

文章编号:1007-2780(2013)01-0015-04

中红外波长负折射率液晶材料

李晓平^{1,2}, 贾 丹^{1,2}, 杨程亮¹, 彭增辉¹, 宣 丽^{1*}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033, E-mail:lixp86@163.com;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 在包含碳化硅核壳微球的向列相液晶中,理论计算发现在 13~13.2 μm 中红外波段范围出现了负折射率。由于强烈声子激化共振产生大的介电常数,碳化硅微球在 13.1 μm 附近产生负磁导率。通过确定壳层材料的等离子参数,获得了负折射率。电磁模拟解释了负介电常数和负磁导率产生的机理。

关 键 词: 负折射率;碳化硅;向列相液晶;中红外

中图分类号: TN27 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3788/YJYXS20132801.0015

Negative Refractive Index Liquid Crystal at Mid-Infrared Wavelength

LI Xiao-ping^{1,2}, JIA Dan^{1,2}, YANG Cheng-liang¹, PENG Zeng-hui¹, XUAN Li^{1*}

(1. *State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China, E-mail:lixp86@163.com;*
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: The negative refractive index has been demonstrated theoretically in nematic liquid crystal consisting of randomly dispersive silicon carbide (SiC) core-shell microspheres in 13~13.2 μm mid-infrared wavelength range. Due to large permittivity of SiC induced by phonon polaritonic resonance, the collections of SiC microspheres produce negative permeability near 13.1 μm . By adjusting reasonable shell parameters, negative index liquid crystal is formed. Electromagnetic simulations show the mechanism for the negative permittivity and negative permeability.

Key words: negative index; silicon carbide; nematic liquid crystal; mid-infrared

1 引 言

前苏联科学家 Veselago 首先从理论上提出负折射率概念,如果一种材料同时具有负的介电常数和负的磁导率会产生负的折射率^[1],即如果 $\epsilon < 0, \mu < 0$, 则 $n = -\sqrt{\epsilon\mu}$ 。利用具有负折射率的材料可以实现许多新奇的应用,比如超透镜^[2]和隐身设备^[3]等。2000 年,在 J. B. Pendry 建议下^[4-5],加州大学的 D. R. Smith 研究组首先在金

属线阵和开口谐振环组合的周期性人造结构中,实验上实现了微波段的负折射率材料^[6]。在光频段,在许多金属-介电组合结构中负折射率也已在实验上获得,如金属纳米条阵列和反转的介电空洞对,以及金属-介电质-金属三明治渔网结构。这些结构的电磁响应主要利用金属在可见光的负介电常数本质属性以及在金属纳米条对中反对称电流诱导的磁偶极子振荡。由于上述的负折射率材料通常需要复杂的微纳加工手段,很难获得大

收稿日期:2012-09-18; 修订日期:2012-10-30

基金项目:国家自然科学基金(No. 11174274, No. 61205021, No. 11204299, No. 11174279)

作者简介:李晓平(1986—),男,内蒙古丰镇人,博士研究生,从事液晶光学研究。

* 通信联系人, E-mail: xuanli@ciomp.ac.cn

面积的样品,一般限制在二维尺度上^[7]。虽然三维的负折射率材料已经在多层堆积的渔网结构中实现,但其仍需要极其复杂的纳米加工工艺^[8]。此外,高频的负磁导率除了在金属条对结构中实现外,理论也表明,在高介电常数纳米球或微球混合体系中也可以实现负的磁导率^[9]。在微波段的实验验证了在高介电球的负磁导率效应的准确性^[10]。如果高介电球表面覆盖一层负介电材料组成核壳结构,会实现三维负折射率材料^[11]。

本文中,利用碳化硅(SiC)在中红外波段声子共振产生的高介电常数特性,获得了在 $13.1 \mu\text{m}$ 附近的负磁导率。通过调节合理的等离子壳层材料参数,负折射率也被获得,电磁模拟阐述了负折射率的来源。

2 理 论

在中红外波长 $12.6 \mu\text{m}$ 附近, SiC 产生强烈的声子共振,在共振峰低频一端,介电常数产生极大的正值。长波近似条件下($\lambda \gg r$),在磁场的激发下, SiC 球类似于振荡的磁偶极子,在靠近共振频率可以实现负磁导率, SiC 介电常数为

$$\epsilon_{\text{SiC}} = \epsilon_{\infty} \left[1 + \frac{\omega_{\text{L}}^2 - \omega_{\text{T}}^2}{\omega_{\text{T}}^2 - \omega^2 - i\Gamma\omega} \right] \quad (1)$$

其中 $\epsilon_{\infty} = 6.7$ 为高频介电常数。 ω 为入射光角频率, $\omega_{\text{L}} = 2\pi \times 29.07 \text{ THz}$, $\omega_{\text{T}} = 2\pi \times 23.79 \text{ THz}$ 和 $\Gamma = 2\pi \times 0.1428 \text{ THz}$ 分别为纵向光学声子频率、横向光学声子频率和阻尼频率^[12]。

具有负介电常数的等离子材料常用 Drude 公式描述:

$$\epsilon_{\text{shell}} = 1 - \omega_{\text{p}}^2 / (\omega^2 + i\omega\gamma) \quad (2)$$

其中 ω_{p} 为等离子共振频率, γ 为阻尼频率。

向列相液晶(NLC)由于与其他材料良好的兼容性,宽带的透明性以及可调谐的介电常数,常用在光子器件设备中。NLC 介电常数为:

$$\epsilon_{\text{NLC}} = \frac{\epsilon_r \epsilon_o}{\epsilon_o \sin^2(\theta) + \epsilon_e \cos^2(\theta)} \quad (3)$$

其中 ϵ_o 和 ϵ_e 分别为寻常光和非寻常光介电常数, θ 为液晶分子排列和光传播方向夹角。在中红外波长范围内,忽略液晶损耗。

如图 1 所示,新的液晶材料由核壳微球随机分散到 NLC 构成。利用 Maxwell-Garnett 混合公式来描述构成的液晶材料的宏观有效介电常数和有效磁导率:

$$\epsilon_{\text{eff}} = \epsilon_{\text{NLC}} \frac{k_3^3 + j4\pi N a_1}{k_3^3 - j2\pi N a_1}$$

$$\mu_{\text{eff}} = \mu_{\text{NLC}} \frac{k_{\text{NLC}}^3 + j4\pi N b_1}{k_{\text{NLC}}^3 - j2\pi N b_1}$$

其中 ϵ_{NLC} 和 μ_{NLC} 为液晶的介电常数和磁导率, k_{NLC} 为液晶中波数, $N = 3f/4\pi r_2^3$ 为核壳球体密度(f 为核壳球在整个结构中的体积分数)。 a_1 和 b_1 分别为核壳球电场和磁场的一阶米氏散射系数,体现了电偶极子和磁偶极子振荡的强度^[11]。由于高频材料磁性的缺失,所以所有材料的磁导率均为 1,即 $\mu_1 = \mu_2 = \mu_{\text{NLC}} = 1$ 。

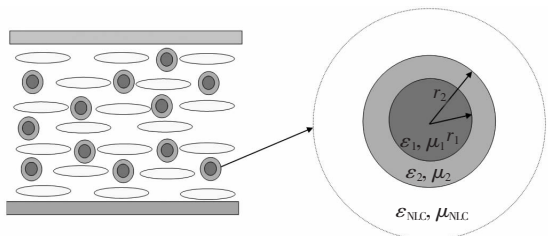


图 1 核壳结构随机分散的负折射率液晶材料

Fig. 1 Schematic diagram of negative index liquid crystal consisting of randomly dispersive core-shell microspheres

3 结果与讨论

通过参数优化,核壳球半径 $r_1 = 0.9 \mu\text{m}$, $r_2 = 0.93 \mu\text{m}$,壳层等离子材料参数 $\omega_{\text{p}} = 2\pi \times 25 \text{ THz}$ 和 $\gamma = \omega_{\text{p}}/100$ 被选择,并采用适中的体积分数 $f = 0.35$ 和 NLC 介电常数 $\epsilon_{\text{NLC}} = 2$ 。利用方程(4)(5),计算整个掺杂液晶材料的有效介电常数、磁导率和折射率,如图 2 所示。图 2(a)显示在 $13.1 \mu\text{m}$,磁导率实部 $\text{Re}(\mu_{\text{eff}})$ 呈现负值,最大约为 -0.14 。负磁导率主要来源于 SiC 在对应波长大的介电常数值,诱导了 SiC 核球强烈的磁共振产生。尽管短波长 $12.7 \mu\text{m}$ 满足共振条件, $\text{Re}(\mu_{\text{eff}}) < 0$ 却没有出现,主要由于 $12.7 \mu\text{m}$ 几乎完全靠近 SiC 的共振声子激化共振峰,总的有效 SiC 核的磁偶极子振荡被严重抑制,宏观上只表现为强烈的抗磁性 $0 < \text{Re}(\mu_{\text{eff}}) < 1$ 。因此只在窄的波长范围 $13.07 \sim 13.13 \mu\text{m}$ 实现负磁导率。

如图 2(b)所示,由于选择的壳层材料等离子共振效应, $\text{Re}(\epsilon_{\text{eff}}) < 0$ 在较宽的范围 $12.5 \sim 13.6 \mu\text{m}$ 内实现。通过公式 $n_{\text{eff}} = \sqrt{\epsilon_{\text{eff}} \mu_{\text{eff}}}$ 来计算整个

核壳液晶材料的有效折射率,如图 2(c)所示。由于整个材料是无源的,需要保证的虚部为正值来确定实部的符号。在波长 $13.1\text{ }\mu\text{m}$,最大的负折射率 -0.8 被获得。负折射率实现范围为 $13\sim 13.2\text{ }\mu\text{m}$ 。由于负折射率实现依赖于电偶极子和磁偶极子共振,整个材料的能量损耗是不可避免的。定义品质因子 $\text{FOM}=-\text{Re}(n_{\text{eff}})/\text{Im}(n_{\text{eff}})$ 来描述整个负折射率材料的能量损耗特性。如图 2(d)所示,在负折射率波段内,FOM 整体较小,在 $13.1\text{ }\mu\text{m}$ 处实现最大值 0.45 ,表明整个负折射率液晶材料中存在强烈的能量损耗。

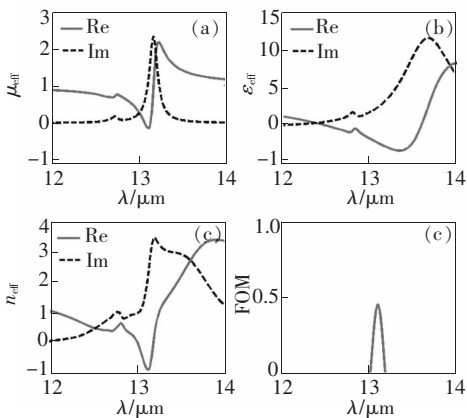


图 2 计算的负折射率液晶的电磁参数。(a)有效磁导率;(b)有效介电常数;(c)有效折射率;(d) FOM.

Fig. 2 Theoretically calculated the electromagnetic parameters of negative index liquid crystal. (a) effective permeability; (b) effective permittivity; (c) effective refractive index; (d) FOM.

为了阐述负磁导率和负介电常数的来源,利用有限元方法,模拟了分散在液晶中核壳微球的电场和磁场的分布,如图 3 所示。二维平方单元被选择进行电磁模拟。波长为 $\lambda=13.1\text{ }\mu\text{m}$ 的平面电磁波沿着 z 方向垂直入射到模拟单元。图 3 (a)清楚地表明核壳球中产生的位移电流诱导了同入射磁场反向的诱导磁场,导致了 SiC 核球中磁偶极子振荡,在宏观上表现为负磁导率。相应的,电场主要分布在壳层结构中,如图 3(b)所示。壳层中诱导的电偶极子共振是负介电常数的来源。因此,在核壳球掺杂液晶材料中,SiC 核球的

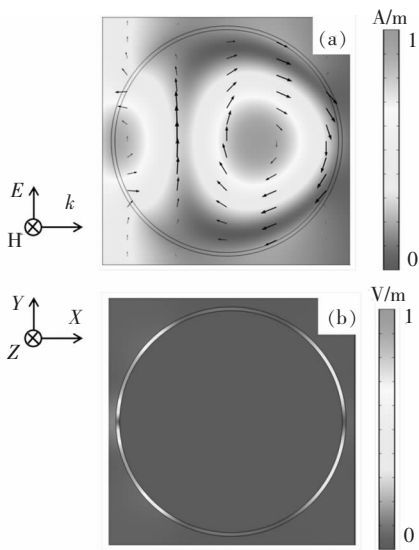


图 3 (a) 基于 SiC 的核壳球位移电流(黑色箭头方向)和归一化的磁场分布;(b)归一化的电场分布. 模拟选取的结构参数为 $r_1=0.9\text{ }\mu\text{m}$, $r_2=0.93\text{ }\mu\text{m}$, 晶格常数 $a=2\text{ }\mu\text{m}$, 周期性边界条件被采用.

Fig. 3 (a) Displacement current density (black arrows) and normalized magnetic field distribution in a SiC-shell microsphere surrounded. (b) The distribution of normalized electric field. The parameters $r_1=0.9\text{ }\mu\text{m}$, $r_2=0.93\text{ }\mu\text{m}$ and square lattice constant $a=2\text{ }\mu\text{m}$ are chosen for the simulation. The periodic boundary condition is employed.

磁偶极子振荡和壳层中电偶极子振荡的共同作用下导致了负折射率的出现。

4 结 论

利用掺杂碳化硅核壳微球的液晶材料,在中红外波长 $13\sim 13.2\text{ }\mu\text{m}$ 范围内理论上表明了负折射率。电磁仿真解释了液晶中负折射率产生的原因。上述提出的负折射率液晶由于核壳微球随机排列,可以较方便实现。其中核壳微球可以利用自主装的化学方法合成,等离子性质的壳材料可以在不同掺杂浓度的硅材料中选择。中红外波长负折射率液晶材料可以极大促进各种光器件的设计,例如中红外波长的亚波长超透镜和隐身设备的设计和制造。

参 考 文 献:

[1] Veselago V G. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ [J]. *Phys. Usp.* ,

- [1] 1968, 10(4):509-514.
- [2] Pendry J B. Negative refraction makes a perfect lens [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, 85(18):3966-3969.
- [3] Pendry J B, Schurig D, Smith D R. Controlling electromagnetic fields [J]. *Science*, 2006, 312(5781):1780-1782.
- [4] Pendry J B, Holden A J, Stewart W J, *et al.* Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1996, 76(25):4773-4776.
- [5] Pendry J B, Holden A J, Robbins D J, *et al.* Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena [J]. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, 1999, 47(11):2075-2084.
- [6] Shelby R A, Smith D R, Schultz S. Experimental verification of a negative index of refraction [J]. *Science*, 2001, 292(5514):77-79.
- [7] Shalaev V M. Optical negative-index metamaterials [J]. *Nat. Photon.*, 2007, 1(1):41-48.
- [8] Valentine J, Zhang S, Zentgraf T, *et al.* Three-dimensional optical metamaterial with a negative refractive index [J]. *Nature*, 2008, 455(7211):376-379.
- [9] Wheeler M S, Aitchison J S, Mojahedi M. Three-dimensional array of dielectric spheres with an isotropic negative permeability at infrared frequencies [J]. *Phys. Rev. B*, 2005, 72(19):193103(1-3).
- [10] Cai X, Zhu R, Hu G. Experimental study for metamaterials based on dielectric resonators and wire frame [J]. *Metamaterials*, 2008, 2(4):220-226.
- [11] Wheeler M S, Aitchison J S, Mojahedi M. Coated nonmagnetic spheres with a negative index of refraction at infrared frequencies [J]. *Phys. Rev. B*, 2006, 73(4):045105(1-3).
- [12] Edward P, Palik I. *Handbook of Optical Constants of Solids* [M]. San Diego: Academic Press, 1985.

欢迎订阅 2013 年《液晶与显示》

《液晶与显示》是中国最早创办的液晶学科专业期刊,也是中国液晶学科和显示技术领域中的惟一的综合性专业学术期刊。它由中国科学院长春光学精密机械与物理研究所、中国物理学会液晶分会和中国光学光电子行业协会液晶分会主办,科学出版社出版。

《液晶与显示》以创新性、综合性、实用性为办刊特色,内容丰富,涵盖面广,信息量大,可读性强,既是启迪科技人员开拓思路的参考期刊,又是从事液晶和显示技术与开发的广大科技人员、大专院校师生及相关领域的科技工作者进行学术交流的论坛,也是图书、情报等部门必不可少的信息来源。

《液晶与显示》为双月刊,国内定价 40.00 元,全年 240.00 元,国内外公开发行。国内邮发代号:12-203,国内读者可在当地邮局订阅;也可通过“全国非邮发报刊联合发行部”订阅(E-mail:lhzd@public.tpt.tj.cn,网址:www.lhzd.com),本刊的代号为:5074。国外读者可通过中国国际图书贸易总公司订阅(电话:010-68433171),国外发行代号:4868BM。同时,《液晶与显示》编辑部将竭诚为广大读者服务,随时办理订阅。

地 址:长春市东南湖大路 3888 号 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

《液晶与显示》编辑部

邮 编:130033

电 话:0431-86176059 0431-84613406

传 真:0431-84627061

E-mail: yjxs@ciomp.ac.cn; yjyxs@126.com

<http://www.yjyxs.com>