

بررسی عددی قابلیت پاسخ‌دهی در آشکارسازهای ناحیه مادون قرمز میانی

با سمیت کم مبتنی بر نقاط کوانتومی $\text{Ag}_2\text{Se-PbS}$

چکیده

مهدی خداوردی زاده^۱

اصغر عسگری^{۲،۳،۴}

مقدمه: حسگرهای نوری بخش جدایی‌ناپذیر از تجهیزات مختلف در زمینه تشخیصی زیست پزشکی هستند. در این میان فناوری‌های فوتونیک به علت دارا بودن مزایای فراوان، برای استفاده به عنوان حسگر در کاربردهای پزشکی و پایش سلامت انسان، محبوبیت فراوان کسب کرده‌اند. دارا بودن حساسیت بالا، امکان ادغام با ادوات الکترونیکی، فشردگی مناسب افزاره، عملکرد بدون فلز، هزینه ارزان و ایمنی الکترومغناطیسی که فناوری‌های فوتونیک ارائه می‌کنند، لزوم مطالعه در زمینه حسگرهای نوری را توجیه می‌کنند.

روش بررسی: در این مطالعه تاثیر درصد ترکیب نقاط کوانتومی Ag_2Se و PbS ، همچنین تغییرات اندازه قطر و چگالی آلایش فیلم نقاط کوانتومی Ag_2Se در ناحیه فعال در دماهای مختلف برای پیشینه‌سازی قابلیت پاسخ‌دهی نوری مورد مطالعه قرار گرفته است. برای دستیابی به قابلیت پاسخ‌دهی نوری براساس ساختار نقاط کوانتومی ابتدا با حل خودسازگار معادلات شروینگر و پواسون به روش تفاضل محدود، چگالی الکترون در هر تراز و پروفایل پتانسیل به دست آمده و قابلیت پاسخ‌دهی نوری آشکارساز محاسبه می‌گردد.

یافته‌ها: نتایج به دست آمده نشان می‌دهد با افزایش درصد ترکیب نقاط کوانتومی PbS نسبت به نقاط کوانتومی Ag_2Se قابلیت پاسخ‌دهی افزاره کاهش می‌یابد. با افزایش چگالی آلایش فیلم Ag_2Se در ابتدا به دلیل افزایش حامل‌ها برای تحریک نوری، قابلیت پاسخ‌دهی نوری افزایش یافته و پس از رسیدن به نقطه پیشینه با افزایش بازترکیب حامل‌ها قابلیت پاسخ‌دهی نوری کاهش می‌یابد. قابلیت پاسخ‌دهی نوری با افزایش قطر نقاط کوانتومی Ag_2Se به دلیل تأثیر محصورشدن کوانتومی، فرار حامل‌ها و اثرات تونل‌زنی افزایش یافته و بعد از رسیدن به نقطه پیشینه کاهشی می‌گردد.

نتیجه‌گیری: امروزه افزایش راندمان کوانتومی و قابلیت پاسخ‌دهی نوری برای حسگرهای نوری زیست‌پزشکی، چالش بزرگی برای مهندسان تجهیزات پزشکی است. به طور کلی پیشینه‌سازی قابلیت پاسخ‌دهی نوری موجب بهبود عملکرد، دقت و ارتقا کارایی آشکارسازها شده و با مهندسی ساختار ادوات می‌توان به این امر دست یافت.

واژه‌های کلیدی: آشکارساز نوری، بیوفوتونیک، قابلیت پاسخ‌دهی نوری، نقاط کوانتومی.

۱ گروه مهندسی اپتیک و لیزر، دانشکده فناوری‌های صنعتی، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه

۲ دانشکده فیزیک، دانشگاه تبریز، تبریز

۳ گروه تحقیقاتی ادوات فوتونیک، پژوهشکده فیزیک کاربردی و ستاره‌شناسی، دانشگاه تبریز، تبریز

۴ دانشکده مهندسی برق، الکترونیک و کامپیوتر، دانشگاه استرالایای غربی، استرالیا

نویسنده مسئول: دکتر مهدی خداوردی زاده

پست الکترونیک:

m.khodaverdi@uut.ac.ir

شماره تماس:

۰۹۱۴۴۴۶۵۳۹۴

مقدمه

ادواتی که یک نوع از سیگنال را به نوع دیگر تبدیل می‌کنند، آشکارساز نامیده می‌شوند. ورودی آشکارسازها می‌تواند هر نوع سیگنالی باشد، در صورتی که سیگنال خروجی باید به کمیت قابل اندازه‌گیری مانند جریان الکتریکی یا ولتاژ تبدیل گردد [۱]. بدین ترتیب در آشکارسازهای نوری^۱ نیز فوتون‌های تابشی به آشکارساز، به جریان الکتریکی قابل اندازه‌گیری تبدیل می‌گردند [۲].

آشکارسازهای نوری ناحیه مادون قرمز میانی ادواتی هستند که در حوزه پزشکی کاربردهای فراوانی دارند. این آشکارسازها قادر به تشخیص و تحلیل پرتوهای مادون قرمز که از بدن انسان ساطع می‌شوند، هستند. یکی از کاربردهای مهم این آشکارسازها تشخیص زود هنگام بیماری‌ها بوده و این آشکارسازها می‌توانند تغییرات بیوشیمیایی در بافت‌ها و سلول‌های بدن را شناسایی کنند. این تغییرات می‌تواند نشان‌دهنده شروع بیماری‌های مختلفی مانند سرطان یا دیابت باشند [۳-۴]. همچنین این آشکارسازها می‌توانند نقش پایش و نظارت داشته و به پزشکان این امکان را دهند که به‌طور مداوم بر وضعیت سلامت بیماران نظارت کنند [۵-۶]. بنابراین با توسعه بیشتر این تکنولوژی، می‌توان انتظار داشت که کاربردهای آن در حوزه پزشکی بیش از پیش گسترش یافته و نتایج بهتری در بهبود سلامت افراد حاصل گردد [۷].

برای آشکارسازی نور در ناحیه مادون قرمز و طول موج‌های بلند، از نیمه‌هادی‌های با گاف نواری^۲ باریک به‌عنوان ماده فعال نوری استفاده می‌گردد. لذا مواد محدودی وجود دارند که دارای این قابلیت بوده و از آنها می‌توان برای آشکارسازی نور در ناحیه مادون قرمز استفاده کرد [۸]. همچنین آشکارسازهای نوری ناحیه مادون قرمز در مقایسه با آشکارسازهای ناحیه مرئی، قابلیت پاسخ‌دهی نوری کمتری را دارند [۹]. امروزه مواد استفاده شده برای ناحیه فعال آشکارسازهای نوری ناحیه مادون قرمز تجاری معمولاً در خلا و دمای بالا با روش‌های پرهزینه رشد می‌یابند. بنابراین با توجه به نیاز روزافزون برای آشکارسازی نور در این ناحیه و همچنین دستیابی به روش‌های ساخت کم‌هزینه‌تر و استفاده از

مواد با قابلیت پاسخ‌دهی بالاتر، اهمیت پژوهش‌های گسترده در آشکارسازی ناحیه مادون قرمز را توجیه می‌کند [۱۰-۱۲]. معرفی اولین آشکارساز مبتنی بر نقاط کوانتومی در ناحیه مادون قرمز میانی براساس گذار درون بانندی در مواد خود آلاینش‌ده^۳ با مطالعه پیشگامانه گویوت - سیونت و همکارانش^۴ صورت گرفت [۱۳]. در ادامه گوبت و همکارانش^۵ پیشنهاد ساختاری را دادند که در آن نقاط کوانتومی HgSe و HgTe را در یک ساختار هسته - پوسته HgSe/HgTe که به‌صورت کلونیدی رشد یافته بودند، ترکیب کنند؛ نتایج نشان داد که در این ساختار، عملکرد آشکارساز با گذار درون بانندی بهبود یافته است [۱۴]. با تکیه بر این دستاوردها، چن و همکارانش^۶ به توسعه یک آشکارساز در ناحیه مادون قرمز میانی با قابلیت تحرک حامل بهبودیافته و کنترل دقیق آلاینش نقاط کوانتومی HgSe پرداختند [۱۵].

آشکارسازهای نوری بر پایه گذار درون بانندی با چالش‌هایی روبرو هستند که نیاز به بررسی و مطالعه محدودیت‌های آنها دارد [۱۶]. متأسفانه در اغلب ادوات نوری برای آشکارسازی در ناحیه مادون قرمز میانی، برای دستیابی به گذار درون بانندی از فلزات سنگین به‌ویژه جیوه استفاده می‌گردد، لذا به دلیل سمیت ذاتی این مواد، نگرانی‌هایی در مورد اثرات زیست محیطی آنها بوجود آمده که کاربرد این ادوات را در زمینه‌های زیست پزشکی محدود می‌کند [۱۷-۱۹]. بنابراین یافتن مواد غیرسمی مانند نقاط کوانتومی Ag₂Se و مطالعه عملکرد آنها برای ساخت آشکارسازهای نوری مادون قرمز یک مسیر امیدوارکننده در این زمینه را فراهم می‌کند [۲۰-۲۱].

در مطالعه حاضر، آشکارساز نوری ناحیه مادون قرمز میانی با ساختار لایه‌ای چند سدی^۷ مورد مطالعه قرار گرفته است. ناحیه فعال در این آشکارساز نوری از نقاط کوانتومی Ag₂Se برای جذب و گذار درون بانندی، و نقاط کوانتومی PbS به عنوان لایه سد تشکیل شده است. در اینجا از شبیه‌سازی‌های عددی برای محاسبه پارامترهای اصلی آشکارسازهای نوری استفاده گردیده و

³ Self-doped

⁴ Guyot-sionnest et al.

⁵ Goubet et al.

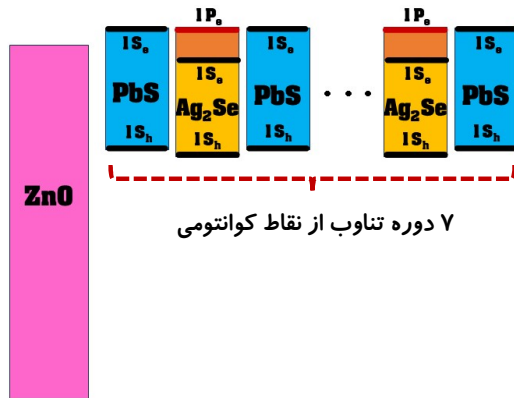
⁶ Chen et al.

⁷ Multi-barrier

¹ Photodetectors

² bandgap

آشکارسازی از حل خودسازگار^۴ معادلات شرودینگر و پواسون شروع می‌گردد.



شکل ۲: ساختار باند انرژی ناحیه فعال افزاره

معادلات شرودینگر و پواسون یک بعدی برای ساختار نقاط کوانتومی به صورت زیر بیان می‌گردد [۲۲ و ۲۳].

$$\left[-\frac{\hbar^2}{2} \frac{d}{dz} \left(\frac{1}{m_e^*} \frac{d}{dz} \right) + V(z) \right] \psi_n(z) = E_n \psi_n(z) \quad (1)$$

$$\frac{d}{dz} \left[\varepsilon(z) \frac{d}{dz} \right] \varphi(z) = -e(N_D(z) - n(z)) \quad (2)$$

که در آن $\hbar$ ثابت کاهیده پلانک، e بار الکترون، m_e^* جرم موثر الکترون، ψ_n ویژه تابع الکترون با ویژه مقدار انرژی E_n ، $V(z)$ پتانسیل، ثابت دی‌الکتریک ماده، φ پتانسیل الکترواستاتیک، N_D غلظت ناخالصی‌دهنده یونیزه‌شده و $n(z)$ تعداد الکترون در واحد حجم تراز انرژی می‌باشد. $V(z)$ و $n(z)$ به صورت زیر بیان می‌شوند [۲۴-۲۵].

$$V(z) = \Delta E - e\varphi(z) \quad (3)$$

$$n(z) = \frac{k_B T m_e^*}{\pi \hbar^2} \sum_n \ln \left[1 + \exp \left(\frac{E_F - E_n}{k_B T} \right) \right] |\psi_n(z)|^2 \quad (4)$$

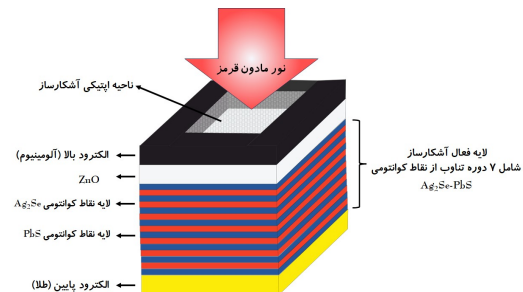
که در آن ΔE جابجایی نوار انرژی^۵، k_B ثابت بولتزمن، T دما و E_F انرژی فرمی می‌باشد.

با استفاده از روش حل خودسازگار معادلات شرودینگر و پواسون، ویژه تابع و ویژه مقدار انرژی مربوطه، چگالی الکترون هر تراز و پروفایل پتانسیل ساختار نقاط کوانتومی محاسبه گردیده و

قابلیت پاسخ‌دهی افزاره با تغییر اندازه قطر و چگالی آلایش فیلم نقاط کوانتومی Ag_2Se و تغییر تعداد لایه‌های نقاط کوانتومی PbS در لایه سد افزاره مورد مطالعه قرار گرفته است.

مبانی و روش‌ها

در این مطالعه برای آشکارسازی نور در ناحیه مادون قرمز میانی از ساختار پیشنهادی که به صورت طرح‌وار در شکل (۱) نشان داده شده، استفاده می‌گردد. این افزاره شامل لایه‌های $\text{Al/ZnO/Ag}_2\text{Se-PbS multi-barrier QDs/Au}$ بوده که در ساختار آن لایه فعال شامل لایه‌های با نقاط کوانتومی $\text{Ag}_2\text{Se-PbS}$ سمیت کمتری در مقایسه با ساختارهای شامل جیوه دارد. در این ساختار نور مادون قرمز میانی تابیده به افزاره توسط نقاط کوانتومی Ag_2Se جذب شده و گذار درون بانندی صورت می‌گیرد.



شکل ۱: طرحواره ساختار افزاره آشکارساز نوری مادون قرمز میانی مبتنی بر نقاط کوانتومی

در طرحواره ارائه‌شده در شکل (۱)، لایه آلومینیومی به عنوان الکتروود بالایی آشکارساز عمل می‌کند. در این ساختار، لایه ZnO به عنوان لایه مسدودکننده حفره^۱ (HBL) برای کاهش جریان تاریک عمل کرده (شکل ۲)، همچنین ۷ دوره از نقاط کوانتومی Ag_2Se و PbS به عنوان لایه فعال آشکارساز عمل می‌کنند. برای غیرفعال کردن نقاط کوانتومی، ابتدا فرض می‌گردد از لیگاند‌های با زنجیره بلند عایق مانند اسید اولئیک^۲ استفاده شده که بعداً با لیگاند‌های زنجیره کوتاه رسانا مانند آمونیم تیوسیانات^۳ (NH_4SCN) مبادله می‌شوند. به منظور دستیابی به مشخصه‌های

¹ Hole Blocking Layer

² oleic acid

³ ammonium thiocyanate

⁴ self-consistent

⁵ energy band offset

نشان‌دهنده نسبت جریان خروجی از آشکارساز به توان نور تابیده به آن می باشد که به صورت زیر تعریف می گردد [۲۸].

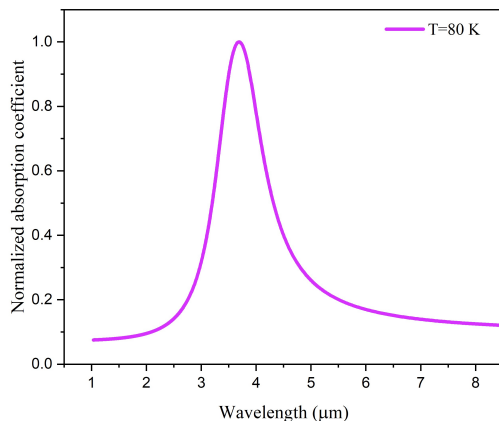
$$\mathcal{R} = I_{photo}/P_{in} \quad (۷)$$

که در آن P_{in} بیانگر توان نور تابیده شده به آشکارساز می باشد.

نتایج و بحث:

در این مقاله، برای ساختار ارائه شده در شکل (۱) با استفاده از روش عددی تفاضل محدود، معادلات شرودینگر و پواسون به طور مکرر حل گردیده تا یک حل خودسازگار برای چگالی الکترون در هر تراز و پروفایل پتانسیل به دست آید.

در اینجا ابتدا با استفاده از رابطه (۶) نمودار ضریب جذب درون بانندی برای طول موج‌های مختلف تابشی به افزاره مورد مطالعه قرار می گیرد. نمودار شکل (۳) نشان می دهد برای افزاره مبتنی بر نقاط کوانتومی Ag2Se-PbS، ضریب جذب درون بانندی بهینه در ناحیه مادون قرمز میانی (۳ تا ۵ میکرومتر) قرار می گیرد.



شکل ۳: ضریب جذب درون بانندی بهنجار شده بصورت تابعی از طول موج نور تابشی

در ادامه با استفاده از نتایج به دست آمده، جریان نوری و در نهایت قابلیت پاسخ‌دهی آشکارساز در دماهای ۸۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ کلوین، براساس پارامترهای ارائه شده در جدول (۱) محاسبه می گردد. در اینجا برای بهبود عملکرد افزاره، به ویژه در آشکارسازی نور تابشی ضعیف و دستیابی به عملکرد بهتر در دماهای بالاتر، تمرکز مطالعه بر روی بهینه سازی قابلیت پاسخ‌دهی افزاره با تغییر تعداد لایه های نقاط کوانتومی PbS در لایه سد ناحیه فعال (تغییر درصد ترکیب نقاط کوانتومی Ag2Se-

برای آنالیز ساختار افزاره استفاده می شود. با استفاده از نتایج به دست آمده جریان نوری محاسبه می گردد [۲۶].

چگالی جریان نوری (I_{ph}) در آشکارساز نوری CQD، زمانی که تحت تابش نور مادون قرمز میانی قرار می گیرد در نتیجه تحریک نوری در نقاط کوانتومی حاصل شده و به صورت زیر بیان می شود [۲۷].

$$I_{photo} = evAFn_0 \left(\beta_c + (1 - \beta_c) \frac{r_{es,v} + r_{es,th}}{r_{es,v} + r_{es,th} + r_r} \right)^M + \left\{ eA I_0 \exp(-a(i-1)l_{qw}) (1 - \exp(-a l_{qw})) \frac{r_{es,v} + r_{es,th}}{r_{es,v} + r_{es,th} + r_r} \sum_{i=1}^M (\beta_c + (1 - \beta_c) \frac{r_{es,v} + r_{es,th}}{r_{es,v} + r_{es,th} + r_r})^{M-i} \right\} \quad (۵)$$

در رابطه (۵)، A ناحیه اپتیکی آشکارساز، n_0 سهم چگالی حامل، $(1 - \beta_c)$ احتمال جذب، M تعداد تناوب نقاط کوانتومی Ag2Se-PbS که در ساختار پیشنهادی ارائه شده در شکل (۱)، γ دوره تناوب در نظر گرفته شده، و I_0 شدت تابش فوتون ها می باشد. همچنین $r_{es,v}$ ، $r_{es,th}$ و r_r به ترتیب نرخ فرار ناشی از بایاس، نرخ فرار ناشی از دما و نرخ بازترکیب^۴ می باشد، همچنین α ضریب جذب درون بانندی^۵ که به صورت زیر بیان می شود. [۲۷].

$$\alpha = \frac{e^2 \omega n_{12}}{\epsilon_0 c n_{ref}} M_{21} \frac{\Gamma/2}{(E_2 - E_1 - \hbar \omega)^2 + (\Gamma/2)^2} \quad (۶)$$

که در آن Γ پهنای خط^۶، M_{21} عناصر ماتریس دو قطبی^۷، ω بسامد زاویه ای نور تابشی، n_{ref} ضریب شکست و n_{12} چگالی موثر الکترون بین دو زیر نوار^۸ است. در نقاط کوانتومی Ag2Se-PbS مورد بررسی در این مطالعه، بیشترین ضریب جذب درون بانندی در ناحیه مادون قرمز میانی قرار گرفته است.

در آشکارسازهای نوری قابلیت پاسخ دهی نوری ($\mathcal{R}$)

¹Carrier concentration

² capture probability

³ escape rate

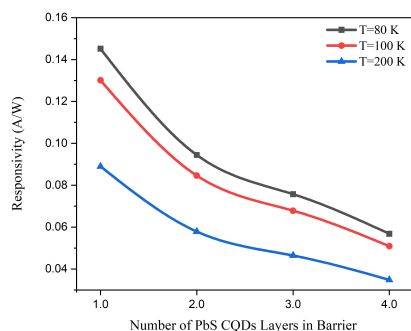
⁴ rate of recombination

⁵ intraband absorption coefficient

⁶ line width

⁷ dipole matrix element

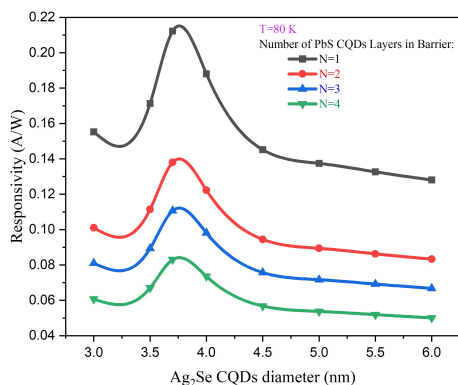
⁸ the effective density of electrons between two subband



شکل ۴: قابلیت پاسخ‌دهی نوری افزاره به صورت تابعی از تعداد لایه‌های نقاط کوانتومی PbS در لایه سد

نتایج به دست آمده در شکل (۴) نشان می‌دهد با افزایش دما قابلیت پاسخ‌دهی افزاره کاهش می‌یابد، این کاهش را می‌توان از طریق چندین عامل به هم پیوسته نظیر تولید حرارتی حامل‌ها و کاهش طول عمر حامل‌ها توصیف کرد. همچنین در یک دمای ثابت با افزایش تعداد لایه‌های نقاط کوانتومی PbS در لایه سد، به دلیل اثرات محصورشدن کوانتومی و کاهش کارایی جمع‌آوری حامل‌ها، قابلیت پاسخ‌دهی افزاره کاهش می‌یابد.

در مرحله دوم تاثیر تغییرات اندازه قطر نقاط کوانتومی Ag₂Se بر روی قابلیت پاسخ‌دهی نوری آشکارساز نوری مورد بررسی قرار گرفته است. شکل (۵) تغییرات قابلیت پاسخ‌دهی افزاره را به صورت تابعی از قطر نقاط کوانتومی Ag₂Se در دمای ۸۰ کلون با بایاس اعمالی ثابت یک ولت، برای تعداد لایه‌های متفاوت از نقاط کوانتومی PbS در لایه سد افزاره را نشان می‌دهد. در اینجا فرض می‌گردد قطر نقاط کوانتومی PbS ۵ نانومتر بوده و همچنین فرض می‌گردد چگالی آلایش فیلم نقاط کوانتومی Ag₂Se ۵×۱۰^{۱۸} cm^{-۳} می‌باشد.



شکل ۵: قابلیت پاسخ‌دهی نوری افزاره به صورت تابعی از قطر نقاط کوانتومی Ag₂Se

PbS در ناحیه فعال)، تغییر اندازه قطر نقاط کوانتومی و چگالی آلایش فیلم نقاط کوانتومی Ag₂Se در ناحیه فعال، در ولتاژ بایاس ثابت یک ولت و دماهای ۸۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ کلون می‌باشد. نور تابشی مادون قرمز میانی تابیده شده به سطح بالایی افزاره توسط ناحیه فعال افزاره جذب شده و گذار درون بانندی در نقاط کوانتومی Ag₂Se صورت می‌گیرد. ناحیه فعال آشکارساز نوری از ۷ دوره تناوب از نقاط کوانتومی Ag₂Se-PbS تشکیل شده است. فرض می‌گردد که نقاط کوانتومی Ag₂Se و PbS شکل کروی یکنواخت دارند.

جدول ۱: پارامترهای آشکارساز نوری نقطه کوانتومی Ag₂Se-PbS

پارامتر	مقدار
قطر نقاط کوانتومی Ag ₂ Se	3 to 6 nm
قطر نقاط کوانتومی PbS	5 nm
چگالی آلایش فیلم نقاط کوانتومی Ag ₂ Se	4×10 ¹⁸ to 10×10 ¹⁸ cm ⁻³
در صد نقاط کوانتومی Ag ₂ Se در ناحیه فعال	50%, 35%, 25%, 20%
توان نور مادون قرمز میانی تابیده	1 mW
مساحت ناحیه اپتیکی ورودی	200μm×200μm
قابلیت تحرک پذیری الکترون	19.4 cm ² V ⁻¹ s ⁻¹
ثابت دی الکتریک (ε _r) Ag ₂ Se	11
ثابت دی الکتریک (ε _r) PbS	170
جرم موثر (m [*]) Ag ₂ Se	0.32 m0
جرم موثر (m [*]) PbS	0.09 m0

در اینجا ابتدا تغییرات تعداد لایه‌های نقاط کوانتومی PbS در لایه سد ناحیه فعال آشکارساز (درصد ترکیب نقاط کوانتومی Ag₂Se و PbS در ناحیه فعال افزاره) بر روی قابلیت پاسخ‌دهی آشکارساز نوری مورد بررسی قرار گرفته است. شکل (۴) تغییرات قابلیت پاسخ‌دهی نوری افزاره را به صورت تابعی از تعداد لایه‌های نقاط کوانتومی PbS در لایه سد در دماهای مختلف با ولتاژ بایاس اعمالی ثابت ۱ ولت نشان می‌دهد. در اینجا فرض می‌گردد نقاط کوانتومی PbS و Ag₂Se به ترتیب دارای قطر ثابت ۵ و ۴/۵ نانومتر بوده، همچنین فرض می‌گردد چگالی آلایش فیلم نقاط کوانتومی Ag₂Se ۵×۱۰^{۱۸} cm^{-۳} می‌باشد.

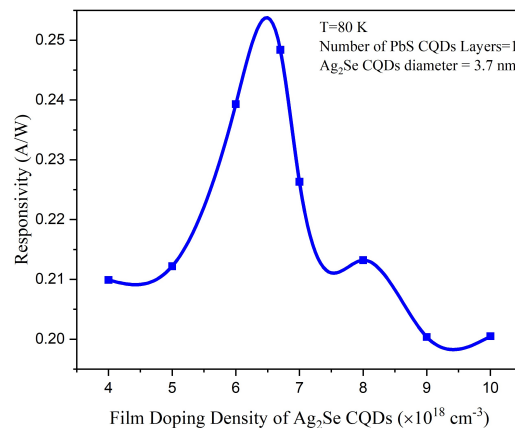
افزاره در چگالی آلایش فیلم نقاط کوانتومی Ag₂Se، 6.7×10^{18} cm⁻³، به بیشینه مقدار 0.248 A/W می‌رسد.

نتیجه‌گیری:

در این مطالعه ساختار یک آشکارساز نوری نقطه کوانتومی ناحیه مادون قرمز با ساختار چند سدی که شامل لایه‌های Al/ZnO/Ag₂Se-PbS multi-barrier QDs/Au می‌باشد مورد بررسی قرار گرفته و تأثیر تغییرات تعداد لایه‌های نقاط کوانتومی PbS در لایه سد ناحیه فعال افزاره، همچنین تأثیر تغییرات اندازه قطر و چگالی آلایش فیلم نقاط کوانتومی Ag₂Se بر قابلیت پاسخ‌دهی افزاره تحت ولتاژ بایاس ۱ ولت در دماهای مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که افزایش تعداد لایه‌های نقاط کوانتومی PbS منجر به کاهش قابلیت پاسخ‌دهی افزاره می‌گردد. قابلیت پاسخ‌دهی افزاره با افزایش قطر نقاط کوانتومی Ag₂Se پس از رسیدن به بیشینه مقدار در $3/7$ نانومتر کاهش می‌یابد. همچنین با در نظر گرفتن تعداد لایه بهینه نقاط کوانتومی PbS در هر دوره تناوب از ناحیه فعال و قطر بهینه نقاط کوانتومی Ag₂Se، در چگالی آلایش فیلم بهینه نقاط کوانتومی Ag₂Se در 3×10^{18} cm⁻³، بیشینه مقدار قابلیت پاسخ‌دهی 0.248 A/W برای افزاره حاصل می‌گردد.

شکل (۵) نشان می‌دهد افزایش قطر نقاط کوانتومی Ag₂Se ابتدا موجب افزایش قابلیت پاسخ‌دهی در افزاره گردیده و پس از رسیدن به قطر بهینه $3/7$ نانومتر، قابلیت پاسخ‌دهی افزاره کاهش می‌یابد. در قطر بهینه، بیشینه قابلیت پاسخ‌دهی 0.21 A/W، در دمای ۸۰ کلوین برای حالتی که یک لایه از نقاط کوانتومی PbS در لایه سد، لایه نشانی شده باشد، حاصل می‌گردد.

در مرحله آخر با در نظر گرفتن دمای بهینه، تعداد لایه بهینه نقاط کوانتومی PbS و قطر بهینه نقاط کوانتومی Ag₂Se، اثر تغییر چگالی آلایش فیلم نقاط کوانتومی Ag₂Se بر قابلیت پاسخ‌دهی آشکارساز نوری مورد بررسی قرار گرفته است. شکل (۶) تغییرات قابلیت پاسخ‌دهی را به صورت تابعی از چگالی آلایش فیلم نقاط کوانتومی Ag₂Se در دمای ۸۰ کلوین تحت ولتاژ بایاس اعمالی ثابت یک ولت نشان می‌دهد. در این مرحله فرض می‌گردد قطر نقاط کوانتومی Ag₂Se، $3/7$ نانومتر بوده و یک لایه از نقاط کوانتومی PbS با قطر ۵ نانومتر در در لایه سد، لایه نشانی شده باشد.



شکل ۶: قابلیت پاسخ‌دهی نوری افزاره بصورت تابعی از چگالی آلایش فیلم نقاط کوانتومی Ag₂Se

نتایج به‌دست‌آمده در شکل (۶) نشان می‌دهد با افزایش اولیه چگالی آلایش فیلم نقاط کوانتومی Ag₂Se، قابلیت پاسخ‌دهی به دلیل افزایش تعداد الکترون‌ها، افزایش می‌یابد با این حال، با ادامه روند افزایش چگالی آلایش فیلم، چگالی الکترون‌های آزاد بیشتر می‌شود. این افزایش منجر به افزایش سرعت بازترکیب حامل‌ها می‌گردد. در نتیجه نرخ بازترکیب غالب شده که منجر به کاهش قابلیت پاسخ‌دهی افزاره می‌شود. در اینجا قابلیت پاسخ‌دهی بهینه شده نهایی

References

- [1] Suyama, Motohiro. "Optoelectronic Sensors." *Handbook of Optical Metrology: Principles and Applications* (2009): 105-135.
- [2] Razeghi, Manijeh. *Fundamentals of solid-state engineering*. New York: Springer, 2006.
- [3] Ten-Doménech, Isabel, et al. "Progress and challenges of mid-infrared spectroscopy for liver characterization focusing on steatosis, fibrosis and cancer." *Applied Spectroscopy Reviews* 59.4 (2024): 578-599.
- [4] Contreras-Rozo, Jose A., et al. "Infrared spectroscopy technique: An alternative technology for diabetes diagnosis." *Biomedical Signal Processing and Control* 86 (2023): 105246.
- [5] An, Donglai, et al. "Mid-infrared absorption spectroscopy with enhanced detection performance for biomedical applications." *Applied Spectroscopy Reviews* 58.10 (2023): 834-868.
- [6] Lambrecht, Armin, and Katrin Schmitt. "Mid-infrared gas-sensing systems and applications." *Mid-infrared Optoelectronics*. Woodhead Publishing, 2020. 661-715.
- [7] Butt, Muhammad Ali, Xavier Mateos, and Ryszard Piramidowicz. "Photonics Sensors: A perspective on current advancements, emerging challenges, and potential solutions." *Physics Letters A* (2024): 129633.
- [8] Vella, Jarrett H., et al. "Broadband infrared photodetection using a narrow bandgap conjugated polymer." *Science advances* 7.24 (2021): eabg2418.
- [9] Bristow, Helen, et al. "Nonfullerene-based organic photodetectors for ultrahigh sensitivity visible light detection." *ACS Applied Materials & Interfaces* 12.43 (2020): 48836-48844.
- [10] Yu, Mengxuan, et al. "In-Synthesis Se-Stabilization Enables Defect and Doping Engineering of HgTe Colloidal Quantum Dots." *Advanced Materials* (2024): 2311830.
- [11] Xue, Xiaomeng, et al. "High-operating-temperature mid-infrared photodetectors via quantum dot gradient homojunction." *Light: Science & Applications* 12.1 (2023): 2.
- [12] Zeng, Longhui, et al. "Van der Waals epitaxial growth of mosaic-like 2D platinum ditelluride layers for room-temperature mid-infrared photodetection up to 10.6 μm ." *Advanced materials* 32.52 (2020): 2004412.
- [13] Deng, Zhiyou, Kwang Seob Jeong, and Philippe Guyot-Sionnest. "Colloidal quantum dots intraband photodetectors." *ACS nano* 8.11 (2014): 11707-11714.
- [14] Goubet, Nicolas, et al. "Wave-function engineering in HgSe/HgTe colloidal heterostructures to enhance mid-infrared photoconductive properties." *Nano letters* 18.7 (2018): 4590-4597.
- [15] Chen, Menglu, et al. "Mid-infrared intraband photodetector via high carrier mobility HgSe colloidal quantum dots." *ACS nano* 16.7 (2022): 11027-11035.
- [16] Hao, Qun, et al. "The historical development of infrared photodetection based on intraband transitions." *Materials* 16.4 (2023): 1562.
- [17] Tian, Yuanyuan, et al. "Mercury chalcogenide colloidal quantum dots for infrared photodetection: from synthesis to device applications." *Nanoscale* 15.14 (2023): 6476-6504.
- [18] Miao, Sijia, and Yuljae Cho. "Toward green optoelectronics: environmental-friendly colloidal quantum dots photodetectors." *Frontiers in Energy Research* 9 (2021): 666534.
- [19] Li, Ning, et al. "Solution-processable infrared photodetectors: Materials, device physics, and applications." *Materials Science and Engineering: R: Reports* 146 (2021): 100643.
- [20] Wang, Yongjie, et al. "Silver telluride colloidal quantum dot infrared photodetectors and image sensors." *Nature Photonics* (2024): 1-7.
- [21] Chang, Ruiguang, et al. "Recent advances in mid-infrared photodetection based on colloidal quantum dots: Challenges and possible solutions." *Coordination Chemistry Reviews* 500 (2024): 215539.
- [22] Sen, Srinjoy. "Self-Consistent Solution of Schrödinger-Poisson Equations For Modeling Realistic Silicon Transistors." (2024).

- [23] Gil-Corrales, John A., Alvaro L. Morales, and Carlos A. Duque. "Self-consistent study of GaAs/AlGaAs quantum wells with modulated doping." *Nanomaterials* 13.5 (2023): 913.
- [24] Dakhlaoui, Hassen, et al. "Theoretical study of electronic and optical properties in doped quantum structures with Razavy confining potential: effects of external fields." *Journal of Computational Electronics* 21.2 (2022): 378–395.
- [25] Woods, Benjamin D., Sankar Das Sarma, and Tudor D. Stanescu. "Electronic structure of full-shell InAs/Al hybrid semiconductor-superconductor nanowires: Spin-orbit coupling and topological phase space." *Physical Review B* 99.16 (2019): 161118.
- [26] Hebal, H., et al. "General-purpose open-source 1D self-consistent Schrödinger-Poisson Solver: Aestimo 1D." *Computational Materials Science* 186 (2021): 110015.
- [27] Billaha, Md Aref, and Mukul K. Das. "Performance analysis of AlGaAs/GaAs/InGaAs-based asymmetric long-wavelength QWIP." *Applied Physics A* 125.7 (2019): 457.
- [28] Zeng, Longhui, et al. "High-responsivity UV-Vis photodetector based on transferable WS₂ film deposited by magnetron sputtering." *Scientific reports* 6.1 (2016): 1–8.