

高对称型声子晶体自准直弯曲及分束

宋宗根 邓科 何兆剑 赵鹤平

Bending and splitting of self-collimated beams in high symmetry sonic crystal

Song Zong-Gen Deng Ke He Zhao-Jian Zhao He-Ping

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 094301 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.094301

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.094301>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I9>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

水下掩埋目标的散射声场计算与实验

Acoustic scattering from elastic target buried in water-sand sediment

物理学报.2016, 65(6): 064301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.064301>

声学脉冲序列及全透声机理研究

Studies on the mechanism of acoustic pulse train and full transmission

物理学报.2016, 65(6): 064302 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.064302>

次 Bjerknes 力作用下气泡的体积振动和散射声场

Volume pulsation and scattering of bubbles under the second Bjerknes force

物理学报.2016, 65(1): 014301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.014301>

管间界面特性对周向超声导波传播特性的影响

Influence of the interfacial properties on guided circumferential wave propagation in the circular tube structure

物理学报.2015, 64(22): 224301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.224301>

声脉冲法空间电荷测量系统的研究

Measurement of space charges in air based on sound pulse method

物理学报.2015, 64(16): 164301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.164301>

高对称型声子晶体自准直弯曲及分束*

宋宗根 邓科† 何兆剑 赵鹤平‡

(吉首大学物理与机电工程学院, 吉首 416000)

(2015年12月21日收到; 2016年1月20日收到修改稿)

基于二维六方晶格声子晶体的高对称性, 通过裁剪声子晶体模型, 实现声波自准直束 60° 和 120° 全反射弯曲, 证实点源声波的准直弯曲和亚波长成像. 在六方晶格声子晶体中引入线缺陷, 实现自准直束的 60° 和 120° 弯曲及分裂, 详细分析了缺陷尺寸对入射准直束的 60° (或 120°) 弯曲声束与透射声束能量分配的影响. 本文的工作可以使基于自准直效应的应用更加灵活.

关键词: 声子晶体, 自准直, 弯曲, 分裂

PACS: 43.20.+g, 43.35.+d, 43.40.+s

DOI: 10.7498/aps.65.094301

1 引言

声子晶体一般指具有弹性波禁带的周期性结构功能材料^[1,2], 由于其内部周期结构的差异, 其色散关系(能带结构)异常特殊. 利用声子晶体的特殊色散关系, 可以实现对声波的人工操控, 设计功能各异的声子晶体材料, 如声滤波器、声二极管、声成像等^[3-5]. 随着声学材料的不断发展, 功能单一的声子晶体材料已经无法满足实际需求, 于是人们提出了复合声子晶体的概念. 复合声子晶体包含多种声学材料, 从而大部分声学信号在传输过程中将会损失, 且声学信号的保真度也很低, 这严重制约了复合声子晶体功能材料的发展.

早在1999年, Kosaka等^[6]针对光学材料, 提出了自准直效应. 这种自准直效应的优点在于在信号传输过程中能量损失小, 且有一定的宽频带效应. 利用自准直效应, 人们设计出了很多有趣的光学材料^[7-9]. 类比于光波, 声波的自准直效应也得到证实^[10-13]. Chen等^[10]通过在空气中引入周期性排列的刚性圆柱, 实现了声波的准直及成像效果. 之后Shi等^[12]设计了一声复合结构, 加宽了自

准直效应的频宽. 但自准直束沿单一方向传输的局限性仍然没有得到解决. 针对这一问题, 2011年Li等^[14]设计了一个四方排列的声子晶体, 利用声子晶体的裁剪特性, 实现声波在晶体中 90° 弯曲传输. 随后Li等^[15]对该模型进行了扩展, 通过在模型中引入适当的线缺陷, 使声子晶体的自准直模式和缺陷态模式相互耦合, 通过调节耦合强度, 实现声波的大角度弯曲传输和自准直传输之间的切换与共存. 2015年, Wu等^[16]也通过设计类似的四方排列声子晶体, 实现了准自束的 90° 弯曲和分裂. 然而, 上述对自准直弯曲及分束的研究多集中在四方晶格声子晶体中(自准直波束的弯曲角度通常是由声子晶体晶格对称特性决定的), 声波能实现的弯曲角度过于单一(只能实现 90° 弯曲), 这使得基于自准直效应的应用不如基于波导的应用灵活.

相对正方晶格而言, 正六边形晶格具有更高的对称性, 其特殊的对称性能实现准直束的多角度弯曲, 从而可以大大提高准直束的灵活性. 本文基于六方晶格声子晶体模型, 通过分析其能带图及等频色散曲线, 实现对声波自准直束的 60° 和 120° 的弯曲, 及准直束 60° 和 120° 的分束设计, 力图为设计

* 国家自然科学基金(批准号: 11464012, 11304119, 11264011, 11564012, 11564013)、湖南省教育厅科学研究项目(批准号: 13A077, 13B091)和湖南省吉首大学(批准号: 14JDY040, JGY201502)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: dengke@jsu.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: phhpzhao@jsu.edu.cn

功能多、灵活性好的声学复合材料提供一定的理论指导.

2 自准直束多角度弯曲设计

本文所用模型为带有橡胶包层的钢柱按六方晶格周期性排列在水中(单个晶胞如图 1(a)), 钢柱的半径为 0.6 mm, 橡胶包层的外径为 0.65 mm, 其中晶格常数 a 取 1.5 mm. 钢的材料参数: 密度 $\rho = 7.78 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 纵波速度 $C_l = 5.09 \times 10^3 \text{ m/s}$, 横波速度 $C_t = 3.32 \times 10^3 \text{ m/s}$. 橡胶的材料参数: 密度 $\rho = 1.3 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 纵波速度 $C_l = 0.2 \times 10^3 \text{ m/s}$, 横波速度 $C_t = 0.04 \times 10^3 \text{ m/s}$. 水的材料参数: 密度 $\rho = 1 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 纵波速度 $C = 1.49 \times 10^3 \text{ m/s}$.

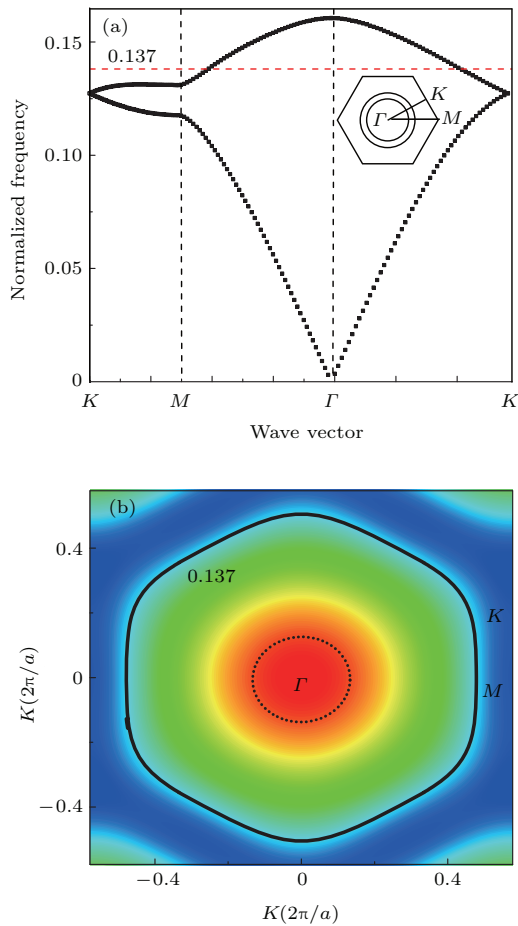


图 1 (网刊彩色) (a) 六方排列声子晶体的能带结构图; (b) 六方排列声子晶体的 EFC 图

Fig. 1. (color online) (a) Band structure of hexagonal sonical crystal; (b) equipfrequency contours of hexagonal sonical crystal.

利用有限元法和周期性边界条件, 我们计算出晶体的能带结构(图 1(a)). 本文所选的参考频率为

0.137(c/a)(其中 c/a 为归一化单位), 在图中用红色虚线标记. 图 1(b) 为晶体的等频色散曲线(EFC), 图中不同颜色代表频率高低变化, 由中心红色到边缘蓝色频率依次降低. 从图中可明显观察到, 频率在淡蓝色区域的 EFC 曲线都接近于正六边形, 本文将参考频率选定在这个区域, 如黑色实线所示. 图中黑色虚线则表示所选参考频率在水中的 EFC 形状, 显然它要比其在晶体中对应的 EFC 图小. 因而当声波(频率为 0.137)沿 $\Gamma-K$ 方向入射进声子晶体时, 其在水中任意方向的波矢及一部分衰减模式的波矢都会折射进入晶体, 并形成沿 $\Gamma-K$ 方向的自准直模式传播.

图 2 为频率取 0.1367 (c/a) 的 EFC, 图 2(a) 中黑色六边形实线为频率 0.137 (c/a) 的声波在晶体中的 EFC, 黑色虚线则表示该频率声波在水中的 EFC. 首先, 考虑两束声波 k_1 和 k_2 分别以与 $\Gamma-K$ 方向成 0° 和 30° 夹角入射声子晶体(其中晶体-水界面垂直于 $\Gamma-K$ 方向). 声波在声子晶体的折射模式满足波矢守恒定律, 即平行于入射界面的波矢分量守恒(图中黑色点虚线为波矢守恒线), 因而声波 k_1 和 k_2 将在晶体中形成折射模式 q_1 和 q_2 . 而折射波在声子晶体中传播方向与群速度 $V_g = \nabla_q[\omega(q)]$ 方向一致, 并垂直于声子晶体的 EFC 传播(如图红色实线箭头所示), 故而实现了大范围多角度的自准直传播. 其次, 考虑晶体-水界面平行 $\Gamma-M$ 方向的情况(图 2(b) 中黑色点线表示晶体-水界面). 当声波在声子晶体里传播遇到切割界面时, 通过绘制波矢 K 守恒量, 可以发现反射模式(分别由始于 Γ 的另外一组 q_1 和 q_2 表示)变成自准直模式沿着斜下方偏转, 这意味着自准直模式经过切割界面时发生了 60° 的反射. 从图 2(b) 中还可观察到, 晶体中的声波平行截面的波矢分量, 远大于水中的波矢, 这表明声波沿着截面折射进入水中后将发生衰减, 从而无法在水中传播, 这也意味着反射模式的效率会达到 100%, 从而实现全反射. 图 2(c) 为沿着 $\Gamma-K$ 方向切割声子晶体实现的 120° 全反射, 其与上述 60° 全反射完全类似.

另外需要指出的是, 图 2 中绿色箭头表示水中衰减模式 k_3 , 由于波矢 EFC 的特定形状, 上述对 k_1 和 k_2 的分析同样适用于 k_3 . 事实上, 对入射声波在 $[-k_3, k_3]$ 的所有模式, 在晶体里都会形成相同的群速度 V_g , 产生同样方向的自准直模式, 经过沿特定方向裁剪的截面都会产生相应的全反射现象. 发生

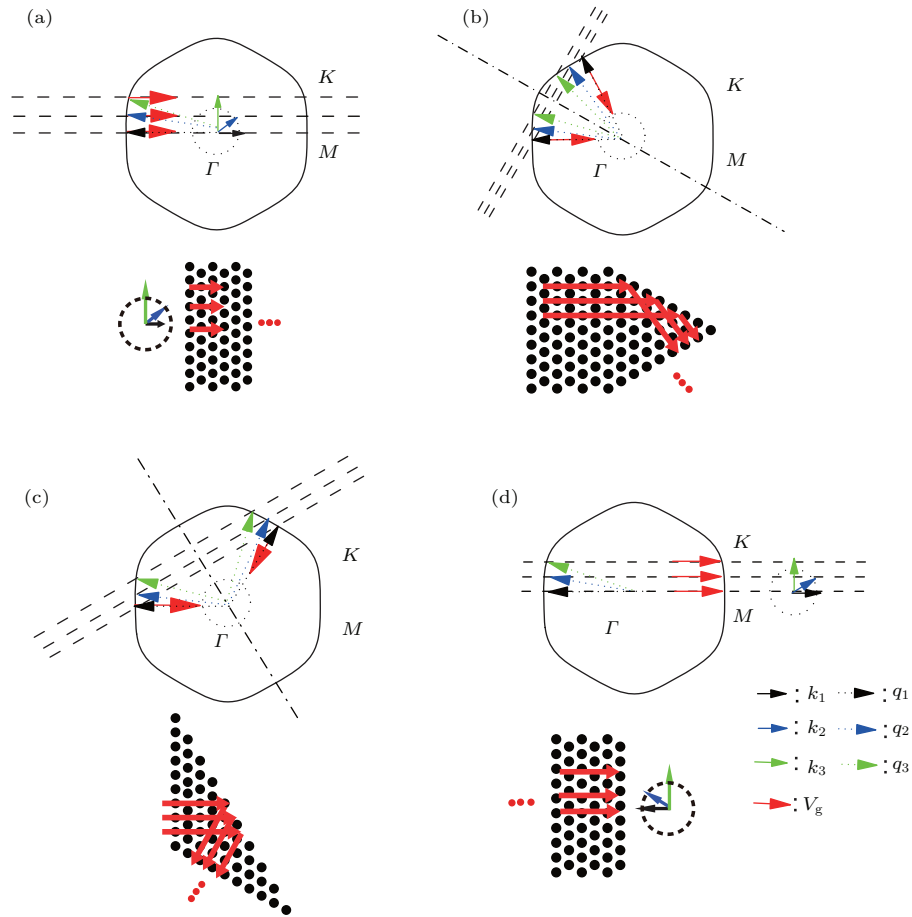


图2 (网刊彩色) (a) 三种不同方向的入射声波, 在晶体中激发准直模式及传播方向; (b) 沿 $\Gamma-M$ 方向切割晶体实现准直束的 60° 弯曲; (c) 沿 $\Gamma-K$ 方向切割晶体实现准直束的 120° 弯曲; (d) 自准直模式出射
 Fig. 2. (color online) (a) The excited self-collimated mode and direction in sonic crystal; (b) 60° -bending of self-collimated beams in SC at a $\Gamma-M$ directed interface. (c) 120° -bending of self-collimated beams in SC at a $\Gamma-K$ directed interface; (d) the output self-collimated beams.

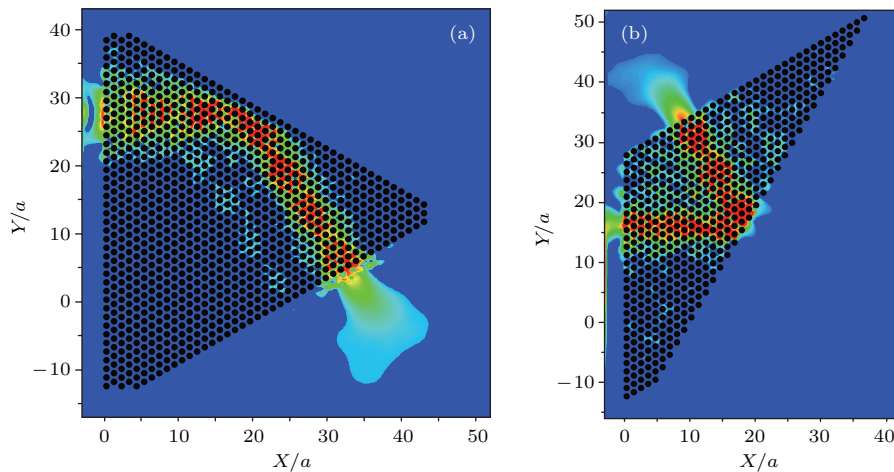


图3 (网刊彩色) (a) 60° 弯曲绝对声压场图; (b) 120° 弯曲绝对声压场图

Fig. 3. (color online) The acoustic pressure field of (a) 60° -bending and (b) 120° -bending.

反射之后, 这些自准直波在另一个出口处形成和声源一样的模式, 如图2(d). 当一点源声波入射声子晶体时, 由于大量衰减模式也会进入晶体并经历

相同的传播, 故其在出口处形成的像具有亚波长细节.

为证明上述分析, 我们用有限元法进行模拟,

图3为60°和120°自准直束弯曲的绝对声压场图(平面波从左至右沿着 $\Gamma-K$ 方向入射).从图中可以看出,声波在晶体中以自准直模式传播,经过特定截面后发生全反射,从而实现了自准直束的60°和120°弯曲.

从上述分析中还可看出,利用六方晶格的高对称性可以同时实现60°和120°弯曲压波长成像.这

里以图4进行说明.图4(a)和图4(c)为点源经过60°和120°弯曲后亚波长成像的声压场图,图4(b)和图4(d)分别为60°和120°像点处的压强透射曲线分布.从图中可以看出,60°和120°点源透射曲线的峰值出现在对应像点位置,60°和120°点源透射峰的半高全宽长度分别约为 $0.38\lambda_0$ 和 $0.34\lambda_0$,这说明像点处呈现的是亚波长成像.

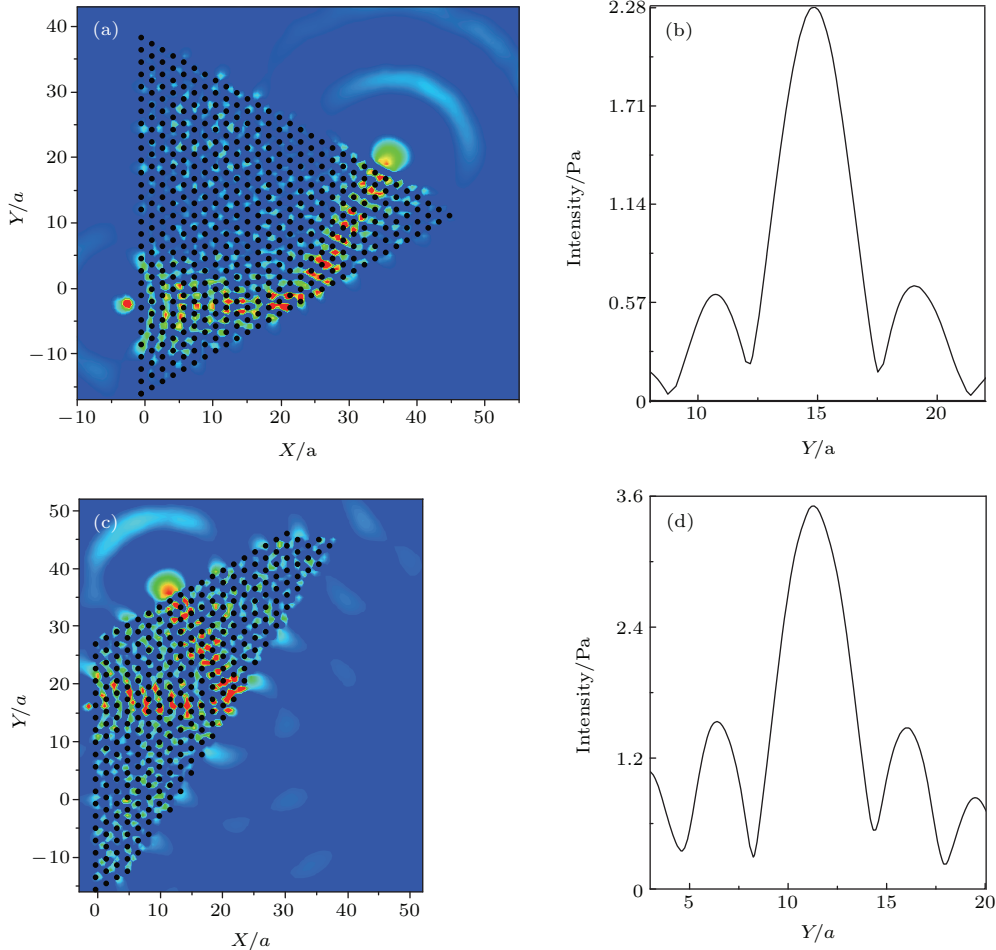


图4 (网刊彩色) (a), (c) 点源的60°和120°弯曲亚波长成像声压图; (b), (d) 像点处的声压分布曲线
 Fig. 4. (color online) (a), (c) 60°-bended and 120°-bended subwavelength imaging for a point source; (b), (d) the pressure distribution curve at the image point.

3 自准直的分束

为使自准直束的应用更广泛,我们通过切割并移动声子晶体形成线缺陷,以实现自准直束的分束.由于六方晶格的高对称性,我们通过沿不同方向引入线缺陷,能实现不同的分束效果,这使得基于自准直的应用更灵活.

图5(a)和图5(b)为引入线缺陷实现的自准直

束弯曲和分束的绝对声压场图,图5(a)线缺陷方向为沿着 $\Gamma-K$ 方向,实现了60°分束效果;图5(b)线缺陷方向为沿着 $\Gamma-M$ 方向,实现了120°分束效果.图5(c)和图5(d)中分别计算了弯曲声束和透射声束的透射率随缺陷距离 d (没有缺陷时 d 为0)的变化关系.从图中可以看出,随着 d 的逐渐增大,60°和120°弯曲声束的透射率都逐渐增大,透射声束的透射率则逐渐减小.

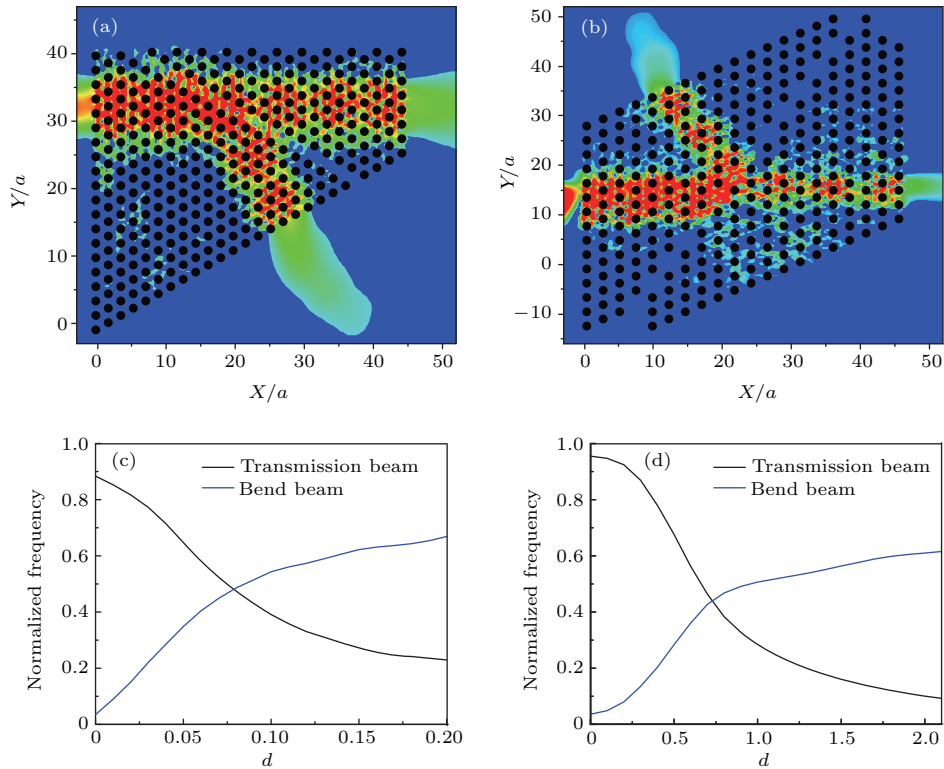


图5 (网刊彩色) (a), (b) 引入缺陷后的 60° 和 120° 弯曲声束和透射声束声压场图; (c), (d) 分别为不同缺陷距离的弯曲声束和透射声束的透射率分布图

Fig. 5. (color online) (a), (b) The pressure field distribution for bend and transmission with introduced line defects; (c), (d) the transmittance of bend and transmission with the change of the distance.

为更好地解释上述现象, 我们计算了缺陷沿着 $\Gamma-K$ 方向 (60° 自准直分束) 的投影带结构 (图6). 其中, 阴影部分为完整晶体在没有缺陷时沿 $\Gamma-K$ 方向的投影带结构, 不同颜色的实线代表不同缺陷距离 d 的缺陷带结构. 根据前面的讨论, 当自准直波传输到剪切面时会发生反射; 而由于缺陷的存在, 自准直波会与缺陷态模式产生耦合, 从而通过缺陷进入晶体中继续做自准直传播.

下面我们讨论缺陷态模式对声波能量分配的调节效应. 把自准直模式分解成两部分, 一部分为平行缺陷方向的波矢, 记为 $q_{0//}$, 另一部分为垂直缺陷方向的波矢. 当频率为 $0.137(c/a)$ 的声波沿 $\Gamma-K$ 方向入射进声子晶体, 其波矢在缺陷方向的分量为 0.42 (图6中用竖直线表示). 由图6可看出, 当缺陷态能带的平行分量 (缺陷带与 0.137 频率的交点) 越接近 $q_{0//}$ 时 (即缺陷减小时), 声波就越能通过缺陷继续传播, 而通过剪切面反射的能量就会越低, 反之亦然. 换句话说, 当缺陷增大时, 分配到弯曲方向上的能量就会增加; 当缺陷减小时, 分配到透射方向上的能量同样会增加. 这与图5(c) 中透射率曲线随距离变化的规律完全一致. 由此, 引

用线缺陷, 我们通过调节缺陷距离实现了自准直束的分束效果. 120° 自准直束的分束与 60° 自准直束分束类似, 这里不再讨论.

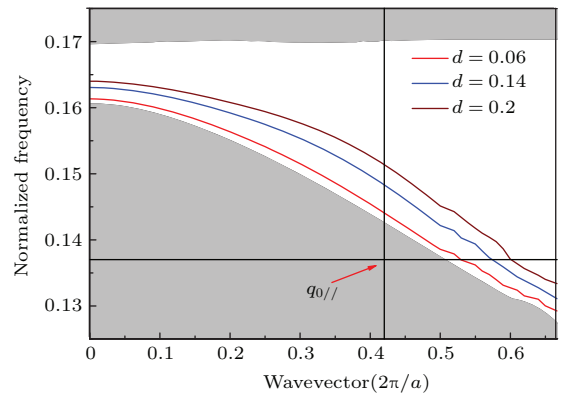


图6 (网刊彩色) 声子晶体沿着 $\Gamma-K$ 的投影带结构及缺陷带结构图

Fig. 6. (color online) Band diagrams for SCs with $\Gamma-K$ derationed lin-defects of different sizes d .

4 结束语

本文以六方晶格排列的声子晶体为模型, 分析其EFC特性, 实现了声波的自准直效应. 通过沿特定方向切割声子晶体, 实现了大角度范围入射的

声平面波的 60° 和 120° 弯曲,证实了点源的 60° 和 120° 弯曲亚波长成像.通过引入线缺陷,实现了自准直束的分束,详细分析了两分束声波透射率与缺陷距离的关系.本文的研究结果可以提高自准直束的灵活性,从而可以为自准直束更多角度的弯曲分束和多功能声学材料的设计提供了一定的理论指导.

参考文献

- [1] Sigalas M M, Economou E N 1992 *J. Sound Vib.* **158** 377
- [2] Kushwaha M S, Halevi P, Dobrzynski L, Djafari R B 1993 *Phys. Rev. Lett.* **71** 2022
- [3] Qiu C Y, Liu Z Y, Mei J, Shi J 2005 *Appl. Phys. Lett.* **87** 104101
- [4] Li X F, Ni X, Feng L, Lu M H, He C, Chen Y F 2011 *Phys. Rev. Lett.* **106** 084301
- [5] Qiu C Y, Zhang X D, Liu Z Y 2005 *Phys. Rev. B* **71** 054302
- [6] Kosaka H, Kawashima T, Tomita A, Notomi M, Tamamura T, Sato T, Kawakami S 1999 *Appl. Phys. Lett.* **74** 1370
- [7] Li Y Y, Gu P F, Li M Y, Zhang J L, Liu X 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 2596 (in Chinese) [厉以宇, 顾培夫, 李明宇, 张锦龙, 刘旭 2006 物理学报 **55** 2596]
- [8] Feng S, Ren C, Wang W Z, Wang Y Q 2012 *Chin. Phys. B* **21** 114212
- [9] Wu Z H, Xie K, Yang H J, Jiang P, He X J 2012 *J. Opt.* **14** 015002
- [10] Chen L S, Kuo C H, Ye Z 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 1072
- [11] Perez-Arjona I, Sanchez-Morcillo V J, Redondo J, Espinosa V, Staliunas K 2007 *Phys. Rev. B* **75** 014304
- [12] Shi J, Lin S, Huang P H 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 111901
- [13] Soliveres E, Espinosa V, Perez-Arjona I, Sanchez-Morcillo V J, Staliunas K 2009 *Appl. Phys. Lett.* **94** 164101
- [14] Li B, Deng K, He Z J 2011 *Appl. Phys. Lett.* **99** 051908
- [15] Li B, Guan J J, Deng K, Zhao H P 2012 *J. Appl. Phys.* **112** 124514
- [16] Li J, Wu F G, Zhong H L, Yao Y W, Zhang X 2015 *J. Appl. Phys.* **118** 144903

Bending and splitting of self-collimated beams in high symmetry sonic crystal*

Song Zong-Gen Deng Ke[†] He Zhao-Jian Zhao He-Ping[‡]

(College of Physics and Mechanical & Electrical Engineering, Jishou University, Jishou 416000, China)

(Received 21 December 2015; revised manuscript received 20 January 2016)

Abstract

Self-collimation, a peculiar effect that allows acoustic signals to propagate in sonic crystals (SCs) along a definite direction with almost no diffraction, possesses a promising prospect in integrated acoustics as it provides an effective way to transmit acoustic signals between on-chip functionalities. There exists, however, the intrinsic inability of self-collimation to efficiently bend and split acoustic signals. Most of existing schemes for bending and splitting of self-collimated acoustic beams are based on SC of square lattice, thus their bending and splitting angles are restricted to 90° . In this paper, the finite element method is used to investigate self-collimation of acoustic beams in an SC of hexagonal lattice. It is shown that 60° and 120° bending of self-collimated acoustic waves can be simultaneously realized by simply truncating the two-dimensional hexagonal SC. Bended imaging for a point source with a subwavelength resolution of $0.38\lambda_0$ can also be realized by truncating the SC structure. In addition, a scheme for 60° and 120° splitting of self-collimated acoustic waves is also proposed by introducing line-defects into the hexagonal SC. It is demonstrated that an incoming self-collimated beam can be split into a 60° (or 120° bended one and a transmitted one, with the power ratio adjusted by the value of defect size. We believe that this hexagonal-SC-based bending and splitting mechanism will offer more flexibilities to the beam control in the design of acoustic devices and will be useful in integrated acoustic applications.

Keywords: sonic crystals, self-collimation, bending, splitting

PACS: 43.20.+g, 43.35.+d, 43.40.+s

DOI: 10.7498/aps.65.094301

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11464012, 11304119, 11264011, 11564012, 11564013), the Natural Science Foundation of Education Department of Hunan Province, China (Grant Nos. 13B091, 13A077), and the Foundation of Jishou University, China (Grant Nos. 14JDY040, JGY201502).

[†] Corresponding author. E-mail: dengke@jsu.edu.cn

[‡] Corresponding author. E-mail: phhpzhao@jsu.edu.cn