Archive of SID

فناوری اپتوفلویدیک[۱]

علی اکبر ابن علی حیدری[۱]

چکیده

تلفیق شاره‌ها و نور از دیر باز مورد توجه پژوهشگران بوده است. تلسکوپ های آینه‌ای مایع و موجبرهای 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 میکرومتر و نانومتر، حوزه پژوهشی جدیدی با عنوان اپتوفلودیک[۲] ایجاد شده است. استفاده از روش ها و ابزارهای مبتنی بر اپتوفلودیک منجر به ایجاد افزاره های فوری فشرده و قابل تنظیم می شود. در چنین سیستم هایی از تلفیق شاره با نور و برهم کنش بین آن ها، برای بسیاری از کاربردها استفاده می شود. در سیستم‌های اپتوفلودیک، ویژگی های شاره، سبب تولید ادوات میکرو فوتونیک قابل انعطاف، تنظیم پذیر با قابلیت بازپیکربندی می شود.

واژگان کلیدی: فناوری‌های اپتوفلویدیک، تراشه فوتونیکی، نورکند.

[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

www.SID.ir

Archive of SID

مقدمه

تلفیق شاره ها و نور از دیر باز مورد توجه پژوهشگران بوده است. تلسکوپ های آینه‌ای مایع و موجبر های نوری با هسته مایع که بالغ بر صد سال پیش توسع 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[۲ ،۱]. از ویژگی‌های منحصر به‌فرد شاره‌ها به‌ویژه در مقیاس‌های میکرومتر و نانومتر برای طراحی و ساخت افزاره‌های جدید نوری استفاده می‌شود که به برخی از این ویژگی‌ها از جمله، توانایی تغییر ویژگی‌های 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 شکت قابل کنترل توسط خاصیت پخش در شاره های نفوذ پذیر و استفاد از شاره به عنوان محیط ترابرد، می‌توان 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 فلورسانی- پراکندگی رامان- آشکارسازی بدون برچسب وغیره، جایگزیدگی نور در مقیاس مورد نیاز و استفاده از نور برای به دام انداختن و هدایت ذرات معلق در مایع، است. شاره‌ها به‌دلیل دارا بودن ضریب شکست بالا، تحرک‌پذیری و قابلیت انعطاف‌پذیری در فازهای مایع- مایع یا هوا- مایع ابزار مناسبی در طراحی ابزارهای نوری قابل تنظیم، انعطاف و باز پیکربندی هستند. ابزارهای مبتنی بر شاره‌های نوری با انعطاف پذیری بالا، از قبیل پالاینده‌های نوری، سوییچ های نوری، موجبرهای نوری با هسته و لایه پوششی مایع، لیزرها و چشمه‌های نوری کوک پذیر ساخته شده اند. با استفاده از ایده اپتوفلودیک چندین ابزار شامل مولفه‌های میکروشاره و نور بر روی یک تراشه مجتمع می شود. مولفه‌های نوری از قبیل منبع نور، لنزها، موجبرها و حسگرها که پیش از این به طور مجزا ساخته می‌شدند، اکنون می‌توانند در یک بستر متمرکز شوند که امروزه با عنوان آزمایشگاه روی تراشه شناخته می‌شود. 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، سوییچ های نوری و حسگرهای نوری و غیره ایجاد کرد [۵-۳].

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

افزاره‌های تنظیم پذیر اپتوفلودیک

یکی از ویژگی های مهم افزاره‌های اپتوفلودیک، تنظیم پذیری با استفاده از انواع سازکارهای فیزیکی است. افزاره‌های اپتوفلودیک نقش اساسی را در سیستم‌های نوری نسل آینده برای استفاده در بیولوژی ، پزشکی ، مخابرات و پردازش اطلاعات، ایفا خواهند کرد. یکی از مزایای مهم ترکیب فناوری‌های میکروشاره ها با فوتونیک، این است که با ترکیب این دو فناوری، طراحی و ساخت افزاره‌های اپتوفلودیک سازگار و قابل تنظیم امکان پذیر است. دینامیک شاره‌ها درمقیاس میکرومتر نقش اساسی را در درک رفتار سیستم های اپتوفلودیک ایفا می‌کند. دینامیک میکروشاره‌ها مانند شاره در مقیاس ماکروسکوپی از معادلات ناویر- استوکس[۱] پیروی می کنند. میکرو شاره دارای چند ویژگی مهم هستند که از آن‌ها برای طراحی و ساخت افزاره‌های اپتوفلودیک با قابلیت انعطاف پذیری و تنظیم پذیری استفاده می‌شود[۲]. یکی از مشخصه‌های شاره ها در مقیاس میکرومتر، شارش لایه‌ای[۲] است. شارش لایه‌ای سبب شکل گیری

[۱] Navier-Stoks
[۲] Laminar flow

www.SID.ir

Archive of SID

مرزهای هموار انعطاف پذیر بین شاره‌ها می شود 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، می توان به مایعی با ضریب شکست مورد نظر دست یافت. علاوه براین، از ترکیب محیط بهره یا جذب در مایع ها، برای ساخت افزاره‌های نوری برای کنترل جذب یا بهره استفاده می شود. رهیافت مرسوم برای تنظیم افزاره‌های اپتوفلودیک، 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 می آید. مدوله شدگی دامنه به طور مستقیم از طریق تغییر در بخش موهومی ضریب شکست و یا به طور غیر مستقیم از طریق روش های تداخل سنجی ایجاد می شود. علاوه بر مدوله شدگی ضریب شکست، تغییر شکل هندسی ساختار نیز موجب تنظیم افزاره‌های اپتوفلودیک می شود، که این نیزموجب تغییر توزیع ضریب شکست موثرمحیط می شود. بسیاری از قابلیت های افزاره‌های اپتوفلودیک توسط شکل هندسی مرزهای بین جامد – جامد ، جامد– مایع، جامد– گاز، مایع– گاز یا مایع – مایع تعیین می‌شود[۲ ،۱]. برخی از افزاره‌های اپتوفلودیک از مواد کشسان نرم مانند پلیمرها ساخته می شوند. تغییر شکل این مواد کشسان باعث تغییر یا جابجایی مرزها و در نتیجه سبب تنظیم افزاره های نوری می شود.

کاربردهای اپتوفلودیک تنها به ادوات نوری قابل تنظیم محدود نمی شود بلکه در آشکار سازی نوری تقویت شده با قابلیت های زیاد در زیست فناوری، علوم زیستی ، بیو پزشکی و غیره توسعه داده شده‌اند. در افزاره های نوری که از اپتوفلودیک بهره می‌گیرند، سهم‌های اپتوفلودیک به طور معمول در سه رده کلی قرار می گیرند: چشمه های نور که از شاره به عنوان محیط بهره استفاده می شود، افزاره‌های نوری که در آن‌ها از شاره برای تنظیم پذیری یا پیکربندی پاسخ نوری این افزاره ها استفاده می شود و حسگرهای اپتوفلودیک که در این ساختارها از محیط شاره برای هدایت و کنترل مسیر ذرات یا آشکار سازی محیط شاره استفاده می‌شود[۲ ،۱]. در ادامه به نمونه هایی از پژوهش های انجام شده در قالب این رده بندی ها اشاره می شود.

چشمه های نور لیزر اپتوفلودیک

نور لیزر، به دلیل همدوسی و شدت طیفی زیاد به عنوان یک چشمه نوری مطلوب محسوب می شود. استفاده از اپتوفلودیک، روش‌های نوینی را برای ایجاد نور لیزر فراهم می آورد. در زمینه اپتوفلودیک، 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 چالش های اساسی است. ادغام گازها و مایع‌ها با تراشه‌های نوری قادر به کوچک سازی چشمه های 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 مولکول های رزینه ای۲ کوک پذیر محلول در یک مایع است. تعدادی از مولکول های رزینه ای، منحنی‌های بهره پهنی در گستره مرئی طیف دارند. محلول بهره حاوی مولکول رزینه‌ای از طریق میکروکانل ها به طور پیوسته به جایگاه مورد نظر در ناحیه کاواک منتقل می‌شود و پس از بر هم کنش با مدهای نور، گذارهای مربوط به عمل لیزری انجام می شود و نور لیزر ایجاد می شود.

در شکل .۱، طرح واره‌ای از دونمونه از چشمه‌های لیزر رنگی اپتوفلودیک نشان داده شده است. در شکل .۱ (الف)، مولکول های رزینه‌ای رودامین ۶G محلول در مایع (متانول یا اتیلن گلیکول) برای تقویت نور از طریق میکرو کانال درون یک کاواک منتقل می شوند. در این شکل، کاواک لیزری از دو

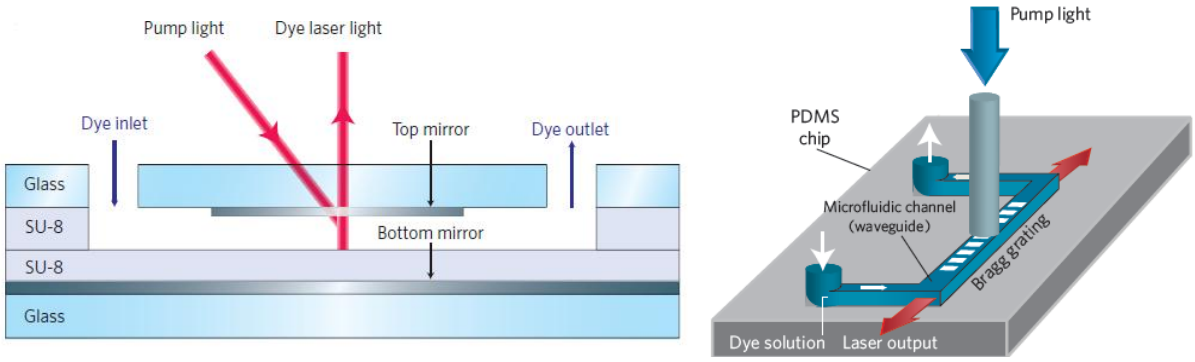
---

۱ Polydimethylsiloxane
۲ Dye

www.SID.ir

Archive of SID

لایه فلزی قرار داده شده در بالا و پائین کانال ایجاد شده است. انرژی دمش لازم توسط یک چشمه لیزر بیرونی انجام می‌شود. عمل لیزری به صورت مد پالسی و توان آستانه نسبتا بالا ($۳۰\ MW\ cm^{-۲}$) است[۸]. نمونه تکامل یافته تر از لیزرهای رنگی اپتوفلودیک، لیزر رنگی بازخورد توزیعی شده (DFB)[۱] است که به صورت طرح وار در شکل ۱. (ب)، نشان داده شده است[۹]. در این شکل، کانال 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 می کند به درون میکرو کانال منتقل می‌شود. عمل دمش لیزر توسط یک لیزر بیرونی انجام می شود. بازخورد ایجاد شده توسط توری براگ سبب نشر لیزری در امتداد میکرو کانال می‌شود . با ساختار، چشمه لیزری اپتوفلودیک تک مدی با توان آستانه پایین‌تر ($۰.۱۳\ MWcm^{-۲}$) از طراحی‌های پیشین ایجاد می‌شود. علاوه به نمونه-های اشاره شده، انواع پیکربندی های دیگری از لیزرهای اپتوفلودیک در سال های اخیر طراحی و ساخته شده اند. از جمله می توان به لیزر های اپتوفلودیک میکرو کاواک ، فابری پرو و غیره اشاره کرد[۱۲-۱۰].



شکل ۱۰: طرح واره‌ای از لیزر اپتوفلودیک (الف) لیزر کاواک عمودی [۸] لیزر بازخورد توزیع شده با دمش عمودی [۹].

افزاره های نوری قابل تنظیم مبتنی بر اپتوفلودیک:

مرز های هموار قابل کنترل بین شاره های مخلوط نشدنی

تنظیم پذیری و قابلیت کنترل ویژگی های نوری افزاره‌های فوتونیکی نسل جدید، از اهمیت به سزایی برخوردار است. زیرا چنین قابلیت هایی منجر به تولید افزاره‌های فوتونیکی فشرده با کارایی و عملکرد بالا و سودمندی سرمایه گذاری به لحاظ صرفه‌جویی در وقت و مواد مصرفی می‌شود. افزاره فوتونیکی جامد، قابلیت کنترل کمتری نسبت به افزاره های نوری اپتوفلودیک دارند. با جایگزینی مایع به جای بستر جامد، افزارهای اپتوفلودیک قابلیت انعطاف پذیری و کنترل بیشتری می یابند. 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 می شود. همچنین ، با تغییر شکل و یا جابجایی

[۱] Distributed feedback

www.SID.ir

Archive of SID

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

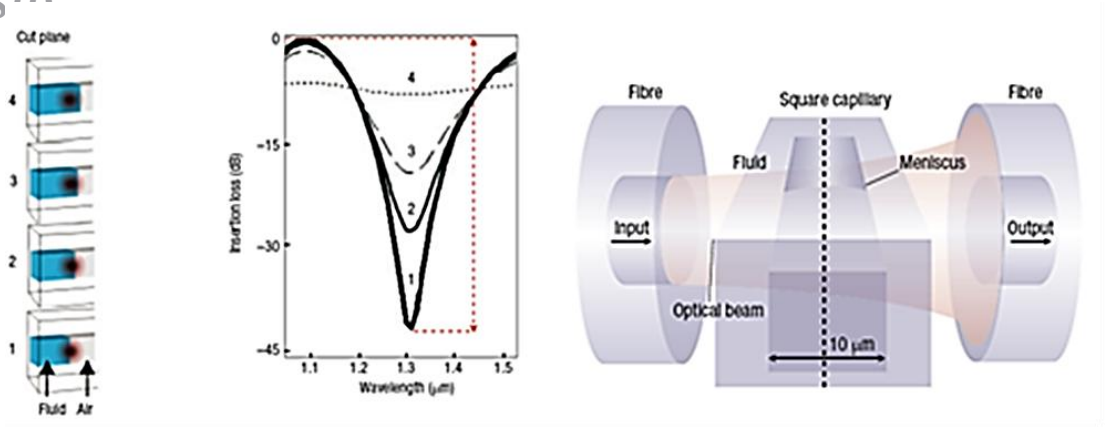
مرزهای شاره ها روشی موثر و مقرون به صرفه در ایجاد سطح های هموار نوری است، که از مدت ها پیش شناخته شده است. به دلیل کشش سطحی، مرز بین دو شاره غیر قابل ا ختلاط، یکنواخت و هموار است. آینه های تلسکوپ مایع که با حرکت دورانی ظروف حاوی جیوه ایجاد می شوند، بر این اصل استوار هستند[۱۳]. در مقیاس کوچک تر، ساخت عدسی ها ی اپتوفلودیک نیز بر این استوار است[۱۴]. در هر دو مورد از تغییر مناسب انحنای 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 سنج تک باریکه ای و بسیاری دیگر اشاره کرد. علاوه براین، 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 بر خی از این افزاره های نوری اپتوفلودیک مرور می شوند.

تداخل سنج تک باریکه‌ای اپتوفلودیک

در یک تداخل سنج 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 سنج تک باریکه ای نشان داده شده است[۲،۱۵]. در این مرز بین آب- هوا در درون لوله مویین مربعی از جنس سیلیکا بین دو فیبر تک مدی قرار گرفته است. در این تداخل سنج تک باریکه‌ای، 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 د رهنگام 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 افرازه 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 سنج تک باریکه‌ای سبب می شود که پاسخ مدوله شده تداخل سنج در طول های بسیار فشرده در حدود $۴۰\mu m$ ایجاد شود. در شکل . ۲ (ب) طیف تراگسیل و چگونگی تنظیم پذیری تداخل سنج نشان داده شده است. با توجه به طیف تراگسیل دیده می‌شود با جابجایی مرز بین آب- هوا نسبت مرکز باریکه، تراگسیل افزاره تغییر می کند.

www.SID.ir

Archive of SID



(ج) (ب) (الف)

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

تزریق شاره در ساختار های بلور فوتونی

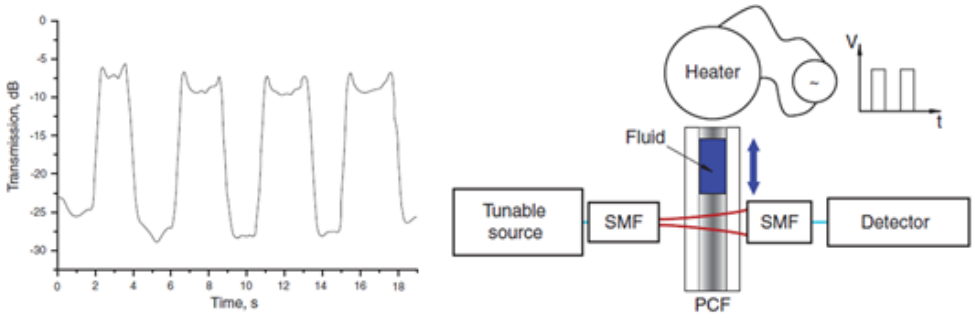
ساختارهای فوتونیکی مانند فیبرهای بلور فوتونی یا بلورهای فوتونی با ترکیب میکروشاره ها بستر مناسبی برای بسیاری از کاربردها نظیر، کاواک ها ، موجبرها، سویچ های نوری و غیره را فراهم می‌آورند. ترکیب این ساختارها با میکروشاره دارای مزیت های مهمی هستند که به برخی از آن ها اشاره می-شود. ۱- وجود حفره های هوا در این ساختارها سبب می شود تا هر نوع شاره (گاز یا مایع) به سهولت در درون آن ها تزریق شود. ۲ – ویژگی‌های نوری این ساختار ها به ضریب شکست حفره ها بستگی دارد. ۳- با مهندسی پاشندگی در این ساختار ها، 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 سوییچ نوری، موجبرهای 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 گستره‌ای از طیف دارای گاف نواری است که در این گستره از طیف، تراگسیل صفر است. با تزریق شاره در حفره های فیبر بلورفوتونی تضاد ضریب شکست شبکه بلوری ساختار تغییر می‌کند در نتیجه ویژگی طیفی فیبربلورفوتونی تغییر میکند[۱۷]. در شکل .۳ (الف)، طرح واره ای از سویچ نوری فیبر بلورفوتونی تزریق شده با شاره نشان داده شده است. فیبر بلور فوتونی با حجم کوچکی از روغن با ضریب شکست تقریبا یکسان با ضریب شکست سیلیکا، پر شده است. هنگامی که باریکه نور در جهت عرضی به فیبر بلور فوتونی می‌تابد، گاف نواری ناپدید می‌شود. 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 تراگسیل سویچ نوری فیبر بلورفوتونی اپتوفلودیک در شکل .۳ (ب)،

www.SID.ir

Archive of SID

نشان داده شده است. پاسخ عرضی افزاره با نسبت تضعیف $۲۰dB$ بین دو روشن و خاموش سویچ می شود. مقیاس زمانی پاسخ دوره ای متناسب با تحریک گرمایی افزاره به چندین ثانیه محدود شده است.



(ب) (الف)

شکل. ۳: (الف) طرح واره ای از سویچ نوری اپتوفلودیک فیبر بلورفوتونی (ب) طیف تراگسیل افزاره بین دو حالت روشن و خاموش[۱۷ ,۱۶].

تزریق میکروشاره در بلورهای فوتونی تیغه‌ای[۱] بستر مناسبی برای ساخت مدارهای مجتمع فوتونیکی 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 می شوند[۱۸]. مولفه‌های نوری متعددی از جمله لیزرها، موجبرها ، حسگر ها و غیره با استفاده از ایجاد نقص در بلورهای فوتونی تیغه‌ای ایجاد شده اند[۲۴-۱۹]. نقص ها 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 میکروکاواک های 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 می گیرد و تغییر دائمی در ویژگی های 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 می کند. 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، می تواند انجام شود. همچنین تغییر ایجاد شده توسط تزریق شاره به دلیل خاصیت روان بودن شاره ، قابل برگشت و تعویض با شاره‌های هستند که سبب بازپیکر بندی افزاره نوری می شود. علاوه بر این، با این راهکار با انتخاب مناسب ضریب شکست شاره تزریق شده، قابلیت انعطاف پذیری و کنترل افزاره های نوری می یابد. تاکنون، پژوهش هایی در ارتباط با تزریق شاره در بلورهای فوتونی تیغه‌ای انجام گرفته است ، که به برخی از آن ها اشاره خواهد شد.

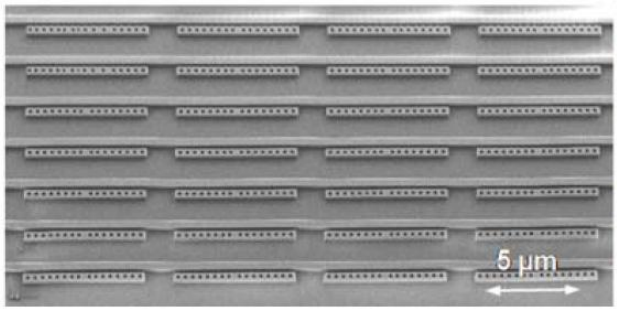
به عنوان مثال، در شکل. ۴ نمونه هایی از ساختارهای پالاینده (فیلتر) نوری اپتوفلودیک نشان داده شده است. در شکل. ۴ (الف)، آرایه‌ای از حسگرهای نوری تشدید کننده های بلور فوتونی یک بعدی در مجاورت موجبرها، نشان داده شده است[۱۹]. در این ساختار، طول موج تشدید هر کدام از میکروکاواک ها توسط ابعاد ساختار کنترل می‌شود و نور به طور موثر در میکروکاواک ها به دام می‌افتد. این علاوه بر استفاده از این ساختار به عنوان حسگر نوری، این ساختار می تواند به عنوان پالاینده نور و انتخاب سطول موج های مورد نظر برای کاربردهای معین مورد استفاده قرار گیرد. این ساختار به عنوان

[۱] Slab photonic crystals

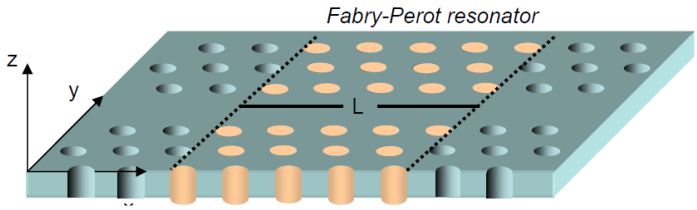
www.SID.ir

Archive of SID

حسگرهای موازی فشرده برای آشکارسازی هم‌زمان چندین شاره که می توانند حامل ویروس‌ها، سلول‌های سرطانی و مواد شیمیایی باشند، استفاده می‌شود. هر کدام از میکرو کاواک ها در مجاورت موجبرها با شاره های متفاوت تزریق می‌شوند، از جابجایی طول موج تشدید میکروکاواک ها می توان ماده مورد نظر را شناسایی کرد. علاوه بر این، این ساختار می تواند به عنوان پالاینده نور و انتخاب طول موج های 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 حفره ها ایجاد شده است . با تزریق شاره در حفره های انتخاب شده موجبر یک مد کاواک ایجاد می‌شود. دلیل ایجاد مد کاواک این است که تزریق موضعی شاره در حفره های انتخاب شده سبب شکل گیری کاواک فابری- پرو می‌شود زیرا بخش های تزریق نشده کناری همانند آینه هایی با باز تابندگی زیاد عمل می کنند. مد کاواک ایجاد شده باعث محصور شدگی مد نور در درون کاواک می‌شود. این ساختار نیز همانند ساختار قبلی هم می تواند به عنوان پالاینده طول موج نور و هم می تواند به عنوان حسگر نوری به کار گرفته شود[۳] .



(الف)



(ب)

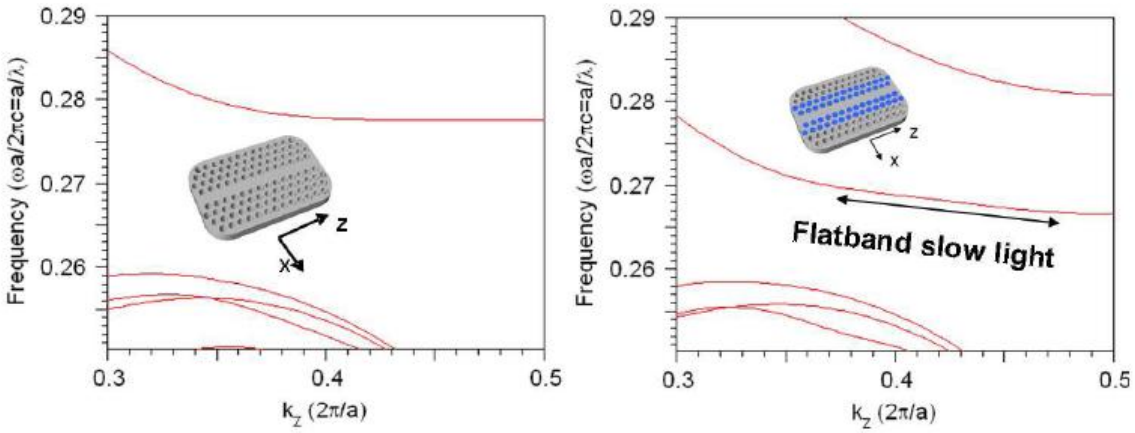
شکل .۴: (الف) آرایه‌ای از پالاینده ها و حسگرهای نوری اپتوفلودیک [۱۹] (ب) طرح واره‌ای از پالاینده ابرساختار بلور فوتونی تیغه‌ای اپتوفلودیک [۳].

یکی از ویژگی بارز رهیافت تزریق میکرو شاره در بلورهای فوتونی تیغه ای، مهندسی پاشندگی بلورهای فوتونی و ایجاد نور کند است. نور کند ایجاد شده در چنین ساختارهایی سبب افزایش برهم کنش نور و ماده می شود که برای کاربردهایی نظیر حسگری نوری و یا تقویت آثار غیر خطی استفاده می شود[۲۴-۲۰]. در شکل. ۵ (سمت راست)، یک موجبر بلور فوتونی اپتوفلودیک 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 حفره های انتخابی به منظور مهندسی پاشندگی و ایجاد نور کند در گستره قابل ملاحظه‌ای طیف تراگسیل صورت گرفته است. منحنی های 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 منحنی ها، دیده می شود که با تزریق شاره در

www.SID.ir

Archive of SID

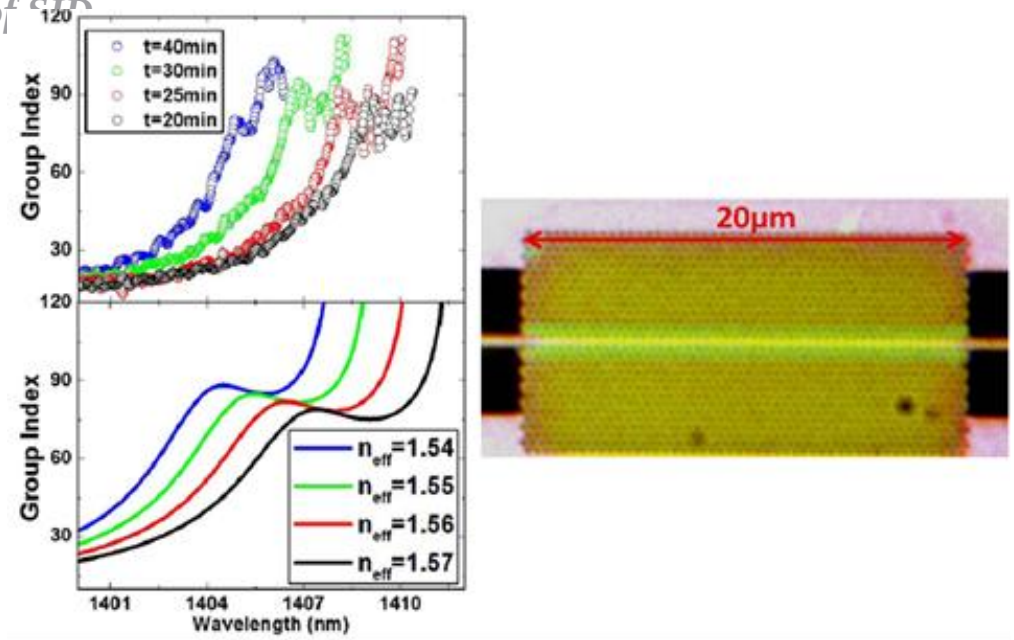
حفره های انتخاب شده، در دور از لبه نوار ناحیه نور کند با شیب ثابت ایجاد می شود. با تزریق شاره با ضریب شکست مناسب بسته به شعاع حفره‌های بلور فوتونی، سرعت گروه مد نور کند بین $\frac{c}{۲۰}$ تا $\frac{c}{۱۱۰}$ قابل کنترل است. در اینجا c سرعت نور در فضای آزاد است. در شکل .۶ (تصویر بالا)، تصویر میکروسکوپی از موجبر بلور فوتونی تزریق شده با شاره نشان داده شده است. طیف‌های 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 اپتوفلودیک (سمت راست) و موجبر معمولی تزریق نشده با شاره (سمت چپ) [۲۰].

www.SID.ir

Archive of SID



(ب) (الف)

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

هدایت و کنترل ذرات مبتنی بر اپتوفلودیک

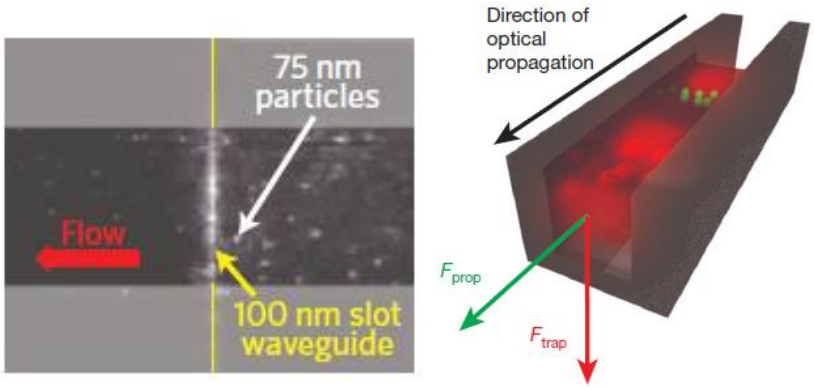
روش های نوری هدایت و دستکاری نوری ذرات نقش اساسی را در بهره برداری از میکرو شاره ها در میکرو سیستم ها و تراشه های فوتونیکی ایفا می کنند. روش های متعددی برای هدایت و کنترل ذرات با استفاده از نور وجود دارد. یکی از این روش ها، روش انبورک[۱] نوری است که در آن از باریکه های لیزری شدید و کانونی شده برای هدایت اجسام در گستره‌ی چندین میکرومتر تا چند صد نانومتر استفاده می‌شود. در روش انبورک نوری، باریکه های 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 محدودیت هایی زیادی هستند. به طور مثال برای به دام انداختن و هدایت مستقیم بسیاری از ذرات بیولوژیکی مانند ویروس های کوچک که معمولا 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، سازکارهای جدید را در علوم زیستی به ویژه تشخیص های شیمیایی و بیو پزشکی مبتنی بر واکافت و هدایت ذرات نانو و میکرو مقیاس در محیط شاره را فراهم می کند. در یک سیستم اپتوفلودیک، نیروی های ناشی از نور سبب حرکت ذرات در مسیر دلخواه و هدایت آن ها به محل مورد نظر می شود. انتقال تکانه از فوتون ها به ذرات در

[۱] Optical tweezing

www.SID.ir

Archive of SID

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)، نمونه‌ای 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 کانال میکرو شاره کشیده می شود و و با استفاده ازنیروی گرادیان در امتداد کانال حاوی مایع حرکت می‌کند. در شکل .۷ (ب)، هدایت ذرات کوچک مانند DNA در امتداد کانال نشان داده شده است[۲۵].



(ب) (الف)

شکل۷ : (الف) ترابرد اپتوفلودیک ذره در موجبر شیار دار (ب) هدایت ذرات کوچک مانند DNA در امتداد کانال حاوی شاره [۲۲].

نتیجه گیری و چشم انداز

اپتوفلودیک، بستر مناسبی برای طراحی و ساخت افزاره های نوری قابل انعطاف و سازگار فراهم می‌کند. 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 اپتوفلودیک، مانند چشمه-های لیزر رزینه‌ای، تداخل سنج تک باریکه‌ای، افزاره‌های اپتوفلودیک 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 فوتونیکی و تولید انرژی در آینده ای نزدیک را می‌دهد.

www.SID.ir

Archive of SID

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).

[۸] B., Helbo, A. Kristensen, A. and A. Menon, "A micro-cavity fluidic dye laser", J. Micromech. Microeng. ۱۳, ۳۰۷–۳۱۱ (۲۰۰۳).

[۹] Z. Li, Z., Zhang, , A. Scherer and D. Psaltis, "Mechanically tunable optofluidic distributed feedback dye laser", Opt. Express ۶, ۱۰۴۹۴–۱۰۴۹۹ (۲۰۰۶).

[۱۰] S. I. Shopova, H. Y. Zhou, X. D. Fan and P.Zhang, "Optofluidic ring resonator based dye laser", Appl. Phys. Lett. ۹۰, ۲۲۱۱۰۱ (۲۰۰۷).

[۱۱] 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).

[۱۲] S. K. Y. Tang, et al. "A multi-color fast-switching microfluidic droplet dye laser Lab Chip", ۹, ۲۷۶۷–۲۷۷۱ (۲۰۰۹).

[۱۳] E. F., Borra, "The liquid-mirror telescope as a viable astronomical tool", Journal of the Royal Astronomical Society of Canada, ۲۴۵-۲۵۶ (۱۹۸۲).

[۱۴] M. Ye, B. Wang, and S. Sato, "Liquid crystal lens with focus movable in focal plane", Optics Communications, ۲۵۹, ۷۱۰-۷۲۲, ۲۰۰۶.

[۱۵] C. Grillet, et al. "Compact tunable microfluidic interferometer", Opt. Express ۱۲, ۵۴۴۰–۵۴۴۷ (۲۰۰۴).

[۱۶] 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).

[۱۷] P.Russell, "Photonic crystal fiber", Science ۲۹۹, ۳۵۸–۳۶۲ (۲۰۰۳).

www.SID.ir

Archive of SID

[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 spectroscopic 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).

www.SID.ir