

# GaAs 体效应器件中阴极深凹槽掺杂分布引起的静止畴

郑一阳

(中国科学院半导体研究所)

1984年5月18日收到

本文首先讨论了 GaAs 体效应器件中不同阴极凹槽掺杂分布对畴状态的影响,指出当凹槽深度较深时能形成在凹槽处生长然后静止的畴模式,讨论了这类畴的生长过程及其特点,并与通常的 Gunn 器件的三角形畴模式进行了比较。

## 一、引言

到目前为止,已对 Gunn 器件进行了大量的理论和实验工作,证实当外加偏压超过阈值时,一般可以在器件的有源区内得到一个三角形电场分布的偶极畴,畴只占据器件有源区的一部分,为高电场的负阻区,而畴外低场部分则是器件的正阻区,这样,器件有源区内形成一个不均匀的静电场分布,在该模式中,高场负阻区只占样品的一部分,因此功率和效率都要受到限制。为了获得体内均匀的电场分布,已经有一些作者进行了研究,1970 年 Carroll<sup>[1]</sup> 指出,如果畴的积累层和耗尽层分开某一距离,则在该间隔中载流子浓度是均匀的施主浓度值,在该区中电场应该是平坦的,并指出除非速度——电场特性的高场速度和低场速度一样,否则这种畴是不稳定的,因此只有速度在足够高的电场下又有升高的情况,平顶畴才能稳定,但实际上电子速度在高场下是饱和的,在电场高达 120 千伏/厘米,还没有观察到稳定的平顶畴,而电场再升高,就要出现畴内的雪崩效应了。这种情况类似于积累层畴的模式,但是在计算中知道,积累层畴的模式是不稳定的,随着畴的生长过程,它逐渐转变为偶极畴模式。1971 年 R. Chrott<sup>[2]</sup> 等利用一个  $1\mu\text{m}$  宽 100% 阴极掺杂凹槽和从阴极浓度为  $10^{15}\text{cm}^{-3}$  到阳极升高为  $2 \times 10^{15}\text{cm}^{-3}$  的不均匀掺杂分布,在有源区中得到了部分的平坦电场分布。为了得到平坦的电场分布,还做了另外一些工作,如有源区的梯度掺杂,阴极肖特基势垒接触和阴极有一窄 P 区等,但这些工作也正在进行中。

本文通过计算机模拟,讨论了由于阴极深凹槽掺杂分布所引起的静止畴,重点讨论它所形成的条件以及它的特点。

## 二、不同阴极凹槽掺杂分布对畴状态影响

为了讨论 Gunn 器件中阴极深凹槽掺杂分布引起的静止畴,先来讨论这种静止畴是

怎样获得的。我们用计算机进行了模拟分析，所有的计算方法与计算条件，已经在文献[3]中进行了讨论，本文只讨论计算结果。

首先讨论均匀有源区的情况，设有源区中浓度起伏近似为零，在阴极制作欧姆接触时没有引入高阻层，因此，阴极附近没有掺杂凹口。在计算中取有源区掺杂浓度为

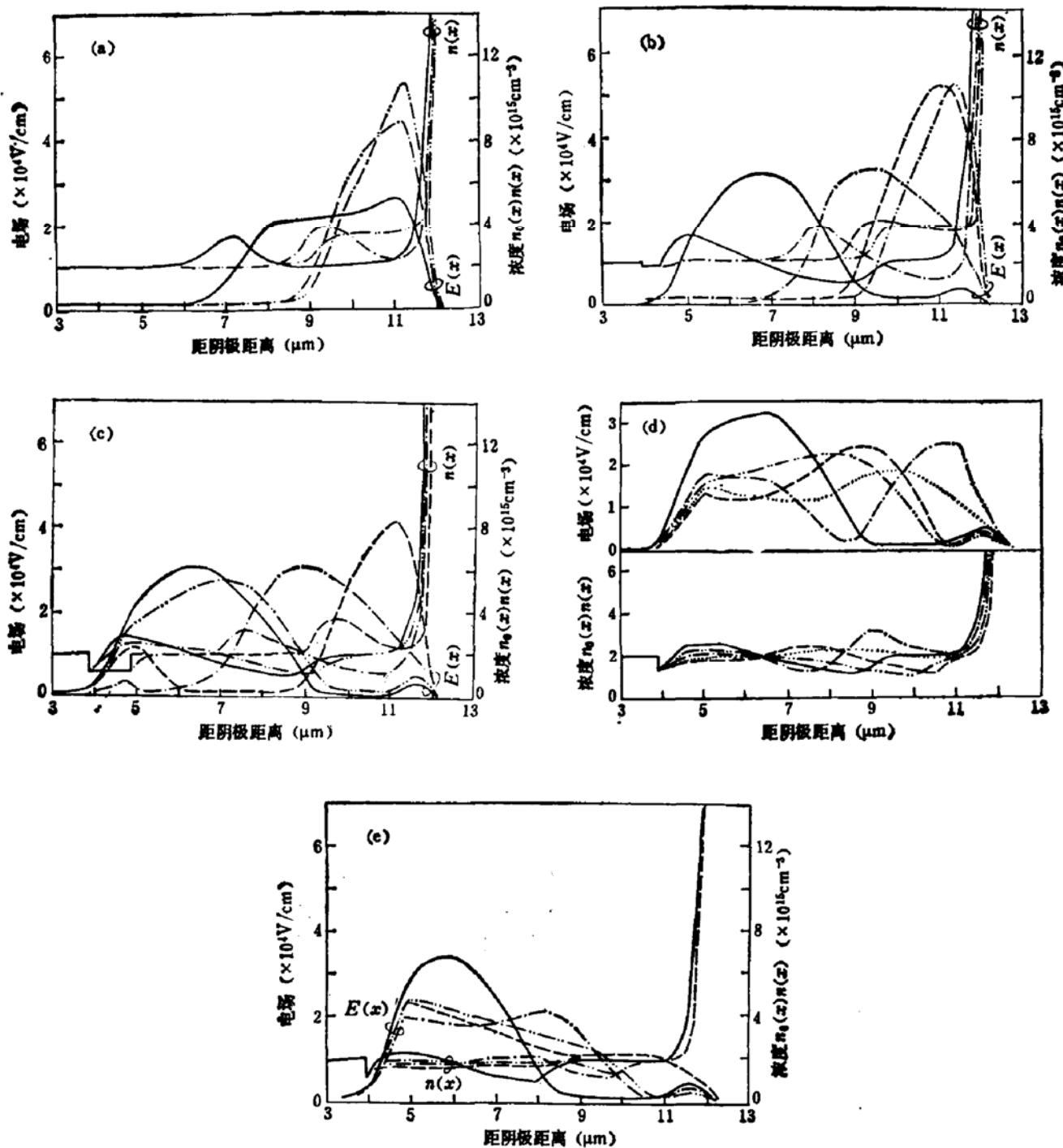


图 1 不同阴极凹槽掺杂分布对瞬态的影响

——25ps    -·-·- 50ps    --- 75ps  
 -·-·- 100ps    ..... 125ps     $n_0 = 2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$

凹槽分别为：(a) 0% (b) 17.5% (c) 50% (d) 70% (e) 90%

$n_0(x) = 2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ , 外加偏压为 11V。从图 1(a) 中看出, 这时虽然没有阴极凹口或体内浓度起伏, 但仍然有畴产生, 它首先以积累层畴的形式出现, 体内为积累层, 浓度高于掺杂浓度  $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ , 为了保持电中性条件, 耗尽层出现在阳极边界的高浓度区, 图中 25ps 所示的状态, 正如序言中所说的那样, 积累层和耗尽层分开一个距离, 由于有源区内没有载流子的耗尽层, 在积累层和阳极边界上的耗尽层之间的施主浓度分布  $n(x) = n_0(x) = 2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ , 是平坦的, 电场分布当然也就接近于平坦, 但是这一状态是不稳定的, 随着时间的推移, 畴的积累层逐渐向阳极移动, 而耗尽层却不能以同样的速度继续向前移动, 这样积累层越来越向阳极接近, 直到积累层和耗尽层在阳极边界相连接, 畴的宽度变窄, 形成一个偶极畴, 电场分布也越来越向三角形过渡, 最后畴区载流子浓度分布趋于平坦, 畴尾部的电场分布接近于线性, 如图 1(a) 中 100ps 时的情况, 由于畴外部浓度分布平坦, 畴外场低于阈值, 体内不能再产生新的畴, 于是畴就静止了下来, 形成静止畴, 关于畴静止的具体过程, 在文献[3]中已作了详细的讨论。第二种情况是设体内有一浓度凹口, 深度为 17.5%, 外加偏压仍为 11 伏, 为了节省计算的机时, 我们把凹口选得略靠中间一点, 设在 4.0—5.0 μm 之间有一个 1 μm 宽的凹槽, 这时畴一形成就是一个偶极畴, 这是最常见的情况, 图 1(b) 中画出了它的电场及浓度分布, 最后仍然是静止畴模式。第三种情况是当凹槽深度继续增加时, 畴就开始出现渡越状态了, 图 1(c) 设凹槽深度为 50% (实际计算中 20% 的凹槽深度畴已变成了渡越畴), 这时畴渡越到阳极时, 在阴极又有新的畴产生, 形成渡越畴模式。凹槽深度增加到 70% 时, 就出现了渡越与静止的第四种过渡状态, 畴最初从阴极产生, 积累层逐渐填满凹槽, 耗尽层向阳极侧扩展, 由于凹槽深度还不是很深, 积累层在填满凹槽之后, 多余的部分与耗尽层一起向阳极渡越, 而填上掺杂凹槽的部分电荷, 由阳极边界的耗尽层来达到电中性的平衡条件, 这样, 畴似乎分成了两个部分, 一部分在掺杂凹槽处静止, 另一部分向阳极渡越, 如 50ps 时的情况, 当向阳极渡越的那部分畴到达阳极高浓度区而在阳极逐渐消失时, 多余的电压又回来加到停在凹槽的畴上, 于是就出现了这种有趣的现象, 即畴在有源区中有时是一个, 有时又分为两部份, 而在凹槽附近的畴则始终停留在那儿, 如图 1(d) 所示, 为了表示得清楚一些, 把浓度分布和电场分布分别作成不同时间的状态图。最后, 当凹槽深度达到 90% 时, 畴在凹槽产生, 然后, 在扩散与漂移作用下, 畴既向阳极扩展, 同时又在扩散作用下趋于平衡, 最后达到一个稳定的状态: 畴的积累层填在凹槽内, 而耗尽层扩展到整个凹槽与阳极之间, 使有源区载流子浓度分布  $n(x)$  趋于稳定, 从而使畴又静止下来, 如图 1(e) 所示。

图 2 画出了这 5 种状态的电流电压随时间的变化关系, 第一种静止畴有最大的峰值电流, 因为这时体内没有凹槽, 在有源区中只有一个积累层, 这就相当于体内有一个浓度的富集区, 而耗尽层出现在阳极的高浓度区, 这就相当于使样品的等效长度增加一点, 这一综合的效果使畴的峰值电流达到最大, 这一类静止畴没有明显的渡越时间, 在 25—50 ps 的这一段时间内, 畴从积累层畴模式变为偶极畴模式。第二种静止畴的情况和第一种类似, 只是因为有一个凹槽, 所以相当于有源区的低场电阻略大一点, 畴在凹口生长后, 即形成积累层和耗尽层, 并向阳极渡越, 从曲线中明显可以看出从 25ps 到 50ps 之间的一段渡越时间。第三种渡越畴由于凹槽更深, 因此峰值电流也更低一些。这是典型的渡越畴模式。第四种是渡越和静止状态之间的过渡情况。第五种是本文重点讨论的一类静止畴,

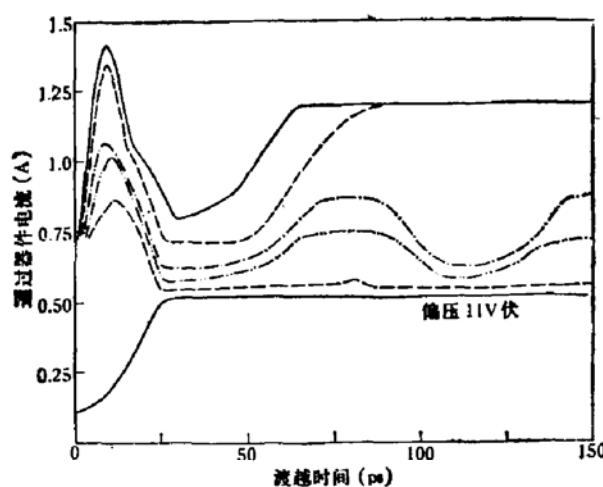


图 2 不同凹槽情况下的电流随时间的变化

——凹槽 0%                   -----凹槽 17.5%  
 ——·—凹槽 50%              ——·—凹槽 70%  
 ————凹槽 90%              外加偏压 11V,  $n_0 = 2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$

从电流曲线中可以看出,这时与第一、二类静止畴不同,在 50—75ps 之间没有电流的回升,在 75ps 处的一个小的起伏是准静态<sup>[3]</sup>引起的,在第二个周期时间中就已经消失掉了。因此随着凹槽的逐渐变深,可以出现静止-渡越-静止的二个转换过程,而在每一次转换过程中,都有一个过渡状态,如第二和第三种状态之间,或第三和第五种状态之间的第四种状态,在计算中没有说明第一个转变过程。

我们在这里说的静止-渡越-静止的模式与我们在文献[3]中讨论的不同,在文献[3]中是由于外加偏压的增高引起的状态转换,而在本文中讨论的是由于凹槽深度的变化引起的,在现在的情况下,浅凹槽引起的静止畴是通常的阴极产生,阳极静止的静止畴模式,这时耗尽层进入阳极高浓度区,而积累层在有源区的阳极侧,电场分布不管怎样都是三角形的,畴的前部较陡,后部比较平坦。而后一种静止畴则是由于深凹槽引起的静止畴,这时畴的积累层在凹槽内,而耗尽层在有源区内,这时畴的形状是不固定的,随外加电压的变化而变,当外加偏压较低时,畴电场前部比较平缓而后部比较陡,但是随着外加偏压的增加,会逐步提高畴前部的电场<sup>[6]</sup>。

### 三、深凹槽畴的生长过程分析

前面提到的阴极产生、阳极静止的模式及畴的渡越模式,它们的生长及渡越机理已经比较清楚。现在重点讨论阴极深凹槽所形成的静止畴,并分析它们是怎样产生及静止下来的。从图 3 我们可以看到,随着电压的增加,畴逐渐形成的过程,图 3 中的插图画出了整个样品的浓度分布,我们用大写字母 ABCD 表示,而深凹槽用小写字母 abcd 表示,把凹槽放大成图 3,并把 abcd 看成是一个小的 Gunn 器件,ab 是阴极,施主浓度分布在  $0.2 \mu\text{m}$  之内从  $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  下降到  $6 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ , bc 是有源区,长度为  $1.0 \mu\text{m}$ , 浓度分布平坦,没有掺杂起伏, cd 是阳极边界,也设在  $0.2 \mu\text{m}$  之内从  $6 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$  上升到  $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ,

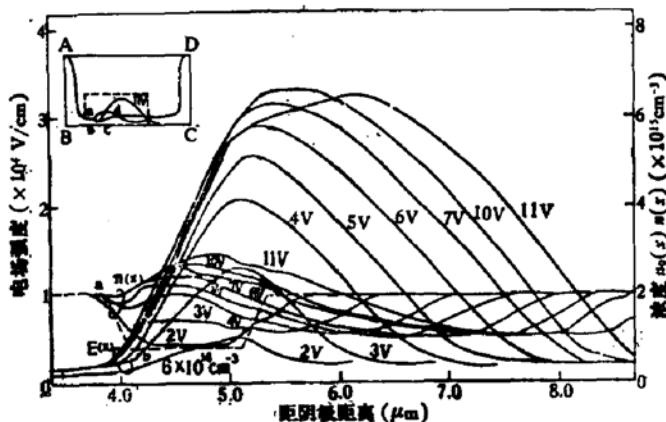


图 3 阴极深凹槽静止畴的形成过程

然后平坦分布几个微米的距离。当外加偏压为 2V 时, 对整个器件 ABCD 来说尚未达到阈值, 但在 abcd 的小器件中则已达到阈值, 由于有源区 bc 分布平坦, 而边界 ab 及 cd 比较陡, 因此首先在两侧有源区内形成积累层, 而在阴极与阳极的高浓度区形成耗尽层, 以保持电中性条件, 其电场分布服从泊松方程, 在 cd 边界上  $n(x) = n_0(x)$  处电场达到最大, 随着外加电压高到 3V, 空间电荷进一步增长, 积累层开始从 b 到 c 填充, 由于积累层的增加, 相应的耗尽层也展宽, 但这时峰值电场的位置仍没有多大的变化。由于耗尽层的深度小于 bc 的凹口深度, 因此畴不能向器件 ABCD 的阳极渡越, 因为这一电压对整个器件 ABCD 来讲, 仍然在阈值之下。当外加电压达到 4V 时, 已经达到了阈值, 于是畴很快生长, 积累层把整个 abcd 填满, 而耗尽层扩展到更大的范围。在外加偏压达到 10V 时, 由于空间电荷的增长, 积累层的电子已经超过了 abcd 的范围, 好像是积累层的电子已经‘溢出’了‘abcd’的容器, 多余的电子向阳极‘流’去, 这时由于余下的电子所形成的积累层与耗尽层一起向前渡越, 使峰值电场也开始向阳极移动。在 25ps 之后, 外加电压已达到稳定的 11V, 在凹槽 abcd 上的积累电子更多, 由于电子浓度高, 畴的后部电场开始下降, 而峰值电场的位置略向前移, 以后的过程便是畴在漂移和扩散的作用下, 耗尽层逐渐扩展到整个器件的体内, 使载流子分布平坦, 而电场也逐渐趋于平坦分布, 最后达到稳定状态。

通过上面的分析可以知道, 在 ABCD 的转移电子器件中, 一旦凹槽 abcd 被积累层所填满, 则整个有源区的载流子分布都是均匀的, 电场也都处于高场状态, 体内没有再产生畴的条件, 于是, 整个器件就处于静止畴状态, 就这一点来说, 它与第一种阳极静止畴的静止原因是一样的, 都是由于畴产生以后, 体内的电场都高于或低于阈值, 使新的畴不能再产生, 于是畴就静止了下来, 但是它们的形成条件是不一样的, 阳极静止畴在阳极静止时, 畴外均处于低场; 深凹槽形成的静止畴在静止后, 体内均处于高电场。因此它们的电场分布形状也各不一样。

#### 四、凹槽深度宽度及形状对畴的影响

本文一开始就讨论了不同的凹槽深度对畴状态的影响, 计算结果表明, 对于畴的静止, 凹槽的深度和宽度是一个关键。如果凹槽的深度不够, 宽度再增加也不能使畴在凹槽

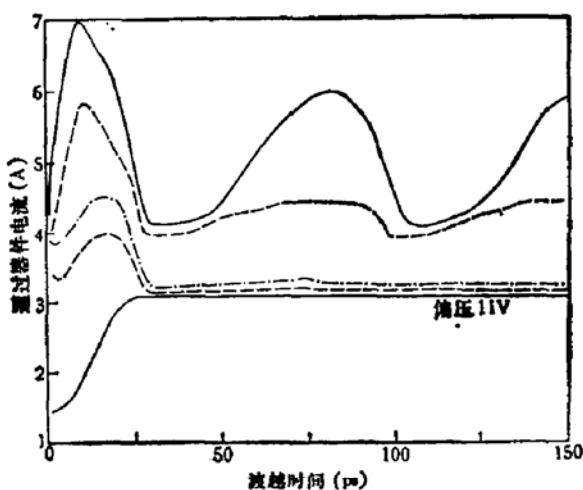


图 4 不同宽度的深凹槽对畴状态的影响

——凹槽 70% 宽  $0.2\mu\text{m}$       ----- 凹槽 70% 宽度  $0.5\mu\text{m}$   
 - - - - - 凹槽 70% 宽  $1.0\mu\text{m}$       — — — 凹槽 70% 宽度  $2.0\mu\text{m}$   
 外加偏压  $11\text{V}$ 、浓度  $n_0 = 3 \times 10^{15}\text{cm}^{-3}$

处静止下来,例如,凹槽深度为 30%,宽为  $3\mu\text{m}$ ,这时畴从凹槽的阳极侧生长,然后渡越到器件的阳极,而这是一个  $3\mu\text{m}$  的凹槽却造成了一个大的低场电阻,将大大降低器件的效率;只有当凹槽足够深时,畴才能静止下来。但是如果这时凹槽太窄,同样也会产生这一问题,如图 4 所示,图中的计算条件是外加偏压为  $11\text{V}$ ,掺杂浓度为  $3 \times 10^{15}\text{cm}^{-3}$ ,当凹槽深度为 70%,宽度为  $2.0\mu\text{m}$  时,畴是静止的,但这时由于凹槽的宽度太宽,因此积累层不能完全填满凹槽,相当于有一个大的串联电阻,使畴的峰值电流下降。当凹槽的宽度降到  $1\mu\text{m}$  时,峰值电流增加。但是凹槽太窄时,也难以使畴静止,当宽度减小到  $0.5\mu\text{m}$  时,已经处于静止与渡越的过渡状态,再减到  $0.2\mu\text{m}$  时,由于凹槽太窄,容纳不了积累层,于是便转变成渡越畴的模式。结果是,在足够深的凹槽时(例如在我们的情况取 70% 的深度),宽度太大,畴的积累层填不满凹槽,使凹槽处浓度下降,电阻增加,从而降低器件的效率,凹口太小又不能使畴静止住,因此在器件设计中要选取一个合适的凹槽宽度与深度值,使畴的积累层正好能填满整个凹槽,这是最佳的条件。

当然,在计算中还应考虑凹槽的形状,我们在计算中选用一个倒梯形的形状,比较理想的是使凹槽符合于畴的积累层的形状,而凹槽向阳极一侧的梯度平缓一些有利于降低凹槽附近的电场峰值,使畴电场有更大的部分落在负微分迁移率的最大处。

## 五、阴极深掺杂凹槽静止畴的特点

前面已经讨论了这类畴的形成条件及生长过程,本节简单讨论它的特点:

(一) 由于有源区内电场分布平坦,可以承受较高的外加偏压。这是最重要的特点之一,电场分布与浓度、长度及外加偏压的关系将另外说明<sup>[6]</sup>,通常的三角形畴因为畴外场很低,不能用改变样品长短来有效的改变峰值电场,电压增加时很容易击穿而限止器件功率。

(二) 在适当的偏压下,使电场落到负微分迁移率最大处,使负阻增大,获得更宽的频带宽度,在文献[4]中指出,在适当外加偏压和浓度下,用小讯号理论算得带宽为 10—100 GHz,且有较大负阻值。

(三) 在有源区内消除了正阻区<sup>[4]</sup>,提高了器件的效率,当高场区展宽到整个体内时,整个器件都呈现负阻,正阻区消失,提高了功率及效率,但在通常的 Gunn 器件中,体内大部分为正阻区,使 Gunn 器件效率不高。

(四) 在电流随时间的变化中,没有或只有很少的电流回升,畴在生长以后即静止下来,既没有渡越,也没有变窄的过程,外回路也就没有充电的过程<sup>[3]</sup>,因此有利于制作开关器件。

(五) 在相同的外加偏压下,随着有源区掺杂浓度的降低,电流落差比增加,使器件减小功耗和增加电流落差比成为统一的结果,在通常 Gunn 器件的静止畴模式中,电流落差比随浓度而增加。在现在的模式中,在相同的偏压的条件下,浓度低的样品的畴要更宽一些,畴更容易占满整个样品而使电流落差比增加。

(六) 这一类静止畴的状态是稳定的<sup>[5]</sup>,当外加偏压增加时,畴只能从凹槽向阳极扩展,一直到畴内电场高到产生畴雪崩效应,因此,认为这是绝对静止畴,这对制作开关器件是很重要的,一般阳极静止畴会因偏压增加而变成渡越畴<sup>[3]</sup>,因此叫相对静止畴,不利于制作开关器件。

(七) 在结构上要求在阴极处制作一窄的低掺杂区,而对其他部分,即使在有源区中浓度起伏较大也不会影响器件性能,但是其他模式对有源区的平坦度要求很高,如限累模式。我们在图 1(a) 中知道,即使有源区浓度起伏为零,也只能产生积累层畴模式。Gunn 模式中有源区浓度起伏太大会影响功率和效率。

(八) 对阳极高浓度区的过渡层没有特别的要求,因为高电场部分全部在体内,到阳极高浓度区时畴电场已开始下降,高电场区不是落在阳极边界,使器件不会因阳极边界太陡而造成烧毁,因此,只要适当制作一个阳极边界就行。在通常 Gunn 器件中希望阳极平缓一些,否则畴峰值电场很高,容易击穿。

(九) 由于体内电场分布均匀,因此体内热量分布均匀,有利于提高器件的可靠性。通常的 Gunn 器件阳极温度最高,而阳极又远离热沉,因此只好采用双面热沉及倒装结构,现在的模式高场区在体内或偏向阴极侧,它的热量分布也是比较均匀或偏向阴极,使热量正好通过阴极热沉散出去,这对器件的可靠性及寿命是有利的。

本工作的实验部分在另一文“GaAs 体效应器件中阴极深凹槽引起的静止畴的实验研究”<sup>[6]</sup>中讨论。

## 六、结 论

综上所述,本文首先讨论了 GaAs 转移电子器件中不同阴极凹槽掺杂分布对畴状态的影响,并指出当凹槽深度较深时,能形成阴极生长然后静止的静止畴模式,它与通常三角形畴有很大差别,它的最大特点是在适当的外加偏压下可以获得平坦的畴电场分布,从而增加这类器件的耐压性能,在制作振荡器时,可以获得超宽带负阻,并有较大的负阻和

效率；在制作开关器件时可以获得较大的电流落差比；在结构上，对有源区的浓度起伏及阳极的制作都容易达到，因此是一种很有实用价值的模式。

### 参 考 文 献

- [1] J. E. Carroll, Hot Electron Microwave Generators London (1970).
- [2] R. Chrotton 等, *Electron. Lett.*, 7, 575 (1971).
- [3] 王守武, 郑一阳, 柳小林, 张进昌, 半导体学报 4, 321(1983).
- [4] 郑一阳, 张进昌, 半导体学报 5, 380(1984).
- [5] 郑一阳, 固体电子学研究与进展 4 No. 3, 14 (1984).
- [6] 郑一阳, 半导体学报, 待发表.

## Stationary Domain Originated from the Cathode Deep Recess Doping Distribution in GaAs Transferred Electron Devices

Zheng Yiyang

(Institute of Semiconductors, Academia Sinica)

### Abstract

The effect of the different cathode deep recess doping distribution in GaAs transferred electron devices on the domain state has been discussed. It has been pointed out that stationary domain is formed when cathode recess doping distribution is rather deep. The growth and feature of this kind of stationary domain have been discussed.