

GaAs 高-低 IMPATT 二极管的 掺杂分布和伏安特性分析*

俞冠高、金立荣、张崇仁

(南京固体器件研究所)

提 要

由于多层外延材料浓度和厚度的不均匀性，实验二极管的击穿电压 V_B 有较大的差别。为此对给定的掺杂分布进行 V_B 、耗尽宽度及电场的分析和计算。从实验中找到室温下掺杂分布和伏安特性之间的对应关系。实际选择管芯时，应根据击穿电压值和大电流下的伏安特性曲线进行挑选。这种挑选管芯的方法已在器件批量生产中应用。

一、引言

在研制高-低结构掺杂分布的 GaAsP-N 结型 IMPATT 二极管时，采用汽相外延材料。掺杂分布如图 1 所示。众所周知，器件对材料掺杂分布要求十分苛刻，尤其是高掺杂区层厚 x_1 的精度要求控制在 $\pm 200 \text{ \AA}$ 以内^[1]。然而目前外延技术却很难达到 500 \AA 以内的精度^[2]。加上实验中多种因素的影响，特别是最后外延 P⁺ 层时，对 N₁ 的补偿深度的差异，以及材料参数本身的起伏，使最终制成的管芯的 V_B 仍然比较分散，这给挑选管芯带来很多困难。虽然有人对脉冲二极管电场分布进行过分析^[3]，但是迄今为止尚未见过关于掺杂分布、电场分布和伏安特性三者之间关系的研究。这三者间关系对判断管芯的优劣有紧密的联系。本文从理论计算和分析着手并通过实验找出它们的对应关系，找到一种挑选管芯的好方法。

二、理论计算和结果分析

Read 器件的理论计算报道很多，本文选用 Shaw 等人^[4]提供的方法计算。假定空穴和电子的离化率相等，忽略空间载流子效应^[4]和 F 型区内的耗尽宽度^[3]，并认为 200°C 下的击穿情况和工作时的情况相似。满足图 1 要求的泊松方程和边界条件为：

$$\begin{aligned} \frac{dE_1}{dx} &= -\frac{q}{\epsilon} N_1 & \text{当 } 0 \leq x \leq x_1 \\ \frac{dE_2}{dx} &= -\frac{q}{\epsilon} N_2 & \text{当 } x_1 < x \leq w \end{aligned} \quad (1)$$

* 1980 年 11 月 19 日收到，1981 年 3 月 13 日收到修改稿。

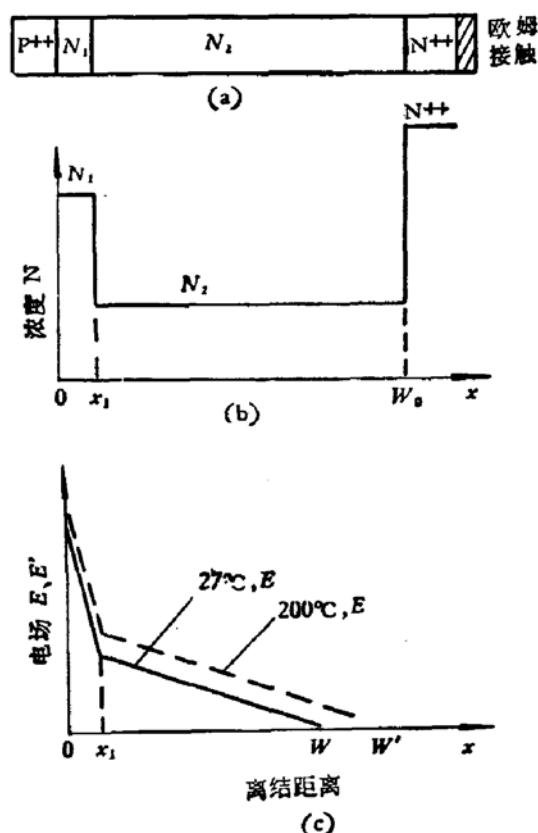


图1 二极管的(a)结构,(b)掺杂分布和(c)雪崩击穿时的电场分布

$$\begin{aligned} E_1(x_1) &= E_2(x_1) \\ E_2(W) &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

其中 q 和 ϵ 分别为电子电荷和介电常数, W 为击穿时耗尽宽度。离化率 α 给为:

$$\alpha(x) = A \exp[-(B/E)^2] \quad (3)$$

其中 A 和 B 为常数, 室温下分别为 1.60×10^5 /厘米和 5.55×10^5 伏/厘米, 200°C 下分别为 2.07×10^5 /厘米和 6.64×10^5 伏/厘米。击穿条件为:

$$\int_0^W \alpha dx = 1 \quad (4)$$

击穿电压 V_B 为:

$$V_B = \int_0^W E dx \quad (5)$$

把低浓度区内的空间电荷区宽度称谓 x_2 , 那末 $x_2 = W - x_1$ 。给定 N_1 、 N_2 和 x_2 , 使用室温的 A 和 B 值, 可以解方程组(1)–(5)。即先任意给一个 x_1 值, 由方程(1)和(2)式解出 $E(x)$, 用(3)式计算积分 $\int_0^W \alpha dx$ 的值, 调整 x_1 值使积分值接近 1 给出数值解 x_1 。利用它重新解出所要的 $E(x)$, 用(5)式算出 V_B 值。用带撇的参数表示 200°C 下与室温相对应的参数, 如 x'_2 , E' 等。在相同的 N_1 、 N_2 和 x_1 下, 利用 200°C 下的 A 、 B 值重新解方程组, 即先任意给 x'_2 值, 计算积分 $\int_0^{W'} \alpha' dx$ 值, 调整 x'_2 使积分值接近于 1, 解出数值解 x'_2 , 进而计算出 200°C 时击穿电场 $E'(x)$ 和 V'_B 。这样就可以给定 N_1 值, 以 N_2 为参变量作出室

温的 x_1-x_2 和 200°C 的 x_1-x_2' 两组曲线, 如图 2(a) 所示, 图中前者用实线表示, 后者用虚线表示。室温击穿电压也标在图上。对于特定频率 f 设计的器件, 根据经验公式^[4]确定 200°C 下击穿时的最佳 W' , 即

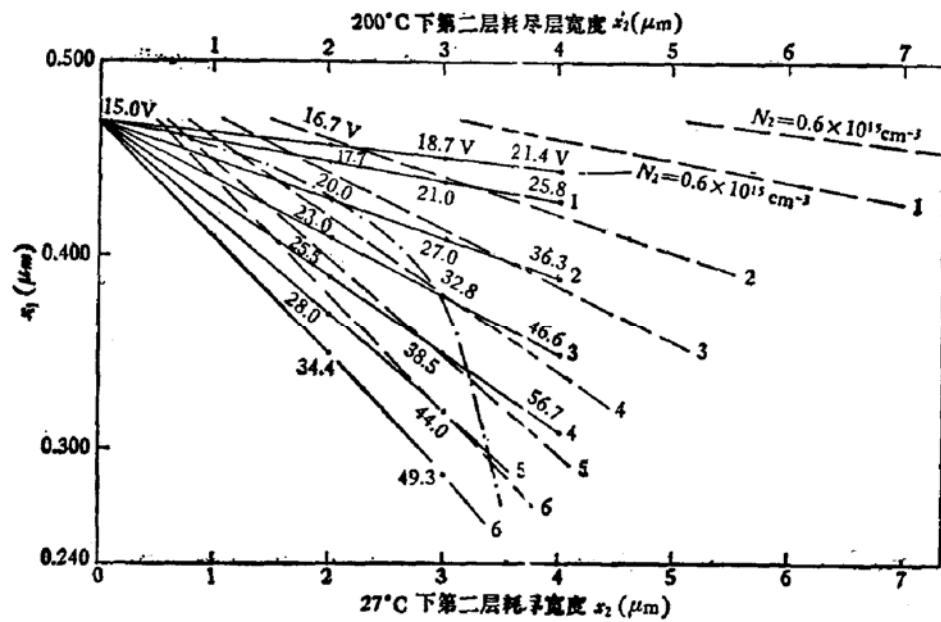


图 2(a) $N_1 = 10^{17}$ 厘米 $^{-3}$ 时 x_1 、 x_2 、 N_2 关系曲线并标出了
 V_B 值 —— 27°C, --- 200°C, -· 27°C, 8GHz

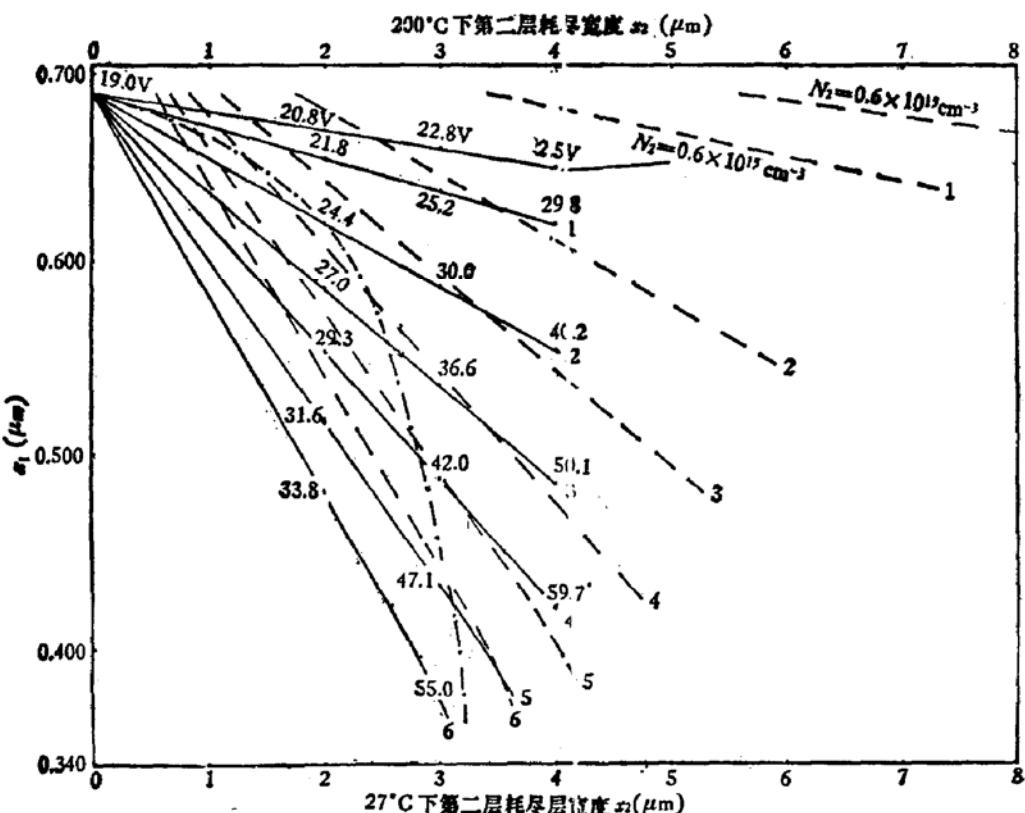


图 2(b) $N_1 = 6 \times 10^{16}$ 厘米 $^{-3}$ 时 x_1 、 x_2 、 N_2 关系曲线, 并标出了
 V_B 值 —— 27°C; --- 200°C; -· 27°C, 8GHz

$$W' = x_1 + x'_2 = 34.4/f \quad (6)$$

其中 f 的单位是千兆赫。例如 8 千兆赫时 W' 为 4.3 微米。确定 N_1 、 N_2 可在图 2(a) 的虚线上找出满足 W' 的 x_1 和 x'_2 ，接着在实线上找到满足 W' 的相应 x_2 。这样就可以作出固定频率为 8 千兆赫的 N_2 、 x_1 、 x_2 关系曲线，用点划线画在图 2(a) 中。

作者用文献 [4] 提供的方法计算过 8 千兆赫频率器件的设计参数，这里只列举结果作参考： $N_1 \geq 6 \times 10^{16}$ 厘米 $^{-3}$ ， $N_2 = 2 - 6 \times 10^{15}$ 厘米 $^{-3}$ ， $x_1 \leq 0.6$ 微米，效率 η 可为 20—26%。

图 2(a) 和 2(b) 是 N_1 分别为 1×10^{17} 厘米 $^{-3}$ 和 6×10^{16} 厘米 $^{-3}$ 的 N_2 、 x_1 和 x_2 相互关系。根据这些曲线可以看出固定频率 8 千兆赫下，可用不同掺杂分布的材料满足最佳 W' ， V_B 也有很大的差别。若固定 N_1 ，那末 N_2 越低， x_2 也越小， x_1 相应增大；当 N_2 小于 10^{15} 厘米 $^{-3}$ 时， x_2 趋于零，即室温击穿时空间电荷区全集中在第一层内，但在工作时可达到要求的宽度 W' 。此时 V_B 仅由 N_1 决定，对 x_1 的精度要求得更高。另一方面， V_B 值主要取决于 N_1 、 N_2 和 x_1 的搭配，固定频率关系曲线给出它们之间的关系，为制管时控制 x_1 提供了依据。其中任一参数的起伏将影响 V_B 的均匀性，无疑也将影响管子的微波性能。

三、两种简化样品的掺杂和电场分布

为简便起见，在计算过的掺杂分布中挑选出两种简化样品加以分析，以此模拟实际样品。这两种样品就是图 3-1 的甲种样品和图 3-2 的乙种样品。它们的参数值分别为 $N_1 = 1 \times 10^{17}$ 厘米 $^{-3}$ ， $N_2 = 0.6 \times 10^{15}$ 厘米 $^{-3}$ 和 $N_1 = 6 \times 10^{16}$ 厘米 $^{-3}$ ， $N_2 = 5 \times 10^{15}$ 厘米 $^{-3}$ 。其主要差别在于 N_2 的大小，其次是 N_1/N_2 的比值。根据计算结果，二极管的电场分布大致可以各自分为 A、B、C 和 D 四类，如图 3 所示。

A 类 室温下击穿时耗尽宽度小于高浓度区厚度 x_1 ，工作时也没有扩展到第二层中去。

B 类 室温击穿时耗尽层刚扩展到第二层。工作时因 N_2 低甲种样品已成过穿通；乙种样品的 N_2 较高，因此工作时仍远离穿通。

C 类 室温击穿时低浓度区大部分被耗尽，工作时甲种样品过穿通，乙种样品接近于穿通。

D 类 室温击穿时已穿通。

显然 A 类管变得和均匀平坦掺杂分布二极管相类似。为得到好的微波性能，应使器件工作时有接近于穿通的耗尽宽度，据此分析电场和掺杂分布。发现乙种样品的 B 类管工作时耗尽宽度不够宽，而甲种样品的 B 类管已过穿通，易失谐和调谐烧毁，均不可能获得好性能。所以甲种样品应选择界于 A 和 B 类之间的 B* 类管芯，以保证工作时有合适的耗尽宽度。

乙种样品的 C 类管子电场分布正合适，可望在一定的电流密度下获得良好的微波性能。如果工作时仍留有适当的未耗尽区，则对改善调谐烧毁很有好处，而且因为 N_2 较高，不致于因为它而引起大串联电阻使效率明显下降，预期有较好的可靠性。其余的电场分

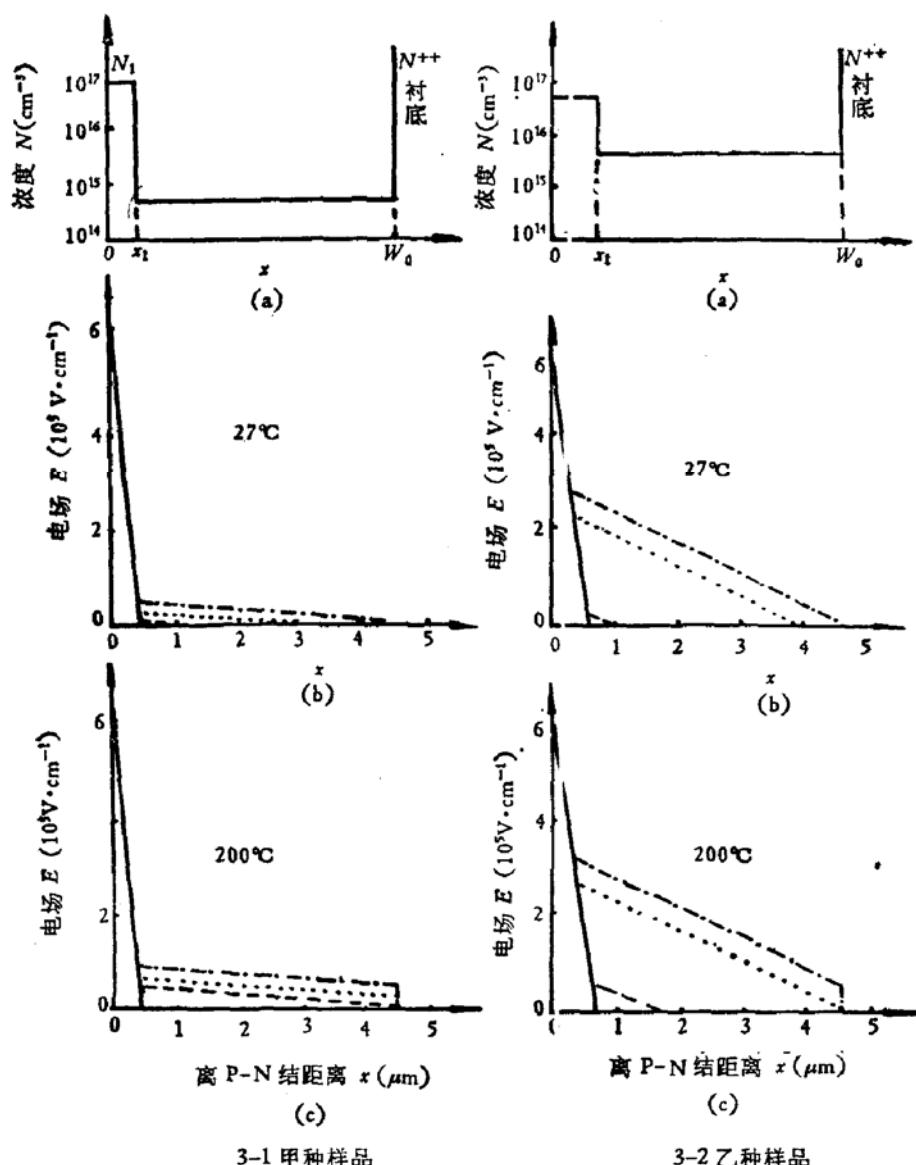


图3 两种简化样品的(a)掺杂分布、(b)27℃击穿电场和(c)200℃击穿电场。——A类,
—B类,····C类;---D类。甲种样品四类管子的 x_1 依次为:0.500、0.471、0.459和0.446
微米。乙种样品四类管子的 x_1 依次为:0.700、0.686、0.420和0.339微米。(为作图的简单明
瞭,把 x_1 全画成相等,而且对于A类二极管,击穿时耗尽宽度在室温下应小于层厚 x_1 ,200℃下应
小于或等于 x_1 均未画出。其中 W_0 为N型外延层总厚度,对于同一种样品是常数)

布类型均因工作时过穿通不足为取。

如果材料的掺杂浓度(尤其是 N_2)界于甲乙两种样品之间时,选择管芯也应作相应的
调整。例如: $N_1 = 1 \times 10^{17}$ 厘米 $^{-3}$, $N_2 = 2 \times 10^{15}$ 厘米 $^{-3}$, 就应该选择界于B和C类之
间的C*类管芯。 N_2 大于 10^{15} 厘米 $^{-3}$ 时管芯的最佳击穿电压可参考图2(a)和2(b)中的
固定频率关系曲线决定。

四、管芯选择

我们采用电镀热沉工艺制作台式倒装器件。用图示仪观察伏安特性。因为器件的漏

电大,规定10毫安下的电压值为 V_B . 由于材料参数的分散和不均匀,即使同一材料制成的管芯也不能仅用 V_B 作为选择管芯的最主要依据. 必须根据大电流伏安特性估计掺杂分布(特别是 N_2)和电场分布才能决定其取舍. 实验证明,管子的直流特性和热沉上未分离前管芯的特性相近. 它们的 V_{100} (100毫安下的电压降)和微波测试工作电压 V_f 相近. 但是由于散热情况的差别,单个芯片的 V_B 和管子的值往往有明显的差异,它的 V_{50} (50毫安下的电压降)和管子的 V_{100} 值相当.

前面已阐明好性能二极管应具有的电场分布(即掺杂分布). 如何从实验上判别它呢? 在外延P型层前,先测 N_1 、 N_2 和 x_1 ,用探针监控微腐蚀控制 x_1 ,复测 N_1 和 N_2 . 制管后,对于不同掺杂分布的二极管,测量 V_B 、伏安特性以及微波性能,并用C-V法和半导体杂质浓度分布测试仪测出二极管的容压特性和杂质分布,通过大量实验的比较分析,定性地找出掺杂分布、伏安特性和与此相关的电场分布间的关系. 确定甲种样品B*类和乙种样品C类管芯的判据. 典型伏安特性示于图4.

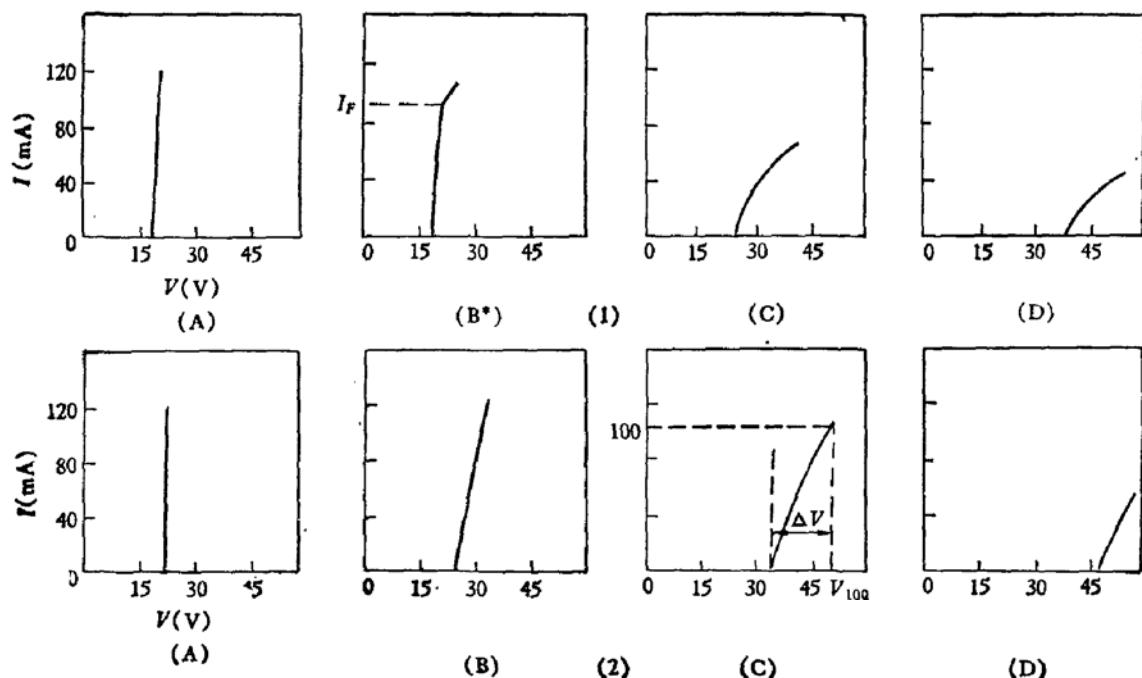


图4 两个典型实验样品的四类不同二极管的伏安特性曲线

(1) 实验的甲种样品, (2) 实验的乙种样品
(A) A类, (B) B类, (C) C类, (D) D类, (B*) B*类

图4-1中实验甲种样品(76-6材料)的A、C和D三类二极管,击穿电压越来越高,曲线斜率越来越小. B*类二极管比较好,击穿电压与A类相同,由第一层浓度 N_1 决定. 特点是伏安特性中有拐点F. 这可以作如下的解释: 它和A类一样在第一层内击穿,随反向电流的增加,产生载流子效应,使场分布产生变化,引起耗尽区加宽. 在拐点处耗尽层前沿推进到高-低结界面,再增加电流,耗尽层前沿进入低掺杂区,引起电压降急剧上升,出现拐点. 拐点以后的斜率和 N_2 值有关. 拐点电流 I_F 的大小和室温击穿时的耗尽前沿与高-低结界面间的距离 Δx_1 有关. 如果结面积一定,那末 N_2 越低,拐点后曲线的斜率也越小; Δx_1 越小, I_F 也越小. 因此 N_2 越低, I_F 应相应增大,才能保证工作时有合适的耗尽

区宽度,以获得良好的微波性能。由此可见,甲种样品 B* 类二极管特征明显(有拐点 F),可以利用 V_B 、 I_F 以及拐点后的斜率定性地估计材料的参数 N_1 、 x_1 和 N_2 ,从而确定 V_B 、 I_F 和 V_{100} 的许可范围挑选所需管芯。

图 4-2 表明,实验乙种样品(79-3 材料)的 A、B、C 和 D 四类二极管,击穿电压依次升高,斜率依次减小。这是空间电荷电阻随耗尽区加宽而增大的缘故^[5]。性能较好的 C 类管子的合适击穿电压值可以参考图 2(a) 和图 2(b) 的有关曲线。如果材料掺杂分布不均匀,则必须根据 V_B 、 V_{100} 和象征伏安特性斜率的 ΔV (见图 4-2(c)) 来区分不同材料的 C 类二极管。 ΔV 主要和 N_2 有关, N_2 越低, ΔV 越大。

实际挑选管芯时,先在集成电镀热沉上确定其合适范围,然后把所要的部分分割成单个芯片,视 V_B 和 V_{100} 大小决定取舍。对于 N_1 为 $6-10 \times 10^{16}$ 厘米 $^{-3}$, N_2 为 $3.5-5.5 \times 10^{15}$ 厘米 $^{-3}$ 的样品,结直径 D 约为 220 微米的 C 类管芯,其 V_{100} 约为 35—55 伏, ΔV 约为 10—20 伏。

五、实验结果

用帽型腔测量微波性能,规定直流工作点(I_0 、 V_f) 输入功率为 8 瓦。如失谐严重,则要降低输入功率。甲种样品的典型结果列于表 1。

表 1 实验甲种样品的典型结果

管号	V_B (V)	I_F (mA)	V_{100} (V)	I_0 (mA)	V_f (V)	P_{out} (mW)	η (%)	f (GHz)
76-6-1	14.5	120	20	150	28	不振		
76-6-2	15.0	100	28	160	51	800	9.8	7.75
76-6-6	17.0	70	52	130	56	780	10.7	7.80
76-6-4	23.5	50	65	120	57	950	13.9	7.66
76-6-10	23.5	20	40*				调 谱 烧 灰	
76-6-5	40.0						低 直 流 烧 灰	

* 为 30 毫安下的电压值。

表 1 给出 76-6 材料的结果,用容压法测得的材料参数为 $N_1 = 7 \times 10^{16}$ 厘米 $^{-3}$ 和 $N_2 = 6 \times 10^{14}$ 厘米 $^{-3}$,与甲种样品的典型数据相近。1# 管子属 A 类,5# 属 D 类,性能极差,C 类管子也差,未列入。2#、4# 和 6# 均为 B* 类好管子。对于本片材料 I_F 一般为 50—100 毫安, V_{100} 约为 28—65 伏。管子间的 V_B 、 I_F 以及拐点后伏安特性曲线的斜率差别大,说明材料的 N_1 和 N_2 均有较大的起伏,有时甚至还出现少数接近于乙种样品的好二极管。因为甲种样品的 N_2 低, N_2 的相对偏差变大。同时要求 x_1 的精度高,因而成品率低。虽然在低电流密度下能达到一定的效率,但对于目前采用的无缓冲层材料和现有电镀热沉等工艺来说,难以得到好的微波性能。

用水银探针逐层容压测量得出 79-3 材料的掺杂分布画于图 5。这是腐蚀掉 P 型层和极薄的补偿层后测得的结果。可以认为它是乙种样品。图 6 示出本片上三个不同类别

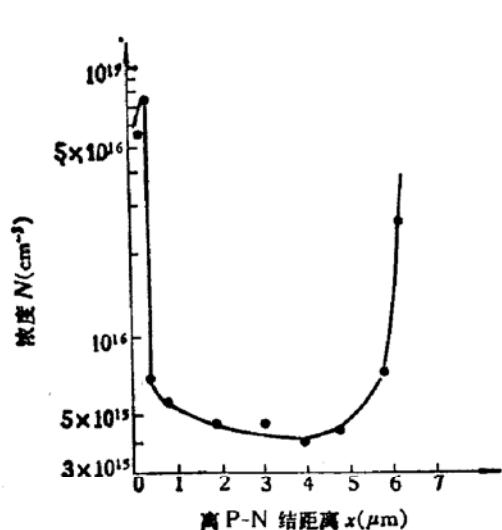


图 5 79-3 材料的掺杂分布

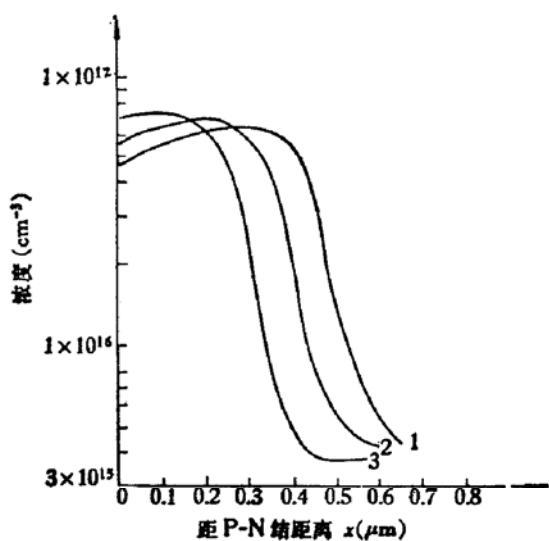


图 6 乙种样品三类二极管掺杂分布

① 79-3-1A, $V_B = 28V$, C* 类;
② 79-3-2A,
 $V_B = 34V$, $V_{100} = 52V$, C 类;
③ 79-3-6A
 $V_B = 50V$, D 类

C*、C 和 D 类的掺杂分布图。它们的 V_B 等写在图注内。这是用半导体杂质浓度分布测试仪描画出来的。正如所预期的那样，这三类管子的 x_1 有明显的差别，由于实验条件所限，未能看到全部耗尽层的掺杂。

该材料部分管子的性能列于表 2 内。该材料的 C 类二极管的 V_B 为 29—36 伏， V_{100} 为 40—55 伏。表中 1#、6# 和 13# 是 C 类管子，输出在 1 瓦以上，性能良好，最近通过定型的 WX51 型 1 瓦的样管中多数就是这类管子，可靠性好。8# 管是 D 类管子，性能差，虽有一定的效率，但极易功率饱和。3# 是 C* 类(界于 B 和 C 之间)管子。这种管子的起振电流大，效率不太高，但不容易功率饱和，随着输入功率的增加效率也有提高。在超过 10 瓦以上的输入功率下能获得超过 2 瓦甚至高达 3.5 瓦的输出。但是结温过高不太可靠。定型的 WX52 型 2 瓦样管中多数就是这类管子。图 7 画出 61 只二极管的效率和 V_B 的关系。说明 C 类二极管的微波性能有较好的一致性，一般均能得到好性能。其余的管子中，虽有少数的效率不低，但容易产生功率饱和，引起调谐烧毁。由于材料参数的起

表 2 实验乙种样品的典型结果

管号	$D(\mu m)$	$V_B(V)$	$V_{100}(V)$	$I_0(mA)$	$V_f(V)$	$P_{out}(W)$	$\eta(\%)$	$f(GHz)$
79-3-3	230	28.0	37	150	50	0.90	12.0	7.63
79-3-1	210	29.0	40	160	49	1.20	15.3	7.74
				180	50	1.50	16.7	7.74
79-3-6	236	31.0	50	150	52	1.08	13.8	7.70
79-3-13	235	32.5	51	130	52	1.20	17.8	7.70
79-3-10	220	36.0	55	120	60	1.00	13.9	7.75
79-3-8	200	41.0	75	70	65	0.48	10.5	7.66

伏, 同一片材料可用管芯的 V_B 往往有几伏到十几伏的偏差, 有时甚至高达 20 多伏。均匀性越好偏差越小。图 8 画出 X-Y 记录仪描出的二极管典型 $C-V$ 曲线, 给出器件击穿前的耗尽情况。伏安特性中有拐点的好二极管, 如 76-6-4 在 $C-V$ 曲线上不存在电容突变 (图 8(a)), 说明室温下在第一层内击穿。伏安特性中找不到拐点的好管子, 如 79-3-1 在 $C-V$ 曲线上可找到电容陡变 (图 8(b)), 说明击穿前早已耗尽到第二层。这与理论分析完全相符。

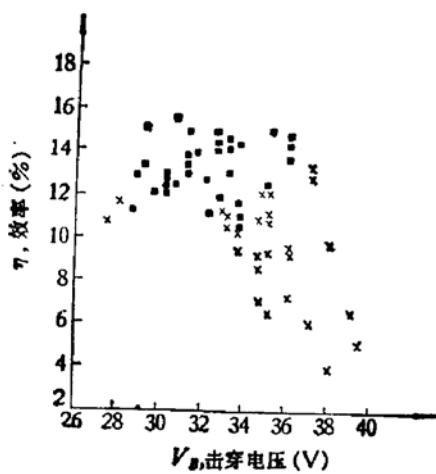


图 7 79-3 材料 61 只管子的效率和 V_B 的关系

■ 为 C 类管子

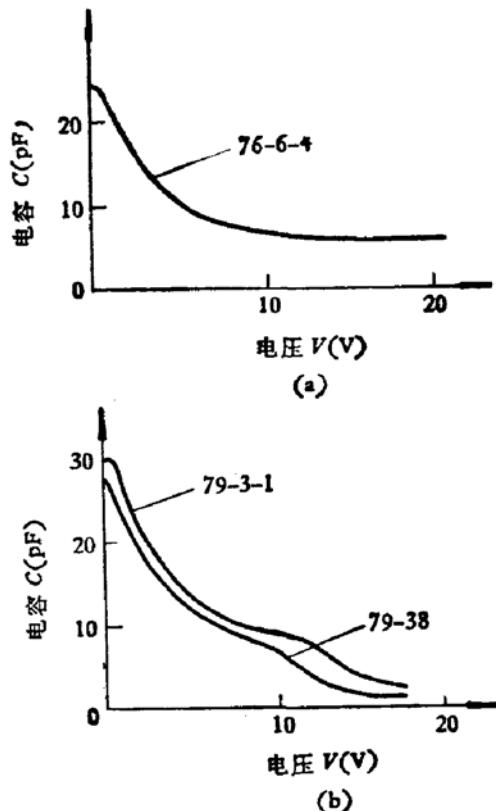


图 8 典型 $C-V$ 曲线

(a) 甲种样品的 B^* 类二极管,
(b) 乙种样品的 C 类二极管

六、结 论

为获得高-低掺杂分布 GaAsP-N 结雪崩二极管的好性能, 必须对器件的掺杂分布, 击穿特性以及与此相关的伏安特性作详细了解。鉴于汽相外延生长的高-低分布材料的均匀性、重复性难以精确控制, 因此单一击穿电压参数已不能作为选择管芯的最主要依据。通过理论计算, 指出设计和制作器件的部分原则, 也就是根据掺杂分布和工作频率的关系, 精确控制 x_1 , 即控制室温下击穿时的耗尽宽度, 使器件工作时接近于穿通。找到一种根据击穿电压和大电流伏安特性评价和挑选管芯的直观方法。克服了制管中的盲目性, 提高了器件的成品率, 并在定型器件中得到应用。实验结果和理论分析基本相符。然而由于实验手段有限, 定量的分析还有待进一步研究。

本工作得到林金庭具体指导, 得到薛舫时、沈克彬、万子鸿的帮助, 由陈桂章等提供材料, 405 组制管, 在此一并表示感谢。

参 考 文 献

- [1] J. R. Grierson, K. Cooper, P. A. Leigh, P. J. Osulli Van and P. W. Huish, *Electron. Lett.*, **15**, 13(1979).
- [2] 鳴野彰夫, 电子材料, 第18卷, (1979), 第11号, 88.
- [3] 西谷和雄, 石原理, 沢野寛、三井茂, 白幡潔, 信学会半トウ研究会, SSD 75—54.
- [4] W. R. Wisseman, D. W. Shaw, R. L. Adams and T. E. Haty, *IEEE Trans.*, ED-21, 317(1974).
- [5] A. B. Bhattacharyya and R. Kumar, *IEEE Trans.*, ED-23, 1016(1976).

Doping Profile and I-V Characteristic Analysis for Hi-Lo GaAs IMPATT

Yu Guangao, Jin Lirong and Zhang Chongren

(Nanjing Solid State Device Institute)

Abstract

The breakdown voltage V_b of experimental diodes varies appreciably due to the nonuniformity of concentration and thickness of multilayer epitaxial materials. For this reason an analysis and calculation of V_b , the width of the depleted region and the electrical field profile for a given impurity profile is presented here. The experimental I - V characteristics relative to the impurity profile at room temperature were found. Thus, in practice, chips may be selected according to the breakdown voltage value and the shape of the I - V characteristic curve at high current density. This method of selecting chips has been applied to batch production.