

多光束相干制作光子晶体

张道中

(中国科学院物理研究所, 100080)



如今,以微电子技术和器件为基础的电子设备,像计算机、通讯器材、电视机等,已深入人们日常生活和工作的各个领域,极大地推动了人类文明的发展。而

在人类即将步入 21 世纪之际,国内外一批科学家已着手研究新一代的光子器件,寻找光子的“半导体材料”。由于光子是以光速运动的粒子,一旦产生了以光子在光子晶体材料中运动规律为基础的光子器件,则可以预期,其将具有比通常的电子器件更高的运行速度及另外一些新特点,从而为光计算机等设备的问世奠定基础。

一、何为光子晶体

光子晶体是指具有光子能带及能隙的一类新型材料,其典型结构是一个折射率周期变化的三维物体,周期变化的距离为光波长的量级。当折射率的变化程度达到比值大于 2 时,这种结构会出现光子的能带。

什么是光子的能带呢?这可从电子与光子的类比来说明。从波粒二象性观点看,光子与电子都具有波动性。由电子的能带理论知道,当单个电子在一个等效的周期性势场中运动时,电子的波函数满足薛定谔方程,即

$$\left[-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(r) \right] \psi = E\psi$$

其中位势 $V(r)$ 是周期性的,即

$$V(r) = V(r + R_n)$$

R_n 为晶格矢量。

另一方面,一束频率为 ω 的光在介电常数作周期性变化的介质中传播时,设变化的周期为 R'_n ,则介电常数与位矢的关系可表示为

$$\epsilon(r) = \epsilon_0 + \epsilon_1(r)$$

$$\epsilon_1(r) = \epsilon_1(r + R'_n)$$

其中 ϵ_0 是介质的平均介电常数,为一常数。可以证明在这种介质中电磁波的电矢量满足的麦克斯韦方程可写成

$$-\nabla^2 \mathbf{E} + \nabla(\nabla \cdot \mathbf{E})$$

$$= -\frac{\omega^2}{c^2} \epsilon_1(r) \mathbf{E} = \frac{\omega^2}{c^2} \epsilon_0 \mathbf{E}$$

显然,这个方程与上述的电子波动方程有某种相似性,只要作如下的类比:

$$\frac{\omega^2}{c^2} \epsilon_1(r) \sim V(r), \quad \frac{\omega^2}{c^2} \epsilon_0 \sim E.$$

就可以看到,介电常数的变化相当于势能的变化, $\frac{\omega^2}{c^2} \epsilon_0$ 相当于电子波动方程中的能量本征值。

从光子和电子运动方程的类比,可得出:在一个折射率周期变化的结构中,光子的运动将类似于在周期性势能变化下电子的运动。因此,这种构形具有光子的能带结构及相应的光子能隙。这样,对于存在光子能隙的介质来说,不是所有频率的光都能在其中传播的,相应于光子能隙区域的那些频率的光将不能通过介质,而是被全部反射出去。

当然,光子与电子并非完全相同的。如电子是标量波,而光子用矢量理论描述,因此光子的能隙不但与光子能量有关,而且也与光子以怎样的方向穿过三维结构有关。只有当光从特定的方向穿过才有的能隙称作不完全能隙;反之,当光从各个方向穿过时都有的能隙称作完全能隙。

简单的分析知道,原则上,完全光子能隙容易出现在布里渊区是近球形的那种空间结构中。而面心立方(FCC)是具有最接近球形布里渊区的一种空间周期结构。对FCC的计算表明,当用球形小颗粒组成FCC时,由于对称性引起的能级简并使它只存在不完全能隙。而把球形颗粒改为近椭圆形圆柱体后,对称性的消失使FCC具有完全的光子能隙。对金刚石型空间结构的计算表明,即使它是由球形颗粒构成的,只要颗粒与周围介质的折射率之比大于2及颗粒体积在结构中的占空比在0.2至0.6之间,在频率为 $0.5c/a$ 处存在完全的光子能隙(这里 c 是光速, a 是金刚石结构的晶格常数)。

这样,在80年代末90年代初,首先从理论上预言了一类新的材料——光子晶体,光子在这种材料中所起的作用类似于电子在凝聚态物质中的作用。

二、怎样构成光子晶体

光子晶体的构成及其与光子的相互作用很快引起广泛的重视。因为这不但能对光与物质相互作用的基本知识有新的了解,而且将能得到一类新的光子学材料。故而对它的研究既有物理上的又有材料科学上的意义。可以设想用光子晶体做成与微电子器件类似,又比之具有速度更快,抗干扰性能更强等优点的光子器件,其应用前景是十分诱人的。目前,初步实验已经证明了这种器件的可能性。如美国的雅布鲁诺维奇(Yablonovitch)等用精密加工的方法做成了在13—16GHz的微波波段有光子能隙的面心立方体光子晶体。用该材料做基底,通过实验发现,13.2GHz的微波完全不能通过光子能隙,几乎百分之百地把能量都射向空中。这项研究为把天线做进集成电路创造了条件。又如,可见及红外波段的光子晶体将能使普通的发光二极管成为有极好空间及时间相干性的类似激光的光源,使它的应用大大扩展。

但是,在自然界很难找到天然的光子晶体材料,必须依靠人工制作来得到。

构成光子晶体的关键是形成周期性的介电

结构,目前已用精密机械加工制作出具有能隙的二维及三维结构。如雅布鲁诺维奇等用两种方法形成了三维周期性结构。首先,他们把折射率为3.06、直径为6毫米的氧化铝小球当作“原子”,按面心立方体的规律把8000个这样的“原子”排成空间结构,随着改变晶格长度,“原子”在结构中的占空比也改变。但他们用这种结构实验,在各种晶格长度时都没有观察到有能隙存在。进而,他们采用更高折射率的材料(折射率为3.5)作为基底,用机械打孔方法构成由球形“空气原子”组成的FCC结构。当“空气原子”的间距为12.7毫米,它的占空比为86%时(此时基底材料只剩下14%,基本上是一个空的结构),观察到不完全能隙。这两种在80年代末完成的实验证实了上述的理论推断。为了得到完全的光子能隙,雅布鲁诺维奇等又设计了一种新的打孔方法,使得在介质基底上打出来的“空气原子”不是球形,而是近椭球的圆柱形,这些“原子”仍以FCC形式排列,结果第一次真正做出了具有电磁波能隙的三维光子晶体。

可是,精密机械加工方法很难把晶格长度加工到微米量级,而这正是在近红外到可见光波段有光子能隙的结构周期的量级。因此,为了实现这个波段的光子能隙,还要研究其它方法。

人们提出了反应离子刻蚀技术,即用能与基底材料起化学反应的离子束打孔。除此以外,非打孔方法来排列粒子的方法也在研究之中,本文介绍的多光束相干法就是一种。

三、多光束相干法产生周期结构

多光束相干可在空间形成驻波图案,空间相干图样随光束的数目及其相互之间夹角而改变。根据光束相干的原理,这种相干图样的光强极大值的间距应该与参与干涉的光的波长同量级。最简单的例子就是两束光相干条纹的间距与光束夹角 θ 的关系为 $D = \frac{\lambda}{2} \sin \frac{\theta}{2}$ 。

同时我们知道,当某种物质颗粒处于一定分布的光场中时,由于光对微粒的作用力,可能

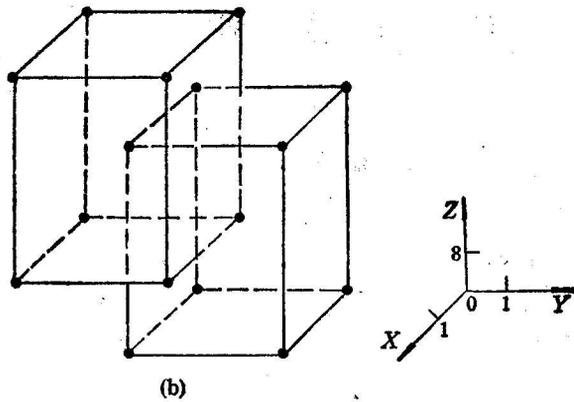
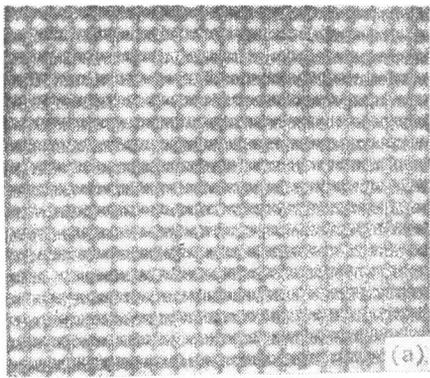


图1 四束光相干产生的光强周期分布, (a) 为实验照片, (b) 为数字模拟

形成光学陷阱把微粒陷住。因此, 如果能让处于悬浮液中的高介电常数的微粒通过光的作用

而陷在光强最强处, 则这些微粒就能按相干图样的空间形状排列起来, 从而形成微粒的空间结构, 其周期就是波长的量级。

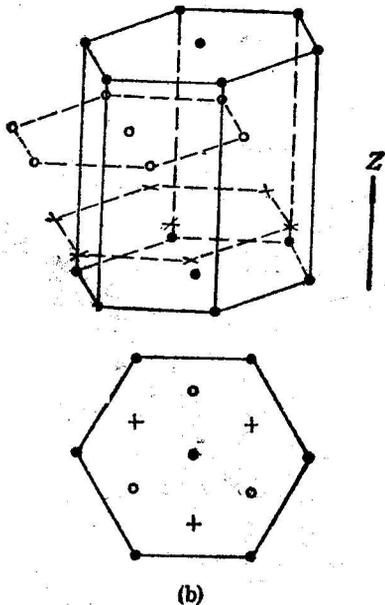
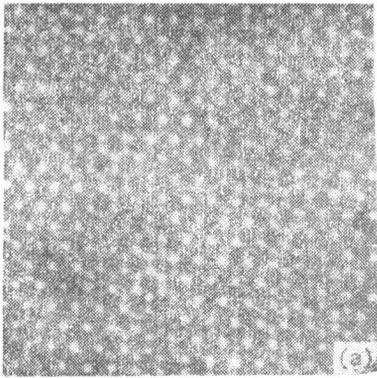


图2 四束光相干产生的光强周期性分布
(a) 为实验照片, (b) 为数字模拟

为了能够得到陷住直径为亚微米量级颗粒的相互作用, 先要弄清光与微粒的相互作用. 现已知道在两者之间存在三种主要的力. 一是光梯度力, 它比例于光强的梯度, 作用方向沿光增强的方向. 即位于光强极大值处的粒子最稳定. 二是光压, 起源于光子与颗粒的动量交换, 其作用使粒子沿光的行进方向运动. 三是光键力, 是由于当光与多个粒子散射时, 某一颗粒与入射光在其它颗粒上的散射光的作用而产生的. 光键力作用沿着粒子的连线方向, 其效果是使粒子陷在间距为光波长整数倍的地方. 在通常情况下, 光梯度力起主要作用. 当入射光强为几瓦时, 光学陷阱的深度为 $0.1-1\text{eV}$, 而在常温下, 粒子热运动能量约为 30 毫电子伏特, 因此用相干的方法产生光学位阱去陷住微粒在原则上是可行的.

1990年, 伯恩斯等用 10 瓦的氩离子激光把微米量级直径的聚苯乙烯小球在水中排成不同形状的二维(平面)结构, 并观察到光在这种结构上的衍射光样. 然而, 由于聚苯乙烯与水的相对折射率太小, 仅为 1.2 左右, 这种微粒形成的周期结构不存在光子能隙.

近年来, 中国科学院物理所有关人员在探索用高介电常数微粒通过强光场干涉产生周期性光强分布来形成空间结构方面开展了一系列

分形分维

肖克东

(四川攀枝花大学)

曾斌

(中国第十九冶金建设公司建筑工程学校)

分形理论是非线性科学的三个组成部分(混沌、孤立子和分形)之一。世界就其本质是非线性的,线性只不过是线性非线性的一个特例。而大多数非线性的几何表现和几何表示是分形理论的研究对象。分形是自然界的几何学。

欧几里德几何研究的是规则的光滑图形。而分形研究不规则的不光滑图形。

分形理论的创始人,美籍法国数学家 B. B. 曼德布罗特 1975 年创造了 fractal 一词,表示破碎不堪,不规则,不光滑和分数的意思。在拉丁文中 fractal 是“碎石”的意思。

分形的基本特征是自相似,即部分与整体有着惊人的相似。自然界许多事物都呈现分形的几何特征。

的研究。我们首次把直径 0.5 微米的聚苯乙烯颗粒排成周期长为 0.8 微米的线状及三角形结构,并观察到周期排列颗粒的激光衍射图样。继而,又首次把具有更高折射率的钛酸锶,二氧化钛 ($n = 2.6 - 2.9$) 颗粒排成二维周期结构,并观察到相应的干涉图样。上述工作证明了在适当条件下光力能够陷住高折射率颗粒,在光学波段能够实现二维光子晶体。

由于光的相干图样决定了微粒空间结构的排列,因此要实现三维光子晶体,首先需要设计光束,使其相干形成有用的空间图样。我们用计算机通过数值模拟,首次证明了只要选择合适的光束数目及配置,多光束干涉能形成一系列有序的光强极大值三维分布,其周期长度为微米或亚微米量级,如:正立方、体心立方、面心立方、体心四方和六方密堆等,几乎所有的简单天然晶体结构都能用此方法形成。并且,我

海岸线的形状,在地图上是光滑的,但实际上是不规则的,测量得越精细,海岸线越长。每一段海岸线的弯曲是随机的,但不同尺度的海岸线其几何形状有着惊人的相似,就象一小块海绵的结构与一大块的结构是完全相似的一样。自然界有许多现象,它的很小部分与很大部分被缩小之后极为相似。所以分形被称为大自然的几何学。而欧几里德几何只不过是人工建构的抽象几何学。

分形理论是一门研究分形的几何特征、数量表征及其普适性的科学。它与拓扑学、概率论和随机过程都有密切的关系。而对分形理论的发展有决定影响的是计算机。

分形理论的划时代意义就在于抛弃了传统微积分学,而代之以计算机的数值解和模拟。分形是计算机时代的产物,分形理论研究不可积系统几何图形自相似性。

分形理论早已跳出了数学的范围,而深入到物理、化学、生物、生理、医学、地质地理、工程技术的各个领域,并在社会科学和哲学上也产生了深远的影响。在传统科学感到困惑的地方,在一切被认为神秘莫测的领域,分形都大显神

们实际利用光束干涉实验已形成了光强极值的体心长方体(图 1)、面心立方体(图 2)结构,其结果与数值模拟设计十分吻合。目前,正在研究用产生的三维强干涉光场束缚高介电常数颗粒。对于直径 1 微米的聚苯乙烯颗粒,初步实验结果表明用这种方法形成三维的颗粒结构是可能的。

有人还提出了利用静电作用在悬浮液中排列颗粒或用高电压使电流变液形成颗粒有序排列的方法,本文不作详细介绍。不论用什么方法形成的空间结构,最后还必须想办法使其固化,才能制作为实用的材料。

由于光子晶体的科学意义及潜在的应用前景,国内外越来越重视在这方面的基础理论和应用开发研究,可以预期,到本世纪末将有突破性的进展,全新的“光子半导体”及相应的“光子学器件”将逐步出现并走向实用。