

离子注入半导体的辐照损伤

孙慧龄 冶宏振

(中国科学院半导体研究所)

光束、电子束、离子束等新型微细加工技术,使半导体集成电路制造工艺的加工尺度提高到了亚微米甚至更高的水平。

作为离子束加工的一个分支,把离子注入技术应用到半导体器件的掺杂工艺,是优于常规热扩散掺杂法的一种新工艺。它是用高能杂质离子强行入射到半导体晶片中,所以掺杂过程就伴有晶格损伤的产生。这些损伤直接影响半导体器件的电性能,因此人们对损伤的产生、观测及其消除情况颇为关心。目前,国际上对这一课题的研究很热烈。这一课题的解决,将使当今半导体工艺中不可缺少的离子注入技术得到更好的应用。

一、离子注入产生辐照损伤

离子注入产生的辐照损伤,是指注入的离子对晶体结构完整性的损伤和破坏。这种损伤可以是简单的空位、间隙原子缺陷,也可以是晶格点阵受到严重破坏的无序层。

1. 原子移位

通常完美晶体,晶格点阵上的原子是处于势能最小的平衡位置。原子从其平衡位置脱出而进入晶格间隙位置,必须获得的最低能量,称为移位阈能 E_d 或移位能量。Banbuny 和 Fisher^[1] 等人认为 E_d 的数值等于移位原子的断键能量与移位原子克服势垒所作功之和。 E_d 的数值一般为几十个电子伏。当高能离子入射晶体与点阵原子发生碰撞,同时把部分能量(其值大于移位阈能)传递给点阵原子时,点阵原子就会移位成为间隙原子,并在原来点阵位置上造成一个空位。间隙原子的存在又使其附近的晶格发生畸变,破坏了晶体结构的完整性。因

此我们说,这种原子移位是产生辐照损伤的最基本的物理过程。

2. 级联碰撞引起的损伤扩展

晶体点阵原子从注入离子的碰撞中获得能量,发生原子移位,移位原子愈多,晶格损伤愈严重。移位原子数是表述晶格损伤程度的一个重要物理量。

注入离子的能量 E 通常为 5—500keV, $E \gg E_d$ 。所以初次被撞原子会有能量与其附近的晶格原子发生碰撞,使第二个被撞原子移位,新的移位原子还有可能再与其它晶格原子发生碰撞,这样产生更多的移位原子,直到最后移位原子的动能 T 小于 E_d 时,这个碰撞过程才会终止。这样的连续碰撞叫作级联碰撞以及相应的原子级联移位。当一个入射离子在晶体中经过时,在它的路径附近将产生一连串的原子移位,从而使损伤区逐步扩展。

Kinchin 和 Pease^[2] 为了定量描述级联移位现象,提出了一个简单的级联移位理论模型,给出了计算移位原子总数平均值的近似方法。这个模型作了如下几个简化假设:

- (a) 相互碰撞的粒子是弹性刚球间的碰撞;
- (b) 固体靶中的原子处于无序状态,碰撞是随机发生的;
- (c) 级联碰撞过程是一系列原子间的二体弹性碰撞。

根据这些假设, Kinchin 和 Pease 导出了表示入射能量为 E 的离子在固体中通过时,因碰撞而产生的移位原子数的平均值 $\bar{n}(E)$ 的表达式:

$$\bar{n}(E) = \frac{E}{2E_d} \quad (2E_d < E < E_c).$$

碰撞时所传递的能量小于电离能量阈值 E_c , 是

弹性碰撞。从上式中可见，入射粒子的能量 E 愈高，或移位阈能 E_d 愈低，所产生的移位原子总数平均值 $\bar{n}(E)$ 就愈大。该式能较好地给出移位原子数的数量级。

他们还认为，当 E 大于电离能量阈值 E_c 时，大于 E_c 的能量部分仅产生电离损失，不会引起 Si 的点阵原子移位，因此能量为 E 的入射离子所引起的移位原子数的平均值 $\bar{n}(E)$ 保持常量，即

$$\bar{n}(E) = \frac{E_c}{2E_d} \quad (E > E_c).$$

但是，该模型过于简化，与实际的级联碰撞的物理过程不完全相符。Winterbon 和 Brice 考虑了非弹性碰撞与弹性碰撞同时发生的情况。他们的计算结果表明，当 $E < E_c$ 时，由于非弹性碰撞损失了一部分能量， $\bar{n}(E)$ 的数值要比按上式计算的数值低 10% 到 20%；当 $E > E_c$ 时，大于 E_c 部分的能量并不完全变成离化能量，还有一部分能量将引起原子移位，因此 $\bar{n}(E)$ 的数值随着 E 的增加而增加（不保持常量），只不过增长的速度低于线性增长速度。

二、辐照损伤的观测

如上所述，完美晶体的晶格点阵原子为有序排列。当入射离子后，由于级联碰撞使其有序排列逐渐遭到破坏，间隙原子愈来愈多，晶体损伤愈来愈重，反映出晶体的光电性质发生变化，我们可以通过观测其光电性质的变化得到损伤的信息。观测的办法很多，对比较常用的方法简述如下。

1. 表面观测

对于常用注入剂量 ($\leq 1 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$) 的样片，用肉眼观察不到注入区与非注入区的差别，表面皆平整光亮。当经 Wright 腐蚀液腐蚀后，用金相显微镜可以看到二者明显的区别。注入区有微缺陷和位错一类的损伤，特别是高剂量注入时，看到损伤是相当严重的。对于注入剂量高于 $1 \times 10^{16} \text{cm}^{-2}$ 的样片，肉眼可以看到注入区表面有颜色。用干涉显微镜可以看到注

入区表面略高于非注入区，测得其高度为几百埃^[3]。

2. 用电子衍射仪及透射电镜观测

用电子衍射仪 (RHEED) 对完整单晶进行观测，可以得到衍射斑点及菊池线图样，而对损伤严重形成的无序层，则得到弥散状图样。因此从注入层的电子衍射照片可以清楚地知道损伤及其消除的状况。

把注入样片制成 1000 \AA 左右的薄膜，可以用透射电镜观察到注入层的损伤。对不同深度处的注入层都制成薄膜，可以观察到损伤在注入深度上的分布。Pelous 等人用能量为 1 MeV 、剂量为 $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 的 B^+ 注入 Si 后，经退火后在不同深度处制得薄膜，得到损伤随深度的分布照片^[4]。

3. 用范德堡法测量霍尔效应

入射晶体的大部分杂质原子处于晶格间隙位置，不能导电。退火后消除损伤，间隙原子进入晶格点阵位置而成为替位原子，才参与导电，称为注入杂质的电激活。因此，注入与否及退火前后注入层的电参数差别很大。注入后未退火损伤严重，杂质原子未激活，测得表面薄层电阻大，载流子浓度低，迁移率不高。退火后这些参数明显改进，可达到所希望的数值。所以，根

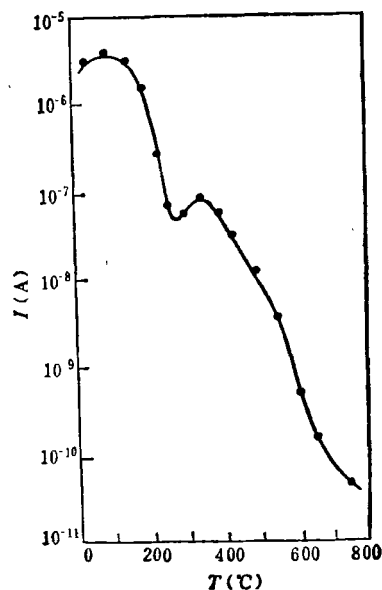


图1 p-n 结漏电流随退火温度的变化

据范德堡法对霍耳效应的常规测量得到的电参数,可知损伤及其恢复的程度。

晶体损伤严重时,在器件中会发现少数载流子寿命降低, p-n 结漏电流增加。同样可以根据器件上测得的电参数看损伤状况。Pickar 和 Dalton^[5] 对 Si 中硼扩散 p-n 结进行测量,用能量为 300keV、剂量为 $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 的碳离子注入硅,经不同温度退火后,测得 p-n 结在 1V 电压下的反向漏电流如图 1 所示。除有两个峰以外,漏电流随退火温度升高而下降,表明损伤随退火温度升高逐步消除。

4. 椭圆仪测损伤

椭圆偏光法是通过分析入射光在样品上反射后的偏振状态来表征样品的损伤状况。晶体的光学性质是晶体结构的灵敏函数。晶体损伤程度不同,其折射率要改变,反映在用椭圆仪测量过程中椭圆参数 ψ 和 Δ 的变化。Kucirkova^[6] 用能量为 30 keV 的、剂量不同的 Te 注入 Si, 测量了 ψ 和 Δ 随注入剂量的变化。如图 2 所示,随

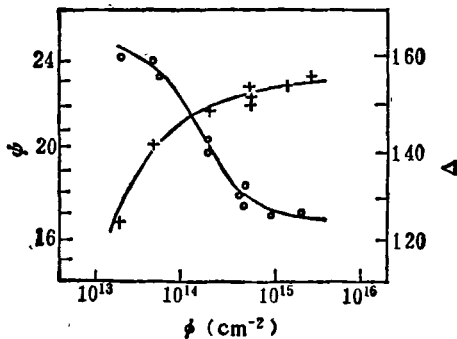


图 2 椭圆参数 ψ 和 Δ 随注入剂量的变化

注入剂量增加,损伤加重, ψ 值增加, Δ 值减少。此外,随退火温度增加,损伤渐消除, ψ 值降低, Δ 值增大。通过得到的 ψ 和 Δ 测量值,可以计算出折射系数 n 及消光系数 k ,其变化量 Δn 和 Δk 与损伤密度成正比。 Δn 与 Δk 随注入深度的分布反映了晶体损伤的深度分布。 n 和 k 的峰值位置就是损伤峰的位置。图 3^[7] 给出了能量为 100 keV、剂量为 $5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 的 P⁺ 注入 Si 的 n 和 k 随深度的分布。所得到的两条高斯型曲线说明损伤分布也是高斯型分布。

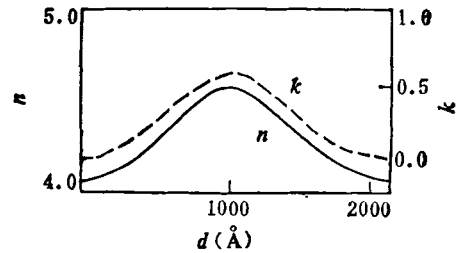


图 3 注入层折射率 n 及消光系数 k 随深度的分布

5. 从反射光谱看损伤

当一束紫外光照射在晶体硅表面上,光的透射深度很浅,反射光谱线主要取决于表面薄层内的光学常数,取决于电子的能带结构。对于完美晶体硅,紫外光垂直入射,由于带内电子跃迁,光反射率在波长 2750 Å 与 3420 Å 处出现峰值。当离子注入辐照晶体损伤后,由于电子带间跃迁动量选择规则破坏,反射光谱线中,峰值减小甚至因损伤严重而消失,如图 4 所示。曲线 1 是完美硅单晶的紫外光反射光谱线,有明显的两个峰。曲线 2 是单晶硅以剂量为 $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 的 P⁺ 注入后的反射光谱线,可看到,损伤使峰值降低。曲线 3 是单晶硅以高剂量为 $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ 的 P⁺ 注入后的反射光谱线,其严重损伤已使峰消失。

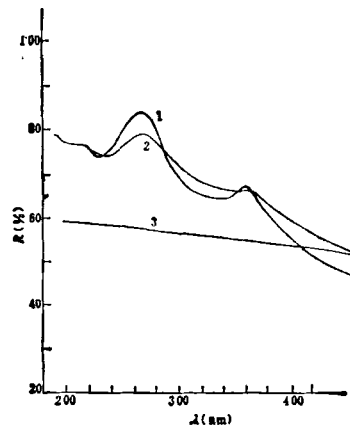


图 4 硅中注磷的反射光谱

1. Si 单晶; 2. 注 p⁺, 70 keV, $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$; 3. 注 p⁺, 70 keV, $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$

若设 R_0 是完美晶体在反射率的极大与极

1) 陈敏麒等,第一届全国光束、电子束、离子束学术年会论文集,(1980), 252.

小处之差, R'_1 是无序硅在同样两波长处的反射率之差, R' 是被测损伤硅的同样两波长处的反射率之差, 则可按下述公式计算出损伤度 DD :

$$DD = 1 - \frac{R' - R'_1}{R_0 - R'_1}$$

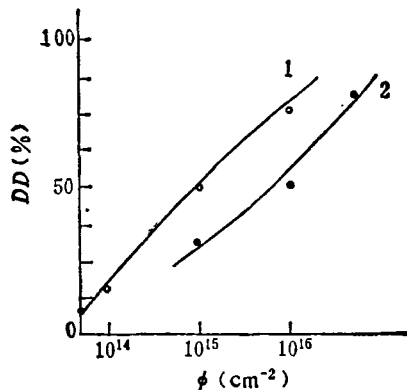


图5 注氮硅表面损伤度与注入剂量的关系

图5是氮注入硅中, 表面损伤度与注入剂量的依赖关系^[7]. 曲线1是氮离子以40 keV和70 keV的能量二次注入硅造成的损伤度. 可以看到, 随剂量增加, DD 值增大. 曲线2是上述样品经800℃退火一小时的结果. 从两条曲线比较可以看到, 对同一剂量, 曲线2的 DD 值小于曲线1. 说明退火消除了部分损伤, 使损伤度降低.

6. 辐照损伤的深能级瞬态谱(DLTS)

辐照损伤使晶格受到破坏, 即使严格按周期性排列的原子周期性势场受到破坏, 有可能在禁带中引入新能级. 用深能级瞬态谱仪可以测得这种深能级电活性点缺陷态密度来表征损伤程度^[8]. 从图6中看到完美单晶体的DLTS谱为一条没有峰的平坦线. 而注入后, 损伤产生大量的电活性点缺陷. 曲线2的峰值经计算, 其缺陷态密度为 $1.9 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$.

7. 沟道背散射技术测损伤

沟道背散射法是目前用来测量晶体损伤的最好手段之一^[9]. 它是用一束单能粒子被加速轰击晶体. 当高能粒子从随机方向入射晶体时, 得到背散射粒子产额很高的随机谱. 若入射粒子对准未注入区晶体的沟道方向入射时, 由于沟道效应, 可得到背散射粒子产额很低的

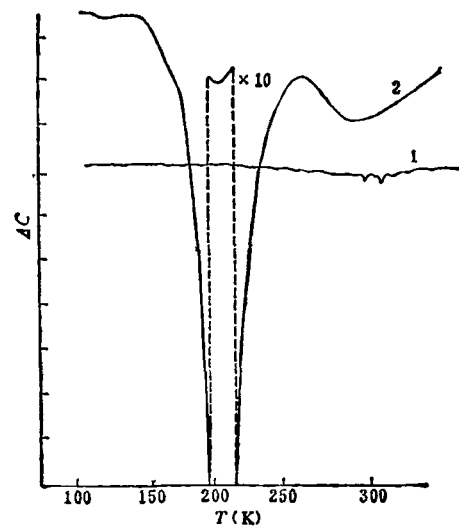


图6 硅中注硼的深能级瞬态谱
1. 单晶 Si; 2. 注 B⁺, 60 keV, $1 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$

准直谱. 而当测量注入区时, 虽然入射粒子仍要对准晶体的沟道方向入射, 但因损伤使沟道破坏, 损伤愈重, 背散射粒子产额愈高, 得到接近随机谱的损伤定向谱. 由损伤峰的面积及位置, 可以计算出损伤量及损伤随深度的分布.

为了定量地描述晶格点阵原子的有序排列遭受破坏的程度, 常用单位体积内的移位原子数 n 与单位体积内晶体本体的原子数 N 之比 $\left(\frac{n}{N}\right) \times 100$ 来表示辐照损伤的轻重, 称为无序度.

实验^[10,11]上得到, 当注入剂量较低时, 无序度随剂量增加而线性地增加; 注入剂量增至某一值时, 无序度趋于饱和. 一般认为, 无序度达到饱和时, 损伤区已经成为无序的非晶层. 开始饱和所需的最低剂量被称作形成非晶层的临界剂量. 在剂量率与注入能量都相同的条件下, 轻质量元素的离子比重质量的对晶体造成的损伤要小些, 所以注入离子质量愈轻, 其临界剂量愈高.

形成无序层的临界剂量受注入温度影响. 对于同种注入离子而言, 在室温附近晶体衬底温度愈低, 临界剂量也愈低. 这是因为温度低

时,空位迁移率较低,缺陷从注入区逸出的速度低,非晶层易于形成。温度过低时,临界剂量不再随温度变化而保持常量。

临界剂量与注入离子的束流强度有关。在室温下随束流强度增加,缺陷的产生率增加,临界剂量降低。

此外,入射离子能量愈高,淀积于点阵原子的能量愈多,损伤也愈严重。所以无序度随注入离子能量的提高而增加。

注入离子相对于晶体的入射方向也是影响损伤的因素之一。沿随机方向入射的离子产生的移位原子数,大于沿沟道方向入射产生的移位原子数,因而后者形成无序层所需要的临界剂量大于前者。

综上所述,可见影响离子注入晶体的辐照损伤有多方面的因素。

离子注入技术是当代半导体集成电路制造工序中不可缺少的一项新工艺,优点甚多。但如上所述,伴随工艺过程会使完美晶体受到辐照损伤。对于这种损伤是有办法可以消除的。常用的热退火方法已有多年的历史,消除损伤的效果很好,使离子注入技术能迅速用于实际的集成电路制作中。近年来又出现了激光退火、电子束退火和闪光灯退火等许多新的消除辐照损伤的方法,它们各有特点,其中扫描电子束退火已从研制阶段发展到了在生产上的实用,美国已用其生产大面积太阳能电池。

退火可以使绝大部分辐照损伤得以消除,但实验观察到退火后的注入层有时还有一些遗留的以及新生的缺陷,这些缺陷称为二次缺陷。它们可能成为复合中心,减小少数载流子寿命。也可能增加对载流子的散射,使迁移率降低,影

响器件的工作频率。还可能使 p-n 结漏电流增大,甚至使器件性能变坏。特别是在集成电路向高速高集成度发展的今天,要求半导体工艺的浅结细线条加工尺度已到了亚微米的水平。用离子注入做浅结是当前半导体工艺中重要的研究课题之一,而这些损伤缺陷对制作浅结的影响是至关重要的。这也是目前人们着力研究离子注入引起的辐照损伤的一个重要原因。从事离子注入技术研究的国内外许多科学工作者,对深入了解辐照损伤的机理,探讨最好的退火方法很感兴趣。从目前的研究信息来看,对辐照损伤的机理研究深度还不够,而损伤的观测实验报道较多,有一些新的退火方法在研究试用当中。想不久的将来,人们会找到消除辐照损伤的简便易行的最佳方法,从而促进半导体工艺的加工尺度从亚微米水平再提高一步。

参 考 文 献

- [1] S. B. Fisher et al. Proc. 1970 Atomic Collision Phenomena in Solids, North-Holland, (1970), 232.
- [2] G. H. Kinchin et al., *Rep. Progr. Phys.* **18** (1955), 1.
- [3] 孙慧龄等, *半导体学报* **3-2**(1982), 136.
- [4] G. P. Pelous et al. *Ion Implantation in Semiconductors*, ed. S. Nambe, Plenum Press, New York, (1974), 439.
- [5] G. Dearnaley et al., *Ion Implantation in Semiconductors*, Americal Elsevier Publishing Company, Inc. New York, (1973), 588.
- [6] A. Kucirkova, *Radiation Effect*, **28** (1976), 129.
- [7] 许振嘉等, *半导体学报*, **5-3**(1984), 256.
- [8] 杜永昌等, *物理* **10-2**(1981), 109.
- [9] 陶琨, *物理*, **11-6**(1982), 366.
- [10] Davies, J. A. et al., *Can. J. Phys.*, **45** (1967), 4053.
- [11] Mayer, J. W. et al., *Can. J. Phys.*, **46** (1968), 663.