

طراحی و شبیه‌سازی میکروهیتر ساخته شده با تکنولوژی MEMS

فاطمه سمائی فر^۱

حسن حاج قاسم^۲، منصور محتشمی فر^۲، مجیدرضا علی احمدی^۳

چکیده

یکی از اجزای کلیدی در میکرو حساسه‌ها میکروهیتر می‌باشد. از میکروهیترها در کاربردهای بسیاری از جمله حساسه‌های گاز و حساسه‌های فشار استفاده می‌کنند. در این مقاله طراحی و شبیه‌سازی میکروهیتر ارائه شده است. آنالیز انتقال گرما به کار گرفته شده است تا مشخص شود کدام ساختار میکروهیتر بهترین بازدهی گرمایی را دارد. حساسیت و دقت یک حساسه گازی که در آن از هیتر استفاده می‌شود به یکنواختی دما در ناحیه فعال هیتر وابسته است. چندین روش برای ایجاد توزیع یکنواخت گرما در میکروهیترها وجود دارد. در این مقاله روش اصلاح شکل هندسی میکروهیتر بررسی شده است. هشت هندسه مختلف طراحی شده و به کمک نرم افزار CowentorWare شبیه‌سازی شده است تا بررسی شود میکروهیتر با کدام هندسه بیشترین یکنواختی گرما را داراست. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که ساختار Ω - شکل بهترین یکنواختی گرما را دارد.

کلید واژه

آنالیز المان محدود، توزیع دما، حساسه گاز، میکروهیتر، MEMS

^۱ دانشگاه صنعتی مالک اشتر، fsamaeifar@yahoo.com

^۲ دانشگاه صنعتی مالک اشتر

^۳ دانشگاه صنعتی مالک اشتر

فهرست علائم و اختصارات

		نمادها
ظرفیت گرمایی	C	k هدایت گرمایی
شکاف انرژی بین هیتر و بستر	g	L طول
مقاومت	R	Q توان مصرفی
ضریب مقاومت گرمایی	α	W عرض
نیم کره فرضی داخلی در پایین	OB	T ضخامت
نیم کره فرضی داخلی در بالا	Or	I کره فرضی داخلی
پایه	Te	i شاخص مواد سازنده میکروهیتر
ثابت زمانی	τ	دما
جریان الکتریکی	I'	M کاواک غشا
کره فرضی خارجی	O	H هیتر
حرارتی	Th	r شعاع
هوا	A	Co سردشونده
زمان	t	He گرم شونده
نسبت طول هیتر به طول کاواک غشا	X	0 مرجع
غیر یکنواختی	Nuf	E الکتریکی
		avg میانگین

مقدمه

در سال‌های اخیر به طور گسترده از میکروهیترها در کاربردهایی مثل فلوحساسه‌ها، حساسه‌های گازی، حساسه‌های فشار، حساسه‌های رطوبت، آشکارکننده‌های مادون قرمز، منابع مادون قرمز و راه‌اندازها استفاده می‌شود [۱-۵]. استفاده از میکروهیترها در حساسه‌های گازی پاسخ دینامیکی را افزایش داده و توان مصرفی را به طور قابل توجهی کاهش می‌دهد [۶]. همچنین استفاده از آن‌ها در حساسه‌های گازی می‌تواند پیچیدگی فرایند ساخت [۷] و قیمت در تولید انبوه را کاهش دهد [۸]. بزرگترین چالش‌ها در طراحی میکروهیتر نیاز به یکنواختی گرما برای افزایش دقت و حساسیت حساسه، توان مصرفی پایین، استحکام حرارتی و مکانیکی بالا برای افزایش استقامت حساسه در محیط‌های خشن و مطابقت با فرآیند استاندارد IC^۴ (مدار مجتمع) برای توانایی در مجتمع شدن با مدارات الکتریکی و کاهش قیمت در تولید انبوه می‌باشد. همچنین توانایی در رسیدن به دمای

 integrated circuit^۴

بالتر از ۷۰۰ درجه سلیسیوس برای انجام فرآیند انیل کردن^۹ لایه‌های حساس به گاز بعد از بسته‌بندی بسیار حائز اهمیت است [۹].

حساسیت و دقت یک حساسه گازی که در آن از هیتر استفاده می‌شود به یکنواختی دما در ناحیه فعال هیتر وابسته است [۱۰]. به منظور عملکرد خوب میکروهیتر گرادیان دما در ناحیه فعال نباید از ۵۰ درجه سلیسیوس تجاوز کند [۱۱]. همچنین سفارش شده است که گرادیان دما کمتر از ۲۵ درجه سلیسیوس باشد [۱۲]. یکنواختی دما در میکروهیتر را می‌توان از طریق چندین روش از جمله استفاده از لایه سیلیکون در زیر غشای میکروهیتر [۱۲، ۱۳]، قرار دادن صفحه پلی‌سیلیکون در زیر غشای میکروهیتر [۱۴] و استفاده از هندسه‌های گوناگون در طراحی میکروهیتر به دست آورد [۱۵]. استفاده از لایه سیلیکون یا پلی‌سیلیکون در زیر غشای میکروهیتر، توان مصرفی را افزایش می‌دهد و فرآیند ساخت را دشوار می‌کند.

با وجود کاربردهای متعدد میکروهیتر، مقالات منتشر شده شامل تناقضاتی در رابطه با مدل‌سازی حرارتی و آنالیز انتقال گرما می‌باشند. انتقال گرما از میکروهیتر به محیط اطراف در [۱۶] به رسانش^۶ و در [۱۷] به همرفت^۷ نسبت داده شده است با وجود اینکه سائز میکروهیتر در [۱۶] و [۱۷] یکسان است. علاوه بر این، در [۱۸] انتقال گرما به محیط اطراف از هر دو طریق همرفت و رسانش به طور جداگانه گنجانده شده است. بعید است که همرفت نقشی اساسی در انتقال گرما در نزدیکی میکروهیتر داشته باشد. با این حال تعدادی از محققان ضریب همرفت را در حدود $100 \text{ W/m}^3 \cdot \text{K}$ فرض می‌کنند که اعتبار تجربی ندارد. همچنین اغلب مقالات منتشر شده بر روی ساختار خاصی از میکروهیتر تمرکز می‌کند و دستورالعمل طراحی عمومی ارائه نمی‌دهند.

در این مقاله ابتدا آنالیز انتقال گرما پارامتر- فشرده را برای انواع ساختارهای میکروهیتر معرفی می‌کنیم و بر اساس این مدل‌سازی، ساختار با بهترین بازده گرمایی و پاسخ زمانی را انتخاب کردیم. برای دست‌یابی به توزیع یکنواخت دما، روش استفاده از هندسه‌های گوناگون در طراحی میکروهیتر را مورد بررسی قرار دادیم. هشت میکروهیتر پلاتینی با هندسه‌های گوناگون ولی با بازده گرمایی یکسان را با نرم‌افزار CoventorWare شبیه‌سازی کرده و هندسه‌ای که بیشترین یکنواختی دما را داراست تعیین کردیم.

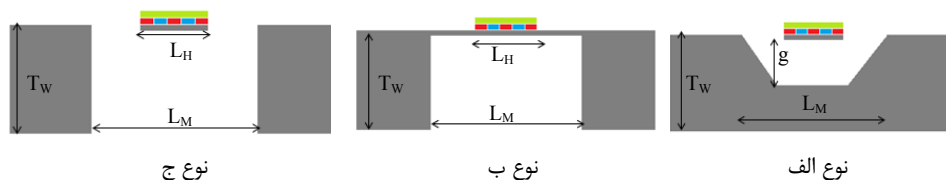
طراحی میکروهیتر

سه نوع ساختار میکروهیتر می تواند وجود داشته باشد:

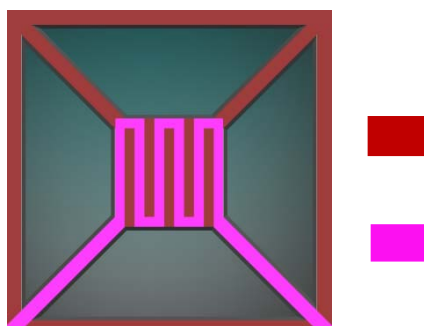
نوع الف میکروهیتر با ساختار غشای معلق شده^۱ از بالا، نوع ب میکروهیتر با ساختار غشای معلق نشده^۲ و نوع ج میکروهیتر با ساختار غشای معلق شده از پایین می باشد. شکل ۱ این سه نوع ساختار میکروهیتر را نشان می دهد.

در هر سه نوع ساختار غشاء، بر روی یک کاواک که به وسیله سونش^۳ بستر سیلیکون ایجاد شده قرار دارد و بر روی غشا مقاومت مارپیچی لایه نشانی می شود. شکل ۲ نمای بالای میکروهیتر را نشان می دهد. مقاومت بر روی یک غشای نازک سیلیکون می باشد و با ۴ پایه روی بستر سیلیکون معلق شده است.

انتقال گرما در انواع میکروهیتر با محیط را برای ساده شدن می توان به روش پارامتر- فشرده^۴ آنالیز کرد [۱۹]. انتقال گرما به شیوه های تابش گرما [۲۰] و جابه جایی گرما [۲۱] به دلیل سایز میکروهیتر



شکل ۱. انواع میکروهیتر. نوع الف غشای معلق شده از بالا، نوع ب غشای معلق نشده، نوع ج غشای معلق شده از پایین



شکل ۲. نمای بالای میکروهیتر

^۱suspended membrane
^۲closed membrane
^۳etched
^۴lumped-parameter

و محدوده دما قابل صرف‌نظر هستند. رسانایی گرما از طریق پایه‌ها، رسانندگی گرما از طریق غشا و رسانندگی گرما از طریق هوای پیرامون به ترتیب با روابط (۱) تا (۳) به دست می‌آیند [۲۲].

$$Q_{Cond,Tethers} = \frac{4 \left(\sum_{i=1}^n k_i T_i \right) W}{L_{Te}} \Delta\theta \quad (1)$$

$$Q_{Cond,Membrane} = \frac{2\pi k_M T_M}{\ln(r_M / r_H)} \Delta\theta \quad (2)$$

$$Q_{Cond,Air} = \frac{4\pi k_A}{1/r_I - 1/r_O} \Delta\theta \quad (3)$$

در جایی که:

$$r_M = (L_M^2 / \pi)^{0.5}, r_H = (L_H^2 / \pi)^{0.5}$$

$$r_I = (L_H^2 / 2\pi)^{0.5}, r_O = (3L_M^2 / 2\pi)^{0.5}$$

هنگامی که هیتر از بالا معلق می‌شود، رسانندگی گرمای از طریق هوا در بالا و پایین هیتر به دلیل عدم تقارن در هندسه باید به طور جداگانه بررسی شود (شعاع نیم کره‌های تصور شده برای فلو گرما در بالا و پایین هیتر یکسان نمی‌باشد). روابط زیر رسانندگی گرما را در نیم کره بالایی و پایینی توصیف می‌کند.

$$Q_{Cond,AirTop} = \frac{2\pi k_A}{1/r_I - 1/r_{Or}} \Delta\theta \quad (4)$$

$$Q_{Cond,AirBottom} = \frac{2\pi k_A}{1/r_I - 1/r_{OB}} \Delta\theta \quad (5)$$

$$r_{OB} = (3g^2 / 2\pi)^{0.5} \quad \text{در جایی که:}$$

از آن‌جا که روابط (۱) تا (۵) رسانندگی گرما را در یک پوسته مربعی نازک با رسانندگی گرما در مختصات استوانه‌ای و کروی ساده‌سازی می‌کند، آنالیز انتقال گرما به روش پارامتر- فشرده وقتی که $L_M \gg L_H$ به بهترین نحو عمل می‌کند. هم‌چنین در این روابط رسانندگی گرمایی به

صورت $\theta_0/2 + \theta_H$ محاسبه می‌شود (میانگین دمای هیتر و مرجع). مدل انتقال گرما به روش پارامتر - فشرده برای میکروهیتر با ساختار غشای معلق شده از بالا، غشای معلق نشده، غشای معلق شده از پایین به ترتیب با روابط (۶) - (۸) آورده شده است:

$$Q_{Total} = Q_{Cond,Tethers} + Q_{Cond,AirTop} + Q_{Cond,AirBottom} \quad (۶)$$

$$Q_{Total} = \frac{4 \left(\sum_{i=1}^n k_i T_i \right) W}{L_{Te}} \Delta\theta + \frac{2\pi k_A}{1/r_I - 1/r_{Or}} \Delta\theta + \frac{2\pi k_A}{1/r_I - 1/r_{OB}} \Delta\theta$$

$$Q_{Total} = Q_{Cond,Tethers} + Q_{Cond,Membrane} + Q_{Cond,Air} \quad (۷)$$

$$Q_{Total} = \frac{4 \left(\sum_{i=1}^n k_i T_i \right) W}{L_{Te}} \Delta\theta + \frac{2\pi k_M T_M}{\ln(r_M / r_H)} \Delta\theta + \frac{4\pi k_A}{1/r_I - 1/r_O} \Delta\theta$$

$$Q_{Total} = Q_{Cond,Tethers} + Q_{Cond,Air} \quad (۸)$$

$$Q_{Total} = \frac{4 \left(\sum_{i=1}^n k_i T_i \right) W}{L_{Te}} \Delta\theta + \frac{4\pi k_A}{1/r_I - 1/r_O} \Delta\theta$$

جدول ۱ خصوصیات فیزیکی مواد استفاده شده در طراحی میکروهیتر را نشان می‌دهد [۲۳ و ۲۴]. با استفاده از جدول ۱ و فرمول‌های مذکور سه نوع ساختار میکروهیتر با هم مقایسه شده‌اند. شکل ۳ نمودار توان مصرفی میکروهیتر را به عنوان تابعی از دمای آن نشان می‌دهد.

جدول ۱. خلاصه‌ای از خصوصیات الکتریکی و گرمایی مواد استفاده شده در طراحی میکروهیتر [۲۳ و ۲۴].

ضریب پواسن	مدول یانگ (Mpa)	هدایت الکتریکی (s/m)	رسانندگی گرمایی (W/m-k)	ظرفیت گرمایی ویژه (J/kg-k)	چگالی (kg/m^3)	ماده
۰/۱۷	$1/5 \times 10^5$	-	۱۵۰	۷۰۰	۲۳۳۰	سیلیکون
۰/۲	$0/7 \times 10^5$	-	۷۳	۱۰۰۰	۲۲۰۰	اکسید سیلیکون
۰/۲۷	$2/9 \times 10^5$	-	۲۲	۱۷۰	۲۹۰۰	نیتريد سیلیکون
۰/۳۸	$1/6 \times 10^5$	۰/۰۹۴	۳۱۵	۱۳۲/۵۱	۲۱۴۴۰	پلاتین
۰/۴۴	$7/8 \times 10^4$	۰/۴۵	۲۹۷	۱۲۸/۷۴	۱۹۲۸۰	طلا

از این پس $L_M=80\ \mu\text{m}$, $L_H=22\ \mu\text{m}$, $T_{SiO_2}=0/4\ \mu\text{m}$, $T_{Si_3N_4}=0/4\ \mu\text{m}$, $T_{Pt}=1/2\ \mu\text{m}$, $g=300$ و $\theta_0=300\ \text{K}$ در نظر گرفته می‌شود مگر آن که مقادیر دیگری ذکر شود.

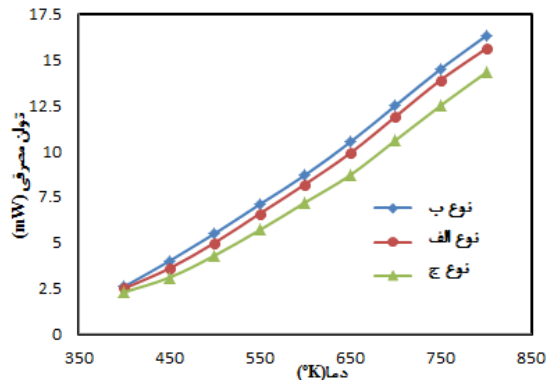
همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، مدل انتقال گرما پیش‌بینی می‌کند که هیتر با ساختار غشای معلق شده از پایین (نوع ج) به کمترین توان مصرفی برای رسیدن به دمای مطلوب نیازمند است، در حالی که نوع (ساختار غشای معلق نشده) بیشترین توان را مصرف می‌کند. هنگامی که گپ g خیلی کوچک است، نوع الف می‌تواند نیازمند توان بیشتری از نوع ب باشد. از این رو ساختار مورد علاقه ما در طراحی‌ها میکروهیتر با ساختار غشای معلق شده از پایین (نوع ج) می‌باشد.

با استفاده از روابط بالا می‌توان مقاومت حرارتی (بازدهی گرمایی) را برای انواع ساختارهای میکروهیتر به دست آورد. به طور مثال مقاومت حرارتی برای میکروهیتر با ساختار غشای معلق شده از پایین (نوع ج) با رابطه زیر به دست می‌آید:

$$R_{Th} = \frac{\Delta\theta}{Q_{Total}} = \left(\frac{4 \left(\sum_{i=1}^n k_i T_i \right) W}{L_{Te}} \Delta\theta + \frac{4\pi k_A}{1/r_I - 1/r_O} \Delta\theta \right)^{-1} \quad (9)$$

با معرفی $X=L_H/L_M$ می‌توان رابطه (۹) را بازنویسی کرد:

$$R_{Th}(L_M, X) = \frac{\Delta\theta}{Q_{Total}} = \frac{L_M(1-X)(\sqrt{3}-X)}{4\sqrt{2} \left(\sum_{i=1}^n k_i T_i \right) W(\sqrt{3}-X) + 2\sqrt{6}\pi k_A L_M^2 X(1-X)} \quad (10)$$



شکل ۳. رفتار گرمایی میکروهیتر به دست آمده با آنالیز انتقال گرما پارامتر- فشرده

برای محاسبه ثابت زمانی هیتر، از معادله‌ی گذرای زیر استفاده کردیم که در آن I منبع جریان ثابت است.

$$C \frac{d\Delta\theta}{dt} + \frac{\Delta\theta}{R_{Th}} = I^2 \underbrace{R_0(1 + \alpha\Delta\theta)}_{R_E} \quad (11)$$

در رابطه ۱۱ از ترم‌های بالاتر مقاومت الکتریکی وابسته به دما در دماهای پایین چشم پوشی شده است. با بازنویسی رابطه ۱۱، ثابت زمانی میکروهیتر در یک سیکل گرم شدن از رابطه زیر به دست می‌آید:

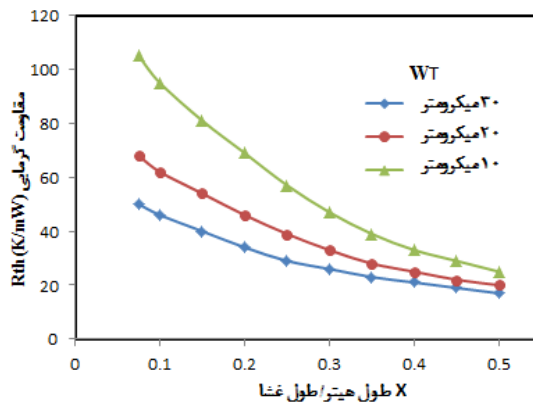
$$\tau_{He} = \left(\frac{1}{R_{Th}} - I^2 R_0 \alpha \right)^{-1} = \frac{R_{Th} C}{1 - I^2 R_0 \alpha R_{Th}} \quad (12)$$

در یک سیکل خنک‌کننده بدون جریان الکتریکی، سمت راست رابطه ۱۱ صفر می‌باشد. ثابت زمانی در سیکل سرد شدن از رابطه ۱۳ به دست می‌آید.

$$\tau_{Co} = R_{Th} C \quad (13)$$

همان‌طور که از روابط (۱۰)، (۱۲) و (۱۳) واضح است یک رقابت بین مقاوت گرمایی و ثابت زمانی وجود دارد. با افزایش مقاومت گرمایی، ثابت زمانی نیز افزایش می‌یابد.

شکل ۴ مقاومت گرمایی را به عنوان تابعی از $X=L_H/L_M$ برای عرض‌های مختلف پایه‌ها در میکروهیتر نوع ج نشان می‌دهد. در این نمودار L_M ثابت و برابر ۸۰۰ میکرومتر می‌باشد و L_H تغییر می‌کند. همچنین دمای هیتر برابر ۴۰۰K در نظر گرفته شده است. شکل ۴ مشخص می‌کند که با



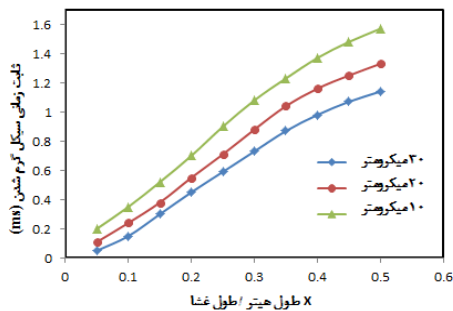
شکل ۴. مقاومت گرمایی به عنوان تابعی از X برای عرض‌های مختلف پایه‌ها، $L_M=800\mu m$ و $\theta_H=400K$ در نظر گرفته شده است.

افزایش X مقاومت گرمایی کاهش می‌یابد. برای یک X داده شده، مقاوت گرمایی با افزایش عرض پایه‌ها کاهش می‌یابد. بنابراین یک هیتر با طول کوتاه (L_H کم) و پایه‌های نازک و بلند می‌تواند بازدهی گرمایی بالایی داشته باشد.

شکل ۵ نمودار ثابت زمانی سیکل سرد شدن را برای میکروهیتر نوع ج به عنوان تابعی از $X=L_H/L_M$ برای عرض‌های مختلف پایه‌ها نشان می‌دهد. در این نمودار L_M ثابت و برابر ۸۰۰ میکرومتر می‌باشد و دمای هیتر در گستره‌ی ۳۰۰K تا ۴۰۰K تغییر می‌کند. همان‌طور که شکل ۵ نشان می‌دهد با افزایش X ثابت زمانی افزایش می‌یابد. برای یک X داده شده، ثابت زمانی با افزایش عرض پایه‌ها کاهش می‌یابد.

باید توجه داشت که طبق رابطه (۱۲) ثابت زمانی در سیکل گرم شدن فقط به مقاومت و ظرفیت گرمایی وابسته نیست بلکه همچنین به جریان الکتریکی، مقاومت الکتریکی در دمای مرجع و ضریب مقاومت گرمایی^{۱۲} (TCR) وابسته است. ولی می‌توان فرض کرد که با ثابت فرض کردن این مقادیر رفتاری شبیه ثابت زمانی در سیکل سرد شدن داشته باشد.

در کل یک میکروهیتر کوچک‌تر (با L_H کمتر) بازدهی گرمایی بهتر و پاسخ زمانی سریع‌تر را نشان می‌دهد. با نازک شدن عرض پایه‌ها بازدهی گرمایی بهبود می‌یابد در حالیکه پاسخ زمانی کند می‌شود. به هر حال عرض پایه‌ها یک رقابت بین بازدهی گرمایی و ثابت زمانی ایجاد می‌کند. با توجه به رابطه $R_{Th}(10)$ تنها به L_M و X بستگی دارد. از این رو هشت میکروهیتر با ساختار غشای معلق شده از پایین (نوع ج) با اشکال هندسی مختلف و با پارامترهای X و L_M یکسان طراحی کردیم.



شکل ۵. ثابت زمانی در سیکل سرد شدن به عنوان تابعی از X برای عرض‌های مختلف پایه‌ها، $L_M=800\mu\text{m}$ و $L_H=400\mu\text{m}$ در نظر گرفته شده است.

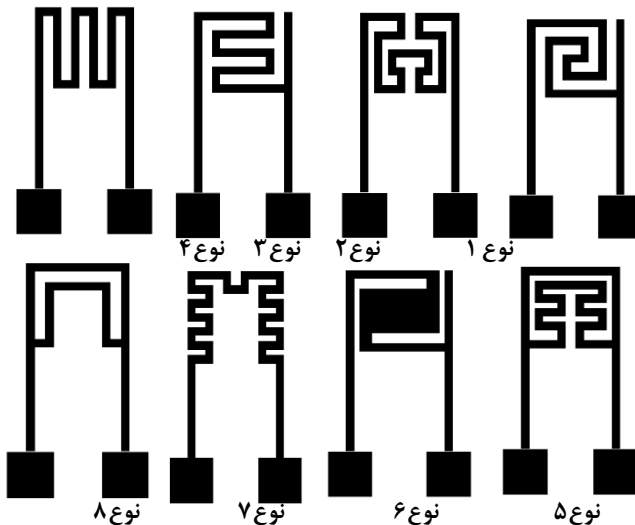
^{۱۲} Temperature coefficient of the resistance

سپس هشت هندسه مختلف را با استفاده از آنالیز MemMech در نرم افزار CoventorWare شبیه سازی کردیم تا تاثیر هندسه روی یکنواختی توزیع دما در میکروهیتر بررسی کنیم. از تمامی خصوصیات ذکر شده در جدول ۱ در شبیه سازی میکروهیتر با CoventorWare استفاده شده است. نتایج شبیه سازی به خصوصیات مواد مورد استفاده در ساختار میکروهیتر وابسته می باشد. همچنین در شبیه سازی با نرم افزار CoventorWare می بایست فرآیند ساخت را نیز وارد کنیم. فرآیند ساخت به طور کامل در بخش بعدی بیان شده است.

در ضمن برای مقایسه کمی بین نتایج شبیه سازی، مقدار غیر یکنواختی^{۱۳} هر ساختار را می توان با رابطه زیر به دست آورد که θ_{\min} و θ_{\max} در آن به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار دما در ناحیه فعال میکروهیتر می باشد.

$$Nuf = \left(\frac{\theta_{\max} - \theta_{\min}}{0.5(\theta_{\max} + \theta_{\min})} \right) = \frac{\Delta\theta}{\theta_{avg}} \quad (14)$$

شکل ۶ اشکال هندسی مختلف طراحی شده را نشان می دهد. در تمامی طراحی ها $\mu m, X=0/275$ و $L_M=800$ و $W_T=20$ در نظر گرفته شده است تا هم بازدهی گرمایی بالا و پاسخ زمانی سریع داشته باشند و هم ساخت آن در آزمایشگاه ممکن باشد. هیتر نوع ۱ پیچشی مضاعف، هیتر نوع ۲ Ω -شکل، هیتر نوع ۳ پیچشی افقی، هیتر نوع ۴ پیچشی عمودی، هیتر نوع ۵ پیچشی موازی، هیتر نوع ۶ S-شکل، هیتر نوع ۷ مارپیچ و هیتر نوع ۸ موازی می باشد.



شکل ۶. شکل های هندسی میکروهیتر

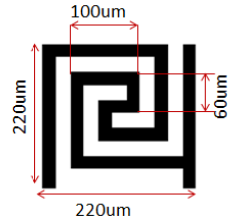
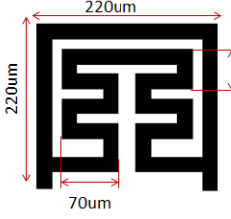
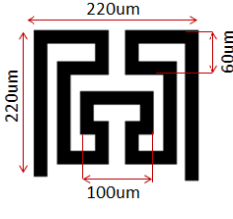
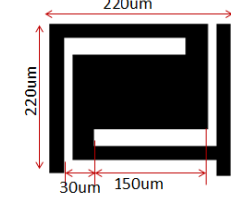
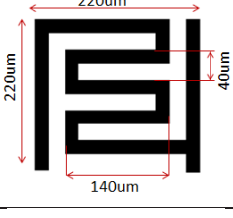
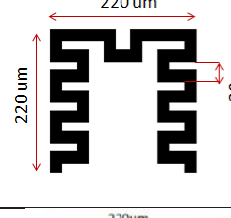
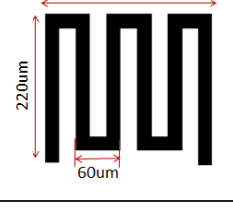
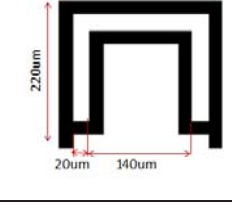
^{۱۳}nonuniformity

جدول ۲ ابعاد میکروهیترهای طراحی شده را نشان می‌دهد. طول و عرض سرتاسری آن‌ها (L_H) ۲۲۰ میکرومتر می‌باشد. عرض المان گرم کننده (خطوط سیاه رنگ) ۲۰ میکرومتر می‌باشد.

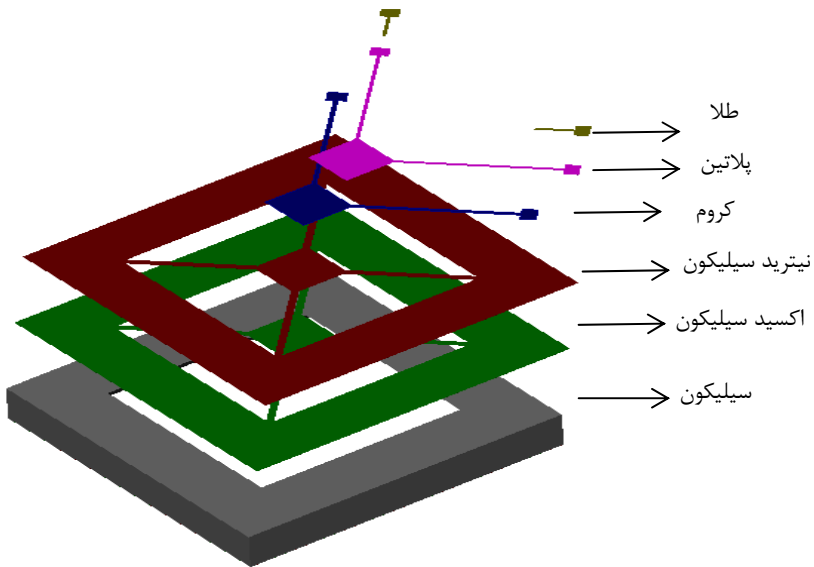
فرآیند ساخت میکروهیتر

میکروهیتر بر روی بستر سیلیکون 100 نوع P با ضخامت ۴۶۰ میکرومتر ساخته می‌شود. اولین فرآیند ساخت رشد اکسید به ضخامت ۰/۲ میکرومتر به روش حرارتی می‌باشد. بر روی اکسید

جدول ۲. ابعاد میکروهیترها

نوع ۱		نوع ۵	
نوع ۲		نوع ۶	
نوع ۳		نوع ۷	
نوع ۴		نوع ۸	

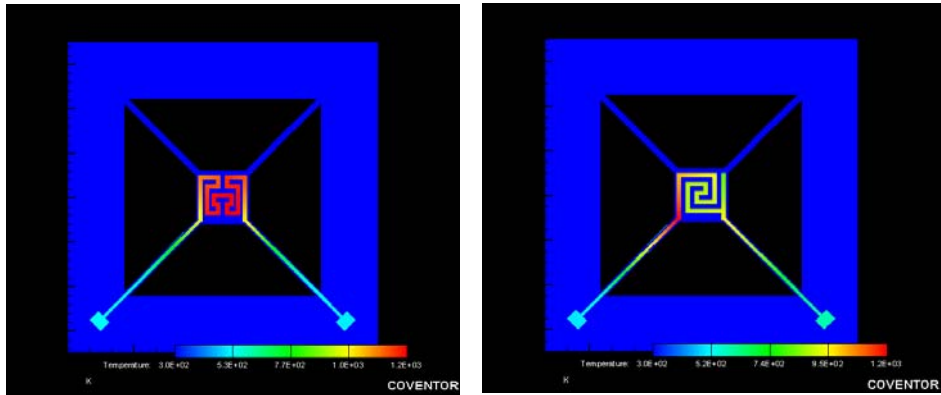
نیتريد سيليكون^{۱۴} به ضخامت ۰/۲ ميكرومتر به روش بخار شيميايي کم فشار^{۱۵} در دو طرف ويفر لايه نشانی می شود. سپس نیتريد سيليكون و اكسيد سيليكون الگودهی شده و به ترتيب با اسيد فسفريك و اسيد فلوريك سونش می شوند. بعد از آن كروم، طلا و پلاتين به ترتيب با ضخامت های ۱۲۰، ۲۰ و ۱۵۰ نانومتر به روش كندوپاش^{۱۶} لايه نشانی شده و سپس به روش Lift-off الگودهی می شوند. كروم برای افزایش چسبندگی بين نیتريد سيليكون و پلاتين استفاده می شود. طلا نیز برای اتصالات الكتريکی می باشد. پلاتين به دليل پایداری دمایی، دمای ذوب بالا، TCR پایدار و مطابقت با فرایند CMOS به طور گسترده به عنوان هیترا استفاده می شود [۲۵ و ۲۶]. آخرين مرحله ایجاد كاواک در پشت ويفر سيليكون است. از این رو، ويفر را در سونشگر KOH می اندازيم تا سيليكون سونش شود. هدف از این کار کاهش اتلاف گرما هیترا به بستر سيليكون است. شكل ۷ لايه های ميكروهیترا را نشان می دهد.



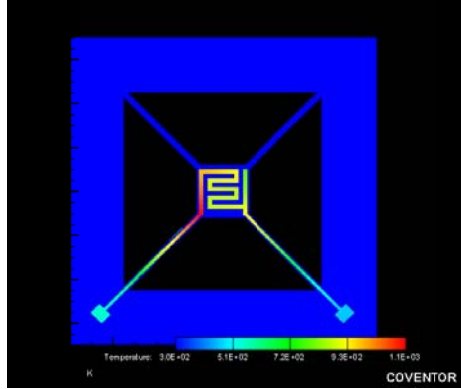
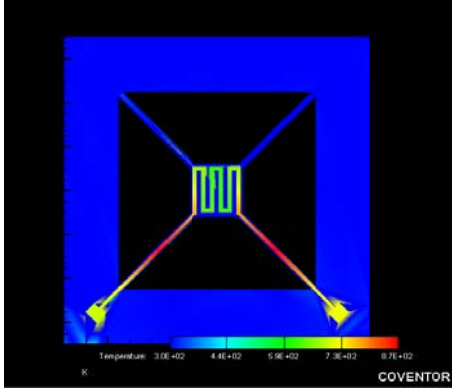
شكل ۷. لايه های ميكروهیترا

شبیه‌سازی و آنالیز

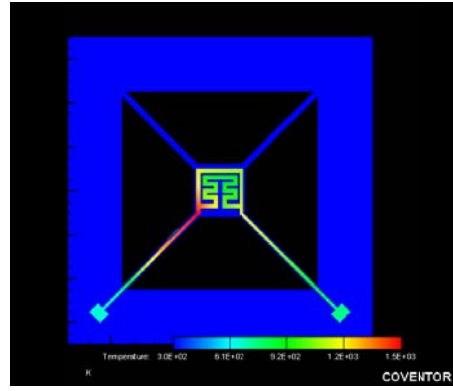
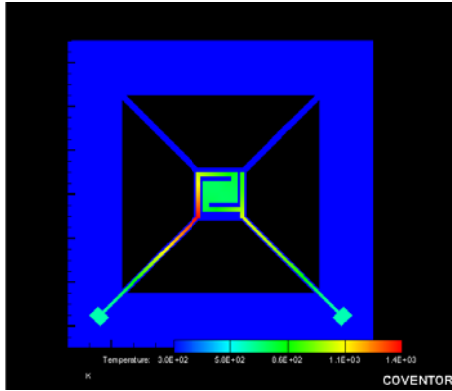
با استفاده از آنالیز المان محدود هشت میکروهیتر با اشکال هندسی مختلف را شبیه‌سازی کردیم. با ورودی ولتاژ $0/5$ ولت به شش ساختار، افزایش دما و یکنواختی دما را در آن‌ها مقایسه کردیم. با اعمال ولتاژ به هیتر دمای آن افزایش می‌یابد که به دلیل تبدیل انرژی الکتریکی به گرما در هیتر می‌باشد. شکل ۸ (الف-ب-ج-د-ه-و-ز-ح) توزیع دما را در میکروهیتر نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود توزیع دما به شکل هندسی میکروهیتر وابسته است. با استفاده از نتایج شبیه‌سازی و به کمک رابطه (۱۴) مقدار غیر یکنواختی را برای انواع میکروهیتر محاسبه کردیم. جدول ۳ بیشترین و کمترین مقدار دما، مقدار دمای میانگین و همچنین مقدار غیریکنواختی دما را در ناحیه فعال هر یک از هشت هندسه مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد میکروهیتر نوع ۲ که Ω - شکل است بیشترین یکنواختی دما را در ناحیه فعال میکروهیتر دارا می‌باشد. در ضمن ساختار Ω - شکل دارای افزایش دمای خوبی در ناحیه فعال میکروهیتر می‌باشد. البته باید توجه داشت که شکل هندسی میکروهیتر بر روی مقدار مقاومت الکتریکی نیز تاثیر دارد و طبق رابطه ۱۲ با تغییر مقاومت الکتریکی، ثابت زمانی در سیکل گرم شدن به مقدار جزئی تغییر می‌کند. ولی همان‌طور که در ستون آخر جدول ۳ آمده است اختلاف مقاومتی این هشت طراحی در حد چندین اهم است و می‌توان گفت که تمامی هشت طراحی حدوداً پاسخ زمانی یکسان دارند.



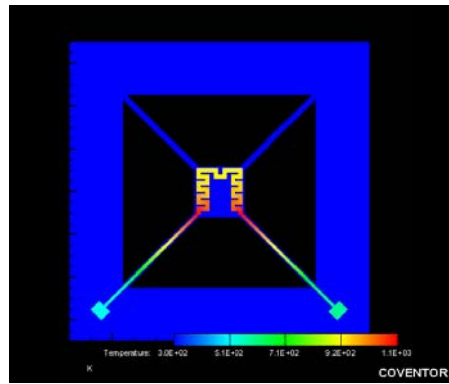
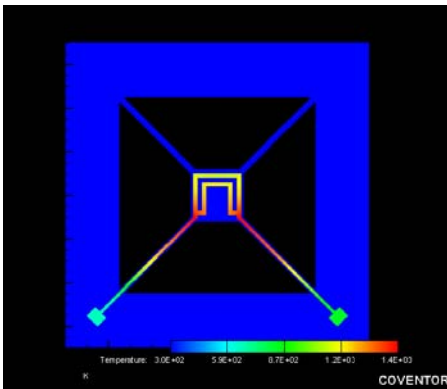
شکل ۸. الف: توزیع دما (میکروهیتر نوع ۱) شکل ۸. ب: توزیع دما (میکروهیتر نوع ۲)



شکل ۸. ج: توزیع دما (میکروهیتر نوع ۳) شکل ۸. د: توزیع دما (میکروهیتر نوع ۴)



شکل ۸. ه: توزیع دما (میکروهیتر نوع ۵) شکل ۸. و: توزیع دما (میکروهیتر نوع ۶)



شکل ۸. ز: توزیع دما (میکروهیتر نوع ۷) شکل ۸. ح: توزیع دما (میکروهیتر نوع ۸)

جدول ۳. نتایج شبیه‌سازی

ردیف	بیشترین دما-کمترین دما (K)	میانگین دما (K)	مقدار غیر یکنواختی	مقاومت الکتریکی (Ω)
نوع ۱	۷۵۰-۱۲۰۰	۹۷۵	۰/۴	۵۳
نوع ۲	۱۰۰۰-۱۲۰۰	۱۱۰۰	۰/۱۸	۶۵
نوع ۳	۷۵۰-۱۱۰۰	۹۲۵	۰/۳۸	۴۸
نوع ۴	۵۹۰-۸۷۰	۷۳۰	۰/۳۸	۶۸
نوع ۵	۹۲۰-۱۵۰۰	۱۲۱۰	۰/۴۸	۷۰
نوع ۶	۸۶۰-۱۴۰۰	۱۱۳۰	۰/۴۸	۲۷/۵
نوع ۷	۹۰۰-۱۱۰۰	۱۰۰۰	۰/۲	۶۳
نوع ۸	۱۰۰۰-۱۴۰۰	۱۲۰۰	۰/۳۳	۴۷/۵

نتیجه‌گیری

در این مقاله طراحی، مدل‌سازی و شبیه‌سازی میکروهیتر با هندسه‌های مختلف ارائه شده است. آنالیز انتقال گرما پارامتر- فشرده نشان می‌دهد که میکروهیتر با ساختار غشای معلق شده از پایین برای رسیدن به دمای مطلوب کمترین توان مصرفی را در مقایسه با دیگر ساختارها نیاز دارد. همچنین با استفاده از نرم افزار CoventorWare هشت میکروهیتر با ساختار غشای معلق شده و بازدهی گرمایی یکسان ولی با اشکال هندسی مختلف را شبیه‌سازی کرده و نشان دادیم که یکنواختی دما در میکروهیتر به شکل هندسی آن وابسته است. نتایج نشان می‌دهد که میکروهیتر Ω - شکل بهترین یکنواختی دما را در ناحیه فعال دارا می‌باشد.

مراجع

- [1] J. Courbat, M. Canonica, D. Teyssieux, D. Briandand N. F. de Rooij, "Design and fabrication of micro-hotplates made on a polyimide foil: electrothermal simulation and characterization to achieve power consumption in the low mW range ," 2011, Journal of Micromechanics and Microengineering 21 (015014), pp11.
- [2] W.J. Hwang, K.S. Shin, J.H. Roh, D.S. Lee and S.H. Choa, "Development of Micro-Heaters with Optimized Temperature Compensation Design for Gas Sensors," Sensors 2011, vol. 11, pp 2580 – 2591.

- [3] W.Konz, J. Hildenbrand, M. Bauersfeld, S. Hartwig, V. Lehmann, J. Wöllenstein, "Micromachined IR-source with excellent blackbody like behaviour," 2005, Proceedings of the SPIE, Vol.5836, pp.540-548, Orlando, Florida, USA.
- [4] I. Elmi, S. Zampolli, E. Cozzani, F. Mancarella, G.C. Cardinali "Development of ultra-low-power consumption MOX sensors with ppb-level VOC detection capabilities for emerging applications," 2008, Sensor and Actuators B, 135,342-351.
- [5] Dai, C.L. "A capacitive humidity sensor integrated with micro heater and ring oscillator circuitfabricated by CMOS-MEMS technique,"2007,Sensor and Actuators B, 122, 375-380.
- [6] C. Tao, C. Yin, M. He and S. Tu, "Thermal Analysisand Design of a Micro-Hotplate for Si-substratedMicro-structural Gas Sensor," January,2008 ,Proceedings of the 3rd IEEE Int. Conf. on Nano/Micro Engineered andMolecular Systems, Sanya, China, 6-9, pp. 284-287.
- [7] J. Courbat, D. Briand and N.F. de Rooij, "Reliability improvement of suspended platinum-based micro- heating elements," 2008,Sensors and Actuators A, vol. 142, pp. 284-291.
- [8] G.S. Chung and J.M. Jeong, "Fabrication of micro heaters on polycrystalline 3C-SiC suspended membranes for gas sensors and their characteristics," 2010, Microelectronic Engineering, vol. 87, pp. 2348-2352.
- [9] J.Laconte, D.Flandre, J.Raskin, "Micromachined thin-film sensors for SOI-CMOS co-integration,"Springer, 2006 XIII, Berlin,292 p 0-387-28842-2.
- [10] P. Ruther, M. Ehmann, T. Lindemann and O. Paul, "Dependence of the Temperature Distribution in Micro Hotplates on Heater Geometry and Heating Mode," June 2003, The 12th International Conference on Solid State Sensors, Actuators and Microsystems, Boston, pp. 73-76.
- [11] S. Asti, A. Gu, E. Scheid, and J. Guillemet, "Design of a low power SnO₂ gas sensor integrated on silicon oxynitride membrane," 2000, Sensors and Actuators B, vol.67,pp. 84–88.
- [12] D. Briand, M.-A. Grtillat, B. van der Schoot, and N. de Rooij, "Thermal management of micro-hotplates using MEMCAD as simulation tool," March 2000, in 3rd International Conference on Modelling and Simulation of Microsystems, (San Diego, California,USA), pp. 640–643, IEEE.
- [13] M. Horrillo, I. Sayago, L. Ars, J. Rodrigo, J. Gutierrez, A. Gtz, I. Grcia, L.Fonseca, C. Can, and E. Lora-Tamayo, "Detection of low NO₂ concentrations with low power micromachined tin oxide gas sensors,"1999, Sensors and Actuators B, vol. 58,pp. 325–329.
- [14] J.O. Dennis, A. Yousif and M.N Mohamad, "Design, Simulation and Modeling of a Micromachined High Temperature Microhotplate for Application in Trace Gas Detection,"2010, Int. Journal of Engineering & Technology IJET-IJENS, vol. 10, pp. 89-96.

- [15] G. Velmathi, N. Ramshanker and S. Mohan, "2D Simulations and Electro-Thermal Analysis of Micro-Heater Designs Using COMSOLTM for Gas Sensor Applications," 2010, Proceedings of the COMSOL Conference, Bangalore, India, October 29-30.
- [16] M. Graf, R. Jurischka, D. Barrettino, and A. Hierlemann, "3D nonlinear modeling of microhotplates in CMOS technology for use as metal-oxide-based gas sensors," Jan. 2005, *J. Micromech. Microeng.*, vol. 15, no. 1, pp. 190–200.
- [17] F. Udrea, J.W. Gardner, D. Setiadi, J. A. Covington, T. Dogaru, C. C. Lua, and W. I. Milne, "Design and simulations of SOI CMOS micro-hotplate gas sensors," Aug, 2001, *Sens. Actuators B, Chem.*, vol. 78, no. 1, pp. 180–190.
- [18] F. Solzbacher, T. Doll, and E. Obermeier, "A comprehensive analytical and numerical analysis of transient and static micro hotplate characteristics," 2003, in *Proc. 12th Int. Conf. Solid-State Sensors, Actuators Microsyst., TRANSDUCERS*, Boston, pp. 1856–1859.
- [19] F. P. Incropera and D. P. DeWitt, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 5th ed. New York: Wiley, 2002.
- [20] J. Lee, T. L. Wright, M. R. Abel, E. O. Sunden, A. Marchenkov, S. Graham, and W. P. King, "Thermal conduction from microcantilever heaters in partial vacuum," Jan. 2007, *J. Appl. Phys.*, vol. 101, no. 1, p. 014 906.
- [21] G. Sberveglieri, W. Hellmich, and G. Muller, "Silicon hotplates for metaloxide gas sensor elements," Aug. 1997 *Microsyst. Technol*, vol. 3, no. 4, pp. 183–190.
- [22] Jungchul Lee, Christopher M. Spadaccini, Erik V. Mukerjee, and William P. King. "Differential Scanning Calorimeter Based on Suspended Membrane Single Crystal Silicon Microhotplate. *Journal of Microelectromechanical systems*, "December 2008, Vol. 17, No. 6.
- [23] T. Siewert, S. Liu, D. Smith, and J. Madeni, "Database for solder properties with emphasis on new lead-free solder," February 11 2002, tech. rep., National Institute of Standards and Technology and Colorado School of Mines, Colorado.
- [24] P. Walker and W. Tarn, *Handbook of Metal etchants*. USA: P. Walker and W.H.Tarn, CRC press ed, 1991.
- [25] O. Grudin, R. Marinescu, L. Landsberger, D. Cheeke and M. Kahrizi, "Microstructure Release and Test Techniques for High-temperature Micro Hotplate," May 12, 1999, Proceedings of the IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, pp. 1610–1615.
- [26] M. Ehmann, P. Ruther, M. von Arx and O. Paul, "Operation and short-term drift of polysilicon-heated CMOS microstructures at temperature up to 1200 K," 2001, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 11, pp. 397–40.

