دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر
فصلنامه‌ی کاربرد شیمی در محیط زیست

سال پانزدهم، شماره‌ی ۵۸
تابستان ۱۴۰۳، صفحات ۸۳-۶۱

"مقاله مروری"

بررسی جامع زیست حسگرهای نوری

نوشین داداش زاده[۱]*، ناصر مصلحی میلانی[۲]

[۱] استادیار، گروه آموزشی فیزیک، واحد ارس، دانشگاه آزاد اسلامی، جلفا، ایران
[۲] استادیار، گروه آموزشی فیزیک، واحد اهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اهر، ایران
*نویسنده مسئول مکاتبات: noushindadashzadeh@yahoo.com

(دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۳/۲۶ پذیرش نهایی: ۱۴۰۳/۰۵/۲۴)

چکیده

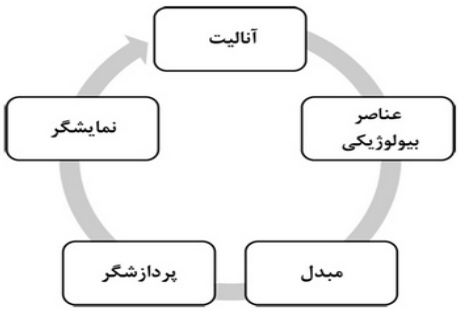
حسگرها، عملکرد ارزشمندی را در مطالعات زیست محیطی، کشاورزی، بازرسی و ایمنی مواد غذایی، پاسخ سریع و مقرون به صرفه در بیوتکنولوژی، تشخیص بیماری و خدمات پزشکی و ... از خود نشان داده‌اند. از میان بسیاری از دسته‌های حسگرها، حسگرهای زیستی نوری به دلیل اندازه‌گیری‌های انتخابی، سریع و بسیار حساس خود، دارای مزایای اضافی مانند استحکام، قابلیت اطمینان و پتانسیل ادغام بر روی تراشه هستند. در مورد حسگرهای زیستی نوری، آنالیت با استفاده از نور با تکنیک‌های مبتنی بر برچسب یا بدون برچسب شناسایی می‌شود. در این مقاله برخی از پیشرفت‌های قابل توجه در دهه گذشته در زمینه حسگرهای زیستی نوری با تاکید بر رویکردهای ساخت آنها و حوزه‌های کاربردی رو به رشد، بررسی شده است. همراه با برخی از مقاله‌های با دقت انتخاب شده در مورد پیشرفت‌های جدید در حسگرهای زیستی نوری مروری کوتاه از حسگرهای زیستی نوری از زمان پیشرفت نیز ارائه شده است. همچنین چالش‌ها و آینده فناوری‌های حسگر زیستی نوری در حال ظهور در دهه جاری ارائه شده است.

کلمات کلیدی: انواع زیست حسگرهای نوری، کاربرد زیست حسگرهای نوری، تشدید پلاسمون سطحی

مقدمه

حسگرهای زیستی ابزارهای تحلیلی هستند که برای تشخیص آنالیت‌های خاص مانند کلسترول، اوره، پنی‌سیلین، اتانول و غیره استفاده می‌شوند که دارای مولکول‌های زیستی مانند اسیدهای نوکلئیک، پروتئین‌ها، کربوهیدرات‌ها به عنوان عنصر کلیدی برای تشخیص این آنالیت‌ها هستند. سایر عناصر کلیدی حسگرهای زیستی یک مبدل و یک ابزار تجزیه و تحلیل داده‌ها هستند. طبق طبقه‌بندی بر اساس مبدل‌های مورد استفاده، یک حسگر می‌تواند پیزوالکتریک، کالریمتری، ترموالکتریک، پیروالکتریک، مغناطیسی، الکترونی، نوری و الکتروشیمیایی باشد (۱). حسگرهای زیستی نوری به دلیل اندازه‌گیری‌های انتخابی، سریع و بسیار حساس، مزیت زیادی در بیوتکنولوژی، مطالعات زیست‌محیطی، تشخیص بیماری‌ها و ابزارهای پزشکی ایجاد کرده‌اند (۲).

شکل (۱): مراحل کلیدی در سنجش زیست



شکل (۲): اجزای کلیدی یک حسگر زیستی

شکل ۱ مراحل کلیدی در سنجش زیستی را نشان می‌دهد که شامل چهار مرحله اصلی از آماده‌سازی نمونه تا تجزیه، تحلیل و نتیجه است. جداسازی، استخراج و شناسایی مراحل کلیدی هستند که معمولاً برای طبقه‌بندی حسگرها استفاده می‌شود.

شکل۲ اجزای کلیدی یک حسگر زیستی را نشان می‌دهد. عنصر حسگر زیستی می‌تواند یک آنتی‌بادی، آنزیم، پروتئین و غیره باشد. اندازه‌گیری‌ها معمولاً با استفاده از مبدل انجام می‌شود و در نهایت داده‌ها تجزیه و تحلیل می‌شوند. حسگرهای زیستی نوری منحصربه‌فرد هستند زیرا از رویکرد اندازه‌گیری نوری استفاده می‌کنند، یعنی از مبدل‌های نوری برای اندازه‌گیری‌ها استفاده می‌کنند. اصل عملکرد و در نتیجه معیارهای کلیدی عملکرد این حسگرهای زیستی نوری بر اساس مبدل نوری مورد استفاده، متفاوت است. به همین دلیل طبقه‌بندی حسگرهای زیستی نوری بر اساس مبدل‌هایشان مهم است. یکی دیگر از روش‌های رایج طبقه‌بندی حسگرهای زیستی نوری، علامت‌گذاری آن‌ها به‌عنوان مبتنی بر برچسب و بدون برچسب است (۳). در حسگرهای زیستی مبتنی بر برچسب، از یک برچسب فلورسنت یا یک برچسب رنگ سنجی استفاده می‌شود و شدت فلورسانس یا تغییر رنگ به ترتیب برای تشخیص یک آنالیت مشاهده می‌شود (٤). بوریس جی آندریوکوف و همکاران[1] حسگرهای زیستی بدون برچسب در تشخیص عفونت را بررسی کرده‌اند (۵).

حسگرهای زیستی مبتنی بر نانومواد نوری با نشانگرهای زیستی اگزوزومی برای تشخیص

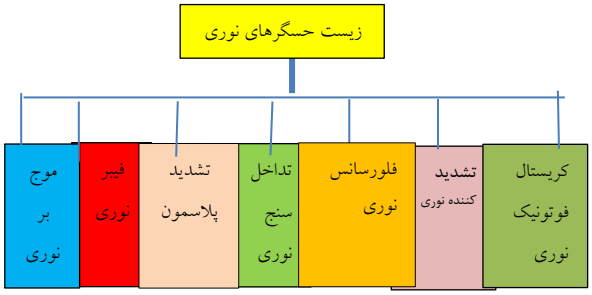
[1] Boris G Andryukov et al

زودهنگام سرطان طراحی شده‌اند (٦). حسگرهای زیستی مبتنی بر انتقال انرژی تشدید فلورسانس (FRET)[۲] به طور مداوم برای تشخیص مولکول‌های فعال زیستی و برای نظارت بر رفتار سلول استفاده می‌شوند (۷). از بین تمام حسگرهای زیستی نوری رایج‌ترین و پرکاربردترین حسگرهای زیستی نوری رزونانس پلاسمون سطحی است. همچنین با نگاهی به گذشته اولین پیشرفت بزرگ در بیوسنسورهای نوری زمانی رخ داد که روش تشدید پلاسمون سطحی برای اولین بار توسط کرچمن (۸) ارائه شد. متعاقباً چندین کار تحقیقاتی از اوایل دهه ۱۹۸۰ بر روی توسعه حسگرهای زیستی نوری به‌ویژه موجبر و تشدید پلاسمون سطحی متمرکز شد. با این حال با ادامه کار در دهه ۱۹۸۰ اولین تشدید پلاسمون سطحی که به صورت تجاری در سال ۱۹۹۰ در دسترس بود هر ساله زیست‌حسگرهای مبتنی بر تشدید پلاسمون سطحی پیشرفته‌تر وارد بازار می‌شوند (۹). با پیشرفت تکنولوژی به تدریج مبدل‌های نوری جدیدتر مانند کریستال‌های فوتونی، تداخل‌سنج و غیره برای کار در حسگر زیستی نوری توسعه یافته‌اند. در دهه گذشته، محققان بر روی کوچک‌سازی، ویژگی، پاسخگویی و اثربخشی زیست‌حسگرهای نوری تمرکز کرده‌اند. پیشرفت‌های جدید در زیست حسگرهای نوری در زمینه‌های بیوتکنولوژی، مطالعات زیست‌محیطی، کشاورزی، بازرسی و ایمنی مواد غذایی، تشخیص بیماری‌ها و خدمات پزشکی کمک شایان توجهی کرده است. در بخش ۱ طبقه‌بندی حسگرهای زیستی نوری در دهه گذشته با تأکید بر رویکردهای ساخت آن‌ها و حوزه‌های کاربردی رو به رشد بررسی شده‌اند. در بخش ۲ حسگرهای زیستی نوری، کاربردهای نوظهور در دهه گذشته، همراه با برخی از مقاله‌هایی که با دقت انتخاب شده‌اند در مورد پیشرفت‌های جدید در حسگرهای زیستی نوری در دهه گذشته بررسی شده‌اند. زمینه‌های کاربردی اصلی و کاربردهای نوظهور در دهه گذشته برای ارائه تصویری واضح از تطبیق‌پذیری حسگرهای زیستی نوری ترسیم شده است و در نهایت، چالش‌ها و آینده فناوری‌های حسگر زیستی نوری در حال ظهور در دهه جاری ارائه می‌شود.

طبقه بندی زیست حسگرهای نوری

پیشینه تاریخی مختصری از حسگرهای زیستی نوری در بخش مقدمه ارائه شده است. در این بخش بر طبقه‌بندی بیوسنسورهای نوری، ساختارهای معمولی همراه با پیشرفت‌های نوظهور در حسگر زیستی نوری تمرکز می‌کنیم، که احتمالاً دهه جاری را تحت تأثیر قرار خواهد داد. بر اساس جنبه‌های طراحی، شکل۳ انواع عمده حسگرهای زیستی نوری، یعنی فیبر نوری، تشدید کننده حلقه، تداخل سنج، موج‌بر نوری، کریستال‌های فوتونی، فلورسانس، تشدید پلاسمون سطحی را نشان می‌دهد. تاکنون، محققان تلاش‌های زیادی را در زمینه حسگر زیستی انجام داده‌اند و قبلاً پیکربندی‌های مختلفی را فرموله کرده‌اند. در این‌جا، شرح انواع مختلف حسگرهای زیستی نوری را با توجه به اصول کار، ویژگی‌ها و همچنین چشم‌انداز آن‌ها توضیح خواهیم داد.

[2] Fluorescence resonance energy transfer



شکل (۳): انواع زیست حسگرهای نوری

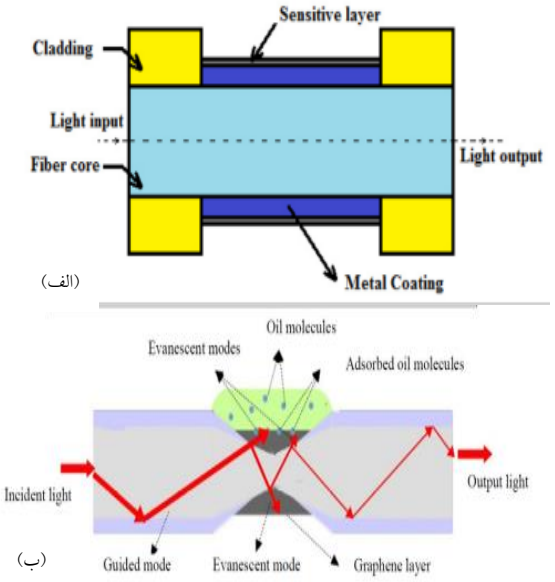
حسگرهای زیستی فیبر نوری

یک فیبر نوری از هسته و روکش تشکیل شده است و ضریب شکست هسته کمی بالاتر از روکش است تا نور فرودی را هدایت کند. لایه‌های اضافی به‌عنوان روکش ثانویه برای محافظت از فیبر و یک لایه حساس برای تشخیص آنالیت‌ها تشکیل شده که در شکل٤ (الف) نشان داده شده است. نور طبق قانون بازتاب اسنل از طریق فیبر نوری منتشر می‌شود. بر این اساس فیبر نوری به عنوان "موج نوری" نیز شناخته می‌شود. هنگامی که تنها یک حالت می‌تواند در فیبر نوری هدایت شود، به آن فیبر تک حالته می‌گویند. هنگامی که بیش از دو حالت می‌توانند به طور همزمان در فیبر نوری منتشر شوند، به آن فیبر چند حالته می‌گویند. حسگرهای مبتنی بر فیبر نوری به دلیل ماهیت فیبرهای نوری که حساس نیستند، توجه زیادی را در زمینه‌های مختلف تحلیلی به خود جلب کرده‌اند و می‌تواند در محیط‌های خشن و دماهای شدید زنده بماند (۱۰).

عناصر حسگر زیستی (آنتی‌بادی‌ها و غیره) روی هسته فیبر بی‌حرکت می‌شوند تا با آنالیت واکنش دهند. حسگرهای زیستی فیبر نوری ارزان‌تر، کوچک‌تر و آسان‌تر برای استفاده هستند. اخیراً چندین فعالیت تحقیقاتی روی حسگرهای زیستی فیبر نوری برای تشخیص پروتئین‌ها، DNA و باکتری‌ها انجام شده است. طیف گسترده‌ای از حسگرهای زیستی فیبر نوری مبتنی بر تشدید پلاسمون سطحی، حسگرهای شیمیایی، پلاسمونیک به طور گسترده گزارش شده است (۱۱). شکل ٤(ب) یک فیبر نوری پلاستیکی پوشیده شده با گرافن و نانولوله‌ها کربنی چند جداره را برای تشخیص تقلب در روغن خوراکی نشان می‌دهد (۱۲). حسگر زیستی فیبر نوری شیشه‌ای بوروسیلیکات کم هزینه و قابل حمل با استفاده از تغییر در ضریب شکست فیبر شیشه نشان داده شده است (۱۳). یک زیست حسگر فیبر نوری بدون آنزیم و بدون برچسب بر اساس واکنش مونتاژ کاتالیزوری و نانوکامپوزیت‌های گرافن اکساید احیا شده برای تشخیص مواد غذایی اصلاح شده ژنتیکی توسعه یافته است (١٤). فابری فیبر نوری تداخل سنج پروت با فیلم‌های دی‌الکتریک دی‌اکسید تیتانیوم و اکسید آلومینیوم به عنوان حسگرهای زیستی برای اندازه‌گیری گلوکز و هموگلوبین استفاده شده‌اند (١٥). النا بنیتو پنا و همکاران[3] پیکربندی‌ها و روش‌های فلورسانس را در حسگرهای زیستی فیبر نوری و موجبر مسطح بر اساس فلورسانس بررسی کرده‌اند (١٦). زیست حسگرهای فیبر نوری دارای اندازه کوچک، انتقال کم تلفات از راه دور، بدون تداخل الکترومغناطیسی هستند و برای تشخیص گازها، مواد آلی، مواد منفجره و غیره استفاده می‌شوند (١٧). زیست حسگرهای فیبر نوری تداخل سنج فابری پرو، با استفاده از پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان ساخته شده با پوشش غوطه‌وری برای توسعه تحلیل لیپیدومی استفاده شده

[3] Elena Benito-Pena et al

است (۱۸). بیوسنسور فیبر نوری فسفر سیاه با آرایش نانو نوری برای تشخیص فوق حساس سرطان پیشنهاد شده است (۱۹). فیبر نوری به طور گسترده در طراحی و توسعه حسگرهای زیستی برای تشخیص حسگر زیستی گلوکز استفاده می‌شود (۲۰).



شکل (٤): (الف) حسگر زیستی فیبر نوری(۱۰). (ب) شماتیک انتشار نور در فیبر نوری پلاستیکی مخروطی با پوشش گرافن (۱۲).

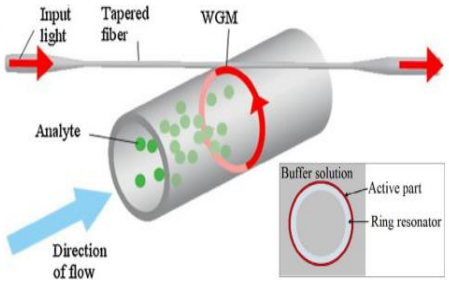
زیست حسگرهای تشدید کننده حلقه نوری

حفره‌ای که نور را در مدار نوری نوسان می‌دهد دارای چندین ویژگی مانند سرعت بالا، انعطاف‌پذیری، هزینه کم، قابلیت تشخیص چند آنالیت و سازگاری با عناصر نوری اضافی است. هنگامی که نور محدود می‌شود و در داخل یک حفره با خود تداخل پیدا می‌کند، فقط فرکانس‌های نوری خاصی که فرکانس‌های تشدید نامیده می‌شوند، می‌توانند در داخل حفره بدون تلفات زیاد پشتیبانی شوند. یک ریزحفره می‌تواند به عنوان یک مبدل سیگنال نوری عمل کند، که در درجه اول از تغییر در هندسه یا مواد حفره استفاده می‌کند (ممکن است در اثر تغییر شکل یا گرم کردن حفره و در نتیجه تغییر پارامترهای تشدید ایجاد شود) که در نهایت به تغییر در شدت نور تبدیل می‌شود. حفره‌های نوری را می‌توان به ریزحفره‌های فابری پرو، تشدیدگرهای حالت گالری پچ‌پچ[4](WGM)، حفره‌های نامتقارن و حفره‌های کریستال فوتونیک طبقه‌بندی کرد. ضریب Q به طور گسترده در ارزیابی یک حفره نوری به کار گرفته شده است. حفره فابری پرو دارای ضریب Q بالاتری است. با این حال، آینه حفره‌ای گران قیمت و تثبیت کننده پیچیده، به طور جدی توسعه و کاربردهای آن را مختل می‌کند. اخیراً تشدید کننده‌های WGM در بیوپزشکی و تشخیص بالینی رایج شده‌اند. با پیشرفت در فناوری نانو، مواد مختلفی برای ساخت تشدیدگرهای WGM، مانند شیشه، پلیمر، و مواد نیمه‌هادی استفاده شده است.

شکل ۵ یک تشدید کننده حلقه نوری سیال را نشان می‌دهد که از میکروسیال و رزوناتور حلقه نوری برای دستیابی به تشخیص سریع سرطان پستان بدون برچسب استفاده می‌شود (۲۱). حسگرهای زیستی تشدید کننده حلقه نوری زمان پاسخ سریع و ارزان‌تری دارند. تشدید کننده‌های حلقه نوری به طور فزاینده‌ای برای توسعه حسگرهای زیستی در تشخیص بیماری‌هایی مانند سرطان استفاده می‌شوند (۲۲). چالش‌های پیش روی اجرای بیوسنسورهای تشدید کننده حلقه نوری در زمینه‌های مختلف مانند داروسازی، پزشکی و ایمنی مواد غذایی و غیره مورد بحث قرار گرفته است (۲۳). تشدید کننده حلقه موجبر فراماده که برهمکنش بین میدان نوری و آنالیت‌ها را

[4] Whispering gallery mode

افزایش می‌دهد ارائه شده است (۲٤). یک تشدید کننده حلقه پلاسمونیک آسان برای ساخت با گذر نور کم تلفات پیشنهاد شده است (۲۵). تشدیدگرهای نانو حلقه اخیرا با استفاده از کریستال فوتونی برای کاربردهای مختلف حسگر زیستی طراحی شده‌اند (۲٦). تشدید کننده‌های میکرو حلقه بسیار حساس برای تشخیص مولکول‌های زیستی نشان داده شده‌اند (۲۷).

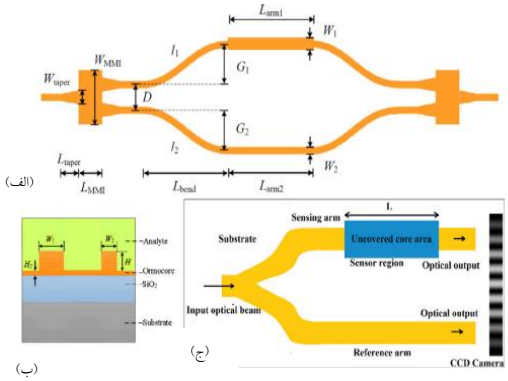


شکل (۵): زیست حسگر تشدید کننده حلقه نوری سیال (۲۱).

حسگرهای زیستی تداخل سنج نوری

در تداخل سنجی، تفاوت‌های حس شده توسط دو پرتو نور که در امتداد مسیرهای یکسان حرکت می‌کنند، اساس سنجش آنالیت‌ها را تشکیل می‌دهد که در شکل ٦ نشان داده شده است. یک تداخل سنج معمولی ماخ زندر دارای یک بازوی مرجع و یک بازوی حسگر به همراه یک دوربین است. یک پرتو نوری ورودی واحد وجود دارد، در حالی که دو خروجی نوری از بازوی مرجع و بازوی حسگر خارج می‌شوند. بازوی حسگر دارای یک ناحیه هسته بدون پوشش است که برای تشخیص آنالیت‌ها طراحی شده است. شکل ٦ (الف) ساختار یک حسگر نوری موجبر یکپارچه پلیمری را با دو بازو با عرض نابرابر و شکل ٦ (ب) مقطع دو بازوی حسگر موجبر را نشان می‌دهد (۲۸). تداخل‌سنج‌های ماخ زندر، تداخل‌سنج‌های ساگناک، موجبر موج دو وجهی و تداخل‌سنج‌های فابری پرو از پرکاربردترین بیوسنسورهای تداخل‌سنج نوری هستند. نیتیش مودگال و همکاران[5] نمایی مقایسه‌ای از حسگرهای زیستی تداخل سنجی و تشدید کننده حلقه‌ای ارائه کرده‌اند (۲۹). حسگرهای عمودی از نظر سهولت ساخت و اتصال نور برتر هستند. اسید نوکلئیک با استفاده از تداخل سنج ماخ زندر با حساسیت فوق‌العاده بالا شناسایی شده است (۳۰). یک تداخل‌سنج سیلیکونی ماخ‌زندر با حساسیت بالا برای سنجش زیستی نوری پیشنهاد شده است (۳۱). مطالعه محاسباتی مدل یک بیوسنسور نوری تداخل سنج ارائه شده است (۳۲). تداخل سنج ساگناک با حساسیت بالا دارای مزایای متعددی از جمله هزینه کم‌تر و سهولت ساخت برای تشخیص استرپتاویدین است (۳۳). تشخیص پاتوژن بیمارستانی با استفاده از یک بیوسنسور تداخل سنجی دو وجهی انجام شده است (۳٤). اسپینوزا و همکاران[6] با استفاده از حسگر زیستی تداخل‌سنجی فابری پرو توانسته‌اند با موفقیت به تشخیص کامپوننت ایمونوگلوبولین‌های خاص E به آلرژن‌های مولکولی دست یابند. تداخل سنجی میکروفیبر سیلیس برای تشخیص بیومارکرهای[7] (HER2) برای تشخیص (بدون برچسب) سرطان سینه ارائه شده است (۳۵).

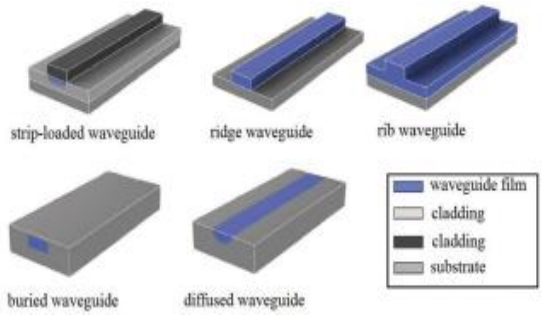
[5] Nitesh Mudgal et al
[6] Espinosa et al
[7] Human epidermal growth factor receptor 2



شکل (۶): (الف) ساختار یک بیوسنسور نوری موجبر یکپارچه پلیمری با دو بازو با عرض نابرابر (ب) مقطع دو بازوی حسگر. (ج) یک تداخل سنج معمولی ماخ زندر (۳۶).

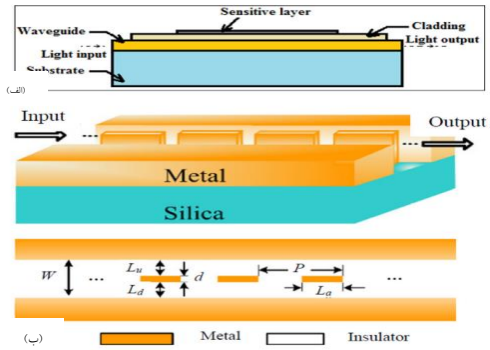
حسگرهای زیستی موج‌بر نوری

موج‌بر نوری معمولاً بر روی بستری با ضخامت کم و ضریب شکست کم با استفاده از مواد سیلیس یا پلیمر ساخته می‌شود. بر اساس مورفولوژی، موج‌بر نوری را می‌توان به صورت زیر طبقه‌بندی کرد: موج‌بر تیغه‌ای و موج‌بر راه‌راه. در ساختار دوم، نور فقط می‌تواند به صورت طولی در امتداد موج‌بر منتشر شود. موج‌بر راه راه را می‌توان به موج‌بر بارگذاری شده نواری، موج‌بر دنده‌ای، موج‌بر مدفون و موج‌بر پخش شده تقسیم کرد که می‌تواند توسط فناوری‌های استاندارد میکرو و نانوساخت اجرا شود (شکل ۷).



شکل (۷): تصویر شماتیک از انواع مختلف موج‌برهای راه‌راه (۳۷).

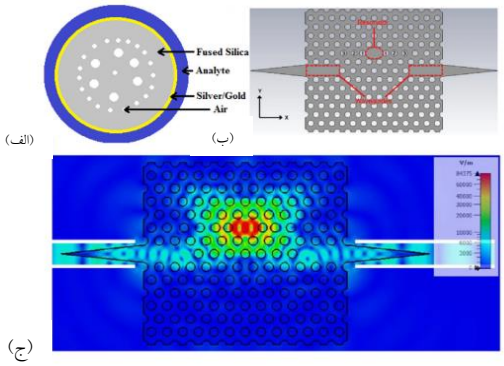
تغییر نوری در مجاورت سطح هدایت کننده ناشی از پراکندگی موج ناپایدار به عنوان مکانیسم تشخیص در حسگرهای زیستی موج‌بر نوری استفاده می‌شود. یک حسگر زیستی موج‌بر نوری معمولی بسیار حساس است، حسگرهای زیستی موجبر نوری انعطاف‌پذیر و با وضوح بالا اخیرا توسعه یافته‌اند. پیشینه تاریخی و طبقه‌بندی حسگرهای زیستی موج‌بر نوری مورد بررسی و بحث قرار گرفته است (۳۸). حسگرهای زیستی موج‌بر نوری با موفقیت در تشخیص و درمان بالینی، تصویربرداری و غیره استفاده می‌شوند (۳۹). تداخل ماخ–زندر بر اساس عایق فلز–فلز مبتنی بر بازتاب براگ برای کاربردهای حسی و ارتباطی طراحی شده است که در شکل ۸ (ب) نشان داده شده است. تشخیص حساسیت بالای مایکوتوکسین‌ها با استفاده از حسگر زیستی نوری مبتنی بر یک موجبر مسطح گزارش شده است (۴۰). حسگر زیستی موج‌بر نوری مبتنی بر فیلم دی اکسید تیتانیوم نقره حساسیت بالاتری نسبت به حسگر زیستی مبتنی بر طلا دارد (۴۱). طراحی حسگر زیستی موج‌بر نوری شاخه Y سیلیکون نیترید از طریق شبیه‌سازی برای حساسیت بالا بهینه شده است (۴۲). بیوسنسور سطحی موج‌بر پلاسمون پلاریتون برای تشخیص حمله قلبی از طریق تروپونین I قلب انسان ارائه شده است (۴۳).



شکل (۸): (الف) زیست حسگر موج‌بر نوری (ب) موج‌بر پلاسمونی MIM (فلز– عایق فلز): نمای سه بعدی و دو بعدی (۴۴).

حسگرهای زیستی کریستال فوتونیک نوری

تغییرات در ضریب شکست و تناوب که منجر به تغییر در رفتار نوری می‌شود به عنوان مکانیزم سنجش در حسگرهای نوری کریستال فوتونی استفاده می‌شود. شکل ۹ (الف) ساختار معمولی حسگر کریستال فوتونی با سیلیس ذوب شده و لایه نقره، طلا را نشان می‌دهد. حسگرهای زیستی کریستال فوتونیک کاربردهای بسیار زیادی در پزشکی دارند. زیست حسگر کریستال فوتونیک با قابلیت‌های بیشتری تکامل یافته‌اند، با این حال آن‌ها فقط به آنالیت‌های خاص محدود شده‌اند و با چالش‌های مرتبط با حساسیت مواجه هستند (٤٥). شکل ۹ (ب) یک تشدید کننده کریستال فوتونی را نشان می‌دهد که با استفاده از ویفر سیلیکونی با مقاومت بالا برای تشخیص سریع طراحی شده است و شکل ۹ (ج) توزیع میدان الکتریکی تشدید کننده کریستال فوتونی را در صفحه xy نشان می‌دهد (٤٦). حساسیت حجمی و حسی قابل توجهی در تشدید کننده ریز حلقه کریستال فوتونی در مقایسه با حسگرهای میکروحلقه معمولی گزارش شده است (٤٧). حسگرهای بلور فوتونیک اندازه کوچکتر، حساسیت بالا و به راحتی قابل ادغام هستند (٤٨). اخیرا حسگرهای زیستی کریستال فوتونی دوبعدی طراحی شده با استفاده از موج‌برها و یک نانوحفره ارائه شده است (٤٩). یک بیوسنسور کریستال فوتونیک دو بعدی با ابعاد کوچک‌تر و حساسیت خوب ارائه شده است (٥٠). یک حسگر زیستی حساس بر اساس کریستال‌های فوتونی دی اکسید تیتانیوم با استفاده از رسوب فاز مایع (LPD)[8] توسعه یافته است (٥١). یک بیوسنسور کریستال فوتونیک تک بعدی با لایه‌های نازک چندلایه که برای حساسیت بالا مورد بررسی قرار گرفته است (٥٢). فیبر کریستال فوتونیک مارپیچی دوقطبی که از نظر تئوری با استفاده از روش اجزا محدود بررسی شده است، حساسیت بالایی نشان داده است (٥٣). یک بیوسنسور فیبر کریستال فوتونیک چند کاناله فشرده و یکپارچه با حساسیت بالا پیشنهاد شده است (٥٤).



شکل (۹): (الف). تشدید کننده بلور فوتونیک در محدوده میلی متر/تراهرتز(ب) یک بیوسنسور کریستال فوتونی معمولی (ج) توزیع میدان الکتریکی تشدید کننده کریستال فوتونیک در صفحه xy (٤٦).

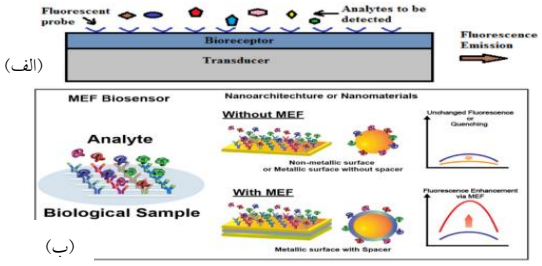
فلورسانس نوری، بیوسنسورهای لومینسانس

در بیوسنسورهای نوری مبتنی بر فلورسانس و لومینسانس، نوری که پس از برانگیختگی فلورسنت ساطع می‌شود، به طور معمول با استفاده از آشکارسازهایی مانند فتودیودها یا لوله‌های فوتومولتی‌پلایر تشخیص داده می‌شود. شکل ۱۰ ساختار کلی یک بیوسنسور نوری را به همراه ارتباط آن با پلتفرم‌های فلورسنس تقویت‌شده فلزی به تصویر می‌کشد. این نوع بیوسنسورها به دلیل پیشرفت‌های

[8] liquid phase deposition

قابل توجه در زمینه فلورسانس و لومینسانس، به طور گسترده‌ای مورد مطالعه قرار گرفته‌اند.

مواد دوبعدی مانند گرافن و دی‌کالکوژنیدهای فلزات واسطه (TMDs) به دلیل خواص منحصر به فرد الکتریکی، نوری و مکانیکی خود، به عنوان بسترهای بسیار مناسبی برای طراحی حسگرهای زیستی فلورسنت نوین مطرح شده‌اند. این مواد با فراهم کردن محیطی پایدار و با سطح تماس بالا، امکان تشخیص دقیق و حساس انواع مختلف بیومولکول‌ها را فراهم می‌آورند.



شکل (۱۰): (الف) ساختار معمولی یک بیوسنسور فلورسنت (ب) حسگر زیستی نوری معمولی و ارتباط آن با پلت فرم‌های فلورسانس افزایش‌یافته فلزی (۵۵).

کریستال‌های مایع کلستریک بدون برچسب، ارزان و نشان‌دهنده رنگ جدید برای تشخیص مولکول‌های زیستی نشان داده شده است (۵۶). حسگرهای ایمنی بدون برچسب مبتنی بر نانوذرات دی اکسید تیتانیم با نورولومینسانس ناحیه مرئی شدید برای تجزیه و تحلیل سریع عفونت‌های سالمونلا وجود دارد (۵۷). الیگودئوکسی ریبونوکلئوتید و اکسید گرافن نشاندار شده با نقاط کربن برای طراحی یک حسگر زیستی فلورسنت برای تشخیص جیوه (II) استفاده شده است (۵۸). رونگ هو و همکاران[9] یک بیوسنسور فلورسنت سریع و حساس برای تشخیص DNA منتشر شده از نواحی مرئی به نزدیک مادون قرمز طراحی کرده اند (۵۹). یک بیوسنسور فلورسنت کدگذاری شده ژنتیکی برای بررسی ردوکس تیوردوکسین مفید در زیست شناسی ردوکس ارائه شده است (۶۰). تشخیص یون مس به طور موثر توسط بیوسنسور فلورسنت مبتنی بر پیووردین انجام شده است (۶۱).

زیست حسگرهای نوری تشدید پلاسمون (SPR)[10]

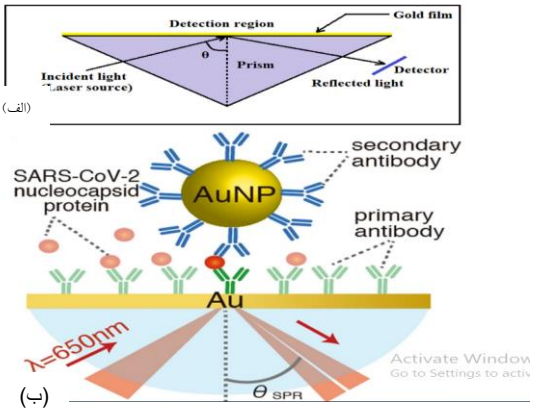
(SPR) مسلماً بیشترین مطالعه و استفاده را در میان زیست حسگرهای نوری شامل می‌شود. زیست حسگرهای نوری SPR خاص، حساس و مقرون به صرفه هستند. شکل ۱۱ (الف) زیست حسگرهای نوری پلاسمون سطحی معمولی را با لایه طلایی روی منشور نشان می‌دهد، جایی که نور فرودی به یک آشکارساز منعکس می‌شود.

تشدید پلاسمون سطحی ناشی از نوسانات چگالی بار سطحی الکترون‌های آزاد در سطح مشترک فلز-دی الکتریک است. می‌توان آن را به طور موثر توسط پرتوی از نور فرودی برانگیخت که امواج ناپایدار تولید می‌کند. در تکنیک مبتنی بر منشور، از یک منشور شیشه‌ای با ضریب شکست بالا استفاده می‌شود که سیگنال نوری فرود را در سطح فلز-دی الکتریک جفت می‌کند. شدت نور منعکس شده از سطح را می‌توان برای اندازه‌گیری حساسیت دستگاه استفاده کرد. تغییر در ضریب شکست در ناحیه تشخیص، سطح حسگر که به‌عنوان تغییر در زاویه تشدید ارزیابی می‌شود، برای هدف حسگر زیستی استفاده می‌شود. بررسی اخیر توسط اوا گورودکیویچ و زنون لوکاس

[9] Rong Hu et al

[10] Surface plasmon resonance

زوسک[11] (٦٢) آخرین پیشرفت‌های بیوسنورهای تشدید پلاسمون سطح نوری را با جزئیات پوشش می‌دهد. گئولینگ لیانگ و همکاران[12] حسگرهای زیستی فیبر نوری SPR، تکنیک‌های ساخت، کاربردها و چشم‌اندازهای آینده آن‌ها را مورد بحث قرار داده‌اند (٦٣). بیوسنسور تشدید پلاسمون سطحی بر اساس انواع مواد، نانوکره‌های طلا و نانومیله‌های طلا، فیلم گرافن/طلا/فیبر نوری پلاستیک، پوشش‌دهی شده با گرافن – تنگستن دی سولفید، لایه‌های نازک اکسید روی (٦٤) اخیراً طراحی شده است. پیشرفت‌ها در رسوب فیلم و رویکردهای جدید طراحی منشور (٦٥) برای بهبود عملکرد حسگرهای زیستی SPR هدف قرار گرفته‌اند. شکل ١٠ (ب) شماتیک سیستم اندازه گیری SPR پروتئین نوکلئوکپسید (پروتئین N) SARS-CoV-2 را با استفاده از نانوذرات طلا نشان می دهد (٦٦). فاتن بشار کمال الدین و یاپ وینگ فن[13] مروری بر بیوسنورهای SPR مبتنی بر نانومواد (٦٧) ارائه کرده‌اند. ویروس ضد دنگی در سرم انسانی به سرعت با استفاده از یک آزمایش جدید تشخیصی دنگی مبتنی بر ایمونوگلوبولین با استفاده از تشدید پلاسمون سطحی (SPR) شناسایی شد (٦٨). یک زیست‌حسگر رزونانس پلاسمون سطحی حساس (SPR) برای تشخیص گلوکز ادرار با استفاده از نیترید بور شش ضلعی به عنوان پوشش روی لایه مولیبدن دی‌سولفید ایجاد شده است (٦٩). مشاهده شده است که حسگر زیستی لایه‌های اکسید روی و نقره و طلا پلاسمون سطحی (SPR) با تیتانات باریم و گرافن عملکرد بهتری نسبت به حسگر زیستی SPR مبتنی بر گرافن مولیبدن دی‌سولفید دارند (٧٠).



شکل (١١): (الف) یک بیوسنسور رزونانس پلاسمون سطحی معمولی. (ب) اندازه‌گیری پروتئین نوکلئوکپسیدSARS-CoV-2 (پروتئین N) SPR با استفاده از نانوذرات طلا (AuNPs) (٦٦).

کاربردهای زیست حسگرهای نوری، در دهه اخیر

زیست حسگرهای نوری امروزه تمام جنبه‌های زندگی روزمره را تحت تاثیر قرار داده‌اند. امروزه از آن‌ها در تشخیص پزشکی، بازرسی مواد غذایی صنایع شیمیایی، مانیتورینگ محیط زیست، تولید محصولات دارویی، بهداشتی و... استفاده می‌کنند. در این بخش، زمینه‌های کاربردی اصلی و کاربردهای نوظهور در دهه گذشته برای ارائه تصویری واضح از تطبیق‌پذیری زیست حسگرهای نوری ترسیم شده است. زمینه‌های کاربردی اصلی حسگرهای نوری را در داروسازی و پزشکی، بازرسی و ایمنی غذا و نوشیدنی، نظارت بر فرآیندهای صنعتی، دامپزشکی و کشاورزی، تشخیص بیماری و مراقبت‌های بهداشتی، بیوتکنولوژی و علوم

[11] Ewa Gorodkiewicz and Zenon Lukas zewsk
[12] Gaoling Liang et al
[13] Faten Bashar Kamal Eddin and Yap Wing Fen

زیستی، بازرسی و ایمنی نظامی و دفاعی و محیطی بررسی می‌کنیم.

داروسازی و پزشکی

زیست حسگرهای نوری کاربردهای بسیار زیادی در زمینه داروسازی برای توسعه داروها و ابزارهای زیست پزشکی دارند. تشخیص سریع و مطمئن عوامل بیماری‌زای متعدد در تمام زمینه‌های مربوط به بهداشت و سلامت نیاز روز است. کاربردهای پزشکی زیست حسگرها در تشخیص و پایش مواد شیمیایی سرطان‌زا و عوامل بیماری‌زا و طبقه‌بندی آن‌ها مورد بحث قرار گرفته است. اخیراً پیشرفت‌های جدید در حسگرهای نوری برای تشخیص پاتوژن، آنتی‌بادی‌ها و بیومارکرها بررسی شده است (۷۱). زیست حسگرهای نوری مبتنی بر سلولز به دلیل زیست سازگاری آنها به طور گسترده برای استفاده در علوم پزشکی قانونی و تشخیص پزشکی توسعه یافته‌اند (۷۲). انواع مختلفی از حسگرهای نوری در نظارت و تشخیص بیماری‌های عفونی، سرطان و اختلالات عصبی کاربرد دارند (۷۳). ویژگی‌های زیست حسگرهای نوری، محدوده تشخیص و کاربردها در نظارت بر داروهای درمانی توسط ویویان گارزون و همکاران[14] جدول‌بندی و بحث شده است (۷٤). آدریان فرناندز گاولا و همکاران[15] حسگرهای نوری بدون برچسب مبتنی بر سیلیکون برای کاربردهای بیوآنالیتیکی و روش‌های جدیدتر و پیشرفته‌تر عملکرد زیستی (۷۵) را مورد بحث قرار داده‌اند. فسفات غیر آلی با استفاده از زیست حسگر فیبر نوری در نمونه‌های ادرار شناسایی شد (۷٦). سروتونین، یک هارمون با استفاده از روش غیر آنزیمی و انتشار فسفرسنت مورد بررسی قرار گرفته است (۷۷). فیلم بلور فوتونیک دو بعدی مبتنی بر پلیمر برای تشخیص پروتئین واکنشی C تولید شده توسط کبد استفاده شده است (۷۸). نظارت بر سطح گلوکز با استفاده از بزاق با تشخیص غلظت گلوکز در محدوده (۵۱٦ – ۳۲) میلی گرم در دسی لیتر با استفاده از زیست حسگر نوری نشان داده شده است (۷۹). لیپوپلی ساکارید باکتریایی (اندوتوکسین) که باعث سپسیس و شوک سپتیک می‌شود، با استفاده از زیست حسگر نوری در سلول زنده شناسایی شده است (۸۰). آنتی بیوتیک‌های آمفنیکل در کلیه گاو توسط زیست حسگر نوری شناسایی شده است (۸۱). تشخیص سریع و دقیق بیومارکرهای مولکولی با استفاده از حسگر زیستی نوری نانوذرات تبدیل شونده نشان داده شده است (۸۲).

بازرسی و ایمنی مواد غذایی و آشامیدنی

زیست حسگرهای نوری در بازرسی اقلام غذایی و تضمین ایمنی مرتبط با عوامل بیماری‌زا استفاده می‌شوند. پیشرفت‌ها در حسگرهای نوری که در پردازش و کنترل مواد غذایی، تشخیص پاتوژن‌ها و آفت‌کش‌ها استفاده می‌شوند، تشریح شده است (۸۳). حسگرهای نوری به طور فزاینده‌ای برای نظارت بر بهداشت، تشخیص آفت‌کش‌ها، داروها، پاتوژن‌ها و سایر مواد شیمیایی سمی در غذا و نوشیدنی مورد استفاده قرار می‌گیرند (۸٤). ای‌کول[16] و سالمونلا[17] در مواد غذایی بر اساس حسگر زیستی تشدید پلاسمون سطحی با رسوب کم شناسایی شده‌اند (۸۵) گونه‌های

[14] Vivian Garzon et al
[15] Adrian Fernandez Gavela et al
[16] E. coli
[17] Salmonella

باکتریایی از آب در صنایع غذایی با استفاده از حسگرهای زیستی متخلخل مبتنی بر سیلیکون شناسایی شده‌اند (۸٦). تترودوتوکسین که نوروتوکسین در آب‌های دریا است با استفاده از زیست حسگر نوری شناسایی شده است (۸۷). پنی‌سیلیوم دیگیتاتوم[18] نام قارچی است که در مرکبات باعث به وجود آمدن پوسیدگی کپکی آبی می‌شود با استفاده از حسگرهای زیستی قبل از ظاهر شدن مورد بررسی قرار گرفته است (۸۸). بیوسنسور نوری برای تعیین جیوه (Hg) که یک آلاینده آب است پیشنهاد شده است (۸۹).

نظارت بر فرآیندهای صنعتی

زیست حسگرهای نوری در حال حاضر برای نظارت بر فرآیندهای زیستی، فاضلاب صنعتی، دارو، فرآوری مواد غذایی و فرآیندهای مختلف صنعتی دیگر استفاده می‌شوند. نظارت بر فرآیندهای صنعتی از طریق زیست حسگرهای نوری نقش کلیدی در تضمین کیفیت و حفظ استانداردهای صنعتی ایفا می‌کند. در مهندسی بافت برای نظارت بر زمان واقعی فعالیت‌های سلولی استفاده می‌شوند. زیست حسگرهای نوری در صنعت داروسازی برای کشف دارو و در صنایع فرآوری مواد غذایی برای حفظ کیفیت و ایمنی کالاها کاربرد دارند. زیست حسگرهای نوری کاربردهایی را در ساخت دستگاه‌های نوری و زیست‌پزشکی در مقیاس نانو پیدا می‌کنند. پیشرفت‌ها و چالش‌ها در بیوسنسور نوری در نظارت بر فرآیند صنعتی و سایر زمینه‌ها تشریح شده است.

صنعت طیور با مقاومت آنتی‌بیوتیکی مواجه است و تشخیص دقیق و سریع آنتی‌بیوتیک‌ها در طیور با استفاده از حسگرهای زیستی مختلف نوری انجام می‌شود. زیست حسگرهای نوری در بسته‌بندی و نظارت بر کیفیت مواد غذایی برای بررسی تازگی، پاتوژن‌ها، آلرژن‌ها و مواد تقلبی مورد بررسی قرار گرفته‌اند (۹۰). زیست حسگر نوری گلوکز به عنوان حسگر گلوکز در کاربردهای صنایع غذایی پیشنهاد شده است (۹۱).

دامپزشکی و کشاورزی

حسگرهای نوری برای تشخیص سریع و در محل پاتوژن‌های دامپزشکی و برای نظارت بر کیفیت شیر و گوشت استفاده می‌شود. علاوه بر این، زیست حسگرهای نوری در تشخیص باقیمانده‌های آفت‌کش‌ها در خاک و محصولات، عوامل بیماری‌زا، کنترل کیفیت میوه‌ها و سبزیجات، تولید با کیفیت محصولات و بررسی بقایای دارو استفاده می‌شوند. تاثیر و کاربردهای حسگرهای نوری در تامین چالش‌های پیش‌روی کشاورزی و صنایع غذایی مورد بررسی قرار گرفته است (۹۲). حسگرهای نوری برای تشخیص پاتوژن در گاو و طیور بررسی شده است (۹۳). از آنزیم آرژنین دیمیناز برای تشخیص ال-آرژنین در آب میوه با زمان پاسخ کم‌تر از ۳۰ ثانیه استفاده شده است (۹٤). متیل پاراتیون، یک آفت‌کش ارگانوفسفره از طریق آنزیم استیل کولین استراز با استفاده از زیست حسگر فیبر نوری مخروطی شناسایی شده است (۹۵). محتوای بیوتین در شیر و پودر شیر با استفاده از روش ایمونواسی حسگر زیستی با ارزیابی

[18] Penicillium digitatum

چندین فاکتور بررسی شده است (۹۶). تشخیص بی‌درنگ، سریع و بدون برچسب آلبومین سرم گاوی در محصولات شیر با استفاده از روش تشدید پلاسمون سطحی انجام شده است (۹۷).

سوء مصرف سولفادیمیدین در آب و محصولات لبنی، که یک نگرانی عمده برای سلامت انسان است، توسط یک حسگر نوری ارزان قیمت موج ناپدید کننده شناسایی شده است (۹۸). به منظور جلوگیری از آسیب به محصولات زراعی، تشخیص زودهنگام عوامل بیماری‌زا ضروری است. یک زیست حسگر نوری مبتنی بر میکروکنتیلهور بسیار حساس برای تشخیص زودهنگام پاتوژن‌های کشاورزی ارائه شده است (۹۹). زیست حسگرهای نوری فشرده و حساس مبتنی بر کریستال فوتونیک برای تشخیص غلظت اوره توسط زینب غرس الله و همکاران[19] گزارش شده است (۱۰۰). غلظت اوره با استفاده از یک فیبر نوری مخروطی از طریق اوره آز در زئولیت ایمیدازولات (۱۰۱) به دست آمده است.

تشخیص بیماری و مراقبت‌های‌بهداشتی

زیست حسگرهای نوری کاربردهای بسیار زیادی در تشخیص بیماری و مراقبت‌های بهداشتی دارند. اساس کار آن‌ها در تشخیص بیماری و مراقبت‌های بهداشتی و کاربردشان در کشف و آزمایش دارو و غیره مورد بحث قرار گرفته است. روش‌های سنتی تشخیص بیماری‌های عفونی با چالش‌های متعددی روبرو هستند، حسگرهای تشخیص سریع را برای درمان زودهنگام انجام می‌دهند و کاربرد بسیار زیادی در تشخیص بیماری‌های عفونی از ویروس‌ها و باکتری‌ها پیدا کرده‌اند. فناوری بدون برچسب برای توسعه داروها توسط جولیا ام هیلگر و همکاران[20] به کار گرفته شده است (۱۰۲). حسگرهای زیستی فلورسنت برای تشخیص هورمون‌ها، انتقال‌دهنده‌های عصبی و برخی از متابولیت‌های اصلی انسان استفاده شده‌اند (۵۶). انواع مختلف حسگرهای فیبر نوری و کاربردهای اخیر آن‌ها در مراقبت‌های بهداشتی به تفصیل بررسی شده است. تعیین میزان داروی آدالیموماب در بیماری کرون با استفاده از روش تشدید پلاسمون سطح فیبر نوری (۱۰۳) انجام شده است. یک زیست حسگر نوری برای تشخیص کاتپسین B که مربوط به بیماری سرطان است طراحی شده است (۱۰۴).

بیوتکنولوژی و علوم زیستی

زیست حسگرهای نوری کاربردهای بسیار زیادی در بیوتکنولوژی و علوم زیستی دارند. از آن‌ها برای مهندسی سلول‌های حیوانی، درمان بیماری‌ها، تحقیقات میکروبیولوژی، ایمونولوژی کاربردی، جنین شناسی، بیوشیمی، ژنتیک و غیره استفاده می‌شوند. حسگرهای زیستی به‌عنوان حسگرهای ایمنی برای تشخیص آنتی‌بادی‌ها و مواد سمی، حسگرهای DNA برای تشخیص ترکیبات غیرماکرومولکولی و پروتئینی و کاربردهای دیگر مورد بررسی قرار گرفته‌اند [۱۰۵]. تشخیص نوری سریع و بدون برچسب آنتی‌بادی‌های مربوط به خودایمنی با طیف‌سنجی تداخل بازتاب‌سنجی انجام شده است.

[19] Zaineb Gharsallah et al

[20] Julia M Hillger et al

برای مطالعه زیست شناسی رشد گیاهان، و نظارت بر متابولیت‌ها در حال حاضر از چندین حسگر زیستی استفاده می‌شود. تجزیه و تحلیل میکروبیولوژیکی، تشخیص پاتوژن‌های مواد غذایی، روش‌های تحلیلی و فناوری مورد بحث قرار گرفته است (۱۰۶). فاطمه حکیمیان و همکاران یک زیست حسگر نوری بسیار حساس برای تشخیص زودهنگام سرطان پستان با استفاده از نانوذرات طلا طراحی کرده‌اند (۱۰۷). میکروسیستین‌ها با استفاده از زیست حسگر نوری برای اطلاعات اولیه در مورد سویه‌های سیانوباکتری اندازه‌گیری شده‌اند (۱۰۸). یک تشخیص ویروس منفرد با استفاده از یک حسگر زیستی مبتنی بر تشدیدگر نوری انجام شده است (۱۰۹). کای سونگ و همکاران[21] یک بیوسنسور نوری مبتنی بر نانوذرات بیوکونژوگه‌های تبدیل آپتامر پیشنهاد کردند (۱۱۰). پروتکلی برای بررسی فعالیت پروتئین در جنین‌های زنده با استفاده از انتقال انرژی تشدید فلورسانس ارائه شده است (۱۱۱). یک بیوسنسور فلورسنت برای تشخیص وضعیت سلامت جنین‌های در حال رشد ارائه شده است (۱۱۲).

نظامی و دفاعی

ارتش هر ملتی باید به خوبی برای مقابله با هر موقعیتی که ناشی از حملات بیولوژیکی یا شیمیایی باشد آماده شوند. زیست حسگرهای نوری برای حس کردن محیط برای حملات بیولوژیکی یا شیمیایی طراحی شده‌اند. زیست حسگرهای نوری در نظارت بر وضعیت سلامت سربازان که یکی از جنبه‌های بسیار مهم در ارتش امروز است، بسیار پیشرفت کرده‌اند. تحقیقات در زمینه زیست حسگرهای نوری برای افزایش قابلیت‌های رزمی ارتش مسیرهای جدیدی را باز می‌کند. برخی از باکتری‌ها و ویروس‌ها ممکن است به عنوان عوامل بیولوژیکی در جنگ استفاده شوند. کشف این عوامل یکی از دغدغه‌های اصلی ارتش است. باسیلوس آنتراسیس هم بر حیوانات و هم بر انسان تأثیر می‌گذارد، هاگ سیاه زخم با استفاده از زیست حسگرهای نوری شناسایی شده است (۱۱۳). باسیلوس آنتراسیس از طریق آنتی ژن محافظ با استفاده از حسگر زیستی تشدید سطح پلاسمون شناسایی شده است و این روش در طی یک جنگ بیولوژیکی مناسب است (۱۱٤). میکروارگانیسم‌های بیماری‌زا، ویروس‌ها و سموم با استفاده از لومینسانس، فلورسانس، موج ناپایدار، تشدید پلاسمون سطحی و دیگر زیست حسگرهای نوری شناسایی شده‌اند (۱۱۵). الکسی نابوک[22] مقایسه‌ای از زیست حسگرهای نوری مختلف مورد استفاده در تشخیص سموم زیستی را ارائه کرده است (۱۱٦). زیست حسگر نوری اکسید گرافن با عملکرد زیستی برای تشخیص ماده منفجره تری نیتروتولوئن (TNT) از طریق تشخیص جذب فرابنفش استفاده شده است. از حسگرهای زیستی برای تشخیص مواد منفجره استفاده می‌شود. تشخیص بسیار حساس ماده منفجره تری‌نیتروتولوئن (TNT) با استفاده از نانولوله‌های کربنی تک جداره زیست حسگرهای نوری گزارش شده است (۱۱۷).

بازرسی و ایمنی محیط زیست

زیست حسگرهای نوری کاربردهای مختلفی در بازرسی و ایمنی محیط پیدا کرده‌اند. فنگ لانگ و

[21] Kai Song et al

[22] Alexei Nabok

همکاران[۲۳] زیست حسگرهای نوری و کاربردهای زیست محیطی آن‌ها را بررسی کرده‌اند (۱۱۸). تعدادی از آن‌ها برای تشخیص آفت‌کش‌ها، آلاینده‌های محیطی، فلزات سنگین در آب و غیره توسعه یافته‌اند. نوعی حسگر نوری برای اندازه‌گیری آلاینده‌های دریایی توسعه یافته است.

پاندمی کووید ۱۹

پس از پاندمی کووید-۱۹ و تهدیدات بزرگی که برای سلامت جهانیان ایجاد کرد، محققان زیادی به مطالعه در این زمینه روی آوردند و یافته‌های زیادی نیز کشف شده است. تحقیقات گسترده و کسب اطلاعات دقیق اهمیت بسزایی دارد. در این مطالعه با مرور مطالعات و شواهد منتشر شده در پایگاه‌های اطلاعاتی، جدیدترین یافته‌ها را ارائه داده‌اند. آزمایش کووید ۱۹ را می‌توان از نظر هزینه، سرعت و حساسیت با کمک زیست حسگرهای نوری بهینه کرد. بحث‌های زیادی در سرتاسر جهان برای اجرای بیدرنگ حسگرهای نوری کووید ۱۹ وجود دارد. هیمانث مدالی و همکاران[۲۴] مروری مفصل از تکنیک‌های نوری مختلف برای تشخیص ویروس ارائه کرده‌اند (۱۱۹). به نظر می‌رسد روش‌های آزمایش نوری مبتنی بر تکنیک تصویربرداری کمی گران‌تر از روش‌های موجود است، اما می‌تواند نتایج دقیق‌تر و روشن‌تری ارائه دهد. حسگرهای نوری این قابلیت را دارند که بر اساس اتصال مولکول‌ها دستگاه‌هایی ایجاد کنند که در هر توالی ویروسی خاصی را تشخیص دهد.

نیاز به حسگرهای زیستی جدید همیشه در حال افزایش است. حسگر نوری مبتنی بر نانومواد به دلیل پیشرفت بیش‌تر در روش‌های طراحی و ساخت، انتخاب‌پذیری بالا، حساسیت کم و تکرارپذیری خوب، گزینه‌ای ایده‌آل به عنوان جایگزینی برای روش‌های فعلی خواهد بود. انتظارات از زیست حسگرهای نوری آماده کووید-۱۹ در آینده نیز شامل مدیریت نمونه، جمع‌آوری نمونه و گزارش‌های سریع است.

چالش‌ها و آینده زیست حسگر نوری

در دهه جاری حسگرهای نوری از اهمیت بالایی برخوردار هستند و شگفتی‌های زیادی انجام داده‌اند. کاربردهای نوظهور بسیار زیادی در پزشکی، دستگاه‌های سموم در ارتش و دفاع، نظارت بر کیفیت خاک و مواد غذایی و غیره پیدا کرده‌اند. شکل ۱۲ حوزه‌های کاربردی کلیدی زیست حسگرهای نوری را نشان می‌دهد. انتظار می‌رود که آن‌ها در آینده نزدیک با زمان‌های اندازه‌گیری سریع، حساسیت و انتخاب‌پذیری بالاتر و کاهش هزینه ساخت تولید شوند. با این حال، استفاده از تمام ایده‌ها و دستگاه‌های پیشنهادی، علاوه بر داشتن امکانات ساخت خوب، همچنان یک چالش است. به منظور بهبود دامنه کاربردها، حساسیت، ویژگی، و تکرارپذیری آن‌ها و همچنین طراحی و اجرای مشخصاتی که امکان استفاده از آن‌ها را در شرایطی که معمولاً در نقطه مورد نیاز یافت می‌شوند، بسیار مهم است. عواملی مانند استحکام، هزینه و رابط کاربری و توانایی انتقال داده‌ها نیز چالشی برای رسیدگی است. زمان‌های تشخیص طولانی‌تر و مقدار زیاد معرف‌ها چالش اصلی در طراحی حسگر زیستی است حسگرهای زیستی بدون

[23] Feng Long et al
[24] Hemanth Maddali et al

برچسب مقرون به صرفه هستند و نتایج تحلیلی بالا و عملکرد آسان‌تری ارائه می‌دهند. طراحی و ساخت حسگرهای نوری حساس و مقرون به صرفه نیاز به بررسی دقیق مواد و فرآیند توسعه دارد. لیگلر و گودینگ و همکاران[25] رویکردهای مختلف برای رسیدگی به چالش‌های مختلف در توسعه حسگرهای زیستی نوری عملی ارائه داده‌اند (۱۲۰).

مزایای نانوحسگرها باعث شده‌است که به عنوان فرصتی وسوسه‌انگیز برای بازار تلقی شوند. نانوحسگرها به‌طور ذاتی کوچک‌تر و حساس‌تر از سایر حسگرها می‌باشند. همچنین این ظرفیت را دارند که قیمت تمام شده آن‌ها کم‌تر از قیمت تمام‌شده حسگرهای موجود در بازار باشد. نقاط کوانتومی، نانولوله‌های کربنی و انواع مختلف نانوذرات به‌طور پیوسته در طراحی حسگرهای زیستی استفاده می‌شوند. می‌توان انتظار داشت که در آینده با ترکیب محرک‌ها و نانوحسگرها بتوان مواد هوشمندی ساخت که در فرایندهای تولید سیستم‌های پیچیده نقش‌های مهمی ایفا کرده و فناوری جدید دیگری را پایه ریزی کنند.

نتیجه‌گیری

در دهه گذشته، فناوری زیست حسگرهای نوری پیشرفت‌های شگرفی در پیکربندی حسگرها داشته است. حسگرهای زیستی نوری در تشخیص انواع آنالیت‌های شیمیایی و بیولوژیکی استفاده شده‌اند، و عملکرد آن‌ها به طور مداوم در حال تکامل است. در این مقاله، پیشرفت‌های اخیر در انواع زیست حسگرهای نوری بر اساس جنبه‌های طراحی آن‌ها و کاربردشان بررسی شده است. تشدید پلاسمون سطحی با طیف وسیعی از کاربردها، بیش‌ترین استفاده را دارند. کاربرد زیست حسگرهای نوری از بازرسی مواد غذایی و نوشیدنی گرفته تا نظامی و دفاعی را شامل می‌شود. نیاز روزافزونی به حسگرهای نوری کم هزینه، بادوام، دقیق و حساس در زمینه‌های کاربردی مانند تشخیص بیماری، داروسازی و پزشکی وجود دارد. پیشرفت در فناوری‌های نانوساخت و مواد جدید در حال حاضر منجر به کوچک‌سازی و گشودن ابعاد مختلف جدیدی در زیست حسگرهای نوری شده است.

شکل (۱۲): حوزه کاربرد بیوسنسورهای نوری

منابع

[1] Malhotra, BD., Md. Azahar., 2018, Nanomaterials in biosensors: Fundamentals and applications, Nanomaterials for Biosensors 1–74.
[2] Singh, P., plasmon., S, 2017, resonance: a boon for viral diagnostics. Reference Module, Life Sci.
[3] Scha¨ferling, M., 2016, Fluorescence-based biosensors, Encyclop. Anal. Chem. 1–52.
[4] Damborsky, P., 2016, Juraj Sˇvitel, Jaroslav Katrlı´k, Optical biosensors. Essays Biochem. 60 (1) 91–100.
[5] Boris, G., Andryukov, N., Besednova, V., Romashko, TS., Zaporozhets, TA., Efimov,

[25] Ligler and Gooding et al

2020, Label-free biosensors for laboratory-based diagnostics of infections: current achievements and new trends, Biosensors 10 (2) 11.
[6] Baoyi, S., Zhongdang, X., 2020, Recent achievements in exosomal biomarkers detection by nanomaterials-based optical biosensors-a review, Anal. Chim. Acta.
[7] Eishu. H., Etsuko, K., 2016, Future perspective of single molecule fret biosensors and intravital fret microscopy, Biophys. J. 111 (6) (2016) 1103–1111.
[8] Kretschmann, E., 1971, Die bestimmung optischer konstanten von metallen durch anregung von oberfla¨ chenplasm aschwingungen, Zeitschrift fu¨r Physik A Hadrons and nuclei 241 (4) 313–324.
[9] Liedberg, B., Nylander, C., Lunstro¨m, I., 1983, Surface plasmon resonance for gas detection and biosensing, Sens. Actuat. 4 299–304.
[11] Esfahani Monfared, Y., 2020, Overview of recent advances in the design of plasmonic fiber-optic biosensors, Biosensors 10 (7) 77.
[12] Puspita, I., Irawati, N., Anoraga Madurani, K., Kurniawan, F., Koentjoro, S., Hatta, A.M.,2022, Graphene-and multi-walled carbon nanotubes-coated tapered plastic optical fiber for detection of lard adulteration in olive oil, Photon. Sens. 12 (4) 1–10.
[13] Maas, MB., Maybery, GH.C., Perold, WJ., Neveling, DP., Dicks, L.M.T., 2018, Borosilicate glass fiber-optic biosensor for the detection of escherichia coli, Curr. Microbiol. 75 (2) 150–155.
[14] Chen, Z., Chengjun, S., Zewei, L., Kunping, L., Xijian, Y., Haimin, Z., Yongxin, L., Yixiang, D., 2018, Fiber optic biosensor for detection of genetically modified food based on catalytic hairpin assembly reaction and nanocomposites assisted signal amplification, Sens. Actuat. B: Chem. 254 956–965.
[15] Marzena, H., Majchrowicz, D., Wierzba, P., Matthieu, W., Bechelany, M., 2017, Małgorzata Jedrzejewska Szczerska, Low-coherence interferometric fiber-optic sensors with potential applications as biosensors, Sensors, 17(2) 261.
[16] Benito-Pen˜a, E., Valde´s, MG., Martı´nez, BG., MariaC, MB., 2016, Fluorescence based fiber optic and planar waveguide biosensors. a review, Anal. Chim. Acta 943. 17–40.
[17] Ming-jie, Y., Gu, Bo., Quan-Fu, An., Chengbin, Y., Yong Liang, G., Ken-Tye, Y., 2018, Recent development of fiber optic chemical sensors and biosensors: Mechanisms, materials, micro/nano-fabrications and applications, Coord. Chem. Rev. 376 348–392.
[18] Mildred, S., Cano-Vela, z., Luz M, L., Juan, HC., 2020, Fiber optic biosensor based on polydimethylsiloxane (pdms) and bioactive lipids, Optical Fibers and Sensors for Medical Diagnostics and Treatment Applications XX, volume 11233, International Society for Optics and Photonics, p. 112330Y.
[19] Lin, Z., Chen, L., Zhengbo, S., Hongju, M., Lin, Z., Yu, X., Jianlong, Z., Xianfeng, C., 2019, Black phosphorus based fiber optic biosensor for ultrasensitive cancer diagnosis, Biosens. Bioelectron. 137 140–147.
[20] Rahaman Khan, Md., Watekar, AV., Kang, SW., 2017, Fiber-optic biosensor to detect ph and glucose, IEEE Sens. J. 18 (4) (2017) 1528–1538.
[21] Gohring, JT., Dale, PS., Xudong, F.,2010, Detection of her2 breast cancer biomarker using the opto-fluidic ring resonator biosensor, Sens. Actuat. B: Chem. 146 (1) 226–230.
[22] Liaquat, A., Mahmood Uddin, M., Mahrukh, K., Bin Yousuf, AH., Chowdhury, MH., 2019, Highquality optical ring resonator-based biosensor for cancer detection, IEEE Sens. J. 20 (4) 1867–1875.
[23] Steglich, Pa., Hu¨lsemann, M., Dietzel, B., Andreas, M., 2019, Optical biosensors based on silicon-on-insulator ring resonators: A review, Molecules 24 (3) 519.
[24] Chang, CW., Xiaochuan, X., Chakravarty, S., Huang, HC., Li-Wei, T., Yungsung Chen, Q., Dalir, H., Krainak, MA., Chen, RT., 2019, Pedestal subwavelength grating metamaterial waveguide ring resonator for ultra-sensitive label-free biosensing, Biosens. Bioelectron. 141 111396.
[25] Voronin, KV., Stebunov, YV., Voronov, AA., Arsenin, AV., Volkov, VS., 2020, Vertically coupled plasmonic racetrack ring resonator for biosensor applications, Sensors 20 (1) 203.
[26] Geidel, S., Llopis, SP., Rodrigo, M., Diego-Castilla, D., Sousa, A., Nestler, J., Otto, T., Gessner, T., Parro, V., et al., 2016, Integration of an optical ring resonator biosensor into a self-contained microfluidic

cartridge with active, single-shot micropumps, Micromachines 7 (9) 153.
[27] Yong, L., Yang, L., Mingyu, L., Jian-Jun, H., 2017, High-sensitivity and wide-range optical sensor based on three cascaded ring resonators, Opt. Exp. 25 (2) 972–978.
[28] Xiaonan, H., Xiuyou, H., Yuchen, S., Zhenlin, W., Yuxin, L., Jie, T., Shuhui, B., Geert, M., Mingshan, Z., 2017, Polymer integrated waveguide optical biosensor by using spectral splitting effect, Photon. Sens. 7 (2) 131–139.
[29] Nitesh, M., Ankit, A., Ankur, S., Sourabh, S., Ashish, KG., Ghanshyam, S., 2020, Comparative study of interferometer and ring resonator based biosensors: A review, in: Optical and Wireless Technologies, Springer, pp. 419–427.
[30] Kun Qin, H., Shuren, ST., Retterer, I., Kravchenko, SM., Weiss, S., 2016, light mach–zehnder interferometer as label-free biosensor with scalable sensitivity, Opt. Lett. 41 (4) 753–756.
[31] Soichiro, Y., Shintaro, I., Taro, A., Yasuo, K., 2017, Highly sensitive optical biosensor based on silicon microring-resonator-loaded mach–zehnder interferometer, Jpn. J. Appl. Phys. 56(4S):04CH08.
[32] Marek, B., 2020, Model of the broadband interferometric optical biosensor in a planar configuration, Photon. Lett. Poland 12 (2) 28–30.
[33] Xuegang, L., Linh, VN., Yong, Z., Heike, E., Stephen, C., 2018, High-sensitivity sagnac interferometer biosensor based on exposed core microstructured optical fiber, Sens. Actuat. B: Chem. 269 103–109.
[34] Maldonado, J., Este´vez, M., Ferna´ndezGavela, A., Gonza´lez-Lo´pez, J., Gonza´lezGuerrero, AB., Lechuga, LM., 2020, Label-free detection of nosocomial bacteria using a nanophotonic interferometric biosensor, Analyst, 145 (2):497–506
[35] Dandan, S., Yongming, F., Yukun, Y.,2020, Label-free detection of breast cancer biomarker using silica microfiber interferometry, Opt. Commun. 463 125375.
[36] Enxiao, L., Hossam, S., Ratner, DM., Cheung, KC., Lukas, C., 2018, Silicon photonic biosensors using label-free detection, Sensors 18 (10) 3519.
[37] Kozma, P., Kehl, F., Ehrentreich-Förster, E., Stamm, C., Bier, FF., 2014, Biosens. Bioelectron., 58, 287.
[38] Gauglitz, G., 2020, Critical assessment of relevant methods in the field of biosensors with direct optical detection based on fibers and waveguides using plasmonic, resonance, and interference effects, Anal. Bioanal. Chem. 1–33.
[39] Valery, N., Konopsky, EV.,2019, Alieva, Imaging biosensor based on planar optical waveguide, Opt. Laser Technol. 115 171–175.
[40] Al-Jawdah, A., Nabok, A., Jarrah, R., Holloway, A., Tsargorodska, A., Eszter, T., Andras, S., 2018, Mycotoxin biosensor based on optical planar waveguide, Toxins 10 (7) 272.
[41] Zhao, J., Weiming, G., Chang, L., Tianyu, X., Qiyu, W., Weitao, Z., Xiaoqiang, C., 2016, A stable and high resolution optical waveguide biosensor based on dense tio2/ag multilayer film, Appl. Surf. Sci. 377 207–212.
[42] Nan, K.K., Shahimin, M.M., Adikan, F.R.M., 2014, Optimization of silicon nitride y-branch optical waveguide for evanescent field biosensor, Advanced Materials Research, volume 875, Trans Tech Publ, pp. 1183–1188.
[43] Oleksiy, K., Pierre, B., 2019, Long-range surface plasmonpolariton waveguide biosensors for human cardiac troponin i detection, Sensors 19 (3) 631.
[44] Liang, Z., Jiaqi, L., Chengyi, C., Xudong, L., Xinyuan, Z., Quanhao, Y., Kunhua, W., 2022, Jun Yang, Yuwen Qin, An integrated-plasmonic chip of bragg reflection and mach zehnder interference based on metal-insulator-metal waveguide, Photon. Sens. 12 (3) 1–10.
[45] Fathi, F., Rashidi, M.R., Samadi Pakchin, P., Ahmadi-Kandjani, S., Nikniazi, A.,2020, Photonic crystal based biosensors: Emerging inverse opals for biomarker detection. Talanta, page 121615.
[46] Yixiong, Z., Kunj, V., Xuan. L., 2022, Gerd vom Bo¨gel, Karsten Seidl, Jan C. Balzer, Photonic crystal resonator in the millimeter/terahertz range as a thin film sensor for future biosensor applications, J. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves 1–19.
[47] Stanley, M.L., Shuren, H., Girija, G., Yiorgos, K., Sharon, M., Philippe, M., 2017, Photonic crystal microring resonator for label-free biosensing, Opt. Exp. 25 (6) 7046–7054.

[48] Silvia, R., Annalisa, L., Mariorosario, M., Erika Penzo, Stefano, C., Ivo, R., Vito, M., 2018, Optical biosensors based on photonic crystals supporting bound states in the continuum, Materials 11 (4) 526.
[49] Divya, J., Selvendran, S., Sivanantha Raja, A., 2018, Photonic crystal based optical biosensor: a brief investigation, Laser Phys. 28 (6) 066206.
[50] Mohsenirad, H., Olyaee, S., Seifouri, M., 2016, Design of a new two-dimensional optical biosensor using photonic crystal waveguides and a nanocavity, Photon. Lasers Med. 5 (1) 51–56.
[51] Keigo, A., Shoma, A., Kenji, S., Hideaki, H., Tatsuro, E., 2016, Development of optical biosensor based on photonic crystal made of tio2 using liquid phase deposition, Jpn. J. Appl. Phys. 55 (8S3) 08RE01.
[52] Bouras, M., Charik, H., 2019, Allal Saı¨d, Abdesselam Hocini, Analysis of highly sensitive biosensor for glucose based on a one-dimensional photonic crystal nanocavity, Opt. Eng. 58 (2) 027102.
[53] Md-Rabiul, H., Sanjida, A., Rifat, A., Sohel, R., Kawsar, A., Rajib, A., Harish, S., Derek, A., 2017, Spiral photonic crystal fiber-based dualpolarized surface plasmon resonance biosensor, IEEE Sens. J. 18 (1) 133–140.
[54] Farhat, O.M., Yassmin, K.A., Hameed, A.A., Alrayk, W., El, D., Salah, S.A.,2016, Obayya, Design of highly sensitive multichannel bimetallic photonic crystal fiber biosensor, J. Nanophoton. 10 (4) 046016.
[55] Yoon, J., Yun-Min, K., Kangwon, L., Won-Gun, K., 2018, Metal enhanced fluorescence (mef) for biosensors: General approaches and a review of recent developments, Biosens. Bioelectron. 111 102–116.
[56] Fu-Lun, C., Yu-Jui, F., Jia-De, L., Yu-Cheng, H., Label-free, c., 2019, sensitive biosensors of cholesteric liquid crystals on a single vertically aligned substrate, Biomed. Opt. Exp. 10 (9) 4636–4642.
[57] Roman, V., Tereshchenko, A., Valentyn, S., Julia, O., Nickolay, S., Rositsa, Y., Volodymyr, K., Arunas, R., 2017, Toward development of optical biosensors based on photoluminescence of tio2 nanoparticles for the detection of salmonella, Sens. Actuat. B: Chem. 252 95–102.
[58] Xin, C., Lei, Z., Jing, W., Hou, Y., Peiyao, W., Zhenni, W., Mei, Y., 2015, A fluorescent biosensor based on carbon dots-labeled oligodeoxyribonucleotide and graphene oxide for mercury (ii) detection, Biosens. Bioelectron. 63 506–512.
[59] Rong, H., Tao, L., Xiao-Bing, Z., Shuang-Yan, H., Cuichen, W., Ting, F., Weihong, T.,2014, Multicolor fluorescent biosensor for multiplexed detection of dna, Anal. Chem. 86 (10) 5009–5016.
[60] Yichong, F., Merna, M., Michael, X., Hui-wang, A., 2017, Monitoring thioredoxin redox with a genetically encoded red fluorescent biosensor, Nat. Chem. Biol., 13(9):1045.
[61] Kun, Y., Yixuan, W., Shasha, W., Lingxin, C., 2016, A sensitive fluorescent biosensor for the detection of copper ion inspired by biological recognition element pyoverdine, Sens. Actuat. B: Chem. 232 257–263.
[62] Gorodkiewicz, E., Lukaszewski, Z., 2018, Recent progress in surface plasmon resonance biosensors (2016 to mid-2018), Biosensors 8 (4) 132.
[63] Gaoling, L., Zewei, L., Kunping, L., Yimin, W., Jianxiong, D., Yixiang, D., 2016, Fiber optic surface plasmon resonance–based biosensor technique: fabrication, advancement, and application, Critical reviews in analytical chemistry 46 (3) 213–223.
[64] Angad, S., Kushwaha, A., Rajeev ,K., Monika, S., Srivastava, S.K., 2018, Zinc oxide, gold and graphene based surface plasmon resonance (spr) biosensor for detection of pseudomonas like bacteria: a comparative study, Optik 172 697–707.
[65] Chandra, P., Amit-Kumar, S., 2022, Recent advancements in the applications of zno: A versatile material. In Nanotechnology, pages 175–188. CRC Press.
[66] Taka-aki, Y., Taira, K., Masayuki, O., Yoshiya, M., Yuichi, H., Atsushi, S., Kunihiro, O., Ayuko, S., Takuya, S., Koji, Y., 2022, et al, Ultrasensitive detection of sars-cov-2 nucleocapsid protein using large gold nanoparticle-enhanced surface plasmon resonance, Scientific reports 12 (1) 1–8.
[67] Faten, B., Kamal, E., Yap-Wing, F., 2020, The principle of nanomaterials based surface plasmon resonance biosensors and its potential for dopamine detection. Molecules, 25 (12):2769.

[68] Jahanshahi, P., Zalnezhad, E., Sekaran, S.D., Rafiq-Mahamd-Adikan, F., 2014, Rapid immunoglobulin m-based dengue diagnostic test using surface plasmon resonance biosensor, Scientific reports 4 3851.
[69] Mudgal, N., Ankur, S., Ankit, A., Jalil, A., 2020, Preecha Yupapin, G. Singh, Modeling of highly sensitive surface plasmon resonance (spr) sensor for urine glucose detection, Opt. Quant. Electron. 52 (6) 1–14.
[70] Mudgal, N., Ankur, S., Ankit, A., Singh, G., 2020, Zno and bi-metallic (ag–au) layers based surface plasmon resonance (spr) biosensor with batio3 and graphene for biosensing applications, IETE Journal of Research 1–8.
[71] Seung, M.Y., Sang-Yup, L., 2016, Optical biosensors for the detection of pathogenic microorganisms, Trends in biotechnology 34 (1) 7–25.
[72] Sha, Y., Liyun, D., Haitao, L., Wei, W., Huang, J., 2019, A novel optical fiber glucose biosensor based on carbon quantum dotsglucose oxidase/cellulose acetate complex sensitive film, Biosens. Bioelectron. 146 111760.
[73] Gharatape, A., Yari Khosroushahi, A., 2019, Optical biomarker-based biosensors for cancer/infectious disease medical diagnoses, Applied Immunohistochemistry & Molecular Morphology 27 (4) 278–286.
[74] Vivian, G., Daniel, G., Pinacho, R.H., Bustos, Gustavo, G., 2019, Sandra Bustamante, Optical biosensors for therapeutic drug monitoring, Biosensors 9 (4) 132.
[75] Ferna´ndez A., Gavela, D., Grajales, G., Jhonattan, C., Ramirez, L.M.,2016, Lechuga. Last advances in siliconbased optical biosensors. sensors, 16(3):285.
[76] Kulkarni, S.d.J., Meena, S., 2020, Karve Fabrication of enzymebased optical biosensor for estimation of inorganic phosphate in a urine sample. SN, Applied Sciences 2 1–8.
[77] Ramon-Marquez, T., Antonio, L., Medina-Castillo, Fernandez-Gutierrez, A., Jorge, F.,2016, Fernandez-Sanchez, A novel optical biosensor for direct and selective determination of serotonin in serum by solid surface-room temperature phosphorescence, Biosens. Bioelectron. 82 217–223.
[78] Tatsuro, E., Hiroshi, K., Kawaguchi, Y., Terumasa, K., Toshiyuki, H., 2016, Label-free optical detection of creactive protein by nanoimprint lithography-based 2d-photonic crystal film, Biotechnol. J. 11 (6) 831–837.
[79] Amit-Kumar, S., Sandeep, K.J., 2019, Fabrication and validation of a handheld non-invasive, optical biosensor for self-monitoring of glucose using saliva, IEEE Sens. J. 19 (18) 8332–8339.
[80] Hui, J., Donglei, J., Jingdong, S., Xiulan, S., Jiasheng, W., 2016, High-throughput living cell-based optical biosensor for detection of bacterial lipopolysaccharide (lps) using a red fluorescent protein reporter system, Scientific reports 6 36987.
[81] Colin, S., Thompson, I., Traynor, T., Fodey, L., Dermot, V. F., Steven, R.H., 2017, Crooks, Screening method for the detection of residues of amphenicol antibiotics in bovine, ovine and porcine kidney by optical biosensor, Talanta 172 120–125.
[82] Yinghui, C., 2019, Upconversion nanoparticle based optical biosensor for the detection of molecular biomarkers. PhD thesis, School of Mathematical and Physical Sciences,Faculty of Science, University of Technology Sydney, 2019.
[83] Akdog˘an, E., Mehmet, M.,2010, Basic principles of optical biosensors in food engineering. Biosensors in food processing, safety, and quality control, pages 53–70.
[84] Nishtha, K., Gurdeep, R., Prayaga, M., Krishna, 2018, Labelfree optical biosensors for food and biological sensor applications, Sensors and Actuators B: Chemical 265 35–49.
[85] Vaisocherova´-Lı´salova´, H., Vı´s˘ova´, I., Laura-Ermini, M., Toma´s˘ S˘pringer, X., Chadtova´, S., Mra´zek, J., Josefı´na Lamac˘ova´, N., Scott Lynn, J., Petr S˘ediva´k, Homola, J., 2016, Low-fouling surface plasmon resonance biosensor for multi-step detection of foodborne bacterial pathogens in complex food samples. Biosensors and Bioelectronics, 80:84– 90.
[86] Massad-Ivanir, N., Shtenberg, G., Nitzan, R., Christel, G., Budding, D., Martine, PB., Ester, S., 2016, Porous silicon-based biosensors: Towards real-time optical detection of target bacteria in the food industry. Scientific reports, 6:38099.

[87] Campbell, K., Barnes, P., Simon, A., Haughey, C.H., Kentaro, K., Vasconcelos, V., Christopher, T.,2013, Elliott, Development and single laboratory validation of an optical biosensor assay for tetrodotoxin detection as a tool to combat emerging risks in european seafood, Analytical and bioanalytical chemistry 405 (24) 7753–7763.
[88] Chalupowicz, D., Veltman, B., Samir, D., Evgeni. E., 2020, Evaluating the use of biosensors for monitoring of penicillium digitatum infection in citrus fruit, Sensors and Actuators B: Chemical 311 127896.
[89] Saurabh, G., Sounik, S., Alexandros, K., Bhattacharya, J., 2019, Development of a cell-free optical biosensor for detection of a broad range of mercury contaminants in water: a plasmid dna-based approach, ACS omega 4 (5) 9480–9487.
[90] Mustafa, F., Andreescu, S., 2018, Chemical and biological sensors for food-quality monitoring and smart packaging, Foods 7 (10) 168.
[91] Mircea, T., Lederle, M., Neuner, L., Dolgowjasow, I., Wiedemann, P., Wo¨lfl, S., Tobias, W., 2017, Optical biosensor optimized for continuous in-line glucose monitoring in animal cell culture, Anal. Bioanal. Chem. 409 (24) 5711–5721.
[92] Kundu, M., Krishnan, P., Kotnala, RK., Gajjala, S., 2019, Recent developments in biosensors to combat agricultural challenges and their future prospects. Trends in food science & technology, 88:157–178.
[93] Jasmina, V., Marisa, M., Chung-Ming, C., Jaffrezic-Renault, N., 2017, Advanced biosensors for detection of pathogens related to livestock and poultry, Veterinary research 48 (1) 1–22.
[94] Neelam, V., Ashish, KS., Pawanjit, K., 2015, Biosensor based on ion selective electrode for detection of larginine in fruit juices, Journal of analytical chemistry 70 (9) 1111–1115.
[95] Arjmand, M., Saghafifar, H., Alijanianzadeh, M., Soltanolkotabi, M., 2017, A sensitive tapered-fiber optic biosensor for the label-free detection of organophosphate pesticides, Sensors and Actuators B: Chemical 249 523–532
[96] Harvey, E., Indyk, BD., Gill, DC., 2014, Woollard, Biotin content of paediatric formulae, early lactation milk and seasonal bovine milk powders by biosensor immunoassay, Int. Dairy J. 35 (1) 25–31.
[97] Harvey, E., Indyk, BD., Gill, DC., 2015, Woollard, An optical biosensor-based immunoassay for the determination of bovine serum albumin in milk and milk products, Int. Dairy J. 4772–78.
[98] Lan-hua, L., Xiao-hong, Z., Wei-qi, X., 2014, Bao-dong Song, Han-chang Shi, Highly sensitive detection of sulfadimidine in water and dairy products by means of an evanescent wave optical biosensor, RSC Advances 4 (104) 60227–60233.
[99] Rajul, P., Mamta, A,, Madhuri, V., Andrea, A., Flavio, G., Leandro, L., Baghini, MS., Ramgopal, R., 2018, Microcantilever based dual mode optical biosensor for agricultural pathogen detection. In 2018 IEEE SENSORS, pages 1–3. IEEE.
[100] Gharsallah, Z., Najjar, M., Bhuvneshwer, S., Vijay, J.,2018, High sensitivity and ultra-compact optical biosensor for detection of urea concentration, Opt. Quant. Electron. 50 (6) 249.
[101] Guixian, Z., Cheng, L., Ruogu, Q., Mizhen, Z., Jiahao, Z., Lianqing, Z., Mingli, D., 2020, A metal-organic zeolitic framework with immobilized urease for use in a tapered optical fiber urea biosensor, Microchim. Acta 187 (1) 72.
[102] Julia, M., Hillger, W., Lieuw, LH., Heitman, AP., zerman, IJ., 2017, Label-free technology and patient cells: from early drug development to precision medicine, Drug Discovery Today 22 (12) 1808–1815.
[103] Sumin-Bian, L., Jiadi, F.,, Vermeire, S., Dragana, S., Lammertyn, J., 2018, Ann Gils, Development and validation of an optical biosensor for rapid monitoring of adalimumab in serum of patients with crohn's disease, Drug Test. Anal. 10 (3) 592–596.
[104] Amouzadeh-Tabrizi, M., Ferre´-Borrull, J., Lluis, F., 2020, Marsal, An optical biosensor for the determination of cathepsin b as a cancer-associated enzyme using nanoporous anodic alumina modified with human serum albumin-thionine, Microchim. Acta 187 (4) 1–9.
[105] Simranjeet, S., Vijay, K., Daljeet-Singh D., Shivika, D., Prasad, R., Joginder, S.,2020, Biological biosensors for monitoring and diagnosis. In Microbial Biotechnology: Basic

Research and Applications, pages 317– 335. Springer.
[106] Tortorello, ML., Gendel, SM., 1997, Food Microbiology and Analytical Methods: New Technologies, CRC Press.
[107] Hakimian, F., Ghourchian, H., Hashemi, A., Arastoo, MR., Behnam Rad, M., 2018, Ultrasensitive optical biosensor for detection of mirna 155 using positively charged au nanoparticles, Scientific reports 8 (1) 1–9.
[108] Jinchuan, L., Xiaohong, Z., Hanchang, S., 2018, An optical biosensor-based quantification of the microcystin synthetase a gene: early warning of toxic cyanobacterial blooming, Analytical chemistry 90 (3) 2362–2368.
[109] Ahmadi, H., Heidarzadeh, H., Taghipour, A., Rostami, A., Baghban, H., Dolatyari, M., Rostami, G., 2014, Evaluation of single virus detection through optical biosensor based on microsphere resonator, Optik 125 (14) 3599–3602.
[110] Xianggui-Kong, KS., Xiaomin, L., Zhang, Y., Qinghui, Z., Langping, T., Zhan, S., Hong, Z., 2012, Aptamer optical biosensor without bio-breakage using upconversion nanoparticles as donors, Chem. Commun. 48 (8) 1156–1158.
[111] Kardash, E., Bandemer, J., Erez, R., 2011, Imaging protein activity in live embryos using fluorescence resonance energy transfer biosensors, Nature protocols 6 (12) 1835.
[112] Malcolm, S., Purdey, AS., Hanna, J., cLennan, M., Benjamin, J., Pullen, EP., Schartner, ML., McDowall, S., Jeremy, G., Thompson, TM., Monro, SJ., Nicholls, A., Abell, D., 2016, Biosensors for detecting stress in developing embryos, SPIE BioPhotonics Australasia, volume 10013, International Society for Optics and Photonicsp. 100130B.
[113] Le´onid, M., Irenge, JG., 2012, Rapid detection methods for bacillus anthracis in environmental samples: a review, Applied microbiology and biotechnology 93 (4) 1411–1422.
[114] Ghosh, N., Gupta, G., Boopathi, M., Pal, V., Singh, A.K., Gopalan, N., Goel, A.K., 2013, Surface plasmon resonance biosensor for detection of bacillus anthracis, the causative agent of anthrax from soil samples targeting protective antigen, Indian journal of microbiology 53 (1) 48–55.
[115] Nickolaj, F., Starodub, YA., Ogorodniichuk, YA., Sitnik, NF.,2012, Slishik, Biosensors for the control of some toxins, viral and microbial infections to prevent actions of bioterrorists, in: Portable Chemical Sensors, Springer, pp. 95–117.
[116] Alexei, N., 2016, Comparative studies on optical biosensors for detection of bio-toxins, in: Biosensors for Security and Bioterrorism Applications, Springer, pp. 491–508.
[117] Wang, J., 2018, Near infrared optical biosensor based on peptide functionalized single-walled carbon nanotubes hybrids for 2, 4, 6-trinitrotoluene (tnt) explosive detection, Analytical biochemistry 550 49–53.
[118] Feng, L., Anna, Z., Hanchang, S., 2013, Recent advances in optical biosensors for environmental monitoring and early warning, Sensors 13 (10) 13928–13948.
[119] Maddali, H., Catherine, E., Joachim Kohn, M., Deirdre, M., 2021, O'Carroll, Optical biosensors for virus detection: Prospects for sars-cov-2/covid-19, ChemBioChem 22 (7) 1176–1189.
[120] Frances, S., Ligler, J., Justin, G., 2019, Lighting up biosensors: Now and the decade to come, Analytical chemistry 91 (14) 8732–8738.

“Review article”

A comprehensive review of optical biosensors

Noushin Dadashzadeh[1*], Naser Moslehi Milani[2]

[1] Assistant Professor, Department of physics, Aras Branch, Islamic Azad University, Jolfa, Iran
[2] Assistant Professor, Department of physics, Ahar Branch, Islamic Azad University, Ahar, Iran
*Corresponding author: noushindadashzadeh@yahoo.com

Abstract

Sensors have demonstrated valuable performance in environmental studies, agriculture, food inspection and safety, rapid and cost-effective responses in biotechnology, disease diagnosis, and medical services, among others. Among the many categories of sensors, optical biosensors, due to their selective, rapid, and highly sensitive measurements, offer additional advantages such as robustness, reliability, and the potential for on-chip integration. In optical biosensors, analytes are detected using light, with either label-based or label-free techniques. This article reviews some of the significant advancements in optical biosensors over the past decade, with a focus on their fabrication approaches and growing application areas. Along with a brief overview of the history of optical biosensors, some carefully selected papers on recent advances in optical biosensors are also presented. Additionally, the challenges and future of emerging optical biosensor technologies in the current decade are discussed.

Keywords: Types of optical biosensors, Application of optical biosensors, Surface plasmon resonance