

# 晶格失配对 GaAsSb/InP 异质结中合金拉曼散射的温度依赖特性的影响

储媛媛<sup>1</sup>, 刘莹妹<sup>1</sup>, 李生娟<sup>1</sup>, 徐志成<sup>3</sup>, 陈建新<sup>3</sup>, 王兴军<sup>2\*</sup>

(1. 上海理工大学材料科学与工程学院, 上海 200093;

2. 中国科学院上海技术物理研究所红外物理国家重点实验室, 上海 200083;

3. 中国科学院上海技术物理研究所红外成像材料与器件重点实验室, 上海 200083)

**摘要:** 通过在 3~300 K 的低温变温拉曼光谱的测量, 对不同 Sb 组分的 GaAsSb/InP 异质结中的由 Sb 组分引起的声子非谐效应进行了拉曼散射的研究。实验发现, 随着温度的降低, 长光学声子峰位向高波数移动, 当温度低于 100 K 时, 变化趋于平缓。分别利用三声子模型和四声子模型计算模拟了光学声子和温度的依赖关系, 并和实验结果对比发现, 与三声子模型相比, 四声子模型与实验数据符合更好, 表明温度依赖的拉曼散射峰位的变化必须考虑四次声子非谐振动。相对于晶格失配的样品 S1 (Sb=37.9%) 和 S3 (Sb=56.2%), 获得的声子非谐度在晶格匹配的样品 S2 (Sb=47.7%) 中是最小的, 同时通过对声子线宽的研究表明 S2 中声子寿命是最长的。结合低温光致发光的实验结果, 证实了 GaAsSb 合金晶格振动的声子非谐效应和声子寿命不仅受合金无序散射的影响, 同时受到和衬底晶格失配引入的线缺陷和缺陷的声子散射影响。

**关键词:** GaAsSb/InP 异质结; 非谐效应; 声子寿命; 四声子模型

中图分类号: TN304.2 文献标识码: A

## Effect of lattice mismatch on the temperature dependence of Raman scattering in GaAsSb / InP heterostructures

CHU Yuan-Yuan<sup>1</sup>, LIU Ying-Mei<sup>1</sup>, LI Sheng-Juan<sup>1</sup>, XU Zhi-Cheng<sup>3</sup>,  
CHEN Jian-Xin<sup>3</sup>, WANG Xing-Jun<sup>2\*</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. State Key Laboratory of Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

3. Key Laboratory of Infrared Imaging Materials and Devices, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

**Abstract:** The phonon anharmonic effect caused by Sb in GaAsSb/InP heterojunction with different Sb components has been studied by measuring Raman spectra at 3~300 K. It is found that with the decrease of temperature, the peak position of long optical phonon moves to the high wave number, and the change tends to be gentle when the temperature is lower than 100K. The relationship between the optical phonon and temperature is simulated by using the three-phonon model and the four-phonon model, respectively. Compared with the experimental results, the four-phonon model agrees better with the experimental data, which indicates that the change of the temperature dependent Raman scattering peak position must consider the four-phonon anharmonic vibration. Compared with the lattice mismatched samples S1 (Sb=37.9%) and S3 (Sb=56.2%), the phonon anharmonic obtained in the lattice matched sample S2 (Sb=47.7%) is the smallest, and the phonon lifetime in S2 is the longest by the study of phonon linearly. The phonon anharmonic effect and phonon lifetime of GaAsSb crystal lattice vibration are not only affected by the disordered scattering of the alloy, but also by the line defects and phonon scattering of the defects introduced by the mismatch with the substrate.

收稿日期: 2021-01-29, 修回日期: 2021-09-03

Received date: 2021-01-29, Revised date: 2021-09-03

基金项目: 国家自然科学基金(11874377), 上海市自然科学基金(18ZR1445700)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China (11874377), Natural Science Foundation of Shanghai (18ZR1445700)  
作者简介 (Biography): 储媛媛, 女, 安徽安庆人, 硕士研究生, 主要研究 III-V 族半导体低维体系的光学和热学特性. E-mail: yuanchu610@163.com

\*通讯作者 (Corresponding author): E-mail: xiwang@mail.sitp.ac.cn

**Key words:** GaAsSb/InP heterojunction, anharmonic effect, phonon lifetime, the four-phonon model

**PACS:** 81. 05. Ea, 81. 15. Gh, 81. 40. Tv, 81. 07. Bc

## 引言

GaAsSb 合金半导体材料由于 Sb 可调节带隙能力<sup>[1-5]</sup>, GaAsSb 的禁带宽度可以从 0.87  $\mu\text{m}$  (GaAs) 调整到 1.7  $\mu\text{m}$  (GaSb), 涵盖了近红外波段 1.3  $\mu\text{m}$  和 1.55  $\mu\text{m}$  的波长范围, 因此对光纤通信应用、近红外光传感和热学应用等等具有极大的吸引力, 也属于基于 Sb 的 III-V 化合物半导体材料, 具有良好的光电特性, 即高光吸收和优越的载流子迁移率<sup>[3, 6]</sup>。其中, Sb~0.5 的 GaAs<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub>/InP 异质结独特的异质结能带和良好的晶格匹配度<sup>[7]</sup>, 可以用作高速运行双异质结双极型晶体管 (DHBT)<sup>[8]</sup>。

R. M. Cohen 等人<sup>[9]</sup>首次对高 Sb 组分的 GaAsSb 进行光致发光 PL 光谱和拉曼散射光谱的测量, 发现 LO 声子峰的线宽和不对称性随着 Sb 组分的变化而变化, 当 As/Sb 接近 1:1 时达到最大值, 归因于无序合金的统计声子散射在 Sb~0.5 最强。Subhasis Das 等人<sup>[10]</sup>利用玻色-爱因斯坦模型分析了与温度相关的 PL 数据, 发现 GaAsSb 中的电子-声子相互作用和平均声子温度都强烈地依赖于 Sb 含量。Gao 等人<sup>[11]</sup>分析了 GaAsSb 样品的 PL 光谱的温度依赖性, 讨论了局域激子与 LO 声子的相互作用, 合金的晶体质量越好则光致发光的线宽越窄, 强度越高。

Prabhat Verma 等人<sup>[12]</sup>对 GaAs 不同结构形式的拉曼散射的温度依赖性进行了比较研究, 发现由于振动势能的非谐效应, 峰位和线宽都随温度而变化, 并且不同结构形式的 GaAs 材料的非谐度不同。GaAs 的主要衰减通道是进入两个相同频率的声学声子。通过非谐波衰变作为晶格温度的函数估计了体材料 GaAs 的 LO 声子的寿命。他们还发现, 寿命随着温度的升高而降低。在三元合金体系中, C. Ramkumar 等人<sup>[13]</sup>针对 GaAs<sub>1-x</sub>P<sub>x</sub> 和 In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As 中不同声子模的温度和成分波动引起拉曼散射的非谐效应进行了比较研究。非谐度随成分变化而变化。组分变化引起的非谐性不仅会引起线宽和峰位中心位置的变化, 还会影响声子寿命。

Linde and Kuhl<sup>[14]</sup>和 Kash and Tang<sup>[15]</sup>等人均使用了时间分辨自发拉曼散射技术 (TRSRS) 估计了在分子束外延 (MBE) 生长的 GaAs 中, 光激发热电子和空穴与晶格相互作用时产生的非平衡非相干 LO 声子的弛豫时间, 研究发现弛豫时间随晶格温度的

升高而减少。针对不同 Sb 组分的 GaAs<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub>/InP 异质结, 刘莹妹等人<sup>[16]</sup>利用 XRD 实验证实了 GaAsSb 异质结在 Sb 成分为 47.7% 的 GaAsSb 薄膜的晶格匹配最好, 晶格质量较优, 样品 S1 (Sb=37.9%) 和 S3 (Sb=56.2%) 因晶格不匹配引起应变。目前关于 GaAsSb 合金半导体中声子非谐效应和声子寿命的详细研究尚未见报道, 并且对 GaAsSb/InP 异质结与衬底晶格失配引入的线缺陷和缺陷对声子非谐效应和声子寿命的影响也很少有人讨论。

在这篇文章中, 我们首先在 InP 衬底上利用分子束外延技术生长了高质量的不同组分的晶格匹配和晶格失配的 GaAsSb 薄膜。采用变温拉曼散射技术, 得到拉曼峰位和温度的依赖关系, 考虑声子非谐效应, 利用三声子和四声子模型对实验结果进行了拟合, 针对晶格匹配的 GaAs<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub>/InP 异质结样品 S2 (Sb=47.7%) 和晶格失配引起的应变样品 S1 (Sb=37.9%) 与 S3 (Sb=56.2%) 进行声子非谐效应和声子寿命的对比探究, 讨论了不同 Sb 合金组分和衬底晶格失配对声子非谐效应和寿命的影响, 并和低温光致发光实验结果进行了印证。

## 1 实验方法

采用分子束外延 (MBE) 生长 GaAsSb/InP 异质结。经过表面清理的衬底 InP 放进预处理室并进行除气, 除气时的 InP 衬底温度为 250  $^{\circ}\text{C}$ , 时间为 20 min。除气的目的在于去除衬底表面所吸附的杂质气体和水。生长 GaAsSb 前, 衬底先在气氛下进行脱氧, 脱氧后将衬底温度降为 200  $^{\circ}\text{C}$ 。样品在固态源 Riber-32 MBE 系统上生长, Ga 金属用作 III 族束源, 而四聚体 As 和 Sb 用作 V 族束源。准备生长 GaAsSb 时, 将衬底加热至 480  $^{\circ}\text{C}$ 。GaAsSb 的生长速率为 0.70  $\mu\text{m}/\text{h}$ , As 的通量保持为  $2.9 \times 10^{-5}$  Torr (等效压强强度, BEP)。在 InP 衬底上生长一系列的 GaAsSb 材料, 并寻找最佳的材料生长工艺, 通过固定 Ga 束流的大小, 改变生长温度和束流比调节生长工艺参数, 最终生长出高质量的 GaAsSb 外延层。在生长过程中, 通过 15 keV 的反射高能电子衍射 (RHEED) 原位监测外延层的表面。通过使用双光束分光光度计在 300 K 下测量生长层的光吸收光谱。由 XRD 双晶衍射曲线可以得到 GaAsSb 材料与 InP 衬底的失配关系, 计算出 GaAsSb 中 As 和 Sb 的组分比, 发现

S2(Sb=47.7%)样品是晶格匹配的而S1(Sb=37.9%)和S3(Sb=56.2%)样品是晶格失配的,其晶格失配度分别是-0.73%和0.66%<sup>[16]</sup>。

使用电子束-聚焦离子束双束电镜FIB\_Helios 5UX对样品横切面进行薄膜制样,通过透射电子显微镜Talos F200X在200 keV下检查生长的层的结构。拉曼光谱测试系统采用波长 $\lambda = 532$  nm的激光器,产生的激光通过显微镜组和布拉格光栅短波滤波片进入显微镜镜头(物镜:50倍,NA=0.8),收集的信号通过光纤进入搭配2400 g/mm光栅的液氮冷却CCD探测器的拉曼光谱仪。对处于Montana Instruments的Cryostation S50低温平台的三块GaAs<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub>/InP异质结样品S1(Sb=37.9%)、S2(Sb=47.7%)和S3(Sb=56.2%)的扫描测试,记录了拉曼位移与线宽的温度依赖关系。同时结合激光器 $\lambda = 532$  nm搭配InGaAs探测器进行了低温光致发光(PL),PL信号由0.5 m光栅单色仪收集。

## 2 结果与讨论

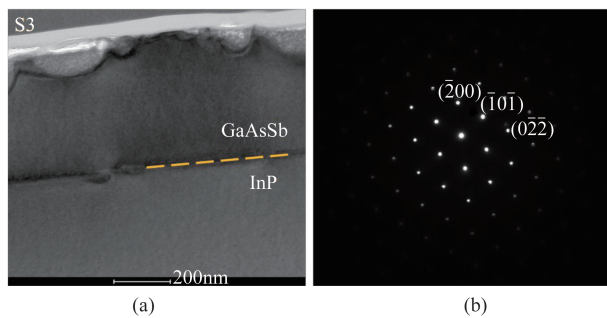


图1 (a) GaAs<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub>/InP(x=56.2%)异质结的截面透射电镜明场像(BF-TEM), (b) 对应的选区电子衍射斑点(SAED)  
Fig. 1 (a) BF-TEM of cross section of GaAs<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub>/InP(x=56.2%) heterojunction, (b) the corresponding selected area electron diffraction (SAED)

为了表征异质结样品的微观形貌,使用透射电镜显微镜来观察生长结构。如图1(a)所示,为GaAs<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub>/InP(x=56.2%)异质结的堆叠的结构截面(110)的透射电镜明场像,可以清晰地看到在衬底InP上生长出高质量的GaAsSb外延层,膜厚约500 nm,在界面处有少量缺陷。结合使用红外反射光谱与扫描电子显微镜(SEM)图确定薄膜厚度分别是:S1(Sb=37.9%)~495 nm、S2(Sb=47.7%)~477 nm和S3(Sb=56.2%)~503 nm,与TEM明场像结果相吻合。图1(b)为截面对应的选区电子衍射光斑,可以看出样品是一个典型的闪锌矿结构,并且与衬底失

配度较小。所以,需要进一步使用光学手段对GaAsSb合金材料的(线)缺陷进行探究。

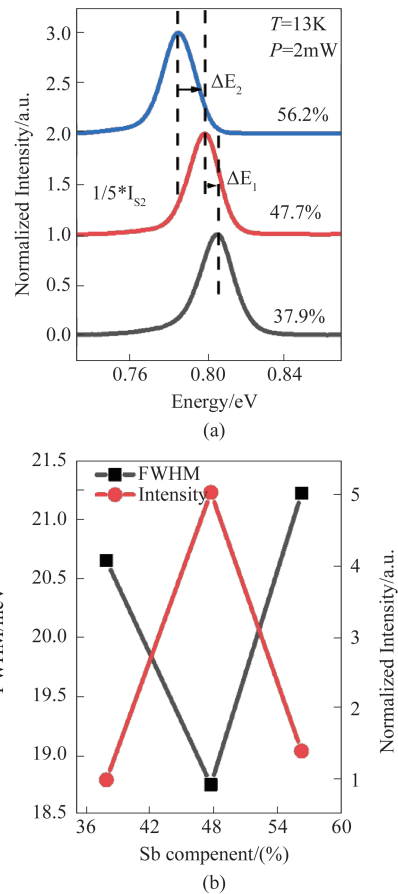


图2 (a) 三块样品S1(Sb=37.9%)、S2(Sb=47.7%)和S3(Sb=56.2%)在13 K下,功率为2 mW的荧光发光光谱, (b) PL光谱的半峰宽和强度的组分依赖关系趋势图  
Fig. 2 (a) The photoluminescence spectra of the three samples S1(Sb=37.9%), S2(Sb=47.7%) and S3(Sb=56.2%) at 13 K with a power of 2 mW, (b) the compositional dependence trend diagram of PL spectra's half-peak width and intensity

光致发光(PL)光谱作为一种无损的测试方法,可以评估和表征材料的界面质量,光学以及结构特征。在低温( $T=13$  K)低激发功率( $P=2$  mW)下,测量的具有不同Sb组分的GaAs<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub>外延层的典型PL光谱如图2(a)所示,发现其发光峰位在~0.8 eV近红外波段附近,并且随着组分增大,其发光峰位逐渐位移,这和文献报道的一致。<sup>[10, 17-19]</sup>图2(b)展示了发光谱线宽和强度随Sb组分的变化,可以看到样品S2(Sb=47.7%)的发光强度相对晶格失配的S1(Sb=37.9%)和S3(Sb=56.2%)强了约五倍,发光半峰宽是最窄的,只有~18.7 meV,这表明我们生长的高质

量的GaAsSb外延层,而伴随着晶格失配引入的(线)缺陷会强烈影响其发光强度和线宽。通常对半导体合金体系,其组分无序度正比于 $\sqrt{x(1-x)}$ <sup>[20]</sup>,因此只考虑合金散射对线宽的影响,S2样品应该具有最大的线宽。这里由于S2样品是和衬底晶格匹配样品,样品晶格质量受应变的影响最小。而对于S1和S3样品,是和衬底晶格失配的样品,综合晶格失配引入的(线)缺陷增多导致声子散射增强和合金无序度等影响,从而造成其发光线宽展宽和光致发光强度的衰减。因此考虑发光线宽不仅要考虑合金散射的影响还要考虑衬底的应变引入的缺陷散射影响。

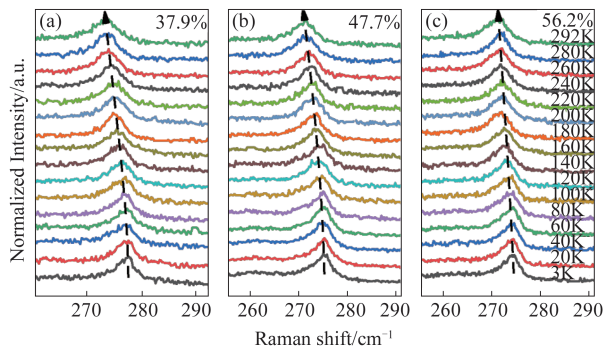


图3 不同Sb组分的GaAs<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub>/InP异质结样品低功率下的温度依赖的拉曼光谱 (a)样品S1(Sb=37.9%), (b)样品S2(Sb=47.7%), (c)样品S3(Sb=56.2%) (虚线箭头为峰位位移变化趋势)

Fig. 3 Temperature-dependent Raman spectra of GaAs<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub>/InP heterojunction samples with different Sb components at low power (a) Sample S1 (Sb=37.9%), (b) sample S2 (Sb=47.7%), (c) sample S3 (Sb=56.2%) (dashed arrow is the trend of peak displacement)

针对不同Sb掺杂的GaAs<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub>外延层样品,对样品开展了进行3~300 K的变温拉曼光谱的测试。从图3中可以看出,随着温度的升高,拉曼峰位向低波数移动,线宽也有一定程度的展宽,并且不同Sb掺杂,声子频率和展宽的变化程度有一定的差异。单声子LO模的峰位中心和线宽随温度的变化而变化。Balkanski等人<sup>[21]</sup>用振动势的非谐性来解释这种变化,这导致一个光学声子衰减为两个、三个或更多的声学声子,从而产生三次和四次的非谐性。根据他们的计算,单声子LO模的峰位中心对温度的依赖性<sup>[22-26]</sup>可以写成

$$\omega(T) = \omega_0 + \Delta(T) \quad (1)$$

$$\Delta(T) = A \left\{ 1 + \frac{2}{e^x - 1} \right\} + B \left\{ 1 + \frac{3}{e^y - 1} + \frac{3}{(e^y - 1)^2} \right\} \quad (2)$$

其中 $x = \hbar\omega_0/2k_B T$ 和 $y = \hbar\omega_0/3k_B T$ , $\omega_0$ 表示为在0 K时的声子频率, $\hbar$ 为普朗克常数, $k_B$ 为玻尔兹曼常数, $A$ 和 $B$ 分别代表不同的非谐常数, $A$ 与三声子衰变过程相关, $B$ 与四声子相关,式(2)称为四声子模型。三声子与四声子过程的相互作用耦合可通过矩阵元素描述。Prabhat Verma<sup>[27]</sup>和C. Ramkumar<sup>[13]</sup>等人认为在远低于德拜温度的情况下,高次非谐项四次的影响可以忽略不计,三声子相互作用在非谐项中占主要成分。式(2)中的常数 $B$ 可以忽略

$$\Delta(T) = A \left\{ 1 + \frac{2}{e^x - 1} \right\} \quad (3)$$

式(3)称为三声子模型。三声子模型和四声子模型的区别在于是否将四声子对非谐项的影响考虑在内。线宽涉及声子的衰变过程的生命周期,拉曼测量中线宽展宽的分析可以作为间接测量布里渊区中心一阶光学声子寿命的方法,光学声子的寿命可以用一个简单的关系来计算

$$\tau = \frac{1}{\pi c \Gamma} \quad (4)$$

其中 $c$ 为光速, $\Gamma$ 为拉曼测量得到的一阶LO声子模的线宽,可根据式(4)来计算不同Sb组分的GaAs<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub>/InP异质结的光学声子的寿命。为了分析振动势的非谐性,利用三声子和四声子模型分别对样品S1、S2和S3的温度依赖的拉曼峰进行分析,如图4所示。当温度 $T \leq 100$  K时,拉曼峰表现出弱的温度依赖关系,表明声子自身性质在这段温区内起主要作用。另外实验结果与三声子模型理论结果略有差异,主要归因于GaAs与GaSb的德拜温度分别为360 K和300 K,接近实验测试的温度,这里需要同时考虑三声子与四声子的相互作用(如图3中的实线所示)。可以发现样品的四声子模型理论与实验更吻合,具体拟合参数列在表1。

从表1可以发现,样品S2(Sb=47.7%)的参数 $A$ 和 $B$ 值均小于S1(Sb=37.9%)和S3(Sb=56.2%),表明其LO声子的非谐性最小。半导体三元合金体系在低温下的声子非谐效应主要是由合金成分无序引起的。合金诱导的成分无序导致了振动特性的改变,包括声子频率的改变、线宽的改变、不对称性和无序激活模式的出现。这种强烈的温度依赖性表明,合金成分无序引起的非谐性占主导地位。样

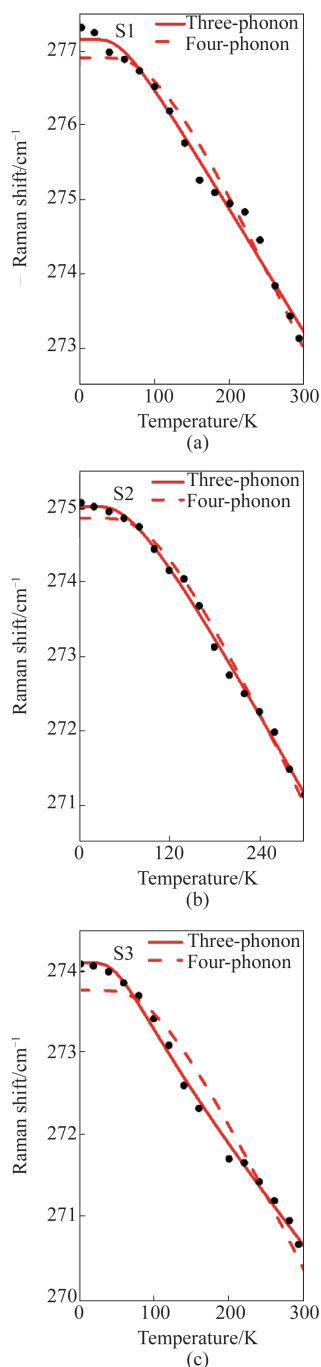


图4 不同Sb组分的GaAs<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub>外延层的温度依赖拉曼峰位变化趋势 (a) 样品 S1 (Sb=37.9%), (b) 样品 S2 (Sb=47.7%), (c) 样品 S3 (Sb=56.2%)

注:虚线为三声子模型拟合曲线,实线为四声子模型

Fig. 4 Temperature dependent Raman peak variation trend of GaAs<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub> epitaxial layer with different Sb components (a) Sample S1 (Sb=37.9%), (b) sample S2 (Sb=47.7%), (c) sample S3 (Sb=56.2%)

Note: Dashed line is three-phonon model fitting curve, solid line is four-phonon model fitting curve

表1 四声子模型拟合参数

Table 1 Four-phonon model fitting parameters

Sb/ (%)	$\omega_0/\text{cm}^{-1}$	$A/\text{cm}^{-1}$	$B/\text{cm}^{-1}$
37.9	277.5±2.0	2.13±3.14	-2.13±1.13
47.7	276.3±1.1	0.08±1.64	-1.35±0.59
56.2	272.2±1.1	4.82±1.86	-2.90±0.68

品 S3 和 S1 的非谐度均大于 Sb=47.7% 组分的 S2 样品,与 C. Ramkumar 等人<sup>[13]</sup>在三元合金 GaAs<sub>1-x</sub>P<sub>x</sub> 中合金组分在 P~0.5 时非谐度最大这一结论不相符,这是由于他们没有考虑衬底引起的晶格失配对声子非谐度的影响。由于样品 S1 和 S3 与衬底晶格失配会引入双轴应变,导致线缺陷增多,而样品 S2 与衬底的晶格失配很小,晶格质量好,由此声子受应变引起的线缺陷少,引起的声子散射强度低,因而非谐度是最小的。

为了更好地表征 GaAs<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub>/InP 异质结的晶体结构的组分依赖关系,如图 5(a) 所示, GaAsSb 合金的不同组分在  $T = 80 \text{ K}$  下的拉曼光谱,从图中可以看出,样品 S2 (Sb=47.7%) 的半峰宽是明显窄于 S3 (Sb=56.2%) 的,与图 2 光致发光光谱线宽最窄这一结果是对应的。在合金半导体中引起光学声子寿命展宽的过程有两种:一种是由光学声子向低能量声子的非谐波衰变引起的,另一种是由成分无序散射引起的。光学声子由于非谐过程而衰减为两个或两个以上的低能量声子,从而缩短了它们的寿命。一般来说,载流子的弛豫通常是由相互作用强的光学声子衰变为相互作用弱的声子所决定的。使用(4)式估算 GaAsSb 外延层在温度  $T=80 \text{ K}$  和  $T=300 \text{ K}$  下的声子寿命,图 5(b) 所示为声子寿命与组分依赖关系图,具体关于寿命和不对称性与 Sb 组分之间的关系由表 2 给出。半峰宽最窄的样品 S2 的声子寿命是远高于 S3 的,与表 1 中样品 S2 的非谐度小于 S1 和 S3 的拟合结果是一致的。与 R. M. Cohen 等人<sup>[9]</sup>认为 GaAs<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub> 的 LO 声子峰的线宽和不对称性当  $x=0.5$  时达到最大值的结论相反,对半导体合金体系,其组分无序度正比于  $\sqrt{x(1-x)}$ <sup>[20]</sup>,因为合金组分越接近  $x \sim 0.5$  形成的合金统计无序形成的合金声子散射最强,但是由于样品 S2 (Sb=47.7%) 的晶格和衬底失配很小,形成的(线)缺陷最少,声子受(线)缺陷的散射最小,因而声子寿命最长。这和前面对低温光致发光的结果是一致的。具体定量分析(线)缺陷与 Sb 组分的关系需要进一步工作。

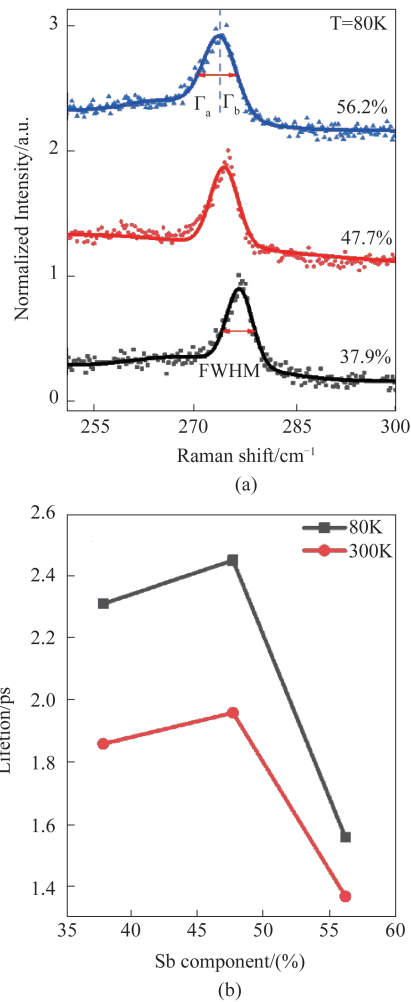


图5 (a) 不同Sb组分的GaAsSb外延层在 $T = 80\text{ K}$ 时的拉曼拟合光谱,(b)  $T = 80\text{ K}$ 和 $T = 300\text{ K}$ 的寿命变化的组分依赖关系趋势图

Fig. 5 (a) Raman fitting spectra of GaAsSb epitaxial layer with different Sb components at  $T=80\text{ K}$ , (b) compositional dependence trend of life change at temperatures  $T=80\text{ K}$  and  $T=300\text{ K}$

表2 不同组分下的GaAsSb材料的寿命与对称性

Table 2 Lifetime and symmetry of GaAsSb materials in different components

	Temperature/K	37.9/(%)	47.7/(%)	56.2/(%)
Lifetime/ps	80	2.31	2.45	1.56
	300	1.86	1.96	1.37
$\Gamma_a/\Gamma_b$	300	1.26	1.31	1.48

受合金散射的影响,声子拉曼峰位出现不对称性,定义为 $\Gamma_a/\Gamma_b$ ( $\Gamma_a$ 为低能量侧的半线宽, $\Gamma_b$ 为高能量侧的)。通过对300 K下的数据提取,随着Sb组分的增大,非对称参数逐渐增大。我们基于温度依赖性拉曼散射关于GaAs<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub>/InP异质结的晶体弛

豫时间和不对称性的分析与实验结果基本一致。这种不对称性和晶格失配关系还需要进一步的实验研究。

### 3 结论

利用变温拉曼光谱(3~300 K),对GaAs<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub>/InP异质结不同Sb组分形成的晶格匹配的样品S2(Sb=47.7%)和晶格失配的样品S1(Sb=37.9%)和S3(Sb=56.2%)进行温度依赖的声子特性的对比探究。利用考虑到非谐声子的三声子和四声子模型对GaAs-Sb合金拉曼散射的温度依赖关系进行分析,结果显示四声子模型实验和理论符合的更好,表明四声子过程是引起薄膜拉曼光谱随温度变化的重要因素,同时提出了温度系数和非谐性常数与GaAsSb薄膜元素组成的依赖关系,结果表明晶格匹配的样品S2(Sb=47.7%)的声子非谐度最小,其声子弛豫寿命是最长的。结合光致发光的实验结果,发现GaAs<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub>/InP异质结的声子非谐效应和LO声子寿命不仅受Sb组分带来的合金无序散射影响,还受到晶格失配引入的(线)缺陷的影响对其声子散射增强的影响。结果表明要降低声子的声子非谐效应和提高声子寿命,减少晶格失配引入的应变是非常重要的。

### References

- [1] Dheeraj D L, Patriarche G, Largeau L, *et al.* Zinc blende GaAsSb nanowires grown by molecular beam epitaxy [J]. *Nanotechnology*. 2008, **19**(27):275605.
- [2] Huh J, Kim D C, Munshi A M, *et al.* Low frequency noise in single GaAsSb nanowires with self-induced compositional gradients[J]. *Nanotechnology*. 2016, **27**(38):385703.
- [3] Ma L, Zhang X, Li H, *et al.* Bandgap-engineered GaAsSb alloy nanowires for near-infrared photodetection at 1.31 $\mu\text{m}$  [J]. *Semiconductor Science and Technology*. 2015, **30**(10): 6-12.
- [4] Ren D, Dheeraj D L, Jin C, *et al.* New insights into the origins of Sb-induced effects on self-catalyzed GaAsSb nanowire arrays [J]. *Nano Letters*. 2016, **16** (2) : 1201-1209.
- [5] Qiu W Y, Wang X J, Chen P P, *et al.* Optical spin polarization and Hanle effect in GaAsSb: Temperature dependence[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, **105**(8):082104.
- [6] Ahmad E, Karim M R, Hafiz S B, *et al.* A two-step growth pathway for high Sb incorporation in GaAsSb nanowires in the telecommunication wavelength range [J]. *Nature*. 2017, **7**(1):10111
- [7] Chou C Y, Torfi A, Wang W I, *et al.* Improvement of GaAsSb alloys on InP grown by molecular beam epitaxy with substrate tilting[J]. *Journal of Applied Physics*. 2013, **114**(15):17-22.
- [8] Li Z, Yuan X, Fu L, *et al.* Room temperature GaAsSb sin-

- gle nanowire infrared photodetectors [J]. *Nanotechnology*. 2015, **26**(44):445202.
- [9] Cohen R M, Cherng M J, Benner R E, *et al.* Raman and photoluminescence spectra of GaAs $_{1-x}$ Sb $_x$ [J]. *Journal of Applied Physics*. 1985, **57**(10):4817–4819.
- [10] Das S, Sharma A S, Bakshi S, *et al.* Photoluminescence investigation of the properties of GaAsSb in the dilute Sb regime[J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2020, **31**(8):6255–6262.
- [11] Gao X, Zhao F, Fang X, *et al.* Optical characteristics of GaAsSb alloy after rapid thermal annealing [J]. *Semiconductor Science and Technology*. 2017, **32**(11):114007.
- [12] Verma P, Abbi S C, Jain K P, *et al.* Raman-scattering probe of anharmonic effects in GaAs[J]. *Phys Rev B Condens Matter*. 1995, **51**(23):16660–16667.
- [13] Ramkumar C, Jain K P, Abbi S C, *et al.* Raman-scattering probe of anharmonic effects due to temperature and compositional disorder in III-V binary and ternary alloy semiconductors [J]. *Physical Review B*. 1996, **53**(20):13672–13681.
- [14] Linde von der D, Kuhl J, Klingenberg H, *et al.* Raman Scattering from Nonequilibrium LO Phonons with Picosecond Resolution [J]. *Physical Review Letters*. 1980, **44**(23):1505–1508.
- [15] Kash J A, Ulbrich R G, Tsang J C, *et al.* Quantitative measurements of intervalley and carrier-carrier scattering in GaAs with hot luminescence[J]. *Solid State Electronics*. 1989, **32**(12):1277–1281.
- [16] Liu Y M, Chu Y Y, Lu Y, *et al.* Lattice-optimized GaAs-Sb/InP heterojunction toward both efficient carrier confinement and thermal dissipation [J]. *Physica Status Solidi-Rapid Research Letters*. 2020,**14**(6):2000108.
- [17] Bremner S P, Ghosh K, Nataraj L, *et al.* Influence of Sb/As soak times on the structural and optical properties of GaAsSb/GaAs interfaces[J]. *Thin Solid Films*. 2010, **519**(1):64–68.
- [18] Deshmukh P, Sharma M, Nalamati S, *et al.* Molecular beam epitaxial growth of high-quality Ga-catalyzed GaAs $_{1-x}$ Sb $_x$  ( $x>0.8$ ) nanowires on Si(111) with photoluminescence emission reaching 1.7  $\mu\text{m}$  [J]. *Semiconductor Science and Technology*. 2018, **33**(12):125007.
- [19] Morozov S V, Kryzhkov D I, Gavrilenko V I, *et al.* Determination of the heterojunction type in structures with GaAsSb/GaAs quantum wells with various antimony fractions by optical methods [J]. *Semiconductors*. 2012, **46**(11):1376–1380.
- [20] Dietrich C P, Lange M, Benndorf G, *et al.* Competing exciton localization effects due to disorder and shallow defects in semiconductor alloys [J]. *New Journal of Physics*. 2010, **12**(3):003030.
- [21] Balkanski M, Wallis R F, Haro E. Anharmonic effects in light scattering due to optical phonons in silicon [J]. *Physical Review B*. 1983, **28**(4):1928–1934.
- [22] Maćzka M, Sanjuán M L, Fuentes A F, *et al.* Temperature-dependent Raman study of the spin-liquid pyrochlore Tb $_2$ Ti $_2$ O $_7$  [J]. *Physical Review B*. 2008, **78**(13):134420.
- [23] Silveira J V, Vieira L L, Filho J M, *et al.* Temperature-dependent Raman spectroscopy study in MoO $_3$  nanoribbons [J]. *Journal of Raman Spectroscopy*. 2012, **43**(10):1407–1412.
- [24] Stanchik A V, Tivanov M S, Tyukhov I I, *et al.* Temperature dependence of Raman scattering in the Cu $_2$ ZnSnSe $_4$  thin films on a Ta foil substrate [J]. *Solar Energy*. 2020, **201**:480–488.
- [25] Hung L X, Nga P T, Dat N N, *et al.* Temperature Dependence of Raman and photoluminescence spectra of ternary alloyed CdSe $_{0.3}$ Te $_{0.7}$  quantum dots [J]. *Journal of Electronic Materials*. 2020, **49**(4):2568–2577.
- [26] Chen Y Q, Peng B, Wang B. Raman spectra and temperature-dependent raman scattering of silicon nanowires [J]. *The Journal of Physical Chemistry C*. 2007, **111**(16):5855–5858.
- [27] Prema Rani M, Saravanan R. Influence of silicon and boron doping on the thermal conductivity of n-gaas single crystals [J]. *Materials Science Forum*, **671**(12):153–163.