

多能量离子注入的研究

王德宁 王渭源

(中国科学院上海冶金研究所)

提 要

本文提出了一种新的多能量离子注入的计算方法——“等效面积法”。应用这一方法可按器件的特殊要求,任意设计各种浓度分布。

本文应用这一方法,设计和计算了具有矩形杂质分布的 Si-RAPD 器件,具有低—高一低特殊分布的 Si-RAPD 和具有“马头”型结构的 GaAs M-ESPET 器件,IMPATT 器件,均得到了较为满意的结果。还对用这一方法设计新型器件的前景作了预测。最后把本文的计算结果与本纳德(R. H. Benhard) (1977) 的实测值作了比较,结果是令人满意的。

一、引 言

随着半导体工艺和器件的迅速发展,各种特殊类型的器件相继问世。它们要求特殊的电场分布,如 IMPATT 器件,要求平坦的电场分布^[1],拉通型硅雪崩光电二极管要求低—高—低^[2]或矩形电场分布^[3],而场效应晶体管则要求“马头”型的电场分布^[4]等等。但要满足上述要求,采用扩散、外延或单能量离子注入方法一般是不行的。本文提出了“等效面积法”,利用这一方法按预先设定的电场要求,可方便地计算出多能量注入的浓度和能量分布,原则上可满足任意设定的“面积”要求。这无疑对进一步提高器件的质量和发新型器件是有益的。

二、多能量注入的“等效面积法”

器件的电场分布按文献[2]有下列通式:

$$E(x) = \frac{q}{\epsilon \epsilon_0} \int_0^x N(x) dx, \quad (1)$$

这里 $N(x)$ 是器件的载流子分布, q 为电子电荷, ϵ 和 ϵ_0 分别是材料的和真空的介电常数。用通常的扩散方法,单能量离子注入只能得到余误差或高斯浓度分布,不可能得到任意分布。文献[5]报道的多能量注入可得到任意分布,但通常只能按照一定的经验来设计,往往带有一定的盲目性。

如果预先设定的电场分布(即(1)式所示的面积)为

$$E(x) = F_B(x), \quad (2)$$

并令多能量注入电场面积的通式为

$$E(x) = \frac{q}{\varepsilon \varepsilon_0} \left[\sum_i (N_i \Delta R_{p_i}) \int_{a_i}^{b_i} \exp - \frac{1}{2} X_i^2 dX_i - C_B x \right], \quad (3)$$

这里 $X_i = (R_{p_i} - x)/\Delta R_{p_i}$, N_i , R_{p_i} , ΔR_{p_i} ^[6] 分别为各注入能量的峰值浓度, 投影射程及其标准偏差, C_B 为衬底浓度。

调节各注入能量和剂量, 使 (3) 式的 $E(x)$ 逼近 $F_B(x)$, 这样, 注入能量和剂量分布即可达预定要求, 而满足各种特殊要求的电场设计。我们称此方法为“等效面积法”。

这里以三能量注入为例 (见图 1, 2) 来说明如何实现矩形电场分布的设计。图中 C_B 为衬底浓度, C_A 为矩形顶的浓度, a_1, b_1, a_2, b_2 和 a_3, b_3 分别为能量 1, 2, 3 的高斯分布与 C_B 的交点, N_x 为可调节的能量 2 的峰值浓度。由图可见, 各能量下的面积有部分相互重叠, 计算时必须相加。设矩形电场的目标分布

$$F_B(x) = b_3(C_A - C_B) \frac{q}{\varepsilon \varepsilon_0}, \quad (4)$$

则按 (3) 式, 三能量注入电场面积

$$E(x) = \frac{q}{\varepsilon \varepsilon_0} \left[N_{p_1} \Delta R_{p_1} \int_{a_1}^{b_1} \exp - \frac{1}{2} X_1^2 dX_1 + N_x \Delta R_{p_2} \int_{a_2}^{b_2} \exp - \frac{1}{2} X_2^2 dX_2 + N_{p_3} \Delta R_{p_3} \int_{a_3}^{b_3} \exp - \frac{1}{2} X_3^2 dX_3 - b_3 C_B \right]. \quad (5)$$

若先假定 $N(x) = C_A - N_p \exp - \frac{1}{2} X_1^2 - N_{p_3} \exp - \frac{1}{2} X_3^2$ 为初值, 代入 (5) 式得 $E(x)$, 同时可得相对误差 $\Delta = (F_B(x) - E(x))/F_B(x)$, 不断调节 $N(x)$, 直至 Δ 为最小, Δ 的绝对值不大于 30%, 就可满足要求。

(5) 式中的 a_i 和 b_i 分别为

$$\begin{aligned} a_i &= R_{p_i} - \Delta R_{p_i} \sqrt{\left[-2 \ln \frac{C_B}{N_i} \right]}; \\ b_i &= R_{p_i} + \Delta R_{p_i} \sqrt{\left[-2 \ln \frac{C_B}{N_i} \right]}. \end{aligned} \quad (6)$$

一旦得到最佳分布, 就可按下式求 $N(x) - x$ 分布

$$\begin{aligned} N(x) &= \sum_i \left[N_{p_i} \exp - \frac{1}{2} \left(\frac{R_{p_i} - x}{\Delta R_{p_i}} \right)^2 + C_B \right]. \end{aligned} \quad (7)$$

如果 b_i 值很大, 则三注入分布不能满足要求, 可用相同方法求五注入、七注入或更多注入的分布, 而达到预定要求。

三、具体应用

1. 拉通型硅雪崩二极管^[3] (Si-RAPD) 和低-高-低结构的 Si-RAPD Si-RAPD—

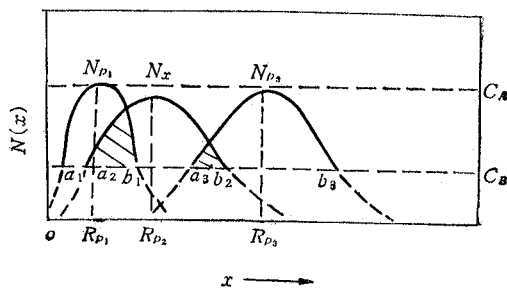


图 1 三能量注入示意图

一般为 $n^+-p-\pi-p^+$ 结构。理想的分布如图 2 所示。作用区 p 区(注入 B^+) 一般希望有矩形分布, $E(x)$ 约为 $3 \times 10^5 \text{V/cm}$, 才能实现拉通。单注入的能量分布呈高斯型分布, 这不仅使电场分布不均匀, 而且使理论分析复杂化。文献 [3] 用矩形电场来近似高斯分布, 这显然不够准确, 但可简单明了地得到拉通条件。一旦得到真正的矩形分布, 则可准确地估算拉通条件下的理想电场。文献 [2] 指出, 矩形电场的噪声最小(该文中的类型 A), 且在平坦分布区, 倍增几乎不随偏压增高而增大(即拉通)。这给应用带来很大方便。我们按 (4)~(7) 式进行了设计, 采用五注入, 结果如图 3 所示。先固定 1, 3, 5 注入能量和剂量, 按预定电场 $3 \times 10^5 \text{V/cm}$ 为矩形目标面积, C_A 为 $1.5 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$, 则由能量 1, 3 决定能量 2 和 N_{x_2} , 由能量 3, 5 决定能量 4 和 N_{x_4} 。计算结果表明, 能量分布为 30, 60, 150, 250 和 420 keV, 峰值浓度分别为 1×10^{18} , 4.54×10^{15} , 1.5×10^{16} , 1.4×10^{16} , $1.5 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 。由图 3 可见, 确实可得到一个近似的矩形面积分布, 可满足设计要求。若用 420keV 的单注入(图中的一·一线), 则形成极不均匀分布。

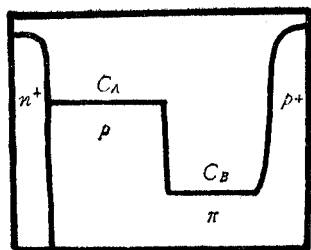
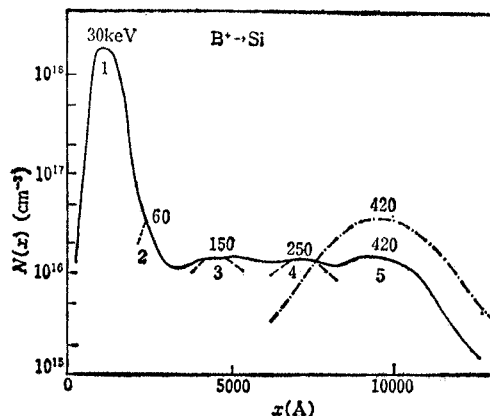


图 2 Si-RAPD 的理想电场分布图

图 3 $n^+-p-\pi-p^+$ Si-RAPD 多能量注入分布图

为了更进一步改善 Si-RAPD 的性能, 文献 [2] 提出了低-高-低结构的 Si-RAPD。这类器件无论在击穿电压、倍增噪声、温度系数, 还是在响应速度、结电容等指标方面均优于前一种 Si-RAPD。文献 [2, 3] 为得到这样的结构, 采用了高纯外延材料 ($5 \times 10^{12} - 1 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$)。这样高的纯度不易达到。我们计算了能量注入, 结果示于图 4。在 $C_B = 5 \times 10^{14}$ 的条件下, 三注入能量为 600, 780 和 1000keV, 三峰值浓度为 1×10^{16} , 9×10^{15} , $1 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$, 可得 10000—20000Å 的平坦区, 两边形成两个 π 区, 成为一个典型的低-高-低结构。

2. IMPATT 二极管^[1] IMPATT 器件是 p^+nin^+ 结构。在 p^+n 结上加反偏压, 将发生雪崩击穿, 产生大量电子-空穴对, 同时电子进入 i 漂移区。由于电子通过漂移区需一定的渡越时间, 这就要求把 i 区的厚度和杂质浓度分别控制在 $0.4 \mu\text{m}$ 和一个均匀的杂质分布区(如图 5 所示), 才能使外电路上的电流与电压之间有近于 π 的位相延迟, 从而得到负阻特性。采用图 5 所示的注入分布, 即分别注入 20, 96, 165, 275keV 四个能量, 对应的峰值浓度分别为 1.9×10^{18} , 1.3×10^{17} , 1.3×10^{17} , $1.4 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$, 所得厚度为 $0.4 - 0.5 \mu\text{m}$, 浓度分布十分平坦。按文献 [1] 可得输出功率为 12—14% 的双漂移 IMPATT

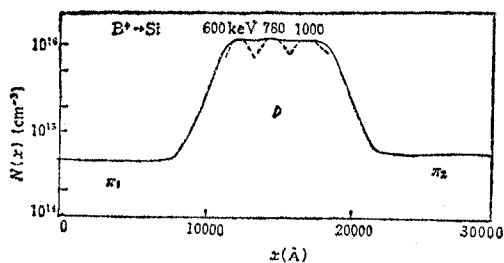


图4 低-高-低结构 Si-RAPD 注入分布图

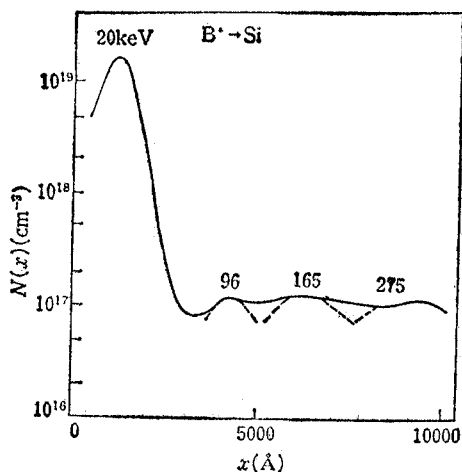
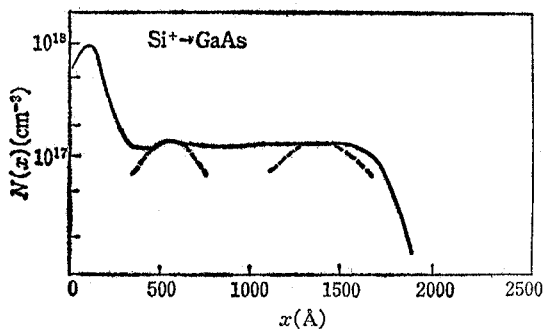


图5 IMPATT 器件多能量注入分布图

二极管。

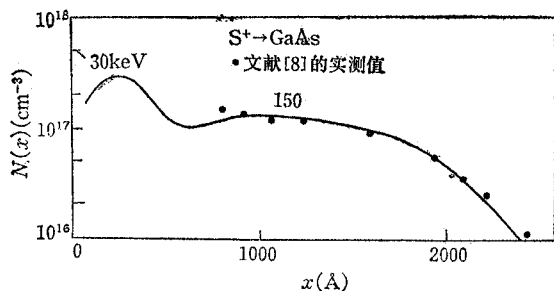
3. GaAs-MESFET 器件

文献[7]详细地叙述了全离子注入平面 GaAs-MESFET 器件的制造工艺和特性。结果指出要得到良好的特性,必须在高阻 GaAs 衬底上用离子注入形成一个 $2000\text{\AA}$ 的平坦杂质分布的薄层,还必须用一个高剂量注入制作欧姆接触层,使呈“马头”型分布。若采用单能量注入就达不到这个要求。本文分别对 $\text{Si}^+ \rightarrow \text{GaAs}$ 多能量注入进行了计算(图6)。由图可见在 $500\text{\AA}$ 范围内是一个高浓度区,有利于形成欧姆接触;而在 $500-2000\text{\AA}$ 范围内是一个平坦的有源区。 Si 较易激活,又较稳定,故一般采用 Si^+ 离子注入。

图6 $\text{Si}^+ \rightarrow \text{GaAs}$ 多能量分布图

四、结果和讨论

为了验证本文计算方法的准确性,对文献[8]给出的 $\text{Si}^+ \rightarrow \text{GaAs}$ 多能量注入的实测

图7 $\text{Si}^+ \rightarrow \text{GaAs}$ 多能量注入实测值与计算值的比较

值和本文的计算值作了比较,两者相当符合(图 7)。文献 [7] 也对 $\text{Si}^+ \rightarrow \text{GaAs}$ 多能量注入的实测值和计算值作了比较,基本上也相符合。均说明本文应用的“等效面积法”是可用的。

本文的计算结果表明,无论对矩形面积、“马头”型面积、还是低-高-低结构,均能应用“等效面积法”来进行设计。原则上,能设计任意形状的面积分布以满足各类器件的特殊需要。在外延生长的 GaAsP 中注入 Zn 时,如用多能量注入就可精确控制结深和杂质分布,从而有可能提高发光效率两倍,甚至更高。在多元系 $\text{Ga}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ 中大剂量注入 Al^+ 和 As^+ , 改变其 x 值,可以制造超薄层异质结器件。这些都必须考虑应用多能量注入技术。但难度很大,有待进一步探索。

本文在计算 (3) 式的积分时,采用了变步长的辛普生 (Simpson) 方法,相对误差可控制在 10^{-7} , 这样的精度在计算中是足够了,而且计算速度也不太慢,符合本方法的要求。

参 考 文 献

- [1] 罗晋生, 离子注入物理, 1979, p. 522.
- [2] H. Kanbe and T. Kimura, *IEEE Trans. on ED*, **ED-23**(1976), 1337.
- [3] T. Kaneda, et al., *J. Appl. Phys.*, **47**(1976), 3135.
- [4] 王渭源等, 半导体学报, **3**(1982), 493.
- [5] H. Mish, et al., *Fujitsu Sci. and Tech. J.*, **11**(1975)4, 113.
- [6] 王德宁等, 物理学报, **29**(1980), 1452.
- [7] 王渭源等, 科技通讯, 1982年, 第3期, 第90页.
- [8] R. H. Benhard, *Solid-State Electron.*, **20**(1977)4, 291.

THE INVESTIGATION OF MULTI-ENERGY IMPLANTATION

Wang Dening, Wang Weiyuan

(Shanghai Institute of Metallurgy, Academia Sinica)

In this paper, a new calculation method of multi-energy implantation i.e., “equivalent area method” has been proposed. According to the requirement for designing the specific device, a variety of concentration and implantation energy profile which can be arbitrarily supposed may be obtained by this method. Hence, it is possible to make the thin layer device which has a plane concentration profile.

Using this method, the Si-RAPD device which has a rectangular on low-high-low concentration profile and the GaAs-MESFET or Si-IMPATT device which has a “horse-head” shape concentration profile have been designed and calculated. The calculated results are very satisfying. The prospect of the use of designing new-type device is predicted. The calculated results in this paper coincide with the experimental ones given by R. H. Benhard (1977).