

# دفترچه اطلاعات آشکارساز نوری مرئی و مادون قرمز (با مدار پایدارساز دمایی)



## ۱. مقدمه

بین انواع آشکارسازها، فوتو دیود نوری بهمنی به دلیل داشتن بهره جریان از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. فوتو دیودهای نوری بهمنی<sup>۱</sup> (APD) فوتو دیودهایی با سرعت و حساسیت بالا هستند که با اعمال ولتاژ معکوس، جریان‌های نوری تکثیر شده (بهمنی) تولید می‌کنند. فرایند تکثیر بهمنی به APD کمک می‌کند تا سیگنال‌های نوری ضعیف را نیز بتواند آشکارسازی کند. این فرایند، تأثیر نویز را نیز تا حد قابل توجهی کاهش داده و نسبت سیگنال به نویز، S/N، را نیز افزایش می‌دهد؛ بنابراین قابلیت اطمینان آشکارساز نیز افزایش می‌یابد.

APDها برای آشکارسازی‌های بسیار حساس، کاربردهای پهنای باند و فرکانس مدولاسیون بالا، تقویت سیگنال نوری ضعیف، و کاهش نویز الکترونیکی توصیه می‌شوند. همچنین، APDها برای کاربردهای بلند برد در

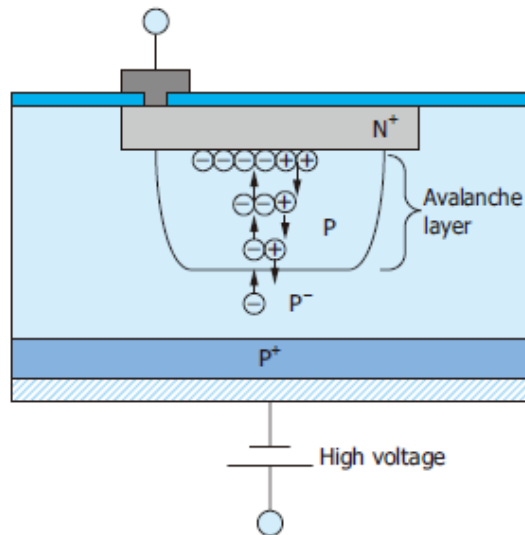
---

<sup>۱</sup> avalanche photo diode

نور محیطی زیاد و شرایطی که TOF مستقیم باید محاسبه شود، نیز مناسب هستند. بعلاوه، دامنه دینامیکی بالای APD ها امکان استفاده از آن در کاربردهایی مانند تشخیص اشیا، اندازه گیری فاصله، سنجش از راه دور، اسکن و تشخیص اشیا و اشکال را می دهد و می تواند در صنایعی مانند دارویی، پزشکی، نظامی، دفاع، و خودروسازی مورد استفاده قرار گیرد.

## ۲. اصول عملکرد APD

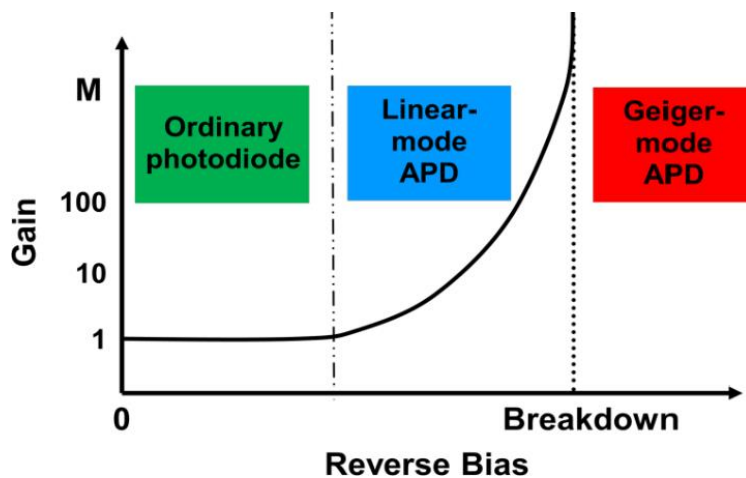
مکانیزم تولید جریان نوری در APD ها مشابه فوتودیودهای معمولی است. هنگامی که نور به فوتودیود برخورد می کند، اگر انرژی آن برابر گاف انرژی ماده فعال فوتودیود باشد، زوج های الکترون - حفره تولید خواهد کرد. نسبت زوج های الکترون - حفره تولید شده به تعداد فوتون های فرودی بازدهی کوانتومی را مشخص می کند. آن چه عملکرد APD ها را نسبت به فوتودیودهای معمولی متفاوت می کند، نحوه تقویت و تکثیر جریان نوری تولید شده در آن است. با اعمال ولتاژ معکوس به پیوندگاه PN، زوج الکترون - حفره در ناحیه فعال ( تخلیه ) APD تولید می شود، در این صورت میدان الکتریکی ایجاد شده در عرض پیوندگاه، الکترون های تولید شده را به سمت ناحیه  $N^+$  و حفره های تولید شده را به سمت ناحیه  $P^+$  سوق می دهد. هر چه میدان الکتریکی قوی تر باشد، سرعت سوق این حامل های بار بیشتر می شود. با افزایش سرعت حامل ها، احتمال برخورد آنها با اتم های شبکه بلور افزایش می یابد. این برخورد منجر به یونیزه شدن اتمها شده و در نتیجه زوج الکترون - حفره های دیگری تولید می کند که آنها نیز به نوبه خود این زنجیره را ادامه می دهند. این پدیده تکثیر بهمنی نامیده می شود. در واقع، به ازای یک فوتون فرودی به فوتودیود، بیش از یک زوج الکترون - حفره تولید می شود ( شکل ۱ ).



شکل ۱. مکانیزم تولید جریان نوری در APD. الکترون‌ها و حفره‌های تولید شده در میدان الکتریکی حاصل از اعمال بایاس معکوس به فوتودیود بترتیب به سمت نواحی  $N^+$  و  $P^+$  شتاب می‌گیرند.

## ۱.۲ بهره APD

ضریب تکثیر زوج الکترون - حفره به‌ازای برخورد یک تک فوتون به APD را بهره،  $M$ ، می‌نامند. بهره توسط نرخ یونیزاسیون شبکه بلور تعیین می‌شود که این نرخ خود شدیداً به میدان الکتریکی ناحیه تخلیه وابسته است. اگر ولتاژ معکوس اعمالی به پیوندگاه PN افزایش یابد، بهره نیز افزایش می‌یابد تا جایی که APD به ولتاژ فروشکست خود برسد (شکل ۲).



شکل ۲. بهره APD بر حسب ولتاژ معکوس

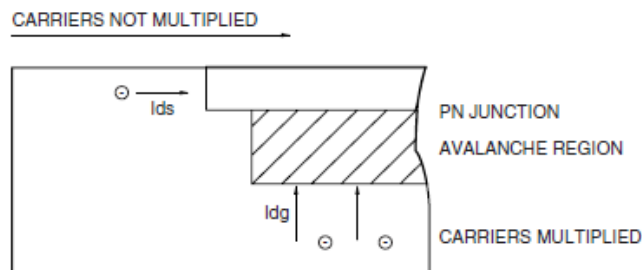
هنگامی که ولتاژ APD برابر ولتاژ فروشکست باشد، پدیده‌ای رخ می‌دهد که در آن جریان نوری خروجی APD با نور فرودی به طور خطی متناسب نیست. بلکه به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. در این حالت می‌گوییم APD از مد خطی (تکثیر بهمنی خطی) به مد گایگر تغییر وضعیت داده است. در این حالت کوچک‌ترین افزایش ولتاژ از مقدار فروشکست جریان بزرگی در APD ایجاد می‌کند و بنابراین ضعیف‌ترین شدت نور (حتی در حد تک فوتون) نیز می‌تواند به وضوح آشکارسازی شود.

بهره APD به دما نیز وابسته است. با افزایش دما، ارتعاشات شبکه بلور افزایش می‌یابد. این امر باعث می‌شود حامل‌های بار، قبل از به دست آوردن انرژی کافی، به اتم‌های شبکه بلور برخورد کنند و بنابراین اتم‌ها نمی‌توانند یونیزاسیون شوند و زوج الکترون - حفره تولید نمی‌شود. این امر منجر به کاهش بهره APD می‌شود.

برای ثابت نگهداشتن بهره، باید دمای APD در یک مقدار مشخص ثابت نگه داشته شود. هم چنین اگر بخواهیم بدون افزایش ولتاژ معکوس APD، بهره آن را افزایش دهیم، باید دمای APD را تا حد امکان پایین نگه داریم. بعلاوه، افزایش دما منجر به افزایش تولید جریان تاریک در APD می‌شود که نویز حاصل از آن نسبت سیگنال به نویز SNR را کاهش می‌دهد. بنابراین استفاده از خنک‌کننده‌های ترموالکتریکی تا حد زیادی می‌تواند به آشکارسازی سیگنال‌های تک فوتون و نیز اعمال ولتاژ کمتر برای شناسایی آنها کمک نماید.

## ۲.۲ جریان تاریکی

جریان تاریک، بخشی از جریان فوتو دیود است که در نبود نور و به علت سازوکارهای گرمایی تولید می‌شود. جریان تاریک شامل جریان نوری تولید شده به وسیله تشعشعات پس‌زمینه و جریان اشباع دیود نیمه‌رسانا است. جریان تاریکی دو منشأ دارد: جریان نشت سطحی  $i_{ds}$  که بین پیوندگاه PN و لایه اکسید Si شارش می‌یابد و جریان داخلی  $I_{dg}$  که درون بستر Si تولید می‌شود (شکل ۳).



شکل ۳. جریان‌های تاریکی APD

جریان نشت سطحی تکثیر نمی‌شود چرا که در ناحیه بهمنی شارش نمی‌یابد. اما جریان داخلی در ناحیه بهمنی شارش یافته و بنابراین تکثیر می‌شود. جریان تاریکی کل  $I_D$  از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$I_D = I_{ds} + M.I_{dg} \quad (1)$$

که  $M$  بهره یا نرخ تکثیر APD است.

با افزایش ولتاژ معکوس، جریان تاریکی افزایش می‌یابد. جریان نشت سطحی چندان وابسته به بایاس معکوس نیست؛ اما جریان داخلی همانند جریان فوتونی با افزایش ولتاژ معکوس افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده تأثیر نقش بهره بر رشد این جریان تاریکی است. این امر می‌تواند بر آشکارسازی سیگنال‌ها تأثیر منفی بگذارد و نیز منجر به آشکارسازی‌های نادرست توسط APD شود. یکی از روش‌های کاهش جریان تاریکی در ولتاژهای بالا، پایین نگه‌داشتن دمای APD است.

## ۳.۲ مشخصه‌های نویزی در APD

جریان نوری ایجاد شده در APD از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$I_{ph} = \frac{M\eta P_0 \lambda q}{hc} \quad (2)$$

که  $M$  بهره،  $\eta$  بازده کوانتومی،  $P_0$  توان نور فرودی،  $\lambda$  طول موج،  $q$  بار الکترون،  $h$  ثابت پلانک و  $c$  سرعت نور است. بازده کوانتومی از حاصلضرب سه عامل بدست می‌آید: (۱) بازتاب نور از سطح (۲) جفت الکترون-حفره‌هایی که در سطح بازترکیب نمی‌شوند و به جریان نوری کمک می‌کنند. (۳) شار فوتونی جذب شده درون ماده، نه در سطح آن. بازده کوانتومی را می‌توان از رابطه زیر بدست آورد:

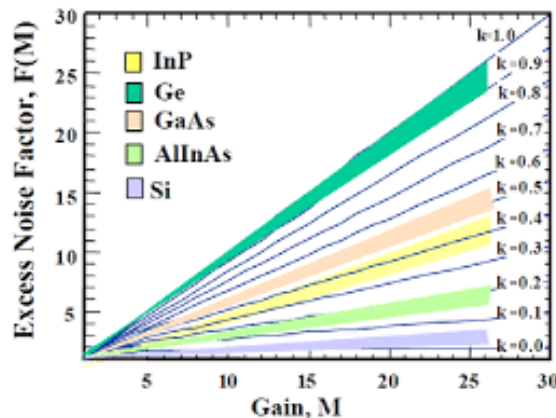
$$\eta = (1 - R)\xi(1 - \exp(-\alpha d)) \quad (3)$$

که R بازتاب توان اپتیکی از سطح ماده است.  $\xi$  کسر جفت الکترون - حفره‌هایی که در تولید جریان نوری سهم دارند.  $\alpha$  ضریب جذب ماده و d عمق آشکارساز نوری است. چون ضریب جذب وابسته به طول موج است، بازده کوانتومی نیز وابسته به طول موج است. تا زمانی که ولتاژ معکوس ثابت است، بهره APD میانگین تکثیر حامل‌ها است. نرخ یونیزاسیون هر حامل یکنواخت نیست و دارای افت و خیز است؛ بنابراین نویز تکثیر که با نام نویز اضافی نیز شناخته می‌شود، در فرایند تکثیر بهمنی به سیستم اعمال می‌شود.

نسبت نرخ یونیزاسیون الکترون،  $\alpha$ ، به نرخ یونیزاسیون حفره،  $\beta$ ، با پارامتر  $k = \frac{\beta}{\alpha}$  مشخص می‌شود. نویز اضافی را می‌توان با استفاده از این پارامتر فرموله کرد:

$$F = Mk + (2 - \frac{1}{M})(1 - k) \quad (4)$$

این رابطه برای زمانی است که الکترون‌ها به ناحیه بهمنی تزریق شوند. اگر بخواهیم نویز اضافی ناشی از تزریق حفره‌ها به ناحیه بهمنی را بررسی کنیم باید در رابطه فوق، بجای k مقدار  $1/k$  قرار دهیم. شکل ۴ نمودار نویز اضافی بر حسب بهره، را نشان می‌دهد. در این نمودار، Si کمترین مقدار k را دارد (حدود ۰.۰۲) و این امر کمک می‌کند با افزایش بهره، شات نویز افزایش چندانی نیابد و تأثیر منفی بر عملکرد APD نداشته باشد. هم‌چنین، نویز اضافی به طول موج نیز وابسته است.



شکل ۴. نمودار نویز اضافی APD بر حسب بهره به‌ازای k های مختلف در نیمرساناهای متفاوت

شات نویز (shot noise) یک APD مجموع نویز جریان نوری و جریان تاریک سطحی و داخلی است.

$$In^2 = 2q(I_{ph} + I_{dg})BM^2F + 2qI_{ds}B \quad (5)$$

که B پهنای باند APD است.

با افزایش بهره، هم نویز اضافی و هم سیگنال افزایش می‌یابند. پس باید نقطه‌ای وجود داشته باشد که به‌ازای آن بهره، نسبت سیگنال به نویز S/N ماکزیمم شود. نسبت S/N در یک APD از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$S / N = \frac{I_{ph}^2 M^2}{2q(I_{ph} + I_{dg})BM^2F + 2qBI_{ds} + \frac{4kTB}{R_L}} \quad (6)$$

که  $2q(I_{ph} + I_{dg})BM^2F + 2qBI_{ds}$  مربع شات نویز و  $\frac{4kTB}{R_L}$  مربع نویز حرارتی است. k ثابت بولتزمان و

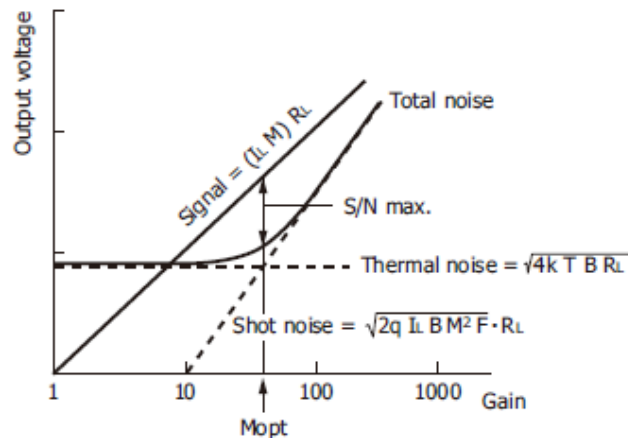
T دمای مطلق و  $R_L$  مقاومت بار است. نویز حرارتی ناشی از مقاومت‌های موجود در APD است. توان معادل نویز در APD از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$NEP = In / MS \quad (7)$$

که M بهره و S حساسیت فوتو دیود است.

در فوتو دیودهای PIN، استفاده از مقاومت بار بزرگ‌تر باعث کاهش نویز حرارتی می‌شود؛ اما از طرفی سرعت پاسخ‌دهی دیود را نیز کاهش می‌دهد؛ بنابراین نویز حرارتی مقاومت بار را نمی‌توان کاهش داد. کران پایین آشکارسازی توسط نویز حرارتی تعیین می‌شود. در APD ها، سیگنال را می‌توان تکثیر و تقویت کرد بدون آن که نویز کل افزایش یابد؛ بنابراین نسبت S/N بهبود می‌یابد درحالی‌که سرعت بالای پاسخ‌دهی نیز حفظ می‌شود. شکل ۵ این موضوع را نشان می‌دهد.  $I_{dg}$  در مقایسه با  $I_{ph}$  معمولاً کوچک است و  $I_{ds}$  نیز تکثیر نمی‌شود بنابراین

شات نویز تقریباً برابر  $In = \sqrt{2qI_{ph}BM^2F}$  می‌شود.



شکل ۵. مشخصه های نویزی در APD

در این حالت، بهره بهینه ( $M_{opt}$ ) را می توان با ماکزیمم کردن  $S/N$  به دست آورد. اگر از  $I_{ds}$  صرف نظر کنیم، بهره بهینه از رابطه زیر به دست می آید.

$$M_{opt} = \left[ \frac{4kT}{q(I_{ph} + I_{dg})R_L} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (۸)$$

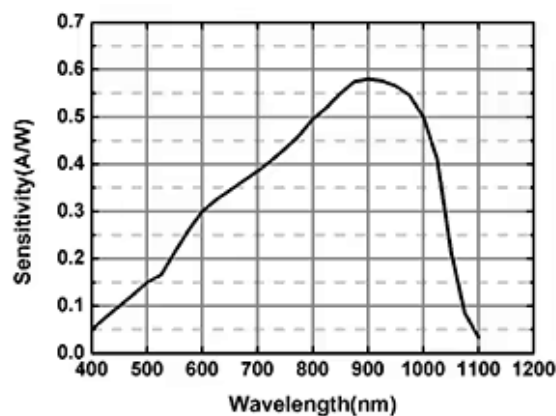
## ۴.۲ پاسخ طیفی APD

بدون اعمال ولتاژ معکوس، پاسخ طیفی APD ها تقریباً مشابه با فوتو دیودهای معمولی است. هنگامی که ولتاژ معکوس اعمال می شود، منحنی پاسخ طیفی تغییر می کند (شکل ۶). عمقی که نور درون سیلیکون نفوذ می کند، وابسته به طول موج نور است. در پرتوهای با طول موج کوتاه، این عمق کم بوده و بنابراین حامل ها در نزدیکی سطح تولید می شوند. ساختار APD تعیین می کند که طول موج بلند یا کوتاه، کدام یک می تواند تکثیر موثری ایجاد کند.

عواملی که سرعت پاسخ دهی فوتو دیود را تعیین می کنند، عبارت اند از: ثابت زمانی CR، زمان گذار حامل در لایه تهی (زمان دریافت)، زمان مورد نیاز برای فرایند تکثیر بهمنی، و زمان تأخیر که ناشی از جریان پخش حامل ها از بیرون به سمت لایه تهی است. با افزایش بهره، زمان لازم برای عبور حامل ها از ناحیه بهمنی طولانی تر می شود. اگر بهره APD در حد چند صد برابر باشد، زمان تکثیر بهمنی تبدیل به یک معضل می شود. پس باید

برای تعیین پهنای لایه تهی یک مقدار معین در نظر گرفت به طوری که پهنای آن نه بسیار زیاد و نه بسیار کم باشد.

زمان تأخیر نیز که ناشی از جریان پخش حامل‌ها است، می‌تواند بر سرعت پاسخ‌دهی APD تأثیر بگذارد. این زمان ممکن است تا چند میکروثانیه طول بکشد، مخصوصاً اگر لایه تهی ضخامت کمتری از ناحیه جذب نور داشته باشد. پس باید باتوجه به طول موج نور فرودی ولتاژ بایاس معکوس را به نحوی تنظیم کرد که این مشکل برطرف شود.



شکل ۶. منحنی پاسخ طیفی Si-APD در دمای اتاق

### ۳. ماژول APD

ماژول‌بندی و یکپارچه‌سازی APD می‌تواند باعث افزایش سرعت پاسخ‌دهی و میزان حساسیت آشکارساز شود. این ماژول متشکل از تراشه APD، مدار تغذیه بایاس APD، مدار تقویت‌کننده TIA، مدار کنترل دمایی، و مدار TDC (در صورت نیاز کاربر) است که در یک چیدمان فشرده یکپارچه شده‌اند.

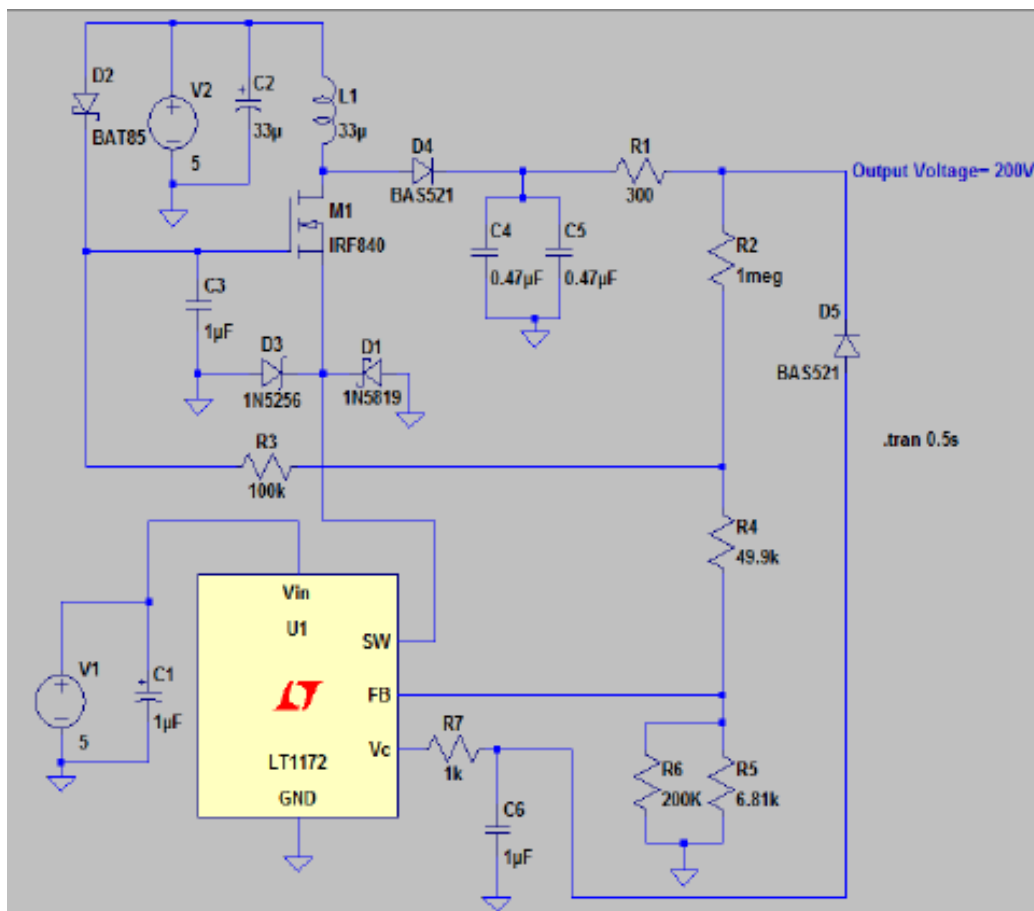
APD‌ها برای حصول به یک بهره معین، باید تا یک ولتاژ معکوس مشخص بایاس شوند؛ بنابراین باید یک مدار تغذیه مناسب برای آنها طراحی گردد. توان مصرفی APD بسیار بیشتر از توان فوتو دیود PIN است و بنابراین نیاز به یک مقاومت بین APD و منبع تغذیه بایاس و نیز یک مدار محدودکننده جریان دارد تا از آسیب به APD پیشگیری شود.

هم چنین بهره APD وابسته به دمای محیطی تغییر می‌کند؛ بنابراین باید یک جبران‌کننده دمایی وجود داشته باشد که ولتاژ معکوس را با تغییرات دما هماهنگ کند و یا دما را کنترل نماید تا در یک مقدار معین ثابت بماند. در روش جبران دمایی، یک سنسور دمایی در مجاورت APD نصب می‌شود تا مطابق با ضرایب دمایی APD، ولتاژ معکوس را کنترل کند. در روش کنترل دمایی، از یک خنک‌کننده ترموالکتریکی برای حفظ دمای APD استفاده می‌شود.

در آشکارسازی سیگنال‌های ضعیف، اگر نور پس‌زمینه وارد APD شود، نسبت سیگنال به نویز،  $S/N$ ، کاهش می‌یابد؛ بنابراین باید تاحدامکان ورود نور پس‌زمینه به APD مینیمم شود. این امر با کاربرد فیلترهای اپتیکی میسر می‌شود که یا زاویه دید آشکارساز را محدود می‌کند.

### ۱.۳ مدار تغذیه بایاس APD

از آنجایی که عملکرد APD نیاز به اعمال بایاس معکوس بالا دارد، بنابراین باید مدارهای تقویت‌کننده‌ای برای حصول به مقادیر ولتاژ معکوس در بازه ۱۳۰ تا ۲۲۰ ولت طراحی کرد. شکل ۷، شماتیک مدار تقویت‌کننده پیشنهادی را نمایش می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، این مدار ورودی ۵ ولت را در خروجی به ۲۰۰ ولت تبدیل می‌کند.



شکل ۷. مدار تقویت کننده ولتاژ APD

### ۲.۳ بلوک تقویت کننده امپدانس انتقالی (TIA)

نور آشکار شده توسط APD به پالس جریان الکتریکی تبدیل می‌شود. این پالس جریان توسط یک تقویت کننده امپدانس انتقالی، TIA، تقویت شده و به یک پالس ولتاژ تبدیل می‌شود. در تقویت کننده TIA، به دلیل انجام عمل فیدبک از طریق مقاومت فیدبک  $R_f$  به ورودی تقویت کننده اساساً بهره و امپدانس بالا است. مزایای استفاده از امپدانس انتقالی TIA را می‌توان چنین بیان کرد:

- نویز بسیار پایین
- دامنه پویایی وسیع
- ثابت زمانی آشکارسازی کوچک

- تداخل پیام و تداخل الکترومغناطیسی بسیار کم
- سهولت در کنترل و تثبیت فرایند تقویت کنندگی

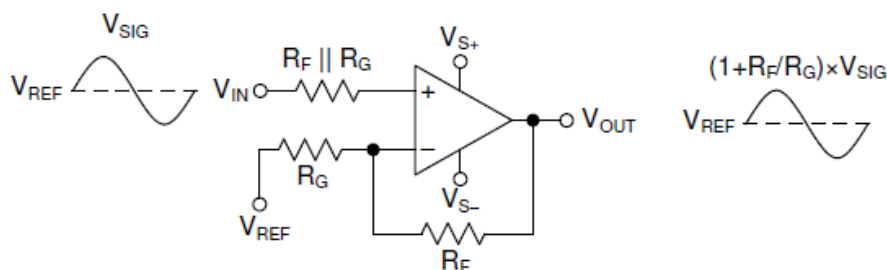
شکل ۸ شماتیک مدار TIA مدل OPA855 ، مورد استفاده در تست های پیاده سازی این پروژه، را نشان میدهد که دارای پهنای نواری 8GHz و بهره بیش از 7V/V با پایداری بالا است. نویز ولتاژ ورودی آن بسیار پایین و در حد  $0.98nV/\sqrt{Hz}$  است. این آپ امپ دارای دو ورودی امپدانس بالا و یک خروجی امپدانس پایین است. این OPA855 برای کاربردهای زمان پرواز (TOF)، لیدار با رزولوشن بالا، مبدل آنالوگ به دیجیتال (ADC) بسیار سریع، در سیگنال های ورودی ضعیف بهینه شده است.



### OPA855 Transimpedance

شکل ۸. تقویت کننده امپدانس انتقالی OPA855

با اعمال ولتاژ  $\pm 2.5V$  به مدار شکل ۹ می توان خروجی با بهره  $g=7$  از OPA855 به دست آورد. همان طور که از مدار پیداست، میزان بهره حاصل از این تقویت کننده وابسته به مقادیر مقاومت فیدبک  $R_F$  و مقاومت  $R_G$  است و از رابطه  $(1 + \frac{R_F}{R_G}) \times V_{signal}$  محاسبه می شود.

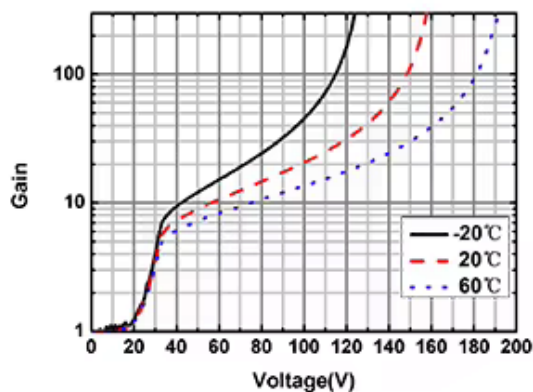


شکل ۹ مدار تقویت کننده امپدانس انتقالی OPA855

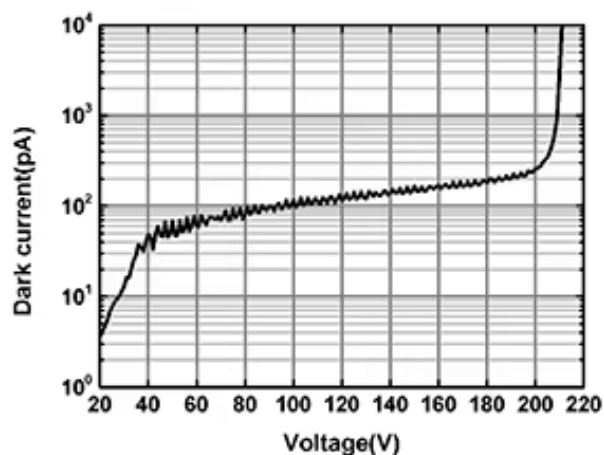
### ۳.۳ مدار کنترل دمای APD

عملکرد قطعات مداری بخش گیرنده به شدت وابسته به دما است. بالاخص، جریان خروجی و بهره فوتو دیود بهمینی باتوجه به تغییرات دما، دچار تغییر خواهد شد و این تغییر منجر به خطای اندازه گیری می شود. هم چنین، با کاهش دما، ولتاژ فروشکست فوتو دیود بهمینی کاهش می یابد؛ بنابراین استفاده از خنک کننده های ترموالکتریکی (TE) می تواند منجر به افزایش بهره وری APD شده و بهره APD را ثابت نگه می دارد.

ولتاژ عملیاتی APD مورد استفاده در این پروژه، دارای ضریب دمایی  $1.1 \text{ V}^{\circ}\text{C}$  است. همان طور که شکل ۱۰ نشان می دهد، در دمای محیط،  $20^{\circ}\text{C}$ ، ولتاژ لازم برای حصول بهره ۱۰۰، حدود ۱۵۰ ولت است. اما اگر بتوان با خنک کننده دمای عملکردی APD را به  $-20^{\circ}\text{C}$  رساند، ولتاژ مورد نیاز به مقدار تقریبی ۱۲۰ ولت کاهش می یابد. از آن جایی که دمای APD در حین فرایند بهمینی و تولید جریان بهمینی بطور قابل توجهی افزایش می یابد، عدم استفاده از خنک کننده و مدارات کنترل دما منجر به تخریب ساختار قطعه خواهد شد. نکته مهمتر این است که نویز جریان تاریکی و شات نویز APD به شدت وابسته به دما بوده و بنابراین بمنظور این که جریان تاریکی در فرایند بهمینی افزایش سریع و غیرقابل کنترل پیدا نکند و باعث اختلال در اندازه گیری پالس نوری نشود، باید دمای APD را بسیار پایین نگه داشت. شکل ۱۱ وابستگی دمایی جریان تاریک این آشکارساز را نمایش می دهد.



شکل ۱۰. مشخصه بهره-ولتاژ APD در دماهای عملکردی مختلف



شکل ۱۱. وابستگی دمایی جریان تاریک APD

از خنک‌کننده‌های متعددی می‌توان برای کنترل دمای APD استفاده کرد. خنک‌کننده‌های ترموالکتریکی پلتیر گزینه مناسب برای این کاربرد هستند. قطعه خنک‌کننده پلتیر Thermo Electric Colling، TEC، یک پمپ گرمایی فعال حالت جامد است که بسته به جهت جریان، گرما را از یک طرف دستگاه به طرف دیگر منتقل می‌کند. این المان سردکننده قطعه‌ای با اندازه‌های مختلف و با ضخامت چند میلی‌متر است که با متصل شدن به برق ۱۲ ولت و کشیدن جریانی در حدود ۲ تا ۲۵ آمپر یک طرف آن بسیار گرم و طرف دیگر سرد می‌شود و اختلاف دمایی حدوداً ۶۹ درجه سانتی‌گراد ایجاد می‌کند. همچنین از هیت‌سینک به‌منظور، کاهش دما و حرارت ناشی از گرمای سمت گرم پلتیر استفاده می‌کنند. با خنک‌شدن دمای طرف گرم دمای طرف سرد نیز کاهش

می‌یابد. در نتیجه یک سمت TEC ، حرارت را جذب و سمت دیگر دفع می‌کند؛ بنابراین همیشه یک سمت خنک و سمت دیگر گرم می‌شود. TEC با ولتاژ DC کار می‌کند.

#### ۴. مشخصه‌های APD آشکارساز کوانتوم هایتک

آشکارساز کوانتوم هایتک یک فوتو دیود سیلیکونی با آشکارسازی در ناحیه مرئی و مادون قرمز و حساسیت بیشینه 55 A/W (M=100) در طول موج 905 nm می‌باشد که مناسب کاربردهای آشکارسازی نوری، لیدار، و فاصله یاب نوری است. قطر ناحیه فعال آن 500 $\mu$ m و ولتاژ فروشکست آن در بازه 130-220V (وابسته به دمای سیستم) است. جدول ۱ مشخصه‌های الکتریکی و اپتیکی APD مذکور را ارائه می‌دهد.

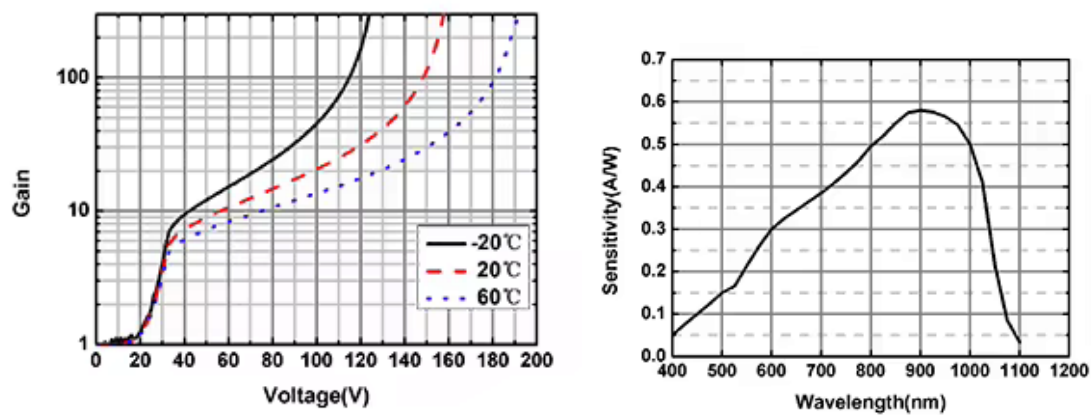
جدول ۱. مشخصه های الکتریکی و اپتیکی آشکارساز کوانتوم هایتک

| مشخصه                 | مقدار                                               |
|-----------------------|-----------------------------------------------------|
| نوع آشکارساز          | سیلیکونی                                            |
| بازه طول موجی         | 400-1100 nm                                         |
| طول موج بیشینه        | 905 nm                                              |
| پهنای باند            | 1 MHz                                               |
| سطح فعال آشکارساز     | 500 $\mu$ m                                         |
| پاسخ‌دهی بیشینه       | 0.55 A/W                                            |
| بهره آشکارساز         | 100                                                 |
| توان معادل نویز (NEP) | $0.13 \times 10^{-14} \text{ W} / \sqrt{\text{Hz}}$ |
| ظرفیت خازنی دیود      | 1.2 pF                                              |
| ولتاژ بایاس           | 12 V                                                |
| جریان تاریکی          | 0.4 nA                                              |

شکل ۱۲ وابستگی حساسیت آشکارساز به طول موج و وابستگی بهره به ولتاژ بایاس APD را نشان می‌دهد. همانطور که از نمودارها پیداست، بیشینه حساسیت APD در طول موج 905nm است. بعلاوه، می‌توان دید که در دمای اتاق، بهره APD در ولتاژ ۱۶۰ ولت بصورت فزاینده ای افزایش یافته و در واقع در این ولتاژ APD از مد

خطی وارد مد گایگر ( آشکارسازی تک فوتون) می شود. اگر بتوان دمای APD را تا  $-20$  درجه سانتی گراد کاهش داد، در ولتاژ حدود  $130$  ولت، APD می تواند بهره  $100$  ارائه دهد.

لازم به ذکر است که ماژول آشکارساز کوانتوم هایتک قابلیت سفارشی سازی برای طول موج ها و توان های مختلف را دارد.



شکل ۱۲. نمودار حساسیت بر حسب طول موج و نمودار بهره بر حسب ولتاژ آشکارساز Si-APD