

# خواص اپتیکی بلور فوتونیکی دی‌الکتریک تک بعدی شبه فلز - دی‌الکتریک

سمیه داودی<sup>۱</sup>، مریم قشلاقی<sup>۲\*</sup>

تاریخ ارسال دی ۹۵، پذیرش بهمن ۹۵

**چکیده:** در این مقاله به بررسی رفتار بلور فوتونیکی تک بعدی شبه فلز - دی‌الکتریک با ساختار اپتیکی با ترتیب لایه‌ها به صورت  $\text{Glass}/(\text{MgF}_2\text{-Ge})^N/\text{Air}$  پرداخته شده است. شبیه‌سازی این بلور انجام شد و طیف عبوری آن رسم گردید. طبق محاسبات شبیه‌سازی شده و رسم نمودار طیف عبوری، این ساختار دارای شکاف باند فوتونیکی پهن بوده است و همچنین طول موج مرکزی آن با اولین توقف باند آن با شرط براگ تطابق خوبی دارد. با افزایش زاویه تابش نور فرودی، پهنای باند قطبیدگی P کاهش یافته است و دو قطبیدگی S و P از یکدیگر جدا می‌شوند. افزایش تعداد تناوب، پهنای شکاف باند را تغییر نمی‌دهد ولی می‌تواند عمق شکاف باند را زیاد کند. همچنین با افزایش فاکتور انباشت (ضریب تعداد لایه‌ها در هر بخش)، شکاف باند فوتونیکی افزایش یافته است و در نتیجه به سمت طول موج‌های بلندتر انتقال پیدا می‌کند.

**واژه‌های کلیدی:** بلور فوتونیکی تک بعدی شبه فلز - دی‌الکتریک، شرط براگ، قطبیدگی.

در نتیجه، یک باند فوتونیکی حاصل PCs مشابه با شکاف باند الکترونیک در بلور نیمه هادی است [۲].

به عبارت دیگر، وقتی امواج الکترومغناطیس (EM) نور فرودی روی بلورهای فوتونیکی (PCs) می‌تابد حالت‌های Bloch در بلور ایجاد می‌شود، اگر موج Bloch پایین بیاید چنین حالتی باندهای ممنوعه (شکاف باند فوتونیکی) نامیده می‌شود، چنین موج ناپایدار است و نمی‌تواند در بلور انتشار پیدا کند. بنابراین پیش‌بینی می‌شود که انرژی نور کلاً بازتاب کند، و کنش‌های بلور به عنوان یک تمام بازتاب برای موج اتفاق می‌افتد. شکاف باند بلور فوتونیکی توانایی کنترل نور حتی در انتشار خودبه‌خودی را دارد [۳]. عنصر ژرمانیوم یک نیمه هادی با ویژگی‌های الکتریکی بین فلز و عایق است. ژرمانیوم برخلاف بیشتر نیمه هادی‌ها دارای شکاف باند<sup>۲</sup> کوچکی است که امکان واکنش موثر به اشعه مادون قرمز را بوجود

## ۱. مقدمه

بلور فوتونیکی یک بعدی<sup>۱</sup> (1D-PC) از لایه‌های متناوبی از مواد که ثابت دی‌الکتریک آن‌ها با هم متفاوت هستند، تشکیل شده است. این بلورها در برابر امواج نوری همان رفتاری را دارند که نیمه رساناها در مقابل امواج الکترونی شبکه از خود نشان می‌دهند. مشخصه اصلی بلور فوتونیکی که نوعاً بصورت مصنوعی ساخته می‌شوند، دوره‌ای بودن ثابت دی‌الکتریک در آن‌هاست [۱]. لازم است اشاره کنیم که انتشار فوتون‌ها در یک PCs شبیه به انتشار الکترون‌ها در یک بلور نیمه هادی است به طوری که اثر متناوب تابع دی‌الکتریک روی انتشار فوتون‌ها در یک PCs خیلی زیاد شبیه به اثر تابع پتانسیل تناوبی روی انتشار الکترون در یک بلور نیمه هادی است.

<sup>2</sup> Band gap

<sup>1</sup> One Dimensional Dielectric Photonic Crystals

<sup>۱</sup> کارشناس ارشد، پژوهشکده لیزر و اپتیک، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای. آدرس پست الکترونیک: sdavodi@aeoi.org.ir

<sup>۲</sup> مربی، پژوهشکده لیزر و اپتیک، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای. آدرس پست الکترونیک: mgshlaghi@aeoi.org.ir

$d$  ضخامت لایه در واحد سلول PC و  $\Lambda$  ثابت شبکه (ثابت تناوب سه بعدی) می‌باشند.

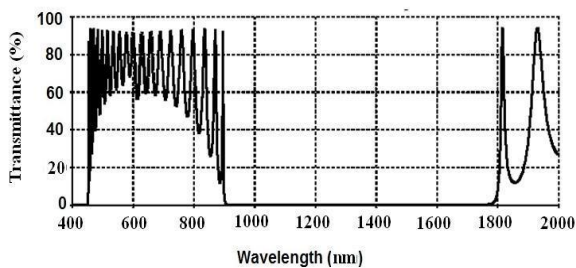
$d_l$  و  $d_h$  به ترتیب ضخامت لایه‌های Ge و  $MgF_2$  می‌باشد. طیف عبوری از 1D-PC در شکل (۲) نمایش داده می‌شود. این شکل نشان می‌دهد که 1D-PC ارائه شده یک باند عبوری برای فرکانس‌های کم (طول موج‌های بلند) و اولین شکاف باند وابسته به شرط براگ است [۵]:

$$\lambda = 2n\Lambda \quad (۲)$$

$\lambda$  طول موج مرکزی از اولین شکاف باند،  $\Lambda$  ثابت شبکه است و  $n$  ضریب شکست موثر می‌باشد. ضریب شکست موثر با رابطه (۳) داده می‌شود:

$$n = (\epsilon_{eff})^{1/2}, \quad \epsilon_{eff} = f_l \epsilon_l + f_h \epsilon_h \quad (۳)$$

جمله  $f_l \epsilon_l$  حاصلضرب فاکتور انباشت مواد با ضریب شکست کم و ضریب گذردهی‌شان و جمله  $f_h \epsilon_h$  حاصلضرب فاکتور انباشت مواد با ضریب شکست زیاد و ضریب گذردهی‌شان را نشان می‌دهند. طول موج مرکزی از اولین شکاف باند فوتونیک<sup>۳</sup> با شرط براگ از معادلات فوق محاسبه شده که تقریباً برابر با ۱۱۷۵ نانومتر است بطوریکه با مقدار گرفته شده از روش ماتریس انتقال که در شکل (۲) نشان داده شده، سازگار است.



شکل ۲. محاسبات طیف عبوری از بلور فوتونیک شبه فلز - دی‌الکتریک  $\theta = 0^\circ$ ,  $N=10$

شکاف باند فوتونیک 1D-PC می‌تواند با تغییرات  $n$  یا  $\Lambda$  تنظیم پذیر شود، و همچنین می‌تواند طول موج‌های بلندتر (کوتاه تر) با افزایش (کاهش) ثابت شبکه یا ضریب موثر به عنوان وضعیت قبل از پیش‌بینی براگ شیفت پیدا

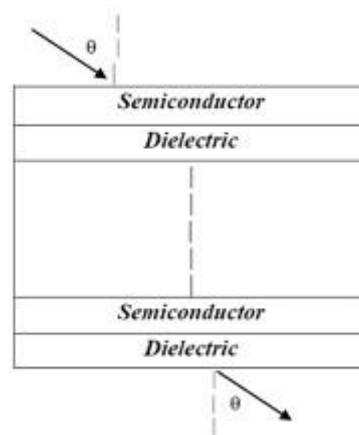
می‌آورد. خواص مهم ژرمانیوم نسبت به دیگر عناصر نیمه‌هادی این است که با افزودن ۰.۰۱٪ آرسنیک به آن رسانش آن هزار برابر افزایش پیدا می‌کند. بنابراین ژرمانیوم در آشکارسازهای مادون قرمز و سایر تجهیزات دیداری که نیازمند یابنده‌های حساس مادون قرمز است و همچنین در ادوات اپتیکی و ارتباطات و ترانزیستورها و ... کاربرد دارد [۴].

## ۲. بررسی بلورهای فوتونیک تک بعدی شبه

### فلز - دی‌الکتریک

بازتاب امواج الکترومغناطیس (EM) در سراسر بلورهای فوتونیک دی‌الکتریک تک بعدی رزونانس بازتاب خیلی زیادی شبیه به پراش پرتوهای ایکس با صفحات شبکه بلوری را نمایش می‌دهد که بازتابنده براگ نامیده می‌شود.

ما یک 1D-PC با مواد با ضریب شکست کم ( $MgF_2$ ) بعنوان دی‌الکتریک و مواد با ضریب شکست زیاد (Ge) بعنوان شبه فلز به صورت تناوبی روی زیر لایه شیشه که در شکل (۱) نشان داده شده انباشت می‌کنیم.



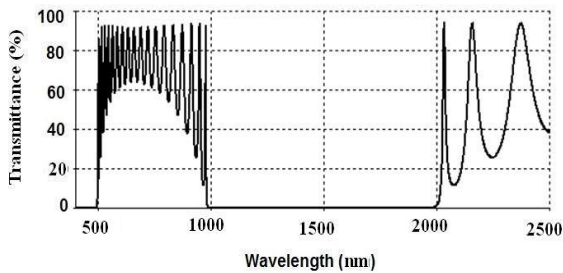
شکل ۱. شماتیک از یک بلور فوتونیک شبه فلز - دی‌الکتریک.

فاکتور انباشت شدن ( $f$ ) یک ماده در یک 1D-PC با رابطه (۱) بیان می‌شود:

$$f = d/\Lambda, \quad \Lambda = d_l + d_h \quad (۱)$$

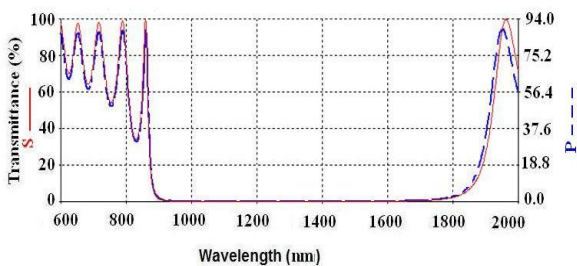
<sup>3</sup> Photonic band gap

شکست زیاد (HIMF)<sup>۴</sup> در شکل (۴) شکاف باند فوتونیک به سمت طول موج‌های بلندتر شیفت پیدا می‌کند، که ناشی از افزایش ضریب شکست موثر انباشت دی الکتریک است. این نتیجه در واقع توصیف کننده این واقعیت است که با افزایش HIMF پهنای شکاف باند فوتونیک اندکی زیاد می‌شود.

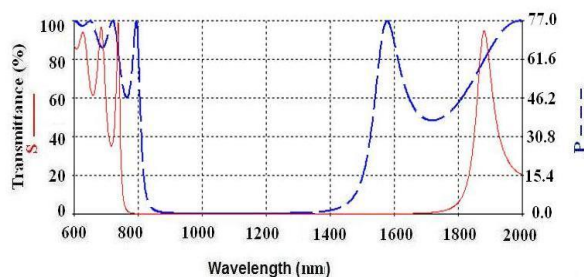


شکل ۴. محاسبات طیف عبوری از بلور فوتونیک شبه فلز - دی الکتریک با  $N=10$ ،  $\theta=0^\circ$ .

اثر زاویه فرودی روی طیف عبوری از یک بلور فوتونیک شبه فلز - دی الکتریک برای قطبیدگی امواج S و P به ترتیب در شکل‌های (۵) و (۶) نشان داده شده است.

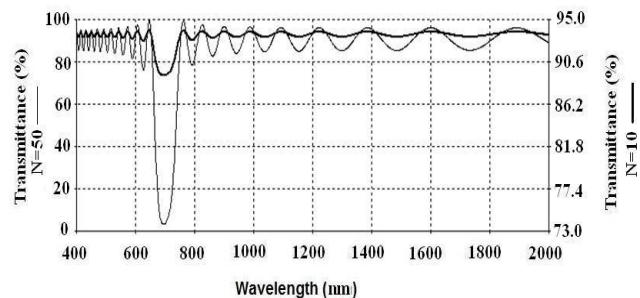


شکل ۵. محاسبات طیف عبوری از بلور فوتونیک شبه فلز - دی الکتریک برای قطبیدگی‌های S، P،  $N=10$ ،  $\theta=10^\circ$ .



شکل ۶. محاسبات طیف عبوری از بلور فوتونیک شبه فلز - دی الکتریک برای قطبیدگی‌های S، P،  $N=10$ ،  $\theta=60^\circ$ .

کند. در یک محدوده فرکانسی تعیین شده عمق شکاف باند فوتونیک در ضریب شکست دو مواد متشکله به  $(\Delta n)$  بستگی دارد. همچنین برای نشان دادن اثر  $\Delta n$ ، ما یک 1D-PC از یک  $MgF_2/SiO_2$  طراحی نمودیم. به طوری که دی اکسید سیلیکون ضریب شکست  $1/46 \sim$  در محدوده مرئی و ماورای بنفش نزدیک دارد. طیف انتقالی در شکل (۳) نمایش داده شده است، طیف مذکور توصیف می‌کند که وقتی تعداد تناوب مساوی ۱۰ است،  $\Delta n$  از  $MgF_2/SiO_2$  با باز شدن شکاف عمق نسبتاً کوچک نیست، اما وقتی که تعداد تناوبها مساوی ۵۰ شد، یک شکاف عمق باریک می‌تواند آشکار شود. بنابراین تعداد تناوبها اثری روی موقعیت یا عمق شکاف باند ندارد. اما افزایش تعداد تناوبها بازتاب پذیری شکاف باند بالا می‌برد و لبه‌های شکاف باند را شیب‌دار می‌کند. در شکل (۳)، تعداد رزونانس پیک‌های انتقالی (RTPs) برای PC از ۵۰ تناوب بزرگ‌تر از تعداد RTPs برای PC از ۱۰ تناوب است. همین‌طور RTPs از 1D-PC مستقیماً متناسب با تعداد تناوبها است و RTPs بازم هم فشرده‌تر شده و با کاهش طول موج تیزتر و معکوس می‌شود.



شکل ۳. محاسبات طیف عبوری از بلور فوتونیک شبه فلز - دی الکتریک با  $N=10, 50$ ،  $\theta=0^\circ$ .

جهت بررسی اثر فاکتور انباشت، طراحی دیگری با فاکتور انباشت متفاوت با طرح شکل (۲) که در آن  $f = 0/4$  است برای بلور فوتونیک شبه فلز - دی الکتریک، در نظر گرفته شد. با افزایش فاکتور انباشت مواد با ضریب

<sup>4</sup> Filling Factor of the High Index Material

### مراجع

- [1]. Lourtioz J. M., "Photonic crystals: Towards Nanoscale Photonic devices", Springer-Verlage Berlin Heidelberg, 2008.
- [2] Joannopoulos J. D., Johnson S. G., Winn J. N. and Meade R. D., "Photonic Crystals: Molding the Flow of Light", Princeton University Press, 2008.
- [3] Awasthi S. K., Ojha S. P., "Design of a tunable optical filter by using a one-dimensional ternary photonic band gap material", Amity Institute of Applied Science, progress in electromagnetic research, 2008, vol. 4, pp. 117-132 .
- [4] Fritzsche H., "Electrical Properties of Germanium Semiconductors at Low Temperatures", Indiana Phys. Rev. 1955, 99, 406 .
- [5] Aly A. H., Sabra W., and Abdel-Rahman E., "Investigation of the Transmittance in Super-conducting Photonic Crystal", Progress In Electromagnetics Research Symposium Proceedings, KL, MALAYSIA, March 2012, 7-30 .
- [6] huang G. Q. , yong H. X, "Ultrafast photonic crystal optical switching", phys.china 2006,2, pp. 171-177.
- [7] Ismail M., Badawy Z. M. and Abdel-Rahman E., "comparative study of the one dimensional dielectric and metallic photonic crystals", optics and photonics journal 2012, 2, pp. 105-112.
- [8] Wu C. J. and Wang Z. H.. "Properties of defect modes in one-dimensional photonic crystals" PIER. 2010, pp,103, 169-184.

وقتی که زاویه فرودی از امواج الکترومغناطیس افزایش می‌یابد، شکاف‌های باند قطبیدگی امواج S و P شیفت پیدا می‌کند. شکاف باند موج قطبیدگی P به علت اثر بروسر در سطح مشترک بین لایه‌ها با ضریب شکست کم و زیاد کوچک می‌شود [۶]. اما شکاف باند موج قطبیدگی S کمی زیاد می‌شود. باندهای ممنوعه برای دو قطبیدگی امواج S و P بر هم منطبق نیستند که این به علت تلفات تبهگنی است. از شکل‌های (۵) و (۶) نتیجه می‌گیریم که موج قطبیدگی P با تغییرات زاویه حساسیت بیشتری از موج قطبیدگی S دارد. شکل (۵)، با زاویه تابش فرودی  $\theta = 10^\circ$  برای امواج الکترومغناطیس S و P رسم شده است، بطوری که تغییرات زیادی در این حالت دیده نشده است. با تغییرات زاویه از ۱۰ به ۶۰ درجه موج قطبیدگی P تقریباً به اندازه ۳۰۰ nm شیفت پیدا می‌کند.

### ۲. نتیجه‌گیری

با توجه به محاسبات و طیف‌های عبوری گرفته شده و مقایسه با نتایج مراجع [۷ و ۸] به این نتیجه می‌رسیم که این نوع بلور رفتاری متناسب با بلور فوتونیک تک بعدی دی‌الکتریک داراست اما با افزایش فاکتور انباشت، شکاف باند فوتونیک آن کمی افزایش یافته و به سمت طول موج‌های بلندتر شیفت پیدا می‌کند که می‌توان آن را از حالت بلور فوتونیک تک بعدی دی‌الکتریک متمایز کرد. همچنین با افزایش زاویه تابش نور فرودی، پهنای باند طیف عبوری قطبیدگی P کاهش یافته و به این ترتیب دو قطبیدگی از یکدیگر جدا می‌شوند. افزایش تعداد تناوب، پهنای شکاف باند را تغییر نمی‌دهد ولی عمق آن را زیاد می‌کند.



# Optical properties of one dimensional quasi metal-dielectric photonic crystal

## Abstract

In this paper, the behavior of one dimensional quasi metal-dielectric photonic crystal with the structure of Glass/  $(\text{MgF}_2\text{-Ge})^N$  /Air was investigated. According to simulation calculations and by Charting of the transmission spectrum, the photonic band gap of this structure is wide, also its central wavelength with the band's first stop is in good agreement with the Bragg condition. By increasing the angle of the incident light radiation, the bandwidth of P polarization decreases and the two polarization S and P are separated. Increasing the number of frequencies, wide band gap does not change, but its depth increases. Also by increasing filling factor, photonic band gap has increased and is shifted towards longer wavelengths.

**Keywords:** one dimensional quasi metal-dielectric photonic crystal, the Bragg condition, polarization.