

文章编号: 1000-7032(2013)01-0087-05

随机介质的相干背散射与局域化研究

李 欣¹, 杨 明^{1*}, 孙宇超², 郭士亮², 李志全²

(1. 哈尔滨工业大学 控制与仿真中心, 黑龙江 哈尔滨 150080;

2. 燕山大学 电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 研究了不同尺度参数和粒子浓度下的 ZnO 随机介质相干背散射强度的分布规律, 采用时域有限差分法分析了不同浓度随机介质的光场能量空间分布, 预测了随机激光器阈值的高低。结果表明: 同一折射率的介质随着介质尺寸的增大, 相干背散射的带宽变窄, 局域化参量 kl 值相应增大, 使得局域化程度呈较大幅度减弱趋势; 并且随着介质浓度的增加, 相干背散射的带宽变宽, 局域化程度增强, 阈值降低。相干背散射有着光子局域化的先期特征, 现在已成为研究光子局域化出现与否的基本判断依据, 对研究光子局域化以及随机激光器具有重要意义。

关键词: 随机介质; 相干背散射; 局域化

中图分类号: O436

文献标识码: A

DOI: 10.3788/fgxb20133401.0087

Coherent Backscattering and Localization in Random Media

LI Xin¹, YANG Ming^{1*}, SUN Yu-chao², GUO Shi-liang², LI Zhi-quan²

(1. Control and Simulation Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China;

2. Institute of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

* Corresponding Author, E-mail: myang@hit.edu.cn

Abstract: In order to measure and research the localization of random media, coherent backscattering (CBS) from ZnO random media is investigated and spatial distribution of electric field of random particles with different concentration is obtained. We studied the distribution of coherent backscattering intensity with different size parameters and different thickness of random media. The results show that under the condition of identical refractive index, the bandwidth of coherent backscattering becomes narrower with the increase of size parameters and the decrease of the concentration. In addition, kl parameter is amplified leading to the localization level is relatively decreased. Further investigation of these issues is significant in decision of localization of light and new energy.

Key words: random media; coherent backscattering; localization

1 引 言

光子局域化是电子局域化的光子学类比, 现已被认为随机介质中激光放大辐射形成的物理

基础之一。早在 1985 年, Wolf 首先观测到了相干背散射现象^[1]。而后由于相干背散射现象具有局域化的先行特征^[2-6], 即通过介质的相干背散射可以测定光子的弱局域化, 所以其特性的研

收稿日期: 2012-08-27; 修订日期: 2012-10-31

基金项目: 国家自然科学基金(61172044); 河北省自然科学基金(F2010002002)资助项目

作者简介: 李欣(1985-), 女, 黑龙江肇东人, 博士, 主要从事随机激光、非线性光学的研究。

E-mail: lixinapple100@sina.com

究已成为了随机激光器研究中的热点问题^[7-9]。因为强光子局域化难以实现,所以相干背散射成为研究光子局域化的重要手段。其中,刘艳云等^[4]利用相干背散射法分别对石英晶体、集束式微结构光纤和双芯型微结构光纤进行了测量,采用光子局域化理论来解释探测到的微结构光纤侧向的相干现象。H. Cao 等^[7]区别于以往的研究方法,通过 FDTD 法模拟了随机介质中的相干背散射。而文献^[10]则研究了 ZnO 随机激光器中的相干散射现象,结果表明:当入射光波长和粒子的运输平均自由程相接近时,满足了光子局域化的条件,便产生了强烈的相干背散射现象。

国内外通过理论研究及实验模拟等方法已经对光子局域化做出广泛研究,但对于像散射体种类、浓度、形貌等因素对局域化会产生怎样的影响大都没有具体说明。根据以上分析,本文研究了不同尺度参数和粒子浓度的 ZnO 随机介质的相干背散射,并且与随机介质的光场能量的空间分布进行了对比,所得结论与随机增益介质的局域化性质一致。

2 光子局域化理论基础

光子局域化就是指散射介质中多重散射波的干涉效应使得光在其中的传播受到有效的抑制。当激光照射在样品表面时,部分光在穿透样品后又从入射方向离开,形成时间反演回路,形成了一对路径相同但传播方向相反的光束对,并在入射的反方向上光束产生相长干涉,从而降低了前向投射的能量,使得光子传播受到抑制,扩散能力降低,实现光子局域化。

2.1 相干背散射原理

研究结果表明光子通过多次散射可能形成一个闭合回路或闭合环,这些闭合环类似于一个环形谐振腔可以提供相干反馈。在弱局域化的情况下,背散射方向由于相长干涉而出现强度的增强,因此弱局域化也被称为相干背散射 (Coherent backscattering)。图 1 给出了相干背散射的原理图。

2.2 光子局域化程度判定

假定介质为无吸收的随机介质,用激光照射其表面,由于光的多次散射,在背散射方向上会产生一个背散射强度核,其分布轮廓为一个三角方锥。锥的宽度定义为半最大值处的全宽度 (FWHM),

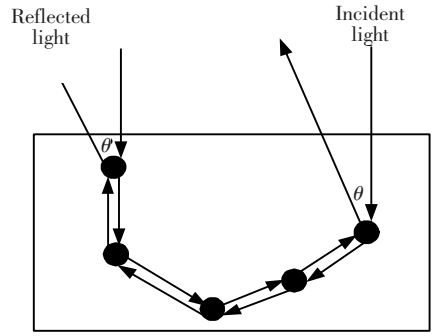


图 1 相干背散射原理图

Fig. 1 Scheme of coherent backscattering

它与光子传播 (或扩散) 平均自由程 l 、等效介质光波矢 k 、介质等效折射率 n 和表面反射系数 R 的关系为:

$$W = 0.7n_e(kl)^{-1}(1 - R), \quad (1)$$

局域化参量为:

$$kl = 0.7n_e W^{-1}(1 - R), \quad (2)$$

理想的安德森局域化条件是:

$$kl \leq 1, \quad (3)$$

式中 kl 称为局域化参量。 kl 的值较大时,锥宽比较窄,介质的局域化程度较弱; kl 的值较小时,锥宽比较宽,局域化程度较强。所以,在观察随机介质中光子局域化现象时可以通过研究其相干背散射来获得局域化信息。基于光在随机介质中的传播理论,在扩散近似下,假定粒子为无吸收、散射为弹性时,相干背散射的电场强度方程如下:

$$E = \sum_j E_j \exp(i\phi_j), \quad (4)$$

平均光强为:

$$\begin{aligned} \langle I \rangle &= \left\langle \left| \sum_j E_j \exp(i\phi_j) \right|^2 \right\rangle = \\ &= \left\langle \left| \sum_j E_j \right|^2 \right\rangle + \sum_{j \neq k} \langle E_j E_k^* \exp(i\phi_j - i\phi_k) \rangle, \end{aligned} \quad (5)$$

若只考虑单次散射路径,入射光线与反射光线经历了次数相同且方向相反的散射,其相位差为:

$$\Delta\phi = (\phi_j - \phi_k) = (\mathbf{k}_i + \mathbf{k}_i) \cdot (\mathbf{r}_n - \mathbf{r}_1), \quad (6)$$

式中入射光波矢为 \mathbf{k}_i , 出射光波矢为 \mathbf{k}_i , \mathbf{r}_1 、 \mathbf{r}_n 分别为入射光线第一次和最后一次散射的位置。当 $(\mathbf{k}_i + \mathbf{k}_i) = 0$, 即 $\theta = 0$ 时,产生的干涉强度最强,效果最好,并产生一个峰值,形成相干背散射。

通过扩散近似,相干背散射的强度^[9]可以表示为:

$$I(q) = \frac{3}{16\pi} \left[1 + 2 \frac{z_0}{l^*} + \frac{1}{(1 + ql^*)^2} \left(1 + \frac{1 - e^{2qz_0}}{ql^*} \right) \right], \tag{7}$$

式中 $q = 2\pi\theta/\lambda$, $z_0 \approx \frac{2}{3}l^*$, l^* 为平均自由程, λ 为入射波长。

3 仿真与分析

ZnO 作为制备紫外发光器件、紫外激光器等短波长光发射器件的主要候选材料, 室温下的禁带宽度为 3.37 eV, 激子束缚能高达 60 meV, 即使在室温甚至高于室温下也能实现高效的激子发射^[11-12]。本文所做的仿真采用对比的方式进行比较, 散射颗粒为尺寸相同的无吸收的球形粒子, 光子传输过程中发生的散射为弹性散射, 介质浓度设定为 18%, 相对折射率为 2.3 (ZnO), 背景材料折射率为 1, 介质颗粒半径为 r , 抽运激光波长设定为 632 nm。通过改变 r 来变化粒子的尺度参数, 并分别仿真了相干背散射的空间强度分布, 计算出局域化参量。具体参数见表 1。

表 1 粒子的尺度参数

Table 1 Size parameter of particles

粒子种类	尺度参数 ($2\pi r/\lambda$)
粒子 1	5
粒子 2	10
粒子 3	15
粒子 4	20

图 2 为尺度参数分别等于 5、10、15 和 20 时相干背散射的强度分布。通过对比可以看出随着尺度参数的增大, 相干背散射锥宽减小, 比照式(2)可知, 相应的局域化参量 kl 变大, 局域化程度变弱。

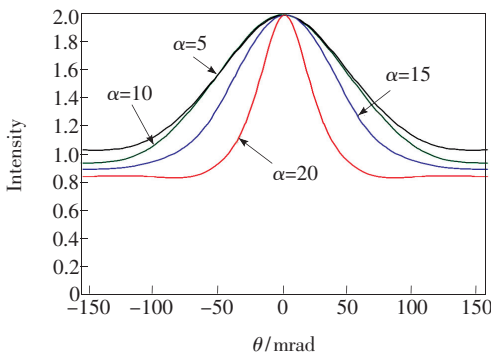


图 2 不同尺度参数下相干背散射强度的空间分布

Fig. 2 The distribution of coherent backscattering intensity with different size parameter

图 3 为相同尺寸、不同浓度小球溶液的相干背散射强度图。图中粒子尺度参数为 18, (a)、(b) 分别对应浓度为 20%、38%。由图 3 可以看出, 随着粒子浓度的增加, 相干背散射的峰值宽度变宽, 局域化程度增强。由于浓度的提高, 光在溶液中的散射次数大大增加, 加强了背散射方向的相干散射。

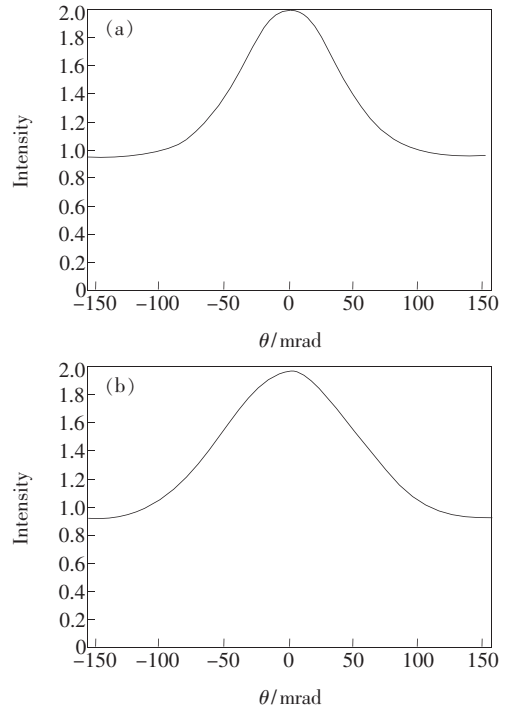


图 3 相同尺寸不同浓度的粒子的相干背散射强度。(a) 20%; (b) 38%。

Fig. 3 The distribution of coherent backscattering intensity with different thickness. (a) 20%. (b) 38%.

为了验证上述背散射理论的正确性, 用有限时域差分 (FDTD) 法^[13-14]对 ZnO 无序系统进行其光场分布的数值模拟。取 $4 \mu\text{m} \times 4 \mu\text{m}$ 的 ZnO 二维随机介质(图 4), 空间步长为 $\Delta x = \Delta y = 0.01 \mu\text{m}$,

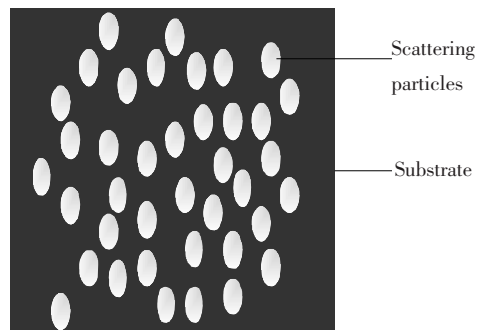


图 4 随机介质结构图

Fig. 4 A modal of 2D random media

时间步长约为 2.3×10^{-17} s, 介质浓度分别取 20%、38%, 并在介质中心位置处引入一束时域高斯脉冲的 TM 模偏振光作为激发源, 模拟系统 10 000 步。介质浓度分别为 20%、38% 时的结果分别如图 5(a)、(b) 所示。从图中可以看出, 浓

度为 38% 的无序介质的整体光强显著增大, 光与随机介质有更强的相互作用, 局域化更明显, 与图 4 中所得结果一致。随机介质中存在许多准态模, 局域化程度越弱的准态模获得的增益越小, 其阈值越高^[15]。

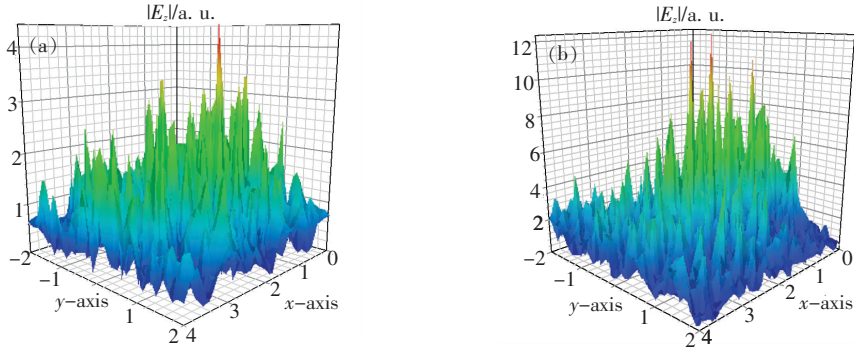


图 5 不同浓度随机介质对应的光场能量空间分布图。(a)20%;(b)38%。

Fig.5 Spatial distribution of random media with different thickness. (a)20%. (b)38%.

4 结 论

首先对 ZnO 随机介质的相干背散射进行了分析, 并且通过相干背散射对随机介质中的局域化程度进行了测定, 从而预测随机激光器的阈值高低。结果表明: 在相对折射率一定的条件下, 随着尺寸参数的增大, 相干背散射的强度变弱, 背散

射锥宽变窄, 局域化参量也随之变大, 局域化程度变弱; 随着介质浓度的增加, 相干背散射的带宽变宽, 相干背散射强度降低, 局域化程度增强, 该结果与 FDTD 法分析随机介质光场空间分布得到的结果一致。此方法可用于测量随机激光器的质量及特性, 具有一定的应用价值。

参 考 文 献:

- [1] Wolf P, Maret G. Weak localization and coherent backscattering of photons in disordered media [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1985, 55(24):2696-2699.
- [2] Sawicki J, Kastor N, Xu M. Electric field Monte Carlo simulation of coherent backscattering of polarized light by a turbid medium containing Mie scatterers [J]. *Opt. Exp.*, 2008, 16(8):5728-5738.
- [3] McAlister D F, Beck M, Clarke L, et al. Optical phase retrieval by phase-space tomography and fractional-order Fourier transforms [J]. *Opt. Lett.*, 1995, 20(10):1181-1183.
- [4] Liu Y Y, Hou L T, Li Q J, et al. Measurement of photon localization in micro-structure optical fibers using coherent back scattering [J]. *Chin. J. Lasers (中国激光)*, 2006, 33(3):343-346 (in Chinese).
- [5] Ding M, Chen K. Numerical investigation on polarization characteristics of coherent enhanced backscattering using SLP-STD [J]. *Opt. Exp.*, 2010, 18(26):27639-27649.
- [6] Carbone F, de Luca A, Barna V, et al. Coherent backscattering and dynamical light localization in liquid crystals driven throughout chaotic regimes [J]. *Opt. Exp.*, 2009, 17(16):13435-13440.
- [7] Cao H, Xu J Y, Zhang D Z, et al. Spatial confinement of laser light in active random media [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, 84(24):5584-5587.
- [8] Dlugach J M, Mishchenko M I, Liu L, et al. Numerically exact computer simulations of light scattering by densely packed, random particulate media [J]. *J. Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2011, 112(13):2068-2078.
- [9] Wolf P, Maret G, Akkermans E, et al. Coherent backscattering of light by disordered media: Analysis of the peak line shape [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1986, 56(14):1471-1474.

- [10] Sun T, Qiu Z R, Su H M, *et al.* Dynamics of random laser and coherent backscattering of light from ZnO amplifying random medium [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, 91(24):241110-1-3.
- [11] Li X P, Cao P J, Su S C, *et al.* Investigation on near band edge UV luminescence of ZnO thin films [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2012, 33(5):481-485 (in Chinese).
- [12] Liu B C, Liu C H, Sun L J, *et al.* Influence of ZnO microstructure variation on its photo electricity characteristics [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2010, 31(2):194-198 (in Chinese).
- [13] Xu J F, Bo Z Y, Bai J, *et al.* Synthetic subdomain method for large-scale integrated optical waveguides FDTD simulation [J]. *Acta Opt. Sin.* (光学学报), 2007, 27(1):5-9 (in Chinese).
- [14] Shams R, Sadeghi P. On optimization of finite-difference time-domain (FDTD) computation on heterogeneous and GPU clusters [J]. *J. Parallel and Distributed Computing*, 2011, 71(4):584-593.
- [15] Liu J S, Wang H. Influence of spatial localization on the threshold of quasi-state cavities in random lasers [J]. *Acta Phys. Sin.* (物理学报), 2004, 53(12):4224-4228 (in Chinese).

《发光学报》

——EI 核心期刊 (物理学类; 无线电电子学、电信技术类)

《发光学报》是中国物理学会发光分会与中国科学院长春光学精密机械与物理研究所共同主办的中国物理学会发光分会的学术会刊。该刊是以发光学、凝聚态物质中的激发过程为专业方向的综合性学术刊物。

《发光学报》于1980年创刊,曾于1992年,1996年,2000年和2004年连续四次被《中文核心期刊要目总览》评为“物理学类核心期刊”,并于2000年同时被评为“无线电电子学、电信技术类核心期刊”。2000年获中国科学院优秀期刊二等奖。现已被《中国学术期刊(光盘版)》、《中国期刊网》和“万方数据资源系统”等列为源期刊。英国《科学文摘》(SA)自1999年;美国《化学文摘》(CA)和俄罗斯《文摘杂志》(AJ)自2000年;美国《剑桥科学文摘社网站》自2002年;日本《科技文献速报》(CBST, JICST)自2003年已定期收录检索该刊论文;2008年被荷兰“Elsevier Bibliographic Databases”确定为源期刊;2010年被美国“EI”确定为源期刊。2001年在国家科技部组织的“中国期刊方阵”的评定中,《发光学报》被评为“双效期刊”。2002年获中国科学院2001~2002年度科学出版基金“择重”资助。2004年被选入《中国知识资源总库·中国科技精品库》。本刊内容丰富、信息量大,主要反映本学科专业领域的科研和技术成就,及时报道国内外的学术动态,开展学术讨论和交流,为提高我国该学科的学术水平服务。

《发光学报》自2011年改为月刊,A4开本,144页,国内外公开发行。国内定价:40元,全年480元,全国各地邮局均可订阅。《发光学报》欢迎广大作者、读者广为利用,踊跃投稿。

地 址:长春市东南湖大路3888号

《发光学报》编辑部

邮 编:130033

电 话:(0431)86176862, 84613407

E-mail: fgxbt@126.com

国内统一刊号: CN 22-1116/04

国际标准刊号: ISSN 1000-7032

国内邮发代号: 12-312

国外发行代号: 4863BM

http://www.fgxb.org