

## 研究简报

# 脉冲电子束退火装置及其对注砷硅的退火结果\*

伊藤糸次\*\*  饶德祥\*\*\*  
田村英男\*\*  大久保靖\*\*

## 一、引言

目前，离子注入技术虽已相当广泛地用于半导体器件的科研和生产中，然而离子注入造成的晶格损伤的恢复和注入杂质的高效率激活方法却还留下一些有待研究的课题。其中，脉冲电子束退火就是当前颇受重视的方法之一。

脉冲电子束退火的特点是，利用电子束加热局限于半导体表面（微米量级的深度），加热时间极短（毫微秒到微秒数量级），可使半导体表面熔融（通常为几千埃深度）。从而能在半导体基片处于接近常温的状态下，使表面损伤层按液相外延方式再结晶。退火后残留缺陷少，杂质的激活率高。此外，比起激光退火来，电子束退火还具有如下优点：照射面积大，束斑径向能量分布均匀，退火效果与半导体表面光学性能无关<sup>[1]</sup>。

脉冲电子束用于晶格损伤退火的研究开始于1974年<sup>[2]</sup>，但真正受到各国重视则是在1977、1978年<sup>[3,4]</sup>以后的事。迄今为止，关于脉冲电子束退火装置的报道还不多。

## 二、装置简述

装置照片如图1。其原理结构如图2，由以下几部分组成：

### 1. 电子源部分 (*F—A* 之间)

灯丝 *F*（钨，直径0.25毫米），提供热电子；  
筛状电极 *A*，双层结构，与圆筒状铝电极 *O* 等电位；  
硼硅酸玻璃圆筒 *G*，直径100毫米，高度200毫米。

### 2. 主加速部分 (*A—H* 之间)

*I* 为高压绝缘环，*H* 为样品座，*A—H* 顶部距离为20毫米。

\* 1980年11月28日收到。

\*\* 日本早稻田大学理工学部。

\*\*\* 北京市半导体器件二厂。

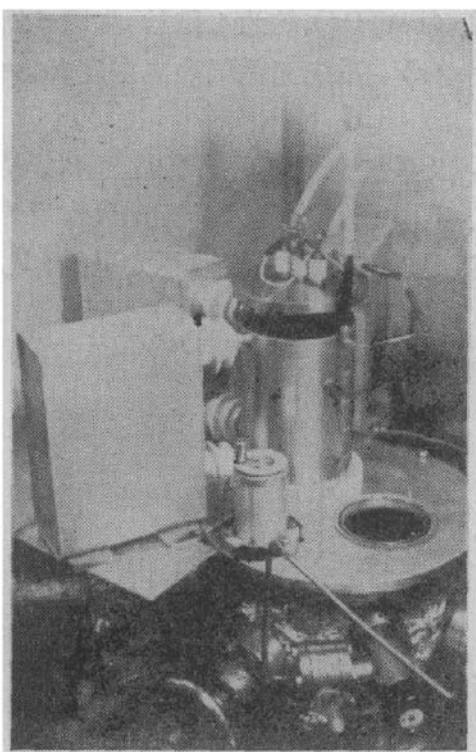


图1 脉冲电子束退火装置

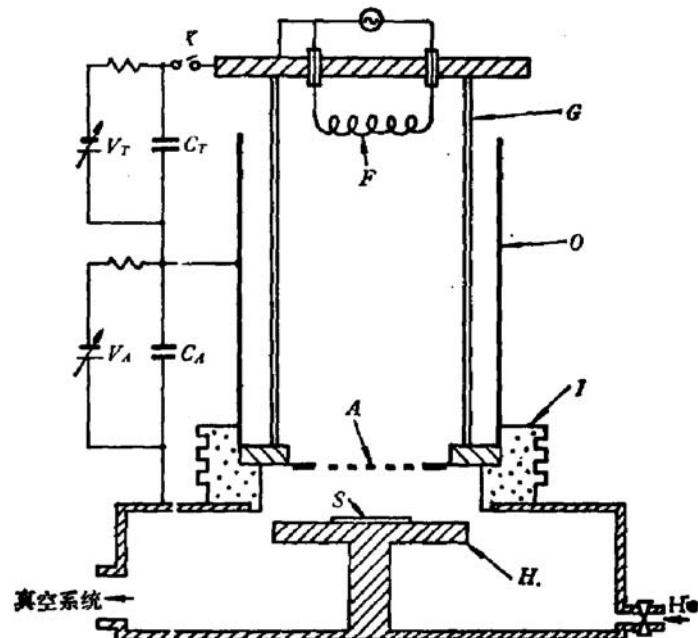


图2 脉冲电子束退火装置原理结构

### 3. 高压电源

$V_T$  为触发放电电源;  $V_A$  为主加速电源;  $C_T$ 、 $C_A$  为高压电容器。

### 4. 真空系统

通常,系统先抽真空至  $10^{-6}$  托,再充氦气(如充至  $10^{-5}$  托)。之后,由  $V_T$  对  $C_T$ (1 微法)充电至 3.5 千伏,由  $V_A$  对  $C_A$ (1.5 微法,由三个容量为 0.5 微法的低电感型电容器组成)充电至 6 到 10 千伏(视需要而定)。当灯丝中流过 6 安培电流时,其周围将有大量热电子放出。合上开关后,热电子立即飞向  $A$ ,导致  $C_T$  放电。并且,热电子通过与途中氮原子碰撞,将产生电离倍增效应。之后,电子穿过  $A$  进入主加速部分,由加在  $A-H$  间的电场获得足够高的能量后碰撞在靶样品  $S$  上。

实验表明,筛状电极  $A$  的材料选择和筛孔设计对电子束的稳定性和束斑径向能量分布均匀性有很大影响。本装置采用双层重叠结构,上层用铝以减小横向电阻,下层用高纯度碳精片以提高热稳定性。

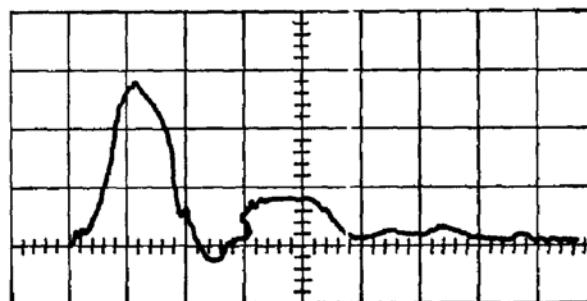


图3 电子束脉冲波形

(X:1μs/格、Y:5V/格)

经实际测量,本装置放电时电子束脉冲的半值宽度(FWHM)约为1微秒,如图3所示。测试条件为灯丝电流 $I_F = 6A$ ,  $V_T = 3.5kV$ ,  $V_A = 6kV$ , 系统充氦气后真空中度 $P_{He} = 1 \times 10^{-5}$ 托。束斑直径约为3厘米。

为获得适当的退火能量,退火时的主加速电压 $V_A$ 及系统充氦气后的真空中度 $P_{He}$ 是重要的参数。具有退火作用的 $V_A$ 及 $P_{He}$ 范围见图4。图中斜线左侧为具有退火作用的范围,实际常用的范围是图中画虚线框部分。 $V_A$ 过高,退火后的样品表面不太平整; $V_A$

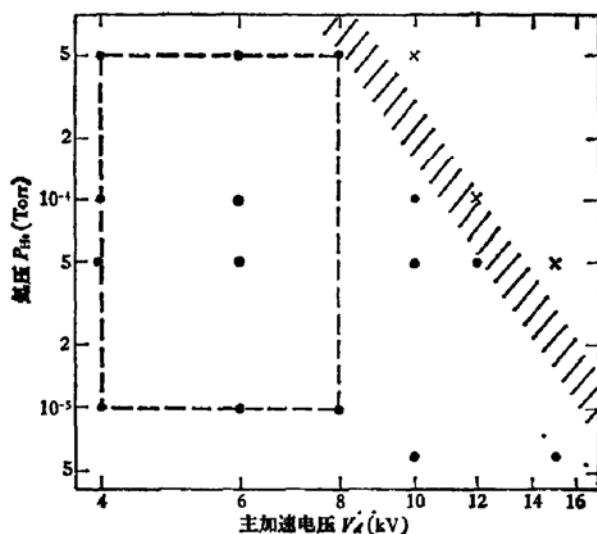


图4 退火效应与  $V_A$ 、 $P_{He}$  的关系

过低,退火能量不足。

### 三、退火实验和结果

#### 1. 注入剂量为 $1 \times 10^{15} As^+ / cm^2$ 样品的退火实验

##### (1) 实验方法

所用样品为(100)晶向的n型硅,电阻率60欧姆·厘米。先在室温下注入砷,注入能量为50 keV,剂量为 $1 \times 10^{15} As^+ / cm^2$ 。显然,这样的注入条件足以使硅单晶表面变成无序结构。

退火条件为 $I_F = 6A$ 、 $V_T = 3.5kV$ 、 $V_A = 8kV$ 、 $P_{He} = 1 \times 10^{-5}$ Torr、室温下辐照一次。

为了检查注入层晶格结构恢复情况及砷原子占据替位的比例,对退火后的样品用350 keV  $He^+$ 进行了背散射测量,其结果如图5所示。

为了评价本装置退火对注入杂质的电激活效果,对退火后的样品用范德堡<sup>[4]</sup>法进行了霍尔测量,如图6所示。测量时采用阳极氧化法进行逐次剥层,电解液为N——甲基乙酰胺的0.04 N硝酸钾溶液。

##### (2) 实验结果及讨论

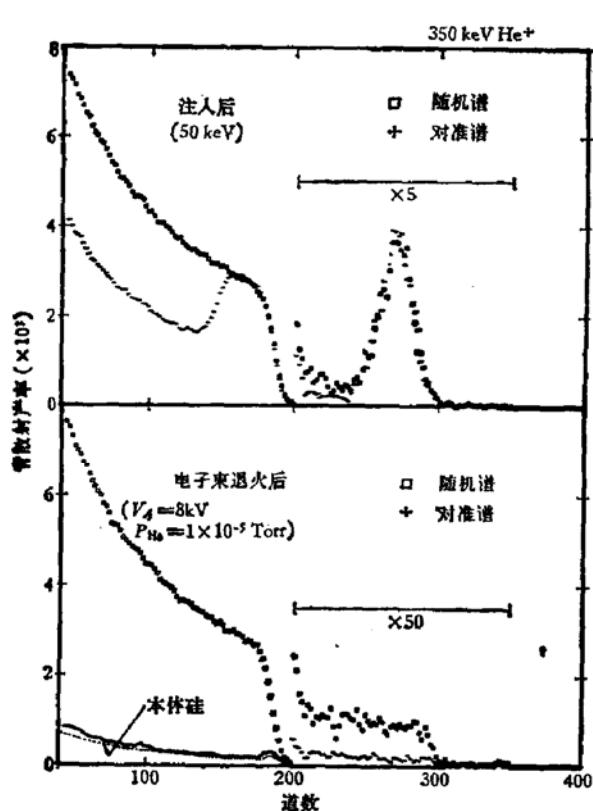


图5 剂量为 $1 \times 10^{15} \text{ As}^+/\text{cm}^2$ 样品退火前后的背散射谱(As谱高度放大了50倍)

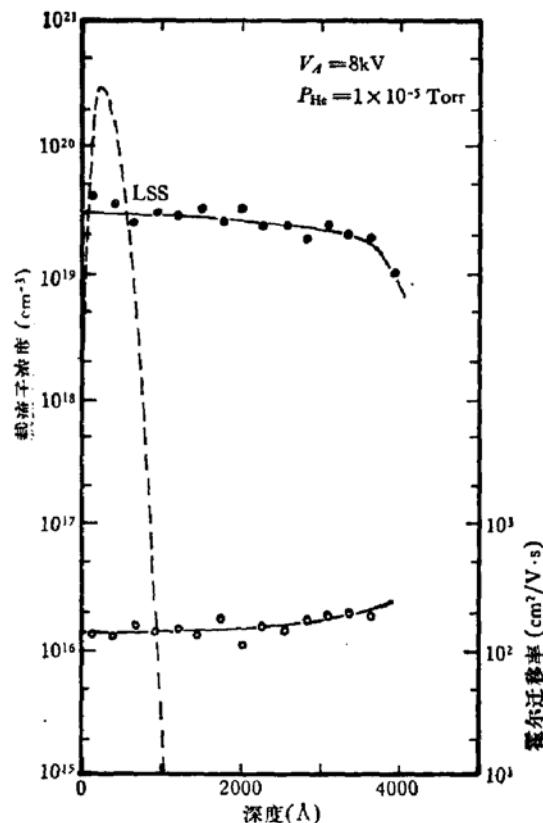


图6 剂量为 $1 \times 10^{15} \text{ As}^+/\text{cm}^2$ 样品退火后载流子浓度和霍尔迁移率随深度方向的分布

图5中上部为样品注入后未退火的背散射谱，下部为退火后样品的背散射谱。由图可知，退火后注入层对准谱的最小背散射产率和硅本体相同，只有相同道数随机谱产率的5%，这说明晶格结构已充分恢复，退火后的砷谱高度无论随机谱和对准谱均大大降低了、变平了，由谱可估计出退火后90%以上的砷原子从间隙位置进入了替位。这同由图6的载流子浓度分布曲线积分得到的砷的激活率为90%大体一致。

由LSS理论可知，50 keV的 $\text{As}^+$ 在硅中的投影射程为322 Å，显然，退火后的砷分布偏离了LSS理论曲线，大大向硅中扩散了。在由表面起大约3500 Å的深度内载流子浓度大体均匀分布，其值为 $(2 \sim 3) \times 10^{19}/\text{cm}^3$ 。计算表明，在1~2微秒的时间内，即使在1400°C下，砷原子在硅中也只能扩散几埃。另外，若采用文献[6]的结果，使500 Å厚掺 $\text{As}$  $(2 \times 10^{20}/\text{cm}^3)$ 无定形层生长为单晶( $\langle 100 \rangle$ )所需时间同温度的关系为 $t_b = 6.15 \times 10^{-13} \exp(2.35 \text{eV}/kT)$ ，即使在1400°C下，所需时间也为7~8微秒。我们的情况下，无定形层厚度应为500 Å以上。由以上扩散距离和外延生长时间的估计可推知，本例的几百埃厚无定形层生长为单晶的机构应为液相外延，退火时砷的扩散系数高达 $10^{-4}\text{cm}^2/\text{秒}$ [7,8]。

## 2. 注入剂量为 $1 \times 10^{16} \text{ As}^+/\text{cm}^2$ 样品的退火实验

### (1) 实验方法

除注入条件中的注入剂量为 $1 \times 10^{16} \text{ As}^+/\text{cm}^2$ 外，本例中所用原始材料、注入条件、退火条件、测试方法均与(三、退火实验和结果中的(1)节中)所述相同。背散射测量及霍

尔测量结果分别如图 7、图 8 所示。

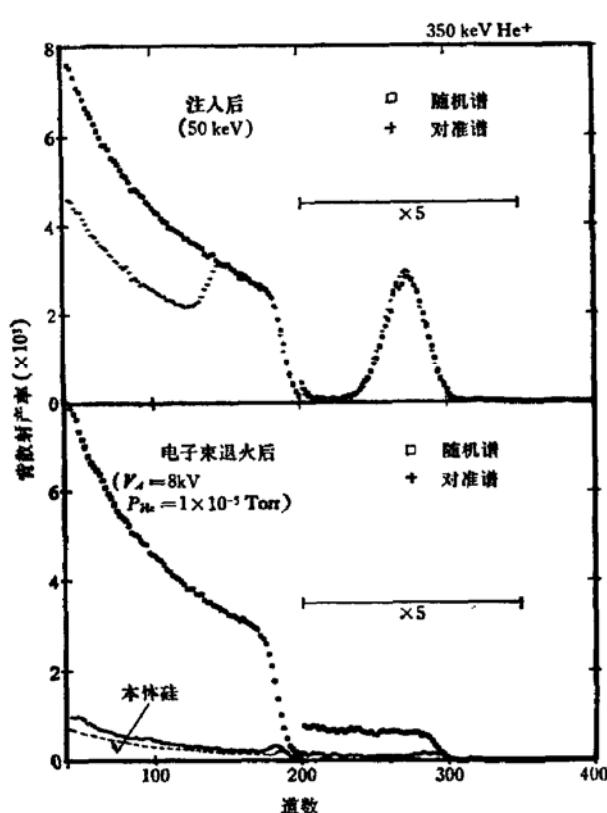


图 7 剂量为  $1 \times 10^{16} \text{ As}^+/\text{cm}^2$  样品的背散射谱  
(As 谱高度放大了 5 倍)

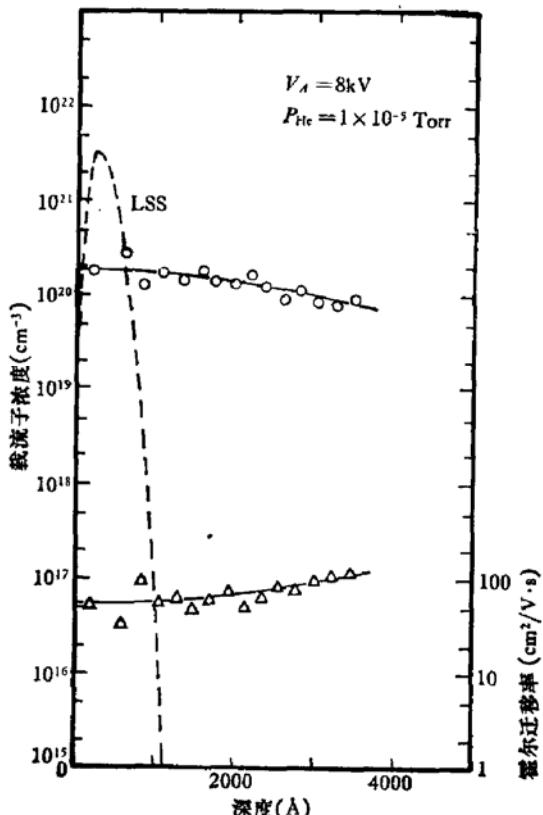


图 8 剂量为  $1 \times 10^{16} \text{ As}^+/\text{cm}^2$  样品  
的载流子浓度和霍尔迁移率随深度  
方向的分布

## (2) 实验结果及讨论

由图 7 可知, 退火后注入层对准谱的最小背散射产率比硅本体略高, 为相同道数随机谱背散射产率的约 5.8% (硅本体约为 5%)。由退火后的砷谱可知, 退火后大约 80% 以上的砷原子进入了点阵位置, 这比由图 8 计算到的 56% 的激活率高得较多。此外, 由图 6 及图 8 对比可知, 在相同退火条件下, 注入剂量为  $1 \times 10^{16} \text{ As}^+/\text{cm}^2$  样品的激活率比注入剂量为  $1 \times 10^{15} \text{ As}^+/\text{cm}^2$  样品的激活率要低。其原因可能是注入层砷浓度很高时, 退火后样品表面层还会留下较多的砷原子的聚合体和砷原子同空位的络合体等缺陷<sup>[9,10]</sup>。

同样, 本例中晶体结构恢复的机构也应是液相外延。

## 四、结 束 语

本文所介绍的脉冲电子束退火装置结构简单、成本低廉、工作电压低、操作方便。改变  $V_A$  及  $P_{He}$  可在较宽范围内改变脉冲电子束参数。

背散射及霍尔测量结果表明, 本装置在 8 千伏下退火硅是以液相外延方式进行的, 晶

格恢复比较完整，对杂质的激活率也较高。

最后，对在本实验过程中曾给我们以有益帮助的山本康博博士表示感谢。

### 参 考 文 献

- [1] 稻田太郎，电子材料，No. 11, 64(1979).
- [2] U. S. Patent, 3950187 (1974).
- [3] A. R. Kirkpatrick et al., *IEEE Trans. Electron. Device*, ED-24, 429(1977).
- [4] A. R. Kirkpatrick et al., Proc. Inter. Natio. Conf. on Ion Beam Modification of Materials, Budapest, Sept. (1978).
- [5] L. J. Van der Pauw, *Philips Research Reports*, 13, 1 (1958).
- [6] J. S. Williams et al., *Appl. Phys. Lett.*, 33, 542(1978).
- [7] A. C. Greenwald et al., *J. Appl. Phys.*, 50(2), 783(1979).
- [8] J. C. Brice et al., *Solid-State Electronics*, 6, 673(1963).
- [9] Y. Akasaka et al., *Jpn. J. Appl. Phys.*, 19, 87(1980).
- [10] R. B. Fair, *J. Appl. Phys.*, 44, 273(1973).

## Pulsed Electron Beam Annealing Apparatus and Annealing of As-Implanted Silicon

T. Itoh\*, D. X. Rao,\*\* H. Tamura\* and Y. Ohkubo\*

(\*School of Science and Engineering, Waseda University)

Shinjuku-ku, Tokyo 160, Japan

(\*\*Beijing Second Semiconductor Device Factory China)

### Abstract

We have developed a low voltage operation E-B apparatus which can be used for single pulsed E-B processing of semiconductor surfaces. The apparatus consists of a high density electron source and an electron beam irradiation chamber, and is operated in a He environment at about  $10^{-5}$  Torr.

Silicon (100) wafers were implanted at room temperature with 50 keV  $\text{As}^+$  of  $10^{15}/\text{cm}^2$  and  $10^{16}/\text{cm}^2$  duration at 8keV. Rapid diffusion of As atoms were observed in this case. The annealing mechanism of lattice damage is that the liquid-phase epitaxial regrowth initiating from the substrate occurs by means of pulsed E-B irradiation.