

An Investigation on the Impact of Aluminum Contact's Properties on the Performance of Si-MSM Photodetector**Maryam Zarepour¹, M.Sc, Hamed Dehdashti Jahromi², Assistant Professor**¹Department of Electrical Engineering, Fasa Branch, Islamic Azad University, Fasa, Iran²Department of Engineering, Jahrom University, Jahrom, Iran

stm.ary.eiman@yahoo.com, jahromi@jahromu.ac.ir

Abstract

Metal-Semiconductor-Metal photodetectors consist of two metallic contacts and an aperture for photon absorption. An MSM photodetector has low dark current, because one of the contacts is always in the reverse bias region. In this paper, we studied the impact of aluminum (metal contact) characteristics on the dark current, photocurrent, and photo-response of a silicon-based MSM photodetector. Metal work function has a small variation in different deposition processes. Impact of metal work function and layer thickness on the performance of MSM photodetector are studied. To this aim, an MSM photodetector is simulated and the dark current, photocurrent, and the photo-response of the structure are investigated. The analyses show that aluminum work function and thickness have a direct effect on the dark current, photocurrent, and photo-response of the photodetector which can change the structure from a photovoltaic to a photoconductive device if the mentioned parameters are not selected well. Therefore, these parameters should be optimized in the design stage. In this study, for a symmetric MSM photodetector, the optimal work function was achieved to be 4.26 eV. Work functions less than this value result in an ohmic contact between the aluminum layer and the silicon layer, and work functions more than this value result in a Schottky junction with a very low breakdown voltage in the reverse bias region which both regions degrade performance of the photodetector. Moreover, the best aluminum layer thickness was obtained to be 1.1 μm . This thickness leads to the maximized photo-response in the photodetector.

Keywords: dark current, photocurrent, photo-response, MSM photodetector, work function**Received:** 5 May 2021**Revised:** 18 July 2021**Accepted:** 22 July 2021**Corresponding Author:** Dr. Hamed Dehdashti Jahromi

بررسی تاثیر مشخصات لایه آلومینیومی بر عملکرد آشکارساز نوری MSM سیلیکنی

مریم زارع پور^۱، کارشناسی ارشد، حامد دهدشتی جهرمی^۲، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق- واحد فسا، دانشگاه آزاد اسلامی، فسا، ایران

۲- دانشکده مهندسی- گروه مهندسی برق، دانشگاه جهرم، جهرم، ایران
stmmary.eiman@yahoo.com, jahromi@jahromu.ac.ir

چکیده: آشکارساز نوری فلز-نیمه‌هادی-فلز از دو پیوند شاتکی و روزنه‌هایی برای جذب فوتون تشکیل شده و جریان تاریک کمی دارد. در این مقاله، به بررسی تاثیر مشخصات اتصال آلومینیومی بر جریان‌های تاریک و نوری و پاسخ نوری آشکارساز فلز-نیمه‌هادی-فلز (MSM) سیلیکنی پرداخته شده است. با توجه به روش رشد لایه فلزی، تابع کار یک فلز می‌تواند در یک بازه محدود تغییر کند. تاثیر تغییرات تابع کار آلومینیوم بر عملکرد آشکارساز مذکور مطالعه شده است. پس از تعیین تابع کار بهینه لایه فلزی، تاثیر ضخامت لایه آلومینیومی بر عملکرد آشکارساز بررسی شده است. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد تابع کار و ضخامت لایه آلومینیوم تاثیر مستقیمی بر جریان تاریک، جریان نوری و پاسخ نوری قطعه دارد. تاثیر این دو مولفه بر پارامترهای آشکارساز نوری مذکور به نحوی است که می‌تواند ساختار را از حالت آشکارسازی خارج کرده و تبدیل به یک مقاومت الکتریکی نماید. بنابراین لازم است برای ساخت، با انتخاب روش لایه نشانی مناسب و ضخامت لایه فلزی مناسب، پارامترهای مذکور بهینه شوند. در این تحقیق برای یک آشکارساز نوری MSM با ساختار متقارن، تابع کار بهینه برابر با ۴/۲۶ الکترون ولت به‌دست آمد. توابع کار کمتر از این مقدار منجر به ایجاد اتصال اهمی بین لایه آلومینیومی و لایه سیلیکنی و توابع کار بیشتر از این مقدار منجر به ایجاد یک پیوند شاتکی با ولتاژ شکست بسیار کم در ناحیه بایاس معکوس می‌شود. همچنین بهترین ضخامت لایه آلومینیومی برابر با ۱/۱ میکرو-متر به‌دست آمد. این ضخامت منجر به بیشترین مقدار پاسخ نوری در آشکارساز مورد مطالعه می‌شود.

کلمات کلیدی: آشکارساز نوری MSM، پاسخ نوری، جریان تاریک، جریان نوری، تابع کار

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۰/۲/۱۵

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۰/۴/۲۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۴/۳۱

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر حامد دهدشتی جهرمی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: جهرم- بلوار شهید استاد مطهری- میدان خلیج فارس- دانشگاه جهرم- دانشکده فنی و مهندسی

۱- مقدمه

ادوات اپتوالکترونیکی از قبیل سلول‌های خورشیدی، حسگرهای نوری، آشکارسازهای نوری و ... به دلیل مزایای بسیار زیادی که دارند همواره در مهندسی الکترونیک مورد توجه بوده‌اند [۳-۱]. با توجه به پیشرفت‌های فوق‌العاده فناوری، امروزه سامانه‌های نوری، مهم‌ترین سامانه انتقال به خصوص در شبکه‌های زیرساخت و بین‌الملل محسوب می‌شوند. چرا که از بارزترین خصوصیات آن‌ها می‌توان به ظرفیت بالا، قیمت پایین، سرعت انتقال زیاد و انعطاف‌پذیری اشاره کرد. هر ارتباط نوری از سه بخش اصلی تشکیل شده است: فرستنده، خط انتقال و گیرنده. در یک سامانه انتقال نوری وظیفه آشکارساز نوری که اولین بلوک گیرنده است تبدیل سیگنال نوری حاوی اطلاعات به سیگنال الکتریکی است. آشکارساز، یک دستگاه الکترونیک نوری است که فوتون‌های نوری را به جریان الکتریکی تبدیل می‌کند [۴]. آشکارسازهای نوری دارای کاربردهای مختلفی از قبیل تشخیص دود (پایش محیط زیست)، مخابرات نوری، حسگری از راه دور، تشخیص پزشکی، سامانه‌های کنترل و ... است [۵-۷]. آشکارسازها بر اساس فرآیندی که به نور تابشی پاسخ می‌دهند به دو گروه عمده‌ی آشکارسازهای حرارتی و آشکارسازهای فوتونی تقسیم می‌شوند. در آشکارسازهای حرارتی جذب نور باعث اعمال تغییرات حرارتی در ساختار آشکارساز می‌شود. در آشکارسازهای فوتونی جذب نور باعث تولید زوج الکترون-حفره‌ی آزاد شده که این حامل‌های آزاد توسط مدارهای الکترونیکی بیرونی دریافت و اندازه‌گیری می‌شوند. اگر از بین حامل‌های آزاد تولید شده، حامل اکثریت اندازه‌گیری شود به فرآیند آن نور-رسانا گفته می‌شود و اگر حامل‌های اقلیت تولید شده اندازه‌گیری شوند فرآیند آن می‌تواند از نوع نور-رسانش یا فوتولتائیک^۲ باشد [۸]. آشکارسازهای نوری نیمه‌هادی به دلیل قیمت کم، اندازه کوچک، استحکام، توان مصرفی کم، محدوده‌ی طیفی وسیع، حساسیت بالا، پاسخ سریع و سازگاری با مدارهای الکترونیکی خوانش-بیرونی مجتمع‌گزینه‌های مناسب‌تری نسبت به سایر آشکارسازهای نوری هستند [۹-۱۰]. آشکارساز نور-رسانا، دیود نوری PN، دیود نوری PIN، دیود نوری بهمنی (APD)^۳، آشکارساز فلز-نیمه‌هادی-فلز^۴ (MSM) و ترانزیستور نوری، انواع مختلف آشکارسازهای نوری نیمه‌هادی هستند [۱۱]. آشکارسازهای MSM به علت طراحی ساختار ساده، هزینه کم تولید، سرعت پاسخ‌دهی بالا و جریان تاریکی کم، بیشتر در نظر گرفته شده است [۱۲]. آشکارسازهای MSM، به دلیل مزایای اساسی‌شان نظیر ساختار ساده، سهولت ساخت و مجتمع‌سازی و ظرفیت کم در واحد سطح به‌طور گسترده‌ای مورد مطالعه قرار گرفته‌اند [۱۳-۱۶].

آشکارساز MSM دارای ساختار ساده‌تری نسبت به APD و PIN است. در واقع این آشکارساز از یک قطعه نیمه‌هادی و دو پیوند شاتکی تشکیل شده است. به دلیل اینکه همواره یکی از پیوندها به‌صورت معکوس بایاس می‌شود نویز و جریان تاریک MSM کم است. حتی در مقایسه با PIN نویز کمتری دارد، سرعت پاسخ‌دهی آن بالاست و پهنای باند فرکانسی خوبی دارد چرا که خازن‌های پیوند بین فلز و نیمه‌هادی به دلیل غلظت ناخالصی کم، کوچک هستند. این آشکارساز گزینه‌ی مناسبی برای سرعت‌های انتقال زیاد در مدارهای مجتمع نوری است. در سال‌های اخیر، آشکارسازهای MSM به دلیل سادگی ساخت، مجتمع‌پذیری با ترانزیستورهای اثرمیدانی (FET)، جریان تاریک و نویز کم و پهنای باند زیاد به وفور مورد توجه قرار گرفته‌اند. دیود نوری MSM، علاوه بر جریان تاریک بسیار کم، پاسخ جریان و بازده کوانتومی زیادی را نشان می‌دهد. خصوصیات این آشکارساز سبب شده که محققین تلاش بسیاری را برای بهینه‌سازی پارامترهای خروجی آن انجام دهند. این تلاش‌ها عموماً در جهت کاهش نویز و افزایش جریان بوده است [۱۷-۱۹].

ساختار MSM با الکترودهای فلزی مشابه، به عنوان یک ساختار MSM متقارن (S-MSM)^۵ شناخته می‌شود. این ساختار را می‌توان با استفاده از دو فلز مختلف برای طراحی الکترودها به یک MSM نامتقارن (A-MSM)^۶ تبدیل کرد [۲۰-۲۴].

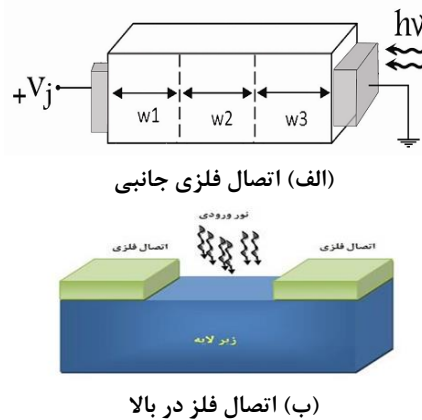
در سال ۲۰۰۷ خانم هتریچ و همکاران ضریب جذب نوری یک آشکارساز MSM را با استفاده از ساختار پلاسمونیک افزایش دادند. آرایه پلاسمونیک استفاده شده در این ساختار باعث افزایش شدید میدان در نزدیکی محل اتصال فلز-نیمه‌هادی شده و منجر به بهبود ضریب جذب نوری در ناحیه جاذب آشکارساز می‌شود [۲۵]. در یک تحقیق دیگر از نانو لوله‌های کوانتومی برای افزایش پاسخ‌دهی یک آشکارساز نوری MSM استفاده شد. در این تحقیق محققان اثر تغییر قطر نانو لوله‌ها را بر پاسخ‌دهی آشکارساز مطالعه نمودند. نتایج ایشان نشان داد تغییر در قطر نانو لوله‌ها به دلیل تغییر خواص کوانتومی ساختار علاوه بر تاثیر و افزایش چشم‌گیر پاسخ‌دهی آشکارساز، سرعت پاسخ آن را نیز به شدت بهبود می‌دهد [۲۶]. آقای رادزالی و همکاران ضمن

ارائه یک روش برای رشد سیلیکن متخلخل؛ یک آشکارساز نوری MSM مبتنی بر سیلیکن متخلخل را ساخته و خصوصیات آن را مطالعه و گزارش کردند. نتایج مطالعات ایشان نشان می‌دهد استفاده از سیلیکن متخلخل در ساختار آشکارساز بعنوان ناحیه فعال باعث بهبود پاسخ نوری شده است [۲۷]. در تحقیق دیگری اثر تاثیر ناخالصی اتم پلاتین بر جریان نوری آشکارساز MSM بررسی شده است. در این تحقیق مشخص گردید استفاده از اتم پلاتین بعنوان ناخالصی می‌تواند جریان نوری را تا بیش از چهار برابر افزایش دهد [۲۸].

در این مقاله یک آشکارساز MSM سیلیکونی متقارن مورد مطالعه قرار گرفته است. در ساختار مذکور از آلومینیوم بعنوان لایه فلزی برای ایجاد اتصالات فلزی استفاده شده است. معمولاً هر فلز دارای یک تابع کار بوده که با توجه به روش رشد لایه فلزی می‌تواند در یک بازه محدود تغییر کند. در این مقاله تاثیر تغییرات تابع کار آلومینیوم (متاثر از پارامترها و روش رشد لایه فلزی) بر عملکرد آشکارساز مورد نظر مطالعه شده است. پس از تعیین تابع کار بهینه لایه فلزی، تاثیر ضخامت لایه آلومینیومی بر پارامترهای جریان تاریک، جریان روشنایی و پاسخدهی نوری آشکارساز بررسی شده است. در این مقاله از روش‌های عددی برای شبیه‌سازی استفاده شده و ساختار افزاره در حالت دو بعدی شبیه‌سازی شده است.

۲- آشکارساز MSM

این آشکارساز شامل یک نیمه‌هادی و دو عدد اتصال فلزی است که در دو طرف نیمه‌هادی یا قسمت بالایی آن وصل می‌شوند. ولتاژ بایاس از سمت الکترودهای فلزی اعمال می‌گردد. در صورت انتخاب فلز با تابع کار مناسب، در اتصال فلز-نیمه‌هادی، فلز نقش نیمه‌هادی با ناخالصی مخالف را ایفا کرده، لذا با اتصال ولتاژ بایاس، یکی از پیوندهای شاتکی در بایاس معکوس و پیوند دیگر در بایاس مستقیم قرار می‌گیرد. تابش فوتون‌های نوری سمت پیوند شاتکی باعث جذب آنها توسط نیمه‌هادی و در نتیجه تغییر در جریان عبوری از قطعه می‌شود. شکل (۱) ساختار ساده‌ای از یک آشکارساز MSM را نشان می‌دهد.



شکل (۱): ساختار ساده‌ای از یک MSM

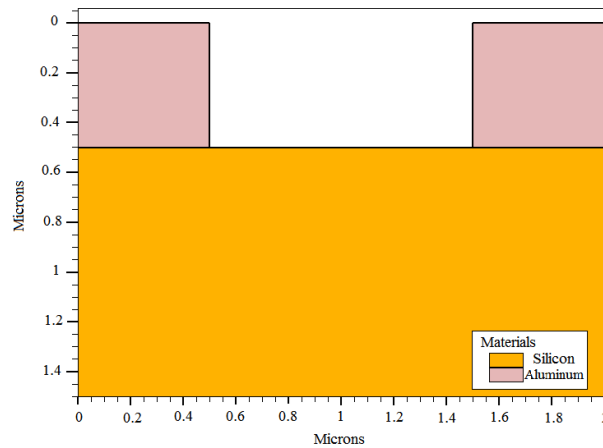
Figure (1): Simple schematics of an MSM, a) lateral contacts, b) top contacts

به‌ازای هر فوتون جذب شده در نیمه‌هادی، یک الکترون از لایه ظرفیت آزاد شده و تولید الکترون-حفره آزاد می‌کند. به این ترتیب زوج الکترون-حفره‌های تولید شده در نیمه‌هادی بر اثر رانش میدان سرعت گرفته و به طرف اتصالات حرکت می‌کنند. این میدان بر اثر ولتاژ بایاس اعمال شده به‌وجود می‌آید و علاوه بر سرعت بخشیدن به حرکت حامل‌ها، مانع از بازترکیب آنها در طول مسیر حرکت شده و جریان کلی افزاره را افزایش می‌دهد.

۳- شبیه‌سازی

برای شبیه‌سازی آشکارساز MSM، یک ویفر سیلیکونی $2 \times 1/5$ میکرو-متر مربع با ماده ناخالصی آرسنیک (As) و چگالی ناخالصی 8×10^{14} بر سانتیمتر-مکعب در جهت کریستالی (۱۰۰) ایجاد می‌کنیم. فلز آلومینیوم (Al) با ضخامت $0/5$ میکرو-متر را روی ویفر سیلیکونی قرار می‌دهیم و برای گسیل نور به قطعه، وسط فلز را برش می‌دهیم. شکل (۲) شماتیک افزاره‌ی

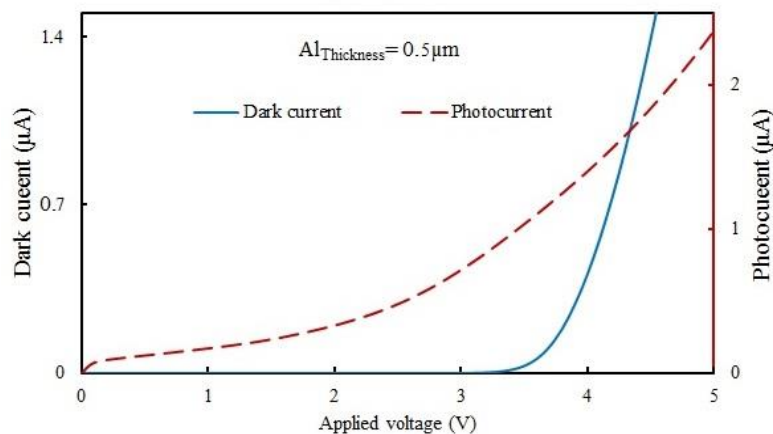
شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد. با توجه به تقارن الکتریکی موجود در ساختار مورد مطالعه، یکی از اتصالات آلومینیومی (کاتد) را به منبع ولتاژ و اتصال دیگر آن (آند) را به زمین وصل کرده و جریان عبوری از آن اندازه‌گیری می‌کنیم. ولتاژ کاتد را از صفر تا ۵ ولت افزایش داده و ولتاژ سمت آند در مقدار صفر ولت ثابت نگه می‌داریم.



شکل (۲): شماتیک افزاره‌ی شبیه‌سازی شده

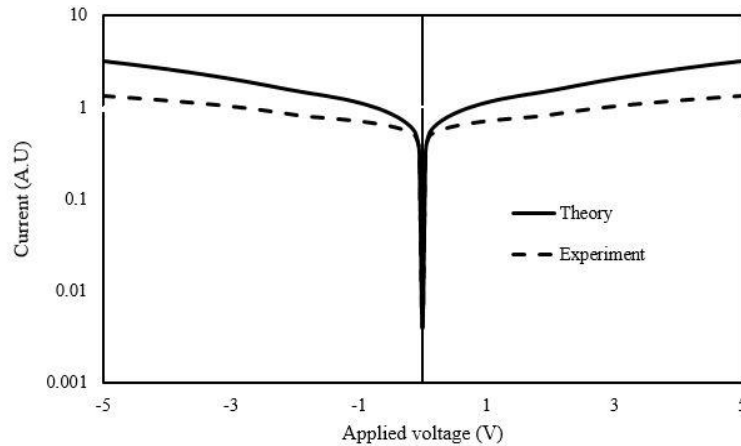
Figure (2): Schematic of the simulated device

در حالت تاریک به افزاره، نوری گسیل نکرده‌ایم، اما برای حالت روشنایی، افزاره را تحت گسیل نور قرار می‌دهیم. از یک منبع نوری با توان ثابت در بازه طول موجی ۱۰۰ تا ۲۴۰۰ نانومتر استفاده نموده و پاسخ افزاره را بررسی می‌کنیم. شکل (۳) جریان تاریک و جریان نوری افزاره مورد مطالعه را با ضخامت لایه آلومینیوم ۰/۵ نانومتر نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل مشخص است، در غیاب نور ورودی در ولتاژهای بایاس کمتر از ۳/۵ ولت، جریان بسیار کمی (در حد نانو آمپر) از قطعه عبور می‌کند (محور سمت چپ). این جریان کم به دلیل این است که یکی از پیوندهای فلز-نیمه هادی در بایاس معکوس قرار دارد و حداکثر جریان عبوری از افزاره، جریان اشباع معکوس آن است. با افزایش ولتاژ بایاس آشکارساز و برای ولتاژهای بیشتر از ۳/۵ ولت جریان عبوری از قطعه افزایش ناگهانی می‌یابد که نشان دهنده این است که پیوندی که بایاس معکوس بوده به شکست می‌رود و جریان زیادی از قطعه عبور می‌کند. در شکل (۳)، جریان نوری قطعه نیز نشان داده شده است (محور سمت راست). همان‌گونه که در این شکل مشخص است جریان نوری قطعه نسبت به جریان تاریک در ولتاژهای بایاس برابر (تا قبل از شکست پیوند فلز-نیمه‌هادی)، مقدار بیشتری دارد که به دلیل جذب فوتون‌های فرودی و تبدیل آنها به زوج الکترون-حفره است و همچنین جریان نوری دارای یک روند صعودی با افزایش ولتاژ بایاس قطعه است. این شکل صحت انتخاب پارامترهای طراحی، تشکیل پیوند شاتکی بین فلز و نیمه‌هادی و همچنین عملکرد صحیح افزاره در جذب فوتون‌های تابیده شده به آن را نشان می‌دهد.



شکل (۳): جریان تاریک و جریان نوری افزاره به‌ازای ولتاژهای بایاس مختلف

Figure (3): Dark current and photocurrent of the device for different applied voltages



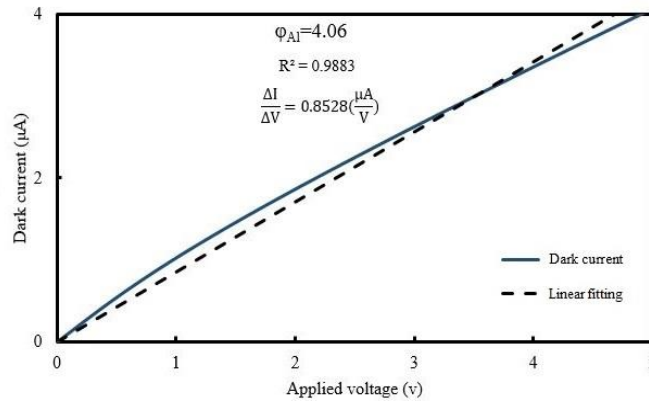
شکل (۴): مقایسه جریان افزاره با نتایج عملی گزارش شده در مرجع [۱۸]
 Figure (4): A comparison of the device current with experimental evidence in [18]

برای اطمینان بیشتر از انتخاب صحیح پارامترها و همچنین صحت عملکرد افزاره طراحی شده نمودار جریان عبوری از آن با نتایج آزمایشگاهی مربوط به جریان یک افزاره MSM مقایسه شده است. شکل (۴) نتیجه این مقایسه را نشان می‌دهد. با توجه به شباهت بسیار زیاد رفتار افزاره در ولتاژهای بایاس مختلف با نتایج آزمایشگاهی، صحت مقادیر انتخاب شده برای پارامترها مورد تایید بوده و در ادامه سایر تحلیل‌ها را با مقادیر انتخاب شده انجام خواهیم داد. یکی از مهم‌ترین و تاثیرگذارترین عوامل در تشکیل پیوند شاتکی در محل اتصال فلز-نیمه‌های، تابع کار فلز است. اولین مرحله از مطالعه این ساختار بررسی تاثیر تابع کار فلز آلومینیوم بر عملکرد آشکارساز مورد نظر است. تابع کار فلز آلومینیوم به شدت به پارامترهای فرآیند لایه نشانی و همچنین روش لایه نشانی وابسته بوده و می‌تواند در بازه ۴/۰۶ تا ۴/۴۶ الکترون ولت تغییر کند [۲۹-۳۱]. بنابراین در این مقاله ابتدا تابع کار آلومینیوم را ۴/۰۶ eV گرفته و با گام‌های ۰/۰۵ تا ۴/۴۶ الکترون ولت تغییر داده و تاثیر آن را بر عملکرد افزاره مطالعه کردیم. با تغییر تابع کار آلومینیوم سه رفتار متفاوت از آشکارساز مشاهده گردید. شکل (۵) جریان تاریک افزاره را برای تابع کار ۴/۰۶ الکترون ولت نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل نشان داده شده است، جریان عبوری از افزاره در غیاب هرگونه نور فرودی، مقدار بسیار زیادی داشته و رابطه بین جریان و ولتاژ قطعه با تقریب بسیار خوبی خطی است. با توجه به این رفتار مشخص می‌شود در محل اتصال فلز آلومینیوم با سیلیکن پیوند شاتکی تشکیل نشده و این اتصال را می‌توان اهمی در نظر گرفت. برای اطمینان بیشتر، یک نمودار خطی روی داده‌های به‌دست آمده از شبیه‌سازی مربوط به جریان تاریک با ضریب همبستگی (R^2) برابر ۰/۹۸۸۳ برازش شد و مقدار مقاومت الکتریکی افزاره در این حالت برابر با ۱/۱۷ مگا اهم به‌دست آمد. جریان تاریک قابل ملاحظه عبوری از افزاره در این حالت آن را برای استفاده به‌عنوان آشکارساز نوری نامناسب می‌کند. زیرا که تغییرات جریان قطعه در اثر جذب نور نسبت به جریان تاریک بسیار ناچیز بوده و پاسخ نوری قطعه به‌شدت پائین و غیر قابل استفاده است. سد پتانسیل شاتکی ایجاد شده در محل اتصال فلز-نیمه هادی (ϕ_B) را می‌توان با معادله زیر محاسبه نمود:

$$\phi_B = \Psi_M - \chi_s \quad (1)$$

در این معادله Ψ_M تابع کار فلز و χ_s مشخصه الکترون‌خواهی نیمه‌هادی است. این رابطه بیان می‌کند افزایش تابع کار باعث افزایش سد پتانسیل شاتکی در محل اتصال فلز-نیمه‌هادی می‌شود. با افزایش تابع کار آلومینیوم از ۴/۱۱ تا ۴/۲۶ الکترون ولت رفتار دیگری از افزاره مشاهده می‌شود که نسبت به حالت قبل تفاوت چشمگیری دارد. شکل (۶) جریان تاریک افزاره را در بازه تابع کار از ۴/۱۱ تا ۴/۲۶ الکترون ولت نشان می‌دهد (محور عمودی لگاریتمی است). جریان عبوری از افزاره در این بازه تابع کار نسبت به حالت قبل به‌شدت کاهش یافته و علاوه بر آن رفتار جریان در ولتاژهای مختلف کاملاً غیر خطی بوده و مطابق جریان اشباع معکوس یک پیوند شاتکی است. جریان عبوری از یک پیوند شاتکی را می‌توان توسط معادله زیر بیان نمود [۳۲]:

$$J = J_0 \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) \quad (2)$$



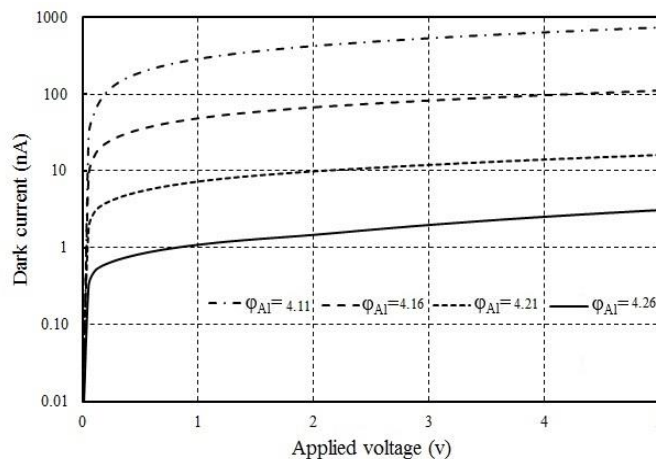
شکل (۵): جریان تاریک افزاره به ازای ولتاژهای بایاس مختلف و تابع کار ۴/۰۶ eV

Figure (5): Dark current of the device for different applied voltages and aluminum work function of 4.06 eV

در این معادله q بار الکترون، V ولتاژ بایاس، k ثابت بولتزمن و T دمای مطلق بر حسب کلوین است. همچنین J_0 به صورت زیر تعریف می شود:

$$J_0 = \frac{4\pi q m_n k^2}{h^3} T^2 e^{-\frac{q\phi_B}{kT}} \quad (3)$$

که در آن h ثابت پلانک و m_n جرم موثر الکترون است. با استفاده از معادله (۲) و همچنین یادآوری این نکته که در ساختار MSM همواره یکی از پیوندها در ناحیه بایاس معکوس است، می توان جریان عبوری از یک آشکارساز MSM را محاسبه نمود. واضح است که در ولتاژهای بایاس منفی اندازه جریان در ابتدا به صورت نمایی افزایش یافته و سپس در مقدار مشخصی (J_0) ثابت می شود. بنابراین فلز آلومینیوم با تابع کار بین ۴/۱۱ تا ۴/۲۶ الکترون ولت با سیلیکن تشکیل پیوند شاتکی داده و جریان اشباع معکوس بسیار کم عبوری از این پیوند شاتکی آنرا برای استفاده به عنوان آشکارساز نوری مناسب می کند. همچنین مشاهده می شود افزایش تابع کار آلومینیوم باعث کاهش شدید و چشم گیر جریان تاریک عبوری از افزاره شده است. این مسئله با در نظر گرفتن افزایش ارتفاع سد شاتکی ایجاد شده در محل پیوند آلومینیوم-سیلیکن (ϕ_B) و ممانعت از عبور حامل های اقلیت برای تشکیل جریان در بایاس معکوس قابل توجیه است (افزایش ϕ_B مطابق رابطه (۳) باعث کاهش J_0 می شود). بنابراین بیشترین مقدار تابع کار آلومینیوم در بازه مذکور (۴/۲۶ الکترون ولت) مناسب ترین انتخاب برای ساخت آشکارساز به نظر می رسد.

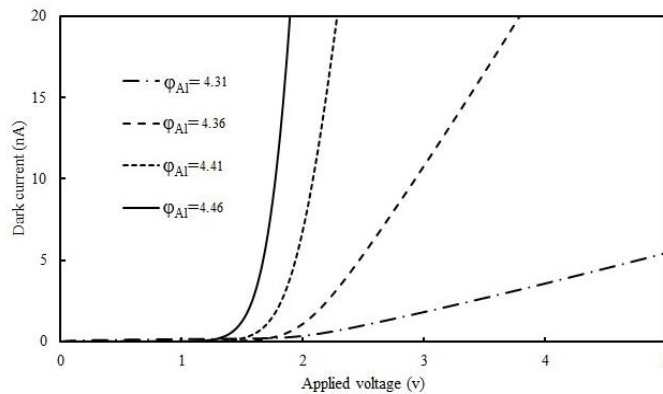


شکل (۶): جریان تاریک افزاره به ازای ولتاژهای بایاس مختلف و توابع کار مختلف از ۴/۱۱ تا ۴/۲۶ eV (محور عمودی لگاریتمی)

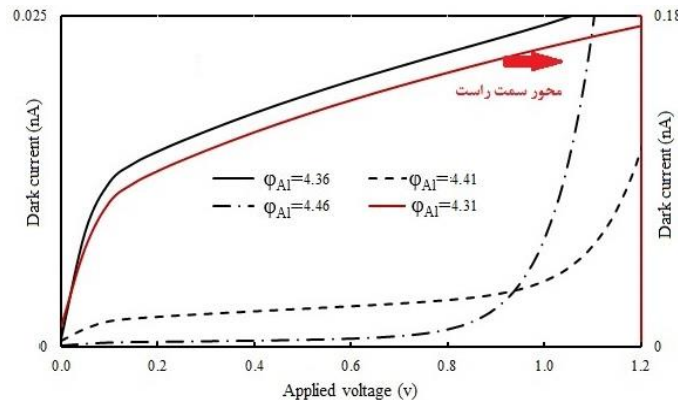
Figure (6): Dark current of the device for different applied voltages and aluminum work functions from 4.11 to 4.26 eV (y axis in log scale)

با افزایش بیشتر تابع کار آلومینیوم نسبت به حالت قبل رفتار جدید دیگری مشاهده شد که می تواند در طراحی آشکارساز بسیار موثر باشد. شکل (۷) جریان تاریک عبوری از افزاره را برای تابع کار آلومینیوم در بازه ۴/۳۱ تا ۴/۴۶ الکترون ولت به ازای

ولتاژهای مختلف نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل مشخص است در ولتاژهای بایاس بسیار کم جریان بسیار کمی از افزاره عبور می‌کند که ناشی از افزایش سد شاتکی در محل اتصال آلومینیوم-سیلیکن است. اما افزایش ولتاژ بایاس باعث می‌شود پیوندی که در بایاس معکوس قرار دارد به شکست رفته و جریان به‌صورت ناگهانی افزایش یابد که عملاً استفاده از آن را به‌عنوان آشکارساز ناممکن می‌سازد. این رفتار می‌تواند به دلیل افزایش شدید میدان الکتریکی در ناحیه تخلیه پیوند در اثر افزایش تابع کار فلز آلومینیوم که معادل افزایش چگالی ناخالصی تعبیر می‌شود، باشد. همان‌گونه که در شکل (۷) نشان داده شده است افزایش تابع کار آلومینیوم باعث کاهش ولتاژ شکست بایاس معکوس پیوند می‌شود. برای مطالعه دقیق‌تر رفتار این قطعه در بازه ولتاژی قبل از شکست پیوند، رفتار افزاره به ازای ولتاژهای بایاس صفر تا ۱/۲ ولت در شکل (۸) رسم شده است.



شکل (۷): جریان تاریک افزاره به‌ازای ولتاژهای بایاس مختلف و توابع کار مختلف از ۴/۳۱ تا ۴/۴۶ الکترون ولت
Figure (7): Dark current of the device for different applied voltages and aluminum work functions from 4.31 to 4.46 eV



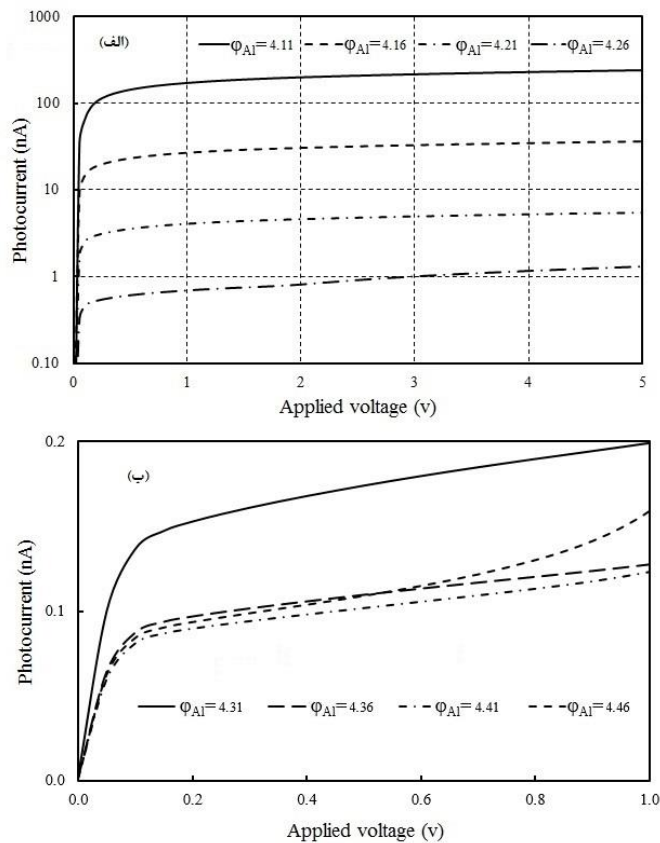
شکل (۸): جریان تاریک افزاره به‌ازای ولتاژهای بایاس زیر ۱/۲ ولت و توابع کار مختلف از ۴/۳۱ تا ۴/۴۶ الکترون ولت
Figure (8): Dark current of the device for different applied voltages less than 1.2 V, and aluminum work functions from 4.31 to 4.46 eV

این شکل به وضوح تایید می‌کند اتصال بین آلومینیوم-سیلیکن از نوع اتصال شاتکی بوده و جریان عبوری از افزاره رفتاری شبیه جریان بایاس معکوس یک دیود را دارد. افزایش تابع کار فلز باعث کاهش شدید جریان تاریک و همچنین کاهش ولتاژ شکست بایاس معکوس پیوند می‌شود. بنابراین در صورتی که تابع کار آلومینیوم در بازه ۴/۱۱ تا ۴/۴۶ الکترون ولت باشد اتصال آلومینیوم-سیلیکن از نوع شاتکی بوده و می‌توان از آن در ساخت آشکارساز استفاده نمود. نکته قابل ملاحظه اینکه فلز آلومینیوم با تابع کار در بازه ۴/۱۱ تا ۴/۲۶ الکترون ولت می‌تواند در ساخت آشکارسازهایی استفاده شود که بازه ولتاژی بیشتری دارد اما از فلز آلومینیوم با تابع کار در بازه ۴/۳۱ تا ۴/۴۶ الکترون ولت می‌توان در ساخت آشکارسازهایی با جریان تاریک کمتر و البته ولتاژ کاری بسیار کمتر استفاده نمود. واضح است که کاهش ولتاژ بایاس قطعه به شدت سرعت پاسخ را محدود کرده و اجازه استفاده از آشکارساز در سیگنال‌های نوری با نرخ بیت بالا را نمی‌دهد. لذا تابع کار بهینه برای آلومینیوم در این ساختار ۴/۲۶ الکترون ولت انتخاب شده و مراحل بعدی تحقیق با آن انجام می‌شود. شکل (۹) جریان نوری افزاره را

برای اتصال آلومینیوم-سیلیکن با تابع کار ۴/۱۱ تا ۴/۴۶ الکترون ولت برای آلومینیوم و در بازه ولتاژهای بایاس قبل از به شکست رفتن پیوند نشان می‌دهند. همان‌گونه که در این شکل نشان داده شده افزایش تابع کار آلومینیوم باعث کاهش جریان نوری افزاره می‌شود. علاوه بر آن، افزایش تابع کار باعث محدود شدن ولتاژ بایاس قابل اعمال به افزاره نیز می‌شود. علی‌رغم اینکه نتایج شکل‌های (۶) و (۸) نشان دهنده کاهش مطلوب جریان تاریک با افزایش تابع کار هستند اما کاهش محدوده ولتاژ قابل اعمال به افزاره [نتایج شکل‌های (۸) و (۹-ب)] و کاهش جریان نوری [نتایج شکل (۹)] پیامدهای نامطلوب آن هستند. بنابراین دلیل تابع کار انتخاب شده در این مقاله به نحوی انتخاب شده که حالت میانه در بین هر سه عامل را داشته باشد. برای نیل به این هدف تابع کار آلومینیوم را برای ادامه این تحقیق برابر با ۴/۲۶ الکترون ولت در نظر گرفته شده است. پاسخ نوری عاملی است که تغییرات جریان افزاره را در حالتی که تحت تابش نور قرار گرفته نسبت به حالت تاریک بیان می‌کند و مهمترین عامل در تعیین کارایی آشکارساز است. پاسخ نوری یک آشکارساز با رابطه زیر محاسبه می‌شود [۳۳]:

$$R = \frac{I_{ph} - I_d}{I_d} \quad (4)$$

در این معادله I_{ph} جریان نوری و I_d جریان تاریک است.



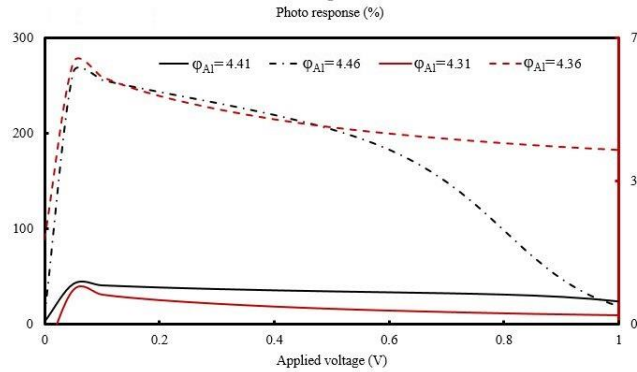
شکل (۹): جریان نوری افزاره به ازای ولتاژهای بایاس مختلف الف) تابع کار آلومینیوم در بازه ۴/۱۱ تا ۴/۲۶ eV (محور عمودی لگاریتمی)،

ب) تابع کار آلومینیوم در بازه ۴/۳۱ تا ۴/۴۶ eV

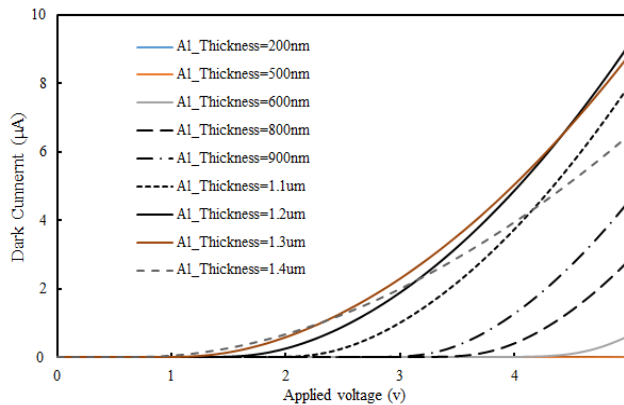
Figure (9): Photocurrent of the device for different applied voltages; a) aluminum work functions from 4.11 to 4.26 eV (y axis in log scale), b) aluminum work functions from 4.31 to 4.46 eV

در شکل (۱۰) پاسخ نوری افزاره به ازای تابع کار آلومینیوم در بازه ۴/۳۱ تا ۴/۴۶ الکترون ولت برای ولتاژهای بایاس صفر تا یک ولت رسم شده است. در این شکل نمودارهای قرمز رنگ (توابع کار ۴/۳۱ و ۴/۳۶ الکترون ولت) مربوط به محور عمودی سمت راست و نمودارهای سیاه رنگ (توابع کار ۴/۴۱ و ۴/۴۶) مربوط به محور عمودی سمت چپ است. همان‌گونه که در این شکل نشان داده شده افزایش تابع کار باعث افزایش چشم‌گیر پاسخ نوری می‌شود ولی بازه ولتاژ مجاز قابل اعمال به افزاره را به دلیل شکست پیوند شاتکی، به شدت کاهش می‌دهد. در ادامه، تاثیر تغییر ضخامت لایه آلومینیوم روی عملکرد قطعه بررسی

می‌شود. شکل (۱۱) جریان تاریک قطعه را برای لایه آلومینیوم با ضخامت‌های مختلف (از ۲۰۰ نانومتر تا ۱/۴ میکرومتر) را برای یک افزاره با تابع کار آلومینیوم برابر با ۴/۲۶ الکترون ولت نشان می‌دهد. همان گونه که در این شکل مشخص است با افزایش ضخامت لایه آلومینیوم از ۲۰۰ نانومتر تا ۱/۲ میکرومتر نرخ تغییرات جریان تاریک نسبت به ولتاژ بیشتر شده و همچنین ولتاژ شکست پیوندی که بایاس معکوس است کاهش می‌یابد. با افزایش بیشتر ضخامت لایه آلومینیوم، جریان تاریک و روند افزایشی آن کاهش می‌یابد.

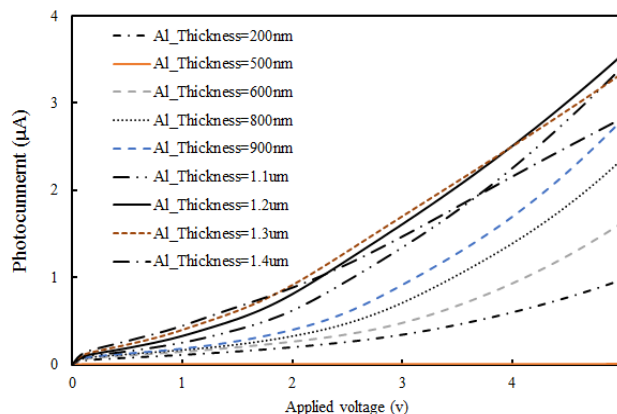


شکل (۱۰): پاسخ نوری افزاره به‌ازای ولتاژهای بایاس مختلف و تابع کار آلومینیوم در بازه ۴/۳۱ تا ۴/۴۶ الکترون ولت
Figure (10): Photocurrent of the device for different applied voltages and aluminum work functions from 4.31 to 4.46 eV



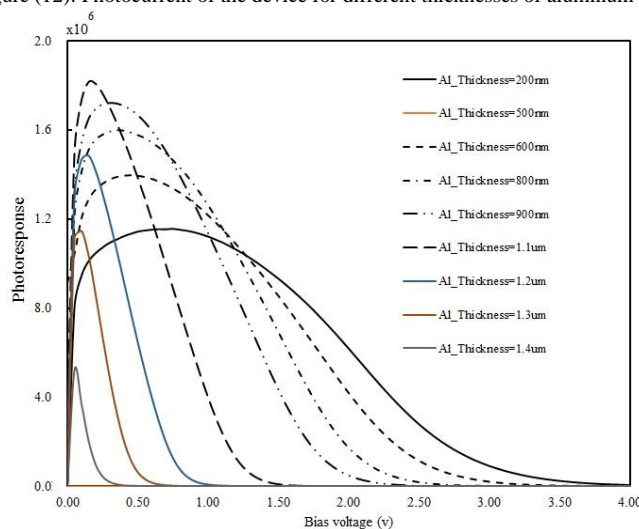
شکل (۱۱): جریان تاریک افزاره برای ضخامت‌های مختلف لایه آلومینیوم
Figure (11): Dark current of the device for different thicknesses of aluminum layer.

با توجه به نتایج به‌دست آمده از این شکل به نظر می‌رسد انتخاب ضخامت‌های بسیار کم یا بسیار زیاد آلومینیوم برای داشتن جریان تاریک کمتر مناسب‌تر باشد. اما مسئله مهم دیگری که باید در کنار کاهش جریان تاریک مد نظر باشد وضعیت جریان نوری افزاره است. بنابراین قبل از انتخاب نهایی ضخامت لایه آلومینیوم، تاثیر آن بر جریان نوری قطعه مطالعه می‌شود. شکل (۱۲) تاثیر تغییر ضخامت لایه آلومینیوم را بر جریان نوری قطعه نشان می‌دهد. همان گونه که در این شکل مشخص است جریان نوری با افزایش ضخامت لایه آلومینیوم از ۲۰۰ نانومتر تا ۱/۲ میکرومتر افزایش یافته و افزایش ضخامت لایه آلومینیوم بیشتر از ۱/۲ میکرومتر باعث کاهش جریان نوری می‌شود. روند تغییرات جریان تاریک و جریان نوری افزاره با مقایسه شکل‌های (۱۰) و (۱۱) یک روند مشابه مشاهده می‌شود. به عبارت دیگر با افزایش ضخامت لایه آلومینیومی از ۲۰۰ نانومتر تا ۱/۲ میکرومتر هم جریان تاریک و هم جریان نوری افزاره افزایش یافته و برای ضخامت‌های بیشتر از ۱/۲ میکرومتر هر دو جریان کاهش می‌یابند. لذا با توجه به این نتایج نمی‌توان تصمیم مناسبی نسبت به تاثیر تغییر ضخامت آلومینیوم بر عملکرد قطعه داشت. بنابراین پاسخ نوری آشکارساز را مورد مطالعه قرار می‌دهیم. شکل (۱۳) پاسخ نوری نوری قطعه را برای ضخامت‌های مختلف لایه آلومینیوم نشان می‌دهد. پاسخ نوری قطعه به ازای تغییر ضخامت لایه آلومینیوم از ۲۰۰ نانومتر تا ۱/۴ میکرومتر افزایش یافته و بیشینه آن در ولتاژهای پایین‌تر اتفاق می‌افتد. افزایش ضخامت لایه آلومینیوم بیش از ۱/۴ میکرومتر باعث کاهش پاسخ نوری شده و بیشینه آن در ولتاژهای کمتری اتفاق می‌افتد.



شکل (۱۲): جریان نوری افزاره برای ضخامت‌های مختلف لایه آلومینیوم

Figure (12): Photocurrent of the device for different thicknesses of aluminum layer



شکل (۱۳): پاسخ نوری افزاره برای ضخامت‌های مختلف لایه آلومینیوم

Figure (13): Photo-response of the device for different thicknesses of aluminum layer

۴- نتیجه گیری

پارامترهای مختلفی در عملکرد یک آشکارساز MSM تاثیر دارند. در این تحقیق، تاثیر تابع کار و ضخامت لایه آلومینیوم بر عملکرد یک آشکارساز MSM بررسی شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد تابع کار و ضخامت لایه آلومینیوم تاثیر مستقیمی بر جریان تاریک، جریان نوری و پاسخ نوری قطعه دارد که برای داشتن بیشترین پاسخ نوری (جریان تاریک کمتر و جریان نوری بیشتر) قبل از ساخت قطعه باید تابع کار مناسب و ضخامت بهینه را برای لایه آلومینیوم به دست آورد. این تحقیق نشان می‌دهد مقدار خیلی کم تابع کار فلز اتصالات آند و کاتد موجب تشکیل پیوند شاتکی نشده و ساختار رفتار مقاومت خطی داشته که برای کاربردهای آشکارسازی نور مناسب نیست. همچنین مقادیر زیاد تابع کار فلز نیز منجر به کاهش شدید ولتاژ شکست پیوند شده که برای ساخت آشکارسازهای نوری سریع در مناسب نیست. همچنین مشخص شد برای ساخت یک آشکارساز نوری با جریان تاریک کم باید ضخامت لایه آلومینیوم را کمترین مقدار انتخاب کرد. رفتار مشابهی در مورد تاثیر ضخامت لایه آلومینیوم بر جریان نوری مشاهده گردید یعنی با افزایش ضخامت لایه آلومینیومی جریان نوری افزاره افزایش می‌یابد. لذا با توجه به تضاد بوجود آمده در انتخاب ضخامت بهینه لایه آلومینیوم پاسخ نوری افزاره بررسی شد و مشخص گردید که افزایش ضخامت لایه آلومینیوم هر چند که باعث افزایش جریان تاریک می‌شود، اما به دلیل افزایش بیشتر در جریان نوری منجر به پاسخ نوری بیشتری خواهد شد، بنابراین در این تحقیق برای یک آشکارساز نوری MSM با ساختار متقارن، تابع کار و ضخامت بهینه لایه آلومینیومی به ترتیب برابر با $4/26$ الکترون ولت و $1/1$ میکرومتر به دست آمد.

References

مراجع

- [1] S.M.S. Hashemi-Nassab, M. Imanieh, A. Kamali, S.A. Emamghorashi, S. Hassanhosseini, "Increased light absorption in CIGS solar cells with plasmonic Ag nanostructures to increase efficiency", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 12, no. 45, pp. 35-49, June 2021 (doi: 20.1001.1.23-223871.1400.12.1.3.9) (in Persian).
- [2] S. Jafari, A. Esmaeilian-Marnani, "Improved fiber bragg grating bending-sensor using TE/TM modes", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 8, no. 30, pp. 33-44, June 2017 (in Persian).
- [3] H. Moradmand, E. Adib, B. Fani, "Investigation and improvement of high step-up DC-DC converters for PV module applications", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 7, no. 28, pp. 35-44, June 2017 (in Persian).
- [4] S. Sorifi, M. Moun, S. Kaushik, R. Singh, "High-temperature performance of a GaSe nanosheet-based broadband photodetector", *ACS Applied Electronic Materials*, vol 2, no. 3, pp. 670–676, Feb. 2020 (doi: 10.1021/acsaelm.9b00770).
- [5] S.V. Averin, P.I. Kuznetsov, V.A. Zhitov, L. Yu. Zakharov, V.M. Kotov, "MSM- photodetector with ZnSe/ZnS/GaAs Bragg reflector", *Optical and Quantum Electronics*, vol. 52, no. 2, pp. 1-7, Jan. 2020 (doi: 10.1007/s11082-020-2213-1).
- [6] X.X. Gong, G.T. Fei, W.B. Fu, B.N. Zhong, X.D. Gao, L.D. Zhang, "Metal-semiconductor-metal infrared photodetector based on PbTe nanowires with fast response and recovery time", *Applied Surface Science*, vol. 404, pp. 7-11, May 2017 (doi: 10.1016/j.apsusc.2017.01.246).
- [7] S.V. Averin, P.I. Kuznetsov, V.A. Zhitov, L.Y. Zakharov, V.M. Kotov, "Electrical, optical and spectral characteristics of type- II ZnSe/ZnTe/GaAs superlattice and MSM- photodetector on their base", *Optical and Quantum Electronics*, vol. 50, no.10, pp. 1-8, Sept. 2018 (doi: 10.1007/s11082-018-1623-9).
- [8] M.A. Kinch, "Fundamental physics of infrared detector materials", *Journal of Electronic Materials*, vol. 29, no.6, pp. 809-817, June 2000 (doi: 10.1007/s11664-000-0229-7).
- [9] F.P. Arquer, A. Armin, P. Meredith, E.H. Sargent, "Solution-processed semiconductors for next-generation photodetectors", *Nature Reviews Materials*, vol. 2, no. 3, pp. 1-17, Jan. 2017 (doi: 10.1038/natrevmats.20-16.100).
- [10] S. Umar, C. Santato, K. . Karim. "Lateral organic semiconductor photodetector. Part I: Use of an insulating layer for low dark current", *IEEE Trans. on Electron Devices*, vol. 61, no.10, pp. 3465-3471, Oct. 2014 (doi: 10.1109/TED.2014.2348540).
- [11] S. Liwen, M. Liao, M. Sumiya, "A comprehensive review of semiconductor ultraviolet photodetectors: from thin film to one-dimensional nanostructures", *Sensors*, vol. 13, no. 8, pp. 10482-10518, Aug. 2013 (doi: 10.3390/s130810482).
- [12] M. Muhammad, S. Ghanbarzadeh, C.H. Lee, C. Con, K.S. Karim, "Nanocrystalline silicon lateral MSM photodetector for infrared sensing applications", *IEEE Trans. on Electron Devices*, vol. 65, no. 2, pp. 584-590, Feb. 2018 (doi: 10.1109/TED.2017.2782769).
- [13] F. Nazia, N. Pradeep, J. Balakrishnan, "Green synthesis of graphene quantum dots and the dual application of graphene quantum dots-decorated flexible MSM p-type ZnO device as UV photodetector and piezotronic generator", *Bulletin of Materials Science*, vol. 44, no. 1, pp. 1-11, Feb. 2021 (doi: 10.1007/s12034-020-02326-w).
- [14] M. Ainorkhilah, Z. Hassan, A.F. Abd-Rahim, R. Radzali, M.D.J. Ooi, N.M. Ahmed, "Enhancing performance of porous Si-doped GaN based MSM photodetector using 50 Hz ACPEC", *Journal of Physics: Conference Series*. vol. 1535. no. 1, June 2020, (doi: 10.1088/1742-6596/1535/1/012006).
- [15] Y. M. Z Mohd, A. Mahyuddin, Z. Hassan. "Fabrication of AlN/GaN MSM photodetector with platinum as schottky contacts", *Materials Research Express*, vol. 6, no. 11, pp.1-7, Nov. 2019 (doi: 10.1088/2053-1591/ab4a40).
- [16] A. Anas, M. Devarajan, N. Afzal, "Fabrication and characterization of high performance MSM UV photodetector based on NiO film", *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 262, pp. 78-86, Aug. 2017 (doi: 10.1016/j.sna.2017.05.028).
- [17] H. Bencherif, L. Dehimi, G. Messina, P. Vincent, F. Pezzimenti, F.G.D. Corte, "An optimized graphene/4H-SiC/graphene MSM UV-photodetector operating in a wide range of temperature", *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 307, pp 1-12, June 2020 (doi: 10.1016/j.sna.2020.112007).
- [18] Y. Firat, W. Fan, Z. Ma, "Flexible amorphous GeSn MSM photodetectors", *IEEE Photonics Journal*, vol. 10, vol. 2, pp. 1-9, April 2018, (doi: 10.1109/JPHOT.2018.2804360).
- [19] D. Linpeng, J. Yu, R. Jia, J. Hu, Y. Zhang, J. Sun, "Self-powered MSM deep-ultraviolet β -Ga₂O₃ photodetector realized by an asymmetrical pair of Schottky contacts", *Optical Materials Express*, vol. 9, no. 3, pp. 1191-1199, March 2019 (doi: 10.1364/OME.9.001191).

- [20] Z. Changjian, S. Raju, B. Li, M. Chan, Y. Chai, C.Y. Yang, "Self-driven metal–semiconductor–metal WSe₂ photodetector with asymmetric contact geometries", *Advanced Functional Materials*, vol. 28, no. 45, pp. 1-8, September 2018 (doi: 10.1002/adfm.201802954).
- [21] J. Shubhendra, S. Krishna, N. Aggarwal, R. Kumar, A. Gundimeda, S.C. Husale, V. Gupta, G. Gupta, "Effect of metal contacts on a GaN/sapphire-based MSM ultraviolet photodetector", *Journal of Electronic Materials*, vol. 47, no. 10, pp. 6086-6090, July 2018 (doi: 10.1007/s11664-018-6501-5).
- [22] P. Jin-Hong, H.Y. Yu, "Dark current suppression in an erbium–germanium–erbium photodetector with an asymmetric electrode area", *Optics letters*, vol. 36, no. 7, pp. 1182-1184, April 2011 (doi: 10.1364/OL.36.-001182).
- [23] J.S. Kumar, N. Aggarwal, S. Krishna, R. Kumar, S. Husale, V. Gupta, G. Gupta, "GaN-UV photodetector integrated with asymmetric metal semiconductor metal structure for enhanced responsivity", *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, vol. 29, no. 11, pp. 8958-8963, March 2018 (doi: 10.1007/s10854-018-8917-3).
- [24] W. Qi, C. Zhou, Y. Chai, "Breaking symmetry in device design for self-driven 2D material based photodetectors", *Nanoscale*, vol. 12, no. 15, pp. 8109-8118, April 2020 (doi: 10.1039/D0NR01326A).
- [25] J. Hetterich, G. Bastian, N.A. Gippius, S.G. Tikhodeev, G.V. Plessen, U. Lemmer, "Optimized design of plasmonic MSM photodetector", *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 43, no. 10, pp. 855-859, Oct. 2007 (doi: 10.1109/JQE.2007.902934).
- [26] V. Dhyani, S. Das, "High speed MSM photodetector based on Ge nanowires network", *Semiconductor Science and Technology*, vol. 32, no. 5, pp. 055008, May 2017 (doi: 10.1088/1361-6641/aa65b4).
- [27] R. Radzali, M.Z. Zakariah, A. Mahmood, A.F. Abd-Rahim, Z. Hassan, Y. Yusof, "The effect of etching duration on structural properties of porous Si fabricated by a new two-steps alternating current photo-assisted electrochemical etching (ACPEC) technique for MSM photodetector", *AIP Conference Proceedings*, vol. 1875, no. 1, pp. 1-10, Aug. 2017 (doi: 10.1063/1.4998357).
- [28] N. Sangwaranatee, I. Sriphanachai, S. Niemcharoen, "Effect of Pt-doped on the photocurrent of MSM photodetector", *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1921, no. 1, May 2021 (doi:10.1088/1742-6596/1921/1/012104).
- [29] C.J. Fall, N. Binggeli, A. Baldereschi, "Anomaly in the anisotropy of the aluminum work function", *Physical Review B*, vol. 58, no. 12, Sept. 1998 (doi: 10.1103/PhysRevB.58.R7544).
- [30] T. Yoshinori, M. Yoshiki, J. Koga, A. Nishiyama, M. Koyama, M. Ogawa, S. Zaima, "Effective work function control with aluminum postdoping in the Ni silicide/HfSiON systems", *IEEE Trans. on Electron Devices*, vol. 55, no. 10, pp. 2648-2656, Oct. 2008 (doi: 10.1109/TED.2008.2003026).
- [31] X. Mingshan, J. Xie, W. Li, F. Wang, J. Ou, C. Yang, C. Li, Z. Zhong, Z. Jiang. "Changes in surface morphology and work function caused by corrosion in aluminum alloys.", *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, vol. 73, no. 6, pp. 781-787, June 2012 (doi: 10.1016/j.jpcs.2012.01.025).
- [32] C.J. Adenilson, C.A. Amorim, O.M. Berengue, L.S. Araujo, E.P. Bernardo, E.R. Leite, "Back-to-back Schottky diodes: the generalization of the diode theory in analysis and extraction of electrical parameters of nanodevices", *Journal of Physics: Condensed Matter*, vol. 24, no. 22, June 2012 (doi: 10.1088/0953-8984/24/22/225303).
- [33] H.D. Jahromi, M.H. Sheikhi, "A pin-hole free architecture for vertical infrared photodetectors based on thin-film organic/inorganic hybrid nanocomposite", *IEEE Sensors Journal*, vol. 16, no. 6, pp. 1634-1640, March 2016 (doi: 10.1109/JSEN.2015.2506661).

زیر نویس ها

1. Photoconductive
2. Photovoltaic
3. Read-out integrated circuitry
4. Avalanche photodiode
5. Metal Semiconductor Metal
6. Symmetric MSM
7. Asymmetric MSM
8. Nanowire
9. Porous Si
10. Photo response
11. Work function