دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده برق و کامپیوتر

بررسی وابستگی دمایی پاسخ گذرای حسگرهای نیمه‌هادی اکسید فلزی و کاربرد نتایج در تشخیص گاز

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق- الکترونیک

حسن قلی‌پور

استاد راهنما
دکتر وحید غفاری‌نیا

۱۳۹۲

دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده برق و کامپیوتر

بررسی وابستگی دمایی پاسخ گذرای حسگرهای نیمه‌هادی اکسید فلزی و کاربرد نتایج در تشخیص گاز

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق- الکترونیک

حسن قلی‌پور

استاد راهنما
دکتر وحید غفاری‌نیا

۱۳۹۲

دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده برق و کامپیوتر

پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی برق – الکترونیک آقای حسن قلی‌پور

تحت عنوان

بررسی وابستگی دمایی پاسخ گذرای حسگرهای نیمه‌هادی اکسید فلزی و کاربرد نتایج در تشخیص گاز

در تاریخ ۹۲/۱۲/۲۶ توسط کمیته‌ی تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱- استاد راهنمای پایان‌نامه	دکتر وحید غفاری‌نیا
۲- استاد داور	دکتر شهاب الدین رحمانیان
سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده	دکتر محمد علی خسروی‌فرد

در آغاز خدا را شکر می‌گزارم که همه هستی‌ام و تمام دارایی‌ام از لطف و رحمت اوست و با عنایت به عبارت زیبای "من لم یشکر المخلوق لم یشکر الخالق" بر خود لازم می‌دانم که از توجه، راهنمایی و تشویق پدر و مادر عزیزم، استاد راهنمای گرامی آقای دکتر وحید غفاری‌نیا و دوستانم مخصوصا آقای مجتبی امیری سپاسگزاری کنم.

کلیه‌ی حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این پایان‌نامه متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست مطالب ..... هفت

چکیده ۱

فصل اول: حسگرهای گاز اکسید فلزی

۱-۱- تعریف حسگر ۲

۱-۲- انواع حسگرها ۳

۱-۳- کاربرد حسگرها ۴

۱-۴- مشخصه‌های حسگری ۶

۱-۴-۱- درستی ۶

۱-۴-۲- خطا ۶

۱-۴-۳- تفکیک پذیری ۶

۱-۴-۴- حساسیت ۶

۱-۴-۵- انتخابگری ۷

۱-۴-۶- نویز ۷

۱-۴-۷- رانش ۷

۱-۴-۸- پهنه مرده ۷

۱-۴-۹- حد اشباع ۸

۱-۴-۱۰- محدوده حسگری ۸

۱-۴-۱۱- زمان پاسخ ۸

۱-۴-۱۲- تکرار پذیری ۹

۱-۴-۱۳- پسماند ۹

۱-۴-۱۴- قابلیت اطمینان ۹

۱-۴-۱۵- پاسخ گذرا ۱۰

۱-۵- حسگر گاز ۱۰

۱-۶- حسگر گاز اکسید فلزی ۱۱

۱-۶-۱- ساختار حسگر گاز اکسید فلزی ۱۲

۱-۶-۲- اکسیدهای فلزی به کار رفته در لایه حساس ۱۲

۱-۶-۳- ساز و کار حسگری ۱۳

۱-۶-۴- روش‌های ساخت حسگر گاز اکسید فلزی ۱۴

۱-۶-۵- عوامل خطا در پاسخ حسگرهای گاز اکسید فلزی ۱۶
۱-۶-۶- مدار اندازه‌گیری پاسخ حسگر مقاومتی ۱۷
فصل دوم: پاسخ گذرای حسگرهای گاز اکسید فلزی
۲-۱- مقدمه ۱۸
۲-۲- فرآیند آشکارسازی گاز ۱۹
۲-۳- پاسخ گذرای ناشی از تغییر دمای کاری ۲۸
۲-۴- پاسخ گذرای ناشی از تغییر تراکم گاز ۳۰
فصل سوم: کار آزمایشگاهی
۳-۱- طراحی و ساخت سامانه آزمایش ۳۲
۳-۲- طراحی آزمایش‌ها ۳۶
فصل چهارم: نتایج و بحث
۴-۱- تاثیر دمای کاری بر مقاومت پایه حسگرهای اکسید فلزی ۳۹
۴-۲- تاثیر دما بر حساسیت حسگرهای اکسید فلزی ۴۰
۴-۳- تاثیر دمای کاری بر پاسخ گذرای حسگرهای اکسید فلزی ۴۱
۴-۴- تاثیر تراکم بر حساسیت حسگر اکسید فلزی ۵۳
۴-۵- تفکیک‌پذیری کمی پاسخ‌های گذرا ۵۴
فصل پنجم: مدل‌سازی پاسخ پله حسگرهای آزمایش شده
۵-۱- مدل‌سازی پاسخ های گذرا ۵۶
فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات
۶-۱- نتیجه‌گیری ۶۲
۶-۲- پیشنهادات ۶۴
مراجع ۶۵

چکیده

حسگرهای گاز به دلیل کاربردهای فراوان و متنوع از مهمترین حسگرهای الکترونیکی هستند. از جمله این کاربردها می‌توان به پایش آلودگی‌های محیط، کنترل کیفیت مواد غذایی و محصولات کشاورزی، تشخیص آتش‌سوزی، تشخیص مواد منفجره و گازهای سمی، تنظیم سوخت خودرو و تشخیص بیماری اشاره نمود. در ساختار حسگر گاز یک لایه حساس به صورت فیزیکی یا شیمیایی با مولکول‌های گاز تعامل دارد که در نتیجه برخی از مشخصه‌های الکتریکی آن تغییر می‌کنند. با اندازه‌گیری تغییرات مشخصه‌های الکتریکی حسگر گاز می‌توان وجود یا عدم وجود گاز همچنین میزان تراکم آن را تشخیص داد. تقریبا اکثر اصول فیزیکی متاثر از مولکول‌های گاز برای ساخت حسگرهای گاز مورد استفاده قرار گرفته‌اند. حسگرهای نیمه‌هادی، پلیمری، نوری، خازنی و کریستالی از جمله پرکاربردترین حسگرهای گاز هستند. تحول اصلی در زمینه تشخیص گاز از اوایل دهه هفتاد با عرضه تجاری حسگرهای گاز نیمه‌هادی آغاز شد. این حسگرها معمولا بر اساس نیمه‌هادی‌های اکسید فلزی ساخته می‌شوند و هدایت لایه حساس آن‌ها در مواجهه با گاز تغییر می‌کند. حساسیت و پایداری بالا و قیمت ارزان از جمله دلایل محبوبیت این نوع از حسگرهای گاز هستند. مقاومت لایه حساس این حسگرها علاوه بر تراکم و نوع گاز موجود در محیط، به دمای کاری آن نیز وابسته است. در پژوهش انجام شده، تاثیر دمای لایه نیمه‌هادی حساس به گاز بر شکل و سرعت پاسخ گذرای حسگر مورد بررسی قرار گرفته است. برای این کار سامانه‌ای طراحی شده است که قابلیت اعمال آنی گاز به حسگر را فراهم می‌کند. با استفاده از این سامانه پاسخ گذرای چند حسگر گاز اکسید فلزی مختلف در محدوده مشخصی از دمای کاری اندازه‌گیری و ثبت شده است. گازهای مورد آزمایش، بخار چهار ایزومر بوتانول هستند که از نظر فرمول و خواص شیمیایی شباهت بسیاری به یکدیگر دارند. نتایج آزمایش نشان داد که پاسخ‌های گذرا به میزان قابل توجهی از دمای کاری حسگر تاثیر می‌پذیرند به طوری که در دمای کاری منطبق با ولتاژ ریزگرمکن 5 V پاسخ به چهار ایزومر یکسان و در دمای کاری منطبق با ولتاژ ریزگرمکن 3 V کاملا متمایز هستند. همچنین منحنی‌های حساسیت حسگرها بر حسب دمای کاری نشان می‌دهد که با افزایش دمای کاری حساسیت حسگرها ابتدا افزایش سپس کاهش می‌یابد. دمایی که در آن بیشینه حساسیت روی می‌دهد برای حسگرهای مختلف متفاوت است. همچنین دمای بیشینه حساسیت برای یک حسگر در معرض گازهای مختلف فرق می‌کند. حتی تغییر تراکم گاز هدف نیز موجب تغییر این دما می‌گردد. این وابستگی دمایی با استفاده از معادلات نفوذ-واکنش مولکول‌های گاز و تاثیر آن بر مقاومت مرزدانه‌ها مدل‌سازی شد. نتایج مدل‌سازی به صورت موفقیت آمیز نحوه تغییرات پاسخ‌های گذرای حاصل از آزمایش را توجیه نمود.

کلمات کلیدی: حسگر گاز اکسید فلزی، پاسخ گذرا، معادله نفوذ-واکنش، وابستگی دمایی.

فصل اول
حسگرهای گاز اکسید فلزی

۱-۱ تعریف حسگر

حسگر[۱] قطعه‌ای است که محرک[۲] را دریافت کرده، با تولید یک سیگنال الکتریکی به آن پاسخ می‌دهد. محرک، ویژگی یا شرایطی است که حس شده به سیگنال الکتریکی تبدیل می‌شود. منظور از لفظ الکتریکی سیگنالی است که می‌تواند توسط قطعات الکترونیکی تقویت و اصلاح شود. سیگنال‌های پاسخ می‌توانند به صورت تغییرات جریان، ولتاژ یا بار باشند [۱]. تعاریف دیگری نیز از حسگرها ارائه شده است. برای مثال حسگر قطعه‌ای است که یک پدیده فیزیکی را به یک سیگنال الکتریکی تبدیل می‌کند. حسگرها به عنوان واسطی بین دنیای فیزیکی و دنیای قطعات الکترونیکی عمل می‌کنند [۲]. در برخی توصیف‌ها حسگر قطعه‌ای است که به بعضی محرک‌ها (با تولید یک خروجی) پاسخ می‌دهد. با قرار گرفتن در معرض یک ماده خاص یا تغییر در شرایط پیرامونی، یک یا چند ویژگی آن مانند جرم، رسانایی الکتریکی و ظرفیت خازنی مستقیم یا غیرمستقیم بصورت قابل اندازه‌گیری تغییر می‌کنند [۳]. حسگرها سیگنال محرک را از حوزه‌های مختلف مکانیکی، نوری، گرمایی، مغناطیسی و شیمیایی به حوزه الکتریکی تبدیل می‌کنند. حسگر کیسه هوا نمونه‌ای از حسگرهای حوزه مکانیکی است. از دسته حسگرهای نوری می‌توان به حسگر تصویر اشاره نمود. در این حسگر شدت نور پیکسل‌های مختلف تصویر به سیگنال الکتریکی تبدیل می‌شود. حسگر دما تغییرات دمایی را به سیگنال الکتریکی تبدیل می‌کند. حسگر هال، تبدیل کننده شدت میدان مغناطیسی به

---

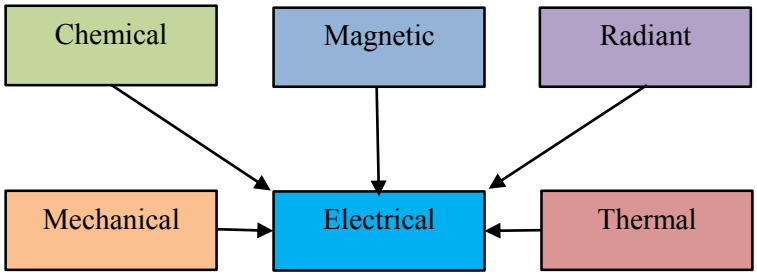
[۱] Sensor

[۲] Stimulus

سیگنال الکتریکی، نمونه‌ای از حسگر حوزه مغناطیسی است. حسگرهای شیمیایی و زیستی می‌توانند سیگنال‌های این حوزه را به سیگنال الکتریکی تبدیل کنند. حسگرهای PH و DNA نمونه‌ای از حسگرهای زیستی هستند. حسگرهای الکتریکی نیز وجود دارند که در آن‌ها یک سیگنال الکتریکی به سیگنال الکتریکی دیگری تبدیل می‌شود [۴]. شکل ۱-۱ شش حوزه پرکاربرد کمیت‌های قابل اندازه‌گیری را نشان می‌دهد. با ملاحظه تعاریف فوق می‌توان حسگر را قطعه‌ای نامید که تغییر در شرایط پیرامونی آن مانند دما، نور، فشار و حضور گاز منجر به تغییر در برخی مشخصه‌های الکتریکی آن مانند رسانایی الکتریکی، ولتاژ خروجی یا ظرفیت خازنی می‌شود.

۱-۲ انواع حسگرها

نگرش‌های مختلفی برای دسته‌بندی حسگرها ارائه شده که با توجه به هدف تقسیم‌بندی در آن‌ها از معیارهای مختلفی استفاده شده است. برای مثال در یک دسته‌بندی حسگرها به دو نوع ساده و پیچیده تقسیم می‌شوند. حسگر ساده یک محرک را به یک سیگنال الکتریکی تبدیل می‌کند یا یک سیگنال الکتریکی را با استفاده از یک اثر فیزیکی مناسب، تغییر می‌دهد. در حالی‌که یک حسگر پیچیده، علاوه بر قسمت حساس به یک یا چند جزء داخلی دیگر مانند مبدل‌های انرژی نیاز دارد تا بتواند در پاسخ به محرک، سیگنال الکتریکی مناسبی را تولید کند. در یک تقسیم‌بندی دیگر، دو نوع حسگر فعال[۱] و غیرفعال[۲] تعریف می‌شود. حسگرهای غیرفعال به منبع انرژی نیاز ندارند. این حسگرها در پاسخ به محرک خارجی به طور مستقیم سیگنال الکتریکی تولید می‌کنند. یعنی انرژی محرک ورودی توسط حسگر به سیگنال خروجی تبدیل می‌شود. ترموکوپل[۳]، دیود نوری[۴] و حسگر پیزوالکتریک[۵] نمونه‌هایی از حسگرهای غیرفعال هستند. در مقابل، حسگرهای فعال به یک منبع انرژی خارجی برای عملکردشان نیاز دارند. این منبع خارجی نقش سیگنال تحریک را ایفا می‌کند. سیگنال تحریک توسط حسگر تغییر داده شده به سیگنال خروجی تبدیل می‌شود. مقاومت حرارتی[۶] به عنوان یک حسگر فعال هیچ‌گونه سیگنالی تولید نمی‌کند اما با برقراری یک جریان بایاس و اندازه‌گیری ولتاژ دو سر مقاومت می‌توان اثر دما بر روی مقاومت حرارتی را مشاهده کرد.



شکل ۱-۱ دسته‌بندی حسگرها بر اساس ماهیت محرک [۴].

---

[۱] Active
[۲] Passive
[۳] Thermocouple
[۴] Photodiode
[۵] Piezoelectric
[۶] Thermistor

جدول۱-۱ دسته‌بندی حسگرها بر اساس نحوه تشخیص، مواد حسگری، اصول تبدیل و مشخصه‌های حسگری [۱].

معیارهای دسته‌بندی			
مشخصه‌های حسگری	اصول تبدیل	مواد حسگری	نحوه تشخیص
Sensitivity	Physical Thermoelectric Photoelectric Photomagnetic	Conductor	Biological
Accuracy		Semiconductor	Chemical
Speed of response		Biological substance	Electric, Magnetic, or electromagnetic wave
Hysteresis	Chemical Chemical transformation Physical transformation Electrochemical process	Insulator	Heat, Temperature
Operating life		Liquid, gas, or plasma	Mechanical displacement or wave
Cost, size, weight		Other	Radioactivity, Radiation
Resolution	Biological Biochemical transformation Effect on test organism Spectroscopy		Other
Selectivity			
Linearity			
Dead band	Other		
Other			

روش‌های دیگری نیز برای تقسیم‌بندی وجود دارد که در آن‌ها حسگرها بر حسب کاربرد، نوع محرک‌ها، مشخصه خروجی و ساختار دسته‌بندی می‌شوند. جدول ۱-۱ دسته‌بندی حسگرها بر اساس نحوه تشخیص[۱]، مواد حسگری[۲]، اصول تبدیل[۳] و مشخصه‌های[۴] حسگری را نشان می‌دهد [۱].

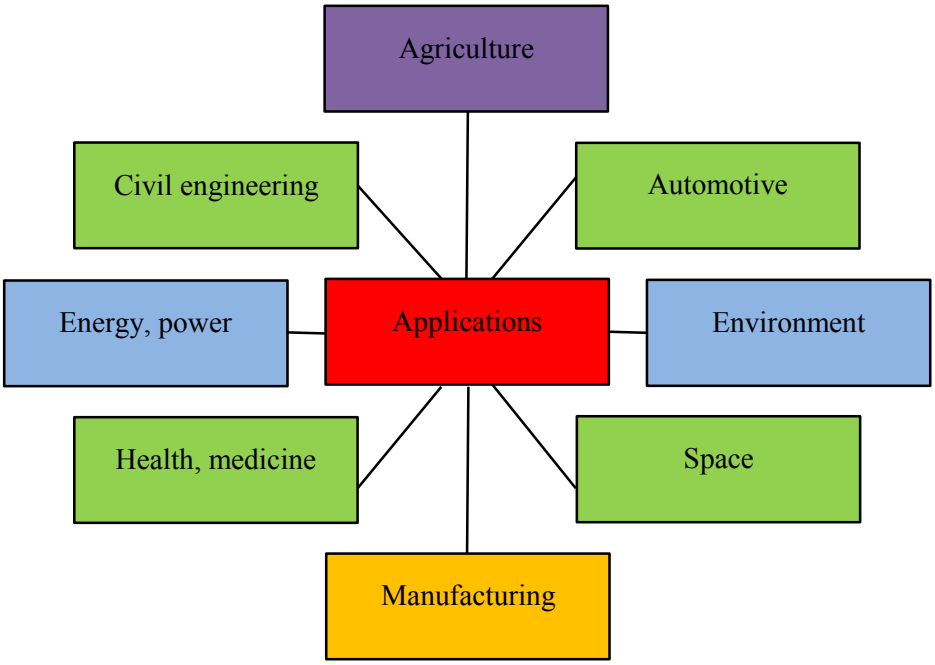
۱-۳ کاربرد حسگرها

در سال‌های اخیر کاربرد حسگرها رشد قابل توجه‌ای داشته است. فناوری‌های مرتبط با حسگرها نیز برای رفع نیازهای حوزه‌های مختلف از جمله فیزیکی، شیمیایی و تشخیص زیستی توسعه یافته است. امروزه حسگرها در کاربردهای بسیار متنوعی از جمله نمایشگرهای محیطی[۵]، تشخیص‌دهنده‌های پزشکی[۶]، صنعت خودرو، صنایع تولیدی[۷]، امور دفاعی[۸]، امنیتی[۹] مورد استفاده قرار می‌گیرند. حسگرها به وفور در محیط پیرامون ما یافت می‌شوند.

---

۱ Detection means
۲ Sensor material
3 Conversion phenomena
۴ Specifications
۵ Environmental monitoring
۶ Medical diagnostics
۷ Industrial manufacturing
۸ Defense
۹ Security

آن‌ها در وسایل الکتریکی مانند یخچال‌های برقی، کنترل‌کننده‌های آب و هوا، آشکارکننده‌های آتش و دود[۱] وجود دارند. حسگرها در اسباب بازی‌های دارای قابلیت عملکرد متقابل نیز یافت می‌شوند. وارد شدن به ساختمان به وسیله درب بازکن‌های اتوماتیک، نمایشگرهای روغن، دما و سوخت در خودرو، همگی نمونه‌هایی از کاربرد حسگرهاست. حسگرهای مورد استفاده در وسایل گازسوز روشن و خاموش بودن پیلت را تشخیص می‌دهند. در صورت خاموش بودن وسایل گازسوز با قطع جریان گاز مانع از انتشار گاز در محیط می‌گردند. کنترل‌کردن فرآیندهای صنعتی یکی دیگر از کاربردهای مهم حسگرهاست. در این‌جا استفاده از حسگرها جهت نمایش دائمی خط تولید، بیشینه بودن کارایی و کمینه بودن هزینه‌ها را امکان‌پذیر می‌سازد. قلمرو فناوری حسگرها وسیع بوده و تنوع بسیاری در تحقیقات حسگری وجود دارد. در چهار دهه گذشته تحقیقات حسگری رشد نمایی داشته است. این رشد تا حد زیادی به دلیل گرایش بیشتر به خودکارسازی[۲] فرآیندها، کاربردهای پزشکی و کاربری زیاد در میکروالکترونیک است. همزمان با این توسعه، قابلیت حسگرها نیز به طور چشمگیری بهبود یافته و قیمت آن‌ها کاهش داشته است. به طور کلی حسگرها امروزه نقش مهمی در زندگی روزمره ما دارند. در شکل ۱-۲ تعدادی از زمینه‌های کاربردی حسگرها نمایش داده شده است [۳].



شکل ۱-۲ انواع حسگرها براساس کاربرد [۱].

[۱] Smoke and fire detectors

[۲] Automation

۱-٤ مشخصه‌های حسگری

مشـخصـه‌های حسـگری پارامترهایی هسـتند که برای ارزیابی عملکرد حسـگرها مورد اسـتفاده قرار می‌گیرند و براسـاس آن‌ها می‌توان حسگرهای مختلف را با یکدیگر مقایسه نمود. در کاربردها نیز معمولا حدود و شرایط سنجش کمیت مشـخص اسـت و با توجه به آن باید حسگری که مشخصه‌های مناسب داشته باشد انتخاب شود. این مشخصه‌ها به عوامل زیادی از جمله سـاختار و اصـول کارکرد حسـگر بسـتگی داشـته تاثیر مسـتقیمی بر قیمت حسـگر دارند. مشـخصـه‌های حسگری را می‌توان به دو دسته ایستا و پویا تقسیم کرد. مشخصه‌های پویا ویژگی‌های گذرای حسگر را شـرح می‌دهند. در حالی‌که مشـخصـه‌های ایسـتا بعد از تثبیت اثرات گذرا اندازه‌گیری می‌شـوند. در ادامه به مهمترین مشخصه‌های حسگر اشاره شده است [۳].

۱-٤-۱ درستی

مشـخصـه درسـتی[۱] تعیین‌کننده صـحت حسـگر در بیان مقدار صـحیح اسـت. به منظور تعیین درسـتی حسـگر باید خروجی آن با یک سـامانه اندازه‌گیری درسـت مقایسه شود. یک حسگر مکان که باید به طور ایده‌آل 1 mV به ازای 1 mm جابجایی تولید کند با تولید 10.5 mV به ازای 10 mm جابجایی 0.5 mV نادرستی در تبدیل دارد [۱-۳].

۱-٤-۲ خطا

بین مقدار درسـت کمیت اندازه‌گیری شـده و مقدار واقعی بدسـت آمده از حسـگر تفاوت وجود دارد. به عنوان مثال، اگر حجم اکسـیژن در اتاقی دقیقا % 21 است و حسگر گاز به ما مقدار % 21.05 را نشان بدهد % 0.05 خطا وجود دارد [۳]. با کالیبراسیون درست و به موقع می‌توان مقدار خطا را تا حد زیادی کاهش داد.

۱-٤-۳ تفکیک‌پذیری

تفکیک‌پذیری[۲] یک حسـگر بیانگر کمینه تغییر قابل تشـخیص کمیت مورد اندازه‌گیری اسـت. یکی از روش‌های ارزیابی تفکیک‌پذیری مقدار نسبت سیگنال به نویز حسگر است [۱-۳].

۱-٤-٤ حساسیت

حسـاسـیت[۳] بیانگر نسبت تغییر در خروجی حسگر به تغییر در کمیت مورد اندازه‌گیری است. برای مثال، اگر ولتاژ خروجی یک حسـگر گاز، به ازای 1000 ppm[٤] افزایش در تراکم اکسیژن، یک ولت افزایش یابد حساسیت حسگر 1 mV/ppm است [۲و۳].

---

[۱] Accuracy
[۲] Resolution
[۳] Sensitivity
[٤] Parts per million (PPM)

۱-٤-۵ انتخابگری

توانایی حسگر برای اندازه‌گیری تنها یک ترکیب در حضور دیگر ترکیبات به عنوان انتخابگری[۱] شناخته می‌شود. برای مثال یک حسگر اکسیژن که پاسخی به گازهای دیگر مانند NO_2، CO_2 و CO نشان نمی‌دهد به عنوان یک حسگر انتخابگر شناخته می‌شود [۳]. در اکثر کاربردها انتخابگری بالا مطلوب است و در معدود کاربردهایی حسگر غیر انتخابگر مورد نیاز است.

۱-٤-٦ نویز

به نوسانات تصادفی سیگنال خروجی در صورت عدم تغییر کمیت مورد اندازه‌گیری، نویز گفته می‌شود. لرزش‌های مکانیکی، سیگنال‌های الکترومغناطیسی مانند موج‌های رادیویی، نوسان منابع تغذیه و تغییر دمای محیطی نمونه‌هایی از عوامل خارجی تولید نویز هستند. نویزهای داخلی بکلی متفاوتند و مواردی مانند نویز الکترونیکی[۲]، نویز تزریقی[۳] و نویز تولید-بازترکیب[٤] را شامل می‌شوند. نویزهای الکترونیکی از نوسانات تصادفی در جریان یا ولتاژ ناشی می‌شود. حرکت تصادفی حامل‌های بار ناشی از انرژی گرمایی، عامل ایجاد کننده نوسانات تصادفی است. این نویز اجتناب‌ناپذیر در همه‌ی مدارهای الکترونیکی وجود دارد. نویز تزریقی در اثر تصادفی بودن زمان ورود حامل‌ها بوجود می‌آید. نویز تولید-بازترکیب از تولید و بازترکیب الکترون‌ها و حفره‌ها در نیمه‌هادی ایجاد می‌گردد [۳].

۱-٤-۷ رانش

منظور از رانش[۵] تغییر تدریجی و معمولا غیر قابل پیش‌بینی در پاسخ حسگر است که باعث می‌شود پاسخ حسگر به ترکیب ثابتی از ورودی متفاوت باشد. این تغییر نامطلوب و غیر منتظره ربطی به ورودی ندارد. رانش می‌تواند در اثر کهنگی، آلودگی و فرسودگی مواد ایجاد شود. به عنوان نمونه در یک حسگر گاز، نفوذ تدریجی فلز الکترود در زیر پایه می‌تواند مقدار مقاومت پایه حسگر را تغییر دهد [۳].

۱-٤-۸ پهنه مرده

پهنه مرده[٦]، عدم حساسیت حسگر به محدوده‌ای از محرک ورودی است. خروجی حسگر در این محدوده نزدیک به یک مقدار معین باقی می‌ماند [۱].

---

[۱] Selectivity
[۲] Electronic noise
[۳] Shot noise
[٤] Generation-Recombination noise
[۵] Drift
[٦] Dead band

۱-٤-۹ حد اشباع

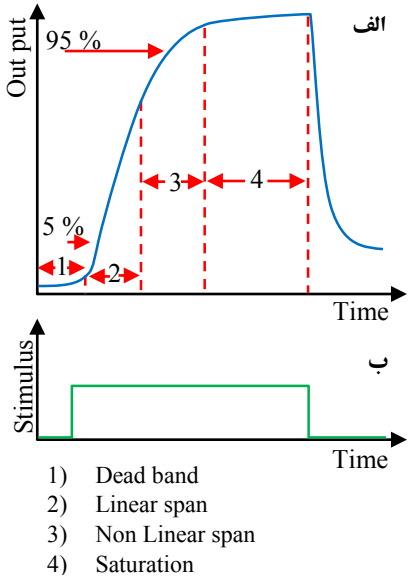
هر حسگر محدوده‌ای دارد که در آن حسگر به محرک ورودی به خوبی پاسخ می‌دهد. معمولا پاسخ حسگر به صورت خطی با کمیت ورودی تغییر می‌کند. قدری افزایش در محرک ورودی به‌گونه‌ای که خارج از محدوده عملکرد قرار گیرد به خروجی نامطلوبی منجر می‌شود. شکل ۱-۳ تابع انتقال را با در نظر گرفتن ناحیه اشباع[۱] نشان می‌دهد [۱و۲].

۱-٤-۱۰ محدوده حسگری

محدوده‌ای از کمیت مورد اندازه‌گیری، که به یک خروجی معنادار و قابل اندازه‌گیری برای حسگر منجر خواهد شد محدوده حسگری[۲] نامیده می‌شود. خارج از این محدوده حسگر پاسخی به تغییرات کمیت ورودی نشان نمی‌دهد و ممکن است حسگر دچار آسیب‌دیدگی برگشت‌ناپذیر شود [۲].

۱-٤-۱۱ زمان پاسخ

مدت زمانی که طول می‌کشد تا پاسخ حسگر به یک سطح تقریبا ثابت برسد، زمان پاسخ[۳] نامیده می شود. همانطور که در شکل ۱-۳ نمایش داده شده است معمولا مدت زمان تغییر از 5 % سطح نهایی سیگنال تا 95 % سطح نهایی به عنوان زمان پاسخ در نظر گرفته می‌شود [۳]. به طور مشابه می‌توان زمان بازگشت[٤] را تعریف نمود.



شکل ۱-۳ الف) تابع انتقال. ب) منحنی اعمال محرک به حسگر.

---

[۱] Saturation
[۲] Dynamic range
[۳] Response time
[٤] Recovery time

۱-٤-۱۲ تکرارپذیری

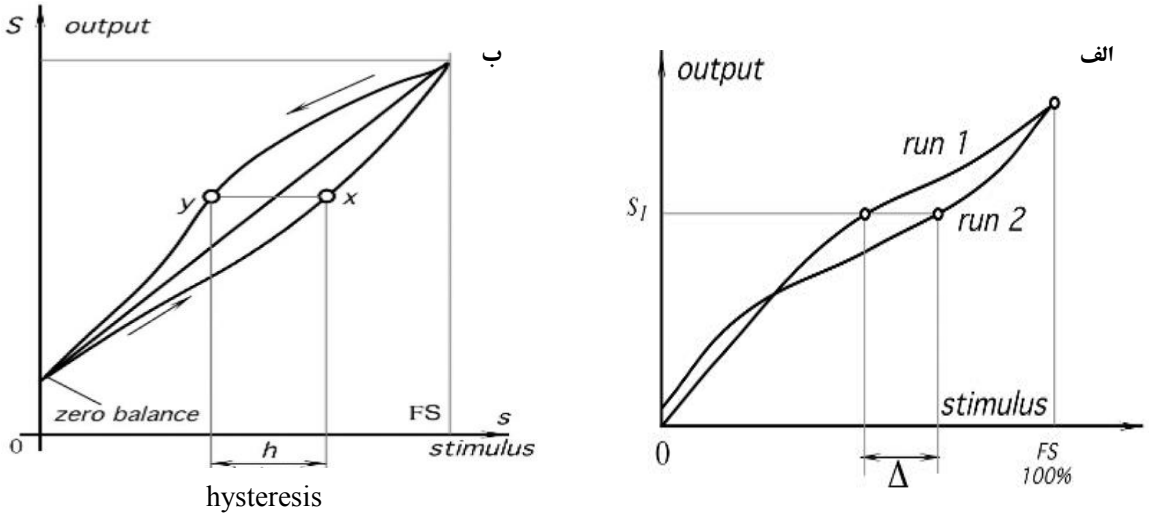
تکرارپذیری[۱] توانایی حسگر در تولید پاسخ‌های یکسان، در اندازه‌گیری‌های متوالی، به ازای ورودی یکسان و تحت شرایط محیطی و عملیاتی ثابت می‌باشد. شکل ۱-۴ خطای تکرار پذیری را نشان می‌دهد [۱و۳]. عدم تکرارپذیری باعث ابهام در تعریف یک منحنی کالیبراسیون مشخص می‌شود.

۱-٤-۱۳ پسماند

خطای پسماند[۲]، انحراف از خروجی حسگر در پاسخ به مقدار مشخصی از محرک بوده، هنگامی‌که از جهات مختلف به آن نزدیک می‌شویم. اثر پسماند برای یک حسگر نوعی در شکل ۱-۴ نمایش داده شده است. برای مثال ولتاژ تولیدی یک حسگر جابجایی، در حرکت از چپ به راست با ولتاژ تولیدی در حرکت از راست به چپ (با جابجایی یکسان)، تفاوت می‌کند. از جمله عوامل رایج در تولید پسماند، حافظه‌دار بودن حسگر، تغییرات ساختاری و اصطکاک در مواد هستند [۱و۲].

۱-٤-۱٤ قابلیت اطمینان

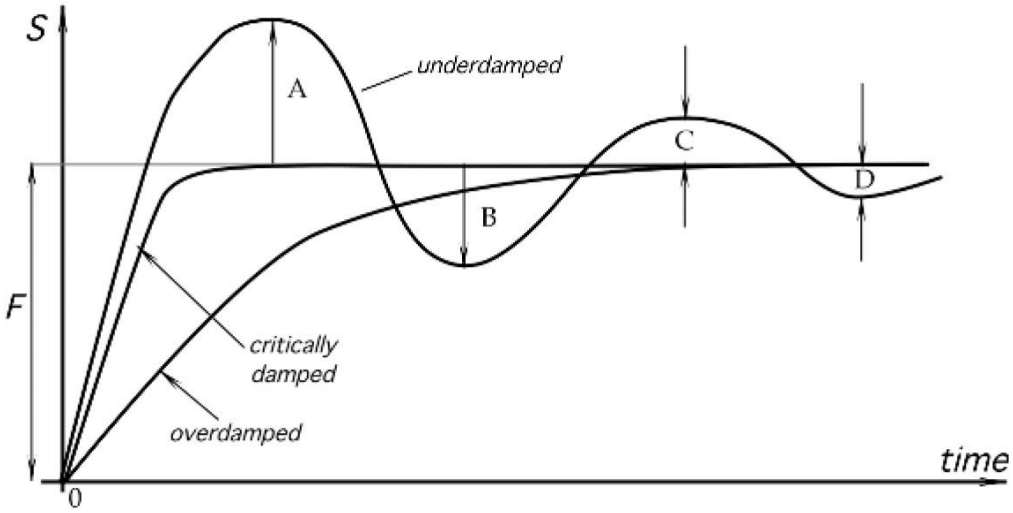
توانایی حسگر در ارائه عملکرد صحیح در یک شرایط مشخص و یک دوره زمانی معین را قابلیت اطمینان[۳] گویند. قابلیت اطمینان متناسب با عکس احتمال خرابی قطعه در یک بازه زمانی است. به عبارت دیگر احتمال اینکه یک قطعه بدون خرابی برای یک بازه زمانی مشخص یا تعداد دفعات معین، کار خواهد کرد [۱].



شکل۱-۴ الف) خطای تکرار پذیری دو اندازه‌گیری متوالی در شرایط ثابت. در پاسخ به دو مقدار متفاوت از محرک ورودی پاسخ یکسان S_1 تولید شده است [۱]. ب) تابع انتقال با پسماند [۱].

---

[۱] Repeatability
[۲] Hysteresis
[۳] Reliability



شکل۱-۵ پاسخ گذرای حسگر با مشخصه‌های میرایی متفاوت [۱].

۱-٤-۱۵ پاسخ گذرا

شکل تغییرات پاسخ حسگر بر حسب زمان، پاسخ گذار[۱] نامیده می‌شود. به عبارت دیگر پاسخ گذرا نشان‌دهنده تغییرات خروجی حسگر در پاسخ به محرک بوده که طی آن خروجی از مقدار پایه (مانند مقدار مقاومت حسگر گاز در معرض هوا) به یک درصد معینی از مقدار نهایی پاسخ می‌رسد. شکل۱-۵ پاسخ گذرای حسگر را برای مشخصه‌های میرایی متفاوت نشان می‌دهد.

۱-۵ حسگر گاز

انواع زیادی از گازها محیط پیرامون ما را فرا گرفته‌اند. بینی انسان به عنوان یک ابزار حسگری بسیار پیشرفته می‌تواند تفاوت بین صدها بو را تشخیص دهد. لیکن توانایی تشخیص تفاوت قطعی بین تراکم‌ها و یا حضور گازهای بدون بو را ندارد [۵]. طی سال‌های گذشته، تعداد گونه‌های گازی که باید تشخیص داده شوند به طور چشمگیری افزایش یافته است. وجود گازهای سمی و خطرناک مورد استفاده در فرآیندهای صنعتی، آلوده‌کننده‌های هوایی مانند NO_x، SO_x و CO_2 همگی بیانگر ضرورت تقاضای حسگرهای گاز هستند. حسگرهای گاز دو کار اساسی را انجام می‌دهند. در گام اول گاز مورد نظر را تشخیص داده، در گام بعدی تشخیص گاز را به یک سیگنال حسگری تبدیل می‌کنند [۶]. در حقیقت حسگر گاز قطعه‌ای است که در مواجهه با مولکول‌های گاز برخی خواص آن تغییر می‌کند. این تغییر مستقیم یا غیرمستقیم منجر به تولید یا تغییر سیگنال الکتریکی قابل اندازه‌گیری می‌گردد. برای کنترل فرآیند و تجزیه و تحلیل آزمایشگاهی دقیق، تحلیل‌کننده‌های گازی گران و حجیم مورد نیاز است ولی برای سایر اهداف این مقدار هزینه و فضا لزومی ندارد. از این‌رو تلاش زیادی برای طراحی حسگرهای گاز ارزان و کوچک صورت گرفته، به طوری که حساسیت، انتخابگری و پایداری بالایی داشته باشند. حاصل تحقیقات فراوان در زمینه تشخیص بو توسعه

[۱] Transient response

انواع گوناگونی از حسگرها مانند حسگرهای نیمه‌هادی، نوری، رسانایی گرمایی[۱] (حرارتی)، کاتالیزوری[۲]، دی‌الکتریک[۳]، الکتروشیمیایی[۴] و الکترولیت[۵] بوده است. این حسگرها دارای اصول حسگری متفاوتی هستند [۵]. امروزه حسگرهای گاز در بسیاری از حوزه‌ها یافت می‌شوند. به عنوان نمونه می‌توان به نمایشگرهای محیطی، ایمنی خانه‌ها، تهویه مطبوع در هواپیما و فضاپیما، صنایع خودرو و شبکه های حسگری اشاره نمود [۷].

۱-۶ حسگر گاز اکسید فلزی

حسگرهای گاز اکسید فلزی مشهورترین و پرکاربردترین حسگرهای گاز نیمه‌هادی هستند. به دلیل این‌که آن‌ها در مقایسه با سایر فناوری‌های حسگری ارزان، مقاوم، کم وزن، بادوام، دارای زمان پاسخ کوتاه، قابلیت اطمینان خوب و حساسیت بالا می‌باشند [۸-۱۱]. حسگرهای اکسید فلزی به تعداد زیادی از گازها مانند بوتان، پروپان، مونوکسیدکربن و الکل‌ها پاسخ می‌دهند. این پاسخ با تغییر تراکم گاز هدف و دمای کاری حسگر تغییر می‌کند [۱۲و۱۳]. لایه حساس[۶] این حسگرها معمولا از جنس نیمه‌هادی‌های اکسید فلزی مانند اکسید قلع و اکسید روی است [۱۴و۱۵]. مقاومت لایه حسگری در معرض گاز هدف به شدت کاهش می‌یابد. ازاینرو آن‌ها را حسگرهای مقاومتی می‌نامند [۱۶]. حسگرهای اکسید فلزی معمولا در محدوده دمایی 200-400 °C کار می‌کنند. ایده استفاده از نیمه‌هادی‌ها به عنوان قطعات حسگری گاز به سال ۱۹۵۲ میلادی بر می‌گردد. زمانی‌که Brattain و Bardeen برای اولین بار اثر گاز بر روی ژرمانیوم را گزارش کردند. بعدها Seiyama اثر گاز بر روی اکسید فلز را بیان نمود. سرانجام Taguchi حسگرهای نیمه‌هادی اکسید فلزی را به تولید صنعتی رسانید. حسگرهای تاگوچی هنوز هم از پرفروش‌ترین حسگرهای تجاری هستند [۵]. امروزه شرکت‌های متعددی مانند FIS، MICS، UST و City Tech انواع حسگرها را عرضه می‌کنند [۱۵]. شکل۱-۶ تصویر چند حسگر تجاری گاز اکسید فلزی را نشان می‌دهد.

شکل۱-۶ تصویر چند حسگر گاز اکسید فلزی تجاری به ترتیب از راست: MQ 811 ساخت Hanwey، TGS 813 ساخت Figaro و TGS 2611 ساخت Figaro.

---

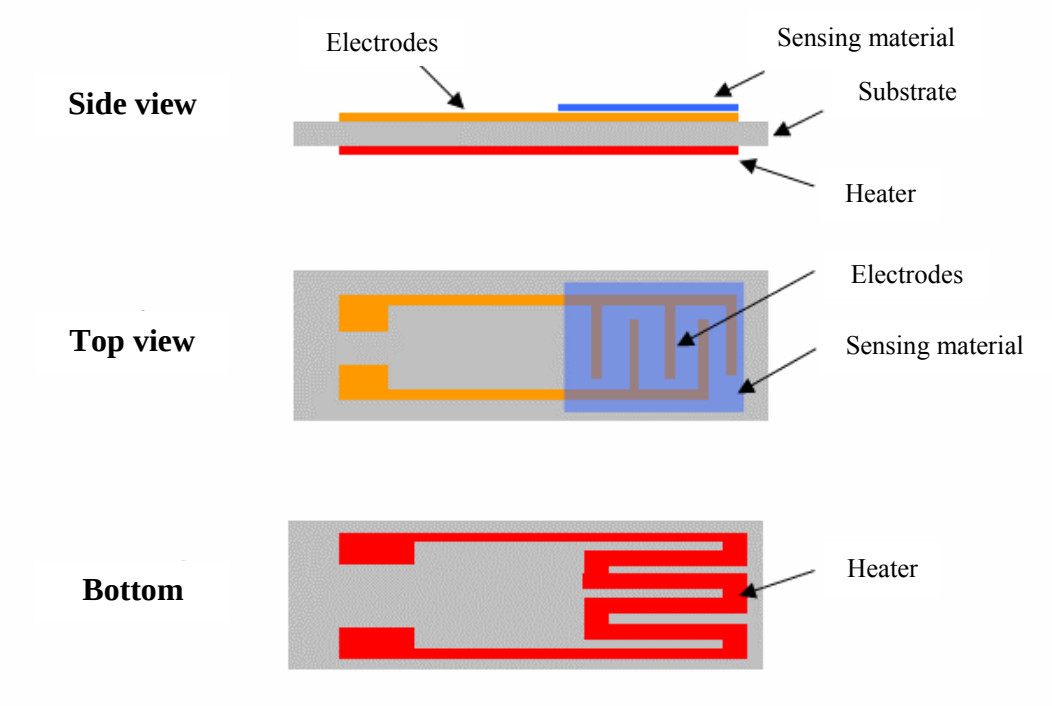
[۱] Thermal conductivity
[۲] Catalytic
[۳] Dielectric
[۴] Electrochemical
[۵] Electrolyte
[۶] Sensing layer

۱-٦-۱ ساختار حسگر گاز اکسید فلزی

همانطور که در شکل ۱-۷ نشان داده شده، حسگر گاز اکسید فلزی معمولا از یک لایه حساس به گاز، زیرپایه[۱]، ریزگرمکن[۲] و دو الکترود[۳] تشکیل می‌شود [۱۵]. لایه حسگری از جنس نیمه‌هادی پلی‌کریستال متخلخل[۴] است. مقاومت این لایه با قرار گرفتن در معرض گاز مورد نظر تغییر می‌کند. زیرپایه به گونه‌ای انتخاب می‌شود که هیچ نقشی در ساز و کار حسگری نداشته باشد [۱۸]. ریزگرمکن دمای مطلوب را برای آشکارسازی گاز فراهم می‌کند.

۱-٦-۲ اکسیدهای فلزی بکار رفته در لایه حساس

در انتخاب مواد حسگری باید به نکاتی مانند پایداری، مشخصه‌های ظاهری و الکترونیکی توجه نمود. پارامترهای جذب و عدم جذب، شکاف باند، نوع رسانایی، پایداری ترمودینامیکی، فعالیت شیمیایی و حساسیت به رطوبت هوای محیطی، همگی از جمله عوامل تاثیرگذار در انتخاب اکسیدهای فلزی لایه حساس هستند [۱۹]. طبق پژوهش‌های انجام شده اکسیدهای فلزی متعددی مانند Cr_2O_3، GeO_2، Fe_2O_3، V_2O_3، TiO_2، WO_3، In_2O_3، SrO، CuO، NiO، Co_3O_4، Mn_2O_3، La_2O_3، Ta_2O_5، MoO_3، Nb_2O_5، Nd_2O_3 و CeO_2 برای تشخیص گازهای اکسیدکننده و کاهنده مناسب هستند [۱۸].



شکل ۱-۷ اجزا و ساختار حسگر گاز اکسید فلزی [۱۷].

---

[۱] Substrate
[۲] Micro heater
[۳] Electrode
[۴] Porous