



# Increasing the Sensitivity of SiO<sub>2</sub>/Al Micro Cantilever Infrared Detector Based on Micro Electromechanical Systems Technology by Optimizing of Dimensions

H. Abdollahi\*, J. Mazloum

Department of Electrical Engineering, Shahid Sattari Aeronautical University of Science and Technology, Tehran, Iran

**ABSTRACT:** In this paper, the sensitivity of the micro-cantilever infrared detector has been increased by optimizing its geometric dimension. The detector's main body consists of an absorbing area, bi-material, and isolation legs, which are made up of silicon dioxide. Bi-material regions (absorbing area and bi-material legs) include a thin film layer of aluminum, which is placed on the main body layer. In this detector, the amount of bending at the end of the tip detector depends on the thickness of insulating and metal layers and the width of isolating and bi-material legs. Furthermore, it has been proved that the detector's displacement and sensitivity are optimized when the thickness of the metal layer is selected the half of the thickness of the absorbing layer. The results of the calculations show that by applying boundary conditions for 100 pW/μm<sup>2</sup> constant thermal flux on the absorber, amount of displacement, thermomechanical, power, displacement, and body temperature sensitivities are increased by 26%, 27%, 28%, 2.3%, and 26%, respectively. In addition, the calculation results show that the sensitivities and response time are improved to 4.24, 54, 12.4, 12.8, 54, 4.2, 54.48, 54, and 1.5 times, respectively, in the vacuum environment if the leg's width, the isolating and metal layers' thicknesses are selected as 1 μm, 0.1 μm, and 0.05 μm, respectively.

## Review History:

Received: Jan. 05, 2018  
Revised: Mar. 14, 2018  
Accepted: Apr. 29, 2018  
Available Online: May. 12, 2018

## Keywords:

Uncooled infrared detector  
Thermal detector  
Microcantilever

## 1. INTRODUCTION

In previous works, we reported the fabrication of an uncooled SiO<sub>2</sub>/Al microcantilever Infrared (IR) detector based on Micro Electromechanical Systems (MEMS) technology [1-5]. In Ref. [6], the design and simulation of this detector were presented and explained that the sensitivity and responsivity are better than other detectors especially when it is fabricated by different materials such as SiN<sub>3</sub>/Au. Since the sensitivity and responsivity are dependent on its dimensions, so they can be improved by optimizing layers' thickness and legs' width. In the current work, our previous work is improved by optimizing its dimensions.

## 2. PRINCIPLE OF OPERATION

The detector's main body consists of three parts including 1) IR absorbing area, 2) bi-material legs, and 3) thermal isolation legs. The temperature of the IR absorbing area increases by absorbing IR power. Then, Heat transfers from the absorbing area to the legs. So, the detector bends due to the Coefficient of Thermal Expansion (CTE) [6].

## 3. THERMODYNAMIC ANALYSIS

The thermal conductance ( $G$ ) must be evaluated to calculate temperature changes and the bending of the detector.

Total thermal conductance can be expressed as Eq. (1):

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

In which,  $G_{leg}$ ,  $G_{rad}$ , and  $G_{amb}$  are the thermal leg's conductance, thermal radiative conductance, and the thermal conductance between detector and environment, respectively.  $G_{leg}$  can be calculated as [7]:

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

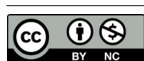
Where  $k_{SiO_2}$  and  $k_{Al}$  are thermal conductivity of SiO<sub>2</sub> and Al, respectively,  $A$  and  $l$  are the cross-section area and the legs' length, respectively.  $G_{rad}$  is calculated as:

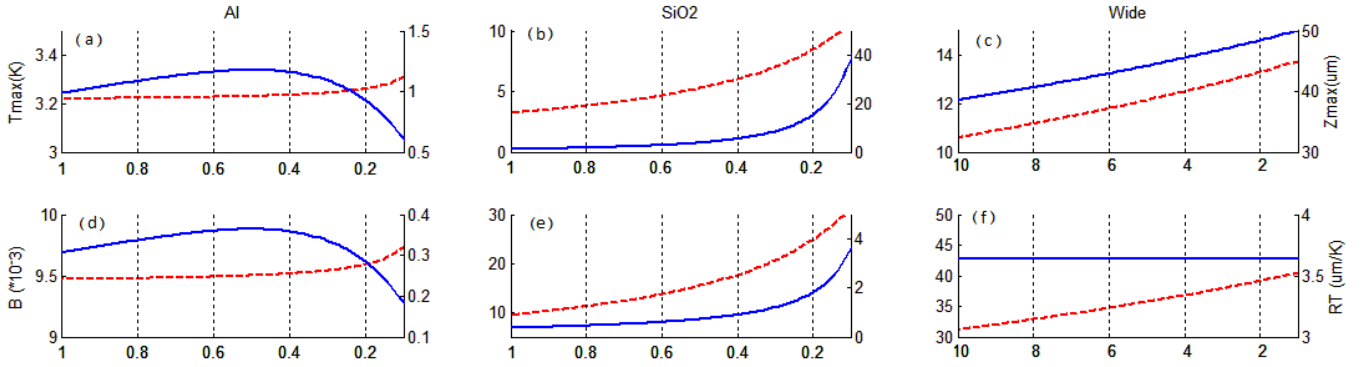
$$G_{rad} = 4 \cdot \sigma \cdot A_{pixel} (\varepsilon_{Al} + \varepsilon_{SiO_2}) T^3 \quad (\text{WK}^{-1}) \quad (3)$$

Where,  $\sigma$ ,  $T$  and  $\varepsilon$  are Stefan-Boltzmann constant, temperature, and emissivity, respectively.

The detector's deformation results from temperature changes ( $\Delta T$ ). The detector temperature is analyzed when the detector is in thermal equilibrium with the surrounding area. Therefore,  $\Delta T$  can be calculated the incident power on the pixel [8]:

\*Corresponding author's email: H.abd@ssau.ac.ir





**Fig. 1.** Figure shows the results of Calculations with respect to changes of  $t_{Al}$ ,  $t_{SiO_2}$  and  $W$ , which are shown in the left to right of horizontal axis, respectively. The red dash lines show the temperature changes and heat transfer coefficient from top to bottom, respectively, in the left vertical axis on diagrams. The blue solid lines show the displacement changes and Thermomechanical sensitivity from top to bottom, respectively, in the right vertical axis on diagrams.

Where  $P_0$  can be calculated from Eq. (5):

$$\Delta T_c = \frac{P}{G} \quad (^\circ\text{C}) \quad (4)$$

$$P_0 = A W_s \quad (\text{W}) \quad (5)$$

In which,  $W_s$  is absorbed IR density. When temperature changes, the microcantilever bends due to different CTE.  $\Delta z$  can be calculated from Eq. (6):

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

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

where ( $t_1$  and  $t_2$ ), ( $\alpha_1$  and  $\alpha_2$ ), and ( $E_1$  and  $E_2$ ) are the thickness, CTE, and Young's modulus of Al and  $\text{SiO}_2$  layers, respectively.

#### 4. OPTIMIZATION METHOD

Displacement will increase with respect to the decrement of legs' width and layers' thickness. With control of fabrication process parameters, one may be able to decrease the thickness of layers and width of legs. Since  $E_1$  is approximately equal to  $E_2$  for Al and  $\text{SiO}_2$  layers, then Eq. (6) can be simplified to Eq. (7).

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

$$\Delta z = 3.(\alpha_1 - \alpha_2) \cdot \frac{r(1+r)}{t_2 K} \cdot I_b^2 \cdot \Delta T \quad (7)$$

Eq. (7) will change into Eq. (8) by substituting  $K$  into the equation:

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

To calculate the maximum displacement according to the ratio of layers' thickness, it is sufficient to find the derivation roots of Eq. (8) with respect to  $r$ . The resulting derivation is shown in Eq. (9):

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

The roots of Eq. (9) are 0.5 and -1. The negative value is an invalid result because thickness cannot be negative. So, the positive value is the correct result, thereupon the thickness of the insulator must be two times larger than the thickness of the metallic layer to achieve the maximum displacement for the microcantilever detector.

#### 5. RESULTS AND DISCUSSION

We calculate Heat transfer coefficient ( $\beta$ ), Thermomechanical ( $\mathfrak{R}_T$ ), Power ( $\mathfrak{R}_p$ ), Temperature ( $S_t$ ), Displacement ( $S_d$ ), and Black body temperature ( $S_{at}$ ) sensitivities and Time constant ( $\tau$ ) to extra study.

**the Thickness ratio of Al and  $\text{SiO}_2$ :**  $\Delta T$  and  $t$  have inverse correlation according to Eq. (4) and Eq. (2). Therefore, temperature decreases by increasing of  $t_{Al}$ . According to Fig. 1, the Calculations results show that maximum bending occurs while  $t_{Al}$  is equal to  $0.5\mu\text{m}$  which is half of  $t_{SiO_2}$ . So,  $\Delta T$ ,  $H$ , and  $S_t$  do not have a sensible change when  $t_{Al}$  changes, and  $\Delta z$ ,  $\mathfrak{R}_T$ ,  $\mathfrak{R}_p$ ,  $S_d$ , and  $S_{at}$  are maximum that  $t_{Al}$  is  $0.5\mu\text{m}$ .

**Effect of silicon dioxide layer's thickness:** According to Fig. 1, Calculations of  $\Delta T$  with respect to changes of  $t_{SiO_2}$  are done by considering the thickness ratio, in which  $t_{Al}$  is half of  $t_{SiO_2}$ . Results show that  $\Delta T$  and  $\Delta z$  increase when  $t_{SiO_2}$  decrease. Also, the following values are optimized by comparing to our previous work respectively, when  $t_{SiO_2}$  is  $500\text{nm}$  and  $100\text{nm}$ :

(1)  $\Delta T$  (1.61 and 3.25) time; (2)  $\Delta z$  (4.13 and 41) time; (3)  $H$  (1.5 and 3.2) time; (4)  $\mathfrak{R}_T$  (2.55 and 12.8) time; (5)  $\mathfrak{R}_p$  (4.2 and 42) time; (6)  $S_t$  (3.22 and 1.6) time; (7)  $S_d$  (41.13 and 41.62) time; (8)  $S_{dt}$  (4.14 and 41.5) time; (8)  $\tau$  (1.06 and 2.64) time.

**Effect of decrement of arms' width:** According to Fig. 1, Calculations of  $G$  with respect to changes of  $W$  are done by considering the thickness ratio, in which  $t_{Al}$  is half of  $t_{SiO_2}$ . Results show that  $\Delta T$  and  $\Delta z$  increase when  $W$  decreases. Also, the following values are optimized by comparing to our previous work respectively, when the detector dimension ( $W, t_{SiO_2}, t_{Al}$ ) is ( $5\mu\text{m}, 0.5\mu\text{m}, 0.25\mu\text{m}$ ) and ( $1\mu\text{m}, 0.1\mu\text{m}, 0.05\mu\text{m}$ ): (1)  $\Delta T$  (3.72 and 4.72) time; (2)  $\Delta z$  (47.7 and 54) time; (3)  $H$  (3.7 and 4.12) time; (4)  $\mathfrak{R}_T$  (12.8 and 12.8) time; (5)  $\mathfrak{R}_p$  (48.46 and 54) time; (6)  $S_t$  (4.2 and 3.71) time; (7)  $S_d$  (47.67 and 48.54) time; (8)  $S_{dt}$  (54 and 47.8) time; (8)  $\tau$  (2.8 and 2.5) time.

## 6. CONCLUSIONS

In this paper,  $\Delta T$ ,  $\Delta z$ , and the sensitivity of the IR detector are increased by optimizing its geometric dimensions. It has been proven that  $\Delta z$ ,  $\mathfrak{R}_p$ ,  $\mathfrak{R}_p$ ,  $S_p$ , and  $S_{dt}$  are increased by 27%, 28%, 26%, and 26%, respectively, when the thickness of the absorbing layer has been selected double of the thickness of the metal layer. In addition, the calculation results show that  $\Delta T$ ,  $\Delta z$ ,  $H$ ,  $\mathfrak{R}_T$ ,  $\mathfrak{R}_p$ ,  $S_p$ ,  $S_d$ ,  $S_{dt}$ , and  $\tau$  are improved by 4.24, 54, 12.4, 12.8, 54, 4.2, 54.48, 54 and 1.5, respectively, times higher than with respect to Ref. [6] in the vacuum environment

## REFERENCES

- [1] H. Abdollahi, H. Hajghassem, S. Mohajerzadeh, Simple fabrication of an uncooled Al/SiO<sub>2</sub> microcantilever IR detector based on bulk micromachining, *Microsystem technologies*, 20(3) (2014) 387-396.
- [2] H. Abdollahi, F. Samaeifar, A. Afifi, M. Aliahmadi, External alignment marks technique for front-to-back side alignment using single-side mask aligner, *Experimental Techniques*, 41(6) (2017) 627-634.
- [3] H. Abdollahi, H. Hajghassem, Investigation of silicon anisotropic etching in TMAH solution, *Advanced processes in materials*, 9 (334) (2015) 133-144. (In Persian)
- [4] H. Abdollahi, Fast and low lost fabrication of SiO<sub>2</sub> microcantilever based on Bulk microelectromechanical system, *Modares Mechanical Engineering*, 17(5) (2017) 12-20. (In Persian)
- [5] H. Abdollahi, Low cost and simple fabrication of bi-material micro cantilever Array based on MEMS technology, *Electronics Industries*, 8(2) (2016) 85-92. (In Persian)
- [6] H. Abdollahi, F. Samaeifar, A. Haghnegahdar, Effect of SiO<sub>2</sub>/Al to increase microcantilever infrared detectors sensitivity and compare with Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Au, *Journal of solid and fluid mechanics*, 5(1) (2015) 151-163. (In Persian)
- [7] P. Datskos, N. Lavrik, S. Rajic, Performance of uncooled microcantilever thermal detectors, *Review of Scientific Instruments*, 75(4) (2004) 1134-1148.
- [8] S.R. Hunter, G. Maurer, L. Jiang, G. Simelgor, High sensitivity uncooled microcantilever infrared imaging arrays, in: *Infrared Technology and Applications XXXII*, International Society for Optics and Photonics, 2006, pp. 62061J.

### HOW TO CITE THIS ARTICLE

H. Abdollahi, J. Mazloum, *Increasing the Sensitivity of SiO<sub>2</sub>/Al Micro Cantilever Infrared Detector Based on Micro Electromechanical Systems Technology by Optimizing of Dimensions*, *Amirkabir J. Mech Eng.*, 53(8) (2021) 1111-1114.

DOI: 10.22060/mej.2018.13909.5751







## افزایش حساسیت آشکارساز مادون قرمز میکروکانتیلیوری از جنس $\text{SiO}_2/\text{Al}$ بر پایه فناوری میکرو ماشین کاری با بهینه سازی ابعاد طراحی

حسن عبداللهی\*، جلیل مظلوم

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

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۶/۱۰/۱۵

بازنگری: ۱۳۹۶/۱۲/۲۳

پذیرش: ۱۳۹۷/۰۲/۰۹

ارائه آنلاین: ۱۳۹۷/۰۲/۲۲

### کلمات کلیدی:

میکرو ماشین کاری

آشکارساز مادون قرمز فاقد خنک ساز

آشکارساز حرارتی

میکروکانتیلیور

بهینه سازی

**خلاصه:** در این مقاله، حساسیت آشکارساز مادون قرمز میکروکانتیلیور با بهینه سازی ابعاد هندسی افزایش می یابد. بدنه اصلی آشکارساز از جنس  $\text{SiO}_2$  شامل ناحیه جاذب، بازوهای دوماده ای و ایزوله کننده است. نواحی دوماده ای (ناحیه جاذب و بازوهای دوماده ای) شامل یک لایه نازک آلومینیوم است که بر روی لایه عایق قرار گرفته است. در این آشکارساز، میزان خمش آشکارساز به ضخامت لایه ها (عایق و فلز) و عرض بازوها (ایزوله کننده و دوماده ای) بستگی دارد. همچنین اثبات شده است که با انتخاب ضخامت لایه فلز به اندازه نصف ضخامت لایه جاذب، میزان جابه جایی و حساسیت به حداکثر مقدار خود می رسد. نتایج حاصل از محاسبات نشان می دهد که با اعمال شرایط مرزی به ازای شار حرارتی ثابت  $100 \text{ pW}/\mu\text{m}^2$  بر روی ناحیه جاذب، میزان جابه جایی، حساسیت های ترمومکانیکی، توانی، جابه جایی و حساسیت به دمای جسم به ترتیب  $26\%$ ،  $27\%$ ،  $28\%$ ،  $23\%$  و  $26\%$  نسبت به ابعاد اولیه افزایش می یابند. همچنین، چنانچه فرآیند ساخت بهبود یابد و پهنای بازوها، ضخامت لایه عایق و فلزی به ترتیب  $1 \mu\text{m}$ ،  $0.1 \mu\text{m}$  و  $0.5 \mu\text{m}$  انتخاب گردند، مقدار دما، میزان جابه جایی، ضریب انتقال دما، حساسیت های ترمومکانیکی، توانی، دمایی، جابه جایی، حساسیت به دمای جسم و ثابت زمانی در محیط خلأ به ترتیب  $4.72\%$ ،  $54\%$ ،  $4.12\%$ ،  $12.8\%$ ،  $54\%$ ،  $4.2\%$ ،  $48.54\%$  و  $54\%$  برابر بهبود می یابند.

### ۱- مقدمه

در دمای محیط کار به دلیل عدم نیاز به خنک کننده، پایین بودن توان مصرفی به دلیل عدم نیاز به بایاس الکتریکی در بخش حساسه، ساده بودن فرآیند ساخت به دلیل حذف اتصالات الکتریکی و حساسیت بالا به دلیل حذف اثر نویز ضربه ای از مزایای بیشتری نسبت به انواع دیگر انواع آشکارسازها از قبیل بالومیترها<sup>۲</sup> [۱۴ و ۱۵]، پیزوالکتریکها<sup>۳</sup> [۱۶ و ۱۷]، ترموپیلها<sup>۴</sup> [۱۸ و ۱۹] برخوردارند.

فرآیند ساخت آشکارساز مادون قرمز میکروکانتیلیوری از جنس  $\text{SiO}_2/\text{Al}$  و بدون نیاز به خنک ساز بر پایه فناوری میکرو ماشین کاری در مراجع [۲۴ - ۲۰] بیان شده و نشان داده شده است که با وجود مشکل بودن حفاظت آلومینیوم داخل زدایشگرهای سیلیکون

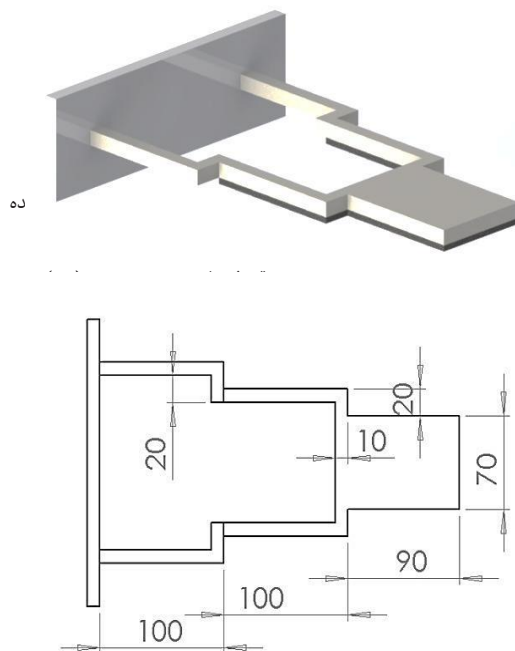
آشکارسازی حرارتی مبتنی بر فناوری میکرو ماشین کاری<sup>۱</sup>، یکی از روش های آشکارسازی امواج مادون قرمز است که کاربردهای وسیعی در صنایع نظامی و غیرنظامی دارد [۶-۱]. در این نوع از آشکارسازها، میزان آشکارسازی مستقل از طول موج [۷] است و دمای آشکارساز نیز به دمای قطعه وابسته است [۸ و ۹]. در این آشکارسازها، انرژی حرارتی سبب تغییر پارامترهای مکانیکی قطعه می شود و این تغییر توسط مدارهای بازخوان اندازه گیری می شود [۱۰ و ۱۱]. آشکارسازهای حرارتی از نوع میکروکانتیلیور [۱۲ و ۱۳] به علت ارزان قیمت، کوچکی ابعاد به جهت پیاده سازی با فناوری میکرو ماشین کاری، قابلیت کارکرد

2 Bolometer  
3 Pyroelectric  
4 Thermopiles

1 Microelectromechanical System (MEMS)

\* نویسنده عهده دار مکاتبات: H.abd@ssau.ac.ir





شکل ۱. تصویر آشکارساز مادون قرمز. (الف) تصویر سه بعدی از آشکارساز که لایه Al به رنگ مشکی در زیر لایه  $\text{SiO}_2$  به رنگ نوک مدادی قرار گرفته است (ب) تصویر دوبعدی از آشکارساز به همراه ابعاد آن

**Fig. 1. Schematic diagram of IR detector. (a) 3D image of the detector with the charcoal gray Al layer under abalone gray  $\text{SiO}_2$  layer. (b) 2D image of the detector with its dimensions.**

ماشین کاری افزایش یافته است. در ادامه، عملکرد آشکارساز در بخش دوم و به طور خلاصه تحلیل های حرارتی و سازه ای آشکارساز در بخش سوم بیان شده است. در بخش چهارم حساسیت های آشکارساز و در بخش پنجم بهینه سازی ضخامت لایه ها بیان شده است. بخش ششم نیز نتایج حاصل از محاسبات را عنوان می کند.

## ۲- عملکرد آشکارساز

آشکارسازهای مادون قرمز میکروکانتیلیوری معمولاً از دو ماده مختلف با اختلاف ضریب انبساط حرارتی زیاد ساخته می شوند. در مقاله [۲۵] نشان داده شده است که برای طراحی این نوع از آشکارسازها بهتر است از دو ماده اکسید سیلیکون و آلومینیوم استفاده شود، زیرا: (۱)  $\text{SiO}_2$  امواج مادون قرمز در طول موج های  $8-14 \mu\text{m}$  را به خوبی جذب می کند. (۲) هدایت حرارتی آن نیز خیلی کم است. (۳) اختلاف ضریب انبساط حرارتی Al با  $\text{SiO}_2$  نیز نسبت به مواد دیگر بیشتر است.

شکل ۱- (الف) تصویر سه بعدی آشکارساز مادون قرمز معرفی شده را نشان می دهد. این آشکارساز از سه بخش اصلی (۱) ناحیه جاذب

(KOH, EDP, TMAH و ...) در فرآیند میکرو ماشین کاری، می توان آن را در آزمایشگاه هایی با امکانات محدود، پیاده سازی نمود. در مرجع [۲۵] طراحی و شبیه سازی آشکارساز مادون قرمز میکروکانتیلیوری از جنس  $\text{SiO}_2/\text{Al}$  و بدون نیاز به خنک ساز انجام شده است و نشان داده شده است که حساسیت و پاسخ آشکارساز میکروکانتیلیوری از جنس  $\text{SiO}_2/\text{Al}$  بیشتر از دیگر آشکارسازهای میکروکانتیلیوری با مواد مختلف از قبیل (نیتريت سيليكون/آلومینیوم  $(\text{SiN}_x/\text{Al})$  [۲۶ و ۲۷] - نیتريت سيليكون/طلا  $(\text{SiN}_x/\text{Au})$  [۲۸] و [۲۹] - هیدروژن آمورف سیلیکون کاربرد/طلا  $(\text{a-SiC:H/Au})$  [۳۰] و [۳۱] و مخصوصاً آشکارساز از جنس  $\text{SiN}_x/\text{Au}$  است، زیرا اختلاف ضریب انبساط حرارتی بین  $\text{SiO}_2$  و Al نسبت به مواد دیگر بیشتر است. از آنجایی که پاسخ آشکارساز به ابعاد آشکارساز وابسته است لذا با انتخاب مناسب ضخامت لایه ها و عرض بازوها می توان حساسیت و پاسخ آشکارساز را افزایش داد.

در این مقاله، پاسخ آشکارساز و حساسیت آشکارساز ارائه شده در مرجع [۲۵] با بهینه سازی ابعاد طراحی آشکارساز مادون قرمز میکروکانتیلیوری از جنس  $\text{SiO}_2/\text{Al}$  بر پایه فناوری میکرو

در این رابطه،  $(\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4})$   $\sigma = (5.67 \times 10^{-8})$  ثابت استفان-بولتزمن<sup>۳</sup>،  $T$  دمای پیکسل و  $\epsilon_{Al} = 0.1$  و  $\epsilon_{SiO_2} = 0.8$  به ترتیب ضرایب تشعشی  $Al$  و  $SiO_2$  هستند. سومین جمله رابطه (۱)، هدایت حرارتی آشکارساز با محیط پیرامونی ( $G_{amb}$ ) است. در این مقاله، تحلیل آشکارساز مادون قرمز در محیط خلأ انجام شده است که مقدار آن  $10^{-1} \text{WK}^{-1}$  در نظر گرفته شده است.

### • دمای آشکارساز

می‌توان میزان جابجایی آشکارساز را به کمک تغییر دمای آشکارساز ( $\Delta T_c$ ) دست آورد. برای محاسبه تغییرات حرارتی فرض می‌شود که تبادل حرارتی آشکارساز با محیط اطراف خود به حالت پایدار رسیده است. تغییر دمای آشکارساز در ناحیه جاذب با جذب توان ( $P_c$ ) از رابطه (۴) به دست می‌آید [۳۱].

$$\Delta T_c = \frac{P_c}{G} \quad (^\circ\text{C}) \quad (4)$$

توان جذبی را نیز می‌توان از رابطه (۵) به دست آورد.

$$P_c = A W_s \quad (\text{W}) \quad (5)$$

در این رابطه، چگالی توان حرارتی جذب شده در روی سطح ناحیه جاذب است. در این مقاله فرض شده است که مقدار آن در بازه  $8-14 \mu\text{m}$  به ازای تشعشع جسم سیاه در  $340$  درجه کلوین در حدود  $100 \text{pW}/\mu\text{m}^2$  است.

### • جابه‌جایی آشکارساز

یک میکروکانتیلیور ساده از دو ماده مختلف با ضریب انبساط حرارتی مختلف تشکیل شده است. وقتی دما تغییر می‌کند، میکروکانتیلیور دو ماده‌ای به علت اختلاف ضریب انبساط حرارتی خم می‌شود. شکل ۲-الف) مدل یک میکروکانتیلیور دو ماده‌ای با استرس‌های متفاوت در هر لایه را نشان می‌دهد. طول و عرض کانتیلیور با  $L$  و  $W$ ، ضخامت لایه‌ها با  $t_1$  و  $t_2$  و ضریب مدول یانگ

مادون قرمز<sup>۱</sup> (۲) بازوهای دو ماده‌ای (۳) بازوهای ایزوله کننده حرارتی تشکیل شده است. در شکل ۱-ب) تصویر دوبعدی آشکارساز به همراه ابعاد آن نشان داده شده است. در این آشکارساز، دمای ناحیه جاذب با جذب امواج مادون قرمز افزایش می‌یابد. سپس انرژی گرمایی از ناحیه جاذب با دمای بیشتر به بازوهای دو ماده‌ای و در ادامه به ناحیه تک ماده‌ای با دمای کمتر انتقال می‌یابد. در نتیجه آشکارساز به علت اختلاف انبساط حرارتی بین دو ماده خم می‌شود [۲۵].

### ۳- تحلیل‌های حرارتی و سازه‌ای

#### • هدایت حرارتی

برای محاسبه تغییر دما و میزان خمش آشکارساز در یک پیکسل، نیاز است که مقدار هدایت حرارتی آشکارساز محاسبه شود. مقدار  $G$  از رابطه (۱) به دست می‌آید:

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

در این رابطه،  $G_{leg}$  هدایت حرارتی بازوها،  $G_{rad}$  هدایت تشعشی و  $G_{amb}$  هدایت ناشی از تبادل حرارتی آشکارساز با محیط پیرامونی است [۳۲].

هدایت حرارتی یک پیکسل از طریق بازوها  $G_{leg}$  طبق رابطه (۲) محاسبه می‌شود [۳۲].

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

در این رابطه،  $k_{Al}$  و  $k_{SiO_2}$  به ترتیب ضریب هدایت حرارتی<sup>۲</sup> اکسید سیلیکون و آلومینیوم،  $A$  مساحت سطح مقطع لایه‌ها در بازوهای دو ماده‌ای و ایزوله،  $l_b$  و  $l_i$  به ترتیب طول بازوهای دو ماده‌ای و ایزوله است.

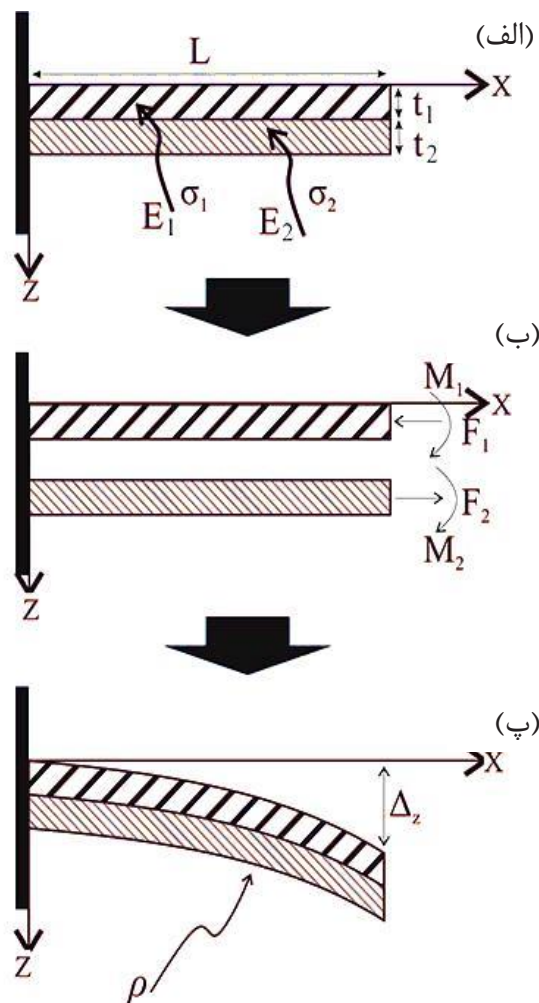
هدایت تشعشی یک پیکسل در رابطه (۱) نیز از رابطه (۳) به دست می‌آید. [۳۲].

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

1 Infrared (IR)

2 Thermal Conductivity

3 Stefan-Boltzmann Constant



شکل ۲. مدل میکروکانتیلیور (الف) میکروکانتیلیور دو ماده‌ای یکسر گیردار (ب) مدل فرضی یک میکروکانتیلیور دو ماده‌ای با دو میکروکانتیلیور یکسر گیردار تک‌ماده‌ای (پ) خمش میکروکانتیلیور بر اثر استرس

Fig. 2. Microcantilever model. (a) the free end of bi-material legs. (b) the assumed model of bi-material microcantilever with two free end of single microcantilever. (c) microcantilever bending duo to differential stresses

برابر است با:

$$\alpha_{t,i} = \alpha_i \Delta T \quad (7)$$

در این رابطه،  $\alpha$  ضریب انبساط حرارتی و  $t$  شماره میکروکانتیلیور است [۳۳].

کرنش به وجود آمده به وسیله نیروی مؤثر برابر است با:

$$\sigma_{f,i} = \frac{F}{E.W.t_i} \quad (8)$$

در این رابطه  $E$  و  $W$  به ترتیب ضریب مدول یانگ و عرض

لایه‌های با  $E_1$  و  $E_2$  مدل شده است. برای اطمینان از پیوستگی فرض می‌شود که تنش و کرنش در مرز دولایه باهم برابر است و میکروکانتیلیور دو ماده‌ای طبق شکل ۲-ب) به دو میکروکانتیلیور تک‌ماده‌ای مجزا تفکیک شده است.

در ادامه فرض می‌شود که نیروی مؤثر  $F_i$  و ممان  $M_i$  روی هر یک از کانتیلیورها اعمال می‌شود. در صورت برابر بودن تنش و کرنش در مرز دولایه، روابط زیر برقرار است:

$$\begin{cases} F_1 = F_2 = F \\ M_1 + M_2 = F \left( \frac{t}{2} \right) \\ t = t_1 + t_2 \end{cases} \quad (6)$$

کرنش به وجود آمده در میکروکانتیلیور به خاطر انبساط حرارتی



میکروکانتیلیور می‌باشند [۳۴].

از طریق حل معادله زیر به دست می‌آید [۳۵]:

$$\frac{d^2 z}{dx^2} = \frac{M_i}{E_i I_i} = \frac{1}{\rho} \quad (15)$$

$$\left. \frac{dz}{dx} \right|_{x=0} = 0$$

$$z|_{x=0} = 0$$

با حل معادله دیفرانسیل (۱۵) به ازای  $x=L_b$  میزان خم

کانتیلیور به صورت رابطه (۱۶) محاسبه می‌شود:

$$\Delta z = 3 \cdot (\alpha_1 - \alpha_2) \cdot \frac{r(1+r)}{t_2 K} \cdot I_b^2 \cdot \Delta T \quad (16)$$

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

طبق این رابطه، میزان خم کانتیلیور بر حسب تغییر دمای آن

محاسبه می‌شود (شکل ۲-پ) [۳۲ و ۳۳].

#### ۴- حساسیت‌ها

برای بررسی و تحلیل بیشتر رفتار آشکارساز مادون قرمز

بهینه‌شده، مقادیر حساسیت‌ها محاسبه و نتایج حاصل از آن در جدول

۱، نشان داده شده است. طبق تعریف، مقدار ضریب انتقال دما (نسبت

تغییرات دمای میکروکانتیلیور  $\Delta T_c$  به تغییر دمای منبع تولید مادون

قرمز ( $\Delta T_c$ )، حساسیت ترمومکانیکی<sup>۱</sup> (نسبت تغییرات  $\Delta z$  آشکارساز

به تغییر دمای  $\Delta T_c$ )، حساسیت توانی (نسبت جابه‌جایی آشکارساز

به توان امواج مادون قرمز تابیده شده به سطح آشکارساز)، حساسیت

دمایی<sup>۲</sup> (نسبت تغییر دمای ناحیه جاذب آشکارساز به چگالی توان

حرارتی جذبی در سطح آشکارسازهای مادون قرمز میکروکانتیلیوری)،

حساسیت جابجایی<sup>۳</sup> (نسبت جابجایی آشکارساز به چگالی توان

حرارتی جذب شده در سطح آشکارساز)، حساسیت به دمای جسم

سیاه (نسبت جابه‌جایی کانتیلیور در آشکارساز به ازای یک درجه

تغییر در دمای جسم سیاه) و ثابت زمانی به ترتیب از روابط (۱۷) تا

(۲۳) به دست می‌آیند [۳۷ و ۳۸]:

ممان مؤثر سبب خم کانتیلیور می‌شود. فرض می‌شود که انحنای کانتیلیور به اندازه  $\rho$  است. کرنش به وجود آمده در سطح کانتیلیور به خاطر این ممان را می‌توان به صورت رابطه (۹) نوشت.

$$\sigma_{M,i} = \pm \frac{t_i}{2\rho_i} \quad (9)$$

$$M_i = \frac{E I_i}{\rho_i} = \frac{E W t_i^3}{12 \rho_i} \quad (10)$$

علامت  $\pm$  برای سطح بالا و پایین است.  $I$  ممان داخلی کانتیلیور است.

با فرض این که خم میکروکانتیلیور بسیار کم است. بنابراین

شعاع انحنای خیلی بیشتر از ضخامت کانتیلیور است. بنابراین می‌توان

فرض کرد که:

$$\rho_1 = \rho_2 = \rho \quad (11)$$

با ترکیب معادلات (۷) و (۸)، کرنش در مرز هر یک از کانتیلیورها

به دست می‌آید.

$$\sigma_1 = \alpha_1 \Delta T - \frac{F}{E_1 W t_1} - \frac{t_1}{2\rho} \quad (12)$$

$$\sigma_2 = \alpha_2 \Delta T - \frac{F}{E_2 W t_2} - \frac{t_2}{2\rho}$$

به علت پیوستگی در مرز داریم  $\sigma_1 = \sigma_2$ ، پس:

$$\alpha_1 \Delta T - \frac{F}{E_1 W t_1} - \frac{t_1}{2\rho} = \alpha_2 \Delta T - \frac{F}{E_2 W t_2} - \frac{t_2}{2\rho} \quad (13)$$

انحنای میکروکانتیلیور با جایگذاری معادلات (۶) و (۱۰) در

معادله (۱۳) به دست می‌آید:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{6E_1 E_2 t_1 t_2 (\alpha_1 - \alpha_2) \Delta T}{(E_2 t_2^2 - E_1 t_1^2)^2 + 4E_1 E_2 t_1 t_2 t^2} \quad (14)$$

1 Temperature Responsively

2 Temperature Sensitivity

3 Displacement Sensitivity

سپس خم میکروکانتیلیور یک آزاد تحت ممان  $M$  در طول آن

جدول ۱. نتایج حاصل از محاسبات  
Table 1. Theoretical calculation results

پارامترها	واحد	آشکا رساز اولیه [۲۴]	بهینه‌سازی ضخامت لایه فلز	بهینه‌سازی ضخامت لایه عایق	بهینه‌سازی عرض بازوها		
$t_{SiO_2}$ ضخامت لایه عایق	$\mu\text{m}$	۱	۱	۰/۵	۰/۱	۰/۵	۰/۱
$t_{Al}$ ضخامت لایه فلزی	$\mu\text{m}$	۰/۲	۰/۵	۰/۲۵	۰/۰۵	۰/۲۵	۰/۰۵
$W$ پهنای بازوها	$\mu\text{m}$	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۵	۱
$\Delta T_c$ تغییر دما	K	۳/۲۶	۳/۲۳	۵/۲۶	۱۰/۶	۱۲/۱۴	۱۳/۷۴
درصد بهبودی			----	۱/۶۱	۳/۲۵	۳/۲۷	۴/۳۱
$G$ هدایت حرارتی کل	$10^{-7} \times \text{WK}^{-1}$	۲/۱۵	۲/۱۲	۱/۳۳	۰/۶۶	۰/۵۷	۰/۵۱
درصد بهبودی			----	۳۸٪	۶۹٪	۷۳٪	۷۶٪
$\Delta z$ جابجایی	nm	۹۲۷	۱۱۷۶	۳۸۳۳	۳۸۶۱۴	۴۴۲۲	۵۰۰۴
درصد بهبودی						۴	۰
$H$ ضریب انتقال دما	$\times 10^{-7}$	۹/۷	۹/۵	۱۵	۳۱/۲	۳۵/۷	۴۰
درصد بهبودی			----	۱/۵	۳/۲	۳/۷	۴/۱۲
$\mathcal{R}_T$ حساسیت ترمومکانیکی	nm/K	۱/۴۱	۳۶۴	۷۲۸	۳۶۴۰	۳۶۴۰	۳۶۴۰
درصد بهبودی			۲۶٪	۴/۱۳	۴۱	۴۷/۷	۵۴
$\mathcal{R}_P$ حساسیت توانی	mW <sup>-1</sup>	۱/۳	۱/۶۷	۵/۴۶	۵۵	۶۳	۷۱
درصد بهبودی			۲۸٪	۴/۲	۴۲	۴۸/۴۶	۵۴
$S_t$ حساسیت دمایی	mK / pW. $\mu\text{m}^{-2}$	۱۵۴	۳۲/۲۳۵	۵۲/۵۳	۱۰۵	۱۲۱	۱۳۷
درصد بهبودی			----	۱/۶	۳/۲۲	۳/۷۱	۴/۲
$S_d$ حساسیت جابجایی	nm / pW. $\mu\text{m}^{-2}$	۹/۲۵	۱۱/۷۳	۳۸/۲۴	۳۸۵	۴۴۱	۴۴۹
درصد بهبودی			۲۰٪	۴/۱۳	۴۱/۶۲	۴۷/۶۷	۴۸/۵۴
$S_{bt}$ حساسیت به دمای جسم	nm/K	۲/۷۲	۳/۴۵	۱۱/۲۷	۱۱۳	۱۳۰	۱۴۷
درصد بهبودی			۲۶٪	۴/۱۴	۴۱/۵	۴۷/۸	۵۴
$\tau$ ثابت زمانی	ms	۱۴۰	۱۶۲	۱۳۲	۵۳	۶۱	۶۹
درصد بهبودی			-۱۳.۵٪	۵٪	۶۲٪	۵۶٪	۵۰٪

$$\mathcal{R}_p = \frac{\Delta z}{P} \quad (\text{nm/K}) \quad (19) \quad H = \frac{\Delta T_c}{\Delta T_t} = \frac{A_{\text{pixel}} \cdot \eta \cdot \tau_0}{G} \quad (17)$$

$$S_t = \frac{\Delta T_c}{W_s} = \frac{A_{\text{pixel}}}{G} \quad \text{mK}/(\text{pW} \cdot \mu\text{m}^{-2}) \quad (20) \quad \mathcal{R}_t = \frac{\Delta z}{\Delta T_c} = \mathcal{R}_p \cdot G \quad (\text{m/K}) \quad (18)$$

میزان خمش میکروکانتیلیور دو ماده‌ای برحسب تغییر دمای آن را می‌توان از رابطه (۱۶) به دست آورد. از آن جایی که ضریب مدول یانگ Al تقریباً برابر با ضریب مدول یانگ SiO<sub>۲</sub> است، لذا رابطه (۱۶) به رابطه (۲۵) ساده می‌شود.

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

$$\Delta z = 3.(\alpha_1 - \alpha_2) \cdot \frac{r(1+r)}{t_2 K} \cdot l_b^2 \cdot \Delta T \quad (24)$$

با جایگذاری  $K$  در معادله خواهیم داشت.

$$\Delta z = 3.(\alpha_1 - \alpha_2) \cdot \frac{r}{t_2 (1+r)^3} \cdot l_b^2 \cdot \Delta T \quad (25)$$

برای محاسبه حداکثر مقدار جابه‌جایی برحسب نسبت ضخامت لایه‌ها، کافی است مشتق رابطه (۲۳) برحسب  $r$  را برابر با صفر قرار داد تا مقدار حداکثر جابه‌جایی محاسبه شود. نتیجه مشتق رابطه (۲۵) به‌صورت رابطه (۲۶) می‌شود.

$$\frac{dz}{dr} = 3.(\alpha_1 - \alpha_2) l_b^2 \cdot \Delta T \cdot (1+r)^2 (1-2r) \quad (26)$$

با صفر قرار دادن رابطه (۲۶)، دو مقدار برای  $r$  حاصل می‌شود که برابر با ۱- و ۰/۵ است. مقدار منفی یک عدد نامعتبر است زیرا ضخامت نمی‌تواند منفی باشد. پس مقدار ۰/۵ پاسخ صحیح خواهد بود، لذا برای حصول حداکثر مقدار جابه‌جایی آشکارساز، ضخامت لایه عایق باید دو برابر ضخامت لایه فلزی باشد.

#### ۶- تحلیل نتایج حاصل از محاسبات

شکل ۳ نتایج حاصل از محاسبات را نشان می‌دهد. این شکل نتایج حاصل از تغییرات پارامترها به ترتیب ستونی از چپ به راست برحسب ضخامت‌های لایه آلومینیوم و دی‌اکسید سیلیکون و عرض بازوهای دو ماده‌ای و ایزوله کننده را نشان می‌دهد. نسبت تغییرات پارامترها برحسب ضخامت Al در محور افقی از ۱ μm تا ۰/۱ μm به ازای ۱ μm ضخامت لایه SiO<sub>۲</sub> در اشکال ستون اول از سمت چپ، نسبت تغییرات برحسب ضخامت لایه عایق در محور افقی از

$$S_d = \frac{\Delta z}{W_s} = A \cdot R_p \cdot T_t \quad \text{nm/(pW} \cdot \mu\text{m}^2) \quad (21)$$

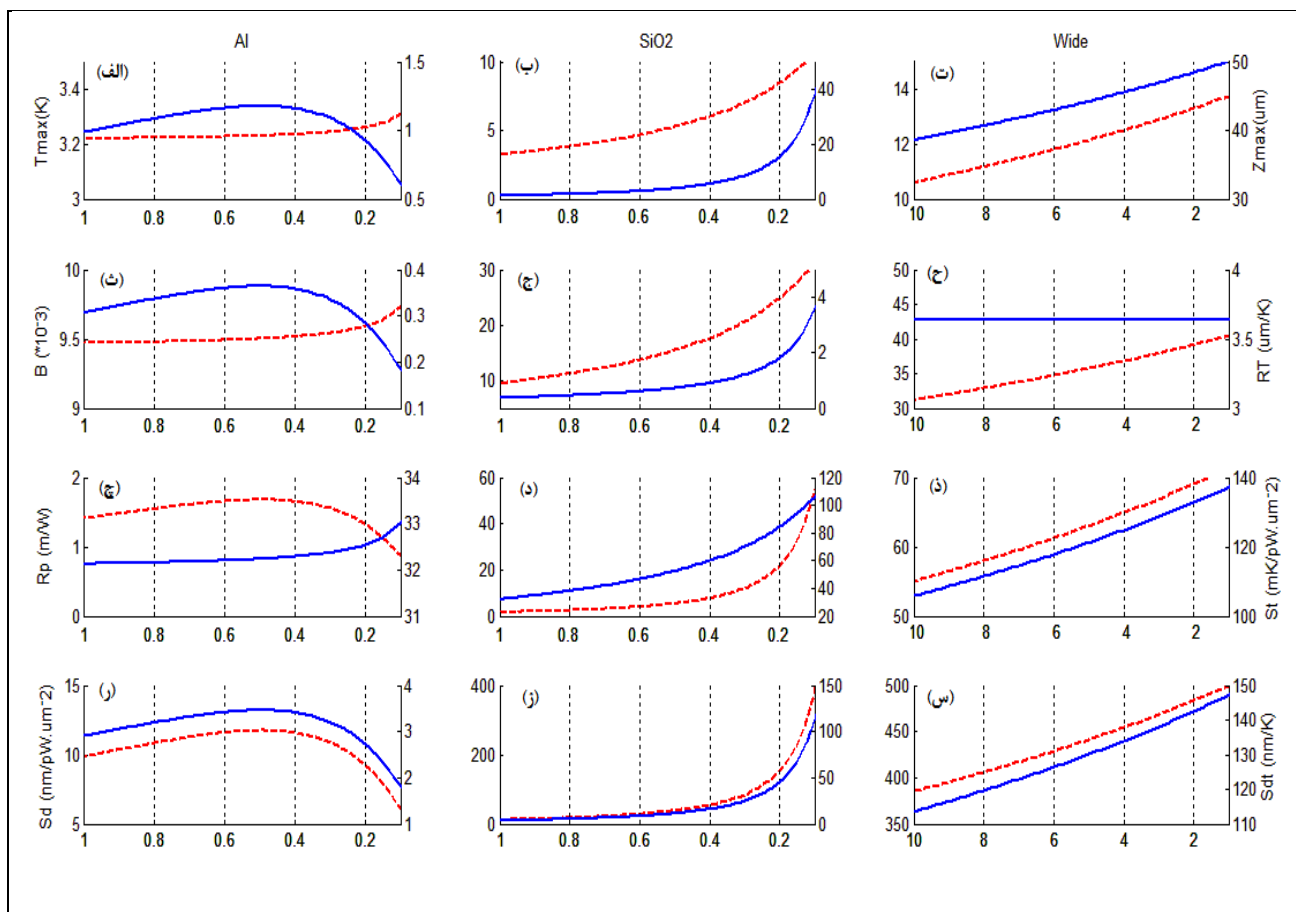
$$S_{dt} = \frac{\Delta z}{\Delta T_t} = R_p \cdot W_s \quad \text{nm/K} \quad (22)$$

$$\tau = \frac{C}{G} = \left( \frac{cV}{G} \right) \quad \text{s} \quad (23)$$

در این روابط،  $\tau$  ضریب انتقال سامانه اپتیکی،  $\eta$  میزان جذب،  $A_{pixel}$  سطح ناحیه جاذب،  $\tau$  زمان پاسخ‌دهی حرارتی،  $C$  ظرفیت گرمایی،  $c$  ضریب گرمای ویژه و  $V$  حجم آشکارساز است.

#### ۵- روش بهینه‌سازی

در مرجع [۲۵] طراحی و شبیه‌سازی یک آشکارساز مادون‌قرمز میکروکانتیلیوری از جنس SiO<sub>۲</sub>/Al بر پایه فناوری میکروماشین‌کاری و بدون نیاز به خنک‌ساز با در نظر گرفتن محدودیت‌های ساخت برای ابعاد آشکارساز در آزمایشگاه‌هایی با امکانات محدود انجام شده است و فرآیند ساخت آن نیز در مراجع [۲۲ - ۲۰ و ۳۸] بیان شده است. در بخش‌های قبلی نشان داده شد که حساسیت و پاسخ آشکارساز مادون‌قرمز میکروکانتیلیوری از جنس SiO<sub>۲</sub>/Al به ابعاد آن وابسته است، لذا با انتخاب مناسب عرض بازوها و ضخامت لایه‌ها می‌توان پاسخ آشکارساز را بهبود داد. از آنجایی که میزان جابه‌جایی با کاهش عرض بازوها و ضخامت لایه‌ها افزایش می‌یابد لذا با بهینه‌سازی فرآیند ساخت می‌توان عرض بازوها و ضخامت لایه‌ها را کاهش داد. در مرجع [۲۴] نشان داده شده است که با بهینه‌سازی فرآیند ساخت در آزمایشگاه‌هایی با امکانات محدود، می‌توان ضخامت لایه عایق را به ۵۰۰ nm کاهش داد. در آزمایشگاه‌های پیشرفته با بهینه‌سازی فرآیند ساخت امکان کاهش ضخامت لایه عایق تا ۱۰۰ nm وجود دارد. در این صورت می‌توان پهنای بازوها را از ۱۰ μm به ۱ μm کاهش داد. نتایج حاصل از کاهش عرض بازوها و ضخامت‌ها لایه‌ها در بخش بعدی بیان خواهد شد. از طرفی طبق رابطه (۱۶) میزان خمش آشکارساز به نسبت ضخامت لایه‌ها بستگی دارد لذا با محاسبه ریاضی می‌توان این نسبت را تعیین کرد و مقدار ماکزیمم را به دست آورد. در ادامه مقدار آن محاسبه می‌شود.



شکل ۳. نمودار پارامترها برحسب ضخامت لایه Al، ضخامت لایه  $\text{SiO}_2$  و عرض بازوها. محور افقی اشکال از سمت چپ به راست به ترتیب ضخامت لایه Al، ضخامت لایه  $\text{SiO}_2$  و عرض بازوها است. نمودارهای اشکال مربوط به محورهای عمودی سمت چپ به رنگ قرمز با خطوط مقطع به ترتیب از بالا به پایین مقدار دما، ضریب انتقال دما، حساسیت توانی و حساسیت جابه‌جایی را نشان می‌دهند و نمودارهای مربوط به محورهای عمودی سمت راست به رنگ آبی با خطوط ممتد به ترتیب از بالا به پایین مقدار جابه‌جایی، حساسیت ترمومکانیکی، حساسیت دمایی و حساسیت به دمای جسم را نشان می‌دهند.

Fig. 3. shows the results of Calculations with respect to changes of  $t_{Al}$ ,  $t_{SiO_2}$  and  $W$ , which are shown in the left to right of horizontal axis, respectively. The red dash lines show the temperature changes, heat transfer coefficient, thermomechanical sensitivity, and power sensitivities from top to bottom, respectively, in the left vertical axis on diagrams. The blue solid lines show the displacement changes and thermomechanical, temperature, and black body temperature sensitivities, from top to bottom, respectively, in the right vertical axis on diagrams.

در جدول ۱ نیز نتایج حاصل از محاسبات به ازای ابعاد مشخص شده در سه سطر اول این جدول و میزان بهبودی هر متغیر در سطر زیر آن پارامتر نشان داده شده است. در ادامه به تشریح و تحلیل بیشتر این اشکال و جدول پرداخته می‌شود.

#### • تحلیل نسبت ضخامت Al به $\text{SiO}_2$

تغییر دما طبق رابطه (۴) نسبت عکس با هدایت حرارتی دارد، از طرفی هدایت حرارتی طبق رابطه (۲) نسبت مستقیم با ضخامت لایه‌ها دارد در نتیجه تغییر دما در آشکارساز نسبت عکس با ضخامت لایه‌ها دارد. بنابراین دما با افزایش ضخامت لایه Al کاهش خواهد یافت.

$1 \mu\text{m}$  تا  $0.1 \mu\text{m}$  با رعایت ضخامت لایه فلزی به اندازه نصف ضخامت لایق عایق در اشکال ستون میانی و نسبت تغییرات پارامترها برحسب پهنای بازوها از  $10 \mu\text{m}$  تا  $1 \mu\text{m}$  به ازای  $0.1 \mu\text{m}$  عایق و  $50 \text{ nm}$  ضخامت لایه فلزی را نشان می‌دهد.

محورهای عمودی سمت چپ این اشکال به ترتیب از بالا به پایین دما، ضریب انتقال دما، حساسیت توانی و حساسیت جابه‌جایی است که با خطوط مقطع به رنگ قرمز نشان داده شده است. محورهای سمت راست این اشکال به ترتیب از بالا به پایین مقدار جابه‌جایی، حساسیت ترمومکانیکی، حساسیت دمایی، و حساسیت به دمای جسم است که با خطوط ممتد به رنگ آبی نشان داده شده است.

کاهش ضخامت لایه  $\text{SiO}_2$  بیشتر می‌شود. این شکل افزایش خمش آشکار ساز با کاهش ضخامت را نیز نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که با کاهش ضخامت  $\text{SiO}_2$  مقدار دما و میزان خمش افزایش می‌یابند. در جدول ۲ محاسبات مربوط به مقادیر پارامترها به ازای ضخامت‌های لایه عایق به اندازه‌های  $500\text{nm}$  و  $100\text{nm}$  انجام شده است. طبق این جدول مشاهده می‌شود که مقادیر افزایش پارامترها برای عایق با ضخامت‌های  $500\text{nm}$  و  $100\text{nm}$  نسبت به آشکار ساز اولیه مرجع [۲۵] به ترتیب برای تغییر دما  $1/61$  و  $3/25$  برابر، میزان جابه‌جایی  $4/13$  و  $41$  برابر، ضریب انتقال دما  $1/5$  و  $3/2$  برابر، حساسیت ترمومکانیکی  $2/55$  و  $12/8$  برابر، حساسیت توانی  $4/2$  و  $42$  برابر، حساسیت دمایی  $1/6$  و  $3/22$  برابر، حساسیت جابه‌جایی  $4/13$  و  $41/62$  برابر، حساسیت به دمای جسم  $4/14$  و  $41/5$  برابر و ثابت زمانی  $1/06$  و  $2/64$  برابر بهبود یافته است.

#### • اثر کاهش عرض بازوها

هدایت حرارتی با کاهش پهنای بازوها طبق رابطه (۲) کاهش می‌یابد. در نتیجه، دما طبق رابطه (۴) با کاهش هدایت حرارتی افزایش می‌یابد. نمودار تغییرات هدایت حرارتی برحسب پهنای بازوها با رعایت ضخامت لایه فلزی به اندازه نصف ضخامت لایه عایق در شکل ۲-ت نشان داده شده است. بر اساس شکل ملاحظه می‌شود که مقدار تغییر دما و خمش آشکار ساز با کاهش پهنای بازوها افزایش می‌یابند. از آنجایی که با بهینه‌سازی فرآیند ساخت، امکان کاهش پهنای بازوها میسر است؛ لذا در ستون مربوط به بهینه‌سازی ضخامت لایه عایق در جدول ۲، محاسبات مربوط به مقادیر پارامترها به ازای پهنای بازوها به اندازه  $5\mu\text{m}$ ، ضخامت لایه عایق به اندازه  $0/5\mu\text{m}$  و ضخامت لایه فلزی به اندازه  $0/25\mu\text{m}$  برای آزمایشگاه‌هایی با امکانات محدود انجام شده است. برای آزمایشگاه‌هایی با امکانات پیشرفته، محاسبات به ازای  $1\mu\text{m}$  برای پهنای بازوها،  $0/1\mu\text{m}$  برای ضخامت لایه عایق و  $0/05\mu\text{m}$  برای ضخامت لایه فلزی انجام شده است. طبق نتایج حاصل در ستون اول از سمت راست جدول مشاهده می‌شود که مقادیر پارامترها برای عایق با پهنای بازوها به اندازه  $5\mu\text{m}$  و  $1\mu\text{m}$  نسبت به مقادیر مرجع [۲۵] به ترتیب برای تغییر دما  $3/72$  و  $4/72$  برابر، میزان جابه‌جایی  $47/7$  و  $54$  برابر، ضریب انتقال دما  $3/7$  و  $4/12$  برابر، حساسیت ترمومکانیکی  $12/8$  و  $12/8$  برابر، حساسیت توانی

در بخش ۵ اثبات شد که میزان خمش با انتخاب ضخامت لایه فلزی به اندازه نصف ضخامت لایه عایق به حداکثر مقدار خود می‌رسد. شکل ۳-الف) نشان می‌دهد که بیشینه خمش آشکار ساز به ازای ضخامت  $\text{Al} = 0/5\mu\text{m}$  رخ داده است که این مقدار نصف ضخامت لایه  $\text{SiO}_2 = 1\mu\text{m}$  می‌باشد.

طبق شکل‌های ۳ (الف-ث-ج-ر) مقدار دما، ضریب انتقال دما و حساسیت دمایی با تغییر ضخامت آلومینیوم تغییر محسوسی ندارد. طبق این اشکال مشاهده می‌شود که بیشینه میزان جابه‌جایی، حساسیت ترمومکانیکی، حساسیت توانی، حساسیت جابه‌جایی و حساسیت به دمای جسم درازای  $\text{Al} = 0/5\mu\text{m}$  است.

در جدول ۱ نتایج حاصل از محاسبات با مقادیر پارامترها در معادلات با در نظر گرفتن نسبت بهینه شده ضخامت آلومینیوم به ضخامت دی‌اکسید سیلیکون درج شده است و روند تغییرات آنها در اشکال ستون دوم و سوم شکل ۳ نشان داده شده‌اند. جدول ۱ نشان می‌دهد که با بهینه‌سازی ضخامت لایه فلزی آشکار ساز مرجع [۲۵] به ازای  $0/5\mu\text{m}$  و با در نظر گرفتن ضخامت لایه عایق به اندازه  $1\mu\text{m}$  و عرض بازوها به اندازه  $10\mu\text{m}$ ، تغییرات دما، هدایت حرارتی، ضریب انتقال دما و حساسیت دمایی بهبود نیافته‌اند و ثابت زمانی نیز به اندازه  $13/5\%$  کاهش یافته است. ولی میزان جابه‌جایی، حساسیت ترمومکانیکی، حساسیت توانی، حساسیت جابه‌جایی و حساسیت به دمای جسم به ترتیب  $26\%$ ،  $27\%$ ،  $28\%$ ،  $26\%$  و  $26\%$  بهبود یافته‌اند. بنابراین با بهینه‌سازی ابعاد هندسی آشکار ساز و با انتخاب ضخامت لایه فلز به اندازه نصف ضخامت لایه عایق، مقادیر حساسیت‌ها بهینه می‌شوند.

#### • اثر کاهش ضخامت $\text{SiO}_2$

کم شدن سطح مقطع بدنه اصلی آشکار ساز طبق رابطه (۲) سبب کاهش هدایت حرارتی می‌گردد، اما این کاهش، سبب پیچیده‌تر شدن فرآیند ساخت می‌شود. همچنین هدایت حرارتی طبق رابطه (۲) نسبت مستقیم با ضخامت لایه‌ها دارد و تغییر دما نیز طبق رابطه (۴) نسبت عکس با هدایت حرارتی دارد، بنابراین تغییر دما در آشکار ساز نسبت عکس با ضخامت لایه‌ها دارد. شکل ۳-ب نمودار تغییرات دما نسبت به تغییر ضخامت لایه  $\text{SiO}_2$  با رعایت ضخامت لایه فلزی به اندازه نصف ضخامت لایه عایق را نشان می‌دهد. طبق این شکل مقدار دما با

- on Photonics and Optoelectronics, IEEE, 2010, pp. 1-5.
- [5] M.S. Willers, C.J. Willers, Key considerations in infrared simulations of the missile-aircraft engagement, in: Technologies for Optical Countermeasures IX, International Society for Optics and Photonics, 2012, pp. 85430N..
- [6] D.R. Luber, J.E. Marion, D. Fields, Kestrel: force protection and Intelligence, Surveillance, and Reconnaissance (ISR) persistent surveillance on aerostats, in: Defense Transformation and Net-Centric Systems 2012, International Society for Optics and Photonics, 2012, pp. 84050L.
- [7] A. Rogalski, Infrared detectors: an overview, Infrared physics & technology, 43(3-5) (2002) 187-210.
- [8] A. Rogalski, Infrared detectors for the future, Acta Physica Polonica-Series A General Physics, 116(3) (2009) 389.
- [9] B. Wang, J. Lai, H. Li, H. Hu, S. Chen, Nanostructured vanadium oxide thin film with high TCR at room temperature for microbolometer, Infrared Physics & Technology, 57 (2013) 8-13.
- [10] N. Lavrik, R. Archibald, D. Grbovic, S. Rajic, P. Datskos, Uncooled MEMS IR imagers with optical readout and image processing, in: Infrared Technology and Applications XXXIII, International Society for Optics and Photonics, 2007, pp. 65421E.
- [11] C. Li, B. Jiao, S. Shi, D. Chen, T. Ye, Q. Zhang, Z. Guo, F. Dong, Z. Miao, A novel uncooled substrate-free optical-readable infrared detector: design, fabrication and performance, Measurement Science and Technology, 17(7) (2006) 1981.
- [12] J.W. Judy, Microelectromechanical systems (MEMS): fabrication, design and applications, Smart materials and Structures, 10(6) (2001) 1115.
- [13] D. Grbovic, G. Karunasiri, 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, 2009, pp. 731108.
- [14] F. Niklaus, C. Vieider, H. Jakobsen, MEMS-based uncooled infrared bolometer arrays: a review, in: MEMS/

۴۸/۴۶ و ۵۴ برابر، حساسیت دمایی ۳/۷۱ و ۴/۲ برابر، حساسیت جابه‌جایی ۴۷/۶۷ و ۴۸/۵۴ برابر، و حساسیت به دمای جسم ۴۷/۸ و ۵۴ برابر و ثابت زمانی ۲/۵ و ۲/۸ برابر بهبود یافته است.

## ۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله، با بهینه‌سازی ابعاد آشکارساز مادون قرمز میکروکانتیلیور از جنس  $\text{SiO}_2 / \text{Al}$ ، مقدار دما، خمش و حساسیت آشکارساز افزایش یافته است. اثبات شد که با انتخاب ضخامت لایه عایق  $\text{SiO}_2$  به اندازه دو برابر ضخامت لایه فلزی  $\text{Al}$ ، میزان جابه‌جایی ۲۶٪، حساسیت ترمومکانیکی ۲۷٪، حساسیت توانی ۲۸٪، حساسیت جابه‌جایی ۲۶٪ و حساسیت به دمای جسم ۲۶٪ بهبود می‌یابند. چنانچه ابعاد آشکارساز به طور مناسب انتخاب شود به طوری که مقدار پهنا، ضخامت لایه عایق و ضخامت لایه فلزی به ترتیب  $5\mu\text{m}$ ،  $0.5\mu\text{m}$  و  $0.25\mu\text{m}$  شوند، در این صورت امکان ساخت آن در آزمایشگاه‌هایی با امکانات محدود میسر خواهد شد. نتایج محاسبات در این ابعاد نشان می‌دهد که در محیط خلأ تغییر دما ۳/۷۲ برابر، میزان جابه‌جایی ۴۷/۷ برابر، ضریب انتقال دما ۳/۷ برابر، حساسیت ترمومکانیکی ۱۲/۸ برابر، حساسیت توانی ۴۸/۴۶ برابر، حساسیت دمایی ۳/۷۱ برابر، حساسیت جابه‌جایی ۴۷/۶۷ برابر و حساسیت به دمای جسم ۴۷/۸ برابر نسبت به مرجع [۲۵] بهبود می‌یابند.

## مراجع

- [1] A.S. Ahmed, H.J. Kim, J. Kim, K.S. Hwang, S. Kim, Enhancing the Responsivity of Uncooled Infrared Detectors Using Plasmonics for High-Performance Infrared Spectroscopy, Sensors (Basel), 17(4) (2017).
- [2] M. Toda, N. Inomata, T. Ono, I. Voiculescu, Cantilever beam temperature sensors for biological applications, IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 12(2) (2017) 153-160.
- [3] S.J. Oh, Y.-M. Huh, J.-S. Suh, J. Choi, S. Haam, J.-H. Son, Cancer diagnosis by terahertz molecular imaging technique, Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 33(1) (2012) 74-81.
- [4] W. Zhang, Remote malfunction diagnosis system based on infrared thermal imaging and RIA, in: 2010 Symposium

- of THz based on surface plasmon resonance, in: Infrared, Millimeter Wave, and Terahertz Technologies, International Society for Optics and Photonics, 2010, pp. 78541H.
- [26] B. Su, G. Duan, A high sensitivity THz detector, in: International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging 2011: Terahertz Wave Technologies and Applications, International Society for Optics and Photonics, 2011, pp. 81951K.
- [27] C. Gong, Y. Zhao, L. Dong, M. Hui, X. Yu, X. Liu, Short-wave infrared, medium-wave infrared, and long-wave infrared imaging study for optical readout microcantilever array infrared sensing system, *Optical Engineering*, 52(2) (2013) 026403.
- [28] C. Gong, Y. Zhao, L. Dong, M. Hui, X. Yu, X. Liu, The tolerable target temperature for bimaterial microcantilever array infrared imaging, *Optics & Laser Technology*, 45 (2013) 545-550.
- [29] S.R. Hunter, R.A. Amantea, L.A. Goodman, D.B. Kharas, S. Gershtein, J.R. Matey, S.N. Perna, Y. Yu, N. Maley, L.K. White, High-sensitivity uncooled microcantilever infrared imaging arrays, in: *Infrared Technology and Applications XXIX*, International Society for Optics and Photonics, 2003, pp. 469-480.
- [30] S.R. Hunter, G. Maurer, L. Jiang, G. Simelgor, High sensitivity uncooled microcantilever infrared imaging arrays, in: *Infrared Technology and Applications XXXII*, International Society for Optics and Photonics, 2006, pp. 62061J.
- [31] P. Datskos, N. Lavrik, S. Rajic, Performance of uncooled microcantilever thermal detectors, *Review of Scientific Instruments*, 75(4) (2004) 1134-1148.
- [32] S. Kouravand, Design and modeling of some sensing and actuating mechanisms for MEMS applications, *Applied mathematical modelling*, 35(10) (2011) 5173-5181.
- [33] M. Pashapour, S.-M. Pesteii, G. Rezazadeh, S. Kouravand, Thermo-Mechanical behavior of a bilayer microbeam subjected to nonlinear electrostatic pressure, *Sensors & Transducers*, 103(4) (2009) 161-169
- [34] S. Kouravand, MEMS capacitive micro thermometer MOEMS technologies and applications III, International Society for Optics and Photonics, 2008, pp. 68360D.
- [15] S. Eminoglu, M.Y. Tanrikulu, T. Akin, A Low-Cost 128 times \$128 Uncooled Infrared Detector Array in CMOS Process, *Journal of Microelectromechanical Systems*, 17(1) (2008) 20-30.
- [16] S. Tadigadapa, K. Mateti, Piezoelectric MEMS sensors: state-of-the-art and perspectives, *Measurement Science and technology*, 20(9) (2009) 092001.
- [17] P. Muralt, Micromachined infrared detectors based on pyroelectric thin films, in: *Electroceramic-Based MEMS*, Springer, 2005, pp. 81-113
- [18] G.J. Snyder, J.R. Lim, C.-K. Huang, J.-P. Fleurial, Thermoelectric microdevice fabricated by a MEMS-like electrochemical process, *Nature materials*, 2(8) (2003) 528-531.
- [19] D. Randjelović, A. Petropoulos, G. Kaltsas, M. Stojanović, Ž. Lazić, Z. Djurić, M. Matić, Multipurpose MEMS thermal sensor based on thermopiles, *Sensors and Actuators A: Physical*, 141(2) (2008) 404-413.
- [20] H. Abdollahi, H. Hajghassem, S. Mohajerzadeh, Simple fabrication of an uncooled Al/SiO<sub>2</sub> microcantilever IR detector based on bulk micromachining, *Microsystem technologies*, 20(3) (2014) 387-396.
- [21] H. Abdollahi, H. Hajghassem, Investigation of silicon anisotropic etching in TMAH solution, *Advanced processes in materials*, 9 (334) (2015) 133-144. (In Persian)
- [22] H. Abdollahi, Fast and low cost fabrication of SiO<sub>2</sub> microcantilever based on Bulk microelectromechanical system, *Modares Mechanical Engineering*, 17(5) (2017) 12-20. (In Persian)
- [23] H. Abdollahi, Low cost and simple fabrication of bi-material micro cantilever Array based on MEMS technology, *Electronics Industries*, 8(2) (2016) 85-92. (In Persian)
- [24] H. Abdollahi, F. Samaeifar, A. Haghnegahdar, Effect of SiO<sub>2</sub>/Al to increase microcantilever infrared detectors sensitivity and compare with Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Au, *Journal of solid and fluid mechanics*, 5(1) (2015) 151-163. (In Persian)
- [25] B. Su, G. Duan, C. Zhang, A detection technology

- [37] W. Wang, V. Upadhyay, C. Munoz, J. Bumgarner, O. Edwards, 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, 2006, pp. 62061L..
- [38] H. Abdollahi, F. Samaeifar, A. Afifi, M. Aliahmadi, External alignment marks technique for front-to-back side alignment using single-side mask aligner, *Experimental Techniques*, 41(6) (2017) 627-634.
- based on tip deflection of bimetallic cantilever beam, *Sensors & Transducers Journal*, 70(8) (2006) 637-644.
- [35] S. Kouravand, Design and Simulation of MOEMS Thermal Sensor Based on a Bimetallic Mechanism, *Sensors & Transducers*, 111(12) (2009) 38-44.
- [36] Y. Zhao, M. Mao, R. Horowitz, A. Majumdar, J. Varesi, P. Norton, J. Kitching, Optomechanical uncooled infrared imaging system: design, microfabrication, and performance, *Journal of microelectromechanical systems*, 11(2) (2002) 136-146.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

H. Abdollahi, J. Mazloun, *Increasing the Sensitivity of SiO<sub>2</sub>/Al Micro Cantilever Infrared Detector Based on Micro Electromechanical Systems Technology by Optimizing of Dimensions*, *Amirkabir J. Mech Eng.*, 53(8) (2021) 4717-4728.

DOI: [10.22060/mej.2018.13909.5751](https://doi.org/10.22060/mej.2018.13909.5751)

