

电子辐照下的 SiC 少子寿命退化模型

尚也淳 张义门 张玉明

(西安电子科技大学微电子所 西安 710071)

摘要 从理论上对电子辐照在 4H-SiC 中引入的缺陷数量和各种缺陷能级进行了分析。结果表明, EH6 和 EH7 缺陷能级在 4H-SiC 中起着有效复合中心的作用。采用 SRH 模型来估计电子辐照下 4H-SiC 的少子寿命, 并给出了电子辐照下 4H-SiC 少子寿命损伤系数的模型。结合具体的测量条件, 证明了这个模型是合理的。辐照电子对 Si、GaAs 和 4H-SiC 产生的不同影响展示了在高空、高辐照条件下 SiC 存在着优势。

关键词: 寿命退化模型, SiC, 电子辐照

PACC: 6180, 7220J, 2880

文章编号: 0253-4177(2000)02-0169-05

A Model of Minority Carrier Lifetime Degradation in SiC Irradiated by Electron

SHANG Ye-chun, ZHANG Yi-men and ZHANG Yu-ming

(Microelectronics Institute, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Received 22 October 1998, revised manuscript received 16 April 1999

Abstract The total number of defects induced by electron irradiation in 4H-SiC has been calculated theoretically in this paper. The deep level defect of EH6 EH7 is considered to play the most important role in carrier recombination from the comparison of all kinds of possible electron traps. Base on this analysis, SRH model is used to calculate the minority carrier lifetime of 4H-SiC irradiated by electrons. And then, a model of the minority carrier lifetime damage constant is presented. The model is proved to be reasonable by good match with experimental data. The different effect of electron irradiation on SiC、Si and GaAs are also compared. The results show the advantage of SiC device used in space system and in the circumstance of radiation.

Key Words: Lifetime Damage Model, SiC, Electron Radiation

尚也淳 男, 1970 年出生, 西安电子科技大学微电子所博士生, 现从事 SiC 材料和器件的辐照特性研究。

张义门 男, 西安电子科技大学教授, 博士生导师, 1984 年从美国亚利桑那州立大学回国后长期从事器件模型, VLSI 计算机辅助设计的教学和研究工作。

1998-10-22 收到, 1999-04-16 定稿

PACC: 6180, 7220J, 2880

Article ID: 0253-4177(2000)02-0169-05

1 引言

SiC 一直被人们看好是一种理想的抗辐照的半导体材料.但由于其材料及器件工艺等条件的限制,目前 SiC 抗辐照研究还处于初级阶段.至今人们还停留在用测量手段对 SiC 辐照后的体特性进行定性研究^[1,2],而对 SiC 的辐照机理及其电参数退化的定量研究还不多见.

考虑到:(1) 太空中的电子是高空范艾伦带的大部分辐射粒子,它已经构成了当前航天器的最大威胁.(2) 少子寿命是半导体材料的一个重要电参数,而它对辐射的位移效应最为敏感,研究辐照对 SiC 少子寿命的影响是研究 SiC 器件辐照效应的基础,它可为 SiC 器件的辐照研究准备理论根据.因此本文从电子辐照在 4H-SiC 中引起的缺陷入手,建立了在电子辐照下 4H-SiC 少子寿命损伤系数的模型,并用测量数据进行了验证.另外通过比较电子辐照对 4H-SiC、Si 和 GaAs 少子寿命不同的影响,展示了在高空,高辐照条件下 SiC 器件具有的优势.

2 电子的辐射损伤

辐射与半导体材料的相互作用存在两种主要方式,一是电子过程(电离和激发),另一是原子过程.电子过程会在材料体内产生瞬态扰动.原子过程的结果使晶格内原子产生位移,位移原子在室温下能保留较长时间,因此原子过程给半导体材料造成永久性损伤.而器件电参数的退化主要与永久性损伤有关.

当高能粒子入射半导体材料时,在半导体晶格原子的作用下会发生库仑散射,而将部分能量交付给晶格原子,可交付的最大能量为 T_m :

$$T_m = \frac{2(\epsilon_e + 2m_e c^2)}{Mc^2} \epsilon_e \quad (1)$$

其中 ϵ_e 为电子能量; m_e 为电子质量; c 为光速; M 为晶格原子质量.

当交付的能量大于某个能量域值 E_d 时,晶格原子则可位移至间隙位置,成为间隙原子,同时在晶格内留下一个空位,这就是 Frenkel 缺陷.可把电子的散射截面 δ_d 和交付能量的关系用 McKinley-Feshbach 公式表示^[4]:

$$d\delta_d = \pi r_0^2 Z^2 \frac{1 - \beta^2}{\beta^4} \left[1 - \beta \left(\beta + \frac{\pi Z}{137} \right) \frac{T}{T_m} + \frac{\pi Z \beta}{137} \left(\frac{T}{T_m} \right)^{1/2} \right] \frac{T_m}{T^2} dT \quad (2)$$

其中 r_0 是电子的经典半径; Z 是晶格原子的原子序数; β 是电子速度和光速的比值; T 是交付给晶格原子的能量.

因为位移原子产生的数量依赖于临界位移能量的大小,为了使问题简化,假设当 $T < E_d$ 时,没有原子位移发生,当 $T \geq E_d$ 时,才会产生 Frenkel 缺陷.则碰撞一次所产生的位移缺陷数为^[4]:

$$g(T) = \begin{cases} 1 & E_d \leq T \leq 2E_d \\ T/2E_d & T > 2E_d \end{cases} \quad (3)$$

于是当一个能量为 ϵ 的电子入射半导体材料时,它所产生的单库仑碰撞位移原子平均数 $n(\epsilon)$ 就有关系:

$$n(\epsilon) \delta_d(\epsilon) = \int_{E_d}^{T_m(\epsilon)} g(T) (d\delta_d/dT) dT \quad (4)$$

知道了(4)式,那么以 ϵ 为入射能量的电子引起的总的原子位移数 $N(\epsilon)$ 就可求得:

$$N(\epsilon) = \int_d^{\infty} \frac{n(\epsilon) \delta_d(\epsilon) d(\epsilon)}{(-d\epsilon/dx)} \quad (5)$$

其中 n_0 是原子密度; $-d\epsilon/dx$ 是电子能量损失. 因为:

$$-d\epsilon/dx = -\frac{d\epsilon}{dR}\rho \quad (6)$$

其中 ρ 为材料密度; $-\frac{d\epsilon}{dR}$ 称为粒子阻止本领. 那么以粒子阻止本领表示的 $N(\epsilon)$ 为:

$$N(\epsilon) = \frac{N_a}{A} \int_{\epsilon_d}^{\epsilon} \frac{n(\epsilon) \delta_d(\epsilon) d(\epsilon)}{(-d\epsilon/dR)} \quad (7)$$

其中 N_a 为 Avogadro 常数; A 为晶格原子的原子量. 从方程(7)可以看出, 总的位移原子数 $N(\epsilon)$ 和衬底材料的密度无关, 而和原子临界位移能量关系紧密.

3 少子寿命损伤模型

用深能级瞬态谱法(DLTS)对 4H-SiC 电子辐照的研究表明, 电子辐照可在 4H-SiC 材料中引入 7 种深能级缺陷. 图 1 是以 $\epsilon = 1.5 \text{ MeV}$, 辐照量 $\Phi = 2.5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 的电子辐照 4H-SiC 样品后的 DLTS 谱(缺陷能级 EH3 不明显). 表 1 是这些缺陷的缺陷能级^[2].

复合中心主要由位于禁带中部的深能级缺陷来充当, 因为它们有着大的复合率 U . 深能级缺陷对载流子复合的影响要比浅能级大得多, 可称作复合中心^[7]. 也就是说电子辐照引入的所有深能级缺陷都充当复合中心. 从表 1 可以看出, EH5、EH6 EH7 的能级位于禁带中心, 另外经测量, Hemmingsson 指出^[2], EH5、EH6 EH7 有着好的热稳定性, 大的复合截面和缺陷浓度, 那么这 3 种缺陷的存在就直接影响着少子控制的 SiC 器件的性能. 再比较 EH5 和 EH6 EH7 的缺陷浓度与复合截面的乘积要比 EH6 EH7 小 50~100 倍^[2], 加上 EH6 EH7 比 EH5 的能级要深得多, 几乎为 0.50eV, 可以近似认为, 在经电子辐照的 4H-SiC 中, 只有 EH6 EH7 这一个缺陷能级在起着关键的复合作用. 也就是说, 只认为存在 EH6 EH7 这一个复合中心.

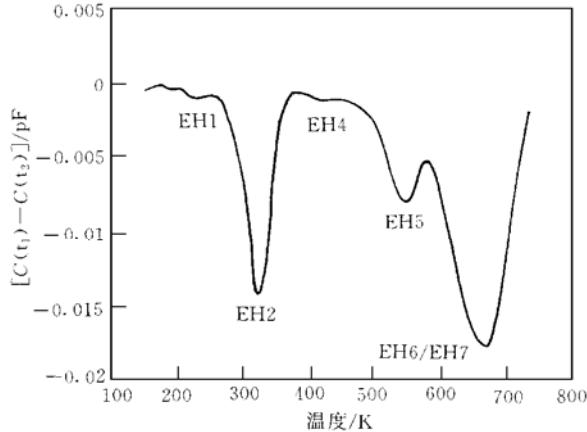


图 1 电子辐照 4H-SiC DLTS 谱

FIG. 1 DLTS for 4H-SiC after Electron Radiation

表 1 4H-SiC 各种缺陷能级

Table 1 Defect Levels for 4H-SiC

缺陷能级	EH1	EH2	EH4	EH5	EH6 EH7
E_i/eV	$E_c - 0.45$	$E_c - 0.68$	$E_c - 0.72$	$E_c - 1.15$	$E_c - 1.65$

基于以上考虑, 就可用 SRH 模型来对电子辐照的 4H-SiC 少子寿命进行估计.

$$\tau = \frac{r_n(n_0 + n_1 + \Delta p) + r_p(P_0 + P_1 + \Delta P)}{N_i r_n r_p (n_0 + p_0 + \Delta p)} \quad (8)$$

则少子寿命的损伤系数 k_τ 为:

$$k_\tau = \frac{\Delta \left[\frac{1}{\tau} \right]}{\Delta \Phi} = \left[\frac{\Delta N_i}{\Delta \Phi} \right] \frac{n_0}{p_1/a_n + (n_1 + n_0)/a_p} \quad (9)$$

其中 n_1 和 p_1 分别是费米能级与缺陷能级重合时的平衡电子和空穴浓度; a_n 和 a_p 分别是电子和空穴的

俘获系数。由于 EH6 EH7 几乎位于禁带中部, 加上 4H-SiC 的禁带宽度相当大, 使得这个能级与导带和价带的距离高达 1.63eV, 所以 p_1 和 n_1 十分小, 认为 $a_n = a_p = a$, 则:

$$k_\tau = \left[\frac{\Delta N_i}{\Delta \phi} \right] a = \left[\frac{\Delta N_i}{\Delta \phi} \right] \delta v_{th} \quad (10)$$

由于在辐照量相同的条件下, 电子辐照引入的缺陷数(即复合中心)正比于每个电子产生的原始缺陷数^[5], 又由于在相同能量电子照射下:

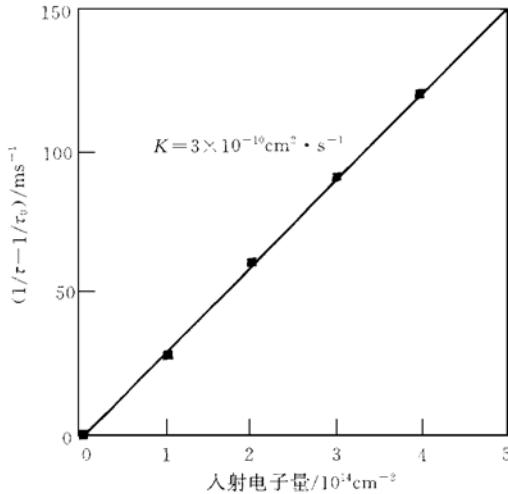


图 2 以 2.2MeV 电子辐照的 SiC
电参数退化

FIG. 2 Electronic Parameter Degeneracy of SiC
Induced by 2.2MeV Electron Radiation

4 K 的结果验证

图 3 是 K_τ 的计算值与 Braunig 测量结果^[1]的比较(曲线为计算值, 方块是测量值)。在计算中考虑以下两点:

(1) 因为测量针对的是 LED, 所以辐照损伤对 p-n 结少子寿命的影响其实仅限于少子的扩散区内, 即平均来说, 只有处在少子的一个扩散长度内的辐射缺陷才会影响少子的复合, 在一个扩散长度之外, 平均来说, 少子已经复合, 故复合中心不再起作用。所以真正影响 SiC LED 少子寿命损伤系数的是在少子一个扩散长度之内的缺陷平均浓度。

(2) 入射电子在半导体材料中随着和晶格原子的碰撞, 伴随着能量沉积, 电子不断地改变自己的运动方向。但分析辐照电子在材料中的轨迹表明^[3], 高能电子在入射的开始不会改变方向, 只有在能量损失到很小时, 运动才会变成无序。而所要考虑的少子一个扩散长度仅几个微米, 且处于电子的入射表面

$N_F = \Phi \delta v_{th} N_0$ (11)
 N_F 为引入的缺陷数, N_0 为晶格原子密度^[5], 可见引入的整个缺陷数还与电子辐照量成正比。基于这两个条件, 因此可以定义比例系数 K , 使得:

$$N_i(\epsilon, \phi) = K \phi N(\epsilon) \quad (12)$$

$N(\epsilon)$ 为以能量 ϵ 入射的单个电子可产生的缺陷数, $N_i(\epsilon, \phi)$ 为以能量 ϵ , 入射量为 ϕ 的电子入射, 所产生的总缺陷数。电子辐照 4H-SiC 少子寿命损伤系数可用以下模型描述:

$$K_\tau(\epsilon) = K N(\epsilon) \delta v_{th} \quad (13)$$

图 2 是以 2.2MeV 电子入射 4H-SiC 所引起的寿命退化^[1], 由图中可以看出当 $\epsilon = 2.2\text{MeV}$ 时, $K_\tau = 3 \times 10^{-10} \text{cm}^2/\text{s}$ 。则:

$$K \delta v_{th} = \frac{K_\tau(2.2\text{MeV})}{N(2.2\text{MeV})} \quad (14)$$

则:

$$K_\tau(\epsilon) = N(\epsilon) \frac{K_\tau(2.2\text{MeV})}{N(2.2\text{MeV})} \quad (15)$$

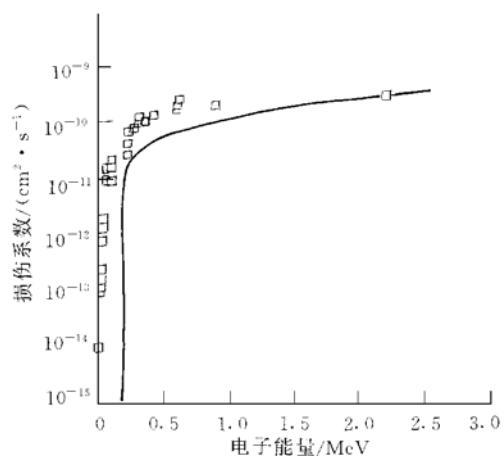


图 3 寿命损伤系数计算值与
Braunig 测量结果的比较

FIG. 3 Comparison of Calculated Lifetime Damage Constant with Braunig Measured Result

附近, 所以完全可以保证在这一扩散长度内, 电子的运动是沿着入射方向的。

从图 3 可以看出, 本文所提出的 4H-SiC 少子寿命损伤系数模型与实际测量值能够符合, 这个模型能够反映少子寿命损伤系数随入射电子能量的变化, 因此这个模型是合理的。图中, 在低能区测量值要比计算值大, 并且在小于入射电子能量域值的情况下, Braunig 还测量到了 K_r 。这是因为理论计算针对的是理想的 SiC 晶体, 而实际的 SiC 材料本身就含有缺陷, 当入射电子能量较小时, 入射电子所产生的缺陷对少子寿命退化的影响没有固有缺陷大, 所以理论计算值就小。而随着入射电子能量的增加, 固有缺陷的影响渐次处于次要位置, 所以理论值和计算值相符。

5 SiC、Si 和 GaAs 少子寿命退化的比较

SiC 有着大的临界位移能 E_d , 这使得它有着良好的抗辐照特性。表 2 是 4H-SiC、Si 和 GaAs 临界位移能的比较^[1]。

表 2 4H-SiC、Si 和 GaAs 临界位移能的比较

Table 2 Comparision of Critical Drift Energies for 4H-SiC, Si and GaAs

材料	4H-SiC	Si	GaAs
E_d/eV	22	15	9

图 4 是以能量 ϵ 入射的电子在 Si、GaAs 和 4H-SiC 中引起的少子寿命损伤系数的比较。由图中可见, GaAs 的 K_r 要比 4H-SiC 高几乎 3 个数量级。

由以上分析可以看出, SiC 由于其自身特性, 使得其抗辐照的能力要比 Si 和 GaAs 高得多, 可见 SiC 材料在抗辐照加固方面有着广泛的应用前景。

6 小结

本文从理论上推导了辐照电子在 4H-SiC 中可引入的缺陷, 分析了电子辐照在 4H-SiC 中引入的各种缺陷能级, 得出其中只有 EH6 EH7 缺陷能级在 4H-SiC 中起着有效的复合中心的作用。在此基础上, 本文用 SRH 模型来估计电子辐照下 4H-SiC 的少子寿命, 并最终给出电子辐照下 4H-SiC 少子寿命损伤系数的模型。结合具体的试验条件, 证明所得出的电子辐照 4H-SiC 少子寿命损伤系数的模型是合理的。

本文还比较了辐照电子对 Si、GaAs 和 4H-SiC 的不同影响, 得出在抗辐照方面, SiC 要比 Si 和 GaAs 优越得多。

参 考 文 献

- [1] D. Braunig, D. Fritsch, B. Lehmann, IEEE Trans. Nucl. Sci., 1992, **39**(3): 428.
- [2] C. Hemmingsson, N. T. Son, O. Kordina *et al.*, Materials Science and Engineering, 1997, **B46**: 336.
- [3] Andrew Holmes-Siedle, Len Adams, Handbook of Radiation Effects, OXFORD University Press, 1993.
- [4] Julius H. Cahn, J. Appl. Phys., 1959, **30**(8): 1301.
- [5] R. J. 查芬, 微波半导体器件—原理和辐射效应, 北京: 原子能出版社, 1980[R. J. Chaffin, Microwave Semiconductor Device-Theory and Radiation Effect, Nuclear Energy Press, Beijing, China, 1980].
- [6] 曹建中, 半导体材料的辐射效应, 北京: 科学出版社, 1993[Cao Jianzhong, Radiation Effect of Semiconductor Materials, Science Press, Beijing, China, 1993].
- [7] 张玉明, 碳化硅材料和器件的研究, 西安交通大学博士论文, 1998[Zhang Yuming, Research on SiC Material and Device, Ph. D. Dissertation of Xi'an Jiaotong University, 1998].

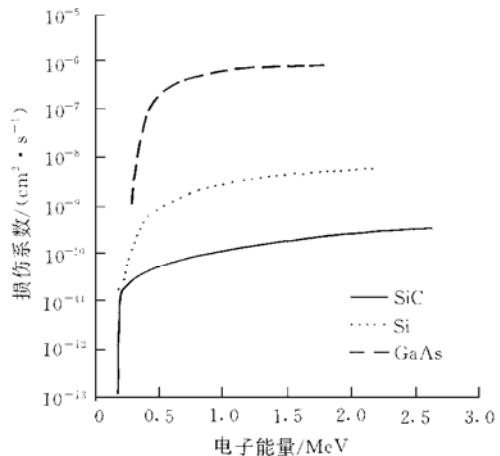


图 4 4H-SiC、Si 和 GaAs 寿命损伤系数的比较

FIG. 4 Comparison of Lifetime Damage Constants for 4H-SiC, Si and GaAs