مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها/ سال ۱۳۹۴/ دوره ۵/ شماره ۳/ صفحه ۱۵۱-۱۶۳

مجله علمی پژوهشی مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها

دانشگاه شاهرود

بررسی اثر به‌کارگیری SiO_2/Al در بالا بردن حساسیت آشکارسازهای مادون‌قرمز بر پایه میکروکانتیلیور و مقایسه آن با Si_3N_4/Au

حسن عبداللهی[۱] ، فاطمه سمائی‌فر [۲] و افسانه حق‌نگهدار [۳]

[۱] استادیار برق-الکترونیک، دانشکده برق، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری

[۲] دانشجوی دکتری برق- الکترونیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

[۳] کارشناس ارشد برق– الکترونیک، دانش آموخته دانشگاه علم و صنعت ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۲/۲۶؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۴/۰۲/۲۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۴/۲۰

چکیده

در این مقاله، آشکارساز مادون‌قرمز میکروکانتیلیور با حساسیت بالا و بدون نیاز به خنک ساز، طراحی و شبیه‌سازی شده است. این آشکارساز شامل، ناحیه جاذب، نواحی دو ماده‌ای و ایزوله و ستون‌های نگه‌دارنده است. ساختار آن معلق و به صورت دو لایه‌ای از جنس دی اکسید سیلیکون (SiO_2) به ضخامت ۱μm و آلومینیوم (Al) به ضخامت ۲۰۰nm است. در این آشکارساز، میزان جذب IR و میزان خمش با طراحی ناحیه جاذب به صورت دو ماده‌ای افزایش یافته است. میزان جذب IR با آیینه شدن امواج مادون‌قرمز توسط لایه فلزی افزایش و میزان خمش با امتداد ناحیه دو ماده‌ای تا انتهای ناحیه جاذب بیشتر شده است. برای شبیه‌سازی رفتار حرارتی و مکانیکی، از روش آنالیز اجزاء محدود استفاده شده است. اندازه تغییر دما و تغییر جابجایی در نوک آشکارساز (دورترین نقطه نسبت به پایه‌ها) به ترتیب، $\Delta T=3/651^{\circ}C$ و $\Delta Z=940nm$ شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی با اعمال شرایط مرزی به ازای شار حرارتی ثابت $100pW/\mu m^2$ روی ناحیه جاذب می‌باشند. در این آشکارساز، ضریب انتقال دما، حساسیت ترمومکانیکی، حساسیت توانی، حساسیت دمایی، حساسیت جابجایی و حساسیت به دمای جسم به ترتیب، $9/7\times10^{-3}$، $0/284\ nm/K$، $667/2\ mW^{-1}$، $32/8\ mK/(pW.\mu m^{-2})$، $9/34\ nm/(pW.\mu m^{-2})$ و $2/75\ nm/K$ محاسبه شدند. این پارامترها نسبت به آشکارساز مشابه از جنس Si_3N_4/Au به ترتیب، ۱۶، ۴۱، ۱۷، ۴۱، ۴۱ و ۲/۳۸ برابر بهبود یافته است.

کلمات کلیدی: میکرو ماشین‌کاری؛ آشکارساز مادون‌قرمز فاقد خنک ساز؛ آشکارساز حرارتی؛ میکروکانتیلیور

Effect of SiO_2/Al to increase microcantilever infrared detectors sensitivity and compare with Si_3N_4/Au

H. Abdollahi[1] , F. Samaeifar [2] and A. haghnegahdar [3]

[1] Assist. Prof., Department of Elec Eng, Shahid Sattari Aeronautical University of Science and Technology, Tehran, Iran

[2] Ph.D. Student, Department of Elec Eng, MUT University, Tehran, Iran

[3] Master of Elec Eng, graduated from IUST, Tehran, Iran

Abstract

In this paper, a high sensitive uncooled microcantilever infrared detector is designed and simulated. The detector consists of absorbing, bi-material and isolator regions, and has two layers suspended structure made of Silicon dioxide (SiO_2) and Aluminum (Al) with a 1μm and 200nm thickness, respectively. Absorbing was increased by reflecting IR flux in absorber layer by coting Al under it, and bending of detector was increased by elongating bi-layer legs in absorber layer. Finite element analysis method was used to simulate thermal and mechanical behaviors. Temperature and displacement changes at the end of tip detector (farthest point from the support leg) were 3.651°C and 940nm, correspondingly, at the $100pW/\mu m^2$ boundary conditions for constant heat flux on the absorber. In this detector, the calculated heat transfer coefficient, power, temperature, body temperature, displacement and thermo-mechanical sensitivity are 9.7×10^{-3}, $667.2mW^{-1}$, $32.8K/(pW.\mu m^{-2})$, 2.75nm/K, $9.34nm/(pW.\mu m^{-2})$ and 284nm/K, respectively. Those parameters are improved 16, 41, 17, 41, 41 and 2.38 times compared to the same Si_3N_4/Au detector.

Keywords: MEMS; uncooled infrared detector; thermal detector; microcantilever.

* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۶۶۶۹۲۹۲۷-۲۱(۹۸+)

آدرس پست الکترونیک: hassan_abdollahi@yahoo.com

۱- مقدمه

آشکارسازهای مادون‌قرمز[1] (IR) کاربردهای وسیعی در هشداردهنده‌ها، سیستم‌های اعلام حریق [۲،۱]، صنایع پزشکی [۳-۵]، صنایع خودروسازی [۶-۱۰]، صنایع نظامی [۱۱-۱۶]، سیستم‌های امنیتی [۱۷-۱۹] و ... دارند.

امواج IR به دو روش فوتونی و حرارتی قابل آشکارسازی است. آشکارسازهای مادون‌قرمز فوتونی، سریع و حساس هستند، اما نسبت سیگنال به نویز آن‌ها به دلیل تولید الکترون- حفره حتی در دمای محیط، پایین است؛ بنابراین این نوع آشکارسازها را باید تا دمای ۷۷ درجه کلوین سرد کرد؛ لذا ابعاد، قیمت و توان مصرفی آن‌ها افزایش می‌یابد [۲۱ و ۲۰]؛ اما دومین روش آشکارسازی امواج مادون‌قرمز، آشکارسازی حرارتی است که مورد بحث ما است. در این آشکارسازها، انرژی حرارتی سبب تغییر پارامترهای الکتریکی و مکانیکی قطعه شده که این تغییرات توسط مدارهای ثانویه اندازه‌گیری می‌شود. میزان آشکارسازی آشکارسازهای حرارتی، مستقل از طول موج بوده و تابع دمای قطعه است [۲۲و۲۳].

با توجه به پیشرفت‌های تحقیقاتی حاصل، از سال ۲۰۰۰ میلادی به بعد، آشکارسازهای IR با قابلیت کارکرد در دمای محیط و بدون نیاز به خنک‌کننده معرفی و به سرعت در صنایع نظامی و تجاری، مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این آشکارسازها با فناوری میکرو ماشین‌کاری[2] (MEMS) طراحی و ساخته‌شده‌اند. از مهم‌ترین مزایای آن‌ها، کوچک بودن اندازه، کم بودن قیمت و پایین بودن توان مصرفی آن‌ها است.

بالومیترها[3] [۲۵،۲۴]، پیزوالکتریک‌ها[4] [۲۷،۲۶]، ترموپیل‌ها[5] [۲۹،۲۸] و میکروکانتلیورها[6] [۳۱،۳۰] از انواع آشکارسازهای حرارتی ساخته شده به روش فناوری-میکروماشین‌کاری هستند که فاقد خنک ساز بوده، در دمای محیط کار می‌کنند. در بین این آشکارسازها، آشکارسازهای IR میکروکانتیلیوری مزیت‌های بهتری نسبت به بقیه دارند؛ زیرا نیازی به بایاس الکتریکی در بخش حساسه ندارند. بنابراین اتصالات الکتریکی در این قسمت حذف و سبب ساده شدن فرآیند ساخت می‌شود؛ همچنین حساسیت آن‌ها به دلیل حذف اثر شات نویز نیز افزایش خواهد یافت.

جنس مواد مورد استفاده، عامل بسیار مهمی در آشکارسازهای IR میکروکانتیلیوری به روش فناوری-میکروماشین‌کاری است. این آشکارسازها معمولاً از مواد مختلفی ساخته می‌شوند که می‌توان آشکارسازهایی از جنس نیتریت سیلیکون/آلومینیوم (SiN_x/Al) [۳۲-۳۵] نیتریت سیلیکون/طلا (SiN_x/Au) [۳۶،۳۱،۳۰،۲۲] و هیدروژن آمورف سیلیکون کاربید/طلا (a-SiC:H/Au) [۳۸،۳۷] را نام برد. لایه جاذب بیشتر این آشکارسازها از جنس SiN_x بوده است.

استفاده از مواد جاذب IR با ضریب انبساط حرارتی کمتر مانند، SiO_2 بجای Si_3N_4 باعث بهبود پاسخ آشکارساز می‌شود؛ بنابراین پاسخ آشکارساز میکروکانتیلیور از جنس SiO_2/Al، نسبت به مواد دیگر بهتر خواهد بود؛ اما امکان محافظت از آلومینیوم در زدایشگرهای سیلیکون (KOH، EDP، TMAH و ...) در فرآیند میکرو ماشین‌کاری حجمی، یکی از مشکلات عمده آن‌ها در ساخت این نوع از آشکارسازها بوده است. در آشکارسازهای IR میکروکانتیلیوری ساخته‌شده توسط Wank [۴۰،۳۹] و Datskos [۴۳-۴۱] نشان داده شده است که می‌توان SiO_2 را جایگزین Si_3N_4 نمود.

در این مقاله، آشکارساز مادون‌قرمز میکروکانتیلیوری از جنس SiO_2/Al بدون نیاز به خنک‌سازی طراحی و شبیه سازی شده است که قابلیت ساخت به روش فناوری میکرو ماشین‌کاری را دارد. در این آشکارساز طراحی‌شده، حساسیت‌های ترومکانیکی، توانی، دمایی، جابجایی و حساسیت به دمای جسم به ترتیب، در حدود ۲۸۴ nm/K، ۶۶۷/۲mW^{-1}، ۳۲/۸۴mK/(pW.μm^{-2})، ۹/۳۴nm/(pW.μm^{-2}) و ۲/۷nm/K به دست آمده است. در این آشکارساز، مقدار تغییر دما با توزیع حرارت در آشکارساز و میزان جابجایی کانتیلیور شبیه‌سازی شده است و ضریب انتقال دما و حساسیت‌های آن با نمونه مشابه دیگری از جنس Si_3N_4/Au مقایسه و در پایان میزان بهبودی پارامترهای محاسبه‌شده با آشکارسازهای ساخته‌شده قبلی بیان شده است.

[1] Infrared
[2] Microelectromechanical System
[3] Bolometer
[4] Pyroelectric
[5] Thermopiles
[6] Microcantilever

۲- طراحی آشکارساز

در ساخت آشکارسازهای میکروکانتیلیوری، از دو ماده مختلف استفاده می‌شود که تأثیر زیادی در پاسخ آشکارسازی دارد. دو ماده انتخاب‌شده باید خواص زیر را داشته باشند.

الف) یکی از مواد باید امواج IR را به خوبی جذب و دیگری باید هدایت الکتریکی خوبی داشته باشند.

ب) اختلاف ضریب انبساط حرارتی[1](CE) دو ماده باید زیاد باشد تا میزان جابجایی آن بیشینه شود.

ت) دو ماده انتخاب‌شده باید با پروسه‌های ساخت CMOS سازگار باشند.

ث) تنش لایه نازک در بین دو ماده باید کم باشد.

ج) ضریب انتقال حرارتی یکی از این مواد تا حد امکان بایستی نسبت به دیگری کم باشد.

لیست خواص فیزیکی برخی از مواد در جدول ۱ آورده شده است. با مقایسه خواص این مواد، مشاهده می‌شود که SiO2 و Al موادی هستند که از مواد دیگر برای طراحی آشکارساز مناسب‌تر می‌باشند، زیرا اکسید سیلیکون ماده‌ای است که امواج IR را در بازه ۸-۱۴μm به خوبی جذب می‌کند و در چند سال گذشته از آن در ساخت آشکارسازهای حرارتی استفاده شده است. هدایت حرارتی SiO_2، خیلی کم و Al نیز یک فلز با ضریب انبساط حرارتی بالاست، به طوری که اختلاف ضریب انبساط حرارتی آن با SiO_2 نسبت به مواد دیگر در جدول ۱ زیاد است. با توجه به برابری ضریب مدول یانگ SiO_2 و Al، تنش پسماند در آن‌ها نیز بسیار کم خواهد شد، بنابراین برای طراحی آشکارساز مناسب می‌باشند.

با توجه به محدودیت‌های ساخت و امکانات موجود داخل کشور، طراحی آشکارساز با حداقل اندازه ۱۰μm انجام پذیرفت. البته نتایج حاصل قابل تعمیم به اندازه‌های کوچک‌تر نیز هست. طرح‌واره آشکارساز IR حرارتی طراحی‌شده در شکل ۱، نشان داده شده است. این آشکارساز از چهار بخش اصلی تشکیل‌شده که به ترتیب عبارت‌اند از: ۱) ناحیه جاذب IR ۲) بازوهای دو ماده‌ای ۳) بازوهای ایزوله کننده حرارتی ۴) ستون‌های نگه‌دارنده

ناحیه جاذب که به عنوان جذب‌کننده امواج IR در باند (۸-۱۴μm) عمل می‌کند، یک صفحه مستطیل شکل به ابعاد ۷۰μm×۱۰۰μm از جنس SiO_2/Al است. لایه فلزی Al به ضخامت ۲۰۰nm روی لایه SiO_2 به ضخامت ۱μm لایه نشانی شده که این لایه به عنوان منعکس‌کننده‌ی امواج IR نیز است (Al را می‌توان با روش‌های PVD[2] روی SiO_2 لایه نشانی کرد). بازتابش امواج IR در SiO_2 به وسیله لایه Al، سبب افزایش میزان جذب IR توسط SiO_2 می‌شود. ضمناً، این ناحیه به فرم دو ماده‌ای نیز است، بنابراین ناحیه دو ماده‌ای تا این ناحیه نیز امتداد یافته است که سبب افزایش میزان جابجایی می‌شود.

بازوهای نگه‌دارنده دو ماده‌ای همانند ناحیه جاذب از دو ماده SiO_2/Al به ابعاد ۱۰μm×۱۰۰μm است.

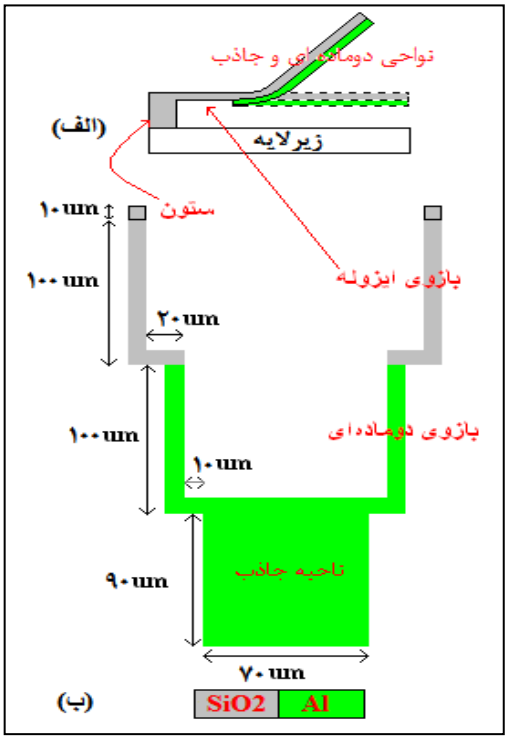
بازوهای ایزوله کننده حرارتی، بخش سوم آشکارساز از جنس SiO_2 به ضخامت ۱μm به اندازه ۱۰μm×۱۰۰μm هستند که انتهای بازوهای ایزوله به ستون‌های نگه‌دارنده متصل شده است.

جدول ۱- خواص مواد [۳۹]

مواد	واحد	Si_3N_4	SiO_2	Al	Au
(E) ضریب یانگ	MPa	۱۳۰×۱۰^{۳}	۷۰×۱۰^{۳}	۷۰×۱۰^{۳}	۷۸×۱۰^{۳}
ضریب پواسون	---	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵
(α) ضریب انبساط حرارتی	/k	$۱/۶\times۱۰^{-۶}$	$۰/۴۱\times۱۰^{-۶}$	$۲۳/۱\times۱۰^{-۶}$	$۱۴/۲\times۱۰^{-۶}$
(G) هدایت حرارتی	pW/um.K	$۲/۹\times۱۰^{۳}$	$۱/۱\times۱۰^{۳}$	$۲/۳۵\times۱۰^{۳}$	$۳/۲۳\times۱۰^{۳}$
(ρ) چگالی	kg/um^3	$۲/۶\times۱۰^{-۱۵}$	$۲/۳\times۱۰^{-۱۵}$	$۲/۷\times۱۰^{-۱۵}$	$۱/۹۳\times۱۰^{-۱۵}$
(C) ظرفیت گرمائی	pJ/kg.K	$۶/۹\times۱۰^{۱۴}$	$۱۶/۶\times۱۰^{۱۴}$	$۸/۹۷\times۱۰^{۱۴}$	$۱/۲۹\times۱۰^{۱۴}$

[1] Coefficients of Thermal Expansion

[2] Physical Vapor Deposition



شکل ۱- طرح واره آشکارساز بطوریکه لایه Al به رنگ سبز و لایه SiO_2 به رنگ نوک مدادی است. (الف) نمای جانبی آشکارساز IR طراحی شده (ب) نمای فوقانی آشکارساز با حداقل اندازه ۱۰μm.

جدول ۲- مشخصات هندسی آشکارساز طراحی‌شده

ابعاد (μm)	جنس	اجزاء آشکارساز IR طراحی‌شده
۷۰×۱۰۰	SiO_2/Al	ناحیه جاذب
۱	SiO_2	ضخامت لایه جاذب (عایق)
۰/۲	Al	ضخامت لایه فلزی
۱۱۰	SiO_2/Al	طول بازوهای دو ماده‌ای
۱۰	SiO_2/Al	عرض بازوهای دو ماده‌ای
۱۰	SiO_2	عرض بازوهای ایزوله
۱۰۰	SiO_2	طول بازوهای ایزوله
۱۰×۱۰	SiO_2	ابعاد ستون‌ها
۲	SiO_2	ارتفاع ستون‌ها

ستون‌های نگه‌دارنده، آخرین قسمت آشکارساز است که از جنس SiO_2 به ابعاد ۱۰μm×۱۰μm و به ارتفاع ۳μm هستند. ستون‌ها، ناحیه جاذب متصل شده به بازوهای نگه‌دارنده دو ماده‌ای و ایزوله را روی زیر لایه‌ی سیلیکون به وسیله دو پایه نگه‌دارنده به حالت معلق در می‌آورند. در جدول ۲، ابعاد آشکارساز طراحی‌شده بیان گردیده است.

چنانچه امواج IR روی ناحیه جاذب تابیده شود، آن ناحیه امواج IR را جذب و گرما تولید می‌شود، گرمای جذب شده، باعث افزایش دما می‌شود. به علت اختلاف دما، انرژی گرمایی به بازوهای دو ماده‌ای نیز انتقال می‌یابد؛ اما با توجه به پایین بودن ضریب انتقال حرارت در بازوهای ایزوله، انتقال حرارت از ناحیه جاذب و بازوهای دو ماده‌ای به سمت زیر لایه به کندی انجام می‌گیرد و سبب افزایش دمای ناحیه جاذب و بازوهای دو ماده‌ای می‌شود. با این تغییر دما، تمامی نواحی دو ماده‌ای (ناحیه جاذب و بازوهای دو ماده‌ای) به علت اختلاف انبساط حرارتی بین دو ماده، به سمت بالا خم می‌شوند. لازم به ذکر است که میزان خمش ناحیه جاذب با اختلاف دما نسبت مستقیم دارد. مقدار این خمش را می‌توان توسط یک سیستم بازخوان اندازه‌گیری کرد. آشکارسازی به روش پیزو، اپتیکی، خازنی، تداخل سنجی، انکسار اپتیکی و روش CCD از انواع روش‌های سیستم‌های بازخوان می‌باشند [۴۴]. به این ترتیب با اندازه‌گیری میزان خمش، می‌توان میزان IR را اندازه‌گیری و مشخص کرد.

۳- تحلیل حرارتی

برای محاسبه میزان جابجایی آشکارساز، باید تغییر دمای آشکارساز را به دست آوریم. این تغییر دما ناشی از جذب امواج IR توسط ناحیه جاذب است. در تحلیل حرارتی فرض می‌کنیم که تبادل حرارتی آشکارساز با محیط اطراف خود به حال پایدار رسیده است. تغییر دمای ΔT_c در ناحیه جاذب آشکارساز را می‌توان از رابطه (۱) به دست آورد [۴۵].

$$\Delta T_c = \frac{W_s A_{pixel}}{G} \qquad (۱)$$

که در این رابطه، W_s چگالی توان جذبی IR، A_{pixel} مساحت ناحیه جاذب و G هدایت حرارتی بین آشکارساز و محیط اطراف خود است. طبق این رابطه، برای افزایش ΔT_c در یک پیکسل، مقدار G در طراحی باید به حداقل برسد. مقدار G در رابطه (۱) عبارت است از:

$$G = G_{leg} + G_{rad} + G_{air} \qquad (۲)$$

در این رابطه، G_{leg} هدایت حرارتی از طریق پایه‌ها، G_{rad} هدایت تشعشعی و G_{air} هدایت از طریق هوا است. هدایت از طریق پایه‌ها را می‌توان از رابطه (۳) به دست آورد [۴۵].

$$G = 2\times\left(\frac{l_b}{k_{SiO_2}A_{SiO_2}+k_{Al}A_{Al}}+\frac{l_i}{k_{SiO_2}A_{SiO_2}}\right)^{-1} \qquad (۳)$$

در این رابطه، k ضریب هدایت حرارتی[1] مواد انتخاب‌شده، A_{sio2} و A_{Al} به ترتیب، مساحت سطح مقطع لایه‌های SiO_2 و Al در بازوهای دو ماده‌ای و ایزوله، l_b طول بازوهای دو ماده‌ای و l_i طول بازوهای ایزوله است. G_{rad} در رابطه (۲)، هدایت تشعشعی از پیکسل است که از رابطه (۴) به دست می‌آید [۴۵].

$$G_{rad} = 4.\sigma.A_{pixel}\left(\varepsilon_{Al}+\varepsilon_{SiO_2}\right)T^3 \qquad (۴)$$

در این رابطه، (σ= (۵/۶۷×۱۰$^{-۸}$ $Wm^{-2}K^{-4}$)، ثابت استفان-بولتزمن[2]، T دمای پیکسل و ε_{Al}=۰.۰۱ و ε_{Sio2}=۰.۸ به ترتیب ضرایب تشعشعی[3] Al و SiO_2 می‌باشند.

هدایت حرارتی از طریق هوا (G_{air})، سومین جمله رابطه (۲) است. در این مقاله فرض شد که بسته‌بندی آشکارساز در خلاء است. در نتیجه مقدار G_{air} در حدود wk^{-1} ۱۰$^{-۱۰}$ خواهد شد که در مقایسه با هدایت حرارتی آشکارساز حرارتی طراحی‌شده در این مقاله، wk^{-1} G=۲/۱۳×۱۰$^{-۷}$ بسیار ناچیز است و می‌توان از اثر آن در معادله صرف‌نظر کرد؛ بنابراین معادله (۲) را می‌توان مجدداً به صورت معادله (۵) بازنویسی کرد [۴۵].

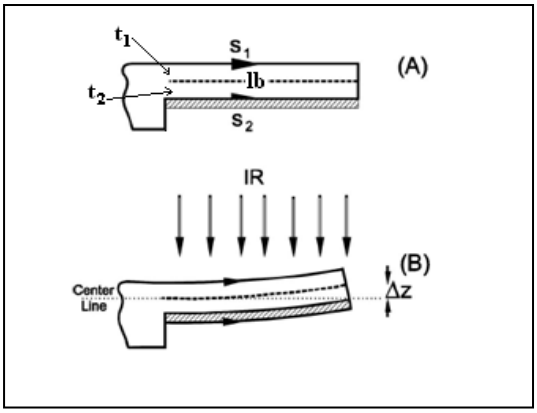
$$G = G_{leg} + G_{rad} \qquad (۵)$$

همان طور که از رابطه (۱) مشخص است، با کاهش G و افزایش A، دمای ناحیه جاذب افزایش می‌یابد. با توجه به طراحی انجام‌گرفته، سطح A معین است، لذا برای کاهش G، G_{leg} تنها جمله موجود در رابطه (۵) است که می‌توان آن را کاهش داد. جهت کاهش G_{leg} طبق رابطه (۳)، لازم است موادی انتخاب شود که ضریب هدایت حرارتی آن کم و طراحی آشکارساز نیز به نحوی باشد که طول بازوهای آن حداکثر و سطح مقطع آن‌ها نیز در کمترین مقدار خود باشند.

از آنجائیکه در طراحی آشکارساز از فلز Al با هدایت حرارتی بالا استفاده شده است، لازم است که یک ناحیه ایزوله که فاقد فلز باشد نیز، در طراحی در نظر گرفته شود تا هدایت حرارتی کاهش یابد [۴۵]. مقادیر حاصل از روابط ΔT_c، G_{leg}، G_{rad} و G برای آشکارساز SiO_2/Al به ترتیب ۳/۲۹°K، wk^{-1} ۱/۷۹×۱۰$^{-۷}$، wk^{-1} ۳/۳۹×۱۰$^{-۸}$ و wk^{-1} ۲/۱۳×۱۰$^{-۷}$ و برای آشکارساز Si_3N_4/Al به ترتیب ۰/۱۸۸°K، wk^{-1} ۳/۶۹×۱۰$^{-۶}$، wk^{-1} ۳/۳۹×۱۰$^{-۸}$ و wk^{-1} ۳/۷۲×۱۰$^{-۶}$ محاسبه شدند. در جدول ۳، نتایج حاصل از این محاسبات بیان شده است.

۴-تحلیل سازه‌ای

شکل ۲، یک میکروکانتیلیور ساده را نشان می‌دهد که از دو ماده مختلف تشکیل شده است. اگر فرض کنیم که ماده اول از جنس SiO_2 و ماده دوم از جنس Al هستند؛ در این صورت، وقتی دما تغییر می‌کند، میکروکانتیلیور به علت اختلاف ضریب انبساط حرارتی دو ماده خم می‌شود. این پدیده همانند اثر دو فلز[4] است؛ بنابراین اختلاف ضریب انبساط حرارتی دو ماده، سبب ایجاد تنش بین SiO_2 و Al خواهد شد. رابطه (۶)، میزان خمش برحسب تغییر دمای کانتیلیور را نشان می‌دهد [۴۵].



شکل ۲- پاسخ مکانیکی کانتیلیور به تغییرات دما. (A): کانتیلیور در حالت عادی بدون تابش IR (B) : خمش کانتیلیور در اثر اعمال تابش IR. (پارامتر Δz نشان دهنده میزان خمش است).

[1] Thermal Conductivity
[2] Stefan-Boltzmann Constant
[3] Emissivity
[4] Bimetal

$$\Delta z = \frac{3l_b^2}{t_1+t_2}\times\left[\frac{\left(1+\frac{t_1}{t_2}\right)^2}{3\left(1+\frac{t_1}{t_2}\right)^2+\left(1+\frac{t_1}{t_2}\frac{E_1}{E_2}\right)\left(\frac{t_1^2}{t_2^2}+\frac{t_2}{t_1}\frac{E_2}{E_1}\right)}\right]\times(\alpha_1-\alpha_2)\Delta T \quad (۶)$$

در این رابطه، l_b طول میکروکانتیلیور، t_1 ضخامت لایه فلزی، t_2 ضخامت لایه جاذب، α_1 و α_2 ضریب انبساط حرارتی[1] و E_1 و E_2 ضریب مدول یانگ[2] لایه‌های فلزی و جاذب هستند. طبق شکل ۲، Δz خمش عمودی میکروکانتیلیور است.

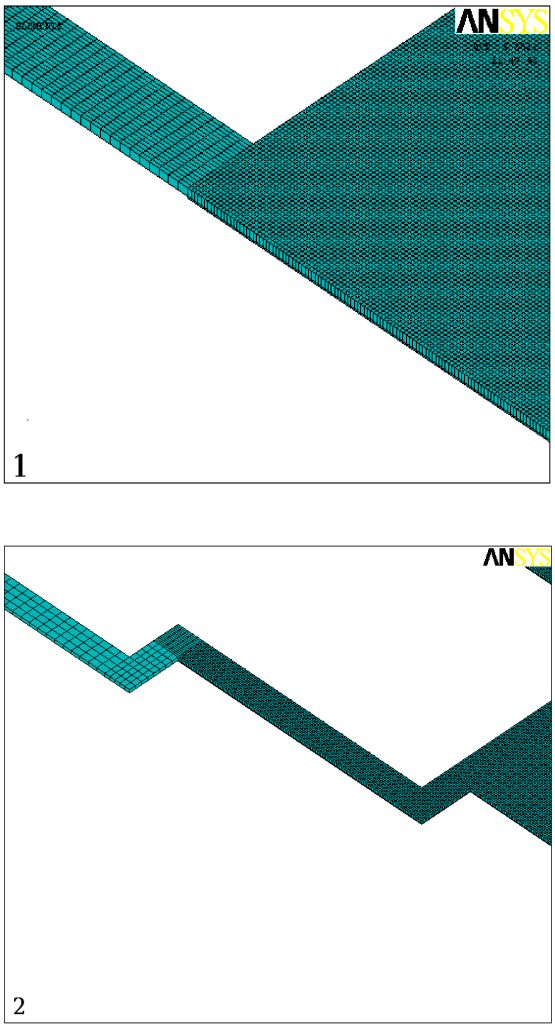
۵-شبیه‌سازی

جهت شبیه‌سازی و بررسی رفتار حرارتی آشکارساز طراحی‌شده، از نرم‌افزار ANSYS و المان ۳ بعدی SOLID90(Brick 20Node 90) استفاده شده است و برای شبیه‌سازی میزان جابجایی آشکارساز، از آنالیز سازه‌ای–حرارتی با المان (Solid95) همزمان با افزایش دما استفاده شده است[۳۹]

شکل ۳، مدل مش‌بندی آشکارساز را نشان می‌دهد. هر چه اندازه المان‌های انتخاب‌شده کمتر باشد، دقت محاسبات و زمان پردازش نیز متناسب با آن افزایش می‌یابد. مش بندی این آشکارساز به روش دستی با المان‌های مکعبی شکل انجام شده است و ضخامت لایه نازک فلزی، کوچک‌ترین اندازه انتخاب‌شده برای آن است. جهت برقراری تعادل بین زمان محاسبات و دقت محاسبات، حداکثر نسبت ۴ برابر در انتخاب ابعاد المان‌های مکعبی شکل رعایت شده است. شرایط مرزی اعمال‌شده عبارت‌اند از: ۱) صفر بودن میزان جابجایی ستون‌های نگه‌دارنده، ۲) دمای $25^{\circ}C$ برای سطح زیرین ستون‌های نگه‌دارنده ۳) توان حرارتی $100\,pW/\mu m^2$ جذب‌شده در سطح ناحیه جاذب

از اتلاف حرارتی تشعشعی در جهت زیرین ناحیه جاذب بعلت ناچیز بودن ضریب تشعشعی آلومینیوم (ε_{Al}=۰.۰۱) صرف‌نظر می‌شود. از تلفات حرارتی همرفتی از طریق هوا با فرض بسته‌بندی آشکارساز در محیط خلاء صرف‌نظر شده است. خواص مواد بکار رفته در شبیه‌سازی اجزاء محدود، در جدول ۱ نشان داده شده است.

جهت مقایسه حساسیت دو ساختار با یکدیگر، خواص Au و Si_3N_4 نیز در جدول ۱ ذکر شده است. به راحتی می‌توان دید، اختلاف ضریب انبساط حرارتی SiO_2/Al نسبت به Si_3N_4/Au بیشتر است؛ بنابراین حساسیت آن بیشتر خواهد بود. همان طور که از جدول ۱ مشخص است، ضریب انبساط حرارتی و ضریب انتقال حرارت SiO_2 از Si_3N_4 کمتر است، بنابراین SiO_2 ماده مناسب‌تری برای طراحی است.



شکل ۳- نحوه مش بندی آشکارساز در ۲ ناحیه مختلف

[1] Thermal Expansion Coefficient
[2] Young's Modulus

۶- نتایج شبیه‌سازی

آنالیز حرارتی و آنالیز سازه‌ای- حرارتی به روش FEM با شبیه‌ساز جهت بررسی رفتار آشکارساز انجام شده و حساسیت حرارتی و حساسیت جابجایی ناشی از جذب IR نیز محاسبه‌شده‌اند. در شکل ۴، نتایج گرافیکی ناشی از تحلیل حرارتی با المان حرارتی نشان داده شده است. تحلیل سازه‌ای با المان سازه‌ای با استفاده از نتایج به دست آمده در تحلیل حرارتی، شبیه‌سازی و نتایج آن در شکل ۵ به تصویر کشیده شده است. شبیه‌سازی فوق با فرض چگالی توان حرارتی جذبی[1] ۱۰۰pW/μm^2 روی سطح ناحیه جاذب است که در آن ضریب انتقال سامانه اپتیکی ۹۰٪، میزان جذب IR، ۵۰٪ و عدد F عدسی یک است. این مقدار از توان جذب‌شده، ناشی از تشعشع IR جسم سیاه[2] در ۳۰۰ درجه کلوین است که مقدار آن از رابطه (۷) به دست می‌آید.

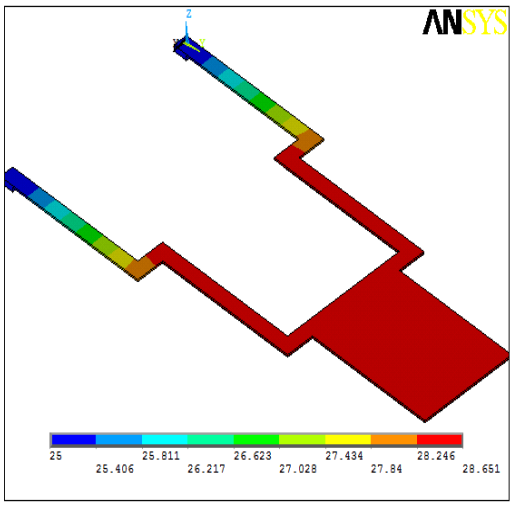
$$W_s = \eta\tau_0 \frac{1}{4F^2}\left(\frac{dP}{dT}\right)_{\lambda_1-\lambda_2} \Delta T_t \qquad (۷)$$

در این رابطه، η ضریب جذب IR[3]، τ_0 ضریب انتقال سامانه اپتیکی[4]، F عدد f سامانه اپتیکی، $\frac{dP}{dT}$=۲/۶۲ pW/(μm)^2.K توان تشعشع شده از جسم سیاه در باند ۸-۱۴μm و ΔT_t تغییر دمای جسم سیاه است [۳۹].

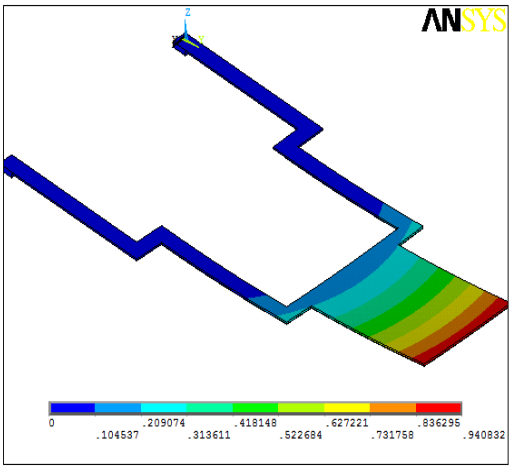
همان طور که از شکل ۴ مشاهده می‌شود؛ توزیع حرارت در نواحی دو ماده‌ای، نسبتاً یکنواخت و در ناحیه ایزوله، گرادیان حرارتی وجود دارد؛ زیرا ناحیه دو ماده‌ای شامل، فلز است که ضریب انتقال حرارت آن بیشتر از ماده غیرفلز است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی حرارتی نیز نشان می‌دهد که افزایش دما در حدود ۳/۶۵۱°C و ۰/۲°C به ترتیب برای آشکارسازهای SiO_2/Al و Si_3N_4/Au هستند. همچنین نتایج حاصل از شبیه‌سازی سازه‌ای-حرارتی نیز نشان‌دهنده میزان جابجایی در نوک آشکارساز SiO_2/Al در حدود ۹۴۰nm و در آشکارساز Si_3N_4/Au در حدود ۲۴/۵nm است. با استفاده از محاسبات صورت پذیرفته برای آشکارساز SiO_2/Al طبق جدول ۳، ΔT_c=۳/۲۹۱°C و Δz=۹۳۶ nm به دست آمده است.

۷- ضریب انتقال دما

نسبت تغییرات دمای میکروکانتیلیور ΔT_c به تغییر دمای منبع تولید IR (ΔT_t) پارامتر، بسیار مهم در آشکارسازهای حرارتی است که مقدار آن به میزان جذب IR توسط آشکارساز و سامانه اپتیکی بستگی دارد. این نسبت از ترکیب رابطه (۱) و (۶) به صورت رابطه (۸) به دست می‌آید [۴۶].



شکل ۴- نتیجه گرافیگی تحلیل حرارتی آشکارساز طراحی شده.



شکل ۵- نتیجه گرافیکی تحلیل سازه‌ای آشکارساز طراحی شده.

1 Infrared Power Density
2 Blackbody
3 Infrared Absorption Efficiency
4 Optical Transmission Efficiency

$$H=\frac{\Delta T_c}{\Delta T_t}=\frac{1}{\left(G_{leg}+G_{rad}\right)}\frac{A_{ab}\left(\varepsilon_{Al}+\varepsilon_{SiO_2}\right).\tau_0.\pi}{4.F_{n0}^2}\frac{dp}{dT_t} \quad (۸)$$

در این رابطه A_{ab}، سطح ناحیه جذب IR است. مقدار H برای آشکارساز SiO_2/Al در حدود $۹/۷\times۱۰^{-۳}$ و برای آشکارساز Si_3N_4/Au در حدود $۰/۶\times۱۰^{-۳}$ شده است.

۸- حساسیت‌ها

جهت بررسی و تحلیل بیشتر رفتار آشکارساز IR طراحی‌شده، مقدار حساسیت‌های ترمومکانیکی، توانی، دمایی، جابجایی و حساسیت به دمای جسم محاسبه و نتایج حاصل از آن در جدول ۳، نشان داده شده است.

حساسیت ترمومکانیکی[1] به صورت نسبت تغییرات Δz آشکارساز به تغییر دمای ΔT_c تعریف می‌شود که مقدار آن را می‌توان از رابطه (۶) به صورت زیر به دست آورد.

$$\Re_T=\frac{\Delta z}{\Delta T_c}=\frac{G\Delta z}{W_s A} \quad (۹)$$

با قرار دادن مشخصات هندسی آشکارساز از جدول ۲، میزان حساسیت ترمومکانیکی برای SiO_2/Al برابر با ۲۸۴/۴۱nm/K و برای آشکارساز Si_3N_4/Au برابر با ۱۹۹/۴۴nm/K محاسبه گردیدند. باید توجه داشت که برای رسیدن به این حساسیت، بایستی یک درجه کلوین تغییر در دما را در ناحیه جاذب آشکارساز داشته باشیم.

حساسیت توانی: نسبت جابجائی آشکارساز به توان امواج IR تابیده‌شده به سطح، یک پارامتر بسیار مهم در آشکارسازهای IR است. مقدار این حساسیت را می‌توان از ترکیب رابطه (۱) و (۶) به دست آورد [۲].

$$\Re_P=\frac{\Delta z}{P_0}=\frac{\Delta z}{W_s.A_{pixel}} \quad (۱۰)$$

با قرار دادن مقادیر از جدول ۲، مقدار حساسیت توانی برای آشکارساز SiO_2/Al و Si_3N_4/Au به ترتیب، $۶۶۷/۲mW^{-1}$ و $۱۶/۰۳\ mW^{-1}$محاسبه شده‌اند.

حساسیت دمایی[2]: تغییر دمای ناحیه جاذب آشکارساز به ازای توان حرارتی جذبی در سطح آشکارساز، پارامتر دیگری در آشکارسازهای مادون‌قرمز میکروکانتیلیوری است. مقدار این حساسیت دمایی را می‌توان از ترکیب رابطه (۱) و رابطه (۷) به دست آورد [۳۹].

$$S_t=\frac{\Delta T}{W_s}=\frac{A_{pixel}}{G} \quad (۱۱)$$

مقدار این حساسیت در حدود ($۳۲/۸۴\ mK/(pW.\mu m^{-2})$ و ($۱/۸۸\ mK/(pW.\mu m^{-2})$ به ترتیب برای آشکارساز SiO_2/Al و Si_3N_4/Au محاسبه شده‌اند.

حساسیت جابجایی[3]: میزان جابجایی آشکارساز به ازای توان حرارتی جذب‌شده در سطح را گویند که مقدار آن را می‌توان با ترکیب رابطه (۲) و رابطه (۸) به صورت زیر به دست آورد [۳۹].

$$S_d=\frac{\Delta z}{W_s}=\frac{\tau_0}{\eta}.A.R_p.T_t \quad (۱۲)$$

S_d برای SiO_2/Al برابر با ($۹/۳۴\ nm/(pW.\mu m^{-2})$ و برای Si_3N_4/Au در حدود ($۰/۲۲۴\ nm/(pW.\mu m^{-2})$ محاسبه شده است.

حساسیت به دمای جسم سیاه را می‌توان به صورت نسبت میزان جابجایی آشکارساز به تغییر دمای جسم سیاه با جایگذاری رابطه (۷) در رابطه (۱۰) به دست آورد.

$$S_{dt}=\frac{\Delta z}{\Delta T_t}=\eta.\tau_0.\frac{1}{4F^2}\Re_p\left(\frac{dp}{dT_t}\right)_{\lambda_1-\lambda_2} \quad (۱۳)$$

با جایگذاری مقادیر آشکارساز در این رابطه، میزان جابجایی کانتیلیور در آشکارساز به ازای یک درجه کلوین تغییر در دمای جسم، به اندازه $۲/۷۵\ nm/K$ برای SiO_2/Al و $۰/۰۶۶\ nm/K$ برای Si_3N_4/Au به دست آمده است.

۹- تحلیل نتایج شبیه‌سازی و محاسبات

در طراحی این آشکارساز، از SiO_2 برای بازوهای ایزوله، بازوهای دو ماده‌ای و ناحیه جاذب استفاده و از Al ، به عنوان یکی از صفحات بازتابنده در ناحیه جاذب و یکی از مواد بازوهای دو ماده‌ای استفاده شده است.

أ. بر اساس رابطه (۳)، هدایت حرارتی نسبت مستقیم با ضریب هدایت حرارتی دارد و طبق جدول ۱

[1] Temperature Responsively
[2] Temperature Sensitivity
[3] Displacement Sensitivity

جدول ۳ - نتایج حاصل از محاسبات و مقایسه با آشکارسازهای محققین دیگر

پارامترها	SiO_2/Al	Si_3N_4/Au	نسبت بهبودی SiO_2/Al به Si_3N_4/Au	نتایج بدست آمده از آشکارساز دیگران	نسبت بهبودی
تغییر دما ΔTc (°K)	۳/۲۹۱۳	۰/۱۸۸	۱۷/۵	----	----
هدایت حرارتی پایه‌ها G_{leg} (wk^{-1}) $\times 10^{-7}$	۱/۷۹	۳۶/۹	۰/۰۴۸	----	----
هدایت تشعشعی G_{rad} (wk^{-1}) $\times 10^{-8}$	۳/۳۹	۳/۳۹	۱	----	----
هدایت حرارتی کل G (wk^{-1}) $\times 10^{-7}$	۲/۱۳	۳/۷۲	۱۷/۵	----	----
جابجائی Δz(nm)	۹۳۶	۲۲/۵	۴۱/۶	----	----
ضریب انتقال دما H $\times 10^{-3}$	۹/۷	۰/۶	۱۶/۱۶	۴/۳[۳۰]	۲
حساسیت ترمومکانیکی $\Re_T$ (nm/K)	۲۸۴/۴۱	۱۱۹/۴	۲/۳۸	۴۲/۵[۴۵]	۶/۶۹
				۱۱۰[۴۶]	۲/۵۸
حساسیت توانی $\Re_P$ (mW^{-1})	۶۶۷/۲	۱۶/۰۳	۴۱/۶	۱۷[۴۵]	۳۹/۲۴
حساسیت دمائی S_t ($mK/pW.\mu m^{-2}$)	۳۲/۸۴	۱/۸۷۹	۱۷.۴۷	۱۵/۶[۴۰]	۲/۱
حساسیت جابجائی S_d ($nm/pW.\mu m^{-2}$)	۹/۳۴	۰/۲۲۴	۴۱/۶	۰/۸۳[۴۰]	۱۱/۲۵
حساسیت به دمای جسم S_{bt} (nm/K)	۲/۷۵	۰/۰۶۶	۴۱/۶	----	----

ضریب هدایت حرارتی SiO_2 در حدود ۲۶ برابر کمتر از Si_3N_4 است، در نتیجه، هدایت حرارتی آن به اندازه ۲۶ برابر کاهش خواهد یافت. انتظار می‌رود که کاهش هدایت حرارتی طبق رابطه (۱)، منجر به افزایش ۲۶ برابری دما گردد. نتایج حاصل از محاسبات در جدول ۳ نشان می‌دهد که میزان افزایش تغییرات دما در آشکارساز SiO_2/Al نسبت به Si_3N_4/Au به اندازه ۱۷/۵ برابر است. با این محاسبه می‌توان نتیجه گرفت که میزان تغییرات دما با استفاده از موادی با ضریب هدایت کمتر (مانند پلیمرها) در نواحی ایزوله، بهبود بیشتری خواهد یافت؛ اما استفاده از این مواد فرآیند ساخت را پیچیده‌تر خواهد کرد.

ب. میزان خمش کانتیلیور دو ماده‌ای طبق رابطه (۶) با ΔT_c و $\Delta\alpha$ رابطه مستقیم دارد. از آنجائیکه ΔT_c و $\Delta\alpha$ ساختار SiO_2/Al نسبت به ساختار Si_3N_4/Au به ترتیب در حدود ۲۶ و ۲ برابر هستند، انتظار داریم که میزان خمش در کانتیلیور در حدود ۵۲ برابر بهبود یابد. نتایج حاصل از محاسبات دقیق طبق جدول ۳، نشان‌دهنده بهبود خمش به میزان ۴۱/۶ برابر است. همان طور که از رابطه خمش (۶) مشخص است، با انتخاب مناسب مواد، طراحی هندسی و تعیین ضخامت‌ها، می‌توان میزان خمش را بیشینه کرد. باید توجه داشت که بهینه‌سازی یک طراحی مطلوب با افزایش میزان خمش به تنهایی امکان‌پذیر نیست. به عنوان مثال، میزان خمش با توان دوم طول، رابطه مستقیم دارد؛ لیکن افزایش طول، سبب افزایش میزان نویز مکانیکی نیز خواهد شد.

ت. هدایت حرارتی طبق رابطه (۸) نسبت عکس با ضریب انتقال دما دارد، بنابراین کاهش هدایت حرارتی، سبب افزایش ضریب انتقال دما در آشکارساز خواهد شد. نتیجه محاسبات نشان‌دهنده بهبود ۱۶/۱۶ برابری این ضریب در آشکارساز SiO_2/Al نسبت به Si_3N_4/Au است. کمتر بودن ضریب هدایت حرارتی SiO_2 نسبت به Si_3N_4 و بیشتر بودن اختلاف انبساط حرارتی SiO_2/Al نسبت به Si_3N_4/Au، تأثیر قابل‌توجهی در مقدار حساسیت‌های این دو آشکارساز دارد. به طوری که طبق جدول ۳ در آشکارساز SiO_2/Al، میزان حساسیت ترمومکانیکی ۲/۳۸ برابر، حساسیت توانی، حساسیت جابجایی و حساسیت به دمای جسم ۴۱/۶ برابر و حساسیت دمایی ۱۷/۴۷ برابر نسبت به آشکارساز Si_3N_4/Au بیشتر است.

ث. طبق رابطه (۳)، افزایش طول ناحیه ایزوله میزان هدایت حرارتی را کاهش می‌دهد، ولی این افزایش سبب بزرگ‌تر شدن طول آشکارساز می‌شود. کم کردن سطح مقطع ناحیه ایزوله نیز، عامل دیگری است که طبق رابطه (۳) سبب کاهش هدایت حرارتی می‌شود، اما این کاهش سبب پیچیده‌تر شدن فرآیند ساخت می‌گردد. با بررسی

بیشتر می‌توان به این نتیجه رسید که کاهش عرض بازوهای ایزوله و دو ماده‌ای نیز سبب کاهش هدایت حرارتی می‌شود، با توجه به محدودیت‌های ساخت و امکانات موجود داخل کشور، طراحی آشکارساز با حداقل اندازه ۱۰μm در این مقاله مد نظر قرار گرفت. البته نتایج حاصل قابل تعمیم به ابعاد کوچک‌تر نیز می‌باشند.

ج. در طراحی این آشکارساز، میزان جذب امواج مادون‌قرمز و اندازه خمش آشکارساز بهبود یافته است. افزایش سطح ناحیه جاذب براساس رابطه (۱)، باعث افزایش میزان تغییرات دما می‌شود، ولی در کاربردهای تصویربرداری حرارتی، این افزایش سبب کاهش دقت دوربین‌های حرارتی می‌شود. در طراحی این آشکارساز، میزان جذب امواج مادون‌قرمز توسط ناحیه جاذب، به دو روش، آیینه کردن امواج مادون‌قرمز و حذف سوراخ‌های زدایش در ناحیه جاذب افزایش یافته است.

ح. میزان جذب امواج مادون‌قرمز با افزایش ضخامت لایه جاذب بیشتر می‌شود، اما افزایش ضخامت این لایه، طبق رابطه (۳)، سبب افزایش سطح مقطع لایه SiO_2 و در نتیجه باعث افزایش ضریب هدایت حرارتی می‌شود که مطلوب نیست. از طرفی با کاهش ضخامت، میزان جذب امواج مادون‌قرمز کمتر می‌شود. در این آشکارساز، لایه نازک Al در زیر ناحیه جاذب قرار داده شده است تا این لایه مثل آیینه عمل کند و سبب برگشت مجدد امواج IR عبوری از لایه SiO_2 به داخل خود ناحیه جاذب شود. بدین ترتیب، با جذب مجدد این امواج برگشتی توسط لایه SiO_2، عملاً ضخامت جذبی لایه جاذب دو برابر می‌شود که سبب افزایش مقدار ضریب جذب در رابطه (۷) می‌شود.

خ. افزایش طول بازوهای دو ماده‌ای بر اساس رابطه (۷)، سبب افزایش خمش (Δz) آشکارساز می‌شود. از آنجائیکه Al در ناحیه جاذب نیز استفاده شده است، بنابراین این ناحیه نیز دو ماده‌ای شده است. بدین ترتیب، طول نواحی دو ماده‌ای تا انتهای سر آزاد آشکارساز امتداد پیدا کرده است. طبق این رابطه، نسبت افزایش خمش با توان دوم طول ناحیه دو ماده‌ای رابطه مستقیم دارد. با ابعاد انتخاب‌شده در طراحی این آشکارساز طبق جدول ۲، طول ناحیه جاذب با طول بازوهای دو ماده‌ای تقریباً هم اندازه است؛ بنابراین طول ناحیه دو ماده‌ای دو برابر شده است؛ در نتیجه، میزان خمش آشکارساز در انتهای سر آزاد این آشکارساز نسبت به آشکارسازها معمول، ۴ برابر افزایش می‌یابد.

د. همان طور که از رابطه خمش (۶) مشخص است، با انتخاب مناسب مواد، طراحی هندسی و تعیین ضخامت‌ها، می‌توان میزان خمش را بیشینه کرد. باید توجه داشت که بهینه‌سازی یک طراحی مطلوب با افزایش میزان خمش، به تنهایی امکان‌پذیر نیست. به عنوان مثال، میزان خمش با توان دوم طول رابطه مستقیم دارد؛ لیکن افزایش طول، سبب افزایش میزان نویز مکانیکی نیز خواهد شد.

۱۰- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک آشکارساز مادون‌قرمز، با حساسیت بالا و حداقل اندازه ۱۰μm، طراحی و شبیه‌سازی شده است.

أ. این آشکارساز از چهار بخش اصلی جاذب IR، بازوهای نگه‌دارنده دو ماده‌ای، بازوهای ایزوله‌کننده حرارتی و ستون‌های نگه‌دارنده تشکیل شده است. با طراحی ناحیه جاذب به صورت دو ماده‌ای، میزان جذب IR و میزان خمش، با آیینه شدن امواج مادون‌قرمز توسط لایه فلز در ناحیه جاذب و با امتداد ناحیه دو ماده‌ای تا انتهای ناحیه جاذب، افزایش یافته است.

ب. برای شبیه‌سازی رفتار حرارتی و مکانیکی از روش آنالیز اجزاء محدود استفاده شده است. به همین منظور یک مدل پارامتری با روش اجزاء محدود طراحی شد تا آشکارساز از جنس SiO_2/Al با آشکارساز مشابه دیگری از جنس Si_3N_4/Au شبیه‌سازی و مقایسه شود.

ت. نتایج حاصل از شبیه‌سازی، بیانگر این موضوع است که استفاده از SiO_2/Al به جای Si_3N_4/Au میزان ΔT_c، Δz، H، $\Re_T$، $\Re_P$، S_t، S_d و S_{dt} را به طور چشمگیری بهبود می‌بخشد. به طوری که H در آشکارساز طراحی‌شده توسط Zhoa و همکارانش در سال ۲۰۱۲ [۳۰] به اندازه $۴/۳\times۱۰^{-۳}$ بوده است که مقدار آن تقریباً ۲ برابر کمتر از آشکارساز طراحی‌شده در این مقاله است. همچنین حساسیت ترمومکانیکی آشکارسازهای Datskos [۴۵] و Zhoa [۴۶] به ترتیب، $\Re_T$=۴۲/۱۱۰،۵nm/K بوده است که این مقدار در مقایسه با آشکارساز ارائه‌شده در این مقاله به ترتیب، ۶/۶۹ و ۲/۵۸ برابر بهبود یافته است. حساسیت توانی

آشکارساز Datskos و همکارانش [۴۵] $\Re_P$=۱۷ mW^{-1} محاسبه شده است که این مقدار در آشکارساز این مقاله در حدود ۳۹/۲۴ برابر بهبود یافته است. حساسیت دمایی و حساسیت جابجایی در آشکارساز Weidong Wang [۴۰] نیز به ترتیب برابر با $mK/(pW.\mu m^{-2})$ (S_t=۱۵/۶ و S_d=۰/۸۳$nm/(pW.\mu m^{-2})$ محاسبه شده است که در این آشکارساز به ترتیب در حدود ۲/۱ و ۱۱/۲۵ برابر افزایش یافته است.

ث. در این آشکارساز، تغییر دمای آشکارساز ΔT_c=۳/۲۹۱K، حساسیت توانی $\Re_P$=۶۶۷/۲ mW^{-1}، تغییر جابجایی در نوک کانتیلیور Δz=۹۳۶ nm، ضریب انتقال H=۹/۷×۱۰$^{-۳}$، حساسیت ترمومکانیکی $\Re_T$=۲۸۴/۴۱ nm/K، حساسیت دمایی (S_t=۳۲/۸۴ $mK/(pW.\mu m^{-2})$، حساسیت جابجایی (S_d=۹/۳۴ $nm/(pW.\mu m^{-2})$ و حساسیت به دمای جسم در حدود S_{dt}=۲/۷۵ nm/K محاسبه شده است.

۱۱- منابع

[1] Steven Verstockt, Tarek Beji, Pieterjan De Potter, Sofie Van Hoecke, Bart Sette, Bart Merci and Rik Van de Walle (2013) Video driven fire spread forecasting (f) using multi-modal LWIR and visual flame and smoke data. Pattern Recognition Letters, 34: 62–69.

[2] Ronan Paugam, Martin J. Wooster, and Gareth Roberts (2013) Use of handheld thermal imager data for airborne mapping of fire radiative power and energy and flame front rate of spread. ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 51:33853399

[3] Seung Jae Oh, Yong-Min Huh, Jin-Suck Suh, Jihye Choi, Seungjoo Haam and Joo-Hiuk Son (2012) Cancer diagnosis by terahertz molecular imaging technique. J Infrared Milli Terahz Waves, 33: 74–81.

[4] Jinn-Rung Kuo, Ming-Hsien Chang, Che-Chuan Wang, Chung-Ching Chio, Jhi-Joung Wang and Bor-Shyh Lin (2013) Wireless near-infrared spectroscopy system for determining brain hemoglobin levels in laboratory animals. Journal of Neuroscience Methods, 214: 204-209.

[5] Mohammad S Apu and Naima Kaabouch (2012) Characteristics of the terahertz sources suitable for biomedical applications. EIT, International Conference, 1-5.

[6] M.Özgün Korukçu and Muhsin Kilic (2009) The usage of IR thermography for the temperature measurements inside an automobile cabin. International Communications in Heat and Mass Transfer, 36: 872-887.

[7] P. Chatzakos, N. Avdelidis, K. Hrissagis and Tat-Hean Gan (2010) Autonomous infrared (IR) thermography based inspection of glass reinforced plastic (GRP) wind turbine blades (WTBs). Conference on Robotics, Automation and Mechatronics, 557-562.

[8] Wenjun Zhang (2010) Remote malfunction diagnosis system based on infrared thermal imaging and RIA. SOPO Symposium, 1-5.

[9] Teng Li, Darryl P. Almond, D. Andrew S. Rees and Ben Weekes (2011) Crack imaging by scanning pulsed laser spot thermography. NDT and E International, 44(2): 216-225.

[10] Pan Cheng-xiong, Zhang Jing-zhou and Shan Yong (2013) Effects of exhaust temperature on helicopter infrared signature. Applied Thermal Engineering, 51: 529-538.

[11] Pan Cheng-xiong, Zhang Jing-zhou and Shan Yong (2013) Effects of exhaust temperature on helicopter infrared signature. Applied Thermal Engineering, 51: 529-538

[12] G. Colombi, A. Ondini, L. Fortunato and G. Balzarotti (2012) Airborne navigation with onboard infraRed sensors. CNNA Workshop, 1-6.

[13] Sungho Kim, Byungin Choi, Jieun Kim, Soon Kwon, and Kyung-Tae Kim (2012) Three plot correlation-based small infrared target detection in dense sun-glint environment for infrared search and track. Proc. of SPIE, 8393: 83930T1-83930T7.

[14] Maria S, Willersa and Cornelius J, Willers (2012) Key considerations in infrared simulations of the missile-aircraft engagement. Proc. of SPIE, 8543: 85430N1-85430N16.

[15] Mrwan Alayed, Munir M, El-Desouki, Motasem S, Alsawadi, Khalid Alghamdi, Attiah A, Al-Ghamdi, Cornelius J, Willers, Azwitamisi E, Mudau, and Dirk F Bezuidenhout (2012) Future-proofing an aircraft self-protection IR signature database. Proc. of SPIE, 8543:85430O1-85430O10.

[16] Greer J. Gray, Nabil Aouf, Mark Richardson, Brian Butters and Roy Walmsley (2013) Countermeasure effectiveness against an intelligent imaging infrared anti-ship missile. Optical Engineering, 52(2): 02640101-02640110.

[17] R. Borja, J.R. de la Pinta, A.lvarez and J.M. Maestre (2013) Integration of service robots in the smart home by means of UPnP: A surveillance robot case study. Robotics and Autonomous Systems, 61: 153–160.

[18] Eldon Puckrin, Caroline S, Turcotte, Marc-André Gagnon, John Bastedo, Vincent Farley and Martin Chamberland (2012) Airborne infrared hyperspectral imager for intelligence, surveillance

thermopiles for uncooled infrared FPA application. Infrared Physics & Technology, 59: 182-187

[30] Zhao An-Di, Zheng Yong-Jun and YU Xiao-Mei (2012) Imaging and characteristics of a bimaterial microcantilever FPA fabricated using bulk silicon processes. Chin. Phys. Lett. 29(5): 0585021-0585024.

[31] Cheng Gong, Yuejin Zhao, Liquan Dong, Mei Hui, Xiaomei Yu and Xiaohua Liu (2013) The tolerable target temperature for bimaterial microcantilever array infrared imaging. Optics & Laser Technology, 45: 545-550.

[32] Bo Su,Guoteng Duan and Cunlin Zhang (2010) A detection technology of THz based on surface plasmon resonance, Proc. of SPIE 7854: 78541H1-78541H9.

[33] Bo Su and Guoteng Duan (2011) A high sensitivity THz detector. Proc. of SPIE 8195: 81951K1-81951K7.

[34] M. Fatih Toy, Onur Ferhanoglu, Hamdi Torun and Hakan Urey (2009) Uncooled infrared thermo-mechanical detector array Design, fabrication and testing. Sensors and Actuators A, 156(1): 88-94.

[35] Shusen Huang, Hu Tao, I-Kuan Lin and Xin Zhang (2008) Development of double-cantilever infrared detectors fabrication, curvature control and demonstration of thermal detection. Sensors and Actuators A, 45(146) 231–240.

[36] Weibing Wang and D Chen (2007) *An uncooled optically readable infrared imaging detector*. Sensors and Actuators A, 133(1): 236–242.

[37] Scott R. Hunter, Robert A. Amantea, Lawrence A. Goodman, David B. Kharas Sergey Gershtein, James R. Matey, Steven N. Perna, Young Yu, Nagi Maley and Lawrence K. White (2003) High sensitivity uncooled microcantilever infrared imaging arrays. Infrared Technology and Applications XXIX, Proc. of SPIE, 5074: 469-480.

[38] Scott R. Hunter and Gregory Maurer (2006) High sensitivity uncooled microantilever infrared imaging arrays. Proc. of SPIE, 6206: 1-12.

[39] Weidong Wang, Vandana Upadhyay, Christel Munoz, John Bumgarner, and Oliver Edwards (2006) FEA Simulation, Design and fabrication of uncooled MEMS capacitive thermal detector for infrared FPA imaging. Infrared Technology and Applications XXXII, Proc. of SPIE 6206: 62061L1-62061L12.

[40] Weidong Wang, Vandana Upadhyay and John Bumgarner (2006) Simulation and experimental studies of an uncooled MEMS capacitive infrared detector for thermal imaging. Journal of Physics: Conference Series, 34: 350-355.

[41] D. Grbovic, N. V. Lavrik, S. Rajic, and P. G. Datskos (2008) Arrays of SiO2 substrate-free and reconnaissance applications. Proc. of SPIE, 8360: 83600401-83600410.

[19] David R, Luber, John E, Marion, and David Fields (2012) Kestrel: force protection and intelligence, surveillance, and reconnaissance (ISR) persistent surveillance on aerostats. Proc. of SPIE, 8405: 84050L1-84050L4

[20] D.A. Cardimona, C.P. Morath, D.H. Guidry and V.M. Cowan (2013) Laterally-biased quantum dot infrared photodetector. Infrared Physics & Technology. 59: 93-99

[21] M. Razeghi, A.Haddadi, A.M. Hoang, E.K. Huang, G.Chen, S. Bogdanov, S.R. Darvish, F. Callewaert, R.McClintock (2013) Advances in antimonide-based Type-II superlattices for infrared detection and imaging at canter for quantum devices. Infrared Physics & Technology. 59:41-52

[22] Cheng Gong, Yuejin Zhao, Liquan Dong, Mei Hui, Xiaomei Yu, Xiaohua Liu (2013) Short-wave infrared, medium-wave infrared, and long-wave infrared imaging study for optical readout microcantilever array infrared sensing system. Optical Engineering, 52(2): 0264031-0264036.

[23*] Bin* Wang, Jianjun Lai, Hui Li, Haoming Hu, Sihai Chen (2013) Nanostructured vanadium oxide thin film with high TCR at room temperature for microbolometer. Infrared Physics & Technology, 57: 8-13.

[24] Duy-Thong Nguyen, François Simoens, Jean-Louis Ouvrier-Buffet, Jérôme Meilhan, and Jean-Louis Coutaz (2012) Broadband THz uncooled antenna-coupled microbolometer array—electromagnetic design, simulations and measurements. ieee Transactions on Terahertz Science and Technology, 2(3): 299-305.

[25] Bin Wang and Jianjun Lai (2012) Vanadium oxide microbolometer with gold black absorbing layer. Optical Engineering, 51(7): 0740031-0740037.

[26] Zunping Xu a,b, Dongxu Yan a, Dingquan Xiao a, Ping Yu and Jianguo Zhu (2012) Temperature field and residual stress analysis of multilayer pyroelectric thin film. Ceramics International, 38(2): 981–985.

[27] Shao Xiumei, Ding Jieying, Ma Xueliang, Yu Yuehua and Fang Jiaxiong (2012) Design and thermal analysis of electrically calibrated pyroelectric detector. Infrared Physics & Technology, 55: 45–48.

[28] Chung-Nan Chen (2012) Fully quantitative characterization of CMOS–MEMS polysilicon / titanium thermopile infrared sensors. Sensors and Actuators B, 161: 892– 900.

[29] M. Abe, Y. Abe, N. Kogushi, K.S. Ang, R. Hofstetter, H. Wang and G.I. Ng (2013) High-performance modulation-doped AlGaAs/InGaAs

micromechanical uncooled infrared and terahertz detectors. J of Applied Physics, 104: 0545081-0545081.

[42] D. Grbovic, S. Rajic, N.V. Lavrik, and P.G. Datskos (2008) Progress with MEMS based UGS (IR/THz). Unattended Ground, Sea, and Air Sensor Technologies and Applications X, Proc. of SPIE, 6963: 696317-69631711.

[43] D. Grbovic and G. Karunasiri (2009) Fabrication of bi-material MEMS detector arrays for THz imaging. Terahertz Physics, Devices, and Systems III, Proc. of SPIE, 7311: 7311081-7311087.

[44] Sandeep Kumar Vashist (2007) A review of microcantilevers for sensing applications. Journal of Nanotechnology, 3: 1-15.

[45] P. G. Datskos, N. V. Lavrik and S. Rajic (2004) Performance of uncooled microcantilever thermal detectors. review of scientific instruments, 75(4): 1134-1148.

[46] Yang Zhao, Minyao Mao, Roberto Horowitz, Arunava Majumdar, John Varesi, Paul Norton, and John Kitching (2002) *optomechanical uncooled infrared imaging system design, microfabrication, and performance.* J of Microelectromechanical Systems, 11(2).