

تحلیل پاسخ فرکانسی و آنالیز نویز آشکارساز IR میکروکانتیلیوری فاقد خنک ساز با بهینه سازی ضخامت لایه ها

حسن عبدالهی^{۱*}، افسانه حق نگهدار^۲

۱. دانشیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، ایران، تهران

۲. کارشناس ارشد، مهندسی برق مخابرات، دانشگاه علم و صنعت، ایران، تهران

تاریخ دریافت:

۵ آذر ماه ۱۴۰۲

تاریخ پذیرش:

۷ بهمن ماه ۱۴۰۲

چکیده

در این مقاله با بهینه سازی ضخامت لایه ها، پاسخ آشکارساز IR میکروکانتیلیوری از جنس SiO₂/Al بهبود یافت و نتایج تحلیل ها نشان داد که ضخامت لایه عایق بایستی دوبرابر ضخامت لایه فلز شود. مقادیر نویز و پاسخ فرکانسی تغییرات دما، جابه جایی، هدایت حرارتی و حساسیت توانی به ازای تغییر ضخامت لایه ها و عرض بازوهای دوماده ای و ایزوله در دو محیط فضای آزاد و خلأ محاسبه شده اند. نتایج تحلیل های عددی نشان می دهد که چنانچه عرض و ضخامت لایه عایق بازوها به ترتیب ۱۰ μm و ۱ μm و ضخامت لایه Al به اندازه نصف ضخامت لایه SiO₂ انتخاب شود، مقادیر هدایت حرارتی، ثابت زمانی و تغییر دما، در محیط خلأ نسبت به فضای آزاد به ترتیب ۱۲۸/۵، ۱۲۳ و ۱۲۵ برابر کاهش و مقادیر تغییر جابه جایی، حساسیت توانی به ترتیب ۱۲۴/۷ و ۱۲۷/۶ برابر افزایش می یابند. نتایج تحلیل های فرکانسی نیز نشان می دهد که در فضای باز، سرعت فیلم برداری و دقت عکس برداری حرارتی بهبود یافته است؛ ولی در محیط خلأ فقط دقت عکس برداری حرارتی آن بهبود یافته است؛ زیرا مقدار ثابت زمانی در خلأ با کاهش هدایت حرارتی افزایش می یابد. نتایج تحلیل های نویزی نیز نشان می دهد که نسبت سیگنال به نویز بهبود یافته است و مقادیر نویزهای نوسان دمایی، پس زمینه، ترمومکانیکی و نویز معادل در خلأ به ترتیب ۱/۳۸mK، ۱/۲۴mK، ۲/۳mK و ۱/۸۶mK کاهش یافته اند. **واژه های کلیدی:** میکرو ماشین کاری؛ آشکارساز مادون قرمز فاقد خنک ساز؛ آشکارساز حرارتی؛ میکروکانتیلیور.

Frequency Response and Noise Analyses of Uncooled Microcontroller IR Detector by Optimizing of Layers Thickness

Hasan Abdolahi^{*1}, Afsaneh Haghnegahdar²

1. Associate Professor of Electrical Engineering, Shahid Sattari Aeronautical University, Tehran, Iran
2. Master of Telecommunications Engineering, Iran University of Science & Technology, Tehran, Iran

Abstract

In this paper, Analysis of frequency response and noise in the SiO₂/Al microcantilever IR detector are presented by changing the thickness of the layers and the width of the bi-material and isolated legs in the vacuum and air space environments. The results of the numerical analysis show that the detector responses are increased by decreasing the thickness of the insulation layer and the width of the legs. If the thickness of the insulation layer and the width of the legs are 10 μm and 1 μm, respectively, and the thickness of the SiO₂ layer is twice the thickness of the Al layer, the thermal conductivity and time constant are reduced 128.5 and 123 times, respectively, and the temperature, displacement, power sensitivity increased 125, 124.7, and 127.6 times, respectively, in the vacuum environment compared with the air environment. The results of the frequency analyze show that thermal video frame rate and thermal imaging accuracy increase in the air environment, but thermal imaging accuracy is increases in the vacuum environment, since the time constant increases due to decrease the thermal conductivity in the vacuum environment. The noise analyze results also shows that noise is improved and temperature fluctuation noise, background fluctuation noise, thermomechanical fluctuation noise and total noise equivalent temperature difference in vacuum reduce to 1.38 mK, 1.24 mK, 2.3 mK, and 1.86 mK, respectively.

Key words: MEMS, Uncooled Infrared Detector; Thermal Detector; Microcantilever.

توانائی آشکارسازی و مشخص کردن اشیا در شرایط نامطلوب محیطی و جوی (از قبیل تاریکی شب و هوای مه‌آلود) همواره مورد توجه صنایع نظامی و تجاری بوده است. آشکارسازی و درک واقعی از اشیا در چنین شرایطی معمولاً به دو صورت فعال^۱ و غیرفعال^۲ انجام می‌شود. در آشکارسازی به روش فعال، با روشن کردن محیط توسط یک منبع نورانی مثل لامپ، شمع و... جسم مورد نظر آشکار شده و توسط چشم قابل‌رؤیت می‌گردد. در روش آشکارسازی غیرمستقیم، ماهیت جسم با تشعشعات برگشتی از جسم یا ساطع شده از آن به صورت حرارت یا تشعشعات مادون قرمز مشخص می‌شود [۱]. اکثر کاربران از دستگاه‌های عکس‌برداری با قابلیت تصویربرداری از جسم در برابر نور مرئی استفاده می‌کنند و آن‌ها نمی‌توانند از چنین دستگاه‌هایی در تاریکی استفاده نمایند. دستگاه‌های تصویربرداری که در بازه طول موج μm ۸-۱۴ کار می‌کنند، خصوصیات جالب توجهی دارند؛ زیرا به روشنایی محیط وابسته نیستند؛ بلکه به اختلاف دمایی بین جسم و محیط اطراف حساس هستند. امواج الکترومغناطیسی ساطع شده در این بازه تضعیف زیادی در اتمسفر ندارند [۱]. با روش‌های مختلفی می‌توان تشعشعات حرارتی را آشکار نمود که می‌توان به آشکارسازی به روش‌های فتوولتائیک [۲] و چاه کوانتومی در آشکارسازهای فوتونی [۳] و آشکارسازی به روش‌های پایرو الکتریک [۴]، بالومتر [۵] و ترموپیل [۶] در آشکارسازهای حرارتی اشاره نمود. در روش آشکارسازی حرارتی، با جذب تشعشعات IR، انرژی فوتون به فونون تبدیل شده که نتیجه آن تغییر دمای قطعه است. این تغییر دما سبب تغییر مشخصات الکتریکی می‌شود که با یک مدار بازخوان قابل‌اندازه‌گیری است. در این روش‌ها جهت تغییر مشخصات الکتریکی نیاز به جریان dc است. این جریان سبب افزایش دما، توان مصرفی قطعه و سبب تولید شات نویز در آشکارساز می‌شود. در آشکارسازهای میکروکانتیلیوری دو ماده‌ای به روش MEMS از خاصیت ترمومکانیکی مواد استفاده می‌شود. در این نوع از آشکارسازها دمای حس‌گر بر اثر تابش امواج IR تغییر می‌کند و تفاوت ضریب انبساط حرارتی بی - متال سبب ایجاد کجی در کانتیلیور می‌شود. با اندازه‌گیری میزان جلبه‌جایی کانتیلیور توسط یک مدار الکتریکی یا سیستم نوری و مکانیکی می‌توان به میزان تغییرات دمای حس‌گر پی برد و کجی را اندازه‌گیری نمود. عدم نیاز به سیستم خنک‌ساز، عدم نیاز به جریان DC برای بلیاس کردن، حذف شات نویز ناشی از جریان dc، حذف پدیده self-heating، کاهش توان مصرفی،

حساسیت بیشتر، سادگی طراحی فرایند پروسه ساخت و پایین بودن قیمت از جمله مزیت‌های این روش نسبت به روش‌های دیگر است [۷-۹]. طراحی فرایند ساخت آشکارساز مادون قرمز میکروکانتیلیوری از جنس SiO_2/Al و بدون نیاز به خنک‌ساز با فناوری میکرو ماشین‌کاری در مرجع [۱۰] بیان شده است و نشان داده شده است که آن را می‌توان با روش‌های ساده و ارزان قیمت در آزمایشگاه‌هایی با امکانات محدود پیاده‌سازی نمود [۱۱-۱۴]. در مرجع [۱۵] نشان داده شده است که به علت اختلاف زیاد ضریب انبساط حرارتی بین SiO_2 و Al نسبت به مواد دیگر، پاسخ این نوع از آشکارساز نسبت به آشکارسازهای میکروکانتیلیوری با مواد مختلف دیگر بیشتر است. در مرجع [۱۶] نیز نشان داده شده است که با بهینه‌سازی پاسخ آشکارساز و حساسیت آن افزایش می‌یابد.

اگرچه مقدار نویز در آشکارساز IR میکروکانتیلیوری از جنس SiO_2/Al با حذف شات نویز ناشی از جریان dc و حذف پدیده self-heating کاهش می‌یابد. ولی در آشکارساز میکروکانتیلیوری، نویزهای ترمومکانیکی به خاطر نوسان دما به وجود می‌آیند که ناشی از طبیعت دینامیکی تبادل حرارت میان آشکارساز و محیط اطراف است؛ لذا لازم است که مقدار نویز تحت بررسی بیشتر قرار گیرد و نتایج حاصل از آن با کارهای مشابه دیگر مورد مقایسه قرار گیرد. به همین دلیل، در مقاله حاضر با بهینه‌سازی ضخامت لایه‌ها، به تحلیل نویزی و تحلیل فرکانسی پرداخته شده است و مقدار تغییرات دما، جابه‌جایی، هدایت حرارتی و حساسیت توانی به‌ازای تغییر ضخامت لایه‌ها و عرض بازوهای دوماده‌ای و ایزوله در دو محیط فضای آزاد و خلأ محاسبه شده‌اند. در ادامه، در بخش دوم عملکرد آشکارساز به طور خیلی خلاصه بیان می‌شود. در بخش دوم روابط حاکم بر آشکارساز در حوزه فرکانس بیان خواهد شد. روابط نویز در بخش چهارم نتایج حاصل از محاسبات تحلیل‌های فرکانسی و نویزی در بخش پنجم به انجام رسیده است. در بخش آخر نیز نتیجه‌گیری این مقاله ارائه می‌شود.

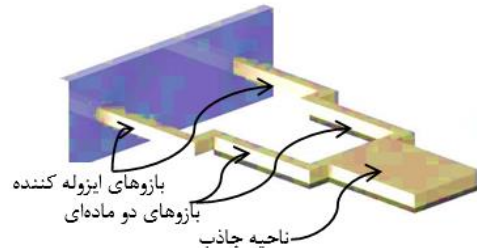
۲- عملکرد آشکارساز

آشکارساز مادون قرمز طراحی شده از ۳ قسمت مختلف، ناحیه جاذب، ناحیه دو ماده‌ای و ناحیه ایزوله تشکیل شده است. در ناحیه جاذب، لایه SiO_2 امواج مادون قرمز را در بازه فرکانسی $8-14 \mu\text{m}$ جذب می‌کند. امواج جذب شده در این ناحیه تبدیل به حرارت می‌شود و باعث افزایش دمای ناحیه جاذب می‌شود. انرژی حرارتی به دلیل اختلاف دما

¹ active

² passive

بین ناحیه جاذب و محیط از ناحیه گرم‌تر به ناحیه سردتر منتقل می‌شود. انتقال حرارت به سه صورت تشعشعی، تبادل با محیط و هدایت انجام می‌شود. انتقال حرارت از طریق هدایت توسط نواحی دو ماده‌ای و ایزوله انجام می‌شود و دمای نواحی دو ماده‌ای با انتقال انرژی حرارتی به آن افزایش می‌یابد. این افزایش دما سبب خمش نواحی دو ماده‌ای به علت اختلاف ضریب انبساط حرارتی دو ماده‌ای می‌شود. در نتیجه این خمش، کل آشکارساز خم می‌شود. با اندازه‌گیری میزان خمش آشکارساز می‌توان به میزان امواج مادون قرمز پی برد. در این طراحی ناحیه جاذب نیز به صورت دو ماده‌ای طراحی شده است تا میزان جذب امواج مادون قرمز با بازتابش موج از لایه Al به داخل SiO₂ افزایش یابد، همچنین طول ناحیه دو ماده‌ای تا انتهای ناحیه جاذب گسترش یافته است تا میزان جابه‌جایی آشکارساز افزایش یابد. در شکل ۱ ساختار هندسی این آشکارساز و در جدول ۱ ابعاد آن نشان داده شده است [۱۴].



شکل ۱- تصویر آشکارساز IR. تصویر ۳ بعدی از آشکارساز که لایه Al به رنگ مشکی در زیر لایه SiO₂ به رنگ نوک‌مدادی قرار گرفته است.

جدول ۱- مشخصات هندسی آشکارساز طراحی شده [۱۴]

ابعاد (μm)	جنس	اجزاء آشکارساز IR طراحی شده
۱۰۰×۷۰	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

۳- تحلیل حرارتی و سازه‌ای

تغییر دمای ΔT_c در ناحیه جاذب آشکارساز به مقدار هدایت حرارتی آشکارساز با محیط پیرامونی بستگی دارد. هدایت

حرارتی در آشکارسازهای میکروکانتیلیوری به سه طریق هدایت حرارتی از طریق بازوهای نگهدارنده (G_{leg})، هدایت تشعشعی (G_{rad}) و هدایت از طریق تبادل حرارت با محیط پیرامونی (G_{amb}) انجام می‌شود که مقادیر آن‌ها به ترتیب از روابط (۱) الی (۳) به دست می‌آیند. تغییر دمای آشکارساز نیز با فرض پایداری تبادل حرارتی آشکارساز با محیط اطراف خود از رابطه (۴) به دست می‌آید. رابطه (۵) مقدار ثابت زمانی و رابطه (۶) نیز میزان خمش بر حسب تغییر دمای کانتیلیور را نشان می‌دهد [۱۷]:

$$G = G_{leg} + G_{rad} + G_{amb} \quad (WK^{-1}) \quad (1)$$

$$G_{leg} = 2 \times \left(\frac{l_b}{k_{SiO_2} A_{SiO_2} + k_{Al} A_{Al}} + \frac{l_i}{k_{SiO_2} A_{SiO_2}} \right)^{-1} \quad (WK^{-1}) \quad (2)$$

$$G_{rad} = 4 \cdot \sigma_T \cdot A_{pixel} (\epsilon_{Al} + \epsilon_{SiO_2}) T^3 \quad (WK^{-1}) \quad (3)$$

$$\Delta T_D = \frac{P_0}{G \sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}} \quad (^\circ C) \quad (4)$$

$$\tau = \frac{C}{G} = \left(\frac{cV}{G} \right) \quad (s) \quad (5)$$

$$\Delta z = 3 \cdot (\alpha_1 - \alpha_2) \cdot \frac{r(1+r)}{t_2 K} \cdot l_b^2 \cdot \Delta T \quad (6)$$

$$K = 4r + 6r^2 + 4r^3 + \frac{E_1}{E_2} r^4 + \frac{E_2}{E_1} \quad r = \frac{t_1}{t_2}$$

در این روابط، (k_{Al} و k_{SiO_2})، (α_1 و α_2)، (E_1 و E_2)، (t_1 و t_2) و ($\epsilon_{Al}=0/1$ و $\epsilon_{SiO_2}=0/8$) به ترتیب ضریب هدایت حرارتی^۱، ضریب انبساط حرارتی^۲، ضریب مدول یانگ^۳ و ضخامت‌ها و ضرایب تشعشعی^۴ لایه فلزی و لایه جاذب (آلومینیوم و اکسید سیلیکون)، مساحت سطح مقطع لایه‌ها در بازوهای دو ماده‌ای و ایزوله، l_i و l_b به ترتیب طول بازوهای دو ماده‌ای و ایزوله، ($5/67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$)، $\sigma_T =$ ضریب استفان - بولتزمن^۵، T دمای پیکسل، P_0 توان جذبی IR، ω فرکانس مدولاسیون، τ زمان پاسخ‌دهی حرارتی، C ظرفیت گرمایی، C ضریب گرمای ویژه و V حجم آشکارساز است. سومین جمله رابطه (۱)، هدایت حرارتی آشکارساز با محیط پیرامونی (G_{amb}) است. در این مقاله، تحلیل آشکارساز مادون قرمز در دو محیط هوا و خلأ انجام شده است. مقدار G_{amb} در محیط خلأ در حدود 10^{-7} wk^{-1} و در محیط هوا با فرض $2/5 \mu\text{m}$ فاصله هوایی در حدود 10^{-5} wk^{-1} و $2/17 \times 10^{-5}$ در نظر گرفته شده است [۱۸]. در رابطه (۴)، ω تنها متغیر

⁴ Emissivity

⁵ Stefan-Boltzmann Constant

¹ Thermal Conductivity

² Thermal Expansion Coefficient

³ Young's Modulus

وابسته به فرکانس است که حاصل آن در زمان پاسخ‌دهی حرارتی τ ضرب شده است.

۴- بهینه‌سازی ضخامت لایه‌ها

طبق معادله (۶) مشاهده می‌شود که میزان جابه‌جایی آشکارساز مادون قرمز میکروکانتیلیوری به ابعاد آن وابسته است، لذا پاسخ آشکارساز را می‌توان با انتخاب مناسب ابعاد بهبود داد. با کاهش عرض بازوها و ضخامت لایه‌ها میزان جابه‌جایی افزایش می‌یابد، عرض بازوها و ضخامت لایه‌ها را می‌توان با بهینه‌سازی فرایند ساخت کاهش داد و می‌توان ضخامت لایه عایق را با بهینه‌سازی فرایند ساخت در آزمایشگاه‌هایی با امکانات محدود به 500nm کاهش داد [۱۴]. امکان کاهش ضخامت لایه عایق تا 100nm با بهینه‌سازی فرایند ساخت در آزمایشگاه‌های پیشرفته وجود دارد؛ بنابراین می‌توان پهنای بازوها را از $10\mu\text{m}$ به $1\mu\text{m}$ کاهش داد. نتایج حاصل از این بهینه‌سازی‌ها بر حسب فرکانس در بخش بعدی بیان خواهد شد. میزان خمش آشکارساز طبق رابطه (۶) به نسبت ضخامت لایه‌ها بستگی دارد؛ لذا با محاسبه ریاضی می‌توان مقدار ماکزیمم این نسبت را دست آورد. از آنجائی که ضریب مدول یانگ Al تقریباً با ضریب مدول یلنگ SiO_2 برابر است، لذا رابطه (۶) به رابطه (۷) ساده می‌شود.

$$K = 1 + 4r + 6r^2 + 4r^3 + r^4 = (1+r)^4 \quad (7)$$

$$\Delta z = 3 \cdot (\alpha_1 - \alpha_2) \cdot \frac{r(1+r)}{t_2 K} \cdot I_b^2 \cdot \Delta T$$

با جای‌گذاری K در معادله فوق خواهیم داشت:

$$\Delta z = 3 \cdot (\alpha_1 - \alpha_2) \cdot \frac{r}{t_2 (1+r)^3} \cdot I_b^2 \cdot \Delta T \quad (8)$$

چنانچه مشتق رابطه (۸) بر حسب r را برابر با صفر قرار شود، می‌توان مقدار حداکثر جابه‌جایی را به دست آورد. نتیجه مشتق رابطه (۸) به صورت رابطه (۹) می‌شود.

$$\frac{dz}{dr} = 3 \cdot (\alpha_1 - \alpha_2) \cdot I_b^2 \cdot \Delta T \cdot (1+r)^2 (1-2r) \quad (9)$$

با صفر قراردادن رابطه (۹)، دو مقدار -1 و $0/5$ برای r حاصل می‌شود. عدد منفی یک مقدار نامعتبر است زیرا ضخامت نمی‌تواند منفی باشد. بنابراین مقدار $0/5$ پاسخ صحیح خواهد بود، لذا ضخامت لایه فلزی باید نصف عایق ضخامت لایه باشد تا مقدار جابه‌جایی آشکارساز به حداکثر برسد.

۵- تحلیل سازه‌ای برحسب فرکانس

حساسیت توانی که نسبت جابه‌جایی آشکارساز به توان امواج مادون قرمز تابیده شده به سطح آشکارساز است از رابطه (۱۰) و میزان خمش کانتیلیور برحسب حساسیت توانی از رابطه (۱۱) به دست می‌آیند [۱۸].

$$\Re_{(\omega)} = \frac{\Delta z}{P_0} = \eta \frac{3}{2} \frac{I_b^2}{t_1 + t_2} \frac{\Delta T}{P_0} \times \left[\frac{\left(1 + \frac{t_1}{t_2}\right)^2}{3 \left(1 + \frac{t_1}{t_2}\right)^2 + \left(1 + \frac{t_1}{t_2} \frac{E_1}{E_2}\right) \left(\frac{t_1^2}{t_2^2} + \frac{t_2}{t_1} \frac{E_2}{E_1}\right)} \right] \quad (10)$$

$$\times (\alpha_1 - \alpha_2) \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)^2 + \frac{\omega^2}{\omega_0^2 Q^2}}} = \frac{\Re_0(\omega)}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)^2 + \frac{\omega^2}{\omega_0^2 Q^2}}} \quad (11)$$

$$\Delta z = \Re_{(\omega)} \cdot P_0 \quad (m)$$

η ضریب جذب^۱ سامانه^۱ اپتیکی و ω_0 فرکانس رزونانس آشکارساز هستند.

۶- تحلیل نویز

مقدار اختلاف دمای معادل نویز^۲ (NEDT) یک عامل مهم در ارزیابی آشکارسازهای میکروکانتیلیوری است. این عامل تعیین‌کننده میزان اختلاف دمای معادل با نویز سیستم است که سبب جابه‌جایی آشکارساز می‌شود. منابع نویزی که در آشکارسازهای حرارتی وجود دارند، عبارت‌اند از: نویز نوسانی دمایی، نویز نوسانی ناشی از پس‌زمینه و نویز ترمومکانیکی. این نویزها به علت نوسان در دمای آشکارساز به وجود می‌آیند که ناشی از طبیعت دینامیکی تبادل حرارت میان آشکارساز و محیط اطراف است. در حالت ایده‌آل، تقویت‌کننده مدار بازخوان و نشان‌دهنده، بدون نویز هستند و تأثیری بر روی کانتیلیورها و نسبت سیگنال به نویز ندارند. در عمل حالت ایده‌آل را نداریم زیرا نویز حاصل از سیستم بازخوانی اثر کمی را بر روی کاهش نسبت سیگنال به نویز در میکروکانتیلیور دارد. در این مقاله از اثر این نویزها صرف‌نظر شده است [۱۹].

نویز نوسان دمایی^۳ (NEDT_{TF}): هر سیستم ترمومکانیکی که در ارتباط با محیط پیرامون است (مانند آشکارسازهای میکروکانتیلیوری) دارای یک تبادل حرارتی در ابعاد میکروسکوپی هستند که سبب ایجاد نویز نوسانی دمایی در آشکارساز می‌گردد.

³ Temperature fluctuation noise

¹ Infrared Absorption Efficiency

² Noise equivalent temperature difference

میکروکانتیلیور وجود دارد. خاصیت نوسان مکانیکی یکی از خصوصیات استثنائی آشکارسازهای میکروکانتیلیوری است که شباهتی با ویژگی‌های انواع دیگر آشکارسازهای IR ندارد. وقتی یک آشکارساز مکانیکی در شرایط تعادل دمایی قرار می‌گیرد، به طور پیوسته یک تبادل ذخیره‌سازی انرژی میان سیستم مکانیکی و حرارتی وجود دارد. مقدار این نوسان خودبه‌خودی در میکروکانتیلیور به‌وسیله انرژی $k_B \cdot T$ بیان می‌شود. فاکتور Q^3 ، فرکانس رزونانس و ضریب سختی^۴ k پارامترهایی هستند که در معادله آن بکار می‌روند. براین اساس، رابطه اندازه نویز ترمومکانیکی $NEDT_{TM}$ به‌صورت رابطه (۱۴) معرفی می‌شود [۱۹].

$$NEDT_{TM} = \frac{4F^2}{\tau_0 A_d \left(\frac{dP}{dT} \right)_{\lambda_1 - \lambda_2}} \frac{1}{\Re_0(\omega)} \sqrt{\frac{k_B T_D B}{K Q \omega_0}} \quad (mK) \quad (14)$$

اگر مقدار فرکانس سیگنال و نویز برابر باشد، نویز نوسان دمایی را نمی‌توان از سیگنال جدا کرد. مهم‌تر از این، وقتی که نویز و سیگنال به‌وسیله فرکانس رزونانس میکروکانتیلیور تقویت و به مقدار حداکثر خود برسد، نسبت سیگنال به نویز را نمی‌توان بهبود داد؛ لذا طراحی میکروکانتیلیور در ناحیه فرکانس رزونانس بسیار مشکل است. در محاسبات تئوری، فرکانس کار به‌اندازه 30 Hz از بلند کناری باید فاصله داشته باشد و این مسئله، وقتی امکان‌پذیر خواهد شد که فرکانس رزونانس خیلی تیز باشد. در این حالت لازم است عامل Q خیلی بزرگ باشد. درنهایت، اندازه نویز معادل را می‌توان به‌صورت رابطه (۱۵) بیان نمود:

$$NEDT_{total} = \sqrt{(NEDT_{TF})^2 + (NEDT_{BF})^2 + (NEDT_{TM})^2} \quad (mK) \quad (15)$$

۷- تحلیل نتایج حاصل از محاسبات

در این مقاله تحلیل‌های هدایت حرارتی، تغییر دما، میزان جابه‌جایی، حساسیت توانی و تحلیل‌های نویز آشکارساز شکل ۱ با بازوهای ایزوله از جنس SiO_2 و بازوهای دو ماده‌ای و ناحیه جاذب از جنس Al/SiO_2 در حوزه فرکانس برای دو محیط خلأ و محیط فضای آزاد انجام شده‌اند. نتایج حاصل از تحلیل‌های انجام شده در اشکال ۲ و ۳ نشان داده شده‌اند. محورهای افقی این اشکال برحسب فرکانس و محورهای عمودی برحسب تابع‌های هستند که محاسبه شده‌اند. نتایج حاصل از محاسبات مقادیر در محیط آزاد با نمودارهای با خطوط مقطع و نتایج حاصل از محاسبات در محیط خلأ با نمودارهای با خطوط ممتد

این حالت دمای کانتیلیور به طور خودبه‌خود بر اثر نویز نوسان دمایی تغییر می‌کند که نتیجه آن جابه‌جایی در آشکارساز به‌صورت نوسانی است. حال اگر میکروکانتیلیور در محیط خلأ قرار گیرد، اتلاف حرارت از طریق نواحی دو ماده‌ای و ایزوله تعیین‌کننده اندازه هدایت حرارتی در آشکارساز خواهند شد. حتی اگر آشکارساز و زیر لایه در یک دمای کاملاً مشابه قرار گیرند، یک تبادل حرارتی دینامیکی در دو جهت پایه‌ها وجود خواهند داشت که ناشی از طبیعت ذاتی تبادل حرارت در مواد است و نتیجه آن نوسان در دمای میکروکانتیلیور است. حال اگر تبادل حرارت تشعشعی میان آشکارساز و محیط اطراف در مقایسه با تبادل هدایتی قابل صرف‌نظر باشد، می‌توان نویز نوسانی دمایی را برای محاسبه $NEDT$ استفاده نمود که اندازه آن طبق رابطه (۱۲) برابر خواهد بود با [۱۹]:

$$NEDT_{TF} = \frac{8F^2 \sqrt{k_B B G T_D}}{\tau_0 A_d \left(\frac{dP}{dT} \right)_{\lambda_1 - \lambda_2}} \quad (mK) \quad (12)$$

در این رابطه: $k_B = 2/62 \text{ pW}/(\mu\text{m})^2 \cdot K$ توان تشعشع شده از جسم سیاه در بلند $8\mu\text{m} - 14\mu\text{m}$ ، k_B ثابت بولتزمن، T_D دمای آشکارساز، F عدد f سامانه اپتیکی، A_d مساحت سطح آشکارساز، B پهنای باند نویز و τ_0 ضریب جذب امواج مادون قرمز است.

نویز پس‌زمینه^۱ ($NEDT_{BF}$): ایجاد ایزولاسیون حرارتی بالا، یک راه‌حل کلیدی و منطقی در طراحی آشکارسازهای حرارتی است. اما همراه یک تشعشع حرارتی بین آشکارساز و محیط اطراف آشکارساز وجود دارد. بنابراین امکان ایجاد ایزوله حرارتی بالا میسر نیست. حال اگر تبادل حرارت تشعشعی، عامل غالب در هدایت حرارتی باشد، در این صورت نوسانات دمایی در آشکارساز ظاهر می‌شود. این نوسانات، نویزهایی را پدید می‌آورد که معمولاً نویز نوسانی پس‌زمینه نامیده می‌شود. در این حالت اندازه نویز نوسانی پس‌زمینه آشکارساز حرارتی میکروکانتیلیوری را می‌توان از رابطه (۱۳) به دست آورد [۱۹].

$$NEDT_{BF} = \frac{8F^2}{\tau_0 \left(\frac{dP}{dT} \right)_{\lambda_1 - \lambda_2}} \sqrt{\frac{2k_B \sigma_T B (T_D^5 + T_B^5)}{A_d}} \quad (mK) \quad (13)$$

در این رابطه: T_B دمای پس‌زمینه است.

نویز ترمومکانیکی^۲ ($NEDT_{TM}$): علاوه بر نویز نوسانی دمایی و نویز نوسانی پس‌زمینه، نویز ترمومکانیکی نیز در آشکارسازهای IR

³ Q-factor

⁴ Stiffness

¹ Background fluctuation noise

² Thermomechanic fluctuation noise

نشان داده شده است. نمودارهای قرمز رنگ به عنوان شاخص مربوط به آشکار ساز مرجع [۱۳] است که در آن ضخامت لایه SiO_2 ، ضخامت لایه Al و عرض بازوها آشکار ساز به ترتیب $1 \mu\text{m}$ ، 200 nm و $10 \mu\text{m}$ هستند. پنج نمودار مشکی رنگ این اشکال مربوط به مقادیر برحسب فرکانس درازای کاهش ضخامت لایه SiO_2 از $1 \mu\text{m}$ تا $0.2 \mu\text{m}$ با گامهای $0.2 \mu\text{m}$ و با رعایت ضخامت لایه Al به اندازه نصف ضخامت لایه SiO_2 هستند. پنج نمودار سبزرنگ این اشکال نیز مربوط به مقادیر برحسب فرکانس درازای کاهش عرض بازوها از $10 \mu\text{m}$ تا $2 \mu\text{m}$ با گامهای $2 \mu\text{m}$ هستند که در آن ضخامت لایه SiO_2 به اندازه $0.2 \mu\text{m}$ با رعایت ضخامت بهینه لایه Al هستند. بردارهای روی اشکال به رنگ سبز و مشکی به ترتیب جهت کاهش ضخامت و عرض بازوها را نشان می دهد. اشکال الف، ب، پ و ت شکل ۲ به ترتیب مربوط به مقادیر هدایت حرارتی، تغییر دما، میزان جابه جایی و حساسیت توانی هستند و اشکال الف، ب، پ و ت شکل ۳ به ترتیب مربوط به مقادیر نویزهای نوسان دمایی، پس زمینه، ترمومکانیکی و معادل مجموع نویزها هستند. در ادامه به تشریح هر کدام پرداخته می شود:

الف) تغییرات هدایت حرارتی: هدایت حرارتی طبق رابطه (۲) نسبت مستقیم با ضخامت لایه ها دارد؛ لذا با کاهش ضخامت لایه عایق، مقدار هدایت حرارتی کاهش می یابد. در شکل (۲-الف) روند کاهش هدایت حرارتی با تغییر ابعاد در شرایط خلأ نشان داده است. طبق این شکل:

(۱) تغییرات مقدار هدایت حرارتی در محیط آزاد تقریباً مقداری ثابت است زیرا طبق رابطه (۱) مقدار هدایت حرارتی از طریق هوا بر دیگر مقادیر هدایت حرارتی غالب است. در این مقاله فرض شده است فاصله هوایی آشکار ساز از بستر در حدود $2/5 \mu\text{m}$ است. با این فرض، مقدار هدایت حرارتی از طریق هوا در حدود $\text{WK}^{-1} \times 10^{-5} \times 2/7$ می شود.

(۲) مقدار هدایت در فرکانس های مختلف تغییری نمی کند و مقدار آن مستقل از فرکانس است.

(۳) هدایت حرارتی در شرایط خلأ از هدایت حرارتی در محیط آزاد کمتر است.

(۴) هدایت حرارتی با کاهش ضخامت و عرض بازوها کاهش می یابد.

ب) دمای آشکار ساز: تغییر دمای آشکار ساز طبق رابطه (۴) نسبت عکس با هدایت حرارتی دارد و هدایت حرارتی طبق رابطه (۲) نسبت

مستقیم با ضخامت لایه ها دارد؛ بنابراین تغییرات دمای آشکار ساز نسبت عکس با ضخامت لایه عایق دارد.

شکل (۲-ب) نمودار تغییرات دمای آشکار ساز بر حسب فرکانس در ازای تغییر ضخامت لایه SiO_2 و تغییر پهنای آشکار ساز را نشان می دهد. بر این اساس:

(۱) طبق شکل ملاحظه می شود که مقدار دما در فضای آزاد کمتر از مقدار دما در فضای عایق است زیرا هدایت حرارتی در فضای آزاد بیشتر از هدایت حرارتی در خلأ است.

(۲) دمای آشکار ساز طبق رابطه (۴) با فرکانس رابطه عکس دارد. تا زمانی که $\omega\tau \ll 1$ است، پاسخ فرکانسی آشکار ساز ثابت می ماند ولی با افزایش ω در فرکانس های بالا، پاسخ فرکانسی ΔT کاهش می یابد. لذا با افزایش فرکانس مقدار دما نیز کاهش می یابد.

(۳) طبق این شکل ملاحظه می شود که بازه ی فرکانسی دمای آشکار ساز در خلأ کمتر از بازه ی فرکانسی آشکار ساز در فضای آزاد است. زیرا مقدار ثابت زمانی در شرایط خلأ بیشتر از مقدار ثابت زمانی در فضای آزاد است. البته بازه فرکانس با افزایش هدایت حرارتی کاهش می یابد. طبق شکل، بازه فرکانسی در فضای آزاد در حدود ده هرتز و در فضای خلأ در حدود چند صد هرتز است. بنابراین پهنای باند فرکانسی آشکار ساز در محیط باز حدوداً ۱۰ برابر بیشتر از پهنای باند فرکانس در فضای خلأ است.

ت) جابه جایی آشکار ساز: شکل (۲-پ) میزان خمش آشکار ساز به ازای تغییر ضخامت لایه ها در فرکانس های مختلف را نشان می دهد. مشاهده می شود که:

(۱) مقدار جابه جایی آشکار ساز در خلأ بیشتر از مقدار جابه جایی در فضای آزاد است زیرا طبق رابطه (۶) مقدار جابه جایی با تغییر دما رابطه مستقیم دارد.

(۲) با کاهش ضخامت SiO_2 میزان خمش افزایش می یابد.

(۳) میزان جابه جایی با کاهش پهنای بازوها افزایش می یابد.

(۴) میزان جا به جایی در آشکار ساز طبق رابطه (۶) با فرکانس نسبت عکس دارد. بنابراین میزان جا به جایی با افزایش فرکانس کاهش خواهد یافت.

(۵) بازه فرکانس آشکار ساز در فضای آزاد بیشتر از بازه فرکانسی آشکار ساز در محیط خلأ است.

۶) یک پیک در مقادیر جابه‌جایی وجود دارد که ناشی از فرکانس روزنانس آشکارساز در فرکانس ۵۵۰۴ هرتز است.

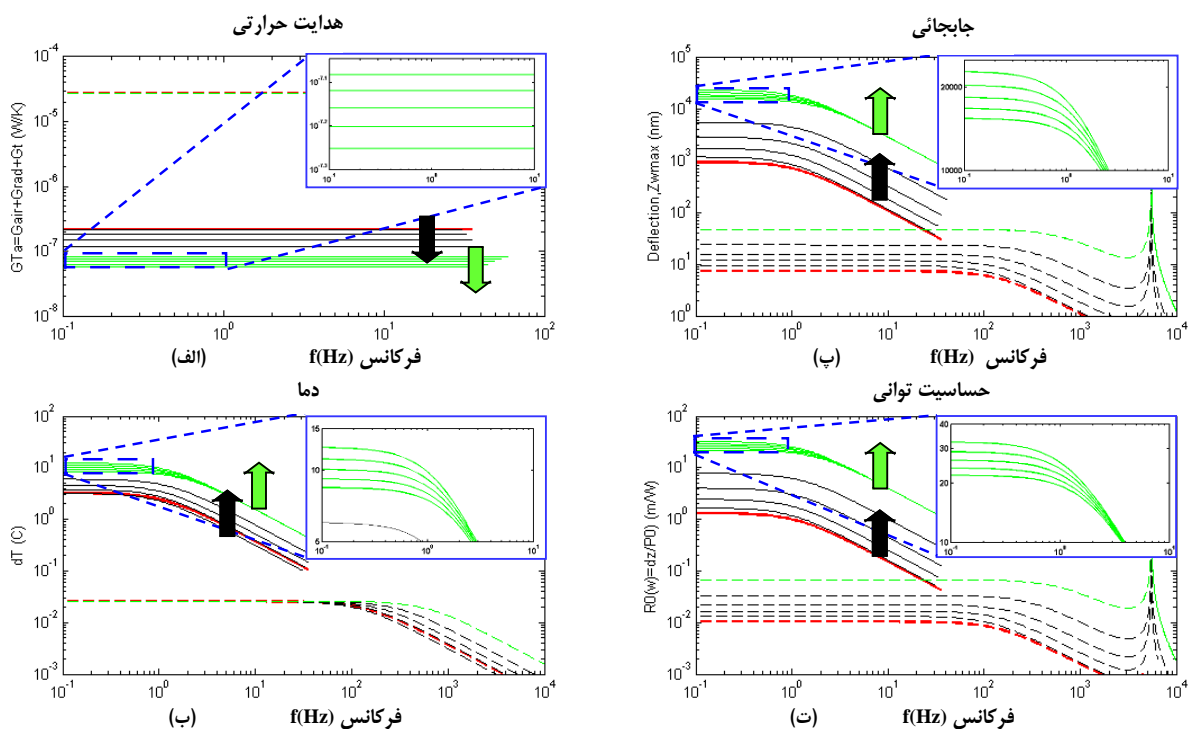
ث) حساسیت توانی: شکل (۲-ت) میزان حساسیت توانی آشکارساز را نشان می‌دهد. در این شکل مشاهده می‌شود که حساسیت توانی در محیط خلأ بیشتر از حساسیت توانی در محیط آزاد است. طبق شکل، حساسیت توانی با کاهش ضخامت لایه عایق و کاهش پهنای بازوها افزایش می‌یابد زیرا طبق رابطه (۶) حساسیت توانی با هدایت حرارتی رابطه عکس دارد. این شکل، نمودار حساسیت توانی برحسب فرکانس را نیز نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که بازه فرکانسی آشکارساز در شرایط خلأ بیشتر بازه فرکانسی آشکارساز در فضای آزاد است. بازه فرکانس در فضای آزاد در حدود ۸ هرتز و در شرایط خلأ در حدود ۴۴۶۸ هرتز است.

ج) نویز نوسان دمایی: نویز نوسان دمایی طبق رابطه (۸) باریشه دوم هدایت حرارتی رابطه مستقیم دارد. لذا با کاهش هدایت حرارتی مقدار این نویز کاهش خواهد یافت. طبق شکل (۳-الف) مشاهده می‌شود که مقدار این نویز با کاهش ضخامت لایه SiO_2 و با کاهش پهنای بازوها کاهش می‌یابد اما کاهش پهنای بازوها اثر بیشتری روی کاهش نویز نسبت به کاهش ضخامت لایه SiO_2 دارد. طبق رابطه (۸) نویز نوسان دمایی با دمای آشکارساز رابطه مستقیم دارد و از طرفی دمای آشکارساز طبق رابطه (۴) با فرکانس رابطه عکس دارد.

بنابراین نویز دمایی با فرکانس رابطه عکس دارد. همان‌طور که شکل (۳-الف) نشان می‌دهد، مقدار NEDT_{TF} با افزایش فرکانس کاهش خواهد یافت اما مقدار این کاهش ناچیز است.

ح) نویز پس‌زمینه: نویز پس‌زمینه طبق رابطه (۹) نسبتی با هدایت حرارتی ندارد بنابراین این نویز رابطه‌ای با ضخامت لایه SiO_2 و پهنای بازوها نخواهد داشت. شکل (۳-ب) هم نشان می‌دهد که مقدار نویز به تغییر ابعاد آشکارساز حساس نیست. NEDT_{BF} طبق رابطه (۹) باریشه دوم توان پنجم دمای آشکارساز رابطه مستقیم و در نتیجه با فرکانس رابطه عکس دارد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود با افزایش فرکانس مقدار نویز کاهش می‌یابد ولی این کاهش ناچیز است.

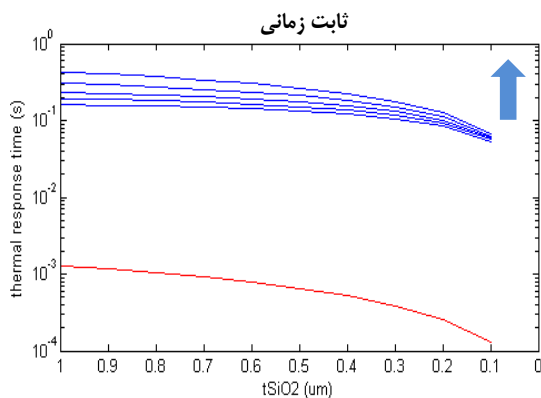
خ) نویز ترمومکانیکی: نویز ترمومکانیکی طبق رابطه (۱۰) با ریشه دوم دمای آشکارساز رابطه مستقیم و با حساسیت جابه‌جایی رابطه عکس دارد. از طرفی دمای آشکارساز و حساسیت جابه‌جایی با فرکانس رابطه عکس دارد. بنابراین نویز NEDT_{TM} با فرکانس رابطه مستقیم خواهد داشت. در شکل (۳-پ) مشاهده می‌شود که مقدار این نویز طبق جدول ۱ در بازه ۱۰-۱۰ mK است که در مقایسه با نویز معادل که در حدود mK است بسیار ناچیز است، بنابراین می‌توان از مقدار آن چشم‌پوشی نمود.



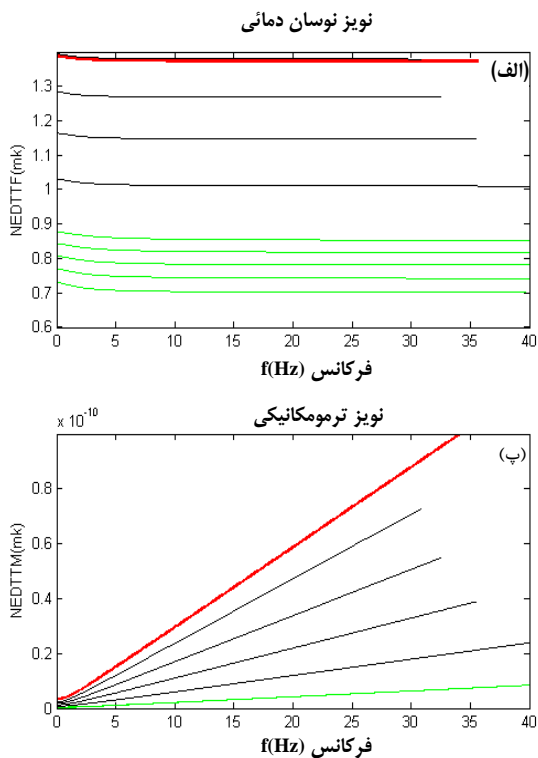
شکل ۲- نمودارهای هدایت حرارتی، تغییرات دما، جابجائی نوک آشکارساز و حساسیت توانی بر حسب فرکانس به ازای پنج ضخامت مختلف SiO_2 از $0.2 \mu\text{m}$ تا $1 \mu\text{m}$ به رنگ سبز و به ازای پنج عرض مختلف بازوها از $2 \mu\text{m}$ تا $10 \mu\text{m}$ به رنگ مشکی، برای آشکارساز با ضخامت $0.2 \mu\text{m}$ بردارها به رنگ سبز و مشکی به ترتیب، جهت کاهش ضخامت و عرض بازوها را نشان می‌دهد. نمودارهای قرمز رنگ مربوط به آشکارساز مرجع [۱۵] است.

(د) نویز معادل: شکل (۳-ت) نمودار نویز معادل برحسب فرکانس را نشان می دهد. مشاهده می شود که مقادیر نویز در فرکانس های مختلف تغییر محسوسی را ندارد و همچنین کاهش ضخامت لایه ها بیشترین اثر را روی کاهش نویز نسبت به کاهش عرض بازوها دارد. محاسبات نشان می دهد که هدایت حرارتی، در شرایط خلأ و فرکانس صفر به ازای $t_{SiO2}=1\mu m$ و $w=10\mu m$ در حدود ۱۲۸.۵ برابر کمتر و دمای آشکارساز، میزان جابه جایی و حساسیت توانی به ترتیب ۱۲۴/۷ و ۱۲۷/۶ برابر بیشتر از آشکارساز با ابعاد مشابه در فضای آزاد هستند. همچنین محاسبات نشان می دهد که هدایت حرارتی به ازای کاهش ابعاد آشکارساز به $t_{SiO2}=0.2\mu m$ و $w=2\mu m$ در حدود ۳/۷۵ برابر کمتر و دمای آشکارساز، میزان جابه جایی و حساسیت توانی به ترتیب ۳/۸۶ و ۱۹/۴ و ۱۹/۵ برابر بیشتر از نسبت ابعاد آشکارساز به ازای $t_{SiO2}=1\mu m$ و $w=10\mu m$ در فرکانس صفر و محیط خلأ است. محاسبات نشان می دهد که نویز نوسان دمایی، نویز پس زمینه، نویز ترمومکانیکی و معادل مجموع نویزهای آشکارساز در شرایط خلأ و فرکانس صفر به ازای $t_{SiO2}=1\mu m$ ، $w=10\mu m$ و ضخامت لایه Al بهینه شده با آشکارساز طراحی شده قبلی یکسان است. همچنین محاسبات نشان می دهد این نویزها به ازای کاهش ابعاد آشکارساز به اندازه $t_{SiO2}=0.2\mu m$ و $w=2\mu m$ به ترتیب ۱/۱۹، ۱/۷ و ۱/۲۵ برابر بهبود می یابند.

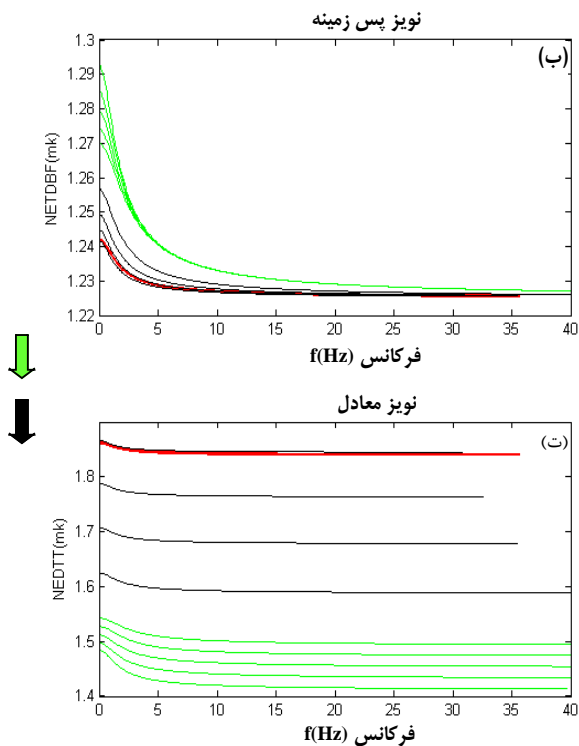
(ذ) ثابت زمانی: نمودار آبی رنگ در شکل (۴) ثابت زمانی آشکارساز برحسب ضخامت لایه SiO_2 به ازای عرض بازوها به اندازه های ۲، ۴، ۶، ۸ و $10\mu m$ در محیط خلأ را نشان می دهد و بردار آبی رنگ جهت افزایش عرض بازوها را نشان می دهد. نمودار قرمز رنگ نیز مقدار ثابت زمانی در فضای آزاد را نشان می دهد. مشاهده می شود که مقدار ثابت زمانی با کاهش ضخامت لایه ها کاهش و با افزایش عرض بازوها افزایش می یابد. همچنین این شکل نشان می دهد که مقدار ثابت زمانی آشکارساز در محیط هوا در مقیاس میلی ثانیه و حدوداً ۱۰۰ برابر کمتر از ثابت زمانی آشکار در محیط خلا است. لذا این نوع از آشکارسازها در محیط هوا قابلیت تصویربرداری و فیلم برداری دارد ولی در محیط خلأ فقط قابلیت تصویربرداری را دارد.



شکل ۴- نمودار پاسخ زمانی آشکارساز بر حسب ضخامت لایه ها به ازای عرض بازوها از $2\mu m$ تا $10\mu m$ با گام های $2\mu m$.



شکل ۳- نمودار نویز نوسان دمائی، نویز پس زمینه، نویز ترمومکانیکی و نویز معادل برحسب فرکانس به ازای پنج ضخامت مختلف SiO_2 از $1\mu m$ تا $10\mu m$ به رنگ سبز و به ازای پنج عرض مختلف بازوها از $2\mu m$ تا $10\mu m$ به رنگ مشکی برای آشکارساز به ضخامت $0.2\mu m$ بردارها به رنگ سبز و مشکی به ترتیب جهت کاهش ضخامت و عرض بازوها را نشان می دهد. نمودارهای قرمز رنگ مربوط به آشکارساز مرجع [۱۵] است.



در جدول ۲ نتایج حاصل از محاسبات آشکارساز مقاله حاضر با آشکارسازهای ساخته شده توسط محققین دیگر مقایسه شده است. در این جدول مقدار نویز، ثابت زمانی و هدایت حرارتی آشکارساز مختلف با ناحیه جاذب و ناحیه دو ماده‌ای مشخص ارائه شده است مشاهده می‌شود که:

(۱) مقدار NETD آشکارساز حاضر از آشکارسازهای دیگر کمتر است. مقدار نویز آشکارساز حاضر (با ابعاد ارائه شده در ردیف ۲۶) در حدود ۶۰٪ کمتر از آشکارساز ردیف اول جدول ۲ است. لذا سیگنال به نویز این نوع آشکارساز نسبت به آشکارسازهای دیگر بیشتر است و می‌توان جهت عکس برداری حرارتی به تصاویری با دقت بیشتر دست یافت.

(۲) مقدار ثابت زمانی آشکارساز حاضر در محیط آزاد نسبت به آشکارسازهای دیگر خیلی کمتر است. در مقایسه با آشکارساز ردیف ۱۲ در جدول ۲، مقدار ثابت زمانی آشکارساز ارائه شده با ابعاد ردیف ۲۶ در حدود ۲ برابر کمتر و با آشکارساز ردیف ۲۸ در حدود ۱۶/۸ برابر کمتر است. لذا این نوع آشکارساز برای فیلم برداری با فریم های بالاتر نسبت آشکارسازهای دیگر از همین نوع مناسب تر است. با آشکارساز ردیف ۲۸، تصویربرداری را می توان با ۶۲۵۰ فریم بر ثانیه به انجام رساند.

۸- نتیجه گیری

در آشکارسازهای میکروکانتیلیوری دو ماده ای از خاصیت ترمومکانیکی مواد برای اندازه گیری میزان تشعشعات IR استفاده می شود. در این

جدول ۲- مقایسه نتایج حاصل از محاسبات مقاله حاضر با نتایج حاصل از آشکارسازهای محققین دیگر

	Infrared detector	absorber	Bi-layer	Pixel size (um ²)	NETD (mK)	τ (ms)		G (WK ⁻¹) $\times 10^{-7}$	Ref		
						هو	خلا				
۱	Zhao	SiNx	SiNx-Al	۱۰۰×۱۰۰	۳	۸۰	۱/۱	[۲۰ و ۲۱]	۲۰۰۲		
۲	Shusen Huang	SiNx-NiCr	SiNx-Al	۵۰×۵۰	۸/۶	۶۰	۲/۲	[۲۱ و ۲۲]	۲۰۰۴		
۳	Scott	a-SiC:H	A_SiC:H/Au	۵۰×۵۰	۵	۱۰-۵	----	[۲۳]	۲۰۰۳		
۴		SiO ₂ /SiON-TiN	SiO ₂ /SiON-Al		۱۸	۱۰۰	----	[۲۴]	۲۰۰۶		
۵					۱۳/۱	۱۰/۱	۹۰/۴	[۲۵]	۲۰۰۷		
۶					۲۵×۲	۱۳/۷	۷/۳			۱۷/۷	
۷					۱۷×۱۷	۱۹/۸	۴/۳			۱۱/۸	
۸					Datskos	SiNx	SiNx-Al	۶۶×۵۰	۹/۲	۱۰/۲	۳۸/۵
۹		SiNx	SiNx-Au			۷۵×۷۵	۱۵۱	۶	۶/۴	[۲۸-۲۷]	۲۰۰۶
۱۰	SiO ₂	SiO ₂ -Al	۲۲۰×۲۲۰	۳/۸		۶۷۲	۰/۵۳۲	[۳۲-۳۰]	۲۰۰۸		
۱۱	Wank	Si ₃ N ₄ /pt	SiO ₂ /Al	۱۳۰×۱۳۰	۱۲/۳	۱۸/۶	----	[۳۳]	۲۰۰۶		
۱۲	Kwon	SiO ₂ /Ti/SiO ₂	SiO ₂ /Al	۵۰×۵۰	۱۱/۲	۲/۷	۰/۶۵	[۳۵ و ۳۴]	۲۰۰۷		
۱۳	Fengliang Dong	SiNx	SiNx-Au	۱۲۰×۱۲۰	۴۰۰	۷۰	۱/۵	[۳۶]	۲۰۰۸		
۱۴				۱۵۰×۱۵۰	۷۰۰۰	۲۴	۸/۲	[۳۷]	۲۰۰۷		
۱۵	Xiaomei	SiNx	SiNx-Au	۱۴۶×۱۱۰	۶۰	۱۵	۱/۳	[۳۸]	۲۰۰۸		
۱۶	Teng Cheng	SiNx	SiNx-Au	۶۰×۶۰	۳۳۰	۱۶	۰/۳۵	[۳۹]	۲۰۰۹		
۱۷	Zhigang	SiNx	SiNx-Au	۴۲×۱۸	۳۷۳	۱۹۰	----	[۴۰]	۲۰۱۳		
۱۸	Fabio Alves	SiO ₂	SiO ₂ /Al	۲۰۰×۲۰۰	----	۶۸۰	۱/۶	[۴۱]	۲۰۱۳		
۱۹					----	۴۷۰	۲/۲				
۲۰					---	۱۰۰	۹/۳				
۲۱	Wei Ma	SiNx	SiNx-Au	۶۰×۶۰	۱۹۴/۷	۲۰/۶	۰/۷۱	[۴۲]	۲۰۱۵		
۲۲		SiN/SiO ₂ /SiNx		۶۰×۴۰	۶/۲۴	۶۵	۰/۷۲	[۴۳]	۲۰۱۶		
۲۳		SiNx	SiNx-Al	۶۰×۱۰۰	۲۰۰	۷/۴	----	[۴۴]	۰۱۵۲		
۲۴	Zhang	SiNx	SiNx-Al	۶۰×۶۰	۵۷	۱۹	۱/۰۹	[۴۵]	۲۰۱۸		
	Kai Wang	SiNx	SiNx-Au	۲۰۰×۲۰۰	----	۷۳	----	[۴۶]	۲۰۲۲		
	Xiaomei Yu	SiNx	SiNx-Al	۱۲۵×۸۵	----	۱۹/۵	۰/۱۲	[۴۷]	۲۰۲۲		
۲۵	Abdollahi	SiO ₂	SiO ₂ -Al	۷۰×۱۰۰	۱/۸۶	۱۴۰	۲/۱۵	[۱۰]	۲۰۱۴		
								[۱۵]	۲۰۱۵		
								[۱۶]	۲۰۲۱		
	$t_{SiO_2}-t_{Al}-w(\mu m)$	SiO ₂	SiO ₂ -Al	۷۰×۱۰۰		هو		مقاله حاضر			
۲۶	۱ - ۰/۵ - ۱۰				۱/۸۶	۱۶۰	۱/۳			۲/۱۷	
۲۷	۰/۵ - ۰/۲۵ - ۱۰				۱/۶۶	۱۳۲	۰/۶۴			۱/۳۳	
۲۸	۰/۲ - ۰/۱ - ۱۰				۱/۵	۶۶	۰/۱۶			۰/۸۲	
۲۹	۰/۵ - ۰/۲۵ - ۵				۱/۵۶	۱۹۳	۰/۶۴			۰/۹۱	
۳۰	۰/۲ - ۰/۱ - ۲	۱/۴۸	۱۲۵	۰/۲۶	۰/۵۶						

- applications in infrared detection." *Small* 9, no. 8 (2013): 1225-1236.
- [3] Liu, Junwei, Jingjing Wang, Kaihu Xian, Wenchao Zhao, Zhihua Zhou, Shaojuan Li, and Long Ye. "Organic and quantum dot hybrid photodetectors: towards full-band and fast detection." *Chemical Communications* 59, no. 3 (2023): 260-269.
- [4] Whatmore, Roger W., and Samuel J. Ward. "Pyroelectric infrared detectors and materials—A critical perspective." *Journal of Applied Physics* 133, no. 8 (2023).
- [5] Varpula, A., Murros, A., Sovanto, K., Rantala, A., Martins, D. G., Tappura, K., ... & Prunnila, M. (2023, October). High-performance silicon-based nano-thermoelectric bolometers for uncooled infrared sensing. In *Electro-Optical and Infrared Systems: Technology and Applications XX* (Vol. 12737, p. 1273702). SPIE.
- [6] Zhou, L., Meng, F., & Sun, Y. (2024). Numerical study on infrared detectors cooling by multi-stage thermoelectric cooler combined with microchannel heat sink. *Applied Thermal Engineering*, 236, 121788.
- [7] Abdullah, A., Koppula, A., Alkorjia, O., & Almasri, M. (2023). Uncooled two-microbolometer stack for long wavelength infrared detection. *Scientific Reports*, 13(1), 3470.
- [8] Qiu, J., Su, L., McDowell, L. L., Phan, Q., Liu, Y., Zhang, G., ... & Shi, Z. (2023). High-Performance Uncooled Mid-Infrared Detector Based on a Polycrystalline PbSe/CdSe Heterojunction. *ACS Applied Materials & Interfaces*.
- [9] Su, L., Liu, Y., Lu, H., Zhang, H., Yang, Y., & Qiu, J. (2023). Design of uncooled mid-wave infrared detectors based on lead selenide barrier structure. *Japanese Journal of Applied Physics*, 62(11), 114002.
- [10] Abdollahi, H., Hajghassem, H., & Mohajerzadeh, S., "Simple fabrication of an uncooled Al/SiO₂ microcantilever IR detector based on bulk micromachining", *Microsystem technologies*, , Vol. 20, No. 3, pp. 387-396, 2014.
- [11] Abdollahi, H., Samaeifar, F., Afifi, A. and Aliahmadi, M.R., "External Alignment Marks Technique for Front-to-Back Side Alignment Using Single-Side Mask Aligner" *Experimental Techniques*, Vol. 41, No. 6, pp. 627-634. 2017.
- [12] H. Abdollahi, and H. Hajghassem, "Investigation of silicon anisotropic etching in TMAH solution," *Advanced processes in materials*, Vol. 9, No. 334, pp. 133-144. 2015. (In Persian).
- [13] H. Abdollahi, *Fast and low cost fabrication of SiO₂ microcantilever based on Bulk microelectromechanical system*, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 5, pp. 12-20. 2015. (In Persian).
- [14] H. Abdollahi, "Low cost and simple fabrication of bi-material micro cantilever Array based on MEMS technology," *Electronics Industries*, Vol. 8, No. 2, pp. 85-92. 2016. (In Persian).
- [15] H. Abdollahi, F. Samaeifar, A. Haghnegahdar, "Effect of SiO₂/Al to increase microcantilever infrared detectors sensitivity and compare with Si₃N₄/Au," *Journal of solid and fluid mechanics*, Vol. 5, No. 1, pp. 151-163. 2015. (In Persian).
- [16] Abdollahi, H., Mazloum, J. "Increasing the sensitivity of SiO₂/Al microcantilever IR detector based on MEMS technology by optimizing design dimensions." *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 53, No. 8, pp. 4717-4728. 2021. (In Persian).
- آشکارسازها امواج مادون قرمز دمای حس گر را تغییر می دهد و آشکارساز همانند یک بی متال کج می شود. با اندازه گیری میران کجی می توان به اندازه امواج IR پی برد. حساسیت آشکارساز میکرو کانتیلیور فاقد خنک از جنس SiO₂/Al بر پایه فناوری MEMS از جنس SiO₂/Al بیشتر از آشکارسازهای مشابه دیگر است و ساخت این نوع از آشکارساز با روش های ساده و ارزان قیمت ارائه شده است به طوری که قابلیت ساخت در آزمایشگاه های با امکانات محدود را دارد. در این مقاله پاسخ فرکانسی و آنالیز نویز آشکارساز ارائه شده در دو محیط خلأ و محیط آزاد با محاسبات تئوری تحلیل شد و نشان داده شد که:
- (۱) مقدار دما، جابه جایی و حساسیت توانی آشکارساز در محیط خلأ بیشتر از پاسخ آشکارساز در محیط آزاد است
- (۲) محاسبات مقدار دما، جابه جایی و حساسیت توانی آشکارساز بر حسب تغییر ضخامت لایه ها و عرض بازوها در دو محیط فضای آزاد و خلأ نشان داد که کاهش ضخامت لایه عایق و عرض بازوها سبب افزایش مقدار پاسخ ها می شود.
- (۳) بازه فرکانسی آشکارساز در محیط خلأ کمتر از بازه فرکانسی آشکارساز در محیط آزاد است.
- (۴) تحلیل فرکانس و تحلیل نویز نشان داد که پاسخ فرکانسی آشکارساز به ابعاد طراحی و محیط قرارگیری آشکارساز بستگی دارد.
- (۵) نتایج تحلیل های فرکانسی نشان داد که در این آشکارساز سرعت فیلم برداری با فریم بالا در محیط فضای باز بهبود یافته است.
- (۶) همچنین تحلیل های فرکانسی نشان دادند که این آشکارساز در محیط خلأ فقط قابلیت عکس برداری دارد و دقت عکس برداری آن نیز بهبود یافت است؛ زیرا مقادیر ثابت زمانی در شرایط خلأ به دلیل کاهش هدایت حرارتی افزایش می یابد.
- (۷) نتایج حاصل از محاسبات تئوری مقادیر نویز نوسان دمایی، پس زمینه، ترمومکانیکی و نویز معادل در حوزه فرکانس و شرایط محیطی خلأ نشان داد که نسبت سیگنال به نویز در این آشکارساز بهبود یافته است.

۹-مراجع

- [1] Y. Zhao, "Optomechanical uncooled Infrared imaging system", Dissertation, University of California, Berkeley, 2002.
- [2] Yang, Leijing, Sheng Wang, Qingsheng Zeng, Zhiyong Zhang, and Lian-Mao Peng. "Carbon nanotube photoelectronic and photovoltaic devices and their

- International Society for Optics and Photonics. Vol. 16, p. 696317, 2008.
- [32] Grbovic D, Karunasiri G., "Fabrication of Bi-material MEMS detector arrays for THz imaging", In Terahertz Physics, Devices, and Systems III: Advanced Applications in Industry and Defense International Society for Optics and Photonics, Vol. 7311, p. 731108, 2009.
- [33] Wang W, Upadhyay V, Munoz C, Bumgarner J, Edwards O., "FEA simulation, design, and fabrication of an uncooled MEMS capacitive thermal detector for infrared FPA imaging", In Infrared Technology and Applications XXXII, International Society for Optics and Photonics, Vol. 6206, p. 62061L, 2006.
- [34] Kwon IW, Kim JE, Hwang CH, Kim TS, Lee YS, Lee HC., "A high fill-factor uncooled infrared detector with thermo-mechanical bimaterial structure", In Infrared Technology and Applications International XXXIII, Society for Optics and Photonics, Vol. 6542, p. 65421O, 2007.
- [35] Kwon IW, Son HJ, Kim DS, Hwang CH, Lee YS, Yu BG, Lee HC., "A cantilever-type uncooled infrared detector with high fill-factor and low-noise characteristic", IEEE Electron Device Letters, Vol. 30, No. 7, pp.635-637, 2009.
- [36] Dong F, Zhang Q, Chen D, Miao Z, Xiong Z, Guo Z, Li C, Jiao B, Wu X., "Uncooled infrared imaging device based on optimized optomechanical micro-cantilever array", Ultramicroscopy. Vol. 108, No. 6, pp.635-637, 2008.
- [37] Dong F, Zhang Q, Chen D, Pan L, Guo Z, Wang W, Duan Z, Wu X., "An uncooled optically readable infrared imaging detector", Sensors and Actuators A: Physical. Vol. 133, No. 1, pp. 236-242, 2007.
- [38] Xiaomei Yu, Yuliang Yi, "Design and fabrication of a high sensitivity focal plane array for uncooled IR imaging", J. Micromech. Microeng. Vol. 18, No. 5, pp. 057001, 2008.
- [39] Cheng T, Zhang Q, Chen D, Shi H, Gao J, Wu X., "Performance of an optimized substrate-free focal plane array for optical readout uncooled infrared detector", Journal of Applied Physics. Vol. 105, No. 3, pp. 034505, 2009.
- [40] Ou Y, Li Z, Dong F, Chen D, Zhang Q, Xie C., "Design, Fabrication, and Characterization of a 240x240 MEMS Uncooled Infrared Focal Plane Array with 42μ Pitch Pixels", Journal of Microelectromechanical Systems, Vol. 22, No. 2, pp. 452-461, 2013.
- [41] Alves F, Grbovic D, Kearney B, Lavrik NV, Karunasiri G., "Bi-material terahertz sensors using metamaterial structures", Optics express. Vol. 21, No. 1, pp. 13256-714, 2013.
- [42] Ma, W., Wang, S., Wen, Y., Zhao, Y., Dong, L., & Yu, X., "Uncooled focal plane array for multiband IR imaging using optical-readout bimaterial cantilevers", Journal of Microelectromechanical Systems, Vol. 24, No. 3, pp. 582-591, 2015.
- [43] Ma, W., Zhao, R., Wang, S., Yu, X., Feng, Y., & Zhao, Y., "Bimaterial cantilever focal plane array for uncooled infrared imaging using sandwich-framed structure", Journal of Microelectromechanical Systems, Vol. 25, No. 2, pp. 413-420, 2016.
- [44] Ma, W., Wen, Y., Yu, X., Feng, Y., & Zhao, Y., "Performance enhancement of uncooled infrared focal plane array by integrating metamaterial absorber", Applied Physics Letters, Vol. 106, No. 11, pp. 111108, 2015.
- [45] Zhang, Xia, and Dacheng Zhang. "Combined design and realization of Al-SiN bi-material optic readout infrared
- [17] Vashist, S.K., "A review of microcantilevers for sensing applications", Journal of Nanotechnology Online, Vol. 3, No. 11, pp.1113-112., 2007.
- [18] Datskos PG, Lavrik NV, Rajic S, "Performance of uncooled microcantilever thermal detectors", Rev Sci Instrum, Vol. 3, No. 11, pp.1134-1148, 2004.
- [19] Ma W, Zhao R, Wang S, Yu X, Feng Y, Zhao Y., "Bimaterial cantilever focal plane array for uncooled infrared imaging using sandwich-framed structure", Journal of Microelectromechanical Systems, Vol. 25, No. 2, pp.413-420, 2016.
- [20] Zhao, Y., Mao, M., Horowitz, R., Majumdar, A., Varesi, J., Norton, P., Kitching, J., "Optomechanical uncooled infrared imaging system: design, microfabrication, and performance", Journal of microelectromechanical systems, Vol. 11, No. 2, pp.136-146, 2002.
- [21] Huang S, Tao H, Lin IK, Zhang X. "Double-Cantilever Infrared Detector: Fabrication, Curvature Control and Demonstration of Thermal Detection. In Solid-State Sensors", Actuators and Microsystems Conference, 2007. TRANSDUCERS 2007. pp. 1601-1604. 2007.
- [22] Shusen Huang, Hu Tao, I-Kuan Lin, Xin Zhang, "Development of double-cantilever infrared detectors Fabrication, curvature control and demonstration of thermal detection," Sensors and Actuators A 145, pp. 231–240, 2008.
- [23] Hunter S. R., Robert A. Amantea, Lawrence A. Goodman, David B. Kharas Sergey Gershtein, James R. Matey, Steven N. Perna, Young Yu, Nagi Maley, Lawrence K. White, "High Sensitivity Uncooled Microcantilever Infrared Imaging Arrays", Infrared Technology and Applications XXXIX, Proceedings of SPIE Vol. 5074, pp. 469-481, 2003.
- [24] Hunter S. R, Maurer. G, "High sensitivity Uncooled microantilever infrared imaging arrays", Conference Proceedings Infrared Technology and Applications XXXII, Vol.6206p. 62061J, SPIE 2006.
- [25] Hunter S. R, Maurer. G, "High sensitivity 25μm and 50μm pitch microcantilever IR imaging arrays", Conference Proceedings Infrared Technology and Applications XXXIII, Vol. 6542, p. 65421F, SPIE 2007.
- [26] Datskos PG, Lavrik NV, Rajic S., "Performance of uncooled microcantilever thermal detectors", Review of Scientific Instruments, Vol. 75, No. 4, pp. 1134-48, 2004.
- [27] Lavrik NV, Grbovic D, Rajic S, Datskos PG, Forrai D, Nelson E, Devitt J, McIntyre B., "Uncooled infrared imaging using bimaterial microcantilever arrays", In Infrared Technology and Applications XXXII. International Society for Optics and Photonics. Vol. 6206, p. 62061K, 2006.
- [28] Grbovic D, Lavrik NV, Datskos PG, Forrai D, Nelson E, Devitt J, McIntyre B., "Uncooled infrared imaging using bimaterial microcantilever arrays" Applied Physics Letters. Vol. 89, No. 7, pp 073118. 2006.
- [29] Lavrik N, Archibald R, Grbovic D, Rajic S, Datskos P., "Uncooled MEMS IR imagers with optical readout and image processing", In Infrared Technology and Applications XXXIII, International Society for Optics and Photonics. Vol. 6542, p. 65421E, 2007.
- [30] Grbovic D, Lavrik NV, Rajic S, Datskos PG., "Arrays of SiO₂ substrate-free micromechanical uncooled infrared and terahertz detectors", Journal of applied physics, Vol. 104, No. 5, pp 054508, 2008.
- [31] Grbovic D, Rajic S, Lavrik NV, Datskos PG., "Progress with MEMS based UGS (IR/THz)", In Unattended Ground, Sea, and Air Sensor Technologies and Applications X,

- [47] Xu J, Miao J, Liu Y, Yu X. "*Performance enhanced terahertz imaging using a high-response thermomechanical microcantilever FPA.*" *Infrared Physics & Technology*. Vol. 123, No. 13, pp. 104161, 2022.
- focal plane array with 320× 240 pixels.*" *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 273, No. 25, pp. 256-265, 2018.
- [46] Zhu H, Wang K, Liu G, Wang G, Mou J, Zhang W, Wei G. "*A Terahertz Optomechanical Detector Based on Metasurface and Bi-Material Micro-Cantilevers.*" *Micromachines*. Vol. 21, No. 13, pp. 805, 2022.