لیزر در پزشکی 1402/ دوره 20 / شماره (1) / صفحات 42-34

مقاله پژوهشی

بهینه‌سازی جریان نوری در آشکارساز مادون قرمز مبتنی بر نقاط کوانتومی کلوئیدی HgSe-HgTe

مهدی خداوردی‌زاده[1و2]
اصغر عسگری[1و2و3]

1 دانشکده فیزیک، دانشگاه تبریز، تبریز
2 گروه تحقیقاتی ادوات فوتونیکی، پژوهشکده فیزیک کاربردی و ستاره شناسی، دانشگاه تبریز، تبریز
3 دانشکده مهندسی برق، الکترونیک و کامپیوتر، دانشگاه استرالیای غربی، استرالیا

نویسنده مسئول : مهدی خداوردی‌زاده
پست الکترونیکی:
M.khodaverdi@tabrizu.ac.ir
شماره تماس: 09134864376

چکیده

اهداف: توسعه سریع فوتونیک مادون قرمز، تقاضا برای طراحی آشکارسازهای نوری با کارایی بالا که در این محدوده طیفی کار می‌کنند را افزایش داده است. در این میان آشکارسازهای نوری مبتنی بر نقاط کوانتومی کلوئیدی به‌علت دارابودن خواص فوق‌العاده ازجمله هزینه تولید مقرون‌به‌صرفه، قابلیت لایه نشانی بر روی لایه‌های انعطاف‌پذیر و قابلیت تغییر فاصله گاف نواری با تغییر اندازه، توجه گسترده‌ای را در کابردهایی نظیر تشخیص پزشکی غیرتهاجمی و مراقبت‌های بهداشتی به خود جلب کرده‌اند. در این آشکارسازهای مادون قرمز جریان نوری به‌طور مستقیم بر حساسیت و عملکرد افزاره تأثیر گذاشته، لذا افزایش و بهینه‌سازی آن از فاکتورهای مهم در کاربردهای پزشکی و زیستی محسوب می‌شود.

مواد و روش‌ها: در این مطالعه تاثیر تغییرات اندازه قطر و چگالی آلایش لایه نقاط کوانتومی کلوئیدی HgSe-HgTe در لایه فعال در دماهای مختلف برای بهینه‌سازی جریان نوری مورد مطالعه قرار گرفته است. برای دستیابی به مشخصه‌های آشکارسازی براساس ساختار نقاط کوانتومی کلوئیدی با حل خودسازگار معادلات شرودینگر و پواسون با روش تفاضل محدود، چگالی الکترون در هر تراز و پروفایل پتانسیل به دست آمده و جریان نوری آشکارساز برای افزاره محاسبه می‌گردد.

یافته‌ها: نتایج نشان می‌دهد که با افزایش چگالی آلایش لایه HgSe در ابتدا به دلیل افزایش حامل‌ها برای تحریک نوری، چگالی جریان نوری افزایش یافته و پس از رسیدن به نقطه بیشینه با افزایش بازترکیب حامل ها چگالی جریان نوری کاهش می‌یابد. ازسوی‌دیگر افزایش چگالی آلایش لایه HgTe می‌تواند منجربه کاهش چگالی جریان نوری گردد. چگالی جریان نوری با افزایش قطر نقاط کوانتومی HgSe بدلیل تأثیر متقابل بین محصور شدن کوانتومی، فرار حاملها، و اثرات تونل زنی افزایش یافته و بعد از رسیدن به نقطه بیشینه کاهشی شده و همچنین با افزایش قطر نقاط کوانتومی HgTe چگالی جریان نوری آشکارساز کاهش می‌یابد.

نتیجه‌گیری: به‌طورکلی بهینه‌سازی و افزایش جریان نوری در کاربردهای پزشکی و زیستی آشکارسازهای مادون قرمز موجب بهبود عملکرد، دقت و ارتقا کارایی آشکارسازهاشده و با مهندسی ساختار آشکارسازهای نوری مادون قرمز براساس نقاط کوانتومی کلوئیدی می‌توان جریان نوری را این آشکارسازها بهینه نمود.

واژه‌های کلیدی: آشکارسازهای نوری، افزاره‌های بیو – اپتوالکترونیکی، جریان نوری، نقاط کوانتومی کلوئیدی.

مقدمه

آشکارسازهای نوری[1] افزاره[2] های اپتوالکترونیکی هستند که می توانند نور تابشی را به جریان الکتریکی تبدیل کنند [1]. با توجه به طول موج آشکارسازی، آشکارسازهای نوری را می توان در آشکارسازهای اشعه X، آشکارسازهای فرابنفش[3] (UV)، آشکارسازهای نور مرئی[4] و آشکارسازهای مادون قرمز[5] (IR) دسته‌بندی کرد[2]. آشکارسازهای نوری ناحیه IR (ناحیه طول موجی 0/7 تا 14 میکرومتر)، کاربردهای مهمی در تصویربرداری[6][3]، ارتباطات[7][4]، حسگرهای زیستی[8] [5] و پیش‌بینی آب و هوا[9] [6] و ... دارند. برای آشکارسازی نور در طول موج‌های بلند و ناحیه IR از نیم‌رساناهای با گاف نواری[10] باریک به عنوان ماده فعال نوری استفاده می‌گردد [7]. از این رو مواد محدودی وجود دارند که می‌توانند برای آشکارسازی نور مادون قرمز مورد استفاده قرار گیرند و این مواد به‌طورکلی تحرک‌پذیری حامل[11] پایین و چگالی نقص[12] بالا دارند [8]. در نتیجه، آشکارسازهای نوری ناحیه مادون قرمز در مقایسه با ناحیه مرئی، قابلیت آشکار سازی[13] کمتری را نشان می‌دهند. امروزه آشکارسازهای نوری IR تجاری شده عموماً بر اساس مواد نیم‌رسانای کپه‌ای[14] با گاف نواری باریک مانند Ge، InGaAs و HgCdTe ساخته می‌شوند[9]. بااین حال، این مواد معمولاً با روش‌های پرهزینه در دمای بالا و خلاء بالا رشد می‌یابند [10و11]. ازسوی‌دیگر، به‌دلیل افزایش تقاضا برای پایش آنی[15] بدن انسان (مانند پایش ضربان قلب[16][12]، اشباع اکسیژن شریانی[17] [13] و ...) آشکارسازهای مادون قرمز انعطاف‌پذیر پوشیدنی[18] بسیار مورد توجه قرار گرفته، ولی نیم‌رساناهای کپه‌ای قابل استفاده در ناحیه IR معمولاً با افزاره‌های انعطاف‌پذیر سازگار نیستند[14] . نقاط کوانتومی کلوئیدی[19] (CQD) ازآنجاکه جذب گسترده‌ای در ناحیه IR داشته و قابلیت انعطاف‌پذیری دارند، به‌عنوان مواد امیدوارکننده، جایگزین مناسبی برای نیم‌رساناهای کپه‌ای سنتی محسوب می‌شوند [15]. علاوه‌براین، CQD ها به‌صورت محلول سنتزشده و فرآیندپذیر به‌صورت محلول هستند و به راحتی می‌توانند با مواد و ساختارهای متفاوت برای بهبود عملکرد افزاره‌های نوری ادغام شوند [16].

نقاط کوانتومی کلوئیدی HgSe و HgTe به‌دلیل دارابودن خواص منحصربه‌فرد برای ساخت آشکارسازهای نوری مادون قرمز در کاربردهای پزشکی و زیستی مورد توجه قرار گرفته‌اند [17]. این نقاط کوانتومی دارای گاف نواری باریک بوده که باعث حساس‌بودن آنها به فوتون‌های نور تابشی در ناحیه IR می‌گردد [18]. این ویژگی نقاط کوانتومی کلوئیدی HgSe قابلیت آشکارسازی طول موج‌ها را در ناحیه IR را بوجود آورده، که برای کاربردهایی مانند تصویربرداری از بافت‌ها و نمونه‌های بیولوژیکی که نور IR را ساطع یا پراکنده می‌کنند، مهم است [19]. علاوه‌براین، با تغییر اندازه نقاط کوانتومی کلوئیدی HgSe، گاف نواری آنها قابل تنظیم بوده، که این قابلیت به محققان اجازه می‌دهد تا آشکارسازی نور را برای محدوده‌های IR خاص تنظیم نموده و عملکرد آشکارسازهای نوری IR در کاربردهای پزشکی و زیستی را افزایش دهند [20]. همچنین در کاربردهای پزشکی و زیستی به‌دلیل پایداری و سازگاری عالی این نانو مواد با

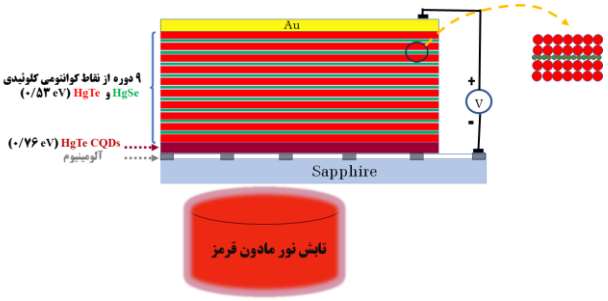
[1] Photodetectors
[2] device
[3] Ultraviolet (UV)
[4] visible
[5] Infrared (IR)
[6] imaging
[7] communications
[8] Bio-Sensors
[9] weather forecast
[10] bandgap
[11] carrier mobility
[12] defect density
[13] detectivity
[14] bulk
[15] real-time monitoring
[16] heart rate
[17] arterial oxygen saturation
[18] wearable flexible infrared photodetectors
[19] Colloidal quantum dots

سیستم‌های بیولوژیکی استفاده از آنها در دستگاه‌های تصویربرداری[1] و حسگرهای زیست سازگار[2] مناسب می‌باشد [21].

در آشکارسازهای نوری مادون قرمز، جریان نوری به‌طور مستقیم بر حساسیت[3] و عملکرد[4] افزاره تأثیر گذاشته، لذا در کاربردهای پزشکی و زیستی از فاکتورهای مهم محسوب می‌شود. در این مقاله هدف بررسی عددی و بهینه‌سازی جریان نوری در آشکارسازهای نوری مادون قرمز CQD از طریق مهندسی ساختار افزاره می‌باشد.

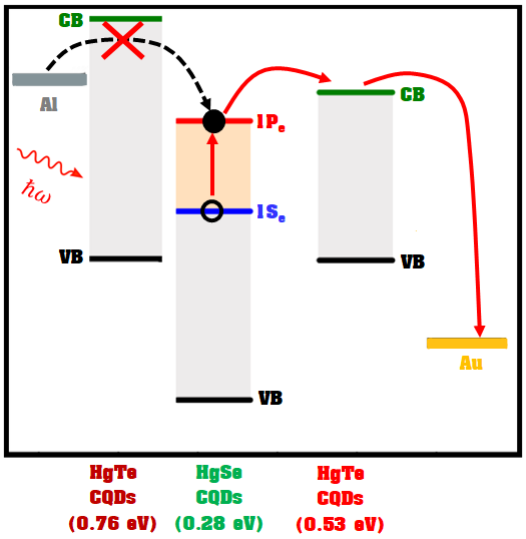
مواد و روش‌ها

برای دستیابی به مشخصه‌های آشکارسازهای نوری براساس ساختار نقاط کوانتومی کلوئیدی با لایه انتقال و مسدودساز حامل[5] فرض می‌گردد تابش نور IR توسط آشکارساز نوری نقطه کوانتومی جذب شده و جفت الکترون – حفره تولید می‌گردد. ساختار مورد مطالعه در این مقاله در شکل (1) نمایش داده شده است.



شکل 1- طرحواره ساختار آشکارساز نوری مادون قرمز مبتنی بر نقاط کوانتومی کلوئیدی

الکترود آلومینیومی مشبک[6]، که بر روی بستر یاقوت کبود (به‌دلیل شفافیت نوری بالای آن در ناحیه mid-IR) قرار گرفته است، به‌عنوان لایه زیرین آشکارساز عمل می‌کند. در این ساختار، HgTe CQD با گاف نواری(0/76 eV) به عنوان لایه مسدودکننده الکترون[7] (EBL) برای کاهش جریان تاریک عمل کرده (شکل (2))، همچنین 9 دوره از نقاط کوانتومی کلوئیدی HgSe و HgTe (0/53 eV) به‌عنوان لایه فعال آشکارساز عمل می‌کنند. برای غیرفعال‌کردن CQD ها، ابتدا فرض می‌گردد از لیگاندهای با زنجیره بلند عایق مانند اسید اولئیک[8] (OA) یا اولیلامین[9] استفاده‌شده که بعداً با لیگاندهای زنجیره کوتاه رسانا مانند 1،2-اتاندی تیول[10] (EDT) مبادله می شوند. به‌منظور دستیابی به مشخصه های آشکارسازی از حل خودسازگار[11] معادلات شرودینگر و پواسون شروع می‌گردد.



شکل 2- ساختار باند آشکار نوری در حضور تابش نور مادون قرمز معادلات شرودینگر و پواسون یک بعدی برای ساختار نقاط کوانتومی به‌صورت زیر بیان می‌گردد [22و23].

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

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

[1] imaging devices
[2] biocompatible sensors
[3] sensitivity
[4] performance
[5] carrier transport layer and carrier blocking layer
[6] grid-shaped

[7] electron blocking layer
[8] oleic acid
[9] oleylamine
[10] 1,2-ethanedithiol
[11] self-consistent

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، ε ثابت دی الکتریک ماده، ، ϕ پتانسیل الکترواستاتیک، N_D غلظت ناخالصی دهنده یونیزه‌شده و $n(z)$ تعداد الکترون در واحد حجم تراز انرژی می‌باشد. $V(z)$ و $n(z)$ به‌صورت زیر بیان می‌شوند[24].

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

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

که در آن ΔE جابجایی نوار انرژی[1]، 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 برای آنالیز ساختار افزاره استفاده می‌شود. با استفاده از نتایج بدست آمده جریان نوری محاسبه می‌گردد[25].

حامل‌ها به دو طریق تونل زنی در زیرنوار[2]ی که حضور دارند و حرکت در نوار پیوسته می‌توانند در جریان الکتریکی خروجی آشکارساز مشارکت نمایند. جریان تولید شده توسط ساز و کار اول، جریان تونل‌زنی به کمک میدان[3] $I_{Tunneling}$ نامیده می‌شود. حرکت حامل‌ها در نوار پیوسته[4] متناسب با روش تولید حامل، $I_{Thermionic}$ برای تولید حامل‌ها به روش حرارتی و I_{ph} برای تولید حامل‌ها به روش نوری نامگذاری می‌گردد[26].

چگالی جریان نوری (J_{ph}) در آشکارساز نوری CQD، زمانیکه تحت تابش نور مادون قرمز قرار می‌گیرد درنتیجه تحریک نوری در نقاط کوانتومی حاصل‌شده و به‌صورت زیر بیان می‌شود[27].

[1] energy band offset
[2] subband
[3] field-assisted tunneling
[4] continuous band

$$J_photo = evFn_0\,\gamma\hat{}M + \{eI_0\ \exp(-\alpha(i-1)\,L_w)\,(1-\exp(-\alpha L_w))\ (r_(es,v) + r_(es,th))/(r_(es,v) + r_(es,th) + r_r)\ \sum_(i=1)\hat{}M \gamma\hat{}(M-i)\} \quad (5)$$

که در رابطه (5)، γ به‌صورت زیر بیان می‌گردد:

$$\gamma = \beta_c + (1-\beta_c)\frac{r_{es,v}+r_{es,th}}{r_{es,v}+r_{es,th}+r_r} \quad (6)$$

در روابط (5) و (6)، n_0 سهم چگالی حامل از گسیلنده[5]، $(1-\beta_c)$ احتمال جذب[6]، α ضریب جذب درون باندی[7]، M تعداد تناوب نقاط کوانتومی HgSe-HgTe و I_0 شدت تابش نور مادون قرمز می‌باشد. همچنین $r_{es,v}$، $r_{es,th}$ و r_r به ترتیب نرخ فرار[8] ناشی از بایاس، نرخ فرار ناشی از دما و نرخ بازترکیب[9] می‌باشد که توسط روابط زیر بیان می‌شود[28].

$$r_{es,v}(V_b) = r_{es}(0)exp[V_b/V_{epl}] \quad (7)$$

$$r_{es,th} = (k_B T/2\pi m_e^* L_w)^{1/2} exp[-V_{epl}/k_B T] \quad (8)$$

$$r_r = 1/\tau_r \quad (9)$$

که در آن $r_{es}(0)$ نرخ گسیل الکترون تحت بایاس صفر، V_{epl} کاهش موثر سد پتانسیل[10] و τ_r طول عمر الکترون ها[11] را نشان می‌دهد.

[5] emitter
[6] capture probability
[7] intraband absorption coefficient
[8] escape rate
[9] rate of recombination
[10] effective potential barrier lowering
[11] carrier lifetime of electrons

یافته‌ها

ساختار کلی افزاره در شکل (1) نشان داده شده است. در این مقاله، با استفاده از محاسبات عددی، پارامترهای عملکردی آشکارساز نوری IR نقطه کوانتومی کلوئیدی در دماهای مختلف بررسی می‌گردد. تمرکز ما بر روی بهینه‌سازی جریان نوری افزاره با تغییر اندازه قطر نقاط کوانتومی و چگالی آلایش لایه نقاط کوانتومی HgSe-HgTe در لایه فعال در بایاس ثابت و دماهای مختلف می‌باشد. نور تابشی Mid-IR ورودی توسط ناحیه فعال افزاره جذب‌شده و حامل‌های نوری تولید می‌گردند. ناحیه فعال آشکارساز نوری شامل 9 دوره از نقاط کوانتومی کلوئیدی HgSe-HgTe می‌باشد. فرض می‌گردد که نقاط کوانتومی HgSe و HgTe شکل کروی یکنواخت دارند. جدول (1) پارامترهای شبیه‌سازی آشکارساز نوری را نشان می دهد.

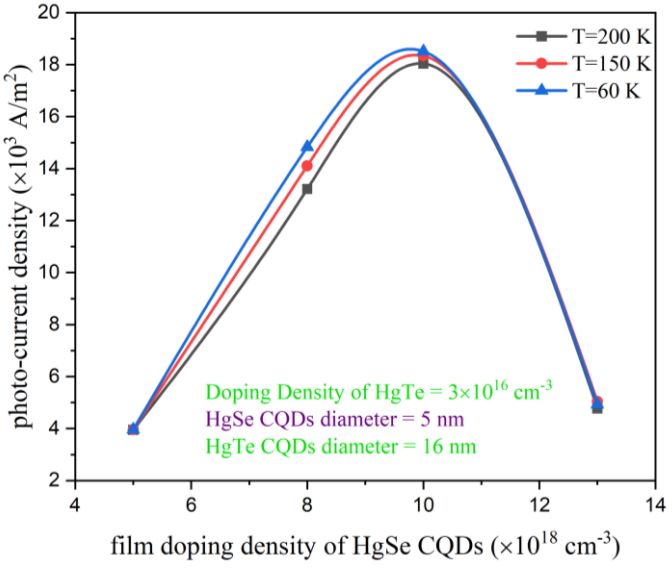
جدول 1: پارامترهای آشکارساز نوری نقطه کوانتومی کلوئیدی HgSe-HgTe

Parameter	*Value*
HgSe CQDs diameter	*3.5* to *5.5 nm*
HgTe CQDs diameter	*12* to *17.5 nm*
Film doping density of HgSe CQDs	5×10^{18} to 13×10^{18} cm^{-3}
Film doping density of HgTe CQDs	10^{15} to 10^{17} cm^{-3}
Dielectric constant of HgSe (ε_r)	16
Dielectric constant of HgTe (ε_r)	15.1
M	9
HgSe effective electron mass (m_e^*)	$0.05\ m_0$
HgTe effective electron mass (m_h^*)	$0.025\ m_0$

جرم الکترون آزاد می‌باشد. m_0

معادلات شرودینگر و پواسون به روش تفاضل محدود گسسته و به‌طور مکرر تا زمانی که یک حل خودسازگار برای چگالی الکترون در هر تراز و پروفایل پتانسیل به دست آید، حل می‌شوند، سپس جریان نوری برای افزاره محاسبه می‌گردد. برای بهبود عملکرد افزاره، به‌ویژه در آشکارسازی نور ورودی ضعیف و دستیابی به عملکرد بهتر در دماهای بالاتر جریان نوری افزاره با مهندسی ساختار آن در شرایط دمایی مختلف بهینه می‌گردد.

در مرحله اول اثر تغییر چگالی آلایش لایه[1] CQD بر روی چگالی جریان نوری آشکارساز نوری مورد بررسی قرار گرفته است. شکل (3) تغییرات چگالی جریان نوری را به‌عنوان تابعی از چگالی آلایش لایه نقاط کوانتومی HgSe در دماهای مختلف با بایاس اعمالی ثابت یک ولت، قطر نقاط کوانتومی و چگالی آلایش لایه HgTe ثابت نشان می‌دهد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد با افزایش دما چگالی جریان نوری کاهش می‌یابد، همچنین رفتار جریان نوری با افزایش چگالی آلایش لایه HgSe را می توان با در نظر گرفتن تأثیر چگالی الکترون‌ها و فرآیندهای بازترکیب[2] توضیح داد.



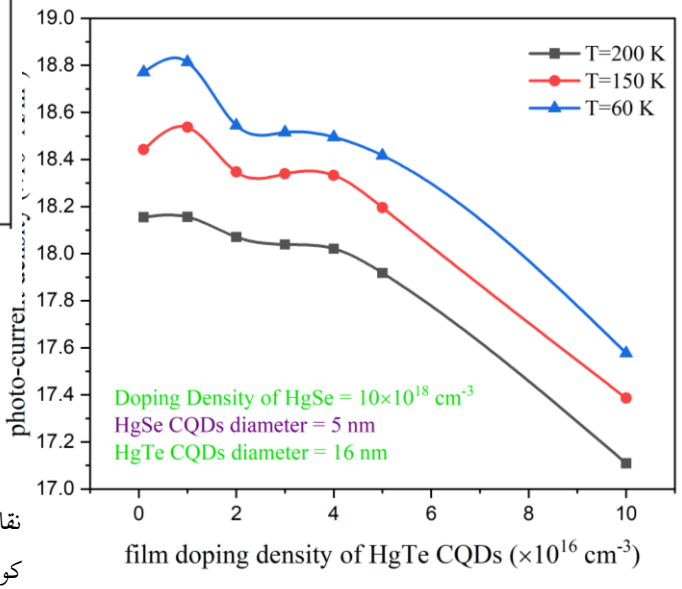
شکل 3- چگالی جریان نوری افزاره به‌صورت تابعی از چگالی آلایش لایه نقاط کوانتومی HgSe

از شکل (3) می‌توان دریافت با افزایش اولیه چگالی آلایش لایه HgSe، چگالی جریان نوری به دلیل وجود حامل‌های موجود بیشتر برای تحریک نوری افزایش می‌یابد بااین‌حال، با ادامه افزایش چگالی آلایش لایه، چگالی حامل های آزاد بیشتر می شود. این افزایش منجربه افزایش

[1] film doping density
[2] recombination

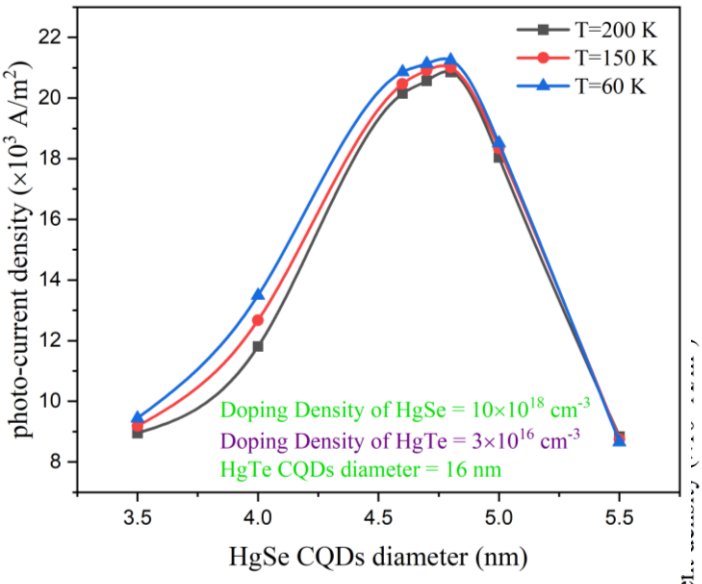
سرعت بازترکیب حامل‌ها می‌گردد. درنتیجه نرخ بازترکیب غالب‌شده که منجربه کاهش چگالی جریان نوری می‌شود. به‌همین‌دلیل است که چگالی جریان نوری درنهایت پس از رسیدن به نقطه اوج 18.51 A/m^2، در چگالی آلایش لایه HgSe، 10^{19} cm^{-3}، با ادامه روند افزایش چگالی آلایش لایه، کاهش می‌یابد.

شکل (4) تغییرات چگالی جریان نوری را به صورت تابعی از چگالی آلایش لایه نقاط کوانتومی HgTe نشان می‌دهد. در اینجا افزایش چگالی آلایش HgTe می‌تواند به‌دلایل افزایش به دام اندازی حامل‌ها، همچنین با افزایش ترکیب مجدد حامل‌ها و کاهش تعداد حامل‌های موجود برای تولید جریان نوری، منجربه کاهش چگالی جریان نوری گردد.



شکل 4- چگالی جریان نوری افزاره به‌صورت تابعی از چگالی آلایش لایه نقاط کوانتومی HgTe

در مرحله دوم اثر تغییر اندازه قطر نقاط کوانتومی کلوئیدی بر روی چگالی جریان نوری آشکارساز نوری مورد بررسی قرار گرفته است. شکل (5) تغییرات چگالی جریان نوری را به صورت تابعی از قطر نقاط کوانتومی HgSe در دماهای مختلف با بایاس اعمالی ثابت، چگالی آلایش لایه‌ها و قطر نقاط کوانتومی HgTe ثابت نشان می‌دهد. تأثیر متقابل بین محصور شدن کوانتومی[1]، فرار حامل‌ها[2]، و اثرات تونل زنی[3] با افزایش قطر نقاط کوانتومی HgSe باعث افزایش اولیه و کاهش متعاقب چگالی جریان نوری در این آشکارساز نوری می‌شود. قطر نقاط کوانتومی بهینه HgSe برای دستیابی به بیشینه چگالی جریان نوری 21.25 A/m^2، در 4.8 nm حاصل می‌گردد.



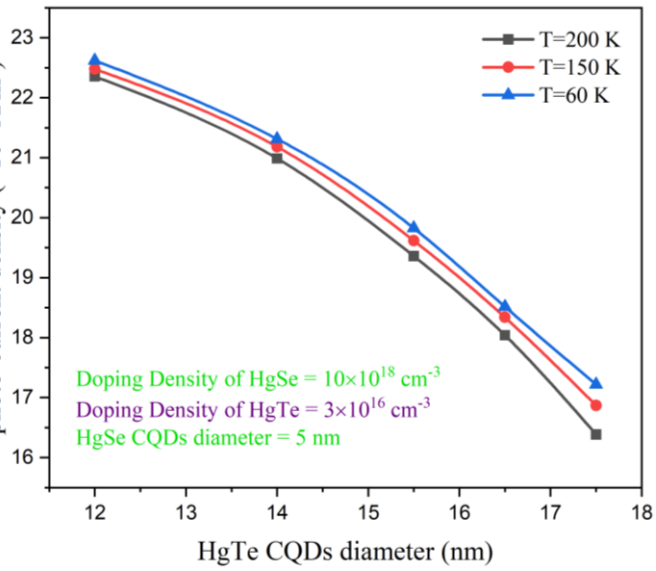
شکل 5- چگالی جریان نوری افزاره به‌صورت تابعی از قطر نقاط کوانتومی HgSe

شکل (6) تغییرات چگالی جریان نوری به صورت تابعی از قطر نقاط کوانتومی HgTe را نشان می‌دهد. در اینجا افزایش قطر نقاط کوانتومی HgTe به‌دلیل اثرات محصورشدن کوانتومی و کاهش کارایی جمع آوری حامل‌ها به کاهش چگالی جریان نوری منجرمی‌گردد.

[1] quantum confinement
[2] carrier escape
[3] tunneling effects

نتیجه‌گیری

به‌طور خلاصه، در این مقاله ساختار یک آشکارساز نوری نقطه کوانتومی کلوئیدی ناحیه مادون قرمز که شامل لایه‌های $sapphire/Al/HgTe\ CQD/9\ periods\ of\ HgSe-HgTe\ CQDs/Al$ بوده مورد مطالعه قرار گرفته و تأثیر چگالی آلایش لایه‌ها و اندازه قطر نقاط کوانتومی کلوئیدی HgSe و HgTe بر چگالی جریان نوری آشکارساز نوری تحت ولتاژ بایاس یک ولت در دماهای مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که افزایش چگالی آلایش لایه HgSe در ابتدا به دلیل افزایش حامل‌ها برای تحریک نوری، چگالی جریان نوری افزایش یافته، سپس با افزایش بازترکیب حامل‌ها کاهش یافته و چگالی جریان نوری بیشینه $18.51\ A/m^2$، در چگالی آلایش لایه HgSe، $10^{19}\ cm^{-3}$ حاصل می‌گردد. ازسوی‌دیگر افزایش چگالی آلایش لایه HgTe می‌تواند منجربه کاهش چگالی جریان نوری گردد. چگالی جریان نوری با افزایش قطر نقاط کوانتومی HgSe به‌دلیل تأثیر متقابل بین محصورشدن کوانتومی، فرار حامل‌ها، و اثرات تونل زنی افزایش‌یافته و بعد از رسیدن به نقطه بیشینه $21.25\ A/m^2$، در $4.8\ nm$، کاهش‌یافته، همچنین با افزایش قطر نقاط کوانتومی HgTe چگالی جریان نوری آشکارساز کاهش می‌یابد. بنابراین نتایج بدست آمده نشان می‌دهد با مهندسی ساختار آشکارسازهای نوری مادون قرمز براساس نقاط کوانتومی کلوئیدی می‌توان جریان نوری را در این آشکارسازها بهینه کرده و افزایش داد.



شکل 6- چگالی جریان نوری افزاره به‌صورت تابعی از قطر نقاط کوانتومی HgTe

References:

1-. J. Piprek, “Handbook of Optoelectronic Device Modeling and Simulation Lasers, Modulators, Photodetectors, Solar Cells, and Numerical Methods”, CRC Press, 2018.

2- Yao, Fang, et al. "Molecular engineering of perovskite photodetectors: recent advances in materials and devices." Molecular Systems Design & Engineering 3.5 (2018): 702-716.

3-. Tran, Huong, et al. "Si-based GeSn photodetectors toward mid-infrared imaging applications." ACS Photonics 6.11 (2019): 2807-2815.

4-. Yang, Ming, et al. "Ultrahigh stability 3D TI Bi2Se3/MoO3 thin film heterojunction infrared photodetector at optical communication waveband." Advanced Functional Materials 30.12 (2020): 1909659.

5-. Gandhi, Sahajkumar Anilkumar, et al. "Quantum dots: Application in medical science." International Journal of Nano Dimension 14.1 (2023): 29-40.

6-. Luo, Yuning, et al. "Resonant cavity-enhanced colloidal quantum-dot dual-band infrared photodetectors." Journal of Materials Chemistry C 10.21 (2022): 8218-8225.

7-. Shawkat, Mashiyat Sumaiya, et al. "Scalable van der Waals two-dimensional PtTe2 layers integrated onto silicon for efficient near-to-mid infrared photodetection." ACS applied materials & interfaces 13.13 (2021): 15542-15550.

8-. Yu, Lijing, et al. "Fast-Response Photodetector Based on Hybrid Bi2Te3/PbS Colloidal Quantum Dots." Nanomaterials 12.18 (2022): 3212.

9-. Rogalski, A., Małgorzata Kopytko, and Piotr Martyniuk. "Comparison of performance limits of HOT HgCdTe photodiodes and colloidal quantum dot infrared detectors." Infrared Technology and Applications XLVI. Vol. 11407. SPIE, 2020.

10-. Xu, Kaimin, Wenjia Zhou, and Zhijun Ning. "Integrated structure and device engineering for high performance and scalable quantum dot infrared photodetectors." Small 16.47 (2020): 2003397.

11-. Wang, Peng, Hui Xia, Qing Li, Fang Wang, Lili Zhang, Tianxin Li, Piotr Martyniuk, Antoni Rogalski, and Weida Hu."Sensing infrared photons at room temperature: from bulk materials to atomic layers." Small 15.46 (2019): 1904396.

12-. Chen, Chao, et al. "One-dimensional Sb2Se3 enabling a highly flexible photodiode for light-source-free heart rate detection." ACS Photonics 7.2 (2020): 352-360.

13-. Polat, Emre O., et al. "Flexible graphene photodetectors for wearable fitness monitoring." Science advances 5.9 (2019): eaaw7846.

14-. Dong, Tao, João Simões, and Zhaochu Yang. "Flexible photodetector based on 2D materials: processing, architectures, and applications." Advanced Materials Interfaces 7.4 (2020): 1901657.

15-. Ramiro, Iñigo, et al. "Mid-and long-wave infrared optoelectronics via intraband transitions in PbS colloidal quantum dots." Nano letters 20.2 (2020): 1003-1008.

16-. Chi, Weiguang, and Sanjay K. Banerjee. "Progress in materials development for the rapid efficiency advancement of perovskite solar cells." Small 16.28 (2020): 1907531.

17-. Ilyas, Nasir, et al. "Low-dimensional materials and state-of-the-art architectures for infrared photodetection." Sensors 18.12 (2018): 4163.

18-. Zhuge, Fuwei, et al. "Nanostructured materials and architectures for advanced infrared photodetection." Advanced Materials Technologies 2.8 (2017): 1700005.

19- Livache, Clément, et al. "Road map for nanocrystal based infrared photodetectors." Frontiers in Chemistry 6 (2018): 575.Choi, Dongsun, et al. "Mid Wavelength Infrared Electronic Transition in Self-Doped Nanocrystals and Correlation of Physical Property." Proceedings of Online nanoGe Fall Meeting 20 (OnlineNFM20). 2020.

20- Rogalski, Antoni. "Progress in quantum dot infrared photodetectors." Quantum Dot Photodetectors (2021): 1-74.

21- Aralekallu, Shambhulinga, Rajamouli Boddula, and Vijay Singh. "Development of glass-based microfluidic devices: A review on its fabrication and biologic applications." Materials & Design (2022): 111517.

22- Dubrovskiy, Sergey V., and Vasiliy I. Zubkov. "Self-consistent solution of schrodinger and poisson equations by means of numerical methods in the LabVIEW development environment." 2017 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). IEEE, 2017.

23- Hebal, H., et al. "General-purpose open-source 1D self-consistent Schrödinger-Poisson Solver: Aestimo 1D." Computational Materials Science 186 (2021): 110015.

24- Tan, I-H., et al. "A self-consistent solution of Schrödinger–Poisson equations using a nonuniform mesh." Journal of applied physics 68.8 (1990): 4071-4076.

25- Chuang, S. L. & Chuang, S. L. Physics of optoelectronic devices (1995)

26- Colbert, Adam E., et al. "Enhanced Infrared Photodiodes Based on PbS/PbCl x Core/Shell Nanocrystals." ACS Applied Materials & Interfaces 13.49 (2021): 58916-58926.

27- Billaha, Md Aref, Bhaskar Roy, and Narayan Sahoo. "Effect of external electric field on photo-responsivity of CdS/ZnSe multiple quantum well photodetector." Superlattices and Microstructures 157 (2021): 107003.

28- 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.