

استفاده از نانوحسگرها برای شناسایی مقادیر ناچیز مواد منفجره

سمانه نبوی فرد^۱

تاریخ دریافت: ۹۳/۱۰/۶ تاریخ پذیرش: ۹۳/۱۲/۲۴

از صفحه ۳۷ تا ۵۰

چکیده

شناسایی گزینش پذیر و حساس مواد منفجره، امری بسیار مهم در مبارزه با تهدیدات تروریستی است. شناسایی مقادیر ناچیز مواد منفجره به دلیل وجود عواملی چون تنوع و گوناگونی آن‌ها، کمبود علایمی که به آسانی قابل شناسایی باشند، روش‌های فراوان ساخت این جنگ‌افزارها و کمبود حسگرهای ارزان قیمت با حساسیت و گزینش پذیری بالا بسیار پیچیده و پرهزینه است. حساسیت و گزینش پذیری بالا همراه با هزینه کم تولید حسگرها برای پیروزی در جنگ‌های تروریستی مبتنی بر مواد منفجره بسیار ضروری است. نانوحسگرها این توانایی و ظرفیت را دارند که همه معیارهای لازم برای یک پلت فرم مؤثر در شناسایی مقادیر ناچیز مواد منفجره را فراهم کنند.

واژگان کلیدی: مواد منفجره، شناسایی، نانو فناوری، حسگر.

مقدمه

در سال‌های اخیر، تروریسم مبتنی بر مواد منفجره به شدت در حال رشد است و دلیل آن هم این است که جنگ‌افزارهای مبتنی بر مواد منفجره خیلی ساده هستند، به آسانی تولید می‌شوند و می‌توانند رعب و وحشت بسیاری ایجاد کنند (کالتن و همکاران، ۲۰۰۳: ۱۳۲۴). شناسایی مواد منفجره به دلایل مختلفی مانند پایین بودن فشار بخار بسیاری از آن‌ها و معرفی پی در پی مواد منفجره جدید، کار پردردسر و چالش برانگیزی است. شناسایی مواد منفجره معمولاً دارای دو گام جمع‌آوری بخار و نمونه‌های خاص و تحلیل آن‌ها به وسیله یک سیستم حسگر ای حساس است. امروزه روش‌های گوناگونی برای شناسایی مواد منفجره وجود دارد (یانون، ۲۰۰۷). معمول‌ترین این روش‌ها، طیف‌سنج تحرک یونی^۱ (IMS)، طیف‌سنج جرمی^۲ (MS) و کروماتوگرافی گازی^۳ (GC) است. بسیاری اما این دستگاه‌ها، بسیار حجیم، گران و نیازمند صرف زمان زیادی برای رسیدن به پاسخ هستند و به دلیل همین محدودیت‌ها، به ندرت از چنین سیستم‌هایی در محل‌های استراتژیکی مانند فرودگاه‌ها و ساختمان‌های دولتی استفاده می‌شود. موضوع وقتی پیچیده‌تر می‌شود که بخواهیم به غیر از فرودگاه‌ها، که به طور معمول باید کنترل شوند، از چنین دستگاه‌هایی در مبادی ورودی اماکن عمومی، شبکه حمل و نقل و شبکه‌های جاده‌ای و زیرساخت‌ها و در محل‌های پردازش استفاده کنیم. در نتیجه مقابله مؤثر با تروریسم مبتنی بر مواد منفجره در گرو به کارگیری انبوه حسگرهای کوچک و قابل حملی است که به اندازه کافی گزینش‌پذیر^۴، حساس^۵ و ارزان باشند.

استراتژی لازم برای بالا بردن حساسیت در شناسایی مقادیر ناچیز مواد منفجره در هوا، شامل چهار مرحله زیر است:

- جمع‌آوری هوا و نمونه‌های خاص از اطراف یا روی شته مشکوک؛
- پیش‌تغلیظ مولکول‌های مواد منفجره بر روی مواد جاذب؛
- جذب مولکول‌های مواد منفجره از روی جاذب بر روی بخش تبدیل سیگنال حسگر^۶ برای شناسایی آن‌ها؛
- تحلیل، توصیف و گزارش داده‌ها.

شناسایی مواد منفجره در حسگرها، بر شناسایی شیمیایی با استفاده از یک عامل گزینش‌گر^۸ و تبدیل سیگنال

1. Sensor
2. Ion mobility spectrometry
3. Mass spectrometry
4. Gas chromatography
5. Selective
6. Sensitive
7. Signal transduction sensor element
8. Selective agent

استوار است. مهم‌ترین ویژگی‌های کارایی^۱ حسگرهای مقادیر ناچیز مواد منفجره عبارتند از: حساسیت^۲ بالا، گزینش پذیری خوب، برگشت پذیری^۳، زمان پاسخ^۴.
(جدول ۱ ویژگی‌های کارایی که معمولاً برای حسگرها استفاده می‌شود را نشان می‌دهد).

جدول ۱. تعریف ویژگی‌های کارایی در حسگرها

ویژگی کارایی	تعریف
حساسیت	شیب منحنی کالیبراسیون یا تغییر در واحد پاسخ حسگر نسبت به تغییر در واحد غلظت آنالیت
حد تشخیص ^۱ (LOD)	کمترین غلظت آنالیت که قابل تشخیص است
گستره خطی ^۲	غلظت آنالیت از حد تشخیص تا بیشترین غلظتی که با اطمینان قابل تشخیص است
گزینش پذیری	توانایی تشخیص یک آنالیت خاص در حضور سایر مولکول‌های مزاحم
برگشت پذیری	توانایی حسگر در بازگشت به حالت اولیه پس از حذف آنالیت
زمان پاسخ	زمان لازم برای پاسخ دادن حسگر از غلظت صفر آنالیت به حد مشخصی از غلظت آن

شناسایی مقادیر ناچیز مواد منفجره به سطح بالایی از حساسیت و حد تشخیص پایین نیاز دارد؛ زیرا به دلیل فشار بخار بسیار پایین آن‌ها، تعداد بسیار کمی از مولکول‌های مواد منفجره جمع‌آوری می‌شوند. برای استفاده پی در پی، حسگر باید به آسانی قابلیت برگشت پذیری در دمای اتاق را داشته باشد. حسگرها هم‌چنین برای عملکرد مؤثرتر باید قابلیت شناسایی سریع و استفاده مکرر را داشته باشند. حسگرهای موجود فعلی قادر نیستند همه این نیازها را برآورده سازند، اما حسگرهای مبتنی بر فناوری نانو، راهی روشن را در مسیر تحقق حسگرهای مواد منفجره‌ای که همه این ویژگی‌ها را داشته باشند، باز می‌کنند.

ویژگی‌های مواد منفجره

قبل از بحث در مورد مقادیر ناچیز مواد منفجره، لازم است که مختصری در مورد فیزیک و شیمی مواد منفجره بدانیم. مواد منفجره دارای ترکیبات شیمیایی هستند که ماهیت آن‌ها بر تفکیک خود-انتشاری^۱ در نتیجه تغییر ناگهانی در گرما و فشار است. مواد منفجره بسته به درجه آتش‌افروزی، به دو دسته مواد منفجره ضعیف^۲ و قوی^۳ تقسیم می‌شوند. مواد منفجره ضعیف دارای درجه آتش‌افروزی ضعیفی در حد سانتی‌متر در ثانیه، مانند پروپلانت‌ها^۴ باروت و غیره. اما مواد منفجره قوی دارای سرعت انفجاری در حد کیلومتر در ثانیه هستند که خود با توجه به میزان پایداری شان به دو دسته مواد منفجره اولیه^۵ و ثانویه^۶ تقسیم می‌شوند. مواد منفجره اولیه مانند سرب آزد، نسبت به محرک‌های خارجی مانند مالش، حرارت و جرقه‌های الکتریکی بسیار حساسند و با این محرک‌ها انفجار آن‌ها آغاز می‌شود. مواد منفجره ثانویه مانند ۲،۴،۶-تری‌نیترو تولوئن (TNT) و هگزوژن^۸ (RDX)، بسیار پایدار هستند و برای شروع انفجار به یک انفجار اولیه نیازمندند. بسیاری از مواد منفجره پرکاربرد، ترکیبات آلی هستند که می‌توان آن‌ها را با توجه به ساختار شیمیایی شان در ۶ گروه طبقه‌بندی کرد:

- ترکیبات نیترو آلیفاتیک، مانند نیترومتان^۹، هیدرازین نیترات^{۱۰}.
- ترکیبات نیترو آروماتیک، مانند تری‌نیترو تولوئن (TNT)، دی‌نیتروبنزن^{۱۱} (DNB)، هگزانیتروزستیلبن^{۱۲}، پیکریک اسید^{۱۳}.
- نیتروآمین‌ها یا نیتروزآمین‌ها مانند اکتوژن^{۱۴} (HMX) یا هگزوژن (RDX).

1. Self-propagating decomposition
2. Low explosives
3. High explosives
4. propellant
5. Primary explosives
6. Secondary explosives
7. 2,4,6-trinitrotoluene
8. Hexogen
9. Nitromethne
10. Hydrazine nitrate
11. Dinitrobenzene
12. Hexanitrostilbene
13. Picric acid
14. Octogen

- نیترات استرها مانند پنتریت^۱ (PETN)، اتیلن گلیکول دی نیترات^۲ (EDGN)، نیتروگلیسیرین و نیتروگوانیدین^۳ (NQ).
- نمک‌های اسیدی مانند آمونیوم نیترات.
- پراکسیدهای آلی^۴، مانند تری استون تری پراکساید^۵ (TATP) و هگزامتیلن تری پراکسید دی آمین^۶ (HMDT).

مواد منفجره گروه آخر به مواد منفجره خانگی^۷ (HMES) مشهور هستند که به دلیل وجود ترکیبات آلی فرار مانند استون در ساختار خود، دارای فشار بخار بسیار بالایی هستند. اخیراً ترور یسم مبتنی بر این نوع از مواد منفجره به دلیل سهولت ساخت این مواد، به شدت در حال گسترش است. هر چند این دسته از مواد منفجره به شدت ناپایدارند و برای جلوگیری از وقوع انفجار در هنگام ساخت و نگهداری آن‌ها، دقت و تخصص بالایی لازم است.

بیشتر مواد منفجره مرسوم، در دمای محیط از فشار بخار بسیار پایینی برخوردارند. وجود فشار بخار پایین در اصل، نتیجه چسبندگی بالای مولکول‌هاست که به آسانی می‌توانند بر روی هر سطحی بنشینند. این نکته مهم را باید در نظر داشت که فشار بخار مواد منفجره به سرعت در اثر افزایش دما بالا می‌رود. بخارات مواد منفجره‌ای که در اثر گرم کردن به وجود آمده‌اند به سرعت بر روی سطوح سرد متراکم می‌شوند. فرآیند جذب بر روی سطح با استفاده از سطوح با انرژی سطحی بالاتر مانند فلزات، اکسید فلزات و غیره، بهتر و سریع‌تر انجام می‌شود و سطوح با انرژی سطحی پایین مانند پلیمرها، پلاستیک‌ها و غیره برای این کار مناسب نیستند. ویژگی چسبندگی مولکول‌های مواد منفجره بر روی سطوح در دمای اتاق باعث تراکم مولکول‌ها بر روی مسی‌های تحویل^۸ در سیستم حسگر می‌شوند. بنابراین نمونه‌برداری از مقادیر ناچیز مواد منفجره‌ای با چنین فشار بخار خیلی کم از مشکلات چالش برانگیز حسگرها خواهد بود که دلیل آن نیز تعداد بسیار کم مولکول‌ها در حجم نمونه است.

جمع‌آوری نمونه و پیش‌تغلیظ

جمع‌آوری نمونه برای هر سیستم حسگری، یک هدف اولیه است و البته در زمینه شناسایی مواد منفجره بسیار چالش برانگیز است. زیرا فشار بخار بیشتر مواد منفجره بسیار پایین است و لازم است مقادیر زیادی از هوا

1. Pentrite
2. Ethylene glycol dinitrate
3. Nitroguanidine
4. Organic peroxides
5. Triacetone triperoxide
6. Hexamethylene triperoxide diamine
7. Home-made explosives
8. Delivery lines

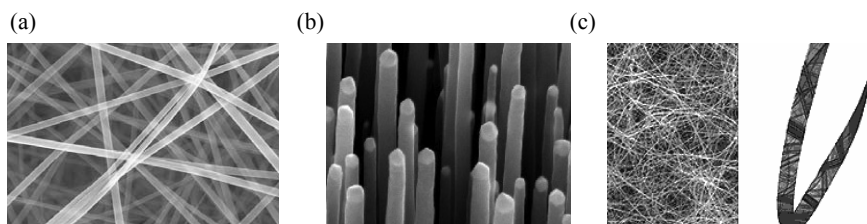
به عنوان نمونه جمع‌آوری شود تا برای بخش شناساگر حسگر، مولکول‌های کافی فراهم شود. بنابراین حساسیت بالای یک حسگر، قابلیت است که می‌تواند این مشکل را حل کند زیرا در این صورت تعداد مولکول کمتری برای جمع‌آوری و آنالیز مورد نیاز است. هم‌چنین به دلیل این که بیشتر حسگرها از حساسیت کافی برای شناسایی مقادیر ناچیز بخارات مواد منفجره در زمان مناسب، برخوردار نیستند، پیش‌تغلیظ‌کننده‌ها اهمیت ویژه‌ای می‌یابند. به‌طور معمول حجم زیادی از هوا که در آن مقادیر زیادی از مولکول‌های مختلف به همراه مقادیر ناچیزی از مولکول‌های مواد منفجره با هم مخلوط شده‌اند، با استفاده از یک پمپ جمع‌آوری می‌شوند و سپس به کمک مواد مخصوصی مولکول‌های مواد منفجره را به دام می‌اندازند. مکانیسم به دام انداختن بر پایه جذب سطحی بر روی صفحات با مساحت بالا استوار است.

تبدیل سیگنال با استفاده از نانوحسگرها

خواص نانو، فرصت‌های بی‌نظیری را برای توسعه حسگرهای مقادیر ناچیز مواد منفجره که همه شرایط و معیارهای ایده‌آل را داشته باشد فراهم می‌کند. نانو در تعریف عمومی‌اش یعنی کاهش در اندازه مواد تا آنجا که خواص جدیدی که در مواد با ابعاد ماکرو وجود ندارد ایجاد می‌شود. یکی از این خواص مهم قابلیت حساسیت بالاست (پینادواگ و همکاران، ۲۰۰۵: ۷۷۴). ابعاد نانو به دلایل مختلفی چون افزایش سطح برخورد، خواص فیزیکی و شیمیایی را افزایش می‌دهند. امروزه تولیدات صنعتی به سمت ابعاد کوچک و کوچک‌تر پیش می‌روند تا به عملکرد فیزیکی بهتری دست یابند. برای مثال، میزان حساسیت می‌تواند به کمک حسگرهای با ابعاد کوچک افزایش یابد. با این حال، افزایش حساسیت شناساگرها به تنهایی نمی‌تواند پاسخگوی همه توقعات لازم از یک حسگر باشد. یک حسگر نیاز دارد که از توانایی تشخیص شیمیایی^۱ بالایی برخوردار باشد. پلت‌فرم‌های نانوحسگر، با وجود حساسیت بالا متأسفانه از گزینش‌پذیری پایین رنج می‌برند. البته توسعه و تولید موادی با خواص نانو که ویژگی‌های شیمیایی^۲ خاصی را ارائه کنند، هنوز در ابتدای راه است. از این نوع مواد، می‌توان به ذرات پلیمری^۳ و نانوذرات^۴ اشاره کرد که هنگام مجاورت با مولکول‌های مواد منفجره، خواص قابل اندازه‌گیری آن‌ها تغییر می‌کند و کارایی بالایی را در شناسایی فراهم می‌کنند. پلت‌فرم‌های حسگری از ویژگی‌های نانو برای افزایش خواص فیزیکی چون الکتریکی، مغناطیسی، مکانیکی و نوری بهره می‌برند. ویژگی حساسیت بالای نانوحسگرها باید با ویژگی گزینش‌پذیری شیمیایی برخی مولکول‌های گیرنده^۵ عجین شود تا بتوان به یک حسگر کوچک با قابلیت گزینش‌پذیری، حساسیت و برگشت‌پذیری خوب دست یافت.

1. Chemical recognition capability
2. Chemical speciation
3. Polymer particles
4. Nanoparticles
5. Receptor

در حوزه نانو، روش‌های گوناگونی با استفاده از مولکول‌ها و اتم‌های خاص، برای ایجاد ساختارهای مفیدی مانند نانوذرات، نانوسیم‌ها و نیز استفاده از گروه‌های عاملی^۲ خاص برای ایجاد عناصر تشخیص مولکولی^۳ و لایه‌های خودآرایش یافته^۴، توسعه یافته‌اند. این گروه‌های عاملی خود، با میکرو و نانو ابزارها ترکیب می‌شوند تا حسگرهایی با کارایی بالاتر را فراهم آورند. المنت‌ها و پلت‌فرم‌های حسی زیادی وجود دارند که می‌توانند به عنوان پلت‌فرم نانوحسگرها مورد استفاده قرار گیرند. از این میان می‌توان به ساختارهای میکرو و نانو^۵، نقاط کوانتومی^۶، نانوسیم‌ها، نانولوله‌ها^۷، ساختارهای نانو با مورفولوژی کمربندی^۸ اشاره کرد. (شکل (۱) تعدادی از این ساختارها را نشان می‌دهد.)



شکل ۱ تصاویر نمونه‌ای از (a) نانوسیم‌ها، (b) نانولوله‌ها و (c) ساختارهای نانو با مورفولوژی کمربندی

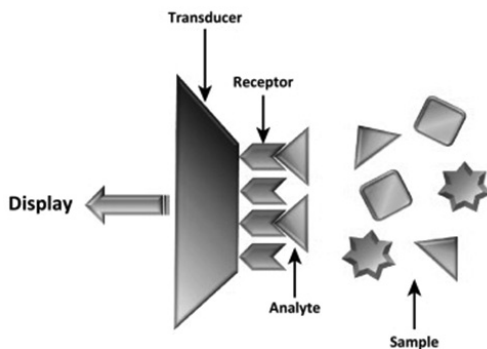
تغییرات فیزیکی در سطوح در اثر جذب مولکولی اساس این حسگرها را تشکیل می‌دهد. برای مثال، ابزارهای رزونانسی^۹ میکرو و نانو ساختاری که برای شناسایی جرمی^{۱۰} استفاده می‌شوند، از همین تغییرات فیزیکی مانند تغییر در فرکانس رزونانسی^{۱۱} مواد بعد از جذب مولکول‌ها بر روی سطوح استفاده می‌کنند. با همه این تفاسیر،

1. Nanowire
2. Functional groups
3. Molecular recognition elements
4. Self-assembled layers
5. Micro and nanofabricated structures
6. Quantum dots
7. Nanotube
8. Nanobelt
9. Resonant device
10. Mass detection
11. Resonance frequency

هنوز نانوحسگرها دارای نقاط وضعی نیز هستند. اول این که، حسگرهای مبتنی بر مولکول‌های گیرنده^۱ اغلب از گزینش پذیری پایینی برخوردار هستند (والث، ۲۰۰۵: ۴۵). و دوم به دلیل آن که از نظر فیزیکی دارای اندازه کوچکی هستند، از ظرفیت لازم برای جمع‌آوری نمونه‌های بیش‌تر، از یک محیط وسیع‌تر در یک مقیاس زمانی مناسب برخوردار نیستند (شیهان و همکاران، ۲۰۰۵: ۸۰۳). بنابراین، حسگرهای دارای مساحت سطح بیشتر، نسبت به آن‌هایی که دارای مساحت سطح کم‌تری هستند، برای جمع‌آوری مولکول‌های مواد منفجره مناسب‌تر هستند. هم‌چنین مشکل دیگری که نانوحسگرهای مبتنی بر جذب سطحی از آن رنج می‌برند این است که به دلیل محدود بودن سایت‌های جذب، گستره خطی وسیعی را نشان نمی‌دهند.

حسگرهای مواد منفجره مبتنی بر مولکول‌های گیرنده

به طور کلی نانوحسگرها به دو دسته مبتنی بر مولکول‌های گیرنده و بی‌نیاز از مولکول‌های گیرنده^۲ قابل تقسیم هستند. نانوحسگرهای بی‌نیاز از مولکول‌های گیرنده، بر اساس شناسایی خواص فیزیکی مواد منفجره مانند خواص ترمودینامیکی یا نوری عمل می‌کنند. گزینش‌پذیری در نانوحسگرهای مبتنی بر مولکول‌های گیرنده، از طریق برخی برهم‌کنش‌های میان مولکول‌های گیرنده و مواد منفجره ایجاد می‌شود. (شمای کلی یک حسگر شیمیایی مبتنی بر مولکول‌های گیرنده در شکل (۲) نشان داده شده است.)



شکل ۲ شمای کلی یک حسگر شیمیایی مبتنی بر مولکول‌های گیرنده

برای کمی‌سازی^۳ این برهم‌کنش‌ها از خواص قابل اندازه‌گیری مانند جرم، رسانایی و جذب نور استفاده می‌شود. اما به دلیل این که، هنوز مولکول‌های گیرنده بر گشت‌پذیر^۴ مناسبی مخصوص مواد منفجره وجود

1. Receptor-based
2. Receptor-free
3. Quantification
4. Reversible receptors

ندارد، از آرایه^۱ ای از مولکول‌های گیرنده برگشت‌پذیر مختلف در قالب یک بینی الکترونیکی^۲ استفاده می‌شود. برهم‌کنش‌های شیمیایی میان مولکول‌های مواد منفجره و مولکول‌های گیرنده، اساس‌گزينش‌پذیری شیمیایی^۳ در شناسایی مواد منفجره را تشکیل می‌دهند. برای انجام شناسایی برگشت‌پذیر، لازم است که مولکول‌های مواد منفجره با مولکول‌های گیرنده، پیوندهای ضعیفی مانند پیوندهای هیدروژنی^۴ و برهم‌کنش‌های واندروالسی^۵ برقرار کنند تا به راحتی در دمای محیط شکسته شوند. از آن‌جا که گزينش‌پذیری شیمیایی مبتنی بر برهم‌کنش‌های ضعیف، بسیار گزينش‌ناپذیر است، باید از آن‌ها در قالب آرایه‌ای مانند بینی الکترونیکی استفاده کرد. پوشش‌های مختلفی وجود دارند که می‌توان از آن‌ها به منظور ایجاد گزينش‌پذیری استفاده کرد. از این میان می‌توان به پلیمرها، اکسیدهای فلزی، تک‌لایه‌های خود آرایش یافته^۶ (SAMS) و DNA تک رشته‌ای اشاره کرد.

روش بینی الکترونیکی

از آن‌جا که مولکول‌های گیرنده برگشت‌پذیر برای مواد منفجره از گزينش‌پذیری بالایی برخوردار نیستند، استفاده از مولکول‌های گیرنده برگشت‌پذیر در قالب یک آرایه برای ایجاد پاسخی شبیه به یک سیستم بویایی مصنوعی، از اهمیت بالایی برخوردار است (پرسواد و همکاران، ۱۹۸۲: ۳۵۲). پلت‌فرم‌های حسگر فیزیکی متنوعی با حساسیت بالا وجود دارند که می‌توان آن‌ها را برای ساخت یک بینی مصنوعی الکترونیکی به کار گرفت. پاسخ این آرایه‌ها به کمک الگوریتم‌های خاص آنالیز می‌شود. هر گروه گیرنده بر روی آرایه، دارای یک سیگنال مخصوص به خود است که این سیگنال‌ها توسط الگوریتم‌های خاص تحلیل می‌شوند. در حال حاضر، هر قالب آرایه‌ای به همراه یک الگوی تشخیص^۷، فقط قادر است یک خاصیت شیمیایی را با اطمینان شناسایی کند. اگر از ترکیب‌های دوتایی استفاده شود، دیگر پاسخ‌ها از اطمینان لازم برخوردار نخواهند بود. باید توجه داشت که افزایش اندازه یک آرایه به هیچ وجه گزينش‌پذیری آن را افزایش نخواهد داد و این اغلب به دلیل محدودیت در تعداد برهم‌کنش‌هایی است که می‌توان آن‌ها را به خدمت گرفت. اما با این وجود هنوز تردیدهایی وجود دارد که روشی مبتنی بر آرایه‌های حسگری و الگوی تشخیص بتواند از گزينش‌پذیری لازم در هنگام برهم‌کنش‌های

1. Array
2. Electronic nose
3. Chemical selectivity
4. Hydrogen bond
5. Van der Waals interactions
6. Coating
7. Self-assembled monolayers
8. Recognition pattern

ساده برای شناسایی مولکول‌های کوچک به خصوص مولکول‌های مواد منفجره برخوردار باشد. به همین منظور تلاش‌های مجدانه‌ای برای توسعه حسگرهای با گزینش‌پذیری بالا در حال انجام است.

پلت‌فرم نانوسیم

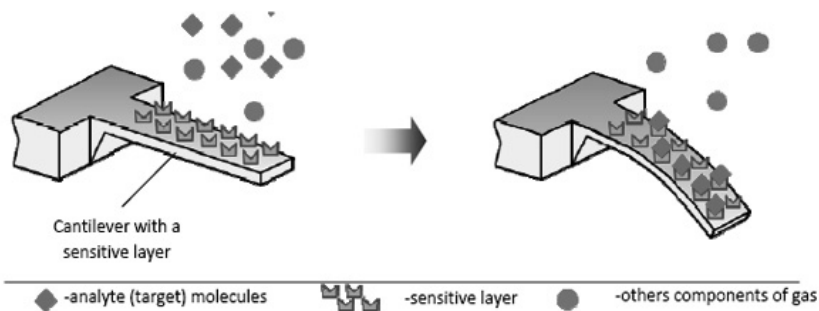
نانوساختارهایی مانند نانوسیم‌ها و نانوکریستال‌ها می‌توانند گزینه‌های خوبی برای توسعه پلت‌فرم‌های با حساسیت بالا باشند (پاتولسکی و همکاران، ۲۰۰۵: ۲۰). یک دسته از نانوسیم‌های مشهور، نانولوله‌های کربنی هستند که قطر نانومتری دارند. از میان نانوسیم‌ها، نانوسیم‌های و نانوکریستال‌های غیرآلی^۳ از خواص نوری و الکتریکی منحصر به فردی برخوردارند که این خواص، آن‌ها را به موادی ایده‌آل در راستای شناسایی به وسیله جذب مولکولی و با حساسیت بالا تبدیل می‌کند. خواص نوری نانوکریستال‌ها در اثر جذب مولکولی دچار تغییر می‌شود. هم‌چنین رسانایی الکتریکی در نانوسیم‌ها در اثر میدان الکتریکی القایی ایجاد شده توسط جذب مولکولی^۴ به شدت دچار تغییر می‌شود. اسنو و همکارانش نشان دادند که به کمک نانولوله‌های کربنی تک‌جداره^۵ (SWNTs) و به کارگیری یک خازن می‌توان دسته‌ای از بخارهای شیمیایی را با حساسیت بالا شناسایی کرد (اسنو و همکاران، ۲۰۰۵: ۱۴۹۲). هنگامی که یک پتانسیل الکتریکی اعمال می‌شود، یک میدان بزرگ الکتریکی را در اطراف نانولوله‌های کربنی تک‌جداره به وجود می‌آورد که این میدان باعث تغییراتی در قطبیت مولکول‌های جذب شده می‌شود. در نتیجه بر ظرفیت خازن که قابل اندازه‌گیری است اثر می‌گذارد. این که هر نوع ماده شیمیایی تنها می‌تواند یک نوع تغییر را در ظرفیت الکتریکی خازن ایجاد کند نکته کلیدی فرآیند شناسایی است. با پوشش‌دهی نانولوله‌های کربنی تک‌جداره به وسیله لایه‌های گزینش‌گر شیمیایی، می‌توان به حساسیت بالاتری نیز دست یافت. نانولوله‌ها را می‌توان از مواد گوناگونی تولید کرد، از جمله این مواد می‌توان به سیلیسیم (Si) و اکسیدروی (ZnO) اشاره کرد. این مواد می‌توانند خواص سطحی متفاوتی را برای شناسایی شیمیایی و اصلاح به کمک گروه‌های عاملی فراهم سازند (ژی و همکاران، ۲۰۰۶: ۸۳۳۹).

پلت‌فرم نانومکانیکی

اثرات نانومکانیکی ایجاد شده توسط جذب سطحی مولکولی فرصت‌های بی‌نظیری را برای شناسایی مقادیر ناچیز مواد منفجره فراهم می‌سازند. حسگرهای نانومکانیکی دارای انواع مختلفی هستند که یکی از آن‌ها به

1. Nanocrystal
2. Carbon nanotubes
3. Inorganic
4. Molecular adsorption
5. Single-walled carbon nanotubes

تیغه‌های معلق^۱ مشهور است (اکینسی و همکاران، ۲۰۰۴: ۴۶۶۹). در این نمونه، فرکانس رزونانسی تیغه معلق در اثر جذب جرم تغییر می‌کند و حساسیت حسگر به میزان فرکانس رزونانسی تیغه‌ها بستگی دارد. هنگامی که مولکول‌ها بر روی یک طرف تیغه جذب می‌شوند می‌توانند تیغه را در ابعاد بسیار کوچک خم کنند که این خم شدن در اثر نیروی جذب سطحی ایجاد می‌شود. حال هر چه ثابت فنریت یک تیغه کمتر باشد (که باعث فرکانس رزونانسی کمتر می‌شود)، حساسیت بالاتری را برای حسگر به همراه خواهد داشت. نانوتیغه‌های معلق نیز به این دلیل که از این ویژگی برخوردارند دارای حساسیت بالاتری هستند (یانگ و همکاران، ۲۰۰۶: ۵۸۳). شکل ۳ سازوکار خم شدن یک نمونه از این حسگرها را نشان می‌دهد. نیرویی که باعث خمیدگی تیغه می‌شود عمدتاً به میزان جرم جذب شده وابسته است.)



شکل ۳ سازوکار پاسخ حسگرهای نانومکانیکی تیغه معلق

حسگرهای مواد منفجره بی‌نیاز از مولکول‌های گیرنده

همان‌طور که قبلاً اشاره شد در نانوحسگرهای بی‌نیاز از مولکول‌های گیرنده، شناسایی مواد منفجره بر اساس تغییر در خواص فیزیکی آن‌ها مانند خواص ترمودینامیکی یا نوری انجام می‌شود. پلت‌فرم‌های مبتنی بر ویژگی تشدید نورتابی پلیمرها (AFP)، یکی از روش‌های بسیار موثر برای شناسایی مقادیر ناچیز مواد منفجره در این بخش است (ژو و همکاران، ۱۹۹۵: ۱۲۵۹۳). هنگامی که مولکول‌های TNT بر روی این نوع پلیمرها جذب سطحی می‌شوند، خصوصیات نورتابی آن‌ها دستخوش تغییر می‌شود. زنجیره‌های پلیمری به محض قرارگیری در معرض یک منبع نور فرابنفش به طور پیوسته تحریک شده و از خود نور ساطع می‌کنند. با جذب مولکول‌های TNT بر روی این پلیمرها، کاهش شدت نورتابی اتفاق می‌افتد و تغییر در شدت نورتابی به کمک دستگاه‌های اپتیکی ساده، اندازه‌گیری می‌شود. یک نوع تجاری از این گونه حسگرها توسط

1. Cantilever beam
2. Amplifying fluorescence polymers

شرکت Noamdics به بازار عرضه شده است که در آن از لایه‌های نازک پلیمرهای مزدوج با خاصیت نورتایی استفاده شده است. در حال حاضر پلت‌فرم‌های متنوعی بر اساس ویژگی نورتایی ساخته شده است (توال و همکاران، ۲۰۰۷: ۷۲). که از آن میان می‌توان به لایه‌های سیلیکای دوپه شده با مولکول‌های پورفیرین که به خوبی کاهش شدت نورتایی را در هنگام جذب مولکول‌های مواد منفجره را نشان می‌دهند اشاره کرد (سن و همکاران، ۲۰۰۳: ۳۸۲۱).

یکی دیگر از روش‌های شناسایی مواد منفجره در این بخش، استفاده از روش‌های الکتروشیمیایی است که از خواص اکسایش-کاهش استفاده می‌کنند (لو و همکاران، ۲۰۰۲: ۲۵۳). هرچند این روش‌ها تنها زمانی کاربرد دارند که مواد منفجره در ابتدا به شکل محلول درآمده باشند. متأسفانه، بیشتر مواد منفجره در آب از حلالیت بالایی برخوردار نیستند. روش ولتامتری پالسی برای شناسایی TNT به کار رفته است. در این روش ابتدا گروه‌های نیتروآروماتیک به گروه‌های هیدروکسیل آمین کاهش یافته و سپس گروه‌های هیدروکسیل آمین به آمین‌ها تبدیل شده‌اند. در روش‌های الکتروشیمیایی پتانسیل کاهش نسبت به یک الکتروود مرجع، منحصر به فرد است و بنابراین گزینش‌پذیری مناسبی را ایجاد می‌کند. این روش بسیار ساده بوده و کاربری آسانی دارد. از معایب این روش نیز می‌توان به حساسیت محدود آن اشاره کرد.

پلت‌فرم‌های ترکیبی

با ترکیب کردن پلت‌فرم‌های حسگری مختلف با یکدیگر، چه حسگرهای مشابه و چه حسگرهای با عملکرد متفاوت، می‌توان میزان گزینش‌پذیری شیمیایی در تشخیص مولکول‌های مواد منفجره را ارتقا بخشید. یکی از مشکلاتی که قبلاً در مورد آن بحث شد گزینش‌پذیری پایین نانو حسگرها بود که این نقص را می‌توان به خوبی به کمک ترکیب کردن پلت‌فرم‌های مختلف در قالب یک حسگر واحد مرتفع کرد و به حساسیت و گزینش‌پذیری بالایی جهت اندازه‌گیری خواص گوناگون فیزیکی و شیمیایی دست یافت. حتی می‌توان از برخی پلت‌فرم‌های فوق حساس نیز در یک حسگر ترکیبی استفاده کرد، مانند کروماتوگرافی گازی که دارای گزینش‌پذیری بالایی شیمیایی است. به هر حال ترکیب کردن حسگرهای مختلفی که از روش‌های متفاوتی برای شناسایی استفاده می‌کنند، زمان تشخیص را طولانی می‌کند که این مشکل را نیز می‌توان به کمک اضافه کردن دستگاه‌های کروماتوگرافی گازی سریع و پیشرفته با ابعاد میکرو به حسگر ترکیبی، حل کرد تا حسگر مورد نظر به یک حسگر فوق حساس برای شناسایی بخارات مواد منفجره تبدیل شود.

چالش‌های پیش روی استفاده عملی از حسگرها

ساخت یک حسگر مناسب با حساسیت و گزینش‌پذیری مناسب، تنها بخشی از چالش‌های پیش روی شناسایی مواد منفجره را تشکیل می‌دهد. بخش دیگر چالش، آوردن مواد منفجره از محیط انفجار و رساندن آن به اجزای حسگر است. به کارگیری عملی نانو حسگرها برای شناسایی مقادیر ناچیز مواد منفجره، مستلزم استفاده از بخش‌های نانو حسگری است که در یک سیستم یکپارچه حاوی محفظه بخار و پیش تغلیظ کننده کنار یکدیگر

تلفیق شوند.

یکپارچگی و اتحاد اجزای مختلف یک حسگر خود چالشی اساسی است. همچنین در مرحله عمل، در مسیر روش‌های جمع‌آوری و روش‌های پیش‌تغلیظ مواد منفجره نیز مشکلاتی وجود دارد که بیشتر ناشی از فشار بخار ناچیز آن‌ها و در نتیجه محدود بودن تعداد مولکول‌های مواد منفجره برای شناسایی در زمان مناسب، ناشی می‌شود. چالش بعدی این است که عمل پیش‌تغلیظ، مدت زمان شناسایی را افزایش می‌دهد؛ زیرا در این مرحله، مولکول‌های مواد منفجره به سطح می‌چسبند و لازم است مسیرهای تحویل و سایر اجزای حسگر در یک دمای بالا باقی بمانند و این خود، باعث کاهش حساسیت می‌شود. به هر حال کاهش در حساسیت، به ویژه هنگامی که از روش مبتنی بر مولکول‌های گیرنده و برهم‌کنش‌های مولکولی کم انرژی استفاده می‌شود، باعث ایجاد مشکلاتی در گزینش‌پذیری نیز می‌شود. برای مثال در برخی روش‌ها که از مولکول‌های گیرنده مشخصی استفاده می‌شود، مولکول‌های آب که دارای غلظتی چندبرابر مواد منفجره هستند، می‌توانند مانع گزینش‌پذیری حسگر شوند. روش‌های مبتنی بر آرایه‌ها، می‌توانند گزینش‌پذیری جزئی را به وجود آورند که با ترکیب روش‌های مبتنی بر مولکول‌های گیرنده و بی‌نیاز از مولکول‌های گیرنده در قالب آرایه‌های چندگانه، گزینش‌پذیری و حساسیت برای شناسایی مواد منفجره بسیار بهبود می‌یابد.

نانوحسگرها نویدبخش‌هایی از دسررها و چالش‌های عنوان شده، به ویژه در مورد استفاده عملی از حسگرها هستند و در نهایت می‌توان به یک پلت‌فرم ایده‌آل جهت شناسایی مقادیر ناچیز مواد منفجره دست یافت.

نتیجه‌گیری

چالش‌هایی اساسی بر سر راه دست‌یابی به حساسیت و گزینش‌پذیری در شناسایی مواد منفجره وجود دارند که مهم‌ترین آن‌ها عبارتند از: تعداد بسیار کم مولکول‌های مواد منفجره که در زمان مناسبی بتوان آن‌ها را جمع‌آوری کرد، کم‌بودن گزینش‌پذیری در اثر مزاحمت ایجاد شده توسط سایر مولکول‌ها و نیز گستردگی ترکیبات شیمیایی که می‌توانند به در ساخت انواع مواد منفجره مورد استفاده قرار گیرند. با این وجود، تحقیقات در ابعاد نانو نشان می‌دهد که تأثیرات نانو موادی که در متن به آن‌ها اشاره شد امید فراوانی را برای دست‌یابی به حسگرهایی با همه‌معیارهای لازم فراهم می‌سازند. نانوحسگرهایی با حساسیت و گزینش‌پذیری بالا که قادر باشند در پلت‌فرم‌های چندگانه بازدهی خوبی را از خود نشان دهند، انگیزه زیادی را برای تولید و توسعه حسگرهای بیشتر ایجاد می‌کنند.

فهرست منابع

- Colton, R. J., and Russell, J. N., *Science journal* (2003).
Cui, Y., et al., In *Nanowires and Nanobelts – Materials, Properties and Devices*, Wang, Z. L., (ed.), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, (2003).
Patolsky, F., and Lieber, C. M., *Materials Today* (2005).

- Persaud, K., and Todd, G. H., *Nature* (1982).
- Pinnaduwaige, L. A., *et al.*, *IEEE Sens. J.* (2005).
- Pinnaduwaige, L. A., *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.* (2004).
- Sheehan, P. E., and Whitman, L. J., *Nano Lett.* (2005).
- Snow, E. S., *et al.*, *Science* (2005).
- Sohn, H., *et al.*, *J. Am. Chem. Soc.* (2003).
- Steinfeld, J. I., and Wormhoudt, J., *Annu. Rev. Phys. Chem.* (1998).
- Toal, S. J., *et al.*, *J. Forensic Sci.* (2007).
- Walt, D. R., *Anal. Chem.* (2005).
- Woodfin, R. L., (ed.), *Trace Chemical Sensing of Explosives*, John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, (2007).
- Xie, C., *et al.*, *Anal. Chem.* (2006).
- Yang, Y. T., *et al.*, *Nano Lett.* (2006).
- Yinon, Y., (ed.), *Counterterrorist Detection Techniques of Explosives*, Elsevier, Amsterdam, (2007)
- Zhou, Q., and Swager, T. M., *J. Am. Chem. Soc.* (1995).