

# 硅对 CO<sub>2</sub> 激光的增强吸收

李元恒 李春金

(中国科学院力学研究所)

**提要:** 测量离子注入硅片对强连续 CO<sub>2</sub> 激光的透射率和反射率随辐照时间的变化,发现硅有极强的能量吸收。这一现象可定性地用自由载流子吸收来解释。

## Enhanced absorption of CO<sub>2</sub> laser by silicon

Li Yuanheng, Li Chunjin

(Institute of Mechanics, Academia Sinica)

**Abstract:** The changes of transmissivity and reflectivity of ion-implanted Si with time under intense CW CO<sub>2</sub> laser irradiation have been measured. It is discovered that there is enhanced absorption of intense CO<sub>2</sub> laser by silicon. This phenomenon may be explained qualitatively by means of free carrier absorption.

### 一、引言

半导体硅(Si)是红外透射材料,对 CO<sub>2</sub> 激光能量的吸收很弱。例如电阻率 6~8 欧姆·厘米的 *n* 型硅,室温时对 CO<sub>2</sub> 激光的吸收系数是 0.1 厘米<sup>-1</sup>[1,2]。但在研究半导体的激光退火时发现<sup>[3,4]</sup>,高功率连续 CO<sub>2</sub> 激光对硅的退火效果很好,辐照区的温度在 1~2 秒钟内从室温上升到 1000°C 左右。这表明硅对连续 CO<sub>2</sub> 激光有极强的能量吸收。为弄清这个问题,我们从实验和理论两方面对它进行了研究。

### 二、实验结果

实验采用的激光源为功率 40 瓦、光束直

径 ~8 毫米的封离型连续 CO<sub>2</sub> 激光器。样品是厚 0.35 毫米、电阻率 6~8 欧姆·厘米的 *P* 型 <100> 硅。为直接针对经离子注入的硅的激光退火研究,我们在样品中注入能量 100 千电子伏、剂量  $5 \times 10^{15}$  厘米<sup>-2</sup> 的砷离子。整个实验装置示于图 1。透射率 *T* 和反射率 *R* 随激光辐照时间变化的测量结果见图 2,其中 *T*<sub>0</sub> 和 *R*<sub>0</sub> 是参考量,分别取作打印机输出的透射率最后平衡值和反射率最初起始值。由图 2 可看到,强 CO<sub>2</sub> 激光辐照时注砷硅片的透射率先是缓慢下降,到某一时刻(这个时刻随激光强度和硅片大小的不同而不同),透射率急剧下降,直至趋近于零。反射率的测量表明,在透射率急剧下降期间反射率并未改变。这说明透射率的下降完全是由于硅对 CO<sub>2</sub> 激光吸收的增强。在透射

收稿日期:1982年4月7日。

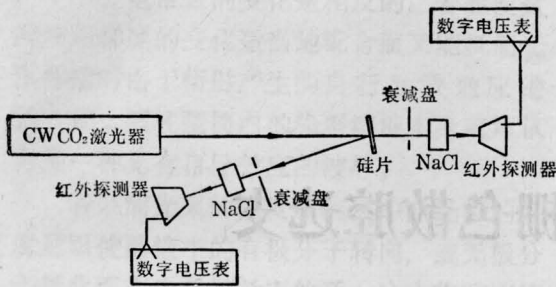


图1 透射率、反射率测量的实验装置示意图

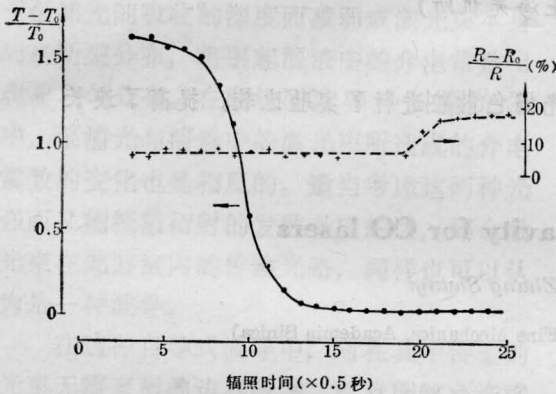


图2 注硼的硅片的相对透射率和反射率随 CO<sub>2</sub> 激光辐照时间的变化

率刚开始急剧下降的时刻,我们遮住激光束并用线径 0.2 毫米的镍铬-镍铝热电偶估测了硅的表面温度,温度为  $\geq 600$  K。由于注入层性状的改变和反射率增大是不可逆的,因此每次实验都得换用新样片。随着透射率趋近于零,可观察到硅片迅速灼红起来,辐射高温计测出这时辐照区的温度已在 1000 K 以上。未作离子注入的硅对强 CO<sub>2</sub> 激光的能量吸收情况与离子注入硅类似。

### 三、理论分析

设硅的吸收系数为  $\alpha$ , 片厚为  $Z$ , 则透射率  $T$  可用下式描述<sup>[5]</sup>

$$T = \frac{(1-R)^2 e^{-\alpha Z}}{1 - R^2 e^{-2\alpha Z}} \quad (1)$$

由(1)式看出,在反射率  $R$  和厚度  $Z$  不变的情况下,透射率里的急剧下降反映了吸收系数  $\alpha$  的猛烈增大。根据半导体内载流子热激

发理论,  $P$  型硅中空穴浓度  $p$  和电子浓度  $n$  随温度的变化遵从费米统计分布<sup>[6]</sup>

$$p = n_i \exp \left[ \sin^{-1} \left( \frac{N_D}{2n_i} \right) \right] \quad (2)$$

$$n = n_i \exp \left[ -\sin^{-1} \left( \frac{N_D}{2n_i} \right) \right]$$

其中  $n_i = c^{\frac{1}{2}} t^{\frac{3}{2}} \exp \left[ -\frac{E_g}{2kt} \right]$  是载流子本征浓度,  $c = 1.5 \times 10^{33}$ ,  $E_g = 1.21 \sim 4.15 \times 10^{-4} t$  (电子伏),  $k = 0.8625 \times 10^{-4}$  (电子伏/K)。  $N_D$  是杂质浓度,对电阻率 6~8 欧姆·厘米的本实验样品  $N_D \approx 2.5 \times 10^{15}$  厘米<sup>-3</sup>[1]。另一方面,硅的红外吸收系数  $\alpha$  由空穴吸收系数  $\alpha_p$  和电子吸收系数  $\alpha_n$  组成

$$\alpha = \alpha_p + \alpha_n = K_p \cdot p + K_n \cdot n \quad (3)$$

其中  $K_p$ 、 $K_n$  分别是空穴和电子的光吸收截面,对本实验样品和温度范围  $K_p$  和  $K_n$  可近似看作常数<sup>[9]</sup>。

由(2)式计算空穴和电子的浓度随温度的变化时看出,温度低于 600 K 时自由载流子的总浓度基本不变,温度高于 600 K 时自由载流子的总浓度开始数量级地增加。载流子浓度的数量级增加通过(3)式表现为光吸收系数的数量级增加,如图 3 所示。这与(1)式由透射率实验数据导出的吸收系数在 600 K 以上开始猛烈增加至少是定性地一致。由此看出,硅对强 CO<sub>2</sub> 激光的增强吸收可能仍主要来自自由载流子吸收。

(下转第 25 页)

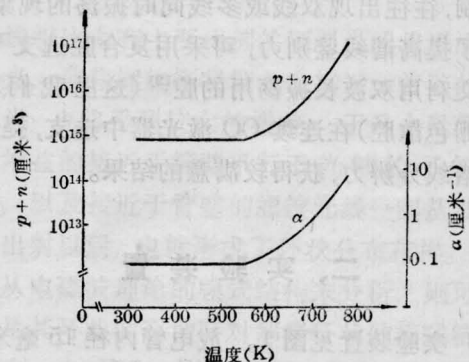
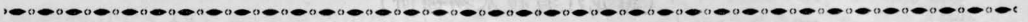


图3 自由载流子浓度( $p+n$ )和光吸收系数  $\alpha$  随温度的变化

个, II组 30个, III组 9个,

抽检喷油嘴采用钻孔、电火花打孔、激光未调制打孔及激光调制打孔四个零件的圆柱度及孔壁的表面光洁度比较见表7。由于该零件孔口表面还要磨去0.10~0.15毫米,结果采用调制打孔圆柱度并不高于电火花打孔。从孔壁的表面质量来看,未调制打孔光洁度最差,而调制打孔时孔壁最为光洁(见图3)。



(上接第27页)

CO<sub>2</sub>激光器(脉宽为0.3微秒)对膜层进行了抗激光强度实验,结果见图1~4。图1和图3是在不同基底上未镀保护膜的情形;图2和图4是在不同基底上镀了ThF<sub>4</sub>保护膜的情形。从照片可以清楚地看出,在同一基底材料上镀保护膜和未镀保护膜的金膜,在同一功率密度的CO<sub>2</sub>激光束作用下,遭到的破坏程度(面积大小、深度、状态)是完全不同的。

对多种高真空蒸镀的金膜和加镀ThF<sub>4</sub>保护膜层后的金膜反射镜进行了反射率测量。镀保护膜后,反射率降低小于0.5%。在2.5~15微米波长范围内,吻合在1%,见图5。



(上接第29页)

M. R. T. Siregar 等人在控制硅片温度(78~850 K)的情况下测量了硅对CO<sub>2</sub>激光的透射率,观察到600 K是透射率下降的突变点<sup>[7]</sup>。本文的分析与Siregar等人的看法是一致的。G. K. Celler 等人<sup>[4]</sup>在研究离子注入硅的连续CO<sub>2</sub>激光退火时先将硅片预热到350°C左右,然后再受CO<sub>2</sub>激光辐照。实验证明这样可以用较低的激光功率而收到更好的效果。从本文工作来看,样品预热除可减小辐照时的热应力外,一个重要的作用是由于热激发使自由载流子的浓度提高,从而大大增强硅对CO<sub>2</sub>激光能量的吸收。Celler 等人选择的预热温度“350°C”与本文得到的600 K是很一致的。

从上述激光脉冲超声调制打孔的实验效果可以看出,对喷油嘴上的微孔以及相类似的不需二次加工的微孔零件,采用激光打孔在工艺上就是可行的了。

## 参 考 文 献

- [1] Ф. Ф. 沃道互托夫等;《激光在工艺中的应用》,机械工业出版社,1980年。

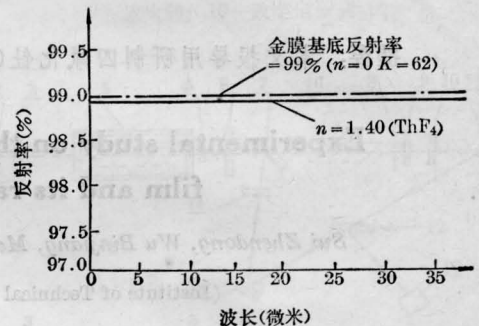


图5 反射率测量曲线

对镀制ThF<sub>4</sub>保护膜后的镜片进行了放射性强度的测量,结果为 $1.4 \times 10^{-14} \sim 7.5 \times 10^{-14}$ 居里/厘米<sup>2</sup>,符合国家放射性卫生防护规定(GBJ-8-74),合乎安全使用标准。

本文经周光地先生审阅修改,工作期间曾与邹世昌先生进行过有益的讨论,并得到赵建荣、孙祉伟同志实验上的帮助,在此致谢。

## 参 考 文 献

- [1] H. F. Wolf; Silicon Semiconductor Data, 1969.  
[2] L. Jastrzebski et al.; J. Electrochemical Soc., 1979, 126, No. 2, 260.  
[3] M. Miyao et al.; Appl. Phys. Lett., 1979, 35, No. 3, 227.  
[4] 李元恒;《北京光学》, 1981, 4, 38.  
[5] Max Born et al.; Principles of Optics, 1975.  
[6] 黄 昆等;“半导体物理学”, 1958年。  
[7] M. R. T. Siregar et al.; Appl. Phys. Lett., 1980, 36, No. 10, 787.