

فناوری اپتوفلوئیدیک^۱

علی اکبر ابن علی حیدری^۱

چکیده

تلفیق شاره‌ها و نور از دیر باز مورد توجه پژوهشگران بوده است. تلسکوپ‌های آینه‌ای مایع و موجبرهای نوری با هسته مایع که بالغ بر صد سال پیش توسعه یافته‌اند، نمونه‌های اولیه ترکیب شاره‌ها با نور هستند. امروزه از تلفیق شاره‌ها و نور در مقیاس میکرومتر و نانومتر، حوزه پژوهشی جدیدی با عنوان اپتوفلوئیدیک^۲ ایجاد شده است. استفاده از روش‌ها و ابزارهای مبتنی بر اپتوفلوئیدیک منجر به ایجاد افزاره‌های فوری فشرده و قابل تنظیم می‌شود. در چنین سیستم‌هایی از تلفیق شاره با نور و برهم کنش بین آن‌ها، برای بسیاری از کاربردها استفاده می‌شود. در سیستم‌های اپتوفلوئیدیک، ویژگی‌های شاره، سبب تولید ادوات میکرو فوتونیک قابل انعطاف، تنظیم پذیر با قابلیت بازیگرندی می‌شود.

واژگان کلیدی: فناوری‌های اپتوفلوئیدیک، تراشه فوتونیک، نور کند.



^۱. استادیار گروه علوم پایه، دانشگاه فرهنگیان، تهران، ایران، نویسنده مسئول، ebnali_akbar@Yahoo.com

^۲ Optofluidics

دریافت: ۹۷/۵/۳۰ پذیرش: ۹۷/۱۲/۲۸

مقدمه

تلفیق شاره ها و نور از دیر باز مورد توجه پژوهشگران بوده است. تلسکوپ های آینه ای مایع و موجبر های نوری با هسته مایع که بالغ بر صد سال پیش توسعه یافته اند، نمونه های اولیه ترکیب شاره ها با نور هستند. امروزه از تلفیق شاره ها و نور در مقیاس میکرو متر و نانومتر، حوزه تحقیقاتی جدیدی با عنوان اپتوفلودیک ایجاد شده است [۱، ۲]. از ویژگی های منحصر به فرد شاره ها به ویژه در مقیاس های میکرو متر و نانومتر برای طراحی و ساخت افزاره های جدید نوری استفاده می شود که به برخی از این ویژگی ها از جمله، توانایی تغییر ویژگی های نوری محیط حاوی شاره در یک افزاره نوری با جایگزینی یک شاره با شاره دیگر، ایجاد مرز های هموار نوری بین دو شاره نفوذ ناپذیر و ایجاد گرادیان غلظت و ضریب شکست قابل کنترل توسط خاصیت پخش در شاره های نفوذ پذیر و استفاد از شاره به عنوان محیط ترابرد، می توان اشاره کرد. به طور مکمل نور نیز در اپتوفلودیک دارای مزیت های کلیدی شامل، ایجاد روش های متعدد آشکارسازی نوری با حساسیت زیاد از قبیل فلورسانتی- پراکندگی رامان- آشکارسازی بدون برجسب و غیره، جایگزینی نور در مقیاس مورد نیاز و استفاده از نور برای به دام انداختن و هدایت ذرات معلق در مایع، است. شاره ها به دلیل دارا بودن ضریب شکست بالا، تحرک پذیری و قابلیت انعطاف پذیری در فازهای مایع- مایع یا هوا- مایع ابزار مناسبی در طراحی ابزارهای نوری قابل تنظیم، انعطاف و باز پیکربندی هستند. ابزارهای مبتنی بر شاره های نوری با انعطاف پذیری بالا، از قبیل پالاینده های نوری، سویچ های نوری، موجبر های نوری با هسته و لایه پوششی مایع، لیزرها و چشمه های نوری کوک پذیر ساخته شده اند. با استفاده از ایده اپتوفلودیک چندین ابزار شامل مولفه های میکرو شاره و نور بر روی یک تراشه مجتمع می شود. مولفه های نوری از قبیل منبع نور، لنزها، موجبرها و حسگرها که پیش از این به طور مجزا ساخته می شدند، اکنون می توانند در یک بستر متمرکز شوند که امروزه با عنوان آزمایشگاه روی تراشه شناخته می شود. به عنوان مثال، در بلور های فوتونی و فیبر های نوری میکرو ساختار با تزریق شاره در حفره های انتخابی و کنترل موضعی شاره، می توان ادوات تنظیم پذیر با قابلیت بازپیکربندی نظیر موجبر های بلور فوتونی نور کند، پالاینده های نوری، سویچ های نوری و حسگرهای نوری و غیره ایجاد کرد [۳-۵].

در این مقاله، ابتدا اپتوفلودیک به طور اجمالی معرفی می شود. سپس برخی از مولفه های فوتونیک مبتنی بر ترکیب محیط های شاره و ساختارهای نوری مجتمع شده توصیف می شود و به برخی از افق های پیش رو در توسعه فناوری های مرتبط با اپتوفلودیک اشاره می شود.

افزاره های تنظیم پذیر اپتوفلودیک

یکی از ویژگی های مهم افزاره های اپتوفلودیک، تنظیم پذیری با استفاده از انواع سازکارهای فیزیکی است. افزاره های اپتوفلودیک نقش اساسی را در سیستم های نوری نسل آینده برای استفاده در بیولوژی، پزشکی، مخابرات و پردازش اطلاعات، ایفا خواهند کرد. یکی از مزایای مهم ترکیب فناوری های میکرو شاره ها با فوتونیک، این است که با ترکیب این دو فناوری، طراحی و ساخت افزاره های اپتوفلودیک سازگار و قابل تنظیم امکان پذیر است. دینامیک شاره ها در مقیاس میکرو متر نقش اساسی را در درک رفتار سیستم های اپتوفلودیک ایفا می کند. دینامیک میکرو شاره ها مانند شاره در مقیاس ماکروسکوپی از معادلات ناویر- استوکس ۱ پیروی می کنند. میکرو شاره دارای چند ویژگی مهم هستند که از آن ها برای طراحی و ساخت افزاره های اپتوفلودیک با قابلیت انعطاف پذیری و تنظیم پذیری استفاده می شود [۲]. یکی از مشخصه های شاره ها در مقیاس میکرو متر، شارش لایه ای ۲ است. شارش لایه ای سبب شکل گیری

^۱ Navier-Stoks

^۲ Laminar flow

مرزهای هموار انعطاف پذیر بین شاره‌ها می‌شود که برای افزاره‌های نوری با اتلاف کم بسیار مهم هستند. یکی از ویژگی مهم شاره، تغییر یا مدوله شدگی ضریب شکست زیاد از طریق تغییر غلظت شاره است. از ترکیب مناسب چندین مایع، می‌توان به مایعی با ضریب شکست مورد نظر دست یافت. علاوه بر این، از ترکیب محیط بهره یا جذب در مایع‌ها، برای ساخت افزاره‌های نوری برای کنترل جذب یا بهره استفاده می‌شود. رهیافت مرسوم برای تنظیم افزاره‌های اپتوفلوریدیک، مدوله کردن ضریب شکست است که سبب تغییر در فاز، دامنه و قطبش میدان الکترو مغناطیسی در افزاره‌های نوری می‌شود. مدوله شدگی فاز از طریق بخش حقیقی ضریب شکست به دست می‌آید، در حالی که مدوله شدگی قطبش با تغییر اندازه یا جهت گیری دو شکستی محیط نور به دست می‌آید. مدوله شدگی دامنه به طور مستقیم از طریق تغییر در بخش موهومی ضریب شکست و یا به طور غیر مستقیم از طریق روش‌های تداخل سنجی ایجاد می‌شود. علاوه بر مدوله شدگی ضریب شکست، تغییر شکل هندسی ساختار نیز موجب تنظیم افزاره‌های اپتوفلوریدیک می‌شود، که این نیز موجب تغییر توزیع ضریب شکست موثر محیط می‌شود. بسیاری از قابلیت‌های افزاره‌های اپتوفلوریدیک توسط شکل هندسی مرزهای بین جامد - جامد، جامد - مایع، جامد - گاز، مایع - گاز یا مایع - مایع تعیین می‌شود [۱، ۲]. برخی از افزاره‌های اپتوفلوریدیک از مواد کشسان نرم مانند پلیمرها ساخته می‌شوند. تغییر شکل این مواد کشسان باعث تغییر یا جابجایی مرزها و در نتیجه سبب تنظیم افزاره‌های نوری می‌شود.

کاربردهای اپتوفلوریدیک تنها به ادوات نوری قابل تنظیم محدود نمی‌شود بلکه در آشکار سازی نوری تقویت شده با قابلیت‌های زیاد در زیست فناوری، علوم زیستی، بیوپزشکی و غیره توسعه داده شده‌اند. در افزاره‌های نوری که از اپتوفلوریدیک بهره می‌گیرند، سهم‌های اپتوفلوریدیک به طور معمول در سه رده کلی قرار می‌گیرند: چشمه‌های نور که از شاره به عنوان محیط بهره استفاده می‌شود، افزاره‌های نوری که در آن‌ها از شاره برای تنظیم پذیری یا پیکربندی پاسخ نوری این افزاره‌ها استفاده می‌شود و حسگرهای اپتوفلوریدیک که در این ساختارها از محیط شاره برای هدایت و کنترل مسیر ذرات یا آشکار سازی محیط شاره استفاده می‌شود [۱، ۲]. در ادامه به نمونه‌هایی از پژوهش‌های انجام شده در قالب این رده بندی‌ها اشاره می‌شود.

چشمه‌های نور لیزر اپتوفلوریدیک

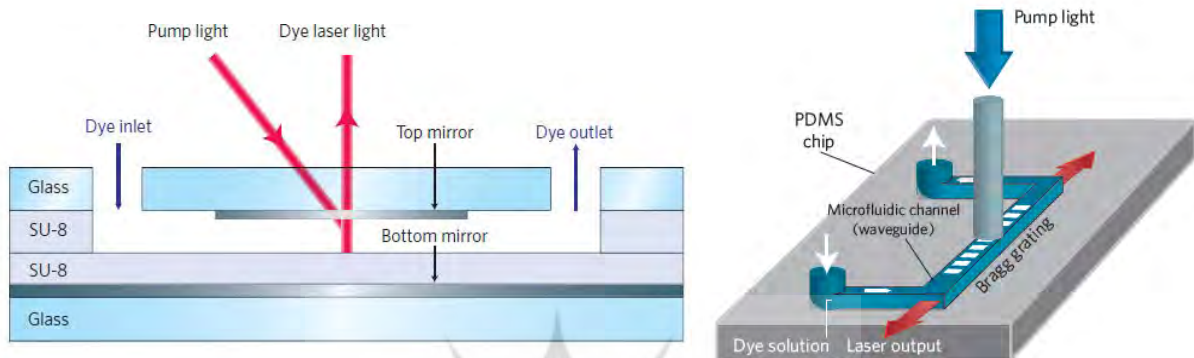
نور لیزر، به دلیل همدوسی و شدت طیفی زیاد به عنوان یک چشمه نوری مطلوب محسوب می‌شود. استفاده از اپتوفلوریدیک، روش‌های نوینی را برای ایجاد نور لیزر فراهم می‌آورد. در زمینه اپتوفلوریدیک، ادغام چشمه لیزری با بستر مواد غیر نورافشان مانند سیلیکون، شیشه یا مواد پلیمری (PDMS)^۱ برای بسیاری از کاربردها مانند مخابرات نوری برای انتقال اطلاعات و یا سیستم‌های واکافت مجتمع و قابل حمل، دارای چالش‌های اساسی است. ادغام گازها و مایع‌ها با تراشه‌های نوری قادر به کوچک سازی چشمه‌های لیزری می‌شود. برای ایجاد نور همدوس لیزر، سه مولفه شامل یک منبع انرژی (دمش)، محیط بهره یا تقویت مناسب و بازخورد فرکانس انتخابی در یک کاواک نوری مورد نیاز است [۶، ۷]. محیط بهره، شامل نمونه‌های فعال مانند مولکول‌های رزینه ای ۲ کوک پذیر محلول در یک مایع است. تعدادی از مولکول‌های رزینه ای، منحنی‌های بهره پهنی در گستره مرئی طیف دارند. محلول بهره حاوی مولکول رزینه ای از طریق میکروکانال‌ها به طور پیوسته به جایگاه مورد نظر در ناحیه کاواک منتقل می‌شود و پس از برهم کنش با مدهای نور، گذارهای مربوط به عمل لیزری انجام می‌شود و نور لیزر ایجاد می‌شود.

در شکل ۱، طرح واره‌ای از دونمونه از چشمه‌های لیزر رنگی اپتوفلوریدیک نشان داده شده است. در شکل ۱. الف)، مولکول‌های رزینه‌ای رودامین ۶G محلول در مایع (متانول یا اتیلن گلیکول) برای تقویت نور از طریق میکروکانال درون یک کاواک منتقل می‌شوند. در این شکل، کاواک لیزری از دو

^۱ Polydimethylsiloxane

^۲ Dye

لایه فلزی قرار داده شده در بالا و پائین کانل ایجاد شده است. انرژی دمش لازم توسط یک چشمه لیزر بیرونی انجام می‌شود. عمل لیزری به صورت مد پالسی و توان آستانه نسبتاً بالا (30 MW cm^{-2}) است [۸]. نمونه تکامل یافته تر از لیزرهای رنگی اپتوفلودیک، لیزر رنگی بازخورد توزیعی شده (DFB) است که به صورت طرح وار در شکل ۱ (ب)، نشان داده شده است [۹]. در این شکل، کانل میکروشاره، شامل ساختار توری براگ است که از مواد پلیمری (PDMS) ساخته شده است. محلول رزین‌ه‌ای که هم به عنوان هسته موجبر نوری و هم به عنوان محیط بهره ایفای نقش می‌کند به درون میکرو کانل منتقل می‌شود. عمل دمش لیزر توسط یک لیزر بیرونی انجام می‌شود. بازخورد ایجاد شده توسط توری براگ سبب نشر لیزری در امتداد میکرو کانل می‌شود. با ساختار، چشمه لیزری اپتوفلودیک تک مدی با توان آستانه پایین‌تر (0.13 MW cm^{-2}) از طراحی‌های پیشین ایجاد می‌شود. علاوه به نمونه‌های اشاره شده، انواع پیکربندی‌های دیگری از لیزرهای اپتوفلودیک در سال‌های اخیر طراحی و ساخته شده‌اند. از جمله می‌توان به لیزرهای اپتوفلودیک میکرو کاواک، فابری پرو و غیره اشاره کرد [۱۰-۱۲].



شکل ۱: طرح واره‌ای از لیزر اپتوفلودیک (الف) لیزر کاواک عمودی [۸] لیزر بازخورد توزیع شده با دمش عمودی [۹].

افزاره‌های نوری قابل تنظیم مبتنی بر اپتوفلودیک:

مرزهای هموار قابل کنترل بین شاره‌های مخلوط نشدنی

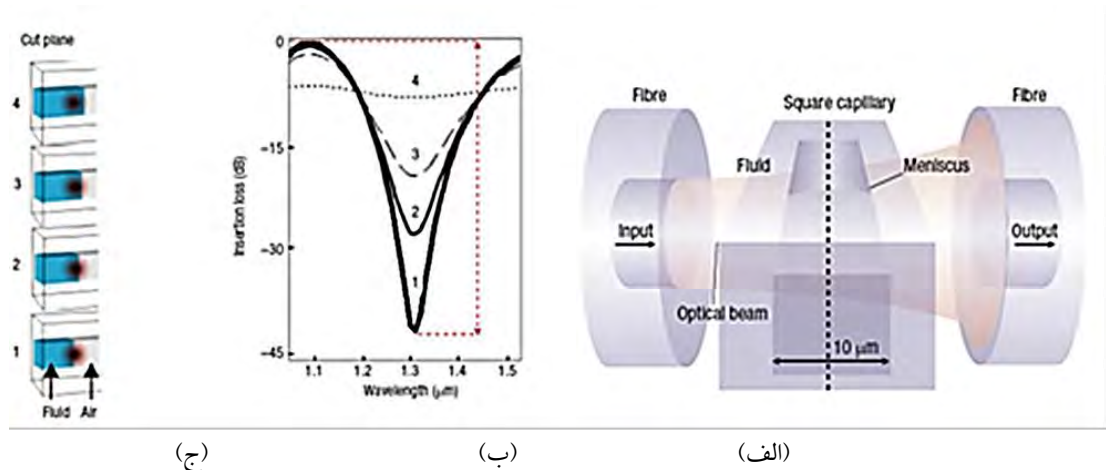
تنظیم پذیری و قابلیت کنترل ویژگی‌های نوری افزاره‌های فوتونیک نسل جدید، از اهمیت به‌سزایی برخوردار است. زیرا چنین قابلیت‌هایی منجر به تولید افزاره‌های فوتونیک فشرده با کارایی و عملکرد بالا و سودمندی سرمایه‌گذاری به لحاظ صرفه‌جویی در وقت و مواد مصرفی می‌شود. افزاره فوتونیک جامد، قابلیت کنترل کمتری نسبت به افزاره‌های نوری اپتوفلودیک دارند. با جایگزینی مایع به جای بستر جامد، افزاره‌های اپتوفلودیک قابلیت انعطاف پذیری و کنترل بیشتری می‌یابند. مرزهای هموار ایجاد شده توسط میکروشاره‌های قابلیت انعطاف و کنترل بهتری نسبت به مرزهای جامد دارند. تضاد ضریب شکست بین مرزهای میکروشاره‌ها، ابزار مناسبی برای کنترل و تنظیم افزاره‌های اپتوفلودیک محسوب می‌شود. همچنین، با تغییر شکل و یا جابجایی

مرز بین شاره ها، کنترل و تنظیم افزاره نوری در میکرو مقیاس انجام شود زیرا در این مقیاس اثرات کشش سطحی بر اثرات ماکروسکوپی گرانس غلبه می کنند [۱،۲].

مرزهای شاره ها روشی موثر و مقرون به صرفه در ایجاد سطح های هموار نوری است، که از مدت ها پیش شناخته شده است. به دلیل کشش سطحی، مرز بین دو شاره غیر قابل اختلاط، یکنواخت و هموار است. آینه های تلسکوپ مایع که با حرکت دورانی ظروف حاوی جیوه ایجاد می شوند، بر این اصل استوار هستند [۱۳]. در مقیاس کوچک تر، ساخت عدسی های اپتوفلودیک نیز بر این استوار است [۱۴]. در هر دو مورد از تغییر مناسب انحناى مرز هموار بین شاره ها برای تغییر فاصله کانونی به مقدار دلخواه استفاده می شود. در سال های اخیر، با استفاده از مرزهای قابل کنترل مبتنی بر شاره ها، افزارهای نوری اپتوفلودیک با قابلیت انعطاف پذیری طراحی یا ساخته شده اند، از جمله آن ها می توان به سویچ های نوری، موجبرهای نوری با هسته و غلاف مایع، تداخل سنچ تک باریکه ای و بسیاری دیگر اشاره کرد. علاوه بر این، تزریق شاره در فیبرهای نوری میکروساختار، فیبرهای بلور فوتونی و بلورهای فوتونی بسترهای مناسبی برای طراحی و ساخت بسیاری از افزاره های نوری از قبیل سویچ های نوری، موجبر بلور فوتونی نور کند، کاواک های نوری و غیره فراهم کرده است. در ادامه، اساس کار برخی از این افزاره های نوری اپتوفلودیک مرور می شوند.

تداخل سنچ تک باریکه ای اپتوفلودیک

در یک تداخل سنچ ماخ-زنر معمولی نور فرودی به دو بخش جدا می شود، در یکی از بخش ها، تاخیر فاز وابسته به طول نسبت به بخش دیگری ایجاد می شود. در شکل ۲ (الف)، یک تداخل سنچ تک باریکه ای نشان داده شده است [۲،۱۵]. در این مرز بین آب- هوا در درون لوله موئین مربعی از جنس سیلیکا بین دو فیبر تک مدی قرار گرفته است. در این تداخل سنچ تک باریکه ای، باریکه فرودی توسط مرز بین دو شاره با ضریب شکست متفاوت به دو بخش جدا می شود. اختلاف مسیر نور و در نتیجه تاخیر فاز القا شده بین دو بخش تک باریکه در هنگام انتشار در مرز بین دو بخش ایجاد می شود. جابجایی فاز القا شده در مرز به طور مستقیم به تضاد ضریب شکست (Δn) بین دو محیط شکل دهنده ایجاد می شود. تضاد ضریب شکست زیاد بین مرز دو محیط شاره سبب مجتمع سازی افزاره نوری با استفاده از ترکیب مولفه های نور و میکروشاره در یک بستر می شود. تضاد ضریب شکست بالا بین آب و هوا در تداخل سنچ تک باریکه ای سبب می شود که پاسخ مدوله شده تداخل سنچ در طول های بسیار فشرده در حدود $40\mu m$ ایجاد شود. در شکل ۲ (ب) طیف تراگسیل و چگونگی تنظیم پذیری تداخل سنچ نشان داده شده است. با توجه به طیف تراگسیل دیده می شود با جابجایی مرز بین آب- هوا نسبت مرکز باریکه، تراگسیل افزاره تغییر می کند.



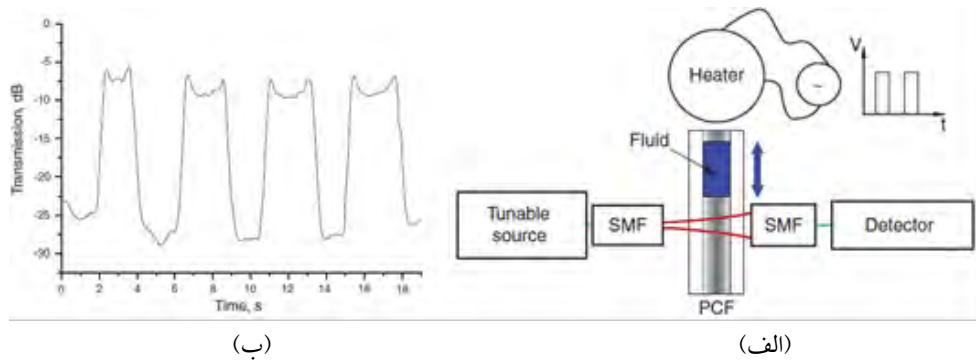
شکل ۸: (الف) طرح واره ای از تداخل سنچ تک باریکه ای (ب) تغییرات طیف تراگیسل افزاره (ج) چگونگی تنظیم پذیری تداخل سنچ، با حرکت مرز بین آب-هوا نسبت به مرکز باریکه [۱۵].

تزریق شاره در ساختار های بلور فوتونی

ساختارهای فوتونیک مانند فیبرهای بلور فوتونی یا بلورهای فوتونی با ترکیب میکروشاره ها بستر مناسبی برای بسیاری از کاربردها نظیر، کاواک ها، موجرها، سویچ های نوری و غیره را فراهم می آورند. ترکیب این ساختارها با میکروشاره دارای مزیت های مهمی هستند که به برخی از آن ها اشاره می شود. ۱- وجود حفره های هوا در این ساختارها سبب می شود تا هر نوع شاره (گاز یا مایع) به سهولت در درون آن ها تزریق شود. ۲- ویژگی های نوری این ساختارها به ضریب شکست حفره ها بستگی دارد. ۳- با مهندسی پاشندگی در این ساختارها، می توان برهم کنش نور و ماده درون حفره را تقویت کرد. در ادامه، نمونه هایی از افزاره های نوری با بستر بلور فوتونی و فیبر بلور فوتونی و ترکیب آن با میکرو شاره ها برای طراحی و ساخت سویچ نوری، موجرهای نور کند را بررسی می کنیم.

از فیبرهای بلور فوتونی دو بعدی برای محصور کردن نور در امتداد جهت انتشار استفاده می شود [۱۶]. فیبر بلور فوتونی به طور معمول از سیلیکا ساخته می شود که درون آن حفره های هوا در امتداد محور فیبر ایجاد می شوند. فیبر بلور فوتونی دارای آرایش دوره ای است، بنابراین در گستره ای از طیف دارای گاف نوری است که در این گستره از طیف، تراگیسل صفر است. با تزریق شاره در حفره های فیبر بلور فوتونی تضاد ضریب شکست شبکه بلوری ساختار تغییر می کند در نتیجه ویژگی طیفی فیبر بلور فوتونی تغییر میکند [۱۷]. در شکل ۳ (الف)، طرح واره ای از سویچ نوری فیبر بلور فوتونی تزریق شده با شاره نشان داده شده است. فیبر بلور فوتونی با حجم کوچکی از روغن با ضریب شکست تقریباً یکسان با ضریب شکست سیلیکا، پر شده است. هنگامی که باریکه نور در جهت عرضی به فیبر بلور فوتونی می تابند، گاف نوری ناپدید می شود. هنگامی که هوای ابتدای فیبر یک منبع گرمایی الکتریکی که به طور دوره ای با ولتاژ مربعی روشن و خاموش می شود، بسته روغن در درون فیبر در ناحیه گمانه نوری به سمت پس و پیش می رود. بنابراین پاسخ نوری عرضی افزاره نوری به طور دوره ای بین دو حالت خاموش و روش سویچ می شود [۱۷]. طیف تراگیسل سویچ نوری فیبر بلور فوتونی اپتوفلودیک در شکل ۳ (ب)،

نشان داده شده است. پاسخ عرضی افزاره با نسبت تضعیف 20 dB بین دو روشن و خاموش سوچ می شود. مقیاس زمانی پاسخ دوره ای متناسب با تحریک گرمایی افزاره به چندین ثانیه محدود شده است.

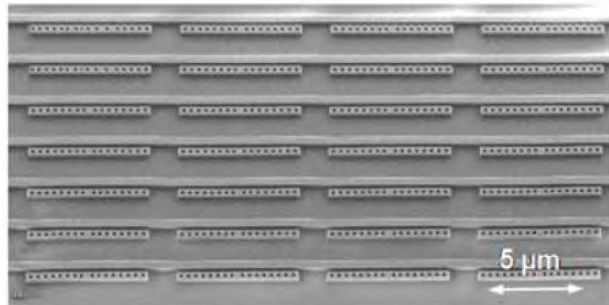


شکل ۳: (الف) طرح واره ای از سوچ نوری اپتوفلویدیک فیبر بلور فوتونی (ب) طیف تراگسیل افزاره بین دو حالت روشن و خاموش [۱۶, ۱۷]. تزریق میکروشاره در بلورهای فوتونی تیغه‌ای^۱ بستر مناسبی برای ساخت مدارهای مجتمع فوتونیک با قابلیت تنظیم و با پیکربندی فراهم می‌کند. این ساختارها شامل شبکه‌های دوره‌ای از حفره‌های هوا هستند که در یک ماده تیغه‌ای با ضریب شکست بالا مانند سیلیکون ایجاد می‌شوند [۱۸]. مولفه‌های نوری متعددی از جمله لیزرها، موجرها، حسگرها و غیره با استفاده از ایجاد نقص در بلورهای فوتونی تیغه‌ای ایجاد شده‌اند [۱۹-۲۴]. نقص‌ها در بلورهای فوتونی تیغه‌ای، با تغییر پارامترهای ساختاری مانند تغییر شعاع حفره‌ها، تغییر جایگاه حفره‌ها یا حذف یک یا چندین حفره در شبکه بلوری ایجاد می‌شوند. با این وجود، در برخی از موارد مانند طراحی و ساخت میکروکاواک‌های بلوری فوتونی با دقت زیاد در مقیاس نانومتر هنوز با چالش‌هایی جدی مواجه هستند. از سویی دیگر، پیکربندی افزاره نوری در حین طراحی و ساخت شکل می‌گیرد و تغییر دائمی در ویژگی‌های شبکه بلوری ایجاد می‌کند. بنابراین به جای ایجاد تغییرات موضعی در پارامترهای ساختاری بلور، تزریق شاره در یک یا چندین حفره در شبکه بلوری تغییرات مشابهی در ضریب شکست موثر ساختار بلوری ایجاد می‌کند. تزریق شاره در حفره‌های انتخاب شده، رهیافت جالبی برای ایجاد نقص در ساختارهای بلور فوتونی هستند، زیرا این رهیافت وابسته به پارامترهای هندسی ساختار نیست و در هر زمانی پس فرآیند ساخت، می‌تواند انجام شود. همچنین تغییر ایجاد شده توسط تزریق شاره به دلیل خاصیت روان بودن شاره، قابل برگشت و تعویض با شاره‌های هستند که سبب بازپیکربندی افزاره نوری می‌شود. علاوه بر این، با این راهکار با انتخاب مناسب ضریب شکست شاره تزریق شده، قابلیت انعطاف پذیری و کنترل افزاره‌های نوری می‌یابد. تاکنون، پژوهش‌هایی در ارتباط با تزریق شاره در بلورهای فوتونی تیغه‌ای انجام گرفته است، که به برخی از آن‌ها اشاره خواهد شد.

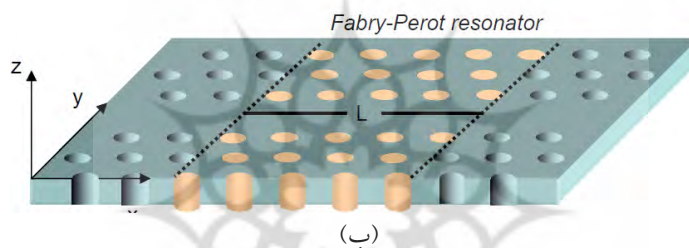
به عنوان مثال، در شکل ۴ نمونه‌هایی از ساختارهای پالایند (فیلتر) نوری اپتوفلویدیک نشان داده شده است. در شکل ۴ (الف)، آرایه‌ای از حسگرهای نوری تشدیدکننده‌های بلور فوتونی یک بعدی در مجاورت موجرها، نشان داده شده است [۱۹]. در این ساختار، طول موج تشدید هر کدام از میکروکاواک‌ها توسط ابعاد ساختار کنترل می‌شود و نور به طور موثر در میکروکاواک‌ها به دام می‌افتد. این علاوه بر استفاده از این ساختار به عنوان حسگر نوری، این ساختار می‌تواند به عنوان پالایند نور و انتخاب سطول موج‌های مورد نظر برای کاربردهای معین مورد استفاده قرار گیرد. این ساختار به عنوان

^۱ Slab photonic crystals

حسگرهای موازی فشرده برای آشکارسازی هم‌زمان چندین شاره که می‌توانند حامل ویروس‌ها، سلول‌های سرطانی و مواد شیمیایی باشند، استفاده می‌شود. هر کدام از میکرو کاواک‌ها در مجاورت موجرها با شاره‌های متفاوت تزریق می‌شوند، از جابجایی طول موج تشدید میکرو کاواک‌ها می‌توان ماده مورد نظر را شناسایی کرد. علاوه بر این، این ساختار می‌تواند به عنوان پالاینده نور و انتخاب طول موج‌های مورد نظر برای کاربردهای خاص مورد استفاده قرار گیرد. در شکل ۴ (ب)، یک موجبر بلور فوتونی نشان داده شده است. که از حذف یک ردیف از حفره‌ها ایجاد شده است. با تزریق شاره در حفره‌های انتخاب شده موجبر یک مد کاواک ایجاد می‌شود. دلیل ایجاد مد کاواک این است که تزریق موضعی شاره در حفره‌های انتخاب شده سبب شکل‌گیری کاواک فابری- پرو می‌شود زیرا بخش‌های تزریق نشده کناری همانند آینه‌هایی با بازتابندگی زیاد عمل می‌کنند. مد کاواک ایجاد شده باعث محصور شدگی مد نور در درون کاواک می‌شود. این ساختار نیز همانند ساختار قبلی هم می‌تواند به عنوان پالاینده طول موج نور و هم می‌تواند به عنوان حسگر نوری به کار گرفته شود [۳].



(الف)

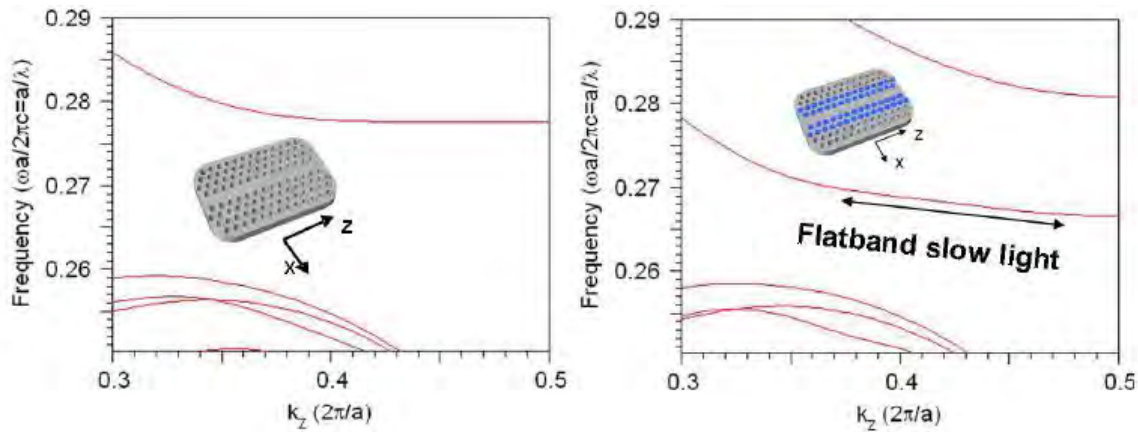


(ب)

شکل ۴: (الف) آرایه‌ای از پالاینده‌ها و حسگرهای نوری اپتوفلوریدیک [۱۹] (ب) طرح واره‌ای از پالاینده ابرساختار بلور فوتونی تیغه‌ای اپتوفلوریدیک [۳].

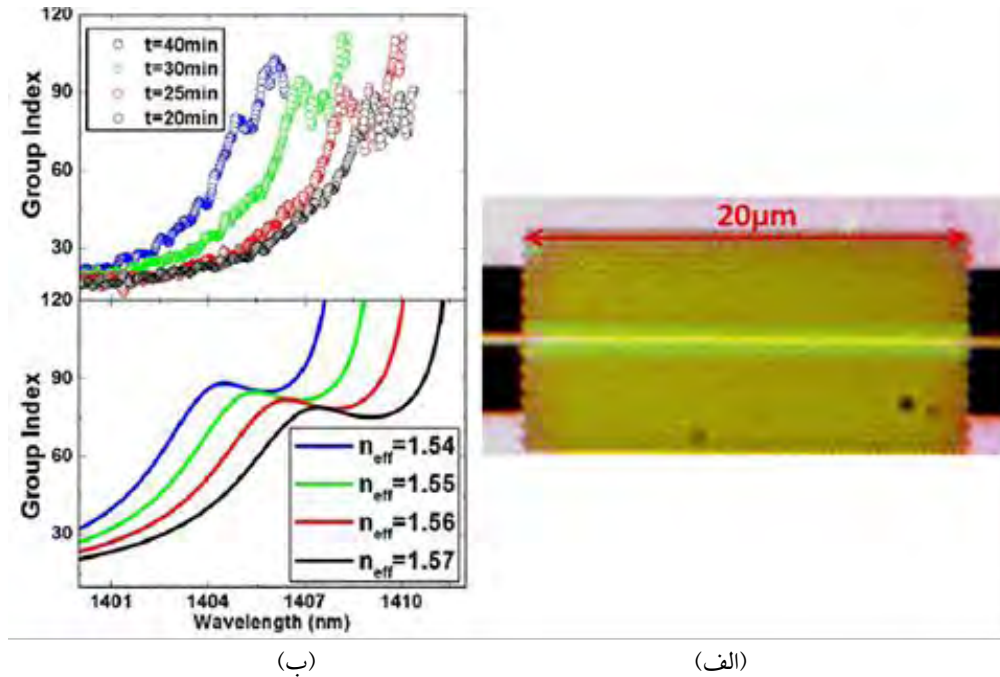
یکی از ویژگی‌های بارز رهیافت تزریق میکرو شاره در بلورهای فوتونی تیغه‌ای، مهندسی پاشندگی بلورهای فوتونی و ایجاد نور کند است. نور کند ایجاد شده در چنین ساختارهایی سبب افزایش برهم کنش نور و ماده می‌شود که برای کاربردهایی نظیر حسگری نوری و یا تقویت آثار غیر خطی استفاده می‌شود [۲۴-۲۰]. در شکل ۵ (سمت راست)، یک موجبر بلور فوتونی اپتوفلوریدیک در بستر سیلیکون به طول ۸۰ میکرو متر نشان داده شده است [۲۰]. در این موجبر حفره‌های دو ردیف بالا و پائین مجاور نقص خطی موجبر با شاره تزریق شده است. تزریق شاره در حفره‌های انتخابی به منظور مهندسی پاشندگی و ایجاد نور کند در گستره قابل ملاحظه‌ای طیف تراگسیل صورت گرفته است. منحنی‌های پاشندگی محاسبه شده موجبر بلور فوتونی در شکل ۵ برای دو حالت تزریق شده (شکل سمت راست) و تزریق نشده (شکل سمت چپ) نشان داده شده است. با مقایسه این منحنی‌ها، دیده می‌شود که با تزریق شاره در

حفره های انتخاب شده، در دور از لبه نوار ناحیه نور کند با شیب ثابت ایجاد می شود. با تزریق شاره با ضریب شکست مناسب بسته به شعاع حفره های بلور فوتونی، سرعت گروه مد نور کند بین $\frac{c}{11}$ تا $\frac{c}{3}$ قابل کنترل است. در اینجا c سرعت نور در فضای آزاد است. در شکل ۶. (تصویر بالا)، تصویر میکروسکوپی از موجبر بلور فوتونی تزریق شده با شاره نشان داده شده است. طیف های ضریب گروه موجبر نور کند نشان داده شده است (شکل وسط مربوط به داده تجربی و شکل پایین مربوط به داده های محاسباتی است) [۲۱].



شکل ۵: منحنی های پاشندگی، موجبر نور کند اپتوفلویدیک (سمت راست) و موجبر معمولی تزریق نشده با شاره (سمت چپ) [۲۰].





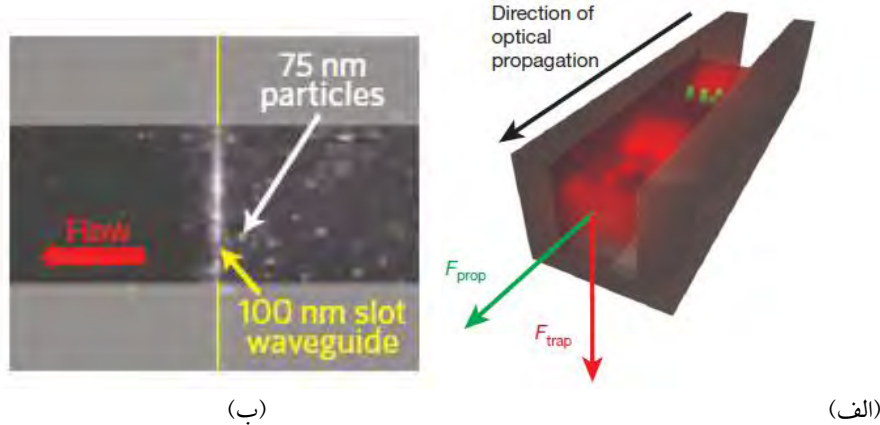
شکل ۶: (الف) تصویر میکروسکوپی از موجبر بلور فوتونی تزریق شده با شماره (ب) طیف‌های ضریب گروه موجبر (شکل بالا مربوط به داده تجربی و شکل پایین مربوط به داده‌های محاسباتی است) [۲۱].

هدایت و کنترل ذرات مبتنی بر اپتوفلودیک

روش‌های نوری هدایت و دستکاری نوری ذرات نقش اساسی را در بهره‌برداری از میکرو شاره‌ها در میکرو سیستم‌ها و تراشه‌های فوتونیک ایفا می‌کنند. روش‌های متعددی برای هدایت و کنترل ذرات با استفاده از نور وجود دارد. یکی از این روش‌ها، روش انبورک^۱ نوری است که در آن از باریکه‌های لیزری شدید و کانونی شده برای هدایت اجسام در گستره‌ی چندین میکرومتر تا چند صد نانومتر استفاده می‌شود. در روش انبورک نوری، باریکه‌های لیزری کانونی شده، نیروی گرادیان کافی برای به دام انداختن اجسام در مقیاس میکرو متر و نانومتر پیرامون نقطه کانونی لیزر ایجاد می‌کنند [۲۵، ۲۶]. استفاده از روش انبورک نوری برای هدایت ذرات نانو مقیاس دارای محدودیت‌هایی زیادی هستند. به طور مثال برای به دام انداختن و هدایت مستقیم بسیاری از ذرات بیولوژیکی مانند ویروس‌های کوچک که معمولاً اندازه آن‌ها در گستره ۵۰ تا ۵ نانومتر است، فراتر از گستره قابل دسترس اپتیک فضای آزاد است. بنابراین سازوکارهای جدیدی برای هدایت و کنترل ذرات نانو مقیاس مورد نیاز است. رهیافت اپتوفلودیک، سازوکارهای جدید را در علوم زیستی به ویژه تشخیص‌های شیمیایی و بیوپزشکی مبتنی بر واکافت و هدایت ذرات نانو و میکرو مقیاس در محیط شاره را فراهم می‌کند. در یک سیستم اپتوفلودیک، نیروی ناشی از نور سبب حرکت ذرات در مسیر دلخواه و هدایت آن‌ها به محل مورد نظر می‌شود. انتقال تکانه از فوتون‌ها به ذرات در

^۱ Optical tweezing

محیط سبب پیدایش دو نیروی نور می شود و منجر به دام افتادن و هدایت ذرات در محیط می شود. در واقع به ذرات دو نیرو، یکی نیروی پراکندگی که در امتداد انتشار باریکه نور می شود و دیگری نیروی گرادیان است که ذره را به سمت ناحیه ی با شدت بالاتر باریکه نور می کشد. در شکل ۷ (الف)، نمونه ای از هدایت نوری ذره در یک موجبر شیار دار نشان داده شده است. در این شکل ذره در اثر نیروی گرادیان ناشی میدان محو شونده شیار موجبر به سمت کانل میکرو شاره کشیده می شود و با استفاده از نیروی گرادیان در امتداد کانل حاوی مایع حرکت می کند. در شکل ۷ (ب)، هدایت ذرات کوچک مانند DNA در امتداد کانل نشان داده شده است [۲۵].



شکل ۷: (الف) ترابرد اپتوفلویدیک ذره در موجبر شیار دار (ب) هدایت ذرات کوچک مانند DNA در امتداد کانل حاوی شاره [۲۲].

نتیجه گیری و چشم انداز

اپتوفلویدیک، بستر مناسبی برای طراحی و ساخت افزاره های نوری قابل انعطاف و سازگار فراهم می کند. با بهره گیری از ویژگی های شاره ها در مقیاس میکرو متر و نانو متر، قابلیت تنظیم پذیری افزاره های نوری افزایش می یابد. در این مقاله مثال هایی از کاربرد های متعدد اپتوفلویدیک، مانند چشمه های لیزر رزینهای، تداخل سنج تک باریکه ای، افزاره های اپتوفلویدیک موجبر نور کند بلور فوتونی و ترابرد ذرات نانو مقیاس معرفی شد. با طراحی های مناسب از تلفیق شاره ها و افزاره های نوری، نوید تولید افزاره های نوری فشرده با قابلیت کنترل، تنظیم و باز پیکر بندی برای سیستم های واکافت [، مخابرات نوری، تراشه های فوتونیک و تولید انرژی در آینده ای نزدیک را می دهد.

منابع:

- [۱] D. Psaltis, et al. "Developing optofluidic technology through the fusion of microfluidics and optics", Nature ۴۴۲, ۳۸۱-۳۸۶ (۲۰۰۶).
- [۲] C. Monat, et al. "Integrated optofluidics: A new river of light", Nature Photon. ۱, ۱۰۶-۱۱۴ (۲۰۰۷).
- [۳] C. Grillet, et al. "Reconfigurable photonic crystal circuits", Laser Photon. Rev. ۴, ۱۹۲-۲۰۴ (۲۰۱۰).
- [۴] M. Ebnali-Heidari, et al. "Dispersion engineering of slow light photonic crystal waveguides using microfluidic infiltration." Optics express ۱۷,۳ ۱۶۲۸-۱۶۳۵ (۲۰۰۹).
- [۵] C. Monat, et al. "Slow light enhancement of nonlinear effects in silicon engineered photonic crystal waveguides". Optics express, ۱۷(۴), ۲۹۴۴-۲۹۵۳ (۲۰۰۹).
- [۶] S. Svanberg, Atomic and Molecular Spectroscopy-Basic Aspects and Practical Applications (Heidelberg, Germany:Springer-Verlag, ۲۰۰۴).
- [۷] B., Helbo, A. Kristensen, A. and A. Menon, "A micro-cavity fluidic dye laser", J. Micromech. Microeng. ۱۳, ۳۰۷-۳۱۱ (۲۰۰۳).
- [۸] Z. Li, Z., Zhang, , A. Scherer and D. Psaltis, "Mechanically tunable optofluidic distributed feedback dye laser", Opt. Express ۶, ۱۰۴۹۴-۱۰۴۹۹ (۲۰۰۶).
- [۹] S. I. Shopova, H. Y. Zhou, X. D. Fan and P.Zhang, "Optofluidic ring resonator based dye laser", Appl. Phys. Lett. ۹۰, ۲۲۱۱۰۱ (۲۰۰۷).
- [۱۰] J. C., Galas, J., Torres, M., Belotti, Q. Kou and Y.Chen, "Microfluidic tunable dye laser with integrated mixer and ring resonator", Appl. Phys. Lett. ۸۶, ۲۶۴۱۰۱ (۲۰۰۵).
- [۱۱] S. K. Y. Tang, et al. "A multi-color fast-switching microfluidic droplet dye laser Lab Chip", ۹, ۲۷۶۷-۲۷۷۱ (۲۰۰۹).
- [۱۲] E. F., Borra, "The liquid-mirror telescope as a viable astronomical tool", Journal of the Royal Astronomical Society of Canada, ۲۴۵-۲۵۶ (۱۹۸۲).
- [۱۳] M. Ye, B. Wang, and S. Sato, "Liquid crystal lens with focus movable in focal plane", Optics Communications, ۲۵۹, ۷۱۰-۷۲۲, ۲۰۰۶.
- [۱۴] C. Grillet, et al. "Compact tunable microfluidic interferometer", Opt. Express ۱۲, ۵۴۴۰-۵۴۴۷ (۲۰۰۴).
- [۱۵] P. Domachuk, H. C. Nguyen, and B. J. Eggleton, "Transverse probed microfluidic switchable photonic crystal fiber devices", IEEE Photon. Technol. Lett., ۱۶, ۱۹۰۰-۱۹۰۲ (۲۰۰۴).
- [۱۶] P.Russell, "Photonic crystal fiber", Science ۲۹۹, ۳۵۸-۳۶۲ (۲۰۰۳).

[۱۸] J. D., Joannopoulos, R. D. Meade, and J. N. Winn, Photonic Crystals: Molding the Flow of Light (Princeton Univ., ۱۹۹۵).

[۱۹] S, Mandal, D. Erickson. "Nanoscale optofluidic sensor arrays." Optics Express ۱۶,۳: ۱۶۲۳-۱۶۳۱ (۲۰۰۸).

[۲۰] M. Ebnali-Heidari, C. Grillet, C. Monat, and B. J. Eggleton, "Dispersion engineering of slow light photonic crystal waveguides using microfluidic infiltration," Opt. Express ۱۷, ۱۶۲۸-۱۶۳۵ (۲۰۰۹).

[۲۱] Casas-Bedoya, Alvaro, et al. "Slow-light dispersion engineering of photonic crystal waveguides using selective microfluidic infiltration". Optics letters, ۳۷(۲۰), ۴۲۱۵-۴۲۱۷(۲۰۱۲).

[۲۲] A. Ebnali-Heidari, C. Prokop, M. Ebnali-Heidari, and C. Karnutsch, "A Proposal for Loss Engineering in Slow-Light Photonic Crystal Waveguides," J. Lightwave Technol., ۳۳(۹), ۱۹۰۵-۱۹۱۲ (۲۰۱۵).

[۲۳] F Hosseinibalam, S Hassanzadeh, A Ebnali-Heidari, and C Karnutsch, "Design of an On-Chip Absorption Spectrometer Using Optofluidic Slotted Photonic Crystal", IEEE Photonics Journal, ۴(۵), ۱۴۸۴-۱۴۹۴, (۲۰۱۲).

[۲۴] A Ebnali-Heidari et al. "Designing tunable microstructure . ctroscopic gas sensor using optofluidic hollow-core photonic crystal fibre," IEEE J. Quantum Elect., ۵۰, ۹۴۳-۹۵۰, (۲۰۱۴).

[۲۵] Yang, A. H. J. et al. "Optical manipulation of nanoparticles and biomolecules insub-wavelength slot waveguides". Nature ۴۵۷, ۷۱-۷۵ (۲۰۰۹).

[۲۶] D, Erickson, and S, MandalYang" "Nanoscale optofluidic devices for molecular detection." U.S. Patent ۹,۴۱۰,۸۹۲, issued August ۹, (۲۰۱۶).

