

光子晶体负折射材料中缺陷对成像质量的影响

刘逢芳 朱兆杰 童元伟

上海理工大学田家炳理学院, 上海 200093

摘要 利用硅介质柱在空气中周期性排列构成六角结构的光子晶体平板,并在晶体平板中引入不同构型的缺陷,通过改变缺陷介质柱的半径和缺陷中心位置探讨引入缺陷对成像质量产生的影响。时域有限差分法模拟结果表明:介质柱半径和位置的变化,能使光的透射率提高,增加像方的强度。由于缺陷的引入,缺陷之间的相互干扰会降低成像的分辨率。

关键词 材料;光子晶体;负折射;缺陷;时域有限差分法;成像质量

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0416004

Effects on Imaging Quality of Defects in the Photonic Crystal with Negative Refractive Index Material

Liu Fengfang Zhu Zhaojie Tong Yuanwei

Tianjia Ping College of Science, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China

Abstract Silicon columns are arranged periodically to constitute a photonic crystal slab with hexagonal structure in the air medium, and different configurations of defects are introduced in the photonic crystal slab. The effects on imaging quality are mainly discussed by changing the radius of the defect dielectric column and the center position of defects. Through the method of finite difference time domain, simulation results show that the change of dielectric column radius and the position of defects can increase the transmittance of light and enhance the image intensity. Due to the introduction of defects, the interference between the defects can reduce the resolution of the imaging.

Key words materials; photonic crystal; negative refraction; defects; finite difference time domain; imaging quality

OCIS codes 160.3918; 160.4670; 160.5298; 190.4400

1 引言

1968年,著名物理学家 Veselago^[1]首先提出了左手材料的概念,这种材料具有光的负折射效应、逆切连科夫效应、反多普勒效应等性质^[2-3]。1996年,Pendry等^[4]从理论上证明了按一定周期排列的金属开口谐振腔和金属线在某波段实现负介电常数和负磁导率。2000年,Pendry^[5]又进一步提出了等效折射率为-1的介质平板,该介质平板能够突破衍射极限的限制实现完美成像。2001年,Smith等^[6]首次成功制备出这种具备负折射效应的介质,之后对于负折射的研究就更为广泛^[7-8],利用这种材料制作的超透镜能够放大倏逝波提高成像的质量。由于金属材料制成的负折射材料工作频段短,经研究发现:光子晶体(PC)在应用较广泛的红外和可见光频段可实现负折射^[9]且能量损耗小,PC为研究负折射材料开辟了新的方向。

光子晶体存在着等效折射率接近-1的频率区域,由Snell定律把相应的等效折射率计算出来。研究发现光子晶体表面介质柱半径发生变化不会影响入射光线的负折射方向^[10-11],当光子晶体平板等效折射率为-1

收稿日期: 2014-09-24; 收到修改稿日期: 2014-10-24

基金项目: 国家自然科学基金(60777045)、教育部重点实验室开放课题(3714341001)

作者简介: 刘逢芳(1989—),女,硕士研究生,主要从事光子晶体成像方面的研究。E-mail: yezi170804020@126.com

导师简介: 童元伟(1971—),男,博士,副教授,主要从事光子晶体负折射特性及其成像特性等方面的研究。

E-mail: tyw0991@hotmail.com(通信联系人)

时,通过改变光子晶体最外层介质柱半径或是顺向平移介质柱,可以增强光子晶体负折射材料成像的像方强度^[12-13]。通过在光子晶体偏振光分束器的拐角处引入缺陷,可以提高电磁波的透射率^[14]。利用光子晶体还可以制作出多种光学器件,如光子晶体光纤^[15]、光开关^[16]等。利用其负折射特性制作的完美透镜可以实现更高的分辨率^[17]。

本文利用平面波展开法和时域有限差分法^[18],研究了以六角格子硅柱子在空气中周期性排列组成的二维(2D)六边形光子晶体平板的成像特点。当光子晶体平板等效折射率为-1时,通过在平板内部引入各种缺陷,来研究无序对负折射材料成像的像方中心光强、光的透射率和成像分辨率的影响,以此来提高成像质量和为实际制作提供理论依据。

2 光子晶体的设计与色散关系分析

光子晶体是由两种或两种以上不同介电函数的材料周期性排列组成的一种人工晶体,按照光子禁带空间分布的特点,光子晶体一般可分为一维光子晶体、二维光子晶体和三维光子晶体三种类型。由于介电函数的周期性对入射光的调制作用,使得特定频率区域的入射光在光子晶体中传播时的群速度方向和相速度方向相反,因而表现出负折射特性。

本文选用了无限长介电常数 $\epsilon = 12$, 折射率 $n = 3.46$ 的硅介质柱作为研究的基本单元,在空气介质中周期性地构造出 7 行 30 列二维六角结构光子晶体平板。光子晶体平板的中心位于 $x-z$ 平面的平面坐标原点处,选用晶格常数 $a = 1 \mu\text{m}$, 圆柱的直径 $2r = 0.8a$, 如图 1(a) 所示。

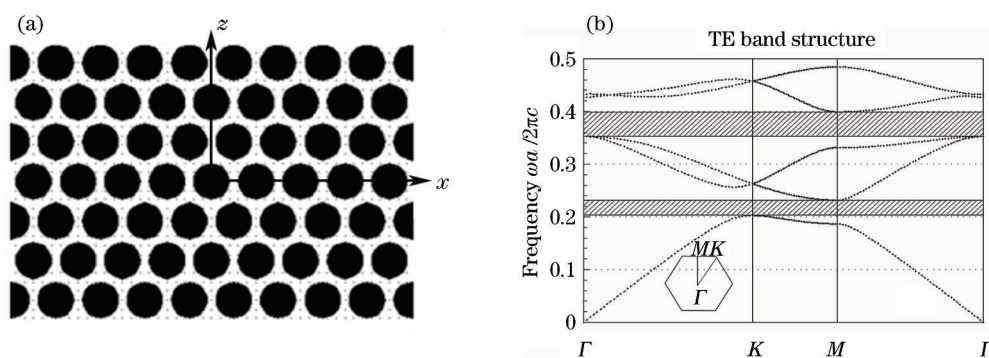


图 1 (a) 二维六角结构光子晶体平板及 (b) 其能带图

Fig.1 (a) 2D hexagonal structure of photonic crystal slab and (b) its band structure

根据能带理论,用平面波展开法进行能带计算,求得六角格子光子晶体的第一布里渊区能带分布情况,在两个禁带之间,是光子晶体的第二个通带,可以通过分析第一布里渊区各个能级的等频率图,研究处于不同能级(频段)的入射光进入晶体时的等效折射率问题^[19-21]。第二能级的等频率图如图 2(a) 所示, k_x 和 k_z 分别表示波矢在 x 和 z 方向上的分量,从图中可知:在第二能级中,从布里渊区中心 Γ 出发,沿 ΓK 、 ΓM 方向(K 、 M 分别为第二能级布里渊区中的高对称点)随着波矢 k (大小为 $2\pi/\lambda$, 方向为波传播的方向, λ 为入射波的波长)的增加,在光子晶体中传播的光波的频率是减小的,即 $\partial\omega/\partial k < 0$ (ω 为光波的角频率),对应于在晶体中传播的横向电场(TE)波的群速度 $v_g = -\nabla_k(\omega) = \partial\omega/\partial k < 0$ [$\nabla_k(\omega)$ 为角频率在波矢 k 方向上的梯度]。TE 波在晶体中传播的等效折射率 $n_{\text{eff}} = c/v_g < 0$ (c 为光速),因此,在第二能级中各个频率的光波从空气入射到介质时会发生负折射。

图 2(b) 为计算得到的第二能级的等效折射率随频率的变化情况。入射波频率 $f = a/\lambda$ 在 0.2316~0.3525 范围内,等效折射率为 -2.4927~0;当频率 $f = 0.298$ 时,有效折射率 $n_{\text{eff}} = -1$ 。通过改变光子晶体平板内部介质柱的结构,引入内部结构的无序来探讨其行为对光子晶体成像质量的影响。

3 光子晶体平板内部缺陷对成像质量的影响

前期本课题组研究了光子晶体表面结构的改变对成像质量的影响^[12],本文着重探讨在光子晶体中引入缺陷,研究缺陷行为对成像质量的影响,为了尽量减小反射波对成像的干扰,采用了完美匹配层作为边界条

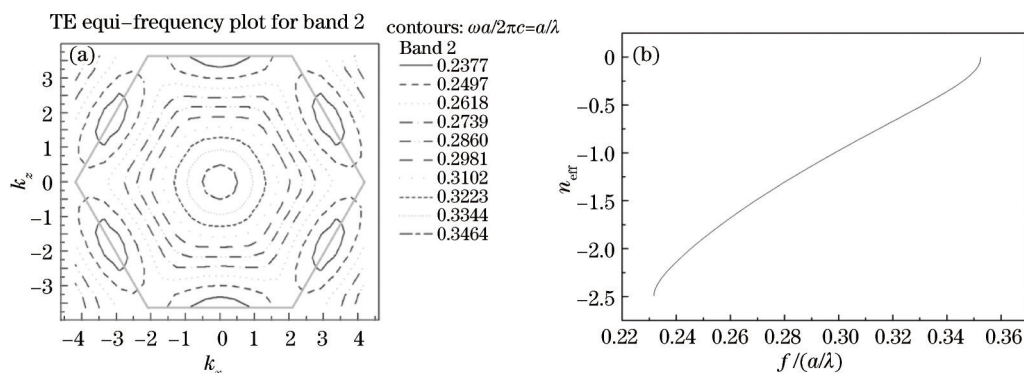


图 2 (a)第 2 能级等频率图及(b)其在 ΓK 方向随频率变化的等效折射率图

Fig.2 (a) Equi-frequency plot for band 2 and (b) its plot of effective refractive index versus frequency in the ΓK direction

件。以第 2 节中设计的光子晶体平板作为研究对象,在距离光子晶体平板中心下方的 $5a$ 处(光源位置固定)放置一个点光源,源点坐标可简写为 $(0, -5a)$,光源频率为 $f = a/\lambda = 0.298$,该点光源经过光子晶体平板会在平板异侧成像。本文以介质柱 $r=0.40a$ 时的成像情况作为研究的基准,可以清楚地掌握基准条件下光子晶体平板成像的规律。图 3 为 $r=0.40a$ 时测得的光源-像点(S-I)周围电场分布图,定义像方中心位置处光强所对应的值为基准光强 I_0 。由图 3 可知:像点与源点的中心都在 z 轴上,像点位置与平板中心的距离为 $6.72a$,像点坐标可以简写为 $(0, 6.72a)$ 。以 $r=0.40a$ 时的光子晶体平板成像情况为基准,以 $0.01a$ 为间隔改变光子晶体平板内层介质柱的半径,即分别讨论平板中引入缺陷的半径 $r=0.30a, 0.31a, 0.32a, \dots, 0.50a$ 时的成像情况,进一步研究内部介质柱不同半径对光子晶体平板成像的影响。光子晶体平板内层介质柱的缺陷采用不同的构型来实现,为了尽可能不改变光子晶体平板能带结构,引入的缺陷必须尽可能简易,主要选取了六边形、倒三角形和上下两个对称三角形的缺陷来进行探究。这几种缺陷的引入对研究的第二通带的带宽带来的影响很小,从表 1~3 可以看出带宽的变化值在 $10^{-3} \sim 10^{-2}$ 量级范围内,为之后对成像质量的影响研究提供了可行性。

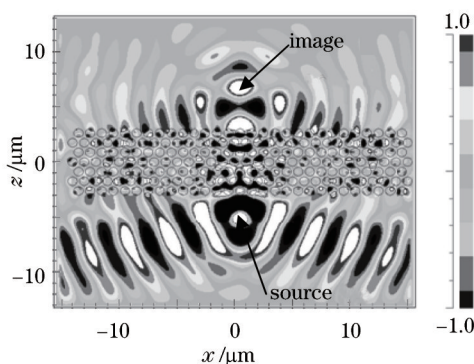


图 3 $f=0.298, r=0.40a$ 时的 S-I 图

Fig.3 Plots of S-I when $f=0.298, r=0.40a$

表 1 六边形构型的缺陷对第二通带带宽的影响

Table 1 Effects of the hexagon defects on the bandwidth of the second transmission band

Defect position z	Maximum a/λ	Minimum a/λ	Change value a/λ
$1.732a$	0.1200	0.1186	0.0014
0	0.1364	0.1197	0.0167
$-1.732a$	0.1207	0.1191	0.0016

3.1 六边形构型的缺陷引入

六边形缺陷的选取:以一个介质柱为中心点,以 z 轴为对称轴的六边形,计算过程中,选取的六边形中心点逐渐上移。

表2 倒三角形构型的缺陷对第二通带带宽的影响

Table 2 Effects of the inverted triangle defects on the bandwidth of the second transmission band

Defect position z	Maximum a/λ	Minimum a/λ	Change value a/λ
$1.732a$	0.1200	0.1186	0.0014
0	0.1364	0.1041	0.0323
$-1.732a$	0.1275	0.1197	0.0078

表3 对称三角形构型的缺陷对第二通带带宽的影响

Table 3 Effects of the symmetrical triangle defects on the bandwidth of the second transmission band

Defect position z	Maximum a/λ	Minimum a/λ	change value a/λ
$0.866a$	0.1200	0.1087	0.0113
0	0.1208	0.1197	0.0011
$-0.866a$	0.1242	0.1007	0.0235

3.1.1 六边形缺陷对成像强度的影响

选取六边形缺陷的中心分别为 $(0, -1.732a)$ 、 $(0, 0)$ 、 $(0, 1.732a)$,当缺陷中心位置不变时,改变构成缺陷的柱子尺寸即 $r=0.30a\sim 0.50a$,以测得的像方中心光强 I 与基准光强 I_0 比值作为像方的相对光强,获得像方的相对光强分布如图4(a)所示。像方强度较基准光强增强时的半径集中在半径较小的一方;在引入缺陷中心点位置 $z=1.732a$ 时,强度增强的半径范围为 $0.35a\sim 0.39a$;在 $r=0.39a$ 时,光强达到最大值。同时,由图4(a)可看出,缺陷中心点位于 $z=0$ 和 $z=-1.732a$ 时,也遵循以上规律,像方强度有增强的半径范围分别为 $0.37a\sim 0.41a$ 和 $0.36a\sim 0.39a$,光强最大时缺陷柱子半径分别 $r=0.38a$ 和 $r=0.39a$ 。因此在光子晶体平板中引入六边形缺陷,当六边形缺陷半径 $r=0.38a\sim 0.39a$ 时,可以通过在光子晶体平板中引入缺陷,形成缺陷峰,以此来增强入射光线与光子晶体的耦合程度,增强像的强度。从模拟得到的结果可知,在图4(a)中峰值的左侧,像方的相对强度随着半径的减小呈现出递减的趋势。

3.1.2 六边形缺陷对光的透射率的影响

不同中心点的六边形缺陷,在改变缺陷半径时,光的透射率也随缺陷半径变化,结果如图4(b)所示,当六边形缺陷的半径在 $r=0.37a\sim 0.39a$ 范围内,光的透射率明显增强,在图中最大峰值的左侧,透射率随着半径的减小逐渐变小。还可以发现,当缺陷中心分别位于 $(0, -1.732a)$ 、 $(0, 0)$ 、 $(0, 1.732a)$ 时,所能获得的光的透射率的最大值也不同,并且随着缺陷中心位置的上移,能获得的最大透射率也在逐渐增加的。可见:在远离光源处引入六边形缺陷,并且缺陷的介质柱半径小于 $0.40a$ 时能获得相对较大的透射率。

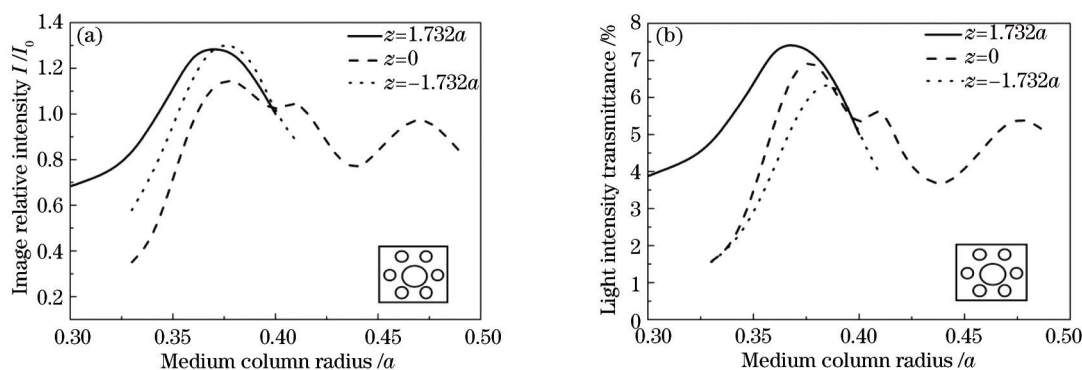


图4 (a)光强和(b)透射率与六边形介质柱半径的关系

Fig.4 Relationship between hexagon medium column radius and (a) image intensity and (b) transmittance

3.2 三角形构型缺陷的引入

三角形构型的缺陷包括单个倒三角形和两个上下对称的三角形两种,倒三角形的选取:以一个介质柱为顶点,底边为两个介质柱组成一个三角形,以 z 轴为对称轴,计算过程中,三角形顶点位置 z 逐渐上移。两个上下对称三角形的选取:它们的顶点分别为 z_1 和 z_2 ,以 $z_0 = (z_1 + z_2)/2$ 作为缺陷的中心位置,在模拟过程

中,缺陷中心位置 z_0 逐渐上移。

3.2.1 倒三角形缺陷对成像强度的影响

图 5(a)表示引入的缺陷构型是不同顶点的倒三角形,在改变三角形缺陷柱子半径时,像点相对光强 I/I_0 与缺陷半径的关系。由图可知:倒三角形顶点位置 $z=-1.732a$ 时,当缺陷介质柱半径为 $0.36a\sim 0.41a$ 时,光强有所增强,并且在半径 $r=0.37a$ 时可以得到在引入这种缺陷时获得像点相对光强的最大值。当缺陷顶点位于 $z=0$ 时,从图中也可看出半径在 $0.36a\sim 0.39a$ 时像方的光强增强,在 $r=0.38a$ 时像方光强达到最大值。但对于 $z=1.732a$ 时情况而言,像方光强增强并不明显。因此,当引入的缺陷为倒三角形时,可以在半径 $r=0.37a\sim 0.39a$ 时,通过在光子晶体平板中近光源处引入倒三角形缺陷使成像强度得到增强。

3.2.2 倒三角形缺陷对光的透射率的影响

当引入不同顶点位置的倒三角形缺陷时,随着介质柱半径的改变,光的透射率也随之改变,如图 5(b)所示,当倒三角形介质柱的半径处在 $0.37a\sim 0.41a$ 范围内,不同顶点位置的光透射率能够得到增强,随着顶点位置的上移,最大的透射率有减小的趋势。所以引入的缺陷介质柱半径应在 $0.40a$ 基准半径附近,并且缺陷位置靠近光源时,光透射率可以被提高。

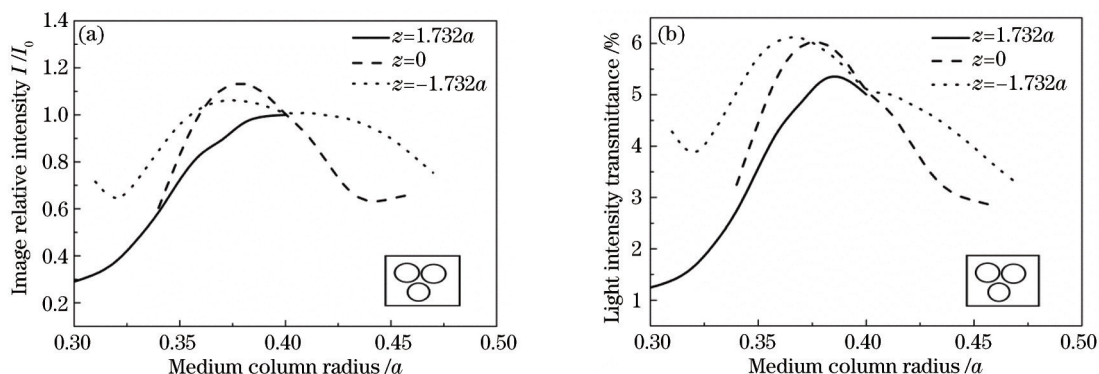


图 5 (a)光强和(b)透射率与倒三角形介质柱半径的关系

Fig.5 (a) Image intensity and (b) transmittance versus inverted triangle medium column radius

3.2.3 对称三角形缺陷对成像强度的影响

点光源在通过包含该缺陷的光子晶体平板成像后像方的相对光强与缺陷半径的关系如图 6(a)所示,从图可以看出:当缺陷中心分别位于 $(0, -0.866a)$ 、 $(0,0)$ 、 $(0,0.866a)$,介质柱半径临近 $0.40a$ 时,像方光强得到增强,并且当缺陷半径分别为 $0.37a$ 、 $0.38a$ 时,像方光强最强。

3.2.4 对称三角形缺陷对光的透射率的影响

当缺陷中心 z_0 不同时,随着半径的变化,光的透射率也有所不同。从图 6(b)可以看出,在缺陷中心 z_0 处于不同位置时,当介质柱半径 $r=0.37a\sim 0.38a$ 范围内时,光的透射率可以达到相对应的最大值,并且随着缺陷中心位置的上移,每种缺陷所对应的透射率最大值呈现出下降的趋势,其变化规律与之前探讨的倒三角

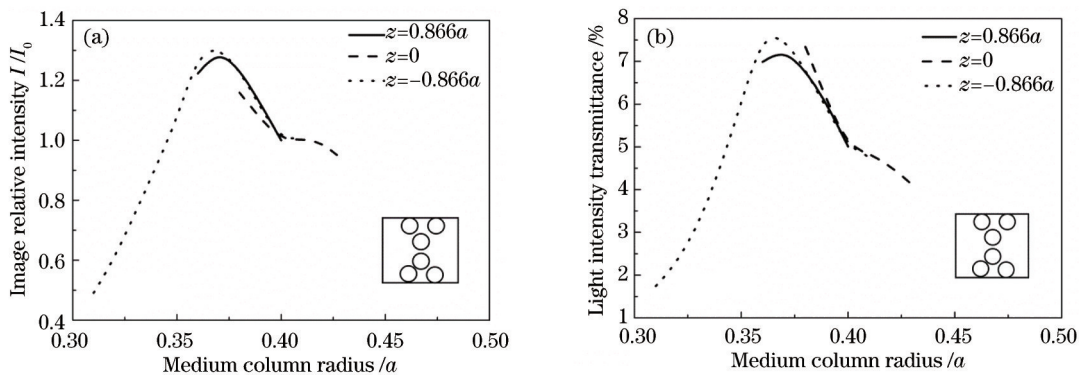


图 6 (a)光强和(b)透射率与对称三角形介质柱半径的关系

Fig.6 (a) Image intensity and (b) transmittance versus symmetrical triangle medium column radius

形缺陷规律相似。

4 光子晶体平板内部缺陷对成像分辨率的影响

半峰全宽(FWHM)是用来表征光学仪器分辨率的一个重要指标,半峰全宽越小,相应的分辨率也就越高。本文用缺陷的引入对成像半峰全宽的影响来描述成像分辨率的变化,在能够清晰成像的条件下,模拟得出了分别引入三种构型缺陷时光子晶体平板成像半峰全宽的变化情况,与未引入缺陷时进行比较,结果如图7所示。

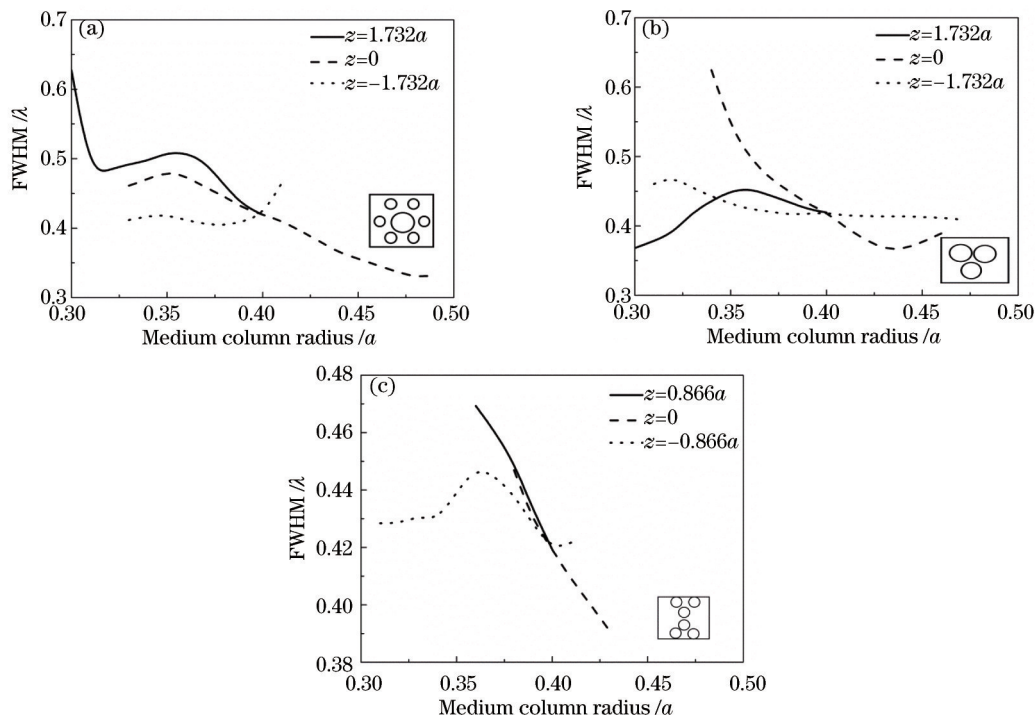


图7 (a)六边形、(b)倒三角形和(c)对称三角形的介质柱半径与半峰全宽的关系

Fig.7 FWHM versus column radius of (a) hexagon (b) inverted triangle and (c) symmetrical triangle

对于六边形构型的缺陷,当缺陷位置 $z=0$ 和 $z=-1.732a$ 时,缺陷的引入能使成像的分辨率比未引入缺陷时高,并且 $z=0, r>0.40a$ 时,分辨率随着半径的增大而增大。

对于倒三角形构型,当缺陷中心位置 $z=0$ 和 $z=-1.732a$,介质柱半径 $r>0.40a$ 时,半峰全宽较 $r=0.40a$ 时有减小的现象,分辨率得到提高,当 $r=0.41a\sim 0.44a$ 时,分辨率在逐渐变大。

对于上下对称的两个三角形构型的缺陷,由于缺陷之间的互相干扰,分辨率普遍有所降低,只有当缺陷中心位置 $z=0$ 时,分辨率有提高的迹象,并且在 $r>0.40a$ 范围内,分辨率随着半径的增大而增大。

综合分析,当缺陷位置 $z=0$ 时,分辨率提高的趋势更为明显,缺陷的引入改变了光子晶体平板的对称性,对称性越高,对光的散射影响越小,使得分辨率越高,并且介质柱半径在临近基准半径时,分辨率提高的概率较大。

在光子晶体平板中引入不同构型的缺陷,与缺陷态频率相吻合的光子会被局域在缺陷位置,光子被局域化程度各不相同,从而造成六边形和三角形两种构型的缺陷影响的光强透射率变化趋势有所区别。光子晶体负折射介质平板能够“完美成像”的物理机制除了负折射效应外还有自准直和近场散射等效应的综合影响,当引入缺陷介质半径较大时光子晶体自准直效应的影响要大于负折射效应,因此要想获得较大的透射光强,可以选择在光子晶体平板中合适的位置引入介质柱半径处于基准半径附近的缺陷,缺陷的位置选择要综合考虑平板的对称性,以此来提高成像的分辨率。

5 结 论

通过引入六边形与三角形构型两类缺陷来对光子晶体平板内部结构中造成无序,缺陷造成的无序体现

在缺陷介质柱半径的变化,以及引入缺陷的中心位置的变化,而缺陷的引入会使得在不同的位置出现光子的局域。

1) 在光子晶体平板中分别引入六边形和三角形构型缺陷,当缺陷介质柱半径处于 $0.36a \sim 0.41a$ 范围内时,像点的相对光强和光的透射率可以较未引入缺陷时有明显增加,像方的相对光强最大时的介质柱半径与光的透射率最大时相同,引入缺陷可以提高像方的光强。

2) 当引入缺陷的构型为六边形时,随着缺陷中心点位置的上移,光的透射率在逐渐增大。当引入缺陷的构型为三角形时,随着缺陷中心位置或者顶点位置的上移,对应的透射率在逐渐减小。在缺陷介质柱半径临近基准半径时,分辨率提高的概率较大,缺陷在光子晶体中所处位置对称性越高,光的散射性越低,分辨率越高。由于内部缺陷之间的互相干扰,引入上下对称的两个三角形构型的缺陷对提高成像分辨率是不利的。

参 考 文 献

- 1 V G Veselago. The electrodynamics substances with simultaneously negative vales of ε and μ [J]. Sov Phys Usp, 1968, 10(4): 509-514.
- 2 Tang Shiwei, Zhu Weiren, Zhao Xiaopeng. Multiband negative index metamaterials at optical frequencies [J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(5): 3220-3223.
汤世伟, 朱卫仁, 赵晓鹏. 光波段多频负折射率超材料[J]. 物理学报, 2009, 58(5): 3220-3223.
- 3 Wang Tongbiao, Liu Nianhua. Band structures and electric fields of one-dimensional photonic crystals composed of alternate layers of left-handed and right-handed materials [J]. Acta Physica Sinica, 2007, 56(10): 5878-5882.
王同标, 刘念华. 正负折射率材料组成的一维光子晶体的能带及电场[J]. 物理学报, 2007, 56(10): 5878-5882.
- 4 J B Pendry, A J Holden, W J Stewart, *et al.*. Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures [J]. Phys Rev Lett, 1996, 76(25): 4773-4776.
- 5 J B Pendry. Negative refraction makes a perfect lens [J]. Phys Rev Lett, 2000, 85(18): 3966-3969.
- 6 D R Smith, W J Padilla, D C Vier, *et al.*. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity [J]. Phys Rev Lett, 2000, 84(18): 4184-4187.
- 7 Xie Guibing, Geng Tao, Wang Yan. Negative refraction properties of anisotropic magnetic materials at ferromagnetic resonance [J]. J University of Shanghai for Science and Technology, 2013, 35(5): 439-442, 448.
谢桂兵, 耿滔, 王燕. 铁磁共振下磁各向异性材料的负折射特性研究[J]. 上海理工大学学报, 2013, 35(5): 439-442, 448.
- 8 Du Yinxiao, Zhao Youlin, Ma Huali, *et al.*. Negative refraction and imaging properties of uniaxial crystal slabs [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(6): 0616001.
杜银霄, 张又林, 康华丽, 等. 各向异性晶体的平板负折射成像研究[J]. 光学学报, 2013, 33(6): 0616001.
- 9 E Cubukcu, K Aydin, E Ozbay, *et al.*. Electromagnetic waves: Negative refraction by photonic crystals [J]. Nature, 2003, 423(6940): 604-605.
- 10 Zhang Jinlong, Liu Xu, Li Yiyu, *et al.*. Analysis of self-collimation and sub wavelength imaging in one-dimensional metal-dielectric structure [J]. Acta Physica Sinica, 2007, 56(10): 6075-6079.
张锦龙, 刘旭, 厉以宇, 等. 一维金属-介质周期结构的自准直特性和亚波长成像[J]. 物理学报, 2007, 56(10): 6075-6079
- 11 Tong Yuanwei, Tian Shuang, Zhuang Songlin. Sub-wavelength imaging of the two-dimensional photonic crystal with effective index close to -1 [J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(5): 054201.
童元伟, 田双, 庄松林. 折射率为非-1时的亚波长成像[J]. 物理学报, 2011, 60(5): 054201.
- 12 Tian Shuang, Tong Yuanwei. Effect of changing surface structure of photonic crystals on image [J]. Acta Photonica Sinica, 2013, 42(2): 171-175.
田双, 童元伟. 光子晶体表面结构的改变对成像的影响[J]. 光子学报, 2013, 42(2): 171-175.
- 13 J Sun, Y F Shen, J Chen, *et al.*. Improving unrestricted imaging quality of a triangular lattice photonic crystal slab by modifying surface configuration [J]. Physica B: Condensed Matter, 2011, 406(3): 461-466.
- 14 Zhou Fei, Fei Hongming, Chen Zihui, *et al.*. A high efficiency photonic crystal polarization beam splitter [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(6): 062304.
周飞, 费宏明, 陈智辉, 等. 一种高效光子晶体偏振光分束器[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(6): 062304.

- 15 Ning Xiangping, Zhao Chunliu, Lang Tingting, *et al.*. Photonic crystal fiber polarizer based on coupling [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(6): 060601.
宁向平, 赵春柳, 郎婷婷, 等. 基于谐振耦合原理的光子晶体光纤偏振器件[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(6): 060601.
- 16 Li Lei, Liu Guiqiang, Chen Yuanhao. An optical switch based on coupled heterostructure photonic-crystal waveguides [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(1): 0123002.
黎磊, 刘桂强, 陈元浩. 光子晶体异质结构耦合波导光开关[J]. *光学学报*, 2013, 33(1): 0123002.
- 17 Song Yi, Wang Ruopeng. Dependence of image resolution on the air hole shape for 2D photonic crystal slab lens [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2009, 45(2): 362-364.
宋毅, 王若鹏. 二维光子晶体的空气孔形状对负折射平板透镜成像分辨率的影响[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2009, 45(2): 362-364.
- 18 Mao Yu, Tong Yuanwei. Effect of the change of surface structure of photonic crystals on intensity of transmitted light [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, 39(9): 1562-1566.
毛宇, 童元伟. 改变光子晶体表面结构对负折射透射光强的影响[J]. *光子学报*, 2010, 39(9): 1562-1566.
- 19 Huang Biqin, Gu Peifu. Extension of one-dimensional photonic crystal's band gap [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23(12): 1497-1501.
黄弼勤, 顾培夫. 一维光子晶体禁带的展宽[J]. *光学学报*, 2003, 23(12): 1497-1501.
- 20 Zhu Zhihong, Ye Weimin, Yuan Xiaodong, *et al.*. Study of transmission characteristics of 2-D photonic crystals by the finite-difference time-domain method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23(5): 522-525.
朱志宏, 叶卫民, 袁晓东, 等. 用时域有限差分法研究二维光子晶体传输特性[J]. *光学学报*, 2003, 23(5): 522-525.
- 21 Tong Yuanwei, Mao Yu, Zhuang Songlin. Numerical study on 2-D photonic crystal with negative refractive index at multiple frequency bands [J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(8): 5553-5558.
童元伟, 毛宇, 庄松林. 光频段多频率域负折射率材料的数值研究[J]. *物理学报*, 2010, 59(8): 5553-5558.

栏目编辑: 史敏