

---

**The introduction of a new structure of the InGaAs / Si SACM APD avalanche photodiode for detection at 1550 nm radiation wavelength**

M. Eskandari<sup>1\*</sup>, M. Azim Karami<sup>2</sup>

\* Faculty of Electrical Engineering, University of Science and Technology, Tehran, Iran

(Received: 13/02/2021; Accepted: 04/09/2021)

**Abstract**

*In this paper, an avalanche photodiode (InGaAs/Si SACM APD) for detection at 1550 nm is presented. This detector has a simple structure defined in terms of layers, and its main detection parameters such as the dark current, photocurrent current, gain and responsivity are optimized. The advantage and distinction of this detector is that its bias voltage is smaller than the models available in the references and its detection parameters can compete with them. This bias voltage is at least 41% lower than other comparative references in similar conditions. In the index (0.9V<sub>br</sub>), the photocurrent is 8.3  $\mu$ A and the dark current is 4.9 nA. At a bias voltage of 25 volts, the 51  $\mu$ A photocurrent and the 21 nA dark current increase, compared to the same photodiode. This detector can also be used for special applications that require a very low dark current.*

**Keywords:** Detector, Avalanche Photodiode, Response, Dark current, Photocurrent.

---

\* Corresponding author E-mail: mehdi\_eskandari@alumni.iust.ir

## ارائه ساختاری نوین از فوتودیود شکست بهمنی InGaAs / Si SACM photodiode avalanche جهت آشکارسازی در طول موج تابشی ۱۵۵۰ نانومتر

مهدی اسکندری<sup>۱\*</sup>، محمدعظیم کریمی<sup>۲</sup>

۱- کارشناس ارشد، ۲- دانشیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران

(دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۲۵، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۱۳)

### چکیده

در این مقاله یک آشکارساز مبتنی بر پدیده شکست بهمنی (InGaAs/Si SACM APD) برای آشکارساز نور در طول موج ۱۵۵۰ نانومتر ارائه گردیده است. این آشکارساز با ساختاری ساده، از حیث لایه‌ها تعریف و کمیت‌های اصلی آشکارسازی آن همانند جریان تاریک، جریان تابش، بهره و پاسخ‌دهی، بهینه شده است. وجه برتری و تمایز این آشکارساز این است که ولتاژ بایاس آن کمتر از مدل‌های موجود در مراجع معرفی شده می‌باشد و کمیت‌های آشکارسازی آن نیز، قابل رقابت با آنها می‌باشد. این ولتاژ بایاس حداقل ۴۱٪ از دیگر مراجع تطبیقی در شرایط مشابه کمتر است. در شاخص  $(0.9V_{br})$ ، جریان تابش  $8/3 \mu A$  و جریان تاریک  $4/9 nA$  حاصل گشته است. در ولتاژ بایاس ۲۵ ولت جریان تابش  $51 \mu A$  و جریان تاریک  $21 nA$  نسبت به فوتودیود مشابه افزایش می‌یابد. از این آشکارساز برای کاربری‌های خاصی که نیاز به جریان تاریک بسیار پایین دارند نیز، می‌توان بهره برداری نمود.

### کلید واژه‌ها: آشکارساز، فوتودیود شکست بهمنی، پاسخ‌دهی، جریان تابش، جریان تاریک

#### ۱. مقدمه

حال انجام است [۴]. اعمال تغییرات در ضخامت و غلظت نواحی مختلف دیود شکست بهمنی، اثر مستقیمی بر روی کارایی آشکارساز دارد به همین علت بررسی اثر تغییرات ضخامت و غلظت نواحی آشکارساز در اکثر مقالات، در بهینه‌سازی‌ها مشاهده می‌گردد [۵].

چالشی که امکان طرح آن وجود دارد این است که چگونه می‌توان با ساختاری که قابلیت پیاده‌سازی را دارد، افزارهای طراحی کرد که بتوان کمیت‌های آشکارسازی آن را با ولتاژهای بایاس پایین‌تر بهینه کرد [۱]. کمیت‌های مهم آشکارسازی عبارتند از جریان تاریک، جریان تابش، بهره جریان، بهره کوانتومی و پاسخ‌دهی و نسبت سیگنال به نویز می‌باشد. از بین کمیت‌های معرفی شده مهم‌ترین دلیل استفاده از APD در فرایند آشکارسازی، بهره داخلی بالای آنها می‌باشد [۶].

یکی از مهم‌ترین کاربردهای آشکارسازهای APD InGaAs/Si، استفاده از آنها در فیبرهای نوری و صنایع مخابراتی است که به عنوان آشکارساز در طول موج‌های بین ۱۳۰۰ تا

آشکارسازهای نوری، در دهه‌های اخیر نقش بسیار تعیین‌کننده‌ای در نجوم، مخابرات نوری، حسگرهای نوری، تصویربرداری نوری و سامانه‌های هشدار لیزری ایفا می‌نمایند. در اغلب این کاربردها، آشکارسازی در ناحیه مادون قرمز نزدیک‌مورد نیاز است [۱]. فوتودیودهای شکست بهمنی به دلیل بهره داخلی و حساسیت بالا به عنوان گزینه مناسبی برای دستیابی به اهداف اشاره شده در بالا، مطرح هستند [۲]. ولتاژهای بایاس بسیار پایین‌تر از دیگر حسگرها، نظیر لوله‌های ضرب‌کننده خلاء و شرایط سهل‌تر در خصوص عملیاتی شدن، از دیگر دلایل برتری این آشکارسازها می‌باشد. به همین دلیل فرایند بهینه‌سازی این ادوات در سال‌های اخیر با سرعت فزاینده‌ای در حال پیشرفت می‌باشد [۳].

استفاده از تکنیک‌های متفاوت برای بهینه‌سازی فوتودیود شکست بهمنی مانند مدرج کردن، تعبیه لایه‌های شارژ و ترکیبی از تمام این روش‌ها، برای کارآمد شدن و افزایش بهره، پاسخ‌دهی و همزمان کاهش نویز در مورد این نوع آشکارسازها هم اکنون در

کوانتومی داخلی نیز معرفی و نامگذاری نموده اند [۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳].

### ۳-۲. عدد ضرب کنندگی<sup>۱</sup>

$$M = \frac{I_{ph}}{I_{pho}} \quad (۳)$$

در رابطه (۳) M نشان دهنده عدد ضرب کنندگی  $I_{pho}$ ، جریان اولیه نوری و جریانی که ضرب کنندگی در آن روی نداده است  $I_{ph0}$  جریان آشکارساز در حالت ضرب کنندگی و تابش می باشد [۱۴، ۱۵].

### ۴-۲. پاسخ دهی

$$R' = \frac{\eta \times q}{h \times \nu} \cong \frac{\eta \times \lambda}{1.24} \quad (۴)$$

$$R = M \times R' \quad (۵)$$

در رابطه (۴)  $\eta$  بهره کوانتومی و  $\lambda$  طول موج پرتو تابیده شده به آشکارساز بر حسب میکرومتر می باشد. در رابطه (۵)  $R'$  پاسخ دهی اولیه محاسبه شده از رابطه (۴) و M عدد ضرب کنندگی و R پاسخ دهی نهایی فوتودیود شکست بهمی می باشد. واحد پاسخ دهی بر حسب  $AW^{-1}$  سنجیده می شود. در فوتودیودهای شکست بهمی به دلیل وجود بهره داخلی عدد پاسخ دهی به دست آمده از رابطه (۴) در بهره ضرب شده است [۱۶، ۱۷، ۱۵].

### ۵-۲. نرخ تولید حامل

پس از تابش نور به نیمه هادی نرخ تولید حامل در درون آن و به طور خاص در لایه جذب از طریق رابطه (۶) محاسبه و تعیین می گردد:

$$g' = \frac{I_v(x) \times \alpha}{h\nu} \quad (۶)$$

در رابطه بالا  $\alpha$  ضریب جذب (در این مقاله ضریب جذب  $In_{.53}Ga_{.47}As$  در طول موج ۱۵۵۰ نانومتر مد نظر است)،  $I_v(x)$  میزان شدت نور تابیده شده به سطح و  $h\nu$  نیز انرژی فوتون در طول موج ۱۵۵۰ نانومتر می باشد [۱۰].

### ۶-۲. فاکتور نویز سرریز<sup>۱</sup>

یکی از مهمترین منابع نویز در APD ها با عنوان نویز تکثیر یا نویز اضافی شناخته می شود این نویز به دلیل ماهیت تصادفی بودن پدیده ضرب کنندگی موجب نوسانات بهره حول مقدار میانگین آن می گردد. در آشکارسازهای بهمی بایستی بهره حداکثر و همزمان نویز اضافی را تا حد امکان تقلیل داد [۱۱].

۱۵۵۰ نانومتر از آن به طور گسترده استفاده می گردد [۷]. در اهدافی که احتیاج به انتقال داده های در فیبر به فواصل دور و همچنین سرعت بالا مطرح باشد استفاده از  $InGaAs/Si$  APD توصیه شده است [۸].

در این مقاله هدف این است که، با ارایه مدلی ساده از حیث تعداد لایه های روشنایی شده به آشکارسازی رسید، که در کمیت های مهم از جمله جریان تاریک، جریان تابش، بهره، بهره کوانتومی و نهایتاً پاسخ دهی بتواند در ولتاژ بایاسی پایین تر، قابلیت های آشکارسازی مناسبی در قیاس با مراجع معرفی شده داشته باشد. با توجه به مصالحه ای که در طراحی ها به وجود می آید طبیعی است که در برخی موارد نتایج در مقایسه با مراجع دیگر بهتر و در مواردی هم اعداد به دست آمده ضعیف تر گردد که این موضوع با توجه به اهداف طراحی، قابل توجیه می باشد. آشکارسازی که در این مقاله به آن پرداخته شده است SACM  $InGaAs/Si$  APD می باشد که فرایند شبیه سازی توسط نرم افزار مخصوص شبیه سازی افزاره و به صورت دو بعدی صورت گرفته است [۹].

لازم به ذکر است برای لایه نشانی  $InGaAs$  بر روی Si ابتدا  $InGaAs$  را روی  $InP$  لایه نشانی کرده سپس به روش باندینگ و تحت فشار چند صد مگا پاسکال و در دمای ۶۵۰ درجه و در مدت زمان ۲۰ دقیقه لایه های  $InGaAs/InP$  به لایه های Si چسبانده می شود و نهایتاً لایه  $InP$  را با زدایش حذف می نمایند [۸].

## ۲. تعاریف و روابط ریاضی

### ۱-۲. تغییرات شدت نور در نیمه هادی

$$I_v(x) = I_v(0)e^{-\alpha x} \quad (۱)$$

در رابطه بالا  $\alpha$  ضریب جذب، x ضخامت نیمه هادی را بیان می کند که پرتوی نوری در آن جذب می شود،  $I_v(x)$  نیز میزان شدت نور تابیده شده بعد از گذر از عمق x از نیمه هادی و  $I_v(0)$  نیز شدت اولیه نور تابیده شده است [۷].

### ۲-۲. بهره کوانتومی

$$\eta = (1 - e^{-(\alpha x)}) \quad (۲)$$

در برخی مراجع عدد به دست آمده از رابطه (۲) را بهره

<sup>۱</sup> Multiplication factor

جهت کمینه شدن بازتابش سطحی از لایه های ضد انعکاس در آشکارسازها استفاده می‌گردد ضخامت این لایه که از جنس سیلیکان نیتريد می‌باشد از طریق رابطه زیر ضخامت این لایه محاسبه می‌گردد.

$$d = \frac{\lambda}{4 \times n_2} \quad (11)$$

در رابطه بالا  $d$  ضخامت لایه ضد انعکاس،  $\lambda$  طول موج پروتو تابیده شده و  $n_2$  ضریب شکست لایه زیرین پوشش ضد انعکاس که در اینجا Si می‌باشد [۱۵].

### ۲-۱۰. بهره کوانتومی خارجی

در مراجع مفهومی به‌عنوان بهره کوانتومی خارجی نیز معرفی شده است که به بازتابش سطحی از هوا و اولین سطح تماسی نور در آشکارساز مرتبط است [۱۰، ۱۱]. در محاسبات فرض بر این است که افزاره تحت تابش نرمال (تابش عمود) قرار گرفته و از بازتابش سطحی صرف‌نظر شده در عمل بایستی با استفاده از رابطه اسنل این بازتابش سطحی محاسبه تا شار تابش وارد شده به آشکارساز و متعاقباً شدت تابش وارد شده به ناحیه جذب به‌طور واقعی محاسبه گردد [۱۰].

$$\Gamma = \left( \frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2 \quad (12)$$

رابطه (۱۲) به رابطه اسنل معروف است که در آن  $n_1$  و  $n_2$  ضریب شکست محیط اول و دوم و  $\Gamma$  مقدار نور بازتابیده شده می‌باشد [۱۰].

### ۳. فرآیند مدلسازی و بهینه سازی فوتودیود

#### شکست بهمنی InGaAs/Si

#### ۳-۱. معرفی مدل و عملکرد نواحی آن

یک فوتودیود شکست بهمنی، InGaAs/Si SACM APD با پنج لایه و ناحیه مختلف در شکل (۱) نمایش داده شده است. ضخامت و غلظت این نواحی به تفکیک در جدول شماره (۱) بیان گردیده است. محل اتصال الکترودها منفی و مثبت در نواحی  $p^+$  و  $n^+$  تعریف گردیده است. ساختار نمایش داده شده در شکل (۱) برای آشکارسازی در طول موج ۱۵۵۰ نانومتر طراحی و مدلسازی شده است.

$$F = \frac{(M^2)}{(M)^2} \quad (7)$$

$$KF = \alpha M + (1 - K) \times (2 - M^{-1}) \quad (8)$$

$$K = \beta / \alpha \quad (9)$$

در روابط قبل  $M$  بهره آشکارساز،  $K$  ثابت یونیزاسیون،  $\alpha$  ثابت یونیزاسیون الکترون و  $\beta$  ثابت یونیزاسیون حفره می‌باشد [۱۹، ۱۸، ۱۷، ۱]. همان‌طور که در رابطه (۸) مشخص است انتظار می‌رود با افزایش میزان بهره نوین تکثیر نیز افزایش پیدا نماید.

### ۲-۷. ولتاژ punch-through

ولتاژ punch-through ولتاژی است که در آن ولتاژ ناحیه تخلیه گسترش پیدا کرده و به لبه‌های ناحیه جذب کشیده می‌شود [۱۹].

پدیده punch-through در دیگر ادوات نیمه هادی پدیده مطلوبی نیست لیکن در SAM APD ها طراح به دنبال ایجاد این شرایط در بین نواحی جذب و ضرب می‌باشد. اندازه جریان تابش تا قبل از ولتاژ punch-through میزان اندکی است چرا که بسیاری از حامل‌های تولید شده در ناحیه جذب آنقدر انرژی و به طبع آن تحرک پذیری لازم را ندارند که از سد پتانسیلی اتصال ناهمگون ایجاد شده بین سیلیکان و اینیدیم گالیوم آرسناید عبور نمایند. لیکن با رسیدن به این ولتاژ انرژی جنبشی لازم برای حامل نوری ایجاد شده و می‌تواند خود را برای تکثیر به ناحیه ضرب برساند. با افزایش ولتاژ punch-through بر مقدار جریان تابش پیوسته افزوده می‌شود [۱۹].

### ۲-۸. فضای مرده<sup>۱</sup>

فضای مرده یا فضای راکد طبق تعریف فاصله‌ای است که بایستی حامل طی نماید تا انرژی جنبشی و سرعت لازم را برای شروع یونیزاسیون برخوردار کسب نماید.

$$d = \frac{E_{the}}{q \times \xi} \quad (10)$$

در رابطه بالا  $E_{the}$  مبین انرژی آستانه یونیزاسیون و  $\xi$  میدان الکتریکی است.  $d$  فاصله‌ای است که بایستی حامل طی نماید تا انرژی و تحرک‌پذیری لازم را برای شروع یونیزاسیون برخوردار کسب نماید [۲۰، ۱].

### ۲-۹. ضخامت لایه ضد انعکاس

<sup>1</sup> Dead space

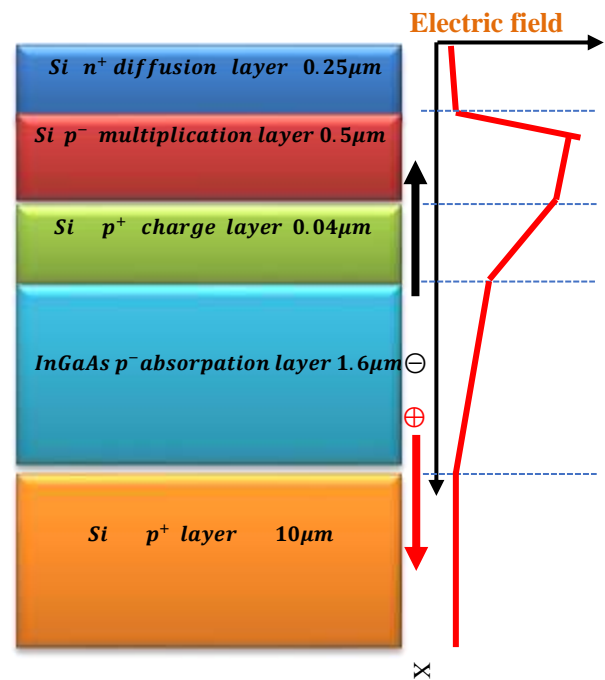
جدول (۱): مقادیر غلظت و ضخامت لایه مختلف آشکارساز APD InGaAs/Si

لایه	ضخامت ( $\mu\text{m}$ )	غلظت ناخالصی ( $\text{cm}^{-3}$ )
Si n <sup>+</sup> diffusion layer	0.25	$5 \times 10^{17}$
Si p <sup>-</sup> multiplication layer	0.50	$2 \times 10^{14}$
Si p <sup>+</sup> charge layer	0.04	$6 \times 10^{17}$
InGaAs p <sup>-</sup> absorption	1.6	$1 \times 10^{14}$
Si p <sup>+</sup> layer	10.0	$1 \times 10^{19}$

ناحیه دوم، ناحیه ضرب‌کنندگی است، در ناحیه ضرب بایستی غلظت و ضخامت‌ها به نوعی تعیین گردد که حداکثر میدان الکتریکی در این ناحیه تامین گردد. برای شروع پدیده بهمنی باید میدانی بالاتر از میدان بحرانی Si که  $3/7 \times 10^5 \frac{\text{V}}{\text{cm}}$  است، در این ناحیه ایجاد تا یونیزاسیون برخورد حادث شود. با توجه به اینکه APD به صورت بایاس معکوس عملیاتی می‌گردد و جهت میدان در داخل آن، حفره‌های تولید شده در ناحیه جذب، خود را بایستی به ناحیه p<sup>+</sup> رسانده و الکترون‌های تولید شده نیز بایستی پس از گذر از ناحیه شارژ برای شرکت در پدیده بهمنی و چند برابر شدن خود را به ناحیه ضرب برساند، جفت الکترون حفره‌های بعدی تولید شده در ناحیه ضرب به ترتیب به سمت منطقه n<sup>+</sup> و p<sup>+</sup> رفته و جریان در افزاره به وجود می‌آید [۱۵، ۱۹، ۱].

علت انتخاب Si در نواحی مختلف از جمله در ناحیه ضرب، رسیدن به بهره‌های بالا می‌باشد. این بهره می‌تواند به عدد  $10^3$  و بیشتر برسد [۱۵]. علت استفاده Si در ناحیه P<sup>+</sup>Si به دلیل این است که این لایه اولین لایه در تماس با تابش است و لازم است پرتو نور با کمترین تضعیف از این منطقه عبور نماید و خود را به ناحیه جذب برساند. از طرفی می‌توان بدون نگرانی از تضعیف نور در ناحیه P<sup>+</sup>Si، لایه جذب را به عمق افزاره و بعد از ناحیه‌ای ضخیم از P<sup>+</sup>Si منتقل نماییم.

نواحی ضرب و جذب و شارژ بین دو ناحیه n<sup>+</sup> و p<sup>+</sup> تعریف می‌گردد. پیوند n<sup>+</sup>p که در ناحیه ضرب و n<sup>+</sup> وجود دارد در تعیین و تغییر ولتاژ شکست نقش کلیدی ایفا می‌نماید. دوپینگ ناحیه کم تغلیظ شده (ناحیه ضرب) در این پیوند، با توجه به مفاهیم پایه‌ای اتصال pn، عامل اصلی تغییر ولتاژ شکست می‌باشد [۲۲، ۱۹].



شکل (۱): ساختار و لایه‌های فوتودیود شکست بهمنی InGaAs/Si که مراحل اولیه بهینه‌سازی در نواحی مختلف آن انجام شده است

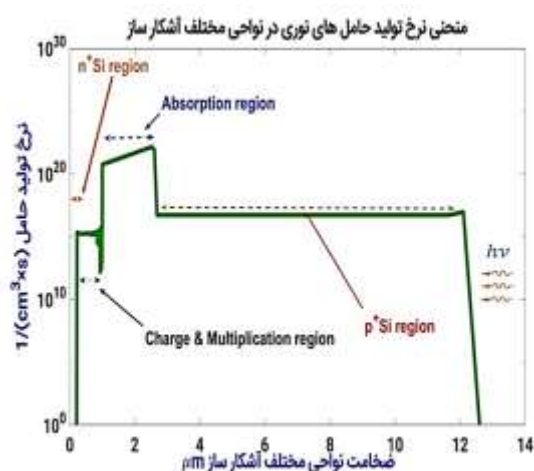
به خاطر آشکارسازی در محدوده فرسرخ بایستی از نیمه هادی استفاده گردد که شکاف باند آن حساسیت لازم در طول موج های بلند و کم توان IR را داشته باشد، به همین دلیل از نیمه هادی مرکب In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As با درصد مولی بیان شده در ناحیه جذب استفاده شده است.

غلظت ناحیه جذب باید با چگالی ناخالصی کم انتخاب شود تا حامل‌های تولید شده تحرک پذیری لازم را پس از برخورد پرتو نور داشته و بتوانند خود را با رانشی که توسط میدان الکتریکی ایجاد شده است، به ناحیه ضرب‌کنندگی برسانند. در طول این ناحیه بایستی میدان از مقدار  $2 \times 10^5 \frac{\text{V}}{\text{cm}}$  کمتر بوده تا پدیده تونل زنی باند به باند و یونیزاسیون برخورد، روی ندهد. وجود میدان‌هایی بزرگتر از حد تعریف شده، به خاطر شکاف باند کوچک InGaAs امکان پدیده یونیزاسیون برخورد را در ناحیه جذب افزایش داده که مطلوب نیست [۲۱، ۱۹، ۱].

در این مقاله میدان الکتریکی ناحیه جذب در بیشینه مقدار خود به عدد  $0.7/38 \times 10^5 \frac{\text{V}}{\text{cm}}$  می‌رسد که در اندازه قابل قبولی با توجه به معیار تعریف شده در بالا می‌باشد.

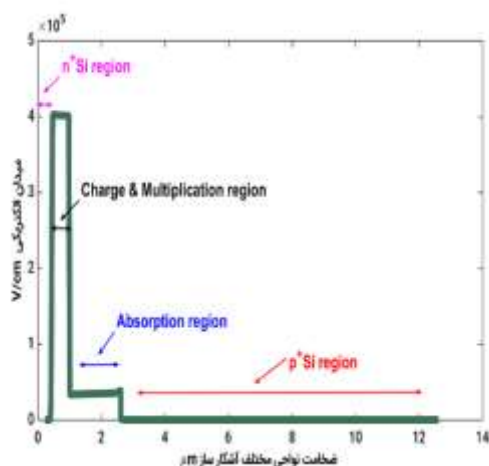
#### ۴. نتایج و نمودارها

با توجه به تابش پرتو نور به قسمت‌های مختلف افزاره امکان تولید زوج الکترون حفره در دیگر نواحی آشکارساز غیر از ناحیه جذب وجود دارد لیکن با بررسی نمودار نرخ تولید فوتون در لایه‌های مختلف افزاره، مشخص می‌گردد نرخ تولید حامل با اختلاف بسیار زیاد در لایه جذب صورت می‌گیرد. در نمودار شکل (۲) این موضوع مشهود است.



شکل (۲): مقایسه حامل‌های نوری تولید شده در نواحی مختلف آشکارساز. در شکل به‌وضوح اختلاف تولید حامل در ناحیه جذب و نواحی دیگر نمایان است.

میدان در نواحی مختلف بررسی گردد. همان‌طور که قبلاً توضیح داده شد، در فوتو دیودهای شکست بهمنی فرایند جذب و ضرب در نواحی جداگانه‌ای برخلاف انواع دیگر آشکارسازها نظیر PINphotodiodeها صورت می‌پذیرد. طبق تعریف APDها فرایند ضرب نیز بایستی به‌طور خاص در ناحیه ضرب صورت بپذیرد و عمده میدان الکتریکی ایجاد شده در افزاره بایستی در این ناحیه توزیع شده باشد، با این وجود این‌طور نیست که در نواحی دیگر میدان صفر باشد به‌عنوان نمونه در ناحیه جذب بایستی میدان کمتر از حد آستانه اشاره شده باشد تا حامل‌های تولید شده انرژی جنبشی لازم را برای رساندن خود به نواحی ضرب و سپس  $n^+$  (برای الکترون‌ها) و ناحیه  $p^+$  (برای حفره‌ها) داشته باشند [۱۳].



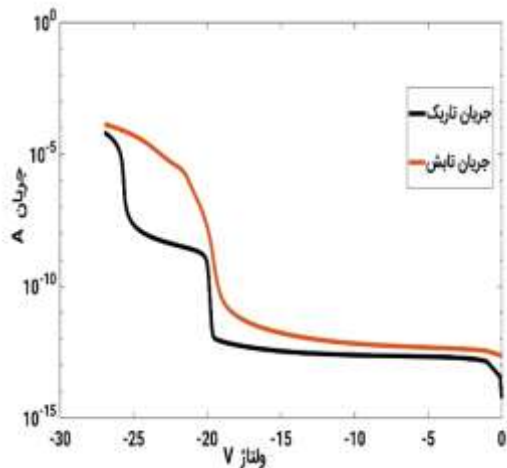
شکل (۳): تغییرات میدان الکتریکی در نواحی مختلف آشکارساز

برای اینکه APD بتوانند عملکرد تعریف شده خود را انجام دهد و پدیده چند برابر شدن حامل‌ها روی دهد، لازم است میدانی با اندازه بیشتر از میدان بحرانی که در قبل به آن اشاره شد در ناحیه ضرب تشکیل گردد. هر چه این میدان بیشتر باشد حامل‌های تولید شده از طریق فرایند ضرب بیشتر شده و بهره جریان بالاتر می‌رود. برای محاسبه بهره و به تبع آن محاسبه فاکتور نویز اضافی دانستن ضرایب  $K$ ،  $\alpha$  و  $\beta$  ضروری می‌باشد. با تعبیه لایه شارژ و تغییر غلظت و ضخامت این لایه، می‌توان میدانی یکنواخت (با تغییرات کم) در تمامی عمق لایه ضرب ایجاد نمود.

خصوصیت اصلی این میدان ثابت در این است که می‌توان مقدار تقریباً ثابتی برای  $\alpha$  و  $\beta$  در تمام ضخامت لایه ضرب در نظر گرفت و مقادیر این کمیت‌ها را به مدل‌های ریاضی نزدیک‌تر نمود و نهایتاً دقت محاسبات را افزایش داد. یکنواختی میدان در شکل (۳) مشاهده می‌گردد. کوچکترین تغییر غلظت در ناحیه

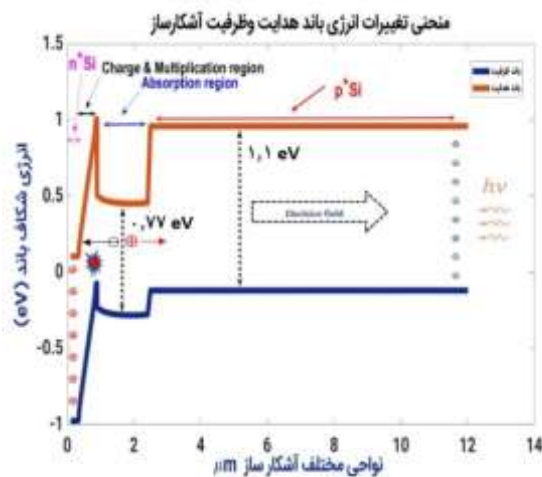
با توجه به رابطه (۶) نرخ تولید حامل در لایه جذب به صورت زیر می‌باشد. در رابطه (۶)،  $\alpha$  ضریب جذب  $In_{.53}Ga_{.47}As$  در طول موج ۱۵۵۰ نانومتر، معادل  $8 \times 10^3 \frac{1}{cm}$  است،  $I_v(x)$  میزان شدت نور تابیده شده به سطح ورودی لایه جذب که با صرف نظر از بازتابش سطحی  $1 \frac{nW}{\mu m^2}$  می‌باشد و نهایتاً  $h\nu$  انرژی فوتون در طول موج ۱۵۵۰ نانومتر که  $0.8 eV$  می‌باشد. با جایگذاری این مقادیر در رابطه (۶) نرخ تولید حامل در هنگام ورود به لایه جذب در شدت نور تابشی بیان شده معادل  $5/31 \times 10^{21} \frac{1}{cm^3.s}$  محاسبه می‌گردد. با توجه به شکل (۲) بیشترین نرخ تولید در لایه جذب صورت گرفته است، اختلاف نرخ تولید حامل با دیگر نواحی آشکارساز حداقل در مرتبه  $10^5$ ، می‌باشد. یکی از اهدافی که در طراحی APD و جداسازی عملکردی نواحی جذب و ضرب وجود دارد، کاهش نویز می‌باشد.

برای بررسی عملکرد آشکارساز بعد از رصد کردن و کنترل جذب فوتون در نواحی و مختلف آشکارساز که در قسمت‌های قبلی به آن اشاره گردید، لازم است برای محاسبه ضرایب یونی‌اسیون الکترون، حفره و نهایتاً محاسبه نویز اضافی، منحنی



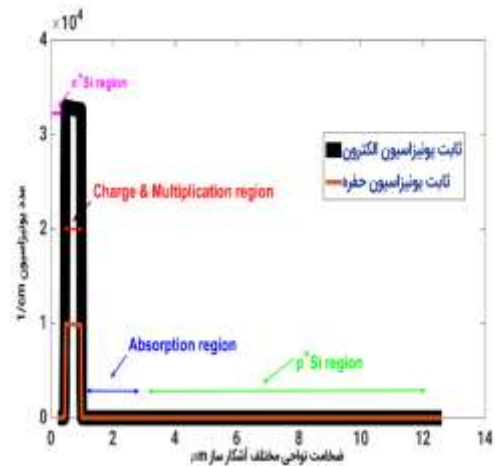
شکل (۵): نمودار جریان تاریک و جریان تابش آشکارساز SACM APD  
InGaAs/Si معرفی شده در شکل (۱)

علت اینکه در ورودی نور و پنجره APDهایی که در این طول موج کار می‌کنند، از نیمه هادی هایی مانند Si و یا InP استفاده می‌گردد، این است که این هر دو نیمه هادی در طول موج‌های بالاتر از ۱۰۰۰ نانومتر، دارای ضریب جذب بسیار کوچک هستند به همین دلیل نور بدون تضعیف از این نواحی گذشته و می‌تواند خود را به ناحیه جذبی که در بعد از این نیمه هادی‌ها تعبیه شده برساند [۱۰]. به همین دلیل بدون نگرانی از تضعیف شدت تابش می‌توان با افزایش ضخامت لایه P<sup>+</sup>Si، لایه جذب را به عمق انتقال داد، تا جذب فوتون‌ها بیشینه گردد. وضعیت باند هدایت و ظرفیت در نقاط مختلف آشکارساز در شکل (۶) نمایش داده شده. اثر خمش باند در ناحیه ضرب که میدانی بالاتر از میدان بحرانی در آن وجود دارد و همچنین ناحیه جذب که میدان در آن به مراتب از ناحیه ضرب ضعیف‌تر است در شکل (۶) نمایان است.



شکل (۶): وضعیت باند هدایت و ظرفیت آشکارساز

شارژ می‌تواند به راحتی کمیت‌های آشکارساز همانند میدان الکتریکی را تغییر دهد و به تبع آن مؤلفه‌های دیگر نیز دگرگون می‌گردد، لذا غلظت این ناحیه کمیتی بحرانی است [۲۳].



شکل (۴): مقایسه ثابت یونیزاسیون الکترون و حفره

دسترسی به عدد یونیزاسیون الکترون و حفره امکان محاسبه ثابت K را مهیا می‌سازد، با داشتن این ثابت و بهره آشکارساز، کمیت فاکتور نویز اضافی محاسبه می‌گردد. معمولاً فاکتور نویز در بهره ۱۰ محاسبه می‌گردد [۱۱].

در شکل (۴) مقدار  $\alpha$  از روی نمودار  $\alpha = 32966 \text{ cm}^{-1}$  و به همین ترتیب برای  $\beta$  عدد  $\beta = 9979 \text{ cm}^{-1}$  استخراج می‌گردد. مقدار ثابت K تقریباً ۰/۳۰ می‌باشد. برای صحت‌سنجی این کمیت، از نمودار تغییرات K بر حسب میدان الکتریکی، در میدان  $400 \frac{\text{KV}}{\text{cm}}$  در خصوص سیلیکان که از مرجع شماره ۸ استخراج شده است استفاده گردید، که عدد ۰/۳۴ برای K احصاء گردید که نزدیکی قابل قبولی دارد. میدان  $400 \frac{\text{KV}}{\text{cm}}$  بیشینه میدان ایجاد شده در ناحیه ضرب آشکارساز می‌باشد که در شکل (۳) مشاهده می‌گردد.

در شکل (۵) وضعیت جریان تابش و جریان تاریک این آشکارساز نمایان است. ولتاژ ۲۰ ولت شروع پدیده punch-through می‌باشد در این ولتاژ، ناحیه تخلیه گسترش پیدا کرده و به لبه‌های ناحیه جذب نزدیک می‌شود. با بررسی جزئیات نمودار جریان تاریک و جریان تابش در شکل (۵) دو منطقه عمده مشاهده می‌گردد. منطقه اول ناحیه‌ای است که از بعد از ولتاژ punch-through یعنی ۲۰/۲ ولت شروع شده و تا قبل از ولتاژ شکست امتداد پیدا می‌نماید که در قبل به آن اشاره گردید. منطقه دوم که می‌تواند داری کاربری خاصی باشد از ولتاژ صفر تا قبل از ولتاژ punch-through تعریف می‌گردد.

جدول (۲): مقایسه جریان تاریک، جریان تابش و فاکتور نویز اضافی در خصوص ۵ آشکارساز APD مبتنی InGaAs با مدل و ساختار طراحی شده در این مقاله

مرجع	$V_{pt}$ (V)	$V_{br}$ (V)	$V = V_{pt}$ (V)		$V = 0.9 V_{br}$ (V)		$M = 10$	
			$I_{ph}$ (nA)	$I_d$ (nA)	$I_{ph}$ (nA)	$I_d$ (nA)	$V_{bias}$ (V)	Excess noise factor
[۲۴]	۲۴	۴۴	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۱	۱	۰/۱	۴۲	-
[۲۵]	۲۴	۵۵	۰/۰۰۸	۰/۰۰۲	۰/۰۰۸	۱/۵	-	-
[۲۶]	۱۶	۵۶	۱	۰/۱	۱۰	۱۰۰	۵۴	٪۲/۹
[۲۷]	۳۰	۸۰	۱/۵	۰/۰۰۸	۹	۱۰	۷۵	٪۶
[۲۸]	۳۴	۵۰	۰/۵	۰/۰۰۹	۴	۰/۹	۵۰	-
این کار	۲۰/۲	۲۵/۶	۰/۰۱۷	۰/۰۶۷	۸/۳	۴/۹	۲۱/۷	٪۴

## ۵. مقایسه مدل شبیه‌سازی شده با کارهای دیگران

ولتاژ بایاس نهایی ۲۵ ولت انتخاب شده است. اندازه جریان تابش در این نقطه چندین مرتبه از مقدار ( $0.9 V_{br}$ ) بزرگتر است. داده‌های مربوط به ولتاژ بایاس ۲۵ ولت در مورد ساختار شکل (۱) در جدول (۳) در صفحه بعد گردآوری شده است. یکی از کمیت‌هایی که بایستی در خروجی‌های شبیه‌سازی بررسی گردد SNR است. در SNR نیز یکی از مؤلفه‌هایی که تأثیرگذار است نسبت جریان تابش به تاریک است که مستقیماً بزرگی SNR را تحت تأثیر قرار می‌دهد. به همین دلیل لازم است در تمامی مراحل فرایند شبیه‌سازی به نسبت  $\frac{I_{ph}}{I_d}$  توجه گردد [۱].

کمیت مهم و تعیین‌کننده دیگری که در این شبیه‌سازی بررسی و نتایج آن در جدول (۳) آورده شده است پاسخ‌دهی است. این مؤلفه نیز مانند بهره، جریان تاریک، جریان تابش و طول موج کاری توسط شرکت‌های سازنده در مستندات مرتبط با آشکارسازهای APD ارایه می‌گردد.

پاسخ‌دهی مستقیماً به بهره کوانتومی وابسته است. بهره کوانتومی با افزایش ضخامت لایه جذب افزایش پیدا می‌کند یعنی انتظار داریم عدد پاسخ‌دهی با افزایش ضخامت لایه جذب افزایش پیدا نماید، لیکن در عمل این اتفاق روی نمی‌دهد چراکه در APD ها پاسخ‌دهی نهایی به بهره نیز مرتبط می‌باشد که در رابطه (۵) بیان شده است.

با افزایش ضخامت لایه جذب به علت افزایش مسافتی که لازم است حامل‌ها از ناحیه جذب طی نماید تا به ناحیه ضرب (برای الکترون‌ها) و ناحیه  $P^+$  (برای حفره‌ها) برسند، افزایش ضخامت لایه جذب و به تبع آن کاهش میدان در این ناحیه، باعث می‌گردد حامل‌ها انرژی جنبشی لازم را برای طی مسافت ناحیه جذب از دست داده و نتوانند خود را به نواحی مورد نظر که اشاره گردید برسانند.

این موضوع باعث می‌گردد حامل نوری تولید شده از بین رفته و اندازه جریان تابش کمتر گردد و نهایتاً بهره پایین بیاید. به همین دلیل پاسخ‌دهی نهایی APD که با بهره مرتبط می‌شود، افت می‌نماید [۱۵، ۱۹، ۲۰].

در جدول (۲) در بالا، داده‌های مربوط به جریان تابش، جریان تاریک و نویز اضافی در خصوص ۵ مرجع معرفی شده، بیان شده است. با توجه به اینکه برای عملیاتی نمودن APD ها می‌توان هر نقطه‌ای قبل از ولتاژ شکست را در نظر گرفت، لیکن لازم است معیار و نقطه‌ای ثابت برای مقایسه اندازه جریان تاریک و تابش آنها در نظر گرفت به همین دلیل در ولتاژی معادل  $0.9 V_{br}$  ولتاژ شکست نتایج استخراج و بررسی می‌گردند. در این مقاله نیز از همین معیار استفاده شده است [۳۲، ۳۱، ۳۰، ۱].

همان‌طور که در جدول (۲) مشخص است جریان تابش این مقاله، از مراجع  $24/25$  با اختلاف بالاتر و در مقیاس و اندازه مراجع  $26, 27, 28$  می‌باشد. اما برتری این آشکارساز نسبت به پنج ساختاری که با آنها مقایسه شده است، در ولتاژ بایاس اعمالی می‌باشد. این مسئله در طراحی آشکارساز مهم است که در ولتاژ بایاسی کمتر فرایند آشکارسازی را در شرایط مطلوبی انجام دهد. اگر ولتاژ بایاس به مقدار  $25$  ولت افزایش پیدا نماید که هنوز تا ولتاژ شکست فاصله دارد، جریان تابش آن به عدد  $51 \text{ nA}$  می‌رسد هم‌زمان اندازه جریان تاریک به مقدار  $20 \text{ nA}$  خواهد رسید. مقدار ولتاژ ( $0.9 V_{br}$ ) برای مراجع  $28, 27, 26, 25, 24$  به ترتیب مقدار  $39, 49/5, 50/4, 72, 45$  ولت می‌باشد. با توجه به عدد  $23$  ولت برای ( $0.9 V_{br}$ )، درصد تغییر ولتاژ آشکارساز این مقاله، نسبت به ( $0.9 V_{br}$ ) مراجع جدول بالا، حداقل  $41\%$  می‌باشد و با لحاظ این موضوع برتری این آشکارساز نسبت به دیگر مراجع معرفی شده از حیث توان مصرفی، مشخص می‌گردد. در خصوص تعیین نویز اضافی، معیاری که در مراجع وجود دارد این است که در ولتاژی معادل بهره  $10$ ، آشکارساز را بایاس می‌نمایند. به همین دلیل در ولتاژ بایاسی متناسب با این بهره بایستی ضرایب یونیزاسیون الکترون و حفره تعیین گردد. ثابت  $K = \beta/\alpha$  در ولتاژ  $21/7$  که معادل بهره  $10$  است، مقدار  $0/27$  می‌باشد. نویز سرریز که به  $K$  وابسته است با افزایش بهره زیاد می‌گردد. نظر به تعریف APD ها، ولتاژ بایاس را تا قبل از ولتاژ شکست باید انتخاب نمود. در این شبیه‌سازی



جدول (۳): استخراج مؤلفه‌ها و کمیت‌های نهایی آشکار مدل‌سازی شده ساختار شکل (۳)

$V_{pt}$	$V_{br}$	$V_{bias}$	$V = 0.9 V_{br}$ (V)		$V_{bias} = 25$ (V)		$R'$ $AW^{-1}$	$R$ $AW^{-1}$ $M = 10$	ENF $M = 10$	$V = 0.9 V_{br}$	$V = 25$ V
			$I_{ph}$ (nA)	$I_d$ (nA)	$I_{ph}$ (nA)	$I_d$ (nA)				$\frac{I_{ph}}{I_d}$	$\frac{I_{ph}}{I_d}$
۲۰/۲	۲۵/۵	۲۵	۸/۳	۴/۹	۵۱/۴	۲۱	۰/۹	۹	٪۴	۱۶۹۴	۲۴۴۸

## ۶. نتیجه‌گیری

در این مقاله از یک فوتو دیود شکست بهمنی (SACM APD) InGaAs/Si، جدید ارایه گردید. برتری اصلی این کار در مرحله نخست این است که ساختاری جدید و ساده‌ای از حیث تعداد لایه‌ها معرفی گردیده است. ویژگی بعدی استفاده از سیلیکان در همه نواحی بغیر از ناحیه جذب می‌باشد که علاوه بر ویژگی‌های خاص Si، رسیدن به بهره جریان بالاتر از فوتودیودهای InGaAs/InP را به ارمغان آورده است. مزیت بعدی این کار در کاهش ولتاژ بایاس آشکارساز است که نهایتاً ۴۱٪ بهبود وجود دارد و توان مصرفی آشکارساز در قیاس با مراجع مقایسه شده کمتر می‌باشد. نحوه رسیدن به ساختار شکل (۱) به‌صورت خلاصه به شرح زیر می‌باشد.

تعبیه نیمه هادی مرکب  $In_{0.53}Ga_{0.47}As$  با شکاف باند خاص برای آشکار سازی در طول موج ۱۵۵۰ نانومتر در ناحیه جذب

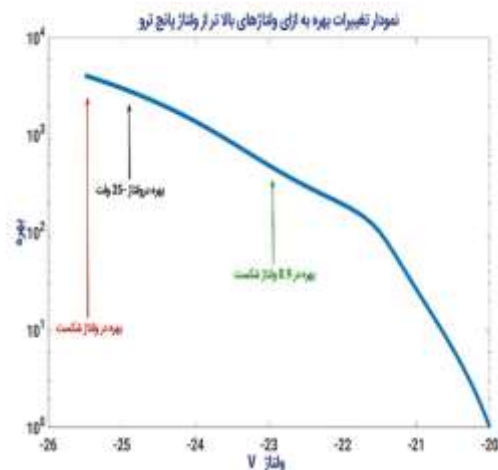
تعبیه نیمه هادی Si در ناحیه ضرب با توجه به ویژگی یونیزاسیون برخورد Si برای رسیدن به بهره جریان بالا

انتخاب نیمه هادی Si به عنوان پنجره ورودی با لایه ای ضخیم، به منظور دور نمودن لایه جذب از سطح و افزایش بهره کوانتومی

تعبیه لایه شارژ با نیمه هادی Si به منظور کنترل میدان الکتریکی در نواحی ضرب و جذب

رسیدن به ساختار -  
InGaAs/Si SACM APD

در جدول شماره (۳)، کمیت‌های نهایی آشکارساز این کار جمع‌آوری شده است. در ستون ۶ و ۷ در ولتاژ بایاس ۲۵ ولت، مقدار جریان تابش به ۵۱/۴ میکرو آمپر و جریان تاریک به عدد ۲۱ نانوآمپر رسیده است. با توجه به اثرگذاری نسبت جریان تابش به جریان تاریک، صرف افزایش جریان تابش یا کاهش جریان تاریک باعث بهینه شدن عملکرد آشکارساز نخواهد شد و هم‌زمان بایستی نسبت  $\frac{I_{ph}}{I_d}$  نیز بررسی گردد تا از شرایط مطلوب ایجاد شده اطمینان حاصل کرد چرا که امکان دارد همان‌طور که در شکل (۵) مشاهده می‌گردد در ولتاژی حوالی ولتاژ شکست این نسبت به‌شدت کاهش یافته و عدد SNR پایین بیاید. نسبت  $\frac{I_{ph}}{I_d}$  به‌واسطه دخالت کمیت  $D\lambda^*$  که به کمیت آشکارسازی در طول موج معروف است، در SNR ورود می‌نماید و عدد SNR را تحت تاثیر قرار می‌دهد [۱]. در ردیف ۱۱ و ۱۲، نسبت  $\frac{I_{ph}}{I_d}$  آورده شده است. با توجه به افزایش نسبت  $\frac{I_{ph}}{I_d}$  در ولتاژ ۲۵ ولت در قیاس با ولتاژ  $(0.9 V_{br})$  عدد سیگنال به نویز ۵۱/۴۴٪، جریان تابش ۵۱۴/۴۶٪ و جریان تاریک ۳۲۸٪ تغییر داشته است. با تحلیل این اعداد می‌توانیم بگویم که شرایط مطلوبی در ولتاژ ۲۵ ولت در خصوص آشکارسازی نسبت به ولتاژ  $(0.9 V_{br})$  ایجاد گردیده است. نهایتاً در شکل (۷) نیز نمودار تغییرات بهره ارایه شده است. در ولتاژ ۲۲/۲ ولت، ولتاژ punch-through است.



شکل (۷): نمودار تغییرات بهره آشکارساز InGaAs/Si SACM APD

## ۷. مراجع

- [19] H. Liu and etal, "Avalanche photodiode punch through gain determination through excess noise analysis," *Journal of Applied Physics* 106.6, 2009.
- [20] M. Majeed, Ch. Zikuan, and A. M. Karim, "An analytical approximation for the excess noise factor of avalanche photodiodes with dead space," pp. 344-347
- [21] M. Hayat, E. A. Bahaa Saleh, and C. Malvin, "Effect of dead space on gain and noise of double-carrier-multiplication avalanche photodiodes," pp. 546-552.19
- [22] W. Neudeck, "The PN junction diode Addison Wesley Publishing Company.
- [23] P. Kleinow and etal, "Charge layer design considerations in SAGCM InGaAs/InAlAs avalanche photodiodes," *physica status solidi*, pp. 925-929, 2016.
- [24] Li. Yuan and Z. Yanli, "Optimum design of the charge layer for avalanche photodiodes," 2017.
- [25] W. Parks and etal, "Theoretical study of device sensitivity and gain saturation of separate absorption, grading, charge, and multiplication InP/InGaAs avalanche photodiodes," pp. 2113-2121, 1998.
- [26] Z. Yanli, "Impact ionization in absorption, grading, charge, and multiplication layers of InP/InGaAs SAGCM APDs with a thick charge layer," pp. 3493-3499, 2013.
- [27] K. Taguchi and etal, "Planarstructure InP/In GaAsP /InGaAs avalanche photodiodes with preferen tial lateral extended guard ring for 1.0-1.6 mu m wavelength optical communication use," pp. 1643 1655.
- [28] Y. Zhao and He. Suxiang. "Multiplication characteristics of InP/ InGaAs avalanche photodiodes with a thicker charge layer," pp. 476-480, 2006.
- [29] K. A. McIntosh and etal, "Ultraviolet photon counting with GaN avalanche photodiodes," pp. 3938-3940, 2006.
- [30] C. Campbell and etal, "Recent advances in avalanche photodiodes," pp. 777-787, 2000.
- [31] Sh. Zhang and Z. Yanli, "Study on impact ionization in charge layer of InP/InGaAs SAGCM avalanche photodiodes," pp. 2689-2696, 2006.
- [32] T. Junjie and et al, "The determination of unity gain for InGaAs/InP avalanche photodiodes with excess noise measurements," pp. 671-674, 2017.
- [1] Sh. MohammadNejad and F .Aghaei, "Noise characteristics improvement of submicron InP/In GaAs avalanche photodiode for laser detection system," 2020. (In Persian)
- [2] Y. Kang and etal, "Monolithic Ge/Si avalanche hotodiodes," 2009.
- [3] A. G. Wright, "The photomultiplier handbook" Oxford University Press, 2017.
- [4] L. Guipeng and etal. "Modeling a novel InP/InGaAs avalanche photodiode structure: Reducing the excess noise factor," pp. 374-377, 2019.
- [5] J. Chen and etal, "Optimization of InGaAs/InAlAs avalanche photodiodes," 2017.
- [6] G. Jianjun, "Optoelectronic integrated circuit design and device modeling," John Wiley and Sons, 2011
- [7] A. Shabbir, "Study of Indium Tin Oxide (ITO) for Novel Optoelectronic Devices," Degree of Doctor of Philosophy, University of London Departmentof Electronic Engineering, 1998.
- [8] A. R. Hawkins, "Silicon-indium-gallium-arsenide avalanche photodetectors," 2000.
- [9] I. Silvano, "ATLAS user's manual," Santa Clara, CA, 2011.
- [10] D. Neamen, "Semiconductor physics and devices: basic principles," New York, NY: McGraw-Hill,, 2012.
- [11] H. Nalwa, "Photodetectors and fiber optics. Elsevier," 2012.
- [12] X. Jingjing, "Characterisation of low noise InGaAs/AlAsSb avalanche photodiodes," Diss. University of Sheffield, 2013.
- [13] J. Zhang and etal, "Advances in InGaAs/InP single photondetector systems for quantum communication 2015.
- [14] A. Bandyopadhyay, M. Deen, and H. S. Nalwa. "Photodetectors and Fiber Optics," Ed. HS Nalwa, Academic Press, New York , 2001.
- [15] O. Kasap and Ravindra Kumar Sinha Optoelectronics and photonics: principles and ractices. vol. 340.
- [16] X. Zhou, "An InGaAlAs-InGaAs two-colour detector, InAs photodiode and Si SPAD for radiation thermometry," Diss. University of Sheffield, 2014.
- [17] H. Meier "characterization and simulation of avalanche photodiodes," Diss. ETH Zurich, 2011.
- [18] M. Saleh and etal, "Impact-ionization and noise characteristics of thin avalanche photodiodes," *IEEE Transactions on Electron Devices* vol.48, 2001.