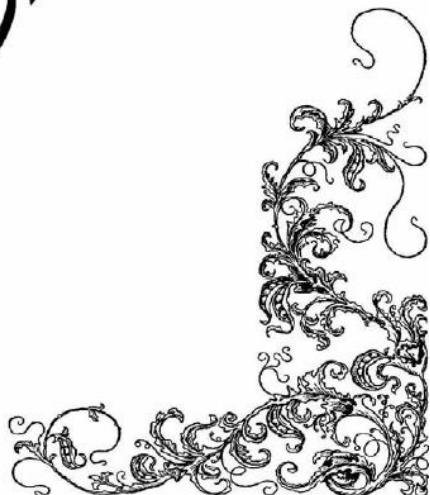
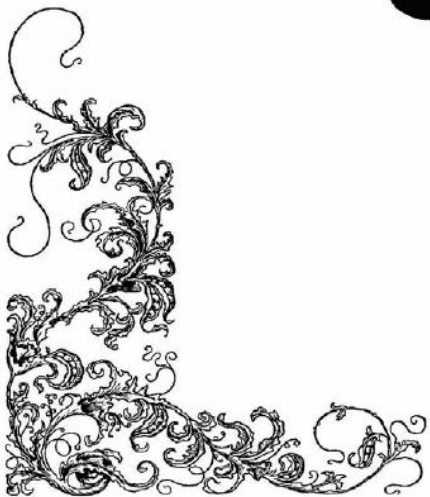


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ
الْحَمْدُ لِلَّهِ الَّذِي
خَلَقَ السَّمَوَاتِ وَالْأَرْضَ
وَالَّذِي يُرِيهِمْ آيَاتِهِ
وَالَّذِي يُخْرِجُ الْمَوْتِ
وَالَّذِي يُحْيِيهِمْ
وَالَّذِي يُمِيتُهُمْ
وَالَّذِي يُحْيِيهِمْ
وَالَّذِي يُمِيتُهُمْ





دانشگاه کاشان
دانشکده فیزیک
گروه لیزر و فوتونیک

رساله

جهت اخذ درجه دکتری
در رشته فیزیک اتمی و مولکولی

عنوان:

تحلیل و شبیه‌سازی سلول‌های خورشیدی نانوساختار چند پیوندی به همراه
طراحی و ساخت لنز شبه فرنل به منظور افزایش بازدهی

استاد راهنما

دکتر سید محمد باقر قرشی

توسط:

معراج رجائی

خرداد ۱۳۹۴

تقدیم به

پدر و مادر عزیز و بزرگوارم

به پاس حمایت‌های همه‌جانبه و دلگرمی‌هایشان که همواره مشوق من در

تحصیل علم و دانش بوده است

همسر مهربانم

که با صبوری و فداکاری همراهیم کرد

تشکر و قدردانی

سپاس می‌گویم خداوند باریتعالی که توانایی آن را بخشید تا بتوانم گامی هر چند کوچک در راستای علم و آگاهی بردارم و این پژوهش را به پایان برسانم. بر خود لازم می‌دانم که از استاد ارجمند، جناب آقای دکتر سید محمد باقر قرشی که راهنمایی این پروژه را برعهده داشتند و همواره با پیگیری‌های دلسوزانه و راهنمایی‌های مشکل‌گشایشان پشتیبان علم و عاطفی عظیمی برای من بوده است، صمیمانه تشکر و قدردانی نمایم.

همچنین مراتب تشکر و امتنان خود را از آقایان، دکتر عباس بهجت، دکتر بهرام جزی و دکتر مجید ناظری به خاطر مطالعه پایان نامه و حضور در جلسه دفاعیه ابراز می‌دارم. در پایان لازم می‌دانم از خانواده‌ام که همواره در طول زندگی از راهنمایی‌ها و حمایت‌های بی‌دریغ‌شان بهره‌مند بوده‌ام سپاس‌گزاری کنم.

چکیده

در این پژوهش با استفاده از نرم افزار شبیه ساز SILVACO تحلیل و بررسی سلول های خورشیدی چندپیوندی مبتنی بر ترکیبات متفاوت انجام شده است. مسأله لایه نشانی آنها مشروط به گاف انرژی های مناسب هر لایه با لایه های مجاور جهت افزایش بازدهی حائز اهمیت می باشد. این نرم افزار قابلیت بالایی در شبیه سازی ادوات نیم رسانا دارد و نرم افزاری است که به طراحان کمک می کند تا بتوانند رفتار قطعات نیم رسانا را به صورت موثر شبیه سازی کنند و این موضوع از آن جهت ارزشمند است که تکرار آزمایشها لایه نشانی بعضا هزینه بر بوده و نیازمند شرایط خاصی خواهد بود. نتایج حاصل از این شبیه سازی ها با تحلیل عددی و نمایش گرافیکی با مراجع مقایسه گردیده است.

در ابتدا به طراحی و شبیه سازی سلول های خورشیدی مبتنی بر گالیوم آرسناید پرداخته می شود. ضمن بررسی پارامترهای موثر در تعیین عملکرد سلول خورشیدی این نوع سلول شبیه سازی شده است بازدهی سلول خورشیدی مبتنی بر گالیوم آرسناید با توجه به تغییر ضخامت و تراکم ناخالصی لایه ها و همچنین اثرات بازتاب سطحی مورد بررسی قرار گرفته است. با بهینه سازی ضخامت لایه پنجره و تراکم ناخالصی ها، بازده بهینه حاصل می گردد. سپس ساختار بهینه شده را با تغییر مواد سازنده پیوند تونلی از قبیل GaAs/GaAs، InGaP/InGaP و AlGaAs/AlGaAs بررسی و نمودار جریان-ولتاژ آن طی مراحل شبیه سازی مورد مقایسه با نتایج عملی قرار گرفته اند. ساختار بهینه شده پیشنهادی با InGaP/ GaAs در مقایسه با ساختار بهینه شده در مراجع نتایج بازده بالاتری را نشان می دهد.

در ادامه، به بررسی عملکرد و عوامل موثر بر پارامترهای خروجی سلول خورشیدی فیلم نازک CIGS پرداخته شده است. در شبیه ساز سلول CIGS با استفاده از پارامترهای واقعی سلول های خورشیدی (مانند ضخامت لایه ها، نسبت گالیوم، سطوح ناخالصی و خواص مواد) مستند در مقالات مختلف، مدل سازی گردید. بازدهی نهایی در مقایسه با مدل اولیه سلول افزایش قابل توجهی پیدا کرده است.

در بخش نهایی، روشی ابتکاری جهت محاسبه متمرکزکننده عدسی اپتیکی شبه فرنل و ماژول ردیابی خورشیدی دومحوره اتوماتیک جهت افزایش بازدهی سلول خورشیدی و در عین حال استفاده از سلول خورشیدی با مساحت کمتر ارائه شده است. شیارهای این عدسی با محاسبات اپتیکی تعیین شده است. بنابراین نور خورشید همیشه با زاویه تعیین شده بر سطح پنل می‌تابد که موجب کاهش سطح مورد نیاز و منطقه تمرکز نور بر روی پنل و در نتیجه بهینه سازی هزینه می‌گردد. برای این کار یک دستگاه ردیاب خورشیدی مشتمل بر ترکیب دو جزء اپتیکی و الکترونیکی طراحی و ساخته شده است. در کارهای گذشته استفاده از ردیاب بدون بکارگیری از عدسی، پیشنهاد و ساخته شده است. دستگاه ردیابی خورشیدی دومحوره پیشنهادی، در واقع با ترکیب حرکات شمالی-جنوبی و شرقی-غربی، سلول خورشیدی قادر به قرارگیری با زاویه عمود بر اشعه‌های دریافتی از خورشید خواهد بود. نتایج عملی حاکی از آن است که استفاده از عدسی شبه فرنل به همراه روش ردیابی خورشیدی دومحوره، بازدهی صفحه فتوولتائیک را بطور فزاینده‌ای افزایش داده است.

کلمات کلیدی: سلول‌های چندپیوندی، گالیم آرسناید، شیشه‌ساز سیلواکو، عدسی شبه فرنل

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	• فصل یک سلول‌های خورشیدی و مشخصات آن
۲	۱- مقدمه
۴	۱-۱- تاریخچه سلول‌های خورشیدی
۶	۱-۲- پارامترهای اساسی سلول خورشیدی
۱۳	۱-۳- ساختار مداری و بازده سلول خورشیدی
۱۹	۱-۴- فناوری‌های ساخت سلول‌های خورشیدی
۲۴	۱-۵- بخش‌های اصلی سیستم‌های فتوولتائیک
۲۵	۱-۶- جمع‌بندی
۲۶	• فصل دو فیزیک سلول‌های خورشیدی
۲۷	۲- مقدمه
۲۸	۲-۱- مشخصات پایه مواد نیم‌رسانا
۳۳	۲-۱-۱- گاف نواری مستقیم و غیرمستقیم در نیم‌رسانا
۳۸	۲-۲- رفتار پیوند p-n در سلول‌های خورشیدی
۴۰	۲-۳- پیوند تونلی
۴۲	۲-۳-۱- تونل زنی مستقیم و غیرمستقیم
۴۳	۲-۴- جمع‌بندی

۴۴	• فصل سه سلول‌های خورشیدی چندپیوندی
۴۵	۳- مقدمه
۴۵	۳-۱- روابط حاکم بر بازده سلول‌های خورشیدی تک پیوندی
۵۰	۳-۲- روابط حاکم بر بازده سلول‌های خورشیدی چند پیوندی
۵۲	۳-۳- ساختار و کاربرد سلول‌های خورشیدی چند پیوندی
۵۴	۳-۴- روش‌های بهبود کارایی سلول‌های خورشیدی چند پیوندی
۵۴	۳-۴-۱- ایجاد ناهمواری در سطح سلول خورشیدی
۵۵	۳-۴-۲- اتصالات میدان سطح پشتی
۵۵	۳-۴-۳- سطح امیتر اثر ناپذیر شده
۵۶	۳-۴-۴- به‌دام اندازی نور
۵۶	۳-۴-۵- متمرکز کننده
۵۸	۳-۴-۶- به کارگیری دیودهای بای‌پس به منظور رفع مشکل نقطه داغ
۵۹	۳-۵- پیوند تونلی در سلول‌های خورشیدی چند پیوندی
۶۰	۳-۶- جمع‌بندی

۶۱	• فصل چهار بهینه‌سازی و شبیه‌سازی سلول‌های گالیوم آرسناید
۶۲	۴- مقدمه
۶۵	۴-۱- ارزش و اهمیت شبیه‌سازی فیزیکی
۶۷	۴-۱-۱- معرفی شبیه‌سازهای موجود در SILVACO TCAD
۷۰	۴-۲- شبیه‌سازی سلول خورشیدی گالیوم آرسناید با یک اتصال p-n
۷۳	۴-۲-۱- بررسی سلول خورشیدی تک پیوندی مبتنی بر گالیوم آرسناید با لایه پنجره
۷۵	۴-۳- سلول گالیوم آرسناید با لایه پنجره AlGaAs
۷۶	۴-۳-۱- اضافه نمودن میدان سطح پشتی و لایه پنجره AlGaAs بر روی سلول گالیوم آرسناید
۷۸	۴-۴- بررسی اثر بازتاب سطحی
۸۱	۴-۴-۱- شبیه‌سازی اثر بازتاب سطحی بر سلول گالیوم آرسناید
۸۲	۴-۵- اضافه نمودن میدان سطح پشتی و لایه پنجره InGaP بر روی سلول گالیوم آرسناید
۸۵	۴-۶- بررسی تغییر ضخامت لایه‌های
۸۵	۴-۶-۱- بررسی تغییر ضخامت لایه بیس با وجود لایه پنجره AlGaAs
۸۶	۴-۶-۲- بررسی تغییر ضخامت لایه بیس با وجود لایه پنجره InGaP
۸۶	۴-۶-۳- تغییر ضخامت لایه امیتر با وجود لایه پنجره AlGaAs
۸۷	۴-۶-۴- تغییر ضخامت لایه امیتر با وجود لایه پنجره InGaP
۸۹	۴-۶-۵- تغییر ضخامت لایه پنجره AlGaAs
۹۰	۴-۶-۶- تغییر ضخامت لایه پنجره InGaP

- ۹۱-۷-۴ بررسی تغییر تراکم ناخالصی
- ۹۱-۷-۴-۱ بررسی تغییر تراکم ناخالصی با وجود لایه پنجره AlGaAs
- ۹۳-۷-۴-۲ بررسی تغییر تراکم ناخالصی با وجود لایه پنجره InGaP
- ۹۴-۷-۴-۳ تغییر تراکم ناخالصی لایه امیتر با وجود لایه پنجره AlGaAs
- ۹۵-۷-۴-۴ تغییر تراکم ناخالصی لایه امیتر با وجود لایه پنجره InGaP
- ۹۶-۷-۴-۵ تغییر تراکم ناخالصی لایه پنجره AlGaAs
- ۹۷-۷-۴-۶ تغییر تراکم ناخالصی لایه پنجره InGaP
- ۹۸-۸-۴ بهینه‌سازی سلول با لایه پنجره
- ۱۰۰-۹-۴ بهینه‌سازی سلول‌های خورشیدی اتصال دوگانه InGaP/GaAs
- ۱۰۳-۱۰-۴ بررسی تغییرات پارامترهای خروجی با تغییر جنس ناحیه پیوند تونلی
- ۱۰۸ • فصل پنجم شبیه‌سازی سلول خورشیدی لایه نازک CIGS
- ۱۰۹-۵ مقدمه
- ۱۱۴-۱-۵ شبیه‌سازی یک نمونه سلول خورشیدی CIGS
- ۱۱۶-۲-۵ تغییر ضخامت لایه جاذب CIGS
- ۱۱۸-۳-۵ تغییر نسبت مولی گالیم لایه جاذب CIGS
- ۱۲۰-۴-۵ تغییر ضخامت لایه ZnO
- ۱۲۱-۵-۵ تغییر ضخامت لایه CdS
- ۱۲۲-۶-۵ بهینه‌سازی سلول‌های خورشیدی CIGS

۱۲۴	• فصل ششم بهبود عملکرد سلولهای فتوولتائیک با عدسی فرنل و دستگاه ردیابی خورشید
۱۲۵	۶- مقدمه
۱۲۷	۶-۱- تغییرات پارامترهای سلول برحسب تغییر دما در عدسی مستطیلی
۱۳۱	۶-۲- اثر عدسی فرنل در افزایش بازدهی
۱۳۴	۶-۳- ساختار متمرکز کننده‌های فتوولتائیک
۱۳۵	۶-۴- محاسبه زوایای شیارها
۱۳۸	۶-۵- مراحل ساخت عدسی شبه فرنل
۱۳۹	۶-۶- ساختار پنل پیشنهادی
۱۴۵	۶-۷- دستگاه ردیاب خورشیدی دو محوره پیشنهادی
۱۵۰	۶-۸- جمع‌بندی
۱۵۱	• فصل هفتم نتایج و پیشنهادات
۱۵۲	۷-۱- نتیجه‌گیری
۱۵۴	۷-۲- پیشنهاداتی برای ادامه کار
۱۵۶	مراجع

فهرست جدول‌ها

صفحه	عنوان
۷۱	جدول ۱-۴ پارامترهای مهم مورد استفاده در شبیه‌سازی‌ها برای گالیم آرسناید
۷۲	جدول ۲-۴ تغییرات بازدهی تبدیل با تغییر ضخامت لایه امیتر
۷۳	جدول ۳-۴ تغییرات بازدهی تبدیل با تغییر ضخامت لایه بیس
۷۸	جدول ۴-۴ مقایسه نتایج خروجی سلول بهینه‌شده گالیم آرسناید با لایه پنجره AlGaAs با حالت اولیه
۸۲	جدول ۵-۴ مقایسه نتایج خروجی سلول، AlGaAs با در نظر گرفتن اثر بازتاب سطحی
۸۴	جدول ۶-۴ مقایسه نتایج خروجی سلول InGaP با لایه‌های پنجره، میدان سطح پشتی و بافر
۸۵	جدول ۷-۴ مشخصات خروجی سلول AlGaAs بر حسب تغییرات ضخامت لایه بیس
۸۶	جدول ۸-۴ مشخصات خروجی سلول InGaP بر حسب تغییرات ضخامت لایه بیس
۸۷	جدول ۹-۴ مشخصات خروجی سلول AlGaAs بر حسب تغییرات ضخامت لایه امیتر
۸۷	جدول ۱۰-۴ مشخصات خروجی سلول InGaP بر حسب تغییرات ضخامت لایه امیتر
۸۹	جدول ۱۱-۴ مشخصات خروجی سلول AlGaAs بر حسب تغییرات ضخامت لایه پنجره
۹۰	جدول ۱۲-۴ مشخصات خروجی سلول InGaP بر حسب تغییرات ضخامت لایه پنجره
۹۲	جدول ۱۳-۴ مشخصات خروجی سلول AlGaAs بر حسب تغییرات تراکم ناخالصی لایه بیس
۹۳	جدول ۱۴-۴ مشخصات خروجی سلول InGaP بر حسب تغییرات تراکم ناخالصی لایه بیس
۹۴	جدول ۱۵-۴ مشخصات خروجی سلول AlGaAs بر حسب تغییرات تراکم ناخالصی لایه امیتر
۹۵	جدول ۱۶-۴ مشخصات خروجی سلول InGaP بر حسب تغییرات تراکم ناخالصی لایه امیتر
۹۶	جدول ۱۷-۴ مشخصات خروجی سلول AlGaAs بر حسب تغییرات تراکم ناخالصی لایه پنجره
۹۷	جدول ۱۸-۴ مشخصات خروجی سلول InGaP بر حسب تغییرات تراکم ناخالصی لایه پنجره

- ۹۹ جدول ۴-۱۹ مقایسه مشخصات خروجی سلول AlGaAs با اعمال سه مرحله شبیه‌سازی
- ۹۹ جدول ۴-۲۰ مقایسه مشخصات خروجی سلول InGaP با اعمال سه مرحله شبیه‌سازی
- ۱۰۲ جدول ۴-۲۱ نتایج تغییرات ضخامت لایه بیس برای سلول بالایی با اتصال دوگانه
- ۱۰۲ جدول ۴-۲۲ نتایج تغییرات ضخامت لایه بیس برای سلول پایینی با اتصال دوگانه
- ۱۰۵ جدول ۴-۲۳ مقایسه‌ی تغییرات جنس ناحیه ی تونلی
- ۱۰۷ جدول ۴-۲۴ نتایج نهایی حاصل از سلول خورشیدی اتصال دوگانه در شرایط بررسی شده
- ۱۱۵ جدول ۵-۱ پارامترهای مهم شبیه‌سازی سلول CIGS
- ۱۱۷ جدول ۵-۲ مشخصات و پارامترهای سلول CIGS
- ۱۱۹ جدول ۵-۳ مشخصات و پارامترهای سلول CIGS با لایه جذب کننده ۲ میکرومتر با مقادیر مختلف نسبت مولی گالیم
- ۱۲۳ جدول ۵-۴ مقایسه پارامترهای اولیه و بهبود یافته
- ۱۲۹ جدول ۶-۱ تغییرات پارامترهای سلول برحسب تغییر دما
- ۱۳۷ جدول ۶-۲ مقادیر زوایای شکست، همگرایی و شیار از سمت راست
- ۱۴۲ جدول ۶-۳ مقایسه سلول با استفاده از عدسی فرنل و بدون استفاده از عدسی فرنل با شدت تابش ۱۰۰۰ وات بر متر مربع
- ۱۴۹ جدول ۶-۴ مقایسه خروجی سلول، با استفاده و بدون استفاده از عدسی شبه فرنل به همراه ردیاب خورشیدی دومحوره

فهرست شکل‌ها

صفحه		عنوان
		فصل اول
۶	ضریب پرتشعاعی در یک سلول خورشیدی	شکل ۱-۱
۱۲	تأثیر مقاومت سری و موازی بر منحنی مشخصه سلول با مقادیر مختلف مقاومت	شکل ۲-۱
۱۳	مدار معادل یک سلول خورشیدی	شکل ۳-۱
		فصل دوم
۳۳	دیگرام باند انرژی مواد نیم‌رسانا غیر ذاتی: الف) نوع n؛ و ب) نوع p	شکل ۱-۲
۳۴	تأثیر انرژی فوتون‌ها بر نفوذ و تولید زوج الکترون-حفره	شکل ۲-۲
۳۵	الف) جذب نور در نیم‌رسانا با گاف انرژی مستقیم ب) جذب فوتون در نیم‌رسانا با گاف انرژی غیرمستقیم	شکل ۳-۲
۳۹	سلول خورشیدی تک پیوندی p-n	شکل ۴-۲
۴۰	جذب فوتون‌ها در یک سلول فتوولتاییک تحت شرایط وجود نور	شکل ۵-۲
۴۲	منحنی مشخصه جریان-ولتاژ پیوند تونلی	شکل ۶-۲
		فصل سوم
۵۲	سلول‌های خورشیدی چند پیوندی؛ الف) سلول (LMJ)، ب) سلول (VMJ)	شکل ۱-۳
۵۳	ساختار سلول‌های چند پیوندی VMJ: الف) مکانیکی، ب) یک پارچه	شکل ۲-۳
۵۶	ایجاد تغییرات در سلول خورشیدی جهت بهبود کارایی	شکل ۳-۳
۵۹	نقطه داغ شدن سطح سلول	شکل ۴-۳
۵۹	استفاده از دیود بای‌پس	شکل ۵-۳
		فصل چهارم
۶۴	منحنی گاف انرژی متفاوت بر حسب بازده در ساختارهای متفاوت	شکل ۱-۴
۶۸	ورودی و خروجی‌های Atlas	شکل ۲-۴
۶۹	نمونه ای از مش بندی در محیط Atlas	شکل ۳-۴
۷۷	ساختار سلول خورشیدی بهینه‌شده گالیم آرسناید با لایه پنجره AlGaAs	شکل ۴-۴
۷۷	الف) ساختار گرافیکی سلول بهینه‌شده گالیم آرسناید با لایه پنجره AlGaAs ب) میدان الکتریکی سلول بهینه‌شده گالیم آرسناید با لایه پنجره AlGaAs	شکل ۵-۴

۷۹	بازتاب نور از سطح مقطع لایه میانی و زیر لایه	شکل ۴-۶
۸۱	ساختار سلول خورشیدی گالیم آرسناید با در نظر گرفتن اثر بازتاب سطحی	شکل ۴-۷
۸۲	نمودار جریان-ولتاژ سلول AlGaAs با در نظر گرفتن اثر بازتاب سطحی	شکل ۴-۸
۸۳	ساختار سلول خورشیدی گالیم آرسناید با لایه پنجره InGaP	شکل ۴-۹
۸۴	نمودار جریان-ولتاژ سلول InGaP با لایه‌های پنجره، میدان سطح پشتی و بافر	شکل ۴-۱۰
۸۸	نمودارهای تغییرات بازده با تغییر ضخامت هر لایه را با وجود لایه‌های پنجره AlGaAs و InGaP	شکل ۴-۱۱
۹۰	نمودارهای تغییرات بازده سلول برحسب تغییرات ضخامت لایه‌های پنجره AlGaAs و InGaP	شکل ۴-۱۲
۹۲	نمودارهای جریان اتصال کوتاه، ولتاژ مدار باز و بازده AlGaAs با تغییرات تراکم لایه بیس	شکل ۴-۱۳
۹۳	نمودار تغییرات ولتاژ مدار باز سلول InGaP به ازای تغییرات تراکم ناخالصی لایه بیس	شکل ۴-۱۴
۹۴	نمودارهای جریان اتصال کوتاه، ولتاژ مدار باز و بازده AlGaAs بر حسب تغییرات تراکم ناخالصی لایه امیتر	شکل ۴-۱۵
۹۵	نمودار تغییرات ولتاژ مدار باز سلول InGaP به ازای تغییرات تراکم ناخالصی لایه بیس	شکل ۴-۱۶
۹۷	نمودار تغییرات بازده سلول‌های AlGaAs و InGaP بر حسب تغییرات تراکم ناخالصی لایه پنجره	شکل ۴-۱۷
۱۰۱	ساختار قطعه چند پیوندی	شکل ۴-۱۸
۱۰۱	ساختار گرافیکی و میدان الکتریکی	شکل ۴-۱۹
۱۰۴	منحنی مشخصه پیوند تونلی و پیوند معمولی	شکل ۴-۲۰
۱۰۶	نمودار چگالی جریان اتصال کوتاه سلول InGaP/ GaAs با پیوند تونلی GaAs/GaAs	شکل ۴-۲۱
۱۰۶	نمودار چگالی جریان اتصال کوتاه سلول InGaP/ GaAs با پیوند تونلی InGaP/InGaP	شکل ۴-۲۲
فصل پنجم		
۱۱۰	دیگرام فاز سه تایی سیستم CIS	شکل ۵-۱
۱۱۱	طرح نمونه از یک سلول فوتوولتائیک بر اساس CIGS	شکل ۵-۲
۱۱۳	ساختار گرافیکی CIGS	شکل ۵-۳
۱۱۵	ساختار گرافیکی سلول خورشیدی CIGS	شکل ۵-۴
۱۱۶	نمودار تغییرات ولتاژ مدار باز سلول به ازای تغییرات ضخامت لایه جاذب CIGS	شکل ۵-۵
۱۱۷	منحنی مشخصه‌های ولتاژ-جریان سلول CIGS با لایه جذب کننده $2 \mu\text{m}$ به ازای مقادیر مختلف نسبت مولی گالیم	شکل ۵-۶
۱۲۰	نمودار تغییرات بازده با تغییر ضخامت لایه شفاف ZnO	شکل ۵-۷
۱۲۲	نمودار تغییرات بازده با تغییر ضخامت لایه شفاف CdS	شکل ۵-۸
۱۲۳	نمودار جریان-ولتاژ سلول CIGS اولیه و بهبود یافته	شکل ۵-۹

فصل ششم

۱۲۸	ساختار استفاده شده به منظور تست تأثیر عدسی‌های مستطیلی (استوانه‌ای)	شکل ۶-۱
۱۲۹	ساختار مورد استفاده به منظور اندازه‌گیری دمای پنل‌ها در زمان‌های مختلف	شکل ۶-۲
۱۳۰	الف) منحنی تغییرات ولتاژ مدار باز برحسب دما ب) منحنی تغییرات جریان اتصال کوتاه بر حسب دما	شکل ۶-۳
۱۳۰	منحنی تغییرات بازده پنل‌ها بر حسب دما	شکل ۶-۴
۱۳۱	عدسی‌های فرنل معادل عدسی‌های استاندارد	شکل ۶-۵
۱۳۲	نمایی از عدسی‌های فرنل با شیارهای به سمت داخل	شکل ۶-۶
۱۳۶	عدسی شبه فرنل پیشنهادی	شکل ۶-۷
۱۳۸	عدسی شیشه‌ای	شکل ۶-۸
۱۳۹	عدسی پلکسی	شکل ۶-۹
۱۳۹	پنل خورشیدی عدسی شبه فرنل	شکل ۶-۱۰
۱۴۰	آرایه عدسی شبه فرنل	شکل ۶-۱۱
۱۴۰	نحوه قرار گرفتن عدسی در حال متمرکز کردن پرتوی تابشی بر سطح پنل	شکل ۶-۱۲
۱۴۱	ساختار کلی عدسی شبه فرنل پیشنهادی بر روی پنل خورشیدی	شکل ۶-۱۳
۱۴۲	الف) نمودار جریان - ولتاژ برحسب شدت تابش بدون استفاده از عدسی فرنل ب) نمودار جریان - ولتاژ برحسب شدت تابش با استفاده از عدسی فرنل	شکل ۶-۱۴
۱۴۳	شارژ باتری و تامین انرژی لامپ	شکل ۶-۱۵
۱۴۴	شارژ باتری با استفاده از مبدل بوست	شکل ۶-۱۶
۱۴۴	نمودار توان خروجی برای پنل با عدسی فرنل و عدسی شبه فرنل	شکل ۶-۱۷
۱۴۷	دستگاه ردیاب خورشیدی دو محوره پیشنهادی	شکل ۶-۱۸
۱۴۸	نحوه چرخش ردیاب دو محوره از طلوع تا غروب	شکل ۶-۱۹
۱۴۹	نمودار جریان - ولتاژ با استفاده و بدون استفاده از ردیاب خورشیدی و عدسی	شکل ۶-۲۰
۱۵۰	توان خروجی سیستم فتوولتائیک با ردیابی و بدون ردیابی خورشید	شکل ۶-۲۱

فصل اول

سلول‌های خورشیدی

و

مشخصات آن

مقدمه

نیاز روز افزون بشر به انرژی و محدود بودن منابع آن همواره او را به تلاش برای دستیابی به روش‌های گوناگون جهت استفاده از منابع انرژی جدید سوق می‌دهد. منابعی مانند نفت، گاز، زغال سنگ، انرژی اتمی و گرمایی زمین جزء منابع محدود به حساب می‌آیند. بنابراین در این میان انرژی خورشیدی، یک منبع انرژی نامحدود و عاری از هرگونه آلودگی و مشکلات زیست محیطی می‌باشد که از چند دهه گذشته مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است.

خورشید در هر ثانیه حدود ۱۰۰۰ ژول انرژی به هر مترمربع از سطح زمین منتقل می‌کند که با جمع‌آوری کردن آن می‌توان انرژی مورد نیاز برای کارهای مختلفی را تأمین کرد. کل منبع انرژی خورشیدی چند هزار برابر مصرف انرژی کنونی بشر است. انرژی خورشیدی این امکان بالقوه را دارد که سهم عمده‌ای در تأمین انرژی جهانی در آینده را داشته باشد. البته در این میان می‌بایست تغییرات فصلی و روزانه را نیز در نظر داشت، که این خود باعث ایجاد محدودیت می‌شود. یکی از راه‌های تبدیل انرژی خورشیدی به انرژی الکتریکی و استفاده از آن، استفاده از سلول‌های خورشیدی است. انرژی خورشیدی ساطع شده از خورشید در هر ثانیه در صورتی که قابل ذخیره‌شدن باشد قادر خواهد بود انرژی مورد نیاز کره زمین را برای مدت خیلی زیادی تأمین نماید. سلول‌های خورشیدی قادرند از این منبع عظیم انرژی استفاده نمایند و یک منبع انرژی رایگان و پاک در اختیار ما قرار دهند. انرژی که از طریق خورشید به زمین می‌رسد چندین هزار بار بیشتر از انرژی مورد نیاز انسان است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که مصرف انرژی در سال ۲۰۵۰، ۳۰ تا ۵۰ درصد بیشتر از مصرف امروزی آن خواهد بود [۱].

یکی از مهمترین ویژگی‌های انرژی خورشیدی حضور تابش خورشید به طور تقریبی در اکثر نقاط روی زمین است. از این رو بحث انتقال نیرو را می‌توان بسیار محدود نمود. در واقع دامنه وسعت حضور تابش خورشید و تکنولوژی‌های به‌کارگیری این تابش می‌تواند به صورت نیروگاهی یا غیرنیروگاهی وجود داشته باشد. متأسفانه ارزانی سوخت‌های فسیلی امکان توسعه چشمگیر سیستم‌های خورشیدی را تاکنون فراهم نیاورده است از جمله کاربردهای مصارف این انرژی، سیستم‌های فتوولتائیک می‌باشد. پایه و زیربنای این سیستم‌ها پنل‌های فتوولتائیک بوده و در حال حاضر مبحث بازدهی این پنل‌ها مسئله‌ای حائز اهمیت به شمار می‌رود. بر این مبنا این موضوع طراحان را به سمت آزمایش پارامترهای گوناگون برای دستیابی به بازدهی بیشتر سوق می‌دهد. اهمیت مدل‌سازی و شبیه‌سازی سلول‌های خورشیدی بر کسی پوشیده نیست. چرا که نتایج شبیه‌سازی مشخص می‌کند آیا تغییرات احتمالی حاصل در ساختار یا فاکتوری خاص ما را به عملکرد مطلوب نزدیک‌تر کرده است یا نه. نور خورشید شامل طول‌موج‌های زیر است: ۴۷ درصد مادون قرمز، ۴۶ درصد نور مرئی، ۷ درصد فرابنفش. از این رو سلول‌های خورشیدی باید در ناحیه مادون قرمز و نور مرئی جذب بالایی داشته باشند. انرژی خورشیدی به دو صورت قابل استفاده می‌باشد؛ انرژی حرارتی خورشیدی، انرژی الکتریکی خورشیدی. در انرژی حرارتی، حرارت جذب شده از خورشید مورد استفاده قرار می‌گیرد و برای گرم کردن آب و یا بخار نمودن آب برای به حرکت درآوردن توربین بخار به کار گرفته می‌شود [۲]. در انرژی الکتریکی، انرژی خورشید به صورت مستقیم توسط سلول خورشیدی به الکتریسیته تبدیل می‌شود. این تبدیل شدن در سلول‌های نسل اول با استفاده از دو لایه سیلیکون انجام می‌پذیرد. سیلیکون یک ماده شیمیایی می‌باشد که از ماسه به دست می‌آید که عمومی‌ترین انتخاب برای سلول‌های خورشیدی با گاف انرژی 1.1 eV و بازده در حدود ۱۵ درصد می‌باشد، پس از آن نیز گالیم آرسناید، با گاف نواری 1.42 eV و بازده در حدود ۲۲ درصد قرار دارد. به دلیل پیچیدگی در فرآیند ساخت، هزینه‌ی بالا و زمان‌بر بودن، بهینه‌سازی عملی سلول‌های خورشیدی بسیار سخت است. شبیه‌سازی و مدل‌سازی عددی به بهینه‌سازی ساختار سلول خورشیدی کمک نموده و در نتیجه باعث کاهش زمان و هزینه‌های مربوط به توسعه‌ی این سلول‌ها می‌گردند. ابزارهای مدل‌سازی بصورت، نرم‌افزار شبیه‌ساز توانسته صحت نتایج و داده‌های آزمایشگاهی را به اثبات برساند در این مدل‌سازی داده‌های استخراج شده از نرم‌افزار و کار آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار می‌گیرند [۳].

۱-۱- تاریخچه سلول‌های خورشیدی

نیاز انسان به انرژی خورشیدی غیر قابل انکار است. نور خورشید به عنوان منبع گرمازا در زندگی مردم هزاره‌ی اول بوده و آزمایشات جدی برای استفاده از آن برای تولید انرژی بطور ویژه در قرن هیجدهم آغاز شد. در مرکز خورشید هر ثانیه ۷۰۰ تن هیدروژن به انرژی تبدیل می‌شود (به صورت فوتون یا نوترینو). دمای خورشید در مرکز آن ۱۵ میلیون و در سطح آن ۵۷۶۲ درجه سانتیگراد است و طیف تشعشی آن می‌تواند با تابش جسم سیاه در همان دما تقریب زده شود. عبارت فوتولتائیک، کلمه‌یونانی است، که ترکیبی از فوتو به معنی نور و ولتائیک به معنای الکتریسیته می‌باشد. ولتائیک از نام فیزیکدان ایتالیایی به نام ولتا گرفته شده است. به پدیده‌ای که در اثر تابش نور و بدون استفاده از ساز و کارهای محرک، الکتریسیته تولید می‌کند. پدیده فوتولتائیک و به هر سیستمی که از این پدیده استفاده نماید سیستم فوتولتائیک می‌گویند [۴-۶].

در سال ۱۸۳۹، ادموند بکرل متوجه شد زمانی که دو ورق برنجی مختلف در یک مایع غوطه ور شوند در صورتی که نور خورشید بر آنها تابیده شود یک جریان مداوم تولید می‌کنند. بعدها در سال ۱۸۷۰، ویلوی اسمیت، دبلیو جی آدامز، و آرای دی اثر فوتولتائیک را در سلنیوم کشف کردند. چند سال بعد، یک آمریکایی به نام فریتز تکه ای ورق سلنیوم غیر شفاف را روی قاب فلزی قرار داد و سلنیوم را با یک برگ فیلم طلای شفاف پوشاند. او ادعا کرد این آرایش از سلنیوم با قرار گرفتن در معرض نور آفتاب جریانی مداوم و ثابت و نیرویی قابل توجه تولید می‌کند. در آن زمان، هیچ نظریه کوانتومی وجود نداشت و شک و تردید زیادی در مورد ادعای او وجود داشت و کسی باور نمی‌کرد نور خورشید تبدیل به الکتریسیته شود. این سلول خورشیدی سلنیومی از برخی جهات شبیه به سلول خورشیدی سیلیکونی امروزی بود. بنابراین او یک نمونه از کار خود را برای ورنر زیمنس فرستاد. او در آلمان زندگی می‌کرد و یکی از معروف ترین کارشناسان برق در آن زمان بود. مشاهدات زیمنس ادعاهای فریتز را تایید می‌کرد. با این حال، بازدهی تبدیل اکسید فیلم مسی نازک و سلول‌های خورشیدی سلنیوم کمتر از ۱٪ بود. حدود ۷۵ سال گذشت تا این که مکانیک کوانتومی کشف گردید. اهمیت تک- نیمه‌هادی‌های بلوری درک شد و رفتار اتصال P-N توضیح داده شد. در سال ۱۹۵۴، چاپین و همکاران او در آزمایشگاه‌های بل، سیلیکون تک بلور سلول‌های خورشیدی را کشف و اختراع کردند، سپس متوجه بازده ۶ درصدی آن شدند. در طول چند سال، محققان بازده سلول‌های خورشیدی سیلیکونی را تا ۱۵٪ افزایش دادند.