

بهینه‌سازی آشکارساز فروقرمز HgCdTe در مد فوتورسانایی در ناحیه طیفی ۲-۶ میکرومتر

شهلا محمودی، محمد صادق آخوندی و علی اصغر شکری

گروه فیزیک، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

پست الکترونیکی: ms_akhoundi@pnu.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۷/۱۳؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۹/۱۲/۰۲)

چکیده

در این مقاله روشی جدید در طراحی و مدل سازی آشکارساز فروقرمز HgCdTe ارائه شده است. در این روش پس از بررسی دقیق خواص مکانیکی، نوری، الکترونیکی نیمه رسانای HgCdTe و حل معادلات فوتورسانا، برنامه نرم افزاری معادلات نوشته می شود و پارامترهای کلیدی نظیر طول موج، ضخامت، میزان آلاش، با حدس اولیه، چرخش مقادیر آنها و تکرار چرخش و کارایی آشکارساز بهینه شده است. مدل سازی آشکارساز فوتورسانا در دمای 300K و در ناحیه طیفی ۲-۶ میکرومتر صورت گرفته و بر اساس نتایج به دست آمده بیشینه آشکارسازی ویژه آن $3 \times 10^9 \text{ cmHz}^{1/2} \text{W}^{-1}$ در طول موج ۵/۷۷ میکرومتر به دست آمده است.

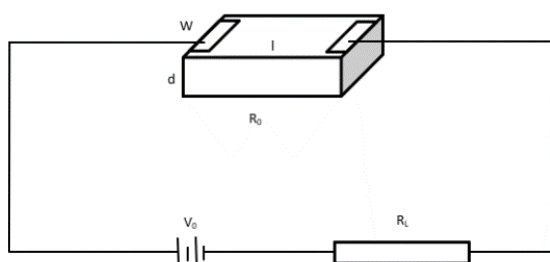
واژه‌های کلیدی: نیمه رسانای باند گپ باریک، HgCdTe، فوتورسانا، آشکارساز فروقرمز، آشکارسازی ویژه

۱. مقدمه

پاسخ دهی سریع در آشکارسازی تابش‌های IR با استفاده از نیم‌رساناهایی نظیر HgCdTe، GaAs، InSb، CdTe و دست یافتنی است. در این زمینه محققین بسیاری کارهای جدیدی را ارائه کرده‌اند که در بین آنها می‌توان به مقالات مروری کاملی نیز برخورد کرد [۱-۳]. نتایج تحقیقات جدیدی نیز از کاربرد مواد دو بعدی نظیر گرافن و سیلیسن برای آشکارسازی در ناحیه فروقرمز ارائه شده است [۴ و ۵].

در بین نیمه‌رساناهای فوق الذکر، $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ، نیم‌رسانایی با گاف متغیر است که در آشکارسازی تابش‌های فروقرمز به

از آشکارسازهای حرارتی نظیر ترموکوپل‌ها، بالومترها، و آشکارسازهای پیروالکترونیک بیشتر در دمای محیط و در محدوده وسیعی از طیف الکترومغناطیسی، از پرتوهای X تا میکروویو، مورد استفاده قرار می‌گیرند. آشکارسازهای دمای محیط سبک، محکم، قابل اطمینان و استفاده از آنها راحت است. البته، آشکارسازی آنها نسبتاً کم، خصوصاً در بسامدهای بالا، است و کاربردهای زیادی وجود دارد که ما در آنها به کارایی بالا و سرعت پاسخ دهی بسیار بالایی نیاز داریم. حساسیت بالا و



شکل ۱. طرحواره‌ای از آشکارساز نیمه‌هادی در مد فوتورسانایی.

است. در محاسبات $x=0.24$ و $T=300\text{K}$ انتخاب شده است. با این انتخاب گاف انرژی ماده در ناحیه طیفی $2-6\text{ }\mu\text{m}$ قرار می‌گیرد.

برای حل معادلات حاکم بر آشکارساز در حالت پایا به منظور محاسبه پاسخ دهی و آشکارسازی ویژه، از فرض تزریق کم استفاده شده است. از بازترکیب در سطوح جلو و عقب آشکارساز نیز صرف‌نظر شده است. برای سادگی و بدون کاستن از کلیت محاسبات، جریان به صورت یک بعدی از نمونه‌هایی با سطح مقطعی که به طور یکنواخت آلاش شده‌اند، در نظر گرفته شده‌اند.

با فرض این که تغییرات رسانایی آشکارساز، هنگامی که در معرض نور قرار می‌گیرد نسبت به رسانایی قطعه در تاریکی، کوچک است، پاسخ دهی R_V محاسبه شده است. در واقع نسبت سیگنال ولتاژ یا جریان خروجی به توان سیگنال ورودی برابر پاسخ دهی است. واحد آن، وات/آمپر یا وات/ولت است [۱، ۳ و ۵]. پاسخ دهی جریان به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$R_V = \frac{V_S}{P_\lambda} = \frac{\eta \lambda \tau V(b+l)}{l w d h c n_i \left(z + \frac{b}{Z} \right)}, \quad (2)$$

در این رابطه η بهره کوانتومی، λ طول موج بر حسب سانتی متر، τ طول عمر حامل‌ها بر حسب ثانیه، V ولتاژ اعمالی بر حسب ولت، l و w و d به ترتیب طول و پهنا و ضخامت قطعه بر حسب سانتی متر، h ثابت پلانک بر حسب الکترون ولت ثانیه، C سرعت نور بر حسب سانتی متر بر ثانیه، $Z = \frac{PO}{ni}$ که در آن P_0 و n_i به ترتیب تراکم حفره‌ها در باند ظرفیت و تراکم

صورت گسترده ایی مورد استفاده قرار می‌گیرد. از مهم‌ترین مزایای این ماده می‌توان به گاف انرژی مستقیم، توانایی در ایجاد تراکم حامل‌های کم و بسیار زیاد، دارا بودن تحرک الکترونی بالا و ضریب دی الکتریک کوچک آن اشاره کرد. از نیم‌رساناها در مدهای فوتولتایی PV و فوتورسانایی PC برای آشکارسازی استفاده می‌شود. آشکارسازهای فوتورسانا، شاخه مهمی از آشکارسازهای فوتونی را تشکیل می‌دهند که بر اساس مفهوم تغییر در رسانایی فوتورسانا در اثر جذب فوتونهای تابشی و تولید زوج الکترون - حفره کار می‌کنند [۶ و ۷]. کارایی آشکارسازهای PC در دماهای بالا، در اثر فرایندهای بازترکیبی از قبیل فرایند تولید بازترکیب شکلی رید هال و تونل زنی باند به باند محدود می‌شود. این فرایندها باعث افزایش جریان تاریکی و در نتیجه کاهش عملکرد فوتورسانا می‌شود [۸-۱۱]. یکی از روش‌های مناسب برای کاهش هزینه‌های طراحی و ساخت آشکارسازها، دستیابی به مدل‌هایی برای شبیه سازی و بهینه سازی آنها است تا قبل از هزینه کردن جهت ساخت آنها بتوان از کارایی آشکارساز مورد نظر مطمئن شد. در این مقاله روشی برای طراحی و بهینه سازی آشکارساز نوررسانا، مبتنی بر نیم‌رسانای $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ارائه شده است.

۲. نظریه فوتورسانا: بحث و بررسی

در واقع، آشکارساز فوتورسانا یک مقاومت حساس به تشعشع است. عملکرد یک رسانای نوری در شکل ۱ نشان داده شده است.

در خلال تابش IR روی قطعه pc، یک فوتون با انرژی بزرگ‌تر از شکاف باند ممنوع E_g ، در ماده جذب شده و زوج الکترون - حفره تولید می‌شود و در نتیجه حامل‌های تولیدی در مدار قطعه قرار گرفته و تبدیل به سیگنال خروجی می‌شوند [۷ و ۸].

انرژی باند گپ $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ با توجه به مقدار مولاریته (x) آن متغیر است که از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۴]:

$$E_g = -0.313 + 1.914x - 0.654x^2 + \left(0.1759x + \left(0.5 - 1.3/92x + 0.14x^2 \right) \right)^{-6} T, \quad (1)$$

در رابطه بالا x مقدار استیکومتری و T دما بر حسب کلین

$$V_{g-r} = \frac{rV(1+b)(\tau\Delta f)^{1/r}}{(lwdn_i)^{1/r} \left(\frac{b}{z} + z\right) \left(\frac{1}{z} + z\right)^{1/r}}, \quad (6)$$

همچنین نوفه کل از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$V_n = \sqrt{(V_{g-r})^2 + (V_j)^2}, \quad (7)$$

در ادامه به بررسی نحوه تاثیر تغییر پارامترهایی نظیر ضخامت و ناخالصی بر روی آشکارسازی ویژه می‌پردازیم.

در شکل ۲. الف منحنی آشکارسازی ویژه بر حسب طول موج فرودی رسم شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود منحنی یک بیشینه را نشان می‌دهد که طول موج متناظر با آن، به طول موج متناظر با گاف انرژی نزدیک است. در شکل ۲. ب منحنی آشکارسازی ویژه بر حسب آلایش Z آورده شده است. همان گونه که از شکل مشاهده می‌شود، با افزایش ناخالصی (آلایش)، ابتدا آشکارسازی ویژه افزایش می‌یابد تا به یک بیشینه برسد و با افزایش بیشتر دوباره کاهش می‌یابد. این رفتار متأثر از وابستگی طول عمر حامل‌ها به ناخالصی است. در شکل ۲. ج منحنی آشکارسازی ویژه بر حسب ضخامت آورده شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود با افزایش ضخامت، آشکارسازی ویژه افزایش می‌یابد و در ضخامت‌های بالاتر مقدار آن اشباع می‌شود؛ یعنی با افزایش بیشتر ضخامت آشکارسازی ویژه تغییرات چندانی نخواهد داشت. این رفتار منبعث از وابستگی بهره کوانتومی به ضخامت آشکارساز است.

در شکل ۳ منحنی آشکارسازی ویژه بر حسب طول موج برای ضخامت‌های ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ میکرومتر آورده شده است. با توجه به شکل مشاهده می‌شود با افزایش ضخامت، مقدار طول موج متناظر با بیشینه پاسخ دهی به سمت طول موج‌های بزرگ‌تر جابه‌جایی شود و در ضمن مقدار آن نیز افزایش می‌یابد. شکل ۴ تغییرات آشکارسازی ویژه بر حسب مقدار آلایش (Z) به ازای ولتاژهای اعمالی مختلف در دمای ۳۰۰ کلوین و $x = 0.24$ و ضخامت ۲۰ میکرومتر را نشان می‌دهد. در MCT، در ولتاژهای کم نوفه حرارتی بر نوفه تولید-باز ترکیب غالب می‌شود ولی در ولتاژهای بالا عکس این مسئله رخ می‌دهد. چون نوفه تولید باز ترکیب صریحاً به ولتاژ اعمالی

ذاتی بر حسب $\frac{\mu_n}{\mu_p} \cdot \text{cm}^{-3}$ که در آن μ_p و μ_n به ترتیب تحریک‌پذیری الکترون‌ها و حفره‌ها بر حسب $m^2/V.S$ هستند. رابطه (۲) به وضوح نشان می‌دهد که برای دستیابی به یک پاسخ دهی بالا در یک طول موج مشخص λ ، نیاز به بازدهی کوانتومی η بالا، طول عمر τ بزرگ برای حامل‌های اضافی، طول نمونه کوچک‌تر، تراکم ذاتی کوچک‌تر و ولتاژ اعمالی بزرگ‌تر است.

آشکارسازی ویژه، پارامتر دیگری که به آن پرداخته شده است. این پارامتر در واقع، مهم‌ترین پارامتر تعیین‌کننده کارایی یک آشکارساز است که با استفاده از آن می‌توان به مقایسه کارایی دو آشکارساز تحت شرایط استاندارد پرداخت که از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱، ۲، ۴ و ۵].

$$A D^* = \frac{R_V (\Delta f)^{1/r}}{V_n}, \quad (3)$$

سطح مقطع در معرض تابش آشکارساز بر حسب $\Delta f, \text{cm}^2$ عرض پهنای باند، و V_n ولتاژ ایجاد شده توسط نوفه است. نوفه یکی از عواملی است که کارایی آشکارساز را محدود می‌کند، بنابراین درک صحیح از منابع نوفه در طراحی و بهینه‌سازی آن از اهمیت زیادی برخوردار است.

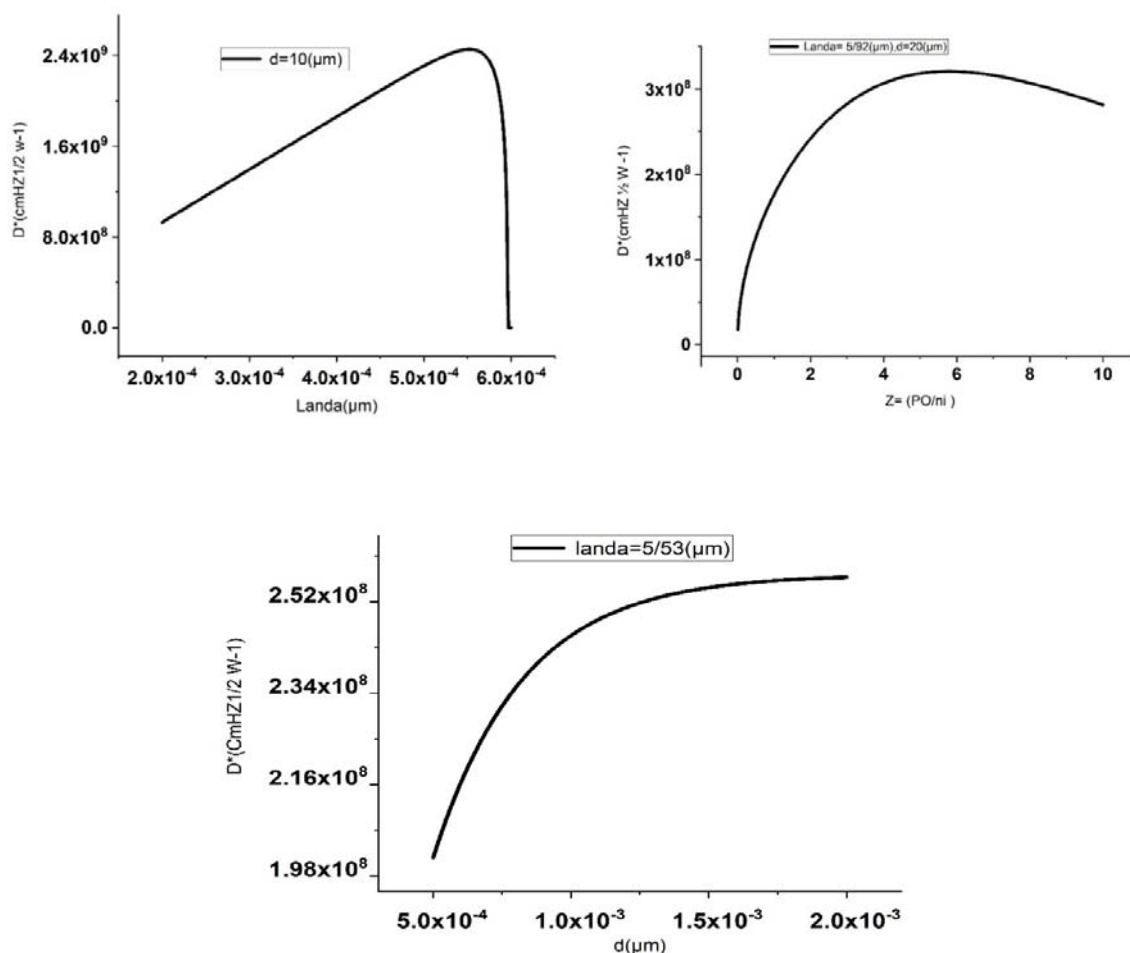
$$V_j = (r K T R \Delta f)^{1/r}, \quad (4)$$

که در آن R مقاومت قطعه است که از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$R = \frac{lZ}{qn_i\mu_n wd(1+b)}, \quad (5)$$

T دمای محیط بر حسب کلوین و V_j ولتاژ نوفه جانسون بر حسب ولت است [۶ و ۹].

تغییرات جزئی در ولتاژ یا جریان در پایانه‌های آشکارساز، ناشی از رسیدن کتره‌ای حامل‌های بار آزاد به آنهاست. نوفه تولید-باز ترکیب، از تولید کتره‌ای حامل‌های بار آزاد توسط نوسانات بلور، و سپس بازترکیب کتره‌ایی آنها ناشی می‌شود. در نیم‌رسانای MCT نوفه تولید-باز ترکیب بر حسب ولت از رابطه زیر به دست می‌آید [۹]:



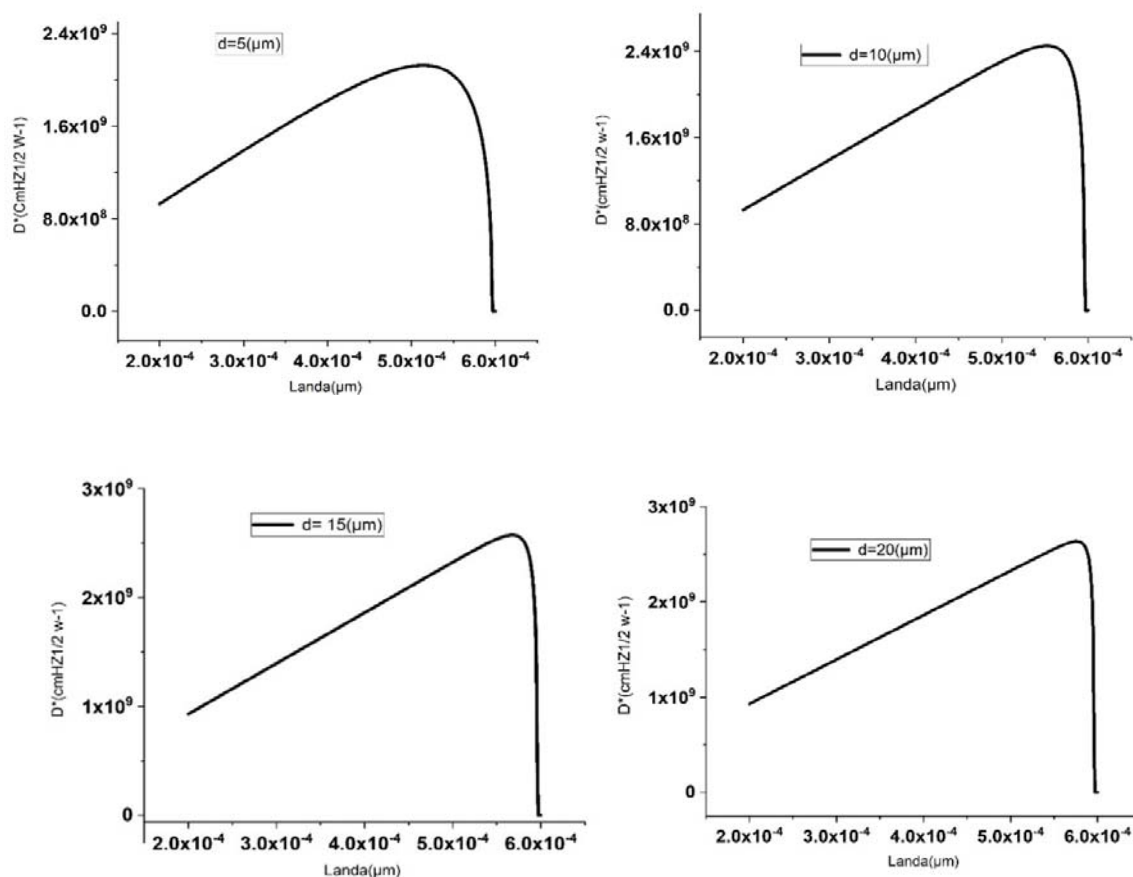
شکل ۲. آشکارسازی ویژه محاسبه شده (الف) بر حسب طول موج فرودی، (ب) بر حسب ناخالصی (آلایش Z) و (ج) بر حسب ضخامت. در ترسیم شکل‌ها مقدار $x = 0.24$ و ولتاژ اعمالی ۱۵ ولت در نظر گرفته شده است.

۳. بهینه سازی آشکارساز

همان گونه که در شکل‌های ۲ و ۳ مشخص شد، آشکارسازی ویژه به پارامترهای مختلفی بستگی دارد. این پارامترها بر روی یکدیگر تأثیرات متقابلی داشته و به تبع آن روی آشکارسازی ویژه اثر می‌گذارد. لذا برای این که بتوان پارامترهای مختلفی را همزمان برای بهینه سازی آشکارسازی ویژه در نظر گرفت، نیاز به انتخاب روشی مناسب است. در این مقاله روشی مبتنی بر حدس، چرخش پارامترها و بیشینه کردن آشکارسازی ویژه

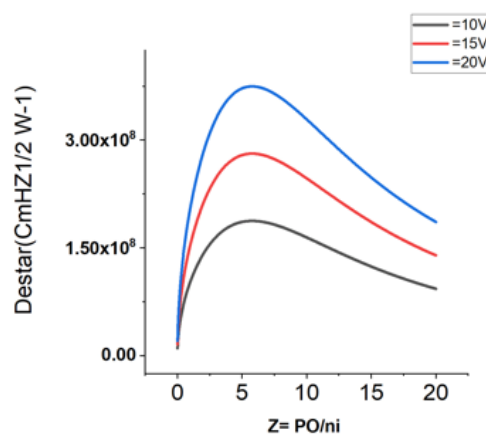
وابسته است می‌توان با انتخاب مناسب ولتاژ اعمالی و میزان آلایش، شرایط را به گونه‌ای تنظیم کرد که نوفه تولید-باز ترکیب در دمای اتاق غالب شود. در ضمن با استناد به این نمودار می‌توان نتیجه گرفت که تغییر در مقدار ولتاژ اعمالی به آشکارساز سبب تغییر مقدار Z متناظر با بیشینه آشکارسازی نمی‌شود [۶ و ۹].

حال که رفتار آشکارسازی ویژه بر حسب پارامترهای مختلف مشخص شد در ادامه به توضیح روش بهینه سازی پرداخته می‌شود.



شکل ۳. تغییرات آشکارسازی ویژه نسبت به طول موج برای HgCdTe در دمای ۳۰۰ کلوین و مقدار $x = 0.24$ و ولتاژ اعمالی ۱۵ ولت در ضخامت‌های ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ میکرومتر.

اتخاذ شده است. ما سعی کرده‌ایم که آشکارساز را نسبت به متغیرهای طول موج تابش فرودی λ ، ضخامت آشکارساز d و آلایش Z بهینه کنیم. برای به دست آوردن آشکارسازی ویژه بهینه، از روش چرخشی متغیرها استفاده شده است، بدین گونه که مطابق جدول ۱ ابتدا طول موج فوتون فرودی متغیر، در حالی که ضخامت قطعه و مقدار آلایش Z ثابت در نظر گرفته شده‌اند و به این ترتیب نمودار آشکارسازی ویژه بر حسب طول موج رسم شده است. مقادیر ثابت در نظر گرفته شده در واقع مقادیر حدسی هستند. شناخت رفتاری پارامترها در آشکارسازی ویژه که در قسمت قبل به آن پرداخته شد، کمک می‌کند تا برای بهینه سازی بتوان حدس‌های دقیق‌تری را در نظر گرفت.



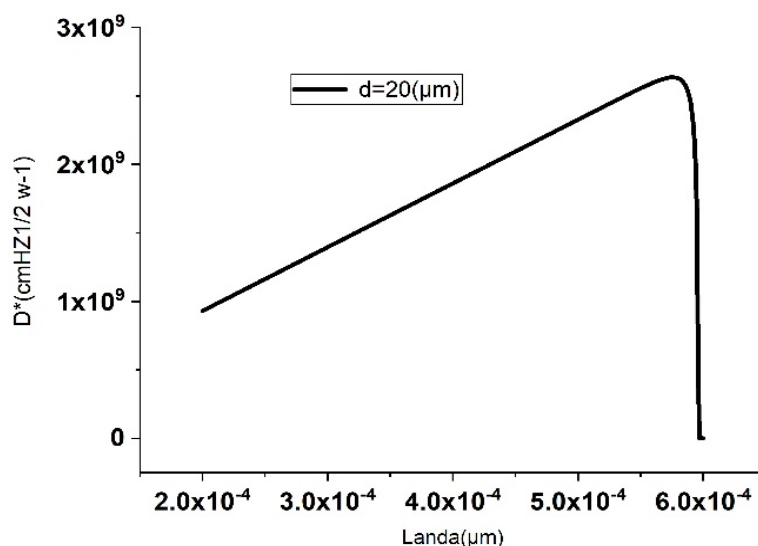
شکل ۴. منحنی آشکارسازی ویژه بر حسب تراکم ناخالصی (آلایش Z) به ازای ولتاژهای ۱۰، ۱۵ و ۲۰ ولت.

جدول ۱. طرحی از چرخه فرایند بهینه سازی.

λ	Z	D
متغیر	ثابت	ثابت
λ_{Peak}	متغیر	ثابت
λ_{Peak}	Z Peak	متغیر
λ_{Peak}	Z Peak	t Peak

جدول ۲. مقادیر به دست آمده در یکی از چرخه‌ها.

$\lambda(\mu m)$	Z	d (μm)
۵/۷۷	۵/۸	۱۰
۵/۷۷	۵/۸	۱۰
۵/۷۷	۵/۸	۲۰
۵/۷۷	۵/۸	۲۰



شکل ۵. نمودار آشکارسازی نمونه بهینه شده در دمای ۳۰۰ کلوین.

لازم به ذکر است که به متغیرهای چرخه می‌توان ولتاژ اعمالی، طول آشکارساز و مقدار مولی x یا هر متغیر دیگر را اضافه کرد. در این صورت به احتمال زیاد، تعداد تکرار چرخه برای رسیدن به مقادیر بهینه، تغییر خواهد یافت (جدول ۲).

در شکل ۵ منحنی آشکارسازی ویژه نمونه با ضخامت و آلایش بهینه ترسیم شده است. همان گونه که از منحنی مشاهده می‌شود این آشکارساز می‌تواند در ناحیه طیفی ۲-۶ میکرومتر، کارایی مناسبی را در دمای محیط داشته باشد که بیشینه آشکارسازی آن به ازای ولتاژ اعمالی ۱۵ ولت تقریباً برابر با $3 \times 10^9 \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$ به دست می‌آید که مقدار قابل قبولی برای یک آشکارساز دمای محیط است.

در مرحله بعد مقدار طول موجی که به ازای آن آشکارسازی ویژه بیشینه شده است، جزء پارامترهای ثابت، و آلایش Z متغیر گرفته می‌شود و منحنی تغییرات آشکارسازی ویژه، نسبت به آن ترسیم می‌شود. مجدداً مقدار Z که در آن آشکارسازی ویژه بیشینه شده است به عنوان ورودی ثابت چرخه بعدی مشخص می‌شود. اولین دور چرخه وقتی تمام می‌شود که یک دور تمام پارامترها متغیر گرفته شوند، این چرخه بارها تکرار می‌شود تا اختلاف هر متغیر با حالت قبل به اندازه ۰/۰۱ شود، به این ترتیب مقادیر بهینه استخراج می‌شوند. در این مقاله با توجه به حدس مناسبی که برای پارامترهای ثابت اولیه زده شده است، پس از سه بار تکرار چرخه، مقدار بهینه آلایش Z و ضخامت به ترتیب برابر ۵/۸ و ۲۰ میکرومتر به دست آمده‌اند.

۴. نتیجه گیری

هدف ما بهینه سازی آشکارساز فروقرمز HgCdTe در مد فوتورسانایی در دمای ۳۰۰K در ناحیه طیفی ۲-۶ میکرومتر است. نیم رسانای HgCdTe به طور گسترده ای به خاطر عملکرد بالا با توجه به خواص نوری و خواص مطلوب آن در رنج طول موج های کوتاه SWIR و بلند VLWIR در طیف فروقرمز به کار می رود. این آشکارساز تحرک بسیار بالایی نسبت به دیگر

ترکیبات گروه III-VI دارد. با توجه به محاسبات صورت گرفته برای این که یک آشکارساز HgCdTe با $x=0.24$ بتواند در ناحیه طیفی ۲-۶ μm در دمای محیط کارایی خوبی داشته باشد بایستی ضخامت آن را ۲۰ μm ، ولتاژ اعمالی ۱۵V و مقدار آلایش آن را ۵/۸ انتخاب کرد؛ که بیشینه آشکارسازی ویژه آن $3 \times 10^9 \text{ cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ به دست می آید.

مراجع

1. M Strojnik, et al., *Applied Optics* **59**, 17 (2020) AIT1.
2. A Rogalski, et al., *Applied Sciences* **11**, 2 (2021) 501.
3. A Rogalski, et al., *Opto-Electronics Review* (2020) 107.
4. M Masoudi, et al., *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures* **124** (2020) 114324.
5. Z Abbasi Azad, et al., *Materials Chemistry and Physics* **257** (2021) 123483.
6. Ch Junhao and Sh Arden, " *Device Physics of Narrow Gap Semiconductors*", Springer Science & Business Media (2009) 341.
7. H Koser, "Numerical modeling and optimization of modeling of HgCdTe infrared photodetector for thermal imaging".degree of Doctor of Philosophy, Electrical and Electronics Engineering Department, Middle East Technical University (2011).
8. M Anne Itsuno, " *Bandgap -Engineered HgCdTe Infrared Detector Structures for Reduced Cooling Requirements*". degree of Doctor of Philosophy, Electrical Engineering, University of Michigan (2012)
9. م ح آخوندی، رساله دکتری، دانشکده فیزیک، دانشگاه تبریز (۱۳۸۲).
۱۰. ب ج استریمین و همکاران، "فیزیک الکترونیک"، انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران (۲۰۰۶).
11. P Martyniuk and W Gawron, *Journal of electronic material* **42**, 11 (2013) 3309.