مقاله پژوهشی

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

مهدی خداوردیزاده^{او2} اصغر عسگری^{او2و3}

I دانشکده فیزیک، دانشگاه تبریز، تبریز 2 گروه تحقیقانی ادوات فوتونیکی، پژوهشکده فیزیک کاربردی و ستاره شناسی، دانشگاه تبریز، تبریز 3 دانشکده مهندسی برق، الکترونیک و محسوب می شود.

مواد و روشها: در این مطالعه تاثیر تغییرات اندازه قطر و چگالی آلایش لایه نقاط کوانتومی کلونیدی -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 می گردد.

ا**هداف:** 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 انعطاف پذیر و

یافتهها: نتایج نشان میدهد که با افزایش چگالی آلایش لایه HgSe در ابتدا به دلیل افزایش حامل ها 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 کلونیدی میتوان جریان نوری را این آشکارسازها بهینه نمود.

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

نوری، چگالی جریان نوری ا نوری کاهش مییابد. ازسوی

چکیدہ

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

09134864376

شمارہ تماس:

مقدمه

آشكار سازهای نوری¹ افزاره² های ایتوالکتر و نیکی هستند که می توانند. نور تابشي را به جريان الكتريكي تبديل كنند [1]. با توجه به طول موج آشکارسازی، آشکارسازهای نوری را می توان در آشکارسازهای اشعه X، آشکارسازهای فراینفش³ (UV)، آشکارسازهای نور مرئی⁴ و آشکارسازهای مادون قر مز ⁵ (IR) دستهبندی کرد[2]. آشکارسازهای نوري ناحيه IR (ناحيه طول موجى 0/7 تـا 14 ميكرومتر)، کاربردهای مهمی در تصویربرداری⁶[3]، ارتباطات⁷[4]، حسگرهای زیستی⁸ [5] و پیش بینی 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 می گردد [7]. از این رو مواد محدودی وجود دارند که می توانند برای آشکارسازی نور مادون قرمز مورد استفاده قرار گیرند و این مواد بهطورکلی تحرک پذیری حامل¹¹ یایین و چگالی نقص¹² بالا دارند [8]. در نتیجه، آشکارسازهای نوری ناحیه مادون قرمز در مقایسه با ناحیه مرئي، قابليت آشکار سازي¹³ کمتري را نشان مي دهند. امروزه آشکارسازهای نوری IR تجاری شده عموماً بر اساس مواد نیمرسانای کیهای¹⁴ با گاف نواری باریک مانند InGaAs ،Ge و InGaAs ا ساخته مي شوند[9]. بااين حال، اين مواد معمولاً با روش هاي يرهزينه در دمای بالا و خلاء بالا رشد می یابند [10و11]. از سوی دیگر،

¹ Photodetectors

³ Ultraviolet (UV)

- ⁶ imaging
- ⁷ communications
- ⁸ Bio-Sensors
- ⁹ weather forecast
- ¹⁰ bandgap
- ¹¹ carrier mobility
- ¹² defect density
- ¹³ detectivity
- ¹⁴ bulk

بهدلیل افزایش تقاضا برای پایش آنی¹⁵ بدن انسان (مانند پایش ضربان قلب¹⁶[12]، اشرباع اکسریژن شریانی¹⁷ [13] و...) آشکارسازهای مادون قرمز انعطاف پذیر پوشیدنی¹⁸ بسیار مورد توجه قرار گرفته، ولی نیم رساناهای کپهای قابل استفاده در ناحیه IR معمولاً با افزاره های انعطاف پذیر سازگار نیستند[14] . نقاط کوانتومی کلوئیدی¹⁹ (CQD) از آنجاکه جذب گسترده ای در ناحیه IR داشته و قابلیت انعطاف پذیری دارند، بهعنوان مواد امیدوارکننده، جایگزین مناسبی برای نیم رساناهای کپهای سنتی محسوب می شوند [15]. علاوه براین، CQD ها به صورت محلول سنتز شده و فر آیند پذیر به صورت محلول هستند و به راحتی می توانند با مواد و ساختارهای متفاوت برای بهبود عملکرد افزاره های نوری ادغام شوند [16].

نقاط کوانتومی کلونیدی HgTe 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 حساس بودن آنها به فوتونهای نور تابشی در ناحیه IR می گردد [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 محققان اجازه می دهد 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

² device

⁴ visible

⁵ Infrared (IR)

¹⁵ real-time monitoring

¹⁶ heart rate

¹⁷ arterial oxygen saturation

¹⁸ wearable flexible infrared photodetectors

¹⁹ Colloidal quantum dots

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

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

> در آشکارسازهای نوری مادون قرمز، جریان نوری بهطور مستقیم بر حساسیت³ و عملکرد⁴ افزاره تأثیر گذاشته، لذا در کاربردهای پزشکی و زیستی از فاکتورهای مهم محسوب می شود. در این مقاله هدف بررسی عددی و بهینهسازی جریان نوری در آشکارسازهای نوری مادون قرمز CQD از طریق مهندسی ساختار افزاره می باشد.

مواد و روشها

برای دستیابی به مشخصههای آشکارسازهای نوری براساس ساختار نقاط کوانتومی کلوئیدی 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- طرحوارہ ساختار آشکارساز نوری مادون قرمز مبتنی بر نقاط کوانتومی کلوئیدی

الکترود آلومینیومی مشبک⁶، 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(V76 eV) به عنوان لایه مسدودکننده الکترون⁷ (EBL) برای کاهش جریان تاریک عمل کرده (شکل (2))، همچنین 9 دوره از نقاط کوانتومی کلوئیدی HgSe و HgTe (200 CQD به عنوان لایه فعال آشکارساز عمل میکنند. برای غیرفعالکردن CQD ها، ابتدا فرض می گردد از لیگاندهای با زنجیره بلند عایق مانند اسید اولئیک⁸ (OA) یا اولیلامین⁹ استفاده شده که بعداً با لیگاندهای زنجیره کوتاه رسانا مانند 2، 1-اتاندی تیول¹⁰ (EDT) مبادله می شوند. به منظور دستیابی به مشخصه های آشکارسازی از حل خودسازگار¹¹ معادلات شرودینگر و پواسون شروع می گردد.



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].

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

$$\frac{d}{dz} \left[\varepsilon(z) \frac{d}{dz} \right] \varphi(z) = -e \left(N_D(z) - n(z) \right)$$
(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 **h** ثابت کاهیده پلانک، e بار الکترون، **m** جرم موثر الکترون، **m** ویژه تابع الکترون با ویژه مقدار انرژی (*x* ، (*z*) پتانسیل، ع ثابت دی الکتریک ماده، ، **¢** پتانسیل الکترواستاتیک، N_D غلظت ناخالصی دهنده یونیزهشده و (*x*) تعداد الکترون در واحد حجم تراز انرژی میباشد. (*x*) و (*x*) بهصورت زیر بیان میشوند[24].

$$V(z) = \Delta E - e\varphi(z) \tag{3}$$

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

که در آن **∆E** جابجایی نوار انرژی¹، **k** ثابت بولتزمن، **T** دما و 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 می شود. با استفاده از نتایج بدست آمده جریان نوری محاسبه می گردد[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 تونلزنی به کمک میدان³ Tunneling نامیده میشود. حرکت حاملها در نوار پیوسته⁴ متناسب با روش تولید حامل، ابه روش برای تولید حاملها به روش حرارتی و I_{ph} برای تولید حاملها به روش نوری نامگذاری می گردد[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].

$$\begin{aligned} & \int_{-photo} = evFn_{-}0 \gamma^{\wedge}M + \{eI_{-}0 \exp(-\alpha(i - 1)L_{-}w) (1 - \exp(-\alpha L_{-}w)) (r_{-}(es, v) + r_{-}(es, th))/(r_{-}(es, v) + r_{-}(es, th) + r_{-}r_{-}) \sum_{-}(i = 1)^{\wedge}M \equiv \gamma^{\wedge}(M - i) \end{aligned}$$
(5)

A34 - C 7 A

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

در روابط (5) و (6)، n_0 سهم چگالی حامل از گسیلنده⁵، M در روابط (5) و (6)، n_0 سهم چگالی حامل از گسیلنده⁷، M حتمال جذب⁶، α ضریب جذب درون باندی⁷، I_0 احتمال کوانتومی HgSe-HgTe و I_0 شدت تابش نور مادون قرمز میباشد. همچنین $r_{es,th}$ $r_{es,v}$ به ترتیب نرخ فرار⁸ ناشی از بایاس، نرخ فرار ناشی از دما و نرخ بازترکیب⁹ میباشد که توسط روابط زیر بیان میشود[28].

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

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

 $r_r = 1/\tau_r \tag{9}$

که در آن **(0) ت**وج ترخ گسیل الکترون تحت بایاس صفر، *Vepl* که در آن ایاس صفر، *Pepl* کاهش موثر سد پتانسیل¹⁰ و *T* طول عمر الکترون ها¹¹ را نشان میدهد.

- 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

⁵ emitter

⁶ capture probability

⁷ intraband absorption coefficient

⁸ escape rate

38 | فصلنامه لیزر در پزشکی / دوره بیستم / شماره (1)

يافتهها

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 IR-MI ورودی توسط ناحیه فعال افزاره جذب شده و حاملهای نوری تولید میگردند. ناحیه فعال آشکارساز میباشد. فرض میگردد که نقاط کوانتومی کلوئیدی HgSe-HgTe شکل میباشد. فرض میگردد که نقاط کوانتومی ایک ای ای ای ای ای کروی یکنواخت دارند. جدول (1) پارامترهای شبیه سازی آشکارساز نوری را نشان می دهد.

جدول 1: پارامترهای آشکارساز نوری نقطه کوانتومی کلوئیدیHgSe-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 (\mathcal{E}_r)	16
Dielectric constant of HgTe (\mathcal{E}_r)	15.1
М	9
HgSe effective electron mass (m_e^*)	$0.05 m_0$
HgTe effective electron mass (m_b^*)	$0.025 m_0$
m (*)	

جرم الكترون ازاد ميباشد. m₀

معادلات شرودینگر و پواسون به روش تفاضل محدود گسسته و به طور مکرر تا زمانی که یک حل خودسازگار برای چگالی الکترون در هر تراز و پروفایل پتانسیل به دست آید، حل می شوند، سپس جریان نوری برای افزاره محاسبه می گردد. برای بهبود عملکرد افزاره، به ویژه در آشکارسازی نور ورودی ضعیف و دستیابی به عملکرد بهتر

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

در دماهای بالاتر جریان نوری افزاره با مهندسی ساختار آن در شرایط دمایی مختلف بهینه می گردد.

در مرحله اول اثر تغییر چگالی آلایش 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 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 بازترکیب² 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 حامل های موجود بیشتر برای تحریک نوری افزایش مییابد بااین حال، 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 حامل ها می گردد. درنتیجه نرخ بازترکیب غالب شده که منجر به کاهش چگالی جریان نوری می شود. به همین دلیل است که چگالی جریان نوری درنهایت پس از رسیدن به نقطه اوج 18.51 A/m²، در چگالی آلایش لایه کاهش می یابد.

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.





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 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/m²، در nm



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 منجرمی گردد.

¹ quantum confinement

² carrier escape

³ tunneling effects

Doping Density of HgSe = 10×10^{18} cm⁻³ Doping Density of HgTe = 3×10^{16} cm⁻³

14

15

HgTe CQDs diameter (nm)

شکل 6- چگالی جریان نوری افزاره بهصورت تابعی از قطر

نقاط كوانتومي HgTe

16

17

18

HgSe CQDs diameter = 5 nm

13

12

- T=200 K

T=150 K

T=60 K

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

نتيجەگىرى 23 مهطور خلاصه، در این مقاله ساختار یک آشکارساز نوری نقطه ⊟ مکوانتـومی کلوئیـدی ناحیـه مـادون قرمـز کـه شـامل لایـههـای 22 sapphire/Al/HgTe CQD/9 periods of HgSe – HgTe CQDs/A $\overline{k_{k_{x}}}^{\circ}$ 21 20 کے پیودہ مورد مطالعہ قرار گرفتہ و تأثیر چگالی آلایش لایہھا و اندازہ قطر ¹⁹ یفقاط کوانتومی کلوئیدی HgSe و HgTe بر چگالی جریان نوری 18 آشکارساز نوری تحت ولتاژ بایاس یک ولت در دماهای مختلف ₁₇ فصورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان میدهد که افزایش چگالی لایش لایه HgSe در ابتدا به دلیل افزایش حامل ها برای تحریک 🛱 16 -نوری، چگالی جریان نوری افزایش یافته، سپس با افزایش بازترکیب حامل ها كاهش یافته و چگالی جریان نوری بیشینه 18.51 A/m²، در چگالی آلایش لایه HgSe، ²⁰¹⁹ cm⁻³ حاصل می گردد. از سوی دیگر افزایش چگالی آلایش لایه HgTe می تواند منجربه کاهش چگالی جریان نوری گردد. چگالی جریان نوری با افزایش قطر نقاط كوانتومى HgSe بەدلىل تأثير متقابل بين محصورشدن كوانتومى، فرار حاملها، و اثرات تونل زنی افزایشیافته و بعد از رسیدن به نقطه سشينه 21.25 A/m²، در 4.8 nm، كاهش يافته، همچنين با افزايش قطر نقاط كوانتومي HgTe چگالي جريان نوري آشكارساز كاهش مییابد. بنابراین نتایج بدست آمده نشان میدهد با مهندسی ساختار آشكارسازهاي نوري مادون قرمز براساس نقاط كوانتومي كلوئيدي مي توان جريان نوري را در اين آشكارسازها بهينه كرده و افزايش داد.

مهدی خداوردیزاده | اصغر عسگری | 41

References:

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

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

- 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 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.

42 | فصلنامه لیزر در یزشکی / دوره بیست و یکم / شماره (1)

- 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/PbC1 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 photoresponsivity 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/InGaAsbased asymmetric long-wavelength QWIP." Applied Physics A 125.7 (2019): 457.