

应用电子辐照技术控制功率开关 晶体管少子寿命的研究

柴天恩 乔健 麦淑贤

(陕西机械学院)

郑继义 常保延

(国营卫光电工厂)

1985年10月14日收到 1986年11月6日修改

本文以高压大功率开关晶体管的电子辐照实验为基础,探讨了辐照对器件少子寿命、直流电流放大系数、饱和压降、开关时间的影响。研究表明:精确控制电子注量可以精确控制少子寿命,并且,适当注量的辐照可以兼顾晶体管的各电参数,从而简化了设计工作,并使器件开关特性得到显著的改善。

一、引言

对于硅功率开关管而言,直流电流放大系数 h_{FE} 、开关时间(这里着重讨论贮存时间 t_s)、饱和压降 V_{ces} 诸电参数均与少子寿命 τ 有着密切的关系。因此,控制 τ 是功率开关管制造工艺中的一项基本技术。本文就电子辐照控制 τ 的技术,探讨了不同注量 Φ 与 h_{FE} 、 t_s 、 V_{ces} 诸电参数间的关系,并对设计制造中诸电参数的兼顾做了一些尝试。

二、理论分析

1. 少子寿命 τ

辐照时,高能电子轰击半导体,在其禁带之中引入深能级复合中心,从而使半导体材料的 τ 受到影响。我们知道,由体内间接复合决定的 τ 与体内复合中心浓度 N_t 、电子、空穴俘获系数 r_n 、 r_p 成反比例。而辐照使 N_t 、 r_n 、 r_p 增大,因而使 τ 下降。

据文献^[1]报道,辐照前 τ_0 及辐照后 τ 之变化关系为:

$$1/\tau = 1/\tau_0 + k_0\Phi. \quad (1)$$

式中, k_0 为辐照损伤常数,是能量的函数, Φ 为电子注量。我们测定了基区少子寿命 τ_{bc} 、高阻集电区少子寿命 τ_{bc} ,变化规律同式(1)相似。

2. 直流电流放大系数 h_{FE}

由 τ 、 τ_0 变化关系式可得出辐照前后 h_{FE} 与 Φ 的关系式^[2]:

$$1/h_{FE} = 1/\lambda \times \frac{W_b^2}{D_{nb}} (1/\tau_{nb0} + k_0\Phi)$$

$$= 1/h_{FE0} + k \cdot \Phi. \quad (2)$$

式中, h_{FE0} 、 h_{FE} 为辐照前后直流电流放大系数, W_b 为基区宽度, D_{nb} 、 τ_{nb0} 为基区电子扩散系数和辐照前少子寿命, k 为相应于 h_{FE} 的辐照损伤常数.

3. 贮存时间 t_s

当高阻集电区宽度大于或等于集电区少子扩散长度时 (功率开关管一般能满足此条件), 贮存时间 t_s 为^[2]:

$$t_s \approx \left(\frac{\tau_{pc}}{2} \right) \ln \left(\frac{h_{FE} \cdot I_{B1} + h_{FE} I_{B2}}{h_{FE} \cdot I_{B2} + I_{CS}} \right) + h_{FE} \left(\frac{1}{\omega_T} + 1.7 R_L C_{TC} \right) \ln \left(\frac{h_{FE} \cdot I_{B2} + I_{CS}}{h_{FE} I_{B2} + 0.9 I_{CS}} \right). \quad (3)$$

式中, τ_{pc} 为集电区空穴寿命, I_{B1} 、 I_{B2} 为基极驱动电流和抽取电流, ω_T 为特征角频率, R_L 为开关电路负载, C_{TC} 为集电结势垒电容, I_{CS} 为集电极临界饱和电流.

式(3)中除 τ_{pc} 、 h_{FE} 之外, 其余各项受辐照影响皆可忽略不计, 因而对 Φ 而言, t_s 可看成是 τ_{pc} 、 h_{FE} 的线性组合, 故将(1)式代入(3)式也可得到 t_s 与 Φ 的关系式, 与 $\tau \sim \Phi$ 、 $h_{FE} \sim \Phi$ 关系相似.

三、实验方法

采用分组实验方法, 将辐照样品分成两类, 一类为三重扩散 $N^+PN^-N^+$ 结构 DK_{150} 管, N^- 区电阻率为 $20 \sim 25 \Omega \cdot \text{cm}$, 厚度 $100 \mu\text{m}$. 另一类为 DK_{30} 管芯, N^- 区电阻率 $30 \sim 40 \Omega \cdot \text{cm}$, 厚度 $100 \mu\text{m}$. 各自分成六组, 采用国产 BF-5 直线加速器, 室温下, 试样在均匀场中辐照, 能量 4MeV , Φ 为 $6 \times 10^{12} \sim 6 \times 10^{13} \text{e}/\text{cm}^2$ (管芯辐照时, 要放入管壳中, 以取得同管子相同的辐照效果). 辐照前后, 采用反向恢复法测 τ_{be} 、 τ_{bc} , 用 JT-1 晶体管特性测试仪测 h_{FE} 、 V_{ces} , 用晶体管开关参数测试仪测 t_s .

四、实验结果与讨论

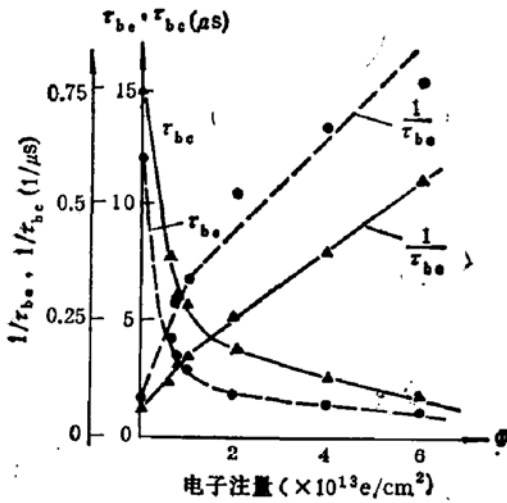
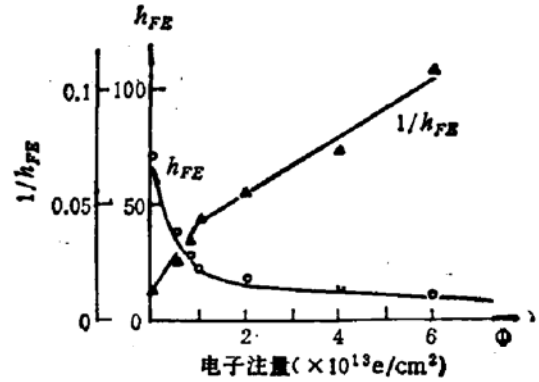
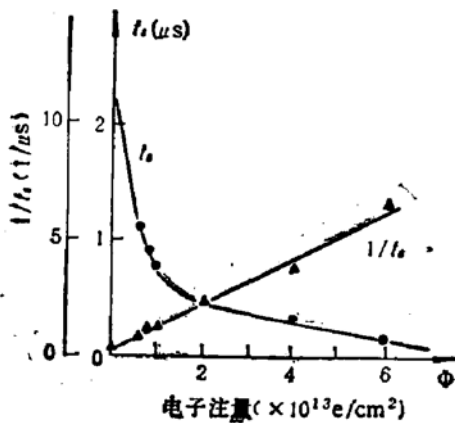
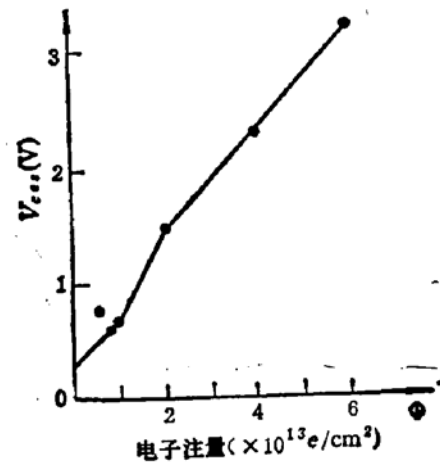
1. 少子寿命 τ_{be} 、 τ_{bc} 与电子注量 Φ 关系

辐照前后 τ_{be} 、 τ_{bc} 与 Φ 的关系曲线如图 1 所示. 可见曲线方程可归纳为式(1)形式. 在 $\Phi < 1 \times 10^{13} \text{e}/\text{cm}^2$ 时, τ_{be} 、 τ_{bc} 随 Φ 的变化较快, 在 $\Phi > 2 \times 10^{13} \text{e}/\text{cm}^2$ 时, τ_{be} 、 τ_{bc} 随 Φ 的变化较缓慢, 在更大剂量范围内 τ_{be} 、 τ_{bc} 变化趋近于零值. 同时, 图 1 所见, 辐照对 τ_{be} 的影响比对 τ_{bc} 的影响大. 由于 h_{FE} 和 t_s 对 τ_{be} 、 τ_{bc} 的不同要求, 所以采用适当的 Φ 来控制 τ_{be} 、 τ_{bc} 从而折衷 h_{FE} 、 t_s 等成为可能.

2. 电流放大系数 h_{FE} 与电子注量 Φ 关系

图 2 所示, 辐照前后 h_{FE} 与 Φ 的关系曲线. 可见 h_{FE} 随 Φ 的变化与式(2)相一致. 并且 $\Phi < 1 \times 10^{13} \text{e}/\text{cm}^2$ 时, 随 Φ 的变化较快, $\Phi > 2 \times 10^{13} \text{e}/\text{cm}^2$ 时, 随 Φ 的变化较缓慢, 最后趋近于零值.

3. 贮存时间 t_s 与电子注量 Φ 关系

图1 $\tau_{be}, \tau_{bc}-\Phi$ 关系曲线图2 $h_{FE}-\Phi$ 关系曲线图3 $t_s-\Phi$ 曲线图4 $V_{ces}-\Phi$ 关系曲线

t_s 与 $\tau_{be}, \tau_{bc}, h_{FE}$ 的关系密切, 因而它受辐照影响较大。如图 3 所示, 其曲线与图 1、2 均相似。

实验表明, $\Phi > 8 \times 10^{12} e/cm^2$ 之后, t_s 一般小于 $1 \mu s$ 。同时下降时间 t_f 随 Φ 的变化也具有相同形式, 且受辐照影响更甚。上升时间 t_r 则随 Φ 增大而略有上升。

4. 饱和压降 V_{ces} 与电子注量 Φ 关系

图 4 所示, V_{ces} 随 Φ 增加而增加。因此, 在保证 V_{ces} 的设计要求之下适当选择 Φ 的范围, 而兼顾 h_{FE}, t_s 的要求, 即可选出最佳注量范围。电子辐照的诸效应为开关管设计提供了方便。

五、结 论

辐照技术通过对注量的控制, 可以精确地控制少子寿命, 使开关管互相矛盾的电参数兼顾成为可能。经老化试验及使用情况表明器件性能稳定, 成品率上升。

此外,使设计工作简化,生产周期缩短,经济效益显著,采用适当的注量即可达到诸电参数要求,又有可能使开关时间缩短到 $1\mu\text{s}$ 以下。

国营卫光电工厂李中江高级工程师给予指导和帮助,北京市辐射中心钱思敏、兰李桥老师协助进行了电子辐照,在此一并表示感谢。

参 考 文 献

- [1] R. O. Carlson, Y. S. Son. *IEEE-ED* 24, 1104 (1977).
[2] 浙江大学半导体器件教研室编,晶体管原理,105~106,249,国防工业出版社(1980年6月第一版)。

Minority Carrier Lifetime Control by Electron Irradiation for Power Switching Transistors

Chai Tianen, Qiao Jian, Mai Shuxian
(*Shanxi Institute of Mechanical Engineering*)

Zheng Jiye and Chang Baoyan
(*Weiguang Factory of Electronic Devices*)

Abstract

The effects of electron irradiation on minority carrier lifetime, D. C. gain, saturation voltage drop and switching time of the power switching transistors are discussed based on the irradiation experiments. It is shown that the lifetime of minority carriers can be precisely controlled by dosage adjustment. By choosing a proper dosage, one can obtain the transistors with compromised parameters, thus remarkably improving switching properties and simplifying the design of devices by adopting electron irradiation processing.