



بیست و یکمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و هفتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۲۳ تا ۲۵ دی ماه ۱۳۹۳، دانشگاه شهید بهشتی



طراحی و شبیه سازی آشکارساز تک فوتون نانو تزریق ایزوله شده

یاشار موثقی^۱، مرتضی فتحی پور^۲

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، آزمایشگاه شبیه سازی و مدل سازی افزاره های نیمه هادی، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تهران

^۲ دانشیار دانشکده برق و کامپیوتر، سرپرست آزمایشگاه شبیه سازی و مدل سازی افزاره های نیمه هادی، دانشگاه تهران

چکیده - در این مقاله به ارائه یک آشکارساز تک فوتون می پردازیم که از نظر مفهومی از سلول های میله ای در چشم انسان الهام گرفته شده است. این آشکارسازها که در اصطلاح به آنها آشکارسازهای تک فوتون نانو تزریق ایزوله شده گفته می شود از دو بخش تزریق گر نانویی و ناحیه بزرگ جذبی تشکیل شده و سازوکار تقویت سازی با نوبز کم و بازده کوانتومی بالا ارائه می دهد. آشکارسازهای تک فوتون نانو تزریق ایزوله شده به دلیل عملکرد پایدار در ولتاژهای پایین کاملا با فناوری CMOS سازگار می باشد. نتایج شبیه سازی تایید می کند که بهره پایدار آشکارساز به ازای ولتاژ بایاس ۳ ولت در حدود ۱۰۰۰ و جریان تاریکی در حدود ۳۰ nA می باشد. زمان صعود با افزایش توان نوری کاهش می یابد.

کلید واژه - آشکار ساز تک فوتون نانو تزریق ایزوله شده، جریان تاریکی، بهره نوری، زمان صعود

Design and simulation of isolated nano-injection single photon detector

Yashar Movassaghi¹, Morteza Fathipour²

¹ Master student, Device and process modeling and simulation lab, School of Electrical and Computer Engineering, University of Tehran

² Associate professor, Director of the device and process modeling and simulation lab, School of Electrical and Computer Engineering, University of Tehran

Abstract- In this paper, we will present a single photon detector that is conceptually inspired taken from the rod cell in human eye. The detector, called the nano-injection single photon detector, couples a nano-scale injector region with a large absorption volume to provide a low-noise internal amplification mechanism, high quantum efficiency. This device has stable operation in low bias voltages so that it is fully compatible with available CMOS technologies. Device simulation results confirms a stable gain value about 1000 for the isolated nano-injection single photon detector at a bias voltages of 3V when the detector is illuminated by a 1.55um light source at room temperature and a dark current about 30nA at 3V bias. The rise time decreases with increasing optical power.

Keywords: Isolated nano-injection single photon detector, Dark current, Optical gain, Rise time

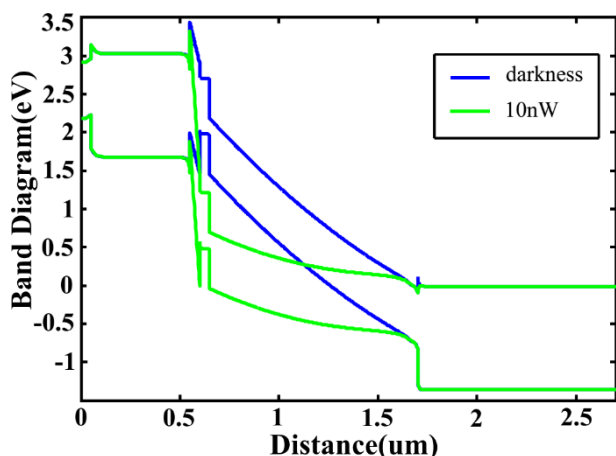
۱- مقدمه

آشکارسازها مشابه سلول‌های میله ای در چشم انسان است. سلول‌های میله ای از دویخش ناحیه جذبی بزرگ و حجمی حسی در مقیاس نانومتر تشکیل شده است که سازوکار تقویت را به شکل ذاتی انجام می‌دهد. نسل اول آشکارسازهای تک فوتون نانو تزریق در سال ۲۰۰۷ طراحی و ساخته شد و در کاربردهای تصویر برداری مادون قرمز استفاده شد [۳]. نرخ سیگنال به نویز اندازه‌گیری شده در آنها به اندازه دو مرتبه بزرگتر از دوربین‌های PIN تجاری است. با این وجود آشکارسازهای تک فوتون نانو تزریق پسیویت نشده سرعت پاسخ پاییی دارند که مانع از کاربرد آنها برای آشکارسازی تک فوتونی می‌شود. در واقع سرعت پایین و بهره بالای آشکارساز تک فوتون نانو تزریق پسیویت نشده به علت طول عمر تله‌های سطحی می‌باشد که ناحیه فعال افزاره را محدود می‌کند و ولتاژ مجاز برای تاثیر بر روی سد پتانسیل بطور قابل توجهی زیاد می‌شود و باعث مقادیر بهره بزرگی می‌شود [۲]. سپس آشکارسازهای تک فوتون نانو تزریق پسیویت شده ارائه شد که سرعت بالا و جیتز بسیار کمی داشتند. با این حال افزاره پسیویت شده بهره کمتری دارد. در واقع به دلیل پسیویت شدن افزاره ناحیه فعال آشکارساز افزایش یافته و در نتیجه سد پتانسیل نمی‌تواند به راحتی بروی جریان عبوری تاثیرگذار باشد، بنابراین بهره افزاره کاهش می‌یابد. در این مقاله آشکارسازی با بهره و سرعت پاسخ بالا ارائه می‌شود. این آشکارساز که در اصطلاح به آن آشکارساز تک فوتون نانو تزریق ایزوله شده گفته می‌شود به ازای ولتاژ ۳۷ جریان تاریکی در حدود ۳۰ nA و بهره نوری در حدود ۱۰۰۰ دارد. پارامترهای اساسی این افزاره از قبیل جریان تاریکی، بهره نوری، زمان صعود با استفاده از نرم افزار سیلوکو شبیه سازی شده است.

۲- طراحی افزاره و ساختار

شکل ۱ ساختار طراحی شده آشکارساز تک فوتون نانو تزریق ایزوله شده که سیستم مواد در آن‌ها مبتنی بر نوع-II می‌باشد را نشان می‌دهد. این افزاره شامل ۵۰۰ nm InP (n^+) به عنوان تزریق گر، ۵۰ nm InAlAs آلاینده نشده به عنوان لایه بافر، ۵۰ nm GaAsSb (p^+) به عنوان سد/ تله، ۱ um InGaAs (n) به عنوان جذب کننده و ۲ um InP (n^+) به عنوان بستر می‌باشد [۴]. شکل ۲ نمودار نوارهای انرژی

امروزه آشکارسازهای تک فوتون در بسیاری از حوزه‌ها از قبیل رمزنگاری کوانتومی، عکس برداری پزشکی، دوربین‌های دید در شب نقش کلیدی دارند. علاوه بر کاربرد در فناوری تصویربرداری از این افزاره‌ها برای تشخیص زیست‌تابناکی و بررسی خواص ماده‌ها به صورت غیر مخرب استفاده می‌شود. آشکارسازهای مبتنی بر سلیکون توانایی آشکار کردن طول موج‌های بالای ۱,۱ um را ندارند در حالی که در بسیاری از کاربردهای ذکر شده در بالا فرایند آشکارسازی مربوط به طیف مادون قرمز دور می‌باشد. در حال حاضر آشکارسازهای PIN، آشکارسازهای بهمنی (APDs) و آشکارسازهای ابررسانه‌ای در سیستم‌های تشخیص مادون قرمز دور استفاده می‌شود [۱]. آشکارسازهای PIN افزاره‌هایی کوچک با سرعت پاسخ بالا است که میزان جیتز در آن‌ها بسیار اندک است. با وجود مقدار جریان تاریکی کم این افزاره‌ها تقویت سازی انجام نمی‌دهند. به همین دلیل با یک پیش تقویت کننده بصورت زوج بکار می‌روند [۲]. در مقابل آشکارسازهای بهمنی همراه با فرایند آشکارسازی تقویت را هم انجام می‌دهند. آشکارسازهای بهمنی مبتنی بر InGaAs/InP به طور معمول در طیف مادون قرمز نزدیک استفاده شده و مقادیر بهره پایدار آنها در دمای اتاق کمتر از ۲۰۰۰ می‌باشد [۲]. با این وجود در این آشکارسازها به دلیل وجود فیدبک مثبت در فرایند تکثیر بصورت بهمنی، بهره افزاره به‌ازای مقادیر بزرگتر دامنه و همچنین افزایش نامعین آن به سمت ناپایداری می‌رود [۲]. نوع دیگر آشکارسازهای تک فوتون مبتنی بر ابررسانایی می‌باشند که معمولاً ضریب تقویت و سرعت عملکرد بالایی دارند و سطوح نویز در آنها کم است اما معمولاً برای عملکرد درست به دماهای کمتر از ۱۰ K نیاز دارند که باعث گران قیمت شدن آشکارسازهای ابررسانا و مانع استفاده عملی از آنها در بسیاری از حوزه‌های کاربردی می‌شود. به این ترتیب، ابداع آشکارساز تک فوتون مادون قرمز با عملکرد بالا، بهره و پهنای باند بالا و کم نویز بودن در ولتاژهای کم به مسئله کلیدی تبدیل شده است. آشکارساز تک فوتون نانو تزریق که الهام گرفته از سلول‌های میله‌ای در چشم انسان است برای غلبه کردن بر محدودیت‌های موجود در آشکارسازها طراحی شده است [۳]. عملکرد این نوع

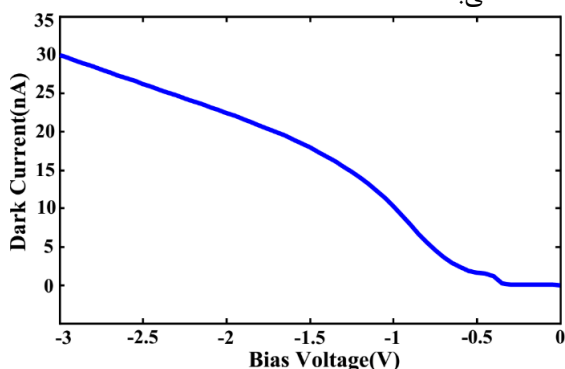


شکل ۲: منحنی نوارهای انرژی آشکارساز

ATLAS و به صورت دو بعدی طراحی شده و از معادلات پواسون و پیوستگی برای شبیه سازی پارامترهای افزاره استفاده شده است. در این شبیه سازی قطر تزریق گر ۱۰um و ناحیه جذبی ۳۰um در نظر گرفته شده است.

۳-۱- جریان تاریکی

شکل ۳ منحنی جریان تاریکی برحسب ولتاژ بایاس را نشان می دهد. به ازای ولتاژهای کمتر از ۰,۷ V -، مقادیر جریان تاریکی بسیار کوچک می باشد و با افزایش ولتاژ بایاس پیوند p^+ GaAsSb / i InAlAs / n^+ InP در حالت بایاس مستقیم و پیوند p^+ GaAsSb / n^- InGaAs در حالت بایاس معکوس می باشد و جریان عبوری از افزاره برابر جریان اشباع معکوس پیوند p^+ GaAsSb / n^- InGaAs و برای ولتاژ ۳V - جریان تاریکی در حدود ۳۰nA می باشد.

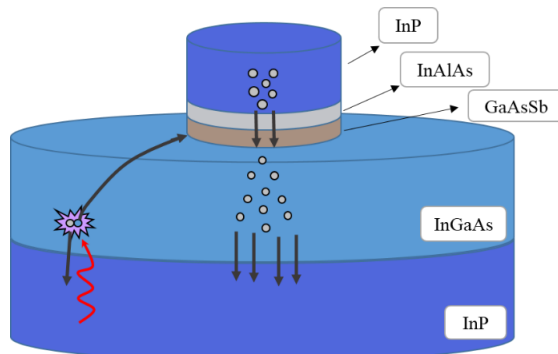


شکل ۳: منحنی تغییرات جریان تاریکی بر حسب ولتاژ بایاس

۳-۲- بهره نوری

برای شبیه سازی بهره نوری آشکارساز تک فوتون نانو تز-

افزاره در راستای محور عمودی در مرکز را نشان می دهد. وقتی ولتاژ بایاس منفی اعمال می شود میدان الکتریکی داخل افزاره که قبل از اعمال بایاس در ناحیه جذب وجود



شکل ۱: شماتیک و عملکرد آشکارساز تک فوتون نانو تزریق ایزوله شده

داشت افزایش یافته و الکترون ها انرژی کافی برای غلبه بر سد پتانسیل در نوار هدایت که مربوط به لایه GaAsSb می باشد را بدست می آورند و از تزریق گر InP که بسیار آلاینده شده است به سمت ناحیه جذبی از جنس InGaAs می روند. برای ولتاژهای بایاس بزرگتر جریان عبوری از افزاره محدود می شود به جریان اشباع معکوس پیوند p^+ GaAsSb / n^- InGaAs / GaAsSb که در حالت بایاس معکوس است. وقتی فوتون توسط ناحیه بزرگ InGaAs جذب می شود، زوج الکترون-حفره ای در این ناحیه تولید می شود و بوسیله میدان الکتریکی داخل افزاره از یکدیگر جدا شده و الکترون به نوار هدایت و حفره به نوار ظرفیت می رود. سپس حفره به سمت تله در لایه GaAsSb رانش می کند و به دام می افتد. حفره به دام افتاده باعث تغییر شدید سد پتانسیل می شود. در نتیجه الکترون های تزریقی به سمت ناحیه جذب بطور ذاتی افزایش می یابد. الکترون های عبوری از سد GaAsSb زمان گذر کوتاهی دارند که پتانسیل محلی را کمتر می کنند در نتیجه ارتفاع سد افزایش می یابد که در خلاف شارش بیشتر الکترون ها می باشد. این امر منجر به سازوکار فیدبک منفی می شود که تزریق و تقویت سازی را پایدار می کند و درحالی که افزاره در حالت خطی با ولتاژ بایاس کم کار می کند تقویت سازی پایدار حاصل می شود.

۳- نتایج شبیه سازی ساختار

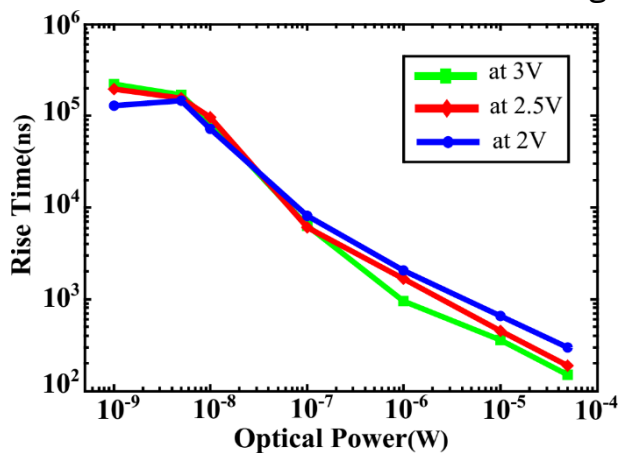
هندسه و ساختار لایه ای آشکارساز با استفاده از نرم افزار

ریق ایزوله شده از منبع نوری با طول موج ۱۵۵۰ nm استفاده شده است. برای محاسبه بهره نوری در این آشکارسازها از رابطه پاسخدهی استفاده می‌شود که بصورت زیر می‌باشد:

ریق ایزوله شده از منبع نوری با طول موج ۱۵۵۰ nm استفاده شده است. برای محاسبه بهره نوری در این آشکارسازها از رابطه پاسخدهی استفاده می‌شود که بصورت زیر می‌باشد:

$$R = \frac{q}{E_{ph}} (1-r)(1-e^{-\alpha L}) \eta_c M \quad (1)$$

در معادله (۱) انرژی فوتون، و در حدود ۰.۸eV می باشد، q بار الکترون، r ضریب انعکاس، α ضریب جذب، L ضخامت لایه جذب، η_c بازده تجمعی، M ضریب تقویت داخلی می باشد. در این رابطه بهره نوری به صورت حاصل ضرب $\eta_c M$ می‌باشد که با داشتن جریان تاریکی و روشنایی و محاسبه R می‌توان بهره‌نوری را بدست آورد. شکل ۴ نمودار تغییرات بهره‌نوری را نسبت به تغییرات توان نوری برای ولتاژ بایاس‌های مختلف نشان می‌دهد. با افزایش توان نوری، بهره نوری ابتدا افزایش و به مقادیری در حدود ۱۰۰۰ می‌رسد و سپس کاهش می‌یابد که به دلیل اشباع افزاره می‌باشد.



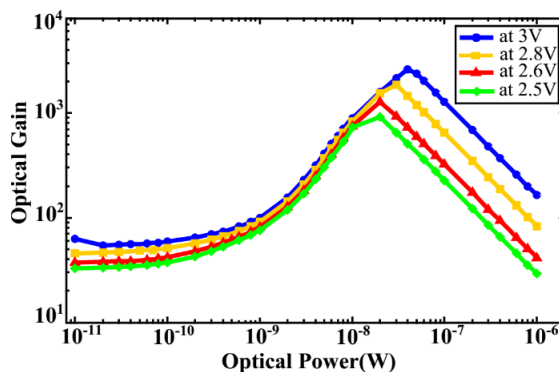
شکل ۵: منحنی تغییرات زمان صعود برحسب تغییرات توان نوری

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله آشکارساز تک فوتون نانو تزریق ایزوله شده با نانو تزریق گر ۱۰um و ناحیه جذب ۳۰um ارائه شد. این آشکارساز در ولتاژ بایاس ۳V دارای جریان تاریکی ۳۰nA و در طول موج ۱.۵۵um به ازای توان ۱۰۰nW دارای بهره نوری در حدود ۱۰۰۰ می‌باشد. همچنین زمان صعود این افزاره شبیه سازی شد که به ازای توان ۱۰۰nW دارای زمان صعودی در حدود ۶ us می‌باشد. هرچه توان نوری بیشتر شود زمان صعود کمتر می‌شود و جریان خروجی سریع‌تر به مقدار نهایی می‌رسد.

مراجع

- [۱] O. G. Memis, A. Katsnelson, H. Mohseni, M. Yan, S. Zhang, T. Hossain, N. Jin, I. Adesida, "A bio-inspired single photon detector with suppressed noise and low jitter", Proceeding of SPIE Vol. ۷۰۳۵, ۷۰۳۵۰۷, ۲۰۰۸.
- [۲] V. Fathipour, O. G. Memis, S. J. Jang, F. Khalid, R. L. Brown, I. Hassani Nia, R. M. Gelfand, H. Mohseni, "Isolated nano-injection photo detectors for high-speed and high-sensitivity single-photon detection," Proc. SPIE ۸۸۶۸, Infrared Sensors, Devices and Applications III, ۸۸۶۸۰۳ (۲۰۱۳).
- [۳] O.G. Memis, A. Katsnelson, S. C. Kong, H. Mohseni, M. Yan, S. Zhang, T. Hossain, N. Jin, and I. Adesida, "A Photon Detector with Very High Gain at Low Bias and at Room Temperature", Applied Physics Letters, ۹۱, ۱۷۱۱۱۲, ۲۰۰۷.
- [۴] H. Mohseni, V. Fathipour and S. J. Jang, Optoelectronics & Communications SPIE Newsroom., (۲۰۱۴).



شکل ۴: منحنی تغییرات بهره نوری برحسب تغییرات توان نوری به ازای ولتاژ بایاس‌های مختلف

۳-۳- سرعت پاسخ

سرعت پاسخ آشکارسازها از شیب زمان صعود تعیین می‌شود. معمولاً زمان صعود بصورت زمان مورد نیاز برای اینکه سیگنال خروجی از ۲۰٪ تا ۸۰٪ مقدار نهایی خود در پاسخ به یک پالس نوری برسد، تعریف می‌شود. شکل ۵ منحنی زمان صعود برای توان‌های نوری مختلف را نشان می‌دهد. با افزایش توان نوری زوج الکترون حفره‌های تولید شده افزایش می‌یابد در نتیجه تراکم حفره‌های بدم افتاده در چاه پتانسیل افزایش می‌یابد. بنابراین با افزایش تراکم حفره‌ها میدان الکتریکی در پیوند