

## تاثیرات احتمال به داماندازی حاملین در آشکارسازهای نوری مادون قرمز مبتنی بر

### InGaAs سیم کوانتومی

امیر ارکانی، مینا پیراعلایی، بهروز رضائی، اصغر عسگری

پژوهشکده فیزیک کاربردی و ستاره شناسی، تبریز، دانشگاه تبریز

#### چکیده

در این مقاله بانوجه به خواص منحصر به فرد نیم رساناهای گروه III-V، آشکارپذیری ویژه آشکارسازهای نوری مبتنی بر سیم کوانتومی از جنس InGaAs در دماها و ولتاژهای مختلف بررسی شده است. همچنین احتمال به دام اندازی حاملین در سیمهای کوانتومی و تاثیر آن در آشکارسازهای نوری مبتنی بر سیم کوانتومی مورد مطالعه قرار گرفته است.

#### مقدمه

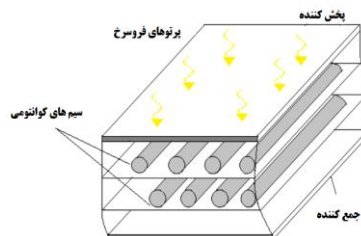
آشکارسازهای نانوساختاری از لحاظ ابعاد کوانتومی و درجه محدودیت به آشکارسازهای چاه کوانتومی، سیم کوانتومی و نقطه کوانتومی تقسیم می شوند. آشکارسازهای چاه کوانتومی برای طول موجهای متوسط و همچنین مادون قرمز به کار می روند. این نوع آشکارسازها دارای تکنولوژی ساخت آسان می باشند و از نظر اقتصادی نیز مقرون به صرفه هستند. با اینکه آشکارسازهای چاه کوانتومی در آشکارسازی نور مادون قرمز نسبت به آشکارسازهای توده های بهتر عمل می کنند، اما دارای مشکلاتی نظیر ممنوع بودن گذار بین بانندی به دلیل انتخاب دو قطبی و فرآیند جفت شدگی هستند. در مقابل، استفاده از سیمهای کوانتومی و نقاط کوانتومی مزایایی دارند که می توان به بهره نوری بیشتر، پوشش کامل طول موجهای مادون قرمز و حساس بودن به نور فرودی اشاره نمود. البته این آشکارسازها نیز مشکلاتی دارند که مهمترین آنها مقدار زیاد جریان تاریک می باشد، با این تفاوت که میزان جریان تاریک در آشکارسازهای سیم کوانتومی نسبت به آشکارسازهای نقطه کوانتومی کمتر و قابل قبول تر است [۱].

#### مدل بندی

آشکارساز مورد مطالعه شامل لایه هایی از سیمهای کوانتومی است که بطور شماتیک در شکل ۱ نشان داده شده است. هر لایه شامل سیمهای کوانتومی متناوب با چگالی  $\Sigma_{QR}$  است. همچنین لایه های سیم کوانتومی با بخشنده هایی با چگالی  $\Sigma_D$  آلاینده شده اند. پاسخ دهی به عنوان یک معیار شایستگی برای مقایسه عملکرد آشکارسازها مورد استفاده قرار می گیرد و در حالت کلی به صورت  $R_i = i_{out} / P_{in}$  تعریف می شود. در مورد سیمهای کوانتومی این کمیت را می توان از اختلاف جریان نوری و جریان تاریک تقسیم بر نور فرودی به صورت زیر محاسبه کرد [۲]:

$$R_{QR} = \frac{\Delta j}{q \hbar \omega I} = \frac{\langle j_{photo} \rangle - \langle j_D \rangle}{q \hbar \omega I} \quad (1)$$

که در آن  $\hbar \omega$  انرژی نور فرودی،  $q$  بار الکترون و  $I$  برابر با انرژی پرتو مادون قرمز است.



شکل ۱: ساختار طرحواره آشکارساز سیم کوانتومی.

آشکارپذیری ویژه یک آشکارساز به حساسیت نور فرودی و جریان تاریک بستگی دارد و از طریق رابطه زیر محاسبه می شود [۳-۴].

$$D_{QR}^* = \frac{R_{QR} \sqrt{A \Delta f}}{\sqrt{4q \langle j_d \rangle g \Delta f}} \quad (2)$$

در رابطه فوق  $A$  مساحت آشکارساز،  $f\Delta$  پهنای باند فرکانسی ( $\Delta f=1\text{Hz}$ )،  $j_d$  جریان تاریک و  $g$  بهره نوری است. مقدار بهره نوری از رابطه‌ی زیر قابل محاسبه است که  $F$  فاکتور پرشدگی،  $M$  تعداد سیم‌های کوانتومی و  $P_c$  احتمال به دام اندازی<sup>۱</sup> حاملین می‌باشد [۵].

$$g = \frac{(1-P_c)}{(M.F.P_c)} \quad (۳)$$

مقدار احتمال به دام اندازی از رابطه  $P_c = \tau_t / \tau_{rec}$  محاسبه می‌شود که در آن  $\tau_t$  و  $\tau_{rec}$  به ترتیب زمان تونل زنی و زمان بازترکیب، از روابط زیر قابل محاسبه هستند [۶]:

$$\tau_t = h_{QR} \frac{\sqrt{1 + (\mu F / v_s)}}{\mu F}, \quad \tau_{rec} = \frac{(M+1)L}{\pi a_{QR}^2 h_{QR} \sum_{QR} v_t} \quad (۴)$$

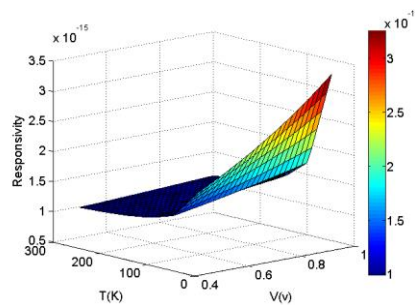
در رابطه فوق  $F$  میدان الکتریکی خارجی اعمالی به سیستم،  $v_s$  سرعت اشباع حفره و  $\mu$  میزان تحرک الکترون‌ها و  $v_t$  نرخ به دام اندازی حفره می‌باشند.

## بحث و نتایج

ابتدا رفتار پاسخ‌دهی سیستم را بر حسب ولتاژ اعمالی و دما برای ساختار نشان داده شده در شکل ۱ محاسبه می‌کنیم. مقادیر پارامترهای مورد استفاده در محاسبات در جدول ۱ نشان داده شده است. با توجه به نتایج بدست آمده در شکل ۲ ملاحظه می‌شود که به دلیل اختلاف جریان نوری و جریان تاریک موجود در آشکارساز سیم کوانتومی، پاسخ دهی با مقدار ولتاژ اعمالی رابطه مستقیم و با دما رابطه عکس دارد. هرچقدر اختلاف آنها زیاد باشد پاسخ‌دهی مقدار بیشتری خواهد داشت و برعکس. جریان نوری با اعمال ولتاژ رابطه مستقیم دارد، به همین دلیل در ولتاژهای خیلی پایین جریان نوری اندکی در سیستم ایجاد می‌شود که تفاوت چندانی با جریان تاریک ندارد. اما با افزایش ولتاژ اعمالی مشاهده می‌شود که جریان نوری بیشتر شده و اختلاف بین جریان تاریک و جریان نوری به حد مناسبی افزایش می‌یابد. مقدار پاسخ‌دهی برای آشکارساز سیم کوانتومی زمانی دارای بیشترین مقدار خواهد بود که مقدار ولتاژ اعمالی زیاد و دمای عملکردی سیستم کم باشد.

جدول ۱: مقادیر استفاده شده در شبیه سازی

F	m	$\Sigma_D$	$\Sigma_{QR}$	$\epsilon$	$a_{QR}$	L	$\sigma$	M
۰/۴	$4 \times 10^{-24}$ g	$5/58 \times 10^{11}$ cm <sup>-2</sup>	$9/3 \times 10^{11}$ cm <sup>-2</sup>	۱۱/۷۴	۲۰Nm	۴۰ nm	$2 \times 10^{-8}$ cm	۱۰

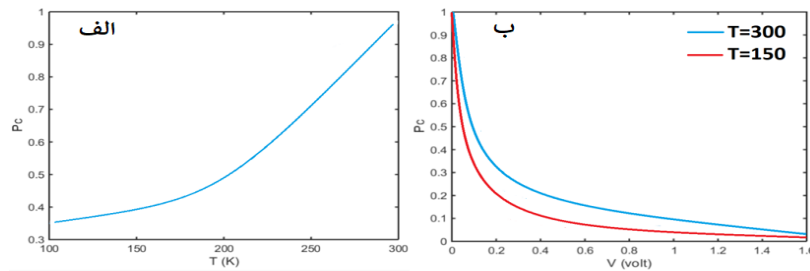


شکل ۲: تغییرات پاسخ دهی با تغییرات دما و ولتاژ در آشکارسازهای سیم کوانتومی.

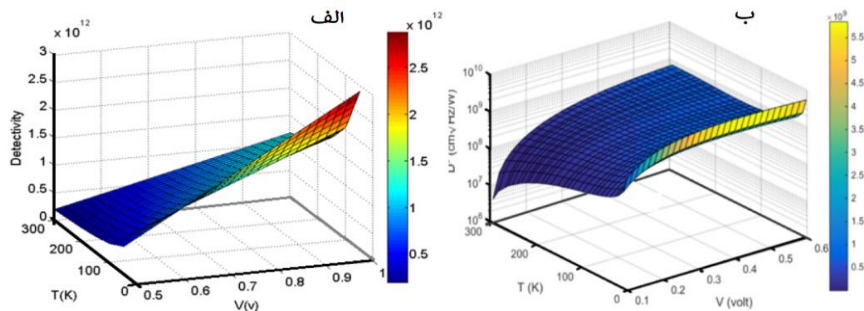
سپس تغییرات  $P_c$  را بر حسب کمیت‌های دما و ولتاژ بررسی می‌کنیم که در شکل ۳ نمایش داده شده است. وابستگی  $P_c$  به عواملی مانند دما، ولتاژ و تعداد سیم‌های کوانتومی تاثیر شایانی در مقدار آشکارپذیری ویژه دارد که در محاسبات قبلی مورد توجه قرار نگرفته است [۷]. با توجه به شکل ۳ (الف) ملاحظه می‌کنیم که با افزایش دما مقدار  $P_c$  افزایش می‌یابد، چرا که الکترون‌های محصور در چاه با افزایش دما انرژی لازم برای فرار از چاه را بدست می‌آورند و شرایط برای به دام افتادن آن‌ها در چاه‌های بعدی مهیا می‌شود. از طرفی با فرار الکترون‌ها از چاه فضا برای به دام

<sup>1</sup>Capture probability

افتادن الکترون‌های دیگر در آن چاه ایجاد می‌شود. همچنین از شکل ۳ (ب) مشاهده می‌شود که با افزایش ولتاژ مقدار  $P_c$  کاهش می‌یابد که این امر به دلیل بیشتر شدن مقدار حاملین جریان می‌باشد. در پایان به منظور بررسی جامع تاثیر  $P_c$  بر روی آشکارپذیری ویژه دو حالت متفاوت را در نظر می‌گیریم. شکل ۴ (الف و ب) به ترتیب تغییرات آشکارپذیری ویژه را به صورت تابعی از ولتاژ و دما با  $P_c$  ثابت و  $P_c$  متغیر (تابعی از ولتاژ و دما) نشان می‌دهد.



شکل ۳: تغییرات احتمال به دام اندازی بر حسب (الف) دما و (ب) ولتاژ



شکل ۴: تغییرات آشکارپذیری بر حسب دما و ولتاژ به ازای (الف)  $P_c=0.4$  و (ب)  $P_c$  متغیر با دما و ولتاژ.

با مقایسه شکل‌های ۴ (الف و ب) مشاهده می‌شود زمانی که  $P_c$  بر حسب دما و ولتاژ متغیر باشد نسبت به حالتی که مقدار آن ثابت است، تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر روی تغییرات آشکارپذیری ویژه دارد و مرتبه مقداری آن کاهش بسزایی دارد و شیب افزایشی آن رفتار بهتری به خود می‌گیرد.

### نتیجه گیری

نتایج محاسبات نشان داد که به دلیل اختلاف جریان نوری و جریان تاریک موجود در آشکارساز سیم کوانتومی، پاسخ‌دهی با ولتاژ اعمالی رابطه مستقیم و با دما رابطه عکس دارد. در این مقاله با در نظر گرفتن وابستگی احتمال به دام اندازی به دما و ولتاژ، نشان دادیم که آشکارپذیری ویژه نسبت به نتایج گزارشات قبلی، که در آن مقدار احتمال به دام اندازی ثابت در نظر گرفته شده است، تغییرات بارزی را نشان می‌دهد و مرتبه مقداری آن بطور چشمگیر کاهش یافته است.

### مرجع‌ها

- [1] B. Das and P. Singaraju, "Novel quantum wire infrared photodetectors", *Infrared Physics Technology* **46** (2005) 209-218.
- [2] A. Nasr, "Performance of quantum wire infrared photodetectors under illumination conditions" *Optics & Laser Technology* **41** (2009) 871-876,
- [3] M. B. El Mashade, M. Ashry, and A. Nasr, "Theoretical analysis of quantum dot infrared photodetectors", *Semicond. Sci Technol.* **18** (2003) 891-900.
- [4] A. A. Nasr, "Dark current characteristics of quantum wire infrared photodetectors" *IET Optoelectron.* **1** (2007) 140-145.
- [5] Jiang, Hongtao, and Jasprit Singh, "Strain distribution and electronic spectra of InAs/GaAs self-assembled dots: An eight-band study", *Physical Review B* **56** (1997) 4696.
- [6] S. G. Wolde, "p-TYPE InAs/GaAs QUANTUM DOT, DOT-IN-WELL, AND LOW-FREQUENCY NOISE PROPERTIES OF INFRARED PHOTODETECTORS, Georgia State University, May 2018.
- [7] A. Nasr, "Detectivity Performance of Quantum Wire Infrared Photodetectors", *J. Opt. Commun.* **32** (2011) 101-106.