

بیست و یکمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران و هفتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران



۲۳ تا ۲۵ دی ماه ۱۳۹۳، دانشگاه شهید بهشتی

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 $W / \overline{Hz} / W$

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 $4.87 \times 10^{12} cm \sqrt{Hz}/W$ 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

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 می شوند. یک QCP شامل چندین دوره می شود 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 مي گيرد. اختلاف انرژي بين حالت پايه و اولين حالت برانگيخته چاه كوانتومي فعال قلهي 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، ۳]. در این مقاله ابتدا مدل تئوری برای محاسبهی مشخصه جریان- ولتاژ و سپس نتایج محاسبههای انجام شده ارائه می شوند.

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 می شود [۵]:

$$\frac{-\hbar^2}{2}\frac{d}{dz}\left[\frac{d\psi(z)}{m(z)dz}\right] + V(z)\psi(z) = E\psi(z) \tag{1}$$

که (z) جرم مؤثر الکترون درون ساختار، V(z) انرژی پتانسیل الکتریکی است که یک الکترون می بیند، E ویژه مقدار انرژی و محور z عمود بر سطح چاههای کوانتومی است. برای حل معادله (۱) فرض می شود که افت ولتاژ اعمالی خارجی در درون افرازه به صورت خطی صورت می گیرد. برای حل عددی، معادله (۱) با استفاده از روش تفاضل متناهی بسط داده می شود که حل مسئله به پیدا کردن مقادیر ویژه و بردارهای ویژه منجر می شود 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.

محاسبه ی چگالی جریان می تواند با انتخاب یک صفحه ی 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 می شوند چگالی جریان الکتریکی محاسبه می شود. برای پراکندگی از یک طرف صفحه فرضی به طرف دیگر به هم پوشانی توابع موج نیاز است. بنابراین در عمل نیاز است فقط دو دوره متوالی در نظر گرفته شوند چراکه هم پوشانی بین توابع موج دوره-نظر گرفته شوند چراکه هم پوشانی بین توابع موج دوره-نام گذاری شوند در آن صورت چگالی جریان الکتریکی با رابطه زیر داده می شود [۶]:

$$J = \sum_{j} \sum_{i} n_i W_{i,j} - \sum_{j} \sum_{i} n_j W_{j,i} \tag{(1)}$$

918

که در آن
$$i \ e \ f_i$$
 به ترتیب به زیرنوارهای انرژی در دوره-
های A و B دلالت دارند. n_i چگالی الکترونها در زیرنوار i
و i, W آهنگ متوسط پراکندگی یک الکترون از زیرنوار i
به زیرنوار i میباشد. n ها از حل معادله نرخ برای چگالی
الکترونها بدست میآیند [۱]. اگر i, W 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 محاسبه میشود. با تفریق کردن جریان
نوری غالب برای پراکندگی، پراکندگی الکترونها توسط
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.
 $M_{i,j}$ مربوط به فونونهای
برای محاسبه جریان تاریک در نظر گرفته مواهد شد.
سرای مربوط به زر $f_i(E) dE$

$$\frac{1}{\tau_{i}} = \frac{\gamma}{2} \Theta \left(k_{i}^{2} - \frac{2m\Delta}{\hbar^{2}} \right) \times$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\pi \left| G_{ij} \left(K_{z} \right) \right|^{2}}{\sqrt{K_{z}^{4} + 2K_{z}^{2} \left(2K_{i}^{2} - \frac{2m\Delta}{\hbar^{2}} \right) + \left(\frac{2m\Delta}{\hbar^{2}} \right)^{2}}} \qquad (f)$$

$$\gamma = \frac{me^{2} \omega_{LO}}{2\pi^{2}\hbar^{2}} \left(\frac{1}{\varepsilon_{\infty}} - \frac{1}{\varepsilon_{s}} \right) \left(N_{O} + \frac{1}{2} \mp \frac{1}{2} \right) \qquad (\Delta)$$

$$G_{ij}\left(K_{z}\right) = \int \psi_{j}^{*}\left(z\right) e^{-iK_{z}z} \psi_{i}\left(z\right) dz \tag{9}$$

i که K_z بردار موج فونون، k_i بردار موج الکترون زیرنوار K_z و Θ تابع پلهای است. ($\chi_j^*(z)$, $\psi_i(z)$) به ترتیب توابع $\Delta = E_j - E_i \mp \hbar \omega_{Lo}$ و زیرنوار i و زیرنوار i و زیرنوار k_z و κ_z به ترتیب پارامترهای m, m, ω_{Lo} , e, \hbar , m و κ_z به ترتیب زاویهای فونونهای نوری طولی، تعداد فونونها، گذردهی راویهای فونونهای نوری طولی، تعداد فونونها، گذردهی در الکتریکی در حالت استاتیکی هستند. علامت منفی برای پراکندگی در

QCP برای محاسبه ی چگالی جریان الکتریکی وقتی که QCP در معرض تابش نور قرار می گیرد، $W_{i,j}$ شامل دو قسمت نوری و غیر نوری است که قسمت نوری با رابطه ی زیر داده می شود:

$$W_{i,j}^{optical} = \frac{\pi e^2 \omega_{\vec{k}} \eta \cos^2(\theta) \varphi_{\vec{k},\alpha}}{c \varepsilon \hbar^2} \times |\langle \phi_j(z) | z | \qquad (Y)$$

 $\phi_i(z) > |^2 \times \frac{\gamma/2\pi}{(|E_j - E_i| - \hbar\omega_k)^2 + (\gamma/2)^2}$

که \mathcal{P} ، \mathcal{P} , \mathcal{P} ,

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



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



شکل ۴: نمودار پاسخدهی بر حسب بایاس اعمالی به آشکارساز. آشکارکنندگی آشکارساز در ۸۰ کلوین در حالتی که بایاس اعمالی صفراست ۸۷/ 10¹² cm حساب شد که در حدود صد مرتبه از آشکارکنندگی آشکارسازهای کوانتومی آبشاری با ساختارهای معمولی

بزرگتر است. برای محاسبه آشکارکنندگی از رابطه
$$R_0$$
 ، T ، R_0 ، R_0 ، R_0 ، R_0 ،

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 عادی دارد. بطوریکه بیشینه آشکارکنندگی این آشکارساز مرابع بزرگتر از آشکارکنندگی آشکارسازهای کوانتومی آبشاری معمولی است.

مراجع

- [1] Hatefi N., Morravej Farshi M. K., Effect of temperature on the current-voltage characteristics of GaAs/AlGaAs quantum cascade photodetectors, Physica E ° ٤ (^Y • ^Y) ^Y^Y¹-^Y¹5 • .
- [^Υ] 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 Λ ξ (Υ··ξ) ξVo.ξVV.
- [$^{\intercal}$] Giorgetta R. F., Baumann E., Graf M., and et al, *Quantum cascade detectors*, **IEEE Journal of Quantum Electronics** $\mathfrak{t} \circ (^{\intercal} \cdot \cdot \cdot) \cdot ^{\intercal} \cdot ^{\intercal} \cdot ^{\intercal} \cdot ^{\intercal}$.
- [ξ] Yin J., Paiella R., *Multiple-junction quantum cascade photodetectors for thermophotovoltaic energy conversion*, **Optics Express** $\xi \lor (\xi \cdot 1 \cdot 1) \downarrow \exists 1 \land 1 \exists \xi \land 1$
- [°] Harrison P., Quantum Wells, Wires and Dots, ^{Ynd} edition, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, England, ^Y··°
- [$\]$ Koeniguer C., Dubois G., Gomez A., Berger V., *Electronic transport in quantum cascade structures at equilibrium*, **Physical Review B** $\stackrel{\xi \vee}{}$ ($\stackrel{\gamma}{} \cdot \cdot \stackrel{\gamma}{}$) $\stackrel{\gamma \vee \circ \gamma \vee \circ}{}$.