

特殊光子晶体电磁散射角偏特性及其应用研究

何小祥 李浩

(南京航空航天大学信息科学与技术学院, 江苏 南京 210016)

摘要 应用数值方法对特殊光子晶体-蓝蝴蝶翅膀微结构的光学散射角偏特性进行了深入研究。根据蓝蝴蝶翅膀的表皮微结构简化模型,应用时域有限差分(FDTD)方法对其在自然光照射下的散射角偏特性进行了分析,深入研究了此光子晶体中各结构参数对光散射角偏特性的影响,详细探讨了该光子晶体的角偏特性散射机理及其在军用目标隐身设计中的应用。

关键词 光子晶体; 角偏特性; 时域有限差分方法; 电磁散射; 蓝蝴蝶

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092901.0256

Angle-Dependent EM Scattering Analysis of Special Photonic Crystal and Its Application

He Xiaoxiang Li Hao

(College of Information Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,
Nanjing, Jiangsu 210016, China)

Abstract The angle-dependent characteristic of electromagnetic (EM) scattering from photonic crystal with the microstructure of morpho butterfly's wing is investigated. The optical scattering properties are analyzed with the simplified model for surface microstructure of morpho butterfly's wing and finite difference time domain (FDTD) method. Furthermore, the influence of structural parameters on angle-dependent characteristic is studied. The reasonable explanation is presented for the angle-dependent electromagnetic scattering mechanism and its application in the stealth design of military targets are also discussed.

Key words photonic crystal; angle-dependent characteristic; finite difference time domain (FDTD) method; electromagnetic scattering; morpho butterfly

1 引 言

光子晶体是一种周期变化的人造结构材料^[1,2]。当某些频率范围内的光在这种结构中传播时会受到抑制,形成阻带,成为光子晶体的一大重要特性。光子晶体概念的提出对众多学科的发展产生了巨大的影响,已经得到越来越多学者的关注^[3~7],其研究范围已涉及到光学、电磁学、声学等波段。

另一方面,在自然界中同样存在一些类似光子晶体的生物微结构。产自于南美洲亚马逊河域的蓝蝴蝶的翅膀就是拥有介质周期结构的典型代表^[8]。自然光照射在该蝴蝶翅膀上,只有波长小于 500 nm

的蓝光发生反射,而大于 500 nm 的其它波段的光可以顺利通过该翅膀微结构,从而具备了典型的光子晶体带阻特性^[9~19]。关于蝴蝶翅膀带阻特性的研究已较为完善^[9~19],不再赘述。与经典光子晶体不同的是,在自然光垂直照射下,由蝴蝶翅膀散射的光波主要集中在偏移垂直方向 $10^\circ \sim 50^\circ$ 的对称角度范围内,而垂直方向的后向散射却较弱,即蝴蝶结构的电磁散射除具备光子晶体的带阻特性外,还具有角偏特性^[9,20,21]。关于蓝蝴蝶翅膀的这种光学散射角偏特性,目前研究较少,文献^[7~10]中有所涉及但不完善。对这种微结构的电磁散射角偏特性进行

收稿日期: 2008-04-14; 收到修改稿日期: 2008-08-03

基金项目: 国家自然科学基金(60601024)项目资助。

作者简介: 何小祥(1976-),博士,副教授,主要从事电磁散射与辐射和计算电磁学等方面的研究。

E-mail: eexxhe@nuaa.edu.cn

深入分析,了解此结构的散射机理,通过仿生学原理对军用目标进行优化设计,从而使之具备当代隐身技术中结构隐身的优点,可为新型飞行器以及武器装备的隐身设计提供借鉴^[22],具有重要的研究意义。作者前期对该蝴蝶结构的光学散射特性进行了初步分析^[22],验证了蝴蝶翅膀微结构的光学散射带阻和角偏特性,但没有能够探究其散射机理,相关研究工作仍不完善。

在前期工作基础上,本文应用 FDTD 方法对蝴蝶翅膀微结构的光学散射角偏特性进行了分析,并深入研究了结构参数对角偏散射特性的影响,探讨了此结构的散射机理,总结出一些重要的规律,为进一步的结构隐身设计奠定了基础。

2 蝴蝶结构理论分析

图 1 所示蓝蝴蝶在显微镜下呈现如图 2 所示水平方向周期排列的脊状结构^[9]。实验测得该脊的周期间隔为 (675 ± 75) nm。在每个脊中垂直方向等间隔排列约十层分枝,分枝的厚度约为 90 nm,枝间间隔也在 90 nm 左右,分枝的长度从上到下逐层增加约 20 nm。脊两侧的分枝排列错开约 90 nm,并非对称分布。树状脊与翅膀表面垂直方向弯曲大约 20° 。测得该脊的介质折射率为 $n = (1.56 \pm 0.01) + i(0.05 \pm 0.01)$ 。由于折射率的虚部只改变散射光强大小,对其散射特性的影响较小,因此可以忽略。



图 1 Morpho 蝴蝶照片

Fig.1 Photo of Morpho butterfly

从蝴蝶翅膀的微结构可以看出,Morpho 蝴蝶翅膀水平方向为周期排列,类似于二维光子晶体结构,而纵向只有十层介质,为有限尺寸,所以这种微结构为一种多层一维光子晶体结构,因而具有光子晶体的频率选择特性。而相邻层的光子晶体错开分布,因而其散射特性将会与一维光子晶体或二维光子晶体有所不同。

文献^[9]根据图 2 的微结构构建了简化模型如

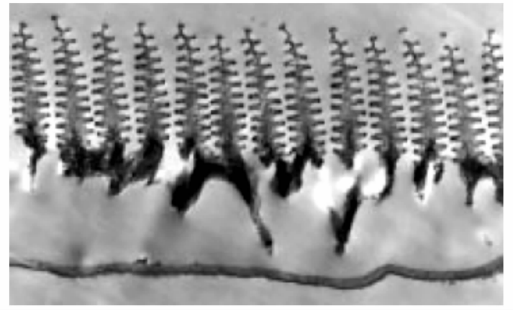


图 2 Morpho 蝴蝶翅微结构

Fig.2 Microstructure of Morpho butterfly's wing

图 3 所示,其中介质块部分的折射率为 1.56,其它部分为空气。为了计算的简便,在 FDTD 计算模型中没有考虑树状脊弯曲的影响,但研究表明,此蝴蝶翅膀微结构模型的电磁散射特性依然存在^[20]。在蝴蝶结构的横截面内,脊周期和脊高度与波长相当,而脊的纵向长度远大于光波波长,所以为简化运算,蝴蝶翅膀微结构可以近似为二维目标电磁散射问题进行处理^[13~17]。

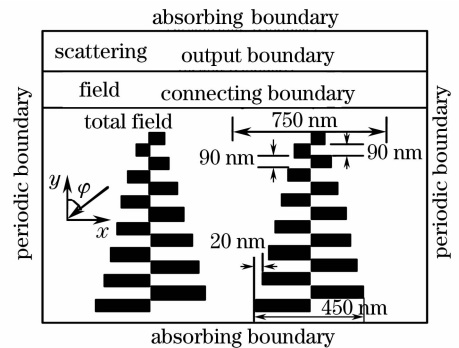


图 3 蝴蝶翅膀结构简化计算模型

Fig.3 Simplified computation model of butterfly's wing structure

应用 FDTD 方法^[20]对如图 3 所示的周期结构目标进行数值分析,空间离散间隔 Δx 设为 5 nm,根据 FDTD 迭代稳定性要求,时间离散间隔定为 $\Delta t = \Delta x / (2c_0)$,其中 c_0 为光在真空中的传播相速度。由于蝴蝶翅膀微结构在水平方向上具有周期性,且本文只研究自然光在垂直入射条件下的散射特性,所以在左右边界可以引入垂直入射下的周期边界条件^[23]对计算区域进行截断。在目标上下边界上采用 Mur 吸收边界条件^[23]吸收后向及前向散射的电磁波。在蝴蝶翅膀的上方空间连接边界上引入入射平面波,并将计算区域划分为总场区和散射场区,通过 FDTD 算法分析得到计算空间任意一点的电磁响应后,根据近远场外推技术^[23],其远区雷达截面(RCS) σ_R 可由输出边界上的近区散射场获

得。

3 计算结果分析

为了验证第 2 节中的简化模型和 FDTD 算法的正确性,以波长为 490 nm 的 TE 极化电磁波垂直入射到图 3 所示的模型上,分析得到光波的双站散射特性如图 4 所示。为了研究结果能够方便对其他波段尤其是微波波段军用目标隐身设计提供借鉴,本文以波长(λ)归一化 σ_R 为表征参量。所得仿真结果与文献[11]中的数据结果进行了对比,二者吻合较好,从而验证了算法和模型的正确性。从图 4 可以看出,当入射波垂直入射到蝴蝶结构表面时,并非在垂直方向上的后向散射最强,而是在偏移一定的角度范围内的 σ_R 取得最大值,即蝴蝶翅膀的散射具有角偏特性。研究表明,正是由于相邻晶体间具有一定的错开量,使得不同层光子晶体上反射电磁波具有一定的相位差,在空间叠加形成如图 4 所示的角偏特性。将具备这种特性的结构应用于飞机以及武器装备的隐身设计中,从而在外形设计上可不用考虑结构隐身设计的限制,大大改善了飞机的气动性能和机动性能设计的自由度,为隐身目标设计提供了一种新的思路。

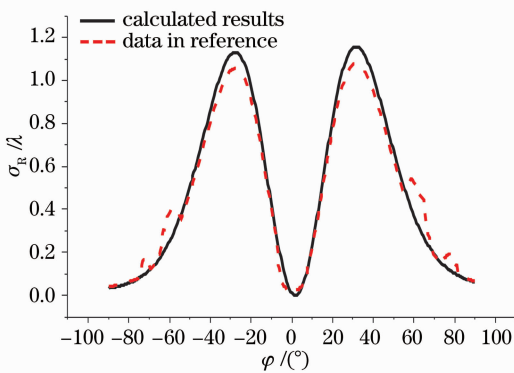


图 4 蝴蝶翅膀电磁散射角偏特性双站 RCS

Fig. 4 Bistatic radar cross-section of angle-dependent electromagnetic scattering of butterfly's wing

图 5 为不同波长电磁波照射下蝴蝶翅膀模型的电磁散射特性,可以看出,在不同电磁波照射下,此结构模型的电磁散射角偏特性的变化。在蓝光所在波长范围内,散射角度基本上保持不变,只是散射幅度不同。由于蝴蝶翅膀为多层光子晶体结构,具有布拉格散射特性,电磁波会受到调制形成能带,当入射波的波长与蝴蝶类光子晶体结构中的晶格尺寸相当时,即蓝光波段时,结构散射较强,而当入射波与树状脊尺寸相差较大时,散射较弱^[10]。随着入射波

长的加大,蝴蝶结构不同层之间的衍射和干涉作用减弱,使得角偏特性随着散射强度的减弱随之变化,甚至角偏特性消失。为了仔细研究角偏电磁散射特性,以下部分内容只针对对电磁散射特性影响显著的波长为 420 nm 的电磁波垂直照射下的蝴蝶翅膀散射特性进行研究。另外,由文献[14]可知,这种光子晶体结构在整个 400~800 nm 的可见光波段内 TE 和 TM 模式电磁波照射下都具有角偏特性,所以本文只对 TE 极化电磁照射下的双站 RCS 进行计算。在其他频段和其他极化电磁波照射下的散射特性,可以得到相同的结论。

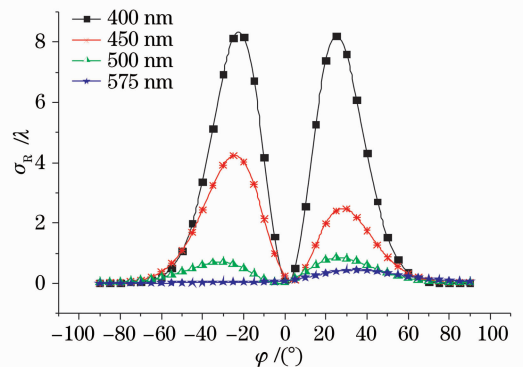


图 5 不同入射波长下的双站 RCS

Fig. 5 Bistatic RCS with different incident wavelength

图 3 所示的蝴蝶翅膀微结构模型中,上下相邻两层光子晶体结构介质块为错开排列,并非不对称分布,而错开量的大小对目标散射特性的影响较大,应用 FDTD 算法仿真得到蝴蝶结构中不同错开量对 RCS 角偏范围、对称性以及幅度的影响如图 6 所示。当树状脊左右两边介质块对称分布,即错开量为 0 时,目标后向散射最大,角度覆盖范围约 $\pm 20^\circ$,不存在角偏特性。而随着左侧介质块向下错开量的增加,散射主峰逐渐向左偏移,幅值逐渐减小。同时

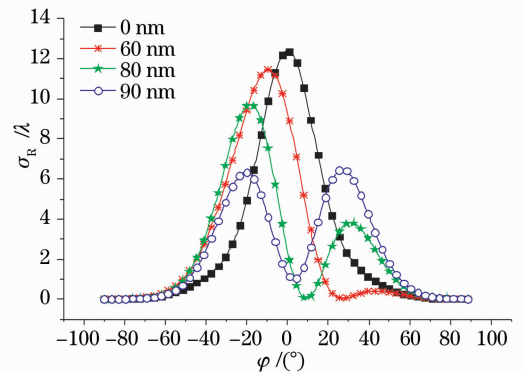


图 6 蝴蝶结构错开量对双站 RCS 的影响

Fig. 6 Impact of stagger number of the butterfly's structure on bistatic RCS

右侧峰值逐渐增加且角度同样向左偏移。当错开量达到 90 nm 时,目标后向散射特性呈现约 $-10^\circ \sim -40^\circ$ 以及 $10^\circ \sim 40^\circ$ 的对称双峰分布。可以看出,正是由于相邻晶体间具有一定的错开量,才使得不同层光子晶体反射的电磁具有一定的相位差,在空间叠加形成角偏特性,当脊两侧错开量为零,则相位差为零,角偏特性消失。通过调节树状脊左右介质块的错开量,可以有效控制蝴蝶翅膀的散射角度和强度,从而利于军事目标的隐身设计。

树状脊中介质块厚度以及介质块垂直方向间隔相差不大,可以令二者近似相等。通过仿真得到介质块厚度及间隔对目标散射特性的影响如图 7 所示。当介质块厚度及垂直间隔在三种不同的取值条件(如图 7 所示)下,计算得到的远场 RCS 的角偏范围基本不变,其散射的最强点维持在 $\pm 22^\circ$ 左右,对角偏特性的影响不大,但散射幅值变化却很显著。根据光学薄膜理论^[24,25],当高低折射率的两种介质交替排列,厚度近似满足表达式 $nd = (1/4)\lambda$ (n 为介质折射率, λ 为光波工作波长)时,从介质表面反射的光,到达前面介质表面时,具有相同的相位,从而产生相长干涉,理论上可以产生接近 100% 的反射率。而不满足如上表达式条件的电磁波入射到此结构表面,由于不能产生相长干涉,反射幅度将大大下降。根据以上特点,在不改变角偏范围的情况下,可以通过控制脊中垂直方向介质块厚度以及介质块间隔来改变散射场幅值的大小,从而有效改变特定频率范围内 RCS 的大小。

也受到一定的影响。其特点仍然可以采用光学薄膜的干涉理论得以解释,当相对介电常数或折射率变化时,对应的相长干涉的频率就发生改变,而本文采用的 420 nm 的入射光波将不能产生相长干涉,反射强度大大降低。可见介电常数的选取对角偏特性也有着重要的影响。

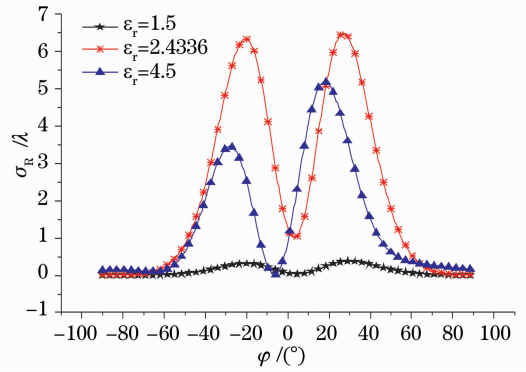


图 8 介质块相对介电常数对双站 RCS 影响

Fig. 8 Impact of the permittivity of dielectric block on bistatic RCS

每一个树状脊中多层介质块长度递减量对幅值和角偏特性的影响如图 9 所示。递减量主要影响目标后向散射的对称性,随着逐层递减量的增加,RCS 的右侧峰值幅值逐渐减小,左侧峰值相应增加,当递减量达到最大值 20 nm 时,后向散射左右对称分布。通过控制逐层递减量的大小,设计特定的结构材料,使目标的强散射区落在敌方雷达的监测角度范围之外,而雷达监测范围之内散射较弱,从而达到更好的隐身效果,为后续目标结构隐身设计增添了又一个技术手段。

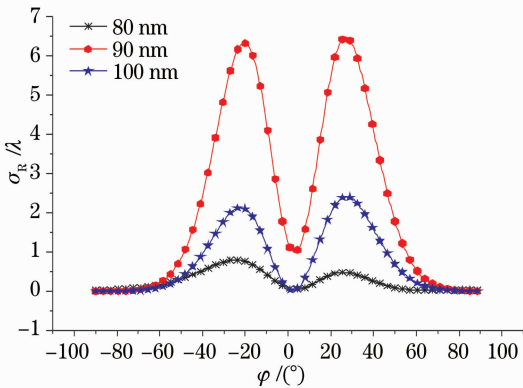


图 7 介质块厚度和间隔对双站 RCS 的影响

Fig. 7 Impact of the thickness and gap of dielectric block on bistatic RCS

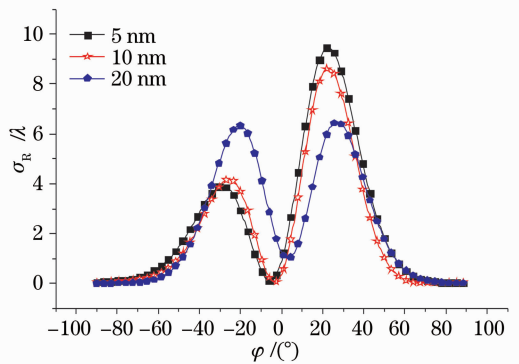


图 9 蝴蝶结构逐层的递减量对双站 RCS 的影响

Fig. 9 Impact of the layer decrease of butterfly's structure on bistatic RCS

图 8 研究了蝴蝶结构树状脊中介质相对介电常数对远场 RCS 的影响,当相对介电常数取不同值时,目标散射的 RCS 幅度变化非常明显,同时后向散射峰值角度有所漂移,而后向散射的左右对称性

由于蝴蝶结构可以看作多层一维光子晶体结构,而光子晶体具有带阻特性,多层一维光子晶体则相当于多级带阻滤波器的级联,故而随着层数的增

加,反射带阻特性将更加明显,阻带内,反射光强随着介质层的个数增加而增强^[2]。图 10 中给出的不同层光子晶体的散射特性证明了上述判断。树状脊中纵向介质块的个数对 RCS 的大小、角偏对称性都有一定的影响。当介质块的个数从 3 块增加到 10 块,RCS 曲线由最初的不对称分布变为对称分布,所以通过调节树状脊中纵向介质块的个数,同样可以控制散射不对称性,从而进一步提高目标隐身效果,有效减小目标的雷达探测概率,从而为目标隐身增添了又一个技术手段。目标的角偏范围基本上维持在 $-10^\circ \sim -50^\circ$ 和 $10^\circ \sim 50^\circ$ 范围内,基本不随介质块的个数变化而变化。

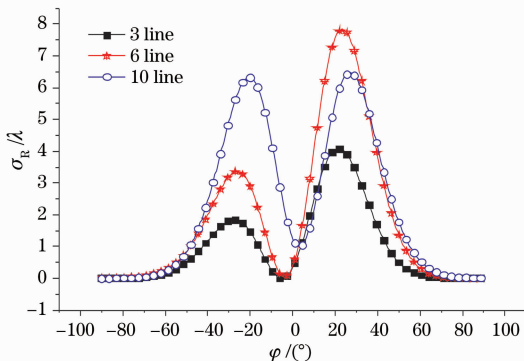


图 10 不同介质块个数对双站 RCS 的影响

Fig. 10 Impact of different number of dielectric block on bistatic RCS

4 结 论

应用 FDTD 方法对蝴蝶翅膀微结构的光学散射特性进行了仿真,探讨了蝴蝶翅膀微结构中各个参数对散射特性的影响,并通过光子晶体、光学薄膜以及干涉、衍射理论对所给数值结果进行了分析。发现蝴蝶翅膀的电磁散射角度偏移特性主要由脊内介质块的错开量决定,而介电常数、逐层递减量、介质块的数目等参数也对散射特性具有一定的影响。应用蝴蝶结构相关散射特性,可以通过缩比原理制作其他频段的隐身结构或新型吸波材料,成为未来的一个努力方向。此外,斜入射情况下的蝴蝶翅膀微结构的电磁散射特性也将是未来有益的研究工作。

参 考 文 献

- 1 Pete Vukusic, J. Roy Sambles. Photonic structures in biology [J]. *Nature*, 2003, **424**(6950): 852~855
- 2 Wen Xisen. The Theory and Technology of Photonic and Phononic Crystals[M]. Beijing: Science Press, 2006. 1~120
温熙森. 光子/声子晶体理论与技术[M]. 北京: 科学出版社,

2006. 1~120
- 3 Xiang Yuanjiang, Tang Zhixiang, Wen Shuangchun *et al.*. Artificial media based low-pass spatial filter [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(s1): 85~89
项元江,唐志祥,文双春等. 基于人工介质的低通滤波器[J]. *中国激光*, 2008, **35**(增刊): 85~89
- 4 Zhang Wenfu, Fang Qiang, Cheng Yihua *et al.*. Narrow band interleaver based on one-dimensional photonic crystal with positive-negative index alternant multilayer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(9): 1695~1699
张文富,方强,程益华等. 正负折射率交替一维光子晶体窄带梳状滤波器[J]. *光学学报*, 2007, **27**(9): 1695~1699
- 5 Wei Chen, Jinyan Li, Shiyu Li *et al.*. Study on single-mode photonic crystal fibers in wide wavelength range [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(7): 383~385
- 6 William M. Merrill, Chryssoula A. Kyriazidou, Harry F. Contopanagos *et al.*. Electromagnetic scattering from a PBG material excited by an electric line source [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1999, **47**(11): 2105~2114
- 7 Hossein Mosallaei, Yahya Rahmat-Samii. Periodic bandgap and effective dielectric materials in electromagnetics: characterization and applications in nanocavities and waveguides [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2003, **51**(3): 549~563
- 8 P. Vukusic, J. R. Sambles, C. R. Lawrence *et al.*. Quantified interference and diffraction in single Morpho Butterfly scales [J]. *Proc. Roy Soc. Lond B*, 1999, **266**(1427): 1403~1411
- 9 Boris Gralak, Gérard Tayeb, Stefan Enoch. Morpho butterflies wings color modeled with lamellar grating theory [J]. *Opt. Exp.*, 2001, **9**(11): 567~578
- 10 Shuchi Kinoshita, Shiya Yoshioka, Yasuhiro Fujii *et al.*. Photophysics of structural color in the morpho butterflies [J]. *Forma*, 2002, **17**(2): 103~121
- 11 Saswatee Banerjee, James B. Cole, Toyohiko Yatagai. Color characterization of a morpho butterfly wing-scale using a high accuracy nonstandard finite difference time-domain method [J]. *Micron*, 2007, **38**(2): 97~103
- 12 Liu Guangping, Xuan Yimin, Han Yuge. Structure-color characteristic of Morpho Butterfly [J]. *Acta Laser Biology Sinica*, 2006, **15**(5): 511~514
刘广平,宣益民,韩玉阁. Morpho 蝴蝶结构显色特性研究 [J]. *激光生物学报*, 2006, **15**(5): 511~514
- 13 Kinoshita S, Yoshioka S, Kawagoe K. Mechanisms of structural color in the Morpho Butterfly: cooperation of regularity and irregularity in an iridescent scale [J]. *Proc. R. Soc. Lond B*, 2002, **269**(1499): 1417~1421
- 14 Eiji Iwase, Kiyoshi Matsumoto, Isao Shimoyama. The structural-color based on the mechanism of butterfly wing coloring for wide viewing angle reflective display [J]. *IEEE. MEMS*, 2004. 105~108
- 15 Sajeer John. Localization and absorption of waves in a weakly dissipative disordered medium [J]. *Phys. Rev. B*, 1985, **31**(1): 301~309
- 16 Mann S E, Miaoulis In, Wong P Y. Spectral imaging, reflectivity measurements and modeling of iridescent butterfly scale structures [J]. *Optical Engineering*, 2001, **40**(10): 2061~2068
- 17 Luca Plattner. Optical properties of the scales of Morpho Rhetenor butterflies: theoretical and experimental investigation of the back-scattering of light in the visible spectrum [J]. *J. R. Soc. Interface*, 2004, **1**(1): 49~59
- 18 Y. Yang, S. M. Hu, R. S. Chen *et al.*. FDTD analysis with modified matrix pencil method for the UC-EBG lowpass filters [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2005, **44**(1): 37~41

- 19 Z. B. Ye, R. S. Chen, Y. Yang. Analysis of finite periodic structure by FDTD and SOC technique [C]. *Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings*, Suzhou, China, 2005, **3**(4):1848~1850
- 20 Luca Plattner. A Study in Biomimetics: Nanometer-Scale, High-Efficiency, Dielectric Diffractive Structures on the Wings of Butterflies and the Silicon Chip Factory [D]. University of Southampton, 2003. 108~142
- 21 Shiya Yoshioka, Shuichi Kinoshita. Wavelength-selective and anisotropic light-diffusing scale on the wing of the morpho butterfly[J]. *Proc. R. Soc. Lond. B*, 2004, **271**(1539): 581~587
- 22 Jin Kui, He Xiaoxiang, Chen Rushan. Analysis on EM scattering of Morpho Rhetenor butterfly[J]. *J. Nanjing University of Science and Technology*, 2007, **31**(1): 118~121
- 金 魁,何小祥,陈如山. 蓝蝴蝶翅膀结构电磁散射特性分析[J]. *南京理工大学学报*, 2007, **31**(1): 118~121
- 23 Ge Debiao, Yan Yubo. The FDTD Method of Electromagnetic Wave[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2005. 49~282
- 葛德彪,闫玉波. 电磁波时域有限差分方法[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2005. 49~282
- 24 Tang Jinfan, Zhen Quan. Application in Optical Coating [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1984. 150~200
- 唐晋发,郑 权. 应用薄膜光学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1984. 150~200
- 25 Wang Dan, Fan Zhengxiu, Huang Jianbing *et al.*. Symmetrical periods used as matching layers in multilayer thin film design[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **11**(4): 675~677