文章编号:1001-5078(2011)12-1368-05

·光子晶体·

一种基于光子晶体结构防红外辐射涂层的研究

李文胜,黄海铭,付艳华,张 琴
(湖北汽车工业学院,湖北 十堰 442002)

摘 要:为减少蒸气在管道传输中的能耗,针对蒸气所辐射的特征波长在4007.1~7765.7 nm的电磁波,选用常见的Si和SiO_2为介质,并在考虑各自色散关系的基础上,设计了一种具有光子晶体结构的保温涂层。利用传输矩阵法计算表明:当两介质各取4层,其几何厚度分别取410.5 nm和972 nm时,在4450~7600 nm的范围内有一个严格的带隙,且具有较好的角度宽容度。当两介质的几何厚度增加,带隙红移,宽度增加,反之亦然。当涂层结构为ababa时,该光子晶体已在4597.2~7305.6 nm之间形成了严格的带隙,介质层数再增加,带隙没有实质性的变化,因此,涂层结构为ababa是最经济的。

关键词:红外辐射;涂层;能耗;光子晶体;传输矩阵
中图分类号:O734 **文献标识码**:A **DOI**:10.3969/j.issn.1001-5078.2011.12.017

Study on infrared radiation prevention coatings based on photonic crystal structure

LI Wen-sheng, HUANG Hai-ming, FU Yan-hua, ZHANG Qin
(Department of Basic Science Hubei Automotive Industries Institute, Shiyan 442002, China)

Abstract: In order to reduce the energy consumption of the steam transmission in the pipeline, an insulating coating having photonic crystal structure is designed. The steam radiates electromagnetic waves with specific wavelengths of 4007.1~7765.7 nm. Common Si and SiO_2 are used as the medium. Calculation using transfer matrix method shows that: when the two medium are of 4 layers respectively, with geometric thickness of 410.5 nm and 972 nm respectively, there would be a strict band gap within 4450~7600 nm, and it has better angle tolerance. When the geometric thickness of two medium increases, the band gap would have red shifts and wider width, and vice versa. When the coating structure is ababa type, the photonic crystal forms a strict band gap between 4597.2~7305.6 nm. With the increasing medium layers, there would be no substantial change to the band gap, therefore, that ababa coating structure is the most economical.

Key words: infrared radiation; insulation coating; energy consumption; photonic crystal; transfer matrix

1 引 言

蒸气在管道传输过程中,由于热传导和辐射[1]而损失能量。为了减少能量的损失,人们通常在传输管道外包上保温材料。本文利用光子晶体的带隙特征[2-3],设计了一种由Si和SiO_2介质构成的光子晶体结构。并在考虑各自色散关系的基础上,针对蒸气的温度范围和辐射的特征波长,计算了该光子晶体在给定波长范围内的透射率分别随两介质的厚度、介质层层数和电磁波入射角不同时的变化规律。为降低蒸气在管道传输过程中能耗的实验研究提供了理论依据。

2 蒸气的辐射特征

任何物体都要辐射电磁波[4],其最大辐出度所

基金项目:湖北省教育厅科研项目(No. B20111807)资助。
作者简介:李文胜(1955-),男,副教授,主要从事光学的教学与研究工作。E-mail:liwensheng200099@sina.com
收稿日期:2011-06-05;**修订日期**:2011-06-13

对应的波长满足维恩位移定律[5]：

$$\lambda_m T = b \tag{1}$$

式中，T 是物体的温度；$b = 2.897756 \times 10^{-3}$ m·K 是维恩常数；λ_m 是最大辐出度所对应的波长，称之为特征波长。由有关文献[6]提供的数据可知，蒸气的温度一般在 100～450 ℃的范围内。因此，根据维恩位移定律，可以计算出在上述温度范围内的蒸气所辐射电磁波的特征波长在 4007.1～7765.7 nm。依特征波长的含义可知，若能使蒸气在管道传输中所辐射在上述波长范围内的电磁波全部反射而无透射，将可以有效地降低蒸气在管道传输中的能耗。

3　光子晶体结构及其带隙计算

两种介质薄膜沿厚度方向的交替排列是光子晶体的基本结构[7]。其典型特征就是具有带隙结构而使一些波长的电磁波不能通过。

光子晶体结构如图 1 所示。设 a，b 两介质的折射率分别为 n_a 和 n_b，几何厚度分别是 d_a 和 d_b。

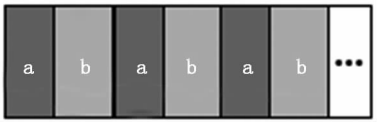


图 1　光子晶体结构示意图

Fig. 1　the structure of photonic crystal

由传输矩阵法[8]可知，上述光子晶体的总传输矩阵为：

$$M = T_a T_b T_a T_b T_a T_b \cdots \tag{2}$$

式中，T_a，T_b 分别是 a，b 两介质的特征矩阵，其中：

$$T_a = \begin{bmatrix} \cos\delta_a & \mathrm{i}\sin\delta_a/\eta_a \\ \mathrm{i}\eta_a\sin\delta_a & \cos\delta_a \end{bmatrix} \tag{3}$$

式中，η_a 是 a 介质的导纳。

$$\delta_a = 2\pi n_a d_a \cos\beta_a/\lambda \tag{4}$$

式中，β_a 是电磁波在 a 介质中的折射角，对 TE 波，$\eta_a = \sqrt{\varepsilon_{ra}/\mu_{ra}}\cos\beta_a$，对 b 介质也有类似的矩阵。

若：

$$M = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \tag{5}$$

则透射率为[9]：

$$T = \frac{4\eta_0^2}{|\eta_0 T_{11} + \eta_0^2 T_{12} + T_{21} + \eta_0 T_{22}|^2} \tag{6}$$

计算中 a，b 介质分别取常见的 Si 和 SiO_2，这两种材料都是色散的[10]，依参考文献[10]可知，Si 和 SiO_2 的色散关系可分别表示为：

$$n_a = 3.41696 + 0.138497L + 0.013924L^2 - 2.09 \times 10^{-5}\lambda^2 + 1.48 \times 10^{-6}\lambda^4 \tag{7}$$

$$n_b = 1.4862 - 1.4456 \times 10^{-5}\lambda \tag{8}$$

式(7)中，$L = 1/(\lambda^2 - 0.028)$，$\lambda$ 是入射光波长。

4　计算结果及分析

4.1　介质厚度不同时对透射谱的影响

为讨论图 1 所示的光子晶体结构在两介质的几何厚度不同时其透射谱的变化，d_a 和 d_b 的基本值分别取 410.5 nm 和 972 nm，a，b 的层数均取 4。当 d_a，d_b 在基本值上变化 10% 时，该光子晶体的透射谱如图 2 所示。可见，当 Si 和 SiO_2 的几何厚度分别取基本厚度（410.5 nm，972nm）时，在 4450～7600 nm 的范围内有一个严格的带隙（即透射率为零）。当两介质的几何厚度在其基本厚度上同时增加或分别增加时，上述带隙产生红移，宽度增加。反之，带隙蓝移，宽度变窄。从图中还可见，当一种介质（无论是 Si 还是 SiO_2）的几何厚度变化，而另一种介质保持基本厚度时，带隙的变化情况相同。此外，两种介质的几何厚度同时变化比一种介质单独变化时对带隙移动的影响大。介质的几何厚度变化越大，带隙相应的变化也越明显。若把带隙上、下边缘透射率为 0.5 处所对应的波长之差称为带隙的宽度，则进一步的计算表明，带隙的中心、宽度与介质几何厚度的关系如图 3 所示。从图 3 可见，当两种介质的几何厚度同时从基本厚度的 0.8 倍增加到 1.2 倍时，带隙的宽度从 3356.1 nm 增加到 5000 nm，而只是一种介质的厚度变化，带隙宽度的变化范围是 3767.1～4589.1 nm。对带隙中心的变化，前者是 5034.1～7500 nm，后者是 5650.7～6883.7 nm。两种介质的几何厚度无论是同时变化还是单独变化，带隙的中心、宽度都和介质的厚度呈线性关系，在介质的厚度变化相等时，带隙中心的变化量比带隙宽度的大。

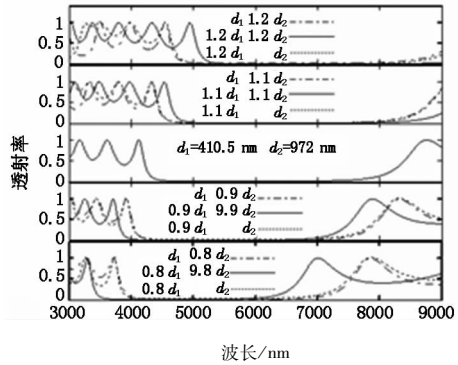
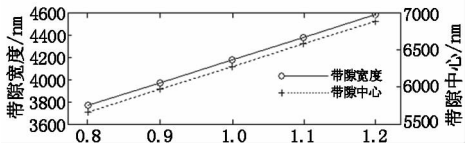
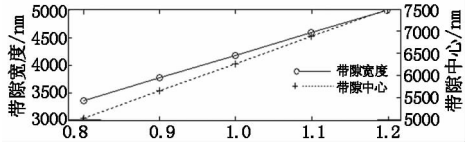


图 2　介质厚度不同时光子晶体的透射谱

Fig. 2　the transmission spectra of photonic crystal with different quantities thickness of medium



(a) Si 或 SiO_2 的几何厚度单独变化与各自基本厚度的比值



(b) Si 和 SiO_2 的几何厚度同时变化与各自基本厚度的比值

图 3 两种介质的几何厚度不同时带隙的中心和宽度

Fig. 3 the width and center of band gap with different thickness of medium

4.2 介质层数对透射谱的影响

为讨论介质层数对上述光子晶体透射谱的影响,两介质仍保持基本厚度(410.5 nm,972 nm)不变,当 a 介质(Si)和 b 介质(SiO_2)的层数变化时,上述光子晶体的带隙结构如图 4 所示。从图 4 可见,当 a,b 两介质都只有一层,即光子晶体结构为 ab 时,在 3000 ~ 9000 nm 的范围内没有严格的带隙。当介质共有 5 层,即结构为 ababa 时,该光子晶体已在 4597.2 ~ 7305.6 nm 之间形成了严格的带隙。当介质的层数再增加时,除带隙的上、下边界变陡外,带隙的中心和严格宽度都没有太明显变化。这表明对由 Si 和 SiO_2 组成的保温涂层,以 5 层为最佳。

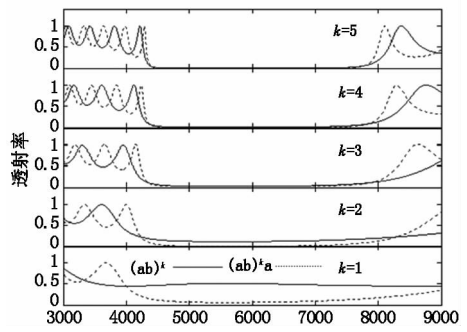


图 4 介质层数不同时的光子晶体透射谱

Fig. 4 the transmission spectra of photonic crystal with different numbers of medium layers

4.3 入射角对透射谱的影响

为探讨光子晶体结构涂层的角度效应,d_a 和 d_b 分别取 410.5 nm 和 972 nm,a,b 的层数均取 4。入射角不同时,上述光子晶体的透射谱如图 5 所示。

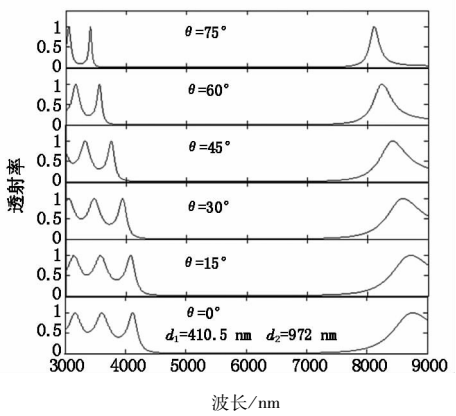


图 5 入射角不同时光子晶体的透射谱

Fig. 5 the transmission spectra of photonic crystal with different incidence angle

从图 5 可见,当入射角 $\theta \leqslant 15°$ 时,带隙的变化不大。当入射角进一步增大,带隙上、下边缘变得陡峭,且带隙上、下透射峰均产生蓝移。若带隙宽度仍按原定义,入射角增加时,带隙的宽度和中心与入射角的关系如图 6 所示。图 6 表示,入射角越大,带隙越宽,入射角从 0° 增大到 75°,带隙宽度由 4178.1 nm 增宽到 4611.1 nm,且与入射角近似呈线性关系,带隙宽度对入射角的变化率约为 5.78 (nm/(°))。而带隙中心随入射角的增加而蓝移,最大移动量为 535.5 nm。从图 5 还可见,入射角在 15° ~ 75° 的范围内变化时,在 4450 ~ 7600 nm 范围内的严格带隙始终存在。这表明上述光子晶体结构具有较好的角度宽容度,非常适合作为保温涂层。

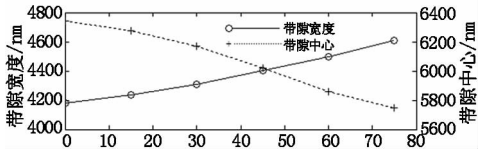


图 6 入射角不同时带隙的宽度和中心

Fig. 6 the width and center of band gap with different of incident angle

上述光子晶体的带隙分别随每层介质的几何厚度、入射角 θ 的变化规律,可以理论上作一简要分析。

从图 2 中可见,带隙的边界由其上、下端透射率为 1 处的位置决定。由传输矩阵的特点,一个周期 ab 传输单元的传输矩阵为:

$$T_a T_b = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{21} \\ m_{12} & m_{22} \end{bmatrix} \tag{9}$$

则第二类切比雪夫多项的综量[11]为：

$$x=\frac{m_{11}+m_{22}}{2} \tag{10}$$

由式(3)及 b 介质的特点，计算可得：

$$x=\cos\delta_a\cos\delta_b-\frac{1}{2}\frac{\eta_a^2+\eta_b^2}{\eta_a\eta_b}\sin\delta_a\sin\delta_b \tag{11}$$

因 Si 和 SiO_2 的折射率均为正值，且相对磁导率 $\mu_{ra}=\mu_{rb}=1$。当光线垂直入射时，$\eta_a=n_a$，$\eta_b=n_b$，$\delta_a=2\pi\frac{n_a d_a}{\lambda}$，$\delta_b=2\pi\frac{n_b d_b}{\lambda}$ 在 Si 和 SiO_2 两介质几何厚度分别取 410.5 nm 和 972 nm，并考虑到它们的色散关系后，经计算有 $\delta_a=\delta_b=\delta$ 则式(11)简化为：

$$x=1-\frac{(n_a+n_b)^2}{2n_a n_b}\sin^2\delta \tag{12}$$

由切比雪夫多项式的性质[11]可知，当 $x=1$ 时，单元传输矩阵式(9)为单位阵，透射率是 1。令 $x=1$，由式(12)有 $\sin\delta=0$，$\delta=k\pi$，因 $\delta=2\pi nd/\lambda$，有 $nd/\lambda=k/2$(k 为整数)，即：

$$\lambda=\frac{2n}{k}d \tag{13}$$

由式(13)可知，无论对于 a 介质(Si)还是 b 介质(SiO_2)，d 增加时，使该式满足的波长 λ 变长；反之，波长 λ 变短。这就是带隙随 a，b 的几何厚度变化而移动的原因。

对于入射角是 θ 的情况，a 层介质中的折射角 θ_a 满足：

$$\theta_a=\sin^{-1}\left(\frac{n_0}{n_a}\sin\theta\right) \tag{14}$$

则 $\delta_a=2\pi nd\cos\theta_a/\lambda$，由式(11)和与上面类似的分析可知，使切比雪夫多项的综量 $x=1$ 的 δ_a 和 δ_b 满足：

$$\delta_a=2\pi n_a d_a\cos\theta_a/\lambda=k\pi \tag{15}$$

$$\delta_b=2\pi n_b d_b\cos\theta_b/\lambda=k\pi \tag{16}$$

由式(14)、式(15)和式(16)可知，a，b 两介质的几何厚度不变时，入射角 θ 增加，θ_a 和 θ_b 也增加，$\cos\theta_a$，$\cos\theta_b$ 减少，满足式(15)和式(16)的波长 λ 也都变短。这就是入射角增大时，带隙蓝移的原因。

5 结 论

选用常见的 Si 和 SiO_2 为介质，并在考虑各自色散关系的基础上，针对蒸气所辐射的特征波长在 4007.1～7765.7 nm 的电磁波，设计了一具有光子晶体结构的保温涂层。数值计算表明该涂层具有如下特征：①当两介质各取 4 层，且其几何厚度分别取基本厚度(410.5 nm，972 nm)时，在 4450～7600 nm 的范围内有一个严格的带隙；②当两介质的几何厚度增加时，带隙产生红移，宽度增加。反之，带隙蓝移，宽度变窄；两种介质的几何厚度同时变化比一种介质单独变化时对带隙移动的影响大；③当介质共取 5 层，即结构为 ababa 时，该光子晶体已在 4597.2～7305.6 nm 之间形成了严格的带隙。当介质的层数再增加时，带隙结构没有太明显变化；④上述结构的光子晶体具有较好的角度宽容度。以上结论对进一步的实验研究提供了重要的参考。

参考文献：

[1] Li Chun, Zhang Liyuan, Qian Shangwu. Thermal [M]. Beijing: People's Education Press, 1998, 7. (in Chinese)
李椿，章立源，钱尚武. 热学[M]. 北京：人民教育出版社，1998，7.

[2] Liu Qineng, Long Tao, Lin Rui, et al. Filtering feature of 1-D flat-panel doping photonic crystal[J]. Laser & Infrarde, 2010, 40(4): 427－430. (in Chinese)
刘启能，龙涛，林睿，等. 一维平板掺杂光子晶体的滤波特性[J]. 激光与红外，2010，40(4)：427－430.

[3] Li Wensheng, Huang Haiming, Fu Yanhua, et al. Polarization properties of one-dimensional photonic crystal containing single-negative materials [J]. Laser & Infrared, 2011, 41(2): 216－219. (in Chinese).
李文胜，黄海铭，付艳华，等. 含单负材料一维光子晶体的偏振特性[J]. 激光与红外，2011，41(2)：216－219.

[4] Zeng Jinyan. Quantum mechanics [M]. Beijing: Science Press, 2003. (in Chinese)
曾谨言. 量子力学[M]. 北京：科学出版社，2003.

[5] Zhong Shike, Wu Dajiang. Concise physical manual[M]. Nanchang: Jiangxi People's Publishing House, 1982, 3 (in Chinese)
钟仕科，吴大江. 简明物理手册[M]. 南昌：江西人民出版社，1982，3

[6] Ma Wenwei, Xie Xishun, Tan Shumei, et al. Physics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2005, 11. (in Chinese)
马文蔚，解希顺，谈漱梅，等. 物理学[M]. 北京：高等教育出版社，2005，11.

[7] Zhang Huiyun, Zhang Yuping, Su Xiyu, et al. A transfer matrix method for analyzing the character of reflectivity in finite period 1D photonic crystal[J]. Acta Sinica Quantum Optica, 2004, 10(1): 174－179. (in Chinese)
张会云，张玉萍，苏希玉，等. 传输矩阵法分析有限周

期光子晶体的反射谱特征[J]. 量子光学学报,2004,10(1): 174 – 179.

[8] Fang Yuntuan. Effect of random fluctuation of structure parameters on optical properties of one-dimensional photonic crystal[J]. Journal of Synthetic Crystals,2008,37(1):243 – 247. (in Chinese).
方云团. 一维光子晶体结构参数的随机扰动对其光学特性的影响[J]. 人工晶体学报,2008,37(1):243 – 247.

[9] Xue Hui, Zheng Zhenrong, Gu Peifu, et al. A novel filter with low angle effect[J]. China. Phys. Soc,2009,58 (6): 3983 – 3987. (in Chinese)
薛辉,郑臻荣,顾培夫,等. 一种新型的低角度效应的滤波器[J]. 物理学报,2009,58 (6):3983 – 3987.

[10] Zhang Ling, Liang Liang, Zhang Linli, et al. Study of band-structure of 1-D photonic crystal[J]. Acta Photonica Sinica,2008,37(9):1815 – 1818. (in Chinese).
张玲,梁良,张琳丽,等. 一维光子晶体带隙结构研究[J]. 光子学报,2008,37(9):1815 – 1818.

[11] Lin Yongchang, Lu Weiqiang. Principle of optical thin films[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1990:40 – 44. (in Chinese)
林永昌,卢维强. 光学薄膜原理[M]. 北京:国防工业出版社,1999:40 – 44.