

硅光电器件两种辐照效应的比较*

陈炳若 黄 昉 李世清 鄢和平 高繁荣

(武汉大学 武汉 430072)

摘要 比较了硅光电器件和MOS电容经300keV质子和1.25MeV γ 射线辐照后光电参数的变化, 讨论了 γ 射线辐照的样管在150℃和200℃的退火效应。在硅器件的光谱响应范围内, 将分光光度法得到的光电流谱用于上述实验, 有助于了解不同辐照引起的损伤在器件中的空间分布。

关键词 光电器件, 光电流谱, 辐照效应, 空间分布

半导体器件辐照效应和退火效应是一直受重视的研究课题。本文研究的硅光电器件不仅与一般双极器件有共性, 而且利用器件的独特结构和功能, 可以设计专门实验对器件辐照效应进行细致研究。专门实验是用分光光度法获得系列单色光, 并测试光电器件所对应的光谱光电流。单色光的波长与它在硅中入射深度的关系, 反映了光谱光电流与器件纵向不同深度范围内的光电流之间的关系。辐照在器件中会引入大量缺陷及复合中心, 它们的数量和分布都会表现在光谱光电流的变化中, 因此可将这种变化作为一种逐层分析的手段, 用以了解辐照影响在硅器件中的空间分布。硅器件光谱响应范围约200—1100nm, 在硅中对应的人射深度约0.1—50 μm , 它覆盖了器件的有效作用区域, 所以在这个光谱范围内进行研究就已足够。我们选择质子和 γ 射线作为辐射源, 是因为空间辐射一般以质子辐射为主, 而核爆辐射和实验室辐射都包含明显的 γ 射线; 此外, 质子是一种带电粒子, 质量与中子相近, 而 γ 射线是一种高能光子流, 是电磁辐射, 它们是两种有代表性的辐射。因此研究和对比它们对光电器件的影响, 具有典型的意义。

1 辐照条件及样品

所用质子辐照能量为300keV, 注量分别为 $5 \times 10^{10}/\text{cm}^2$ 和 $3 \times 10^{11}/\text{cm}^2$ 。计算表明, 300keV低能质子在硅中投影射程为2.8 μm , 纵向离散约为0.17 μm , 横向离散约为0.35 μm 。样品置于移动靶上, 每次只辐照一个样品, 样品有效面垂直于质子辐照的法线方向。所用 γ 射线平均能量为1.25MeV, 剂量分别为2kGy(Si)和20kGy(Si), 折合注量大致为 10^{14} — $10^{15}/\text{cm}^2$ 。

受辐照样品有三类: 第一类为NPN硅光电三极管, 衬底材料为电阻率6—8 $\Omega \cdot \text{cm}$ 、(111)面的N型单晶片, 有效光敏面积0.5mm²。第二类为P/N型硅光电二极管, 衬底材料分别为N型单晶片和N/N⁺高阻外延片, 两者电阻率相近, 约120 $\Omega \cdot \text{cm}$, (111)面; 两种二极管结深均为1.5—2.0 μm , 有效光敏面积4.2mm², 外延材料制作的样管在适当的反向偏压下, 有类似于PIN管的结构。第三类为MOS电容, P型硅衬底, (100)面, 电阻率8—9 $\Omega \cdot \text{cm}$,

* 国家教委资助项目

收稿日期: 1996-12-13, 修回日期: 1997-05-05

SiO₂层厚约200nm, 电容面积1mm²。以上各类样管对半分开, 分别进行质子和γ射线辐照, 辐照在室温下进行, 其间器件上未加任何偏置电压。

2 测试仪器和内容

2.1 测试仪器

测试仪器主要有HZ1830型灵敏直流数字电压表, SS1792型可跟踪直流稳压电源, CARL ZEISS单色仪、EG&G MODEL410 C-V仪等。

2.2 测试内容

2.2.1 测试分析了两种光电二极管及光电三极管的光电流、暗电流(只测了光电三极管)、转折电压、光电响应时间、三极管电流增益等光电参数在质子和γ射线辐照前后的变化规律。其中光电流测试包括积分光电流和光谱光电流。积分光电流的光源由6V、15W的钨丝灯在色温2856K产生的连续光谱提供, 对光电二极管, 照度用2000lx, 对光电三极管, 照度用1000lx。光谱光电流的光源由单色仪(或干涉滤光片)将稳流稳压的Br-W灯的连续光谱分光得到, 单色程度有一定近似。测试过程中光电二极管的反向偏置为10V, 光电三极管为5V。

2.2.2 测试分析了MOS电容样管的1MHz高频C-V特性辐照前后的变化。

2.2.3 测试了经γ射线辐照后的光电器件样管积分光电流和光谱光电流的退火效应。退火温度分别为150℃和200℃, 时间各20min。

2.2.4 实验结果的变化率R的计算式为

$$R = (\text{辐照后的值} / \text{辐照前的值}) \times 100\%$$

为了对比辐照后样品变化率的实际大小, 对R不作归一化处理。整个实验过程必须保持测试条件的一致。

3 光电器件辐照结果和讨论

3.1 实验结果

3.1.1 积分光电流。表1为两种光电二极管及光电三极管辐照前后积分光电流的变化。表中A、B分别表示γ辐照剂量为2、20kGy(Si); C、D分别表示质子辐照注量为5×10¹⁰/cm²、3×10¹¹/cm²。表1结果表明: 质子辐照对光电二极管的影响比γ辐照的影响强; 而光电三极管的实验结果则相反。

表1 质子和γ射线辐照后积分光电流的变化

Table 1 The changes of integrated photocurrent after proton or γ irradiation (mA)

时间 Time	普通光电二极管 Conventional PD				PIN光电 二极管 PIN-PD				光电三极管 Phototransistor			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
	辐照前 Before irradiation	0.056	0.056	0.178	0.115	0.088	0.081	0.188	0.193	5.74	4.41	5.64
辐照后 After irradiation	0.050	0.049	0.068	0.066	0.079	0.071	0.115	0.117	2.54	0.46	5.07	3.74
R/%	89.3	87.5	57.5	57.2	89.8	87.6	61.2	59.9	44.3	10.4	89.9	67.1

3.1.2 光谱光电流。图1、图2分别为普通光电二极管、PIN光电二极管和光电三极管在质子和γ射线辐照后的对比结果。图中a、c为质子辐照样管; b、d为γ辐照样管。

图1表明两种粒子辐照都使光电二极管光谱光电流在短波段(紫端)衰减很快;随着入射波长增加,衰减变小且曲线逐渐平坦,表现出不同波长光电流变化率的差别减小。两种辐照的不同之处是,质子辐照在紫端的光电流衰减更为迅速,当波长 $\lambda > 550\text{nm}$ 后,光电流的衰减就很小了;而 γ 辐照的样品,紫端光电流衰减较质子辐照小,在 $\lambda > 550\text{nm}$ 后,对应的光电流仍有相当程度衰减。这表明质子辐照的影响更集中在器件的表层及表面,而 γ 辐照的体效应相对显著,这与低能质子及 γ 辐照的特性相符。由图1还可看出PIN管电流衰减比普通光电二极管小,这与两类光电器件的工作特征也是符合的。

光电三极管光谱光电流的变化规律与光电二极管不同(见图2)。首先两种辐照引起的光谱光电流衰减都非常剧烈,在测试的整个光谱范围内, R 与二极管平均相差2—3个量级,即使对于质子辐照、 $\lambda > 550\text{nm}$ 也是如此,而在这个光谱范围中,光电二极管光电流变化很小。其次,光电三极管辐照后 R 的离散性较二极管大。从统计结果看,质子辐照样管光谱光电流变化大于 γ 辐照一个量级,即质子辐照后样管光谱光电流衰减较 γ 辐照后显著,这与积分光电流的实验结果相反。

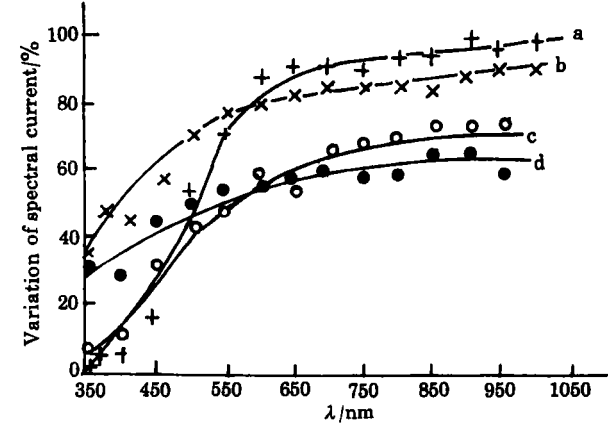


图1 辐照对普通光电二极管(c,d)和PIN光电二极管(a,b)光谱光电流的影响
Fig.1 The effect of irradiation on spectral current for conventional PD (c,d) and PIN-PD (a,b)

3.1.3 暗电流。在本实验结果中,光电三极管受辐照后暗电流减小。其中质子辐照样管暗电流平均下降一个量级;而 γ 辐照样管暗电流下降了3倍, R 平均值为32%,可见器件暗电流(反向饱和电流)辐照后的确并不总是增大的^[1-4]。

3.2 讨论

3.2.1 光电二极管。根据质子的能量和质量可以计算出300keV低能质子在硅中的入射深度约 $2.8\mu\text{m}$ 。 SiO_2 和Al层密度与硅材料相近,当质子在硅器件上由表及里通过Al层、 SiO_2 层入射到硅材料中时,入射深度还会小于 $2.8\mu\text{m}$ 。而 γ 射线穿透能力很强,可以穿透硅器件衬底材料($\sim 300\mu\text{m}$)。但辐射粒子在物质中的能量沉积并不是均匀分布的,且造成损伤要有一定的能量阈值,因此辐射粒子在硅中的入射深度不同于损伤区域。光电流减小本质上是由于损伤引入的缺陷造成少子寿命衰减所致,而光电流与少子寿命的依赖关系能灵敏地反映辐

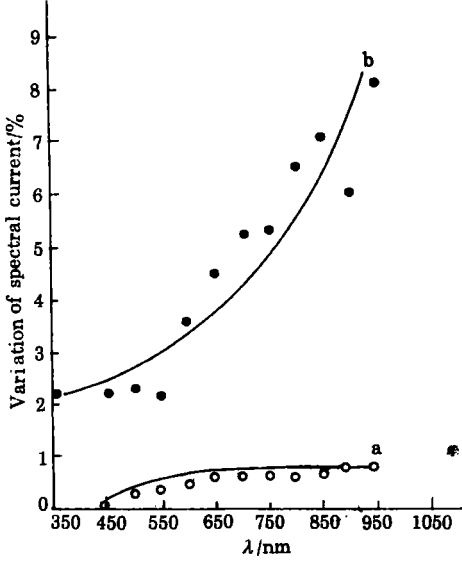


图2 辐照对光电三极管光谱光电流的影响
Fig.2 The effect of irradiation on spectral current for phototransistor

照损伤。因此根据光电流谱的变化,有理由认为辐射粒子在硅中引起的缺陷是不均匀的,在粒子入射的法线方向存在一个分布。根据图1所示曲线,可以大致估算这个损伤层的厚度。550nm的光在硅中入射深度大约为 $1.5\text{ }\mu\text{m}$,曲线a、c所示的质子辐照的损伤层大致在这一范围,这一深度正好是一般光电二极管PN结所在的位置,对器件性能影响很大,积分光电流和紫端光电流的严重衰减即可说明这一点;曲线b、d对应 γ 辐照,从它在测试的整个光谱范围内(350—940nm)光电流均有衰减的事实看,辐照损伤区域应当有 $40\text{ }\mu\text{m}$ 以上。但在影响区域内损伤密度较质子辐照小。

与材料体性质不同,造成器件光电流衰减的另一个重要原因是辐照在器件表面和界面引入了大量的复合中心,它们引起的表面复合电流对输出的光电流没有贡献。这对表面附近的光生载流子影响很大,加速了器件光电流在短波区的损失,表现在曲线上紫端电流下降很快。

至于质子辐照在Si及SiO₂中是否会阻留以及阻留会产生什么影响等问题还有待以后深入研究。

3.2.2 光电三极管。在入射光下,光电三极管在发射区、基区、集电区、发射结和集电结势垒区(特别是在集电区)将产生光电流。这个电流就是光照条件下的基极电流 I_{Lb} ,此时的集电结等效为一个输出电流为 I_{Lb} 的光电二极管。光照还使基区电位升高,发射结转变为正向偏置,使光电三极管具有电流增益 β 。在测试电路中,光电三极管共射极连接,输出光电流为

$$I_L = \beta I_{Lb} \quad (1)$$

令暗条件下集电结输出的暗电流为 I_{Db} ,则三极管输出暗电流为

$$I_D = \beta' I_{Db} \quad (2)$$

此处考虑到电流增益的非线性,用 β 和 β' 分别表示在 I_{Lb} 和 I_{Db} 两种不同注入水平下的电流增益。根据(1)、(2)式可知,光电三极管输出的光、暗电流的变化要考虑载流子注入(I_{Lb} 和 I_{Db})以及倍增(β 和 β')两方面的影响。

I_{Lb} 和 I_{Db} 在本质上都是非平衡少子产生的,前者取决于光激发,后者取决于热激发,两者激发水平相差甚远,因而对应的 β 不同。 I_{Lb} 和 I_{Db} 与器件掺杂浓度、少子寿命等密切相关,就辐照损伤引起少子寿命衰减而言,三极管中 I_{Lb} 和 I_{Db} 的变化规律与一般光电二极管相同,微小的区别是在光电三极管中, I_{Lb} 由较深的集电结产生,受辐照影响和器件表面状况影响相对微弱。

光电三极管电流增益 β 可表示为

$$\beta^{-1} = (R_{se}/R_{sb}) + [W_b^2/(4D_b \tau_b)] + [(S_0 W_b A_s)/(A_e D_b)] + (I_{re}/I_e) \quad (3)$$

式中,右边第一项中 R_{se} 、 R_{sb} 分别为发射区和基区的方块电阻,此项反映发射结注入比;第二项中 W_b 、 τ_b 、 D_b 分别为基区的宽度、少子寿命和少子扩散系数,此项反映基区体内输运性质;第三项中 S_0 、 A_s 、 A_e 分别表示表面复合速度、表面复合面积及发射结面积,此项反映表面复合性质;第四项中 I_{re} 、 I_e 分别为发射结势垒区复合电流和发射极总电流,此项反映势垒区复合的影响。总之式(3)综合考虑了影响 β 大小的各个因素。辐照可能引起的载流子去除效应、少子寿命衰减及大量复合中心均会灵敏地影响 β 的大小。上述实验结果表明,即使在光电二极管光电流变化很小的波长区,光电三极管的光电流变化也很大,可见这不完全是 I_{Lb} 、 I_{Db} 的衰减造成的,而主要是由 β 的衰减引起的。

β 的严重衰减使 I_L 和 I_D 都减小。虽然辐照引入的缺陷有使暗电流 I_D 增大的可能,但暗电流的实际变化取决于器件具体结构、性能、工艺水平等综合因素,它并不总是增大的。

特别需要指出的是,光电三极管积分光电流的衰减是 γ 辐照甚于质子辐照,而光谱光电流的衰减是质子辐照甚于 γ 辐照,这一实验结果与三极管电流增益的非线性有关。积分光电流测试光强为1000 lx,光谱范围覆盖了器件光谱响应区域,此时器件处于正常放大区,对应的 β 受辐照而减小。此外,从集电结光生电流 I_{Lb} 的角度来看,在靠近器件表层一个相同的深度之中, γ 辐照的影响虽然不如质子辐照,但它对长波长光所对应的光电流影响却较质子辐照大,根据硅器件光谱响应曲线可知,这部分光电流在积分中的比重非常大,对 I_{Lb} 的影响很大,因而 γ 辐照后器件积分光电流的退化更显著一些。而光谱光电流测试使用的单色光是由连续光谱分光得到的,经过光学系统之后,其照度远远低于1000 lx,此时器件工作在小电流情况下,对应的电流增益不同于器件正常放大区的 β 值。根据器件原理可知,器件在小电流工作时的 β 主要由(3)式右边的第三、四项决定,即取决于表面复合和势垒区复合。质子辐照对器件表层及表面有显著的影响,使得小电流下的 β 显著减小。光谱光电流的实验结果符合质子辐照特征,也表明辐照对电流增益的影响在不同工作状态下有所不同。这提示人们在设计辐照环境中电子器件的使用条件时,应避免小电流工作状态。

4 MOS电容高频 $C-V$ 特性

为了进一步了解受辐照器件的表面及界面情况,深入分析器件的辐照效应,我们将一组MOS电容置于与光电器件相同的辐照环境中,以观察电容辐照后其高频 $C-V$ 特性的变化,结果如下。

(1)两种辐照之后,样管的平带电压均向负向漂移,漂移量与注量有关,最大可达4.25V,对应的电荷密度为 $7 \times 10^{-8} \text{C/cm}^2$ 。辐照过程中,器件处于零偏置。平带电压的负向漂移是由正电荷引起的,这符合辐照效应的一般规律。

(2)对于注量为 $3 \times 10^{11}/\text{cm}^2$ 的质子辐照样管, $C-V$ 曲线出现明显畸变。

(3)辐照之后的MOS电容样管在温度偏置实验中, $C-V$ 曲线出现回漂,例如质子辐照样品,回漂约0.8V,平带电压的漂移不是固定正电荷所致,可能与可动电荷及界面态电荷状态的变化有关。

(4)辐照后的样管,归一化电容量减小。例如 $3 \times 10^{11}/\text{cm}^2$ 的质子辐照,归一化电容减小10%,下降了约10pF。这可能与载流子去除效应有关。

5 退火效应

为了使损伤缺陷恢复有序和钝化,对 γ 辐照样管在空气中加热强迫退火,退火温度分别为150℃和200℃,时间各20min。结果如下。

(1)积分光电流。与辐照前样管相比,光电二极管经两次退火,平均恢复到近95%;而光电三极管两次累积结果平均只恢复到30%—40%。

(2)光谱光电流。图3为PIN样管经2kGy(Si) γ 辐照后两种温度的等时退火曲线,它更细致地反映了损伤恢复的情况。由图3看出,长波区较短波区恢复得好一些;在350—450nm的短波段,两种温度退火的效果基本相同。经辐照后,在器件中存在着永久性损伤,它们引

起二极管短波段光电流的减小;或引起三极管 β 的衰减,因而三极管积分光电流的恢复相应差些。而光电二极管短波光电流在积分光电流中比重很小,所以积分光电流的恢复可达95%。

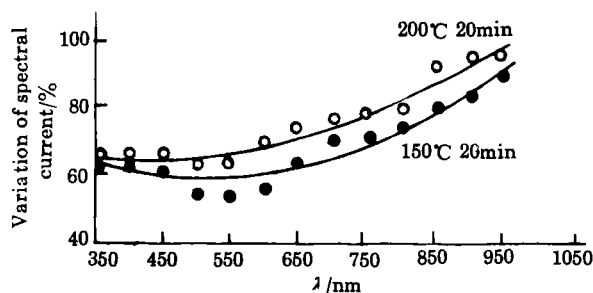


图3 PIN光电二极管 γ 辐照后的退火效应
Fig.3 The annealing effect of PIN-PD after γ -irradiation

参 考 文 献

- 1 高光渤, 李学信. 半导体器件可靠性物理. 北京: 科学出版社, 1987. 499
- 2 查芬 R J. 微波半导体器件原理和辐射效应. 北京: 原子能出版社, 1980. 93

Two kinds of irradiation effects of photodevices

CHEN Bingruo HUANG Fang LI Shiqing YAN Heping GAO Fanrong

(Wuhan University, Wuhan 430072)

Abstract

The changes of photoelectronic characteristics for photodevices and MOS capacitors after proton or γ -ray irradiation are investigated. The annealing effect of the samples at 150°C and 200°C after γ -ray irradiation is also discussed. The photocurrent spectra of the Si photodevices measured with spectrophotometry in the range of Si spectral response have been used to understand the space distribution of damages in the devices induced by different irradiations.

Key words Photodevice, Photocurrent spectra, Irradiation effect, Space distribution