

红外透射光谱测量重掺杂化合物半导体 载流子浓度方法的研究

何秀坤 王 琴 李光平 阎 萍 汝琼娜 李晓波

(天津电子材料研究所, 天津, 300192)

1991年4月9日收到, 同年8月14日修改定稿

本文报道了用红外透射光谱测量重掺杂化合物半导体 n-GaAs 和 n-InP 载流子浓度的研究结果。给出了载流子浓度 N 和透射光谱截止波长 λ_c 的关系曲线, 对应的经验公式为: 对于 n-GaAs, $N = 1.09 \times 10^{11} \lambda_c^{-3.0623}$; n-InP, $N = 3.58 \times 10^{20} \lambda_c^{-2.0689}$ 。本方法载流子浓度测量范围为 $1.0 \times 10^{17} \leq N \leq 2.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, 测量误差 $\pm 10 \sim 15\%$ 。文中对测量条件进行了讨论, 并给出了 GaAs:Si 样品载流子浓度径向分布的测量结果。

PACC: 3320E, 3320F, 3220F

一、引 言

对于重掺杂 III-V 化合物半导体, 载流子浓度是一非常重要的参数。采用非破坏性光学方法测量重掺杂化合物半导体载流子浓度已进行了大量的研究^[1-6], 这些研究基本是根据等离子体共振极小波长或反射率极小波长计算载流子浓度。

对于重掺杂 n-GaAs 和 n-InP 化合物半导体, 当载流子浓度大于 $1.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 时, 上述光学方法测量载流子浓度, 只需测得样品中红外反射光谱, 且测量灵敏度高。但当载流子浓度小于 $1.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 时, 其测量灵敏度明显下降, 且要获得样品远红外反射光谱。这不仅导致测量误差增加, 而且远红外反射光谱的测量亦较困难。

本文所报道的测量方法, 是基于重掺杂半导体中红外透射光谱截止波长和载流子浓度间的对应关系。本文给出了重掺杂 n-GaAs 和 n-InP III-V 化合物半导体载流子浓度测量的研究结果。

二、实 验

测量仪器为 Nicolet 170SX FT-IR 光谱仪, TGS 检测器, 光谱分辨率为 4 cm^{-1} , 室温测量。样品为重掺杂 n-GaAs:Te、n-GaAs:Si 和 n-InP:S, 载流子浓度范围为 $1.0 \times 10^{17} \leq N \leq 2.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 。样品为双面抛光、单面抛光(背面 305# 金刚砂研磨)或双面 305# 金刚砂研磨。样品厚度 0.2—0.9 mm。标定对比测量采用霍尔法或红外反射法。

三、实验结果

图 1 是不同载流子浓度 n -GaAs 和 n -InP 样品的中红外透射光谱。由图 1 我们

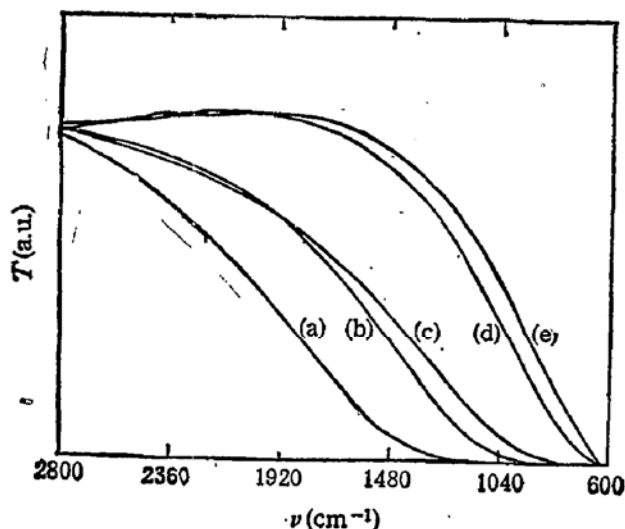


图 1 n -GaAs 和 n -InP 样品的红外透射光谱

n -GaAs: (a) $N = 2.59 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$; (b) $N = 1.22 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$;
(d) $N = 3.64 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$

n -InP: (c) $N = 7.52 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$; (e) $N = 2.65 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$

这里, N ——载流子浓度 (cm^{-3}); λ_c ——红外透射光谱截止波长 (μm); 相关系数 $r = 0.9966$.

对于 n -InP

$$N = 3.58 \times 10^{20} \lambda_c^{-2.6689}$$

(2)

相关系数 $r = 0.9936$

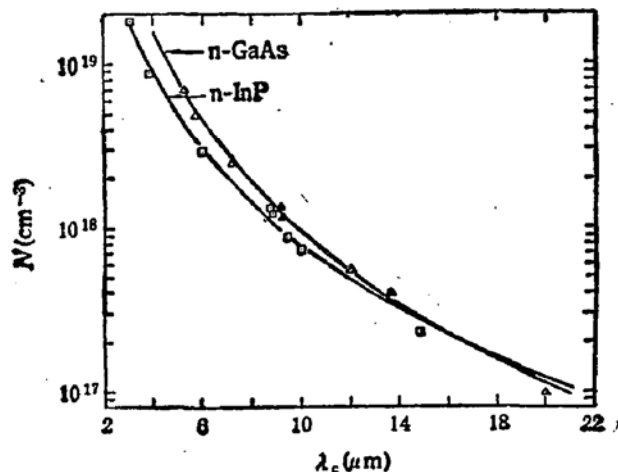


图 2 重掺杂 n -GaAs 和 n -InP N - λ_c 曲线

四、结果讨论

1. 透射光谱截止波长 λ_c 的确定

图 3 是双面抛光 GaAs:Si 样品的红外透射光谱截止波长 λ_c 确定的示意图。由图 1

我们可以清楚地看到,重掺杂半导体的中红外透射光谱,可大致分为五个区域。透过率恒定区,在这一区域,透过率基本不随波长而变。透过率恒定区随载流子浓度增加而减小,且透过率数值下降;透过率缓慢变化区,在这一区域,透过率随波长增加而较缓慢下降;透过率线性变化区,由于载流子吸收的影响,在这一区域,透过率随波长增加而迅速线性下降;透过率截止区,载流子吸收使这一区域透过率基本趋于零;在透过率线性变化区和截止区之间,还有一明显的转折区,在转折区,透过率随波长增加要比线性区下降的缓慢。

透过率线性变化区(直线区)向波数轴延长,我们把延长线与波数轴的交点所对应的波长定义为透射光谱截止波长,即 λ_c 。 λ_c 的确定方法如图 3 所示。

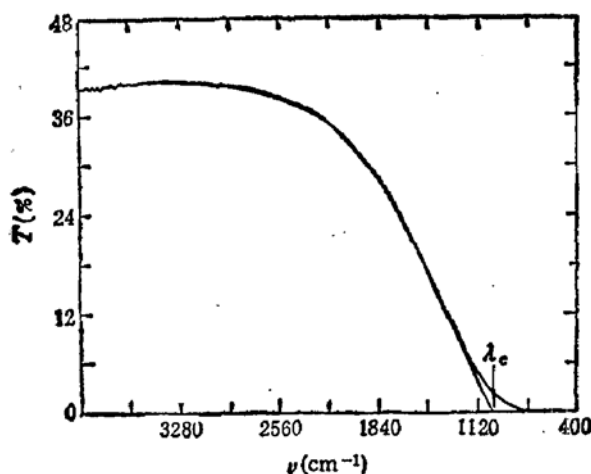


图 3 确定 λ_c 示意图

样品厚度 0.5 mm; $\lambda_c = 9.62 \mu\text{m}$;
 $N = 1.06 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$

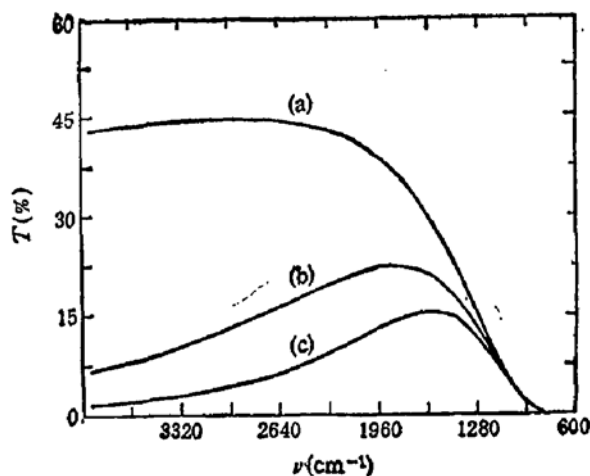


图 4 GaAs:Te 样品不同表面条件原位对比红外光谱样品厚度 0.5 mm; $N = 7.86 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$

(a) 双面抛光; (b) 单面抛光(背面 305# 金刚砂研磨) (c) 双面 305# 金刚砂研磨

2. 样品表面条件对 λ_c 的影响

我们对样品表面条件对 λ_c 的影响进行了研究。图 4 是典型 GaAs:Te 样品双面抛光、单面抛光(另一面 305# 金刚砂研磨)和双面 305# 金刚砂研磨原位对比测量红外透射光谱。

图 4 原位对比光谱表明,样品表面散射对重掺杂半导体红外透射光谱的影响是明显的。表面散射对透射光谱的影响可用 e^{-c/λ^2} 来描述, c 和样品表面粗糙因子相关。对 λ_c 的影响,使得 $\lambda_{c3} > \lambda_{c2} > \lambda_{c1}$, 这里 λ_{c3} 、 λ_{c2} 、 λ_{c1} 分别为样品表面双面研磨、单面抛光和双面抛光所对应的透射光谱截止波长。 λ_{c3} 、 λ_{c2} 、 λ_{c1} 间的数值差取决于样品表面粗糙因子和载流子浓度。

对于非双面抛光样品,选用与被测样品表面情况相同的高阻样品做参考,采用差别法可完全消除样品表面散射对 λ_c 的影响。

3. 样品厚度对 λ_c 的影响

实验结果表明:由透射光谱确定 λ_c ,当样品厚度增加时, λ_c 向短波方向移动。这样 λ_c 的确定就要受到样品厚度的影响。为了消除样品厚度对 λ_c 的影响,需要对透射光

谱进行归一化处理。在实际应用过程中,由于使用的样品多为 0.5 mm 厚。因此,在拟合 λ_c 和载流子浓度关系公式时,我们使用的样品厚度为 0.5 mm。当样品厚度不为 0.5 mm 时,对透射光谱要进行归一化处理。首先将测得的透射光谱转换为吸收光谱,吸收光谱乘上归一化因子 K , K 由下式计算:

$$K = 0.05/d, \quad (3)$$

其中 d 为样品厚度 (cm)。

将吸收光谱变换为透射光谱以后,即可完全消除样品厚度对 λ_c 的影响。

上述光谱的变换,对计算机控制的红外光谱仪是非常方便的。需要注意的是,透射光谱归一化以后,其截止区数据是不连续的,但这对 λ_c 的确定没有影响。

4. 测量灵敏度、测量误差及检测限

图 2 是 n -GaAs 和 n -InP 化合物半导体 $N \sim \lambda_c$ 的关系曲线。在

$$1.0 \times 10^{17} \leq N \leq 1.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$$

范围, λ_c 对 N 的变化是灵敏的。这就是说,在这一浓度范围由透射光谱截止波长计算重掺杂半导体载流子浓度具有较高的测量灵敏度,测量误差 $\leq \pm 10\%$ 。

在 $1.5 \times 10^{18} < N \leq 2.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 范围, λ_c 对 N 的变化灵敏度显著下降,这时测

8.33	8.33	10.1	9.38	10.1	11.5	8.33	8.33	7.65	8.68	8.33	3.03	2.69	3.20	3.61
8.46	8.33	7.50	9.04	8.33	7.99	10.1	7.83	7.83	7.83	5.45	2.54	3.03	3.03	5.45
6.74	7.50	6.74	7.36	8.33	7.99	8.33	7.83	7.65	7.19	2.69	3.11	3.11	3.48	4.93
7.04	7.99	6.79	8.33	7.99	7.65	7.36	7.65	4.95	2.39	2.85	3.20	3.39	4.84	
5.90	7.19	7.36	7.83	8.33	7.65	7.99	3.97	2.62	2.69	3.03	3.03	4.07		
2.39	2.54	2.24	2.18	2.54	2.39	2.69	2.78	3.03	3.11	3.48	5.49			
3.03	2.54	2.54	2.85	3.11	2.54	2.39	3.03	3.20	3.57	5.90				
3.03	2.85	2.18	2.24	2.31	2.39	2.54	3.30	3.61						

图 5 2.5 英寸 LEC GaAs:Si 样品 1/4 面积载流子浓度二维分布测量结果

量误差可达 $\pm 15\%$ 。由于晶格的吸收, 即使对于高阻的 GaAs 和 InP 样品, 在 500 cm^{-1} 以后透过率接近零。因此, 采用红外透射光谱测量重掺杂半导体的载流子浓度, 对于 n-GaAs 和 n-InP 化合物半导体, λ_c 的最大值为 $20\text{ }\mu\text{m}$, 所对应的载流子浓度检测下限为 $1.0 \times 10^{17}\text{ cm}^{-3}$ 。

5. 与其它光学测量方法的对比分析

文献[1,2,5]所报告的用红外反射光谱测量重掺杂 III-V 化合物半导体的载流子浓度, 是基于等离子体共振极小波长或反射率极小波长, 所测量的是样品表面载流子浓度。不仅可测量体材料, 而且亦可测量多层结构样品。对于透射光谱测量重掺杂半导体的载流子浓度, 当样品为多层结构时, 由于载流子吸收的影响, 透射光谱只能反映整体效应, 而不能将不同层的信息分层反映出来。一般说来, 虽然反射法能测量多层结构样品, 但对于两层以上结构, 测量也较为困难。其最适宜双层结构样品的测量。

另外, 对于 n-GaAs 和 n-InP 化合物半导体, 当载流子浓度大于 $1.5 \times 10^{18}\text{ cm}^{-3}$ 时, 反射法测量灵敏度和测量误差均好于透射法。但当载流子浓度 $\leq 1.5 \times 10^{18}\text{ cm}^{-3}$ 时, 透射法优于反射法。

我们认为, 根据样品的不同实际情况, 分别选择透射法或反射法测量重掺杂半导体的载流子浓度, 可简化测量并使测量结果更加可靠。

6. 测量实例分析

图 5 是 2.5 英寸 LEC 法生长的 GaAs:Si 样品 1/4 面积载流子浓度径向分布测量结果。用微动样品架移动样品, 测量光斑为 $\phi 2\text{ mm}$ 。

由图 4 发现, GaAs:Si 样品载流子浓度在中间区域分布较均匀, 在边缘区域, 载流子浓度较中间则明显下降。

五、结 论

1. 对于重掺杂 n-GaAs 和 n-InP 化合物半导体, 载流子浓度和透射光谱截止波长的关系分别为 $N = 1.09 \times 10^{21} \lambda_c^{-3.0523}$ 和 $N = 3.58 \times 10^{20} \lambda_c^{-2.6689}$ 。

2. 本方法载流子浓度检测下限为 $1.0 \times 10^{17}\text{ cm}^{-3}$ 。当载流子小于 $1.5 \times 10^{18}\text{ cm}^{-3}$ 时, 测量误差为 $\leq \pm 10\%$ 。当载流子浓度大于 $1.5 \times 10^{18}\text{ cm}^{-3}$ 时, 测量误差为 $\pm 15\%$ 。

3. 透射光谱测量重掺杂半导体的载流子浓度, 一般无需单独制备测量样品。对非双面抛光样品, 可选择与测量样品相同表面的参样, 用差别法消除表面散射对 λ_c 的影响。

4. 对于不同掺杂浓度的样品, 如分别选择反射法或透射法测量载流子浓度, 可使测量简化并使测量结果更加可靠。

5. 在建立了 $N \sim \lambda_c$ 相应的经验关系以后, 本方法亦适用于其它重掺杂半导体材料。

参 考 文 献

- [1] R.T. Holm, J. W. Gibson and E. D. Palik, *J. Appl. Phys.*, **48**, 212(1977).
- [2] O. K. Kim and W. A. Bonner, *J. Elec. Mater.*, **12**, 827(1983).
- [3] Wang Baojing and Zhang GuangYin, *Infrared Phys.*, **23**, 329 (1983).

- [4] Gopal V., *Infrared Phys.*, **21**, 101 (1981).
[5] Hua QingHeng, Li GuangPing, He XuKun and Wang Qin, *Mater. Lett.*, **3**, 93 (1985).
[6] C. Pickering, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **16**, 213 (1983).

Study of Infrared Transmission Spectra for Measuring Carrier Concentration of Heavily-Doped Compound Semiconductors

He Xiukun, Wang Qin, Li Guangping, Yan Ping, Ru Qiongna and Li Xiaobo
(Tianjin Electronic Materials Research Institute, Tianjin, 300192)

Abstract

The carrier concentrations in heavily-doped compound semiconductors (n-GaAs and n-InP) are measured using infrared transmission method. The relation between carrier concentration (N) and threshold-wavelength (λ_c) is given, the experience formulas follow $N = 1.09 \times 10^{21} \lambda_c^{-3.0623}$ and $N = 3.58 \times 10^{20} \lambda_c^{-2.6589}$ for n-GaAs and n-InP, respectively. The measurement range and precision of carrier concentration are $1.0 \times 10^{17} \leq N \leq 2.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ and $\pm 10 \sim 15\%$ with above method. The measurement conditions have been discussed in detail. The radial distributions of carrier concentration for GaAs:Si samples have also been shown.

PACC: 3320E, 3320F, 3220F