

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه کاشان

پژوهشکده علوم و فناوری نانو

پایان نامه

جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

در رشته نانوفیزیک

عنوان:

بررسی ساختاری لایه نازک CIS تهیه شده
به روش الکتروشیمیایی جهت استفاده در سلول
خورشیدی نانوساختار

استاد راهنما:

دکتر سید محمد باقر قرشی

استاد مشاور:

دکتر محسن بهپور

توسط:

مولود موحدی فرد

شهریور ۱۳۹۳

به نشانه سپاس ژرف و خالصانه، تقدیم به

پدر بزرگواریم

به پاس حمایت‌ها و دلگرمی‌هایشان که همواره مشوق من در زمینه تحصیل علم بوده‌اند.

مادر عزیزم

به پاس محبت‌هایشان که همواره مدیون زحمات و لطف بی‌دریغش هستیم.

سپاس

اکنون که به یاری لطف ایزد منان، گامی ناچیز در راه کسب علم و آگاهی برداشته شد و این پژوهش به اتمام رسید، در آغاز سپاس می‌گویم پروردگار متعال را که توفیق گام نهادن در مسیر علم و آگاهی را به من ارزانی فرمود. پس از آن بر خود لازم و بایسته می‌دانم از استاد فرزانه جناب آقای دکتر سید محمد باقر قرشی که با راهنمایی‌های سودمندشان گنجینه دانش خود را بر روی من گشودند صمیمانه تشکر و قدردانی کنم. همچنین از آقای دکتر محسن بهپور که با وجود مشغله کاری مشاوره این پایان‌نامه را برعهده گرفتند و به‌صورت حضوری و غیرحضوری از محضرشان استفاده نمودم و با نظرات مفیدشان بنده را یاری نمودند و از آقای شهریار سعیدیان به‌خاطر کمک‌های بی‌دریغشان در کارهای آزمایشگاهی صمیمانه تشکر و قدردانی می‌کنم. مراتب قدردانی خود را از آقایان دکتر مصطفی زاهدی فر و دکتر مهرداد مرادی که داوری رساله را قبول نمودند و با دقت نظر و نکته‌سنجی‌های به‌جا این رساله را غنی ساختند سپاسگذاری می‌کنم. تشکر ویژه از پدر و مادر عزیزم که مشوقم بودند و موجب قوت قلب و تسهیل شدن راهم گشتند دارم. همچنین از اساتید بزرگواری که افتخار شاگردی آنها را داشته‌ام، دانشجویانی که در آزمایشگاه سلول‌های خورشیدی نانوساختار و آزمایشگاه شیمی تجزیه دانشکده فیزیک و شیمی در خدمتشان بودم تقدیر و تشکر می‌نمایم.

مولود موحدی فرد

چکیده

ساختار مس‌گونه CIS به‌عنوان ماده جاذب برای سلول‌های خورشیدی لایه نازک کاربرد تجاری گسترده‌ای دارد. در این تحقیق روش ساخت لایه نازک CIS و CIGS به روش الکتروشیمیایی توضیح داده شده است. ابتدا لایه‌های CI و CIG با استفاده از روش آبرکاری الکتریکی لایه‌نشانی شده‌اند سپس نمونه‌ها در کوره تحت دمای 470°C سلنیوم دار شده‌اند. این فرایند بر روی بستری از شیشه‌های Soda – lime که مولیبدن بر روی آن‌ها به روش کندوپاش لایه‌نشانی شده است، انجام شد. پس از ساخت این لایه‌ها، یک لایه به‌ضخامت 180nm فلز آلومینیم به‌عنوان کاتد بر روی آن‌ها به روش تبخیر حرارتی لایه‌نشانی و مشخصه جریان-ولتاژ آن‌ها اندازه‌گیری شد. سپس رفتار دیودی آن‌ها توسط معادلات شاتکی بررسی شد و چهار پارامتر عامل ایده‌آل، ارتفاع سد پتانسیل، چگالی جریان اشباع معکوس و نسبت یکسوسازی برای هرکدام از آن‌ها محاسبه شد. با مقایسه این پارامترها برای سه نمونه CIS با غلظت‌های مختلف ایندیم مشخص شد که سه پارامتر عامل ایده‌آل، ارتفاع سد پتانسیل و نسبت یکسوسازی با افزایش مقدار ایندیم افزایش یافته است و مقدار ارتفاع سد پتانسیل برای همه نمونه‌ها و نمونه CIGS مقدار 0.1 eV به‌دست آمد.

کلمات کلیدی: لایه نازک، الکتروشیمیایی، سلول خورشیدی نانوساختار، CIS، روش ولتامتری

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
و	فهرست شکل‌ها
۱	فصل ۱ سلول‌های خورشیدی
۱	۱.۱ مقدمه
۳	۲.۱ انرژی نوار و انرژی گاف
۷	۳.۱ سلول‌های خورشیدی با پیوند $P - N$
۱۰	۴.۱ نحوه‌ی کارکردن سلول خورشیدی
۱۲	۵.۱ مشخصه‌ی $I - V$ سلول خورشیدی
۱۴	۶.۱ سلول‌های خورشیدی چند پیوندی
۱۸	۷.۱ سلول‌های خورشیدی لایه نازک
۲۴	۸.۱ سلول‌های خورشیدی لایه نازک بر پایه مس
۲۶	۱.۸.۱ بستر
۲۶	۲.۸.۱ اتصال پشتی
۲۷	۳.۸.۱ لایه‌ی جاذب CIS/CGS/CIGS
۲۸	۴.۸.۱ لایه‌ی بافر
۲۸	۵.۸.۱ لایه‌ی پنجره

۲۹	..... جمع کننده	۶.۸.۱
۲۹	..... تشکیل CIGS	۹.۱
۳۴	..... مقدار گالیم	۱.۹.۱
۳۵	..... ضخامت لایه‌ی CIGS	۲.۹.۱
۳۸	..... دستگاه‌های مورد استفاده در ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی، مواد و روش‌ها	فصل ۲
۳۸	..... مقدمه	۱.۲
۳۸	..... وسایل آزمایشگاهی	۲.۲
۳۹	..... دستگاه‌های مورد استفاده	۳.۲
۳۹	..... دستگاه لایه‌نشانی به‌روش کندوپاش	۱.۳.۲
۴۰	..... دستگاه پتانسیواستات	۲.۳.۲
۴۰	..... دستگاه لایه‌نشانی تبخیر حرارتی تحت خلا	۳.۳.۲
۴۲	..... کوره	۴.۳.۲
۴۳	..... همزن مغناطیسی	۵.۳.۲
۴۳	..... دستگاه لرزش فراصوتی	۶.۳.۲
۴۴	..... pH متر	۷.۳.۲
۴۵	..... دستگاه آون	۸.۳.۲
۴۶	..... دستگاه اندازه‌گیری جریان - ولتاژ	۹.۳.۲
۴۶	..... دستگاه XRD	۱۰.۳.۲
۴۶	..... دستگاه EDS	۱۱.۳.۲
۴۸	..... مواد مورد استفاده	۴.۲
۴۹	..... روش انجام آزمایش	۵.۲
۴۹	..... آبرکاری الکتریکی	۱.۵.۲

۵۰	روش کروئوپتانسیومتری (CHP)	۲۰۵.۲
۵۰	روش کروئوآپرومتری (CHA)	۳۰۵.۲
۵۱	فصل ۳ ساخت و بررسی نتایج	
۵۱	آماده‌سازی نمونه	۱.۳
۵۱	برش و شستشو	۱.۱.۳
۵۱	لایه‌نشانی مولیبدن	۲.۱.۳
۵۲	لایه‌نشانی مس	۳.۱.۳
۵۳	لایه‌نشانی مس و ایندیم	۴.۱.۳
۵۴	لایه‌نشانی مس، ایندیم و گالیم	۵.۱.۳
۵۴	سلنیوم‌دار کردن نمونه‌ها	۶.۱.۳
۵۵	آنالیز XRD و EDS	۲.۳
۵۷	روش ویلیامسون-هال	۱.۲.۳
۶۹	لایه‌نشانی کاتد	۳.۳
۷۱	منحنی $J - V$	۴.۳
۷۹	نتیجه‌گیری	۵.۳
۸۰	فهرست مراجع	

فهرست شکل‌ها

صفحه	عنوان
۴	۱.۱ نمایش ساده‌ای از سطوح انرژی نیمه‌هادی
۷	۲.۱ نمایش انرژی نواری و انرژی گاف مواد [۱۰]
۸	۳.۱ گاف نواری و ثوابت شبکه برای چند ترکیب نیمه‌هادی [۱۲]
۹	۴.۱ جذب فوتون‌ها در سلول PV تحت تابش
۱۰	۵.۱ نور تابیده بر روی سلول [۱۵]
۱۱	۶.۱ اثر PV در سلول خورشیدی [۱۱]
۱۳	۷.۱ منحنی I-V یک سلول فتوولتائیک نشان‌دهنده مستطیل حداکثر توان [۱۶]
۱۵	۸.۱ طیف AM ^۰ (آبی) و AM ^{۱.۵} (قرمز) [۱۷]
	۹.۱ انرژی‌های گاف نواری به‌عنوان تابعی از ثوابت شبکه برای مواد نیمه‌هادی مختلف
۱۶	[۱۸]
۱۷	۱۰.۱ طیف خورشید و پاسخ CIGS [۱۸]
۱۸	۱۱.۱ نمایشی از سلول خورشیدی چند پیوندی [۱۹]
۲۱	۱۲.۱ وابستگی بین بازده تبدیل و گاف نواری نیمه‌هادی [۱۴]
۲۲	۱۳.۱ ضریب جذب نیمه‌هادی‌های مختلف به‌عنوان تابعی از انرژی فوتون [۲۰]
۲۴	۱۴.۱ بهترین تحقیق بازده سلول‌های خورشیدی [۲۱]
۲۵	۱۵.۱ TFSC با لایه جاذب مس‌گونه [۲۲]

۳۰	.....	دیاگرام فاز سه‌تایی سیستم Cu-In-Ga [۲۳]	۱۶.۱
۳۳	.....	طرح شماتیک سلول CIGS [۲۵]	۱۷.۱
۳۴	.....	پاسخ فرکانسی CIGS برای مقادیر مختلف Ga [۲۶]	۱۸.۱
۳۶	.....	گاف نواری جاذب CIGS بر حسب بازده سلول خورشیدی و ولتاژ مدارباز [۲۶]	۱۹.۱
۴۰	.....	سیستم لایه نشانی کندوپاش	۱.۲
۴۱	.....	دستگاه SAMA موجود در آزمایشگاه شیمی تجزیه	۲.۲
۴۲	.....	تصویر دستگاه لایه‌نشانی تبخیر حرارتی	۳.۲
۴۳	.....	کوره	۴.۲
۴۴	.....	تصویر دستگاه pH متر	۵.۲
۴۵	.....	دستگاه آون	۶.۲
۴۶	.....	دستگاه اندازه‌گیری جریان-ولتاژ	۷.۲
۴۷	.....	دستگاه پراش پرتو ایکس که در زوایای مختلف به نمونه اشعه ایکس می‌تاباند	۸.۲
۵۳	.....	سیستم لایه‌نشانی الکتروشیمیایی	۱.۳
۵۵	.....	برنامه زمانی فرایند سلنیوم‌دار کردن	۲.۳
		پراش براگ (الف) از بلورک بدون کرنش (ب) از بلورک با کرنش همگن (ج) از	۳.۳
۵۶	.....	بلورک با کرنش ناهمگن	
۵۸	.....	الگوی پراش اشعه ایکس برای مس و مولیبدن	۴.۳
۵۹	.....	منحنی ویلیامسون-هال	۵.۳
۶۰	.....	الگوی پراش اشعه ایکس برای مس، مولیبدن و ایندیم	۶.۳
۶۱	.....	آنالیز EDS مربوط به نمونه با غلظت ایندیم ۰/۹ mM	۷.۳
۶۲	.....	آنالیز EDS مربوط به نمونه با غلظت ایندیم ۱ mM	۸.۳

۶۳	.....	آنالیز XRD نمونه ۳	۹.۳
۶۴	.....	آنالیز XRD نمونه ۴	۱۰.۳
۶۵	.....	آنالیز EDS نمونه ۱	۱۱.۳
۶۶	.....	آنالیز EDS نمونه ۲	۱۲.۳
۶۷	.....	آنالیز EDS نمونه ۳	۱۳.۳
۶۸	.....	آنالیز EDS نمونه ۴	۱۴.۳
۶۹	.....	تغییرات Cu/In برحسب تغییرات غلظت In	۱۵.۳
۷۰	.....	تصویری از نمونه آماده شده	۱۶.۳
۷۲	.....	منحنی $J - V$ برای نمونه ۱	۱۷.۳
۷۳	.....	منحنی $LnJ - V^{1/2}$ برای نمونه ۱	۱۸.۳
۷۳	.....	منحنی $LnJ - V$ برای نمونه ۱	۱۹.۳
۷۴	.....	منحنی $J - V$ برای نمونه ۲	۲۰.۳
۷۴	.....	منحنی $LnJ - V^{1/2}$ برای نمونه ۲	۲۱.۳
۷۵	.....	منحنی $LnJ - V$ برای نمونه ۲	۲۲.۳
۷۵	.....	منحنی $J - V$ برای نمونه ۳	۲۳.۳
۷۶	.....	منحنی $LnJ - V^{1/2}$ برای نمونه ۳	۲۴.۳
۷۶	.....	منحنی $LnJ - V$ برای نمونه ۳	۲۵.۳
۷۷	.....	منحنی $J - V$ برای نمونه ۴	۲۶.۳
۷۷	.....	منحنی $LnJ - V^{1/2}$ برای نمونه ۴	۲۷.۳
۷۸	.....	منحنی $LnJ - V$ برای نمونه ۴	۲۸.۳

فصل ۱

سلول‌های خورشیدی^۱

۱.۱ مقدمه

یکی از بزرگترین مشکلات این روزها محدودیت دسترسی به سوخت‌های فسیلی^۲ و هیدروکربنی^۳ و افزایش عواقب ناشی از مصرف آن‌ها بر محیط زیست، کیفیت زندگی و سلامت انسان است. به این دلایل، ضروری است که سراغ دیگر منابع انرژی برویم. انرژی تجدیدپذیر^۴ یک راه حل برای این مشکل است که یکی از منابع متداول آن خورشید است. از طریق تکنولوژی فتوولتائیک (PV)^۵، انرژی خورشید در دسترس و به‌طور گسترده‌ای قابل استفاده است.

امروزه تکنولوژی PV رشد قابل توجهی دارد و به‌عنوان یک منبع انرژی الکتریکی^۶ به‌اندازه‌ی کافی قابل اعتماد است. بهره‌برداری و نگهداری از نیروگاه‌های PV بسیار ارزان‌قیمت است و بهره‌برداری از این مجموعه به‌دلیل اینکه هیچ قسمت متحرکی ندارد بسیار آرام و ساکت است. موضوع مهم‌تر این است که تکنولوژی PV هیچ‌گونه آلودگی هوا ندارد. این نیروگاه‌ها را می‌توان به‌سرعت تاسیس کرد و به‌راحتی به‌صورت مستقیم به منبع تغذیه قابل نصب و تنظیم است و نیازی به خطوط انتقال ندارد.

^۱Solar cells
^۲Fossil Fuels
^۳Hydrocarbons
^۴Renewable energy
^۵Photovoltaic
^۶Electric energy

در حال حاضر سلول‌های سیلیکونی^۷ (Si) در بازار صفحات PV غالب هستند که علی‌رغم بازده^۸ بالا، ساخت آنها پرهزینه است زیرا ضخامت زیادی برای سلول مورد نیاز و سیلیکون بلوری گران‌قیمت است و رشد‌کنندگی دارد. این‌طور فرض شده است که تکنولوژی PV رشد بازده و صرفه اقتصادی خود را ادامه دهد و در این راستا همه‌ی تولیدکنندگان تلاش می‌کنند.

یکی از گزینه‌ها استفاده از سلول‌های خورشیدی لایه نازک^۹ ($TFSC$) مثل مس ایندیم گالیم سلناید، $Cu(In, Ga)Se_2$ ($CIGS$) است. علی‌رغم هزینه پایین تولید آن، به دلیل کاهش ضخامت (تا حدود ۱۰۰۰ برابر نازک‌تر از سلول‌های Si)، به‌طور کلی $TFSC$ فاقد کارایی هستند و توسعه‌ی کمتری در زمینه‌ی دانش و تکنولوژی درمقایسه با Si داشته‌اند. سلول‌های خورشیدی $CIGS$ با گاف نواری $1.3\text{eV} - 1.2\text{eV}$ به بازده سیلیکون بلوری با بازده ۲۰/۳ درصد رسیده است. انتظار می‌رود با استفاده از سلول‌های خورشیدی دو^{۱۰}، سه^{۱۱} و چند پیوندی^{۱۲} متشکل از لایه‌هایی با گاف نواری متفاوت به‌منظور استفاده در نواحی انرژی مختلف طیف خورشید^{۱۳}، بازده افزایش یابد.

در این زمینه مطالعات مختلف برای ساخت سلول‌های ایده‌آل با گاف نواری زیاد جهت استفاده به‌عنوان یک سلول خوب انجام شده است. مواد برپایه‌ی $CIGS$ آلایش یافته^{۱۴} با مقدار متوسطی از آلومینیوم ($CIAGS$) افزایش گاف نواری 1.5eV را نشان داده است [۴]. خصوصیات شیمیایی و فیزیکی نانوذرات $CIGS$ ^{۱۵} و لایه‌های نازک $CuGaSe_2$ (CGS) برای سلول دوتایی نشان می‌دهد که گاف نواری اپتیکی^{۱۶} نانوذرات وقتی در دمای بالا رشد داده می‌شوند افزایش می‌یابد [۶]. به‌علاوه شبیه‌سازی^{۱۷} سلول خورشیدی دوتایی $CGS/CIGS$ بازده ۲۵ درصد [۷] و سلول $CdZnTe/CIGS$

^۷Silicon cells

^۸Efficiency

^۹Thin film solar cells

^{۱۰}Tandem

^{۱۱}Triple

^{۱۲}Multi-junction

^{۱۳}Solar spectrum

^{۱۴}Doping

^{۱۵}Nanoparticles

^{۱۶}Optical band gap

^{۱۷}Simulation

بازده ۲۶ درصد را نشان داده است [۸]. با شبیه‌سازی سلول فتوولتائیک دوتایی هیبریدی آلی- معدنی^{۱۸} قیمت پایین، رسیدن به بازده بیشتر از ۲۰ درصد پیش‌بینی شده است [۹].

۲.۱ انرژی نوار و انرژی گاف

الکترون‌ها^{۱۹} در اتم‌های یک جامد بلوری^{۲۰} می‌توانند تنها در نوارهای انرژی وجود داشته باشند. اگر یک نیمه‌هادی^{۲۱} یک مقدار مشخصی از انرژی را به شکل گرما یا تابش^{۲۲} دریافت کند مانند وقتی که در دمای اتاق انرژی گرمایی^{۲۳} اتم‌ها را منتقل می‌کند و باعث آزاد شدن الکترون‌ها از پیوندها می‌شود. الکترون‌های آزاد شده بوسیله‌ی انرژی جنبشی^{۲۴} بدست آمده از گرما از پیوندها حذف می‌شوند و تولید الکتریسیته می‌کنند و نیمه‌هادی خاصیت رسانایی پیدا می‌کند. پیوندهای ضعیف در ساختار باعث به هم ریختن پیوستگی ساختار نمی‌شود زیرا باقی ماندن پیوندهای شیمیایی به همراه پیوندهای ناقص برای حفظ اتم‌ها در موقعیتشان کافی هستند. الکترون‌های رسانش^{۲۵} یا همان الکترون‌های آزاد^{۲۶} به صورت نامنظم درون جسم حرکت می‌کنند تا زمانی که آنها افزایش انرژی خود را حفظ کنند. اگر این انرژی به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یابد، آنها به موقعیت‌های خالی پیوندهای ناقص برمی‌گردند. جاهای خالی را می‌توان با یک الکترون مجاور که جای خالی در اتم اولیه خودش را ترک کرده است، پر کرد. انتقال این جاهای خالی را می‌توان با یک ذره‌ی ویژه که به آن حفره^{۲۷} می‌گویند توصیف کرد که به صورت تئوری دارای جرم یکسان و بار مخالف با الکترون است. از لحاظ انرژی، الکترون‌ها به سه دسته تقسیم می‌شوند. الکترون‌های لایه‌های

^{۱۸}Organic-inorganic hybrid tandem PV cell

^{۱۹}Electrons

^{۲۰}Crystalline solids

^{۲۱}Semiconductor

^{۲۲}Radiation

^{۲۳}Thermal energy

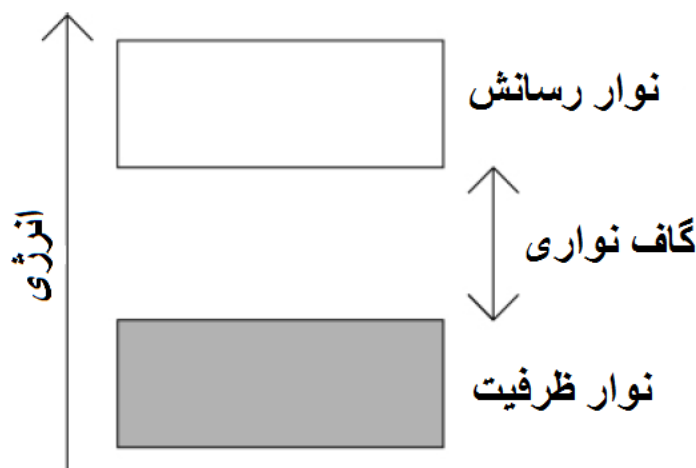
^{۲۴}Kinetic energy

^{۲۵}Conduction electrons

^{۲۶}Free electrons

^{۲۷}Holes

داخلی که فعالیت کمتری دارند و در تشکیل پیوندهای شیمیایی شرکت نمی‌کنند؛ الکترون‌های ظرفیت^{۲۸} که پیوندها را تشکیل می‌دهند و الکترون‌های آزاد که در نوار رسانش حضور دارند. سطوح انرژی الکترون‌های ظرفیت نوار ظرفیت^{۲۹} را تشکیل می‌دهند و متناظر با آن سطوح انرژی الکترون‌های رسانش^{۳۰} نوار رسانش^{۳۱} را تشکیل می‌دهند. فاصله‌ی انرژی بین دو نوار که اختلاف انرژی بین پایین‌ترین انرژی نوار رسانش الکترون‌ها و بالاترین انرژی نوار ظرفیت الکترون‌هاست را گاف نواری^{۳۲} می‌گویند و نشان‌دهنده‌ی حداقل انرژی برای تحریک الکترون ظرفیت و ایجاد حفره است. این پدیده در شکل (۱.۱) نشان داده شده است.



شکل ۱.۱: نمایش ساده‌ای از سطوح انرژی نیمه‌هادی

در یک نیمه‌هادی کاملاً خالص بدون هیچ‌گونه ناخالصی^{۳۳} و یک شبکه‌ی بلوری^{۳۴} کامل هیچ تراز انرژی درون گاف بین نوار ظرفیت E_v و نوار رسانش E_c وجود ندارد و این ناحیه یک ناحیه‌ی ممنوعه‌ی نوار انرژی^{۳۵} است. انرژی مورد نیاز یک الکترون برای انتقال از نوار ظرفیت و رفتن

^{۲۸}Valency electrons
^{۲۹}Valence band
^{۳۰}Conduction electrons
^{۳۱}Conduction band
^{۳۲}Band gap
^{۳۳}Impurities
^{۳۴}Crystal lattice
^{۳۵}Forbidden energy band

به نوار رسانش را انرژی گاف نواری E_g می‌گویند که واحد آن الکترون‌ولت (eV) است. تحریک یک الکترون ظرفیت زمانی اتفاق می‌افتد که مقداری انرژی دریافت شود

$$E = h\nu \quad (1.1)$$

که h ثابت پلانک ($6.63 \times 10^{-15} J.s$) و ν فرکانس^{۳۶} موج الکترومغناطیسی^{۳۷} (Hz) است. اگر انرژی فوتون‌ها کم‌تر از انرژی گاف نواری باشد الکترون تحریک شده^{۳۸} نمی‌تواند به تراز بالاتر برود. اگر فوتون^{۳۹}‌های تابشی انرژی بیشتری نسبت به گاف نواری داشته باشند، الکترون پیوند کووالانسی^{۴۰} را ترک می‌کند و انرژی آن به انرژی جنبشی تبدیل می‌شود که به دلیل افزایش دمای مواد دریافت شده است. احتمال این‌که انرژی دریافت شده از محیط الکترون‌های ظرفیت به اندازه‌ای باشد که بتواند تحریک شود و بر انرژی گاف نواری چیره شود به دمای مطلق عنصر بستگی دارد و متناسب با $e^{\frac{E_g}{kT}}$ است که k ثابت بولتزمن ($1.38 \times 10^{-23} J/K$) و T دما بر حسب درجه‌ی کلوین است. ترازهای انرژی نواحی با سطوح مجزا و فواصل کم هستند که می‌توان آن‌ها را به صورت یک زنجیره در نظر گرفت درحالی‌که گاف انرژی ممنوعه یک ناحیه است که در آن هیچ تراز انرژی وجود ندارد. این ساختار نواری ناشی از نظم تناوبی اتم‌ها درون بلور است که باعث تداخل^{۴۱} توابع موج-الکترون^{۴۲} می‌شود. طبق اصل پائولی^{۴۳} حضور بیشتر از یک الکترون در یک تراز ممنوع است، سطوح انرژی پوسته‌ی اتمی^{۴۴} بیرونی به سطوح مجزایی که فقط کمی از هم جدا هستند شکسته می‌شوند. از آنجا که دو الکترون با اسپین^{۴۵} مخالف ممکن است در یک تراز قرار بگیرند تعداد ترازها درون بلور با تعداد جفت الکترون‌ها برابر است. این شکست تاثیری بر سطوح

^{۳۶}Frequency

^{۳۷}Electromagnetic wave

^{۳۸}Excited electron

^{۳۹}Photon

^{۴۰}Covalent bond

^{۴۱}Overlapping

^{۴۲}Electron-wave functions

^{۴۳}Pauli principle

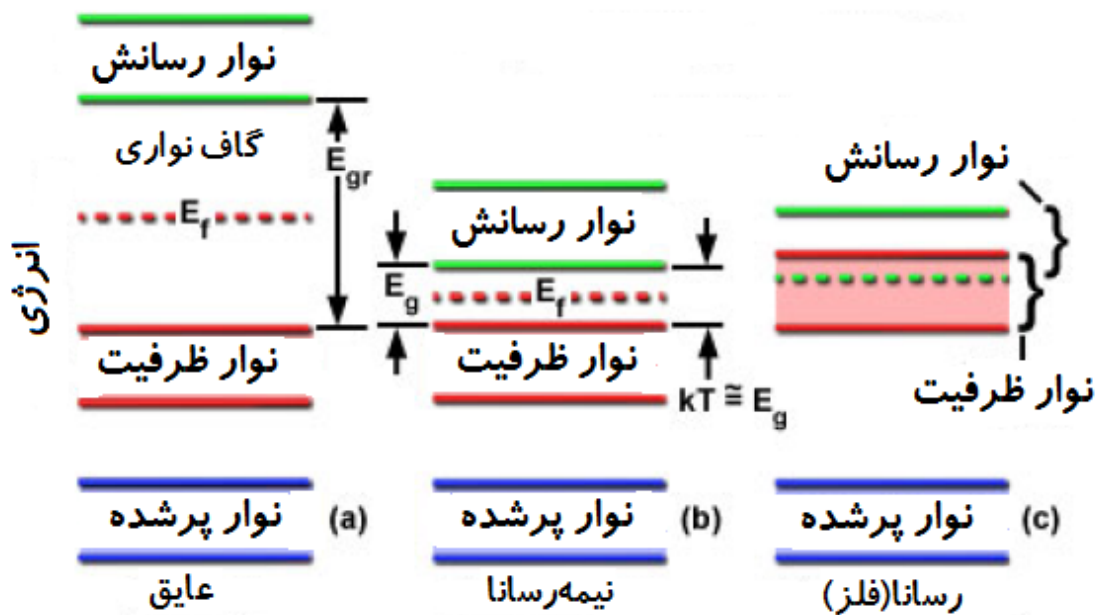
^{۴۴}Atomic-shell

^{۴۵}Spin

اتمی داخلی ندارد زیرا بسیار محکم هستند. بالاترین نوار انرژی نوار رسانش است. الکترون‌ها در این ناحیه از اتمهایشان جدا می‌شوند و آزادانه درون ساختار حرکت می‌کنند. اما الکترون‌های درون ترازهای نوار ظرفیت بسیار محکم هستند و ارتباط خود را با اتمهای شبکه حفظ می‌کنند. پهنای گاف و نوارها توسط فواصل شبکه بین اتمی تعیین می‌شود. این عوامل به دما و فشار بستگی دارند. در رساناها، گاف انرژی وجود ندارد درحالی که در عایق‌ها گاف بزرگ است. در دماهای معمولی الکترون‌ها درون عایق همگی در نوار ظرفیت قرار دارند و انرژی گرمایی برای حرکت الکترون‌ها کافی نیست. وقتی یک میدان الکتریکی^{۴۶} خارجی اعمال می‌شود، الکترون‌های نوار رسانش هیچ حرکتی درون بلور نخواهند کرد و در نتیجه جریانی^{۴۷} برقرار نمی‌شود. برای یک رسانا، عدم وجود گاف نواری باعث می‌شود الکترون‌های تحریک شده توسط گرما به راحتی به نوار رسانش بروند و در آنجا آزادانه درون بلور حرکت کنند. اگر میدان الکتریکی اعمال شود جریان برقرار خواهد شد. درون یک نیمه‌هادی گاف نواری اندازه‌ی متوسطی دارد به طوری که تعداد کمی از الکترون‌های تحریک شده می‌توانند با تحریک گرمایی به نوار رسانش بروند. وقتی میدان الکتریکی اعمال شود جریان کوچکی مشاهده خواهد شد. اگر نیمه‌هادی در دماهای پایین قرار بگیرند، تقریباً همه‌ی الکترون‌های آن درون نوار ظرفیت قرار می‌گیرند و رسانش نیمه‌هادی کاهش می‌یابد. تصویر سه نمونه از مواد با گاف نواریشان در شکل (۲.۱) نشان داده شده است و انرژی گاف نواری برای چندین نیمه‌هادی را می‌توان در شکل (۳.۱) مشاهده کرد.

^{۴۶}Electrical field

^{۴۷}Current



شکل ۲۰۱: نمایش انرژی نواری و انرژی گاف مواد [۱۰]

مقادیر انرژی گاف نواری 0.66 eV برای Ge ، 1.12 eV برای Si و 1.42 eV برای $GaAs$ در دمای اتاق و فشار معمولی بدست آمده است [۱۳]. این مقادیر که در بالا ذکر شده است برای عناصر بسیار خالص صدق می‌کند. برای مواد با ناخالصی زیاد انرژی گاف نواری کوچکتر است. داده‌های تجربی نشان می‌دهد که در بیشتر نیمه‌هادی‌ها انرژی گاف نواری با افزایش دما کاهش می‌یابد.

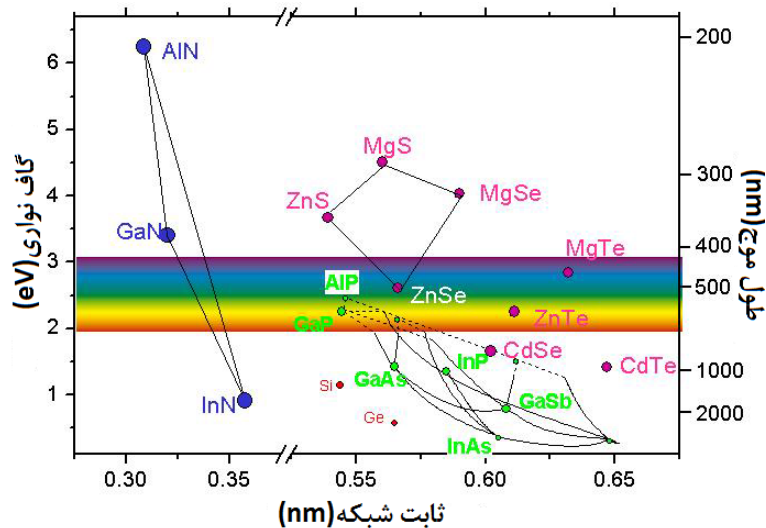
۳.۱ سلول‌های خورشیدی با پیوند $P - N$

یک پیوند $p - n$ با یک ناحیه n بسیار نازک را در نظر گرفته شد که تابش ^{۴۸} از یک طرف این ناحیه صورت می‌گیرد. در ناحیه تهی ^{۴۹} W یک میدان الکتریکی به سمت ناحیه p گسترش یافته است. الکترودهای ^{۵۰} روی یک طرف ناحیه تابش (مثلاً ناحیه n) باید بتواند تابش را به

^{۴۸} Irradiation

^{۴۹} Depletion region

^{۵۰} Electrodes



شکل ۳.۱: گاف نواری و ثوابت شبکه برای چند ترکیب نیمه‌هادی [۱۲]

دستگاه برساند. آنها باید دارای مقاومت سری^{۵۱} کوچکی باشند و به همین دلیل وقتی در ناحیه‌ی n قرار می‌گیرند یک آرایه‌ای از الکترودهای شاخه‌ای^{۵۲} روی سطح ایجاد می‌کنند. از آنجا که ناحیه‌ی n بسیار نازک است بسیاری از فوتون‌ها از آن عبور می‌کنند. آنها درون ناحیه‌ی تهی جذب می‌شوند و این در این ناحیه جفت الکترون-حفره^{۵۳} تولید می‌شود. به دلیل حضور میدان الکتریکی جفت‌های الکترون-حفره تولید شده فوراً از هم جدا می‌شوند. الکترون‌ها در ناحیه‌ی خنثی n حرکت می‌کنند و بار منفی اضافی تولید می‌کنند و حفره‌ها به سمت ناحیه‌ی خنثی p حرکت می‌کنند و بار مثبت تولید می‌کنند. این پدیده یک ولتاژ مدار باز^{۵۴} در دو انتهای دستگاه ایجاد می‌کند. بنابراین ناحیه‌ی p بسیار مثبت‌تر از ناحیه‌ی n است. با اتصال یک بار خارجی، الکترون‌های اضافی می‌توانند با جریان خارجی حرکت کنند و به ناحیه‌ی p برسند و در آنجا با حفره‌ها بازترکیب^{۵۵} شوند.

^{۵۱}Series resistance

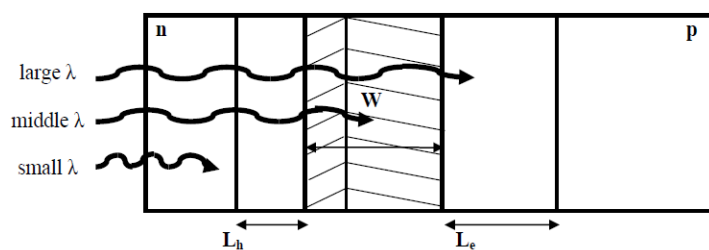
^{۵۲}Branched electrodes

^{۵۳}Electron-hole pairs

^{۵۴}Open-circuit voltage

^{۵۵}Recombine

فوتون‌های با طول موج^{۵۶} بلند عمیق‌تر نفوذ می‌کنند و به ناحیه‌ی p می‌رسند و در آن‌جا پراکنده می‌شوند زیرا در این ناحیه هیچ میدان الکتریکی وجود ندارد. هر جفت الکترون تولید شده دارای یک زمان بازترکیب^{۵۷} و طول پخش^{۵۸} (L_e) مشخص است. بنابراین الکترون‌ها با طول کم‌تر از مقدار طول پخش متوسط به راحتی وجود دارند و تحت تاثیر میدان الکتریکی درون ناحیه‌ی n منتقل می‌شوند. متعاقباً تنها حامل‌های با طول کمتر از طول پخش جریان تولید می‌کنند و در تولید پدیده‌ی فتوالکتریک^{۵۹} شرکت می‌کنند. با این روند، الکترون درون ناحیه‌ی n تحت تاثیر میدان الکتریکی یک بار الکتریکی منفی اضافی در این ناحیه تولید می‌کند. به همین ترتیب حفره در ناحیه‌ی p یک بار مثبت اضافی ایجاد می‌کند. جفت‌های قرار گرفته در فواصل بزرگتر از طول پخش (L_e) ناحیه‌ی تهی بازترکیب می‌شوند. همین امر در ناحیه‌ی n برای فوتون‌های با طول موج کوتاه در نظر گرفته می‌شود. بنابراین حفره‌ها در فواصل کم‌تر از طول پخش (L_h) از ناحیه‌ی تهی به همان شیوه درون ناحیه‌ی p حرکت می‌کنند. بنابراین، می‌توانیم بگوییم که تحریک جفت الکترون-حفره کمک می‌کند اثر فتوالکتریک درون یک منطقه با پهنای ($L_h + W + L_e$) رخ دهد. این پدیده در شکل (۴.۱) نشان داده شده است.



شکل ۴.۱: جذب فوتون‌ها در سلول PV تحت تابش

^{۵۶}Wavelength

^{۵۷}Recombination time

^{۵۸}Diffusion length

^{۵۹}Photovoltaic effect