

文章编号: 0253-2239(2006)02-0221-4

p 型 GaAs 的远红外波段光学特性*

刘 成¹ 吴惠桢^{1*} 劳燕锋¹ 李爱珍¹ 任重桥² 沈文忠²

(¹ 中国科学院上海微系统与信息技术研究所信息功能材料国家重点实验室, 上海 200050)
(² 上海交通大学物理系, 上海 200030)

摘要: 砷化镓(GaAs)是太赫兹波段半导体异质结构激光器的重要材料之一,为了获得 p 型 GaAs 材料在远红外波段的光学特性,采用气态源分子束外延(GSMBE)技术在半绝缘 GaAs(100)衬底上生长了掺 Be 的 p 型 GaAs 薄膜材料,其载流子浓度从 $1.54 \times 10^{15} \sim 1.85 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 。用远红外变换傅里叶光谱仪测量了其远红外反射光谱,并对反射光谱进行了理论模拟和分析,计算得出了不同空穴浓度的 p 型 GaAs 在远红外波段的折射率、消光系数和吸收系数。发现在这一波段消光系数和吸收系数均随着载流子浓度的增加而增大,吸收系数最大值可达到 $4.0 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$ 。

关键词: 光学材料; 光学常数; 远红外反射光谱; p 型 GaAs

中图分类号: O472+.3 文献标识码: A

Optical Properties of p-Type GaAs in Far-Infrared Region

Liu Cheng¹ Wu Huizhen¹ Lao Yanfeng¹ Li Aizhen¹ Ren Chongqiao² Shen Wenzhong²

(¹ State Key Laboratory of Functional Materials for Informatics, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050)
(² Department of Physics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030)

Abstract: GaAs is an important material for the fabrication of semiconductor heterostructure lasers working at terahertz frequencies. To study the optical properties of p-type GaAs in far-infrared region, p-type (Be-doped) GaAs with carrier concentrations varied from $1.54 \times 10^{15} \sim 1.85 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ has been epitaxially grown by gas source molecular beam epitaxy (GSMBE) on semi-insulating GaAs(100) substrates. Fourier transform infrared (FTIR) spectrometer is employed to characterize far-infrared reflectance spectra of the p-type GaAs. Simulation of the measured far-infrared reflectance spectra has been performed. And refractive indices, extinction coefficients and absorption coefficients for different carrier concentrations have been determined. It is found that extinction coefficients and absorption coefficients increase with the carrier concentration in far-infrared region, and the maximum of absorption coefficients can reach $4.0 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$.

Key words: optical materials; optical constants; far-infrared reflectance spectra; p-type GaAs

1 引 言

最近两年来,太赫兹波段(1~10 THz,对应波数为 $33.4 \sim 334 \text{ cm}^{-1}$ 或波长为 $300 \sim 30 \mu\text{m}$)半导体异质结构激光器的研究正成为国际上新光源研究的热点之一^[1~5],尤其是太赫兹半导体量子级联激光器的出现使人们对实现微型太赫兹光源充满信心。但是至今太赫兹半导体量子级联激光器的工作温度还很低($T < 77 \text{ K}$),远未达到能实际应用的程度,其

主要原因在太赫兹波段激光器的设计和研制中遇到的两个重要问题尚未完全解决。其一是源区量子阱中两个子带靠得非常近,实现粒子数反转有一定难度,第二是长波长光学模的限制问题,因为在太赫兹波段,普通激光器的光波导结构对远红外光学模的限制相对较弱。目前太赫兹波段半导体量子级联激光器的材料体系多为 GaAs-AlGaAs 异质结构,波导结构的设计用 GaAs 材料。虽然本征 GaAs 的

* 国家自然科学基金(10963102,10125416)和国家重点基础研究发展计划(2003CB314903)资助课题。

作者简介: 刘 成(1980~),男,湖南株洲人,博士研究生,主要从事半导体光电子材料与器件的研究。

* * 通信联系人。E-mail: hzww@mail.sim.ac.cn

收稿日期: 2005-03-04; 收到修改稿日期: 2005-05-25

太赫兹波段光学性质已有不少报道^[6,7],电注入太赫兹半导体量子级联激光器中用的却多是掺杂的 GaAs,例如在现有的太赫兹半导体量子级联激光器结构中就采用了掺杂浓度约为 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 的 GaAs^[1,2],可见掺杂 GaAs 的光学特性,如折射率、吸收系数等对太赫兹波段量子级联激光器和探测器的性能影响至关重要。但是至今关于不同掺杂浓度的 GaAs 的长波长的光学性质的报道却不多见。

为了理解掺杂 GaAs 在远红外波段的光学特性,采用气态源分子束外延(GSMBE)技术生长了一系列不同掺杂浓度的 p 型 GaAs 薄膜材料,利用傅里叶变换远红外光谱仪测量了其远红外反射光谱,采用多振子模型对反射光谱进行了理论模拟和分析,并计算得出了在远红外波段不同载流子浓度下的 p 型 GaAs 的折射率、消光系数和吸收系数。

2 实验方法

p 型 GaAs 样品由气态源分子束外延生长,Ⅲ族元素 Ga 为高纯固态源,Ⅴ族源为砷烷(AsH_3)经高温($1000 \text{ }^\circ\text{C}$)裂解形成 As_2 ,p 型掺杂源为高纯铍(Be)元素,衬底为半绝缘 GaAs(100),外延层厚度为 $1.2 \text{ }\mu\text{m}$,样品的掺杂浓度分别为 $1.54 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $1.54 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, $1.76 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $5.37 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 和 $1.85 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 。

测量远红外反射光谱的仪器是 Nicolet Nexus 870 傅里叶变换红外(FTIR)光谱仪,它配置了 Globar 远红外光源、Solid-Substrate 分束镜和 DTGS Polyethylene 探测器,测试范围为 $220 \sim 500 \text{ cm}^{-1}$,分辨率为 4.0 cm^{-1} ,光束入射角小于 10° ,测量是在室温和大气气氛中进行的。

3 结果与分析

3.1 远红外反射光谱

采用多振子模型^[8,9]理论模拟其反射谱线。该模型衬底及薄膜材料的介电常量 $\epsilon(\omega)$ 均可表示为

$$\epsilon(\omega) = \epsilon_\infty + \sum_j^M \frac{S_j \omega_{\text{TO},j}^2}{\omega_{\text{TO},j}^2 - \omega^2 - i\gamma_j \omega} - \frac{\epsilon_\infty \omega_p^2}{\omega^2 + i\gamma_p \omega}, \quad (1)$$

式中 ω 为光波频率;右边第一项 ϵ_∞ 为考虑到带间电子跃迁的等效高频介电常量;第二项为长光学波对介电函数的贡献,其中 M 为总振子数, S_j 、 $\omega_{\text{TO},j}$ 、 γ_j 分别为第 j 个振子的强度、横向光学声子(TO)频率和阻尼系数;第三项为等离子体振荡对介电常量的贡献,其

中 γ_p 为阻尼系数, ω_p 为等离子体频率,它定义为

$$\omega_p^2 = 4e^2 N \pi / (m^* \epsilon_\infty), \quad (2)$$

其中 m^* 为有效质量, N 为载流子浓度。

采用的是半绝缘的 GaAs 衬底片,可近似认为其中没有自由载流子。采用(1)式计算衬底的介电常量时不考虑等离子体振荡的影响。

对于 p 型 GaAs 外延片,在计算反射光谱时应考虑空气、薄膜和衬底三层介质。设薄膜和衬底的复折射率分别为 n_f 和 n_s ,空气-薄膜和薄膜-衬底两个反射界面的反射系数分别为 r_{vf} 和 r_{fs} ,传输相位因子为 a 。下面给出这些参量的表达式:

$$n_{f,s} = \sqrt{\epsilon_{f,s}}, \quad (3)$$

$$r_{\text{vf}} = (1 - n_f) / (1 + n_f), \quad (4)$$

$$r_{\text{fs}} = (n_f - n_s) / (n_f + n_s), \quad (5)$$

$$a = \exp\left(i \frac{2\omega d n_f}{c}\right), \quad (6)$$

反射率 $R(\omega)$ 的表达式:

$$R = \left| \frac{r_{\text{vf}} + a r_{\text{fs}}}{1 + a r_{\text{vf}} r_{\text{fs}}} \right|^2. \quad (7)$$

在拟合过程中,取 $\epsilon_\infty = 10.9$, $S = 2.03$, $\omega_{\text{TO}} = 269.2 \text{ cm}^{-1}$, $m^* = 0.34m_0$, $\gamma = 2.5 \text{ cm}^{-1}$ ^[8]。如表 1 所示,设定 γ_p 为拟合参量,根据以上公式采用最小二乘法进行拟合。

表 1 p 型 GaAs 远红外反射光谱的拟合参量

Table 1 Simulation parameters for far-infrared reflectance spectra of p-type GaAs

Sample	p / cm^{-3}	$\gamma_p / \text{cm}^{-1}$	$\omega_p / \text{cm}^{-1}$
(a)	1.54×10^{15}	426	6
(b)	1.54×10^{17}	577	61
(c)	1.76×10^{18}	414	206
(d)	5.37×10^{18}	385	360
(e)	1.85×10^{19}	762	669

p 型 GaAs 的远红外反射光谱如图 1 所示,其

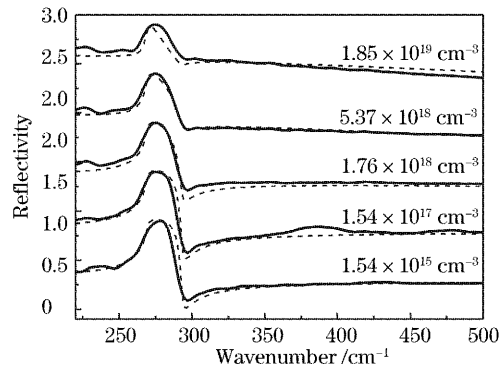


图 1 p 型 GaAs 的远红外反射光谱

Fig. 1 Far-infrared reflectance spectra of p-type GaAs

中实线代表实验测量得到的反射光谱,虚线代表理论模拟得到的反射光谱。除载流子浓度为 $1.54 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 的光谱所对应的为实际测量值外,其余谱线为按载流子浓度增加的次序,由实际测量值依次向上平移0.5个单位得到。从图中可见实验所测得的反射光谱与采用多振子模型得到的反射光谱相符合。

p 型 GaAs 的反射光谱均在 275 cm^{-1} 处出现峰值,在 297 cm^{-1} 处出现谷值。随着载流子浓度的增大, $250 \sim 300 \text{ cm}^{-1}$ 波段反射率基本保持不变。其原因是在远红外波段,光与 p 型 GaAs 中横向光学模(横向声子)耦合,产生声子极化激元,在横向声子频率(269 cm^{-1})和纵向声子频率(292 cm^{-1})之间光不能在晶体中传播,形成剩余射线带,使得在 $250 \sim 300 \text{ cm}^{-1}$ 波段反射率基本保持不变。

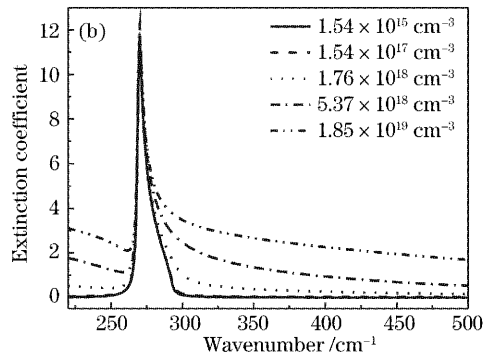
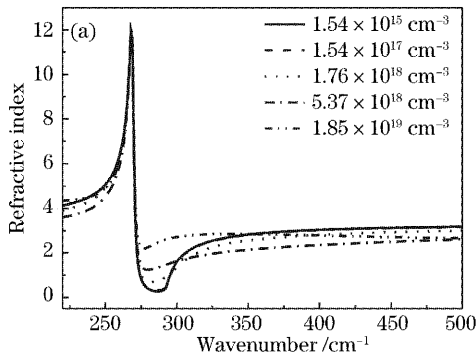


图 2 不同载流子浓度下 p 型 GaAs 的折射率(a)和消光系数(b)

Fig. 2 Refractive indices (a) and extinction coefficients (b) of p-type GaAs for different carrier concentrations

从图 2 可知,在远红外波段,在不同载流子浓度下的折射率变化很小,大体上保持不变。但在 $275 \sim 300 \text{ cm}^{-1}$ 区域,随着载流子浓度增大,折射率的变化较大,例如在 285 cm^{-1} 处,折射率从 $1.54 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 时的 0.28 逐渐增大到 $1.85 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 时的 2.41。

在远红外波段,载流子浓度为 $1.54 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 和 $1.54 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 的 p 型 GaAs 的消光系数相等。随着载流子浓度的进一步增大,除了在共振吸收峰(270 cm^{-1})处的消光系数最大值保持恒定外,在其它区域消光系数逐渐增大,并且增加的幅度越来越大。

图 3 中给出了在 333 cm^{-1} 的波数(对应频率为 10 THz)时折射率和消光系数随载流子浓度的变化情况。从图中可见,随着载流子浓度的增大,折射率从 $1.54 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 时的 2.66 逐渐减小到 $5.37 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 时的 2.03,但当载流子浓度增加到 $1.85 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 时,折射率又增大到 2.85。

333 cm^{-1} 波数下, p 型 GaAs 的消光系数与载流子浓度的对数之间的关系近似为指数关系,载流

从表 1 中得知,随着载流子浓度的增大,等离子体频率逐渐增大。当等离子体频率与纵向声子频率相近时,两者之间发生强烈的耦合,耦合模下支的频率趋近于横向声子频率,导致反射光谱中 297 cm^{-1} 处的谷逐渐消失。同时,等离子体频率逐渐增大,等离子体边缘发生蓝移,材料的等离子体高反射区域不断扩大,这是除剩余射线带外其他区域的反射率逐渐增大的一个重要原因^[10]。

3.2 折射率、消光系数和吸收系数

在反射光谱的拟合过程中,得出了薄膜材料的复折射率 n_r ,其实部即为折射率,虚部即为消光系数。故在拟合反射光谱的同时计算出了在远红外波段不同载流子浓度下的 p 型 GaAs 的折射率和消光系数,如图 2 所示。

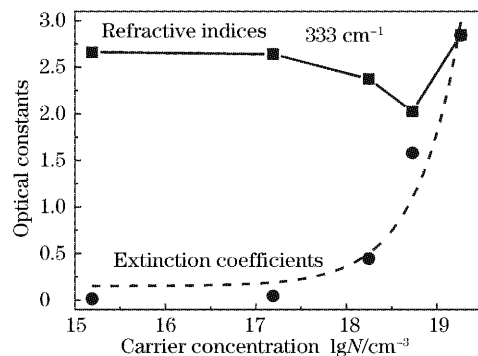


图 3 在波数为 333 cm^{-1} (10 THz)处 p 型 GaAs 的折射率和消光系数随载流子浓度对数的变化

Fig. 3 Changes of refractive indices and extinction coefficients at 333 cm^{-1} (10 THz) versus logarithm of carrier concentration for p-type GaAs

子浓度越大,消光系数 K 增加得越快。通过拟合(拟合的曲线如图中虚线所示),得出其关系表达式:

$$K = 1.90 \times 10^{-17} \exp\left(\frac{\lg N}{0.49}\right) + 0.15. \quad (8)$$

通过(9)式能够计算出吸收系数:

$$\alpha = 2\omega K/c. \quad (9)$$

图 4 给出了在远红外波段不同载流子浓度下 p 型 GaAs 吸收系数的变化。从图中可知,在共振吸收峰(270 cm^{-1})处吸收系数均达到 $4.0 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$ 。本实验中所测量的是掺 Be 的 p 型 GaAs 外延片,其在远红外波段吸收系数的最大值与文献[11]中所计算的掺 C 的 p 型 GaAs 样品的吸收系数最大值非常接近。随着载流子浓度的增大,共振吸收峰两侧的吸收系数逐渐增大,其原因是价带内电子跃迁时的带内吸收(包括自由载流子吸收和等离子激元吸收)逐渐增强。

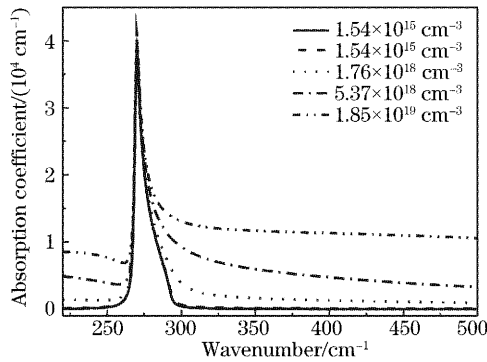


图 4 不同载流子浓度下 p 型 GaAs 的吸收系数

Fig. 5 Absorption coefficients of p-type GaAs for different carrier concentrations

4 结 论

采用气态源分子束外延(GSMBE)技术生长了一系列不同掺杂浓度的 p 型 GaAs 薄膜材料,利用傅里叶变换远红外光谱仪测量了其远红外反射光谱,采用多振子模型对反射光谱进行了理论模拟和分析,并计算得出了在远红外波段不同载流子浓度

下的 p 型 GaAs 的折射率、消光系数和吸收系数,这些结果对太赫兹波段半导体激光器的设计将有一定的参考价值。

参 考 文 献

- 1 Rudeger Kohler, Alessandro Tredicucci, Fabio Beltram *et al.*. Terahertz semiconductor heterostructure laser[J]. *Nature*, 2002, **417**(6685): 156~159
- 2 Benjamin S. Williams, Hans Callebaut, Sushil Kumar *et al.*. 3.4-THz quantum cascade laser based on longitudinal-optical-phonon scattering for depopulation[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **82**(7): 1015~1017
- 3 Wei Shi, Jingzhou Xu, X. C. Zhang. Terahertz generation from Si_3N_4 covered photoconductive dipole antenna[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(5): 308~310
- 4 Wen Liang-sheng, Wu Jian, Lin Jin-tong. Analysis of the characteristics of amplified spontaneous emission in TOAD[J]. *Chin. J. Lasers*, 2003, **30**(9): 829~834 (in Chinese)
- 5 温亮生,伍 剑,林金桐. 太赫兹光非对称解复用器中自发辐射噪声特性分析[J]. *中国激光*, 2003, **30**(9): 829~834
- 6 Liying Lang, Qirong Xing, Shuxin Li. Experimental study on terahertz radiation[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(11): 677~679
- 7 J. A. A. Engelbrecht, I. G. Lee, D. J. L. Venter. Optical characterization of doped and undoped GaAs at 300 K[J]. *Infrared Phys.*, 1987, **27**(1): 57~62
- 8 M. Hass, B. W. Henvis. Infrared lattice reflection spectra of III-V compound semiconductors[J]. *J. Phys. Chem. Solids*, 1962, **23**(8): 1099~1104
- 9 Ryoichi Fukasawa, Kiyomi Askai, Sidney Perkowitz. Far-infrared reflectance study of coupled longitudinal-optical phonon-hole plasmon modes and transport properties in heavily doped p-type GaAs[J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1997, **36**(9A): 5543~5548
- 10 Z. G. Qian, G. Yu, W. Z. Shen. Growth-dependent phonon characteristics in InN thin films[J]. *Physica B*, 2002, **318**: 180~187
- 11 Shen Xuechu. *Semiconductor Spectroscopy and Optical Properties* [M]. second edition, Beijing: Science Press, 2002 (in Chinese)
- 12 沈学础. 半导体光谱学与光学性质(第二版)[M]. 北京: 科学出版社, 2002
- 13 A. L. Krotokov, A. G. U. Perera, W. Z. Shen *et al.*. Free-carrier absorption in Be- and C- doped GaAs epilayers and far infrared detector applications[J]. *J. Appl. Phys.*, 2001, **89**(6): 3295~3300