

GaAs 体材料折射率红外椭圆偏振光谱研究*

TN304.23

黄志明 季华美[√] 陈敏挥 史国良 陈诗伟 陈良尧** 褚君浩
(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)

0472.3

摘要 报道了采用红外椭圆偏振光谱术测量 GaAs 体材料折射率, 测量范围为 2.5~12.5μm, 并将所得实验数据与理论计算和其它实验结果进行了对比, 表明了实验结果的可靠性.

关键词 红外椭圆偏振光谱, 折射率, GaAs 体材料.

砷化镓

引言

GaAs 是十分重要的半导体材料, 在红外波段人们通过测量棱镜最小偏向角和测量透射干涉条纹间距等方法对其折射率进行了研究^[1,2], 然而这些方法具有测量难度大或样品制备困难等缺点. 椭圆偏振光谱技术在可见光波段广泛用于测量材料的光学常数, 被认为是直接测量材料光学常数的最精确方法之一. 近几年红外椭圆偏振光谱得到了较快发展, 但不如可见光波段椭圆偏振光谱成熟, 其应用主要限制在对材料结构的研究, 很少用于对材料光学常数进行精确测量. 我们利用自己研制的红外椭圆偏振光谱仪测量了 GaAs 体材料在红外波段(2.5~12.5μm)的折射率, 得出了较为满意的实验结果.

1 实验原理及方法

将被测试 GaAs 样品表面化机抛光, 背面用粗砂纸打磨毛糙以尽量消除样品背面反射光分量贡献. 椭圆偏振测量采用同时旋转起偏器(角度为 P)和检偏器(角度为 A)变入射角自动红外椭圆偏振光谱仪^[3], 旋转比例为 $A : P = 1 : 1$, 实验测量入射角度为 60° .

椭圆偏振光谱术通过测量偏振方向平行(\tilde{r}_p)与垂直(\tilde{r}_s)于入射面方向反射系数之比

$$\rho = \tilde{r}_p / \tilde{r}_s = r_p / r_s \exp(i\Delta) = \tan\Psi \exp(i\Delta) \quad (1)$$

来确定椭圆偏振参数.

实验原理图见文献[3]. 固定偏振器用于获得线性偏振光, 其偏振方向 P_0 垂直于入射面, 假设所有元件是理想的, 忽略入射光剩余偏振效应, 采用琼斯矩阵分析, 得到

$$\left. \begin{aligned} \rho_0 &= \sqrt{\frac{I_2 - 4I_4 + 9I_6}{I_2 + I_6}} \\ \cos\Delta &= \frac{I_2 - 4I_4 + 9I_6}{\sqrt{(I_2 - 4I_4 + 9I_6)(I_2 + I_6)}} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

* 国家自然科学基金(编号 69738020)资助项目
** 复旦大学物理系, 上海, 200433
稿件收到日期 1998-05-05, 修改稿收到日期 1998-09-29

其中 I_j 可由傅里叶变换获得, 即

$$I_j = \frac{2}{N} \sum_{t=1}^N I(t) \cos(jA(t)), \quad j = 2, 4, 6 \quad (3)$$

通过直接测量起偏器和检偏器不同方位角 $A(t)$ 和信号强度 $I(t)$ 的变化, 根据式(3)计算出系数 $I_j (j=2, 4, 6)$, 然后根据式(2)得到椭圆偏振参数 Ψ 和 Δ . 复介电函数 ϵ 可通过理想两相模型得到^[4]:

$$\epsilon = \epsilon_s \{ \sin^2 \varphi + \sin^2 \varphi \tan^2 \varphi [(1 - \rho)/(1 + \rho)]^2 \}, \quad (4)$$

这里 ϵ 和 ϵ_s 分别是衬底和透明介质的介电函数, 不考虑衬底表面可能出现的覆盖层, φ 是光线入射角度. 对于空气 $\epsilon_s \approx 1$, 实验测量入射角为 60° . 折射率 n 和消光系数分别为:

$$\left. \begin{aligned} n &= \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\sqrt{\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2 + \epsilon_1}} \right), \\ k &= \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\sqrt{\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2 - \epsilon_1}} \right). \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

这里 ϵ_1 和 ϵ_2 是复介电函数 ϵ 的实部和虚部.

样品表面薄的覆盖层(如 Ga_2O_3 和 As_2O_3)或表面微观粗糙都对介电函数有影响, 但在红外波段几乎没有影响^[5], 因此可不予考虑.

能量小于禁带宽度时, 自由载流子吸收系数很小, 对于红外辐射样品几乎是透明的, $\Delta \cong 0$ 或 $-\pi$, 如 Aspnes 所指出^[6]; 这时 ρ 的不确定性变得任意大. 然而, 当 $|\cos \Delta| \rightarrow 1$ 时, 均方根值 $|\delta \rho|_{\text{rms}}$ 幅度不确定性的增加是由于 $\delta \Delta_{\text{rms}}$ 而不是 $\delta (\tan \Psi)_{\text{rms}}$ 的增加所致, 因此能量小于禁带宽度的折射率测量中, 当入射远离主角时, Δ 为 0 或 $-\pi$. 椭圆偏振仪仍可以用来测量材料折射率. 在能量小于禁带宽度时, 可假定消光系数 $k=0$, 因为在自由载流子吸收区域 k 值很小^[6,7], 对椭圆偏振测量可忽略不计.

2 实验结果与讨论

图 1 给出了 GaAs 体材料折射率椭圆偏振光谱测量结果及与其它数据的比较 ($0.8 \sim 12.5 \mu\text{m}$), 图中虚线为实验测量结果, “+”为其它实验测量结果^[2,5], 实线为量子理论计算结果^[7,8], 载流子浓度取室温本征载流子浓度 $n_i = 1.1 \times 10^7 \text{ (cm}^{-3}\text{)}$ ^[9]. 由图 1 可见, 在实验测量波长范围内, 椭圆偏振实验结果比文献[2]和[5]约低 0.02, 比文献[7]和[8]约高 0.01, 表明实验结果与其它方法符合得较好.

虽然样品背面已打毛, 仍会有部分反

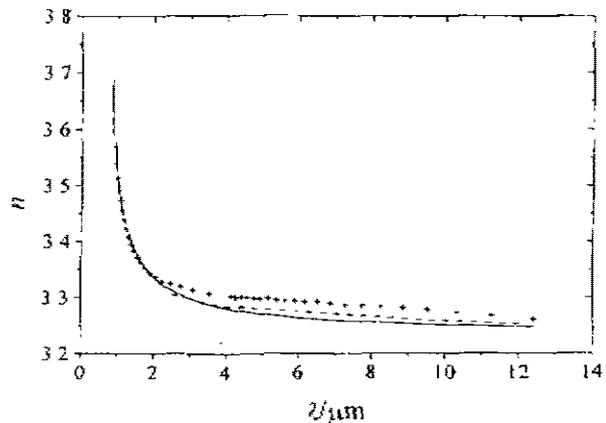


图 1 GaAs 体材料折射率
不同方法所得结果比较

Fig. 1 A comparison of GaAs refractive
indices with different method

射光来自于背面反射,将会使实验折射率数据略偏低,通过测量正入射时样品背面反射及根据菲涅耳公式估算,样品背面的影响小于1%。如果对所测实验结果进行修正,会发现椭圆偏振测量结果与文献[2]和[5]吻合得相当好。在吸收边附近,文献[7]和[8]的模型较好地解释了折射率实验结果^[2-5],但在自由载流子吸收区域,理论计算值略偏低。

我们利用红外椭圆偏振光谱仪测量了 GaAs 体材料的折射率,实验结果与其它实验和理论方法所得结果进行了对比,显示出实验结果的可靠性。

REFERENCES

- 1 Marple D T F. *J. Appl. Phys.*, 1964, **35**:1241
- 2 Pikhtin A N, Yas'kov A D. *Fiz. phys. semicond.*, 1978, **12**:022; Pikhtin A N, Ya's Kov A D. *Tekh. Poluprovodn.*, 1978, **12**:1047
- 3 HUANG Zhi-Ming, JIN Shi-Rong, CHEN Shi-Wei, et al. *Journal of Infrared and Millimeter Waves* (黄志明,金世荣,陈诗伟等. *红外毫米波学报*), 1998, **17**(5):321
- 4 Azzam R M A, Bashrara N M. *Ellipsometry and Polarized Light*, Amsterdam, North Holland, 1977
- 5 Palik E D. *Handbook of Optical Constants of Solids*, London, Academic Press, 1985, 432
- 6 Aspnes D E. *J. Opt. Soc. Am.*, 1974, **64**:639
- 7 Jensen B, Torbi A. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1983, **QE-19**:448
- 8 Jensen B, Torbi A. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1983, **QE-19**:877
- 9 YIE Liang-Xiu. *Semiconductor Physics*, Beijing: Advanced Education Press (叶良修. *半导体物理学*, 北京:高等教育出版社), 1996:120

STUDY ON THE REFRACTIVE INDEX OF GaAs BULK MATERIAL BY INFRARED SPECTROSCOPIC ELLIPSOMETRY*

HUANG Zhi-Ming JI Hua-Mei CHEN Min-Hui SHI Guo-Liang
CHEN Shi-Wei CHEN Liang-Yao** CHU Jun-Hao

(National Laboratory for Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics,
Chinese Academy Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract The refractive index of GaAs bulk material was studied using infrared spectroscopic ellipsometer (2.5~12.5 μm). Comparisons with data obtained by other methods were also presented, showing good agreement between them.

Key words infrared ellipsometric spectroscopy, refractive index, GaAs bulk material.

* The project supported by the National Natural Science Foundation of China

** Department of Physics Fudan University, Shanghai 200433, China

Received 1998-05-05, revised 1998-09-29