دانشکده علوم پایه
گروه فیزیک

عنوان پایان‌نامه:

طراحی و ساخت حسگر گازی لایه‌نازک، نانوساختار نیمرسانای SnO_2 و مطالعه اثر ناخالصی Cu روی خواص حسگری

ارائه شده جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد
در رشته فیزیک گرایش حالت جامد

اساتید راهنما:

دکتر ناصر شاه طهماسبی

دکتر ناصر تجبر

استاد مشاور:

دکتر محمود رضایی رکن آبادی

نگارنده:

حسین رضوانی نیکابادی

شهریور ۱۳۸۷

چکیده :

در این تحقیق، لایه‌های نازک اکسید قلع با ناخالصی مس به عنوان یک حسگر گازی لایه‌نازک به روش اسپری پایرولیز لایه‌نشانی شده است. پارامترهای حسگری قطعه حسگر در حضور گازهای O_2 و CO_2 بر پایه حسگر SnO_2:Cu با ترازهای مختلف ناخالصی برای درصدهای اتمی [Cu]/[Sn] = ۰، ۲، ۴، ۶، ۱۰، ۱۲٫۵، ۱۵، ۲۰، ۲۵at% مطالعه شد. همچنین اثر ضخامت لایه و دمای بستر در مقدار ناخالصی ثابت ۴at% بر روی پارامترهای حسگری مورد مطالعه قرارگرفت. مطالعات ساختاری توسط طیف پراش پرتو X و تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM الگوی نانوساختار نمونه‌ها را مشخص کرده است. جذب و عبور اپتیکی لایه‌ها بوسیله دستگاه اسپکتروفوتومتر UV-Vis اندازه‌گیری شده است، و مقدار گاف نواری از ۳٫۳۴ eV (برای ۴at٪) تا ۳٫۷۲ eV (برای ۱۵at٪) محاسبه شده است.

اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی لایه‌ها نشان داد که با افزایش ناخالصی Cu در لایه‌ها، مقاومت الکتریکی قطعه افزایش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد که از این پدیده می‌توان برای حسگری گازهای $O_2 - CO_2$ استفاده نمود. بهترین حساسیت نسبت به گاز اکسیژن و گاز دی اکسید کربن به ترتیب در نمونه‌های با ناخالصی ۱۰at% و ۱۲٫۵ at% بدست آمد.

تقدیر و تشکر

در ابتدا از **پدر** و **مادر** عزیزم که بهترین سالهای عمرشان را به پـای فرزنـدان خـود ریختـه‌انـد کمال تشکر و قدردانی را بجا می‌آورم، باشد که این رساله برای لحظـه‌ای لبخنـد رضـایت ایـشان را سبب شود.

از اساتید راهنمای گرانقدرم آقایان دکتر شاه‌طهماسبی و دکتر تجبر و اسـتاد مـشاورم آقـای دکتـر رضایی رکن آبادی کمال تشکر و سپاسگزاری را دارم.

همچنین از اساتید بزرگوار آقایان دکتر کمپانی و دکتر حسینی و ریاست محترم گروه فیزیک آقـای دکتر میری و از دیگر اساتید در گروه فیزیک دانشگاه فردوسی سپاسگزارم.

از جناب آقای دکتر باقری محققی به خاطر راهنمایی هـا و کمـک هـای ارزشمندشـان در ایـن رساله تشکر و قدردانی می کنم. از تمامی دوستان عزیـزم، مخـصوصا آقایـان کریمـی پـور، شـیخی، محمدی و بابایی و خانم مظفری و سایر عزیزانی که مرا در این مدت تنها نگذاشته و همواره به مـن کمک کرده‌اند کمال تشکر را دارم، باشد که قدردان زحمات ایشان باشم.

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه، تاریخچه و معرفی انواع حسگرها و کاربرد آنها

مقدمه ۲
۱-۱ علم حسگری ۲
۱-۲ سازوکار حسگری ۳
۱-۳ دسته‌بندی حسگرهای نیمرسانا ۴
۱-۴ تکامل حسگرهای نیمرسانا ۵
۱-۵ انواع حسگرها ۶
۱-۵-۱ حسگرهای صوتی ۶
۱-۵-۲ حسگرهای مکانیکی ۶
۱-۵-۳ حسگرهای مغناطیسی ۷
۱-۵-۴ حسگرهای تابشی ۱۰
۱-۵-۵ حسگرهای گرمایی ۱۱
۱-۵-۶ بیوحسگرها (حسگرهای زیستی) ۱۲
۱-۵-۷ حسگرهای گازی ۱۲
۱-۵-۷-۱ مقدمه ۱۲
۱-۵-۷-۲ حسگرهای گازی نیمرسانا (SGS) ۱۶
۱-۶ مراجع ۱۹

فصل دوم: مطالعه خواص ساختاری، الکتریکی، و اپتیکی حسگرهای لایه‌نازک SnO_2

۲-۱ اکسیدهای رسانای شفاف ۲۲
۲-۲ خصوصیات ساختاری SnO_2 ۲۲
۲-۳ خواص الکتریکی SnO_2 ۲۴
۲-۴ خواص اپتیکی SnO_2 ۲۵
۲-۵ کاربردهای لایه‌های SnO_2 ۲۶
۲-۵-۱ الکترودهای شفاف ۲۶
۲-۵-۲ باتری‌های خورشیدی ۲۷
۲-۵-۳ پوشش‌هایی با گسیل پایین ۲۸
۲-۶ دیدگاه نظری نحوه حسگری ۲۸

۲-۷ فرایندهای جذب سطحی گاز در سطوح جامد ۳۳
۲-۷-۱ جذب فیزیکی ۳۳
۲-۷-۲ پیوند هیدروژنی ۳۳
۲-۷-۳ جذب شیمیایی ۳۴
۲-۷-۴ جذب یونی ۳۵
۲-۸ اثرحضورگازها در تماس با سطح اکسید قلع ۳۵
۲-۹ اثرات دما بر حسگری SnO_2 ۳۷
۲-۱۰ اثر افزودن ناخالصی‌ها در حسگرهای نیمرسانای اکسید فلزی ۳۹
۲- ۱۱ گزینندگی در حسگرهای اکسید – فلز ۴۱
۲-۱۲ پایداری: رانش در حسگرهای اکسید – فلز ۴۳
۲-۱۳ باز تولید در حسگرهای اکسید- فلز ۴۴
۲-۱۴ حسگرهای لایه ضخیم ۴۵
۲-۱۴-۱ مراحل تولید ۴۵
۲-۱۵ حسگرهای لایه‌نازک ۴۶
۲-۱۶ روش‌های لایه‌نشانی لایه‌های نازک ۴۷
۲-۱۶-۱ روش‌های لایه‌نشانی بخار فیزیکی (PVD) ۴۷
۲-۱۶-۱-۱ روش تبخیرگرمایی در خلاء ۴۷
۲-۱۶-۱-۲ روش کندوپاش ۵۴
۲-۱۶-۲ روش‌های لایه‌نشانی شیمیایی ۵۶
۲-۱۶-۲-۱ روش‌های لایه‌نشانی بخارشیمیایی (CVD) ۵۶
۲-۱۶-۲-۲ روش‌های لایه‌نشانی از محلول شیمیایی ۵۷
۲-۱۶-۲-۳ روش‌های لایه‌نشانی الکتروشیمیایی ۵۸
۲-۱۶-۳ روشهای لایه‌نشانی ترکیبی (شیمیایی- فیزیکی) ۵۹
۲-۱۶-۳-۱ لایه‌نشانی به روش سل- ژل ۵۹
۲-۱۶-۳-۲ لایه‌نشانی به روش اسپری پایرولیزیز ۶۰
۲- ۱۷ مروری بر تحقیقات انجام شده در زمینه حسگرهای گازی ۶۲
۲-۱۷-۱ اکسید قلع ۶۲
۲-۱۷-۲ اکسید های فلزی دیگر ۶۶
۲-۱۸ مراجع ۶۷

فصل سوم: کارهای تجربی بخش اول: آماده سازی و تهیه لایه‌های نازک

مقدمه ۷۲
۳-۱ تهیه‌ی لایه‌های نازک نانوساختار SnO_2:Cu به روش اسپری پایرولیزیز (SP) ۷۲
۳-۱-۱ تغییر پارامتر ناخالصی ۷۴
۳-۱-۲ تغییر دمای بستر ۷۶
۳-۱-۳ تغییر ضخامت لایه ۷۶
۳-۲ بررسی‌های ساختاری لایه‌های نازک تهیه شده به روش SPD ۷۷
۳-۲-۱ تعیین نوع ساختار بلوری با XRD ۷۷
۳-۲-۲- مشاهده‌ی دانه‌بندی نمونه‌ها با تصویربرداری SEM ۷۷
۳-۳ معرفی روشهای اندازه‌گیری‌های اپتیکی ۷۹
۳-۴ معرفی روشهای اندازه‌گیری‌های الکتریکی ۸۰
۳-۴-۱ اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی ۸۰
۳-۴-۲ اثرات ترموالکتریک ۸۲
۳-۵ محاسبه حساسیت حسگر لایه نازک ۸۳
۳-۶ معرفی سیستم اندازه‌گیری عملیات حسگری ۸۳
۳-۷ طراحی مدار الکترونیکی برای عملیات حسگری قطعه ۸۶
۳-۸ مراجع ۸۷

فصل چهارم: کارهای تجربی بخش دوم: مشخصه‌یابی لایه‌های نازک نانو ساختار Cu: SnO_2

۴-۱ نتایج بررسی‌های ساختاری ۸۹
۴-۱-۱ تعیین نوع ساختار بلوری با XRD ۸۹
۴-۱-۲ مشاهده‌ی دانه‌بندی لایه‌ها با تصویربرداری SEM ۱۰۲
۴-۲ نتایج اندازه‌گیری‌های الکتریکی ۱۰۵
۴-۳ نتایج اندازه‌گیری‌های اپتیکی ۱۰۶
۴-۴ نتایج اندازه‌گیری‌های حسگری قطعه حسگر ۱۱۲
۴-۵ جمع‌بندی ۱۱۹
۴-۶ پیشنهادات ۱۲۲
۴-۷ مراجع ۱۲۲
پیوست ۱۲۳

فصل اول

مقدمه، تاریخچه و معرفی انواع حسگرها و کاربرد آنها

۱-۱ علم حسگری

۱-۲ سازوکار حسگری

۱-۳ دسته‌بندی حسگرهای نیمرسانا

۱-۴ تکامل حسگرهای نیمرسانا

۱-۵ انواع حسگرها

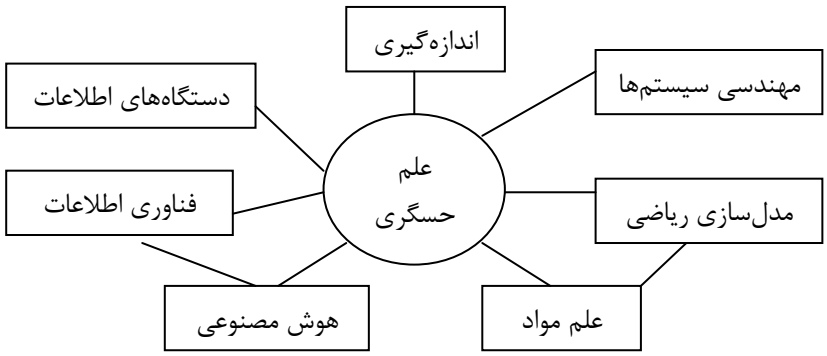
۱-۶ مراجع

مقدمه

آشکارسازی گازهای شیمیایی کاربردهای گسترده‌ای در صنایع و زمینه‌های مختلف علوم و تکنولوژی پیدا کرده است. از کاربردهای حسگرهای گازی می‌توان به آشکارسازهای دود ناشی از آتش، آشکارسازهای نشتی گاز، کنترل‌گرهای سوخت در ماشینها و هواپیماها، قطعات هشدار دهنده حضور گازهای خطرناک در محیط‌های صنعتی، پالایشگاهها و نیروگاههای برق و آشکارسازی ترکیبات آلی فرار اشاره کرد. عملکرد حسگرهای اکسیدهای فلزی بر پایه کاهش مقاومت الکتریکی لایه‌نازک اکسید فلزی در حضور یک گاز می‌باشد و پارامترهای حساسیت، گزینندگی و پایداری آنها مورد مطالعه قرار گرفته است. یک حسگر گازی با مواد نانوساختار، سطح مؤثر بیشتری در مقابل گاز نشان می‌دهد. از طرف دیگر پارامترهای حساسیت این قطعات به حضور ناخالصی‌هایی از قبیل Cu، Fe و Co وابسته است. این در حالتی است که کارآیی قطعات در حالت نانوساختار، افزایش قابل ملاحظه‌ای را نشان می‌دهد.

۱-۱ علم حسگری[۱]

دانشمندان شاخه‌ای جدید در علم، به نام علم حسگری را معرفی کرده‌اند [۱]. علم حسگری عنصر اساسی در علم اندازه‌گیری است و علم اندازه‌گیری به نوبه‌ی خود پایه اصلی در علم ماشین است. هدف اصلی علم حسگری طراحی انواع جدید حسگرها و سیستم‌های حسگری است. این علم در حوزه فناوری اطلاعات قرار دارد. شکل (۱-۱) جایگاه این علم را برای شناسایی اجزاء و ارتباط این علم با دیگر علوم را نشان می-دهد.



شکل ۱-۱: نمودار نحوه ارتباط علم حسگرها با علوم دیگر و شاخه‌های مربوط به آن [۱].

۱. Sensing Science

۱-۲ سازوکار حسگری

واژه حسگر[۱] از لغت لاتینی sentire به معنای "درک کردن" گرفته شده است. حسگر اطلاعاتی را در مورد سیگنال‌های فیزیکی و شیمیایی در بر دارد، که به طور مستقیم توسط حواس ما نمی‌تواند درک شود. یک تعریف لغت‌نامه‌ای (فرهنگ لغت دانشگاهی وبستر) از "حسگر" عبارت است از "وسیله‌ای که به یک محرک فیزیکی (یا شیمیایی) نظیر (گرما، نور، صدا، فشار، مغناطیس، یا یک حرکت خاص) پاسخ می‌دهد و پالس به دست آمده (مانند اندازه‌گیری یا انجام کار یک کنترل) را انتقال می‌دهد". بنابراین، حسگر می‌تواند یک سیگنال (یا انرژی) ورودی را آشکارسازی، و آن را به یک سیگنال (یا انرژی) خروجی مناسب تبدیل کند [۲].

به طور کلی حسگرها به حسگرهای صوتی، مکانیکی، مغناطیسی، تابشی، گرمایی، بیوحسگرها (حسگرهای زیستی)، و حسگرهای گازی دسته بندی می‌شوند که در ادامه به شرح آنها می‌پردازیم.

حسگر نیمرسانا در اندازه کوچک و تکنیکی که در ساخت آن استفاده می‌شود، از دیگر حسگرهای جامد متمایز است. بیشتر حسگرهای نیمرسانا به وسیله فرایندهایی که برای مدارهای مجتمع (IC) توسعه یافته است، ساخته می‌شوند. با استفاده از فرایند پردازش تجمعی استاندارد، نظیر صنعت IC، صدها و هزاران حسگر نیمرسانای یکسان می‌تواند در یک خط تولید شود. بنابراین به طور اساسی نسبت کارایی به قیمت آن‌ها بهتر می‌شود.

اندازه کوچک حسگرهای نیمرسانا نه تنها در پایین بودن قیمت آن‌ها دخالت دارد، بلکه به آن‌ها اجازه می‌دهد تا با مدارهای میکروالکترونیک مجتمع شوند (اصطلاحاً حسگرهای مجتمع)، که در این صورت کارآیی آن‌ها افزایش می‌یابد.

واژه دیگر مرتبط با حسگر"مبدل[۲]" است، مبدل وسیله‌ای است که انرژی را به شکل اولیه یا به شکل دیگری از یک سیستم به سیستم دیگر منتقل می‌کند، سیگنال‌ها نیز نظیر انرژی، در یک مبدل منتقل می‌شوند. حسگرها و مبدل‌ها گاهی به عنوان واژه‌های مترادف استفاده می‌شوند. اختلاف بین حسگر و مبدل بسیار کم است. مبدل عمل تبدیل را انجام می‌دهد، و حسگر لزوماً باید برخی سیگنال‌های فیزیکی و شیمیایی را حس کند.

---

۱. Sensor
۲. Transducer

۱-۳ دسته‌بندی حسگرهای نیمرسانا

به منظور معرفی و مقایسه حسگرها دسته‌بندی‌های متفاوتی ارائه شده است [۳]. این دسته‌بندی‌های متفاوت برای توصیف و مقایسه حسگرهای نیمرسانا مفید است. در جدول (۱-۱) کمیت‌های قابل اندازه‌گیری، شرایط ورودی آشکارسازی و نوع خاصیت اندازه‌گیری شده توسط حسگرها ارائه شده است. به طور مثال، اگر خاصیت قابل اندازه‌گیری گرما باشد، توسط یک حسگر گرمایی، و اگر فشار باشد توسط یک حسگر فشار اندازه‌گیری می‌شود. خاصیت قابل اندازه‌گیری عبارتند از: صوتی، بیولوژیکی، شیمیایی، الکتریکی، مغناطیسی، مکانیکی، اپتیکی، تابشی و گرمایی. به طور مثال، مورد « دامنه موج » تحت عنوان «اپتیکی» می‌تواند برای حسگری به کار رود که شدت تابش فروسرخ در یک منطقه را اندازه‌گیری کند، یا شار اپتیکی متغیر زمان دیود نوری را آشکارسازی کند.

جدول ۱-۱: دسته‌بندی و تعیین کمیت‌های قابل اندازه‌گیری مربوط به حسگرها [۲، ۴].

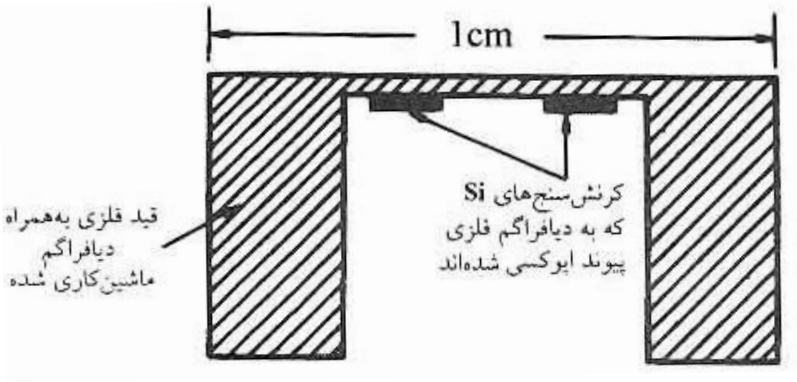
خاصیت مورد نظر		کمیت‌های قابل اندازه‌گیری
شیمیایی	شیمیایی	رطوبت، سطح PH و یون‌ها، غلظت گاز، مواد سمی و قابل اشتعال، غلظت بخارات و عطرها، آلاینده‌ها
	زیستی	جرم زیستی (ماهیت، غلظت، حالت)، قندها، پروتئین‌ها، هورمون‌ها، آنتی‌ژن‌ها و غیره
الکتریکی		بار، جریان، اختلاف پتانسیل، میدان الکتریکی (دامنه، فاز، قطبش، طیف)، رسانایی، گذردهی، وغیره
مغناطیسی		میدان مغناطیسی (دامنه، فاز، قطبش، طیف)، شار، گشتاور مغناطیسی، مغناطش، تراوایی مغناطیسی و غیره
مکانیکی	مکانیکی	مکان (خطی، زاویه‌ای)، جابه‌جایی، سرعت، شتاب، تکانه، گشتاور، نیرو، کرنش، فشار، شار جرم، سرعت شاره، چگالی، چسبناکی، ساختار بلوری، و غیره
	صوتی	دامنه موج، فاز، قطبش، طیف، سرعت موج و غیره
تابشی	تابشی	پرتو X، گاما، فرابنفش، نور مربی، فروسرخ، میکروویو (ریزموج)، امواج رادیویی و غیره
	اپتیکی	دامنه، فاز، قطبش، طیف موج، سرعت موج و غیره
گرمایی		دما، شار، گرما، آنتروپی، ظرفیت گرمایی، رسانش گرمایی و غیره

۱-۴ تکامل حسگرهای نیمرسانا

در سال ۱۸۷۴، براون[۱] اولین تحقیق منظم خود را در مورد یک سیستم یکسوسازی نیمرسانا - فلز انجام داد. وی متوجه بستگی مقاومت به قطبیت ولتاژ اعمالی شد. برای این قطعه، کمیت قابل اندازه‌گیری شامل ولتاژ ورودی و تغییر مقاومت خروجی است و هر دو الکتریکی می‌باشند.

اولین حسگر نیمرسانا، یکسوساز نقطه - تماس[۲] در سال ۱۹۰۴ برای آشکارسازی امواج رادیویی اختراع شد. کمیت مورد اندازه‌گیری یک سیگنال رادیویی و خروجی الکتریکی بود. پیشرفت‌های اخیر در زمینه حسگرهای نیمرسانای مدرن به پیشرفت‌های فناوری ترانزیستور بر می‌گردد.

اولین حسگر"فشار" نیمرسانا بر اساس اندازه‌گیری کرنش مکانیکی بر روی یک تراشه سیلیکون ساخته شد. قطعاتی از این تراشه، به طور دستی، به یک دیافراگم فلزی که به طور مستقیم با محیط اندازه‌گیری در تماس بود، چسبانیده شدند، (شکل۱-۲). فشار اعمال شده باعث یک انحراف در دیافراگم می‌شود که به کرنش‌سنج‌ها منتقل می‌شود. تغییر در مقاومت مکانیکی به صورت خطی با نیروی اعمالی متناسب است. طراحی اولیه به خاطر عدم هماهنگی گرمایی سطح مشترک سیلیکون- چسب- فلز دچار واکنش کم و پایداری ضعیف بود. اولین کاربرد صنعتی این حسگرها در سال ۱۹۵۸ آغاز شد.



شکل۱-۲: اولین حسگر فشار نیمرسانا با استفاده از تراشه سیلیکون.

۱. Braun
۲. Point - Contact Rectiffier

۱-۵ انواع حسگرها

۱-۵-۱ حسگرهای صوتی

حسگرهای صوتی، امواج کشسان را در محدوده فرکانسی مگاهرتز تا محدوده پایین گیگاهرتز برای اندازه-گیری مقادیر کمیت‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی به کار می‌گیرند. حساسیت بالای این دستگاه‌ها، آن‌ها را برای تشخیص گازهای شیمیایی مناسب ساخته است. در بیشتر موارد خروجی این حسگرها، بسامد است که می‌تواند به سادگی و به طور دقیق با یک شمارنده الکترونیکی اندازه‌گیری شود. امروزه این نوع حسگرها در سیستم‌های حمل و نقل هوایی، نظامی، کنترل احتراق اتوموبیل‌ها و به طور نوعی در علوم پزشکی به عنوان حسگرهای زیستی کاربرد پیدا کرده‌اند [۲].

انتشار امواج صوتی در هر قطعه با نوع ماده بستر و جابه‌جایی‌های ذره نسبت به جهت انتشار موج و سطح حساس تعیین می‌شود. این قطعات بسته به نوع خواص فیزیکی خود می‌توانند در محیط مایع یا گاز کار کنند. مکانیسم حسگری تابعی از پارامتر اختلال است که روی انتشار موج صوتی در سطح حسگر تأثیر می‌گذارد [۵].

۱-۵-۲ حسگرهای مکانیکی

همه حسگرهای مکانیکی بر پایه برخی اصول فیزیکی، سیگنال مکانیکی را به الکتریکی تبدیل می‌کنند. این روش‌ها به صورت زیر دسته‌بندی می‌شوند:

الف) روش‌های ایستا

- آشکارسازی تنش

۱) کرنش‌سنج‌های پیزو- مقاومت (تنش معمولی)

۲) اندازه‌گیری‌های ولتاژ عرضی (تنش برشی)

۳) اثر پیوند پیزو

- آشکارسازی تغییر شکل

۱) از طریق اندازه‌گیری ظرفیت

۲) به روش تداخل‌سنجی اپتیکی

ب) روش‌های تشدیدی

- کرنش‌سنج‌های پیزو- مقاومت

- با استفاده از روش‌های اپتیکی

در دسته روش‌های ایستا، مجموعه عناصر به فشار ایجاد شده توسط تغییر شکل در ریزساختار حساسند. در روش‌های آشکارسازی تغییر شکل یا جابه‌جایی ریزساختار می‌تواند به عنوان یک الکترود خازنی انتخاب شود، که الکترود دیگرش ثابت است. الکترود دوم یک لایه نازک فلزی روی بستر شیشه‌ای یا سیلیکون است که به ریزساختار مقید شده است. حسگر می‌تواند به صورت ساختار تشدیدی طراحی شود. برای مثال: برای حسگرهای فشار، فرکانس تشدید غشاء سیلکون به فشار اعمالی بستگی دارد.

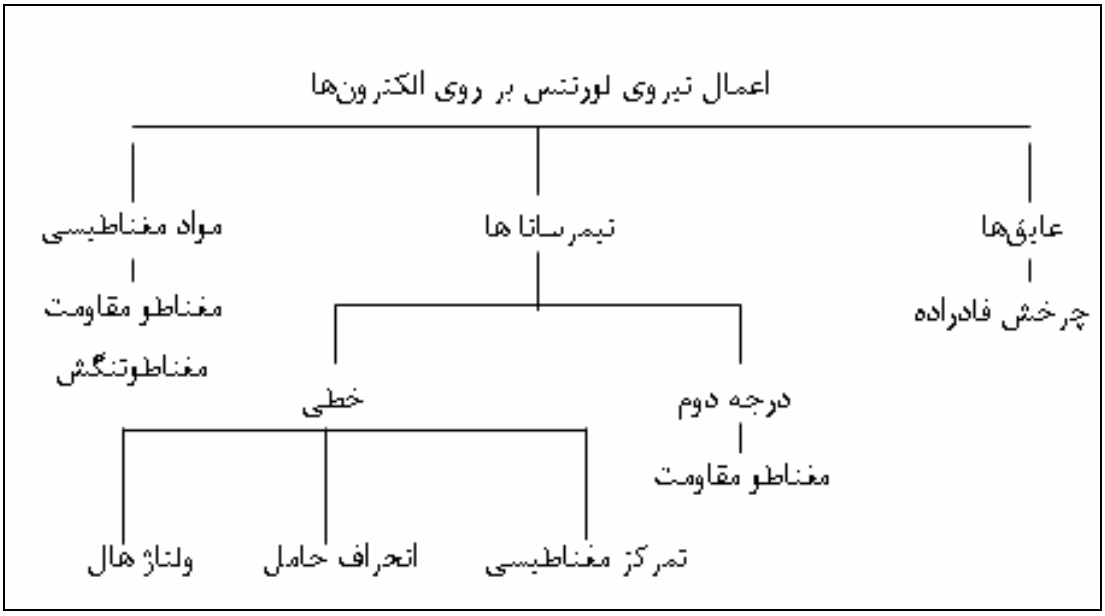
دلایل استفاده از سلیکون در حسگرهای مکانیکی عبارتند از: دارا بودن خواص الکتریکی و مکانیکی مناسب، در فرآیند پردازش دسته‌ای و در مدارهای مجتمع قابل استفاده است، و نیز دارای وزن و ابعاد بسیار کوچک است. سیلیکون در حسگرهای مکانیکی سیگنال دقیق می‌دهد، زیرا قبل از ورود به ناحیه پلاستیک می‌شکند. در عین حال استحکامی قابل مقاسیه با فولاد دارد. هم‌چنین پدیده‌هایی نظیر خزش و پسماند مکانیکی در آن وجود ندارد.

در اکثر فرآیندهای ساخت از فناوری ساخت مدارها مجتمع، استفاده می‌شود، که شامل طرح‌دهی، اکسیداسیون، پخش، لایه‌نشانی لایه‌نازک، فلزگذاری، و روش‌های مختلف دیگر است [۶، ۷].

۱-۵-۳ حسگرهای مغناطیسی

یک حسگر مغناطیسی قطعه‌ای است که توانایی حسگری میدان مغناطیسی و استخراج اطلاعات از آن را دارد. در اکثر کاربردهای عملی، این اطلاعات مربوط به القای مغناطیسی در راستای یک محور است، که توسط حسگر به سیگنال الکتریکی تبدیل می‌شود. بنابراین حسگر مغناطیسی مبدلی است که میدان

مغناطیسی را به یک سیگنال الکتریکی مناسب تبدیل می‌کند. شکل (۱-۳) گروه‌بندی برخی از مواد و اثرات مغناطیسی را نشان می‌دهد [۸].



شکل ۱-۳: مواد و اثرات خانواده حسگرهای مغناطیسی.

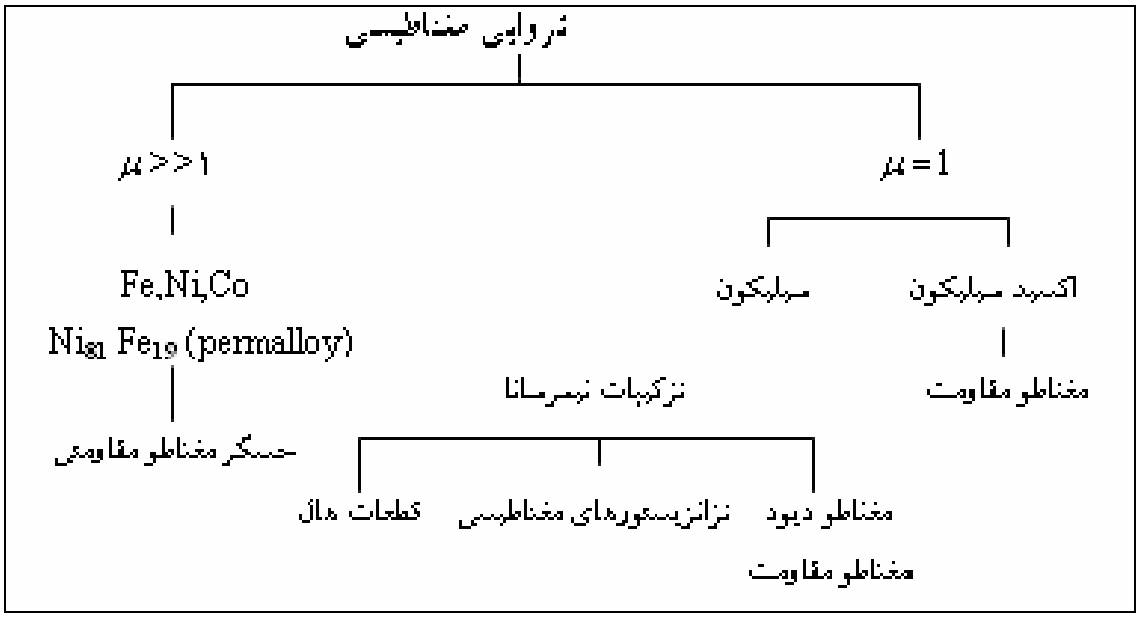
اکثر حسگرهای مغناطیسی از رابطه

$$F = qv \times B \qquad (۱-۱)$$

(نیروی لورنتس) استفاده می‌کنند. که q بار، v سرعت بار، و B میدان اعمالی است. چون کمیت مورد اندازه‌گیری میدان مغناطیسی H است، از رابطه $B = \mu\mu_0 H$ برای تبدیل روابط استفاده می‌کنیم، که μ_0 تراوایی فضای آزاد و μ تراوایی نسبی ماده حسگر است. هر چه تراوایی نسبی بالاتر باشد پاسخ حسگر زیادتر می‌شود. بنابراین دو گروه در طبقه‌بندی برای حسگرهای مغناطیسی وجود دارد (شکل۱-۴). حسگرهای مغناطیسی که از مواد با تراوایی بالا (فرو یا فری مغناطیس، $\mu >> ۱$)، استفاده می‌کنند که حساسیت حسگری بیشتری دارند. مثال‌های آن عبارت است از: حسگرهای بر پایه مغناطومقاومت[۱] لایه‌های نازک NiFe، مغناطوتنگش[۲] (تغییرشکل بر اثر میدان مغناطیسی) پوشش نیکل در یک فیبر نوری، یا اثرات مغناطواپتیکی[۳] در گارنت‌ها[۴]، و هر حسگری که با یک قطعه تمرکزکننده شار ترکیب شده

۱. Magneto Resistance
۲. Magneto Striction
۳. Magneto-Optic Effects
۴. Garnets

است. حسگرهای مغناطیسی که از مواد با تراوایی پایین (دیا یا پارامغناطیسی، $\mu = 1$)، استفاده می‌کنند، تقویت محسوسی به علت پایین بودن ضریب μ فراهم نمی‌کنند. همه حسگرهایی که مبتنی بر اثرات گالوانومتری در نیمرساناها هستند در این دسته قرار دارند.



شکل ۱-۴: ساختار خانواده حسگرهای مغناطیسی.

از نظر کاربردی حسگرهای مغناطیسی را می‌توان به دو گروه مستقیم و غیرمستقیم، تقسیم کرد. در کاربردهای مستقیم، حسگر مغناطیسی جزیی از مغناطومتر است. برای مثال، در اندازه‌گیری میدان مغناطیسی زمین، خواندن در محیط ذخیره اطلاعات مغناطیسی، شناسایی الگوها درکارت‌ها یا اسکناس‌ها، و کنترل ابزار مغناطیسی در گروه کاربردهای مستقیم قرار دارند.

در کاربردهای غیر مستقیم، میدان مغناطیسی به عنوان عامل واسطه برای آشکارسازی سیگنال‌های غیرمغناطیسی به کار می‌رود. از کاربردهای غیرمستقیم می‌توان به آشکارسازی جریان مستقل از ولتاژ برای حفاظت از بار اضافی، وات-ساعت‌سنج‌های مجتمع، و آشکارسازی بدون تماس موقعیت خطی یا زاویه‌ای، جابه‌جایی یا سرعت با استفاده از مغناطیس دایم اشاره کرد. در مرجع [۹] کاربردهای حسگرهای مغناطیسی در صنعت اتوموبیل‌سازی آورده شده است.

۱-۵-۴ حسگرهای تابشی

این حسگرها تابش یونیزه، نور مریی، فروسرخ(IR)، و فرابنفش(UV) را پوشش می‌دهند. حسگرهای تابشی یونیزه برای ذرات با انرژی بالا و پرتو X، لامپهای گایگر- مولر[۱](GM) و نوسانگرها هستند. این نوع حسگرها اگرچه با فناوری MEMS[۲] تحقق نیافته‌اند، ولی مینیاتوری آن‌ها کاری عملی است. حسگرهای تابشی مریی، IR، و UV به دو گروه مستقیم و غیرمستقیم تقسیم می‌شوند. حسگرهای اپتیکی بطور مستقیم فوتون‌ها را آشکارسازی کرده و یک سیگنال الکترونیکی ایجاد می‌کنند. حسگرهای غیرمستقیم سیگنال‌های اپتیکی را به یک انرژی واسط (برای مثال، گرمایی یا شیمیایی) تبدیل می‌کنند؛ که پس از آن به صورت الکتریکی اندازه‌گیری می‌شوند. تنوع وسیعی از حسگرهای مستقیم و غیرمستقیم وجود دارد که در این جا به معمول‌ترین آن‌ها اشاره می‌کنیم:

فوتودیودها[۳] : فوتودیود یک قطعه نیمرسانا است که برای اندازه‌گیری شدت نور بر اساس اثر نوررسانایی[۴] (افزایش رسانش نیمرسانا به واسطه تابش نور و جذب آن) کار می‌کند. تابش نور مریی یا نور نزدیک فروسرخ به یک پیوند p-n حامل‌های اضافی بار تولید می‌کند که باعث افزایش شار جریان می‌شود.

قطعات جفت‌شده بار (CCD[۵]) : یکی از معمول‌ترین آشکارسازهای نوری هستند که در دوربین‌های ویدیویی و درکاربردهای مصرفی متعدد استفاده می‌شوند. CCD از یک دروازه فلزی (الکترود) روی یک دی‌الکتریک و یک بستر نیمرسانا تشکیل شده است، که این ساختار تشکیل یک خازن نیمرسانا اکسید فلز (MOS)[۶] را می‌دهد، و بار الکتریکی از حامل‌های تولیدی توسط جذب نور به وجود می‌آید. CCD می‌تواند خطی باشد یا این که از آرایه‌ای از حسگرهای فلز- عایق- نیمرسانا تشکیل شده و طوری چیده شود که بتواند بار ایجاد شده توسط نور را در ریزدروازه ذخیره کرده و آن را با تغییر مناسب در ولتاژهای کنترل که به دروازه‌ها اعمال می‌شوند منتقل کند.

---

۱. Geiger- Muller
۲. Micro Electromechanical Systems
۳. Photodiodes
٤. Photoconduction Effect
٥. Charge- Coupled Devices
٦. Metal Oxide Semiconductor

حسگرهای گرماالکتریکی[۱]: مثالی از حسگرهای اپتیکی غیر مستقیم هستند و در اصل خازن‌هایی هستند که با تغییر در روشنایی یا دما، بار آن‌ها تغییر می‌کند. حسگرهای گرماالکتریکی با تبدیل نور فرودی به گرما و سپس اندازه‌گیری آن، کاربردهای وسیعی در مراقبت (دیده‌بانی)، درکاربردهای نظامی، و فروشگاه‌های با امنیت بالا (برای آشکارسازی حرکت انسان و غیره) پیدا کرده‌اند. ZnO معمول‌ترین ماده‌ای است که در زمینه حسگرهای گرماالکتریکی در MEMS استفاده می‌شود.

۱-۵-۵ حسگرهای گرمایی

حسگرهای ترمو- مکانیکی[۲] : حسگری (و بکاراندازی) ترمودینامیکی از این حقیقت بهره می‌گیرد که همه مواد یک ضریب انبساط گرمایی دارند. در نتیجه، اگر دو ماده متفاوت با یکدیگر ساندویچ شده و تحت تغییر دما قرار گیرند، در مجموعه ساندویچ شده، حرکت رخ خواهد داد. این در واقع پایه حسگری و بکار اندازی دو فلزی می‌باشد.

حسگرهای ترمومقاومتی[۳]: حسگرهای ترمومقاومت بر این اصل استوار است که مقاومت ویژه بسیاری از مواد با دما تغییر می‌کند و با رابطه

$$\rho = \rho_o(1 + aT + bT^2) \qquad (۲-۱)$$

داده می‌شود؛ که در آن ρ_o مقاومت ویژه ماده در دمای مرجع، T، a و b ثابت‌های مربوط به ماده‌ی مورد استفاده هستند. آهنگ تغییر مقاومت با دما ضریب دمایی مقاومت نام دارد. مواد معمولی و بویژه فلزات افزایش مقاومت را با دما نشان می‌دهند (برای مثال، تغییر مقاومت پلاتین با دما خطی است). مواد خاصی مانند کربن، برخی سرامیک‌ها و اکثر نیمرساناهای به کار رفته در ترمومقاومت‌ها یا «ترمیستورها[۴]» با افزایش دما کاهش مقاومت از خود نشان می‌دهند و مانند پلاتین خطی نیستند، اما اغلب ساخت آن‌ها آسان‌تر است و راحت‌تر با قطعات MEMS در مدارها مجتمع می‌شوند.

ترموکوپل‌ها[۵] : ترموکوپل‌ها معمول‌ترین مبدل‌های دما هستند؛ و شامل یک اتصال بین دو ماده مختلف می‌باشند که ولتاژ وابسته به دما را که از اتصال ناشی می‌شود، اندازه می‌گیرند. مواد نیمرسانا اغلب

۱. Pyroelectric Sensors
۲. Thermo- Mechanical Sensors
۳. Thermo Resistive Sensors
٤. Thermistors
٥. Thermocouples

اثر ترموالکتریکی بهتری نسبت به فلزات از خود نشان می‌دهند. ترموکوپل‌ها به طور گسترده در آرایه‌هایی به عنوان ترموپیل در حسگرهای MEMS استفاده می‌شوند.

۱-۵-۶ بیوحسگرها (حسگرهای زیستی[۱])

بیوحسگر عبارتی است برای طبقه حسگرهایی که از یک برهم کنش بیوشیمیایی برای تعیین یک ترکیب خاص استفاده می‌کنند. در حالت کلی بیوحسگر مبدلی است که با یک آنزیم ساکن ترکیب می‌شود تا ناظر هرگونه تغییر خاص در ریز محیط باشد. به طور نوعی آنزیم، آنتی‌بادی[۲]، پلی‌ساکارید[۳]، یا اسید نوکلییک[۴] برای برهم کنش با ماده مورد اندازه‌گیری استفاده می‌شوند. حسگر می‌تواند از انواع متفاوت باشد ولی به طور نوعی از ISFET[۵] استفاده می‌شود. نوک شاخص در یک فاز مایع فرو برده می‌شود و از این طریق با فرآیند، به صورت مستقیم یا از طریق یک غشاء در تماس است. این حسگرها فراگیر نشده‌اند زیرا اشکالات زیادی نظیر انجام واکنش اکسیداسیون با محصول، حساسیت افراطی، و نیاز به کالیبراسیون منظم (که برای «قطعات قابل کاشت» مناسب نیست) را دارند.

یکی از بهترین کاربردهای بیوحسگر، حسگر بر پایه گلوکز اکسیداز[۶] است که برای نمایش دادن سطح گلوکز در خون به کار می‌رود. این کاربرد برای بیماری دیابت و هم‌چنین فرآیند تخمیر مفید است.

۱-۵-۷ حسگرهای گازی

۱-۵-۷-۱ مقدمه

گازها کمیت مورد اندازه‌گیری کلیدی در بسیاری از زمینه‌های صنعتی و مصارف خانگی هستند. در دهه گذشته تقاضای ویژه‌ای برای آشکارسازی و کنترل گازها به خاطر آگاهی از لزوم حفاظت از محیط زیست ایجاد شد. حسگرهای گازی در زمینه‌های مختلفی کاربرد پیدا کرده‌اند [۱۰، ۱۱]. دو گروه مهم از این کاربردها عبارتند از: آشکارسازی گازها به صورت منفرد (مانند NO_X، NH_3، O_3، CO، CH_4، H_2، SO_X، و غیره) و تشخیص بوها [۱۲]، یا به طور کلی نظارت بر تغییرات محیطی. از حسگرهای گازی منفرد می‌توان به عنوان نمونه به آشکارسازهای آتش، آشکارسازهای نشتی، کنترل‌گرهای سوخت در ماشین‌ها و

۱. Biosensors
۲. Antibody
۳. Polysaccharide
٤. Nucleic Acid
٥. Ion Selective Field Effect Transistor.
٦. Glucose Oxidase

هواپیماها، وسایل هشدار دهنده وجود گازهای خطرناک بیش از حد مجاز در محیط کار اشاره کرد. آشکارسازی ترکیبات آلی فرار[۱] (VOCS) یا بوی ایجاد شده از غذاها یا محصولات خانگی نیز به طور روز افزون در صنایع غذایی و در کنترل کیفیت هوا در مصارف خانگی اهمیت پیدا کرده‌اند. سیستم‌های چند حسگری (که اغلب آن را "بینی الکترونیکی[۲]" می‌نامند) برای آنالیز مخلوط پیچیده‌ای از گازها استفاده می‌شود [۱۳، ۱۴]. در جدول (۱-۲) مثال‌هایی از این کاربردها آورده شده است.

دسته بندی‌های گوناگونی برای حسگرهای گازی ارائه شده است[۱۱، ۱۵-۱۷]. با توجه به میزان استفاده، حسگرهای گازی را بسته به نوع فناوری ساخت به کار رفته در آن‌ها به سه گروه عمده می‌توان تقسیم کرد: حسگرهای گازی حالت جامد[۳]، سیستم‌های طیف‌نگاری[۴] و حسگرهای گازی اپتیکی[۵] [۱۵].

جدول ۱-۲: مثال‌هایی از کاربردهای حسگرهای گازی [۱۸].

صنایع اتومبیل: کنترل تهویه ماشین، کنترل فیلتر، آشکارسازی بخار گازوئیل، تست الکل
ایمنی: آشکارسازی آتش، آشکارسازی گازهای سمی، قابل اشتعال، و قابل انفجار ، هشداردهنده‌های فردی
کنترل کیفیت هوا در مصارف خانگی: آلاینده‌های هوا، کنترل تهویه، کنترل پخت
کنترل محیطی: ایستگاه‌های هواشناسی، نظارت بر آلودگی
صنایع غذایی: کنترل کیفیت غذا، کنترل فرآیند، کنترل کیفیت بسته‌بندی
تولید صنعتی: کنترل تخمیر، کنترل فرآیند
پزشکی: آنالیز، تنفس، تشخیص بیماری

۱. Volatile Organic Compounds
۲. Electronic Nose
۳. Solid State Gas Sensors
٤. Spectroscopic Systems
٥. Optical Gas Sensors