

طراحی لایه نشانی انتخابی کم نشر طیف مادون قرمز

داودی، سمیه^۱؛ قشلاقی، مریم^۱

^۱پژوهشکده لیزر و اپتیک، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، انتهای خیابان کارگر شمالی، تهران

چکیده

در این مقاله طراحی لایه نشانی بلور فوتونیکی تک بعدی در طیف مادون قرمز نهان، با مواد Ge و MgF_2 روی زیر لایه Ge در هر یک از نواحی جوی $3 \sim 5 \mu m$ و $8 \sim 14 \mu m$ به صورت جداگانه، انجام شد. سپس برای انطباق انتشار کم در نواحی جوی $3 \sim 5 \mu m$ و $8 \sim 14 \mu m$ و انتشار زیاد در ناحیه غیر جوی $5 \sim 8 \mu m$ جهت دست یافتن به مادون قرمز نهان و تشعشعات داغ، بلور فوتونیکی تک بعدی هترو طراحی گردید و مشخصات طیف مادون قرمز انتخابی قابلیت نشر کم بر مبنای این بلور فوتونیکی تک بعدی بدست آمد. طیف بازتاب بلور فوتونیکی تک بعدی با روش ماتریس مشخصه در تئوری اپتیک لایه نازک طراحی و با استفاده از نرم افزار طراحی لایه نشانی $TFCalc$ بهینه شد به این ترتیب باند ممنوعه با تشکیل ساختار بلور فوتونیکی تک بعدی هترو وسیع شد. بنابراین، هدف مادون قرمز نهان و تشعشعات داغ در نواحی جوی و غیرجوی شبیه سازی شد

The Design of the Infrared Spectrally Selective Low Emissivity Coating

S.Davodi^{1*} and M.Gheshlaghi¹

^{1*} Laser and optics research school, Nuclear Science and Technology Research Institute (NSTRI), Tehran, Iran

Abstract

In this paper, the coating of one-dimensional photonic crystal in the Infrared stealthy is designed with Ge and MgF_2 on the Ge substrate, in each of the atmospheric windows $3 \sim 5 \mu m$ and $8 \sim 14 \mu m$ individually. Then one-dimensional photonic crystal Heathrow was designed to coincide the low emission of the atmospheric windows $3 \sim 5 \mu m$ and $8 \sim 14 \mu m$ with the highest emissions of the no atmospheric window $5 \sim 8 \mu m$ for achieving the Infrared stealthy and heat radiation. And the characteristics of the optional infrared spectrum with low emission based on the one-dimensional photonic crystals were obtained. The reflectance spectrum of one-dimensional photonic crystals with the characteristic matrix method in the theory of optical thin film design was obtained and optimized by $TFCalc$ software. The band gap with the structure of one-dimensional photonic crystal Heathrow was wide. Thus, the Infrared stealthy and the heat radiation is simulated in the atmospheric and no atmospheric windows.

مقدمه

دارد. در میان انواع مختلف این تکنولوژی، مادون قرمز نهان^۱ یکی از مهمترین اهداف است. به طور کلی مفهوم مادون قرمز نهان، حذف یا کاهش پارامترهای مختلف تشعشع در بازه های جوی

با توجه به نیازهای نظامی و غیر نظامی جدید، تکنولوژی مادون قرمز در چند دهه اخیر پیشرفت های چشمگیری داشته است و محققان زیادی در این زمینه فعالیت می کنند [۱]. لایه نشانی قابل نشر مادون قرمز، در بازه های جوی و غیرجوی کاربرد وسیعی

¹ Infrared stealthy

لازمه بلور 1DPC با طیف مادون قرمز انتخابی کم نشر، انتشار کم در بازه های جوی $3\sim 5\mu\text{m}$ و $8\sim 14\mu\text{m}$ (مادون قرمز نهان)، و انتشار زیاد در بازه غیر جوی $5\sim 8\mu\text{m}$ (تشعشعات داغ) است. بلور 1DPC از موادی با ضریب شکست کمتر (لایه L) و بیشتر (لایه H) از ضریب شکست شیشه، تشکیل شده است. هندسه ساختار بلور فوتونیک با یک جفت دی الکتریک Ge/MgF_2 می باشد بطوریکه، ماده با ضریب شکست بالا در حدود $4/0.2$ است و MgF_2 ماده با ضریب شکست پایین در حدود $1/3.8$ است و تعداد ۶ جفت لایه به صورت متقارن از چپ به راست طراحی شده است. ساختار طرح لایه نشانی به صورت $\text{Sub}/(\text{HL})^6/\text{Air}$ می باشد. طبق قانون کیهرشف [۹]، نسبت بین انتقال T، بازتاب R و انتشار مادون قرمز ϵ می تواند به صورت زیر بیان شود:

$$T + R + \epsilon = 1 \quad (2)$$

انتقال می تواند صفر به نظر برسد و به این معناست که انتشار مادون قرمز می تواند به صورت زیر بیان شود:

$$\epsilon \sim 1 - R \quad (3)$$

طبق تئوری محاسبات لایه نازک، برای j امین لایه میانی، ماتریس مشخصه به صورت زیر است:

$$M_j = \begin{bmatrix} \cos \delta_j & -\frac{i}{p_j} \sin \delta_j \\ -ip_j \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{bmatrix} \quad (4)$$

در معادله ۴، پارامترهای δ_j و p_j به ترتیب طبق معادلات ۵ و ۶ تعریف می شوند:

$$\delta_j = k_0 n_j d_j \cos \theta_j \quad (5)$$

$$p_j = \sqrt{\epsilon_j / \mu_j} \cos \theta_j \quad (6)$$

$n_j d_j$ ضخامت اپتیکی، $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ عدد موج نور فرودی در خلاء، λ_0 طول موج نور فرودی، θ_j زاویه تابش نور در لایه j ام می-باشند. برای 1DPC با تناوب های N، ماتریس مشخصه می تواند به صورت معادله ۷ بیان شود:

$$M = \sum_{j=1}^N M_j = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \quad (7)$$

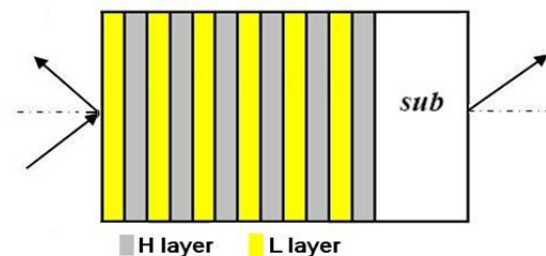
$3\sim 5\mu\text{m}$ و $8\sim 14\mu\text{m}$ می باشد [۴و۲]. قابلیت نشر کم مادون قرمز در سراسر باند، در عملکرد تشعشعات داغ موثر است، و بلافاصله باعث بالا رفتن دما می شود. طبق معادله استفان بولتزمن [۵] داریم:

$$M = \epsilon \sigma T^4 \quad (1)$$

بطوریکه M شدت تابش مادون قرمز، ϵ انتشار مادون قرمز از سطح، σ ثابت استفان - بولتزمن، و T دمای مطلق است. طبق معادله ۱، افزایش دما ممکن همچنین منجر به افزایش شدت تابش مادون قرمز شود و قدرت آشکارسازی هدف ها را بالا ببرد. دی الکتریک ها نقش مهمی در هدایت نور در موجبرهای نوری دارند. کلاس خاصی از بلورهای دی الکتریک معروف به بلورهای فوتونی وجود دارد که در آنها امواج نوری در فرکانس های خاصی اجازه انتشار ندارند. به این محدوده فرکانس های ممنوع، شکاف باند فوتونی می گویند. تکنولوژی بلورهای فوتونی از جدیدترین نوآوری هایی است که با شتاب زیادی در حال توسعه تکنولوژی سیستم های نوری است. این ساختارها بدلیل توانایی کنترل انتشار امواج نوری کاربردهای بالقوه فراوانی دارند [۶و۸]. در این مقاله لایه نشانی بلورهای فوتونی جدیدی طراحی شد که مادون قرمز نهان و تشعشعات داغ را به طور همزمان پوشش دهد.

روش تحلیل و مدل ریاضی

در این مقاله به کمک بلور فوتونیک تک بعدی^۲ (1DPC) نشان داده شده در شکل ۱، لایه نشانی مادون قرمز نهان طراحی شده است. در این طراحی، از Ge به عنوان زیرلایه استفاده می کنیم.

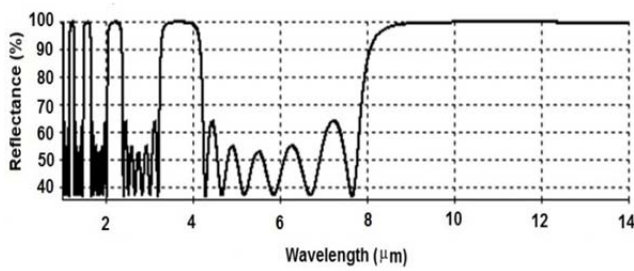


شکل ۱. شماتیکی از بلور فوتونیک تک بعدی

³ Low layer

⁴ High layer

² One-dimensional Photonic Crystal

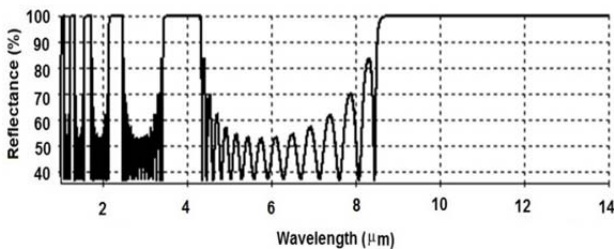


شکل ۳. طیف بازتاب بلور فوتونی محدوده ۸-۱۴ μm

درصد بازتاب برای محدوده ۸-۱۴ μm برابر با ۹۹/۹۹٪ می باشد. شکل های ۲ و ۳ نشان می دهند که با طراحی فوق، ناحیه بازتاب بالا برای دو محدوده جوی ۳-۵ μm و ۸-۱۴ μm به طور همزمان امکان پذیر نمی باشد. برای حل این مشکل از بلور فوتونی تک بعدی با ساختار هترو^۵ استفاده می کنیم. در ساختار هترو، بلور فوتونی از دو ماده با ضریب شکست مختلف تشکیل شده است. به منظور عدم انطباق داخلی بین دو ناحیه بلور فوتونی که ضریب شکست های مختلفی دارند، این دو ناحیه باید در اندازه های شکاف باند منطبق باشند. وقتی بلور های فوتونی با ضریب شکست های مختلف در کنار هم قرار می گیرند، به دلیل عدم انطباق بین شکاف های باند آنها امکان دارد در باندهای انرژی آن ساختارهای ناپیوسته بوجود آید [۱۰]. برای دو ضریب شکستی که در این مقاله استفاده شده است، ساختار زیر را پیشنهاد می دهیم:

$$\text{Sub}/(\text{HL})^6(\text{HL})^6/\text{Air}$$

که منحنی بازتاب ساختار هترو فوق در طول موج مرکزی ۱۱/۵ نانومتر، در شکل (۴) نمایش داده شده است.



شکل ۴. طیف بازتاب با ساختار هترو

ضریب بازتاب 1DPC می تواند به صورت معادله ۸ می باشد:

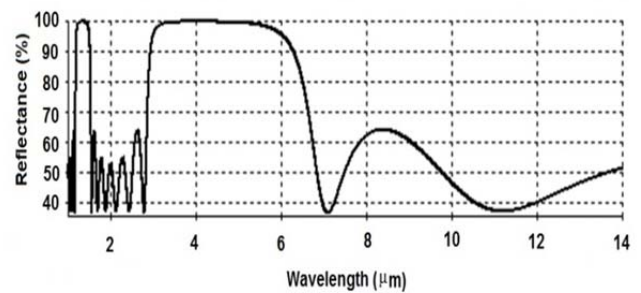
$$r = \frac{m_{11}p_1 + m_{12}p_1p_L - m_{21} - m_{22}p_L}{m_{11}p_1 + m_{12}p_1p_L + m_{21} + m_{22}p_L} \quad (8)$$

در معادله ۸، پارامترهای $p_L = \sqrt{\epsilon_L/\mu_L} \cos\theta_L$ و $p_1 = \sqrt{\epsilon_1/\mu_1} \cos\theta_1$ طوری تعریف می شوند که $\epsilon_1, \mu_1, \epsilon_L$ به ترتیب ثابت دی الکتریک و قابلیت رسانایی مغناطیسی مرزهای چپ و راست 1DPC را نشان دهند. θ_1, θ_L حاصل ضرب زاویه فرودی و عبوری 1DPC (نسبت محور عمود بر سطح) است. بازتاب به صورت معادله ۹، بیان شود:

$$R = |r|^2 \quad (9)$$

طراحی و شبیه سازی

ابتدا، برای باند ۳-۵ μm، یک بلور فوتونی با طول موج مرکزی ۴ μm طراحی کرده و ضخامت اپتیکی هر لایه برابر با $\lambda_0/4$ می باشد. منحنی طیف بازتاب آن در شکل (۲) نمایش داده شد.



شکل ۲. طیف بازتاب بلور فوتونی محدوده ۳-۵ μm

در شکل ۲ مشاهده می شود که درصد بازتاب در محدوده ۳-۵ μm برابر با ۹۹/۹۹٪ می باشد.

مشابه طراحی قبل این بار با طول موج مرکزی λ_0 برابر با ۱۰ μm طراحی دیگری برای محدوده طول موجی ۸-۱۴ μm انجام می دهیم منحنی طیف بازتاب آن در شکل (۳) نمایش داده شد.

⁵ one-dimensional heterostructure photonic crystal

بیشتر از ۴۰/۸۷ شد. طیف بازتاب بلور فوتونیک تک بعدی با روش ماتریس مشخصه در تئوری اپتیکی لایه نازک طراحی و با استفاده از نرم افزار طراحی لایه نشانی TFCalc بهینه شد. در نتیجه بلور فوتونی تک بعدی جدید در نواحی جوی $3\sim 5\mu\text{m}$ و $8\sim 14\mu\text{m}$ بازتاب زیاد (انتشار کم مادون قرمز) و در ناحیه غیر جوی $5\sim 8\mu\text{m}$ بازتاب کم (انتشار زیاد مادون قرمز) دارد. بنابراین، هدف مادون قرمز نهان و تشعشعات داغ در نواحی جوی و غیرجوی شبیه سازی کند. که روشی جدید و بهتر را برای تشخیص مادون قرمز نهان فراهم می کند.

مرجع ها

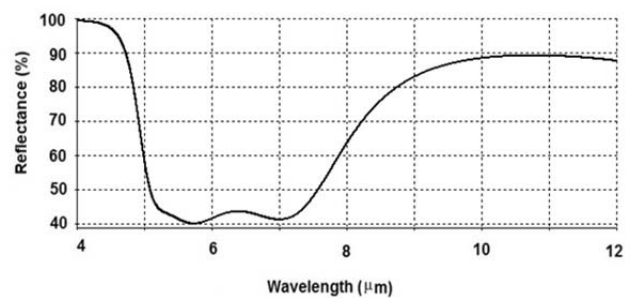
- [1] H.A. Macleod, "Thin Film Optical Filters", 2nd edition, c.1989, McGraw-Hill.
- [2] B.L. Liu, J.M. Shi, D.P. Zhao, W. Zhang, B. Xu. "Analysis on the camouflage application of photonic crystals", J. Laser & Infrared. **1** (2009) 42-45.
- [3] X.G. Diao, W.CH. Hao, T.M. Wang, Z. Wu, J. Huang. "Infrared stealth properties of low emissivity thin films", J. Aerospace Materials & Technology. **5** (2007) 39-42.
- [4] W.D. Mu, H.F. Cheng, G.P. Tang, Zh.H. Chen. "The present situation and the development of thermal infrared stealth camouflage technology and materials", J. Mater Rev. **21** (2007) 114-117.
- [5] T. Hao, L. Hai-Tao, C. Hai-Feng, "A thin radar-infrared stealth-compatible structure: Design, fabrication, and characterization", Chin. Phys. B. **23**, No. 2 (2014) 025201.
- [6] E. Yablonovitch, "Inhibited spontaneous emission in solid-state physics electronics", Phys. Rev. Lett. **58** (1987) 2059-2062.
- [7] S. John, "Strong localization of phonics in certain disordered dielectric Superlattices", Phys. Rev. Lett., **58** (1987) 2486-2489.
- [8] J.D. Joannopoulos, R.D. Mead, J.N. Winn, "Photonic Crystals: Molding the Flow of Light", Princeton, NJ: Princeton Univ. Press, 1995.
- [9] S. Enoch, J.J. Simon, L. Escoubas. "Simple layer-by-layer photonic crystal for the control of thermal emission", J. Appl. Phys. Lett. **86** (2005) 261101.

شکل ۴، نشان می دهد که در نواحی جوی $3\sim 5\mu\text{m}$ و $8\sim 14\mu\text{m}$ بازتاب می تواند زیاد باشد، اما در ناحیه غیرجوی $5\sim 8\mu\text{m}$ متوسط بازتاب در حدود ۴۷/۷۵ درصد است، که این نتیجه منجر به ناکارآمدی تشعشعات داغ می باشد. ماتریس مشخصه اصلی ترین روش برای طراحی لایه اپتیکی است [۱۱].

برای بهینه سازی ساختار هترو، نیاز به تغییر ضخامت لایه ها می باشد. لذا به دلیل پیچیدگی رفتار لایه و اثرات بهتر انتخابی انتشار کم، از روش شبیه سازی کامپیوتری TFCalc استفاده شد. با این روش طرح لایه نشانی به صورت زیر انتخاب شد:

Sub/0.09H0.15L0.18H0.15L0.35H0.75L0.84H0.15L0.01H0.19L0.01H0.01L/Air

که نمودار آن در شکل (۵) نشان داده شده است.



شکل ۵. طیف بازتاب با بهینه سازی ساختار هترو

چنانچه ملاحظه می شود در طراحی بهینه شده هترو، علی رغم کم شدن بازتاب در ناحیه جوی $8\sim 14\mu\text{m}$ ، نوسانات بازتابش در ناحیه غیر جوی $5\sim 8\mu\text{m}$ به حداقل رسیده و میانگین بازتاب در این ناحیه کاهش می یابد.

نتیجه گیری

بطور خلاصه، Ge/MgF_2 ترکیب بلور فوتونیک تک بعدی (IDPC) را می سازد. باند ممنوعه با تشکیل ساختار دیگر بلور فوتونیک تک بعدی (IDHPC) وسیع می شود، و مشخصات طیف مادون قرمز انتخابی قابلیت نشر کم بر مبنای این بلور فوتونیک تک بعدی طراحی شد. نتایج نشان می دهد که با طراحی فوق، ماکزیمم بازتاب در نواحی جوی $3\sim 5\mu\text{m}$ و $8\sim 14\mu\text{m}$ به ترتیب ۹۹/۹۲ و ۹۹/۹۸ درصد و در ناحیه غیرجوی $5\sim 8\mu\text{m}$