

二维 Thue-Morse 型准周期光子晶体的制作与光学特性

冯亚萍¹ 周 骏¹ 阳明仰¹ Lucia Petti² 林 豪¹ 丁海芳¹

(¹ 宁波大学理学院物理系, 浙江 宁波 315211
² Istituto di Cibernetica, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Pozzuoli (Na) 80078, Italy)

摘要 采用电子束刻蚀技术在聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 基底上制作高精度、大面积纳米量级的二维 Thue-Morse 型准周期光子晶体, 并且对其远场衍射的光学特性进行了实验研究。同时, 根据光的衍射和干涉理论, 对二维 Thue-Morse 型准周期光子晶体的夫琅禾费衍射图像的空间强度分布进行了理论分析, 理论模拟和实验结果一致。

关键词 光学器件; 准周期光子晶体; Thue-Morse 序列; 电子束刻蚀; 远场衍射

中图分类号 O734 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201131.0423001

Fabrication and Optical Properties of Two-Dimensional Thue-Morse Quasicrystals

Feng Yaping¹ Zhou Jun¹ Yang Mingyang¹ Lucia Petti² Lin Hao¹ Ding Haifang¹

(¹ Department of Physics, Faculty of Science, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China
² Istituto di Cibernetica, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Pozzuoli (Na) 80078, Italy)

Abstract A large-area two-dimensional Thue-Morse quasicrystal with nanometer structures is fabricated on polymethyl methacrylate (PMMA) substrate using the technology of electron beam lithography (EBL). And the optical properties of sample are studied by the far-field diffraction experiment. In addition, according to the diffraction principle and interference theory, the Fraunhofer diffraction patterns of the Thue-Morse quasicrystal are simulated and analyzed. It is shown that the theoretical simulations are consistent with the experimental results very well.

Key words optical devices; photonic quasicrystals; Thue-Morse sequence; electron beam lithography; the far-field diffraction

OCIS codes 230.5298; 250.0250; 260.0260; 270.0270

1 引 言

1987 年, E. Yablonovitch^[1] 和 S. John^[2] 分别独立提出了“光子晶体”的概念, 由于光子晶体具有光子禁带和光子局域特性, 很快引起了人们的研究热潮。所谓光子晶体是由不同折射率的介质周期性排列的人工微结构材料, 能够产生光子带隙, 如果在光子晶体的周期性结构中引入缺陷, 破坏结构的周期

性, 那么在光子带隙中就会形成相应的缺陷能级, 并且只有特定频率的光才能在这个缺陷能级中传播^[3]。近年来, 光子晶体在应用方面的研究已经取得了极大进展, 出现了多种光子晶体器件, 例如光子晶体微腔和无阈值激光器^[4]、光子晶体波导和光纤^[5,6]、双稳态光开关^[7]和光子晶体偏振器^[8,9]等。1984 年, Shchtmann 等^[10]发现了具有长程平移对称

收稿日期: 2010-08-16; **收到修改稿日期:** 2010-11-08

基金项目: 国家自然科学基金 (60977408)、宁波市自然科学基金 (2008A610001) 和宁波市国际科技合作项目 (2010D10018) 资助课题。

作者简介: 冯亚萍 (1987—), 女, 硕士研究生, 主要从事准周期光子晶体、光通信器件设计与制备技术等方面的研究。

E-mail: fyp_121@163.com

导师简介: 周 骏 (1958—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事非线性光学、光电子材料与器件制备技术等方面的研究。

E-mail: ejzhou@yahoo.com.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 (<http://www.opticsjournal.net>)

性和高度旋转对称性的准晶体之后,一种介于周期结构和无序结构之间的准周期结构引起了人们广泛的重视。由于无缺陷的准周期光子晶体可以看成是有缺陷的周期性光子晶体,更重要的是它也能够产生类似于周期性光子晶体的光子带隙^[11]。因此,研究准周期光子晶体的特性可以拓宽光子晶体的应用范围^[12],设计性能优良的光子晶体带隙器件^[13]。

另一方面,纳米量级的准周期光子晶体结构制作非常困难,目前对于准周期结构的研究大部分都限于理论模拟。本文利用电子束刻蚀技术在聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)基底上制作纳米量级的二维 Thue-Morse 型准周期光子晶体,实验上测量了样品的远场衍射图像,并对二维 Thue-Morse 结构的衍射光场分布进行理论分析,所得模拟结果与实验结果一致。

2 Thue-Morse 型准周期光子晶体

2.1 结构模型

Thue-Morse 型准周期结构是一种具有自相似

性的长程平移对称性的准周期光子晶体的实例^[14~16]。任意定义两个符号 A 和 B ,并且满足: $B = \overline{A}$,则一维 Thue-Morse 型序列的生成方式为: $s_N = s_{N-1} \overline{s_{N-1}}$ 。例如:以 A 元素开始,即 $s_1 = A$,则有 $s_2 = s_1 \overline{s_1} = A \overline{A} = AB, s_3 = s_2 \overline{s_2} = ABBA \dots$ 。一维 Thue-Morse 序列的生成方式可以被推广到二维空间^[17],则二维 Thue-Morse 序列可表示为

$$S_N = \begin{bmatrix} s_{N-1} & \overline{s_{N-1}} \\ \overline{s_{N-1}} & s_{N-1} \end{bmatrix},$$

按照 s_N 阵列的递推置换就可以得到整个序列的阵列,同样 S_N 也是由 A 和 B 两种元素组成。二维 Thue-Morse 序列的结构,如图 1 所示,可以看出 N 阶序列可以被分割成 $2^N \times 2^N$ 个大小相等的单元格,当图形绕其几何中心旋转 90° 时即可与原图重合。图 1(a) 中灰色部分表示 AB ,下半部分则表示 BA ,对于准周期光子晶体结构, A 和 B 代表具有不同折射率材料的区域。

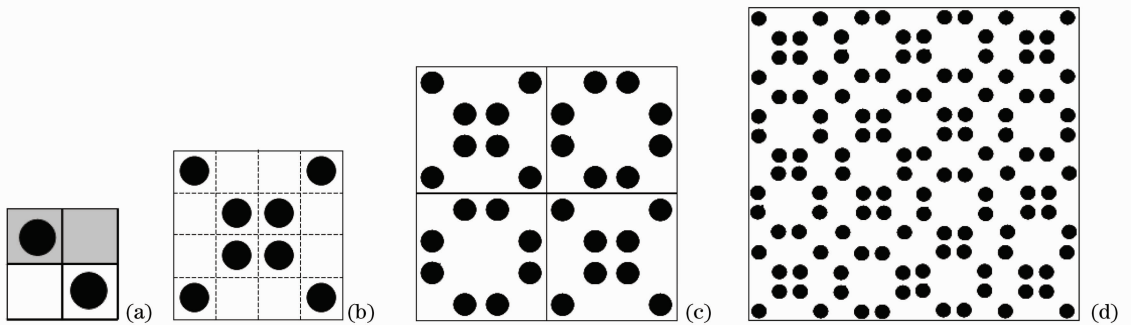


图 1 二维 Thue-Morse 序列的结构图,阶数分别为。(a) $N=1$, (b) $N=2$, (c) $N=3$, (d) $N=4$

Fig. 1 Structure diagram of 2D Thue-Morse sequence. (a) $N=1$, (b) $N=2$, (c) $N=3$, (d) $N=4$

2.2 样品制作

实验制作二维 Thue-Morse 型准周期光子晶体就是按照上述 Thue-Morse 序列的生成方式,在一系列规则的正方形阵列中利用电子束刻蚀方法改变特定区域的折射率来实现。主要有五个步骤:1) 按照二维 Thue-Morse 型序列的生成方式,设定所要制作准周期结构的阶数,确定该结构的阵列元素,得到所设计图形的位置矩阵元,并编码输入德国 Raith150 电子束刻蚀系统;2) 在一块导电玻璃(ITO 镀膜玻璃)上均匀涂镀一层正性光刻胶聚甲基丙烯酸甲酯作为样品的基底;3) 按照所设计的矩阵元,将电子束聚焦到样品的基底上,曝光特定区

域;4) 使用甲基异丁基甲酮(MIBK)与异丙醇(IPA)按照 1:3 配比作为显影液进行显影,然后用 IPA 进行定影;5) 用去离子水清洗样品并烘干后即可得到二维 Thue-Morse 型准周期光子晶体。制作的样品是由一系列折射率 $n_a=1$ 的空气孔镶嵌到折射率 $n_b=1.49$ 的聚合物 PMMA 基底上组成,基底的厚度为 850 nm,样品的面积为 $800 \mu\text{m}^2$,空气孔的半径 $R=294.2 \text{ nm}$,相邻两空气孔之间的距离 $d=123.4 \text{ nm}$,其空间分布如图 2 所示。图 2(a) 是阶数 $N=10$ 样品的扫描电镜(SEM)照片,与图 1(d) 进行比较,可以清楚的看出样品的结构完全满足 Thue-Morse 型序列的特征。

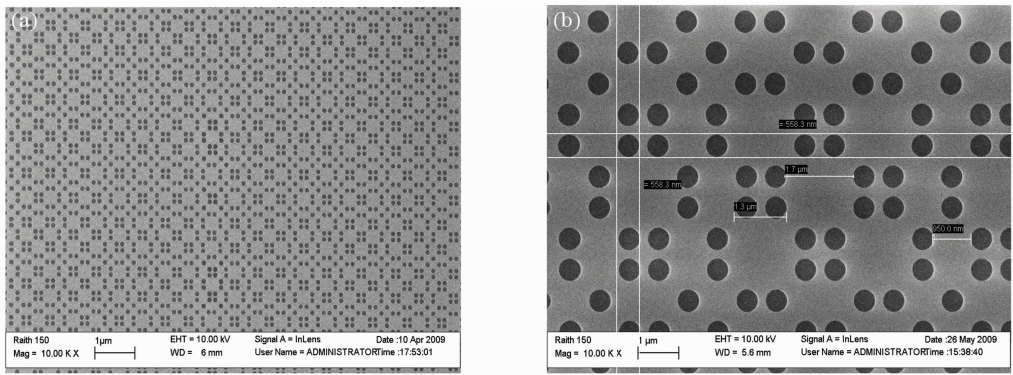


图 2 样品的 SEM 照片。(a) $N=10$, $R=294.2$ nm, $d=123.4$ nm, (b) 样品的精细结构图

Fig. 2 Scanning electron microscopy (SEM) images of 2D Thue-Morse quasicrystals. (a) $N=10$, $R=294.2$ nm, $d=123.4$ nm, (b) detail of the sample image.

3 远场衍射实验

为研究 Thue-Morse 型准周期光子晶体的光学特性,对其进行远场衍射实验,光路如图 3 所示。在图 3 中,光源分别为 Ar^+ 激光器(波长 $\lambda=488$ nm)、He-Ne 激光器($\lambda=632.8$ nm)和半导体激光器($\lambda=532$ nm)。 Ar^+ 激光器发出的激光经过衰减片后通过一个直径为 $500 \mu\text{m}$ 的光阑,此时产生小孔衍射,出现明暗交替的同心环形圆孔衍射图案,中央最亮

的零级衍射光斑为艾里斑,计算可知光斑直径为 2.99 mm。因为零级衍射波具有很好的空间相干性,而更高级次衍射波的发散角比较大,偏离主光轴,在实验中将其滤掉。然后,采用扩束镜将艾里斑光束扩束成平行光,再经过第二个光阑,获得均匀性良好的平行光照射样品,在凸透镜焦点处的观察屏上观察样品的远场衍射图案。

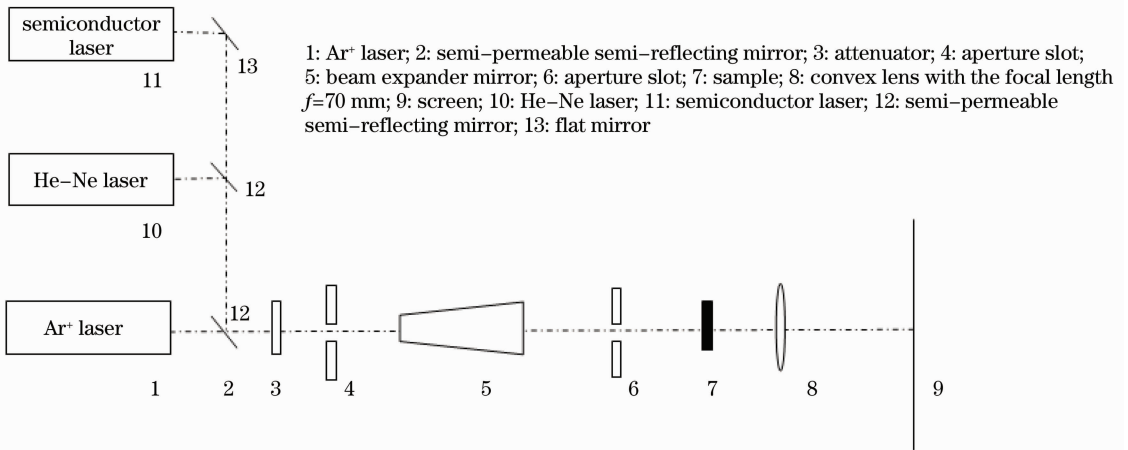


图 3 实验光路示意图

Fig. 3 Experimental setup

实验获得的远场衍射图案如图 4 所示,其中图 4(a)为 He-Ne 激光器产生的红光图案,图 4(b)为半导体激光器产生的绿光图案,图 4(c)为 Ar^+ 激光器产生的蓝光图案,图 4(d)为上述 3 束光同时照射到样品上所得的衍射图案。图案中心部分的亮斑为零级主极大,光强非常强。从图 4 可以看出衍射图案与样品结构具有相同的旋转对称性,将衍射图案旋转 90° 能够与原图重合。沿着光轴前后移动样品,衍射图案均不会发生变化,衍射强度分布与样品和扩束镜之

间的距离无关,说明照射在样品上的光线的平行性很好。将平行光以小角度斜入射到样品,衍射图案的花样不会发生变化,只仅仅做整体的偏离光轴方向的平移,说明衍射图案的花样仅与样品本身的结构特征有关。测量图 4(a)~(c)中竖直方向和水平方向的次级亮斑 A, B, C 和 D 的间距,当屏与样品之间的距离为 80 mm 时,红光、绿光和蓝光对应的 \overline{AB} 分别为 $200, 120$ 和 100 mm, \overline{CD} 的长度为 $200, 120$ 和 100 mm,可以看出 $\overline{AB}=\overline{CD}$ 。从图 4(d)可以

看出,仅改变入射光的波长,衍射图案的花样不会生变化,但是随着入射光波长的增大,衍射图案中亮条纹的间距变大。需要指出,图 4 中衍射图案上的黑

色斑点是实验中在观察屏上添加的,主要是为了滤掉图案中心的强光,增加拍摄图像的清晰度。

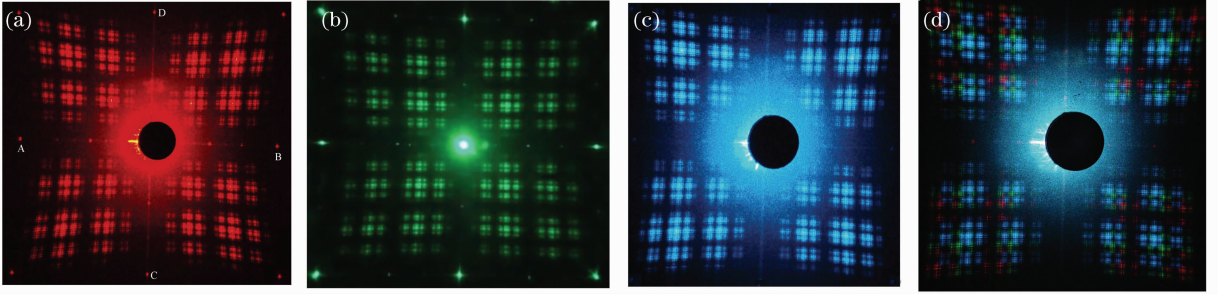


图 4 (a)~(c)不同入射光波长下样品的远场衍射图案,对应波长分别为 632.8,532 和 488 nm, (d)三束光同时通过样品时的衍射图案

Fig. 4 (a)~(c) Diffraction patterns, the wavelength of the incident light is 632.8, 532 and 488 nm, respectively, (d) diffraction patterns when three beams propagate through the sample at the same time

4 理论分析

由于实验样品的 Thue-Morse 结构为纳米量级,照射在样品上的入射光近似为平行光,因此观察屏与样品之间的距离可看成无限远,可以认为实验中所发生的衍射为夫琅禾费多孔衍射,并且孔与孔之间产生干涉,所以在实验中得到的衍射图案是受干涉调制的衍射现象。

首先讨论单个空气孔的衍射情况。根据夫琅禾费圆孔衍射理论,样品上第 i 个空气孔在观察屏任意点 P 的光强可表示为^[18]

$$I(\theta_i) = I_0 \left[\frac{2J_1(x_i)}{x_i} \right]^2, \quad x_i = \frac{2\pi R \sin \theta_i}{\lambda} \quad (1)$$

式中 $J_1(x_i)$ 为一阶贝塞尔函数, R 为圆孔的半径, θ_i 为第 i 个空气孔的衍射角, λ 为入射光的波长, I_0 是圆孔所发出的次波在衍射角为零时的强度。

然后,将圆孔的衍射光视为孔与孔之间干涉的光源。由于样品中任意两孔之间的光程差并不一定相等,运用双光束干涉理论^[19]可知样品中任意两个圆孔的光在点 P 产生的干涉光强可表示为

$$I_p = 2I_0 \sum_{i,j} \left[\frac{2J_1(x_i)}{x_i} \right]^2 \cdot \left[1 + \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{n\Delta s_{ij}d}{s_i + s_j} \right) \right], \quad (2)$$

式中 $i = 1, 2, 3, \dots, 2^{2N-1} - 1, j = 2, 3, 4, \dots, 2^{2N-1}$, 并且 $j > i, i, j$ 分别表示样品中空气孔的编号, 2^{2N-1} 则表示阶数为 N 的样品中共有 2^{2N-1} 个空气孔; s_i, s_j 分别第 i 个和第 j 个空气孔的中心到 P 点的距离; $\Delta s_{ij} = |s_i - s_j|$, 由于样品与屏之间的距离 D 远远

大于孔与孔之间的距离 d , 为了便于计算近似取: $s_i + s_j \approx 2D$ 。

根据(2)式所表示的光强分布,样品的远场衍射图案的模拟结果如图 5 所示。由于 Thue-Morse 型准周期结构有自相似性^[13],即低阶数结构的光学特性与高阶数结构的具有相似性,如对于阶数 $N = 1$ 的结构[图 1(a)],其远场衍射现象来自于对角元元的两个圆孔的衍射以及它们之间的干涉对圆孔衍射进行的调制,可以推广到高阶数结构的情况。下面考虑阶数较高结构的衍射。取入射光的波长 $\lambda = 532$ nm,当阶数 $N = 2, 3$ 时得到的衍射图案如图 5(a),(b)所示,并与图 4(b)进行比较,可以看出模拟结果与实验结果非常相似,由此证明, Thue-Morse 结构具有自相似性的特征。对比图 5(a), (b),显然图 5(b)与实验结果吻合的更好,也就是说,随着模拟结构阶数 N 的增加,模拟结果越接近实验结果。此外,确定阶数 $N = 3$,改变入射光波长,分别对两种波长 $\lambda = 488$ nm 和 $\lambda = 632.8$ nm 的情况进行模拟,结果如图 5(c),(d)所示。比较图 5(b)~(d)可看出,阶数确定时,随着入射光波长的增大,衍射图案中相邻两个亮斑之间的距离越来越大。而对比图 5(a),(b)发现,当波长确定而阶数改变时,相邻两个亮斑之间的距离确定不变。当然,图 5 中的模拟结果与实验结果并非完全吻合,如果要使模拟结果和实验结果能够更好地吻合,则需要对更高阶数的 Thue-Morse 结构进行模拟。

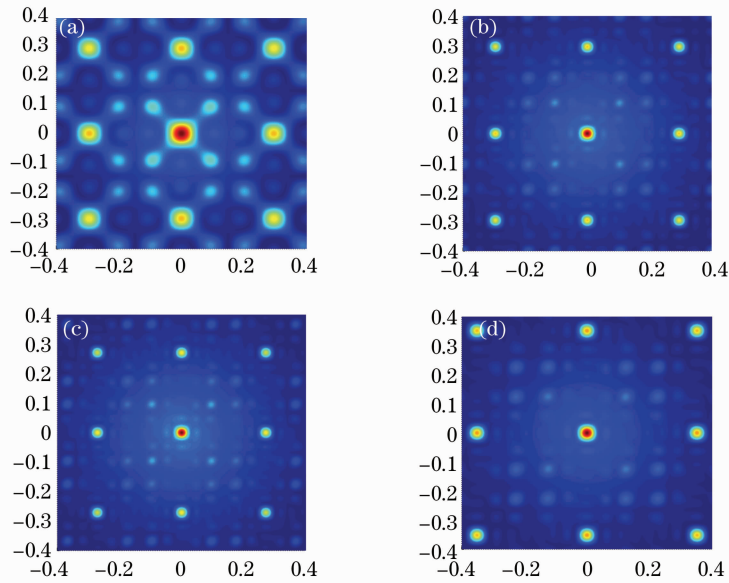


图 5 不同入射波长下模拟的衍射图案。(a) $\lambda=532$ nm, $N=2$, (b) $\lambda=532$ nm, $N=3$,
(c) $\lambda=488$ nm, $N=3$, (d) $\lambda=632.8$ nm, $N=3$

Fig. 5 Simulated diffraction patterns with different wavelengths. (a) $\lambda=532$ nm, $N=2$, (b) $\lambda=532$ nm, $N=3$,
(c) $\lambda=488$ nm, $N=3$, (d) $\lambda=632.8$ nm, $N=3$

5 结 论

应用电子束刻蚀技术在聚合物基底上制作大面积纳米量级的二维 Thue-Morse 型准周期光子晶体,结构的间距最小可达 10 nm。通过对二维 Thue-Morse 型准周期光子晶体的远场衍射实验进行观测,衍射现象显著,图案清晰。从理论上对样品的衍射特性进行分析,模拟结果与实验结果一致,证明了 Thue-Morse 型准周期结构的自相似性,说明制作的样品的精度很高,实验效果很好。该 Thue-Morse 型准周期光子晶体的衍射光学特性将为新型光子晶体带隙器件和衍射光子器件的设计与制作开辟新的途径,在图像处理、载波复用、选频器和非线性频率转换^[20]等方面具有重要应用。

参 考 文 献

- 1 E. Yablonovitch. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(20): 2059~2062
- 2 S. John. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(23): 2486~2489
- 3 Sun Zhihong. The study of the defect modes and coupling characteristics of photonic crystals[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(7): 984~989
孙志红. 光子晶体局域缺陷模及耦合特性研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(7): 984~989
- 4 H. Yakoyama, K. Nishi, T. Anan *et al.*. Controlling spontaneous emission and threshold less laser oscillation with

- optical microcavities[J]. *Opt. Quant. Electron.*, 1992, **24**(2): 245~272
- 5 J. C. Knight, J. Broeng, T. A. Birks *et al.*. Photonic band gap guidance in optical fiber [J]. *Science*, 1998, **282**(5393): 1476~1478
- 6 Z. Q. Zhang, C. C. Wong, K. K. Fnnng *et al.*. Obserbation of localized electeomagnetic waves in three-dimensional networks of waveguides[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1998, **81**(25): 5540~5543
- 7 P. Tran. Optical switching with a nonlinear photonic crystal; a numerical study [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(15): 1138~1140
- 8 S. Noda, M. Yokoyama, M. Imada *et al.*. Polarization mode control of two-dimensional photonic crystal laser by unit cell structure[J]. *Science*, 2001, **293**(5532): 1123~1125
- 9 Kong Weijin, Yun Maojin, Wang Mei *et al.*. Beam splitter and deflector in two-dimensional photonic crystals[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(3): 818~821
孔伟金, 云茂金, 王 美 等. 二维光子晶体分束器和偏转器[J]. *光学学报*, 2009, **29**(3): 818~821
- 10 D. Shechtman, I. Blech. Metallic phase with long-range orientation order and translational symmetry [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1984, **53**(20): 1951~1953
- 11 M. E. Zoorob, M. D. B. Charlton, G. J. Parker *et al.*. Complete photonic bandgaps in 12-fold symmetric quasicrystals [J]. *Nature*, 2000, **404**(6779): 740~743
- 12 Ren Kun, Ren Xiaobin. Focus achieved by a slab lens of quasiperiodic photonic crystal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(8): 2317~2319
任 坤, 任晓斌. 准周期光子晶体平板透镜的光会聚[J]. *光学学报*, 2009, **29**(8): 2317~2319
- 13 L. Petti, V. Matarazzo, M. Rippa *et al.*. High resolution lithography as a tool to fabricate quasiperiodic crystals[C], AIP. Conf. Proc, 2009, **1176**(2): 146~148
- 14 N. Liu. Propagation of light waves in Thue-Morse dielectric multilayers[J]. *Phys. Rev. B*, 1997, **55**(6): 3543~3547
- 15 L. Moretti, I. Rea, L. Rotiroti *et al.*. Photonic band gaps analysis of Thue-Morse multilayers made of porous silicon[J].

- Opt. Express*, 2006, **14**(13): 6264~6272
- 16 F. Axel, H. Terauchi. High-resolution X-ray-diffraction spectra of Thue-Morse GaAs-AlAs heterostructures: towards a novel description of disorder[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1991, **66**(17): 2223~2226
- 17 Luigi Moretti, Vito Mocella. Two-dimensional photonic aperiodic crystals based on Thue-Morse sequence[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(23): 15314~15323
- 18 Zhao Kaihua. Optical [M]. Beijing: Higher Education Press, 2002. 365~370
- 赵凯华. 光学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002. 189~190
- 19 Born M, Wolf E. Principles of Optics [M]. Yang Jiasun Transl. Beijing: Electronics Industry Press, 2002. 365~370
- 马科斯. 玻恩, 埃米尔. 沃耳夫. 光学原理[M]. 杨葭荪译. 北京: 电子工业出版社, 2006. 365~370
- 20 R. Lifshitz, A. Arie, A. Bahabad. Photonic quasicrystals for nonlinear optical frequency conversion[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, **95**(13): 133901~133903