

文章编号 1004-924X(2014)04-0877-07

光子晶体负折射效应在糖溶液浓度检测中的应用

梁斌明, 胡艾青*, 蒋 强, 庄松林

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要:探讨了光子晶体负折射效应在糖溶液浓度检测中的应用,在软件中使用时域有限差分法对光在光子晶体中的传播进行了模拟实验。模拟显示:糖溶液的浓度变化与输出功率变化接近线性关系,而线性相关程度受介质柱半径常数的影响。进行了多组参数比对与优化,最终获得了线性度最高的输出功率与糖溶液浓度的对应关系。基于这个对应关系,提出了基于光子晶体负折射效应的糖溶液浓度检测方法并设计了相应的糖溶液浓度检测器。实验结果表明:基于光子晶体的糖溶液浓度检测器具有结构简单、测量精度高、响应速度快、易于与激光器件集成且不受外界电磁环境影响等优点。

关键词:光子晶体;光子晶体探测器;负折射效应;糖溶液;浓度检测

中图分类号:O661;TP212.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142204.0877

Application of photonic crystal negative refraction effect to sugar solution concentration detection

LIANG Bin-ming, HU Ai-qing*, JIANG Qiang, ZHUANG Song-lin

(School of Optical-Electronic Information and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

* Corresponding author, E-mail: huaqing999@sina.com

Abstract: The application of photonic crystal negative refraction effect to the concentration detection of sugar solution was explored and a simulation experiment on light propagation in a photonic crystal was performed by Finite Difference Time Domain(FDTD) method. Simulation experiments show that the concentration change of sugar solution has a linear relationship with output power changes and the linear correlation degree is affected by medium column radius constant. The obtained multiple parameters were compared and optimized, and eventually the linearity relationship between the highest output power and the concentration of sugar solution was obtained. Based on this relation, a sugar solution concentration detection method based on photonic crystal negative refraction effect was proposed and a corresponding concentration detector was developed. Compared to other detection methods, the application of photonic crystals is characterized by a small size, long life, easy to integrate with the laser device and is not subject to external electromagnetic environment effects.

Key words: photonic crystal; photonic crystal detector; negative refraction effect; sugar solution; concentration detection

收稿日期:2013-07-10;修订日期:2013-09-03.

基金项目:国家 973 重点基础研究发展计划资助项目(No. 2011CB707504);国家自然科学基金资助项目(No. 61177043, No. 11104184)

1 引言

溶液浓度的测量与控制在化工、制糖、乳制品、制药、饮料等行业中有着广泛的应用,它是保证和提高产品质量的重要技术手段。液体的折射率取决于其浓度 c 和温度 T ,因此通过测量溶液的折射率来计算溶液浓度是常用的溶液浓度测量方法。目前,透明介质折射率的测量方法和仪器有很多,普遍采用的是分光计法,但分光计的调整过于复杂,既不利于操作,也不利于实际应用中与其他器件的集成。

光子晶体也称光子带隙材料,它是一种由人工设计和制造、介质常数具有一定周期性分布的结构,其最重要的特性就是具有光子带隙,即禁带。自 1987 年美国科学家 Yablonovitch 和 John 提出光子禁带理论^[1-2]后,光子晶体便引起了学术界和产业界的密切关注,各国政府机构和一些研究机构纷纷开展了与其有关的理论、材料和器件的研究工作。光子晶体的应用(包括光子晶体光纤的商业应用)与潜在前景使它成为非线性光学领域的研究热点,并得到了迅速发展。目前,光子晶体的应用有很多^[3-5],如光子晶体光纤^[6]、光子晶体偏正分束器^[7]、发光二极管(LED)^[8]以及光子晶体激光器^[9]等,这些是光子晶体的几种典型应用。近年来,光子晶体的负折射效应逐渐成为光子晶体研究的热点之一。早在 1968 年俄国科学家 Veselago 就提出了负折射的概念,但对负折射的研究却是直到 20 世纪初负折射率材料被制备出来后才得以发展起来^[10-14]。由于光子晶体器件具有体积小、寿命长、易于与激光器件集成并且不受外界电磁环境影响等优点,基于光子晶体的光电器件近年来得到广泛地研究并向高度集成化发展。

本文在前期研究的基础上,采用同之前类似的光子晶体结构置于糖溶液中,用时域有限差分法(Finite Difference Time Domain, FDTD)进行仿真分析得到了糖溶液浓度与输出功率的关系,即为接近线性的关系,且线性相关程度受介质柱半径常数的影响。将光子晶体这一特性应用于检测糖溶液浓度,设计了相应的糖溶液浓度检测器,该检测器可实时探测糖溶液浓度。

2 基本理论

在二维光子晶体中电磁场可以分解为横电模(TE)和横磁模(TM)^[15]。有研究表明,由空气孔组成的光子晶体在 TM 模式下的负折射现象较明显,而由介质柱组成的光子晶体在 TE 模式下的负折射现象较明显^[16]。由于本论文是以硅作为介质柱的二维光子晶体为例,所以采用 TE 模式。二维光子晶体的介质柱在 X-Z 平面内周期排列,在一般电介质中 Maxwell 微分式为:

$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{E} = -\mu_0 \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{H} = \epsilon_0 \epsilon(r) \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \end{cases} \quad (1)$$

由于研究的是 TE 模,所以可将矢量式简化为标量式:

$$\begin{cases} \frac{\partial H_y}{\partial z} = \epsilon_0 \epsilon(r) \frac{\partial E_x}{\partial t} \\ \frac{\partial H_y}{\partial x} = \epsilon_0 \epsilon(r) \frac{\partial E_z}{\partial t} \\ \frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z} = -\mu_0 \frac{\partial H_y}{\partial t} \end{cases} \quad (2)$$

根据 Yee 元胞^[17]进行空间离散,式(2)以中心差分法离散化得到有限时域差分方程式:

$$\begin{cases} H_y^{n+\frac{1}{2}} \left(i+\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2} \right) = H_y^{n-\frac{1}{2}} \left(i+\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2} \right) - \frac{\Delta t}{\mu_0} \times \left\{ \frac{1}{\Delta x} \left[E_z^n \left(i+1, k+\frac{1}{2} \right) - E_z^n \left(i, k+\frac{1}{2} \right) \right] - \frac{1}{\Delta z} \left[E_x^n \left(i+\frac{1}{2}, k+1 \right) - E_x^n \left(i+\frac{1}{2}, k \right) \right] \right\} \\ E_x^{n+1} \left(i+\frac{1}{2}, k \right) = E_x^n \left(i+\frac{1}{2}, k \right) + \frac{\Delta t}{\epsilon_0 \epsilon(r)} \times \left\{ \frac{1}{\Delta z} \left[H_y^{n+\frac{1}{2}} \left(i+\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2} \right) - H_y^{n+\frac{1}{2}} \left(i+\frac{1}{2}, k-\frac{1}{2} \right) \right] \right\} \\ E_z^{n+1} \left(i, k+\frac{1}{2} \right) = E_z^n \left(i, k+\frac{1}{2} \right) - \frac{\Delta t}{\epsilon_0 \epsilon(r)} \times \left\{ \frac{1}{\Delta x} \left[H_y^{n+\frac{1}{2}} \left(i+\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2} \right) - H_y^{n+\frac{1}{2}} \left(i-\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2} \right) \right] \right\} \end{cases} \quad (3)$$

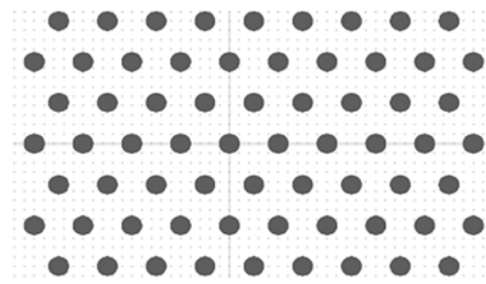
通过重复不断地求解式(3)可以得到电磁场的传播规律。在 FDTD 中要得到稳定解,时间步长必须受到空间步长的限制,它们之间满足:

$$\Delta t \leq \frac{1}{v} \left(\frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta z)^2} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (4)$$

FDTD 建立在一个有限的计算区域,而求解电磁场时假定空间是无限大的;所以需要利用吸收边界条件(Absorbing Boundary Conditions, ABCs)解决两者之间的矛盾,使得边界无明显反射。本文采用了完美匹配层边界条件(Perfectly Matched Layer, PML)^[18]。

3 二维光子晶体结构

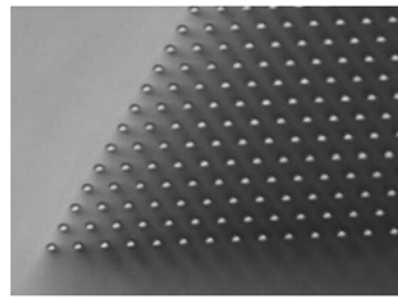
光子晶体是介质折射率具有一定周期性分布的结构,本文在数学模拟仿真实验中采用梯形光子晶体,其结构如图 1(a)所示。图 1 中黑色圆点表示介质柱(折射率为 $n=3.42$ 的硅柱),介质柱的单元形状为圆柱体,呈三角形排列;白色部分表示作为基底介质的折射率为 n_0 、浓度为 c 的待测糖溶液,糖溶液的折射率比硅小得多,处于 $1.33 \sim 1.45$ 。如图 1(b)所示,相邻介质柱中心之间的距离为晶格常数 $a(a=\lambda \cdot F, F$ 为归一化频率, λ 为自由空间波长值)。而介质柱直径,又称波导宽度,常被定义为 $b \cdot a$,其中 b 为任一小于 1 的常量,本文令 b 为介质柱半径常数。圆形介质柱按照三角形晶格周期性排列在基底介质中,构成的光子晶体整体形状如图 1(a)所示。



(b) 介质柱呈六边形晶格排布
(b) Hexagonal structure of dielectric cylinders

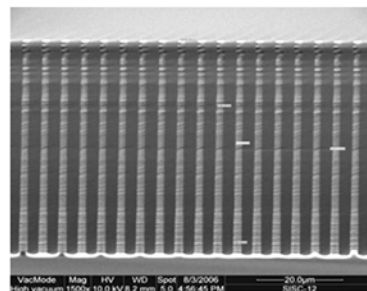
图 1 光子晶体结构示意图

Fig. 1 Structure of 2D photonic crystals



(a) 俯视图

(a) Overlook

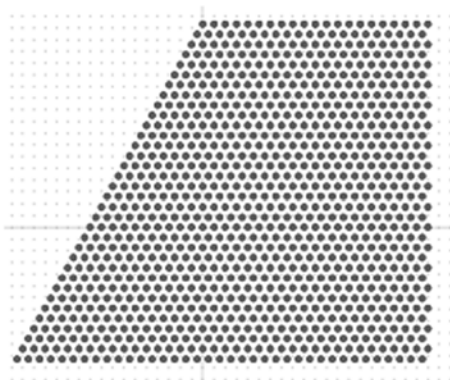


(b) 侧视图

(b) Side view

图 2 光子晶体样本的 SEM 照片

Fig. 2 SEM Photos of a sample by microscope



(a) 二维光子晶体梯形整体结构

(a) Trapezium structure of 2D photonic crystals

课题组前期已经制成的光子晶体的结构^[19]如图 2 所示,其晶格常数 a 为 $5 \mu\text{m}$,柱子直径为 $2 \mu\text{m}$,柱子高度为 $50 \mu\text{m}$,由于柱子高度为柱子直径的 25 倍,理论计算时假设柱子高度为无限长量。

4 数值模拟结果与分析

光子禁带是光子晶体的一个重要特性,受它的影响光子晶体会产生负折射现象。本文以 FDTD 方法模拟了光在以糖溶液为基底介质、硅材料为介质柱且硅柱呈三角形排列的二维光子晶体中的传播过程。借助 RSOFTE 软件可以很快得到光子晶体基底糖溶液浓度 $c=30\%$ 时的光子晶体能带结构图,如图 3 所示。图中给出了能带结构随着半径常数 b 的变化,对应阴影区域频率的光可以在具有相应 b 值的结构中传播。阴影区域称为导带,空白区域称为禁带。图 3 对应的光子晶体的结构参数为:介质柱为硅柱,折射率 $n=3.42$;基底介质是糖溶液,浓度 c 为 30% ;介质柱半径常数 b 为 $0\sim 1$;介质柱排列结构如图 1 所示。

图 3 中纵坐标表示入射光的归一化频率 $f(f = a/\lambda, \lambda$ 为自由空间波长),横坐标表示介质柱的半径常数 b 。图中主要的 3 条禁带都是随着 b 的增大,先是变宽,然后逐渐变窄并且下移。文献 [20] 提到,入射光的归一化频率越靠近光子晶体能带结构图中最下面一条禁带的上边缘,光波的偏折现象就越明显。由此猜测,当入射光的归一化频率在最下面一条禁带的上边缘附近取值时,由 b 变化导致的禁带结构变化会对输出功率产生一定程度的影响。

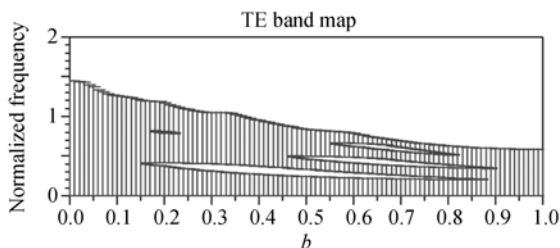


图 3 光子晶体 TE 模能带结构随硅柱半径常数 b 变化图谱
Fig. 3 Band structure of photonic crystal in TE polarization vs. waveguide width parameter b

本文采用了文献 [21] 公开的在温度为 $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、湿度为 62% 的实验状态下测量的蔗糖溶液浓度与其折射率的转换关系:

$$n_0 = 1.328 + 0.00184c, \quad (5)$$

其中: n_0 为糖溶液折射率, c 为糖溶液浓度。设定 8 组入射光,其归一化频率从 0.28 以 0.01 步长增加到 0.35,糖溶液浓度从 0 开始,每增加 10% 测定一次输出功率,将 8 组数据代入式 (5) 中进行计算。图 4 为糖溶液浓度为 40% , b 为 0.62 时, Fullwave 模拟仿真得到光在光子晶体中的传播过程。其中小圆圈是硅介质柱,基底介质为待测糖溶液,箭头方向为光入射方向和光折射后的方向。从图中可以很直观地看出,入射光正入射后在出射面发生了负折射,折射光与入射光在法线的同一侧。由此可见,折射光与入射光传播方向的夹角大于 90° ,完全不存在入射光与输出光(即折射光)混合而影响到输出功率探测的问题。所以利用负折射可以很好地改变光路方向,避免杂散光的影响,减少输出探测误差。经过模拟仿真得到了 b 分别取 0.62, 0.63, 0.64, 0.65 时,糖溶液浓度 c 与出射光功率 P 的关系曲线图,如图 5 所示。

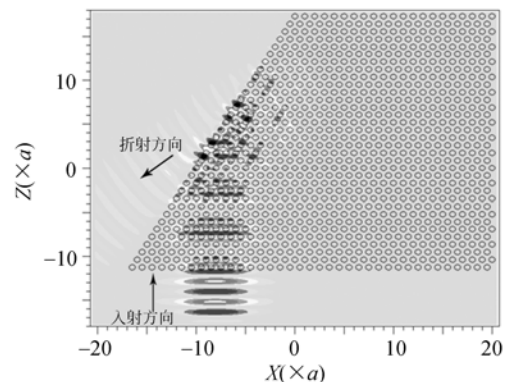


图 4 光传播图(a 为晶格常数)

Fig. 4 Light propagation (a is lattice period)

从图 5 可以看出, b 的变化对输出光功率有明显的影响。 $f=0.298$ 时,随着 b 值的增大,功率曲线向右移动,即输出光功率随 b 值的增大而增大。当 $b=0.62$ 时,随着 f 的增大,曲线斜率越来越大;而 $b=0.65$ 时,情况相反。由此说明, b 值的改变影响曲线的曲率, b 值越大,输出功率越大,其变化率也发生了改变。在同一 b 值比较不同归一化频率的入射曲线可知,入射光不同,功率的大小和变化率也有差异。由此可以通过搭配不同的 b 与入射光频率 f 来优化结果曲线。

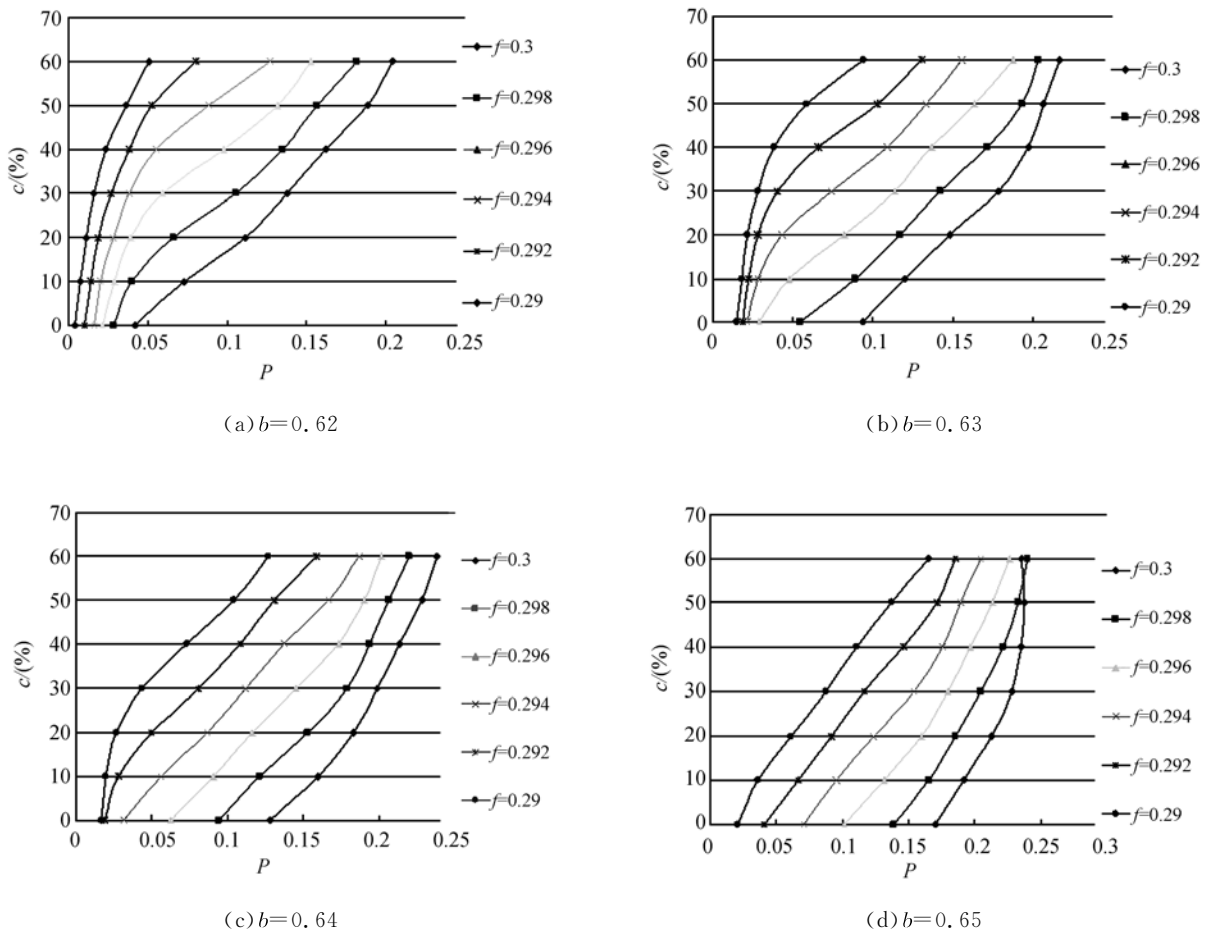


图 5 b 不同时糖溶液浓度 c 与出射光功率 P 的关系曲线图

Fig. 5 Relation between output power P and sugar solution concentration c with different b

5 浓度测量实验

为了得到一个较优的 c - P 曲线,通过一系列取值搭配实验得到了糖溶液浓度 c 与输出功率 P 的关系曲线,如图 6 所示。图中 $b = 0.64$, $f = 0.294$,拟合得到的 c - P 关系曲线接近线性。

由计算可得,曲线的线性拟合度为 99.84%,拟合出 c - P 关系为:

$$c = 380.91P - 12.33. \quad (6)$$

将式(6)应用于糖溶液探测器。在实际的糖溶液探测器设计中,设定入射波长 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$,由归一化频率 $f = 0.294$ 可计算出光子晶体的晶格常数 $a = \lambda \cdot f = 0.4557 \mu\text{m}$ 。将探测到的输出光功率代入式(6)就能很快地得到糖溶液浓度。

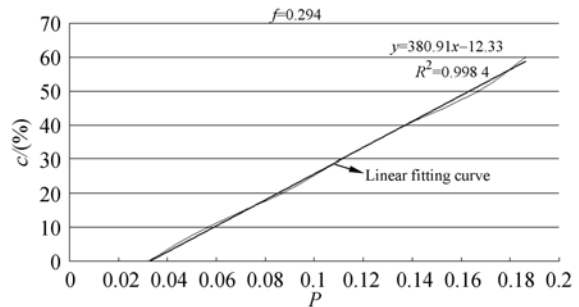


图 6 $b=0.64$ 、 $f=0.294$ 时糖溶液浓度 c 与出射光功率 P 的关系曲线

Fig. 6 Relation between sugar solution concentration c and output power P with b of 0.64 and f of 0.294

6 误差分析

为了验证上述公式的正确性,分别用浓度 c

为 30% 和 40% 的糖溶液对该公式的误差进行了测量。当糖溶液浓度为 $c_1 = 30\%$ 和 $c_2 = 40\%$ 时, 输出功率为 $P_1 = 0.11182$ 和 $P_2 = 0.13734$ 。代入式(6)计算得到两种糖溶液浓度分别为 $c_1 = 30.26\%$, $c_2 = 39.98\%$ 。由此得到公式计算的相对误差分别为 $\epsilon_1 = 0.88\%$ 和 $\epsilon_2 = 0.04\%$ 。该结果说明了公式的正确性。

从图 4 中可看出入射频率对输出功率会产生一定影响。为观察激光器带宽对实验误差的影响, 以糖溶液浓度为 40% 为例, 入射光波长取 $1.5492 \sim 1.5508 \mu\text{m}$ 且间隔为 $0.0002 \mu\text{m}$, 对

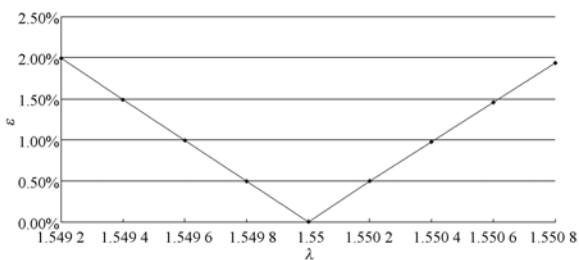


图 7 糖溶液浓度为 40% 时入射光波长漂移的误差分析
Fig. 7 Error analysis of wavelength shift in 40% sugar solution

参考文献:

- [1] YAB L E. Inhibited spontaneous emission in solid state physics and electronics [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, 58: 20592-20562.
- [2] JOHN S. Strong localization of photon in certain disordered dielectric super lattices [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, 58: 2486-2489.
- [3] 吴斌, 王庆康. 带反射回馈的高效光子晶体多路滤波器件 [J]. *光学精密工程*, 2007, 15(8): 1208-1214.
WU B, WANG Q K. Highly efficient photonic crystal-based multichannel drop filters with reflection feedback [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(8): 1208-1214. (in Chinese)
- [4] 崔乃迪, 梁静秋, 梁中嵩, 等. 二维硅薄膜光子晶体波导的设计及制作 [J]. *光学精密工程*, 2010, 18(12): 2549-2556.
CHUI N D, LIANG J Q, LIANG ZH Y, *et al.*. Design and fabrication of two-dimensional photonic crystal waveguides on silicon films [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(12): 2549-2556. (in Chinese)
- [5] 陈胜钰, 庄冬霞, 强则焯, 等. 基于自准直效应的硅

每一个取值结果求相对误差, 结果如图 7 所示。由图可知, 波长在小范围内变化时输出的相对误差是线性的, 且在带宽为 0.1 nm 时产生的误差 $\epsilon \leq 0.25\%$ 。(DFB-LD 的带宽小于 0.1 nm)

7 结 论

本文采用 FDTD 方法在 RSOFT 软件上模拟了光在光子晶体中传播和负折射过程, 分别研究了光子晶体中的硅柱半径常数对光子禁带, 以及基底介质糖溶液的浓度对光输出功率的影响。仿真结果表明, 光输出功率和糖溶液浓度之间为线性关系。据此拟合出两者之间的关系式, 应用于糖溶液浓度检测, 检测结果表明, 由公式计算得到的相对误差小于 1%。

本文的研究结果为基于光子晶体的糖溶液检测提供了参考依据。基于光子晶体的糖溶液浓度检测器具有结构简单、体积小、测量精度高、响应速度快、操作方便、性能稳定可靠等优点, 且由于负折射的出射光方向与入射光方向相反, 能够有效地减小杂散光的干扰。

- 基光子晶体 1×4 光复用器 [J]. *光学精密工程*, 2012, 20(12): 2626-2632.
- CHEN SH Y, ZHUANG D X, QIANG Z X, *et al.*. 1×4 optical multiplexer based on self-collimation effect in silicon photonic crystals [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(12): 2626-2632. (in Chinese)
- [6] KNIGHT J C. Photonic crystal fibers [J]. *Nature*, 2003, 424: 847-851.
- [7] AO X, LIU L, WOSINSKI L, *et al.*. Polarization beam splitter based on a two-dimensional photonic crystal of pillar type [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, 89: 171115.
- [8] KIM K, LEISHER P O, DANNER A J, *et al.*. Photonic crystal structure effect on the enhancement in the external quantum efficiency of a red LED [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, 18: 1876-1878.
- [9] SRINIVASAN K, PAINTER O, COLOMBELLI R, *et al.*. Lasing mode pattern of a quantum cascade photonic crystal surface-emitting microcavity laser [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, 84: 4164-4166.
- [10] HUANGFU J T, RAN L X, CHEN H SH, *et al.*. Experimental confirmation of negative refractive index of amaterial composed of W-like metallic

- patterns [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, 84(9): 1537-1539.
- [11] CHEN H SH, RAN L X, HUANGFU J T, *et al.*. Negative refraction of a combined double S-shaped metamaterial [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, 86: 151909.
- [12] ZHAO X P, ZHAO Q, KANG L, *et al.*. Defect effect of split ring resonators in left-handed metamaterials [J]. *Phys. Lett. A*, 2005, 346: 87-91.
- [13] POPA B I, CUMMER S A. Direct measurement of evanescent wave enhancement inside passive metamaterials [J]. *Phys. Rev. E*, 2006, 73: 0166179.
- [14] CHEN H, RAN L, WANG D, *et al.*. Metamaterial with randomized patterns for negative refraction of electromagnetic waves [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, 88: 031908.
- [15] 梁铨庭. 物理光学[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.
- LIANG Q T. *Physical Optics* [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2008. (in Chinese)
- [16] NOTOMI M. Theory of light propagation in strongly modulated photonic crystals: refraction like behavior in the vicinity of the photonic band gap [J]. *Phys. Rev. B*, 2000, 62: 10696.
- [17] YEE K S. Numerical solution of initial boundary value problems involving maxwell's equations in isotropic media [J]. *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, 1966, 14(3): 302-307.
- [18] BERENGER J P. A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves [J]. *J. Comput. Phys.*, 1994, 114: 185-200.
- [19] CHEN J B, WANG Y, JIA B H, *et al.*. Observation of the inverse Doppler effect in negative-index materials at optical frequencies [J]. *Nature Photonics*, 2011, 5(4): 239-245.
- [20] 冯莉, 梁斌明, 李卓, 等. 入射光频率变化对负折射现象的影响 [J]. *激光与光电子学进展*, 2008, 45(3): 61-65.
- FENG L, LIANG B M, LI ZH, *et al.*. Dependence of negative refraction phenomenon on incident light frequency [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, 45(3): 61-65. (in Chinese)
- [21] 白泽生, 刘竹琴, 徐红. 几种液体的折射率与其浓度关系的经验公式 [J]. *延安大学学报: 自然科学版*, 2004, 23(1): 33-36.
- BAI ZH SH, LIU ZH Q, XU H. An experienced formula about the connection of refraction index and consistence of several liquid [J]. *Journal of Yanan University: Natural Science Edition*, 2004, 23(1): 33-36. (in Chinese)

作者简介:



梁斌明(1977—),男,江西临川人,硕士生导师,主要研究方向为微纳光学。E-mail: liangbinming@sina.com

通讯作者:



胡艾青(1990—)女,江西宜春人,硕士研究生,主要研究方向为光子晶体器件。E-mail: huaiqing999@sina.com