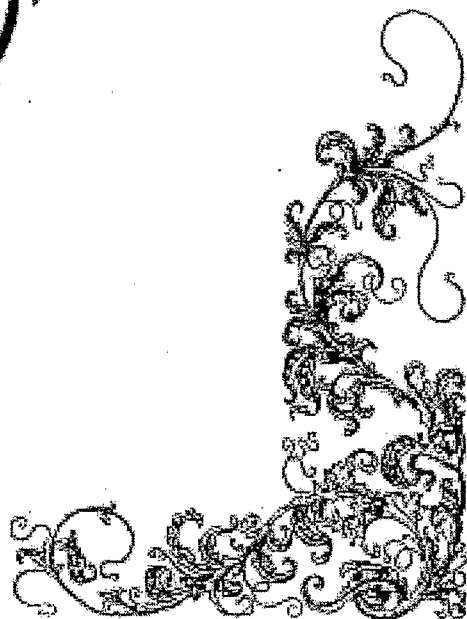
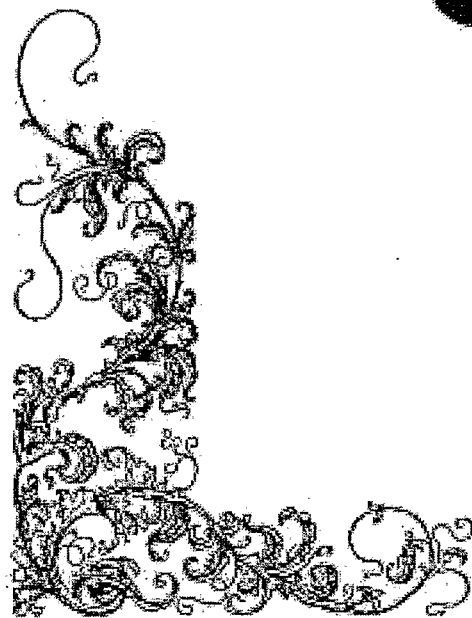


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ  
الْحَمْدُ لِلَّهِ الَّذِي  
خَلَقَ السَّمَوَاتِ وَالْأَرْضَ  
وَالَّذِي يُضَوِّبُ الْمَوْتِ  
وَالَّذِي يُحْيِي الْمَوْتِ  
وَالَّذِي يُخْرِجُ الْمَوْتِ  
وَالَّذِي يُخْرِجُ الْمَوْتِ  
وَالَّذِي يُخْرِجُ الْمَوْتِ



دانشکده علوم

گروه فیزیک

(گرایش حالت جامد)

بررسی رفتار آشکار ساز نوری فلز- نیمه هادی- فلزیس دریچه دار شده  
نسبت به موقعیت پالس نوری تابیده شده بر سطح آن

از

وحید مصلی نژاد

استاد راهنما:

۱۳۸۶ / ۷ / ۲۸

دکتر حمید رضا مشایخی

(تیر ۸۶)



۷۹۸۴۲

تقدیم به خانوادهٔ مهر بانم که با تمام وجود دوستشان  
می دارم

۱۳۸۶ / ۷ / ۲۸

## تشکر و قدردانی

سپاس و ستایش خداوند را که حمد و ثنا مخصوص اوست.

در ابتدا از خانوادهٔ مهربانم به ویژه پدر و مادر عزیزم تشکر می‌کنم که با یاری‌های همیشگی و بی‌دریغ خویش مرا در جهت علم‌آموزی تشویق و تقویت نموده‌اند. پس از آن از استاد راهنمای خویش آقای دکتر مشایخی به سبب راهنمایی‌های ارزنده و کمک‌های فراوان در کل دوره و تلاش برای به نتیجه رسیدن پروژه کمال تشکر را دارم. همچنین آقایان احسان منبری، رضا محمد زاده و مهدی بی‌درنگ به سبب کمک‌های فکری و معنوی فراوان تشکر و قدردانی می‌نمایم.

همچنین از آقایان دکتر باطبی و دکتر رحیم پورکه عهده دار داوری این پایان‌نامه بودند متشکرم.

## فهرست مطالب

عنوان.....	صفحه.....
چکیده فارسی.....	د.....
چکیده انگلیسی.....	ذ.....
فصل اول: مقدمه.....	۱.....
فصل دوم: پیش زمینه.....	۳.....
۱-۲- توصیف تئوری نواری.....	۳.....
۲-۲- نیمه هادی ها و عوامل رسانش در آنها.....	۴.....
۳-۲- مکانیزم های انتقال.....	۵.....
۱-۳-۲- جریان سوق.....	۵.....
۲-۳-۲- جریان پخش.....	۵.....
۴-۲- نیمه رساناهای گاف مستقیم و غیر مستقیم.....	۶.....
۵-۲- نیمه هادی ذاتی و غیر ذاتی.....	۸.....
۶-۲- چگالی حالتها و سطح فرمی.....	۱۰.....
۷-۲- پیوندگاه.....	۱۲.....
۸-۲- معادلات اساسی در پیوندگاه $p-n$ .....	۱۳.....
۹-۲- اعمال ولتاژ به پیوندگاه.....	۱۵.....
۱۰-۲- تزریق و ترابرد حاملها با پیش ولت در $p-n$ .....	۱۷.....
۱۱-۲- تولید، باز ترکیب و تزریق حامل ها.....	۲۱.....

۲۲..... ۱۲-۲- معادلات انتقال

۲۳..... ۱۳-۲- زمان پاسخ قطعه

۲۵..... فصل سوم: آشکار ساز های نوری

۲۵..... ۱-۳- مقدمه

۲۵..... ۲-۳- انواع آشکار ساز ها

۲۵..... ۱-۲-۳- فتورسانا

۲۷..... ۲-۲-۳- آشکار ساز pin

۲۸..... ۳-۲-۳- آشکار ساز بهمنی

۳۰..... ۴-۲-۳- آشکار ساز فلز- نیمه هادی-فلز

۳۱..... ۵-۲-۳- آشکار ساز های نوری فلز- نیمه هادی- فلز پس دریچه دار شده

۳۲..... ۳-۳- منبع پالس نوری

۳۴..... ۴-۳- چند آزمایش تجربی

۳۴..... ۱-۴-۳- خصوصیات I-V آشکار ساز

۳۵..... ۲-۴-۳- پاسخ قطعه به یک پالس اپتیکی

۳۶..... ۳-۴-۳- وابستگی جریان به مکان مرکز پالس

۳۷..... ۵-۳- عمق نفوذ در نمونه

۳۹..... فصل چهارم: مدل سازی جریان الکتریکی آشکار ساز نوری BGMSM

۳۹..... ۱-۴- مقدمه

۴۰..... ۲-۴- توزیع آرایش و طراحی نقاط شبکه

۴۲..... ۳-۴- معادله پخش

۴۳..... ۴-۴- جدا سازی به روش دیفرانسیل محدود

.....	۴-۵-۰- روش حل	۴۵
.....	۴-۵-۱- روش صریح	۴۵
.....	۴-۵-۲- روش تلویحی	۴۶
.....	۴-۵-۳- روش کرانک- نیکلسون	۴۸
.....	۴-۶- معادلات سهموی در دو بعد	۵۰
.....	۴-۶-۱- روش ADI	۵۰
.....	۴-۶-۲- روش دو بعدی تلویحی	۵۱
.....	۴-۷- شرایط مرزی	۵۳
.....	۴-۸- شرایط اولیه	۵۴
.....	۴-۹- روش حل	۵۶
.....	۴-۱۰- جریان الکتریکی	۵۸
.....	۴-۱۱- تغییر مکان مرکز پالس نسبت به مرکز ناحیه فعال	۶۱
.....	۴-۱۲- تغییر پهنای فضایی پالس	۶۴
.....	فصل پنجم: جمع بندی و نتیجه گیری	۶۵
.....	نتایج	۶۵
.....	پیشنهاد برای ادامه کار	۶۸
.....	مراجع	۶۹
.....	پیوست	۷۱

## فهرست جدول ها

جدول ۴-۱: پارمترهای موثر در میزان تزریق اولیه حامل ها ..... ۵۵



## فهرست شکل ها

عنوان	صفحه
شکل ۱-۲: شکافتگی تراز های انرژی بر حسب کاهش فاصله مولکولها در نیمه هادی.....	۳
شکل ۲-۲: (الف) بلور گاف مستقیم (ب) بلور گاف غیر مستقیم.....	۷
شکل ۲-۳: ساختار بلوری یک نیمه هادی چهار ظرفیتی با (الف) یک اتم نا خالص سه ظرفیتی (پذیرنده) و (ب) یک اتم نا-خالص پنج ظرفیتی (بخشنده).....	۹
شکل ۲-۴: توزیع فرمی دیراک در دما های متفاوت.....	۱۱
شکل ۲-۵: نمودار انرژی پیوندگاه (الف) ساختار نواری نیمه هادی ها قبل از اتصال (ب) ساختار نواری پیوند گاه بعد از اتصال دو بلوک نیمه هادی در نواحی مختلف.....	۱۵
شکل ۲-۶: نمودار پتانسیل ساخت در یک پیوندگاه <b>p-n</b> .....	۱۶
شکل ۲-۷: تغییرات ارتفاع سد در اثر اعمال ولتاژ خارجی (الف) ولتاژ موافق (ب) ولتاژ مخالف.....	۱۶
شکل ۲-۸: پیوندگاه $p-n$ با اعمال پیش ولت موافق (الف) توزیع حامل های اقلیتی (ب) جریان حامل های اقلیتی (ج) جریان الکترون و حفره.....	۲۰
شکل ۳-۱: نمونه ای از فتو رسانا همراه با طریقه اتصال به مدار خارجی.....	۲۶
شکل ۲-۳: (الف) آشکار ساز نوری <b>pin</b> (ب) مقطع از نوار انرژی <b>pin</b> در پیش ولت مخالف (ج) توان اپتیکی بر حسب طول در ناحیه ذاتی.....	۲۷
شکل ۳-۳: آشکار ساز بهمنی. (الف) آشکار ساز <b>pin</b> در بایاس معکوس. (ب) الکترون و حفره های اولیه و ثانویه.....	۲۹
شکل ۳-۴: الف نمونه ای از <b>MSM</b> (ب) نمودار نوار انرژی (ج) نمودار <b>I-V</b> یک <b>MSM</b> .....	۳۰
شکل ۳-۵: آشکار ساز نوری <b>BGMSM</b> همراه با چگونگی اتصال به مدار خارجی.....	۳۲
شکل ۳-۶: نمودار تجربی <b>I-V</b> برای <b>BGMSM</b> .....	۳۵
شکل ۳-۷: نمونه ای از پاسخ آشکار ساز نوری <b>BGMSM</b> به پالس اپتیکی با اعمال ولتاژ به اتصالات بالایی و پایینی.....	۳۶

- شکل ۳-۸: نمودار تجربی بیشینه جریان خروجی یک پالس نوری بر حسب مکان مرکز پالس نوری..... ۳۷
- شکل ۴-۱: انتخاب ابعاد یک آشکار ساز نوری..... ۴۰
- شکل ۴-۲: شبکه بندی یک سطح مکعبی ..... ۴۱
- شکل ۴-۳: سطح مقطع یک آشکار ساز نوری BGMSM ..... ۴۱
- شکل ۴-۴: نمودار توضیح فضایی آرایش در BGMSM ..... ۴۱
- شکل ۴-۵: طرحی از پنج نقطه یک شبکه مقارن..... ۴۴
- شکل ۴-۶: انواع مرزها در آشکار ساز نوری ..... ۵۴
- شکل ۴-۷: نمایشی از تولید حاملهای نوری در ناحیه فعال  $\sigma = 0.5 \times 10^{-1}$  ..... ۵۵
- شکل ۴-۸: (الف) ماتریس مقادیر اولیه (ب) ماتریس ضرائب ..... ۵۶
- شکل ۴-۹: چگونگی پخش حامل ها پس از گذشت زمان (الف) پخش توزیع حامل ها (ب) تغییرات ماتریس مقادیر اولیه..... ۵۷
- شکل ۴-۱۰: مقطعی از پخش حامل ها (الف) مقطعی با دو مرز دیریکله (ب) مقطعی با دو مرز نیومن ..... ۵۷
- شکل ۴-۱۱: تغییرات چگالی حامل ها در کناره یک اتصال، خط پیوسته الکترون و خط غیر پیوسته حفره ..... ۶۰
- شکل ۴-۱۲: جریان الکترونی و حفره ای در یک اتصال (خط کم رنگ مربوط به الکترون است) ..... ۶۰
- شکل ۴-۱۳: تولید حامل ها در تابش پالس اپتیکی (الف) جابجایی به سمت اتصال بالایی (ب) جابجایی به سمت اتصال پایین..... ۶۱
- شکل ۴-۱۴: کاهش جریان عبور کرده از اتصالی (دور شونده) که پالس از آن دور می شود..... ۶۲
- شکل ۴-۱۵: افزایش اولیه و کاهش جریان عبور کرده از اتصالی (نزدیک شونده) که پالس به سمت آن نزدیک می شود..... ۶۲
- شکل ۴-۱۶: نمودار عددی ماکزیمم جریان عبوری از مدار خارجی بر حسب مکان مرکز پالس ..... ۶۳
- شکل ۴-۱۷: تغییر جریان عبوری بر اثر تغییر پهنایی پالس..... ۶۴
- شکل ۴-۱۸: نمودار های بیشینه جریان الکتریکی کل بر حسب تغییر مکان مرکز پالس به یک سو در پهناهای فضایی متفاوت..... ۶۵

بررسی رفتار آشکار ساز نوری فلز- نیمه هادی- فلزیس دریچه دار شده نسبت به موقعیت پالس نوری تابیده شده بر سطح آن  
وحید مصلی نژاد

آشکار ساز نوری فلز-نیمه-رسانا- فلز پس دریچه دار شده (BGMSM) از دو اتصال شاتکی در بالای ناحیه فعال و یک اتصال دیگر به ناحیه زیرین آن، به منظور جمع آوری حفرهای سنگین، تشکیل می شود. در وضعیت تعادل (یعنی حالتی که هیچگونه ولتاژی به هیچکدام از اتصالات اعمال نشده است)، اگر قطر فضایی پالس نوری تابیده شده بر سطح فعال آشکار ساز قابل مقایسه با فاصله بین دو اتصال باشد، آنگاه پاسخ آشکار ساز وابسته به موقعیت پالس نوری است. در این حالت اگر نقطه مرکزی پالس نوری (نقطه ای با بیشینه شدت) را از مرکز ناحیه فعال به سمت هر یک از اتصالات حرکت دهیم پاسخ آشکار ساز نه تنها از نظر دامنه بزرگی بلکه از نظر قطبیت هم تغییر خواهد کرد. با توجه به اینکه هیچگونه ولتاژی به این قطعه اعمال نشده است لذا مکانیزم جریان الکتریکی، مکانیزم پخش خواهد بود. در این پایان نامه قصد بر این است که با بدست آوردن معادلات دیفرانسیل حاکم بر قطعه (معادلات پخش) و حل عددی آنها این رفتار قطعه را توصیف نماییم.

کلید واژه: آشکار ساز فلز نیمه هادی فلز- مکانیزم پخش- حل عددی- پالس اپتیکی

## Abstract

Study of the response of the BGMSM PD (Back-gated metal semiconductor metal) photo-detector to optical pulse falling across the active region

Mosallanejad vahid

The Back Gated Metal-Semiconductor-Metal (BGMSM) is made of two Schottky contacts on the top and one another underneath of an active region which acts as a collector of heavy holes. In equilibrium condition, (i.e, no voltages on any contacts), the photodetector's response is dependent on the position of the optical pulses impinging on its active region if the spatial diameter of optical beam is comparable with the distance between the two top contacts. In this situation, if the pulse central point (the most intense point) is displaced from the center of the active region, then its electrical response changes not only in amplitude but also in polarity. Since there is no applied voltage on the device, it can be concluded that the governing mechanisms for electrical current is the diffusion mechanisms. In this dissertation, the intension is to obtain the governing differential equations and its numerical solution in order to describe this behavior of the device.

Key word: Metal Semiconductor Metal photodetector -diffusion mechanism- numerical solution-optical pulse.

# فصل اول

## مقدمه

سیستم تبادل اطلاعات نوری یا مخابرات نوری یکی از بزرگترین پیشرفت های اخیر بشر است. چنین سیستمی از سه بخش کلی فرستنده، محیط انتقال و گیرنده تشکیل شده است. نقش فرستنده تبدیل اطلاعات به پالس های نوری با استفاده از یک منبع مناسب نور لیزر و یا دیود های نوری (LED) است. محیط انتقال انواع فیبر های نوری هستند که نیازهای یک سیستم را از نظر اتلاف و پراکندگی برآورده نمایند و بتوانند پهنای باند وسیعی را در اختیار سیستم قرار دهند. آخرین بخش این سیستم گیرنده ها می باشند که اطلاعات نوری را به اطلاعات الکتریکی تبدیل می کنند. این تبدیل توسط قطعه ای به نام آشکار ساز نوری انجام می شود. آشکار ساز های نوری بسته به نوع کاربرد آن دارای طراحی و ساختار متفاوت می باشند. آگاهی به شیوه کار هر کدام از این آشکار سازها نیاز به داشتن اطلاعات بنیادین درباره قطعات نیمه هادی می باشد که در فصل دوم به آن پرداخته شده است. آشکار سازهای نوری می توانند به عنوان مولد های انرژی مانند فوتو کاندکتورها و یا به عنوان آشکار ساز های سریع مانند pin و MSM<sup>1</sup> و یا به عنوان تقویت کننده پالسهای نوری در یک سیستم مورد استفاده قرار بگیرند. در فصل سوم طرز کار این گونه آشکارسازها بحث شده و با ساخت یک نمونه از آنها، BGMSM<sup>2</sup>، بیشتر آشنا می شویم. آشکار ساز های نوری MSM به دلیل ساختار ساده شان و ظرفیت خازنی پایین از اهمیت خاصی در سیستم های مخابرات نوری برخوردار هستند. آشکار ساز نوری BGMSM که نوع بیهیسه سازی شده MSM می باشد، دارای پتانسیل پاسخ گویی با سرعت بالا به پالسهای نوری می باشد. در عمل، هنگامی که فاصله بین اتصالات قابل مقایسه با پهنای فضایی پالس نوری تابیده شده بر سطح آن باشد آنگاه شکل پالس الکتریکی وابسته به موقعیت مکانی پالس نوری تابیده شده بر سطح آن می باشد. در تجربه مشاهده شده است که در وضعیتی که هیچگونه ولتاژی به قطعه اعمال نشده است و مرکز پالس نوری (نقطه ماکزیمم پالس گوسی) به وسط ناحیه فعال (وسط دو اتصال) تابیده می شود پاسخ قطعه به پالس نوری تقریباً صفر است [۳۱]. با جابجایی پالس نوری به سمت یکی از اتصالات نه تنها دامنه پالس الکتریکی تغییر می کند بلکه قطبیت آن نیز عوض می شود. با توجه به اینکه پاسخ قطعه در این حالت فقط تحت تاثیر مکانیزم پخش می باشد لذا بنظر می رسد با حل معادلات

<sup>1</sup> Metal-semiconductor-metal photodetector

<sup>2</sup> Back gated metal-semiconductor-metal photodetector

حاکم بر این قطعه در این حالت بتوان این رفتار را توصیف نمود. بنابراین در فصل چهارم معادلات حاکم بر قطعه را بدست آورده و شیوه های متداول برای حل عددی آن مطرح می گردد. با استفاده از نرم افزار متلب<sup>1</sup> معادلات پخش بصورت عددی حل شده و نتایج آن در فصل پنجم ارایه می گردد. نتایج عددی بدست آمده از محاسبات عددی گویای این مطلب می باشد که فرضیه مکانیزم پخش حاکم بر رفتار آشکار ساز علیرغم تقریب ها و ساده سازیها مکانیزم قابل قبول برای این رفتار آشکار ساز می باشد.

---

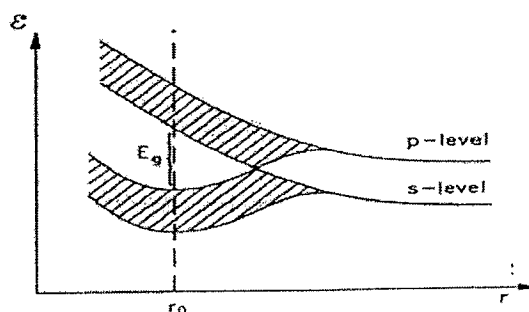
<sup>1</sup> MATLAB

## فصل دوم

### پیش زمینه

#### ۱-۲- توصیف تئوری نواری

یک بلور شامل تعداد زیادی الکترون در واحد حجم می شود. تعداد زیادی از آنها در پوسته های داخلی اتمهای خود هستند و نیروی شدیدی بین آنها و هسته هایشان برقرار است. این الکترونها داخلی به وسیله الکترونها خارجی از اثرات اتمهای دیگر محافظت می شوند. از طرف دیگر در پوسته های خارجی الکترونها خارجی قرار دارند و چون اندر-کنش کولنی به وسیله الکترونها پوسته های داخلی استتار می شود، پتانسیل ربایشی کمتری بر آنها اثر می کند. وقتی تعداد زیادی اتم تشکیل بلور دهند خواص الکترونها خارجی با زمانی که به صورت تک مولکول هستند بسیار متفاوت است. الکترونها خارجی دیگر مقید نیستند بلکه در تمامی شبکه بلور گسترده می شوند. همچنین در نتیجه اندرکنش بین اتمی تبهگنی برای الکترونها موجود در هر تراز از بین رفته تراز ها شکافته می شود و هر قدر که تعداد اتمهای تشکیل دهنده بلور زیادتر باشد این شکافتگی بیشتر و بیشتر می شود. از آنجا که اتمهای داخلی به هسته قویاً پیوند خورده اند شکافتگی برای تراز های خارجی هر اتم بیشتر است. تراز های شکافته شده تشکیل یک نوار را می دهند که به آنها نوار انرژی می-گویند. این نوارهای انرژی به وسیله گافهای انرژی از هم جدا می شوند. شکل ۱-۲ شکافتگی تراز ها را در یک بلور نشان می دهد [۲۱].



شکل ۱-۲: شکافتگی تراز های انرژی بر حسب کاهش فاصله مولکولها در نیمه هادی

در کل بالاترین نوار را نوار هدایت می گویند که شامل الکترونهاى آزاد است و نوارهای پایینی را نوار ظرفیت می گویند و شامل الکترونهاى در بلور می شود که به اتم ها مقیدند. می توان توصیف کیفی را با حل معادله شرودینگر برای الکترون در یک پتانسیل تناوبی  $w(r) = w(r+a)$  و با در نظر گرفتن خواص تقارنی موجود در شبکه

$$\left[ \frac{-\hbar^2}{2m} \nabla^2 + w(r) \right] \psi(r) = \epsilon \psi(r) \quad (1-2)$$

بررسی کرد. جواب معادله ویژه مقاداری بالایک تابع تناوبی  $\psi_{nk}(r)$  است که تابع بلوخ نامیده می شود.

$$\psi_{nk}(r) = e^{ik \cdot r} U_{nk}(r) \quad (2-2)$$

که  $U_{nk}(r)$  یک تابع تناوبی است [۳۱].

تاثیر نوع اتم بر  $\psi_{nk}(r)$  در عبارت  $U_{nk}(r)$  نهفته است.  $k$  بردار شبکه وارون در درون منطقه اول بریلون است.

همچنین مفاهیم حفره، جرم موثر، گاف مستقیم و گاف غیر مستقیم در رابطه مستقیم با این تئوری است که در قسمتهای بعد به آنها اشاره می شود.

## ۲-۲- نیمه هادی ها و عوامل رسانش در آنها

معمولا نیمه رسانا را به عنوان عایقی با انرژی گاف  $E_g$  کوچک می شناسند. عناصری مانند  $Si$ ،  $Ge$  از گروه چهار جدول تناوبی و همچنین ترکیبات آلایزی مثل  $GaAs$  و... دارای چنین خاصیتی هستند. چنانچه الکترونی انرژی لازم برای حضور در نوار رسانش را (از انرژی گرمایی موجود در شبکه) کسب کنند، می تواند در فرایند رسانش شرکت کند درحالت پایا و در شرایط عادی در دماهای بالاتر از صفر کلوین کسری از الکترون ها ی موجود در بلور دارای چنین انرژی هستند. امکان دارد که الکترونها به وسیله یک عامل خارجی تحریک شوند و با کسب انرژی از نوار ظرفیت به نوار هدایت بروند. زمانی که الکترونها از نوار ظرفیت به نوار هدایت بروند پشت سر خود یک جای خالی در نوار ظرفیت باقی می گذارند. این جای خالی را حفره می گویند. عوامل تحریک می تواند شامل گرما، میدان الکتریکی، تابش نور (برخورد فوتون) و باشد. به علت کوچکی گاف در بلور نیمه هادی امکان گذار برای الکترون به طور قابل توجهی بالا است. در چنین شرایطی هم الکترون در نوار رسانش و هم حفره در نوار ظرفیت در فرایند رسانش شرکت می کنند. به حفره بار الکتریکی معادل با الکترون ولی با علامت مثبت نسبت داده می شود. همانطور که حرکت الکترون در جهت مشخصی باعث ایجاد جریان می -



شود حرکت حفره هم باعث به وجود آمدن جریان درخلاف جهت حرکت الکترون خواهد شد. به علت برهم کنش الکترون و حفره با شبکه حرکت الکترون در نوار رسانش نسبت به الکترون آزاد کندتر و حرکت الکترون در نوار رسانش سریعتر از حرکت حفره در نوار ظرفیت است. بنابراین به صورت ساده جرم در نظر گرفته شده برای حفره سنگین تر خواهد شد و به آن جرم موثر حفره  $m_h$  می گویند. جرم الکترون در شبکه نیز کمتر از جرم الکترون آزاد است آن را جرم موثر الکترون  $m_e$  می نامند [۱].

### ۲-۳- مکانیزم های انتقال

عوامل رسانش ( الکترون و حفره ) در اثر دو نوع پدیده سوق و پخش باعث شارش جریان الکتریکی می شود. پس دو نوع جریان سوق و پخش برای الکترون یا حفره داریم.

#### ۲-۳-۱- جریان سوق

ترابرد حامل ها تحت تاثیر یک میدان الکتریکی اعمال شده را جریان سوق می نامند. اگر میله ای دارای  $n$  الکترون در واحد حجم باشد چگالی شارش جریان از رابطه زیر بدست می آید.

$$J_n = -qnv_d = q\mu_n nE \quad (۳-۲)$$

که در آن  $q$  قدر مطلق بار الکتریکی،  $v_d$  سرعت الکترون،  $E$  میدان الکتریکی و  $\mu_n$  تحرک الکترونها است.

برای حفره ها هم به تناسب جریان سوقی به شکل زیر وجود دارد.

$$J_p = q\mu_p pE \quad (۴-۲)$$

$\mu_p$  تحرک حفره و  $p$  چگالی حفره است [۱].

#### ۲-۳-۲- جریان پخش

ساز و کار مهم دیگر برای انتقال حامل ها پدیده پخش است. پخش حامل ها هنگامی صورت می گیرد که یک تغییر فضایی در غلظت حامل های وجود داشته باشد. چون حامل ها سعی می کنند از سمت تراکم زیاد به سمت تراکم کم حرکت کند. طبق قانون فیک چگالی جریان پخش برای الکترون و حفره به صورت زیر بدست می آید.

$$J_n = qD_n \nabla n \quad (۵-۲)$$

$$J_p = -qD_p \nabla p \quad (6-2)$$

که  $q$  قدر مطلق بار الکتریکی واحد،  $D_n$  و  $D_p$  ثابت های پخش الکترون و حفره هستند.

ثابت های پخش توسط رابطه انیشتین با تحرک در ارتباطند.

$$\frac{D_p}{\mu_p} = \frac{D_n}{\mu_n} = \frac{KT}{q} \quad (7-2)$$

در کل جریان الکترونی و حفره ای در یک بعد به صورت زیر خواهد بود

$$J_n(x) = q\mu_n n(x)E(x) + qD_n \frac{dn(x)}{dx} \quad (8-2)$$

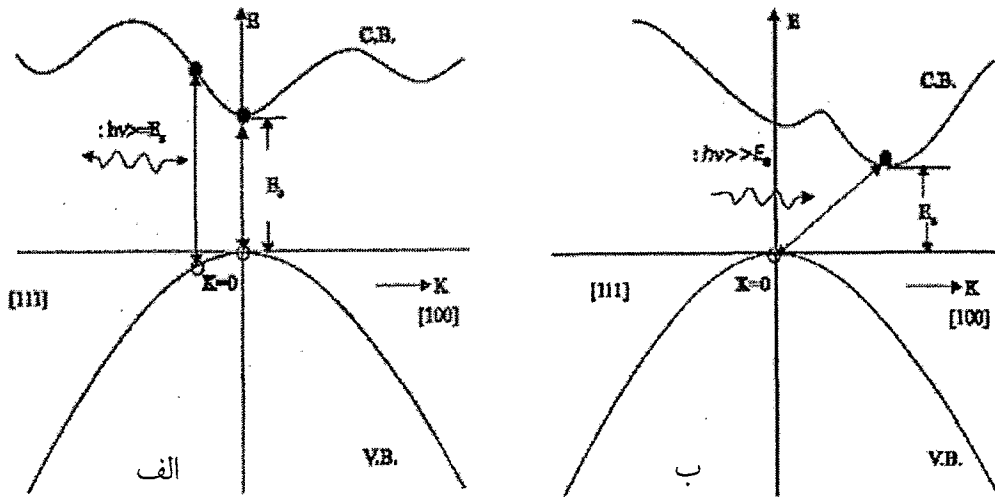
$$J_p(x) = q\mu_p p(x)E(x) - qD_p \frac{dp(x)}{dx} \quad (9-2)$$

جریان کل شامل مجموع این دو جریان می شود [۱۰]

$$J = J_n + J_p \quad (10-2)$$

## ۲-۴- نیمه رساناهای گاف مستقیم و غیر مستقیم

وقتی برای یک نیمه هادی در جهت هایی خاص نمودار انرژی را در فضای اندازه حرکت  $K$  رسم کنیم، مشاهده می کنیم که در بعضی از نیمه رسانا ها قله نوار ظرفیت درست در مقابل پایین ترین قسمت نوار رسانش یا درست در مقابل پایین ترین دره نوار رسانش قرار دارد، این نیمه هادیهای خاص را نیمه هادی گاف مستقیم می نامند. نیمه هادی های ترکیبی مثل  $InSb$ ،  $CdS$  و  $InSb$  از گروه های  $III-V$ ،  $II-VI$  از جمله نیمه هادی های گاف مستقیم هستند. وقتی کمینه نوار رسانش در جای دیگری غیر از مقابل بیشینه نوار ظرفیت قرار داشته باشد، آن نیمه هادی را گاف غیرمستقیم می نامند. شکل ۲-۲ مقایسه بین این دو را نشان می دهد.



شکل ۲-۲: (الف) بلور گاف مستقیم (ب) بلور گاف غیر مستقیم

جذب و تابش فوتون باید همراه با بقای اندازه حرکت و بقای انرژی باشد.

$$\varepsilon_i + \hbar\omega = \varepsilon_f \quad (11-2)$$

$$\hbar k_i + \hbar q = \hbar k_f \quad (12-2)$$

که در آنها  $\varepsilon_i$  و  $\varepsilon_f$  انرژیهای اولیه و نهایی الکترون،  $k_i$  و  $k_f$  بردارهای موج اولیه و نهایی الکترون بوده و  $\hbar\omega$  و  $q$  انرژی و بردار موج فوتون است. چون بردار موج فوتون  $q$  در مقایسه با عدد موج الکترون در منطقه اول بریلوئن کوچک است، اغلب از آن صرف نظر می شود.

$$k_i = k_f \quad (13-2)$$

اگر مطابق شکل ۲-۲ الف از فوتون برای تحریک الکترونها نوار ظرفیت استفاده کنیم چون در این نوع ساختار شبکه کمینه نوار رسانش و بیشینه نوار ظرفیت در مقدار  $k$  مشابهی ( $k=0$ ) قرار دارند متوجه می شویم یک فوتون با انرژی  $h\nu = E_g$  می تواند الکترونی را از بالای نوار ظرفیت به پائین نوار رسانش منتقل کرده و یک حفره در نوار ظرفیت به جای بگذارد. فرایند معکوس حالت قبل زمانی در یک نیمه رسانای گاف مستقیم رخ می دهد که یک الکترون از نوار رسانش به یک جای خالی در نوار ظرفیت بیفتد. انرژی الکترون در این فرایند به صورت یک فوتون نور آزاد می شود. از طرف دیگر در شکل ۲-۲ ب کمینه نوار رسانش و بیشینه نوار ظرفیت در مقدار  $k$  های متفاوتی قرار دارند و نیمه هادی

گاف غیر مستقیم است. به طور کلی گاف غیر مستقیم به یک فونون القایی برای کامل کردن گذار احتیاج دارد. قوانین بقاء برای گذار غیر مستقیم به صورت زیر نوشته می شود.

$$\varepsilon_f = \varepsilon_i + \hbar\omega \pm \hbar\Omega \quad (14-2)$$

$$k_f = k_i \pm K \quad (15-2)$$

که در آن  $\hbar\Omega$  و  $K$  انرژی و بردار موج یک فونون هستند. فونون اضافی اندازه حرکت مورد نیاز را برای گذار غیر مستقیم فراهم می آورد. علامت مثبت برای جذب و علامت منفی برای گسیل فونون است.

$$\hbar\omega = E_g \mp \hbar\Omega \quad (16-2)$$

بنا بر این انرژی فوتون باید بیشتر از گاف انرژی باشد [۲].

$$\hbar\omega > E_g \quad (17-2)$$

به طور کلی این خاصیت (گاف مستقیم یا غیر مستقیم) تعیین کننده کاربرد نوع نیمه هادی در انواع ادوات نوری حالت جامد مثل LEDها و آشکار ساز نوری است.

## ۲-۵- نیمه هادی ذاتی و غیر ذاتی

یک بلور نیمه هادی کامل را بدون هیچ گونه آلاینش را نیمه هادی ذاتی می گویند. برای چنین نیمه هادی هایی در دمای صفر درجه کلوین تمام حالت ها در نوار ظرفیت پر و تمام حالت ها در نوار رسانش خالی می باشد. اما در دماهای بالاتر در اثر وجود گرما زوج الکترون-حفره ها به تدریج تولید می شوند. شمار الکترون ها در نوار رسانش  $n_0$  با شمار حفره ها در نوار ظرفیت  $p_0$  برابر است و به صورت نمایی با دما و پهنای گاف نواری مطابق فرمول زیر ارتباط دارد [۱ و ۶].

$$n_0 = p_0 = C \exp\left(\frac{-E_g}{2KT}\right) \quad (18-2)$$

$K$  ثابت بولتزمن و  $C$  یک ثابت که است مقدار آن با دو ثابتی که انتهای این قسمت خواهیم دید به صورت زیر رابطه دارد [۷ و ۱].

$$C = \sqrt{N_c N_v} \quad (19-2)$$