

معرفی ریز حسگرهای امواج آکوستیک و کاربرد آنها به عنوان حسگر شیمیایی

Introduction to Acoustic Wave Micro Sensors and Their Application as Chemical Sensor

پروین شکرالهی

مرکز تحقیقات پلیمر ایران

دریافت: ۷۳/۶/۵، پذیرش: ۷۳/۷/۲۰

چکیده

در بسیاری از روشهای دستگاهی از یک منبع مناسب برای تشخیص کمی و کیفی مواد شیمیایی استفاده می‌شود. این منبع می‌تواند موج نور (نور مرئی، فرابنفش، زیر قرمز و لیزر) یا موج آکوستیک (صوت، فراصوت، فروصوت) باشد. در ابزارهایی که با استفاده از موج آکوستیک کار می‌کنند، تغییر سرعت و دامنه موج آکوستیک در اثر تغییرات فیزیکی محیط مورد سنجش، عامل اصلی پاسخ دستگاه است. این ابزارها در محیطهای خلاء گاز و مایع مورد استفاده قرار گرفته‌اند و معلوم شده است که می‌توانند در مورد بارگذاری جرمی، مدول پلیمرها، دماهای انتقال پلیمری مانند T_g و T_{α} ، رسانایی فیلمهای پلیمری، دمای پخت پلیمرها، گرانشی و چگالی مایعات و تخلخل سطح فیلمهای به کار رفته اطلاعات مفیدی ارائه دهند.

واژه‌های کلیدی: حسگر، آکوستیک، امپدل، بلور پیزوالکتریک، آشکارساز جرمی.

Key Words: sensor, acoustic, transducer, piezoelectric crystal, mass detector

مقدمه

آکوستیک به موج فشاری تناوبی (periodic pressure wave) گفته می‌شود. آکوستیک با صوت مترادف است و شامل امواج با بسامد شنودی (audio) که به وسیله گوش انسان قابل دریافت است، بسامدهای بالاتر از صوت (فراصوت) و بسامدهای پایینتر از صوت (فروصوت) می‌شود. اندازه‌گیریهای آکوستیک از نوع دینامیک - مکانیکی است. ولی، اندازه‌گیری دینامیک - مکانیکی غالباً در بسامدهای پایین انجام می‌شود.

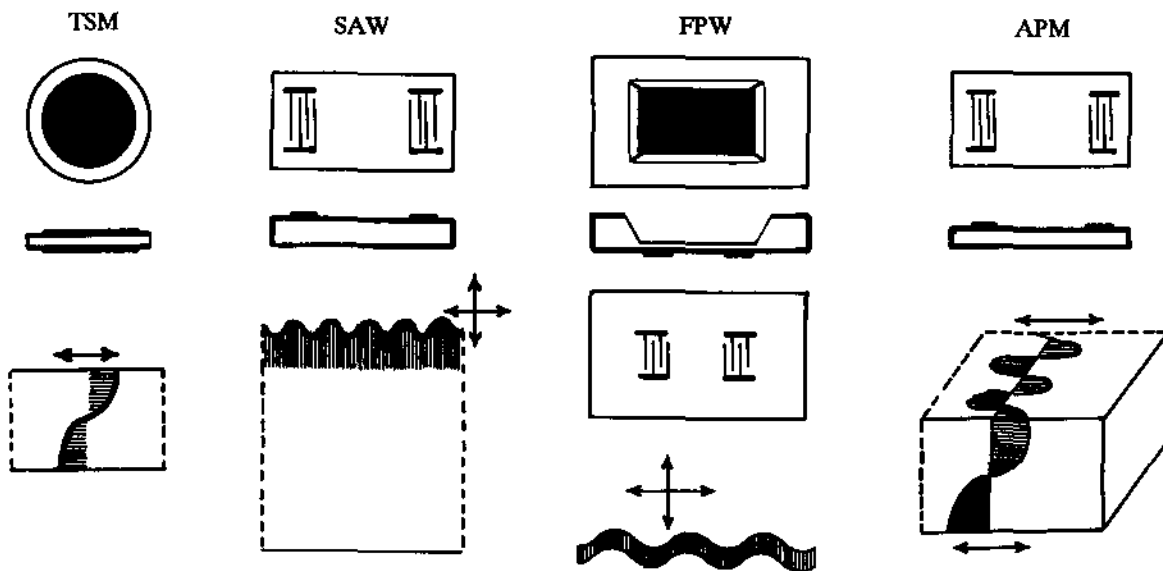
اندازه‌گیری سرعت و جذب صوت در پلیمرها برای تعقیب ساختار مولکولی آنها مفید است. خواص آکوستیکی را می‌توان به عوامل ساختاری نظیر دمای انتقال شیشه‌ای، چگالی پیوندهای عرضی،

شکل شناسی و ترکیب شیمیایی نسبت داد. بنابراین، اندازه‌گیری آکوستیکی می‌تواند برای بررسی این عوامل یا حداقل نمایش تغییراتی به کار رود که به صورت تابعی از زمان، دما، فشار یا متغیرهای دیگر رخ می‌دهند [۱].

در این مقاله، اندازه‌گیری تغییرات سرعت و بسامد موج آکوستیک در محیطهای مختلف و روشهای عملی برای این اندازه‌گیریها مورد بحث قرار می‌گیرد و از مقوله جذب صحبتی به میان نمی‌آید.

بحث

ریز حسگرهایی که در آنها از امواج آکوستیک به عنوان منبع استفاده



شکل ۱ - ساختار ابزارهای TSM، SAW، FPW، و APM [۲].

مسیری برای عمل ابزار و روشی برای اندازه‌گیری مشخصات موج است. تغییر در سرعت، بسامد یا دامنه موج نشان دهنده تغییر خواص فیزیکی است که در سطح ابزار رخ می‌دهد. برای به کارگیری این ابزارها به عنوان حسگرهای شیمیایی معمولاً لایه‌ای به سطح آنها اضافه می‌شود که قادر به احساس و برقراری پیوند با آنالیت مورد نظر است. پیوند یاد شده باعث انتقال آنالیت از محیط مورد آزمایش به سطح ابزار می‌شود و در نتیجه یک یا چند خاصیت فیزیکی تغییر می‌کند که موج اکوستیک به آن پاسخ می‌دهد. لایه‌های گزینشگر شیمیایی دامنه وسیعی از مواد، از جمله فیلمهای نازکی از پلیمر یا سایر مواد آلی، کمپلکسهای فلزات واسطه، مواد الکتروفعال، فیلمهایی از فلزات و اکسید آنها را در برمی‌گیرد [۲].

ساختمان و اجزای ابزار اکوستیک

یک ریز ابزار (microdevice) اکوستیک معمولاً شامل ماده پیزوالکتریک با یک یا چند مبدل فلزی روی سطح (سطوح) است. این مبدلها، امواج اکوستیک را در بسامدهای فراصوت، از ۱ تا صدها مگاهرتز، می‌فرستند. کوارتز به دلیل پایداری گرمایی بالا، متداولترین ماده پیزوالکتریک است و به شکل ورقه جلادار یا فیلم جهت یافته به کار می‌رود. انواع مواد دیگر نیز می‌توانند در کاربردهای ویژه خواص

می‌شود، گروه وسیعی از حسگرها را تشکیل می‌دهند. از آنجا که این گروه به تغییرات جرم در سطح بسیار حساس‌اند، کاربردهای زیادی به‌عنوان حسگرهای شیمیایی یافته‌اند. به علاوه، با استفاده از این حسگرها می‌توان خواص متعدد دیگری از جمله چگالی و گرانشی مایع و همچنین مدول پلمری و رسانایی الکتریکی را در محیطهای مایع یا جامد تعیین کرد.

ابتدا ابزارهایی که به عنوان حسگرهای شیمیایی به کار می‌روند، معرفی می‌شوند. مهمترین این ابزارها عبارت‌اند از: TSM (Thickness Shear Mode) SAW (Surface Acoustic Wave)، FPW (Flexural Plate Wave) و APM (Acoustic Plate Mode)*. ساختار این ابزارها در شکل ۱ نمایش داده شده است. سطح حس‌کنندگی در آنها عموماً دارای مساحتی معادل 1cm^2 یا کمتر است [۲]. در این شکل نماهای جانبی مقاطع عرضی ابزارند. تصویر پایین هر ستون حرکت موج و پیکان دو جهته‌دار، راستای جابه‌جایی ذرات سطحی را نشان می‌دهد. ناحیه هاشور خورده معرف عمق نفوذ موج در ورقه است.

عملکرد ابزار اکوستیک

استفاده از موج اکوستیک نیازمند وجود ابزاری برای تولید امواج،

* امواج اکوستیک می‌توانند به چند شیوه منتشر شوند. ابزارهای اکوستیک را بر حسب شیوه انتشار امواج اکوستیک، که به عنوان منبع مورد استفاده قرار می‌گیرد، تقسیم‌بندی می‌کنند. در این تقسیم‌بندی TSM شیوه برشی مربوط به ضخامت، SAW موج اکوستیک سطحی، FPW موج تخت خمشی و APM شیوه تخت اکوستیک است.

افقی برشی (shear horizontal mode) طوری قطبیده شده‌اند که جهت انتشار آنها موازی با سطح حس‌کننده است، در حالی که در شیوه عمودی برشی جهت انتشار عمود بر سطح حس‌کننده است.

امواج اکوستیک تولید شده در ابزار TSM (شکل ۱) از نوع عرضی هستند. ضخامت ورقه، d ، طول موجهای اصلی ($n=1$) و هماهنگهای ($n=2,5,7$) رزونانس را بر اساس معادله $\lambda = 2d/n$ تعیین می‌کند. بسامد رزونانس شیوه اصلی ۵ تا ۱۰ مگاهرتز است و با کاهش ضخامت ورقه افزایش می‌یابد. مبدلهای روی TSM شامل فیلمهای نازکی هستند که به عنوان الکترود عمل می‌کنند. این مبدلهای دو طرف (پشت و رو) ورقه واقع شده‌اند. این الکترودها در مجموع یک جزء الکتریکی هستند. در ابزار TSM، نقش پارامترهای سطح مشترک، که تعدادی از آنها در شکل ۲ نشان داده شده‌اند، به ویژه مهم است و روی پاسخ ابزار اثر می‌گذارد [۲].

اگر ماده‌ای روی یک یا هر دو وجه بلور پیزوالکتریک بنشیند، بسامد رزونانس کاهش می‌یابد. ارتباط کمی بین عوامل یاد شده برای نخستین بار توسط ساوربری ارائه شد [۳]:

$$\Delta f = \frac{2F_q^2}{\sqrt{\mu_q P_q}} \times \frac{\Delta M}{A}$$

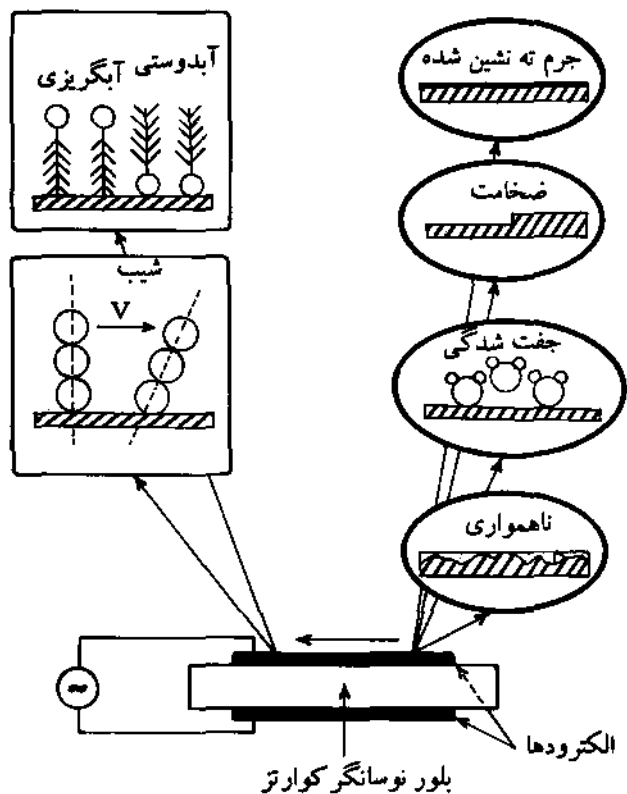
که در این معادله Δf تغییر بسامد، ΔM جرم اضافه شده، F_q بسامد رزونانس اصلی کوآرتز بدون افزایش جرم، μ_q مدول برشی کوآرتز ($2/947 \times 10^{11} \text{ gcm}^{-2}$)، P_q چگالی کوآرتز ($2/648 \text{ gcm}^{-3}$) و A مساحت سطح بر حسب cm^2 است. با قرار دادن مقادیر ثابت و استفاده از معادله $\Delta m = \Delta M/A$ داریم:

$$\Delta F = -C_1 \Delta m$$

که در آن $C_1 = 2/26 \times 10^{-6} F_q^2 \text{ Hz cm}^2 \text{ g}^{-1}$ ، Δm جرم اضافه شده به واحد سطح بر حسب gcm^{-2} است. بدین ترتیب ΔF با Δm رابطه خطی دارد و این معادله ساده اساس به کارگیری بلور پیزوالکتریک با حد تشخیص 10^{-12} g است [۳].

ابزار SAW (شکل ۱) پس از اختراع مبدلهای درون رقیمی، (Inter Digital Transformer) IDT، توسعه یافتند. مبدلهای درون رقیمی روی ورقه‌های نسبتاً ضخیم کوآرتز امواج رایلی تولید می‌کنند که انرژی آنها در ناحیه‌ای با ابعاد طول موج اکوستیک متمرکز است [۲].

اگر یک الکترود فلزی به صورت دندان‌های نازک روی هم در سطح بلور پیزوالکتریک قرار بگیرد (شکل ۳)،



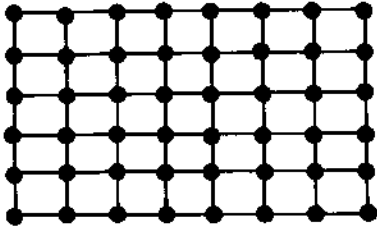
شکل ۲ - نمودار عوامل مؤثر در سطح مشترک که بر رفتار حسگر TSM نوسانی در فاز مایع حاکم‌اند [۳].

مطلوبتری ارائه دهند.

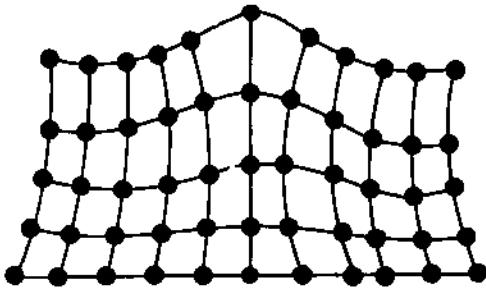
جهت‌یابی بلوری (crystal orientation) و ضخامت بستر پیزوالکتریک و وضعیت هندسی مبدل فلزی، نوع موج اکوستیک تولید شده و بسامد رزونانس ابزار را تعیین می‌کند. موج می‌تواند در توده ماده ورقه‌ای پیزوالکتریک حرکت کند [۲].

یک خط مرجع به موازات جهت انتشار موج و یک صفحه مرجع در سطح حس‌کنندگی ابزار برای دسته‌بندی این موجها مفید است. موجهای عرضی (transverse) دارای جابه‌جایی ذرات محیط انتشار در جهت عمود بر راستای انتشار موج‌اند و می‌توان آنها را طوری قطبیده کرد که جا به جایی ذرات به صورت موازی یا عمود بر سطح حس‌کننده اتفاق بیفتد. برعکس، جا به جایی ذرات محیط انتشار در امواج تراکمی (compressional) موازی با جهت انتشار موج است. ابزارهایی که در اینجا مورد بحث قرار می‌گیرند امواجی تولید می‌کنند که یا عرضی‌اند، یا یک جز عرضی دارند.

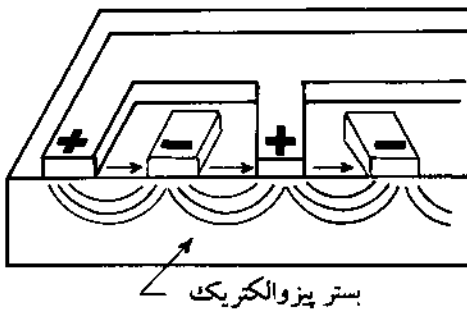
امواج عرضی را امواج برشی (shear) نیز می‌نامند. امواج با شیوه



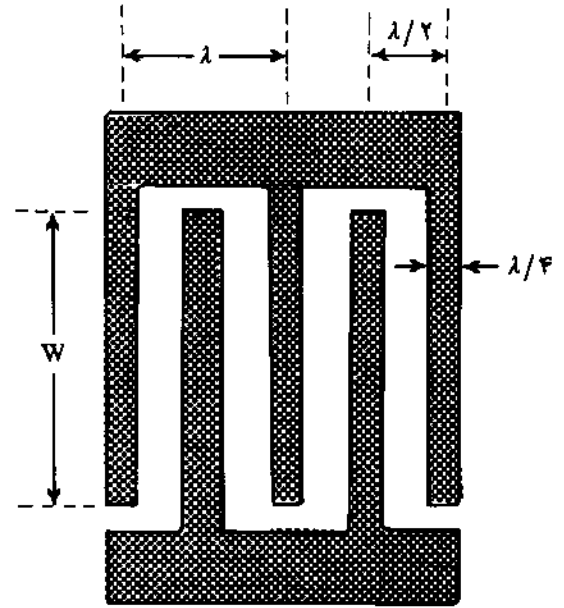
شکل ۴ - محل ثابت ذرات در بلور جامد، وقتی ماده تحت تنش قرار نگرفته است [۵].



شکل ۵ - جابه جایی ذرات جامد کشسان، در اثر موج سطحی اکوستیک یا رایلی، که پیچیده است و تنها در نزدیکی سطح جامد مشاهده می شود [۵].



شکل ۶ - عملکرد IDT، علامت الکترومغناطیس با بستر پیزوالکتریک برهم کنش دارد. این برهم کنش به طور متناوب بستر را آشفتگی می کند که در پی آن فرایند آسایش اتفاق می افتد [۵].



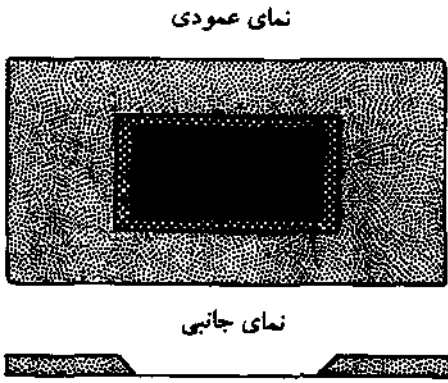
شکل ۳ - طراحی IDT ابزار SAW [۵].

IDT ساخته می شود. میدانهای الکتریکی که با IDT تولید می شوند، باعث جابه جایی ذرات جامد در جهتی می شوند که با ضریب جفت شدگی پیزوالکتریک (piezoelectric coupling coefficient) تعیین می شود. در مرحله بعد موج تولید شده با یک IDT دیگر و به روش مشابه آشکار می شود [۴].

اساس کار ابزار SAW بسیار ساده است. یک موج اکوستیک در بستر پیزوالکتریک منتشر شده و اگر ماده دیگری نیز در مسیر موجود باشد، با آن وارد برهم کنش می شود. این برهم کنش به گونه ای است که برخی خواص موج مانند دامنه، فاز و محتوای هماهنگ (harmonic content) آن را تغییر می دهد. اندازه گیری تغییرات مشخصات موج سطحی، شناساگر حساسی برای تعیین خواص موادی موجود در سطح ابزار است.

جابه جایی ذرات در ماده مولد موج اکوستیک، در شکل های ۴ و ۵ نشان داده شده است. IDT برای اعمال میدان الکتریکی متناوب به ماده پیزوالکتریک به کار می رود. برای این منظور یک منبع تحریک بسامد رادیویی به IDT متصل شده و موج سطحی را به روشی که در شکل های ۶ و ۷ نشان داده شده است تولید می کند.

بسامد عمل حسگرهای SAW معمولاً بین ۳۰ تا ۳۰۰ مگاهرتز است. ابزار SAW می تواند دو نوع آرایش داشته باشد. این آرایشها در شکل های ۸ و ۹ نشان داده شده اند. شکل ۸ آرایش با خط تأخیر (delay line) را نشان می دهد که IDTها در دو انتهای ورقه قرار دارند [۶].



جزئیات غشا



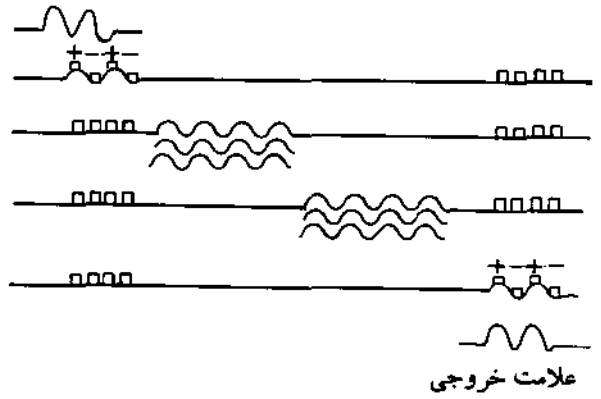
شکل ۱۰ - نمودار اجمالی FPW. در نمای عمودی، غشا به رنگ سیاه نشان داده شده است و IDTها در دو سوی آن واقع شده‌اند [۷].

آرایش تشدیدگر می‌تواند با یک یا دو IDT در حفره ساخته شود (شکل ۹).

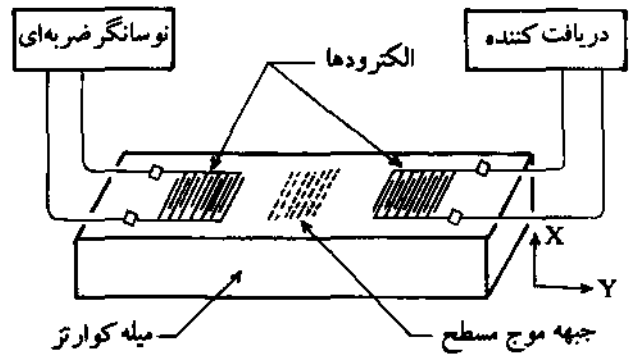
IDTهای روی صفحه پیزوالکتریک قادرند، بسته به جهتگیری بلورها و ضخامت ورقه، امواج دیگری را نیز القا کنند. با تغییر جهتگیری بلورها در محیط می‌توان روی صفحه نازک موج سطحی از نوع افقی برشی نیز تولید کرد. IDT ورودی امواج سطحی تولید می‌کند که سرعت آنها با جنس ورقه و طول موج با تناوب مبدل کنترل می‌شود. تناوب مبدل عبارت از فاصله بین دو دندان متوالی است که به یک میله اصلی متصل‌اند. ابزارهای که برای تولید این امواج طراحی شده‌اند ظاهری شبیه به SAWهای با خط تأخیر دارند، ولی برای ممانعت از پراکندگی موج در توده ورقه، روی سطح با فیلم جامد نازک یا شبکه (ورقه‌ای با شیارهای بسیار ظریف که روی آن، هر شیار موج رابه شیار بعدی منعکس می‌کند) پوشیده می‌شود.

این نوع حسگرها، موج عرضی سطحی، (Surface Transverse Wave) STW، نامیده می‌شوند [۴]. روی بسترهای نازک پیزوالکتریک، IDTها می‌توانند دو نوع موج تولید کنند که عبارت‌اند از: امواج لمب (Lamb) و امواج تخت اکوستیک نوع افقی برشی. جابه جایی ذرات در امواج لمب مشابه امواج ریلی است. در امواج تخت نوع افقی برشی، جابه جایی ذرات نسبت به جهت انتشار موج عمود است و

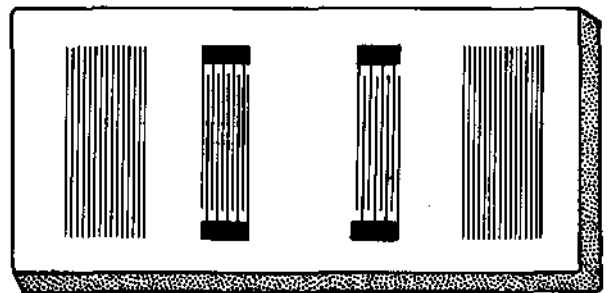
علامت ورودی



شکل ۷ - طرحی از عملکرد موج ریلی [۵].



شکل ۸ - آرایش با خط تأخیر ابزار SAW کوارتز [۶].



شکل ۹ - ابزار SAW با آرایش تشدیدگر [۴].

آرایش دیگر ابزار SAW، تشدیدگر (Resonator) نامیده می‌شود. امواج اکوستیک به وسیله IDT که در مرکز ابزار قرار دارد، القا می‌شوند. این امواج به وسیله شکافهای روی سطح ابزار، که تولید یک حفره رزونانس در مرکز می‌کنند، به جلو و عقب منعکس می‌شوند.

جدول ۱- مقایسه امواج اکوستیک [۲].

موج	نوع موج	جابه جایی ذرات الف	جابه جایی جزء عرضی ب	محیط	بسامد معمول (MHz)
TSM	توده	عرضی	موازی	گاز، مایع ^د	۵-۱۰
SAW	سطحی	عرضی موازی ج	عمود	گاز	۲۰-۳۰۰
STW	سطحی	عرضی	موازی	گاز، مایع ^د	۲۰-۳۰۰
FPW	تخت	عرضی موازی ج	عمود	گاز، مایع	۲-۷
SH-APM	تخت	عرضی	موازی	گاز، مایع ^د	۲۵-۲۰۰

الف) جابه جایی ذرات نسبت به جهت انتشار موج، ب) جابه جایی جزء عرضی نسبت به سطح حسگر، ج) جزء موازی جا به جایی ذره در جهت انتشار موج است و با سطح حسگر موازی است. مجموع اجزای موازی و عرضی باعث حرکت تخم مرغی شکل می‌شود، د) ابتدا برای کار در فاز گازی در نظر گرفته شد، ولی می‌تواند در فاز مایع نیز به کار رود.

همان‌طور که از نام آن پیداست، جابه جایی در سطح غالباً در صفحه اتفاق می‌افتد. نوع موج تولید شده به جهتگیری بلور بستگی دارد. در هر دو حالت سرعت امواج را جنس ورقه و ضخامت آن تعیین می‌کنند. امواج لمب روی ورقه‌ای با ضخامت محدود مجموعه‌ای از شیوه‌های متقارن و ضد متقارن (متقارن و ضد متقارن چگونگی حرکت ذره حول سطح میانی ورقه را نشان می‌دهد) سطح را تولید می‌کنند. همه این شیوه‌ها بجز شیوه ضد متقارن دارای پایستری درجه، سرعتی بیشتر از SAW در محیط مشابه دارند و سرعت آنها با کاهش ضخامت ورقه افزایش می‌یابد. در اینجا تنها شیوه تخت ضد متقارن از پایستری درجه مورد بحث قرار می‌گیرد. در این شرایط شیوه خمشی (flexural mode) است و موج تخت خمشی یا FPW نامیده می‌شود (شکل ۱۰). با کاهش ضخامت ورقه، سرعت موج در این شیوه کاهش می‌یابد. از آنجا که ضخامت ورقه در FPW حدود ۲ تا ۳ میکرون است، ورقه غشا نامیده می‌شود. بسامد ابزار FPW معمولاً ۲ تا ۷ مگاهرتز است [۷، ۲].

همان‌طور که اشاره شد، ابزار APM نوع افقی برشی همان‌طور که اشاره شد، ابزار APM نوع افقی برشی

SH-APM) از نظر ظاهری مشابه ابزار SAW با خط تاخیر است، با این تفاوت که ورقه در آن نازکتر است. ضخامت معمول این ورقه‌ها چند برابر طول موج اکوستیک است. علاوه بر امواج رایلی، IDTها روی این ورقه‌ها امواج افقی برشی، که در توده ماده با زوایای معینی نسبت به سطح منتشر می‌شوند، تولید می‌کنند. نمای جانبی، مقطع عرضی را از مرکز نشان می‌دهد که حاوی اطلاعات بیشتری در مورد غشاست. تصویر بزرگ شده همین‌جا وجود لایه‌های بیشتری را در بستر نشان می‌دهد که از بالا به پایین عبارت‌اند از: بستر سیلیسیم در کنارها، لایه سیلیسیم نیتريد، ورقه آلومینیومی، لایه روی اکسید (پیزوالکتریک) و IDTهای آلومینیومی [۷]. این امواج ضمن پیشرفت در عمق ورقه‌ها، در فواصل بین IDTها، از بین سطوح ورقه‌ها منعکس می‌شوند. روی هم قرار گرفتن این امواج منجر به تولید مجموعه‌ای از شیوه‌های تخت می‌شود که بسامدهای مربوط به آنها اندکی با یکدیگر تفاوت دارد.

بسامد معمول این ابزار ۲۵ تا ۲۰۰ مگاهرتز است. برخی

جدول ۲- نمونه مشخصات پنج نوع ابزار اکوستیک [۲].

نوع ابزار	طول موج ابزار (μm)	ضخامت ورقه (μm)	جنس ورقه	سرعت موج (m/s)	ضخامت ورقه (بر حسب طول موج اکوستیک)	عوامل تعیین کننده بسامد الف
TSM	۵۵۴	۲۷۷	کوارتز	۳۳۳۰	$\lambda/2$	ضخامت ورقه
SAW	۲۰	۷۶۰	کوارتز	۳۱۶۰	$>>\lambda$	فاصله بین دندان‌های IDT
STW	۲۰	۵۰۰	کوارتز	۵۰۰۰	$>>\lambda$	فاصله بین دندان‌های IDT
FPW	۱۰۰	۳/۵	روی اکسید	۵۵۰	$<<\lambda$	ضخامت ورقه و فاصله بین دندان‌های IDT
SH-APM	۵۰	۲۰۳	کوارتز	۵۰۶۰	$\lambda(10-3)$	ضخامت ورقه و فاصله بین دندان‌های IDT

الف) در همه موارد جنس ورقه نقش اساسی در تعیین بسامد دارد، ب) فاصله به وسیله شبکه کمی تغییر می‌کند، ج) ورقه مرکب از سیلیسیم نیتريد، آلومینیم و روی اکسید است. پیزوالکتریک است.

است تغییر می‌کند. مبدل دوم موج یاد شده را دریافت و به یک علامت الکتریکی خروجی تبدیل می‌کند. چهار نوع آرایش الکترونیکی موجود برای اندازه‌گیریهای اکوستیکی در شکل ۱۲ نشان داده شده‌اند. مسیر نوسانگر (oscillator circuit) شکل الف، یک ابزار پیزوالکتریک دو جزئی را در حلقه پس‌خور (feedback loop) تقویت‌کننده بسامد رادیویی قرار می‌دهد. در این روش بلور پیزوالکتریک بین ورودی و خروجی تقویت‌کننده نوسان قرار می‌گیرد و پس‌خور مثبتی به وجود می‌آورد که باعث نوسان می‌شود. بسامد رزونانس بلور با شمارگر الکترونیک اندازه‌گیری می‌شود [۳، ۱۰]. تغییر جزئی سرعت موج از تغییرات معادل در بسامد نوسان نتیجه‌گیری می‌شود:

$$\Delta f/f_0 = \Delta v/v_0$$

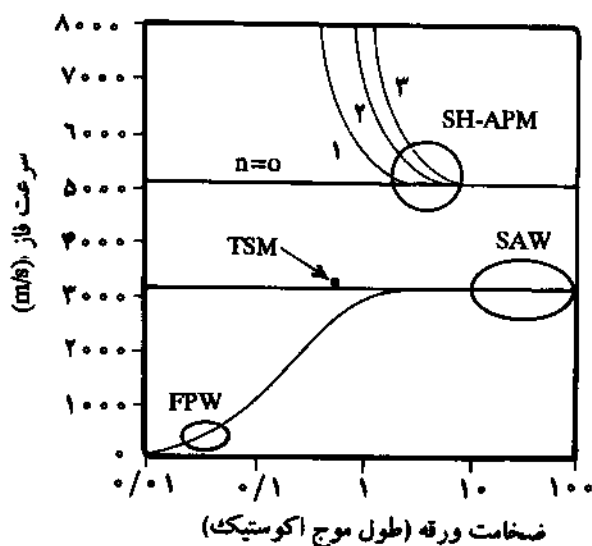
که در آن v_0 و f_0 مقادیر اولیه سرعت و بسامد و Δv و Δf مقادیر جابه‌جایی آن دو را نشان می‌دهد. ضمن به کارگیری یک نوسانگر در آزمایشگاه، می‌توان از یک نوسان‌نما (oscilloscope) برای بررسی بزرگی و شکل موج خروجی نیز استفاده کرد.

ابزار دو جزئی با به کارگیری منبع علامت و ولت‌سنج برداری (شکل ۱۱ ب) اطلاعاتی در مورد سرعت و دامنه موج به دست می‌دهد. این ابزار از مشکل قطع نوسان مصون است. منبع یا مولد علامت در بسامد ثابتی برابر با بسامد رزونانس ابزار، ولتاژ بسامد رادیویی به مبدل ورودی اعمال می‌کند. تغییرات دامنه علامت و جا به جایی فاز بین مبدلهای ورودی و خروجی با ولت‌سنج برداری اندازه‌گیری می‌شود. تغییر فاز، معرف تغییر سرعت موج است. تغییرات دامنه موج اطلاعاتی درباره تضعیف موج توسط محیطی که در تماس با سطح ابزار است، ارائه می‌دهد.

برای ابزارهای تک‌جزئی، تجزیه‌گر مشبک، علامت منعکس شده از مبدل ورودی را برای اندازه‌گیری مشخصه امپدانس ابزار، اندازه می‌گیرد. برای ابزارهای دو جزئی، تجزیه‌گر مشبک علامت عبوری را برای به دست آوردن مشخصه امپدانس تجزیه می‌کند [۲].

حساسیت جرمی و حد تشخیص

با اینکه بارگذاری جرمی تنها مکانیسم پاسخ‌گویی حسگر نیست، روش مفیدی برای تعیین ویژگیها و مقایسه ابزارهای مختلف است. حساسیت جرمی تغییر افزایشی علامت است که در پاسخ به تغییر افزایشی جرم رخ می‌دهد. پاسخهای حسگر می‌تواند بر حسب عبارات مطلق مثل تغییر بسامد بر حسب هرترتز یا به طور نسبی بر حسب جا به جایی نسبت به بسامد عمل ابزار بیان شود. برای مقایسه حساسیتهای جرمی از عامل حساسیت

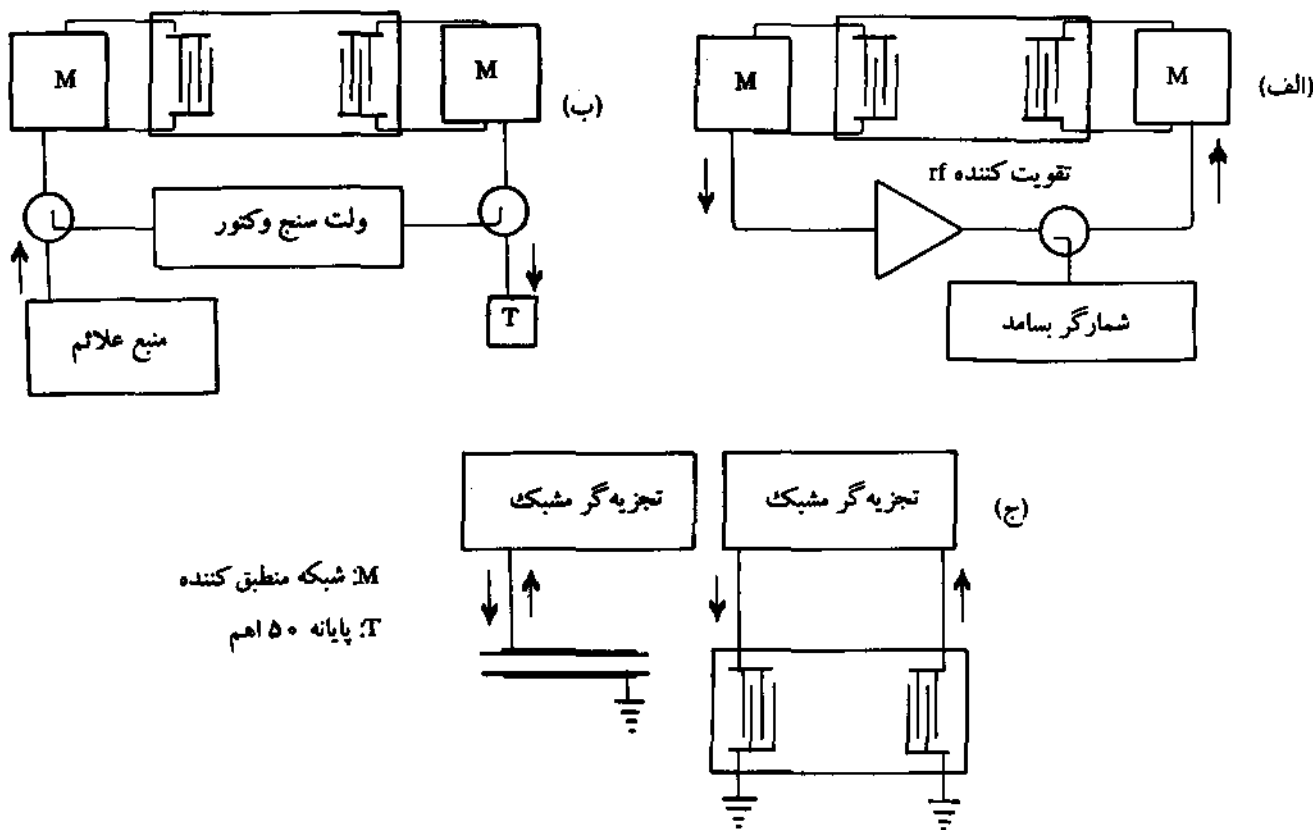


شکل ۱۱ - سرعتهای فاز امواج اکوستیک در ورقه‌های کوارتز به عنوان تابعی از ضخامت ورقه بر حسب طول موج اکوستیک [۲]

مشخصات ابزارهای SH-APM، SAW، FPW و همراه با نمونه در جداول ۱ و ۲ خلاصه شده‌اند. در طراحی این ابزارها، ضخامت ورقه عامل مهمی است. شکل ۱۱ نشان می‌دهد که چگونه سرعت موجهای مختلف به ضخامت ورقه، که بر حسب طول موج بیان می‌شود، بستگی دارد و ناحیه‌ای از منحنی "ضخامت - سرعت" را که ابزار مختلف در آن فعال‌اند، معین می‌کند. ابزار SAW و FPW در دو حد نمودار یاد شده واقع‌اند.

روشهای اندازه‌گیری

در ابزارهای تک‌جزئی مانند TSM، تنها جزء موجود به عنوان ورودی و خروجی هر دو عمل می‌کند. علامت ورودی یک شیوه اکوستیک را تحریک کرده که در واقع روی الکتروود ورودی بار تولید می‌کند. این علامت با یکدیگر ترکیب شده و تغییر امپدانس را، که سازنده پاسخ ابزار مثلا TSM است، موجب می‌شوند. ابزارهای دو جزئی یک جزء ورودی و یک جزء خروجی دارند که این دو جزء قابل تعویض‌اند. علامت ورودی توسط مبدل اول به موج اکوستیک تبدیل می‌شود. برخی خواص موج اکوستیک تولید شده، مانند بسامد و دامنه، ضمن عبور از ماده پیزوالکتریک یا محیطی که در تماس با بستر پیزوالکتریک



M: شبکه منطبق کننده
T: پایانه ۵۰ اهم

شکل ۱۲ - سه طرز کار ابزار ییزوالکتریک [۲]: (الف) مسیر نوسانگر یک علامت تک فرکانس تولید می کند، (ب) ولت‌سنج برداری اطلاعاتی در مورد فاز و دامنه موج ایجاد می کند و (ج) تجزیه گرهای مشبک به ابزارهای یک و دو جزئی متصل شده‌اند.

مطلق حسگر به افزایش جرم و حساسیت بر حسب S_m در جدول ۳ گرد آمده‌اند.

جرمی، S_m ، استفاده می شود که از معادله زیر به دست می آید:

$$S_m = \lim_{\Delta m \rightarrow 0} (\Delta v / v_0) / \Delta m$$

حد تشخیص جرمی به نوفه (noise) حسگر بستگی دارد و با حساسیت حسگر و همچنین تغییر جرم در واحد سطح نیز جا به جا می شود. نوفه به نوسانات کوتاه مدت در علامت گفته می شود. نوفه مبحث پیچیده‌ای است، زیرا اندازه گیریها تحت شرایط مختلف انجام می گیرند و نوفه می تواند به عوامل محیطی مثل نوسانات ظریف دمایی سیستم اندازه گیری و فاصله زمانی بین اندازه گیریها وابسته باشد. در کارهای تجزیه، حد تشخیص به غلظتی از آنالیت که علامتی تا ۳ برابر نوفه ایجاد کند، گفته می شود. اغلب دستگاههای حسگر، نوفه‌ای در حد ۱ Hz یا کمتر دارند، یعنی تنها قادرند علامتهای تا ۳ هرتز را تفکیک کنند. حد تشخیص واقعی غلظتی از نمونه است که در آن غلظت نمونه بدون مزاحمت قابل ملاحظه از جانب سایر گونه‌ها اندازه گیری شود. به علاوه ممکن است به دلیل وجود علامتهایی که بد تفسیر شده و به آنالیت نسبت داده شوند، نیز مقداری جا به جایی در مقادیر اندازه گیری شده، ایجاد شود. در این مورد استفاده از مواد گزینشگر

که در آن Δm جرمی است که به طور یکپوخت در سطح ابزار توزیع می شود. v_0 سرعت فاز اولیه ابزار قبل از بارگذاری جرمی و Δv تغییر سرعت فاز است که به دلیل بارگذاری جرمی اتفاق می افتد. اشاره می شود که v_0 سرعت نقطه‌ای با فاز ثابت روی موج است. از آنجا که سرعت مستقیماً با بسامد متناسب است، می توان S_m را بر حسب بسامد نوسانگر بیان کرد:

$$S_m = \lim_{\Delta m \rightarrow 0} (\Delta f / F_0) / \Delta m$$

که در آن F_0 بسامد اصلی و اولیه نوسانگر در هوا و Δf تغییر بسامدی است که در اثر بارگذاری جرمی اتفاق می افتد. عبارات مربوط به پاسخ

جدول ۳ - حساسیت‌های جرمی پنج نوع ابزار اکوستیک [۲].

مشخصات بستر پیزوالکتریک	S_m [$\frac{Hz/MHz}{(ng/cm^2)}$]	S_m آشفته نشده	پاسخ به جرم اضافه شده	موارد افزایش حساسیت جرمی	نوع قطعه
کوارتز، ۶ MHz	۰/۰۱۴	$S_m = -\frac{\gamma}{\rho\lambda} = -\frac{1}{\rho d}$	$\Delta f = -C_T F^2 \Delta m$	ضخامت کاهشی ورقه (بسامد افزایشی)	TSM
کوارتز، ۱۵۸ MHz	۰/۲۰	$S_m = -\frac{K(\delta)}{\rho\lambda} = -\frac{K(\delta)}{\rho V_R} F$	$\Delta f = -C_T F^2 \Delta m$	طول موج کاهشی (بسامد افزایشی)	SAW
کوارتز ۲۵۰ MHz	۰/۱۸	$S_m = -\frac{K(\delta, G)}{\rho\lambda} = -\frac{K(\delta, G)}{\rho V_{STW}} F$	$\Delta f = -C_G F^2 \Delta m$	ضخامت افزایشی ورقه (بسامد افزایشی با طول موج کاهشی)	STW
کامپوزیت، ۵/۵ MHz	۰/۲۸	$S_m = -\frac{1}{\gamma M} = -\frac{1}{\gamma \rho d}$	$\Delta f = -\frac{1}{\gamma M} F \Delta m$	ضخامت کاهشی ورقه (بسامد کاهشی با طول موج ثابت)	FPW
کوارتز، ۱۰۱ MHz	۰/۰۱۹	$S_m = -\frac{J}{\rho d}$	$\Delta f = -\frac{J}{\rho d} F \Delta m$	ضخامت کاهشی ورقه (بسامد افزایشی با طول موج ثابت)	SH-APM

توضیح: ثابت‌های C_T و C_G به ترتیب به خواص پیزوالکتریک ورقه در ابزار TSM، SAW، و شبکه STW بستگی دارد. عامل $K(\delta)$ به خواص ورقه پیزوالکتریک SAW بستگی دارد و $K(\delta, G)$ عاملی است که به خواص ورقه پیزوالکتریک و شبکه STW وابسته است. M جرم واحد سطح فضای FPW، V_R سرعت موج رابلی و V_{STW} سرعت موج از نوع عرضی برشی است.

پوشش سطح افزایش یافته و بسامد SAW متناسب با آن کاهش می‌یابد. در مورد بخارات کمتر قطبی، که پیوند آنها به سطح ضعیفتر است، جابه‌جایی بسامد با غلظت بخار متناسب نیست.

ریز ساختار فیلمهای نازک که روی سطح SAW نشسته‌اند با اندازه‌گیری منحنی همدمای جذب N_p در دمای نیتروژن مایع مشخص شده است. با رسم منحنیهای همدمای حاصل از کاهش بسامد SAW پارامترهایی مثل مساحت سطح، حجم خلل و فرج و توزیع اندازه آنها به دست آمده‌اند [۲].

عوامل مؤثر در پاسخ حسگر

ابزارهای اکوستیک را می‌توان با به کارگیری لایه‌گزینه‌گر شیمیایی به حسگر شیمیایی تبدیل کرد. در تشخیص بخارات آلی می‌توان از مواد پلیمری استفاده کرد، زیرا این نوع بخارات در لاستیکها به سرعت و به طور برگشت پذیر جذب می‌شوند. پلیمرها فیلمهای نازک چسبنده تشکیل می‌دهند و گزینه‌گری آنها می‌تواند با تغییر دادن ساختار شیمیایی به شکل مطلوب در آید.

با مدل‌های مربوط به SAWهای قدیمی پیش‌بینی می‌شد که بسامد رزونانس SAW، با اعمال هر نوع جرم یا مدول برشی به سطح فیلم نازک تغییر می‌کند. مطالعات بعدی روشن ساخت که ابزارهای SAW می‌توانند انتقالات پلیمری مختلف را آشکار کنند. در سالهای اخیر تصویر کاملتری از آثار ویسکوالاستیک فیلمهای نازک روی ابزارهای

شیمیایی در برطرف کردن جابه‌جایی مهم‌تر از طراحی ابزار است.

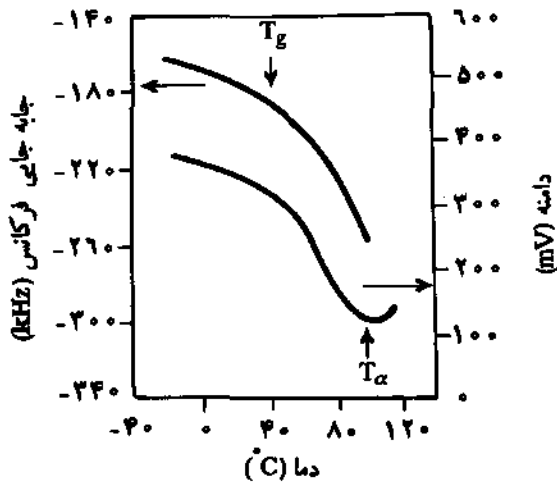
آشکارسازهای جرمی

حساسیت زیاد ابزارهای موج اکوستیک موجب توسعه تعداد زیادی حسگر شیمیایی برای استفاده در فازهای مایع و گاز شد. تا همین اواخر پاسخ مشاهده شده به بارگذاری جرمی نسبت داده می‌شد و مکانیسمهای دیگری که می‌توانست موجب رشد علامتهای تجزیه‌ای شود، بررسی نمی‌شد. در بخش بعد، چند آشکارساز جرمی معرفی می‌شوند.

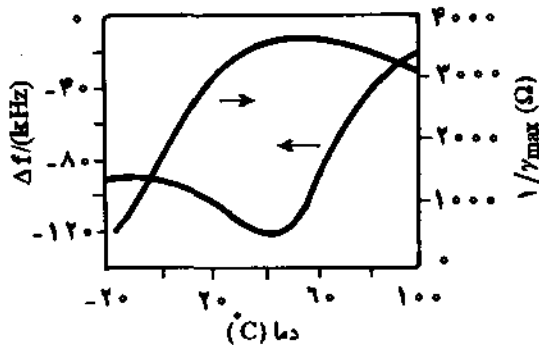
ساده‌ترین نمونه آشکارسازی جرمی با ریزحسگر اکوستیک اندازه‌گیری ضخامت فیلمهای نازک فلزی نشانده شده بر سطح در خلاء است. در این روش که به طور گسترده تجاری شده است، از حسگر TSM کوارتز استفاده می‌شود. جابه‌جایی اندازه‌گیری شده بسامد در خلاء با جرم فیلم متناسب است و از طریق چگالی فیلم و امپدانس اکوستیک، ضخامت فیلم به دست می‌آید. این روش دقیق است و برای لایه‌های نازک فیلم به کار می‌رود. این نکته قابل توجه است که فیلم فلزی باید سفت باشد و به خوبی به سطح بچسبد. در این شرایط جرم افزوده همزمان با حرکت برشی سطح حرکت می‌کند. حساسیت جرمی زیاد ابزار SAW امکان اندازه‌گیری جذب سطحی مولکولهای بخار در پوششهای زیر تک لایه زیرین (submonolayer) را نیز فراهم می‌کند. این قابلیت با نظارت بر جذب بخار روی سطح ابزار لخت در سیستم خلاء نشان داده شده است. ضمن افزایش فشار بخار جزئی، ضخامت

بررسی خواص ویسکوالاستیک پلیمرها

پس از آنکه قطعات زنجیرهای پلیمر با اعمال امواج اکوستیک به روش مکانیکی دچار آشفتگی شدند، با سرعتی که به دما و ساختار پلیمر وابسته است به شرایط اولیه خود باز می‌گردند. این فرایند آسایش، که در T_{α} مشاهده می‌شود، باعث بروز یک حداقل در دامنه علامت و کاهش



شکل ۱۳ - اثر انبساط گرمایی و فرایندهای انتقالی پلیمر که روی فیلم نازک PVA با استفاده از ابزار FPW مشاهده شده‌اند [۱۰].



شکل ۱۴ - آثار رزونانس فیلم که توسط ابزار TSM کوارتز با پوششی از جنس پلی ایزوبوتیلن با ضخامت $15/6\mu m$ مشاهده شده است [۱۰].

اکوستیک به دست آمده است. تغییر سرعت موج و دامنه آن در پاسخ به انبساط گرمایی پلیمر، فرایند آسایش پلیمر و آثار رزونانس فیلم اتفاق می‌افتد. به عبارت بسیار ساده، مدول به معنی سفتی ماده است. در محیط ابزار فراصوت، اندازه‌گیری مدول تا حدود زیادی به بسامد وابسته است. در حضور امواج با بسامد زیاد، فیلمهای پلیمری لاستیکی روی ابزار اکوستیک طوری رفتار می‌کنند که گویی مدولی دارند که مشخصه مواد شیشه‌ای است. اگر همین فیلمها با روش بسامد پایین بررسی شوند، مدول اندازه‌گیری شده همان مقداری را خواهد داشت که از لاستیک انتظار می‌رود.

با افزایش دما و ضمن انبساط پلیمر، مدول آن کاهش می‌یابد. این آثار در دستگاههای متداول که سرعت صوت در پلیمر با افزایش دما کاهش می‌یابد، به خوبی شناخته شده‌اند. سرعت برشی صوت (V_s) با ریشه دوم مدول برشی ذخیره شده (G) و با ریشه دوم چگالی به طور معکوس متناسب است:

$$V_s = (G/\rho)^{1/2}$$

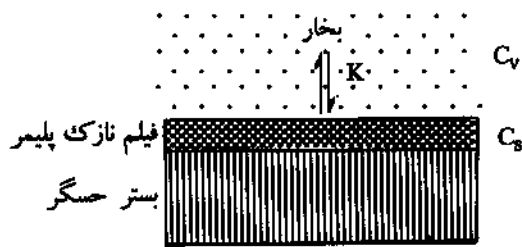
از آنجا که مدول و چگالی هر دو با پایین آمدن دما کم می‌شوند، کاهش مشاهده شده در سرعت صوت نشان می‌دهد که مدول، عامل غالب مؤثر بر سرعت صوت است. با وجود این، چگالی و حجم به طور غیر مستقیم روی سرعت صوت اثر می‌گذارند، زیرا مدول کاملاً به حجم وابسته است [۱، ۲].

وقتی از پوشش پلیمر به صورت فیلم ضخیم روی حسگرهای بخار استفاده می‌شود، انبساط گرمایی پلیمر در ابزارهای SAW و FPW باعث کاهش بسامد در حد ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ Hz در درجه سانتیگراد می‌شود [۱، ۲]. اشاره می‌شود که بسامد رو به کاهش نوسانگر بیان کننده سرعتهای رو به کاهش صوت است. این اثر با تغییر جرم در سطح همراه نیست. بنابراین، وقتی ابزارها به عنوان حسگر شیمیایی همراه با لایه‌ای به کار می‌روند که خواص فیزیکی آن با دما تغییر می‌کند، لازم است که خط تاخیر مرجع نیز با همان ماده پلیمری خط تاخیر حسگر پوشش یابد. در این شرایط لازم است که خط تاخیر مرجع از قرار گرفتن در معرض بخار نمونه محافظت شود. به علاوه در بسیاری از کاربردها بهتر است که دما با وسیله‌ای ساده کنترل شود. مطالعات اخیر نشان داده است که ابزار FPW با پوشش پلیمر می‌تواند تغییرات خواص فیزیکی را که در دماهای انتقال شیشه‌ای ایستا (T_g) و پویا (T_{α}) روی می‌دهد، حس کند. نتایج مربوط به فیلم نازک پلی وینیل استات روی ابزار FPW (۵ MHz) در شکل ۱۲ نشان داده شده است. در T_g ، شیب منحنی فرکانس - دما تغییر می‌کند. این تغییر بیانگر حساسیت به سرعت انبساط گرمایی پلیمر است که در T_g به طور ناگهانی افزایش می‌یابد.

جدول ۴- مواد پوششی برای آشکارسازهای جذبی [۸].

ماده پوششی	مشخصات آشکارساز
اسکولان، روغن سیلیکون، گریس اپیزون پلی اتیلن گلیکول، سولفولان، دی نوبیل فتالات، آلدول ۴۰، آلکیل سولفونات سیلیکاژل، غریبال مولکولی، آلومینا، پلیمرهای نمگیر* سرب استات، نقره فلزی، مس فلزی، آنتراکونینون دی سولفونیک اسید	آشکارساز هیدروکربن که نسبت به نوع ترکیب، گزینشگر نیست آشکارسازی مولکولهای قطبی مثل آروماتیکها، ترکیبات اکسیژن دار و ترکیبات سیر نشده بخار آب هیدروژن سولفید

* رزینهای طبیعی، مشتقات سلولز و پلیمرهای سنتزی.



شکل ۱۵ - آثار مدول و جرم پوشش در استفاده از SAW با پوشش پلیمر [۱۰].

پاسخ خطی تر و گزینشگری و سرعت بیشتری دارند [۸].

در دستگاههای SAW کوارتر از فیلمهای نازک پلیمری برای جذب برگشت پذیر بخار استفاده می شود. معمولاً پلیمر فیلمی نازک از لاستیک است.

عواملی که بر حساسیت تاثیر می گذارند عبارت اند از: استحکام پیوند بخار جذب شده با سطح پلیمر و حساسیت ذاتی دستگاه به خواص فیزیکی فیلم نازک که با جذب بخار تغییر می کند. چگونگی جذب، که میزان آن مستقل از ابزار اکوستیک است و در شکل ۱۵ نشان داده شده است، با ضریب تقسیم معرفی می شود:

$$K = C_g / C_v$$

در این رابطه K ضریب تقسیم، C_g غلظت آنالیت در فاز جاذب و C_v غلظت آنالیت در فاز بخار است.

در ساخت و استفاده از حسگرهای بخار نوع SAW دو سؤال در مورد مکانیسم عمل مطرح می شود:

- ۱- مکانیسم کاهش بسامد در صورت استفاده از فیلم پلیمری کدام است؟
- ۲- مکانیسم کاهش بسامد به هنگام جذب بخار توسط پلیمر چیست؟

S شکل در منحنی فرکانس - دما می شود (شکل ۱۳). در مطالعه با ابزار FPW نتایج حاصل در مورد T_g و T_∞ با نتایجی که به روشهای استاندارد تجزیه، مثل انبساط سنجی، گرماسنجی روشی تفاضلی و تحلیل رفتار مکانیکی - دینامیکی به دست می آیند، مطابقت دارد [۱۰].

اثر ویسکوالاستیک دیگری را که می توان با این ابزارها مطالعه کرد، رزونانس فیلم است که به بسامد ابزار، ضخامت فیلم، مدول برشی پلیمر و چگالی پلیمر وابسته است. اثر رزونانس فیلم روی پاسخ ابزار در شکل ۱۴ نشان داده شده است. در دماهای پایتتر از رزونانس فیلم، با افزایش دما بسامد ابزار به دلیل انبساط پلیمر و کاهش مدول کم می شود. با نزدیک شدن به رزونانس فیلم بسامد با شیب بیشتری افت می کند، ولی در رزونانس فیلم، افزایش ناگهانی پیدا می کند، به طوری که از مقدار اولیه بالاتر می رود. برای یک پلیمر مشخص دمای رزونانس با افزایش بسامد ابزار یا ضخامت پلیمر کاهش می یابد [۱۰].

حسگرهای بخار با پوشش پلیمری

در ساخت بلورها، معمولاً فلزات معینی را به روش تبخیر روی سطح ورقه کوارتر می نشانند تا نقش الکترود را ایفا کنند. از روی مقدار فلزی که روی سطح می نشیند می توان بسامد را کنترل کرد. فلزات و بسیاری از جامدات دیگر روی ارتعاش ورقه تاثیر مهمی ندارند، ولی اگر مایع روی سطح جذب شود، ارتعاش ورقه تضعیف می شود که دلیل آن انتشار انرژیها در مایع توسط سطح مرتعش بلور است. اگر گاز در مایع جذب شود، دامنه ارتعاش باز هم بیشتر کاهش می یابد و بدین ترتیب دامنه ارتعاش می تواند برای آشکارسازی ساختار گاز به کار رود. بلوری که به روش یاد شده عمل می کند، آشکارساز جذبی پیزوالکتریک نامیده می شود. جدول ۴ فهرستی کوتاه از موادی است که می توانند در ساخت آشکارسازهای جاذب گزینشگر به کار روند. اگر بلور و ماده پوششی بعد از به کارگیری ابزار تخریب نشوند، روش پوشش دهی بحرانی نیست. این آشکارسازها در جرهای مولکولی بالاتر، حساسیت بیشتر،

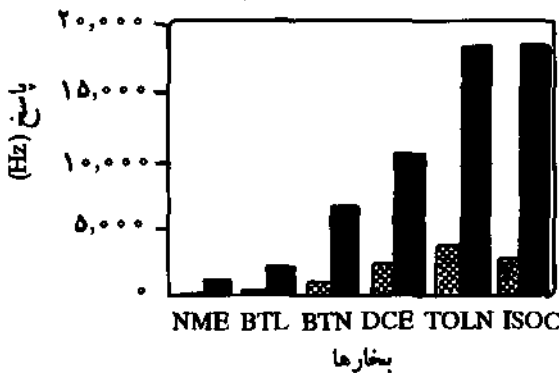
این شکل پاسخ حسگر با پوشش پلی (ایزوبوتیلن) به بخارات ترکیبات آلی نیترومتان، NME؛ ۱- بوتانول، BTL؛ ۲- بوتانول، BTN؛ ۱ و ۲ دی کلرو اتان، DCE؛ تولوئن، TOLN؛ ایزواکتان، ISOC، نشان داده شده است.

همان طور که در شکل ۱۷ دیده می شود پاسخ واقعی حسگر ۴ تا ۶ بار از پاسخهای جرمی محاسبه شده بزرگتر است. بنابراین، بر عکس پیش بینیهای قبلی بارگذاری جرمی نمی تواند تنها مکانیسمی باشد که این حسگرها بر اساس آن پاسخ می دهند. حساسیت به تغییرات مدول باید اثر خیلی بیشتری داشته باشد و رابطه بالا باید اصلاح شود.

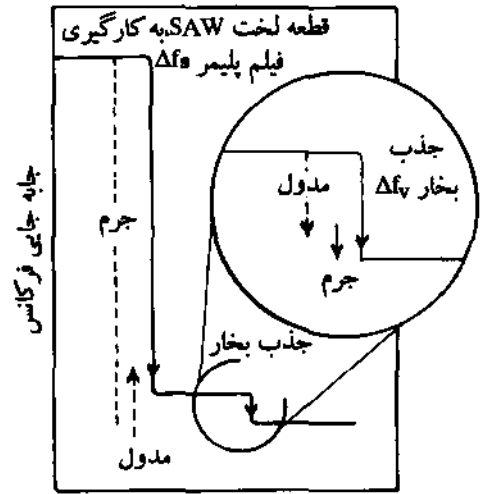
در روش دیگری، از رابطه های متقابل بین حجم پلیمر، مدول، سرعت اکوستیک و بسامدهای نوسان ابزار برای تخمین مستقل پاسخ حسگر در اثر کاهش مدول استفاده شده است. با استفاده از سرعتهای معلوم انبساط گرمایی و آثار اندازه گیری شده، انبساط فیلم پلیمر بر بسامدهای حسگر SAW، اثر حجم به ازای هر یک درصد افزایش حجم، ۱۰ تا ۲۰ کیلوهرتز تخمین زده شده است. با این فرض که تورم ناشی از جذب و انبساط گرمایی، آثار مشابهی بر مدول دارند، می توان آثار ناشی از انبساط گرمایی را به بارگذاری جرمی اضافه و پاسخ حسگر را پیش بینی کرد. این بار پاسخها ۴ تا ۶ بار بزرگتر از مقداری است که از معادله یاد شده به دست می آید. بنابراین با افزایش اثر مدول که به این ترتیب محاسبه می شود، می توان معادله موجود را طوری اصلاح کرد که پاسخهای محاسبه شده، به پاسخهای اندازه گیری شده نزدیک باشد [۲].

آثار دی الکتریک و اکوستوالکتریک

وقتی موج اکوستیک در یک ماده پیزوالکتریک منتشر می شود، در سطح آن لایه بار مقید (bound charge) تولید می کند که با موج مکانیکی همراه است. این لایه یک میدان الکتریکی ناپایدار به وجود



شکل ۱۷ - مقایسه پاسخهای حسگر بخار SAW با آنچه که بر اساس بارگذاری جرمی پیش بینی می شود [۱۰].



شکل ۱۶ - جذب برگشت پذیر بخار [۱۰].

این فرایندها و مکانیسمهای مؤثر در شکل ۱۶ خلاصه شده اند. وقتی فیلم پلیمر روی ابزار SAW لخت قرار می گیرد، کاهش بسامد مشاهده شده در درجه اول به دلیل جرم پوشش است. از لحاظ نظری، جا به جایی بسامد پس از به کارگیری پوشش، به جرم و مدول پوشش بستگی دارد.

با این حال، در بسامد SAW برای مدول اندازه گیری شده 10^9 N/m^2 ، اثر مدول ۱۰ تا ۱۵٪ اثر جرم و برای مدول اندازه گیری شده 10^6 N/m^2 این اثر قابل اغماض است. چون جا به جایی بسامد به جرم پوشش بستگی دارد، اندازه گیری آن روش مناسبی برای تعیین ضخامت پوشش است. وقتی ابزار با پوشش پلیمری در معرض بخار قرار می گیرد، جذب بخار لایه پلیمر را آشفته می سازد و معمولاً بسامد حسگر کاهش می یابد. محاسبه میزان تغییر پاسخ حسگر، در اثر تغییر مدول ناشی از جذب بخار بسیار مشکل است، زیرا اندازه گیری مدول فیلم قبل و بعد از جذب بخار کار دشواری است. برای محاسبه آثار بارگذاری جرمی، معادله ای وجود دارد که پاسخ حسگر را به ضرایب تقسیم مربوط می کند:

$$\Delta f_{\nu(\text{جرم})} = \Delta f_0 C_V K/\rho$$

که در آن $\Delta f_{\nu(\text{جرم})}$ ، C_V ، K و ρ به ترتیب عبارتند از: جا به جایی بسامد به دلیل جرم بخار، ضخامت پوشش، غلظت بخار در گاز، ضریب تقسیم و چگالی ماده پلیمری.

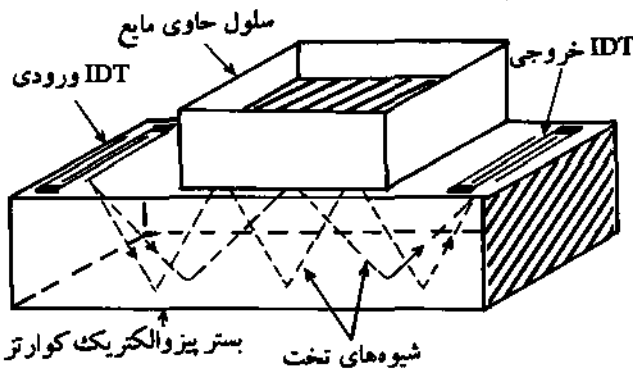
پاسخهای حسگر SAW پوشش داده شده در 25°C ، به جریانهای بخار درجه بندی شده تعیین و با پاسخهای محاسبه شده از رابطه بالا مقایسه شدند. نتیجه این مقایسه در شکل ۱۷ آمده است. در

رسانایی ورقه فیلم در محدوده‌ای است که آثار اکوستوالکتریک قابل ملاحظه‌اند. با افزایش ضخامت ورقه فیلم، رسانایی آن از حد بحرانی برای اثر اکوستوالکتریک فراتر می‌رود، تضعیف دامنه موج کم می‌شود و تغییر سرعت موج با ضخامت فیلم دوباره آثار باردهی جرمی اولیه را نشان می‌دهد.

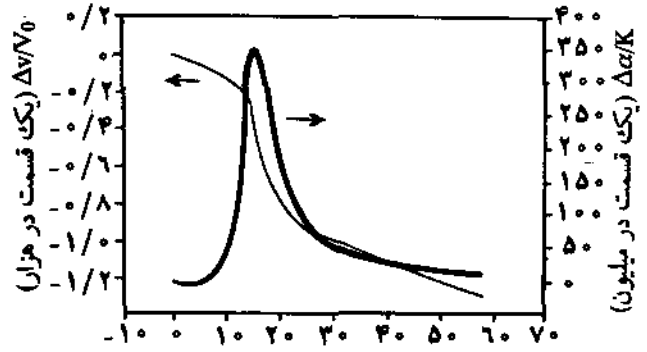
اخیراً مشاهده شده است که ظرفیت IDT ابزار SAW می‌تواند پاسخ حسگر را تحت تاثیر قرار دهد. این اثر در نوبه خط پایه و بزرگی علامت مؤثر است [۴]. وجود آثار اکوستیک در محیط مایع نیز به وسیله ابزار SH-APM مشاهده و مطالعه شده‌اند [۱۰]. در محیط مایع میدان الکتریکی ناپایدار بسامد رادیویی [۱۰] در سطح با میدان الکتریکی حاصل از یونهای محلول جفت شده و منجر به حرکت یونها می‌شود که انرژی الکتریکی را ذخیره و پراکنده می‌کنند. تغییر انرژی ذخیره شده سرعت موج را تغییر می‌دهد و دامنه آن را تضعیف می‌کند. سرعت اثرگذاری رسانایی یونی روی سرعت موج به ثابت دی‌الکتریک حلال بستگی دارد [۴].

حس‌کنندگی در محیط مایع

در گذشته مطالعات انجام شده با حسگرهای موج اکوستیک بیشتر روی فازهای گاز متمرکز بود، زیرا تماس با مایعات تا حد زیادی باعث سیرابی این امواج می‌شد. امروزه ریزحسگرهایی ساخته شده‌اند که می‌توانند گرانشی سیالات را در محیط واکنش‌های شیمیایی تعیین کنند. برخلاف گرانشی سنجهای متداول، حسگر اکوستیک به کمتر از ۱/۱۰۰ نمونه نیاز دارد. این حسگرها با انتشار امواج تخت عمل می‌کنند. اجزای سطحی موج با مایع گرانشی جفت می‌شوند که باعث حرکت لایه نازکی از مایع در مجاورت سطح بلور شده و بدین ترتیب اتلاف در حین انتشار به گرانشی مربوط می‌شود. در این حسگر، امواج تخت به وسیله IDTهایی تولید و آشکار می‌شوند، که در دو سوی سلول ظریف حاوی



شکل ۱۹ - نمودار اجزای حسگر ظریف گرانشی با استفاده از شیوه‌های تخت [۹].



شکل ۱۸ - آثار اکوستوالکتریک [۱۰] حداکثر تضعیف (سمت راست) و کاهش در سرعت موج (سمت چپ) معرف ضخامت است که رسانایی ورقه در ناحیه وقوع اثر قرار دارد.

می‌آورد که در محیط مجاور با سطح گسترش می‌یابد و باعث حرکت حاملین بار و دو قطبها در آن محیط می‌شود. انرژی ذخیره و پراکنده شده در این بارها و دو قطبهای متحرک روی سرعت موج و دامنه آن اثر می‌گذارد. این پدیده که اثر اکوستوالکتریک نامیده می‌شود بدان علت است که رسانایی ورقه فیلم در دامنه بحرانی مشخص قرار دارد. آثار اکوستوالکتریک فقط وقتی رسانایی ورقه فیلم (δ_s) در معادله زیر صدق کند، قابل ملاحظه است:

$$\delta_s = V_0 (\epsilon_s + \epsilon_0)$$

که در آن V_0 سرعت SAW و ϵ_s و ϵ_0 به ترتیب نفوذپذیری بستر و هواست. اگر یک لایه فیلم از نیمه رسانای ضعیفی چون فتالوسیانین سرب روی ابزار SAW با بستر لیتیم نیوبات قرار گیرد، این ابزار به آثار اکوستوالکتریک حساس خواهد بود. این اثر اساس عمل حسگرهای گازی را فراهم می‌آورد. جذب شیمیایی گازهایی مثل NO_2 ، که رسانایی فیلم فتالوسیانین سرب را تغییر می‌دهد، موجب تغییر سرعت موج می‌شود. این تغییر سرعت از مقداری که از بارگذاری جرمی تنها انتظار می‌رود، خیلی بزرگتر است. اگر از فتالوسیانین فلزات دیگر استفاده شود، هر یک از حسگرهای حاصل به گاز خاصی پاسخ خواهند داد [۱۰].

اهمیت رسانایی ورقه در پدیده اکوستوالکتریک در شکل ۱۸ نشان داده شده است. این شکل اثر نشان دادن فیلم نیکل را روی سرعت و دامنه موج SAW نشان می‌دهد. در قسمت اول کاهش سرعت موج با افزایش ضخامت فیلم به دلیل بارگذاری جرمی روی سطح است. ولی وقتی ضخامت فیلم به ۲۰ تا 30 \AA می‌رسد، تغییر سرعت موج خیلی بیشتر شده و دامنه موج به شدت تضعیف می‌شود. در این ضخامت،

مایع مورد مطالعه قرار دارد (شکل ۱۹).

جابه جایی بسامد رزونانس در بارگذاری مایع روی سطح TSM باریشه دوم حاصل ضرب گرانیوزی و چگالی مایع متناسب است. کنترل شرایط تجربی در این مطالعات بسیار مهم است، مثلاً باید شرایط همدمایه به دقت کنترل شود، زیرا گرانیوزی با دما ارتباط نمایی دارد.

ابزار FPW و SH-APM نیز وقتی در تماس با مایع عمل می‌کنند، پاسخهایی ارائه می‌دهند که می‌تواند به چگالی و گرانیوزی مربوط شوند [۹]. علاوه بر گرانیوزی و چگالی عواملی نظیر ناهمواری سطح و سازمان یابی مجدد حلال در سطح مشترک نیز می‌تواند روی پاسخ حسگر اثر بگذارد [۱۰].

سایر کاربردها

مطالعاتی در مورد اثر تغییر ساختار مولکولی روی سرعت صوت نیز انجام گرفته است. جایگزینی اتمهای هیدروژن در پلی اتیلن با اتمهای فلورین، سرعت صوت را کم می‌کند. علت این امر را می‌توان به کم شدن جاذبه بین مولکولی به دلیل بزرگی اندازه اتمهای F و افزایش چگالی پلیمر نسبت داد. در مورد گروهی از ترکیبات پلی (آلکیل متاکریلات) مشاهده شده است که سرعت صوت با افزایش طول زنجیر جانبی آلکیل کاهش می‌یابد. در این حالت نیز افزایش حجم باعث کاهش برهم کنش بین مولکولی می‌شود [۱].

نتایج مطالعات بسیار روی فرایند پخت پلیمرهای ملایم، فنولی، و پلی استر بیانگر افزایش قابل توجه سرعت صوت ضمن عبور ماده از حالت‌های پخت نشده و ژل و رسیدن به پخت کامل است [۱]. از حسگرهای پیزوالکتریک با آرایش تشدیدگر و بستر کوارتز، که پوششی از فیلمهای پلیمری آمفوتر دارند، می‌توان برای اندازه‌گیری تغییرات pH در محیطهای زیست شناختی استفاده کرد [۱۱، ۱۲].

نتیجه‌گیری

در ابزار اکوستیک، حس‌کنندگی به دلیل مغشوش شدن امواج صوت در بسامدهای فراصوت روی می‌دهد. این ابزارها در محیطهای خلاء، گاز و مایع به عنوان حسگر جرمی عمل می‌کنند. با توجه به خواص ویسکوالاستیک فیلمهای پلیمری و با کمک این ابزار، تعیین T_g ، وقوع اثر رزونانس فیلم و تشخیص بخارات در فاز گاز ممکن می‌شود. با بررسی زمانهای آسایش و ارتباط آنها به بسامد موج اکوستیک، T_g تعیین می‌شود. بررسی آثار اکوستیک محدوده‌رسانایی فیلمها و تغییرات این رسانایی را در اثر جذب بخار مشخص می‌کند. سرانجام با استفاده از امواج تخت و حس‌کنندگی در محیط مایع می‌توان گرانیوزی، چگالی و ناهمواری سطوح را مطالعه کرد. این ابزار را می‌توان به عنوان آشکار ساز در سایر دستگاهها از جمله HPLC نیز به کار گرفت. استفاده از لایه‌های

گزینه‌گر در جذب می‌تواند حساسیت ابزارها را افزایش دهد. چون جذب برگشت‌پذیر ۱۰۰٪ امکان‌پذیر است، استفاده از آرایه حسگرها به عنوان بهبود دهنده گزینه‌گری شیمیایی در شناسایی بخارات سمی و تجزیه همزمان چند جزء مورد بررسی قرار گرفته است. با تغلیظ اولیه نمونه، می‌توان حساسیت و گزینه‌گری را بالا برد. سیستمهایی که در آنها از آرایه حسگرها استفاده شده است، بینی‌های الکترونیک یا حسگرهای هوشمند نیز نامیده می‌شوند.

در تفسیر پاسخ حسگرهای شیمیایی باید تمام عوامل یاد شده را در نظر گرفت و نمی‌توان بسادگی فرض کرد که پاسخ مشاهده شده، تنها به یکی از آنها مربوط است، مگر آنکه همه فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی که در سطح حسگر رخ می‌دهند، به‌خوبی درک شده باشند.

مراجع

1. Mark, Bikales, Overberger and Menges, *Encyclopedia of polymer Science and Engineering*, John Wiley & Sons, 1,131-160, 1985.
2. Grate J.W., Martin S.J. and White R.M., *Anal. Chem.*, **65**, 940A, 1993.
3. Thompson A., Kipling A.L. and Hewitt D., *Analyst*, **116**, 881-889, 1991.
4. Edmonds T.E., *Chemical Sensors*, Chapman and Hall, New York, 1988.
5. Wohtjen H. and Dessy R., *Anal. Chem.*, **51**, 1458-1464, 1979.
6. White R.M. and Voltmer F.W., *Appl. Phys. Lett.*, **7**, 314-316, 1965.
7. Grate J.W., Wenzel S.W. and White R.M., *Anal. Chem.*, **63**, 1552-1561, 1991.
8. King W.H., *Anal. Chem.*, **36**, 1735-1739, 1964.
9. Ricco A.J. and Martin S.J., *Appl. Phys. Lett.*, **50**, 1474-76, 1987.
10. Grate J.W., Martin S.J. and White R.M., *Anal. Chem.*, **65**, 987 A, 1993.
11. *Analyst*, **118**, 175-180, 1993.
12. *Anal. Chem.*, **65**, 2571-2588, 1993.