

回旋速调管放大器及其发展评述¹

刘濮鲲 徐寿喜

(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

摘要 回旋速调管放大器是一种具有重要发展前景的高功率相干毫米波源。该文简要介绍了回旋速调管的结构和工作机理,详细评述了国际上回旋速调管的发展状况及趋势,指出了发展中存在的一些关键问题,并提出了自己的建议。

关键词 回旋速调管放大器,毫米波相干辐射源

中图分类号 TN129, TN122

1 引言

近年来,在微波武器、毫米波雷达、通信、精确制导、陶瓷烧结、热核聚变的等离子体加热和 TeV 超高能对撞机的 RF 驱动源等强烈需求的推动下,高功率相干毫米波源的研究在国际上得到高度重视,并迅速发展成为研究前沿与热点。传统的真空电子器件,如行波管和速调管等,由于受结构、工艺材料及工作机理等各种因数的限制,工作在毫米波段遇到了极大的困难。另一方面,以量子效应为基础的一般激光器件由于难以找到合适的工作物质及建立粒子数反转的状态也难于在此波段有效工作。因此,在等离子体物理学和相对论电子学的发展带动下,人们发展出了能够在此波段有效工作的快波器件——回旋管(gyrotron)。回旋管是一类以电子回旋谐振受激辐射为机理的快波器件,其运行机制是依靠电子在磁场中旋转的回旋频率的相对论变化,将电子在磁场中的回旋能量转化成微波。回旋管结构相对简单,在很宽的频率范围,特别是在毫米和亚毫米波段能以多种方式产生高脉冲峰值功率与连续波功率,因而在国际上受到高度重视。通过磁控注入电子枪、高次模式、高次谐波、开放式谐振腔、模式选择和抑制以及模式线极化变换等一系列技术的有效利用,回旋管振荡器在产生高功率毫米波,提高效率,以及稳定性和可靠性等多方面都已取得重大突破。

但是,为了获得高功率相干毫米波源以将其应用于军事领域,必须发展回旋管放大器。经过近 20 多年的努力,已发展出行波管(gyro-TWT)、回旋速调管(gyro-klystron)和回旋行波速调管(gyro-twystron)3种主要管型。但国外已应用于实际系统的回旋管放大器几乎都是回旋速调管。回旋速调管的功率大,效率和增益高,磁场装置紧凑,也有一定带宽,而且性能比较稳定,在高功率雷达、电子战系统及下一代直线对撞机、高梯度加速器中都具有重要的应用前景,因而在国际上受到特别的重视。目前美国和俄罗斯正在利用回旋速调管放大器发展特殊的军事应用。俄罗斯已利用两只峰值功率 500kW、频率 34GHz 的回旋速调管作为发射机功率源研制成功毫米波相控阵雷达,距离分辨率达到 1cm,其应用目的直接针对美国的国家导弹防御系统(NMD)。而美国利用 94GHz、峰值功率 100kW 的回旋速调管作为发射机功率源研制成功掠海面飞行目标跟踪、探测雷达,能够有效排除低空近海面杂波干扰,识别低空飞行巡航导弹,从而弥补了厘米波雷达的不足,对掌握制海权具有重要意义。

本文在简要介绍回旋速调管放大器的结构和工作原理的基础上,全面评述了国际上回旋速调管的发展状况和趋势,指出了发展中存在的一些关键问题,并提出了自己的建议。鉴于回旋速调管放大器的重要性,以及国内目前在这方面的研究才开始起步,水平很低的现状,希望本文能对我国回旋速调管的发展起到推动作用。

¹ 2002-04-08 收到, 2002-07-10 改回

国家杰出青年科学基金(60125104)、中国科学院支撑技术预研项目(42201030202)和人事部留学回国人员科技活动择优资助项目(重点)资助

2 回旋速调管放大器的结构与工作机理

回旋速调管 (gyro-klystron) 是一种快波器件, 属回旋管家族的一员。它以电子回旋谐振受激辐射为机理, 同时又利用了速调管的多腔群聚效应。其结构虽然与多腔速调管类似, 但却有本质上的不同。它采用了磁控注入式电子枪, 电子注角向群聚和换能机制与回旋振荡管类似。相互作用系统是两个或多个分离的谐振腔, 其间是微波截止的电子漂移区, 外加一轴向磁场。第一个腔输入微波信号, 使电子注产生初始角向群聚, 接着穿过截止漂移区继续角向群聚, 以后进入输出腔通过注-波相互作用换能, 使电子注的横向能量转换成高频能量, 然后通过输出窗输出被放大的微波信号。输出腔前可加中间谐振腔以加强群聚和提高增益。中间谐振腔数目增多, 放大器的增益和输出功率通常也随着增加。与回旋振荡管一样, 回旋速调管采用了过模腔, 可增加功率容量, 而其工作频率则由外加轴向磁场来决定。回旋速调管既可作为放大器, 也可作为锁相振荡器^[1]。本文主要讨论回旋速调管放大器。图 1 给出了典型的三腔回旋速调管示意图。

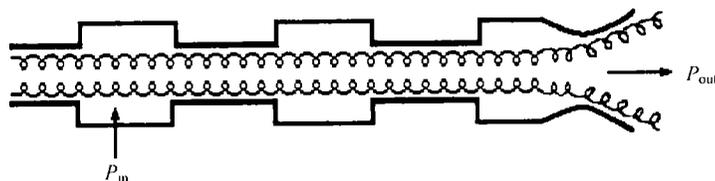


图 1 三腔回旋速调管示意图

3 回旋速调管放大器的国内外发展状况

1966 年, 在前苏联的 Gaponov 等人和美国的 Wachtel 等人几乎同时提出基于回旋管相互作用的放大器建议之后, 前苏联于 1967 年开始了对回旋速调管的研制工作^[2], 但由于保密的缘故, 没有公开发表, 仅在 1978 年 Andronov 等人^[3]才报道了 X 波段的回旋速调管实验获得了 1kW 的连续波输出。该实验吸引人的地方在于它极高的效率 (70%), 据认为是由于它使用了低导流系数电子注, 与后来使用的高电子注功率的磁控注入枪相比, 其轨道与轴向速度之比要大得多。此后直到 90 年代, 俄罗斯研究人员才开始在国际会议上报道他们过去的工作。从中我们了解到, 在 20 世纪 70 年代期间俄罗斯一直在继续 X 和 Ku 波段的回旋速调管实验。特别是研制了 16GHz 的三腔回旋速调管, 它能产生 160kW 功率、40% 效率、30dB 增益和 0.5% 的带宽^[4]。

美国的回旋管放大器研究开始于 70 年代末, 主要研究机构为海军研究实验室 (NRL) 和瓦里安 (Varian) 公司。瓦里安公司的 Jory 等人^[5]于 1977 年发表了第一篇回旋速调管的研究报告, 他们讨论了工作频率 28GHz、峰值功率 65kW、效率 10%、带宽 0.2% 和占空比 5% 的两腔回旋速调管放大器的研制情况。另一个实验是工作在二次回旋谐波的 X 波段三腔回旋速调管^[6]。该实验获得了 20kW 功率和 8.2% 效率的性能。两个实验都指出, 要提供稳定放大还需要更多的努力以改善回旋速调管的性能。海军实验室的三腔回旋速调管在 4.5GHz 频率获得了 54kW 的输出功率和 30% 的效率, 同时还设计了输出功率 100kW、效率大于 35%、增益 40dB 的回旋速调管^[7-9]。这些实验进一步证实了回旋速调管作为高功率和高效率的微波毫米波器件具有诱人的前景, 为以后向更高频段的发展奠定了基础。另一项在海军研究实验室 (NRL) 和马里兰大学 (UMD) 的回旋速调管研究是集中在回旋速调管和常规速调管的相位稳定性上。

该项研究显示,两种类型的放大器相位稳定与电子能量的关系完全不同。对于电子注能量小于 100keV,预计在回旋速调管中相位稳定性更好。此后,回旋速调管的发展主要转向更高的频率。

国内从事回旋管放大器研究的单位主要是中国科学院电子学研究所和成都电子科技大学。中科院电子所正在进行的 8mm 谐波倍增回旋行波放大器已获得 60kW 的稳定输出,8mm 谐波倍增回旋速调管放大器的研究也已启动。电子科大正在进行 Ka 波段基波回旋速调管的研究工作,在回旋速调管的非线性模拟与模式变换等方面也进行了一些理论工作。但总的来说,国内整个回旋管放大器的研究水平都很低,尚处于起步阶段。

目前,国外回旋速调管放大器的应用主要集中在毫米波雷达和加速器驱动两方面。因此,本文也主要从应用于毫米波雷达的弱相对论回旋速调管和应用于加速器驱动的强相对论回旋速调管两方面来阐述其国内外发展状况。在此之前,本文首先介绍回旋速调管放大器本身的理论研究和进展情况。

3.1 回旋速调管放大器的理论与模拟

回旋速调管放大器的理论与模拟主要是致力于解决基本问题和设计计算。早在 1973 年, Demidovich^[10] 等人就开展过回旋速调管的计算工作,其计算的三腔回旋速调管的电子轨道效率可达 85%。随后, Kolosov^[11] 和 Kurayev^[12] 对双腔回旋速调管输出腔进行优化后,也得到了基波和二次谐波电子轨道效率。Kanavets 和 Klimov^[13] 计算的相对论性三腔回旋速调管的总效率为 65%。

与回旋管振荡器一样,回旋速调管放大器同样是基于电子回旋脉塞的机理,因此人们会很自然地将回旋单腔振荡管的理论运用到回旋速调管放大器的研究中。

Symons 和 Jory^[14] 首先发展了回旋速调管的小信号理论。Kovalev 等人^[15] 则对空间电荷效应进行了研究,结果表明空间电荷效应既可以增强漂移区的电子束群聚,也可以增加电子束的速度零散,从而导致效率降低。Kurayev^[16] 在后来的研究中也得到了类似的结果。Keier 在文献 [17, 18] 中指出,利用适当的非均匀磁场可以提高效率。Ganguly 和 K.R.Chu^[19] 对双腔回旋速调管的理论进行了研究,并设计了一输入腔为 TE₀₁₁ 模,输出腔工作在 TE₀₄₁ 模的双腔回旋速调管。输出腔采用高次模式的目的是增加输出功率。他们指出,像回旋单腔管一样,采用渐变磁场可以提高效率,而且回旋速调管对电子束速度的零散比回旋单腔管敏感。Caplan^[20] 基于麦克斯韦-伏拉索夫方程提出了回旋速调管的小信号自治理论。在此基础上, Ganguly 等人于 1985 年提出了基于格林函数的多腔回旋速调管理论^[21],通过一系列的近似获得了小信号增益,并利用这个理论计算了三腔回旋速调管的小信号增益。紧接着 Tran 等人又提出了在低电场、低电流、低 Q 值情况下谐波回旋速调管的自治理论,并对回旋速调管的效率进行了理论分析^[22,23]。

传统回旋管需要的工作磁场一般高达 1 特斯拉以上,即使采用超导磁场,也显得体积笨重,成本昂贵,使用也不方便。我们知道,回旋管的工作磁场由下式决定:

$$B \approx \omega m_0 \gamma / (el) \quad (1)$$

式中 l 为回旋谐波数。因此,采用高次回旋谐波是减小磁场的一种有效方法。但采用高次谐波后注波相互作用效率会下降,并且可能与低次谐波模式产生严重的模式竞争问题。所以,为使高次谐波回旋管能稳定地工作,人们进行了多方面的研究。目前主要发展出大回旋轨道(电子回旋中心在波导轴上)和小回旋轨道(电子回旋中心不在波导轴上)两种方案,其中大回旋方案适合于工作在更高次回旋谐波的情况。

Kolosov^[11] 和 Kurayev^[12] 首先对二次谐波回旋速调管进行了理论研究。Jory^[24-25] 设计的二次谐波三腔回旋速调管在 10.4GHz 频率下可获得最大输出功率 20kW,效率为 8.2%,但增益只有 10dB。Furuno 等人^[26-27] 提出了高次谐波回旋速调管的小信号理论。它采用两个腔体,从电子枪出来的电子束通过加速器加速,在五次和六次谐波下获得了超过 20dB 的增益。K.R.Chu^[28] 等人进一步发展了 Furuno 的理论,在工作频率 11.3GHz、磁场 0.13T、五次谐波下获得了大于 20dB 的增益。Latham 等人对二次谐波回旋速调管进行了理论分析和设计^[29]。

利用 EGUN 程序对电子枪进行了设计, 采用单阳极磁控式注入枪, 电子束的电压为 500kV, 电流为 800A, 轴向速度零散小于 10%; 采用两个同轴腔, 工作模式为 TE_{011} 和 TE_{021} , 工作频率为 17GHz, 可获得 100MW 的输出功率, 预计效率约 25%。McDermott 等人^[30]建立了采用大回旋轨道电子注方案的高次谐波开槽回旋速调管放大器的线性流体理论和自洽非线性理论, 并设计出工作频率为 95GHz 的六次谐波三腔开槽回旋速调管, 输出功率达到 84kW, 效率 12%, 饱和增益 27dB, 带宽 0.2%。McNally 等人^[31,32]则采用小回旋轨道电子注方案, 利用自洽非线性模拟设计了 95GHz 的三次谐波三腔回旋速调管, 其峰值功率 70kW、效率 20%、增益 30dB、带宽 0.2%, 并指出利用参差调谐技术可以达到 1% 的带宽。

近年来, 倍频回旋速调管的研究也比较活跃^[33-35]。采用倍频工作方式有以下两个优点: (1) 输出频率在回旋频率的谐波, 可减小磁场; (2) 激励器件的输入级在基波谐振, 有了利用低频大功率驱动源的可能性。该工作的理论背景在 Nusinovich 等人的文献^[36,37]中已有详述。对于输入腔工作在基波, 倒数第二个腔工作在基波或二次谐波, 输出腔工作在前 4 次谐波之一的情况, 在文献^[36]中系统阐述了三腔回旋速调管简化的一般理论。特别是它表明一个所谓的 1-2-4 体系可能有相当高的效率(此处数字 1、2 和 4 指的是每个腔的谐振回旋谐波数)。在文献^[37]中, 分析时考虑了对高次谐波中等相对论性(电压低于 100kV)回旋速调管重要的限制条件。减轻这些限制的一些方法也在文中作了分析。特别是它说明甚至在存在电子速度离散的情况下, 由轨道与轴向速度比平均为 1.5 的 60kV 电子束驱动的“1-2-4”回旋速调管能够以大于 30% 的效率工作。

电子枪的质量对回旋速调管的设计有举足轻重的作用。Lawson 等人对用于二次谐波回旋速调管的脉宽 $1\mu\text{s}$ 、电压 500kV、电流 600A 的单阳极和双阳极形式的磁控注入枪进行了优化和设计^[38]。Nguyen 等人对电子枪和降压收集极提出了设计^[39]。电子束的横纵速度比 α 影响着回旋速调管的输出功率、效率和增益, 文献^[40]从理论上对 α 的影响进行了分析和测试。

输入系统的模式纯度和输入腔的 Q 值影响着管子的效率。文献^[41]对 X 波段的回旋速调管输入系统通过 HFSS 进行了模拟。McCurdy 等人^[42]和 Garven 等人^[43]分别对 35GHz 和 94GHz 回旋速调管的输入耦合器进行了研究。

回旋速调管放大器的理论, 与其它相对论电子束器件一样, 最基本的都是由电磁场麦克斯韦方程和相对论电子运动方程来描述。电磁场的源是电子电流和外加驱动场, 而电子的驱动力包括轴向静磁场和电子束产生的电磁场。国外学者们花费了大量的时间和精力来开发可用于电子束器件的模拟和优化设计的程序。目前, 可用于电子束器件设计的三维电磁模拟程序有著名的商业软件 MAGIC 和 MAFIA。它们都可用于回旋速调管的研究和设计。而对于回旋速调管, 研究人员特别开发出了回旋速调管软件 MAGYKL 和新版本的 MAGY 软件^[29,44,45], 最近它们都被成功地应用于 Ka 波段和 W 波段回旋速调管的设计中^[46,47]。

3.2 用于毫米波雷达的回旋速调管

毫米波雷达兼具微波雷达和激光雷达的优点。与厘米波雷达相比, 毫米波雷达具有波束窄、分辨率高、可用频带宽、抗多径效应及抗干扰能力强、体积小和重量轻等优点; 它能在雨天、雾天以及战场烟雾环境下工作, 与红外和光学传感器相比, 其全天候性能更好。近 10 多年来, 对高性能毫米波雷达的军事需求已大大地促进了回旋管放大器的发展, 并且也是回旋速调管发展的主要推动力^[48]。这方面的研究工作主要集中在频率约为 35GHz 和 94GHz 的两个大气窗口, 虽然在海军的许多应用中, 信号传输是处在低海平面高度, 这时由于湿度高, 这些窗口已经消失。尽管如此, 即使在这种情况下, 具有相对窄的辐射方向图的高功率毫米波源的发展使人们能追踪靠近海平面的目标^[49]。当然, 对主要工作在靠近上空的角度的机载雷达以及地基和舰基雷达, 该窗口是存在的, 特别是在晴天。

表 1 Ka 波段和 W 波段的回旋速调管的研制情况 [44,48,50-58]

| 研制单位 | 中心频率 (GHz) | 工作 模式 | 腔体数 | 峰值功率 (kW) | 平均功率 (kW) | 效率 (%) | 带宽 (%) | 增益 (dB) |
|---------------------|----------------|------------------|-----|--------------|--------------|-----------|-----------|------------|
| IAP/TORY | 35 | TE ₀₁ | 3 | 250 | 1.2 | 35 | 1.4 | 40 |
| IAP/TORY | 35 | TE ₀₂ | 2 | 750 | 5 | 24 | 0.6 | 20 |
| IAP | 35 (二次谐波) | TE ₀₂ | 2 | 260 | 0.13 | 18 | 0.1 | 17 |
| IAP | 35.1 (二次谐波) | TE ₀₂ | 2 | 125 | 6 | 15 | 0.1 | 15 |
| IAP/ISTOK | 94 | TE ₀₁ | 4 | 65 | 2.5 | 25 | 0.35 | 30 |
| IAP/ISTOK | 91.6 | | | 2.5 (连续波) | | 25 | 0.33 | 30 |
| IAP/TORY | 93.2 | | | 65 | 3 | 26 | 0.32 | 35 |
| NRL | 34.95 | TE ₀₁ | 2 | 210 | 10 | 37 | 0.36 | 23.6 |
| NRL | 34.9 | TE ₀₁ | 3 | 225 | | 32 | 0.82 | 30.3 |
| NRL | 34.9 | TE ₀₁ | 4 | 208 | | 30 | 0.5 | 53 |
| NRL | 34.9 | TE ₀₁ | 4 | 174 | | 25 | 0.7 | 56 |
| NRL | 93.2 | TE ₀₁ | 4 | 60 | 3 | 24 | 0.69 | 27 |
| NRL | 94 | TE ₀₁ | | 92 | 10 | 33.5 | 0.45 | 32 |
| CPI/Litton/NRL/U.M. | 94 | TE ₀₁ | 4 | 118 | 10.1 | 29.5 | 0.64 | 24.7 |
| CPI | 93 | TE ₀₁ | 4 | 84 | | 34 | 0.39 | 40.7 |
| CPI | 93.4 | TE ₀₁ | 5 | 72 | | 27 | 0.44 | 50 |

为简要描述 Ka 波段和 W 波段回旋速调管放大器的发展现状,我们在表 1 中给出了美国通讯与功率企业 (CPI)、海军研究实验室 (NRL) 和俄罗斯科学院应用物理研究所 (IAP)(IAP 与俄罗斯科研生产联合体 TORY 或 ISTOK 合作发展其回旋放大器) 等几个最主要的研究单位研制回旋速调管的情况。

从表中我们看到,俄罗斯的回旋速调管已达到很高的功率水平。而美国海军研究实验室 (NRL) 最新的工作在基波的 35GHz 三腔回旋速调管实验也达到了超过 200kW 的功率电平、大于 30% 的效率和大于 30dB 的饱和增益^[55]。实验表明,带宽以及相应的增益带宽积对外磁场的绝对值和它在电路区的渐变是非常敏感的。一般来说,负渐变改善效率而正渐变增大增益和带宽。在这些实验中实现的最大带宽接近 1%。此外我们也看到,由美国通讯与功率企业 (CPI)、海军研究实验室 (NRL) 和马里兰大学等单位联合研制的 W 波段回旋速调管在峰值功率和平均功率两方面都取得了进展^[54]。该管在实验中已产生 118kW 峰值功率、约 30% 的效率、600MHz 的瞬时带宽和 0.2% 的射频占空因子(见图 2)。在 11% 的占空因子下,该管已产生达 10.1kW 的平均功率、大于 400MHz 的带宽和 33% 的电子效率。作为比较,应当提及 W 波段耦合腔行波管 Millitron^[59],它给出了 5kW 峰值功率和 0.5kW 平均功率、1GHz 带宽和 8% 的效率,代表了以前微波管工业的发展状况。因此,在平均功率方面(它常常决定着雷达的性能),W 波段回旋速调管超越其它的 W 波段放大器一个多量级。

作为雷达应用,带宽是回旋速调管的一个非常重要的参数。在普通速调管中曾成功地利用参差调谐技术来展宽带宽,因而人们也开始研究将这种方法运用到回旋速调管上^[60-63]。减小输入腔的 Q 值和利用参差调谐技术可以展宽带宽,但这要引起效率、增益和功率的下降。在早

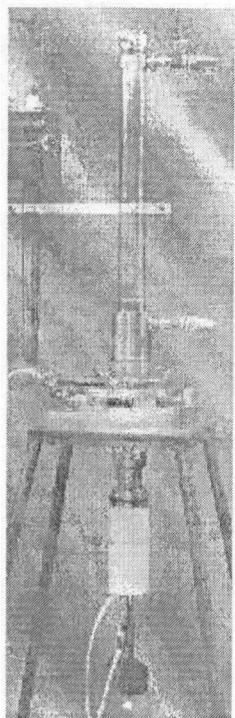


图 2 美国 CPI 的 94GHz 回旋速调管

期的研究中, Park 等人^[64]和 Tantawi 等人^[65]分别在 4.5GHz 和 10GHz 频率对三腔回旋速调管的末前腔调谐和渐变磁场对效率的影响进行过实验工作。Zasytkin 等人^[61]对三腔回旋速调管末前腔的位置和调谐对放大器的效率和增益的影响从理论和实验两方面进行了研究。海军研究实验室 (NRL) 在这方面也做了一系列的研究工作。如 Ka 波段的三腔回旋速调管获得了 0.82% 的带宽^[55], 比在两腔时高一倍 (0.36%)^[53], 而效率只下降一点 (由 37% 变为 30.3%); W 波段的四腔回旋速调管获得了 0.6% 的带宽和 60kW 功率输出, 效率为 25%^[66]。Blank 等人对 W 波段四腔回旋速调管的设计中, 通过数值模拟获得了 80.2kW 的峰值功率, 20.6% 的效率和 0.79% 的带宽^[67]。

毫米波雷达要求噪声越小越好, Antonsen 等人在文献 [68] 中对回旋速调管的相位噪声、幅度噪声和热噪声也进行了研究。

3.3 用于加速器驱动的回旋速调管放大器

下一代高能物理加速器和认识基本粒子的下一个前沿是基于超级对撞机。对于常规的直线对撞机, 其质心能量大于 1TeV, 因而需要频率在 17-35GHz、峰值功率 300MW、脉宽 0.2 μ s 和重复频率 1kHz 的射频驱动源^[69]。这种源必须是相位相干的, 所以它可以是放大器或锁相振荡器。回旋速调管放大器作为一种高功率、高效率的相干毫米波源, 与传统管型相比其性能因子 Pf^2 要高两个数量级。采用回旋速调管作为射频驱动源可以大大缩小建设规模和资金投入, 因此它是下一代太电子伏超高能直线对撞机驱动源的有力竞争者。目前, 这方面的应用已成为另一个促进回旋速调管迅速发展的因素。美国马里兰大学 10 多年来一直着手这方面的研究工作, 具体情况简要列在表 2 中。

表 2 马里兰大学研制的相对论性回旋速调管^[65,70-72]

| 工作频率 (GHz) | 工作模式 | 腔体数 | 峰值功率 (MW) | 效率 (%) | 增益 (dB) | 备注 |
|-----------------|------------------|-----|-----------|--------|---------|------|
| 8.57 | TE ₀₁ | 3 | 85 | 32 | 30 | 同轴腔 |
| 9.87 | TE ₀₁ | 2 | 24 | 30 | 33 | |
| 9.87 | TE ₀₁ | 3 | 27 | 32 | 36 | 功率最大 |
| 9.87 | TE ₀₁ | 3 | 16 | 37 | 33 | 效率最高 |
| 9.87 | TE ₀₁ | 3 | 20 | 28 | 50 | 增益最大 |
| 19.75 (二次谐波) | TE ₀₂ | 2 | 21.6 | 21 | 25 | |
| 19.76 (二次谐波) | TE ₀₂ | 2 | 32 | 29 | 27 | |
| 29.57 (3次谐波) | TE ₀₃ | 2 | 1.8 | 2 | 14 | |

从表中可以看出, 马里兰大学的实验工作大都集中在 X 和 Ku 波段的相对论性回旋速调管, 文献 [72] 中已给出了详细评论。在其第一步的实验中使用了 1 μ s、460kV、400A 的线

性调制器, 电子束由采用热阴极的磁控注入式电子枪产生。其基波实验工作在 9.85GHz 频率。在二次谐波实验中, 第 1 个腔保持与以前一样, 但替换了漂移段和输出腔以使回旋速调管获得 19.7GHz 的倍频输出。他们还进行了产生三次谐波输出的尝试。在一次和二次谐波实验中, 微波脉冲的长度都超过了 $1\mu\text{s}$ 。特别是 19.76GHz 的两腔倍频放大器实验, 产生了 32MW 的峰值输出功率和 29% 的效率。

为了将回旋速调管功率提高到 100MW 水平, 马里兰大学等离子体研究所对调制器进行了升级, 使其电流达到了 800A, 并且设计了单阳极电子枪^[38]。为防止微波从腔体泄漏进漂移段, 还采用了同轴腔来代替圆柱腔。这个预防措施消除了腔体之间的“串音”。三腔基波同轴 X 波段回旋速调管实验产生了峰值功率 85MW、效率 32%、增益 30dB、脉宽 $2\mu\text{s}$ 的微波输出^[73]。二次谐波同轴回旋速调管实验现在还在进行之中。

Saraph 等人^[33]已经设计出工作在一次和二次谐波的 100MW 回旋速调管。在 Ka 波段, Melany 等人设计了四腔同轴倍频回旋速调管。它采用双阳极磁控式注入枪, 可获得峰值功率 55MW、效率 36.5%、增益 47dB^[74]。

近来马里兰大学也在进行 W 波段的相对论性回旋速调管研究^[75]。输入腔采用基波的 TE_{01} 模, 输出腔采用工作在二次谐波的 TE_{02} 模, α 为 1.5, 轴向速度零散 5%。计算的峰值功率为 7.56MW, 增益为 51.6dB, 效率为 33.6%。

在直线加速器的应用中, 相位的稳定和控制也是一个重要的考虑因素。文献 [76] 对相位噪声进行了测试。Park 等人^[77,78]对回旋速调管和常规速调管的相位稳定性进行了比较和系统研究, 实验是在工作电压 30kV、峰值功率 50kW 的三腔回旋速调管和工作电压 7.5kV、峰值功率 1kW 的四腔速调管之间进行的。在电压变化 1% 时, 速调管相位灵敏度为 13° , 回旋速调管为 4° 。最后得出的结论是: 回旋速调管在工作电压低于 100kV 时相位比较稳定, 而速调管在更高的工作电压下相位较为稳定。文中还对其它参数如输入功率、磁场强度和输入频率对相位灵敏度的影响进行了研究。

4 回旋速调管放大器的发展趋势及主要问题

目前, 回旋速调管放大器已成为高功率相干毫米波源家族中最重要的成员之一, 对它的研究正越来越受到世界各主要大国的重视。但要充分发挥它的潜力, 还需要克服许多重要的挑战。这些面临的挑战是:

- (1) 回旋速调管放大器中需要实现高次模式工作来提高平均功率容量;
- (2) 回旋速调管的带宽、增益和效率还有待进一步提高, 可能需要一些创新的方法;
- (3) 需要实现有效的高次谐波工作来减小所需的工作磁场;
- (4) 有必要简化驱动级, 以使整管结构变得更加紧凑。

虽然在毫米波段现有回旋速调管放大器的技术指标, 如峰值功率电平和效率已大大超过了传统的微波管, 但其平均功率容量还不够大, 频宽、功率与效率难以兼顾, 使用超导磁场很不方便, 驱动源设备较复杂且不易获得。因此, 今后回旋速调管放大器的发展趋势主要是面向先进的毫米波雷达和太电子伏超高能加速器应用, 针对上述问题, 需加强在以下几个方面的研究工作:

(1) 提高峰值功率和平均功率。一类是用于毫米波雷达的宽带高平均功率回旋速调管, 其峰值功率为几十千瓦至几百千瓦, 平均功率几千瓦至几十千瓦; 另一类是用于加速器的高峰值功率回旋速调管, 其峰值功率为几兆瓦至几十兆瓦, 乃至上百兆瓦。

由于回旋管的互作用结构是过模波导, 存在许多电磁模式, 而电子束回旋波也存在许多谐波模式, 它们之间容易发生交叉耦合, 因此模式竞争问题迫使目前的回旋速调管放大器工作在 TE_{02} 以下的波导模, 从而大大限制了器件的功率容量。要解决这个问题, 现在主要有两个办法: (a) 采用由曲率半径等于其间距的一对柱形镜面构成的共焦谐振腔, 它可以通过衍射抑制

寄生模式, 而工作模式不受影响。美国麻省理工学院的共焦回旋振荡器实验^[79]已证明了这种方法的可行性。它们在 TE_{061} 工作模式下, 获得了 60kW 的输出功率和 18% 的效率。模式扫描证实它具有强大的寄生模抑制能力。(b) 马里兰大学的倍频体制^[80]。在其多腔回旋速调管中, 输入腔工作在 TE_{011} 模且与回旋基波互作用, 可避免模式竞争问题; 而输出腔工作在 TE_{021} 模且与二次回旋谐波互作用, 一方面降低了磁场, 简化了驱动级, 另一方面也由于几何尺寸大而具有高功率容量。当然, 这种方案首先要回答的是工作在二次谐波时, 其实际效率最大能达到多少。

(2) 提高带宽、增益和重复频率。对雷达应用而言, 这是 3 个很重要的指标。宽频带是雷达电子对抗的必然要求, 增加带宽主要是通过参差调谐技术, 将增益、功率和效率折衷综合考虑。基于高功率回旋放大器的雷达系统, 如果增益不够高, 将需要中功率的真空电子放大器件, 如耦合腔行波管来推动, 从而对驱动级提出较高的要求, 使系统复杂化。而在一些雷达应用, 特别是多普勒雷达中, 放大器必须能够工作在高重复频率。用低压栅控电子注较易获得高重复频率, 这也是未来回旋管放大器电子枪技术的一个重要方向。

(3) 谐波工作。对 Ka 波段工作而言, 如果采用二次谐波就有可能实现工作磁场的永磁包装, 从而大大降低整管的重量和体积。若采用谐波倍增方式, 则有利于工作在更高的频率, 并且只需要较低频率的驱动源。

(4) 降压收集极。对许多雷达应用特别是飞机和军舰平台来说, 发射机的整体效率是极为重要的。回旋速调管比耦合腔行波管具有明显高的互作用效率, 但它也有必要采用降压收集极, 因为这样不但可以降低对整个功率的需求, 而且还能减小放大器的体积和重量。

(5) 新型超导磁场技术。Ka 波段的回旋速调管, 如果工作在电子回旋频率的基波, 需要 1.2 — 1.3T 的螺线磁场; 如果是 W 波段, 则需要 3.4 — 3.6T 的磁场。这么高的磁场, 从整个功率的需求考虑, 采用超导磁场无疑是最有吸引力的。最近, 基于高温超导材料和有效的循环低温冷却装置的无制冷剂超导磁铁技术的出现特别适合于回旋管放大器。这样, 基于回旋管放大器的雷达系统在飞机、军舰以及偏僻的陆基雷达站的安装将不再受在这些平台和站点处理液体制冷剂的后勤困难所阻碍。

(6) 加强三维电磁模拟程序的开发, 提高设计水平, 缩短研制周期。

总的来说, 国外回旋速调管放大器的研究工作在近年来取得了巨大进展。鉴于回旋速调管放大器重要的军事应用, 我们必须结合我国实际情况, 尽快在此领域作出有自己特色的工作。为此, 建议开展 Ka 波段二倍频和三倍频回旋速调管放大器的研究工作。它具有如下特点: (1) 采用谐波倍增技术, 使工作磁场降为基波时的 1/2 或 1/3, 可实现永磁包装; 并且由于倍频的原因, 使得 Ka 波段输出时只需 Ku 或 X 波段输入, 因此驱动级可大大简化。(2) 输出腔工作在高次模式, 因而具有高功率容量。(3) 采用 TE 模簇腔 (Clustered cavity) 有效地拓宽了增益带宽积。(4) 采用独特的无场漂移区, 可使电子注充分群聚, 提高互作用效率。(5) 通过模式选择技术与特殊结构的宽带输入耦合器, 以消除模式竞争问题, 保证输出段回旋谐波工作的稳定性和较高的相位稳定性和频谱纯度。近期目标是研制出峰值功率大于 100kW、带宽接近 1% 的紧凑型 Ka 波段二倍频和三倍频回旋速调管放大器, 从而使我国在回旋速调管的研究中跻身国际先进水平。

5 结 束 语

本文对回旋速调管放大器及其发展进行了全面评述。回旋速调管的高功率、高增益、高效率、性能稳定并有一定带宽的优点, 决定了它在军事和民用上都有重要的应用前景。目前, 回旋速调管放大器在国外正处于走出实验室, 进入国防和商业应用的阶段。并且, 人们正在开拓它的新的应用领域。因此, 回旋速调管放大器的体积和重量、可靠性和稳定性、低成本以及易用性也是现阶段人们非常关注的问题。随着这些问题和其它关键技术问题的解决以及人们对高

功率相干毫米波源的日益浓厚的兴趣, 回旋速调管放大器在不久的将来一定能达到一个新的水平, 并获得更大的应用和发展。

参 考 文 献

- [1] J. M. Burke, M. A. Czarnaski, R. P. Fischer, *et al.*, Design of an 85GHz TE_{1,3} phase-locked gyrokystron oscillator experiment, *Int. J. Electronics*, 1991, 70(7), 1109-1130.
- [2] I. I. Antakov, A. V. Gaponov, V. A. Ginzburg, *et al.*, An amplifier of electromagnetic oscillations in centimeter, millimeter and submillimeter wavelength regions, Copyright No.302050 with priority of June 16, 1967; Official Bulletin KDIO of SM USSR, 1975, 41, 205.
- [3] A. A. Andronov, V. A. Flyagin, A. V. Gaponov, *et al.*, The gyrotron: high power source of millimeter and submillimeter waves, *Infrared Phys.* 1978, 18(5/6), 385-393.
- [4] I. I. Antakov, A. V. Gaponov, E. V. Zasytkin, *et al.*, Gyroklystrons-millimeter wave amplifiers of the highest power, Proc. 1993 Int. Symp. Strong Microwaves in Plasmas, Moscow- N. Novgorod-Moscow, 1994, 587.
- [5] H. R. Jory, F. Friedlan, S. J. Hegji, *et al.*, Gyrotrons for high-power millimeter wave generation, Dig. IEEE Int. Electron Devices Meeting, Washington D. C., 1977, 234-237.
- [6] R. S. Symons, H. R. Jory. Cyclotron Resonance Devices, In *Advances in Electronics and Electron Physics*, Vol. 55, L. Marton Eds, New York, Academic Press, 1981, 1-75.
- [7] W. M. Bollen, A. H. McCurdy, J. H. McAdoo, *et al.*, Operational characteristics of the NRL gyrokystron amplifier, *IEEE Trans. on Nuclear Sci.*, 1985, 32(5), 2879-2880.
- [8] W. M. Bollen, A. H. McCurdy, R. K. Parker, *et al.*, Design and performance of a three-cavity gyrokystron amplifier, *IEEE Trans. on Plasma Science*, 1985, 13(6), 417-423.
- [9] B. Arfin, A. K. Ganguly, A three-cavity gyrokystron amplifier experiment, *Int. J. Electronics*, 1982, 53(6), 709-714.
- [10] E. M. Demidovich, I. S. Kovalev, A. A. Kurayev, *et al.*, Efficiency-optimized cascaded circuits utilizing the cyclotron resonance, *Radio Eng. Electron. Phys.*, 1973, 18(10), 1542-1549.
- [11] S. V. Kolosov, A. A. Kurayev, Comparative analysis of the interaction at the first and second harmonics of the cyclotron frequency in gyroresonance devices, *Radio Eng. Electron. Phys.*, 1974, 19(10), 65-73.
- [12] A. A. Kurayev, F. G. Shevchenko, V. P. Shetakovich, Efficiency-optimized output cavity profiles that provide a higher margin of gyrokystron stability, *Radio Eng. Electron. Phys.*, 1974, 19(5), 96-103.
- [13] V. I. Kanavets, O. I. Klimov, The electron efficiency of a monotron and klystron with a relativistic polyhedral electron beam, *Radio Eng. Electron. Phys.*, 1976, 21(11), 78-83
- [14] R. S. Symons, H. R. Jory, Small-signal theory of gyrotrons and gyrokystrons, in Proc. 7th Symp. Eng. Probl. Fusion. Res., Knoxville, TN, 1977, 1111-1115.
- [15] I. S. Kovalev, A. A. Kurayev, S. V. Kolosov, *et al.*, The effect of space charge in gyroresonance devices with thin equally mixed and axially symmetrical electron beams, *Radio Eng. Electron. Phys.*, 1974, 19(5), 149-151.
- [16] A. A. Kurayev, A. F. Stekol'nikov, Study of influence of space charge forces on electron bunching in drift tube of gyrokystron, *Radio Eng. Electron. Phys.*, 1980, 25(9), 78-84.
- [17] A. P. Keier, Electron flux bunching with spread in electron velocities in a gyrokystron with a nonuniform magnetic field, *Radio Phys. Quantum Electron.*, 1978, 21(6), 631-635.
- [18] A. P. Keier, Modes of operation of output cavity of a gyrokystron with electron velocity spread and nonuniform magnetic field, *Radio Phys. Quantum Electron.*, 1978, 21(6), 636-642.
- [19] A. K. Ganguly, K. R. Chu, Analysis of two-cavity gyrokystron, *Int. J. Electronics*, 1981, 51(4), 503-520.
- [20] Caplan, Gain characteristics of stagger-tuned multi-cavity gyrokystron amplifier, in Conf. Dig. 8th Int. Conf. IR & MM Waves, Miami, FL, Dec. 12-17, 1983, W4.2.
- [21] A. K. Ganguly, A. W. Fliflet, A. H. McCurdy, Theory of multicavity gyrokystron amplifier based on a Green's function approach, *IEEE Trans. on Plasma Sci.*, 1985, 13(6), 409-416.

- [22] T. M. Tran, K. E. Kreischer, R. J. Temkin, Self-consistent theory of a harmonic gyrokystron with a minimum Q cavity, *Phys. Fluids*, 1986, 29(11), 3858–3863.
- [23] T. M. Tran, B. G. Danly, K. E. Kreischer, *et al.*, Operation of gyrokystron efficiency, *Phys. Fluids*, 1986, 29(4), 1274–1281.
- [24] H. R. Jory, Millimeter Wave Gyrotron Development Phase I, Rome Air Development Center, Griffiss AFB, Rome, NY, Tech. Rep. RADCTR-77-210, 1977.
- [25] S. J. Hegji, H. R. Jory, High-Power Millimeter Wave Amplifier, Rome Air Development Center, Griffiss AFB, Rome, NY, Interim Rep. RADCTR-78-235, 1978.
- [26] D. S. Furuno, D. B. McDermott, N. C. Luthmann, Jr., *et al.*, Design and operation of a high-harmonic gyro-klystron amplifier, in *Conf. Dig. 8th Int. Conf. IR&MM Waves*, Miami, FL, Dec., 12-17, 1983, W4. 7.
- [27] D. S. Furuno, D. B. McDermott, N. C. Luthmann, Jr., *et al.*, A high-harmonic gyro-klystron amplifier: theory and experiment, *Int. J. Electronics*, 1984, 57(6), 1151–1165.
- [28] K. R. Chu, D. S. Furuno, N. C. Luthmann, Jr., *et al.*, Theory, design, and operation of large-orbit high-harmonic gyrokystron amplifiers, *IEEE Trans. on Plasma Sci.*, 1985, 13(6), 435–443.
- [29] P. E. Latham, W. Lawson, V. Irwin, The design of a 100MW, Ku band second harmonic gyrokystron experiment, *IEEE Trans. on Plasma Sci.*, 1994, 22(5), 804–817.
- [30] D. B. McDermott, C. K. Chong, N. C. Luthmann, Jr., *et al.*, High-harmonic slotted gyrokystron amplifier: linear theory and nonlinear simulation, *IEEE Trans. on Plasma Sci.*, 1994, 22(5), 920–931.
- [31] J. D. McNally, D. B. McDermott, N. C. Luthmann, Jr., *et al.*, Third-harmonic TE₄₁₁ gyrokystron amplifier, *IEEE Trans. on Plasma Sci.*, 1998, 26(3), 496–499.
- [32] J. D. McNally, D. B. McDermott, Q. S. Wang, *et al.*, High performance, 70kV third-harmonic smooth-bore gyrokystron amplifier, *IEEE Trans. on Plasma Sci.*, 1994, 22(5), 932–938.
- [33] G. P. Saraph, W. Lawson, M. Castel, *et al.*, 100–150MW designs of two- and three-cavity gyrokystron amplifiers operating at the fundamental and second harmonics in X-band and Ku-bands, *IEEE Trans. on Plasma Sci.*, 1996, 24(3), 671–677.
- [34] I. G. Yovchev, W. G. Lawson, G. S. Nusinovich, *et al.*, Present status of 17.1GHz four-cavity frequency-doubling coaxial gyrokystron design, *IEEE Trans. on Plasma Sci.*, 2000, 28(3), 523–528.
- [35] M. T. Walter, G. S. Nusinovich, V. L. Granatstein, *et al.*, Design of a frequency-doubling, 35GHz, 1MW gyrokystron, *IEEE Trans. on Plasma Sci.*, 2000, 28(3), 688–693.
- [36] G. S. Nusinovich, O. Dumbrajs, Two-harmonic prebunching of electrons in multi-cavity gyro-devices, *Phys. Plasmas*, 1995, 2(2), 568–577.
- [37] G. S. Nusinovich, B. Levush, O. Dumbrajs, Optimization of multistage harmonic gyro-devices, *Phys. Plasmas*, 1996, 3(8), 3133–3144.
- [38] W. Lawson, V. Specht, Design comparison of single-anode and double-anode 300MW magnetron injection gun, *IEEE Trans. on Electron Devices*, 1993, 40(7), 1322–1328.
- [39] K. T. Nguyen, B. G. Danly, B. Levush, *et al.*, Electron gun and collector design for 94GHz gyro-amplifiers, *IEEE Trans. on Plasma Sci.*, 1998, 26(3), 799–813.
- [40] J. P. Calame, J. Cheng, B. Hogan, *et al.*, Measurements of velocity ratio in a 90 MW gyrokystron electron beam, *IEEE Trans. on Plasma Sci.*, 1994, 22(4), 476–485.
- [41] X. Xu, C. Liu, J. Anderson, *et al.*, Development of an X-Band advanced-concept input system for high-power gyrokystron, *IEEE Trans. on Plasma Sci.*, 1999, 27(2), 520–530.
- [42] A. H. McCurdy and J. J. Choi, Design and analysis of a coaxial coupler for a 35GHz gyrokystron amplifier, *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, 1999, 47(2), 164–175.
- [43] M. Garven, W. M. Manheimer, M. Blank, Simple theory of input couplers for gyrokystron amplifiers, *IEEE Trans. on Plasma Sci.*, 1998, 26(3), 433–443.
- [44] M. Blank, B. G. Danley, B. Levush, *et al.*, Experimental demonstration of a W-band gyrokystron amplifier, *Phys. Rev. Lett.*, 1997, 79(2), 4485–4488.
- [45] M. Botou, T. M. Antonsen, Jr., B. Levush, *et al.*, MAGY: a time dependent code of simulation of slow and fast microwave sources, *IEEE Trans. on Plasma Sci.*, 1998, 26(3), 882–892.

- [46] J. Choi, A. H. McCurdy, F. Wood, *et al.*, Experimental investigation of a high power, two-cavity, 35GHz gyrokystron amplifier, *IEEE Trans. on Plasma Sci.*, 1998, 26(3), 416-425.
- [47] M. Blank, B. G. Danly, B. Levush, *et al.*, Experimental investigation of W-Band (93 GHz) gyrokystron amplifiers, *IEEE Trans. on Plasma Sci.*, 1998, 26(3), 409-415.
- [48] K. Felch, B. G. Danly, H. R. Jory, *et al.*, Characteristics and applications of fast-wave gyrodevices, *Proc. IEEE*, 1999, 87(5), 752-781.
- [49] D. R. Lohrmann, Millimeter wave radars tracking approaching sea-skimming targets, *Digest 22nd Int. Conf. IR&MM Waves*, Wintergreen, VA, 1997, 39-41.
- [50] I. I. Antokov, E. V. Zasyrkin, E. V. Sokolov, 35GHz radar gyrokystron, in *Proc. 18th Int. Conf. IR&MM Waves*, Vol.2104, J. R. Birch and T. J. Parker, Eds., Colchester, UK, 1993, 338-339.
- [51] I. I. Antokov, E. V. Zasyrkin, E. V. Sokolov, Design and performance of 94 GHz high power multicavity gyrokystron amplifier, in *Proc. 18th Int. Conf. IR&MM Waves*, Vol. 2104, J. R. Birch and T. J. Parker, Eds, Colchester, UK, 1993, 466-467.
- [52] E. V. Zasyrkin, M. A. Moiseev, I. G. Gachev, *et al.*, Study of high-harmonic Ka-band second-harmonic gyrokystron amplifier, *IEEE Trans. on Plasma Sci.*, 1996, 24(3), 666-670.
- [53] J. J. Choi, A. H. McCurdy, F. N. Wood, *et al.*, Experimental investigation of a high power, two-cavity, 35GHz gyrokystron amplifier, *IEEE Trans. on Plasma Sci.*, 1998, 26(3), 416-425.
- [54] M. Blank, B. G. Danly, J. P. Calame, *et al.*, Demonstration of a 10kW average power W-band gyrokystron amplifier, *Phys. Plasmas*, 1999, 12(6), 4405-4409.
- [55] J. P. Calame, M. Garven, J. J. Choi, *et al.*, Experimental studies of bandwidth and power production in a three-cavity, 35GHz gyrokystron amplifier, *Phys. Plasma*, 1999, 6(1), 285-297.
- [56] M. Garven, J. P. Calame, K. T. Nguyen, *et al.*, Experimental studies of a four-cavity, 35GHz gyrokystron amplifier, *IEEE Trans. on Plasma Sci.*, 2000, 28(3), 672-680.
- [57] B. G. Danly, M. Blank, J. P. Calame, *et al.*, Development and testing of a high-average power, 94GHz gyrokystron, *IEEE Trans. on Plasma Sci.*, 2000, 28(3), 713-726.
- [58] M. Blank, B. G. Danly, B. Levush, Experimental demonstration of W-band gyrokystron amplifiers with improved gain and efficiency, *IEEE Trans. on Plasma Sci.*, 2000, 28(3), 706-711.
- [59] B. G. James, M. Kreuzer, High power millitron TWTs in W band, *Dig. 20th Int. Conf. IR&MM Waves*, Orlando, FL, 1995, 13-14.
- [60] K. R. Chu, P. E. Latham, V. L. Granatstein, Penultimate cavity tuning of the gyrokystron amplifier, *Int. J. Electronics*, 1988, 65(3), 419-428.
- [61] E. V. Zasyrkin, M. A. Moiseev, E. V. Sokolov, *et al.*, Effect of penultimate cavity position and tuning on three-cavity gyrokystron amplifier performance, *Int. J. Electronics*, 1995, 78(2), 423-433.
- [62] G. S. Nusinovich, B. G. Danly, B. Levush, Gain and bandwidth in stagger-tuned gyrokystrons, *Phys. Plasma*, 1997, 4(2), 469-478.
- [63] G. S. Nusinovich, Theory of multibeam stagger-tuned gyrokystrons, *IEEE Trans. on Plasma Sci.*, 1998, 26(3), 475-481.
- [64] G. S. Park, V. L. Granatstein, S. Y. Park, *et al.*, Experiment study of efficiency optimization in a three-cavity gyrokystron amplifier, *IEEE Trans. on Plasma Sci.*, 1992, 20(3), 224-231.
- [65] S. G. Tantawi, W. T. Main, P. E. Latham, *et al.*, High-power X-band amplification from an overmoded three cavity gyrokystron with a tunable penultimate cavity, *IEEE Trans. on Plasma Sci.*, 1992, 20(3), 205-215.
- [66] M. Blank, B. G. Danly, B. Levush, *et al.*, Experiment investigation of W-band(93GHz) gyrokystron amplifiers, *IEEE Trans. on Plasma Sci.*, 1998, 26(3), 409-415.
- [67] M. Blank, B. G. Danly, B. Levush, Circuit design of a wideband W-band gyrokystron amplifier for radar applications, *IEEE Trans. on Plasma Sci.*, 1998, 26(3), 426-432.
- [68] T. M. Antonsen, Jr., W. M. Manheimer, Shot noise in gyrokystrons, *IEEE Trans. on Plasma Sci.*, 1998, 26(3), 444-450.
- [69] V. L. Granatstein, W. Lawson, Gyro-amplifiers as candidate RF drivers for TeV linear colliders, *IEEE Trans. on Plasma Sci.*, 1996, 24(3), 648-663.

- [70] W. Lawson, J. P. Calame, B. P. Hogan, *et al.*, Performance characteristics of a high-power X-band two-cavity gyrokystron, *IEEE Trans. on Plasma Sci.*, 1992, 20(3), 216-223.
- [71] H. W. Matthews, W. Lawson, J. P. Calame, *et al.*, Experiment studies of stability and amplification in a two-cavity second harmonic gyrokystron, *IEEE Trans. on Plasma Sci.*, 1994, 22(5): 825-833.
- [72] W. Lawson, H. W. Matthews, M. K. E. Lee, *et al.*, High-harmonic operation of a K-band second-harmonic gyrokystron, *Phys. Rev. Lett.*, 1993, 71(3), 456-459.
- [73] J. Cheng, X. Xu, W. J. Lawson, *et al.*, Experiment studies of a high power, X-band, coaxial gyrokystron, *IEEE Trans. on Plasma Sci.*, 1999, 27(4), 1175-1187.
- [74] M. R. Arjona, W. G. Lawson, Design of a 34-GHz second-harmonic coaxial gyrokystron experiment for accelerator applications, *IEEE Trans. on Plasma Sci.*, 2000, 28(3), 700-705.
- [75] M. R. Arjon, W. Lawson, Design of a 7MW, 95GHz, three-cavity gyrokystron, *IEEE Trans. on Plasma Sci.*, 1999, 27(2), 438-444.
- [76] J. McAdoo, W. M. Bollen, A. H. McCurdy, *et al.*, Gyrokystron amplifier phase noise measurement, *Int. J. Electronics*, 1986, 61(6), 1025-1028.
- [77] G. S. Park, V. L. Granatstein, P. E. Latham, *et al.*, Phase stability of gyrokystron amplifier, *IEEE Trans. on Plasma Sci.*, 1991, 19(4), 632-640.
- [78] G. S. Park, V. L. Granatstein, J. Mcadoo, *et al.*, Phase noise reduction in gyrokystron amplifier, *Int. J. Electronics*, 1992, 72(5), 909-920.
- [79] W. Hu, M. A. Shapiro, K. E. Kreischer, *et al.*, 140GHz confocal gyrotron experiment, *Proc. 22nd Int. Conf. IR&MM Waves*, Wintergreen, VA, July 1997, 116-117.
- [80] H. Guo, S. H. Shen, V. L. Granatstein, *et al.*, Operation of highly overmoded, harmonic-multiplying, wideband gyro-amplifier, *Phys. Rev. Lett.*, 1997, 79(3), 515-518.

REVIEW OF GYROKLYSTRON AMPLIFIERS AND ITS DEVELOPMENT

Liu Pukun Xu Shouxi

(*Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*)

Abstract Gyrokystron is one of the most promising high-power coherent millimeter wave sources. The configuration and operating mechanism of the gyrokystrons are briefly introduced. The state-of-art and developing trend are reviewed in detail. Some remaining critical problems are also discussed and some suggestions are also presented.

Key words Gyrokystron amplifier, Coherent millimeter wave source

刘濮鲲: 男, 1965年生, 研究员, 博士生导师, 主要从事高功率微波与毫米波领域的研究工作。

徐寿喜: 男, 1971年生, 博士生, 主要从事回旋管方面的研究工作。