

# 中子辐照下的 6H-SiC pn 结电特性分析

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:** 用中子辐照在 6H-SiC pn 结中引入的复合中心和深能级陷阱解释了 SiC pn 结辐照后电特性退化的现象, 并推导了辐照后 SiC pn 结理想因子与外加电压的关系, 给出了 SiC pn 结中子辐照电特性退化的模型, 模拟结果和实验数据的对比说明关于 SiC pn 结电特性退化的理论解释是正确的.

**关键词:** pn 结特性; 6H-SiC; 中子辐照

**PACC:** 6180; 7220J; 7340L

**中图分类号:** O475    **文献标识码:** A    **文章编号:** 0253-4177(2000)07-0691-06

## Analysis of Electrical Characteristics in 6H-SiC Junctions Irradiated by Neutron

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

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

Received 18 April 1999, revised manuscript received 21 July 1999

**Abstract:** Neutron irradiation can introduce plenty of recombination centers and deep-level traps in SiC pn junctions. The degradation of the electrical characteristics in SiC pn junctions irradiated by neutron can be attributed to the recombination centers and the electric field effect on the thermal emission of traps within the depletion region. The relationship of the ideal factor to the applied voltage has been theoretically studied. A model of the SiC pn junctions irradiated by neutron is presented. The model is proved by good matches with the experimental data.

**Key words:** characteristics of p-n junction; 6H-SiC; irradiation by neutron

尚也淳 男, 1970 年出生, 博士生, 现从事 SiC 材料和器件的辐照特性研究[ SHANG Ye-chun, male, was born in 1970, postdoctor, is engaged now in irradiated characteristics of SiC materials and devices].

张义门 男, 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[ ZHANG Yi-men, male, professor, teacher of postdoctor, works now on devices models, computer CAD of VLSI].

1999-04-18 收到, 1999-07-21 定稿

PACC: 6180; 7220J; 7340L

Article ID: 0253-4177(2000)07-0691-06

## 1 引言

近几年来, SiC 作为一种有前途的抗辐照半导体材料一直受到人们的广泛关注。对 SiC pn 结辐照特性的分析将是研究 SiC 器件抗辐照特性的基础。实验结果表明, 辐照会引起 SiC pn 结理想因子的增大和电流特性的改变。许多文献<sup>[1,2]</sup>曾经提出过, SiC pn 结附近的缺陷常常会影响它的复合电流机制和扩散电流机制, 有时使得它的理想因子  $n$  可能会接近 3。但这方面深入的理论探讨还未见报道。

中子辐照在 SiC pn 结中会引入大量的复合中心和深能级陷阱, 本文认为正是这些复合中心的复合作用以及耗尽区中的陷阱在电场作用下的载流子热发射是导致 SiC pn 结电特性退化的根本原因。本文从机理上对 SiC pn 结的中子辐照响应进行了分析, 并得出了辐照下 SiC pn 结电特性的模型。

## 2 6H-SiC pn 结的基本特性

在 6H-SiC 的晶体结构中, 有两个立方位和一个六角位, 杂质原子处于不同的位置会有不同的电离能, 在 n 型 6H-SiC 中, 如果忽略深能级杂质补偿, 那么准中性条件为<sup>[3]</sup>:

$$n = \frac{N_{D1}}{1 + ng_D/N_c \exp[-\Delta E_{D1}/kT]} + \frac{N_{D2}}{1 + ng_D/N_c \exp[-\Delta E_{D2}/kT]} \quad (1)$$

其中  $\Delta E_{D1} = 0.085\text{eV}$ ;  $\Delta E_{D2} = 0.125\text{eV}$ ;  $g_D$  为施主简并度;  $N_{D1}$  和  $N_{D2}$  分别为两施主能级上的施主数;  $N_{D2} = 2N_{D1}$ ;  $N_c$  为有效状态密度。依据以上 n 型 SiC 的准中性近似可以确定 n 型 6H-SiC 的电子浓度。p 型 6H-SiC 中的空穴浓度可依据类似的方法求得。

低场时, 决定 SiC 电子迁移率的散射机理主要有晶格散射、电离杂质散射和压电散射, Caughey-Thomas 方程可以用来很好地描述 SiC 载流子的低场迁移率随温度的变化<sup>[4]</sup>。

$$\mu_{n,p} = \mu_{n,p}^{\min} + \frac{\mu_{n,p}^{\delta\text{elta}}}{1 + [(N_D + N_A)/N_{n,p}^{\mu}] \gamma_{n,p}} (T/300\text{K})^{\alpha_{n,p}} \quad (2)$$

其中  $\mu_n^{\min} = 20\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ ;  $\mu_n^{\delta\text{elta}} = 380\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ ;  $N_n^{\mu} = 4.5 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$ ;  $\gamma_n = 0.45$ ;  $\alpha_n = -3$ ;  $\mu_p^{\min} = 5\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ ;  $\mu_p^{\delta\text{elta}} = 70\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ ;  $N_p^{\mu} = 1 \times 10^{19}\text{cm}^{-3}$ ;  $\gamma_p = 0.5$ ;  $\alpha_p = -3$ 。

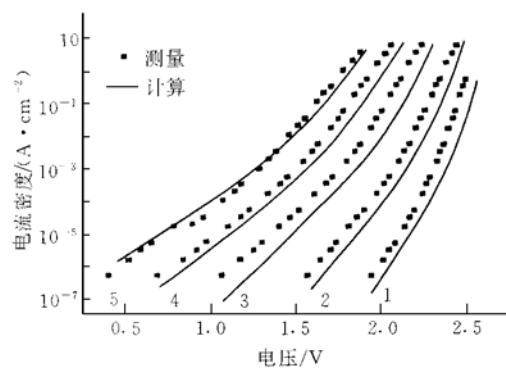


图 1 pn 结的正向特性

曲线 1: 293K, 曲线 2: 373K, 曲线 3: 473K,  
曲线 4: 573K, 曲线 5: 673K

FIG. 1 Forward Characteristics of SiC pn Junction

在较低的正向电压  $V$  作用下, 正向电流密度  $J_F$  就由空间电荷区复合产生的电流  $J_{FR}$  和接近于空间电荷区的扩散电流  $J_{FD}$  所决定。

$$J_F = J_{FR} + J_{FD} = \frac{qn_i W}{2\pi} \exp\left(-\frac{qV}{2kT}\right) + J_S [\exp(-qV/kT) - 1] \quad (3)$$

其中

$$J_S = \sqrt{\frac{q\mu_p k T}{\tau_p}} \frac{n_i^2}{N_D} + \sqrt{\frac{q\mu_n k T}{\tau_n}} \frac{n_i^2}{N_A} \quad (4)$$

其中  $\tau_p$  和  $\tau_n$  分别是 n 区和 p 区中少子空穴和电子的寿命;  $n_i$  是本征载流子浓度;  $\tau$  是复合寿命;  $W$  是耗尽区宽度。

依据以上分析对 6H-SiC pn 结的正向特性在不同的温度下进行计算, 图 1 是计算结果和实际测量

值<sup>[5]</sup>的比较,由图中可以看出计算值和测量值相符,这反映出实验中所用 SiC pn 结的正向电流起因于理想的扩散机理和复合机理。实验用 SiC pn 结 CFLPE(Container-Free Liquid-Phase Epitaxy) 法获得,其中:  $N_D$  取  $0.75 \times 10^{18}/\text{cm}^2$ ,  $N_A$  取  $1 \times 10^{19}/\text{cm}^2$ 。电子和空穴的少子寿命  $\tau_n$  和  $\tau_p$  与掺杂水平有着一定的关系,根据文献[4, 6]可取  $\tau_n = 10^{-8}\text{s}$ ,  $\tau_n = \tau_p = 10^{-10}\text{s}$ 。

### 3 6H-SiC pn 结正向电流的辐照响应

#### 3.1 辐照对耗尽区复合率的影响

辐照中子入射到 SiC 体内,可将一部分能量交付给晶格原子,当这个能量超过一定的阈值后,会使晶格原子发生位移,从而形成缺陷。中子辐照会在 SiC 中引入深能级缺陷<sup>[7]</sup>,深能级缺陷能够起陷阱作用,也能够起复合中心作用,如果载流子在俘获态中停留了一个平均寿命的时间,然后被热激发到原来的能带,那么这个缺陷就起陷阱作用。如果在可能发生热激发之前俘获了另一个相反电荷的载流子,那么就起复合中心作用。处于 SiC pn 结耗尽区中的这种缺陷陷阱由于受到耗尽区电场的作用,会使载流子的热发射率发生改变,这归咎于半导体上外加电场引起了库仑势垒的降低和隧道效应。中子辐照可在 SiC 体内产生大量的这种缺陷,所以研究 SiC pn 结的中子辐照效应就必须考虑耗尽区内陷阱的电场热发射。

假设陷阱是施主型的,那么可以把它看作库仑势阱,库仑势阱在电场作用下势垒降低,它的电子热发射率可表示为<sup>[8]</sup>:

$$e_n^* = e_n \eta_n \quad (5)$$

$$\eta_n = \exp\left(\frac{\Delta E_i}{kT}\right) + \int_{\Delta E_i/kT}^{E_i^n/kT} \exp\left(z - z^{3/2} \left[ \frac{4}{3} \times \frac{\left[2m_n^*\right]^{1/2}(kT)^{3/2}}{q \hbar E} \right] \left[ 1 - \left( \frac{\Delta E_i}{z kT} \right)^{5/3} \right] dz \quad (6)$$

其中  $\eta_n$  为电子热发射的增强率;  $E$  为电场;  $E_i^n$  为电子离化能;  $\Delta E_i$  为在电场存在下  $E_i$  的降低。

$$\Delta E_i = q \left[ \frac{qE}{\pi \epsilon_0 \epsilon_0} \right]^{1/2} \quad (7)$$

$$E = \left[ \frac{2q}{\epsilon_0 \epsilon_0} \right]^{1/2} N_A^{1/2} (V_{bi} - V)^{1/2} \quad (8)$$

电子的发射和电子的俘获是一个可逆的过程,平衡时这两个过程相互抵消,也就是说平衡时电子的俘获率  $\gamma_n$  将变为:

$$\gamma_n^* = \gamma_n \eta_n \quad (9)$$

由于施主型陷阱在没有被空穴填满时显示中性,所以空穴的发射势垒在电场下不会降低<sup>[9]</sup>,但电场会使得空穴的隧道效应加强。施主型陷阱在电场作用下空穴的发射率可表示为<sup>[8]</sup>:

$$e_p^* = e_p \eta_p = e_p \left[ 1 + \int_0^{E_p^n/kT} \exp\left(z - z^{3/2} \left[ \frac{4}{3} \times \frac{(2m_p^*)^{1/2}(kT)^{3/2}}{q \hbar E} \right] dz \right] \right] \quad (10)$$

其中  $\eta_p$  为空穴发射的增强率;  $E_p^n$  为空穴的离化能。那么空穴的俘获率将变为:

$$\gamma_p^* = \gamma_p \eta_p \quad (11)$$

对于受主型陷阱,依据以上原因,载流子在电场作用下的发射也作类似变化。

一般情况下,SiC pn 结耗尽区中的最大复合率  $U_{max}$  可由下式给出<sup>[4]</sup>:

$$U_{max} = \frac{n_i \exp(qV/2kT)}{2 \sqrt{\tau_n \tau_p}} \quad (12)$$

$$\tau_n = 1/(N_A \gamma_n) \quad (13)$$

$$\tau_p = 1/(N_D \gamma_p) \quad (14)$$

由于辐照中子在 SiC pn 结中引入了大量的陷阱,那么在 SiC pn 结耗尽区电场的作用下,耗尽区内的载流子最大复合率  $U^*$  就应为:

$$U^* = \sqrt{\eta_n \eta_p} U_{\max} \quad (15)$$

### 3.2 中子辐照下的 SiC pn 结正向电流特性

为了获得理想因子, 采用和 Quintanilla<sup>[10]</sup>相同的方法, 对  $U^*$  中项:  $\sqrt{\eta_n \eta_p} \exp\left(\frac{qV}{2kT}\right)$  进行分析, 对  $\ln\left[\sqrt{\eta_n \eta_p} \exp\left(\frac{qV}{2kT}\right)\right]$  中的电压  $V$  求微分, 那么考虑场致陷阱热发射的 SiC pn 结的理想因子  $n$  就应为:

$$n = \frac{q}{2} + \frac{kT}{2\eta} \left[ \frac{d\eta_n}{dV} + \frac{d\eta_p}{dV} \right] \quad (16)$$

为了使问题简化, 取  $E_i^n = E_i^p = E_g/2$ .

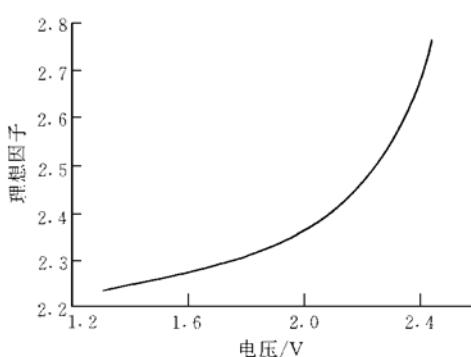


图 2 辐照条件下 SiC pn 结理想因子与电压的关系

FIG. 2 Ideal Factor of pn Junction Versus Junction Voltage Under Irradiation

和耗尽区复合寿命.

假设辐照所产生的位移缺陷浓度正比于辐照剂量, 缺陷所引起的载流子复合率的增长正比于缺陷浓度, 那么辐照所引起的寿命退化与辐照剂量的关系为:

$$\Delta \left[ \frac{1}{\tau} \right] = \frac{1}{\tau_0} - \frac{1}{\tau} = k_r \varphi \quad (18)$$

其中  $\tau_0$  是在特定注入水平、费米能级和温度下的初始非平衡载流子寿命;  $\tau$  是辐照后的载流子寿命,  $\varphi$  是辐照剂量.

图 3 是在室温和不同辐照剂量下 6H-SiC pn 结的正向特性, 图中理论计算值反映出了辐照对 pn 结正向特性的影响. 图 3 中测量值来源于另一组用 CFLPE 法获得的 6H-SiC pn 结<sup>[11]</sup>, 其中  $N_D = 0.75 \times 10^{18}/\text{cm}^2$ ,  $N_A = 1 \times 10^{19}/\text{cm}^2$ ,  $\tau_n = \tau_p = 10^{-10}\text{s}$ ,  $\tau_r = 3 \times 10^{-9}\text{s}$ ,  $k_{nr} = 0.2\text{cm}^2/\text{s}$ ,  $k_{pr} = k_{np} = 0.05\text{cm}^2/\text{s}$ ,  $Q_1 = 5 \times 10^{13}/\text{cm}^2$ ,  $Q_2 = 5.5 \times 10^{14}/\text{cm}^2$ .

## 4 6H-SiC pn 结反向电流的辐照响应

当 pn 结反向偏置时, 由于耗尽区内的强电场对载流子的抽取作用, 耗尽区内载流子浓度低于平衡值, 那么在耗尽区内将存在产生电流. 理想 SiC pn 结总的反向电流密度就为:

$$J_R = J_{RG} + J_{RD} = \frac{qn_i W}{2\tau_g} + J_S \left[ \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (19)$$

其中  $J_{RG}$  为反向产生电流密度;  $J_{RD}$  为反向扩散电流;  $\tau_g$  为载流子的产生寿命.

考虑到: (1) 中子辐照在 SiC pn 结耗尽区中引入了缺陷, (2) 反向电压造成的大耗尽区电场对耗尽区

陷阱热发射产生了增强效应。那么, 中子辐照将引起耗尽区产生电流的增强。考虑陷阱电场热发射效应的产生复合电流和载流子发射率增强因子成正比<sup>[10]</sup>, 依据前面分析, 为了使问题简化起见, 令:

$$J_{RG\varphi} = - \frac{qn_i W}{2\tau_{\text{ep}} k\varphi} \sqrt{\eta_n \eta_p} \quad (20)$$

其中  $J_{RG\varphi}$  为辐照后的反向产生电流密度;  $k\varphi$  为比例常数。则中子辐照后的 SiC pn 结反向电流密度将为:

$$J_R = \left[ \sqrt{\frac{q\mu_p kT}{\tau_{\text{ep}}}} \times \frac{n_i^2}{N_D} + \sqrt{\frac{q\mu_n kT}{\tau_{\text{ep}}}} \times \frac{n_i^2}{N_A} \right] [\exp(-qV/kT) - 1] + J_{RG\varphi} \quad (21)$$

对于理想的突变 p<sup>+</sup> n 结, 忽略辐照对雪崩击穿电压  $V_B$  的影响, 那么:

$$V_B = \epsilon \epsilon_0 E_m^2 / 2qN_D \quad (22)$$

其中  $E_m$  为临界击穿电场, 对于 6H-SiC 来说<sup>[12]</sup>,  $E_m = 3.5 \times 10^6 \text{ V/cm}$ .

图 4 是依据以上分析对 6H-SiC pn 结辐照后的反向特性进行计算的结果和测量值<sup>[11]</sup>的比较, 其中取  $k\varphi = 2 \times 10^4$ , 由图中可以看出, 计算值和测量值符合很好。

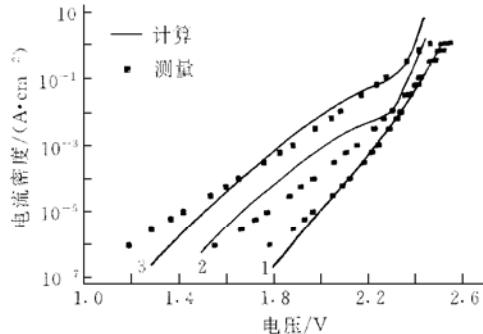


图 3 pn 结正向特性随中子剂量的变化

曲线 1: 辐照前, 曲线 2: 辐照剂量为  $\Phi_1$ ,  
曲线 3: 辐照剂量为  $\Phi_2$ .

FIG. 3 Forward Characteristics of pn  
Junction Versus Dose of Neutrons

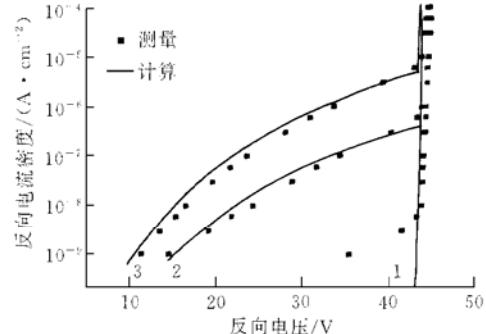


图 4 SiC pn 结反向特性随中子剂量的变化

曲线 1: 辐照前, 曲线 2: 辐照剂量为  $\Phi_1$ ,  
曲线 3: 辐照剂量为  $\Phi_2$

FIG. 4 Backward Characteristics of SiC pn  
Junction Versus Dose of Neutrons

## 5 结束语

中子辐照在 SiC pn 结中引入了大量的缺陷, 而正是这些缺陷充当了复合中心和深能级陷阱才使得 SiC pn 结的电特性发生了退化。具体地说就是由于大量复合中心的存在和 pn 结耗尽区中的辐照陷阱在耗尽区电场的作用下热发射效应得到加强, 从而引起耗尽区复合率和产生率的加强, 这就导致 pn 结正偏和反偏时的复合电流和产生电流的改变。本文从理论上推导了 SiC pn 结在中子辐照下的理想因子随外加电场变化的规律, 说明了辐照后 SiC pn 结理想因子大于 2 的原因是由于在 SiC pn 结中引入了缺陷, 这可为文献[6, 11]中报道的 SiC pn 结理想因子大于 2 的现象提供理论依据。本文还对 6H-SiC pn 结中子辐照后的电特性进行了模拟, 模拟结果和实验测量数据对比的结果表明, 以上对 SiC pn 结电特性辐照退化机理的解释是正确的。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] J. A. Edmond, K. Das, R. F. Davis, *J. Appl. Phys.*, 1988, **63**(3): 922.
- [ 2 ] M. Ikeda, T. Hayakawa, S. Yamagawa, *J. Appl. Phys.*, 1979, **50**(12): 8215.
- [ 3 ] 张玉明, SiC 材料和器件的研究, 西安交通大学博士论文, 1998[ ZHANG Yuming, SiC Materials and Devices, Doctoral Thesis for Xi'an Jiaotong University, 1998(in Chinese) ].
- [ 4 ] Martin Ruff, Heinz Mitlehner, Reinhard Helbig, *IEEE Trans. on Electron Device*, 1994, **41**(6): 1040.
- [ 5 ] A. M. Strel'chuk, A. L. Syrkin, V. E. Chelnokov, The Current, Electroluminescence and Recombination Parameters of SiC pn Structures Produced by Container-Free Liquid-Phase Epitaxy, The 5th SiC and Related Materials Conf., Washington, 1993, p549.
- [ 6 ] M. M. Anikin, A. A. Lebedev, S. N. Pyatko, Minority Carrier Diffusion Length in Epitaxially Grown SiC(6H) pn Diodes, Amorphous and Crystalline Silicon Carbide III, Springer Proceedings in Physics, 1992, **56**: 269.
- [ 7 ] J. M. McGarity, F. B. McLean, W. M. Delaney, *IEEE Trans. on Nuclear Science*, 1992, **39**(6): 1974.
- [ 8 ] G. Vincent, A. Chantre, D. Bois, *J. Appl. Phys.*, 1979, **50**(8): 5484.
- [ 9 ] Jason C. S. Woo, James D. Plummer, Johannes M. C. Stork, *IEEE Trans. on Electron Devices*, 1987, **34**(1): 130.
- [ 10 ] L. Quintanilla, S. Duenas, E. Castan, *J. Appl. Phys.*, 1996, **79**(1): 310.
- [ 11 ] V. V. Evstropov, A. M. Strel'chuk, A. L. Syrkin, The Effect of Neutron Irradiation on Current in SiC pn Structures, The 5th SiC and Related Materials Conf., Washington, 1993, p589.
- [ 12 ] L. G. Matus, J. A. Powell, C. S. Salupo, *Appl. Phys. Lett.*, 1991, **59**(14): 1770.