

# 液相外延制备的 $\text{InAs}_{0.94}\text{Sb}_{0.06}$ 薄膜的光学性质

吕英飞, 周 炜, 王 洋, 俞国林, 胡淑红\*, 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:**采用液相外延方法在 InAs 衬底上制备了  $\text{InAs}_{0.94}\text{Sb}_{0.06}$  外延薄膜. 分别通过高分辨率 X 射线衍射谱和扫描电子显微镜测试对样品的结构特性和截面形貌进行表征分析, 外延薄膜的晶体质量较好. 利用样品在 3 000 ~ 6 000 nm 波段内的椭圆偏振光谱, 结合介电函数模型, 拟合得到了室温下 InAs 衬底和  $\text{InAs}_{0.94}\text{Sb}_{0.06}$  薄膜位于禁带位置附近的折射率和消光系数光谱. 由禁带位置附近的折射率能量增强效应确定  $\text{InAs}_{0.94}\text{Sb}_{0.06}$  薄膜的禁带宽度为 0.308 eV.

**关键词:**液相外延; 砷锑薄膜; 红外椭圆偏; 光学性质  
**中图分类号:** O472+.3 **文献标识码:** A

## Investigations on optical properties of LPE-grown $\text{InAs}_{0.94}\text{Sb}_{0.06}$ film

LV Ying-Fei, ZHOU Wei, WANG Yang, YU Guo-Lin, HU Shu-Hong\*, DAI Ning\*  
(National Laboratory for Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

**Abstract:** High quality  $\text{InAs}_{0.94}\text{Sb}_{0.06}$  films were grown on InAs substrates by the liquid phase epitaxy technique. The structural characteristics and cross-section morphology of  $\text{InAs}_{0.94}\text{Sb}_{0.06}$  samples were investigated by high-resolution *x-ray* diffraction measurements and scanning electronic microscopy measurements, respectively. The refractive index and extinction coefficient spectra of  $\text{InAs}_{0.94}\text{Sb}_{0.06}$  film near the energy band gap were obtained by fitting room temperature infrared spectroscopic ellipsometry with the model of dielectric function in the range of 3 000 to 6 000 nm. The energy band gap of  $\text{InAs}_{0.94}\text{Sb}_{0.06}$  was 0.308 eV, which was determined by refractive enhancement.

**Key words:** liquid phase epitaxy,  $\text{InAs}_{0.94}\text{Sb}_{0.06}$  film, infrared spectroscopic ellipsometry, optical property

**PACS:** 78.20. - e

## 引言

近年来 III-V 族三元合金材料  $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$  引起了人们的广泛关注. 相比于  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  材料, 它的热稳定性好、均匀性好、电子迁移率高<sup>[1]</sup>, 是制备红外光电器件, 如探测器、激光器、发光二极管等的潜力材料, 在气象预报、环境监测、资源分布调查和灾情防治等众多领域有着广阔的应用前景<sup>[2-3]</sup>.

$\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$  材料的折射率、吸收系数以及禁带宽

度等物理参数在器件设计中具有很重要的作用. 其光学性质的研究一般通过光致发光光谱 (PL) 和傅里叶红外透射光谱 (FTIR) 进行<sup>[4-6]</sup>. 然而, 利用 PL 光谱研究  $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$  材料室温下的光学性质较为困难, 而傅里叶红外透射光谱一般难以同时获得材料在吸收边附近的折射率和吸收系数. 椭圆偏振光谱法 (SE, 简称椭圆法) 是一种非接触式光学测量技术, 通过建立适当的椭圆模型并进行迭代拟合, 使椭圆参数  $\Psi$  与  $\Delta$  的计算值与测量值尽量符合, 以反演

收稿日期: 2015-01-20, 修回日期: 2015-08-23

Received date: 2015-01-20, revised date: 2015-08-23

基金项目: 国家自然科学基金 (61274139, 61290304, 11304335); 中科院上海技术物理研究所创新专项 (Q-ZY-127)

Foundation items: Supported by the National Natural Science Foundation of China (61274139, 61290304, 11304335) and the SITP KIP (Q-ZY-127)

作者简介 (Biography): 吕英飞 (1985-), 女, 山东烟台人, 博士研究生, 主要研究领域为 III-V 族半导体材料的液相外延生长与其性质表征. E-mail: yingfei@mail.sitp.ac.cn

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

得到材料的介电函数谱,进而得到材料的折射率、消光系数和禁带宽度等光学参数,在研究 III-V 族半导体材料的光学性质方面发挥了重要作用<sup>[7-8]</sup>.

本研究工作通过液相外延技术(LPE)获得了晶体质量较好的  $\text{InAs}_{0.94}\text{Sb}_{0.06}$  外延薄膜.使用红外椭圆偏振光谱法对  $\text{InAs}_{0.94}\text{Sb}_{0.06}$  外延薄膜的光学性质进行了研究.根据 S. Adachi 等人提出的介电函数模型(MDF),对椭圆偏参数进行拟合,得到了  $\text{InAs}_{0.94}\text{Sb}_{0.06}$  材料的折射率谱、吸收系数谱和禁带宽度<sup>[9]</sup>.

## 1 实验部分

$\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$  薄膜在高纯氢气环境下用传统的水平液相外延系统进行生长.衬底为本征型 InAs (100)单晶片,熔源材料为纯度为 7N 的 In、InAs 单晶碎片和 6N 的 Sb.在外延生长之前,先将熔源材料进行高温熔融,一方面使各种熔源材料混合均匀,另一方面减少了外延薄膜中的杂质含量.液相外延生长所用的方法为超冷法,生长温度为 550 °C,过冷度为 12 °C,降温速率为 0.3 °C/min.

样品表面光滑平整.样品的结构特性和晶体质量通过高分辨 X 射线衍射谱(HR-XRD)(Bruker, Germany, D8/Discover 2000)表征,通过 Ge 单色仪后仅剩余  $\text{Cu } K_{\alpha 1}$  ( $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$ )线.薄膜的厚度通过扫描电子显微镜(SEM)(FEI, USA, Sirion 200D1615)获得.样品的表面形貌通过光学显微镜获得(Leica, Germany, DM4000M).傅里叶红外椭圆偏振测试(J. A. Woollam Co. Inc, USA, IR-Vase)的测量范围为 0.21 ~ 0.41 eV,出光孔光阑直径为 8 mm.椭圆偏测试入射角度取为 65°和 70°.

## 2 结果及讨论

图 1 所示为  $\text{InAsSb}/\text{InAs}$  样品的 HR-XRD 谱.可以看到外延薄膜的(400)衍射峰清晰明显.由于 Sb 元素的引入, $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$  外延薄膜的衍射峰相对于 InAs 衬底的衍射峰向小角度方向移动.首先,运用布拉格方程:

$$2d\sin\theta \quad , \quad (1)$$

晶面间距  $d = \frac{a}{\sqrt{m^2 + n^2 + l^2}}$ ,  $a$  为晶格常数,  $(mnl)$  为密勒指数,  $\theta$  为布拉格衍射角,  $\lambda$  为入射 X 射线的波长.计算得到  $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$  外延薄膜的晶格常数,进而可以得到外延薄膜与 InAs 衬底之间的晶格失配为 0.4%.然后,运用维格定律:

$$a_0 = xa_{\text{InSb}} + (1-x)a_{\text{InAs}} \quad , \quad (2)$$

$a_0$ ,  $a_{\text{InSb}}$  和  $a_{\text{InAs}}$  分别为闪锌矿结构的  $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ , InSb 和 InAs 的晶格常数,  $x$  为外延薄膜中的 Sb 元素含量.计算得到外延薄膜中的 Sb 元素含量  $x = 0.06$ .图 1 中内插图为  $\text{InAs}_{0.94}\text{Sb}_{0.06}$  (400) 衍射峰的摇摆曲线,可以看到外延薄膜的摇摆曲线呈高斯分布,其半高宽为 228 arcsec,外延薄膜的晶体质量较好.

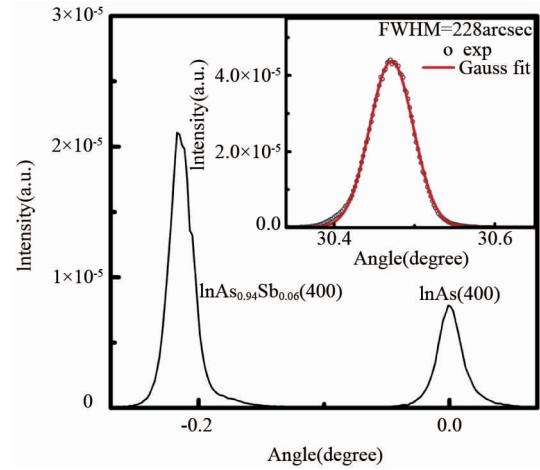


图 1  $\text{InAs}_{0.94}\text{Sb}_{0.06}/\text{InAs}$  样品(400)衍射峰的 HR-XRD 谱.内插图为  $\text{InAs}_{0.94}\text{Sb}_{0.06}$  (400) 衍射峰的摇摆曲线的实验值与高斯函数拟合值  
Fig.1 Typical HR-XRD (400) curve of  $\text{InAs}_{0.94}\text{Sb}_{0.06}$  epilayer grown on InAs substrate. The inset shows the (400) rocking curve of  $\text{InAs}_{0.94}\text{Sb}_{0.06}$  epilayer, which is fitted with a Gaussian function

图 2 所示为  $\text{InAs}_{0.94}\text{Sb}_{0.06}/\text{InAs}$  样品的扫描电子显微镜截面图(图 2(a))和光学显微镜表面形貌图(图 2(b)).可以看到  $\text{InAs}_{0.94}\text{Sb}_{0.06}$  外延薄膜与 InAs 衬底之间的交界面清晰明显,交界面处无孔洞与界面回熔现象出现,薄膜厚度均匀(约为 4  $\mu\text{m}$ ).图 2(b)为外延薄膜表面的光学显微镜图.外延薄膜表面光滑平整,由于较小的晶格失配引起的轻微的 Cross-hatch 形貌明显<sup>[10]</sup>.

椭圆偏振光谱是一种通过拟合椭圆偏参数以获取样品介电函数的方法.椭圆偏测试可不依赖色散模型直接逐点反推获得样品的介电函数,又称为赝介电函数:

$$\begin{aligned} \langle \varepsilon \rangle &= \langle \varepsilon_1 \rangle + i \langle \varepsilon_2 \rangle \\ &= \sin^2 \Phi \left\{ 1 + \left[ \frac{1-\rho}{1+\rho} \right]^2 \tan^2 \Phi \right\} \quad , \quad (3) \end{aligned}$$

椭圆偏参数  $\psi$ ,  $\Delta$  与复反射比  $\rho$  之间满足关系:

$$\rho = R_p/R_s = \tan\psi \cdot e^{i\Delta} \quad , \quad (4)$$

其中,  $\Phi$  为测量时的入射角,  $\psi$  和  $\Delta$  为椭圆偏参数(即椭圆偏仪所需测试的量),  $R_p$  和  $R_s$  分别表示偏振光的

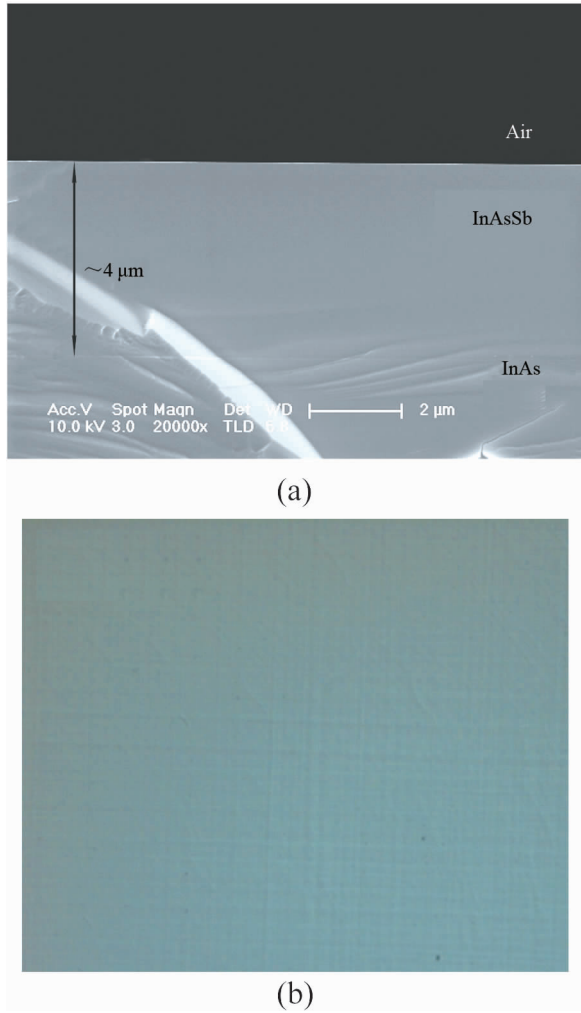


图2 (a)  $\text{InAs}_{0.94}\text{Sb}_{0.06}/\text{InAs}$  样品 SEM 截面图, (b)  $\text{InAs}_{0.94}\text{Sb}_{0.06}/\text{InAs}$  样品光学显微镜表面形貌图

Fig. 2 (a) The cross-section image of  $\text{InAs}_{0.94}\text{Sb}_{0.06}$  epilayer grown on InAs substrate scanned by SEM, (b) The surface morphology of  $\text{InAs}_{0.94}\text{Sb}_{0.06}$  film scanned by optical microscopy

反射系数相对于入射面的平行分量和垂直分量. 如果待测薄膜吸收较小, 则需考虑衬底的情况以及多层薄膜的情形. 赝介电函数给出的是所有薄膜介电函数的整体效果, 因此, 在拟合时需采用适当的介电函数色散模型, 通过数值反演计算得到样品的复介电函数的值.

对于本研究中涉及到的情形,  $\text{InAs}_{0.94}\text{Sb}_{0.06}$  外延薄膜的厚度达  $4 \mu\text{m}$ , 故可近似认为其赝介电函数谱为块体材料特性<sup>[11]</sup>. InAs 衬底表面十分光滑, 其表面粗糙度优于  $1 \text{ nm}$ , 而  $\text{InAs}_{0.94}\text{Sb}_{0.06}$  外延薄膜表面则呈现出规则的织布状纹理, 薄膜表面粗糙度一般为  $10 \text{ nm}$  量级<sup>[12]</sup>. 因此, 在拟合 InAs 衬底的光学常数时, 使用了空气/氧化层/InAs 衬底三相模型. 而在拟合  $\text{InAs}_{0.94}\text{Sb}_{0.06}$  膜层时, 使用了空气/粗糙层/I-

$\text{nAs}_{0.94}\text{Sb}_{0.06}$  膜层三相模型. 分别如图 3 (a) 和图 3 (b) 中的内插图所示.

半导体材料的介电函数可写为:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_1(\omega) + i\varepsilon_2(\omega) \quad , \quad (5)$$

其中,  $\varepsilon_1(\omega)$  和  $\varepsilon_2(\omega)$  分别为介电函数的实部和虚部, 两者之间由 Kramers-Kroing 关系相联系. 半导体材料的介电函数与材料的电子结构密切相关, 在临界点结构附近的光学联合态密度最大, 从而对跃迁有最大贡献并决定了材料的光学性质. 若近似认为半导体材料的导带和价带呈抛物线形分布, 可从 S. Adachi 等人提出的 MDF 模型出发, 推导出最低直接带隙  $E_0$  和  $E_0 + \Delta_0$  对介电函数贡献的表达式<sup>[9,13]</sup>:

$$\varepsilon_j^{\text{Adachi}}(E) = A_j E_j^{-1.5} (\chi_j^{-2} [2 - (1 + \chi_j)^{0.5} - (1 - \chi_j)^{0.5}]) \quad , \quad (6)$$

其中,  $\chi_j = (\hbar\omega + i\Gamma_j)/E_j$  ( $j=0$  指代  $E_0$  位置,  $j = \Delta_0$  指代  $E_0 + \Delta_0$  位置),  $A_j, E_j$  分别代表幅度值和与临界点结构对应的跃迁能量. 材料生长中杂质和晶格缺陷将影响电子态的寿命, 使之呈现一定的展宽, 导致临界点结构附近的光学性质受到一定的影响, 在 MDF 模型中可使用能量展宽因子  $\Gamma_j$  进行描述. 来自于较高能量处临界点结构对介电函数实部的贡献可约化为模型项  $(c + d \cdot E^2 + g \cdot E^4)$ . 定义函数:

$$f(\chi_j) = (\chi_j^{-2} [2 - (1 + \chi_j)^{0.5} - (1 - \chi_j)^{0.5}]) \quad , \quad (7)$$

则 MDF 模型的完整表达式为上述三项之和, 可写为:

$$\begin{aligned} \varepsilon(E) &= \varepsilon_0^{\text{Adachi}}(E) + \varepsilon_{\Delta_0}^{\text{Adachi}}(E) + c + d \cdot E^2 + g \cdot E^4 \\ &= A_0 E_0^{-1.5} f(\chi_0) + A_{\Delta_0} (E_0 + \Delta_0)^{-1.5} f(\chi_{\Delta_0}) + c + d \cdot E^2 + g \cdot E^4 \quad . \quad (8) \end{aligned}$$

下面将基于 MDF 模型分别对 InAs 衬底和  $\text{InAs}_{0.94}\text{Sb}_{0.06}$  外延薄膜的椭圆参数进行拟合.

#### (1) InAs 衬底

InAs 衬底材料椭圆参数的拟合步骤如下:

- I. 建立椭圆拟合结构模型, 对自然氧化层的厚度  $d_{\text{oxi}}$  及折射率  $n$  进行赋值;
- II. 根据参考文献给定材料临界点结构对应跃迁能量  $E_0$  和  $E_0 + \Delta_0$  的值;
- III. 根据参考文献给定非色散项  $c$  的值和展宽因子项  $\Gamma_j$  的值, 将  $d, g$  初步设置为 0;
- IV. 固定以上三步中的各初始值, 对幅度值因子  $A_j$  以及  $d, g$  参数进行拟合;
- V. 对所有待拟合参数进行数据拟合, 得到材料的光学常数.

图 3(a) 中内插图 of InAs 衬底材料的结构模型示意图. 其表面氧化薄层的厚度一般在 1.5 ~ 3 nm, 折射率的取值范围为 1.75 ~ 2.0, 在此范围内改变取值对最终拟合结果的影响可忽略<sup>[14]</sup>. 本文将 InAs 衬底表面氧化层厚度取为 3 nm, 折射率设定为 2, InAs 衬底材料禁带宽度  $E_g$  和自旋—轨道分裂能  $\Delta_o$  的取值分别为 0.355 eV 和 0.400 eV<sup>[15]</sup>, 非色散项  $c$  的取值取为 10.15,  $E_g$  处的展宽因子  $\Gamma_o$  的大小一般为 3 ~ 5 meV, 与椭圆测试最小能量分辨率相当, 此处设为固定值 5 meV. 另外,  $E_g + \Delta_o = 0.755$  eV 超出了椭圆光谱测试的能量范围, 在此将其展宽因子设为固定值  $\Gamma_\Delta = 40$  meV<sup>[16]</sup>. 按照上述步骤拟合, 可得到 InAs 材料椭圆参数的拟合结果(图 3(a)), 得到的 InAs 材料的光学常数如图 3(c) 所示. 具体模型参数的拟合值在表格 1 中列出.

表 1 InAs 衬底及 InAsSb 外延薄膜椭圆参数的拟合值  
Table 1 Fitted values of SE parameters of InAs substrate and InAsSb film

参数	InAs 衬底	InAsSb 薄膜
$A_0$ (eV <sup>1.5</sup> )	0.50	0.41
$E_g$ (eV)	0.351	0.308
$A_{\Delta_0}$ (eV <sup>1.5</sup> )	2.60	2.58
$\Delta_o$ (eV)	0.400	0.353
$c$	10.15	10.34
$d$	5.8	4.9
$f$	-7	-6
$\Gamma_o$ (meV)	5	5
$\Gamma_\Delta$ (meV)	40	40
$d_{oxi}$ (nm)	3	—
$d_{rou}$ (nm)	—	10.6
$f_V$	—	0.72

## (2) $\text{InAs}_{0.94}\text{Sb}_{0.06}$ 薄膜

在  $\text{InAs}_{0.94}\text{Sb}_{0.06}$  材料椭圆参数的拟合过程中采取了如下步骤:

I. 建立椭圆拟合结构模型. 其中粗糙层采用 Bruggeman 型有效介质近似 (EMA), 并对其厚度及空气含量比例  $f_v$  进行初步赋值;

II. 根据参考文献估计材料临界点结构对应跃迁能量  $E_g$  和  $E_g + \Delta_o$  的初始值;

III. 估计非色散项的值和展宽因子项  $\Gamma_j$  的值, 将  $d$ ,  $g$  初步设置为 0;

IV. 固定 I - III 步中的各初始值, 对幅度值因子  $A_j$  以及  $d$ ,  $g$  参数进行拟合;

V. 对  $\text{InAs}_{0.94}\text{Sb}_{0.06}$  材料粗糙层的厚度  $d_{rou}$  及折射率  $n$  进行拟合;

VI. 对所有待拟合参数进行数据拟合, 得到材料的

光学常数.

按照上述拟合步骤首先对粗糙层的厚度及折射率进行了初步赋值. 粗糙层采用 Bruggeman 型 EMA. 粗糙层包含两种物质:  $\text{InAs}_{0.94}\text{Sb}_{0.06}$  薄膜和空气, 设定其厚度初始值为 10 nm, 空气含量比例设定为 0.5. 接着估算了材料临界点结构对应的能量. 在三元合金材料  $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$  中, 材料的禁带宽度和自旋—轨道分裂能  $\Delta_o$  一般随组分  $x$  的改变呈现出抛物线形变化, 可用二次方程式表示<sup>[17]</sup>:

$$T_{ABC}(x) = xT_{AC} + (1-x)T_{BC} + C_j^b x(x-1) \quad (9)$$

式中,  $C_j^b$  为能带弯曲系数,  $T$  为材料的带隙值. 文献报道指出, 临界点  $E_g$  和  $E_g + \Delta_o$  位置处的能带弯曲系数分别为  $C_o^b = 0.58$  和  $C_\Delta^b = 1.2$ . 由公式(9)可得室温下 InAs 和 InSb 材料的能带宽度分别为 0.355 eV 和 0.175 eV; 自旋—轨道分裂能分别为 0.40 eV 和 0.81 eV<sup>[15]</sup>. 将薄膜中 Sb 元素含量  $x = 0.06$  带入式(9)中, 计算可得  $\text{InAs}_{0.94}\text{Sb}_{0.06}$  薄膜的直接带隙能和自旋—轨道分裂能分别为 0.310 eV 和 0.350 eV. 同(1)部分所述,  $\Gamma_o$  设定为 5 meV,  $\Gamma_\Delta$  设定为 40 meV. 非色散项通过对 InAs 和 InSb 材料的参考值线性外插而得到, 此处取  $c = 10.34$ <sup>[17]</sup>. 按照上述步骤 III 到 VI, 可得到  $\text{InAs}_{0.94}\text{Sb}_{0.06}$  材料椭圆参数的拟合结果(图 3(b)), 得到的  $\text{InAs}_{0.94}\text{Sb}_{0.06}$  材料的光学常数如图 3(c) 所示. 具体模型参数的拟合值在表格 1 中列出.

根据公式:

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda} \quad (10)$$

式中,  $\alpha$  为吸收系数,  $k$  为消光系数. 可计算得到 InAs 衬底和  $\text{InAs}_{0.94}\text{Sb}_{0.06}$  膜层的吸收光谱, 如图 4 所示. 本文取拟合所得带隙能量值  $E_g$  为禁带位置, 发现 InAs 衬底和  $\text{InAs}_{0.94}\text{Sb}_{0.06}$  外延薄膜在禁带处的吸收系数均为  $900 \text{ cm}^{-1}$  左右.  $\text{InAs}_{0.94}\text{Sb}_{0.06}$  薄膜禁带宽度的椭圆法拟合值为 0.308 eV. 根据 Clawson 等人提出的经验公式<sup>[18-19]</sup>:

$$E_g = 0.411 - \frac{3.4 \times 10^{-4} T^2}{210 + T} - 0.876x + 0.7x^2 + 3.4 \times 10^{-4} xT(1-x) \quad (11)$$

计算得到室温下  $\text{InAs}_{0.94}\text{Sb}_{0.06}$  外延薄膜的禁带宽度的理论计算值为 0.306 eV, 与椭圆测试拟合计算的结果符合较好.

## 3 结论

使用红外椭圆偏振光谱法研究了  $\text{InAs}_{0.94}\text{Sb}_{0.06}$



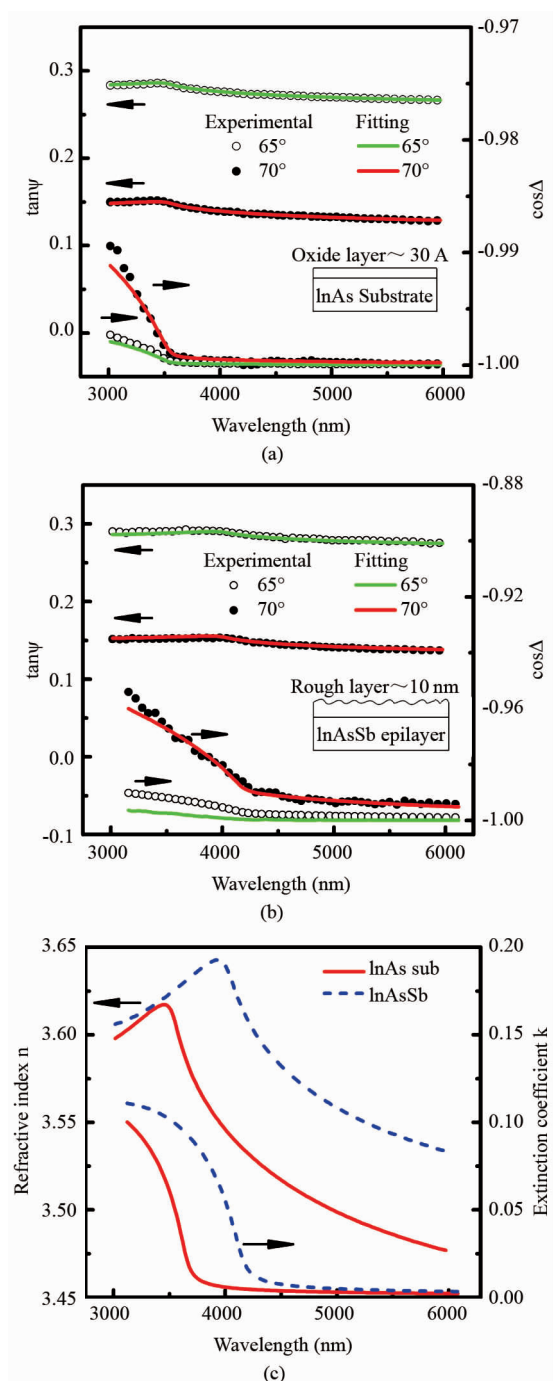


图3 (a) InAs 衬底椭偏参数的实验值与拟合结果, (b)  $\text{InAs}_{0.94}\text{Sb}_{0.06}$  薄膜椭偏参数的实验值与拟合结果, (c) 室温下 InAs 衬底及  $\text{InAs}_{0.94}\text{Sb}_{0.06}$  薄膜的折射率和消光系数谱  
Fig.3 (a) The experimental and theoretical data of SE parameters of InAs substrate and (b)  $\text{InAs}_{0.94}\text{Sb}_{0.06}$  film. (c) The room temperature refractive indices and extinction coefficients of InAs substrate and  $\text{InAs}_{0.94}\text{Sb}_{0.06}$  film

外延薄膜在禁带附近的光学性质. 通过建立空气/氧化层/InAs 衬底和空气/粗糙层/InAs<sub>0.94</sub>Sb<sub>0.06</sub> 膜层三

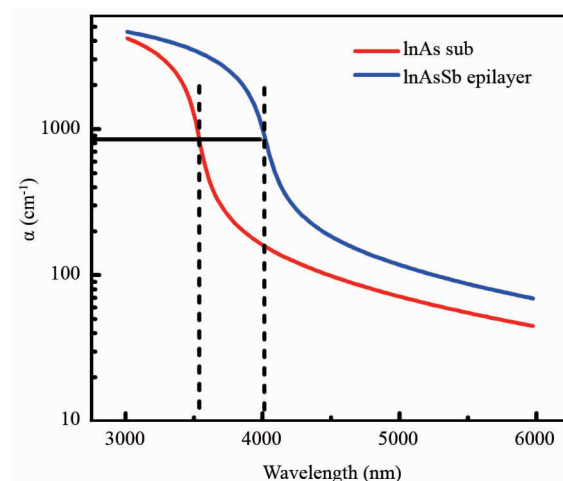


图4 InAs 衬底与  $\text{InAs}_{0.94}\text{Sb}_{0.06}$  外延薄膜的吸收光谱 (3 000 ~ 6 000 nm)

Fig.4 The absorption spectra of InAs substrate and  $\text{InAs}_{0.94}\text{Sb}_{0.06}$  film (3 000 ~ 6 000 nm)

相模型, 结合 MDF 色散模型, 分别拟合得到了 InAs 衬底和  $\text{InAs}_{0.94}\text{Sb}_{0.06}$  薄膜在禁带位置附近 (3 000 ~ 6 000 nm) 的折射率和吸收系数谱. 拟合得到室温下  $\text{InAs}_{0.94}\text{Sb}_{0.06}$  外延薄膜的禁带宽度为 0.308 eV, 与 Clawson 等人的经验公式的计算结果相一致.

## References

- [1] VENTER A, SHAMBA P, BOTHA L, *et al.* Growth and electrical characterization of Zn-doped InAs and InAs<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub> [J]. *Thin Solid Films*, 2009, **517**:4468 - 4473.
- [2] LAL R K, CHAKRABARTI P. A comparison of dominant recombination mechanisms in n-type InAsSb materials [J]. *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials*, 2006, **52**:33 - 39.
- [3] HIROYUKI M, SUZUKI R, AMANO H, *et al.* Sb surface segregation effect on the phase separation of MBE grown InAsSb [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2002, **237-239**:1519 - 1524.
- [4] SARNEY W L, SVENSSON S P, HIER H, *et al.* Structural and luminescent properties of bulk InAsSb [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*, 2012, **30**:02B105.
- [5] SVENSSON S P, SARNEY W L, HIER H, *et al.* Band gap of InAs<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub> with native lattice constant [J]. *Physical Review B*, 2012, **86**:245205.
- [6] SUN C H, WANG Q W, QIU F, *et al.* Single crystalline InAs<sub>x</sub>Sb<sub>1-x</sub> films with cut-off wavelength of 7 - 8 μm grown on (100) InSb substrates by liquid phase epitaxy [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2012, **535**:39 - 43.
- [7] SIK J, SCHUBERT M, LEIBIGER G, *et al.* Near-band-gap optical functions spectra and band-gap energies of GaNAs/GaAs superlattice heterostructures measured by spectroscopic ellipsometry [J]. *Applied Physics Letters*, 2000, **76**(20):2859 - 2861.

(下转第 128 页)

量,从而选择合适的滤波初值个数.

(3)如图2所示,存在异常误差时,RIGSCKF算法能够趋于收敛,所受影响较小,而其他算法均受到不同程度的影响.当出现连续异常误差(26min~30min)时,UKF、CKF、GSCKF算法曲线上升较快,所受影响较大,而RIGSCKF算法曲线较为平缓.当出现大异常误差(33 min)时,UKF、CKF结果明显受到扭曲,算法趋于发散,GSCKF算法因为似然函数急剧恶化导致滤波失败,而RIGSCKF算法利用等价权函数降低异常数据的权值,保持了较高的滤波精度.

#### 4 结论

提出了一种新的单站IRST只测角目标跟踪算法,即RIGSCKF算法.该算法改进了RP初值选取策略,采用新的非线性判别和高斯分割合并方法,并引入鲁棒估计思想,有效提高了恶劣测量环境下IRST系统的跟踪精度的滤波稳定性.仿真实验表明,所提算法能够有效克服高非线性和异常误差带来的不利影响,性能优于传统算法.下一步可以利用红外实测数据来分析所提算法的性能,并进一步改善其精度.

#### References

[1] XIN Yun-Hong, YANG Wan-Hai. Pseudo-linear Kalman filter with application to the passive tracking of multi-sta-

tions IRSTS [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (辛云宏,杨万海.基于伪线性卡尔曼滤波的多站IRST系统跟踪技术.红外与毫米波学报),2005,24(5):374-377.

- [2] XIN Yun-Hong, YANG Wan-Hai. A method of maneuvering target tracking with IRSTS [J]. *Acta Photonica Sinica* (辛云宏,杨万海.IRST系统的单站机动目标跟踪算法研究.光子学报),2004,33(9):1131-1135.
- [3] Arasratham I, Haykin S. Cubature Kalman filters [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2009, 54(6):1254-1269.
- [4] JIA B, XIN M, CHENG Y. High-degree cubature Kalman filter [J]. *Automatica*, 2013, 49:510-518.
- [5] Leong P H, Arulampalam S, Lamahewa T A, et al. A Gaussian-sum based cubature Kalman filter for bearings-only tracking [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2013, 49(2):1161-1176.
- [6] YANG Yuan-Xi. *Adaptive navigation and kinematic positioning* [M]. Beijing: Surveying and Mapping press (杨元喜.自适应动态导航定位.北京:测绘出版社),2006.
- [7] Peach N. Bearings-only tracking using a set of range-parameterised extended Kalman filters [J]. *IEE Proc. Control Theory Applications*, 1995, 142(1):73-80.
- [8] Dunik J, Straka O, Simiandl M. Nonlinearity and non-Gaussianity measures for stochastic dynamic systems: 16th International Conference on Information Fusion, Turkey, 2013 [C]. Istanbul, 2013:204-211.
- [9] Leong P H, Arulampalam S, Lamahewa T A, et al. Gaussian-sum cubature Kalman filter with improved robustness for bearings-only tracking [J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2014, 21(5):513-517.
- [10] Leutnant V, Krueger A, Haeb-Umbach R. A versatile Gaussian splitting approach to non-linear state estimation and its application to noise-robust ASR: Interspeech, Italy, 2011 [C]. Florence 2011:1641-1644.

(上接46页)

[8] LIANG Bang-Li, XIA Guan-Qun, HUANG Zhi-Ming, et al. Determining the band gap of  $Ga_xIn_{1-x}As_ySb_{1-y}$  quaternary alloy by infrared ellipsometric spectroscopy [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (梁帮立,夏冠群,黄志明,等.红外椭圆偏振光谱研究  $Ga_xIn_{1-x}As_ySb_{1-y}$  材料的禁带宽度.红外与毫米波学报),2000,19(3):188-190.

[9] ADACHI S. Optical properties of  $In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y}$  alloys [J]. *Physical Review B*, 1989, 39(17):12612-12621.

[10] ANDREWS A M, ROMANOV A E, SPECK J S, et al. Development of cross-hatch morphology during growth of lattice mismatched layers [J]. *Applied Physics Letters*, 2000, 77(23):3740-3742.

[11] WALLACE S G, ROBINSON B J, MASCHER P, et al. Refractive indices of InGaAsP lattice-matched to GaAs at wavelengths relevant to device design [J]. *Applied Physics Letters*, 2000, 76(19):2791-2793.

[12] BELENKY G, DONETSKY D, KIPSHIDZE G, et al. Properties of unrelaxed  $InAs_{1-x}Sb_x$  alloys grown on compositionally graded buffers [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99(14):141116.

[13] LEIBIGER G, GOTTSCHALCH V, SCHUBERT M. Optical functions, phonon properties, and composition of InGaAsN single layers derived from far- and near-infrared

spectroscopic ellipsometry [J]. *Journal of Applied Physics*, 2001, 90(12):5951-5958.

- [14] ZOLLNER S. Model dielectric functions for native oxides on compound semiconductors [J]. *Applied Physics Letters*, 1993, 63(18):2523-2524.
- [15] PASKOV P P. Refractive indices of InSb, InAs, GaSb,  $InAs_xSb_{1-x}$ , and  $In_{1-x}Ga_xSb$ : Effects of free carriers [J]. *Journal of Applied Physics*, 1997, 81(4):1890-1898.
- [16] CHARLES C K, GARLAND J W, RACCAH P M. Modeling the optical dielectric function of the alloy system  $Al_xGa_{1-x}As$  [J]. *Physical Review B*, 1993, 47(4):1876-1888.
- [17] ADACHI S. Band gaps and refractive indices of AlGaAsSb, GaInAsSb, and InPAsSb: Key properties for a variety of the 2~4 $\mu$ m optoelectronic device applications [J]. *Journal of Applied Physics*, 1987, 61(10):4869-4876.
- [18] WOOLLEY J C, WARNER J. Optical energy-gap variation in InAs-InSb alloys [J]. *Canadian Journal of Physics*, 1964, 42:1879-1885.
- [19] WIEDER H H, CLAWSON A R. photo-electronic properties of InAsSb films [J]. *Thin Solid Films*, 1973, 15:217-221.