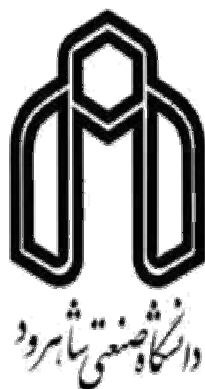


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده : فیزیک

گروه : حالت جامد

اثر فوتوولتایی در سلولهای خورشیدی نیم رساناهای نیتروژندار رقیق

دانشجو : فائزه محمدبیگی

استاد راهنما :

دکتر حسین عشقی

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

تیر ماه ۱۳۸۹

تقدیم به بهترین هایم

پدرم

که آسمان، وسعت و بیکرانگی اش را از قلب او به ودیعه گرفته

مادرم

که گرمای محبتش خورشید را خجل نموده

و

تمامی کسانی که همواره همراه بی منتم بودند.

## تقدیر و تشکر

سپاس پروردگار یگانه را که همواره نسبت به بندگانش لطف فراوان دارد.

تقدیر و سپاس فراوان از استاد بزرگوارم جناب آقای دکتر حسین عشقی که همواره با راهنمایی‌های ارزشمندشان روشنگر راه من بودند، استاد ارجمندی که شاگردی ایشان یکی از بزرگترین افتخارات زندگی من می‌باشد.

از اساتید ارجمند دکتر قاضی و دکتر حسامی که داوری این پایان نامه را تقبل نموده‌اند صمیمانه تشکر می‌نمایم.

لازم می‌دانم از ریاست محترم دانشکده دکتر ایزدی‌فرد و همه اساتیدی که در مدت تحصیل از حضور آنها استفاده نمودم تشکر نمایم.

از دوستان گرامیم در گروه فیزیک و نیز دوستان عزیزم در خوابگاه بسیار ممنون و سپاسگزارم.

دانشجو تأیید می نماید که مطالب مندرج در این پایان نامه ( رساله ) نتیجه تحقیقات خودش می باشد و در صورت استفاده از نتایج دیگران مرجع آن را ذکر نموده است.

کلیه حقوق مادی مترتب از نتایج مطالعات ، آزمایشات و نو آوری ناشی از تحقیق موضوع این پایان نامه ( رساله ) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد .

تیر ۱۳۸۹

## چکیده

با توجه به خواص ویژه مواد نیتروژندار رقیق گروه III-V، نظیر کاهش شدید گاف نواری و افزایش جرم موثر الکترون با افزودن مقدار ناچیزی نیتروژن به ترکیب گروه III-V، و اینکه می‌توان آنها را به صورت همخوان شبکه‌ای با ماده GaAs و Ge رشد داد این مواد را به عنوان کاندیدای خوبی برای کاربردهای سلول خورشیدی ساخته است. جالب توجه آن است که استفاده از زیر سلولهای GaInNAs با گاف نواری بین ۱ تا ۱/۲۵ الکترون ولت می‌تواند به عنوان راهی برای افزایش بازدهی سلولهای خورشیدی سه و یا چهار پیوندگامی باشد. اگر چه هنوز برخی مسائل مانند خواص ضعیف ترابری حاملها و مشکلات آلاینده موانع سر راه پیشرفت این قطعات هستند.

در این پایان نامه به بررسی و محاسبه برخی پارامترهای موثر در سلولهای خورشیدی مبتنی بر مواد نیتروژندار رقیق از جمله عرض ناحیه تهی، طول پخش حامل اقلیت، جریان اتصال کوتاه، جریان تاریکی و ولتاژ مدار باز از طریق مدل‌های نظری وابسته به بازدهی کوانتومی داخلی سلول خورشیدی پرداخته‌ایم. محاسبات ما حاکی از آنست که در سلولهای خورشیدی با ساختار p-n رشد یافته به روش MBE، میزان آلاینش کمتر در لایه نوع n و نیز استفاده از عملیات بازپخت پارامترهای سلول خورشیدی بهبود یافته است. علاوه بر این مشاهده می‌شود که در ساختارهای p-i-n ضخامت لایه i در بهبود بازدهی قطعه موثر است. در فصل اول به مرور بر کارهای انجام شده در این مورد پرداخته و در فصل دوم به طور اجمالی مواد نیتروژندار رقیق Ga(In)NAs را معرفی کرده‌ایم. در فصل سوم با نحوه عملکرد سلولهای خورشیدی آشنا شده و در فصل چهارم روابط و پارامترهای موثر در بازدهی کوانتومی داخلی سلولهای خورشیدی را بیان نموده‌ایم. سرانجام در فصل پنجم به بررسی و تحلیل داده‌های گزارش شده در سلولهای خورشیدی مبتنی بر نیمرساناهای نیتروژندار رقیق Ga(In)NAs با ساختارهای مختلف (p-i-n و p-n) پرداخته‌ایم.

**کلمات کلیدی:** سلول خورشیدی، نیمرساناهای نیتروژندار رقیق، بازدهی کوانتومی، عرض ناحیه تهی و طول پخش حامل اقلیت.

## لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

۱- محمدبیگی فائزه، حسین عشقی، (۱۳۸۸) "تاثیر بازپخت بر افزایش بازدهی کوانتومی داخلی در سلول خورشیدی با نیمرسانای نیتروژندار رقیق با ساختار  $n^+ \text{GaAs/p GaInNAs}$  " کنفرانس فیزیک ایران، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲- محمدبیگی فائزه، حسین عشقی، (۱۳۸۸) " تاثیر تراکم آرایش نوع n بر بازدهی کوانتومی داخلی و مشخصه جریان - ولتاژ سلول‌های خورشیدی p/n با نیمرسانای نیتروژندار رقیق  $\text{GaInNAs}$ " شانزدهمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران، دانشگاه یزد

3- Hosein Eshghi; Faezeh Mohammad beigi (2010) "A quantitative explanation for annealing effect and In incorporation on internal quantum efficiency of dilute nitride  $n^+ \text{GaAs/p Ga(In)NAs}$  solar cells" World renewable energy congress, Abu Dhabi – United Arab Emirates

## فهرست مطالب

عنوان..... صفحه

### فصل ۱- مروری بر مقالات

۱-۱ مقدمه..... ۲

۲-۱ مروری بر کارهای انجام شده..... ۳

### فصل ۲- مروری بر مواد نیتروژندار رقیق

۱-۲ مقدمه..... ۷

۲-۲ بررسی گاف نواری و پارامتر خمش..... ۸

۳-۲ جرم موثر..... ۱۲

۴-۲ تحرک پذیری..... ۱۳

۵-۲ تراکم الکترونی و وابستگی آن به روش رشد در مواد نیتروژندار رقیق..... ۱۴

۱-۵-۲ رشد نیمرسانای  $GaN_xAa_{1-x}$ ..... ۱۶

۲-۵-۲ رشد نیمرسانای  $In_yGa_{1-y}N_xAs_{1-x}$ ..... ۱۶

۶-۲ برخی ویژگی‌های اپتیکی  $GaInNAs$ ..... ۱۷

۷-۲ نقایص در ماده..... ۱۸

### فصل ۳- آشنایی با نحوه عملکرد سلولهای خورشیدی

۱-۳ مقدمه..... ۲۰

۲-۳ طیف خورشید..... ۲۱

۳-۳ جذب نوری در نیمرسانا..... ۲۳

۴-۳ اصول عملگری سلولهای خورشیدی تک پیوندگاهی..... ۲۵

۵-۳ سلول خورشیدی چند پیوندگاهی..... ۲۸



۳-۶ مزایا و معایب سلول‌های خورشیدی..... ۳۰

۳-۷ کاربردهایی از سلول‌های خورشیدی..... ۳۱

#### فصل ۴- روابط و پارامترهای موثر در طراحی سلول‌های خورشیدی

۴-۱ مقدمه..... ۳۵

۴-۲ پارامترهای اساسی در ساختار سلول‌های خورشیدی..... ۳۶

۴-۲-۱ مشخصه جریان - ولتاژ در یک سلول خورشیدی..... ۳۶

۴-۲-۲ جریان مدار اتصال کوتاه (Isc)..... ۳۸

۴-۲-۳ ولتاژ مدار باز (Voc)..... ۳۸

۴-۲-۴ ضریب پرکنندگی (F.F.)..... ۴۰

۴-۲-۵ مشخصه جریان - ولتاژ در سلول خورشیدی واقعی..... ۴۰

۴-۲-۶ بازده ( $\eta$ )..... ۴۲

۴-۲-۷ بازدهی کوانتومی خارجی و داخلی..... ۴۳

۴-۳ عوامل موثر در طراحی بهینه سلول‌های خورشیدی..... ۴۴

۴-۳-۱ ضخامت لایه ها..... ۴۴

۴-۳-۲ چگالی ناخالصی در لایه بالایی..... ۴۶

۴-۳-۳ چگالی ناخالصی در لایه زیرین..... ۴۷

۴-۳-۴ اتصالات اهمی..... ۴۹

۴-۴ عوامل موثر در افت بازده سلول‌های خورشیدی..... ۵۰

۴-۴-۱ تلفات نوری..... ۵۰

۴-۴-۲ تلفات بازترکیب..... ۵۰

۴-۴-۳ تلفات مقاومت‌های متوالی و موازی..... ۵۱

۴-۴-۴ تاثیر دما..... ۵۱

۵-۴ روش‌های بهبود کارایی سلول‌های خورشیدی.....۵۲

۵-۴-۱ استفاده از پوشش‌های ضد بازتاب.....۵۲

۵-۴-۲ استفاده از ساختارهای بهینه.....۵۴

## فصل ۵- بررسی و تحلیل داده‌های سلولهای خورشیدی مبتنی بر نیمرساناهای نیتروژندار

### رقیق

۱-۵ مقدمه.....۵۶

۲-۵ مطالعه پارامترهای موثر بر بازدهی کوانتومی داخلی سلول‌های خورشیدی.....۵۷

۱-۲-۵ اثر بازپخت و حضور اتمهای In در سلولهای با ساختار ناهمگون n+p تهیه شده به

روش MOVPE.....۵۷

۲-۲-۵ اثر تراکم آلایش در سلولهای با ساختار همگون p-n تهیه شده به روش MOVPE.....۶۴

۳-۲-۵ بررسی ساختارهای مختلف سلولهای خورشیدی و اثر آن بر بازدهی کوانتومی.....۶۷

۴-۲-۵ بررسی تاثیر روش رشد ( MBE و MOVPE ) بر بازدهی کوانتومی داخلی در سلولهای

خورشیدی نیتروژندار رقیق GaInNAs با ساختار p-i-n.....۷۲

۳-۵ مطالعه مشخصه جریان-ولتاژ در سلول‌های خورشیدی با ساختار همگون p-n.....۷۷

۱-۳-۵ تاثیر تراکم آلایش در لایه نوع n بر مشخصه جریان-ولتاژ پیوندگاه همگون p-n.....۷۷

۲-۳-۵ اثر جمع‌آوری به کمک میدان بر مشخصه جریان-ولتاژ.....۷۹

۴-۵ بررسی اثر دما بر ولتاژ مدار باز سلول‌های خورشیدی.....۸۳

نتیجه‌گیری.....۸۶

مراجع.....۸۸

## فهرست اشکال

صفحه

- شکل ۱-۲- رابطه پاشندگی در آلیاژ  $\text{GaAs}_{1-x}\text{N}_x$  به ازای  $x = 0.1$ . خطوط بریده و نقطه چین به ترتیب موقعیت انرژیهای غیر اختلالی نیمرسانای میزبان GaAs و ترازهای N را نشان می دهند. ۱۰
- شکل ۲-۲- گاف نواری بر حسب ثابت شبکه برای GaNAs، InGaAs و InGaNAs رشد یافته بر روی زیرلایه GaAs در ناحیه سایه خورده در زیر خط آلیاژی GaNAs و InGaAs، می توان ترکیب چهارتایی InGaNAs را رشد داد. ۱۱
- شکل ۳-۲- تغییرات جرم موثر در GaNAs بر حسب گاف نواری ۱۲
- شکل ۴-۲- تغییرات تحرک پذیری الکترونی در GaNAs بر حسب کسر مولی نیتروژن ۱۳
- شکل ۵-۲- مقایسه غلظت کربن و هیدروژن برای GaInNAs رشد یافته به روش MOVPE و MBE ۱۴
- شکل ۶-۲- تغییرات تراکم حامل آزاد در ماده GaNAs به صورت تابعی از غلظت نیتروژن در دمای اتاق ۱۵
- شکل ۷-۲- ضریب جذب برای GaAs و ترکیبات  $\text{GaInN}_x\text{As}_{1-x}$  با مقادیر مختلف نیتروژن ( $x$ ) (منحنی اول از سمت است طیف جذب GaAs و سایر منحنی ها مربوط به ترکیبات  $\text{GaInN}_x\text{As}_{1-x}$  بوده که با افزایش  $x$  به سمت چپ جابه جا می شوند). ۱۷
- شکل ۱-۳- نمودار طیف امواج الکترومغناطیسی از ناحیه فرابنفش تا ناحیه فروسرخ ۲۱
- شکل ۲-۳- منحنی های مربوط به تابندگی خورشید در شرایط AM1 و AM0 ۲۲
- شکل ۳-۳- منحنی مربوط به شدت گسیلی طیف خورشید در شرایط AM1.5، به همراه با منحنی طیف جسم سیاه در دمای ۵۸۰۰ کلوین ۲۲
- شکل ۴-۳- فرایند جذب نور (الف) نیمرسانای تحت تابش (ب) تغییرات کاهشی نمایی شار فوتونها در حین عبور در داخل ماده ۲۳
- شکل ۵-۳- ضرایب جذب نوری برای مواد نیمرسانای گوناگون ۲۴
- شکل ۶-۳- یک دیود نوری با پیوندگاه p-n تحت تابش در حالت فوتولتایی ۲۵
- شکل ۷-۳- یک دیود نوری با پیوندگاه p-n تحت تابش در حالت فوتولتایی ۲۶
- شکل ۸-۳- مشخصه جریان - ولتاژ یک سلول خورشیدی در شرایط تاریکی و تابش نور ۲۷
- شکل ۹-۳- بازدهی ایده آل محاسبه شده بر حسب گاف نواری برای یک سلول خورشیدی تک پیوندگاهی ۲۷
- شکل ۱۰-۳- ساختارهای (الف) پیوندگاه همگون (ب) پیوندگاه ناهمگون ۲۸
- شکل ۱۱-۳- ساختار سلول خورشیدی (الف) سه پیوندگاهی با بازدهی ایده آل ۴۶/۲٪، (ب) چهارپیوندگاهی با بازدهی ایده آل ۴۹/۴٪ و (ج) سه پیوندگاهی با بازدهی ایده آل ۴۹/۲٪ ۳۰

- شکل ۳-۱۲- نمونه‌ای از کاربرد اثر فوتوولتایی در تامین برق یک تلفن ثابت بین راهی ۳۱
- شکل ۳-۱۳- یک کلبه کوهستانی مجهز به سیستم فوتوولتایی در آلمان ۳۲
- شکل ۳-۱۴- سیستم فوتوولتایی به کار گرفته شده برای تامین برق مورد نیاز در تهیه آب آشامیدنی ۳۲
- شکل ۳-۱۵- ایستگاه فضایی بین‌المللی ۳۳
- شکل ۴-۱- (الف) مشخصه جریان - ولتاژ یک سلول خورشیدی تحت تابش. تصویر (ب) وارونه بخش مربوط به ربع چهارم در شکل (الف) حول محور ولتاژ ۳۷
- شکل ۴-۲- تغییرات  $V_{oc}$  و  $J_{sc}$  بر حسب توان تابشی فرودی ۳۹
- شکل ۴-۳- مدار معادل یک سلول خورشیدی واقعی به همراه مقاومتهای متوالی و موازی ۴۱
- شکل ۴-۴- مشخصه جریان - ولتاژ در یک سلول خورشیدی ایده‌آل و تاثیر وجود هر کدام از مقاومتهای (الف) متوالی و (ب) موازی در یک سلول خورشیدی واقعی بر آن ۴۱
- شکل ۴-۵- نمودار شماتیک یک سلول خورشیدی ۴۵
- شکل ۴-۶- مسیر جریان در یک سلول خورشیدی با ساختار p-n ۴۷
- شکل ۴-۷- طرح یک سلول خورشیدی با اتصالات اهمی شانه ای شکل ۴۹
- شکل ۵-۱- ساختار هندسی سلول خورشیدی با ساختار ناهمگون  $n^+p$  ۵۸
- شکل ۵-۲- بازدهی کوانتومی داخلی سلول خورشیدی برای ماده In دار در شرایط قبل و بعد از بازپخت (مربعهای سفید و سیاه) و برای ماده بدون In در شرایط قبل و بعد از بازپخت (دایره‌های سفید و سیاه) ۵۹
- شکل ۵-۳- تغییرات ضریب جذب بر حسب تابعی از انرژی فوتونهای نوری برای نیمرساناهای GaAs و GaNAs و Ga(In)NAs. منحنیهای خط نقطه‌چین مربوط به شرایط قبل از بازپخت و خط‌چین پس از بازپخت است ۶۰
- شکل ۵-۴- بازدهی کوانتومی داخلی سلول خورشیدی بر حسب تابعی از انرژی فوتونهای نور تابشی در شرایط قبل و بعد از بازپخت برای نمونه‌های (الف و ب) GaNAs و (ج و د) GaInNAs. هر یک از منحنی‌ها در این شکلها رفتار انتظاری نظری قطعه را به ازای یک عرض ناحیه تهی معین (W) بر حسب میکرون نشان می‌دهد ۶۲
- شکل ۵-۵- طیف بازدهی کوانتومی داخلی برای سلول خورشیدی نمونه اول (داده‌های مربعی) و نمونه دوم (داده‌های دایره‌ای) ۶۵
- شکل ۵-۶- تغییرات ضریب جذب بر حسب تابعی از انرژی فوتونهای نوری برای نیمرسانای GaInNAs نمونه اول (خط‌چین) و نمونه دوم (خط نقطه‌چین) و GaAs خط پر ۶۶

- شکل ۵-۷- بازدهی کوانتومی داخلی برای سلول خورشیدی نمونه اول (مربع‌های تو پر) و نمونه دوم (دایره‌های توپر). هر یک از منحنی‌ها در این شکل رفتار انتظاری نظری قطعه را به ازای یک عرض ناحیه تهی معین ( $W$ ) بر حسب میکرون نشان می‌دهد
- شکل ۵-۸- ساختار (الف) لایه‌ای و (ب) نواری نمونه‌های با اتصال p-n و p-i-n
- شکل ۵-۹- بازدهی کوانتومی خارجی برای سلول خورشیدی با ساختار p-i-n (مربع‌های سفید) و ساختار pn (مربع‌های سیاه)
- شکل ۵-۱۰- طیف جذب ماده GaInNAs نظری ما برای قطعات مورد بررسی
- شکل ۵-۱۱- بازدهی کوانتومی خارجی برای سلول خورشیدی p-n. هر یک از منحنی‌ها در این شکل رفتار انتظاری نظری قطعه را به ازای یک عرض ناحیه تهی معین ( $W$ ) بر حسب میکرون نشان می‌دهد
- شکل ۵-۱۲- بازدهی کوانتومی خارجی برای سلول خورشیدی p-i-n. هر یک از منحنی‌ها در این شکل رفتار انتظاری نظری قطعه را به ازای یک عرض ناحیه تهی معین ( $W$ ) بر حسب میکرون نشان می‌دهد
- شکل ۵-۱۳- بازدهی کوانتومی برای سلول خورشیدی با ساختار p-i-n رشد یافته به روش MBE (مربع‌های تو پر) و رشد یافته به روش MOVPE (مربع‌های تو خالی)
- شکل ۵-۱۴- تغییرات ضریب جذب بر حسب تابعی از انرژی فوتونهای نوری برای نیمرساناهای GaAs (خط پر) و GaInNAs رشد یافته به روش MBE (خط پر) و به روش MOVPE (خط نقطه چین)
- شکل ۵-۱۵- بازدهی کوانتومی سلولهای خورشیدی بر حسب تابعی از انرژی نور تابشی در (الف) نمونه رشد یافته به روش MBE و (ب) نمونه رشد یافته به روش MOVPE. هر یک از منحنیها در این شکلها رفتار انتظاری نظری قطعه را به ازای یک پارامتر برازشی معین بر حسب میکرون نشان می دهد
- شکل ۵-۱۶- مشخصه جریان-ولتاژ سلولهای خورشیدی برای نمونه اول (داده‌های مربعی) و نمونه دوم (داده‌های دایره‌ای). نمودارهای منطبق شده در داده‌ها حاصل محاسبات نظری ما است (به متن مراجعه شود)
- شکل ۵-۱۷- ساختار هندسی سلول خورشیدی
- شکل ۵-۱۸- (الف) بازدهی کوانتومی داخلی و (ب) مشخصه I-V برای سلول خورشیدی  $\text{GaInN}_x\text{As}_{1-x}$  برای نمونه اول (داده‌های دایره‌ای) و نمونه دوم (داده‌های مربعی)
- شکل ۵-۱۹- تغییرات شار فوتونهای فرودی بر سطح سلول خورشیدی در شرایط AM1.5 (به متن مراجعه شود)
- شکل ۵-۲۰- نحوه تغییرات گف نواری بر حسب تابعی از دما برای سلول خورشیدی بخش ۵-۲-۳.
- شکل ۵-۲۱- محاسبات نظری مربوط به تغییرات ولتاژ مدار باز بر حسب تابعی از دما برای سلول خورشیدی معرفی شده در بخش ۵-۲-۳

## فهرست جداول

صفحه

- ۹ جدول ۱-۲. بخشی از جدول تناوبی که عناصر به کار رفته در مواد نیمرسانا را نشان می‌دهد
- ۵۳ جدول ۱-۴. مواد مورد استفاده به عنوان پوششهای ضد بازتاب (AR) در سلولهای خورشیدی
- ۶۰ جدول ۱-۵. گاف نواری، ولتاژ مدار باز و طول پخش حاملها در نمونه‌های مورد مطالعه قبل و بعد از بازیخت
- ۷۶ جدول ۲-۵. کمیت‌های محاسبه شده (کمیت‌های ستاره دار \*) به همراه مقادیر گزارش شده در هر نمونه
- ۷۸ جدول ۳-۵. ضریب ایده‌آلی (n) و چگالی جریان تاریکی ( $J_0$ ) در قطعات مورد بررسی
- ۸۰ جدول ۴-۵. گزارش شده شامل جریان اتصال کوتاه، ولتاژ مدار باز و ضریب ایده‌آلی مربوط به نمونه‌های ۱ و ۲
- ۸۲ جدول ۵-۵. چگالی جریان اتصال کوتاه گزارش شده و محاسبه شده ما در نمونه‌های مورد بررسی
- ۸۳ جدول ۶-۵. برخی پارامترهای گزارش شده در نمونه در دمای  $T=300K$

## فهرست علائم

$E_{ph}$	انرژی فوتون
$q$	بار الکتریکی الکترون
$R$	بازتابندگی سطحی
$\eta$	بازده
$IQE$	بازده کوانتومی داخلی
$EQE$	بازدهی کوانتومی خارجی
$\mu$	تحرک پذیری
$N_a$	تراکم آرایش پذیرنده
$N_d$	تراکم آرایش دهنده
$P_{in}$	توان فرودی
$P_m$	توان ماکزیمم
$k_B$	ثابت بولتزمن
$h$	ثابت پلانک
$m^*$	جرم موثر
$I_L$	جریان اتصال کوتاه
$I_o$	جریان اشباع معکوس
$I_d$	جریان دیودی
$I_m$	جریان ماکزیمم
$J_{sc} \equiv J_L$	چگالی جریان اتصال کوتاه
$T$	دما
$S$	سرعت بازترکیب سطحی
$\phi_o$	شار فوتونهای فرودی
$n$	ضریب ایده‌آلی

$D$	ضریب پخش حامل اقلیت
$\alpha$	ضریب جذب
$L$	طول پخش حامل اقلیتی
$\tau$	طول عمر حامل اقلیتی
$\lambda$	طول موج فوتون
$W$	عرض ناحیه تهی
$E_a$	عمق تراز تله
$F.F.$	فاکتور پرکنندگی
$E_g$	گاف نواری
$R_s$	مقاومت سری
$R_{sh}$	مقاومت شانت
$E_o$	میدان الکتریکی در پیوندگاه
$V_m$	ولتاژ ماکزیمم
$V_{oc}$	ولتاژ مدار باز



# فصل ۱

مروری بر مقالات

## ۱-۱- مقدمه

سلول‌های خورشیدی سه پیوندگامی GaInP/GaAs/Ge در حال حاضر رکورد بالاترین بازدهی (۳۲/۴٪) را در جهان به خود اختصاص داده اند [۱]. انتظار می‌رود نسل بعدی سلول‌های خورشیدی با استفاده از موادی با گاف نواری مناسب از مواد نیمرسانای گروه III-V با گاف نواری بین Ge و GaAs بتواند به بازدهی بیشتری دست یابد. وجود این پیوندگاه اضافی با گاف نواری در حدود ۱ تا ۱/۴ eV امکان استفاده بیشتر از طیف خورشید را فراهم می‌سازد. در دهه اخیر با کشف مواد نیمرسانای گروه III-V که با افزودن مقدار کمی نیتروژن (کوچکتر از ۰.۲٪) گاف نواری ماده رو به کاهش می‌گذارد و همچنین با افزوده شدن اتمهای In انطباق ثابت شبکه با GaAs حاصل می‌آید، طیف جدیدی از قطعات امکان پذیر شده است. بدین ترتیب به نظر می‌رسد که ماده نیمرسانای نیتروژندار رقیق GaInNAs ماده‌ای مناسب برای سلول‌های خورشیدی نسل جدید باشد.

پایه و اساس عملکرد اغلب سلول‌های خورشیدی جمع‌آوری حاملها در پیوندگاه p-n می‌باشد، اما اثرات نامطلوب نیتروژن بر خواص ترابری حاملها از جمله طول پخش و طول عمر آنها تحقق این امر را در این سلولها با مشکلاتی مواجه ساخته است [۲]. از سازوکارهای بازدارنده در بازدهی قطعه می‌توان به مواردی از جمله نقصهای بلوری وابسته به تنشهای ناشی از عدم انطباق ثابت شبکه لایه‌های مجاور، نقایص نقطه‌ای ناشی از حضور اتمهای نیتروژن به ویژه ایجاد ترازهای تله‌های عمیق در این مواد اشاره نمود که لازم است برای بالا بردن بازدهی سلول آنها را به کمترین مقدار خود رسانید.

به منظور بهینه سازی یک سلول خورشیدی چندپیوندگامی و بالا بردن بازدهی آن باید هر یک

از پیوندگاههای به کار رفته در آن بهینه شوند. در اینجا ما به بررسی کارهای انجام شده در رابطه با روشهای بهینه سازی سلولهای خورشیدی نیمرسانای نیتروژندار رقیق به منظور الحاق آن به یک ساختار چند پیوندگاهی پرداخته‌ایم.

## ۱-۲- مروری بر کارهای انجام شده

در سلولهای خورشیدی گزارش شده توسط فرایدمن و کورتز [۱] که به روش MOVPE و با ساختار p-n رشد داده شده‌اند با افزایش درصد نیتروژن از ۲٪ به ۳٪ در GaInNAs، گاف نواری از  $1.07\text{eV}$  به  $1.02\text{eV}$  کاهش یافته است. در این دو سلول خورشیدی جریانهای اتصال کوتاه به ترتیب  $9.50$  و  $13.2\text{mA/cm}^2$  و ولتاژ مدار باز نیز به ترتیب برابر  $0.371$  و  $0.316\text{V}$  گزارش شده است. n ضریب ایده‌آلی در این قطعات که از مشخصه جریان-ولتاژ تاریک به دست آمده است به ترتیب برابر  $1/35$  و  $1/5$  می‌باشد [۱]. آنها همچنین در یافتن نمونه‌هایی با ویژگیهای مناسبتر در ساختار p-n مبادرت به تغییرتراکم آلاینش در لایه نوع n نموده‌اند [۳]. نتایج اندازه‌گیری حاکی از آن است که جریان اتصال کوتاه و ولتاژ مدار باز به ترتیب برای قطعه با آلاینش کمتر  $6.5\text{mA/cm}^2$  و  $0.294\text{V}$  و برای قطعه با آلاینش بیشتر  $1.8\text{mA/cm}^2$  و  $0.353\text{V}$  می‌باشد [۳]. چنانچه ملاحظه می‌شود در نمونه با آلاینش کمتر جریان اتصال کوتاه افزایش یافته لکن ولتاژ مدار باز قدری کاهش یافته است.

همانطور که گفته شد یکی از عوامل کاهش بازدهی سلولهای خورشیدی مواد نیمرسانای نیتروژندار آن است که با اضافه شدن نیتروژن به ماده، به منظور کاهش گاف نواری آن، نقایص نقطه‌ای در نقش مراکز شبه-ناخالصیهای بخشنده و پذیرنده افزایش می‌یابند [۴]. یک راه برای کاهش این نقایص عمل بازپخت می‌باشد. خوان و همکاران [۴] با انجام این عمل بر روی GaNAs و GaInNAs نوع p- رشد یافته به روش MOCVD دریافتند طول پخش حاملها در ساختار GaAs n<sup>+</sup>-p GaInNAs از  $0.06\mu\text{m}$  قبل از بازپخت به  $0.21\mu\text{m}$  پس از بازپخت ارتقا یافته و حاصل آن افزایش بازدهی کوانتومی قطعه است [۴]. در همین زمینه کورتز و همکارانش [۵] به بررسی نمونه‌های n-p از مواد

GaInNAs که به روش MOCVD رشد یافته بودند، پرداخته‌اند. آنها دریافتند که عرض ناحیه تهی در این قطعات از  $0.15\mu\text{m}$  قبل از بازپخت به  $0.26\mu\text{m}$  بعد از بازپخت می‌رسد [۵]. این نتایج نشانگر آن است که عملیات بازپخت موجب بهبود پارامترهای موثر در بازدهی سلول خورشیدی وابسته به مواد نیتروژندار رقیق گردیده است.

در مواردی که طول پخش حاملهای اقلیت در ماده جاذب فوتونهای نوری کوچک باشد جمع‌آوری حاملها تنها محدود به تهی لایه خواهد بود. یکی از راههای رفع این اشکال استفاده از ساختار p-i-n است (لایه i یک لایه ذاتی بدون ناخالصی خواسته است). در این مورد سلول خورشیدی گزارش شده توسط باور و همکاران [۶] با ساختار p-i-n که به روش MOVPE رشد یافته است ضخامت لایه i در حدود ۳۰۰ نانومتر می‌باشد. آنها با تهیه این نمونه موفق به کسب قطعه‌ای با بازدهی کوانتومی داخلی و جریان اتصال کوتاه  $7.9\text{mA}/\text{cm}^2$  شده‌اند. پیتک و همکارانش [۷] نیز مبادرت به تحقیق در همین ساختار (p-i-n) به روش MBE با یک لایه ضخیم i، نموده‌اند. آنها توانستند قطعه‌ای با بازدهی کوانتومی داخلی نزدیک به یک با جریان اتصال کوتاه  $6.64\text{mA}/\text{cm}^2$  را بدست آورند.

میاشیتا و همکاران [۸] نیز به بررسی تاثیر ضخامت لایه i در رفتار سلول خورشیدی با ساختار p-GaAs/i-n-GaInNAs پرداخته‌اند. آنها از لایه i با ضخامتهای مختلف (۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر) استفاده کرده‌اند. آنها سلولهای خود را به روش RF-MBE بر روی زیرلایه (۱۰۰) GaAs تهیه کرده‌اند. نتایج آنها نشانگر آن است که با افزایش ضخامت لایه i بازدهی کوانتومی افزایش یافته است، به طوری که به ازای ضخامت ۶۰۰ نانومتر مقدار بازدهی کوانتومی قطعه به بیش از ۸۰٪ و در نمودار جریان-ولتاژ بیان کننده جریان اتصال کوتاه به  $22.5\text{mA}/\text{cm}^2$  و ولتاژ مدار باز به  $0.73\text{V}$  می‌رسد.

یکی دیگر از مواد شناخته شده که دارای گاف نواری بین  $0.9\text{eV}$  تا  $1.3\text{eV}$  است در حالی که به طور همزمان دارای انطباق شبکه‌ای با Ge هستند مواد نیتروژندار رقیق GaInNAsSb می‌باشند. بازدهی کوانتومی داخلی در این سلولها حدوداً به ۸۰ درصد می‌رسد [۹]. جریان اتصال کوتاه برای این سلول تحت GaAs در یک ساختار چند پیوندگاهی برابر  $14.8\text{mA}/\text{cm}^2$  گزارش شده است. هر چند

ولتاژ مدار باز در این سلول  $0.287V$  است که در مقایسه با سلول GaInNAs با گاف نواری  $1.03eV$  کاهش یافته است. عرض ناحیه تهی برای قطعه GaInNAsSb  $0.44\mu m$  و برای قطعه GaInNAs  $0.28\mu m$  اندازه‌گیری شده است. قطعه GaInNAsSb ناحیه تهی بزرگتری دارد که بازدهی جمع‌آوری را افزایش می‌دهد، اما به طور معکوس روی جریان تاریک با افزایش بازترکیب در ناحیه تهی اثر می‌گذارد. با استفاده از مشخصه جریان-ولتاژ تاریک در این قطعه می‌توان n ضریب ایده‌آل را تخمین زد. که به ترتیب برای GaInNAs و GaInNAsSb این کمیت  $1/36$  و  $1/54$  گزارش شده است [۹].

## فصل ۲

معرفی مواد نیمرسانای نیتروژندار رقیق

## ۲-۱- مقدمه

نیمرساناها از جمله ترکیباتی هستند که نقش زیادی در پیشرفتهای اخیر در زمینه قطعات الکترونیکی و اپتوالکترونیکی داشته‌اند. از جمله کاربردهای این مواد می‌توان به حسگرهای نوری و گازی، سلولهای خورشیدی، قطعات جامد نورگسیل<sup>۱</sup> نظیر دیودهای گسیلنده نور<sup>۲</sup> و دیودهای لیزری<sup>۳</sup> اشاره کرد. با ترکیب دو یا چند نیمرسانا با یکدیگر این امکان وجود دارد که بتوان یک نیمرسانای آلیاژی تهیه کرد. با این روش می‌توان گاف نواری نیمرسانا را، که خواص الکترونیکی و نوری به آن وابسته است، کنترل نمود.

GaAs یکی از مهمترین نیمرساناهای ترکیبی<sup>۴</sup> با ساختار زینک بلند<sup>۵</sup> است که با داشتن گاف نواری مستقیم<sup>۶</sup>، در مقایسه با نیمرساناهای عنصری نظیر Si و Ge در قطعات اپتوالکترونیکی از بازدهی نوری بالاتری برخوردار است. این ماده همچنین به علت بهره‌مندی از تحرک الکترونی<sup>۷</sup> بزرگتر می‌تواند در مقایسه با سیلیکون و ژرمانیوم در قطعات الکترونیکی کارا تر باشد. از دیگر ویژگیهای این ماده قابلیت آلیاژ شدن آن با عناصر گروه III مانند In و Al، و گروه V مانند P و Sb است. از این خاصیت در کنترل بزرگی گاف انرژی ماده‌ی آلیاژی استفاده می‌شود [۱۰].

---

<sup>۱</sup>Solid state light emitting devices

<sup>۲</sup>Light emitting diodes

<sup>۳</sup>Laser diodes

<sup>۴</sup>Compound semiconductors

<sup>۵</sup>Zinc-blend

<sup>۶</sup>Direct band gap

<sup>۷</sup>Mobility

در اوایل دهه ۱۹۹۰ میلادی تاثیر حضور نیتروژن (از دیگر عناصر گروه V) به مقدار ناچیز (کمتر از ۵ درصد) به GaAs مورد بررسی قرار گرفت. گزارشات تجربی [۱۱و۱۲] در این زمینه بیانگر کاهش قابل ملاحظه‌ی گاف نواری برای این ترکیبات ( $\text{GaN}_x\text{As}_{1-x}$ ) است که رفتاری متفاوت با نیمرساناهای آلیاژی معمول دارد [۱۳]. امروزه به این ترکیبات نیمرساناهای نیتروژندار رقیق<sup>۱</sup> گفته می‌شود. این نیمرساناها که به صورت کلی III-V-N نمایش داده می‌شوند، می‌توانند در ترکیب آلیاژهای سه‌تایی مانند:  $\text{GaN}_x\text{As}_{1-x}$ ،  $\text{GaN}_x\text{P}_{1-x}$  و چهارتایی مانند:  $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}_x\text{As}_{1-x}$ ،  $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}_x\text{As}_{1-x}$  و  $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}_x\text{P}_{1-x}$ ،  $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}_x\text{As}_{1-x}$  و ... رشد داده شوند. اضافه شدن نیتروژن به میزان کم می‌تواند رفتارهای غیر عادی دیگری مانند: بزرگی قابل توجه پارامتر خمش<sup>۲</sup> در گاف نواری، افزایش جرم موثر و کاهش تحرک الکترونی و تراکم را به دنبال داشته باشد [۱۱]. در ادامه به بررسی هر یک از این پارامترها می‌پردازیم.

## ۲-۲- گاف نواری و پارامتر خمش

در بیشتر آلیاژهای نیمرسانای سه تایی  $A_{1-x}B_xC$ ، گاف نواری واقعی  $E_g^{ABC}(x)$  از گاف نواری میانگین  $\bar{E}_g^{ABC}(x) = (1-x)E_g^{AC} + xE_g^{AB}$  به اندازه  $\Delta E_g(x) = E_g^{ABC}(x) - \bar{E}_g^{ABC}(x) = bx(1-x)$  متفاوت است که در آن پارامتر خمش بوده و معمولاً مقداری کمتر از ۱ eV دارد (جدول ۲-۱) [۱۴]. همان گونه که گفته شد در آلیاژهای نیمرسانای III-V جانشینی عنصر گروه V با اتمهای نیتروژن منجر به افزایش قابل توجه پارامتر خمش (تقریباً ۲۶ eV) و کاهش گاف نواری می‌شود [۱۵]. کاهش گاف نواری در این مواد می‌تواند به حدود ۰/۱ eV به ازای افزوده شدن یک درصد اتمی اتمهای نیتروژن برسد.

<sup>۱</sup>Dilute Nitride Semiconductors

<sup>۲</sup>Bowing parameter



جدول ۱-۲ بخشی از جدول تناوبی که عناصر به کار رفته در مواد نیمرسانا را نشان می‌دهد [۱۵ و ۱۱].

ترکیب نیمرسانا	پارامتر خمش (eV)
$Al_xIn_{1-x}As$	۰
$Al_xGa_{1-x}As$	۰/۶۹۸
$In_{1-x}Ga_xP$	۰/۷۸۶
$InAs_xSb_{1-x}$	۰/۵۶
$GaNxAs_{1-x}$	$\approx ۲۶$ $x < ۱\%$
	$\approx ۱۸$ $۱ < x < ۵\%$

بزرگی بیش از حد معمول پارامتر  $b$  و کاهش قابل توجه گاف نواری نیمرساناهای نیتروژندار رقیق از طریق نظریه BAC<sup>۱</sup> که توسط شان و همکاران [۱۶] پیشنهاد شد قابل توجیه است. در نیمرسانای GaNAs انتظار می‌رود در اطراف اتمهای Ga با احتمال  $x\%$  اتمهای نیتروژن و با احتمال  $(1-x)\%$  اتمهای As وجود داشته باشند. اما در شرایط واقعی همیشه چنین اتفاقی نمی‌افتد و معمولاً بی‌نظمی‌هایی در قرار گیری اتمها در شبکه بلوری وجود دارد. اتمهای نیتروژن از اتمهای As کوچکترند (شعاع اتمهای نیتروژن برابر  $۰/۰۶۸nm$  و شعاع اتمهای آرسنیک برابر  $۰/۱۲۱nm$  است [۱۷ و ۱۸])، در نتیجه به هنگام رشد لایه غالباً اتمهای نیتروژن توزیعی غیر یکنواخت داشته و به صورت خوشه‌ای در ماده شکل می‌گیرند. این امر سبب نقایص شبکه‌ای شده و باعث تغییر قابل توجه در ساختار نواری ماده می‌گردد. علاوه بر تفاوت ابعادی بین اتمهای N و As تفاوت زیادی در مقدار الکترونگاتیوی این دو اتم نیز وجود دارد (الکترونگاتیویته نیتروژن  $۳/۴۱$  و آرسنیک  $۲/۱۸$  است [۱۷ و ۱۸])، که منجر به شکل‌گیری ترازهای انرژی بسیار جایگزیده در نزدیکی لبه نوار رسانش می‌شود. بر اساس مدل BAC اضافه شدن اتمهای N به نیمرسانای III-V منجر به یک برهمکنش قوی بین نوار رسانش نیمرسانای میزبان و ترازهای جایگزیده N می‌شود. در نتیجه این برهمکنش، نوار رسانش به دو زیرنوار شکافته می‌شود و همین امر موجب کاهش گاف نواری می‌شود (شکل ۱-۲)

<sup>۱</sup>Band Anti Crossing

[۱۴و۱۹]. مسئله برهمکنش بین دو تراز را می‌توان با استفاده از نظریه اختلال توسط ماتریس

برهمکنش به صورت زیر بیان کرد [۱۴]:

$$\begin{vmatrix} E(k) - E_M(k) & V_{NM} \\ V_{NM} & E(k) - E_N \end{vmatrix} = 0 \quad (1-2)$$

که در آن انرژی لبه نوار رسانش نیمرسانای میزبان III-V،  $E_N$  انرژی ترازهای N نسبت به قله نوار

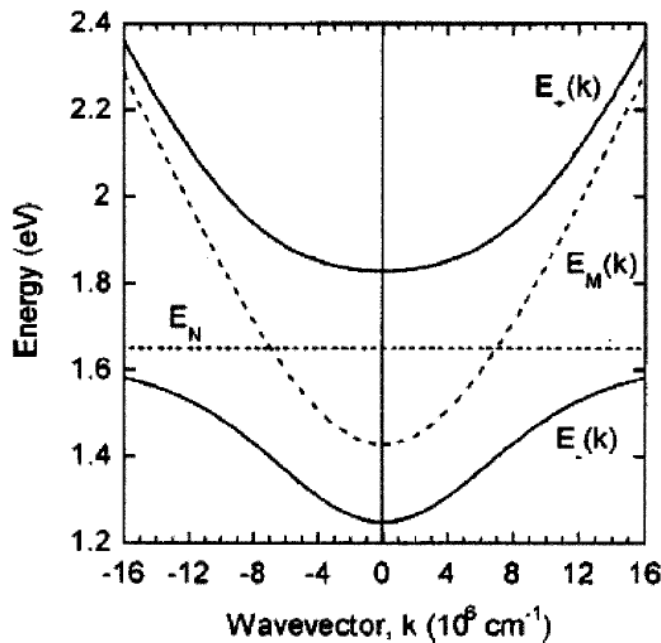
ظرفیت و  $V_{NM} = C_{NM} x^{1/2}$  عنصر ماتریسی است که برهمکنش بین این دو تراز را بیان می‌کند، و

$C_{NM} = 2/veV$  یک ثابت است. از حل این ماتریس موقعیت لبه‌های نوار رسانش ( $E_-$  و  $E_+$ ) به

صورت

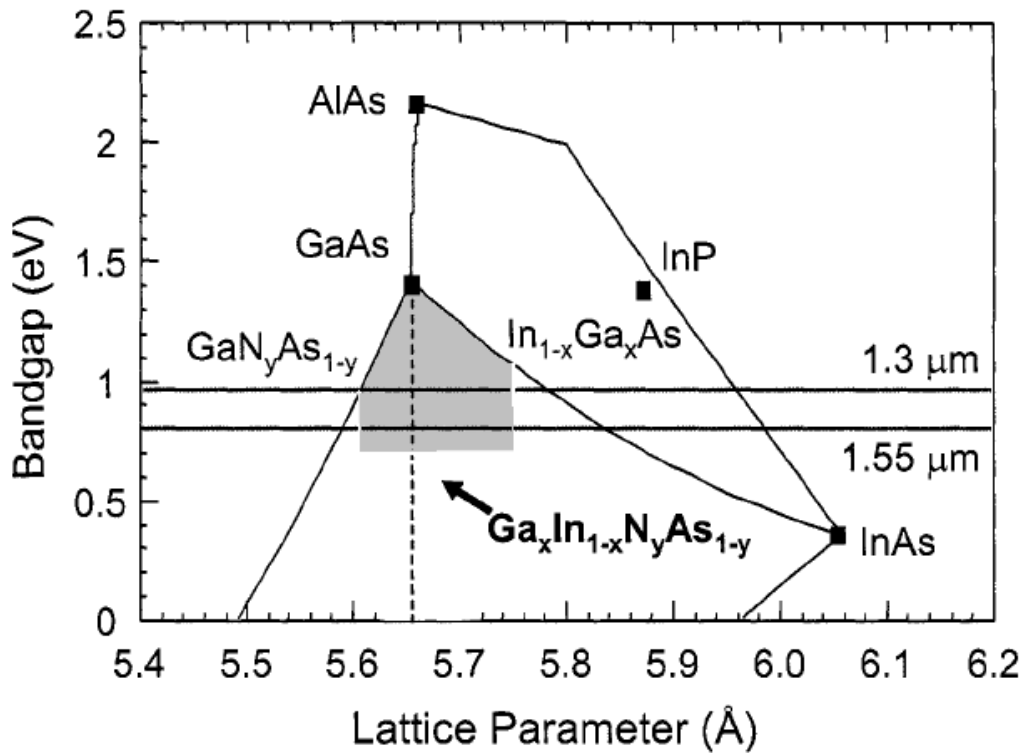
$$E_{\pm} = \frac{1}{2} \left\{ E_N + E_M \pm \left[ (E_N - E_M)^2 + 4V_{NM}^2 \right]^{1/2} \right\} \quad (2-2)$$

حاصل می‌آید.



شکل (۲-۱): رابطه پاشندگی در آلیاژ  $\text{GaAs}_{1-x}\text{N}_x$  به ازای  $x = 0.1$ . خطوط بریده و نقطه‌چین به ترتیب موقعیت انرژی‌های غیر اختلالی نیمرسانای میزبان GaAs و ترازهای N را نشان می‌دهند [۱۴].

شکل (۲-۲) تغییرات گاف نواری مربوط به چند نیمرسانا را بر حسب ثابت شبکه‌ی<sup>۱</sup> آنها نشان می‌دهد.



شکل (۲-۲): گاف نواری بر حسب ثابت شبکه برای GaNAs و InGaAs. رشد یافته بر روی زیرلایه GaAs در ناحیه سایه خورده در زیر خط آلیاژی GaNAs و InGaAs، می‌توان ترکیب چهارتایی InGaNAS را رشد داد [۲۰].

نکته قابل توجه اینکه با افزودن In ثابت شبکه رو به افزایش و با افزودن N ثابت شبکه رو به کاهش می‌گذارد به طوری که با انتخاب مناسب تراکم In و N، که غالباً به صورت  $(y \approx 3x)$  گزارش شده است [۲۱]، می‌توان لایه‌ای ترکیبی مانند  $In_yGa_{1-y}N_xAs_{1-x}$  را رشد داد که با زیرلایه به کار گرفته شده (GaAs یا Ge) جفت شدگی شبکه‌ای داشته باشد.

<sup>۱</sup>Lattice constant

## ۳-۲- جرم موثر

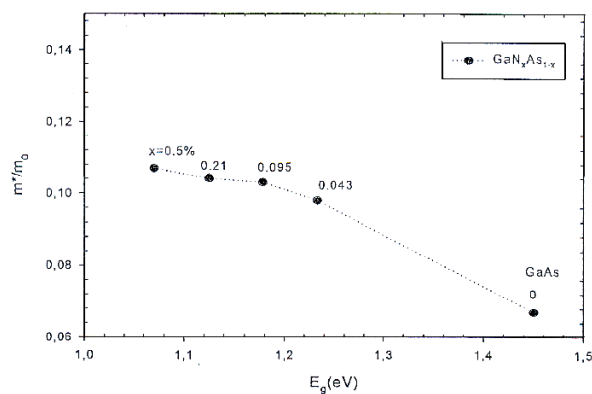
یکی از کمیت‌های مهم در خواص الکتریکی یک نیم‌رسانا جرم موثر حامل‌های بار در آن است. مشاهدات معمول در آلیاژها و دیگر نیم‌رساناهای مرسوم حاکی از افزایش جرم موثر با افزایش گاف نواری است [۲۲]. اما این ارتباط در ترکیبات نیم‌رساناهای نیتروژندار رقیق GaNAs متفاوت است به طوری که با کاهش گاف نواری جرم موثر افزایش می‌یابد (شکل ۳-۲). از آنجا که حضور اتم‌های N در این نیم‌رساناها باعث اختلال در نوار رسانش می‌شود و با توجه به رابطه جرم موثر و ساختار نواری:

$$\frac{1}{m^*} = \frac{1}{\hbar^2} \frac{d^2 E}{dk^2} \quad (۳-۲)$$

انتظار می‌رود این اختلال بر جرم موثر الکترونیهای نوار رسانش تاثیر بگذارد. جانشینی  $E_-(k)$  از معادله (۲-۲) در معادله (۳-۲) رابطه زیر را به دست می‌دهد:

$$m_{E_-}^* = 2m_e^* \left[ 1 - \frac{E_M(k) - E_N}{\sqrt{(E_M(k) - E_N)^2 + 4V_{NM}^2}} \right]^{-1} \quad (۴-۲)$$

که  $m_e^*$  جرم موثر الکترون در نوار میزبان غیر اختلالی است. افزایش جرم موثر که با رابطه فوق پیش‌بینی می‌شود به طور تجربی برای آلیاژهای مختلف III-V-N مورد بررسی قرار گرفته است. این افزایش در جرم موثر الکترونها مانعی است برای قطعاتی که اساس آنها مبتنی بر ترابری الکترونهاست. ارتباط بین جرم موثر و گاف نواری در شکل ۳-۲ نشان داده شده است [۲۳].



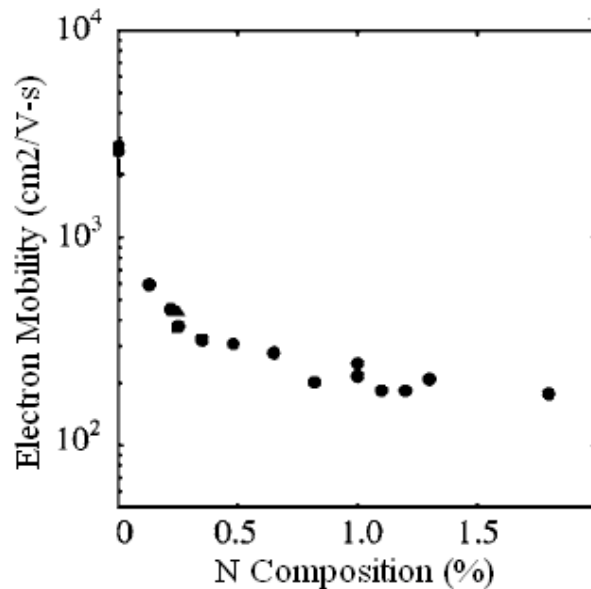
شکل (۳-۲): تغییرات جرم موثر در GaNAs بر حسب گاف نواری [۲۳].

## ۴-۲- تحرک پذیری

ورود نیتروژن به شبکه GaAs نه تنها بر گاف نواری و جرم موثر الکترون اثر می‌گذارد بلکه می‌تواند سبب تغییرات فاحش در خواص ترابری الکتریکی نیمرسانا نیز بشود. در این بین تحرک الکترونی که از رابطه

$$\mu = q\tau / m^* \quad (۵-۲)$$

به دست می‌آید به کمیت‌های جرم موثر حامل (الکترون)  $m^*$  و زمان آزاد میانگین  $\tau$  آن وابسته است که این خود تابع سازوکارهای گوناگون پراکندگی می‌باشد. نتایج تجربی حاکی از آن است که مقدار تحرک الکترونی در GaAs رشد یافته در شرایط بدون نیتروژن در بازه  $۹۰۰-۱۱۰۰ \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  بوده و با ورود نیتروژن به مقادیری در بازه  $۲۰۰-۴۰۰ \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  تنزل می‌یابد [۲۴ و ۲۵] (شکل ۴-۲). این کاهش قابل توجه در تحرک الکترونی غالباً به تاثیر رفتار افزایشی جرم موثر و نیز ازدیاد عوامل پراکندگی به ویژه پراکندگی‌های کتره‌ای و خوشه‌ای اتم‌های نیتروژن<sup>۱</sup> نسبت داده می‌شود.

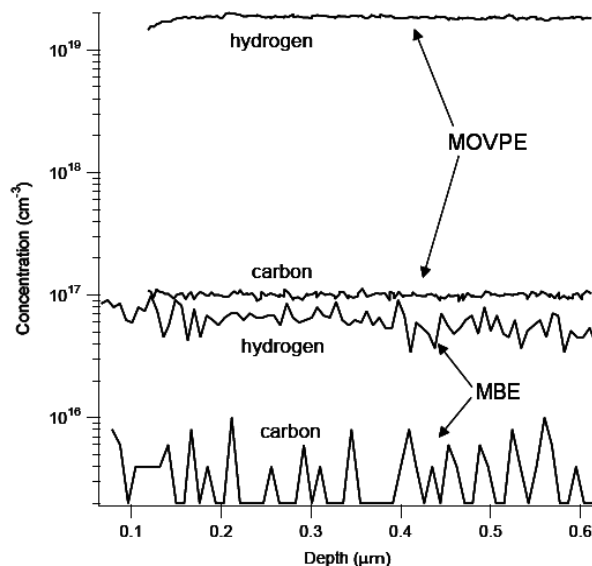


شکل (۴-۲): تغییرات تحرک‌پذیری الکترونی در GaNAs بر حسب کسر مولی نیتروژن [۲۶]

<sup>۱</sup>Nitrogen Clusters

## ۵-۲- تراکم الکترونی و وابستگی آن به روش رشد در مواد نیتروژندار رقیق

MOCVD<sup>۱</sup>، MBE<sup>۲</sup> و MOVPE<sup>۳</sup> از جمله روشهای روآراستی برای رشد مواد نیتروژندار رقیق نظیر GaInNAs و GaNAs که می‌تواند در سلول‌های خورشیدی نیز کاربرد داشته باشد، می‌باشند. مشاهدات تجربی نشانگر تراکم الکترونی نسبتاً بالا (در حدود  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ) به صورت پس‌زمینه در لایه‌های GaInNAs تازه رشد یافته - بدون ناخالصی خواسته - است. تراکم الکترونی در این نمونه‌ها می‌تواند به تراکم اتمهای کربن و هیدروژن که در حین عملیات رشد در محیط لایه نشانی وجود دارد نسبت داده شود (شکل ۵-۲) [۲۵]. چنانچه از نتایج تجربی در این شکل پیداست تراکم این اتمها با تغییر روش رشد به MBE کاهش قابل توجهی در حدود ۱۰۰ برابر پیدا کرده است. این کاهش با مقادیر تراکم الکترونی وابسته به نمونه‌های رشد یافته به روش MBE که در گستره  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$  تا  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$  گزارش شده‌اند [۲۷] مطابقت دارد.



شکل (۵-۲): مقایسه غلظت کربن و هیدروژن برای رشد یافته به روش MBE و MOVPE [۲۷].

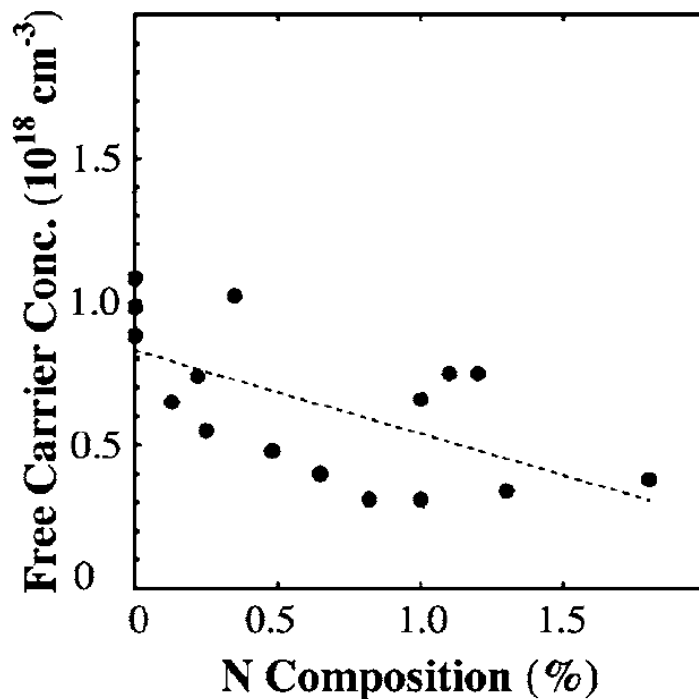
<sup>۱</sup>Metal Organic Chemical Vapor Deposition

<sup>۲</sup>Molecular Beam Epitaxy

<sup>۳</sup>Metal Organic Vapor-Phase Epitaxy

در رشد لایه‌ها با روش MOCVD به علت نیاز به فشار بالا به هنگام رشد، تراکم بالای ناخالصی کربن را بر جای می‌گذارد و دمای بالای رشد موجب کاهش تراکم N در لایه GaInNAs می‌گردد [۲۸]. در نتیجه دمای رشد پایین‌تری مورد نیاز است. در روش MBE آلودگی کربنی دیده نمی‌شود ولی کیفیت بلور به دلیل منبع نیتروژن به کار رفته در این روش کاهش می‌یابد. برای رفع این مشکل روش جدیدی به نام CBE<sup>۱</sup> توسط یاماگوچی و همکاران [۲۸] در سال ۱۹۹۴ پیشنهاد شد. در این روش هم از خاصیت پرتو مولکولی در روش MBE و هم خاصیت منابع بخار در روش MOCVD استفاده می‌شود.

در نمونه  $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}_x\text{As}_{1-x}$  تراکم الکترونی با افزایش میزان ترکیب نیتروژن کاهش می‌یابد که دلیل این امر به تشکیل ترازهای تله‌ای<sup>۲</sup> وابسته به اتمهای نیتروژن نسبت داده می‌شود [۲۹]. شکل ۲-۶ این تغییرات را نشان می‌دهد.



شکل (۲-۶): تغییرات تراکم حامل آزاد در ماده GaNAs به صورت تابعی از غلظت نیتروژن در دمای اتاق [۲۶].

<sup>۱</sup>Chemical Beam Epitaxy

<sup>۲</sup>Trap levels

## ۲-۵-۱- رشد نیمرسانای $\text{GaN}_x\text{As}_{1-x}$

در رشد این لایه سه تایی معمولاً از روشهای مختلف مانند: MBE، MOCVD و MOVPE استفاده می‌شود. این لایه‌ها معمولاً به صورت روآراستی بر روی زیرلایه‌های Si، GaAs و GaP رشد داده می‌شوند [۳۰]. معمولاً لایه‌های بدون آلایش از خود رسانندگی نوع n نشان می‌دهند [۲۴ و ۲۵]. اما در موارد معدودی رسانش نوع p نیز مشاهده شده است [۳۱]. معمولاً در این ماده برای دستیابی به آلایش نوع p و n به ترتیب از اتمهای Be و Si به عنوان آلاینده استفاده می‌شود [۳۰ و ۳۲].

با توجه به اندازه‌گیریهای نوری انجام شده، آلایش  $\text{GaN}_x\text{As}_{1-x}$  دارای گاف نواری مستقیم می‌باشد [۳۳]، اما بنا به گزارش گودیم و همکاران [۳۴] هنگامی که میزان کسر مولی N از  $x = ۲/۵۵\%$  بیشتر می‌شود گاف نواری به صورت غیر مستقیم در می‌آید.

## ۲-۵-۲- رشد نیمرسانای $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}_x\text{As}_{1-x}$

در رشد لایه‌های چهارتایی نیتروژندار رقیق نیز از همان روشهای مرسوم در آلایش سه تایی  $\text{GaN}_x\text{As}_{1-x}$  استفاده می‌شود. بعد از رشد GaAs پایه، ایندیوم را به آن وارد می‌کنند. در ادامه روند رشد با کاهش دمای زیرلایه، شرایط برای ورود نیتروژن به لایه  $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$  مهیا می‌گردد. این کاهش دما باعث پایین آمدن کیفیت بلوری در ماده  $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}_x\text{As}_{1-x}$  می‌گردد [۲۴ و ۲۵]. به هنگام رشد  $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}_x\text{As}_{1-x}$  بر روی زیرلایه‌های Ge و GaAs و ایجاد انطباق شبکه‌ای<sup>۱</sup> با این زیرلایه‌ها و همچنین ثابت نگه داشتن گاف انرژی (۱ eV) معمولاً نسبت  $y = ۳x$  رعایت می‌گردد.

از مشخصه‌های رشد  $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}_x\text{As}_{1-x}$  به روش MOVPE این است که با افزایش میزان ایندیوم امکان حضور مقدار نیتروژن، در لایه کاهش می‌یابد. برای مثال بنا به گزارش تایونن [۳۵] با ورود ایندیوم به میزان  $y = ۱۰\%$  و  $y = ۳۰\%$  میزان ترکیب نیتروژن به ترتیب از  $x = ۱\%$  به  $x = ۰/۱\%$  و از  $x = ۲/۵\%$  به  $x = ۰/۸\%$  کاهش می‌یابد. نکته قابل توجه دیگر در این ترکیب آنکه با

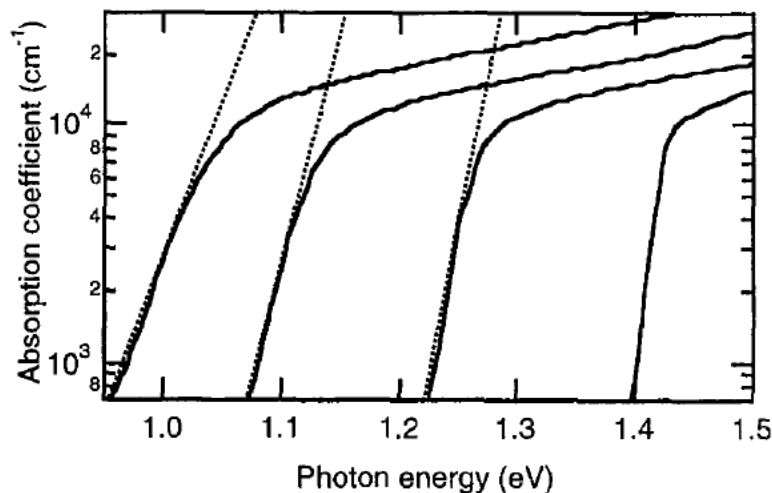
<sup>۱</sup>Lattice-matched



افزایش دمای رشد از امکان حضور نیتروژن در لایه مورد نظر کاسته می‌شود [۳۵]. با توجه به داده‌های تجربی گزارش شده تحرک الکترونی در نمونه ایندیوم‌دار افزایش یافته است [۲۵] که علت این امر وجود پیوند In-N می‌باشد که موجب کاهش تنشهای درونی نمونه می‌گردند [۳۶].

## ۲-۶- برخی ویژگی‌های اپتیکی GaInNAs

تغییر در میزان کسر مولی نیتروژن در مواد نیم‌رسانای نیتروژندار رقیق می‌تواند بر روی برخی خواص اپتیکی این مواد از جمله ضریب جذب آنها اثر داشته باشد. شکل ۲-۷ طیف ضریب جذب GaInNAs را به ازای مقادیر مختلف نیتروژن نشان می‌دهد [۳۷]. چنانچه پیداست با اضافه شدن نیتروژن در ماده GaAs لبه جذب که با گاف نواری ماده به طور مستقیم در ارتباط است به سوی انرژیهای پایینتر میل می‌کند.



شکل (۲-۷): ضریب جذب برای GaAs و ترکیبات  $\text{GaIn}_x\text{As}_{1-x}$  با مقادیر مختلف نیتروژن  $(x)$  (منحنی اول از سمت راست طیف جذب GaAs و سایر منحنی‌ها مربوط به ترکیبات  $\text{GaIn}_x\text{As}_{1-x}$  بوده که با افزایش  $x$  به سمت چپ جابه جا می‌شوند). [۳۷].

همانطور که از شکل پیداست طیف ضریب جذب ماده GaInNAs در انرژیهای بیشتر از گاف نواری شبیه طیف جذب GaAs است. در انرژیهای نزدیک گاف نواری، شکل ضریب جذب GaInNAs نه تنها با میزان آرایش بلکه با مقدار گاف نواری، شرایط رشد ماده و بازپخت تغییر می‌کند.

## ۲-۷- نقایص در ماده

تلاشهای زیادی برای شناسایی نقص‌های نقطه‌ای در ماده Ga(In)NAs انجام شده است. خواص قطعات وابسته به حامل اقلیت مانند سلولهای خورشیدی به شدت به نقص‌های نقطه‌ای حساس بوده و کمیت‌های مهمی نظیر طول عمر حامل‌های اقلیت و تحرک‌پذیری آنها را تحت تاثیر قرار می‌دهد [۳۸]. از جمله عوامل شکل‌گیری این نقایص می‌توان به تجمع‌های خوشه‌ای اتم‌های نیتروژن، ایجاد ترازهای شبه‌بخشنده و پذیرنده این اتم‌ها، تشکیل ترازهای عمیق ناشی از نقایص بلوری حاصل از عدم انطباق ثابت‌های شبکه‌ای بین لایه‌ها اشاره کرد. برخی حضور نیتروژن را مسئول به وجود آمدن این نقصها در مواد نیتروژندار رقیق می‌دانند [۳۹ و ۴۰]. بدیهی است به منظور افزایش بازدهی در این قطعات باید تراکم این نقایص را کاهش داد که یکی از آنها استفاده از روش بازپخت است. به کارگیری این روش و تاثیر آن بر عملکرد سلولهای خورشیدی را در فصل پنجم بخش ۵-۲-۱ مورد بحث قرار داده‌ایم. همچنین می‌توان از روشهای رشد بهینه‌تر مواد نیتروژندار رقیق استفاده نمود تا از ورود ناخالصی‌های ناخواسته که می‌توانند به صورت نقائص در ماده عمل کنند جلوگیری نمود.

## فصل ۳

آشنایی با نحوه عملکرد سلولهای  
خورشیدی

### ۳-۱- مقدمه

در حال حاضر مصرف انرژی در جهان از مرتبه  $13TW$  در سال است که تا سال ۲۰۵۰ به  $30TW$  خواهد رسید [۴۱]. با توجه به آلودگی‌های سوخت فسیلی و تغییر در آب و هوا به دلیل گازهای گلخانه‌ای ناشی از سوخت فسیلی، تولید انرژی با استفاده از منابع پاک و تجدیدپذیر مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است. به نظر می‌رسد یک راه امیدوارکننده برای تامین انرژی استفاده از بخشی از توان  $125000TW \approx$  خورشیدی است که به زمین می‌رسد.

تولید توان فوتوولتایی<sup>۱</sup> (PV) یک راه کارآمد برای استفاده از توان خورشیدی است. سازوکار تبدیل انرژی نورانی به انرژی الکتریکی را اثر فوتوولتایی می‌نامند [۴۲]. قطعات PV، مرسوم به سلولهای خورشیدی می‌توانند انرژی نورانی خورشید را مستقیماً از طریق فرایند "تولید جفت الکترون - حفره" به انرژی الکتریکی تبدیل کنند. اولین نسل سلولهای خورشیدی بر پایه نیمرسانای Si، نسل دوم مبتنی بر لایه‌های نازک و نسل سوم آنها به منظور افزایش بازدهی، قطعات چند پیوندگاهی<sup>۲</sup> مانند GaInP/GaInAs/Ge هستند. یک سلول خورشیدی چند پیوندگاهی قطعه‌ای با اتصالات متوالی از لایه‌ها، مشتمل بر پیوندگاههای متعددی هستند. به کارگیری چند ماده جذب کننده با گافهای نواری متفاوت امکان استفاده وسیعتری از طیف خورشیدی را فراهم می‌سازد. سلولهای خورشیدی نیمرسانای نوع III-V به طور گسترده‌ای در کاربردهای فضایی مورد استفاده واقع شده‌اند. با وجود

---

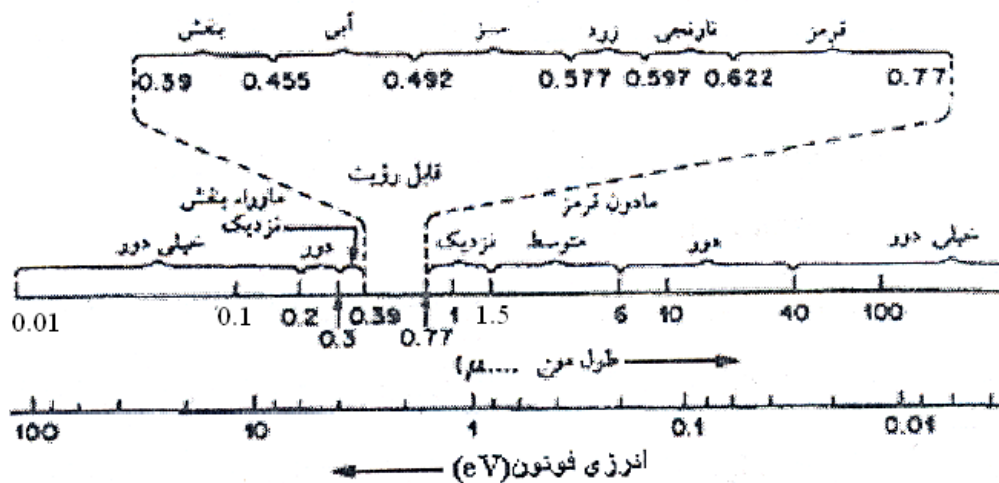
<sup>۱</sup>Photovoltaic

<sup>۲</sup>Multi junction

اینکه ساخت این سلولها به دلیل رشد روآراستی بر روی زیرلایه تک بلور نسبتا گران است اما آنها بازدهی بالایی برخوردار بوده و می‌توانند در تولید ارزان قیمت الکتروسیسته در آینده موثر باشند. در ادامه این فصل به اختصار به معرفی خصوصیات طیف خورشید و دیگر اصول پایه عملگری سلولهای خورشیدی پرداخته‌ایم.

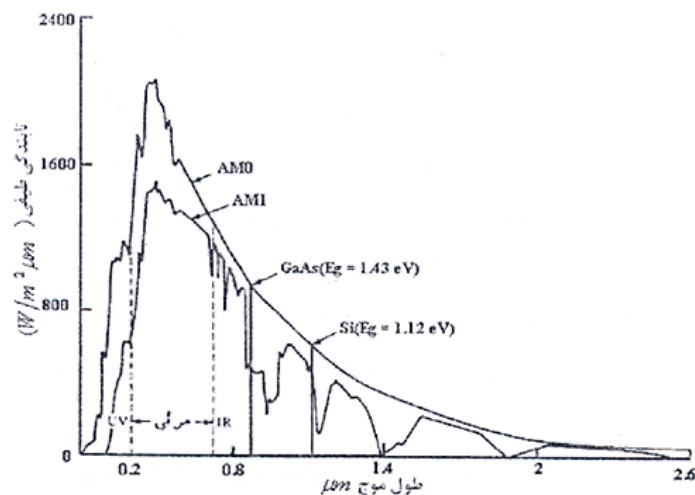
### ۲-۳- طیف خورشید

شکل ۱-۳ بخش وسیعی از طیف امواج الکترومغناطیسی در گستره فرابنفش تا فرورسرخ و نیز محدوده نور مرئی نشان می‌دهد.



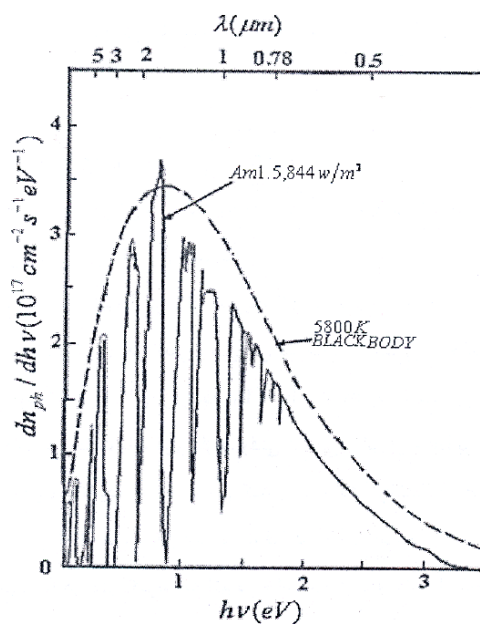
شکل (۱-۳): نمودار طیف امواج الکترومغناطیسی از ناحیه فرابنفش تا ناحیه فرورسرخ [۴۳]

شدت متوسط نور خورشید که در فضای آزاد به زمین می‌رسد، ثابت خورشیدی (AM0) نام دارد و مقدار آن  $1353 \text{ W/m}^2$  می‌باشد. نور خورشید در گذر از جو زمین دستخوش جذب و پراکندگی شده و در نتیجه طیف آن در سطح دریا قدری تغییر پیدا می‌کند (شکل ۲-۳). در سطح دریا هنگامی که خورشید به طور قائم بتابد با AM1 نشان داده شده و برابر  $925 \text{ W/m}^2$  می‌باشد.



شکل (۳-۲): منحنی‌های مربوط به تابندگی خورشید در شرایط AM0 و AM1 [۴۴].

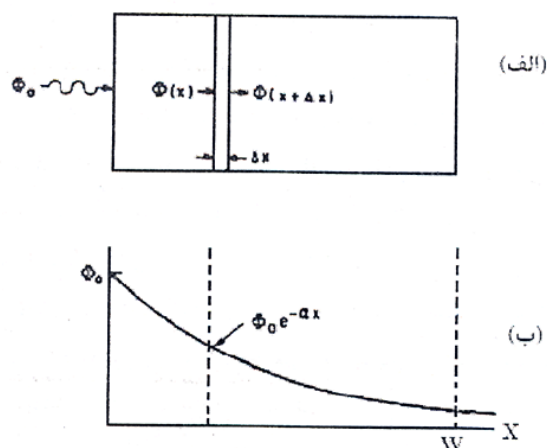
در بیشتر اندازه‌گیریها از یک طیف تابشی میانگین AM1.5 با شدت  $884 \text{ W/m}^2$  استفاده می‌شود. در این شرایط نور خورشید در سطح دریا با افق زاویه  $45^\circ$  درجه می‌سازد. شکل ۳-۳ منحنی مربوط به شدت طیف خورشیدی در شرایط AM1.5 و نیز منحنی متناظر با شدت گسیلی از یک جسم سیاه ایده‌آل را در دمای  $5800^\circ \text{K}$  (جسم سیاه) نشان می‌دهد [۴۳].



شکل (۳-۳): منحنی مربوط به شدت گسیلی طیف خورشید در شرایط AM1.5، به همراه با منحنی طیف جسم سیاه در دمای  $5800^\circ \text{K}$  [۴۳].

### ۳-۳- جذب نوری در نیمرسانا

در صورتی که یک نیمرسانا تحت تابش امواج نوری قرار گیرد، چنانچه انرژی فوتونهای فرودی بزرگتر و یا مساوی گاف نواری  $E_g$  ماده مورد نظر باشد جذب خواهند شد. در این شرایط به ازای هر فوتون جذب شده در ماده یک زوج الکترون - حفره تولید می‌شود. بدیهی است هر چه گاف نواری ماده نیمرسانا کوچکتر باشد انرژی آستانه فوتونهای قابل جذب کوچکتر بوده و بخش بیشتری از طیف تابشی نور خورشید جذب شده و امکان افزایش بازدهی قطعه را فراهم می‌آورد. در یک سلول خورشیدی فرایندهای جذب اپتیکی و نیز خواص ترابرد الکتریکی به ویژه ترابرد حامل‌های اقلیتی از اهمیت زیادی برخوردار هستند. هر گاه یک نیمرسانا با منبع نوری با انرژی فوتونی  $E_{ph}$  (بزرگتر از  $E_g$ ) و شار  $\phi_0$  (تعداد فوتون‌ها بر واحد سطح در هر ثانیه) تحت تابش قرار گیرد، ضمن عبور نور از داخل آن کسری از فوتون‌ها که با شار فرودی آنها متناسب است جذب می‌شوند. بنابراین تعداد فوتونهای جذب شده در فاصله  $\Delta x$  عبارت خواهد بود از [۴۵]:



شکل (۳-۴): فرایند جذب نور (الف) نیمرسانای تحت تابش (ب) تغییرات کاهشی نمایی شار فوتونها در حین عبور در داخل ماده [۴۵].

$$\phi(x + \Delta x) - \phi(x) = \frac{d\phi(x)}{dx} \Delta x = -\alpha\phi(x)\Delta x \quad (۱-۳)$$

یا

$$\frac{d\phi(x)}{dx} = -\alpha\phi(x) \quad (2-3)$$

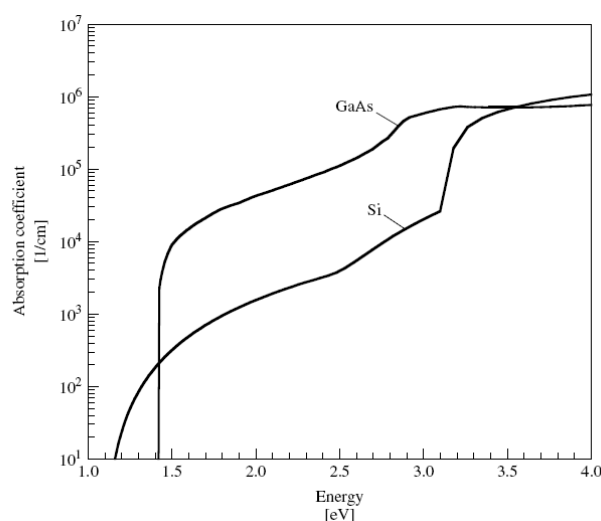
در این روابط  $\alpha$  به ضریب جذب موسوم است. علامت منفی در این رابطه نشانگر جذب و در نتیجه کاهش شدت شار فوتونی ضمن گذر در داخل ماده است (شکل ۳-۴). جواب معادله (۲-۳) با استفاده از شرایط مرزی  $\phi(x) = \phi_0$  در  $x = 0$  عبارت خواهد بود از:

$$\phi(x) = \phi_0 e^{-\alpha x} \quad (3-3)$$

بنابراین کسری از شار فوتونها که از انتهای دیگر نیمرسانا به ضخامت  $W$  (شکل ۳-۴-ب) خارج خواهد شد عبارت خواهد بود از:

$$\phi(W) = \phi_0 e^{-\alpha W} \quad (4-3)$$

در حالت کلی ضریب جذب  $\alpha$  در ماده تابعی از انرژی فوتونهای فرودی ( $E_{ph}$ ) است. شکل ۳-۵ ضریب جذب اندازه‌گیری شده را برای دو نیمرسانای Si و GaAs نشان می‌دهد.



شکل (۳-۵): ضرایب جذب نوری برای مواد نیمرسانای گوناگون [۴۳].

با توجه به رابطه ۳-۳ شار فوتونها در فاصله  $1/\alpha$  به  $1/e$  مقدار اولیه  $\phi_0$  می‌رسد. این فاصله به عمق نفوذ فوتونها موسوم است. از آنجا که بنابر شکل ۳-۵ مقدار  $\alpha$  تابعی از انرژی فوتونهای فرودی است انتظار می‌رود فوتونهای پر انرژی دارای عمق نفوذ کم و فوتونهای کم انرژی از عمق نفوذ بیشتری

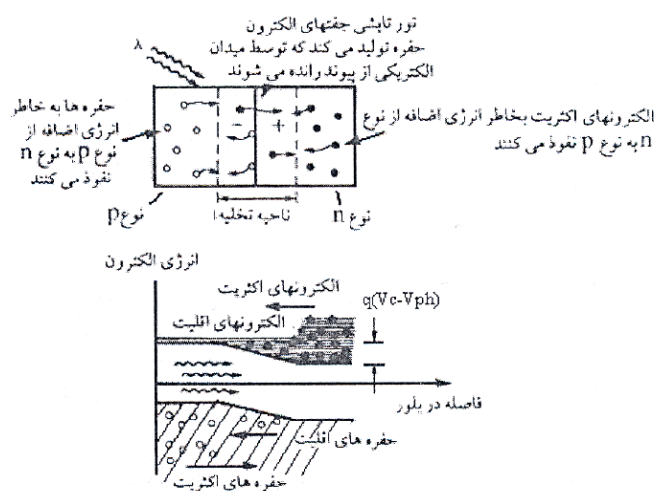


برخوردار باشند. این نتیجه به معنی آن است که فوتونهای پر انرژی در نزدیکی سطح بالائی ماده و فوتونهای کم انرژی در عمق ماده جذب می‌شوند.

برای نیمرساناهای با گاف نواری مستقیم ضریب جذب به صورت  $\alpha(E) \propto (E - E_g)^{1/2}$  و برای نیمرساناهای با گاف نواری غیر مستقیم ضریب جذب به صورت  $\alpha(E) \propto (E - E_g)^2$  تغییر می‌کند [۱۴]. از آنجا که در مقایسه با نیمرساناهای مستقیم، در نیمرساناهای غیر مستقیم ضریب جذب نوری کوچکتر است بنابراین عمق نفوذ فوتونها در این نیمرساناها بزرگتر بوده و در نتیجه در این قبیل سلولها ضخامت مواد به کار گرفته شده بایستی ضخیم‌تر (معمولاً بیش از  $200-100 \mu m$ ) باشند تا بتوانند بخش بزرگتری از فوتونهای با انرژی  $E_{ph} > E_g$  را جذب کنند [۱۴].

### ۳-۴- اصول عملگری سلولهای خورشیدی تک پیوندگامی

چنانچه اشاره شد در صورت جذب انرژی امواج الکترومغناطیسی الکترونها از نوار ظرفیت به نوار رسانش گذار پیدا کرده و جفت الکترون - حفره‌هایی در ماده تولید می‌شوند. در صورت حضور یک میدان الکتریکی در داخل نیمرسانا این جفت‌های الکترون-حفره ای می‌توانند از یکدیگر جدا شوند. این پدیده در یک پیوندگاه p-n و در محل تهی لایه رخ می‌دهد، (شکل ۳-۶) [۴۲].



شکل (۳-۶): یک دیود نوری با پیوندگاه p-n تحت تابش در حالت فوتولتایی [۴۲].

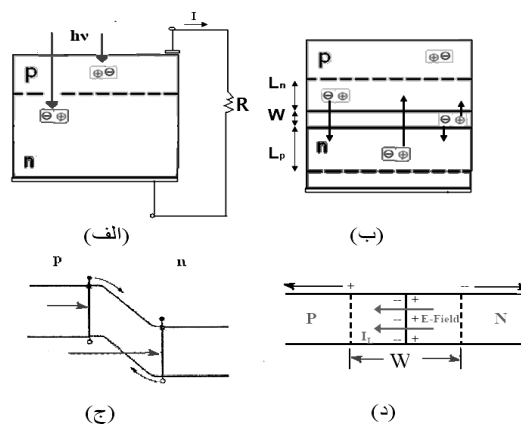
در عملکرد یک سلول خورشیدی جدا شدن حامل‌ها قبل از بازترکیب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به طور کلی، فرایند تبدیل انرژی نورانی به انرژی الکتریکی در یک پیوندگاه p-n شامل مراحل اساسی زیر است:

(۱) جذب فوتون‌های نوری و تشکیل زوج‌های الکترون - حفره در هر دو طرف پیوندگاه p-n (شکل ۳-۷-الف).

(۲) حرکت پخشی الکترون‌ها و حفره‌های ایجاد شده در فاصله یک طول پخش از پیوندگاه و رسیدن آنها به تهی لایه (شکل ۳-۷-ب).

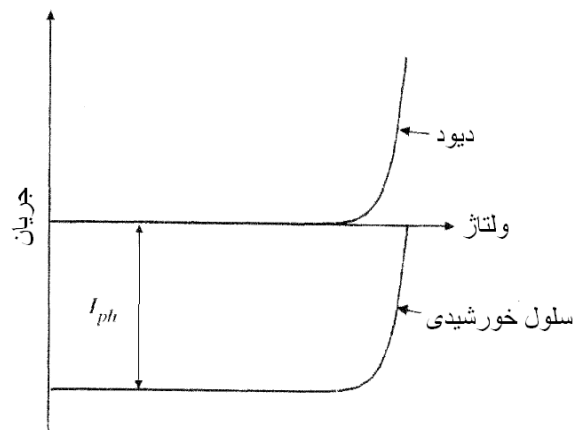
(۳) جدا شدن زوج الکترون - حفره‌ها توسط میدان الکتریکی قوی در محل تهی لایه در پیوندگاه (شکل ۳-۷-ج).

(۴) ایجاد یک ولتاژ مدار باز ( $V_{oc}$ ) به علت انباشت الکترون‌ها و حفره‌ها در دو طرف پیوندگاه در صورتی که قطعه به مقاومت بار خارجی وصل نشده باشد (شکل ۳-۷-د). بدیهی است چنانچه یک مقاومت بار به قطعه وصل شود در مدار یک جریان الکتریکی برقرار خواهد شد (شکل ۳-۷-الف). در این وضعیت بیشینه جریان، وقتی به دست خواهد آمد که مقاومت بار برابر با صفر (حالت اتصال کوتاه) باشد. جریان ایجاد شده در این حالت به جریان مدار اتصال کوتاه ( $J_{sc}$ ) موسوم است [۴۶].



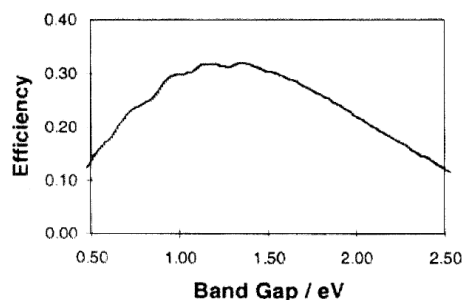
شکل (۳-۷): یک دیود نوری با پیوندگاه p-n تحت تابش در حالت فوتولتایی [۴۶]

شکل ۳-۸ مشخصه جریان - ولتاژ یک سلول خورشیدی در شرایط تاریکی (دیود) و تابش نور (سلول خورشیدی) نشان می‌دهد.



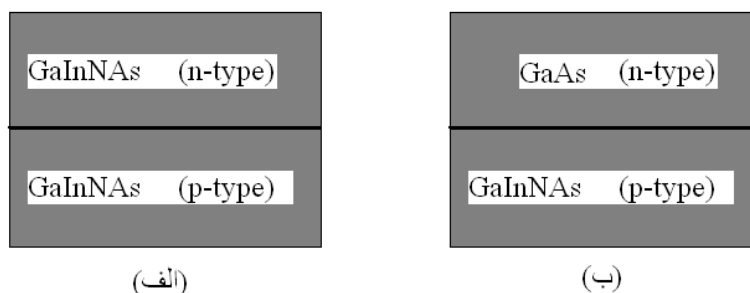
شکل (۳-۸): مشخصه جریان - ولتاژ یک سلول خورشیدی در شرایط تاریکی و تابش نور [۴۳]

در یک سلول خورشیدی تک پیوندگاهی که از یک پیوندگاه p-n ساده تشکیل شده است معمولاً بخش قابل توجهی از طیف خورشید که انرژی فوتونهای آن کوچکتر از گاف نواری هستند جذب نشده و در جریان نوری نقشی ایفا نخواهند کرد. شکل ۳-۹ تغییرات بازدهی ایده‌آل یک سلول خورشیدی تک پیوندگاهی را که بر حسب گاف نواری ماده نیم‌رسانای به کار رفته در شرایط AM1.5 محاسبه شده است، نشان می‌دهد. تا کنون بالاترین بازدهی برای سلول خورشیدی تک پیوندگاهی GaAs مقدار ۲۵/۱٪ به دست آمده است [۱۴]. امروزه به منظور افزایش بازدهی از سلولهای خورشیدی چند پیوندگاهی که در بخش بعد به آن پرداخته‌ایم، استفاده می‌شود.



شکل (۳-۹): بازدهی ایده‌آل محاسبه شده بر حسب گاف نواری برای یک سلول خورشیدی تک پیوندگاهی [۱۴].

در صورتی که لایه‌های نوع p و n به کار رفته در یک پیوندگاه p-n از یک نوع ماده تشکیل شده و دارای آلایش یکنواخت باشند، به آن یک ساختار همگون<sup>۱</sup> می‌گویند اما در صورتی که دو نوع ماده با گاف نواری متفاوت برای ساختن پیوندگاه به کار رود به آن یک ساختار ناهمگون<sup>۲</sup> می‌گویند. شکل ۱۰-۳ که طرح شماتیک ساده‌ای از این نوع ساختارها را نشان می‌دهد می‌تواند در سلولهای خورشیدی چند پیوندگاهی مورد استفاده قرار گیرد.



شکل (۱۰-۳): ساختارهای (الف) پیوندگاه همگون (ب) پیوندگاه ناهمگون.

### ۳-۵- سلول خورشیدی چند پیوندگاهی<sup>۳</sup>

همان طور که در بخش قبل گفته شد در سلولهای خورشیدی تک پیوندگاهی به علت محدودیت انتخاب در یک ماده با گاف نواری بخصوص بخشی از طیف خورشیدی در تبدیل انرژی مورد استفاده قرار نمی‌گیرد. با به کار گیری سلولهای خورشیدی چند پیوندگاهی و استفاده از چند نیمرسانای متفاوت با گافهای نواری مختلف به طور متوالی می‌توان به این مشکل فائق آمد. در این ساختارها لازم است بالاترین پیوندگاه از ماده‌ای با دارای بیشترین گاف نواری بوده و دیگر پیوندگاههای زیرین به ترتیب از گاف نواری کوچکتری برخوردار باشند. در این صورت فوتونها با انرژی بیشتر در بالاترین پیوندگاه و فوتونها با انرژی کمتر در لایه‌های زیرین جذب خواهند شد.

<sup>۱</sup>homojunction

<sup>۲</sup>heterojunction

<sup>۳</sup>Multi-junction

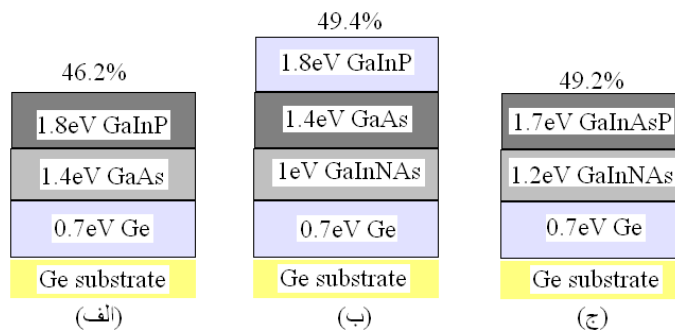
در طراحی قطعات چندپیوندگاهی لازم به توجه است که مواد مورد استفاده بایستی با یکدیگر از نظر ساختاری و ثابت شبکه‌ای هماهنگی داشته باشند تا نقایص<sup>۱</sup> ساختاری (مانند دررفتگی‌ها)<sup>۲</sup> که می‌توانند در نقش مراکز بازترکیب<sup>۳</sup> عمل کنند، ایجاد نشوند. وجود این نقایص، همانطور که در فصل ۵ مورد بررسی قرار گرفته است، سبب کوتاه شدن طول پخش حامل‌ها شده و در نتیجه سبب کاهش بازدهی قطعه می‌گردد. بهترین ترکیبات لایه‌های چندپیوندگاهی با انطباق شبکه‌ای مناسب سلول خورشیدی سه پیوندگاهی از مجموعه ترکیبی GaInP/GaAs/Ge (با نسبت گاف نواری ۰/۷: ۱/۴: ۱/۸) حاصل شده و با بازدهی ۳۵٪ مورد استفاده تجاری قرار گرفته است. ملاحظه شده است که در صورت وجود یک پیوندگاه اضافی با گاف نواری در حدود ۱ eV می‌تواند گزینه مناسبی در این ساختار مابین GaAs-Ge باشد. با توجه به مقدار گاف نواری ترکیبات نیتروژندار رقیق Ga(In)NAs که در همین محدوده انرژی قرار دارد می‌توان یکی از دو گزینه زیر را در نظر گرفت: (۱) افزودن یک پیوندگاه با گاف نواری ۱ eV به قطعه GaInP/GaAs/Ge (شکل ۳-۱۱ الف) و رسیدن به یک ساختار چهار پیوندگاهی GaInP/GaAs 1 -eV /Ge (شکل ۳-۱۱ ب). (۲) استفاده از قطعه سه پیوندگاهی GaInAsP(1.7eV)/1.2-eV /Ge(0.7-eV) (شکل ۳-۱۱ ج). لازم به ذکر است که در نیمرسانای GaInNAs اگر چه گاف نواری را می‌توان با تغییر کسر مولی In برای حصول به گاف نواری ۱ تا ۱ eV تغییر داد، لکن وجود طول پخش کوتاه برای حامل‌های اقلیت در این ماده مشکلی است که رفع آن نیازمند تحقیق بیشتر می‌باشد [۲۷].

---

<sup>۱</sup>Defects

<sup>۲</sup>Dislocations

<sup>۳</sup>Recombination centers



شکل (۳-۱۱): ساختار سلول خورشیدی (الف) سه پیوندگامی با بازدهی ایده‌آل ۴۶/۲٪، (ب) چهارپیوندگامی با بازدهی ایده‌آل ۴۹/۴٪ و (ج) سه پیوندگامی با بازده ایده‌آل ۴۹/۲٪ [۲۷].

نکته جالب توجه در ساختارهای چند پیوندگامی آنکه در این قطعات که با قرار گیری متوالی چند پیوندگام تشکیل می‌شود جریان نهایی خروجی از قطعه با کوچکترین جریان ایجاد شده در هر یک از زیر سلول‌ها برابر خواهد بود [۴۷] بدین معنا که سلولی که دارای کمترین جریان است جریان کل ساختار را محدود می‌کند؛ بنابراین باید توجه داشت که جریان نوری ایجاد شده در هر یک از زیر سلولها از نظر بزرگی نیز با یکدیگر مطابقت داشته باشند.

### ۳-۶- مزایا و معایب سلول‌های خورشیدی

مزایا و معایبی که معمولا می‌توان برای سلول‌های خورشیدی برشمرد عبارت‌اند از [۴۸]:

#### الف- مزایای سلول‌های خورشیدی

- ۱- وزن نسبتا کم
- ۲- قابلیت اطمینان بالا
- ۳- قابلیت حمل و نقل آسان
- ۴- نصب و برچیدن سریع
- ۵- خدمات نگهداری بسیار کم

۶- عدم آلوده سازی محیط زیست

۷- عمر طولانی (بالغ بر ۲۰ سال)

۸- تبدیل انرژی به صورت مستقیم بدون چرخش مکانیکی (بدون صدا و استهلاک مکانیکی)

### ب- معایب سلول‌های خورشیدی

۱- قیمت بالای تمام شده برای سرمایه‌گذاری اولیه

۲- محدودیت در تهیه قطعات با توان بیشتر

۳- بازدهی نسبتاً پایین

۴- وابستگی به نور خورشید برای تولید انرژی الکتریکی

۵- در موارد خاص، نیاز به ذخیره کننده انرژی برای کار در اوقات تاریکی

### ۷-۳- کاربردهایی از سلول‌های خورشیدی

نخستین کاربرد سلول‌های خورشیدی در ماشینهای محاسبه بوده است. امروزه ساعتهای خورشیدی،

شارژر باتری و دیگر وسائلی که به وسیله نور خورشید کار می‌کنند، در دسترس هستند. شکل ۳-۱۲

یکی از کاربردهای سلول‌های خورشیدی مربوط به یک تلفن ثابت در جاده را نشان می‌دهد.



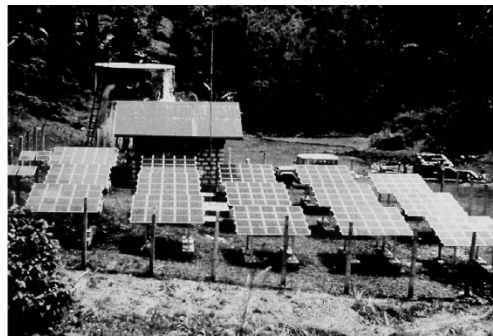
شکل (۳-۱۲): نمونه‌ای از کاربرد اثر فوتوولتایی در تامین برق یک تلفن ثابت بین راهی [۴۹]

بر اساس تخمین اتحادیه اروپا، در حدود هزار میلیون نفر در سراسر دنیا به ویژه در آفریقا، آسیا و آمریکای لاتین در مناطقی زندگی می‌کنند که هیچ ارتباطی با شبکه الکتریکی ندارند. در این مناطق تامین الکتریسیته از طریق سیستم‌های خورشیدی می‌تواند بسیار مقرون به صرفه باشد. شکل (۱۳-۳) یک نمونه از این نوع کاربرد جهت تامین برق یک ساختمان را نشان می‌دهد.



شکل (۱۳-۳): یک کلبه کوهستانی مجهز به سیستم فوتولتایی در آلمان [۴۹].

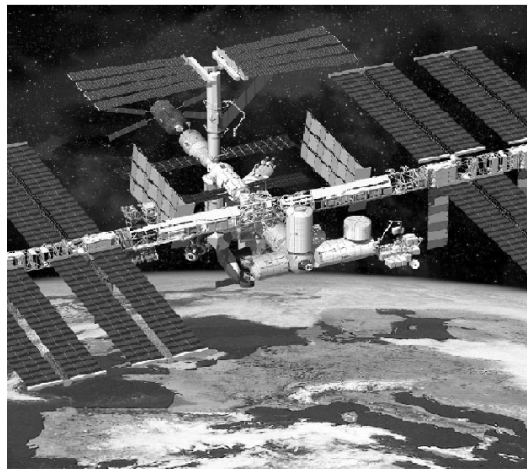
از آنجا که در بسیاری از مناطق جهان دسترسی به آب قابل شرب وجود ندارد، سیستم‌های فوتولتایی می‌توانند به منظور تامین نیروی محرکه الکتریکی در پمپاژ آب برای آبیاری مزارع یا آب آشامیدنی نیز مورد استفاده قرار گیرند. این روش نخستین بار در سال ۱۹۷۰ به کار گرفته شد (شکل (۱۴-۳)).



شکل (۱۴-۳): سیستم فوتولتایی به کار گرفته شده برای تامین برق مورد نیاز در تهیه آب آشامیدنی [۴۹].



از دیگر کاربردهای سلولهای خورشیدی در سفینه‌های فضایی و ماهواره‌ها می‌باشد. تا کنون بیش از ۵۰۰۰ ماهواره به فضا فرستاده شده است که نزدیک به ۲۵۰۰ عدد از آنها به طور دائم در فضا در حال ارسال سیگنالها به زمین می‌باشند. در ایستگاههای فضایی نیز برای تامین انرژی الکتریکی از سیستمهای فوتوولتایی استفاده می‌شود. شکل ۳-۱۵ ایستگاه فضایی بین‌المللی در فضا را نشان می‌دهد.



شکل (۳-۱۵): ایستگاه فضایی بین‌المللی [۴۹].

# فصل ۴

روابط و پارامترهای موثر در طراحی  
سلول‌های خورشیدی

#### ۴-۱- مقدمه

به منظور بهینه سازی عملگری سلول‌های خورشیدی لازم است فرایندهایی که در این قطعات رخ می‌دهد و روابط حاکم بر این فرایندها را بشناسیم. اساس تولید انرژی الکتریکی در سلول‌های خورشیدی پدیده فوتوولتایی است که در طی آن با تابش نور بر یک پیوندگاه p-n جریان الکتریکی ایجاد 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 موثر بر افت بازدهی در آنها را بشناسیم تا بتوانیم راه‌های مناسب برای بهبود بازدهی آنها را بیابیم.

## ۴-۲- 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 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. پارامتر مفید دیگری که از طریق آن می‌توان به توصیف عملکرد سلول خورشیدی پرداخت طیف بازدهی کوانتومی است که در ادامه به آن خواهیم پرداخت.

### ۴-۲-۱- مشخصه جریان - ولتاژ در یک سلول 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 به کار رفته در این سلول در طرفین پیوندگاه p-n، زوج‌های الکترون - حفره تولید می‌شوند. در ماده نوع p الکترون‌های تولید شده حامل‌های اقلیتی بوده و تحت تاثیر میدان داخلی در تهی‌لایه، در جهت عمود بر سطح اتصال p-n به سوی ناحیه n حرکت می‌کنند. 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، بر قرار می‌گردد [۴۳]:

$$I = I_L - I_d \quad (۱-۴)$$

که در آن

$$I_d = I_o \left( \exp\left(\frac{V}{V_T}\right) - 1 \right) \quad (۲-۴)$$

بوده و  $V_T = nk_B T / q$  می‌باشد به طوری که  $I_o$  جریان اشباع معکوس دیودی،  $q$  بار الکتریکی الکترون،  $k_B$  ثابت بولتزمن،  $T$  دمای مطلق پیوندگاه و  $n$  ضریب ایده‌آلی قطعه است که در واقعیت  $n$  مقداری

بین ۱ و ۲ دارد؛ برای قطعاتی که در آنها جریان پخشی غالب است مقدار  $n=1$  است و در حالتی که  $n=2$  باشد جریان باز ترکیبی غالب می‌باشد [۵۰].

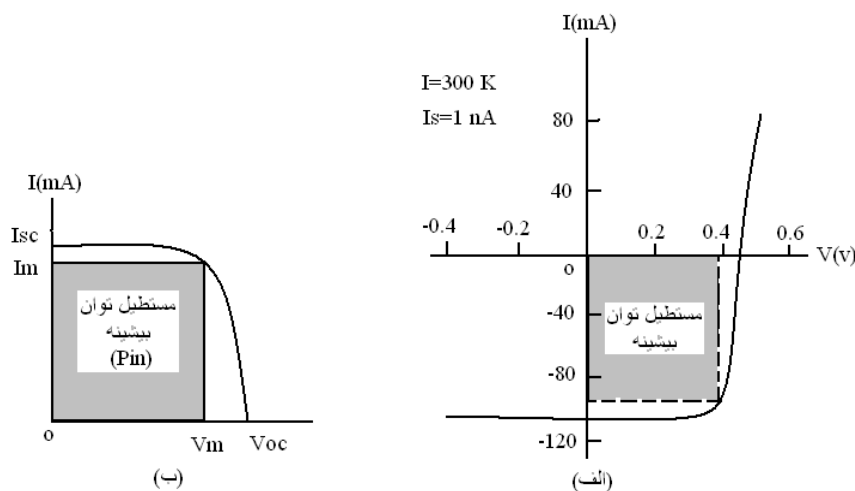
در معادله (۱-۴) با فرض یکنواخت بودن آهنگ جذب در سرتاسر قطعه می‌توان رابطه زیر را برای  $I_L$  نوشت [۴۶]:

$$I_L = qG_L(L_n + L_p)A \quad (۳-۴)$$

که در آن  $G_L$  آهنگ تولید چگالی زوج‌های الکترون - حفره،  $L_n$  و  $L_p$  طول پخش حامل‌های اقلیتی تا تهی لایه (بخش ۳-۴) و  $A$  سطح مقطع ناحیه فعال سلول خورشیدی است. بنابراین رابطه (۱-۴) را می‌توان به صورت زیر نوشت [۴۳]:

$$I = I_L - I_o \left( \exp\left(\frac{V}{V_T}\right) - 1 \right) \quad (۴-۴)$$

این معادله نشانگر مشخصه جریان - ولتاژ یک سلول خورشیدی ایده آل است. شکل ۱-۴ نمودار وابسته به مشخصه I-V را برای یک سلول خورشیدی با  $A=4 \text{ cm}^2$ ،  $I_L=100 \text{ mA}$  و  $I_o=1 \text{ nA}$  در دمای اتاق نشان می‌دهد [۴۳].



شکل (۱-۴): (الف) مشخصه جریان - ولتاژ یک سلول خورشیدی تحت تابش. تصویر (ب) وارونه بخش مربوط به ربع چهارم در شکل (الف) حول محور ولتاژ [۴۳].

## ۴-۲-۲- جریان مدار اتصال کوتاه (Isc)

با توجه به مشخصه جریان - ولتاژ در شکل ۴-۱ این منحنی مشخصه محور جریان را قطع می‌کند. محل تلاقی منحنی با محور جریان، جریان مدار اتصال کوتاه  $I_{sc}$  نام دارد. این کمیت به ازای  $V=0$  از معادله (۴-۴) 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 معادله (۴-۳) عوامل موثر بر بزرگی جریان مدار اتصال کوتاه در یک سلول خورشیدی، شدت تابش نور فرودی و طولهای پخش حاملهای اقلیت ( $L_n$  و  $L_p$ ) در قطعه می‌باشد. واضح است که با افزایش شدت تابش نور فرودی، آهنگ تولید چگالی زوج‌های الکترون - حفره ( $G_L$ ) افزایش می‌یابد.

## ۴-۲-۳- ولتاژ مدار باز (Voc)

ولتاژ مدار باز نیز یکی دیگر از پارامترهای مهم در یک سلول خورشیدی است که از تلاقی منحنی جریان - ولتاژ با محور ولتاژ (شکل ۴-۱) به دست می‌آید. مقدار این کمیت با توجه به معادله (۴-۴) و به ازای  $I=0$  به صورت زیر به دست می‌آید [۴۳]:

$$V_{oc} = V_T \ln\left(\frac{I_L}{I_0} + 1\right) \quad (۵-۴)$$

هر گاه شدت تابش نور به اندازه کافی بزرگ باشد به طوری که  $I_L \gg I_0$  باشد، رابطه (۵-۴) را می‌توان به صورت زیر نوشت [۴۳]:

$$V_{oc} \cong V_T \ln \frac{I_L}{I_0} \quad (۶-۴)$$

که  $V_T = nk_B T / q$  است. با جانشانی  $I_L$  از رابطه (۴-۳) و  $I_0$  از رابطه‌ای مشابه یعنی:

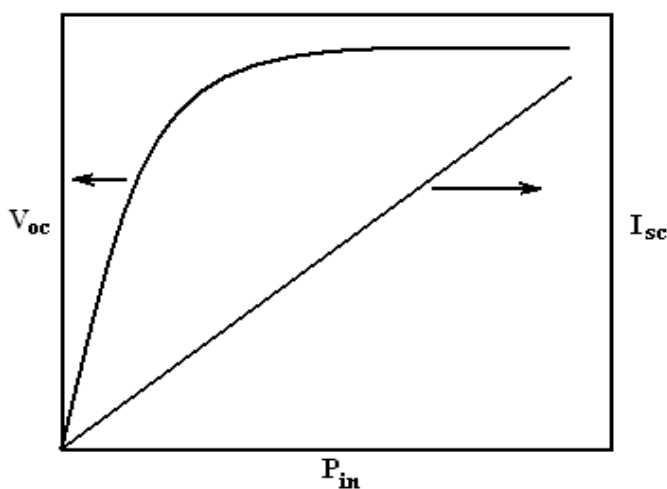
$$I_0 \cong q A G_T (L_n + L_p) \quad \text{که در آن } G_T = \frac{p_{n0}}{\tau_p} = \frac{n_{p0}}{\tau_n}$$

طول عمر باز ترکیب حامل‌ها و  $p_{n0}$  و  $n_{p0}$  چگالی حامل‌ها در تعادل گرمایی می‌باشند،

معادله (۶-۴) به صورت [۵۱]:

$$V_{oc} \cong V_T \ln \frac{G_L}{G_T} \quad (7-4)$$

حاصل می‌شود. از رابطه (7-4) چنین انتظار می‌رود که  $V_{oc}$  با افزایش  $G_L$  همچنان زیاد شود. اگر چه 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 بازترکیب‌ها ( $\tau_n$  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 می‌ماند و در نتیجه  $V_{oc}$  به یک مقدار اشباع نزدیک می‌شود. در عمل حداکثر مقدار ممکن برای  $V_{oc}$  برابر ولتاژ سد داخلی پیوندگاه دیودی است. شکل 2-4 تغییرات  $V_{oc}$  بر حسب توان تابش فرودی ( $P_{in}$ )، را نشان می‌دهد [51].



شکل (2-4): تغییرات  $V_{oc}$  و  $I_{sc}$  بر حسب توان تابشی فرودی [51].

حال با به دست آوردن  $I_s$  از معادله (5-4) و قرار دادن آن در معادله (4-4) و نوشتن آن بر حسب ولتاژ، به شکل دیگری از معادله (4-4) خواهیم رسید [1]:

$$V(I) = \frac{nk_B T}{q} \ln \left[ \frac{I}{I_{sc}} + \left(1 - \frac{I}{I_{sc}}\right) \exp\left(\frac{qV_{oc}}{nk_B T}\right) \right] \quad (8-4)$$

که در فصل ۵ در تحلیل داده‌های تجربی از این معادله استفاده خواهیم کرد.

#### ۴-۲-۴ - ضریب پرکنندگی (F.F.)

ضریب پرکنندگی کمیتی است که بیانگر بیشترین میزان توان الکتریکی قابل حصول از یک سلول خورشیدی می‌باشد. همانطور که در شکل ۴-۱ مشاهده می‌شود، به ازای یک مقاومت بار بخصوص می‌توان 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 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 می‌کنند [۴۳]:

$$F.F. = \frac{I_m V_m}{I_{sc} V_{oc}} \quad (۹-۴)$$

با توجه به این تعریف اگر چه حداکثر مقدار ممکن برای F.F. می‌تواند به واحد نزدیک شود، لکن این ضریب در سلول‌های خورشیدی واقعی با بازده بالا مقداری بین ۰/۷ تا ۰/۹ می‌باشد [۵۲].

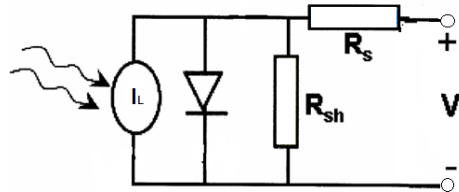
#### ۴-۲-۵ - مشخصه جریان - ولتاژ در سلول خورشیدی واقعی

معادله (۴-۴) رفتار انتظاری مشخصه جریان - ولتاژ یک سلول خورشیدی را در شرایط ایده‌آل به دست می‌دهد. در شرایط واقعی کمیت‌های دیگری نظیر مقاومت‌های متوالی ( $R_s$ ) و موازی ( $R_{sh}$ ) نیز می‌توانند حضور داشته باشند. مقاومت مواد نیم‌رسانای به کار رفته در ساخت سلول خورشیدی مشتمل بر تاثیر کلیه عوامل پراکندگی حاملها و مقاومت‌های وابسته به اتصال‌ها و مسیرهای ارتباطی است که منشا مقاومت متوالی بوده و نیز مرزهای بلورک‌های احتمالی در لایه‌های نیم‌رسانا است که منشا مقاومت موازی می‌باشد. بنابراین در شرایط کلی‌تر معادله مشخصه جریان - ولتاژ یک سلول خورشیدی را می‌توان به صورت

$$I = I_L - I_o \left( \exp\left(\frac{q(V + R_s I)}{nk_B T}\right) - 1 \right) - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (۱۰-۴)$$

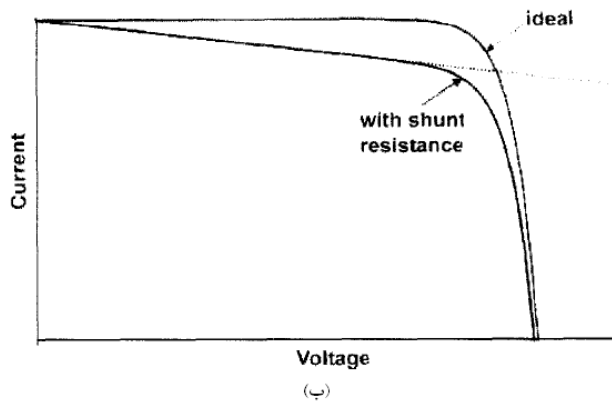
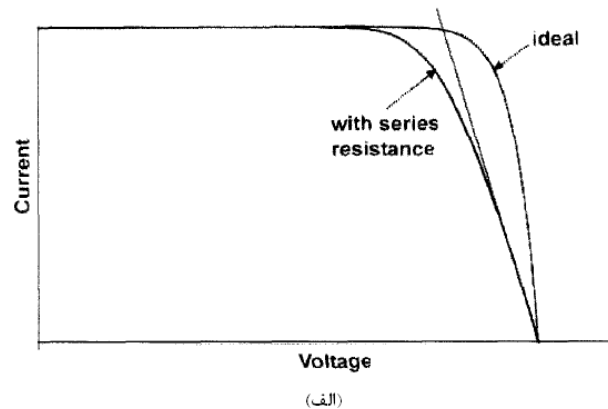


در نظر گرفت [۴۳]. شکل ۳-۴ مدار معادل یک سلول خورشیدی واقعی به همراه مقاومت‌های متوالی و موازی را نشان می‌دهد. با توجه به معادله (۴-۴) انتظار می‌رود در شرایط ایده‌آل مقاومت سری برابر صفر و مقاومت موازی بی‌نهایت باشد.



شکل (۳-۴): مدار معادل یک سلول خورشیدی واقعی به همراه مقاومت‌های متوالی و موازی.

شکل‌های ۴-۴ (الف) و (ب) به ترتیب اثر مقاومت‌های متوالی و موازی را بر منحنی I-V نشان می‌دهد [۱۴].



شکل (۴-۴): مشخصه جریان - ولتاژ در یک سلول خورشیدی ایده‌آل و تاثیر وجود هر کدام از مقاومت‌های (الف) متوالی و (ب) موازی در یک سلول خورشیدی واقعی بر آن [۱۴].

نکته جالب توجه آنکه در سلول‌های خورشیدی مبتنی بر نیمرسانای نیتروژندار رقیق GaInNAs (مورد مطالعه ما در این پایان نامه) بنا به گزارش فرایدمن و کورتز [۱] به علت کوچکی مقاومت‌های متوالی و موازی می‌توان از آنها چشم پوشی کرد.

#### ۴-۲-۶ 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 قطعه را محاسبه نمود. معمولاً هنگامی که صحبت از بازده سلول خورشیدی می‌شود منظور همان بیشترین مقدار بازده قابل دستیابی در نقطه کار سلول خورشیدی است که به صورت زیر تعریف می‌شود [۴۳]:

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{in}} = \frac{F \cdot F \cdot V_{oc} I_{sc}}{P_{in}} \quad (11-4)$$

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

$$P_{in} = \sum_{\lambda} n_o(\lambda) E_{ph}(\lambda) \quad (12-4)$$

که در آن  $n_o(\lambda)$  و  $E_{ph}(\lambda)$  به ترتیب شار فوتون‌های فرودی با طول موج  $\lambda$  و انرژی مربوط به آنها است.

با توجه به معادله (۱۱-۴) انتظار می‌رود هر چه  $V_{oc}$  و  $I_{sc}$  در یک سلول خورشیدی بزرگتر باشد مقدار  $\eta$  نیز بزرگتر شود. از طرفی این کمیتها با توجه به معادلات (۳-۴) و (۶-۴) خود به پارامترهای دیگری از جمله طول پخش حاملهای اقلیتی وابسته‌اند، به طوری که این کمیتها نیز تابع ضریب پخش (D) و زمان واهلش متوسط حاملها ( $\bar{\tau}$ ) هستند ( $L = \sqrt{D\bar{\tau}}$ ). با توجه به بستگی D و تحرک حاملها ( $\mu$ ) به صورت:

$$D = \frac{k_B T}{q} \mu \quad , \quad \mu = \frac{q\tau}{m^*} \quad (13-4)$$

ملاحظه می‌شود که کمیت  $\bar{\tau}$  که وابسته به حضور انواع پراکنده‌گیها در بلور (شامل فونونها، ناخالصیها و ناراستی‌های بلوری)، همچنین بازترکیبهای سطحی است نقش اصلی را در کنترل بزرگی  $L_p$  و  $L_n$  و در نتیجه  $\eta$  ایفا می‌کند [۵۱].

در GaAs طول پخش الکترونها،  $L_n$ ، در حدود ۱۰ میکرون یا بیشتر گزارش شده است [۲۷]، در حالی که با افزوده شدن مقدار کمی نیتروژن به آن، برای مثال در GaInNAs، در بهترین شرایط این مقدار به حدود ۰/۱ تا ۱ میکرون می‌رسد [۲۷].

#### ۴-۲-۷- بازدهی کوانتومی خارجی و داخلی

از دیگر راههای مناسب برای توصیف عملکرد سلول خورشیدی بیان طیفهای بازدهی کوانتومی خارجی  $EQE(\lambda)$ ، و داخلی  $IQE(\lambda)$  قطعه می‌باشد. بازدهی کوانتومی خارجی به صورت نسبت تعداد فوتونهای جذب شده که در جریان الکتریکی نوری قطعه وارد شده‌اند به کل فوتونهای فرودی بر سطح قطعه و بازدهی کوانتومی داخلی نسبت تعداد فوتونهای جذب شده که در جریان الکتریکی قطعه مشارکت دارند به فوتونهای خالص وارد شده به قطعه تعریف می‌شوند. ارتباط بین این دو کمیت به صورت زیر است [۵۰]

$$IQE = \frac{EQE}{1-R} \quad (۴-۱۴)$$

که در آن  $R$  بازتابندگی سطحی ماده می‌باشد. در واقع بازدهی کوانتومی داخلی با استفاده از اندازه‌گیری بازدهی کوانتومی خارجی و بازتابندگی سطحی تعیین می‌شود. در قطعاتی که از پوشش ضد بازتاب برخوردارند بازدهی کوانتومی داخلی برابر با بازدهی کوانتومی خارجی می‌شود.

با استفاده از نتایج مربوط به اندازه‌گیریهای بازدهی کوانتومی می‌توان اطلاعات بسیار مهمی نظیر عرض ناحیه تهی در محل پیوندگاه ( $W$ ) و طول پخش حاملهای اقلیتی ( $L_n$  و یا  $L_p$ ) را از طریق مدلسازی دقیق این طیف تخمین زد، که در این مورد در فصل ۵ این عملیات تشریح و به کار گرفته شده است. معادله (۴-۱۵) ارتباط بین بازدهی کوانتومی داخلی و این پارامترها را نشان می‌دهد [۲۷].

$$QE(\lambda) = [1 - \exp(-\alpha(\lambda)W)] + \frac{\alpha L}{1 + \alpha(\lambda)L} \times 1 - \exp(-\alpha(\lambda)W) \quad (15-4)$$

که در آن  $\alpha(\lambda)$  ضریب جذب بر حسب تابعی از طول موج نور است. در این عبارت، جمله اول نشان دهنده سهم جذب نور در ناحیه تهی و جمله دوم نشان دهنده سهم جذب نور در ناحیه طول پخش حاملهای اقلیتی می باشد.

در صورت کوچک بودن طول پخش حاملهای اقلیتی ( $L \ll W$ ) جذب موثر نور عمدتاً محدود به عرض ناحیه تهی شده، سبب کاهش بازدهی کوانتومی قطعه می گردد. در این وضعیت بنا به گزارش گیز و همکاران [۳۱]، بازدهی کوانتومی داخلی قطعه از رابطه زیر قابل محاسبه خواهد بود:

$$QE(\lambda) = 1 - \exp(-\alpha(\lambda)W) \quad (16-4)$$

از دیگر کمیت‌های قابل حصول و مدلسازی از طیف بازدهی کوانتومی داخلی، جریان اتصال کوتاه سلول خورشیدی است. معادله (۴-۱۷) رابطه بین بازدهی کوانتومی داخلی یک سلول خورشیدی با جریان اتصال کوتاه انتظاری از قطعه را نشان می دهد [۴۹]

$$J_{sc} = q \int QE(\lambda) \Phi_o(\lambda) d\lambda \quad (17-4)$$

که در آن  $\Phi_o(\lambda)$  طیف فرودی نور خورشید در گستره قابل جذب در ماده نیم رساناست.

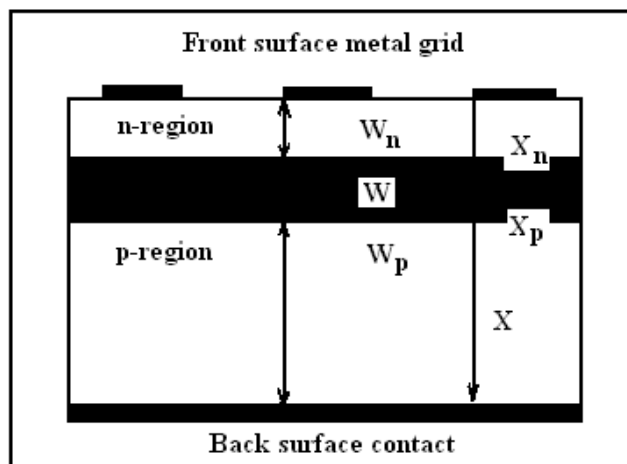
### ۳-۴- عوامل موثر در طراحی بهینه سلولهای خورشیدی

در این بخش به منظور بهینه سازی بازده یک سلول خورشیدی به بررسی برخی از پارامترهای مهم در ساخت این قطعات شامل ضخامت لایه‌ها، چگالی ناخالصیها در لایه‌ها و اتصالات اهمی خواهیم پرداخت.

#### ۴-۳-۱- ضخامت لایه ها

یکی از عوامل موثر در کارایی یک سلول خورشیدی، بهینه سازی ضخامت لایه های n و p به منظور بیشینه سازی جریان مدار اتصال کوتاه است. شکل ۴-۵ یک سلول خورشیدی را با ساختار p-n

نشان می‌دهد. در این ساختار  $W_p$  و  $W_n$  نشانگر ضخامت نواحی خنثی در لایه‌های  $n$  و  $p$ ، و  $W$  کل پهناى تهی لایه، و  $x_p$  و  $x_n$  بترتیب پهناى تهی لایه در نواحی  $n$  و  $p$  هستند. اتصالات شبکه فلزی در قسمت فوقانی و تحتانی مربوط به پایانه‌های خارجی هستند.



شکل (۴-۵): نمودار شماتیک یک سلول خورشیدی [۵۱].

همانطور که در بخش ۳-۷ بیان شد، نور فرودی بر قطعه از قسمت فوقانی به داخل آن نفوذ کرده و امکان دارد که تمامی یا بخشی از آن در نواحی مختلف شامل ناحیه  $n$  تهی لایه و یا لایه  $p$  جذب شوند. شرط خنثایی بار در ناحیه تهی مستلزم آن است که بارها در دو طرف پیوندگاه مساوی باشند. لذا

$$N_a x_p = N_d x_n \quad (۱۸-۴)$$

که در آن  $x_p$  و  $x_n$  به ترتیب عرض لایه تهی در نواحی  $p$  و  $n$  بوده و عرض کل ناحیه تهی برابر خواهد بود با [۴۶]:

$$W = x_p + x_n \quad (۱۹-۴)$$

با در نظر گرفتن  $J_L$  به عنوان چگالی جریان نوری تولید شده می‌توان آن را به صورت مجموع سه مولفه نوشت:

$$J_L = J_n + J_p + J_{dep} \quad (۲۰-۴)$$

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 [۴۶ و ۵۱]:

$$J_n = qn_0(1-R)(IQE) \frac{\alpha L_n}{(\alpha L_n)^2 - 1} \exp(-\alpha L_p) [F_1 - F_2 \exp(-\alpha W_p)] \quad (21-4)$$

$$J_p = qn_0(1-R)(IQE) \frac{\alpha L_p}{(\alpha L_p)^2 - 1} [F_1' - F_2' \exp(-\alpha W_n)] \quad (22-4)$$

$$J_{dep} = qn_0(1-R)(IQE) \exp(-\alpha x_n) [1 - \exp(-\alpha W)] \quad (23-4)$$

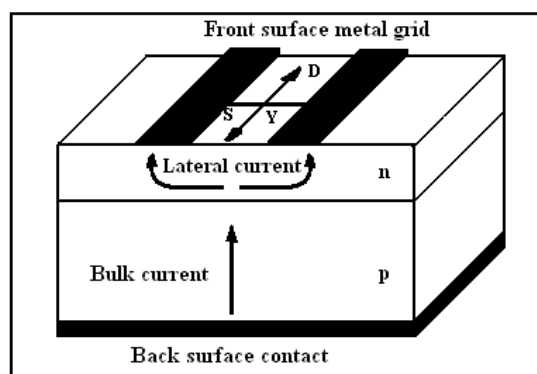
که در این روابط  $q$ ،  $IQE$ ،  $n_0$ ،  $R$  و  $\alpha$  به ترتیب بار الکتریکی الکترون، بازده کوانتومی داخلی، شار فوتونهای تابشی، ضریب بازتابش و ضریب جذب در نیمرسانا هستند.  $F_1$  و  $F_2$  پارامترهای وابسته به  $L_n$  و  $D_n$  (به ترتیب طول پخش حامل‌ها در ناحیه p و ضریب پخش الکترون‌ها)،  $F_1'$  و  $F_2'$  پارامترهای وابسته به  $L_p$  و  $D_p$  (به ترتیب طول پخش حامل‌ها در ناحیه n و ضریب پخش حفره‌ها) می‌باشند. جریان الکترون‌ها و حفره‌ها هر دو به ازای ضخامت مشخص لایه خنثی n و p دارای یک مقدار بیشینه می‌باشند که با مشتق‌گیری از روابط (۲۲-۴) و (۲۳-۴) نسبت به ضخامت لایه خنثی n و p و برابر صفر قرار دادن مشتق به دست می‌آیند.

با توجه به تغییرات نوعی طیف جذب فوتونها بر حسب انرژی، (شکل ۲-۷)، کاملاً واضح است که فوتونهای با طول موج کوتاه عمدتاً در نزدیکی سطح و فوتونهای با طول موج بلند عمدتاً در عمقهای بیشتر در داخل ماده جذب می‌شوند. بنابراین در صورتی که پیوندگاه در نزدیکی سطح قطعه باشد در این صورت تابشهای نوری با طول موج کوتاه در نزدیکی پیوندگاه جذب شده و می‌توانند در جریان نوری مشارکت کنند.

#### ۴-۳-۲- چگالی ناخالصی در لایه بالایی

پس از بررسی لایه‌ها از نظر ابعاد هندسی اکنون به تاثیر میزان چگالی ناخالصی در لایه‌ها می‌پردازیم که می‌تواند بر مقدار مقاومت متوالی قطعه ( $R_s$ ) موثر باشد. در طراحی لایه بالایی لازم به

توجه است که مسیر حرکت حامل‌ها (جریان الکتریکی) در این لایه، بر خلاف 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 و نیز شکل الگوی اتصال‌های اهمی بر روی سطح 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 موسوم هستند. شکل ۴-۶ مسیر جریان در یک سلول خورشیدی را نشان می‌دهد.



شکل (۴-۶): مسیر جریان در یک سلول خورشیدی با ساختار p-n [۵۱].

یک راه برای کاهش تلفات بازده ناشی از جریان‌های افقی، کاهش فاصله میان اتصالات اهمی در لایه بالایی و یا افزودن مقداری ناخالصی در این لایه به منظور دستیابی به رسانندگی بیشتر (مقاومت ویژه کمتر) در لایه است. لازم به توجه است که در صورت کاهش فاصله اتصالات اهمی میزان نور ورودی به سلول کاهش خواهد یافت. بنابراین برای رسیدن به بازدهی بیشینه بایستی شرایط بهینه برای تعداد و فاصله میان اتصالات مورد بررسی قرار گیرد [۵۱].

#### ۴-۳-۳- 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.

بنابراین پارامتر کلیدی در تعیین جریان نوری ( $I_L$ )، طول پخش حامل‌های اقلیت در لایه زیرین ( $L_n$ ) و  $L_p$  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 [۴۳]:

$$L_n = \left( \mu_n \tau_n \frac{k_B T}{q} \right)^{1/2} \quad (24-4)$$

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. بنابراین 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 [۵۱]:

$$I_o = q A N_c N_v \left( \frac{k_B T}{q} \right)^{1/2} \left( \frac{\mu_n^{1/2} N_A}{\tau_n^{1/2} N_A} + \frac{\mu_p^{1/2} N_D}{\tau_p^{1/2} N_D} \right) \quad (25-4)$$

که در آن  $N_c$  و  $N_v$  به ترتیب چگالی موثر حالت‌ها در نوار رسانش و نوار ظرفیت بوده و  $N_A$  تراکم پذیرنده‌ها می‌باشد، جریان اشباع معکوس (جریان تاریکی) 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.

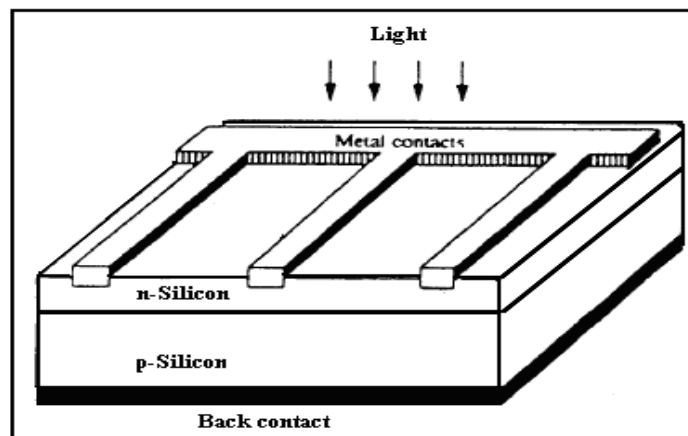
بنابراین یک مقدار بهینه برای چگالی ناخالصی‌ها در این لایه وجود دارد که به ازای آن حاصلضرب  $V_{oc} I_{sc}$  بیشینه می‌شود و معمولاً مقدار آن نسبت به چگالی ناخالصی در لایه بالایی بسیار کمتر است [۵۱].

معمولاً نیمرسانای لایه زیرین سلول خورشیدی از نوع p می‌باشد، زیرا قابلیت تحرک الکترون‌ها از قابلیت تحرک حفره‌ها بیشتر است. بدین ترتیب پیوند n<sup>+</sup>-p یک ساختار استاندارد در اکثر سلول‌های خورشیدی است [۵۲].



#### ۴-۳-۴- 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 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 تاثیر 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، می‌تواند به عنوان پنجره‌ای برای عبور نور به ناحیه فعال عمل کند. شکل‌های هندسی متداول برای طراحی اتصال بالایی در سلول‌های خورشیدی به صورت شانه‌ای و شبکه‌ای هستند. در شکل ۴-۷، نمونه‌ای از اتصالات اهمی به شکل شانه‌ای را نشان می‌دهد. در اتصالات اهمی به شکل شانه‌ای و شبکه‌ای نیز مقدار بهینه‌ای برای فاصله میان اتصالات وجود دارد که تعیین مقدار دقیق آن نیازمند محاسبات پیچیده‌ای است [۵۱].



شکل (۴-۷): طرح یک سلول خورشیدی با اتصالات اهمی شانه ای شکل [۵۱].

#### ۴-۴- عوامل موثر 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 ۴-۵ به آنها اشاره خواهد شد. در این بخش برخی از عوامل موثر بر کاهش بازدهی یک سلول خورشیدی را مورد بررسی قرار خواهیم داد.

##### ۴-۴-۱- 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 موثر 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 غیر مستقیم، 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.

##### ۴-۴-۲- تلفات باز ترکیب

تلفات باز ترکیب 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 آنکه توسط پایانه‌های خروجی جمع‌آوری شوند، بازترکیب شده و همین امر موجب کاهش جریان نوری و در نتیجه تلفات بازترکیب می‌گردد [۵۲].

در یک نیم‌رسانا بدون نقائص بلوری، بازترکیب حامل‌ها طول عمر ذاتی آنها را تعیین می‌کنند. در این حالت طول عمر حامل‌ها به چگالی ناخالصی‌ها بستگی دارد و کاهش طول عمر بازترکیب‌ها با افزایش چگالی ناخالصی‌ها گزارش شده است. این در حالی است که عملاً به خاطر وجود نقائص بلوری در نیم‌رسانا کاهش طول عمر حامل‌ها باز هم کوچکتر می‌شود [۵۱].

نکته دیگری که باید در نظر داشت، نقش بازترکیب‌ها در تهی لایه است که در عمل می‌تواند بخشی از بازترکیب‌ها را شامل شود و تاثیر آن افزایش جریان اشباع معکوس و کاهش ولتاژ مدار باز سلول می‌باشد [۵۱].

#### ۴-۴-۳ - 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 تاثیر 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 در قطعه می‌شود.

#### ۴-۴-۴ - تاثیر 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 [۵۱].

در یک نیم‌رسانا با افزایش دما، معمولاً گاف نواری نیم‌رسانا کاهش و طول عمر 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 [۵۱]. 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 [۵۱]. به این موضوع در بخش ۴-۵ پرداخته‌ایم.

#### ۴-۵- روش‌های بهبود کارایی سلول‌های خورشیدی

چنانکه در بخش ۴-۵ 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.

#### ۴-۵-۱- استفاده از پوشش‌های ضد بازتاب

همانطور که در بخش ۴-۵-۱ اشاره شد بازتابش نور از سطح نیم‌رسانا از مهمترین عوامل تاثیر 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 به گونه‌ای 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  $180^\circ$  درجه‌ای ایجاد شده تا یکدیگر را حذف کنند. بنابراین اگر  $\lambda$  طول موج مورد نظر باشد، ضخامت پوشش AR باید  $\lambda/4$  در نظر گرفته شود.

---

<sup>۱</sup>Antireflection coating

ضریب بازتابندگی با فرض وجود پوشش AR از رابطه زیر به دست می‌آید [۵۳]:

$$R = \left( \frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2 \quad (۲۶-۴)$$

که در آن  $n_1$  و  $n_2$  به ترتیب ضرایب شکست پوشش AR و نیمرسانا هستند. چنانکه رابطه (۲۶-۴) نشان می‌دهد به ازای  $n_1 = n_2$  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  $n_1 = n_2$ ، 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 ۱-۴ برخی از مواد رایج به عنوان پوشش‌های AR، به همراه ضرایب شکست آنها را نشان می‌دهد [۵۱].

جدول ۱-۴ مواد مورد استفاده به عنوان پوشش‌های ضد بازتاب (AR) در سلول‌های خورشیدی [۵۱].

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

#### ۴-۵-۲- استفاده از ساختارهای بهینه

همانگونه که قبلا نیز اشاره شد یک راه مناسب برای بهینه سازی سلولهای خورشیدی و افزایش بازدهی آنها بهینه کردن ساختار آنها می باشد. برای این منظور به جای پیوندگاه p-n از پیوندگاه p-i-n استفاده می شود که در آن یک لایه با آرایش بسیار کم i در بین پیوندگاه p-n قرار گرفته است. در این شرایط میدان الکتریکی داخلی در ناحیه وسیع تری گسترده شده و امکان جمع آوری حامل های بیشتری فراهم می گردد. البته باید توجه داشت که یک ایراد در استفاده از ساختار p-i-n باز ترکیب حاملها در ناحیه تهی و کاهش  $V_{oc}$  سلول می باشد. بنابراین بایستی یک مقدار بهینه را برای ضخامت لایه i در نظر گرفت.

# فصل ۵

بررسی و تحلیل داده‌های سلول‌های  
خورشیدی مبتنی بر نیم‌رساناهای  
نیتروژندار رقیق

## ۵-۱- مقدمه

به منظور تامین انرژی همواره تلاش‌های بسیاری برای پیشرفت سلول‌های خورشیدی در جهت افزایش بازدهی و کاهش هزینه‌های تولید آن در جریان است. مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که هر یک از مواد و تکنولوژی‌های مورد استفاده در ساخت سلول‌های خورشیدی وابسته به آن الگوی توسعه مشخصی را دنبال کرده و سرانجام با رسیدن به یک مقدار مشخص بازده این روند متوقف شده است. لذا برای دستیابی به بازدهی بیشتر و بهینه‌سازی سلول‌های خورشیدی استفاده از مواد جدید امری ضروری به نظر می‌رسد. بهبود عملکرد سلول خورشیدی نه تنها نیازمند دستیابی به ماده‌ای با کیفیت رشد بهینه است، بلکه ساختار به کار گرفته شده در ساخت قطعه نیز از اهمیت خاصی برخوردار می‌باشد.

همانطور که پیشتر اشاره شد سلول‌های خورشیدی چند پیوندگاهی قابلیت دستیابی به بازدهی بالا در حدود ۴۰٪ را دارا می‌باشند [۱]. امروزه با شناخت مواد نیم‌رسانای نیتروژندار رقیق نظیر GaInNAs که با تغییر تراکم نیتروژن در حد مقادیر بسیار کم (کوچکتر از ۵٪) می‌توان گاف نواری آن را کنترل نمود، به عنوان کاندیدی مناسب در سلول‌های خورشیدی چند پیوندگاهی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این ماده با گاف نواری بین ۱ تا ۱/۲۵ eV را می‌توان به طور همخوان شبکه‌ای با بلور Ge و GaAs رشد داد. همین خاصیت سبب شده است که در سالهای اخیر تحقیقات و بررسی‌های گسترده‌ای از این ماده برای استفاده در سلول‌های خورشیدی چند پیوندگاهی صورت پذیرد.



در این فصل در بخش ۲-۵ به مطالعه پارامترهای موثر بر طیف بازدهی کوانتومی داخلی بر حسب تابعی از انرژی فوتونهای تابشی شامل اثر بازپخت و تاثیر حضور اتمهای In در ماده به کار گرفته شده و اثر تراکم آلاینش در لایه‌های وابسته به ناحیه فعال سلول و نیز ساختارها و روشهای رشد متفاوت مورد بررسی قرار گرفته است. در بخش ۳-۵ به مطالعه مشخصه جریان - ولتاژ در سلول‌های خورشیدی با ساختارهای متفاوت پرداخته و بازدهی کوانتومی، مشخصه جریان - ولتاژ، عرض ناحیه تهی و طول پخش حامل‌های اقلیت را مورد بررسی قرار می‌دهیم. در ادامه در بخش ۴-۵ به مطالعه بستگی مشخصه الکتریکی به دما می‌پردازیم.

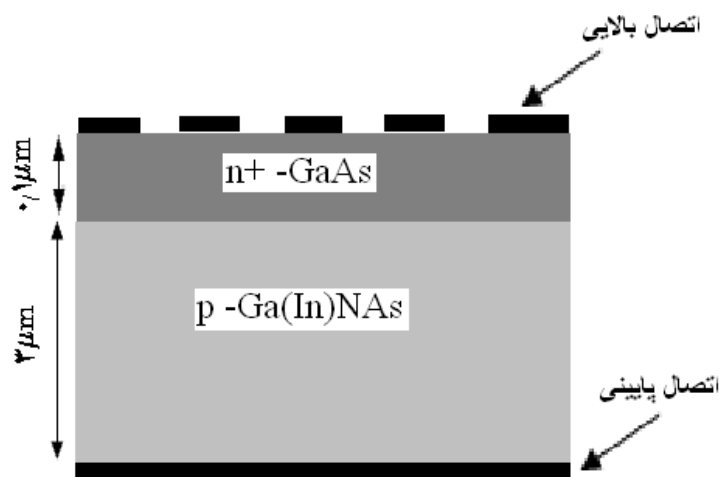
## ۲-۵ - مطالعه پارامترهای موثر بر بازدهی کوانتومی داخلی سلولهای خورشیدی مبتنی بر نیمرساناهای نیتروژندار رقیق Ga(In)NAs

در این بخش به مطالعه نظری بازدهی کوانتومی داخلی سلول‌های خورشیدی می‌پردازیم و عوامل مختلفی از جمله ترکیب لایه‌های به کار گرفته شده در ساختار سلولهای خورشیدی  $n^+$  GaAs- p GaInNAs را بررسی کرده و تاثیر حضور اتمهای In در ترکیب ماده به همراه بازپخت (بخش ۲-۵-۲-۱)، تراکم آلاینش (بخش ۲-۲-۵) همچنین ساختارهای مختلف (بخش ۳-۲-۵) و روش رشد به کار گرفته شده در لایه نشانی نمونه (بخش ۴-۲-۵) مورد مطالعه قرار می‌دهیم.

### ۲-۵-۱ - اثر بازپخت و حضور اتمهای In در سلولهای با ساختار ناهمگون $n^+$ -p تهیه شده به روش MOCVD

همانگونه که در بخش ۷-۲-۴ آمده است کمیتهایی از جمله عرض ناحیه تهی و طول پخش حاملهای اقلیت نقش مهمی در بازدهی کوانتومی داخلی یک سلول خورشیدی دارند. موضوع مورد مطالعه ما در این بخش بررسی تاثیر بازپخت و حضور اتمهای In (حدود ۰.۳٪) بر این کمیتهای در سلولهای خورشیدی با ترکیب لایه‌ای ناهمگون  $n^+$  GaAs-p Ga(In)NAs است که به روش MOCVD رشد یافته است [۴]. این سلولها (شکل ۱-۵) متشکل از یک لایه  $n^+$  از جنس GaAs با

آلایش بالا ( $10^{18} \text{cm}^{-3}$ ) از اتم‌های بخشنده Se و با ضخامت  $0.1 \mu\text{m}$  است که بر روی لایه‌ای از Ga(In)NAs با ضخامت  $3 \mu\text{m}$  و آلایش متوسط ( $10^{17} \text{cm}^{-3}$ ) با اتم‌های پذیرنده Zn لایه نشانی شده است. اتصالات اهمی نیز در قطعه مورد نظر در قسمت پایین و بالا رشد داده شده‌اند. در این نمونه‌ها اثر بازپخت در شرایط دمایی  $700$  درجه سانتیگراد به مدت  $30$  دقیقه و همچنین حضور اتم‌های In بر بزرگی بازدهی کوانتومی داخلی این قطعات مورد مطالعه قرار گرفته است.

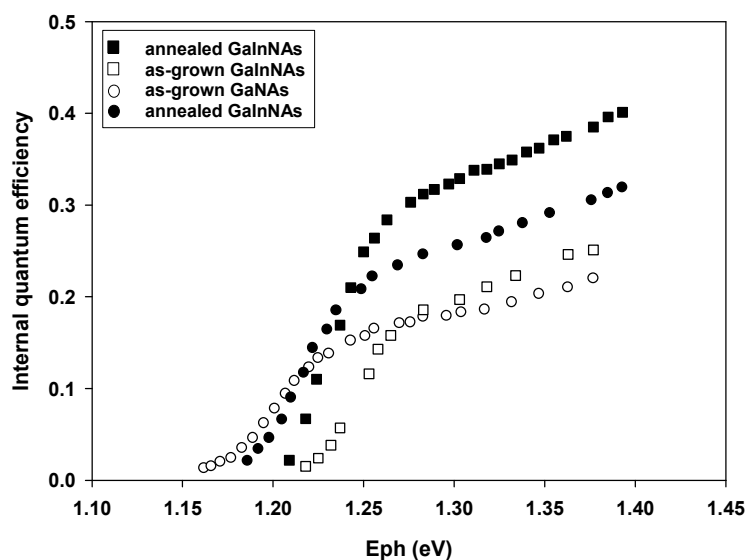


شکل (۵-۱): ساختار هندسی سلول خورشیدی با ساختار ناهمگون  $n^+p$  [۴].

شکل ۵-۲ تغییرات طیف بازدهی کوانتومی داخلی این قطعات را بر حسب انرژی برای GaNAs (قبل و بعد از بازپخت، دایره‌های سفید و سیاه) و GaInNAs (قبل و بعد از بازپخت، مربع‌های سفید و سیاه) گزارش شده توسط خوان و همکاران [۴] را نشان می‌دهد. با توجه به این نتایج کاملاً آشکار است که با انجام عملیات گرمایی بازدهی داخلی در تمامی گستره انرژی مورد نظر افزایش یافته است. با توجه به مطالب بخش ۴-۲ این تغییرات می‌تواند متاثر از تغییرات عرض ناحیه تهی ( $W$ ) و طول پخش حامل‌های اقلیت ( $L$ ) باشد.

در بررسی این داده‌ها می‌توان به موارد ذیل اشاره نمود: (۱) بنظر می‌رسد فرایند جذب و در نتیجه حصول بازدهی تولید بر اثر فوتون‌های فرودی در گستره  $1$  تا  $1/4 \text{ eV}$  رخ داده‌اند که خود نشانگر

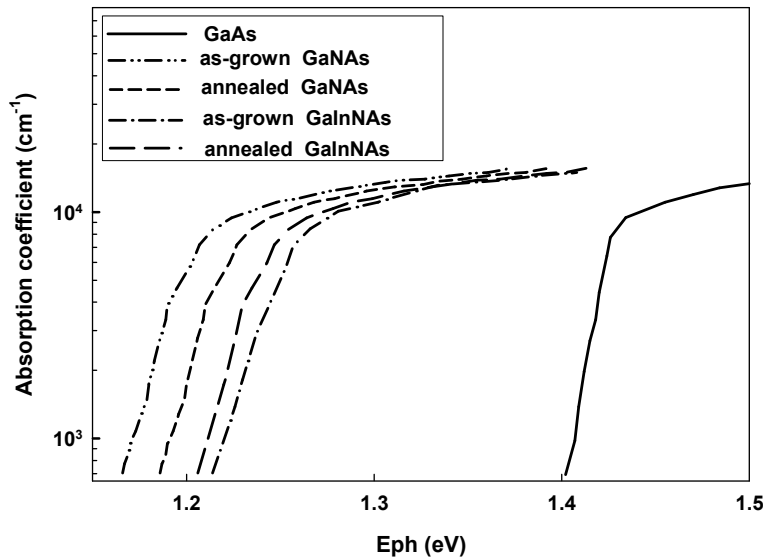
شفاف بودن لایه فوقانی (GaAs) با گاف نواری  $1/4$  eV می‌باشد. (۲) با توجه به بالا بودن تراکم آرایش در لایه GaAs انتظار می‌رود پخش حامل اقلیت در آن در مقایسه با لایه زیرین کوتاه باشد به طوری که بتوان از آن در برابر طول پخش لایه زیرین چشمپوشی کرد (بخش ۳-۳-۴). این نکات بیانگر آن است که در این ساختار لایه GaAs نقش موثری در تبدیل انرژی نوری به الکتریکی نداشته و بخش اصلی عملگری قطعه وابسته به لایه زیرین می‌باشد.



شکل (۲-۵): بازدهی کوانتومی داخلی سلول خورشیدی برای ماده In دار در شرایط قبل و بعد از بازپخت (مربع های سفید و سیاه) و برای ماده بدون In در شرایط قبل و بعد از بازپخت (دایره های سفید و سیاه) [۴].

به منظور توصیف نظری داده‌ها در شکل ۲-۵ می‌توان از معادله (۴-۱۵) استفاده کرد. همانطور که از این معادله پیداست برای تعیین بازدهی کوانتومی داخلی نیازمند اطلاع از نحوه تغییرات طیف ضریب جذب لایه زیرین هستیم. شکل ۳-۵ وابستگی ضریب جذب بر حسب انرژی برای مواد به کار گرفته شده در این سلولها را نشان می‌دهد. این مقادیر حاصل عملیات برازشی ما از طیف جذب GaAs و استفاده از روش پیتک و همکاران [۵۴] می‌باشد. در این روش از انتقال طیف جذب GaInNAs به طوری که با گاف نواری آن ماده Ga(In)NAs مطابقت کند استفاده شده است. برخی

مقادیر گزارش شده توسط خوان و همکاران [۴] برای مواد فعال در عملگری سلول خورشیدی، در اینجا GaInNAs و GaNAs قبل و بعد از بازپخت در جدول ۱-۵ آمده است.

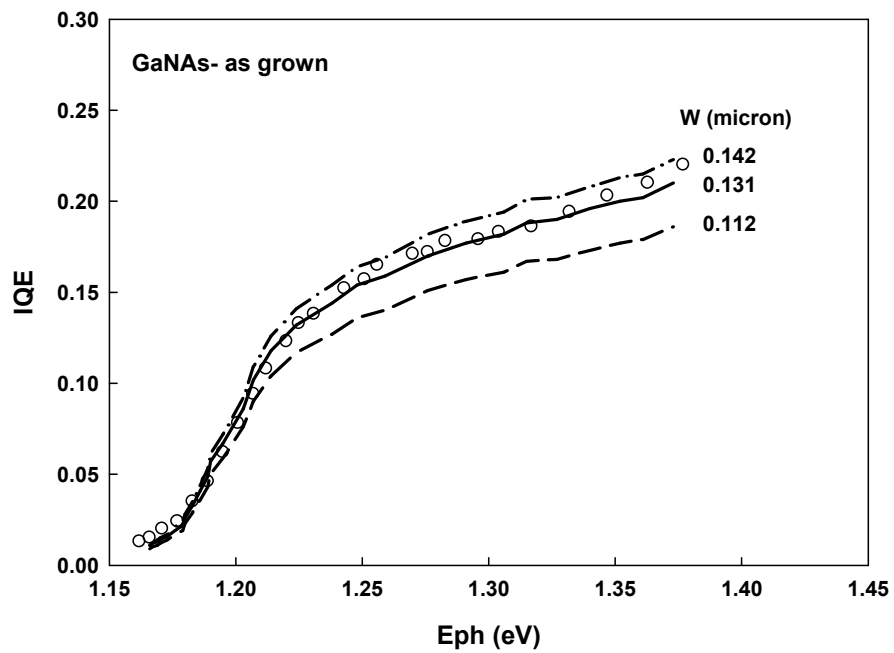


شکل (۳-۵): تغییرات ضریب جذب بر حسب تابعی از انرژی فوتونهای نوری برای نیمرساناهای GaNAs و GaAs و Ga(In)NAs. منحنی های خط نقطه چین مربوط به شرایط قبل از بازپخت و خط چین پس از باز پخت است.

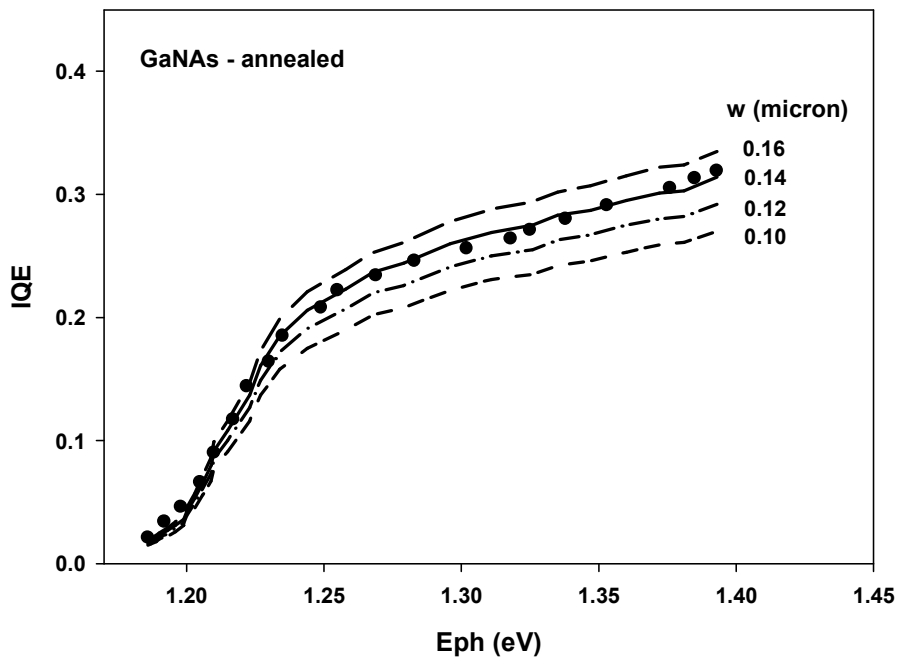
جدول ۱-۵ گاف نواری، ولتاژ مدار باز و طول پخش حاملها در نمونه‌های مورد مطالعه قبل و بعد از بازپخت [۴]

نمونه	$E_g$ (eV)	$V_{oc}$ (V)	$L$ ( $\mu\text{m}$ )
GaNAs	۱٫۱۹	۰٫۵۸	۰٫۰۲
GaNAs (a)	۱٫۲۱	۰٫۶۲	۰٫۱۱
GaInNAs	۱٫۲۴	۰٫۶۶۵	۰٫۰۶
GaInNAs (a)	۱٫۲۳	۰٫۶۷۵	۰٫۲۱

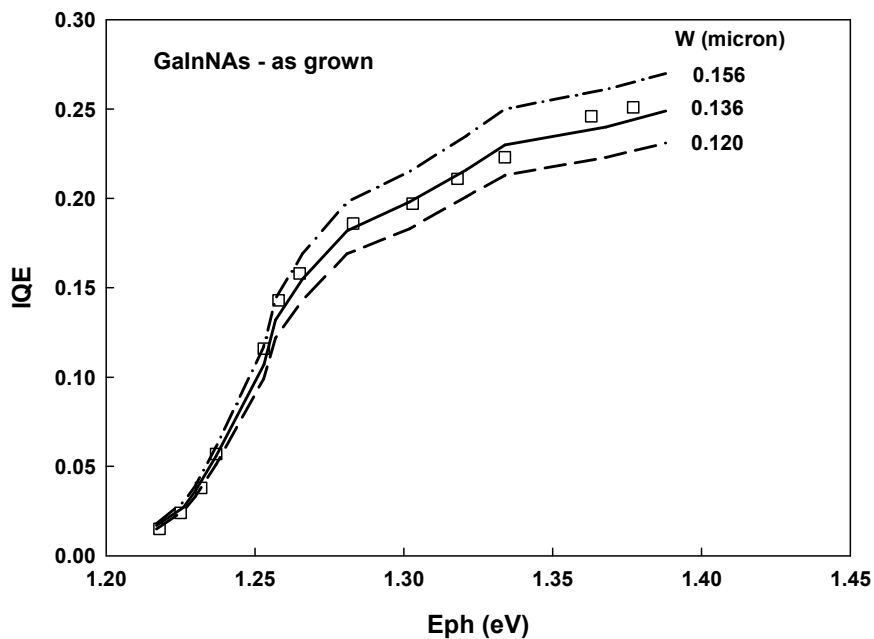
با بکارگیری تغییرات ضریب جذب و نیز مقادیر مربوط به طول پخش ( $L$ ) حامل‌های اقلیت الکترونی (جدول ۱-۵) در معادله (۴-۱۵) مقدار عرض ناحیه تهی ( $W$ ) به عنوان پارامتر برازشی را به دست آوردیم. همانگونه که در شکل‌های ۴-۵ (الف، ب، ج و د) مشاهده می‌شود، مناسبترین مقدار برازشی حاصل آمده برای این نمونه‌ها بترتیب برابر ۰٫۱۳۱، ۰٫۱۴۲، ۰٫۱۳۶ و ۰٫۱۶۳ میکرون می‌باشد.



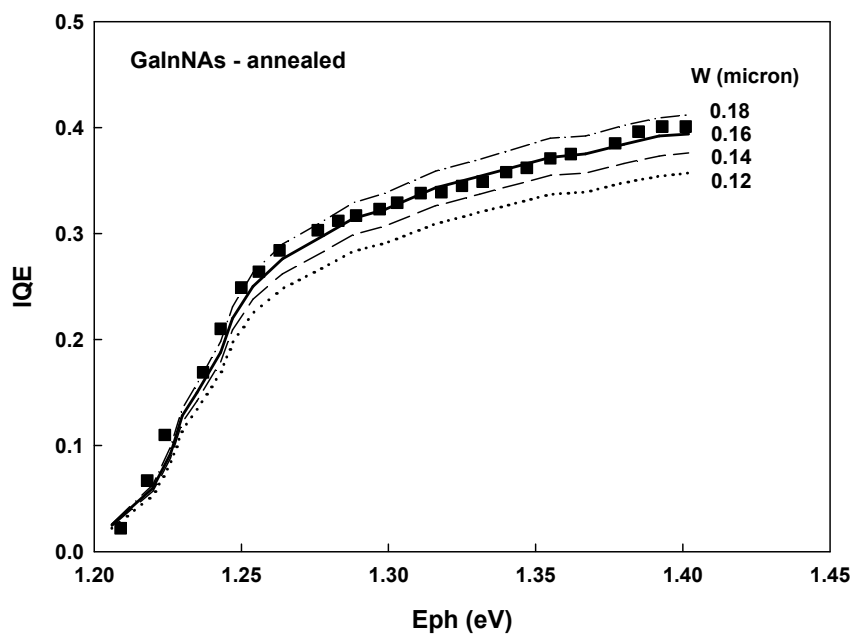
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل (۴-۵): بازدهی کوانتومی داخلی سلول خورشیدی بر حسب تابعی از انرژی فوتونهای نور تابشی در شرایط قبل و بعد از بازپخت برای نمونه‌های (الف و ب) GaNAs و (ج و د) GaInNAs. هر یک از منحنی‌ها در این شکلها رفتار انتظاری نظری قطعه را به ازای یک عرض ناحیه تهی معین ( $W$ ) بر حسب میکرون نشان می‌دهد.

برای واضحتر بودن و مشاهده تاثیر مقدار  $W$  در این محاسبات منحنی‌های وابسته به پیش‌بینی IQE نمونه‌ها را به ازای مقادیر نزدیک به  $W$  بهینه نیز رسم نموده‌ایم. این نتایج را می‌توان بر اساس موضوعات ذیل توصیف نمود:

(۱) با افزودن In به نمونه GaNAs طول پخش الکترون با ضریب ۳ برابر افزایش یافته و بعد از بازپخت نمونه GaInNAs، نیز این کمیت با ضریب ۳/۵ برابر افزایش یافته است. همانطور که قبلاً نیز گفته شد  $L$  با ضریب پخش حامل  $D$  متناسب است ( $L \propto \sqrt{D}$ ) و  $D$  نیز خود با تحرک‌پذیری حاملها  $\mu$  متناسب است ( $D \propto \mu$ )؛ بنابراین با افزودن اتمهای In به ماده، مکانیسم پراکندگی الکترونها از خوشه‌های پیوندهای Ga-N بر اثر تشکیل پیوندهای کتره‌ای In-N در این ماده کاهش می‌یابد [۵۵]. انتظار می‌رود با کاهش پراکندگی آلیاژ خوشه‌ای، تحرک حاملها و به دنبال آن طول پخش آنها نیز افزایش یابد. تحرک حاملها مجدداً با عملیات بازپخت به دلیل کاهش مکانیسم پراکندگی مربوط به اتمهای N، شامل آلیاژهای خوشه‌ای، تله‌ها و در رفتگی‌ها افزایش می‌یابد [۶ و ۵۹ و ۵۸ و ۵۷ و ۵۶].

(۲) با مقایسه عرض تهی لایه بهینه  $W$  در نمونه‌های مختلف مشاهده می‌شود که با وجود اینکه افزودن اتمهای In موجب بهبود این کمیت شده است (با ضریب ۱/۰۴) اما بعد از بازپخت نمونه GaInNAs با ضریب ۱/۲۴ افزایش یافته است. این نتایج می‌تواند بیانگر این امر باشد که حضور اتمهای In در نمونه تازه رشد یافته تا حدودی سبب کاهش مراکز بازترکیبی وابسته به اتمهای نیتروژن در GaNAs شده و در نتیجه به افزایش اندک در عرض تهی لایه می‌انجامد. افزایش قابل توجه در عرض تهی لایه پس از بازپخت GaInNAs نشان دهنده تاثیر عملیات گرمایی در کاهش هر چه بیشتر تراکم نقایص نقطه‌ای و ناراستی‌های بلوری در ماده GaInNAs نوع p، که می‌توانند به عنوان مراکز بازترکیب عمل کنند، باشد [۲۷].

(۳) همچنین بر اساس مقادیر ولتاژ مدار باز گزارش شده در جدول ۵-۱ یک افزایش سیستماتیک را در این نمونه‌ها می‌توان مشاهده نمود. معادله گزارش شده برای ولتاژ مدار باز توسط کورتز و

همکاران [۵۹] در یک سلول خورشیدی GaInNAs

$$V_{oc} = E_g - E_a - 0.37 \quad (1-5)$$

است که در آن  $E_a$  عمق تراز تله نسبت به لبه نوار رسانش می‌باشد. تغییر سیستماتیک ذکر شده می‌تواند ناشی از کاهش عمق تراز تله مربوط به نیتروژن از عمق زیاد (در GaNAs) به حالت کم عمق و کم عمق‌تر در GaInNAs به ترتیب قبل و بعد از بازپخت باشد. این امر با گزارشات تئوری و تجربی دیگر در این نمونه‌ها سازگار است [۶۲ و ۵۸].

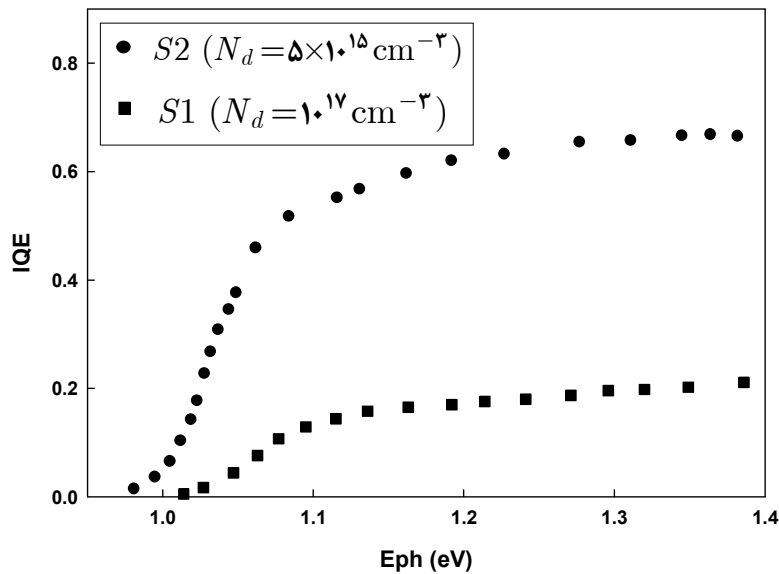
این نتایج حاکی از آن است که با اضافه شدن اتمهای In به GaNAs مقدار طول پخش حاملها در حدود سه برابر و با انجام بازپخت بر روی آن افزایش مجدد دیگری قدری بیش از سه برابر رخ داده است. از مقایسه نتایج وابسته به عرض ناحیه تهی ملاحظه می‌شود با اضافه شدن In به GaNAs تغییر قابل توجهی در بزرگی  $W$  بروز نکرده (در حدود ۴ درصد) لکن پس از بازپخت نمونه GaInNAs، مقدار عرض ناحیه تهی در حدود ۲۳ درصد افزایش یافته است.

## ۵-۲-۲- اثر تراکم آلیش در سلولهای با ساختار همگون p-n تهیه شده به روش

### MOVPE

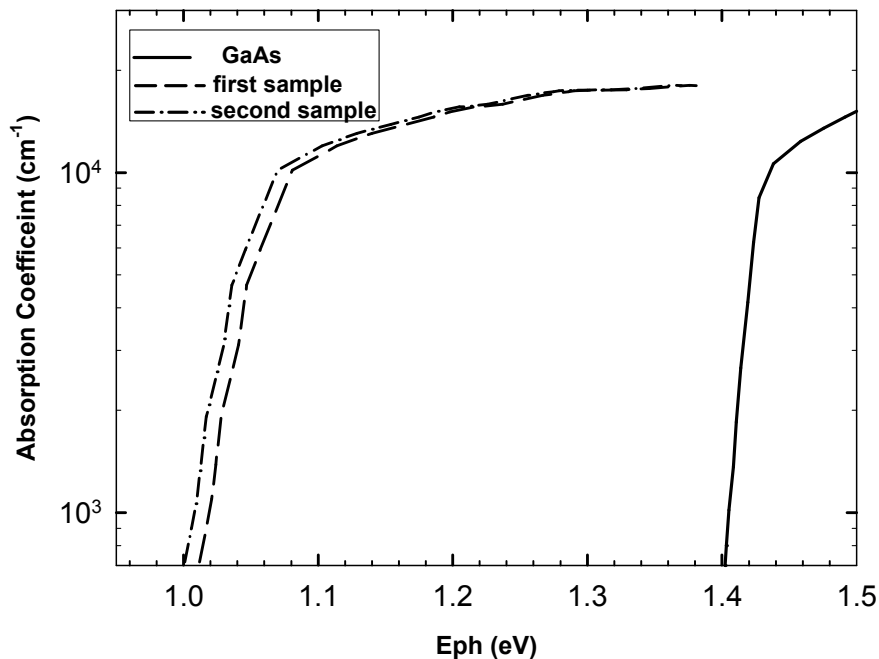
در این مبحث سعی بر آن است که تاثیر تراکم آلیش نوع n بر عرض ناحیه تهی که یک پارامتر موثر در طیف بازدهی کوانتومی داخلی سلولهای خورشیدی است، مورد بررسی قرار دهیم. سلولهای خورشیدی مورد بررسی ما دارای ساختار همگون p-n تهیه شده از مواد نیمرسانای نیتروژندار رقیق GaInNAs است که به روش MOVPE رشد یافته و توسط فرایدمن و همکاران [۳] گزارش شده است. در این نمونه‌ها لایه بالایی (نوع p) به ضخامت ۰/۲ میکرومتر با تراکم آلیشی  $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  و لایه زیرین (نوع n) به ضخامت ۱ میکرومتر که با Si آلییده شده است. این دو نمونه از نظر ساختار لایه‌ای نظیر یکدیگر بوده و تفاوت اصلی آنها میزان آلیش در لایه نوع n است. در نمونه اول (S1) تراکم آلیش برابر  $10^{17}$  و در نمونه دوم (S2) برابر  $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  می‌باشد. شکل ۵-۵ طیف بازدهی کوانتومی داخلی مربوط به این دو قطعه را نشان می‌دهد.





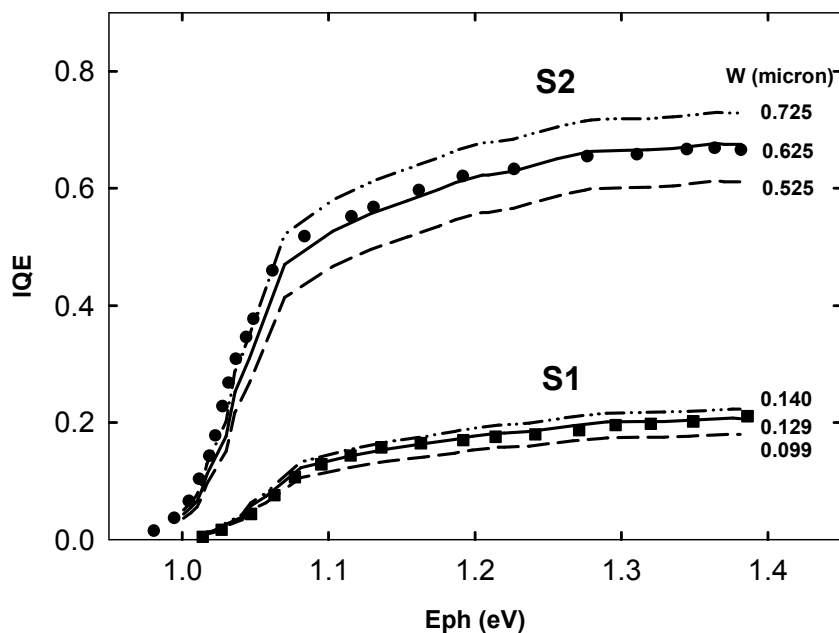
شکل (۵-۵): طیف بازدهی کوانتومی داخلی برای سلول خورشیدی نمونه اول (داده‌های مربعی) و نمونه دوم (داده‌های دایره‌ای) [۳].

با توجه به مطالب بخش قبل و کوچکی طول پخش حامل‌های اقلیتی ناشی از کوچکی تحرک حاملها در نیمرساناهای نیتروژندار رقیق به کار رفته در این سلولها [۳] می‌توان انتظار داشت تقریب  $L < W$  به خوبی در سلولهای خورشیدی وابسته به این مواد صادق بوده و بتوان تغییرات IQE بر حسب انرژی فوتونی را با استفاده از معادله (۴-۱۶) مدلسازی کرد. در این شرایط نیز همانند بحث ما در بخش ۵-۲-۱ نیازمند اطلاع از طیف ضریب جذب ( $\alpha$ ) ماده بر حسب انرژی فوتونهای تابشی هستیم. شکل ۵-۶ نحوه تغییرات این کمیت را در ماده به کار گرفته شده GaInNAs با گافهای نواری ۱.۰۵۲ (نمونه S1) و ۱.۰۲۵ eV (نمونه S2) نشان می‌دهد [۳]. لازم به ذکر است که در این مرحله نیز ضریب جذب به روش ذکر شده در بخش ۵-۲-۱ یعنی انطباق طیف جذب GaInNAs با گاف نواری مواد به کار رفته به دست آمده‌اند.



شکل (۵-۶): تغییرات ضریب جذب بر حسب تابعی از انرژی فوتونهای نوری برای نیمرسانای GaInNAs نمونه اول (خط چین) و نمونه دوم (خط نقطه چین) و GaAs خط پر.

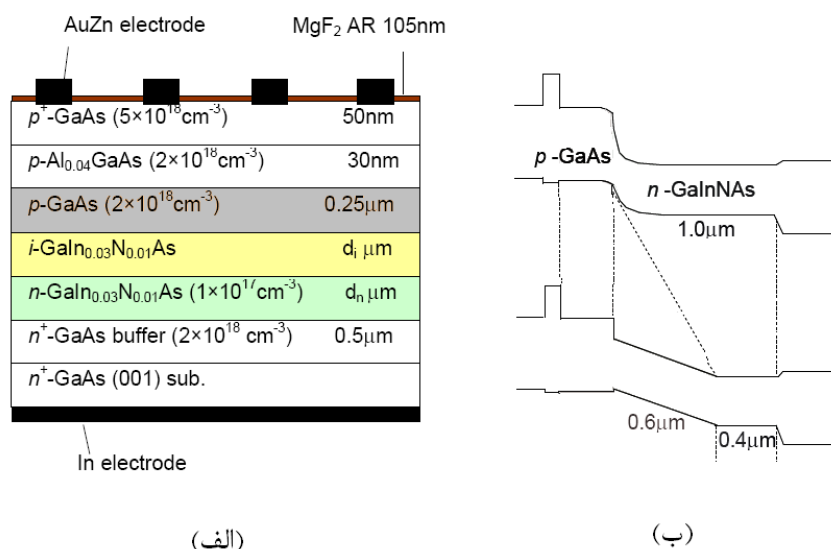
با معلوم شدن تغییرات ضریب جذب و اطلاع از داده‌های تجربی IQE در این نمونه‌ها (شکل ۵-۵) از معادله (۴-۱۶) استفاده کرده و به روش برازشی  $W$  بهینه را به دست آوردیم. شکل ۵-۷ نمودارهای حاصل از پیش‌بینی نظری حاصل از این معادله را بر حسب مقادیر مختلف  $W$  نشان می‌دهد. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان دریافت در نمونه S1 با محتوی آلیش بالا ناحیه  $n$  به ازای  $W=0.129$ ، و در نمونه S2 با آلیش پایین در ناحیه  $n$  به ازای  $W=0.625$  منحنی‌های برازشی دارای بهترین انطباق با داده‌های تجربی است. لازم به ذکر است که مقادیر محاسباتی ما با دقت خوبی با مقادیر گزارش شده توسط محققین مزبور [۳]، به ترتیب برابر  $0.1\mu\text{m}$  و  $0.5\mu\text{m}$ ، سازگار است. نتایج به دست آمده بیانگر آن است که با کاهش تراکم آلیش ناحیه  $n$  از  $10^{17}$  به  $5 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$  مقدار عرض ناحیه تهی در حدود  $0.5\mu\text{m}$  افزایش یافته است که خود منشا افزایش بازدهی کوانتومی داخلی قطعه و بهبود پاسخ نوری سلول شده است.



شکل (۷-۵): بازدهی کوانتومی داخلی برای سلول خورشیدی نمونه اول (مربع‌های تو پر) و نمونه دوم (دایره‌های توپر) [۳]. هر یک از منحنی‌ها در این شکل رفتار انتظاری نظری قطعه را به ازای یک عرض ناحیه تهی معین (W) بر حسب میکرون نشان می‌دهد.

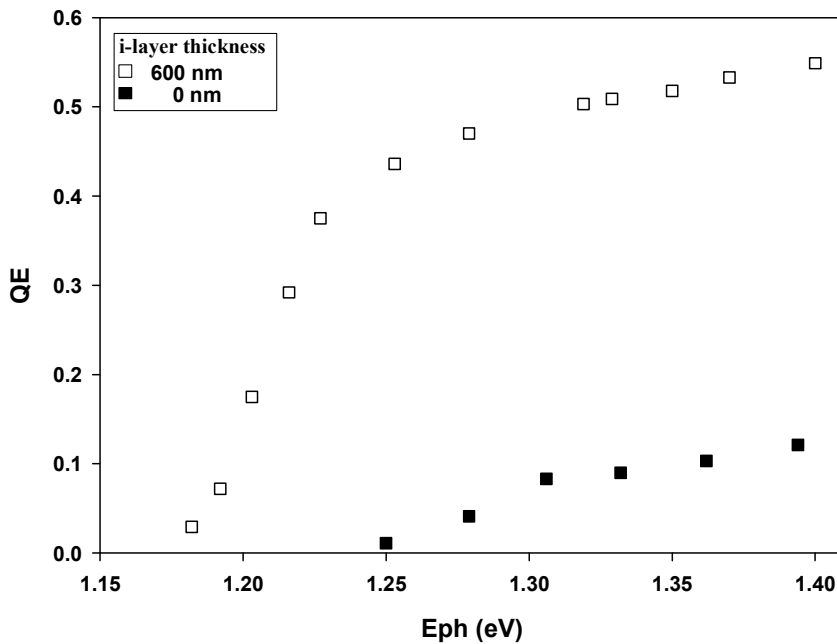
### ۵-۲-۳- بررسی ساختارهای مختلف سلولهای خورشیدی و اثر آن بر بازدهی کوانتومی

همانگونه که قبلاً نیز اشاره شد در پیوندگاههای ساخته شده از مواد نیمرسانای نیتروژندار رقیق به دلیل وجود نقص‌های بلوری ناشی از حضور اتمهای نیتروژن دارای طول عمر حامل اقلیتی کم و در نتیجه طول پخش کوچکی هستند. یک راه برای افزایش بازدهی قطعه به همراه جریان اتصال کوتاه در آن استفاده از ساختارهای p-i-n است که در آن لایه i یک لایه ذاتی و به دور از ناخالصی خواسته می‌باشد. میدان الکتریکی در عرض این لایه ذاتی همانند ناحیه تهی عمل کرده و موجب جداسازی و نیز جمع‌آوری حامل‌ها می‌شود.



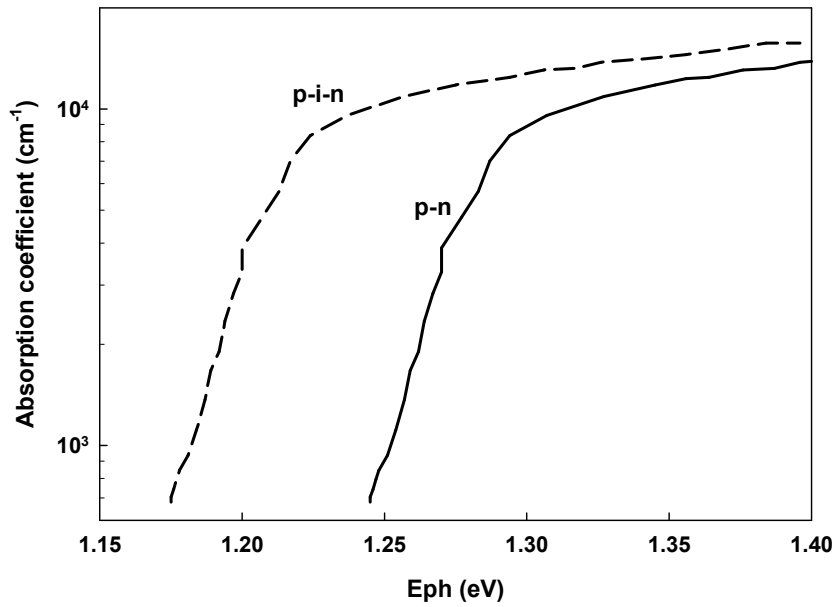
شکل (۸-۵): طرح ساختار (الف) لایه‌ای و (ب) نواری نمونه‌های با اتصال p-n و p-i-n [۸].

در این بخش ما به بررسی کمی تاثیر این لایه (i) در سلول‌های خورشیدی با ساختارهای ناهمگون p-n (بدون لایه i) و p-i-n که توسط میاشیتا و همکاران [۸] گزارش شده است پرداخته‌ایم. این نمونه‌ها به روش MBE رشد یافته‌اند به طوری که برای ساختار p-i-n در ناحیه فعال لایه بالای از نیمرسانای GaAs نوع p با آرایش Be ( $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ) به ضخامت ۰/۲۵ میکرون، لایه زیرین از نیمرسانای  $\text{GaIn}_{0.03}\text{N}_{0.01}\text{As}$  نوع n با آرایش Si ( $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ) به ضخامت ۰/۴ میکرون است، و لایه i از جنس GaInNAs با ضخامت ۶۰۰ نانومتر می‌باشد. شکل ۸-۵ ساختار لایه‌ای نمونه به همراه ساختار نواری آن را نشان می‌دهد. در ساختار p-n نیز همین مشخصات برقرار بوده، لکن ضخامت لایه n برابر ۱ میکرون می‌باشد. شکل ۹-۵ نمودار بازدهی کوانتومی خارجی بر حسب انرژی را برای این دو نمونه نشان می‌دهد که با توجه به اینکه در این نمونه‌ها از لایه‌های ضد بازتاب استفاده شده است، طبق معادله (۴-۱۴) انتظار می‌رود این طیف با طیف بازدهی کوانتومی داخلی نمونه‌ها یکی باشد. با توجه به این داده‌ها کاملاً آشکار است که اضافه شدن لایه i در پیوندگاه p-n علاوه بر ارتقاء حدود ۵ برابری در QE، سبب جذب فوتونهای کم انرژی (۱/۲ تا ۱/۲۵ الکترون ولت) نیز گردیده است.

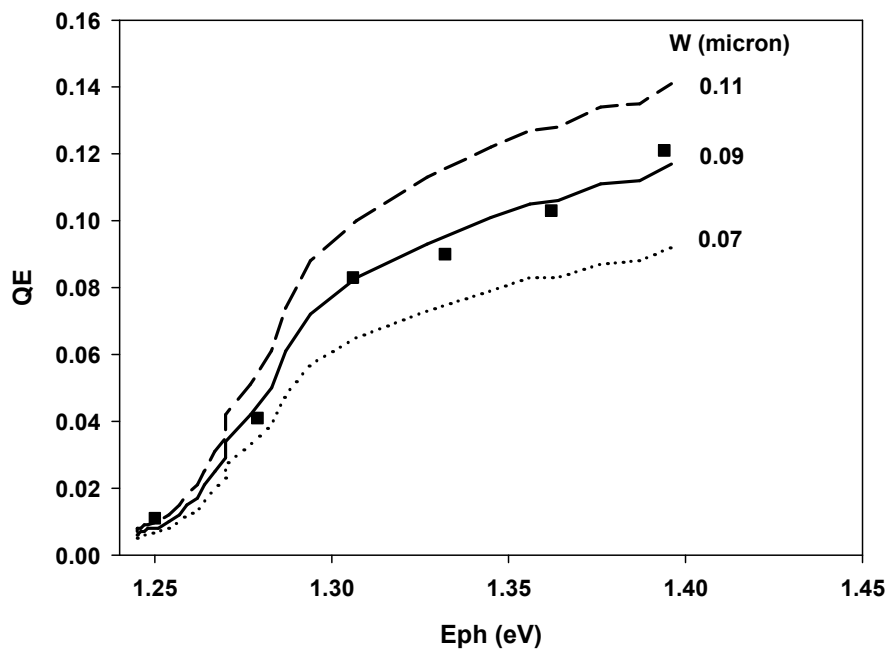


شکل (۹-۵): بازدهی کوانتومی خارجی برای سلول خورشیدی با ساختار p-i-n (مربع‌های سفید) و ساختار pn (مربع‌های سیاه) [۸].

همانگونه که در مباحث گذشته اشاره شد حجم ناحیه فعال در محل پیوندگاه (محدوده ناحیه تهی و طول پخش حامل‌های اقلیتی) از جمله پارامترهای مهم در بازدهی یک سلول خورشیدی است. به منظور تحلیل کمی این پارامترها، نخست طیف جذب لایه‌های نیتروژندار رقیق را پیدا کرده (شکل ۱۰-۵) و سپس در نمونه با ساختار p-n به کمک معادله (۴-۱۶) با در نظر گرفتن  $W$  به عنوان پارامتر برازشی مقدار آن را تعیین کردیم (شکل ۵-۱۱). چنانچه پیداست به ازای  $W=0.09\mu\text{m}$  در این نمونه منحنی برازشی دارای بهترین انطباق با داده‌های تجربی است.



شکل (۵-۱۰): طیف جذب ماده GaInNAs نظری ما برای قطعات مورد بررسی.



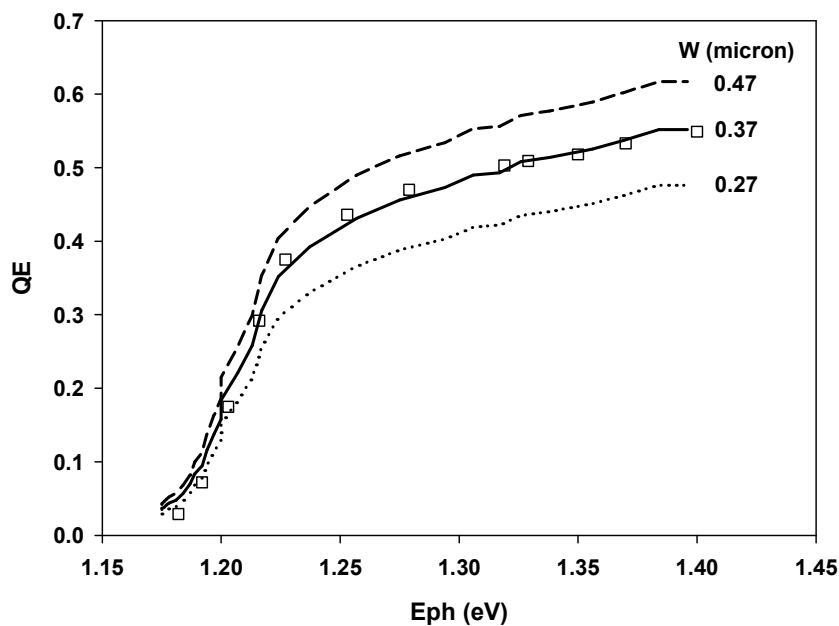
شکل (۵-۱۱): بازدهی کوانتومی خارجی برای سلول خورشیدی p-n. هر یک از منحنی‌ها در این شکل رفتار انتظاری نظری قطعه را به ازای یک عرض ناحیه تهی معین (W) بر حسب میکرون نشان می‌دهد.

در ساختار ناهمگون p-i-n به منظور محاسبه عرض ناحیه تهی از رابطه نظری بازدهی کوانتومی

در این ساختارها به صورت [۸]

$$QE(\lambda) = \left(1 - \frac{\exp(-\alpha W)}{1 + \alpha L}\right) \times \left(1 + \frac{S}{\mu E_0}\right)^{-1} \quad (2-5)$$

استفاده کردیم، که در آن  $L$  طول پخش حامل‌های اقلیت،  $W$  عرض ناحیه تهی،  $S$  سرعت بازترکیب سطحی،  $E_0$  میدان الکتریکی در پیوندگاه،  $\mu$  تحرک‌پذیری حامل‌ها و  $\alpha(\lambda)$  ضریب جذب بر حسب تابعی از طول موج نور است. ما در محاسبات خود برای نیم‌رسانای GaInNAs برای کمیت‌های  $S$ ،  $\mu$ ،  $E_0$  و  $L$  به ترتیب از مقادیر تقریبی  $10^5 \text{ cm/s}$  [۶۳]،  $\sim 200 \text{ cm}^2/\text{V-s}$ ،  $1 \text{ V}/\mu\text{m}$  [۶۴]، و  $160 \text{ nm}$  [۸] و برای  $\alpha(\lambda)$  از نتایج شکل ۵-۱۰ استفاده نموده‌ایم. شکل ۵-۱۲ نتایج تحلیل ما را با در نظر گرفتن  $W$  به عنوان پارامتر برازشی نشان می‌دهد.



شکل (۵-۱۲): بازدهی کوانتومی خارجی برای سلول خورشیدی p-i-n هر یک از منحنی‌ها در این شکل رفتار انتظاری نظری قطعه را به ازای یک عرض ناحیه تهی معین ( $W$ ) بر حسب میکرون نشان می‌دهد.

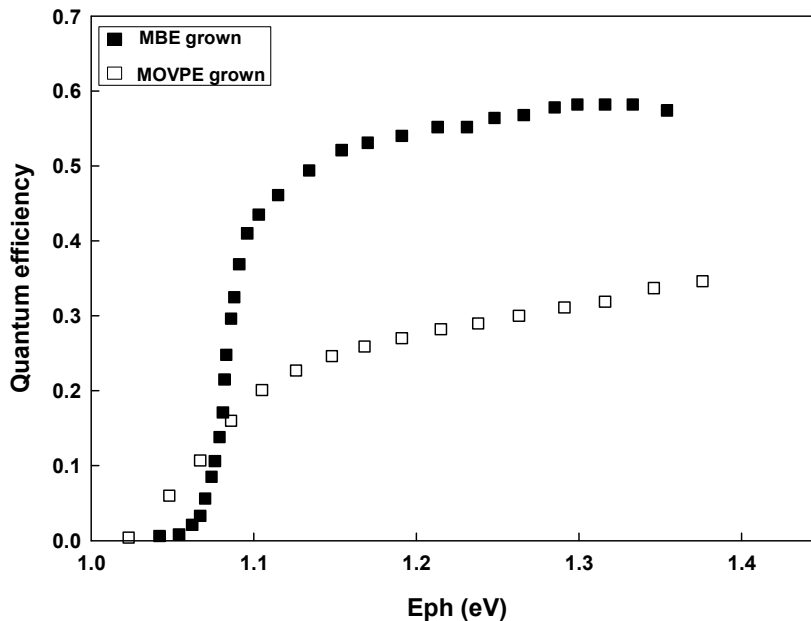
چنانچه از شکل پیداست به ازای  $W=0.37\mu\text{m}$  در این نمونه منحنی برآزشی دارای بهترین انطباق با داده‌های تجربی است و چنانچه انتظار می‌رود این پهنا کوچکتر از ضخامت لایه i به کار رفته در این ساختار می‌باشد.

#### ۵-۲-۴- بررسی تاثیر روش رشد (MOVPE و MBE) بر بازدهی کوانتومی داخلی در

#### سلول‌های خورشیدی نیتروژندار رقیق GaInNAs با ساختار p-i-n

در این قسمت به بررسی تاثیر روش رشد بر پارامترهای سلول خورشیدی می‌پردازیم. همانگونه که قبلاً نیز گفتیم برای رشد ماده GaInNAs روش‌های مختلفی وجود دارد که در اینجا ما به مقایسه دو قطعه با ساختار لایه‌ای نسبتاً مشابه p-i-n که یکی به روش MBE و دیگری به روش MOVPE رشد یافته است می‌پردازیم. نمونه اول که توسط جاکرل و همکاران [۹] گزارش شده است دارای ساختار ناهمگون متشکل از لایه‌ای از GaAs نوع p با آرایش Be و تراکم آرایش  $10^{18} \text{cm}^{-3}$  و ضخامت  $0.5 \mu\text{m}$  بر روی لایه‌ای از GaInNAs بدون ناخالصی خواسته (لایه i) و با ضخامت  $1 \mu\text{m}$  و لایه نوع n از جنس GaAs با ضخامت  $1 \mu\text{m}$  و تراکم آرایش Si به مقدار  $10^{18} \text{cm}^{-3}$  می‌باشند. نمونه دوم که توسط باور و همکاران [۶] گزارش شده لکن (رشد یافته به روش MOVPE) از یک لایه نوع p از GaAs آلائیده با اتمهای Mg و با تراکم آرایش بالای  $5 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$  و ضخامت  $0.25 \mu\text{m}$  و لایه های نوع i و n از جنس GaInNAs بترتیب با ضخامتهای  $0.3 \mu\text{m}$  و  $1/4 \mu\text{m}$  می‌باشد که در آن لایه نوع-n با اتمهای Te آلائیده است. اگرچه در این دو قطعه تراکم لایه ها و ضخامت آنها دقیقاً باهم یکی نیستند لکن با توجه به نحوه قرارگیری لایه ها با ساختار p-i-n انتظار می رود اصول عملکردی آنها باهم قابل مقایسه باشند. شکل ۵-۱۳ نمودار بازدهی کوانتومی بر حسب انرژی را برای این قطعات نشان می‌دهد. در این شکل داده‌های مربعی سیاه مربوط به سلول رشد یافته به روش MBE و داده های مربعی سفید مربوط به سلول خورشیدی رشد یافته به روش MOVPE است.

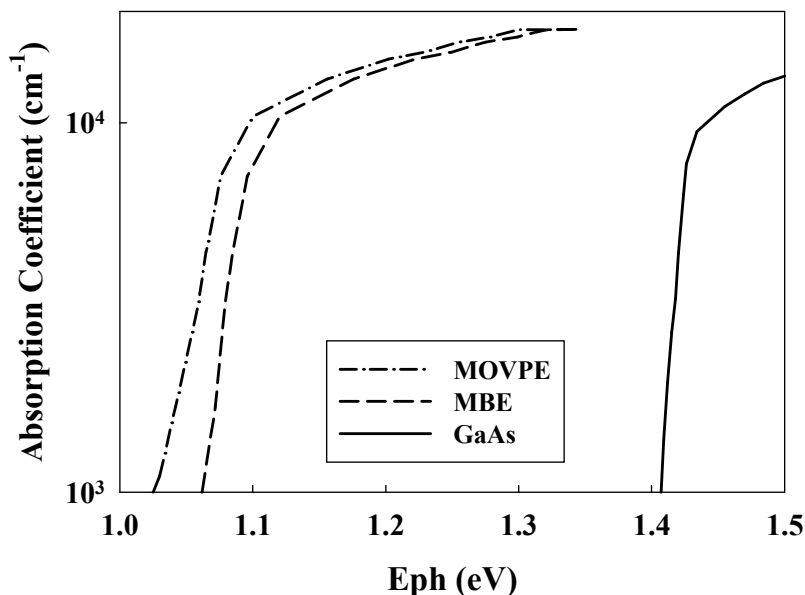




شکل (۵-۱۳): بازدهی کوانتومی برای سلول خورشیدی با ساختار p-i-n رشد یافته به روش MBE [۹] (مربع‌های تو پر) و رشد یافته به روش MOVPE (مربع‌های تو خالی) [۶].

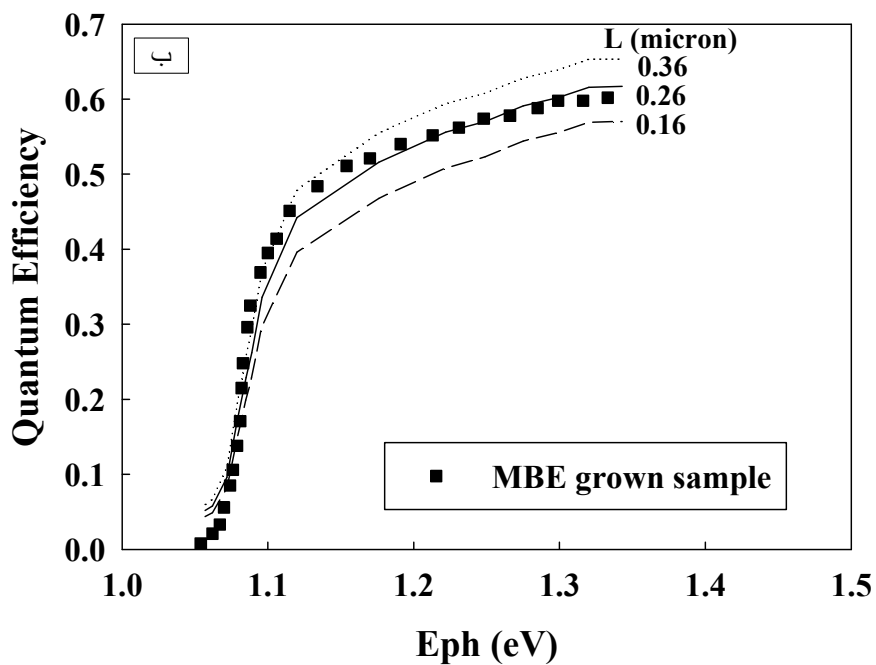
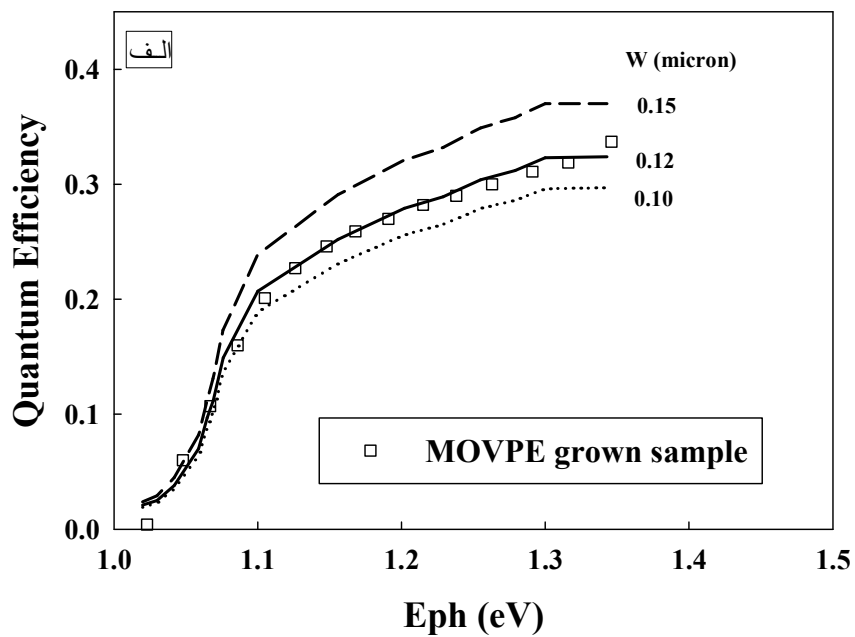
چنانچه پیداست رشد لایه‌ها در این سلولها به روش MBE در مقایسه با روش MOVPE تاثیر بسزایی در بازدهی کوانتومی داشته است. به منظور توصیف نظری این داده‌ها و تفاوت نسبی بین آنها از رابطه نظری بازدهی کوانتومی داخلی در یک سلول خورشیدی p-i-n (معادله ۵-۲) استفاده کرده‌ایم. به این ترتیب که در محاسبات خود برای نیمرسانای GaInNAs برای کمیت‌های  $S$ ،  $\mu$ ، و  $E_0$  بترتیب از مقادیر تقریبی  $10^5 \text{ cm}^2/\text{V-s}$  [۶۳]،  $\sim 200 \text{ cm}^2/\text{V-s}$  و  $1 \text{ V}/\mu\text{m}$  [۶۴] استفاده نموده‌ایم. همچنین در نمونه MBE،  $W=0.37 \mu\text{m}$  و در نمونه MOVPE،  $L=0.12 \mu\text{m}$  گزارش شده است. چنانچه از معادله (۵-۲) پیداست برای تعیین بازدهی کوانتومی داخلی لازم است طیف وابسته به ضریب جذب GaInNAs را نیز به دست آوریم. ما برای یافتن این کمیت از روشی که در بخش‌های ۵-۱-۲ و ۵-۲-۲ و ۵-۳-۲ گفته شده استفاده کرده‌ایم. شکل ۵-۱۴ وابستگی انرژی ضریب جذب را برای مواد به کار گرفته شده در این سلول برای مواد GaAs و GaInNAs با تراکم نیتروژن رقیق نشان

می‌دهد [۳۷]. گاف نواری برای ماده رشد یافته به روش MBE  $1.08\text{ eV}$  [۹] و برای ماده رشد یافته به روش MOVPE  $1.05\text{ eV}$  [۶] گزارش شده است.



شکل (۵-۱۴): تغییرات ضریب جذب بر حسب تابعی از انرژی فوتونهای نوری برای نیمرساناهای GaAs (خط پر) و GaInNAs رشد یافته به روش MBE (خط‌پر) و به روش MOVPE (خط نقطه چین).

اکنون با استفاده از اطلاعات فوق و بکارگیری معادله (۵-۲) می‌توان مقدار  $W$  را در نمونه MOVPE و مقدار  $L$  را در نمونه MBE به عنوان پارامتر برازشی بدست آورد. نتایج این تحلیل‌ها در شکل ۵-۱۵ (الف و ب) و نیز جدول ۵-۲ نشان داده شده است. در این تحلیل‌ها به ترتیب کمیت‌های  $W$  و  $L$  به عنوان پارامترهای برازشی در نظر گرفته شده‌اند.



شکل (۵-۱۵): بازدهی کوانتومی سلولهای خورشیدی بر حسب تابعی از انرژی نور تابشی در (الف) نمونه رشد یافته به روش MBE و (ب) نمونه رشد یافته به روش MOVPE. هر یک از منحنی ها در این شکلها رفتار انتظاری نظری قطعه را به ازای یک پارامتر برازشی معین بر حسب میکرون نشان می دهد.

لازم به ذکر است که در نمونه رشد یافته به روش MBE از آنجا که لایه های p و n دارای تراکم ناخالصی یکسانی هستند انتظار می رود مقدار برازشی طول پخش حاملی (L) متعلق به مجموع سهمهای الکترونها و حفره ها، و در نمونه دیگر با توجه به تراکم بسیار بالا در لایه p این کمیت تنها سهم حاملهای حفره ای باشد. جدول ۵-۲ کمیتهای محاسبه شده (کمیتهای ستاره دار \*) به همراه مقادیر گزارش شده در هر نمونه را نشان می دهد.

جدول ۵-۲ کمیتهای محاسبه شده (کمیتهای ستاره دار \*) به همراه مقادیر گزارش شده در هر نمونه

نمونه	گاف نواری (eV)	طول پخش حامل ها ( $\mu m$ )	عرض ناحیه تهی ( $\mu m$ )
MBE	۱/۰۸ [۹]	$L_n+L_p = ۰/۲۶^*$	۰/۳۷
MOVPE	۱/۰۵ [۶]	$L_p = ۰/۱۲$	۰/۱۲*

چنانچه پیداست با توجه به پیش بینی مدل نظری بازدهی کوانتومی داخلی منحنیهای برازشی به ازای  $L=۰/۲۲ \mu m$  در قطعه MBE و  $W=۰/۱۱ \mu m$  در قطعه MOVPE دارای بهترین انطباق با داده های تجربی است. از مقایسه مقادیر W و L در این نمونهها ملاحظه می شود که هر دوی این کمیتها در نمونه MOVPE کوچکتر از نمونه MBE هستند. علت این امر با توجه به نتایج وابسته به شکل ۲-۵ در ارتباط با فزونی حدود ۱۰۰ برابری تراکم اتمهای ناخواسته کربن و هیدروژن در نمونههای رشد یافته به روش MOVPE قابل توجیه است. حضور این اتمها در ماده می توانند نه تنها در نقش نواقص شبکه ای به صورت تله های پذیرنده الکترونی [۲۷] به کاهش عرض ناحیه تهی در نمونه وابسته بیانجامد، بلکه همچنین می توانند در نقش مراکز پراکندگی آلیاژی سبب کاهش طول پخش حاملهای اقلیتی که با تحرک حاملها رابطه مستقیم دارد [۴۳] بشوند. به همین دلیل ساختارهای p-i-n رشد یافته به روش MBE دارای عرض ناحیه تهی و طول پخش حامل اقلیت بزرگتری بوده و انتظار می رود از بازدهی کوانتومی داخلی بیشتری (شکل ۵-۱۳) برخوردار باشند.

### ۳-۵- مطالعه مشخصه جریان-ولتاژ در سلول‌های خورشیدی با ساختار همگون p-n

در این بخش به مطالعه نظری مشخصه جریان - ولتاژ سلول‌های خورشیدی مبتنی بر نیم‌رساناهای نیتروژندار رقیق پرداخته و عوامل موثر بر آن را مورد بررسی قرار می‌دهیم. همچنین به محاسبه برخی پارامترها از جمله جریان اتصال کوتاه، ضریب ایده‌آلی و جریان تاریکی در نمونه‌های مختلف پرداخته و آنها را به لحاظ عملگری با یکدیگر مقایسه می‌نماییم.

#### ۱-۳-۵- تاثیر تراکم آلایش در لایه نوع n بر مشخصه جریان-ولتاژ پیوندگاه

##### همگون p-n

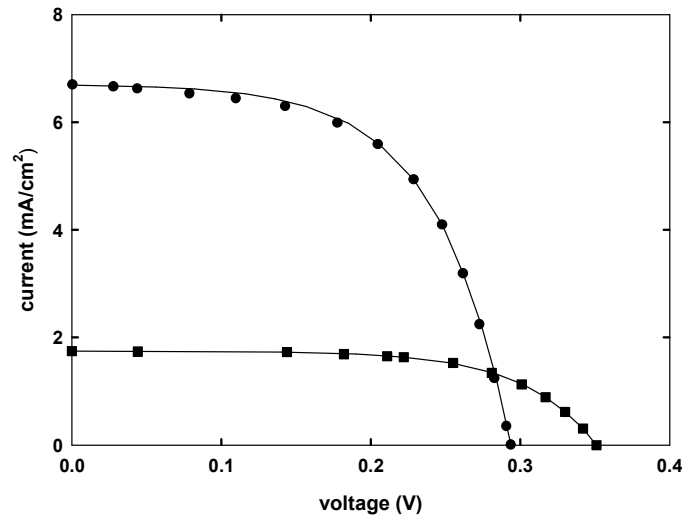
سلول‌های خورشیدی مورد بحث ما در این قسمت همان نمونه‌های معرفی شده در بخش ۲-۵- بوده که تفاوت اصلی آنها در میزان تراکم آلایش در لایه نوع n است. مشخصه I-V مربوط به این دو قطعه در شکل ۱۶-۵ به ترتیب با داده‌های مربعی برای نمونه S1 (با تراکم آلایش  $10^{17}$ ) و داده‌های دایره‌ای برای نمونه S2 (با تراکم آلایش  $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ) نشان داده شده است. از مقایسه این داده‌ها می‌توان دریافت که مقدار  $J_{sc}$  در نمونه S2 با ضریبی در حدود  $3/5$  برابر نسبت به نمونه S1 افزایش یافته است. این افزایش با توجه به معادله (۴-۱۷) و ارتباط مستقیم  $J_{sc}$  با IQE امری قابل انتظار است؛ بنابراین می‌توان گفت که با افزایش عرض ناحیه تهی،  $J_{sc}$  در نمونه S2 افزایش یافته است. این در حالی است که ولتاژ مدار باز در نمونه دوم در حدود  $20/7$  درصد نسبت به نمونه اول کاهش یافته است. ما در ادامه این بحث به بررسی این موضوع می‌پردازیم.

نکته جالب توجه آنکه با وجود رابطه مستقیم بین  $J_{sc}$  و  $V_{oc}$  در معادله (۴-۶)

$$\{V_{oc} = \frac{nk_B T}{q} \ln \frac{J_L}{J_0}\}$$

بزرگتری در مقایسه با نمونه اول برخوردار است لکن  $V_{oc}$  آن به  $0.29V$  کاهش یافته است. از طرفی کاهش ولتاژ مدار باز در نمونه دوم نیز می‌تواند وابسته به بزرگتر بودن  $W$  در این نمونه باشد. بنا به

گزارش فریدمن و همکاران [۳] با افزایش پهنای تهی لایه، جریان تاریکی ( $J_0$ ) ناشی از جریانهای بازترکیبی در این ناحیه افزایش می‌یابد. بدیهی است با توجه به معادله (۴-۶) افزایش  $J_{SC}$  در صورت کسر بایستی با افزایش بزرگتری در  $J_0$  در مخرج کسر همراه باشد. برای تحقیق در این مورد با انجام برآزش داده‌های تجربی جریان-ولتاژ در شکل ۵-۱۶ با معادله (۴-۸) مقدار  $n$  ضریب ایده‌آلی را به دست آورده، سپس با قرار دادن این مقادیر در معادله (۴-۶) و به کار گیری مقادیر  $J_{SC}$  و  $V_{oc}$  در هر کدام از سلولها مقدار جریان تاریک را در هر مورد به دست آوردیم. نتایج حاصل از این محاسبات در جدول ۳-۵ آمده است.



شکل (۵-۱۶): مشخصه جریان-ولتاژ سلولهای خورشیدی برای نمونه اول (داده‌های مربعی) و نمونه دوم (داده‌های دایره‌ای) [۳]. نمودارهای منطبق شده در داده‌ها حاصل محاسبات نظری ما است (به متن مراجعه شود).

جدول ۳-۵ ضریب ایده‌آلی ( $n$ ) و چگالی جریان تاریکی ( $J_0$ ) در قطعات مورد بررسی.

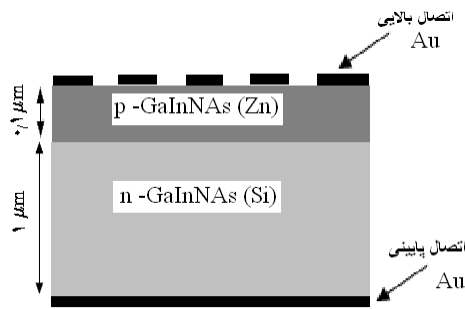
پارامترها نمونه‌ها	$n$	$J_0$ ( $A/cm^2$ )
نمونه اول	۱٫۸	$۹٫۴ \times 10^{-۷}$
نمونه دوم	۱٫۹	$۱٫۷ \times 10^{-۵}$

نتایج به دست آمده حاکی از آن است که بزرگی جریان تاریکی در نمونه دوم در حدود ۱۸ برابر نمونه اول است. با توجه به معادله (۴-۶) مشاهده می‌شود که گرچه Jsc در نمونه اول حدود ۳ برابر افزایش داشته است اما افزایش حدود ۱۸ برابری جریان تاریکی در مخرج می‌تواند توجیه کننده تغییرات کاهشی Voc در این نمونه در قیاس با نمونه اول باشد. بنابراین بخشی از کاهش ولتاژ مدار باز قطعه ناشی از افزایش جریان تاریکی بازترکیبی در اثر افزایش عرض ناحیه تهی می‌باشد اما بخش دیگر کاهش ولتاژ مدار باز قطعه می‌تواند ناشی از کاهش گاف نواری (از ۱٫۰۵۲ به ۱٫۰۲۵eV) در قطعه نیز باشد که با توجه به معادله (۵-۱) قابل توجیه است [۲۷].

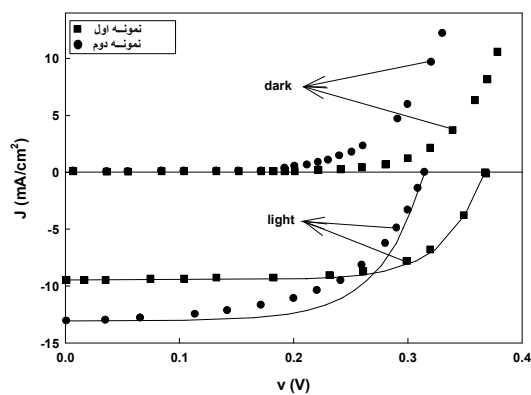
### ۵-۳-۲- اثر جمع‌آوری به کمک میدان بر مشخصه جریان-ولتاژ

در این قسمت می‌خواهیم مشخصه جریان - ولتاژ دو سلول خورشیدی که دارای ساختار یکسان و درصد نیتروژن به کار رفته متفاوت می‌باشند مورد بررسی قرار دهیم و مقدار جریان اتصال کوتاه و جریان تاریکی را برای این دو قطعه به دست آوریم.

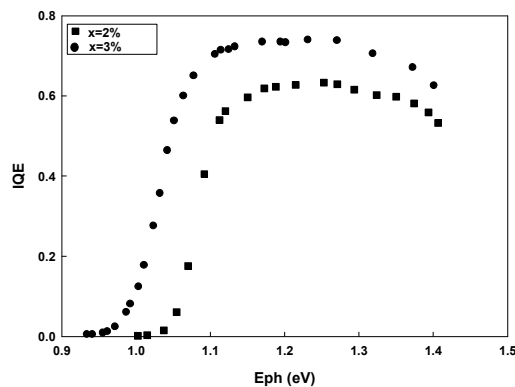
سلول‌های خورشیدی مورد مطالعه ما دارای ساختار همگون p-n تهیه شده از مواد نیمرسانای نیتروژندار رقیق GaInNAs هستند که توسط فرایدمن و کورتز [۱] گزارش شده و به روش MOVPE رشد یافته‌اند. در این نمونه‌ها (شکل ۵-۱۷) لایه بالایی (نوع p) با ضخامت ۰٫۱ میکرومتر با آلایش Zn و لایه زیرین (نوع n) و به ضخامت ۱ میکرومتر با آلایش Si می‌باشند. این دو نمونه از نظر ساختار لایه‌ای نظیر یکدیگر بوده و تفاوت اصلی در میزان نیتروژن به کار رفته در آنها می‌باشد. در نمونه اول مقدار کسر مولی نیتروژن برابر ۳٪ متناظر با گاف نواری ۱٫۰۲eV، و در نمونه دوم مقدار نیتروژن برابر ۲٪، متناظر با گاف نواری ۱٫۰۷eV، می‌باشد. شکل ۵-۱۸ الف طیف بازدهی کوانتومی داخلی و مشخصه جریان - ولتاژ در حالت تاریکی و روشنایی مربوط به این دو قطعه را نشان می‌دهد.



شکل (۵-۱۷): ساختار هندسی سلول خورشیدی [۱].



(ب)



(الف)

شکل (۵-۱۸): (الف) بازدهی کوانتومی داخلی و (ب) مشخصه I-V برای سلول خورشیدی  $\text{GaInN}_x\text{As}_{1-x}$  برای نمونه اول (داده‌های دایره‌ای) و نمونه دوم (داده‌های مربعی) [۱].

علاوه بر این اطلاعات، دیگر کمیتهای گزارش شده این قطعات شامل مقادیر  $J_{sc}$ ،  $V_{oc}$  و  $n$  در جدول ۴-۵ آمده است.

جدول ۴-۵ پارامترهای گزارش شده شامل جریان اتصال کوتاه، ولتاژ مدار باز و ضریب ایده‌آلی مربوط به نمونه‌های ۱ و ۲

[۱].

پارامترها نمونه‌ها	$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$V_{oc}$ (V)	$n$
نمونه اول ( $x=0.03$ )	۱۳٫۲	۰٫۳۱۶	۱٫۵
نمونه دوم ( $x=0.02$ )	۹٫۵۰	۰٫۳۷۱	۱٫۳۵



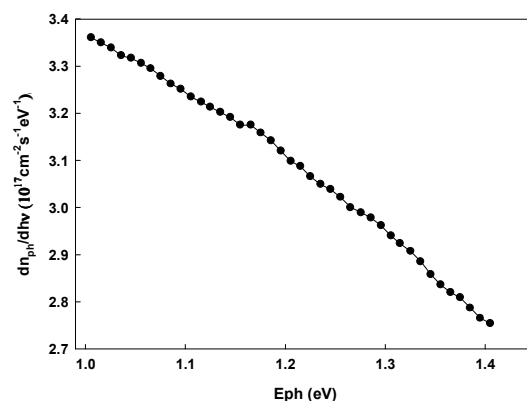
در ادامه به مطالعه نظری مقادیر اندازه‌گیری شده  $J_{sc}$  و  $V_{oc}$  در این نمونه‌ها می‌پردازیم.

**(الف) بررسی تغییرات  $J_{sc}$**  تغییرات کمی تاثیر بازدهی کوانتومی بر چگالی جریان مدار اتصال

کوتاه ( $J_{sc}$ ) در یک سلول خورشیدی مستلزم رابطه‌ای است که این دو کمیت را به یکدیگر مربوط سازد [۴۹].

$$J_{sc} = q \sum_{\lambda_0}^{\lambda_g} IQE(\lambda) \phi_o(\lambda) d\lambda \quad (۳-۵)$$

که در آن  $q$  بار الکتریکی الکترون‌ها،  $IQE(\lambda)$  بازدهی کوانتومی داخلی،  $\phi_o(\lambda)$  شار فوتونهای فرودی خورشید به ازای بازه واحد انرژی می‌باشد. مقادیر  $\lambda_0 = 1300 \text{ nm}$  ( $E_{ph} \cong 1 \text{ eV}$ ) و  $\lambda_g = 885 \text{ nm}$  ( $E_{ph} \cong 1.4 \text{ eV}$ ) در این جمع‌بندی به ترتیب حدهای پایینی و بالایی طول موجهای محدوده جذب مطلوب در سلولهای خورشیدی GaInNAs است. به منظور محاسبه این جمع‌بندی علاوه بر اطلاع از بازدهی کوانتومی در هر نمونه، که داده‌های تجربی آن در شکل ۵-۱۸-الف آمده است، لازم است تغییرات  $\phi_o(\lambda)$  را در نظر بگیریم. این کار با استفاده از طیف نور خورشید در شرایط AM1.5 (معادل شدت  $84.4 \text{ mW/cm}^2$ ) (شکل ۳-۳) در بازه انرژی مورد نظر ما که در شکل ۵-۱۹ نشان داده شده است، امکانپذیر می‌باشد [۴۵].



شکل (۵-۱۹): تغییرات شار فوتونهای فرودی بر سطح سلول خورشیدی در شرایط AM1.5 (به متن مراجعه شود).

با انجام محاسبات لازم در جمع‌بندی معادله ۳-۵ در بازه‌های انرژی ۱ تا  $1/4 eV$  چگالی جریان اتصال کوتاه را در هر قطعه محاسبه کردیم. نتایج محاسبات در جدول ۵-۵ آمده است.

جدول ۵-۵ چگالی جریان اتصال کوتاه گزارش شده و محاسبه شده ما در نمونه‌های مورد بررسی.

نمونه‌ها پارامترها	نمونه اول	نمونه دوم
$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> ) گزارش شده	۱۳٫۲	۹٫۵۰
$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> ) محاسبه شده	۱۳٫۰۴	۹٫۳۳

افزایش جریان نمونه اول نسبت به نمونه دوم با توجه به طیف بازدهی کوانتومی این نمونه قابل توجیه است.

**(ب) بررسی تغییرات  $V_{oc}$**  چنانچه از شکل ۵-۱۸-ب پیداست ولتاژ مدار باز در نمونه اول

نسبت به نمونه دوم قدری کاهش یافته است. به منظور تحقیق در علت این تغییرات به محاسبه جریان تاریکی ( $J_0$ ) در این نمونه‌ها پرداخته‌ایم. با جایگذاری مقادیر  $V_{oc}$ ،  $J_{sc}$  و  $n$  (جدول ۵-۴) جریان تاریکی برای نمونه اول برابر برابر  $3.8 \times 10^{-6} A/cm^2$  و برای نمونه دوم برابر  $2.3 \times 10^{-7} A/cm^2$  به دست می‌آیند. بدین ترتیب ملاحظه می‌شود که بزرگتر بودن  $J_0$  در نمونه اول می‌تواند دلیلی بر کوچکتر بودن  $V_{oc}$  در این نمونه باشد. البته بخشی دیگر از کوچکتر بودن  $V_{oc}$  در نمونه اول می‌تواند ناشی از کوچکتر بودن گاف نواری در نمونه اول به دلیل حضور بیشتر کسر مولی نیتروژن در این نمونه باشد که با توجه به معادله (۵-۱) امری قابل انتظار است [۲۷ و ۶۶].

همانگونه که از شکل ۵-۱۸-ب پیداست با قرار دادن مقادیر  $J_{sc}$ ،  $V_{oc}$  و  $n$  در معادله (۴-۸)

منحنی‌های برازشی برای داده‌های تجربی جریان-ولتاژ را در حالت روشنایی رسم نموده‌ایم. با نگاهی به منحنی  $I-V$  در حالت روشنایی در نمونه اول به نظر می‌رسد که شیب غیر صفر داده‌های تجربی در ولتاژهای اعمالی کوچک ناشی از وجود مقاومت شانت در این قطعه می‌باشد (به شکل ۴-۴-ب مراجعه

شود) اما با توجه به منحنی I-V در حالت تاریکی و اینکه شیب غیر صفر در ولتاژهای اعمالی کوچک در داده‌های تجربی این نمودار در حالت تاریکی وجود ندارد می‌توان نتیجه گرفت که در این نمونه مقاومت شانت وجود نداشته بلکه این شیب می‌تواند نشانگر جمع‌آوری حامل به کمک میدان الکتریکی موجود در مجاورت تهی لایه باشد که موجب افزایش جریان اتصال کوتاه در این قطعه شده است [۲۷]. در برخی از سلولهای خورشیدی مواد نیتروژندار رقیق با افزایش عرض ناحیه تهی جمع‌آوری حامل توسط این میدان الکتریکی صورت می‌گیرد که به "جمع‌آوری به کمک میدان" موسوم است [۶۴].

#### ۴-۵ - بررسی اثر دما بر ولتاژ مدار باز سلولهای خورشیدی

در این مبحث سعی بر آن است که تاثیر دما را بر ولتاژ مدار باز که یک پارامتر موثر در مشخصه جریان-ولتاژ سلولهای خورشیدی است، مورد بررسی قرار دهیم.

سلول خورشیدی مورد بررسی ما در اینجا همان سلول خورشیدی معرفی شده در بخش ۵-۲-۳ است که به روش MBE رشد یافته و دارای ساختار p-i-n می‌باشد. برخی از خصوصیات این سلول در جدول ۵-۶ آمده است.

جدول ۵-۶ برخی پارامترهای گزارش شده در نمونه در دمای  $T=300K$  [۸].

گاف نواری	جریان اتصال کوتاه	ولتاژ مدار باز	در $T=300K$
۱٫۲۵ (eV)	۲۲٫۵۷ (mA/cm <sup>۲</sup> )	۰٫۷۳ (V)	روش رشد MBE

به منظور مطالعه تاثیر دما بر ولتاژ مدار باز با توجه به رابطه (۴-۶)  $\{V_{oc} = \frac{nk_B T}{q} \ln \frac{J_L}{J_0}\}$  در

نگاه اول به نظر می‌رسد که  $V_{oc}$  با دما نسبت مستقیم داشته باشد، اما تغییرات  $J_0$  با دما به صورت [۸]:

$$J_0(T) \simeq C \times T^3 \exp[-E_g(T)/k_B T] \quad (۴-۵)$$

می‌باشد. در این رابطه  $C$  یک کمیت مستقل از دماست. همانطور که از معادله (۴-۵) مشاهده می‌شود، باید مقدار  $C$  و وابستگی دمایی گاف نواری را تعیین نماییم و سپس با قرار دادن رابطه (۴-۵) در معادله (۶-۴) وابستگی دمایی ولتاژ مدار باز را در این سلول تعیین نماییم.

(۱) به منظور تعیین  $C$  بر حسب  $J_0(300K)$  داریم:

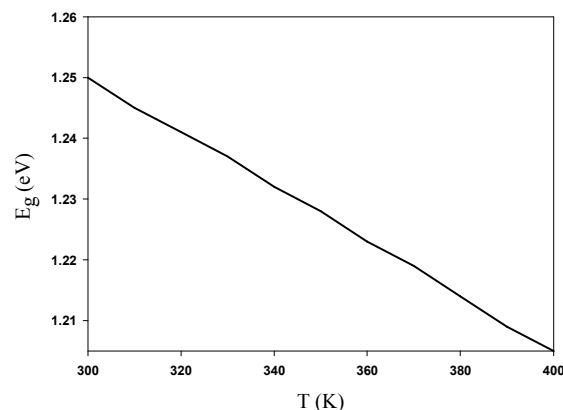
$$C = J_0(300K) / \left\{ (300K)^2 \exp \left[ -E_g(300K) / k_B \times (300K) \right] \right\} \quad (5-5)$$

مقدار  $J_0(300K)$  را می‌توان با داشتن مقادیر  $n$ ،  $J_{sc}$  و  $V_{oc}$  در دمای اتاق با استفاده از معادله (۶-۴) محاسبه کرد. بدین ترتیب با توجه به معادله (۴-۵) و با داشتن مقدار ثابت  $C$  می‌توان  $J_0$  را در هر دمای دیگری نیز محاسبه نمود. برای سلول خورشیدی مورد نظر ما با توجه به مقادیر جدول ۶-۵ مقدار ثابت  $C$  برابر  $2.42 \times 10^5$  حاصل می‌آید.

(۲) وابستگی دمایی گاف نواری با رابطه زیر توصیف می‌شود که به آن تابع وارثنی گفته می‌شود [۶۷]

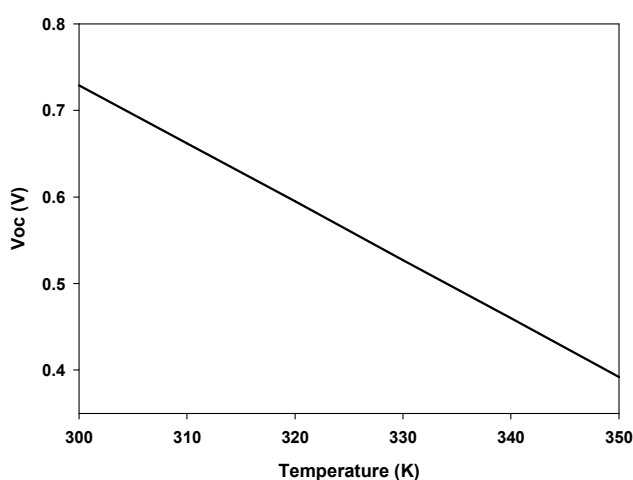
$$E_g(T) = E_0 - \frac{\alpha T^2}{\beta + T} \quad (6-5)$$

که در آن برای ماده GaInNAs  $\alpha = 5.5 \times 10^{-4} \text{ eV/K}$ ،  $\beta = 266 \text{ K}$  و  $E_0 = 1.337 \text{ eV}$  می‌باشد [۶۸]. نحوه تغییرات  $E_g(T)$  بر حسب دما در شکل ۵-۲۰ نشان داده شده است.



شکل (۵-۲۰): نحوه تغییرات گاف نواری بر حسب تابعی از دما برای سلول خورشیدی بخش ۵-۲-۳.

با قرار دادن رابطه فوق در معادله (۴-۵) می‌توان وابستگی دمایی  $J_0$  را یافت و سپس با قرار دادن رابطه  $J_0$  در معادله (۶-۴) می‌توان وابستگی دمایی ولتاژ مدار باز را رسم کرد. بنابراین با توجه به اینکه نمو افزایش  $J_0$  (در مخرج کسر معادله (۶-۴)) بیشتر از افزایش خطی  $T$  در ضریب می‌باشد، لذا انتظار می‌رود تغییرات  $V_{oc}$  بر حسب دما یک شیب منفی را نشان دهد. شکل ۵-۲۱ این وابستگی را در بازه دمایی بین ۳۰۰ تا ۳۵۰ کلوین نشان می‌دهد.



شکل (۵-۲۱): محاسبات نظری مربوط به تغییرات ولتاژ مدار باز بر حسب تابعی از دما برای سلول خورشیدی معرفی شده در بخش ۵-۲-۳.

همانطور که مشاهده می‌شود مقادیر محاسبه شده ولتاژ مدار باز در سلول خورشیدی توصیف شده در ابتدای این بخش با افزایش دما کاهش می‌یابند که این امر با روند تغییرات مقادیر ولتاژ مدار باز با دما در یک سلول خورشیدی سیلیکونی [۶۵] مطابقت دارد.

## نتیجه گیری

با مطالعه و تحلیل طیف بازدهی کوانتومی داخلی سلولهای خورشیدی مبتنی بر مواد نیتروژندار رقیق شامل  $n+\text{GaAs}/p\text{ Ga(In)NAs}$  در شرایط قبل و بعد از بازپخت دریافتیم حضور اتمهای In در این ترکیب و نیز انجام عمل بازپخت می‌تواند تاثیر قابل توجهی بر افزایش طیف بازدهی کوانتومی سلول مربوطه داشته باشند. در این موارد محاسبات ما حاکی از آن است که اگر چه حضور اتمهای In تاثیر چندانی بر عرض ناحیه تهی در محل پیوندگاه نداشته لکن بر طول پخش حاملهای اقلیتی ( $L_n$ ) تاثیر قابل ملاحظه‌ای می‌گذارد. این تغییرات می‌تواند ناشی از کم شدن پراکندگی الکترونها از خوشه‌های نیتروژنی در پیوندهای Ga-N به دنبال تشکیل پیوندهای کتره‌ای In-N در این ماده باشد. انتظار می‌رود با کاهش پراکندگی آلیاژ خوشه‌ای، تحرک حاملها و به دنبال آن طول پخش آنها افزایش یابد. در تحلیل داده‌های تجربی مربوط به این نمونه‌ها ملاحظه شد که عملیات بازپخت بر کیفیت ماده تاثیر گذار بوده و این امر را می‌توان با کاهش نقصهای نقطه‌ای و ناراستی‌های بلوری در ماده GaInNAs نوع p در اثر بازپخت توجیه نمود و بدین ترتیب طول پخش حاملها، عرض ناحیه تهی و ولتاژ مدار باز قطعه نیز افزایش می‌یابد.

در بررسی طیف بازدهی کوانتومی داخلی و بزرگی جریان اتصال کوتاه و ولتاژ مدار باز در سلولهای خورشیدی با ساختار p-n که لایه زیرین (n) آنها از تراکمهای آلیشی متفاوت  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$  و  $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  برخوردارند با توجه به محاسبات ارائه شده ملاحظه گردید پهنای ناحیه تهی در نمونه با آلیش کمتر حدود 0/5 میکرون افزایش یافته است. این افزایش با توجه به ارتباط تراکم آلیش ناخالصی با عرض ناحیه تهی قابل توجیه بوده و دریافتیم که این افزایش پهنای منشاء افزایش بازدهی کوانتومی داخلی و جریان اتصال کوتاه و نیز کاهش ولتاژ مدار باز در این سلولهای خورشیدی می‌باشد. در مطالعه طیف بازدهی کوانتومی سلولهای خورشیدی با ساختارهای متفاوت p-n و p-i-n دریافتیم که اضافه شدن لایه i در پیوندگاه p-n تاثیر بسزایی در افزایش بازدهی کوانتومی قطعه داشته

است. در حقیقت حضور این لایه می‌تواند سبب افزایش عرض ناحیه تهی (ناحیه فعال) شده و با جمع‌آوری حامل‌های اقلیتی بیشتر به افزایش جریان نوری در قطعه منجر شود.

از آنجا که علاوه بر ساختار سلول، کیفیت مواد به کار رفته نیز می‌تواند در بزرگی بازدهی کوانتومی قطعه نیز موثر باشد به مطالعه تاثیر روش رشد (MBE و MOVPE) در نمونه‌های رشد داده شده پرداختیم. ملاحظه گردید که مقادیر پارامترهای وابسته به طیف بازدهی کوانتومی داخلی از جمله عرض ناحیه تهی و طول پخش حامل اقلیت در نمونه رشد یافته به روش MOVPE کمتر از نمونه رشد یافته به روش MBE می‌باشند. این امر با توجه به افزایش ۱۰۰ برابری اتم‌های ناخواسته کربن و هیدروژن در روش MOVPE که منجر به نقص‌های موجود در ماده می‌شوند قابل توجیه است. در بررسی مشخصه‌های سلول‌های خورشیدی با مقادیر کسر مولی نیتروژن متفاوت (۲ و ۳ درصد) ملاحظه گردید نمونه با کسر مولی بیشتر، از بازدهی کوانتومی بزرگتری برخوردار است. نتایج محاسبات ما در به کارگیری این داده‌ها در پیش‌بینی جریان اتصال کوتاه نشانگر توافق بسیار خوب با نتایج تجربی گزارش شده بوده است.

سرانجام در بخش بررسی دما (بالتر از دمای اتاق) محاسبات ما نشانگر آن است که ولتاژ مدار باز با افزایش دما کاهش می‌یابد که می‌تواند به تغییرات پارامترهای گاف نواری و جریان تاریکی با دما وابسته باشد.

- [1] D. J. Friedman and S. Kurtz; (2002) "Breakeven Criteria for the GaInNAs Junction in GaInP/GaAs/GaInNAs/Ge Four-junction Solar Cells" *Prog. Photovol:Res. Appl.* 10: 331-344
- [2] S. R. Kurtz, N. A. Modine, E. D. Jones, A. A. Allerman and J. F. Klem (2002) "Insights to the electronic properties of InGaAsN: the effect of nitrogen from band structure to devices" *Semicond. Sci. Technol.* 17 p 843-850
- [3] D. J. Friedman, J. Geisz, S. Kurtz, J. M. Olson (1998) "1-eV solar cells with GaInNAs active layer" *Crystal Growth* 195, 409-415.
- [4] A. Khan, S. R. Kurtz, S. Prasad, S. W. Johnston, J. Gou; (2007) "Correlation of nitrogen related traps in InGaAsN with solar cell properties" *Appl. Phys. Lett.* 90 243509.
- [5] S. R. Kurtz, A. A. Allerman, E. D. Jones, J. M. Gee, J. J. Banas and B. E. Hammons (1999) "InGaAsN solar cells with 1.0 eV band gap, lattice matched to GaAs" *Appl. Phys. Lett.* 74,409-415.
- [6] C. Baur, A. W. Bett, F. Dimorth, S. van Reisen, B. Kunert, M. Traversa, K. Volz, W. Stolz (2003) "Development of a 1.0 eV (GaIn)(NAs) solar cell" 3<sup>rd</sup> world conference on photovoltaic energy conversion, p 677 Osaka, Japan, 11-18 May.
- [7] A. J. Ptak, D. J. Friedman, S. Kurtz and J. Keihl (2005) "Enhanced-depletion-width GaInNAs solar cells grown by molecular-beam epitaxy" 31<sup>st</sup> IEEE Photovoltaic Specialists Conference, p 603-606
- [8] N. Miyashita, Y. Shimizu, N. Kobayashi, Y. Okada and M. Yamaguchi (2006) "Fabrication of GaInNAs-based Solar Cells for Application to Multi-junction Tandem Solar Cells" 32<sup>th</sup> IEEE Photovoltaic Specialists Conference, p 869-872
- [9] D. Jackrel, S.R. Bank, H. B. Yuen, M. A. Wistey and J. S. Harris (2007) "Dilute nitride GaInNAs and GaInNAsSb solar cells by molecular beam epitaxy" *Appl. Phys. Lett.* 101, 114916
- [10] E. Co.Young, (2006), PhD thesis, "GaNAs and GaAsBi: structural and electronic properties of two resonant state semiconductor alloys", University of British Columbia.
- [11] M. Weyers, M.sato, H.Ando (1992) " Red shift of photoluminescence and absorption in dilute GaAsN alloy layers" *Jpn. J. Appl. Phys. Lett.* 31: 583.



- [12] M. Kondow, K. Uomi, K. Hosomi, and T. Mozume, (1994) "Gas-source molecular beam epitaxy of GaN<sub>x</sub>As<sub>1-x</sub> using a N radical as the N source" *J. Appl. Phys. Lett.* 33:L 1058.
- [13] M. Weyers and M. Sato (1993) "Growth of GaAsN alloys by low-pressure metalorganic chemical vapor deposition using plasma-cracked NH<sub>3</sub>" *Jpn. J. Appl. Phys. Lett.* 62: 1396.
- [14] A. Fotkatzikis, (2007), PhD thesis, "Development of III-V dilute nitride based solar cells grown by chemical beam epitaxy", Phys. depart. Houston university.
- [15] W. G. Bi, C. W. Tu (1997) "Bowing parameter of the band-gap energy of GaNAs", *Appl. Phys. Lett.* 70, 1608
- [16] W. Shan, W. Walukiewicz, J. W. Ager III, E. E. Haller, F. Geisz, D. J. Friedman, J. M. Olson, and S. R. Kurtz (1999) " Band Anticrossing in GaInNAs Alloys" *Phys. Rev. Lett.* 82, 1221
- [17] J. Toivonen, T. Hakkarianen, M. Sopanen, H. Lipsanen (1996) " High nitrogen composition GaAsN by atmospheric pressure metalorganic vapor-phase epitaxy" *Cryst. Growth.* 221, 456
- [18] I. A. Buyanova, W. M. Chen, B. Monemar (2001) "Electronic properties of Ga(In)NAs alloys ", *MRS Internet J. Nitride Semicond. Res.* 6, 2
- [19] W. Walukiewicz (2003) "Narrow band gap group III-Nitride alloys", *Physica E* 20, 300-307
- [20] M. A. Wistey, (2006) Phd thesis "Growth of 1.5 μm GaInNAsSb vertical cavity surface emitting lasers by molecular beam", Standford university.
- [21] C. Skierbiszewski, P. Perlin, P. Wisniewski, T. Suski, F. Geisz, K. Hingerl, W. Jantsch, D. Mars, and W. Walukiewicz (2001) "Band structure and optical properties of InGaNAs alloys", *Phys. Rev. B.* V65, 035207.
- [22] N. Balkan (2003). "Physics and Technology of Dilute Nitrides for Optical Communications" *IEE Proc. Optoelectron.* 150, No. 1
- [23] F. Maisa, A. Polimeni, Baldassarri Höger von Högersthal, M. Bissiri, M. Capizzi, P. J. Klar, and W. Stolz, (2003) "Early manifestation of localization effects in GaNAs" *Appl. Phys. Lett.* 82, 4474.
- [24] A. Hashimoto, T. Yamaguchi, T. Suzuki, A. Yamamoto (2005) "Hall electron mobility versus N-Spatial distribution in III-V-N systems", *J. Cryst. Growth.* 278, 532-537.

- [25] T. Suzuki, T. Yamaguchi (2003) "Electric properties of RF-MBE InGaNAs grown layer", *Phys. Stat. sol(b)*, No. 7.2769-2772.
- [26] M. Reason, Y. Jin, H. A. McKay, N. Mangan, D. Mao, R. S. Goldman, X. Bai and C. Kurdak (2007) "Influence of N on the electronic properties of GaAsN alloy films and heterostructures" *Appl. Phys. Lett.*, 102, 103710.
- [27] D. J. Friedman, J. F. Geisz and A. J. Ptak, "*Photovoltaic Applications Of Dilute Nitrides*", Vol. 21: I. A. Buyanova and W. Chen, Taylor and Francis, New York, (2004).
- [28] M. Yamaguchi, K. Nishimura, T. Sasaki, H. Suzuki, K. Arafune, N. Kojima, Y. Ohsita, Y. Okada, A. Yamamoto, T. Takamoto and K. Araki (2008) "Novel materials for high-efficiency III-V multi-junction solar cells", *J. Solar Energy*, 82, 173-180.
- [29] W. Li and M. Pess (2003) "Doping and carrier transport in  $\text{Ga}_{1-3x}\text{In}_{3x}\text{N}_x\text{As}_{1-x}$  alloys", *Phys. Rev. B*. 64, 113308.
- [30] C. W. T, M. Chen, I. A. Buyanova (2006) "Material properties of dilute nitrides: Ga(In)NAs and Ga(In)NP" *J. Cryst. Growth*. 288, 7.
- [31] J. F. Geisz, D. J. Friedman J. Olson, S. Kurtz, B. Keyes (1998) "Photocurrent of 1 eV InGaNAs lattice-matched to GaAs", *J. Cryst. Growth*. 195, 401-408.
- [32] E. Storm, (2002), Master of science thesis "Optical and electrical properties of dilute  $\text{GaN}_x\text{As}_{1-x}$  alloys", British Columbia University.
- [33] M. Sato, (1996) "GaN and related materials" Mater. Res. Soc. Symp. Proc. 395, 285.
- [34] A. Gueddim, R. Zerdoum, N. Bouarissa, (2006) "Dependence of electronic properties on nitrogen concentration in  $\text{GaAs}_{1-x}\text{N}_x$  dilute alloys" *J. Physics and Chemistry of Solid* 67, 1618.
- [35] J. Toivonen, (2003), PhD thesis, "Growth and properties of GaNAs structures", Helsinki University.
- [36] J. Wangner, T. Geppert, K. Köhler, P. Ganser, and M. Maier, (2003) "Bonding of nitrogen in dilute GaInAsN and AlGaAsN studied by raman spectroscopy" *Solid State Electron*. 47, 461.
- [37] S. Kurtz, J. Geisz, D. J. Friedman, J. Olson and A. Duda, (2000) "Modeling of electron diffusion length in GaInAsN solar cells" 28th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, p 1210-1213.

- [38] Y. Shimizu, N. Miyashita, Y. Mura, A. Uedono, Y. Okada (2007) "Effect of growth temperature on the properties of GaInNAs thin films by atomic hydrogen-assisted RF-MBE", *J. Cryst. Growth*. 301, 579-582
- [39] W. Li, M. Pessa, T. Ahlgren, and J. Decker, (2001) "Origin of improved luminescence efficiency after annealing of Ga(In)NAs materials grown by molecular-beam epitaxy" *Appl. Phys. Lett.* 79:1094–1096.
- [40] P. Krispin, S. G. Spruytte, J. S. Harris, and K. H. Ploog, (2000) "Electrical depth profile of p-type GaAs/Ga(As,N)/GaAs heterostructures determined by capacitance-voltage measurements" *J. Appl. Phys.* 88:4153–4158.
- [41] A. Slaoui and R. T. Collins (2007) "Advanced Inorganic Materials for Photovoltaics" *Materials Research Society Bulletin*, 32,211.
- [42] D. M. Chapin, C. S. Fuller, G. L. Pearson, (1954) "A New Silicon p-n Junction Photocell for Converting Solar Radiation into Electrical Power" *J. Appl. Phys.* 25, 676.
- [43] S. M. Sze, (1985): "*Semiconductor devices, physics and technology*", Wiley.
- [44] M. P. Thekaekara, (1974), "Data on incident solar energy" *Suppl. Proc.* 20<sup>th</sup> Ann. Meet. Inst. Environ. Sci, P. 21.
- [45] H. Melchior, F. T. Arecchi and E. O. Schulz (1972) "*Laser Handbook*", Dubios, Eds. 1, 725-835.
- [46] E. Yang, (1978): "*Fundamental of semiconductor devices*", McGraw-Hill.
- [47] J. M. Olson, S. R. Kurtz, A. E. Kinbbler and P. Faine (1990) "A 27.3% efficient Ga<sub>0.5</sub>In<sub>0.5</sub>P/GaAs Tandem Solar Cell", *J. Appl. Phys. Lett.* 56: 623-625.
- [48] نشریات داخلی سازمان انرژی‌های نو ایران (سانا)، معاونت انرژی، وزارت نیرو، شماره‌های ۱۳، ۱۴، ۱۵، ۱۷ و ۱۹، سال ۱۳۷۸.
- [49] Antonio Luque, Steven Hegedus, (2003) "*Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*", John Wiley & Sons Ltd, England.
- [50] D. B. Jackrel, (2005), PhD thesis, "InGaAs and GaInNAs(Sb) 1064 nm Photodetectors and Solar Cells on GaAs Substrates", Materials Science and Engineering depart. Stanford university.
- [51] H. J. Moller, (1993): "*Semiconductor for solar cells*" Artech House.

[۵۲] حجت اله حمیدی، ۱۳۷۹، پایان نامه کارشناسی ارشد "طراحی و رشد سلول خورشیدی با ساختار p-n با نیمه هادی گالیوم آرسنید (GaAs)، به روش MBE"، دانشکده برق و الکترونیک الکترونیک، دانشگاه علم و صنعت ایران.

[53] G. R. Fowles, (1975): "*Introduction to modern optics*" Dover publications, Inc., New York.

[54] A. J. Ptak, D. J. Friedman, S. Kurtz and R. C. Reedy. (2005) "Low-acceptor-concentration GaInNAs grown by molecular-beam epitaxy for high-current p-i-n solar cell applications" *Appl. Phys. Lett.* 98, 094501

[55] T. Suzuki, T. Yamaguchi, A. Yamamoto, A. Hashimoto, (2003) "Electric properties of RF-MBE InGaAsN grown layer" *Phys. Stat. Sol (c)* 0, No 7, 2769-2772. The 5th International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS -5).

[56] H. Eshghi, F. Shariatmadar Tehrani, (2009) "A quantitative study of nitrogen concentration on dislocation density in dilute nitride semiconductor GaNAs", *J. Optoelectronics and Advanced Materials*, 11, 1467.

[57] H. Eshghi, M. Ameri, (2009) "Determination of electron trap density in dilute nitride GaNAs and InGaNAs semiconductors", International Conference on Materials for Advanced Technologies (MRS-S) Singapore, (ICMAT) 28 June – 3 July.

[۵۸] محسن عامری، حسین عشقی (۱۳۸۸) "بررسی کمی تاثیر بازپخت بر کیفیت بلوری نیمرسانای نیتروژندار رقیق InGaNAs" کنفرانس سالانه فیزیک ایران، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۲۴ تا ۲۷ مرداد

[59] S. Kurtz, J. F. Geisz, D. J. Friedman, A. J. Ptak, R. R. King, D. C. Law, N. H. Karam (2005) "Collection of photocarriers in  $Ga_{1-x}In_xN_yAs_{1-y}$  solar cells" 31<sup>st</sup> IEEE Photovoltaic Specialists Conference, p 707-710.

[60] S. Kurtz, S. Johnston, and H. M. Branz; (2005) "Capacitance-spectroscopy identification of a key defect in N-degraded GaInNAs solar cells" *Appl. Phys. Lett.* 86, 113506.

[61] R. J. Kaplar, A. R. Arehart, S. A. Ringel, A. A. Allerman, R. M. Sieg and S. R. Kurtz, (2001) " Deep levels and their impact on generation current in Sn-doped InGaAsN" *J. Appl. Phys.*, 90, 3405.

- [62] A. Fleck, B. J. Robinson, D. A. Thompson, (2001) " Characterization of defects in doped InGaAsN grown by molecular beam epitaxy" *Appl. Phys. Lett.*, 78, 1694.
- [63] A. Balcioglu, R. K. Ahrenkiel and D. J. Friedman, (2003) "Effects of oxygen contamination on diffusion length in p<sup>+</sup>-n GaInNAs solar cells" *J. Appl. Phys.* 93, 3635.
- [64] S. Kurtz, J. F. Geisz, D. J. Friedman, A. J. Ptak, R. R. King, D. C. Law, N. H. Karam (2005) "Collection of photocarriers in Ga<sub>1-x</sub>In<sub>x</sub>N<sub>y</sub>As<sub>1-y</sub> solar cells" 31<sup>st</sup> IEEE Photovoltaic Specialists Conference, p 707-710.
- [۶۵] نسرين صالحی، ۱۳۸۶، "اثر فوتوولتایی در سلول‌های خورشیدی با سیلیکون متخلخل"، پایان نامه کارشناسی ارشد فیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- [66] S. Kurtz, A. Ptak, S. Johnston, C. Kramer, M. Young, D. Friedman, J. Geisz, W. McMahon, A. Kibbler, J. Olson, R. Crandall and H. Branz, (2005) "Understanding the potential and limitations of dilute nitride alloys for solar cells" DOE Solar Energy Technologies Program Review Meeting
- [67] Y.P. Varshni, (1967) " Temperature dependence of the energy gap in semiconductors" *Physica*, 34, 149
- [68] P. Perlin, SG. Subramanya, DE. Mars, J. Kruger, NA. Shapiro, H. Siegle, ER. Weber (1998) "Pressure and temperature dependence of the absorption edge of a thick Ga<sub>0.92</sub>In<sub>0.08</sub>As<sub>0.985</sub>N<sub>0.015</sub> layer" *Applied Physics Letters*; 73:p 3703–3705.

## **Abstract**

The peculiar properties of III-V dilute nitrides, namely the substantial reduction of the energy bandgap and the increase of the electron effective mass upon the introduction of a small amount of nitrogen in the III-V matrix which can be grown lattice-matched with GaAs and Ge, make them ideal candidates for solar cell applications. Specifically, the use of 1.0 - 1.25 eV GaInAsN subcells has been proposed as a potential way of enhancing the efficiency of triple and quadruple junction solar cells. However some problems such as doping difficulties and poor minority carrier properties have mitigated the success of these attempts.

In this thesis we have tried to study some important parameters in dilute nitride semiconductor based solar cells, including width of the depletion layer, minority carrier diffusion length, short circuit current and open circuit voltage affecting the internal quantum efficiency of the device using the well-known theoretical models.

Our analysis show in p-n structure solar cells using MBE as the growth method, a low doping level in n-type layer and annealing process tend to more efficient samples. We also found in p-i-n structures i-layer thickness is crucial in improving the device efficiency.

Here in this work we have briefly introduced the presented literature reports in chapter 1 and some important physical properties related to dilute nitride semiconductors, including Ga(In)NAs in chapter 2. In chapters 3 and 4 the basic theories describes the solar cell operation, and related parameters in internal quantum efficiency of such devices are presented, respectively. Finally in chapter 5 we have tried to show the results of our analysis in different reported p-n and p-i-n structures.

**Key Words:** Solar cell, Dilute Nitride Semiconductor, Quantum Efficiency, Width of Depletion Region and Diffusion Length of Minority Carrier



**Shahrood University of Technology**

**Faculty of Physics**

**Photovoltaic Effect in Dilute Nitride Semiconductor Solar Cells**

**Faezeh Mohammadbeigi**

**Supervisor:**

**Dr. Hosein Eshghi**

**Date: June 2010**