

近红外波段硅基金属光子晶体平板的亚波长成像特性

陈胥冲 冯 帅* 张贝贝 李 超 王义全

(中央民族大学理学院, 北京 100081)

摘要 利用时域有限差分方法,理论上研究了由正方形金属嵌入背景材料硅中组成的二维正方晶格和三角晶格光子晶体的亚波长成像特性。采用 Drude 模型描述金属银的色散特性,在近红外波段该模型可以很好地描述金属的实际介电常数。通过结构参数的设计,在上述两种结构中实现了波长在 1550 nm 附近的亚波长成像,并且发现金属对入射光的吸收使得成像位置处的光强稍有降低,但是对于光子晶体亚波长成像的质量并无影响。相对于通常的硅基空气孔型光子晶体亚波长成像器件,该种硅基金属型全固态光子晶体结构更加稳定,因而可以更好地在复杂全光集成回路中加以实际应用。

关键词 材料;光子晶体;负折射;亚波长成像;能带结构;等频率曲线

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201333.0123003

Subwavelength Imaging Characteristics of the Near-Infrared Silicon-Based Metallic Photonic Crystal Slabs

Chen Xuchong Feng Shuai Zhang Beibei Li Chao Wang Yiquan

(School of Science, Minzu University of China, Beijing 100081, China)

Abstract The subwavelength imaging properties of the two-dimensional square-lattice and triangular-lattice photonic crystals consisting of square metals immersed in the silicon background are studied by the finite-difference time-domain method. The Drude model is adopted to describe the metal's dispersion characteristics, which is in a good agreement with the metal's actual permittivity for the near-infrared wavelengths. Subwavelength imaging for the wavelength around 1550 nm is obtained through designing the parameters of the above two structures. It is found that the influence of metal's absorption to the incident light can degrade the image spot's intensity for a little degree, but it is trivial to degrade the subwavelength image's quality. Compared with the traditional photonic crystal subwavelength-imaging devices consisting of air holes immersed in silicon, this kind of all-solid photonic crystal device consisting of metals immersed in silicon is more stable and can be actually applied in the complex all-optical integrated circuits.

Key words materials; photonic crystal; negative refraction; subwavelength imaging; band structure; equal-frequency surface contour

OCIS codes 050.5298; 050.6624; 230.1150

1 引 言

光子晶体是不同介电材料在空间周期性排列组成的人造晶体^[1,2]。当电磁波在光子晶体中传播时,其色散曲线会表现出类似于半导体能带和带隙结构的光子能带和光子带隙结构。目前光子晶体的

大部分应用都是基于光子晶体的带隙,后来人们发现由于光子晶体对入射光的强色散调制特性,即使在光子晶体通带中的某些频率区域,也会出现新颖的负折射^[3~13]和自准直特性^[14~16]。基于光子晶体的光通信器件结构紧凑,在未来光集成芯片和全光

收稿日期: 2012-07-10; 收到修改稿日期: 2012-09-03

基金项目: 国家自然科学基金(10904176)、大学生研究计划训练项目(BEIJ2012110002,URTP2012110003)、“985”工程(98507-012009)和“211”工程项目资助课题。

作者简介: 陈胥冲(1986—),男,硕士研究生,主要从事光子晶体领域理论方面的研究。E-mail: walsh_chen@163.com

导师简介: 王义全(1964—),男,博士,研究员,主要从事光子晶体方面的研究。E-mail: yiquanwang@gmail.com

* 通信联系人。E-mail: fengshuai75@163.com

通信网络中具有广阔的应用前景,相关研究已成为目前光通信领域的研究前沿。

2002年Luo等^[3]研究发现在由圆形介质柱排列在空气中组成的二维正方晶格光子晶体平板中可以实现超透镜成像,其中入射光位于光子晶体的第一个能带中且靠近带隙的频率区域。Li等^[4]研究发现:除了负折射效应之外,自准直效应和近场散射效应在二维正方晶格光子晶体的近场亚波长成像中发挥了主导作用。Feng等^[5~7]研究了由理想金属嵌入不同背景介质材料中所组成的二维正方晶格和三角晶格光子晶体平板的亚波长成像特性,通过改变背景材料的折射率实现对于负折射成像质量和位置的调控。然而上述理想金属型光子晶体的特性只能适用于微波等低频率范围。随着电磁波频率的增加(尤其是在近红外和可见光波段),金属对于电磁波的强色散特性越来越明显,已经不能够利用理想金属模型来描述金属的色散特性。为此,本文基于Drude色散模型金属,系统研究了适用于近红外波段入射光的硅基金属二维正方晶格和三角晶格光子晶体中的点光源亚波长成像特性,发现金属对于近红外波段入射光的吸收作用并没有显著降低亚波长成像时的出射光强度和质量。研究结果可为人们继续研究金属型光子晶体器件在全光集成电路中的具体应用起到积极的推动作用。

2 硅基金属二维正方晶格光子晶体的近场成像特性

首先研究由边长为130 nm的金属银嵌入在半导体材料硅中形成的二维正方晶格光子晶体,硅的折射率为3.45。其中光子晶体的晶格常数为390 nm,正方形金属的边长沿着光子晶体的 ΓX 方向放置。金属的介电常数用Drude模型 $\epsilon(\omega) = \epsilon_0 \left[1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\gamma)} \right]$ 描述,其中 ω_p 为等离子体频率, γ 为碰撞(阻尼)频率。该模型能够准确地描述金属在近红外通信波段的介电常数^[17]。这里选取金属银, $\omega_p = 1.366 \times 10^{16}$ rad/s, $\gamma = 2.7\pi \times 10^{13}$ rad/s。

利用时域有限差分方法,计算了上述金属型正方晶格光子晶体对于TM偏振入射光的能带结构,计算结果如图1(a)所示。可以看出光子晶体存在一个截止频率0.123 c/a , c 为真空光速, a 为晶格常数。频率低于该数值的入射光无法在其中传播,此时光子晶体等效于一个高通滤波器。在光子晶体的第一个和第二个能带之间存在一个完全光子晶体禁带,其频率范围为0.208 $c/a \sim 0.219 c/a$ 。第二个能带中的若干等频率曲线如图1(b)所示。可以看到在频率为0.252 c/a 的等频率曲线中,以 ΓX 线为中心的部分区域,曲线形状是比较平的,并且表面法线指

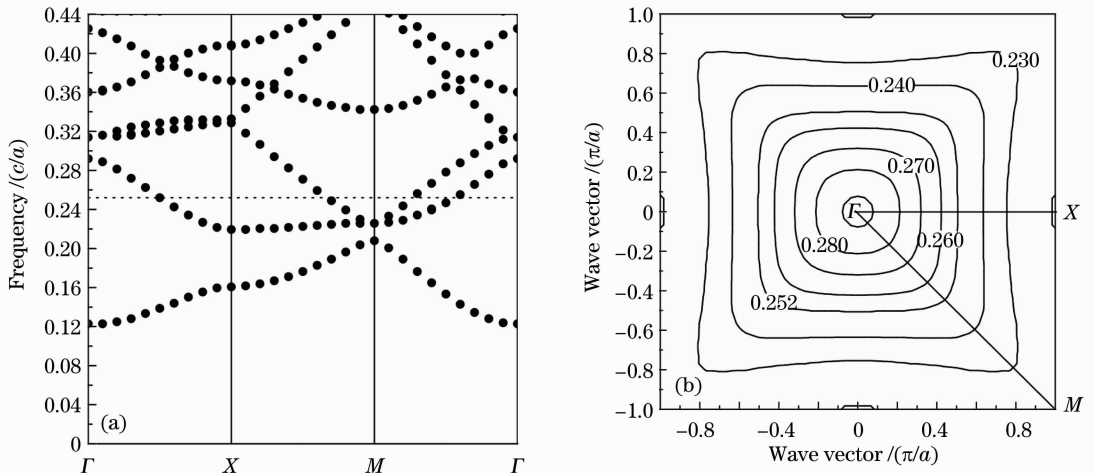


图1 (a)边长为130 nm的正方形金属柱嵌入背景硅中组成的二维正方晶格光子晶体的能带结构;
(b)第二个能带中的等频率曲线

Fig. 1 (a) Band structure of the two-dimensional square-lattice photonic crystal consisting of square metals with the side length of 130 nm immersed in silicon; (b) equal-frequency surface contours of several frequencies in the second band of the photonic crystal

向 ΓX 方向。由于对于一个确定的布洛赫模，其群速度方向是平行于该点的表面法线方向的，因此该区域激发的布洛赫模的群速度方向是指向 ΓX 方向的。对于一个表面法线平行于 ΓX 方向的光子晶体平板来说，该群速度方向代表了一种明显的自准直效应。在以 ΓM 线为中心的附近区域，频率曲线相对于 Γ 点是凸起的，并且等频率曲线的曲率半径随着频率的增加而减小，意味着负折射效应的存在。

在分析了等频率曲线特性的基础上，利用时域有限差分方法计算了由频率为 $0.252 c/a$ 的点光源发出的光经过矩形光子晶体平板的传输特性，其对应的真空波长为 1548 nm 。当矩形光子晶体平板的

宽度为 40 列金属柱，沿着光传输方向的厚度分别为 8 排和 18 排金属柱时，计算得到的电场强度空间分布分别如图 2(a) 和 (b) 所示。其中点光源放在光子晶体平板的左侧，到最临近的金属边缘的距离为 $0.85a$ 。从图 2(a) 可以看出，由点光源发出的光穿过光子晶体平板，在光子晶体平板的右侧形成一个清晰的实像，该实像的宽度约为 $1.5a$ ，相当于入射光波长的 0.378 倍。当光子晶体平板的厚度增加为 18 排金属柱时，从图 2(b) 可以看出在光子晶体右侧也存在一个清晰的实像。该实像的宽度改变为 $2.1a$ ，相当于入射波长的 0.529 倍。

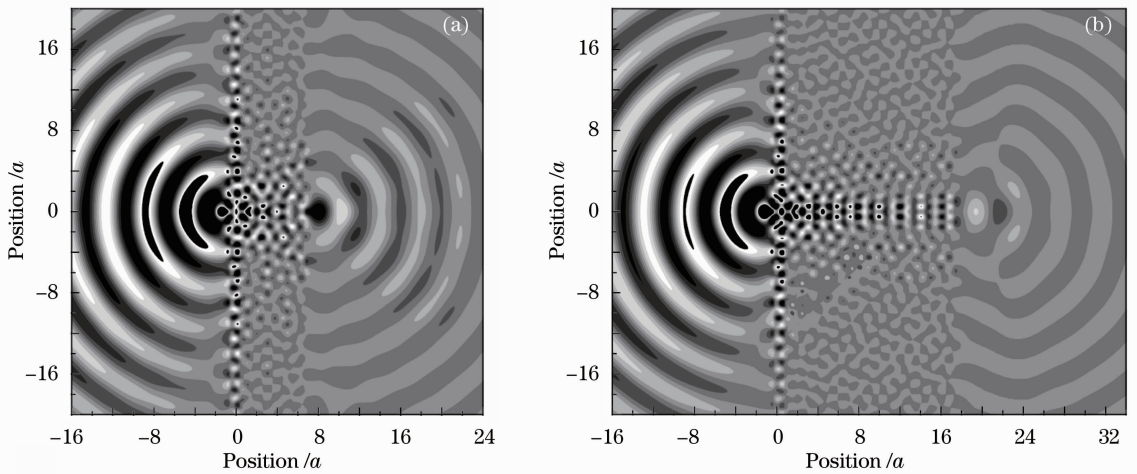


图 2 频率为 $0.252 c/a$ 的点光源发出的光经过不同厚度金属柱的正方晶格光子晶体平板时的电场空间分布。(a) 厚度为 8 排金属柱；(b) 厚度为 18 排金属柱

Fig. 2 Spatial field distributions of light from a point source of $0.252 c/a$ frequency propagating through the square-lattice photonic crystal slab with different thicknesses of metallic rods. (a) Thickness of 8-layer metallic rods; (b) thickness of 18-layer metallic rods

3 硅基金属三角晶格金属光子晶体的负折射成像特性

在前面工作的基础上，研究了由边长为 130 nm 的金属银嵌入半导体材料硅中形成的二维三角晶格光子晶体，其中光子晶体的晶格常数为 430 nm ，背景材料硅的折射率为 3.45 ，正方形金属的边长沿着三角晶格光子晶体的 ΓK 方向放置。对于 TM 模的入射光束，利用时域有限差分方法计算得到的该光子晶体的能带结构和第二个能带中若干频率的等频率曲线分别如图 3(a), (b) 所示。从图 3(a) 可以看出该光子晶体的截止频率为 $0.128 c/a$ ，第二个能带的频率范围为 $0.203 c/a \sim 0.329 c/a$ 。从图 3(b) 可以看出频率 $0.240 c/a$, $0.277 c/a$ 和 $0.300 c/a$ 的等频率曲线为理想的圆形，意味着光子晶体对于这些

频率的入射光可以等效为各向同性材料。并且等频率曲线的曲率半径随着频率的增加而减小，代表着群速度的方向与相速度的方向相反，光子晶体对于这些频率的等效折射率为负值。

利用时域有限差分方法计算了由频率 $0.277 c/a$ 的入射光束 (该频率所对应的真空波长为 1552 nm) 分别以 30° 和 45° 入射到矩形光子晶体平板时的电场空间分布，计算结果如图 4 所示。晶体平板的表面法线沿着光子晶体的 ΓK 方向，厚度为 21 层金属柱。在这两种情况下，都可以看出在光子晶体内部区域的折射光线与入射光线位于界面法线的同侧，意味着负折射现象的存在。对比折射光束和入射光束的传播方向，折射角和入射角大小几乎相等，此时光子晶体平板对于该频率的入射光，其有效折射率约为 -1 。

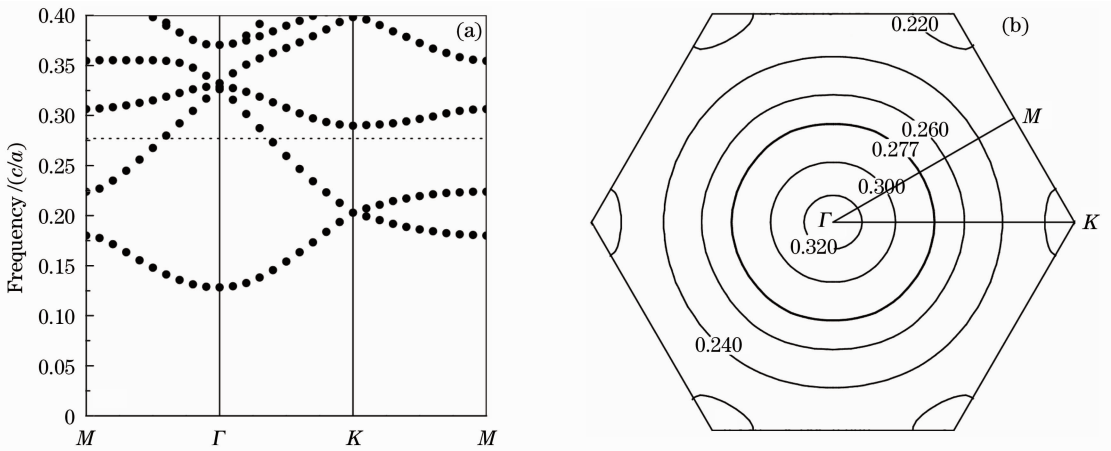


图 3 (a)边长为 130 nm 的正方形金属柱嵌入背景硅中组成的二维三角晶格光子晶体的能带结构；
(b)第二个能带中的等频率曲线

Fig. 3 (a) Band structure of the two-dimensional triangular-lattice photonic crystal consisting of square metals with the side length of 130 nm immersed in silicon; (b) equal-frequency surface contours of several frequencies in the second band of the photonic crystal

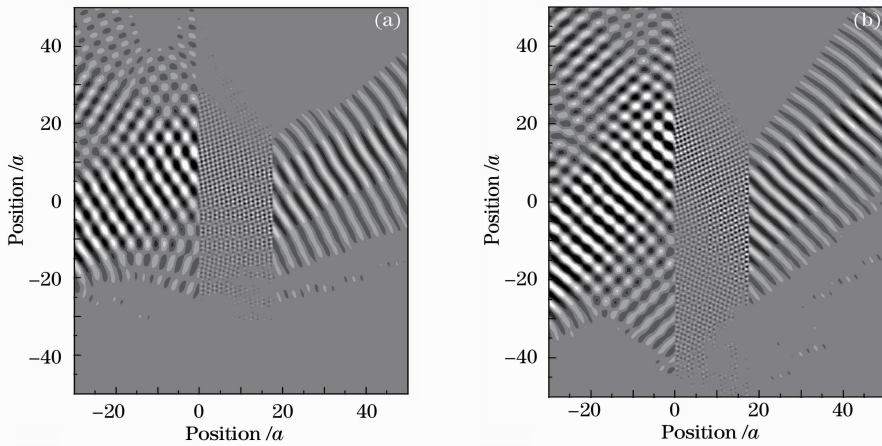


图 4 频率为 $0.277 c/a$ 的入射光束在不同入射角时通过矩形三角晶格光子晶体平板时的光强空间分布。(a)入射角为 30° ；(b)入射角为 45°

Fig. 4 Spatial intensity distributions of the incident light beams of $0.277 c/a$ frequency propagating through the rectangular triangular-lattice photonic crystal slab with different incident angles. (a) Angle of 30° ; (b) angle of 45°

在有效折射率为 -1 的情况下,点光源发出的光经过矩形平板后会形成一个实像,点光源中心与实像中心之间的距离为晶体平板厚度的 2 倍。图 5 为频率为 $0.277 c/a$ 的点光源经过厚度分别为 11 排和 21 排金属柱的三角晶格光子晶体平板时的电场空间分布。如图 5(a)所示,点光源放在光子晶体平板的左侧,距离最临近的金属边缘 $4.4a$,金属平板边缘之间的距离为 $9.3a$,点光源与所成实像中心位置之间的距离为 $19.6a$ 。该实像在垂直于传播方向上的宽度为 $1.6a$,相当于真空中入射光波长的 0.443 倍。当光子晶体平板的厚度改变为 21 排金属

柱时,金属平板左右两侧金属边缘之间的距离增加至 $17.9a$ 。图 5(b)中可以看出,由点光源发出的光穿过光子晶体平板,在光子晶体平板的右侧形成一个清晰的实像,该实像的宽度约为 $1.9a$,相当于入射光波长的 0.526 倍。此时点光源与所成实像中心位置之间的距离为 $36.8a$ 。从图 5 中两种情况下的点光源会聚成像特性进一步验证了该光子晶体平板对于该频率入射光的有效折射率接近 -1 。

最后研究了金属对光子晶体的吸收特性对于光子晶体亚波长成像的影响。点光源发出的入射光束经过厚度为 8 排金属柱的二维正方晶格光子晶体平

板后在像点位置纵向上的相对光强分布如图 6(a) 所示,其中实线为不考虑金属对入射光的吸收作用时计算得出的结果,虚线为考虑金属对入射光的吸收所得出的计算结果。从中可以看出金属对于入射光的吸收使得光强降低为原来的 0.90 倍,但是所成实像在纵向的大小并没有显著变化。对于沿着光传

输方向厚度为 11 排金属柱的二维三角晶格光子晶体,吸收对于所成实像的强度和质量影响如图 6(b) 所示。从中可以看出金属对于入射光的吸收使得最大光强降低为原来的 0.93 倍,所成实像的大小也没有变化。

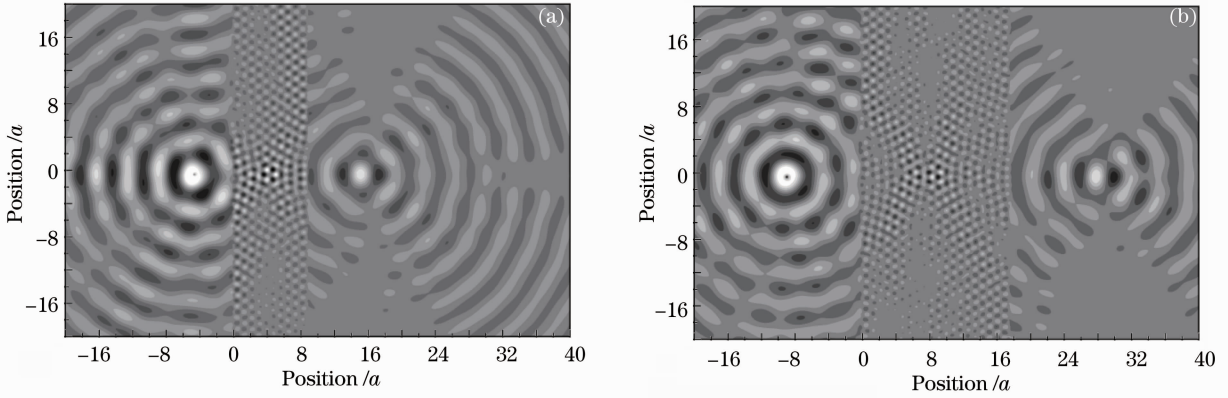


图 5 频率为 $0.277 c/a$ 的点光源发出的光经过不同厚度金属柱的三角晶格光子晶体平板的光强空间分布。(a)厚度为 11 排金属柱; (b)厚度为 21 排金属柱

Fig. 5 Spatial intensity distributions of light from a point source of $0.277 c/a$ frequency propagating through the rectangular photonic crystal slab with different thicknesses of metallic rods. (a) Thickness of 11-layer metallic rods; (b) thickness of 21-layer metallic rods

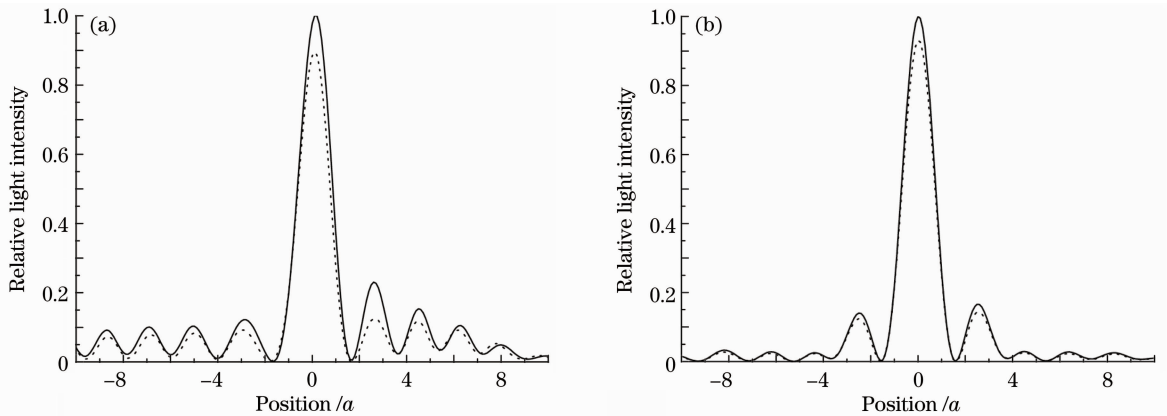


图 6 由点光源发出的光经过(a)厚度为 8 排金属柱的正方晶格光子晶体平板和(b)厚度为 11 排金属柱的三角晶格光子晶体平板时,在所成像点位置处侧向上的相对光强分布

Fig. 6 Relative lateral light intensity distributions centered at the image spot formed by the light propagation of a point source across the (a) 8-layer square-lattice photonic crystal slab and (b) 11-layer triangular-lattice photonic crystal slab

4 结 论

本文研究了由正方形金属嵌入背景材料硅中组成的二维正方晶格和三角晶格光子晶体的亚波长成像特性。通过结构的设计实现了波长在 1550 nm 附近点光源发出的光经过矩形光子晶体平板发生的近场和非近场亚波长成像。研究发现金属对近红外波段入射光的吸收并不显著,对于成像质量也没有

影响。相对于人们广泛研究的硅基空气孔型二维光子晶体的负折射特性,该类硅基金属型全固态光子晶体平板成像器件结构更加稳定,可望在未来的复杂全光集成回路中得以应用。

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 C. Luo, S. G. Johnson, J. D. Joannopoulos *et al.*. All-angle negative refraction without negative effective index [J]. *Phys. Rev. B*, 2002, **65**(20): 201104
 - 4 Z. Y. Li, L. L. Lin. Evaluation of lensing in photonic crystal slabs exhibiting negative refraction [J]. *Phys. Rev. B*, 2003, **68**(24): 245110
 - 5 S. Feng, Z. Y. Li, Z. F. Feng *et al.*. Engineering the imaging properties of a metallic photonic-crystal slab lens [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **88**(3): 031104
 - 6 S. Feng, Y. Q. Wang, Z. Y. Li *et al.*. Controlling the focusing properties of a triangular-lattice metallic photonic-crystal slab [J]. *Chin. Phys.*, 2007, **16**(6): 1689~1693
 - 7 S. Feng, Z. F. Feng, K. Ren *et al.*. Near-field imaging of a square-lattice metallic photonic-crystal slab at the second band [J]. *Chin. Phys.*, 2006, **15**(3): 552~555
 - 8 Y. T. Fang, T. G. Shen. Multi-imaging by photonic crystal slab using negative refraction [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2005, **22**(4): 949~951
 - 9 Ao Ling, Feng Shuai, Wang Yiquan. Near-field imaging properties of two-dimensional square-lattice photonic crystal slabs [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(4): 1092~1095
敖玲, 冯帅, 王义全. 二维正方晶格光子晶体平板的近场成像特性 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(4): 1092~1095
 - 10 X. D. Zhang. Image resolution depending on slab thickness and object distance in a two-dimensional photonic-crystal-based superlens [J]. *Phys. Rev. B*, 2004, **70**(19): 195110
 - 11 J. Li, M. H. Lu, J. Ren *et al.*. All-angle negative refraction imaging effect with complex two-dimensional hexagonal photonic crystals [J]. *J. Appl. Phys.*, 2007, **102**(7): 073538
 - 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 Dong Haixia, Jiang Haitao, Yang Chengquan *et al.*. Theoretical simulation and transmission properties of one-dimensional photonic quantum-well structure containing defect layers with negative refractive index [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(12): 2245~2249
董海霞, 江海涛, 杨成全等. 含负折射率缺陷的光量子阱的透射特性及理论模拟 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(12): 2245~2249
 - 14 S. Feng, C. Ren, Y. Q. Wang *et al.*. All-optical diode based on the self-collimation characteristics of the near-infrared photonic crystal heterojunctions [J]. *Europhys. Lett.*, 2012, **97**(6): 064001
 - 15 L. Gan, F. Qin, Z. Y. Li. Broadband large-angle self-collimation in two-dimensional silicon photonic crystal [J]. *Opt. Lett.*, 2012, **37**(12): 2412~2414
 - 16 T. T. Kim, S. G. Lee, S. H. Kim *et al.*. Ring-type Fabry-Perot filter based on the self-collimation effect in a 2D photonic crystal [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(16): 17106~17113
 - 17 R. Umeda, C. Totsuji, K. Tsuruta *et al.*. Dispersion models and electromagnetic FDTD analyses of nanostructured metamaterials using parallel computer [C]. *Memoirs of the Faculty Engineering, Okayama University*, 2009, **43**: 8~15

栏目编辑: 韩峰