

图5 硅气凝胶的结构示意图

的结构确实就是如此^[15,16]。

另外硅气凝胶还是研究分形结构动力学的最佳材料^[10]。任何实际存在的分形都有上下限(其上限是关联长度 ξ , 下限是有关粒子尺寸 a)，因此相对应的分形子存在的频率范围也有上下界，这样分形材料将存在三个不同的振动区，要在不同试样上来检测分形子的色散关系以及不同振动区的渡越行为，就需要能够制备出一系列分维数 D 相同，而宏观密度值 $\rho_{宏观}$ 各异的试样，而且其结构是交互自相似的。由于硅气凝胶的结构可控性，可以制备出符合要求的样品系列来。布里渊散射实验已经提供了硅气凝胶 GHz 范围长波长声子到分形子的第一次渡越的明确证据^[17]，非弹性中子散射证实了硅气凝胶的第二次渡越行为^[18]，而拉曼散射实验结果同时显示出了它的两次渡越行为^[19]。

本文作者对德国维尔兹堡大学物理所 J. Fricke 教授的支持和合作表示衷心感谢，同时还感谢德国大众汽车厂基金会给予我们“气凝胶的制备与研究”课题的资助。

- [1] J. Fricke ed., *Aerogels*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, (1986).
- [2] S. Henning and L. Svensson, *Phys. Scr.*, **23** (1981), 697.
- [3] X. Lu et al., *J. Non-Cryst. Solids*, **145** (1992), 207.
- [4] E. Hummer et al., *J. Non-Cryst. Solids*, **145** (1992), 211.
- [5] K. I. Jensen et al., *J. Non-Cryst. Solids*, **145** (1992), 237.
- [6] S. Svendsen et al., *J. Non-Cryst. Solids*, **145** (1992), 240.
- [7] J. N. Armor et al., *Mater. Lett.*, **4**(1986), 373.
- [8] M. Gronauer, *J. Fricke, Acustica*, **59**(1986), 177.
- [9] D. W. Schaefer et al., *Springer Proc. Phys.*, **5** (1985), 31.
- [10] R. Vacher et al., *Phys. Rev. B*, **37** (1988), 6500.
- [11] E. Courtens et al., *Z. Phys. B*, **68**(1987), 355.
- [12] R. Reisfeld et al., *Chemistry, Spectroscopy and Applications of Sol-Gel Glasses*. Springer-Verlag, Heidelberg, (1992).
- [13] J. Fricke, G. Reichenauer, *J. Non-Cryst. Solids*, **95 & 96** (1987), 1135.
- [14] B. B. Mandelbrot, *The Fractal Geometry of Nature*, Freeman, San Francisco, (1982).
- [15] D. W. Schaefer et al., *Phys. Rev. Lett.*, **56**(1986), 2199.
- [16] J. Pelous et al., *J. Non-Cryst. Solids*, **145**(1992), 63.
- [17] E. Courtens et al., *Phys. Rev. Lett.*, **58** (1987), 128.
- [18] R. Vacher et al., *Phys. Rev. B*, **39** (1989), 7384.
- [19] Yuji Tsujimi et al., *Phys. Rev. Lett.*, **60**(1988), 2757.

超晶格的瓦尼尔-斯塔克效应

张耀辉 李 锋 刘 伟 江德生

(半导体超晶格国家重点实验室,中国科学院半导体研究所,北京 100083)

一、历史的回顾

著名物理学家布洛赫早在固体能带论创立之初,就研究了能带电子在电场作用下的行为。按照能带电子运动的半经典描述,电子的波矢

物理

q 在电场 F 作用下按牛顿定律变化

$$\frac{dq}{dt} = -\frac{eF}{\hbar}$$

因而从 k 空间来看(如图 1 所示),位于零点的电子在电场加速下,如果电子的散射时间足够长,会被移动到布里渊区边界 π/a 点,若不计齐

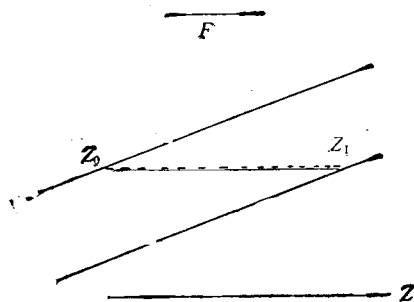
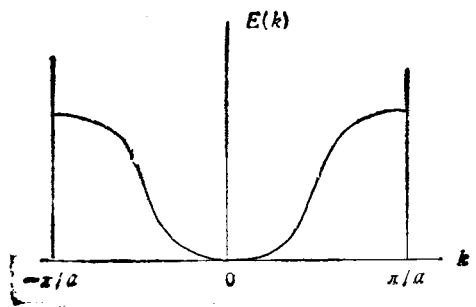


图 1

纳 (Zeuer) 隧穿, 电子会在布里渊区边界发生布拉格反射至 $-\frac{\pi}{a}$ 点. 电子在电场作用下又回到零点, 因此电子在 k 空间作由 $0 \rightarrow \frac{\pi}{a} \rightarrow -\frac{\pi}{a} \rightarrow 0$ 的周期性运动, 这就是布洛赫振荡. 振荡频率为 eFa/h . 从实空间来看, 能带电子在电场作用下的运动是局域化的, 只能在 $(0, Z_0)$ 之间来回振荡, Z_0 为 Δ/eF , Δ 为能带宽度. 既然电子的运动产生了局域化, 因而瓦尼尔在 30 年以前预言: 准连续的能带在电场作用下, 分裂成一系等能量间距为 eFa 的能态, 称之为瓦尼尔-斯塔克态, 其波函数是局域化的. 事实上, 瓦尼尔-斯塔克态是能态电子在电场下布洛赫振荡的量子力学描述. 由于瓦尼尔-斯塔克态的能量间距是相等的, 又称“斯塔克梯”.

尽管布洛赫振荡和斯塔克梯等概念很早就提出来, 但是过去在体材料中从未观测到. 因为通常材料的布里渊区很大, 在电子的散射时间范围内, 在电场小于 10^6V/cm 时, 要观测到布洛赫振荡是不可能的. 同时, 体材料晶格常

数 a 仅为几个 \AA , 对于通常材料所能承受的电场强度 ($< 10^6 \text{V/cm}$), eFa 仍相当小, 因而要观测到“斯塔克梯”仍然是十分困难的. 所以, 布洛赫振荡和“斯塔克梯”自提出以来一直没有在实验上观察到, 这是固体物理中颇受争议的一个问题.

二、超晶格中布洛赫振荡的实现

我们可以设想, 如果能人工生长出一种新型材料, 具有较大的晶格周期, 因而也具有较小的布里渊区, 就有可能实现布洛赫振荡和观测到“斯塔克梯”. 事实上, 江崎和朱兆祥提出超晶格概念的目的就是想利用由两种能带结构的超薄层材料构成超周期^[1], 这种超晶格结构的晶格周期比原来组分材料的晶格常数大得多, 其布里渊区也小得多, 这样就可以用来实现布洛赫振荡和瓦尼尔-斯塔克效应.

半导体超晶格是由交替的势阱材料和势垒材料层组成, 相邻的量子阱能级之间存在较强的耦合并形成能带, 其带宽(导带带宽 Δ_c 和价带带宽) Δ_b 比体材料的小得多, 通常约为几十个 meV , 称为微带. 根据紧束缚近似, 超晶格的带隙 E_g^{sl} 比分立量子阱的能隙 E_g^{qw} 小 $\frac{1}{2} (\Delta_c + \Delta_b)$. 当沿超晶格生长方向施加电场 F 时, 准连续的超晶格微带分裂成“斯塔克梯”, 原来扩展的波函数趋于在几个相邻的量子阱范围内局域化. 若超晶格周期为 d , 则当 $F \sim \Delta/d$ 时, 局域化达到极限, 波函数被限制在一个量子阱中. 此时, 电场约为几十个 kV/cm . 这个效应能在吸收光谱测量中充分表现出来. 当电场从零增加到几十个 kV/cm 时, 吸收边的能量位置从超晶格微带带间跃迁的带隙 E_g^{sl} 变为带隙为 E_g^{qw} 的量子阱, 吸收边蓝移 $\frac{1}{2} (\Delta_c + \Delta_b)$.

在这个过程中, 吸收光谱中除了有能量在 E_g^{qw} 的主跃迁结构外, 还出现能量为 $E_g^{\text{qw}} \pm n e F d$ 的小结构伴随 ($n = \pm 1, \pm 2, \dots$), 这是来源于不同量子阱间的电子空穴的实空间斜跃迁. 当电

场强度增大时,其强度急剧降低(n 为整数).这些小结构的出现正反映了“斯塔克梯”的效应,其强度的急剧减小是由于波函数的场致局域化导致.不过,电场引起的局域化把激子的束缚能 E_b 从零场时的近三维里德伯值(约为 4.2meV)增加到高场时单量子阱的二维束缚能 E_b (约 8.0meV).所以,实验上的吸收边的场致蓝移量应为 $\frac{1}{2}(\Delta_c + \Delta_h) - (E_b^{0W} - E_b^{SL})$.利用这种吸收边的场致蓝移可以实现“常态关”(指不加偏压时,光开关处于“关”态)的电光调制行为,设计制成快速电光调制器和自电光效应器件(SEED),特别是SEED器件是光逻辑运算和光子计算机的核心元件.这种调制机制与量子阱的吸收边斯塔克红移相比,具有驱动电压低,幅度大的优点,而且有较大的调制带宽.

三、瓦尼尔-斯塔克效应的实验研究

超晶格的瓦尼尔-斯塔克效应由于使人们对固体能带电子在电场下的行为有了认识,并且它在光电子器件领域里具有重要应用价值,自1988年IBM实验室的E. E. Mendez等人^[2]首次报道以来,它一直是半导体物理领域的热

点.世界上著名的实验室相继开展这方面的研究.我们与中国科学院物理研究所的周均铭小组合作利用国产MBE设备生长的样品,立足国内的工艺条件,首次在国内实现了瓦尼尔-斯塔克效应,并且作出了一些有特色的工作,如对超晶格中鞍点激子^[3]的研究,对超晶格电子散射时间的研究^[4]等.我们利用瓦尼尔-斯塔克效应在室温下实现了自电光双稳和三稳跳变转换^[5],这在国际上是首次.此外,我们在应变超晶格中也实现了瓦尼尔-斯塔克效应^[6,7].总的说来,对瓦尼尔-斯塔克效应的研究使人们对超晶格中电子态的量子化行为有了进一步的认识,它在光电子和微波器件领域也具有意义深远的的应用前景.因而,目前这方面的工作正受到国际上越来越多人的重视.

- [1] L. Esaki and R. Tsu, *IBM J. Res. Develop.*, **14** (1970), 61.
- [2] E. E. Mendez, F. Agullo-Rueda and J. M. Hong, *Phys. Rev. Lett.*, **60**(1988), 2426.
- [3] Y. H. Zhang et al., *J. Appl. Phys.*, **72** (1992), 3209.
- [4] Y. H. Zhang et al., *Phys. Rev. B*, **48** (1993), 12296.
- [5] 张耀辉等, *半导体学报*, **14**(1993), 251.
- [6] 刘伟、张耀辉、江德生, *半导体学报*, **14**(1993), 517.
- [7] W. Liu et al., *J. Appl. Phys.*, **74**(1993), 4274.

(上接第493页)

七、固体废物的利用和处理中的物理学

矿业开采和洗选矿石过程中产生的渣物和工业加工、交通运输、工程建设、商业活动中产生的废渣及农业、生活垃圾的排放量日趋增多,对环境的污染逐日增加,而不可再生的自然资源逐渐枯竭(自然资源中有70%~90%变成废物).综合利用废物,以减少它对环境的污染已变得更为迫切.

废物的分选是废物利用的首要步骤.分选主要有以下几种:(1)筛选;(2)风力分选,可以分选出如废纸等轻物;(3)光学分离法则是利用物质表面光反射特性不同而改变光电管输出电压,再通过电子装置使异色物定向下降从而

达到分选效果;(4)磁分离法可分离出金属物,例如矿渣、工业废渣可通过磁选分离出废钢铁、钢渣等金属;(5)静电分离法可使含水分的和电导率高的有机物被高压电吸收,而玻璃、陶瓷、塑料、橡胶等电导率低的物质不受电场作用而分离出来.利用高温高压可将废物制成建筑材料和精美的陶瓷,有的还从中提炼出宝石.

对于有毒的废物也可通过物理处理技术,例如沉积、离心、悬浮、压滤、过滤、干燥、蒸馏、蒸发、吸收、吸附等等物理方法处理,使之达到安全排放标准.

综上所述,物理学不仅对环境科学的发展有深远的影响,物理学构成了环境工程的基础之一,而且基础物理在环境保护中还有着直接的应用.