

强 CO₂ 激光退火时离子 注入 Si 的光学性质

李元恒

王振明

(中国科学院力学研究所) (一机部自动化研究所)

提 要

本文测量了砷离子(As⁺)注入的 Si 在连续 CO₂ 激光辐照下光的椭圆偏振参数、反射率、表面薄层电阻率随时间的变化。从 ψ 、 Δ 、 R 、 ρ 的变化看出 Si 注入层的激光退火是在一定的时间、温度条件下迅速完成的。

用强激光辐照的方法对集成电路用的离子注入 Si 进行退火是近几年大力研究的一个问题^[1~4]。实验表明激光退火比常用的高温炉热退火效果更好,特别是对大剂量的重离子注入,再结晶度和电激活率均超过热退火的水平。早期的激光退火大多选用红宝石、YAG、氩离子等波长较短的激光器,因为这类激光单个光子的能量比 Si 的禁带宽度大,并且利用 Si 的吸收。后来发现,短的激光波长对于完成退火并不是必备的先决条件。例如光子能量为 0.117 eV 和波长 10.6 μm 的 CO₂ 激光也能使 Si 的离子注入层由非晶态恢复成单晶并达到完全电激活^[5~9]。CO₂ 激光用于离子注入 Si 的退火显然具有重要的意义,因为 CO₂ 激光器比起固体激光器和氩离子激光器来电-光转换效率高得多,已经有各种商品化的高功率大能量 CO₂ 激光器可供使用。同时,利用 CO₂ 激光能透过 Si 的特性可对 Si 进行深层退火和背面退火。特别是现已发现背面退火比从正面退火的效果更好^[8]。

离子注入 Si 的激光退火效果可用许多方法检查。除背散射与沟道分析外,电子衍射、扫描或透射电子显微镜、测量霍尔系数等都是常用的方法。光学测量方面,曾有 M. Migao 等人通过测量椭圆偏振光参数和反射率来估计离子注入层的损伤度^[10, 11],但很少注意用光学方法研究退火状态。本文通过椭圆偏振光参数 ψ , Δ , 反射率 R , 以及表层电阻率 ρ 的测量研究了注砷的 Si 在连续 CO₂ 激光辐照下的退火过程。从 ψ 、 Δ 、 R 、 ρ 随时间变化所呈现的近乎直角的转折看出,要完成退火,存在着比较确定的温度要求和时间界限。

光是一种电磁波,氦氖(He-Ne)激光束入射到 Si 表面时测到的椭圆偏振参数和反射率所表征的应是材料表面趋肤深度 δ 内的性质。从宏观电动力学知^[12]

$$\delta = \frac{c}{\sqrt{\mu\epsilon} \cdot \omega} \left[\frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{16\pi^2\sigma^2}{\epsilon^2\omega^2}} - 1 \right) \right]^{-\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

式中 c 是真空中光速, μ 是磁导率, ϵ 是介电常数, ω 是入射光角频率, σ 是电导率。取 $\mu=1$, $\epsilon=14.56$, $c=3 \times 10^{10}$ cm/sec, $\omega=2.98 \times 10^{15}$ /sec, $\sigma \simeq 770 \Omega^{-1}\text{cm}$ (对已作 CO₂ 激光退火的注砷 Si 用 Van der Paw 法测量)可算出 $\delta=1.26 \mu$ 。这个值大于样品的注入层厚度

($\leq 0.1\mu$)。对于未退火的离子注入 Si, 因 σ 小故使 δ 更大。对单晶 Si 基底因 σ 变大故 δ 又将变小。总之, 我们用 He-Ne 激光束将足以探测到注入层性状的变化。用(1)式计算趋肤深度时需注意量纲的统一, σ 应由 $\Omega^{-1}\text{cm}$ 换成 CGSE 单位, 即乘以因子 9×10^{11} 。要指出的是, (1)式描述的是电磁波垂直入射的情况, 对非垂直入射样品中电磁波的传播方向可能与振幅衰减方向不一致, 但上述分析同样适用。

实验用的样片是电阻率 $6 \sim 8 \Omega/\text{cm}$ 的 P 型 (100)Si 基底上以能量 150 keV、剂量 $1 \times 10^{16}/\text{cm}^2$ 的砷离子注入。样片呈正方形, 面积 $\leq 1\text{cm}^2$, 共八片。实验时采用角顶支撑, 使样片与支架尽可能热绝缘。激光器是输出功率 40 W, 光束直径 $\sim 8\text{mm}$ 的封离型连续 CO_2 激光器。实验程序是, 在 $\sim 100 \text{ W}/\text{cm}^2$ 的同一激光功率密度下对各样片分别施以 1 秒、2 秒、3 秒、5 秒、10 秒、20 秒的连续辐照, 然后用椭圆偏振光仪和 D-F 透射反射测量仪^[13] 测量被照表面的椭圆偏振参数 ψ 、 Δ 和反射率 R 。椭圆偏振仪和透射反射测量仪的探测光源是 He-Ne 激光, 波长 6328 \AA 。同时我们也用四探针法测量了样品有效薄层电阻率 ρ 。全部测量结果示于图 1。显然 ψ 、 Δ 、 R 、 ρ 随辐照时间的变化规律相当类似。

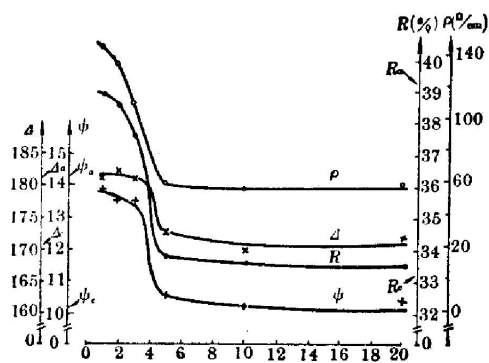


图 1 注砷 Si 的 ψ 、 Δ 、 R 、 ρ 值随 CO_2 激光辐照时间的变化

Fig. 1 Values of ψ , Δ , R , ρ as functions of CO_2 laser radiation time for As^+ -implanted Si

实验结果清楚表明, 本实验条件下辐照时间 ≤ 3 秒, ψ 、 Δ 、 R 值大体不变。从 3 秒到 5 秒, Si 片渐有灼红辉光, 由光学辐射高温计和镍铬-镍铝热电偶测知表面温度已达 $900 \sim 1000 \text{ K}$ 。这时 ψ 、 Δ 、 R 值均有较大幅度的下降, 降到与晶态 Si 的值 ($\psi = 10.17$, $\Delta = 171.0$, $R = 33.3\%$) 很接近。辐照时间从 5 秒延至 20 秒, 样品温度亦继续有所升高 ($\sim 1100 \text{ K}$), 但并不引起 ψ 、 Δ 、 R 、 ρ 值的任何新的明显变化。这说明 5 秒的激光辐照、 $900 \sim 1000 \text{ K}$ 的高温已可使注入层完成退火, 并且是在 $1 \sim 2$ 秒内迅速完成的。然而退火一旦完成, 继续延长激光辐照时间和升高温度已无本质的意义。M. Takai 等人的实验指出^[7], 用连续 CO_2 激光辐照的方法

诱发 Si 片离子注入层的固相外延再结晶在一个很宽的功率密度范围内都可以进行。当功率密度很高, 加热 Si 的速率相当快时, 则注入层来不及形成多晶核而外延生长为单晶。激光功率密度较低, 对 Si 的加热速率较慢时, 由于抑制不住注入层中的多晶成核过程而外延成微晶或多晶^[9]。He⁺ 离子背散射分析和反射型电子衍射的观察表明, 本实验注砷 Si 的表面非晶层在 CO_2 激光辐照后的确是外延成了晶态, 只不过不是单晶而是晶粒甚小的微晶, 这是激光功率密度不够高的缘故。实验中肉眼可观察到, 5 秒的激光辐照刚好能使离子注入 Si 的表面转变为带金属光泽, 与未经退火的 Si 相比因反射率不同而有明显的反差。这与 K. G. Cellen 等人^[6]在研究 CO_2 激光退火时看到的现象几乎一样。M. Migao 等人^[5]用功率 50 W、光斑直径 0.65 mm 的 CO_2 激光对注磷 Si 退火时发现, 表面载流子浓度在辐照时间 3 秒到 10 秒内迅速上升到 100% 电激活的水平, 然后渐趋饱和。这与本文光学参数在退火过程中急剧下降并趋于饱和的实验结果有很大的相似性。

椭圆偏振光参数 ψ 、 Δ 分别对应于平行或垂直入射平面之光场矢量的相对振幅衰减和位相移动。从 ψ 、 Δ 本可计算被测样品的折射率 n 和消光系数 k ^[14]

$$\begin{aligned} n^2 - k^2 &= n_0^2 \sin^2 \theta \left[1 + \tan^2 \frac{\cos^2 2\psi - \sin^2 2\psi \cdot \sin^2 \Delta}{(1 + \sin 2\psi \cdot \cos \Delta)^2} \right], \\ 2nk &= n_0^2 \sin^2 \theta \cdot \tan^2 \theta \frac{\sin 4\psi \cdot \sin \Delta}{(1 + \sin 2\psi \cdot \cos \Delta)^2}, \end{aligned} \quad (2)$$

其中 $n_0=1.0$ 是空气的折射率, θ 是偏振光的入射角。由于本实验样品是单晶 Si 上有注入层, 注入层上有氧化层, 所以测得的 ψ 、 Δ 是总的效果, 不能简单地由此计算 n 、 k 。但作为研究激光退火的变化过程, 我们可直接依据这个等效的 ψ 、 Δ 。

对于连续激光退火而言, 起决定作用的参量是样品达到的温度而不是辐照时间。随着样片大小和激光功率密度的不同, 完成退火所需的最短时间是不同的, 但实验表明样品所达到的温度基本相同。显然光的椭圆偏振参数和反射率的测量同样可用于脉冲激光退火和热退火的研究。由于这种方法简便易行, 并且对样品无损坏, 因此在离子注入 Si 退火的研究中可获得一定的应用。

参 考 文 献

- [1] E. Rimini; *«Laser Effects in Ion Implanted Semiconductors»* (Catania, 1978).
- [2] C. L. Anderson et al.; *«Laser and Electron Beam Processing of Electronic Materials»* (Electrochemical Society, Princeton, 1979).
- [3] S. D. Ferris et al.; *«Laser-Solid Interactions and Laser Processing»* (Boston, 1978).
- [4] G. W. White et al.; *«Symposium A: Materials Research Society Meeting, 1979»* (Academic, New York, 1980).
- [5] M. Miyao et al.; *A. P. L.* 1979, **35**, No. 3 (1 Jul), 227.
- [6] G. K. Celler et al.; *J. A. P.*, 1979, **50**, No. 1 (Nov), 7264.
- [7] M. Takai et al.; *Appl. Phys.*, 1980, **22**, No. 2 (Jun), 129.
- [8] S. C. Tsou et al.; *Appl. Phys.*, 1980, **23**, No. 2 (Oct), 163.
- [9] P. H. Tsien et al.; *Phys. Stat. Sol.*, 1981, **63**, No. 1, 1.
- [10] M. Miyao et al.; *Japan J. A. P.*, 1978, **17**, No. 5 (May), 955.
- [11] A. Kucikova et al.; *Radiation Effects*, 1978, **28**, 129.
- [12] 曹昌祺编著; *«电动力学»* (人民教育出版社, 1978).
- [13] 高伯龙; *«工学学报»*, 1978, **4**, No. 1, 1.
- [14] K. H. Zaininger et al.; *RCA Rev.*, 1964, **25**, No. 1 (Mar), 85.

Optical properties of ion-implanted Si by CO₂ intense-laser annealing

LI YUANHENG

(Institute of Mechanics, Academia Sinica, Beijing)

WANG ZHENMING

(Institute of Automation, the First Department of Mechanical Industry, Beijing)

(Received 4 May 1981)

Abstract

We have experimentally investigated variations in ellipsometrical parameters ψ , Δ , reflectivity R , surface sheet resistance ρ with radiation time by CW CO₂ laser annealing. Output power of CO₂ laser is 40 watts and beam diameter ~ 8 mm. 150 keV As⁺ ions were implanted to a dose of $1 \times 10^{16}/\text{cm}^2$ for $6 \sim 8 \Omega \cdot \text{cm}$ (100)P type Si. The experiments discovered that ψ , Δ , R , ρ didn't obviously change in initial stage, but sharp decreased to the vicinity of values of the crystal silicon at 5 seconds radiation, and there were no any changes when extending radiation time. Measurements of thermoelectric couple and optical pyrometer shown surface temperature of Si has already reached about 1000 K in condition of 5 seconds radiation. The ψ , Δ -radiation time relation is similar to ψ , Δ -of curves, it explains that CW CO₂ laser annealing has the characteristic of thermal annealing. We can understand from an abrupt turn in ψ , Δ , R , ρ curves that laser annealing of ion-implanted layer is swiftly completed during 1~2 seconds, and is not any linear or gradual process.