

طراحی و بهینه‌سازی سلول‌های خورشیدی ناهمگون دورویه با لایه نازک ذاتی ریزبلوری

الناز شبرنگ^۱، علی شاه‌حسینی^{*۱}

^۱ دانشگاه آزاد اسلامی، دانشکده مهندسی برق، پزشکی و مکاترونیک، قزوین، ایران.

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۹۳/۲/۲۱، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۹۵/۴/۲۳، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۳۹۵/۶/۲

چکیده در این مقاله، یک سلول خورشیدی ناهمگون با دو لایه ذاتی ریزبلوری با استفاده از نرم‌افزار AFORS-HET طراحی و بهینه‌سازی شده است. ساختار شبیه‌سازی به صورت TCO/a-Si:H(n)/ μ c-Si:H(i)/c-Si(p)/ μ c-Si:H(i)/BSF/TCO/Ag می‌باشد. با ثابت فرض کرن ضخامت لایه امیتر و لایه میدان سطحی تحتانی (BSF) اثر پارامترهای مختلفی مانند: تغییر ضخامت لایه ذاتی تحتانی، ضخامت ویفر، نقص چگالی لایه واسط و با استفاده از سه نوع مختلف لایه میدان سطحی تحتانی و مقایسه خروجی‌های بدست آمده از این سه نوع ساختار با ساختاری که بدون لایه میدان سطحی تحتانی است، راندمان سلول خورشیدی مورد مطالعه قرار می‌گیرد و در بهترین حالت موجود مقدار بهینه به ازای سلول انتخاب می‌شود. شایان ذکر است با توجه به نتایج شبیه‌سازی، استفاده از لایه ذاتی ریزبلوری بین لایه‌های a-Si:H(n)/c-Si(p) و c-Si(p)/a-Si:H(p+) چگالی حالات و باز ترکیبی حامل‌ها را کاهش داده و سبب افزایش راندمان سلول خورشیدی سیلیکانی به مقدار عددی ۲۸٪ می‌شود.

کلمات کلیدی: سلول خورشیدی سیلیکانی، میدان سطحی تحتانی، لایه ذاتی.

Simulation and Optimization of Bifacial Solar Cells with a Hetero-Junction MicroCrystalline Intrinsic thin layer

Elnaz Shabrang¹, Ali Shahhoseini^{*1}

¹Islamic Azad University, Department of Electrical, Biomedical and Mechatronics Engineering, Qazvin, Iran.

Abstract In this paper, the TCO/a-Si:H(n)/ μ c-Si:H(i)/c-Si(p)/ μ c-Si:H(i)/BSF/TCO/Ag Bifacial HIT (Heterojunction with intrinsic thin-layer) solar cells was analyzed and designed by AFORS-HET Software. We consider the emitter and BSF layers thickness is constant, then the influences of wafer and intrinsic layer thickness, Densities of interface defects (D_{it}), and using three different types BSF layer and compare the output from these three types of structure with structure without the BSF layer, Solar cell efficiency is studied And the best available mode for optimum cell is selected. It is noteworthy that according to the simulation results, use a layer of intrinsic microcrystalline layer of a-Si: H (n) / c-Si (p) and c-Si (p) / a-Si: H (p +) Density of states and combined carriers reduce, Increase the efficiency of silicon solar cells is the numerical value of 28%.

Keywords: Silicon solar cells, Back Surface Field (BSF), Intrinsic Layers).

۱- مقدمه

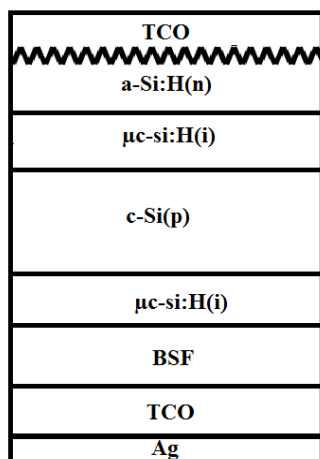
رشد جهانی مصرف انرژی و افزایش گازهای گلخانه‌ای خسارات جبران ناپذیری را در قرن اخیر برای منابع حیاتی دربر داشته است. به منظور کاهش اتکا جهانی به منابع طبیعی پایان‌پذیر و سوخت‌های مخرب محیط زیست، تلاش‌های علمی فراوانی برای کاهش هزینه‌های تولید انرژی از منابع تجدیدپذیر، از قبیل انرژی خورشیدی، انرژی باد، انرژی امواج و انرژی زمین گرمایی صورت گرفته است. از این میان انرژی خورشید ۵۰۰۰ بار بیشتر از سایر منابع تجدیدپذیر انرژی تولید می‌کند و از سایر مزایای انرژی خورشید می‌توان به رایگان و در دسترس بودن، پاک و بدون آلودگی (حذف انتشار گازهای گلخانه‌ای از جمله دی اکسید کربن)، و امن و بی‌خطر بودن آن اشاره کرد و همین امر سبب شده است که در سال‌های اخیر استفاده از این انرژی مورد توجه قرار گیرد. متداول‌ترین و بهترین سلول‌های خورشیدی از نیمه‌رسانای سیلیکانی که ۲۷/۷٪ پوسته زمین را تشکیل می‌دهد [۱]، ساخته می‌شوند اگر توسط هر فوتون که با سلول خورشیدی برخورد می‌کند، باز ترکیبی صورت نمی‌گرفت و یک الکترون جدا می‌شد، سلول می‌توانست تمام نوری را که به آن می‌رسید را به الکتریسیته تبدیل کند، در حالی که بازده سلول‌های خورشیدی واقعی ۵ تا ۲۰ درصد است [۱]. سلول‌های خورشیدی سیلیکان بلوری راندمان بالایی دارند ولی با وجود این، هزینه‌های ساخت این سلول‌ها و دمای مورد نیاز ساخت لایه‌ها (ویفر...) بالا می‌باشد، در همین راستا توسعه تکنولوژی سلول‌های خورشیدی فیلم نازک که در کاهش هزینه نقش مهمی دارد، از اهمیت بالایی برخوردار است [۲-۴]. سلول‌های خورشیدی فیلم نازک ناهمگون با لایه ذاتی (Intrinsic) نخستین بار توسط سانئو ال تی دی (SANYO.LTD) در سال ۱۹۹۴ به منظور کاهش هزینه ساخت و دست‌یابی به راندمان بالا با استفاده از زیر لایه ساخت (Substrate) نوع n توسعه یافت [۲-۵]، امروزه به دلیل استفاده فراوان از زیر لایه نوع p در صنعت فوتولتائیک مطالعات بسیاری در این زمینه صورت گرفته است [۶]. به منظور افزایش راندمان، توسعه ساختارهای دورویه (Bifacial) و استفاده از لایه میدان سطحی تحتانی در ساختارهای سلول‌های ناهمگون بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۷، ۸ و ۹] اخیراً

سلول‌های خورشیدی با راندمان ۲۵٪ [۱۱-۱۰] و ۲۵/۶٪ [۱۲] توسعه یافته و سانئو در صدد است تا با کاهش ضخامت ویفر سیلیکان بلوری، هزینه‌های ساخت HIT را به حداقل برساند. سلول‌های خورشیدی HIT شامل یک لایه نازک سیلیکان آمورف که بر روی جاذب سیلیکان بلوری رشد داده شده، می‌باشد. در این سلول‌ها، رسانایی اندک سیلیکان آمورف هیدروژنه استفاده از لایه رسانای شفاف در بالای امیتر را سبب می‌شود تا تلفات مقاومتی و نیز خسارت‌های بازتاب شار فوتون را کاهش دهد. در سلول‌های خورشیدی ناهمگون با لایه ذاتی، لایه واسط $a\text{-Si:H(n)}/c\text{-Si(p)}$ از اهمیت بالایی برخوردار است، زیرا خصوصیات پیوند (Junction) تعیین کننده راندمان سلول خورشیدی می‌باشد [۱۰].

تحقیق انجام شده شامل بخش‌های زیر می‌باشد، ابتدا در بخش ۲ ساختاری جدید، از طریق نشان دادن یک لایه نازک ذاتی ریز بلوری دوپینگ نشده در سمت تحتانی سلول معرفی می‌شود، سپس در بخش ۳ با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌ساز AFORS-HET پارامترهای هر لایه و توزیع حالات نقص در لایه‌های ساختار ناهمگون با دو لایه ذاتی ریز بلوری در روند مدل‌سازی بیان می‌شود و بخش ۴ ابتدا با اشاره‌ای بر شبیه‌سازی‌های انجام شده در این راستا، اثر پارامترهای مختلفی بر ولتاژ مدار باز، جریان اتصال کوتاه، عامل پرشدگی و راندمان جهت دستیابی به مقادیر بهینه مطالعه می‌شود. در بخش ۵ ضمن توصیف تأثیر هر کدام از پارامترهای مطالعه شده بر عملکرد سلول مقادیر بهینه نتیجه‌گیری می‌شود و امید است این بهینه‌سازی مقدمه‌ای بر توسعه هر چه بیشتر تکنولوژی سلول‌های HIT راندمان بالا قرار گیرد..

۲- روش تحقیق

تاکنون مطالعات فراوانی بر ساختارهای سلول‌های خورشیدی ناهمگون با یا بدون لایه ذاتی صورت گرفته است. استفاده از لایه ذاتی دوپینگ نشده بین لایه امیتر و ویفر (دوپینگ شده) که چگالی حالات کمتری نسبت به لایه‌های دوپینگ شده دارد، سبب می‌شود چگالی لایه واسط ناهمگون ایجاد شده بین لایه ذاتی/ویفر نسبت به لایه واسط ناهمگون ایجاد شده با لایه امیتر دوپینگ شده کمتر باشد، عملکرد سلول



شکل ۱. شماتیک ساختار سلول خورشیدی شبیه‌سازی شده.

بهبود یابد در این مقاله با استناد به نتایج پیشین و مطالعات صورت گرفته در زمینه سلول‌های خورشیدی ناهمگون با یک یا دو لایه ذاتی، ساختار ناهمگون جدیدی را با استفاده از دو لایه ذاتی سیلیکان ریز بلوری با زیر لایه سیلیکان بلوری نوع p معرفی کرده‌ایم. شکل ۱ نشان دهنده شماتیک ساختار اصلی شبیه‌سازی شده می‌باشد و شامل، دو لایه اکسید رسانای شفاف با سطح بافته در سمت فوقانی و تحتانی سلول و یک لایه a-Si:H(n) به عنوان لایه امیتر و دو لایه ذاتی سیلیکان ریز بلوری c-Si(p) و نیز یک لایه میدان سطحی تحتانی، a-Si:H(p+) در قسمت زیرین سلول می‌باشد. با توجه به آنچه درباره استفاده

جدول ۱ [۱۳-۱۴]. مقادیر پارامترها در سلول خورشیدی ناهمگون با لایه ذاتی ریزبلوری.

a-Si:H(n)	μc-Si:H(i)	c-Si(p)	a-Si:H(p+)	پارامترها
۳	۳	3×10^5	۱۰	ضخامت لایه (nm)
۱۱/۹	۱۱/۹	۱۱/۹	۱۱/۹	ثابت دی‌الکتریک
۳/۹	۴	۴/۰۵	۳/۹	الکترون خواهی (eV)
۱/۷۲	۱/۲	۱/۱۲۴	۱/۷۲	انرژی گپ (eV)
۱/۷۲	۱/۲	۱/۱۲۴	۱/۷۲	انرژی گپ نوری (eV)
10^{20}	3×10^{19}	$2/8 \times 10^{19}$	10^{20}	چگالی باند ظرفیت (Cm^{-3})
10^{20}	2×10^{19}	$1/0.4 \times 10^{19}$	10^{20}	چگالی باند هدایت (Cm^{-3})
۵	۵۰	۴۰۲۱	۵	موبیلیتی الکترون ($\text{Cm}^{-1}\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$)
۱	۵	۴۱۲/۹	۱	موبیلیتی حفره ($\text{Cm}^{-1}\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$)
۰	۰	$1/5 \times 10^{16}$	10^{20}	غلظت دوپینگ پذیرنده (Cm^{-3})
10^{19}	۰	۰	۰	غلظت دوپینگ دهنده (Cm^{-3})
10^7	10^7	10^7	10^7	سرعت حرارتی الکترون (Cms^{-1})
10^7	10^7	10^7	10^7	سرعت حرارتی حفره (Cms^{-1})
۲/۳۲۸	۲/۳۲۸	۲/۳۲۸	۲/۳۲۸	چگالی لایه‌ها (gCm^{-3})
۰	۰	$2/2 \times 10^{-31}$	۰	ضریب بازترکیبی اوژه الکترون ($\text{Cm}^{\text{e}}\text{s}^{-1}$)
۰	۰	$9/9 \times 10^{-32}$	۰	ضریب بازترکیبی اوژه حفره ($\text{Cm}^{\text{h}}\text{s}^{-1}$)
۰	۰	۰	۰	ضریب بازترکیبی باند-تا-باند ($\text{Cm}^{\text{e}}\text{s}^{-1}$)

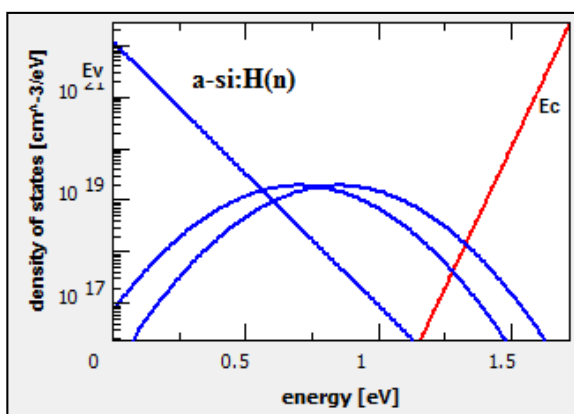
از یک لایه ذاتی گفته شد می‌توان اظهار داشت که با استفاده از دو لایه نازک ذاتی سیلیکان ریز بلوری در دو طرف ویفر نقص در سطح آن و لایه واسط ناهمگون بیشتر کاهش یافته و تأثیری مثبت بر عملکرد سلول خواهد داشت. طرف ویفر نقص در سطح آن و لایه واسط ناهمگون بیشتر کاهش یافته و تأثیری مثبت بر عملکرد سلول خواهد داشت.

۳- مدل‌سازی

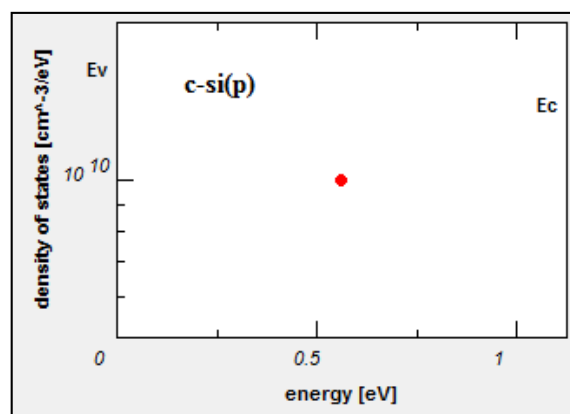
شبیه‌سازی ساختار سلول خورشیدی ناهمگون با استفاده از نرم‌افزار AFORS-HET که یک شبیه‌ساز عددی ساختارهای ناهمگون است و معادلات یک بعدی نیمه‌هادی را بر اساس آمار باز ترکیبی شاکلی-رید-هال حل می‌کند، صورت گرفته است [۱۳-۱۴]. برخی از پارامترهای شبیه‌سازی به ازای لایه‌های امیتر و ویفر و دو لایه ذاتی سیلیکان ریز بلوری و میدان سطحی تحتانی براساس مقادیر پیش‌فرض در نرم‌افزار

۴- نتایج شبیه‌سازی و بحث

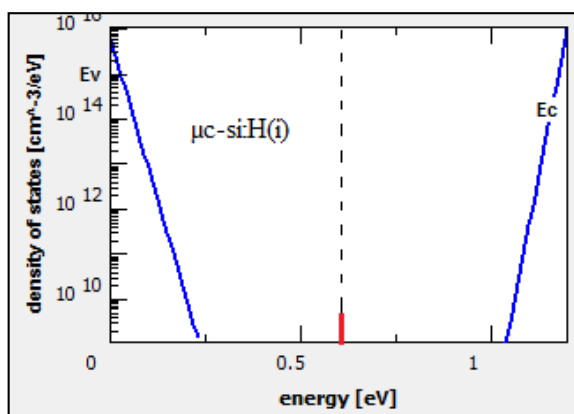
در این بخش ابتدا با بررسی اجمالی در مورد ساختار



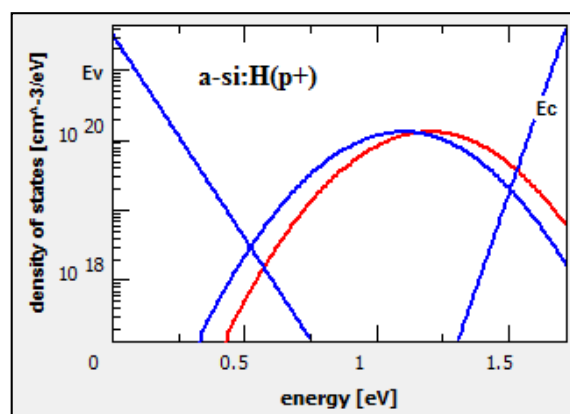
(ب)



(ف)



(ت)



(پ)

شکل ۲. توزیع حالات نقص به ازای لایه‌های مختلف در شبیه‌سازی، الف. c-Si(p)، ب. a-Si:H(p+)، ت. μc-Si:H(i)، ج. a-Si:H(n)، د. μc-Si:H(i).

میدان سطحی تحتانی مشاهده می‌کنیم که راندمان سلول خورشیدی به میزان ۳/۵٪ نسبت به ساختار با یک لایه ذاتی ریزبلوری افزایش می‌یابد. با توجه به نتایج شبیه‌سازی، شکل ۳. الف، با افزایش ضخامت لایه ذاتی از ۱ تا ۲۰ نانومتر، جریان اتصال کوتاه افزایش می‌یابد، علت این امر را می‌توان این گونه بیان کرد، که با افزایش ضخامت لایه ذاتی جذب فوتون بیشتر شده و تولید جفت الکترون حفره افزایش می‌یابد. با توجه به شکل ۳. ب، افزایش ضخامت لایه ذاتی تأثیری در میزان ولتاژ مدار باز سلول ندارد و مقدار ولتاژ به ازای ضخامت‌های مختلف ۶۴۱/۴ میلی ولت می‌باشد. در ادامه روند شبیه‌سازی شکل ۳. پ، با توجه به (معادله ۱) و نسبت عکس عامل پرشدگی با جریان اتصال کوتاه، با افزایش جریان، عامل پرشدگی کاهش می‌یابد، به ازای ضخامت‌هایی با بیشترین مقدار جریان، عامل پرشدگی کمترین مقدار خود را خواهد داشت. در شکل ۳. ت، روند تغییرات راندمان سلول به ازای تغییر ضخامت لایه ذاتی نشان داده شده است، با افزایش ضخامت راندمان با تغییر جزئی از مقدار ۲۷/۹۸٪ تا ۲۸٪ افزایش می‌یابد، در نهایت بهینه مقدار راندمان را به منظور کاهش هزینه‌های ساخت به ازای ضخامت لایه ذاتی برابر با مقدار ۳ نانومتر، ۲۷/۹۹٪ در نظر می‌گیریم. شکل (۳) اثر ضخامت لایه ذاتی را بر مشخصه‌های سلول خورشیدی نشان می‌دهد.

$$F.F. = \frac{V_m I_m}{V_{oc} I_{sc}} \quad \text{معادله (۱)}$$

۴-۲- اثر ضخامت ویفر

با ثابت فرض کردن ضخامت سایر لایه‌ها، هنگامی که ضخامت ویفر افزایش می‌یابد راندمان سلول خورشیدی هم افزایش یافته به همین دلیل مقدار بهینه راندمان به ازای ضخامت ۳۰۰ میکرومتر برای سلول خورشیدی با لایه ذاتی ریزبلوری به دست می‌آید. شکل (۴) وابستگی راندمان به ضخامت ویفر را نشان می‌دهد.

جدول ۲. پارامترهای خروجی ساختار سلول خورشیدی ناهمگون

TCO/a-si:H(n)/ $\mu\text{c-Si:H(i)/c-Si(p)$ /BSF

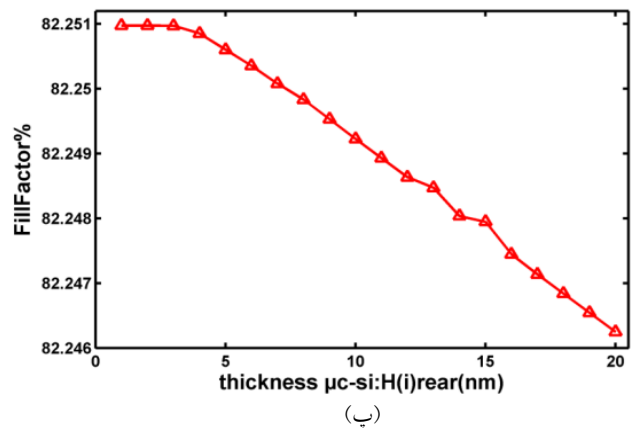
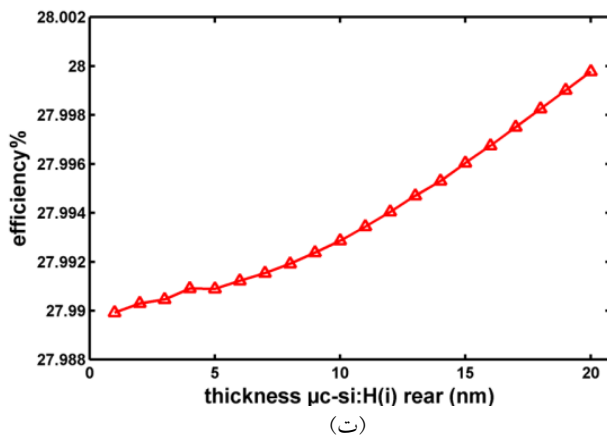
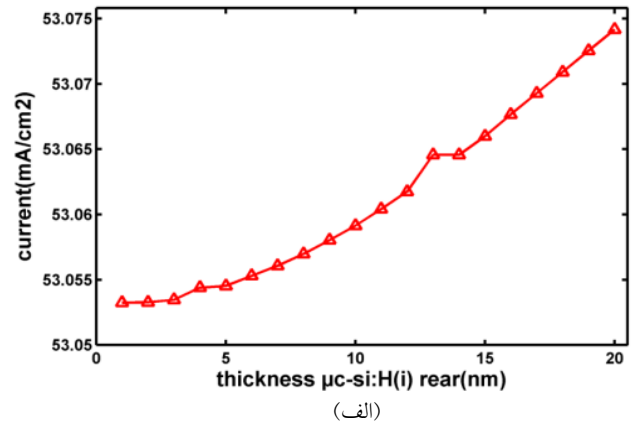
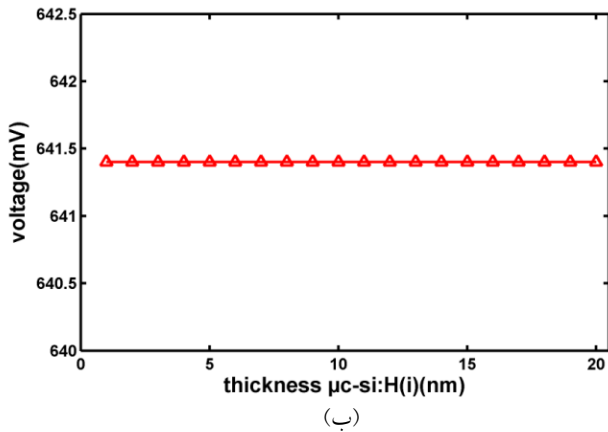
(mV) V_{oc}	(mA/cm ²) I_{sc}	% FF	% η
۶۲۶	۴۸۷	۸۲/۴۹	۲۴/۴۸

ارائه شده با یک لایه ذاتی سیلیکان ریز بلوری که مبنای اصلی در پیشبرد این مقاله بوده، اثر پارامترهای مختلفی از قبیل ضخامت لایه ذاتی سیلیکان ریزبلوری تحتانی بر ولتاژ مدار باز، جریان اتصال کوتاه، عامل پرشدگی و راندمان و ضخامت لایه ویفر بر راندمان و اثر لایه میدان سطحی تحتانی (با یا بدون BSF) بر پارامترهای خروجی سلول نمونه و نیز اثر نقص چگالی لایه واسط بر راندمان بررسی و مطالعه می‌شود. در بهترین گزارش دیده شده درباره نتایج سلول خورشیدی ناهمگون با یک لایه ذاتی ریزبلوری با ساختار TCO/a-Si:H(n)/ $\mu\text{c-Si:H(i)/c-Si(p)$ /BSF، به ترتیب ولتاژ مدار باز، جریان اتصال کوتاه، عامل پرشدگی و راندمان در جدول (۲) بیان شده است [۱۰]:

در این مقاله می‌خواهیم با ارائه ساختار سلول خورشیدی ناهمگون با دو لایه ذاتی ریزبلوری، و اعمال تغییرات بر آن، خروجی سلول خورشیدی نمونه را تا حد مطلوبی بهبود بخشیم.

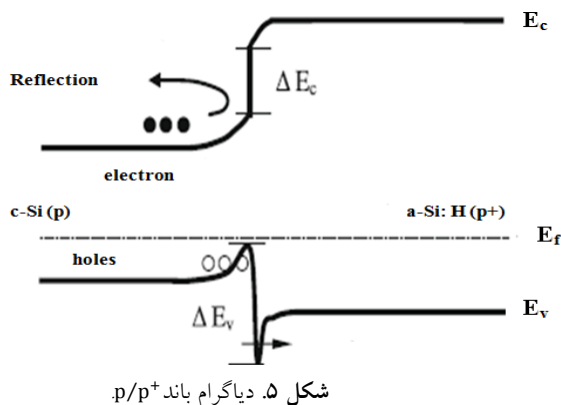
۴-۱- اثر ضخامت لایه ذاتی تحتانی

در سلول‌های خورشیدی فیلم نازک، به دلیل نقص چگالی بالا و طول کوتاه دیفیوژن حامل‌های بار در سیلیکان آمورف هیدروژنه از لایه ذاتی به عنوان جاذب استفاده کرده تا جفت الکترون-حفره تولید کند، جفت‌های الکترون-حفره با استفاده از میدان الکتریکی تولید شده توسط لایه‌های دوپینگ شده n و p در دو طرف لایه ذاتی، جدا شده سپس حفره‌ها به سمت ناحیه p و الکترون‌ها به سمت ناحیه n می‌روند. در نتیجه جدایی بارها، ولتاژی بین ناحیه n و p ایجاد می‌گردد که اگر این دو ناحیه از طریق یک الکتروود با استفاده از مدار خارجی به هم مرتبط شوند، جریان فوتونی تولید می‌شود. در راستای مطالعات پیشین [۱۰]، با ثابت نگه داشتن ضخامت لایه ذاتی در مقدار ۳ نانومتر در سمت فوقانی سلول و افزودن یک لایه ذاتی در سمت تحتانی ساختار بین ویفر بلوری و لایه

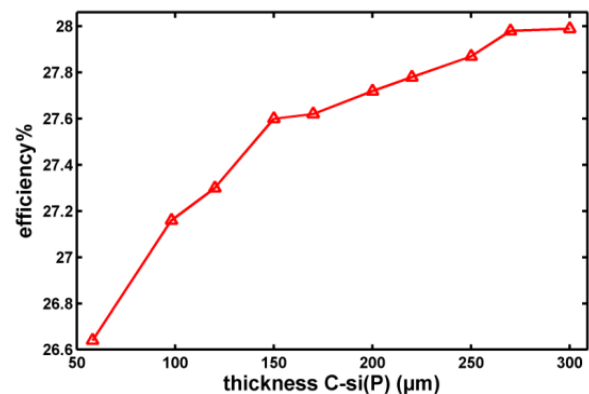


شکل ۳. الف-ولتاژ مدارباز، ب-جریان اتصال کوتاه، پ-عامل پرشدگی ت-راندمان به عنوان تابعی از ضخامت لایه ذاتی.

به دست آید. شکل (۵) دیاگرام باند ساختار p/p^+ را نشان می‌دهد. شکاف انرژی بالا و آفست بزرگ باند هدایت (ΔE_c) در $a\text{-Si:H}(p^+)$ انعکاس خوبی در برابر انتقال الکترون‌ها ایجاد می‌کند. افزایش آفست باند ظرفیت (ΔE_v) سبب می‌شود سدی در برابر عبور حفره‌ها در پیوندهای تحتانی، به وجود آید و با کاهش بازترکیبی حامل‌ها راندمان سلول خورشیدی بهبود یابد. شکل ۶ اثر BSF بر راندمان را نشان می‌دهد.



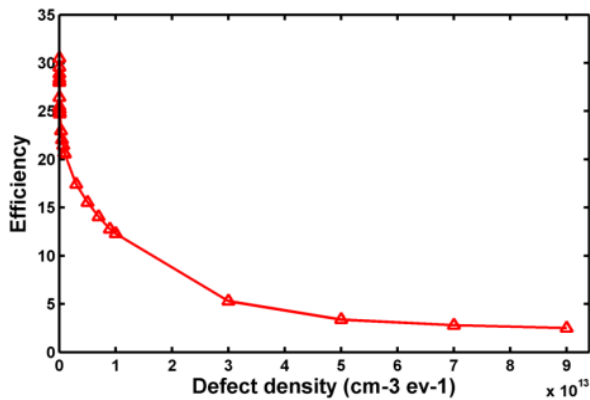
شکل ۵. دیاگرام باند p/p^+



شکل ۴. راندمان سلول خورشیدی شبیه‌سازی شده تابعی از ضخامت ویفر.

۳-۴ اثر BSF بر راندمان سلول خورشیدی

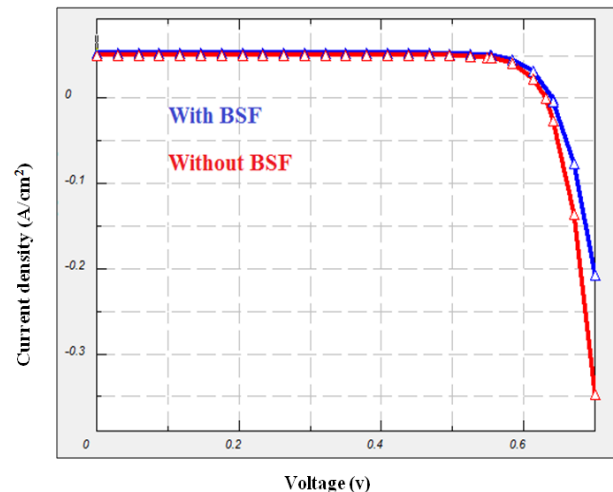
با استفاده از ساختارهای همگون n/n^+ و p/p^+ عنوان لایه غیر فعال اثر میدان، در سمت تحتانی سلول‌های خورشیدی می‌توان اثر بازترکیبی را کاهش داد تا راندمان بهینه



شکل ۷. اثر چگالی نقص رابط بر راندمان سلول خورشیدی.

۴- نتیجه گیری

در این مقاله با استفاده از نرم افزار AFORS-HET، اثر پارامترهای مختلفی از قبیل ضخامت لایه ذاتی، ضخامت ویفر، میدان سطحی تحتانی، نقص چگالی لایه واسط بر پارامترهای فوتولتائیک سلول خورشیدی مورد مطالعه قرار گرفت و با افزودن لایه ذاتی ریزبلوری تحتانی براساس نتایج به دست آمده از شبیه سازی و همچنین با تغییر ضخامت این لایه راندمان سلول خورشیدی افزایش می یابد. علت این است که لایه های دوپینگ شده ویفر، امپتر و لایه میدان سطحی تحتانی از چگالی نقص بالایی برخوردار هستند که استفاده از لایه ذاتی در سمت فوقانی و تحتانی سلول با در نظر گرفتن میزان غلظت دوپینگ صفر، سبب اثر ناپذیری نقص در سطح و با کاهش بازترکیبی حامل ها در محل پیوند p-n، تولید جفت الکترون-حفره را افزایش داده و راندمان بهبود می یابد. به منظور کاهش هزینه های ساخت، ضخامت بهینه لایه ذاتی ۳ نانومتر در نظر گرفته می شود و استفاده از لایه میدان سطحی تحتانی (لایه غیر فعال اثر میدان) در ساختار سلول ناهمگون نسبت به سلول هایی بدون لایه BSF با کاهش باز ترکیبی حامل ها راندمان سلول بهبود می یابد. افزایش نقص چگالی لایه واسط به بیش از مقدار 10^{11} ابر سانتی متر مکعب در الکترون ولت به دلیل افزایش بازترکیبی حامل ها در لایه واسط سبب کاهش راندمان سلول خورشیدی می شود به همین دلیل جهت دستیابی به راندمان بهینه، میزان نقص چگالی لایه واسط را 10^{11} ابر سانتی متر مکعب در الکترون ولت در نظر می گیریم، نتایج شبیه سازی نشان می دهد با افزایش ضخامت ویفر راندمان سلول افزایش می یابد و ماکزیمم مقدار راندمان در ضخامت ۳۰۰ میکرومتر حاصل می شود.



شکل ۶. اثر BSF بر راندمان سلول خورشیدی.

جدول ۳. وابستگی پارامترهای سلول خورشیدی (با و بدون BSF) لایه میدان سطحی عقب.

n/i/p/i/p	n/i/p/i
$(mV) = V_{oc} 641/4$	$(mV) = V_{oc} 630/5$
$(mA/cm^2) = I_{sc} 53/05$	$(ma/cm^2) = I_{sc} 51/2$
$\% = FF 82/25$	$\% = FF 82/4$
$\% = \eta 27/99$	$\% = \eta 26/6$

۴-۴ اثر نقص چگالی لایه واسط بر راندمان

با افزایش نقص چگالی لایه واسط احتمال بازترکیبی حامل ها افزایش یافته، بنابراین جریان اشباع معکوس افزایش می یابد. با توجه به رابطه عکس ولتاژ مدار باز با جریان اشباع معکوس رابطه ۱-۲ ولتاژ مدار باز و عامل پرشدگی کاهش می یابد. با توجه به رابطه راندمان سلول خورشیدی (۱-۳) و ارتباط مستقیم راندمان با ولتاژ مدار باز و عامل پرشدگی، راندمان کاهش می یابد. شکل (۷) اثر چگالی نقص لایه واسط بر راندمان را نشان می دهد.

$$V_{oc} = \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{I_{sc}}{I_u} \right) \quad \text{معادله (۲)}$$

$$\eta = \frac{V_{oc} I_{sc} FF}{P_{in}} \quad \text{معادله (۳)}$$

مراجع

9. Dwivedi, N. et al., Simulation approach for optimization of device structure and thickness of HIT solar cells to achieve $\sim 27\%$ efficiency., Elsevier, *Sol Energy*, 2013, 31-41.
 10. Vishkasougheh, H.M. and Tunaboylu, B., Simulation of high efficiency silicon solar cells with a heterojunction with microcrystalline intrinsic thin layer., *Energy Conv. & Manage.*, 2013, 72, pp.141-146.
 11. Acevedo, M. et al., Modeling solar cells: a method for improving their efficiency., *Sci. Eng.*
 12. Como, N.H. and Acevedo, A.M., Simulation of heterojunction solar cells with AMPS-1D., *Sol. Energy*, 2010, 62-67.
 13. Stangle, R. et al., AFORS-HET, a numerical pc-program for simulation of heterojunction solar cell, version 1.1 (open-source on demand), to be distributed for public use, Germany.
 14. Stangl, R. et al., AFORS-HET, version 2.2, a numerical computer program for simulation of heterojunction solar cell and measurement., *Inst Berlin, Kekuléstr.5, D-12489*
 15. Iwaniczko, E. et al., Effective interfaces in silicon heterojunction solar cells., *IEEE*, 2005.
 16. Sharma, M. et al., Optimization of band gap, thickness and carrier concentrations for the development of efficient microcrystalline silicon solar cells A theoretical approach., *Sol Energy.*, 2013, 97, 176-185.
 17. Coignus, J et al., Key issues for accurate simulation of a-Si:H/c-Si heterojunction solar cells., *Silicon PV Freiburg*, 2011, 17-20, April.
۱. ف. اعتبار و ف. بهزادی، سلول‌های خورشیدی، مقدمه‌ای بر خواص اساسی نیمه رساناها، دانشگاه شیراز دانشکده علوم پایه گروه فیزیک.
 2. Tucci, M et al., Comparison of amorphous/crystalline heterojunction solar cells based on n and p-type crystalline silicon., *Thin Solid Films*, 2004, 355, pp. 451-452.
 3. Ying, Xu et al., Heterojunction solar cells with n-type nanocrystalline silicon emitters on p-type c-Si wafers., *J Non-Cryst Solids*, 2006, 352.
 4. Munoz, D et al., Bifacial heterojunction silicon solar cells by hot-wire CVD with open-circuit voltages exceeding 600 mV., *Thin Solid Films*, 2006 511-512, 415-419.
 5. Kleider, JP et al., Electronic and structural properties of the amorphous crystalline silicon interface., *Thin Solid Films*, 2009, 517, 6386-91.
 6. Zhao, L et al, *Solar Energy Materials & Solar cells*, 2008, 673-681.
 7. Lisheng, W. and Fengxiang, C., Simulation of high efficiency bifacial solar cells on n-type substrate whit AFORS-HET., *Dept.phy.sci.thec., China*, 2011.
 8. Dao, V.A. et al., Simulation and study of the influence of the buffer intrinsic layer, back surface field, densities of interface defects, resistivity of p-type silicon substrate and transparent conductive oxide on heterojunction with intrinsic thin-layer (HIT) solar cell., *sol.Eng.*, 2010, 84, 777-783.