



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده فیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد فیزیک

گرایش حالت جامد

## اثر فوتوولتایی در سلول‌های خورشیدی با سیلیکون متخلخل

استاد راهنما:

دکتر حسین عشقی

استاد مشاور:

دکتر مرتضی ایزدی‌فرد

نگارش:

نسرین صالحی

تأیید شده  
۹۰  
۴۰۴۲

شهریور ۱۳۸۶

الحمد لله رب العالمين

تقدیم

به مادرم

به خاطر گرمای دست‌هایش

و پدرم

برای حمایت‌هایش

## تشکر و قدردانی

اکنون که با تأییدات خداوند متعال دوره‌ای دیگر از تحصیل را پشت سر می‌گذارم و از آنجا که دستیابی به این مهم در سایه محبت و بزرگواری عزیزانی میسر گردیده است، هر چند واژه‌ها از بیان شکوه محبت و لطف این بزرگواران عاجز است، لکن به رسم ادب لطفشان را ارج نهاده و برخورد واجب می‌دانم که از زحمات بی‌شائبه استاد فرزانه و بزرگوار **آقای دکتر حسین عشقی** که روحیه پژوهش را در این حقیر زنده کرده و همواره با رهنمودهای گهربار و صبر و حوصله فراوان مشوق اینجانب بوده‌اند صمیمانه تشکر و قدردانی نمایم. همچنین از استاد فرزانه **آقای دکتر مرتضی ایزدی‌فرد** که با نظرات کارگشا خویش در پیشبرد و تکمیل این پایان‌نامه نقش به‌سزایی داشتند، تشکر و سپاسگزاری می‌نمایم.

از هیات محترم داوران به خاطر قبول زحمت نقد و بررسی پایان‌نامه، 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 آموزش‌های حکیمانه‌شان تقدیم آن بزرگواران می‌نمایم. امید که با استعانت از خداوند و ادامه دادن این راه بتوانم قدردانشان بوده و لبخند رضایت را بر لبانشان بنشانم.

## مقالات چاپ شده از رساله

۱- صالحی نسرين، عشقی حسین، هونگ چین اوی، «بررسی کمی تأثیر بازتابندگی سطحی بر چگالی جریان اتصال کوتاه در سلول‌های خورشیدی سیلیکونی با و بدون نانو تخلخل‌های سطحی»، مقاله‌نامه کنفرانس فیزیک ایران، دانشگاه یاسوج، ۵-۸ شهریور ۱۳۸۶.

### چکیده

نتایج تجربی حاکی از آنند که سلول‌های خورشیدی سیلیکونی با سطح متخلخل (در ابعاد نانومتری) در مقایسه با قطعات عادی (بدون تخلخل) از چگالی جریان اتصال کوتاه بزرگتری برخوردارند. به منظور پیدا کردن علت این مشاهدات از مدل نظری استفاده نمودیم. نتایج حاصل از آنالیز نشانگر آن است که این مدل برای نمونه‌های متخلخل و عادی تطابق بسیار خوبی با داده‌های تجربی داشته و وجود نانو تخلخل‌های سطحی، که به کاهش بازتابندگی نور می‌انجامد، علت اصلی افزایش چگالی جریان در این قطعات ارزیابی می‌شود.

۲- صالحی نسرين، عشقی حسین، هونگ چین اوی، «تأثیر نانوتخلخل سیلیکون بر کاهش مقاومت متوالی در سلول خورشیدی»، مقاله‌نامه کنفرانس فیزیک ماده چگال مرکز تحصیلات تکمیلی زنجان، ۱۰-۱۱ خرداد ۱۳۸۶.

### چکیده

مشخصه I-V سلول‌های خورشیدی با ساختار  $n^+/p\text{-Si}$  یکی با سطح متخلخل به ضخامت ۷۲ nm و دیگری بدون تخلخل، به عنوان سلول مقایسه، که در شرایط یکسانی رشد پیدا کرده‌اند را به کمک مدل‌های نظری مورد بررسی قرار داده‌ایم. داده‌های تجربی حاکی از افزایش بازدهی قطعه متخلخل به میزان بیش از ۸۰ درصد می‌باشد. در این مقاله به مطالعه پارامترهای مؤثر در این مورد شامل سطح مؤثر نور فرودی، گاف نواری و ضریب جذب ماده، همچنین مقاومت متوالی قطعه پرداخته‌ایم. محاسبات نظری ما نشانگر کاهش مقاومت متوالی قطعه متخلخل به میزان بیش از ۵۰ درصد بوده است که می‌تواند بر کارایی قطعه تأثیر گذار باشد.

## چکیده

در این پروژه ما نخست به معرفی پارامترها و کمیت‌های مؤثر بر بازدهی سلول‌های خورشیدی سیلیکونی با ساختار p-n اقدام نموده و سپس به بررسی کمی تأثیر حضور پوسته‌ای از نانو تخلخل‌های سطحی پرداخته‌ایم. گزارش‌های منتشر شده در خصوص گروه‌هایی از سلول‌های خورشیدی با ساختارهای  $p^+/n\text{-Si}$  و  $n^+/p\text{-Si}$  حاکی از آنند که بازدهی در ساختارهایی با یک پوسته متخلخل سطحی (در ابعاد نانومتری) در مقایسه با نمونه‌های غیرمتخلخل افزایش یافته است. از بررسی کمی مشخصه I-V در این قطعات ملاحظه شد که علل اصلی این موضوع ناشی از تغییرات مقاومت متوالی و بازتابندگی سطحی است.

دریافتیم: (۱) با توجه به منحنی I-V در این قطعات، مقاومت متوالی در نمونه‌های با ساختار  $n^+/p\text{-Si}$  از نمونه‌های عادی، و همچنین نمونه‌های با ساختار  $p^+/n\text{-Si}$  کمتر است. (۲) در پیش‌بینی مقدار چگالی جریان مدار اتصال کوتاه ( $J_{sc}$ )، با استفاده از معادله ۲-۴، بازتابندگی سطحی نقش بسیار مهمی را ایفا می‌نماید. (۳) اگرچه ولتاژ مدار باز ( $V_{oc}$ ) به ازای شدت‌های تابشی ( $P_{in}$ ) بزرگتر از  $40 \text{ mW/cm}^2$  به یک مقدار ثابت میل می‌کند، بین  $J_{sc}$  و  $P_{in}$  در تمامی گستره شدت تابشی رابطه‌ای خطی ( $J_{sc} = \beta P_{in}$ ) برقرار است. محاسبات ما حاکی از آن است که مقدار ضریب تناسب  $\beta$  برای یک قطعه ایده‌آل (بدون بازتابندگی سطحی) برابر  $0.61 \text{ V}^{-1}$  و در نمونه‌های واقعی، بسته به مقدار بازتابندگی سطحی آنها، در نمونه‌های متخلخل و عادی به ترتیب در حدود  $0.5 \text{ V}^{-1}$  و  $0.3 \text{ V}^{-1}$  می‌باشند.

## فهرست مطالب

عنوان ..... صفحه

پیشگفتار ..... ۱

### گفتار اول - تاریخچه سیلیکون متخلخل

مقدمه ..... ۳

۱-۱- سیلیکون متخلخل چیست؟ ..... ۴

۱-۱-۱- تقسیم بندی سیلیکون متخلخل به لحاظ ابعادی ..... ۴

۱-۱-۲- تقسیم بندی سیلیکون متخلخل به لحاظ شکل ..... ۵

۲-۱- روش های متداول ساخت سیلیکون متخلخل ..... ۶

۱-۲-۱- پارامترهای مؤثر در کیفیت رشد سیلیکون متخلخل در روش های مختلف ..... ۹

۳-۱- برخی ویژگی های الکتریکی سیلیکون متخلخل ..... ۱۰

۴-۱- برخی ویژگی های اپتیکی سیلیکون متخلخل ..... ۱۱

۵-۱- سیلیکون متخلخل و کاربردهای آن ..... ۱۲

مراجع ..... ۱۴

### گفتار دوم - آشنایی با نحوه عملکرد و کاربرد سلول های خورشیدی با ساختار p-n

مقدمه ..... ۱۷

۱-۲- تشعشع خورشیدی ..... ۱۸

۲-۲- گذارهای تابشی ..... ۲۱

۳-۲- جذب نوری در نیمرسانا ..... ۲۲

|    |                                                                |
|----|----------------------------------------------------------------|
| ۲۵ | ۴-۲- اثر فوتوولتایی.....                                       |
| ۲۸ | ۵-۲- نحوه عملکرد سلول های خورشیدی با ساختار p-n.....           |
| ۳۰ | ۶-۲- کاربردهایی از سلول های خورشیدی.....                       |
| ۳۰ | ۲-۶-۱- کاربرد سلول های خورشیدی در تأمین برق منازل روستایی..... |
| ۳۰ | ۲-۶-۲- کاربرد سلول های خورشیدی در صنعت خودرو سازی.....         |
| ۳۱ | ۲-۶-۳- کاربرد سلول های خورشیدی در تحقیقات فضایی.....           |
| ۳۲ | ۷-۲- مزایا و معایب سلول های خورشیدی.....                       |
| ۳۲ | ۲-۷-۱- مزایای سلول های خورشیدی.....                            |
| ۳۲ | ۲-۷-۲- معایب سلول های خورشیدی.....                             |
| ۳۳ | ۸-۲- تاریخچه سلول های خورشیدی و استفاده از آن در ایران.....    |
| ۳۴ | مراجع.....                                                     |

## گفتار سوم- روابط و پارامترهای مؤثر در طراحی سلول های خورشیدی با ساختار

### p-n

|    |                                                       |
|----|-------------------------------------------------------|
| ۳۶ | مقدمه.....                                            |
| ۳۷ | ۳-۱- پارامترهای اساسی در ساختار سلول های خورشیدی..... |
| ۳۷ | ۳-۱-۱- مشخصه جریان - ولتاژ سلول های خورشیدی.....      |
| ۴۰ | ۳-۱-۲- جریان مدار اتصال کوتاه ( $I_{sc}$ ).....       |
| ۴۱ | ۳-۱-۳- ولتاژ مدار باز ( $V_{oc}$ ).....               |
| ۴۲ | ۳-۱-۴- ضریب پر کنندگی (F.F.).....                     |
| ۴۳ | ۳-۱-۵- بازده ( $\eta$ ).....                          |
| ۴۳ | ۳-۲- عوامل مؤثر در طراحی بهینه سلول های خورشیدی.....  |

|    |                                                    |
|----|----------------------------------------------------|
| ۴۳ | ۱-۲-۳- ضخامت لایه ها.....                          |
| ۴۵ | ۲-۲-۳- چگالی ناخالصی در لایه بالایی.....           |
| ۴۷ | ۳-۲-۳- چگالی ناخالصی در لایه زیرین.....            |
| ۴۹ | ۴-۲-۳- اتصالات اهمی.....                           |
| ۵۰ | ۳-۳- عوامل مؤثر در افت بازده سلول های خورشیدی..... |
| ۵۰ | ۱-۳-۳- تلفات نوری.....                             |
| ۵۰ | ۲-۳-۳- تلفات بازترکیب.....                         |
| ۵۱ | ۳-۳-۳- تلفات مقاومت های متوالی و موازی.....        |
| ۵۱ | ۴-۳-۳- تأثیر دما.....                              |
| ۵۲ | ۴-۳- روش های بهبود کارایی سلول های خورشیدی.....    |
| ۵۲ | ۱-۴-۳- استفاده از پوشش های ضد بازتاب.....          |
| ۵۴ | ۲-۴-۳- ایجاد ناهمواری در سطح سلول های خورشیدی..... |
| ۵۵ | ۳-۴-۳- به دام اندازی نور.....                      |
| ۵۶ | مراجع.....                                         |

## گفتار چهارم- بررسی و تحلیل داده های سلول های خورشیدی با ساختارهای عادی و متخلخل

|    |                                                                            |
|----|----------------------------------------------------------------------------|
| ۵۸ | مقدمه.....                                                                 |
| ۵۹ | ۱-۴- مطالعه مشخصه I-V سلول های خورشیدی با ساختارهای متفاوت.....            |
| ۵۹ | ۱-۱-۴- سلول های خورشیدی با ساختار $n^+/p\text{-Si}$ (با و بدون تخلخل)..... |
| ۶۲ | ۲-۱-۴- سلول های خورشیدی با ساختار $p^+/n\text{-Si}$ (با و بدون تخلخل)..... |
| ۶۵ | ۲-۴- بررسی تأثیر تخلخل بر مشخصه الکتریکی سلول های خورشیدی.....             |

|     |                                                                                     |
|-----|-------------------------------------------------------------------------------------|
| ۶۵  | ۴-۲-۱- مقاومت متوالی قطعه.....                                                      |
| ۶۹  | ۴-۲-۲- بازتابندگی سطحی.....                                                         |
| ۷۴  | ۴-۲-۳- ضخامت پوسته متخلخل در لایه بالایی.....                                       |
| ۷۹  | ۴-۲-۴- ضخامت لایه بالایی (گسیلنده).....                                             |
| ۳-۴ | مطالعه بستگی مشخصه الکتریکی به شدت تابش و دما در نمونه‌های متخلخل و غیر متخلخل..... |
| ۸۰  | ۴-۳-۱- تأثیر شدت تابش بر مشخصه الکتریکی.....                                        |
| ۸۱  | ۴-۳-۲- تأثیر دما بر مشخصه الکتریکی.....                                             |
| ۸۴  | ۴-۴- نتیجه‌گیری.....                                                                |
| ۸۷  | مراجع.....                                                                          |
| ۹۰  |                                                                                     |

## پیشگفتار

پس از ساخت سیلیکون (Si) متخلخل توسط اوهرل<sup>۱</sup> در سال ۱۹۵۶، تا سال ۱۹۹۰ که کنهام<sup>۲</sup> توانست فوتولومینسانس<sup>۳</sup> (PL) قویی از این ماده در ناحیه مرئی در دمای اتاق گزارش کند، تا مدت‌ها این ماده به دست فراموشی سپرده شده بود. امروزه این ویژگی، بعلاوه ارزان بودن سیلیکون متخلخل نسبت به سایر مواد نیم‌رسانا سبب کاربرد وسیع آن در صنایع اپتوالکترونیک گردیده است. بررسی‌های انجام شده روی این ماده نشان می‌دهد که ایجاد تخلخل در سطح سیلیکون منجر به ایجاد خصوصیات برجسته‌ای در این ماده می‌شود که این خصوصیات تأثیر مستقیمی در کارایی قطعات ساخته شده از این ماده نظیر سلول‌های خورشیدی دارد. به دلیل قابلیت ساخت این ماده در ابعاد و ساختارهای متفاوت، توصیف کامل و دقیق خواص الکتریکی و اپتیکی آن هنوز هم مورد مطالعه و بحث می‌باشد.

از آنجایی که در سال‌های اخیر کاربرد سیلیکون متخلخل در ساخت سلول‌های خورشیدی با ساختار p-n مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است، لذا در این پایان‌نامه به طور کمی و کیفی به تأثیر استفاده از این ماده در ساخت ساختارهای مختلف سلول خورشیدی پرداخته‌ایم و دلایلی برای افزایش بازده سلول‌های خورشیدی با پوسته سطحی سیلیکون متخلخل ارائه نموده ایم. در گفتار اول به آشنایی با سیلیکون متخلخل و معرفی برخی ویژگی‌های ساختاری، الکتریکی و اپتیکی آن پرداخته شده است. آشنایی با نحوه عملکرد و کاربرد سلول‌های خورشیدی با ساختار p-n، موضوع بحث گفتار دوم است. در گفتار سوم روابط و پارامترهای مؤثر در طراحی سلول‌های خورشیدی با ساختار p-n مورد بررسی قرار گرفته است. در گفتار چهارم با استفاده از داده‌های تجربی گزارش شده در مقالات علمی معتبر علل بهبود کارایی سلول‌های خورشیدی با پوسته سطحی سیلیکون متخلخل نسبت به نمونه‌های غیرمتخلخل را از جنبه‌های گوناگون مورد بررسی قرار داده ایم.

# گفتار اول

تاریخچه سیلیکون متخلخل

## مقدمه

از سال ۱۹۵۶ میلادی که اوهرل بطور تصادفی در حین از بین بردن لایه‌های صدمه دیده سطح ویفرهای سیلیکونی به کمک روش خوردگی شیمیایی (بخش ۱-۳)، با سطوحی متخلخل مواجه گشت حدود پنجاه سال می‌گذرد [۱]. از آن زمان تلاش برای شناخت بیشتر خواص الکتریکی و اپتیکی این ماده آغاز گردید. در سال ۱۹۵۸ میلادی در همین راستا ترنر موفق به ساخت نخستین لایه سیلیکون متخلخل شد [۲]. پیکرینگ<sup>۱</sup> در سال ۱۹۸۴ برای نخستین بار موفق به مشاهده طیف فوتولومینسانس حاصل از این ماده در دمای  $42\text{ K}$  گردید [۳]، ولی چون دمایی که در آن طیف فوتولومینسانس مشاهده گردید بسیار پایین بود این موفقیت چندان مورد توجه محققان قرار نگرفت. در سال ۱۹۸۷ لهن و گوسل<sup>۲</sup> گاف نواری سیلیکون متخلخل را به روش اپتیکی تعیین نمودند؛ بر اساس گزارش آنها گاف نواری سیلیکون متخلخل بیش از  $1/7\text{ eV}$  در دمای اتاق 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 یافته‌های بزرگ وی که سبب وقوع انقلابی در سال ۱۹۹۰ در عرصه تکنولوژی سیلیکون متخلخل شد، مشاهده طیف فوتولومینسانس مرئی و قوی از این ماده در دمای اتاق است [۵]. چند سال بعد کنهام موفق شد ارتباط بین بیشینه شدت فوتولومینسانس سیلیکون متخلخل و ابعاد ستون‌های سیلیکونی را پیدا کند. وی گزارش کرد که با باریک تر شدن قطر ستون‌های سیلیکونی برجای مانده، بیشینه شدت فوتولومینسانس به سمت انرژی‌های بالاتر جابجا می‌شود [۶].

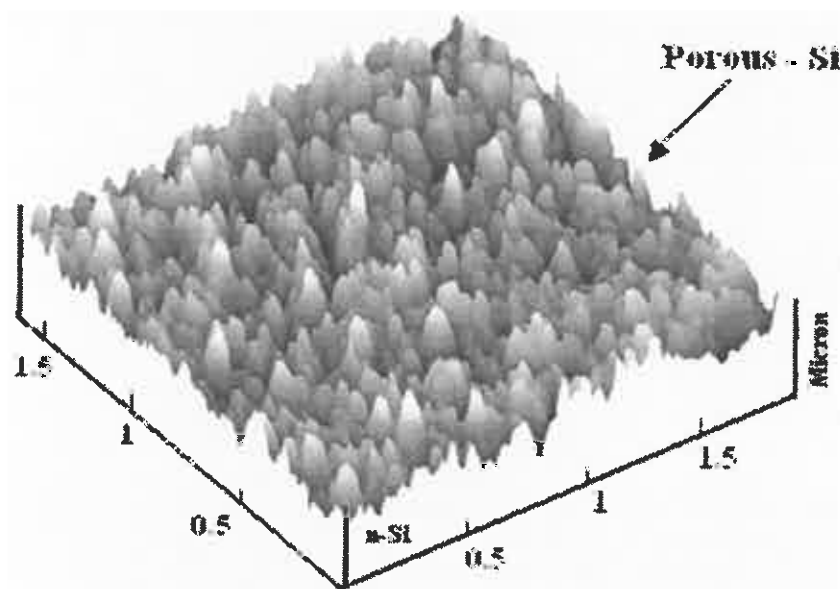
با وجود پیشرفت‌های بسیاری که در زمینه ساخت و کاربردهای سیلیکون متخلخل صورت گرفته است، هنوز جنبه‌های ناشناخته بسیاری وجود دارد که به ساختار نامنظم این ماده مربوط می‌شود. از

جمله مهم‌ترین آنها مستقیم یا غیرمستقیم بودن گاف نواری سیلیکون متخلخل است. اگرچه برخلاف انتظار گزارش‌هایی مبنی بر مستقیم بودن گاف نواری سیلیکون متخلخل وجود دارد [۶] لیکن بسیاری از محققین همچنان سیلیکون متخلخل را در شمار نیم‌رساناهایی با گاف نواری غیرمستقیم به حساب می‌آورند [۷].

### ۱-۱- سیلیکون متخلخل چیست؟

چنانچه سطح سیلیکون با موادی مانند  $HF$  و  $KOH$  و  $NaOH$  در تماس باشد، در سطح آن خوردگی بوجود می‌آید. سیلیکونی که با روش‌های خوردگی به ساختاری اسفنجی شکل شامل ستون‌های سیلیکونی و حفره‌های خورده شده تبدیل شده است، سیلیکون متخلخل نامیده می‌شود (شکل ۱-۱).

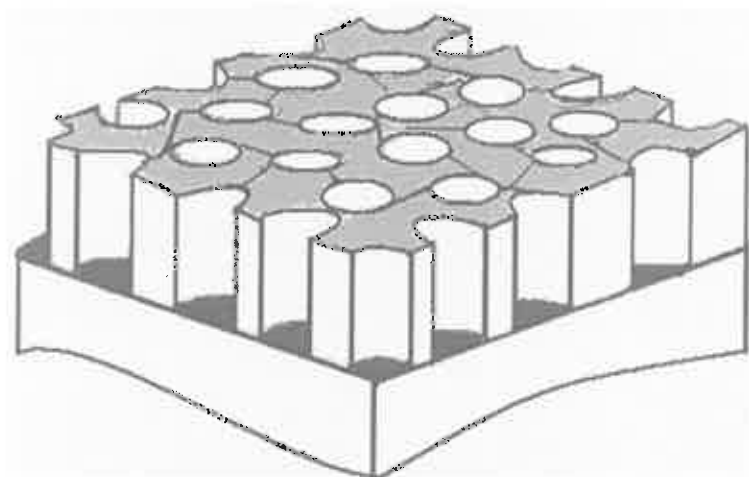
سیلیکون متخلخل با توجه به ابعاد و شکل حفره‌های خورده شده به اقسام گوناگونی تقسیم می‌شود که در ادامه به معرفی آنها خواهیم پرداخت.



شکل ۱-۱- برشی از یک لایه سیلیکون متخلخل [۸].

#### ۱-۱-۱- تقسیم بندی سیلیکون متخلخل به لحاظ ابعادی

آنچه باعث تمایز سطح ناهموار و سطح متخلخل می‌شود، وجود حفره‌هایی است که ارتفاع آنها از پهنایشان 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.



شکل ۱-۲- طرح ساده‌ای از سطح سیلیکون متخلخل [۹].

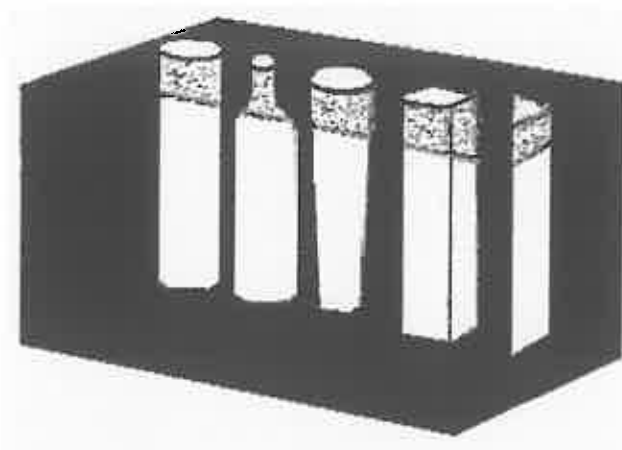
جدول ۱-۱- تقسیم بندی سیلیکون متخلخل به لحاظ ابعادی [۶].

| نوع حفره | پهنای حفره                    |
|----------|-------------------------------|
| نانومتر  | $\leq 250 \text{ nm}$         |
| میکرومتر | $\leq 2 \text{ }\mu\text{m}$  |
| مزومتر   | $2 - 50 \text{ }\mu\text{m}$  |
| ماکرومتر | $\geq 50 \text{ }\mu\text{m}$ |

تعیین ابعاد خلل و فرج وقتی یک 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 است، ولی در تخلخل میکرومتری و نانومتری، تعیین دقیق شکل خلل و فرج‌ها به سادگی امکان پذیر نیست. قابل ذکر است که در بررسی سیلیکون متخلخل میکرومتری به دلیل ابعاد بسیار کوچک ستون‌های سیلیکونی باید اثرات کوانتومی را نیز در نظر گرفت [۶]. این موضوع روی بزرگی گاف نواری سیلیکون متخلخل اثر می‌گذارد که در بخش ۴-۱ به آن پرداخته ایم.

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

شکل ۱-۳ رایج‌ترین اشکال حفره‌ها را نشان می‌دهد. حفره‌ها می‌توانند به شکل استوانه ساده یا شاخه دار باشند. علاوه بر این خلل و فرج‌ها ممکن است دارای سطح مقطع مربعی یا مثلثی بوده و یا به شکل قیف و یا بطری باشند [۶].



شکل ۱-۳- اشکال گوناگون حفره‌های خورده شده؛ از سمت چپ: استوانه‌ای، بطری، قیفی، سطح مقطع مربعی و مثلثی [۶].

در عمل مشاهده شده است که شکل حفره‌ها به سمتگیری بلوری ویفر سیلیکون بستگی دارد. بعنوان مثال متخلخل‌سازی به روش خوردگی الکتروشیمیایی (بخش ۱-۳) در ویفرهایی با سمتگیری (۱۰۰) به ایجاد حفره‌هایی با سطح مقطع مربعی و با سمتگیری (۱۱۱) به حفره‌هایی با سطح مقطع مثلثی می‌انجامد [۶].

## ۱-۲- روش‌های متداول ساخت سیلیکون متخلخل

از آنجا که در نمونه‌های مورد بررسی در این پروژه به روش‌های ساخت سیلیکون متخلخل نیز اشاره می‌شود، لذا برای آشنایی به معرفی آنها می‌پردازیم. روش‌های معمول برای تهیه سیلیکون متخلخل عبارتند از:

الف- خوردگی الکتروشیمیایی<sup>۱</sup>؛

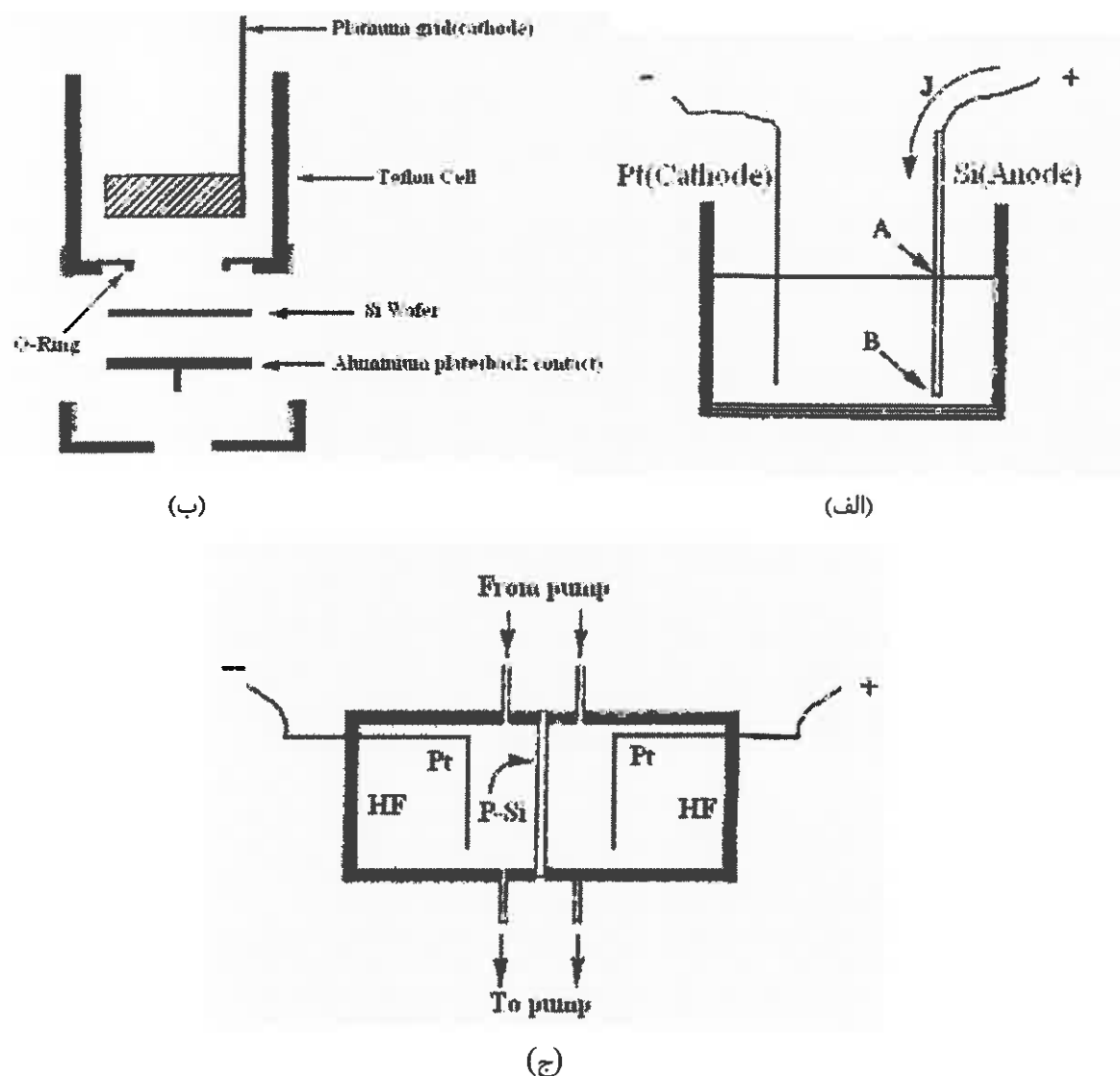
ب- خوردگی شیمیایی<sup>۲</sup>؛

ج- تولید جریان داخلی توسط عناصر گالوانیک؛

در روش خوردگی الکتروشیمیایی اساس کار بر تجزیه الکتروشیمیایی سیلیکون در محلول‌هایی است که جزء اصلی آنها HF می‌باشد. در این روش از ویفر سیلیکون به عنوان آند و از پلاتین، یا هر فلز دیگری که در مقابل HF مقاوم بوده و هادی جریان الکتریسیته نیز باشد، بعنوان کاتد استفاده

<sup>۱</sup>Anodizing  
<sup>۲</sup>Etching

می شود. از جمله مزایای این روش، تهیه لایه‌های سیلیکون متخلخل با ضخامت بیش از  $100\ \mu\text{m}$  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 در آن محلول الکترولیت از سمت پشت با ویفر سیلیکون در تماس است [۱۰، ۶].

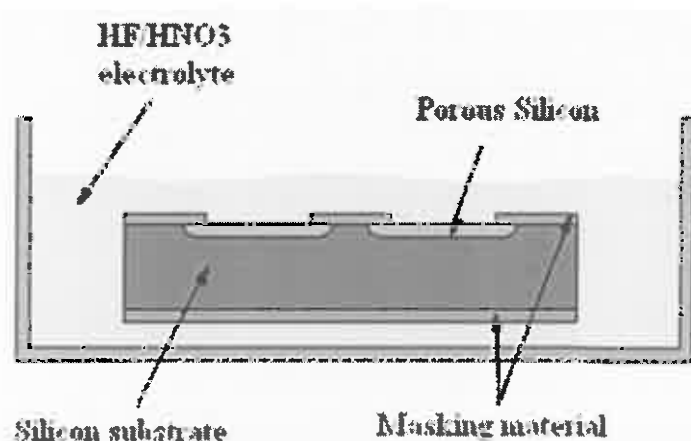


شکل ۱-۴- انواع محفظه‌های مورد استفاده در روش خوردگی الکتروشیمیایی: (الف) محفظه ساده، (ب) محفظه تکی، (ج) محفظه دوگانه [۶].

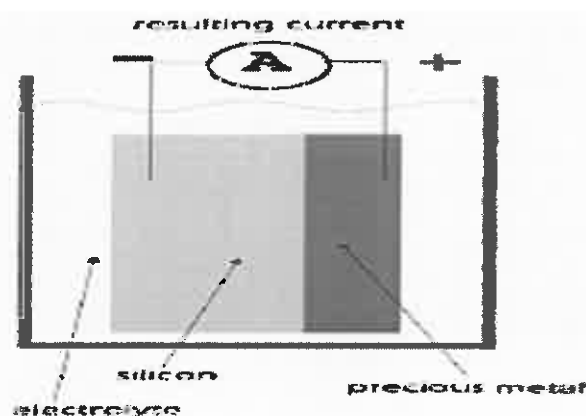
روش خوردگی شیمیایی براساس اکسید شدن سیلیکون در  $\text{HNO}_3$  و برداشته شدن اکسید با HF است. شکل ۱-۵- الف محفظه مورد استفاده در این روش را نشان می دهد. در این روش نیازی به عبور جریان الکتریسته نیست و به همین دلیل سرعت خوردگی در این روش پایین است. سادگی و

عدم نیاز به تجهیزات پیچیده آزمایشگاهی از مزایای این روش است، ولی کیفیت لایه‌های متخلخل تولید شده پایین می باشد [۱۰، ۶].

تولید جریان داخلی توسط عناصر گالوانیک روش نسبتاً جدیدی است که برای ساخت سیلیکون متخلخل مورد استفاده قرار می گیرد. منظور از عنصر گالوانیک، اتصال سیلیکون با فلزهایی چون طلا و پلاتین است که در الکترولیت  $\text{HF}/\text{H}_2\text{O}_2/\text{ethanol}$  قرار داده شده اند. در این روش نیز مشابه روش خوردگی الکتروشیمیایی از سیلیکون بعنوان آند و از فلز بعنوان کاتد استفاده می شود. اختلاف پتانسیل داخلی بین آند و کاتد سبب القای جریانی درون سیلیکون می شود. شکل ۱-۵-ب محفظه مورد استفاده در این روش را نشان می دهد. از مزایای این روش می توان به سادگی و همچنین تولید لایه‌های متخلخل ضخیم اشاره کرد [۱۰].



(الف)



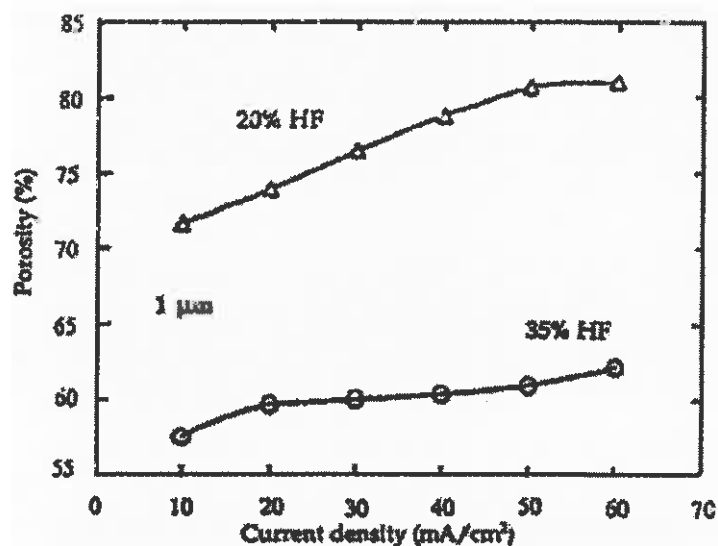
(ب)

شکل ۱-۵- طرح شماتیک محفظه مورد استفاده در روش (الف) خوردگی شیمیایی و (ب) تولید جریان داخلی توسط عناصر گالوانیک [۱۰، ۱۱].

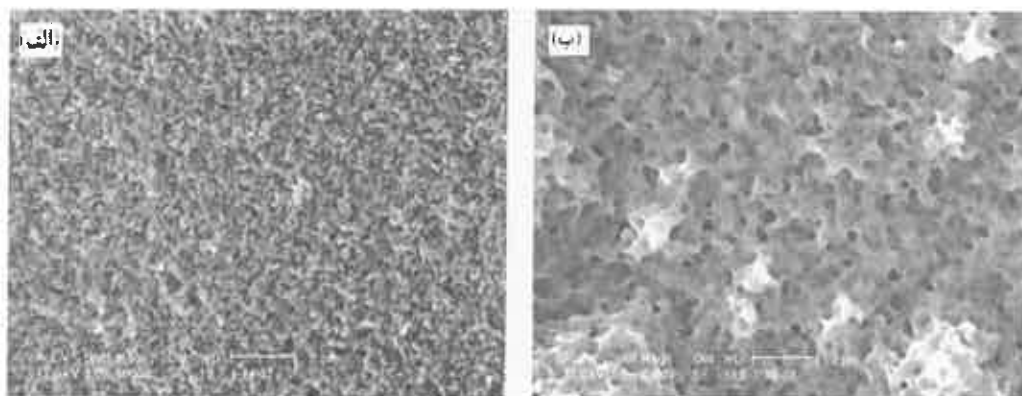
در ادامه به بررسی پارامترهای مؤثر در هر یک از روش‌های فوق پرداخته ایم.

### ۱-۲-۱- پارامترهای مؤثر در کیفیت رشد سیلیکون متخلخل در روش‌های مختلف

تجربه نشان داده است که تغییر چگالی جریان و زمان آنودایز در روش خوردگی الکتروشیمیایی روی درصد تخلخل اثر می‌گذارند. مشخص شده است که در یک غلظت HF ثابت، افزایش چگالی جریان آنودایز سبب افزایش درصد تخلخل می‌شود، (شکل ۶-۱). بطور مشابه افزایش زمان آنودایز نیز ضخامت لایه متخلخل را بیشتر می‌کند؛ زیرا سطح زیرلایه زمان بیشتری در معرض اسید خورنده قرار می‌گیرد [۶]، شکل (۷-۱).



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



شکل ۷-۱- ابعاد حفره‌ها در سطح سیلیکون متخلخل در اثر خوردگی در مدت زمان: (الف) ۱۰ ثانیه، (ب) ۱۲۰ ثانیه [۱۲].

نوع آلودگی زیرلایه و همچنین غلظت HF از جمله پارامترهایی هستند که در تمام روش‌های ساخت در کیفیت رشد سیلیکون متخلخل مؤثرند. افزایش میزان آلودگی زیرلایه، باعث کاهش درصد تخلخل در زیرلایه نوع p و افزایش آن در زیرلایه نوع n می‌شود. افزایش غلظت اسید خورنده HF درصد تخلخل را کاهش می‌دهد [۶].

آزمایش‌های 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 می‌باشند. 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 [۱۰].

### ۳-۱- برخی ویژگی‌های الکتریکی سیلیکون متخلخل

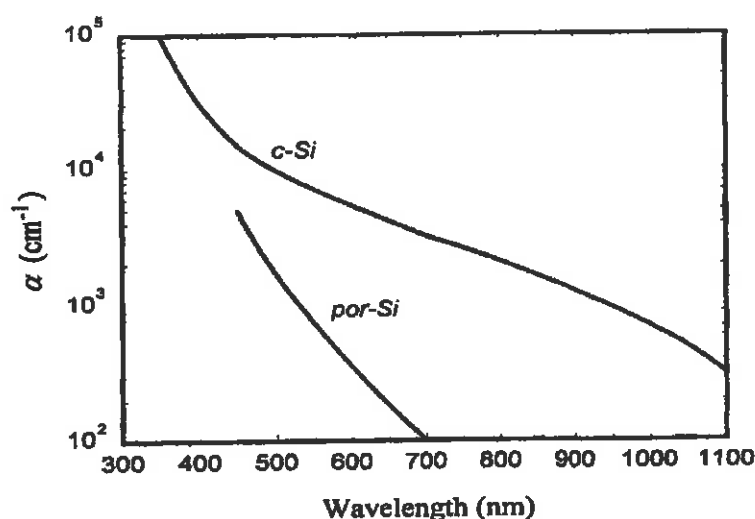
ویژگی‌های الکتریکی سیلیکون متخلخل از قبیل رسانندگی و گاف نواری به شدت تحت تأثیر ساختار نامنظم و درصد تخلخل آن می‌باشند. همین مساله باعث شده است که نتوان یک مقدار مشخص به گاف نواری آن نسبت داد [۶]. استفاده از طیف فوتولومینسانس، یکی از روش‌های تعیین گاف نواری می‌باشد. برای گاف نواری سیلیکون متخلخل مقادیر مختلفی در گستره  $1.3-2.2$  eV گزارش شده است [۶].

پهن شدن گاف نواری به دلیل اثر حبس کوانتومی<sup>۱</sup> موجب می‌شود که تراکم حامل‌ها در یک دمای معین کاهش یابد، از طرفی به دلیل ساختار نامنظم سیلیکون متخلخل و وجود حالت‌های پذیرنده سطحی، احتمال به دام افتادن حامل‌ها نیز وجود دارد. مجموع این عوامل باعث کم شدن تعداد حامل‌های آزاد در ناحیه پوسته متخلخل می‌شود [۶، ۱۳].

تحرك الکترونی در سیلیکون متخلخل از مرتبه  $10^{-4}$  تا  $10^{-5} \text{ cm}^2/\text{V.s}$  می باشد که در مقایسه با مقدار آن در سیلیکون غیرمتخلخل (که در Si نوع n و p به ترتیب  $1500 \text{ cm}^2/\text{V.s}$  و  $500$  است) [۱۴] تقریباً  $10^7$  تا  $10^8$  برابر کوچکتر است [۱۵].

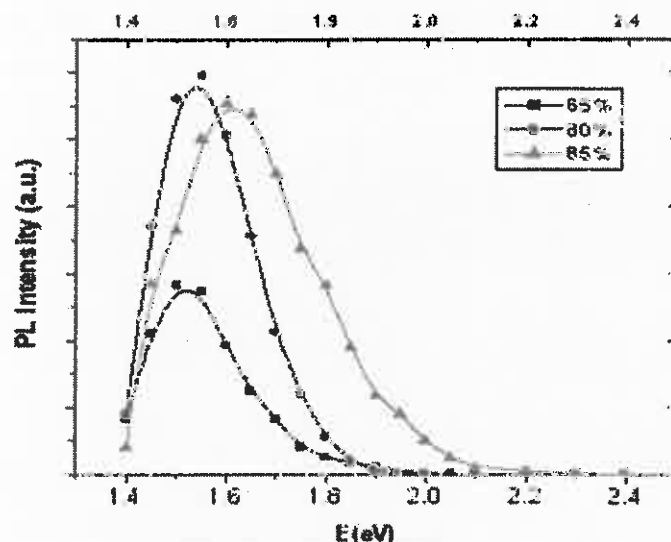
## ۱-۵- ویژگی های اپتیکی سیلیکون متخلخل

ضریب جذب سیلیکون متخلخل در طول موج  $700 \text{ nm}$  حدود  $25$  برابر و در طول موج  $450 \text{ nm}$  در حدود  $3$  برابر کوچکتر از سیلیکون غیرمتخلخل است (شکل ۱-۸) [۱۶] و همین ویژگی آن را کاندیدای خوبی برای استفاده در سلول های خورشیدی سیلیکونی (فصل ۲) می سازد. علاوه بر این وجود کاواک های تشکیل شده در سیلیکون متخلخل می تواند سبب افزایش سطح مؤثر به دام اندازی فوتون های فرودی و در نتیجه کاهش بازتاب سطحی شود. این ویژگی سیلیکون متخلخل سبب استفاده از آن به عنوان پوشش ضد بازتاب در قطعات اپتوالکترونیکی که فرآیند غالب در آنها فرآیند جذب می باشد، شده است [۱۷].



شکل ۱-۸- ضریب جذب سیلیکون متخلخل و غیرمتخلخل [۱۷].

علاوه بر این مشخص گردیده است که در اثر تابش نور فرابنفش به سیلیکون متخلخل، طیف گسلی از آن در گستره طول موج های مرئی 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 ۱-۹).



شکل ۱-۹- پیک فوتولومینسانس سیلیکون متخلخل با افزایش درصد تخلخل به سمت انرژی‌های بالاتر جابجا می‌شود [۱۸].

## ۱-۶- سیلیکون متخلخل و کاربردهای آن

امروزه قابلیت‌های استفاده از سیلیکون متخلخل در عرصه‌های گوناگون آشکار شده است. از جمله کاربردهای این ماده در عرصه ایتوالکترونیک می‌توان به استفاده در سلول‌های خورشیدی [۱۹، ۲۰، ۲۱]، دیودهای نورگسیل [۲۲]، آشکارسازهای مادون قرمز [۲۳، ۲۴] و موجبرها [۳] اشاره کرد که بهره‌گیری از سیلیکون متخلخل به ترتیب سبب کاهش بازتاب سطحی و افزایش بازده قطعه، 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 می‌شود. در زمینه کاربرد سیلیکون متخلخل در سلول‌های خورشیدی در فصل چهارم به تفصیل بیشتری خواهیم پرداخت.

چسبندگی سطحی بالا [۱۱، ۶] و نسبت سطح به حجم بالای سیلیکون متخلخل موجب کاربرد وسیع آن در ساخت حسگرهای گازی شده است [۱۱]. حسگرهایی که با سیلیکون متخلخل ساخته می‌شوند، در مقایسه با سایر حسگرها از زمان پاسخ کوتاه‌تری برخوردار بوده و در گستره دمایی وسیع‌تری قابل استفاده می‌باشند [۱۱، ۶].

علاوه بر موارد ذکر شده در بالا، وجود میدان های الکتریکی قوی در نوک ستون های سیلیکونی [۲۵] در اتصالات سد شاتکی سیلیساید و سیلیکون متخلخل، این قطعه را در مقایسه با دیگر قطعات مشابه، به منظور به کارگیری در آشکارسازهای فروسرخ ممتاز نموده است [۲۶].

۲۶- مریم محمدی، ۱۳۸۴، بررسی خواص الکتریکی سیلیکون متخلخل و تأثیر آن بر عملکرد قطعات نیمرسانا، پایان نامه کارشناسی ارشد فیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

# گفتار دوم

آشنایی با نحوه عملکرد و کاربرد سلول‌های

خورشیدی با ساختار p-n

## مقدمه

در دهه‌های اخیر رشد فزاینده میزان آلودگی هوا، بالا رفتن دمای کره زمین، محدودیت ذخائر سوخت‌های فسیلی و مشکلات ناشی از مصرف این سوخت‌ها، باعث ایجاد اثرات نامطلوبی بر محیط زیست انسان شده است و زندگی بشر را در معرض خطرات متعددی قرار داده است.

به منظور کاهش این خطرات لزوم استفاده از منابع انرژی پاک و تجدید پذیر و جایگزینی آنها به عنوان منابع تولید انرژی مورد نیاز بشر مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است.

آینده به انرژی خورشیدی که مهمترین منبع انرژی عاری از آلودگی است، تعلق دارد. این منبع سالانه معادل ۹۰۰ هزار میلیارد مگاوات ساعت، انرژی به سوی زمین می فرستد که این مقدار ده هزار بار بیشتر از انرژی مورد نیاز بشر در سراسر کره زمین است [۱].

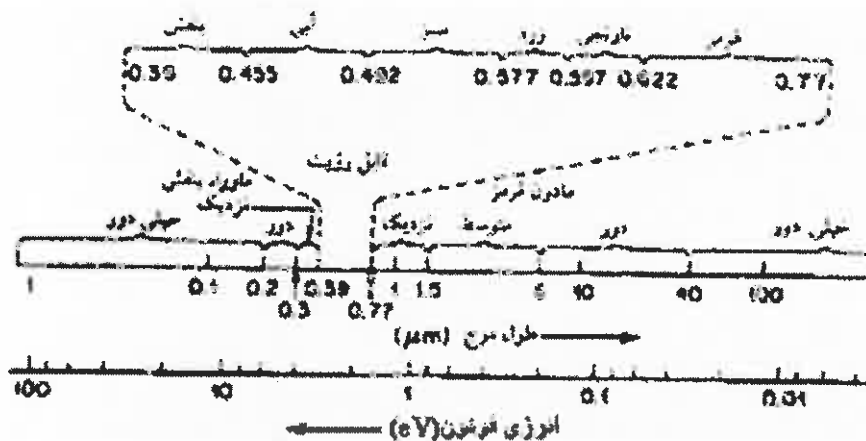
یکی از روش‌های استفاده از انرژی خورشیدی، روش فوتوولتایی می باشد که به وسیله آن می‌توان انرژی نورانی خورشید را مستقیماً به انرژی الکتریکی تبدیل کرد. این کار توسط سلول‌های خورشیدی انجام می شود. سلول‌های خورشیدی هم برای کاربردهای فضایی و هم زمینی مفید هستند. این قطعات منبع تغذیه طولانی مدت را برای ماهواره‌ها تأمین می کنند و داوطلب مهمی برای جانشینی چشمه‌های انرژی زمینی هستند، زیرا می توانند با بازده تبدیل خوب و بهای عملیاتی کم، توان تقریباً دائمی را فراهم کنند [۲].

در این گفتار به آشنایی با نحوه عملکرد و کاربرد سلول‌های خورشیدی با ساختار p-n خواهیم پرداخت.

## ۲-۱- تشعشع خورشیدی

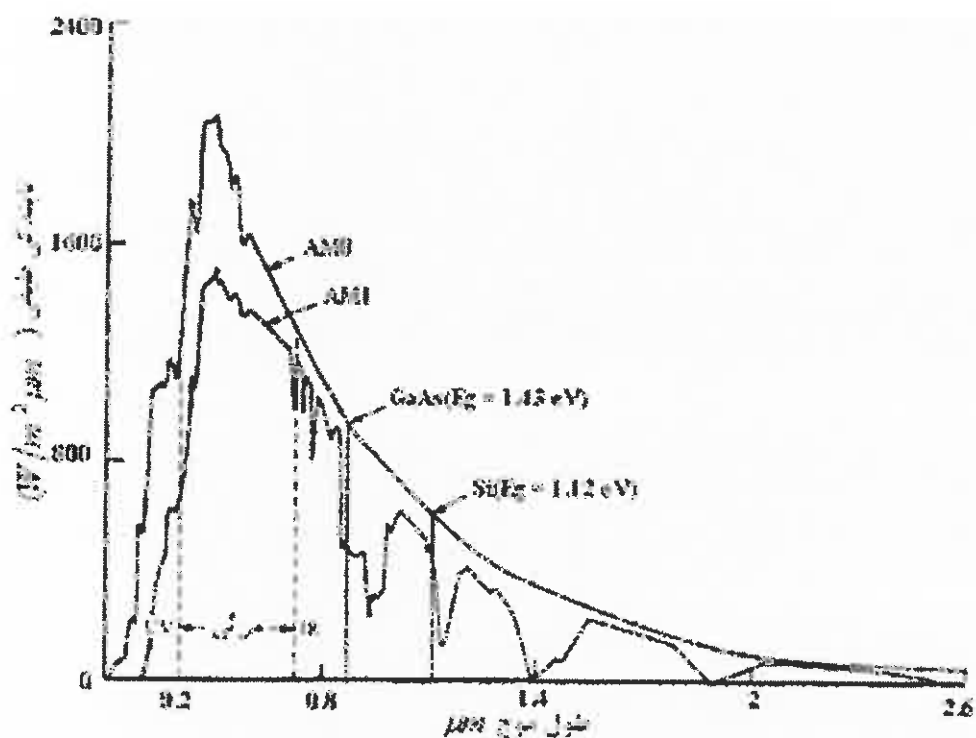
انرژی تابشی خروجی از خورشید از واکنش‌های هسته‌ای در سطح خورشید حاصل می‌شود که طی این فرآیندها در هر ثانیه با کاهش جرم  $4 \times 10^3 \text{ kg}$ ، حدود  $6 \times 10^{11} \text{ kg}$  هیدروژن به هلیوم تبدیل می‌شود، که طبق رابطهٔ اینشتین ( $E = mc^2$ ) معادل  $4 \times 10^{26} \text{ J}$  انرژی تولید می‌شود. این انرژی عموماً به صورت تابش امواج الکترومغناطیسی، در گسترهٔ فرابنفش تا فروسرخ ( $0.2$  تا  $3$  میکرومتر) ظاهر می‌شود (شکل ۱-۲).

با توجه به جرم کنونی خورشید که حدوداً  $2 \times 10^{30} \text{ kg}$  است، طول عمری که برای خورشید با توجه به این میزان انرژی تابشی تصور می‌شود، بیش از  $10$  بیلیون ( $10^{10}$ ) سال می‌باشد [۳].



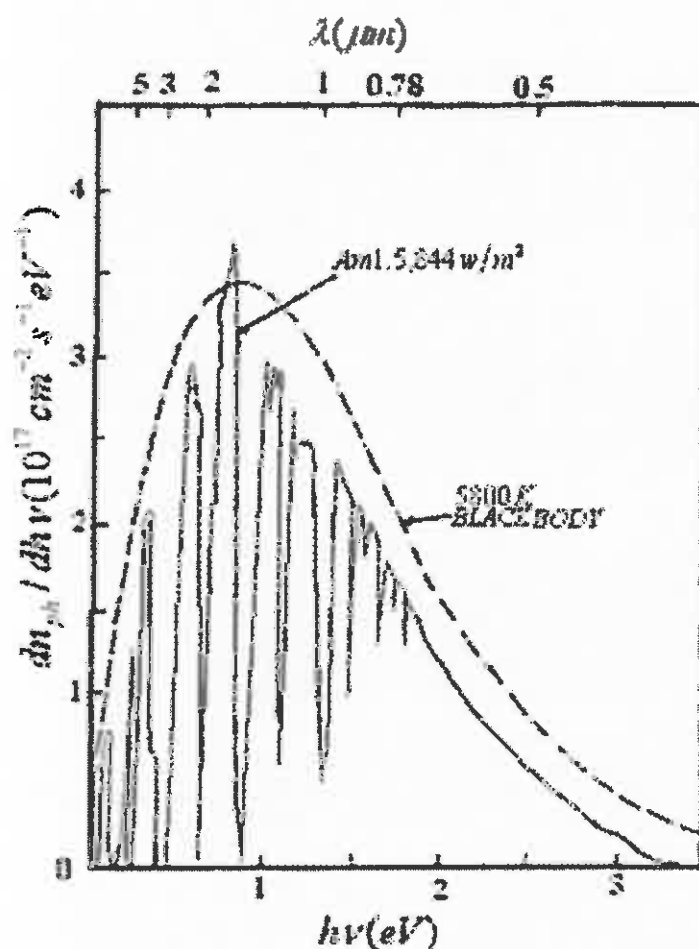
شکل ۱-۲- نمودار طیف امواج الکترومغناطیسی از ناحیه فرابنفش تا ناحیه فروسرخ [۳].

شدت تابش خورشیدی در فضای آزاد در فاصله متوسط زمین از خورشید به صورت ثابت خورشیدی تعریف می‌شود که مقدار آن  $1353 \text{ W/m}^2$  می‌باشد و درجه تأثیر جو بر این امواج نورانی که توسط سطح زمین دریافت می‌شود، توسط جرم هوا معین می‌شود. شکل ۲-۲ دو منحنی مربوط به تابندگی خورشید (توان در واحد سطح در واحد طول موج) را نشان می‌دهد [۴].



شکل ۲-۲- منحنی‌های مربوط به تابندگی خورشید در شرایط AM0 و AM1 [۴].

در این شکل منحنی بالایی، طیف خورشید را در خارج از جو زمین نشان می‌دهد، جایی که توان تابشی  $1353 \text{ W/m}^2$  است، و به اختصار به صورت AM0 (جرم هوای صفر) نمایش داده می‌شود. این طیف برای کاربردهای ماهواره‌ای و فضایی استفاده می‌شود. منحنی پایینی، مربوط به طیف جرم هوای یک (AM1)، معادل با توان تابشی حدود  $925 \text{ W/m}^2$  است که در این وضعیت، موقعیت خورشید در بالای سر و قطعه آزمایشی در سطح زمین یا دریا، زیر آسمان صاف قرار دارد. تفاوتی که میان AM0 و AM1 مشاهده می‌شود عمدتاً مربوط به جذب پرتوهای فرابنفش در لایه ازن، جذب پرتوهای فروسرخ در بخار آب و وجود گرد و غبار و ذرات موجود در هوا می‌باشد. در شکل ۲-۳ منحنی مربوط به درخشندگی طیف خورشیدی در شرایط AM1.5، معادل با توان تابشی حدود  $844 \text{ W/m}^2$  نشان داده شده است. در این شرایط نور خورشید با سطح افق زاویه  $45^\circ$  درجه می‌سازد. در این شکل همچنین منحنی مربوط به درخشندگی طیف خورشید در دمای  $5800^\circ \text{K}$  (جسم سیاه) نیز مشاهده می‌شود [۳].



شکل ۲-۳- منحنی مربوط به درخشندگی طیف خورشیدی در شرایط AM1.5، همراه با منحنی طیف جسم سیاه در دمای ۵۸۰۰ K [۳].

از آنجا که در یک نیمرسانا شرط جذب یک فوتون آن است که انرژی آن بایستی از انرژی گاف نواری ماده نیمرسانا ( $E_g$ ) بیشتر باشد، لذا از مقدار کل انرژی یاد شده فوتون‌هایی قابل استفاده‌اند که در محدوده انرژی  $E_g$  و بالاتر (سطح زیر منحنی بازتابندگی در شکل‌های ۲-۲ و ۳-۲) باشند. همانطور که در شکل ۲-۲ مشاهده می‌شود با توجه به کوچکتر بودن گاف نواری Si (۱/۱ eV) در مقایسه با گاف نواری GaAs (۱/۴ eV)، آستانه انرژی فوتون‌های قابل جذب در Si نسبت به GaAs پایین‌تر بوده و بنابراین تعداد فوتون‌های بیشتری می‌توانند توسط این نیمرسانا جذب شوند. با توجه به مطالب فوق، می‌توان دریافت که Si ماده مناسب‌تری نسبت به GaAs در جذب فوتون‌های نور مرئی خورشید می‌باشد، اما از طرف دیگر تفاضل انرژی اضافی فوتون‌های جذب شده و

گاف نواری ماده  $(E_{ph} - E_g)$  در Si بیشتر از GaAs است. این تفاضل انرژی معمولاً به شکل گرما تلف می‌شود.

## ۲-۲- گذارهای تابشی

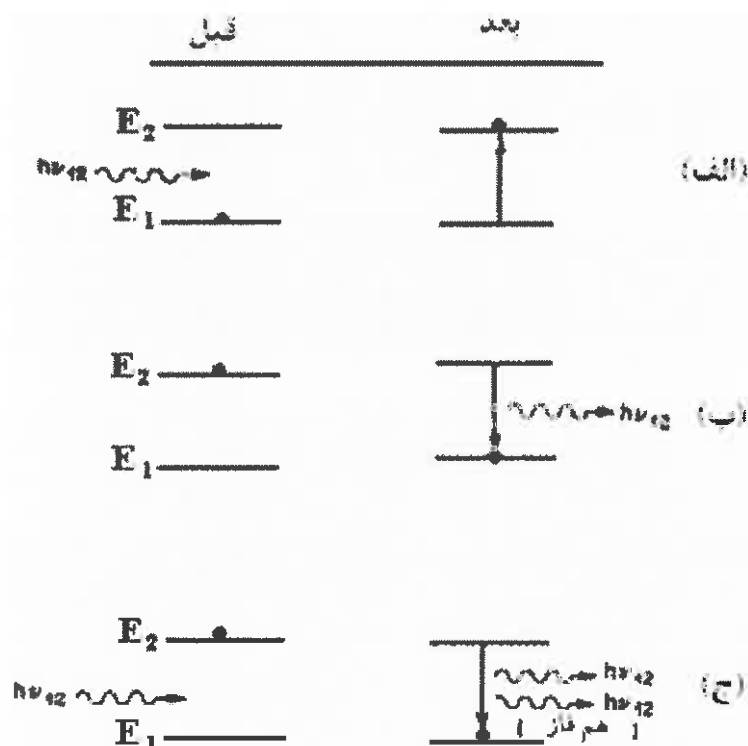
در برهمکنش بین فوتون‌ها و الکترون‌های یک ماده سه فرآیند اساسی: جذب، گسیل خود به خودی و گسیل القایی می‌تواند رخ دهد [۱۵].

دو تراز انرژی یک اتم را در نظر بگیرید، که  $E_1$  متناظر با حالت پایه و  $E_2$  مربوط به حالت برانگیخته باشد (شکل ۲-۴). هر گذاری بین این دو حالت با گسیل یا جذب یک فوتون با بسامد  $\nu_{12}$  همراه خواهد بود که انرژی آن از رابطه  $h\nu_{12} = E_2 - E_1$  به دست می‌آید. در دمای اتاق، بیشتر اتم‌های یک جامد در حالت پایه قرار دارند. وقتی فوتونی با انرژی  $h\nu_{12}$  بر ماده فرود آید، اتمی که در حالت  $E_1$  است فوتون تابیده را جذب می‌کند و به حالت برانگیخته  $E_2$  می‌رود. این تغییر در تراز انرژی، که در شکل ۲-۴ الف نشان داده شده، فرآیند جذب نامیده می‌شود.

حال وضعیتی را در نظر بگیرید که اتم در حالت برانگیخته باشد؛ از آنجا که این حالت ناپایدار است و بعد از زمانی کوتاه اتم به طور خود به خودی به حالت پایه گذار می‌کند و فوتونی را با انرژی  $h\nu_{12}$  تابش می‌کند، این فرایند گسیل خود به خودی نامیده می‌شود (شکل ۲-۴ ب).

سومین وضعیت حالتی است که وقتی فوتونی با انرژی  $h\nu_{12}$  به اتم برخورد می‌کند، اتم مورد نظر در حالت برانگیخته باشد (شکل ۲-۴ ج). در این شرایط اتم می‌تواند تحریک شده، به حالت پایه گذار کرده و فوتونی با انرژی  $h\nu_{12}$  را تابش کند. این فرآیند که در آن فوتون تولید شده هم فاز با فوتون فرودی اولیه است به گسیل القایی (برانگیخته) موسوم می‌باشد. از آنجا که این فوتون‌ها دقیقاً دارای انرژی یکسان  $h\nu_{12}$  می‌باشند در نتیجه پرتو حاصل از این گسیل القایی، تکرنگ بوده و چون تمام فوتون‌های گسیل شده هم‌فاز نیز هستند، این پرتو همدوس نیز خواهد بود.

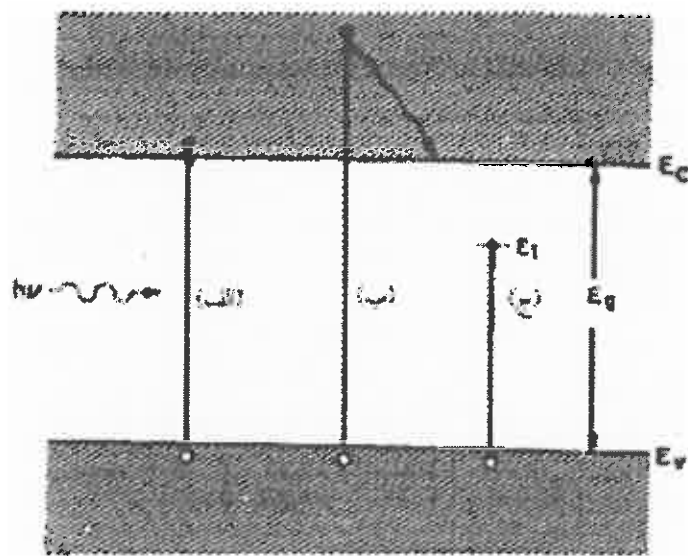
فرایند غالب در دیودهای گسیلنده نور گسیل خود به خودی، و در لیزرها گسیل القایی است. در سلول‌های خورشیدی (قطعه مورد توجه ما در این رساله) و آشکارسازهای نوری، فرآیند غالب جذب می‌باشد [۳].



شکل ۲-۴- سه گذار اساسی بین دو تراز انرژی: (الف) جذب، (ب) گسیل خود به خودی و (ج) گسیل برانگیخته [۳].

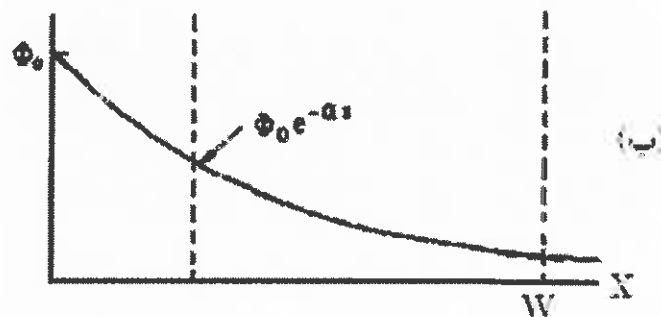
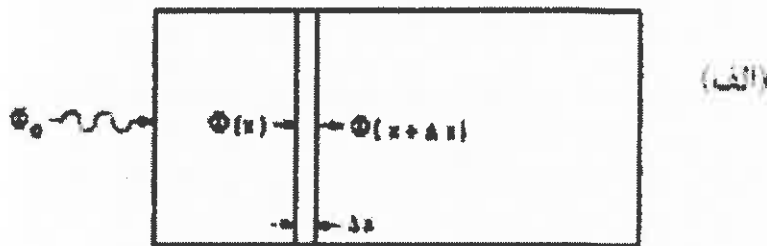
## ۲-۳- جذب نوری در نیمرسانا

شکل ۲-۵ گذارهای اساسی در نیمرسانا را نشان می دهد. هنگامی که نیمرسانا تحت تابش امواج نوری قرار می گیرد، فوتون ها در نیمرسانا جذب می شوند تا زوج الکترون - حفره هایی نظیر آنچه در شکل ۲-۵ الف نشان داده شده است تولید کنند. به طور معمول وقوع این فرآیند مشروط بر آن است که انرژی فوتون فرودی ( $E_{ph}$ ) با انرژی گاف نواری ( $E_g$ ) برابر باشد. اگر  $E_{ph}$  بزرگتر از  $E_g$  باشد، علاوه بر تولید یک زوج الکترون - حفره، انرژی اضافی ( $E_{ph} - E_g$ ) نظیر آنچه در شکل ۲-۵ ب نشان داده شده است به صورت گرما تلف می شود. هر دو فرآیند (الف) و (ب) گذارهای ذاتی (یا گذار نوار - به نوار) نامیده می شوند. از طرف دیگر، هرگاه  $E_{ph}$  کوچکتر از  $E_g$  باشد، تنها در صورتی امکان جذب فوتون فرودی وجود دارد که تراز و وابسته به ناخالصی های شیمیایی یا نوارستی های بلوری، نظیر آنچه در شکل ۲-۵ ج نشان داده شده است، در محدوده گاف نواری وجود داشته باشد. این فرآیند یک گذار غیر ذاتی را نشان می دهد [۶].



شکل ۲-۵- جذب نوری برای (الف)  $h\nu = E_g$ ، (ب)  $h\nu > E_g$  و (ج)  $h\nu < E_g$  [۶].

هرگاه نیمرسانایی توسط منبع نوری با انرژی  $E_{ph}$  (بزرگتر از  $E_g$ ) و شار  $\phi_0$  (تعداد فوتون‌ها بر واحد سطح در هر ثانیه) تحت تابش قرارگیرد، ضمن عبور نور از داخل نیمرسانا، کسری از فوتون‌ها که با شار آنها متناسب است توسط نیمرسانا جذب می‌شود. بنابراین، تعداد فوتون‌های جذب شده در حد فاصله  $\Delta x$  (شکل ۲-۶-الف) برابر  $\alpha\phi(x)\Delta x$  خواهد بود، که در آن  $\alpha$  به ضریب جذب موسوم است.



شکل ۲-۶- جذب نوری (الف) نیمرسانای تحت تابش (ب) کاهش نمایی شار فوتون [۶].

از پیوستگی شار فوتون نظیر آنچه در شکل ۲-۶-الف نشان داده شده است، داریم [۶]:

$$\phi(x + \Delta x) - \phi(x) = \frac{d\phi(x)}{dx} \Delta x = -\alpha\phi(x)\Delta x \quad (۱-۲)$$

یا:

$$\frac{d\phi(x)}{dx} = -\alpha\phi(x) \quad (۲-۲)$$

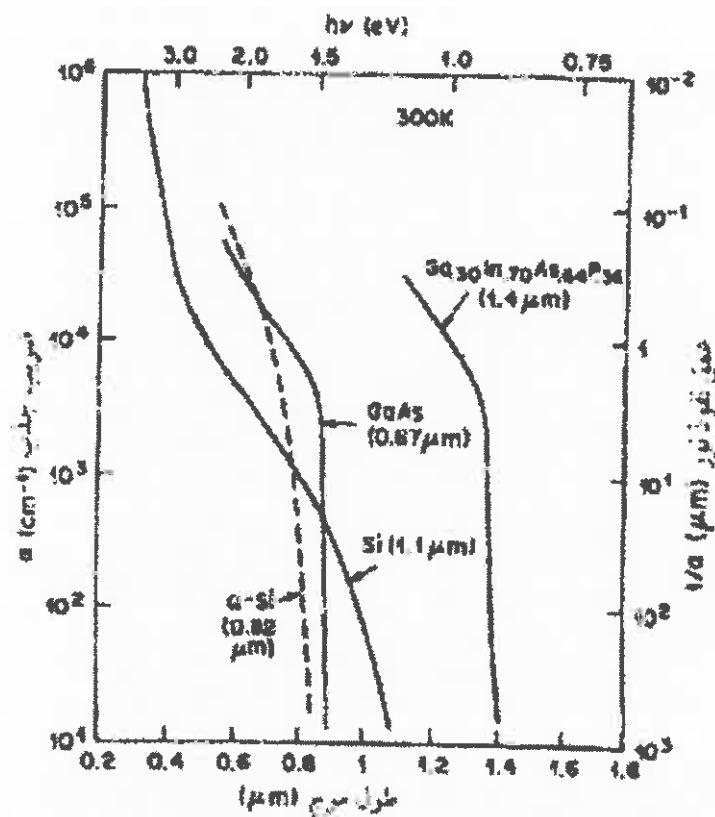
علامت منفی بر کاهش شدت شار فوتون به خاطر جذب دلالت می کند. جواب معادله ۲ با استفاده از شرایط مرزی  $\phi(x) = \phi_0$  در  $x = 0$  عبارت است از :

$$\phi(x) = \phi_0 e^{-\alpha x} \quad (۳-۲)$$

کسری از شار فوتون که از انتهای دیگر نیمرسانا در  $x = W$  (شکل ۲-۶-ب) خارج می شود، عبارت است از :

$$\phi(W) = \phi_0 e^{-\alpha W} \quad (۴-۲)$$

ضریب جذب  $\alpha$  تابعی از  $E_{ph}$  است. شکل ۲-۷ ضریب جذب اندازه گیری شده را برای برخی از نیمرساناهای مهم که برای ساخت قطعات فوتونی به کار برده می شوند، نشان می دهد. در این شکل ضریب جذب سیلیکون، که ماده مهمی در ساخت سلول های خورشیدی می باشد، نیز نشان داده شده است.



شکل ۲-۷- ضرایب جذب نوری برای مواد نیمرسانای گوناگون [۳].

ضریب جذب در طول موج قطع ( $\lambda_c$ ) که از رابطه زیر به دست می آید به سرعت کاهش می یابد [۶]:

$$\lambda_c = \frac{1.24}{E_g} (\mu m) \quad (2-5)$$

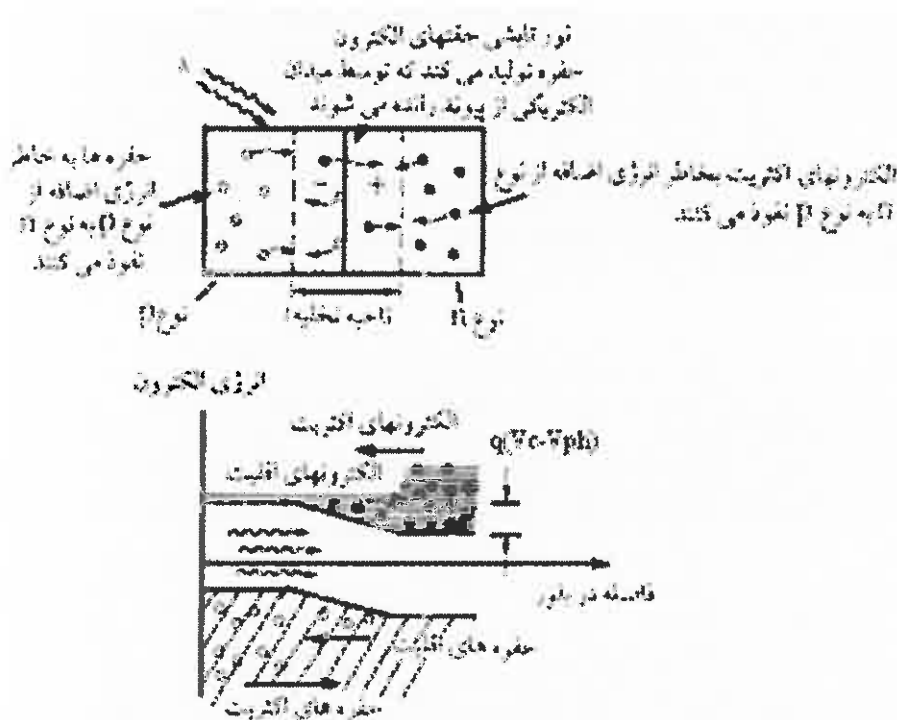
علت این امر آن است که برای فوتون های با انرژی  $E_{ph} < E_g$  یا طول موج  $\lambda > \lambda_c$  جذب نوری نوار به نوار قابل چشم پوشی است.

## ۲-۴- اثر فوتوولتایی

در بخش های قبلی اشاره کردیم که انرژی نوری در صورتی می تواند در نیمرسانا جذب شود که انرژی فوتون های آن از انرژی گاف نواری نیمرسانا بزرگتر باشد. فوتون های جذب شده، زوج های الکترون - حفره تولید کرده و باعث ایجاد اختلاف پتانسیلی در دو سر پیوندگاه p-n می شوند. سازوکار

تبدیل انرژی نورانی به انرژی الکتریکی را اثر فوتوولتایی می‌نامند [۲]. فوتو دیودها و سلول‌های خورشیدی مفیدترین قطعات از این نوع هستند.

عملگری یک سلول خورشیدی در حالت مدار باز به این صورت است که، جفت‌های الکترون - حفره تولید شده در محل پیوندگاه به دلیل حضور میدان الکتریکی درونی از هم جدا شده و در دو سوی مخالف هم رانده می‌شوند. از آنجایی که الکترون‌ها به طرف ناحیه  $n$  و حفره‌ها به طرف ناحیه  $p$  رانده می‌شوند، اثر این عمل آن است که سد پتانسیل نسبت به مقدار حالت تعادل خود کاهش می‌یابد (شکل ۲-۸)، و حامل‌های اکثریت بیشتری می‌توانند از پیوندگاه عبور کنند [۲].

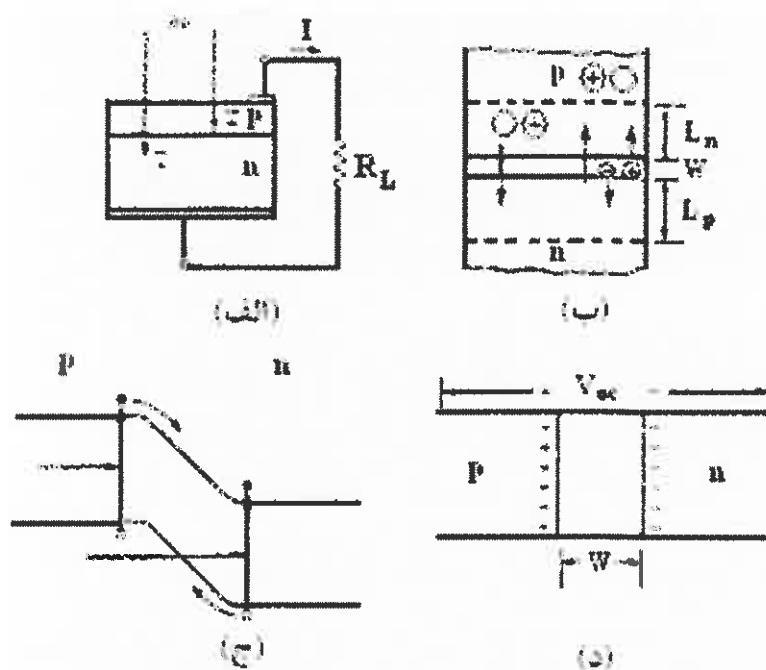


شکل ۲-۸- یک دیود نوری با پیوندگاه  $p-n$  تحت تابش در حالت فوتوولتایی [۲].

به طور کلی، فرایند تبدیل انرژی نورانی به انرژی الکتریکی در یک پیوندگاه  $p-n$  شامل مراحل اساسی زیر است:

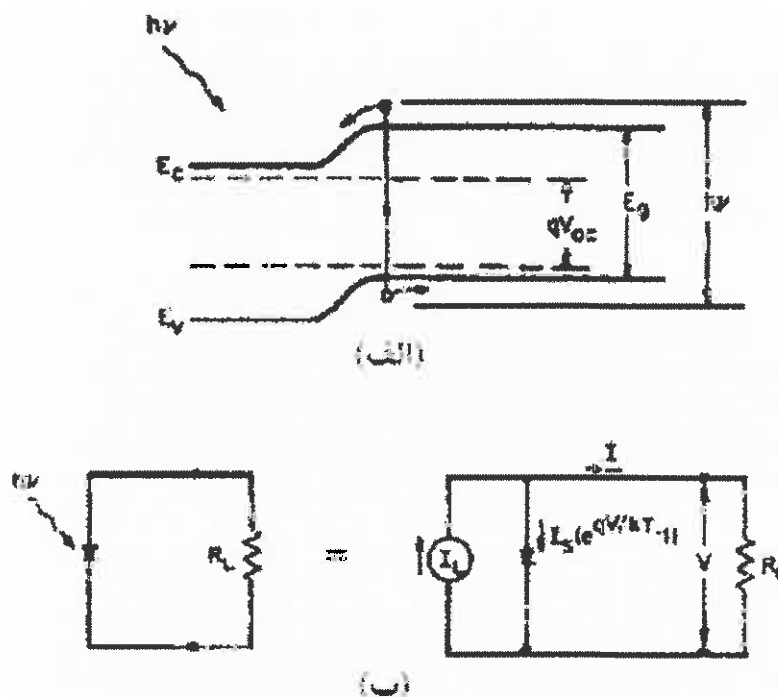
- (۱) فوتون‌ها جذب می‌شوند، به طوری که زوج‌های الکترون - حفره در هر دو طرف پیوندگاه  $p-n$  تولید می‌شوند (شکل ۲-۹-الف). (۲) الکترون‌ها و حفره‌هایی که در فاصله یک طول پخش از پیوندگاه تولید شده‌اند، بر اثر پدیده پخش به تهی لایه می‌رسند (شکل ۲-۹-ب). (۳) سپس

زوج‌های الکترون - حفره توسط میدان الکتریکی قوی از هم جدا می‌شوند، بنابراین الکترون‌های طرف p از سد پتانسیل به پایین می‌لغزند تا به طرف n بروند و حفره‌ها نیز در جهت مقابل حرکت می‌کنند (شکل ۹-۲-ج). (۴) اگر دیود p-n مدار باز باشد، انبارش الکترون‌ها و حفره‌ها در دو طرف پیوندگاه، یک ولتاژ مدار باز ایجاد می‌کند (شکل ۹-۲-د). اگر یک مقاومت بار به دیود وصل شود جریان در مدار برقرار خواهد شد (شکل ۹-۲-الف) و بیشینهٔ جریان، وقتی بدست می‌آید که مقاومت بار برابر با صفر یا حالت اتصال کوتاه در دو سر دیود برقرار شود. جریان ایجاد شده در این حالت را جریان مدار اتصال کوتاه می‌نامند [۷].



شکل ۹-۲- فرآیند تبدیل انرژی نورانی به انرژی الکتریکی (الف) سلول خورشیدی با مقاومت بار، (ب) پخش الکترون‌ها و حفره‌ها که جریان تولید می‌کند، (ج) نمودار نوار انرژی (ب)، و (د) برقراری ولتاژ مدار باز (نمایش طرح واره) [۷].

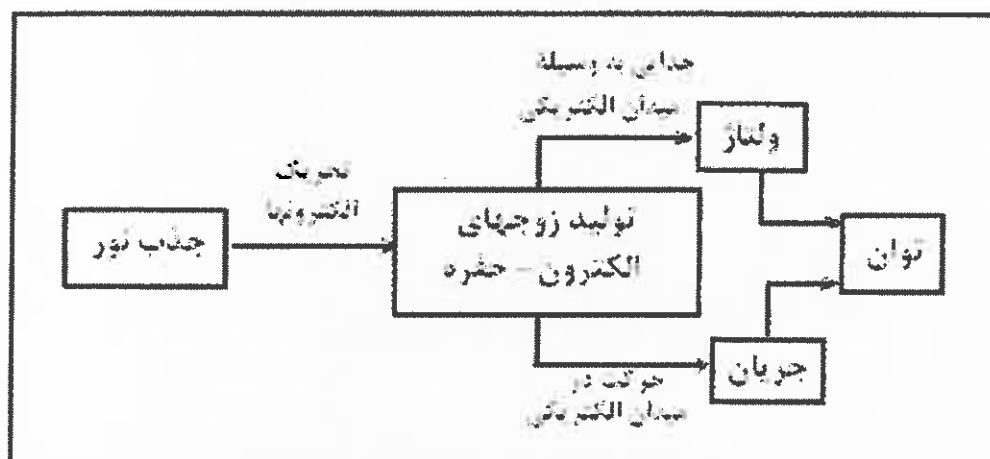
در شرایطی که  $R_L \neq 0$  باشد، وضعیت نوارهای انرژی به همراه مدار معادل یک سلول خورشیدی را می‌توان متناظر با شکل ۱۰-۲ نشان داد. منبع جریان  $I_L$  ناشی از حرکت حامل‌های اقلیت اضافی می‌باشد که توسط تابش خورشیدی بوجود آمده‌اند،  $I_s$  جریان اشباع معکوس دیود و  $R_L$  مقاومت بار است [۳].



شکل ۲-۱۰- (الف) نمودار نوار انرژی سلول خورشیدی با پیوندگاه p-n تحت تابش نور خورشید. (ب) مدار معادل ایده‌آل شده سلول خورشیدی [۳].

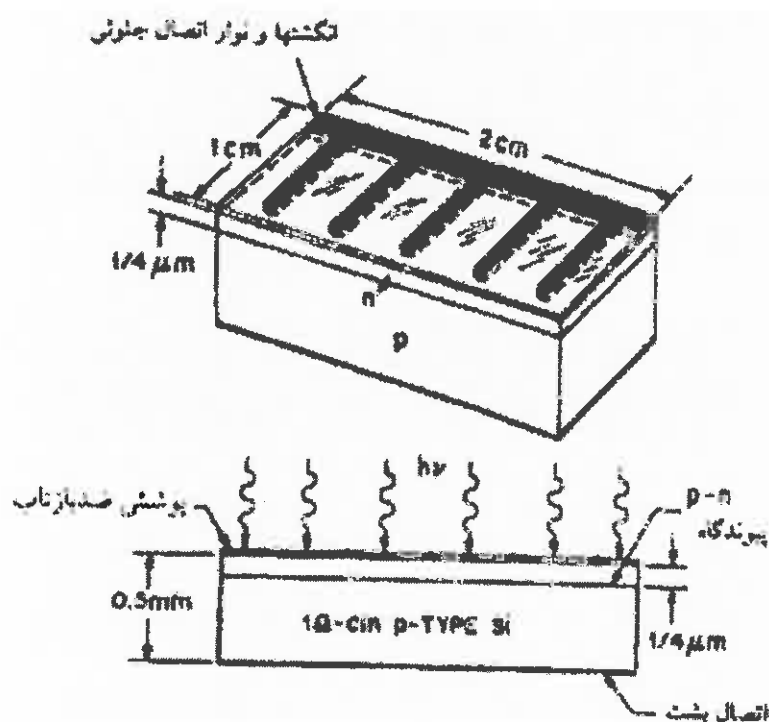
## ۲-۵- نحوه عملکرد سلول‌های خورشیدی با ساختار p-n

اساس کار برخی سلول‌های خورشیدی مبتنی بر یک پیوندگاه p-n است. هنگامی که این پیوندگاه تحت تابش نوری با انرژی بزرگتر از گاف نواری نیمرسانا قرار گیرد، فوتون‌ها می‌توانند در نیمرسانا جذب شوند [۷]. هرگاه بخش عمده جذب در تهی لایه و یا به فاصله طول پخش حامل‌های اقلیتی صورت گیرد، زوج الکترون - حفره‌های تولید شده تحت تأثیر میدان داخلی از یکدیگر جدا شده و این جدایی بارهای الکتریکی باعث ایجاد ولتاژ می‌شود، از سوی دیگر حرکت بارهای الکتریکی به طور همزمان سبب تولید جریان و در نتیجه توان خواهد شد و همانطور که پیشاپیش اشاره شد این اثر را اثر فوتوولتایی می‌نامند. شکل ۲-۱۱ تصویر ساده‌ای از این مراحل را نشان می‌دهد [۲].



شکل ۲-۱۱- تصویر نشان دهنده اثر فوتوولتایی.

در شکل ۲-۱۲ نمایش طرح وار یک سلول خورشیدی سیلیکونی با پیوندگاه p-n نشان داده شده است. این سلول شامل قسمت‌های: (الف) یک پیوندگاه p-n کم عمق که روی سطح تشکیل می‌شود، (ب) انگشت‌ها و نوار اتصال اهمی جلویی، (ج) اتصال اهمی عقبی که معمولاً تمام سطح پشت سلول را می‌پوشاند، و (د) پوشش ضد بازتاب روی سطح جلویی، می‌باشد [۳].



شکل ۲-۱۲- نمایش طرح گونه سلول خورشیدی سیلیکونی با پیوندگاه p-n [۳].

## ۲-۶- کاربردهایی از سلول‌های خورشیدی

سلول‌های خورشیدی می‌توانند نقش گسترده‌ای در زمینه‌های مختلف داشته باشند. در این بخش به چند مورد از این کاربردها اشاره می‌کنیم.

### ۲-۶-۱- کاربرد سلول‌های خورشیدی در تأمین برق منازل روستایی

در کشور آفریقای جنوبی، از سلول‌های خورشیدی جهت تأمین برق ۵۰۰۰۰ خانه روستایی استفاده شده است. این در حالی است که تنها منبع روشنایی آنها در شب، شمع و پارافین بوده، لکن استفاده از سلول‌های خورشیدی امکان استفاده از روشنایی مناسب، سیستم‌های صوتی تصویری، خنک کننده، گرم کننده و... را برای آنها به ارمغان آورده است.

در این طرح برای هر مصرف کننده یک هزینه نصب و راه‌اندازی اولیه و یک هزینه دائمی و ماهانه که در حد استفاده از سوخت‌های دیگر می‌باشد (سوخت‌های فسیلی) در نظر گرفته می‌شود. هزینه نصب و راه‌اندازی این سیستم ۳۰ دلار و هزینه آبونمان ۸ دلار آمریکا در نظر گرفته شده است [۸]. در شکل ۲-۱۳ تصویری از کاربرد سلول‌های خورشیدی در این منازل روستایی نشان داده شده است.



شکل ۲-۱۳- کاربرد سلول‌های خورشیدی در منازل روستایی.

### ۲-۶-۲- کاربرد سلول‌های خورشیدی در صنعت خودرو سازی

در سال‌های اخیر، طرح استفاده از سلول‌های خورشیدی از سوی کارخانجات بزرگ خودرو سازی همچون بنز، تویوتا، جنرال موتورز و بی.ام.مورد استقبال قرار گرفته است. با استفاده از طرح فوق

سیستم سیم کشی داخلی و روشنایی خودرو به طور عمده دست خوش تغییر و تحول خواهد شد، این مصرف به طور کلی شامل موارد زیر است:

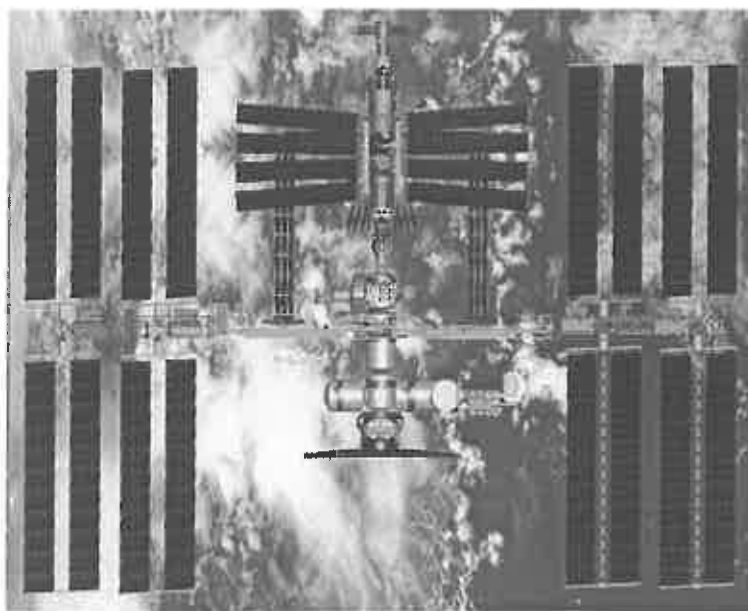
- ۱- تولید یک منبع نوری در داخل خودرو و انتقال آن به مکان‌های مورد نیاز
  - ۲- حذف سیم کشی چراغ‌ها اعم از: (الف) چراغ‌های داخل کابین خودرو (ب) روشنایی‌های خارجی (چراغ‌های راهنما، نور پائین و بالا .....)
  - ۳- سهولت در تعمیر ایرادات بوجود آمده در روشنایی‌ها و چراغ‌های خودرو
- باتوجه به دلایل فوق، این بخش از صنایع (صنعت خودروسازی) بودجه قابل توجهی را جهت تسریع در امر تحقیق، بررسی و اقتصادی نمودن تولید سلول‌های خورشیدی اختصاص داده است [۸].
- شکل ۲-۱۴ یک نمونه آزمایشی از اتومبیلی مجهز به سلول‌های خورشیدی را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۱۴- کاربرد سلول‌های خورشیدی در صنعت خودروسازی.

## ۲-۶-۳- کاربرد سلول‌های خورشیدی در تحقیقات فضایی

سلول‌های خورشیدی علاوه بر کاربردهای زمینی در کاربردهای فضایی نیز مفید هستند. این سلول‌ها می‌توانند به عنوان منبع تغذیه الکتریکی برای ماهواره‌ها و سفینه‌های فضایی مورد استفاده قرار گیرند. شکل ۲-۱۵ کاربرد فضایی سلول‌های خورشیدی را در یک سفینه فضایی تحقیقاتی نشان می‌دهد.



شکل ۲-۱۵- کاربرد سلول‌های خورشیدی در سفینه‌های فضایی.

## ۲-۷- مزایا و معایب سلول‌های خورشیدی

مزایا و معایبی که معمولاً می‌توان برای سلول‌های خورشیدی بر شمرده عبارت‌اند از [۸]:

### ۲-۷-۱- مزایای سلول‌های خورشیدی

۱. وزن نسبتاً کم
۲. قابلیت اطمینان بالا
۳. قابلیت حمل و نقل آسان
۴. نصب و برچیدن سریع
۵. خدمات نگهداری بسیار کم
۶. عدم آلوده‌سازی محیط زیست
۷. عمر طولانی (بالغ بر ۲۰ سال)
۸. تبدیل انرژی به صورت مستقیم بدون هیچ چرخش مکانیکی (بدون صدا و استهلاک مکانیکی)

### ۲-۷-۲- معایب سلول‌های خورشیدی

۱. قیمت بالای تمام شده برای سرمایه‌گذاری اولیه

۲. محدودیت در تهیه قطعات با توان بیشتر

۳. راندمان تقریباً کم

۴. وابستگی به نور خورشید برای تولید انرژی الکتریکی

۵. در مصارف خاص، نیاز به ذخیره کننده انرژی (عموماً باتری) برای کار در ساعات خاموشی

## ۲-۸- تاریخچه سلول‌های خورشیدی و استفاده از آن در ایران

اولین سلول خورشیدی با بازده ۶ درصدی، در سال ۱۹۵۴ توسط آقای D. M. Shopin در شرکت بل ساخته شد و در سال ۱۹۵۵ تولید تجاری سلولی با بازدهی ۳ تا ۴ درصد در شرکت الکترونیکی هافمن آغاز شد. هزینه تولید برق با این روش در سال ۱۹۷۴ از ۵۰ دلار بر کیلو وات ساعت به ۱۵ دلار بر کیلو وات ساعت کاهش یافت.

بیشترین آمار استفاده از سلول‌های خورشیدی را کشور آمریکا به خود اختصاص داده است به گونه ای که طبق آمار کل مساحت پانل‌های به کار رفته حدود ۰/۳ درصد از کل مساحت این کشور می‌باشد [۸].

در سال‌های اخیر استفاده از انرژی خورشیدی با در نظر گرفتن خصوصیات منحصر به فرد آن به عنوان یک منبع بی‌پایان انرژی و عاری از مخاطرات زیست محیطی، توجه بسیاری از محققان را به خود معطوف داشته است. در کشور ما میزان تابش متوسط آفتاب به  $2000 \text{ Wh/m}^2$  می‌رسد [۸].

نکته قابل توجهی که در اینجا می‌توان به آن اشاره کرد این است که مساحت کشور ایران تقریباً  $10^{12} \times 1/65$  متر مربع بوده و مقدار متوسط انرژی خورشیدی که روزانه به سطح کشور می‌رسد چیزی معادل ۴/۸ میلیارد بشکه نفت خام می‌باشد، که این مقدار انرژی تقریباً ۸۵۰ برابر انرژی حاصل از نفت خام کشور است که روزانه صادر شده و یا به مصارف داخلی می‌رسد. وسعت و شرایط جغرافیایی کشور، بافت اجتماعی، فراوانی و گسترده‌ی روستاها و نیز مشکلات مربوط به تکنولوژی تولید و توزیع انرژی الکتریکی به روش‌های متداول، مبین آن است که استفاده از انرژی خورشیدی بر اساس اصول علمی و فنی می‌تواند منبعی مطمئن برای تأمین انرژی کشورمان، خصوصاً در نقاط دور افتاده باشد [۸].

## مراجع

- 1- H. J. Moller, 1993: *Semiconductors for Solar Cells*, Artech House.
- 2- D. M. Chapin, C. S. Fuller, G. L. Pearson, 1954, *J. Appl. Phys.* 25, 676.
- 3- S. M. Sze, 1985: *Semiconductor Devices, Physics and Technology*, Wiley.
- 4- M. p. Thekaekara, 1974, *Suppl. Proc. 20<sup>th</sup> Ann. Meet. Inst. Environ. Sci.*, p. 21.
- 5- H. C. Casey, M. B. Panish, 1978: *Heterostructure Lasers*, Academic New York.
- 6- H. Melchior, 1972, F. T. Arecchi and E. O. Schulz – Dubois, Eds. *Laser Handbook*, 1, 725 – 835.
- 7- E. Yang, 1978: *Fundamental of Semiconductor Devices*, McGraw-Hill.
- ۸- نشریات داخلی سازمان انرژی های نو ایران (سانا) معاونت انرژی، وزارت نیرو، شماره های ۱۳، ۱۴، ۱۵، ۱۷ و ۱۹،

سال ۱۳۷۸.

## مقدمه

به منظور بهینه‌سازی عملکرد سلول‌های خورشیدی لازم است فرآیندهایی که در این قطعات رخ می‌دهد و روابط حاکم بر این فرآیندها را با دقت بیشتری بشناسیم. اساس تولید انرژی الکتریکی در سلول‌های خورشیدی، پدیده فوتوولتائیک است که در طی آن با تابش نور بر یک پیوندگاه p-n جریان الکتریکی تولید می‌شود.

دلیل استفاده از پیوندگاه p-n آن است که برای تبدیل نور به انرژی الکتریکی، لازم است الکترون‌ها و حفره‌های تولید شده توسط نور، از یکدیگر جدا شده و هر گروه از حامل‌ها خود را به یکی از پایانه‌های خروجی برساند. برای تحقق این امر به یک میدان الکتریکی داخلی احتیاج است که در یک پیوندگاه p-n به طور ذاتی ایجاد می‌شود.

در این فصل سعی بر آن است که به بررسی پارامترهای اساسی در ساختار سلول‌های خورشیدی پرداخته و عوامل مؤثر در افت بازدهی آنها را بشناسیم و روش‌هایی که برای بهبود کارایی آنها امکان پذیر است بیان کنیم.

### ۳-۱- پارامترهای اساسی در ساختار سلول‌های خورشیدی

رفتار یک سلول خورشیدی در یک مدار الکتریکی توسط معادله مشخصه جریان-ولتاژ آن قطعه مشخص می‌شود. با این حال در بسیاری از کاربردهای عملی لازم نیست با معادله مشخصه پیچیده سلول خورشیدی درگیر شویم و با تعریف چند پارامتر اساسی شامل جریان مدار اتصال کوتاه، ولتاژ مدار باز، ضریب پرکنندگی و بازدهی که از همین معادله مشخصه استخراج می‌شوند می‌توان در بسیاری از حالات رفتار سلول خورشیدی را به سادگی تعیین کرد.

#### ۳-۱-۱- مشخصه جریان - ولتاژ سلول‌های خورشیدی

همانطور که در فصل قبل اشاره شد، در یک سلول خورشیدی پس از جذب فوتون‌های امواج نور فرودی با انرژی بزرگتر یا برابر با گاف نواری نیمرسانای بکار رفته در این سلول، در طرفین پیوندگاه p-n زوج‌های الکترون - حفره تولید خواهند شد. در ماده نوع p الکترون‌های تولید شده حامل‌های اقلیتی بوده و تحت تأثیر میدان داخلی در تهی لایه، در جهت عمود بر سطح اتصال p-n به سوی ناحیه n حرکت می‌نمایند. بحث مشابهی نیز برای حفره‌های ایجاد شده در ماده نوع n صادق است. بدین ترتیب جریان این بارهای اقلیتی ( $I_L$ ) که در خلاف جهت جریان مستقیم ( $I_d$ ) در پیوندگاه p-n است، برقرار می‌گردد [۱]:

$$I = I_L - I_d \quad (۱-۳)$$

که در آن

$$I_d = I_s \left( \exp\left(\frac{V}{V_T}\right) - 1 \right) \quad (۲-۳)$$

بوده و  $V_T = \frac{K_B T}{q}$  می‌باشد ( $q$  بار الکتریکی الکترون،  $K_B$  ثابت بولتزمن و  $T$  دمای مطلق پیوندگاه

است). در رابطه فوق  $I_s$  جریان اشباع معکوس دیود است.

با فرض یکنواخت بودن آهنگ جذب در سرتاسر قطعه می‌توان رابطه زیر را برای  $I_L$  نوشت

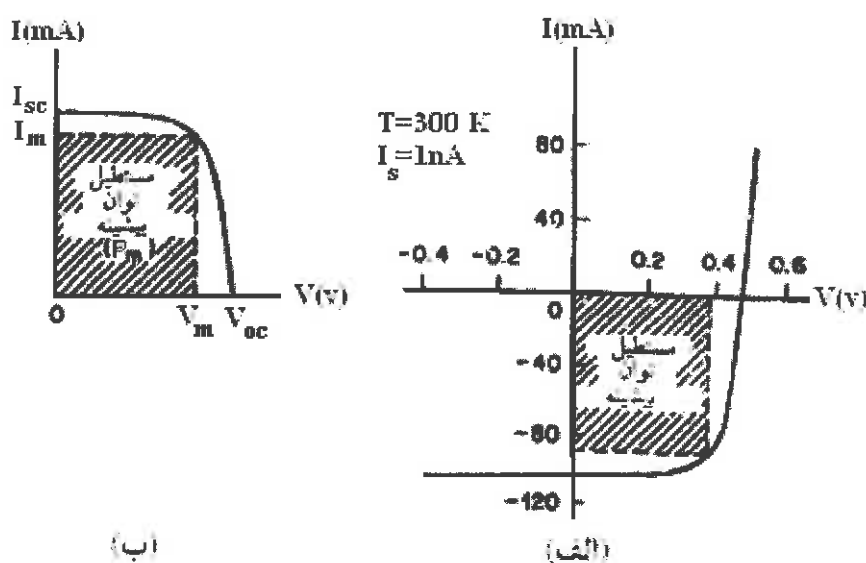
[۲]:

$$I_L = q G_L (L_n + L_p) A \quad (۳-۳)$$

که در آن  $G_L$  آهنگ تولید چگالی زوج‌های الکترون - حفره،  $L_p$  و  $L_n$  فاصله طول پخش حامل‌های اقلیتی تا تهی لایه (بخش ۲-۴) و  $A$  سطح مقطع ناحیه فعال سلول خورشیدی می‌باشد. بنابراین رابطه (۱-۳) را می‌توان به شکل زیر نوشت [۱]:

$$I = I_L - I_s \left( \exp\left(\frac{V}{V_T}\right) - 1 \right) \quad (4-3)$$

معادله (۴-۳) نشانگر مشخصه جریان - ولتاژ یک سلول خورشیدی ایده‌آل است. شکل ۱-۳ نمودار وابسته به این معادله را برای یک سلول خورشیدی با  $I_s = 1 \text{ nA}$ ،  $I_L = 100 \text{ mA}$ ،  $A = 4 \text{ cm}^2$  در دمای اتاق نشان می‌دهد [۱].



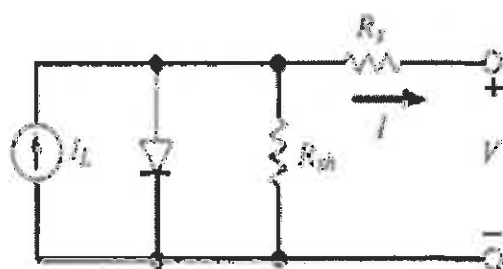
شکل ۱-۳- (الف) مشخصه جریان - ولتاژ یک سلول خورشیدی تحت تابش. تصویر (ب) وارونه بخش مربوط به ربع چهارم در شکل (الف) حول محور ولتاژ [۱].

نکته دیگری که در به دست آوردن معادله مشخصه سلول خورشیدی باید به آن توجه داشت حضور مقاومت‌های مزاحم متوالی ( $R_s$ ) و موازی ( $R_{sh}$ ) است. مقاومت مربوط به ماده نیم‌رسانای به کار رفته در ساخت سلول خورشیدی، همچنین مقاومت‌های وابسته به اتصال‌ها و مسیرهای ارتباطی، منشاء تولید مقاومت متوالی بوده و وجود نقائص بلوری در تهی لایه و مرزهای بلورک‌های احتمالی در نیم‌رسانا، می‌توانند منشاء تولید مقاومت موازی باشند.

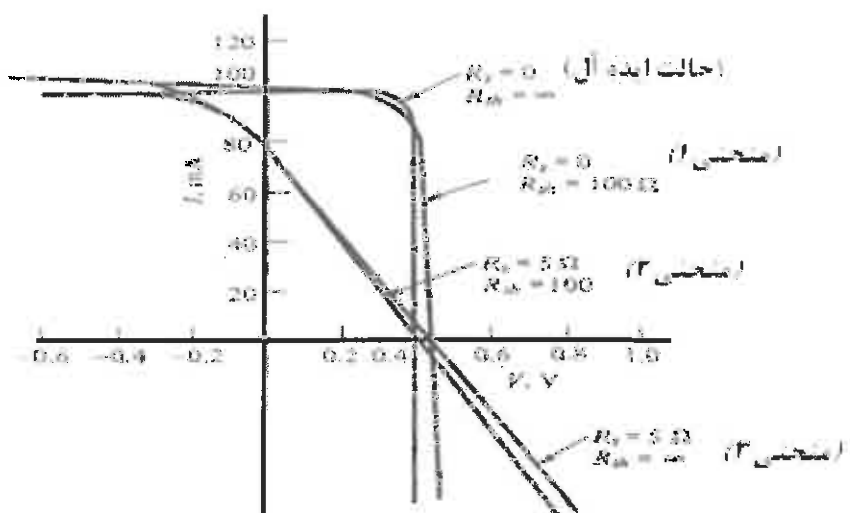
با در نظر گرفتن مقاومت‌های متوالی و موازی، رابطه کلی زیر را می‌توان برای معادله مشخصه جریان - ولتاژ یک سلول خورشیدی در نظر گرفت [۳]:

$$I = I_L - I_s \left[ \exp\left(\frac{q(V + R_s I)}{nK_B T}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (5-3)$$

در شکل ۳-۲ الف مدار معادل یک سلول خورشیدی واقعی به همراه مقاومت‌های متوالی و موازی نشان داده شده است. آثار ناشی از این دو عامل مقاومتی بر منحنی مشخصه جریان - ولتاژ سلول خورشیدی، در شکل ۳-۲ ب مشاهده می‌شود [۲].



(الف)



(ب)

شکل ۳-۲ الف) مدار معادل یک سلول خورشیدی واقعی به همراه مقاومت‌های متوالی و موازی. (ب) آثار ناشی از این دو عامل مقاومتی بر منحنی مشخصه جریان - ولتاژ سلول خورشیدی [۲].

در شکل ۳-۲ ب نمودارهای وابسته به  $R_s = 0$  و  $R_{sh} = \infty$  وضعیت حالت ایده‌آل را نشان می‌دهند. از مقایسه منحنی ۱ با منحنی حالت ایده‌آل می‌توان دریافت که با ثابت نگه داشتن

بزرگی مقاومت متوالی، افزایش مقاومت موازی از ۱۰۰ اهم تا بی‌نهایت تأثیر بسزایی بر منحنی مشخصه جریان - ولتاژ سلول خورشیدی نمی‌گذارد. از سوی دیگر مقایسه منحنی‌های ۳ و حالت ایده‌آل نشانگر آن است که با ثابت ماندن بزرگی مقاومت موازی، افزایش مقاومت متوالی به میزان ۵ اهم سبب کاهش جریان مدار اتصال کوتاه (بخش ۳-۱-۲) و نیز کاهش ضریب پرکنندگی (بخش ۳-۱-۴) می‌شود (در بخش ۳-۱-۵ خواهیم دید که این دو پارامتر به طور مستقیم بر بازدهی سلول خورشیدی تأثیر می‌گذارند). لازم به توجه است که در شکل مذکور کمترین سطح زیر منحنی جریان - ولتاژ مربوط به منحنی ۲ می‌باشد (به سبب وجود هر دو مقاومت متوالی و موازی).

بنابر آنچه بیان شد، می‌توان دریافت که وجود مقاومت موازی تأثیر ناچیزی بر مشخصه عملکردی سلول‌های خورشیدی داشته و در اغلب موارد قابل چشم‌پوشی است [۲]، لیکن حضور مقاومت‌های متوالی می‌توانند نقش مهمی بر مشخصه الکتریکی سلول و کاهش بازدهی آن داشته باشند. بنابر این رابطه (۳-۵) را می‌توان به صورت ساده زیر نوشت [۱]:

$$I = I_L - I_s \left[ \exp\left(\frac{q(V - R_s I)}{nK_B T}\right) - 1 \right] \quad (3-6)$$

### ۳-۱-۲- جریان مدار اتصال کوتاه ( $I_{sc}$ )

همانطور که در شکل ۳-۱ دیده می‌شود منحنی مشخصه سلول خورشیدی، محور عمودی جریان را قطع می‌کند. محل تلاقی منحنی با محور جریان، جریان مدار اتصال کوتاه نام دارد که آن را با  $I_{sc}$  نشان می‌دهند که به ازای  $V = 0$  از معادله (۳-۶) به دست می‌آید. به عبارت دیگر جریان مدار اتصال کوتاه بیشترین جریان نوری است که از سلول خورشیدی به عنوان منبع انرژی الکتریکی می‌توان دریافت کرد. با توجه به رابطه (۳-۶) می‌توان دریافت کرد که اگر  $R_s = 0$  باشد در آن صورت  $I = I_L$  بوده و اگر  $R_s \neq 0$  باشد، در آن صورت  $I$  کوچکتر از  $I_L$  خواهد بود [۴].

یکی از عوامل مؤثر بر بزرگی جریان مدار اتصال کوتاه در یک سلول خورشیدی، شدت تابش نور فرودی بر قطعه می‌باشد. واضح است که با افزایش شدت تابش نور فرودی، آهنگ تولید چگالی زوج‌های الکترون - حفره ( $G_L$ ) افزایش یافته و از سوی دیگر با توجه به معادله ۳-۳، جریان نوری

سلول نیز افزایش خواهد یافت. بنابراین انتظار می‌رود که تغییرات بزرگی جریان مدار اتصال کوتاه با شدت تابش نور فرودی در یک سلول خورشیدی رابطه‌ای خطی مطابق شکل ۳-۳ داشته باشد.

### ۳-۱-۳- ولتاژ مدار باز ( $V_{oc}$ )

ولتاژ مدار باز نیز یکی دیگر از پارامترهای مهم در یک سلول خورشیدی است که از محل تلاقی منحنی جریان - ولتاژ با محور افقی ولتاژ (شکل ۳-۱) به دست می‌آید. البته در حالت کلی حل معادله (۳-۶) به ازای  $I = 0$  و به دست آوردن یک جواب جبری صریح برای  $V_{oc}$  ممکن نیست و نیاز به روش‌های عددی دارد، لیکن با فرض  $R_s = 0$ ، مقدار آن به صورت زیر به دست می‌آید [۱]:

$$V_{oc} \cong V_T \ln\left(\frac{I_L}{I_s} + 1\right) \quad (۷-۳)$$

هرگاه شدت تابش نور به اندازه کافی بزرگ باشد به طوری که  $I_L \gg I_s$ ، رابطه (۷-۳) را می‌توان به صورت زیر نوشت [۱]:

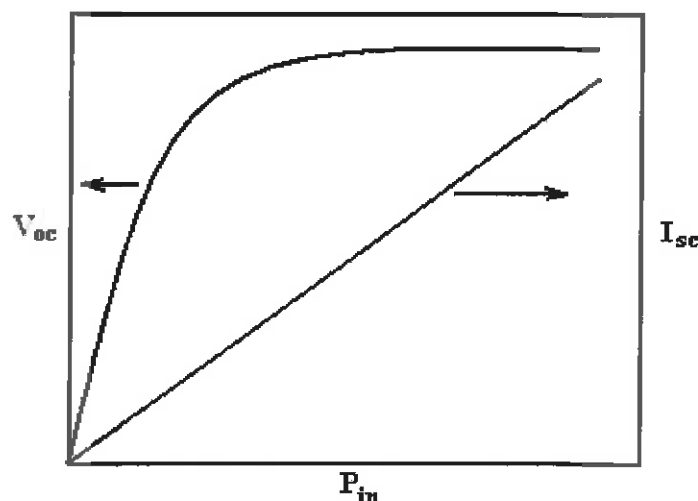
$$V_{oc} \cong V_T \ln \frac{I_L}{I_s} \quad (۸-۳)$$

حال اگر در معادله (۸-۳) مقدار  $I_L$  را از رابطه (۳-۳) و مقدار  $I_s$  را از رابطه‌ای مشابه رابطه (۳-۳) یعنی رابطه:  $I_s \cong qAG_T(L_n + L_p)$  که در آن  $G_T$  آهنگ تولید گرمایی حامل‌ها است،  $G_T = \frac{p_{n0}}{\tau_p} = \frac{n_{p0}}{\tau_n}$  که در آن  $\tau_n$  و  $\tau_p$  طول عمر باز ترکیب حامل‌ها و  $p_{n0}$  و  $n_{p0}$  چگالی حامل‌ها در تعادل گرمایی می‌باشند) جایگزین کنیم به رابطه زیر که بیان ریاضی اثر فوتولتایی است، خواهیم رسید [۵]:

$$V_{oc} \cong V_T \ln \frac{G_L}{G_T} \quad (۹-۳)$$

از رابطه (۹-۳) چنین انتظار می‌رود که  $V_{oc}$  با افزایش  $G_L$  همچنان زیاد شود. اگرچه این موضوع در حد شدت‌های تابشی کم صادق است لکن در شدت‌های تابشی زیاد، با افزایش  $G_L$  تعداد حامل‌های اضافی افزایش یافته و در نتیجه طول عمر باز ترکیب‌ها ( $\tau_n$  و یا  $\tau_p$ ) کاهش می‌یابد. از طرفی چون چگالی حامل‌های اقلیتی در شرایط تعادل گرمایی (یعنی  $p_{n0}$  و  $n_{p0}$ ) در یک نیم‌رسانا و در یک دمای معین ثابت است، آهنگ تولید گرمایی حامل‌ها یعنی  $G_T$  نیز افزایش می‌یابد و

نسبت  $\frac{G_L}{G_T}$  در نهایت ثابت می ماند و در نتیجه  $V_{oc}$  به یک مقدار اشباع نزدیک می شود. در عمل حد اکثر مقدار ممکن برای  $V_{oc}$  برابر ولتاژ سد داخلی پیوند دیودی است. در شکل ۳-۳ تغییرات  $V_{oc}$  بر حسب توان تابش فرودی ( $P_{in}$ )، نشان داده شده است [۵].



شکل ۳-۳- تغییرات  $V_{oc}$  و  $I_{sc}$  در سلول خورشیدی بر حسب توان تابشی [۵].

### ۳-۱-۴- ضریب پرکنندگی<sup>۱</sup> (F.F.)

ضریب پرکنندگی به نحوی بیانگر بیشترین میزان توان الکتریکی قابل حصول از یک سلول خورشیدی است. همانطور که در شکل ۳-۱ مشاهده می شود، به ازای یک تفاوت بار بخصوص می توان نقطه کاری را یافت که مساحت سایه خورده مربوط به آن بیشترین مقدار را دارا باشد. هرگاه مختصات وابسته به این نقطه  $I_m$  و  $V_m$  باشند در چنین حالتی بیشترین توان قابل حصول از قطعه بیشینه مقدار، یعنی  $P_{max} = V_m I_m$  خواهد بود. با توجه به ویژگی این نقطه، کمیتی به نام ضریب پرکنندگی را به صورت زیر تعریف می کنند [۱]:

$$F.F. = \frac{I_m V_m}{I_{sc} V_{oc}} \quad (۳-۱۰)$$

با توجه به این تعریف اگرچه حداکثر مقدار ممکن برای F.F. برابر واحد است لکن عملاً این ضریب در سلول های خورشیدی با بازده بالا مقداری بین ۰/۷ تا ۰/۹ می باشد [۴].

<sup>۱</sup> Fill Factor

### ۳-۱-۵- بازده ( $\eta$ )

با اطلاع از سه پارامتر جریان مدار اتصال کوتاه، ولتاژ مدار باز و ضریب پرکنندگی در یک سلول خورشیدی، به راحتی می‌توان بازده آن قطعه را محاسبه نمود. معمولاً هنگامی که صحبت از بازده سلول خورشیدی می‌شود منظور همان بیشترین مقدار بازده قابل دستیابی در نقطه کارسلول خورشیدی است که به صورت زیر تعریف می‌شود [۱]:

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{in}} = \frac{F.F.V_{oc}I_{sc}}{P_{in}} \quad (۱۱-۳)$$

کمیت  $P_{in}$  که همان توان تابش فرودی بر قطعه است، با رابطه زیر بیان می‌شود:

$$P_{in} = \sum_{\lambda} n_0(\lambda) E_{ph}(\lambda) \quad (۱۲-۳)$$

که در آن  $n_0(\lambda)$  و  $E_{ph}(\lambda)$  به ترتیب شار فوتون‌های فرودی و انرژی آنها می‌باشند.

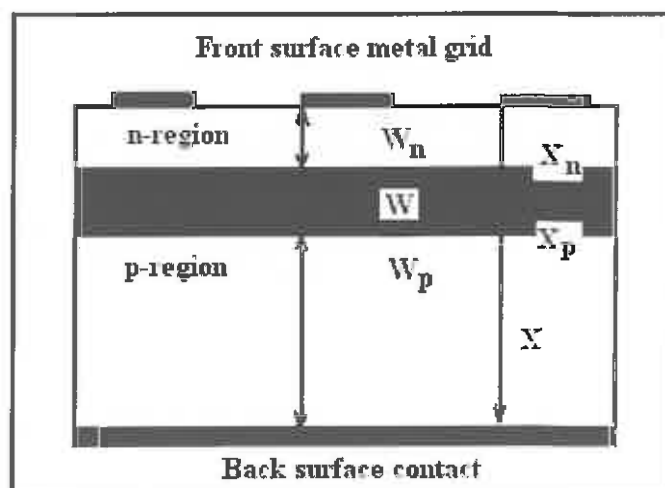
طول عمر بازترکیب و تحرک حامل‌های اقلیت، همچنین میزان بازترکیب‌های سطحی نیز می‌توانند از جمله عوامل مؤثر در بزرگی راندمان یک سلول خورشیدی باشند [۵].

### ۳-۲- عوامل مؤثر در طراحی بهینه سلول‌های خورشیدی

در این بخش به منظور بهینه‌سازی بازده یک سلول خورشیدی به بررسی برخی از پارامترهای مهم در ساخت این قطعات خواهیم پرداخت.

#### ۳-۲-۱- ضخامت لایه‌ها

یکی از عوامل مؤثر در کارایی یک سلول خورشیدی، بهینه‌سازی ضخامت لایه‌های  $n$  و  $p$  به منظور بیشینه‌سازی جریان مدار اتصال کوتاه است. در شکل ۳-۴ یک سلول خورشیدی به طور شماتیک نشان داده شده است.



شکل ۳-۴- نمودار شماتیک یک سلول خورشیدی [۵].

نور فرودی بر قطعه به داخل آن نفوذ کرده و امکان دارد که تمامی فوتون‌ها یا بخشی از آنها در نواحی مختلف شامل ناحیه n، تهی لایه و یا لایه p جذب شوند. اگر  $J_L$  چگالی جریان نوری تولید شده ناشی از حامل‌های اقلیتی در دیود باشد، می‌توان آن را به صورت مجموع سه مولفه نوشت:

$$J_L = J_n + J_p + J_{dep} \quad (۱۳-۳)$$

که در آن جمله اول چگالی جریان نوری الکترون‌ها در ناحیه p، جمله دوم چگالی جریان نوری حفره‌ها در ناحیه n و جمله سوم چگالی جریان نوری در تهی لایه است. هر یک از مولفه‌های رابطه فوق، از حل معادله پواسون و با توجه به شرایط مرزی در دیود به دست می‌آید [۲، ۵]:

$$J_n = q\beta S_0(1-R) \frac{\alpha L_n}{(\alpha L_n)^2 - 1} \exp(-\alpha x_p) [F_1 - F_2 \exp(-\alpha W_p)] \quad (۱۴-۳)$$

$$J_p = q\beta S_0(1-R) \frac{\alpha L_p}{(\alpha L_p)^2 - 1} [F'_1 - F'_2 \exp(-\alpha W_n)] \quad (۱۵-۳)$$

$$J_{dep} = q\beta S_0(1-R) \exp(-\alpha x_n) [1 - \exp(-\alpha W)] \quad (۱۶-۳)$$

که در این روابط  $q$ ,  $\beta$ ,  $S_0$ ,  $R$  و  $\alpha$  به ترتیب بار الکتریکی الکترون، بازده کوانتومی داخلی، شار فوتون‌های تابشی، ضریب بازتابش و ضریب جذب در نیمرسانا می‌باشند.  $F_1$  و  $F_2$  پارامترهای وابسته به  $L_n$  و  $D_n$  (به ترتیب طول پخش حامل‌ها در ناحیه p و ضریب پخش الکترون‌ها)،  $F'_1$  و  $F'_2$  پارامترهای وابسته به  $L_p$  و  $D_p$  (به ترتیب طول پخش حامل‌ها در ناحیه n و ضریب پخش

حفره‌ها)،  $W_p$  و  $W_n$ ،  $X_p$ ،  $X_n$  به ترتیب عرض تهی لایه در ناحیه  $n$ ، عرض تهی لایه در ناحیه  $p$ ، ضخامت تهی لایه، ضخامت لایه  $n$  و ضخامت لایه  $p$  می‌باشند.

جریان الکترون‌ها و حفره‌ها هر دو دارای یک مقدار بیشینه به ازای ضخامت مشخص لایه خنثی  $n$  و  $p$  می‌باشند که با مشتق‌گیری از روابط (۳-۱۴) و (۳-۱۵) نسبت به ضخامت لایه خنثی  $n$  و  $p$  برابر صفر قرار دادن مشتق به دست می‌آیند.

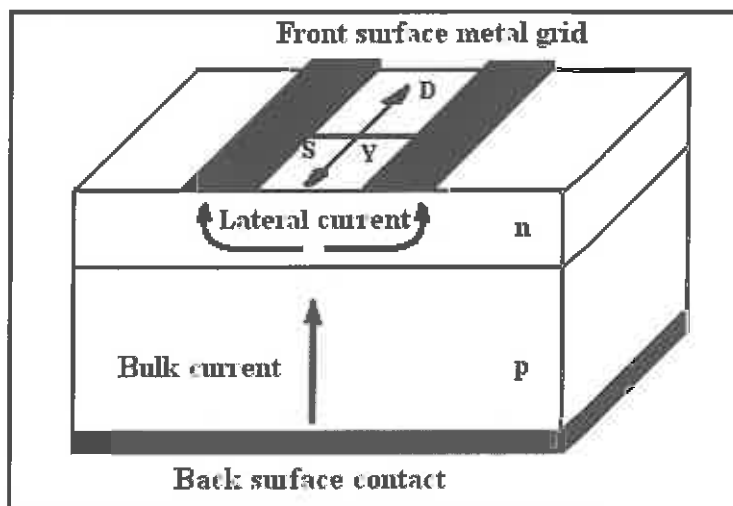
نتایج محاسبات نشان می‌دهد که  $J_n$  با طول نفوذ حامل‌ها در لایه  $p$  متناسب است. بنابراین برای بهینه‌سازی سلول خورشیدی لازم است که طول نفوذ حامل‌ها در لایه  $p$  کمی بیشتر از ضخامت این لایه باشد. برای مواد با ضرایب جذب کوچک ( $\alpha L_p < 1$ ) و به عبارت دیگر طول موج‌های بلند، ضخامت بهینه لایه  $n$  حدود ۲ برابر طول نفوذ حفره‌ها است و برای ضرایب جذب بزرگ ( $\alpha L_p > 1$ ) ضخامت بهینه این لایه صفر است، یعنی محل پیوندگاه باید تا حد ممکن به سطح سلول نزدیک باشد. برای اغلب نیمرساناها  $\alpha L_p > 1$  بوده و بنابراین برای دستیابی به چگالی جریان بیشینه باید لایه بالایی (در این جا لایه  $n$ ) تا حد ممکن کم عمق بوده و پیوندگاه به سطح قطعه نزدیکتر باشد. لازم به ذکر است به دلیل محدودیت‌های موجود در تکنولوژی‌های رشد و ساخت، در میزان نزدیکی پیوندگاه به سطح قطعه با محدودیت مواجه هستیم [۵].

### ۳-۲-۲- چگالی ناخالصی در لایه بالایی

پس از بررسی ابعاد هندسی لایه‌ها در سلول خورشیدی، اکنون به تعیین میزان چگالی ناخالصی در این لایه‌ها می‌پردازیم. در طراحی لایه بالایی لازم به توجه است که مسیر حرکت حامل‌ها (جریان الکتریکی) در این لایه برخلاف لایه زیرین، لزوماً عمود بر پیوندگاه نبوده و تا حد زیادی به موازات پیوندگاه و سطح سلول می‌باشد. این امر می‌تواند ناشی از کم عمق بودن لایه بالایی و نیز شکل اتصال‌های اهمی در این لایه باشد. از آنجا که اتصال اهمی در لایه بالایی تمامی سطح سلول را نمی‌پوشاند، بارهای الکتریکی برای رسیدن به آنها باید مسیری را به موازات سطح سلول طی کنند. این جریان‌ها به جریان‌های افقی<sup>۱</sup> موسومند.

شکل ۳-۵ مسیر جریان در یک سلول خورشیدی را نشان می‌دهد.

<sup>۱</sup> Lateral current



شکل ۳-۵- مسیر جریان در یک سلول خورشیدی با ساختار p-n [۵].

علاوه بر جریان‌های افقی در لایه بالایی سلول، مقاومت صفحه‌ای ( $R_s$ ) این لایه را نیز باید در نظر داشت. این کمیت بر حسب اهم بر واحد سطح ( $\Omega/\square$ ) به صورت زیر تعریف می‌شود [۲]:

$$R_s = \frac{\rho}{W} \quad (۳-۱۷)$$

در رابطه فوق  $W$  ضخامت لایه و  $\rho$  مقاومت ویژه ماده است و با فرض یکنواخت بودن چگالی ناخالصی در لایه بالایی سلول از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\rho = \frac{1}{q\mu_n N_D} \quad (۳-۱۸)$$

که در آن  $N_D$  تراکم دهنده‌ها و  $\mu_n$  تحرک الکترونی می‌باشد. نمودار مقاومت ویژه بر حسب تراکم ناخالصی برای سیلیکون نوع n و p در دمای ۳۰۰ درجه کلوین در شکل ۳-۶ آمده است.

مقاومت متوالی که در برابر جریان‌های افقی وجود دارد ناشی از مقاومت صفحه‌ای بوده و باعث افت بازده قطعه می‌شود. بنابراین هر چه مقدار مقاومت صفحه‌ای لایه بالایی سلول کمتر باشد مطلوب‌تر است.

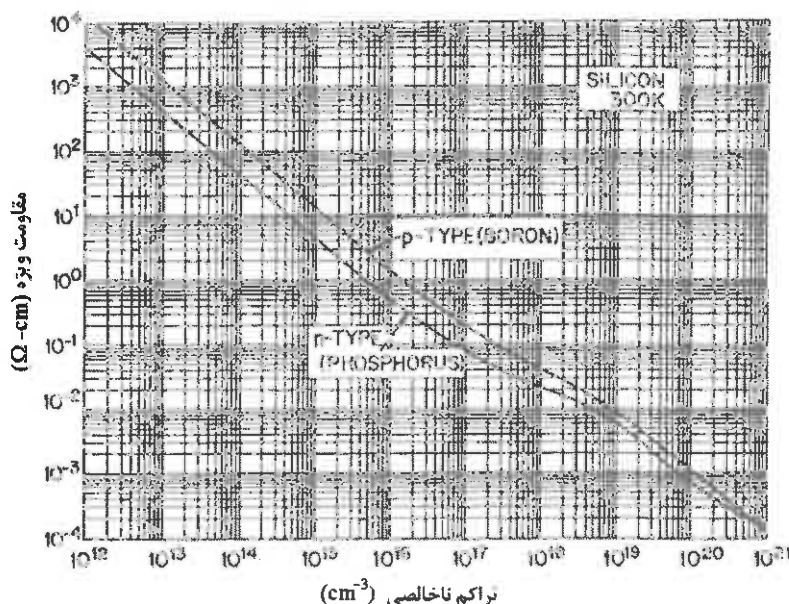
یک راه برای کاهش تلفات بازده ناشی از جریان‌های افقی و وجود مقاومت‌های متوالی، کاهش فاصله میان اتصالات اهمی در لایه بالایی می‌باشد که این به معنای افزایش تعداد اتصالات در واحد

سطح و کاهش میزان نور ورودی به سلول خورشیدی است. بنابراین یک مقدار بهینه برای فاصله میان اتصالات و تعداد آنها وجود دارد که از طریق محاسبات پیچیده‌ای بدست می‌آید [۵].

راه دیگر برای کاهش افت بازده، کاهش مقاومت صفحه‌ای است. کاهش  $R_s$  از دو طریق میسر می‌شود:

(الف) افزایش ضخامت لایه بالایی سلول خورشیدی؛ این عمل همانطور که در بخش ۳-۲-۱ بیان شد تأثیر نامطلوبی بر جریان نوری سلول خورشیدی می‌گذارد و راه مناسبی برای کاهش مقاومت صفحه‌ای نمی‌باشد.

(ب) افزایش چگالی ناخالصی‌ها در لایه بالایی سلول خورشیدی؛ که این عمل نیز سبب کاهش طول عمر حامل‌ها در لایه مذکور می‌گردد. بنا براین برای میزان چگالی ناخالصی‌ها در لایه بالایی یک مقدار بهینه وجود دارد که معمولاً در رده مقادیر نسبتاً زیاد است. به همین خاطر معمولاً لایه بالایی سلول‌های خورشیدی از یک نیمرسانای نوع  $n^+$  تشکیل می‌شود [۵].



شکل ۳-۶- مقاومت ویژه بر حسب تراکم ناخالصی برای Si در دمای ۳۰۰ درجه کلوین [۶].

### ۳-۲-۳- چگالی ناخالصی در لایه زیرین

چگالی ناخالصی در لایه زیرین سلول خورشیدی نیز با توجه به شرایط تحقق بازده بیشینه، تعیین می‌شود. چنانکه پیش از این نیز اشاره شد، برای تعیین بازده یک سلول خورشیدی باید

جریان نوری و ولتاژ مدار باز (که به جریان نوری و جریان اشباع معکوس بستگی دارد) در نظر گرفته شوند.

همانطور که ذکر شد، به منظور دستیابی به کاهش مقاومت صفحه‌ای در لایه بالایی سلول خورشیدی، لازم است چگالی ناخالصی در این لایه نسبتاً زیاد باشد. بنابراین پارامتر کلیدی در تعیین جریان نوری ( $I_L$ )، طول نفوذ حامل‌های اقلیت در لایه زیرین ( $L_n$ ) می‌باشد، زیرا چگالی جریان در این لایه ( $J_n$ ) مستقیماً به این پارامتر بستگی دارد.

از طرف دیگر رابطه میان  $L_n$  و چگالی ناخالصی‌ها در لایه زیرین سلول از رابطه زیر قابل حصول است [۱]:

$$L_n = (\mu_n \tau_n \frac{KT}{q})^{\frac{1}{2}} \quad (۱۹-۳)$$

که در آن  $\mu_n$  و  $\tau_n$  خود رابطه پیچیده‌ای با چگالی ناخالصی‌ها دارند. در حالت کلی  $\tau_n$  با افزایش چگالی ناخالصی‌ها کاهش و  $\mu_n$  نیز با افزایش چگالی ناخالصی‌ها به دلیل افزایش پراکندگی ناشی از حضور ناخالصی‌ها کاهش می‌یابد. بنابر این افزایش چگالی ناخالصی‌ها در لایه زیرین سلول سبب کاهش  $L_n$ ،  $J_n$  و در نتیجه کاهش جریان نوری سلول می‌گردد. از طرف دیگر طبق رابطه زیر [۵]:

$$I_s = qAN_cN_v \left( \frac{K_B T}{q} \right)^{\frac{1}{2}} \left( \frac{\mu_n^{\frac{1}{2}}}{\tau_n^{\frac{1}{2}} N_A} + \frac{\mu_p^{\frac{1}{2}}}{\tau_p^{\frac{1}{2}} N_D} \right) \quad (۲۰-۳)$$

که در آن  $N_v$  و  $N_c$  به ترتیب چگالی مؤثر حالت‌ها در نوار رسانش و نوار ظرفیت بوده و  $N_A$  تراکم پذیرنده‌ها می‌باشد، جریان اشباع معکوس نیز با افزایش چگالی ناخالصی‌ها در لایه‌های سلول خورشیدی کاهش می‌یابد. از آنجا که میزان کاهش  $I_s$  بیشتر از میزان کاهش  $I_L$  می‌باشد، ولتاژ مدار باز با افزایش چگالی ناخالصی‌ها در لایه زیرین افزایش می‌یابد.

بنابراین یک مقدار بهینه برای چگالی ناخالصی‌ها در این لایه وجود دارد که به ازای آن حاصلضرب  $V_{oc} I_{sc}$  بیشینه می‌شود و معمولاً مقدار آن نسبت به چگالی ناخالصی در لایه بالایی بسیار کمتر است [۵].

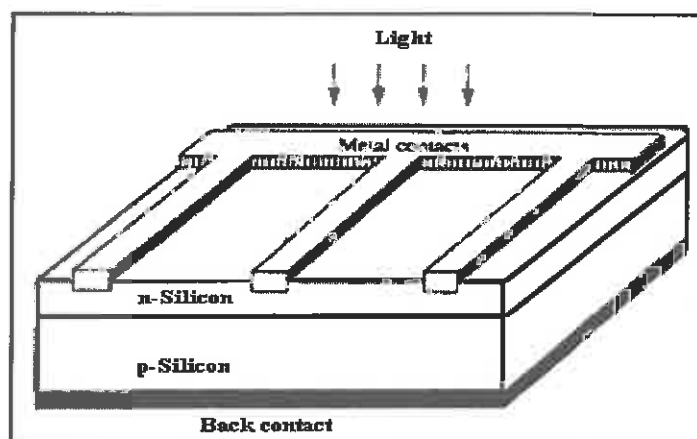
معمولاً نیمرسانای لایه زیرین سلول خورشیدی از نوع p می‌باشد، زیرا قابلیت تحرک الکترون‌ها از قابلیت تحرک حفره‌ها بیشتر است. بدین ترتیب پیوند  $n^+p$  یک ساختار استاندارد در

اکثر سلول‌های خورشیدی است [۴]. البته در مواردی خاص (همچون ساختارهایی با سیلیکون متخلخل که در فصل ۴ به آن پرداخته شده است) ممکن است لایه زیرین سلول از یک نیم‌رسانای نوع n انتخاب شود.

### ۳-۲-۴- اتصالات اهمی

برای هدایت جریان تولید شده در سلول خورشیدی لازم است در دو سطح بالایی و زیرین سلول اتصالات اهمی برقرار شود. اتصال اهمی در ناحیه زیرین با توجه به آنکه قطعه از این ناحیه در معرض تابش نور قرار نمی‌گیرد می‌تواند به صورت یک اتصال سراسری، کل سطح زیرین سلول را بپوشاند، لکن از آنجا که امواج نوری قادر به عبور از اتصالات ضخیم فلزی نمی‌باشند، نمی‌توان کل سطح بالایی سلول را که در معرض تابش نور قرار دارد با اتصال پوشاند.

بنابراین طراحی اتصال اهمی سطح بالایی سلول به دو صورت تأثیر بسزایی بر بازدهی قطعه می‌گذارد. از یک سو با جلوگیری از ورود بخشی از نور تابشی به داخل سلول، جریان نوری را کاهش می‌دهد و از سوی دیگر چون تمام سطح را نمی‌پوشاند، سبب ایجاد جریان‌های افقی در لایه بالایی شده و این به نوبه خود موجب تلفات اهمی در این لایه می‌گردد. شکل‌های هندسی متداول برای طراحی اتصال بالایی در سلول‌های خورشیدی به صورت نقطه‌ای، شانه‌ای و شبکه‌ای می‌باشد. در شکل ۳-۷، نمونه‌ای از اتصالات اهمی به شکل شانه‌ای نشان داده شده است. در اتصالات اهمی به شکل شانه‌ای و شبکه‌ای نیز یک مقدار بهینه برای فاصله میان اتصالات وجود دارد که تعیین مقدار دقیق آن نیازمند محاسبات پیچیده‌ای است [۵].



شکل ۳-۷- طرح یک سلول خورشیدی با اتصالات اهمی شانه‌ای شکل [۵].

### ۳-۳- عوامل مؤثر در افت بازده سلول‌های خورشیدی

در یک سلول خورشیدی واقعی عوامل مختلفی شامل محدودیت‌های موجود در تکنولوژی ساخت سلول‌های خورشیدی وجود دارد که سبب افت بازده سلول خورشیدی می‌گردد. برخی از این عوامل را می‌توان با بکارگیری روش‌های تکنیکی خاص حذف کرده و یا کاهش داد که در بخش ۳-۴ به آنها اشاره خواهد شد. در این بخش برخی از عوامل مؤثر بر کاهش بازدهی یک سلول خورشیدی را مورد بررسی قرار خواهیم داد.

#### ۳-۳-۱- تلفات نوری

مهمترین عامل در ایجاد تلفات نوری، بازتابش نور از سطح نیمرسانا است که با پارامتر ضریب بازتابندگی ( $R$ )، بیان می‌شود.

یکی دیگر از عوامل مؤثر در تلفات نوری، محدود بودن ضخامت سلول خورشیدی است که سبب می‌شود بخشی از نور تابشی بدون آنکه جذب شود از قطعه عبور کند. به همین دلیل در سلول‌های خورشیدی تشکیل شده از نیمرساناهای غیرمستقیم، به منظور افزایش جذب نور تابشی، لازم است یا ضخامت سلول را زیاد کنند و یا با استفاده از یک پوشش فلزی اهمی به صورت سرتاسری در قسمت زیرین، از عبور نور جلوگیری نمایند.

اتصال اهمی در سطح بالایی سلول نیز یکی از عوامل ایجاد تلفات نوری است که مانع ورود بخشی از نور به داخل نیمرسانا می‌شود [۵].

#### ۳-۳-۲- تلفات بازترکیب

تلفات بازترکیب در داخل نیمرسانا می‌تواند ناشی از محدود بودن طول عمر حامل‌های اقلیتی، طول نفوذ آنها و همچنین وجود نقائص بلوری در نیمرسانا باشد. با جذب نور در نیمرسانا تعدادی از حامل‌ها در نواحی دور از ناحیه فعال سلول، تولید می‌شوند و در نتیجه بخشی از حامل‌های تولید شده قبل از آن که توسط ترمینال‌های خروجی جمع‌آوری شوند، بازترکیب شده و همین امر موجب کاهش جریان نوری و در نتیجه تلفات بازترکیب می‌گردد. این بحث به خصوص در لایه بایینی سلول که ضخامت زیادی دارد از اهمیت بیشتری برخوردار است [۴].

در یک نیمرسانای بدون نقائص بلوری، بازترکیب حامل‌ها طول عمر ذاتی آنها را تعیین می‌کنند. در این حالت طول عمر حامل‌ها به چگالی ناخالصی‌ها بستگی دارد و به عنوان مثال برای لایه پایینی سلول خورشیدی که معمولاً از نیمرسانای نوع p تشکیل می‌شود، از رابطه تقریبی زیر به دست می‌آید [۵]:

$$\tau = \frac{1}{S_n N_A + S_{an} N_A^2} \quad (3-21)$$

که در آن  $\tau$  طول عمر بازترکیب‌ها و  $N_A$  چگالی اتم‌های پذیرنده در ناحیه p است. ضرایب  $S_n$  و  $S_{an}$  احتمال‌های گذار هستند. این رابطه نشان می‌دهد که طول عمر بازترکیب‌ها با افزایش چگالی ناخالصی‌ها کاهش می‌یابد. این در حالی است که عملاً به خاطر وجود نقائص بلوری در نیمرسانا کاهش طول عمر حامل‌ها باز هم کوچکتر می‌شود [۵].

نکته دیگری که باید در نظر داشت، نقش بازترکیب‌ها در تهی لایه است که در عمل می‌تواند بخشی از بازترکیب‌ها را شامل شود و تأثیر آن افزایش جریان اشباع معکوس و کاهش ولتاژ مدار باز سلول می‌باشد [۵].

### ۳-۳-۳- تلفات مقاومت‌های متوالی و موازی

همانطور که در مبحث مشخصه جریان-ولتاژ سلول خورشیدی در همین فصل اشاره شد، در یک مدل واقع‌گرایانه از یک سلول خورشیدی، باید تأثیر مقاومت‌های متوالی و موازی را نیز در کارایی سلول خورشیدی در نظر داشت، به خصوص حضور مقاومت‌های متوالی که سبب کاهش جریان مدار اتصال کوتاه و ضریب پرکنندگی در قطعه می‌شوند.

### ۳-۳-۴- تأثیر دما

در یک سلول خورشیدی بخش قابل توجهی از انرژی نور تابشی به گرما تبدیل می‌شود و این امر سبب افزایش دمای سلول خواهد شد. این موضوع بخصوص در مورد سلول‌های خورشیدی با متمرکز کننده نور، از اهمیت بیشتری برخوردار است زیرا محدوده تغییرات دما در آنها بسیار وسیع است [۵].

در یک نیمرسانا با افزایش دما، معمولاً گاف نواری نیمرسانا کاهش و طول حامل‌ها افزایش می‌یابد. کاهش گاف نواری نیمرسانا موجب افزایش پهنای جذب در طیف نور فرودی شده و افزایش طول عمر حامل‌ها نیز می‌تواند سبب افزایش عمق نفوذ آنها گردد. بنابراین انتظار می‌رود که افزایش دما منجر به افزایش جریان نوری گردد [۵].

اما ولتاژ مدار باز در یک سلول خورشیدی به دلیل بستگی نمایی جریان اشباع معکوس به دما، با افزایش دما به سرعت کاهش می‌یابد. کاهش ولتاژ مدار باز نسبت به تغییرات جریان مدار اتصال کوتاه قوی‌تر بوده و در نهایت منجر به کاهش بازدهی سلول خورشیدی می‌گردد [۵]. به این موضوعات در بخش ۴-۳-۲ پرداخته‌ایم.

### ۴-۳- روش‌های بهبود کارایی سلول‌های خورشیدی

چنانکه در بخش ۳-۳ اشاره شد، در عمل محدودیت‌های تکنولوژیکی باعث کاهش بازده سلول خورشیدی می‌شود. به همین دلیل در طول تحقیقات بر روی ساخت سلول‌های خورشیدی روش‌هایی ابداع شده است، تا با کاربرد آنها اثر این محدودیت‌ها کاهش یابد. در این بخش به برخی از این روش‌ها اشاره می‌شود.

#### ۴-۳-۱- استفاده از پوشش‌های ضد بازتاب

همانطور که در بخش ۳-۳-۱ اشاره شد بازتابش نور از سطح نیمرسانا از مهمترین عوامل تأثیر گذار بر کاهش بازدهی یک سلول خورشیدی است. یکی از راه‌های کاهش بازتابش نور از سطح قطعه، استفاده از پوشش‌های ضد بازتاب<sup>۱</sup> (AR) در سطح بالایی سلول خورشیدی است.

موادی که به عنوان پوشش‌های AR به کار می‌روند معمولاً دارای ضریب شکست کمتری نسبت به نیمرسانای به کار رفته در سلول خورشیدی می‌باشند. این پوشش‌ها با کاهش ضریب شکست سطح نیمرسانا، بازتابندگی سطحی را کم می‌کنند. همچنین ضخامت آنها بگونه‌ای تنظیم می‌شود که در بخش وسیعتری از طول موج‌های فرودی، بین امواج بازتابیده از سطح پوشش AR و امواج بازتابیده از سطح نیمرسانا یک اختلاف فاز ۱۸۰ درجه‌ای ایجاد شده تا باعث شود این امواج

---

<sup>۱</sup> Antireflection coating

یکدیگر را حذف کنند. بنابراین اگر  $\lambda$  طول موج مورد نظر باشد، ضخامت پوشش AR باید  $\lambda/4$  در نظر گرفته شود.

ضریب بازتابندگی با فرض وجود پوشش AR از رابطه زیر به دست می‌آید [۵]:

$$R_{\min} = \left( \frac{n_1^2 - n_0 n_2}{n_1^2 + n_0 n_2} \right)^2 \quad (22-3)$$

که در آن  $n_0$ ،  $n_1$  و  $n_2$  به ترتیب ضرایب شکست هوا، پوشش AR و نیمرسانا هستند. چنانکه رابطه ۲۲-۳ نشان می‌دهد به ازای  $n_1^2 = n_0 n_2$  ضریب بازتابندگی به صفر خواهد رسید، که البته این شرط چنانکه ذکر شد فقط در یک طول موج خاص (چهار برابر ضخامت پوشش AR) صادق است.

در عمل پوشش AR به گونه‌ای انتخاب می‌شود که شرط  $n_1^2 = n_0 n_2$  در طول موجی که حداکثر شدت تابش خورشید در آن طول موج رخ می‌دهد (در حدود ۶۰۰ نانومتر)، صادق باشد. گاهی برای کاهش بیشتر بازتابندگی از پوشش‌های AR چند لایه‌ای با ضرایب شکست مختلف استفاده می‌شود. جدول ۱-۳ برخی از مواد رایج به عنوان پوشش‌های AR، به همراه ضرایب شکست آنها را نشان می‌دهد [۵].

جدول ۱-۳- مواد مورد استفاده به عنوان پوشش‌های ضد بازتاب (AR) در سلول‌های خورشیدی [۵].

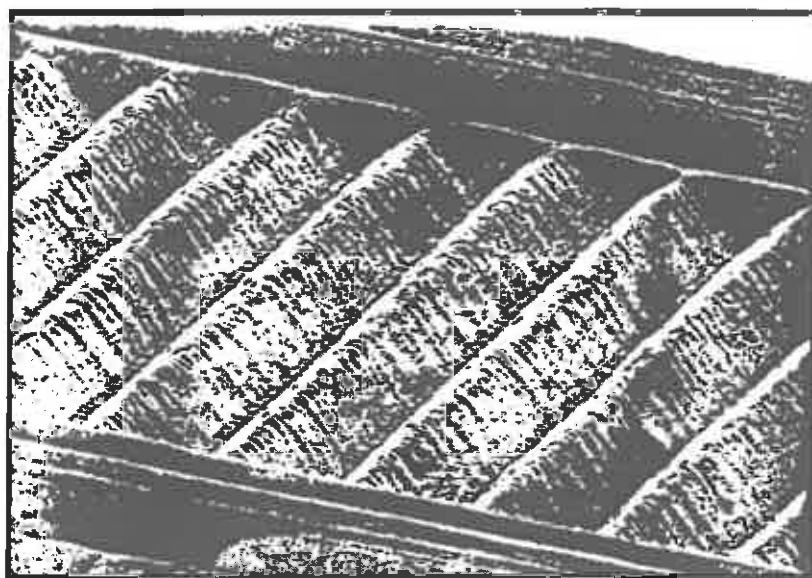
| ضریب شکست | ماده                           |
|-----------|--------------------------------|
| ۱/۴ - ۱/۵ | SiO <sub>2</sub>               |
| ۱/۸ - ۱/۹ | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |
| ۱/۹       | Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> |
| ۱/۳ - ۱/۴ | MgF <sub>2</sub>               |
| ۲/۳       | TiO <sub>2</sub>               |
| ۲/۳ - ۲/۴ | ZnS                            |

### ۳-۴-۲- ایجاد ناهمواری در سطح سلول‌های خورشیدی

علاوه بر استفاده از پوشش‌های ضد بازتاب، روش دیگری نیز برای کاهش ضریب بازتابندگی سطح قطعه وجود دارد و آن تغییر وضعیت سطح از حالت صاف و صیقلی به سطحی دارای ناهمواری (فرورفتگی و برجستگی) است. به این روش اصطلاحاً ناهموارکردن سطح<sup>۱</sup> گفته می‌شود. در این روش با استفاده از خوردگی ناهمگون<sup>۲</sup> در سطح نیم‌رسانا الگوهای شامل پستی و بلندی به وجود می‌آورند که در نتیجه آن میزان بازتابش نور از سطح کاهش می‌یابد.

از رایج‌ترین این الگوها پستی و بلندی‌هایی به شکل حرف *V* است (*V-Grooved*). شکل ۳-۸ یک تصویر *SEM* نوعی از سطح یک سلول خورشیدی را که دارای این نوع الگو است نشان می‌دهد [۷۴].

بدین ترتیب با انجام ناهموارسازی، بازتابش سطحی و به همراه آن میزان اتلاف فوتون‌های نوری مفید کاهش می‌یابد.



شکل ۳-۸- تصویر SEM نوعی از سطح یک سلول خورشیدی *V-Grooved* [۴].

Texturing<sup>۱</sup>  
Anisotropic Etching<sup>۲</sup>

### ۳-۴-۳- به دام اندازی نور

چنانچه پیش از این نیز اشاره شد، یکی از عوامل مؤثر در تلفات نوری، محدود بودن ضخامت سلول خورشیدی است. روش به دام اندازی نور<sup>۱</sup> عملاً ضخامت مؤثر سلول را افزایش داده و در نتیجه به جذب مقدار بیشتری از نور در قطعه منجر می‌گردد. ایده اصلی این روش جلوگیری از خروج نور از سطح زیرین سلول است. با ناهموار کردن این سطح، نوری که در مرحله اول در درون ماده جذب نمی‌گردد در برخورد با آن در زوایای مختلفی به داخل سلول بازتابیده می‌شود که گویی ضخامت سلول بیشتر شده است. بدین ترتیب نور مسافت بیشتری را در داخل سلول طی کرده و احتمال جذب آن بیشتر می‌شود [۵].

## مراجع

- 1- S. M. Sze, 1985: *Semiconductor Devices, Physics and Technology*, Wiley.
- 2- E. Yang, 1978: *Fundamental of Semiconductor Devices*, McGraw-Hill.
- 3- M. Scholz, D. Peros, M. Wagner, M. Böhm, 1998, 2<sup>nd</sup> World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion, Wien.
- ۴- حجت اله حمیدی، ۱۳۷۹، طراحی و رشد سلول خورشیدی با ساختار p-n با نیمه هادی گالیم آرسناید (GaAs)، به روش MBE، پایان نامه کارشناسی ارشد الکترونیک، دانشگاه علم و صنعت ایران.
- 5- H. J. Moller, 1993: *Semiconductors for Solar Cells*, Artech House.
- 6- W. F. Beadle, J. C. C. Tsai, R. D. Plummer, Eds, 1985: *Quick Reference Manual for Semiconductor Engineers*, Wiley.
- 7- B. G. Streetman, 1990: *Solid State Electronic Devices*, Prentice - Hall.

# گفتار چهارم

بررسی و تحلیل داده‌های سلول‌های خورشیدی  
با ساختارهای عادی و متخلخل

## مقدمه

همانطور که پیشتر اشاره گردید از نظر تاریخی Si به علت فراوانی در پوسته زمین و غیرسمی بودن آن نخستین ماده نیمرسانایی است که در ساخت سلول‌های خورشیدی تجاری مورد استفاده قرار گرفته است، لذا تلاش‌های فراوانی در جهت افزایش بازده و کاهش هزینه‌های تولید سلول‌های خورشیدی بر پایه سیلیکون انجام شده است. اما نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که هر یک از مواد و تکنولوژی‌های مورد استفاده در ساخت سلول‌های خورشیدی الگوی توسعه مشخصی را دنبال کرده و سرانجام با رسیدن به یک مقدار مشخص بازده، این روند متوقف می‌شود [۱]. لذا برای دستیابی به بازده بیشتر و بهینه‌سازی سلول‌های خورشیدی (کاهش بهاء الکتریسیته) استفاده از مواد جدید و اثرات نوین آنها امری ضروری به نظر می‌رسد.

همان طور که در فصل ۱ شرح داده شد سیلیکون متخلخل (PS) از جمله موادی است که به علت خواص اپتوالکترونیکی منحصر به فرد مانند پهن شدگی گاف نواری و افت بازتاب سطحی [۲]، قابلیت رسانندگی نوری [۳] و سادگی تکنولوژی ساخت برای کاربردهای فوتوولتایی ماده‌ای بسیار مطلوب است.

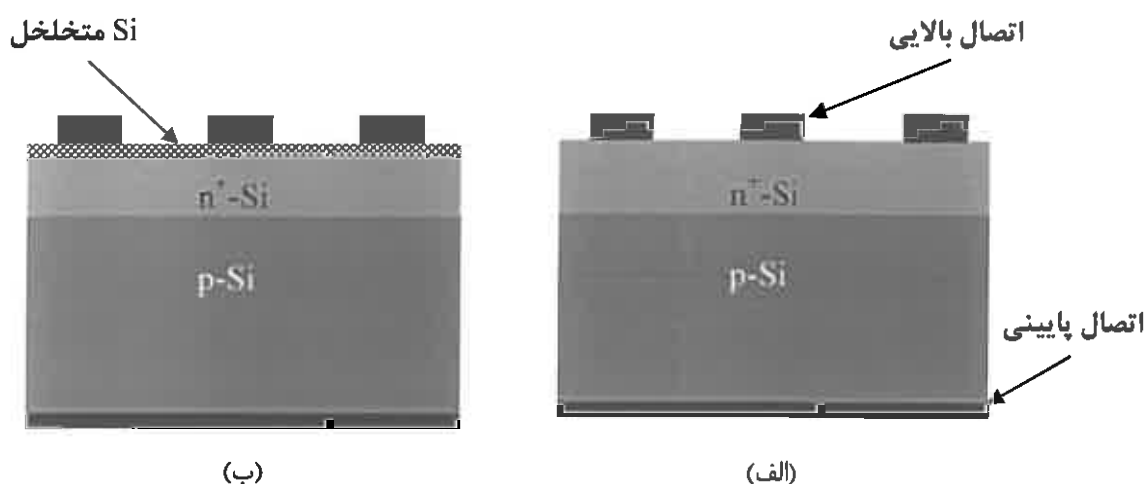
در این گفتار ابتدا به مطالعه مشخصه I-V سلول‌های خورشیدی با ساختارهای متفاوت پرداخته و سپس تأثیر تخلخل بر مشخصه الکتریکی سلول خورشیدی، مشتمل بر مقاومت متوالی قطعه، بازتابندگی سطحی، ضخامت لایه متخلخل و ضخامت لایه بالایی (گسیلنده) را مورد بررسی قرار می‌دهیم. در ادامه به مطالعه بستگی مشخصه الکتریکی به شدت تابش و دما در نمونه‌های متخلخل و غیرمتخلخل می‌پردازیم.

#### ۱-۴- مطالعه مشخصه I-V سلول‌های خورشیدی با ساختارهای متفاوت

در این مبحث نخست به بررسی نظری مشخصه I-V دو گروه از سلول‌های خورشیدی، گروه اول با ساختار  $n^+/p\text{-Si}$  (با و بدون تخلخل)، گزارش شده توسط ویتانوف و همکاران [۲] و گروه دوم با ساختار  $p^+/n\text{-Si}$  (با و بدون تخلخل)، حاصل گزارش کلخوران و همکاران [۴] به طور جداگانه پرداخته و سپس این نمونه‌ها را به لحاظ عملکردی با یکدیگر مقایسه می‌نماییم.

##### ۱-۱-۴- سلول‌های خورشیدی با ساختار $n^+/p\text{-Si}$ (با و بدون تخلخل)

سلول خورشیدی عادی (غیرمتخلخل)  $n^+/p\text{-Si}$  مورد بررسی ما شامل یک لایه  $n^+$  با آلایش اتم‌های بخشنده فسفر و مقاومت سطحی (واحد سطح / اهم) ۱۳ است که بر روی ویفر سیلیکون با ضخامت  $525\text{ }\mu\text{m}$  و با آلایش اتم‌های پذیرنده boron رشد یافته است. نمونه متخلخل  $p\text{-Si}/n^+$  دارای ساختاری کاملاً مشابه نمونه عادی بوده تنها با این تفاوت که بر روی لایه بالایی ( $n^+$ ) آن به روش خوردگی شیمیایی پوسته متخلخلی به ضخامت  $72\text{ nm}$  تشکیل شده است. در هر دو نمونه اتصالات اهمی در سطح زیرین سلول به صورت سراسری و در سطح بالایی آن به صورت شانه‌ای طراحی شده‌اند. لازم به ذکر است که در نمونه متخلخل پس از ایجاد نانو تخلخل‌های سطحی، اتصال اهمی بالایی در سلول شکل گرفته است. شکل ۱-۴ ساختار هندسی مربوط به این دو قطعه را نشان می‌دهد.



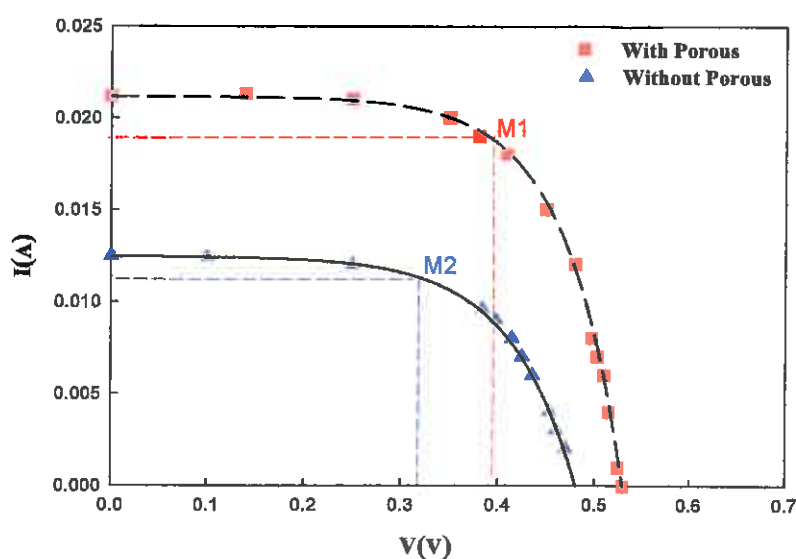
شکل ۱-۴- ساختار هندسی سلول‌های خورشیدی گروه ۱ (الف) عادی  $n^+/p\text{-Si}$  و (ب) متخلخل  $p\text{-Si}/n^+$  [۲].

برخی از ویژگی‌های ساختاری دو نمونه مورد بررسی ما در جدول ۱-۴ آمده است.

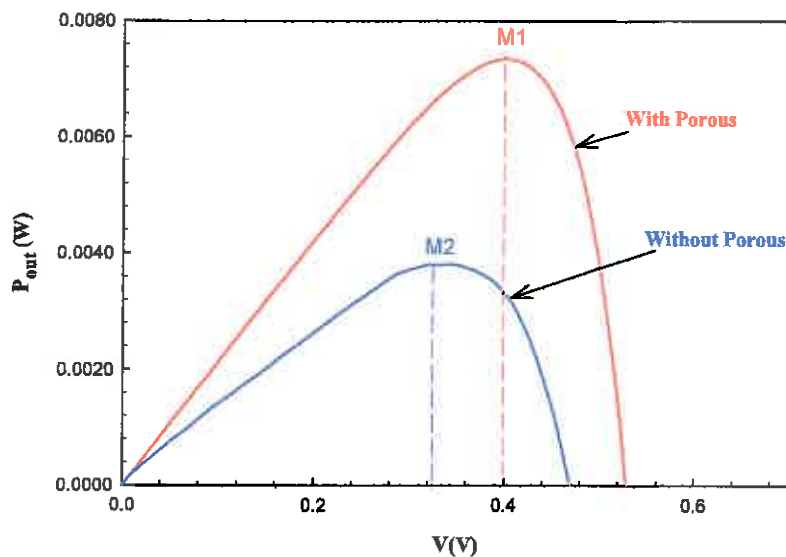
جدول ۱-۴- برخی از ویژگی‌های سلول‌های خورشیدی گروه ۱، با و بدون نانو تخلخل‌های سطحی.

| نمونه  | پژوهشگر     | ضخامت پوسته PS (nm) | مقاومت ویژه زیر لایه p ( $\Omega cm$ ) | ضخامت لایه $n^+$ ( $\mu m$ ) | سمتگیری زیر لایه p | مساحت مؤثر سلول ( $cm^2$ ) |
|--------|-------------|---------------------|----------------------------------------|------------------------------|--------------------|----------------------------|
| عادی   | ویتانوف [۲] | -                   | ۸-۱۰                                   | ۲/۲                          | (۱۰۰)              | ۱                          |
| متخلخل | ویتانوف [۲] | ۷۲                  | ۸-۱۰                                   | ۲/۲                          | (۱۰۰)              | ۱                          |

مشخصه I-V این دو قطعه به صورت داده‌های مربعی برای نمونه متخلخل و داده‌های مثلثی برای نمونه عادی، در شرایطی که تحت تابش  $AM1.5$  قرار گرفته اند، در شکل ۲-۴ مشاهده می‌شود. از مقایسه این داده‌ها می‌توان دریافت که مقدار  $I_{sc}$  در نمونه متخلخل به میزان ۵۰ درصد نسبت به نمونه عادی افزایش یافته است، در حالی که تغییرات ولتاژ مدار باز تنها در حدود ۵ درصد می‌باشد. در شکل ۳-۴ نمودار توان الکتریکی خروجی ( $P_{out} = I(V) \times V$ ) بر حسب ولتاژ برای نمونه متخلخل و عادی رسم شده اند.



شکل ۲-۴- مشخصه I-V سلول‌های خورشیدی گروه اول با ساختار  $n^+/p-Si$ ، با پوسته متخلخل (داده‌های مربعی) و بدون تخلخل (داده‌های مثلثی)، تحت تابش  $AM1.5$  [۲]. نقاط  $M_1$  و  $M_2$  در این دو نمودار وابسته به مختصات  $I_m$  و  $V_m$  مربوط به هر قطعه می‌باشند. نمودارهای منطبق شده در داده‌ها حاصل محاسبات نظری ما است (طبق معادله ۱-۴ در متن).



شکل ۴-۳- توان الکتریکی خروجی محاسبه شده بر حسب ولتاژ برای سلول‌های خورشیدی گروه ۱، با (نمودار قرمز رنگ) و بدون (نمودار آبی رنگ) پوسته متخلخل. نقاط M1 و M2 در این دو نمودار متناظر با نقاط کار این دو قطعه می‌باشند.

برای تعیین F.F. معادله (۳-۱۰) و  $\eta$  معادله (۳-۱۱) در هر نمونه، لازم است مقادیر  $V_m$  و  $I_m$  را برای هر کدام به دست آوریم. برای این منظور از مدل نظری ارائه شده توسط احمد و همکاران [۵] استفاده کرده‌ایم.

$$I = I_{sc} \left[ 1 - \exp\left(\frac{-(V_{oc} - V)}{C}\right) \right] \quad (1-4)$$

به طوری که در آن  $C = (V_{oc} - V_m) / \ln(I_{sc} / (I_{sc} - I_m))$  می‌باشد.

با انجام برازش داده‌ها به روش کمینه سازی مجموع مربعات و در نظر گرفتن مقادیر  $V_m$  و  $I_m$  به عنوان پارامترهای برازش، مقادیر F.F. و  $\eta$  قابل حصول‌اند. نتایج محاسبات ما در جدول ۴-۲ آمده است.

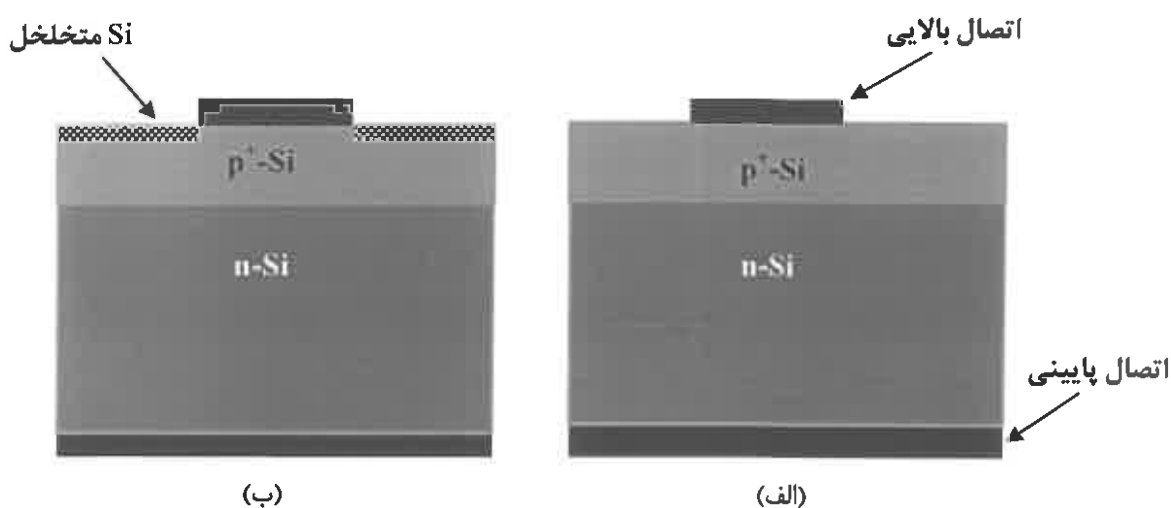
جدول ۴-۲- پارامترهای برازشی ( $V_m$  و  $I_m$ ) به همراه مقادیر محاسبه شده ضریب پرکنندگی (F.F.) و بازدهی ( $\eta$ )، برای سلول‌های خورشیدی عادی ( $n^+/p\text{-Si}$ ) و متخلخل (PS/ $n^+/p\text{-Si}$ ) گروه ۱.

| پارامترها<br>نمونه‌ها | $I_m(\text{mA})$ | $V_m(\text{V})$ | F.F.  | $\eta(\%)$ |
|-----------------------|------------------|-----------------|-------|------------|
| نمونه عادی            | ۱۱/۳۵            | ۰/۳۲            | ۰/۶۰۷ | ۳/۶۳       |
| نمونه متخلخل          | ۱۸/۳۴            | ۰/۴۰            | ۰/۶۵۳ | ۷/۳۳       |

خطوط انطباق یافته در شکل ۲-۴ حاصل به کارگیری معادله ۱-۴، با در نظر گرفتن مقادیر  $I_m$  و  $V_m$  محاسبه شده برای هر نمونه است. چنانچه از نتایج محاسبه شده در جدول ۲-۴ پیداست، کلیه مقادیر وابسته به نمونه متخلخل بر مقادیر متناظر در نمونه عادی برتری دارد: نقطه کار قطعه در جریان و ولتاژ بالاتری است، ضریب پرکنندگی آن بیشتر است و مهمتر از همه بازدهی تبدیل انرژی در قطعه متخلخل حدود ۲ برابر بیشتر از قطعه عادی می‌باشد.

#### ۲-۱-۴- سلول‌های خورشیدی با ساختار $p^+/n$ -Si (با و بدون تخلخل)

سلول خورشیدی عادی مورد بررسی ما در این بخش شامل یک لایه  $p^+$  با آلایش boron بوده که بر روی یک ویفر سیلیکون نوع n با آلایش فسفر رشد یافته است. سلول متخلخل  $p^+/n$ -Si PS دارای ساختاری کاملاً مشابه با نمونه عادی بوده لکن بر روی لایه بالایی ( $p^+$ ) آن به روش خوردگی شیمیایی پوسته متخلخلی با ضخامت تقریبی ۲۵۰ nm شکل گرفته است. در هر دو قطعه پس از رشد لایه‌ها اتصال اهمی سطح زیرین سلول به طور یکپارچه و اتصال اهمی سطح بالایی به صورت نقطه ای ایجاد شده است. در نمونه متخلخل پس از برقراری اتصالات اهمی، سطح باقی مانده در اطراف اتصال نقطه‌ای در معرض خوردگی شیمیایی قرار می‌گیرد. ساختار هندسی مربوط به این دو نمونه در شکل ۴-۴ نشان داده شده است.



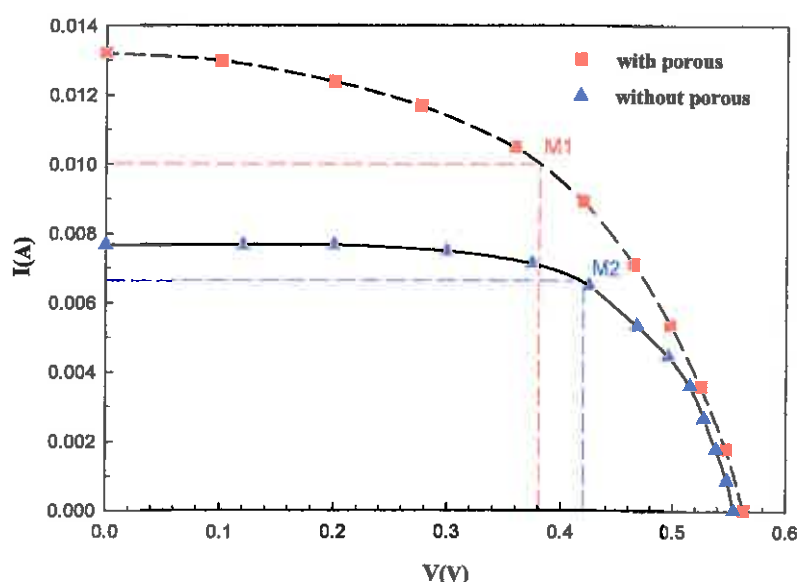
شکل ۴-۴- ساختار هندسی سلول‌های خورشیدی گروه (الف) عادی  $p^+/n$ -Si و (ب) متخلخل  $p^+/n$ -Si PS [۴].

برخی از ویژگی‌های ساختاری این دو قطعه در جدول ۳-۴ آمده است.

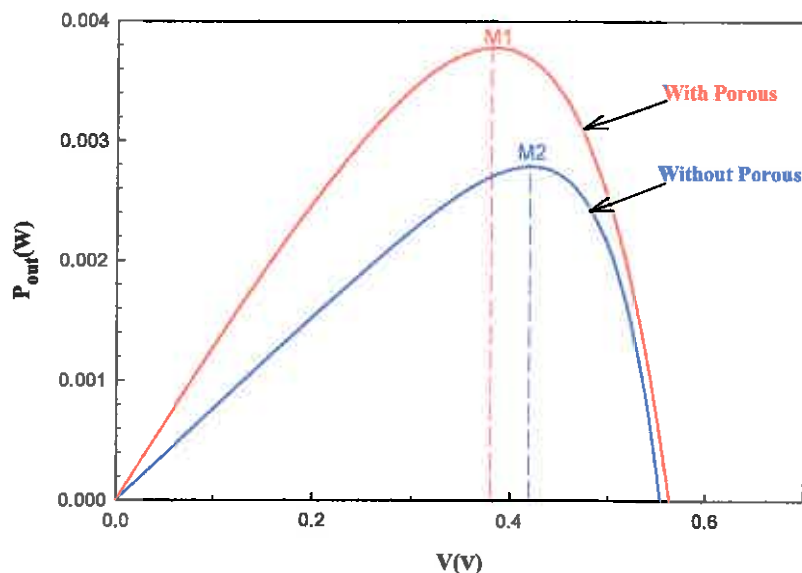
جدول ۳-۴- برخی از ویژگی‌های سلول‌های خورشیدی گروه ۲، با و بدون نانوتخلخل‌های سطحی.

| نمونه  | پژوهشگر     | ضخامت پوسته PS (nm) | مقاومت ویژه زیر لایه n ( $\Omega cm$ ) | ضخامت لایه $p^+$ ( $\mu m$ ) | نوع زیر لایه n | مساحت مؤثر سلول ( $cm^2$ ) |
|--------|-------------|---------------------|----------------------------------------|------------------------------|----------------|----------------------------|
| عادی   | کلخوران [۴] | -                   | ۳                                      | ۰/۷۵                         | تک کریستال     | ۰/۴۴                       |
| متخلخل | کلخوران [۴] | ۲۵۰                 | ۳                                      | ۰/۷۵                         | تک کریستال     | ۰/۴۴                       |

مشخصه I-V این دو قطعه، تحت تابش  $AM1.5$  به صورت داده‌های مربعی برای سلول متخلخل و داده‌های مثلثی برای سلول عادی در شکل ۴-۵ نشان داده شده است. نمودارهای توان الکتریکی خروجی بر حسب ولتاژ برای این نمونه‌ها در شکل ۴-۶ رسم شده‌اند.



شکل ۴-۵- مشخصه I-V سلول‌های خورشیدی گروه ۲ با ساختار  $p^+/n-Si$ ، با (داده‌های مربعی) و بدون پوسته متخلخل (داده‌های مثلثی)، تحت تابش  $AM1.5$  [۴]. نقاط  $M_1$  و  $M_2$  در این دو نمودار وابسته به مختصات  $I_m$  و  $V_m$  مربوط به هر قطعه می‌باشند. نمودارهای منطبق شده در داده‌ها حاصل محاسبات نظری ما است (به متن مراجعه شود).



شکل ۴-۶- توان الکتریکی خروجی محاسبه شده بر حسب ولتاژ برای سلول‌های خورشیدی گروه ۱، با (نمودار قرمز رنگ) و بدون (نمودار آبی رنگ) پوسته متخلخل. نقاط  $M_1$  و  $M_2$  در این دو نمودار متناظر با نقاط کار این دو قطعه می‌باشند.

با مقایسه داده‌های مربوط به این نمونه‌ها می‌توان دریافت که مقدار  $I_{sc}$  در نمونه متخلخل به میزان ۷۰ درصد نسبت به نمونه عادی افزایش یافته است در حالی که تغییرات ولتاژ مدار باز تنها در حدود ۱ درصد می‌باشد.

همانند بخش ۴-۱-۱ به منظور تعیین  $F.F.$  و  $\eta$  از معادله ۴-۱ برای پیدا کردن مقادیر  $I_m$  و  $V_m$  استفاده کرده و با برازش داده‌ها به روش کمینه سازی مجموع مربعات این مقادیر را بدست آوردیم. نتایج حاصل از این محاسبات در جدول ۴-۴ آمده است.

جدول ۴-۴- پارامترهای محاسبه شده برای سلول‌های خورشیدی عادی  $p^+/m-Si$  و متخلخل  $PS/p^+/n-Si$  گروه ۲.

| پارامترها<br>نمونه ها | $I_m(mA)$ | $V_m(V)$ | $F.F.$ | $\eta(\%)$ |
|-----------------------|-----------|----------|--------|------------|
| نمونه عادی            | ۶/۶       | ۰/۴۲     | ۰/۶۵   | ۶/۳        |
| نمونه متخلخل          | ۱۰        | ۰/۳۸     | ۰/۵۲   | ۸/۶        |

خطوط انطباق یافته در شکل ۴-۵ حاصل به کارگیری معادله ۴-۱، با در نظر گرفتن مقادیر  $I_m$  و  $V_m$  محاسبه شده برای دو نمونه می‌باشد. محاسبات ما حاکی از آن است که بازدهی تبدیل انرژی در قطعه متخلخل حدود ۳۵ درصد نسبت به نمونه عادی افزایش یافته است.

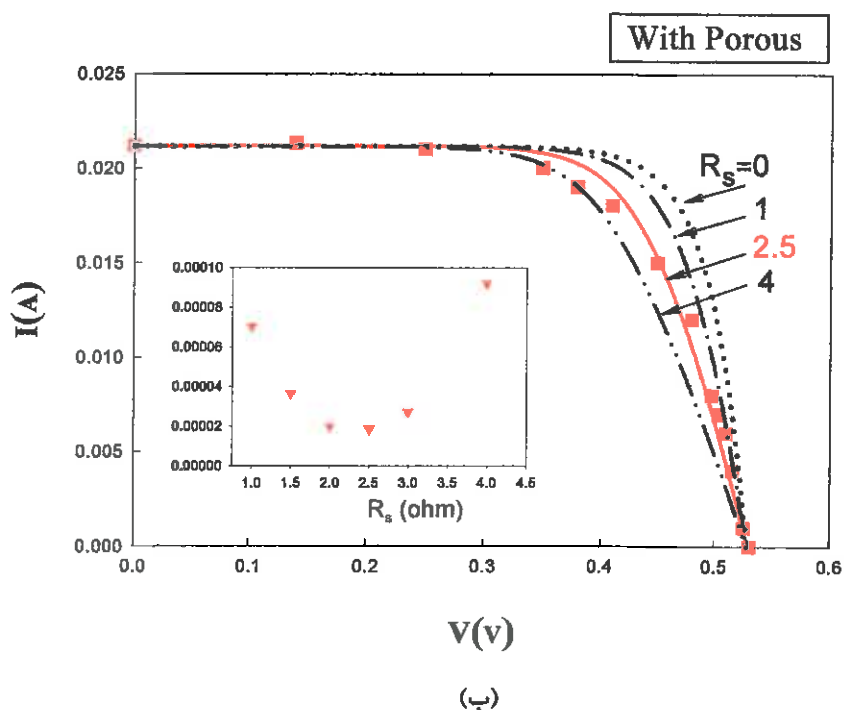
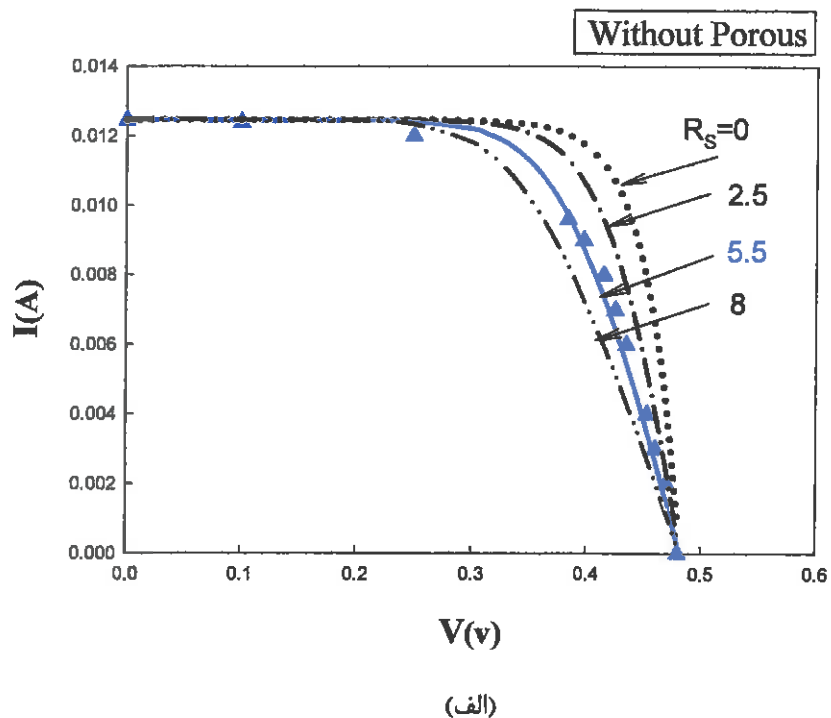
#### ۲-۴- بررسی تأثیر تخلخل بر مشخصه الکتریکی سلول‌های خورشیدی

در این مبحث سعی بر آن است که تأثیر تخلخل بر برخی از پارامترهای مؤثر در مشخصه الکتریکی سلول‌های خورشیدی، از جمله مقاومت متوالی و بازتابندگی سطحی قطعه را مورد بررسی قرار داده و در ادامه به مطالعه تأثیر ضخامت پوسته سیلیکون متخلخل (حالت کم عمق و عمیق) و همچنین فاصله پیوندگاه تا سطح، بر مشخصه الکتریکی سلول‌های خورشیدی بپردازیم.

##### ۲-۴-۱- مقاومت متوالی قطعه

به منظور بررسی تأثیر نانو تخلخل‌های سطحی بر مقاومت متوالی سلول‌های خورشیدی، نمونه‌های معرفی شده در بخش ۱-۱-۴ (گروه ۱) و ۲-۱-۴ (گروه ۲) را مورد مطالعه قرار می‌دهیم. با توجه به مطالب بخش ۱-۱-۳، مقدار مقاومت متوالی ( $R_s$ ) قطعه می‌تواند بر بزرگی سطح زیر منحنی مشخصه  $I-V$  سلول، و در نتیجه مقدار  $F.F.$ ، تأثیر گذار باشد. به منظور تعیین  $R_s$  در این نمونه‌ها (با و بدون تخلخل) از برازش معادله ۳-۶ در داده‌های تجربی وابسته به هر کدام از قطعات استفاده کرده‌ایم.

ابتدا به محاسبه مقاومت متوالی در نمونه‌های گروه ۱ می‌پردازیم. بدین منظور با جایگزین کردن مقادیر  $I_s = 1nA$ ،  $|V| = 0.6V$ ،  $q = 1.6 \times 10^{-19} C$ ،  $K_B = 1.38 \times 10^{-23} J/K$ ،  $R_s = 0$ ،  $K_B = 1.38 \times 10^{-23} J/K$ ،  $q = 1.6 \times 10^{-19} C$ ،  $I_s = 1nA$  (که به ازای  $R_s = 0$ ) برابر  $I_{sc}$  است) وابسته به هر قطعه (عادی و متخلخل) و یک مقدار دلخواه برای ضریب ایده‌آلی ( $n$ ) (بین ۱ تا ۲)، در معادله ۳-۶، منحنی مشخصه  $I-V$  مربوط به این نمونه‌ها در وضعیت حالت ایده‌آل ( $R_s = 0$ )، در بازه ۰ تا ۰/۶ ولت رسم شده است. به منظور تعیین مقدار دقیق  $n$  در نمونه‌های فوق مقدار این پارامتر را تغییر دادیم تا آنجا که مشخصه  $I-V$  حالت ایده‌آل در دو نقطه  $V_{oc}$  و  $I_{sc}$  با داده‌های تجربی گزارش شده منطبق شوند. با این روش ضریب ایده‌آلی ( $n$ ) را برای نمونه‌های عادی و متخلخل به ترتیب ۱/۱۴ و ۱/۲۱ بدست آوردیم. به کمک این مقادیر، مشخصه  $I-V$  مربوط به هر قطعه را به ازای مقادیر مختلف  $R_s$  رسم نموده‌ایم. بررسی ما برای قطعه عادی در بازه صفر تا ۸ اهم و در قطعه متخلخل در محدوده صفر تا ۴ اهم با توالی ۰/۱ اهم انجام شده است. برخی از این نتایج در شکل‌های ۲-۴-الف و ۲-۴-ب نشان داده شده‌اند.



شکل ۴-۷- مشخصه I-V سلول‌های خورشیدی گروه ۱. (الف) قطعه عادی و (ب) قطعه متخلخل. هر یک از منحنی‌ها در این شکل‌ها رفتار انتظاری (معادله ۴-۱) قطعه را در  $R_s$  نشان داده شده در شکل بر حسب اهم نشان می‌دهد. نمودارهای وابسته به  $R_s = 0$  وضعیت حالت ایده‌آل را نشان می‌دهد. تصویر ضمیمه شده به شکل (ب) نشانگر تغییرات مجموع اختلاف مربعات مقادیر نظری و تجربی به ازای مقادیر مختلف  $R_s$  است.

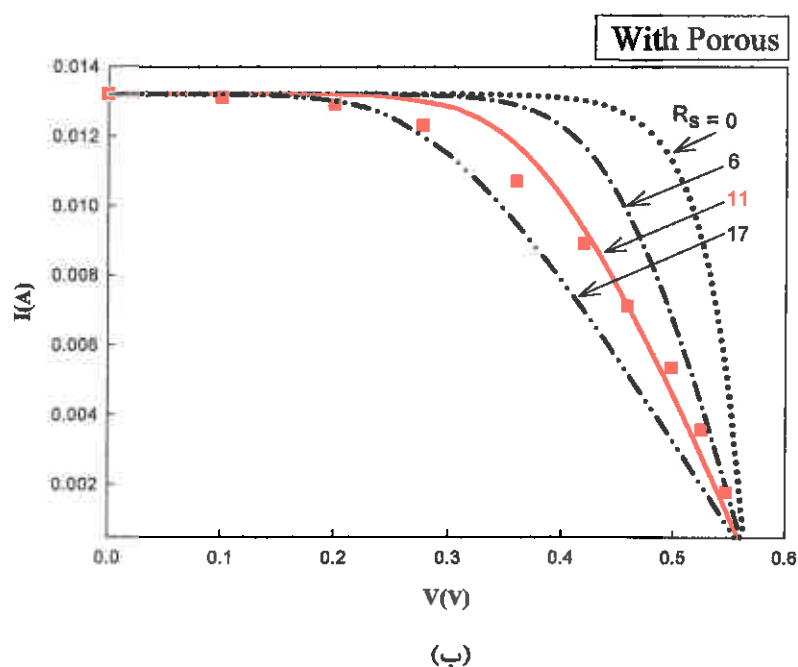
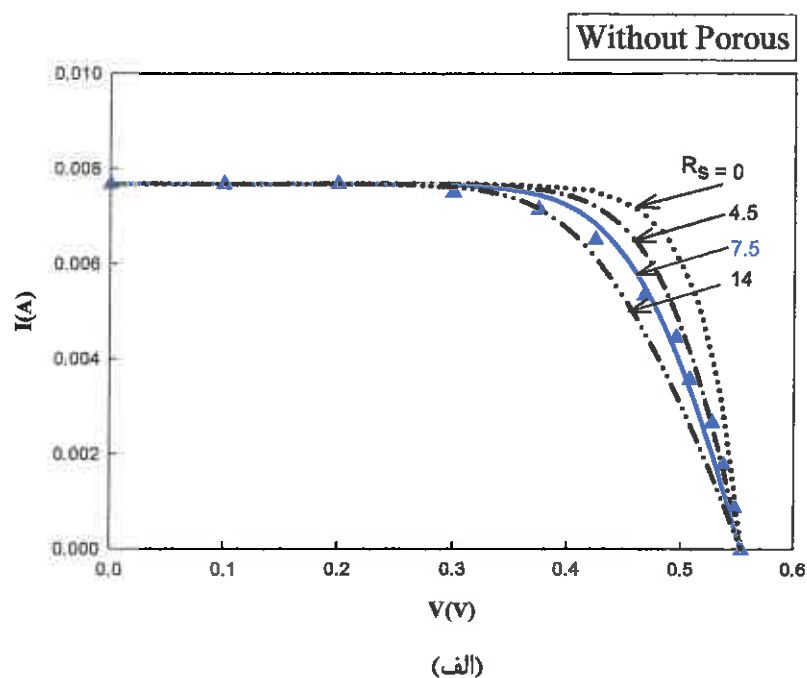
چنانچه پیداست مدل نظری جریان - ولتاژ (معادله ۴-۱) به ازای  $R_s = 5/5 \Omega$  در نمونه عادی و  $R_s = 2/5 \Omega$  در نمونه متخلخل دارای بهترین انطباق با داده‌های تجربی و کمترین خطاست. تصویر الصاقی به شکل ۴-۷ ب نشانگر تغییرات میزان خطا  $|S = \sum (I_{exp} - I_{theory})^2|$  بر حسب  $R_s$  است. در خصوص علت کاهش مقاومت متوالی در نمونه متخلخل گروه ۱، می‌توان به کوتاه‌تر شدن مسیر حرکت حامل‌های نوری و نیز بزرگ‌تر شدن سطح مؤثر تماس اتصال فلز در پایانه بالایی اشاره کرد.

به منظور تعیین مقاومت متوالی در نمونه‌های گروه ۲ نیز به روشی مشابه عمل کرده و ضرایب ایده‌آلی برای نمونه‌های عادی و متخلخل به ترتیب برابر  $1/35$  و  $1/33$  محاسبه شد. با جایگذاری ضرایب ایده‌آلی محاسبه شده برای نمونه‌های فوق، در معادله ۳-۶، مشخصه  $I-V$  این نمونه‌ها را به ازای مقادیر مختلف  $R_s$  در بازه ۰ تا  $0.6$  ولت مورد بررسی قرار داده‌ایم. بررسی ما درقطعه عادی این گروه در محدوده صفر تا  $14$  اهم و در قطعه متخلخل آن در بازه صفر تا  $17$  اهم، با توالی  $0.1$  اهم انجام شده است. برخی از این نتایج در شکل‌های ۴-۸ الف و ۴-۸ ب نشان داده شده‌اند.

نتایج این محاسبات نشانگر آن است که مدل نظری جریان - ولتاژ (معادله ۴-۱) به ازای  $R_s = 7/5 \Omega$  در قطعه عادی و  $R_s = 11 \Omega$  در قطعه متخلخل دارای بهترین انطباق با داده‌های تجربی و کمترین خطاست. چنانچه پیداست مقدار مقاومت متوالی در سلول متخلخل این گروه نسبت به نمونه عادی آن افزایش یافته است. علت این تفاوت می‌تواند ناشی از ساختار هندسی اتصال اهمی در لایه فوقانی باشد، که به صورت یک نقطه مرکزی شکل گرفته است. در این ساختار ستون‌های سیلیکونی در سطح نقش مانع را برای حرکت افقی حامل‌ها ایفا نموده و مقاومت مؤثر نمونه را افزایش داده‌اند.

در خصوص چگونگی تأثیر مقاومت متوالی بر بازدهی سلول‌های خورشیدی می‌توان گفت که با توجه به نتایج محاسبات ما در مورد مقادیر مقاومت متوالی در نمونه‌های عادی و متخلخل در هر دو گروه (۱ و ۲)، انتظار می‌رود با کاهش مقاومت متوالی در نمونه، ضریب پرکنندگی قطعه افزایش یابد. در نمونه‌های گروه ۱، مقدار  $R_s$  در نمونه متخلخل کوچکتر از نمونه عادی است، بنابراین لازم است ضریب پرکنندگی در نمونه متخلخل بزرگتر از نمونه عادی باشد. جدول ۴-۲ مؤید این نتیجه است. از طرفی با توجه به بزرگی  $I_{sc}$  در نمونه متخلخل (نسبت به نمونه عادی)، بازدهی نمونه متخلخل افزایش یافته است. در نمونه‌های گروه ۲، مقدار  $R_s$  در نمونه متخلخل بزرگتر از نمونه عادی است، بنابراین همانگونه که از نتایج جدول ۴-۴ پیداست داریم:  $F.F.(por) < F.F.(non-por)$ . اما از آنجا که  $I_{sc}$  نمونه متخلخل

تحت تأثیر کاهش ضریب بازتابندگی سطحی حدود دو برابر نمونه عادی است، بنابراین بازهم بازدهی نمونه متخلخل بزرگتر از نمونه عادی می‌باشد.



شکل ۴-۸- مشخصه  $I-V$  سلول‌های خورشیدی گروه ۲. (الف) قطعه عادی و (ب) قطعه متخلخل. هر یک از منحنی‌ها در این شکل‌ها رفتار انتظاری (معادله ۴-۱) قطعه را به ازای  $R_s$  مربوطه (بر حسب اهم) نشان می‌دهد. نمودارهای وابسته به  $R_s = 0$  وضعیت حالت ایده‌آل را نشان می‌دهد.

#### ۴-۲-۲- بازتابندگی سطحی

در این بخش به منظور مطالعه تأثیر میزان بازتابندگی سطحی ( $R$ ) بر بزرگی چگالی جریان مدار اتصال کوتاه ( $J_{sc}$ ) یک سلول خورشیدی سیلیکونی با سطح متخلخل و نیز غیرمتخلخل (عادی)، سه گروه از سلول‌های خورشیدی که توسط ویتانوف (نمونه‌های گروه ۱)، کلخوران (نمونه‌های گروه ۲) و چاکراواری (نمونه‌های گروه ۳) گزارش شده‌اند را مورد بررسی قرار داده‌ایم (ویژگی‌های نمونه‌های گروه‌های ۱ و ۲ به ترتیب در جداول ۴-۱ و ۴-۳ بیان شده است). نمونه‌های گروه ۳ با ساختار  $n^+/p\text{-Si}$  (با و بدون تخلخل)، مشابه نمونه‌های گروه ۱ در شکل ۴-۱، شامل یک لایه  $n^+$  با آلایش فسفر بوده که بر روی ویفر سیلیکون نوع  $p$  با آلایش boron رشد یافته‌اند (نمونه عادی). نمونه متخلخل  $PS/n^+/p\text{-Si}$  دارای ساختاری کاملاً مشابه نمونه عادی بوده تنها با این تفاوت که بر روی لایه بالایی ( $n^+$ ) آن به روش خوردگی شیمیایی آنودی پوسته متخلخلی با ضخامت ۷۰ nm تشکیل شده است. در هر دو نمونه اتصالات اهمی در سطح زیرین سلول به صورت سراسری و در سطح بالایی آن به صورت شانه‌ای می‌باشد. برخی از ویژگی‌های مربوط به این نمونه‌ها در جدول ۴-۵ آمده است.

جدول ۴-۵- برخی از ویژگی‌های سلول‌های خورشیدی گروه ۳، با و بدون نانو تخلخل‌های سطحی.

| نمونه  | بزه‌سگر       | سمتگیری زیر لایه<br>p | مقاومت ویژه لایه<br>( $\Omega cm$ ) p | ضخامت لایه<br>( $\mu m$ ) $n^+$ | ضخامت پوسته<br>PS (nm) |
|--------|---------------|-----------------------|---------------------------------------|---------------------------------|------------------------|
| عادی   | چاکراواری [۶] | (۱۰۰)                 | ۵-۱۰                                  | ۰/۵                             | -                      |
| متخلخل | چاکراواری [۶] | (۱۰۰)                 | ۵-۱۰                                  | ۰/۵                             | ۷۰                     |

. مقادیر  $J_{sc}$ ،  $V_{oc}$ ، F.F. و  $\eta$  در این نمونه‌ها و قطعات پیشین در جدول ۴-۶ جمع آوری شده‌اند.

نکته قابل توجه در این داده‌ها تفاوت قابل ملاحظه در بزرگی چگالی جریان مدار اتصال کوتاه در نمونه‌های متخلخل نسبت به نمونه‌های عادی است. یکی از عوامل مؤثر بر این پارامتر که با تولید زوج الکترون - حفره‌ها در ناحیه فعال ارتباط مستقیم دارد حضور شار فوتون‌های فرودی در این پهنه است که این خود به میزان بازتابندگی ( $R$ ) در سطح قطعه وابسته می‌باشد.

جدول ۴-۶- پارامترهای گزارش شده مربوط به نمونه‌های گروه‌های ۱، ۲ و ۳ تحت شرایط تابشی AM1.5.

| نمونه‌ها<br>پارامترها             | گروه ۱ |        | گروه ۲ |        | گروه ۳ |        |
|-----------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                                   | عادی   | متخلخل | عادی   | متخلخل | عادی   | متخلخل |
| $J_{sc}$<br>(mA/cm <sup>۲</sup> ) | ۱۲/۴۷  | ۲۱/۱۷  | ۱۷/۴۲  | ۳۰/۰۷  | ۲۰/۹   | ۲۶/۳   |
| $V_{oc}$ (V)                      | ۰/۴۸   | ۰/۵۳   | ۰/۵۵۴  | ۰/۵۶۳  | ۰/۵۷۸  | ۰/۵۸   |
| FF                                | ۰/۶۰۷  | ۰/۶۵۳  | ۰/۶۵   | ۰/۵۲   | ۰/۷۴۱  | ۰/۷۳۱  |
| $\eta$ (%)                        | ۳/۶۳   | ۷/۳۳   | ۶/۳    | ۸/۶    | ۹/۰۵   | ۱۱/۲۵  |

بررسی کمی تأثیر بازتابندگی سطحی بر چگالی جریان مدار اتصال کوتاه در یک سلول خورشیدی مستلزم رابطه‌ای است که این دو کمیت را به یکدیگر مربوط سازد. انتظار می‌رود معادله:

$$J_{sc} = q \sum_{\lambda_0}^{\lambda_g} n_0(\lambda) f(\lambda, x) (1 - R) \Delta \lambda \Delta x \quad (۲-۴)$$

این خواسته را برآورده کند. که در آن  $q$  بار الکتریکی الکترون‌ها،  $n_0(\lambda)$  شار فوتون‌های با طول موج  $\lambda$  در سطح نمونه  $(x=0)$ ،  $f(\lambda, x)$  کسر فوتون‌های جذب شده با طول موج  $\lambda$  در مقطع  $x$  از سطح نمونه واقع در محدوده  $\Delta x$  و در گستره  $\Delta \lambda$  در ناحیه فعال قطعه می‌باشند. مقادیر  $\lambda_0 = 400 \text{ nm}$  و  $\lambda_g = 1150 \text{ nm}$  به ترتیب حد پایینی و بالایی طول موج‌های قابل جذب در سلول‌های خورشیدی سیلیکونی است. به منظور محاسبه این جمع بندی علاوه بر اطلاع از بازتابندگی  $R$  در هر نمونه (شکل های ۴-۹- الف، ب و ج) لازم است مقادیر مربوط به عمق ناحیه فعال،  $f$  و  $n_0$  را بیابیم:

**الف- تعیین عمق ناحیه فعال:** به منظور محاسبه طول پخش حامل‌های اقلیتی در نواحی با تراکم‌های ناخالصی پایین، بالا و تهی لایه از روابط زیر استفاده شده است [۷]:

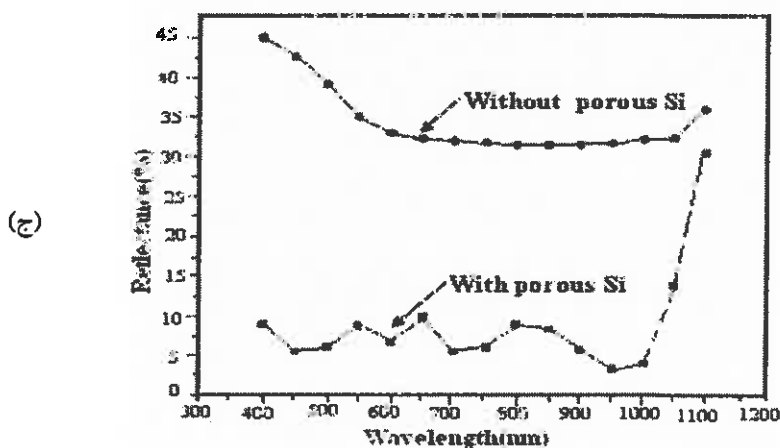
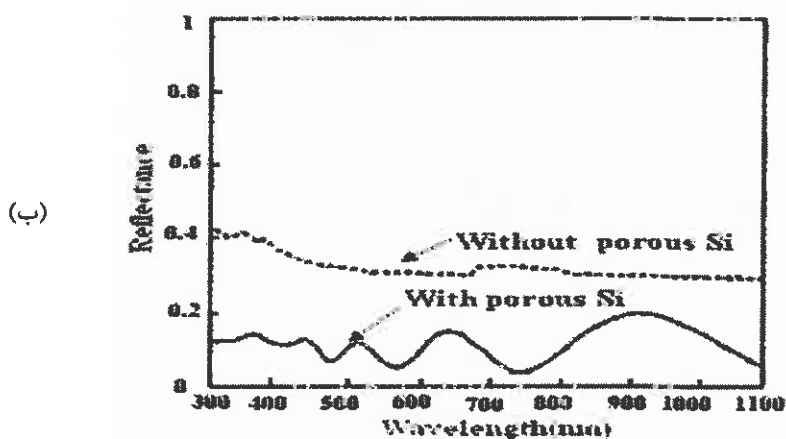
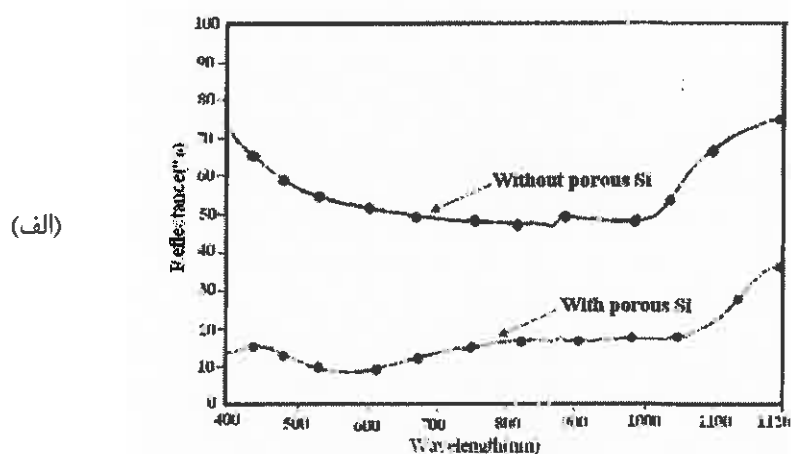
$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n}$$

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p} \quad (۳-۴)$$

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q} \left[ \frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right] V_{bi}}$$

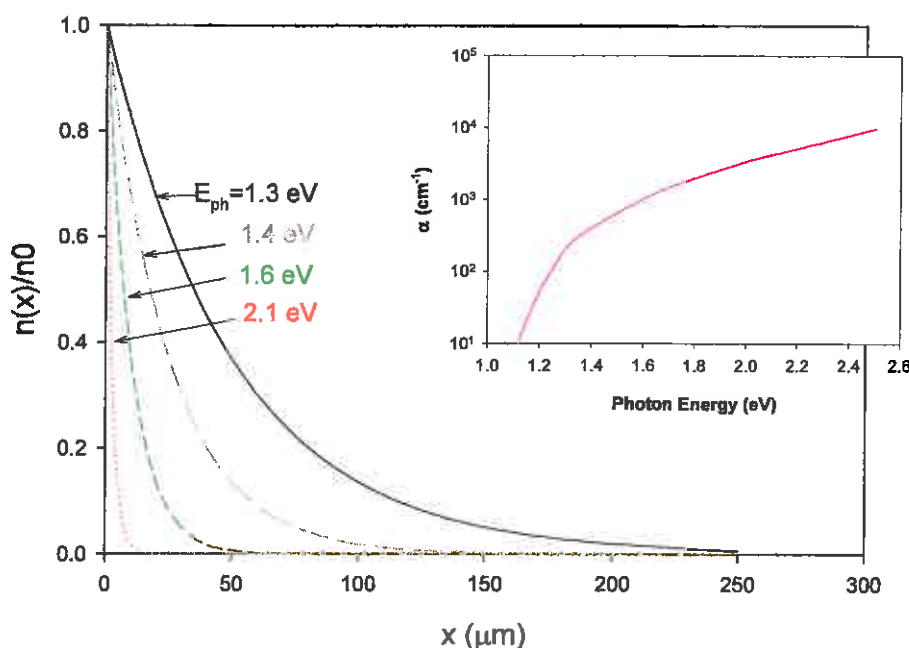
که در آن  $\epsilon_s = 10 \times \epsilon_0$ ،  $V_{bi} = 0.8 \text{ V}$  و  $\tau_n = \tau_p = 2 \times 10^{-6} \text{ s}$  می‌باشند [۸]. مقادیر مربوط به پخش ویژه ( $D_p$  و  $D_n$ ) برای Si به ترتیب برابر با  $35 \text{ cm}^2/\text{s}$  و  $12/5 \text{ cm}^2/\text{s}$  در محاسبات در نظر گرفته

شده‌اند [۸]. با اطلاع از مقادیر گزارش شده برای مقاومتهای ویژه لایه‌ها و به کمک شکل (۳-۶)، مقادیر محاسبه شده برای  $L_p$ ،  $L_n$  و  $W$  به ترتیب در حدود ۸۵، ۵۰ و ۰/۱ میکرون می‌باشند. با توجه به این مقادیر و ضخامت ناچیز لایه بالایی در نمونه‌ها (در حدود ۲ میکرون) در مقایسه با طول پخش حامل‌ها در آن لایه، واضح است که بخش عمده جذب نور در ناحیه طول پخش وابسته به لایه با آلایش پایین در عمقی حدود  $90\ \mu m$  تا سطح قطعه رخ می‌دهد.



شکل ۴-۹- بازتابندگی سطحی R برای نمونه‌های (الف) گروه ۱، (ب) گروه ۲ و (ج) گروه ۳.

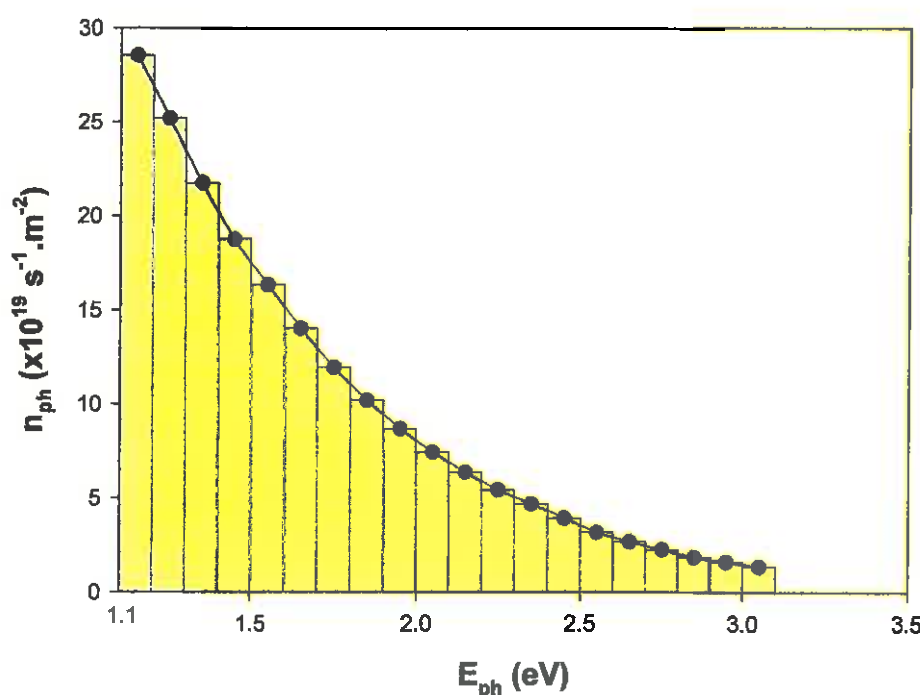
ب- تعیین  $f(\lambda, x)$ : با استفاده از معادله  $n(x)/n_0 = \exp(-\alpha x)$  که در آن  $\alpha$  ضریب جذب در ماده (در اینجا سیلیکون) بوده و در حالت کلی تابعی از انرژی فوتون‌های فرودی است (تصویر الصاقی شکل ۴-۱۰) می‌توان کسر فوتون‌های رسیده به مقطع  $x$  تا سطح نمونه را یافت. شکل ۴-۱۰ نشانگر این نسبت بر حسب تابعی از فاصله تا عمق ۲۵۰ میکرون (ضخامت نوعی ویفرهای سیلیکون در سلول‌های خورشیدی) است. بدیهی است که:  $f = 1 - n(x)/n_0$  خواهد بود. چنانچه از این شکل پیداست برای فوتون‌های با انرژی‌های بزرگتر از ۱/۴ eV تقریباً همگی و در انرژی‌های کمتر (تا ۱/۱ eV) در حدود ۸۵٪ آنها جذب می‌شوند.



شکل ۴-۱۰- تغییرات نسبت شار فوتون‌ها در مقطع  $x$  به شار در سطح نمونه بر حسب تابعی از فاصله برای فوتون‌های با انرژی ۱/۳، ۱/۴، ۱/۶ و ۲/۱ الکترون ولت. تصویر الصاقی نشانگر تغییرات ضریب جذب سیلیکون بر حسب تابعی از انرژی فوتون‌هاست.

ج- تعیین  $n_0$ : برای یافتن تعداد فوتون‌ها در واحد بازه طول موج تابش خورشیدی می‌توان طیف گسیلی از خورشید در شرایط AM1.5 (شکل ۲-۳، معادل شدت  $84/4 \text{ mW/cm}^2$ ) را در بازه انرژی ۱/۳ تا ۳/۰ الکترون ولت با تقریب خوبی به طیف گسیلی از یک تابشگر جسم سیاه در دمای ۵۸۰۰ کلوین نزدیک دانست [۷]. به منظور یافتن تعداد فوتون‌ها در واحد بازه انرژی ابتدا لازم است که بزرگی سطح زیر منحنی تابش جسم سیاه را به دست آوریم. بدین منظور سطح فوق را به مستطیل‌هایی با

عرض  $E$  و  $E+\Delta E$  تقسیم می‌کنیم، مجموع مساحت این قطعات با تقریب خوبی با سطح زیر این منحنی برابر می‌باشد. نسبت مساحت هر یک از این مستطیل‌ها به سطح کل، نشانگر کسر شار فوتون‌های موجود در این گستره خواهد بود. با اطلاع از این نسبت همراه با انرژی کل دریافتی در واحد زمان در واحد سطح ( $84/4 \text{ mW/cm}^2$ ) می‌توان شار انرژی وابسته به هر یک از این قطعات را به دست آورد. با تقسیم این مقادیر بر انرژی میانگین فوتون‌ها در آن بازه می‌توان تعداد فوتون‌ها ( $n_0$ ) را در بازه انرژی مورد نظر به دست آورد. شکل ۴-۱۱ نتایج حاصل از این محاسبات را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱۱- تغییرات شار فوتون‌های فرودی بر سطح یک سلول خورشیدی در شرایط  $AM1.5$  (به متن مراجعه شود).

بدین ترتیب با اطلاع از مقادیر ضریب بازتاب نمونه‌های مختلف (داده‌های شکل ۴-۹) و همچنین بکارگیری محاسبات مندرج در بخش‌های الف، ب و ج، در معادله ۴-۲ می‌توان چگالی جریان مدار اتصال کوتاه را محاسبه نمود. نتایج این محاسبات در جدول ۴-۷ آمده است.

جدول ۴-۷- پارامترهای محاسبه شده مربوط به نمونه‌های گروه‌های ۱، ۲ و ۳.

| نمونه‌ها<br>پارامترها                           | گروه ۱ |        | گروه ۲ |        | گروه ۳ |        |
|-------------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                                                 | عادی   | متخلخل | عادی   | متخلخل | عادی   | متخلخل |
| $J_{sc}$<br>(mA/cm <sup>۲</sup> )<br>محاسبه شده | ۱۲/۴۲  | ۲۰/۱۳  | ۱۷/۸۳  | ۲۴     | ۱۹/۶   | ۲۳/۹۲  |
| $J_{sc}$<br>(mA/cm <sup>۲</sup> )<br>گزارش شده  | ۱۲/۴۷  | ۲۱/۱۷  | ۱۷/۴۲  | ۳۰/۰۷  | ۲۰/۹   | ۲۶/۳   |

محاسبات ما حاکی از آن است که مقادیر  $J_{sc}$  برای نمونه‌های عادی به خوبی با مقادیر تجربی منطبق است. در مورد نمونه‌های متخلخل ملاحظه می‌شود که  $J_{sc}$  محاسبه شده در مقایسه با مقادیر تجربی در نمونه‌های گروه‌های ۱ و ۳ تفاوتی در حدود ۵ تا ۱۰ درصد دارد. در نمونه گروه ۲ این تفاوت اندکی بیشتر است. نکته جالب توجه اینکه مقدار چگالی جریان مدار اتصال کوتاه محاسبه شده ما در این سه نمونه متخلخل همواره قدری کمتر از مقادیر تجربی است. علت این امر می‌تواند ناشی از عوامل وابسته به حضور نانو تخلخل‌های سطحی در داخل سیلیکون (همچون تفاوت در بزرگی گاف نواری Si متخلخل و Si عادی [۱۰]، متفاوت بودن ضریب جذب آنها [۱۱]، کوچکتر بودن مقاومت متوالی در نمونه‌های متخلخل [۱۲] و وجود میدان‌های الکتریکی قوی در نقاط نوک تیز وابسته به نانو تخلخل‌ها) باشد.

#### ۴-۲-۳- ضخامت پوسته متخلخل در لایه بالایی

در این بخش به بررسی کیفی تأثیر ضخامت پوسته سیلیکون متخلخل بر مشخصه الکتریکی سلول‌های خورشیدی (الف) نمونه‌های گروه ۱ و (ب) نمونه‌های گروه ۲ خواهیم پرداخت.

##### (الف) پوسته متخلخل کم عمق:

بدین منظور سلول‌های خورشیدی گروه ۱ با ساختار کاملاً مشابه، لکن با ضخامت‌های متفاوتی از پوسته PS را تحت تابش AM1.5 مورد بررسی قرار داده‌ایم. پارامترهای وابسته به این نمونه‌ها در جدول ۴-۸ آمده است.

جدول ۴-۸- پارامترهای وابسته به نمونه‌های متخلخل گروه ۱ با ضخامت‌های متفاوتی از پوسته PS [۲].

| ضخامت پوسته<br>PS<br>پارامترها | ۵۵(nm) | ۷۲(nm) | ۸۵(nm) | ۱۱۰(nm) | ۱۲۰(nm) |
|--------------------------------|--------|--------|--------|---------|---------|
| $I_{scPS}$                     | ۱۵     | ۲۱/۱۷  | ۱۸/۲۸  | ۱۵/۹۲   | ۱۰/۴۷   |
| $V_{ocPS}$                     | ۰/۴۸۵  | ۰/۵۳   | ۰/۴۹۶  | ۰/۴۸۲   | ۰/۴۶    |
| $\eta_{PS}$                    | ۵/۲۷   | ۷/۳۳   | ۶/۲۲   | ۵/۳۳    | ۳/۴۲    |

به منظور کسب دیدگاهی مناسب‌تر از ویژگی‌های سلول‌های خورشیدی مورد بحث، روابط زیر را تعریف می‌کنیم:

$$\Delta I_{sc} = [(I_{scPS} - I_{scB}) / I_{scB}] \times 100$$

$$\Delta V_{oc} = [(V_{ocPS} - V_{ocB}) / V_{ocB}] \times 100 \quad (۴-۴)$$

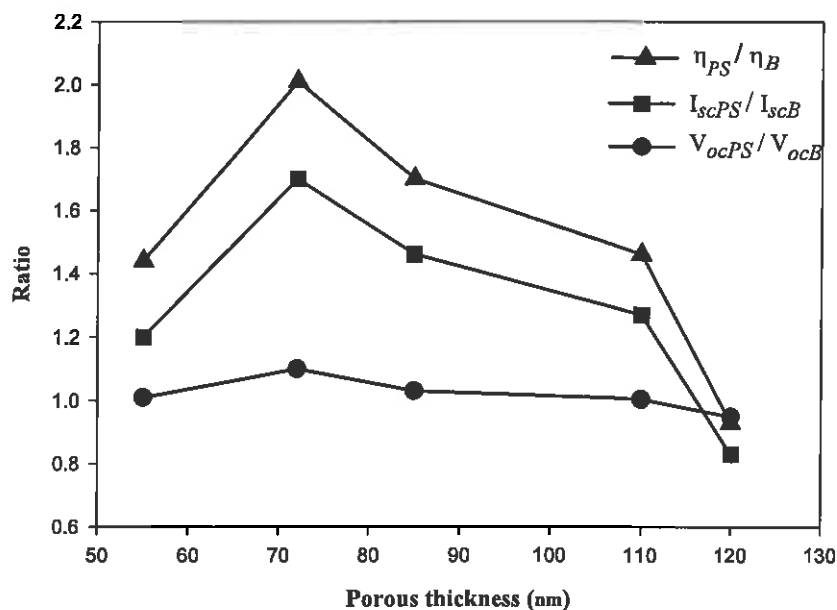
$$\Delta \eta = [(\eta_{PS} - \eta_B) / \eta_B] \times 100$$

در این روابط شاخص پایین B وابسته به پارامترهای نمونه غیرمتخلخل می‌باشد. با استفاده از روابط فوق درصد تغییرات نسبی پارامترهای وابسته به سلول‌های خورشیدی متخلخل نسبت به نمونه غیرمتخلخل را بر حسب ضخامت پوسته PS محاسبه کرده‌ایم. نتایج محاسبات ما در جدول ۴-۹ آمده است.

جدول ۴-۹- درصد تغییرات نسبی پارامترهای وابسته به سلول‌های خورشیدی متخلخل نسبت به نمونه غیرمتخلخل در گروه ۱، بر حسب ضخامت پوسته PS.

| ضخامت پوسته<br>PS<br>تغییر<br>پارامترها (%) | ۵۵(nm) | ۷۲(nm) | ۸۵(nm) | ۱۱۰(nm) | ۱۲۰(nm) |
|---------------------------------------------|--------|--------|--------|---------|---------|
| $\Delta I_{sc} (\%)$                        | +۲۰/۳۲ | +۷۰    | +۴۶/۶  | +۲۷/۷   | -۱۶     |
| $\Delta V_{oc} (\%)$                        | +۱/۲   | +۱۰/۴  | +۳/۵   | +۰/۶    | -۴      |
| $\Delta \eta (\%)$                          | +۴۵    | +۱۰۰   | +۷۱    | +۴۶/۶   | -۶      |

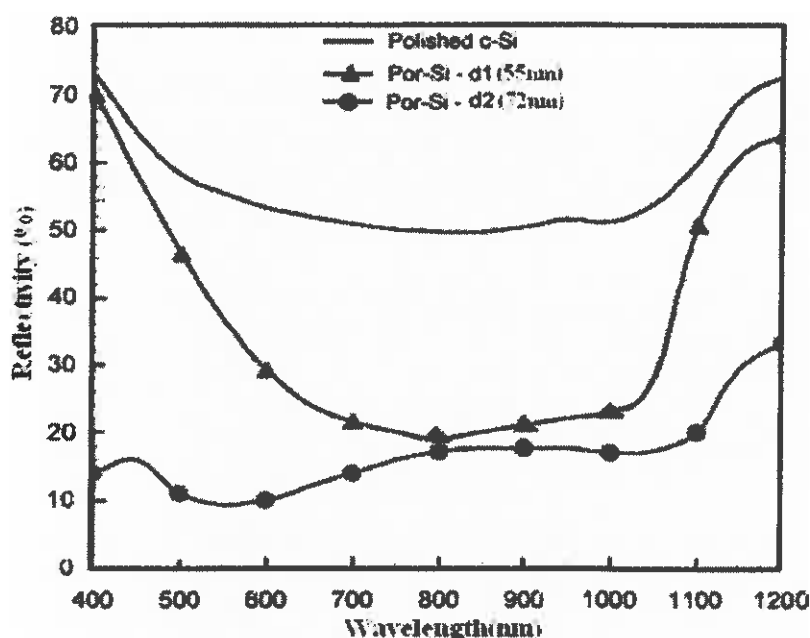
نسبت جریان مدار اتصال کوتاه، ولتاژ مدار باز و بازدهی نمونه‌های متخلخل به نمونه عادی بر حسب تابعی از ضخامت پوسته متخلخل، در شکل ۴-۱۲ نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۲- تغییرات نسبی جریان مدار اتصال کوتاه، ولتاژ مدار باز و بازدهی نمونه‌های متخلخل به نمونه عادی بر حسب تابعی از ضخامت پوسته متخلخل.

همانطور که در شکل ۴-۱۲ مشاهده می‌شود بیشترین تغییرات نسبی جریان نوری، ولتاژ مدار باز و نهایتاً بازدهی، در نمونه‌ای حاصل می‌شود که ضخامت پوسته PS در آن ۷۲ nm است. همان گونه که در بخش ۴-۲-۲ دیدیم، بازتابندگی سطحی نقش مهمی در جریان مدار اتصال کوتاه و در نتیجه در بازدهی قطعه ایفا می‌کند. شکل ۴-۱۳ این واقعیت را به خوبی آشکار می‌نماید. این شکل تغییرات بازتاب سطحی لایه سیلیکون فوقانی را بر حسب تابعی از طول موج در حالت صیقلی و همچنین با وجود پوسته های نانومتری متخلخلی به ضخامت های ۵۵ و ۷۲ نانومتر نشان می‌دهد [۲].

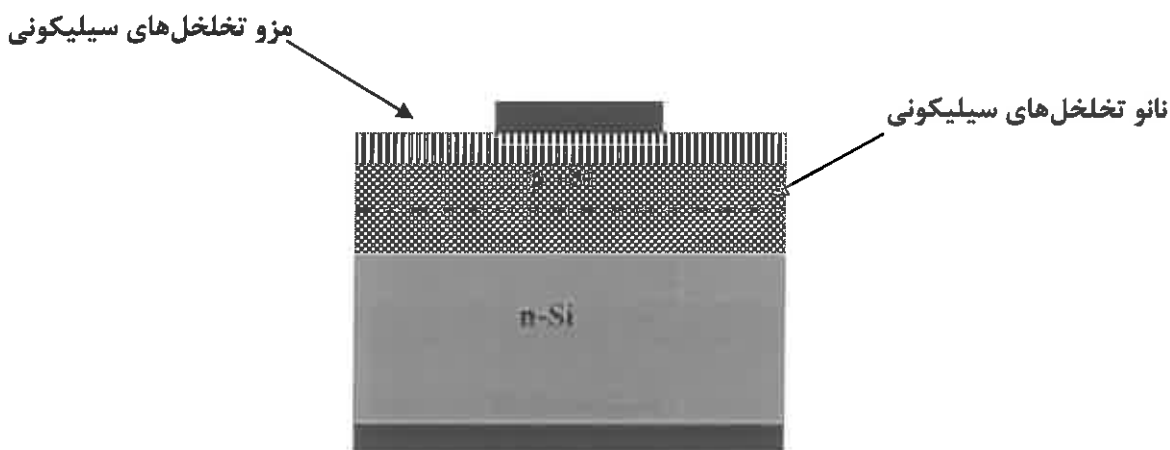
چنانچه انتظار می‌رود سطح پوشیده شده با پوسته متخلخلی به ضخامت ۷۲ nm دارای کمترین بازتاب سطحی است. بدین ترتیب ملاحظه می‌شود که در ساختار سلول خورشیدی PS/n<sup>+</sup>/p-Si ضخامت بهینه پوسته متخلخل برابر ۷۲ نانومتر بوده و این پوسته بالاترین احتمال به دام اندازی فوتون‌های نوری را فراهم می‌سازد. این امر سبب افزایش احتمال جذب فوتون‌ها می‌شود که در نهایت به افزایش جریان نوری و بازدهی قطعه منجر می‌گردد.



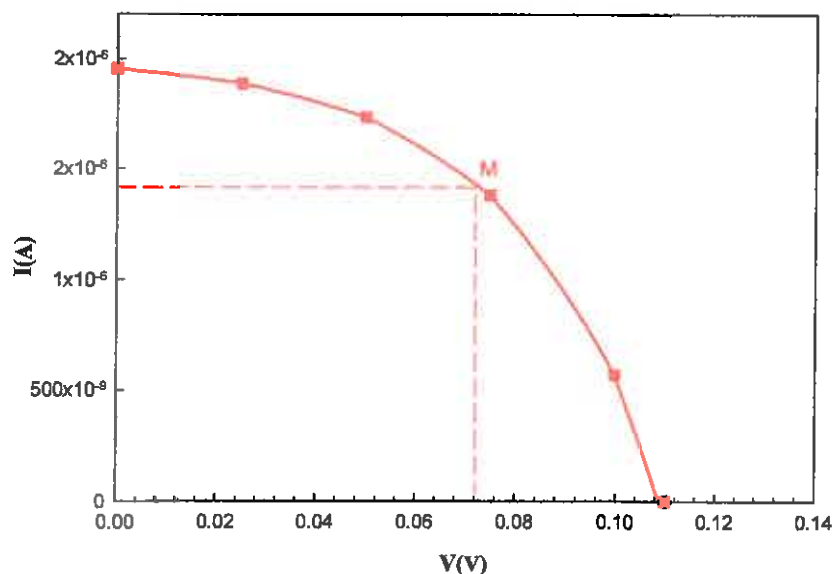
شکل ۴-۱۳- بازتاب سطحی مربوط به نمونه عادی و دو نمونه با ضخامت‌های متفاوت پوسته PS، در شرایط تابش AM1.5 [۲۱].

#### (ب) پوسته متخلخل عمیق:

نمونه مورد بررسی ما در این بخش، سلول خورشیدی  $p^+/n\text{-Si}$  / لایه عمیق PS، گزارش شده توسط کلخوران [۴] است که از نظر روش متخلخل سازی و ابعاد کاملاً مشابه نمونه متخلخل گروه ۲ بوده، لکن ضخامت پوسته سیلیکون متخلخل در این نمونه بیش از  $0.75 \mu\text{m}$  (عمق پیوندگاه) می‌باشد. ساختار هندسی و مشخصه I-V مربوط به این نمونه به ترتیب در شکل‌های ۴-۱۴ و ۴-۱۵ نشان داده شده‌اند.



شکل ۴-۱۴- ساختار هندسی لایه‌های سلول خورشیدی گروه ۲ با ساختار  $p^+/n\text{-Si}$  / پوسته عمیق PS [۴].



شکل ۴-۱۵- مشخصه I-V سلول خورشیدی گروه ۲ با ساختار  $p^+/n\text{-Si}$  پوسته عمیق PS، تحت تابش AM1.5 [۴]. نمودار منطبق شده در داده‌ها همراه با موقعیت نقطه کار M حاصل محاسبات نظری ما است (به متن مراجعه شود).

پارامترهای مربوط به این سلول خورشیدی را نیز با استفاده از معادله ۴-۱ و برازش داده‌ها به روش کمینه‌سازی مجموع مربعات بدست آورده‌ایم که نتایج این محاسبات در جدول ۴-۱۰ آمده است.

جدول ۴-۱۰- پارامترهای محاسبه شده برای سلول خورشیدی گروه ۲ با ساختار  $p^+/n\text{-Si}$  پوسته عمیق PS.

| پارامترها<br>نمونه | $I_m (\mu A)$ | $V_m (V)$ | FF   | $\eta (\%)$ |
|--------------------|---------------|-----------|------|-------------|
| نمونه متخلخل       | ۱/۴۲          | ۰/۰۷۳     | ۰/۴۷ | ۰/۰۰۰۲۳     |

با مقایسه مشخصه I-V مربوط به این ساختار و نمونه عادی (داده‌های مثلی در شکل ۴-۵) و پارامترهای مربوط به این دو قطعه می‌توان دریافت که مقدار  $I_{sc}$  در نمونه با پوسته عمیق سیلیکون متخلخل در حدود  $2 \mu A$  و در نمونه عادی این مقدار  $7 mA$  می‌باشد، که نشانگر تغییرات جریان از محدوده میلی آمپر (در نمونه عادی) به میکروآمپر (در نمونه متخلخل) است. از طرف دیگر مقدار ولتاژ مدار باز در این نمونه نسبت به نمونه عادی به میزان بیش از ۸۰ درصد کاهش یافته است.

در خصوص علت کاهش جریان نوری در این نمونه می‌توان به حضور ستون‌های سیلیکونی در محل تهی لایه اشاره کرد. در این صورت اگرچه جداسازی حامل‌ها همچنان توسط میدان داخلی در

این ناحیه انجام می شود، لکن حضور این ستون ها می توانند نقش موانعی را بر سر راه حرکت حامل های نوری تا پایانه های خروجی ایفا کنند.

بدین ترتیب از مقایسه نمونه متخلخل گروه ۲ (با پوسته متخلخل کم عمق) و این نمونه متخلخل (با پوسته متخلخل عمیق) می توان دریافت که به کارگیری پوسته متخلخل در سلول خورشیدی با ساختار  $p^+/n\text{-Si}$  تنها در صورتی منجر به افزایش بازدهی قطعه می گردد که ضخامت پوسته متخلخل در گستره نانومتری بوده و خلل و فرج ها در پیوندگاه نفوذ نکند.

#### ۴-۲-۴- ضخامت لایه بالایی (گسیلنده)

در این بخش به بررسی تأثیر ضخامت لایه بالایی که به آن لایه گسیلنده نیز گفته می شود، بر مشخصه الکتریکی سلول های خورشیدی گروه ۱ می پردازیم.

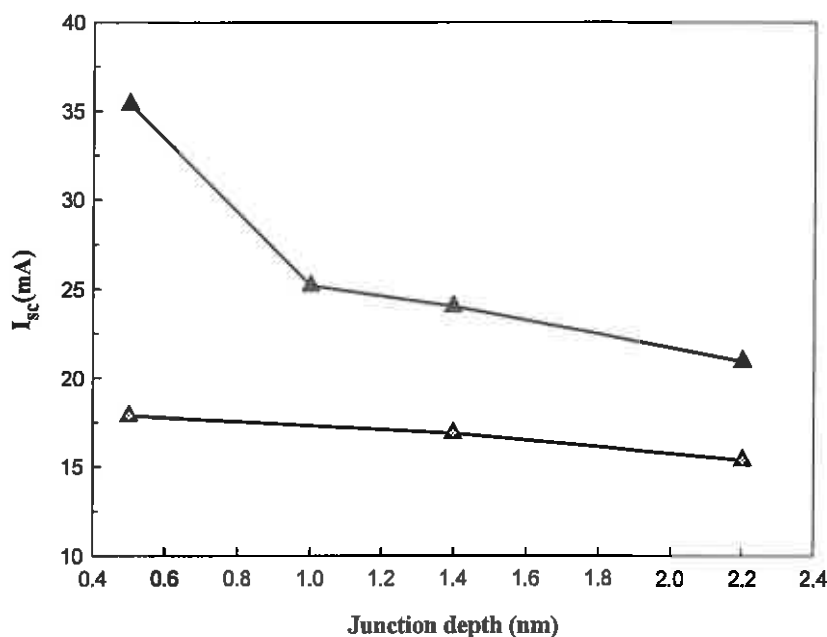
به منظور تعیین نقش ضخامت لایه گسیلنده ( $n^+$ ) در بازدهی این نمونه ها، قطعاتی را که ضخامت لایه  $n^+$  در آنها از ۰/۵ تا ۲/۲ میکرومتر تغییر می کند، در نظر گرفته ایم. در تمامی این قطعات ضخامت پوسته PS ثابت و برابر با ۷۲ nm می باشد [۱۳].

پارامترهای گزارش شده مربوط به نمونه متخلخل و نمونه عادی مربوط به هر قطعه، با ضخامت های متفاوتی از لایه گسیلنده در جدول ۴-۱۱ آمده است (مقادیر مربوط به نمونه عادی وابسته به نمونه متخلخل با لایه گسیلنده ای به ضخامت  $1\ \mu m$  در این مقاله گزارش نشده است) [۱۳].

جدول ۴-۱۱- پارامترهای گزارش شده مربوط به نمونه های متخلخل به همراه نمونه عادی مربوط به هر قطعه بر حسب ضخامت لایه  $n^+$  [۱۳].

| ضخامت لایه $n^+$<br>پارامترها | ۰/۵ ( $\mu m$ ) |       | ۱ ( $\mu m$ ) | ۱/۴ ( $\mu m$ ) |      | ۲/۲ ( $\mu m$ ) |      |
|-------------------------------|-----------------|-------|---------------|-----------------|------|-----------------|------|
|                               | متخلخل          | عادی  | متخلخل        | متخلخل          | عادی | متخلخل          | عادی |
| $I_{sc}$                      | ۳۵/۴۰           | ۱۷/۸۸ | ۲۵/۲۰         | ۲۴/۰۴           | ۱۶/۹ | ۲۰/۹۶           | ۱۵/۴ |
| $V_{oc}$                      | ۰/۵۳            | ۰/۵۱  | ۰/۴۸          | ۰/۴۶            | ۰/۴۵ | ۰/۴۹            | ۰/۴۸ |

تأثیر ضخامت لایه  $n^+$  بر بزرگی جریان مدار اتصال کوتاه در سلول های خورشیدی عادی و متخلخل مورد بررسی ما، در شکل ۴-۱۶ نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۶- جریان مدار اتصال کوتاه در نمونه‌های متخلخل (مثلث توپر) و عادی (مثلث توخالی) بر حسب تابعی از ضخامت لایه  $n^+$

از داده‌های جدول ۴-۱۱ و نمودار شکل ۴-۱۶ می‌توان دریافت که اگرچه با تغییر عمق پیوندگاه در مقدار  $V_{oc}$  تغییر چندانی ملاحظه نمی‌شود، لکن مقدار جریان مدار اتصال کوتاه در نمونه‌های عادی و به ویژه متخلخل با کاهش ضخامت لایه  $n^+$  افزایش می‌یابد. علت این افزایش را می‌توان ناشی از کاهش افت بازترکیب حامل‌ها در لایه گسیلنده دانست.

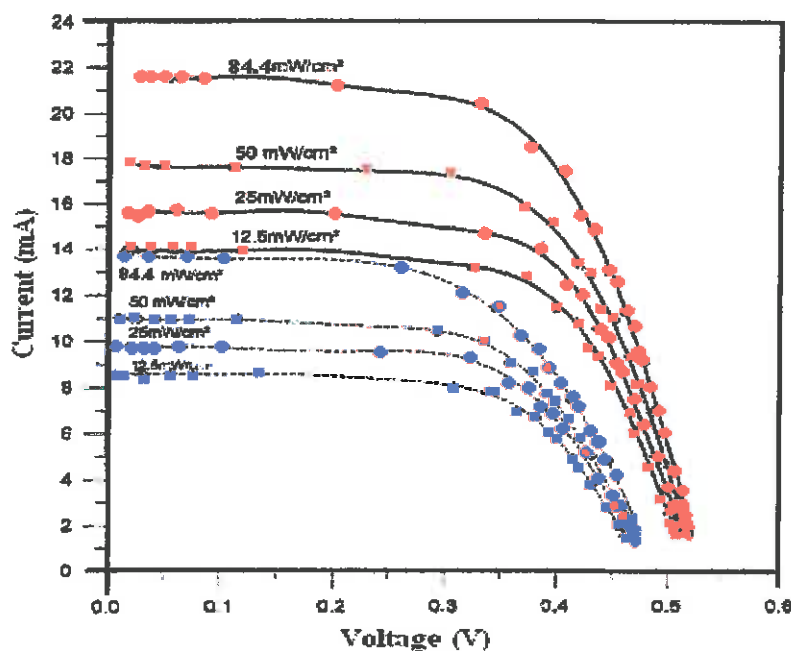
#### ۴-۳- مطالعه بستگی مشخصه الکتریکی به شدت تابش و دما در نمونه‌های

##### متخلخل و غیرمتخلخل

با توجه به این که سلول‌های خورشیدی به هنگام عملگری تحت شدت‌های تابشی متفاوت در شرایط دمایی گوناگونی قرار می‌گیرند، بررسی تأثیر این کمیت‌ها بر خصوصیات الکتریکی آنها حائز اهمیت است. ما در این بخش نخست به بررسی تأثیر شدت تابش فرودی بر مشخصه الکتریکی سلول‌های خورشیدی عادی و متخلخل گروه ۱ پرداخته و در ادامه اثر پارامتر دما را بر این مشخصه مورد مطالعه قرار می‌دهیم.

### ۴-۳-۱- تأثیر شدت تابش بر مشخصه الکتریکی

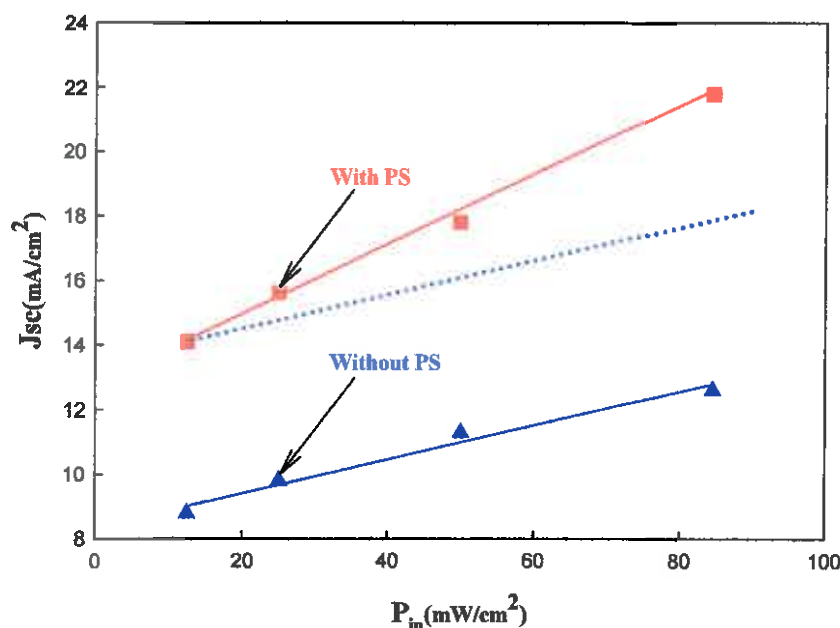
همانطور که در فصل ۳ اشاره شد، یکی از عوامل مؤثر بر بازدهی یک سلول خورشیدی، شدت تابش فوتون‌های فرودی (شار فوتون‌ها) است (معادله ۴-۲). این معادله ارتباط مستقیم افزایش شار تابشی و چگالی جریان مدار اتصال کوتاه را نشان می‌دهد. شکل ۴-۱۷ که مشخصه I-V سلول‌های خورشیدی گروه ۱ (با و بدون تخلخل) [۲]، را تحت تابش‌های گوناگون  $12/5 \text{ mW/cm}^2$ ،  $25 \text{ mW/cm}^2$ ،  $50 \text{ mW/cm}^2$  و  $84/4 \text{ mW/cm}^2$  نشان می‌دهد، مؤید این گفته است.



شکل ۴-۱۷- مشخصه I-V سلول‌های خورشیدی گروه ۱ با پوسته متخلخل (داده‌های قرمز رنگ) و بدون تخلخل (داده‌های آبی رنگ)، تحت تابش‌های  $12/5 \text{ mW/cm}^2$ ،  $25 \text{ mW/cm}^2$ ،  $50 \text{ mW/cm}^2$  و  $84/4 \text{ mW/cm}^2$  [۲].

### الف: چگالی جریان مدار اتصال کوتاه

به منظور ملاحظه هر چه بهتر میزان بستگی چگالی جریان مدار اتصال کوتاه ( $J_{sc}$ ) به شدت تابش فرودی ( $P_{in}$ )، تغییرات  $J_{sc}$  بر حسب تابعی از  $P_{in}$  در شکل ۴-۱۸ برای نمونه متخلخل و عادی رسم شده است. در این شکل خط‌های پررنگ برای مشاهده هر چه ساده تر تغییرات خطی وابسته به داده‌ها و خط نقطه‌چین که به موازات خط وابسته به تغییرات نمونه عادی است، به عنوان راهنمایی برای مقایسه شیب تغییرات  $J_{sc}$  بر حسب  $P_{in}$  در نمونه‌های متخلخل و عادی کشیده شده‌اند.



شکل ۴-۱۸- چگالی جریان مدار اتصال کوتاه بر حسب شدت تابش برای نمونه متخلخل (داده‌های مربعی) و نمونه عادی (داده‌های مثلثی) گروه ۱. خط نقطه چین تنها به منظور مقایسه شیب دو نمودار مربوط به نمونه متخلخل و عادی رسم شده است.

همانگونه که اشاره شد با توجه به داده‌ها و روابط نظری می‌توان انتظار داشت که بین  $J_{sc}$  و  $P_{in}$  رابطه‌ای خطی به صورت زیر برقرار باشد:

$$J_{sc} = \beta P_{in} \quad (4-5)$$

از جایگذاری روابط (۲-۴) و (۳-۱۲) در رابطه (۴-۵) می‌توان  $\beta$  را به صورت کمی به کمک رابطه:

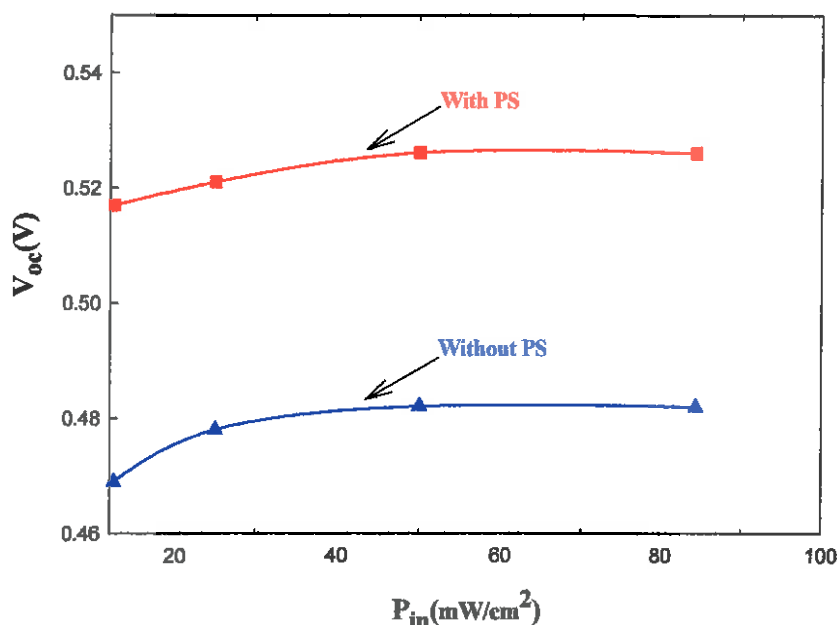
$$\beta = \frac{q \sum_{\lambda} [n_0(\lambda)(1 - R_{\lambda})]}{\sum_{\lambda} \left[ n_0(\lambda) h \frac{c}{\lambda} \right]} \quad (4-6)$$

تعیین کرد. معادله (۴-۶) بیانگر وابستگی  $\beta$  به ضریب بازتابندگی  $R$  است. با توجه به رابطه فوق می‌توان دریافت که در حالت ایده‌آل ( $R_{\lambda} = 0$ )، بیشترین مقدار خود را دارا خواهد بود. به منظور محاسبه  $\beta$  در این حالت، لازم است مقادیر صورت و مخرج کسر این معادله را تعیین کنیم. مقدار صورت کسر در این شرایط عبارت خواهد بود از سطح زیر منحنی در شکل ۴-۱۱. همان گونه که در این شکل نشان داده شده است، این کار با تقسیم محور افقی به بازه‌های  $\Delta E$  به ازای هر انرژی  $E$  امکان پذیر است. با اطلاع از این مساحت‌ها و نیز انرژی میانگین فوتون‌ها در هر بازه و جمع‌بندی بر

روی این مقادیر، مخرج کسر نیز معلوم خواهد شد. بدین ترتیب مقدار  $\beta$  قابل محاسبه خواهد بود. محاسبات ما حاکی از آن است که مقدار  $\beta$  در حالت ایده‌آل برابر  $0.61 \text{ V}^{-1}$  می‌باشد. در یک سلول خورشیدی واقعی به سبب وجود بازتابندگی سطحی مقدار  $\beta$  همواره کمتر از مقدار حالت ایده‌آل آن می‌باشد.  $\beta$  محاسبه شده برای دو نمونه متخلخل و عادی در شکل ۴-۱۸ به ترتیب برابر  $0.47 \text{ V}^{-1}$  و  $0.32 \text{ V}^{-1}$  می‌باشد. بدیهی است که علت بیشتر بودن ضریب  $\beta$  در نمونه متخلخل نسبت به نمونه عادی می‌تواند ناشی از نقش پوسته PS به عنوان پوشش ضد بازتاب باشد.

### ب: ولتاژ مدار باز

به منظور بررسی تأثیر شدت تابش بر ولتاژ مدار باز نیز از داده‌های مربوط به نمونه متخلخل و عادی در شکل ۴-۱۷ استفاده کرده‌ایم. با توجه به مطالب ارائه شده در بخش ۳-۱-۳ انتظار می‌رود که ولتاژ مدار باز با افزایش شدت تابش ابتدا به صورت نمایی افزایش یافته و نهایتاً در یک مقدار ثابت به اشباع برسد. شکل ۴-۱۹ داده‌های وابسته به ولتاژ مدار باز این نمونه‌ها (با و بدون تخلخل) را بر حسب تابعی از شدت تابش نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱۹- ولتاژ مدار باز بر حسب تابعی از شدت تابش برای سلول‌های خورشیدی گروه ۱، با تخلخل (داده‌های مربعی) و بدون تخلخل (داده‌های مثلثی).

از نکات جالب توجه در این داده‌ها آن است که در شدت‌های تابشی یکسان، ولتاژهای مدار باز قطعات در نمونه‌های متخلخل بزرگتر از نمونه‌های عادی بوده و علاوه بر این سرعت تغییرات ولتاژ در نمونه متخلخل در شدت‌های پایین کمتر از نمونه‌های عادی است؛ که این هر دو از مزایای قطعات متخلخل نسبت به قطعات عادی می‌باشد. همانطور که در شکل ۴-۱۹ مشاهده می‌شود، داده‌های مربوط به هر دو نمونه به خوبی با استدلال نظری بخش ۳-۱-۳ سازگار است.

#### ۴-۳-۲- تأثیر دما بر مشخصه الکتریکی

به منظور مطالعه تأثیر دما بر چگالی جریان مدار اتصال کوتاه و ولتاژ مدار باز، از داده‌های گزارش شده برای سلول‌های خورشیدی گروه ۱ استفاده کرده‌ایم. داده‌های وابسته به دما در این قطعات برای نمونه متخلخل (به ضخامت  $72\text{ nm}$ ) و غیرمتخلخل در جدول ۴-۱۲ آمده است [۲].

جدول ۴-۱۲- داده‌های گزارش شده مربوط به بستگی دمایی سلول‌های خورشیدی گروه ۱ (با و بدون تخلخل) [۲].

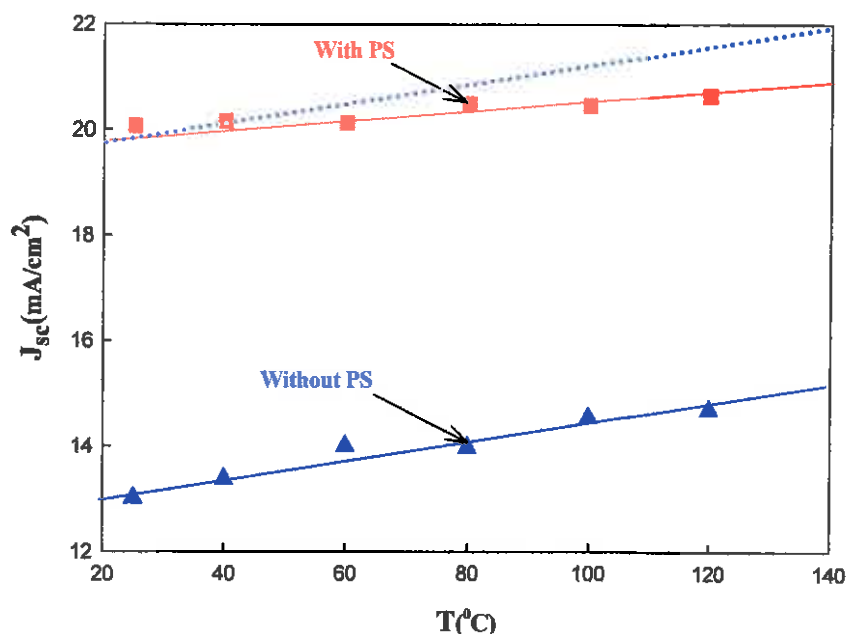
| پارامترها<br>دما (°C) | $J_{sc} (\text{mA/cm}^2)$ |        | $V_{oc} (\text{V})$ |        |
|-----------------------|---------------------------|--------|---------------------|--------|
|                       | عادی                      | متخلخل | عادی                | متخلخل |
| ۲۵                    | ۱۲/۴۷                     | ۲۱/۱۷  | ۰/۴۸                | ۰/۵۳   |
| ۴۰                    | ۱۳/۳۸                     | ۲۰/۱۶  | ۰/۴۶                | ۰/۴۹   |
| ۶۰                    | ۱۴                        | ۲۰/۱۲  | ۰/۳۸                | ۰/۴۴   |
| ۸۰                    | ۱۳/۹۷                     | ۲۰/۴۸  | ۰/۳۵                | ۰/۳۹   |
| ۱۰۰                   | ۱۴/۵۴                     | ۲۰/۴۵  | ۰/۳۰                | ۰/۳۴   |
| ۱۲۰                   | ۱۴/۶۹                     | ۲۰/۶۴  | ۰/۲۵                | ۰/۳۰   |

#### الف: چگالی جریان مدار اتصال کوتاه

شکل ۴-۲۰ نمودار تغییرات چگالی جریان مدار اتصال کوتاه را در این قطعات بر حسب تابعی از دما برای نمونه متخلخل (داده‌های مربعی) و نمونه عادی (داده‌های مثلثی) نشان می‌دهد.

همان طور که از شکل پیداست مقدار  $J_{sc}$  در هر دو دسته قطعات (عادی و متخلخل) با افزایش دما افزایش می‌یابد. یکی از علل این افزایش می‌تواند ناشی از کاهش انرژی گاف نواری ماده نیم‌رسانا با دما باشد [۷]. کوچکتر شدن گاف نواری می‌تواند سبب شود تا تعداد فوتون‌های بیشتری در گستره طیف خورشید قابلیت جذب در نیم‌رسانا را پیدا کرده و منجر به تولید حامل‌های نوری بیشتری شوند. نکته

قابل ذکر دیگر در مورد این داده‌ها این است که تغییرات  $J_{sc}$  با دما در نمونه عادی و نیز شیب نمودار وابسته به آن نسبت به نمونه متخلخل اندکی بیشتر می‌باشد. یکی از پارامترهای مهم در ساخت قطعات اپتوالکترونیکی کاهش اثر تغییرات دما بر عملکرد آن قطعه است، بنابراین استفاده از سلول خورشیدی با ساختار متخلخل می‌تواند از مزیت بیشتری نسبت به نمونه عادی برخوردار باشد.



شکل ۴-۲۰- چگالی جریان مدار اتصال کوتاه بر حسب تابعی از دما برای سلول‌های خورشیدی گروه ۱، متخلخل (داده‌های مربعی) و عادی (داده‌های مثلثی). خط نقطه چین که به موازات خط پر آبی رسم شده است، تنها به منظور مقایسه شیب خطوط آمده است.

### ب: ولتاژ مدار باز

در ادامه به منظور بررسی تأثیر پارامتر دما بر ولتاژ مدار باز، نمودار  $V_{oc}$  را بر حسب تابعی از دما برای سلول‌های خورشیدی گروه ۱، در شکل ۴-۲۱ رسم کرده‌ایم.

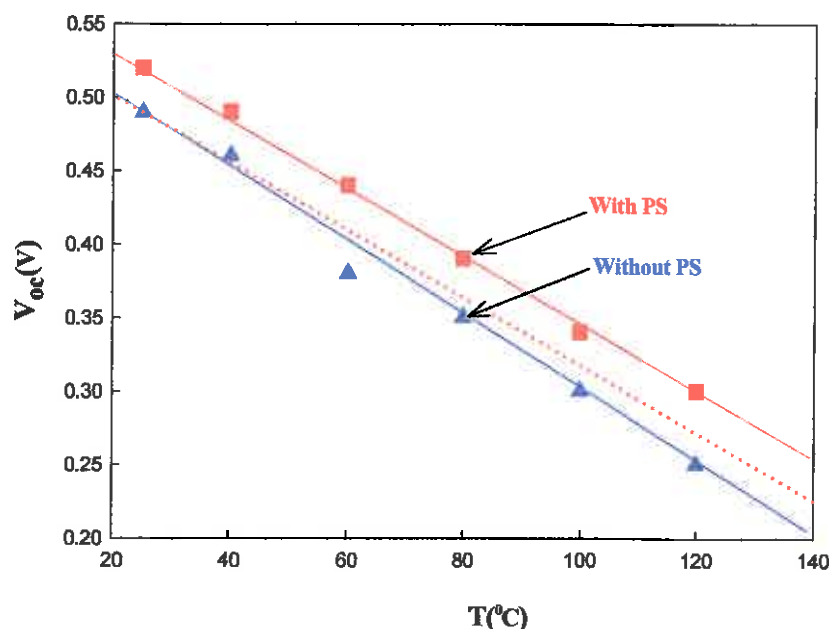
با توجه به رابطه ۳-۸ در نگاه اول به نظر می‌رسد که  $V_{oc}$  با دما نسبت مستقیم داشته باشد، اما با

توجه به رابطه زیر [۷]:

$$I_s = qN_A N_D A \ln \left[ \frac{1}{N_A} \sqrt{\frac{D_n}{\tau_n}} + \frac{1}{N_D} \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}} \right] e^{-E_g / kT} \quad (7-4)$$

ملاحظه می‌شود که با افزایش  $T$ ، مقدار  $I_s$  افزایش می‌یابد. بنابراین با توجه به اینکه نمو افزایش  $I_s$  (در مخرج کسر معادله ۳-۸) بیشتر از افزایش خطی  $T$  (در ضریب  $V_T$ ) می‌باشد، لذا انتظار می‌رود

تغییرات  $V_{oc}$  بر حسب دما یک شیب منفی را نشان دهد. با توجه به شکل ۴-۲۱ می‌توان دریافت که رفتار هر دو نمونه متخلخل و عادی از این نظریه پیروی می‌کنند. نکته دیگر که از این شکل می‌توان دریافت آن است که با توجه به شیب نمودارها بستگی ولتاژ مدار باز با دما در نمونه متخلخل کمتر از نمونه عادی است، که این خود دلیل دیگری بر برتری نمونه متخلخل نسبت به نمونه عادی می‌باشد.



شکل ۴-۲۱- ولتاژ مدار باز بر حسب تابعی از دما برای سلول‌های خورشیدی گروه ۱، با تخلخل (داده‌های مربعی) و بدون تخلخل (داده‌های مثلثی). خط نقطه چین به موازات خط تغییرات نمونه متخلخل می‌باشد.

#### ۴-۴- نتیجه گیری

با مطالعه و آنالیز بر روی مشخصه I-V سلول‌های خورشیدی با ساختارهای  $n^+/p\text{-Si}$  و  $p^+/n\text{-Si}$  دریافتیم که بازدهی نمونه‌هایی که در ساختار آنها از یک پوسته سطحی (در ابعاد نانومتری) سیلیکون متخلخل استفاده شده است در مقایسه با نمونه‌های بدون پوسته متخلخل افزایش یافته است. در خصوص علل این افزایش می‌توان به موارد ذیل اشاره کرد:

(الف) حضور نانو تخلخل‌های لایه بالایی: وجود کاواک‌های تشکیل شده در لایه بالایی می‌تواند سبب افزایش سطح موثر به دام اندازی فوتون‌های فرودی و در نتیجه کاهش بازتاب فوتون‌های نوری از سطح شوند، که این خود سبب افزایش جریان نوری در قطعه می‌گردد.

(ب) تفاوت در بزرگی گاف نواری: بزرگتر بودن گاف نواری سیلیکون متخلخل ( $\sim 1/8\text{ eV}$ ) [۱۰] در مقایسه با Si غیرمتخلخل ( $1/1\text{ eV}$ ) سبب می‌شود، آستانه انرژی فوتون‌های قابل جذب بالا رفته و فوتون‌هایی که انرژی‌شان در گستره  $1/1$  تا  $1/8$  الکترون ولت هستند بتوانند در فواصلی نزدیکتر به پیوندگاه جذب شده و در جریان نوری سلول مشارکت کنند.

(ج) تفاوت در ضریب جذب: ضریب جذب Si متخلخل در طول موج  $700\text{ nm}$  حدود ۲۵ برابر و در طول موج  $450\text{ nm}$  در حدود ۳ برابر کوچکتر از Si غیرمتخلخل است [۱۱]. همین امر سبب می‌شود که لایه متخلخل همانند یک لایه پنجره ای در محدوده نور مرئی خورشید عمل کرده و کسر بزرگتری از فوتون‌ها را به نزدیکی ناحیه فعال برساند [۱۴].

علاوه بر موارد یاد شده کمیت‌هایی مانند مقاومت متوالی قطعه و همچنین ضریب بازتابندگی سطحی نیز می‌توانند در بازدهی سلول تأثیر گذار باشند. نتیجه محاسبات ما در بررسی کمی تأثیر تخلخل بر مقاومت متوالی و بازتابندگی سطحی در نمونه‌های مورد نظر را می‌توان به شرح ذیل خلاصه نمود:

در نمونه با ساختار  $n^+/p\text{-Si}$  (بخش ۴-۲-۱) ملاحظه می‌شود که بزرگی مقاومت متوالی در نمونه متخلخل در حدود  $2/5$  اهم و در نمونه غیرمتخلخل در حدود  $5/5$  اهم است. این کاهش می‌تواند ناشی از کوتاهتر شدن مسیر حرکت حامل‌های نوری و نیز بزرگتر شدن سطح مؤثر تماس اتصال فلز در پایانه بالایی باشد. لکن در نمونه با ساختار  $p^+/n\text{-Si}$  (بخش ۴-۲-۱) مقدار مقاومت متوالی در نمونه

متخلخل (۱۱ اهم) بیشتر از نمونه عادی (۷/۵ اهم) می باشد. علت این تفاوت می تواند ناشی از ساختار هندسی اتصال اهمی در لایه فوقانی باشد که در نمونه های گروه اول اتصالات به صورت دندان شانه ای و در نمونه های اخیر به صورت یک نقطه مرکزی می باشد. در این ساختار ستون های سیلیکونی در سطح نقش مانع را برای حرکت افقی حامل ها ایفا نموده و مقاومت مؤثر قطعه را افزایش داده اند.

در بررسی اثر بازتابندگی سطحی بر روی مشخصه الکتریکی سلول خورشیدی دریافتیم که معادله ۴-۲ بزرگی چگالی جریان مدار اتصال کوتاه وابسته به سه گروه از سلول های خورشیدی را به خوبی پیش بینی می کند. نتایج این محاسبات (بخش ۴-۲-۲) در بردارنده نکات زیر است:

(الف) با کاهش انرژی فوتون ها از  $2/1 \text{ eV}$  تا  $1/4 \text{ eV}$  تقریباً تمامی آنها در لایه بالایی و نیز در محدوده طول پخش حامل های اقلیتی در لایه پایینی جذب می شوند ( $f=1$ )، این مقدار برای سایر فوتون های قابل جذب (تا  $1/1 \text{ eV}$ ) در حدود  $0/85$  می باشد.

(ب) به ازای یک شدت تابش معین (جدول ۴-۶) مقدار  $J_{sc}$  در نمونه های متخلخل همواره بزرگتر از نمونه های عادی است؛ که علت اصلی آن می تواند ناشی از پایین تر بودن ضریب بازتابندگی سطحی در این نمونه ها به سبب وجود نانو تخلخل های سطحی در لایه بالایی آنها باشد. علاوه بر موارد فوق دریافتیم که:

۱- در نمونه های متخلخل گروه ۱، مناسب ترین ضخامت برای پوسته سیلیکون متخلخل برابر  $72$  نانومتر می باشد. در این شرایط مقدار بازتابندگی سطحی کمینه مقدار خود را داراست.

۲- به کارگیری پوسته متخلخل در سلول خورشیدی با ساختار  $p^+/n\text{-Si}$  تنها در صورتی منجر به افزایش بازدهی قطعه می گردد که ضخامت پوسته متخلخل در گستره نانومتری بوده و خلل و فرج ها در پیوندگاه نفوذ نکند. در صورت پیشروی ناحیه متخلخل در تهی لایه، انتظار می رود اگرچه جداسازی حامل ها همچنان توسط میدان داخلی در این ناحیه انجام شود، لکن حضور کواک های ما بین ستون های سیلیکونی مانع حرکت حامل های نوری تا پایانه های خروجی شوند.

۳- مقدار جریان مدار اتصال کوتاه با کاهش ضخامت لایه بالایی (گسیلنده) افزایش می یابد. علت این افزایش می تواند ناشی از کاهش افت باز ترکیب حامل ها در لایه گسیلنده باشد.

۴- در سلول‌های خورشیدی، در شدت‌های تابشی ( $P_{in}$ ) یکسان، بین چگالی جریان مدار اتصال کوتاه ( $J_{sc}$ ) و  $P_{in}$  رابطه‌ای خطی به صورت  $J_{sc} = \beta P_{in}$  برقرار است (بخش ۴-۳-۱). محاسبات ما حاکی از آن است که مقدار  $\beta$  برای یک سلول خورشیدی در حالت ایده‌آل ( $R_d = 0$ ) بازتابندگی برابر  $V^{-1}$  ۰/۶۱ می‌باشد. نتایج تجربی نشانگر آن است که در یک سلول خورشیدی واقعی به سبب وجود بازتابندگی سطحی مقدار  $\beta$  همواره کمتر از مقدار حالت ایده‌آل آن می‌باشد. اگرچه مقدار  $J_{sc}$  همواره با افزایش  $P_{in}$  به طور خطی افزایش می‌یابد، لکن کمیت  $V_{oc}$  در شدت تابش‌های زیاد در یک مقدار ثابت به حالت اشباع میل می‌کند، به طوری که این مقدار در نمونه متخلخل بزرگتر از نمونه عادی است.

۵- با تغییر دما، هم  $J_{sc}$  و هم  $V_{oc}$  تغییر می‌کنند. افزایش دما به افزایش  $J_{sc}$  و به کاهش  $V_{oc}$  منجر می‌شود (شکل‌های ۴-۲۰ و ۴-۲۱). جالب توجه اینکه شیب تغییرات این کمیت‌ها در نمونه‌های متخلخل کمتر از نمونه‌های عادی است؛ که این خود از مزایای قطعه متخلخل می‌باشد.

## مراجع

- 1- A. Goetzberger, 2002: *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 74, 1 – 11.
- 2- P. Vitanov, M. Kamenova, N. Tyutyundzhiev, M. Delibasheva, E. Goranova, M. Peneva, 1997: *Thin Solid Films*, 297, 299.
- 3- N. Koshida, H. Koyama, 1992: *Proc. Mater. Res. Soc. Symp.*, 256, 219.
- 4- N. Kalkhoran, S. Vernon, H. Marusk, W. Halverson: 1994, *IEEE Photovoltaic Specialists Conf.*, 2, 1583.
- 5- G. Ahmad, H. M. Hussein, H. El-Ghetany: 2003: *Renewable Energy* 28, 1159 - 1167.
- 6- B. Chakravarty, J. Tripathi, A. Sharma, R. Kumar, K. Sood, S. Samanta, S. Singh, 2007: *Solar Energy Materials & Solar Cells* 91, 701 - 706.
- 7- S. M. Sze: 1995, *Semiconductor Devices Physics and Technology*, Wiley.
- 8- B. G. Streetman, 1990: *Solid State Electronic Devices*, Prentice – Hall.
- 9- J. Singh, *Semiconductor Optoelectronics*: 1995, McGraw-Hill.
- 10- V. Lehmann, U. Gosele: 1991, *Appl. Phys. Lett.*, 69, 856.
- 11- H. Koyama, M. Araki, Y. Yamamoto, N. Koshida: 1991, *Appl. Phys.*, 30, 3606.
- ۱۲- صالحی نسرين، عشقی حسين، هونگ چين اوى، کنفرانس فیزیک ماده چگال مرکز تحصیلات تکمیلی زنجان - خرداد ۱۳۸۶.
- 13- P. Vitanov, M. Delibasheva, E. Goranova, M. Peneva: 2000, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 61, 213 - 221.
- 14- V. Yerokhov, I. Melnyk: 1999, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 3, 291.

## Abstract

In this project we first introduced the parameters and effective quantities which affect the efficiency of p-n junction silicon solar cells, and then we studied the effect of presence of a surface nano thickness porous layer on the efficiency of such devices. The published papers for a number of research groups working on solar cells with  $n^+/p$ -Si and also  $p^+/n$ -Si structures indicates that the efficiency of those solar cells with a surface porous layer is higher than the common ones. Our quantitative analysis on I-V characteristic show that changes in series resistance and surface reflectivity are the main reasons.

We found: (1) from I-V curve of these devices the series resistance in samples with  $n^+/p$ -Si structures are lower than that in non porous, also in  $p^+/n$ -Si structures. (2) To predict the short circuit current density ( $J_{sc}$ ), using eq. 4-2, surface reflectivity has a very important role. (3) Although the open circuit voltage ( $V_{oc}$ ) saturates for incident light intensity ( $P_{in}$ ) more than  $40 \text{ mW/cm}^2$ , there is a linear relation between  $J_{sc}$  and  $P_{in}$  for all light intensity range (i.e.  $J_{sc} = \beta P_{in}$ ). Our analysis shows for an ideal, nonreflecting surface, device the proportionality factor ( $\beta$ ) is equal  $0.61 \text{ V}^{-1}$  and in real ones, depending on their surface reflectivity, are  $\approx 0.5$  and  $\approx 0.3 \text{ V}^{-1}$  in samples with and without porous layer, respectively.



*Physics Department*  
*Shahrood University of Technology*

# ***Photovoltaic Effect in Porous Silicon Solar Cell***

*By:*

**Nasrin Salehi**

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

***Solid State Physics***

*Under Supervision of:*

**Dr. Hosein Eshghi**  
**Dr. Morteza Izadifard**

*September 2007*