

国 外
微波半导体器件简况

(内 部)

第四机械工业部第一研究所

一九七五年三月

B:733/171/81

73.733
171
C.2

目 录

21620/35

| | |
|---------------------|-------|
| 引 言..... | (1) |
| 微波晶体管..... | (3) |
| 一、微波功率晶体管..... | (4) |
| 二、微波低噪声晶体管..... | (9) |
| 雪崩二极管..... | (13) |
| 一、Impatt二极管..... | (13) |
| 二、Trapatt 二极 管..... | (18) |
| 三、雪崩二极管放大器..... | (19) |
| 转移电子器件..... | (22) |
| 一、耿氏二极管..... | (23) |
| 二、限累二极管..... | (25) |
| 三、其它模式的转移电子器件..... | (26) |
| 四、应 用..... | (26) |
| 隧道二极管..... | (28) |
| 其 它..... | (30) |

国外微波半导体器件简况

引 言

微波半导体器件近十年来发展很快，开始愈来愈广泛地应用到微波仪器、雷达、微波通信、宇宙通信以及导弹、火箭等电子设备中，並已形成半导体领域里一个重要分支。人们不断地探索半导体的基本工作原理及其性能极限，使微波半导体器件在更高频率、更大功率和更低噪声等几方面不断涌现新器件。在某些场合下它们已逐步取代一部分电子管，为微波电子设备缩小体积，减轻重量，提高可靠性，降低耗电创制了有利条件。

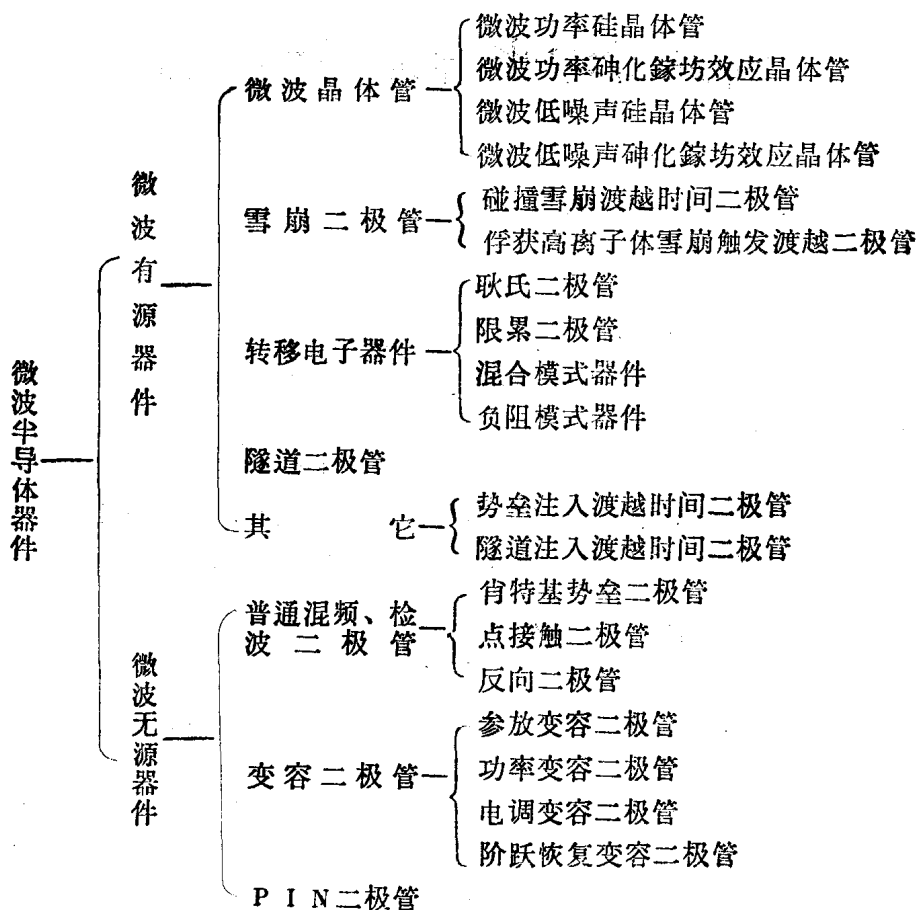
由于它们的应用迅速发展，美国微波半导体器件的产销值近年来有明显的增长，电真空器件在同期内则有减少的趋势。这在美国公布的七四年电子市场展望中得到了一定反映。

1974年美国电子市场展望（百万美元）—摘录

| 器 件 | 产 销 值 时 间 | 1972年 | 1973年 | 1974年 | 1977年 | 增 长 率 (77年比72年) |
|-----------------------------|--------------|--------|--------|--------|---------|--------------------|
| | | | | | | |
| 微波 半 导 体 器 件 | 隧 道 二 极 管 | 4.0 | 4.0 | 3.6 | 2 | - 50% |
| | 微波二极管 (总) | 16.3 | 17.4 | 19.1 | 27 | + 65.6% |
| | 雪 崩 | 0.5 | 0.5 | 0.6 | 3 | + 500% |
| | P I N | 4.5 | 5.0 | 5.5 | 7 | + 55.5% |
| | 耿 氏 | 0.8 | 0.8 | 1.3 | 3 | + 275% |
| | 变 容 | 6.8 | 7.3 | 7.7 | 9 | + 32.3% |
| | 混频检波 | 3.7 | 3.8 | 4.0 | 5 | + 35.1% |
| | 微 波 晶 体 管 | 9.5 | 11.9 | 14.8 | 22 | + 131.5% |
| 电 真 空 器 件 | 电 子 管 (总) | 1143.9 | 1147.3 | 1115.9 | 1097 | - 4.12% |
| | 收 信 管 | 226.5 | 191.5 | 166.4 | 120 | - 47% |
| | 速 调 管 | 34.9 | 34.0 | 31.7 | 30 | - 14.4% |
| | 磁 控 管 | 34.3 | 34.0 | 30.0 | 32 | - 6.7% |
| | 行 波 管 | 74.3 | 72.0 | 73.0 | 73 | - 1.8% |
| | 阴 极 射 线 管 | 16.8 | 17.0 | 17.2 | 19 | + 13.5% |
| | 黑白电视显象管 | 49.0 | 40.0 | 33.0 | 21 | - 57% |
| 彩色电视显象管 | 575.0 | 626.0 | 627.0 | 678 | + 16.9% | |

目前微波半导体器件种类繁多，为了便于叙述，现将它们分门归类列于表1。我们将按表1次序，对一九七四年四月以前的国外各器件的发展概况作一简单介绍。但是，篇幅有限，微波无源器件本文不再赘述。

表 1 微波半导体器件分类



微波半导体器件主要起信号接收、信号产生和信号控制三大功能。它们在各种电子设备中的主要用途列于表 2。信号接收可分为高放式和直接混频检波式两大类。前者用于作用距离远、灵敏度要求高的情况，如卫星通信和远程雷达；后者用于近距离，灵敏度较低或频带要求特别宽的情况。这些方面，微波半导体器件可取代大部分电真空器件。信号产生主要是作固态信号源等，而信号控制是指对微波信号的幅度、频率和相位的控制。在这两方面，特别是大功率和宽频带应用时电真空器件有独到之处。但是，微波半导体器件是处于发展中的一门新学科，随着新工艺，新材料和新器件的出现，它将在微波领域产生越来越大的影响。

表 2 微波半导体器件的功能与用途

| 功能与用途 | | 采用的器件 |
|-------|-------|-----------------------------------|
| 信号接收 | 检波器 | 肖特基势垒二极管、点接触二极管、反向二极管、隧道二极管 |
| | 混频器 | “ “ “ |
| | 低噪声放大 | 参放变容二极管、低噪声双极与场效应晶体管、转移电子器件、隧道二极管 |

| | | |
|----------|-------|--|
| 信号(功率)产生 | 振荡器 | 转移电子器件、雪崩二极管、微波晶体管、势垒注入渡越时间二极管、隧道注入渡越时间二极管 |
| | 功率放大器 | 转移电子器件、雪崩二极管、微波功率晶体管 |
| | 倍频器 | 变容二极管 |
| | 噪声源 | 雪崩二极管 |
| 信号控制 | 开关 | P I N二极管、肖特基势垒二极管、隧道二极管、变容二极管 |
| | 电调衰减器 | P I N二极管 |
| | 电调谐 | 电调变容二极管 |
| | 限幅器 | P I N二极管 |
| | 移相器 | P I N二极管 |

微波晶体管

微波晶体管在微波领域中主要是起信号产生和信号接收的功能。基于这两种不同用途，微波晶体管可粗略地分成微波功率晶体管和微波低噪声晶体管。

微波晶体管只有十余年的发展史。早在六十年代初期，美国仙童半导体公司制造低频晶

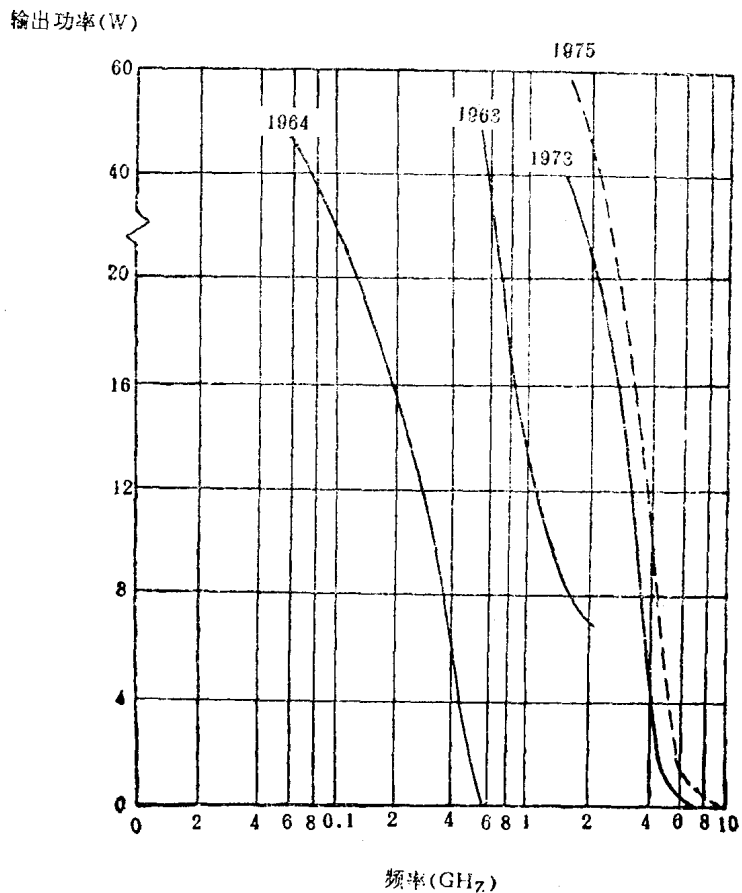


图1 微波晶体管进展情况

体管而引入的平面工艺为生产现代微波晶体管奠定了工艺基础。直到一九六五年，德克萨斯仪器公司才从实验室中得到了工作频率1千兆赫的晶体管。以后，半导体工艺的不断改进与革新，使微波晶体管性能出现了日新月异的变化。图1给出了近几年微波晶体管的频率与功率的进展情况。

当前，在市场上已出售的产品有2千兆赫、20瓦的微波功率晶体管，有4千兆赫、噪声系数为2.8分贝的微波低噪声双极晶体管和8千兆赫、噪声系数4.0分贝的微波低噪声砷化镓肖特基势垒场效应晶体管等。一九七四年，市场上出售的小信号低噪声双极晶体管在4~5千兆赫以下仍占优势，而且最高可达8千兆赫。对于输出功率大于1瓦的硅双极晶体管的频率将向6千兆赫靠拢。另一方面，砷化镓场效应晶体管将作出15千兆赫的小信号放大器，而且将成为X波段噪声低、输出功率大、动态范围大的唯一的三端固态器件。微波晶体管发展如此迅速，除半导体材料工艺的进展外主要是由于：

- 1、光刻工艺的改进，可获得精细而紧凑的几何图形；
- 2、扩散工艺的提高，可制造极浅的p-n结，减少载流子渡越时间；
- 3、封装工艺的革新，减小高频寄生效应，同时降低了器件热阻；
- 4、钝化与良好的金属化技术的应用，提供了器件的可靠性。

可以说，微波晶体管性能主要取决于为最佳设计铺平道路的晶体管工艺的研制水平。下面，我们分别对微波功率晶体管和微波低噪声晶体管的目前状况作一粗略介绍。

一、微波功率晶体管

微波功率晶体管受到相控阵雷达和潜在应用量很大的电子对抗和遥测系统的刺激，发展异常迅速。在过去九年，微波功率晶体管的性能提高了十倍。一九七三年市场上已有1.3千兆赫输出功率30瓦，2千兆赫输出功率20瓦，4千兆赫输出功率5瓦等商品出售。在实验室中得到了6千兆赫输出功率1瓦的晶体管。很多设计人员正在研制工作频率为10千兆赫的微波功率晶体管。表3给出当前微波功率晶体管的科研生产水平及近1~2年将达到的水平。

如前所述，微波功率晶体管的性能是随着晶体管工艺的不断改进而逐步提高的。一九七三年成功地采用“内部调整”方法，使硅n-p-n平面晶体管在2千兆赫时输出功率达20瓦。其方法是在芯片上连有数个MOS片电容和一定长度的焊接引线（电容与电感值取决于晶体管的阻抗特性），提高了晶体管输入输出阻抗，加宽带宽，简化低阻抗电路的匹配问题。为了改善管芯的热不均匀性，使用16个工作单元的鱼骨形几何图形及发射极镇流电阻，同时也降低了发射极的电流密度。图2，3和4为其结构图。

发射极镇流电阻工艺已普遍地用在目前的微波功率晶体管中，使管芯的电流分布更均匀。同时，采用钝化而掺有一定杂质的铝金属化系统，使某些晶体管的平均失效间隔时间高达 10^5 小时。有些晶体管的金属化系统使用了难熔的金，但还没有充分数据证明这种系统更好。再加上封装和管芯设计的不断革新使微波功率晶体管的热阻很低（例如，雷声公司的RMT2610，其热阻为 $5^\circ\text{C}/\text{瓦}$ ）。因此，工作时器件的结温较低，大大提高了功率晶体管的可靠性。

2千兆赫或2千兆赫以上的晶体管采用了极好的菱形几何结构，可使发射极周边对基区面积之比（简称纵横比）作到很大，大大改善了微波晶体管的高频性能。

纵横比是多年来表征微波晶体管的一个质量因数。例如，从晶体管的功率容量来看，当纵横比为8:1，频率2千兆赫时，理论上可输出10瓦功率。若纵横比9.5:1时，则输出功率可

表 3 微波功率晶体管水平

| 型 号 | 工作频率 (千兆赫) | 功 率 (瓦) | 厂 家 | 1975年以前 将达到的水平 |
|-----------|---------------|------------|------------|-------------------|
| MSC1330MP | 1.3 | 30 (生产) | 美国微波半导体公司 | |
| PH2020 | 2 | 20 (生产) | 美国功率混合公司 | 40瓦 |
| MSC4005SP | 4 | 5 (生产) | 美国微波半导体公司 | 8瓦 |
| MSO146 | 5 | 0.4(生产) | 美国德克萨斯仪器公司 | |
| | 5 | 1 (研制) | 美国雷声公司 | |
| | 6 | 0.5(生产) | | 1瓦 |
| | 6 | 1 (研制) | | |
| | 8 | 0.1(生产) | | 0.5瓦 |
| | 10 | | | 0.1瓦 |

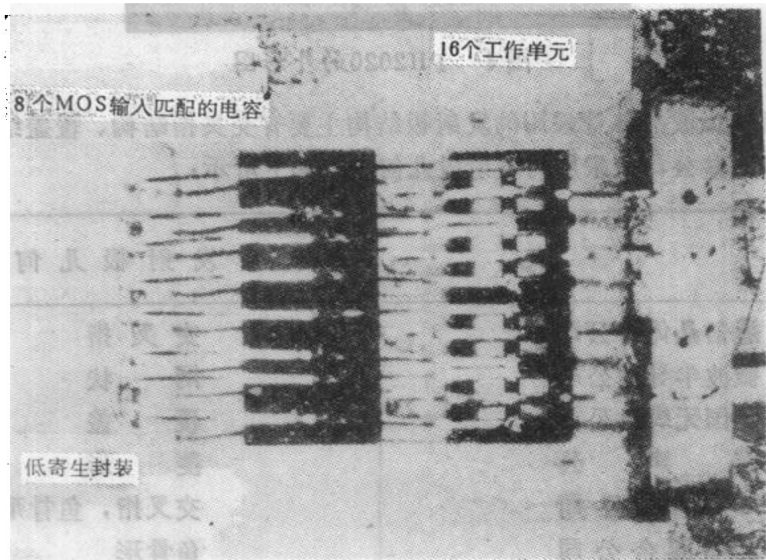


图 2 PH2020的芯片，有16个工作单元（右）和8个输入匹配的MOS电容（左）

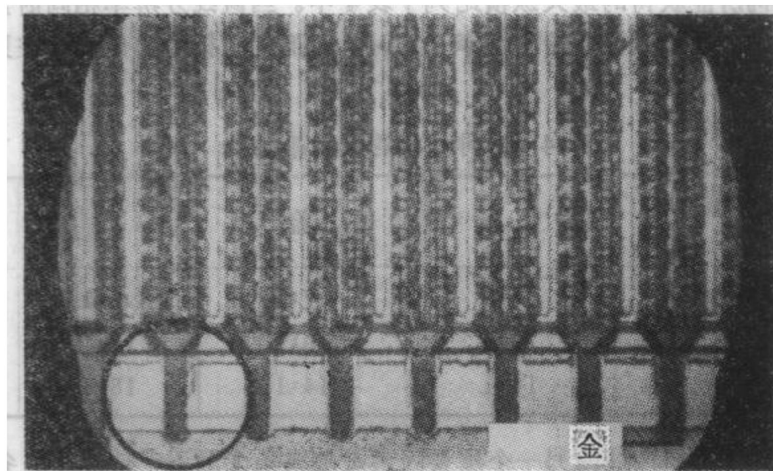


图 3 鱼骨形管芯，每个工作单元有10个镇流电阻，圆圈里的是其中之一

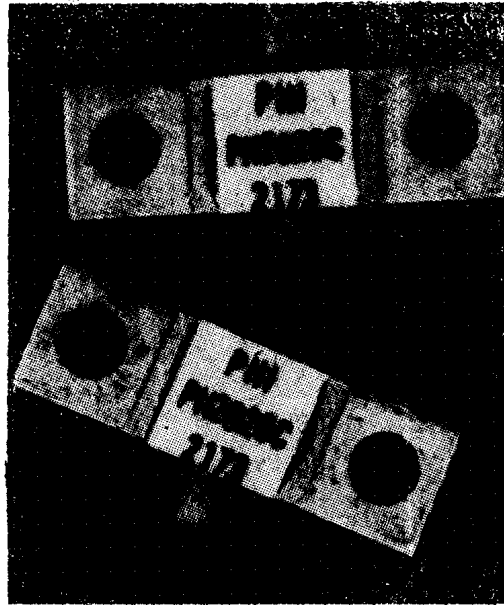


图4 PH2020的外形图

提高到20瓦。目前微波晶体管采用的发射极结构主要有交叉指结构、覆盖结构、网状结构和菱形结构。美国一些公司所采用的发射极几何图形如下所示：

| 厂 家 | 发 射 极 几 何 图 形 |
|-----------|---------------|
| 通信晶体管公司 | 交 叉 指 |
| 微波半导体公司 | 网 状 |
| 美国无线电公司 | 覆 盖 |
| 雷 声 公 司 | 菱 形 |
| T R W 公 司 | 交叉指，鱼骨形，十字环 |
| 功率混合公司 | 鱼骨形 |

上述四种结构所能获得的最大纵横比列于表4中。当直线分辨率相同时，菱形发射极结构的纵横比为最大。也就是说，输出功率一定时，菱形发射极的晶体管可在更高的频率下工作。

表4 各种结构的最大纵横比

| 最小分辨率 | 结 构 | 交叉指型 | 覆 盖 型 | 网 状 | 菱 形 |
|--------|-----|------|-------|-------|------|
| 2 微 米 | | 7:1 | 7:1 | 8.5:1 | 14:1 |
| 1.5微 米 | | 9:1 | 9:1 | 11:1 | 18:1 |
| 1 微 米 | | 14:1 | 14:1 | 18:1 | 28:1 |

决定微波晶体管高频性能的另一个重要因素是细线条光刻工艺的水平。各国用普通接触掩模对准机所达到的线宽极限是1.25微米，最好的可达1.0微米。为了提高分辨率，正在

表 5

| 光 刻 系 统 | 最 小 线 宽 (微 米) |
|-----------|---------------|
| 平 行 光 源 | 1 |
| 软 X 射 线 | 1/2 |
| 电 子 束 光 曝 | 1/4 |

研制各种电子束曝光系统。表5给出了不同光刻工艺，所能得到的最小线宽。

因此，改进光刻材料和设备对提高微波晶体管的水平有很大影响。预计，将来生产的晶体管需要有亚微米级线宽和0.5微米的对准精度。这只有发展电子束光刻和投影式光刻技术才能解决。

另外，为了改善照象制版和化学处理的精度，提高成品率，将用等离子体腐蚀技术取代目前的湿化学法。例如，最近发现 CF_4 气体，在等离子化后产生的氟基可用来腐蚀硅和硅的化合物。在这种工艺中光致抗蚀剂可直接用作掩模，而且等离子体腐蚀时不出现钻蚀现象，为高精度光刻提供了有利条件。同时，大大缩短了工艺过程，提高了产品的均一性。

金属化系统也是重要的一环，它直接影响着功率晶体管的可靠性。从电迁移观点看，铝要比金坏100倍。但是，金需要复杂的多层金属系统，其中包括与硅作欧姆接触的的金属层，防止金从合金中进入硅中的势垒金属层和传导电流用的金层。因此，采用铝的金属化系统比用金作金属化更现实些。在改善铝金属化系统的可靠性中，目前大都采用特定掺杂（如掺硅）的钝化了的铝金属化系统。该系统接触电阻低，稳定，对铝的电迁移有抑制作用。因此，是各国较多采用的方法。但是，微波功率晶体管进一步提高频率，减小线条宽度时要承受更大的电流密度，就必须考虑铝以外的其它金属或难熔的金属化系统。

封装工艺也直接影响着微波晶体管的性能。对封装的要求是要提供良好的热导率，以便处理由微波功率晶体管管芯产生的很大的功率密度（例如，在2千兆赫、输出10瓦的晶体管中，典型功率密度为30000瓦/厘米²）。同时，又要在工作频率下有尽可能小的寄生分量。把成本/性能作为因数来考虑，氧化铍是目前较好的封装材料。图4是美国雷声公司用在2千兆赫微波功率晶体管生产线上的封装，其寄生效应较小，热导率较好。它也适合3千兆赫的功率晶体管。另一种方法是上述的“内部调整”法。预计这种方法会被工业生产大量采纳，微波功率晶体管的频率可更高，功率更大。总之，微波晶体管封装仍有很多问题尚待解决。

微波大功率输出，除用双极晶体管外，目前正在研制用场效应晶体管。人们把它叫作微波功率场效应晶体管。例如，美国无线电公司实验室研制出一种多栅场效应晶体管结构，4千兆赫时功率输出0.8瓦，增益压缩1分贝。

图5示出了美国无线电公司的多栅微波功率场效应晶体管的俯视图及源-栅-漏区的截面图。该场效应晶体管具有8条“V”型栅极，每条“V”型栅的顶部连有栅极焊接区。每条栅长0.016吋。它克服了过去每条栅极对应的源极周长增加时，高频性能受到影响的缺点。目前，该管在栅-漏间可承受29伏以上的反向偏压。为了适应大功率，采用双外延法来制造。原始层掺杂浓度为 $2 \sim 4 \times 10^{16}/\text{厘米}^3$ ，保证了肖特基势垒栅的击穿电压较高。美国无线电公司认为，这种晶体管将来在10千兆赫下会得到5瓦的输出功率。

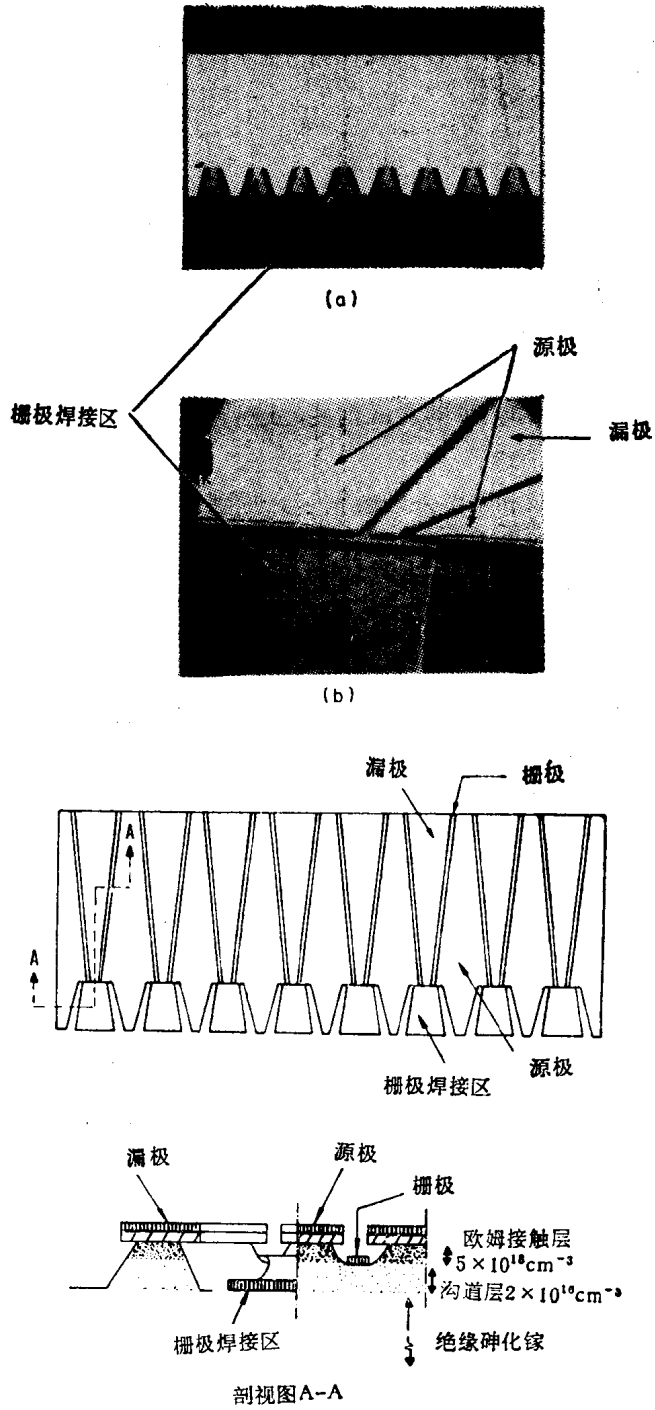


图5 多栅场效应晶体管

a) 放大30倍的实物照片

b) 放大2000倍的实物照片

c) 俯视图和A-A截面图

日本富上通公司也研制出一种砷化镓微波功率场效应晶体管，在2千兆赫时功率输出1.6瓦，功率增益5分贝。该公司使用的是网状源极，与网状发射极晶体管的几何图形一样，可得到较大的栅宽与面积之比。该场效应晶体管是在掺疏的n型外延层上制成的。外延

层掺杂浓度为 3.5×10^{16} 厘米⁻³，厚度为0.3微米。外延层上淀积一层金—铱膜，并用光刻工艺作源和漏的欧姆接触。肖特基势垒栅长1微米，宽8000微米，与漏间隔3微米。然后，用化学气相法被复 Si_3O_2 膜，进行选择腐蚀做接触窗。最后，蒸铝作复盖式电极。该几何结构图示于图6

二、微波低噪声晶体管

微波低噪声晶体管主要起信号接收的功能。一般在接收机的前端，象隧道二极管放大器 and 参量放大器那样，作低噪声放大。目前它包括有微波低噪声硅晶体管和微波低噪声砷化镓场效应晶体管。

微波低噪声硅晶体管放大器具有体积小，频带宽等优点，已取代了1~2千兆赫和2~4千兆赫的行波管放大器。在三、五年内可望取代4~6千兆赫的行波管放大器。由于其最高振荡频率只有20千兆赫左右，一般实际工作频限的6千兆赫以下，否则噪声将显著增加。

微波低噪声砷化镓场效应晶体管尽管在金属化互连，热导率、电路匹配等方面有待进一步完善，但在6千兆赫以上的低噪声放大器中，无疑会取代双极晶体管，论上，该放大器可工作在20千兆赫左右。在4~6千兆赫的低噪声应用中，也不亚于双极晶体管。

过去五年间，微波低噪声双极晶体管的制造工艺进展迅速，噪声不断降低。但是，当前进展速度有所下降，这可能是双极晶体管已基本成熟的原故。但是，随着微波低噪声砷化镓场效应晶体的出现，特别是高频段（如X波段），它比双极晶体管的噪声低很多，使人们产生了取代微波低噪声双极晶体管的想。因此，在叙述微波低噪声场效应晶体管时，主要是对这两种微波低噪声半导体器件作比较，以便正确评价它们在微波低噪声领域的地位。

1. 硅微波低噪声双极晶体管

当前，各国为提高低噪声晶体管的工作频率和降低噪声系数，正进行一系列结构和工艺上的努力。水平较高的是美国，其次是日本。目前已研制出2千兆赫噪声系数1.8分贝；4千兆赫噪声系数2.8分贝；6千兆赫噪声系数为4.0分贝的各种晶体管。美国仙童半导体公司最新研制的硅低噪声双极晶体管频率已达8千兆赫，噪声系数4分贝，增益6分贝。表6给出了目前微波低噪声双极晶体管的研制水平及未来1~2年内可达到的水平。

众所周知，要提高工作频限，关键是减小基区宽度，其次是减小发射极、基极线宽。要降低噪声，就必须降低基区电阻 r_b ，提高截止频率 f_α 和提高电流增益 h_{FE} 。这就要求细线条光刻技术以及浅结高浓度的或可控浓度的精密扩散技术。当然也要有完整性极高，厚度很薄的外延材料和寄生参数很小的封装工艺等。

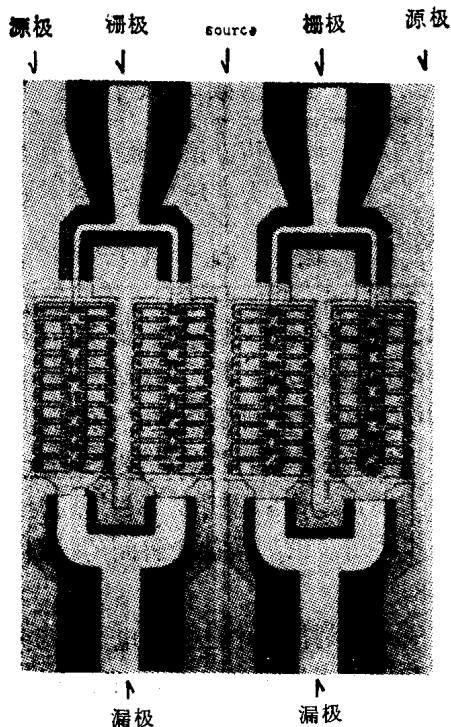


图6 微波功率场效应晶体管的网状源极

表 6 微波低噪声双极晶体管的现状及未来 (1975年以前)

| 特 性 | | 频率(千兆赫) | | | | |
|-----|-----------|---------------------------|-----|-----|-----|-----|
| | | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 |
| 现 状 | 噪声系数(分贝) | 1.8 | 2.8 | 4.0 | 5.0 | / |
| | 最大增益(分贝) | 18 | 13 | 10 | 8 | 5 |
| | 截止频率(千兆赫) | ~8 (大生产水平) <10~15 (研制水平) | | | | |
| 未 来 | 噪声系数(分贝) | 1.3 | 2.0 | 2.5 | 3.0 | 4.0 |
| | 最大增益(分贝) | 21 | 16 | 13 | 10 | 8 |
| | 截止频率(千兆赫) | ~15 (大生产水平) <15~20 (研制水平) | | | | |

从某种意义上来说,微波低噪声双极晶体管的进展是与深结扩散技术和细线条光刻技术所取得的成就密切相关的。浅结扩散技术中包括有离子掺杂和质子增强扩散(Proton-enhanced diffusion)、砷发射极扩散以及掺砷氧化物扩散结合低浓度的硼离子注入的基区掺杂技术(即IBT法)等。用这些技术均能获得较窄的基区宽度(可达0.05微米左右),且基区掺杂浓度高,正向偏置时发射极-基极结的固有电容小。因此,提高了晶体管的 f_T 和 f_{max} ,降低了噪声。用浅结扩散技术研制的单级晶体管放大器在6千兆赫时,增益5.5分贝,噪声系数仅3.8分贝。

细线条光刻技术中已采用电子束光刻等工艺。目前已能制造0.5微米的发射极图形,并向0.25微米的几何图形努力。预计在1974~75年间将会把离子注入等技术用在一般双极晶体管的生产上,同时可把发射极宽度减小到0.5微米。这会大大降低晶体管的噪声。譬如,目前生产的发射极线宽为1微米的晶体管在4千兆赫时,增益6.6分贝,噪声系数3分贝;当发射极线宽为0.5微米时,在8千兆赫下,增益5分贝,噪声系数仅4分贝。

为配合细线条光刻技术,美国卡斯佩尔仪器公司研制成2510型投影式掩模对准机,并已用在生产发射极宽度为1.0微米的HP-35876E微波晶体管中。它也能用在0.5微米的图形上但有效视野将减小到60×60平方密耳。这在大生产中是不经济的。目前,最好的办法是用可控制的扫描电子束作掩模对准与曝光。

表7是典型的几种商品性能,大多是线宽1.0微米浅扩砷的发射极。其中,休利特-帕卡德公司的HP-122为900~1000埃深的扩砷发射极,金属化系统是Mo-Au,而MT4000是铝金属化系统。其中,只有日本电气公司的V-914是用掺磷发射极,线宽1.25~1.50微米。

表 7 低噪声双极晶体管的噪声

| 型 号 | 噪 声 系 数 (分 贝) | | | | 厂 家 |
|----------------|---------------|---------|---------|---------|-------------|
| | 2 千 兆 赫 | 3 千 兆 赫 | 4 千 兆 赫 | 5 千 兆 赫 | |
| HP-122(35876E) | 2.25 | 2.70 | 3.30 | 4.10 | 美国休利特-帕卡德公司 |
| MT4000 | 2.0 | 2.75 | 3.60 | 4.60 | 美国仙童半导体公司 |
| V-914 | 2.20 | 2.80 | 3.40 | 4.30 | 日本电气公司 |
| AT-561 | / | / | 3.30 | / | 美国阿文特克公司 |

目前美国研制了线宽0.5微米的HP-222微波低噪声晶体管，在4千兆赫时，最小噪声系数1.9分贝；6千兆赫时2.4分贝；8千兆赫时3.0分贝。但是，大生产中还有一定问题。

在各种军用、民用无线电设备中，微波低噪声双极晶体管主要作小信号低噪声放大。表8是当前市售的宽带放大器噪声水平。

表 8 微波晶体管宽带放大器的噪声水平

| 频 率 (千 兆 赫) | 噪 声 系 数 (分 贝) |
|-------------|---------------|
| 1.7~2.3 | 3.2 |
| 2.0~4.0 | 4.5 |
| 3.0~5.0 | 8.0 |
| 4.0~6.0 | 10.0 |

2. 砷化镓微波低噪声场效应晶体管

场效应晶体管用在微波低噪声领域还是近几年的事。当人们认识到砷化镓适于作噪声很低的微波场效应晶体管后，瑞士的苏黎世IBM实验室首先解决了工艺问题，成功地制成砷化镓肖特基势垒栅场效应晶体管，引起了微波界的极大兴趣。

当前，市场上公开出售的是美国仙童半导体公司生产的FMT-900。它在8千兆赫下增益11分贝，噪声系数4.0分贝，采用同轴封装。图7是它的最大增益和频率的关系曲线。图8是噪声系数与频率的关系曲线。由图可见，FMT-900的性能相当于线宽1微米的HP-122硅双极晶体管的水平。但是，FMT-900的栅长是1.8微米。若缩小到1微米时，性能还有可能改进。

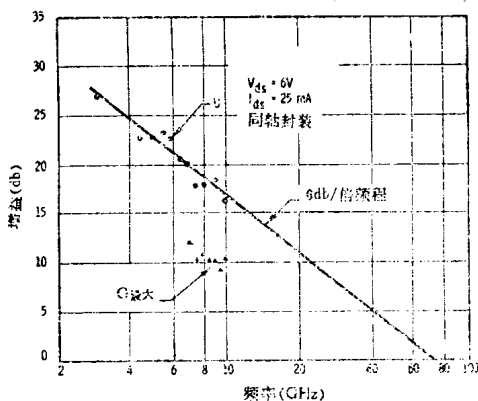


图 7 砷化镓场效应晶体管FMT-900的增益与频率的关系

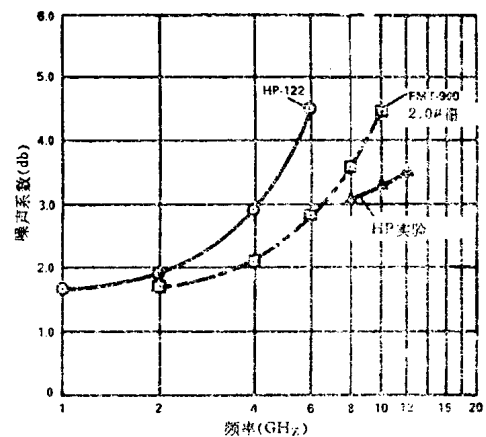


图 8 FMT-900噪声与频率的关系

砷化镓场效应晶体管发展较快，但目前商品较少，各国一般都处于实验室阶段。1974年在4~8千兆赫频段内的产品将普及。表9给出1974年砷化镓场效应晶体管将达到的水平。图9为砷化镓场效应晶体管与双极晶体管目前水平的比较。由图可以看出，HP-122与FMT-900，在2千兆赫以下时噪声特性基本一致。然而，频率再升高，FMT-900开始优于HP-122。

4千兆赫时砷化镓场效应晶体管FMT-900比低噪声双极晶体管HP-122的噪声几乎小1分贝，而在6千兆赫时要小1.5分贝。

表 9 砷化镓微波低噪声场效应晶体管水平

| 性能 | 1972年 | 1974年 |
|------|-------------------------|-------------------------|
| 噪声系数 | 栅1.0长微米 10千兆赫时，3.3分贝 | 栅长0.5微米 10千兆赫时，3.0分贝 |
| 增益 | 10千兆赫时，6.6分贝 | 10千兆赫时，12分贝 |

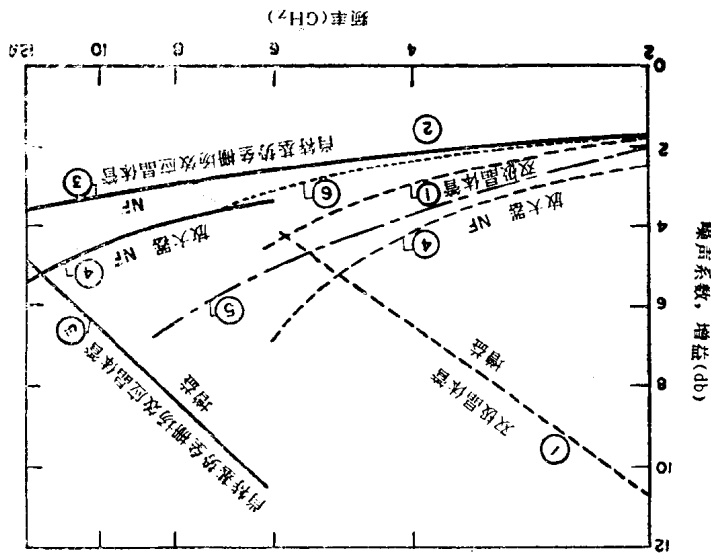


图 9 砷化镓场效应晶体管与双极晶体管目前水平比较

- 1) 休利特-帕卡德公司的双极晶体管HP-122
- 2) 仙童公司的砷化镓场效应晶体管FMT-900 (2~6千兆赫)
- 3) 休利特-帕卡德公司研制的砷化镓场效应晶体管 (8~12.4千兆赫)
- 4) 假设匹配电路为0.5分贝插入损耗时, 各级噪声相等的无限长的放大链
- 5) 仙童公司的双极晶体管MT4000
- 6) 仙童公司试验的双极晶体管918QY-14

在功率增益方面, 砷化镓场效应晶体管显然要比双极晶体管好。图10是两种晶体管的增益。10千兆赫时, 休利特-帕卡德的HP-122最大增益为5分贝, 这是较好的水平。但是, 砷化镓场效应晶体管FMT-900为7分贝, 休利特-帕卡德公司研制的场效应晶体管在相同频率下增益可达11分贝。

综上所述, 尽管砷化镓场效应晶体管有上述优点, 但仍不能完全取代硅双极晶体管。考虑到硅双极晶体管至少已有15年历史, 其材料与器件工艺相当成熟且可靠性又

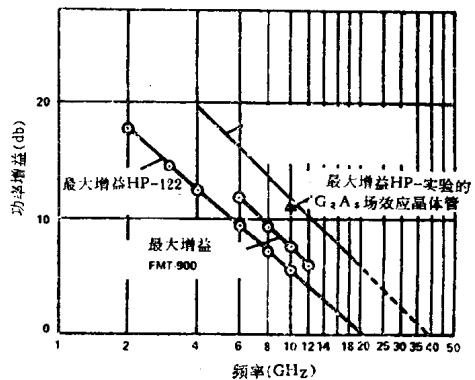


图10 硅双极晶体管与砷化镓场效应晶体管功率增益比较

经过长期的大量的实践所证实。但是，砷化镓材料禁带宽，最易沾污。在互连中需要两层金属化系统，给大量生产带来一定困难。所外，它也缺少象 SiO_2 那种固有的钝化层。因此，据期刊报导只有在6千兆赫以上的频段中，砷化镓场效应晶体管才占主导地位。可以预料，它会象用在L、S波段的硅双极晶体管那样，将广泛地用在C、X和 K_u 波段上。

雪崩二极管

雪崩二极管是一种负阻二端器件。它是利用施加反向偏压的p-n结碰撞雪崩倍增现象和载流子渡越时间效应做成的二极管。按其不同的工作模式可分成碰撞雪崩渡越时间二极管，即Impatt二极管，和俘获等离子体雪崩触发渡越二极管，即Trapatt二极管。雪崩二极管比耿氏二极管效率高，输出功率大，使用频率可高达100千兆赫以上。它主要是用在1~100千兆赫的微波波段作振荡器和放大器，成为微波领域中信号产生的另一类重要的半导体器件。

用硅、砷化镓和锗都能制造雪崩二极管，其中Trapatt二极管目前只能用硅和锗材料制造。由于锗雪崩二极管的温度限制比前两者苛刻，所以各国很少生产。砷化镓Impatt二极管的效率比硅的高，噪声比硅的低，是较有发展前途的一种雪崩二极管。只是砷化镓材料的纯度、完整性和化学配比问题没有得到很好解决，而且硅材料便宜，器件制造工艺成熟。所以大量使用的仍是硅Impatt二极管。下面仅就硅和砷化镓Impatt二极管以及硅Trapatt二极管的当前科研生产水平及典型用例作简单介绍。

一、Impatt二极管

雷德在1955年首先提出了Impatt二极管的理论。他指出，在 $N^+-N-I-P^+$ 或 $P^+-N-I-N^+$ 结构的二极管中，能获得微波功率输出。雷德提出的这种理论为以后雪崩二极管的发展奠定了理论基础。随后，1964年来美国贝尔电话研究所的约翰斯敦等人从硅的P-n结中实际观察到了这种微波振荡现象。此后，雪崩二极管相继出现了 P^+-N-N^+ 、 $P-I-N$ 以及 $P^+-P-N-N^+$ 和肖特基势垒等各种结构的Impatt二极管。Impatt二极管一词目前已成为上述各种雪崩二极管的总称。为了与另一类雪崩二极管相区别，有时也把它们通称为雷德型雪崩二极管。这类雪崩二极管的工作频率高（最高可达140千兆赫），很适合毫米波范围应用。

硅Impatt二极管的实验室水平： $X\sim k_u$ 波段，连续波功率输出4瓦，典型效率8%；50千兆赫时连续波输出1.52瓦，效率16.8%；92千兆赫时，已有380毫瓦的连续波功率，效率12.5%；高达140千兆赫时，有140毫瓦的功率。

砷化镓Impatt二极管的成绩更大。据报导，5.5千兆赫下已有8瓦的样管。9.75千兆赫下，输出功率3.3瓦，效率24%。21.2千兆赫下，输出功率1.22瓦，效率15.6%。目前已制成可工作于80千兆赫、输出50毫瓦的砷化镓Impatt二极管。

表10和11列出了Impatt二极管的商品水平和研制水平。

为了提高Impatt二极管的功率和效率，各国对器件的结构、制造工艺和散热条件等诸方面作了大量工作。人们研制了各种低热阻的P-N结几何图形，如环形的、多环形的和多盘形的，参见图11。

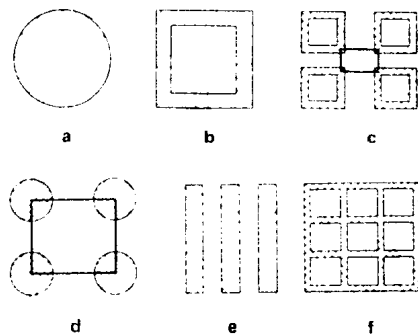


图11 几种结面的设计方案

表10 Impatt二极管的商品水平

| 型 号 | 材 料 | 频 率 (千兆赫) | 功 率 (毫瓦) | 效 率 (%) | 厂 家 |
|------------|------|--------------|-------------|------------|------------|
| ML4803 | Si | 5~8 | 1.5瓦 | 5.5 | 美国微波联合公司 |
| ML4804 | // | 8~10 | 1.25瓦 | 5.5 | // // |
| PGG211-83 | // | 8~12 | 1.0瓦 | 6~5 | 美国参量工业公司 |
| S8250B | // | 5.9~8.2 | 2.0瓦 | / | 日本东芝公司 |
| ML4805 | // | 10~12 | 1.0瓦 | 5 | 美国微波联合公司 |
| VA023H2N19 | // | 15~18 | 500 | 6.8 | 美国维利安联合公司 |
| PGG222-34 | // | 18~26 | 150 | 2.5 | 美国参量工业公司 |
| DC1186G | // | 26~40 | ≥100 | / | 英国联合电气工业公司 |
| MS838B | GaAs | 6~8 | 4瓦 | | 美国雷声公司 |
| MS812B | // | 10~12 | 2瓦 | | // // |
| MS859A | // | 12~15 | 1瓦 | | // // |
| MS858B | // | 15~18 | 500 | | // // |
| MS874B | // | 22~26 | 200 | | // // |
| MS893A | // | 26~33 | 100 | | // // |
| MS894B | // | 33~40 | 100 | | // // |

雪崩二极管过去是采用热压焊工艺，焊接过程中管芯产生应力，初始老练和筛选测试中出现大量报废。一九六九年前后出现了电镀热沉工艺。其特点是靠近PN结一边，电镀150微米左右的金或铜等良导热层，倒装在管座上。这是降低雪崩二极管热阻、提高成品率行之有效的一种管芯焊接工艺。同时，为改进散热条件，已用比铜导热率大3~5倍的Ⅰ_a型金刚石作散热器。

除此之外，也有采用多管芯串-并联结构以及功率合成技术。把多个二极管组合起来，获得大功率输出。例如，美国休斯公司实验室，把32个在9.3千兆赫下，连续波输出功率500毫瓦的Impatt二极管装入同轴微波腔体做成的功率组合器中。在9.3千兆赫下从该功率组合器可获得23瓦的连续波输出功率，如图12所示。它可作成自由振荡器，注入锁定振荡器或稳定的反射式放大器。这种组合器的优点是二极管的选择范围很宽，一般可允许二极管电容和击穿电压有20%的变化，输出功率有40%的变化。而且，当某个二极管失效后，功率仅下降12%。只要把腔体做得足够大，增加Impatt二极管的数目，就可以得到上百瓦的连续波功率。这是在微波波段获得较大功率的一种切实可行的办法。

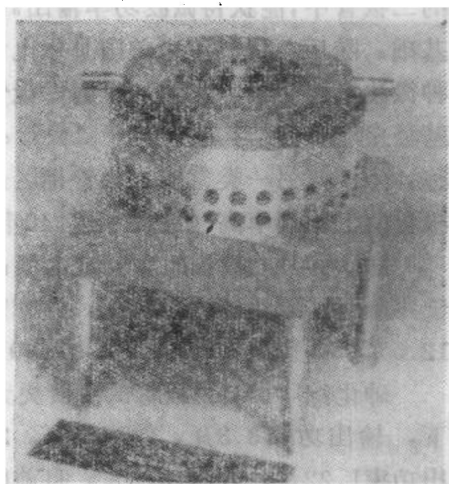


图12 功率组合器

表 11 Impatt二极管的研制水平

| 材 料 | 频 率 (千兆赫) | 功 率 (毫 瓦) | 效 率 (%) | 结 构 | 说 明 | 厂 家 |
|-------------|--------------|--------------|------------|---|------------------------------|--------------|
| 硅 | 8 | 4瓦(连续) | / | | | 英国微波联合公司 |
| | 10 | 16瓦(脉冲) | 12.3 | 双漂移结构 | 占空25%,脉宽800ns | 美国休利特-帕卡德公司 |
| | 13~14 | 4.7瓦(连续) | 8 | 二芯并联 | | 美国德克萨斯仪器公司 |
| | 16.5 | 11瓦(脉冲) | 14 | 双漂移结构 | 占空25%,脉宽800ns | 美国休利特-帕卡德公司 |
| | 29.6 | 1.01瓦(连续) | 11.7 | N ⁺ -P结构 | | 美国贝尔研究所 |
| | 38 | 6.4瓦(脉冲) | 5.3 | 双漂移结构 | 占空0.5%,脉宽50ns | 美国休利特-帕卡德公司 |
| | 43 | 700(连续) | 10 | // | | 英国伯莱赛公司 |
| | 40~50 | 500(//) | 10 | // | | // // |
| | 50 | 1.22瓦(//) | 15.5 | N-P ⁺ 结构 | | 美国贝尔研究所 |
| | 50 | 1.52瓦(//) | 16.8 | 双漂移结构 | | // // |
| | 80 | 225(//) | 3.5 | 离子注入 双漂移 | | 日本武藏野电气通信研究所 |
| | 92 | 380(//) | 12.5 | // | | 美国贝尔研究所 |
| | 100 | 160(//) | / | | | 美国 |
| | 140 | 140(//) | / | | | 美国休斯公司 |
| 砷 化 镓 | 5.5 | 8瓦(连续) | / | | | 美国贝尔研究所 |
| | 7 | 3.8瓦(//) | 14.5 | 肖特基结构 | | 日本日电中央研究所 |
| | 9.75 | 3.3瓦(//) | 24.8 | // | | 美国雷声公司 |
| | 10.56 | 5.4瓦(脉冲) | 17.5 | // | 重复频率1KH _z 脉宽1μ | 美国维利安联合公司 |
| | 13.75 | 3.2瓦(连续) | 20 | // | | 美国雷声公司 |
| | 21.2 | 1.22瓦 // | 15.6 | P ⁺ P-N-N ⁺ 液延 | | 日本日立中央研究所 |
| | 30 | 840 // | 13.5 | 肖特基结构 | | 日本日立有限公司 |
| | 53 | 420 // | 5.23 | // | | // // |
| | 40~60 | 140 // | >7 | | | 英国伯莱赛公司 |
| | 75 | 60 // | 3.2 | | | // // |
| 80 | 50 // | / | | | 日本日电中央研究所 | |

目前,各种大功率Impatt二极管主要有四种典型结构:

- 1) 双外延或对外延层作扩散的结构;
- 2) 肖特基势垒结构;
- 3) 改进的雷德型结构;
- 4) 离子注入制造的双漂移结构。

图13给出了这四种结构的示意图及其电势分布图。

Impatt二极管的输出功率是有一定限制的,一方面是电学限制,另一方面是低频段的热学限制。特别是硅Impatt二极管在低于100千兆赫时,连续波输出功率受热耗散能力所限,近似随1/f变化。当频率再升高(或更窄的脉冲)时,输出功率受空间电荷、击穿电压和电路