

重掺 III-V 族化合物半导体 载流子浓度的光测法研究

徐谨民 邵丽影 吴 敏

(南开大学 测试计算中心)

1988年11月17日收到

本文应用计算机,绘出各类重掺 III-V 族化合物半导体在不同等离子频率 ω_p 下的反射率曲线,从中找出了反射谱的高低频反射边在反射率极小值处所对应的频率 ω_1 与 ω_p 之和与 ω_p 间的函数关系。并应用此关系对不同载流子浓度的重掺 III-V 族化合物半导体 GaAs 和 InP 样品进行实验上的验证,获得了满意的结果。

主题词: III-V 族化合物, 载流子浓度。

一、前言

应用反射谱高频反射边反射率极小值处所对应的频率(或波数) ω_1 代替等离子体频率 ω_p , 进行重掺 III-V 族化合物半导体载流子浓度的测量^[1-3], 虽然方法简便, 但正如我们曾经所指出的^[4], 它只适用于高含量范围 (10^{18} cm^{-3} 以上) 的测量, 否则将引起很大的误差。应用 K-K 关系对反射谱进行数据处理求出 ω_p 的方法^[4], 虽然能较准确地测量含量范围在 3×10^{16} — 10^{19} cm^{-3} 内的载流子浓度, 但由于计算复杂, 不适用于无计算机控制的一般色散型红外光谱仪, 而且也很费时间。本文所提方法, 能解决上述矛盾, 它既可以做到方法简便又可较准确地测量 3×10^{16} — 10^{19} cm^{-3} 含量范围的重掺 III-V 族化合物半导体的载流子浓度。

二、基本原理

当光束垂直入射至抛光样品的界面时, 根据菲涅耳公式及 Drude 模型, 界面的反射率 R 可表示为波数 ω 的函数^[4]。即:

$$R = f(\omega) \quad (1)$$

上式中包含有二个与载流子浓度有关的参数 ω_p 与 γ , 它们分别是等离子体频率与阻尼系数。

应用下述方法, 我们分别研究这两个参数对 $R-\omega$ 曲线(即反射光谱)的影响。

(i) 固定 ω_p 的数值, 改变 γ , 按(1)式用计算机绘制一组随 γ 变化的 $R-\omega$ 曲线(见图 1)。从图中可看出 $R-\omega$ 曲线的高低频反射边 R 极小值处的波数 ω_1 与 ω_2 的位移随

γ 的改变都很不敏感。

(ii) 固定 γ 的数值, 改变 ω_p , 用计算机绘制另一组随 ω_p 变化的 $R-\omega$ 曲线(图 2), 从图中可明显看出 $R-\omega$ 曲线的高低频反射边 R 极小值处波数 ω_1, ω_2 的位移随 ω_p 的改变都很敏感。当 ω_p 很小时, ω_p 的改变所引起反射边带的位移主要在低波数端, ω_p 很大时, 正好相反。这说明 ω_1 与 ω_2 随 ω_p 改变产生位移的大小与 ω_p 本身大小有关。根据上述情况, 我们通过大量数据, 分析了 ω_1 与 ω_2 之和同 ω_p 间的关系, 得到了很有意义的结果。这就是, 对于一定的 ω_p 的改变量 $\Delta\omega_p$, ω_1 与 ω_2 之和的改变量 $\Delta(\omega_1 + \omega_2)$ 是一恒定值, 与 ω_p 本身的大小无关, 也就是说 ω_p 与 $\omega_1 + \omega_2$ 存在线性关系。由于 ω_p 很小时, ω_1 基本不随 ω_p 的改变而改变, ω_p 很大时, ω_2 基本不随 ω_p 的改变而改变, 通过数据分析得出, ω_1 与 ω_2 同 ω_p 间只在局部范围内存在线性关系, 图 3 就是 GaAs 的 ω_p 与 ω_1, ω_2 及 $\omega_1 + \omega_2$ 间的关系曲线, 从图中明显看出 $\omega_1 + \omega_2$ 与 ω_p 间有很好的线性关系, 而 ω_p 与 ω_1 只在 ω_p 大于 400cm^{-1} 时(对 GaAs 相当于 $N = 1.3 \times 10^{13}\text{cm}^{-3}$), 存在线性关系。这正是文献[1—3]利用 ω_1 进行重掺 III-V 族化合物载流子浓度的测量只适用于 10^{18}cm^{-3} 以上的原因。

另外我们还绘制了 GaP、GaSb、InAs、InP、InSb 等重掺 III-V 族化合物的 ω_p 与 $\omega_1 + \omega_2$ 间的关系曲线(见图 4), 这些曲线都是斜率相同而截距不同的直线。通过对大量数据的全面分析, 发现截距不同的主要原因是由于 ω_L 不同所致, 同时还与 ω_T 与 $\epsilon_\infty - \epsilon_0$ 之比有关(其中 ω_L, ω_T 与 ϵ_∞ 是 III-V 族化合物的声子纵频, 声子横频及远离 ω_L 及 ω_p 处的高频介电常数, ϵ_0 是高频纯 III-V 族化合物远离 ω_T 处的低频介电常数)。最后可得到以上六类重掺 III-V 族化合物半导体 ω_p 的表达式为:

$$\omega_p = 0.995 \left[\omega_1 + \omega_2 - \omega_L - \frac{\omega_T}{10(\epsilon_0 - \epsilon_\infty)} \right] \quad (2)$$

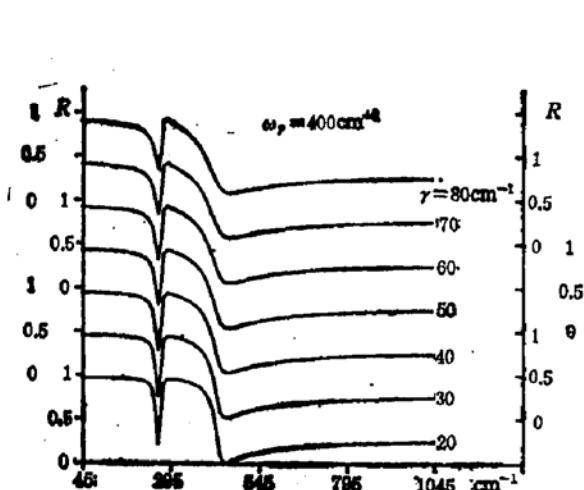


图 1 ω_p 值固定时, γ 改变对 $R-\omega$ 曲线的影响

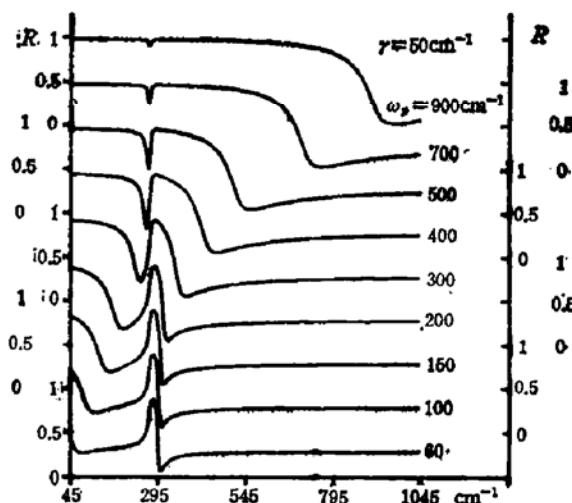
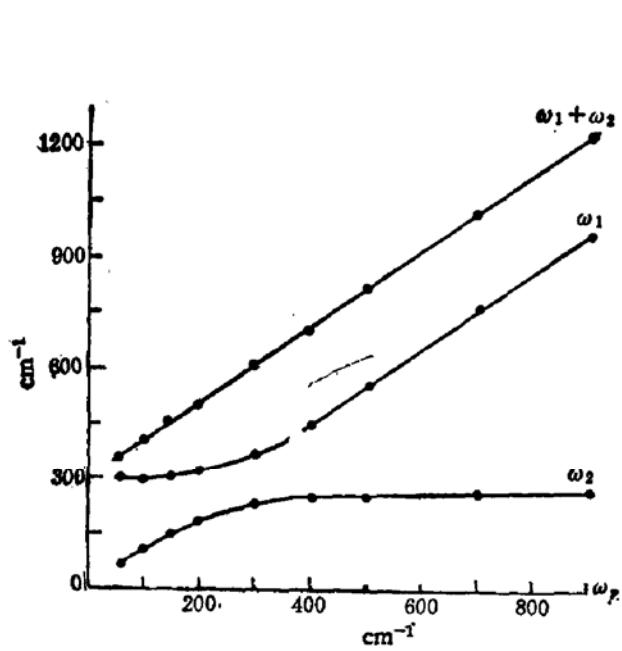
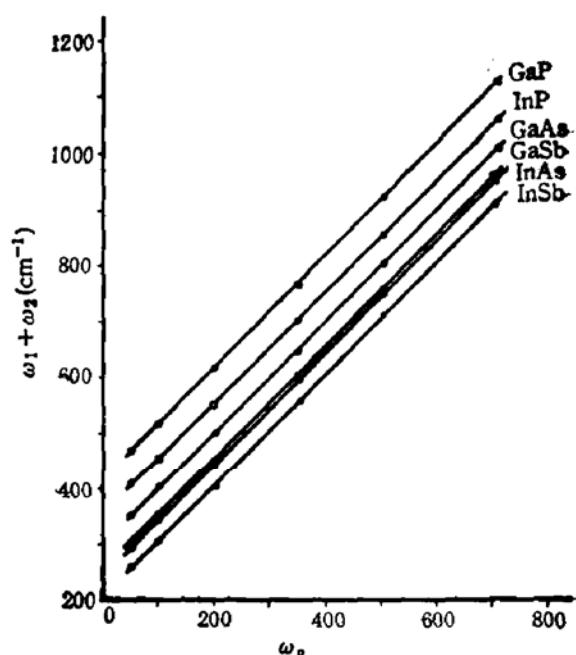


图 2 γ 值固定时, ω_p 改变对 $R-\omega$ 曲线的影响

因此只要测出重掺 III-V 族化合物半导体的反射谱, 就能很容易求出载流子浓度 N 。不同材料的 $\omega_L, \omega_T, \epsilon_0, \epsilon_\infty$ 等常数, 可从文献[5]查出, 折合质量 m^* 也可以从有关文献中查出或按文献[4]的方法求得。

从图 2 还可看出当 $\omega_p = 60\text{cm}^{-1}$ 时, ω_2 已不太明显, 而且接近 50cm^{-1} 。由于 50cm^{-1}

图3 ω_p 与 ω_1 、 ω_2 及 $\omega_1 + \omega_2$ 间的关系曲线图4 不同的重掺 III-V 族化合物的 ω_p 与 $\omega_1 + \omega_2$ 间的关系曲线

以下的反射谱在测量上将因光源能量低, 干涉仪分束器的效率低, 及空气中微量水气干扰的存在, 使得因噪声影响而很难确定 ω_2 的真实数值。因此应用此方法测量载流子浓度在 3×10^{16} 以下时, 会造成很大误差, 而且含量越低误差越大。

三、实验方法及结果

为了在实验上验证公式(2)的可靠程度, 我们在 170 SXFT-IR 仪器上, 应用 10° 角的反射附件分别测量了五个不同载流子浓度的 n 型 GaAs 及 n 型 InP 样品, 其反射光谱

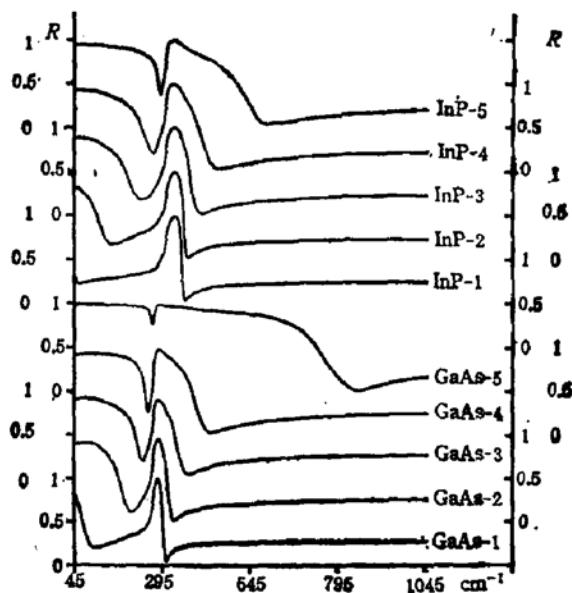


图5 不同载流子浓度的 n-GaAs 及 n-InP 的反射光谱

见图 5. 测试样品时, 样品采用单面抛光或双面抛光均可。所得数据及测量结果分别列于表 1 及表 2。

表 1 反射谱反射边带极小值处位置

样品号	ω_1/cm^{-1}	ω_2/cm^{-1}	样品号	ω_1/cm^{-1}	ω_2/cm^{-1}
GaAs-1	301.0	98.5	InP-1	354.9	54.0
GaAs-2	324.0	200.7	InP-2	363.0	142.7
GaAs-3	366.7	235.3	InP-3	401.1	227.7
GaAs-4	433.8	250.6	InP-4	447.4	262.7
GaAs-5	850.5	264.0	InP-5	582.6	285.4

表 2 电测数据与本方法所测数据的对照

样品号	电测数据	本法所测数据	相对偏差
	N/cm^{-3}	N/cm^{-3}	$\Delta N/N$
GaAs-1	8.7×10^{14}	8.83×10^{14}	+1.5%
GaAs-2	4.7×10^{17}	4.74×10^{17}	+0.8%
GaAs-3	8.7×10^{17}	8.67×10^{17}	-0.3%
GaAs-4	1.36×10^{18}	1.42×10^{18}	+4.4%
GaAs-5	6.5×10^{18}	6.44×10^{18}	-0.92%
InP-1	3.0×10^{16}	2.86×10^{16}	-4.7%
InP-2	2.4×10^{17}	2.28×10^{17}	-5.0%
InP-3	7.8×10^{17}	7.55×10^{17}	-3.2%
InP-4	1.3×10^{18}	1.27×10^{18}	-2.3%
InP-5	2.5×10^{18}	2.66×10^{18}	+6.4%

($\omega_L, \omega_T, m^*, \epsilon_\infty, \epsilon_0$ 采用文献[4]的数据)

从表 2 可以看出, 在各五个 GaAs 和 InP 样品的测试中, 本方法所测结果与电测结果的偏差除 InP-5 为 6.4% 外, 其余全在 5% 以内。因此采用本方法测量重掺 III-V 族化合物半导体载流子浓度, 可以认为是一种简便可行的方法。

参 考 文 献

- [1] J. Kudman, *J. Appl. Phys.*, 34, 1826 (1963).
- [2] J. F. Black, et al., *Infrared Phys.*, 10, 125(1970).
- [3] V. Gopal, *Infrared Phys.*, 21, 101(1981).
- [4] 徐道民等, 红外研究, 6, 271(1987).
- [5] 杨顺华等译, 固体物理导论, 340, 科学出版社, (1979).

Research on Optical Measurement of Carrier Concentration of Heavily-Doped III-V Compound Semiconductors

Xu Jinmin Shao Liying and Wu Min

(*Test Centre, Nankai University, Tianjing*)

Abstract

Reflectivity curves of several kinds of heavily-doped III-V compound semiconductors are drawn in different plasma frequency ω_p , using computer simulation. The relation between ω_p and the sum of ω_1 and ω_2 is found, where ω_1 and ω_2 are frequencies of the high-and low-frequency reflection edge on reflection spectra at the positions of reflectivity minima. Heavily-doped GaAs and InP with different carrier concentrations are tested using this method and the result is satisfactory.

KEY WORDS III-V Group Compound, Carrier Concentration