



کنفرانس بین‌المللی پژوهش‌های نوین در مهندسی ICRAE2013  
واحد خمینی شهر، اسفند ۱۳۹۱ ایران، دانشگاه آزاد اسلامی



## شبیه سازی ویژگی های آشکارساز شکست بهمنی تک فوتون $\text{InGaAs/InP}^1$ با ناحیه جذب، بار و تکثیر جداگانه

بهار قهرمانپور

مریی - دانشگاه آزاد اسلامی واحد نقده

bahar\_ghahremanpour@yahoo.com

### چکیده

در این مقاله آشکارساز شکست بهمنی تک فوتون  $\text{InGaAs/InP}$  با ناحیه جذب و تکثیر جداگانه و بار جداگانه  $\text{SAGCM}^2$  برای طول موج ۱،۵۵ میکرو متر شبیه سازی شده است. مهمترین عامل در آشکارسازهای شکست بهمنی تک فوتون، بازده آشکارسازی و جریان شمارش تاریکی میباشد. نتایج نشان میدهد که با افزایش ضخامت ناحیه تکثیر  $\text{InP}$  بازده آشکارساز شکسته بهمنی افزایش و نرخ شمارش تاریکی، کاهش میابد. مکانیسم بدیم صورت است که با افزایش ضخامت ناحیه تکثیر، میدان الکتریکی کاهش میابد و در نتیجه تونل زنی باند به باند را در ناحیه تکثیر متوقف میکند. (تونل زنی باند به باند عامل اصلی تولید شمارش تاریکی است.)

واژه های کلیدی: آشکارساز شکست بهمنی تک فوتون، بازده آشکارسازی، جریان شمارش تاریکی، ناحیه تکثیر، ولتاژ شکست.

۱- بهار قهرمانپور

1-Indium gallium arsenide/Indium phosphide.

2-Separate absorption, grading, charge and multiplication.



شکل (۱) ساختار شبیه سازی شده جدول (۱) لایه های مختلف و مواد استفاده شده در هر لایه آشکار ساز را نشان میدهد .

#### ۱- مقدمه

پیوند های 1P-N سیلیکونی که بالای نقطه شکست بایاس میشوند ، به عنوان آشکارساز تک فوتون آشکارساز شکست بهمینی تک فوتون (SPADs) نامیده میشوند [1]. این آشکارسازها ، آشکارساز شکست بهمینی حالت گایگر نیز نامیده میشوند و کاربرد زیادی در توزیع کلیدهای کوانتومی ، تصویر نگاری کوانتومی ، شکارش فوتون های وابسته به زمان و رمزنگاری کوانتومی دارند [2]. عملکرد SPAD به این صورت است که هنگامیکه بایاس به بالای نقطه شکست میرسد ، حتی یک فوتون تنها نیز میتواند باعث ایجاد پدیده شکست گردد و جریانی در حد میلی آمپر تولید کند. به علت خاصیت ویژه کارکرد وسیله ، پدیده شکست میتواند علاوه بر حامل تولید شده از جذب فوتون ، توسط حامل تولید شده از گرما نیز بوجود بیاید [3]. بنابراین حتی در غیاب بایاس نیز وسیله میتواند جریانی تولید کند که شمارش تاریکی نامیده میشود. شمارش تاریکی باعث ایجاد خطا در شمارش فوتون میشود بنابراین تا حد ممکن باید مقدار آن کاهش یابد .

#### ۲- بخش تجربی

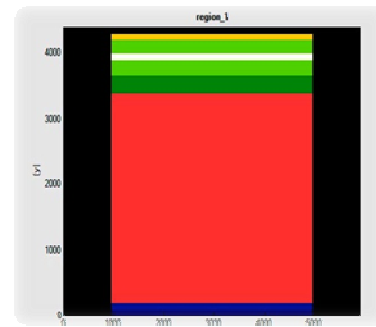
در این مقاله آشکار ساز SPAD با استفاده از نرم افزار Next Nano++ شبیه سازی شده است. ساختار کلی در شکل (۱) نشان داده شده است و طوری طراحی شده است که نمره های تولید شده در ناحیه با گاف انرژی باریکتر InGaAs بوسیله میدان به ناحیه با گاف انرژی بزرگتر InP ارائه شود . گسستگی بین باند ظرفیت بین InGaAs و InP با استفاده از یک لایه با گاف انرژی میانی InGaAsP دانه بندی هموارتر شده است. این ساختار با ناحیه جذب و تکثیر جداگانه (SAGCM) ، در ولتاژهای بالای نقطه شکست به عنوان حالت گایگر به کار میرود و برای اجتناب از افزایش نرخ شمارش تاریکی ، دمای کاری پایین ضروری است.

1-P-n junctions.

2-Single photon avalanche photodiodes.

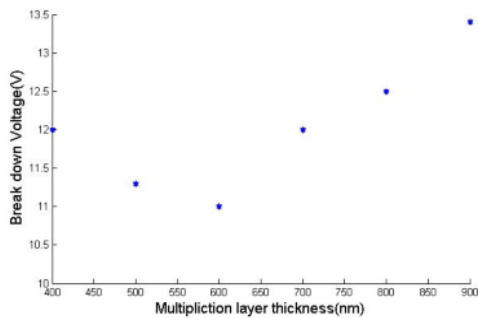
### ۳- نتایج و بحث

از آنجایی که آشکارساز شکست بهمنی باید بازده بالایی داشته باشد. پس باید ساختار را طوری تعیین کنیم که بهینه‌ترین کارایی را داشته باشیم. ضخامت ناحیه تکثیر و میزان ناخالصی (دوپینگ) لایه‌های ساختار دو عاملی هستند که بر تغییر نقطه شکست موثرند [3]. در بررسی ولتاژ شکست آشکارساز شکست بهمنی تک فوتون میبینیم که با تغییر عرض ناحیه تکثیر نقطه شکست تغییر میکند. شکل (۲) تغییرات نقطه شکست را با تغییر ضخامت لایه تکثیر نشان میدهد.



شکل (۱) ساختار شبیه سازی شده و جدول (۱) لایه‌های مختلف و مواد استفاده شده در هر لایه آشکارساز را نشان میدهد.

جدول (۱) لایه‌های مختلف آشکارساز شکست بهمنی



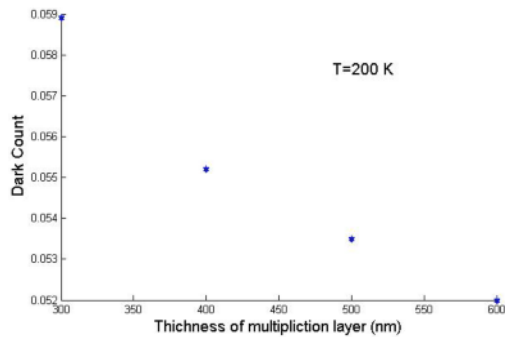
شکل (۲) تغییرات ولتاژ شکست با عرض ناحیه تکثیر

نام ماده	۱	۲	۳	۴	۵	۶
	InP	InGaAs	InGaAsP	InP	InP	InP
	$n^+$	$n^-$	$i^-$	$n^-$	$p^+$	$n^+$
کاربرد	بافر	جذب	ضخامت	بار	پیوند تک	تکثیر
ضخامت لایه	۰.۱	۳	۰.۱۲	۰.۱	۰.۶	۰.۱
( $\mu\text{m}$ )				۳۵		
میزان ناخالصی	$3 \times 10^{18}$	$2 \times 10^{14}$	$5 \times 10^{15}$	$7.5 \times 10^{16}$	$5 \times 10^{19}$	$10^{19}$
( $\text{cm}^{-3}$ )						

ولتاژ شکست آشکارساز شکست بهمنی به میزان ناخالصی ناحیه بار نیز بستگی دارد. حل معادلات پواسن در ناحیه بار، نشان میدهد که ولتاژ شکست به صورت معکوس به میزان دوپینگ ناحیه بار وابسته است. شکل (۳) چگونگی تغییر ولتاژ شکست را با تغییر میزان ناخالصی ناحیه بار، را نشان میدهد. همانطور که انتظار داریم با افزایش میزان ناخالصی در لایه بار، شکست در ولتاژ پایین تری اتفاق می افتد.

### ۱-۳ شمارش تاریکی

می‌باید و در نتیجه تونل زنی باند تو باند را در ناحیه تکثیر متوقف می‌کند. ( تونل زنی بالایی باند عامل اصلی تولید شمارش تاریکی است). شکل (۱) شمارش تاریکی را بر افزایش عرض ناحیه تکثیر نشان می‌دهد. شمارش تاریکی به میدان الکتریکی و دما وابسته است. در اینجا دما را ثابت و برابر با ۲۰۰ درجه کلوین در نظر گرفته ایم. جریان تونل زنی و جریان تولید شده، که ما بین ناحیه تخلیه و ناحیه ناحیه بار و همچنین در ناحیه جذب تولید میشوند به عنوان منبع اصلی شمارش تاریکی به شمار می‌آیند.



شکل (۴) نرخ شمارش تاریکی بر حسب ضخامت

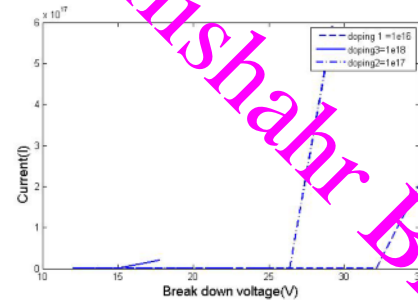
ناحیه تکثیر در دمای ۲۰۰ درجه کلوین

### ۲-۳- بررسی ضریب یونیزاسیون

تعداد جفت الکترون - حفره های تولید شده توسط یونیزاسیون برخوردی در آشکارساز شکست بهمنی به ضریب یونیزاسیون برخوردی الکترون و حفره وابسته است. با افزایش میدان الکتریکی فاصله بین یونیزاسیون ها کاهش می‌یابد و در نتیجه ضریب یونیزاسیون برای الکترون و حفره تقریباً با هم برابر میشوند. پس در اینجا ضریب یونیزاسیون را فقط برای الکترون بررسی می‌کنیم. ضریب یونیزاسیون به میدان الکتریکی وابسته است و با افزایش میدان الکتریکی به صورت خیلی سریع افزایش می‌یابد. شکل (۵) تغییرات ضریب یونیزاسیون را با افزایش میدان الکتریکی نشان می‌دهد.

شمارش تاریکی شمارشی اشتباهی است که در حالت آشکارسازی تک فوتون بدون آنکه فوتونی تابیده شود، شمرده میشود. این حامل‌ها در طول پالس در ناحیه تکثیر بوجود می‌آیند یا به ناحیه تزریق میشوند و سپس از طریق پدیده شکست تعداد زیادی حامل تاریکی متولد میشود.

مهمترین پارامتر در محاسبه شمارش تاریکی، میدان الکتریکی در ناحیه تکثیر است. ( چون میدان در ناحیه جذب، کم است بنابراین در محاسبات میدان این ناحیه را در نظر نمی‌گیریم ). چون میدان الکتریکی در ناحیه تکثیر ثابت نیست، مقدار متوسط میدان الکتریکی بدست آمده از حل معادلات پواسن را در معادلات قرار می‌دهیم. حاصل (۲) میدان الکتریکی محاسبه شده را برای عرض‌های تکثیر مختلف را نشان می‌دهد



شکل (۳) نمودار ولتاژ - جریان برای لایه‌های بار با

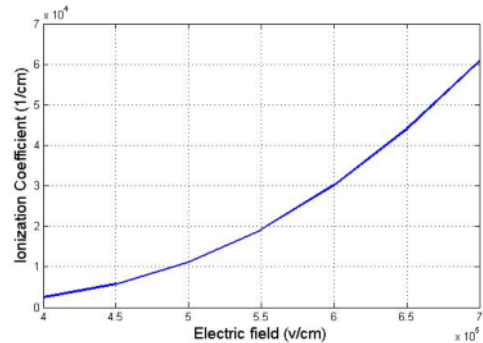
ناخالصی‌های مختلف

جدول (۲) میدان الکتریکی با عرض ناحیه تکثیر

عرض ناحیه تکثیر (nm)	۳۰۰	۴۰۰	۵۰۰	۶۰۰
میدان الکتریکی (kv/cm)	۱۰.۸۷	۱۰.۲۴	۹.۹۵	۹.۶

نتایج نشان می‌دهند که با افزایش عرض ناحیه تکثیر، نرخ شمارش تاریکی کاهش می‌یابد. مکانیسم بدین صورت است که با افزایش عرض ناحیه تکثیر میدان الکتریکی کاهش

شکل (۶) بازده آشکارساز شکست بهمنی بر حسب ولتاژ معکوس اعمالی

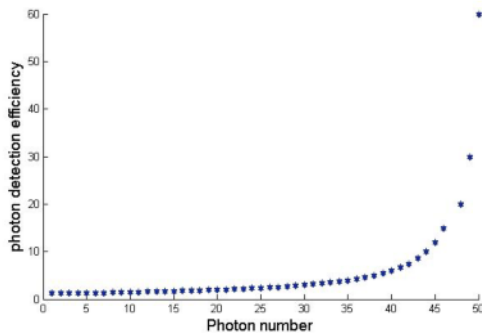


شکل (۵) ضریب یونیزاسیون بر حسب میدان الکتریکی

با افزایش تعداد فوتون‌های تابیده شده بازده آشکارسازی افزایش میابد . شکل (۷) بازده آشکارسازی فوتون را بر حسب تعداد فوتون تابیده شده با ساختار نشان میدهد . همانطور که در شکل دیده میشود با افزایش تعداد فوتون در هر پالس ، بازده افزایش پیدا میکند.

### ۳-۳- بازده آشکارساز شکست بهمنی تک فوتون

شکل (۶) بازده آشکارساز تک فوتون را بر حسب ولتاژ معکوس اعمال شده به ساختار نشان میدهد . ولتاژ شکست این ساختار ۱۱ ولت است . در شکل نمودار بالایی مربوط به بازده است هنگامیکه فرض میکنیم در پالس نوری اعمال شده بیش از یک فوتون وجود دارد . نم‌دار پایینی بازده را در حالتی نشان میدهد که فقط و فقط یک فوتون به ساختار برخورد کند .

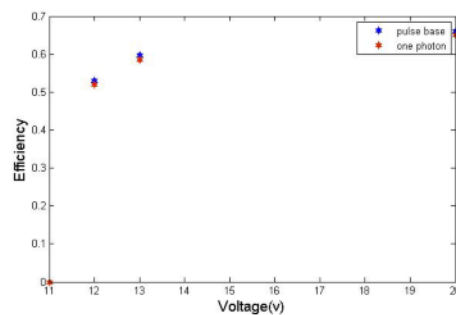


در حالت کلی در در هنگام محاسبه بازده ، هدف وجود یک پالس است ( نه فقط یک فوتون ) که ممکن است شامل بیش از یک فوتون باشد . محاسبات ساده نشان میدهد که وقتی تعداد متوسط فوتون در هر پالس کمتر از یک باشد ، نظر گرفته شود بازده محاسبه شده بر مبنای پالس با بازده محاسبه شده بر مبنای فوتون تقریباً یکی خواهند شد .

شکل (۷) بازده آشکارساز بر حسب تعداد فوتون

تابیده شده

نور ورودی آشکارساز توسط لیزر تامین میگردد . منبع نور همگرا از توزیع پواسن پیروی میکند . در شکست بهمنی اشباع نشده توزیع ولتاژ دارای پیک هایی است که از جریان های بهمنی القا شده ناشی شده از تعداد متفاوت فوتو نهاست . اگر فاصله پیک های شکست بهمنی ولتاژ ناشی از دو فوتون متوالی کم باشد ، نمیتوان به وضوح تعداد فوتون ها را شمارش کرد





#### ۴- نتیجه گیری

در این مقاله بازده و شمارش تاریکی را برای رنج وسیعی از ضخامت ناحیه تکثیر برای آشکارساز شکست بهمنی تک فوتون InGaAs/InP با ناحیه جذب، بار و تکثیر جداگانه بدست آوردیم. و سپس به محاسبه ولتاژ شکست پرداختیم. نتایج نشان داد که با افزایش ضخامت ناحیه تکثیر، شمارش تاریکی به طور قابل ملاحظه ای کاهش میابد. سپس به محاسبه میدان الکتریکی در ناحیه تکثیر پرداختیم و دریافتیم با افزایش بیشتر ضخامت ناحیه تکثیر، میدان الکتریکی از حد معینی کمتر نمیشود. و ضخامت

ناحیه تکثیر را برای بدست آوردن بالاترین بازده و کمترین شمارش تاریکی بهینه کردیم

#### مراجع

[1]. Spinelli ,A.,and Lacaita,A.L.,” Physics and Numerical Simulation of Single Photon Avalanche Diodes,” IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES, VOL. 44, NO. 11, NOVEMBER 1997.

[2]. Ramirez,A., Hayat,M., Campbell,C., Torres,N., Saleh,E.A., , C. Teich,” Detection Efficiencies and Generalized Breakdown Probabilities for Nanosecond-Gated Near Infrared Single-Photon Avalanche Photodiodes,” IEEE journal of quantum of electronics,vol.42,no.2,2006.

[۳]. Hasko,D., “InGaAs/InP avalanche photodiode with separated absorption, charge and multiplication layers,”*International Student and Young Scientists Workshop"Photonics an"Photonics and Microsystems"*, 2004.