

电子辐照对硅双极晶体管参数的影响

翟冬青

(河北大学, 保定)

摘要 报道了 2 MeV 电子束辐照对硅双极晶体管参数 h_{FE} 、 t_{off} 和 C_T 的影响。这些参数的变化依赖于电子辐照在晶体管内部引入缺陷能级的性质。实测表明, 这些缺陷能级引起的少数载流子寿命下降和多数载流子去除效应是 h_{FE} 、 t_{off} 和 C_T 变化的直接原因。

关键词 双极晶体管, 少数载流子寿命下降, 多数载流子去除效应

近年来, 随着空间电子学的发展, 人们广泛开展了与此有关的高能粒子辐照对半导体器件参数影响的研究。本文简要报道 2 MeV 电子辐照对硅小功率双极晶体管 3CG₂₁ 的参数 h_{FE} 、 t_{off} 和 G_T 的影响。并讨论了这些参数的变化机理。

实验与结果

本实验所用电子束能量为 2 MeV。辐照试验样品为 3CG₂₁ 硅双极晶体管。

1. 电流增益 h_{FE} 变化与辐照剂量 Φ 的关系

实验表明, 当辐照剂量超过某一阈值 Φ_T (不同型号的晶体管 Φ_T 值不同, 本试验样品为 $5 \times 10^{13} \text{c/cm}^2$) 时, h_{FE} 随 Φ 增大而迅速减小 (见图 1)。 h_{FE} 的测试条件为 $V_{CE} = -6 \text{V}$ 、 $I_c = 30 \text{mA}$, 图中不同剂量 Φ 下的 h_{FE} 数据是 10 只试样的平均值。根据该实验结果, 提出了一种用电子辐照结合热、电处理辅助控制 h_{FE} 的加工技术^[1]。它既可使过高的 h_{FE} 值下调到合适值, 也可使分散的 h_{FE} 调整为集中的 h_{FE} 值。

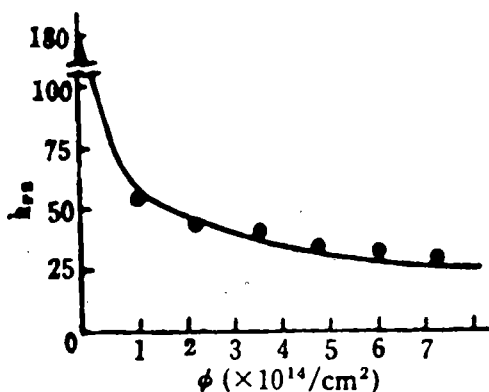


Fig 1. The relationship between changes of h_{FE} and radiation fluence ϕ

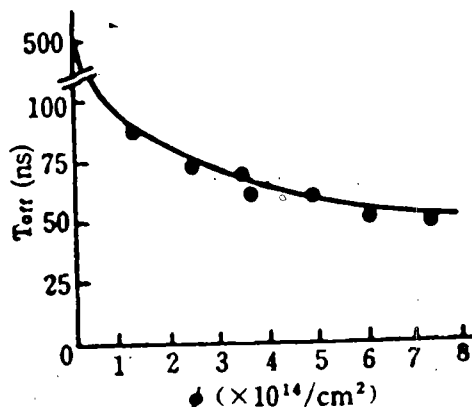


Fig 2. The relationship between changes of t_{off} and radiation fluence ϕ

2. 关断时间 t_{off} 变化与辐照剂量 Φ 的关系

同样, 当辐照剂量超过某一阈值 Φ_T (与 h_{FE} 相同) 时, 双极晶体管的关断时间 t_{off} 也随 Φ 的增

加而迅速减小(见图2)。 t_{off} 的测试条件为 $I_B = 1 \text{ mA}$ 、 $I_C = 10 \text{ mA}$ 。图中不同注量下的 t_{off} 值的取法与 h_{FE} 值取法相同。从图2可知, 当辐照注量大于 10^{14} e/cm^2 时, 其关断时间 t_{off} 由约 500 毫微秒降至几十个毫微秒范围。因此, 可以用电子辐照将普通晶体管加工成开关晶体管, 也可以用电子辐照取代掺金工艺来制取开关晶体管^[2]。可见, 电子辐照具有广泛应用价值。

3. pn 结势垒电容 C_T 变化与辐照注量 Φ 的关系

实验得到的发射结势垒电容 C_{Te} 和收集结势垒电容 C_{Tc} 的变化与辐照注量的关系示于图

3中。图中的 C_{Te} 值和 C_{Tc} 值均在零偏压下的测量值, 不同注量 Φ 下 C_T 值的取法与 h_{FE} 的取法相同。从图中可知, 随注量的增加, C_{Te} 和 C_{Tc} 逐渐变小, 其变化率较 h_{FE} 和 t_{off} 的要小得多。且 C_{Tc} 比 C_{Te} 的变化率又稍大些, 这是由于收集结两侧原始杂质浓度较低所致。

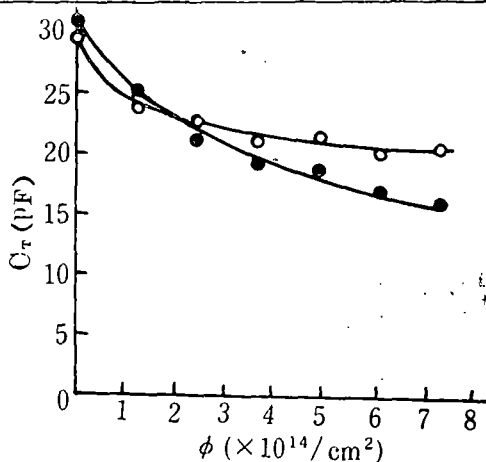


Fig 3. The relationship between changes of C_T and radiation fulence ϕ (○) C_{Te} (●) C_{Tc} .

讨 论

1. 电子辐照在晶体管引入缺陷的性质

试验样品在电子辐照前用深能级瞬态谱 DLTS 检测时未发现有大于 $10^{11} / \text{cm}^3$ 的缺陷能级, 经 2 MeV 、 $\phi = 2.8 \times 10^{14} \text{ e/cm}^2$ 辐照后, 用 DLTS 测量后再用文献[3]提供的计算方法得到的缺陷能级的性质列于表1中。这个结果与 G·E 公司 Evmarge 等对高阻无位错 N 型高阻的报道相近^[4]。这表明电子辐照在管芯中引入的缺陷是引起 h_{FE} 、 t_{off} 和 C_T 变化的根本原因。

Tab 1. The defects level introduced by electron radiation in 3 CG_{21}

Position of energy level (eV)	$E_c - 0.25$	$E_v + 0.36$
Capture cross section (cm^2)	4.6×10^{-15}	1.6×10^{-15}
Defect density (cm^{-3})	3.98×10^{13}	

2. C_T 降低机理

pn 结势垒电容 C_T 的大小对于一个给定的 pn 结, 完全取决于 pn 结两侧的多数载流子浓度及分布, 浓度越高, C_T 越大。经电子辐照后, 其多数载流子去除率为^[5]

$$\frac{\Delta n}{\phi} = -A \left[1 - \exp\left(\frac{E_T - E_F}{kT}\right) \right] \quad (1)$$

式中 Δn 为载流子减少量; E_T 和 E_F 分别为缺陷能级和费米能级; $A = N_T / \phi$ 为缺陷引入率; N_T 为缺陷浓度。

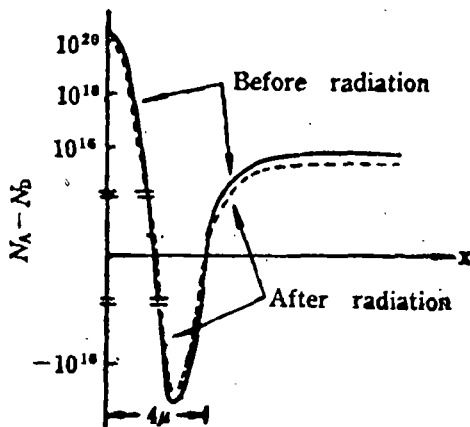


Fig 4. The change of majority carrier density in 3 CG_{12} before and after radiation

3 CG₂₁ 管芯在 2MeV 电子 $\phi = 7.2 \times 10^{14} \text{e/cm}^2$ 辐照前后, 用 ASR-100 C 12 型扩展电阻探针测得管芯的多数载流子纵向分布图给于图 4 中。从图中可知, 经电子辐照后的 3 CG₂₁ 管芯中, 在发射区、基区和集电区中产生了多数载流子去除效应, 使晶体管的各区中的有效载流子浓度略有下降, 从而引起了与之有关的 C_T 的降低。

2. h_{FE} 降低机理

电子辐照引起 h_{FE} 降低的机理, 如认为仅仅是缺陷能级导致基区少数载流子寿命降低的结果^[2,6], 则 h_{FE} 的变化量 Δh_{FE} 可由结合电子辐照后少数载流子寿命与注量关系^[7,8] 简化为:

$$\frac{1}{\Delta h_{FE}} = \frac{W_b^2}{\lambda D_{nb}} \Delta \frac{1}{\tau_{pb}} = \frac{W_b^2}{\lambda D_{pb}} k_0 \phi \quad (2)$$

式中 W_b 表示基区宽度, λ 为与基区掺杂分布有关的系数, τ_{pb} 和 D_{pb} 分别为基区少数载流子寿命及扩散系数, k_0 为辐照损伤因子。式(2)表明, Δh_{FE} 与注量 ϕ 成线性关系。但从图 1 看出, Δh_{FE} 与 ϕ 并非为线性关系, 这说明 h_{FE} 下降还存在其它原因。

从图 4 和 C_T 变化看到, 电子辐照在样品中产生了多数载流子去除效应, 使晶体管中各区内的有效多数载流子浓度降低。这一变化也对 Δh_{FE} 产生影响, 它主要体现在两方面, 一个是发射结空间电荷区展宽, 使其内复合电流变大; 另一个是收集区多数载流子减少, 使之较早发生有效基区扩展效应。这与文献[9]报道一致。

本工作得到天津市技术物理研究所李浩高级工程师等的帮助, 在此表示感谢。

参 考 文 献

- 1 翟冬青, 李 浩. 河北大学学报, 1990, 10(1):72
- 2 张秀森, 贺国根. 半导体杂志, 1987, 12(6):12
- 3 Lang D V. J. Appl. phys., 1974, 45:3203
- 4 Evmayre A C., Sun E. J. Appl. phys., 1976, 47:3776
- 5 查芬 R J 著; 陶光彬, 胡林浦译, 微波半导体器件原理和辐照效应. 原子能出版社, 北京:1980:105
- 6 柴天恩, 乔 健, 麦淑贤, 郑继义, 常保延. 半导体学报, 1987, 8(3):325
- 7 浙江大学半导体器件教研室编. 晶体管原理. 国防工业出版社, 北京:1983:107
- 8 Carlson R O, Son Y S. IEEE-ED, 1977 24:1104
- 9 Graham E D, Chaffin R J, Gwyn C W. IEEE Trans. Nucl. Sci., 1972, 19:335

(稿件收到日期: 1990 年 11 月 15 日)

THE EFFECTS OF ELECTRON RADIATION ON PARAMETERS OF SILICON BIPOLAR TRANSISTORS

Zhai Dongqing

(Hebei University, Baoding)

ABSTRACT In this paper, the effects of 2 MeV electron radiation on parameters h_{FE} , t_{off} and C_T of silicon bipolar transistors is reported. The changes of these parameters depended largely on characteristic of defect level in transistors introduced by electron radiation. The measurement results indicate that reduction of minority carrier lifetime and effect of majority carrier removing induced by these defects level are direct reason for changes of h_{FE} , t_{off} and C_T .

KEYWORDS Bipolar transistors, Reduction of minority carrier lifetime, Effect of majority carrier removing