

## سنسورهای شیمیایی

سنسورهای شیمیایی غلظت ذرات مخصوص (اتم ها، مولکول ها یا یون ها. را در گازها یا مایعات) را با استفاده از علامت الکتریکی ثبت می کنند. در مواردیکه با تشخیص مواد بیولوژیکی ویژه سر و کار دارند، وسایل به کار برده شده به عنوان سنسورهای بیولوژیکی شناخته می شوند. اینها اغلب یک طبقه ی جداگانه از سنسور شیمیایی تلقی می شوند. سنسورهای شیمیایی خیلی متفاوت از سنسورهای فیزیکی هستند، در وهله ی اول، تعداد گونه های شیمیایی که روی سنسور عمل می کنند معمولاً خیلی بالا هستند. یادآوری می شود که تقریباً 100 اندازه گیری فیزیکی می تواند با استفاده از سنسورهای فیزیکی ثبت شود. در مورد سنسورهای شیمیایی، این تعداد از یطر اهمیت چندین مرتبه بزرگتر است. یک مثال از این تعداد ترکیباتی است که برای آزمایش ها در آزمایشگاه های پزشکی انجام می شود. ثانیاً، باید سنسور شیمیایی وسیله ای را که اندازه گیری می کند «باز» باشد و نمی تواند مثل مورد سنسورهای حرارتی بسته باشد. این بدان معنی است که آن در معرض عوامل نامطلوب از قبیل نور یا خوردگی قرار دارد.

تشخیص ذرات ویژه همانطور که در بالا شرح داده شد در بیشتر موارد مسئله ی اصلی نیست. چون این کاری است که می تواند با استفاده از روش های شیمی تجزیه ای، به عنوان مثال، با کمک طیف سنج های جرمی، کروماتوگراف های گازی، یا روش های نوری یا مغناطیسی، انجام شود. در مقایسه با این روش ها، که معمولاً نیاز به وسایل گرانبه و کار ناپوسته دارد، نیاز مبرم به سنسورهای شیمیایی وجود دارد با خواصی از قبیل:

✓ ساختمان کوچک، نیرومند و قابل اعتماد؛

✓ سازگاری میکروالکترونیکی؛

✓ قابلیت تجدید کردن؛

✓ پاسخ انتخابی و سریع؛

✓ بزرگترین غیر واتسبگی ممکن از پارامترهای محیطی؛

✓ قابلیت ساخت با استفاده از روش های میکروالکترونیکی قراردادی.

این احتیاجات بدین معنی است که یک رشته ی وسیعی از کاربردها وجود دارد. مثال ها اندازه گیری نثرها و حفاظت محیط زیست، اندازه گیری های ایمنیون ها، جلوگیری از آتش و انفجارات اندازه گیری های فرآیندها (برای مثال در شیمی، در صنایع غذایی، بیوتکنولوژی) پزشکی، تکنولوژی اتومبیل، وسایل خانگی، تهیه ی آب و تجزیه ی فاضلاب و تجزیه ی سطح و مواد می باشند.

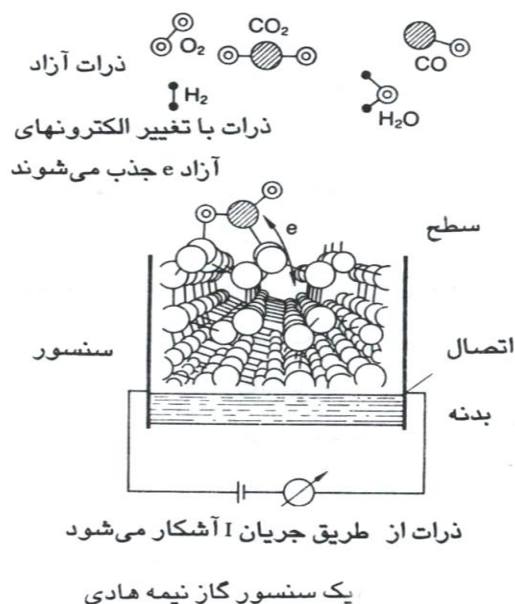
هدف پژوهشگران در زمینه ی توسعه ی سنسور شیمیایی همراهی کردن یک آزمایشگاه شیمی تجزیه ای کامل با یک چیپ منفرد می باشد. اگرچه، در واقعیت آن هنوز یک انتظار دست نیافتنی است.

میلیون ها از سنسورهای شیمیایی ساخته شده اند. متداول ترین اینها سنسور  $\text{SnO}_2$  تاگوچی برای آشکارسازی گازهای احیاء شونده می باشد، سپس سنسورهای  $\text{O}_2$  که بر پایه ی سنسورهای انتقال یون  $\text{ZrO}_2$  قرار دارد. این پیشرفت علی رغم این حقیقت که مکانیسم های اساسی کارکرد سنسورهای شیمیایی

اغلب کاملاً فهمیده شده اند، به وقوع پیوست. امروزه، یونها در جامدات، غشاءها یا اتصالات اغلب با عمل سنسورهای تجارتي در دسترس تعیین می شوند.

در سال های اخیر نیاز به سنسورهای شیمیایی به طور زیاد افزایش یافته است. دلایل برای این، افزایش پیچیدگی خیلی از فرآیندهای تولیدی، به خوبی خواست اقتصادی کردن استفاده از انرژی و مواد خام و کاهش آلودگی محیط زیست می باشد. خلاصه تمام اینها، این است که خیلی از پژوهشگران اکنون انرژی را برای توسعه ی سنسورهای شیمیایی با خواص ویژه برای کاربردهای ویژه و با اصول کاری شناخته شده، فدا می کنند. کار پژوهش و توسعه در دو مرحله پیشرفت می کند. یکی نقطه ی شروع برای توسعه ی سنسورهای جدید است که به طور تجربی برای استفاده تحت شرایط کاربردی واقعی بهینه شده و به وسیله ی حساسیت آنها، حساسیت جنبی، روش مدت-طول و شرایط طولانی مشخص شده است. اندازه گیری دما می تواند انتقال جریان مستقیم، امپدانس های پیچیده، کاپاسیتانس، یا مقادیر پتانسیومتری و آمپرومتری باشد. این پارامترهای پدیده ی منطقی که رسماً سنسور را مشخص می کنند با ساختار اتمی سنسور ارتباط دارند. این، تعدیل سیستماتیک و بهینه سازی ممکن سنسور را در مرحله ی دوم می سازد. این پیش فرض ها وجود تکنیکهای بررسی فیزیکی مربوطه و سابقه ی تئوریک می باشد. این بحث از هر دو، تا فرصت دیگر کنار گذاشته می شود. در دهه ی 1980 گویل و همکاران برخی از ایده های تحریک کننده را برای پژوهش در توسعه ی سنسورهای شیمیایی تهیه کردند.

### آشکار ساختن اصول و نیازمندیهای سنسور شیمیایی



یک سنسور ساده برای تشخیص مولکول های ویژه از مخلوط مولکول ها به طور شماتیک در شکل روبرو نشان داده شده است. در این مثال مولکول سه اتمی خطی  $CO_2$  تشکیل یک کمپلکس جذبی در گاز با اتم ها در سطح سنسور می دهد. این کمپلکس می تواند از باند اتصالی سنسور هم الکترون بگیرد و هم الکترون بدهد. خواص مولکول است که به آن اجازه می دهد که یک گیرنده یا دهنده در سطح سبب تمرکز حمل و نقل های آزاد

در نیمه هادی به کاهش یا افزایش باشد. این یک تغییر وابسته را در هدایت فراهم کرده که آشکار سازی الکترونیکی ذرات را ممکن می سازد. در اصل خواص سنسور خیلی متفاوت  $G$  می تواند برای آشکار سازی در تداخل انتخابی ذرات با سنسور استفاده شود. جدول 8.1 واکنش می دهد. در واقعیت این قبیل انتخاب

گری با درجه ی بالا مشاهده نشده است. حساسیت - متقاطع بدین معنی است که همچنین با دیگر ذرات واکنش می دهد. یک سنسور گاز باید حداقل یک پاسخ برگشت پذیر با تغییر در فشار جزئی و دما نشان دهد. این خواص، سنسور G را یک تابع مرزی در زمینه ی ترمودینامیکی می سازد، همان طور که در جدول 8.2 نشان داده شده است، نقطه ی 1. جدول 8.2 همچنین نشان می دهد که علامت سنسور به طور ترمودینامیکی امکان دارد، اگر تابع مرزی G، یعنی، مقدار دیفرانسیل آنتالپی آزاد، برای تداخل بین ذرات آشکار شده و سطح سنسور منفی باشد. نقطه ی 3 این را روشن می سازد که اثرات جذب سطحی برای آشکار سازی ذرات در دمای پایین برتر است. برعکس، حساسیت با دما افزایش می یابد وقتی که ذرات با استفاده از نقطه نقص های سنسور آشکار شوند .

خواص سنسور ویژه مورد استفاده برای تشخیص در سنسورهای شیمیایی

پتانسیل الکتریکی، جریان، کاپاسیتانس	سنسورهای الکترولیت مایع:
پتانسیل الکتریکی، جریان	سنسورهای الکترولیت جامد:
هدایت الکتریکی	سنسورهای هادی:
پتانسیل ها	سنسورهای اثر میدان:
جذب سطحی یا دمای واکنش	سنسورهای کالریمتری:
ابعاد نوری بعنوان یک تابع از فرکانس	سنسورهای فتوشیمیایی:
جرم ذرات جذب سطحی شده	سنسورهای حساس - جرمی:

خلاصه ای (1) از پیش شرط ها برای علایم سنسور قابل تجدید؛ (2) از توابع مرزی و سرعت های تداخل های ذره- سنسور ویژه؛ (3) از پدیده های ترمودینامیکی تداخل های گاز- سنسور عمومی؛ (4) از ارتباط ما بین درجه پوشش  $\theta$ ، انتالپی آزاد G و داده های مرزی را مشخص می کند.

1- نیازمندی: خاصیت سنسور G یک تابع مرزی است.

$$dG^* = \left(\frac{\partial G^*}{\partial P_1}\right)_{P_i \neq 1, T} dP_1 + \left(\frac{\partial G^*}{\partial P_2}\right)_{P_i \neq 2, T} dP_2 + \dots + \left(\frac{\partial G^*}{\partial p}\right)_{P_i} dT$$

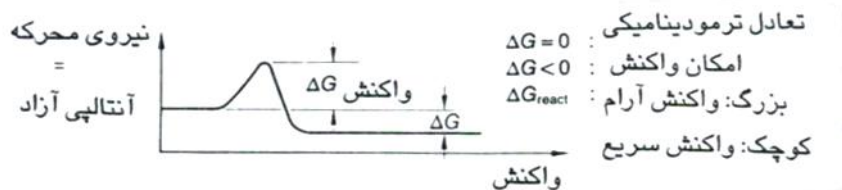
$$\int dG^* = 0 \quad \text{که}$$

2- جنبه های ترمودینامیکی و سی نتیکی سنسورهای شیمیایی و بیوشیمیایی

(a) چرا واکنش های ذره- سنسور وجود دارد؟

(b) کی این واکنش های ذره- سنسور سریع می شود؟

(c)



3- چرا آنتالپی آزاد  $G$  و نه انرژی؟

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S = \Delta(U + PV) - T\Delta S$$

مثال ها:

$$\Delta U(\Delta H) < 0, \Delta S < 0 \quad \text{الف) جذب شیمیایی}$$

← نتایج خوب در  $T=0K$

$$|T\Delta S| > |\Delta H| \quad \text{واجذب وقتی}$$

$$\Delta U(\Delta H) > 0, \Delta S > 0 \quad \text{ب) نقطه نقض}$$

← صرف نظر می شود در  $T=0K$

$$|T\Delta S| > |\Delta H| \quad \text{اصلاح می شود در دماهای بالا اگر}$$

4- ارتباط ما بین  $G$  و انرژی های  $\varepsilon_i$  الکترون ها، فوتون ها، پلاسمون ها، اون ها (یعنی، حالت های

ساکن مقدماتی از مواد)؟

ترمودینامیک های آماری

$$\varepsilon_i \leftrightarrow Q = \sum e^{e\varepsilon_i/kt} \leftrightarrow G = -KT(\ln Q - \frac{\partial \ln Q}{\partial \ln V}) \leftrightarrow \theta = f(P, T), \text{ etc.}$$

همان طور که بیشتر سنسورها در فاصله هایی متوسط کار می کنند، هر دو اثر باید در نظر گرفته شود. در همان زمان به عنوان واکنش مطلوب، یک سری از دیگر واکنش های تعیین شده ی ترمودینامیکی یا سی نتیکی در سطح سنسور به وقوع می پیوندد. این منجر به تغییرات برگشت ناپذیر و بنابراین دریافت زمان-طولانی می شود، هرچند از آن می توان به وسیله ی انتخاب مواد سنسور مناسب اجتناب نمود. روش های مدرن آنالیز لایه ی مرزی ثبت اطلاعات در مورد ساختمان های اتمی، پوشش سطح، ناخالصی و قدرت پیوند هم قبل و هم بعد از تداخل سنسور با ذرات را ممکن می سازد. یک فقره از اطلاعات که به وسیله ی این داده ها فراهم می شود انرژی های برانگیخت

ی اولیه حالت های ساکن مختلف سیستم است. این یک ارتباط با حاصل جمع حالت  $Q$  برقرار می کنند که در نقطه ی 4 جدول 8.2 و بنابراین با مشاهدات پدید منطقی مشخص شده است. با در دست داشتن  $Q$ ، ایزوترم های جذب سطحی می تواند برای تهیه ی اطلاعات درباره، برای مثال، درجه ی پوشش  $\theta' = f(P')_{T=\text{ثابت}}$  مولکول های جذب شده در سطح سنسور گاز به عنوان تابعی از فشار جزئی و دما استفاده شود. این اصل می تواند در دیگر پارامترها به کار برده شود.

به طور خلاصه، می توان گفت که استفاده از متدهای تجزیه ای مختلف قطعاً برای توسعه ی انتخابی سنسورهای شیمیایی لازم است.

## انواع طرح

سنسورهای شیمیایی می توانند بر طبق زمینه های کاربردیشان طبقه بندی شوند، ذراتی که آنها نامزد تشخیص یا اصل عملکرد فیزیکی شیمیایی شان هستند. یک خط فاصله همچنین به طور متناوب ما بین تشکیل دهنده های نیمه هادی حساس شیمیایی و دیگران کشیده شده است. در این متن از طبقه بندی زیر استفاده شده است:

1- سنسورهای هادی. در این سنسورها تأثیر متقابل گاز با جامد (اکسید فلزی نیمه هادی یا نیمه هادی آلی) موجب تغییر در هدایت می شود. یک تغییر در مقاومت همچنین می تواند موجب تغییر در دمای مواد سنسور شود.

2- سنسورهای نیمه هادی ساخته شده. اینها سازنده های نیمه هادی اصلاح شده هستند که در آنها تغییرات در لایه های دو گانه ی الکتریکی در مرزهای فازی برای اندازه گیری استفاده می شود.

3- سنسورهای الکتروشیمیایی. در این سنسورها از اثر کاتالیزوری الکترودهای ویژه برای تشخیص گاز یا تأثیر متقابل انتخابی مولکول ها یا یون ها با غشاءهای ثابت در سیستم های جاری استفاده می شود.

4- سنسورهای الکتروولت جامد. این در هدایت یونی در سطوح هدایتی الکترونی قابل اغماض به کار می رود.

5- FET های حساس شیمیایی. در این وسایل تأثیر متقابل یونها یا مولکول ها در یک لایه یون-انتخابی یا گاز-حساس در ناحیه گیت یک FET سبب می شود که پتانسیل گیت ترانزیستور تغییر یابد. در اصل، این نوع سنسور ترکیبی از یک سنسور پتانسیومتری (لایه ی حساس) و یک آمیلی فایر بار است.

6- انواع دیگر سنسور. این شامل سنسورهایی است که به طور غیر مستقیم در فرآیندهای شیمیایی عمل می کنند، مثل سنسورهای نوری، سنسورهای اُپتوترمال، میکروبالانس های کوارتز، سنسورهای SAW و سنسورهای بیولوژیکی که به طور ویژه برای آشکار سازی مواد بیولوژیکی به کار می روند.

## سنسورهای هادی

به دلیل پایداری شیمیایی و حرارتی اکسیدهای فلزی به طور غالب در کاربردهای علمی استفاده می شوند. در دمای حدود  $500^{\circ}\text{C}$  مقاومت الکتریکی آنها یک درجه بالای از وابستگی را روی غلظت گازهای معین نشان می دهد. در دماهای بین  $200^{\circ}\text{C}$ – $500^{\circ}\text{C}$  اکسیدهای فلزی با راه های حامل الکترون نوع -n، از قبیل  $\text{ZnO}$ ،  $\text{SnO}_2$  یا  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ، ابتدا به گازهای قابل اکسید شدن از قبیل  $\text{H}_2$ ،  $\text{CH}_4$ ،  $\text{C}_2\text{H}_5$  یا  $\text{H}_2\text{S}$  پاسخ داده و هدایت آنها را افزایش می دهد. بر عکس، نیمه هاری های نوع P- از قبیل  $\text{CuO}$ ،  $\text{NiO}$  یا  $\text{CoO}$  ابتدا به گازهای قابل احیاء از قبیل  $\text{O}_2$ ،  $\text{NO}_2$ ،  $\text{Cl}_2$  پاسخ می دهند. در کنار این اکسیدهای فلزی

دوتایی، اکسیدهای فلزی سه تایی و چهارتایی و ترکیبات آنها در سنسورهای گازی مشابه استفاده می شوند. سنسورهای اکسید فلزی غالباً از طریق افزایش اتم های فلزی مثل Au, Cu, Pt, Pd و Ag اصلاح و بهینه می شوند. این سنسورهایی با درجه معین از انتخابگری به دست می دهد. برای دلایل تکنیکی، سنسورهای اکسید فلزی بر پایه  $\text{SnO}_2$ ,  $\text{ZnO}_2$ , یا  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  دارای اهمیت زیادی در کاربردهای عملی است.

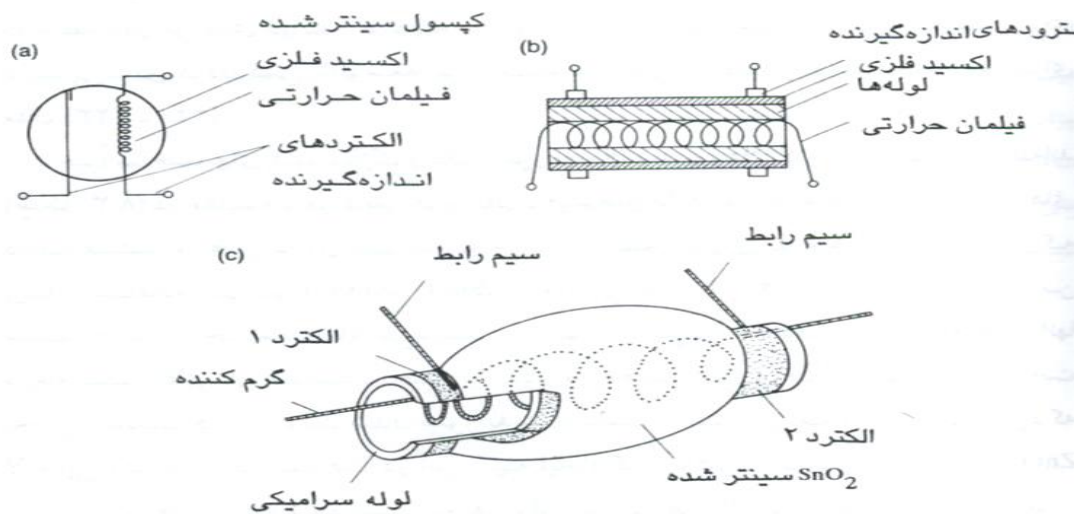
اولین سنسورهای گازی مشابه سنسورهای پلی کریستالین بود. شناخته شده ترین آنها سنسور گازی تاگوچی (TGS) است که بر پایه  $\text{SnO}_2$  می باشد و به مقدار زیاد به وسیله ی شرکت فیگارو ژاپن تولید می شود. این سنسور به عنوان هشدار دهنده ی آتش در خیلی از خانه های ژاپنی نصب شده است. آشکار سازی گازهای احیاء شونده با استفاده از مقدار هدایت  $G$  با زمان پاسخ بر حسب دقیقه انجام می شود. حد جریان آشکار سازی با استفاده از سنسورهای  $0/2\text{ppm}$  است. دریافت زمان - طولانی، ابتدا در شکل انتشار و اثرات رسوب در مرزهای ذرات غیر قابل اجتناب است. اساساً،  $G$  به غلظت  $C_i$  یا فشار جزئی  $P_i$  گاز ارتباط دارد و نشان داده می شود به وسیله ی  $G \approx c_i^{ni}$  که  $ni$  ثابت تجربی است که در مورد گازهای احیاء شونده ی مثبت و کوچکتر از 1 می باشد. اگر چه، این سنسور خیلی مناسب برای اندازه گیری کمی نیست. برای مثال، در غیاب گازهای احیاء شونده مقدار هدایت به فشار جزئی اکسیژن و آب بستگی دارد. به علاوه، هر چند تعداد زیادی از گازهای قابل احیاء می توانند آشکار شوند، همیشه یک درجه ی معین از حساسیت جنبی وجود دارد. حساسیت جنبی بدین معنی است که تغییرات معادل در مقاومت می تواند موجب تغییرات در غلظت های گازهای مختلف شود. چندین روش برای مدل کردن حساسیت جنبی وجود دارد. برای مثال، یک تلاش برای شرح آن به طور قراردادی به وسیله ی پارامترهای زیر ساخته شده است.

$$(G/G_0)^a = (1 + \sum_{j=1}^N k_j c_{1j}^{n_{1j}} C_{2j}^{n_{2j}} \dots) / c_{O_2}$$

گازهای تشخیص داده شده

اکسیدها در سنسور نیمه هادی مربوطه

$O_2$	$La_2O_3, SnO_2, ZrO_2, ZnO, CoO, Fe_2O_3, TiO_2$
$CO$	$In_2O_3, SnO_2, ZrO_2, ZnO, NiO, Cr_2O_3$
$CH_4$	$ZnO, Co_3O_4, Fe_3O_2, Fe_2O_3$
$NO_x$	$VO, SnO_2$
هالوژن ها	$SnO_2, Al_2O_3, ZnO$



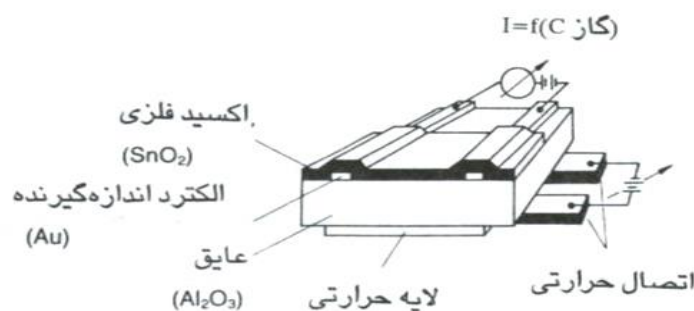
سنسورهای نیمه هادی مشابه [۲۰۴]: (a) سنسور پلی کریستالین با فیلمان کرمایی پلاتین سینتر شده؛ (b) سنسور پلی کریستالین با فیلمان حرارتی جداگانه با (c) سنسور تاگوپی تجارتي.

معادله ی فوق تغییرات مقدار هدایت در تشخیص  $N$  گاز با غلظت های  $C_{ij}$  با استفاده از مجموع  $N$  با  $n_{ij}, k_j, \alpha$  به عنوان پارامترهای تجربی را شرح می دهد.  $G_0$  مقدار هدایت تحت شرایط استاندارد می باشد. با وجودیکه این معادله می تواند ساده تر شود، آن هنوز برای گازهای معین باید اصلاح شود. شکل تجزیه ای برای تعیین مورد نیاز است، برای مثال، خواه سنسور برای تشخیص گاز خواه به عنوان الگوی شناسایی در آرایش سنسور استفاده شود.

رفتار مقدار هدایت در نیمه هادی های نوع- $n$  می تواند در جملات کیفی به وسیله ی نفوذ رقابتی اکسیژن جذب سطح شده ی منفی و تشکیل پیوسته ی لایه های سطحی از الکترون - تهی شده در سطح یا بین بلورها بیان شود. گازهای احیاء شده مقدار  $O_2$  جذب شده را کاهش داده و بنابراین موجب توسعه ی کوچک لایه های سطحی از الکترون - تهی شده و، در نتیجه، یک افزایش در هدایت می شود. در اصل این اثر هدایت همچنین می تواند به وسیله ی واکنش گاز احیاء شونده با اکسیژن شبکه بشود. این موجب عیب هایی می شود که می تواند در دمای بالا به داخل بدنه نفوذ کند. اندازه گیری، یعنی کل هدایت، به وسیله ی نسبت های الکترون ها و یون ها در سطح، در مرزهای ذرات و در بدنه ی سنسور تعیین می شود. مقدار زیادی از کوشش برای تولید پی بندی کردن کمی یا توسعه ی این توضیح تئوریک اختصاص دارد.

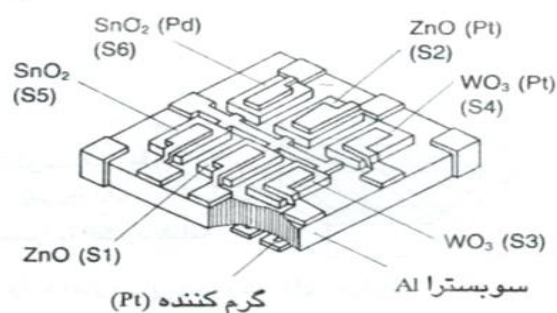
اخیراً ساختمان های فیلم - نازک و بک - بلور به عنوان سنسورهای گاز مشابه توسعه یافته اند در مقایسه با مواد پلی کریستالی فیلم های نازک دارای غلظت کمی در مرزهای ذرات هستند اما هنوز دارای یک

نسبت خوب از سطح اتم های بدنه هستند. از موادی که زیاد استفاده می شوند  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{SnO}_2$ ,  $\text{ZnO}$  می باشند. این سنسورها دارای حساسیت بالا می باشند و زمان های پاسخ در حد دقیقه دارند. مع هذا، آن ها درجه ی نسبتاً بالایی از حساسیت جنبی را نشان می دهند. پایداری طولانی - مدت رضایت بخش و قابلیت دوباره تولید شدن هنوز به دست نیامده است. این امیدواری وجود دارد که لایه ی اپی تاکسیال یک پیشرفت در این زمینه ایجاد کند. تاکنون تنها کریستال منفرد،  $\text{ZnO}$  برای سنسورها استفاده شده است. مع هذا، این سنسورها برای تولید خیلی گران هستند. تکنولوژی فیلم - ضخیم همچنین برای سنسورهای اکسید فلزی جالب هستند چون این به درجه ی بالایی از قابلیت دوباره تولید شدن که می توان با استفاده از روش های سینتر شدن به دست آید اجازه می دهد. علی رغم این، تنها چندین مثال شناخته شده اند. یک مثال جالب از سنسور فیلم - ضخیم مولتی سنسور برای تشخیص بو، همان طور که در شکل 8.4 مشخص شده است می باشد.



شکل ۸.۳ سنسور اکسید فلزی فیلم - نازک [۲۰۴]

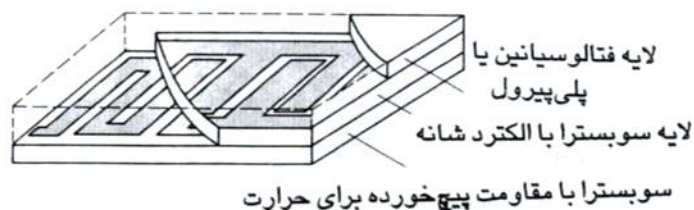
زمینه ی اصلی کاربرد سنسورهای نیمه هادی همگی تهیه ی گاز نصب شده به طور خانگی، سیستم های اخطار برای تشخیص  $\text{CO}$ ، برای تشخیص  $\text{H}_2\text{S}$  در پالایشگاه ها، و برای آزمایش میزان الکل در تنفس می باشد، سنسورهای نیمه هادی که تغییرات در سطح مقاومت را شناسایی می کنند همچنین برای اندازه گیری رطوبت نسبی به کار می روند. مواد سنسور که برای آن به کار می رود  $\text{TiO}_2 - \text{V}_2\text{O}_5$  یا  $\text{MgCr}_2\text{O}_4 - \text{TiO}_2$  هستند. برخی از این سنسورها دارای زمان پاسخ خیلی سریع بر حسب ثانیه هستند.



شکل ۸.۴ مولتی سنسور مورد استفاده در تکنولوژی فیلم - ضخیم [۲۴۱].



سنسورهایی که از نیمه هادی های آلی ساخته شده اند همچنین یک پایین آمدن در مقاومت را وقتی در معرض گازهای احیاء شونده یا اکسید شونده قرار می گیرند، از خود نشان می دهند. اگر چه این دارای شناخت طولانی است و علی رغم این حقیقت که آن ها می توانند در حدود  $150^{\circ}\text{C}$  عمل کنند، یعنی، در ماهای پایین تر از سنسورهای اکسید فلزی، آن ها هنوز نسبتاً کاربرد کمی دارند. این تا یک اندازه نتیجه ی این حقیقت است که مسائل خلوص یا ناخالصی های انتخابی، تنظیم ساختمانی مواد حساس، به خوبی مسائل اتصال - مربوط شده برای حساسیت، پایداری و قابلیت تولید دوباره سنسور قطعی هستند. چنین بر می آید که خواص و شرایط برای ساخت این مواد باید در جزئیات قابل ملاحظه فهمیده شود. این طبقه از مواد شامل کمپلکس های فتالوسیانین و پلیمرهای نیمه هادی از قبیل پلی پیرول است. یک فیلم پلی کریستال از PbPC که تا  $150^{\circ}\text{C}$  گرم شده است، برای تشخیص انتخابی اکسیدهای نیتروژن از نوع  $\text{NO}_2$  استفاده می شود. حد تشخیص در حد  $\text{PPb}$  می باشد. این قبیل سنسور برای اندازه گیری گازهای سمی در محیط از قبیل مخلوط  $\text{NO}_2/\text{N}_2\text{O}_4$  خیلی مناسب است.  $\text{CuPC}$  یک فیلم نازک مناسب برای تشخیص  $\text{NH}_3$  است.  $\text{H}_2\text{PC}$  و  $\text{CoPC}$  همچنین به عنوان مواد سنسور بالقوه آزمایش می شود. راه های جالب توسعه برای استفاده از نیمه هادی یا مواد پلیمر هادی در تکنولوژی باز شده است. برای مثال، در  $150^{\circ}\text{C}$  پلی پیرول تغییر مقاومت محسوسی در حضور  $\text{NH}_3$  بازی می کند. ترکیب این نیمه هادی های آلی با مواد سنسور معدنی جستجوی نهایی برای آینده است.

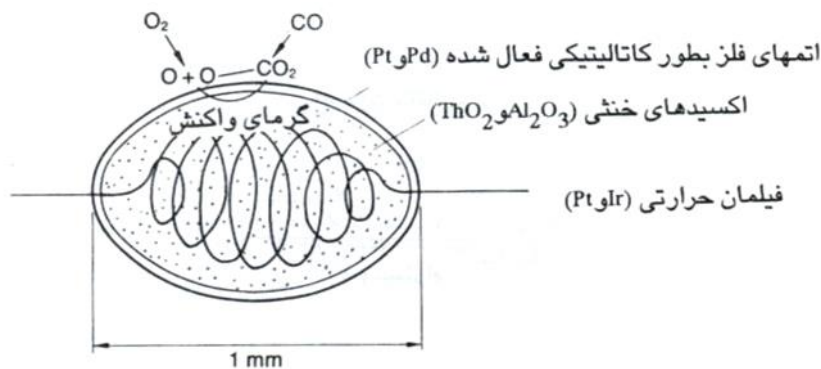


شکل ۸.۵ سنسور گاز براساس لایه فتالوسیانین یا پلی پیرول [۲۳۲].

به عنوان مثال نهایی از سنسور هدایتی اجازه دهید سنسور گازی کاتالیتیکی را انتخاب کنیم که خیلی سال هاست مورد استفاده قرار می گیرد. بدنه های سینتر شده خنثی شامل ابتداً  $\text{ThO}_2$  یا  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ؛ با یک فیلمان داخلی است و سطح آن به وسیله ی یک کاتالیست پوشانده شده، با گازهای قابل احیاء در حدود  $550^{\circ}\text{C}$  واکنش می دهد. این واکنش سطح تولید حرارت می کند که به وسیله ی اندازه گیری مقاومت پلیستور یا سیم Pt تعیین می شود این وسایل اخیراً مورد توجه قرار گرفته اند زیرا می توانند تابعی از سنسورهای انتخابی وقتی یک کاتالیست مناسب انتخاب شود باشند.

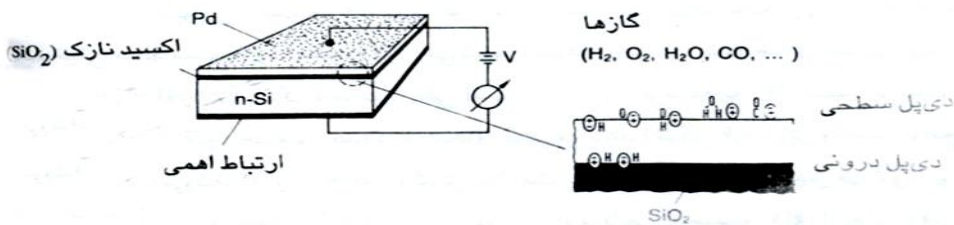
## سنسورهای نیمه هادی ساخته شده

در این وسایل تغییر در لایه دوگانه ی الکتریکی در یک مرز عایق / فاز فلزی برای اندازه گیری استفاده می شود. آن ها به ویژه برای تشخیص  $H_2$  در دمای اتاق جالب هستند. فلز مورد استفاده معمولاً پالادیم است. این دارای دو خاصیت مهم می باشد. اول، آن به طور کاتالیتیکی فعال است. آن مولکول های  $H_2$  را به اتم های آن در سطح خود تفکیک می کند دوم، آن دارای درجه ی بالایی از حلالیت برای اتم های  $H$  است. اگر یک دیود  $Pd-MOS$ ، شناخته شده به عنوان یک  $GasFET$ ، که در آن گیت فلزی از  $Pd$  ساخته شده است، در معرض هیدروژن قرار داده شود، آخری در سطح خارجی فلز تفکیک می شود.

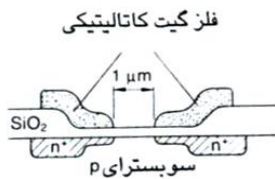


شکل ۸.۶ ساختمان سنسور گاز کاتالیتیکی

اتم های هیدروژن سپس به داخل فلز منتشر می شوند و در داخل فلز - عایق جذب می شوند. یک سد مرزی در قطبی تشکیل می شود، و این سد را وقتی تولید شد، اگر هیچ  $H_2$  تهیه نشود کاهش می دهد. این می تواند به وسیله ی تغییر در منحنی های مشخصه، برای مثال در منحنی - ظرفیت-ولتاژ در دیود  $MOS$ ، یا به وسیله ی تغییر مکان در ولتاژ آستانه در ترانزیستور، آشکار شود.

شکل ۸.۷ ساختمان دیود  $MOS - Pd$  [۲۰۴]

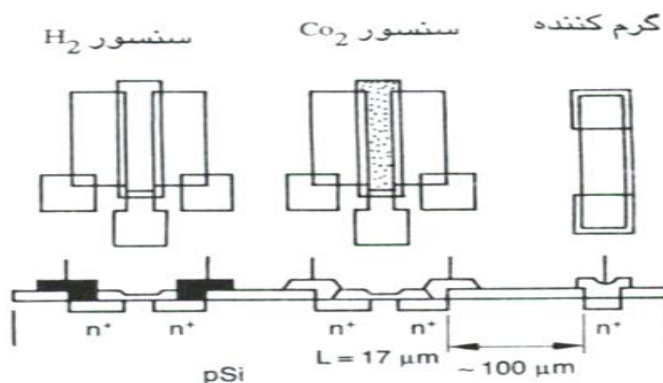
کوشش ها همچنین برای شناسایی دیگر گازها از قبیل  $CO$  با استفاده از این تکنیک انجام شده است. با وجود این، اکثریت این سنسورها درجه ی بالایی از حساسیت جنبی را در حضور  $H_2$  نشان می دهند. به همین دلیل ساختمان های  $MOS$  به وسیله ی به کار بردن سوراخ ها در فلز گیت اصلاح شده است.



شکل ۸۸ نمایش یک Gas FET با یک ساختمان کپ - گیت [۳۳۱].

گازهایی می توانند از میان این سوراخ ها مستقیماً به داخل اکسید فلزی عبور کنند که آن ها تابع کار فلز را تغییر دهند. تغییر دیگر با استفاده از ساختمان های ترانزیستور گپ - گیت ساخته شده اند. ساختمان ترانزیستور مخصوص با کانال

کوتاه، انتشار  $H_2$  در فلز گیت را از کار می اندازد و بنابراین حساسیت جنبی به  $H_2$  را کاهش می دهد. یک راه حل دیگر یکی کردن یک سنسور  $H_2$  با سنسور  $CO_2$  در یک چیپ منفرد است و میزان جریان غلظت  $H_2$  برای تصحیح علامت از سنسور  $CO_2$  طی تهیه ی علامت استفاده می شود. در حقیقت این یک الگوی تشخیص دوش را نشان می دهد. یک توسعه ی نو با یک زمان عمر توسعه داده شده شامل FET ها با یک شبکه میکرو معلق شده است. آنها همچنین به عنوان CHEMFET های گیت معلق شده شناخته شده اند. در این دستگاه ها فلز گیت به وسیله ی یک فضای اضافی که، در مورد Gas FET ها، تراوا به گازها می باشد، جدا شده است. شبکه ی معلق شده ی بالا عایق گیت از Au یا Pt ساخته شده است. کاربرد لایه ی Pd به این یک سنسور  $H_2$  تولید می کند. اگر لایه ی پلیمر هادی، از قبیل پلی پیرول، در سطح شبکه ی فلزی ته نشین شود، پس سنسور خیلی به الکل ها حساس می شود. در هر دو مورد واکنش گاز با سطح شبکه ی فلز معلق شده یا با سطح عایق موجب یک تغییر در میدان الکتریکی می شود که در جریان درین اصلاح شده تشخیص داده می شود.



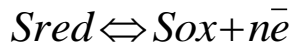
شکل ۸۹ جمع شدن سنسورهای  $H_2$  و  $CO_2$  و یک گرم کننده روی سنسور سیلیکون [۳۳۱]. شبکه پلاتین معلق شده



شکل ۸۱۰ GasFET با شبکه Pt معلق شده بالای گیت [۳۳۱].

## سنسورهای الکتروشیمیایی

موادی در گازها و مایعات می توانند به طور الکتروشیمیایی شناسایی شوند اگر آن ها داخل واکنش ها در سل الکتروشیمیایی یا اگر آن ها واکنش های نفوذی اتفاق افتاده در سل باشند. یک سل الکتروشیمیایی شامل یک الکترولیت، یک الکتروود اندازه گیرنده، یک الکتروود همراه و یک الکتروود شاهد می باشد. معمولاً در سل ماده Sred به طور آندی به Sox اکسید شده یا یک ماده Sox به طور کاتدی به Sred احیاء می شود.



که n تعداد الکترون های مورد نیاز، Sred فرم احیا شده ی ماده و Sox فرم اکسید شده می باشد. در این واکنش ها، الکترون ها یا مصرف یا رها می شوند. در تعادل این الکترون ها موجب ظهور یک پتانسیل مربوطه در الکتروود یا، اگر مواد تبدیل شوند، یک جریان ظاهر می شود.

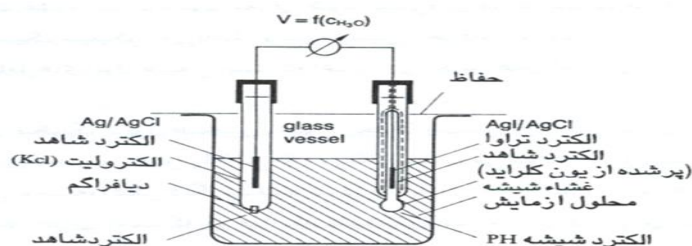
تولید پتانسیل یا فلوی جریان به عنوان روش های شناسایی در سنسورهای الکتروشیمیایی به کار می روند. متد اندازه گیری ولتاژ یا جریان به عنوان پتانسیومتری یا بسته به کنترل پتانسیل، به عنوان آمپرومتری، پلاروگرافی یا ولتامتری شناخته شده اند. اصول کار سنسورها مطابق با این متدها طبقه بندی شده است.

$$p = p + (RT/nf) \ln a_{ox} / a_{red}$$

که p پتانسیل الکتروود کار، p0 پتانسیل استاندارد، R ثابت گازها، T دمای مطلق، F ثابت فارادی، n سرعت واکنش است، و a فعالیت تشکیل دهنده های Sred و Sox را نشان می دهد که به غلظت C و فشار جزئی P بستگی دارند. به میژه در دماهای بالا انحرافات مابین  $a_i$  و  $C_i/C_o$  وجود دارد. پتانسیل الکتروود اندازه گیرنده به صورت ولتاژ در برابر پتانسیل الکتروود شاهد، برای مثال الکتروود هیدروژن نرمال یا الکتروود کالومل اندازه گرفته می شود. استفاده از روش های اندازه گیری پتانسیل به ویژه وقتی اهمیت دارد که تنها یک واکنش به طور برگشت پذیر انجام شود و بنابراین پتانسیل های مخلوط وجود نداشته باشد. سرعت واکنش باید سریع باشد. این گروه به وسیله ی الکتروودهای حساس یون نشان داده می شود، شناخته شده ترین آن ها که مدت طولانی استفاده می شود الکتروود شیشه برای تعیین مقدار PH می باشد. آن برای شناسایی یون های  $H_3O^+$  استفاده می شود.



شکل ۸.۱۱ سنسور پتانسیومتری

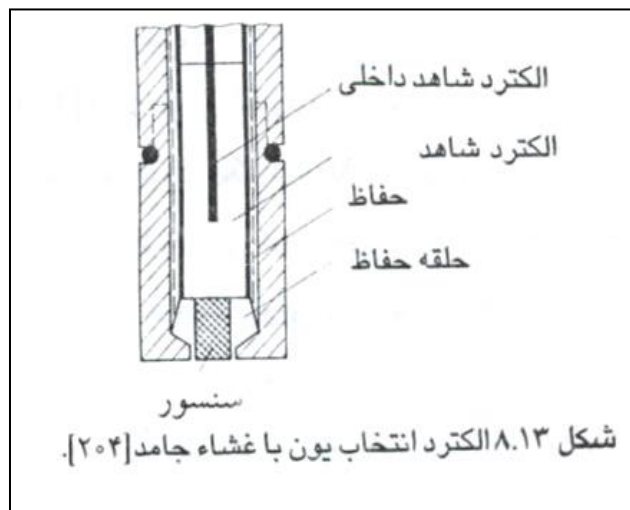


شکل ۸.۱۲ یک کاسکید اندازه گیری PH با الکتروودهای شیشه و شاهد [۲۰۲].

شکل 8.12 اندازه گیری PH با یک الکتروود شیشه PH و الکتروود شاهد را نشان می دهد. واکنش های مبادله ی یون در الکتروود شیشه موجب یک کاسکید در پتانسیل در سطح می شود که در ارتباط با محلول اندازه شونده، است، اندازه ی آن بستگی به غلظت  $H_3O^+$  دارد. داخل الکتروود شیشه یک جامپ ثابت در پتانسیل در مقایسه با الکتروولیت شاهد ایجاد می شود. الکتروود Ag/AgCl برای تپ ولتاژ به کار می رود. پتانسیل نسبت به الکتروود شاهد اندازه گیری می شود. به طور لگاریتمی به غلظت یون های  $H_3O^+$  بستگی دارد.

انی همچنین ممکن است که غشاء الکتروود شیشه را برای به دست آوردن الکتروودها برای یون ها دیگر اصلاح کرد، برای مثال  $F^-, K^+, Na^+$  و غیره. این به وسیله ی استفاده از موادی با پتانسیل های مبادله ی یون انتخابی، هدایت یون انتخابی یا داخل شدن یون انتخابی انجام می شود. شکل 7.13 اصول اساسی ساختمان یک الکتروود انتخابی یون را با یک غشاء جامد نشان می دهد. یک غشاء نمونه  $LaF_3$  است که به عنوان یک هدایت کننده یون های  $F^-$  عمل می کند. دیگر یون ها به وسیله ی استفاده از غشاءهای نمک فلزی مختلف شناسایی می شوند.

گروه بزرگ دیگر از الکتروودهای انتخابی - یون دارای غشاءهای مایع یا پلیمر با ساخت - داخلی مبادله کننده های یون یا حامل های یون طبیعی می باشد. مایع می تواند هم به شکل ژل یا به صورت غشاء استات سلولز معرفی شود. پلیمرهای مورد استفاده شده غالباً PVC، پلی اتیلن و لاستیک سیلیکون می باشد. والینوماسین، جا داده شده در پلاستیسول PVC یک مثال از حامل های یون طبیعی است که اغلب در الکتروودهای انتخابی  $K^+$  استفاده می شود.



الکتروودهای انتخابگر - یون همچنین اغلب به عنوان سنسورهای گاز برای مثال برای تشخیص گازهای محلول از قبیل  $SO_2, CO_2, NH_3$  استفاده می شوند. اگر واکنش شناسایی الکتروشیمیایی به وسیله ی واکنش دیگر مسدود شود، برای مثال یک واکنش آنزیم که تولید کننده یا مصرف کننده اجزایی است که در فرآیند تشخیص شرکت می کند، پس آن همچنین می تواند برای سنسورهای بیولوژیکی مورد استفاده

قرار گیرد. با استفاده از الکتروودهای حساس - یون ممکن است که سطح خطابه به 1% برسد. زمان پاسخ در محدوده ی 1ppm تقریباً 1 دقیقه برای مقدار 90% است. عیب این کالترودها این است که مدارهای الکترومتر پیچیده با مقاومت های ورودی بی نهایت بالا اغلب مورد نیاز می باشد. به علاوه، آن ها نسبتاً بزرگ هستند.

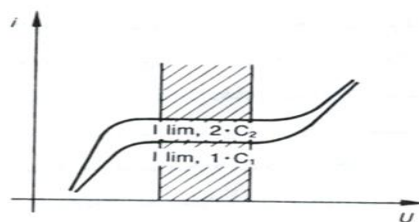
(ابعاد نمونه: طول 100-150mm و قطر 10mm) و بنابراین به طور مکانیکی مستعد اشتباه هستند. از این عیب ها در FET های حساس - یون می تواند اجتناب شود.

الکترودهای انتخابی - یون در مقدار زیادی از کاربردهای اندازه گیری فرآیندها، در تجزیه های پزشکی و پژوهشی به کار می روند. کاربردهای نمونه ی اندازه گیری یون ها در خون، ادرار، آب دریا، فاضلاب، آب تصفیه شده، مواد غذایی و اجناس مصرفی هستند. اگر بیش از یک واکنش در پتانسیل مخلوط انجام شود. آنی که در الکترودها اندازه گیری می شود می تواند به طور قطعی به ساطنده ای که تجزیه می شود نسبت داده شود. در این موارد، اندازه گیری جریان به اندازه گیری پتانسیل در تعادل الکترودها اندازه گیرنده عمداً در مقادیر پتانسیل بالا یا پایین نگه داشته می شود. این بدان معنی است که جریان کاتدی یا آنودی از میان الکترودها اندازه گیرنده می گذرد و تبدیل شیمیایی به وقوع می پیوندد. ماده ای که شناسایی می شود به طور

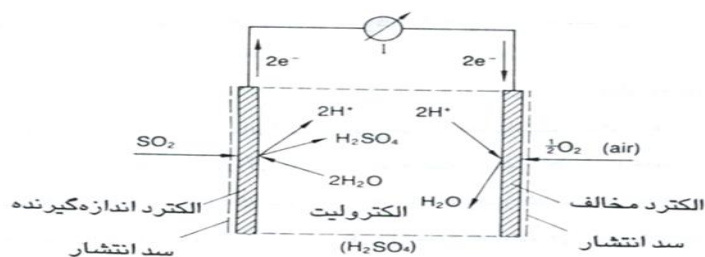
الکتروشیمیایی احیا یا اکسید می شود علامت اندازه گیری شدن جریان فارادایی  $I$  است:  $I \approx F(dNi/dt)$  که  $dNi/dt$  تبدیل سازنده  $i$  در واحد زمان است. این جریان به پتانسیل الکترودها و غلظت سازنده ی اندازه گیری شده بستگی دارد. اگر یک ارتباط واضح مابین جریان و غلظت به دست آید، پس باید توجه کرد که سازنده ای که شناسایی می شود به طور کامل به الکترودها اندازه گیرنده انتقال یافته است. در این روش، پتانسیل الکترودها از یک حالت تعادل که تمام مولکول یا یون های منتشره در الکترودها تبدیل شده اند، جابه جا شده است. این بدان معنی است که غلظت گونه در سطح الکترودها که اندازه گرفته می شود صفر است جریان حد انتشار فرا می رسد. ارتباط ساده

$$I_{lim,i} = \{(nFAD)/\delta\}c_i$$

به کار می رود که  $\delta$  ضخامت لایه ی انتشار،  $D$  ضریب انتشار،  $A$  مساحت سطح الکترودها و  $C_i$  غلظت سازنده  $i$  می باشد. منحنی شدت جریان - پتانسیل نشان داده شده در شکل 8.14 به دست می آید. دو راه برای تنظیم پتانسیل الکترودها اندازه گیرنده در ناحیه ی جریان حد انتشار وجود دارد:



شکل ۸.۱۴ منحنی شدت جریان - پتانسیل با یک فاصله جریان حد تنظیم شده با انتشار (سایه زده شده) [۲۲۴]



شکل ۸.۱۵ سل دو - الکترودها (بطور دیاگرامی) برای شناسایی SO₂ در هوا [۲۲۴].



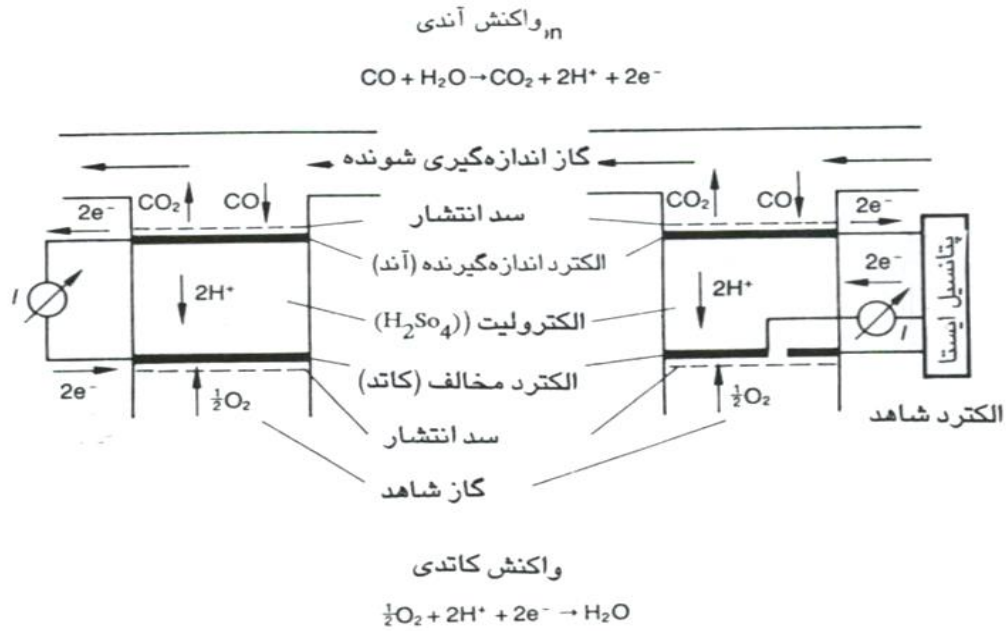
- انتخاب الکتروود شاهد با پتانسیل الکتروود مناسب؛
  - به طور الکترونیکی، استفاده از یک مدار پتانسیواستاتیک.
- سل ها حاوی دو یا سه الکتروود هستند که برای اندازه گیری جریان استفاده می شود. چیز مشترک در همه ی این ها این حقیقت است که گازی که اندازه گیری می شود تنها می تواند به الکتروود اندازه گیرنده ی فعال کاتالیتیکی به وسیله ی عبور از سد انتشار برسد.

جدول ۸.۴ مثالهایی از سل های شیمیایی مورد استفاده در تشخیص گاز

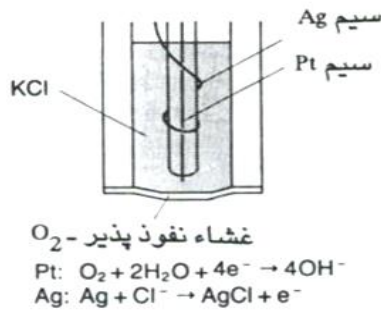
گاز سازنده	آند	واکنش آندی	کاتد	واکنش کاتدی
H <sub>2</sub> S	Ag	$\text{H}_2\text{S} + 2\text{Ag}^+ \rightarrow \text{Ag}_2\text{S} + 2\text{H}^+$ $2\text{Ag} \rightarrow 2\text{Ag}^+ + 2\text{e}^-$	Ag	$\frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}$
CO	Pt	$\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$	C	$\frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}$
Cl <sub>2</sub>	Pt	$\text{H}_2\text{O} \rightarrow \frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$	Au	$\text{Cl}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{Cl}^-$
SO <sub>2</sub>	Au	$\text{SO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_4 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$	Pt	$\frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}$

شکل 8.15 یک سل الکتروود-دوتایی مورد استفاده برای شناسایی SO<sub>2</sub> را نشان می دهد. یک ولتاژ ثابت مابین الکتروود اندازه گیرنده و الکتروود مخالف ایجاد شده است. الکتروود مخالف به مقدار جزئی به وسیله ی عبور جریان پلاریزه می شود به طوریکه پتانسیل الکتروود اندازه گیرنده ثابت باقی می ماند. این مسئله در سل به سه الکتروود حل شده است که در آن پتانسیل در مقدار از پیش تعیین شده به وسیله ی کنترل پتانسیواستاتیک و الکتروود شاده با پتانسیل - ثابت نگه داشته می شود. مواد آندی و کاتدی مختلف بسته به گاز اندازه گیری شونده، مورد استفاده قرار می گیرند. تفلون (PTFE) اغلب به عنوان غشاء مورد استفاده قرار می گیرد.

سل کلارک، یک سنسور مهم O<sub>2</sub> برای کاربردهای هم صنعتی و هم پزشکی است. سل دو الکترودی الکتروشیمیایی از محیط اطراف به وسیله ی یک عشاء آب گریز، تراوای O<sub>2</sub>- جدا می شود. یک ولتاژ 800-600mv مابین الکتروودها به کار برده می شود. این موجب می شود که سنسور در فاصله جریان حد انتشار عمل کند. چون انتشار به دما-بستگی دارد، دما اندازه گیری و اثر آن جبران می شود. سل کلارک همچنین برای اندازه گیری اکسیژن در دستگاه تصفیه - فاضلاب، در سیستم های چرخه ی آب صنعتی، در فرآیندهای خوردگی ناچیز یا در تعیین نسبت اکسیژن حل شده در آب سطحی به کار می رود. سنسورهای آمپرومتری همچنین برای تعیین مقدار Cl موجود در آب آشامیدنی به کار می رود.



شکل ۸.۱۶ سنسور گاز الکتروشیمیایی برای اندازه‌گیری CO (سل سه - الکترودی تنظیم شده پتانسیومتری).

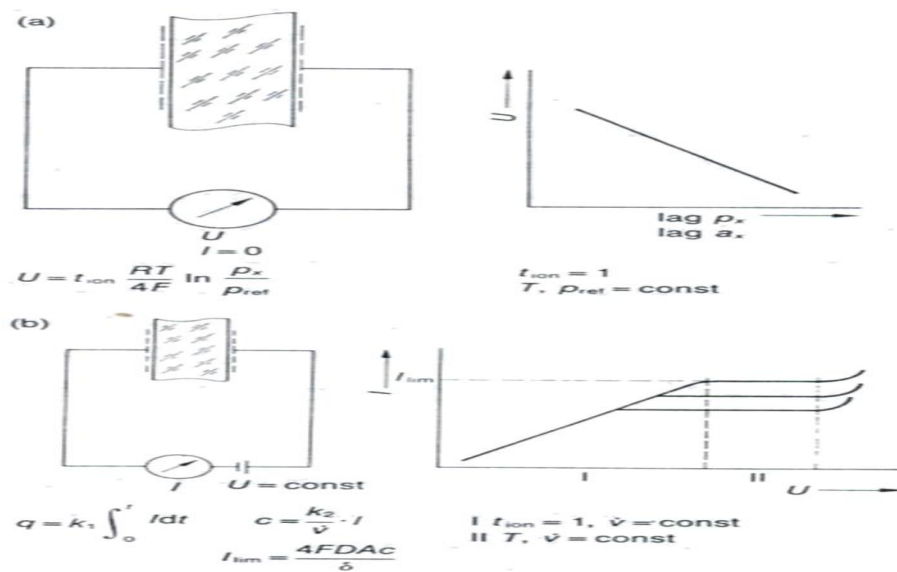


شکل ۸.۱۷ سل کلارک [۳.۷]

### سنسورهای الکترولیت جامد

- سنسورهای الکترولیت جامد یک موقعیت مخصوص در میان سنسورهای شیمیایی اشغال می‌کند. آن‌ها استفاده از خاصیت کریستال‌های معین انتقال دهنده ی جریان الکتریکی در شکل یون‌ها در دماهای بالا را ممکن می‌سازند. یک فرق مابین دو ساختمان اساسی کشیده شده است:
- اندازه‌گیری جریان - صفر پتانسیل مابین یک الکترود شاهد و یک الکترود کار (شکل a 8.18):
  - اندازه‌گیری جریان یونی از طریق کاربرد یک ولتاژ خارجی در الکترودها (شکل b 8.18).



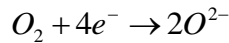


شکل (a) سنسور الکترولیت جامد پتانسیومتری: (b) سنسور الکترولیت جامد آمپرومتری

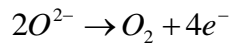
روش عمل سنسورهای الکترولیت جامد پتانسیومتری بر اساس معادله نرنست می باشد، یعنی، اگر دما ثابت باشد و پتانسیل – الکتروکد شاهد مشخص باشد. پس یک ارتباط خطی مابین ولتاژسل و لگاریتم فعالیت یا فشار جزئی سازنده ای که اندازه گیری می شود وجود دارد.

این سنسورها قادر به پوشش اندازه گیری فاصله ی وسیعی می باشند. آشکار سازی سریع آن ها (برحسب ثانیه) و فاصله ی دمایی عمل کنندگی وسیع آن ها ( $100-1800^{\circ}C$ ، بسته به مواد الکترولیت جامد) پیشنهاد می کند که سنسورهای پتانسیومتری به ویژه برای اندازه گیری فرایندها در حین عمل مناسب هستند. مثال خیلی شناخته شده سنسور که بر این طبقه متعلق است سنسور  $O_2$  است که بر اساس ایتريوم – دوپه شده  $ZrO_2$  می باشد. آن برای اندازه گیری فشار جزئی  $O_2$  در دوده های آگزوز ماشین به کار می رود و مخلوط سوخت – هوا برای رسیدن به استفاده ی خیلی موثر تبدیلات کاتالیکی را تنظیم می کند. این وسیله به نام  $\lambda$  probe شناخته شده است. از اواسط دهه ی 1970 بیش از 10 میلیون پروب لامبدا در اطراف دنیا به کار گرفته شده است. سنسور  $ZrO_2$  همچنین نقش مهمی در نشان دادن میزان اکسیژن در گازهای احتراق به خوبی دیگر مخلوط های گاز، یا در اندازه گیری سطوح اکسیژن باقی مانده در فولاد مذاب و دیگر فلزات مذاب یا شیشه های مذاب دارد. سیستم های اندازه گیری تجاری برای این کاربردها تولید شده است. خیلی از آن ها در کارخانه های برق به کار برده می شوند. به وسیله ی استفاده از سنسورها می توان به طور قابل ملاحظه ای مصرف سوخت را کاهش داد و بنابراین همچنین آلودگی محیط زیست را از بین برد.

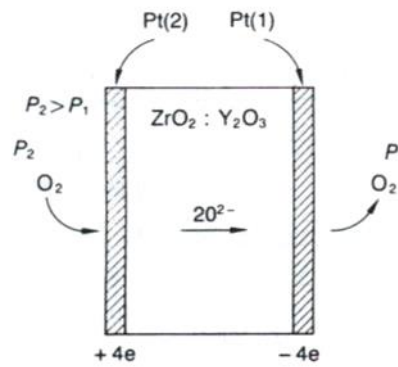
یک توضیح ساده از طریقه عمل یک سنسور پتانسیومتر  $ZrO_2$  برای تشخیص  $O_2$  در شکل 8.19 نشان داده شده است. الکترو پلاتین سوراخ دار (Pt(2)) در معرض مقدار  $O_2$  زیاد است، در حالی که Pt(1) در معرض مقدار کم  $O_2$  می باشد. در کاتد Pt(2) واکنش



و در آند Pt(1) واکنش



انجام می شود. انتقال الکترون از 2 به 1 موجب ایجاد یک میدان الکتریکی می شود.



شکل ۸.۱۹ سل  $ZrO_2$  [۲۵۵].

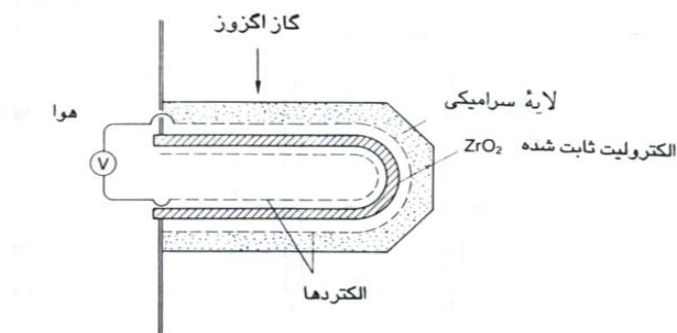
در تعادل اختلاف پتانسیل الکتریکی برابر و مخالف اختلاف پتانسیل شیمیایی است که به وسیله ی اختلاف در فشار جزئی  $O_2$  در دو الکترو د ایجاد می شود. ولتاژ مابین الکتروها پس دارای مقدار زیر است.

$$U = R(T/4) \ln(p_1/p_2)$$

شکل 8.20 ساختمان سنسور پتانسیومتری  $Y_2O_3$ -doped  $ZrO_2$  یا پروب لامبدا را نشان می دهد. سرامیک از دو طرف با کاتالیست Pt سوراخ دار پوشانیده شده و خانه های شاهد و اندازه گیری شونده را جدا می کند. برای حفاظت از ناخالصی ها، الکترو دی که در معرض گازهای آگروز گذاشته می شود به وسیله ی یک لایه سرامیکی سوراخ دار اضافی پوشانده می شود. نسبت هوا- سوخت، همچنین به عنوان  $\lambda$  شناخته، به صورت زیر تعریف می شود

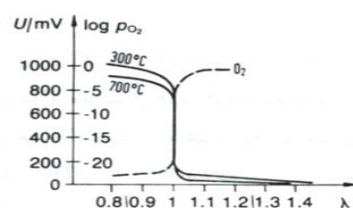
$$\lambda = \frac{\text{حجم هوای مصرف شده}}{\text{حجم هوای مورد نیاز تئوریک}}$$

این نسبت نام خود سنسور را می دهد.  $\lambda = 1$  به طور واقعی با مخلوط استیوکیومتری از اکسیژن (هوا) و سوخت (یعنی، نفت). مطابقت دارد. در مورد نفت، نسبت برای احتراق کامل سونت به طور تقریبی 14/6:1 می باشد. در این مورد، احتراق ایده آل به دست می آید. خروجی آلوده از یک دستگاه مجهز شده با یک مبدل کاتالیتیکی دست کم وجود دارد وقتی یک مخلوط استیوکیومتری حضور داشته باشد. عبور از میان فاصله ی  $\lambda < 1$  (مخلوط غلیظ) به  $\lambda > 1$  (مخلوط رقیق) غلظت اکسیژن را تا ده برابر بزرگتر می کند.



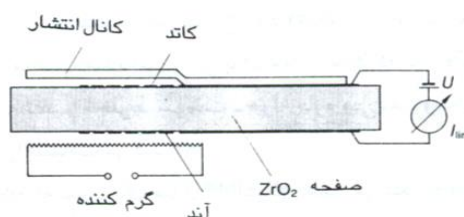
شکل ۸.۲۰ پروب لامبدا برای اندازه‌گیری اکسیژن در گازهای اکزوز

این همچنین موجب تغییرات بزرگ در پتانسیل پروب می‌شود (شکل ۸.۲۱) این تغییر خیلی خوب با تجزیه ی الکترونیکی مناسب شده است. این بدان معنی است که اندازه‌گیری در نقطه ی  $\lambda = 1$  ممکن است. این به تنظیم مخلوط سوخت - هوا اجازه می‌دهد و تکمیل کار مبدل‌های کاتالیتیکی سه راه ضمانت می‌کند. در مورد دستگاه که بدون یک مبدل کاتالیتیکی عمل می‌کند آن به استفاده از  $\lambda > 1$  حساس است، یعنی، مخلوط سوخت رقیق است. این نتایج در مصرف سوخت بهینه با انتشار  $\text{NO}_x$  مینیمم به دست می‌آید. هم پتانسیومتری (با  $\lambda = 1.5$ ) و هم پروب‌های با جریان جدید انتشار، که بر پایه  $\text{ZrO}_2$  است (با  $\lambda = 2$ )، استفاده می‌شوند. سنسورهای الکترولیت جامد آمپرومتری به شاهد نیازی ندارد، یعنی هیچ احتیاجی به جدا کردن الکتردها نیست. جریان یون می‌تواند به هر جهت بسته به قطبیت ولتاژ به کار رفته حرکت کند. اگر سنسور نزدیک جریان حد - انتشار عمل کند پس نیاز به تهیه ی سدهای انتشار برای سازنده ی X در محل اندازه‌گیری در الکترو است که سازنده ی X را مصرف می‌کند، برای مثال به وسیله ی تولید ژنومتری ویژه (گپ) یا به وسیله ی گذاشته لایه سوراخ دار مابین محل اندازه‌گیری و الکترو.



شکل ۸.۲۱ ارتباط ما بین پروب ولتاژ یا محتوای اکسیژن و مقدار  $\lambda$  [۲۵۵].

شکل ۸.۲۲ این نوع از پروب جریان حد را برای اندازه‌گیری  $\lambda$  در گازهای اکزوز دستگاه نشان می‌دهد.



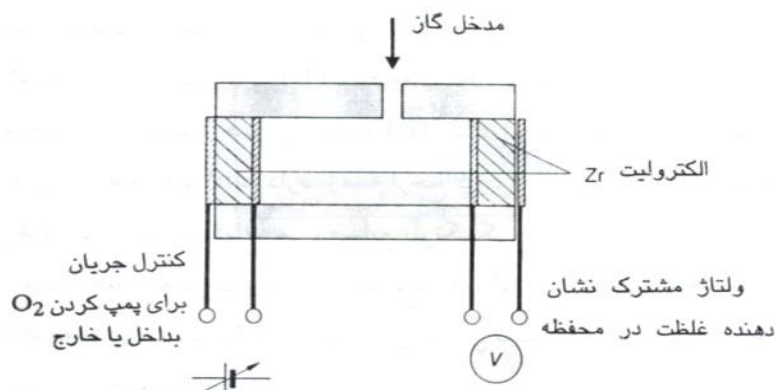
شکل ۸.۲۲ پرب جریان حد برای اندازه‌گیری  $\lambda$  در گازهای اکزوز وسیله نقلیه

جریان حد با غلظت اکسیژن متناسب است. هر دو سنسورهای پتانسیومتری و آمپرومتری می توانند تا دمای چند صد درجه سلسیوس حرارت داده شوند که برای انتقال یون لازم است، هم از طریق حرارت داخلی یا به وسیله ی استفاده از حرارت گازهای اگزوز. آماده ی کار کردن این دو سنسور برحسب پوشش منطقه وسیعی از غلظت سودمند است. شکل 8.23 اصول را نشان می دهد. سنسور پتانسیومتری غلظت را در محفظه اندازه می گیرد. بسته به جهت جریان، سنسور جریان  $O_2$  را به داخل یا خارج محفظه پمپ می کند. این اثر می تواند اکنون برای ارزیابی جامپ در پتانسیل سنسور  $O_2$  پتانسیومتری در نسبت استیوکیومتری در فاصله ی  $O_2$  مازاد ( $\lambda > 1$ )

استفاده شود. به وسیله ی تغییر جریان پمپ امکان دارد که منحنی مشخصه به مقادیر بالاتر از  $\lambda$  حرکت کند. این نوع از سنسور اکسیژن با پمپ اکسیژن جمع شده با استفاده از تکنولوژی فیلم ضخیم رها می شود. پیشرفت های دیگر برای استفاده از مخلوط های رقیق با استهاده از الکترولیتهای جامد مختلف از قبیل  $SrTiO_3$  بررسی شده است.

جدا از استفاده آنها در تشخیص  $O_2$ ، سنسورهای  $ZrO_2$  همچنین می توانند برای تشخیص غیر مستقیم  $H_2$  و  $CO$  یا بخار  $H_2O$  و  $CO_2$  به کار برده شود. کمیت اندازه گیری اکسیژن متصل شده در تعادل شیمیایی است. کوپل کردن سل های اندازه گیری و پمپ اندازه گیری محتویات قابل احتراق گازهای بی اثر را ممکن می سازد.

استفاده از سنسورهای  $ZrO_2$  اندازه گیری  $O_2$  در گازها را محدود نمی کند. آنها همچنین در ارتباط با اندازه گیری مواد مذاب از قبیل فولاد مذاب، مس گداخته یا  $Na$  مایع خیلی جالب هستند. اگر چه  $ZrO_2$  به مراتب اغلب اوقات به عنوان هدایت کننده ی یون ها اکسیژن استفاده می شود،  $TiO_2$ ،  $Nb_2O_5$ ،  $CeO_2$  علاقه ی بیشتری را جلب می کنند. هادی های پرتون، یون هالوژن و کاتیون در مرحله ی آزمایشگاهی توسعه می یابد. مثال های این ها در جدول 8.5 آورده شده است. اگر چه، خیلی مسائل از قبیل جریان برگشت ناپذیر علامت اندازه گیری، مانده که حل شود. پژوهش در توسعه ی سنسورهای آمپروتوری استفاده شده در روش های میکروالکترونیک همچنین جالب هستند.



شکل 8.23 کوپل کردن سنسورهای  $O_2$  پتانسیومتری و آمپرومتری

جدول ۸.۵ هدایت کننده‌های یون مورد استفاده در الکترولیت‌های جامد [۲۵۲].

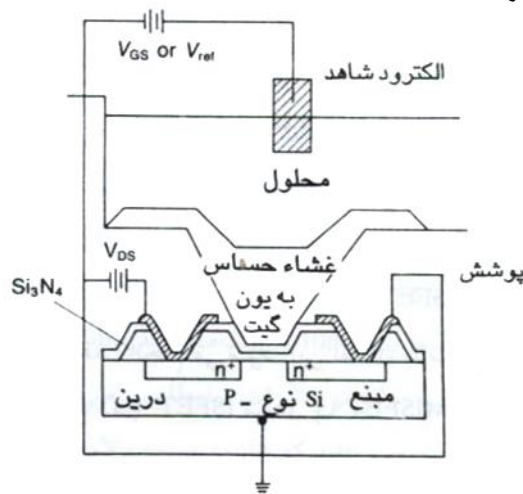
تجزیه سازنده‌ها	گونه یونی حمل شده	هدایت کننده یونی
$H_2O_2$ ، $H_2O_2$ غـ مستقیم، هیدروکربن‌ها	$O^{2-}$	زیرکونیوم اکسید پایدار شده
$O_2$	$O^{2-}$	توریوم اکسید دوپه شده
$H_2$ ، $H_2O$	$H^+$	$SrCeO_3$ دوپه شده
$H_2$	$H^+$	اسیدهای پلی آنتیمونیک $Sb_2O_5 \cdot nH_2O$
$F_2$ ، $O_2$ ، $H_2$ ، $NH_3$	$F^-$	$PbSnF_4$
$CO_2$	$K^+$	$K_2CO_3$ (+ $SrCO_3$ )
$SO_x$	$K^+$	$K_2SO_4$ (+ $BaSO_4$ )

### FETهای حساس شیمیایی (CHEMFETs)

در سال ۱۹۷۰ برگولد نشان داد که اصلاح سازنده میکروالکترونیک به خوبی شناخته شده، ترانزیستور با اثر- میدان (FET)، برای استفاده به عنوان سنسور شیمیایی یعنی، اندازه گیری غلظت های شیمیایی در محلول ها ممکن است به جای اتصال یک الکترو حساس به یون کلاسیک با یک آمپلی فایر FET با مقاومت بالا، عقیده ی برگولد استفاده از FET به طور مستقیم به عنوان یک الکترو حساس -یون (ISE) است. این فکر بذریخیلی از توسعه های جهان گستر است. که هنوز هم ادامه دارد. زمینه ارجح کاربرد این سنسور تشخیص های طبی، مونیتورهای کنترل فرآیند در شیمی، صنایع بیوتکنیکی و داروسازی و در حفاظت محیط زیست است. خیلی تغییرات پیشنهاد شده به وسیله ی برگولد در اصل توسعه یافته است. در زیر مهمترین اصول اساسی نشان داده شده است.

سازنده از زمان های پیش شناخته شده و بارها بررسی شده FET حساس به یون (ISFET) می باشد. این از FET نیمه هادی جدا کننده - فلز (MISFET) تفاوت دارد، که در آن گیت فلزی MISFET به وسیله ی یک ماده ی حساس به یون تعویض شده است. جذب سطحی یا واکنش ها در این لایه سنسور پتانسیل سد ترانزیستور را تعدیل کرده و بنابراین فلوی جریان مابین درین و منبع عبور می کند. توابع ISFET به عنوان یک مبدل امپدانس و آمپلی فایر مستقیماً در محل تشخیص است. اطلاعات تجزیه ای به وسیله ی بزرگی پتانسیل گیت که ISFET را کنترل می کند تهیه می شود. این ولتاژ به کار رفته در الکترو شاهد  $V_{GS}$ ، جامپ پتانسیل در سطح مشترک بین الکترو و شاهد و آنالیت و جامپ پتانسیل در مرز فازی مابین لایه حساس و آنالیت را تولید می نماید. حساسیت شیمیایی ISFET به وسیله ی مواد حساس به یون اندازه گیری می شود. عموماً، هر غشاء که در الکترو حساس به یون استفاده می شود می تواند

همچنین به عنوان ماده ی گیت در یک ISFET ، به کار برده شود. برتری اصلی ISFET ها بر ISE ها بر این حقیقت استوار است که جامپ پتانسیل در لایه حساس به یون می تواند به طور ظرفیتی کوپل شده و بدون جریان اندازه گرفته شود.



شکل ۸.۲۴ ساختمان یک ISFET

این بدان معنی است که استفاده لایه های حساس به یون ممکن است که به طور الکتریکی غیر هادی باشد. عموماً مواد زیر استفاده می شوند.

- غشاهای نفوذناپذیر - بار فعال سطح (یعنی لایه های عایق از قبیل  $ZrO_2$ ,  $Ta_2O_5$ ,  $SiO_2$ ,  $Si_3N_4$ );
- غشاهای خنثی نفوذناپذیر - بار از قبیل لایه های پلیمری (PTFE)
- غشاهای نفوذ پذیر بار، فعال - بدنه ( یعنی، غشاهای مبادله کننده ی یون از قبیل ماتریکس PVC با مبادله کننده های یون مایع);
- غشاهای خنثی، نفوذ پذیر - بار (مواد الکتروفیلی از قبیل والینومایسین);
- غشاهای جدید از قبیل فیلم های لانگ میر - بلودگت (LB)، لایه های نشانده شده یا اصلاح شده ی  $SiO_2-Si_3N_4$ ، پلیمرهای معین (پاریلن)

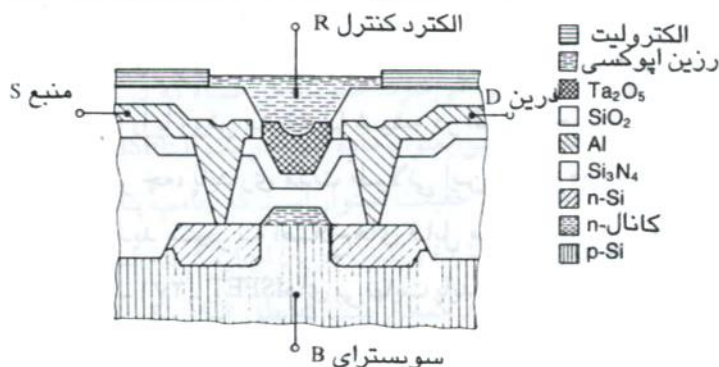
اولین سنسورهای PH به کار برده شده یک FET استاندارد با یک عایق گیت  $SiO_2$  بود که کارهای یک مبادله گر یون را با روش مشابه با شیشه در الکترو حساس -  $Na^+$  یا PH قراردادی انجام می داد. اگر چه، پایداری مدت طولانی این سازنده ها غیر کافی است. تکنولوژی های تولید جدید منجر به اصلاح قابل ملاحظه ای در تعدیل گیت و عایق سازی می شود. ISFET های بی نهایت پایدار برای اندازه گیری مقادیر PH از  $Ta_2O_5$  به عنوان غشاء استفاده می کنند. جدول 8.6 دیگر متدهای تشخیص یون های قلیا، آمونیاک، سلفید و هالید را درج کرده است. همچنین غشاهای جدید اهمیت زیاد و جالبی دارند که بر اساس شیشه های مخصوص است و برای شناسایی یون های فلزی سنگین ( $Tl^{+2}$ ,  $Sn^{+2}$ ,  $Cd^{+2}$ ,  $Pb^{+2}$ ) در آب به کار می روند. ISFET ، که معمولاً به فرم مسطح است، به عنوان یک سازنده منفرد است و این



الکتروکود کوچک شده است. حل این مسئله با استفاده از ترکیب دو ISFET یا یک MISFET - ISFET (ISFET اندازه گیرنده یا شاهد) انجام می شود. این امکان به دست می آید که اثر تداخل کاهش یابد (دریفت، اثر نور، دما). ISFET شاهد یا MISFET به عنوان REFET شناخته شده اند. این ساختار دوگانه با استفاده از تکنولوژی CMOS یا NMOS فراهم می شود.

جدول ۸۶ لایه های غشایی نمونه و موادی که آنها می توانند برای تشخیص استفاده شوند.

نوع غشاء	مواد حساس	مواد قابل تشخیص
دی الکتریک	$Si_3N_4, Al_2O_3, Ta_2O_5$ سیلیکاتها، Na-Al, B-, Al-	$H_2O^+$ $Na^+, K^+, Ca^{2+}$
بلور	AgCl, AgBr, Ag <sub>2</sub> S, LaF <sub>3</sub>	$Ag^+, Li^{3+}$ $Cl^-, F^-, Br^-, S^{2-}, \dots$
ناهمگن	مبادله کننده های یون پلیمر + یونفور یون نشانده شده $SiO_2, Si_3N_4$	$H_2O^+, Ka^+, Na^+,$ $Cl^-, F^-, NO_3^-,$ $NH_4^+$



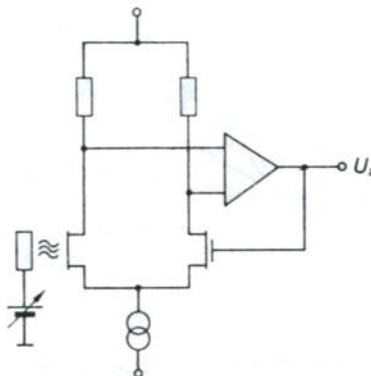
شکل ۸.۲۵ ساختمان یک ISFET-n کانال با لایه گیت  $Ta_2O_5$  حساس - PH [۲۷۰]

الکتروکود کنترل شده ی سهیم پس می تواند برای هر نوع ترکیب عادی استفاده شود. تبدیل علامت شیمیایی به علامت الکتریکی در مرز فازی مابین یک غشاء انتخابی یون و الکترولیت انجام می شود. علامت در ده برابر تغییر غلظت، یعنی، حساسیت شیمیایی، بین 40 و 60 میلی ولت قرار دارد. بعد از فرآیند علامت مناسب، برای مثال استفاده از یک رابطه دیفرانسیلی که در شکل 8.26 نشان داده شده است، علایم اندازه گیری حدود صد میلی ولت به دست می آید. زمان پاسخ تئوریک ISFETها بر حسب چند میکروثانیه می باشد. مع هذا، مقادیر نمونه مابین 10 ms و چند صد میلی ثانیه است.

پدیده ی دریفت به خوبی تأثیر دما و نور اثرات نامطلوبی می باشند. دریفت به ویژه در اندازه گیری مدت - طولانی تجزیه می یابد که نیاز به درجه بالایی از دقت دارد. این ابتدا بستگی دارد به ماده غشاء و می تواند

به وسیله ی کالیبراسیون ممتد یا تصحیح بیرونی حذف شود. اگر دما به وسیله ی اندازه گیری در چیپ به طور اختصاصی ساخته شود.

در کنار ISFET، CHEMFET قبلاً نشان داده شده (نگاه کنید به شکل 8.10) همچنین در سیستم های سیال جالب هستند چون این وسیله زمان عمر را افزایش می دهد. در این سنسور شبکه پلی ایمید تقریباً  $1\mu\text{m}$  بالای سطح گیت قرار دارد این شبکه پلی ایمید (سوراخ های  $10\mu\text{m}$ ) می تواند به عنوان تقویت برای لایه حساس - یون ملاحظه شود. شبکه چسبندگی غشاء را در FET اصلاح کرده و به عنوان یک شبکه زمان عمرشان را افزایش می دهد.



شکل ۸.۲۶ OPV با مرحله ورودی دیفرانسیلی MISFET - ISFET

در اصلاح دیگر طرح CHEMFET، گیت به وسیله ی یک لایه آنزیم حساس جایگزین می شود. این نوع وسیله به عنوان یک ENFET شناخته شده است.

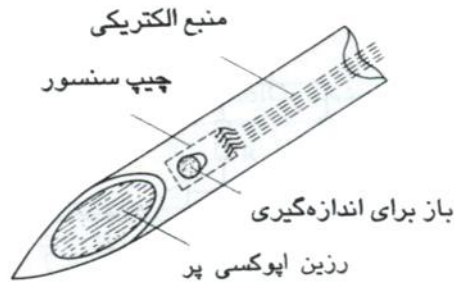
علی رغم پیشرفت های قابل ملاحظه در توسعه CHEMFET ها، هنوز تعداد زیادی از مسائل باید حل شوند از قبیل عایق سازی، پایداری مدت طولانی و دریافت این نشان می دهد که در اصل زمان عمر تقریباً 6 ماه می تواند به دست آید. این برای سنسورهای مورد استفاده منفرد در کاربردهای پزشکی، برای اهداف تجزیه اییا برای کاربردهای صنعتی این سنسورها برای آینده خیلی امید بخش هستند.

ساختمان های کامل شده به طور افزاینده توجه توسعه گران ISFET را جلب می کند. این شامل

- کامل کردن چندین ISFET در یک چیپ منفرد: یک کاره و چند کاره؛
- کامل کردن سازنده های الکترونیکی برای فرآیند علامت (آمپلی فایرها، آمپلی فایرهای دیفرانسیلی) یا برای جبران موانع (سنسورهای حرارتی)؛
- تحقق الکتردهای شاهد میکرو

شکل 8.28 یک مثال از مولتی سنسور برای تشخیص همزمان یون های  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $H^+$  در یک قطره از خون را نشان می دهد.





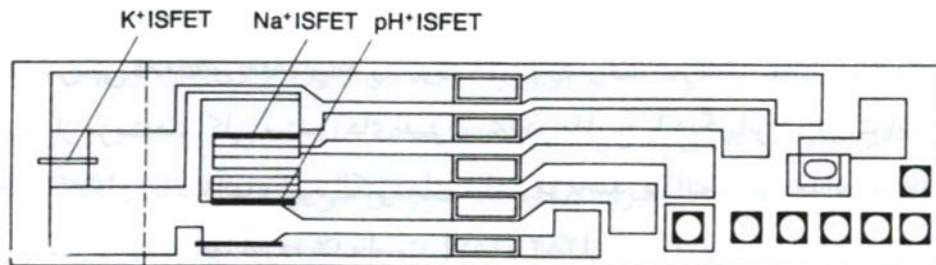
شکل ۸.۲۷ مثالی از سنسور توبولار<sup>۱</sup> برای داخل شدن در بافت [۲۷۲].

## طرح‌های ویژه

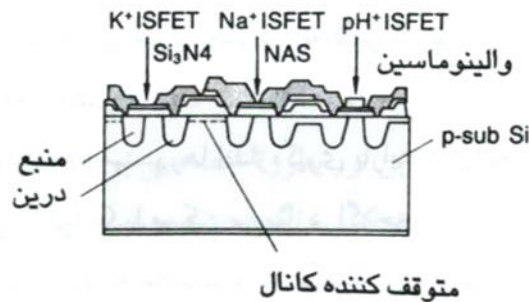
### اپترودها

پیشرفت‌ها در تکنولوژی فیبر نوری استفاده از آن‌ها را در سنسورهای شیمیایی ممکن می‌سازد. این دستگاه‌ها به عنوان سنسورهای شیمیایی - نوری یا اپترودها شناخته شده‌اند، و ظاهراً بر اساس یک اصل عملکرد ساده قرار دارند.

تصویر از بالا



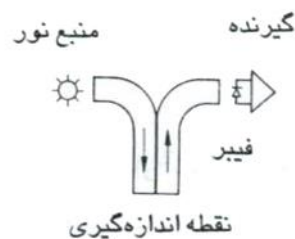
بخش - عرضی



شکل ۸.۲۸ ساختمان یک چیپ مولتی - ISFET

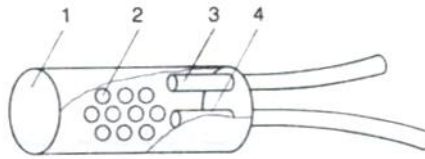
نور از میان فیبر نوری از یک منبع نور (لیزر نیمه هادی، دیود نشر کننده ی نور، لامپ هالوژن) برای اندازه گیری نقطه ای که جذب شده، منعکس شده یا پخش شده، عبور می کند. این می تواند هم به وسیله ی موادی که آزمایش می شوند یا به عنوان نتیجه ی یک واکنش شیمیایی که به وسیله ی این مواد تحت تأثیر قرار گرفته اند انجام شود. علامتی که بدین طریق اصلاح شود از طریق یک فیبر نوری به آشکارگر که تمرکز داده شده، فیلتر شده عبور داده می شود و به علامت الکتریکی که مطابق با مقدار اندازه گیری شده لازم برای آنالیز است تبدیل می شود. صرف نظر از مزیت های کلی سنسورهای فیبر نوری در مقایسه با دیگر انواع، مزیت این اپترودها در انتخابی بودن آن ها و نبود الکترودهای شاهد می باشد. در این جا تعداد کمی از مثال های ممکن بی شمار آن ها آورده شده است.

یک مثال کاربردی برای یک سنسور خارجی، برای مثال، اندازه گیری غلظت اکسیژن خون است. هموگلوبین به رنگ قرمز - ارغوانی خون با افزایش  $O_2$  به اکسی هموگلوبین قرمز روشن تبدیل می شود. تغییر در انعکاس می تواند برای تعیین میزان غلظت اکسیژن در خون استفاده شود.



شکل ۸.۲۹ سنسور فیبر نوری شیمیایی [۲۸۱]

تولید دوم سنسورها اندازه گیری پارامترهای تجزیه ای از قبیل مقادیر PH یا فشارهای جزئی  $O_2$  ,  $CO_2$  را ممکن می سازد. اگرچه، این دستگاه نیاز به یک لایه حساس انتخابی شیمیایی دارد که علامت نوری به وسیله ی شناساگرهای ساکن که کار آنها تبدیل کردن است، به کار می روند. امروزه مواد فلورسانس به عنوان شناساگرها ترجیح داده می شوند به دلیل حساسیت و انتخاب گری بسیار بالایی که دارند. شکل 8.30 یک اپتروود  $O_2$  را شرح می دهد. در آن انتهای خالی فیبر نوری با یک پیگمان فلورسانس پر می شود که در ارتباط با گلوله های کوچک پلی استایرن می باشد و با یک غشاء نفوذ پذیر - اکسیژن پر شده است. یک فیبر نوری (3) نور تعییج شده آبی رنگ به ذرات در انتهای فیبر انتقال می دهد. نور فلورسانس سبز، که شدت آن بستگی به فشار جزئی  $O_2$  دارد، و نور پخش شده ی آبی (که به عنوان علامت شاهد استفاده می شود) از میان فیبر دوم (4) به دیود گیرنده عبور داده می شود. اگر سیستم مورد آزمایش حاوی  $O_2$  باشد پس این موجب تهییج فلورسانس می شود. شدت میزان شده فلورسانس نسبت عکس با فشار جزئی  $O_2$  دارد. این اپتروود برای اندازه گیری های پزشکی، به ویژه در فشارهای جزئی پایین  $O_2$  استفاده می شود.

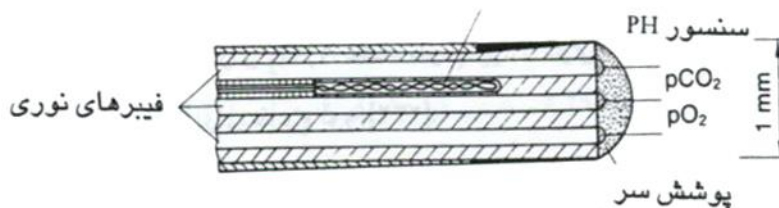


شکل ۸.۳۰ سنسور فیبر نوری برای  $O_2$  (۱: غشاء نفوذپذیر؛ ۲: گوی‌های پلیمری با رنگ؛ ۳: فیبر برای ورود نور؛ ۴: فیبر خروج نور) [۲۳۲].

در اصل این نوع اندازه‌گیری  $O_2$  پیوسته همچنین می‌تواند برای اندازه‌گیری میزان اکسیژن در کابین‌های هواپیما برای آزاد شدن سریع ماسک‌های اکسیژن وقتی فشار افت پیدا می‌کند استفاده شود. اصل جالب دیگر اندازه‌گیری همزمان فشار خون، سرعت نبض و فشار  $O_2$ ،  $CO_2$  در خون را ممکن می‌سازد. این به وسیله‌ی یک دسته از فیبرها در یک انتهای لوله کوتاه به دست می‌آید. در انتهای دیگر یک غشاء نرم، تراوای - گاز و منعکس کننده وجود دارد. نور با طول موج‌های  $760nm$  و  $2\mu m$  داخل سل برای اندازه‌گیری فشار جزئی  $O_2$ ،  $CO_2$  انتشار می‌یابد. قسمتی از این نور به طور اختصاصی به وسیله‌ی دو گاز جذب شده و باقی مانده در طول دسته فیبر به عقب منعکس می‌گردد. توزیع نور مابین فیبرها بستگی به کج بودن غشاء دارد. فرکانس و وسعت تغییر مکان نور اطلاعات پیوسته در مورد سرعت نبض و فشار خون تولید می‌کند. مثال دیگر در شکل ۸.۳۲ نشان داده شده است. یک انتهای هر فیبر در کاتتر با یک لایه مخصوص حساس آماده می‌شود. نور فلورسانس اطلاعاتی درباره‌ی خواصی که اندازه گرفته شده تهیه می‌کند. ساخت سنسور حرارتی بایست به وابستگی دمایی تمام سنسورها طی فرایندی که آنالیز داده‌ها را ممکن می‌سازد اهمیت بدهد.



شکل ۸.۳۱ سنسور مرکب برای تشخیص حجم گاز و فشار [۲۰۷].  
ترموکوپل پوشش پلیمری



شکل ۸.۳۲ سنسور کوچک برای تشخیص مداوم  $pH$ ،  $pO_2$ ،  $pCO_2$  [۲۸۰].  
پوشش سر

در اصل، این همچنین استفاده از زمان زوال فلورانس به عنوان میزانی از غلظت ذرات ممکن است. توسعه های جدید با استفاده از تنها یک فیبر نوری، در انتهای اندازه گیری که تعدادی از لایه های نازک قابل انطباقند امکان پذیر است. نور مرکب از طول موج های مختلف از میان فیبر نوری عبور کرده و آنالیز می شود. این به کوچک کردن زیاد اجازه می دهد آپترودها همچنین آتیه ی خوبی در زمینه ی بیولوژیکی و ایمونوسنسورها نشان می دهند.

جدول 8.7 انواع نمونه ی سنسور گاز نوری را به صورت گروهی درج کرده، در حالی که جدول 8.8 سنسورها را برای تشخیص گونه های یونی ویژه درج کرده است.

### بیوسنسورها

اصولی که تاکنون برای سنسورهای شیمیایی تشریح شد همچنین می تواند بقریباً در کلیات در مورد بیوسنسورها به کار رود. علی رغم این، نیاز است که آن ها به طور جداگانه بررسی شوند چون، از یک طرف، انواع گوناگونی از مواد بیولوژیکی برای تشخیص وجود دارند، و از طرف دیگر، ساختمان های ویژه تولید می شوند.

یک بیوسنسور ساختمانی است که در آن عنصر حساس بیولوژیکی در ارتباط با یک مبدل فیزیکی و الکترونیکی است. جسم تولید یک علامت می کند که با بزرگی یا با فرکانس غلظت ماده ای که اندازه گیری می شود متناسب است. عنصر حساس به طور بیولوژیکی یک سنسور بیواکتیو است و به عنوان گیرنده شناخته می شود. ماده ای که شناسایی می شود، آنالیت، به این گیرنده وصل می شود. این پیش فرض ها که آنالیت با گیرنده عمل مقابل دارد، که آن به طور شیمیایی تبدیل می شود، یا تحت تأثیر بعضی راه های دیگر قرار می گیرد. بدین ترتیب مرحله ی اول در طراحی یک بیوسنسور تأمین کردن آن است که گیرنده به طور اختصاصی با آنالیت اتصال یابد. این موجب می شود که توزیع بار در سازنده گیرنده تغییر یابد. مع هذا، واکنش های ثانوی ناخواسته ممکن است اتفاق بیفتد. این مسئله به وسیله ی نمایش محصولات واکنش های شیمیایی منتج با استفاده از سنسور کاتالیتیک اجتناب می گردد.

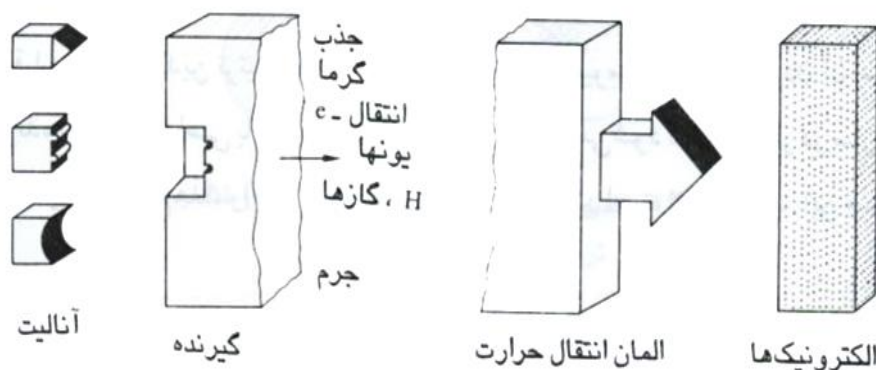
جدول ۸.۷ آپترودهای گازی انتخاب شده [۲۸۰]

گونه ها	روش تشخیصی	مقدار اندازه گیری نمونه
اکسیژن	خاموشی فلورسانس	۰/۵ - ۳۰۰ torr
	خاموشی فسفرسانس	۰/۰۰۰۵ - ۰/۱ torr
CO <sub>2</sub>	از طریق اندازه گیری PH در بافر داخلی	۰/۵ - ۱۰۰ torr
SO <sub>2</sub>	خاموشی فلورسانس	۷۰ - ۵۰۰۰۰ ppm
کلر	جذب داخلی	۰/۰۱ - ۰/۰۵
هیدروژن	اندازه گیری اینترفرومتریک <sup>۱</sup>	۵ - ۲۰۰۰ ppm

جدول ۸۸ سنسور انتخاب شده برای الکترولیت‌ها

گونه‌های	روش تشخیصی	مقدار اندازه‌گیری نمونه
H <sup>+</sup>	رفلکتومتری	واحدهای PH ۳-۲/۵
فلورسانس	واحدهای PH ۴-۵	
Cu <sup>2+</sup>	جذب داخلی در ۸۲۰mm	۵۰-۵۰۰mm
Al <sup>3+</sup>	فلورسانس کمپلکس‌های مورین <sup>۲</sup> ۱-۱۰۰μM	
K <sup>+</sup> , Ca <sup>2+</sup>	رفلکتومتری اندازه‌گیری پتانسیل نوری	۰/۰۰۱-۱۰۰mm
		۵-۵۰mm
Na <sup>+</sup>	فلورسانس	۲۰-۲۰۰mm
هالیدها	خاموشی فلورسانس	۱۵-۲۰۰mm

این نیاز به اتصال یک مبدل مناسب برای تولید کردن اثر دارد، یعنی، تغییر دربار، تولید گاز یا یون، یا تغییر حرارت. این دومین مرحله‌ی توسعه‌ی یک بیوسنسور می‌باشد. مبدل می‌تواند به فرم یک ISE، یک الکتروآپرومتری، یک FET، یک سنسور هدایتی، یک ترمیستور، یک FOS، یا یک کریستال پیزوالکتریک، باشد. تولید علامت در مرحله‌ی سوم اتفاق می‌افتد و ممکن است دوش برای جبران دریافت به کار رود و وابستگی دما یا کالیبراسیون مداوم اجرا شود. این وسعت قابل ملاحظه‌ی قلمرو کاربرد بیوسنسورها، که به گونه‌ی دیگر غالباً یک درجه بالای از پایداری گرمایی و شیمیایی را نشان می‌دهد.



شکل ۸.۳۳ ساختمان یک بیوسنسور

بوسیله نمایش محصولات واکنش‌های شیمیایی منتج با استفاده از سنسور کاتالیتیک اجتناب

با داشتن این تعریف کلی نشان داده شده برای بیوسنسورها، در این جا چندین مثال انتخاب شده آورده می شود. به عنوان یک شاخه از تکنولوژی سنسور، بیوسنسورها به طور رایج توسعه ی قابل ملاحظه ای یافته اند، و خیلی زمینه های جالب کاربردی که هم اکنون وجود دارد یا برای آینده تعیین شده اند (پزشکی، بیوتکنولوژی، کنترل فرآیند، کشاورزی، شیمی، حفاظت محیط زیست، دارو سازی، غیره). خیلی از کارهای توسعه یافته اخیر با سوالاتی در مورد ماده گیرنده سر و کار دارد و راه های ثابت نمودن آن روی مبدل متمرکز است. قبلی نیازمند به دانش بیوشیمی قابل ملاحظه ای دارد، دومی سوالات تکنولوژیکی پیچیده ای را طرح می کند.

کلارک به وسیله ی جاسازی یک محلول آنزیم با یک غشاء نیمه-تراوا در جلو الکتروکد  $O_2$  که وز قبلاً اختراع کرده بود این سنسور را طراحی نمود. این تکنیک الکتروکد آنزیم تعیین کننده ادامه ی تکنولوژی بیوسنسور تا به امروز است. اگر، برای مثال، میزان قند خون تشخیص داده شود پس آنزیم گلوکز اکسیداز (GOD) مورد نیاز است. این آنزیم کاتالیزر برای اکسیداسیون گلوکز به گلوکونیک اسیدها و هیدروژن



$H_2O_2$  تولید شده می تواند در الکتروکد از طریق فرایند اکسیداسیون آندی مشاهده شود. غلظت گلوکز مابین  $10 \mu\text{mol/l}$  و  $5 \text{mmol/l}$  می تواند اندازه گیری شود. الکتروکد شرح داده شده توسط کلارک یک الکتروکد آنزیم آمپرومتری است. الکتروکدهای آنزیم پتانسیومتری می توانند برای اندازه گیری آنالیت هایی به کار روند که تبدیلات آنزیمی موجب یک تغییر در مقدار  $O_2$ ، تولید یا مصرف یون ها یا تولید گازها شوند. این قبیل الکتروکدها برای مثال، برای تعیین حضور اوره یا پنی سیلین استفاده می شوند.

جدول ۸.۹ مثالهایی از بیوالکتروکدها برای آنالیت های ویژه [۳۳۱]

آنالیت	گیرنده	سنسور
گلوکز	گلوکز اکسیداز	الکتروکد $PH, O_2, H_2O_2$
اتانول	الکل اکسیداز	الکتروکد $O_2$
D-آمینو اسیدها	D-آمینو اکسیداز	الکتروکد $NH_4^+$
L-گلو تامین	L-گلو تیمیناز	الکتروکد $NH_4^+$
پنی سیلین G	پنی سیلین از	الکتروکد PH
اوره	اوره آز	الکتروکد $PH$ و $NH_4^+$
	آنتی H- BsAg	الکتروکد $GOD + O_2$
هپاتیت B	آنتی هپاتیت	الکتروکد Ag/AgCl
	آنتی ژن سطحی	
پراکسیداز	کان $A^+$	$H_2O_2$



منابع علمی تاکنون حاوی توضیحات بیوسنسورها برای تعیین حدوداً 110 ماده ی مختلف، از میان آن ها، سوبستراها، باز دارنده ها، فعال کننده ها، کوفاکتورها، گروه های پروستتیک، فعالیت ها آنزیمی، هاپتن ها، آنتی ژن ها یا میکروارگانیسم، آنتی بادی ها، لکتین ها و سیستم های گیرنده بیوتیک برای تشخیص مولکول ها در بیوسنسورها به کار می روند.

جدول ۸.۱۰ اصول بیوسنسورها

۱- سنسورهای آفینته	۲- سنسورهای متابولیک
$S + R \rightleftharpoons SR$	$S + R \rightleftharpoons SR \rightarrow P + R$
تغییر در دانسیته الکترون	انتقال مواد و تشکیل محصولات
گیرنده R	R
علامت شیمیایی S	S
پروتئین	آنزیم
رنگ	سوبسترا
لکتین	کوفاکتور
آپوآنزیم	فعالیت آنزیم
گروه پروستتیک	پارگی بافت
آنتی بادی	آنتی ژن، هاپتن
گیرنده	هورمون
۳- سیستمهای کوپل شده و هیپرید	۶- سنسورهای بیومیمتیک <sup>۱</sup>
تابعیت	گیرنده R
موافقت	علامت S
عدم - مداخله	آنزیم حامل
بسط	صدا
	کشش
	نور

مسئله ی بعدی ثابت نمودن یا بی حرکت کردن این مواد در الکترو می باشد. در اصل ، این به وسیله ی روش های حصاری، اتصال سه بعدی، پیوند کووالانسی یا جذب سطحی به دست می آید. شکل 8.34 تعدادی از گونه ها را نشان می دهد. لایه ی حاوی ماده ی بیولوژیکی جا داده شده باید شرایط معین را اجرا کند از قبیل:

- چسبندگی مناسب به سوبسترا؛
- درجه مناسبی از نیمه - تراوایی؛
- واکنش شیمیایی با قابلیت دوباره تولید شدن؛
- پیوند عمل حداقل به مدت چند روز (به استثنای سنسورهای قابل مصرف)؛
- قابلیت انبار کردن برای چندین ماه؛
- باید ساخت آن ممکن باشد.



شکل ۸.۳۴ ساختمانهای ممکن برای بیوالکتردها [۲۹۶].

الکتردهای بیویژه به سه دسته از توسعه بسته به درجه جمع شدن سازنده های آن ها طبقه بندی می شوند. ساده ترین اصل بر اساس کوپل شدن بیوکاتالیست ها است که شامل غشایی است که در جلو الکترد واقع شده است، که به عنوان ترانس داکتور عمل می کند یا به عشاء وصل شده است (دسته ی اول). اتصال فیزیکی یا شیمیایی مستقیم به سطح الکترد منجر به زمان های پاسخ سریع به واسطه ی امیسیون در غشاء دیالیز می گردد. غیر متحرک بودن سوبستراها با هم توسعه میزان دینامیک الکتردهای آنزیمی را ممکن می سازد (دسته ی دوم). ثابت کردن بیوکاتالیست به یک سازنده الکترونیکی، برای مثال به گیت FET، که فرآیند علایم دهی را به طور مستقیم انجام می دهد، منجر به کوچک کردن بیشتر شده و قرار دادن تعدادی از سنسورها را در یک چیپ ساده ممکن می سازد (دسته ی سوم) بنابراین ساخت سیستم های سنسور که بتوانند به طور همزمان آنالیزهای گوناگون را تشخیص دهند و یا پروفیل غلظت یک آنالیت منفرد را تشخیص دهد را ممکن می سازد. اگر چه هیچ شکی نیست. که این دسته اهمیت زیادی در آینده دارند، مسائل هنوز تا امروز وجود دارند. این شامل مشکل به کار گیری یک سازگاری تکنولوژیکی، لایه ی قابل



ساخت به ISFET,PH یا مشکل اثر جنبی کوچک کردن از قبیل نفوذ تغییرات در مقادیر PH یا ظرفیت بافر پروب اندازه گیری است. به همین دلیل سنسورهای دسته ی اول تا به امروز، با الکترودهای آنزیم آمپرومتری بر اساس غشاءهای چند لایه بهره مند از کاربرد با میزان وسیع تعیین کننده می باشند. این فرایند، میزان اندازه گیری خطی برای مقادیر مختلف غلظت با حد تشخیص پایین تر از  $1\mu\text{mol/l}$  یک قابلیت دوباره 10000 اندازه گیری برای هر غشاء، و اجازه به یک فرکانس پروب 300/h می باشد. کاربردها در تشخیص های طبی، برای مثال آنالیزور آنزیم- شیمیایی ECA 20 برای تشخیص قند خون، در کنترل تخمیر یا در حفاظت محیط زیست مثال های موثری از امکان های با برد وسیع است.

مزیت اصلی بیوسنسورها بر این حقیقت استوارند که آن ها می توانند به طور مستقیم در محیط های مایع استفاده شوند و دارای درجه ی بالایی از انتخاب گری هستند، که اندازه گیری سازنده های تنها را در مخلوط های پیچیده بدون جداسازی اولیه آن ها ممکن می سازد. کار اخیر اندازه گیری آنالیت ها در فاز گازی، برای مثال بیوسیدها را بررسی می کند. این به وسیله ی آنزیم های غیر متحرک شده یا آنتی بادی ها روی کریستال های پیزوالکتریک به دست می آید. اگر اتصال آنالیت موجب بالا رفتن وزن کریستال شود، این موجب تغییر در فرکانس نوسان می شود. اولین تلاش برای استفاده از این روش برای تشخیص داروها و مواد منفجره خیلی موفقیت آمیز بود. این روش کاملاً در ارتباط با سنسورهای رزونانس بحث شده است. سنسورهای SAW، که به طور افزاینده ای به عنوان هم سنسورهای شیمیایی و هم بیولوژیکی جالب هستند، همچنین تحت این عنوان مورد بحث قرار گرفته اند.

### سنسورهای رطوبت

توانایی هوا در نگه داشتن آب تاثیر قابل ملاحظه ای روی تعداد زیادی از فرآیندها که در اتمسفر عادی انجام می گیرند دارد، برحسب تعداد کاربردهایی که شامل می شود، آب ممکن است ماده خیلی مهمی در زندگی روزمره ی ما باشد و آن در هوا، جامدات و سیالات اتفاق می افتد. آن در این مواد تشخیص داده می شود. با وجودیکه جمله «رطوبت» معمولاً به آب موجود در هوا اطلاق می شود (که مهمترین کار اندازه گیری رطوبت نشان داده می شود)، آن اغلب خیلی مفید است که بتوان محتوای آب جامدات و مایعات را به طور مستقیم تعیین نمود.

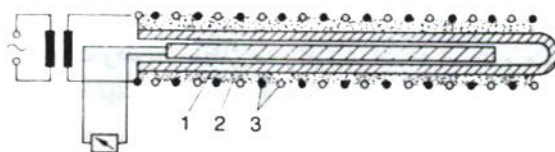
وقتی غلظت بخار آب در گازها، اصولاً هوا، تعیین می شود مهم است که میان موارد زیر فرق گذاشت:

- رطوبت مطلق، که مقدار بخار آب موجود در واحد حجم گاز است، و به وسیله ی گرم بر متر مکعب اندازه گیری می شود.
- رطوبت اشباع، که مقدار ماکزیمم آب در واحد حجم گاز است که گاز در دمای داده شده نگه می دارد؛ و
- رطوبت نسبی، که نسبت رطوبت مطلق به رطوبت اشباع است و مقدار آن بین 0,1 می باشد.

همچنین نسبت فشار جزئی بخار آب در دمای اندازه گیری به فشار اشباع ممکن در همان دما استفاده شود. عموماً، آن رطوبت نسبی است که مهمترین مقدار اندازه گیری شده را نشان می دهد یک اندازه ی قابل استفاده غالباً نقطه ی تراکم می باشد. این دمایی است که در آن رطوبت مطلق اتمسفر که قابل ملاحظه است فرض می شود که رطوبت نسبی در آن مقدار 1 را دارد. وقتی که دما زیر این نقطه بیفتد بخار آب شروع به تراکم می کند.

اندازه گیری مستقیم محتوای آب مایعات و جامدات خیلی مشکل است چون آن به ندرت ممکن است که محتوای آب یک محصول به عنوان یک اندازه گیری جداگانه انجام شود. در جامدات این مقدار به راحتی به وسیله ی وزن کردن محصول، خشک کردن آن، و سپس دوباره وزن کردن آن به دست می آید. اگر چه، تعدادی منبع خطا در ارتباط با این روش، برای مثال، تجزیه شدن پروب، طول مدت خشک کردن، و نوع پیوند آب وجود دارد.

سیستم های اندازه گیری موثق از زمان های طولانی برای تعیین مقدار رطوبت وجود داشته است. این شامل روش های مکانیکی از قبیل رطوبت سنج مو، پسی کرومتر، و شناساگر رطوبت LiCl که در آن مقاومت سطح سنجیده می شود. ساختمان این شناساگر کلاسیک در شکل 8.35 نشان داده شده است. یک ولتاژ a.c. در الکتrod شماره 3 به کار برده می شود. این موجب جاری شدن یک جریان از میان LiCl و گرم شدن محلول LiCl می گردد. در نتیجه آب از محلول بخار می شود. به زودی تمام آب بخار می شود، هدایت، و با آن جریان مابین الکتrodها، به سرعت تنزل و دما سقوط می کند، رطوبت سنج LiCl حالا قادر به جذب آب از هوا است. هدایت آن افزایش یافته و جریان دوباره موجب تبخیر آب می شود. در این روش دما خودش را به حالت تعادل مابین توان الکتریکی به کار گرفته شده و انرژی گرمایی مورد نیاز برای تبخیر تنظیم می کند. این تعادل به طور انحصاری بستگی به فشار بخار آب هوای اطراف دارد و بنابراین میزانی از رطوبت مطلق است. دما در تعادل به وسیله ی اندازه گیری مقاومت (1) ثبت می شود و سپس به عنوان یک کمیت الکتریکی عمل می کند. اندازه گیری رطوبت نسبی %90-15 در دمای  $0-60^{\circ}\text{C}$  ممکن است. زمان پاسخ بر حسب دقیقه می باشد.



شکل 8.35 رطوبت سنج LiCl (۱) اندازه گیری مقاومت ساخت شده از Pt، ۲: فیبر شیشه ای با LiCl؛

۳: فیلمان های الکتrod.

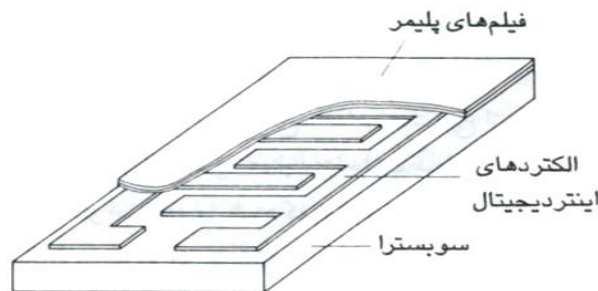
اهمیت تکنیکی این آشکارگرهای کلاسیک امروزه که سنسورهای قابل کوچک کردن، چپتر هستند، تندتر و بعضی اوقات خیلی صحیح است. سه روش توسعه وجود دارد. تغییرات در مقاومت، به ویژه در مقاومت سطح، اساس یک نوع از سنسورها است. این شامل رطوبت سنج های سرامیکی است که همچنین جذب سطحی آب در سطح داخلی مواد سرامیکی خلل و فرج دار استفاده می شود که از پودر سینتر شده است. سرامیک های مورد استفاده  $\text{TiO}_2\text{-V}_2\text{O}_5$ ،  $\text{MgCr}_2\text{O}_4\text{-TiO}_2$ ،  $\text{ZnCr}_2\text{O-LiZnVO}_4$  و پرووسکیت است. سنسورهای ساخته شده از  $\text{MgCr}_2\text{O}_4\text{-TiO}_4$  به طور تجارتي در اجاق های میکروویو استفاده می شود. آن ها دارای زمان پاسخ حدود 20S و میزان رطوبت در حدود 30-90% می باشند. دیگر سنسور بر اساس مقاومت شامل پلی استایرن سولفون شده یا پودر کربن سوسپانسه شده در سلولز ژلاتین می باشد. هدایت سطح این سنسورها وقتی آنها آب می گیرند تغییر می کند. موادی از قبیل ترکیب های  $\text{LiF/Al}_2\text{O}_3$ ، فسفات های زیرکونیوم و سیلیکات ها، پلی سیکلو اکسان ها با گروه های آب دوست، و پلیمرهای معین برای این دسته از سنسور مساعد هستند. پلیمرها باید به رطوبت حساس و در همان زمان غیر قابل حل در آب باشند. پلی وینیل پیریدین متصل شده به طور رایج برای این نیاز مناسب است.

سنسور نوع دوم تغییراتی را در ظرفیت ایجاد می کند. به طور کلی، این سنسورها برد وسیعی از رطوبت ها را ثبت می کنند و از سنسورهایی که بر پایه ی روش مقاومت قرار دارند بسیار صحیح تر هستند. به خاطر سادگی، اگر از اثرات حاشیه ای صرف نظر شود ظرفیت یک صفحه ی ظرفیت به وسیله ی رابطه ی زیر به

$$C = \epsilon_r \epsilon_0 A / d$$

دست می آید.

که  $A$  مساحت و  $d$  فاصله مابین صفحات،  $\epsilon_0$  ثابت دی الکتریک (DC) و  $\epsilon_r$ ، DC نسبی است. اثر سنسور را تعیین می کند. این با کاهش DC مواد حامل افزایش می یابد.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  خلل و فرج دار در ابتدا با DC نسبی 10 به عنوان مواد سنسور استفاده می شود. روش های فیلم - نازک از آن به عنوان سوبسترا (شیشه، سرامیک) استفاده کردند چون آن ها ساختمان ساده دارند و لایه ها جمه و جور است. در کنار  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ، اکسید تانتالیوم و اکسید تیتانیوم استفاده می شوند. اخیراً پلیمرهای با یک DC نسبی 2-15 به طور روزافزونی انتخاب می شوند. این مواد دارای درجه ی بالایی از پایداری مدت - طولانی و شامل استات سلولز، پلی استایرن، پلی ایمیدها هستند که می توانند داخل لایه ها، حساس با استفاده از روشهای پوشش قالبی، به خوبی پلیمرهای تولید شده به وسیله ی پلیمریزاسیون تخلیه ی گرم تشکیل شوند. ظرفیت می تواند هم در صفحه جاذب شبه - فیلم یا حالت عمودی آن اندازه گیری شود.

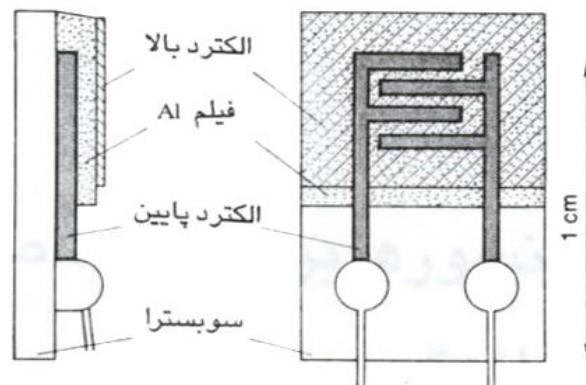


شکل ۸.۳۶ سنسور رطوبت ظرفیتی صفحه ای

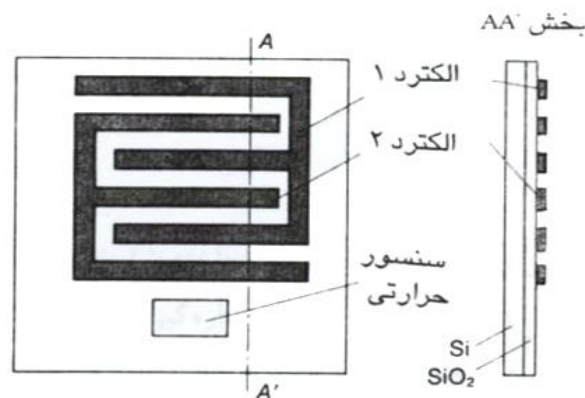
در مورد دوم، ساختمان «ساندویچی»، یکی از دو الکترو د باید به رطوبت تراوا باشد. عموماً، این به وسیله ی استفاده از یک فیلم طلائی صورت می گیرد که ضخامت آن یک سازشی مابین پایداری عنصر (فیلم - ضخیم) و زمان پاسخ پایین (فیلم - نازک) را نشان می دهد.

این نوع از سنسور رطوبت بر اساس - پلیمر، برای مثال، برای اندازه گیری رطوبت نسبی از روی برد کامل مقادیر در دماهای مابین  $80^{\circ}\text{C}$  و  $175^{\circ}\text{C}$  و دارای یک صحت بهتر از 1% در دسترس است. وقتی عملیات در نزدیکی نقطه تراکم انجام شود، این سنسورها می توانند در دمای مابین  $60^{\circ}\text{C}$  و  $30^{\circ}\text{C}+$  استفاده شوند. در این مثال ارزیابی الکترونیک ها شامل یک پل اندازه گیری HF با خطی نمودن بعدی مقادیر علامت می باشد. کاربردهای دیگر با استفاده از ASIC ها انجام می شود.

خازن، سنسورهای دطوبتی پلیمر در حال حاضر با دریافت پایین و زمان عمر چندین سال ساخته می شود. یک درجه بالایی از برگشت پذیری می تواند به دست آید. آنها بعضی اوقات می توانند برای تعیین محتوای آب مواد مایع از قبیل محلول های آلی یا سوخت استفاده شوند.



شکل ۸.۳۷ سنسور رطوبت با استفاده از ساختمان 'ساندویچی'



شکل ۸.۳۸ سنسور نقطه تراکم

نوع سوم سنسور رطوبت نقطه ی تراکم می باشد. نقطه ی تراکم، همان طور که تعریف آن پیشنهاد می کند، به وسیله ی سرد نمودن سطح آزمایش و مشاهده ی متراکم شدن یا تشکیل لایه مایع به عنوان تابعی از دما می تواند اندازه گیری شود. این مشاهده، برای مثال، می تواند به طور نوری انجام شود. اگر سطح آزمایش صاف و صیقلی باشد، آن به وسیله ی ته نشینی آب تیره شده و انعکاس پرتو نور پخش می شود. این اثر برای تشخیص آسان است. غالباً، روشهای اندازه گیری خازن یا هدایت موارد استفاده قرار می گیرد. شکل 8.38 یک نمونه از سنسور نقطه ی تراکم خازن را نشان می دهد. یک الکتروود با استفاده از عمل تکنیک فیلم – نازک به عنوان یک خازن با یک ظرفیت به کار می رود که وقتی مایع روی آن می نشیند تغییر می کند.

هیچ سنسور کوچک شده برای اندازه گیری محتوای آب جامدات وجود ندارد. روشهای کلاسیک اندازه گیری هدایت الکتریکی همراه با جذب میکروویو و مادون قرمز تعیین کننده است.