خواص آشکارسازی یک آشکارساز کوانتومی آبشاری با ساختار تونل‌زنی تشدیدی از نوع GaAs/AlGaAs

ناصر هاتفی کرگان، زهره محمودی راد

n.hatefi@yahoo.com, zohre.mahmoudi@ymail.com,

دانشگاه سیستان و بلوچستان، دانشکده علوم، گروه فیزیک

چکیده – در این مقاله خواص آشکارسازی یک آشکارساز کوانتومی آبشاری دارای ساختار تونل‌زنی تشدیدی بررسی شده است. ساختار تونل‌زنی تشدیدی بدین نحو است که این آشکارساز در هر دوره شامل یک چاه کوانتومی با عرض کم است که بین دو سد پتانسیل بلند قرار دارد و حالت پایه‌ی آن با حالت برانگیخته‌ی چاه کوانتومی فعال در حالت تشدید است. وجود این حالت تشدید باعث می‌شود تا تابع موج حالت برانگیخته چاه فعال از حالت محدود بودن بیشتر به چاه فعال خارج شود که این امر باعث انتقال آسانتر الکترون‌های برانگیخته شده در نتیجه جذب فوتون‌ها در درون آشکارساز می‌شود. همچنین وجود سدهای بلند چگالی جریان تاریک را پایین می-آورد. نتایج محاسبه‌ها نشان می‌دهند که این مزایا باعث می‌شوند تا بیشینه آشکارکنندگی افزاره $4.87\times10^{12}\,cm\sqrt{Hz}/W$ شود که حدود صد برابر بزرگتر از آشکارکنندگی آشکارسازهای کوانتومی آبشاری معمولی است.

کلید واژه- آشکارساز، کوانتومی آبشاری، چاه کوانتومی، تونل‌زنی تشدیدی، آشکارکنندگی

Detection Performance of a GaAs/AlGaAs Resonant Tunneling Structure Quantum Cascade Photodetector

Naser Hatefi Kargan, Zohre Mahmoudi Rad

Department of Physics, Faculty of Sciences, University of Sistan and Baluchestan

Abstract- In this paper detection performance of a resonant tunneling structure quantum cascade photodetector is investigated. The resonant tunneling structure is so that the photodetector in each period has a narrow well between two high barriers and its ground state is in resonance with the excited state of the active well. The existence of resonance causes that the excited state of the active well not to be more localized to the well, which causes easy transport of excited electrons, due to photons, inside the structure. In addition the existence of high barriers decreases dark current of the photodetector. The results of calculations show that these advantages cause peak detectivity of the photodetector to be $4.87\times10^{12}cm\sqrt{Hz}/W$ that is two orders of magnitude higher than the detectivity of quantum cascade photodetectors with conventional structures.

Keywords: Photodetector, Quanum Cascade, Quantum Well, Resonant Tunneling, Detectivity

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-04]

۱- مقدمه

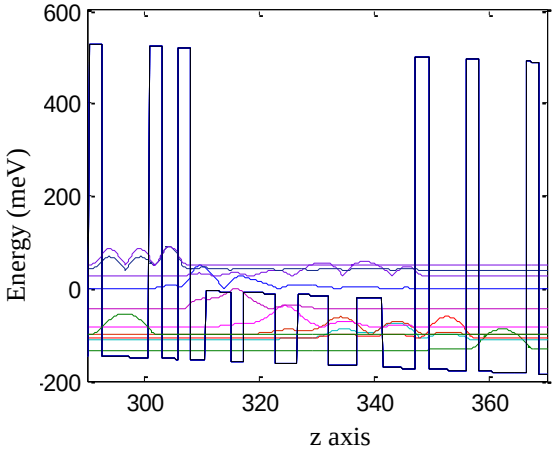
آشکارسازهای کوانتومی آبشاری (QCPs) در سال ۲۰۰۴ ظهور یافتند. این افزاره‌ها برای بالا بردن بازده آشکارسازی در ناحیه مادون قرمز دور و میانی استفاده می‌شوند. یک QCP شامل چندین دوره می‌شود که هر دوره شامل یک ناحیه برای انتقال الکترون‌ها به صورت آبشارگونه و یک چاه کوانتومی فعال است که با ناخالصی نوع n آلاییده شده است. جذب فوتون در هر دوره درون چاه کوانتومی فعال صورت می‌گیرد. اختلاف انرژی بین حالت پایه و اولین حالت برانگیخته چاه کوانتومی فعال قله‌ی طول موج آشکارسازی را در یک QCP تعیین می‌کند [۱، ۲]. به دلیل اهمیت بالای QCPs، پژوهشگران به منظور شناخت بهتر و یافتن راهی برای حذف یا کاهش جریان تاریک به عنوان یک عامل مزاحم، پژوهش‌های فراوان انجام داده‌اند [۳، ۴]. در این مقاله ابتدا مدل تئوری برای محاسبه‌ی مشخصه جریان- ولتاژ و سپس نتایج محاسبه‌های انجام شده ارائه می‌شوند.

۲- مبانی تئوری

انتقال الکترون در آشکارساز کوانتومی آبشاری به روش پراکندگی صورت می‌گیرد. در این روش برای محاسبه‌ی چگالی جریان الکتریکی درون ساختار QCP به صورت تابعی از ولتاژ اعمال شده، ابتدا نیاز است که حالت‌های انرژی و توابع موج الکترون‌های درون ساختار محاسبه شوند. که برای این کار لازم است معادله شرودینگر حل شود. معادله‌ی شرودینگر در تقریب جرم موثر به صورت زیر نوشته می‌شود [۵]:

$$\frac{-\hbar^2}{2}\frac{d}{dz}\left[\frac{d\psi(z)}{m(z)dz}\right]+V(z)\psi(z)=E\psi(z) \qquad (۱)$$

که $m(z)$ جرم مؤثر الکترون درون ساختار، $V(z)$ انرژی پتانسیل الکتریکی است که یک الکترون می‌بیند، E ویژه مقدار انرژی و محور z عمود بر سطح چاه‌های کوانتومی است. برای حل معادله (۱) فرض می‌شود که افت ولتاژ اعمالی خارجی در درون افزاره به صورت خطی صورت می‌گیرد. برای حل عددی، معادله (۱) با استفاده از روش تفاضل متناهی بسط داده می‌شود که حل مسئله به پیدا کردن مقادیر ویژه و بردارهای ویژه منجر می‌شود که مقادیر ویژه حالت‌های انرژی و بردارهای ویژه توابع موج مربوطه هستند.



شکل ۱: ساختار نواری آشکارساز کوانتومی آبشاری تونل‌زنی تشدیدی پیشنهادی و توابع موج حالت‌های کوانتومی مربوطه در یک دوره نشان داده شده است.

شکل ۱ ساختار نواری یک دوره از آشکارشاز کوانتومی آبشاری تونل‌زنی تشدیدی مورد بررسی در این مقاله و توابع موج مربوطه را نشان می‌دهد. انرژی حالت پایه چاه کوانتومی با عرض کم که بین دو سد بلند محدود شده و در کنار چاه کوانتومی فعال قرار دارد در نزدیکی انرژی اولین حالت برانگیخته چاه کوانتومی فعال است. این امر باعث ایجاد تشدید بین این دو حالت انرژی می‌شود.

محاسبه‌ی چگالی جریان می‌تواند با انتخاب یک صفحه‌ی فرضی در داخل ساختار آشکارساز محاسبه شود، بدین طریق که از تفریق تعداد الکترون‌هایی که در واحد زمان از واحد سطح به سمت راست و تعداد الکترون‌هایی که به سمت چپ صفحه فرضی پراکنده می‌شوند چگالی جریان الکتریکی محاسبه می‌شود. برای پراکندگی از یک طرف صفحه فرضی به طرف دیگر به هم‌پوشانی توابع موج نیاز است. بنابراین در عمل نیاز است فقط دو دوره متوالی در نظر گرفته شوند چراکه هم‌پوشانی بین توابع موج دوره-های دور بسیار ناچیز است. اگر این دو دوره متوالی A و B نام‌گذاری شوند در آن صورت چگالی جریان الکتریکی با رابطه زیر داده می‌شود [۶]:

$$J=\sum_j\sum_i n_i W_{i,j}-\sum_j\sum_i n_j W_{j,i} \qquad (۲)$$

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-04]

که در آن i و j به ترتیب به زیرنوارهای انرژی در دوره-های A و B دلالت دارند. n_i چگالی الکترون‌ها در زیرنوار i و $W_{i,j}$ آهنگ متوسط پراکندگی یک الکترون از زیرنوار i به زیرنوار j می‌باشد. n_iها از حل معادله نرخ برای چگالی الکترون‌ها بدست می‌آیند [۱]. اگر $W_{i,j}$ فقط شامل مولفه‌های غیر نوری باشد جریان تاریک محاسبه می‌شود ولی اگر شامل هم مولفه نوری و هم مولفه‌های غیر نوری باشد جریان کل محاسبه می‌شود. با تفریق کردن جریان تاریک از جریان کل جریان نوری محاسبه می‌شود. در آشکارسازهای مادون قرمز کوانتومی آبشاری مولفه غیر نوری غالب برای پراکندگی، پراکندگی الکترون‌ها توسط فونون‌های نوری است که در محاسبه‌ها فقط این مولفه برای محاسبه جریان تاریک در نظر گرفته خواهد شد. $W_{i,j}$ مربوط به فونون‌های نوری طولی با رابطه زیر داده می‌شود:

$$W_{i,j}^{nonoptical}=\frac{\int \frac{1}{\tau_i} f_i(E)(1-f_j(E\pm\hbar\omega_{LO}))\,dE}{\int f_i(E)\,dE} \quad (۳)$$

$$\frac{1}{\tau_i}=\frac{\gamma}{2}\Theta\left(k_i^2-\frac{2m\Delta}{\hbar^2}\right)\times \int_{-\infty}^{+\infty}\frac{\pi\left|G_{ij}\left(K_z\right)\right|^2}{\sqrt{K_z^4+2K_z^2\left(2K_i^2-\frac{2m\Delta}{\hbar^2}\right)+\left(\frac{2m\Delta}{\hbar^2}\right)^2}} \quad (۴)$$

$$\gamma=\frac{me^2\omega_{LO}}{2\pi^2\hbar^2}\left(\frac{1}{\varepsilon_\infty}-\frac{1}{\varepsilon_s}\right)\left(N_O+\frac{1}{2}\mp\frac{1}{2}\right) \quad (۵)$$

$$G_{ij}\left(K_z\right)=\int\psi_j^*\left(z\right)e^{-iK_z z}\psi_i\left(z\right)dz \quad (۶)$$

که K_z بردار موج فونون، k_i بردار موج الکترون زیرنوار i و Θ تابع پله‌ای است. $\psi_j^*(z)$، $\psi_i(z)$ به ترتیب توابع موج در ته زیرنوار i و زیرنوار j و $\Delta=E_j-E_i\mp\hbar\omega_{Lo}$. پارامترهای m، $\hbar$، e، ω_{Lo}، N_0، ε_∞ و ε_s به ترتیب جرم مؤثر الکترون، ثابت پلانک، بار الکترون، فرکانس زاویه‌ای فونون‌های نوری طولی، تعداد فونون‌ها، گذردهی الکتریکی در فرکانس‌های بالا و گذردهی الکتریکی در حالت استاتیکی هستند. علامت منفی برای پراکندگی در اثر جذب فونون و علامت مثبت برای پراکندگی به دلیل نشر فونون است [۱].

برای محاسبه‌ی چگالی جریان الکتریکی وقتی که QCP در معرض تابش نور قرار می‌گیرد، $W_{i,j}$ شامل دو قسمت نوری و غیر نوری است که قسمت نوری با رابطه‌ی زیر داده می‌شود:

$$W_{i,j}^{optical}=\frac{\pi e^2\omega_{\bar{k}}\eta\cos^2(\theta)\varphi_{\bar{k},\alpha}}{c\varepsilon\hbar^2}\times|<\phi_j(z)|z| \quad (۷)$$
$$\phi_i(z)>|^2\times\frac{\gamma/2\pi}{(|E_j-E_i|-\hbar\omega_k)^2+(\gamma/2)^2}$$

که c، η، ε_0، ω، φ، θ و γ به ترتیب سرعت نور در فضای آزاد، ضریب شکست فوتون‌ها در ماده‌ی QCP، گذردهی الکتریکی فضای آزاد، فرکانس زاویه‌ای فوتون-های فرودی، شار فوتون‌های تابشی روی QCP، زاویه‌ی بین میدان الکتریکی تابش الکترومغناطیس و امتداد محور z و پهنای طیفی در نصف بیشینه برای گذارهای بین زیرنوار i و زیرنوار j هستند.

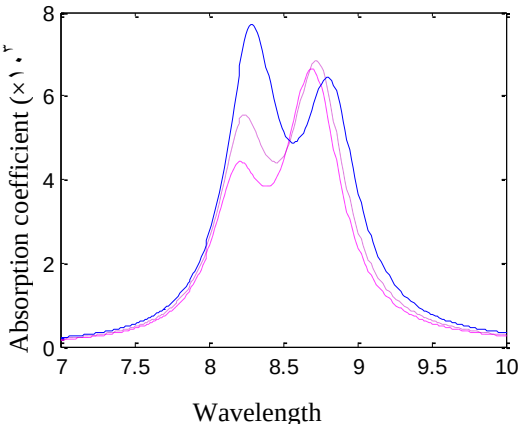
۳- نتایج محاسبات

شکل ۲ طیف جذبی ساختار در چند ولتاژ مختلف را در دمای ۸۰ کلوین نشان می‌دهد. ایجاد تشدید بین دو تراز انرژی نزدیک به هم باعث بوجود آمدن دو قله جذب روی طیف جذب آشکارساز شده است. با اعمال ولتاژ دو حالت انرژی برانگیخته در حالت تشدید جای خود را با هم عوض می‌کنند که این امر باعث تغییر در طیف جذبی با اعمال ولتاژ می‌شود.

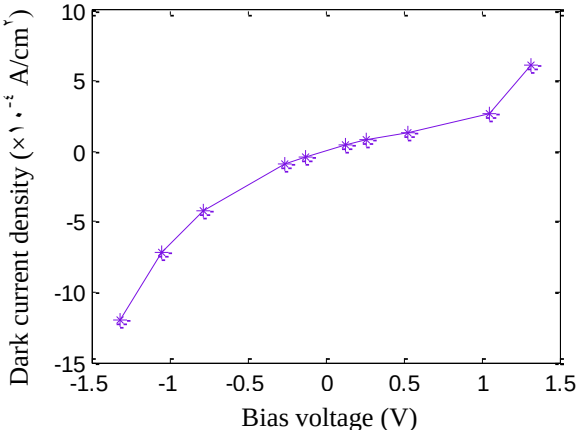
شکل ۳ چگالی جریان تاریک را بر حسب بایاس اعمالی نشان می‌دهد. عدم تقارن این مشخصه به دلیل غیر یکنواختی ساختار آشکارساز می‌باشد.

چگالی جریان نوری با محاسبه‌ی اختلاف چگالی جریان در حضور تابش و چگالی جریان تاریک بدست می‌آید. با معلوم بودن چگالی جریان نوری بر حسب توان تابشی می‌توان پاسخدهی آشکارساز را محاسبه کرد. شکل ۴ پاسخدهی را بر حسب بایاس اعمالی نشان می‌دهد که قله پاسخدهی این اشکارساز نزدیک صفر ولت است.

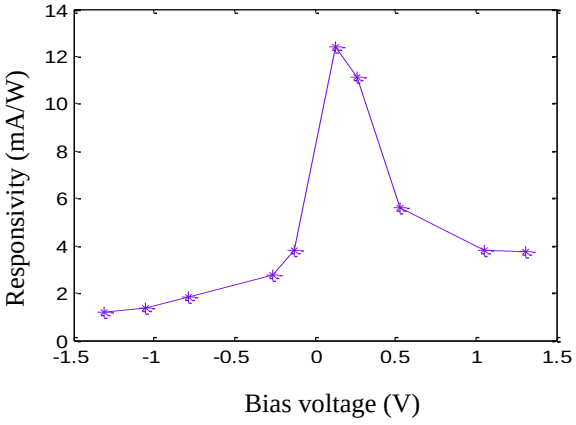
[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-04]



شکل۲: طیف جذبی ساختار در ولتاژهای ۰/۰۵ ولت (خط‌چین)، ۰/۲ ولت (نقطه‌چین) و ۰/۵ ولت (خط ممتد) در دمای ۸۰ کلوین.



شکل ۳: چگالی جریان تاریک بر حسب ولتاژ اعمالی در ۸۰ کلوین.



شکل ۴: نمودار پاسخ‌دهی بر حسب بایاس اعمالی به آشکارساز.

آشکارکنندگی آشکارساز در ۸۰ کلوین در حالتی که بایاس اعمالی صفراست $4.87\times10^{12}\,cm\sqrt{Hz}/W$ حساب شد که در حدود صد مرتبه از آشکارکنندگی آشکارسازهای کوانتومی آبشاری با ساختارهای معمولی بزرگتر است. برای محاسبه آشکارکنندگی از رابطه $D=R\sqrt{R_0A/4k_bT}$ استفاده شد که در آن R، T، R_0، A و k_b به ترتیب پاسخ‌دهی آشکارساز، دمای آشکارساز بر حسب کلوین، مقاومت آشکارساز نوری در ولتاژ صفر، سطح آشکارساز و ثابت بولتزمن هستند. R_0A با تقسیم ولتاژ بر چگالی جریان وقتی ولتاژ بایاس ۰/۱۳ ولت بود بدست آمد. زیرا در بایاس‌های اعمالی کم مشخصه جریان- ولتاژ را می‌توان خطی در نظر گرفت.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک آشکارساز کوانتومی آبشاری دارای ساختار تونل‌زنی تشدیدی بررسی شد. نتایج محاسبه‌ها نشان می‌دهند که این آشکارساز خواص آشکارسازی خیلی بهتری نسبت به هم نوع‌های خود با ساختارهای عادی دارد. بطوریکه بیشینه آشکارکنندگی این آشکارساز $4.87\times10^{12}\,cm\sqrt{Hz}/W$ محاسبه شد که حدود صد مرتبه بزرگتر از آشکارکنندگی آشکارسازهای کوانتومی آبشاری معمولی است.

مراجع

[۱] Hatefi N., Morravej Farshi M. K., *Effect of temperature on the current–voltage characteristics of GaAs/AlGaAs quantum cascade photodetectors*, **Physica E** ٥٤ (٢٠١٣) ٣٣٦_٣٤٠.

[۲] Graf M., Scalari G., Hofstetter D., Faist J., Beere H., Linfield E., Ritchie D., Davies G., *Terahertz range quantum well infrared photodetector*, **Applied Physics Letters** ٨٤ (٢٠٠٤) ٤٧٥-٤٧٧.

[۳] Giorgetta R. F., Baumann E., Graf M., and et al, *Quantum cascade detectors*, **IEEE Journal of Quantum Electronics** ٤٥ (٢٠٠٩) ١٠٣٩-١٠٥٢.

[٤] Yin J., Paiella R., *Multiple-junction quantum cascade photodetectors for thermophotovoltaic energy conversion*, **Optics Express** ٤٧ (٢٠١٠) ١٦١٨-١٦٢٩.

[٥] Harrison P.,*Quantum Wells, Wires and Dots*, ٢nd edition, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, England, ٢٠٠٥

[٦] Koeniguer C., Dubois G., Gomez A., Berger V., *Electronic transport in quantum cascade structures at equilibrium*, **Physical Review B** ٤٧ (٢٠٠٦) ٢٣٥٣٢٥.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-04]