



بیست و پنجمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران و یازدهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران. ۹-۱۱ بهمن ۱۳۹۷



## طراحی و شبیه سازی تک لایه ضدبازتاب پهن باند بر زیر لایه سیلیکون با استفاده از بلور فوتونی

پریسا حسینی زاده، محمد ملک محمد

گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه اصفهان

چکیده - یکی از روش‌های مؤثر کاهش بازتاب، روش ساختاردهی به سطح مانند ایجاد ساختار چشم پروانه‌ای است. برای طراحی این ساختارها روش‌های مختلفی وجود دارد. یکی از این روش‌ها استفاده از بلور فوتونی است. طبق این روش می‌توان تک لایه ضدبازتاب با ساختاری منظم و قابل کنترل طراحی کرد. به طوری که این لایه در پهنای طیف وسیع، با زاویه فرود زیاد و مستقل از قطبش نور فرودی منجر به کاهش بازتاب می‌شود. در این پژوهش به کمک روش تفاضل متناهی در حوزه زمان (FDTD)، تک لایه ضدبازتاب بر زیر لایه سیلیکون به کمک بلور فوتونی دو بعدی در بازه طیفی ۳-۵ میکرومتر با مقدار میانگین بازتاب حدود ۱٪ و عبور ۹۹٪ شبیه سازی شده است. تک لایه ضدبازتاب سیلیکونی در بسیاری از سامانه‌های اپتیکی و صنایع نظام به خصوص در بازه طیفی ۳-۵ میکرومتر کاربرد دارد.

کلید واژه- بلور فوتونی، تک لایه ضدبازتاب، ساختار چشم پروانه‌ای، FDTD

## Design and simulation of single broadband anti-reflection layer on silicon substrate by photonic crystals

Parisa Hosseinizadeh, Mohammad Malekmohammad

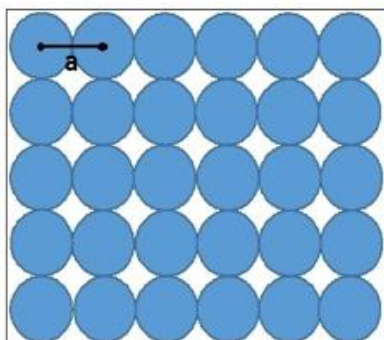
Physics department, Science faculty, Isfahan University

Abstract- One of the effective methods to reduce the reflection is surface structuring (such as moth-eye structures). There are different techniques for designing structures, one of them is the use of the photonic crystals. In this way, a single anti-reflection layer can be designed with controllable structure. This layer reduces the reflection in both polarization, and large range of wavelength and incident angles. In this study, with the finite difference time domain (FDTD) method a single anti-reflection layer on silicon substrate by two-dimensional photonic crystals in a spectral range of 3-5  $\mu\text{m}$  with an average reflection about 1% and transmission about 99% was simulated. This silicon anti-reflection layer is used in many optical and industrial systems, especially in the range of 3-5  $\mu\text{m}$ .

Keywords: FDTD, Moth-eye structure, Photonic crystals, Single anti-reflection layer

## ۱- مقدمه

که در آن  $\varepsilon(x)$  تابع مکانی گذردهی الکتریکی است. در شکل ۱ بلور فوتونی دو بعدی نشان داده شده است.  $a$  ثابت شبکه و یا دوره تناوب نامیده می‌شود و نمایانگر حداقل طول فضایی است که ساختار شبکه در آن تکرار می‌شود. [۷].



شکل ۱: بلور فوتونی دو بعدی ( $a$ : ثابت شبکه).

## ۲- اصول کار شبیه سازی

الگوهای ارائه شده برای توصیف انواع بلور فوتونی بر اساس حل معادلات ماکسول در محیط بلور بنا شده‌اند. روش تفاضل متناهی در حوزه زمان یکی از رایج‌ترین ابزارهای تحلیل ساختارهای بلور فوتونی است. در این روش معادله‌های ماکسول به صورت عددی حل می‌شوند. برای این کار، فضا و زمان را در بازه‌های کوچک شبکه‌بندی نموده و مشتق‌های مکانی و زمانی در معادله‌های ماکسول به صورت گسسته نوشته می‌شوند. با حل این معادله‌ها، میدان‌های الکترومغناطیسی بر حسب فضا و زمان در تمام ناحیه مورد نظر به دست می‌آید. با ذخیره سازی میدان در تمام پله‌های زمانی در نقاط شبکه می‌توان با استفاده از تبدیل فوریه پاسخ را در حوزه بسامد به دست آورد و با بهنجار کردن نسبت به انرژی ورودی می‌توان ضرایب عبور و بازتاب را به دست آورد [۸ و ۹].

کاهش بازتاب در بلور فوتونی به ابعاد دوره تناوب، ارتفاع ساختار و ضریب پخشندگی (ضریب پخشندگی، میزان حجم نسبی مواد بلوکهای ساختمانی بلور به حجم کل را نشان

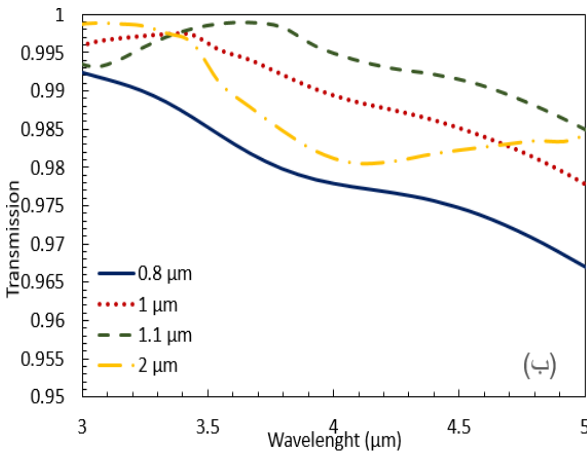
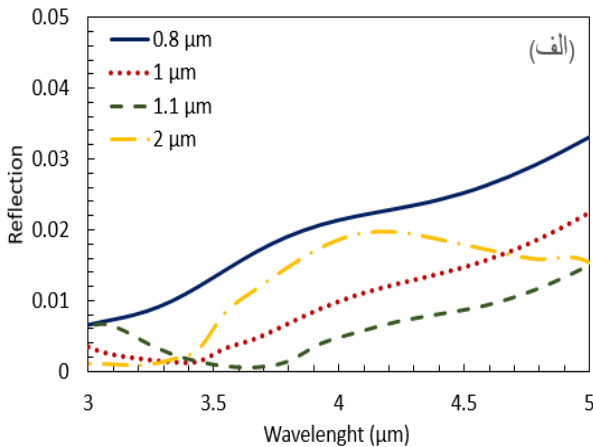
در بسیاری از سامانه‌های اپتیکی، بازتاب از سطوح عناصر باعث کاهش کارایی سامانه می‌شود. معمولاً برای کاهش بازتاب از ساختارهای چند لایه استفاده می‌کنند. در این روش یک تک لایه ضدبازتاب می‌تواند تنها در یک بازه طول موجی محدود، زاویه فرودی و قطبش مشخص بازتاب را کمینه کند [۱]. برای افزایش پهنای باند می‌توان از یک ساختار چند لایه استفاده کرد. ولی در این صورت معمولاً کارکرد آن در زوایای فرود و قطبش‌های مشخص مناسب نخواهد بود و در محیط‌های سخت و خشن طول عمر کوتاهی خواهد داشت [۲ و ۳].

در طبیعت سطح چشم بعضی از حشرات مانند پروانه صاف نیست، بلکه شامل آرایه‌های نانوساختار است و خاصیت ضدبازتابی دارد [۴]. محققان با الهام گرفتن از ساختار چشم پروانه توانستند لایه‌های ضدبازتاب در پهنای طیف وسیع، با زاویه فرود زیاد نسبت به لایه‌های ضدبازتاب معمولی و مستقل از قطبش نور فرودی تولید کنند [۵].

برای ساخت آرایه‌ها روش‌های مختلفی وجود دارد. یکی از این روش‌ها استفاده از بلور فوتونی دو بعدی است. لایه ضدبازتاب که طبق این روش طراحی می‌شود دارای ساختار منظم و قابل کنترل است و ابعاد آرایه‌ها در حد طول موج می‌باشد. در این ساختار پراکندگی نور در هر نقطه با نقاط دیگر به صورت تداخل ویرانگر جمع می‌شود و باعث کاهش بازتاب می‌شود. در این روش آرایه‌ها روی خود زیرلایه تشکیل می‌شوند، بنابراین مشخصات ضریب شکست در تمام بازه طول موج با زیرلایه یکسان است و کاهش بازتاب در پهنای طیف وسیع رخ می‌دهد. همچنین مشخصات مکانیکی و گرمایی لایه ضدبازتاب و زیر لایه تقریباً یکسان خواهد بود، در نتیجه در محیط‌های سخت و خشن مقاومت و طول عمر بیشتری خواهد داشت [۶].

بلور فوتونی را به طور ساده می‌توان یک محیط با خواص اپتیکی متناوب تعریف کرد. به بیان دیگر  $\varepsilon(x) = \varepsilon(x+a)$

در شکل ۳، نمودار بازتاب و عبور در عمق  $3/5 \mu\text{m}$  با دوره تناوب‌های مختلف شبیه سازی شده است. با افزایش دوره تناوب در بازه  $0/1-1/1 \mu\text{m}$  مقدار بازتاب کاهش پیدا می‌کند؛ اما با دوره تناوب  $2 \mu\text{m}$  مقدار بازتاب افزایش پیدا می‌کند؛ بنابراین ساختار با دوره تناوب  $1/1$  میکرومتر در بازه طیفی  $3-5$  میکرومتر کمترین بازتاب را خواهد داشت.



شکل ۳: نمودار طیف بازتاب و عبور با عمق  $3/5 \mu\text{m}$  و دوره تناوب‌های مختلف.

با توجه به شکل ۲ و ۳، جمع مقدار بازتاب و عبور در هر طول موج برابر مقدار واحد است که نشانگر این نکته است که در این محدوده، پراکندگی و یا جذب وجود ندارد.

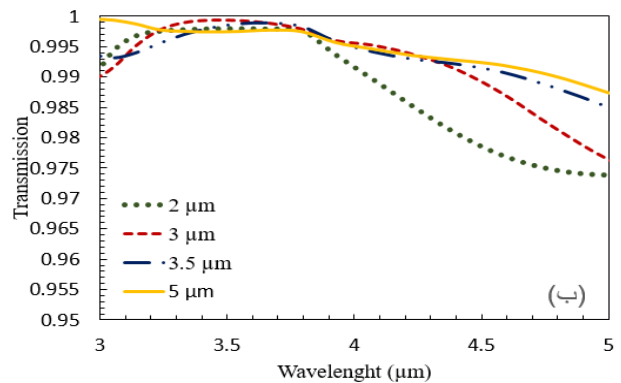
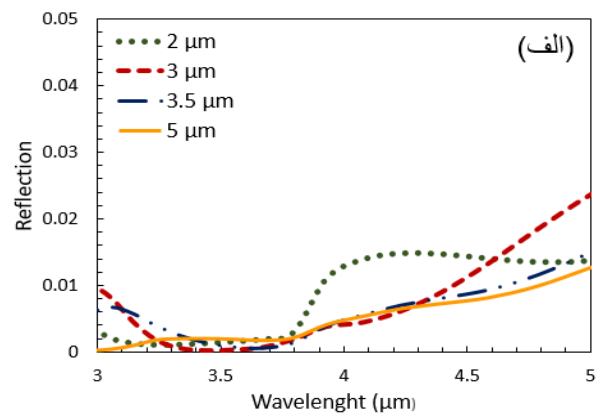
در شکل ۴، نشان داده شده است که با افزایش زاویه نور از  $0-30$  درجه مقدار بازتاب در حدود  $2\%$  و در زاویه  $50$  درجه کمتر از  $10\%$  می‌باشد؛ بنابراین مقدار بازتاب در این ساختار حساسیت زیادی به زاویه فرود از  $30-0$  درجه

می‌دهد (بستگی دارد). در این شبیه سازی ضریب پرتدادگی  $0/215$  در نظر گرفته شده است و مقدار بازتاب و عبور با تغییر ارتفاع و دوره تناوب ساختار در محدوده طیفی  $3-5$  میکرومتر مورد بررسی قرار گرفته است.

### ۳- تحلیل نتایج

برای سیلیکون ضریب شکست ثابت  $3/44$  در نظر گرفته شده و طیف بازتاب و عبور در بازه  $3-5 \mu\text{m}$  برای سطح سیلیکون خام به ترتیب  $30\%$  و  $70\%$  شبیه سازی شده است.

در نمودار شکل ۲-الف، با افزایش عمق آرایه‌ها در بازه  $3-5 \mu\text{m}$  بازتاب کاهش پیدا می‌کند و در عمق  $3/5 \mu\text{m}$  میانگین بازتاب به حدود  $1\%$  می‌رسد. از طرفی با افزایش عمق ساختار بیش از  $3/5 \mu\text{m}$  تغییر قابل ملاحظه‌ای در مقدار میانگین بازتاب دیده نمی‌شود.



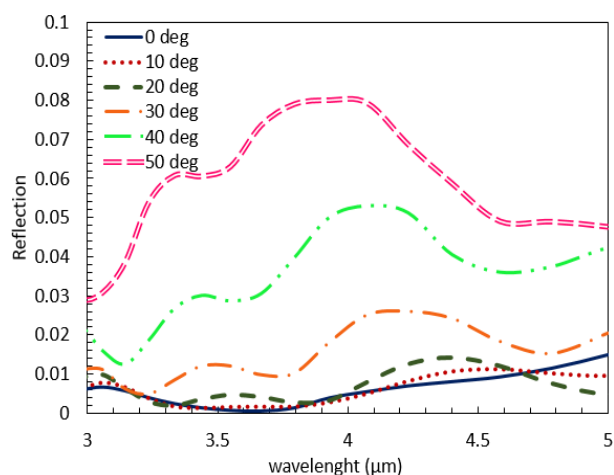
شکل ۲: نمودار طیف بازتاب و عبور با دوره تناوب  $1/1 \mu\text{m}$  و عمق‌های مختلف.

موج با زیرلایه یکسان است و بنابراین لایه ضدبازتاب می‌تواند بسیار پهن باند باشد. هم‌چنین ضریب گرمایی و مکانیکی لایه ضدبازتاب و زیرلایه یکسان است، بنابراین این لایه در محیط‌هایی با شرایط متفاوت، طول عمر بیشتری خواهد داشت.

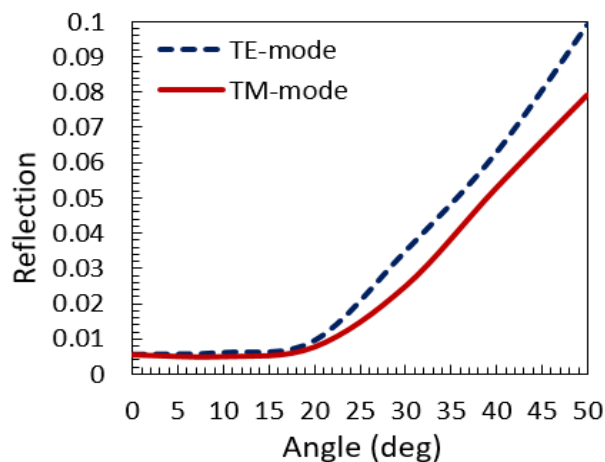
## مراجع

- [1] Hemant. Kumar. Ruat, V. Anand. Ganesh, A. Sreekumaran. Nair, Seeram. Ramakrishna, "Anti-reflective coatings: A critical, in-depth review", Energy & Environmental Science 4, 3779 (2011).
- [2] Cai. Jinguang, Qi. Limin, "Recent advances in antireflective based on nanostructure arrays", Material Horizons 2, 37-53 (2015).
- [3] Lohmueller, Theobald, Robert Brunner, and Joachim P. Spatz. "Improved properties of optical surfaces by following the example of the 'Moth Eye'." Biomimetics Learning From Nature (2010).
- [4] Clapham, P. B. and M. C. Hutley. "Reduction of lens reflexion by the "Moth Eye"principle." Nature 244.5414, 281 (1973).
- [5] Lohmueller, Theobald, Robert Brunner, and Joachim P. Spatz. "Improved properties of optical surfaces by following the example of the 'Moth Eye'." Biomimetics Learning From Nature (2010).
- [6] Yi-Fan. Huang, Surojit. Chattopahyay, Li-Chyong. Chen, "Improved broadband and quasi-omnidirectional anti-reflection properties with biomimetic silicon and nanostructures", Nature Nanotechnology 2, 770-774 (2007).
- [7] خراسانی، سینا، مقدمه‌ای بر اپتیک بلورهای فوتونی، انتشارات دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۸۶.
- [8] عابدی، کامبیز، مقدمه‌ای بر ادوات نوری بلور فوتونی، انتشارات مهرجرد، ۱۳۹۴.
- [9] Inoue, Kuon, and Kazuo Ohtaka, Photonic crystals: physics, fabrication and applications, Vol. 94. Springer, 2013.

ندارد. هم‌چنین در شکل ۵ نشان داده شده است که مقدار بازتاب در ۰-۲۰ درجه مستقل از قطبش نور فرودی است و در محدوده ۵۰-۲۰ درجه، اختلاف مقدار بازتاب در دو مد TE و TM حدود ۱٪ است.



شکل ۴: نمودار طیف بازتاب برای فرود با زوایای مختلف بر نمونه با دوره تناوب ۱/۱ μm و عمق ۳/۵ μm.



شکل ۵: نمودار طیف بازتاب برای فرود با زوایای مختلف در دو مد TE و TM بر نمونه با دوره تناوب ۱/۱ μm و عمق ۳/۵ μm.

## ۴- نتیجه‌گیری

شبهه سازی نشان می‌دهد که به کمک بلور فوتونی با ابعاد در حد طول موج می‌توان تک لایه ضدبازتاب مستقل از زاویه و قطبش نور فرودی با مقدار میانگین بازتاب حدود ۱٪ و عبور ۹۹٪ در طیف ۳-۵ میکرومتر تولید کرد. چون در این روش از خود زیرلایه برای تولید آرایه‌ها استفاده می‌شود، مشخصات ضریب شکست آن در تمام بازه طول