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 میله‌ای 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 نویز 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 Movassaghi [۱], Morteza Fathipour [۲]

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

[۲] 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 ۱۰۰۰ for the isolated nano-injection single photon detector at a bias voltages of ۳V when the detector is illuminated by a ۱,۵۵um light source at room temperature and a dark current about ۳۰nA at ۳V bias. The rise time decreases with increasing optical power.

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

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-03]

۱- مقدمه

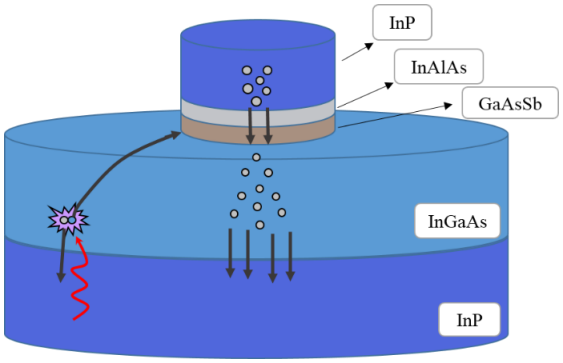
امروزه آشکارسازهای تک فوتون در بسیاری از حوزه ها از قبیل رمزنگاری کوانتومی، عکس برداری پزشکی، دوربین-های دید در شب نقش کلیدی دارند. علاوه برکاربرد در فناوری تصویربرداری از این افزاره‌ها برای تشخیص زیست تابناکی و بررسی خواص ماده ها به صورت غیر مخرب استفاده می‌شود. آشکارسازهای مبتنی بر سیلیکون توانایی آشکار کردن طول موج های بالای ۱,۱um‌را ندارند در حالی که در بسیاری از کاربردهای ذکر شده در بالا فرایند آشکارسازی مربوط به طیف مادون قرمز دور می باشد. در حال حاضر آشکارسازهای PIN، آشکارسازهای بهمنی (APDs) و آشکارسازهای ابررسانه‌ای در سیستم‌های تشخیص مادون قرمز دور استفاده می شود[۱]. آشکارساز-های PIN افزاره‌هایی کوچک با سرعت پاسخ بالا است که میزان جیتر در آن‌ها بسیار اندک است. با وجود مقدار جریان تاریکی کم این افزاره‌ها تقویت سازی انجام نمی دهند. 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 می باشد[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 به‌سمت ناپایداری می‌رود[۲]. نوع دیگر آشکارسازهای تک فوتون مبتنی بر ابررسانایی می‌باشند که معمولا ضریب تقویت و سرعت عملکرد بالایی دارند و سطوح نویز در آنها کم است اما معمولا برای عملکرد درست به دماهای کمتر از ۱۰K نیاز دارند که باعث گران قیمت شدن آشکارسازهای ابررسانا و مانع استفاده عملی از آنها در بسیاری از حوزه های 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 آشکارسازها مشابه سلول‌های میله ای در چشم انسان است. سلول های میله ای از دوبخش 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 اندازه-گیری شده در آنها به اندازه دو مرتبه بزرگتر از دوربین های PIN تجاری است. با این وجود آشکارسازهای تک فوتون نانو تزریق پسیویت نشده سرعت پاسخ پایینی دارند که مانع از کاربرد آنها برای آشکارسازی تک فوتونی می شود. درواقع سرعت پایین و بهره بالای آشکارساز تک فوتون نانو تزریق پسیویت نشده به علت طول عمر تله های سطحی می باشد که ناحیه فعال افزاره را محدود می کند و ولتاژ مجاز برای تاثیر بر روی سد پتانسیل بطور قابل توجهی زیاد می شود و باعث مقادیر بهره بزرگی می-شود[۲]. سپس آشکارسازهای تک فوتون نانو تزریق پسیویت شده ارائه شد که سرعت بالا و جیتر 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 درنتیجه سد پتانسیل نمی‌تواند به راحتی بروی جریان عبوری تاثیرگذار باشد، بنابراین بهره افزاره کاهش می یابد. دراین 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 ۳V جریان‌تاریکی در حدود ۳۰nAو بهره نوری درحدود ۱۰۰۰ دارد. پارامترهای اساسی این افزاره از قبیل جریان تاریکی، بهره نوری، زمان‌صعود با استفاده از نرم افزار سیلواکو 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 InP ۵۰۰nm (n^+) به عنوان تزریق‌گر، InAlAs ۵۰nm آلاییده نشده به عنوان لایه بافر، GaAsSb ۵۰nm (p^+) به عنوان سد/ تله، InGaAs ۱um (n^-) به عنوان جذب کننده و InP ۲um (n^+) به عنوان بستر می‌باشد[۴]. شکل ۲ نمودار نوارهای انرژی

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-03]

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

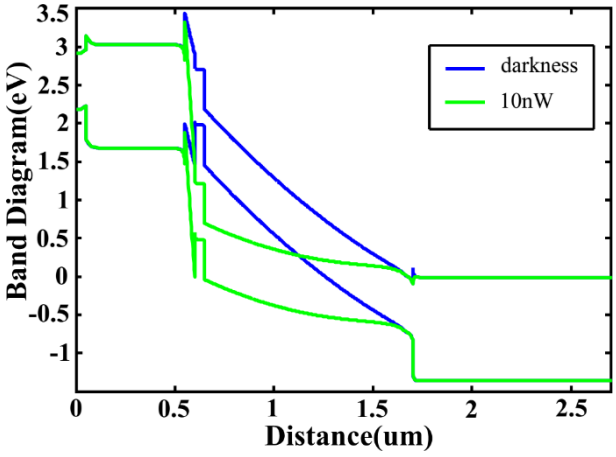


شکل۱: شماتیک و عملکرد آشکارساز تک فوتون نانو تزریق ایزوله شده

داشت افزایش یافته و الکترون‌ها انرژی کافی برای غلبه بر سد پتانسیل در نوار هدایت که مربوط به لایه GaAsSb می باشد را بدست می آورند و از تزریق‌گر InP که بسیار آلاییده شده است به سمت ناحیه جذبی از جنس InGaAs می‌روند. برای ولتاژهای بایاس بزرگتر جریان عبوری از افزاره محدود می‌شود به جریان اشباع معکوس پیوند p^+ n^- InGaAs / GaAsSb که در حالت بایاس معکوس است. وقتی فوتون توسط ناحیه بزرگ InGaAs جذب می شود، زوج الکترون- حفره‌ای در این ناحیه تولید می‌شود و بوسیله‌ی 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 الکترون‌های تزریقی به سمت ناحیه جذب بطور ذاتی افزایش می یابد. الکترون‌های عبوری از سد GaAsSb زمان گذر کوتاهی دارند که پتانسیل محلی را کمتر می‌کنند درنتیجه ارتفاع سد افزایش می یابد که در خلاف شارش بیشتر الکترون‌ها می باشد. این امر منجر به سازوکار فیدبک منفی می‌شود که تزریق و تقویت سازی را پایدار می کند و درحالی که افزاره در حالت خطی با ولتاژ بایاس کم کار می‌کند تقویت سازی پایدار حاصل می شود.

۳- نتایج شبیه سازی ساختار

هندسه و ساختار لایه‌ای آشکارساز با استفاده از نرم افزار

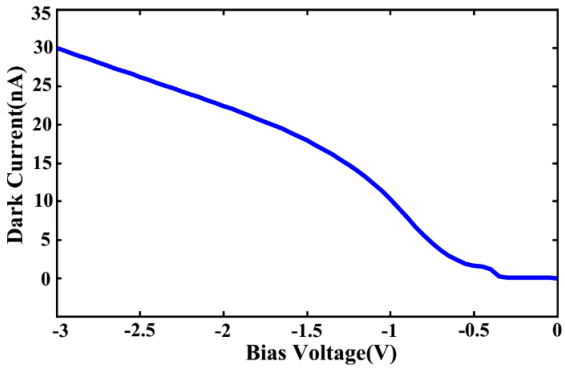


شکل۲: منحنی نوارهای انرژِی آشکارساز

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 می‌باشد و با افزایش ولتاژ بایاس پیوند n^+ InP / i InAlAs / p^+ GaAsSb در حالت بایاس مستقیم و پیوند n^- InGaAs / p^+ GaAsSb در حالت بایاس معکوس می‌باشد و جریان عبوری از افزاره برابر جریان اشباع معکوس پیوند n^- InGaAs / p^+ GaAsSb و برای ولتاژ ۳V- جریان تاریکی در حدود ۳۰nA می‌باشد.



شکل۳: منحنی تغییرات جریان تاریکی بر حسب ولتاژ بایاس

۳-۲- بهره نوری

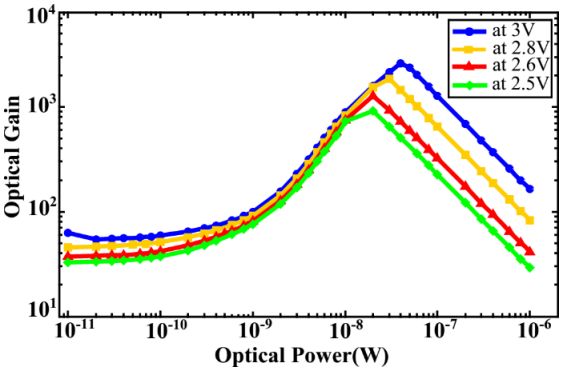
برای شبیه سازی بهره نوری آشکار ساز تک فوتون نانو تز-

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-03]

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:

$$R=\frac{q}{E_{ph}}(1-\mathrm{r})(1-\mathrm{e}^{-\alpha L})\eta_c M \qquad (۱)$$

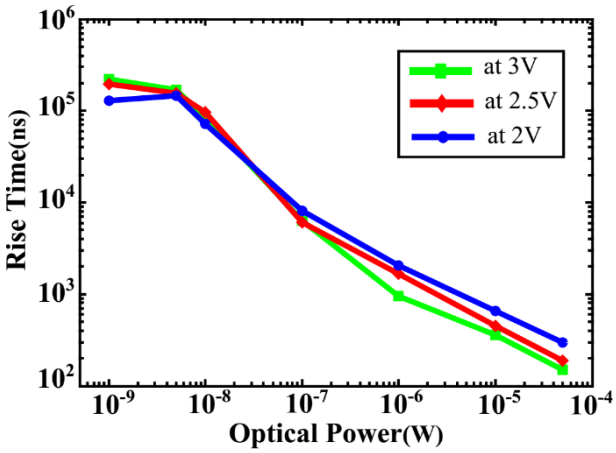
در معادله (۱) E_{ph} انرژی فوتون، و در حدود ۰٫۸eV می باشد، q بار الکترون، r ضریب انعکاس، α ضریب جذب، L ضخامت لایه جذب، η_c بازده تجمعی، M ضریب تقویت داخلی می باشد. در این رابطه بهره نوری به صورت حاصل ضرب $\eta_c M$ می‌باشد که با داشتن جریان تاریکی و روشنایی و محاسبه‌ی R می‌توان بهره‌نوری را بدست آورد. شکل ۴ نمودار تغییرات بهره‌نوری را نسبت به تغییرات توان نوری برای ولتاژ بایاس‌های مختلف نشان می دهد. با افزایش توان نوری، بهره نوری ابتدا افزایش و به مقادیری در حدود ۱۰۰۰ می‌رسد و سپس کاهش می-یابد که به دلیل اشباع افزاره می‌باشد.



شکل۴: منحنی تغییرات بهره نوری برحسب تغییرات توان نوری به ازای ولتاژ بایاس های مختلف

۳-۳- سرعت پاسخ

سرعت پاسخ آشکارسازها از شیب زمان صعود تعیین می-شود. معمولا 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 بدام افتاده در چاه پتانسیل افزایش می‌یابد. بنابراین با افزایش تراکم حفره‌ها میدان الکتریکی در پیوند p^+ GaAsSb/i InAlAs/n^+ InGaAs به ویژه در درناحیه ذاتی InAlAs به شدت افزایش می‌یابد. این منجر به افزایش سرعت الکترون‌ها می شود و از آنجا که زمان صعود که نسبت عکس با سرعت الکترون‌ها دارد کاهش می‌یابد.



شکل۵: منحنی تغییرات زمان صعود برحسب تغییرات توان نوری

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله آشکارساز تک فوتون نانو تزریق ایزوله شده با نانو تزریق‌گر 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 درحدود ۱۰۰۰ می‌باشد. همچنین زمان صعود این افزاره شبیه سازی شد که به ازای توان ۱۰۰nW دارای زمان صعودی درحدود 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, ۷۰۳۵۰V, ۲۰۰۸.

[۲] V. Fathipour, O. G. Memis, S. J. Jang, F. Khalid, R. L. Brown, I. Hassani Nia, R. M. Gelfand, H. Mohseni, "*Isolated nanoinjection photo detectors for high-speed and high-sensitivity single-photon detection*," Proc. SPIE ۸۸٦۸, Infrared Sensors, Devices and Applications III, ۸۸٦۸۰۳ (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.

[٤] H. Mohseni, V. Fathipour and S. J. Jang, Optoelectronics & Communications SPIE Newsroom., (۲۰۱٤).

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-03]