

بهینه‌سازی جریان نوری در آشکارساز مادون قرمز مبتنی

بر نقاط کوانتومی کلئیدی HgSe-HgTe

چکیده

مهدی خداوردی‌زاده^{1و2}اصغر عسگری^{1و2و3}

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 کلئیدی به علت دارا بودن خواص فوق‌العاده از جمله هزینه تولید مقرون‌به‌صرفه، قابلیت لایه نشانی بر روی لایه‌های انعطاف‌پذیر و قابلیت تغییر فاصله گاف نواری با تغییر اندازه، توجه گسترده‌ای را در کاربردهایی 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 کلئیدی 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 کلئیدی 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 حامل‌ها چگالی جریان نوری کاهش می‌یابد. از سوی دیگر افزایش چگالی آلایش لایه HgTe می‌تواند منجر به 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 کاهش یافته 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 آشکارسازها شده و با مهندسی ساختار آشکارسازهای نوری مادون قرمز براساس نقاط کوانتومی کلئیدی می‌توان جریان نوری را این آشکارسازها بهینه نمود.

واژه‌های کلیدی: آشکارسازهای نوری، افزاره‌های بیو - اپتوالکترونیک، جریان نوری، نقاط کوانتومی کلئیدی.

1 دانشکده فیزیک، دانشگاه تبریز، تبریز
2 گروه تحقیقاتی ادوات فوتونیک، پژوهشکده فیزیک کاربردی و ستاره‌شناسی، دانشگاه تبریز، تبریز
3 دانشکده مهندسی برق، الکترونیک و کامپیوتر، دانشگاه استرالیا غربی، استرالیا

نویسنده مسئول: مهدی خداوردی‌زاده

پست الکترونیکی:

M.khodaverdi@tabrizu.ac.ir

09134864376

شماره تماس:

مقدمه

به دلیل افزایش تقاضا برای پایش آنی¹⁵ بدن انسان (مانند پایش ضربان قلب¹⁶ [12]، اشباع اکسیژن شریانی¹⁷ [13] و ...) آشکارسازهای مادون قرمز انعطاف‌پذیر پوشیدنی¹⁸ بسیار مورد توجه قرار گرفته، ولی نیم‌رساناهای کپه‌ای قابل استفاده در ناحیه IR معمولاً با افزاره‌های انعطاف‌پذیر سازگار نیستند [14]. نقاط کوانتومی کلونیدی¹⁹ (CQD) از آنجا که جذب گسترده‌ای در ناحیه IR داشته و قابلیت انعطاف‌پذیری دارند، به عنوان مواد امیدوارکننده، جایگزین مناسبی برای نیم‌رساناهای کپه‌ای سنتی محسوب می‌شوند [15]. علاوه بر این، CQD ها به صورت محلول سنتز شده و فرآیندپذیر به صورت محلول هستند و به راحتی می‌توانند با مواد و ساختارهای متفاوت برای بهبود عملکرد افزاره‌های نوری ادغام شوند [16].

نقاط کوانتومی کلونیدی HgTe و HgSe به دلیل دارا بودن خواص منحصر به فرد 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 حساس بودن آنها به فوتون‌های نور تابشی در ناحیه IR می‌گردد [18]. این ویژگی نقاط کوانتومی کلونیدی 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]. علاوه بر این، با تغییر اندازه نقاط کوانتومی کلونیدی 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 به دلیل پایداری و سازگاری عالی این نانو مواد با

آشکارسازهای نوری¹ افزاره² های اپتوالکترونیکی هستند که می‌توانند نور تابشی را به جریان الکتریکی تبدیل کنند [1]. با توجه به طول موج آشکارسازی، آشکارسازهای نوری را می‌توان در آشکارسازهای اشعه X، آشکارسازهای فرابنفش³ (UV)، آشکارسازهای نور مرئی⁴ و آشکارسازهای مادون قرمز⁵ (IR) دسته‌بندی کرد [2]. آشکارسازهای نوری ناحیه IR (ناحیه طول موجی 0/7 تا 14 میکرومتر)، کاربردهای مهمی در تصویربرداری⁶ [3]، ارتباطات⁷ [4]، حسگرهای زیستی⁸ [5] و پیش‌بینی آب و هوا⁹ [6] و ... دارند. برای آشکارسازی نور در طول موج‌های بلند و ناحیه IR از نیم‌رساناهای با گاف نواری¹⁰ 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 به‌طور کلی تحرک‌پذیری حامل¹¹ پایین و چگالی نقص¹² بالا دارند [8]. در نتیجه، آشکارسازهای نوری ناحیه مادون قرمز در مقایسه با ناحیه مرئی، قابلیت آشکار سازی¹³ کمتری را نشان می‌دهند. امروزه آشکارسازهای نوری IR تجاری شده عموماً بر اساس مواد نیم‌رسانای کپه‌ای¹⁴ با گاف نواری باریک مانند Ge، InGaAs و HgCdTe ساخته می‌شوند [9]. با این حال، این مواد معمولاً با روش‌های پرهزینه در دمای بالا و خلاء بالا رشد می‌یابند [10 و 11]. از سوی دیگر،

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

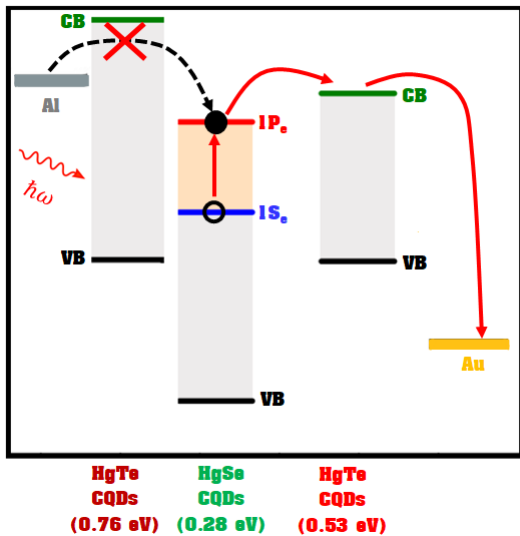
¹⁶ heart rate

¹⁷ arterial oxygen saturation

¹⁸ wearable flexible infrared photodetectors

¹⁹ Colloidal quantum dots

CQD با گاف نواری (0/76 eV) به عنوان لایه مسدودکننده الکترون⁷ (EBL) برای کاهش جریان تاریک عمل کرده (شکل (2)). همچنین 9 دوره از نقاط کوانتومی کلئیدی HgSe و HgTe (0/53 eV) به عنوان لایه فعال آشکارساز عمل می‌کنند. برای غیرفعال کردن CQD ها، ابتدا فرض می‌گردد از لیگاندهای با زنجیره بلند عایق مانند اسید اولئیک⁸ (OA) یا اولیلامین⁹ استفاده شده که بعداً با لیگاندهای زنجیره کوتاه رسانا مانند 1,2-اتانیدی تیول¹⁰ (EDT) مبادله می‌شوند. به منظور دستیابی به مشخصه های آشکارسازی از حل خودسازگار¹¹ معادلات شرویدینگر و پواسون شروع می‌گردد.



شکل 2- ساختار باند آشکار نوری در حضور تابش نور مادون قرمز معادلات شرویدینگر و پواسون یک بعدی برای ساختار نقاط کوانتومی به صورت زیر بیان می‌گردد [23و22].

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

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

⁷ electron blocking layer

⁸ oleic acid

⁹ oleylamine

¹⁰ 1,2-ethanedithiol

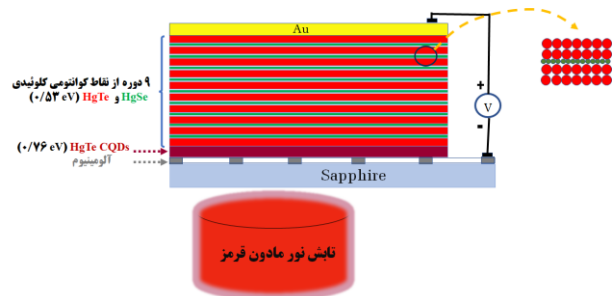
¹¹ self-consistent

سیستم‌های بیولوژیکی استفاده از آنها در دستگاه‌های تصویربرداری¹ و حسگرهای زیست سازگار² مناسب می‌باشد [21].

در آشکارسازهای نوری مادون قرمز، جریان نوری به طور مستقیم بر حساسیت³ و عملکرد⁴ 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 کلئیدی با لایه انتقال و مسدودساز حامل⁵ 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 کلئیدی

الکتروآلومینیومی مشبک⁶، که بر روی بستر یاقوت کبود (به دلیل شفافیت نوری بالای آن در ناحیه mid-IR) قرار گرفته است، به عنوان لایه زیرین آشکارساز عمل می‌کند. در این ساختار، HgTe

¹ imaging devices

² biocompatible sensors

³ sensitivity

⁴ performance

⁵ carrier transport layer and carrier blocking layer

⁶ grid-shaped

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

که در رابطه (5)، γ به صورت 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 گسیلنده⁵، M احتمال جذب⁶، α ضریب جذب درون باندی⁷، I_0 شدت تابش نور تعداد تناوب نقاط کوانتومی HgSe-HgTe و r_r به ترتیب نرخ مادون قرمز می‌باشد. همچنین $r_{es,v}$ ، $r_{es,th}$ و r_r به ترتیب نرخ فرار⁸ ناشی از بایاس، نرخ فرار ناشی از دما و نرخ بازترکیب⁹ می‌باشد که توسط روابط زیر بیان می‌شود [28].

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

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

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

که در آن $r_{es}(0)$ نرخ گسیل الکترون تحت بایاس صفر، V_{epi} کاهش موثر سد پتانسیل¹⁰ و τ_r طول عمر الکترون ها¹¹ را نشان می‌دهد.

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 یونیزه شده و $n(z)$ تعداد الکترون در واحد حجم تراز انرژی می‌باشد. $V(z)$ و $n(z)$ به صورت 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 انرژی¹، 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 زیرنوار²ی 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 تونل زنی به کمک میدان³ $I_{Tunneling}$ نامیده می‌شود. حرکت حامل‌ها در نوار پیوسته⁴ 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 در نتیجه تحریک نوری در نقاط کوانتومی حاصل شده و به صورت زیر بیان می‌شود [27].

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

¹ energy band offset

² subband

³ field-assisted tunneling

⁴ continuous band

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 کلئیدی در دماهای مختلف بررسی می‌گردد. تمرکز ما بر روی بهینه‌سازی جریان نوری افزاره با تغییر اندازه قطر نقاط کوانتومی و چگالی آلاینش لایه نقاط کوانتومی HgSe-HgTe در لایه فعال در بایاس ثابت و دماهای مختلف می‌باشد. نور تابشی Mid-IR ورودی توسط ناحیه فعال افزاره جذب شده و حامل‌های نوری تولید می‌گردند. ناحیه فعال آشکارساز نوری شامل 9 دوره از نقاط کوانتومی کلئیدی HgSe-HgTe می‌باشد. فرض می‌گردد که نقاط کوانتومی HgSe و HgTe شکل کروی یکنواخت دارند. جدول (1) پارامترهای شبیه‌سازی آشکارساز نوری را نشان می‌دهد.

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

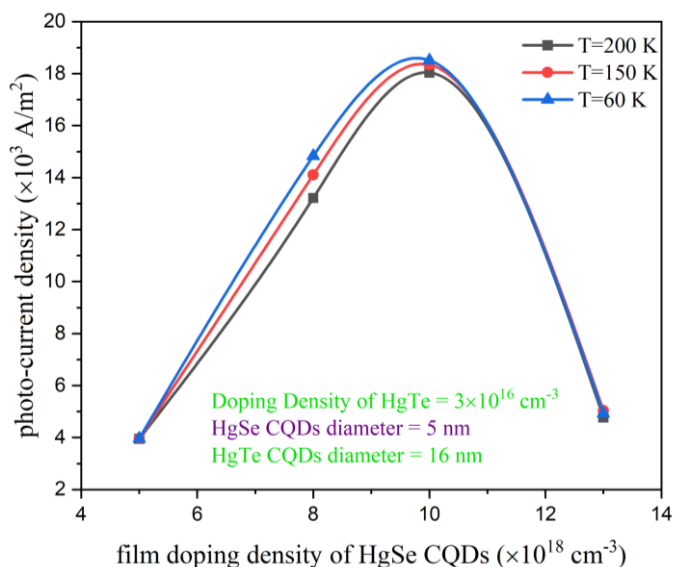
Parameter	Value
HgSe CQDs diameter	3.5 to 5.5 nm
HgTe CQDs diameter	12 to 17.5 nm
Film doping density of HgSe CQDs	5×10^{18} to $13 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
Film doping density of HgTe CQDs	10^{15} to 10^{17} cm^{-3}
Dielectric constant of HgSe (ϵ_r)	16
Dielectric constant of HgTe (ϵ_r)	15.1
M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

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 آلاینش لایه¹ CQD بر روی چگالی جریان نوری آشکارساز نوری مورد بررسی قرار گرفته است. شکل (3) تغییرات چگالی جریان نوری را به‌عنوان تابعی از چگالی آلاینش لایه نقاط کوانتومی HgSe در دماهای مختلف با بایاس اعمالی ثابت یک ولت، قطر نقاط کوانتومی و چگالی آلاینش 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 آلاینش لایه HgSe را می‌توان با در نظر گرفتن تأثیر چگالی الکترون‌ها و فرآیندهای بازترکیب² توضیح داد.



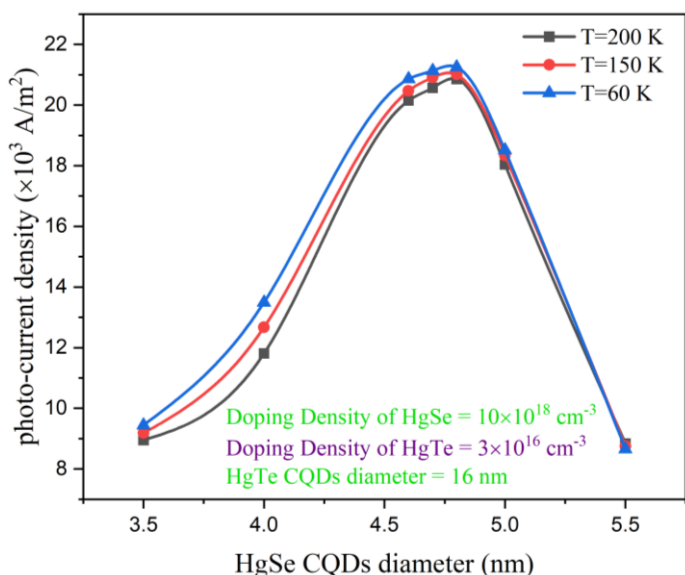
شکل 3- چگالی جریان نوری افزاره به‌صورت تابعی از چگالی آلاینش لایه نقاط کوانتومی HgSe

از شکل (3) می‌توان دریافت با افزایش اولیه چگالی آلاینش لایه HgSe، چگالی جریان نوری به دلیل وجود حامل‌های موجود بیشتر برای تحریک نوری افزایش می‌یابد با این حال، با ادامه افزایش چگالی آلاینش لایه، چگالی حامل‌های آزاد بیشتر می‌شود. این افزایش منجر به افزایش

¹ film doping density

² recombination

می‌دهد. تأثیر متقابل بین محصور شدن کوانتومی¹، فرار حامل‌ها²، و اثرات تونل زنی³ 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.

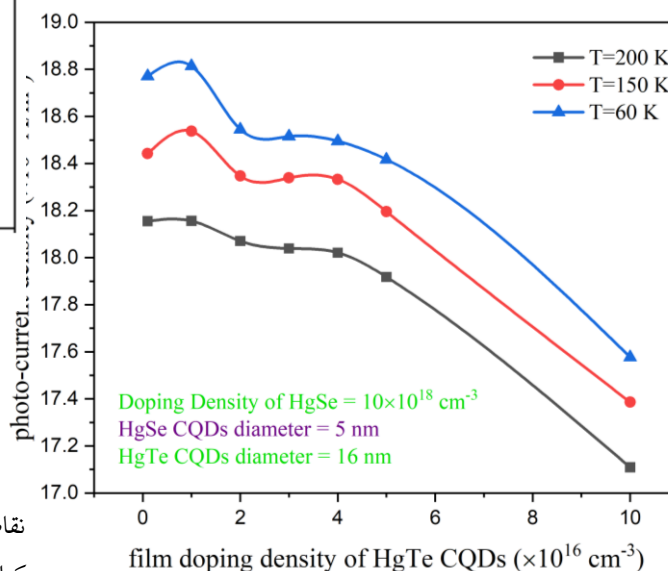


شکل 5- چگالی جریان نوری افزاره به صورت تابعی از قطر نقاط کوانتومی HgSe

شکل (6) تغییرات چگالی جریان نوری به صورت تابعی از قطر نقاط کوانتومی HgTe را نشان می‌دهد. در اینجا افزایش قطر نقاط کوانتومی HgTe به دلیل اثرات محصور شدن کوانتومی و کاهش کارایی جمع آوری حامل‌ها به کاهش چگالی جریان نوری منجر می‌گردد.

سرعت بازترکیب حامل‌ها می‌گردد. در نتیجه نرخ بازترکیب غالب شده که منجر به کاهش چگالی جریان نوری می‌شود. به همین دلیل است که چگالی جریان نوری در نهایت پس از رسیدن به نقطه اوج 18.51 A/m^2 ، در چگالی آرایش لایه HgSe 10^{19} cm^{-3} ، با ادامه روند افزایش چگالی آرایش لایه، کاهش می‌یابد.

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



شکل 4- چگالی جریان نوری افزاره به صورت تابعی از چگالی آرایش لایه نقاط کوانتومی HgTe

در مرحله دوم اثر تغییر اندازه قطر نقاط کوانتومی کلونیدی 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 آرایش لایه‌ها و قطر نقاط کوانتومی HgTe ثابت نشان

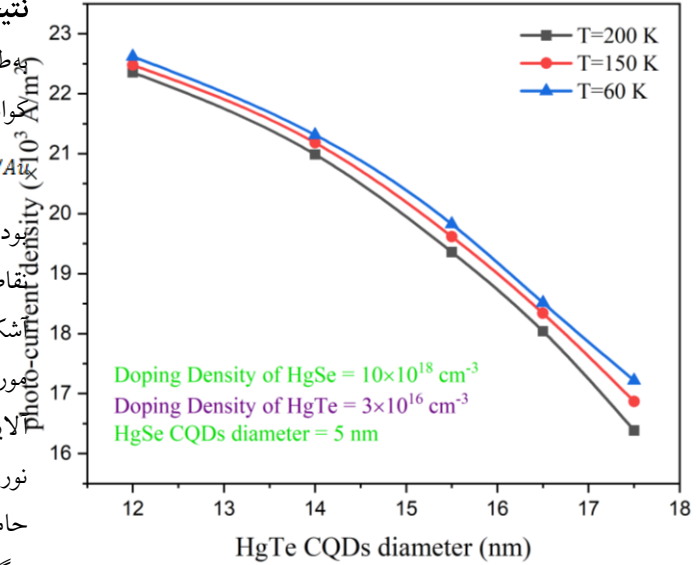
¹ quantum confinement

² carrier escape

³ tunneling effects

نتیجه‌گیری

بهبودطور خلاصه، در این مقاله ساختار یک آشکارساز نوری نقطه کوانتومی کلونیدی 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 کلونیدی 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. از سوی دیگر افزایش چگالی آلایش لایه HgTe می‌تواند منجر به کاهش چگالی جریان نوری گردد. چگالی جریان نوری با افزایش قطر نقاط کوانتومی HgSe به دلیل تأثیر متقابل بین محصورشدن کوانتومی، فرار حامل‌ها، و اثرات تونل زنی افزایش یافته و بعد از رسیدن به نقطه بیشینه $21.25 A/m^2$ در $4.8 nm$ ، کاهش یافته، 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 بر اساس نقاط کوانتومی کلونیدی می‌توان جریان نوری را در این آشکارسازها بهینه کرده و افزایش داد.



شکل 6- چگالی جریان نوری افزاره به صورت 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 Meeting20(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 Vasily 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.