

# 基于阿贝正弦条件的光子等频图和能带结构测试系统

袁小文<sup>1,2</sup> 王 玓<sup>1,2</sup> 陈长清<sup>1</sup> 张 波<sup>2</sup> 孙聊新<sup>2\*</sup>

(<sup>1</sup> 华中科技大学光学与电子信息学院武汉光电国家实验室, 湖北 武汉 430074)  
(<sup>2</sup> 中国科学院上海技术物理研究所红外物理国家重点实验室, 上海 200083)

**摘要** 通过结合电磁波在周期性纳米材料中的传播特性以及阿贝完备成像理论中的阿贝正弦条件, 提出了一种快速测试光子等频图和能带结构的测试技术和光学检测系统。将无限筒长显微物镜作为一种把波矢空间直接转换到实空间的变换器件, 并通过配备二维面阵 CCD 的光栅光谱仪实现了对周期性纳米材料的等频图和能带结构的一次性拍照, 真正实现了方便、快速和无损的探测技术。利用自行搭建的测试系统对用自组装方法制备的二维周期性纳米材料进行了相关光学测试, 通过实验测试结果和相关理论计算的对比验证了系统的可行性和可靠性, 从而说明该光学系统在研究周期性纳米材料的光学特性方面具有一定的优势。

**关键词** 测量; 光子晶体; 阿贝正弦条件; 光子等频图

**中图分类号** O439 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.1212004

## Measurement of Photonic Isofrequency Curves and Band Structure Based on the Abbe Sine Condition

Yuan Xiaowen<sup>1,2</sup> Wang Qi<sup>1,2</sup> Chen Changqing<sup>1</sup> Zhang Bo<sup>2</sup> Sun Liaoxin<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, College of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China

<sup>2</sup> National Laboratory for Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China

**Abstract** Based on the transmission characteristics of electromagnetic waves in periodic nanomaterial and the optical Abbe sine condition, the optical system that can measure photonic isofrequency curves and band structures is proposed. By using a grating spectrometer equipped with a two-dimensional CCD and an infinite tube length microscope objective that can directly transform the wave vector space into real space, the information of photonic isofrequency curves and band structures are obtained with a snapshot, leading to a simple, rapid and nondestructive detection method. This experimental scheme is applied to measure a two-dimensional periodic nanomaterial which is prepared by using self-assembly technology. By comparing experimental results and theoretical calculation, feasibility and reliability of this system are verified. It indicates an unique advantage in studying the optical property of the periodic nonmaterial.

**Key words** measurement; photonic crystal; Abbe sine condition; photonic isofrequency curves

**OCIS codes** 120.4640; 160.5320; 080.1005; 160.5293

## 1 引 言

众所周知, 无论是电子的德布罗意波, 还是电磁

波, 只要受到周期性调制, 都具有能带结构, 也都可能出现带隙, 而能量落在带隙中的波是不能传播

收稿日期: 2014-05-12; 收到修改稿日期: 2014-07-16

基金项目: 国家自然科学基金(11104320)、上海市自然科学基金(11ZR1442300)

作者简介: 袁小文(1987—), 男, 博士研究生, 主要从事光子晶体光谱特性研究和近红外光谱探测系统设计等方面的研究。E-mail: yxw2007@mail.sitp.ac.cn

导师简介: 张 波(1967—), 男, 博士, 研究员, 主要从事红外光谱探测方面的研究。E-mail: bozhang@mail.sitp.ac.cn

\* 通信联系人。E-mail: sunlx@mail.sitp.ac.cn

的<sup>[1]</sup>。1987年, Yabnolovitch等<sup>[2-3]</sup>分别在独立讨论如何抑制自发辐射和光子局域时提出了光子晶体这一新概念。如果将具有不同介电常数的介电材料构成波长量级的周期结构, 电磁波在其中传播时由于受到布拉格散射, 传播特性会受到调制而形成能带结构, 这种能带结构叫做光子能带; 而利用光子能带结构调控光子特性已经成为当今光电子领域炙手可热的研究方向。除光子晶体以外, 自1998年, Ebbesen等<sup>[4]</sup>先后发现电磁波透过金属膜的纳米孔、纳米狭缝及其阵列时具有增强透射现象以来, 表面等离子体及其应用也成为近年来光学领域的研究热点之一。总之, 到目前为止, 光子晶体和周期性表面等离子体已经成为调控光子行为最有效的两种方式<sup>[5]</sup>。它们在光波导<sup>[6-7]</sup>、全光开关<sup>[8-9]</sup>、光子集成电路、微细加工、超分辨成像<sup>[10]</sup>、隐身斗篷<sup>[11]</sup>等方面具有广阔的应用前景。

对于像光子晶体和表面等离子体等周期性纳米材料, 光子能带结构和光子等频图能够最直观地反映材料结构的光学特性。通过能带结构可以区分晶体材料是否存在禁带<sup>[12]</sup>, 而等频图更加清楚地反映了电磁波进入晶体的等效折射率问题<sup>[13]</sup>。随着计算机技术的发展, 现如今已经形成了一系列如有限时域差分<sup>[14]</sup>、平面波展开等较完善、可靠的理论计算和模拟技术<sup>[15]</sup>。在这些技术的支持下, 人们可以有目的地设计各种新型功能的周期性材料体系。除了理论模拟, 毋庸置疑的是如何实验获得新型材料的光学特性才是更好地优化理论及指导材料设计的必经之路。然而周期性纳米材料的光学特性获取在检测技术却受到了极大的限制。现如今国内的主流检测技术主要是通过限制光学系统的数值孔径来实现准单一角度入射, 这种测试方法由于要多角度扫描<sup>[16-17]</sup>, 不仅费时费力, 而且根据光学拉赫不变量的条件, 光束准直度和光斑大小是一对矛盾量, 使得入射能量和被检测样品的几何尺寸都受到了极大的限制<sup>[18]</sup>, 这些缺陷严重违背了纳米材料微型化、集成化的发展趋势。现如今这些限制使得人们对新设计材料的光子学性质缺乏足够的认识, 从而很难对其应用前景做出客观的、合理的预见。本文基于阿贝成像理论中的阿贝正弦条件提出了一种针对周期性材料光学特性的测试方法和光学检测系统。此系统将无限筒长显微物镜当做一种直接把波矢空间转换到实空间的变换器件, 能够通过一次性成像测试出材料的光子等频图和能带结构, 真正做到了快速、方便和无损伤探测。

## 2 测试系统工作原理

### 2.1 光子等频图与能带结构

光子等频图反映了某一特定频率的电磁波在不同切向波矢  $K_{//}$  ( $K_{//} = 2\pi \cdot \sin \theta / \lambda$ ) 条件时在周期性纳米材料中的传播特性, 它可以非常清楚地反映电磁波进入晶体的等效折射率问题和在材料界面电磁波的传播路径<sup>[17-19]</sup>。为了更加直观、深刻地理解光子等频图的物理意义, 以一维光子晶体为例进行详细说明。

图1为某一特定频率电磁波入射到一维光子晶体多层膜结构上的示意图。此材料由两种折射率分别为  $n_1$  和  $n_2$  的介质薄膜交替组成, 其厚度分别为  $h_1$  和  $h_2$ 。但是当电磁波以角度  $\theta$  入射时, 其实际感受到的厚度分别为  $h_1 / \cos \theta$  和  $h_2 / \cos \theta$ 。因此当电磁波以不同的角度入射到光子晶体表面时将会出现不同的传输特性。考虑到电磁波入射到介质表面时切向波矢连续, 因此光子等频图通过不同的切向波矢  $K_{//}$  描绘特定频率电磁波入射到样品时的传输特性。光子能带结构则是考虑了不同波长条件下等频图, 平时常见的能带结构主要由于受到图形描述时二维坐标在维度上的限制, 往往只选择了样品某一特定方向来绘制, 这两者都可以非常直观地反映周期性材料的光学特性。

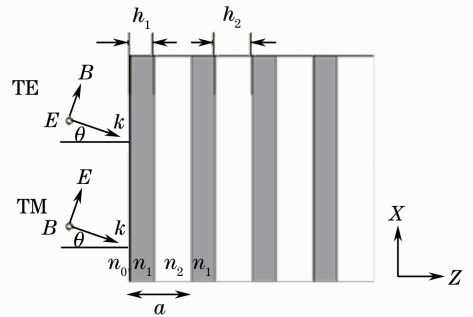


图1 电磁波入射到一维光子晶体上

Fig. 1 Situation of electromagnetic wave incident on a one-dimensional photonic crystals

### 2.2 阿贝正弦关系

鲁道夫·京斯莱克曾在其著作中认为, 根据阿贝正弦条件的完备理论表明, 当透镜已经针对彗差和球差进行校正后, 透镜的第二主平面就不再是平面, 而是以焦点为圆心, 以焦距为半径的圆的一部分<sup>[20]</sup>。从这种意义上来说, 传统的薄透镜定义对深入分析成像特点显得有些误导性, 因为此时对于经过良好校正的光学系统, 在第二主面为平面的近似条件下的  $\tan \theta$  几何关系更加接近于  $\sin \theta$ 。下面通

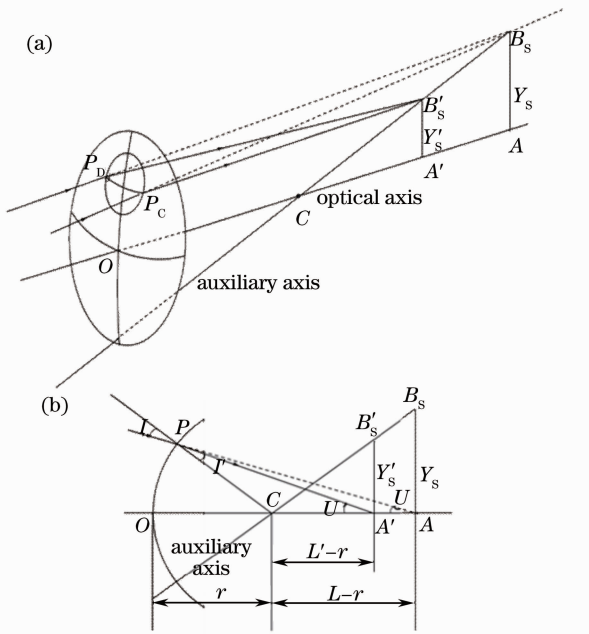


图2 阿贝正弦关系的推导示意图

Fig. 2 Derivation process of Abbe sine condition

过阿贝正弦条件对这一论述作出证明并进行详细分析。

图2(a)中 $P_C B_s$ 和 $P_D B_s$ 是一对弧矢光线,在折射前相交于 $B_s$ 。过折射球面圆心 $C$ 和 $B_s$ 做辅轴。根据折射定律,由于这两条弧矢光线对称于子午平面,其折射后的交点 $B'_s$ 也在子午平面内,而且在辅轴上。图2(b)中点 $A$ 和 $A'$ 是轴上点边缘光线在球面折射前和折射后与光轴的交点。过点 $A$ 作垂直于光轴的平面 $AB_s$ ,此 $B_s$ 即为图2(a)图中的对应点。如果在小视场或轴外像差经过矫正的系统像面弯曲可以忽略不计,此时可认为 $P_C B_s$ 和 $P_D B_s$ 经折射后的交点 $B'_s$ 位于过点 $A'$ 的垂直于光轴的平面内。 $Y_s$ 和 $Y'_s$ 分别表示 $B_s$ 和 $B'_s$ 的垂直距离。根据几何关系

$$\sin I = (L - r)/(r \cdot \sin U), \quad (1)$$

$$\sin I' = (L' - r)/(r \cdot \sin U') \quad (2)$$

$$\sin I / \sin I' = n' / n. \quad (3)$$

相除可得

$$(L - r)/(L' - r) = n' \sin U' / (n \sin U), \quad (4)$$

由于 $\triangle B_s C A$ 和 $\triangle B'_s C A'$ 相似,得

$$(L - r)/(L' - r) = Y_s / Y'_s, \quad (5)$$

代入(4)式有

$$n' Y'_s \sin U' = n Y_s \sin U. \quad (6)$$

必须指出的是,此处的 $Y_s$ 和 $Y'_s$ 是弧矢光线交点的高度,而不是主光线与物平面和理想像平面交点的高度。主光线是一个成像光斑的中心点,反映了成像光斑在像面的实际位置,因此更为关注的是

主光线与像面的交点。然而根据几何光学像差定义,如果系统同时无慧差和球差, $B'_s$ 与主光线和理想像面交点重合, $Y'_s$ 即为理想像高 $y'$ 。而 $Y_s$ 为光线折射之前的垂直高度,即为物高 $y$ <sup>[21]</sup>。因此可得到阿贝正弦关系

$$n y \sin U = n' y' \sin U', \quad (7)$$

或

$$n \sin U / (n' \sin U') = \beta, \quad (8)$$

式中 $\beta$ 为垂轴放大率。

下面基于阿贝正弦关系考虑一种特殊的情况。当物体在无穷远,孔径角 $\sin U = 0$ 时,正弦条件可以表示为另外一种形式:

$$n' \sin U' = n \sin U / \beta, \quad (9)$$

垂轴放大率

$$\beta = f/x = f/(l + f), \quad (10)$$

式中 $x$ 为物到前焦点的距离, $l$ 为物到折射表面的距离。

当 $l \rightarrow \infty$ , $\sin U \rightarrow 0$ ,则 $l \sin U = h$ ,则有

$$n' \sin U' = -nh/f = n'h/f. \quad (11)$$

最后得到物体位于无限远时的正弦条件为

$$h = f' \sin U'. \quad (12)$$

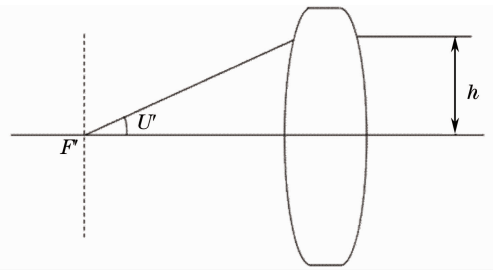


图3 无穷远时的阿贝正弦条件

Fig. 3 Abbe sine condition for the object at infinity position

此时的阿贝正弦条件意味着当一定高度的光线会聚于理想像面(后焦平面)时其高度 $h$ 和孔径角 $U'$ 成正弦关系,而非通常认为的正切关系。这一特点验证了鲁道夫·京斯莱克在著作中发现相对孔径 $D/(2f)$ 等于孔径角的正弦值以及数值孔径要用 $n \sin U$ 来定义的客观事实。同时根据光路可逆,对于处于焦平面上的物点,其孔径角的正弦信息将会被转化为空间信息,并且和垂轴方向空间坐标成线性关系。这一特性恰好是光子等频图测试系统所要利用的。当某特定频率或波长的电磁波入射到样品表面时,其切向波矢 $K_{//} = 2\pi \cdot \sin \theta / \lambda$ 仅仅与角度的正弦相关,此时在经过像差校正的光学系统后面获取的空间信息完全和周期性材料的切向波矢信息相

对应。

### 3 实验系统

光子等频图和能带结构光学检测系统主要是基于无穷远条件下的阿贝正弦条件,将无限筒长显微物镜作为一种波矢空间到实空间的转换器件,它不仅完成光子等频图和能带结构的测试,而且可以将光斑压缩到微米量级。系统示意图如图 4 所示,主要包括无限筒长显微物镜、白光源、窄带滤光片轮、光谱仪、二维 CCD 和成像系统。具体参数如下:显微物镜放大倍数为  $50\times$ ,数值孔径为 0.5,这样可接收的孔径角  $U$  范围为  $\sin U = \pm 0.5$ ,成像系统采用完全对称式消色差系统以消除成像过程中的彗差、畸变和倍率色差,光栅光谱仪焦长为 400 mm,光栅为 600 line/

mm、闪耀波长为 400 nm 的闪耀光栅,CCD 像元数为 1024 pixel(光谱方向) $\times$ 256 pixel(狭缝方向),单个像元大小为  $15\ \mu\text{m}$ ;窄带滤光片的半峰全宽为 2 nm。测试时样品放置于无限筒长显微物镜前焦平面,由于该显微物镜对前焦平面和无穷远这对共轭面进行了严格的像差校正从而能够保证阿贝正弦关系的成立。如果仅针对轴上物点,物镜后任意距离位置都可以观测到此物点孔径角  $U$  的正弦信息。但是考虑到显微物镜具有一定的视场,轴外物点相同角度的光线只会会聚到后焦平面,因此系统选取物镜后焦平面进行相关分析。系统中成像系统的作用是将物镜的后焦面光强分布成像至光谱仪入射狭缝所在的平面以便于后续信号的收集。

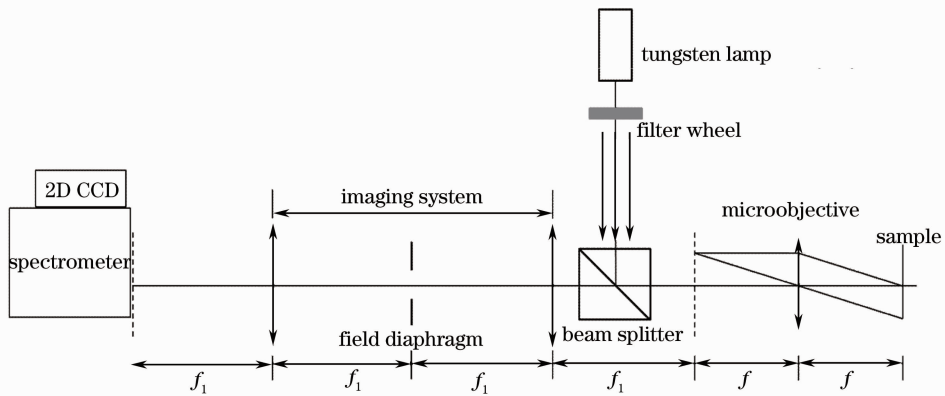


图 4 光子等频图和能带结构测试系统示意图

Fig. 4 Sketch of the test system for photonic isofrequency curves and band structure

在测试样品等频图时,白光源经过窄带滤光片轮以保证入射光的单色性。再经过显微物镜的会聚以多角度入射到样品表面。根据 1.1 节介绍可知,由于电磁波受到周期性结构的布拉格散射,某些特定  $K_{//}$  对应的角度入射不能被材料所支持,因此会出现高反射的情况。反射光经过物镜的再次会聚后会在其后焦平面形成此频率对应的光子等频图。此时光谱仪狭缝完全打开,光栅调整至 0 阶相当于反射镜。根据光谱仪的光路原理可知此时二维 CCD 可以探测物镜后焦平面经成像系统所成的实像,即实时拍摄材料的光子等频图。在测试光子能带结构时,滤光片轮设置到空,入射光为宽谱段白光源。此时显微物镜后焦平面呈现了不同波长等频图的叠加信号,同时将光谱仪的光栅作为色散元件并设置到特定波长范围。由于能带结构反映的是样品某一特定方向的波矢和能量关系,因此在测试时需要缩窄光谱仪狭缝以选择能带方向。此时二维 CCD 在光

栅色散方向的维度探测波长变化,狭缝方向的维度则线性地反映了孔径角正弦值  $\sin U$  变化,然后根据公式  $K_{//} = 2\pi \cdot \sin \theta / \lambda$  对坐标进行变换从而得到所需要的光子能带结构。

### 4 实验结果与讨论

为了验证系统的可行性,采用自组装方式制备了一种二维周期性纳米材料,即先在石英衬底上通过热蒸发方法蒸镀 200 nm 厚的 Ag 金属薄膜,然后在表面排列单层的周期性聚苯乙烯小球。此材料的结构示意图为图 5(a)所示,此种材料具有高反射的特性,另外由于该结构同时支持波导模式和表面等离子体模式<sup>[22]</sup>,所得能带结构明显,方便系统测量。图 5(b)为实际样品的扫描电镜(SEM)图,右上角为 473 nm 激光垂直入射时的衍射图,它可以更加直观地反映样品结构的周期性。图 5(c)和图 5(d)分别为样品 532 nm 处光子等频图的实验测试值和严格



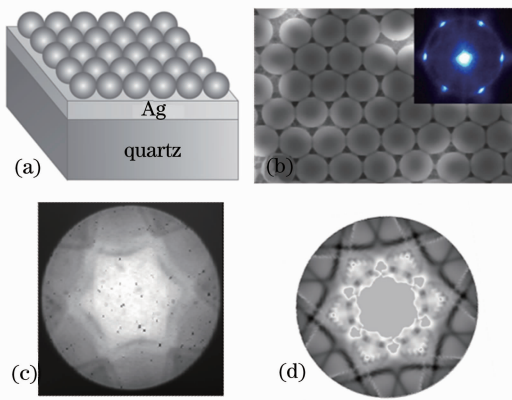


图 5 (a) 样品结构示意图；(b) 样品 SEM 图和衍射图；(c) 和 (d) 样品 532 nm 光子等频图的实验测试值和理论计算值

Fig. 5 (a) Schematic of the crystal structure; (b) SEM image of the top view of the crystal and the diffraction pattern; (c) and (d) experimental and calculation results of photonic isofrequency curves when the incident wavelength is 532 nm

耦合模式分析方法(RCWA)<sup>[23-24]</sup>的理论计算值,其中切向波矢范围为 0 至  $\pi/a$ 。

可以看出实验测试的等频图和理论图在形貌上完全一致。但是由于自组装过程中各种缺陷的引入以及材料自身的吸收等问题,使得样品的 Q 因子比理论计算值要小,从而引起波长和波矢  $K_{//}$  的展宽,进而导致实际测试的等频图的部分细节信息丢失。同样在等频图的基础上,如果考虑多波长情况,便可以测得样品的光子能带结构。因为能带结构本质是不同频率的等频图按频率堆叠在一起然后选择某一特定方向得到的。图 6 便为对同块样品的光子能带

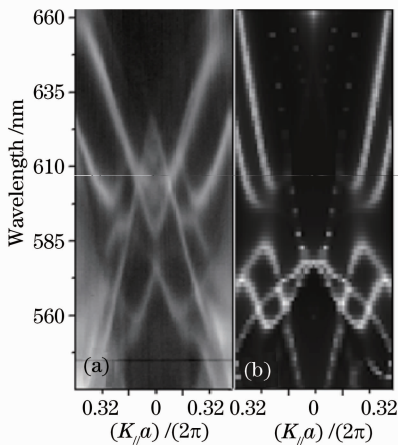


图 6 (a)(b) 样品光子能带结构的实验测试值和理论计算值

Fig. 6 (a) and (b) experimental and calculation results of photonic band structure

结构的实验测试值和计算所得的理论值,通过对比可以发现两者的相似性。以上实验充分证明了此套系统在研究周期性纳米材料的光学特性方面的可靠性和稳定性。

## 5 结 论

本文深入分析了电磁波在周期性纳米材料中的传播特性和阿贝成像理论中的正弦关系,通过结合两者之间的共同点,提出了一种能够对周期性纳米材料光子等频图和光子能带结构进行一次性成像的测试方法和光学检测系统,该系统将无限筒长显微物镜当做一种把波矢空间直接转换到实空间的变换器件,并结合配备二维面阵 CCD 的光栅光谱仪真正实现了方便、快速、无损的探测技术。同时对自组方法自制的二维周期性材料进行了相关光学等频图和能带结构测试,发现测试结果和理论计算值能够很好地吻合,从而验证了该光学系统的可行性和可靠性,表明其在研究周期性纳米材料的光学特性方面具有一定的优势。

## 参 考 文 献

- 1 R H Lipson, C Lu. Photonic crystals: a unique partnership between light and matter [J]. *European Journal of Physics*, 2009, 30(4): S33-S48.
- 2 E Yablonovitch. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics [J]. *Phys Rev Lett*, 1987, 58(20): 2059-2062.
- 3 S John. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices [J]. *Phys Rev Lett*, 1987, 58(23): 2486-2489.
- 4 T W Ebbesen, H J Lezec, H F Ghaemi, *et al.*. Extraordinary optical transmission through sub-wavelength hole arrays [J]. *Nature*, 1998, 391(6668): 667-669.
- 5 Editorial. Surface plasmon resurrection [J]. *Nature Photon*, 2012, 6(11): 707.
- 6 Cui Naidi, Liang Jingqiu, Liang Zhongzhu, *et al.*. Photonic crystal single channel side-coupled waveguide with parallel resonators [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(2): 0223001.  
崔乃迪, 梁静秋, 梁中翥, 等. 并联谐振腔光子晶体单通道侧面耦合波导 [J]. *光学学报*, 2012, 32(2): 0223001.
- 7 Li Jinxing, Chen Kaixin, Zheng Yanlin. A novel asymmetric interleaver with arbitrary bandwidth ratio based on planar optical waveguide [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(11): 1105005.  
李金星, 陈开鑫, 郑燕琳. 基于平板光波导任意带宽比的新型非对称交错滤波器 [J]. *中国激光*, 2012, 39(11): 1105005.
- 8 Guan Xiaowei, Wu Hao, Dai Daoxin. Silicon hybrid surface plasmonic nano-optics-waveguide and interconnection devices [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(2): 182-195.  
管小伟, 吴昊, 戴道鑫. 硅基混合表面等离子体纳米光波导及集成器件 [J]. *中国光学*, 2014, 7(2): 182-195.
- 9 Liu Yi, Tong Xiaogang, Yu Jinlong, *et al.*. All-optical switching in silicon-on-insulator serially coupled double-ring resonator based on thermal nonlinear effect [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(2): 0205006.  
刘毅, 仝晓刚, 于晋龙, 等. 基于热非线性效应的硅基串联双

- 微环谐振腔全光开关[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0205006.
- 10 H J Lezec, A Degiron, E Devaux, *et al.*. Beaming light from a subwavelength aperture [J]. *Science*, 2002, 297(5582): 820–822.
- 11 J B Pendry, D Schurig, D R Smith. Controlling electromagnetic fields [J]. *Science*, 2006, 312(5781): 1780–1782.
- 12 M Fujita, S Takahashi, Y Tanaka, *et al.*. Simultaneous inhibition and redistribution of spontaneous light emission in photonic crystals [J]. *Science*, 2005, 308(5726): 1296–1298.
- 13 X H Hu, Y F Shen, X H Liu, *et al.*. Superlensing effect in liquid surface waves [J]. *Phys Rev E*, 2004, 69(3): 030201.
- 14 C Leiner, S Schweitzer, F P Wenzl, *et al.*. A simulation procedure interfacing ray-tracing and finite-difference time-domain methods for a combined simulation of diffractive and refractive optical elements [J]. *J Lightwave Technol*, 2014, 32(6): 1054–1062.
- 15 Zhao Duobiao, Jiang Yuanyuan, Shan Jing, *et al.*. Optical property of three-dimensional photonic crystal simulated by scalar wave approximation method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(12): 1216004.
- 赵夺彪, 蒋袁媛, 单晶, 等. 基于标量波近似方法模拟三维光子晶体光学特性 [J]. *光学学报*, 2013, 33(12): 1216004.
- 16 L Shi, H W Yin, X L Zhu, *et al.*. Direct observation of iso-frequency contour of surface modes in defective photonic crystals in real space [J]. *Appl Phys Lett*, 2010, 97(25): 251111.
- 17 M Notomi. Theory of light propagation in strongly modulated photonic crystals: refractionlike behavior in the vicinity of the photonic band gap [J]. *Phys Rev B*, 2000, 62(16): 10696–10705.
- 18 J Ling, S Q Zhang, H Yang, *et al.*. Spectral control of 1-D photonic crystal [J]. *J Appl Opt*, 2012, 33(2): 380–384.
- 19 Gu Guochang, Li Hongqiang, Chen Hongtao, *et al.*. Properties of light propagation in 1-D periodic dielectric structure [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, 20(6): 728–734.
- 顾国昌, 李宏强, 陈洪涛, 等. 一维光子晶体材料中的光学传输特性 [J]. *光学学报*, 2000, 20(6): 728–734.
- 20 R Kingslake. *Lenses in Photography: the Practical Guide to Optics for Photographers* [M]. Rochester: Case Hoyt Corporation, 1951.
- 21 Zhang Yimo. *Applied Optics* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008.
- 张以谟. *应用光学* [M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.
- 22 X W Yuan, Q Wang, X F Zhu, *et al.*. High Q factor propagating plasmon modes based on low-cost metals [J]. *J Phys D-Appl Phys*, 2014, 47(8): 085109.
- 23 M G Moharam, T K Gaylord. Rigorous coupled-wave analysis of planar-grating diffraction [J]. *J Opt Soc Am*, 1981, 71(7): 811–818.
- 24 Y C Lee, Y Y Chou, C C Chang. Performance analysis of reflection reduction in submicrometer structures using rigorous coupled wave analysis [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2013, 19(5): 1–6.

栏目编辑: 何卓铭