

电子迴旋脉塞研究的现状和展望

陈 增 圭

(中国科学院电子学研究所,北京)

摘要 电子迴旋脉塞作为开拓毫米波、亚毫米波波谱的高功率相干辐射源,近年来研究工作十分活跃,取得了不少鼓舞人心的新进展。本文综述了迴旋单腔振荡器、迴旋管放大器、高次谐波迴旋管和强流相对论迴旋管等电子迴旋脉塞各类器件的研究现状,指出了一些技术关键问题及其解决措施,并展望了它的发展前景。

关键词 微波电子学;毫米、亚毫米波相干辐射源;电子迴旋脉塞

一、引 言

电子迴旋脉塞即迴旋管 (gyrotron) 是一类新型的高功率毫米波、亚毫米波相干辐射源^[1-4]。它的出现是微波电子学的一项重大突破,近十多年来获得了迅猛的发展^[5-10],在高技术发展中引人注目。迴旋脉塞互作用依据电子迴旋运动的相对论性效应这一崭新的工作机理。电磁辐射频率取决于外加的磁场强度。高频互作用系统采用大尺寸的过模谐振腔或过模波导,使电子注功率和高频系统功率容量得以成倍增加。因而迴旋管突破了传统微波管的局限性,成为在毫米、亚毫米波段富有生命力的高功率相干辐射源。

近年来的研究表明,对应于传统微波管的每一种管型,几乎都可以派生出相应的迴旋脉塞器件。迄今最为人们关注的主要还是迴旋单腔振荡器 (gyromonotron oscillators) 和迴旋行波放大器 (gyrotron-TWA)。前者是固定频率振荡器,如图1(a)所示。它广泛应用于受控热核聚变的等离子体加热。后者是一类宽频带放大器^[11-15],结构示意见图1(b)。它有可能用于毫米波雷达和通讯

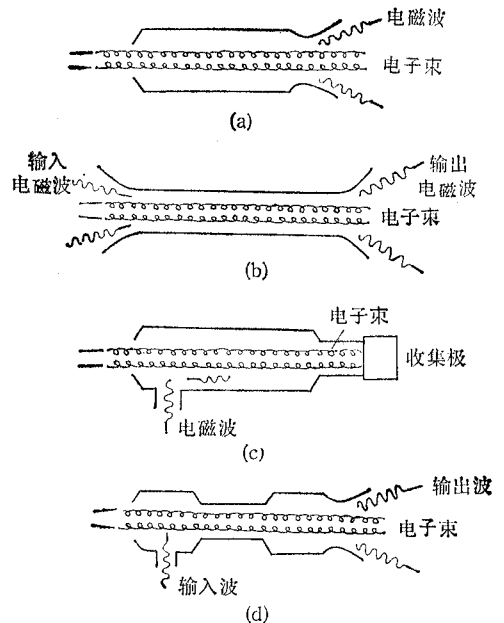


图1 各类迴旋管结构示意图

- (a) 迴旋单腔振荡器 (b) 迴旋行波放大器
(c) 迴旋返波管振荡器 (d) 迴旋速调管放大器

* 1987年4月10日收到,1988年6月15日修改定稿。

系统。此外,其它一些迴旋脉塞器件也引起了学术界的兴趣,它们都各具特点,各有所长。例如为了实现频率调谐,出现了迴旋返波管振荡器 (gyrotron-BWO)^[16,17]。通过改变工作磁场值可以使振荡频率在很宽范围内调谐。这种高功率可调谐毫米波源可用于磁约束聚变等离子体的预电离和非线性毫米波波谱学,也可以作为迴旋行波放大器的激励源确定其饱和带宽。又如为了提高增益、功率和效率,出现了迴旋速调管放大器 (gyroklystron amplifier)^[18,19],当然其带宽远不及迴旋行波放大器。它有可能成为新一代线性加速器的高频源。迴旋返波管振荡器和迴旋速调管放大器的示意图见图 1(c),(d)。

为了降低工作磁场值,以实现迴旋管的永磁小型化包装,开拓迴旋脉塞器件更广泛的应用,高次谐波迴旋管也应运而生了^[20-23]。而为了获得超高脉冲功率源以及高能物理研究工作的需要,强流相对论迴旋管的研制恢复了生机^[8,24-26],并取得了较大的进展。

纵观电子迴旋脉塞的发展,可以看出,它基本上是沿着提高工作性能和开拓新型管种的方向前进的。本文将综述这两方面的情况及其研究现状,阐明和评价要解决的技术关键问题,并展望它的发展前景。

二、迴旋单腔振荡器

迴旋单腔振荡器是最早研制成功的一类迴旋管。许多年过去了,人们对它的兴趣却有增无减,迴旋管的大量研究工作仍是围绕着单腔振荡器(包括为解决模式竞争而研制的复合腔振荡器在内)而开展的。近年来取得了多方面的进展,已经广泛地用于受控热核聚变装置中磁约束等离子体的电子迴旋共振加热 (ECRH)。

ECRH 对迴旋管的最终要求是连续波功率大于 1 MW,频率范围在 100—300 GHz 之间。为了实现这一目标,各国学者正在提高功率和频率,改善效率和工作稳定性等方面潜心研究,开拓前进。表 1 说明了近年来迴旋单腔振荡器的研究动态和现状。可见在上述诸方面都有了可喜的进展。最近苏联科学院宣布,在新建的大型托卡马克 T-15 装置中,将采用迴旋管加热等离子体到 1 亿度¹⁾。

表 1 迴旋单腔振荡器的研究进展和现状

频率 GHz	功率 kW	效率(%)	脉冲长度	工作模式
100	1100	34	0.1ms	TE _{13,1}
127	195	41		TE _{4,2}
28	342	37	CW	
60	214	33	CW	TE ₀₁ /TE ₀₂
35	340	54	1 μs	TE ₀₁ /TE ₀₄
375	120	15	0.1 ms	TE _{mp} (<i>m</i> ≫ <i>p</i>)
60,70	200		几秒	
160	100			TE _{6,2}
85	300	43		TE _{1,3}
140	100	27	CW	
140	645	23		

1) 经科,“苏建造把等离子体加热到 1 亿度的 T-15 装置”,《科学报》1987 年 3 月 17 日第 3 版。

为了提高功率、频率和效率,改善工作的稳定性,人们想了很多办法,采取了多种技术途径和措施,归纳起来主要有以下几方面:

1. 选用高阶模式工作

众所周知,随着频率的提高,特别是进入短毫米波长(ECRH 要求相应的工作波长为 $3-1\text{ mm}$) 时,开放腔的体积越来越小,电子束的束截面也相应减小,这就限制了谐振腔的功率容量和电子束功率,导致器件输出功率急剧下降. 为此人们选用高阶圆波导模式工作以解决上述问题,如高阶圆电模 (TE_{0n} , $n \geq 3$)^[27,28] 或边廊模 (TE_{mp} , $m \gg p$, whispering-gallery mode)^[20,21,29]. 圆电模腔壁损耗小,但模式竞争比较严重(特别是与 TE_{2n} 模),边廊模腔壁损耗比圆电模大一些,但模式竞争问题不严重,有利于提高工作稳定性. 究竟选用哪一种模式,可视具体要求而定. 为了解决圆电模工作时模式竞争严重这一问题,可以采用复合腔 (complex resonator) 技术.

2. 采用复合腔技术

模式竞争是电子回旋脉塞研制中遇到的一个突出的问题,严重阻碍了器件获得高的效率和输出功率. 为解决这一问题,实现模式控制,人们采取了不少措施,其中关键技术之一就是采用复合型开放式谐振腔即复合腔^[6,30].

图 2 表示复合腔的基本结构. 它由一大一小两个开放式圆柱腔相互耦合而成. 其中小腔工作在低阶模式,而大腔工作在高阶模式. 两种模式具有相同的角向标号,但径向标号不同. 适当选择两个腔的尺寸使这两种模式的本征频率相等,此时两个腔之间便产生强耦合,形成一个复合腔(也称耦合腔)系统. 一般地说,低阶模腔是电子注的预群聚腔,高阶模腔是注波能量交换腔. 群聚和换能分开(在通常的回旋管振荡器中,群聚和换能是在同一个腔中完成的),有利于器件工作稳定和提高效率. 从另一方面讲,这样一个复合腔中的统一的耦合模(如 $\text{TE}_{0n1}-\text{TE}_{0n1}$) 的纵向场分布最利于和电子注的相互作用,是其他具有纵向双峰场分布的竞争模式所不能比拟的,因而复合腔结构大大地减少了模式竞争,提高了工作稳定性. 其次,第二腔是高阶模腔,几何尺寸较大,因此功率容量增加,这对研制高功率短波长(短毫米波-亚毫米波)回旋管也是十分有利的.

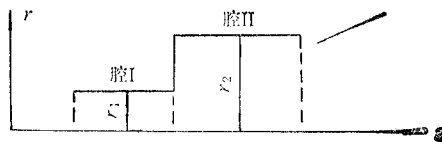


图 2 复合腔的基本结构

3. 研制准光腔回旋管

解决模式竞争,提高工作稳定性的又一有效办法是用 Fabry-Perot 型光学谐振腔代替通常的微波谐振腔,从而出现了准光腔回旋管 (Quasi-optical gyrotron)^[31,32]. 准光腔体积较大,也利于器件向高频率、高功率推进. 在准光腔回旋管中,电子注既可以平行于腔轴也可以垂直于腔轴行进,但目前通常采用垂直位形,其结构示意图见图 3. 在这种情况下,由于电子注速度零散影响甚小,高频输出路径和电子注收集路径又完全分开,所以有利于提高效率和工作稳定性.

最近几年准光腔回旋管在输出功率等方面有了不少进展。1984年美国海军实验室(NRL)已研制成功频率为115 GHz的样管,其束电压为60 kV,束电流为8 A,输出功率达53 kW,总效率11% (电子效率为30%),纵模 TEM_{00q} 的频率分隔度为3%,即 $\Delta f/f = 3\%$ [33]。

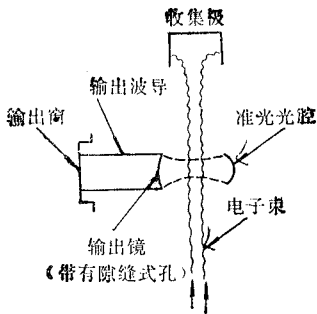


图3 准光腔回旋管示意图

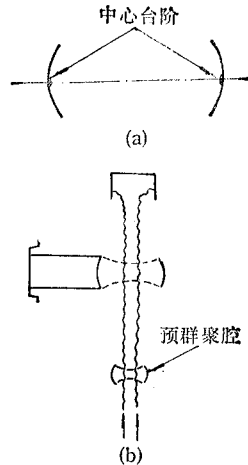


图4 (a) 中心台阶准光腔结构示意图
(b) 有预群聚腔的准光腔回旋管示意图

为了进一步提高纵模的模式纯度(由于很高的衍射损耗,横模的模式竞争一般可不予考虑),文献[34]提出了中心台阶准光腔结构(见图4(a));也有人想到了增设一预群聚腔[35,36](见图4(b)),工作原理类似于复合腔,从而进一步提高效率和改善工作稳定性。文献[37,38]提出了又一类新型准光腔回旋管,并取得了初步实验结果。

与通常采用微波腔的回旋单腔振荡器相比,准光腔回旋管的效率较低,主要原因是谐振腔功率几乎有一半左右被非输出镜面处的衍射而损失了,其次输出回路效率也不够理想,造成器件总效率较低。另外 Fabry-Perot 型谐振腔的制造工艺比微波谐振腔复杂。这些都是准光腔回旋管存在的缺点和困难,有待于不断改进和克服。

4. 高功率输出窗的改进

和传统微波管一样,输出窗是研制高频率、高功率回旋管的关键技术问题之一,窗的

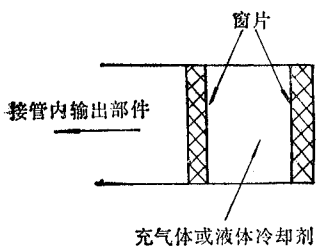


图5 双圆盘窗的结构示意图

打火、炸裂往往是器件损坏的常见原因。选用质量优良的介质材料(如 BcO 和高纯度 Al_2O_3 等)作输出窗,以减少高频损耗。改进窗部件的高频设计,尽量减少反射,改善驻波特性,拓宽频带。为了提高输出窗的功率容量,一般都选用直径较大的窗片,有的还采用双圆盘窗结构,并进行强迫气冷或液冷。双窗结构的示意图见图5。这种结构的输出窗在高频上也有特色,通过调节两窗片间的距离,在某些频率下的反射可接近于零。这就给我们提供了一种方法来补偿窗片介电常数的变化,或者针对不同的波导模式对频率特性曲线进行调谐,以满足实际

的需求。

需要^[39]。

窗的寿命是由其慢变化裂缝的增长决定的,而慢变化裂缝的产生和发展主要取决于窗的应力和表面状态。所以,做好输出窗应力和表面状态的分析测定,开展窗损坏机理的研究,是提高输出窗性能和寿命的重要途径。

除了上述四个方面的技术途径和措施以外,大电流、高磁压缩比和低速度零散的磁控注入电子枪的设计,可调节的并有合适磁场梯度的磁路设计,降压收集极技术的应用,谐振腔和收集极的冷却技术,以及模式变换器、水负荷等非标准专用配件或设备的研制等都是不可忽视的重要课题。

通过持续的努力,回旋单腔振荡器在向高频率、高功率、高效率和高稳定性即“四高”性能进军中必将取得新的进展,达到 ECRH 的要求已经为期不远了。

三、回旋管放大器

如上所述,回旋管振荡器作为毫米波段的相干辐射源取得了惊人的进展,其高功率、高频率、高效率的工作性能为世人瞩目。但这类器件也有缺陷,它基本上是一类固定频率功率源,不能满足有带宽要求的应用方面的需要,同时辐射波的相位也不能很好控制。所以人们又开始研制回旋管放大器,初期的工作主要集中在回旋行波放大器方面。实验证明,其输出功率远大于传统的毫米波行波管,瞬时带宽一般可达百分之几,适用于毫米波通讯和雷达系统。为了进一步拓宽频带,人们采用渐变磁场和渐变波导的双渐变技术,提出了非反射型(即前向注入型)和反射型回旋行波放大器的概念。理论分析和实验表明,这是提高瞬时带宽的有效途径^[43,40],在 8 毫米波段,25% 甚至更大的瞬时带宽已经达到了^[44,41]。

回旋行波放大器的研究进展和现状列于表 2。今后研究工作的重点主要是:低速度零散的电子枪的设计(要求比振荡器更高)、饱和和工作状态的分析以及进一步展宽瞬时带宽。

表 2 回旋行波放大器的研究进展和现状

频率 GHz	增益 dB	输出功率 kW	效率(%)	瞬时带宽	工作模式
35	17	10			TF ₀₁
5	24(小讯号) 18(饱和)	120	26	6%	TE ₁₁
35	18			13%	TF ₀₁
94	30	>20	8	2%	TE ₁₁
33	20			25%	TF ₀₀

回旋管放大器的另一种管型是回旋速调管放大器。和传统的速调管放大器一样,它由两个或两个以上的谐振腔和相邻腔之间的漂移段组成,外加一轴向磁场。输入激励信号由第一腔馈入并调制直流电子束,随后电子束在漂移空间产生相位群聚,在束波相互作用过程中电子束的直流能量被转换成高频能量,被放大的高频信号由最后一个腔引出。中间腔数目增多,放大器的增益和输出功率通常也随着增加。回旋速调管放大器与回旋行波

放大器相比,可以有更高的增益、输出功率和效率,但瞬时带宽远不及后者,为一大缺点.美苏于七十年代后期开始有实验结果报道,例如一个工作在 28 GHz, TE_{03} 模的三腔回旋速调管已在美国 Varian 公司研制成功,输出功率 50 kW,效率 8%;苏联有一个 10 GHz 频率的器件能产生 3 kW 输出,特点是效率较高,轨道效率达 70%.最近几年美国 NRL 陆续报道了他们的研究动态,一个工作频率 4.5 GHz 的三腔放大器工作在矩形波导主模,输出功率约 50 kW,效率 30%,大信号增益 24dB^[19,42];为了得到更高的功率,他们又设计了一个频率相同的四腔放大器,最后一个腔采用 TE_{13} 模式工作,前三个腔仍工作在矩形波导主模 TE_{10} ,预计输出功率可达 200 kW,效率高于 30%,大信号增益为 45—50 dB,瞬时带宽约为 0.4%^[19].

回旋速调管在毫米波雷达和新型加速器中的应用很有前途.关键技术之一是低速度零散的电子枪的设计.其次高次谐波工作降低对磁场的要求以及增加带宽等也都是重要的研究方向和课题.

四、高次谐波回旋管

众所周知,根据电子回旋脉塞的工作机理,回旋管的工作频率越高,所需的外加磁场就越强.例如 ECRH 所需回旋管的辐射频率最好在 100—300 GHz 范围内,按 150GHz (波长 2 mm) 计算,基波工作时所需磁场值约为 53 kG,这样高的磁场只能由超导磁铁产生.这给实际使用带来了困难,也限制了回旋脉塞器件的进一步推广应用.近几年来人们着意寻求降低工作磁场,实现永磁小型化包装的种种途径.其中一个有效的办法就是采用高次回旋谐波工作.围绕这一概念,先后提出了回旋磁控管 (gyromagnetron)、谐波回旋管 (harmonic gyrotron) 和回旋佩尼管 (gyro-peniotron) 等新型管种.

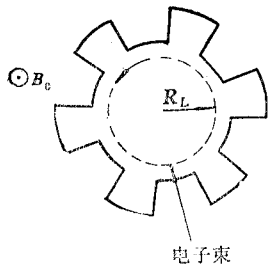


图 6 回旋磁控管的横截面结构

回旋磁控管的横截面结构示于图 6. 一空心电子束沿着外加直流磁场 B_0 的方向行进,其回旋半径为 R_L ,高频结构为磁控管型波导.这种器件可作振荡器,也可作放大器,视有无激励信号而定.在回旋磁控管中,束波相互作用与普通回旋管不同,能量转换发生在绕波导轴旋转的大回旋半径电子束和磁控管波导模式 (2π 或 π 模) 之间.由于器件工作在第 l 次回旋谐波频率上,所以所需的外加直流磁场值将大大降低,仅为基波工作时的 $1/l$.

文献 [43,44] 对回旋磁控管的有关理论进行了深入的研究和分析;作者还提出了采用佩尼管互作用机理提高电子效率的设想^[45]. W. Namkung 和 J. Y. Cheo 的实验成功地论证了回旋磁控管的工作原理^[23],初步结果表明,工作在 6 次谐波,辐射频率 4.36 GHz,输出功率可达 0.5—1 kW,而外加磁场仅 250 G;又工作在 12 次谐波时,辐射频率为 7.4—8.2 GHz,相应磁场值为 210—220G,此时由于波导模和束模的色散曲线二者相切的工作条件未予满足导致输出功率大为降低.回旋磁控管有时也称为 cusptron,因其采用跃变反转磁场 (Cusp magnetic field) 获得电子束的纵、横速度转换而得名,这和通常回旋管中磁控注入电子光学系统用缓变磁场(满足磁矩是寝渐不

变量)获得束的纵、横速度转换是大不相同的。用 magnetic cusp 产生大迴旋半径电子束的缺点是电子纵向速度零散大,不利于束波相互作用。

谐波迴旋管是另一类工作在高次谐波的迴旋管。传统的迴旋管采用小迴旋半径电子注,而它却采用绕波导轴作大迴旋运动的电子注,如图 7 所示。同时谐波迴旋管的工作模式是边廊模 (whispering gallery mode, 也称表面模)。当大迴旋半径电子注的第 n 次迴旋谐波与腔场 TE_{nm} 模的角向标号一致时,两者就产生良好的同步相互作用。此时电子直接与波导场同步相互作用,而不再是仅与场的某一次空间谐波同步作用。谐波迴旋管中通常 $n \gtrsim 5-30$, 所以工作磁场将成倍地下降,同时也能保证相当的相互作用效率和输出功率。

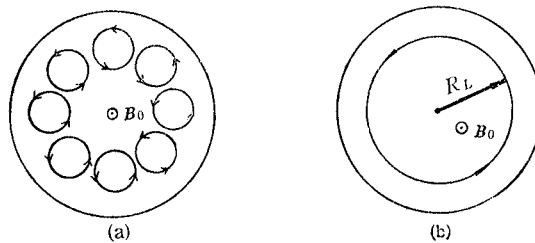


图 7 两种迴旋管的原理示意图

- (a) 传统迴旋管,采用小迴旋半径电子注,工作磁场高。
(b) 谐波迴旋管,采用大迴旋半径电子注,工作磁场低

刘盛纲教授等对大迴旋半径谐波迴旋管的理论进行了详细研究^[21,22,46]。美国加州大学 (UCLA) 的 McDermott 博士等还进行了实验研究^[20]。为了获得大迴旋半径电子束,他们采用了 X 波段的 TE_{111} 模加速腔,一低能电子束 (≤ 4 keV) 经过此微波腔受角向加速后变为高能 (≤ 500 keV) 大迴旋半径电子束,然后通过漂移管进入迴旋脉塞作用腔,大迴旋半径电子束的第 n 次迴旋谐波与该腔内的 TE_{nm} 模进行同步相互作用,最后得到毫米波相干辐射。

有加速器腔的谐波迴旋管的结构示于图 8。初步实验结果表明, TE_{111} 和 TE_{412} 都能起振。工作频率约 32 GHz, 最大输出功率为 1.8 kW, 电子效率 16%。由于 4 次谐波工作, 对外加直流磁场值的要求则大为降低。这类谐波迴旋管的突出问题是,通过漂移管时高能电子流 (大迴旋半径) 的截获和轴向模式的竞争,直接影响到输出功率和效率。UCLA 采用在迴旋脉塞作用腔中适当放置吸收材料来抑制轴向模式竞争^[47]。

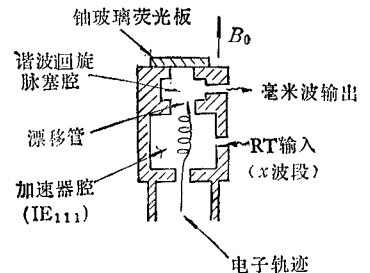


图 8 有加速器腔的谐波迴旋管示意图

迴旋佩尼管 (gyro-peniotron) 是近年来提出的一种新型迴旋脉塞器件^[22,48-50], 它采用迴旋管的高频电路和佩尼管 (peniotron) 的相互作用机理, 因而具有迴旋管的高功率和 peniotron 的高效率的双重优点, 同时也适合于高次谐波工作。在迴旋佩尼管中, 电子束的导引中心 (即迴旋中心) 一般应置于高频电场的节点, 以适合佩尼管相互作用的要求。理论计算效率在参量最佳化条件下可高达 90%。迴旋佩尼管的缺点是起振电流较大, 对

阴极发射要求较高,同时对电子光学系统也有相当高的要求。器件欲获高功率、高效率的优异特性,关键要保证电子束的高质量:束纵向速度零散必须小于10—15%,初始导引中心的偏差不得大于百分之几^[49]。

此外,利用 Fabry-Perot 型谐振腔的准光腔迴旋管、迴旋行波放大器和迴旋速调管放大器等管种也都可以工作在高次迴旋谐波^[7,51,52],并且已经取得了一些理论和实验结果。

五、强流相对论迴旋管

用强流相对论电子束产生微波已经不是新鲜的事了^[53-55]。近年来为了获得超高脉冲功率的相干辐射以及高能物理研究方面的需要,人们对强流相对论电子迴旋脉塞的兴趣大大加强了^[56]。图9表示它的原理方框图。和一般迴旋管不同的是,它采用强流相对论电子束为工作媒介,(通常人们把束流大于、等于几千安培,束能量高于250 keV 的电子束称为强流相对论电子束)。束由电子加速器产生,通过纵横能量转换区获得高横向动能,再进入高频相互作用区和场交换能量,最后得到微波-毫米波辐射,经由介质窗输出,作用后的电子束由输出波导壁(作为电子收集极)收集。

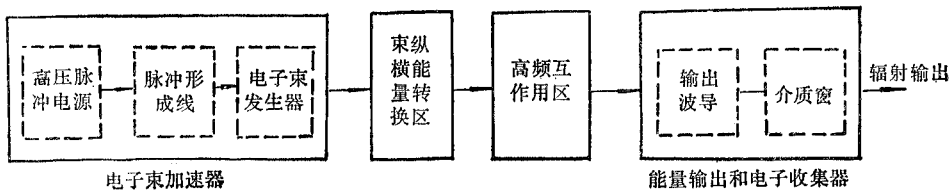


图9 强流相对论迴旋管原理方框图

表3 强流相对论迴旋管振荡器的发展动态

波长或频率	峰值功率 MW	效率(%)	二 极 管		国 别	年 份
			电压 MV	电流 kA		
4mm	2	~0.02	0.6	15	美	1972
Ku 波段	20	~0.2	0.68	16	美	1973
X 波段	20		0.4	15—30	美	1973
3.8cm	50	~0.65	1.1	7	美	1975
10cm	1500		0.9	6—8	苏	1975
10cm	2500~3000		1.2	6—8	苏	1975
10cm	1400	30	0.9		苏	1976
4cm	900	~0.34	3.3	80	美	1977
3cm	60	15	0.35		苏	1978
40 GHz	40	10	0.35		苏	1983
35 GHz	20	~8.5	0.35	0.7	美	1985
8.6mm	100	8			美	1986

和传统迴旋管一样,根据高频相互作用的不同形式,强流相对论迴旋管也可分为各类不同的管种,例如迴旋单腔振荡器、迴旋速调管放大器等。

强流相对论回旋管振荡器的发展动态示于表 3。可见这种器件在微波、毫米波波谱内能够产生几兆瓦到几千兆瓦的超高功率脉冲,这是一个显著的优点;缺点是效率通常很低(低于 10%)这是由于采用非谐振结构型相互作用系统等因素造成的。后改用谐振结构型相互作用系统,如一般回旋管中的开放腔,经过多方面的努力,效率已达到 10—30%。若能进一步改进电子枪设计,用热阴极取代冷阴极,以及实现重复频率工作,谋求实验参量最佳化,估计效率会有进一步的提高^[8]。

在放大器方面,美国早在七十年代中期就开展了 X 波段的工作,其二极管电压 1.2 MV,束电流 5 kA,输出脉冲功率达 4 MW,增益 16dB。近年来,为了发展高能量(1 TeV)正负电子对撞机的需要,人们提出了研制强流相对论回旋速调管放大器作为激励源的方案,初步设计工作在 9 GHz,二极管电压 0.6 MV,电流 1.4kA,输出功率 300MW,增益 25 dB,效率计算值为 37%^[8]。

* * * * *

综上所述,电子回旋脉塞(gyrotron)近年来发展迅速,在提高工作性能、开拓新型管种两方面都取得了很大进展,前景乐观。我国从七十年代末开始起步,在中国科学院电子学研究所、成都电讯工程学院、北京真空电子器件研究所和北京大学等单位坚持不懈的努力下取得了一批成果,打下了良好的工作基础。在当前形势下,我们应继续布署力量跟踪这一高技术领域,结合国情积极而有选择地开展一些研究工作,力求创新,做出特色,注意探求在国民经济和国防等方面的可能应用,加强国际交流和合作,争取更大的成绩。

参 考 文 献

- [1] J. L. Hirshfield, V. L. Granatstein, *IEEE Trans. on MTT*, **MTT-25**(1977), 522.
- [2] A. A. Andronov et al., *Infrared Phys*, **18**(1978), 385.
- [3] H. Döring, Vorträge der NTG-Fechtagung, Elektronenröhren, 1980, S. 23.
- [4] J. Feinstein, K. Felch, *IEEE Trans. on ED*, **ED-34**(1987), 461.
- [5] V. A. Flyagin, et al., *Int. J. Infrared Millimeter Waves*, **4**(1983), 629.
- [6] Y. Carmel, et al., *Phys. Rev. Lett.*, **50**(1983), 122.
- [7] V. L. Granatstein, S. Y. Park, Survey of Recent Gyrotron Developments, IEDM Tech. Dig., 1983, p. 263.
- [8] V. L. Granatstein, *Int. J. Electronics*, **57**(1984), 787.
- [9] H. R. Jory, Gyrotron Development Activity at Varian Associates, 10th Int. Conf. Infrared Millimeter Waves, 1985, p. 288.
- [10] S. H. Gold, et al., A Ka-Band Gyrotron Experiment Using an Intense Relativistic Electron Beam, 10th Int. Conf. Infrared Millimeter Waves, 1985, p. 336.
- [11] J. Seftor, et al., *IEEE J. of QE*, **QE-15**(1979), 848.
- [12] R. S. Symons, et al., *IEEE Trans. on MTT*, **MTT-29**(1981), 181.
- [13] L. R. Barnett, et al., *IEEE Trans. on ED*, **ED-28**(1981), 872.
- [14] L. R. Barnett, et al., A Wideband Millimeter Gyrotron Traveling-Wave Amplifier Experiment in Fundamental Mode Rectangular Waveguide, 7th Int. Conf. Infrared Millimeter Waves, 1983, p. 82.
- [15] Zeng-gui Chen (陈增圭), *Int. J. Infrared Millimeter Waves*, **5**(1984), 73.
- [16] J. M. Wachtel, E. J. Wachtel, *Appl. Phys. Lett.*, **37**(1980), 1059.
- [17] S. Y. Park, Gyrotron Backward-Wave Oscillator, Report 83—10, Omega-P Inc., New Haven, CN, 1983.
- [18] A. K. Ganguly, K. R. Chu, *Int. J. Electronics*, **51**(1981), 503.
- [19] W. M. Bollen, et al., Advanced Gyroklystron at NRL, 10th Int. Conf. Infrared Millimeter Waves, 1985, p. 361.
- [20] D. B. McDermott, et al., *Int. J. Infrared Millimeter Waves*, **4**(1983), 639.
- [21] D. B. McDermott, et al., *Phys. Fluids*, **26**(1983), 1936.
- [22] P. Vitello, et al., *IEEE Trans. on MTT*, **MTT-32**(1984), 373.

- [23] W. Namkung, J. Y. Choe, Cusptron Microwave Tube, 10th Int. Conf. Infrared Millimeter Waves, 1985, p. 231.
- [24] V. I. Kremontsov, et al., *Sov. Phys. JETP*, **48**(1978), 1084.
- [25] S. N. Voronkov, et al., *Sov. Phys. Tech. Phys.*, **27**(1983), 61.
- [26] V. L. Granatstein et al., *IEEE Trans. on NS*, **NS-32**(1985), 2957.
- [27] B. Arfin, et al., *IEEE Trans. on ED*, **ED-29**(1982), 1911.
- [28] R. Temkin, et al., *Int. J. Infrared Millimeter Waves*, **3**(1982), 427.
- [29] K. E. Kreischer, Prospects for High Frequency, Megawatt Gyrotrons, 10th Int. Conf. Infrared Millimeter Waves, 1985, p. 221.
- [30] H. R. Jory, et al., First 200kw CW Operation of a 60 GHz Gyrotron, IEDM Tech. Dig., 1983, p. 267.
- [31] P. Sprangle, et al., *Appl. Phys. Lett.*, **38**(1981), 310.
- [32] N. A. Ebrahim et al., *Phys. Rev. Lett.*, **49**(1982), 1556.
- [33] T. A. Hargreaves, et al., *Int. J. Electronics*, **57**(1984), 977.
- [34] A. Perrenoud, et al., On the Design of Open Resonators for Quasi-Optical Gyrotron, 10th Int. Conf. Infrared Millimeter Waves, 1985, p. 259.
- [35] B. Levush, et al., *Int. J. Electronics*, **54**(1983), 749.
- [36] A. Bondeson, et al., *Int. J. Electronics*, **53**(1982), 547.
- [37] Yang Zhonghai (杨中海), Liu Shenggang (刘盛纲), *Int. J. Electronics*, **57**(1984), 1003.
- [38] Yang Zhonghai (杨中海), et al., *Int. J. Infrared Millimeter Waves*, **7**(1986), 1169.
- [39] H. Stickel, Transmission and Tunability of a Double-Disc Gyrotron Window at 120—160GHz, 10th Int. Conf. Infrared Millimeter Waves, 1985, p. 168.
- [40] Z. G. Chen (陈增圭), H. Döring, *Int. J. Infrared Millimeter Waves*, **5**(1984), 691.
- [41] Z. G. Chen (陈增圭), H. Döring, *Int. J. Infrared Millimeter Waves*, **5**(1984), 1117.
- [42] H. P. Freund, et al., *Int. J. Electronics*, **57**(1984), 1125.
- [43] Y. Y. Lau, L. R. Barnett, *Int. J. Infrared Millimeter Waves*, **3**(1982), 619.
- [44] R. W. Grow, U. A. Shrivastava, *Int. J. Electronics*, **53**(1982), 699.
- [45] Chen Zenggui (陈增圭), *J. Electronics*, (China), **4**(1987), 200.
- [46] 刘盛纲,张世昌,电子科学学刊,**8**(1986),1—7.
- [47] D. B. McDermott, et al., Suppression of Axial Mode Competition in a High-Harmonic Gyromonotron, 10th Int. Conf. Infrared Millimeter Waves, 1985, p. 295.
- [48] S. Ono, et al., Proposing the Gyro-Peniotron with its Operation Analysis, IEDM Tech. Dig., Dig., 1983. p. 456.
- [49] P. Vitello, K. Ko, The High Power Gyro-Peniotron Oscillator, 10th Int. Conf. Infrared Millimeter Waves, 1985, p. 289.
- [50] 陈增圭,电子科学学刊,**10**(1988)2,113—119.
- [51] D. S. Furuno, et al., The Operation of a Multicavity High-Harmonic Gyro-Klystron Amplifier, 10th Int. Conf. Infrared Millimeter Waves, 1985, p. 293.
- [52] Q. F. Li (李强法), et al., *IEEE Trans. on MTT*, **MTT-34**(1986), 1044.
- [53] M. Friedman, M. Herndon, *Phys. Rev. Lett.*, **28**(1972), 210.
- [54] Y. Carmel, J. Nation, *J. Appl Phys.*, **44**(1973), 5286.
- [55] A. Didenko, et al., *Sov. J. Plasma Phys.*, **2**(1976), 283.
- [56] S. H. Gold, et al., High Power Millimeter-Wave Gyrotron Oscillator Research Using an Intense Relativistic Electron Beam, 11th Int. Conf. Infrared Millimeter Waves, 1986, p. 351.

REVIEW AND PROSPECT OF RESEARCH ON THE ELECTRON CYCLOTRON MASER

Chen Zenggui

(Institute of Electronics, Academia Sinica, Beijing)

Abstract In recent years, a remarkable progress of the research work on the electron cyclotron maser (i.e. gyrotron), which provides an efficient source for generating high power radiation at millimeter and submillimeter wavelengths, has been made. The current state of the art on gyro-devices, including gyromonotron oscillators, gyrotron amplifiers, high-harmonic gyrotrons and gyrotrons with an intense relativistic electron beam are expounded. Some existing problems, measures of solving difficulties as well as the trends of research and development in gyrotron are recommended.

Key words Microwave electronics; Millimeter, submillimeter coherent radiation source; Electron cyclotron maser