

中子辐照损伤区对硅少数载流子寿命的影响

施毅 吴凤美 沈德勋 程开甲
(南京大学物理系)

王长河
(河北半导体研究所, 石家庄)
1988年8月1日收到

中子辐照在半导体硅晶体中形成无序区, 使其电学性能受到严重影响。本文根据无序区基本特征, 系统分析中子辐照对少数载流子寿命影响的过程, 给出了一个完整自洽的计算表达式; 理论计算了材料掺杂浓度、无序区辐照缺陷分布态, 以及载流子注入量等参数对少数载流子寿命的影响。最后, 将计算结果与点缺陷模型、及实验测量数量进行比较和讨论。

主题词: 硅, 少子寿命, 中子辐照, 无序区

一、引言

在中子辐照对半导体材料及器件的影响中, 最重要是少数载流子寿命的变化。一方面少子寿命对辐照最为敏感, 再则少子寿命决定着一些半导体器件的工作状态。对于机制复杂的中子辐照损伤过程, 如何正确有效地分析和估算少数载流子寿命的变化是人们感兴趣的课题。

半导体材料受到中子辐照, 中子与晶格原子将发生相互核作用而产生初始反冲位移原子, 这一原子所获得的能量将用于进一步碰撞其它晶格原子而引起级联碰撞位移, 从而产生浓度很高的缺陷聚合团, 即无序区 (Disordered regions)。这种由饱和空位缺陷为核和空位-杂质等复合缺陷为外壳组成的无序区^[1] 对半导体电学性能 (尤少数载流子寿命) 的辐照效应起着关键作用^[2-4]。中子辐照效应与 γ 射线、电子等辐照所造成的影响是不完全相同的^[2-4]。1959年 B. R. Gossior^[5] 提出中子辐照产生的无序区物理模型, 并得到进一步发展, 许多作者^[6-9] 在此模型基础上分析和计算了中子辐照对少子寿命的影响。以前工作主要是对无序区部分特性进行分析和处理, 缺少系统研究, 没有将无序区内因因素与复合过程结合起来。R. F. Konopleva 等^[7] 虽对此进行了详细考虑, 但是对如何求得无序区周围能带弯曲高度的变化等至今未得到解决。因此, 以前的计算结果尚不能与实验数据直接进行比较。本文对无序区特征作了进一步分析, 采用无序区中 Shockley-Read-Hall^[10] 统计复合理论的有效近似, 计算得到了无序区周围能带弯曲高度, 即电势高度 V_s , 给出中子辐照无序区对少数载流子寿命影响的计算表达式。它包括无序区中缺陷浓度,

能带弯曲高度、准费米能级变化,以及过剩载流子浓度等对少子寿命的影响关系。最后将无序区模型计算结果与点缺陷模型、及实验测量数据进行比较,并作了详细的讨论。

二、物理模型

以中子辐照对 n 型硅半导体材料少数载流子寿命的影响为例。中子辐照后晶体内形成了近似均匀分布但形状各异的无序损伤区。对于这些无序区的尺寸可用一个等效半径 r_0 作近似^[11,12], r_0 与入射中子能量、材料性质等因素有关。由此辐照产生的无序区简化为一个个半径为 r_0 的球体均匀分布在以点缺陷为“背景”的损伤晶体之中,如图 1(a)、(b) 所示。图中, r_1 为无序区周围空间电荷区半径, r_2 为相邻无序区的半间距。对 r_2 有

$$\frac{4\pi r_2^3}{3} = N_d^{-1} \quad (N_d \text{ 为无序区浓度})$$

$$(r_2 \gg r_1)$$

由于无序区中缺陷态的陷阱作用, 大量多数载流子被缺陷俘获而使整个无序区呈荷电态。因其周围多子的耗尽, 形成了一个准 PN 状的空间电荷区, 导致周围能带弯曲 ($\approx kT$)。这样产生了对少数载流子(这里为空穴)为陷阱和对多数载流子(电子)为势垒的一个特定区域。在空间电荷区外 ($r > r_1$) 存在着点缺陷。当注入过剩载流子时, 一部分载流子被点缺陷所复合, 一部分扩散进入空间电荷区, 到达无序区而复合。由于过剩载流子的存在, 无序区中缺陷被载流子占据的状态、能带弯曲高度(即电势高度 V_d) 等亦发生变化, 并建立新的稳定非平衡态, 如图 1(c) 所示。

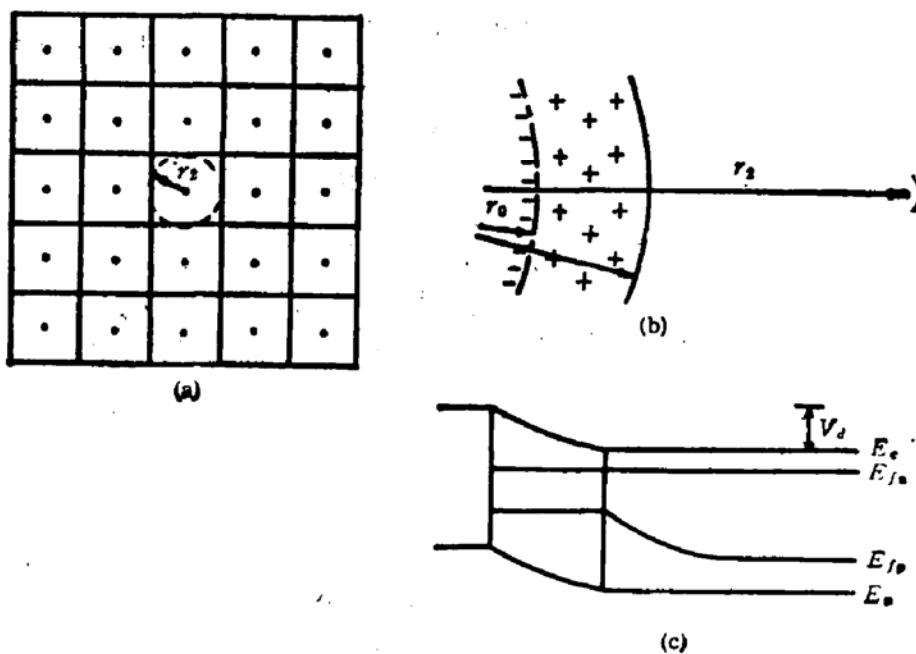


图 1 无序区在辐射损伤晶体中的简图

(a) 辐照晶体中均匀分布的无序区 (b) 无序区剖面示意图 (c) 稳定非平衡态下无序区周围能带的弯曲和准费米能级分布

无序区对载流子的复合机制非常复杂,为使计算简单而有效,必须作一些近似处理。

(1) 对于无序区上载流子的复合作用, SRH 统计复合理论依然有效^[6];

(2) 由于空间电荷区很薄,载流子在该区域中的复合作用可忽略,电荷区两个界面亦近似是平行的。

(3) 在中性区域 ($r_1 < r \leq r_s$), 载流子的复合由点缺陷所决定,并设少子寿命为一已知常数 τ_b .

根据以上分析及物理模型,载流子复合过程可分为中性区中点缺陷复合和无序区内复合二个部分。无序区所复合的载流子主要是中性区扩散进入的载流子,因此无序区的载流子复合率 R 近似等于中性区界面 r_1 处的载流子扩散流 J , 即

$$R = J|_{r=r_1} \quad (1)$$

根据载流子有效寿命定义, τ_{eff} 有

$$\begin{aligned} \tau_{eff}^{-1} &= \tau_b^{-1} + \tau_d^{-1} \\ &= \tau_b^{-1} + J|_{r_1}/P \\ &= \tau_b^{-1} + R/P \end{aligned} \quad (2)$$

式中, τ_b 、 τ_d 分别为中性区中及无序区内少数载流子寿命, 并 $\tau_d \ll \tau_b$; P 为整个单元中的过剩少数载流子数, 有 $P = 4\pi \int_{r_1}^{r_s} \Delta p(r) r^2 dr$. 其中, $\Delta p(r)$ 是中性区少子浓度, 它是距离 r 的函数。

由此可见, 确定中子辐照对少数载流子寿命的影响就是如何从式(2)由 R 和 $\Delta p(r)$ 求得有效寿命 τ_{eff} , 即计算无序区载流子复合率 R 和中性区过剩少数载流子浓度 $\Delta p(r)$.

1. 无序区中载流子复合率 R

在稳定态条件下,对于无序区上净电荷量 Q_d 和空间电荷区所含的总电荷量 Q_s , 根据电中性方程有

$$|Q_d| = |Q_s| \quad (3)$$

由此空间电荷区半径 r_s 和电势高度 V_s 可分别表示为

$$r_s = \left[\frac{3|Q_d|}{4\pi \cdot q \cdot (N_D - N_A)} + r_1 \right]^{1/2} \quad (4)$$

$$V_s = \frac{q \cdot (N_D - N_A) \cdot r_s^2}{3\epsilon_0 \cdot \epsilon_r} \cdot \left[\frac{1}{2} - \frac{3}{2} \left(\frac{r_1}{r_s} \right)^2 + \left(\frac{r_1}{r_s} \right)^3 \right] \quad (5)$$

这里, N_D 和 N_A 分别是掺杂施主和受主杂质浓度, ϵ_0 、 ϵ_r 分别表示真空介电常数和相对介电常数, q 是电子电荷绝对值。

相应地无序区上载流子浓度(多子 $n(r_s)$ 和少子 $p(r_s)$) 可通过 r_1 处的载流子浓度写为

$$\left. \begin{aligned} n(r_s) &= n(r_1) \exp^{-qV_s/kT} = N_e \exp\left(\frac{E_{fn}(r_1) - E_e - qV_s}{kT}\right) \\ p(r_s) &= p(r_1) \exp^{+qV_s/kT} = N_h \exp\left(\frac{E_v - E_{fp}(r_1) + qV_s}{kT}\right) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中, N_e 和 N_h 分别表示导带和价带等效态密度, $E_{fn}(r_1)$ 和 $E_{fp}(r_1)$ 为 r_1 处电子和空穴的准费米能级。

在稳定非平衡态下,电子和空穴的净俘获速率相等($R_n = R_p$),即等于复合速率 R ,在忽略陷阱作用下,对各缺陷态求和

$$\begin{aligned} R &= v_{n,h} \sum_{(i,k)} N_i f_i^{(k)} \left[\sigma_n^{(k)} n(r_0) - \sigma_p^{(k+1)} \cdot \frac{f_{p,i}^{(k+1)}}{f_{n,i}^{(k)}} n_0(r_0) \right] \\ &= v_{p,h} \sum_{(i,k)} N_i f_i^{(k)} \left[\sigma_p^{(k)} p(r_0) - \sigma_n^{(k-1)} \frac{f_{n,i}^{(k-1)}}{f_{p,i}^{(k)}} p_0(r_0) \right] \end{aligned} \quad (7)$$

这里,下标*i*,*k*表示*i*类缺陷处于*k*荷电态。 N_i 为*i*类缺陷在无序区中的总含量, $f_{n,i}^{(k)}$ 、 $f_{p,i}^{(k)}$ 则分别表示*i*类缺陷在平衡或非平衡态时处于*k*态的几率分布数, σ_n 和 σ_p 表示缺陷对电子和空穴的俘获截面, $v_{n,h}$ 为电子或空穴的热运动速度,这里约 $10^7 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$.

缺陷处于某一荷电态的几率分布 $f_i^{(k)}$ 是非常重要的量,根据推广的SRH理论^[13]可表示成:

(a) 对单荷电态缺陷,即(+1,0)或(0,-1)态的缺陷,相应的 $f_i^{(+)}$ 或 $f_i^{(-)}$ 可写为

$$\begin{aligned} f_i^{(+)} &= \frac{\sigma_{ni} n_{ii}(r_0) + \sigma_{pi} p_{ii}(r_0)}{\sigma_{ni}(n(r_0) + n_{ii}(r_0)) + \sigma_{pi}(p(r_0) + p_{ii}(r_0))} \\ \text{或} \quad f_i^{(-)} &= \frac{\sigma_{ni} n(r_0) + \sigma_{pi} p_{ii}(r_0)}{\sigma_{ni}(n(r_0) + n_{ii}(r_0)) + \sigma_{pi}(p(r_0) + p_{ii}(r_0))} \end{aligned} \quad (8-1)$$

其中,

$$n_{ii} = N_i \exp\left(-\frac{E_i - E_H}{kT}\right), \quad p_{ii} = n_i^2 / n_{ii},$$

E_H 为缺陷能级, n_i 为本征载流子浓度.

(b) 多荷电态缺陷.

以双空位缺陷为例,它具有*k*=+1,0,-1,-2四种态,各态的几率分布函数

$$\begin{aligned} f_{p,i}^{(+)} &= \frac{a_p^{(0)} a_p^{(-)} a_p^{(-)}}{A}, \quad f_{p,i}^{(0)} = \frac{a_p^{(+)} a_p^{(-)} a_p^{(-)}}{A} \\ f_{p,i}^{(-)} &= \frac{a_p^{(+)} a_p^{(0)} a_p^{(-)}}{A}, \quad f_{p,i}^{(-2)} = \frac{a_p^{(+)} a_p^{(0)} a_p^{(-)}}{A} \end{aligned} \quad (8-2)$$

其中所引用的系数

$$\begin{aligned} A &= a_p^{(0)} a_p^{(-)} a_p^{(-)} + a_p^{(+)} a_p^{(-)} a_p^{(-)} + a_p^{(+)} a_p^{(0)} a_p^{(-)} + a_p^{(+)} a_p^{(0)} a_p^{(-)} \\ a_n^{(k)} &= \sigma_n^{(k)} n(r_0) + \frac{f_{p,i}^{(k-1)}}{f_{n,i}^{(k)}} \sigma_p^{(k-1)} p_0(r_0) \\ a_p^{(k)} &= \frac{f_{p,i}^{(k+1)}}{f_{n,i}^{(k)}} \sigma_n^{(k+1)} n_0(r_0) + \sigma_p^{(k)} p(r_0) \end{aligned}$$

$f_{n,i}^{(k)}$ 为平衡态中的*k*态几率分布函数.

在以上推导 $f_i^{(k)}$ 过程中,引用了P. Panyatatos^[13]处理位错缺陷态的方法.

获得 $f_i^{(k)}$ 后即可对无序区中各缺陷所带的荷电量 $q_i^{(k)}$ 求和得到无序区上净电荷量 Q_d

$$Q_d = \sum_{(i,k)} N_i f_i^{(k)} q_i^{(k)} \quad (9)$$

对于**a**型材料, $Q_d < 0$.

对以上各表达式进行分析,可看到各式之间是相互联系和制约着的,将无序区内各物

理参数自治地联系着。在文献[6—9]中，是通过假设已知某一参数（如电势高度 V_s ）进行分析和计算，没有对无序区复合过程作系统自治处理。

2. 中性区过剩少数载流子浓度分布 $\Delta p(r)$

在稳定非平衡态下，中性区过剩少数载流子浓度 $\Delta p(r)$ 的状态方程可写成

$$\nabla^2 \Delta p(r) - \frac{\Delta p(r)}{L^2} = -g/D \quad (10)$$

这里， $L = (\tau_b \cdot D)^{1/2}$ 为中性区空穴扩散长度， D 是扩散系数， g 是过剩载流子对产生率。

其相应的边界条件

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\Delta p(r)}{dr} \Big|_{r=r_1} &= 0 \\ -D \cdot \frac{d\Delta p(r)}{dr} \Big|_{r=r_1} &= -i \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

其中， $i = J|_{r_1}/4\pi r_1^2 = R/4\pi r_1^2$ 是 r_1 处扩散空穴流密度。

由式(10)和(11)可解得球坐标下解析表达式

$$\begin{aligned} \Delta p(r) = g\tau_b \cdot & \left\{ 1 - c \frac{r_1}{r} \left[\exp\left(\frac{r-r_2}{L}\right) \right. \right. \\ & \left. \left. + \exp\left(\frac{r_2-r}{L}\right) \left(\frac{r_2-L}{r_2+L} \right) \right] \right\} \end{aligned} \quad (12)$$

系数 c 有

$$c = \left[\frac{i}{D\tau_b g} \right] \cdot \left[\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{L} \right) \exp\left(\frac{r_1-r_2}{L}\right) \right. \\ \left. + \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{L} \right) \exp\left(\frac{r_2-r_1}{L}\right) \left(\frac{r_2-L}{r_2+L} \right) \right]^{-1}$$

将式(7)和(12)代入式(2)，计算得中子辐照，对少数载流子有效寿命 τ_{eff} 的影响。

三、计算结果和讨论

将以上给出的表达式进行数值解获得中子辐照对少数载流子寿命的影响的计算结果。大量文献表明，在无序区内主要的带负荷电缺陷（多子中心）有 A 中心 ($E_c - 0.18\text{eV}$)、E 中心 ($E_c - 0.41\text{eV}$)，及双空位缺陷 ($V_2^+, E_c - 0.24\text{eV}; V_2^-, E_c - 0.39\text{eV}$)；带正荷电态的缺陷（少子中心）有双空位 ($V_2^+, E_c + 0.19\text{eV}$) 及四空位 ($E_c + 0.35\text{eV}$)。载流子复合主要来自于这些缺陷的作用。对于这些缺陷的浓度、能级位置 E_c 和俘获截面

表 1 基本参数

参数	$E_c - E_g$ (eV)	kT (eV)	$N_D - N_A$ (cm ⁻³)	τ_B (s)	D (cm ² s ⁻¹)
	1.1	0.025	1×10^{11}	10^{-4}	8

σ 等参数可由 DLTS、EP 等技术测试获得。在数值计算中, 无序区等效半径 r_0 及无序区浓度 N_d 及半径 r_1 来自文献^[12,15], 计算所用的部分基本数据由表 1 和表 2 给出。

表 2 主要辐照缺陷参数^[13,16]

缺陷能级(eV)	$\sigma_n(\text{cm}^{-3})$	$\sigma_p(\text{cm}^{-3})$
$E_c - 0.18$	1.5×10^{-14}	4.9×10^{-14}
$E_c - 0.24$	3.6×10^{-15}	3.5×10^{-14}
$E_c - 0.39$	2.9×10^{-15}	3×10^{-14}
$E_c - 0.43$	5×10^{-15}	2.7×10^{-13}
$E_p + 0.19$	1×10^{-15}	5.2×10^{-16}
$E_p + 0.35$	1×10^{-14}	2.9×10^{-15}

图 2 给出了少数载流子寿命随过剩载流子浓度的相对变化关系。图中实验数据来自于 J. R. Srour^[17] 对单晶硅在反应堆和中子倍加器上辐照后少子寿命的测量值。由图可见, 少子寿命依据一定的规律随过剩载流子浓度而变化, 并且大约在 $\Delta\bar{\rho}/(N_D - N_A) \approx 1.0$ 处出现极大值。这一变化过程主要由无序区内缺陷态分布等因素决定。计算结果表明, 少子寿命随着无序区浓度 N_d , 即辐照剂量而变化, 但当无序区内各缺陷态相对分布不改变时, 少子寿命随过剩载流子浓度的变化规律是基本一致的, 这与 Srour^[17] 结论相吻。对于不同能量中子 ($E_n > 0.1 \text{ MeV}$) 辐照, 其引入的缺陷态相对分布几乎相同, 因而对于同一种材料, 在反应堆中子或 14 MeV 中子辐照后, 少子寿命随过剩载流子浓度有基本相同的变化关系。

少子寿命随过剩载流子浓度的变化关系同样可由空间电荷区电势高度 V_s 来说明。如图 3 所示。在平衡态下, 电势高度 V_s 处于最大值 V_{sd} , 即能带弯曲最大。 V_s 反映着无序区对中性区少子的俘获能力, V_s 较大时, 无序区形成了对少子一定的吸引力, 使得中性区少子向无序区的扩散能力, 以及无序区对载流子的复合作用均处于较强的状态。随着 V_s 减小, 这种能力随之而削弱。在低过剩载流子浓度下, V_s 仍较大, 少子寿命亦相对较低。由于过剩载流子浓度增加, V_s 逐渐减小, 少子寿命随之增大。当过剩载流子浓度接近和超过平衡态下的多子浓度时, V_s 趋于一定的低值, 此时无序区载流子复合过程接近于点缺陷模型的情况, 少子寿命由 SRH 复合理论所决定, 使寿命随过剩载流子浓度增大而减少。这就导致在过剩载流子浓度变化过程中少子寿命在某一浓度下出现极值。

图 4 显示了在相同缺陷分布条件下, 无序区模型和点缺陷模型分别给出的少子寿命随过剩载流子浓度 $\Delta\bar{\rho}$ 的变化关系。图中, 在低过剩载流子浓度下, 无序区模型给出的少子寿命值小于点缺陷模型近一个量级。由于在无序区模型中能带弯曲增强了缺陷对载流子的复合作用。在低 $\Delta\bar{\rho}$ 下, 其增强效应更为明显。而对点缺陷模型而言不存在这种效应。这说明中子辐照对少子寿命的影响区别于 γ 射线、电子辐照的影响。同样, 在少子寿命

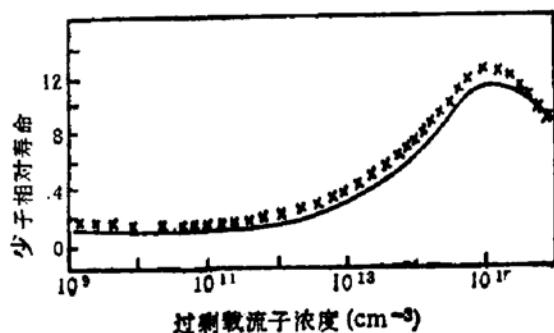


图 2 少数载流子寿命 τ_{eff} 随过剩载流子浓度 $\Delta\bar{\rho}$ 的相对变化关系 \times 实验数据; — 理论结果

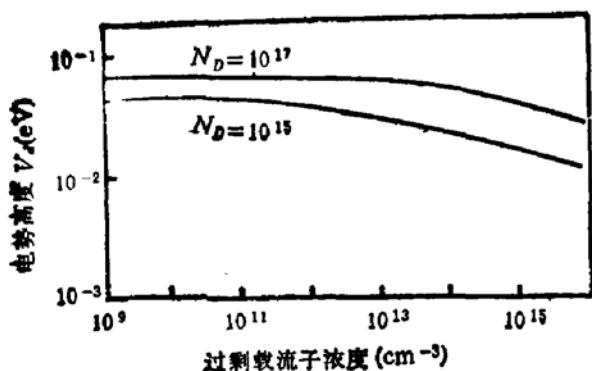


图 3 电势高度 V_d 随过剩载流子浓度的变化

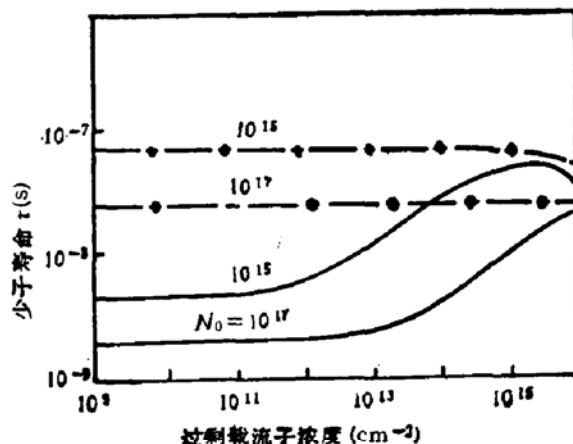


图 4 相同缺陷分布下, 无序区模型和点缺陷模型所分别给出的少子寿命随 Δp 的变化关系。——, 无序区模型; -·-, 点缺陷模型结果

随过剩载流子浓度 Δp 的变化关系上, 两种模型的结果亦不一致。点缺陷模型遵循的是 SRH 统计复合理论; 而在无序区模型中, 载流子复合过程不仅受 SRH 理论的制约, 而且受电势高度 V_d 等参数的影响。

在无序区和点缺陷模型中, 还有一个明显的差别就是少子复合中心的作用。后者少子复合中心对载流子的复合过程影响较小, 计算中一般被忽略; 但在前者中由于电势高度 V_d 取决于无序区内净电荷量 Q_s , 少子复合中心的存在部分中和了多子复合中心所带的电荷量, 改变了 V_d , 从而对无序区载流子复合过程产生着一定的影响。计算表明, 对于不同的少子复合中心浓度, 其寿命有明显差别。由此在无序区模型中必须仔细考虑少子复合中心的影响。

四、总 结

在计算中子辐照对硅少数载流子寿命影响中, 由于根据无序区载流子复合的基本模型, 采用推广的 SRH 统计复合理论近似计算了无序区内各缺陷态分布函数 $f_i^{(k)}$, 从而得到该区内净电荷量 Q_s , 空间电荷区电势高度 V_d 等物理参量, 并与中性区中载流子浓度分布关系相耦合, 得到中子辐照对少子寿命影响的一个自治表达关系。数值模拟结果, 以及与点缺陷模型、实验数据的比较表明, 本文所给出的计算方法较好地处理了中子辐照对半导体硅少数载流子寿命的影响。

参 考 文 献

- [1] J. C. 斯米尔诺夫, 半导体的核反应方法掺杂, 王正元, 杜光庭译, 科学出版社, 北京(1986).
- [2] B. R. Gossior, *J. Appl. Phys.*, 30, 1214(1959).
- [3] V. A. J. van Lint, R. E. Leadon and J. F. Colwell, *IEEE Trans. Nuclear Science*, NS-19, 181(1972).
- [4] R. F. Konoleva, V. L. Litvinov and N. A. Ukhin, *Characteristics of Radiation Damage of Semiconductors by High-Energy Particles*, [in Russian] Atomizdat, Moscow (1973).
- [5] V. A. J. van Lint et al., *Mechanisms of Radiation Effects in Electronic Materials*, Vol. 1, John Wiley &

- Sons Inc., New York (1980).
- [6] O. L. Jr. Curtis and J. R. Srou, *IEEE Trans. Nuclear Science*, **NS-20**, 196(1973).
- [7] R. F. Konopleva and V. A. Yuferev, *Fiz. Tekh. Poluprovodn.*, **9**, 413(1975).
- [8] P. F. Lugakow and V. V. Shusha, *Fiz. Tekh. Poluprovodn.*, **15**, 1452(1981).
- [9] V. A. Artem'ev and V. V. Mikhnovich, *Fiz. Tekh. Poluprovodn.*, **21**, 537(1987).
- [10] W. Shockley and J. W. T. Read, *Phys. Rev.*, **87**, 835(1952).
- [11] V. A. J. van Lint and R. E. Leadon, *Lattice Defects in Semiconductors* 1974, Ed. by A. Seeger, Institute of Physics, Conf. Series No. 23, p. 227(1974).
- [12] A. P. Dolgolenko and I. I. Fishchuk, in *Defects and Radiation Defects in Semiconductors*, Ed. by J. H. Albany, Institute of Physics, Conf. Series No. 46, p. 287(1978).
- [13] P. Panytatos and H. C. Card, *IEEE Trans. Electron Device*, **EDL-1**, 263(1980).
- [14] N. S. Mineav, N. A. Pokionskii, V. F. Stelmakh and V. D. Tkachey, *Fiz. Tekh. Poluprovodn.*, **8**, 1074 (1974).
- [15] J. M. Meese, *Defects in Semiconductor*, Ed. by J. Narayan, Elsevier North Holland, New York, p. 225 (1980).
- [16] P. V. Kuchinskij and V. A. Lomako, *Sov. Stat. Electr.*, **29**, 1041(1986).
- [17] J. R. Srou, *IEEE Trans. Nuclear Science*, **NS-20**, 190(1973).

Influence of Disordered Regions on Minority Carrier Lifetime in Neutron Irradiated Si

Shi Yi, Wu Fengmei, Shen Dexun, Chen Kaijia

(Department of Physics, Nanjing University, Nanjing)

Wang Changhe

(Hebei Semiconductor Research Institute, Hebei)

Abstract

Disordered regions produced by neutron irradiation are highly effective on the degradation of minority carrier lifetime in semiconductors. According to the characteristics of disordered regions, the carrier recombination process in silicon involving the regions is analysed. A self-consistent computation model is presented. The calculated results of the dependences of minority lifetime degradation on the defect distribution, doped concentration and excess carrier density have been obtained. Finally, the results of the disordered-regions model are compared with that of the point defect model, and with the measurement data.

KEY WORDS: Silicon, Minority carriers lifetime, Neutron irradiation, Disordered regions