

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



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

پریسا حسینیزاده، 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 می توان 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 می شود. در این پژوهش به کمک روش تفاضل متناهی در حوزه زمان (FDTD)، تک لایه ضدبازتاب بر زیرلایه سیلیکون به کمک بلور فوتونی دو بعدی در بازه طیفی ۵–۳ میکرومتر با مقدار میانگین بازتاب حدود ۱٪ و عبور ۸۹۴ شبیه سازی شده است. تک لایه ضدبازتاب سیلیکونی در بسیاری از سامانههای اپتیکی و صنایع نظام به خصوص در بازه طیفی ۵–۳ میکرومتر کاربرد دارد.

كليد واژه- بلور فوتونى، تك لايه ضدبازتاب، ساختار چشم پروانهاى، 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 $3-5 \ \mu m$ 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 $3-5 \ \mu m$.

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

۱ – مقدمه

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 آرایه ها روش های مختلفی وجود دارد. یکی از این روش ها استفاده از بلور فوتونی دو بعدی است. لایه ضدبازتاب که طبق این روش طراحی می شود دارای ساختار منظم و قابل کنترل است و ابعاد آرایه ها در حد طول موج می باشد. در این ساختار پراکندگی نور در هر نقطه با نقاط دیگر به صورت تداخل ویرانگر جمع می شود و باعث کاهش بازتاب می شود. در این روش آرایه ها روی خود زیرلایه تشکیل می شوند، بنابراین مشخصات ضریب شکست در تمام بازه طول موج با زیرلایه یکسان است و مشخصات مکانیکی و گرمایی لایه ضدبازتاب و زیر لایه تقریباً یکسان خواهد بود، در نتیجه در محیط های 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 ($\epsilon(x + a) = \epsilon(x + a)$

که در آن (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 بهنجار کردن نسبت به انرژی ورودی میتوان ضرایب عبور بهنجار کردن نسبت به انرژی ورودی میتوان ضرایب عبور

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

میدهد) بستگی دارد. در این شبیه سازی ضریب پرشدگی ۰/۲۱۵ در نظر گرفته شده است و مقدار بازتاب و عبور با تغییر ارتفاع و دوره تناوب ساختار در محدوده طیفی ۵-۳ میکرومتر مورد بررسی قرار گرفته است.

۳- تحليل نتايج

برای سیلیکون ضریب شکست ثابت ۳/۴۴ در نظر گرفته شده و طیف بازتاب و عبور در بازه ۳۸ ۳–۵ برای سطح سیلیکون خام به ترتیب ۳۰٪ و ۷۰٪ شبیه سازی شده است.

در نمودار شکل ۲-الف، با افزایش عمق آرایهها در بازه μm ۳-۵ بازتاب کاهش پیدا میکند و در عمق ۳/۵μm میانگین بازتاب به حدود ۱٪ میرسد. از طرفی با افزایش عمق ساختار بیش از ۳/۵μm تغییر قابل ملاحظهای در مقدار میانگین بازتاب دیده نمی شود.





در شکل ۳، نمودار بازتاب و عبور در عمق ۳/۵μm با دوره تناوبهای مختلف شبیه سازی شده است. با افزایش دوره تناوب در بازه بازه ۸/۱μm مقدار بازتاب کاهش پیدا می کند؛ اما با دوره تناوب ۲μ۳ مقدار بازتاب افزایش پیدا می کند؛ بنابراین ساختار با دوره تناوب ۱/۱ میکرومتر در بازه طیفی ۵-۳ میکرومتر کمترین بازتاب را خواهد داشت.



شکل ۳: نمودار طیف بازتاب و عبور با عمق ۳/۵μ۳ 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 ۰-۳۰ درجه مقدار بازتاب در حدود ۲٪ و در زاویه ۵۰ درجه کمتر از ۱۰٪ میباشد؛ بنابراین مقدار بازتاب در این ساختار حساسیت زیادی به زوایه فرود از ۳۰-۰ درجه

٨٧

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت <u>www.opsi.ir</u> قابل دسترسی باشد.

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.

[1] Hemant. Kumar. Ruat, V. Anand. Ganesh, A. Sreekumaran. Nair, Seeram. Ramakrishna, "Anti-reflective coatings: A critical, in-depth review", Energy & Enviromental 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).

[۷] خراسانی، سینا، مقدمهای بر اپتیک بلورهای فوتونی، انتشارات دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۸۶.

[۸] 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 ۰۰-۲۰ 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 ۱/۱μm و عمق μ۳ ۵/۳.



شکل ۵: نمودار طیف بازتاب برای فرود با زوایای مختلف در دو مد TE و TM بر نمونه با دوره تناوب ۱/۱µm و عمق۳۸ ۳/۵.

۴– نتیجهگیری

شبیه 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 ۵–۳ میکرومتر تولید کرد. چون در این روش از خود زیرلایه برای تولید آرایهها استفاده میشود، مشخصات ضریب شکست آن در تمام بازه طول