

单晶硅的 $10.6\mu\text{m}$ 光吸收系数与电阻率的关系

吴仲墀 赵有源 高如芳 钱佑华

(复旦大学)

1984年8月9日收到

$10.6\mu\text{m}$ 的 CO_2 激光, 对于一定电阻率范围的晶态硅, 正处在载流子光吸收的强吸收区。利用输出光强高度稳定的 CO_2 激光器作为硅电阻率的无损检测工具, 是比较理想的途径之一。

令光束正入射于上下表面为平行镜面、厚度为 Z 的硅晶体, 若样品载流子浓度介于 $10^{15}-10^{19}\text{cm}^{-3}$ 之间; 光学常数 $\tilde{n} = n + ik$ 的实部和虚部满足 $n^2 \gg k^2$, 透射光束及反射光束均无干涉产生, 则吸收系数可表示为:

$$\alpha = \frac{1}{Z} \ln \left\{ \frac{1}{\frac{1}{2} \left[\sqrt{\frac{(1-R)^4}{T^2 R^4} + \frac{4}{R^2}} - \frac{(1-R)^2}{TR^2} \right]} \right\},$$

式中 T 和 R 分别为透射率和反射率。反射率 R 是样品的一个内禀量, 美国 MIT 的一个小组^[1]给出载流子浓度在 $10^{15}-10^{18}\text{cm}^{-3}$ 的 N-Si 和 $10^{15}-2 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ 范围的 P-Si 的反射

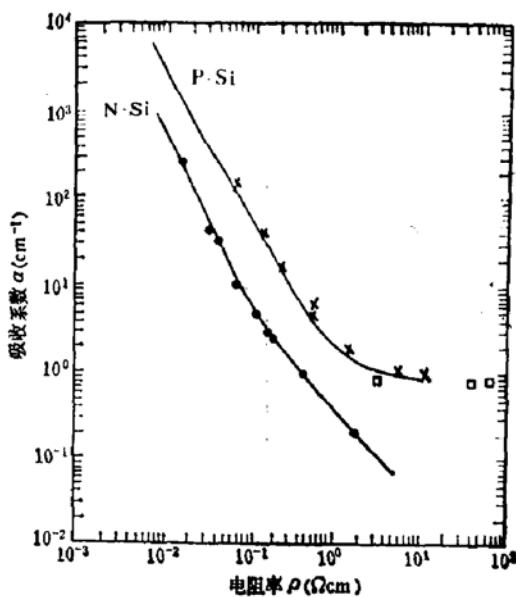


图 1 硅 $10.6\mu\text{m}$ 吸收系数 α 与电阻率 ρ 的关系
实线是 L. Jastrzebski 等人的 $\alpha-N$ 用 Irvin 曲线变换为 $\alpha-\rho$
+ 为本文 P-Si 实验数据
· 为本文 N-Si 实验数据
□ 光学上薄的 N-Si ($Z = 0.2\text{cm}$) 的实验数据

率为 $R \approx 0.29$, 几乎与载流子浓度无关。我们用红外傅里叶光谱仪对 $\alpha Z > 1$ 的。载流子浓度介于 $1.3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 与 $3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 之间的样品作了验证。结果表明, 如略去消光系数 k 的影响, 取 $n = 3.42$ ^[2], 则得到 $R \approx 0.30$, 与文献[1]的报道相符。对于厚度 Z 的测量, 我们用千分表和百分表分别测薄样品和较厚样品的 Z 值, 其精度可达到要求。这样, 只要测量透射率 T , 就可得到与样品载流子浓度对应的吸收系数值。

(1) 吸收系数与电阻率的关系 $\alpha(\rho)$

厂家在半导体材料参数的标报方面, 习惯上是报型号和电阻率而不是载流子浓度值。所以我们用四探针装置测量了所有样品的电阻率, 经换位反复测量取平均, 作为样品的 ρ 值。用光强稳定的 $10.6 \mu\text{m}$ 光束测量 T 后, 绘制了 $\alpha(\rho)$ 作为定标曲线, 如图 1 所示。为了将此曲线与文献[1]的 $\alpha(N)$ 曲线作对照, 我们用 Irvin 的经验的 $\rho(N)$ 曲线将他们的 N 变换成 ρ , 一并绘于图 1 中。可以看到, 二者基本上一致, P-Si 数据的符合尤佳。需要注意的是, 只有当硅的结构完整性良好时, 才能妥善地利用 Irvin 曲线。在我们的样品中, 有两块样品 P-4 和 P'-4, 它们的电阻率基本相同, $\rho \approx 0.6 \Omega\text{cm}$, 而样品 P'-4 的吸收系数明显高于文献[1]的曲线(见图 1)。后来发现样品 P'-4 含有高密度的氧和碳, 导致迁移率下降。

(2) 样品背面粗糙度的影响

出厂硅片通常都是单面抛光的。为了结合实用, 需要探明背面粗糙程度对 CO_2 激光束透射的影响; 同时我们的一些高阻 P-Si 样品的 α 较文献[1]略高, 使我们怀疑是否由于我们的样品镜面制作稍有不足, 因而从实验上研究了 ρ 和 Z 相同而背面粗糙度不同的样品的表观吸收。改变背面粗糙程度的方法是用颗粒线度 ϕ 不等的金刚石研磨膏将背面

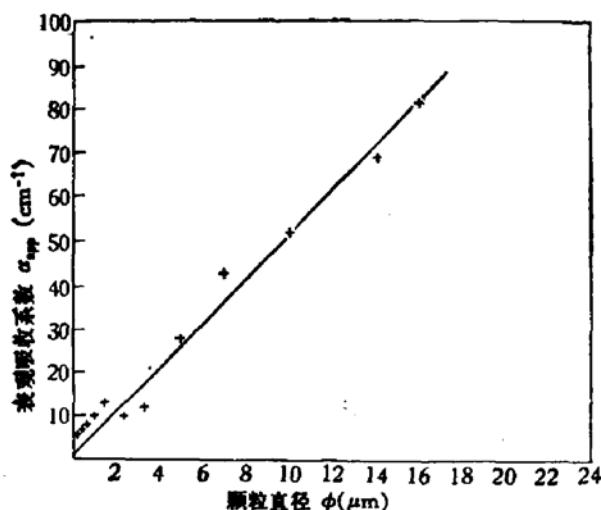


图 2 硅 $10.6 \mu\text{m}$ 表现吸收系数 α_{app} 与研磨膏颗粒线度 ϕ 的关系。 $\alpha_{app} \approx \alpha + K\phi$, $K \approx 5 \text{ cm}^{-1}/1 \mu\text{m}$
样品: N-Si, $\rho \approx 1 \Omega\text{cm}$, $Z = 0.04 \text{ cm}$

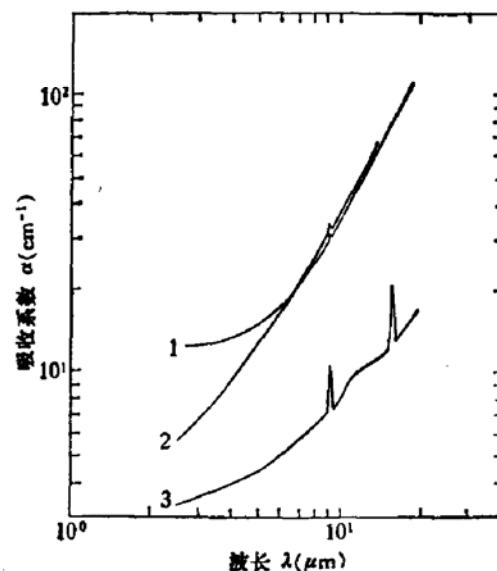


图 3 硅的红外吸收光谱

- 曲线 1: N-Si, 样品 N-9
- 曲线 2: P-Si, 样品 P-6
- 曲线 3: P-Si 样品 P'-4

进行充分的研磨。测量时，是以镜面正对入射的激光束。图2为表观吸收系数 α_{app} 与颗粒度 ϕ （在一定程度上表征了粗糙度）的关系。我们发现在我们的测量系统中， $\alpha_{app} \approx \alpha + K\phi$ ，其中常数 $K \approx 5\text{cm}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$ 。对照图1可知，在高阻情况下，透射很容易主要由表面粗糙所支配，对抛光工艺的要求格外苛刻。

(3) 红外吸收光谱

用 IFS113V 型红外傅里叶光谱仪测量了一系列样品的 $\alpha(\lambda)$ 。图3是三种有代表性的吸收曲线。可以看到：(i) 波长在 $6\mu\text{m}$ 以上， α 显示典型的自由载流子光吸收线性特征；(ii) $10.6\mu\text{m}$ 波长对不同样品都处在 α 的线性区。这说明，用 $10.6\mu\text{m}$ CO_2 激光检测我们所给定范围的 ρ ，是可信的。样品 N-9 和 P-6 的直线部分的斜率接近于 $3/2$ ，反映了声学声子散射的特点。P'-4(P-Si, $\rho \approx 0.6\Omega\text{cm}$) 的曲线线性部分斜率明显较小，同时叠加着很强的氧碳吸收峰。用参比法估算^[3]，氧、碳含量分别达到 9×10^{17} 和 $3 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$ 。这里好象说明，氧、碳改变了声子色散，使载流子的室温散射增强。用经典公式 $\alpha \approx \frac{AN}{m^*\tau} \lambda^{p/2}$ 进行粗略估计^[4]，得到该样品的空穴弛豫时间只有一般正常值的 $1/4$ 左右。这也解释了图1中相应的实验点偏高的问题。但是，氧、碳峰的半宽是比较小的，不致于直接影响 $10.6\mu\text{m}$ 的 α 值。

参考文献

- [1] L. Jastrzebski, J. Lagowski and H. C. Gatos, *J.Electrochem. Soc.*, 126, 260(1979).
- [2] W. G. Driscoll, *Handbook of Optics*, 1978, McGraw-Hill, Co.
- [3] 中国科学院半导体研究所理化分析中心研究室著，*半导体的检测与分析*，p. 508，科学出版社，(1984)。
- [4] R. A. Smith, *Semiconductors*, Cambridge Univ. Press, 1961.

Correlation between Optical Absorption Coefficient at $10.6\mu\text{m}$ and the Resistivity of Crystalline Silicon

Wu Zhongchi, Zhao Youyuan, Gao Rufang and Qian Youhua
(Fudan University)

Abstract

The correlation between the optical absorption coefficient at wavelength of $10.6\mu\text{m}$ and the corresponding electrical resistivity of single crystalline silicon is determined experimentally. The resulting calibration curves are considered to be applicable in the contactless and non-destructive characterization of silicon wafers for resistivity less than $1\Omega\text{-cm}$ and its radial profiles. The influence of surface roughness and high oxygen and carbon contents on the absorption-resistivity relationship has been observed and discussed.