

شبیه‌سازی آشکارساز نوری بر مبنای نانوروبان زیگزاگ سیلیسن با الکترودهای نامتقارن

فاطمه علایی، محمدعلی صادق‌زاده*، فاطمه استواری

گروه حالت جامد، دانشکده فیزیک، دانشگاه یزد، یزد، استان یزد، ایران

چکیده: در این پژوهش، با استفاده از نظریه‌ی تابع گرین غیر تعادلی جفت شده با تقریب بستگی قوی، و در نظر گرفتن نزدیک‌ترین همسایه‌ها، عملکرد آشکارساز نوری بر مبنای نانوروبان زیگزاگ سیلیسن با الکترودهای آلابیده‌ی نامتقارن شبیه‌سازی شد. مشخصه‌های الکترونی، از جمله ساختار نواری و چگالی حالت‌های کانال، و خواص تراپردی افزاره نظیر جریان نوری بر حسب انرژی فوتون تابشی و بدون بایاس خارجی و همچنین جریان تاریک بر حسب ولتاژ اعمالی به درین به دست آمدند. برای ارزیابی نظری عملکرد این افزاره از نور تک‌رنگ در محدوده‌ی ۱۲۴ تا ۱۲۴۰ نانومتر استفاده شده است. بیشترین جریان نوری در این افزاره ناشی از تابشی با طول موج ۴۳۸ نانومتر بوده که منتج به بازدهی کوانتومی ۲۴٪، پاسخ‌دهی نوری A/mW ۸/۴۴ و قدرت آشکارسازی $10^9 \times 5/3$ جونز شده است. تغییرات جریان کل عبوری از افزاره بر حسب ولتاژ اعمالی به درین در شرایط تاریک و تحت تابش نور تک‌رنگ ۴۳۸ نانومتر و شدت‌های مختلف ارزیابی شد. مشخص شد که در ولتاژ معین و با افزایش شدت نور، جریان کل کاهش می‌یابد که متناظر با کاهش جریان اتصال کوتاه در سلول‌های خورشیدی سیلیکونی است.

واژگان کلیدی: نانوروبان سیلیسن، آشکارساز نوری، جریان فوتونی، پاسخ‌دهی نوری، بازدهی کوانتومی.

*msadeghzadeh@yazd.ac.ir

ساختارها، مواد دوبعدی به دلیل بالا بودن میزان تحرک‌پذیری، کمتر بودن پراکندگی در الکترودها نسبت به سایر نانومواد و امکان دریافت فوتون‌های بیشتر در واحد سطح، پیوسته منجر به تولید جریان نوری بیشتر خواهند شد. از آنجایی که پایه و اساس صنعت الکترونیک سیلیکون بوده است، برای کاستن هزینه‌ی ساخت و هماهنگی با آن، بهتر است در صورت استفاده از نانومواد، در کانال این افزاره‌ها از سیلیسن استفاده شود. سیلیسن آلوتروپ دوبعدی از سیلیکون است که دارای خواصی شبیه گرافن، با ساختار دوبعدی از سیلیکون بجای کربن، است. اما برخلاف گرافن که کاملاً تخت است، سیلیسن یک ناصافی جزئی در ساختار خود دارد، به صورتی که، اتم‌های همسایه در ارتفاع‌های متفاوتی چیده شده‌اند. این ماده‌ی شبه دوبعدی، خصوصیات جالبی از جمله، اثر هال کوانتومی، نیمه فلزی و فرومغناطیس بودن،

۱- مقدمه

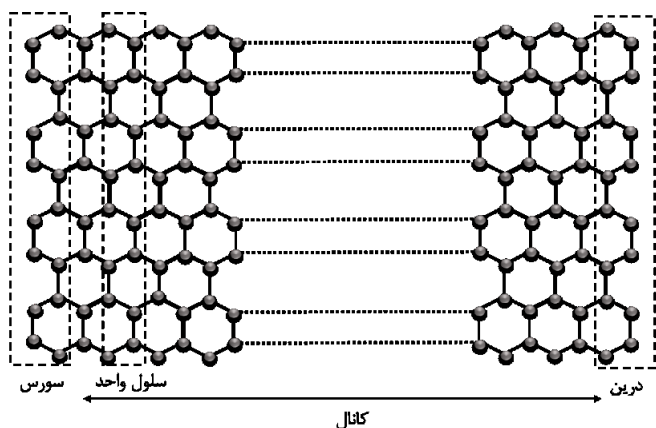
آشکارساز نوری معمولاً به سیستمی نسبت داده می‌شود که به نور حساس بوده، و با جذب نور و متناسب با توان و شدت فوتون فرودی، سیگنال الکتریکی تولید می‌کند [۱]. این آشکارسازها در زمینه‌های دفاعی، ارتباطات، امنیتی، پزشکی و محیط زیست می‌توانند کاربرد داشته باشند [۳و۲]. چالش امروزه پژوهشگران بهینه‌سازی این قطعات الکترونیکی از نظر هزینه‌ی ساخت، بازدهی و طیف پاسخ‌دهی است. با پیشرفت فناوری و کوچکتر شدن قطعات الکترونیکی و اپتوالکترونیکی، استفاده از ساختارهای در ابعاد نانو مانند ساختار دوبعدی (نانوصفحه)، ساختار تک بعدی (نانوروبان، نانوسیم و لوله کوانتومی) و ساختار صفر بعدی (نقاط کوانتومی) بیش از پیش رواج پیدا کرده است. در میان این

آشکارساز را با محاسبه‌ی بازدهی کوانتومی، پاسخ‌دهی نوری و قدرت آشکارسازی بررسی خواهیم کرد. در این پژوهش از نرم‌افزار متلب برای شبیه‌سازی استفاده شده است.

۲- ساختار و روش محاسبات

۲-۱- ساختار افزاره

ساختار آشکارساز نوری تحت مطالعه، با کانال نانوروبان زیگزاگ سیلیسن و الکترودهای نامتقارن، به طور شماتیک در شکل ۱ نشان داده شده است. این آشکارساز از سه بخش کانال (ناحیه‌ی فعال) و الکترودهای سورس و درین تشکیل شده است. برای ناحیه‌ی کانال، از نانوروبان زیگزاگ سیلیسن به دلیل مزیت رسانا بودن آن نسبت به نانوروبان آرمچیر، استفاده شده است. علاوه بر آن، برای الکترودهای سورس و درین از ادامه نانوروبان زیگزاگ سیلیسنی آلائیده شده با فلزات ایریدیوم و مس جهت ایجاد خمش نواری مناسب استفاده شده است. استفاده از الکترودهای رسانا با ساختار مشابه کانال، منجر به کاهش پراکندگی حامل بار در نقاط اتصال الکترودها و کانال می‌شود. در آشکارساز شبیه‌سازی شده، از ۵۲ اتم سیلیکون در طول کانال (معادل ۲۰/۱۵ نانومتر) و ۱۶ اتم سیلیکون در عرض کانال (معادل ۲/۴۶ نانومتر) استفاده شده است. همچنین در این شبیه‌سازی از اثرات زیرلایه، صرف‌نظر کرده و تراپرد بالیستیک در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۱: طرح‌واره آشکارساز نوری با کانال نانوروبان زیگزاگ سیلیسن و الکترودهای سورس و درین نامتقارن آلائیده به ترتیب با ایریدیوم و مس.

ساختار الکترودهای نامتقارن با جذب سطحی اتم‌های مس و ایریدیوم به ترتیب با توابع کار ۴/۹۴۸ و ۴/۳۸۲ الکترون‌ولت، بر

مقاومت مغناطیسی بسیار بزرگ و ابررسانایی را از خود به نمایش گذاشته است [۴]. در سال‌های اخیر، پژوهش‌های زیادی در زمینه‌ی ترانزیستورهای اثر میدانی بر پایه‌ی سیلیسن انجام پذیرفته که در آن‌ها خصوصیات ترابردی این ماده بررسی شده است. تائو و همکارانش، موفق به ساختن یک ترانزیستور اثر میدانی بر پایه‌ی سیلیسن بر روی زیرلایه‌ای از نقره با طول کانال ۱/۸ میکرومتر، در آزمایشگاه شدند [۵]. آن‌ها، جریان تاریک را بر حسب ولتاژ گیت و ولتاژ سورس-درین محاسبه و در ادامه مقاومت آن را بر حسب ولتاژ به دست آوردند. کلندن و همکارانش، سه ترانزیستور اثر میدانی را، بر پایه‌ی نانوروبان‌هایی از گرافن، سیلیسن و فسفرن، با استفاده از رهیافت تابع گرین غیر تعادلی مدل‌سازی کرده‌اند [۶]. هم‌چنین، نی و همکارانش یک ترانزیستور اثر میدانی تونلی p-i-n را بر پایه‌ی سیلیسن شبیه‌سازی کرده که در آن از سیلیسن آلائیده شده با فلزات واسطه‌ی متفاوت در نواحی مختلف این ترانزیستور استفاده شده بود [۷]. در زمینه‌ی آشکارساز نوری، استواری و همکاران، این افزاره را بر پایه‌ی نانوروبان آرمچیر و زیگزاگ گرافن، با الکترودهای نامتقارن و بدون اعمال ولتاژ بایاس با روش تابع گرین غیر تعادلی، شبیه‌سازی کردند [۸-۱۰]. خردادی و همکارانش، یک آشکارساز نوری مبتنی بر نانوروبان زیگزاگ سیلیسن با لبه‌های غیرفعال شده با اتم‌های کلر و لیتیوم، با روش نظریه‌ی تابعی چگالی شبیه‌سازی کردند و کمیت‌های پاسخ‌دهی نوری و قدرت آشکارسازی را با اعمال ولتاژ به گیت محاسبه کردند [۱۱]. در مطالعات قبلی که بر روی سیلیسن انجام شده است، تولید جریان تاریک و نوری همراه با اعمال (ولتاژ گیت و یا ولتاژ سورس-درین) بوده است. در پژوهش حاضر، آشکارساز نوری بگونه‌ای شبیه‌سازی شده که بدون اعمال ولتاژ خارجی و تنها بدلیل خمش نواری مناسب ایجاد شده در حضور الکترودهای نامتقارن، جریان نوری در مدار خارجی شارش می‌یابد.

برای هر آشکارساز، تعدادی پارامتر کارایی در نظر گرفته می‌شود که از آن جمله می‌توان به جریان تاریک، پاسخ‌دهی نوری، بازدهی کوانتومی و قدرت آشکارسازی اشاره کرد. در این پژوهش آشکارساز نوری بر پایه‌ی نانوروبان سیلیسن به روش تابع گرین غیر تعادلی شبیه‌سازی شده و طول موج منتج به بیشینه‌ی جریان نوری را به دست خواهیم آورد. سپس در همان طول موج عملکرد

در این جا، \hat{H}_{CH} هامیلتونی کانال، $\tilde{\epsilon}_i$ انرژی هر اتم، \tilde{t}_{ij} پارامتر پرش بین همسایه‌ها و $\hat{c}^\dagger(c)$ عملگر خلق (فنا) کوانتومی هستند. از آن جایی که $\tilde{\epsilon}_i$ تنها نقطه‌ی مرجع انرژی را مشخص می‌کند، آن را برابر با صفر در نظر گرفته‌ایم. هم‌چنین مقدار پارامتر پرش برای سیلیسن برابر با $1/6$ الکترون‌ولت است. H_{ph} جمله‌ی برهم‌کنشی الکترون-فوتون است که اثر تابش نور را به هامیلتونی اضافه می‌کند. در جمله‌ی دوم، q و m_0 به ترتیب بار و جرم الکترون، $\mathbf{A} = |\mathbf{A}|\hat{\epsilon}_x$ ، پتانسیل برداری مغناطیسی و p بردار تکانه‌ی سیستم است.

برای به دست آوردن ساختار نواری نیاز به هامیلتونی یک سلول واحد و جفت‌شدگی آن با سلول‌های همسایه است که از رابطه‌ی زیر قابل محاسبه است [۱۱]،

$$H_k = H_{00} + H_{01}e^{ika} + H_{10}e^{-ika}, \quad (3)$$

که در آن، H_{00} هامیلتونی یک سلول واحد، و $(H_{10})H_{01}$ جفت‌شدگی بین هر سلول با سلول پس(پیش) خود را نشان می‌دهد. a عرض هر سلول و k بردار موج الکترونی است.

در محاسبه‌ی چگالی حالت‌های سیستم، نخستین قدم به دست آوردن تابع گرین سیستم است [۱۳]،

$$G = [E + i\eta - \hat{H}_{CH} - U - \Sigma_s - \Sigma_d - \Sigma_{ph}]^{-1},$$

که در آن، E انرژی، η ، یک ثابت بینهایت کوچک، \hat{H}_{CH} هامیلتونی کانال سیلیسنی، U ، پتانسیل الکتروستاتیک کانال، $(\Sigma_d)\Sigma_s$ ، خودانرژی سورس(درین) و Σ_{ph} خودانرژی ناشی از برهم‌کنش الکترون-فوتون هستند.

سپس، چگالی حالت‌ها $D(E)$ و جریان فوتونی $I_{ph}(E)$ سیستم از روابط زیر به دست خواهند آمد [۸-۱۰ و ۱۴]،

$$D(E) = \frac{i}{2\pi} \text{Tr}(G - G^\dagger), \quad (5)$$

$$I_{ph}(E) = \frac{2qi}{h} \text{Tr}[\hat{H}_{CH_{k,k+1}} G_{k,k+1}^n(E) - \hat{H}_{CH_{k+1,k}} G_{k+1,k}^n(E)] \quad (6)$$

روی ادامه نوار زیگزاگی سیلیسن شبیه‌سازی شده است. قرار گرفتن این اتمها بر روی سیلیسن منجر به جابجایی تراز فرمی آن می‌شود و بترتیب آن را آلاینده نوع p و n می‌کنند. طبق نتایج پژوهش نی و همکارانش، جابجایی تراز فرمی در الکتروند Cu/Si برابر 365 میلی الکترون‌ولت و برای الکتروند Ir/Si برابر با 315 میلی الکترون‌ولت خواهد بود [۷]. تحقیقات نشان داده‌اند که حضور این مواد بر روی سیلیسن می‌تواند بگونه‌ای کنترل شود که ساختار الکترونی آن را مختل نکند. در نتیجه این آلاینده‌ی در محدوده‌ی بین الکترونها و کانال، پله‌های پتانسیلی ایجاد می‌شوند که موجب القای یک میدان الکترونیکی داخلی ضعیف در کانال می‌شود. مزیت استفاده از این نوع آلاینده‌ی بر روی سیلیسن، ایجاد کمترین پراکندگی الکترون در عبور از کانال به سمت الکتروند آلاینده شده با مس و ایریدیوم است. در محاسبات صورت گرفته تنها از این مقادیر در محاسبه پله پتانسیل ایجاد شده در الکترونها استفاده شده است. اندازه‌ی هریک از این پله‌ها $(e\Delta V)$ از رابطه‌ی زیر و با وارد کردن مقدار جابه‌جایی سطح فرمی مربوطه، به مقدار 17 و 97 میلی الکترون‌ولت به دست می‌آید [۸-۱۰]،

$$e\Delta V = W_M - W_{Si} - \Delta E_F \quad (1)$$

که در آن، W_M و W_{Si} تابع کار سیلیسن و فلز و ΔE_F جابه‌جایی سطح فرمی را نشان می‌دهند.

تابش فوتون‌ها به ناحیه‌ی کانال موجب تولید جفت الکترون و حفره شده و میدان داخلی القایی در کانال، آن‌ها را در جهت‌های مخالف یکدیگر به حرکت وا می‌دارد. در نهایت در مدار خارجی جریان ناشی از آنها با یکدیگر جمع شده و جریان فوتونی بدون اعمال پتانسیل خارجی را تولید می‌کنند [۸].

۲-۲- روش محاسبات

هامیلتونی سیستم در تقریب بستگی قوی با در نظر گرفتن نزدیک‌ترین همسایه‌ها به صورت زیر نوشته می‌شود [۸]،

$$\hat{H}_{CH} = H_{00} + H_{ph} = \sum_i \tilde{\epsilon}_i \hat{c}_i^\dagger \hat{c}_i - \sum_{\langle i,j \rangle} \tilde{t}_{ij} \hat{c}_i^\dagger \hat{c}_j + \left(\frac{q}{m_0}\right) \mathbf{A} \cdot \mathbf{p} \quad (2)$$

پارامترهای کارایی آشکارسازهای نوری

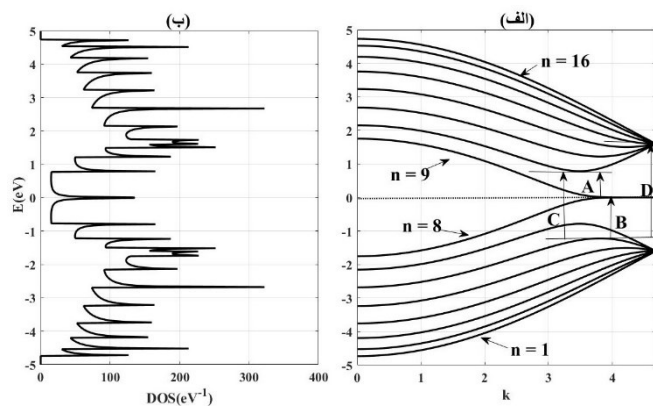
توانایی افزاره را برای تبدیل سیگنال دریافتی به کمیتی قابل اندازه‌گیری، نظیر جریان، قدرت آشکارسازی گفته و به صورت زیر و در واحد جونز محاسبه می‌شود،

$$D = \frac{R\sqrt{A}}{\sqrt{2qI_{dark}}} \quad (12)$$

در این رابطه، R ، ماتریس پاسخ‌دهی نوری بر حسب انرژی فوتون فرودی، A ، مساحت کانال، q ، بار الکترون و I_{dark} ، مقدار جریان تاریک در یک ولتاژ خاص است [۱۸ و ۱۹].

۳- نتایج و بحث

بر این اساس، ساختار نواری و نیز گذارهای ممکن بین زیر نوارهای انرژی و منحنی چگالی حالت‌ها برحسب انرژی، محاسبه و به ترتیب در شکل ۲ الف و ب نشان داده شده‌اند. شکل ۲ به وضوح، عدم وجود گاف نواری در سطح فرمی و خاصیت فلزی این ساختار از سیلیسن را نشان می‌دهد.



شکل ۲: (الف) ساختار نواری و (ب) چگالی حالت‌ها محاسبه شده برای نانوروبان زیگزاگ سیلیسن (کانال افزاره).

برای محاسبه‌ی جریان فوتونی، از تابش نور تک‌رنگ در بازه‌ی وسیعی از انرژی بین ۰/۱ تا ۱۰ الکترون‌ولت (محدوده‌ی انرژی فرسوخ تا فرابنفش خورشید کور) و با شدت 1 kW/cm^2 و بدون اعمال ولتاژ بایاس استفاده شده است. طیف جریان فوتونی با این شرایط، محاسبه و در شکل ۳ نشان داده شده است.

جریان تاریک: خصوصیات تراپردی سیستم از رابطه‌ی لاندائو-بوتیکر به دست می‌آید [۱۵]. برای این کار ماتریس ضرایب انتقال و جریان تاریک به ترتیب از روابط زیر محاسبه می‌شوند،

$$T(E) = G\Gamma^l G^\dagger \Gamma^r, \quad (7)$$

$$I_{dark} = \frac{q^2}{h} \int T(E)[f_l(E) - f_r(E)]dE. \quad (8)$$

در این روابط $T(E)$ ، ماتریس ضرایب انتقال، h ثابت پلانک و $f_l(E)$ ($f_r(E)$)، تابع فرمی-دیراک برای الکترودهای سورس (درین) هستند. در انتها جریان عبوری از افزاره، I ، مجموع جریان تاریک و جریان فوتونی است [۱۶]،

$$I = I_{dark} + I_{ph} \quad (9)$$

از آن جایی که وجود جریان تاریک در سیستم‌های الکترونیکی منجر به هدررفت انرژی می‌شود، کاهش آن یکی از چالش‌های مهم در شبیه‌سازی و ساخت این افزاره‌ها است.

پاسخ‌دهی نوری: یکی از پارامترهای مهم و تاثیرگذار در آشکارسازهای نوری، پاسخ‌دهی نوری R آن است. این پارامتر به صورت نسبت جریان فوتونی آشکار شده به توان اپتیکی فرودی به افزاره، تعریف شده و با واحد A/W اندازه‌گیری می‌شود [۱۷]،

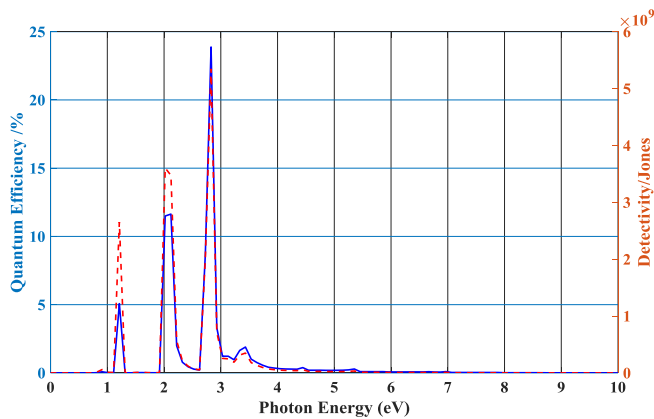
$$R = \frac{I_{ph}}{P_{op}} \quad (10)$$

در این رابطه، I_{ph} ، جریان فوتونی و P_{op} ، توان فرودی به ناحیه‌ی فعال آشکارساز است که مطابق با رابطه‌ی $P_{op} = I_{\omega}A$ محاسبه می‌شود، که در آن I_{ω} شدت نور فرودی در بسامد ω و A مساحت کانال است.

بازدهی کوانتومی: نسبت تعداد حامل‌هایی که در تولید جریان فوتونی سهیم هستند، به تعداد فوتون‌های فرودی را بازدهی کوانتومی α می‌نامند و از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود [۱۶]:

$$\alpha \equiv (I_{ph}/q)/(P_{op}/\hbar\omega) \quad (11)$$

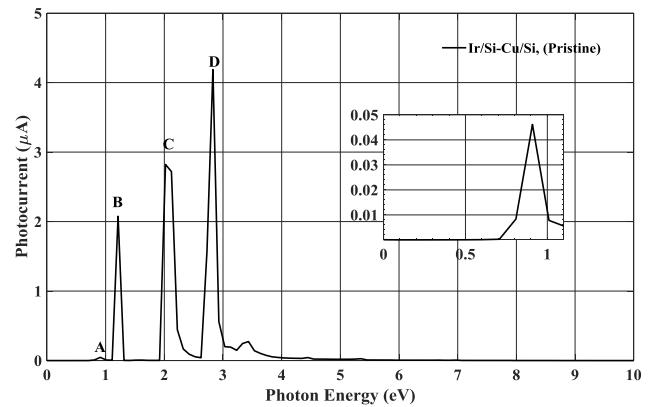
قدرت آشکارسازی: توانایی یک آشکارساز برای تشخیص امواج نوری، قدرت آشکارسازی D تعریف می‌شود. به عبارت دیگر،



شکل ۴: نمودار خط ممتد (با مقیاس محور چپ) بازدهی کوانتومی و نمودار خط چین (با مقیاس محور راست) قدرت آشکارسازی تحت تابش نور با شدت 1 kW/cm^2 و جریان تاریک در ولتاژ درین ۰/۱ ولت.

همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، بیشینه‌ی بازدهی کوانتومی برای این افزاره در حدود ۲۴٪ و قدرت آشکارسازی برابر با $5/3 \times 10^9$ جونز به دست آمده است که حدود سه مرتبه‌ی بزرگی از نتیجه‌ی مباحث خردادی (مرجع ۱۱) کمتر است. از آن‌جایی که قدرت آشکارسازی، نسبت وارون با مقدار جریان تاریک دارد، کاهش مقدار آن موجب افزایش قابل توجهی در این کمیت خواهد شد. بزرگی این کمیت در افزاره بر مبنای نانوروبان زیگزاگ سیلیسن با لبه‌های غیرفعال شده با لیتیم و کلر (مرجع ۱۱) می‌تواند ناشی از خاصیت نیم‌رسانایی کانال آن و در نتیجه مقدار جریان تاریک کمتر در مقایسه با این پژوهش باشد.

برای محاسبه‌ی بیشینه‌ی پاسخدهی نوری، در حضور تابش نور تک‌رنگ با طول موج ۴۳۸ نانومتر، شدت شار تابش را در بازه‌ی ۱ تا 10 kW/cm^2 تغییر داده و شیب نمودار جریان فوتونی بر حسب توان فرودی به ناحیه‌ی فعال آشکارساز، بیشینه‌ی پاسخدهی نوری را تعیین می‌کند. این مقدار برای آشکارساز شبیه‌سازی شده برابر با $8/44 \text{ A/mW}$ محاسبه شده است که با مقدار به دست آمده در مرجع [۵] تطابق دارد.



شکل ۳: نمودار جریان فوتونی برای آشکارساز بر مبنای نانوروبان زیگزاگ سیلیسنی با الکترودهای نامتقارن سورس و درین (Ir/Si-Cu/Si) تحت تابش نور با

شدت 1 kW/cm^2 و بدون اعمال ولتاژ خارجی

شکل ۳، سه پیک قابل توجه جریان نوری تولید شده توسط آشکارساز در محدوده‌ی تقریبی ۱-۳ الکترون‌ولت، را نشان می‌دهد. هر پیک در طیف جریان فوتونی نشان‌دهنده‌ی یک گذار مجاز از نوار ظرفیت به نوار رسانش است (شکل ۲ الف). بیشینه‌ی جریان فوتونی با بزرگی $4/186$ میکروآمپر در طول موج ۴۳۸ نانومتر (پیک D در محدوده‌ی نور آبی) به دست آمده که متناظر با محتمل‌ترین گذار مجاز است.

اگر زیرنوارها را از ابتدای نوار ظرفیت تا ابتدای نوررسانش از ۱ تا ۱۶ عددگذاری کنیم، نخستین پیک (A) در نمودار جریان نوری، گذاری از زیرنوار ۸ به ۱۰ (۷ به ۹) را نشان می‌دهد. به همین ترتیب دومین (B) و سومین پیک (C)، می‌تواند انتقالی از زیرنوار ۶ به ۸ (۹ به ۱۱) و از زیرنوار ۶ به ۱۰ (۷ به ۱۱) را توصیف کند. بیشینه‌ی جریان، به عبارت دیگر، بلندترین پیک (D)، نیز در انتقالی از زیرنوار ۶ به ۱۴ (۳ به ۱۱) امکان‌پذیر است. به این ترتیب، گذارهای مجاز در نانوروبان زیگزاگ سیلیسن، از زیرنوار با اندیس زوج (فرد) به اندیس زوج (فرد) خواهد بود که این قاعده‌ی انتخاب با مورد نانوروبان گرافن با لبه‌ی زیگزاگ در تطابق کامل است [۲۰ و ۲۱].

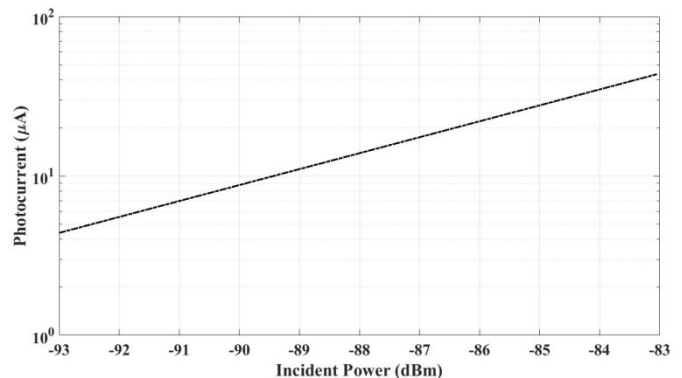
با توجه به متناسب بودن رابطه‌های بازدهی کوانتومی و قدرت آشکارسازی با جریان فوتونی، نمودار تغییرات بازدهی کوانتومی و قدرت آشکارسازی بر حسب انرژی فوتون فرودی با شدت 1 kW/cm^2 و جریان تاریک در ولتاژ درین ۰/۱ ولت محاسبه و در شکل ۴، به نمایش گذاشته شده‌اند.

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، با استفاده از روش تابع گرین غیر تعادلی با تقریب بستگی قوی و برهم‌کنش الکترون-فوتون، یک آشکارساز نوری بر مبنای نانوروبان زیگزاگ سیلیسن، با الکترودهای نامتقارن و بدون اعمال ولتاژ خارجی، شبیه‌سازی شده است. محاسبات ساختار نواری و چگالی حالت‌ها نشان داد که کانال این افزاره رسانا بوده است. همچنین، در بازه‌ی فرسرخ تا نور مرئی سه پیک قابل توجه در طیف جریان فوتونی این آشکارساز وجود دارد. بیشترین جریان نوری در این افزاره مربوط به تابش با طول موج ۴۳۸ نانومتر بوده که منجر به بازدهی کوانتومی ۲۴٪، پاسخ‌دهی نوری ۸/۴۴ A/mW و قدرت آشکارسازی $5/3 \times 10^9$ جونز شده است. منحنی جریان کل عبوری از افزاره برحسب ولتاژ اعمالی به درین در شرایط تاریک (منحنی ممتد) و تحت تابش نور تک‌رنگ ۴۳۸ نانومتر (با انرژی ۲/۸۲ الکترون‌ولت) و شدت‌های ۱، ۳ و ۵ kW/cm^2 نشان می‌دهد. در شرایط تابش نور، جریان فوتونی در جهتی خلاف جریان تاریک تولید می‌شود که در نتیجه‌ی آن، در هر ولتاژ معین با زیاد شدن شدت نور و به تبع آن، افزایش جریان فوتونی، جریان کل کاهش می‌یابد. کاهش جریان کل (با افزایش شدت نور تابشی) در این افزاره مشابه با کاهش جریان اتصال کوتاه در سلول‌های خورشیدی سیلیکونی است [۲۲ و ۲۳]، با این تفاوت که منحنی جریان-ولتاژ در سلول‌های خورشیدی سیلیکونی غیر خطی بوده ولی برای این افزاره خطی است که ناشی از رسانا بودن این ساختار از سیلیکون است.

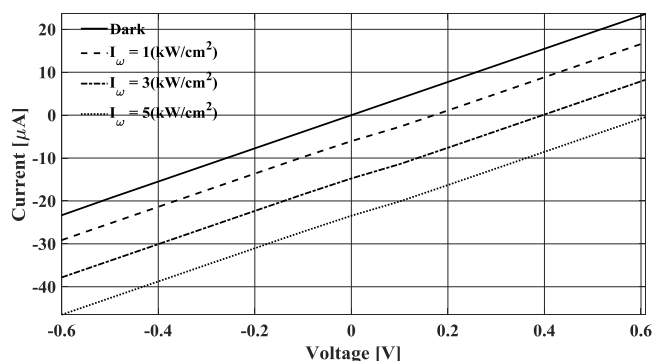
مراجع

- [1] R. Hui, "Introduction to fiber-optic communications," Academic Press, 2019.
- [2] J. Chen, J. Wang, X. Li, J. Chen, F. Yu, J. He, J. Wang, Z. Zhao, G. Li, X. Chen, W. Lu, "Recent progress in improving the performance of infrared photodetectors via optical field manipulations." Sensors, 22, 677, 2022.
- [3] C. Zhang, S. Wang, L. Yang, Y. Liu, T. Xu, Z. Ning, A. Zak, Z. Zhang, R. Tenne, Q. Chen, "High-performance photodetectors for visible and near-infrared lights based on individual WS₂ nanotubes," Applied physics letters, 100, 243101, 2012.
- [4] J. Zhao, H. Liu, Z. Yu, R. Quhe, S. Zhou, Y. Wang, C. C. Liu, H. Zhong, N. Han, J. Lu, Y. Yao, "Rise of silicene: A competitive 2D material," Progress in Materials Science, 83, 24-151, 2016.
- [5] L. Tao, E. Cinquanta, D. Chiappe, C. Grazianetti, M. Fanciulli, M. Dubey, A. Molle and D. Akinwande, "Silicene field-effect transistors operating at room temperature," Nature nanotechnology, 10, 227—231, 2015.



شکل ۵: جریان نوری بر حسب توان نور فرودی برای آشکارساز بر مبنای نانوروبان زیگزاگ سیلیسنی با الکترودهای نامقارن سورس و درین (Ir/Si-Cu/Si) و بدون اعمال ولتاژ خارجی.

نمودار شکل ۶ منحنی جریان کل عبوری از افزاره برحسب ولتاژ اعمالی به درین را در شرایط تاریک (منحنی ممتد) و تحت تابش نور تک‌رنگ ۴۳۸ نانومتر (با انرژی ۲/۸۲ الکترون‌ولت) و شدت‌های ۱، ۳ و ۵ kW/cm^2 نشان می‌دهد. در شرایط تابش نور، جریان فوتونی در جهتی خلاف جریان تاریک تولید می‌شود که در نتیجه‌ی آن، در هر ولتاژ معین با زیاد شدن شدت نور و به تبع آن، افزایش جریان فوتونی، جریان کل کاهش می‌یابد. کاهش جریان کل (با افزایش شدت نور تابشی) در این افزاره مشابه با کاهش جریان اتصال کوتاه در سلول‌های خورشیدی سیلیکونی است [۲۲ و ۲۳]، با این تفاوت که منحنی جریان-ولتاژ در سلول‌های خورشیدی سیلیکونی غیر خطی بوده ولی برای این افزاره خطی است که ناشی از رسانا بودن این ساختار از سیلیکون است.



شکل ۶: نمودار جریان بر حسب ولتاژ درین برای آشکارساز بر مبنای نانوروبان زیگزاگ سیلیسنی با الکترودهای نامقارن سورس و درین (Ir/Si-Cu/Si) در تاریکی (منحنی ممتد) و تحت تابش ۱ (خط چین)، ۳ (خط چین-نقطه) و ۵ kW/cm^2 (نقطه چین)، در طول موج ۴۳۸ نانومتر.

B, 31, 6207, 1985.

[16] D. A. Stewart, F. Léonard, "Energy conversion efficiency in nanotube optoelectronics," *Nano Letters*, 5, 219-222, 2005.

[17] H. Liu, Y. Niu, Y. Yin, S. Liu, "Modeling of the photodetector based on the multilayer graphene nanoribbons," *AIP Advances*, 6, 075205, 2016.

[18] H. Geng, D. Yuan, Z. Yang, Z. Tang, X. Zhang, K. Yang, Y. Su, "Graphene van der Waals heterostructures for high-performance photodetectors," *Journal of Materials Chemistry C*, 7, 11056-11067, 2019.

[19] A. Varghese, D. Saha, K. Thakar, V. Jindal, S. Ghosh, N. V. Medhekar, S. Ghosh, S. Lodha, "Near-direct bandgap WSe₂/ReS₂ type-II pn heterojunction for enhanced ultrafast photodetection and high-performance photovoltaics," *Nano Letters*, 20, 1707-1717, 2020.

[20] M. Moradinasab, H. Nematian, M. Pourfath, M. Fathipour, H. Kosina, "Analytical models of approximations for wave functions and energy dispersion in zigzag graphene nanoribbons,"

[21] H. Hsu, L. E. Reichl, "Selection rule for the optical absorption of graphene nanoribbons," *Physical Review B*, 76, 045418, 2007.

[22] S. M. Sze, Y. Li, K. K. Ng, "Physics of semiconductor devices," John Wiley & Sons, 1981.

[23] Y. Iglu, "Printed Electronics: Current Trends and Applications," Intechopen, 2016.

[6] C. Clendennen, N. Mori and H. Tsuchiya, "Non-equilibrium Green function simulations of graphene, silicene, and germanene nanoribbon field-effect transistors," *Journal of Advanced Simulation in Science and Engineering*, 2, 171-177, 2015.

[7] Z. Ni, H. Zhong, X. Jiang, R. Quhe, G. Luo, Y. Wang, M. Ye, J. Yang, J. Shi, J. Lu, "Tunable band gap and doping type in silicene by surface adsorption: towards tunneling transistors," *Nanoscale*, 6, 7609-7618, 2014.

[8] F. Ostovari, M.K. Moravej-Farshi, "Photodetectors with armchair graphene nanoribbons and asymmetric source and drain contacts," *Applied surface science*, 318, 108-112, 2014.

[9] F. Ostovari, M.K. Moravej-Farshi, "Dual function armchair graphene nanoribbon-based spin-photodetector: optical spin-valve and light helicity detector," *Applied Physics Letters*, 105, 072407, 2014.

[10] F. Ostovari, M.K. Moravej-Farshi, "Photodetectors with zigzag and armchair graphene nanoribbon channels and asymmetric source and drain contacts: Detectors for visible and solar blind applications," *Journal of Applied Physics*, 120, 144505, 2016.

[11] M. A. Kharadi, G. F. A. Malik, K. A. Shah, F. A. Khanday, "Performance analysis of functionalized silicene nanoribbon-based photodetector," *International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields*, 34, e2809, 2021.

[12] K. Shakouri, H. Simchi, M. Esmailzadeh, H. Mazidabadi, F.M. Peeters, "Tunable spin and charge transport in silicene nanoribbons," *Physical Review B*, 92, 035413, 2015.

[13] J. Guo, M. A. Alam, Y. Yoon, "Theoretical investigation on photoconductivity of single intrinsic carbon nanotubes," *Applied physics letters*, 88, 133111, 2006.

[14] P. A. Derosa, J. M., Seminario, "Electron transport through single molecules: Scattering treatment using density functional and green function theories," *The Journal of Physical Chemistry B*, 105, 471-481.

[15] M. Büttiker, Y. Imry, R. Landauer, S. Pinhas, "Generalized many-channel conductance formula with application to small rings," *Physical Review*

Simulation of a photodetector based on zigzag edge Silicene nanoribbons with asymmetric electrodes

F. Alaei, M. A. Sadeghzadeh*, F. Ostovari

Department of Physics, Faculty of Science., Yazd University, Yazd, Iran

Abstract: In this research, a Zigzag edge Silicene Nanoribbons (ZSiNR) photodetector having asymmetric doped source and drain electrodes has been simulated using the tight-binding approximation and taking account first nearest neighbors, coupling to Non-Equilibrium Green Function approach. The electronic characteristics including band energy structure and density of states of the Chanel and transport traits of the device such as photocurrent in terms of incident photon energy in the absent of external bias, moreover the dark current versus applied voltage to the drain have been determined. For theoretical assessment of device performance, monochromatic illumination in the range of **124 – 1240 nm** has been used. The maximum photocurrent of this device is related to 438 nm illumination which resulted the quantum efficiency of 24%, photoresponsivity of 8.44 A/mW, and detectivity as much as $\sim 10^9$ Jones. Variations of device total current versus drain voltage in dark and of monochromatic 438 nm illumination with different intensities has been assessed. It is revealed that, in constant applied voltage, as the illumination intensity increases the total device current reduces which is correspond to reduction of short circuit current of silicon solar cells.

Keywords: Silicene Nanoribbons, Photodetector, Photocurrent, Photo-responsivity, Quantum Efficiency.