



# 高浓度注砷硅的红外瞬态辐照退火

侯东彦 钱佩信 李志坚

(清华大学微电子学研究所)

1983年3月11日收到

## 提 要

用高温石墨作为红外辐射源，对高浓度的注砷硅进行了瞬态(13秒)辐照，达到非常好的退火效果。对于 $10^{16} \text{ cm}^{-2}$ 剂量的注砷硅可达到100%的电激活，且损伤恢复比热退火(1100°C, 30分)情况要好，引起的注入原子的再分布比常规的高温热退火要小得多。用本方法退火的注砷硅PN结具有良好的电特性。因此，在VLSI工艺中它是一种很有应用前景的离子注入退火技术。

## 一、引言

超大规模集成电路技术要求极低的扩散层方块电阻，同时又要求很浅的PN结结深。离子注入是目前可以达到此目的的唯一掺杂技术。但是为了使注入后的晶体缺陷得以消除，以及使注入杂质达到电激活(进入代位态)，常规的热退火使注入杂质分布扩展(结深变宽)，而且对高浓度注入硅达不到100%的电激活。近年来发展了多种瞬态退火方法，如脉冲激光退火<sup>[1,2]</sup>，连续激光退火<sup>[3,4]</sup>，电子束退火<sup>[5]</sup>，太阳能辐照退火<sup>[6]</sup>，非相干光辐照退火<sup>[7]</sup>等等。这些方法克服了常规热退火的上述一些缺点，但要用于生产实际，还存在不少问题。本文对红外瞬态辐照退火技术进行了研究。

## 二、红外瞬态辐照退火的原理

用高温半导体级石墨作红外辐射源，图1为绝对黑体的辐射功率的光谱分布<sup>[8]</sup>。可以看出，辐射体的温度越高，辐射的能量越高，峰值波长就越短。温度高达1377°C时，峰值波长约1.8 μm，仍处于红外光范围。所以在实用的温度范围内，石墨的辐射光谱主要在红外光范围。

硅的禁带宽度为1.1 eV，所以对于红外光，硅的本征吸收是非常小的。硅对于红外光的吸收主要是载流子吸收，载流子浓度越高，吸收系数就越大，如图2所示<sup>[9]</sup>。只要硅的温度足够高，就可以使硅有足够高的本征载流子浓度。因此，高温时在红外光范围硅也有足够高的吸收系数。所以在红外辐照下样品可以达到加温作用，从而达到瞬态退火的目的。

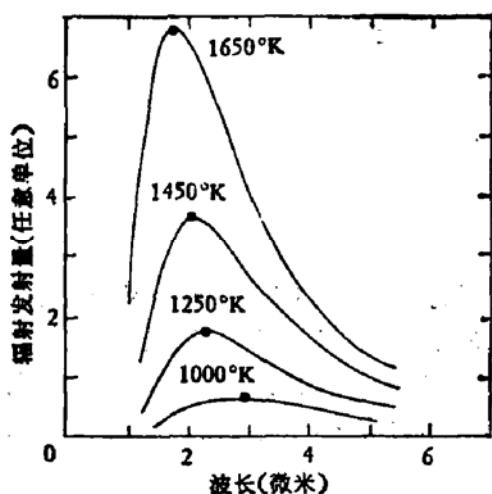


图 1 黑体辐射功率的光谱分布

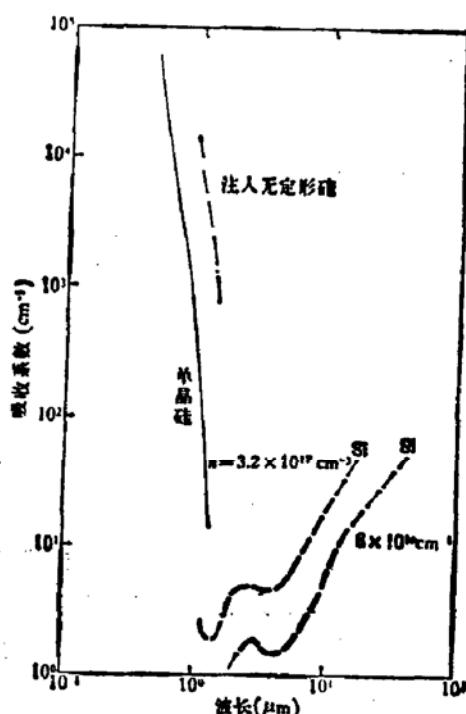


图 2 硅的吸收系数与波长的关系

### 三、实验技术

用高频感应加热石墨。为防止石墨及样品氧化，工作时通高纯氮气保护。

样品采用 Van der Pauw 结构，为了减少接触电阻，四个接触区在注入前都扩散高浓度的磷（结深为  $0.7 \mu\text{m}$ ）。样品选用  $\langle 100 \rangle$  晶向的 P 型单晶硅，其电阻率为  $6-8 \Omega\cdot\text{cm}$ 。注入砷的剂量有两种 ( $10^{16}\text{cm}^{-2}$ ,  $10^{15}\text{cm}^{-2}$ )，注入能量都是  $150 \text{ keV}$ 。注入时样品倾斜  $8^\circ$  以避免注入的沟道效应，并且样品不加冷却。

样品温度的测量采用无接触式红外测温仪，型号是 Barnes 12-8762，其时间响应为  $50 \text{ ms}$ 。样品升到预定温度的时间为 3 秒，从样品温度升到预定温度的  $90\%$  时开始计退火时间。

样品的检测技术如下：

- ① 用霍尔测试来测定样品退火后的有效载流子面密度  $N_{\text{eff}}$ ，有效迁移率  $\mu_{\text{eff}}$  与方块电阻  $R_{\square}$ 。
- ② 用背散射和沟道效应测量来测定退火前后注入离子的分布和晶体损伤情况。 $\text{He}^+$  探测束垂直于样品，散射角为  $155^\circ$ ， $\text{He}^+$  的能量为  $1.68 \text{ MeV}$ 。
- ③ 用高压透射电镜观察退火后的样品的缺陷。
- ④ 用 Zerbst 方法<sup>[10]</sup> 测定样品表面的少子寿命  $\tau$ 。
- ⑤ 用磨角-扩展电阻法测定 PN 结结深。

#### 四、实验结果与讨论

图3是注入砷的剂量为 $10^{16} \text{ cm}^{-2}$ 的样品的瞬态退火温度与 $N_{\text{eff}}$ ， $\mu_{\text{eff}}$ 和 $R_{\square}$ 的关系（退火时间为13秒），并和常规热退火（退火时间30分）作了比较。可以看出，随着辐照温度的提高，注入离子的电激活率逐渐升高，当硅片温度达到1100℃以上时，砷离子可全部激活。和常规稳态热退火相比，在相同的温度条件下，红外退火样品的电激活率高于热退火样品。因此，在注入离子的电激活率方面，红外瞬态退火有明显的优势。

由下面提出的实验可知，常规热退火后注入砷原子的分布与红外瞬态退火后样品中砷原子的分布相比有明显的扩展，所以图中所对应热退火样品的载流子浓度远低于红外退火样品。由于电子迁移率随离化杂质浓度增加而下降，因此红外退火样品的电子迁移率必定要比热退火样品的电子迁移率低些<sup>[11]</sup>。如图3所示。

图4为样品的透射电镜(TEM)照片。从图中可以明显地看出，常规热退火(1100℃，30分)样品的缺陷明显多于前两种，而2分钟红外退火样品的缺陷又略多于13秒红外瞬态退火样品。同时观察中发现，常规热退火样品的可见缺陷在整个观察的薄区内分布均匀，而13秒和2分钟红外退火的样品只有在局部区域才能找到如图中a)和b)这样的缺陷。瞬态退火表面缺陷浓度低的一个可能原因是缺陷形成的弛豫时间常数大于瞬态退火时间。

红外辐照退火和常规热退火样品的背散射与沟道效应测试结果示于图5。为清楚起见，图中只画出硅谱。从图中看出，未退火的注入样品在表面有一层厚约2000Å的无定形层(注入条件为 $10^{16} \text{ cm}^{-2}$ , 150 keV)。在常规热退火(1100℃, 30分)或红外辐照退火(1100℃, 13秒)后，都使这一无定形层恢复成晶体，不过13秒红外瞬态辐照退火后，使这层无定形硅恢复得更接近于完整晶体，4.5秒，1100℃红外瞬态辐照退火后的晶体在表面1000—2000Å之间还存在一个损伤区，损伤没完全消除。

根据背散射的砷谱计算出的砷原子在硅中的纵向分布，如图6所示。图中表明了注

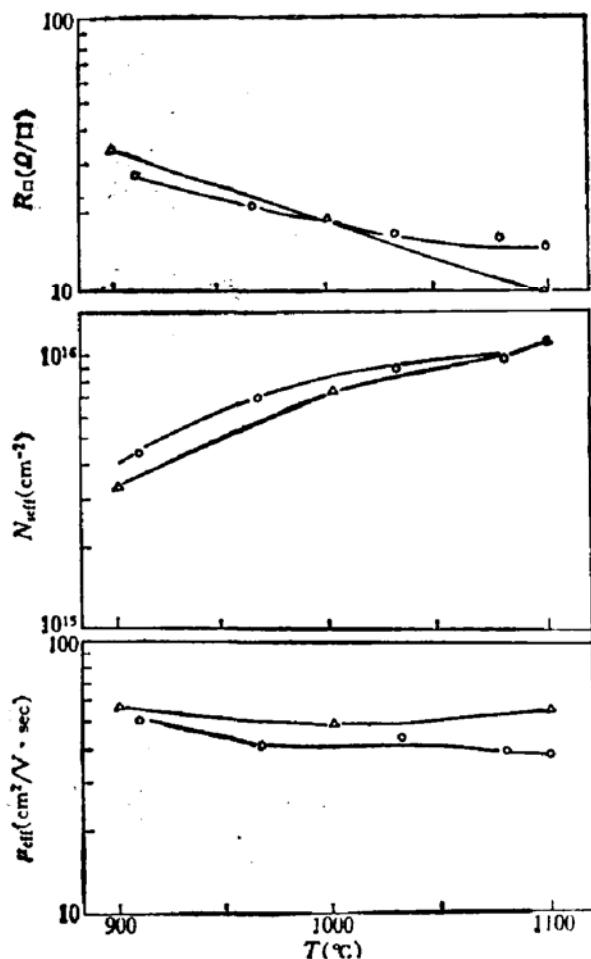


图3 注砷剂量为 $10^{16} \text{ cm}^{-2}$ 硅的 $N_{\text{eff}}$ ， $\mu_{\text{eff}}$ 和 $R_{\square}$ 与退火温度的关系，As: Si <100>， $E = 150 \text{ keV}$ ，  
 $N_{\square} = 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ 。○ 13秒(红外退火)，  
△30分(热退火)

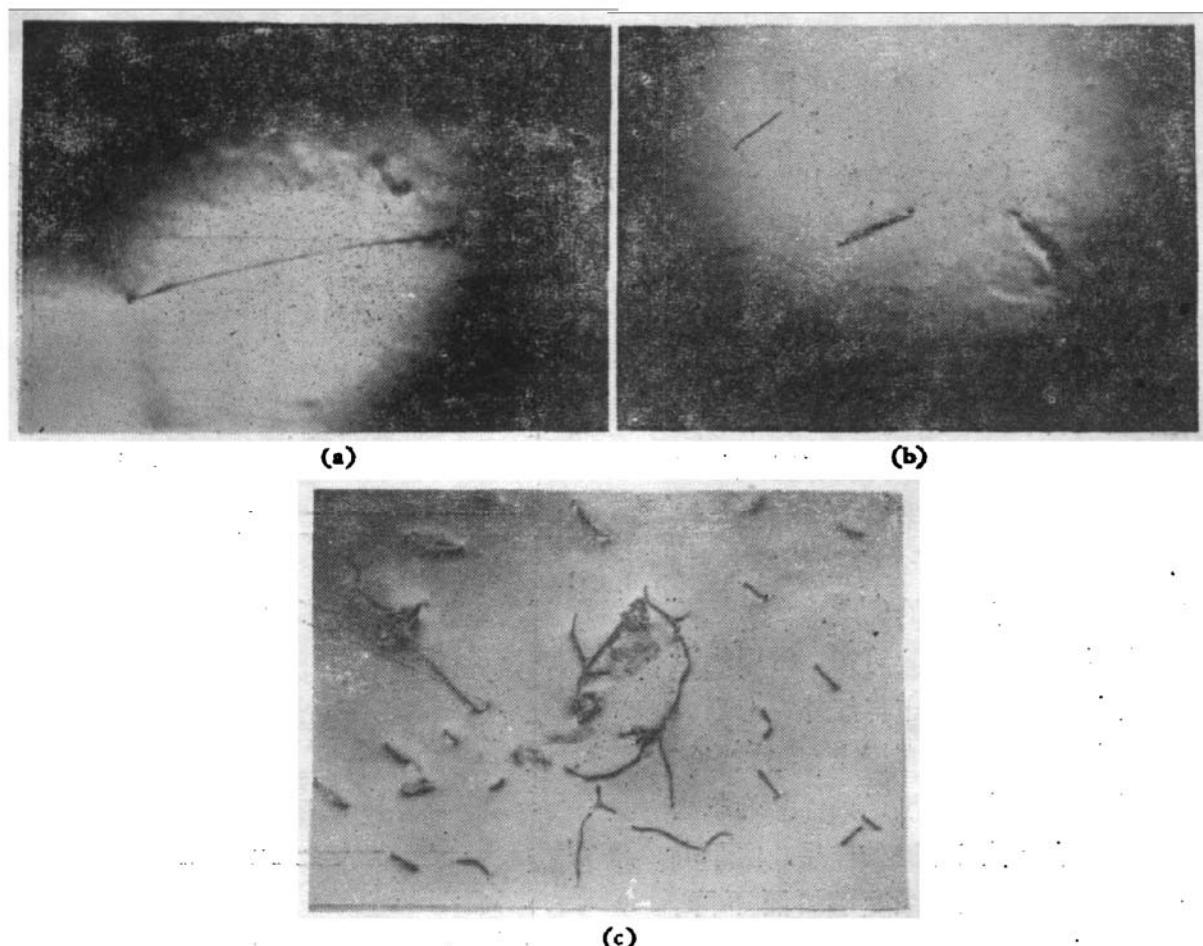


图4 注砷硅 ( $10^{14} \text{cm}^{-2}$ , 150keV) 退火后的高压透射电镜照片

(a) 红外瞬态退火 ( $1100^\circ\text{C}$ , 13秒), 放大20万倍. (b) 红外退火 ( $1100^\circ\text{C}$ , 2分钟), 放大15万倍. (c) 常规热退火 ( $1100^\circ\text{C}$ , 30分), 放大15万倍

入后没有退火、红外瞬态退火 ( $1100^\circ\text{C}$ , 13秒;  $1100^\circ\text{C}$ , 4.5秒) 样品的砷原子纵向分布图. 由于常规热退火 ( $1100^\circ\text{C}$ , 30分) 后砷原子的分布扩展很深, 在我们所采用的  $\text{He}^+$  的能量情况下, 分布大于  $5000 \text{\AA}$  的砷谱必将与硅谱重叠, 因此已无法用背散射砷谱来确定其分布. 为此用磨角-扩展电阻法测出其结深为  $1.05 \mu\text{m}$ . 由图6看出, 短时间的红外瞬态辐照退火样品的砷原子分布没有明显的扩展. 而13秒红外辐照后砷原子的分布稍许有点变化, 分布扩展仅为  $1000 \text{\AA}$ . 这与常规热退火相比, 砷原子分布的扩展要小得多. 从图中看到13秒红外辐照退火后砷原子的分布曲线变平, 实用上这可能是有利的.

除了上述高注入剂量的样品的退火实验以外, 为了对比, 还作了注入剂量为  $10^{15} \text{cm}^{-2}$  较低剂量的注砷硅的退火实验. 对于这种样品, 在13秒的红外辐照下, 硅片温度只要高于  $900^\circ\text{C}$ , 砷原子均可全部激活. 测量结果示于图7.

测定了红外瞬态辐照退火 ( $1100^\circ\text{C}$ , 13秒); 氮氢处理 ( $450^\circ\text{C}$ , 30分) 前后的样品表面少子寿命  $\tau$ . 结果示于表1.

结果表明经过红外退火后, 少子的寿命趋于均匀, 长寿命的稍有变短, 寿命短的有点变长. 寿命提高这一现象似乎可用集中的强复合中心(如各种缺陷团或复合体)在瞬态高温过程中分解来说明. 红外退火后少子寿命趋于均匀对于VLSI的成品率显然是有利的.

对  $\phi 40\text{mm}$  的注砷 ( $10^{14} \text{cm}^{-2}$ ) 样品在红外瞬态退火后 ( $1100^\circ\text{C}$ , 13秒) 进行径向均

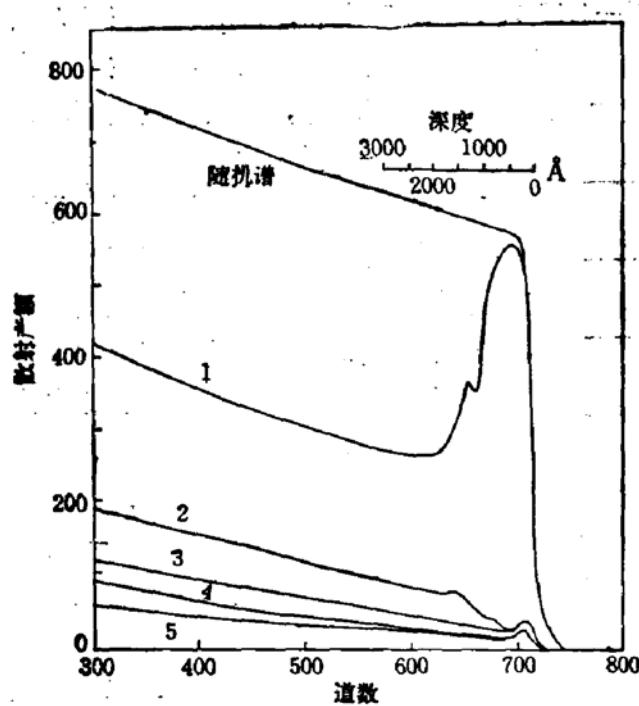


图5 硅样品的He离子背散射谱(As: $\langle 100 \rangle$ Si,  
 $N_{\square} = 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ ,  $E = 150 \text{ keV}$ )。

①—④为定向谱, 其中④为注入后未退火样品, ③为注入后红外瞬态退火( $1100^{\circ}\text{C}$ , 4.5秒)样品, ②为注入后常规热退火( $1100^{\circ}\text{C}$ , 30分)样品, ①为注入后红外瞬态退火( $1100^{\circ}\text{C}$ , 13秒)样品, ⑤为未注入样品

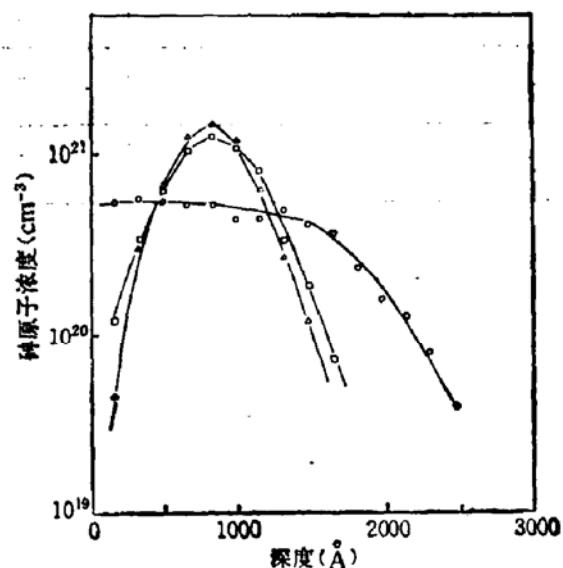


图6 由背散射谱计算出的砷原子在  
硅中的分布曲线

As:Si  $\langle 100 \rangle$   
 $N_{\square} = 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ ,  $E = 150 \text{ keV}$   
□ 红外退火( $1100^{\circ}\text{C}$ , 4.5秒)  
○ 红外退火( $1100^{\circ}\text{C}$ , 30分)  
△ 注入后未退火

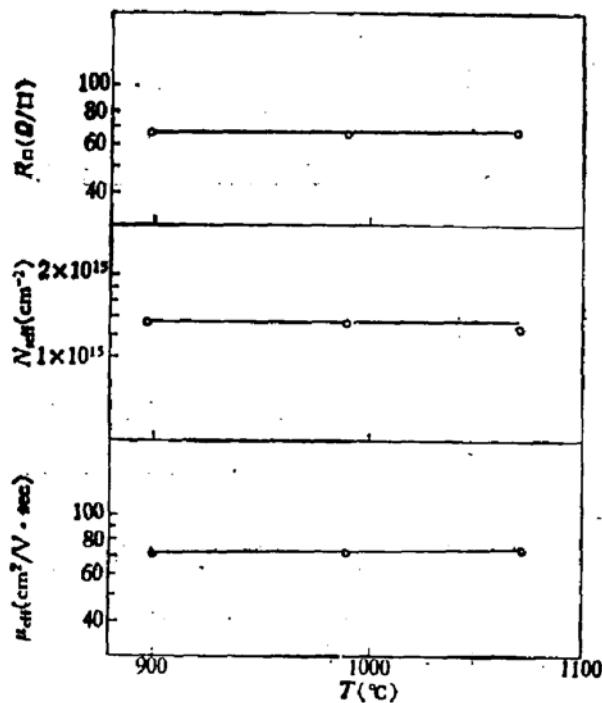


图7 注砷剂量为  $10^{16} \text{ cm}^{-2}$  硅的  $N_{\text{eff}}$ 、 $\mu_{\text{eff}}$  和  
 $R_{\square}$  与温度的关系, 退火时间为13秒(As: Si  
 $\langle 100 \rangle$ ,  $E = 150 \text{ keV}$ ,  $N_{\square} = 1.3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ )

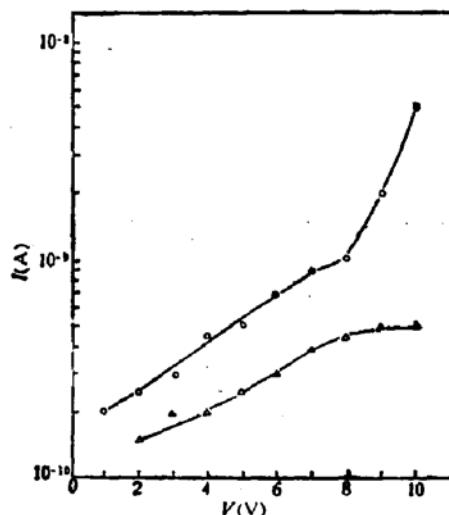


图8 △ 红外瞬态退火( $1100^{\circ}\text{C}$ , 13秒)与  
○ 常规热退火( $1100^{\circ}\text{C}$ , 30分)的PN结  
的反向特性

匀性测试。结果表明  $N_{\text{eff}}$  在  $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ — $1.15 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$  之间。相对偏差在  $\pm 7\%$ 。

表 1 红外瞬态退火前后的样品表面少子寿命  $\tau$

测试图形	$\tau_1$ (退火前) $\mu\text{s}$	$\tau_2$ (退火后) $\mu\text{s}$
1	356	117
2	34	95
3	78	87
4	273	87

造成这些偏差的原因很多，但主要是由退火的径向不均匀，注入的径向不均匀以及测量误差所引起的。

经过红外瞬态退火后的 2 吋圆片经用平整度仪测量后发现其形变在光刻工艺允许的范围以内。所用的平整度仪是 Canon 激光平整度测量仪 LSF-500 型。

PN 结实验的样品是在 P 型硅片上注入砷 ( $10^{16} \text{ cm}^{-2}$ , 150 keV) 得到的。砷原子经过  $600 \text{ \AA}$  氧化层注入硅中。每个 PN

结 N 区面积为  $0.25 \text{ mm}^2$ 。图 8 为红外瞬态退火和常规热退火后 PN 结的反向电流与外加的反向电压的关系。可以看出红外瞬态退火所得的 PN 结具有良好的反向特性。反向电流很小。这也证明结区附近的晶体缺陷很少。

此外，红外瞬态退火技术与连续  $\text{CO}_2$  激光退火技术相比有许多共同之处。二者都是用红外波段的光束加热样品，光透入的深度大，因此样品在整个深度范围内均匀加热，光照区的升温时间都在 1—3 秒<sup>[12]</sup>。但是，用 CW- $\text{CO}_2$  激光束(束斑为  $\phi 2.5 \text{ mm}$ ) 扫射整个样品时，为了防止样品变形和产生滑移线，要把样品预热到  $450^\circ\text{C}$ ，激光退火后高浓度砷注入样品 ( $10^{16} \text{ cm}^{-2}$ , 150 keV) 的砷原子的电激活率只有 70%<sup>[12]</sup>。只有大光束 ( $\phi 8 \text{ mm}$ ) 定点照射不预热的小样品 ( $7 \times 7 \text{ mm}^2$ ; 注入剂量是  $10^{16} \text{ cm}^{-2}$ , 150 keV)，退火后注入离子才能完全电激活<sup>[4]</sup>。红外辐照退火可以对大样品进行单次辐照，并且能使注入离子达到 100% 电激活。所以红外辐照退火技术又有它的特有的优点。

和 R. T. Fulks 等人报道的方法<sup>[13]</sup>相比，本退火方法有更高的电激活率。前者对于  $6 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$  的注入砷硅退火只有  $\sim 85\%$  的电激活率，这是被辐照的样品温度不够高所引起的。虽然二种方法石墨的温度都在  $1300^\circ\text{C}$  左右，但本退火方法的样品温度比 R. T. Fulks 的样品温度高一百多度。

## 五、结 论

上述实验结果表明，红外瞬态退火技术有注入原子电激活率高，再分布小，损伤少以及样品形变小等优点，而且设备简单，成本低，操作方便和生产效率高。因此它是一种在 VLSI 工艺中很有实用前景的瞬态退火技术。

陈必贤同志参加了全部实验工作，样品加工主要由本所科研组完成。另外中国科学院原子能所王豫生、郑胜男同志帮助我们作了样品的背散射与沟道效应测试，冶金部有色金属研究院帮助我们作了扩展电阻测试。对此深表感谢。

## 参 考 文 献

- [1] O. G. Kutukova and L. N. Strel'stov, Sov. Phys. Semicond., 10, 265 (1976).

- [2] G. K. Celler, J. M. Poate and L. C. Kimerling, *Appl. Phys. Lett.*, **32**, 464(1978).
- [3] A. Gat and J. F. Gibbons, *Appl. Phys. Lett.*, **32**, 142(1978).
- [4] P. H. Tsien, J. Götzlich, H. Ryssel and I. Ruge, *J. Appl. Phys.*, **53**, 663(1982).
- [5] T. O. Yep, R. T. Fulks, and R. A. Powell, *Appl. Phys. Lett.*, **38**, 162(1981).
- [6] S. S. Lau, M. Von Allmen, I. Golecki, M-A. Nicolet, E. F. Kennedy and W. F. Tseng, *Appl. Phys. Lett.*, **35**, 327(1979).
- [7] R. A. Powell, T. O. Yep and R. T. Fulks, *Appl. Phys. Lett.*, **39**, 150(1981).
- [8] 克罗塞等著,洪怀瑞译,红外技术基础,上海科学技术出版社,1965年。
- [9] G. K. Celler, R. Bornitta, W. L. Brown, J. M. Poate, G. A. Rozgonyi and T. T. Sheng, *Laser-solid Interactions and Laser-Processing-1978. (Materials Research Society, Boston)* (AIP, New York, 1979) p. 381.
- [10] M. Zerbst, *Z. angew. Phys.*, **22**, 30(1966).
- [11] P. H. Tsien, H. Ryssel, D. Röschenthaler and I. Ruge, *J. Appl. Phys.*, **52**, 4775(1981).
- [12] S. C. Tsou, P. H. Tsien, M. Takai, D. Röschenthaler, M. Ramin, H. Ryssel and I. Ruge, *Appl. Phys.*, **22**, 129(1980).
- [13] R. T. Fulks, C. J. Russo, P. R. Hanley and T. I. Kamins, *Appl. Phys. Lett.*, **39**, 604(1981).

## Transient Annealing of High-Dose As<sup>+</sup>-Implanted Silicon with Infrared Irradiation

Hou Dongyan, Tsien Peihsin and Li Zhijian

*(Institute of Microelectronics, Tsinghua University)*

### Abstract

High-dose ( $10^{16} \text{ cm}^{-2}$ ) As<sup>+</sup>-implanted silicon wafers are irradiated transiently using a RF heated graphite as an infrared irradiation source. Satisfactory results are obtained: the electrical activation of the dopants is 100% complete. In contrast with the conventional furnace annealing, better recovery of the implantation damage is obtained and the dopant redistribution is weakened greatly, P-N junctions annealed in this way show good electrical characteristics. It is believed that the IR annealing has a good prospect in the application of VLSI.