

GaAs 体效应器件中阴极深凹槽掺杂分布引起的静止畴的电场的计算分析

郑 一 阳

(中国科学院半导体研究所)

1984年5月18日收到

本文讨论了 GaAs 体效应器件中阴极深凹槽掺杂分布引起的静止畴的电场分布,指出掺杂浓度、有源区长度、扩散系数及外加偏压对电场分布的影响,并与通常的 Gunn 器件的三角形畴模式进行了比较。

一、引言

众所周知,固体电子器件的研究中离不开对器件内部电场的分析。同样,在 Gunn 器件中,对电场分布的研究也是极为重要的。由于在 Gunn 器件中有畴的存在,因此电场分布就随畴的性能而变,通常所说的 Gunn 器件,就是指的渡越畴模式,在外加偏压超过阈值以后,器件内部有一个近似三角形的畴,在体内周而复始的产生与消失,形成一个 Gunn 振荡。而电场最强点为三角形畴的顶点,即积累层与耗尽层的交界处。后来虽然有人观察到了阳极静止畴的模式,但畴的形状仍然是三角形的。一旦畴在有源区中形成,外电压大部分降落在畴内,因此外加电压的增加导致畴内峰值电场的很快增加。由于畴外场很低,即使增加样品长度也不能有效的增加器件承受电压的能力,因此这一模式使器件的功率输出受到限制,也影响它的可靠性。

本文讨论在转移电子器件中的另外一种畴模式——阴极深凹槽掺杂形成的静止畴的电场分布。在该模式中,可以在体内得到较均匀的电场分布。我们在文献[1]中用计算机模拟了这种畴的形成原因、产生条件及它们的特点。例如可以大大增加外加偏压,可以消除体内的正阻区,可以改善器件的热分布等等。这里进一步讨论有源区浓度、长度及扩散系数等对电场的影响;也讨论电压上升时间及幅度对电场的影响。

二、外加偏压对深凹槽静止畴的电场分布的影响

外加偏压对深凹槽静止畴的电场分布有很大的影响,我们用计算机模拟了这一类畴的电场分布,所有的计算方法与计算条件均与文献[2]相同。在计算中取有源区的掺杂浓度 $n_0 = 2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, 样品总长度为 $9.0 \mu\text{m}$, 阴极和阳极都做欧姆接触,分别以指数的形式从 $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 下降到 $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 。掺杂浓度为 $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 的有源区部分大约为 $5 \mu\text{m}$ 左右,仍然采用 $1 \mu\text{m}$ 的阴极凹槽,深度为 90%, 分别加 5 伏, 11 伏, 15

伏, 20 伏及 30 伏的偏压。结果如图 1 所示。图中所示的状态是在加上偏压以后 150 ps 时刻的状态, 这时畴已经静止下来, 随着时间的变化电场分布不再变化。当外加偏压为 5

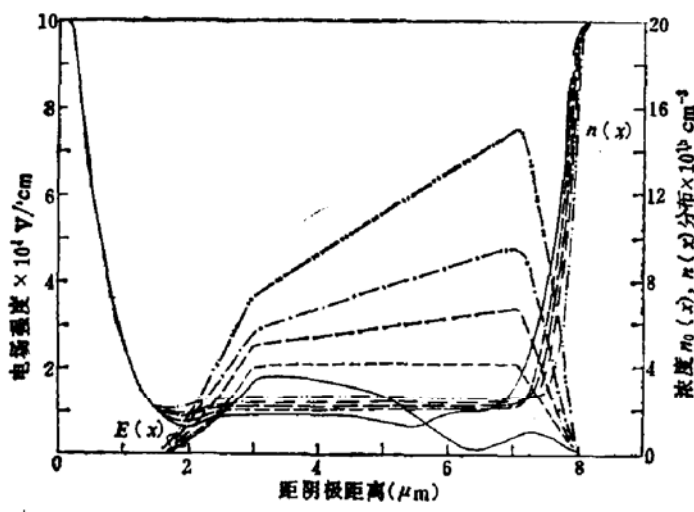


图 1 在 $t = 150$ ps 时不同偏压下的电场及浓度分布

—— 外加偏压 5 伏 - - - - - 外加偏压 11 伏
- - - - - 外加偏压 15 伏 - · - · - 外加偏压 20 伏
- · - · - 外加偏压 30 伏 $n_0 = 2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ $t = 150$ ps 时刻

由于这一条件满足, 因此处处都是相同的高电场, 浓度及电场分布几乎不随距离而变, 在阴极凹槽填充的电子来源于阳极边界上载流子的耗尽, 最终满足电中性条件, 图中看出, 在阳极边界上, 11 伏时的耗尽层要比 5 伏外加偏压时更向阳极侧展宽。外加偏压增加到 15 伏时, 空间电荷进一步增长, 这时阴极凹槽几乎被填满, 多余的电子扩展到整个体内, 使体内 $n(x)$ 的值大于 $n_0(x)$ 的值, 在该偏压下, 体内 $n(x) = 2.15 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, 大于原来的体内掺杂浓度

$$n_0(x) = 2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$$

的值, 由于这一原因, 使电场分布从阴极到阳极线性递增。在 20 伏和 30 伏的偏压下, 就更加明显。从图中可以看到, 随着外加偏压的提高, 空间电荷进一步增长, 阴极凹槽全部填满后多余的电子填充到有源区中, 使浓度 $n(x)$ 增加, 但仍然保持平坦的浓度分布。

电压从 5 伏增加到 30 伏, 电场分布由从阴极到阳极递减的分布到平坦的分布, 然后到递增的分布, 把这五种偏压下的畴峰值电场随时间的变化作成图 2。从图中看出, 最高畴峰值电场的位置不是在畴静止以后, 而

伏时, 在静止畴形成以后(关于这类静止畴的形成原因及条件, 已在文献[1]中作了详细的讨论), 由于这时外加偏压较低, 畴的积累层和耗尽层的空间电荷生长得比较少, 积累层的电子不能全部填满凹槽, 畴的耗尽层也不能全部扩展到样品的体内, 因而在阳极边界附近的有源区内还留有一些正阻区。当外加电压为 11 伏时, 这时正好达到了平坦的电场分布, 除了阴极凹口还有一点低浓度区没有填满外, 体内浓度分布都是平坦的, 而且

$$n(x) = n_0(x),$$

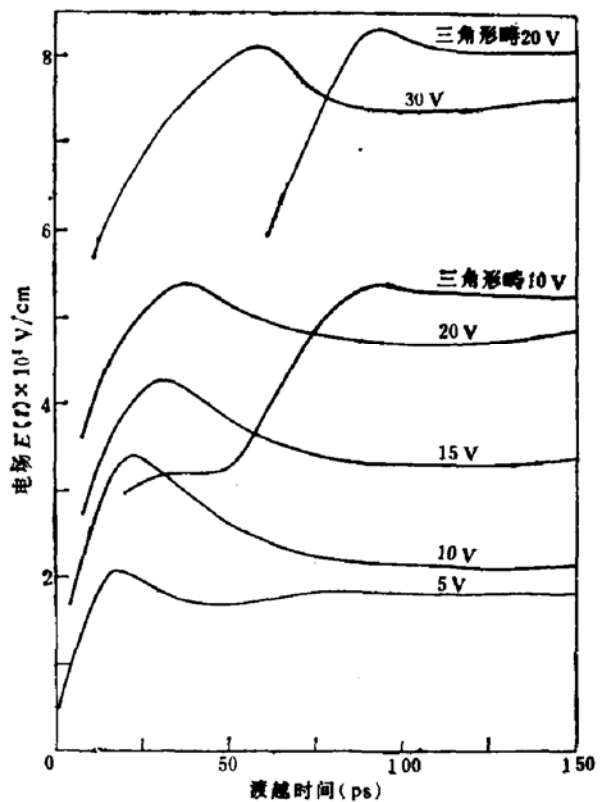


图 2 五种偏压的畴峰值电场随时间的变化

是在畴的生长过程中,或者,当外加电压增高时,是在畴的积累层向阳极平衡的过程中。对于较低的外加偏压,畴的空间电荷比较少,畴生长以后,比较容易调整到稳定,但在较高偏压时,畴的积累层除了填满阴极凹槽外,另一部分仍然和耗尽层一起向阳极渡越,这时在体内形成整个过程中的最大峰值电场,例如在 30 伏外加偏压时,最大峰值电场是在 60 ps 的时刻。此后,畴再向阳极渡越一些,由于在凹槽处有电场的降落,因此峰值电场反而下降一些。这种情况与通常的三角形阳极畴不一样,在三角形阳极畴中,由于畴达到阳极时畴外电场很低,而阳极浓度分布又使峰值电场增加,因此畴在阳极静止后达到最大的电场分布。为了进行比较,图 2 中画出了一般阳极静止畴的电场随时间的分布情况,图中还可以看出,在相同的外加偏压下,深凹槽静止畴的峰值电场比通常的阳极静止畴的峰值电场要低得多,例如,外加电压为 20 伏的峰值电场为 54 千伏每厘米,只相当于三角形畴 10 伏时的峰值电场。因此,当外加偏压增高时,这一类畴的峰值电场上升较慢,从而也不容易击穿。

三、掺杂浓度对深凹槽静止畴的电场分布的影响

器件有源区的掺杂浓度对畴的参数有很大的影响,在通常的 Gunn 器件中,当掺杂浓度增加时,在相同的外加偏压下,畴的宽度变窄,因此,畴的峰值电场迅速提高。在深阴极凹槽静止畴中,电场随掺杂浓度变化的情况比较复杂,为了说得更清楚一些,我们相应于图 1 那样,画出 $3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 掺杂浓度的不同偏压下的电场及浓度分布,如图 3 所示,这时外加偏压取 5 伏、11 伏、15 伏、17 伏、20 伏及 30 伏六种,可以看出,在较低的同时外加偏压下,现在的掺杂浓度下畴的宽度变窄,畴峰值电场提高,例如在 5 伏外加偏压下峰值电场上升到 23 千伏每厘米,随着外加偏压的提高,畴逐渐向阳极扩展而峰值电场不断提高,一直到外加偏压为 17 伏时,这时畴的峰值电场获得平坦分布。我们以电场分布平坦的梯形畴作为一个标准,分析在不同浓度下达到电场平坦分布所需要的外加偏压及电场,这时有源区浓度分布平坦,而数值与掺杂浓度相同,我们从图 4 中可以看出,对于 $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 的掺杂浓度,达到平坦电场分布的外加偏压是 7 伏,这时的平均电场为 14 kV/cm,对于 $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 的掺杂浓度,达到平坦电场分布的偏压是 11 伏,平均电场是 22 kV/cm,而 $3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 的是 17 伏,平均电场是 34 kV/cm,从这里可以看出,在平坦分布的情况,电场的值基本上满足 $E = V/L$, 其中 V 是外加电压, L 是样品的有

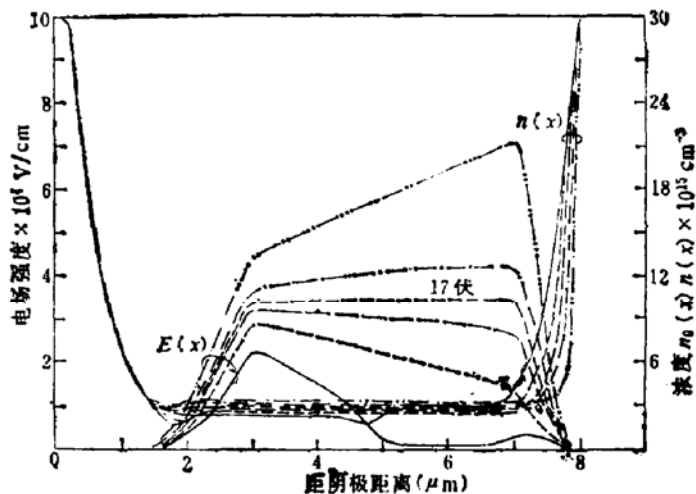


图 3 $3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 掺杂浓度的电场及浓度分布曲线

——外加偏压 5 伏 - - - - -外加偏压 11 伏
 - - - - -外加偏压 15 伏 - · - · -外加偏压 20 伏
 - · - · -外加偏压 30 伏 外加偏压为 17 伏的图中已标明。
 浓度 $n_0 = 3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ $t = 150 \text{ ps}$ 时刻。

源区,这时有源区浓度分布平坦,而数值与掺杂浓度相同,我们从图 4 中可以看出,对于 $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 的掺杂浓度,达到平坦电场分布的外加偏压是 7 伏,这时的平均电场为 14 kV/cm,对于 $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 的掺杂浓度,达到平坦电场分布的偏压是 11 伏,平均电场是 22 kV/cm,而 $3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 的是 17 伏,平均电场是 34 kV/cm,从这里可以看出,在平坦分布的情况,电场的值基本上满足 $E = V/L$, 其中 V 是外加电压, L 是样品的有

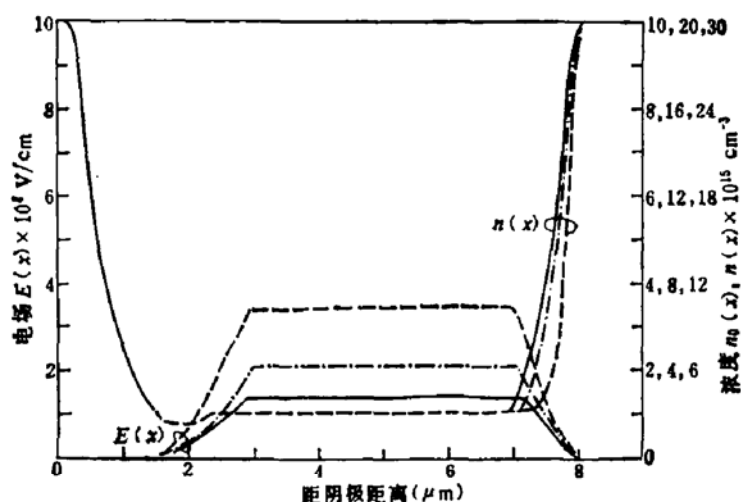


图4 不同掺杂浓度下的平坦电场值

- 外加偏压为 7 伏. $n_0 = 1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$
 - - - 外加偏压为 11 伏. $n_0 = 2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$
 - · - 外加偏压为 17 伏. $n_0 = 3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$
 $t = 150 \text{ ps}$ 时刻.

源区长度,从上面三种浓度求得的样品的长度正好为 $5 \mu\text{m}$,它就是在计算中所取的样品的有源区长度.

在 150 ps 以后,畴已经静止下来,这时不同浓度下的畴峰值电场与外加偏压的关系如图 5 所示,对于同一个浓度,畴的峰值电场与外加偏压的关系中分为两个部分,在畴达到平坦电场分布之前,畴的峰值电场上升比较慢,而一旦外加电压已经使畴内电场为梯形分布以后,畴的峰值电场上升就

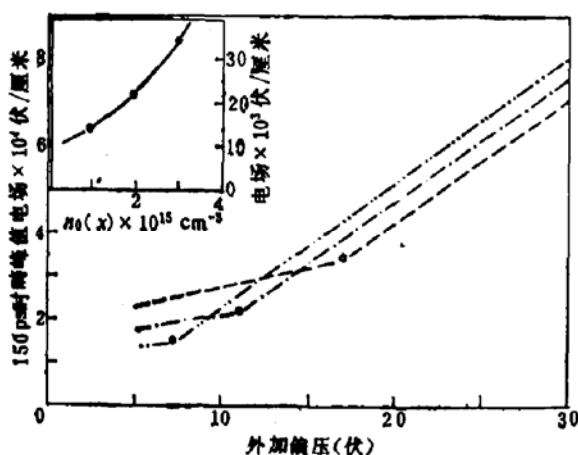


图5 不同浓度下的畴峰值电场与外加偏压的关系

- - - 掺杂浓度 $3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$
 - · - 掺杂浓度 $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$
 — 掺杂浓度 $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$

较快。前面已经说过,不同浓度的器件的平坦电场分布的电压是不一样的,因此在同一电压下峰值电场随浓度的变化也分成两个部分。在平坦电场之下,由于畴占样品的一部分,畴外场基本上都一样,外加偏压都降落在畴内,有源区浓度越高,畴越窄,畴的峰值电场越高,这与通常的三角形畴的规律是一样的,而在平坦电场之上时,由于浓度越高,畴的平坦电场值越高,在外加偏压固定时,它已经吸收了更多的外电压,因此浓度越高,畴的峰值电场反而降低,这与通常的三角形畴的规律是相反的,这也是这一类畴的一个特点。这对于制作高浓度器件而防止高电场击穿是有利的。

图中曲线的拐点即为该浓度下的畴电场平坦分布电压,把这一点的电场与掺杂浓度 $n_0(x)$ 作成曲线如图中插图所示。这时可以看出,掺杂浓度越高,它的平坦电场也越大,因此为了获得高的耐压,可以适当选取较高的浓度。

四、器件有源区长度对深凹槽静止畴的电场分布的影响

从前面电压和浓度的分析中知道,当浓度一定时,随着外加偏压的增高,畴前部的电场分布由递减分布变成平坦分布,然后变成递增的分布。这就说明,当畴电场达到平坦分布以后,外电场再增加,这部分增加的外电压要加到畴电场上去,这时由于浓度分布是平坦的,而且 $n(x)$ 分布大于 $n_0(x)$ 分布,多余的电压就形成一个前部陡,后部平坦的三角形,叠加到梯形电场之上,而且外加电压越高,这一三角形的顶点的电场也越高。

但是畴的电场分布也与器件的有源区的长度有密切的关系,如前面图 3 中 20 伏的一条曲线为例,这时有源区为 $5\mu\text{m}$, 电场

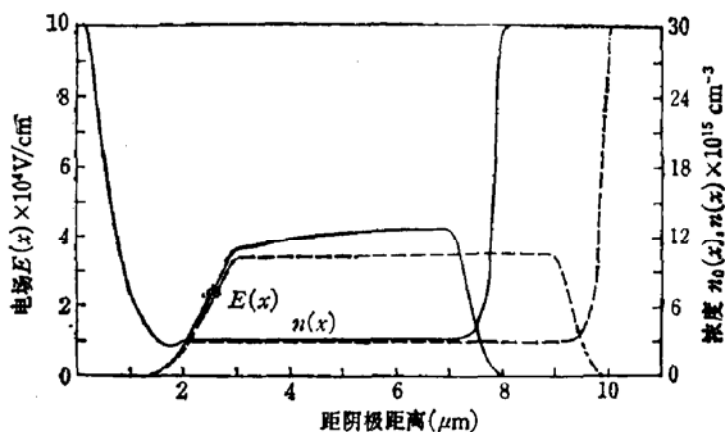


图 6 器件有源区增加后, 电场又得到了平坦分布。

—— 有源区长度为 $5\mu\text{m}$ - - - - 有源区长度为 $7\mu\text{m}$
 $n_0 = 3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ $t = 150 \text{ ps}$ 时刻 外加偏压为 20 伏。

分布超过平坦的分布,如果这时样品有源区的长度增加 $2\mu\text{m}$, 则多余的电压将落到扩展的 $2\mu\text{m}$ 区域,如图 6 所示,这时虽然外电压不变,但仍然得到了平坦的分布。这时还可以看到,有源区内的浓度也从原来的 $3.08 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 降到 $3.00 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, 如果再增加样品的长度,电场的前部将降低,相反,如果已经得到平坦分布的器件,缩短有源区,会使阳极附近的电场上升,成为不平坦的电场分布。

因此,在现在的模式中,如果知道有源区的长度和浓度,而凹槽的形状又是已知的,则大体可以估计体内的电场分布,从而可以确定器件的工作状态。例如,在小讯号放大时,希望有较大的负阻,则取较低的浓度和较低的电压,而在功率器件中,则希望能耐较高的

偏压,但是在通常的三角形畴模式中,由于畴外场较低,因此在固定外加偏压时,样品的长短对畴的峰值电场影响不大。

五、扩散系数对阴极深凹槽畴的电场分布的影响

在固体器件中,扩散的作用是很重要的。在 Gunn 器件中,扩散系数的大小直接影响到畴的积累层和耗尽层的宽度和分布,这当然会影响到畴内电场的分布。在扩散系数为零的情况下,一般很难得到静止畴的模式,当

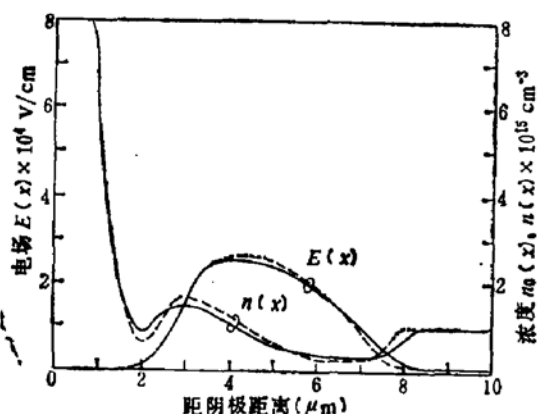


图 7 两种不同扩散系数所算得的畴状态

—— 取文献[3]中数据
 - - - - $D = 250 \text{ cm}^2/\text{s}$

然,在实际器件中载流子的扩散系数不会为零,从而在实验中可以观察到静止畴的现象。

对于阴极掺杂深凹槽畴的模式也是一样,扩散系数的值不一样,畴的宽窄也不同,它既影响到电场分布的形状,也影响到畴到达稳定状态的时间,图7是扩散系数取常数 $250\text{cm}^2/\text{s}$ 和采用文献[3]的扩散系数的计算结果,后者的扩散系数与电场有关,在阈值电场附近扩散系数可以达到 $800\text{cm}^2/\text{s}$ 以上,在这两种情况中,扩散系数为 $250\text{cm}^2/\text{s}$ 的畴显得要窄一些,相应畴的峰值电场也要高一些。

图中所取凹槽为90%,所加偏压10伏,并取25ps时刻的状态。

关于扩散系数的选取,现在已有很多作者进行了分析,但是真正从实验上测得的还不多,因此可能给实际器件带来一些误差,我们在计算中通常采用[3]的扩散系数,从实验结果看,取大一点的扩散系数比较符合实验的结果。

六、结 论

本文在文献[1]讨论了GaAs体效应器件中阴极深凹槽掺杂分布引起的静止畴的形成原因,产生条件及它们的特点的基础上,讨论了这种畴的电场分布随外加偏压、器件有源区浓度、器件长度及扩散系数等因素的影响,以便在设计器件中选择各种不同的参数以获得最佳条件下的器件运用,并为制作功率器件及宽带器件提供一定的依据。

参 考 文 献

- [1] 郑一阳,半导体学报, 6, 281(1985).
- [2] 王守武,郑一阳,郝小林,张进昌,半导体学报, 4, 321(1983).
- [3] J. G. Ruch and G. S. Kino; *Phys Rev.*, 174, 921 (1969).

Uniform Static Field Distribution of Stationary Domain Originated from the Cathode Deep Recess Doping Distribution in GaAs Transferred Electron Devices

Zheng Yiyang

(Institute of Semiconductors, Academia Sinica)

Abstract

The uniform static field distribution of the stationary domain originated from the cathode deep recess doping distribution in GaAs transferred electron devices is discussed. The uniform field distribution is obtainable if the cathode doping has a cathode deep recess doping distribution. The effect of the doping distribution, the active region length and the diffusion coefficient on the electronic field has been discussed. This kind of domain is compared with the general triangle domain.