

文章编号:1001-9014(2007)01-0005-05

InAs_{0.96}Sb_{0.04} 红外薄膜的光学性质研究

邓惠勇, 方维政, 洪学鹏, 戴宁

(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)

摘要:采用水平滑移石墨舟液相外延生长技术在 *n* 型(100)InAs 衬底上生长了 InAs_{0.96}Sb_{0.04} 薄膜. 在 1.5~5.5 eV 光子能量范围采用紫外—可见光椭圆偏振光谱仪于室温下测试了其介电函数谱 $\varepsilon(E)$. 基于电子带间跃迁和联合态密度理论, 采用 S. Adachi 的 MDF 模型对 $\varepsilon(E)$ 进行了拟合, 并计算了各种临界点电子跃迁对 $\varepsilon(E)$ 的贡献. 结果表明: 实验数据与模型吻合得非常好, E_1 和 $E_1 + \Delta_1$ 跃迁发生在布里渊区(BZ)的 Λ 轴或 L 点, 分别对应于 M_1 型临界点 $A_5^+ \rightarrow A_6^+$ (或 $L_{4,5}^+ \rightarrow L_6^+$) 和 $A_6^+ \rightarrow A_6^+$ (或 $L_6^+ \rightarrow L_6^+$) 跃迁; E_2 跃迁是由于 M_1 型和 M_2 型鞍点能量简并引起的, 沿着 BZ 的 Σ 和 Δ 轴方向.

关键词: InAsSb; 光学常数; 椭圆偏振光谱; 液相外延
中图分类号: TN4 **文献标识码:** A

INVESTIGATIONS ON OPTICAL PROPERTIES OF InAs_{0.96}Sb_{0.04} INFRARED THIN FILMS

DENG Hui-Yong, FANG Wei-Zheng, HONG Xue-Kun, DAI Ning
(National Laboratory for Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: InAs_{0.96}Sb_{0.04} infrared thin films were grown by liquid phase epitaxy on *n*-type (100) InAs substrate by using horizontally sliding multi-wells graphite boats. The dielectric function $\varepsilon(E)$ was measured by using spectroscopic ellipsometry at room temperature within 1.5-5.5 eV. Based on the theory of the electronic interband transition and joint state density, the $\varepsilon(E)$ spectra were analyzed by S. Adachi's MDF model and the individual contribution from each critical point (CP) was also calculated. The results show that excellent agreement between the model calculation and the experimental data is achieved over the entire energy range studied. E_1 and $E_1 + \Delta_1$ transitions are assigned to M_1 -type $A_5^+ \rightarrow A_6^+$ (or $L_{4,5}^+ \rightarrow L_6^+$) and $A_6^+ \rightarrow A_6^+$ (or $L_6^+ \rightarrow L_6^+$), respectively, which are along the Λ symmetry axis (or near the L point) in the first Brillouin zone (BZ). E_2 transition, which is due to the degenerate of M_1 -type and M_2 -type CPs, is expected to take place along Σ or Δ axis.

Key words: InAsSb; optical constants; ellipsometric spectra; liquid phase epitaxy

引言

近年来,人们对于室温红外探测材料的需求刺激了 As—基和 Sb—基 III—V 族化合物半导体材料的研究. InAs_{1-x}Sb_x 是一种重要的红外材料,长期以来一直是 3~5 μm 波段研究的热点材料之一,已制成各种类型的室温中红外光电器件^[1-3]. 尽管室温下 InAs 和 InSb 的带隙(E_g)对应的波长都在 3~8 μm , 但通过调节 InAs_{1-x}Sb_x 化合物的组份 x , 其截止波长能达到 12 μm . 特别是近 10 年来,远红外波段(8~

12 μm) 室温工作 InAs_{1-x}Sb_x 光电器件的报导使得其成为最热门的室温远红外探测材料之一^[2,3]. 光学性质的测试是研究半导体能带结构的有效方法^[4]. 电子导带(VB)和价带(CB)之间的联合态密度的性质决定了半导体材料的介电函数 $\varepsilon(E)$, 在联合态密度的临界点, $\varepsilon(E)$ 表现出的典型结构反映了其能带结构. 目前, InAs_{1-x}Sb_x 光学性质的研究主要集中在本征吸收区(E_g 能量)附近的电子跃迁, 对应于布里渊区(BZ)的中心(Γ 点). 对于发生在 BZ 其它对称轴和对称点的能量大于 E_g 的高阶电子跃迁的研

收稿日期:2006-05-30, 修回日期:2006-11-27

Received date: 2006-05-30, revised date: 2006-11-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(10334030, 60221502)

作者简介:邓惠勇(1977-),男,湖北武汉人,助研,主要从事 III—V 族窄带隙半导体材料与器件的研究.

究甚少,其跃迁发生的光子能量在紫外—可见光波段. 本文通过采用紫外—可见光椭圆偏振光谱仪对 $\text{InAs}_{0.96}\text{Sb}_{0.04}$ 薄膜的光学性质进行了详细研究,并采用 S. Adachi 的 MDF 模型分析了各种高阶临界点的跃迁.

1 实验过程

$\text{InAs}_{0.96}\text{Sb}_{0.04}$ 薄膜采用水平滑移石墨舟液相外延生长系统生长在(100)取向的砷化铟(InAs)衬底上. 为了得到高纯的外延层,去除杂质硅(Si)、氧(O)等元素,在整个生长过程中始终通入高纯氢气(H_2). 使用的原料为高纯的铟(In)(7N)、锑(Sb)(6N)和 InAs(6N). 采用高纯去离子水和 MOS 级的盐酸(HCl)混合液(体积比为 1:1)清洗 In 和 Sb 各 30 秒,采用 MOS 级双氧水(H_2O_2)和硝酸(HNO_3)混合液(体积比为 5:3)清洗 InAs 衬底 70 秒,然后用氮气(N_2)吹干. 在生长之前,石英炉先抽真空并在 800°C 高温下烘烤 4 小时,然后在高纯 H_2 气氛下 800°C 高温烘烤 4 小时. InAs 衬底放入衬底槽,回溶原料和生长原料依次入第一个、第二个液槽. 在外延生长 $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ 前,先让 InAs 衬底与回溶液作用几秒钟,以清洁其表面. 生长初始温度为 520°C ,降温速率为 $0.4^\circ\text{C}/\text{min}$,生长时间约为 10min.

采用 X 射线衍射(XRD)表征薄膜的结晶性和取向性, $\text{Cu K}\alpha$ 射线衍射源的 $\text{K}\alpha_1$ 线与 $\text{K}\alpha_2$ 线强度比为 2:1. 薄膜表面形貌和横截面的表征采用美国 FEI 公司生产的 Sirion200D1615 场发射扫描电镜(SEM),测试过程中加速电压为 5.03 kV. 采用椭圆偏振光谱仪测量了薄膜的介电函数谱,能量范围为 1.5~5.5 eV,入射角为 65° .

2 结果与讨论

图 1 为生长在(100)取向 InAs 衬底上 $\text{InAs}_{0.96}\text{Sb}_{0.04}$ 的 XRD 图谱. 可以发现,除了(200)与(400)衍射峰,没有观察到其它的峰,说明薄膜结晶取向良好,并且与衬底取向一致. 薄膜的(400)半高宽(FWHM)约为 $216''$,表明其结晶性很好. 插图为其放大的(400)衍射峰,可以发现峰 B 的强度为峰 A 的强度一半,因而,峰 A 和 B 被指认为薄膜的 $\text{K}\alpha_1$ 和 $\text{K}\alpha_2$ 峰. 峰 C 位置为 61.28° ,与 InAs 衬底材料的 $\text{K}\alpha_2$ 峰相一致,而位于 61.12° 的 $\text{K}\alpha_1$ 峰由于被峰 C 掩盖而无法辨认. SEM 研究表明,所制备的样品表面光滑,薄膜厚度约为 $4\mu\text{m}$.

薄膜室温介电函数 $\varepsilon(E)$ 的测量采用椭圆偏振

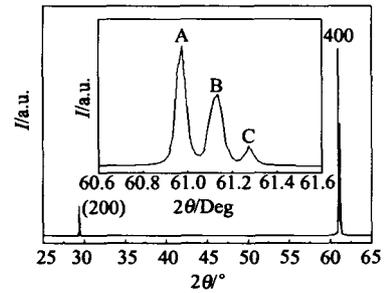


图 1 生长在(100)取向 InAs 衬底上 $\text{InAs}_{0.96}\text{Sb}_{0.04}$ 薄膜的 XRD 图谱. 插图为(400)衍射峰的细节结构
Fig. 1 XRD pattern of $\text{InAs}_{0.96}\text{Sb}_{0.04}$ film grown on (100) InAs substrate. The inset is the detailed (400) diffraction peak

光谱(SE),其测量能量范围为 1.5~5.5 eV. 在测试之前,采用 5:3 $\text{H}_2\text{O}_2:\text{HNO}_3$ 腐蚀液去除表面氧化层. 由于在紫外与可见光波段,薄膜的穿透深度小于 50nm,因而我们可以忽略衬底的影响^[5]. 另一方面,尽管 SE 测试对样品的表面非常敏感,然而,样品表面氧化层的厚度小于 2nm,因而不会改变峰的位置,也可以忽略表面氧化层的影响^[6,7]. 因此,我们可以采用两相模型获得薄膜的 $\varepsilon(E)$ ^[6,7],其公式为:

$$\varepsilon = \sin^2 \Phi + \sin^2 \Phi \tan^2 \Phi \left(\frac{1-\rho}{1+\rho} \right)^2 = \varepsilon_1 + i\varepsilon_2 \quad (1)$$

其中

$$\rho = \frac{r_p}{r_s} = (\tan \psi) \cdot e^{i\Delta} \quad (2)$$

其中 r_p 和 r_s 分别为偏振光平行和垂直入射面方向的反射系数,椭圆参数 Ψ 和 Δ 通过测量反射光的偏振状态确定.

对于直接带隙跃迁,介电函数虚部 $\varepsilon_2(E)$ 可表述为

$$\varepsilon_2(E) = \frac{4\pi^2 q^2}{m^2 E^2} \sum_{c,c'} \int_{\text{BZ}} \frac{2dk}{(2\pi)^3} |e \cdot M_{cc'}(k)|^2 \delta[E_c(k) - E_v(k) - E] \quad (3)$$

这里积分是对整个第一 BZ, dk 前的因子 2 是考虑到两种可能的自旋态,其中 $|e \cdot M_{cc'}(k)|^2$ 为动量矩阵元,是 k 的渐变函数,和 δ 函数相比,它随 k 的变化可以忽略,可以近似提到积分号外面来. 因而 $\varepsilon_2(E)$ 主要由联合态密度决定

$$J_{cc'}(E) = \int_{\text{BZ}} \frac{2dk}{(2\pi)^3} \delta[E_{cc'}(k) - E] \\ = \frac{1}{4\pi^3} \int_{E_v=E} \frac{ds}{|\nabla_k E_{cc'}(k)|} \quad (4)$$

其中

$$E_{cc'}(k) = E_c(k) - E_v(k) \quad (5)$$

$$dk = \frac{dE_{cv}}{|\nabla_k E_{cv}(k)|} ds, \quad (6)$$

满足 $|\nabla_k E_{cv}(k)| = 0$ 的 k 点, 是联合态密度的临界点. 当 $\nabla_k E_c(k) = \nabla_k E_v(k) = 0$ 时, 称为极值型临界点, 记为 M_0 (极小值) 和 M_3 (极大值); 当 $\nabla_k E_c(k) - \nabla_k E_v(k) = 0$ 时, 称为鞍点型临界点, 记为 M_1 和 M_2 . 式(4)表明在这些临界点 $\varepsilon_2(E)$ 谱出现典型结构, 分析其电子跃迁对 $\varepsilon_2(E)$ 的贡献, 利用 K-K 关系可得到介电函数实部 $\varepsilon_1(E)$. 对于 III-V 族化合物半导体, S. Adachi 的 MDF 模型关于各临界点电子跃迁对 $\varepsilon(E)$ 的贡献简述如下^[8,9].

(a) E_g 和 $E_g + \Delta_g$ 跃迁发生在 BZ 中心, 属于 3D M_0 型临界点. 对于窄带隙闪锌矿结构半导体, SO 作用导致在 BZ 的 Γ 点能带分裂, Γ_{25}^{VB} (价带) 分裂成四度简并的 Γ_8^{v} 和二度简并的 $\Gamma_7^{\text{v}}, \Gamma_{15}^{\text{v}}$ CB (导带) 分裂成四度简并的 Γ_8^{c} 和二度简并的 Γ_6^{c} . E_g 和 $E_g + \Delta_g$ 跃迁分别对应于 $\Gamma_8^{\text{v}} \rightarrow \Gamma_6^{\text{c}}$ 和 $\Gamma_7^{\text{v}} \rightarrow \Gamma_6^{\text{c}}$ 跃迁, 其对 $\varepsilon(E)$ 的贡献可表达为

$$\varepsilon_g(E) = AE_g^{-3/2} \left[f(\chi_g) + \frac{1}{2} \left(\frac{E_g}{E_g + \Delta_g} \right)^{3/2} f(\chi_{g_s}) \right], \quad (7)$$

其中

$$f(y) = y^{-2} [2 - (1+y)^{1/2} - (1-y)^{1/2}], \quad (8a)$$

$$\chi_g = (E + i\Gamma_g)/E_g, \quad (8b)$$

$$\chi_{g_s} = (E + i\Gamma_g)/(E_g + \Delta_g), \quad (8c)$$

其中 A 和 Γ 分别为强度和展宽因子, 下同.

对于半导体材料, 由于 CB 电子和 VB 空穴之间的作用较弱, 仅仅考虑万尼尔激子对 $\varepsilon(E)$ 的贡献. 通过采用有效质量模型 (EMA) 近似, 与 $E_g/E_g + \Delta_g$ 临界点相联系的分立型万尼尔激子的贡献为

$$\varepsilon_{gex}(E) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_g^{ex}}{n^3} \left[\frac{1}{E_g - (G_g/n^2) - E - i\Gamma_g} + \frac{1}{2} \frac{1}{E_g + \Delta_g - (G_g/n^2) - E - i\Gamma_g} \right], \quad (9)$$

其中 G 是结合能, n 是激子的激发态量子数.

(b) $E_1/E_1 + \Delta_1$ 跃迁. 理论计算和实验结果表明, E_1 和 $E_1 + \Delta_1$ 跃迁发生在 BZ 的 A 轴方向和 L 点, 对应于 3D M_1 型临界点, 其特征为在低能量方向陡峭上升和往高能量方向平缓下降. 它们对 $\varepsilon(E)$ 的贡献可表达为

$$\varepsilon_l(E) = -B_l \chi_{l1}^{-2} \ln(1 - \chi_{l1}^2) - B_{l_s} \chi_{l_s}^{-2} \ln(1 - \chi_{l_s}^2), \quad (10)$$

其中

$$\chi_{l1} = (E + i\Gamma_{l1})/E_1, \quad (11a)$$

$$\chi_{l_s} = (E + i\Gamma_{l1})/(E_1 + \Delta_1), \quad (11b)$$

其中 B 是强度因子, 下同.

鞍点附近能带色散关系具有双曲函数的特征, 与之相联系的激子称为双曲临界点激子. 由于双曲激子跃迁的影响, E_1 和 $E_1 + \Delta_1$ 特征峰变得尖锐, 其对 $\varepsilon(E)$ 的贡献为

$$\varepsilon_{lex}(E) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^3} \left[\frac{B_{lx}}{E_1 - G_{lx}/(2n-1)^2 - E - i\Gamma_{l1}} + \frac{B_{2x}}{(E_1 + \Delta_1) - G_{lx}/(2n-1)^2 - E - i\Gamma_{l1}} \right], \quad (12)$$

(c) E_2 跃迁非常复杂, 通常不对应于单个类型临界点, 为了简化问题, S. Adachi 的 MDF 模型对其用 DHO 模型进行了拟合, 取得了不错的拟合效果, 其表达式为

$$\varepsilon_n(E) = \sum_{j=1}^{n_{osc}} \frac{B_j E_j^2}{E_j^2 - E^2 - iE\Gamma_j}. \quad (13)$$

(d) 非直接跃迁 E_g^{id} . 为了保持准动量守恒, 非直接跃迁 E_g^{id} 通常伴随着一个或多个声子, 其发生的概率非常小. 对于闪锌矿型窄带隙半导体, E_g^{id} 跃迁被认为对应于电子 $\Gamma_8^{\text{v}} \rightarrow X_6^{\text{c}}$ 跃迁, 其对 $\varepsilon(E)$ 的贡献可表达为

$$\varepsilon_{id}(E) = -\frac{2D}{\pi} \frac{(E_g^{id})^2}{(E + i\Gamma)^2} \ln \left(\frac{E_g}{E_g^{id}} \right) + \frac{D}{\pi} \left(1 + \frac{E_g^{id}}{E + i\Gamma} \right) \ln \left(\frac{E + i\Gamma + E_g}{E + i\Gamma + E_g^{id}} \right) + \frac{D}{\pi} \left(1 - \frac{E_g^{id}}{E + i\Gamma} \right) \ln \left(\frac{E + i\Gamma - E_g}{E + i\Gamma - E_g^{id}} \right), \quad (14)$$

其中 D 是强度因子.

综述以上各临界点跃迁对 $\varepsilon(E)$ 的贡献, 介电函数可表达为

$$\varepsilon(E) = \varepsilon_g(E) + \varepsilon_{gex}(E) + \varepsilon_l(E) + \varepsilon_{lex}(E) + \varepsilon_n(E) + \varepsilon_{id}(E), \quad (15)$$

由于 InAs_{1-x}Sb_x 的 E_g 比 InAs (0.34 eV) 的还要小, 在 1.5 ~ 5.5 eV 光子能量范围, 可以忽略 $\varepsilon_g(E)$ 和 $\varepsilon_{gex}(E)$. 另外, 非直接跃迁发生的概率小, 也可以忽略其对 $\varepsilon(E)$ 的贡献 $\varepsilon_{id}(E)$. 因而式(15)可以简化为

$$\varepsilon(E) = \varepsilon_l(E) + \varepsilon_{lex}(E) + \varepsilon_n(E). \quad (16)$$

图 2 为 InAs_{0.96}Sb_{0.04} 薄膜室温介电函数谱, 图 2 (a) 和 (b) 分别给出了虚部和实部. 图中实心圆点为实验数据点, 实线为采用式(16)拟合得到的曲线, 在 1.5 ~ 5.5 eV 光子能量范围拟合曲线与实验数据吻合得非常好. 由于 $n=1$ 和 $n=2$ 的双曲临界点激子对 $\varepsilon(E)$ 的贡献之比为 $(1)^3/(1/3)^3 = 27:1$, 随着 n 增大双曲激子对 $\varepsilon(E)$ 的贡献更迅速下降, 所以我们在拟合过程中仅考虑 $n=1$ 双曲激子对其贡献. 对于 Ge, Si 和 III-V 族化合物半导体, $E_1/E_1 + \Delta_1$ 跃迁曾经被认为发生在 BZ 的 L 点, 对应于 $L_3^{\text{v}} \rightarrow L_1$ 跃迁和

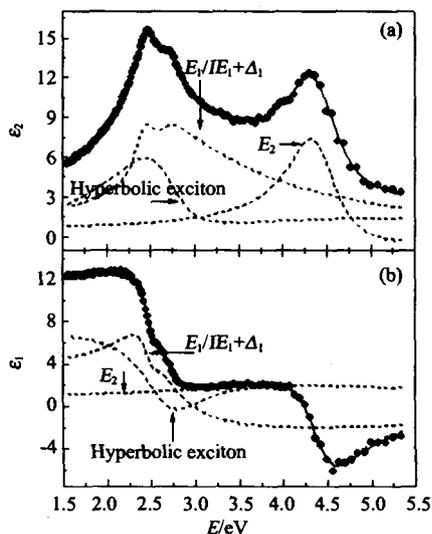


图2 InAs_{0.96}Sb_{0.04}薄膜室温介电函数虚部谱 $\varepsilon_2(E)$ (a) 和介电函数实部谱 $\varepsilon_1(E)$ (b). 实心圆点为实验数据点, 实线为拟合曲线, 虚线为各临界点跃迁对 $\varepsilon(E)$ 的贡献
Fig. 2 Room temperature $\varepsilon_2(E)$ (a) and $\varepsilon_1(E)$ (b) spectra (solid circles) of InAs_{0.96}Sb_{0.04} and the MDf model fit (solid lines). The dashed lines show the calculated individual contributions by E_1 and $E_1 + \Delta_1$, hyperbolic exciton, and E_2 , respectively.

在该点的 SO 分裂, 然而 Brust 等的研究发现 Ge 的 M_1 型 E_1 跃迁 (2.26 eV) 发生在 BZ 的 Λ 轴方向, 即对应 $\Lambda_3 \rightarrow \Lambda_1$ ^[10]. 而且联合态密度的理论表明 E_1 跃迁也最易沿着 Λ 轴发生. 因此, 结合 III-V 族窄带隙化合物半导体的能带结构, E_1 和 $E_1 + \Delta_1$ 跃迁可分别指认为 M_1 型临界点 $\Lambda_3^s \rightarrow \Lambda_1^s$ (或 $L_{4,5}^s \rightarrow L_6^s$) 和 $\Lambda_6^s \rightarrow \Lambda_6^s$ (或 $L_6^s \rightarrow L_6^s$) 跃迁^[7]. 图 2 中的虚线分别为各种临界点电子跃迁对 $\varepsilon(E)$ 的贡献, 曲线 $E_1/E_1 + \Delta_1$ 为 E_1 和 $E_1 + \Delta_1$ 跃迁对其贡献, 可以看出其峰在低能量端陡峭上升和高能量端的平缓下降, 表现出 M_1 型临界点的特征. 我们也可以发现, 由于双曲激子跃迁的影响, E_1 和 $E_1 + \Delta_1$ 峰变得尖锐. D. Brust 等的计算表明对于 Ge、Si 和闪锌矿结构半导体 E_2 峰起源于 $X_4 \rightarrow X_1$ 跃迁 (M_1 型鞍点) 和 $\Sigma_4 \rightarrow \Sigma_1$ 跃迁 (M_2 型鞍点) 能量简并引起^[10]. 另外, 由于反映对称的消除, 闪锌矿结构半导体 X 导带的简并消除了, 于是以 X 导带为终态的跃迁发生分裂, 在一些闪锌矿半导体中 E_2 峰发生分裂, 观察到的双峰结构也证明了这一解释. 为了简化实验的分析, MDf 模型采用单阻尼谐振子模型 (DHO) 对 E_2 峰进行拟合, 结果表明能与实验数据很好的吻合.

复折射率 $n^* = n + ik$ 的折射率 n 和消光系数 k

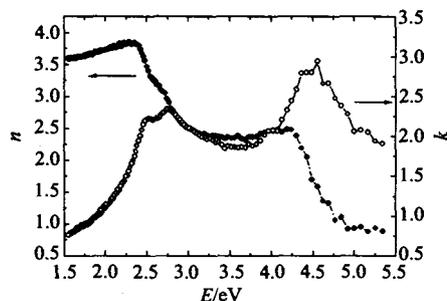


图3 InAs_{0.96}Sb_{0.04}薄膜的折射率 $n(E)$ 和消光系数 $k(E)$ 的色散关系。

Fig. 3 Dispersion relation of refractive index $n(E)$ and extinction coefficient $k(E)$ for InAs_{0.96}Sb_{0.04} film.

与 $\varepsilon(E)$ 的关系如下,

$$n(E) = \left\{ \frac{[\varepsilon_1(E)^2 + \varepsilon_2(E)^2]^{1/2} + \varepsilon_1(E)}{2} \right\}^{1/2}, \quad (17)$$

$$k(E) = \left\{ \frac{[\varepsilon_1(E)^2 + \varepsilon_2(E)^2]^{1/2} - \varepsilon_1(E)}{2} \right\}^{1/2}. \quad (18)$$

我们可以得到其折射率 $n(E)$ 和消光系数 $k(E)$ 的色散关系, 如图 3. 可以发现, $n(E)$ 与 $\varepsilon_1(E)$ 有相似的结构, 随着光子能量的增大, $n(E)$ 逐渐减小, 而 $k(E)$ 与 $\varepsilon_2(E)$ 有相似的结构. 在高阶临界点 E_1 、 $E_1 + \Delta_1$ 和 E_2 处, 消光系数 $k(E)$ 均呈现出极大值, 说明薄膜对此频率的光子吸收较强, 特别是对于 E_2 跃迁, 由于 M_1 型和 M_2 型鞍点能量简并, 导致很高的联合态密度, 因而在此光子能量处出现强烈吸收, $k(E)$ 出现最大值.

3 结论

采用液相外延 (LPE) 生长技术在 n 型 (100) I-nAs 衬底上生长了 InAs_{0.96}Sb_{0.04} 薄膜. XRD 和 SEM 表明获得了表明光滑结晶完整的 (100) 取向单晶薄膜, 薄膜厚度约 4 μm . 用紫外-可见光椭圆偏振光谱仪于室温下研究了其介电函数谱 $\varepsilon(E)$, 并采用 S. Adachi 的 MDf 模型对 $\varepsilon(E)$ 进行了拟合, 分析了在非布里渊区 Γ 点其它高阶临界点的跃迁行为, 结果表明实验数据与模型吻合得非常好. 我们亦得到其折射率 $n(E)$ 和消光系数 $k(E)$ 的色散关系.

REFERENCES

- [1] Rakovska A, Berger V, Marcadet X, et al. Room temperature InAsSb photovoltaic midinfrared detector [J]. *Appl. Phys. Lett.* 2000, 77(3): 397-399.
- [2] Gao Y Z, Gong X Y, Gui Y S, et al. Electrical properties of melt-epitaxy-grown InAs_{0.96}Sb_{0.04} Layers with cutoff wavelength of 12 μm [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.* 2004, 43(3): 1051-1054.

- [3] Kim J D, Kim S, Wu D, *et al.* 8 ~ 13 μm InAsSb hetero-junction photodiode operating at near room temperature [J]. *Appl. Phys. Lett.* 1995, **67**(18): 2645—2647.
- [4] LI Guo-Hua, CHEN Ye, FANG Zai-Li, *et al.* Photoluminescence of low-dimensional semiconductor structures under pressure [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (李国华, 陈晔, 方再利, 等. 半导体低维结构的压力光谱研究. 红外与毫米波学报), 2005, **24**(3): 174—178.
- [5] Hung W K, Chern M Y, Chen Y F, *et al.* Optical properties of GaAs_{1-x}N_x on GaAs [J]. *Phys. Rev. B*, 2000, **62**(19): 13028—13033.
- [6] Aspnes D E, Studna A A. Dielectric functions and optical parameters of Si, Ge, GaP, GaAs, GaSb, InP, InAs, and InSb from 1.5 to 6.0 eV [J]. *Phys. Rev. B*, 1983, **27**(2): 985—1009.
- [7] Deng H Y, Dai N. High-lying interband transitions and optical properties of InAs_{1-x}Sb_x films [J]. *Phys. Rev. B*, 2006, **73**: 113102.
- [8] Adachi S. Model dielectric constants of GaP, GaAs, GaSb, InP, InAs, and InSb [J]. *Phys. Rev. B*, 1987, **35**(14): 7454—7463.
- [9] Adachi S. Optical properties of Al_xGa_{1-x}As alloys [J]. *Phys. Rev. B*, 1988, **38**(17): 12345—12352.
- [10] Brust D, Phillips J C, Bassani F. Critical points and ultraviolet reflectivity of semiconductors [J]. *Phys. Rev. Lett.* 1962, **9**(3): 94—97.

(上接 4 页)

- [6] Watanabe M O, Morizuka K, Mashita M, *et al.* Donor levels in Si-Doped AlGaAs grown by MBE [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1984 **23**: L103—L105.
- [7] Watanabe M O, Maeda H. Electron activation energy in Si-Doped AlGaAs grown by MBE [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1984, **23**: L734—L736.
- [8] ZHANG Yong-gang, GU Yi, ZHU Cheng, *et al.* Fabrication of short wavelength infrared InGaAs/InP photovoltaic detector series [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (张永刚, 顾溢, 朱诚, 郝国强, 等. 短波红外 InGaAs/InP 光伏探测器系列的研制. 红外与毫米波学报), 2006, **25**(1), 6—9.
- [9] HAO Guo-qiang, ZHANG Yong-gang, GU Yi, *et al.* Performance analysis of extended wavelength InGaAs photovoltaic detectors grown with gas source MBE [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (郝国强, 张永刚, 顾溢, 等. 气态源分子束外延生长扩展波长 InGaAs 探测器性能分析. 红外与毫米波学报), 2006, **25**(4), 241—245.
- [10] Vurgaftman I, Meyer J R, Ram-Mohan L R. Band parameters for III - V compound semiconductors and their alloys [J]. *J. Appl. Phys.*, 2001, **89**: 5815—5875.
- [11] Levinshtein M, Rumyantsev S, Shur M. *Handbook Series on Semiconductor Parameters* [M]. Vol. 2 Singapore: World Scientific, 1999, Chap. 1, 5.
- [12] Li A Z, Wang J X, Zheng Y L, *et al.* The behavior of dopant incorporation and internal strain in Al_xGa_{1-x}As_{0.03}Sb_{0.97} grown by molecular beam epitaxy [J]. *J. Crystal Growth*, 1993, **127**: 566—569.
- [13] Hava S, Auslender M. Velocity-field relation in GaAlAs versus alloy composition [J]. *J. Appl. Phys.*, 1993, **73**: 7431—7434.
- [14] El-Ela F M A. Monte carlo simulation of electron transport in AlGaAs [J]. *AIP Conference Proceedings*, 2005, **748**: 86—92.