

آشنایی با بلورهای فوتونی

نگارنده: حسین طاهری

۱. پیش گفتار:

قوانین مکسول، که در سال‌های پایانی قرن نوزدهم تکمیل و ارائه شدند، همراه با اصول نظریه‌ی کوانتم که در طی دهه‌های آغازین قرن بیستم پایه‌ریزی گردیدند، راه را به سوی پیشرفت‌های شگرفی در سال‌های پس از آن گشودند. گسترش دانسته‌های بشر در مورد ساختار مواد منجر به اختراع ترانزیستور و آغاز جنبشی بزرگ موسوم به انقلاب نیم‌رسانا در دهه‌ی ۱۹۴۰ میلادی گردید که تأثیرات فراوان آن زندگی در این عصر را با اعصار پیشین به شدت متفاوت نمود. اختراع لیزر در دهه‌ی ۱۹۶۰ میلادی نیز پیشرفت قابل توجه دیگری در عرصه‌ی فناوری بود. قدم بعدی در این زمینه، معرفی ساختارهایی به نام بلورهای فوتونی^۱ در اواخر دهه‌ی ۱۹۸۰ میلادی در دو مقاله‌ی اثرگذار سجویو جان^۲ و الی یابلونوویچ^۳ بود. این دسته از مواد نویدبخش کاربردهایی بدیع و پیشرفت‌هایی عظیم در حوزه‌های مختلف از جمله در ارتباطات و رایانه می‌باشد.

بلورهای فوتونی ساختارهایی متناوب و معمولاً کم‌تلف هستند که امکان کنترل انتشار فوتون‌ها را پدید می‌آورند. در حقیقت، واژه‌ی بلور یا کریستال به وجود ساختارهای متناوب و واژه‌ی فوتونی به ارتباط این بلورها با نور و انتشار فوتون‌ها اشاره دارد و به این ترتیب، دلیل کاربرد عبارت بلورهای فوتونی مشخص می‌شود. همان‌گونه که توزیع متناوب پتانسیل در بلورهای مواد، مثلاً در نیم‌رساناها، بر عبور و توزیع انرژی الکترون‌ها اثر گذاشته و دانش بشر در مورد مواد امکان کنترل عبور الکترون‌ها را در مدارهای الکترونیکی فراهم آورده است، وجود ساختارهای متناوب با ضرایب گذردهی متناوباً متفاوت در بلورهای فوتونی نیز بر عبور فوتون‌ها در این بلورها مؤثر بوده، دانسته‌ها و یافته‌ها در باب بلورهای فوتونی نیز توانایی کنترل عبور نور را در بلورهای فوتونی فراهم می‌نماید. همچنین، مشابه با وجود سطوح مجاز برای انرژی الکترون در کنار باندهای انرژی غیر مجاز در مواد، بلورهای فوتونی نیز می‌توانند امواج با فرکانس‌هایی خاص را از خود عبور داده، امواج با فرکانس‌های دیگر را متوقف سازند. به این ترتیب باندهای عبور و قطع را برای امواج نوری پدید آورند. به علاوه، بلورهای فوتونی امکان هدایت امواج با فرکانس‌هایی را ایجاد می‌نمایند که هدایت آن‌ها با موج‌های فلزی عادی با تلف بسیار همراه است و به همین علت به لحاظ عملی ممکن یا مقرون به صرفه نمی‌باشد.

چندان که اشاره شد، بلورهای هم‌تاهای نوری یا فوتونی مواد هستند که در آن‌ها بلورهای اتم‌ها و مولکول‌ها با محیط‌های ماکروسکوپی منظم با ثوابت دی‌الکتریک متناوباً متفاوت، و پتانسیل‌های متناوب با یک تابع دی‌الکتریک متغیر جایگزین شده‌اند. ویژگی مهم، چنان‌که در بخش بعدی بیشتر بدان پرداخته می‌شود، آن است که، به دلیل ماکروسکوپی بودن این ساختارها، می‌توان قوانین مکسول را برای توصیف عبور نور در بلورهای فوتونی با موفقیت به کار برد و این امر ما را قادر می‌سازد که از دانسته‌های خود در مورد قوانین مکسول و الکترومغناطیس در پژوهش‌های مربوط به بلورهای فوتونی استفاده نماییم. به علاوه، ذکر این نکته سودمند است که فرمول بندی مسأله‌ی عبور فوتون‌ها در بلورهای فوتونی ما را به معادله‌ی الکترومغناطیس می‌رساند که، همان‌طور که در بخش نخست گزارش حاضر بدان اشاره خواهیم کرد، بسیار شبیه معادله‌ی شرودینگر در مکانیک کوانتومی است و این موضوع پژوهشگران آشنا با شاخه‌ی مذکور از دانش زیبای فیزیک را قادر ساخته است که بسیاری از نتایج مشابه با یافته‌های پیشین در مکانیک کوانتومی را در مورد بلورهای فوتونی نیز استنتاج کرده به کار برند.

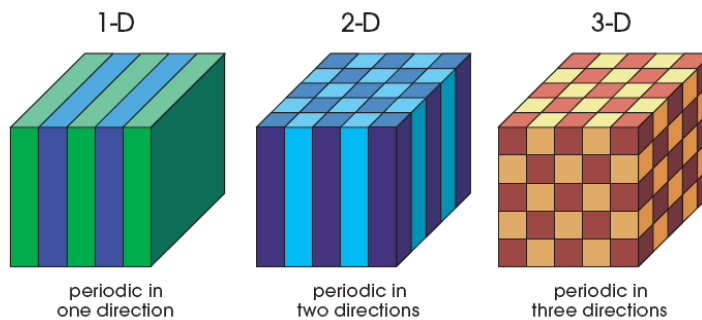
¹ Photonic Crystals

² Sajeew John

³ Eli Yablonovitch

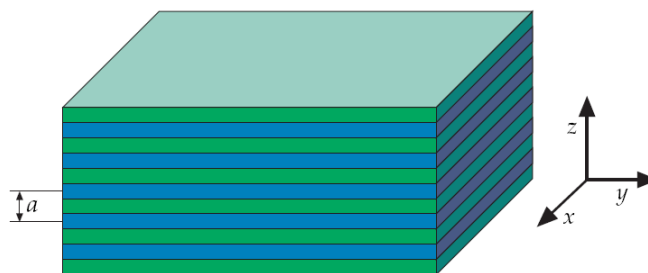
۲. نمونه هایی از کاربردها:

اگر ضرایب گذردهی مواد مختلف در یک بلور فوتونی به نحوی حساب شده انتخاب شده باشند و جذب نور توسط مواد تشکیل دهنده ی بلور هم اندک باشد، انعکاس و انکسار نور از تمام مرزهای لایه های متفاوت می توانند بسیاری از پدیده هایی را که پتانسیل های اتمی برای الکترون ها به وجود می آورند برای فوتون ها ایجاد نمایند. بلورهای فوتونی، چنان که در شکل (۱.۱) به نحوی ساده و ابتدایی نشان داده شده است، ممکن است یک بعدی، دو بعدی یا سه بعدی باشند. در این شکل، مواد با ثوابت دی الکتریک متفاوت با رنگ های مختلفی نشان داده شده اند.



شکل ۱.۱. ساختارهای یک بعدی، دو بعدی و سه بعدی در بلورهای فوتونی

یکی از افزاره های نوری پرکاربرد، یک آینه ی دی الکتریکی چند لایه، متشکل از چندین لایه از مواد با ضرایب دی الکتریک متفاوت است. هنگامی که نور با طول موجی خاص، یا به بیان ساده تر با رنگی به خصوص، به چنین ماده ی چند لایه ای برخورد می کند، به طور کامل بازتاب داده می شود و به این ترتیب آینه ای دی الکتریک محقق می گردد. دلیل چنین رفتاری، همان طور که در بخش چهارم این گزارش به تفصیل شرح داده می شود، آن است که نور از هر یک از مرزهای دی الکتریک ها باز می تابد و در صورتی که فاصله های این لایه های متفاوت دی الکتریک متناوب باشد، انعکاس های پیاپی موج برخورد کننده با تداخلی مخرب، باعث بازتاب کامل موج می شود. این افزاره، که مدل ساده ای از آن در شکل (۱.۲) نشان داده شده است، نمونه ای بلورهای فوتونی یک بعدی می باشد، اما همین صورت ساده از بلورهای فوتونی نیز می تواند ویژگی های جالبی از خود نشان دهد. در بخش چهارم این گزارش نشان خواهیم داد که، در حالت ایده آل، چنین ساختاری چند لایه ای می تواند چنان طراحی گردد که نور تابشی بر سطح از هر زاویه ای و با هر قطبشی را بازتاباند و به این ترتیب یک بازتابنده ی همه سویی^۴ بسازد.



شکل ۱.۲. یک آینه ی دی الکتریک چند لایه که نوعی بلور فوتونی یک بعدی است. پارامتر a تناوب فضایی ساختار را نشان می دهد. رنگ های متفاوت بیان گر ضرایب دی الکتریک مختلف می باشند. فرض می شود که ساختار در راستاهای x و y تا بی نهایت گسترش یافته و تناوب آن در راستای z نیز تا بی نهایت ادامه دارد.

⁴ Omnidirectional

یکی دیگر از کاربردهای بلورهای فوتونی ناشی از توانایی حذف هم‌شنوایی^۵ در آن‌ها هنگام عبور نور از مسیرهای متقاطع است. ساخت مدارهای مجتمع ادوات نوری در آینده، به‌طور قطع نیاز به این ویژگی بلورهای فوتونی را پدید خواهد آورد و ویژگی مذکور در بلورهای فوتونی، که از مشخصات تقارنی آن‌ها حاصل می‌شود، بسیار ارزشمند می‌باشد.^۶ در بخش سوم این گزارش، مشخصات تقارنی امواج منتشر شونده در بلورهای فوتونی را بررسی خواهیم کرد.

ساخت موجبرهایی برای هدایت امواج در فرکانس‌هایی خارج از محدوده‌ی فرکانس‌های مایکروویو نیز کاربرد مهم دیگری از بلورهای فوتونی است. از آن‌جا که ساخت بلورهای فوتونی، به‌ویژه در سه بعد، دشوار است، تلاش‌های بسیاری برای ابداع روش‌های ساخت ساده‌تر و کم‌هزینه‌تر صورت گرفته و در جریان است. یکی از گزینه‌های مناسب استفاده از تیغه‌های بلورهای فوتونی^۷ است که نویددهنده‌ی روش‌های ساده‌تری برای ساخت بلورهای فوتونی با استفاده از فناوری‌های موجود، به‌ویژه روش‌های مورد استفاده در فناوری‌های نیم‌رسانا، می‌باشد. تیغه‌های بلورهای فوتونی ساختارهایی دارای تناوب دو بعدی هستند که به کمک هدایت اندیسی^۸ نور را در بعد سوم محدود و هدایت می‌کنند و قادر به محقق ساختن بسیاری از ویژگی‌های بلورهای فوتونی با روش‌های ساخت بسیار ساده‌تر در ابعاد زیرمیکرونی^۹ می‌باشند.

۳. نمونه‌هایی از بلورهای فوتونی در طبیعت:

نمونه‌هایی از بلورهای فوتونی در طبیعت مشاهده شده‌اند، که برای مثال گونه‌ای از سنگ‌های قیمتی موسوم به عین‌الشمس^{۱۰} و یا بلورهای فوتونی موجود روی بال نوعی پروانه به نام مورفو^{۱۱} را می‌توان نام برد. این نمونه‌ها، بلورهای فوتونی یک بعدی هستند که از لایه‌هایی متناوب از دو نوع ماده یا از دو آرایش متفاوت از یک ماده ساخته شده‌اند. هنگامی که نور روی این لایه‌ها می‌تابد، به دلیل وجود باند قطع برای برخی طول‌موج‌ها، بازتابانده می‌شود، اما چون ضرایب دی‌الکتریک این لایه‌ها در این ساختارهای طبیعی تفاوت زیادی ندارند، شکاف باند^{۱۲} برای آن‌ها باریک است و این بدان معناست که نور بازگشتی تک‌رنگ می‌باشد. هنگامی که از زاویه‌های متفاوت به این ساختارها بنگریم، چون تناوب تغییر می‌کند، شکاف باند جا به جا شده و نور بازتابی دارای رنگی متفاوت خواهد بود. به همین خاطر است که با حرکت بال پروانه‌ی مورفو یا با تغییر زاویه‌ی نگاه کردن به عین‌الشمس، که در شکل‌های زیر نشان داده شده‌اند، رنگ‌های متفاوتی دیده می‌شوند.



شکل ۱.۳. تصویر یک قطعه‌ی تزئینی با نگینی از جنس عین‌الشمس (opal). این سنگ قیمتی نمونه‌ای از بلورهای فوتونی یک بعدی موجود در طبیعت است.

⁵ Cross-talk

⁷ Photonic Crystal Slabs

⁸ Index guiding

⁹ Sub-micron

¹⁰ Opal

⁶ برای نمونه رجوع کنید به بخش سوم از [۲].

¹¹ Morpho، رجوع کنید به [۴].
¹² band gap



شکل ۱.۴. تصویر پروانه ی مورفوکه بر روی بال های خود نمونه ای از بلورهای فوتونی یک بعدی دارد.

۱.۴. مراجع:

- [1] J. D. Joannopoulos, S. G. Johnson, J. N. Winn, and R. D. Meade, *Photonic Crystals: Molding the Flow of Light*, 2nd ed. (Princeton, 2008).
- [2] S. G. Johnson and J. D. Joannopoulos, *Photonic Crystals: The Road from Theory to Practice*, 3rd printing (Kluwer Academic Publishers, 2003).
- [3] K. Busch, S. Lölkes, R. B. Wehrspohn, and H. Föll, *Photonic Crystals: Advances in Design, Fabrication and Characterization* (Wiley VCH, 2004).
- [4] Shuichi Kinoshita, Shinya Yoshioka, and Kenji Kawagoe, "Mechanisms of structural colour in the Morpho butterfly: cooperation of regularity and irregularity in an iridescent scale," *Proc. R. Soc. Lond.*, pp. 1417-1421, Jun. 2002.