一种基于光子晶体结构的军用车辆红外隐身涂层的设计

李文胜,张 琴,付艳华,黄海铭

(湖北汽车工业学院 理学院,湖北 十堰 442002)

摘 要:根据军用车辆的体表温度,针对红外大气窗口,选用常见的 Si 和 LiF 为介质,并在考虑各自色散关系的基础上,设计了一具有光子晶体结构的复合涂层。利用传输矩阵法计算表明,当 Si 和 LiF 均取 4 层,且每层的几何厚度分别取 0.800 μm 和 1.900 μm 时,在 8~14 μm 之间存在一个严格的带隙,此带隙有以下特征:介质层数大于 4 时,带隙不再发生实质性的变化。增加两介质的几何厚度,带隙红移,宽度变宽,反之亦然。入射角增加,8~14 μm 之间的带隙总是存在。以上结论可为该复合涂层的进一步研究提供有益的参考。

关键词:光子晶体; 军用车辆; 红外隐身涂层; 传输矩阵

中图分类号:O734 **文献标志码**:A **文章编号**:1007-2276(2015)11-3299-05

Design of infrared stealth coating of military vehicle based on photonic crystal

Li Wensheng, Zhang Qin, Fu Yanhua, Huang Haiming

(School of Science, Hubei University of Automotive Technology, Shiyan 442002, Chin)

Abstract: According to the surface temperature of military vehicles and for the infrared atmospheric window, a compound coating having photonic crystal structure was designed using common Si and LiF as the medium and in consideration of the respective dispersion relations. The calculation using the transfer matrix method showed when the two medium are of 4 layers respectively, with geometric thickness of each layer is 0.800 μm and 1.900 μm, there would be a strict band gap within 8-14 μm, and the band gap had the following characteristics: With five or more medium layers, the band gap no longer changed substantially. When the geometric thickness of two medium increased, the band gap would have red shifts, width is wider and vice versa. The band gap between 8-14 μm always exist regardless the changes of the incident angle. These conclusion may provide a useful reference for the experiment study of the coating.

Key words: photonic crystal; military vehicles; infrared stealth coating; transfer matrix

收稿日期:2015-03-11; **修订日期**:2015-04-03

基金项目:湖北省教育厅科学技术研究项目(Q20122307)

作者简介:李文胜(1955-),男,教授,主要从事光学方向的教学与研究。Email:liwensheng200099@sina.com

0 引 言

军用车辆在静止和行驶中都要向外辐射电磁波，尽管在不同使用状态和不同部位所辐射的波长不同，但都包括在红外波长的范围内。对红外部分的电磁波，除 1~2.5 μm、3~5 μm 和 8~14 μm 三个波段外，其它波段的电磁波在大气中传播时衰减很快[1]。所以屏蔽以上三个波段(红外大气窗口)的电磁辐射，对军用车辆的红外隐身，减少其红外暴露，避免远程打击，提高其生存能力，在现代战争中具有十分重要的意义。然而，有关资料表明，目前使用的隐身方法在实际效果和波段兼容方面还需进一步改善，而使用自然材料要实现新的突破还有相当难度[2]。因而人们把研究的焦点转向新型人工材料，以求有所突破。

自从光子晶体的概念提出以后[3]，因其特殊的带隙结构，人们除了利用其特性开发一些新型光电器件外[4]，还在利用其带隙特性实现自然材料难以达到的效果方面进行了积极的探索，并取得了一定的进展。如美国 Snndia 实验室的 Shawn-Yu Lin 等人[5]早在 2000 年就研究了三维光子晶体在减弱或增强热辐射方面的作用，并在实验室制备了具有独特结构的三维光子晶体。有关实验表明，该光子晶体可以有效地抑制 8.0~20.0 μm 波段的红外辐射[6]，但是，考虑到大尺寸的三维光子晶体在制备方面还存在许多困难，所以在实际工程中利用它来抑制热辐射还不太现实。而一维光子晶体具有和三维光子晶体同样的带隙，而制备工艺要相对简单得多。所以，探讨一维光子晶体在抑制红外辐射，实现军用车辆的红外隐身方面的应用，具有积极的意义。

1 涂层结构及隐身机制

涂层由两种介质沿厚度方向交替排列而成，这和一维光子晶体的结构完全一致。带隙结构是光子晶体最显著的特点，波长处于带隙范围内的电磁波是不能通过的。因此上述涂层也应对电磁波的通过具有选择性[7-9]，关键是要找到合适的结构参数。其具体的计算方法也可以借用光子晶体中计算的常用方法——转移矩阵法。

涂层的结构如图 1 所示。其中 A、B 介质的折射率分别是 n_A 和 n_B，几何厚度分别为 a 和 b。由转移矩阵法[10]得到复合涂层的总转移矩阵是：

$$M=T_AT_BT_AT_BT_AT_B\cdots \tag{1}$$

式中：T_A 和 T_B 分别是 A、B 介质的特征矩阵，其中：

$$T_A=\begin{bmatrix}\cos\delta_A & i\sin\delta_A/\eta_A\\ i\eta_A\sin\delta_A & \cos\delta_A\end{bmatrix} \tag{2}$$

$$\delta_A=2\pi n_A a\cos\beta_A/\lambda \tag{3}$$

式中：η_A 为 A 介质的导纳，公式(3)中 β_A 为电磁波在 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：

$$M=\begin{bmatrix}T_{11} & T_{12}\\ T_{21} & T_{22}\end{bmatrix} \tag{4}$$

则透射率为[11]：

$$T=\frac{4\eta_0^2}{|\eta_0T_{11}+\eta_0^2T_{12}+T_{21}+\eta_0T_{22}|^2} \tag{5}$$

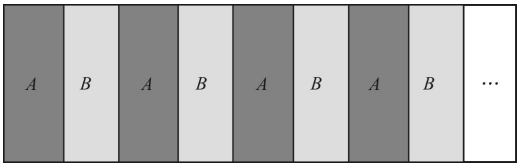

图 1 涂层结构示意图

Fig.1 Structure of coatings

数值计算时，A、B 分别选用 Si 和 LiF，为使计算结果更具有实用性，两材料实际存在的色散特性必须考虑[11]，由参考文献 [11]可知，两材料的色散关系可分别表示为：

$$n_A=3.416\,96+0.138\,497L+0.013\,924L^2-2.09\times10^{-5}\lambda^2+1.48\times10^{-6}\lambda^4 \tag{6}$$

$$n_B=1.387\,61+1.796\times10^{-3}L-4.1\times10^{-4}L^2-2.304\,5\times10^{-3}\lambda^2-5.567\times10^{-6}\lambda^4 \tag{7}$$

式中：$L=1/(\lambda^2-0.028)$，其中 λ 是入射光波长，μm。

物体辐射的单色辐出度最大值所对应的波长 λ_m 和辐射体的温度 T 之间的关系满足维恩位移定律[12]：

$$\lambda_mT=b \tag{8}$$

式中：$b=2.897\times10^{-3}$ m·K，是维恩常量。对大气红外窗口的三个波段 1~2.5 μm、3~5 μm 和 8~14 μm，利用公式(8)计算可得辐射体对应的温度分别为 2 625~886 ℃、693~306 ℃和 89~-66 ℃。对于军用车辆，其体表温度包含在第三区间[13]，所辐射电磁波对应的波长也包括在 8~14 μm 之内。因此，对军事车辆只要屏蔽该波长(8~14 μm)范围内的电磁辐射，便可实现其

红外隐身。

2 计算结果

2.1 涂层层数不同时的透射谱

为讨论图 1 所示的涂层在层数不同时其透射谱，a 和 b 的基本值分别取 a_0=800 nm 和 b_0=1 900 nm，A、B 的层数分别取不同值时，该涂层的透射谱如图2 所示。从图中可见，当 Si 和 LiF 的层数都只有一层，即涂层的结构为 AB 型时，在 8~14 μm 之间最小的透射率也有 0.256。若借用光子晶体中带隙的概念，把上涂层透射谱中透射率为零区间称为带隙，则

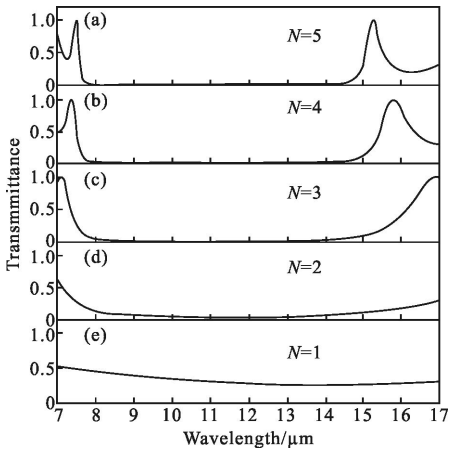

图 2 涂层层数不同时的透射谱

Fig.2 Transmission spectra at different number of coatings

N=1 时涂层在 8~14 μm 之间还没有形成的带隙。当 N=2 时，上波长范围内的带隙已初步显现，但在8 μm 和 14 μm 两处的透射率仍分别有 0.128 和 0.079。当 N=3 时，上波长范围内的带隙已基本形成，特别是在 8.6~13.2 μm 间的透射率已经为零，即使在两端点，透射率最大的也只有 0.051 2。这表明，涂层结构为 $ABABAB$ 型时，该涂层对 8~14 μm 的红外辐射，已具备了较好的屏蔽效果。为进一步提高屏蔽效果，取 N=4，数值计算表明，在此条件下，8~14 μm 是严格的带隙，而在 7.3 μm 和 15.6 μm 处有两个透射率为 1的透射峰，所幸的是这两个透射峰的中心已在红外大气窗口之外。这表明，复合涂层的介质各取 4 层，即涂层结构为$(AB)^4$ 型时，涂层对上波段范围内的辐射具备了很好的屏蔽功能。当 N=5 时，从图中可见，上述波长范围内的严格带隙依然存在，只是短波端透射峰的中心红移，而长波端的中心蓝移，带隙没有实质的变化。这表明，对屏蔽 8~14 μm 之间的辐射而言，涂层层数再增加，已没有实际的意义。因此，考虑到实际的喷涂工艺和成本，复合涂层取 N=4 是最理想的。

2.2 介质几何厚度不同时的透射谱

在实际的喷涂工艺中，每层介质几何厚度的误差是不可避免的，因此讨论每层介质的几何厚度不同时涂层透射谱的特征，具有实际意义。为此，取 N=4，当 A、B 两介质的几何厚度在其基本厚度(a_0=800 nm、b_0=1 900 nm)的基础上，分别或同时变化 10%时，涂层的透射谱如图 3 所示。

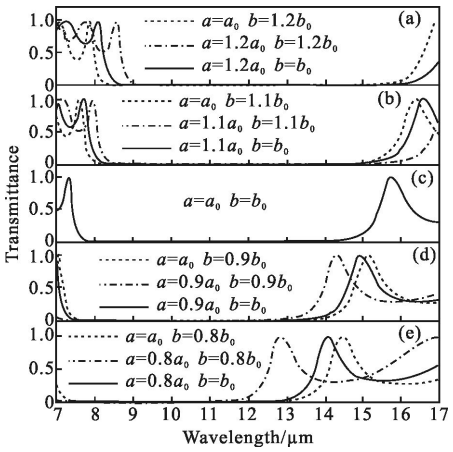

图 3 介质几何厚度不同时的透射谱

Fig.3 Transmission spectra at different geometry thickness of medium

从图中可见，B 介质(LiF)的几何厚度保持不变，A 介质(Si)的几何厚度增加，将引起上述带隙两端透射峰的中心发生红移，且长波端的红移量大于短波端的，所以相应的带隙宽度变宽；反之，A 介质的几何厚度减小，带隙两端的透射峰中心蓝移，因长波端的蓝移量大于短波端的，所以相应的带隙宽度变窄，如图中实线所示。

而 A 介质(Si)的几何厚度保持基本厚度不变，仅 B 介质(LiF)的几何厚度变化时，上述带隙两端透射峰的中心和带隙宽度的变化规律与 B 介质的几何厚度单独变化时的相同，只是变化量比对应的小。B 介质单独变化时的透射谱如图中虚线所示。

当 A、B 两介质的几何厚度同时变化时，上述带隙两端透射峰的中心和带隙宽度的变化规律与各介质的单独变化几何厚度时的相同。即两介质的几何厚度同时增加，将导致带隙两端的透射峰红移，带隙

宽度增加;反之,两端的透射峰蓝移,带隙宽度减小。且透射峰的移动量和带隙宽度的变化量均比 A 或 B 介质单独变化时的大。A、B 两介质的几何厚度同时变化时的透射谱如图中点划线所示。

从上述透射谱随两介质几何厚度的变化规律可见,涂层中两介质几何厚度的变化只要不同时超过其基本值的 5%,或任何一种介质的几何厚度的单独变化不超过其基本值的 10%,则 8~14 μm 间的带隙总是存在的。所以在实际喷涂工艺中,只需按上述要求合理控制各介质层几何厚度的误差,就可保证复合涂层对 8~14 之间辐射的屏蔽。

2.3 入射角对透射谱的影响

因车体的外形是复杂的,车体所辐射电磁波的传播方向不可能都垂直于涂层,因此,探讨上述复合涂层的角度效应,具有积极的意义。为讨论入射角不同时的透射谱,A、B 介质的层数均取 4,其几何厚度分别取 a_0=800 nm 和 b_0=1 900 nm,入射角变化时,上述涂层的透射谱如图 4 所示。

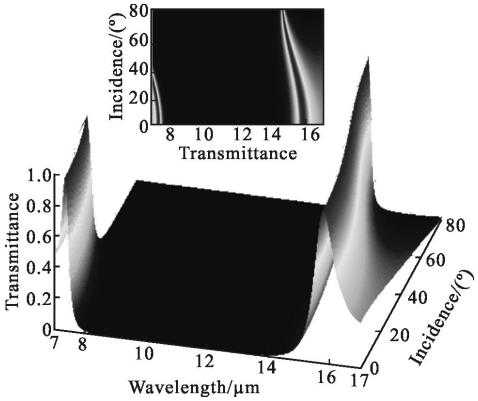

图 4 入射角变化时的透射谱

Fig.4 Transmission spectra at different incidences

从图中可见,当入射角 $\theta \leqslant 10°$时,原带隙两端透射峰的位置和透射率保持基本不变,因而带隙的宽度也无明显的变化。当入射角进一步增大,原带隙两端的透射峰的透射率依然不变。从图中附图可见,随着入射角的增加,原带隙两端透射峰的中心均产生了蓝移,且透射峰的半峰全宽度变窄。从附图还可见,即使入射角达到 80°,透射谱中 8~14 μm 波长范围内的透射率始终为零。透射谱随入射角的变化特征表明,上述复合涂层的透射谱对入射角的变化较迟钝,具有很好的角度宽容性,满足红外隐身涂层对大角度入射的要求。

需要说明的是,在以上讨论中,只考虑了涂层的屏蔽性能。实际上,涂层本身也有温度,也有辐射。对于这一矛盾,可按以下思路解决:在涂层的最外层用折射率和 LiF 相当,但辐射系数较低材料代替 LiF,因其较低的辐射系数,从而使其辐射强度低于探测器的灵敏度。

3 结果分析

几何厚度、入射角 θ 变化对上述复合涂层的透射谱的影响,可从理论上作一简单的分析。

图 2 表示,带隙的宽度由其长、短波处透射峰中心波长的差决定。由传输矩阵的特点,一个周期的传输矩阵单元为:

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

则第二类切比雪夫多项式的综量[14]为:

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

由公式(2)及介质 B 的特点计算有:

$$x=\cos\delta_A\cos\delta_B-\frac{1}{2}\frac{\eta_A^2+\eta_B^2}{\eta_A\eta_B}\sin\delta_A\sin\delta_B \tag{11}$$

因 Si 和 LiF 的折射率均为正值,且都是非磁性材料,所以其相对磁导率满足 $\mu_{rA}=\mu_{rB}=1$。当光线垂直入射时,有:$\eta_A=n_{A'}$, $\delta_A=2\pi\frac{n_A a}{\lambda}$; $\eta_B=n_{B'}$, $\delta_B=2\pi\frac{n_B b}{\lambda}$。当 Si 和 LiF 两介质几何厚度分别取 800 nm 和 1 900 nm,利用公式(6)、(7),经计算可得 $\delta_A=\delta_B=\delta$,则公式(11)可简化为:

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

由切比雪夫多项式的性质可知,当综量 x=1 时,传输矩阵单元公式(9)为单位阵,透射率是 1,对应透射谱中透射峰的中心波长。为此令 x=1,由公式(11)则有 $\sin\delta=0$, $\delta=k\pi$,因:

$$\delta=2\pi n_A a/\lambda=2\pi n_B b/\lambda$$

所以有 $n_A a/\lambda=n_B b/\lambda=k/2$($k$ 为整数),即:

$$\lambda=\frac{2n_A}{k}a=\frac{2n_B}{k}b \tag{13}$$

由公式(13)可知,无论对于 A 介质(Si)还是 B 介质(LiF),其几何厚度(a、b)增加时,满足公式(14)的波长 λ 变长,亦即透射峰中心红移;反之,透射峰中心

蓝移。这就是涂层的透射谱中带隙随介质的几何厚度变化而移动的原因。

当入射角是 θ 时,介质 A 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 $\delta_A=2\pi n_A\cos\theta_A/\lambda$,由公式(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:

$$\delta_A=2\pi n_A a\cos\theta_A/\lambda=k\pi \tag{15}$$

$$\delta_B=2\pi n_B b\cos\theta_B/\lambda=k\pi \tag{16}$$

由公式(14)、(15)和(16)可知,A、B 两介质的几何厚度一定时, 入射角 θ 增加,θ_A 和 θ_B 都增加,$\cos\theta_A$、$\cos\theta_B$ 减少,满足公式(15)和(16)的波长 λ 也随之变短。这就是入射角增大导致涂层带隙蓝移的原因。

4 结 论

把普通的Si 和 LiF 选为为介质, 并在考虑其色散关系的基础上, 结合军用车辆表面所辐射的特征和红外大气窗口 8~14 μm, 提出了一复合涂层的模型。并对该涂层的透射谱进行了模拟计算,结果表明该涂层具有以下透射特征:(1) 当两介质均取 4 层,且每层的几何厚度分别取 0.800 μm 和 1.900 μm 时,有一个波长范围在 8~14 μm 间的一个严格的带隙。(2) 若两介质的几何厚度增加,带隙发生红移,且其宽度变宽,反之,带隙发生蓝移,且其宽度变窄。两种介质的几何厚度同时变化对带隙的影响要大于一种介质单独变化时的。(3) 当介质各取 4 层,即涂层结构为$(AB)^4$ 型时,该涂层对波长在 8~14 μm 之间的电磁波的透射率为零,即形成了对应的带隙。当介质的层数再增加,上带隙不再发生实质性的改变。(4) 上述复合涂层具有很好的角度宽容度,即使入射角达到 80°,8~14 μm 范围内的严格带隙总是存在,这表明此复合涂层能很好地满足电磁波大角度入射的要求。以上结论对此复合涂层的实验研究提供了有益的参考。

参考文献:

[1] Belov P A. Backward wave and negative refraction in uniaxial dielectrics with negative dielectric permittivity along the anisotropy axis [J]. ***Microw and Opt Tech Lett***, 2003, 37(4): 259-263.

[2] Lindell I V, Tretyakov S A, Nikoskinen K I, et al. BW-media with negative parameters capable of supporting backward wave[J]. ***Microw and Opt Tech Lett***, 2001, 31(2): 129-133.

[3] Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission solid state physics and electronics [J]. ***Phys Rev Lett***, 1987, 58(20): 2059-2062.

[4] Zhang Zhengren, Long Zhengwen, Yuan Yuqu, et al. The band structure of symmetrical structured 1-D photonic crystal with single-negative materials [J]. ***Acta Physica Ainica***, 2010, 59(1): 587-591. (in Chinese)

[5] Lin Shawn Yu, Fleming J G. Enhancement and suppression of thermal emission by a 3D photonic cryistal[J]. ***Phys Rew B***, 2000, 62: 2243.

[6] Fleming J G, Lin S Y. Metallic photonic crystals for teharetz tunable filters[J]. ***Nature***, 2002, 52: 417.

[7] 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)

[8] Li Wensheng, Zhang QinHuang, Huang Haiming, et al. Comb filtering in terahertz frequency based on photonic crystal containing doped semiconductor [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2014, 43(6): 1869-1872. (in Chinese)

[9] Yu G, Fang Y. Achieving optical bistability through ultra-compact metal-dielectric structure [J]. ***Optics & Laser Technology***, 2011, (43): 36-39.

[10] Li Wensheng, Huang Haiming, Fu Yanhua, et al. Polarization properties of photonic crystal tunneling mode containing single-negative materials [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2012, 41(1): 69-72. (in Chinese)

[11] 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)

[12] Zeng Jinyan. Quantum Mechanics [M]. Beijing: Science Press, 2003: 9-10. (in Chinese)

[13] Li Wensheng, Luo Shijun, Huang Haiming, et al. The design of tank coating based on photonic crystal[J]. ***Acta Phys Sin***, 2012, 16(61): 164102-1-164102-6.

[14] Lin Yongchang, Lu Weiqian. Principle of Optical Thin Films [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1990: 40-44. (in Chinese)