

砷化镓注锡的红宝石脉冲激光退火

吴恒显 刘立人

(中国科学院上海光机所)

赵新安 忻尚衡

(中国科学院上海冶金所)

Annealing of Sn implanted GaAs by pulsed ruby laser

Wu Hengxian Liu Liren

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

Zhao Xinan Xin Shanghen

(Shanghai Institute of Metallurgy, Academia Sinica)

Abstract

Samples of GaAs implanted with tin were irradiated with a Q-switched ruby laser ($\sim 1 \text{ J/cm}^2$, 30–40 ns). Investigation on proton channeling and electron diffraction showed that the amorphous layer of samples implanted with 60 keV or 300 keV Sn ions was recrystallized by laser irradiation, and the dopant atoms were in substitutional sites. The maximum concentration of GaAs carriers was up to $1 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ after annealing, it is 20 times higher than that of the heat annealed samples.

一、引言

半导体经离子注入后,需经热退火使注入过程引起的晶格损伤得到恢复,同时使注入杂质活化,才能获得良好的电特性。但是热退火有许多的局限性,如高剂量注入所产生的晶格损伤得不到充分恢复,衬底材料的少子寿命与扩散长度会严重下降,对化学稳定性较差的化合物半导体,还会引起分解与

化学配比的变化等。离子注入 GaAs 的热退火特性与 Si 颇不相同,对晶向的依赖性不如 Si 明显,再结晶温度范围较宽,退火后的再生长层仍有较高的无序。为了得到较高的电激活率,一般采用热靶注入。因此多年来,科学研究一直在致力于探索一种新的退火工艺。近几年试采用激光退火工艺,因激光退火具有一系列的优点。用激光辐照可以在室温、大气环境里进行,而且时间只需毫微秒到毫

收稿日期: 1979年2月24日。

秒,即可完成热退火的功能。通过激光束的扫描和激光束能量的控制,还可做到三维方向的定域退火。因此,近几年来激光退火受到人们的重视。已对硅作了大量的研究^[1-5],最近 Sealy 等人^[6-7]研究了 GaAs 注 Te、Ge 等的激光退火特性。本文中,我们用调 Q 红宝石激光对 GaAs 注 Sn 的样品进行了退火。退火后,用离子背散射技术、反射电子衍射和微分霍耳效应等方法,研究了晶体结构恢复程度和载流子的活化。实验表明激光退火可使注入损伤层充分恢复,且可得到 n_{\max} 达 $1.4 \times 10^{19}/\text{厘米}^3$,其激活程度比热退火高 20 倍。

二、实验方法

离子注入在丹麦奥尔胡斯大学物理研究所同位素分离器上进行。采用的 GaAs 样品为晶向 $\langle 100 \rangle$ 的掺 Cr 高阻单晶片,注入能量为 60 千电子伏或 300 千电子伏,剂量为 $4 \times 10^{14}/\text{厘米}^2$ 或 $1 \times 10^{15}/\text{厘米}^2$ 的 Sn 离子,偏离 $\langle 100 \rangle$ 晶向 7° ,以避免沟道效应的影响。为了防止砷化镓材料在退火时 As 离解,在样品注入面上用高频溅射沉积一层复盖层,对激光退火的复盖层是 600~700 埃的 Si_3N_4 ,而热退火的复盖层为 1000 埃的 Si_3N_4 和 2000 埃的 SiO_2 薄膜。

实验用的调 Q 红宝石脉冲激光器如图 1 所示。激光器由振荡级、小孔选模及放大级组成,用 KD*P 晶体进行调 Q。波长 6943 埃,脉冲宽度 30 毫微秒,激光束由焦距 $f=7$ 厘米的平凸透镜输出,激光辐照能量密度范围为 $0.75 \sim 2.5$ 焦耳/厘米² 之间,辐照的斑点直径为 3~8 毫米。

对退火后的样品,用离子背散射技术、反射电子衍射、相衬干涉显微镜和微分霍耳效应等技术,研究了晶格损伤的消除,载流子浓度的分布,表面形貌相的变化等。

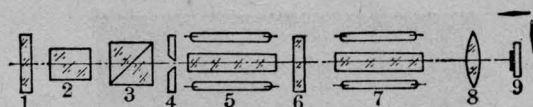


图 1 调 Q 红宝石脉冲激光退火装置

1—全反射镜 $T=100\%$; 2—KD*P 晶体; 3—格兰棱镜;
4—小孔; 5—第一级红宝石棒;
6— $T=50\%$ 的介质膜片; 7—第二级红宝石棒;
8—透镜; 9—工作样品

三、实验结果

1. 激光退火后无定形层的结构变化

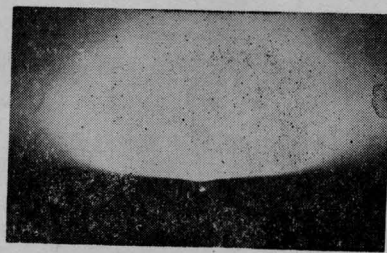
对 60 千电子伏、 $4 \times 10^{14}/\text{厘米}^2$ Sn 离子注入的 GaAs 样品,经能量密度为 ~ 1 焦耳/厘米² 的激光辐照后,用肉眼可以看到注入表面无定形层褪色,并恢复到原来砷化镓金属光泽,定性地说明了无定形层经激光辐照后结构发生变化,回复到单晶状态。

用反射电子衍射法证实了上述情况。图 2(a)、(b)、(c) 分别是注入层未退火和经能量密度为 0.77 焦耳/厘米²、 1.1 焦耳/厘米² 的激光退火的电子衍射照片。图 2(a) 模糊一片,说明注入层是无定形层;图 2(b) 说明无定形层经 0.77 焦耳/厘米² 激光辐照后变成了多晶层;而图 2(c) 说明注入样品的无定形层经 1.1 焦耳/厘米² 的激光辐照后转变成单晶层。图 2 结果表明,要使无定形层转变为单晶层,辐照的激光要具有一定的能量密度。

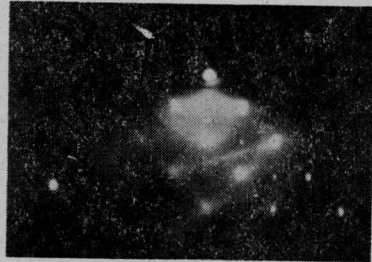
另外,我们用能量密度为 1.5 焦耳/厘米² 的激光对 300 千电子伏、 $1 \times 10^{15}/\text{厘米}^2$ 、 200°C 热靶注入 Sn 的 GaAs 样品进行了激光退火,同时获得了清晰的单晶衍射图,如图 2(d) 所示。

2. 背散射能谱

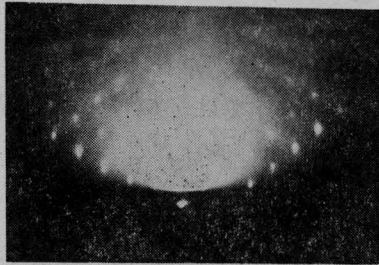
用 165 千电子伏质子背散射与沟道效应测量了经能量密度为 1 焦耳/厘米² 的激光辐照后样品的背散射能谱,测量系统能量分辨率 (FWHM) 为 4 千电子伏,图 3 是背散射的能谱,从图 3 可以看出,激光退火后,



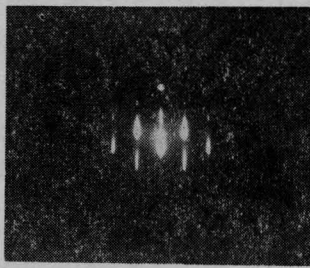
(a)



(b)



(c)



(d)

图2 注入层退火前后的反射电子衍射照片
(a) 未退火的注入无定形层; (b) 激光退火后多晶衍射图(能量密度 0.77 焦耳/厘米²); (c) 激光退火后单晶衍射图(能量密度 1.1 焦耳/厘米²); (d) 激光退火后的电子衍射图(能量密度 1.5 焦耳/厘米²)

样品的损伤定向谱高度跌到随机谱高度的 5%, 几乎与未经注入单晶定向谱吻合, 这是热退火试样难于达到的。充分说明无定形层经激光退火后, 晶格损伤的恢复几乎是完全的。

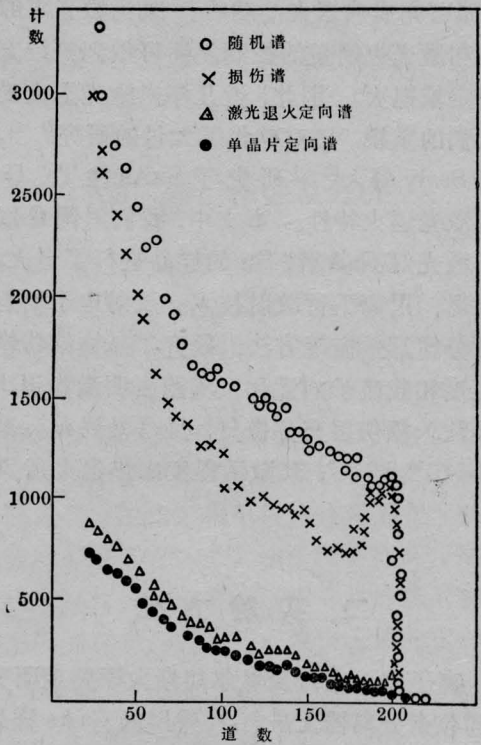


图3 背散射能谱
165 千伏, He⁺, GaAs:Cr, 注 Sn⁺¹²⁰,
60 千伏, 40 × 10¹⁴/厘米²

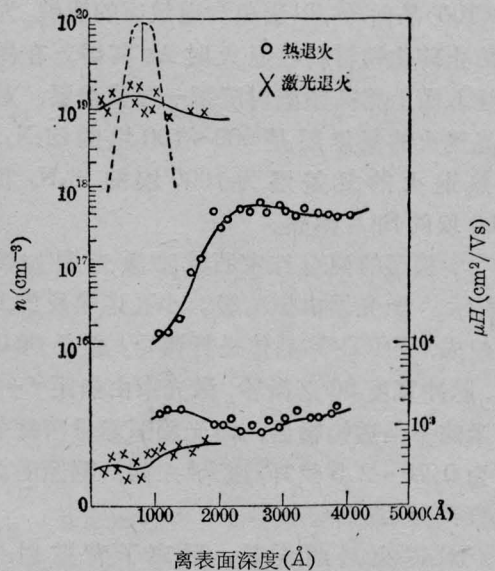


图4 GaAs 样品激光退火后
电性能测量结果

3. 激光退火后电性能的测量

采用微分霍尔效应结合阳极氧化剥离,

得到的热退火和激光退火注入样品的载流子分布见图4, 注入条件为300千电子伏, 1×10^{15} /厘米², 200°C热注入。图4中, ×点为单次脉冲激光退火样品的测量点, 激光辐照的能量密度为~1.5焦耳/厘米²; ○点为700°C热退火10分钟样品的测量点。从图可估计出热退火样品的薄层浓度 N_s 为 1.34×10^{13} /厘米², 最大浓度为 5.2×10^{17} /厘米³; 而激光退火的薄层浓度 N_s 为 3.0×10^{14} /厘米², 最大浓度高达 1.3×10^{19} /厘米³。由此可见激光退火的杂质利用系数比热退火高近20倍, 注入杂质的激活率高一个数量级以上。而且激光退火后, 载流子分布在离表面2000埃的薄层内; 热退火的载流子分布在离

表面4000埃的范围里, 与LSS理论分布偏差较大。必须指出, 对60千电子伏注Sn⁺样品, 由于注入深度太浅, 受表面影响大, 无法用微分霍尔法测出载流子浓度分布。

4. 激光退火的形貌相

图5(a)、(b)、(c)分别为激光退火能量密度0.77焦耳/厘米²、1.1焦耳/厘米²和2.4焦耳/厘米²的Nomareki相衬干涉显微照片。GaAs样品经1.1焦耳/厘米²的激光辐照后, 样品表面上出现明显的熔化痕迹, 随着激光能量密度升高至2.4焦耳/厘米², 样品表面凹凸熔融痕迹更为严重。图5结果表明, 激光辐照样品, 达到一定阈值能量密度时, 表面层熔化, 然后发生再结晶, 并使无定形注入层有序化而形成单晶。

微分霍尔测试结果表明, 脉冲激光退火后, 材料迁移率只有理论值的一半。Sealy^[6]和Woodcock^[7]的实验结果也有同样的情况。我们认为衬底材料中存在较多的Cr受主中心及Ga空位, 退火期间会形成大量的施主—Ga空位络合物, 它们既充当补偿中心, 又可作为一种散射中心, 因此使载流子迁移率严重下降。另一方面, Sn在GaAs材料中是一种双性杂质, 它占As位为受主, 占Ga位为施主, 因此, 总电离杂质远较 n 值为大, 也是载流子迁移率下降的一个可能原因。

参 考 文 献

- [1] G. Battaglin *et al.*; *Phys. Stat. Sol. (a)*, **49**, 374 (1978).
- [2] G. Foti *et al.*; *Lett. N: Cimento*, **20**, 89 (1978).
- [3] R. T. Young *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, **32**, 139 (1978).
- [4] J. Krymicki *et al.*; *J. Rudiger. Phys. Lett.*, **61A**, 181 (1977).
- [5] G. Foti *et al.*; *J. Appl. Phys.*, **49** (4), 2559 (1978).
- [6] B. J. Sealy *et al.*; Proc. ion beam modification of materials, Budapest (1978).
- [7] Woodcock, H. Butler; Proc. ion beam modification of materials, Budapest (1978).



图5 不同激光能量密度辐照后GaAs的形貌相