

近零折射率材料的古斯汉欣位移的特性研究

陆志仁 梁斌明 丁俊伟 陈家璧 庄松林

Goos-Hänchen shift based on nearzero-refractive-index materials

Lu Zhi-Ren Liang Bin-Ming Ding Jun-Wei Chen Jia-Bi Zhuang Song-Lin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 154208 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.154208

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.154208>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I15>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

LCR 分流电路下压电声子晶体智能材料的带隙

Band gaps of the phononic piezoelectric smart materials with LCR shunting circuits

物理学报.2016, 65(16): 164202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.164202>

二维函数光子晶体

Two-dimensional function photonic crystal

物理学报.2016, 65(13): 134207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.134207>

偶极子位置及偏振对激发光子晶体 H1 微腔的影响

Effects of location and polarization of a dipole source on the excitation of a photonic crystal H1 cavity

物理学报.2016, 65(13): 134206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.134206>

一种基于共享孔径 Fabry-Perot 谐振腔结构的宽带高增益磁电偶极子微带天线

Design of a broadband and highgain shared-aperture fabry-perot resonator magneto-electric microstrip antenna

物理学报.2016, 65(13): 134205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.134205>

光子晶体理论研究的新方法 -----混合变分法

A powerful method to analyze of photonic crystals: mixed variational method

物理学报.2016, 65(12): 124206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.124206>

近零折射率材料的古斯汉欣位移的特性研究

陆志仁 梁斌明[†] 丁俊伟 陈家璧 庄松林

(上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 宁波 200093)

(2016年2月16日收到; 2016年5月29日收到修改稿)

古斯汉欣位移是一种特殊的光学现象, 由于纳米光学的不断普及, 古斯汉欣位移成为了一个极其有价值的研究. 本文采用以硅为介质柱周期排列的正方形的光子晶体, 采用时域有限差分方法, 研究了波长以及温度对于近零折射率材料中的古斯汉欣位移的影响. 研究表明, 波长对于古斯汉欣位移的影响非常大, 而温度对于古斯汉欣位移的影响比较小.

关键词: 古斯汉欣位移, 零折射率, 光子晶体**PACS:** 42.70.Qs, 42.25.Bs**DOI:** 10.7498/aps.65.154208

1 引言

自1947年古斯汉欣位移被古斯和汉欣发现之后就成为了研究的焦点^[1]. Seshadri^[2]在1987年研究了内部反射的古斯汉欣位移. 在1995年, Tran等^[3]发表了关于在弯曲表面上的古斯汉欣位移的研究. 随着现代微加工工艺水平的提高和加工成本的降低, 微纳光子学成为现代光学的一个热点, 在未来光集成芯片中, 光学器件的尺度将变得与波长接近, 而古斯汉欣位移的尺度为波长甚至几十个波长的量级, 光被光子晶体表面反射时的古斯汉欣位移, 将是一个有价值并且值得深入研究的问题^[4-9]. 近年来, 随着负折射率材料的实现以及光子晶体广泛的研究与应用^[10-14], 研究者们也开始研究这两方面的古斯汉欣位移. 2003年, Felbacq等^[15]提出了光子晶体禁带也有古斯汉欣位移; Shadrivov等^[16]研究了左手材料的古斯汉欣位移. 2010年, Zhou等^[17]通过边缘单元法的数学模拟研究了曲面的古斯汉欣位移. 2011年, Rechtsman等^[18]研究了不同条件下周期性媒介的负古斯汉欣位移.

近些年, 近零折射率材料成为研究热点. 所谓近零是指材料的折射率接近或等于零. 2011年,

Huang等在其论文中提出在方形的二维光子晶体中实现零折射率^[19], 光子带隙在其能带结构的布里渊区中心会变的很窄, 形成的锥形的点被称为狄拉克点^[20]; 此外, 当一个平带穿过此点时, 会形成由随机简并有道的狄拉克点, 在这一点所对应的频率处, 该结构的等效介电常量和等效磁导率将同时为零. 因为近零折射率材料的特性在众多领域中有所应用, 例如: 以近零折射率的材料制作光束自准直、波前相位调控、非线性光学的相位匹配^[21-24], 近期更是应用在集成光子器件中.

目前对于近零折射率材料的研究主要集中在近零材料的应用以及不同条件下实现近零折射率材料. 但是, 从上述的内容中不难发现, 在已经提出的应用中, 应当考虑古斯汉欣位移, 从而提高应用的精度、减小误差, 避免一些错误. 本文着重研究了不同入射波的波长以及在不同温度下对近零折射率材料的古斯汉欣位移的影响, 从而对于那些器件精度要达到波长级的设计有所帮助.

2 二维光子晶体的结构

光子晶体是指具有光子带隙特性的人造周期性电介质结构, 即频率落在光子带隙内的电磁波是

[†] 通信作者. E-mail: Liangbinming@sina.com

禁止传播的. 本文中所运用的到二维光子晶体, 是根据 Huang 等^[20]所提到的内容所设置的. 其中介质柱的 $\epsilon = 12$, $\mu = 1$ (其中 ϵ 为介电常数, μ 为磁导率), 半径 $r = 0.2a$ (a 为晶格常数), 波长为 $1.848a$ (对应频率为 $f = 0.541c/a$), 介质柱的形状为圆形, 构成了正方形的结构, 如图 1(a). 通过计算 TE 波 (本文中的 TE 波的磁场方向是垂直于 X 轴与 Z 轴所构成的平面, 即平行于 Y 轴, 坐标系见图 2) 的能带图, 如图 1(b), 在图中可以看到在 Γ 点得到狄拉克锥.

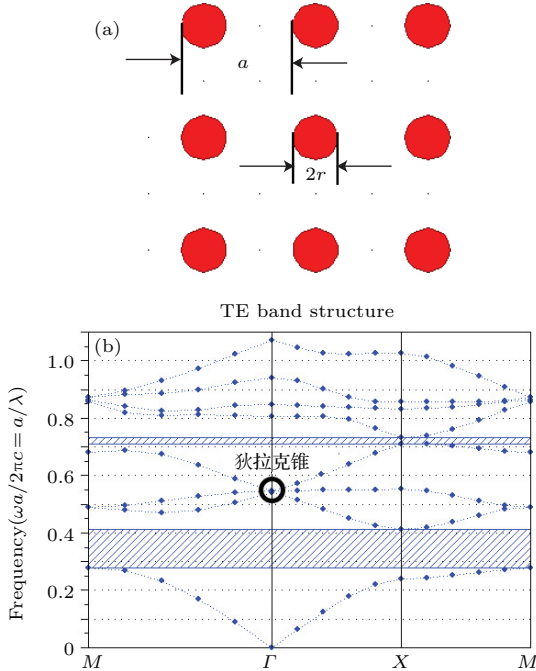


图 1 (a) 光子晶体平面版结构; (b) $\epsilon = 12$, $\mu = 1$, 半径 $r = 0.2a$ 时 TE 波的能带图
Fig. 1. (a) Construction of the photonic crystal board; (b) TE band structure when $\epsilon = 12$, $\mu = 1$, $r = 0.2a$.

本文是通过 R-soft 采用二维时域有限差分法 (FDTD) 利用上述提到的光子晶体来模拟古斯汉欣位移. 模拟示意图如图 2, 其中图 2(a) 中显示了模拟时的坐标轴参考系, 并且以图中最下方一排介质柱的中点作为坐标系的原点. 在光子晶体的左下方设置入射光源, 设入射角为 α , 光源中心的 z 轴坐标为 10 , x 轴坐标为 $10 \tan \alpha$, 这样就可以保证无论入射光的角度如何变化, 总能入射到原点. 以 x 为对称轴, 设置探测器的中心位置, 用来探测反射光的能量, 从能量偏移的大小与方向, 可得出古斯汉欣位移的大小及方向. 由于古斯汉欣位移主要发生在全反射角附近, 因此文中还会着重讨论材料等效折射率的变化. 在实验中, 当透过率小于 0.01 时, 则认为入射光达到了全反射的条件.

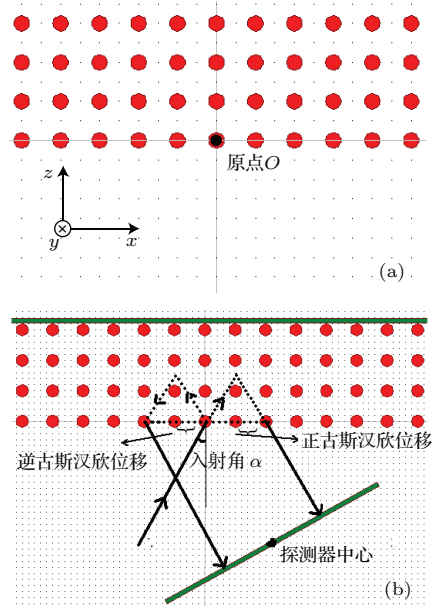


图 2 (a) 坐标系示意图; (b) 古斯汉欣位移示意图
Fig. 2. (a) The schematic diagram of coordinate system used in simulation; (b) the schematic diagram of Goos-Hänchen shift.

3 波长对于近零折射率材料的古斯汉欣位移的影响

将入射波长设为变量, 选取 $\lambda = 1.648a$, $\lambda = 1.848a$, $\lambda = 2.048a$, 3 个不同的波长分别模拟其古斯汉欣位移, 观察其在不同的波长下的位移情况. 在图 3(a) 和图 3(b) 分别显示了当入射波长为 $1.848a$ 时, 入射角在 3° , 6° 时的实验模拟图. 从图中可以看出, 当角度逐渐变大时折射穿透介质的光的能量在逐渐减少, 在 6° 时达到了全反射. 此时的古斯汉欣位移经模拟为 $1.1a$.

图 4(a) 和图 4(b) 分别显示了入射波波长 $\lambda = 1.648a$, 入射角分别在 15° , 27° 时的状况. 从图 4(a) 中可以看出, 当入射角增大为 15° 时, 入射光可以轻易地穿透介质, 与 $\lambda = 1.848a$, 入射角为 6° 时入射光就发生了全反射不同. 从图 4(b) 中可以看到此时全反射角已近增大到了 27° , 此时的古斯汉欣位移是 $1a$.

图 5(a) 和图 5(b) 分别显示了入射波长为 $\lambda = 2.048a$ 时入射角分别为 15° , 27° 时的情况. 从图 5(a) 中可以看到, 与前两组实验不同的是在 15° 时其折射角为负, 由此可以判定材料的等效折射率为负, 并且经过模拟其古斯汉欣位移为 $-3.4a$.

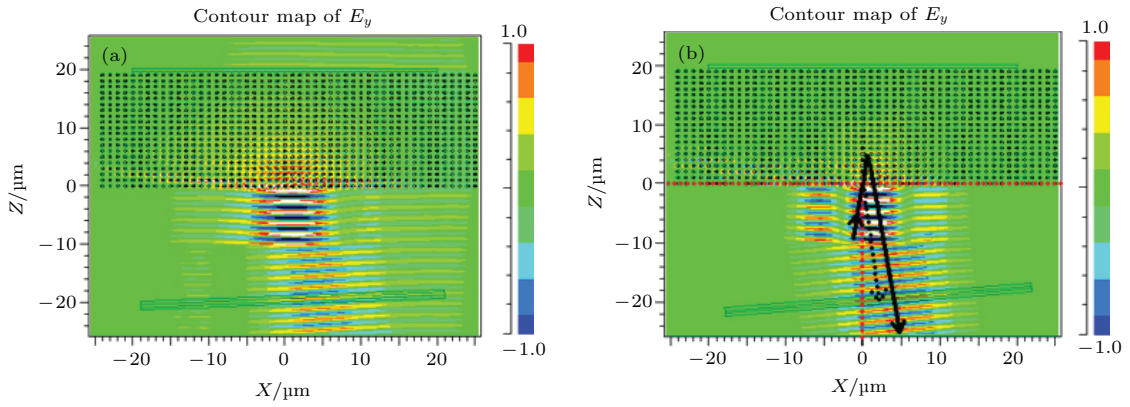


图3 (网刊彩色) (a) 波长为 $1.848a$ 时 3° 入射角示意图; (b) 波长为 $1.848a$ 时 6° 入射角示意图, 虚线为无古斯汉欣位移时的反射光, 实线为入射光及实际的反射光 (即发生了古斯汉欣位移时的反射光)

Fig. 3. (color online) (a) The schematic diagram of simulation at $\lambda = 1.848a$, $\alpha = 3^\circ$; (b) the schematic diagram of simulation at $\lambda = 1.848a$, $\alpha = 3^\circ$, imaginary line means reflected light with no Goos-Hänchen shift, full light means reflected light in the simulation and with Goos-Hänchen shift.

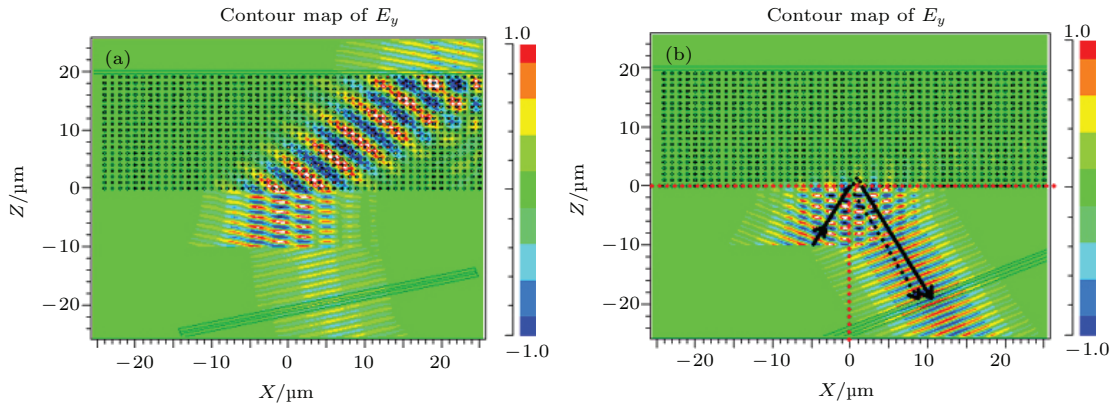


图4 (网刊彩色) (a) 波长为 $1.648a$, 入射角为 15° 时的示意图; (b) 波长为 $1.648a$, 入射角为 27° 时示意图, 虚线为无古斯汉欣位移时的反射光, 实线为入射光及实际的反射光 (即发生了古斯汉欣位移时的反射光)

Fig. 4. (color online) (a) The schematic diagram of simulation at $\lambda = 1.648a$, $\alpha = 15^\circ$; (b) The schematic diagram of simulation at $\lambda = 1.648a$, $\alpha = 27^\circ$, imaginary line means reflected light with no Goos-Hänchen shift, full light means reflected light in the simulation and with Goos-Hänchen shift.

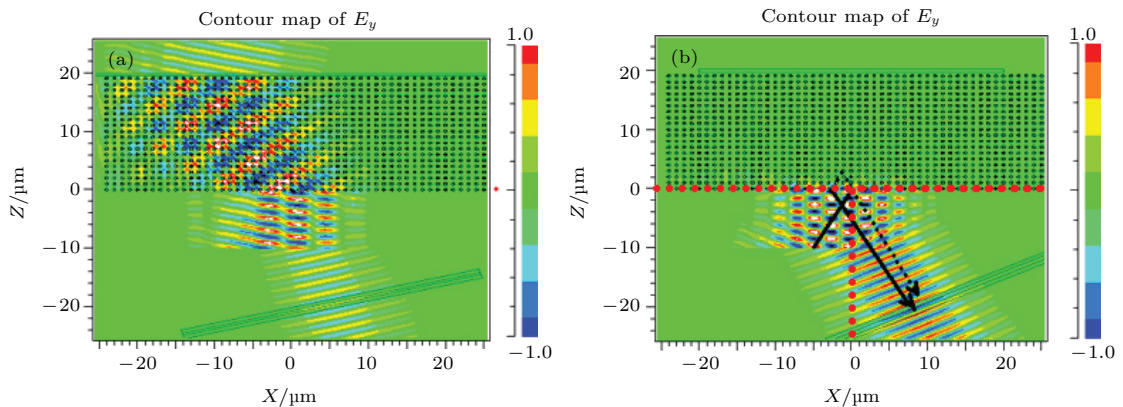


图5 (网刊彩色)(a) 波长为 $2.048a$ 入射角为 15° 示意图 (b) 波长为 $2.048a$ 入射角为 27° 意图, 虚线为无古斯汉欣位移时的反射光, 实线为入射光及实际的反射光 (即发生了古斯汉欣位移时的反射光)

Fig. 5. (color online) (a) The schematic diagram of simulation at $\lambda = 2.048a$, $\alpha = 15^\circ$; (b) the schematic diagram of simulation at $\lambda = 2.048a$, $\alpha = 27^\circ$, imaginary line means reflected light with no Goos-Hänchen shift, full light means reflected light in the simulation and with Goos-Hänchen shift.

从以上三个波长可以看出, 在改变波长的情况下, 近零折射率材料的古斯汉欣位移的确会发生变化. 为了更好地了解改变波长对于古斯汉欣位移的影响, 在 $\lambda = 1.648a - 1.848a$ 中取若干点, 观察当波长小于 $\lambda = 1.848a$ 时其古斯汉欣位移的变化. 再从 $\lambda = 1.848a - 2.048a$ 中选取若干点来观察当波长大于 $\lambda = 1.848a$ 时, 其古斯汉欣位移的情况. 从图 6(a) 中可以看出, 当波长从 $1.648a$ 逐渐增大到 $1.848a$ 时, 材料的等效折射率从正数逐渐趋向于零, 这也意味全反射角是逐渐变小的. 从图 6(b) 中可以发现, 在 $1.648a$ 到 $1.848a$ 这段波长区间中 (不包括 $1.848a$), 其古斯汉欣位移都是正向的, 数值不断增大, 从 $1a$ 增长到了 $2.4a$. 当波长从 $1.848a$ 增大到

$2.048a$ 时, 材料的等效折射率是逐渐减小的, 但由于折射率为负的关系, 其全反射角是不断增大的. 从图 6(b) 中可以看出在 $1.848a$ 和 $1.858a$ 时古斯汉欣位移为正数, 位移的数值为 $1a$ 左右, 当波长增大到 $1.898a$ 时, 其古斯汉欣位移为负了, 位移的数值不断的减小, 从 $-3.8a$ 减少到了 $-2a$.

根据上述的一系列数据可以得出结论: 当波长变化时, 其古斯汉欣位移会发生改变; 当波长从 $1.648a$ 逐渐增大到 $1.848a$ 时, 古斯汉欣位移都是正的且位移不断增大; 当波长从 $1.948a$ 增大到 $2.048a$ 时, 古斯汉欣位移则为负, 古斯汉欣位移数值不断减小; 当波长接近 $1.848a$ 和 $1.858a$ 时, 古斯汉欣位移在 $1a$ 左右.

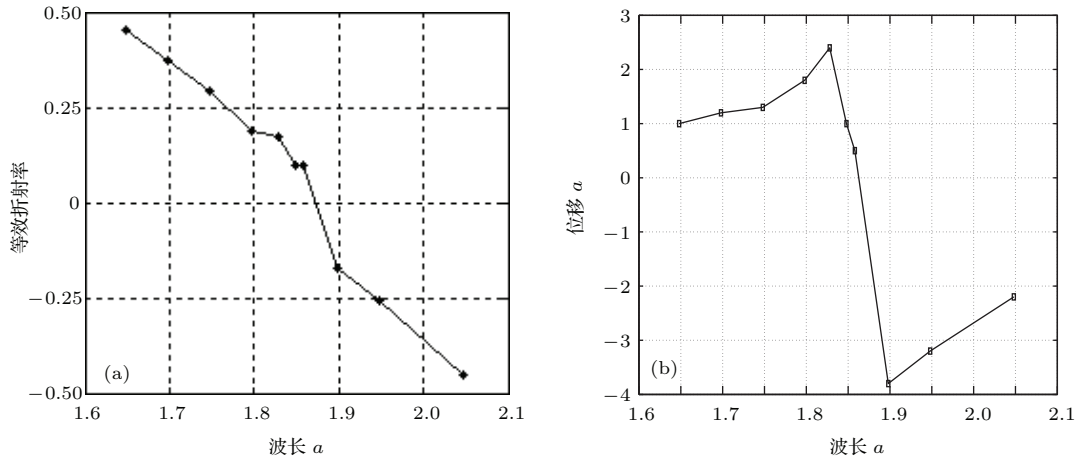


图 6 (a) 不同波长下的材料等效折射率; (b) 不同波长下的古斯汉欣位移的变化

Fig. 6. (a) The effective refractive index at different wavelength; (b) the Goos-Hänchen shift at different wavelength.

4 温度对于近零折射率材料的古斯汉欣位移的影响

由于光子晶体中介质柱的材料为硅, 当温度变化时, 硅本身的折射率会有所改变, 所以导致整个光子晶体的等效折射率发生改变. 在光子晶体工作温度范围 ($0 - 220\text{ }^\circ\text{C}$) 内, 温度变化与介质折射率间的关系可表达为

$$\Delta n = \alpha \cdot n \cdot \Delta T,$$

其中 n 为介质的折射率; α 为介质的热光系数, ΔT 为温度变化量. 硅的热光系数为 $\alpha = 1.86 \times 10^{-4}/^\circ\text{C}$. 当温度变化时介质柱的折射率是不断上升的.

在不改变原来介质柱的其他参数的情况下, 当波长 $\lambda = 1.848a$ 时, 改变温度即改变介质柱本身的折射率, 观察整个材料的古斯汉欣位移的情况. 从图 7(a) 和图 7(b) 可以看出, 同样在入射角为 6° 的情况下, $0\text{ }^\circ\text{C}$ 时发生了全反射, 而 $80\text{ }^\circ\text{C}$ 时还有部分光折透过介质. 可以看出当温度改变时, 材料的折射率会发生一定的变化. 在 $0 - 100\text{ }^\circ\text{C}$ 中每隔 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 对其模拟, 模拟结果如图 7(c), 可以看出, 当温度上升时, 其折射率也是不断增加的, 从 0.1 提升到了 0.156 . 与此同时, 材料的古斯汉欣位移都为正向, 数值在 $1.5a - 2.7a$ 范围波动.

从图 8 中可以看出, 当波长为 $\lambda = 1.648a$ 时, 和 $\lambda = 1.848a$ 时一样, 温度上升时折射率也上升, 在 $0\text{ }^\circ\text{C}$ 时等效折射率为 0.45 , 在 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 时等效折

射率为0.5, 上升比较缓慢, 其古斯汉欣位移在 $0.7a-0.4a$ 之间. 当 $\lambda = 2.048a$, 温度上升时, 由于折射率为负, 其折射率的绝对值不断下降, 从 0°C 时的 -0.45 变为 100°C 时的 -0.41 , 其古斯汉欣位移则是在 $-2.3a-2a$ 之间.

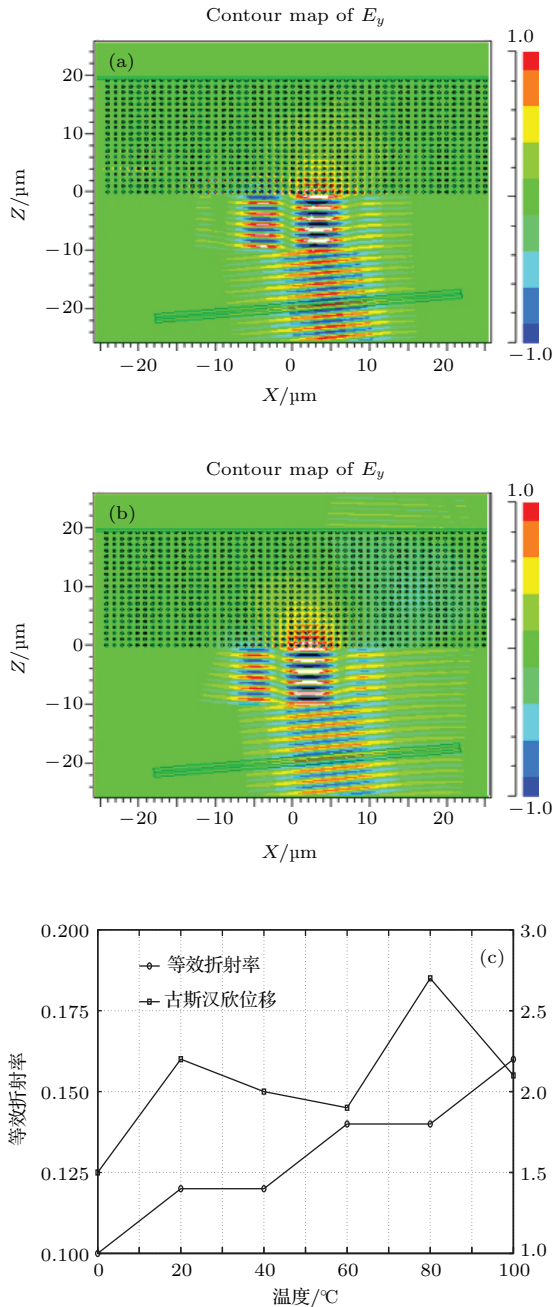


图7 (网刊彩色) (a) 波长为 $1.848a$ 时 0°C 示意图; (b) 波长为 $1.848a$ 时 80°C 示意图; (c) 波长为 $1.848a$ 时改变温度对折射率以及古斯汉欣位移的影响

Fig. 7. (color online) (a) The schematic diagram of simulation at 0°C ; (b) the schematic diagram of simulation at $\lambda = 1.848a$, 80°C ; (c) the effect to Goos-Hänchen shift and effective refractive index by the difference of temperature at $\lambda = 1.848a$.

温度上升时, 当波长为 $1.648a$ 和 $1.848a$ 时折射率变大, 当波长为 $2.048a$ 则相反. 三个波长下的古斯汉欣位移分别在 $1.5a-2.7a$, $0.4a-0.7a$, $-2a-2.3a$ 下波动.

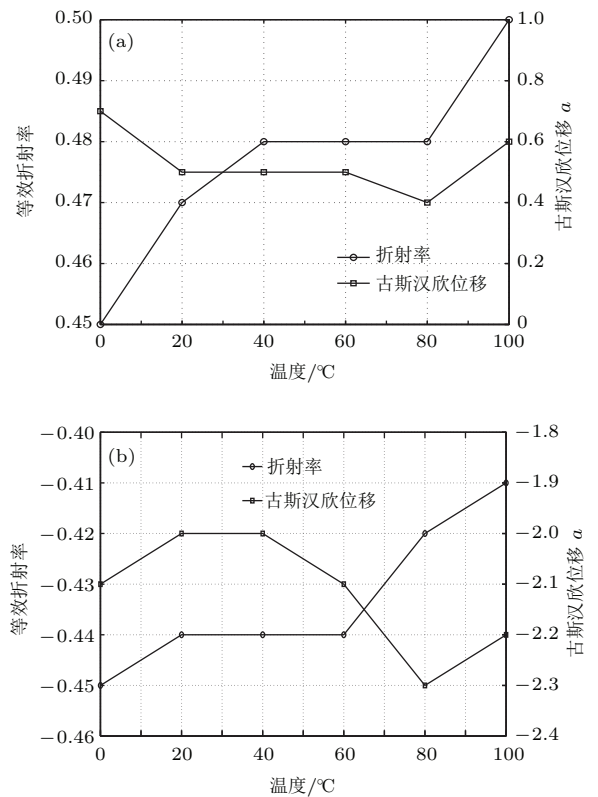


图8 (a) 波长为 $1.648a$ 时温度对折射率和古斯汉欣位移影响; (b) 波长为 $2.048a$ 时温度对折射率和古斯汉欣位移影响

Fig. 8. (a) The effect to Goos-Hänchen shift and effective refractive index by the difference of temperature at $\lambda = 1.648a$; (b) the effect to Goos-Hänchen shift and effective refractive index by the difference of temperature at $\lambda = 2.048a$.

5 结 论

本文利用FDTD方法, 探究了波长以及温度对于近零折射率材料的古斯汉欣位移的影响. 在只改变波长的情况下, 当波长从 $1.648a$ 从增大到 $1.848a$ 时 (不包括 $1.848a$), 其全反射角不断减小, 同时折射率为正且不断减小, 其古斯汉欣位移为正向, 数值在不断增大. 当波长从 $1.848a$ 增大到 $2.048a$ 时, 其全反射角不断变大, 但是当波长为 $1.848a$ 以及 $1.858a$ 其折射率为正, 古斯汉欣位移为正, 当波长大于 $1.948a$ 时其折射率为负, 古斯汉欣位移为负且不断变大. 当温度变化时, 在波长为 $1.648a$ 和 $1.848a$ 时, 其折射率随着温度的上升而上升. 当波

长2.048 μ m时,随着温度的上升,其折射率绝对值不断减小.三个波长下的古斯汉欣位移都是在一定区间下波动.

参考文献

- [1] Goos F, Hanchen H 1947 *Ann. Phys.* **436** 333
- [2] Seshadri S R 1988 *J. Opt. Soc. Am.* **5** 583
- [3] Tran N H, Dutriaux L, Balcou P, Floch A L, Bretenaker F 1995 *Opt. Lett.* **20** 1233
- [4] Alishahi F, Mehrany K 2010 *Opt. Lett.* **35** 1759
- [5] Fang Y T, Liu Y Z, Shen T G 2006 *Chin. Opt. Lett.* **4** 230
- [6] Soboleva I V, Moskalenko V V, Fedyanin A A 2012 *Phys. Rev. Lett.* **108** 123901
- [7] Berman P B 2002 *Phys. Rev. E* **66** 067603
- [8] Xiang Y, Dai X, Wen S 2007 *Appl. Phys. A* **87** 285
- [9] Zhou L M, Zou C L, Han Z F 2011 *Opt. Lett.* **36** 624
- [10] Lin S Y, Hietala V M, Wang L, Jones E 1996 *Opt. Lett.* **21** 1771
- [11] Joannopoulos J D, Johnson S G, Winn J N, Meade R D 2011 *Photonic Crystals: Molding the Flow of Light* (Princeton: Princeton university press) pp66–93
- [12] Notomi M 2000 *Phys. Rev. B* **62** 10696
- [13] Maigyte L, Purlys V, Trul J, Peckus M, Cojocar C, Gailevicius D, Mlinauska M, Staliuns K 2013 *Opt. Lett.* **38** 2376
- [14] Luo C, Johnson S G, Joannopoulos J D, Pendry J B 2003 *Phys. Rev. B* **68** 045115
- [15] Felbacq D, Moreau A, Smaali R 2003 *Opt. Lett.* **28** 1633
- [16] Shadrivov I V, Zharov A A, Kivshar Y S 2003 *Appl. Phys. Lett.* **83** 2713
- [17] Zhou L M, Zou C L, Han Z F, Guo G C, Sun F W 2011 *Opt. Lett.* **36** 624
- [18] Rechtsman M C, Kartashov Y V, Setzpfandt F, Trompeter H, Torner L, Pertsch T, Peschel U, Szameit A 2011 *Opt. Lett.* **36** 4446
- [19] Huang X Q, Lai Y, Hang Z H, Zheng H H, Chan C T 2011 *Nature Mater.* **10** 582
- [20] Huang X Q, Chen Z T 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 184208 (in Chinese) [黄学勤, 陈子亭 2015 物理学报 **64** 184208]
- [21] Geng T, Wu N, Dong X M, Gao X M 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 154210 (in Chinese) [耿滔, 吴娜, 董祥美, 高秀敏 2015 物理学报 **64** 154210]
- [22] Mocella V, Cabrini S, Chang A S P, Dardano P, Moretti L, Rendina I, Olynick D, Harteneck B, Dhuey S 2009 *Phys. Rev. Lett.* **102** 133902
- [23] Lin H X, Yu X N, Liu S Y 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 034203 (in Chinese) [林海笑, 俞昕宁, 刘士阳 2015 物理学报 **64** 034203]
- [24] Suchowski H, O'Brien K, Wong Z J, Salandrino A, Yin X, Zhang X 2013 *Science* **342** 1233

Goos-Hänchen shift based on nearzero-refractive-index materials

Lu Zhi-Ren Liang Bin-Ming[†] Ding Jun-Wei Chen Jia-Bi Zhuang Song-Lin

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

(Received 16 February 2016; revised manuscript received 29 May 2016)

Abstract

Goos-Hänchen shift is a special optical phenomenon. With the development of the nano-optics, Goos-Hänchen shift has become one of the most valuable and hottest issues in optical field. Meanwhile, due to the unique feature of the near-zero-refractive-index material, it has been used in many fields, but the effect of Goos-Hänchen shift has little studied and received less attention. As a result, the purpose of this paper is to analyze the Goos-Hänchen shift based on near-zero-refractive-index material. In the paper, the photonic crystal with specific parameter is used to simulate the near-zero-refractive-index material, and the measurement in the simulation is based on finite difference time domain. We approach the issue by studying whether and how the wavelength and temperature will affect the Goos-Hänchen shift based on near-zero-refractive-index material. After the simulation at different wavelengths and temperatures based on the incidence angle which gives rise to total reflection, the results of the simulation reveal that when wavelength is between $1.648a$ and $1.848a$ (not including $1.848a$), the Goos-Hänchen shift is positive and increases gradually, and the total reflection angle decreases. When wavelength is between $1.848a$ and $2.048a$, the total reflection angle increases. When the wavelength is in a range between $1.848a$ and $1.858a$, the Goos-Hänchen shift is negative. When the wavelength is above $1.858a$, the Goos-Hänchen shift is negative and increases gradually. When the temperature increases from $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, the Goos-Hänchen shift is unsimilar to the situation of different wavelengths, and fluctuates in the interval at wavelengths ranging from $1.648a$ to $1.848a$, and the total reflection angle increases gradually. Goos-Hänchen shift decreases at a wavelength of $2.048a$, and the total reflection angle decreases gradually, but a little. Based on the simulation result, it is concluded that the variations of the wavelength and temperature will affect the Goos-Hänchen shift based on near-zero-refractive-index material, and the effective value is in a range from about $1a$ to $4a$, which is not a small value to the shift especially in some precision instruments. As a result, the changes of wavelength and temperature should be taken into consideration, when Goos-Hänchen shift based on near-zero-refractive-index materials is measured or used in research. These findings are expected to be instructive for device design and nano-optics.

Keywords: Goos-Hänchen shift, zero-refractive-index materials, two-dimensional photonic crystal

PACS: 42.70.Qs, 42.25.Bs

DOI: 10.7498/aps.65.154208

[†] Corresponding author. E-mail: Liangbinming@sina.com