

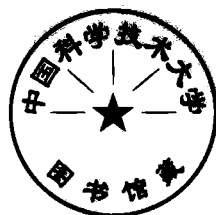
体效应 半导体器件

(内部发行)

半导体情报编辑部

体效应半导体器件

(内部发行)



~~半导体情报编辑部~~

1972.8

毛主席语录

中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平。

在生产斗争和科学实验范围内，人类总是不断发展的，自然界也总是不断发展的，永远不会停止在一个水平上。因此，人类总得不断地总结经验，有所发现，有所发明，有所创造，有所前进。停止的论点，悲观的论点，无所作为和骄傲自满的论点，都是错误的。

内 容 简 介

砷化镓体效应半导体器件是一种新型半导体器件。它是基于 n 型砷化镓等化合物半导体材料在高电场下呈现负阻效应而制成的。因它属于体内效应，与一般 pn 结器件不同，所以称为“体效应半导体器件”。目前，国外正在大力进行研究。

本书对体效应半导体器件的基本原理、器件工艺、电路以及应用等方面作了较为通俗和系统的介绍，可供从事这方面工作的广大工人、科学技术人员以及高等院校的师生学习基础知识之用。

本书根据日本《日刊工业新闻社》1969年版本译出，作者是片岡照荣和館野博。

目 录

1. 概 论

1.1 体效应的发现	(1)
1.2 耿效应的理论	(3)
1.3 在振荡器方面的应用	(6)
1.4 在放大器方面的应用	(9)
1.5 在功能器件方面的应用	(11)
1.6 体效应应用的分类	(12)
1.7 体效应器件的现状	(14)

2. 负微分迁移率和电导

2.1 负微分迁移率介质中的空间电荷	(16)
2.2 负微分迁移率介质的直流电阻	(18)
2.3 n 型砷化镓的能带结构	(20)
2.4 双谷结构的负微分迁移率	(21)
2.5 电导的基本方程式	(22)
2.6 n 型砷化镓的速度电场特性	(23)
2.7 直流电场分布	(24)

3. 高 场 畴

3.1 空间电荷积累层畴	(27)
3.2 偶极畴	(31)
3.3 不等面积定理	(34)

3.4 砷化镓的电流-电压特性	(36)
3.5 稳态畴的性质	(38)
3.6 非稳态畴的性质	(40)
3.7 有关畴的实验	(41)

4. 小信号特性

4.1 小信号理论的适用范围	(45)
4.2 一维二端小信号阻抗	(46)
4.3 小信号导纳的频率特性	(48)
4.4 二维小信号理论	(50)
4.5 用电介质抑制畴效应的理论	(53)
4.6 厚度对电流振荡的影响	(54)
4.7 介质表面负荷器件的特性	(56)

5. 振荡器

5.1 振荡模式	(59)
5.2 振荡频率范围	(60)
5.3 渡越时间模式	(62)
5.3.1 纯粹的渡越时间模式	(62)
5.3.2 偶极畴猝灭模式	(63)
5.3.3 延迟偶极畴模式	(68)
5.3.4 空间电荷积累层模式	(72)
5.3.5 空间电荷积累层猝灭模式	(73)
5.4 限累模式	(74)
5.4.1 限累模式的条件	(75)
5.4.2 限累模式的转换效率	(77)
5.4.3 限累模式的建立	(80)
5.4.4 限累振荡的测量结果	(81)

5.4.5 限累振荡的频率上限	(83)
5.5 混合模式	(87)
5.6 电介质表面负载振荡器	(90)
5.7 弛豫振荡模式	(91)
5.8 器件串联合并联工作的振荡器	(93)
5.8.1 串联工作振荡器	(93)
5.8.2 并联工作振荡器	(96)
5.9 电子调谐振荡器	(97)
5.9.1 变容管调谐振荡器	(97)
5.9.2 钽铁石榴石调谐振荡器	(98)

6. 放 大 器

6.1 两端稳态放大器	(100)
6.2 渡越畴放大器	(104)
6.3 三端放大器	(105)
6.4 行波放大器	(107)
6.5 其他放大器	(110)

7. 逻辑功能器件

7.1 开关特性	(111)
7.1.1 开关时间	(111)
7.1.2 偏置条件	(114)
7.1.3 触发特性	(115)
7.1.4 输出端数	(119)
7.2 脉冲发生器和放大器	(120)
7.3 逻辑器件	(121)
7.3.1 “与”门和“或”门器件	(121)
7.3.2 比较器	(122)

7.3.3 神经器件	(124)
7.4 功能器件	(125)
7.4.1 波形发生器	(127)
7.4.2 A-D变换器件	(131)
7.4.3 变换器	(131)
7.4.4 扫描器	(132)

8. 技术上的各种问题

8.1 材料技术	(134)
8.1.1 砷化镓的制备	(134)
8.2 器件的制造技术	(137)
8.3 可靠性	(139)
8.4 温度特性和散热	(141)
8.5 市售器件的特性	(144)

参考资料	(147)
------------	---------

1. 概 论

1.1 体效应的发现

第二次世界大战以后，在半导体电子学领域里已经取得了惊人的进展，1962年到1963年又有了非常重要的发现，距目前仅仅有6~7年的时间。在那之前，几乎所有的有源半导体器件都是象图 1.1 (a)所示的那样，利用电性能不同两部分的界面的作用构成 P-N 结，其材料仅限于锗、硅。然而 1963 年美国国际商业机器公司(IBM)J.B.耿^{(1)~(2)}在砷化镓化合物半导体 n 型单晶上，如图 1.1(b)那样做上欧姆性电极，在高场下测量其电性能时，偶然发现了图 1.2 那样很高频率的电流振荡。而且发现这种振荡频率(当时为 0.47~6.5 千兆赫)与样品的长度成反比，大约等于电子在电极间传输时间的倒数。对于其原因设想了种种可能性，但那时对基本的因素尚不清楚。所说的砷化镓

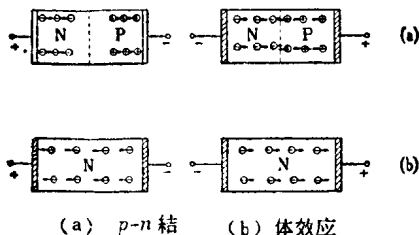
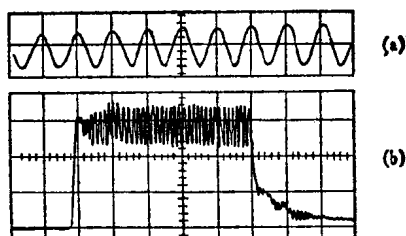


图 1.1 半导体器件的基本结构

是Ⅲ—V族化合物半导体的一种，它具有如图 1.3 所示的闪锌矿晶格结构，其格点上，规则整齐地排列着镓、砷原子。砷化镓

镓做为半导体材料的历史还不长，是在十五年前才发现的。

当时，晶体管的工作频率高到大约 1 千兆赫，由于象图 1.1 (a)所示的那种 P-N 结结构，具有电容，所以从本质上来看，不能期待它做超高频运用，因而对于砷化镓这样均匀的半导体的振荡就抱着很大的希望。本书的名字叫“体效应半导体”，相对于 P-N 结来讲，这就意味着“具有均匀电气性质的半导体”。



(b)横轴一格为 2 毫微秒，纵轴一格为 0.23 安培

(a)它的放大图

图 1.2 最初由体效应观测到的电流振荡

(引自耿的文章)

这个现象为当时停滞的半导体技术展示了新的前景，成了当时很多研究者的研究对象。耿在进一步用探针做了实验后，确认，这种振荡现象是由于偶极层在砷化镓中渡越而引起的⁽³⁾，1961 年英国马拉德研究所的 B.K.Ridley 和 T.B.Watkins⁽⁴⁾从理论上预测，在某种半导体中能够发生这种现象。后来，在 1962 年耿又以英国国立电子技术研究所 G.Hilsum⁽⁵⁾发表的半导体导带间电子跃迁的理论为基础，提出了超高频振荡放大的可能性，直到 1964 年美国维利安公司的 H. Kroemer⁽⁶⁾才对这种可能性做了详细的说明。

1965 年，A. R. Hutson⁽⁷⁾等人给砷化镓加压力，确认其开始振荡的阈值电压降低了，之后，以当时英国国立电子技术

研究所在斯坦福大学留学的 J. W. Allen⁽⁸⁾ 为中心的小组, 通过改变 $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ 混合晶体中砷和磷的比例测量阈值电场的变化, 所得到的结果与 Ridley 和 Watkins 以及 Hilsum 的理论完全一致。这种现象的实质, 已在实验上得到证实, 这大约是在 4 年前发生的事情。

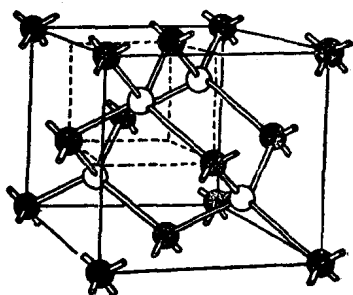


图 1.3 砷化镓的晶格结构

1.2 耿效应的理论

根据迄今为止已明确了半导体理论, 这种新型的振荡现象是产生于图 1.4 所示的那种导带中具有双谷能带结构的半导体中。因为各谷中的迁移率不同, 当加上强场时, 下能谷的电子向上能谷跃迁, 结果, 在某阈值电场以上, 电子平均迁移率减少显示出负微分迁移率。当这种现象显著时, 电子平均速度

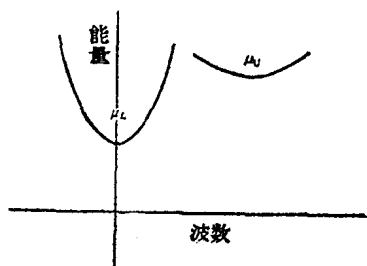


图 1.4 半导体的双谷结构

不是和电场成比例地增加, 而是在阈值电场以上, 电场增加, 平均电子速度反而减少, 即成为图 1.5 所示的特性。这就是所谓的负微分电导特性。

在具有这种性质的材料上, 做两个欧姆性电极, 成为图 1.1 那样的器件, 它遵从

图 1.5 的特性。以电流 I 代替平均电子速度，以电压 V 代替电场，乍看起来，电压-电流特性也好像显示出负阻特性，实际上并非如此。其原因是：这样的材料处于阈值电压以下时，电子的分布是均匀的，内部电场分布也是均匀的。但是，一旦超过阈值电压，就变得不稳定了，至少在电场比阈值电压稍高的那个地方，电子速度变慢，

因而就出现了图 1.6 所示的电子积累和电子耗尽区域，构成了偶极层，偶极层内的电场愈来愈强，空间电荷进一步积累，其结果是使局部电场非常强(叫做高场畴)，偶极层以外的电场是低的。

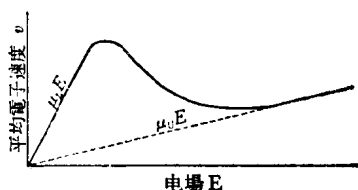
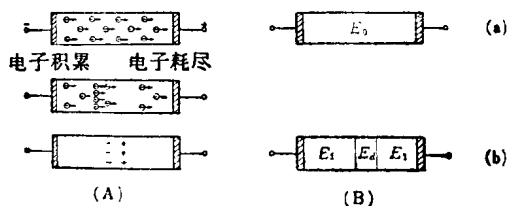


图 1.5 双谷结构半导体的电场和平均电子速度的关系

这样的电场分布是根据电子作出的，而在直流电场作用下，电子都是从阴极向阳极渡越，所以高场畴也是从阴极向阳极渡越，到达阳极就消失了，于是高电场就变成最初的状态，再一个高场畴形成，并向阳极渡越，这样的现象周而复始。



(a) 低电压 (b) 高电压

图 1.6 本体半导体中的电荷分布(A)和电场分布(B)

在这种状态下，如果观察器件的电流，就会看到，刚开始加高电压的瞬间，有大电流流过，但是高场畴一旦形成，电流就减少了，高场畴渡越期间电流值保持不变。当到达阳极消失

时电流增大，又有一个新的高场畴形成，又使电流减小，呈现图 1.7 所示的电流振荡现象。以发现者的名字命名，称之为“耿效应”，利用这种效应的振荡器叫“耿振荡器”。另外，因为这种半导体器件是两端器件，因此又称“耿二极管”。不过，由于器件本来不呈现整流特性，所以叫二极管是不合适的。再者，象下面还要讲到的那样，由于不断地发现了一些和耿发现的现象不同的工作模式，所以把砷化镓所显示出来的所有体效应现象都叫做耿效应也是不适当的。

从这样的理由出发，现在学术界用“转移电子器件”这个名字。但它不是 P-N 结，是均匀体内效应半导体所特有的现象，所以叫体效应也可以。但是做为体效应半导体器件在其他方面还有热敏电阻、霍耳器件、光电器件等等，也就是说，用体效应这个名字还是不合适，可是为了说明它具有的特征，本书还是利用了这个名字。

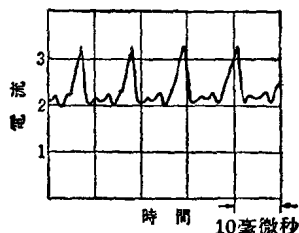


图 1.7 耿振荡波形

随着其物理振荡机构的进一步明确，无论是对振荡器，还是对放大器的应用方法都做了广泛的研究，进行了实用装置的研制，这个研制主要是以贝尔实验室为中心的美国人进行的，这和最初的原理、理论的研究主要是英国研究所进行的相对照，感到十分有趣。再顺便提一下，发明者耿也是英国人，他在剑桥受过教育，是英国皇家雷达研究所的研究人员，在发现耿效应之前大约三年才转到美国国际商业机械公司工作的。

1.3 在振荡器方面的应用

应用研究的初期，把利用高场畴的形成和消失的那种振荡作为研究对象，贝尔实验室的 McCumber 和 Cheynoweth⁽⁹⁾ 做了详细而完全的计算机模拟，整个形状十分清楚。图 1.8 是他们用计算机解析得到的电流波形和砷化镓内电场分布之间的关系，实际上也用砷化镓晶体试制了振荡器。

随后，在 1966 年，通过各种不同的工作条件，相继对这种现象的有效利用进行了研究。将器件置入谐振器，使外加电压随时间变化，进行了控制高场畴发生和消失时间，扩大频率

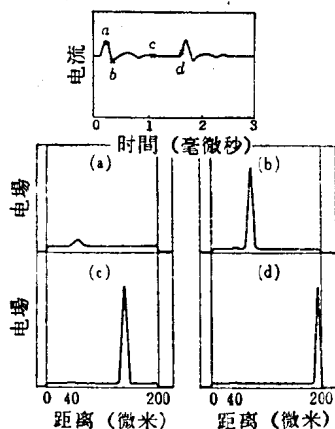


图 1.8 砷化镓体效应电流振荡的计算机解析结果
(引自 McCumber 和 Chynoweth 的文章)

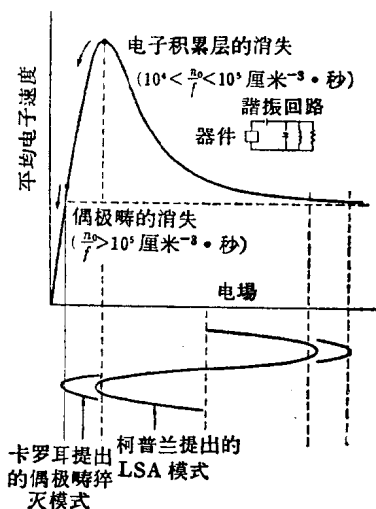


图 1.9 通过谐振器的工作抑制高场畴的发生

调谐范围和提高振荡效率等问题的研究。最初注意这个现象并提出大功率、高频振荡可能性的是英国电子技术研究所的 J. B. Corroll⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。如图 1.9 所示，他使谐振回路和置于其中的器件并联，使加在器件上的高频电压大幅度地变化，在一段时间内，使高场畴完全消失，偶极层呈猝灭状态，它的振荡频率比高场畴在器件内渡越时间所决定的频率要高得多。

但是，提出更有效的利用这种工作的是美国贝尔实验室的 J. A. Copeland⁽¹²⁾，他在用计算机解析耿效应谐振器工作时，发现了一种新的工作状态，它比 Corroll 的情况能更有效地抑制高场畴的发生，并得到了更高的振荡频率。其工作状态是：在砷化镓的内部，在高场畴生长过程所引起的空间电荷积累的阶段，通过使高频电场摆入正阻区，使积累的空间电荷完全消失。在这种情况下，就象图 1.9 所看到的那样，高频电场比偶极层猝灭的那种情况小。结果，砷化镓内部形成了均匀的电场分布，根据器件的阻抗也可以得到相当于图 1.5 那样的电子速度和电场的关系，在一定的电压范围内显示出负阻特性。它由谐振回路来决定振荡频率，这样的状态，Copeland 称之为抑制空间电荷积累模式，简称为“LSA”。

在这种模式中，(1)因为频率不被样品大小所左右，因而超高频振荡是有可能的，(2)频率在谐振器中能任意变化，(3)由于最大限度地利用了负阻特性，因而效率高(理论计算可达20%)等等。它被视如本世纪的一大发明而引起了极大的关注，把原来从事耿振荡器研究的人一下子

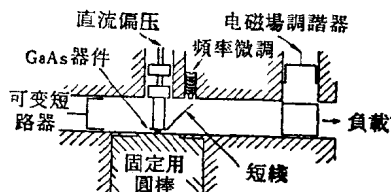


图 1.10 88 千兆赫振荡器 (引自 Copeland 的文章)

都吸引到这个问题的研究上来了。Copeland 用图 1.10 所示的装置实现了理论上的 LSA 工作，达到了 88 千兆赫下 20 瓦的振荡功率。但是，为了进行这样的工作，空间电荷的生长和消失速度（这要由砷化镓介质弛豫时间决定，是电导率和介电常

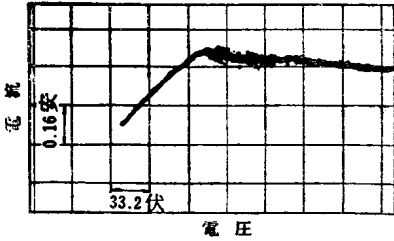


图 1.11 楔形介质负载器件所得到的负载特性(引自片冈的文章)

数是函数)和谐振器所产生的高频电压的频率之间需要有一定条件，所以砷化镓低电场平衡电子密度 n_0 和频率 f 的比值必须在 $2 \times 10^4 \sim 2 \times 10^5$ 之间，在所构成的实际装置中，工作条件是相当严格的。从图 1.9 也可以看清楚，这种工作要求内部电场均匀。由于极高的电压在瞬间加到器件上，因此砷化镓材料本身的均匀性要高，这在实用上就存在着种种困难，不过，作为毫米波振荡器却很有希望，目前阶段正在努力进行探讨。

直到 1967 年，康奈尔大学的一个小组指出，实际上，实现了 LSA 工作和耿振荡共存时，在微波频率下能进行高效率振荡，称之为“混合模式”。并指出它比纯碎的 LSA 模式实用，在 X 波段已经实用化了。

那时，为了简化起见，主要的理论解析，都是以一定的截面积，以一维模型为基础的。根据这样的解析，体效应的基础现象是相当明确的了。自那以后，电子工艺工作者主要由器件的形状，以及和其他物质组合出发，探讨能否在更高效率或者更广的范围内进行应用，进行了二维效应的研究。其一，在发生特殊波形的振荡器方面，贝尔实验室的庄司⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾进行了有力的研究。另一方面，以作者等为主着手于在砷化镓上加介质负

载来抑制高场畴,得到了独特的效果。1968年,把振荡器的截面积加以变化,以便更有效地利用器件的负阻特性,这从图1.11所示的实验结果就可以看出。关于耿振荡器,Carroll⁽²²⁾从不同的观点发表了象图1.12那样形状的器件,他认为这种形状比较好。至此,体效应器件的研究,明显地由物理研究阶段进入了工艺研究阶段,向着功能器件方向发展,这一点在下面将要讲到。

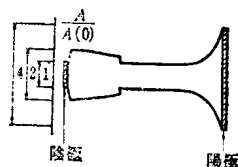


图 1.12 改善性能的耿振荡器的形状 (根据 Carroll 的文章)

1.4 在放大器方面的应用

在进行振荡器研究之同时,以 Hilsum 提出的原理为基础,也进行了微波固体放大器方面的研究。它最早是由贝尔实验室的 H.Thim 和植之源在实验中发现的,用平衡电子密度 n_0 和样品的长度 L 的乘积小于 $10^{12}/\text{厘米}^2$ 的材料,使高场畴

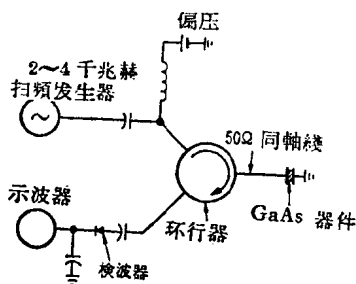


图 1.13 砷化镓两端放大器的构造 (引自 Thim 的文章)

不发生,在与电极间渡越时间相应的频率下呈现负阻特性。用图1.13所示的电路可以进行两端放大,观测到了10分贝的增益。

进而在1967年左右,注意了在 $n_0 L < 10^{12}/\text{厘米}^2$ 的器件内,高场畴不能生长,但是在砷化镓内部存在着偏置在阈值电场以上的部分。