

微波电子枪

谢家麟*

(中国科学院高能物理研究所, 北京 100039)

[关键词] 谐振腔, 电子发射, 粒子动力学, 直线加速器注入器, 自由电子激光

本文将从以下五个方面, 简单介绍微波电子枪:

1 意义、用途

微波电子枪及其组成的注入系统是近年发展的一种可提供低发射度、皮秒级、强流、相对论性电子束团的装置。它可以直接做成简易的小型电子加速器, 供辐照加工或术后放疗使用, 也可经过 α 磁铁压缩脉冲宽度, 选择能量后作为高性能要求的电子直线加速器的注入器或化学辐射分解研究应用。此外, 短脉冲强流束团在加速器物理与技术领域有广泛的应用, 如产生相干的红外—远红外光辐射、作为导致束流不稳定性尾场的研究手段。在远距离能量传输中, 它也可能发展成为一种把微波场能量转化为电子动能的能量转换器。

2 工作原理

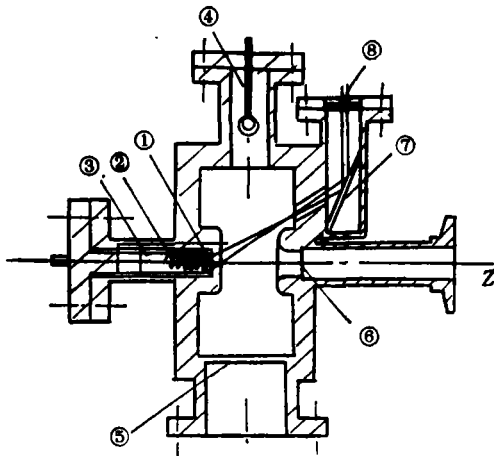


图1 微波腔及阴极结构简化示意图

1. 阴极发射体, 2. 加热灯丝, 3. Ta筒, 4. 测量耦合环,
5. 功率耦合孔, 6. 束流引出孔, 7. 反射镜, 8. 激光束。

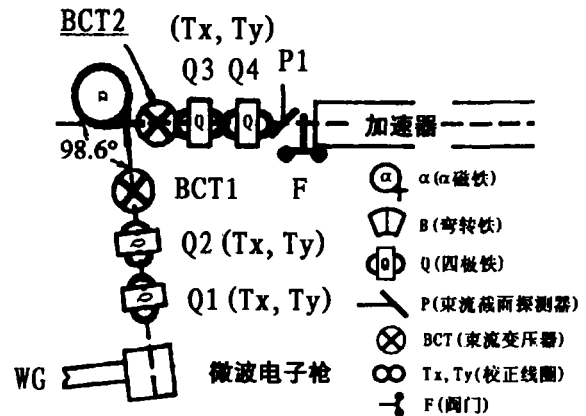


图2 微波电子枪注入器总体示意图

* 中国科学院院士。

本文于1996年4月16日收到。

微波电子枪是利用高功率微波在谐振腔中建立强电场。并用以加速由位于谐振腔内的热阴极(或激光加热阴极,或光、电阴极)发射的电子,使之达到相对论性速度,然后射出腔外。其结构如图1所示。由它组成的注入器包括 α 磁铁、四极聚焦磁铁、导向磁铁、束流变压器、束流截面探测器等(如图2)。其作用是选择电子束团能量,压缩束团的相宽度,以产生皮秒级的束团脉冲。

微波电子枪的研制,首先需要计算特定轮廓的谐振腔内的电场分布,然后据以模拟电子在腔内的运动状态,要建成高性能的调制器作为大功率速调管的电源,保证在宏脉冲内微波场的振幅与相位的稳定,以便通过对电子束流的测量确定微波枪的性能;要掌握LAB₆及其他阴极材料的发射特性和制备工艺;要研究阴极支撑的微波结构,腔场和电子束团的监测、 α 磁铁和束流输运系统的设计与测试等等。我们最后获得了能量为1.0到1.8 MeV,流强大于20 A,束宽为4 ps左右的束团。

3 发展历史

热阴极微波电子枪首先由美国斯坦福大学J.M.J. Madey教授及其研究生G. A. Westenskow等人在1984年发明的,1987年取得美国专利,随即用于自由电子激光装置作为注入器,取得良好的效果。经过十年来的发展,它除作为注入器使用外,还可做成小型电子加速器、红外—远红外光源等应用。

中国科学院高能物理所于1986年开展微波电子枪的研制,前后有博士研究生高杰、黄永章、张仁善、唐传祥(与清华大学联合培养)、博士后刘红秀及研究人员宋燠、王钢、吴钢、王友智、吴渊民、赵新侨等,时间长短不一地参加了研制。此项工作在1988至1990年得到国家自然科学基金资助,开展了实验工作,并取得了可喜的成果。这是最后由国家高技术发展研究计划资助建成的“北京自由电子激光”装置的一个至为关键的部件,它为北京自由电子激光研制成功奠定了重要的技术基础。北京自由电子激光装置后于1993年底出光达到饱和,成为亚洲第一台成功的红外自由电子激光装置,引起国际上的重视。

4 改进研究

热阴极微波电子枪是一种设备比较简单、经费投入较低的强流、短脉冲电子源,性能良好,具有广泛的应用前景。但是,它也有一定的局限性,最主要的就是存在电子反轰问题:一部分产生的电子在离开微波腔以前,被反向的微波场向阴极加速,轰击阴极表面使其温度上升,发射电流增大,从而吸收更多的腔场能量而使场强降低,输出电子束团的能量减少,即存在所谓“束流负载作用”。作为辐照源使用,能散稍大并不重要,但作为对束团质量有很高要求的注入器而言,过大的能散将影响系统的性能。因此,我们在掌握微波枪的关键技术并投入使用之后,对它的反轰问题展开了大量的研究,以便改进它的性能。现将我们开展的几个研究方向,加以简单的介绍:

- (1) 研究在阴极附近,设置的偏转磁场的最佳分布,以减少反轰功率;
- (2) 研究在阴极表面开孔,使反轰电子不致打到阴极表面导致温升;
- (3) 研究使用多腔设计,使阴极位于长度较小的首腔,使多数电子在微波场反向前即已脱离首腔,并在其后各腔得到加速;

(4) 研究一种独创的前馈系统,控制高功率微波的振幅和相位在宏脉冲内的变化,以补偿束流负载效应。

以上几种改进方案经过模拟计算及实际测量,都取得了不同程度的明显效果,这些研究工作,至今仍在进行之中。

5 发展前景

前面提到微波电子枪的用途和意义,不难看出,它是有很广阔的发展前景的,现简述于下:

(1) 自由电子激光的特点是它可产生高度相干、高亮度、短脉冲的激光,而在红外—远红外光谱区还缺少同时具有这些特点的光源。因此,科学界普遍认为,自由电子激光在红外—远红外谱区占有独特的地位。事实上,世界上已有这样的用户装置。但是,应该看到,自由电子激光装置技术复杂,造价昂贵,绝非一般实验室所能拥有。因此,要进一步发挥自由电子激光的作用,小型化是一个极为重要的条件。在已有的自由电子激光使用的注入器中,热阴极微波电子枪最为简单,适于小型化的要求。同样,它也适用于高能电子直线加速器中,美国在同步辐射加速器中,已使用了热阴极微波电子枪做为注入器。

(2) 使用多腔的微波电子枪,可产生几百万电子伏的束流,作为简单的辐射源或经过发展,制成术后放疗的医用微型加速器。

(3) 人们目前正在热烈讨论对下一代光源的要求,取得的共识是它必须能产生高度相干、高亮度和短脉冲的光辐射,即将以自由电子激光代替常规的同步辐射。热阴极微波电子枪目前已能产生 100 fs(FWHM)的脉冲,脉冲越窄,越可由各种辐射机制产生相干的辐射,因此,它也是研究其他相干光源的有力手段。

(4) 高流强、短脉冲的电子束团是研究高能加速器尾场效应(这是高能加速器的关键问题)的有力工具。在特殊情况下,也可发展为远距离能量传输的能量转换器。

由以上微波电子枪的有关情况,可以看出它在我国是以一个重要的部件研究开始,但结果却成为许多有关科技发展的必要的环节,这在自然科学基金资助的运筹中,是一个很好的成功的范例。

MICROWAVE ELECTRON GUN

Xie Jialin

(Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100039)

Key words cavity resonator, electron emission, beam dynamics, linac injector, free electron laser