

## 离子型声子晶体的光学性质\*

陆延青 朱永元 陈延峰 祝世宁 闵乃本

(南京大学固体微结构物理国家重点实验室 南京 210093)

冯一军

(南京大学电子科学与工程系 南京 210093)

**摘要** 提出了离子型声子晶体的概念,发展了相应的理论;在实验上证实了离子型声子晶体中存在超晶格振动与电磁波的强烈耦合,观察到原先存在于离子晶体中的极化激元等长波光波行为;预言了一些可能的物理效应.离子型声子晶体中超晶格振动和电磁波的耦合方程与黄昆方程在形式上完全一致,说明了超晶格与实际晶格在物理上的相似性.

**关键词** 离子型声子晶体,介电超晶格,光学性质,耦合效应

## OPTICAL PROPERTIES OF AN IONIC-TYPE PHONONIC CRYSTAL

LU Yan-Qing ZHU Yong-Yuan CHEN Yan-Feng ZHU Shi-Ning MIN Nai-Ben

(National Laboratory of Solid State Microstructures, Nanjing University, Nanjing 210093)

FENG Yi-Jun

(Department of Electronic Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093)

**Abstract** An ionic-type phononic crystal (ITPC) composed of two piezoelectric media aligned periodically in a superlattice structure was studied theoretically and experimentally. Because of the coupling between vibrations of the superlattice and the electromagnetic waves, various long-wavelength optical properties including microwave absorption and polariton modes that are related to ionic crystals were found in the ITPC. The fundamental equations that describe the coupling of the superlattice vibration and electromagnetic field are of the same type as Huang's equations, which means that the artificial crystal structure can be used to simulate microscopic physical processes in real crystals.

**Key words** ionic-type phononic crystal, dielectric superlattice, optical properties, coupling effects

半导体超晶格、量子阱等相关材料和器件的成功应用,使能带论突破了以固有材料为研究对象的局限,进入了通过能带设计与剪裁来模拟实际晶格以获得新型人工微结构材料 and 器件的新阶段.同样地,人们也在设想通过在更大尺度上的微结构调制并选择不同的调制对象以获得其他的新效应.介电超晶格材料就是一个例子.在介电超晶格中,介电体的物性常数在微米尺度内受到人工调制,形成超晶格结构,从而对介电体中的许多重要的物理过程产生了影响.具体地说,如果调制的对象是介电常数,这种介电超晶格称为光子晶体.与电子在晶格周期势中一样,光在这种周期介电常数的介质中也可形成能带结构,分裂成导带和禁带<sup>[1]</sup>.光子晶体可用以抑制自发辐射、控制光的传播路径、构造新型的微

腔激光器,因而引起了人们的广泛研究兴趣.在介电超晶格中,如果调制的对象是非线性光学系数,则称为准位相匹配材料<sup>[2]</sup>;而如果是材料的弹性性质受到周期性的调制,则形成声子晶体,同样可以产生声的带结构.只有位于导带的声波才能在材料中传播<sup>[3]</sup>.这些性质在新型的超声换能器、振荡器等方面有重要的应用价值,因而声子晶体的研究也正日趋成为一个热门研究课题.

声子晶体、光子晶体等超晶格材料的出现,提供了一种利用人工微结构材料来模拟和对应地研究实

\* 国家基础研究重大发展规划项目、国家自然科学基金资助项目、国家“八六三”计划新材料领域项目

1999-09-21 收到初稿,1999-11-05 修回

实际晶体中微观过程的方法,使得人们能够更加方便地研究结构与物性之间的内在关系.在实际晶体中,电子、声子、光子等同时存在,而且它们之间还存在着强烈的耦合,比如讲,在离子晶体中,由于晶格振动与电磁波之间存在着强烈的耦合,从而导致了红外吸收、极化激元等长波光学行为.自然地,人们会设想这样的耦合物理过程是否也存在于介电超晶格材料中.这样的问题显然具有重要的基础研究意义和应用前景.

我们最近的研究结果对这个问题作了一个肯定的回答<sup>[4]</sup>.我们提出了“离子型声子晶体”的新概念,对这种材料中的耦合物理过程进行了初步的理论和实验研究.

“离子型声子晶体”是基于声子晶体的概念而提出的.我们知道,计算声子晶体的色散关系已有平面波展开、转移矩阵等有效方法.然而,对一维声子晶体而言,我们还可以通过其与一维原子链的对应而找到一个更为简单的方法:把一维声子晶体视为一个一维质点弹簧系统,即把质量等效集中于界面处(即弹性常数跃变处),相邻质点之间连以一等效的弹簧,弹簧的等效力学常数的选取应保证组成声子晶体的每一个单元基本频率不变.显然,这样的等效使得系统自由度大为减少,但却保留了周期性和基本频率的不变.简单地套用固体物理中一维双原子链的结果,就可以同样方便地得到一维声子晶体的色散关系.对比结果表明,其主要结论与其他方法的结果是一致的.

既然一维声子晶体可以等效于一维双原子链,就可以假设存在一种自发极化首尾相连的同种或异种铁电畴组成的声子晶体.同样,畴界处可以视为一等效质点.然而,这种带电荷的畴界又使得畴界处不但可视为质量的中心,而且又可视为电荷中心.这就使这种材料在物理图像上十分类似于离子晶体中由异性相邻离子组成的离子链.因此,我们称这种材料为“离子型声子晶体”.

在离子型声子晶体中,异性相邻“离子”(即异性相邻铁电畴)形成电偶极子.与离子晶体中的正负离子一样,同样可与电磁波发生相互作用而产生超晶格与电磁波的耦合.可以预想,在离子型声子晶体中的超晶格振动与电磁波的耦合,也同样会带来新颖的物理性质.由于离子型声子晶体和实际离子晶体在物理图像上的相似性,我们可以仿照离子晶体中反映晶格与电磁波耦合运动的著名的黄昆方程<sup>[5]</sup>,写出超晶格与电磁波的耦合方程:

$$\begin{cases} \ddot{W} = b_{11} W + b_{12} E \\ P = b_{21} W + b_{22} E \end{cases},$$

式中  $W$  代表正负“离子”的相对运动,  $E$  是外电场,  $P$  是由于外电场及异性相邻“离子”相对运动造成的电极化.  $b_{11}, b_{12}, b_{21}, b_{22}$  是待定系数,它们与超晶格和电磁波的相互作用的具体机制有关.这里必须说明的是,虽然假设材料由铁电体构成,从而将带电畴界等效为正负“离子”,可以使我们方便地建立起离子型声子晶体的物理图像,但是超晶格与电磁波相互耦合的物理本质却是压电效应.也就是说,即使是由不具有自发极化的普通压电材料构成的超晶格,也会存在着电磁波与超晶格的耦合,所以“离子型声子晶体”的概念实际上可以由铁电材料推广到一般压电材料构成的超晶格.

为方便总结出主要物理规律,我们选择了一种最为简单的离子型声子晶体作为研究对象.假设组成离子型声子晶体的两种材料具有同样的厚度和弹性性质,两者的区别仅在于压电系数异号.这可由前面所述的自发极化头尾相连的铁电体超晶格组成.作这样的简化使得我们能够清晰地研究由于超晶格振动与电磁波的耦合带来的新物理效应.

基于压电方程,在长波近似条件下,将离子型声子晶体等效成一维质点链.我们得到了不同压电材料的界面(对铁电体即为畴界)相对运动的方程:

$$\begin{cases} \ddot{W} = -\frac{\pi^2 v^2}{l^2} W + \frac{2e}{\sqrt{d}} E \\ P = \frac{2e}{\sqrt{d}} W + \epsilon_0(\epsilon - 1) E \end{cases}.$$

显然,这与黄昆方程在形式上完全一致.于是可定出黄昆方程中的各项待定系数.这样,我们就得到了离子型声子晶体中超晶格与电磁波相互耦合的基本运动方程.它与黄昆方程在形式上的完全一致,不但说明了超晶格与晶格的对应性,也表明压电方程与黄昆方程之间有着密切的联系.

基于以上方程,与研究离子晶体的长光学波性质一样,我们可以方便地研究离子型声子晶体的光学性质.理论结果表明,与离子晶体一样,离子型声子晶体中横振动与纵振动频率同样满足 LST 关系,并同样存在着电磁波(微波)吸收、介电反常、极化激元等物理性质.这就大大拓宽了这些熟知的物理概念的适用范围,揭示了超晶格与晶格在物理本质上的相似性.

为验证以上结论,我们利用旋转性生长条纹法通过晶体生长制备了一块由铈酸锂构成的周期为

7.2 $\mu\text{m}$ 的离子型声子晶体.我们仔细研究了该样品在微波波段的光学性质,在实验中观测到材料在502 MHz处存在着强烈的微波吸收,与理论值500 MHz十分接近,这正对应着离子晶体中的红外吸收.此外,我们还测量了材料的微波介电常数(如图1所示).由于介电常数与色散关系之间可以相互换算,而实验结果与理论预言吻合,这就从实验上证

实了离子型声子晶体中确实存在着极化激元等长波光学行为.

当然,离子型声子晶体的研究不但有基础研究意义,同样具有重要的应用前景.根据其长波光学性质,可望开发出一些新型微波器件和声学器件,而且,基于离子型声子晶体与实际晶格的相似性,可以预言,离子型声子晶体中也可能存在微波波段的拉曼散射、布里渊散射等效应,这些都值得人们进一步的研究与探索.此外,除了晶格与电磁波的耦合,实际晶体中还存在着大量的其他各种耦合效应和集体激发.这些都有可能在声子晶体、光子晶体等介电超晶格材料中找到对应的物理过程.而由于超晶格结构的可控性,这些结果又可以反过来给实际晶体的研究以借鉴作用.当然,不同的物理系统和不同的结构层次之间除了对应即相似的一面外,也必然存在着不能对应即相异的一面,也就是说,声子晶体、光子晶体和实际晶体之间有关联,又具有各自的特殊性,这又为探索某些物性的本质以及尺度对物理规律的影响提供了方便的途径.总之,可以预言,对介电超晶格材料中的物理效应,特别是各种耦合物理过程的研究,必将成为凝聚态物理学、材料科学和光电子技术领域的一个极富基础研究意义与应用价值的新热点.

#### 参 考 文 献

- [ 1 ] Yablonovitch E. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, 58:2059—2062
- [ 2 ] Zhu S N, Zhu Y Y, Ming N B. *Science*, 1997, 278:843—846
- [ 3 ] Montero de Espinosa F R, Jimenez E, Torres M. *Phys. Rev. Lett.*, 1998, 80:1208—1211
- [ 4 ] Lu Y Q, Zhu Y Y, Chen Y F *et al.* *Science*, 1999, 284:1822—1824
- [ 5 ] Born M, Huang K. *Dynamical Theory of Crystal Lattices*. Oxford: Oxford University, 1954.

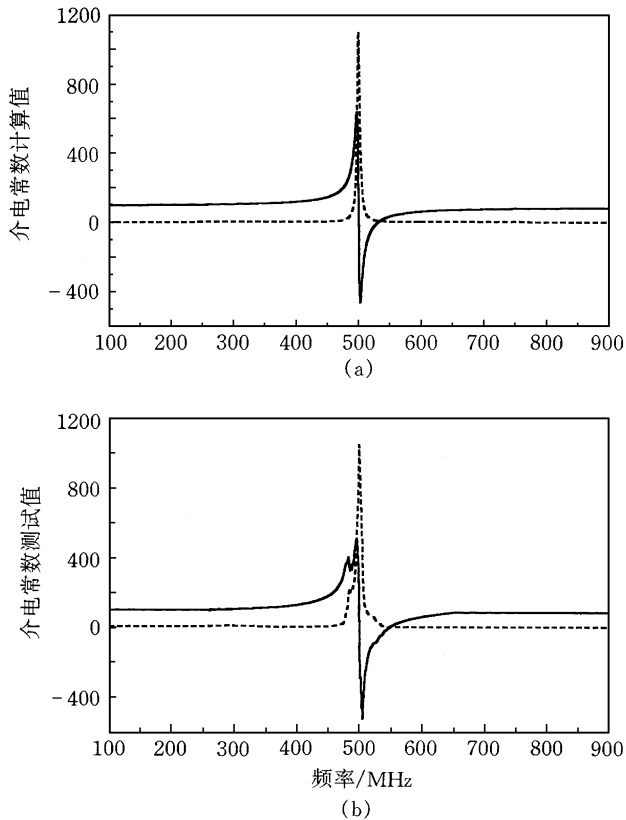


图1 一个周期为7.2 $\mu\text{m}$ 的铌酸锂离子型声子晶体的介电常数曲线  
(a)计算结果; (b)实验测量结果  
(实线对应实部;虚线对应虚部)

### 封 面 说 明

图示为钙钛矿结构磁电阻材料( $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x$ ) $\text{MnO}_3$  ( $x \geq 0.5$ )薄膜的表面形貌原子力显微镜像。在一定生长条件下,薄膜的表面形成由具特殊微结构的条纹相互正交构成的有序自组织结构。其特征是:条纹自由长度在微米至几十微米范围可控;条纹宽度可以控制在几十至几百纳米;由条纹的结构特征可调节薄膜表面的颗粒分布;这种有序结构可导致无磁电阻的反铁磁绝缘体( $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x$ ) $\text{MnO}_3$  ( $x \geq 0.5$ )薄膜在低磁场下具超大磁电阻效应。这一特性可用载流子穿越条纹的自旋隧道效应解释。

(中国科学院物理研究所 赵柏儒)