

فناوری ساخت افزارهای فوتونیکی انعطاف پذیر

سیده ثریا موسوی، بتول سجاد*

آزمایشگاه فوتونیک، دانشکده فیزیک و شیمی، دانشگاه الزهرا

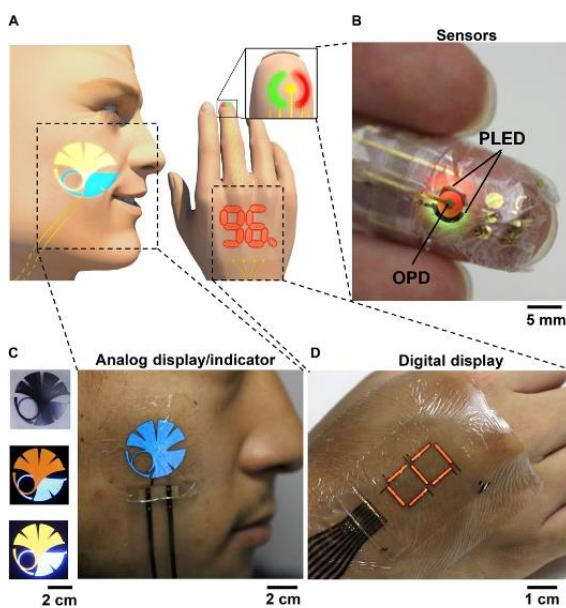
چکیده

در این مقاله، پیشرفت‌های اخیر در زمینه‌ی ساخت افزارهای فوتونیکی انعطاف پذیر در سایه‌ی توسعه‌ی روزافزون نانومواد جدید و طراحی‌های مکانیکی خلاقانه مرور شده است. سپس گستره‌ی وسیع کاربرد این دسته از افزارها در زمینه‌های مختلف صنعت، سلامت و فناوری مطالعه و ارائه شده است. در گام بعدی، چالش‌های پیش رو که مانع از عرضه‌ی این افزارها همگام با پیشرفت‌های مشابه در صنعت الکترونیک شده است، مطرح شده و پس از آن روش‌های ارائه شده برای رفع موانع موجود در این زمینه را به صورت اجمالی بررسی شده است.

واژه‌های کلیدی: افزارهای فوتونیکی انعطاف پذیر، پلیمرها، کالکوزناید

ایمیل نویسنده مسئول: bsajad@alzahra.ac.ir

۱- مقدمه



شکل ۱. سیستم پوست الکترونیک هوشمند که شامل حس‌گرهای مراقبت از سلامت، نمایش‌گرها و دیودهای نورگسیل پلیمری فوق انعطاف پذیر است [۱۱].

فناوری ادوات انعطاف پذیر گستره‌ی وسیعی از کاربردها را در بر می‌گیرد که از آن جمله می‌توان به پوست الکترونیک (قابل استفاده در رباتیک و صنعت پروتز)، حس-گرهای زیستی، ابزارهای پزشکی، باتری‌های انعطاف پذیر، ترانزیستورهای الکترونیک و نوری، الکترودها، نمایشگرها و غیره اشاره کرد [۱۰-۲].

علاوه بر سیگنال‌های الکترونیک، برهم‌کنش موثر فوتونها با ماده نیز می‌تواند حاوی اطلاعات ارزشمندی باشد. با این وجود به ندرت ادوات فوتونیک به صورت انعطاف پذیر و قابل کشش ارائه می‌شوند که دلیل آن پیچیدگی فرآیند ساخت و لزوم بهره‌گیری از بسترهای صلب در این افزارها است. به گونه‌ای

امروزه افزارهای الکترونیک و اپتیک انعطاف پذیر با ارائه‌ی قابلیت‌های ویژه و کاربردهای نوین در زندگی بشر، با اقبال زیادی روبرو شده‌اند. ابداع روش‌ها، مواد و فرآیندهای ساخت جدید، فناوری تولید ادوات انعطاف پذیر را بیش از پیش سرعت بخشیده است. در این مجال ما به بررسی کاربردهای روزافزون، طراحی‌ها و نانومواد پیشرفته‌ای که امروزه در فرآیند ساخت این دسته از افزارها مورد استفاده قرار می‌گیرد، می‌پردازیم.

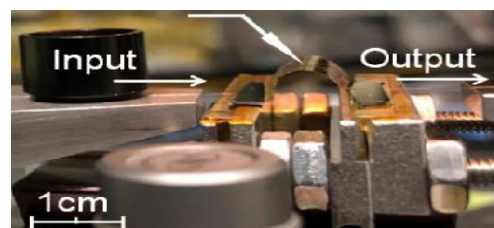
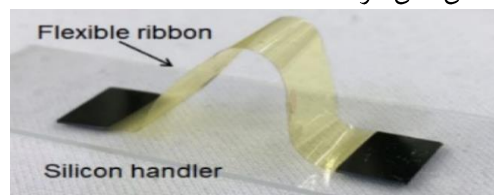
با ظهور فناوری‌هایی همچون اینترنت و گوشی‌های همراه، ادوات الکترونیک قابل حمل به عنوان مهم‌ترین افزارهای پردازش اطلاعات تبدیل به جزء جدایی ناپذیری از زندگی امروزی شده است. همچنین افزارهای الکترونیک قابل پوشیدن، گونه‌ای از افزارهای قابل حملی است که می‌تواند بر روی لباس‌ها نصب شده یا آن که به صورت مستقیم با پوست قابل لمس باشد (شکل ۱). طراحی دستگاه‌های الکترونیک سنتی اغلب بر پایه-ی مدارهای مجتمعی صورت می‌گرفت که از ویفرهای نیم-رسانای مسطح و صلب تولید می‌شدند. این ادوات به راحتی با اشیای نرم، متحرک و نامرتب مانند پوست انسان یا لباس منطبق نشده و شکل نمی‌گرفتند. هم این معضلات استفاده از ادوات الکترونیک سنتی، زمینه ظهور فناوری ادوات انعطاف پذیر امروزی را فراهم آورده است [۱]. پیشرفت‌های جدید در این زمینه تحقیقاتی، چشم انداز نویدبخشی را پیش روی صنعت الکترونیک گشوده است.

که عملکرد یک افزاره‌ی فوتونیک‌ی به فرم منحنی و انعطاف‌پذیر با محدودیت‌های زیادی مواجه می‌شود. اما به تازگی با استفاده از روش‌های ساخت غیرسنتی مانند لیتوگرافی با نقش نگاری نانویی نرم و پرینت به صورت انتقال نانویی افزاره‌هایی کارآمد و با قابلیت‌های بیشتر ارائه شده است. در ادامه‌ی بحث ابتدا دستاوردهای اخیر دانشمندان در زمینه‌ی ساخت افزاره‌های فوتونیک‌ی انعطاف‌پذیر را مورد مطالعه قرار داده و سپس محدودیت‌ها و چالش‌های پیش روی این صنعت را بررسی خواهیم کرد.

۲- مواد و روش‌های نوین مورد استفاده در ساخت افزاره‌های فوتونیک‌ی انعطاف‌پذیر

هیو^۱، دانشیار علوم مواد و مهندسی موسسه فلمینگ^۲، اشتیاق روزافزون مردم به فناوری‌های نوری قابل کشش و خمش‌پذیر را مطرح می‌کند، به ویژه برای کاربردهایی که می‌توانند به طور مستقیم سیگنال‌های نوری را حس کنند. به عنوان مثال چنین افزاره‌هایی می‌توانند در صنعت پزشکی، فنانوردی، انواع تصویربرداری‌ها، حسگرها و چشمه‌های نوری، موجرها و ... کاربردهای گسترده داشته باشد [۱۲].

افزاره‌های فوتونیک‌ی باریکه‌های نور را به طور مستقیم با استفاده از تجهیزاتی همچون دیودهای^۳، لنزها و آینه‌های ساخته شده با فرآیندهایی مشابه ساخت میکروتراشه‌های الکترونیک‌ی، پردازش می‌کنند. بهره‌گیری از باریکه‌های نوری علاوه بر شارش الکترونی می‌تواند در بسیاری از کاربردها سودمند باشد [۱۳]. اما اکثر افزاره‌های فوتونیک‌ی رایج با استفاده از مواد صلب بر روی بسترهای سخت ساخته می‌شوند. لذا برای کاربردهایی که باید از انعطاف بیشتری برخوردار باشند، ناهم‌هنگی ذاتی خواهند داشت.



شکل ۲. یک نوار موجر پلیمری ساده با قابلیت انعطاف‌پذیری بالا و کاربرد آن در یک چینش اپتیکی کاربردی [۱۴].

پلیمرها از جمله مهم‌ترین موادی هستند که در زمینه‌ی ساخت افزاره‌های فوتونیک‌ی انعطاف‌پذیر به صورت گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند. این مواد در طول موج‌های ارتباطاتی بسیار شفاف بوده، تنوع ترکیبی و ساختاری وسیع با قابلیت پردازش تطبیق‌پذیری دارند، از انعطاف‌پذیری بالایی برخوردارند و ضریب شکست پایینی دارند که می‌توانند به راحتی با فیبرهای سیلیکا هم‌هنگ شوند. به عنوان مثال، موجرهای پلیمری به طور کامل با هر دو نوع پیکربندی، روی برد و روی تراشه جمع می‌شود. همچنین با اتلاف انتشاری کمتر از ۱ dB/cm در میان اتصال‌های اپتیکی بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرند. بر خلاف افزاره‌ی فوتونیک‌ی با ساختار صلب، این موجرهای پلیمری می‌توانند با انعطاف‌پذیری بسیار بالا و قابلیت تحمل خمش، پیچش و حتی کشش ساخته و عرضه شوند. با برخورداری از این قابلیت‌ها می‌توان این افزاره‌ها را به عنوان جایگزین مناسبی برای مجموعه فیبرهایی که در کاربردهای فضایی مورد استفاده قرار می‌گیرند، در نظر گرفت. در واقع این ضریب شکست پایین در موجرهای پلیمری باعث کاهش بازتاب فرسند در جفت‌شدگی فیبرها شده و تبدیل مد را تسهیل می‌کند [۱۴].

شکل ۲ نسل جدیدی از موجرهای پلیمری با قابلیت خمش‌پذیری را نشان می‌دهد. اما هنگامی که نوبت به کاربردهای زیست فوتونیک‌ی می‌رسد، انعطاف‌پذیری مکانیک‌ی پلیمرها ناهمسانی الاستیک‌ی بین بافت‌های زیستی و افزاره‌های فوتونیک‌ی را به حداقل می‌رساند، که این امر امکان جمع هم‌شکل حسگرهای نوری بر روی سطوح منحنی بافت (مانند پوست انسان) را با بیشترین میزان انطباق فراهم آورده و آسیب‌های بافتی را که در اثر استفاده از افزاره‌های کاشته شده ایجاد می‌شود، به حداقل می‌رساند [۱۵].

در کاربردهای زیست فوتونیک‌ی شامل تصویربرداری‌های نوری، حسگرهای اپتیکی و درمان با نور فعال‌شده، مواد به کار رفته برای ساخت اجزای نوری باید هم‌زمان بتوانند پاسخ‌گوی نیازهای زیستی، شیمیایی، مکانیک‌ی و اپتیکی کاربرد موردنظر باشد. در انتخاب مواد اپتیکی، میزان شفافیت، ضریب شکست و بستگی طول موجی مهم‌ترین ویژگی‌هایی هستند که باید در نظر گرفته شود.

مواد با شفافیت بالا به طور معمول بازتاب، جذب و پراکندگی نسبی پایینی دارند که این امر اتلاف اپتیکی را کاهش می‌دهد. اما پلیمرهای زیست سازگار به گونه‌ای طراحی شده‌اند که می‌توانند با هدف تشخیص و درمان با سیستم‌های زیستی برهم‌کنش کنند. در نتیجه، علاوه بر ویژگی‌های اپتیکی، مشخصه‌های مکانیک‌ی، شیمیایی و بیولوژیکی پلیمرهای زیستی هم در کاربردهای زیست فوتونیک‌ی باید مورد مطالعه قرار گیرد. به عنوان مثال فیبرهای سیلیکا که کاربردهای اپتیکی فراوانی دارد، سمی بوده و برای کاربردهای زیستی و پزشکی مناسب نیستند. کما اینکه شکنندگی مکانیک‌ی و تردی آنها خطر آسیب به بافت‌های زنده را هم افزایش می‌دهد. از این رو مواد پلیمری زیستی شفاف را می‌توان به عنوان کلیدی‌ترین مواد اپتیکی قابل

^۱-Hue
^۲-Flemings
^۳LED (Light Emission Diode)

فیزیکی پلیمرهای مصنوعی را کنترل و تنظیم نمود. ضمن آنکه به صورت عملی به واسطه عدم محدودیت منابع، می‌توان در گستره وسیعی از کاربردهای فوتونیک-بیولوژیکی از آنها بهره گرفت [۲۱-۲۲].

ضمن آن که، امروزه قابلیت جغاری به صورت ساختارهای سه بعدی زیر موجی در پلیمرها فراهم شده است که به روش لیتوگرافی دو یا چند فوتونی صورت می‌گیرد و امکان ساخت نمونه‌هایی با طراحی‌های جدید و بی‌نظیر را برای دستکاری و جفت‌شدگی سریع الانتقال نور، میسر ساخته است. با تنظیم و بهینه‌سازی مشخصه‌های اپتیکی ملزومات مورد نیاز برای ساخت انواع ادوات فوتونیکی فراهم می‌شود [۲۱].

پلیمرهای مصنوعی تخریب‌ناپذیر مانند پلی اتیلن گلیکول، پلی اکریل آمید، پلی دی متیل سیلوکسان، و پلیمرهای مصنوعی تخریب شونده شامل مواد زیستی بر مبنای پلی لاکتون و سیترات، نمونه‌هایی از پلیمرها هستند که به صورت تخریب شونده و تخریب‌ناپذیر تولید می‌شوند [۱۵].

پلیمرها با ارائه‌ی خمش‌پذیری ذاتی، مدت‌هاست که به عنوان بهترین گزینه برای ساخت افزارهای انعطاف‌پذیر مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این مواد علاوه بر اینکه به عنوان بستر انعطاف‌پذیر استفاده می‌شود، در ساخت انواع موجرها، فیلترها، گسیلنده‌های نوری و همچنین مدولاتورهای اپتیکی هم از ویژگی‌های آن بهره گرفته می‌شود.

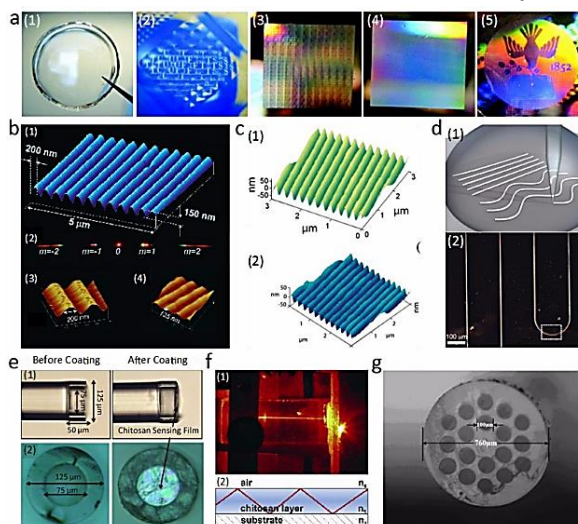
با این حال، ضریب شکست بسیار پایین پلیمرها، منجر به بروز قابلیت ضعیفی برای محدود کردن باریکه‌های نوری می‌شود که این امر قابلیت بهره‌گیری از این مواد را در بسیاری از دیگر کاربردهای فوتونیک با مشکل رو به رو می‌سازد. از این رو، دانشمندان دسته‌ی دیگری از مواد را برای ساخت این گونه ادوات فوتونیکی پیشنهاد دادند.

امروزه، مواد جدید دیگری نیز به عنوان بسترهای انعطاف‌پذیر عرضه شده‌اند که ویژگی‌های نوبنی را ارائه می‌دهند. بسیاری از این مواد در حالت توده‌ای، به عنوان موادی صلب و حتی شکننده محسوب می‌شوند. این در حالیست که نانوغشاهای ساده‌ی ساخته شده از همان مواد می‌توانند به راحتی خم شوند بدون آن که ترک بخورند. زیرا فشار سطح ناشی از خمیدگی به صورت معکوس با ضخامت متناسب است. به ویژه، نانو غشاهای نیم‌رسانا را می‌توان به عنوان ماده‌ای مناسب برای ساخت افزارهای فوتونیکی فعال که می‌تواند با یک بستر پلیمری جمع شود، در نظر گرفت [۲۳].

از سوی دیگر، در یافته‌های اخیر، دانشمندان از گونه‌ی خاصی از شیشه که کالکوژناید^۵ نامیده می‌شود، برای ساخت ادوات فوتونیکی انعطاف‌پذیر بهره می‌گیرند [۲۴]. شکل ۴ نمونه‌ای از شیشه‌های کالکوژناید قابل استفاده در کاربردهای طول موجی فرو سرخ نشان می‌دهد.

استفاده در چنین کاربردهایی در نظر گرفت. زیرا از مزایایی چون مشخصه‌های مکانیکی نرم، زیست سازگاری، تخریب‌پذیری زیستی و همچنین عملکردهای شیمیایی و بیولوژیکی مطلوب برخوردار هستند. با وجود اینکه، تاکنون تلاش‌های زیادی برای مطالعه و توسعه و پیشرفت در زمینه‌ی ساخت این دسته از پلیمرها توسط دانشمندان صورت گرفته است ولی همچنان تحقیق برای بهبود قابلیت‌های پلیمرهای زیستی قابل استفاده در زمینه‌های فوتونیک ادامه دارد. به طور کلی می‌توان این دسته از پلیمرها را به دو دسته اصلی طبقه‌بندی کرد:

دسته اول شامل پلیمرهایی است که به صورت طبیعی از مواد زیستی مشتق شده‌اند و عملکرد زیستی مناسبی دارند. البته اکثر مواد طبیعی ویژگی‌های اپتیکی مطلوبی از خود نشان می‌دهند. از این رو، شفافیت بالا، بازده هدایت نور مناسب امکان استفاده از آنها را در کاربردهای زیست فوتونیک فراهم می‌کند [۱۵]. از جمله‌ی این پلیمرهای طبیعی می‌توان به DNA [۱۶]، ابریشم [۱۷]، کیتوسان [۱۸]، سلولز [۱۹] و آگارز [۲۰] اشاره کرد.

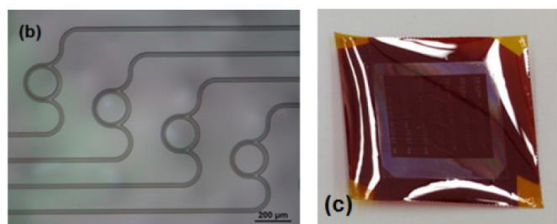
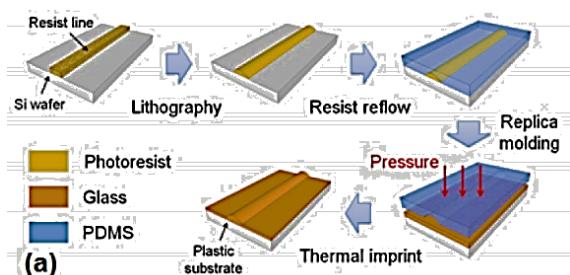


شکل ۳. (a) صورت‌های مختلف ابریشم به عنوان یک پلیمر طبیعی، (b) تصاویر AFM یک شبکه‌ی نوری با الگوی نانویی، (c) تصاویر AFM یک شبکه‌ی طرح نگاری شده بر روی لایه‌ی ابریشمی، (d) تصویر شماتیک نگارش مستقیم موجر ابریشمی و تصویر اپتیکی آن، (e) حسگر لایه‌نشانی شده توسط کیتوسان، قبل و بعد از لایه‌نشانی، (f) تصویر و ساختار شماتیک کیتوسان استات و (g) برش عرضی از یک سلولز^۶ (MPOF) [۱۵].

اما دسته‌ی دوم شامل پلیمرهای مصنوعی است. اگرچه پلیمرهای طبیعی ساخته‌ی طبیعت هستند، اما به علت عدم کنترل در فرایند تولید اغلب دارای محدودیت‌های خاصی هستند که از آن جمله می‌توان به غیریکنواختی مشخصه‌های ماده، منابع محدود، قابلیت طراحی ضعیف اشاره کرد. این در حالیست که می‌توان مشخصه‌های بیولوژیکی، شیمیایی و

^۵ Chalcogenide

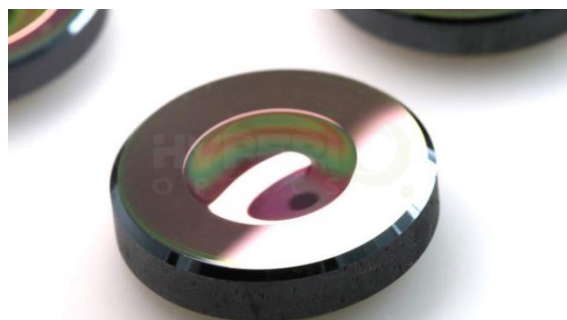
^۶ Microstructured polymer optical fiber.



شکل ۵. (a) فرایند تک مرحله‌ای انتقال طرح به صورت نانوپرینت بر روی بستر پلاستیکی، (b) تصویر اپتیکی میکرو حلقه‌های تشدیدکننده از جنس شیشه‌های کالکوژناید As_2Se_3 که بر روی بستر پلاستیکی با روش نگارش ساخته شده است، (c) تصویر افزاره‌یتشدیدگر از جنس شیشه‌ی کالکوژناید که بر روی بستر انعطاف‌پذیری ساخته شده است [۲۳].

بنا به گفته‌ی هیو، در نهایت شما به چیزی با انعطاف‌پذیری مشابه لاستیک دست می‌یابید، که می‌تواند کشیده و یا خمیده شود در حالیکه همچنان از ضریب شکست بسیار بالایی برخوردار بوده و بسیار شفاف است. بررسی‌ها نشان داده است که چنین ساختارهای فزگونه‌ای، به راحتی بر روی بسترهای پلیمری شکل گرفته و می‌توانند بدون هیچ گونه تغییر در عملکرد اپتیکی‌شان هزاران چرخه‌ی کششی را تحمل کنند. این تیم اجزای فوتونیک متنوعی را تولید کرده‌اند که به وسیله‌ی موجبرهای فزمانند انعطاف‌پذیر به هم متصل شده‌اند. تمام این بخش‌ها درون ماتریس اپوکسی قرار دارند که در مجاورت اجزای اپتیکی سفت‌تر شده و اطراف موجبراز انعطاف‌پذیری بیشتری برخوردار است [۲۸]. شکل ۵ نمونه‌ای از افزاره‌های ساخته شده با شیشه‌های کالکوژناید و شماتیک فرآیند ساخت آنها را نشان می‌دهد.

گونه‌های دیگری از ادوات فوتونیک با قابلیت کشسانی، از قرار دادن نانو میله‌های یک ماده‌ی سفت‌تر درون یک پلیمر ساخته شده‌اند. اما تعداد مراحل ساخت در این روش بیشتر بوده و با سیستم‌های فوتونیک موجود چندان سازگار نیست. چنین مدارهای فوتونیک انعطاف‌پذیری را می‌توان در کاربردهایی که لازم است افزاره بر سطح غیریکنواخت ماده‌ی دیگری منطبق شود مانند فشارسنج‌ها مورد استفاده قرار داد. فناوری نوری به



شکل ۴. شیشه‌های کالکوژناید قابل استفاده در اپتیک فروسرخ در واقع شیشه‌ی کالکوژناید متشکل از یک یا چند کالکوژن (سولفور، سلنیوم و تلوریوم به جز اکسیژن) است. یک کالکوژناید ترکیبی شیمیایی متشکل از دست کم یک آنیون کالکوژن و یک عنصر با الکترون‌دهندگی بالاتر است. اگرچه تمام عناصر گروه ۱۶ جدول تناوبی را به عنوان کالکوژن‌ها می‌شناسند، اما عبارت کالکوژناید بیشتر در مورد سولفیدها، سلنایدها، تلورایدها و پولونایدها به جای اکسیدها استفاده می‌شود.

در کالکوژنایدها، تعداد کمی از لایه‌های اتمی به صورت کوالانسی پیوند خورده و یک لایه‌ی مولکولی را تشکیل می‌دهند. سپس این لایه‌های مولکولی با هم انباشته شده و بر اثر برهم‌کنش‌های واندروالسی ضعیف، ساختار بلوری تشکیل می‌دهند [۲۵]. مشخصه‌های الکترونیک یک تک لایه‌ی کالکوژنایدی با ساختار توده‌ای آن متفاوت است. به عنوان مثال، یک تک لایه‌ی MoS_2 یک نیم‌رسانا با گاف انرژی مستقیم است، در حالیکه ساختار توده‌ای آن گاف غیر مستقیم دارد [۲۶-۲۷]. با توجه به ویژگی‌های خاص این گونه مواد، هیو و همکارانش به جای استفاده از مواد پلیمری انعطاف‌پذیری، رویکرد جدیدی را در پیش گرفتند. آن‌ها لایه‌ی نازکی متشکل از یک شیشه‌ی کالکوژناید را به صورت چنبره‌ای فزری مانند فرم دادند. درست مانند فولادی که به شکل فنر درمی‌آید و می‌تواند کشیده و خمیده شود، معماری این چنبره شیشه‌ای این امکان را فراهم می‌کند که به راحتی کشیده و خمیده شود، بی آنکه مشخصه‌های نوری مطلوب آن تغییر کند [۱۲].



- [11] T.Yokota, P. Zalar, M. Kaltenbrunner and et al., Science Advances, 2, 4, (2016).
- [12] H. Lin, Y. Song, Y. Huang, D. Kita, S. Deckoff-Jones, K. Wang, J. Hu, Nature Photonics, 11, 12, 798-805, (2017).
- [13] S. I. Park, Y. Xiong, R. H. Kim, P. Elvikis, and et al., Science, 325, 5943, 977-981, (2009).
- [14] H. Zuo, S. Yu, T. Gu, and J. Hu, OPTICS EXPRESS, 27, 8, (2019).
- [15] D. Shan, E. Gerhard, C. Zhang, and et al., Bioactive Materials, 3, 4, 434-445, (2018).
- [16] S. Peng, T.L. Derrien, J. Cui, C. Xu, D. Luo, Mater.Today, 15, 5, 190-194, (2012).
- [17] M. B. Applegate, G. Perotto, D. L. Kaplan, and et al., Biomed. Optic Express, 6, 11, 4221-4227, (2015).
- [18] A. Y. Mironenko, A. A. Sergeev, A. E. Nazirov, and et al., Sensor. Actuator. B Chem., 225, 348-353, (2016).
- [19] H. Golmohammadi, E. Morales-Narváez, T. Naghdi, A. Merkoçi, Chem. Mater., 29, 13, 5426-5446, (2017).
- [20] A. Jain, A. H. J. Yang, D. Erickson, Opt. Lett., 37, 9, 1472-1474, (2012).
- [21] P. I. Dietrich, M. Blaicher, I. Reuter, M. Billah, and et al., Nat. Photonics, 12, 4, 241-247, (2018).
- [22] Sun Q, Qian B, Uto k, Chen J, Liu X, et al., Biosens. Bioelectron, 2018, 03, (2018).
- [23] J. Hu, L. Li, H. Lin, P. Zhang, and et al., OPTICAL MATERIALS EXPRESS, 3, 9, (2013).
- [24] J. Emsley, New York, NY: Oxford University Press. pp. 375-383, 412-415, 475-481, 511-520, 529-533, 582, (2011).
- [25] S. M. Kwon, J. K. Won, J. W. Jo, and et al., Science Advances, 4, 4, (2018).
- [26] Q. H. Wang, K. Kalantar-Zadeh, A. Kis, and et al., NATURE NANOTECHNOLOGY, 7, (2012).
- [27] Y. w. Jung, J. Shen and J. J. Cha, Nano Convergence, 1, 18, (2014).
- [28] Li, L. et al., Nat. Photon, 8, 643-646, (2014).

فشار کششی بسیار حساس بوده و می‌تواند تغییر شکل کمتر از یک صدم یک درصد را شناسایی کند.

در مقاله‌ای که در نشریه‌ی نیچر منتشر شد، هیو و همکارانش روش جدیدی را برای مجتمع‌سازی لایه‌های فوتونیک متشکل از شیشه‌ی کالکوزناید و مواد دو بعدی مانند گرافن و مدار فوتونیک نیم‌رسانای معمولی، ارائه دادند. روش‌های موجود جهت مجتمع‌سازی چنین موادی مستلزم آنست که همه‌ی آنها ابتدا بر روی یک سطح ساخته شده سپس از روی سطح برداشته شده و بر روی سطح نیم‌رسانا منتقل شوند که این امر پیچیدگی مراحل ساخت را به طور چشمگیر افزایش می‌دهد. در عوض رویکرد جدید این امکان را به ما می‌دهد که لایه‌ها به طور مستقیم و در دمای اتاق بر روی سطح نیم‌رسانا تشکیل شده و با جهت‌مندی دقیق‌تر و سهولت بیشتر فرآیند ساخت طی شود [۲۳]. همچنین این فرآیند می‌تواند با بهره‌گیری از کالکوزناید به عنوان یک لایه‌ی انفعالی مانع از تخریب مواد دو بعدی در یک محیط مرطوب شود و در واقع به عنوان رویکردی جهت کنترل مشخصه‌های اپتوالکترونیک مواد دو بعدی مورد استفاده قرار گیرد [۲۷].

۳- نتیجه گیری

آنچه مسلم است، با وجود تمام پیشرفت‌های اخیر در زمینه‌ی ساخت ادوات فوتونیک انعطاف پذیر، همچنان تلاش برای توسعه‌ی این صنعت ادامه دارد. با تولید نانومواد جدید، ابداع روش‌های بدیع طرح نگاری، کاهش ابعاد افزارها آینده نویدبخشی را در توسعه‌ی این صنعت کاربردی به تصویر می‌کشد. ضمن آنکه افزایش روزافزون تقاضای بشر- برای تولید افزاره‌هایی کارآمد و با قابلیت‌های چندمنظوره، بازار این شاخه از صنعت را بیش از پیش رونق خواهد بخشید.

۴- منابع

- [1] M. Zou, Y. Ma, X. Yuan, Y. Hu, J. Liu and Z. Jin, Journal of Semiconductors, 39, 1, (2018).
- [2] Paolo Bettotti, CRC Press Taylor & Francis Group, (2016).
- [3] Kim, D.-H. et al., Science 333, 838-843 (2011).
- [4] Y. Yang, X. Yang, X. Zou, and et al., Adv. Funct. Mater, 27, 19, 1604096, (2017).
- [5] Kenry, J. C. Yeo, C. T. Lim, Microsyst. Nanoeng, 2, 16043, (2016).
- [6] S. P. Lacour, S. Benmerah, E. Tarte, and et al. Med Biolog Eng Comput, 48, 10, 945, (2010).
- [7] J. W. Jeong, M. K. Kim, H. Cheng, and et al. Adv. Healthcare. Mater, 3, 5, 642, (2014).
- [8] L. Chen, G. Zhou, Z. Liu, and et al., Adv. Mater, 28, 3, 510, (2016).
- [9] C. Zhang, C. L. Zou, Y. Zhao, C. H. Dong, and et al., Science Advances, 1, 8, (2015).
- [10] S. D. Kim, B. Lee, T. Byun, I. S. Chung, J. Park, Science Advances, 4, 10, (2018).