

重掺杂发射区中禁带宽度和少子复合寿命的确定方法*

郑 茫 冯耀兰

(南京工学院微电子中心, 南京)

摘要 禁带宽度和少子复合寿命是硅晶体管发射区中重要的物理参数。本文利用 $p-n$ 结反向扩散电流的温度特性和借助于线性外推法, 提出了一种确定绝对零度时禁带宽度的新方法。由于发射区重掺杂, 本文考虑了载流子的费米-狄拉克统计分布。提出了确定发射区中少子复合寿命的方法。该方法简便实用。

关键词 重掺杂发射区; 禁带宽度; 少子复合寿命

1. 引言

禁带宽度和少子复合寿命是晶体管发射区中的重要物理参量。为了精确地预示器件的电特性和对它们有一个较深入的理解, 测量重掺杂发射区中禁带宽度和少子复合寿命的工作变得十分重要。

目前, 有关禁带宽度^[1,2]和少子复合寿命^[3,4]的测量方法已开展了一些工作。然而, 确定重掺杂发射区中禁带宽度和少子复合寿命的方法还不多。本文提出了一种电学测量方法, 测试简便、实用。

2. 理论分析

(1) 发射区中禁带宽度的测量原理 对于硅晶体管来说, 集电极电流 I_C 可表示为:

$$I_C = I_0 \exp(qV_{BE}/kT) \quad (1)$$

其中:

$$I_0 = A_E \frac{kT \mu_B n_{iB}^2}{N_B W_B} \quad (2)$$

(2) 式中 A_E 表示发射区面积, μ_B 表示基区少子迁移率, n_{iB} 表示基区本征载流子浓度, N_B 与 W_B 则为基区掺杂浓度和基区宽度。

对于基-射结 $p-n$ 结, 将其作为一独立二极管, 并在集电极上加一定的反偏电压, 则其电流电压特性符合肖克莱方程, 在小注入区可表示为:

$$I_{BE} = I_{BE0} \exp(qV_{BE}/kT) \quad (3)$$

其中反向扩散电流 I_{BE0} 可表示为以下二式, 若 $L_E \leq W_E$, 则为:

* 1987 年 7 月 17 日收到, 1988 年 3 月 31 日修改定稿。

$$I_{BE0} = A_E \frac{kT \mu_E n_{iE}^2}{N_{\text{eff}} L_E} + A_E \frac{kT \mu_B n_{iB}^2}{N_B W_B} \quad (4)$$

若 $L_E > W_E$, 则为:

$$I_{BE0} = A_E \frac{kT \mu_E n_{iE}^2}{N_{\text{eff}} W_E} + A_E \frac{kT \mu_B n_{iB}^2}{N_B W_B} \quad (5)$$

(4)和(5)式中 μ_E , n_{iE} , N_{eff} , L_E 和 W_E 分别为发射区中少子迁移率、本征载流子浓度、有效多子浓度、少子扩散长度和发射区宽度.

由(4),(5)和(2)式,可得反向扩散电流中发射区部分 I_{E0} 的表示式:

$$I_{E0} = I_{BE0} - I_0 = A_E \frac{kT \mu_E n_{iE}^2}{N_{\text{eff}} L_E} \quad (6)$$

和

$$I_{E0} = A_E \frac{kT \mu_E n_{iE}^2}{N_{\text{eff}} W_E} \quad (7)$$

本征载流子浓度 n_{iE} 可表示为:

$$n_{iE}^2 = C_0 T^3 \exp(-E_{gE0}/kT) \quad (8)$$

其中 E_{gE0} 表示发射区中禁带宽度, C_0 是一常数, 其值为 $9.61 \times 10^{32} \text{ cm}^{-6} \text{ K}^{-3}$. 若用 E_{gI0} 表示本征硅中禁带宽度, ΔE_{gE0} 表示发射区中禁带宽度变窄量, 则有:

$$E_{gE0} = E_{gI0} - \Delta E_{gE0} = 1.206 - \Delta E_{gE0} \quad (9)$$

重掺杂发射区中有效多子浓度 N_{eff} 可表示为:

$$N_{\text{eff}} = N_E \exp(\eta_c) / F_{1/2}(\eta_c) \quad (10)$$

(10)式中 N_E 为发射区中掺杂浓度, $F_{1/2}$ 为费米积分, $\eta_c = (E_F - E_c)/kT$.

由 $L_E = \sqrt{D_E \tau_E}$, $D_E = kT \mu_E / q$, 则有:

$$L_E = \sqrt{kT \mu_E \tau_E / q} \quad (11)$$

(11)式中 D_E 和 τ_E 是发射区中少子扩散系数和少子复合寿命.

由于发射区重掺杂, 其 μ_E 基本上与温度无关, τ_E 也基本上与温度无关^[5].

将(8),(9),(10)和(11)式都相应代入(6)和(7)式可得:

$$I_{E0} = A_E \frac{(qkT \mu_E)^{1/2} C_0 T^3 \exp(-E_{gI0}/kT) \exp(\Delta E_{gE0}/kT)}{N_E \tau_E^{1/2} \exp(\eta_c) / F_{1/2}(\eta_c)} \quad (12)$$

和

$$I_{E0} = A_E \frac{k \mu_E C_0 T^3 \exp(-E_{gI0}/kT) \exp(\Delta E_{gE0}/kT)}{N_E W_E \exp(\eta_c) / F_{1/2}(\eta_c)} \quad (13)$$

将与温度无关的量都算入常数项, 整理取对数后则可表示为:

$$\ln \frac{I_{E0}}{T^{7/2} \exp(-\eta_c) F_{1/2}(\eta_c)} = C_1 - \frac{E_{gI0} - \Delta E_{gE0}}{kT} \quad (14)$$

和

$$\ln \frac{I_{E0}}{T^4 \exp(-\eta_c) F_{1/2}(\eta_c)} = C_2 - \frac{E_{gI0} - \Delta E_{gE0}}{kT} \quad (15)$$

其中 C_1 和 C_2 都是常数项. 作出 $\ln [I_{E0}/T^{7/2} \exp(-\eta_c) \cdot F_{1/2}(\eta_c)]$ 和 $\ln [I_{E0}/T^4 \exp(-\eta_c)$

$F_{1/2}(\eta_c)]$ 与 $1/T$ 的关系曲线,用最小二乘法模拟求得斜率为 m , 则有:

$$-\frac{E_{g10} - \Delta E_{gE0}}{k} = m \quad (16)$$

由此可得发射区中禁带变容量和禁带宽度为:

$$\Delta E_{gE0} = E_{g10} + km \quad (17)$$

$$E_{gE0} = -km \quad (18)$$

(2) 发射区中少子复合寿命的测量原理 由式(6)可得:

$$L_E = A_E \frac{kT \mu_E n_{iE}'}{N_{Eeff} I_{E0}} \quad (19)$$

(19)式中:若已知一定的温度和掺杂浓度,则 A_E , k , T , n_{iE}' , N_{Eeff} 和 I_{E0} 都是已知的和可求得的量。

文献[6]给出了少子迁移率与杂质浓度和温度关系的表达式, N 型材料中空穴迁移率表示如下:

$$\mu_E = 54.3 T_n^{-0.57} + \frac{1.36 \times 10^8 T^{-2.23}}{1 + [N / (2.35 \times 10^{17} T_n^{2.4})] 0.88 T_n^{-0.146}} \quad (20)$$

(20)式中 $T_n = T/300$.

所以,若测出 I_{E0} 的值,则可求得少子扩散长度 L_E 的值. 由(11)式可得:

$$\tau_E = \frac{q L_E^2}{kT \mu_E} \quad (21)$$

由(21)式就可获得少子复合寿命 τ_E 的值.

3. 实验结果和讨论

(1) 发射区中禁带宽度的确定 由(1)式可得:

$$\ln I_C = \ln I_0 + \frac{q}{kT} V_{BE}$$

测量不同温度下 I_C 与 V_{BE} 的关系,作出了 $\ln I_C$ 与 V_{BE} 的关系曲线,由最小二乘法求曲线的截距确定 $\ln I_0$ 的值,便可获得 I_0 的值,数据如表 1 所示:

表 1 不同温度下的 I_0 的值

$T(K)$	298	323	348	373	398
$I_0(A)$	4.069×10^{-15}	4.068×10^{-15}	2.184×10^{-12}	7.945×10^{-11}	6.238×10^{-10}

由(3)式可得:

$$\ln I_{BE} = \ln I_{BE0} + \frac{q}{kT} V_{BE}$$

测量不同温度下基射极 $p-n$ 结的电流 I_{BE} 与电压 V_{BE} 的关系,其中可确定小注入区. 在小注入区内,作出 $\ln I_{BE}$ 与 V_{BE} 的关系曲线,由最小二乘法求曲线的截距确定不同温度下的 $\ln I_{BE0}$ 的值,便可获得 I_{BE0} 的值,数据如表 2 所示:

根据(6)式可获得不同温度下的 I_{E0} 的值,数据如表 3 所示:

本文所测晶体管的发射区掺杂浓度 $N_E = 1 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$. 而 η_c 一般由 $N_E = N_C \times$

表 2 不同温度下的 I_{BE0} 的值

$T(K)$	298	323	348	373	398
$I_{BE0}(A)$	9.41×10^{15}	1×10^{-12}	8.77×10^{-12}	1.286×10^{-10}	1.49×10^{-9}

表 3 不同温度下的 I_{E0} 的值

$T(K)$	298	323	348	373	398
$I_{E0}(A)$	5.34×10^{-15}	5.93×10^{-13}	6.95×10^{-12}	5.11×10^{-11}	8.7×10^{-10}

$\times F_{1/2}(\eta_c)$ 方程确定。本文中 $\exp(-\eta_c) \cdot F_{1/2}(\eta_c)$ 与温度 T 的关系经计算近似为一直线,可表示为:

$$\exp(-\eta_c)F_{1/2}(\eta_c) = 1.375 \times 10^{-3}T + 0.455$$

由此可确定各个温度点下的 $\exp(-\eta_c)F_{1/2}(\eta_c)$ 的值。还可求出 $\ln[I_{E0}/T^{7/2}\exp(-\eta_c) \times F_{1/2}(\eta_c)]$ 与 $1/T$ 的关系,数据如表 4 所示:

表 4 $\ln[I_{E0}/T^{7/2}\exp(-\eta_c)F_{1/2}(\eta_c)]$ 与 $1/T$ 关系

$1/T (1/K)$	3.356×10^{-3}	3.096×10^{-3}	2.874×10^{-3}	2.681×10^{-3}	2.513×10^{-3}
$\ln[I_{E0}/T^{7/2}\exp(-\eta_c)F_{1/2}(\eta_c)]$	-52.658	-48.269	-46.106	-44.39	-41.813

由最小二乘法可求得斜率为 $m = -1.2249$ 。根据(17)和(18)式可得:

$$\Delta E_{gE0} = E_{gE0} + km = 0.1495(\text{eV})$$

$$E_{gE0} = 1.0565(\text{eV})$$

文献[2]给出了如下的一个表达式:

$$\Delta E_{g0} = 0.148 \left[\frac{N(x)}{10^{20}} \right]^{0.325} \quad (22)$$

$N_E = 1 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$, 由(22)式可得: $\Delta E_{g0} = 0.148 \text{eV}$, 所得结果与文献[2]的结果相接近。

对于发射区,由于杂质浓度高,禁带变窄效应较为严重,所以其禁带变窄量也较大一些。

(2) 发射区中少子复合寿命的确定 由 $N_E = 1 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$, $T = 298 \text{K}$, 可得: $\mu_E = 55.6 \text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$, 已知 $A_E = 8 \times 10^{-4} \text{cm}^{-2}$, 由(19)式可得: $L_E = 2.1 \times 10^{-5} \text{cm}$, 则由(21)式可得少子复合寿命 τ_E 的值: $\tau_E = 3.1 \times 10^{-10} \text{s}$ 。

重掺杂发射区中主要的复合机理是带与带之间的俄歇复合过程,空穴寿命可写为:

$$\tau_E = \frac{1}{C_P N_E^2} \quad (23)$$

文献[7]给出: $C_P = 2.8 \times 10^{-31} \text{cm}^6/\text{s}$, 所以由(23)式可得: $\tau_E = 3.57 \times 10^{-10} \text{s}$ 。由此可见,本方法是适用的。

4. 结论

实验结果表明:本文所提出的确定硅晶体管发射区中禁带宽度和少子复合寿命的方法是有效的和实用的。这有助于更好地分析器件的电特性,加深对器件物理细节的了解。

参 考 文 献

- [1] J. W. Slotboom, et al., *Solid-State Electron.*, **19**(1976), 857—862.
- [2] G. E. Possin, et al., *IEEE Trans. on ED*, **ED-27**(1980), 983—990.
- [3] N. D. Arora, et al., *Appl. Phys. Lett.*, **37**(1980), 325—327.
- [4] D. J. Roulston, et al., *IEEE Trans. on ED*, **ED-29**(1982), 284—291.
- [5] C. H. Henry, et al., *Phys. Rev.*, **B15**(1977), 989—1016.
- [6] N. D. Arora, et al., *IEEE Trans. on ED*, **ED-29**(1982), 292—295.
- [7] J. Dziemior, et al., *Appl. Phys. Lett.*, **31**(1977), 346—350.

A NEW METHOD FOR DETERMINATION OF ENERGY GAP AND MINORITY-CARRIER RECOMBINATION LIFETIME IN HIGHLY DOPED EMITTER

Zhen Jiang Feng Yaolan

(Microelectronics Center of Nanjing Institute of Technology, Nanjing)

Abstract Energy gap and minority-carrier recombination lifetime are important physical parameters in the emitter of silicon transistor. Using temperature characteristics obtained from the reverse diffusion current of $p-n$ junction and by means of linear extrapolation, a new method for determination of the energy gap at 0K is presented. Based on the carrier Fermi-Dirac statistic distribution, a method for determination of minority-carrier recombination lifetime in highly doped emitter is presented. This test method is simple and can be used in practice.

Key words

lifetime

Highly doped emitter; Energy gap; Minority-carrier recombination li-