ۳ باشد آن‌گاه یک حفره‌ی اضافی ایجاد می‌شود. حفره را می‌توان به گونه‌ای می‌توان گفت جای خالی الکترون است، با بار مثبت (به اندازه‌ی الکترون) و جرمی برابر با جرم الکترون و به آن سیلیسیوم نوع p (positive) می‌گویند. هر سلول خورشیدی از ۶ لایه تشکیل شده که هر لایه را ماده‌ای خاص تشکیل می‌دهد.

۲-۱- مقدمه‌ای بر پیوندگاه $n-p$ به کار رفته در ابزار الکترونی:

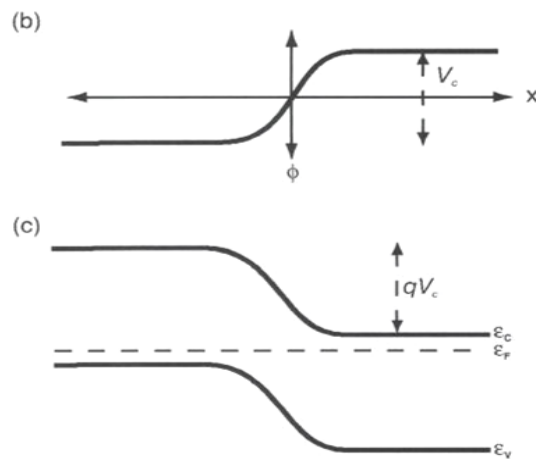
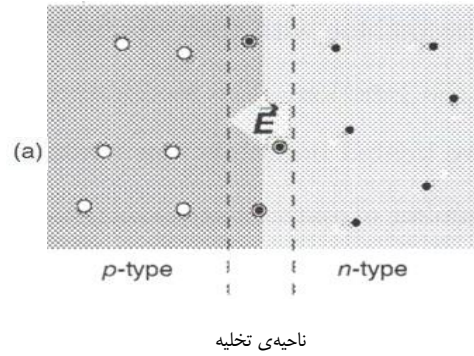
ما در اینجا با در نظر گرفتن پیوندگاه تشکیل شده از دو تکه‌ی جداگانه از جنس نیمه‌رسانای هم‌جنس، که یکی پیش بینی می‌شود تا از نوع p با اتم‌های ناخالصی پذیرنده باشد، و دیگری از نوع n با اتم‌های ناخالصی دهنده. اگر دو تکه را در اتصال با هم قرار دهیم، شیب بزرگی در غلظت حامل منطقه‌ی پیوندگاه دیده خواهد شد. پس از هم‌همی این مراحل پیش بینی می‌شود که الکترون‌ها در یک طرف و حفره‌ها در طرف دیگر قرار بگیرند. اختلاف تراکم در حامل‌ها سبب ایجاد پتانسیل انتشار در عرض پیوندگاه می‌شود. الکترون‌ها و حفره‌ها در عرض پیوندگاه به سمت نواحی با تراکم کمتر شروع به پخش شدن می‌کنند. هم‌چنان‌که آن‌ها به طرف دیگر پیوندگاه می‌روند، با همتایان خود در آن ناحیه که بار مخالف دارند ترکیب می‌شوند. حامل‌های ترکیب شده دور از لبه‌ی تقاطع به دام می‌افتند و در طرفی که از آن می‌آیند یون‌های بی‌تحرك باقی می‌گذارند. هم‌چنان‌که بر تعداد این یون‌ها افزوده می‌شود (یون‌های مثبت در طرف n یون‌های منفی در طرف p)، یک اختلاف پتانسیل ایجاد می‌شود که به یک میدان الکتریکی در جهت مخالف پتانسیل انتشار غلبه می‌کند. پس از ایجاد تعادل، یک لایه‌ی نازک جداکننده نزدیک پیوندگاه قرار دارد که در آن حامل‌های بار با ترکیب شدن تخلیه می‌شوند، و یک میدان الکتریکی قوی و اختلاف پتانسیل بزرگ شکل می‌گیرد. شکل (۲-۱) مراحل را که به ایجاد پتانسیل اتصال و میدان الکتریکی داخلی می‌انجامد نشان می‌دهد. هم‌چنین

شکل (۲-۲) پیوندگاه را در حالت تعادل نشان می‌دهد و همراه با آن نمودار تغییرات پتانسیل نزدیک پیوندگاه و نیز نمودار گاف انرژی را نشان می‌دهد.

حال می‌خواهیم ببینیم چه اتفاقی می‌افتد زمانی که یک پیوندگاه را با به‌کارگیری یک میدان الکتریکی خارج از حالت تعادل خارج می‌کنیم (شکل ۲-۳). اولین چیزی که ما در نظر می‌گیریم یک میدان الکتریکی کاربردی است که میدان داخلی را تقویت می‌کند. میدان حفره‌ها را در سمت p به طرف چپ و الکترون‌ها در ناحیه n را به سمت راست می‌راند. این ناحیه‌ی جدا کننده را گسترش می‌دهد و باعث افزایش میدان الکتریکی داخلی و و هم‌چنین اختلاف پتانسیل در عرض پیوندگاه می‌شود. در این مورد هیچ جریانی شارش نمی‌یابد. این ترتیب‌دهی به شرایط بایاس معکوس معروف است. سپس یک میدان الکتریکی کاربردی در نظر می‌گیریم که مخالف میدان الکتریکی داخلی است. در این مورد میدان الکتریکی منطقه‌ی تخلیه را کوچک می‌کند با کم شدن میدان الکتریکی داخلی و اختلاف پتانسیل در عرض پیوندگاه $p-n$. با الکترون‌های به جا مانده از سمت راست و حفره‌هایی که الکترون‌ها از سمت چپ به جا گذاشته‌اند، با دوباره پر کردن حامل‌هایی که در ناحیه‌ی پیوندگاه تخلیه شده‌اند جریانی به‌راه می‌افتد. جریان خیلی سریع با افزایش میدان خارجی زیاد می‌شود. این وضعیت به بایاس مستقیم معروف است. از این بحث به این نتیجه می‌رسیم که پیوندگاه اجازه می‌دهد جریان فقط در یک جهت شارش یابد یعنی جریان را یک‌سو می‌کند. این همان رفتار الکتریکی آشنای یک دیود است.

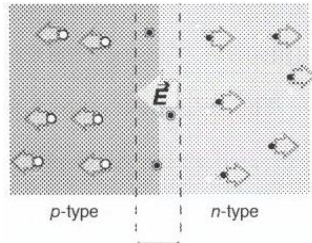


شکل (۲-۱): تصاویر نشان‌دهنده‌ی مراحل ایجاد پتانسیل و میدان الکتریکی در پیوندگاه $p-n$

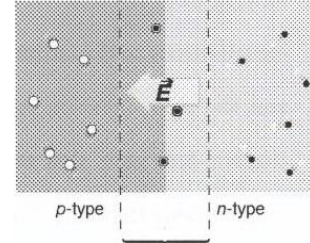


شکل (۲-۲) (a) تصویر نشان‌دهنده‌ی مرحله‌ی پایانی پیوندگاه در تعادل

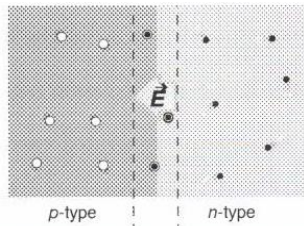
گرمایی. (b) تغییر پتانسیل با فاصله و (c) نمودار باند - انرژی. V_c .



به کار بردن میدان الکتریکی که میدان داخلی را تقویت می کند. حفره ها به سمت چپ و الکترون ها به سمت راست رانده می شوند.

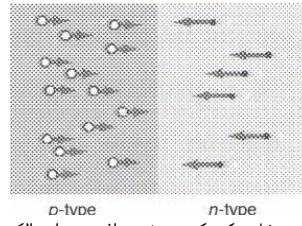


ناحیه ی تخلیه گسترش می یابد. افت پتانسیل و میدان الکتریکی در عرض ناحیه ی تخلیه افزایش می یابد. رسانایی وجود ندارد.



به کار بردن یک میدان الکتریکی خارجی که در جهت مخالف میدان الکتریکی داخلی است

بایاس مستقیم



ناحیه ی تخلیه کوچک می شود. افت میدان الکتریکی و پتانسیل در عرض ناحیه ی تخلیه کاهش می یابد. جریان شارش می یابد و با پتانسیل کاربردی افزایش می یابد.

شکل (۲-۳): (a) تصویر پیوندگاه p-n تحت اثر یک میدان الکتریکی خارجی که میدان داخلی را تقویت می کند (شرایط بایاس معکوس). (b) تصویر نشان دهنده ی یک پیوندگاه p-n تحت اثر یک میدان الکتریکی خارجی مخالف میدان داخلی. (شرایط بایاس مستقیم)

۲-۱-۱- شارش جریان در یک سو:

حال می‌خواهیم رفتار یک سو کنندگی را با توجه بیشتری به عواملی که در شارش جریان سهم دارند در نظر بگیریم. بدین منظور یک جریان مثبت را تعریف می‌کنیم که از یک حفره که از چپ به راست یا به‌طور مشابه از یک الکترون که از راست به چپ حرکت می‌کند، مانند آن‌چه که در تصاویر بالا نشان داده شده است. در یک دیود ایده‌آل دو عامل مهم در ایجاد جریان در عرض پیوندگاه مشارکت دارند، وجود دارد که عبارتند از جریان تولیدی (I_{gen}) و جریان بازترکیبی (I_{rec}). جریان تولیدی برمی‌گردد به جریان از جفت‌های الکترون - حفره که به‌طور گرمایی در ناحیه‌ی تخلیه خلق شده‌اند. برای یک شرایط مشخص (جنبش، دما، طول موج حامل، غلظت حامل و ...) یک سرعت آماری در جفت‌های الکترون - حفره‌ای که به‌طور خودبه‌خودی در منطقه‌ی تخلیه تولید می‌شوند وجود دارد. اگر یک جفت الکترون - حفره در ناحیه‌ی تخلیه خلق شود، میدان الکتریکی داخلی قوی خیلی سریع جفت را از هم جدا می‌کند و الکترون و حفره در شارش جریان در عرض پیوندگاه مشارکت می‌کنند. جریان تولیدی بنابر تعریف ما منفی است و نوعاً کوچک است ($< 1\mu A$). جریان تولیدی برای بیشترین قسمت، مستقل از بزرگی اختلاف پتانسیل در عرض ناحیه‌ی تخلیه است زیرا هر اختلاف پتانسیلی به یک میدان الکتریکی منجر می‌شود که باعث جدایی حامل‌های تولید شده می‌شود. جریان بازترکیبی ناشی از احتمال آماری است که الکترون‌ها (حفره‌ها) در قطب n یا قطب p وجود دارند که انرژی گرمایی کافی برای گذر از سد پتانسیل را در پیوندگاه دارند. تعداد حامل‌ها با انرژی گرمایی کافی از آمار فرمی - دیراک پیروی می‌کنند و جریان بازترکیب وابستگی نمایی به دما و اندازه‌ی گام پتانسیل دارد. اندازه‌ی گام پتانسیل به هر دو مورد پتانسیل اتصال در تعادل حرارتی و اندازه‌ی ولتاژ کاربردی بستگی دارد. جریان بازترکیبی بر اساس تعریف ما مثبت است. بنابراین ما داریم:

$$I_{gen} \propto \text{سرعت تولید} \quad (1-2)$$

$$I_{rec} \propto e^{\frac{V_{applied} - V_{contact}}{k_B T}} \quad (2-2)$$

$$\propto e^{V_{applied}}$$

$$I_{tot} = I_{rec} - I_{gen} \quad (3-2)$$

بدون میدان کاربردی و در حرارت گرمایی، شارش جریان کلی بایستی صفر باشد و I_{rec} باید با I_{gen} مساوی باشد. تحت این شرایط حل مسأله بدین ترتیب خواهد بود:

$$I_{tot} \propto I_{gen} (e^{V_{applied}} - 1) \quad (4-2)$$

از این معادله، به آسانی می‌توان دید که رفتار مشخصه‌ی ولتاژ-جریان ($I-V$) یک دیود به‌دست می‌آید. شکل (b) (۴-۲). اگر ما یک ولتاژ منفی به کار ببریم (بایاس معکوس)، جمله‌ی نمایی خیلی سریع به صفر میل می‌کند و شارش جریان کلی در مقدار حداقل $-I_{gen}$ اشباع می‌شود. اما اگر یک ولتاژ مثبت به کار ببریم (بایاس مستقیم)، جریان به‌طور نمایی افزایش می‌یابد. این نتیجه به‌طور آشکار در شکل (۳-۵) دیده می‌شود. بنابراین یک پیوندگاه p-n به جریان اجازه می‌دهد تا در یک سو شارش یابد.

پس از آشنایی با پیوندگاه، می‌خواهیم بدانیم چه اتفاقی می‌افتد وقتی که نور خورشید بر پیوندگاه می‌تابد اگر یک فوتون با انرژی کافی به ناحیه‌ی تخلیه وارد شود، جذب می‌شود و یک جفت الکترون - حفره می‌سازد. دوباره این جفت الکترون - حفره جریان فوتونی (I_L) است و متناسب با تعداد فوتون‌های تصادفی است. در این صورت داریم:

$$I_{tot} = I_{gen}(e^{V_{applied}} - 1) - I_L \quad (5-2)$$

جمله‌ی جریان فوتونی، منحنی I-V را با یک مقدار متناسب با تعداد فوتون‌های فرودی کاهش می‌دهد (توان فرودی).

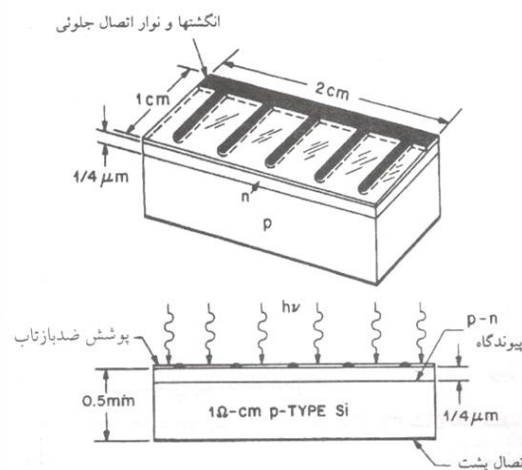
۲-۲- سلول خورشیدی پیوندگاه p-n:

نمایش طرح‌وار سلول خورشیدی پیوندگاه p-n در شکل زیر آمده است. این سلول شامل قسمت‌های زیر است: یک پیوندگاه p-n کم عمق که روی سطح تشکیل می‌شود، انگشت‌ها و نوار اتصال جلویی، اتصال اهمی عقبی که تمام سطح پشت را می‌پوشاند، و پوشش ضد بازتاب روی سطح جلویی.

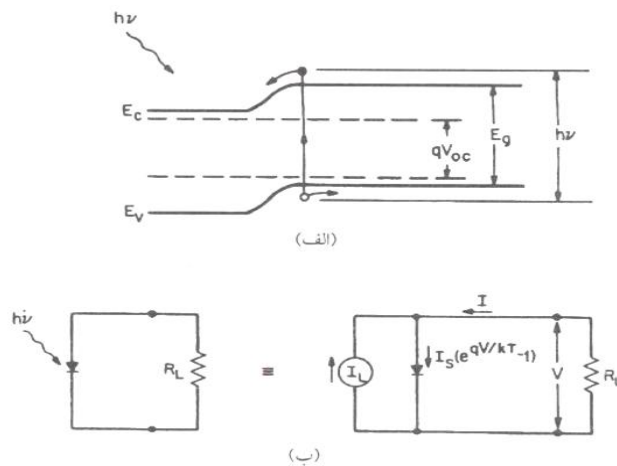
۲-۲-۱- عملکرد سلول خورشیدی:

با اتصال یک نیمه مادی نوع p به یک نیمه هادی نوع n، الکترون‌ها از ناحیه‌ی n به ناحیه‌ی p و حفره‌ها از ناحیه‌ی p به ناحیه‌ی n منتقل می‌شوند. با انتقال هر الکترون به ناحیه‌ی p یک یون مثبت در ناحیه‌ی n و با انتقال هر حفره به ناحیه‌ی n، یک یون منفی در ناحیه‌ی p باقی می‌ماند. یون‌های مثبت و منفی میدان الکتریکی داخلی ایجاد می‌کنند که جهت آن از ناحیه‌ی n به ناحیه‌ی p است. این میدان با انتقال بیشتر باربرها (الکترون‌ها و حفره‌ها)، قوی‌تر و قوی‌تر می‌شوند.

نمایش طرح‌وار سلول خورشیدی پیوندگاه p-n در شکل (۵-۲) نشان داده شده است. این سلول شامل قسمت‌های زیر است: یک پیوندگاه p-n کم عمق که روی سطح تشکیل می‌شود، انگشت‌ها و نوار اتصال اهمی جلویی، اتصال عقبی که تمام سطح پشت را می‌پوشاند و پوشش ضد بازتاب روی سطح جلویی.



شکل (۵-۲): نمایش طرح‌وار سلول خورشیدی پیوندگاه p-n سیلیسیومی



شکل (۶-۲): (الف) نمودار نوار انرژی سلول خورشیدی پیوندگاه تحت درخشندگی خورشیدی.

(ب) مدار معادل ایده‌آل شده سلول خورشیدی

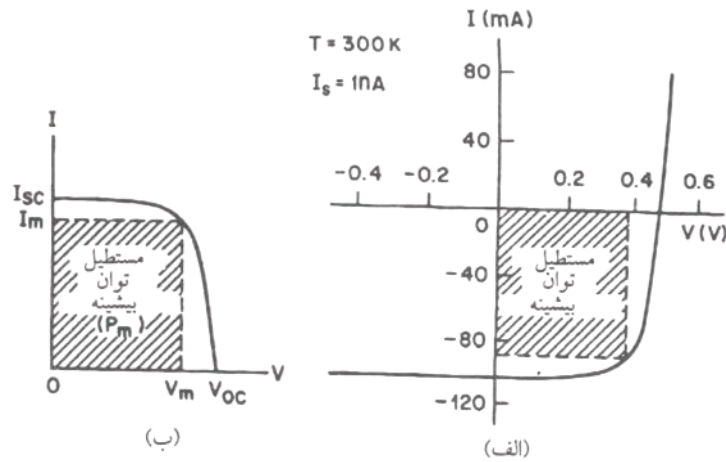
وقتی سلول در معرض بیناب خورشیدی قرار می‌گیرد، فوتونی که دارای گاف انرژی کمتر از گاف نواری E_g است هیچ سهمی در خروجی سلول ندارد. فوتونی که دارای انرژی بزرگ‌تر از E_g است به اندازه‌ی انرژی E_g در خروجی سلول مشارکت می‌کند. انرژی مازاد بر به صورت گرما تلف می‌شود. برای به‌دست آوردن بازدهی تبدیل، نمودار نوار انرژی پیوندگاه p-n تحت تابش خورشیدی را که در شکل نشان داده شده بررسی می‌کنیم. مدار معادل در شکل آمده است، که در آن منبع جریان - ثابت با پیوندگاه موازی است. منبع I_L از تحریک حامل‌های اضافی توسط تشعشع خورشیدی حاصل می‌شود، جریان اشباع دیود است و R_L مقاومت بار می‌باشد. مشخصه‌های ایده‌آل چنین قطعه‌ای به طریق زیر به‌دست می‌آید [۱]:

$$I = I_S (e^{qV / kT} - 1) - I_L \quad (۶-۲)$$

$$J_S = \frac{I_S}{A} = qN_C N_V \left[\frac{1}{N_A} \sqrt{\frac{D_n}{\tau_n}} + \frac{1}{N_D} \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}} \right] e^{-E_g / kT}$$

(۷-۲)

که در آن مساحت قطعه است. نمودار معادله (۶-۲) برای $I_L = 100 \text{ mA}$ ، $I_S = 1 \text{ nA}$ ، مساحت سلول $A = 4 \text{ cm}^2$ و $T = 300 \text{ K}$ در شکل (۷-۲) نشان داده می‌شود. منحنی از ربع چهارم می‌گذرد، و بنابراین توان را می‌توان از قطعه به‌دست آورد. منحنی به‌طور عمومی‌تر در شکل نشان داده می‌شود، که وارونه‌ی شکل حول محور ولتاژ است. با انتخاب بار مناسب، نزدیک به ۸۰٪ از حاصلضرب $I_{SC} V_{OC}$ را می‌توان بیرون کشید، که در آن I_{SC} جریان مدار کوتاه برابر با I_L است و V_{OC} ولتاژ مدار-باز سلول است. مساحت هاشور خورده در شکل مستطیل توان - بیشینه است. در شکل کمیت‌های I_m و V_m نیز معین شده‌اند که به ترتیب مترادف با جریان و ولتاژ برای توان خروجی بیشینه‌ی $(I_m V_m)$ هستند.



شکل (۷-۲): (الف) مشخصه‌های جریان-ولتاژ سلول خورشیدی تحت تابش. (ب) وارونه‌ی (الف)

حول محور ولتاژ

از معادله‌ی ولتاژ مدار- باز ($I = 0$) به دست می‌آوریم:

$$V_{oc} = \frac{KT}{q} \ln\left[\frac{I_L}{I_s} + 1\right] \approx \frac{KT}{q} \ln\left[\frac{I_L}{I_s}\right] \quad (۸-۲)$$

از این رو، I_L معین، V_{oc} با جریان اشباع کاهنده‌ی I_s به طور لگاریتمی افزایش می‌یابد. توان خروجی از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$P = IV = I_s V (e^{qV/KT} - 1) - I_L V \quad (۹-۲)$$

شرط توان بیشینه وقتی به دست می‌آید که $\frac{dp}{dV} = 0$ است، یا:

$$V_m = \frac{KT}{q} \ln\left[\frac{1 + (I_L/I_s)}{1 + (qV_m/KT)}\right] = V_{oc} - \frac{KT}{q} \ln\left[1 + \frac{qV_m}{KT}\right] \quad (۱۰-۲)$$