

内部资料  
注意保存

# 真空电子器件回顾与展望

信息产业部电真空专业情报网

2001年1月

# 真空电子器件回顾与展望

## 编委会

**名誉主任委员：**熊和生

**主任委员：**廖复疆

**常务副主任委员：**宋鑫宝

**编委：**杨崇峰、张受权、吴华夏、马世太、王立成、  
王秀甫、莫火石

**编辑：**李永平、王嘉富、王尔镇、严增濯、费富伦、  
段 诚、乔希竹

**撰稿人员** (除上述人员外):唐 敏、王雅杰、洪光烈、  
邹锁宝、曹长南、李光祖、欧阳勤、彭自安、  
苏奇才、李 季

## 序

真空电子技术是一门既古老又年轻的学科。说它古老，是因为自 1897 年法国科学家布朗 (BROWN) 发明阴极射线管至今已百年有余，即使从 1906 年英国科学家佛莱铭 (FLEMING) 发明真空二极管算起，也有近百年的历史。百年沧桑，真空电子器件家族已发展成拥有空间电荷控制电子管、微波电子管、真空微电子器件、超高功率微波器件、阴极射线管、真空光电器件、离子器件和其它特种真空器件等一个庞大的家族。说它年轻，不是因为近代一百年时光只是人类历史长河中短暂的一瞬，而是因为技术的发展永无止境，就真空电子器件而言，无论是器件的设计机理，所用原料的选择及优化、器件应用的类型以及频谱宽度、功率量级、速度和亮度等级等具体的性能指标还处在蒸蒸日上的发展时期，各种基于新原理、新工艺、新材料的新型器件不断出现，所展示的极为广泛的应用前景正如早晨初升的太阳。例如，以回旋管为代表的相对论超高功率器件，将使真空电子器件可能成为直接使用的定向能武器；又如，应用真空电子的工作原理，加上用集成电路的制造技术，即真空微电子技术，可以制造出体积同半导体集成电路一样大小、低电压工作的真空电子器件，将会把真空电子器件推到另一个新的高度，而成为真空电子器件的一次技术革命。真空电子器件方兴未艾，大有作为。

真空电子器件的发展是伴随着军事工业的发展而迅速发展起来的。早在上个世纪的第二次世界大战期间，真空管就被应用在先进的军事雷达中，成为当是英国抗击德国空袭的“杀手锏”。近三十年来，特别是最近的十多年中，无论是海湾战争、还是科索沃战争，90%以上的军用微波发射机都是采用微波管做发射源。美国使用的最先进、最关键的军事装备都离不开微波管，如在科索沃战争中使用的 KH-11、12 侦察卫星，SR-71、U-2 高空侦察飞机及其配备的合成孔径雷达 (SAR)；RC-135V/W、P-3、EP-3、EOP-3、RC-12D 等侦察巡逻机及无人机；EA-6B、EC-130H、F-16C/J、F/A-18、F-4G 等电子战飞机；E-2C、E-3 预警机；EC-130E、E-8 “联合星”空中作战指挥控制飞机；F-15、F-16 等战斗机；反辐射导弹和防空压制武器“哈姆” (HARM)、精确制导炸弹、软炸弹等，都装有各种先进的功能不同的真空器件。真空电子器件在现代军事电子装备中完成信号的产生、放大、发射、接受、光电信息转换，其独特的功能和优越的性能是其他器件所不能取代的。

由于现代军事装备的牵引，真空电子器件被不断推进到新的水平。例如，国外在电子对抗宽带大功率行波管领域，都有成系列的管型。法国用 3 只管子覆盖 2-18GHz，用 4 只管子覆盖 2-40GHz，功率大于或等于 200W。许多真空电子器件在军事装备的需求牵引下，不仅技术性能、可靠性水平突飞猛进，而且也极大地带动了民用工业的发展。例如，1993 年日本富士通公司就在借鉴军用技术的基础上，实现了 54cm 彩色 PDP 量产，到 1997 年，日本已有 7 家公司推出 PDP 产品。除日本外，韩国、法国都加速了开发的步伐，到 97 年底全世界投资兴建 PDP 生产线的资金已超过 10 亿美元，预计到 2005 年全世界年产各种规格的彩色 PDP 可能达到 500 万台左右。

我国真空电子技术起步较晚，解放前是一片空白，解放后党和政府给予高度重视，相继开办了 741、772、773、774、775、776、777、778、779、4400、4401、4404、

12所、电子所、55所等一批工厂和研究所，大学设立专门的真空电子器件课程，为我国真空电子器件的发展奠定了基础。经过五十年的努力特别是近10多年来的发展，依靠自己的力量，形成了一个相对比较完整的工业体系和一支训练有素的科技队伍；掌握了真空电子器件的研究、分析、设计理论；采用CAD设计并日益深化；一大批标志性的成果相继问世，如各类磁控管、大功率速调管技术日臻成熟；千瓦级毫米波脉冲行波管已制出样管；毫米波宽带连续波行波管接近国际先进水平；多注速调管、双模行波管等新型大功率器件逐步得到应用；中小尺寸、中等分辨率的PDP单色平板显示器件的寿命大于10000小时，拼接式大屏彩色显示器已经问世；场致发光、电致发光和真空显示管等器件也有了长足的进步；脉冲氙灯、高压钠灯等军用电光源已具有相当的水平，某些技术还可以出口。总之，我国在真空电子器件的研制和生产方面，起步时间不长，发展速度不慢，进步和成绩亦不小，相对而言还是可圈可点的。但作为一个有近13亿人口的大国，面对市场空间无比巨大，应用需求十分强烈的现实，现有的基础、能力和技术水平是很不相称的，尤其在一些技术含量高、经济效益好的关键器件方面，与国际先进水平相比已经不能同日而语，其明显的差距令人担忧。例如，彩色液晶显示器件几乎全部靠外国进口；彩色真空显示管新产品开发还须依靠国外技术；微波炉用磁控管与国外产品相比在性能价格比上没有优势；宽带大功率行波管、民航机场航管雷达用大功率真空管等受国外竞争挤压，市场占有率较低，难以形成良性循环；新型真空电子器件研究开发能力较弱，从研制样品向实用化产品转化的周期较长。以上种种，究其原因，这主要是我们的创新能力差，没有自己的发明创造，一直跟在人家后面追。国外有了新发展，就成了我们的空白。而创新机制的形成，一是取决于人们的观念，要把基础工业摆到优先的地位抓住、抓牢；二是取决于基础工业，尤其是关键原材料要先行；三是取决于基础理论和工艺技术的水平，要有一批人专门从事前期研究，由国家养起来；四是取决于高素质的人才，大学不能只图短期效应，要针对真空电子器件发展的需要开设相应的专业，同时还要有竞争。用人单位要创造吸引人材、让优秀人才脱颖而出的环境；五是取决于经费投入，要舍得在真空电子器件领域花钱；六是取决于管理，要搞好统筹规划，坚持军民结合。总而言之，真空电子器件领域任重而道远，只要我们坚持有所想、有所赶、有所为，发扬中华民族自强不息、奋力拼搏的精神，定会在不太远的将来，赶上和超过世界先进水平。

谨以此为序，牵强之处，敬请海涵。

熊和生  
2001年4月10日

## 前 言

60年代初,我国真空电子器件已经由全仿制向自行设计发展,急需借鉴大量的国外技术资料;1964年,在当时的四机部技术情报所领导下成立了四机部电真空专业情报网,后因文化革命的干扰,活动被迫中止。70年代初期,由于当时国防重点工程的需要,要求迅速研制大功率、长寿命、抗干扰、高可靠的真空电子器件。于是1974年4月在南京又恢复成立了电真空专业情报网,会上推荐772厂为网长单位,774、773厂与上海电真空器件研究所为副网长单位,12所为《真空电子技术》网刊主办单位。

电真空专业情报网是跨全国六个部门,19个地区的技术情报行业性组织,是电子工业专业科技情报网的一个组成部分。受电子部科技司与各专业局双重领导。电真空专业情报网的宗旨是:把我国从事真空电子器件科研、生产和教学的有关单位的技术情报部门组织起来,进行技术信息交流和情报业务协作,达到信息资源共享,推动本专业的科研、生产、教学不断发展和不断取得新的成果。自1982年到1991年本情报网先后获得国家级科技成果奖1项,电子工业部科技成果一等奖1项,二等奖6项,三等奖2项。

三十多年来,电真空专业情报网主要做了技术交流、出版情报专辑和参加电子部组织的大型课题研讨三件事。

### (一) 技术交流

70年代中期到80年代中期本网组织了16次技术交流会,参加单位388个,人数1114人次,交流材料718份。技术交流会都是针对我国电子管的基础工艺、关键技术、科研生产中出现的问题以及如何提高产品质量等课题,因此,收到良好的效果与效益。情报网主要的交流会有:

- 1、长寿命阴极技术交流会
- 2、陶瓷金属封接技术交流会
- 3、微波管零件的精密加工技术交流会
- 4、栅极技术交流会
- 5、显像管有机膜蒸铝技术交流会
- 6、真空技术在电子器件中的应用经验交流会
- 7、发射管技术交流会
- 8、提高收讯管寿命技术交流会
- 9、微波管参数测试技术交流会
- 10、微波管技术进展学术讨论会
- 11、摄像管技术交流会
- 12、电子束管技术交流会
- 13、大功率发射管工艺技术及应用交流会
- 14、微波管工艺材料交流会
- 15、真空开关管技术交流会
- 16、微波设计及其工艺在民品中的应用交流会

### (二) 情报研究

针对技术关键,组织全网力量开展情报研究,然后撰写研究报告,共出版专辑15集,其分别是:

- 1、 行波管长寿命阴极及概况
- 2、 陶瓷—金属封接研究
- 3、 彩色显像管国外现状
- 4、 国内外显像管发展概况及产品市场动态
- 5、 收讯管市场前景预测
- 6、 国内外平板显示器件发展状况及动态水平对比报告
- 7、 微波与真空电子技术综合开发前景调研
- 8、 微波真空电子器件及其在军事上的应用
- 9、 国外真空电子器件及其在军事上的应用
- 10、 平面显示器件及其在军事上的应用
- 11、 毫米波真空电子器件及其在军事上的应用
- 12、 宽频带大功率微波电子器件及其在军事装备中的应用
- 13、 定向武器用功率源概况
- 14、 国际真空微电子学概况
- 15、 中国真空电子器件数据手册

### (三) 大型课题研讨

本情报网还多次参加电子部组织的大型课题研讨：

- 1、 电子科技情报网发展概况（1988年）
- 2、 2000年国防电子发展水平和趋势（1990年）
- 3、 世界电子工业概况（1991年）
- 4、 2010年电子装备与技术发展研究（1995年）
- 5、 军用通信装备与技术研究（1995年）

《真空电子器件回顾与展望》专辑是电真空专业情报网在二十世纪里编写的最后一集专辑。本专辑将尽可能汇集二十世纪电真空领域的技术进步和成就，着重反映二十世纪出现和应用的新器件、新技术、新工艺，以使领导和科技人员将这些闪光的业绩带到二十一世纪，继往开来，发扬光大，在二十一世纪作出更大的贡献，创造更大的业绩。

本专辑是国营741厂、772厂、774厂、777厂、4400厂、信息产业部第12研究所、55研究所等七个单位联合编写。本专辑共分六章，第一章微波真空电子器件由12所廖复疆、费富伦等人编写，772厂宋鑫宝、王嘉富、李永平等作了一些补充；第二章平面显示器件由55所王秀甫、莫火石、乔希竹等编写；第三章真空显示器件由741厂严增濯与4400厂马世太、段诚等编写；第四章光电器件由741厂张受权、王尔镇、严增濯及55所曹长南等编写；第五章发射管由774厂邹锁宝、王尧义、李保真等编写；真空开关管由777厂唐敏、王雅杰、王立成等编写；最后由772厂汇总编辑出版。

本专辑在编写过程中得到了总装电子部熊和生局长、杨崇峰参谋、芜湖电真空研究所吴华夏所长以及编写单位领导的人力支持和帮助，在此一并表示衷心感谢。

# 目 录

第一章	微波真空电子器件 .....	1
1. 1	行波管 .....	1
1. 2	微波功率模块 (MPM) 及其应用 .....	25
1. 3	速调管 .....	31
1. 4	正交场器件 .....	35
1. 5	高功率微波源 .....	46
1. 6	真空微电子器 .....	48
1. 7	微波管 CAD 技术 .....	55
1. 8	微波管热阴极现状、存在的问题、解决措施及发展方向 .....	56
第二章	平面显示器件 .....	71
2. 1	等离子体显示器件 (PDP) .....	71
2. 2	液晶显示器件 (LCD) .....	78
2. 3	真空荧光显示 (VFD) .....	84
2. 4	场发射显示器件 (FED) .....	87
2. 5	电致发光器件 (ELD) .....	91
第三章	真空显示器件 .....	96
3. 1	分类和应用 .....	96
3. 2	军事真空显示器件 .....	97
3. 3	国内外产品技术的生产水平的对比 .....	99
3. 4	彩色显像 (示) 管 .....	103
3. 5	发展中的真空显示器件 .....	104
第四章	光电器件 .....	108
4. 1	真空光电器件的应用 .....	108
4. 2	光电倍增管的新发展 .....	110

4. 3	微通道板光电倍增管 (MCP-PMT) .....	111
4. 4	变像管和像增强管 .....	117
4. 5	核辐射器计数管 .....	120
4. 6	军用电光源 .....	121
第五章	发射管 .....	128
5. 1	概述 .....	128
5. 2	我国大功率发射管的研制过程与在国民经济中的作用 .....	128
5. 3	国外发射管概况 .....	131
5. 4	国内概况与国外差距 .....	137
5. 5	二十世纪发射管发展预计和我们的任务必 .....	140
第六章	真空开关管 .....	143
6. 1	概述 .....	143
6. 2	作用与地位 .....	143
6. 3	国外的概况 .....	145
6. 4	国内的概况以及与国外的差距 .....	145
6. 5	关键技术 .....	146
6. 6	二十一世纪发展预测 .....	148
6. 7	对策与建议 .....	148



# 第一章 微波真空电子器件

微波真空电子器件是现代电子技术的重要组成部分,广泛应用于雷达、电子对抗、通信、电子兵器、仪器仪表、高能物理、海关检查、缉私、探伤及医用电子等军事民用各个领域。虽然固态微波功率器件发展迅速,而且在某些方面与微波真空电子器件有着激烈的竞争,但由于微波真空电子器件自身的特点,固态器件不可能完全取代微波真空电子器件,在今后的发展中也将会各自扬己之长在不同领地共存,并各自以己之长相互渗透、结合,形成性能更优良的微波器件。与固态器件相比,微波真空电子器件主要有以下优势:

(1) 基于高的转换效率可以产生微波高功率,单管输出功率远远大于固态器件;

(2) 具有高增益;

(3) 当频率升高(如2-5GHz以上),固态器件输出功率降低,价格上扬,如:6GHz,400-500W、14GHz,40-100W性能的器件,微波真空电子器件的价格仅为固态器件的25%,而且微波真空器件的极限频率可达2000GHz以上;

(4) 真空电子器件具有金属陶瓷结构,有强的散热能力,耐高温,在电子对抗中抗辐射、抗干扰及忍受恶劣环境的能力强;

(5) 在某些情况下(如雷达)要求工作比很小而平均功率较大时,可用提高真空电子器件峰值功率来满足,固态器件则不能。真空电子器件的峰值功率可高达平均功率的10000倍,而固态器件仅为10倍。

大功率微波真空电子器件,特别是大功率行波管在高科技军事中有着重要的作用。海湾战争中,美国大功率发射机中,90%以上使用了具有强大功率、很宽频带的微波真空电子器件,据此他们牢牢地掌握了制电磁权,赢得了战争的胜利。这就足以说明大功率微波管是高科技战争的制胜关键。

微波真空器件自1904年英国Fleming发明二极管以来,至今已有近百年历史,从1916年德国Kurtz发明减速场微波振荡器算起,微波电子管也有86年的历史了。现在微波电子管已经是根深叶茂,而且仍在蓬勃向上发展着,微波管品种大致归纳于表1。本章将对在现代国防上有着重要应用的微波真空电子器件:行波管、速调管、正交场器件以及它们的关键部件——热阴极等,进行回顾与展望,并对在现代国防发展上有着诱人前景的微波功率模块、真空微电子器件、大功率微波源等,予以叙述。

## 1.1 行波管

行波管在微波真空电子器件中是最璀璨、最活跃、应用最广泛的一支。由于需求的迫切,新技术的不断出现,大功率行波管的发展呈常盛不衰之势,随着计算机模拟技术的发展、材料、工艺进一步更新,行波管将产生更具生命力的新生代。

近年来我国的行波管有着长足进展,各种管型全面开花,水平不断上升,已接近国际水平。但我国的行波管事业与国外相比还存在较大的差距,主要表现在:性能水平有待提高,管型品种少且不成系列,质量和可靠性须大力加强。我们今后工作的重点是:切实广泛地使用CAD, CAM, CAT;下大力解决技术关键,如高性能阴极、多级降压收集极、大功率输出窗、散热技术、高性能磁性材料等,以提高行波管的性能和质量。

当前我国陆海空三军的电子设备都急需国产大功率微波管的支持,即使在平时时期有的

管型如大功率脉冲行波管也不能从国外得到，更何况战争年代呢？因此我们只能自力更生，加强自己的研制生产体系。下面就我国当前及近期需求的行波管做个简单的归纳。

(1) 2-4GHz TWT CW.100-200W 用于歼击机，轰炸机自卫设备上的有源干扰系统，  
CW.1KW 用于干扰敌予警机 E-3A 中的雷达。

(2) 4-8GHz TWT CW.100-200W 用于歼击机，轰炸机及予警机之自卫有源干扰系统。

(3) 9-10GHz 大功率 TWT 用于干扰敌予警机 E-8A 中的雷达。

(4) 0.7-1.4GHz 用于歼击机，轰炸机电子战自卫设备

2.0-18GHz (含干扰吊仓) 的 ESM 系统

6.0-18GHz

30-40GHz

(5) 0.8-2GHz 1KW-3KW 用于轰炸机群装载的多种类型的有源干扰机。

2.0-8GHz 15KW-50KW

6.0-12GHz 50KW-150KW

此外，当前整机予研急需以下三个方面的行波管：

(1) 毫米波功率行波管（频率：26.5-40GHz，功率>40W）；

(2) 相位一致行波管需要大批量的支持；

(3) 2-3cm 连续波行波管，功率量级为25W，100W，200W 等。

并希望微波功率模块尽快研制成功达到军事实用化。

本节叙述的主要内容是：国防应用重中之重的宽带连续波行波管、国防急需的相位一致行波管、电子对抗等方面应用的宽带大功率脉冲行波管、广泛用于雷达的耦合腔行波管、迅速发展的毫米波行波管以及其他行波管和新技术。

## 1.1.1 宽带连续波行波管

### 1.1.1.1 简单回顾

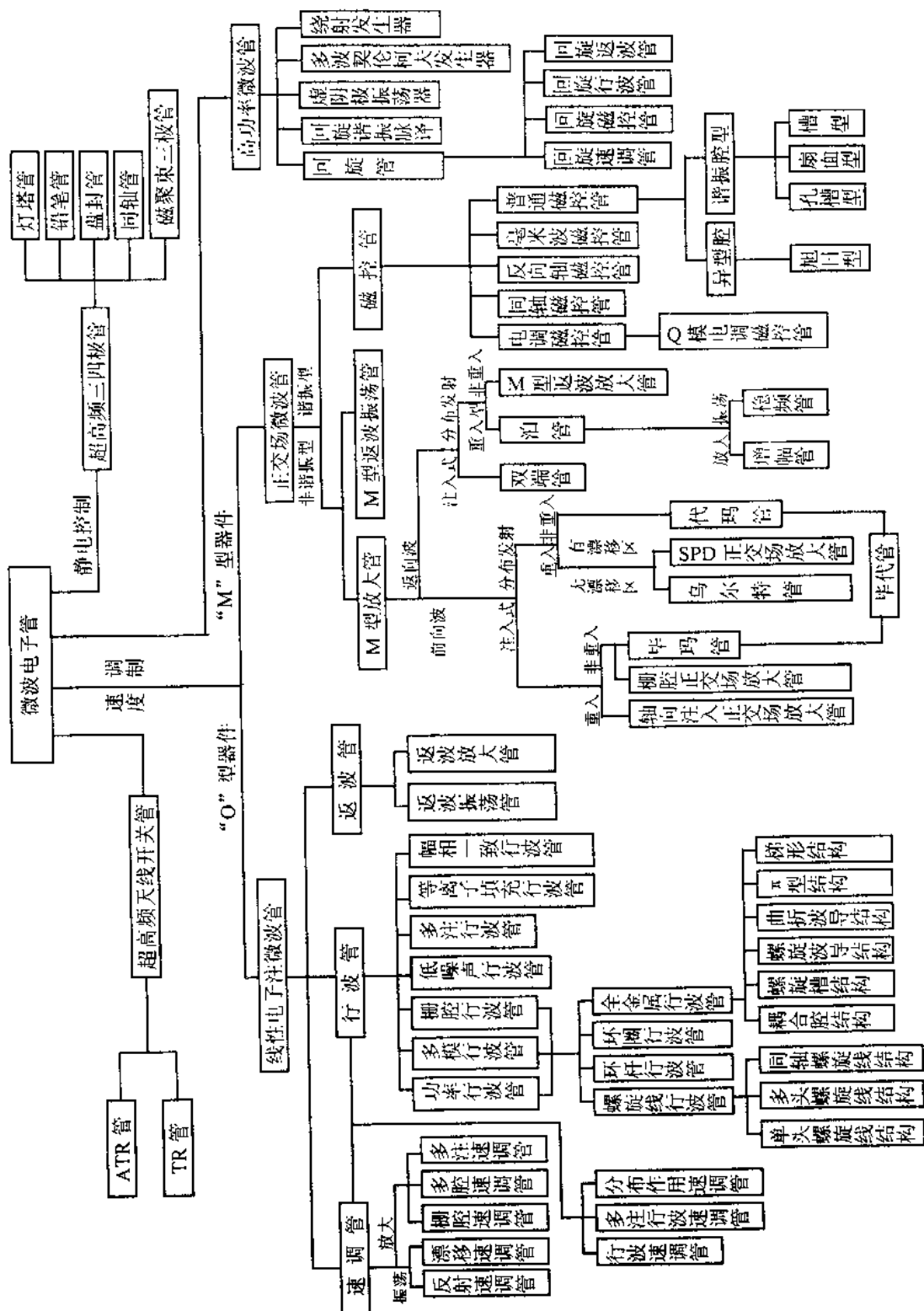
宽带连续波行波管是干扰机的核心，以螺旋线为慢波结构的宽带大功率连续波行波管是军用真空电子器件的重中之重，在我国“九五”及“十五”规划中均有体现。

我国从二十世纪八十年代起先后从国外购买了螺旋线连续波行波管，如意大利的 E3508 (2-3cm, 200W)，英国的 N10501 放大链 (2-3cm, 100W)，美国的 A600-200 (8-18GHz, 200W) 及俄罗斯的 K-2 (2-4GHz, 1000W) 等。这些对我们的行波管乃至整机的研制起到了一定的推动作用。近年来行波管研制的技术进展主要表现在以下几方面：

#### (1) 大功率输能装置

经反复试验，改进了螺旋线与输能内导体特别是输出内导体的焊接方式，较好地解决了焊接牢固、散热有效、匹配良好的焊接工艺（从电阻焊到氩弧焊，电子束焊，激光焊），使之在2-3cm 波段，得到250W 功率的稳定传输，以及在10cm 波段承受1000W 功率。在频率和功率不断升高的情况下，弃锥形窗，用针封窗，通过试验使氧化铍针封窗日渐稳定，它在6-18GHz 传输250W（实验中到460W）获得成功。借鉴与设计试验，使我们在倍频程及其以上的宽带大功率的传输上，成功地应用了双脊波导，我们自行设计了4-8GHz 的24JS3500、8-18GHz 的24JS7500以及国外通用的6.5-18GHz 的 WRD650等双脊波导。匹配基本做到驻波系数不大于2，这是大功率传输的基础。

表1 微波电子管



(2) 降压收集极及整管散热结构

E3508的收集极给出了很好的启示,用氧化铍板作为介质可获得散热、绝缘、耐压的良好性能。在此基础上我们设计了传导冷却、风冷等不同类型的收集极并采用充气的办法提高了耐压性能。几经改进,夹持的螺旋线通过管壳,周期永磁聚焦系统到底板以及收集级到底板采用紧密配合或焊接的方式提高了散热效果,使宽带大功率行波管的功率量级从100W提高到200W, 300W, 目前预研课题已到350W。

(3) 宽带色散成形技术

在原有成熟工艺的基础上设计了简单易行的加载方式,获得了6-18GHz平坦的色散特性。此外还摸索了宽带抑制返波振荡、降低谐波分量的技术。

(4) 大电流电子注的产生和维持为宽带大功率行波管奠定了基础。

(5) 工模夹具的设计能力及制造水平大为提高,形成了成熟的可以小批量生产的宽带连续波行波管生产线。

1.1.1.2 国内外水平比较:

将国外具有代表性的管型和我国的最高水平列表如下:

表 1.2 汤姆逊 (THOMSON) 公司产品 \*研制中

型号	TH 3596	TH 3597	TL 10055	TH 10058	TH 3875	TH 21802	TH 3751*
频率 GHz	2-4	4-8	6-18	7.5-18	18-40	7.5-18	6-18
功率 W	600	600	150	200	80	400	600
增益 dB	30	30	30	30	40		

表 1.3 英国 EEV 公司产品

型号	N10063	N10053	N10043	N10091		N10110
频率 GHz	2.5-7.5	6-18	18-40	8-18	10-15	6-18
功率 W	200	200	20	350	500	250
增益 dB	45	50	43			40

表 1.4 美国利顿 (LITTON) 公司产品

型 号	L-2124	L-5832
频 率 GHz	2.5-7.5	6.5-18
功 率 W	500	150
增 益 dB	38	40

表 1.5 国内研制情况

型 号	B1981	B1943	B1941	B9701	预研	预研
频率 GHz	2-4	4-8	8-16	8-17	2-8	6-18
功率 W	1000	350	200	300	200	300-350
增益 dB	35	35	30	30	30	30

俄罗斯: 型号 K-2, 频率 2-4GHz, 功率 1000W

从表中我们可以看到, 国外用于电子对抗的宽带大功率行波管, 如美、英、法等国都有

成系列的管型，法国汤姆逊公司用三只管子覆盖了 2.0-18.0GHz，功率大于 200W。用 4 只管子覆盖 2.0-40.0GHz，功率为 200W 和 80W；英国用三只管子覆盖了 2.5-18.0GHz，功率 200W。用另三只管子覆盖了 2.5-40.0GHz，功率为 200W 和 20W；美国的情况也是这样。所以他们能实现全波段干扰。从电子对抗的需求看，我国需要 2.0-40.0GHz 的各种干扰系统，而且应以尽少的管子覆盖这一频段。目前，我们的管子频带窄，频段有空白，且我们的管子还不够成熟。据悉在“九五”期间已有 18-40GHz 研究项目，功率为 60W，还有其它波段的一些项目，若研制成功，我们的水平将上一个台阶。

与国外相比，另一个差距就是单管水平有待提高，如法国 TH21802 7.5-18GHz 功率 400W，正在向 600W 努力；N10110 250W；N10091 350-500W。这还需我们在“十五”规划中制定方案予以突破。我们与国外相比，一个致命问题在于制管的重复性、参数的稳定性、使用的可靠性（在许多方面我们是以实验室的水平与国外商品管水平比较），这个问题至关重要，我们将在后面专述。

### 1.1.1.3 发展方向与关键技术

我们应尽快拓宽频带，特别是 18-40GHz，提高功率电平。酝酿中的 2-8GHz 500W；4-8GHz 800-1200W；6-18GHz 400-500W，将是我们近期奋斗目标。使用多级降压收集极提高效率，并进一步降低谐波，抑制振荡，努力降低噪声输出等，这些是我们今后的主攻方向。为此有关材料及关键技术的突破应成为工作重点。

(1) 散热技术是大功率行波管的基础 功率和频率的升高使功率密度大大增加，如不能有效散热，质轻的螺旋线将难以承受。在螺旋线、陶瓷杆、管壳、PPM 聚焦系统到底板的导热途径上，在输出端及其附近的关键部位的散热上，在承受大功率耗散的收集极到底板的散热上都要认真解决。这里涉及螺旋线、陶瓷杆和管壳材料及其夹持焊接技术、匹配、聚焦、降压收集极等等技术。

(2) 具有高发射电流密度的阴极在行波管中的运用 随着功率和频率升高希望得到高导流系数、压缩比小的性能优良的电子注，因此要求阴极发射密度要高、要均匀，同时能承受大功率工作状态下的恶劣环境。

(3) 大功率输能窗及输能装置 氧化铍窗在 2-3cm 波段最高实验室水平近 500W，如再提高功率，就要进一步试验。采用氮化硼窗是一种方法，但要试验并解决工艺问题。在从螺旋线与内导体焊接处标起的输能装置中，有多处结构变换，还有尺寸很小的内外导体间隙，它们的设计应保证良好的匹配传输和有效散热。

(4) 性能稳定的高磁能积磁性材料及质地均匀的高导磁材料是使大功率行波管电子注得以维持的基础。行波管功率升高，尺寸减小必然要用更强的磁场以聚焦电子注，因此需要提高磁性材料的性能和改进工艺。

(5) 开展 CAD 技术 对行波管错综复杂的参数进行优化设计，缩短研制周期，提高行波管研制水平。

## 1.1.2 相位一致行波管

### 1.1.2.1 概况

多波束干扰机具有高的功率带宽乘积，它是由多只（如 32 只，160 只等）相幅特性一致的宽带功率行波管合成的。国外于二十世纪八十年代开始研制开发，九十年代初美国已有 4 万余只相位一致行波管装配在 200 多艘舰船上，美国 Ragtheon 公司，CPI 公司（原 Varain 公司），以色列的 ELTA 公司，法国的 Thomson 公司，英国的 EEV 公司以及俄罗斯的阿尔玛兹

公司等都在生产相位一致行波管。

目前我国地对空干扰系统，机载和舰载干扰系统等也采用了功率合成技术。相应的国内十二所和七七六厂开展了相位一致行波管的研制工作，十余年来研制工作取得了很好的进展。高频参数与国外水平相当或接近，但生产成品率及生产能力则相差甚远。

### 1.1.2.2 国内外水平比较

十余年前，国内开始相位一致行波管的预先研究。电子12所和776厂于1995年研制出相位一致行波管参数尚可，但噪声功率偏大，成品率低不能批量生产。后经过改进，使噪声功率降到了100mW以下，并使成品率提高，进行了小批量生产。12所于1998年向整机所提供20只相位一致行波管，2000年初完成设计定型。776厂和12所都已经成功地研制了50W相位一致行波管，目前都正向着“九五”预研目标努力。

表 1.6 国内外相位一致行波管

国别	型号	F (GHz)	P (W)	G (dB)	$\Delta\phi$ (°)	$\Delta G$ (dB)	噪声功率 (mW)
法国	TH3986	6-18	60 min	40	$\pm 20(9-15\text{GHz})$ $\pm 35(6-18\text{GHz})$	$\pm 2.0$	<50
英国	NN10028	6-18	75(6-18) 100(8-14)	50(9-17) 45(8-9,17-18)	$\pm 20$		
以色列	T4012	8-18	50	50	$\pm 25$		
美国	VTM-6198x1	8-18	25	40	$\pm 20$		<50
中国 776厂	B-5981	8-18	50	45	$\pm 20(25\text{max})$	$\pm 2.0$	
中国 12所	B-5981	8-18	50 40min	45	$\leq \pm 20$	$\pm 2.0$	50-100

由上表看到：

(1) 在高频参数方面国内水平基本接近国外水平，不足之处为噪声功率偏大，频带有待拓宽，二次谐波还需降低（TH3986的最大值为-3dBc，VTM-6198为-6dBc。而我们部分管子<-3dBc、有的则>-3dBc）。这将是今后努力提高的方向。

(2) 成品率低：关键部件焊接成品率为50%，一般部件为80%，从可测管到合格管成品率为60%左右，这样总的成品率远达不到50-60%，落后于国外。

(3) 生产能力差：这也为成品率低所制约。

表 1.7 国内外生产情况

厂 家	年产量 (只)	生产能力 (只/年)
以色列 Elta	500-800	1000
美国 CPI	1000-1500	3000
中国电子12所	50	

(4) 可靠性和寿命未经考验：国外管子已生产多年经过了整机考验，国内行波管仅在样机上试用，未经长期考验（现电子12所的B-5981寿命试验已进行了2000多小时，初步目标为2000小时）。国外管保证寿命5000-10000小时，国内管为1960小时。

尽管我们与国外存在差距，但十年来的研制使我们在设计与生产技术上取得了长足的进

展, 这将为我国今后发展奠定一个好的基础, 这主要表现在:

- (1) 较好地掌握了单管设计和生产技术, 有了一定的生产能力。
- (2) 掌握了管子结构设计和模夹具的设计制造技术。
- (3) 掌握了一套行之有效的外线路相位及增益补偿技术。
- (4) 制管成品率在不断提高。

### 1.1.2.3 关键技术及建议

(1) 零件加工手段落后, 导致零件及模具精度差且零散大, 使装配的管子性能相差甚远, 有的管子经调试仍不能满足相位一致度的要求。建议采用 CAM 技术及先进的检验技术, 减少人为因素, 使零件精度提高, 一致性增强。

(2) 计算与实验表明: 螺距变化 $0.01\text{mm}$ , 同步电压变化 $150\text{V}$ 。而同步电压变化 $1\text{V}$ , 相位将变化 $2^\circ$ 。建议购置精度更高的螺旋线绕制机, 其精度应提高到 $\pm 1\sim\pm 2.5\mu\text{m}$ 。

(3) 陶瓷杆介电常数的零散及衰减器的不一致性, 严重地影响管子的一致性, 应做逐个检测而不是抽测。

(4) 慢波系统的相位特性、色散特性及匹配特性应列为必测项目, 以提高成品率。

(5) 在制作阴极的过程中对零部件严格检验, 增加对过程的监控, 阴极温度逐个测试并测试阴极活性。

(6) 严格控制磁场分布的一致性, 并注意横向场的控制。

(7) 所用材料应予检测, 特别是关键材料。

(8) 增加工艺流程的控制, 提高设备性能, 如: 进行动态排气并使管子封离真空度达到 $10^{-8}\text{Pa}$ 等, 以提高成品率, 提高生产能力, 满足国防急需。

## 1.1.3 宽带大功率脉冲行波管

### 1.1.3.1 高功率管的发展

宽带大功率脉冲行波管广泛用于电子对抗, 雷达及导弹上, 具有重要意义。随着行波管研制水平及工艺能力的进步, 螺旋线行波管的电压冲出了低于 $10\text{kV}$ 的限制, 不同方式抑制返波振荡技术试验成功, 使宽带行波管脉冲峰值功率的提高有了大的突破。这一进步引起了与耦合腔行波管的激烈竞争。耦合腔行波管具有足够高的功率成为现代雷达发射机末级功率放大的必选管型, 但在有些方面宽带高功率行波管使瞬时带宽仅为 $10\%$ 的耦合腔行波管相形见绌, 军事与民用各领域广泛应用的大瞬时带宽的雷达, 也呼唤大功率宽频带脉冲行波管。随着计算机的发展, 数字回收技术的更新, 使以宽带大功率行波管代替耦合腔行波管成为可能。法国汤姆逊公司致力于研制的宽带高功率行波管, 显示了突出的优点, 为这种管型的应用开创了新的前景。水平相当的螺旋线行波管与耦合腔行波管相比, 前者的优势:

(1) 制造成本低;

(2) 重量轻、尺寸小;

(3) 具有很宽的瞬时带宽, 如汤姆逊公司研制的 $8\sim 10.5\text{GHz}$ 螺旋线行波管, 将至少需要 $3\sim 4$ 只耦合腔行波管来覆盖这个带宽;

(4) 其高频性能, 增益波动、功率波动、效率波动都比耦合腔行波管优良。这样好的增益放大特性使它们易于用在相位调制及幅度调制上;

(5) 可做到用一只管子设计一台发射机满足电子对抗及雷达的双重需要, 这将引起电子战装备的革命。

### 1.1.3.2 国内外水平比较

我国自20世纪70年代以来，宽带大功率脉冲行波管的研制取得了一定的成绩，特别是获得高峰值功率遇到的抑制返波振荡的技术有了突破和实用。80年代我国曾购买意大利E6504，后又陆续购买了E6510及美国的脉冲行波管等。现将国内外代表管型作个比较，见表1.8。

对比我们看到：

- (1) 国外管子频带宽，多是等于或大于倍频程，以往我们大多是倍频程的；
- (2) 国外各公司的管型多，且形成系列，各家都有覆盖率1-18GHz或2-18GHz，功率多为1-2kW，平均功率为100W左右的系列管，而我们少且不成系列；
- (3) 在高峰值功率方面，我们的管型其峰值功率平均功率都有待提高，特别更应向I/J波段发展。

表 1.8 国内外宽带脉冲行波管

厂 家	型 号	频 率 (GHz)	峰 值 功 率 (kW)	增 益 (dB)	工 作 比 (%)	平 均 功 率 (W)
LITTON	L-5873	2-8	1	45	8	
	L-5833	6.5-18	1.5	45	6	
TMD	PTC6351	1-2	1	60	4	
	PTC6353	2-8	1	60	6	
	PTC6576	6.5-18	1	60	6	
THOMSON	TL5050	2.6-7.3	1	60	10	
	TH3893	6-16	1.5	40	2	
	TL10050	7.5-17	2	60	4	
	TH4021	8.5-10.5	4	41		400
	TH3845	8-10	20	43		800
	TH3999	9-10.3	8	40		400
Hughes	756H	4-8	6		2.5	
中国 12 所	VE3023	2-4	1	33	1	
	BM1941	4-8	3.5	35	2-2.5	
中国 772 厂	BM1921	7.5-16.5	2	55	2	
	预研	4-8	8	35	2	160
	攻关	6.5-18	2.5	50	3	75

### 1.1.3.3 关键技术

基本同于宽带连续波行波管，但脉冲管的突出特点是抑制振荡和栅控技术。

(1) 抑制返波振荡技术 相速渐变相速跳变，提高起振电流和起振长度的方法使用较多较方便，谐振损耗吸收返波能量的方法也有使用，但在C波段以上由于谐振曲折线尺寸小，制造难度大，应用较困难，其他方法用得很少。应当更进一步探讨抑制效果更好并对行波管参数更有益的方法。

(2) 栅控技术 峰值功率的提高要求电子注的导流系数更高，性能更优良。电压的提高要求改进设计，工艺，提高耐压，减少打火以及更好的抑制栅发射。



## 1.1.4 耦合腔行波管

### 1.1.4.1 现代雷达对电真空器件的要求

现代战争中,雷达在防空及攻防结合系统中,在各级作战指挥系统(C<sup>3</sup>I)中是主要的实时主动获取信息的探测手段,而且还是各类先进的作战平台(飞机、舰艇、导弹、战车等)的组成部分。雷达观察的目标及参数在增加,它们的工作环境却日益恶化,这些对现代雷达提出了越来越高的要求,除了探测外雷达的功能还扩展到炮位瞄准、制导、寻的等多种用途。雷达发射机的关键设备和基础是微波大功率真空电子器件,特别是耦合腔行波管,因此现代雷达对微波管的要求日渐提高。

雷达反隐身措施突出地要求微波管的输出功率应大大提高,表 1.9 介绍了国外几个典型雷达发射机的功率量级(考虑对付隐身目标时,表中发射机的平均功率大约应提高到100kW)。

有源相控阵雷达要求微波真空电子器件具有高效率、长寿命、高增益、低电压的特点而且要求体积小、重量轻、成本低。机载火控雷达为增加作用距离迫切要求平均功率大(1kW-2kW)的双模栅控行波管。机载预警雷达还要求低的附加噪声和相位灵敏度,在这方面多注速调管有着良好的应用前景。为提高雷达的抗干扰能力,微波管还应有足够的调谐带宽以实现捷变频。双频雷达需要相应的双频大功率微波管。适应雷达成像的需求,大瞬时带宽的雷达已广泛应用于军民各领域,目前实用雷达中的信号带宽在 L 波段为200MHz, C 波段为500MHz, X 波段为 1GHz,为此要求大功率微波管在大的带宽内,解决好幅频和相频的非线性问题。为增加雷达作用距离,观察隐身目标,提高抗反辐射导弹的能力,要求雷达信号脉冲宽度加大,常规雷达已到数百 $\mu$ s,外空监视雷达甚至可达16ms,故要求微波管具有大的带宽与时宽乘积,这些都是很高的要求。

表 1.9 国外几个典型雷达发射机功率

雷达名称及型号	工作频段	微波管类型	发射机平均功率
“猎迷”空中预警机雷达	S 波段	TWT	5 kW×2
E3-A 空中预警机雷达	S 波段	Kly.	10 kW
机载火控雷达,俄“甲虫”	X 波段	双模 GTWT	1kW
机载火控雷达,美 AN/APG-98	X 波段	双模 GTWT	1kW
超视距雷达, AN/FPS-118	短波6.74-22.25MHz	三、四极管	120kW×2
空间监视雷达 AN/FPS-108	L 波段	TWT(QKW-1723)	160kW×96
炮位侦察雷达, AN/TPQ-37	S 波段	GTWT(1743H)	60kW
相控阵测量雷达	C 波段	TWT(VTC-5760)	5kW、1MW

### 1.1.4.2 国内外水平比较

国外耦合腔行波管发展迅速,其设计能力、工艺水平、性能参数、质量与可靠性均相当先进,它覆盖了从分米波段到3mm波段的频率范围。我们可从峰值功率,平均功率及工作带宽来看一下国外的最高水平,见表 1.10。