

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده فنی و مهندسی

گروه برق - الکترونیک

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق گرایش
الکترونیک

شبه سازی آشکارسازهای نوری بهمنی با نواحی جذب و تکثیر مجزا برای بررسی
مشخصات خروجی فتودیود

استاد راهنما

دکتر محمد مهدی کارخانه چی

نگارش

محمد باقری رحیم آبادی

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و
نوآوری های ناشی از تحقیق موضوع این پایان نامه
متعلق به دانشگاه رازی است.

دی ۱۳۸۹

سپاس خداوند را که نعمتش از شماره افزون است و شکرش از حد قدرت ما بیرون، به روز روشن غبار ظلمت می‌زداید و به نور دانش پرده جهل می‌گشاید. رهنمای خرد، کلام اوست و آرامش دل پیام او و آرامش جان، ذکر نام او. به عجز خویش اقرار داریم که نتوانیم شکر نعمت او گزاریم. اگر دست ما نگیرد همگی از دست برویم و اگر پای ما استوار ندارد جملگی از پای درآییم. اوست که به حکمت این جهان را بیافرید و انسان را خلیفه خود گردانید و جهان را بدو سپرد و کلید خرد به دست او داد که از گنج هستی، راز بگشاید و به قدر طاقت بشری از سر حکمت او آگاه گردد.

از زحمات بی‌دریغ و تلاش‌های بی‌وقفه استاد گرامی جناب آقای دکتر محمد مهدی کارخانه چی کمال تشکر و قدردانی را دارم.

بر خود می‌دانم که از راهنمایی‌های با ارزش و برادرانه دوست عزیزم جواد یوسفوند که در تمامی مراحل با همفکری هایش مرا در انجام این تحقیق یاری نمود، صمیمانه سپاس گزار می‌کنم. همچنین از اساتید محترم جناب دکتر آرش احمدی استادیار دانشگاه رازی و جناب دکتر محمد رزاقی استاد یار دانشگاه کردستان که داوری این پایان نامه را به عهده داشتند، متشکرم.

به پاس تعبیر عظیم و انسانی شان از کلمه ایثار و از خود گذشتگی
به پاس عاطفه سرشار و گرمای امیدبخش وجودشان که در این سردترین روزگاران بهترین پشتیبان است

به پاس قلب های بزرگشان که فریاد رس است و سرگردانی و ترس در
پناهمان به شجاعت می گراید و به پاس محبت های بی دریغشان که هرگز فروکش نمی کند

تقدیم به:

پدر و مادر مهربانم که وجودشان گرمی بخش زندگیم است

چکیده

آشکارسازهای نوری بخش حساس هر سیستم مخابرات نوری را تشکیل می‌دهند، چنانچه افزایش حساسیت و بهبود عملکرد آنها مستقیماً بر روی کیفیت مخابره نوری تأثیر می‌گذارد. آشکارسازهای نوری به‌همی با نواحی جذب و تکثیر مجزا، نوعی از آشکارساز نوری می‌باشند که نواحی جذب فوتون و تولید حاملهای بار و ناحیه تکثیر حاملهای بار در این نوع آشکارساز از یکدیگر جدا می‌باشد. برای بدست آوردن نویز اضافی کمتر در یک آشکارساز باید ضریبهای یونیزاسیون الکترون و حفره هر چه بیشتر با هم اختلاف داشته باشند. یکی از روشهایی که برای حل این مساله بکار برده میشود، استفاده از آشکارسازهای با نواحی جذب و تکثیر مجزا می‌باشد. در این پروژه سعی بر این است که با استفاده از یک الگوریتم ساده و گسسته بهره آشکارساز را بدست آوریم. ویژگی اصلی این الگوریتم محاسبه کردن بهره آشکارساز با در نظر گرفتن اثر فضای مرده¹ می‌باشد. بارهای الکتریکی موجود در ناحیه تکثیر برای بدست آوردن انرژی لازم برای یونیزاسیون باید مسافتی را در این ناحیه با شتاب حرکت کنند که در این مسافت که فضای مرده نامیده میشود هیچ یونیزاسیونی انجام نمی‌شود. این مسافت به جنس ماده و همچنین میدان الکتریکی وابسته است. به همین علت در ناحیه جذب که میدان الکتریکی پایین است میتوان از تکثیر صرف نظر کرد.

فهرست مطالب

عنوان	شماره صفحه
فصل اول : آشکار سازهای نوری	
۱-۱- مقدمه	۲
۱-۲- نحوه آشکار سازی نور	۳
۱-۳- مشخصات آشکار سازهای نوری	۷
۱-۳-۱- بازده کوانتومی	۸
۱-۳-۲- راههای افزایش بازده کوانتومی	۹
۱-۳-۳- ضریب پاسخدهی	۹
۱-۴- انواع آشکار سازهای نوری	۱۰
۱-۴-۱- فتودیودهای نیمه هادی بدون بهره داخلی PIN	۱۰
۱-۴-۲- فتودیودهای نیمه هادی با بهره داخلی APD	۱۴
فصل دوم : نویز در آشکار سازهای نوری	
۱-۲- مقدمه	۱۹
۲-۲- ضریب نویز اضافی	۲۴
۳-۲- عوامل موثر بر نویز اضافی SAM-APD	۲۵
فصل سوم : آشکار سازهای نوری بهمنی با نواحی جذب و تکثیر مجزا	
۱-۳- مقدمه	۲۷
۲-۳- نحوه کار آشکار ساز SAM-APD	۲۸
۳-۳- آشکار سازهای نوری ابر شبکه ای	۳۱
۴-۳- اثر دما بر روی ولتاژ شکست آشکار سازهای نوری SAM-APD	۳۳
۵-۳- تونل زنی	۳۵

۳-۶-ولتاژ شکست ۳۹

۳-۷- جریان نوری ۴۱

۳-۸- جریان تاریک ۴۲

فصل چهارم : شبیه سازی آشکارساز

۴-۱- مقدمه: سرعت رانش حاملها در نیمه رسانا ۴۶

۴-۲- ضریب یونیزاسیون بر خوردی ۵۱

۴-۳- معادلات پیوستگی، طول نفوذ ۵۶

۴-۴- میدان الکتریکی ۶۱

۴-۵- بدست آوردن بهره آشکارساز ۶۵

۱-۵-۴

.....مقدمه

۶۵.....

۴-۵-۲ رابطه

.....بازگشتی

۶۷.....

فصل پنجم : نتایج شبیه سازی

۵-۱- مقدمه ۷۲

فصل ششم : نتیجه گیری و پیشنهاد

۶-۱- نتیجه گیری ۷۹

۶-۲- پیشنهادات ۸۰

فهرست شکل ها

- عنوان
شماره صفحه
- شکل ۱-۱- (a) نمایی از یک آشکارساز p-n ، (b) چگالی بارهای دیود، N_a و N_d به ترتیب غلظت حاملهای دهنده و پذیرنده میباشند، (c) میداتن الکتریکی در ناحیه تهی 4
- شکل ۱-۲- ضریب جذب بر حسب طول موج برای چند نیمه رسانا 7
- شکل ۱-۳- نمای ساده از یک آشکارساز PIN ۱1
- شکل ۱-۲- نويز ضربه ای جریان تاريك مربوط به پیوند p-n ۲۰
- شکل ۲-۲- نمودار ضریب نويز اضافی بر حسب مقدار تکثیر ۲۵
- شکل ۱-۳- آشکارساز نوری بهمنی با نواحی جذب و تکثیر مجزا ۲۷
- شکل ۲-۳- تکثیر حاملهای بار (الکترون و حفره) بر اثر فرآیند یونیزاسیون برخوردی، در این شکل یونیزاسیون فقط توسط الکترونها انجام میگردد و ضریب یونیزاسیون حفره صفر است. ۲۸
- شکل ۳-۳- آشکارساز SAM-APD ساخته شده با هشت مرحله ماسک گذاری ۳۰
- شکل ۳-۴- نمودار باند انرژی آشکارساز SAM-APD با سد پتانسیل در باند ظرفیت ۳۰
- شکل ۳-۵- قرار دادن لایه نیمه رسانا با گاف انرژی متوسط بین دو نیمه رسانا ۳۱
- شکل ۳-۶- ساختار یک آشکارساز ابر شبکه ای ۳۲
- شکل ۳-۷- نمودار تکثیر بر حسب بایاس معکوس در محدوده دمایی ۲۰ تا ۳۷۵ درجه کلوین ۳3
- شکل ۳-۸- نمودار تکثیر بر حسب بایاس معکوس در محدوده دمایی ۲۰ تا ۳۷۵ درجه کلوین برای آشکارساز InAlAs ۳۴
- شکل ۳-۹- نمودار تغییرات $\Delta V/\Delta T$ بر حسب طول ناحیه تکثیر ۳۵
- شکل ۳-۱۰- شرایط مرزی میدان الکتریکی ۳۹
- شکل ۳-۱۱- نمودار ولتاژ شکست بر حسب غلظت حاملها ۴۰
- شکل ۳-۱۲- جریان نوری آشکارساز مشخص شده بر حسب ولتاژ معکوس ۴۱

- شکل ۳-۱۳- جریان تاریک بر حسب ولتاژ بایاس معکوس ۴۳
- شکل ۳-۱۴- جریان تاریک بر حسب ضخامت ناحیه تکثیر در V_b ۰/۹ ۴۳
- شکل ۴-۱- سرعت حاملها بر حسب میدان الکتریکی برای غلظت های کم [۱] ۴۷
- شکل ۴-۲- نرخ یونیزاسیون در دمای ۳۰۰ درجه کلوین بر حسب معکوس میدان ۵۳
- شکل ۴-۳- سرعت اشباع حاملها بر حسب دما ۵۵
- شکل ۴-۴- نمای مفهومی از معادله پیوستگی ۵۶
- شکل ۴-۵- میدان الکتریکی آشکار ساز تابعی از مکان ۶۲
- شکل ۴-۶- آشکار ساز مورد مطالعه برای بدست آوردن میدان الکتریکی ۶۳
- شکل ۴-۷- میدان الکتریکی آشکار ساز تحت ولتاژ معکوس ۶۵
- شکل ۵-۱- مقادیر یونیزاسیون الکترون و حفره ۷۳
- شکل ۵-۲- میزان بهره آشکار ساز نسبت به ولتاژ بایاس معکوس ۷۴
- شکل ۵-۳- جریان تاریک آشکار ساز نسبت به ولتاژ بایاس معکوس ۷۵
- شکل ۵-۴- تغییرات میانگین طول آزاد بر حسب دما ۷۶
- شکل ۵-۵- تغییرات ضرایب یونیزاسیون بر حسب دما ۷۶
- شکل ۵-۶- تغییرات بهره بر حسب دما ۷۷

فهرست جدول ها

عنوان	شماره صفحه
جدول ۱-۱- گاف انرژی، طول موج قطع بالا و نوع گاف انرژی چند نوع نیمه رسانا 6	
جدول ۱-۲- مشخصات آشکارسازهای مختلف در شرایط عملکرد نرمال در بایاس معکوس ۱۵	
جدول ۴-۱- ولتاژ الکتریکی شکست برای بعضی مواد مختلف ۵۴	
جدول ۴-۲- پارامترهای مهم برای بدست آوردن میدان الکتریکی ۶۳	
جدول ۵-۱- مشخصات مربوط به آشکارساز ۷۲	

کوتاه نوشت ها:

APD	Avalanche Photodiode
AR	Anti Reflection
QE	Quantum Efficiency
RMS	Root Mean Square
SNR	Signal to Noise Ratio
NEP	Noise Equivalent Power
SAM	Separate Absorption and Multiplication
SAGM	Separate Absorption, Grading and Multiplication

فصل اول

آشکار سازهای نوری

۱-۱- مقدمه

آشکار سازهای نوری بخش حساس هر سیستم مخابرات نوری را تشکیل می دهند، چنانچه افزایش حساسیت و بهبود عملکرد آنها مستقیماً بر روی کیفیت مخابره نوری تأثیر می گذارد. آشکار سازهای نوری در سیستم های مخابرات نوری، تشخیص حرکت و همچنین در سیستم های کنترلی استفاده می شود. این قطعات یک سیگنال نوری را به یک سیگنال الکتریکی از نوع ولتاژ یا جریان تبدیل می کند. در اکثر آشکار سازهای نوری شیشه رسانه های نوری^۱ و دیودهای نوری^۲، این تبدیل بوسیله تولید زوج الکترون و حفره در اثر جذب نور، انجام می گیرد به طوریکه الکترون در باند هدایت و حفره در باند ظرفیت

۱-Photo Conductors
۲- Photo diodes

تولید می شود. در بعضی دیگر از قطعات شبیه آشکار سازهای گرمایی، تبدیل انرژی بصورت تولید گرما در قطعه صورت می پذیرد که دمای قطعه را بالا میبرد و به این خاطر قابلیت نفوذ پذیری الکتریکی آن را زیاد می کند.

در سیستمهای مخابرات نوری، آشکارسازهایی با عملکرد نوبز پایین و بهره بالا یک نیاز اساسی و مورد علاقه می باشد. تیوبهای تکثیر کننده نور^۱ دارای بهره زیاد و همچنین نوبز کمی میباشند که از این رو دارای خصوصیات خوبی می باشند اما این تیوبها به دیلی اندازه بزرگ و ولتاژ بالا برای کار، برای استفاده در سیستم های مخابراتی مفید نیستند. از سوی دیگر، آشکارسازهای نوری^۲ بهمنی بعثت تکثیر بهمنی دارای بهره زیادی می باشند که این آشکارسازها را از دیگر آنها متمایز می کند.

این آشکارسازها به راحتی در مدارهای مجتمع قرار داده می شوند و برای مصارف با بهره بالا کاملاً مناسب هستند. از اوایل دهه ۱۹۸۰ کارهای مختلفی در زمینه ساختار و اندازه گیری پارامترهای آن انجام شده است. این نوع آشکارسازها بصورت بسیار زیاد در سیستم های مخابرات نوری استفاده می شوند.

نیمه هادی هایی که در ساخت یک آشکارساز استفاده می شود، عموماً عبارتند از: سیلیسیوم، گالیوم، ایندیوم، آلومینیوم، ژرمانیوم، آرسنیک و همچنین انواع آلیاژهای ترکیبی سه تایی و چهار تایی که بسته به نوع کاربرد می توانند برای آشکارسازی بخشی از طیف نور از ماوراء بنفش (**ultra violet**) تا مادون قرمز (**infra red**) تولید شوند.

۱-۲- نحوه آشکارسازی نور

ساده ترین نوع آشکارساز نوری، یک پیوند p-n می باشد که این قطعه دارای اندازه کوچک، سرعت و حساسیت بالا برای استفاده در سیستم های مخابرات نوری می باشد. برای اینکه جذب نور بخوبی در سطح یک پیوند p-n انجام گیرد از یک ماده ضد بازتاب نور^۳ که معمولاً **Si3N4** می باشد، بر روی سطح آشکارساز استفاده میشود و به این وسیله بازتاب نور کاهش می یابد و توان بیشتری جذب آشکارساز می شود [3].

برای اینکه یک پیوند p-n بصورت آشکار ساز عمل کند همانطور که در شکل ۱-۱ نشان داده شده است باید بصورت معکوس بایاس گردد.

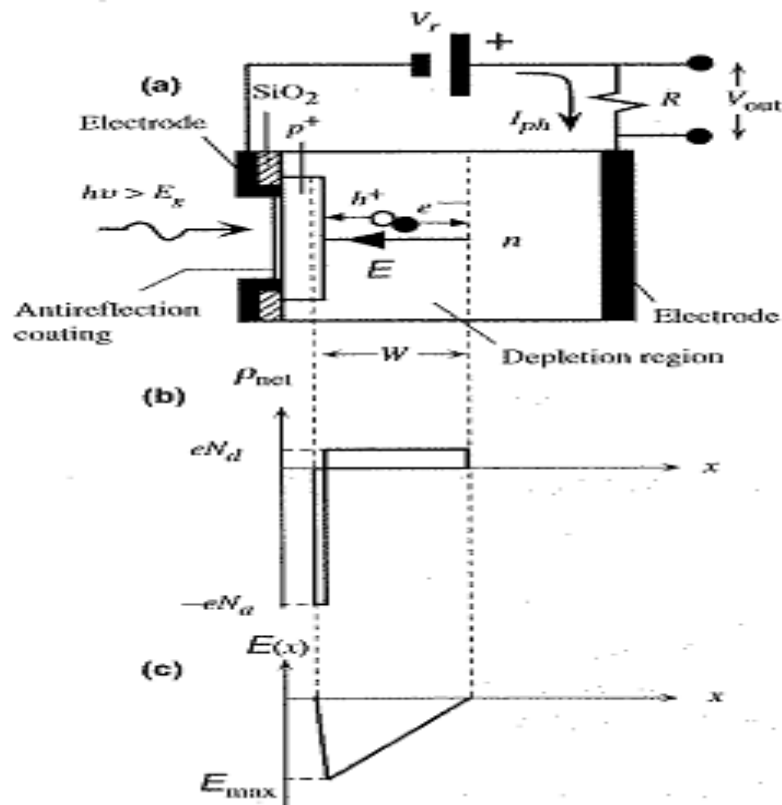
میدان الکتریکی حاصل از ولتاژ خارجی اعمال شده، بر روی ناحیه تخلیه قرار می گیرد. هنگامیکه یک فوتون^۴ نوری با انرژی بیشتر از انرژی گاف نیمه رسانا ($h\nu > E_g$) بصورت تصادفی به آن برخورد می کند

۱-Photomultiplier Tube
4-Avalanche Photodiode
1-Anti Reflection
2-Photon

، بوسیله نیمه رسانا جذب میشود و یک زوج الکترون و حفره آزاد تولید می کند به این صورت که الکترون در باند هدایت و حفره در باند ظرفیت قرار می گیرند . جذب شدن فوتون و همچنین تولید زوج الکترون و حفره در ناحیه تهی انجام می شود سپس زوج الکترون و حفره بر اثر میدان الکتریکی ناحیه تهی به ترتیب به سمت ناحیه **n** و **p** رانده می شوند.

رائش حاملهای انرژی باعث تولید جریان الکتریکی می شود که به آن جریان نوری (**I_{ph}**) گفته می شود و این جریان در مدار خروجی باعث تولید سیگنال الکتریکی می شود . جریان الکتریکی تا وقتی که حاملهای انرژی از ناحیه تهی عبور می کنند ادامه دارد.

هنگامیکه حفره های تولید شده بوسیله نور بر اثر میدان الکتریکی اعمال شده به ناحیه **p** می رسند ، با الکترونهای موجود در این ناحیه که حاملهای اقلیت هستند باز ترکیب می گردند . همینطور هنگامیکه الکترونهای تولیدی به ناحیه **n** می رسند، با حفره های موجود باز ترکیب می شوند . مقدار جریان نوری تولید شده (**I_{ph}**) به مقدار جذب نور توسط آشکارساز و به تبع آن به تعداد زوج الکترون حفره تولیدی و همچنین سرعت رائش حاملهای انرژی از ناحیه تهی که بوسیله اعمال میدان الکتریکی خارجی تولید می شود، بستگی دارد.



شکل ۱-۱- (a) نمایی از یک آشکارساز p-n، (b) چگالی بارهای دیود، Nd و Na به ترتیب غلظت حاملهای دهنده و پذیرنده میباشند، (c) میداتن الکتریکی در ناحیه تهی [3]

از آنجائیکه میدان الکتریکی در ناحیه تهی یک میدان یکنواخت نمی باشد و جذب فوتون بوسیله آشکارساز دارای ماهیت تصادفی می باشد و همچنین جذب فوتون به طول موج فوتون بستگی دارد، بدست آوردن معادله جریان خروجی بصورت ساده امکان پذیر نمی باشد. باید ذکر شود که جریان نوری که در مدار خروجی جریان دارد برابر است با شار تولیدی توسط الکترونها یا حفره هائیکه در مدار بوسیله میدان الکتریکی رانش می کنند و نه هر دوی آنها. فرآیند جذب فوتون برای تولید جریان نوری به فوتونهایی با انرژی حداقل برابر با انرژی گاف نیمه رسانا نیاز دارد برای اینکه یک الکترون از باند ظرفیت به باند هدایت برانگیخته شود. از آنجائیکه انرژی یک فوتون بصورت معادله زیر بیان می شود:

$$E=hu=hc/\lambda \quad (1-1)$$

بنابراین طول موج قطع بالا که طبق تعریف برابر با طول موجی است که فوتونهای نوری انرژی لازم را برای غلبه بر گاف انرژی نیمه رسانا ندارند و توسط نیمه رسانا جذب نمی شوند، برای یک نیمه رسانا به صورت نوشته شده در فرمول صفحه بعد تعریف می گردد:

$$\lambda_g(\mu m) = 1240 / E_g(eV) \quad (2-1)$$

به عنوان مثال برای سیلیسیوم انرژی گاف برابر است با ۱/۱۲ الکترون ولت پس طول موج قطع بالا برای آشکارسازهایی از جنس سیلیسیوم برابر با ۱/۱۱ میکرون می باشد. در صورتیکه برای ژرمانیوم انرژی گاف ۰/۶۶ الکترون ولت می باشد که طول موج قطع ۱/۸۷ میکرون می باشد. مشخص است که فتو دیودهای سیلیسیومی برای استفاده در مخابرات نوری در محدوده طول موج ۱/۳ تا ۱/۵۵ میکرون مناسب نیستند در حالیکه فتو دیودهای ژرمانیوم بصورت زیادی در مخابرات نوری استفاده می شوند. در عمل برای ساخت آشکارسازهایی با طول موج دلخواه از ترکیبهای دو تایی و سه تایی نیمه رسانا استفاده می شود که گاف انرژی آنها قابل تغییر می باشد. جدول ۱-۱ گاف انرژی و طول موج قطع بالا و همچنین نوع گاف انرژی (مستقیم یا غیر مستقیم) چند نیمه رسانا را نشان میدهد.

برای بدست آوردن نویز اضافی کمتر در یک آشکارساز باید ضریبهای یونیزاسیون الکترون و حفره هر چه بیشتر با هم اختلاف داشته باشند اما اکثر نیمه رساناهای ترکیبی III-V دارای ضریبهای یونیزاسیون

تقریباً یکسانی دارند. روشهای مختلفی برای حل این مشکل بکار گرفته شده است که از جمله میتوان به استفاده از ساختارهای ابر شبکه ای و یا استفاده از چاههای کوانتومی و یا استفاده از آشکارسازهای با نواحی جذب و تکثیر مجزا اشاره کرد

جدول ۱-۱- گاف انرژی، طول موج قطع بالا و نوع گاف انرژی چند نوع نیمه رسانا [1]

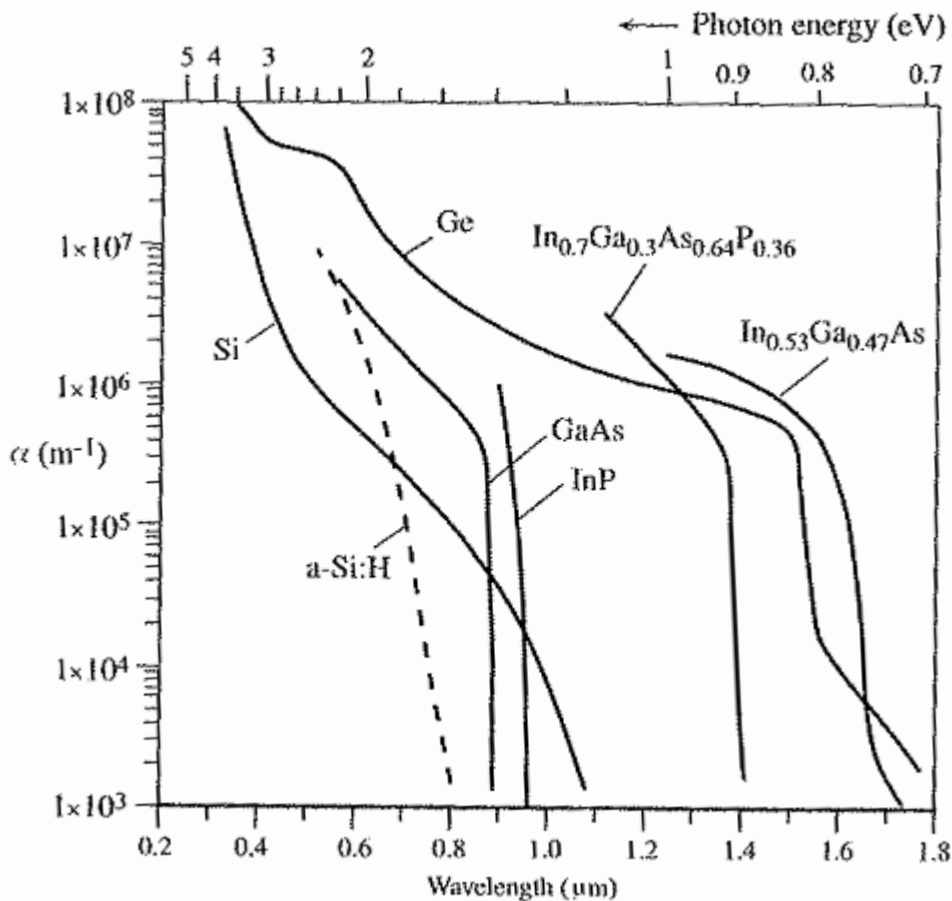
Semiconductor	E_g (ev)	λ_g (um)	Type
InP	۱/۳۵	۰/۹۱	D
GaAsSb	۱/۱۵	۱/۰۸	D
Si	۱/۱۲	۱/۱۱	I
InGaAsP	۰/۸۹	۱/۴	D
InGaAs	۰/۷۵	۱/۶۵	D
Ge	۰/۶۶	۱/۸۷	I
InAs	۰/۳۵	۳/۵	D

فتونهای نوری که دارای طول موج کمتر از طول موج قطع نیمه هادی باشند، توسط نیمه هادی جذب شده و شدت نور مربوط به تعداد فوتونهای جذب شده بصورت نمایی نسبت به مکان کاهش می یابد [3]:

$$I(x) = I_0 \exp(-\alpha x) \quad (3-1)$$

که α ضریب جذب^۱ نام دارد و در شکل ۱-۲ ضریب جذب چند نیمه رسانای نمونه نشان داده شده است. ضریب جذب در یک نیمه رسانا وابسته به جنس ماده و طول موج نور دریافتی است. در انتخاب نوع نیمه رسانا باید دقت شود که انرژی گاف از انرژی فوتون کمتر باشد بعلاوه در مورد طول موج دریافتی جذب نور بایستی در یک فاصله ای از ناحیه تهی اتفاق بیفتد که زوج الکترون و حفره تولیدی در این ناحیه بوسیله میدان از هم جدا شوند و به سمت الکترودهای خروجی روند.

اگر ضریب جذب بزرگ باشد، جذب نور بسیار نزدیک به سطح لایه P^+ که سطح بیرونی آشکارساز است انجام می شود و فاصله رانش الکترونها تا ناحیه n زیاد است و زمان زیادی طول می کشد تا به الکترودهای خروجی برسد و همچنین در نقصهای سطحی سریعاً باز ترکیب می شوند به این علت که این نواقص همانند مراکز باز ترکیب عمل می کنند. اگر ضریب جذب خیلی کوچک باشد؛ تنها تعداد کمی از فوتونها در ناحیه تهی جذب می شوند و زوج الکترون حفره کمی تولید می شود.



شکل ۱-۲- ضریب جذب بر حسب طول موج برای چند نیمه رسانا [3]

۱-۳- مشخصات آشکارسازهای نوری

در این بخش ویژگیهای عمده در طراحی آشکارسازهای نوری توضیح داده شده است [2]:

الف) حساسیت آشکارسازهای نوری باید در همان طول موجهای مورد کاربرد در مخابرات نوری باشد. چنانچه در نسل اول مخابرات نوری طول موجهای ۰/۸ الی ۰/۹ میکرون مورد نظر بود، حال آنکه امروزه عمدتاً طول موجهای ۱/۳ الی ۱/۵۵ میکرون در طراحی مورد توجه می باشد.

ب) دریافت تمیز علائم نوری در عین خطی عمل کردن آنها از مزایای یک آشکارساز نوری محسوب می گردد.

ج) ضریب بازده کوانتومی بالا که این به معنی تولید جریان الکتریکی مفید در خروجی آشکارساز نوری با حداقل تعداد فوتونهای تابیده می باشد.

د) داشتن حداقل میزان نویز افزوده به سیستم در عین حداقل بودن جریان تاریک در فتودیوهای آشکارساز نور.

ه) پهنای باند وسیع تا حد چندین صد گیگا هرتز و حتی بالاتر.

و) پایداری مطلوب عملکرد آشکارسازی مخصوصاً به هنگام تغییر درجه حرارت.

ز) ابعاد فیزیکی هر چه کوچکتر به منظور سهولت ارتباط با فیبر نوری از یک سو و مدارات الکتریکی از سوی دیگر .

در این جا به توضیح دو پارامتر مهم بازده کوانتومی^۱ و ضریب پاسخدهی^۲ می پردازیم که معیار کمی مناسبی را جهت مقایسه بین انواع فتودیودها در اختیار می نهند .

۱-۳-۱- بازده کوانتومی

تمام فوتونهای تصادفی تابیده شده به یک آشکارساز هرگز توسط آشکارساز جذب نمی گردد که زوج الکترون حفره آزاد تولید کند.

$$\eta = \frac{\text{تعداد زوج الکترون و حفره تولیدی}}{\text{تعداد فوتونهای نوری تابیده شده}}$$

طبق تعریف بازده کوانتومی عبارت است از نسبت تعداد زوج الکترون حفره آزاد تولید شده به تعداد فوتونهای تابیده شده به آشکارساز :

جریان نوری I_{ph} در مدار خروجی آشکارساز برابر با شار الکترونها بر ثانیه به سمت پایانه های آشکارساز می باشد . تعداد الکترونها جمع شده بر ثانیه برابر است با I_{ph}/e ، اگر P_0 برابر با توان نوری تصادفی آشکارساز باشد ، بنابراین تعداد فوتونها بر ثانیه برابر است با $P/h\nu$ پس بازده کوانتومی را می توان بصورت زیر تعریف کرد:

$$\eta = \frac{I_{ph} / e}{P_0 / h\nu} \quad (4-1)$$

هرگز تمامی فوتونهای جذب شده ، زوج الکترون حفره آزاد تولید نمی کنند و بعضی از زوج های الکترون حفره آزاد بدون شرکت در تولید جریان نوری باز ترکیب می شوند بعلاوه اگر طول نیمه هادی با طول جذب قابل مقایسه باشد ، هرگز تمامی فوتونها جذب نمی شوند بنابراین بازده کوانتومی همیشه کمتر از واحد است. این بازده به ضریب جذب نیمه هادی و همچنین طول موج مورد نیاز کاری آشکارساز بستگی دارد .

۱-۳-۲- راههای افزایش بازده کوانتومی

۱- کاهش میزان بازتاب نور در سطح فتودیود بوسیله پوشش خاص .

۲- افزایش جذب فوتون در ناحیه تهی .

۳- جلوگیری از بازترکیب حاملهای جریان در تله ها و نواقص موجود در نیمه هادی .

بازده کوانتومی تعریف شده در معاله (۴-۱) ، معروف به بازده کوانتومی خارجی میباشد ، بازده کوانتومی داخلی برابر است با نسبت تعداد زوج الکترون حفره تولیدی به تعداد فوتونهای جذب شده در فتودیود که مقدار آن برای تمامی فتودیودها مقدار نسبتاً بالایی است . بازده کوانتومی یک نمونه آشکارساز سیلیسیومی که دارای یک طراحی خوب باشد در طول موج ۷۰۰ الی ۹۰۰ نانومتر تقریباً برابر است با ۹۰ الی ۹۵٪ .

۱-۳-۳- ضریب پاسخ دهی

در تعریف ضریب بازده کوانتومی ، انرژی فوتون گنجانیده نشده است ، لذا نیاز به تعریف دیگری موسوم به ضریب پاسخدهی است که آن را با R نشان میدهیم و عبارت است از نسبت جریان نوری در خروجی آشکارساز به توان نوری تصادفی تابیده شده:

$$R = \frac{\text{جریان نوری خروجی}}{\text{توان نوری تابیده}} \quad (۵-۱)$$
$$= \frac{I_{ph} (A)}{P_0 (w)}$$

با توجه به تعریف بازده کوانتومی داریم :

$$R = \eta \frac{e}{h\nu} = \eta \frac{e\lambda}{hc} \quad (۶-۱)$$

در معادله ۶-۱ η به طول موج بستگی دارد بنابراین بطور آشکار ، ضریب پاسخدهی به طول موج بستگی دارد . همچنین به پاسخدهی طیفی و یا حساسیت نوری معروف است . نمودار R بر حسب λ ، پاسخ طیفی فتودیود نسبت به طول موج را مشخص می کند و معمولاً توسط کارخانه سازنده داده می شود . در حالت ایده آل با بازده کوانتومی ۱۰۰٪ ($\eta = 1$) مقدار R با افزایش λ باید تا مقدار λg افزایش پیدا کند . در عمل بازده کوانتومی کمتر از واحد ، مقدار پاسخدهی را کاهش می دهد و آنرا بین طول موج قطع بالا و پایین قرار می دهد .

۱-۴- انواع آشکارسازهای نوری

از نظر پیچیدگی ، انواع آشکارسازهای نوری بصورت زیر دسته بندی می شوند [2] :