

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه تربیت مدرس شهید رجایی

کریستال‌های فوتونی

افزارها، فیبرها، نانوساختارها و حسگرها

تألیف و تصنیف:

دکتر سعید علیائی

استاد دانشگاه تربیت مدرس شهید رجایی

احمد محب‌زاده بهابادی

با مقدمه‌ای از: دکتر نصرت‌ا... گرانپایه

| | |
|----------------------|---|
| سر شناسنامه | : علیائی، سعید، ۱۳۵۲- |
| عنوان و نام پدید آور | : کریستال های فوتونی افزارها، فیبرها، نانوساختارها و حسگرها / تألیف و تصنیف. سعید علیائی، احمد محب زاده بهابادی |
| مشخصات نشر | : تهران: دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی، ۱۳۹۵. |
| مشخصات ظاهری | : ح، ۲۶۶ ص.: مصور، جدول، نمودار. |
| شابک | : ۹۷۸-۶۰۰-۶۵۹۴-۶۴-۴ |
| وضعیت فهرست نویسی | : فیپا |
| یادداشت | : واژه نامه. |
| یادداشت | : نمایه. |
| موضوع | : فوتونیک |
| موضوع | : Photonics |
| موضوع | : لیزر |
| موضوع | : Lasers |
| شناسه افزوده | : محب زاده بهابادی، احمد، ۱۳۶۶- |
| شناسه افزوده | : دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی |
| شناسه افزوده | : Shahid Rajaei Teacher Training University |
| رده بندی کنگره | : TA ۱۵۲۰/ع۸۷۴ ۱۳۹۵ |
| رده بندی دیویی | : ۶۲۱/۳۶ |
| شماره کتابشناسی ملی | : ۴۲۴۹۵۰۱ |



دانشگاه تربیت دبیر رجائی

| | |
|-------------------------|--|
| عنوان | : کریستال های فوتونی؛ افزارها، فیبرها، نانوساختارها و حسگرها |
| تألیف و تصنیف | : دکتر سعید علیائی، استاد دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی، احمد محب زاده بهابادی |
| ویراستار علمی | : دکتر نصرتا... گرانیپه |
| ویراستار ادبی | : عاطفه نجیبی |
| چاپ اول | : بهار ۱۳۹۵ |
| چاپ دوم | : بهار ۱۳۹۷ |
| انتشارات | : دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی |
| لبتوگرافی | : فراتقش |
| چاپ | : شریف |
| طراح جلد | : صابر یحیی پور |
| ناظر چاپ | : محمد معتمدی نژاد |
| صفحه آرا | : عاطفه نجیبی |
| کارشناسان | : نیره فیروزی/ طاهره کیا/ علی رضایی اهوانویی |
| شمارگان | : ۵۰۰ جلد |
| قیمت | : ۲۰۰,۰۰۰ ریال |
| شابک | : ۹۷۸-۶۰۰-۶۵۹۴-۶۴-۴ |
| ISBN: 978-600-6594-64-4 | |

کلیه حقوق این اثر برای مؤلفین و مترجمین و دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی محفوظ است.
 نشانی: تهران، لویزان - کد پستی ۱۵۸۱۱-۱۶۷۸۸ - صندوق پستی ۱۶۳ - ۱۶۷۸۵ - تلفن: (۲۶۳۲) ۹ - ۲۲۹۷۰۰۶۰، ۲۲۹۷۰۰۷۰
 نامبر: ۲۲۹۷۰۰۰۳، پست الکترونیکی: Publish@sru.ac.ir، وب سایت: http://Publish.sru.ac.ir

تقدیم به

همسرم

و پسر، آرتین

از طرف سعید علیانی

تقدیم به

شادی بخش زندگیم،

دختر دلبندم، حانیه

از طرف احمد محب زاده بهابادی

پیش‌گفتار ویراستار

«آب^۱»، فیزیک‌دان، دانشمند اپتیکی، کارآفرین، و مصلح اجتماعی آلمانی، به همراه «شات^۲» شیمیدان و متخصص شیشه، و «زایس^۳»، طراح و سازنده افزاره‌های اپتیکی، بنیاد تولید افزاره‌های اپتیکی نوین را بنا نهاده بودند. آب در سال ۱۸۷۳ میلادی، اعلام نمود که وضوح افزاره‌های اپتیکی چون تلسکوپ، میکروسکوپ، و ... ارتباطی با کیفیت افزاره‌های ساخته شده نداشته، با «پراش نور^۴» محدود می‌شود، که در واقع به طول موج نور و گشودگی عددی وسیله وابسته است. مفهوم این عبارت این بود که به‌عنوان مثال میکروسکوپ نمی‌تواند دو ذره با فاصله کم‌تر از نصف حاصل‌ضرب طول موج نور و گشودگی عددی عدسی را از یک‌دیگر تمیز دهد. این اصل که به «حد پراش^۵ افزاره‌ها» موسوم شد، تا یک قرن بدون کوچک‌ترین شکی مورد احترام و پیروی بود.

در سال ۱۹۸۷، یابلونوویچ^۶ در مقاله‌ای در دوم ژوئن و جان^۷ در ۱۸ مه، کریستال‌های فوتونی را معرفی کردند. کریستال‌های فوتونی، به‌خصوص یک بعدی آن از سال ۱۸۸۷ مورد مطالعه قرار گرفته‌بودند، ولی عبارت «کریستال‌های فوتونی» برای اولین بار توسط یابلونوویچ مطرح شد. کریستال فوتونی از ساختار متناوب عایق یا رسانا-عایق تشکیل می‌شود. همان‌طور که کریستال‌های نیم‌رسانا به خاطر متناوب بودن پتانسیل الکتریکی، بر حرکت الکترون‌ها تاثیر می‌گذارند، کریستال‌های فوتونی همین وضعیت را نسبت به حرکت فوتون‌ها دارند. این مشابهت نتیجه مشابهت معادله شرودینگر در فیزیک حالت جامد و معادله هلم‌هولتز در انتشار میدان الکترومغناطیسی است. ضریب شکست در معادله هلم‌هولتز، همان نقش پتانسیل الکتریکی در معادله شرودینگر را بازی می‌کند. فوتون‌ها (معادل ذره‌ای امواج الکترومغناطیسی) بسته به طول موجشان می‌توانند از درون کریستال‌های فوتونی عبور کنند یا بازتاب شوند. محدوده طول موج‌هایی که اجازه عبور ندارند را باند ممنوعه فوتونی می‌نامند (شبهه باند انرژی ممنوعه

¹ Ernst Karl Abbe (Jan. 23, 1840 – Jan. 14, 1905)

² Friedrich Otto Schott (Dec. 17, 1851 – Aug. 27, 1935)

³ Carl Zeiss (Sept. 11, 1816 – Dec. 3, 1888)

⁴ Light Diffraction

⁵ Diffraction limit

⁶ Eli Yablonovitch (Dec. 15, 1946, Austria)

⁷ Sajeew John (1957, India)

الکترونی در نیم‌رساناها). عدم انتشار نور در باند ممنوعه نشان داد که می‌توان نور را تا حد بسیار کم‌تر از حد پراش متمرکز کرد. در شرایطی که در علم الکترونیک ابعاد مدارهای مجتمع روز به روز کوچک‌تر می‌شد، علم فوتونیک با محدودیت حد پراش افزارها روبه‌رو بود، که پیدایش کریستال‌های فوتونی در کنار سایر کشفیات هم‌چون متاماده‌ها^۱ توسط بوز^۲ و ویسلاگو^۳، پلاسمونیک توسط پاین^۴ و بوهم^۵، و گرافین توسط گایم^۶، نووژلاو^۷، و همکاران این محدودیت را برای افزارهای نوری از بین برد. پژوهش‌ها در زمینه رفع مشکل‌های کریستال فوتونی، متاماده، پلاسمونیک، و گرافین در جریان است و در آینده‌ای نزدیک شاهد طراحی و ساخت افزارهای نوری در زیر حد پراش و مدارهای مجتمع فوتونیک خواهیم بود.

کتاب «کریستال‌های فوتونی: افزارها، فیبرها، نانوساختارها، و حسگرها» توسط همکار گرامی جناب آقای دکتر سعید علیائی و مهندس احمد محب‌زاده به‌ببادی در ۱۱ فصل تهیه شده است. در دو فصل اولیه این کتاب به معرفی، مشخصه‌ها، و روش‌های تحلیل کریستال‌های فوتونی پرداخته شده است. در فصل سوم به‌بعد افزارهای کریستال فوتونی هم‌چون فیبرهای کریستال فوتونی هسته‌هوا و هسته جامد، حسگرهای کریستال فوتونی زیستی، فشار، جابه‌جایی، و گاز مبتنی بر کریستال‌های فوتونی و تشدیدگرهای کریستال فوتونی طراحی و تحلیل شده‌اند. یکی از مشخصه‌های جالب این کتاب این است که در فصل‌های کاربردی سوم به‌بعد کارهای تئوری دکتر علیائی نیز مطرح شده، که هماهنگی و انطباق خوبی با کارهای سایر گروه‌ها دارد. خصوصیت جالب دیگر کتاب استفاده از واژه‌های فارسی مورد تایید فرهنگستان زبان و ادب فارسی است. کتاب، مفاهیم علمی مرتبط با کریستال‌های فوتونی را به زبانی ساده طرح و تحلیل کرده، که استفاده از آن را به دانش‌پژوهان در کلیه مقطع‌های تحصیلی و پژوهشی توصیه می‌کنم.

نصرت‌ا... گرانیپه

دانشکده مهندسی برق

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

بهار ۱۳۹۵

1 Metamaterials

2 Jagadish Chandra Bose (Nov. 30, 1858, Bangladesh – Nov. 23 1937, India)

3 Victor Veselago (1929 Ukraine)

4 David Pines (June 8, 1924, USA)

5 David Bohm (Dec. 20, 1917, USA - Oct. 27, 1992, UK)

6 Sir Andre Konstantin Geim (Oct. 21, 1958, Russia)

7 Sir Konstantin Novoselov (Aug. 23, 1974, Russia)

پیش‌گفتار مولفان

کم‌تر از ۳۰ سال از معرفی کریستال‌های فوتونی دوبعدی نمی‌گذرد، اما سیر پرشتاب تحولات علمی و جذابیت این حوزه از علم باعث شده است در همین مدت انواع ساختارهای کریستال فوتونی طراحی، مدل‌سازی، شبیه‌سازی، بهینه‌سازی و ساخته شوند، طوری که همه‌روزه روش‌های جدیدی برای طراحی و ساخت انواع افزاره‌های منطقی، موج‌برها و حسگرهای کریستال فوتونی در نشریات معتبر روز دنیا گزارش می‌شود. این موضوع بر پتانسیل بالای این شاخه از علم گواهی دارد. این در حالی است که نخستین ساختار کریستال فوتونی دوبعدی در سال ۱۹۹۶ یعنی ۲۰ سال پیش ساخته شد. پیشرفت قابل توجه در این حوزه از علم باعث شده است که امیدها برای داشتن سامانه‌های تمام نوری و جایگزینی الکترون با فوتون، بیش از پیش ایجاد گردد.

با توجه به ضرورت پرداختن به این حوزه از علم، این کتاب قصد آن دارد تا در عین سادگی، به مباحث روز کریستال‌های فوتونی بپردازد. بدون شک پرداختن به همه زوایای این موضوع، از حوصله یک کتاب خارج است اما سعی شده است تا ضمن مروری بر مفاهیم و کلیات کریستال‌های فوتونی به شرح مختصری از فیبرها و موج‌برها، افزاره‌ها و نانو‌ساختارهای کریستال فوتونی پرداخته شود. عمده بحث این کتاب به حسگرهای کریستال فوتونی اشاره دارد که حاصل چند سال تدریس و پژوهش در آزمایشگاه تحقیقاتی نانوفوتونیک و اپتوالکترونیک^۱ است. حسگرهایی مانند حسگر زیستی، حسگر گاز، حسگر فشار و حسگر جابه‌جایی در این کتاب بررسی شده‌اند و در حد حوصله خواننده، به جزئیات طراحی و تشریح عملکرد آن‌ها پرداخته شده است. برای این منظور تاریخچه و مقدمه‌ای از کریستال‌های فوتونی را به همراه مفاهیم رایج آن‌ها در فصل نخست آورده‌ایم. شرحی بر روش‌های تحلیل و مروری اجمالی بر افزاره‌های کریستال فوتونی نیز به ترتیب در فصل‌های دوم و سوم آمده است. فصل چهارم به موضوع فیبرهای کریستال فوتونی می‌پردازد که در آن سعی شده است از سیر پیدایش این فیبرها تا انواع آن‌ها مورد بررسی قرار گیرد. کلیات حسگرهای کریستال فوتونی و مفاهیم رایج در آن‌ها در

¹ Nano-photonics and Optoelectronics Research Laboratory (NORLab)

فصل پنجم آمده است و پس از آن از فصل‌های ششم تا یازدهم انواع مختلفی از حسگرهای کریستال فوتونی بررسی می‌شود.

به منظور سهولت دسترسی خوانندگان محترم به معادل کلمه‌ها، علاوه بر قراردادن زیرنویس‌ها، در انتهای کتاب، واژه‌نامه فارسی به انگلیسی و انگلیسی به فارسی آورده شده است تا ضمن ایجاد متنی روان و با واژه‌های اصیل فارسی، امکان دسترسی سریع به اصل واژه نیز فراهم گردد. نمایه انتهای کتاب نیز سریع‌ترین راه برای دستیابی به مفاهیم، بدون صرف وقت زیاد برای جستجو در متن کتاب است.

در انتها جا دارد از کلیه عزیزانی که در تالیف این کتاب ما را یاری کرده‌اند تشکر کنیم. لازم است از داوران گرامی که این کتاب را بازبینی و با ارائه نکات و پیشنهادهای ارزنده، ما را در جهت بهبود نگارش علمی و محتوایی یاری رساندند تشکر و قدردانی نماییم. کتاب کریستال‌های فوتونی از مقدمه ارزشمند استاد ارجمند، جناب آقای دکتر نصرت‌الله گرانبایه عضو محترم هیات علمی دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی بهره‌مند گردید و ویراستاری علمی که توسط ایشان از محتوای کتاب انجام شد، بر غنای علمی آن دوچندان افزود. بنابراین جا دارد از دقت نظر و حوصله ایشان صمیمانه تشکر و قدردانی نماییم. از دوست عزیزمان، آقای مهندس صابر یحیی‌پور برای تهیه طرح جلد کتاب سپاسگزاریم. همچنین لازم است مراتب عمیق قدردانی خود را تقدیم سرکار خانم نجیبی کنیم که با حوصله فراوان، ویرایش ادبی متن را بر عهده گرفتند. و در انتها از کلیه دانش‌آموختگان آزمایشگاه تحقیقاتی نانوفوتونیک و اپتوالکترونیک به-خصوص خانم‌ها مهندس فهیمه تقی‌پور، مهندس سمیرا نجفقلی‌نژاد، مهندس عالییه نراقی و مهندس حمیده محسنی‌راد و آقایان مهندس علی‌اصغر دهقانی، مهندس مرتضی عزیزی و مهندس حسن آرمان سپاسگزاریم.

هرچند مطالب کتاب بارها و بارها مطالعه و ویرایش شده است، اما در داشتن اشکالات شکلی و مفهومی خالی از ایراد نیست. بدون شک دریافت پیشنهادهای ارزنده خوانندگان گرامی، ما را در بهبود سطح علمی و ادبی این مجموعه در ویرایش‌های بعدی یاری‌گر خواهد بود.

سعید علیائی^۱ و احمد محب‌زاده‌بهبادی

بهار ۱۳۹۵

¹ s_olyaee@sru.ac.ir

فهرست مطالب

فصل نخست: کریستال‌های فوتونی

| | |
|----|--|
| ۱ | ۱-۱ مقدمه |
| ۳ | ۲-۱ تاریخچه کریستال فوتونی |
| ۵ | ۳-۱ معرفی کریستال‌های فوتونی و خواص آن‌ها |
| ۶ | ۴-۱ انواع کریستال‌های فوتونی |
| ۶ | ۱-۴-۱ کریستال‌های فوتونی یک بعدی |
| ۸ | ۲-۴-۱ کریستال‌های فوتونی دو بعدی |
| ۱۰ | ۳-۴-۱ کریستال‌های فوتونی سه بعدی |
| ۱۰ | ۵-۱ ویژگی‌های ساختارهای کریستال فوتونی |
| ۱۱ | ۱-۵-۱ ویژگی‌های کریستال فوتونی یک‌بعدی |
| ۱۱ | ۲-۵-۱ ویژگی‌های کریستال فوتونی دوبعدی |
| ۱۲ | ۳-۵-۱ ویژگی‌های کریستال فوتونی سه بعدی |
| ۱۲ | ۶-۱ برخی مفاهیم رایج در کریستال‌های فوتونی |
| ۱۲ | ۱-۶-۱ ثابت شبکه |
| ۱۳ | ۲-۶-۱ نسبت پرشدگی |
| ۱۳ | ۳-۶-۱ مقیاس‌پذیری |
| ۱۳ | ۴-۶-۱ شبکه هم‌پاسخ و ناحیه بریلوین |
| ۱۴ | ۵-۶-۱ شکاف باند فوتونی |
| ۱۵ | ۶-۶-۱ نمودار شکاف باند نوری کریستال فوتونی |
| ۱۷ | مرجع‌ها |

فصل دوم: روش‌های تحلیل کریستال‌های فوتونی

| | |
|----|---|
| ۱۹ | ۱-۲ معادله‌های ماکسول |
| ۲۰ | ۲-۲ معادله‌های ماکسول در محیط‌های متناوب و کریستال‌های فوتونی |
| ۲۶ | ۳-۲ تحلیل کریستال‌های فوتونی |
| ۲۶ | ۱-۳-۲ روش بسط موج صفحه‌ای |
| ۲۸ | ۲-۳-۲ روش تفاضل متناهی در حوزه زمان |
| ۳۰ | مرجع‌ها |

فصل سوم: مروری بر افزاره‌های کریستال فوتونی

| | |
|----|--------------------------------|
| ۳۱ | ۱-۳ تشدیدگر |
| ۳۳ | ۲-۳ موج‌برهای کریستال فوتونی |
| ۳۹ | ۳-۳ موج‌بر و تشدیدگر تزویج شده |
| ۴۱ | ۴-۳ فیلترها |
| ۴۱ | ۵-۳ خم‌های کریستال فوتونی |
| ۴۲ | ۶-۳ تولید لیزر |
| ۴۴ | ۷-۳ جداکننده‌های پرتو |
| ۴۴ | ۸-۳ فیبرهای کریستال فوتونی |
| ۴۶ | مرجع‌ها |

فصل چهارم: فیبرهای کریستال فوتونی

| | |
|----|--|
| ۴۹ | ۱-۴ سیر پیدایش فیبرهای کریستال فوتونی |
| ۵۲ | ۲-۴ دسته‌بندی فیبرهای کریستال فوتونی و ساز و کار هدایت آن‌ها |
| ۵۳ | ۱-۲-۴ فیبر مغزی هوا |
| ۵۴ | ۱-۲-۴-۱ فیبرهای کریستال فوتونی مغزی هوای هدایت کننده نور |
| ۵۴ | ۲-۲-۴-۱ فیبر کریستال فوتونی دارای مغزی با ضریب شکست کم |
| ۵۵ | ۳-۲-۴-۱ فیبرهای براگ |
| ۵۵ | ۲-۲-۴-۲ فیبرهای مغزی جامد |
| ۵۶ | ۱-۲-۲-۴ فیبر کریستال فوتونی غیرخطی |
| ۵۶ | ۲-۲-۲-۴ فیبر کریستال فوتونی با ناحیه مودی بزرگ |
| ۵۷ | ۳-۲-۲-۴ فیبر کریستال فوتونی با روزه عددی زیاد |
| ۵۷ | ۳-۴ مشخصات مهم فیبرهای کریستال فوتونی |
| ۵۷ | ۱-۳-۴ تلفات تحدید |
| ۵۹ | ۲-۳-۴ پاشیدگی در فیبرهای کریستال فوتونی |
| ۶۱ | ۳-۳-۴ سطح موثر |
| ۶۲ | ۴-۳-۴ عملکرد تک مود در فیبر کریستال فوتونی مغزی جامد |
| ۶۳ | ۵-۳-۴ اثرات غیرخطی |
| ۶۷ | ۴-۴ فیبرهای کریستال فوتونی با ساختار مربعی |
| ۷۰ | مرجع‌ها |

فصل پنجم: مروری بر حسگرهای کریستال فوتونی

- ۷۳ ۱-۵ اجزای حسگرهای کریستال فوتونی
- ۷۵ ۲-۵ مزایای حسگرهای زیستی کریستال فوتونی
- ۷۶ ۳-۵ سازوکار سنجش در حسگرهای کریستال فوتونی
- ۷۷ ۴-۵ پارامترهای مهم در بررسی حسگرهای کریستال فوتونی
- ۷۷ ۱-۴-۵ محدوده طیفی آزاد
- ۷۷ ۲-۴-۵ پهنای کامل در نصف بیشینه
- ۷۸ ۳-۴-۵ ضریب کیفیت
- ۷۸ ۴-۴-۵ حساسیت
- ۷۹ ۵-۴-۵ ضریب هم‌بستگی
- ۸۰ ۶-۴-۵ کمینه حد آشکارسازی
- ۸۲ مرجع‌ها

فصل ششم: کلیات روش‌های شناسایی در حسگرهای زیستی

- ۸۶ ۱-۶ معرفی حسگر زیستی
- ۸۹ ۲-۶ انواع روش‌های حسگری زیستی
- ۸۹ ۳-۶ انواع روش‌های تشخیص بدون برچسب
- ۹۱ ۴-۶ پیشرفت‌های اخیر در حسگرهای زیستی بدون برچسب
- ۹۲ ۱-۴-۶ حسگر زیستی مبتنی بر موج‌برهای کریستال فوتونی
- ۹۲ ۲-۴-۶ حسگر زیستی مبتنی بر فیبرهای کریستال فوتونی
- ۹۵ ۳-۴-۶ حسگر زیستی مبتنی بر تشدیدگرهای کریستال فوتونی
- ۹۸ ۴-۴-۶ حسگر زیستی مبتنی بر نانوحلقه تشدیدگر کریستال فوتونی
- ۱۰۳ ۵-۴-۶ حسگر زیستی مبتنی بر تشدیدگر LX
- ۱۰۷ ۶-۴-۶ طراحی یک حسگر زیستی چند کاناله
- ۱۱۱ مرجع‌ها

فصل هفتم: حسگرهای زیستی مبتنی بر تشدیدگرهای کریستال فوتونی

- ۱۱۵ ۱-۷ حسگری زیستی برای تشخیص پروتئین
- ۱۱۵ ۱-۱-۷ ساختار حسگر زیستی
- ۱۱۸ ۲-۱-۷ حسگر زیستی برای شناسایی غلظت پروتئین
- ۱۱۹ ۲-۷ حسگر زیستی مبتنی بر نانوتشدیدگر

- ۳-۷ حسگرهای زیستی با محدوده اندازه‌گیری وسیع ۱۲۰
- ۱-۳-۷ ساختار حسگر زیستی ۱۲۰
- ۱-۱-۳-۷ بررسی فاصله تزویج بین موج‌بر و تشدیدگر ۱۲۲
- ۲-۱-۳-۷ بررسی تاثیر طول موج‌بر ورودی و خروجی ۱۲۲
- ۲-۳-۷ مطالعه حسگر در کاربرد حسگری زیستی ۱۲۵
- ۴-۷ حسگر زیستی کریستال فوتونی مبتنی بر تشدیدگر حذف حفره ۱۲۷
- مرجع‌ها ۱۳۳

فصل هشتم: حسگرهای زیستی مبتنی بر نانوحلقه تشدیدگر کریستال فوتونی

- ۱-۸ حسگر زیستی مبتنی بر نانوحلقه تشدیدگر لوزی شکل ۱۳۵
- ۱-۱-۸ بررسی پارامترهای مهم در بهبود عملکرد حسگر ۱۳۶
- ۱-۱-۱-۸ فاصله تزویج بین موج‌بر و نانوحلقه تشدیدگر ۱۳۷
- ۲-۱-۱-۸ اندازه حفره‌های موجود در مسیر نقص ۱۳۷
- ۳-۱-۱-۸ حفره انتهایی موج‌بر ۱۳۸
- ۴-۱-۱-۸ بهترین حفره سنجش برای اتصال مولکول زیستی ۱۳۹
- ۲-۱-۸ بررسی خاصیت حسگری زیستی در حسگر ۱۴۱
- ۲-۸ ساختار حسگر زیستی کریستال فوتونی با نانوحلقه تشدیدگر شش ضلعی ۱۴۴
- ۱-۲-۸ ساختار حسگر زیستی کریستال فوتونی با یک نانوحلقه تشدیدگر شش ضلعی ۱۴۴
- ۲-۲-۸ ساختار حسگر زیستی با دو نانوحلقه تشدیدگر شش ضلعی ۱۵۰
- ۳-۲-۸ ساختار حسگر زیستی با سه نانوحلقه تشدیدگر شش ضلعی ۱۵۱
- ۳-۸ حسگر زیستی مبتنی بر نانوحلقه تشدیدگر با دو نیم شش ضلعی ۱۵۵
- ۱-۳-۸ بررسی پارامترهای مهم در بهبود عملکرد حسگر ۱۵۶
- ۱-۱-۳-۸ بررسی فاصله افقی بین دو کاواک نیم شش ضلعی ۱۵۶
- ۲-۱-۳-۸ بررسی فاصله عمودی بین دو کاواک نیم شش ضلعی ۱۵۷
- ۲-۳-۸ بررسی خاصیت حسگری زیستی ۱۵۸
- ۴-۸ حسگر زیستی مبتنی بر نانوحلقه تشدیدگر با دو نیم شش ضلعی رو در رو ۱۶۰
- مرجع‌ها ۱۶۵

فصل نهم: حسگر فشار

- ۱-۹ بررسی اثرات فشار بر ساختار کریستال فوتونی ۱۶۷

- ۱۶۷ ۱-۱-۹ تاثیر فشار بر مشخصات هندسی کریستال فوتونی
- ۱۶۹ ۲-۱-۹ تاثیر فشار بر ضریب شکست
- ۱۷۳ ۲-۹ حسگر فشار مبتنی بر فیبر کریستال فوتونی
- ۱۷۸ ۳-۹ حسگر فشار مبتنی بر میکرو تشدیدگر کریستال فوتونی
- ۱۷۹ ۴-۹ حسگر فشار بر روی یک ساختار مربعی از میله‌های عایق در هوا
- ۱۸۵ ۵-۹ حسگر فشار کریستال فوتونی در ساختار شش ضلعی و نانوکاوک
- ۱۸۸ مرجع‌ها

فصل دهم: حسگر جابه‌جایی

- ۱۹۰ ۱-۱۰ حسگر جابه‌جایی مبتنی بر موج‌بر کریستال فوتونی
- ۱۹۲ ۲-۱۰ حسگر میکرو جابه‌جایی مبتنی بر تشدید کاواک نقص خطی
- ۱۹۶ ۳-۱۰ حسگر میکرو جابه‌جایی با محدوده وسیع اندازه‌گیری
- ۱۹۸ ۴-۱۰ حسگر جابه‌جایی بر پایه نانوکاوک‌های با ضریب کیفیت بالا در شکاف کریستال فوتونی
- ۲۰۱ ۵-۱۰ حسگر کریستال فوتونی دو بعدی با موج‌بر با حفره‌های تغییر اندازه یافته
- ۲۰۳ مرجع‌ها

فصل یازدهم: حسگر گاز

- ۲۰۶ ۱-۱۱ حسگرهای گاز مبتنی بر فیبرهای شکاف باند فوتونی
- ۲۰۷ ۱-۱-۱۱ حسگر گاز با حساسیت بالا و تلفات تحدید کم
- ۲۱۲ ۲-۱-۱۱ حسگر گاز مبتنی بر فیبر شکاف باند فوتونی با مغزی بزرگ
- ۲۱۳ ۱-۱-۲-۱-۱۱ کاهش موده‌های سطحی با بهینه‌سازی ساختار
- ۲۱۳ ۲-۱-۲-۱-۱۱ تضعیف موده‌های درجه بالا در مغزی بزرگ مرکز فیبر
- ۲۱۸ ۳-۱-۱۱ اندازه‌گیری ضریب نفوذ گاز با استفاده از فیبر شکاف باند فوتونی
- ۲۲۰ ۴-۱-۱۱ حسگر گاز استیلین مبتنی بر فیبر شکاف باند فوتونی
- ۲۲۲ ۲-۱۱ حسگرهای گاز مبتنی بر فیبر کریستال فوتونی هدایت نمایه
- ۲۲۲ ۱-۲-۱۱ فیبر کریستال فوتونی هدایت نمایه با حفره مرکزی کوچک
- ۲۲۳ ۲-۲-۱۱ فیبر کریستال فوتونی با نقص حلقه‌ای ضریب شکست بالا در مرکز
- ۲۲۶ ۳-۱۱ حسگر گاز بر مبنای تغییر بسامد قطع
- ۲۲۷ ۴-۱۱ حسگر گاز بر مبنای جابجایی قله بسامد
- ۲۲۸ مرجع‌ها

پیوست‌ها

| | |
|-----|---------------------------------------|
| ۲۲۹ | پیوست نخست: شکاف باند فوتونی |
| ۲۳۷ | پیوست دوم: روش المان محدود |
| ۲۴۱ | پیوست سوم: مبانی اندازه‌گیری جذب نوری |
| ۲۴۵ | واژه‌نامه انگلیسی به فارسی |
| ۲۵۳ | واژه‌نامه فارسی به انگلیسی |
| ۲۶۱ | نمایه |

فصل نخست

کریستال‌های فوتونیک

در این فصل تاریخچه مختصری از سیر تحولات کریستال فوتونیک^۱ بیان می‌شود. ضمن معرفی کریستال‌های فوتونیک، انواع کریستال‌های فوتونیک تعریف شده و ویژگی‌های هر کدام برشمرده شده است. برخی مفاهیم رایج در کریستال‌های فوتونیک که در ساختارهای مربوطه مهم است، توضیح داده می‌شود.

۱-۱ مقدمه

امروزه بخش زیادی از ارتباطات از طریق کابل‌های فیبر نوری صورت می‌گیرد که پهنای باند وسیعی به همراه تلفات کم را در اختیار قرار می‌دهند. این فیبرهای نوری در محدوده فرکانسی فروسرخ نزدیک^۲ (طول موج بین ۰/۸ تا ۱/۶۵ میکرومتر) طراحی شده‌اند و اطلاعات را با پهنای باند بسیار وسیعی در حدود یک تراهرتز^۳ انتقال می‌دهند. اما مشکل اصلی در سامانه‌های مخابراتی برای افزایش سرعت، عدم توانایی سامانه‌های الکترونیک انتهای خطوط برای پردازش سریع داده‌های دریافتی است. این موضوع در دو دهه گذشته مشکل زیادی در سامانه‌ها به حساب نمی‌آمد، زیرا نسبت کاربران مخابرات در برابر سرعت سامانه چندان زیاد نبود. با افزایش روز افزون تقاضای انتقال اطلاعات، این مشکل بیشتر نمایان شده و با وجود پهنای باند وسیع‌تر در شبکه انتقال، سرعت کم

¹ Photonic crystal

² Near infrared (NIR)

³ Terahertz (THz)

دستگاه‌های الکترونیک نسبت به شبکه‌های نوری باعث محدودیت در انتقال اطلاعات می‌شد.

حل این مشکل در درک تفاوت اساسی سازوکار انتقال اطلاعات از طریق نور یا از طریق جریان الکترون‌ها امکان‌پذیر است. مدارهای الکترونیک و مدارهای مجتمع در پردازش و مسیره‌ی اطلاعات از جریان الکترون‌ها و کنترل آن استفاده می‌کنند، در صورتی که سرعت حرکت الکترون‌ها و فرایندهای الکتریکی بسیار آهسته‌تر از سرعت فوتون‌ها است. همچنین الکترون‌ها دارای برهم‌کنش هستند و این باعث می‌شود که خط‌های جریان الکتریکی برهم تاثیر نامطلوب بگذارند، ولی فوتون‌ها می‌توانند انرژی خود را به طور مستقل حمل کنند. از طرفی ریزسازی مدارهای مجتمع و مدارهای فشرده^۱ دارای حدی است که با محدودیت‌های فن‌آوری و ساختاری تعیین می‌شود. با در نظرگرفتن این مقایسه، رویکردی رو به رشد به سمت مدارهای اپتیک و فوتونیک فشرده^۲ آغاز شده است که در آن به جای پردازش الکتریکی داده‌ها، از پردازش نوری آن‌ها استفاده می‌شود. این رویکرد باعث افزایش چشم‌گیر سرعت و پهنای باند عملکرد مدارها می‌شود. به عنوان نمونه اگر تمام پردازش‌های یک کامپیوتر، به جای الکتریکی به صورت نوری صورت گیرد باعث می‌شود که سرعت کامپیوتر هزاران بار بیش از سرعت فعلی آن شود.

یک مشکل اصلی در عملی شدن این تغییر رویکرد، این است که نمی‌توان مسیر حرکت نور را مانند حرکت الکترون‌ها در ساختارهای بسیار کوچک کنترل نمود، چون طبق محدودیت پراش^۳، نور را نمی‌توان در ابعادی کم‌تر از طول‌موج متمرکز کرد. بنابراین کوچک‌کردن مدارهای اپتیک که در آن‌ها خم شدگی‌ها و تغییر مسیرهای فراوانی وجود داشته باشد کار ساده‌ای نیست. به همین دلیل قطعات اپتیک موجود نسبت به قطعات متناظر الکترونیک دارای ابعاد بزرگ‌تری هستند. روش‌ها و ساختارهای جدیدی برای حل این مشکل مطرح شده‌اند که تا حد زیادی باعث نزدیک شدن به

¹ Miniaturization

² Photonic integrated circuit

³ Diffraction limit

مقصود اصلی می‌شوند. یکی از ساختارهای جدید که برای این منظور طراحی می‌شود، ساختارهای مبتنی بر کریستال‌های فوتونی است.

کریستال‌های فوتونی موادی هستند که ضریب شکست^۱ در آن‌ها تابعی متناوب از مکان است (مدولاسیون ضریب شکست دارد) و این تناوب، در ابعادی نزدیک به طول موج نور است^[۱]. واژه کریستال از آن جهت اطلاق می‌شود که این مواد از تکرار و تناوب یک سلول اولیه به وجود می‌آیند (مانند ساختار تناوبی اتم‌ها در نیم‌رسانا). کاربرد واژه فوتونی نیز به دلیل تاثیرگذاری کریستال‌های فوتونی بر خصوصیات انتشار فوتون‌ها است. به عبارت دیگر کریستال‌های فوتونی ساختارهایی هستند که امواج نورانی در بازه‌های فرکانسی خاصی، توانایی عبور از آن‌ها را ندارند. این رفتار در این ساختارها همانند رفتاری است که ساختارهای نیم‌رسانا در برابر عبور الکترون‌ها از خود نشان می‌دهند. تمام رفتارهایی که نیم‌رساناها از خود نشان می‌دهند به دلیل وجود ترازهای مجاز و غیر مجاز انرژی است. حال اگر بتوان محیطی را ایجاد کرد که برای فوتون‌های دارای انرژی خاص، اجازه عبور از ساختار وجود نداشته باشد، می‌توان انتظار داشت که مشابه کنترل رفتار الکترون‌ها را برای رفتار فوتون‌ها حاکم نمود^[۲]. در کریستال‌های فوتونی واحدهای تشکیل دهنده ساختار به جای اتم‌ها، مواد عایق هستند و این مواد به صورت متناوب وجود دارند. معادله‌های حاکم بر ساختار و معادله‌های توصیف‌کننده رفتارهای گوناگون موج در آن، همان معادله‌های میدان الکترومغناطیسی، یعنی معادله‌های ماکسول هستند. بنابراین می‌توان کریستال‌های فوتونی را به نحوی طراحی کرد که دارای شکاف‌باند کامل^۲ باشند. منظور از شکاف‌باند، محدوده بسامدی است که در آن نور امکان انتشار در داخل کریستال فوتونی را ندارد^[۳-۵].

۱-۲ تاریخچه کریستال فوتونی

انتشار امواج الکترومغناطیسی در محیط‌های متناوب اولین بار توسط لرد ریلی^۳ در سال ۱۸۸۷ در ارتباط با خصوصیات غیر معمول بازتاب از مواد شیمیایی با ساختار بلوری

¹ Refractive index

² Complete band gap

³ Lord Rayleigh