

سلول‌های خورشیدی

در حوزه پلاسمونیک

مؤلف:

دکتر سید محمد صادق هاشمی نسب

سرشناسه :	هاشمی نسب، سید محمد صادق، ۱۳۴۹-
عنوان و نام پدیدآور :	سلول های خورشیدی در حوزه پلاسمونیک / مولف سید محمد صادق هاشمی نسب.
مشخصات نشر :	شیراز: انتشارات پردیس ارم، ۱۴۰۰.
مشخصات ظاهری :	۱۰۳ ص.: مصور (بخشی رنگی)، نمودار (بخشی رنگی).
شابک :	۹۷۸-۶۲۲-۹۸۱۶۳-۰-۱
وضعیت فهرست نویسی :	فیفا
یادداشت :	کتابنامه: ص. ۹۹-۱۰۳.
موضوع :	پیل های خورشیدی
موضوع :	Solar cells
موضوع :	پلاسمون ها
موضوع :	(Plasmons (Physics
موضوع :	پیل های خورشیدی -- شبیه سازی کامپیوتری -- نرم افزار
موضوع :	Solar cells -- Computer simulation -- Software
رده بندی کنگره :	TK۲۹۶۰
رده بندی دیویی :	۶۲۱/۳۱۲۴۴
شماره کتابشناسی ملی :	۷۶۰۷۵۳۰

عنوان: سلول های خورشیدی در حوزه پلاسمونیک

مولف: دکتر سید محمد صادق هاشمی نسب

ناشر: انتشارات پردیس ارم

شابک: ۹۷۸-۶۲۲-۹۸۱۶۳-۰-۱

صفحه آرا: اعظم دبستانی

طرح جلد: سید محمد مهدی هاشمی نسب

لیتوگرافی: پردیس چاپ و صحافی: دنا

نوبت چاپ: اول بهار ۱۴۰۰

قیمت: ۳۵۰۰۰ تومان



انتشارات پردیس ارم

مقدمه مؤلف

سپاس و ستایش خدای را جل و جلاله که آثار قدرت او بر چهره‌ی روز، تابان است و انوار حکمت او در دل شب، درفشان. آفریدگاری که خویشتن را به ما شناساند و درهای علم را بر ما گشود. عمری و فرصتی عطا فرمود تا بدان، بنده ضعیف خویش را در طریق علم و معرفت بیازماید. حمد خداوند کارسازی را که مرا از لطف بیکران خود محروم نگردانید و لحظه لحظه میل به آموختن را در وجود من شعله‌ور گرداند.

این کتاب شامل بخش‌های مختلفی در مورد سلول‌های خورشیدی است. در فصل اول با مبانی فیزیک الکترونیک سلول خورشیدی آشنا می‌شوید. در فصل دوم انواع سلول‌های خورشیدی و در فصل سوم با سلول‌های خورشیدی CIGS که از متداول‌ترین سلول‌های خورشیدی است آشنا می‌شوید. فصل چهارم این کتاب به سلول‌های خورشیدی در حوزه پلاسمونیک پرداخته شده است. در فصل پنجم ضمن معرفی نرم‌افزارهای مربوط به این حوزه، نحوه شبیه‌سازی به‌طور مختصر بیان شده است.

در پایان ضمن تشکر و قدردانی از اساتید بزرگوارم جناب آقای دکتر محسن ایمانیه و جناب آقای دکتر عباس کمالی اعضاء هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد فسا، این کتاب را به همسر و فرزندان دلبندم به خاطر فداکاری‌ها و صبوریشان تقدیم می‌دارم.

سید محمدصادق هاشمی نسب

Sa_hashemi3@yahoo.com

فهرست

عنوان	صفحه
فصل اول: فیزیک الکترونیک سلول‌های خورشیدی ۱-۳۱	
۱-۱- مقدمه	
۱-۲- طیف خورشید و فوتون‌ها	
۱-۳- خواص اساسی نیمه‌رساناها	
۱-۳-۱- ساختار نواری	
۱-۳-۲- گاف نواری مستقیم و غیر مستقیم	
۱-۳-۳- انتقال حامل در نیمه‌رسانا	
۱-۴- اثر فتوولتایی	
۱-۵- باز ترکیب	
۱-۶- نیمه‌رساناهای ذاتی و غیر ذاتی	
۱-۷- فرآیندهای جذب اپتیکی	
۱-۸- تفکیک حامل‌های بار در نیمه‌رسانا	
۱-۹- معادله‌ی پیوستگی	
۱-۱۰- خواص الکتریکی پیوندگاه p-n	
۱-۱۱- مشخصه‌های V-I ایده‌آل تحت تاریکی	
۱-۱۲- اثرات تولید و باز ترکیب حامل	
۱-۱۳- خواص فتوولتایی	
فصل دوم: انواع سلول‌های خورشیدی ۲-۳۲	
۲-۱- مقدمه	
۲-۲- انواع سلول‌های خورشیدی	
۲-۳- سلول‌های خورشیدی سیلیکونی	
۲-۳-۱- سلول‌های خورشیدی مبتنی بر سیلیکون کریستالی	

۲-۳-۲- سلول‌های خورشیدی مبتنی بر سیلیکون لایه نازک غیر کریستالی (آمورف)

۲-۳-۳- سلول‌های خورشیدی لایه نازک GaAs

۲-۴- سلول‌های خورشیدی اکسیتونی

۲-۴-۱- سلول‌های خورشیدی حساس به رنگ (DSSC)

۴-۲-۲- سلول‌های خورشیدی پلیمری

۲-۴-۳- سلول‌های خورشیدی مبتنی بر نقاط کوانتومی

۲-۵- سلول‌های خورشیدی چالکوجناید

۲-۵-۱- سلول‌های خورشیدی تلورید کادمیوم cdTe

۲-۵-۲- سلول‌های خورشیدی cds/cdTe

۲-۶- مقایسه سلول‌های خورشیدی آلی و معدنی

فصل سوم: سلول‌های خورشیدی CIGS ۴۸-۶۳

۳-۱- مقدمه

۲-۳- سلول‌های خورشیدی CIGS

۳-۲-۱- سلول‌های خورشیدی فیلم نازک

۳-۲-۲- شکل‌های مختلف CIGS

۳-۲-۳- لایه‌های مختلف CIGS

۳-۲-۴- مقدار Ga

۳-۲-۵- ضخامت لایه‌ی جاذب CIGS

۳-۲-۶- ضخامت لایه شفاف TCO

فصل چهارم: سلول‌های خورشیدی در حوزه پلاسمونیک ۶۶-۷۹

۴-۱- مقدمه

۴-۲- علم پلاسمونیک

۴-۲-۱- پلاسمون‌های سطحی موضعی

۴-۲-۲- بررسی نانوذره‌ها

۴-۲-۳- پلاسمون پلاریتون‌های سطحی

۴-۳- نانوذرات پلاسمونیک

۴-۴- مدل درود

۴-۵- مدل لورنتس

۴-۶- مدل درود- لورنتس

۴-۷- چرا از پلاسمونیک استفاده می‌کنیم

۴-۸- معادلات حاکم بر سلول‌های خورشیدی لایه نازک پلاسمونیک

فصل پنجم: شبیه‌سازی سلول خورشیدی نانوساختار پلاسمونیک ۹۸-۸۰

۵-۱- مقدمه

۵-۲- نرم‌افزار کامسول

۵-۳- مراحل شبیه‌سازی

۵-۴- کار با نرم‌افزار

۵-۴-۱- افزودن فیزیک و شرایط مرزی و اولیه

۵-۴-۲- ایجاد هندسه

۵-۴-۳- تعریف ماده

۵-۴-۴- مش‌بندی

۵-۴-۵- محاسبات و حل

۵-۴-۶- نتایج

۵-۵- نرم‌افزار لومریکال

۵-۵-۱- معرفی نرم‌افزار لومریکال

۵-۵-۲- مروری بر محصولات لومریکال

۵-۵-۳- آشنایی مختصر با محیط نرم‌افزار لومریکال

۵-۵-۴- چند نکته مهم

منابع ۱۰۳-۹۹

فصل اول

فیزیک الکترونیک سلول‌های خورشیدی

۱-۱- مقدمه

رشد مصرف جهانی انرژی در قرن اخیر و همراه با آن، افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای، با آلودگی بیش از پیش محیط‌زیست و خسارات جبران‌ناپذیر برای منابع حیاتی همراه بوده است. به منظور کاهش اتکا جهانی به منابع طبیعی پایان‌پذیر و سوخت‌های مخرب محیط‌زیست، تلاش‌های علمی فراوانی برای کاهش هزینه‌های تولید انرژی از منابع تجدیدپذیر صورت گرفته است. از جمله، تلاش برای تولید انرژی الکتریکی با استفاده از نور خورشید، که با استفاده از خاصیت ذاتی نیمه‌رساناها انجام شده است. نخستین سلول‌های خورشیدی بر پایه نیمه‌رساناها، که بازده آن‌ها به بیش از ۱۰٪ می‌رسید، در سال‌های ۱۹۶۰-۱۹۵۰ ساخته شدند. هم اکنون ۹۰-۸۵٪ قطعات فتوولتایی خورشیدی در سراسر جهان، بر پایه قرص‌های نازک بلوری سیلیکون ساخته می‌شوند. امروزه استفاده از نیمه‌رساناها، تحول عظیمی در صنایع اپتیک و الکترونیک بوجود آورده است. امروزه رشد اقتصادی کشورها، وابسته به تأمین منابع انرژی است. در بیشتر کشورها این منابع شامل زغال سنگ، نفت، گاز طبیعی و همچنین انرژی هسته‌ای می‌باشد. با این وجود، استفاده از این منابع با چالش‌های مختلفی، از جمله پایان‌پذیر بودن منابع سوخت‌های فسیلی رو به رو است. بین سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۳۰ میلادی، مصرف جهانی انرژی، سالانه با رشدی بیش از ۵۰٪ تخمین زده می‌شود. افزایشی به همین نسبت در انتشار گاز دی اکسید کربن^۱، حاصل از سوخت‌های فسیلی احتراقی، پیش‌بینی می‌شود. به منظور کم کردن اتکا جهانی به منابع طبیعی پایان‌پذیر و سوخت‌های مخرب محیط‌زیست، تلاش‌های علمی فراوانی برای کاهش هزینه‌های تولید انرژی از منابع تجدیدپذیر، از قبیل: انرژی خورشیدی، آب، باد و غیره، صورت گرفته است. از آنجا که مجموعه‌ی بزرگی از پدیده‌های حالت جامد، شامل تبدیل انرژی از شکلی به شکل دیگر هستند، مطالعه‌ی تبدیل انرژی در مواد، با استفاده از قطعات حالت جامد، زمینه‌ای گسترده برای پیشرفت تکنولوژی انرژی‌های تجدید پذیر، خواهد بود. بسیاری از نیمه‌رساناها می‌توانند الکتریسیته را از نور خورشید تولید کنند. سلول‌های فتوولتایی، که اغلب سلول‌های خورشیدی نامیده می‌شوند، از جمله قطعات حالت جامد هستند که بر اساس تبدیل انرژی خورشید به الکتریسیته، کار می‌کنند. از مزایای این روش تبدیل انرژی این است که، مواد غیر دوستدار محیط‌زیست تولید نمی‌کند و منبع نامحدودی از انرژی در

(یک گاز گلخانه‌ای شاخص) CO_2 - ۱

اختیار ما قرار می‌دهد. متداول‌ترین و بهترین سلول‌های خورشیدی توسعه یافته، از سیلیکون ساخته می‌شوند. از آنجا که سیلیکون $\% 27/7$ پوسته‌ی زمین را تشکیل می‌دهد، به نظر می‌رسد سلول‌های خورشیدی سیلیکونی، به طور بالقوه ارزان باشند، اما تبدیل سیلیکون به سلول خورشیدی، فرآیندی پرهزینه است که به الکتریسیته قابل توجهی نیاز دارد.

۲-۱- طیف خورشید و فوتون‌ها^۱

سؤال این است که، نور خورشید چگونه توصیف می‌شود؟ مشاهده‌ی رنگ‌های طیف، نشان می‌دهد که نور خورشید می‌تواند به رنگ‌های مختلفی تقسیم شود. همچنین، استفاده از خطوط موازی بسیار نزدیک، به عنوان توری پراش، نشان می‌دهد که رنگ‌ها می‌توانند با فاصله خطوط مرتبط باشند. بدین معنی که طول موجی مربوط به هر رنگ وجود دارد. از این رو، نور یک موج الکترومغناطیسی است و می‌توان یک طول موج به آن نسبت داد. از سوی دیگر، با مشاهده‌ی پدیده‌هایی چون اثر فتوالکتریک، انیشتین توضیح داد که، نور به صورت بسته‌های کوچک انرژی حرکت می‌کند، که مانند ذره رفتار می‌کنند و فوتون نامیده می‌شوند. انرژی فوتون با طول موج آن به صورت زیر در ارتباط است:

$$E_{ph} = \frac{hc}{\lambda} \quad (1-1)$$

در این رابطه h ثابت پلانک و c سرعت نور است. تنها فوتون‌هایی می‌توانند در فرآیند تبدیل انرژی شرکت کنند که انرژی بالاتر از شکاف باند انرژی ماده نیمه‌هادی سلول داشته باشند. انرژی خورشید در خارج از جو زمین با شدت 1353 W/m^2 به اجرام می‌رسد و طیف نوری آن تحت عنوان جرم هوایی^۲ صفر نامیده می‌شود. پس از ورود این اشعه به داخل اتمسفر زمین، بخش مادون قرمز آن توسط بخار آب موجود در جو زمین جذب شده و بخش ماوراء بنفش آن توسط جذب در لایه‌ی اوزون و پراکنش توسط ذرات معلق موجود در هوا، تضعیف می‌شود. جرم هوایی معیاری از چگونگی تأثیر جذب در اتمسفر بر روی طیف و شدت تشعشع نوری است که به سطح زمین می‌رسد. همچنین جرم هوایی نشان دهنده‌ی محل قرارگیری خورشید و زاویه‌ی تابش آن است و از رابطه زیر بدست می‌آید:

^۱ - Photons

^۲ - Air mass

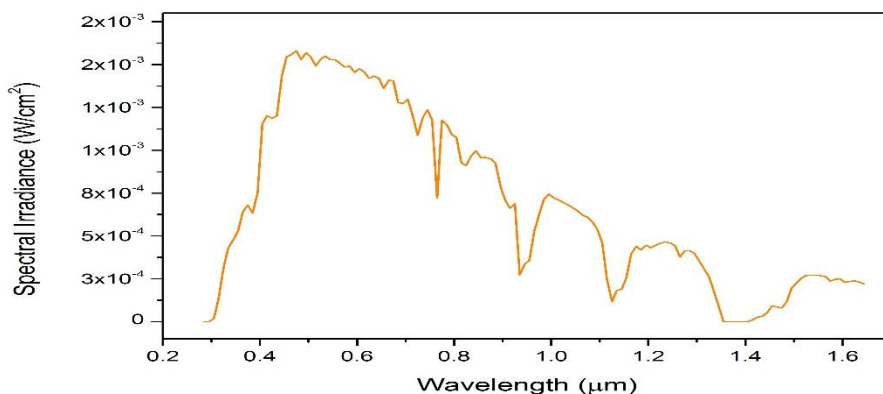
$$AM = \frac{1}{\cos \theta} \quad (1-2)$$

در این رابطه، θ زاویه‌ی فرودی نور خورشید است. این رابطه نشان می‌دهد که، عدد جرم هوایی همیشه بزرگتر یا مساوی یک است. جرم هوایی $1/5$ به این معنی است که، خورشید در محلی قرار گرفته که طول مسیر آن برای تابش روی سطح سلول، $1/5$ برابر حالت عمودی است. این حالت، معادل زاویه‌ی فرودی حدود 48° درجه نور تابشی در سطح زمین است. پرکاربردترین استاندارد که برای مقایسه‌ی عملکرد سلول‌های خورشیدی مورد استفاده قرار می‌گیرد، طیف $AM\ 1/5$ است. خلاصه‌ای از استانداردهای توزیع طیف انرژی خورشید در جدول (1-1) نشان داده شده است.

جدول (1-1) - مشخصات توزیع طیف‌های انرژی خورشید

ارتفاع	موقعیت خورشید	توان خورشیدی تابشی (W/m^2)	توزیع طیفی
بیرون اتمسفر	-----	1353	$AM\ 0$
روی سطح	$\theta = 90^\circ$	1040	$AM\ 1$
روی سطح	$\theta = 48^\circ$	1000	$AM\ 1/5$
روی سطح	$\theta = 60^\circ$	691	$AM\ 2$

در شکل (1-1) طیف خورشیدی نشان داده شده است. سلول‌های خورشیدی پایه سیلیکونی توانایی جذب تا طول موج $1/1$ میکرومتری از طیف تابشی خورشید را دارا هستند.



شکل (1-1) - طیف خورشید در $AM\ 1/5$

در یک سلول خورشیدی، نیروی الکتریکی در نتیجه‌ی جذب فوتون، تولید جفت‌های الکترون-حفره^۱ و عبور آن‌ها از یک ولتاژ، بوجود می‌آید. نیمه‌رساناها به طور ذاتی، یک انرژی جذب آستانه دارند که با آن ولتاژی که الکترون در نیمه‌رسانا می‌بیند، تعیین می‌شود. انرژی‌های فوتونی و جذب آستانه با واحد الکترون‌ولت داده می‌شود. برای مثال در شکل (۱-۱) انرژی آستانه جذب، برای سیلیکون ۱/۱ الکترون‌ولت است که مساوی با ۱/۱ میکرون می‌باشد. فوتون‌هایی با انرژی کمتر از ۱/۱ الکترون‌ولت جذب نمی‌شوند و انرژی خورشید با طول موج بزرگ‌تر از ۱/۱ میکرون تلف می‌شود.

۳-۱- خواص اساسی نیمه‌رساناها

برای وارد شدن به بحث سلول‌های خورشیدی، درک برخی مفاهیم و خواص اساسی نیمه‌رساناها از اهمیت زیادی برخوردار است.

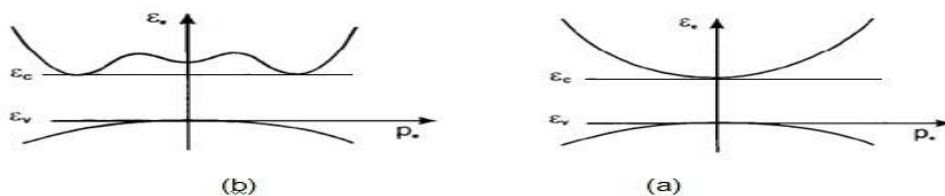
۳-۱-۱- ساختار نواری

الکترون‌های یک اتم منزوی، ترازهای انرژی مجزایی دارند. هنگامی که اتم‌ها، برای تشکیل بلور، به هم نزدیک می‌گردند، بایستی ترازهای انرژی از هم شکافته باشند، اما به دلیل برهم‌کنش اتمی، ترازها بسیار نزدیک به هم قرار می‌گیرند، که منجر به یک نوار پیوسته انرژی می‌شود. دو نوار متمایز انرژی در نیمه‌رساناها وجود دارد. در دمای صفر کلوین، نوار پایین‌تر، که نوار ظرفیت نامیده می‌شود، پر از الکترون است (در دماهای متناهی این نوار می‌تواند با جابه‌جایی حالت‌های تهی، رسانایی را موجب شود). بار الکتریکی در یک جامد مانند یک سیال است و حالت‌های تهی مانند حباب در سیال رفتار می‌کنند، از این رو، حفره نامیده می‌شوند. در نیمه‌رساناها نوار بالایی، تقریباً خالی از الکترون است و در بردارنده حالت‌های الکترونی برانگیخته است (الکترون‌ها از پیوند کووالانسی جایگزیده، به حالت‌های گسترده در بدنه بلور می‌روند). چنین الکترون‌هایی، با به کارگیری یک میدان الکتریکی شتاب می‌گیرند و در شار جریان شرکت می‌کنند، بدین جهت این نوار، نوار رسانش نامیده می‌شود. اختلاف انرژی دو نوار، گاف نواری نامیده می‌شود که ناحیه ممنوع انرژی است.

۱- Electron-hole

۳-۲-۱- گاف نواری مستقیم و غیرمستقیم در نیمه‌رساناها

می‌توان نمودار نوار انرژی الکترون، در مقابل اندازه حرکت را رسم کرد. مینیمم نوار رسانش و ماکزیمم نوار ظرفیت، نسبت به هم، به دو صورت واقع می‌شوند. در حالت اول مینیمم نوار رسانش و ماکزیمم نوار ظرفیت، مطابق شکل (۱-۲) (a)، در اندازه حرکت یکسانی قرار می‌گیرند و وقتی الکترون از نوار ظرفیت به نوار رسانش جهش می‌کند، تغییری در اندازه حرکت آن به وجود نمی‌آید. گالیم آرسنید و اکسیدروی، مثال‌هایی از این مورد هستند. چنین موادی، نیمه‌رسانای مستقیم نامیده می‌شوند. در مقابل ممکن است، مینیمم نوار رسانش و ماکزیمم نوار ظرفیت، مطابق شکل (۱-۲) (b)، در اندازه حرکت یکسان قرار نگیرند. بنابراین برانگیختگی یک الکترون از نوار ظرفیت به نوار رسانش، نه تنها نیاز به صرف انرژی زیادی دارد، بلکه، تغییری در اندازه حرکت آن به وجود خواهد آورد. با چنین موقعیتی در سیلیکون رو به رو هستیم. این مواد را نیمه‌رساناهای غیر مستقیم می‌نامیم.



شکل (۱-۲) - نمودار نوار انرژی الکترون بر حسب اندازه حرکت برای نیمه‌رسانای (a) مستقیم (b) غیرمستقیم

در نیمه‌رساناهای مستقیم، یک فوتون با انرژی $h\nu = E_g$ (h ثابت پلانک و ν فرکانس نور است)، می‌تواند یک الکترون را از نوار ظرفیت به نوار رسانش برانگیخته کند (عبور مستقیم). اما در نیمه‌رساناهای غیرمستقیم، این نوع عبور، امکان‌پذیر نمی‌باشد. به دلیل آن که فوتون‌ها اندازه حرکت بسیار کوچکی دارند، در حالی که الکترون باید دستخوش تغییر بزرگی در اندازه حرکت شود. در این موارد، عبور الکترون از نوار ظرفیت به نوار رسانش، می‌تواند با اتلاف یک فونون شبکه (انرژی گرمایی) رخ دهد، در این صورت اندازه حرکت مورد نیاز، تأمین می‌شود (عبور غیرمستقیم؛ به دلیل برهم‌کنش بین اتم‌ها، یک جامد مدهای ارتعاشی دارد. کوانتوم انرژی ارتعاشی، فونون نامیده می‌شود، در برهم‌کنش فونون- الکترون انرژی و اندازه حرکت پایسته می‌مانند). البته عبورهای

مستقیم نیز امکان‌پذیر هستند، اما یک انرژی فوتونی مینیمم برای برانگیخته کردن الکترون مورد نیاز است که بزرگتر از گاف انرژی باشد.

۱-۳-۳- انتقال حامل در نیمه‌رسانا

تحرك^۱: در یک نیمه‌رسانا، الکترون‌ها، بوسیله انرژی گرمایی، به صورت تصادفی در همه جهات، حرکت می‌کنند. پس از طی مسافت کوتاهی، الکترون‌ها به یک اتم شبکه یا یک اتم ناخالصی و یا یک مرکز پراکندگی دیگر برخورد می‌کنند. این فرآیند پراکندگی، موجب می‌شود الکترون مقداری از انرژی خود را از دست بدهد. متوسط زمان بین برخوردها، زمان آزاد میانگین^۲، نامیده می‌شود. هنگامی که میدان الکتریکی کوچکی (E)، به نیمه رسانا اعمال شود، نیروی $-qE$ ، به الکترون‌ها وارد می‌شود و به آنها شتابی در خلاف جهت میدان می‌دهد (q واحد بار الکتریکی است). مؤلفه‌ی حرکت تولید شده بوسیله میدان الکتریکی، سرعت سوق، v_n ، نامیده می‌شود. تغییر اندازه حرکت الکترون در یک زمان آزاد میانگین، با رابطه زیر داده می‌شود:

$$\Delta \vec{P} = \vec{F} \Delta t \Rightarrow m_n v_n = -qE \tau_c \quad (1-3)$$

$$v_n = -\frac{q\tau_c}{m_n} E = -\mu_n E \quad (1-4)$$

μ_n ، تحرک الکترون نامیده می‌شود و هم‌ارز با μ_p ، تحرک حفره است. هنگامی که میدان الکتریکی به یک نیمه‌رسانا اعمال می‌شود، الکترون‌ها و حفره‌ها، برای کاهش انرژی پتانسیل، جریان پیدا می‌کنند. هنگامی که نیمه‌رسانای نوع n با مساحت سطح مقطع A در میدان الکتریکی واقع شود و جریان الکترون، I_n باشد، چگالی جریان الکترونی با رابطه زیر داده می‌شود:]

$$J_n = \frac{I_n}{A} = -nqv_n = nq\mu_n E \quad (1-5)$$

به همین ترتیب چگالی جریان حفره، J_p ، تعریف می‌شود. چگالی جریان نهایی، ناشی از میدان الکتریکی، که از جمع چگالی جریان الکترون‌ها و حفره‌ها حاصل می‌شود، جریان سوق^۳ نام دارد:

$$J = J_n + J_p = (nq\mu_n + pq\mu_p)E = \sigma E \quad (1-6)$$

۱- Mobility

۱- τ_c

۲- Drift current

σ رسانایی نامیده می‌شود. باید توجه داشت که، اگر چه الکترون‌ها و حفره‌ها در خلاف جهت یکدیگر حرکت می‌کنند، اما با توجه به اینکه علامت آنها نیز مخالف هم است، جهت جریان ناشی از آنها یکسان است. هنگامی که یک تغییر فضایی در تراکم الکترون‌ها در نیمه‌رسانا بوجود می‌آید، الکترون‌ها از ناحیه با تراکم بالا، به سمت تراکم کمتر جریان پیدا می‌کنند. این جریان، جریان پخش^۱ نام دارد. با فرض یک بعدی بودن، الکترون‌ها از راست به چپ جریان پیدا می‌کنند و آهنگ چگالی جریان الکترونی بر مساحت واحد، بصورت زیر داده می‌شود:

$$F = - D_n \frac{dn}{dx} \quad (1-7)$$

D_n ضریب پخش الکترونی است و با رابطه انیشتین داده می‌شود $\mu_n = (kT/q) \frac{dn}{dx}$ و D_n گرادیان تراکم الکترون‌ها در یک بعد است. بنابراین چگالی جریان پخش الکترون از رابطه زیر بدست می‌آید: [۱۳]

$$J_n = q D_n \frac{dn}{dx} \quad (1-8)$$

جریان پخش حفره‌ها $J_p = q D_p \left(\frac{dn}{dx} \right)$ نیز، به همین صورت تعریف می‌شود.

۴-۱- اثر فتوولتایی

پدیده‌ی تبدیل پرتو نوری به انرژی الکتریکی، اثر فتوولتایی (PV) نامیده می‌شود. دو قطعه‌ی مهم که بر اساس اثر فتوولتایی کار می‌کنند، سلول خورشیدی و آشکارساز نوری^۲ می‌باشند. هنگامی که یک فوتون با انرژی $h\nu$ که بزرگتر یا مساوی با گاف نواری E_g است، با یک نیمه‌رسانا برخورد می‌کند، جذب نور و در نتیجه تولید یک جفت الکترون-حفره می‌تواند رخ دهد. در شکل (۱-۳) این مطلب نشان داده شده است. به عبارت دیگر، به منظور تولید جفت‌ها در یک نیمه‌رسانای خاص، طول موج تابش برخوردی، باید کمتر از یک مقدار ویژه به نام طول موج قطع^۳ یا λ_c ، برای آن ماده باشد. همچنین، توانایی مواد برای جذب نور، به پارامتر دیگری به نام ضریب جذب^۴ یا α وابسته است. α واحد عکس طول دارد، به طوری که α^{-1} طول جذب مؤثر، نامیده می‌شود و اندازه‌ای از ضخامت ماده است که در آن فوتون برخوردی بوسیله‌ی نیمه‌رسانا جذب می‌شود. کسری از تابش

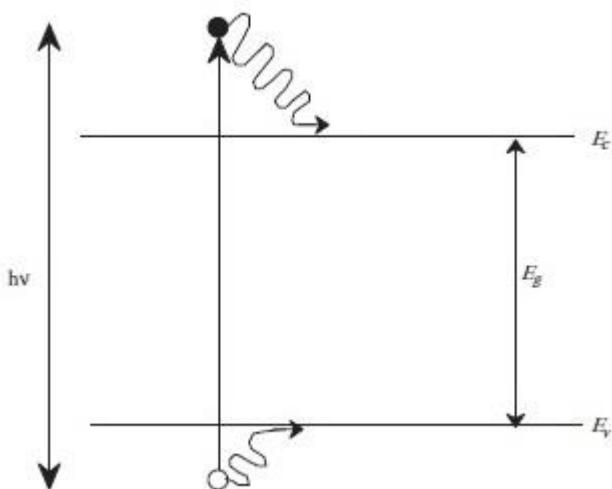
۱- Diffusion Current

۲- photo detector

۳- Cut off wavelength

۴- Absorption coefficient

برخوردی که در فاصله x از سطح جذب می‌شوند، با رابطه‌ی $[1 - \exp(-\alpha x)]$ داده می‌شود. اگر α بزرگتر شود، مقدار بیشتری از تابش برخوردی در فاصله x جذب می‌شود. برای نیمه‌رساناهای با گاف نواری غیرمستقیم، مقدار α ، در یک انرژی فوتونی خاص (معمولاً برای مواد با E_g بزرگتر)، کمتر از نیمه‌رساناهایی با گاف نواری مستقیم است. این نشان می‌دهد، در یک انرژی فوتونی داده شده، برای جذب نور لایه نازک‌تری از نیمه‌رسانای مستقیم، مانند ZnO، نسبت به نیمه‌رسانای غیرمستقیم، مانند Si لازم است.



شکل (۱-۳) = جذب اپتیکی در نیمه‌رسانا

نتیجه اینکه، انرژی خورشیدی از جمله منابع تجدیدپذیر انرژی است که در کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی مؤثر خواهد بود. شناخت نحوه عملکرد سلول‌های خورشیدی، نیازمند درک اصول حاکم بر رفتار نیمه‌رساناها می‌باشد. دو نوار متمایز انرژی الکترونی (نوار رسانش و نوار ظرفیت) و تحرک الکترون‌ها بین آن‌ها، منشأ بسیاری از خواص نیمه‌رساناها می‌باشد. هنگامی که نیمه‌رسانا در معرض نور قرار می‌گیرد، حامل‌های بار اضافی در آن تولید می‌شود. بازده یک سلول وابسته به تولید و جدایی حامل‌های بار است. از این رو، شناخت عوامل مؤثر در تولید، تفکیک و نیز بازترکیب حامل‌ها حائز اهمیت است.

۵-۱- باز ترکیب^۱

هنگامی که نیمه‌رسانا در معرض منبع نور قرار می‌گیرد، با تولید جفت الکترون-حفره، خاصیت رسانایی آن افزایش می‌یابد. این پدیده، اثر فتورسانایی^۲ نامیده می‌شود. حامل‌های بار اضافی تولید شده در نیمه‌رسانا، پس از خاموش شدن منبع نور، نابود می‌شوند. این فرآیند باز ترکیب نامیده می‌شود. در جامدات حجیم، پدیده باز ترکیب به صورت باز ترکیب مستقیم، غیرمستقیم (از طریق ترازهای انرژی جایگزیده در گاف انرژی ممنوع) و باز ترکیب اوژه^۳ انجام می‌شود. باز ترکیب مستقیم معمولاً در نیمه‌رسانای مستقیم غالب است. در یک نیمه‌رسانای مستقیم، هنگامی که یک الکترون از نوار رسانش سقوط می‌کند تا یک جای خالی در نوار ظرفیت را پر کند، انرژی به صورت یک فوتون نوری باز پس داده می‌شود. در حالی که در مورد نیمه‌رسانای غیرمستقیم، این نوع عبور، علاوه بر تغییر در انرژی، شامل تغییری در اندازه حرکت می‌باشد و اختلاف انرژی، به جای یک فوتون نوری، معمولاً به صورت گرما به شبکه بلوری داده می‌شود. بنابراین قطعات گسیل نوری عموماً از نیمه‌رساناهای مستقیم ساخته می‌شوند. همچنین، باز ترکیب اوژه هنگامی رخ می‌دهد که یک الکترون انرژی اضافی خود را به الکترونی دیگر، در نوار رسانش یا ظرفیت می‌دهد که منجر به برانگیخته شدن الکترون به سطح بالاتری از انرژی می‌شود. فرآیند اوژه هنگامی که تراکم حامل زیاد باشد، اهمیت پیدا می‌کند، بویژه در نیمه‌رساناهایی با گاف نواری کوچک.

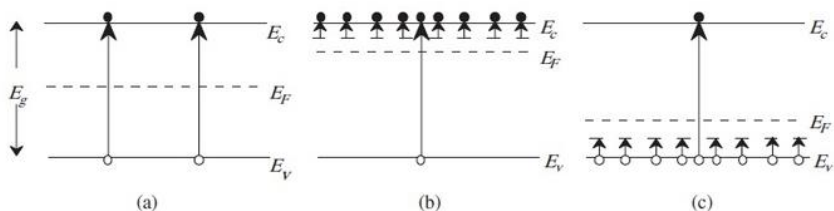
در نیمه‌رساناها، در دمای صفر کلون همه‌ی ترازهای انرژی در نوار ظرفیت بوسیله‌ی الکترون‌ها اشغال شده‌اند و در نوار رسانش، این ترازها خالی هستند. در دماهای بالاتر، برخی از پیوندها با ارتعاشات گرمایی شکسته می‌شوند. زیرا گاف نواری در محدوده ۰/۵-۳ است. این منجر به خلق الکترون‌ها در نوار رسانش و حفره‌ها در نوار ظرفیت می‌شود. در شکل (۱-۴) (a)، نوار انرژی برای نیمه‌رسانا نشان داده شده است و به ترتیب به عنوان لبه پایین نوار رسانش و بالای نوار ظرفیت مشخص شده‌اند. الکترون‌ها در نوار رسانش و حفره‌ها در نوار ظرفیت می‌توانند در رسانش سهم داشته باشند. در مقابل، در یک عایق، گاف نواری به اندازه‌ی بزرگ است که نوار رسانش حتی در دمای اتاق، خالی است. در یک رسانا، نوار رسانش به طور جزئی بوسیله الکترون‌ها پر شده، یا با نوار

^۱ - Recombination

^۲ - Photoconductive Effect

^۳ - Auger Recombination

ظرفیت هم‌پوشانی دارد. در نتیجه، گاف نواری وجود ندارد و مقاومت بسیار کم است. این مطلب اهمیت نیمه‌رساناها برای ساخت سلول خورشیدی را نشان می‌دهد.



شکل (۱-۴) - نمایش نوار انرژی (a) نیمه‌رسانای ذاتی (b) نیمه‌رسانای غیرذاتی با دهنده‌ها (c) نیمه‌رسانای غیرذاتی با پذیرنده‌ها

۱-۶- نیمه‌رساناهای ذاتی و غیرذاتی

هنگامی که الکترون‌ها و حفره‌های تولید شده در اثر ناخالصی در نیمه‌رسانا، بسیار کمتر از الکترون‌ها و حفره‌های تولید شده گرمایی باشد، آن را نیمه‌رسانای ذاتی^۱ می‌نامیم. تعداد الکترون‌ها در نوار رسانش و حفره‌ها در نوار ظرفیت در واحد حجم، به ترتیب با n و p نشان داده می‌شود و می‌توان آن‌ها را از چگالی حالت‌ها^۲ و تابع توزیع از رابطه‌ی (۲-۹) بدست آورد.

$$n = \int_0^{E_{top}} (\text{density of state}) \times (\text{probability an electron state is occupied}) dE \quad (1-9)$$

که E_C انرژی پایین نوار رسانش و E_V انرژی بالای نوار رسانش است. چگالی حالت‌ها از رابطه (۱-۱۰) بدست می‌آید و احتمال اشغال یک تراز انرژی، بوسیله تابع توزیع فرمی-دیراک از رابطه‌ی (۱-۱۱) داده می‌شود، بنابراین مقدار n از رابطه‌ی (۱-۱۲) محاسبه می‌شود.

$$N_C = 4\pi \left(\frac{2m_n}{h^2} \right)^{3/2} E^{1/2} \quad (1-10)$$

$$E(F) = \frac{1}{1 + e^{\frac{E - E_F}{KT}}} \quad (1-11)$$

$$n = 2 \left(\frac{2\pi m_n KT}{h^2} \right)^{3/2} \exp \left(-\frac{E_C - E_F}{KT} \right) = N_C \exp \left(-\frac{E_C - E_F}{KT} \right) \quad (1-12)$$

۱- intrinsic semiconductors

۲- density of state

که $E_C - E_F$ سطح فرمی^۱، K ثابت بولتزمن، T دمای مطلق، m_n^* جرم مؤثر الکترون، h ثابت پلانک و N_C چگالی مؤثر حالت‌های الکترونی، در نوار رسانش است.

به طور مشابه، تعداد حفره‌ها در نوار ظرفیت بدست می‌آید. (m_p^* جرم مؤثر حفره‌ها و N_V چگالی مؤثر حفره‌ها در نوار ظرفیت خواهد بود). پس می‌توان رابطه‌ی زیر را محاسبه کرد.

$$n.p = N_V N_C e^{\frac{E_V - E_C}{KT}} = N_V N_C e^{\frac{E_g}{KT}} = n_i^2 \quad (1-13)$$

که در آن، از این مطلب استفاده کردیم که اختلاف انرژی دو نوار ظرفیت و رسانش، گاف نواری، نامیده می‌شود. برای نیمه‌رسانای ذاتی ایده‌آل، در یک دمای متعادل، تعداد الکترون‌ها در نوار رسانش برابر با تعداد حفره‌ها در نوار ظرفیت است، که تراکم حامل ذاتی است. با استفاده از معادلات (۱-۱۲) و (۱-۱۳) می‌توان سطح فرمی (سطح فرمی به طور عام به عنوان انرژی بالاترین تراز اشغال شده بوسیله الکترون‌ها تعریف می‌شود) نیمه‌رسانای ذاتی را بصورت زیر محاسبه کرد.

$$E_F = \frac{E_C - E_V}{2} + \frac{KT}{2} \ln \frac{N_V}{N_C} \quad (1-14)$$

از آنجا که جمله دوم، بسیار کوچک‌تر از جمله اول است، سطح فرمی نزدیک به میانه گاف نواری قرار می‌گیرد. هنگامی که الکترون‌ها و حفره‌های تولید شده در اثر ناخالصی غیر قابل چشم‌پوشی باشند، نیمه‌رسانا را غیر ذاتی می‌نامیم. به عنوان مثال، تراکم حامل در سیلیکون، را مورد بررسی قرار می‌دهیم. هنگامی که اتم‌های گروه پنجم (مانند فسفر)، به عنوان ناخالصی به سیلیکون اضافه شوند، اتم فسفر با چهار اتم Si مجاور خود پیوند کووالانسی تشکیل می‌دهد. الکترون پنجم، پیوندی بسیار آزادانه با فسفر دارد و حتی در دمای اتاق یونیزه می‌شود، بنابراین یک الکترون رسانش با بار منفی محسوب می‌شود. در این مورد، Si نیمه‌رسانای نوع n و اتم فسفر، دهنده نامیده می‌شود. دهنده، یک اتم ثابت با بار مثبت است. تحت شرایط یونی‌زاسیون کامل، تراکم الکترون (حامل اکثریت) با N_D ، نشان داده می‌شود، که تراکم دهنده است. از آنجا که معادله برای نیمه‌رسانای غیر ذاتی، در شرایط تعادل گرمایی معتبر است، تراکم حفره (حامل اقلیت) با N_C نشان داده می‌شود و سطح فرمی از رابطه زیر بدست می‌آید.

^۱ - Fermi level

$$E_C - E_F = KT \ln \frac{N_C}{N_D} \quad (1-15)$$

در این مورد، سطح فرمی بوسیله‌ی تراکم دهنده‌ها کنترل می‌شود و نزدیک به انتهای نوار رسانش است. به طور مشابه، هنگامی که اتم‌های گروه سوم (مانند بور) به عنوان ناخالصی به Si اضافه شوند، پیوندهای کووالانسی که اتم بور با چهار Si همسایه تشکیل می‌دهد، یک حفره رسانش با بار مثبت بوجود می‌آورد. در این مورد Si نیمه‌رسانای نوع p و اتم بور، پذیرنده نامیده می‌شود. تراکم حفره (حامل اکثریت) با N_A نشان داده می‌شود، که تراکم اتم‌های پذیرنده است. پذیرنده، یک اتم ثابت با بار منفی است. تراکم الکترون (حامل اقلیت) با N_V نشان داده می‌شود. سطح فرمی از رابطه زیر بدست می‌آید.

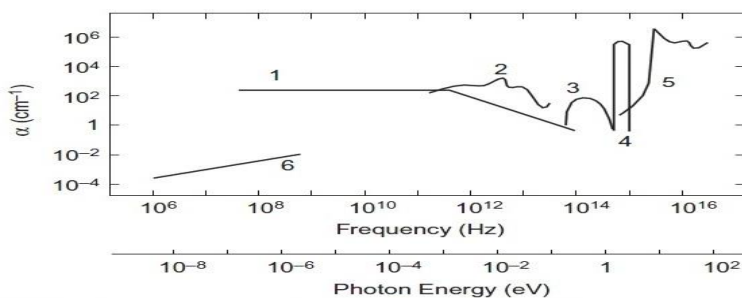
$$E_F - E_V = KT \ln \frac{N_V}{N_A} \quad (1-16)$$

۷-۱- فرآیندهای جذب اپتیکی

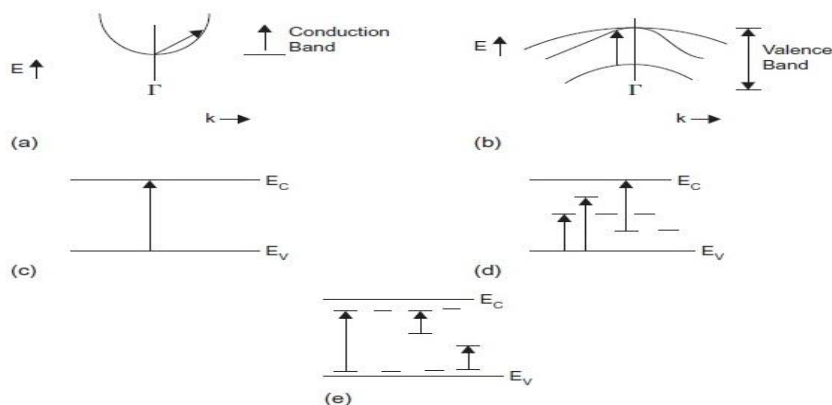
فرض کنید یک نیمه‌رسانا در معرض نور خورشید واقع شود. هنگامی که انرژی فوتون کوچک‌تر از گاف نواری نیمه‌رسانا باشد، نور از ماده عبور خواهد کرد و نیمه‌رسانا برای نور شفاف خواهد بود. البته، در چنین شرایطی بازتاب نیز امکان‌پذیر است. هنگامی که انرژی فوتون، بزرگتر از گاف نواری باشد، فوتون برخوردی به صورت‌های گوناگون جذب خواهد شد. احتمال جذب فوتونی با انرژی، با ضریب جذب تعیین می‌شود. (خاصیت ماده مستقل از هندسه جسم است). در شکل (۱-۵) نموداری از فرآیندهای مختلف جذب تابش الکترومغناطیس در جامدات و محدوده اثر آن‌ها بر حسب ضریب جذب ماده و فرکانس نور نشان داده شده است. فرآیند ۱ در شکل مربوط به گذارهای الکترون (یا حفره) درون یک نوار، در نتیجه جذب انرژی فوتونی می‌باشد. نموداری از این گذارهای درون نواری^۱ در شکل (۱-۶) (b) و شکل (۱-۶) (a)، نشان داده شده است. این نوع گذار در فلزات و نیمه‌رساناهایی که تراکم حامل‌ها در یک نوار، قابل ملاحظه باشد از اهمیت زیادی برخوردار است. فرآیند ۲ در شکل (۱-۶) مربوط به جذب فوتونی است، بدین معنی که نور با برانگیختن مدهای فوتونی در ماده جذب می‌شود. الکترون‌ها در این فرآیند درگیر نمی‌شوند. به دلیل انرژی‌های کمی که فوتون‌ها دارند، این فرآیند جذب در محدوده فروسرخ طیف نور رخ می‌دهد. فرآیند ۳ همه انواع

^۱ - transitions intraband

گذار ناشی از جذب فوتون، بین ترازهای موجود در گاف نواری و همچنین بین ترازهای موجود در گاف و یک نوار را شامل می‌شود. شکل (۱-۶) (e) و شکل (۱-۶) (d) ترازهای انرژی در گاف نواری نیمه‌رسانا می‌تواند به دلیل وجود ناخالصی‌ها در نیمه‌رسانا بوجود آید. به این ترازهای انرژی الکترونی، حالت‌های جایگزیده ناشی از اتم‌های دهنده یا پذیرنده می‌گویند. فرآیند ۴ مربوط به جذب فوتون همراه با تولید اکسایتون‌ها (جفت‌های الکترون-حفره مقید) است. جذب در مواد ارگانیک، از قبیل مولکول‌های کوچک رنگ‌ها در سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای^۲ و جاذب‌های پلیمری در سلول‌های خورشیدی ارگانیک، عموماً یک فرآیند اکسایتونی است. همچنین در نانو ذرات، اکسایتون‌ها نقش کلیدی در جذب دارند.



شکل (۱-۵) - نمودار شماتیک از گستره فرآیندهای جذب اپتیکی در جامدات



شکل (۱-۶) - نمودار گذار الکترون بین حالت‌های تک الکترونی در نتیجه جذب نور

۲- exciton

۳- dye-sensitized solar cells