مروری بر ساختار سیستم‌های میکروالکترومکانیکی

حسین عباس‌زاده مبارکی[1]

۱ دانشجوی کارشناسی مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه hossein.mobaraki1995@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۲/۱۲
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۱/۱۷

چکیده

فناوری سیستم‌های میکروالکترومکانیک، فناوری دستگاه‌های بسیار کوچک است و آن را در مقیاس نانو به سیستم‌های نانوالکترومکانیکی و فناوری نانو درمی‌آورد. اگرچه این فناوری در حال حاضر به روش آزمون و خطا طراحی می‌شود، اما حاصل تلفیق اجزای مکانیکی، حسگرها، محرک‌ها و قطعات الکترونیکی روی یک لایهٔ سیلیکون به‌کمک فناوری ساخت تراشه‌های میکرونی است. تولید سیستم‌های میکروالکترومکانیکی به‌کمک یکی از بنیادی‌ترین فناوری‌ها انجام می‌شود. میکروماشینکاری سیلیکونی پیشرفته‌ترین فناوری میکروماشینکاری است. امروزه در کشورهای پیشرفتهٔ جهان، توسعهٔ تلفیقی سیستم‌های مکانیکی و الکترونیکی در ابعاد بسیار کوچک مورد نظر است؛ زیرا این حوزهٔ مهم علمی موجب افزایش سرعت و کاهش حجم در بخش‌های مختلف صنعت خواهد شد. فناوری سیستم‌های میکروالکترومکانیکی در صنایع گوناگون و اثرگذار جهان از جمله صنعت خودروسازی، موشکی، تولید انواع تراشه و صنایع نظامی کاربرد بسیار زیادی دارد. علاوه بر تجاری‌سازی برخی دستگاه‌های میکروالکترومکانیکی، که دارای یکپارچگی کمتری هستند مانند میکروشتاب‌سنج‌ها، مفاهیم و امکان‌پذیری بیشتر سیستم‌های میکروالکترومکانیکی پیچیده برای کاربردهایی در زمینه‌های متنوع همچون سیستم‌های بی‌سیم و اپتیک ارائه شده است. در این مقاله به برخی از ابعاد گوناگون این بخش از صنعت اشاره شده است.

واژگان کلیدی: سیستم میکروالکترومکانیکی، حسگر، محرک، میکروماشینکاری

۱. مقدمه

اگر ساخت نیمه‌هادی‌ها نخستین انقلاب ساخت میکرونی باشد، بی‌شک سیستم‌های میکروالکترومکانیکی دومین انقلاب محسوب می‌شوند. قطعات الکترونیکی به‌کمک ساخت مدار مجتمع مدارهای یکپارچه ساخته می‌شوند، حال آنکه عناصر میکروماشین‌ها از طریق فرایند ماشینکاری میکرونی تولید می‌گردند. سیستم‌های میکروالکترومکانیکی با تلفیق میکروالکترونیک سیلیکونی با فناوری ماشینکاری میکرونی نویدبخش ظهور تحول در طراحی و تولید هر محصولی است. سیستم‌های میکروالکترومکانیکی دارای فناوری توانمندی است که با درک و کنترل قابلیت میکروحسگرها و میکرومحرک‌ها و به‌همراه آوردن توانایی محاسبات دستگاه‌های میکروالکترونیکی، موجب پیشرفت در تولیدات هوشمند می‌شوند. سیستم‌های میکروالکترومکانیکی

تلفیقی از اجزای مکانیکی، حسگرها، بازوهای مکانیکی و اجزای الکترونیکی‌اند که روی لایه‌ای از مادهٔ استراتژیک سیلیکون قرار دارند. این ساختار مکانیکی بسیار کوچک در ابعاد میکرون، بر پایهٔ فناوری تراشه‌های الکترونیکی استوار است. سیستم‌های میکروالکترومکانیکی به‌عنوان یک فناوری ساخت، چندین فایدهٔ مشخص و متمایز دارد: نخست اینکه طبیعت میان رشته‌های فناوری سیستم‌های میکروالکترومکانیکی و روش‌های میکروماشینکاری آن به‌همراه تنوع کاربرد در محدودهٔ بی‌سابقه‌ای از دستگاه‌ها نتیجه داده است و بین زمینه‌هایی که در گذشته ارتباطی با هم نداشته‌اند، وجوه اشتراک ایجاد کرده است (مثلاً زیست‌شناسی و میکروالکترونیک). دیگر اینکه سیستم‌های میکروالکترومکانیکی و روش‌های تولید آن امکان ساخت قطعات و دستگاه‌ها با کارآیی و قابلیت اطمینان بالا را مهیا می‌کند، در عین حال که فوایدی چون کاهش اندازهٔ فیزیکی، حجم، وزن و قیمت را درپی دارد. همچنین سیستم‌های میکروالکترومکانیکی فناوری برای ساخت محصولاتی است که تولید آنها با روش‌های دیگر ممکن نیست. این عوامل سیستم‌های میکروالکترومکانیکی را متمایز می‌سازد. با این وجود، چالش‌ها و موانع فنی فراوانی بر سر راه کوچک‌سازی وجود دارد.

۲. لفظ سیستم‌های میکروالکترومکانیکی

لفظ سیستم‌های میکروالکترومکانیکی به‌صورت جهانی مورد استفاده قرار می‌گیرد. نام‌های دیگری که برای این حوزه از فناوری استفاده می‌شود شامل فناوری میکروسیستم‌ها در اروپا و میکروماشین در آسیا می‌باشد.

۳. کاربرد سیستم‌های میکروالکترومکانیکی

رشد و توسعهٔ سیستم‌های میکروالکترومکانیکی طی سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است؛ زیرا این حوزه از داش فنی حجم قطعات صنعتی را کاهش و سرعت آنها را افزایش داده است؛ به‌ویژه اینکه فناوری سیستم‌های میکروالکترومکانیکی می‌تواند قطعاتی را برای ارتباط با دنیای الکترونیک تولید کند. در حقیقت سیستم‌های میکروالکترومکانیکی ترکیبی از عناصر مکانیکی، حسگرها و عناصر الکترونیکی‌اند. سیستم‌ها و دستگاه‌های موفق از دیدگاه تجاری که دارای فناوری سیستم‌های میکروالکترومکانیکی می‌باشند، شامل میکروحسگرها (مانند حسگرهای فشار، حسگرهای شیمیایی)، میکرومحرک‌ها (مانند میکروپمپ‌ها) و میکروسیستم‌ها هستند. لذا موفق‌ترین گام‌ها در تولید سیستم‌های میکروالکترومکانیکی از خصوصیات زیر بهره می‌برند.

۳-۱. آثار سودمند اندازه

برخی از مواد در ابعاد میکرومتر خواص فیزیکی و مکانیکی بهتر و مؤثرتری از خود نشان می‌دهند.

۳-۲. مدارهای یکپارچه

با یکپارچه‌سازی مدارها توسط سیستم‌های میکروالکترومکانیکی می‌توان سود بالایی به‌دست آورد. البته با در نظر گرفتن اینکه هزینه و پیچیدگی در امر تولید می‌تواند عامل بازدارنده باشد. سیستم‌های میکروالکترومکانیکی با خصوصیات مذکور، بسیار کارآمدند و کاربرد وسیعی در شاخه‌های متنوع علوم از جمله علوم مهندسی دارند. از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱. فناوری جهش میکروسیستم‌ها جهت غربال و انتخاب سریع دارو
۲. تراشه‌های زیستی شناساگر عوامل خطرناک شیمیایی و زیستی
۳. شتاب‌سنج‌های سیستم‌های میکروالکترومکانیکی که به سرعت جایگزین سرعت‌سنج‌های مربوط به سیستم‌های کیسهٔ هوا در خودرو شدند

۴. فناوری ساخت سیستم‌های میکروالکترومکانیکی

همان‌گونه که قبلاً بیان شد، سیستم‌های میکروالکترومکانیکی فناوری کوچک‌سازی برای تولید میکرودستگاه‌ها و سیستم‌های یکپارچهٔ کوچک با استفاده از تکنیک‌های ساخت دسته‌ای مدارهای یکپارچه‌اند. برای تولید یک سیستم میکروالکترومکانیکی سودمند، فیزیک پایه و اصول اجرایی آن شامل قوانین مقایسه نیازمند درک کامل و توجه به سطوح میکرو و ماکرو می‌باشد. در مواردی سیستم‌های میکروالکترومکانیکی اطلاعات مفیدی از نظر وزن، اندازه در اختیار قرار نمی‌دهند:

۱. اصطکاک بیشتر از نیروی اینرسی است. نیروهای الکترواستاتیکی و اتمی همانند چسبندگی در مقیاس میکرو می‌توانند مهم باشند

۲. اتلاف حرارت بیش از ذخیره آن می‌باشد. لذا خواص انتقال حرارتی می‌تواند سبب مشکل بروز و یا بهرهٔ فراوان شوند
۳. خواص مهندسی مواد و نظریات مکانیکی، وابسته به اندازه‌اند

۵. سیلیکون مورد استفاده در ماشینکاری

سیلیکون از جمله مواد مورد استفاده در ماشینکاری است. این ماده در صنعت میکروالکترونیک به‌دلائل زیر موفق بوده است:

۱. فراوان و ارزان است و می‌تواند با خلوص بالایی تولید شود
۲. برای ته‌نشینی در فیلم‌های نازک بسیار متمایل به سیستم‌های میکروالکترومکانیکی توانمند است

بقیهٔ نیمه‌هادی‌های کریستالی شامل ژرمانیم و گالیم آرسنید به‌عنوان مواد زیرلایه‌ای به‌دلیل خصوصیات ذاتی به‌کار می‌روند. اما سیلیکون چون می‌تواند به آسانی با اکسیژن ترکیب شود، تا لایهٔ سطحی شیمیایی بی‌اثر و عایق الکتریکی از اکسید سیلیس در معرض بخار ایجاد کند، از مابقی نیمه‌هادی‌ها مهم‌تر است.

۶. مبدل‌های سیستم‌های میکروالکترومکانیکی

میکروحسگرها و میکرومحرک‌ها در ساختار بسیاری از سیستم‌های میکروالکترومکانیکی وجود دارند. میکروحسگر تغییرات در محیط را شناسایی می‌کند. بخش هوشمند، پردازش اطلاعات شناسایی‌شده توسط حسگر و تصمیم‌گیری در قالب سیگنال را برعهده دارد. میکرومحرک بر این سیگنال عمل کرده و سبب تغییرات در محیط می‌شود. حسگرها و محرک‌ها به‌طور گسترده مبدل نامیده می‌شوند و به‌عنوان دستگاه‌هایی که صورتی از انرژی را به صورت دیگر تبدیل می‌کنند مهم تلقی می‌شوند. بسیاری از حسگرها و محرک‌های سیستم‌های میکروالکترومکانیکی شامل هیچ‌یک از تکنیک‌های ماشینکاری نمی‌شوند. اگرچه بسیاری از این دستگاه‌ها می‌توانند با فناوری سیستم‌های میکروالکترومکانیکی توسعه یابند.

۷. مقیاس‌گذاری سیستم‌های مکانیکی

وقتی ابعاد خطی یک جسم با ضریب s کاهش می‌یابد، حجم و در نتیجه جرم آن با ضریب s^3 کم می‌شود. لذا وقتی خمش مکانیکی با ضریب s کاهش می‌یابد، سختی مکانیکی آن با توجه به رابطهٔ زیر با ضریب s کاهش می‌یابد [۱]. لذا مقاومت مکانیکی یک جسم نسبت به نیروی لختی که با s^3 تغییر می‌کند، کاهش کمتری دارد. نتیجهٔ این خاصیت این است که سیستم‌های میکروالکترومکانیکی می‌توانند در برابر تغییر سرعت زیاد بدون شکستگی و یا کوچکترین خرابی مقاومت کنند.

$$k = \frac{wt^3}{4l^3}E \qquad (۱)$$

۸. آیندهٔ سیستم‌های میکروالکترومکانیکی

بازار برای سیستم‌های میکروالکترومکانیکی هنوز در حال توسعه است، اما رشد انفجاری را همانند صنعت مدارهای یکپارچه نداشته است. امروزه بسیاری از پژوهش‌ها، بر میکروماشینکاری سطح متمرکز شده است، اما در صنعت اکثر دستگاه‌های حمل هنوز هم با استفاده از روش قدیمی‌تر تولید می‌شوند. برای تجاری‌سازی واقعی سیستم‌های میکروالکترومکانیکی، صنایع ریخته‌گری بایستی بر تنگناهای حیاتی فناوری غلبه کنند تا یکپارچه‌سازی قطعات مبتنی بر سیستم‌های میکروالکترومکانیکی ممکن شود. کاهش هزینه نیز، که ناشی از دسترسی بهتر زیرساخت‌ها، فرایندهای تولید قابل اطمینان و اطلاعات فنی همانند استانداردهای مرتبط می‌باشد، بسیار مهم است.

۹. بازار کنونی سیستم‌های میکروالکترومکانیکی

به‌دلیل فوائد بسیار سیستم‌های میکروالکترومکانیکی، میزان مبادله و فروش آنها به‌طور چشمگیری روبه افزایش و بازار جهانی آنها بسیار رقابتی و پرجنب‌وجوش است. دربارهٔ بازار سیستم‌های میکروالکترومکانیکی سه پژوهش معروف انجام شده است [۲-۴]. البته تفاوت‌هایی بین نتایج این پژوهش‌ها به‌چشم می‌خورد، اما آنچه به‌عنوان حداقل فروش سیستم‌های میکروالکترومکانیکی،میکروسیستم‌ها و قطعات میکروماشینکاری شده در سال ۲۰۰۰ ذکر شده است، میزان ۱۴/۲ میلیارد دلار می‌باشد (جدول ۱). نتایج تحقیق نخست را در مورد بازار جهانی سیستم‌های میکروالکترومکانیکی در سال ۱۹۹۶ و پیش‌بینی آن برای سال ۲۰۰۲ برای انواع محصولات سیستم‌های میکروالکترومکانیکی نشان می‌دهد. نتایج تحقیقات جدیدتر [۵] نشان می‌دهد که فروش سیستم‌های میکروالکترومکانیکی از

۱۴/۲ میلیارد دلار در سال ۲۰۰۰ به ۳۰/۲ میلیارد دلار در سال ۲۰۰۴ رسیده است، که این امر با نرخ رشد سالیانهٔ ۲۱ درصد تحقق می‌یابد. جدول ۲ میزان پیش‌بینی فروش این سیستم‌ها را به تفکیک کاربرد در سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۰۴ نشان می‌دهد.

جدول۱. میزان بازارجهانی برخی از سیستم‌های میکروالکترو مکانیکی در سال‌های ۱۹۹۶ و۲۰۰۲ م برای محصولات فعلی [۲]

نوع محصول	۱۹۹۶ (میلیون عدد)	میلیون دلار (امریکا)	۲۰۰۲ (میلیون عدد)	میلیون دلار (امریکا)
سمعک	۴	۱۱۵۰	۷	۲۰۰۰
فشارسنج	۱۱۵	۶۰۰	۳۰۹	۱۳۰۰
شتاب‌سنج	۲۴	۲۴۰	۹۰	۴۳۰
ژیروسکوپ	۶	۱۵۰	۳۰	۳۶۰
میکروطیف‌سنج	۰/۰۰۶	۳	۰/۱۵	۴۰
حسگر شیمیایی	۱۰۰	۳۰۰	۴۰۰	۸۰۰

جدول۲. بازار جهانی محصولات سیستم‌های میکروالکترومکانیکی در سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۰٤ م به تفکیک ناحیهٔ کاربرد (برحسب میلیون دلار) [۵،۲]

حوزهٔ کاربرد	۲۰۰۰ م	۲۰۰۴ م	نرخ رشد سالانه (درصد)
فناوری اطلاعات	۸۷۰۰	۱۳۴۰۰	۱۱/۵
خودرو	۱۲۶۰	۲۳۵۰	۱۶/۹
مخابرات	۱۳۰	۳۶۵۰	۱۲۸/۱
صنعتی و اتوماسیون	۱۱۹۰	۱۸۵۰	۱۱/۶
پزشکی و بیوشیمیایی	۲۴۰۰	۷۴۰۰	۳۲/۵

در پژوهش‌های نکسوز[1] برای پیش‌بینی بازار سیستم‌های میکروالکترومکانیکی طی سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۰۹ م ارائه داد، بازار ۲۵ میلیارد دلاری برای این سیستم‌ها در سال ۲۰۰۹ م پیش‌بینی شده است، هرچند پیش‌بینی دیگری این رقم را برای سال۲۰۱۰ برابر با۱۰۰ میلیارد دلار تخمین زده است.

۱۰. استفاده در سیستم‌های فضایی

بحث‌های گسترده‌ای پیرامون استفاده از سیستم‌های میکروالکترومکانیک در مأموریت‌های فضایی، هم در ماهواره‌ها و هم ماژول اکتشاف بین‌سیاره‌ای، وجود دارد [۶]. علاوه بر کاهش ابعاد در ابزار دقیق، فناوری سیستم‌های میکروالکترومکانیکی برای تولید سیستم‌های میکرو نیروی محرکه استفاده شده است. آزمایشگاه پیشرانش جت[2] سازمانی خاص برای دفاع از به‌کارگیری سیستم‌های میکروالکترومکانیکی در فضا، به‌ویژه در مأموریت‌های آتی به مریخ است. یک نگرانی مهم تأثیر سطوح بالایی اشعه برای مدتی طولانی روی عملکرد سیستم‌های میکروالکترومکانیکی است. آزمایش با سیستم‌های میکروالکترومکانیکی یکپارچهٔ اینرسیایی دستگاه نشان داده است که اثر اشعه می‌تواند قابل توجه باشد [۷].

۱۱. میکروتحریک‌پذیری

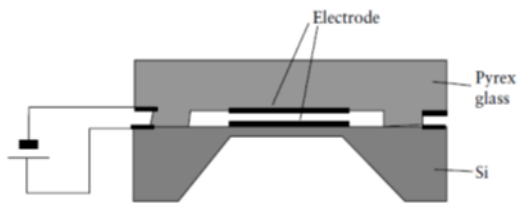
تاکنون پیشرفت‌های قابل ملاحظه‌ای در توسعهٔ میکرومحرک‌ها با توجه به اهمیت آنها در انجام وظایف فیزیکی سیستم‌های میکروالکترومکانیکی پدید آمده است [۸]. تلاش تحقیق و توسعه به‌سمت استفاده از اصول مختلف تحریک و طراحی سازه‌های مختلف برای برنامه‌های کاربردی خاص شده است. در ادامه مقدمه‌ای کوتاه از میکرومحرک‌ها با توجه به اصل تحریک‌پذیری ارائه شده است.

۱۱-۱. تحریک‌پذیری الکترواستاتیکی

برای ساده‌ترین میکرومحرک الکترواستاتیکی موازی سطح، همان‌طور که در شکل ۱ نمایش داده شده است، نیروی الکترواستاتیکی توسط ولتاژ اعمال‌شده در سراسر دو صفحه که توسط لایهٔ عایق با ضخامت معین از هم جدا شده‌اند، ایجاد شده است:

$$F = \frac{\varepsilon S V^2}{2d^2} \qquad (۲)$$

به‌طوری‌که در این رابطه F نیروی الکترواستاتیکی، ε ثابت دی‌الکتریک مادهٔ عایق، V ولتاژ اعمالی و d فاصلهٔ دی‌الکتریک بین دو صفحه است. تحریک‌پذیری الکترواستاتیکی به‌طور گسترده در تحولات میکرومحرک‌ها استفاده می‌شود. به‌طور کلی تحریک‌پذیری الکترواستاتیکی در تحریک‌پذیری تراشه‌ها مؤثر است؛ این در حالی است که در آنها قدرت تحریک بالا مورد نیاز نیست و از سوی دیگر میکرومحرک‌های الکترواستاتیکی می‌توانند به‌راحتی از طریق دیدگاه ساخت، روی تراشه‌ها یکپارچه و کنترل شوند و برق ورودی کمتری مصرف کنند.



شکل ۱. تحریک الکترواستاتیکی

۱۱-۲. تحریک‌پذیری مغناطیسی

در ابعاد بزرگ، نیروی مغناطیسی استفادهٔ زیادی دارد. گواهی بر این مدعا، استفادهٔ وسیع از موتورهای الکترومغناطیسی، سلونوئیدها و وسائلی دیگر از این دست است. بر پایهٔ یک مقیاس‌بندی ساده، به‌وسیلهٔ کوچک‌سازی کاهش مهمی در نیروی مغناطیسی قابل دسترس توسط تحریک‌کننده‌های مغناطیسی، چه از نوع الکترومغناطیسی و چه مغناطیس دائم، ایجاد می‌شود [۹]. هرچند این امر به فرض اتخاذشده در تحلیل بستگی دارد. شار مغناطیسی و در نتیجهٔ آن نیرو را می‌توان با کاهش چگالی جریان عبوری از سیم‌پیچ کاهش داد. این امر گرمای بیشتری تولید می‌کند که در سیستم‌های در ابعاد میکرو تا دمای معینی مجاز است. تحریک مغناطیسی معمولاً در مقایسه با تحریک الکترواستاتیکی، توان مصرفی و پیچیدگی ساخت بالاتری دارد و مجتمع‌سازی آن بسیار سخت است. با این وجود برای برخی کاربردها، رله‌های میکروماشینکاری‌شدهٔ مغناطیسی توسط لابراتوارهای میکرو به‌صورت تجاری درآمده‌اند. همان‌گونه که اشاره شد، روش تحریک با نیروی مگنواستاتیک به ولتاژ کنترلی کمی نیاز دارد و نیروی اتصال در آن بسیار قوی است. در یک مقایسه با روش الکترواستاتیک و پیزوالکتریک، این روش بسیار کند است و جریان الکتریکی زیادی مصرف می‌کنند. بدین ترتیب وقتی به حفظ وضع موجود در سوئیچ نیاز است، توان زیادی تلف خواهد شد. از این گذشته، نوع مگنواستاتیک بسیار حجیم بوده، عموماً ساخت آن دشوار است؛ زیرا علاوه بر یک سیم‌پیچ سه‌بعدی به یک هستهٔ مغناطیسی نرم نیز نیاز است.

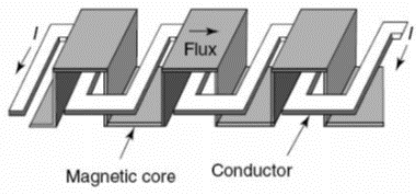
۱۲. سلف میکروالکترومکانیکی

از دیگر المان‌های مهم سیستم‌های میکروالکترومکانیکی سلف با فرکانس رادیویی است. به‌دلیل بازده بالا و قیمت پایین سلف نیمه‌رسانا مکمل اکسید فلز سیلیکونی، چند روش جهت بهبود ضریب کیفیت سلف‌های نیمه‌رسانا مکمل اکسید فلز سیلیکونی معرفی شده است. البته ضریب هدایت سلف نیمه‌رسانا مکمل اکسید فلز سیلیکونی، همچنان به‌عنوان یک مشکل سلف نیمه‌رسانا مکمل اکسید فلز سیلیکونی محسوب می‌شود. ضریب هدایت سلف نیمه‌رسانا مکمل اکسید فلز باقی مانده است که راه‌حل ساده برای حل این مشکل استفاده از زیرلایه‌های مقاومتی نظیر کوارتز و یاقوت می‌باشد و سلف نیمه‌رسانا مکمل اکسید فلز کبود یا سیلیکون با مقاومت بالا است [۱۰]. متأسفانه این روش مناسب با فناوری نیازمند هزینهٔ بالاتری برای ساخت است. سلف‌های میکروالکترومکانیکی را می‌توان به سه دستهٔ عمدهٔ سلف‌های زیگزاگی، سلف‌های سلونوئیدی و سلف‌های حلزون تقسیم کرد. در این بین، سلف حلزونی بیشترین کاربرد را در مقیاس میکرو دارد.

۱۲-۱. سلف زیگزاگی

به‌دلیل طبیعت مارپیچی سلف زیگزاگی و اثر منفی اندوکتانس متقابل بالا، اندازهٔ این نوع سلف غالباً کوچک است. یکی دیگر از مهم‌ترین مشکلات سلف زیگزاگی ساخت هستهٔ سه‌بعدی سلونوئیدی با استفاده از پروسهٔ ساخت مسطح و تحریک

مغناطیسی در ابعاد میکرو است. درک بیشتر تحریک‌های میکرو سبب پیشرفت در روش‌های هیبریدی مانند ایجاد مؤلفهٔ مغناطیسی در چنبرهٔ مسطح، معرفی میدان مغناطیسی اضافی در قسمت‌های متحرک با ضریب نفوذپذیری بالا و روش‌های قلم‌زنی برای ساخت سلف زیگزاگی لایهٔ نازک با فضای سیم‌پیچی در حدود ۷ میکرومتر شده است. با استفاده از تکنیک‌های میکروماشینکاری سطحی، هادی‌های زیگزاگ کم تلفات با هستهٔ مغناطیسی خمیده در یک سطح مطابق شکل ۲ با هم ترکیب شده‌اند [۱۱].



شکل ۲. نمایی از پیاده‌سازی سلف زیگزاگی به‌صورت چندسطحی

هستهٔ مغناطیسی به‌صورت چندسطحی ساخته شده و به همین صورت هادی دور آن پیچیده می‌شود. این ساختار سلفی با ۲۶ دور و ابعاد ۴ در ۰/۹ میلی‌متر می‌باشد و اندوکتانسی در حدود ۰/۲ میکروهانری را در فرکانس ۱۰۰ کیلوهرتز نشان می‌دهد. البته با کوچک و مسطح‌شدن هادی‌ها مقاومت کل سیم پیچ افزایش می‌یابد.

۱۲-۲. سلف سلونوئیدی

سلف‌های سلونوئیدی معمول با پیچیدن سیم هادی حول هستهٔ مغناطیسی ایجاد می‌شوند. هرچند تبدیل ساختار سه‌بعدی به مسطح مشکلی شگرف است، ساخت هادی مارپیچی حول یک هسته با تکنیک‌ها، خیلی سخت‌تر از ساخت شکل‌های زیگزاگی یا حلزونی است. این سلف به‌خاطر اثر کاهندهٔ اندوکتانس متقابل دارای مقدار سلفی خیلی کم است. سلف‌های حلزونی نیز نیازمند قطعه‌ای سیم هادی برای اتصال انتهای داخل سیم‌پیچ به بیرون است که این امر خازن‌های سرگردان غالبی را نشان می‌دهد.

۱۳. سازوکارهای سنجش

میکروثانیه‌های زیادی براساس اصول مختلف سنجش برای سیستم‌های میکروالکترومکانیکی توسعه یافته‌اند [۱۲-۱۳]. از جمله حسگرهای شیمیایی، حسگر گاز، حسگر نوری، زیستی، حرارتی، مکانیکی. برخی از سازوکارهای عمدهٔ سنجش برای میکروثانیه‌های مکانیکی در ادامه ذکر شده است.

۱۳-۱. سنجش رزونانس

اصل سنجش رزونانس بر این اساس است که فرکانس تشدید تشدیدکننده با کرنش (تنش) ایجادشده در ساختار تشدیدکننده تفاوت پیدا می‌کند. در میکروحسگر تشدیدشدهٔ توسعه‌یافته، کرنش ایجادشده توسط فشار روی دیافرام منجر به فرکانس طبیعی تشدیدکننده می‌شود. با استفاده از تفاوت فرکانس طبیعی تشدیدکننده، اطلاعات فیزیکی که منجر به کرنش شده است، حس خواهد شد. مثلاً فرکانس تشدید طبیعی تشدیدکننده خمشی با دو سر ثابت را می‌توان از مأخذ [۱۴] به‌دست آورد:

$$f = \frac{4.73^2 h}{2\pi l^2}\left(\frac{E}{12\rho}\right)\sqrt{1+0.2366\left(\frac{1}{h}\right)^2 \varepsilon} \qquad (۳)$$

در این رابطه f فرکانس طبیعی حالت نوسان اساسی، l طول تشدیدکننده، h ضخامت تشدیدکننده، E ضریب یانگ، ρ چگالی مادهٔ دیافرام و ε کرنش ایجادشده در ساختار تشدیدکننده است. با مقایسهٔ سنجش تشدیدشده با سنجش مقاومتی پیزو، تشدیدکننده به‌عنوان کرنش‌سنج عمل می‌کند. بنابراین ضریب اندازهٔ این کرنش‌سنج رزونانس را می‌توان به‌صورت ۴ بیان کرد:

$$k_{gf} = \frac{1}{2}\left(\frac{0.2366(1/h)^2}{1+0.2366(1/h)^2 \varepsilon}\right) \qquad (۴)$$

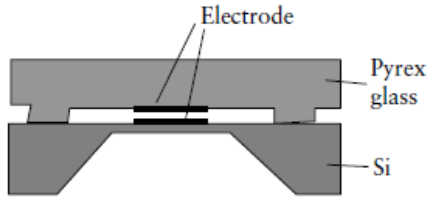
$$\frac{\Delta f}{f} = k_{gf}\varepsilon \qquad (۵)$$

اگر کرنش ۱۰۰ پی. پی. ام. باشد، برای طول ۱/۲ میلی‌متر، پهنای ۲۰ و ۵ میکرون ضخامت کرنش‌سنج تشدیدکننده، ضریب اندازه می‌تواند بالاتر از ۳۰۰۰ باشد؛ در حالی‌که ضریب کرنش سنج مقاومتی پیزو در حدود ۲ است. چون ضریب اندازه مستقیماً به حساسیت حسگر بستگی دارد، سنجش رزونانس می‌تواند برای میکروثانیه‌ها با حساسیت بالا به‌دست آید.

۱۳-۲. سنجش خازنی

سنجش خازنی از دیافرام تغییر شکل ناشی از تغییر ظرفیت برای تبدیل اطلاعات فشار و نیرو به سیگنال‌های الکتریکی استفاده می‌کند. ساختار میکروحسگر خازنی معمول در شکل ۳ نمایش

داده شده است. میکروثانیه‌های خازنی برای مواردی از قبیل شتاب، فشار، جابه‌جایی، موقعیت می‌توانند به‌کار روند. برای میکروثانیه‌های خازنی تغییر ظرفیت خازن با توجه به تغییر شکل دیافرام خطی نبوده و همچنین ظرفیت کم نیازمند مدار اندازه‌گیری می‌باشد تا روی تراشه یکپارچه شود.



شکل ۳. ساختار سنجش خازنی

۱۴. نتیجه‌گیری

با توجه به ویژگی‌های این فناوری می‌توان به توسعهٔ دقت و سرعت صنایع بهبود بخشید. سیستم‌های میکروالکترومکانیکی فاصلهٔ بین سیستم‌های پیچیدهٔ مکانیکی و مدارهای مجتمع الکترونیکی را پر می‌کند. حسگرها و محرک‌ها عموماً گران‌اند، به‌علاوه سیستم الکترونیکی، محرک‌ها و حسگرها در ابعاد بزرگ قابل اعتماد نیستند. این فناوری ساخت سیستم‌های میکروالکترومکانیکی را با استفاده از روش‌های ساخت ناپیوسته ممکن می‌کند و موجب برابری قیمت و اعتبار حسگرها و محرک‌ها با مدارهای مجتمع می‌شود.

۱۵. مآخذ

[1] Roark R. J., W. C. Young, *Roark's Formulas for Stress and Strain*, 6th edition, New York: McGraw-Hill, 1989.

[2] NEXUS, The Network of Excellence in Multifunctional Microsystems, Task Force, Market Analysis for Microsystems: 1996-2002, 1998, http://www.nexus-emsto.com (accessed April 25, 2016).

[3] System Planning Corporation (SPC), Micro-Electro-mechanical Systems (MEMS): An SPC Study, 1994.

[4] Battelle Institute, Micromechanics, Battelle Institute, Frankfurt am Main, 1992.

[5] Roger Grace Associates, http://www.rgrace.com (accessed April 25, 2016).

[6] Tang, W. C., *MEMS applications in space exploration Micro-machined Devices and Components III*, Austin, Texas, 1997, Proceedings. SPIE Volume. 3224, 1997, pp. 202-11.

[7] Edmonds L. Dو, G. M. Swift, C. I. Lee, "Radiation response of a MEMS accelerometer: an electrostatic force." *IEEE Transactions. Nuclear Science* 45, 1998, pp. 2779–88.

[8] Fujita, H., "Micro-actuators and micro-machines." *Proceedings IEEE*, 86, (8), 1998, pp. 1721-1732.

[9] Madou, M., *Fundamentals of Micro-fabrication*, CRC press, 1997.

[10] Oogarah, T. B., *Low Temperature Radio frequency MEMS Inductors Using Porous Anodic Alumina*, Waterloo, Ontario, Canada, 2008.

[11] Ahn, C. H., M. G. Allen. "A fully integrated surface micro-machined micro-actuator with a multilevel meander magnetic core." *Journal of Micro-electro-mechanical Systems* 2(1), 1998, pp. 15–22.

[12] Fatikow, S., U. Rembold, *Micro-system technology and micro-robots*, Springer Publishing New York, 1997.

[13] Rai-choudhury, P., *Handbook of icrolithography, micro-machining and micro-fabrication*, SPIE Optical Engineering Press, 1997.

[14] Ikeda, K., etal. "Silicon pressure sensor integrates resonant strain gauge on diaphragm." *Sensors and Actuators*, 1990, pp. 146–150.

پی‌نوشت

1. NEXUS
2. Jet Propulsion Laboratory (JPL)