

中远红外超宽波段高反射一维光子晶体薄膜结构设计

汤道麟, 李享成, 陈平安, 朱颖丽, 朱伯铨

(武汉科技大学省部共建耐火材料与冶金国家重点实验室, 武汉 430081)

摘 要: 红外高反射薄膜是实现超低损耗光学器件、红外隐身等技术的关键基础材料。根据多层光学薄膜的传输矩阵原理, 得到一维光子晶体的反射率和透射率表达式, 分析推导了一维光子晶体的能带结构。利用传输矩阵原理, 以 Ge 和 SiO₂ 为介质材料设计了 28 层 $\lambda/4$ 一维光子晶体结构。随后, 利用有限元法计算其光子能带, 使用折射率差值更大的 PbSe 和 SiO₂, 计算出光子晶体的第一、第二禁带分别为 $2.01 \times 10^{13} \sim 4.11 \times 10^{13}$ Hz 和 $8.13 \times 10^{13} \sim 1.02 \times 10^{14}$ Hz。优化后的 $\lambda/4$ 一维光子晶体结构层数低至 14 层, 实现了 3~5 μm 和 8~14 μm 的高反射率。

关键词: 计算仿真; 红外高反射膜结构; 能带曲线; 光子晶体

中图分类号: TN213 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2022)05-1310-06

网络出版时间: 2022-04-01



Design of One-Dimensional Photonic Crystal Film Structure with High Reflection in Ultra-Wide Range of Mid-/Far-Infrared Band

TANG Daolin, LI Xiangcheng, CHEN Ping'an, ZHU Yingli, ZHU Boquan

(The State Key Laboratory of Refractories and Metallurgy, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)

Abstract: The infrared films with ultra-high reflection is the key and basic materials for the realization of low loss optical device, infrared stealth, etc.. According to the transmission matrix principle of multilayer optical films, the reflectance and transmittance expressions of one-dimensional photonic crystals were obtained, and the energy band structure of one-dimensional photonic crystals was analyzed. Using the principle of transmission matrix, we designed a 28-layer $\lambda/4$ one-dimensional photonic crystal structure with Ge and SiO₂ as dielectric materials. Also, the first and second band gaps of the photonic crystal calculated by the finite element method to be $2.01 \times 10^{13} \sim 4.11 \times 10^{13}$ Hz and $8.13 \times 10^{13} \sim 1.02 \times 10^{14}$ Hz, respectively. The optimized $\lambda/4$ one-dimensional photonic crystal structure has as low as 14 layers, thus achieving high reflections of 3~5 μm and 8~14 μm .

Keywords: computational simulation; infrared high reflective film structure; energy band curve; photonic crystal

由于大气中气体分子等物质对红外光的散射和吸收, 大气对不同波长的红外光具有不同的透过率。0.7~2.5 μm 、3.0~5.0 μm 和 8.0~14.0 μm 波段在大气中具有较高的透射率, 被称为大气窗口, 目前红外探测器的工作波长主要位于这些波段^[1]。降低物体在大气窗口波段的发射率, 可以降低其被红外光电雷达探测到的概率, 从而实现红外隐身。

根据 Kirchhoff 定律, 提高材料在大气窗口波段的反射率, 可降低其在该波段的发射率。基于此原

理发展出了金属微粉涂层^[2]、导电薄膜^[3]和红外高反射光子晶体^[4]等红外隐身技术。红外高反射光子晶体由于其良好的电磁兼容性能^[5-6], 是理想的多波段兼容隐身材料。光子晶体(PC)是一种具有周期性介电结构的新型材料, 它具有光子带隙^[7]和光子局域^[8]两大特性。光子带隙指光子晶体具有光子禁带和导带, 位于禁带内的光子无法在光子晶体内传播; 光子局域指光子晶体在引入缺陷后, 与缺陷态频率吻合的光子被局限于缺陷处, 允许该频率的光子在禁

收稿日期: 2021-05-12。 修订日期: 2021-09-11。

基金项目: 国家自然科学基金(51972242); 国防基础科研项目。

第一作者: 汤道麟(1998—), 男, 硕士研究生。

通信作者: 李享成(1978—), 男, 博士, 教授。

Received date: 2021-05-12. Revised date: 2021-09-11.

First author: TANG DaoLin (1998—), male, Master candidate.

E-mail: tangdaolin.tdl@foxmail.com

Correspondent author: LI Xiangcheng (1978—), male, Ph.D., Professor.

E-mail: lixiangcheng@wust.edu.cn

带内传播。使 3~5 μm 和 8~14 μm 的红外光位于光子禁带内, 利用光子禁带不允许光子传播的性质, 进而实现红外隐身^[9]。相较于更高维数的二维、三维光子晶体, 一维光子晶体的设计和制备更加简单, 受到研究者的广泛关注^[10]。2008 年, 刘必鏊等^[11]利用 CdSe 和 SiO_2 设计了一维光子晶体结构, 在 3.14~5.57 μm 和 8.16~13.96 μm 波段范围内获得了 95% 以上的反射率。2011 年, 高永芳等^[12]在一维光子晶体中引入缺陷, 成功实现了 8~14 μm 远红外高反射和 10.6 μm 激光高透射的兼容。2014 年, Wang 等^[13]利用 Ge 和 ZnS 为材料, 复合 4 个一维光子晶体, 设计出了 48 层结构, 实现了 3~5 μm 和 8~14 μm 波段的高反射率。Qi 等^[6]利用 Ge 和 ZnS 研究了工作范围在可见光和近红外的一维光子晶体, 3~5 μm 波长内的平均反射率为 95.1%。2018 年, 李康文等^[14]利用 Si 和 Y_2O_3 设计出 24 层的一维光子晶体结构, 在 3~5 μm 波段能实现高达 97.418%~99.999% 的反射率。

本文研究对象为 $\lambda/4$ 膜系光子晶体, $\lambda/4$ 膜系光子晶体使光束在介质面处形成相同的相位, 所产生的干涉相长使得整个膜系得到极大值反射率^[14]。单个一维光子晶体的带隙无法完全覆盖多个波段的大气窗口, 因此需要拓展其带隙, 从而实现多个波段上的高反射率。引入匹配层^[15]、增强层^[16]、金属结构层^[17]等, 可以实现光子带隙的扩展。但这些方式在设计和制备上难度系数较大, 工艺选择性较复杂, 比较高效的方式还是合并多个光子晶体以实现光子带隙的展宽^[18]。这势必会增加膜结构的厚度, 大大增加工艺难度和生产成本。因此, 设计多波段宽频低层数的光子晶体结构是急需解决的问题^[14]。

1 计算原理

1.1 传输矩阵

传输矩阵可以反映介质的全部有用参数, 包括折射率、厚度、入射角等。它可以看为单层膜的数学模型, 在求解多层膜的折射和反射时, 只需要将每层膜的传输矩阵相乘, 就可以在数学上表示出电磁波进入系统和射出系统前后电场和磁场分量的关系。

为简化计算, 假设平面电磁波以 S 偏振模式正入射, 沿着 z 方向直线传播。根据传输矩阵原理可得到第 K 层的传输矩阵为^[13]:

$$\mathbf{M}_K = \begin{pmatrix} \cos \delta_K & \frac{i}{\eta_K} \sin \delta_K \\ i\eta_K \sin \delta_K & \cos \delta_K \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中: η_K 为光子晶体第 K 层的光学导纳, 对于 P 偏振光 $\eta_K = \frac{\eta_K}{\cos \theta_K}$, 对于 S 偏振光 $\eta_K = \eta_K \cos \theta_K$, δ_K 为第 K 层的相位因子, 表达式为:

$$\delta_K = \frac{2\pi}{\lambda} n_K d_K \cos \theta_K \quad (2)$$

其中, λ 为入射光的波长, n_K 为第 K 层的折射率, d_K 为第 K 层的厚度, θ_K 为第 K 层的折射角。

对于层数为 N 的光子晶体, 其特征矩阵可表达为^[13]:

$$\mathbf{M} = \prod_{K=1}^N \mathbf{M}_K = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \quad (3)$$

假设入射光的电场分量和磁场分量为 E_0 和 H_0 , 经过 N 层一维光子晶体后, 透射光的电场分量和磁场分量分别为 E_{N+1} 和 H_{N+1} 。利用传输矩阵, 可将入射光和透射光的电场分量和磁场分量联系起来, 表达式为:

$$\begin{pmatrix} E_0 \\ H_0 \end{pmatrix} = \prod_{K=1}^N \mathbf{M}_K = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{N+1} \\ H_{N+1} \end{pmatrix} \quad (4)$$

由此可得到反射率为^[13]:

$$R = \left[\frac{\eta_0(A + B\eta_{N+1}) - (C + D\eta_{N+1})}{\eta_0(A + B\eta_{N+1}) + (C + D\eta_{N+1})} \right]^2 \quad (5)$$

1.2 能带结构

对于无穷大一维光子晶体, 假设高、低折射率材料在 z 方向上周期性堆叠。不考虑材料的磁性, 其中第 1 种介质折射率为 n_1 , 厚度为 d_1 ; 第 2 种介质折射率为 n_2 , 厚度为 d_2 。光子晶体的周期为 $d = d_1 + d_2$ 。

电磁波在沿 Z 方向正入射时, 由于光子晶体折射率周期性变化, 电磁波的电场和磁场分量会受到势场的周期性作用。根据 Bloch 定理, 势场与 Z 的关系可写为周期函数与平面波乘积的形式。

$$u(z + d) = u(z) \exp(-ikd) \quad (6)$$

根据传输矩阵原理可知, 经过一个周期, 电场强度和磁场强度的关系为

$$\begin{pmatrix} E_{K+1} \\ H_{K+1} \end{pmatrix} = \mathbf{M}_K \mathbf{M}_{K+1} \begin{pmatrix} E_K \\ H_K \end{pmatrix} \quad (7)$$

规定

$$\mathbf{M}_K \mathbf{M}_{K+1} = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix} \quad (8)$$

结合 Bloch 定理, 可得等式关系

$$\exp(-ikd) \begin{pmatrix} E_{K+1} \\ H_{K+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_K \\ H_K \end{pmatrix} \quad (9)$$

此时 $\exp(-ikd)$ 为矩阵 $\begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix}$ 的本征值, 求解方程 $|M_K M_{K+1} - \exp(-ikd)| = 0$ 可得一维光子晶体的色散方程^[13]。

$$\cos k(\omega)d = \left| \frac{1}{2}(m_{11} + m_{22}) \right| = \left| \cos \delta_H \cos \delta_L - \frac{1}{2} \left(\frac{n_H}{n_L} + \frac{n_L}{n_H} \right) \sin \delta_H \sin \delta_L \right| \quad (10)$$

式中 k 为 Bloch 矢量, 取决于光子晶体的结构和介质材料的性质。当 $\left| \frac{1}{2}(m_{11} + m_{22}) \right| \leq 1$ 时, k 为实数,

电磁波可以在光子晶体中传播; $\left| \frac{1}{2}(m_{11} + m_{22}) \right| > 1$ 时, k 有虚部, 电磁波在光子晶体中指数衰减, 无法深入光子晶体。

2 分析与讨论

2.1 3~5 μm 与 8~14 μm 波段红外高反射的实现

不同中心波长的一维光子晶体复合, 可以实现 3~5 μm 与 8~14 μm 波段红外高反射。共设计了 3 种膜系结构, 为方便区分, 将其分别命名为膜系结构 A、膜系结构 B 和膜系结构 C。不同膜系结构的层数和介质材料有所不同, 如图 1 所示。

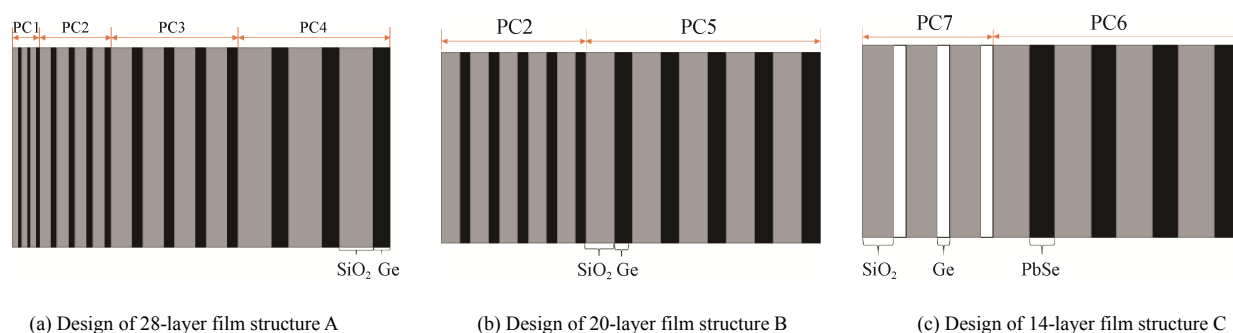


图 1 膜系结构 A、B、C 的设计图

Fig. 1 Design of film structure A, B and C

膜系结构 A 由 PC1、PC2、PC3、PC4 共 4 个 Ge/SiO₂ 光子晶体复合而成, 共 28 层, Ge 折射率为 4.00, SiO₂ 折射率为 1.45。PC1 周期数为 3, 中心波长为 3.5 μm ; PC2 周期数为 4, 中心波长为 4.3 μm ; PC3 周期数为 4, 中心波长为 9.8 μm ; PC4 周期数为 3, 中心波长为 13.0 μm 。PC1 和 PC2 的功能为实现 3~5 μm 的高反射, PC3 和 PC4 的功能为实现 8~14 μm 的高反射。膜系结构 B 由 PC5 和 PC2 2 个 Ge/SiO₂ 光子晶体复合而成, 共 20 层。PC5 与 PC3 中心波长一致, 周期数从 4 增加到 6。膜系结构 C 由 PbSe/SiO₂ 光子晶体 PC6 和 Ge/SiO₂ 光子晶体 PC7 复合而成, 仅 14 层。PC6 中心波长与 PC3 相同, 周期数为 4, 介质材料由 Ge($n=4.0$) 替换为 PbSe($n=4.5$); PC7 与 PC2 中心波长一致, 层数降低至 3 层。

28 层一维膜系结构 A 及各组成部分的反射率光谱如图 2a~图 2c 所示。

计算结果表明, 复合光子晶体的反射率为各组成部分反射率的叠加, 高反射带完全覆盖 3~5 μm 和 8~14 μm 波段, 反射率为 99.26%~99.99%; PC1 反射率 99% 以上的波段在 3.22~3.83 μm , PC2 反射率 99% 以上的波段在 3.41~5.82 μm , PC3 有 2 个高反射

带, 反射率 99% 以上的波段分别为 3.01~3.58 μm 和 7.77~13.27 μm 。PC4 也有 2 个高反射带, 反射率 99% 以上的波段为 4.20~4.45 μm 和 12.00~14.21 μm 。随着中心波长的增加, 高反射带的宽度也随之增加; 对于中心波长较大的光子晶体, 其次级高反射带会出现在反射谱的短波方向上。

尽管 28 层的膜系结构 A 在 3~5 μm 和 8~14 μm 波段拥有 99% 以上的反射率, 但层数较高, 生产加工的可控性较差, 有待进一步优化设计以减少层数。

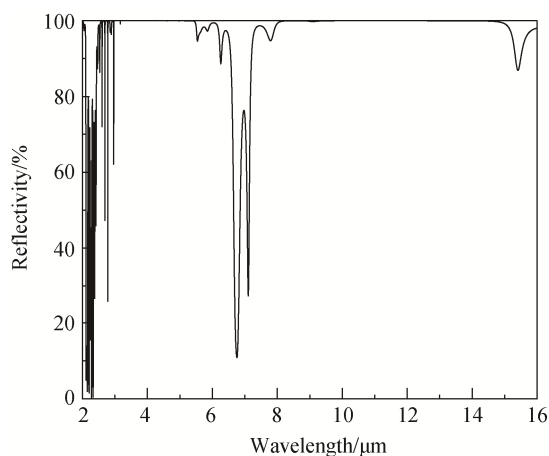
2.2 3~5 μm 与 8~14 μm 波段红外高反射的优化

图 2c 中不难发现, 实现 8~14 μm 波段高反射的光子晶体, 在 2~4 μm 左右, 会产生一个范围非常窄的次级高反射带, 宽度约为 600~700 nm。合理利用这一次级高反射带, 使其部分覆盖 3~5 μm 区域, 理论上可以减少膜结构的厚度。为研究其次反射带产生的原因, 绘制了 PC3 的正入射能带如图 3 所示。

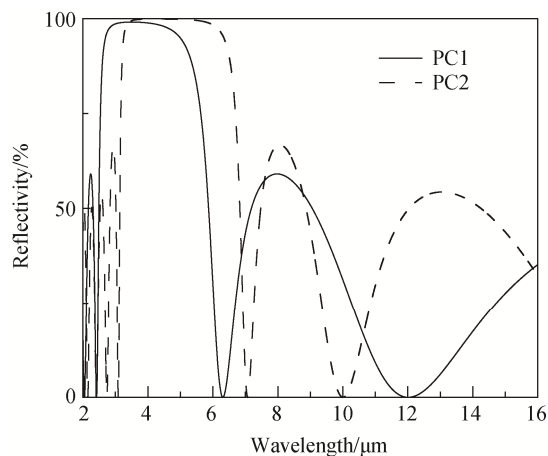
能带图中(图 3), 曲线能够经过的频段为光子晶体的通带, 曲线无法经过的频段, 为光子带隙。可以发现, PC3 拥有不止一条光子带隙, 随着频率上升, 光子带隙的宽度降低。第一带隙范围是 $2.11 \times 10^{13} \sim 4.01 \times 10^{13} \text{ Hz}$, 对应 7.45~14.12 μm 波段, 宽度为

6.67 μm ; 第二带隙范围是 $8.23 \times 10^{13} \sim 1.01 \times 10^{14} \text{Hz}$, 对应 2.95~3.62 μm 波段, 宽度为 0.67 μm ; 更高级次的带隙, 位于可见光区, 不在研究范围内。8~14 μm 高反射的光子晶体的第二带隙恰好有部分位于 3~

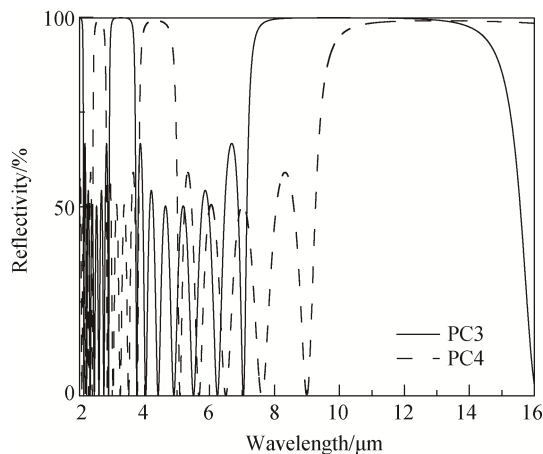
5 μm 范围内。与图 2c 比较, PC3 实际的高反射带宽度与能带图计算得出的理论带隙宽度存在偏差, 这是计算时存在层数差异所导致的, 能带计算时假设周期数为无穷大, 而 PC3 实际只有 4 个周期。



(a) Reflectance spectrum of film structure A



(b) Reflectance spectrum of PC1 and PC2



(c) Reflectance spectrum of PC3 and PC4

图 2 膜系结构 A 及各部分反射谱

Figure 2 Reflectance spectrum of film system structure A and each part

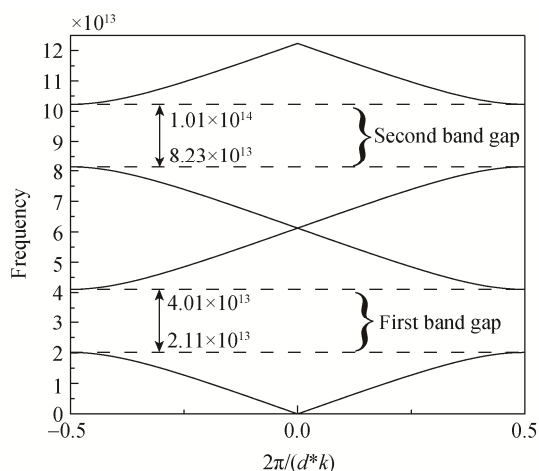


图 3 Ge/SiO₂ 8 层光子晶体 PC3 的能带曲线

Fig. 3 Band curve of 8-layer Ge/SiO₂ photonic crystal PC3

经计算, PC3 的第一禁带完全覆盖 8~14 μm 波段, 第二禁带宽度很小, 但仍位于 3~5 μm 范围内。仅需针对剩余的 3.62~5.00 μm 频段进行设计, 同时增加 PC3 的周期数, 使实际带隙宽度尽可能接近理论计算的结果。

基于此, 将 PC3 的周期数增加到 6, 命名为 PC5, 与 PC2 复合后, 得到 10 个周期共 20 层的膜系结构 B, 计算得到其反射率, 如图 4 所示。

高反射带完全覆盖 3~5 μm 和 8~14 μm 波段, 平均反射率在 99% 以上。理论上 2.95~3.62 μm 范围内的反射率都应大于 99%, 而实际上在 3 000~3 018 nm 波段内有 1 个小幅波动, 最低值在 3 011 nm 处, 为 97.95%。这是 PC5 的周期数不够导致的。

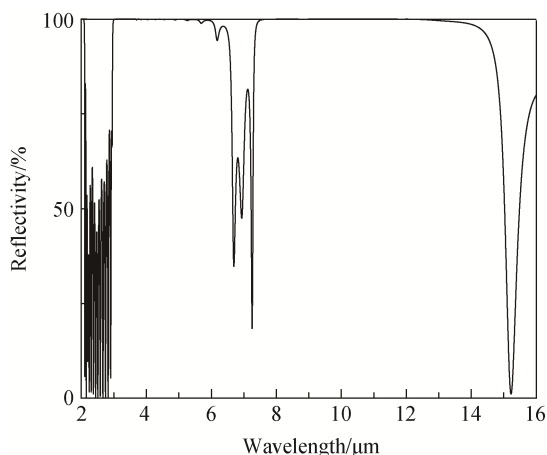
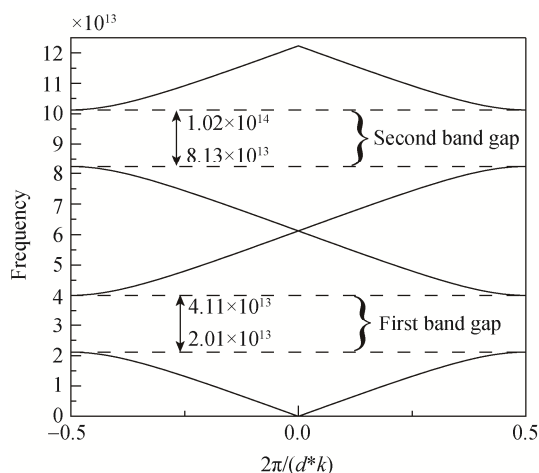


图4 膜系结构B的反射谱

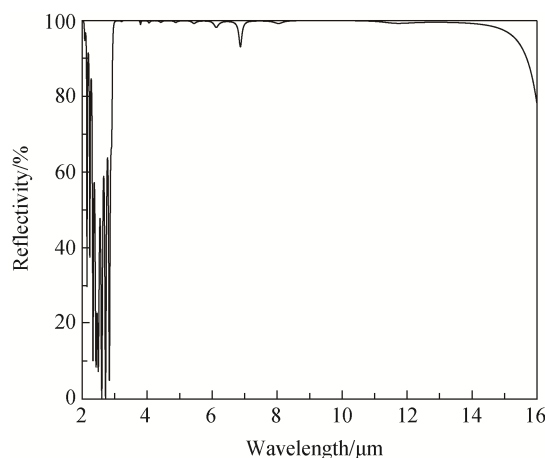
Fig. 4 Reflectance spectrum of film system structure B

增大光子晶体的带隙宽度还可以用增大介质材料折射率差值的方式来实现^[19]。将PC5的材料由Ge换为PbSe($n=4.5$), 光子晶体的中心波长仍为9.8 μm, 将其命名为PC6, 其能带曲线如图5所示。

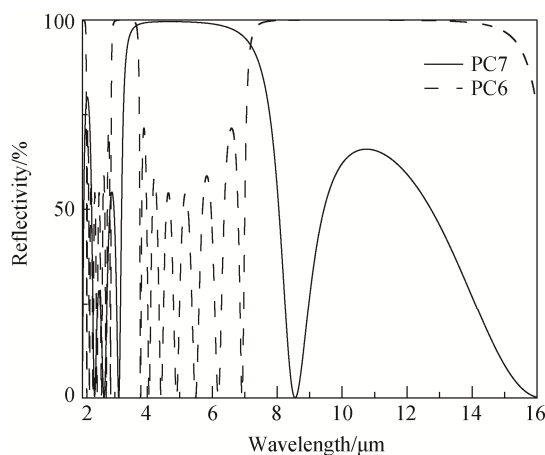
图5 PbSe/SiO₂ 8层光子晶体PC6的能带曲线Fig. 5 Band curve of 8-layer PbSe/SiO₂ photonic crystal PC6

增大介质的折射率差值后, PC6的带隙相比于PC5得到了较大的拓展。与PC3相同, 仅第一、第二禁带在研究范围内, 第一禁带在 $2.01 \times 10^{13} \sim 4.11 \times 10^{13}$ Hz范围内, 第二禁带在 $8.13 \times 10^{13} \sim 1.02 \times 10^{14}$ Hz范围内。将频率换算到波长, 其第一禁带与第二禁带分别位于7 251~14 826 nm和2 922~3 665 nm波段, 宽度分别为7 575 nm和743 nm。与PC3相比, 由于介质的折射率差值更大, 第一禁带变宽了905 nm, 第二禁带变宽了72 nm。此时, PC6禁带完全覆盖8.0~14.0 μm和3.0~3.6 μm波长范围, 仅需再针对3.6~5.0 μm波段进行设计, 便可实现3.0~5.0 μm和8.0~14.0 μm波段的高反射。

将PC2的周期数减少至3个周期, 命名为PC7; 令PC6有4个周期。复合PC7和PC6, 得到7个周期共14层的膜系结构C, 其反射率谱及各组成部分谱如图6a和图6b所示。



(a) Reflectance spectrum of film structure C



(b) Reflectance spectrum of PC5 and PC6

图6 膜系结构C的反射率及各部分反射率谱

Fig. 6 Reflectance spectrum of film system structure C and each part

从图6可以看出, 3~5 μm的反射率为98.9%~99.9%, 8~14 μm的反射率为99.2%~99.9%; 3~5 μm范围内, 折射率小幅下降5次, 极小值点分别位于3.22、3.79、4.06、4.42、4.87 μm波长处, 极小值分别为99.7%、98.9%、99.4%、99.5%、99.5%。

红外高反射率的设计已由国内和国外的实验所验证, 如有毅^[20]设计了Si/SiO₂光子晶体, 通过磁控溅射制备, 结果表明设计与实验结果基本一致。Jena等^[21]设计了TiO₂/SiO₂一维光子晶体, 同样采用磁控溅射进行了制备, 发现光子带隙与计算结果非常匹配。

结合图6a和图6b可以发现, 图6a中3~5 μm

的高反射带内的极小值点正好与图 6b 中 PC6 和 PC7 在该波段的极小值点相对应。这是因为 PC6 和 PC7 的层数较低, 使禁带区域的反射率较理论值偏低, 导致膜结构 C 的折射率在高反射带出现波动。

3 结论

1) 禁带不同的光子晶体复合后可以拓展其光子带隙。复合后的光子晶体禁带能完全覆盖 3~5 μm 和 8~14 μm 大气窗口波段, 但未经优化的 Ge/SiO₂ 复合光子晶体层数高达 28 层, 难以实验制备。

2) 使用折射率差值更大的介质材料能够获得更宽的光子带隙, 将 Ge 替换为 PbSe 后, 中心波长不变的 PbSe/SiO₂ 光子晶体相比 Ge/SiO₂ 光子晶体, 其第一禁带和第二禁带均拓宽了 $0.2 \times 10^{13} \text{Hz}$ 。

3) 根据能带曲线对 28 层 Ge/SiO₂ 复合光子晶体进行优化, 引入介质材料 PbSe 后, 可将层数减少至 14 层, 且 3~5 μm 和 8~14 μm 大气红外窗口波段的反射率在 98% 以上。

参考文献:

- [1] 王江安, 肖伟岸, 申林. 海空背景下目标红外辐射特征分析[J]. 海军工程大学学报, 2001(4): 29–31.
WANG Jiang'an, XIAO Wei'an, SHEN Lin. J Naval Univer Engineer (in Chinese), 2001(4): 29–31.
- [2] ZHAO J, LUO W, LUN Q, et al. The High-Temperature Resistance Properties of Polysiloxane/Al Coatings with Low Infrared Emissivity [J]. Coatings, 2018, 8(4): 125–135.
- [3] HUANG Z, ZHOU W, TANG X, et al. High-temperature application of the low-emissivity Au/Ni films on alloys[J]. Appl Surface Sci 2010, 256(22): 6893–6898.
- [4] 刘必臻, 时家明, 赵大鹏, 等. 光子晶体隐身应用分析[J]. 激光与红外, 2009, 39(1): 42–45.
LIU Biliu, SHI Jiaming, ZHAO Dapeng, et al. Laser Infrared(in Chinese), 2009, 39(1): 42–45.
- [5] WANG Z X, CHEN Y Z, NIE Y, et al. Design and realization of one-dimensional double hetero-structure photonic crystals for infrared-radar stealth-compatible materials applications[J]. J Appl Physics, 2014, 116(5): 54905.
- [6] QI D, WANG X, CHENG Y Z, et al. Design and characterization of one-dimensional photonic crystals based on ZnS/Ge for infrared-visible compatible stealth applications[J]. Opt Mater, 2016, 62: 52–56.
- [7] YABLONOVITCH E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. Phys Rev Lett, 1987, 58(20): 2059–2062.
- [8] JOHN S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices[J]. Phys Rev Letters, 1987, 58(23): 2486–2489.
- [9] 王皓, 杨忠泽, 刘可歆, 等. 光子晶体在红外隐身中的应用及其发展历程[J]. 材料科学, 2019, 9(9): 835–848.
WANG Hao, YANG Zhongze, LIU Kexin, et al. Mater Sci(in Chinese), 2019, 9(9): 835–848.
- [10] 张民, 杨小静, 刘名扬. 一维光子晶体反射镜的光学能带结构[J]. 装甲兵工程学院学报, 2008, 22(3): 91–94.
ZHANG Min, YANG Xiaojing, LIU Mingyang. J academy Armored Force Engineer(in Chinese), 2008, 22(3): 91–94.
- [11] 刘必臻, 时家明, 赵大鹏, 等. 一种基于光子晶体的红外伪装材料 [J]. 红外技术, 2008, 30(9): 512–515.
LIU Biliu, SHI Jiaming, ZHAO Dapeng, et al. Infrared Technol(in Chinese), 2008, 30(9): 512–515.
- [12] 高永芳, 时家明, 赵大鹏, 等. 一种基于光子晶体的远红外与 10.6 μm 激光兼容伪装材料的设计与制备[J]. 光学学报, 2011, 31(6): 162–165.
GAO Yongfang, SHI Jiaming, ZHAO Dapeng, et al. Acta Optica Sinica(in Chinese), 2011, 31(6): 162–165.
- [13] WANG F, CHENG Y Z, WANG X, et al. Effective modulation of the photonic band gap based on Ge/ZnS one-dimensional photonic crystal at the infrared band[J]. Opt Mater, 2018, 75: 373–378.
- [14] 李康文, 李享成, 陈平安, 等. 基于异质结构的一维光子晶体红外 3~5 μm 高反射镜设计[J]. 光学学报, 2018, 38(9): 309–315.
LI Kangwen, LI Xiangcheng, CHEN Ping'an, et al. Acta Opt Sinica(in Chinese), 2018, 38(9): 309–315.
- [15] ZHANG H F, LIU S B, KONG X K, et al. Enhancement of omnidirectional photonic band gaps in one-dimensional dielectric plasma photonic crystals with a matching layer[J]. Phys Plasm, 2012, 19(2): 2059.
- [16] ALEJO-MOLINA A, ROMERO-ANTEQUERA D L, SÁNCHEZ-MONDRAGÓN J J. Localization and characterization of the metallic band gaps in a ternary metallo-dielectric photonic crystal[J]. Opt Commun, 2014, 312: 168–174.
- [17] JAMSHIDI-GHALEH K, EBRAHIMPOUR Z, MOSLEMI F. Amplifying and compressing optical filter based on one-dimensional ternary photonic crystal structure containing gain medium[J]. Phys B Condens Matter, 2015, 468: 72–75.
- [18] 黄弼勤, 顾培夫. 一维光子晶体禁带的展宽[J]. 光学学报, 2003, 23(12): 1497–1501.
HUANG Biqin, GU Peifu. Extension of One-Dimensional Photonic Crystal's Band Gap[J]. Acta Optica Sinica(in Chinese), 2003, 23(12): 1497–1501.
- [19] 陈慰宗, 申影, 忽满利, 等. 一维光子晶体的基本周期结构及其禁带特征[J]. 光子学报, 2001, 30(12): 1453–1456.
CHEN Weizong, SHEN Ying, HU Manli, et al. Acta Photon Sin(in Chinese), 2001, 30(12): 1453–1456.
- [20] 有毅. 一维 Si/SiO₂ 光子晶体滤波特性的研究[D]. 太原理工大学, 2018: 13–44.
YOU Yi. Study on Filtering Characteristics of One Dimensional Si/SiO₂ Photonic Crystals(in Chinese, dissertation). Taiyuan University of Technology, 2018: 13–44.
- [21] JENA S, TOKAS R B, SARKAR P, et al. Omnidirectional photonic band gap in magnetron sputtered TiO₂/SiO₂ one dimensional photonic crystal[J]. Thin Solid Films, 2016, 599: 138–144.