

电子辐照对硅双极晶体管交流参数的影响

翟冬青 李彦波

(河北大学电子系, 保定 071002)

李 浩

(天津市技术物理研究所, 天津, 300192)

1991年6月17日收到, 同年9月15日修改定稿

本文研究了 2 MeV 电子辐照对硅双极外延平面晶体管交流参数的影响。结果表明, 在 $7 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 注入剂量下, 输出电容 C_{ob} 有明显减小, 特征频率 f_T 基本不变, 而功率增益 G_p 稍有增加。用多数载流子去除效应讨论了辐照后这些参数的变化和性质。

EEACC: 2560J; PACC: 2880

一、前 言

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。电子辐照可使硅双极晶体管的 dc 电流增益 h_{FE} 迅速减小^[1,2]及关断时间 t_{off} 迅速降低^[3]已有不少报道, 而电子辐照对硅双极晶体管交流参数的影响却报道很少, Keery^[1] 和 Fujioka^[4] 曾指出, 高能电子辐照可使 h_{FE} 降低, 却不影响双极大规模集成电路的工作, 但并未给予说明和解释; Jenkins^[5] 报道, 用低能电子束 ($< 50 \text{ keV}$) 辐照硅自对准双极晶体管, 也可使 dc 电流增益 h_{FE} 迅速减小, 而该晶体管的高频响应特性则基本不变。本文则研究 2 MeV 高能电子辐照对普通硅外延平面双极晶体管交流参数输出电容 C_{ob} 、特征频率 f_T 及功率增益 G_p 的影响, 并讨论了产生这些影响的原因。

二、实 验

本实验所用高能电子是由静电加速器产生的 2 MeV 电子束, 辐照注入剂量为 $7 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$, 选择这样的注入剂量是因为它可使该晶体管的 h_{FE} 及 t_{off} 产生巨大变化, h_{FE} 从 130 降至 45 ($V_{CE} = 6 \text{ V}$, $I_C = 30 \text{ mA}$), 而 t_{off} 从 $> 500 \text{ ns}$ 降至 55 ns ($I_b = 1 \text{ mA}$, $I_c = 10 \text{ mA}$)。

本实验所用样品是由常规平面工艺制作的 3CG21 硅 pnp 小功率三极管。该管采用 p 型 $\langle 111 \rangle$ 晶向、厚度 15 μm 、电阻率为 $1.5-2 \Omega \cdot \text{cm}$ 的外延片, 经磷硼扩散而成, 基

区宽度约为 $1.5 \mu\text{m}$, 发射结和收集结面积分别为 2.6×10^4 和 $7 \times 10^4 \mu\text{m}^2$ 。从同一批次产品中随机抽取成品管及管芯体辐照实验, 辐照是在室温下进行的, 辐照期间样品未加偏置电压。

分别对样品体辐照前后的交流参数 C_{ss} 、 f_T 及 G_p 测量、记录变化数据, 所有实验数据均为 10 支样品数据的平均结果。用深能级瞬态谱 DLTS 测量引入的缺陷能级性质, 用 ASR-100C12 型扩展电阻探针测量载流子纵向分布, 以确定多数载流子的去除率。

三、结果和讨论

1. 缺陷能级

样品在辐照前经 DLTS 观察未发现有大于 10^{11} cm^{-3} 的缺陷能级, 经 2 MeV 电子辐照后在收集结 P 型收集区一侧引入了一个电子陷阱 $E_e - 0.25 \text{ eV}$ 和一个空穴陷阱 $E_h + 0.36 \text{ eV}$ 。前者与 Ewwaraye^[6] 报道相符, 后者与文献[3]相似。为得到 n 型基区引入缺陷情况, 我们对一 npn 晶体管(其 n 型收集区浓度与 3CG21 基区靠近收集结区域的浓度相近)进行了相同注入剂量的辐照, 结果在 n 型收集区引入了四个电子陷阱和一个空穴陷阱, 分别为 $E_e - 0.16 \text{ eV}$, $E_e - 0.09 \text{ eV}$, $E_e - 0.22 \text{ eV}$, $E_e - 0.41 \text{ eV}$ 和 $E_h + 0.38 \text{ eV}$, 它们的俘获截面及密度各不相同。我们认为 3CG21 基区中引入的缺陷也是如此。

2. 多数载流子去除效应

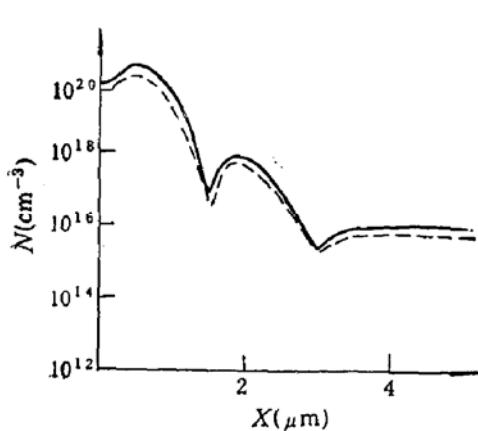


图 1 样品辐照前后多子纵向分布
实线为辐照前, 虚线为辐照后

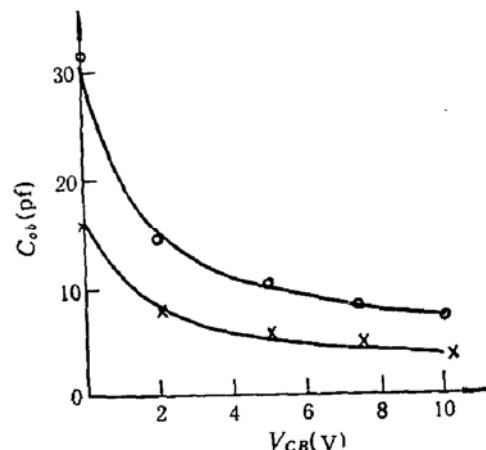


图 2 样品辐照前后 C_{ss} 随 V_{cb} 变化曲线
○为辐照前数据, ×为辐照后数据

电子辐照引入的上述缺陷能级既可充当复合中心, 使少数载流子寿命下降, 从而导致 τ_{FE} 和 t_{off} 的巨大降低^[2,3]; 也可充当补偿中心, 产生多数载流子去除效应; 还可充当散射中心, 使载流子迁移率下降, 不过, 根据 Wikner^[7] 提供的数据, 在我们的实验条件下估算出的迁移率相对变化小于 1%, 这样小的变化, 在我们下面的讨论中将不予考虑它的影响。

样品辐照前后用 ASR-100C12 测出的多子浓度纵向分布曲线见图 1。已知辐照引

起的多子去除率遵循^[8]:

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

式中 E_T 和 E_F 分别为电子辐照引入的缺陷能级及原来的费米能级位置; $A = N_T / \phi$ 为缺陷引入率, N_T 为缺陷密度; Δn 为载流子减少量, $\frac{\Delta n}{\phi}$ 为去除率。(1) 式是采用单一深能级模型导出的, 在我们的实验中, 可以近似用来分析估算。由图 1 估计出本实验条件下的去除率在基区平均约为 20 cm^{-1} , 在收集区约为 7 cm^{-1} 。

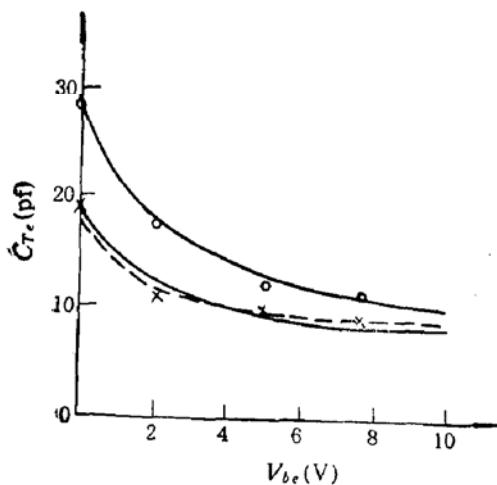


图 3 C_{Te} 随 V_{be} 变化曲线
○为辐照前数据, ×为辐照后数据, 虚线为辐照后计算值

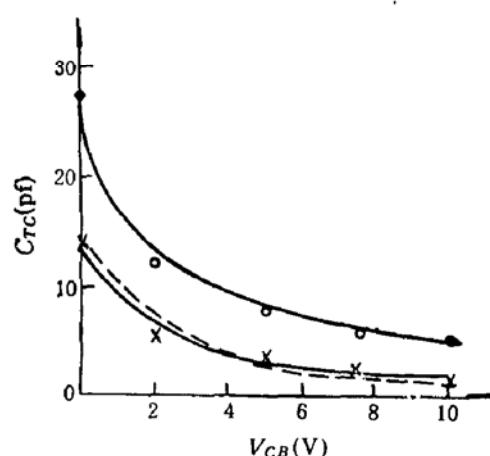


图 4 C_{Tc} 随 V_{cb} 变化曲线
○为辐照前数据, ×为辐照后数据, 虚线为辐照后计算值

3. 输出电容 C_{ob}

样品辐照前后的输出电容 C_{ob} 随反偏电压变化情况绘于图 2 中, 从图中数据看出, 辐照后的样品较辐照前的 C_{ob} 值在 0V 和 10V 下分别下降了 44% 和 50% 之多。图 3、图 4 分别绘出了该样品的发射结势垒电容 C_{Te} 和收集结势垒电容 C_{Tc} 辐照前后的变化情况, C_{Te} 和 C_{Tc} 的电容值是由测量的基极-发射极电容、集电极-基极电容值减去寄生电容和附加电容后算出的。因为 PN 结势垒电容在给定面积下仅与 PN 结两侧载流子浓度有关, 故电子辐照后 C_{Te} 和 C_{Tc} 的变化完全是由多数载流子去除效应引起的。根据去除后的载流子浓度及该样品的有关结构参数和工艺参数, 按扩散结对待估算得到的 C_{Te} 和 C_{Tc} 值(虚线)与实际值符合的较好。

4. 特征频率 f_T

晶体管辐照前后的在不同 I_c 下的特征频率 f_T 值变化见图 5。从图中数据看到, 在 $I_c \leq 40 \text{ mA}$ 阶段, 辐照前后的 f_T 值基本相同, f_T 随 I_c 变化规律也相同; 而在 $I_c \geq 50 \text{ mA}$ 阶段, 辐照后较辐照前的值稍有变高, 而且 f_T 随 I_c 增大而下降的速度也较缓。对这样的结果, 可作如下说明。

我们知道, 晶体管的特征频率 f_T 与通过晶体管的总的信号延迟时间 τ_{ss} 相联系, 对普通高频管有^[9]

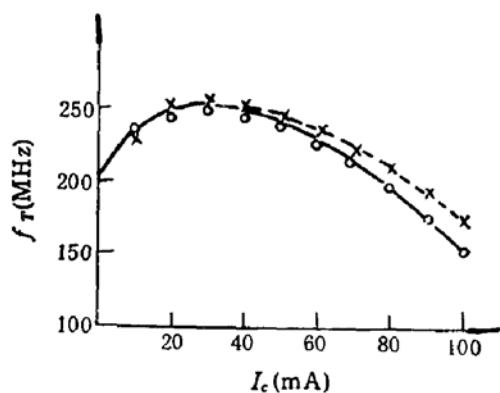


图 5 辐照前后 f_T 随 I_c 变化曲线
○为辐照前数据, ×为辐照后数据(测试条件: $V_{CB} = 10V$, $f = 100MHz$)

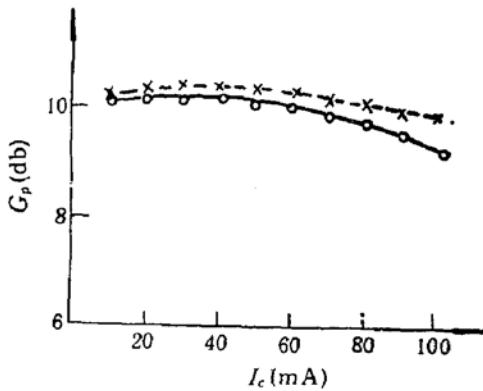


图 6 辐照前后 G_p 随 I_c 变化曲线
○为辐照前数据, ×为辐照后数据. 测试条件为 $V_{CB} = 10V$, $f = 100MHz$

$$\begin{aligned} \frac{1}{2\pi f_T} &= \tau_{ec} = \tau_e + \tau_b + \tau_d + \tau_c \\ &= r_e(C_{Te} + C_{Tc}) + \frac{W_b}{\lambda D_{pb} b} + \frac{X_{mc}}{2v_{sl}} + r_{ce}C_{Tc}. \end{aligned} \quad (2)$$

式中 f_T 为特征频率, τ_{ec} 为信号通过晶体管的总延迟时间; τ_e 为发射极延迟时间常数, r_e 为发射极电阻, C_{Te} 和 C_{Tc} 分别为发射结和收集结的势垒电容; τ_b 为基区渡越时间常数, W_b 为基区宽度, D_{pb} 为基区中空穴扩散系数, λ 为一由基区杂质分布状况决定的常数; τ_d 为收集结渡越时间常数, X_{mc} 为工作偏压下收集结空间电荷区宽度, v_{sl} 为载流子极限漂移速度; τ_c 为收集极延迟时间常数, r_{ce} 为收集区串联电阻。

将样品的有关结构参数、工艺参数及测试条件代入, 对(2)式中的各项进行估算。在 $V_{CB} = 10V$, $I_c = 40mA$ 下, τ_b 约为 $5.0 \times 10^{-10}s$, 占到 τ_{ec} 总量的 80% 以上, 而且在 $I_c \leq 40mA$ 阶段, τ_b 值不变, 这就是说, 在 $I_c \leq 40mA$ 阶段, f_T 主要由 τ_b 确定。而 τ_b 式中各量在辐照前后是基本不变的, 因为多子去除效应引起的收集结空间电荷区宽度 X_{mc} 增加主要发生在收集区一侧, 故 W_b 基本不变; 多子去除效应也基本不引起基区中与杂质分布相关的 λ 值的变化; 在忽略迁移率变化时, 扩散系数 D_{pb} 也不变化。这便是在 $I_c \leq 40mA$ 阶段, 样品辐照前后 f_T 值基本相同的原因。在 $I_c \geq 50mA$ 阶段, 变化因素较多, 其中两个变化起着主要作用, 一个是由电流密度增大后出现的有效基区宽度扩展效应, 使有效基区宽度 W_b 随 I_c 增大而增加, 从而使 τ_b 增大和 f_T 降低, 这便是在 $I_c \geq 50mA$ 阶段 f_T 随 I_c 增大而下降的主要原因; 另一个则是 τ_c 在确定 f_T 值中所起的作用逐渐增大, 而且其值在辐照前后变化也较大, 这是因为辐照后 C_{Tc} 下降较多, 而由于有效基区扩展使收集区串联电阻 r_{ce} 在辐照前后却变化不大, 总的效果是辐照后 τ_c 变小, 这大概是 $I_c \geq 50mA$ 阶段辐照后的 f_T 随 I_c 增大而下降变缓的主要原因。

5. 功率增益 G_p

样品辐照前后的功率增益 G_p 随 I_c 变化情况绘于图 6 中, 其主要特征有二, 一是辐照后 G_p 值始终高于辐照前的值, 二是在 $I_c \geq 50mA$ 阶段, G_p 随 I_c 增大而下降的

速度，辐照后比辐照前明显减缓。这些特性由下式^[10]不难理解。

$$G_p = \frac{f_T}{8\pi f^2 r_b C_c}, \quad (3)$$

式中 f 为测试频率， r_b 为基区电阻， $C_c = C_{Te} + C_{Tc}$ 。电子辐照后的载流子去除效应，可使 r_b 上升和 C_c 下降，前者使 G_p 下降，后者使 G_p 上升，但由于后者的作用大于前者，总的效果是使样品辐照后 G_p 始终高于辐照前的值。在 $I_c \geq 50$ mA 阶段， G_p 值随 I_c 增大而下降的速度在辐照前后出现的差别，则是 f_T 及 C_c 共同起作用的结果。

四、结 论

研究了 2 MeV 电子辐照硅双极外延平面 pnp 晶体管的辐照效应，辐照在收集区和基区引入了空穴陷阱和电子陷阱。在 7×10^{14} cm⁻² 注入剂量下，输出电容 C_{ob} 明显下降，特征频率 f_T 基本不变，而功率增益 G_p 变高，在较大电流下， f_T 和 G_p 随 I_c 增大而下降的速度较辐照前变缓。测量和分析表明，与电子辐照后 h_{FE} 和 t_{off} 降低主要由少数载流子寿命下降效应支配^[2,3]不同，电子辐照对这些交流参数的影响主要由多数载流子去除效应支配。

这一实验结果表明，在 2 MeV、 7×10^{14} cm⁻² 电子辐照后，单个普通硅双极晶体管的高频交流特性没有向坏的方向发生变化，考虑到电子辐照可使关断时间 t_{off} 减小，预期电子辐照不会影响硅双极集成电路的高频和逻辑工作特性，文献[4]的结论是可信的。

参 考 文 献

- [1] W. J. Keery et al., IITRI (Chicago, IL), 507(1976).
- [2] 翟冬青、李浩, 河北大学学报10(1), 72(1990).
- [3] 王忠安、郭世民, 电子学报, 16(2), 125(1988).
- [4] H. Fujioka et al., IEEE J. Solid-State Circuits, SC-15, 177(1980).
- [5] K. A. Jenkins, IEEE Trans. Electron. Devices, ED-36, 1722(1989).
- [6] A. C. Evwaraye et al., J. Appl. Phys., 47, 3776 (1976).
- [7] E. G. Wikner et al., IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-13(6) 18(1966).
- [8] R. J. 查芬, 微波半导体器件原理和辐照效应(中译本), 105 (1980).
- [9] 张屏英、周佑漠, 晶体管原理, 119(1985).
- [10] S. M. Sze, Physics of Semiconductor Devices, 164(1981).

Effects of Electron-Irradiation on AC Parameters of Silicon Bipolar Transistors

Zhai Dongqing Li Yanbo

(Department of Electronics, Hebei University, Baoding, 071002)

Li Hao

(Tianjin Technical Physics Institute, Tianjin, 300192)

Abstract

The effects of 2MeV electron irradiation on the AC parameters of Si bipolar epitaxial planar transistors are studied. The results show that the output capacitance C_{ob} evidently decreases, characteristic frequency f_T remains almost unchanged and power gain G_p slightly increases at $7 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ fluence. The changes and properties of these parameters after radiation are discussed with majority carrier removing effect.

EEACC: 2560J ;PACC: 2880