

达通型硅雪崩光电二极管结参数与倍增特性的计算

文雪冬 钟泽祥

(西南技术物理研究所, 成都, 610041)

摘要: 本文提出了设计达通型硅雪崩光电二极管的分区计算模型。给出了雪崩区参数和倍增特性的计算结果。

The computation of junction parameters and multiplication characteristic of reach-through avalanche photodiode

Wen Xuedong, Zhong Zexiang

(Southwest Institute of Technical Physics)

Abstract: The purpose of this paper is to introduce a dividing region computation model for designing reach-through avalanche photodiode (RAPD). The computed results of the junction parameters and multiplication characteristics of avalanche-region of RAPD are presented.

一、引言

$n^+p^-xp^+$ 达通型结构在最大可能程度上集中了高速、高增益、低噪声、增益随偏压变化平缓及在较低偏压下对 $1.06\mu\text{m}$ 光有较高量子效率等优点。它不仅是 $0.4\sim 1.1\mu\text{m}$ 波段的优良的激光探测器, 而且亦适合于探测低能 x 射线。由于其结构合理, 应用广泛, 因而获得了极大重视。自从 Ruegg^[1] 首次提出这一概念后, 许多研究工作者根据不同的工艺手段相继提出了许多不同实验结构。这些结构大致可分为三类: 一类是离子注入加外延形成的高低结构; 一类是外延工艺形成的阶梯形结构; 第三类则为双扩散型缓变结构^[2]。

本文仅对双扩散型缓变结构的倍增特性进行分析计算, 并试图提供一组供设计这类器件的结参数的计算曲线。我们首先介绍计算模型, 然后介绍计算结果及结果应用。

二、分区计算模型

双扩散 $n^+p^-xp^+$ 硅达通型雪崩光电二极管杂质分布如图 1a 所示。随着偏压的变化, 体内电场分布及变化过程如图 1b 所示。

图 1b 中线 b 表示在某一偏压下, 正好耗尽 p^- 区, 即耗尽区右边界与高低结 x_p 重合, 我们在本文中定义这时为“达通”, 相应电压为达通电压 V_R , 其耗尽区左边界为 x_n 。达通后, 随着偏压的增加, 雪崩区上电场均匀增加。对于设计合理的达通型器件, 直到雪崩击穿, 耗尽区左边界 x_n 向左的继续扩展量可略去。耗尽区右边界则向 π 区迅速扩展达到 p^+ 区欧姆接触层, 如图 1b 中线 d 所示状态。这一状态便是 Ruegg 提出的达通概念, 如果 π 区是理想的本征材料, 则本文数学处理所定义的达通点与原始概念的达通点是完全一致的。

描述雪崩倍增特性的主要参量如电场强度、击穿电压、倍增因子随偏压的变化及结构参数对倍增特性的影响等都要通过电离积分计算确定。对于图 1 所示结构, x 轴原点选在表面, 则

电子和空穴倍增因子 M_e, M_h 由下式给出:

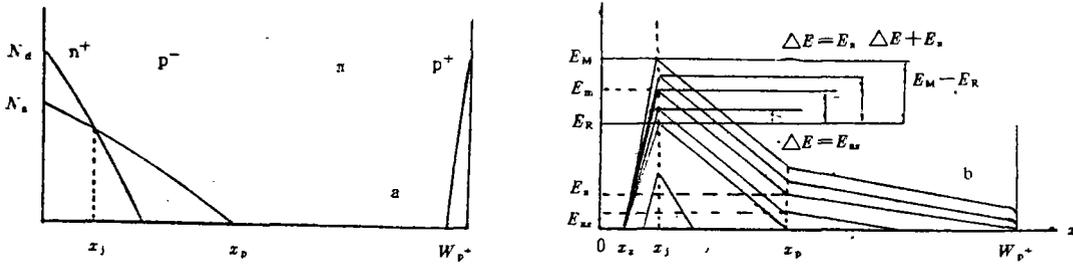


Fig. 1 Section of the RAPD with definition for computation

a—impurity distribution b—electric field profile at different reverse bias

$$1 - \frac{1}{M_e} = \int_{x_s}^W \alpha \exp\left[-\int_x^W (\alpha - \beta) dx'\right] dx = L_e \quad (1)$$

$$1 - \frac{1}{M_h} = \int_{x_s}^W \beta \exp\left[-\int_x^W (\beta - \alpha) dx'\right] dx = L_h \quad (2)$$

式中, L_e, L_h 分别为电子、空穴电离积分值; W 为耗尽区右边界; α, β 则是电子、空穴电离率, 它是电场的函数, 即杂质分布的函数。它包含了 N_a (施主表面浓度)、 L_d (施主扩散长度)、 N_s (π 区杂质浓度)、 W_s (x_s 到 p^+ 结的距离) 等参量。当我们进行参数设计时, 应将各量代入 (1) 式反复计算比较, 然后选择合理参数。显然, 这一计算是繁杂的, 而且结果缺少普适性。那么我们可否将计算予以简化, 而所得结果又有一定的普适性呢? 我们下面来分析这一点。

设计合理的达通型器件, 达通时倍增达到 10 左右时为合适, 或者说要求电场强度接近击穿时最高场强的 90%。对于从 p^+ 面进光的 $n^+p^-\pi p^+$ 结构, 是以电子发动倍增为主, 按前面所述, 这一达通条件表述为

$$L_e = \int_{x_s}^{x_p} \alpha \exp\left[-\int_x^{x_p} (\alpha - \beta) dx'\right] dx \approx 0.90 \quad (3)$$

达通后倍增因子随偏压的变化则应由 (1) 和 (2) 式计算。如前所述, 它将涉及描述 n^+, p^-, π 和 p^+ 四个区的八个参量。但若满足条件 (3) 则 x_p, p^+ 区间, 即漂移区上对电离积分的贡献是可略而不计的^[3], 因此我们在计算达通后倍增因子 M_e, M_h 随偏压的变化时的积分限就选在 x_s 和 x_p , 而且我们定义 $x_p - x_s = W_s$ 为雪崩区, 而随偏压增量变化换成随电场强度增量的变化, 直到 $M_e \rightarrow \infty$, 便可确定出达到雪崩击穿时的最高电场强度 E_M 等量。我们在这一计算过程中完全抛开了 π 区和 p^+ 参数。

π 区上的电离积分可以略去, 而 π 区上的电场衰减、电压降落则必需考虑, 然而却可单独计算, 而且容易。 p^+ 区的参数则是完全略去了的。

这样, 我们把计算处理分成了两个区域: $x_s \sim x_p$ 间的雪崩区和 $x_p \sim x_{p^+}$ 间的漂移区。因此我们将其称之为分区计算模型。

在设计器件和分析其相关特性时, 可利用分区计算数据或曲线, 按设计要求进行组合便可以实现器件结构参数的设计和预计器件的基本性能。因此总起来说, 我们将这一方法称之为“分区计算组合设计法”或“分区计算组合分析法”。下面介绍分区计算结果。

三、计算结果

1. 雪崩区参数计算

我们设图 1 中的杂质分布为高斯型,且全部电离。

$$N_d(x) = N_d \exp[-(x/2L_d)^2] \quad (4)$$

$$N_a(x) = N_a \exp[-(x/2L_a)^2] \quad (5)$$

$$N_a(x_p) = 5 \times 10^{12} \quad (6)$$

我们选用达通条件 $M_{R0} = 10 \pm 0.5$ 即:

$$0.895 \leq L_a = \int_{x_2}^{x_p} \alpha \exp[-\int_x^x f(\alpha-\beta) dx'] dx \leq 0.905 \quad (7)$$

$$\alpha(x) = A \exp[-B/E(x)] \quad (8)$$

$$\beta(x) = C \exp[-D/E(x)] \quad (9)$$

$$E(x) = (qN_dL_d \sqrt{\pi/\epsilon}) [\operatorname{erf}(x_p/2L_d) - \operatorname{erf}(x/2L_d)] - (qN_aL_a \sqrt{\pi/\epsilon}) [\operatorname{erf}(x_p/2L_a) - \operatorname{erf}(x/2L_a)] \quad (10)$$

$$V_R = \int_{x_2}^{x_p} E(x) dx \quad (11)$$

(8)式、(9)式中的 A, B, C, D 为常数,使用 Lee 等^[4]的数据。(10)式中 q 为电子电荷, ϵ 为硅的介电常数。(7)式确定了满足规定达通条件的 N_d, L_d, N_a, L_a 四个特征量之间的关系。相应的 x_2, x_p, V_R, E_R (达通时结上的最高电场强度)等雪崩区参数也就确定了。我们在计算中选用 N_d 为 10^{20}cm^{-3} , 而 L_d 则选在 $0.2 \sim 2 \mu\text{m}$ 之间变化, N_a 则选用 $5 \times 10^{15} \sim 10^{17} \text{cm}^{-3}$, 由一组 L_d, N_a 计算出相应的 L_a 值。为了加大复盖面,我们共计算了 110 组数据。我们以曲线图形式给出计算结果,如图 2~5 所示。

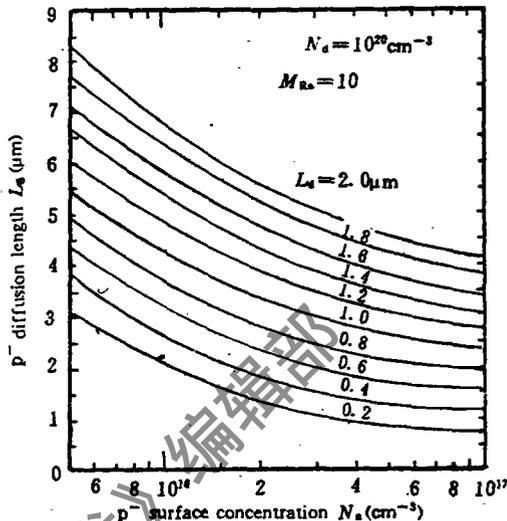


Fig. 2 Dependence of L_a and N_a when $M_{R0} = 10$

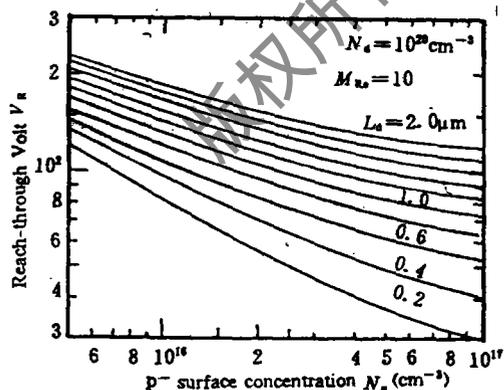


Fig. 3 Dependence of V_R and N_a when $M_{R0} = 10$

结上的最高电场强度为:

$$E_m = E_R + \Delta E \quad (15)$$

计算出符合达通条件的雪崩区参数后,可进一步计算相应的 M_n-E 和 M_p-E 曲线。

$$M_n = 1/(1-L_n) \quad (12)$$

$$M_n = 1 / \left\{ 1 - \int_{x_2}^{x_p} \beta \exp[-\int_x^x (\beta-\alpha) dx'] dx \right\} \quad (13)$$

式中的 L_n 同(7)式, α, β 项中的 $E(x)$ 则为(8)式加 ΔE 。因倍增因子与电场为非线性关系,计算中 ΔE 选用变步长。

雪崩区上的电压降为:

$$V_p = V_R + \Delta E(x_p - x_2) \quad (14)$$

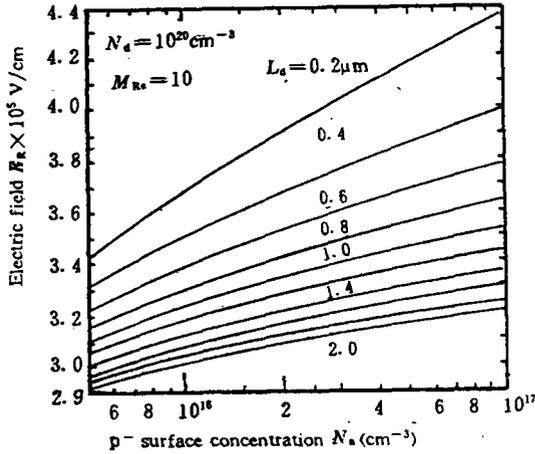


Fig. 4 Dependence of E_N and N_s when $M_{R_s} = 10$

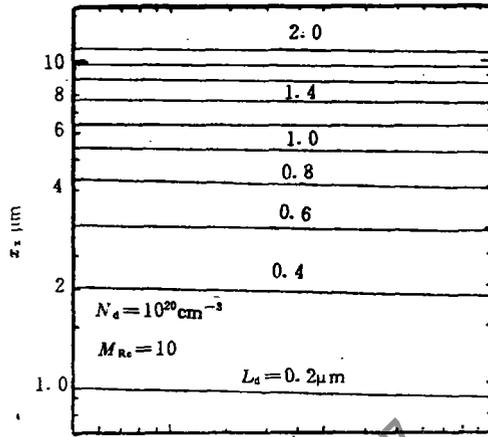


Fig. 5 Dependence of X_s and N_s when $M_{R_s} = 10$

当 $M \rightarrow \infty$ 时(在实际计算中用 $M_s \leq 0$ 或 $L_d \geq 1$)定作雪崩击穿,这时的电场强度便为雪崩击穿最高场强 E_M ,雪崩区上的电压降为 V_{PB} 。这样计算出的以 L_d, N_d 为参变数的 E_M 随 N_s 的变化曲线如图 6 所示。以 L_d, N_d, N_s 为参变数的 M_s-E 曲线如图 7a, 7b, 7c 所示。限于篇幅,略去了大部分 M_s-E 曲线图及由已给参数借助计算器便能得出的曲线图(如 V_{PB}, x_s, x_p 曲线图等)。

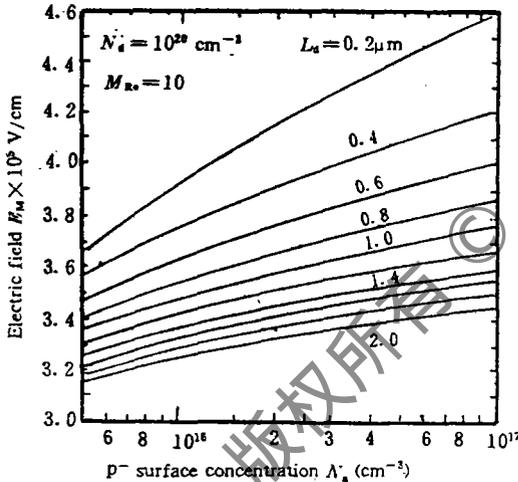


Fig. 6 Dependence of E_N and N_s when $M_{R_s} = 10$

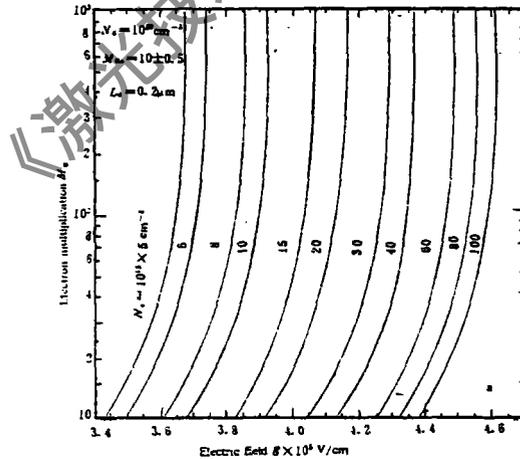


Fig. 7a Effects of E on M_s when $M_{R_s} = 10$ ($L_d = 0.2 \mu m$)

2. π 区参数计算

π 区耗尽时对电场的贡献或电场衰减为:

$$E_x = qN_x W_x / \epsilon \tag{16}$$

耗尽电压为:

$$V_x = qN_x W_x^2 / (2\epsilon) \tag{17}$$

π 区耗尽后的增量电压降落则为

$$V_x = V_x + \Delta E \cdot W_x \tag{18}$$

这些曲线的计算是简单的,故从略。

3. 雪崩区与 π 区的组合

我们可以从光学参数如量子效率出发考虑也可以从电压出发考虑,但主要是从电场强度出发考虑。

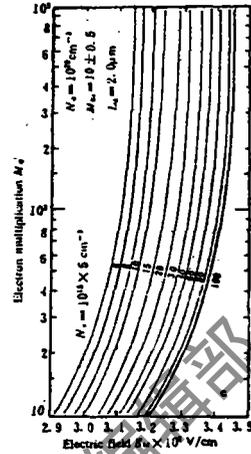
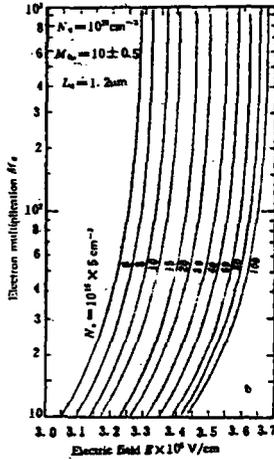


Fig. 7b Effects of E on M_e when $M_n = 10$ ($L_n = 1.2 \mu\text{m}$)

Fig. 7c Effects of E on M_e when $M_n = 10$ ($L_n = 2.0 \mu\text{m}$)

如由噪声考虑, E_M 应该低, 我们选定 E_M 的上限后, 则可以从图 5, 图 2, 图 3 找出相应的雪崩区结构参数。

如从载流子漂移速度和温度效应出发考虑, 则要求在雪崩击穿时耗尽区右端 π^+ 结处有一定场强, 设为 ΔE 。

由对 ΔE 的要求可以由下式确定 π 区参数或可允许的选择值。

$$E_r = E_M - E_R - \Delta E \tag{19}$$

或
$$\Delta E = E_M - E_R - E_r \tag{20}$$

$$W_r = [\sqrt{\Delta E^2 - 2qN_s(V_{PB})/\epsilon} - \Delta E](qN_s/\epsilon) \tag{21}$$

$\Delta E = 0$, 正好全耗尽时雪崩击穿; $\Delta E < 0$, 则不能全耗尽便发生雪崩击穿; $\Delta E > 0$, 则为设计要求值。

四、结果应用

1. 器件参数设计

我们从结的最高场强出发, 雪崩器件要求有小的空穴—电子电离比值, 即要求有较低的电场强度。如要求 $E_M \leq 3.5 \times 10^6 \text{V/cm}$, 设取值为 $3.4 \times 10^6 \text{V/cm}$, 由图 6 可以得到多组 N_s 和 L_n 参数满足这一要求。如取 $N_s = 10^{16} \text{cm}^{-3}$, 则 L_n 应取 $1.2 \mu\text{m}$ 。由图 2 查得 $L_n = 4.8 \mu\text{m}$ 。图 3 查得 $V_R = 140 \text{V}$ 。图 4 查得 $E_R = 3.18 \times 10^6 \text{V/cm}$ 。图 5 查得耗尽区左边界 $x_s = 6.5 \mu\text{m}$ 。计算得 p^- 结深 $x_p = 25 \mu\text{m}$, $x_j = 7.5 \mu\text{m}$, $V_{PB} = 185 \text{V}$ 。图 7b 可查得不同电场强度下电子倍增因子 M_e 。结合设计选定 π 区参数 (W_r 和 N_s), 便可通过计算, 绘制出 M_e-V 曲线, 预计器件性能。

2. 用于估计过剩噪声因子

我们可以利用 M_e-E 曲线计算出有效电子、空穴电离比值 k_{eff} , 然后计算出过剩噪声因子 F 。

如前述参数构成的雪崩区, 当倍增因子达到 100 时, 其电场强度约为 $3.37 \times 10^6 \text{V/cm}$ 。可估算出有效电离比值 k_{eff} 和 F 值分别为 0.17 和 3.7。再根据其它参数便估算出等效噪声功率了。

关于构造 M_s-V 曲线, 比较简单 pN 结和达通型结构的倍增特性, 分析 π 区对倍增特性的影响方面的讨论则因篇幅所限在此从略。实际应用效果, 即试验验证, 将结合具体器件另文介绍。

五、讨 论

1. 计算结果的合理性

按满足(7)式规定条件计算的各量是准确的, 其准确性取决于计算的取值精度, 我们在计算电离积分时精度取值为 2×10^{-3} 。

由 M_s-E 曲线可以看出, 按(7)式规定的达通要求算出的 E_R 值与雪崩击穿时最高场强 E_M 相差约 $2.2 \sim 2.4 \times 10^4 \text{V/cm}$, 即 x_p 处最高场强在 $2.5 \times 10^4 \text{V/cm}$ 范围, 因此略去 π 区上的电离积分是合理的, 即分区计算模型是合理的。

2. N_d 值的影响及曲线的适应范围

我们计算中取的是 10^{20}cm^{-3} 的磷表面浓度。为了比较磷表面浓度的影响, 我们选用了 $3 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 的表面浓度值计算了相应雪崩区参数和 M_s-E 曲线, 对于同一 p 表面浓度和扩散长度所得 M_s-E 曲线几乎重合。这一方面表明 RAPD 器件倍增特性主要决定于 p 的分布, 同时表明给出的曲线适应于磷表面浓度在 $3 \times 10^{19} \sim 10^{20} \text{cm}^{-3}$ 的取值范围内参考。

对于实际中遇到的其它情况, 可以用内插仿形曲线估算相关参数。

综上所述, 所计算的曲线适应范围为:

$$N_d = 3 \times 10^{19} \sim 10^{20} \text{cm}^{-3}, L_d = 0.2 \sim 2 \mu\text{m}$$

$$N_a = 5 \times 10^{15} \sim 10^{17} \text{cm}^{-3}, L_a = 0.8 \sim 8.5 \mu\text{m}$$

这几乎复盖了双扩散达通型硅雪崩光电探测器的结构参数的实际取值范围。

六、结 论

由前述讨论可知, 所用计算模型是合理的。举例说明了曲线的用法、用途及适应范围。所得结果有一定的普适性, 能满足双扩散达通型硅雪崩单元、象限和多元列阵器件设计需要。

作者对徐立高级工程师、徐竹君高级工程师在预备性计算中提供的帮助深表感谢。

参 考 文 献

- [1] Ruegg H W. IEEE Trans on Electron Devices, 1967, ED-14(5): 239
- [2] Conradi J. Solid State Electron, 1974, 17(1): 99
- [3] 文雪冬. 兵器激光, 1979, (4): 25
- [4] Lee C A, Logan R A, Batdort R L et al. Phys Rev, 1964, 134(3A): 761
- [5] Nishida K, Taguchi K 著, 程泰平译, 许少龙校. 半导体光电, 1980, (4): 88~93

* * *

作者简介: 文雪冬, 男, 1941年12月出生。研究员级高工。现从事硅光电探测器研究。

钟泽祥, 男, 1944年11月出生。高工。1991年9月至1992年6月作为高级访问学者在芬兰 Tampere University of Technology 作研究工作。现从事计算机应用及信号处理技术研究。

收稿日期: 1993年3月15日。