

# 强 CO<sub>2</sub> 激光辐照下离子注入 Si 反射率的动态干涉效应

李元恒

(中国科学院力学研究所)

**摘要:** 本文从理论和实验研究了连续 CO<sub>2</sub> 激光辐照下磷离子注入 Si 对 He-Ne 激光束反射率呈现的动态干涉效应。从反射强度随时间的变化看出, Si 片离子注入层固相外延的速率在整个再结晶过程中是不均匀的。

## Dynamic interference effect of reflectance of ion-implanted Si by intense CO<sub>2</sub> laser radiation

Li Yuanheng

(Institute of Mechanics, Academia Sinica)

**Abstract:** Theory and experiment have shown dynamical interference of the reflectance of P<sup>+</sup>-implanted Si for He-Ne laser beam by CW CO<sub>2</sub> laser annealing. Analysing the dependence of the reflection on the time, we have discovered that the epitaxial growth rate of ion-implanted layer of Si is not uniform during the crystallization.

### 一、引言

在集成电路和太阳能电池等的退火研究中,用强激光辐照的方法消除高能离子注入造成的损伤——激光退火——是近几年广泛注意的一个问题<sup>[1~4]</sup>。实验多次证明,从晶格的恢复和电激活率来看激光退火比高温炉内热退火效果更好。采用连续激光退火还有一个优点,即在达到注入杂质完全电激活时并不改变杂质的空间分布<sup>[5]</sup>,这在热退火是不可能的。现已清楚<sup>[6~8]</sup>,连续激光作用下 Si 表面并不熔化,离子注入造成的损坏或非晶是通过高温固相外延再生长恢复成晶态

的。然而连续 CO<sub>2</sub> 激光作用下注入层固相外延的特征研究报导尚少。

本文以波长 0.6328 微米的氩-氟激光作为探测光束,分析了固相外延期间随着再生长阵面的推进,外表面反射光与晶态-非晶态界面反射光之间产生干涉的可能性,并在实验上观测到了这种干涉效应。从实验测出的反射光极大和极小随时间的变化,可估算离子注入形成的非晶层厚度和固相外延再生长的速率。结果表明,离子注入 Si 在连续 CO<sub>2</sub> 激光退火的整个过程中,外延再生长的速率是由慢到快再到慢地变化着的。

收稿日期: 1981 年 8 月 17 日。

## 二、分 析

高能离子注入到单晶 Si, 随着注入剂量增大, Si 表层的晶体结构由严重损坏逐渐变为非晶。非晶层厚度随注入离子能量升高而增加, 并随离子种类的不同而不同<sup>[9]</sup>。设想一片样品, 单晶 Si 上由于离子注入而形成的非晶层厚度为  $h$ 。一束 He-Ne 激光以  $\theta$  角入射到 Si 表面上, 一部分反射, 一部分透入非晶层并在非晶与单晶的界面处再次反射。此二束反射光的光程差为:

$$\Delta\varphi = 2n_a h \cos \theta' \quad (1)$$

$n_a$  是非晶层的折射率,  $\theta'$  是折射角。  $\theta'$  与入射角  $\theta$  的关系为:

$$\sin \theta' = \frac{n_c}{n_a} \sin \theta \quad (2)$$

对应的相位差为:

$$\delta = \frac{4\pi}{\lambda} n_a h \cos \theta' \quad (3)$$

这里  $\lambda = 0.6328$  微米, 是 He-Ne 激光在真空中的波长。激光退火时随着外延再生长阵面的推进,  $h$  不断减小。当

$$\delta = m2\pi \quad (4)$$

时反射光强度有极大值。当

$$\delta = \left(m \pm \frac{1}{2}\right)2\pi \quad (5)$$

时反射光强度有极小值。  $m$  取整数。

因此, 从测量反射光强度随时间的变化, 可以知道连续激光作用下非晶注入层再结晶的情况。

## 三、实验与讨论

实验样片的基底是电阻率 6~9 欧姆厘米的 P 型 (100)Si, 然后以能量 60 千电子伏、剂量  $2 \times 10^{15}$ /厘米<sup>2</sup> 的磷离子注入表面。根据 X 射线透射技术检查晶格畸变量的实验数据断定<sup>[9]</sup>, 本样片的离子注入层已完全变为非晶态。退火用的激光器是功率 40 瓦、光

束直径  $\phi \approx 8$  毫米封离型连续 CO<sub>2</sub> 激光器。探测光束是功率 1 毫瓦的氦-氖激光。接收元件是 2CU 型硅光电二极管。为增大接收信号的强度, 实验中将光电管与 6 伏直流电源和 1000 欧姆电阻串联, 然后由电阻两端取出电压信号送 LZ3-300 型 X-Y 记录仪记录。整个实验装置示于图 1。

CO<sub>2</sub> 激光束和 He-Ne 激光束入射在离子注入 Si 片的同一点。CO<sub>2</sub> 激光接近正入射, He-Ne 激光入射角  $\theta \approx 10^\circ$ 。实验测出反射率相对强度随时间变化的曲线见图 2。由图显见, CO<sub>2</sub> 激光开始辐照的头 4~5 秒内, Si 片对 He-Ne 激光的反射率保持不变 (图线的 ab 段)。5 秒钟以后反射率逐渐增大到第一个峰值 c。随后经历谷值 d 和第二个峰值 e, 降至最低值 f。停止 CO<sub>2</sub> 激光照射时, 随着 Si 片温度迅速下降, He-Ne 激光反射率还有一点微小降低 (g), 这是折射率随温度变化所引起的。随着样品大小以及与支架间热接触的不同, 反射率达到第一个峰值所需的时间亦有所不同, 但曲线的总体形状相似。

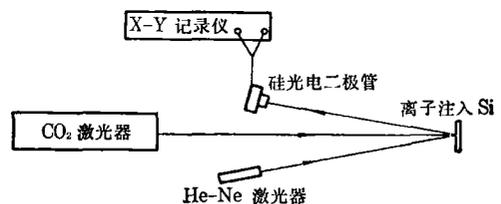


图 1 实验装置示意图

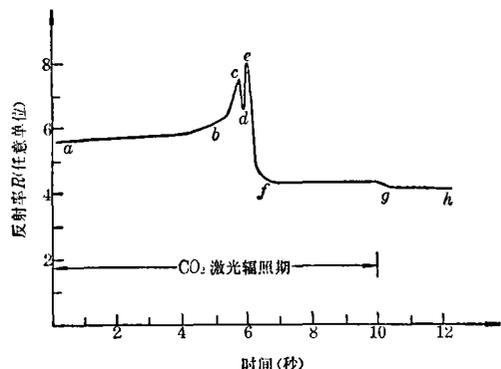


图 2 注磷 Si 在 CO<sub>2</sub> 激光退火时 He-Ne 激光反射率随时间的变化

现对图3所列实验结果作如下讨论。 $\text{CO}_2$ 激光开始辐照后的一段时间内, He-Ne激光的次级反射来自注入层中晶态-非晶态界面 $Q_0$ , 这时的总反射率由图2曲线的 $ab$ 段表示。随着辐照时间增长, 晶态-非晶态界面亦因固相外延而向表面移动。设时刻 $t=t_1$ , 晶态-非晶态界面移到 $Q_1$ , He-Ne激光次级反射与初级反射的位相差正好满足(4)式, 即

$$\frac{4\pi}{\lambda} n_0 h_1 \cos \theta' = m2\pi \quad (6)$$

$h_1$ 是 $t=t_1$ 时刻非晶层的厚度, 或者说 $Q_1$ 至表面的距离。这时反射呈现相干极大, 对应于图2中第一个峰值 $c$ 。时刻 $t=t_2$ , 晶态-非晶态界面推进到 $Q_2$ , He-Ne激光的次级反射与初级反射的位相差满足(5)式

$$\frac{4\pi}{\lambda} n_0 h_2 \cos \theta' = \left(m - \frac{1}{2}\right)2\pi \quad (7)$$

$h_2$ 是 $t=t_2$ 时刻非晶层的厚度。这时反射呈现相干极小, 对应于图2中的谷 $d$ 。依此类推, 时刻 $t=t_3$ , 晶态-非晶态界面是 $Q_3$ , He-Ne激光的次级反射与初级反射位相差复又满足(4)式, 反射光再次呈现极大, 对应于图2中第二个峰 $e$ 。

已知非晶Si的折射系数 $n_0=4.85$ , 晶态Si的折射系数 $n_c=4.16^{[10]}$ , 所以晶态Si的He-Ne激光强反射率比非晶态小6%左右。这是图2中第二个谷不明显的缘故。从反射率实验曲线只有两个峰不难判断(6)、(7)式中 $m=2$ 。用光学辐射高温计并参照镍铬-镍铝热电偶, 测知图2中 $f$ 点附近的Si表面温

度是1000K左右。取1000K时的折射率相对变化量 $\frac{dn}{n}=0.025^{[11]}$ , 可算出 $h_1=1277\text{\AA}$ 。

不言而喻, $h_1$ 就是Si表面非晶注入层的最小厚度, 而非晶层的最大厚度不会超过 $h_1 + \frac{1}{2}h_3=1597\text{\AA}$ 。从离子注入射程分布表查知 $^{[11]}$ , 注入层厚度 $R_p+2\Delta R_p=1326\text{\AA}$ 。可见从He-Ne激光反射率计算出注入层的厚度, 与射程分布表的数据是相当吻合的。诚然, 上述分析是基于假设非晶态与晶态之间有一清晰界面得出的, 实际情况是非晶态逐渐过渡到晶态。对此可用分层介质的波动光学理论处理 $^{[13]}$ , 但比较繁复, 最后结果与简化分析没有大的差异。

从图2可看到, 反射率从初始值 $b$ 上升到第一个峰值 $c$ 耗费的时间比较长( $\sim 0.8$ 秒), 从 $c$ 到 $d$ 、 $d$ 到 $e$ 均只需很短的时间( $\sim 0.1$ 秒), 而从 $e$ 到 $f$ 所经历的时间又长起来( $\sim 0.6$ 秒)。这说明Si的磷离子注入层在连续 $\text{CO}_2$ 激光作用下开始固相外延时速率很慢, 然后加快, 在接近表面时速率又减慢下来。这与G. L. Olson等人 $^{[10]}$ 在注磷Si氩离子激光退火的反射率实验中观察到的现象很一致。

在本实验所用的激光功率密度下, 注入层非晶态虽外延成晶态, 但并不是完整的单晶, 沟道背散射的实验观测说明了这一点。作为离子注入Si在连续 $\text{CO}_2$ 激光辐照下固相外延过程的研究, 本工作具有一定的意义。

作者感谢导师周光地先生的指导, 王春奎同志在实验中给予了不少帮助, 并对上海冶金所协助进行沟道分析工作致以谢意。

## 参 考 文 献

- [1] E. Rimini; Laser Effects in Ion Implantation Semiconductors, (Catania, 1978).
- [2] S. D. Ferris *et al.*; Laser-Solid Interactions and Laser Processing, (Boston, 1978).

(下转第497页)

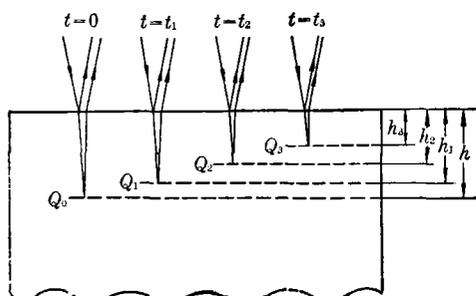


图3 反射率动态干涉效应示意图

$C$  是双光子作用合作参量;  $\Phi$  是谐振腔失调参量。若令  $M=0$ , 即可得到[3]的结果。

图 1 表示双双稳, 即相当于二个双稳态。所用参数为  $r=0.5$ ,  $C=20$ ,  $\Omega=24$ ,  $\Phi=8$ ,  $\delta=-0.02$ 。第一个双稳来自克尔效应(没达到饱和吸收); 第二个双稳来自饱和吸收效应。

图 2 表示三稳态。所用参数为  $r=10$ ,  $C=20$ ,  $\Omega=24$ ,  $\Phi=8$ ,  $\delta=-0.02$ 。对于一个输入光强  $Y(Y_2^{\min}<Y<Y_1^{\max})$ , 可以有三个稳定态。当  $Y$  连续增大时, 输出光强从  $A$  跳到  $B$ , 然后从  $C$  跳到  $D$ 。当  $Y$  逐渐减弱时, 输出光强从  $E$  跳到  $F$ , 然后从  $G$  跳到  $H$ 。这里开关强度  $Y_1^{\min}<Y_2^{\min}<Y_1^{\max}<Y_2^{\max}$ 。

图 3 表示另一种类型的光学三稳态。所用参数为  $r=10$ ,  $C=20$ ,  $\Omega=20$ ,  $\Phi=1$ ,  $\delta=-0.1$ 。图 3 与图 2 的区别在于, 在图 3 中  $Y_1^{\min}<Y_2^{\min}<Y_2^{\max}<Y_1^{\max}$ 。当输入光强连续增大时, 输出光从  $A$  跳到  $B$ 。当  $Y$  减小时, 输出光从  $C$  跳到  $D$ , 然后从  $E$  降到  $F$ 。然而, 如果输入光在  $EG$  分支内从  $D$  点增强, 输出光从  $G$  跳到  $H$ 。

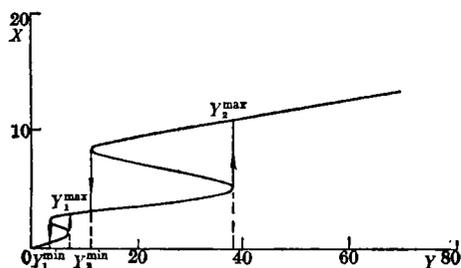


图 1 双光子光学双双稳态

(上接第 500 页)

- [3] C. L. Anderson *et al.*; *Laser and Electron Processing of Electronic Materials* (Electrochemical Society, Princeton, 1979).
- [4] C. W. White *et al.*; *Symposium A, Materials Research Society Meeting, 1979* (Academic, New York, 1980).
- [5] A. Gat *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1978, **32**, 276.
- [6] D. H. Auston *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1978, **33**, 539.
- [7] J. S. Williams *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1978, **33**,

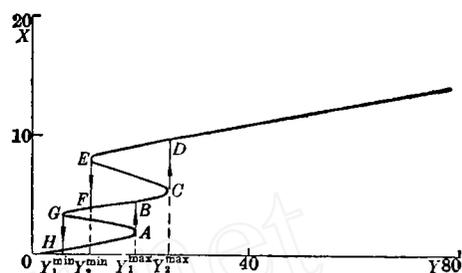


图 2 第一类双光子光学三稳态

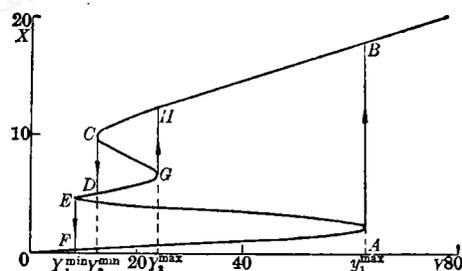


图 3 第二类双光子光学三稳态

双光子光学多稳态或许会作为多重逻辑的元件而找到应用。

本文曾与西安光机所牛憨本同志和帝国学院 J. N. Elgin 博士讨论过, 谨致谢意。

### 参 考 文 献

- [1] E. Giacobino *et al.*; *Phys. Rev. Lett.*, 1980, **45**, 434.
- [2] F. T. Arrechi, A. Politi; *Lett. AL. Nuovo Cimento*, 1978, **23**, 65.
- [3] G. P. Agrawal, C. Flytzanis; *Phys. Rev. Lett.*, 1980, **44**, 1058.
- [4] J. A. Hermann, B. V. Thompson; *Phys. Lett.*, 1980, **79A**, 153.
- [5] J. A. Hermann; *Opt. Commun.*, 1981, **37**, 431.
- [6] D. F. Walls *et al.*; *Phys. Rev.*, 1981, **24A**, 627.
- [7] 542.
- [8] A. Gat *et al.*; *J. Appl. Phys.*, 1979, **50**, No. 4, 2926.
- [9] J. W. Mayer *et al.*; *Ion Implantation in Semiconductors Si and Ge* (1970).
- [10] G. L. Olson *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1980, **37**, 1019.
- [11] G. Dearnaley *et al.*; *Ion Implantation* (1973).
- [12] Helmut F. Wolf; *Silicon Semiconductor Data* (1969).
- [13] M. Born *et al.*; *Principles of Optics* (1975).