

GaAs 体效应器件中阴极深凹槽引起的静止畴的实验研究

郑 一 阳

(中国科学院半导体研究所)

1984年5月18日收到

本文通过实验测量了 GaAs 体效应器件的畴雪崩击穿电压及相应的光发射,并进行了器件的烧毁实验,比较了阴极深几何凹槽和一般的 Gunn 器件之间的区别,从而说明这一模式的存在。

一、引 言

我们已经对 GaAs 体效应器件中阴极深凹槽掺杂分布引起的静止畴及其特点进行了讨论^[1],并对这类畴的电场分布进行了计算机模拟^[2],现在我们用实验测定不同几何凹口深度的平面 Gunn 器件的伏安特性曲线,畴雪崩电压及样品的光发射,证明当达到足够的阴极几何凹口深度时,这种模式就能实现。

二、实 验 结 果

为了证实这种模式,我们初步进行了一些实验工作。在实验中,改变夹层型 Gunn 器件的深凹槽掺杂分布需要制作一层不同浓度和不同厚度的 n^- 层,在材料制作时比较困难。我们在实验中采用了平面 Gunn 器件的结构,并在阴极附近制作一个几何凹槽,等效于一个浓度凹口,用腐蚀的办法制作不同深度的凹槽,来得到不同的畴的工作状态,并与理论计算作了相应的比较。

1. 平面 Gunn 器件中几何凹槽加深引起的畴模式的转变

在平面 Gunn 器件中,我们用一个几何凹槽来代替夹层 Gunn 器件中的浓度深凹槽。为了与文献[1]中第二部分相对应,我们用厚度为 $3.3 \mu\text{m}$, $n_0 = 8.5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 的 GaAs 外延材料制作了长为 $45 \mu\text{m}$, 宽度为 $25 \mu\text{m}$ 的平面 Gunn 器件,然后腐蚀不同的凹槽深度,凹槽的宽度为 $2 \mu\text{m}$ 。在制作样品时,与阴极保持一定的距离,如图 1 所示。对不同深度的

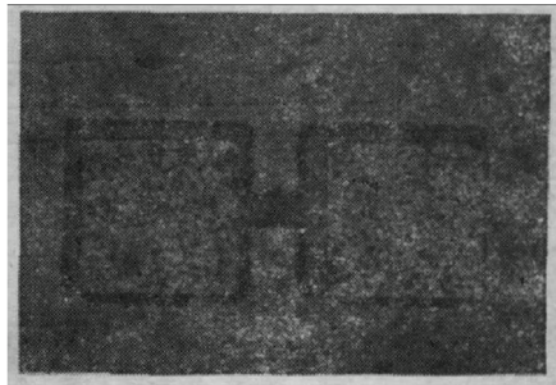
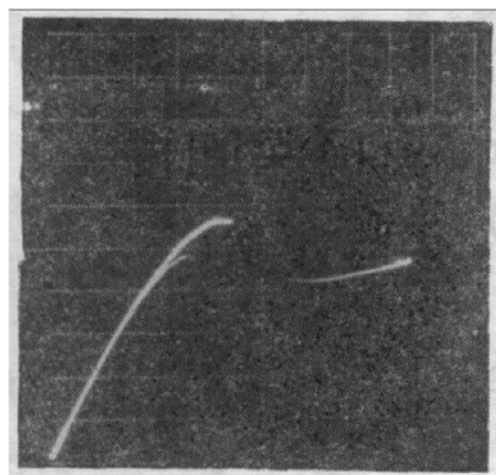
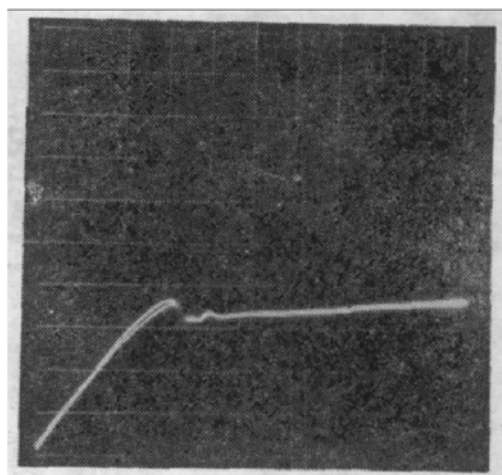


图1 具有阴极几何凹槽的平面 Gunn 器件

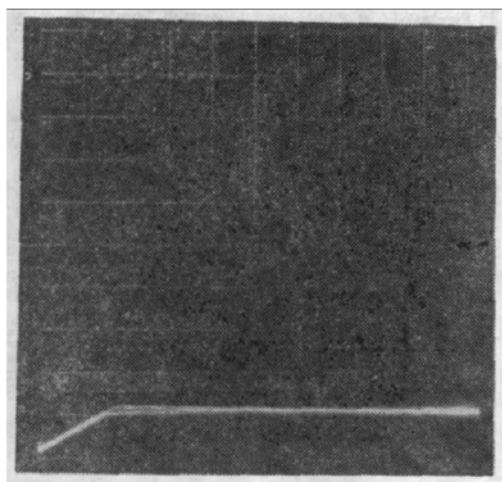
的畴的工作状态,并与理论计算作了相应的比较。



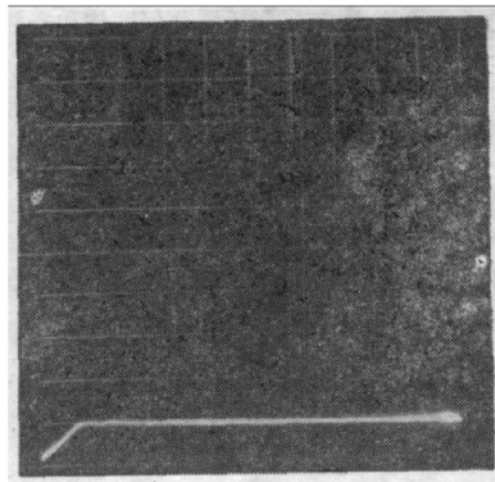
(a)



(b)



(c)



(d)

x 轴: 电压 5 伏/格 y 轴: 电流 2 毫安/格

图 2 不同凹槽深度的平面 Gunn 器件的 I-V 特性

凹槽的平面 Gunn 器件进行了伏安特性曲线的测量, 结果如图 2 所示。图中只选择了四

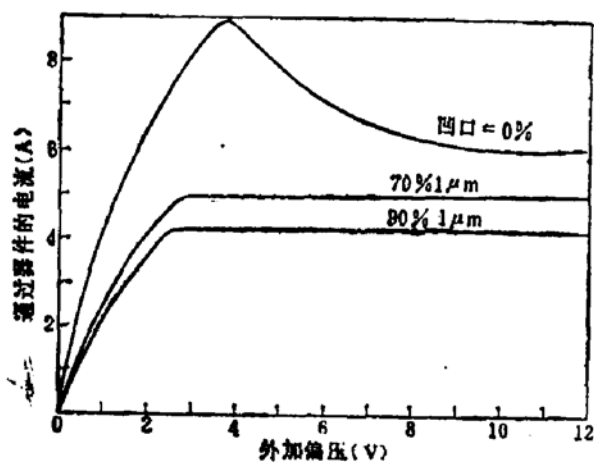


图 3 计算得到的不同凹槽的伏安特性曲线
 $n_0 = 2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$

种不同深度的凹槽, 图 2(a) 是凹槽较浅的情况, 如文献 [1] 中所讨论的浅凹槽静止畴或渡越畴的情况。器件有较大的峰值电流, 阈电压为 20 伏左右, 达到阈值后即出现负阻, 器件进入高电压小电流的状态。但是当外加电压超过 30 伏以后, 电流值又开始增加。说明由于电压的加高, 畴内已有离化产生。当外加偏压增加到 43 伏时, 就开始产生畴的雪崩效应, 这时电流开始突然增加, 在阈值一倍的低电压下畴就开始出现雪崩。说明这类畴承受不了更高的电压, 这就是通常的三角形畴的模式。当

凹槽深度增加时, 从图 2(b) 可以看出, 这时阈值电压降低到 15 伏, 负阻没有浅凹槽时那

么明显,但在 20 伏偏压以后,仍然观察到电流随电压的缓慢增加,说明仍然有畴内的离化出现,但是一直到 50 伏,没有出现畴的雪崩效应。与图 2(a) 相比,这时阈值降低而畴雪崩电压反而增加,这与通常的 Gunn 模式是矛盾的,而这种状态也正好说明已经转变为一种过渡的状态。图 2(c) 是凹槽更深的情况,这时负阻更不明显,阈值明显下降到 8 伏左右,电流几乎一直是恒定的,没有随电压而增加,直到 50 伏,没有迹象说明畴出现离化效应。图 2(d) 的情况更为明显,这时由于畴在阴极凹槽静止,然后扩展到体内,畴的宽度很宽,承受电压的能力更强,这与文献[1]中的计算结果是一致的。在计算中可以看出,在浅凹槽的情况,凹槽的电场不是很强,只有当体内电场达到阈值附近时,才能使凹槽的电场超过阈值,从而有畴产生。而畴一旦产生,便离开凹槽,向阳极渡越,成为三角形畴,这种畴不能承受更高的电压;而在深凹槽的情况,由于凹槽很深,在凹槽附近的电场很强,虽然整个体内平均电场尚未达到阈值,但在凹槽中的电场早已超过阈值,从而有畴产生,畴产生后并不向阳极渡越,因此承受电压的能力较高,这就解释了为什么在这种情况下阈值电压变小而畴雪崩击穿电压反而提高的这一矛盾现象。

上述实验曲线与计算机的计算结果进行了比较,图 3 是用浓度 $n_0 = 2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, 凹槽分别为 0%、70% 和 90% 所算得的 I-V 曲线,在规律上大体相符,因为实测的伏安特性曲线是一个与时间无关的稳态过程,在图 3 中所示的结果是除去了位移电流的影响。另外,计算中所用的浓度是 $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$,而实际制作的器件是 $n_0 = 8.5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$,又由于计算中所取的凹槽是 $1 \mu\text{m}$ 宽,实际制作的器件的凹槽宽度大约是 $2-3 \mu\text{m}$ 。由于样品的浓度高、凹槽宽,因此积累层大约填满整个凹槽(在平面 Gunn 器件中的凹槽是一个几何凹槽,所谓填满凹槽指的是在凹槽下留下的部分的浓度 $n(x)$ 要比 $n_0(x)$ 为高,以等效于体内浓度相等),结果使实测的电流下降要比计算的电流下降要多一些。当然,为了更准确一些,在计算平面 Gunn 器件时,最好采用二维计算。

2. 不同畴状态的相应的光辐射研究

我们知道,当高场畴内的电压足够高时,畴就会出现雪崩击穿效应^[3],这时有红外光辐射,通过对光辐射的观察,可以判断高场畴内的电场情况。

现在我们讨论在不同凹槽深度下的畴雪崩击穿电压并观察它们的光发射情况,如图 4 所示。对于浅凹槽的情况的光发射,对应于图 2(a),这时由于样品有源区

比较长,样品达到阈值时的偏压已经达到 20 伏,又因为样品的浓度比较高,因此在畴一形成以后,即已达到畴离化的电场(通常为 100 kV/cm 以上,不同作者所取数值不同),由于畴内电场最高处产生电子空穴对,在复合过程中有光子产生,因此可以探测到红外光。随着电压加高,光辐射很快增加,直到产生畴雪崩。这时器件电流急剧增加,光辐射也急剧增加。在这种情况下,如果没有限流电阻阻止流过器件的电流,很容易导致样品的烧毁。

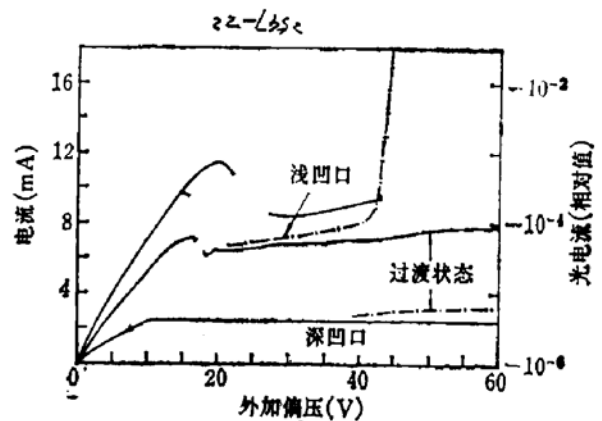


图 4 不同凹口深度的样品的光发射随偏压的关系

—— 器件的 I-V 曲线, 参照图 2(a, b, c.)
- - - 相应的光电流的变化

但是对于图 2(b) 的过渡状态,光电流就明显地小得多,增加的速度也比较缓慢。从计算中知道,这时体内的电场要低得多。由于畴的宽度较宽,电场随电压的上升率也比较缓慢,使总的光电流输出减小。至于图 2(c, d) 的深凹槽的情况,这时畴的电场分布趋于平坦,外加电压在 200 伏之内没有观察到光的辐射,这时即使把光电倍增管冷却到液氮的温度,使测试系统的噪声降到极低,也仍然接收不到光讯号,说明在这样的样品内,畴的峰值电场是不高的。当然,它们的畴击穿电压也各不相同,对于浅凹槽的情况,畴雪崩电压为 43 伏左右,而深凹槽的样品,击穿电压显著提高,这时因为偏压加得很高,必须使用脉冲偏置。有些样品甚至加高到 500 伏的脉冲电压也仍然没有产生畴的雪崩效应,这么高的外加偏压在一般三角形畴的 Gunn 器件中是不可能的。但是我们可以做一个简单的分析来说明这一问题。对于 $8.5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 的浓度,如果在 40 伏时三角形畴的宽度为 $2 \mu\text{m}$,平均峰值电场已达到畴的雪崩电场以上,为 200 kV/cm ;而对于平坦的梯形畴,这时有源区为 $30 \mu\text{m}$,畴宽也近似为 $30 \mu\text{m}$,外加偏压为 200 伏时平均峰值电场只有 67 kV/cm ,这时还没有达到畴离化的条件,当然就观察不到畴的光发射效应,即使外加偏压达到 500 伏时,平均峰值电场也只有 170 kV/cm 。从这一比较中可以看出电场均匀分布的梯形畴在耐压上的优越性。当然,这一分析是很粗略的,只是作一个定性的说明,在实际的器件中,畴电场的分布要复杂得多。

3. 器件烧毁的实验研究

为了研究畴的峰值电场的位置,我们观察了样品的烧毁情况,对于阳极静止畴,我们用 10^{15} cm^{-3} 的 GaAs 外延片制作了平面 Gunn 器件,没有制作阴极凹槽,然后加脉冲电压,使畴内电场达到畴雪崩电场,这时所产生的畴是通常的三角形畴,畴渡越到阳极,在阳极高浓度区边缘畴内电场突然上升,造成阳极侧电击穿,使电流突然增加。当大电流通过有源区时,形成电流丝,如图 5(a, b) 所示,结果使器件烧毁。在器件通过大电流而烧毁的瞬间,可以从显微镜中观察到有源区中红黄色的可见光。对于另外一类深凹槽的样品,如前面图 1 所示,这时只有当有源区浓度比较高时,才在深凹槽处有较强的电场,我们选用 10^{16} cm^{-3} 以上的有源区浓度,并加 50 Hz 的全波整流电压,然后加高电压使器件烧毁。这时器件的阴极和阳极都做成几何扩展,以降低电场,避免在阴极和阳极形成畴。与图 1 相对应,可以看出图 6 中的烧毁位置正好在深凹槽处,由于这时器件的浓度较高,所

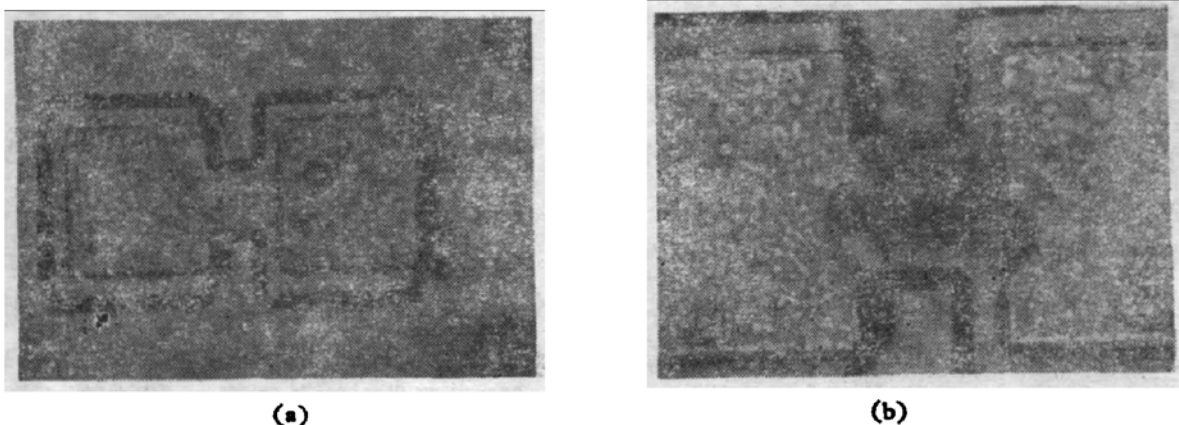


图 5 样品烧毁前 (a) 后 (b) 的情况

以电场集中在凹槽处,在器件烧毁时有一个很大的电流流过器件体内,但由于有源区有较高的浓度,可以不用形成电流丝而提供大的电流。图中可以看出、未烧毁部分的有源区仍然是完好的。

4. 肖特基结深耗尽层所形成的浓度凹槽的影响

前面已经说过,在平面 Gunn 器件中可以用深几何凹槽来使畴在深凹槽处静止而获得高的耐压,那么是否有可能在平面 Gunn 器件中制作一个肖特基栅,并在栅上加反偏压形成深耗尽层作为一个等效的深浓度凹槽而使畴在栅的阳极侧静止,从而获得高的电压呢?为此我们制作了如图 7 所示的图形。测试结果如图 8 所示。图中我们只画出了在肖特基栅偏压较高时的情况,这时产生的现象和 GaAs 功率 MESFET 在栅偏压加高时的情况相类似^[4],进一步增加栅偏压,导致源漏电流的增加而不是减少,认为这是由于栅漏雪崩所引起的,我们在实验中也观察到了这一现象,例如栅偏压为 -5 伏时、阳极和阴极之间的电压在 17.9 伏以上时通过样品的电流开始增加,而当栅偏压为 -7 伏时,偏压在 13.5 伏时就开始有电流的增加,但是这只是特性的一个方面。在样品中我们还观察到,在外加偏压进一步提高时,有一个更明显的击穿电压,在这一电压下,电流突然增加,而这一击穿电压与栅的反偏压的大小成正比。从图 8 的伏安特性曲线中看出,即使在栅偏压很高的情况下,器件已经被夹断,但对击穿电压并没有明显的提高,这说明利用加高栅偏压来获得深的耗尽层的办法不能使畴在栅形成的耗尽区内静止,当然也就不能用这一办法来获得高的耐压。为了使 GaAs MESFET 获得高的外加漏源电压,必须在栅极的位置上先做一个深的几何凹槽,然后再做一个栅极,这方面的研究工作近来已经报道了一些分析^[5]及实验工作^[6],也证实了这一看法。

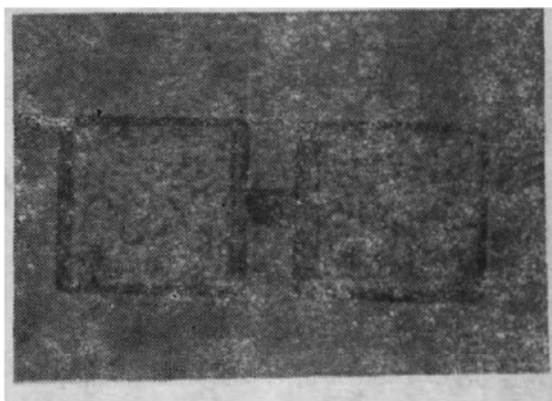


图 6 深几何凹槽样品的烧毁情况

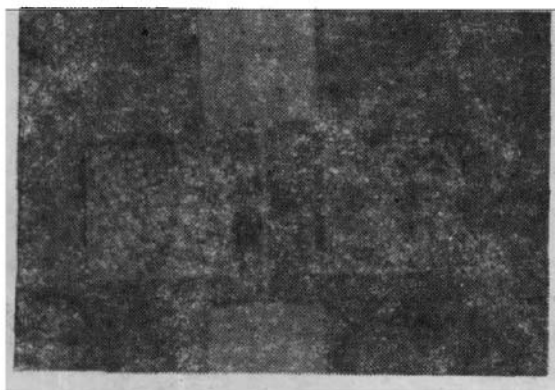


图 7 具有一个肖特基栅的平面 Gunn 器件

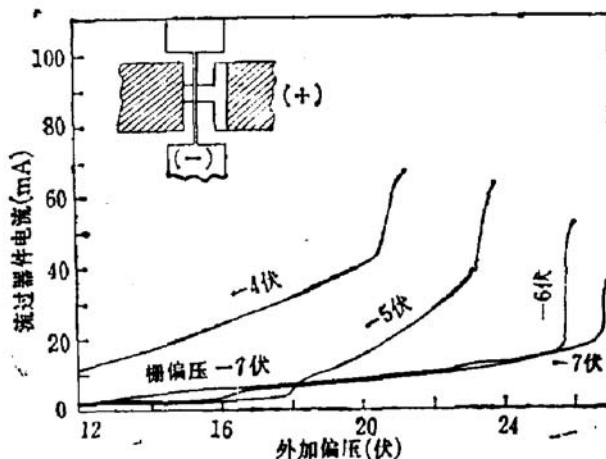


图 8 深耗尽时平面 Gunn 器件的耐压情况

三、结 论

本文在理论分析计算的基础上,对 GaAs 体效应器件中阴极深凹槽引起的静止畴进行了实验研究。通过对不同几何凹槽深度的器件的伏安特性的观测和击穿电压及畴雪崩光辐射的研究,证实了这一类畴的存在。

参 考 文 献

- [1] 郑一阳,半导体学报, 6, 281(1985).
- [2] 郑一阳,半导体学报, 6, 469(1985).
- [3] 王守武,郑一阳,刘朝中,中国科学, No.6, p.577 (1975).
- [4] J. V. Diloranzo, et al., IEEE Trans., MTT, MTT-27, 367 (1979).
- [5] W. R. Frensley, IEEE Trans, ED, ED-28, 962 (1981).
- [6] S. Tiwari, L. Eastman and L. Ratbun. IEEE Trans. Electron Devices, ED-27 1045 (1980).

Experimental Result of Stationary Domain Originated from the Cathode Deep Recess in GaAs Transferred Electron Devices

Zheng Yiyang

(Institute of Semiconductors, Academia Sinica)

Abstract

The voltage of the avalanche in the high field domain and correlation light emission in GaAs transferred electron devices are described. The burnout characteristics of the devices have also been studied. The stationary domains originated from the cathode deep recess are compared with the general triangle domain in GaAs transferred electron devices, thus giving the reason for its existence.