

从磁控管到回旋管和自由电子激光

张世昌

(成都电讯工程学院物理系)

微波电子学作为一门独立学科从物理学分离出来,应归于磁控管的产生和发展。有趣的是,从磁控管演化到回旋管及自由电子激光,又使这一研究领域戏剧性地回归到物理学范畴。本文将研究这一历史过程的重大事件,展示磁控管的发展如何促使实用雷达系统的诞生,在第二次世界大战后又如何摆脱了困境,在六十年代及七十年代又先后出现两个飞跃,产生了回旋管及自由电子激光。

一、磁控管

二十世纪初,国际上电话电报事业竞争非常激烈,各公司都试图研制放大器来提高传输能力。在1914年纽约与旧金山之间的长途电话实验中,栅控真空三极管击败磁控式水银蒸气放电管而占据商业市场。随后,在美国通用电气公司与美国电话电报公司之间,发生了争夺栅控管专利权的诉讼纠纷。结果后者胜诉,迫使美国通用电气公司不得不另辟蹊径。1916年11月,美国通用电气公司的物理学家 A. W. Hull 提出了一项专利申请,其中描述了在真空二极管的阴极和板极之间加入可变磁场,能够控制谐振电路的振幅。1921年,他在美国《物理评论》上发表了一篇理论文章,进一步研究了纵向磁场对处于二极管之间的电子运动的影响,导出了阳极电流截止时的磁场阈值公式,即著名的 Hull 条件^[1]。随后,美国通用电气公司制造出相应的振荡器,被命名为磁控管(magnetron)。

1924年,捷克物理学家 A. Zacek 报道了一个重要发现:磁控管可以产生波长为29cm的高频振荡。同年,德国耶拿大学 E. Habann

发现采用分瓣阳极系统,阳极缝隙由于负阻特性,可使磁控管频率取决于跨接在两极上的外部谐振电路。遗憾的是,这些工作当时未能引起足够重视。直到1929年,日本物理学家 H. Yagi 和他的学生 K. Okabe 把磁控管发展到超高频,才使得学者们和工程界对磁控管产生了兴趣。

1932年,美国西屋实验室的 G. R. Kilgore 将磁控管的波长缩短到1.6cm。1934年,密西根大学的 C. E. Cleeton 将西屋实验室的磁控管进行缩尺改造,把波长进一步缩短到1cm。由于磁控管的工作频率比普通真空管高得多,所以在通信中很受重视。Kilgore 等人于1933年用自己研制的磁控管,实现了1.5英里的无线电通信。同年, W. D. Hershberger 用西屋生产的磁控管装备发射机,实现了1英里的通信,并观察到一辆行驶卡车的反射回波。第二年,他又用美国无线电公司生产的分瓣阳极磁控管,实现了16英里的通信,观察到半英里远处一艘轮船的反射回波。但是,人们很快意识到现有的磁控管功率水平太低,还不能使雷达实用化。

于是,注意力转向提高磁控管的功率。在实验研究方面,磁控管得到两个重大改进。一是,法国 CGTSF 公司的 H. Gutton 将阴极改造成大尺寸氧化物阴极,同时,把双缝分瓣阳极改成多缝分瓣阳极。二是,苏联的 Alekslov 和 Malairov 于1940年研究出影响磁控管功率提高的原因是阳极散热问题;实验中他们在铜块上钻出圆柱孔解决散热,获得良好效果,在波长10cm得到300W功率。在理论研究方面,菲利浦公司的研究员 Posthumus 于1935年提出了旋转场理论^[2],对尔后磁控管的发展作出

了杰出贡献。

上述进展有力地促进了通信及雷达研究。1935年,德国电话公司采用永磁体磁控管,能透过云层烟雾探测到飞机。1936年,美国通用电气公司用永磁体磁控管,实现了距离为六英里的通信,探测到一辆行驶的汽车和飞机。1937年,英国通用电气公司用四缝阳极磁控管,在厘米波段成功地装备了保密通信发射机。同年,飞利浦公司采用磁控管装备发射机,建立了距离为50多公里的无线电通信线路。

磁控管发展的重要里程碑,是英国通用电气公司的 H. A. Boot 和 J. T. Randall 于1940年发明的腔体磁控管。1939年,英国受到德国轰炸机的严重威胁,发展实用雷达系统已成燃眉之急。Boot 和 Randall 于当年11月接手研制新型磁控管,由于时间非常紧迫,来不及研究已有的全部资料,只钻研了旋转场理论。他们提出了一个卓见:用三维圆柱谐振腔代替原来的二维赫兹天线,起到外接谐振电路和阳极的双重作用。随后于1940年2月成功地制出样管,在波长为9.8cm条件下获得了400W连续输出功率。他们把这一结果迅速告诉了正在温伯利英国通用电气实验室研究防空雷达的 Megaw。于是,温伯利的科技人员马上用已拥有的工艺,对样管进行改制。前后不到三个月,便改造出新的磁控管装备雷达系统,于1940年5月成功地探测到7英里外一艘潜艇的潜望镜。自此,腔体磁控管的发明,不仅使磁控管本身发展成熟,而且一扫雷达研究徘徊不前的局面,从而使雷达实用化。

1940年秋,由 Tizard 爵士率领的英国科技代表团访问美国,将温伯利英国通用电器实验室不久前才制成的腔体磁控管,秘密送给美国。该管的波长10cm,峰值功率为10kW,是当时美国雷达工作频率的四倍,功率的五倍。几个月后,贝尔电话实验室便仿制出好几只腔体磁控管。由于第二次世界大战的需要,大批优秀的科学家和工程师都投身到研制发展磁控管,在战争期间装备了100多部雷达系统。在战争期间,美国在磁控管及雷达系统方面投资

达二十多亿美元。

毋庸置疑,磁控管和雷达系统在保卫伦敦以及在整个大战中,发挥了非常重要的作用。同时,随着磁控管和雷达系统的深入发展,相应的交叉学科,如微波电子学、微波理论、天线理论、电波传播理论等等,也应运而生,并从传统的物理学中分离出来。

大战结束后,磁控管广泛地用于导弹系统、空间通信和微波炉。但是,随着科学技术的发展,人们越来越感到现有的厘米波源不能满足需要,迫切希望获得更短波长的波源。为此,科技人员曾对磁控管及其他真空电子器件做了许多改进工作。但人们失望地发现,现有微波管结构的几何尺寸受到加工条件及散热条件的限制,既难于将工作波长缩短到毫米亚毫米,又难于进一步提高输出功率。

二、回旋管

五十年代后期微波管的发展处于低潮的时候,一些科学家仍然锲而不舍地寻求新机理,试图将真空电子器件继续向前推进。

1958年,澳大利亚物理学家 Twiss 从理论上发现,自由电子在磁场作用下的回旋辐射可以产生放大作用^[2]。1959年,美国的 Schneider^[4] 和苏联的 Gaponov^[5] 在不了解 Twiss 工作的情况下(前者用量子理论,后者用经典理论),分别独立地计算了相对论性自由电子在磁场作用下的受激辐射。其中,Gaponov 讨论了单色相对论性电子在波导中回旋运动的受激辐射,可以被认为是回旋管的雏型。

回旋辐射的放大机理,可以用电子运动的角向群聚得到定向解释:在静磁场 B_0 作用下,同一拉莫尔圆上的电子沿着圆周均匀分布,以同一回旋角速度 $\omega_c = |e|B_0/\gamma m_0$ (e, m, γ 为电子的电量、静质量及相对论能量因子)作回旋运动。当波导中引入行波场后,半个圆周上的电子受到高频电场的加速作用,另外半圆周上的电子则受到高频电场的减速作用。受到加速的电子,其相对论能量因子 γ 增加,从而使旋转

角速度变慢;受到减速的电子情况正好相反,旋转角速度变快。这样一来,高频场的作用使原来沿圆周均匀分布的电子,出现角向群聚现象。分析表明,如果波的角频率略大于电子回旋频率,那么群聚块落入减速场区域,所有电子的平均效果是将净动能交给高频场,使入射行波能量增加而得到放大。因此,回旋辐射放大机理的物理本质,是电子角向运动的相对论效应。

斯坦福大学的 Pantell 等人于 1959 至 1964 年期间,曾做过利用电子束与回旋返波相互作用的振荡器实验^[6]。但在这些实验中,电子的纵向群聚起着重要作用,与传统的微波管中电子束与波相互作用情况比较类似,还不足以证明上述机理。1964 年,耶鲁大学的 Hirshfield 和 Wachtel^[7] 用实验首次令人信服地证明了回旋辐射放大机理,并以《电子回旋微波激射器》(Electron Cyclotron Maser) 为题,在美国《物理评论快报》上发表。苏联沿用真空电子器件命名惯例,把电子回旋微波激射器称为回旋管(Gyrotron)。

回旋管与普通微波管相比较,具有两个明显的优点:(1)工作频率由电子的回旋频率决定,不受几何结构的限制。因此,通过提高回旋频率,可以将器件的工作频率突破厘米波段,进入毫米亚毫米波段。(2)回旋管属于快波器件,不需要慢波结构,因而腔体可采用波导结构或准光腔结构,这样器件的功率容量就非常大。有趣的是,尽管美国在回旋管开拓性研究中表现了很高热情并做出了显著贡献,但对于将此制作成毫米亚毫米波器件,却兴趣不大,几乎停滞了十年之久。与此相反,苏联一开始就注重将回旋管实用化。早在 1967 年,苏联的二次谐波回旋管在波长 4.95mm 获得了 5kW 的连续输出功率,效率达 17%。到 1978 年,苏联回旋管在 3mm 波长获得 1.1MW 脉冲功率,效率 34%。苏联所获得的惊人进展刺激美国及其他国家,他们急起直追,自 1977 年以来,积极开展回旋管的研制,至今不衰。目前,回旋管已达到非常高的水平。例如,美国海军研究实验室于 1986 年在 4mm 波长时获得 0.3MW 功率,效率达

43%;麻省理工学院于 1984 年在 2mm 波长时获得 175kW 功率,效率为 36%;法国 Thomson-CSF 公司于 1986 年在波长 3mm 时获得长脉冲(100ms)功率 280kW,效率为 40%;西德于 1986 年在波长 4mm 时获得长脉冲(100ms)功率 200kW,效率为 22%;日本 1984 年在波长 3mm 时获得脉冲为 1ms 的数千瓦功率,效率为 10%。

回旋管之所以受到极大重视,在于它在毫米亚毫米波段具有普通微波管和固体器件等其他器件无与伦比的强大功率和工作效率。这些优越性使回旋管在雷达系统、高能加速器以及受控核聚变中找到应用前景。早在 1978 年,美国万瑞公司就研制出 100kW 的回旋速调管,用作频率为 94GHz 的雷达系统的功率放大器。在高能加速器方面,普通的 RF 加速器使用的是传统微波速调管,波长较长,功率较小,造价昂贵。据美国专家们估算,如果采用目前斯坦福直线加速器中心的微波速调管(频率 2.856 GHz,峰值功率 35MW)作为微波功率源,用于将来的 1TeV 直线对撞机,那么装置将花费三十多亿美元;如果把频率提高到 5.712GHz,那么装置将节约十亿美元的费用。目前,马里兰大学正在为 1TeV 直线对撞机研制波长为 3cm、峰值功率为 300MW 的回旋速调管,可望进一步大幅度降低该装置的造价。在受控核聚变等离子体加热方面,回旋管已广泛被启用。美国海军研究实验室研制的 35GHz 回旋管,于 1982 年用于 ISXB 托卡马克上,已获得明显的加热效果。麻省理工学院和万瑞公司等单位,正在为等离子体加热研制强功率长脉冲回旋管。苏联在 T10 托卡马克上采用 84GHz 回旋管,在 DIII 托卡马克上采用 60GHz 回旋管,也获得明显的加热效果。欧洲国家在 W7A 仿星器上采用 28GHz 和 70GHz 回旋管,在 TER 托卡马克上用 60GHz 回旋管,在 Cleo 托卡马克上用 28GHz 和 60GHz 回旋管,进行等离子体加热研究。日本 1984 年研制的长脉冲回旋管,也已用于托卡马克上。

回旋管使“山穷水尽疑无路”的真空电子器

件获得生机。1977年,美国《IEEE微波理论与技术汇刊》首先为回旋管出版专辑;1985年,《IEEE等离子体科学汇刊》也以回旋管为主体出版专辑。英国《国际电子学学报》自1980年以来,已为回旋管出版了四次专辑。

三、自由电子激光

除回旋管外,从微波管生长出来的另一新成果,就是自由电子激光。后者要比前者晚十年左右。它们各具特色:回旋管中由弱相对论效应产生角向群聚;自由电子激光中由强相对论效应产生多普勒频率上移。

事实上,早在1933年,Kapitza和Dirac^[8]就提出了受激汤姆孙或康普顿效应,只是很长时期都没发现其实际用途,直到五十年代左右人们致力于把普通微波管推进到更短波段,康普顿效应才受到重视。Ginsburg^[9]于1947年,Motz^[10]于1951年,分别研究了相对论性电子束通过极性交错安排的静磁场(即波荡器 undulator 或 wiggler 磁场)时,所产生的自发辐射。1953年,Motz等人在斯坦福大学进行实验,测得的自发辐射功率和频谱,与用经典电动力学中单电子公式计算结果很一致。

1959年,Motz和Nakamura进一步证明,如果用波导结构,那么注入的信号波可以得到放大。1960年,Phillips^[11]发展了Motz工作,设计了一个叫做Ubitron的装置,使相对论性电子束注入波导腔,在横向wiggler磁场与纵向静磁场构成的复合场作用下,产生电磁辐射。该实验获得了大约100kW功率,效率约为10%。由于实验中电子的相对论能量因子 γ 仅1.3左右,故辐射波长较长(约10cm),没有显示出优越性。1968年,斯坦福大学的Pantell^[12]从另一角度改进了Motz实验,加入了一对反射镜作为光学腔,将静磁wiggler改成微波undulator。

1971年,斯坦福大学的Madey^[13]详细地研究了相对论性电子在横向静磁wiggler作用下的自发辐射,以及有光学腔存在时的受激辐

射,并命名为自由电子激光(Free-Electron laser)。紧接着,Palmer^[14]论证了用加速器技术提供强相对论性电子束用于自由电子激光的可能性。1976年,Elias等人^[15]利用加速器提供的高能量低电流相对论性电子束($\gamma \approx 47$, $I \approx 70\text{mA}$),测定了在横向wiggler中的自发辐射,以及有光学腔时受激辐射对波长为 $10.6\mu\text{m}$ 的入射波的放大作用,从原理上验证了Madey理论。第二年,Deacon等人^[16]用更强的电子束($\gamma \approx 87$, $I \approx 2.6\text{A}$)实现了自由电子激光振荡器,在波长 $3.4\mu\text{m}$ 时获得了7kW输出功率。在这些实验中,空间电荷波的影响可忽略不计,故装置被称为康普顿型自由电子激光器。哥伦比亚大学的Efthimion等人^[17]于1977年,Marshall等人^[18]于同年,以低能量高电流相对论电子束,实现了被称为喇曼型自由电子激光放大器及振荡器。

与此同时,自由电子激光的理论研究也不断深入扩展。早期的理论大多采用量子方法。Hopf等人^[19]于1976年证明了可以用经典理论处理自由电子激光中的受激散射过程。1979年,Madey进一步发展了他本人于1971年提出的理论,求得了自发辐射与受激辐射之间的定量关系,被公认为Madey定理。

近十年来,自由电子激光已出现了许多新思想。例如,除横向静磁wiggler自由电子激光外,还有角向静磁wiggler,纵向静磁wiggler以及电磁wiggler自由电子激光。此外,还出现了基于史密斯-帕塞尔效应的自由电子激光,基于受激切伦科夫辐射的自由电子激光,基于渡越辐射的自由电子激光,利用储存环使电子多次回收使用的自由电子激光,以及光速调管自由电子激光。目前,自由电子激光的发展方向,倾向于进一步缩短波长提高效率的新机理探讨及实验研究。这两方面的工作已取得了令人鼓舞的进展,法国于1985年进行的高次谐波光速调管自由电子激光实验,已获得波长为 $0.355\mu\text{m}$ 的紫外相干辐射。美国洛斯-阿拉莫斯国家实验室于1983年进行实验,在波长为 $10.6\mu\text{m}$ 时获得900MW输出功率,效率从早期

短波长实验的0.25%提高到4%。1986年,美国劳伦斯-利弗莫尔国家实验室与劳伦斯-贝克利国家实验室联合进行的实验中,在波长8mm时获得约1000MW输出功率,效率高达34%。预计近期内美国在超紫外及X射线波段将有重大进展。

与普通激光器相比较,自由电子激光之所以具有很强的竞争力,在于其功率非常强大,波段覆盖极宽,工作频率连续可调,相干性好,工作稳定。自由电子激光的工作物质是相对论电子束,理论及实验均已证明其工作波长正比于wiggler的空间周期,反比于电子相对论能量因子的平方。因此,在给定wiggler周期长度后,通过改变电子束能量,便可使工作频率连续可调,原则上可以覆盖从微波到X射线整个波段。

自由电子激光的独特优点,使其应用前景不断拓宽。除可用于通信、等离子体加热、高能加速器外,自由电子激光由于其脉冲间隔可达 10^{-10} 至 10^{-11} s,因此还适宜用来研究半导体中的电荷载体以及光子、等离子体激元和超导隙的动力学行为,测定单晶中被吸收分子的振动谱,以及研究非线性暂态问题。自由电子激光的光束可以很窄,可用于激光外科手术及光辐射医学。在国防上,用自由电子激光有可能制造出光速定向能武器。目前,美国里根政府已将自由电子激光列为“星球大战”计划中的重点研究课题。

1986年5月,杨振宁博士来华讲学时,有人问:“应当选择哪些领域研究才有发展前途?”杨博士认为:“这好比淘金矿,当然以淘新金矿为好”。他特别提到准晶和自由电子激光,认为

这两个领域刚在世界上起步,把握住这个时机可以赶上去,甚至还可以走到潮流的前面。的确,自由电子激光在世界上已广受重视。美国《IEEE量子电子学学报》自1981年起,已为自由电子激光出版四期专辑。截止今年底,已召开了九届一年一度的国际自由电子激光会议。

从磁控管的诞生到回旋管及自由电子激光的演化过程,我们可以得出几个有益的结论:(1)科学技术的研究方向同社会需求相结合,对双方都具有良性循环作用。(2)在应用科学中也存在基础理论研究问题,而且这种基础研究往往是新技术的生长点。(3)新学术思想,新原理的确立和深化,要靠实验手段。

- [1] A. W. Hull, *Phys. Rev.*, **18**(1921), 13.
- [2] K. Posthumus, *Wireless Eng. Exp. Wireless*, **12**(1935), 126.
- [3] R. Q. Twiss, *Auss. J. Phys.*, **11**(1958), 564.
- [4] J. Schneider, *Phys. Rev. Lett.*, **2**(1959), 504.
- [5] A. V. Gaponov, *Izv. VUZ Radiofizika*, **2**(1959), 837.
- [6] R. H. Pantell, *Proc. IRE*, **47**(1959), 1146.
- [7] J. L. Hirshfield et al., *Phys. Rev. Lett.*, **12**(1964), 533.
- [8] P. L. Kapitza et al., *Proc. Camb. Phil. Soc.*, **29**(1933), 297.
- [9] V. L. Ginsburg, *Izvestia Akademii Nauk (USSR) Ser Phys.*, **11**(1947), 165.
- [10] H. Motz, *J. Appl. Phys.*, **22**(1951), 527.
- [11] R. M. Phillips, *IRE Trans.*, **ED-7**(1960), 231.
- [12] R. H. Pantell et al., *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-4**(1968), 905.
- [13] J. M. Madey, *J. Appl. Phys.*, **42**(1971), 1906.
- [14] R. B. Palmer, *J. Appl. Phys.*, **43**(1972), 3014.
- [15] L. R. Elias et al., *Phys. Rev. Lett.*, **36**(1976), 710.
- [16] D. A. G. Deacon et al., *Phys. Rev. Lett.*, **38**(1977), 892.
- [17] P. Efthimion et al., *Phys. Rev. A*, **16**(1977), 633.
- [18] T. C. Marshall et al., *Appl. Phys. Lett.*, **31**(1977), 320.
- [19] F. A. Hopf et al., *Phys. Rev. Lett.*, **37**(1976), 1215.

1988年美国物理学年会重视高温超导

今年美国物理学“三月年会”在美国南方旅游胜地新奥尔良市(New Orleans)举行。去年纽约市举行的“三月年会”,重视了高温超导问题(参见本刊1987年9期“高温”超导在1987年美国物理学年会上引人注目),今年继承与发展了去年的做法,对高温超导作了深入细致的讨论。在为期五天(3月21日至3月25日)的会议中,每天都有三个超导分会同时举行。从高温超导的材料性质到制作,从超导原理到应用都一一

进行了研究。会议还临时安排了一个高温超导的专题报告会,探讨了最新发现的非稀土高温超导材料(铋-钙-锶-铜-氧,铋-钙-钡-铜-氧)。引人兴奋的是中国留学人员在这方面作出颇大的贡献,他们直接参与了发现与研究新材料工作,得到与会专家的赞扬,为祖国争得了荣誉。

(王兴五)