

文章编号: 1002-2082(2006)05-0390-04

光子晶体在座舱罩雷达散射截面减缩中的应用

银 燕¹, 袁乃昌²

(1. 国防科技大学 理学院 应用物理系, 长沙 410073;

2. 国防科技大学 电子工程学院 电子技术系, 长沙 410073)

摘 要: 提出一种金属-介质型光子晶体薄膜, 用传输矩阵法计算这种光子晶体薄膜的反射率和透射率。计算结果表明, 这种光子晶体薄膜对毫米和厘米量级的微波的反射率高达 99% 以上; 对于波长为微米量级的可见光, 平均透光率为 50%。分析了介质单元厚度、金属单元厚度、金属层总厚度对透射率的影响, 给出这种光子晶体薄膜的材料选择和结构设计应遵循的原则。指出这种光子晶体薄膜涂镀在飞机座舱玻璃上, 可以有效地减小座舱罩的雷达散射截面。

关键词: 光子晶体; 薄膜反射率; 薄膜透射率; 雷达散射截面; 传输矩阵法

中图分类号: O43

文献标志码: A

Application of photonic crystal in radar cross-section reduction of scattering on airplane canopy

YIN Yan¹ YUAN Nai-chang²

(1. Department of Applied Physics, National University of Defense Technology,

Changsha 410073, China; 2. Institute of Electronic Science and Engineering,

National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: A metallic-dielectric photonic crystal thin-film is presented. Its reflectivity and transmissivity are calculated with the transmission matrix method. The numerical results show that the photonic crystal film has an up to 99% reflectivity for millimeter and centimeter waves and about 50% average transmissivity for the visible light in microwave spectrum. The effects of the dielectric layer thickness, the metallic layer thickness and the total thickness of metallic layers on the transmissivity are examined, and the principles of material selection and structure design are presented. Due to these characteristics, the metallic-dielectric photonic crystal film can be employed in effective reduction of radar cross-section of scattering on airplane canopy.

Key words: metallic-dielectric photonic crystal; reflectivity of photonic crystal film; transmissivity of photonic crystal film; radar cross section of scattering; transmission matrix method

引言

常规飞机座舱罩是透波的。电磁波可以穿过座舱罩, 在座舱内的金属结构、电子设备、驾驶员身体

等物体上发生散射, 产生具有明显目标特征的后向回波。因此, 飞机座舱是飞机头向的强散射源。电磁波进入座舱还会对机载电子设备产生电磁干扰,

收稿日期: 2006-03-06; 修回日期: 2006-05-23

基金项目: 国家安全重大基础研究项目资助(51307)

作者简介: 银燕(1977-), 女, 湖北随州人, 博士后, 国防科技大学理学院讲师, 主要从事光子晶体的研究。E-mail: yinyansilver@yahoo.com.cn

影响其正常工作。为了减小座舱罩的雷达散射截面,普遍采用给座舱罩镀上一层金属薄膜的方法。但是,这种方法有其局限性,具体表现为电磁波在金属中的趋肤深度 $d \propto \omega^{-1/2}$, 频率越高,趋肤深度越小。为了保证一定的透光率,削弱对雷达波的反射作用,镀层不能很厚。例如,10 nm 厚的金属薄膜在可见光波段有65%以上的平均透光率,但是对厘米波的反射率为91%。因此,在隐身飞机设计中,需要改变座舱罩的外形,使反射波绝大部分偏离到雷达接收不到的方向上,从而降低飞机座舱的雷达散射截面^[1]。

光子晶体是一种折射率在空间中周期分布的人工功能材料,具有光子带隙,频率落在带隙范围内的电磁波不能在光子晶体中传播^[2-3]。基于以上功能,光子晶体在光学元件中得到了广泛的应用,出现了光子晶体光纤^[4]、光子晶体波导^[5]、光子晶体滤波器^[6]等。近年来,介质和金属周期排列构成的金属-介质型光子晶体引起了人们的广泛兴趣^[7-9]。金属-介质型光子晶体不仅具有电磁禁带,还能降低金属对电磁波的吸收损耗。H. Contopanagos 等人用一维金属-介质型光子晶体制成微波全反射镜,反射率由96%提高到99%以上^[10]。M. Scalora 的研究表明,一维金属-介质型光子晶体的透光率大大高于等厚度单层金属的透光率^[11]。

笔者利用一维金属-介质型光子晶体具有降低吸收损耗的性能,提出一种金属-介质型光子晶体薄膜,它对波长为毫米和厘米量级的微波,反射率高达99%以上;对于可见光,平均透光率为50%。将这种光子晶体材料涂镀在飞机座舱玻璃上,可以有效地减小座舱罩的雷达散射截面。

1 一维光子晶体全向带隙的理论计算

一维光子晶体的结构如图1所示。折射率为 n_1 和 n_2 , 厚度为 h_1 和 h_2 的介质在 XY 面上为无限大均

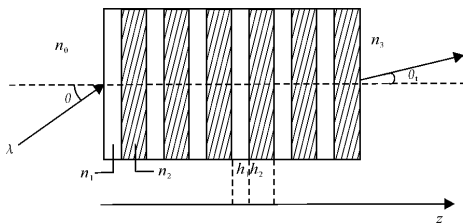


图1 一维光子晶体结构及光路

Fig. 1 The structure of one-dimensional photonic crystal and the light path

匀分布,沿 Z 方向呈周期排列,周期数为 N 。波长为 λ 的电磁波斜射到光子晶体上,入射角为 θ 。光子晶体的环境介质分别为空气 ($n_0 = 1$) 和氟玻璃 ($n_3 = 1.45$)。

设光子晶体的一个周期由 L 层均匀介质 (n_i, h_i) ($i = 1, 2, \dots, L$) 构成,电磁波入射到单层均匀介质 (n_i, h_i) 中的入射角为 θ_i ,电磁波在该介质中的传播方向与 Z 轴的夹角可以由菲涅耳定律求得。则电磁波在单层均匀介质 (n_i, h_i) 中的传播用特性矩阵表示^[12]成

$$m_i = \begin{bmatrix} \cos \beta_i & -\frac{i}{p_i} \sin \beta_i \\ -i p_i \sin \beta_i & \cos \beta_i \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, $\beta_i = \frac{2\pi}{\lambda} n_i h_i \cdot \cos \theta_i$ 。对于 S 偏振电磁波(电矢量垂直于 YZ 平面)有 $p_i = n_i / \cos \theta_i$; 对于 P 偏振电磁波(磁矢量垂直于 YZ 平面)有 $p_i = n_i / \cos \theta_i$ ^[12]。

光子晶体一个周期的特性矩阵为

$$m = \prod_{i=1}^L m_i = \prod_{i=1}^L \begin{bmatrix} \cos \beta_i & -\frac{i}{p_i} \sin \beta_i \\ -i p_i \sin \beta_i & \cos \beta_i \end{bmatrix} \quad (2)$$

由 N 个周期组成的一维光子晶体的特性矩阵为

$$M = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} = m^N \quad (3)$$

求出 M 后,就可得到电磁波入射到一维光子晶体上的反射系数 r 和透射系数 t :

$$r = \frac{(M_{11} + M_{12} \cdot \cos \theta_t) \cdot \cos \theta - (M_{21} + M_{22} \cdot \cos \theta_t)}{(M_{11} + M_{12} \cdot \cos \theta_t) \cdot \cos \theta + (M_{21} + M_{22} \cdot \cos \theta_t)} \quad (4)$$

$$t = \frac{2 \cdot \cos \theta}{(M_{11} + M_{12} \cdot \cos \theta_t) \cdot \cos \theta + (M_{21} + M_{22} \cdot \cos \theta_t)} \quad (5)$$

反射率 R 和透射率 T 为

$$R = |r|^2$$

$$T = \frac{\cos \theta_t}{\cos \theta} |t|^2 \quad (6)$$

对于金属-介质型光子晶体,需要考虑金属的损耗,引入复折射率 $\tilde{n} = n(l + i\kappa)$ 后上述公式仍成立。其中 κ 为金属的衰减指数,又称为消光系数。

2 用于飞行器座舱罩的一维金属-介质型光子晶体设计

在微波到光谱红外区的频率范围 ($\lambda \geq 10 \mu\text{m}$)

内,大多数金属的静电导率 σ 约为 10^{17} s^{-1} (高斯制)数量级,复折射率可以近似为

$$\tilde{n} = n(1 + i\kappa), n \sim n\kappa \approx \sqrt{\frac{2\pi\mu\sigma}{\omega}} \quad (7)$$

式中, ω 为入射电磁波的角频率; μ 为金属的相对磁导率。在高频区($\lambda < 1 \mu\text{m}$),金属的光学性质十分复杂,其光学常数可从实验数据中得到^[13]。

笔者采用传输矩阵法,计算了下面2种构型对可见光(0.4~0.7 μm)的透过率和对微波(1 mm~1 cm)的反射率,计算结果如图2所示。其中,金属Ag在可见光波段的折射率引自文献^[13]。图2中虚线为90 nm Ag 单层金属膜;实线为9个周期120 nm MgF_2 和10 nm Ag 的一维光子晶体。

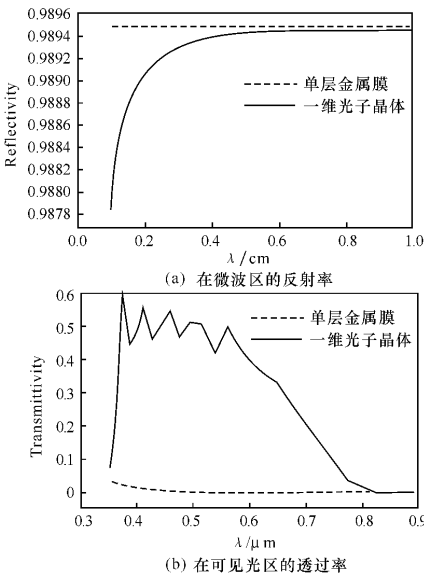


图2 单层金属膜和金属-介质型光子晶体对微波的反射率和对可见光的透过率

Fig. 2 The reflectivity in microwave region and the transmittivity in visible light region for the solid metal film (dash line) and the metallic-dielectric photonic crystal (solid line)

从图2可以看出,将金属层等分成多层,和介质材料构成一维金属-介质型光子晶体后,光子晶体对微波的反射率仅下降了0.2%,且随着微波波长的增加趋近于单层金属膜的情况,而光子晶体对可见光的透射率大大提高,达到50%左右。

3 影响透光率的结构因素

上述分析表明,光子晶体薄膜对微波的反射率

基本上与等厚度的单层金属膜的微波反射率相等,对可见光的透射率却随结构参数的不同变化较大。笔者研究了以下3个因素:介质单元厚度、金属单元厚度、金属层总厚度对透射率的影响,其结果如图3所示。图3中曲线1为一维光子晶体,其中 MgF_2 厚度120 nm,Ag厚度10 nm,10个周期;曲线2为一维光子晶体,其中厚度60 nm,Ag厚度10 nm,10个周期;曲线3为一维光子晶体,其中 MgF_2 厚度120 nm,Ag厚度5 nm,20个周期;曲线4为一维光子晶体,其中 MgF_2 厚度120 nm,Ag厚度10 nm,4个周期。

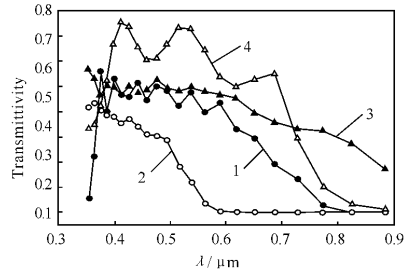


图3 4种结构的金属-介质型光子晶体对可见光的透射率

Fig. 3 The transmittivity in visible light region for the four kinds of metallic-dielectric photonic crystals

从图3中曲线1和2可以看出,介质层单元厚度对可见光透射率的影响,以及多层膜的特性由单层膜的特性决定。增透膜的设计原则是,选择折射率 n 低于基质(本文取氟玻璃, $n_3 = 1.45$)的材料,并令膜厚 h 满足 $nh = \lambda/4$,其中 λ 是希望增透的波长。当 MgF_2 膜厚为120 nm时, $h_1 = \lambda_m/4n_1$,其中 $\lambda_m = 0.6 \mu\text{m}$ 为可见光区的中心频率,此时透射峰覆盖可见光区。当膜厚为80 nm时,增透波长向短波区移动,透射峰也整体向紫外区移动。

从图3中曲线1和3可以看出金属层单元厚度对可见光透射率的影响。在金属层总厚度一定的前提下,增加光子晶体的周期会使金属膜单元厚度降低,仅使透射峰增宽,而透射峰的峰值不变。从图3曲线1和4可以看出金属层总厚度对透射峰的影响,显然,金属层总厚度越小,透射率越高。

4 结 论

本文对光子晶体在减缩飞机座舱罩雷达散射截面中的应用进行了研究,提出金属-介质型光子晶体薄膜可以有效地反射微波,透射可见光。这种

光子晶体薄膜的材料选择和结构设计应遵循以下原则:在选择介质材料时,应选择折射率足够低的增透型材料;介质层单元厚度 $nh = \lambda_{\text{mid}}/4$;金属层的总厚度应该高于雷达波的趋肤深度,以保证对雷达波的高反射率。在满足这个条件的前提下,总厚度越小,对可见光的透过率越高。在金属层的总厚度一定时,光子晶体周期数越多,即每个周期的金属层越薄,对可见光的透过率越高。

参考文献:

- [1] 张考,马东立. 军用飞机生存力与隐身设计[M]. 北京:国防工业出版社,2002.
ZHANG Kao, MA Dong-li. Military Aircraft Survivability and Stealth Design [M]. Beijing: National Defence Industry Press,2002. (in Chinese)
- [2] YABLONOVITCH E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. Phys Rev Lett,1987,58(20):2059-2062.
- [3] JOHN S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices [J]. Phys Rev Lett,1987,58(23):2486-2489.
- [4] 李启成. 光子晶体光纤的原理、结构、制作及潜在应用[J]. 应用光学,2005,26(6):49-52.
LI Qi-cheng. Principle, configuration, manufacture and potential application of photonic crystal fiber [J]. Journal of Applied Optics, 2005,26(6):49-52. (in Chinese)
- [5] 宋俊峰,常玉春,王海嵩,等. 光子晶体光波导传输特性研究[J]. 中国激光,2002,A29(8):711-713.
SONG Jun-feng, CHANG Yu-chun, WANG Hai-song, et al. Transmission characteristic of photonic crystal waveguide [J]. Chinese Journal of Lasers, 2002,A29(8):711-713. (in Chinese)
- [6] OSWALD J A, WU B I, McIntosh K A, et al. Dual-band infrared metallodielectric photonic crystal filters[J]. Appl Phys Lett,2000,77(14):2098-2100.
- [7] BENDICKSON J M, DOWLING J P. Analytic expressions for the electromagnetic mode density in finite, one-dimensional, photonic band-gap structures[J]. Phys Rev:E,1996,53(4):4107-4121.
- [8] FINK Y, WINN J N, FAN S, et al. A dielectric omnidirectional reflector[J]. Science, 1998(282): 1679-1682.
- [9] MCINTOSH K A, MAHONEY L J, MOLVAR K M, et al. Three-dimensional metallodielectric photonic crystals exhibiting resonant infrared stop bands [J]. IEEE Trans Microwave Theory and Techniques,1998,46(9):1310-1312.
- [10] CONTOPANAGOS H, ALEXOPOULOS N G, YABLONOVITCH E. High-Q radio-frequency structures using one-dimensionally periodic metallic films [J]. IEEE Trans Microwave Theory and Techniques, 1998,46(9):1310-1312.
- [11] SCALORA M, BLOEMER M J, PETHEL A S, et al. Transparent, metallo-dielectric, one-dimensional, photonic band-gap structures[J]. J Appl Phys. 1998,83(5):2377-2383.
- [12] 玻恩,沃尔夫. 光学原理[M]. 北京:科学出版社,1981.
BORN M, WOLF E. Principles of Optics [M]. Beijing:Science Press,1981. (in Chinese)
- [13] PALIK E D. Handbook of Optical Constants of Solids[M]. New York:Academic Press,1985.