

文章编号:1004-4213(2010)01-0080-5

基于 Mie 散射理论的光子晶体安德森定域化研究*

张士英

(枣庄学院 物理与电子工程系, 山东 枣庄 277160)

摘 要:基于 Mie 散射理论和低浓度近似,对磷化镓光子晶体的安德森定域化进行了理论计算,并分析了影响定域化参量的各种因素.结果表明,在浓度为 10%,折射率比值大于 3.8,无吸收状态下,中红外区出现了安德森定域化现象,并且随粒子半径的增大,定域化区向长波段移动,且基质折射率的增大使定域化现象减弱.研究结果为该类晶体的定域化现象提供了理论参考.

关键词:光子晶体;安德森定域化;Mie 散射;GaP

中图分类号:O434.3, O734

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20103901.0080

0 引言

安德森定域化是指在散射介质中由于散射体的多重散射波的干涉效应,使得光在散射介质中的传播受到彻底的抑制^[1-3],而光子输运在扩散区与定域化区的转变类似于掺杂半导体中金属-绝缘体相变.近几年来,人们对二维和三维有周期结构的光子晶体中的安德森定域化进行了大量的理论与实验研究^[4-5].理论上,安德森定域化在人工结构的光子晶体中不难实现;实验上,近 20 年来只在微波区报道了公认的定域化效应,但体系的吸收很大^[6-7],同时在可见光和近红外区报道了大折射率半导体材料(GaP 和 GaAs)的相对强的定域化效应,而中红外区的研究还很少涉及.本课题组希望将安德森定域化研究扩展到红外区,因为在这一区域有独特的研究价值和材料特性方面的优势,主要体现在:1)这一区域电磁波波长从几个微米到几百微米,与样品的线度差别不大,这一尺度的样品具有优越的红外特性,适合红外材料开发与应用;2)在实际应用中有很多的红外透明基质材料,如 NaF、KBr 等,其折射率在 1.3~2 之间,并且有大量高折射率低损耗的材料,如 AlP、Ge、PbS、PbTe 等^[8];3)大量的半导体材料,如 AlP、GaP、InAs 以及 AlGaInP 等是高折射率低损耗的材料,彼此在红外区的差别不是很大,因而有广泛的实际应用,如应用于 DBR 晶体制备、微球谐振腔等.

本文以 GaP 作为散射体,假定其背景材料(基质)均为无损耗的空气,对折射率较小的 NaF 构成

的光子晶体的定域化问题进行研究,从而促进中红外区光子定域化的理论、实验与应用方面的研究.

1 理论基础

电磁波在介质内传播,当遇到非均匀区时,电磁波将被吸收和散射.在理想状态下,非均匀区可以简化成由不同材料形成的球形区,电磁波在这种介质中传播将被球形区多次吸收和散射.

介质中的波矢量为 k , l 为散射平均自由程,理想的安德森定域化条件是

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

这一条件也称为 Ioffe-regel 临界条件^[9].设 $kl = \eta$, 则定域化条件可以写为

$$\eta^{-1} \geq 1 \quad (2)$$

当散射体存在吸收时,散射截面和消光截面不相等,因而定域化参量有两个 kl_{sca} 、 kl_{ext} .则对于定域化条件也应该有两个,并期望

$$\eta_{\text{sca}}^{-1} \geq 1; \eta_{\text{ext}}^{-1} \geq 1 \quad (3)$$

当散射体无吸收时,两个参量是相等的.

由于散射体浓度较高时理论处理的方法还不成熟,对于浓度较低时, Watson 等人已经通过实验证实,在散射体的体积比为 9.6% 时,测得的定域化参量与用 Mie 散射理论计算得到的定域化参量符合的非常好^[10].

Mie 散射理论已经精确的给出球形粒子的散射截面(Q_{sca})、消光截面(Q_{ext})、吸收截面(Q_{abs})并由式(4)表示^[11]

$$\begin{aligned} Q_{\text{sca}} &= \frac{1}{|x|^2} \sum_{n=1}^{\infty} 2(2n+1) (|a_n^s|^2 + |b_n^s|^2) \\ Q_{\text{ext}} &= \frac{1}{|x|^2} \sum_{n=1}^{\infty} 2(2n+1) R_e (a_n^s + b_n^s) \\ Q_{\text{abs}} &= Q_{\text{ext}} - Q_{\text{sca}} \end{aligned} \quad (4)$$

* 山东省科技攻关项目(2007GG30004005)和山东省教育厅科技计划项目(J08LI68)资助

Tel:0632-3786765

Email:xqjwl@126.com

收稿日期:2009-02-10

修回日期:2009-03-25

式中 $x=2\pi a\hat{n}/\lambda$ 为尺寸参量, a 是粒子的半径, \hat{n} 为散射体环境(或基质)的折射率, a_n^* 、 b_n^* 为 Mie 系数. 影响 Mie 系数的因素还有相对折射率 m , 等于散射体的折射率与所处基质折射率的比值.

在低散射体浓度近似下, 散射平均自由程和消光平均自由程可由式(5)决定

$$\begin{aligned} l_{\text{sca}} &= 1/\rho\sigma_{\text{sca}}; \\ l_{\text{ext}} &= 1/\rho\sigma_{\text{ext}} \end{aligned} \quad (5)$$

式中 ρ 为散射体的密度, 即单位体积内散射体的数目, σ_{sca} 、 σ_{ext} 为散射效率和消光效率, ρ 与体积比 f 的关系为

$$f = \rho 4\pi a^3 / 3 \quad (6)$$

因此, 定域化参量可以表示为

$$\begin{aligned} \eta_{\text{sca}}^{-1} &= (3f/4)(Q_{\text{sca}}/x) \\ \eta_{\text{ext}}^{-1} &= (3f/4)/(Q_{\text{ext}}/x) \end{aligned} \quad (7)$$

当散射体和基质均为无吸收时 $\eta_{\text{sca}}^{-1} = \eta_{\text{ext}}^{-1}$.

利用这些基本理论对图 1 三维光子晶体进行了研究, 其中散射体由一个半径为 a 的高折射率半导

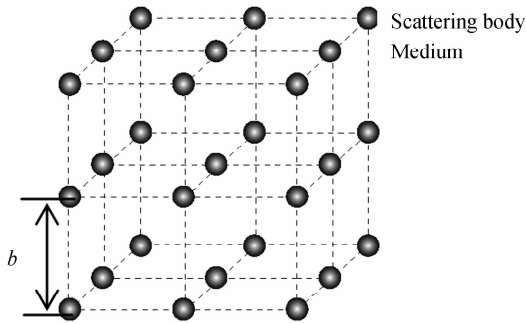


图 1 蛋白石类光子晶体的基本结构
Fig. 1 Structure of the opal photonic crystal

体材料微粒(如 GaP), 基质是折射率较低的材料(如空气、NaF 等)组成. 设晶体为一简单立方体, 散射体间距为 b , 当体积比 $f=10\%$ 时, 则有

$$f = \frac{4}{3}\pi a^3 / b^3 \quad (8)$$

此时, 晶格长度为

$$b = \sqrt[3]{\frac{4\pi}{3f}}a = 3.47a \quad (9)$$

2 结果与讨论

为了验证本文计算理论和方法的正确性且不失一般性, 本文首先研究了在散射体浓度 $f=10\%$, 相对折射率 m 分别为 2.6、3.0、3.8、4.0、5.0、6.0, 入射波长为 $30\ \mu\text{m}$ 时, 定域化参量与粒子尺寸参量的关系, 如图 2. 由于 $\eta_{\text{sca}}^{-1} \geq 1$ 是本文关心的定域化区, 从图中可以直观地看到: 当散射体折射率与所处基质折射率比值 $m \geq 3.8$, 将会出现第一个定域化区, 这与 Watson 等的结论是一致的^[10]; 当 $m \geq 6$ 以后还

会出现第二个定域化区, 在 $x=0.50$ 处定域化参量 η_{sca}^{-1} 最大值可达到 2.96. 因此, 对应的定域化参量 η_{sca} 可达到 0.34.

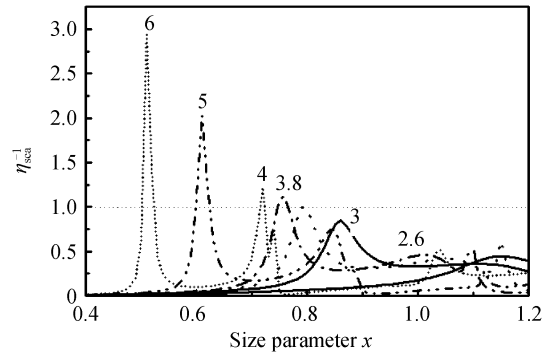


图 2 定域化参量 η_{sca}^{-1} 与尺寸参量 x 关系

Fig. 2 Relationship of η_{sca}^{-1} and size parameter x

图 3 是 GaP 在空气基质中, 相对折射率与入射波长的关系. 入射波长在 $27 \sim 35\ \mu\text{m}$ 范围内, GaP 的复折射率中的实部 n 很大 ($3.84 \sim 4.70$), 虚部(吸收系数) k 却很小(近似为 0). 这对于图 1 中所提到的发生定域化的研究相对折射率 $m \geq 3.8$ 的条件很容易满足. 在入射波长为 $30\ \mu\text{m}$ 处, 相对折射率最大.

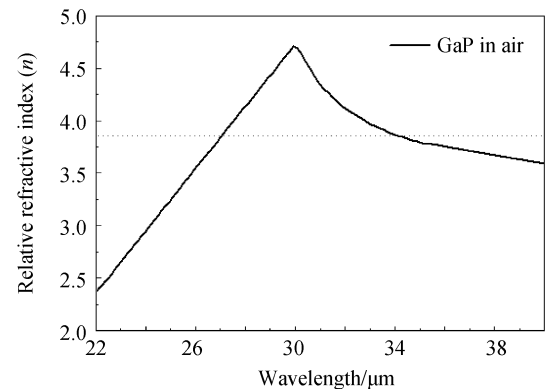


图 3 相对折射率与入射波长的关系

Fig. 3 Relationship of relative refractive index and incidence wavelength

为了证实这一点, 本文计算了固定波长下, 定域化参量 η_{sca}^{-1} 与尺寸参量 x 关系, 如图 4. 以 GaP 作为

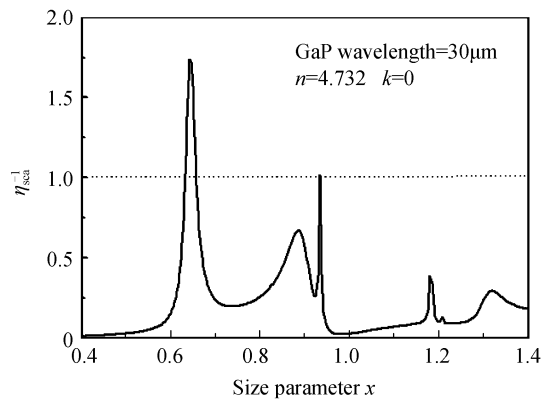


图 4 定域化参量 η_{sca}^{-1} 与尺寸参量 x 关系

Fig. 4 Relationship of η_{sca}^{-1} and x

散射体,周围的基质为空气形成的蛋白石型光子晶体,散射体浓度 $f=10\%$. 从图 4 可以看出,在 $x=0.64, 0.93$ 附近出现了两个 $\eta_{\text{sca}}^{-1} \geq 1$ 的区域,即定域化区或光子禁带区. 此时,波长为 $30 \mu\text{m}$ 的中红外光传输被截止.

图 5 是散射体粒子(GaP)半径分别为 $3, 3.5$ 和 $4 \mu\text{m}$ 时,定域化参量与入射波长的关系曲线. 由图可见在中红外波段,半径一定的情况下,GaP 光子晶体只出现一个定域化区;当半径为 $3 \mu\text{m}$ 时,定域化区是 $29.7 \mu\text{m}$;当半径是 $4 \mu\text{m}$ 时,定域化区是 $32.9 \mu\text{m}$. 显而易见,随粒子半径的增大,定域化区向长波移动. 并且定域化参量 η_{sca}^{-1} 变小.

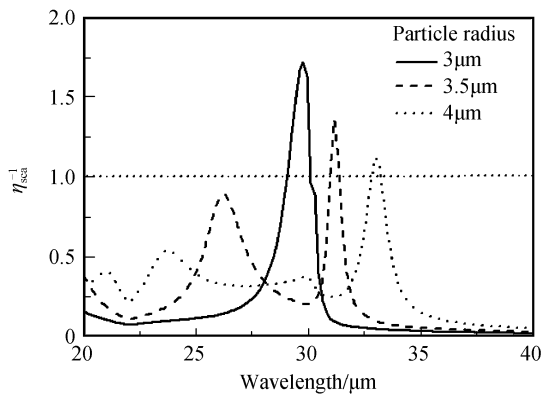


图 5 定域化参量 η_{sca}^{-1} 与入射波长的关系

Fig. 5 Relationship of η_{sca}^{-1} and wavelength

在中红外光子定域化研究中,NaF 作为基质,由于折射率相对小,适合做含常折射率电介质散射体无损介质的基质^[5]. 为了进一步验证周围基质对定域化的影响,本文计算了粒径为 $3 \mu\text{m}$ 的 GaP 分别置于空气和 NaF 介质中,定域化参量 η_{sca}^{-1} 与入射波长的关系(见图 6). 在 NaF 介质中,由于在 $30 \mu\text{m}$ 附近处仍满足 $m \geq 3.8$,所以在该处光子定域化区仍然存在,只是定域化参量比空气中的值要小.

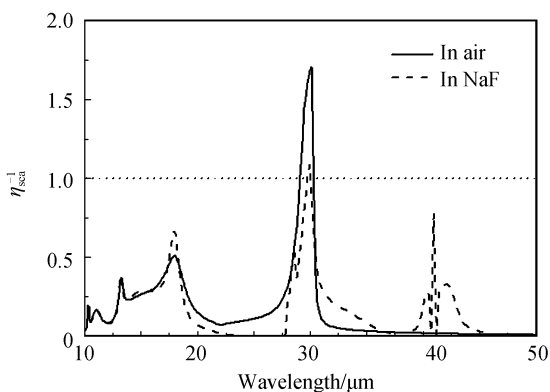


图 6 在空气中和在 NaF 基质中,定域化参量与入射波长的关系

Fig. 6 Relationship of η_{sca}^{-1} and wavelength in the mediums of air and NaF, respectively

3 结论

利用 Mie 散射理论和低浓度近似,对 GaP 光子晶体在空气和 NaF 介质中的定域化问题进行了理论研究,结果表明:

1) 当散射体浓度为 10% ,相对折射 $m \geq 3.8$ 时,在中红外区出现了理想的定域化区. 对应的尺寸参量 x 不是很高,一般在 $0.01 \sim 1$ 之间. 在这种条件下,由于多重波的干涉叠加相消,使得传输中的中红外电磁波在定域化区被抑制.

2) 周围基质对定域化现象有着重要的影响,由于基质的折射率使得散射体的散射本领减弱,导致了退定域化现象的出现.

由于散射体和基质的吸收作用,定域化参量的选择以及实验上的观测有待于进一步研究. 但本文提供的理论方法不失为研究此类光子晶体的一般方法,为实验上实现光子定域化现象提供了参考.

参考文献

- [1] SCHUURMANS F J P, MEGENS M, VANMAEKELBERGH D, *et al.* Light scattering near the localization transition in macroporous GaP networks[J]. *Phys Rev Lett*, 1999, **83**:2183-2186.
- [2] SCHUURMANS F J P, VANMAEKELBERGH D, *et al.* Strongly photonic macroporous GaP Networks[J]. *Science*, 1999, **284**:141-143.
- [3] PINHEIRO E A, MARTINEZ A S, SAMPAIO L C. New effects in light scattering in disordered media and coherent backscattering cone: systems of magnetic particles[J]. *Phys Rev Lett*, 2000, **84**:1435-1438.
- [4] WIERSMA D, BARTOLINI P, LAGENDIJK A, *et al.* Localization of light in a disordered medium[J]. *Nature*, 1997, **390**:671-673.
- [5] LIU Xiao-dong, LI Shu-guang, HOU Lan-tian, *et al.* Theoretical study on photon localization in the mid-infrared random media at low density[J]. *Acta Physica Sinica*, 2002, **51**(9):2117-2122.
刘晓东,李曙光,侯蓝田,等. 中红外低浓度无序介质的光子定域化理论研究[J]. *物理学报*, 2002, **51**(9):2117-2122.
- [6] GARCIA N, GENACK A. Anomalous photon diffusion at the threshold of the anderson localization[J]. *Phys Rev Lett*, 1991, **66**:1850-1853.
- [7] GENACK A Z, GARCIA N. Observation of photon localization in a three-dimensional disordered system[J]. *Phys Rev Lett*, 1991, **66**:2064-2067.
- [8] BASS M. Handbook of optics[M]. New York, Mc Graw-Hill, 1995.
- [9] RIVAS J G, SPRICK R, LAGENDIJK A, *et al.* Static and dynamic transport of light close to the Anderson localization transition[J]. *Phys Rev E*, 2001, **63**:1-12.

- [10] WATSON G H, FLEURY P A, MCCALL S L. Search for photon localization in the time domain[J]. *Phys Rev Lett*, 1987, **58**:945-948.
- [11] ADEN A L, KERKER M. Scattering of electromagnetic waves from concentric spheres[J]. *J Appl Phys*, 1951, **22**: 1242-1245.

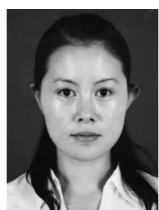
Anderson Localization of Photonic Crystal Based on Mie Scattering Theory

ZHANG Shi-ying

(Department of Physics and Electron Engineering, Zaozhuang University, Zaozhuang Shandong 277160, China)

Abstract: Based on the Mie scattering theory and the low density approximation, anderson localization of GaP photonic crystal is calculated theoretically and the factors are analyzed which influence on the anderson localization parameter. The results show that the photonic crystal of GaP has anderson localization phenomenon in middle infrared with the condition of density of 10% and the ratio of refractive index of larger than 3.8 and without the absorption. With the increase of the particle's radius, the localization area shifts to long wavelength. And, the increase of medium's refractive index makes the localization phenomenon weak, which provides theory reference to research anderson localization phenomenon of GaP photonic crystal.

Key words: Photonic crystal; Anderson localization; Mie scattering; GaP



ZHANG Shi-ying was born in 1978. She received his M. S. degree from physics college Shandong Normal University in 2008. Her research interests are in the area of photonics and technology.