

研究快报

Ge_xSi_{1-x}/Si 应变层超晶格的折迭纵声学声子*

张树霖 金 鹰 秦国刚

(北京大学物理系, 北京, 100871)

盛 篓 周国良 周铁成

(复旦大学应用表面物理国家重点实验室, 上海, 200433)

1991年1月3日收到, 1991年2月1日修改定稿

用喇曼光谱研究了 Ge_xSi_{1-x}/Si ($x = 0.5$) 应变层超晶格的折迭纵声学声子。在 Ge_xSi_{1-x} 和 Si 的层厚分别为 50 和 250 Å 的样品中, 我们首次观察到了多达 9 级的折迭纵声学声子模。与理论计算比较, 鉴认了不同波矢值的声学声子模。理论与实验结果间符合得相当的好。它表明 Rylov 模型对长周期 Ge_xSi_{1-x}/Si 超晶格可以较好地得到应用。

锗-硅应变层超晶格具有把间接带隙跃迁转变成直接带隙跃迁的可能, 展示了迷人的制造新型器件的可能, 成为近来被广泛研究的超晶格材料之一^[1]。锗-硅超晶格中的声子喇曼光谱研究已有不少工作发表^[2-4], 但相对于传统的 GaAs/Ga_xAl_{1-x}As 超晶格的研究还很不深入, 无论从实验还是从理论角度看仍有许多问题有待解决。对于折迭声学声子谱更是如此。本快报将报道长周期非对称应变型 Ge_xSi_{1-x}/Si 超晶格折迭声学声子的喇曼光谱的研究结果。

本实验所用的二个样品为 Si(001) 衬底生长的 Ge_xSi_{1-x}/Si 合金超晶格, 它们的结构参数列于表 1 中。喇曼实验所用仪器和几何配置与文[5]的完全相同。

表 1 Ge_xSi_{1-x}/Si 超晶格样品结构参数

编 号	周期数	x 值	合金层厚度 d_1 /Si 层厚度 d_2 (Å)	
			标称值	喇曼测值
GSA1	20	0.5	30/70	27/63
GSA2	20	0.5	50/250	46/229

图 1 是用 4880 Å 激光激发 GSA1 和 GSA2 的折迭声学声子的喇曼光谱图。在 GSA1 的光谱中, 我们看到在 25.3、35 和 56.5、65 cm⁻¹ 处有两对双峰, 它们是第一级和第二级的折迭纵声学声子 (FLA)。这里, 由于散射波矢约为 0.35 q_m (q_m 是布里渊区波矢最大值), 已远离布里渊区中心, $k = 0$ 的选择定则失效^[1], 因此我们观察到的每一级折迭声学

* 国家自然科学基金和中国科学院半导体超晶格国家重点实验室资助课题。

声子都会是双峰。根据 Rylov 模型^[6]推导的色散关系为

$$\cos(qd) = \cos\left(\frac{\omega d_1}{v_1}\right)\cos\left(\frac{\omega d_2}{v_2}\right) - \frac{1+K^2}{2K} \sin\left(\frac{\omega d_1}{v_1}\right)\sin\left(\frac{\omega d_2}{v_2}\right) \quad (1)$$

$$K = \rho_2 v_2 / \rho_1 v_1 \quad (2)$$

其中 $d = d_1 + d_2$ 是超晶格周期, d_i 、 ρ_i 和 v_i ($i = 1, 2$) 依次分别是 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ 和 Si 层的层厚、体密度和沿 [001] 方向纵波的体声速, ω 和 q 是声子频率和沿 [001] 方向的波矢。由色散公式 (1) 可以从折迭声子频率得到层厚 d_1 和 d_2 的喇曼测量值; 我们假定比值 d_1/d_2 和标称值相同, 得到了 GSA 1 和 GSA 2 的 d_1 和 d_2 喇曼测量值(列于表 1), 它们比生长时用石英晶体振荡器监测得到的在表 1 中称作标称值的少约 10%, 相应的 GSA 1 的 FLA 双峰的频率计算值已用实箭头标在光谱的上方。至于 GSA 1 光谱图上位于 18 和 46.5cm^{-1} 处的两个独立的弱峰, 其频率值分别与计算得到的布里渊区边界折迭纵声学声子的第一级和第二级相符, 计算得到的频率值由虚箭头标于图 1 中 GSA 1 的光谱上。这两个布里渊区边界模, 按常规说在本实验的散射配置下是观察不到的, 它们的出现或许是由于 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ 合金层和 Si 层界面上的位错等缺陷激发的喇曼散射^[3]。此外, 在 GSA1 的光谱中 53 和 62.5cm^{-1} 处还存在一对小峰, 通过和理论计算值相比较, 我们认为出现这两个小峰可能是由于超晶格中除了周期 $d = 90\text{\AA}$ 的主结构外, 还存在另外一个周期为 94\AA 的结构。至于这个周期结构的一级 FLA, 由于和超晶格中主结构的一级 FLA 很接近, 因此在光谱中未能分辨出来。

图 1 下部所显示的 GSA2 的光谱是一个值得注意的光谱。首先, 在超晶格周期几乎

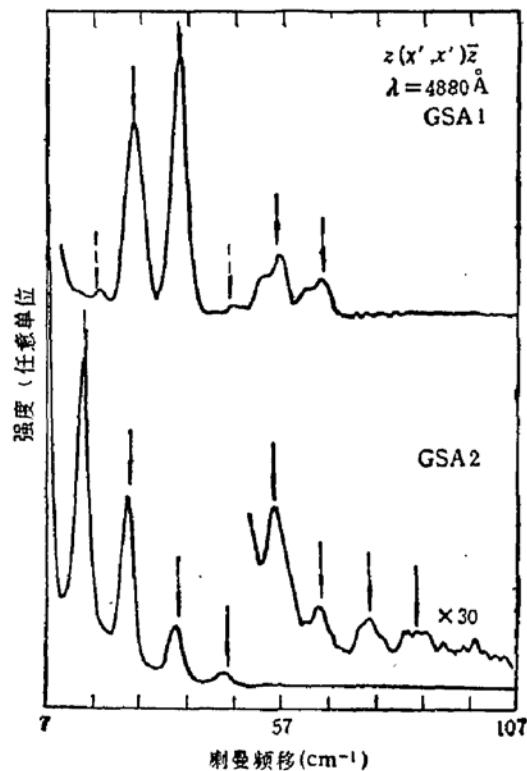


图 1 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ 超晶格折迭声学声子的喇曼光谱

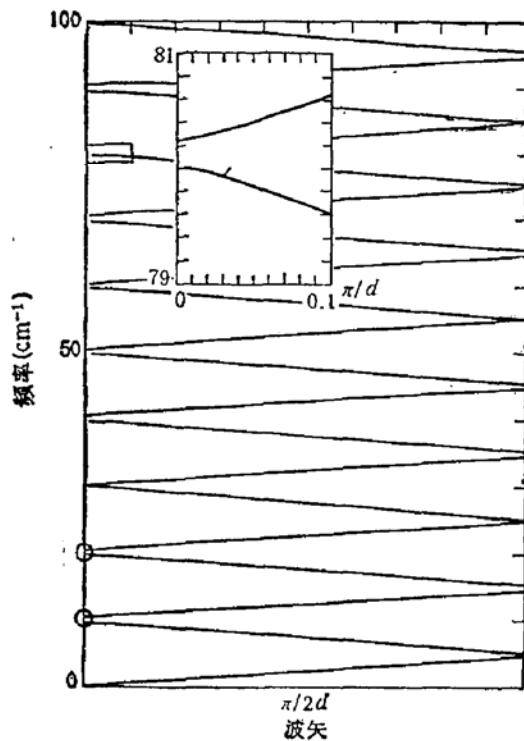


图 2 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ 超晶格 GSA2 的纵声学声子色散曲线。插图为方框区的放大图

相同的类似样品上 Lockwood 等曾观察到 5 级 FLA^[3], 但是, 图 1 的实验结果表明, 我们观察到了多达 9 级的 FLA。从 FLA 的实验值, 用和 GSA1 相同的方法, 从 Rytov 公式得到了该样品的喇曼光谱测量的层厚 d_1 和 d_2

(列于表 1 中), 它们比标称值也小约 10%。另外用 X 光测量得到的结构参数与 GSA2 十分相近样品的 d_1 和 d_2 值也恰好比标称值小约 10%。我们也计算了该样品的 FLA 的色散曲线, 示于图 2; 根据实验条件, 其散射波矢为 $0.97q_m$, 由此散射波矢从色散曲线截取各级 FLA 的频率值用实箭头标于图 1 中 GSA 2 光谱上, 它们与实验结果符合得相当好。如果注意到该样品的超晶格层的总厚度为 6000 \AA 左右, 与 4579 \AA 的激发光在 Si 层中的可能穿透深度 6400 \AA 相近^[3], 因此, 用该波长的激光激发喇曼光谱, 则预计应容易观察到入射激光在样品 Si 和 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ 合金层界面层反射后激发的前向散射产生的零波矢喇曼光谱^[3]。用 4579 \AA 激光激发的喇曼光谱示于图 3 中, 各谱峰的实验频率值已分别标在图上。

图 3 $\text{Ge}_{0.5}\text{Si}_{0.5}/\text{Si}$ 超晶格样品 GSA2 的低频折迭声子喇曼光谱图

的提高, 图 2 中表现为单峰的结构, 在图 3 上已可以分辨为两个极强的 FLA 双峰。从实验条件确定的布里渊区内对应的散射波矢为 $0.91q_m$, 由此波矢值从色散曲线上截取的第一和第二级 FLA 的理论频率值也与实验值符合得相当好, 说明它们确为 FLA 的散射峰。剩余的几个小光谱结构可能为零波矢即布里渊区中心的声子模。经与图 2 的色散曲线上圆圈标出的第一级和第二级布里渊区中心的折迭纵声学声子, 它们明显的单峰结构进一步说明它们确实来自选择定则被严格遵守的零波矢散射。

综上所述, 我们在前人已观察到 5 级 FLA 的相近结构的 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ 超晶格中, 观察到了多达 9 级的来自 FLA 的散射。通过 Rytov 模型的计算不仅得到超晶格层厚的喇曼测量值, 还帮助我们对各光谱结构进行了指认; 理论与实验结果很好地相符, 表明在长周期 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ 应变超晶格中, Rytov 模型可以较好地得到运用。

参 考 文 献

- [1] B. Jusserand and M. Cardona, in "Light Scattering in Solids V", edited by M. Cardona and G. Güntherodt Springer, Heidelberg, 1989, p. 49.
- [2] F. Gerdeid, A. Pinczuk, J. C. Beam, B. Baflogg and B. A. Wilson, *Appl. Phys. Lett.*, **45**, 1138 (1984).
- [3] D. J. Lockwood, M. W. C. Dharma-wardana, J.-M. Barbeau, and D. C. Houghton, *Phys. Rev.*, **B35**, 2243(1987).
- [4] E. Kasper, H. Kibbel, H. Jorke, H. Brugger, E. Friess and G. Abstreiter, *Phys. Rev.*, **B38**, 3599(1988).
- [5] 金鹰、张树霖、秦国刚、盛巍和周铁成, 半导体学报, **12**(3), 129(1991).
- [6] S. M. Rytov, *Akust. Zh.*, **2**, 71(1956), [Sov. Phys. Acoust., **2**, 68(1956)].

[7] 周国良,尚未发表.

FLA Phonons in $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ Strained-Layer Superlattices

Zhang Shulin, Jin Ying and Qin Guogang

(Department of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

Sheng Chi, Zhou Guoliang and Zhou Tiecheng

(National Lab. for Applied Surface Physics Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract

The Raman spectrum due to the folded longitudinal acoustic (FLA) phonons in the $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ ($x=0.5$) superlattices has been performed. We observed for the first time more up to the 9th FLA mode in the sample constituted by $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ with the layer thickness $d_1=50 \text{ \AA}$ and Si with the layer thickness $d_2=250 \text{ \AA}$. The observed acoustic modes of various wavevectors were identified by means of comparing with theoretical calculation. The striking coincidence between theoretical and experimental results indicate that Rytov model is favourable for the large-period $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ superlattices.

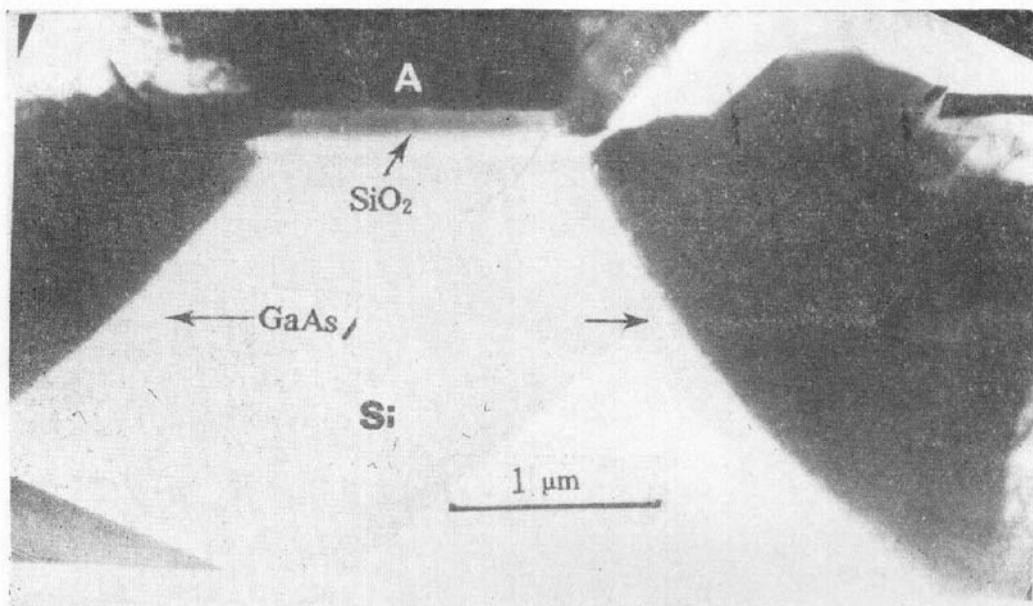


图 2(a) 相邻沟槽边沿及中间岛的形貌像

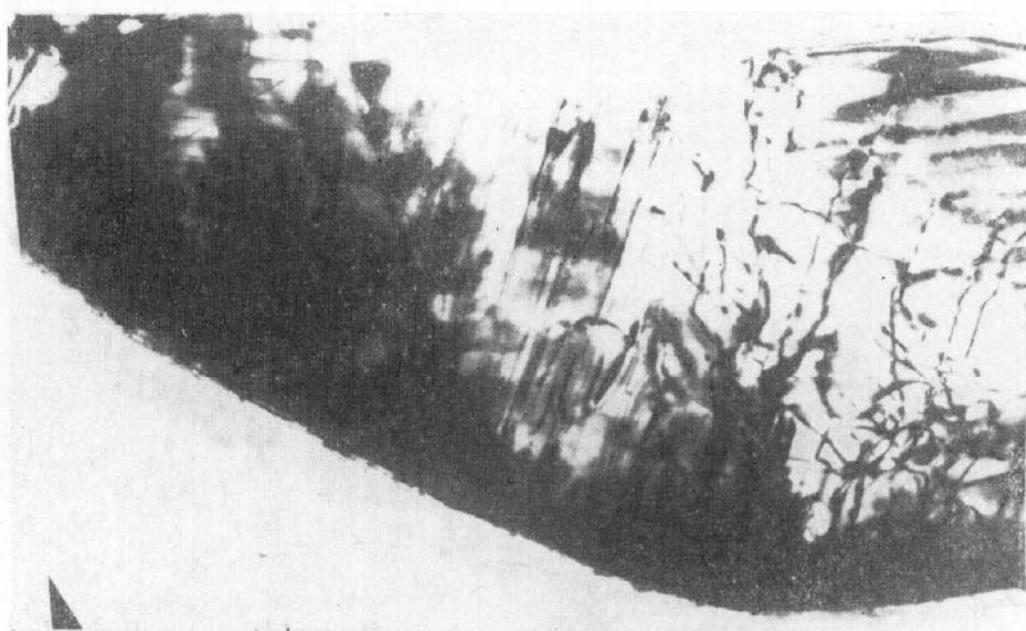


图 2(b) 沟槽边沿外延层的典型形貌像