



بیست و پنجمین کنفرانس اپتیک و  
فوتونیک ایران و یازدهمین کنفرانس  
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،  
دانشگاه شیراز،  
شیراز، ایران.  
۹-۱۱ بهمن ۱۳۹۷



## بررسی تئوری آشکارساز مادون قرمز نقطه کوانتومی ژرمانیوم/سیلیکن

محمد قلی پور، داود فتحی، مهدی گردی ارمکی

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

چکیده- در این مقاله ما از یک مدل نسبتاً دقیق به منظور مطالعه تئوری جریان تاریکی و نوری آشکارساز مادون قرمز نقطه کوانتومی Ge/Si که ساختار نواری متفاوتی را نسبت به نظایر آن در گروه سه - پنج همچون InAs/GaAs دارند، استفاده کرده‌ایم. در بررسی مان، فرض کرده‌ایم که هر دو مکانیزم تونل‌زنی میدان کمکی و انتشار حرارتی در تعیین اندازه جریان تاریکی سهمیم هستند. وابستگی جریان تاریکی آشکارسازهای نقطه کوانتومی به دما و ولتاژ، همچنین سهم تونل‌زنی میدان کمکی و انتشار حرارتی در دماها و ولتاژهای متفاوت در آشکارساز بررسی شده اند. پیش بینی می‌شود با توجه به نتایج بدست آمده، مقدار جریان تاریکی در نقاط کوانتومی Ge/Si نسبت به نظایر آن در گروه سه - پنج کوچکتر باشد. در نتیجه این ساختارها از قابلیت آشکارسازی بهتری برخوردار هستند.

کلید واژه- نقطه کوانتوم، سیلیکن-ژرمانیوم، جریان تاریکی، آشکارساز نوری.

## Theoretical analysis of Ge/Si quantum dot infrared photodetector

Mohammad Gholipoor, Davood Fathi\*, Mahdi Gordi Armaki

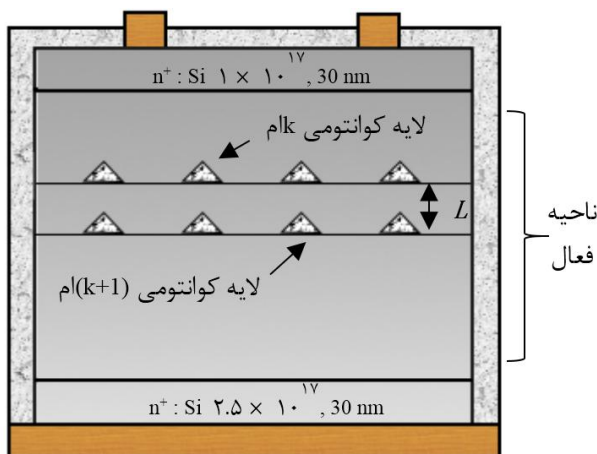
\* d.fathi@modares.ac.ir

**Abstract-** In the article, we have used an accurate model for theoretical studying of dark and illumination characteristics of Ge/Si quantum dot infrared photodetector. In our considerations it is assumed that both thermionic emission and field-assisted tunnelling mechanisms determine the dark current of quantum dot detector. Dependence of the QDIPs dark current to the temperature and voltage bias, and also the thermionic emission and field-assisted tunneling at various temperatures and biasing voltages are investigated. Our results predict that the dark current of Ge/Si quantum dot is smaller than other materials of III-V groups such as InAs/GaAs and as a result, detectivity in photodetectors can be improved.

-Keywords: Quantum dots, Silicon-Germanium, dark current, photodetectors

## مقدمه

هر کدام از این لایه‌ها شامل چگالی نقطه کوانتومی  $\Sigma_{QD}$  و چگالی ناخالصی پذیرنده  $\Sigma_D$  و با دوره تناوب یکسان می‌باشند. عرض سطح مقطع این نقطه کوانتومی‌های هرمی شکل،  $a_{QD}$ ، به اندازه کافی از اندازه ارتفاع آن  $h_{QD}$  بزرگتر است. از اینرو مجموع ضخامت لایه آشکارساز نوری می‌تواند به نحوی تنظیم شود که در راستای عمودی تنها دو تراز انرژی کوانتیده مقید شود. همچنین اندازه بزرگتر سطح مقطع این نقاط کوانتومی هرمی باعث ایجاد ترازهای مقید بیشتر و در نتیجه ظرفیت پذیرش حفره بیشتر می‌شود. مطابق شکل ۱ ناحیه فعال آشکارساز بین دو اتصال با ناخالصی بالا که به عنوان امیتر و کلکتور هستند، قرار گرفته است.



شکل ۱: تصویر شماتیکی از آشکارساز نقطه کوانتومی Si/Ge

شکل ۲ ساختار نواری نقاط کوانتومی Ge/Si را نشان می‌دهد. همانطور که از این شکل دیده می‌شود ناپیوستگی بزرگ باند ظرفیت منجر به تحدید موثر حفره در چاه پتانسیل ژرمانیوم می‌شود. میانگین چگالی جریان تاریکی در یک QDIP بصورت زیر بیان می‌شود [۵]:

$$\langle J_{dark} \rangle = J_{max} \Sigma_{QD} \int_0^{\infty} \exp(q\phi/k_B T) \quad (1)$$

آشکارساز مادون قرمز نقطه کوانتومی یا به اختصار QDIP، توجه محققان زیادی را در دو دهه گذشته به خود جلب کرده است. در این افزاره چون حامل‌ها در سه بعد محصور می‌شوند، عملکرد بهتری همچون دمای کاری بالاتر، جریان تاریکی کمتر و بهره نورسانایی بیشتری انتظار می‌رود [۱].

در سال ۲۰۰۴ رژی یک مدل تئوری به منظور مطالعه و بررسی رفتار QDIP<sup>۱</sup> ها در زیر تابش نور و در وضعیت تاریکی معرفی کرد [۲] که این مدل در سال ۲۰۰۹ با در نظر گرفتن سهم فرآیند تونل-زنی میدان کمکی از الکترون‌ها بهبود یافت و نتایج آن توافق خوبی با داده‌های تجربی را نشان دادند [۳]. تاکنون، از این مدل تنها به منظور مطالعه ساختارهای ناهمگون گروه سه - پنج مانند InAs/GaAs استفاده شده است. از طرف دیگر، آشکارسازهای نقطه کوانتومی ژرمانیوم محصور شده در بستر سیلیکن، با توجه به سازگاری‌شان با دیگر افزاره‌های نوری مبتنی بر سیلیکن، نوع جذاب دیگری از این ساختارها هستند [۴]. در این مقاله، ما از مدل مذکور برای توصیف عملکرد آشکارسازهای مادون قرمز نقطه کوانتومی Ge/Si استفاده کرده‌ایم.

## مدل فیزیکی جریان تاریکی QDIP

شکل ۱ شماتیکی از برش عرضی یک نمونه از آشکارساز نقطه کوانتومی را نشان می‌دهد. ناحیه جذب این آشکارساز از مجموعه‌ای از لایه‌های نقطه کوانتومی جدا شده از موادی با شکاف نواری پهن تشکیل شده است.

<sup>1</sup> Quantum dot infrared photodetector

$$\langle J_{dark} \rangle = \frac{q \Sigma_{QD}}{P_k} (G_{th} + G_{tm}) \quad (3)$$

که پارامترهای  $P_k$  احتمال تسخیر حفره،  $G_{th}$  نرخ انتشار حرارتی و  $G_{tm}$  نرخ تونل زنی میدان کمکی می باشد. جزئیات این روابط در مرجع [۵] آمده است. زیر تابش، حفره ها توسط فرایند تحریک نوری از تراز مقید به تراز پیوسته بالای چاه پتانسیل انتقال می یابند. با فرض اینکه در زیر تابش، تحریک نوری بر تحریک حرارتی غالب است، چگالی میانگین جریان نوری را می توان توسط رابطه زیر تعیین کرد:

$$\langle J_{photo} \rangle = q \eta \phi_s g \quad (4)$$

در معادله فوق،  $\eta$  راندمان کوانتومی،  $g$  بهره نور رسانایی و  $\phi_s$  چگالی شار فوتون های فرودی بر روی آشکارساز است.

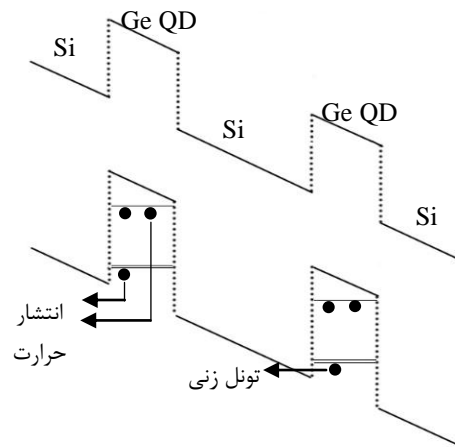
## نتایج

ما از این مدل تحلیلی توسعه یافته به منظور محاسبه جریان تاریکی و نوری QDIP با ناحیه فعال Ge/Si که عملاً تابعی از پارامترهای ساختار همچون ابعاد نقطه کوانتومی، ولتاژ بایاس اعمالی و دما است، استفاده کرده ایم. مقادیر مهمترین پارامترهای استفاده شده برای شبیه سازی در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱: مقادیر پارامترهای آشکارساز Ge/Si شبیه سازی شده

	$\Sigma$	

شکل ۳ جریان تاریکی آشکارسازهای Ge/Si را بر حسب ولتاژ بایاس در سه دمای کاری نشان می دهد. با افزایش ولتاژ بخاطر کاهش سد پیش روی حامل نرخ تونل زنی افزایش می یابد در نتیجه شاهد افزایش جریان هستیم. افزایش دما نیز سبب افزایش نرخ انتشار حرارتی و



شکل ۲: تصویر شماتیکی از ساختار نواری Ge/Si

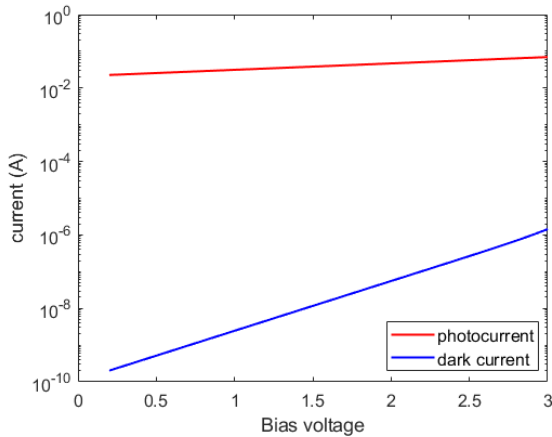
که در این معادله  $q$  بار حفره،  $\Phi$  توزیع پتانسیل حفره ها در هر لایه نقطه کوانتومی، و  $J_{max}$  چگالی جریان بیشینه از اتصال  $n^+$  بالایی است. با جایگذاری توزیع پتانسیل رابطه فوق را می توان بصورت زیر نوشت:

$$\langle J_{dark} \rangle = J_{max} \frac{\theta}{\langle N \rangle} \times \exp \left( q \left( V + V_D - \frac{\langle N \rangle}{N_{QD}} V_{QD} \right) / (K+1) k_B T \right) \quad (2)$$

که در معادله فوق،  $\langle N \rangle$  میانگین حفره ها در هر نقطه کوانتومی،  $L$  فاصله بین لایه ها،  $N_{QD}$  تعداد بیشینه حفره های که یک نقطه کوانتومی می تواند بپذیرد،  $\epsilon_r$  ثابت دی الکتریک ماده نقطه کوانتومی است. جزئیات روابط  $\theta$ ،  $V_D$  و  $V_{QD}$  در مرجع [۵] آمده اند.

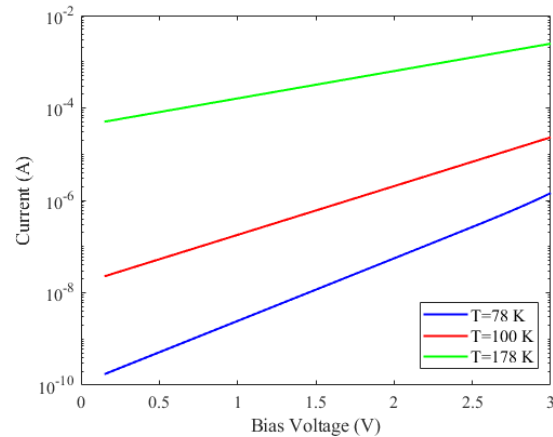
شکل ۲ همچنین بصورت شماتیک فرآیندهای تسخیر، انتشار حرارتی و تونل زنی میدان کمکی را در غیاب نور نشان می دهد. به صورت کیفی، جریان QDIP ها تحت بایاس از سه فرآیند اصلی تشکیل شده است: الف) تحریک نوری و حرارتی حفره ها از ترازهای مقید نقاط کوانتومی به ترازهای پیوسته، ب) تسخیر حفره های متحرک در نقاط کوانتومی، ج) انتقال حفره ها بین نقاط کوانتومی باردار. از اینرو معادله توازن دیگری بر مبنای توصیف کیفی فوق چنین می توان نوشت:

حامل بیشتر جریان تاریکی کمتر و قابلیت آشکارسازی  
 مطلوبی را نشان می‌دهند.



شکل ۴: جریان تاریکی و نوری آشکارساز Ge/Si در دمای ۷۸ درجه کلوین

همچنین بخاطر حضور بیشتر حامل‌ها در تراز برانگیخته،  
 باعث افزایش نرخ تونل‌زنی می‌شود، در نتیجه جریان  
 تاریکی با افزایش دما بیشتر می‌شود.



شکل ۳: جریان تاریکی آشکارسازهای Ge/Si

### مرجع‌ها

- [1] G. Liu, J. Zhang, and L. Wang, "Dark current model and characteristics of quantum dot infrared photodetectors," *Infrared Physics & Technology*, vol. 73, pp. 36-40, 2015.
- [2] A. Stiff-Roberts, X. Su, S. Chakrabarti, and P. Bhattacharya, "Contribution of field-assisted tunneling emission to dark current in InAs-GaAs quantum dot infrared photodetectors," *IEEE photonics technology letters*, vol. 16, no. 3, pp. 867-869, 2004.
- [3] H. Liu, J. Zhang, Z. Gao, and Y. Shi, "Photodetection of Infrared Photodetector Based on Surrounding Barriers Formed by Charged Quantum Dots," *IEEE Photonics Journal*, vol. 7, no. 3, pp. 1-8, 2015.
- [4] A. Yakimov, V. Timofeev, A. Bloshkin, A. Nikiforov, and A. Dvurechenskii, "Photovoltaic Ge/Si quantum dot detectors operating in the mid-wave atmospheric window (3 to 5  $\mu$  m)," *Nanoscale research letters*, vol. 7, no. 1, p. 494, 2012.
- [5] P. Martyniuk and A. Rogalski, "Insight into performance of quantum dot infrared photodetectors," *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*, vol. 57, no. 1, pp. 103-116, 2009.

تغییرات ملایم‌تر جریان تاریکی با ولتاژ در این آشکارساز  
 نسبت به ساختارهایی همچون InAs/GaAs، بخاطر  
 کاهش نرخ تونل‌زنی یا وابستگی ضعیف‌تر آن به میدان  
 الکتریکی می‌باشد. همچنین با توجه به اینکه حفره‌ها سازنده  
 جریان تاریکی هستند کاهش نرخ انتشار حرارتی و هم نرخ  
 تونل‌زنی را داریم که نهایتاً سبب کاهش بیشتر جریان  
 تاریکی می‌شود.

نقاط کوانتومی Ge/Si پاسخ نوری درون نواری در محدوده  
 طیفی ۳ تا ۵ میکرومتر را نشان می‌دهند. تحت تابش این  
 محدوده از طول موج نور، و چگالی شار فوتون‌های فرودی  
 $8 \times 10^{17} \text{ photon/cm}^2\text{s}$ ، تغییرات جریان نوری در دمای  
 ۷۸ درجه کلوین بر حسب ولتاژ بصورت شکل ۴ می‌باشد.  
 علت افزایش جریان نوری با ولتاژ، فرآیندهای بوجود  
 آورنده جریان تاریکی می‌باشند.

### نتیجه‌گیری

به عنوان نتیجه، ما عملکرد یک آشکارساز مادون قرمز  
 نقطه کوانتومی Ge/Si را بصورت تحلیلی بررسی کردیم.  
 این آشکارساز با توجه به نرخ تونل‌زنی کمتر و جرم موثر