

研究简报

GaAs(100) 和 InP(100) 面上表面光学声子的实验观察

丁训民 董国胜 杨曙 王迅 徐亚伯

(复旦大学现代物理研究所)

(浙江大学物理系)

1982年11月27日收到

晶体的表面具有与体内不同的晶格对称性,因而在表面可以存在三维晶格中所没有的格波,其量子即表面声子。然而从实验上观察表面声子往往由于不易与量子能量相近的体声子区分而较难实现。高分辨率电子能量损失谱(HRELS)的出现使得这一实验难题变得较易解决了。在HRELS中,以具有高度单色性的低能电子束射到固体表面,测量经表面非弹性散射电子的能谱。七十年代初,Ibach用这一技术首次在ZnO(1 $\bar{1}$ 00)和(0001)面上观察到了分别具有相等能量间隔的损失峰系列。经过与体TO和LO声子的红外数据的比较,他确认观察到的损失峰对应于表面光学声子的激发^[1,2]。后来,用HRELS在Si(111)面^[2]和GaAs(110)面^[3,4]上也观察到了只有用表面散射才能解释的结果。Froitzheim根据通常使用的HRELS实验条件的具体参数,估算了在镜面反射方向,体非弹性散射强度约为表面非弹性散射强度的 $10^{-2[5]}$,这就使得在分析HRELS实验结果时,体声子的影响可以完全忽略。

本文工作用HRELS观察了GaAs(100)和InP(100)面上的表面光学声子。实验是在ADES-400型多功能电子能谱仪上进行的。真空室的基本压强低于 1×10^{-9} Pa。所用样品分别为掺Te的n型($n = 5 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$)GaAs(100)和非有意掺杂的n型($n = 8 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$)InP(100)晶片。样品在真空室中的处理是采用氩离子刻蚀和加热退火的方法。对于初次用于实验的样品,先用较高能量(2keV以上)的氩离子束刻蚀掉上千埃的表面层,以去除样品表面可能存在的机械损伤,接着用0.5—1keV的氩离子束刻蚀20分钟左右,以减小高能量氩刻蚀所引起的损伤。经这样处理的样品表面是无序的,并有氩离子的埋入,需要经过热退火使表面恢复有序。对GaAs(100),经500—550℃退火20—30分钟后,表面可观察到(4×1)LEED图样。对InP(100),经250—300℃退火20—30分钟后,呈现(4×2)LEED图样。用XPS检查这两种表面均未发现可观察到的C和O沾污。在HRELS中,用作电子单色器的是半球形静电型偏转器,一次电子束的能量为3eV,散射电子用一个127°柱型能量分析器收集。电子单色器和分析器一起的固有能量分辨率为10meV。样品可以绕垂直于入射面的轴旋转,也可以绕法线旋转。分析器可以有两个转动自由度,一般是在入射平面内旋转,以改变探测电子的发射角。所有测量都在

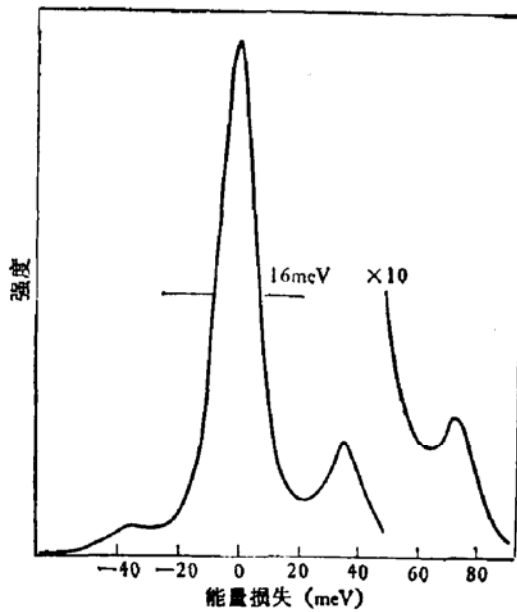


图1 GaAs(100)(4×1) 的 HRELS

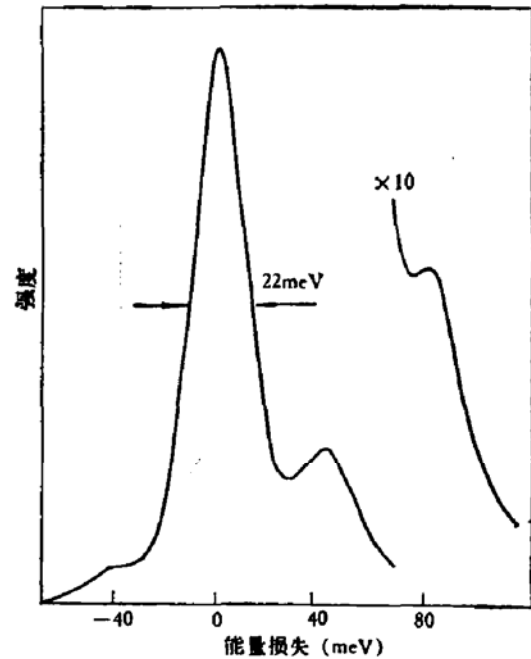


图2 InP(100)(4×2) 的 HRELS

镜面反射方向进行, 偏离这一方向, 损失峰和弹性峰强度都显著减小。

图 1 和图 2 是在较大入射角下(分别为 68° 和 62°) 测得的典型的 GaAs(100)(4×1) 结构和 InP(100)(4×2) 结构的 ELS 谱。GaAs 的损失峰出现在距弹性峰 36 和 72 meV 处, InP 的损失峰出现在 42 和 84 meV 处, 它们分别对应于激发一个和两个表面声子。此外, 在损失能量为 -36 meV (GaAs) 和 -42 meV (InP) 处的峰是对应于吸收一个表面声子的增益峰。增益峰与第一损失峰的强度比为 0.26 和 0.19, 均符合 $e^{-\hbar\omega/kT}$ 的玻耳兹曼关系。在图中还标出了弹性峰的半高宽度 (FWHM), GaAs(100) 为 16 meV, InP(100) 为 22 meV, 这可能与这两种材料具有不同的载流子浓度和导带弯曲程度有关^[3]。另外, 表面有序程度的好坏也会影响到弹性峰的宽度。例如, 对经过氩离子刻蚀但未退火的样品, 测得它的弹性峰除因反射系数减小而强度明显降低外, 峰的半高宽度比有序表面来得大, 本底也增强。图 3 就是 GaAs 经氩刻未退火表面的 ELS 谱, 其半高宽接近于 20 meV。我们所得的 InP(100)(4×2) 结构, LEED 的本底强度比 GaAs(100)(4×1) 来得大, 因而前者的有序程度来得差些。

ELS 实验结果通常可用介电理论来解释。根据这一理论, 损失峰对应的频率为

$$\omega = \omega_{\text{TO}}[\varepsilon(0) + 1]^{1/2} / [\varepsilon(\infty) + 1]^{1/2}.$$

式中 ω_{TO} 是体 TO 声子的频率, $\varepsilon(0)$ 是静电介电常数, $\varepsilon(\infty)$ 是光频介电常数。利用 TO 和 LO 声子频率的关系, 还可将上式改写成

$$\omega = \left[\frac{\omega_{\text{TO}}^2 + \varepsilon(\infty)\omega_{\text{LO}}^2}{\varepsilon(\infty) + 1} \right]^{1/2}.$$

对于 GaAs, 取 $\omega_{\text{TO}} = 269\text{cm}^{-1}$, $\omega_{\text{LO}} = 292\text{cm}^{-1}$,^[6] $\varepsilon(\infty) = 11.1$, 对 InP, 取 $\omega_{\text{TO}} = 307\text{cm}^{-1}$, $\omega_{\text{LO}} = 351\text{cm}^{-1}$,^[6] $\varepsilon(\infty) = 9.61$, 得出它们的 $\hbar\omega$ 分别为 36.0 meV 和 43.0 meV。我们的实验值同这一理论计算值基本相符。文献 [3] 对 GaAs(110) 面测得的表面光学声子数据与我们的结果也完全一样。对于 GaAs 这样的各向同性介质, 考虑长程相互作用

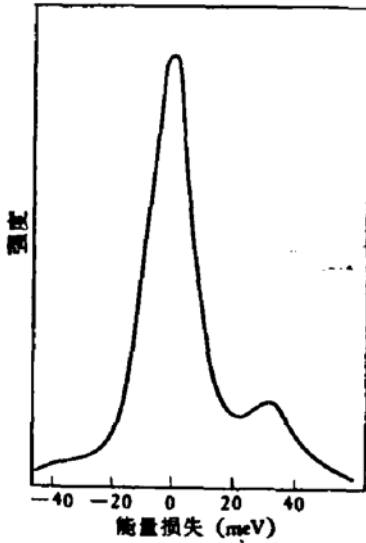


图3 氢离子刻蚀后未退火的 GaAs(100) 面的 HRELS

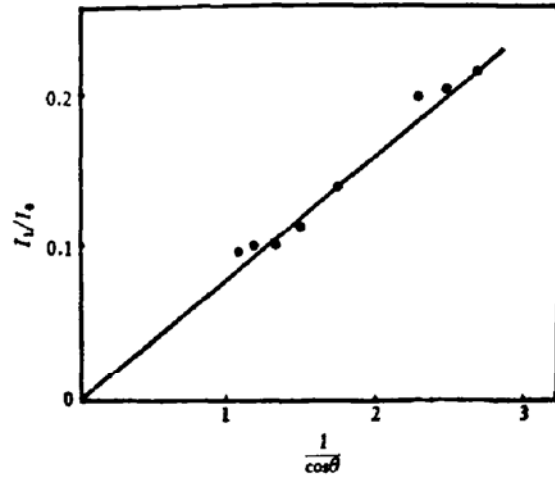


图4 损失峰相对强度的角度依赖关系

用时, 表面声子能量同它的再构没有关系, 这是符合于理论的预期的。

在表面散射的情况下, 散射截面正比于 $(\cos\theta)^{-1}$ (θ 为入射角)^[5]。我们对 GaAs 样品测量了不同入射角下在镜面反射方向上损失峰强度 I_1 相对于弹性峰强度 I_0 的变化, 其结果如图 4 所示, 证明 I_1/I_0 的角依赖关系与理论预期的 $(\cos\theta)^{-1}$ 关系相一致。

参 考 文 献

- [1] H. Ibach, *Phys. Rev. Lett.*, **24**, 1416 (1970).
- [2] H. Ibach, *J. Vac. Sci. Technol.*, **9**, 713 (1972).
- [3] R. Matz and H. Lüth, Proceedings of the 4th International Conference on Solid Surfaces and the 3rd European Conference on Surface Science (Supplément à la Revue "Le Vide, les Couches Minces" No. 201, 762, 1980).
- [4] R. Matz and H. Lüth, *Phys. Rev. Lett.*, **46**, 500 (1981).
- [5] H. Fritzsche, "Electron Energy Loss Spectroscopy" in "Electron Spectroscopy for Surface Analysis" p. 205, edit. H. Ibach, Springer Berlin, Heidelberg, New York, (1977).
- [6] A. S. Barker and A. J. Sievers, *Rev. Mod. Phys.*, **47**, Suppl. 2 (1975).

Experimental Observation of Optical Surface Phonons for GaAs (100) and InP (100) Surfaces

Ding Xunmin, Dong Guosheng, Yang Shu, Wang Xun

(Institute of Modern Physics, Fudan University)

Xu Yabuo

(Department of Physics, Zhejiang University)

Abstract

Series of loss peaks, energetically separated by 36 MeV and 42 MeV respectively, have been observed for well-defined GaAs (100) and InP (100) surfaces by means of high resolution electron energy loss spectroscopy (HRELS). These loss peaks correspond to the excitation of optical surface phonons. The experimentally measured values agree well with those calculated from the dielectric theory.