

超高精密准直技术在毫米波管装配中的应用

尤 政 杨 韧 刘兴占 董 斌

(清华大学精密仪器系 北京100084)

摘要 给出了一种用于调整军用高频毫米波发射管中阴极和磁聚焦(rf)管同心度的简单技术。该种毫米波管的磁聚焦(rf)管内径为0.2mm,它必须与阴极实现很好的准直。文中采用的解决方法是使用 He-Ne 激光器测量从阴极到磁聚焦管的不同轴度,并在最终的装配前用机械调整结构校正。激光束从阴极中心的小孔中射出,穿过磁聚焦(rf)圈,用一个图像检测器在发射管的电子接受区接收光信号。该技术简单,能很好地提高高频毫米波管装配中的同轴度。

关键词 激光束 四像限光电池 同轴度 阴极 磁聚焦管

1 引 言

毫米波发射管中,从阴极发射出的电子束,穿过阳极,经磁聚焦管聚焦和加速,最后从枪管中射出。由于毫米波发射管的磁聚焦是由许多磁聚焦圈叠成的,而且内径很小,阴极发射面是一凹面,如果磁聚焦圈和阴极发射中心不能很好的准直的话,从阴极发射出的电子经过经磁聚焦管聚集和加速后将不能被接收到。

对于低频毫米波发射管的成熟设计中极容易被接受的公差也许在设计尺寸更小的高频装置时不被接受。电子束和 rf 圈直径最终决定了在电子束和 rf 圈之间可以接受的同轴度公差。对于低频,同轴度的要求是不严的。当毫米波发射管的零件被装配时,可被接受的电子枪(束)轴和 rf 圈轴的偏离为0.05mm。例如,当电子束和圈直径分别是1.2mm和2.5mm时,一个微小的轴之间的偏差不会显著地影响管子的功能。假如毫米波装置电子束和 rf 圈尺寸被设计得只有原来的十分之一,则0.05mm的同轴度偏差的影响将会显著增大。对于一个直径0.12mm的电子束,同样的0.05mm的轴偏差将是不能接受的。在高频毫米波发射管中,这种不准直可立刻导致毫米波发射管停止工作,甚至当很好的电子枪和聚焦系统被采用时也如此。

目前,国内对于毫米波发射管中阴极和 rf 圈的准直是通过提高磁聚焦管的端面精度来达

到装配要求的。这样的话,对于磁聚焦管的端面精度要求过高,而且很多情况下不能使装配结果满足要求。

对于这种不准直问题的解决,可通过应用激光准直来实现,并提高装配精度和降低磁聚焦管的端面精度要求,减少费用。

2 光学系统原理

首先用 YAG 激光在阴极底部钻一小孔,允许激光束通过,并使该小孔轴线通过阴极凹面的球心。同时,先将一片片的 rf 圈叠在一起并装配成满足要求的 rf 管。图1表示一个简化的阴极和 rf 管截面图。光束在阴极小孔处发生衍射,衍射光通过 rf 管,到达四象限光电探测器。照射到 rf 管管壁的衍射光被管壁吸收。探测器安装在电子束接受器最终将被安装处。探测器总输出是四象限光电探测器四个分化区输出的独立的电压信号。

当激光束通过阴极小孔时,阴极为一个中心有直径为 $0.04 \pm 0.008\text{mm}$ 小孔的凹面,假设入射激光波长为 $0.6328\mu\text{m}$,光束经过小孔后产生衍射图样。在不同距离 z 的平面上,衍射图样分布不同。按其衍射现象的特性可以分为两种类型:菲涅耳衍射及夫琅和费衍射。夫琅和费衍射应满足条件: $z \gg \frac{(x^2 + y^2)_{\max}}{\lambda}$ 。($x^2 + y^2$ 为衍射小孔的最大孔径值)。阴极小孔直径 0.04mm 和激光波长 $0.6328\mu\text{m}$ 代入衍射条件公式,可得:要发生夫琅和费衍射须满足 $z \gg 5\mu\text{m}$ 。由于 rf 管的管体长约 0.5m 左右,远远大于满足夫琅和费衍射需要的最小距离,四象限光电探测器位于 rf 管的后面,故可以认为在四象限光电探测器处发生夫琅和费衍射,衍射图样为一中心强度很大的亮斑(这一亮斑称为

Airy 斑),边缘有逐渐变弱的亮暗环纹。图2、图3分别为夫琅和费圆孔衍射的光强和衍射图样。

由于中央亮斑(Airy 斑)占衍射光总能量的 83.78% ,可通过用四象限光电探测器来检测衍射光的能量分布来确定轴的偏离量。同时,用当激光束通过阴极小孔产生的衍射图样来确定激光束与阴极垂直。

当阴极/激光束偏离磁聚焦管轴线后,四象限光电探测器接受到的光能分布使探测器提供一输出信号。四象限光电探测器中心十字分划线线宽为 $60\mu\text{m}$ 。

在进行测量准直时,每一象限敏感区输出的电流可近似地表示为:

$$A_{\text{photo}} = k \int_{1/4\text{象限}} \exp\left(-\frac{2[(h-x)^2 + (k-y)^2]}{1.22z\lambda}\right) \cdot a \, dx \, dy$$

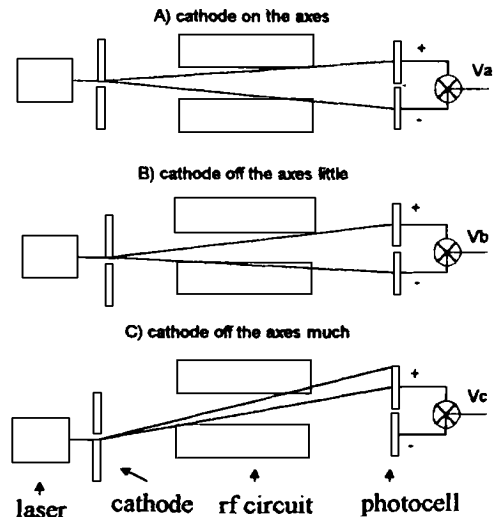


Fig. 1 Laser beam alignment system

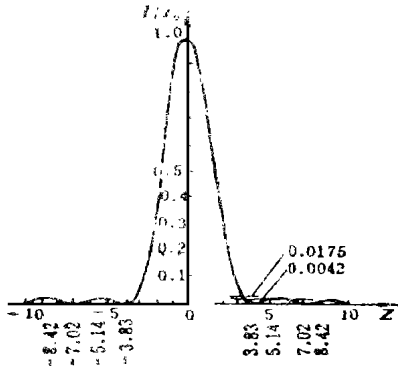


Fig. 2 Fraunhofer diffraction intensity distribution

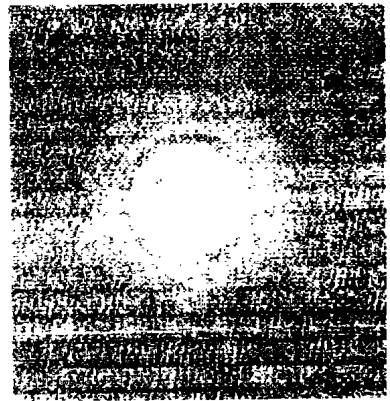


Fig. 3 Fraunhofer diffraction pattern

其中, h, k 为光束中心坐标, k 为常数, 取决于四象限光电池的响应率以及衍射光的一些特征。 a 为衍射孔的孔半径, z 为衍射屏到衍射孔之间的距离, λ 为光波波长。四象限光电池的相对的灵敏区产生的信号显示 X, Y 向的定位数据。将四象限光电池的输出信号 A_1, A_2, A_3 和 A_4 经放大变成电压信号分别送入计算机, 用二维平面工作台记录下位移信号, 计算出 $S = [(A_1 + A_3) - (A_2 + A_4)] / [A_1 + A_2 + A_3 + A_4]$ 。然后画出 S 与位移 Y 的关系。

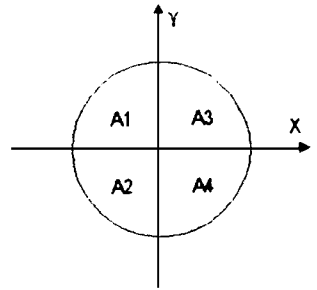


Fig. 4 The four-quadrant photocell

图5显示的是理论上四象限光电池电压输出量作为阴极位置离轴量的函数。图1a、1b、1c 的输出量表示在图5中。点 V_a 代表阴极在轴上时, 如图1a 所示。当阴极离轴时, 更多的光照在图像探测器的正极上, 如图1b 所示。图1c 显示出阴极离轴太远, 最终, 以至几乎没有光到达探测器。在这一点, 探测器的输出几乎是零。在相反的方向离轴将会得到具有相似形状的符号相反的信号。

detector output (V)

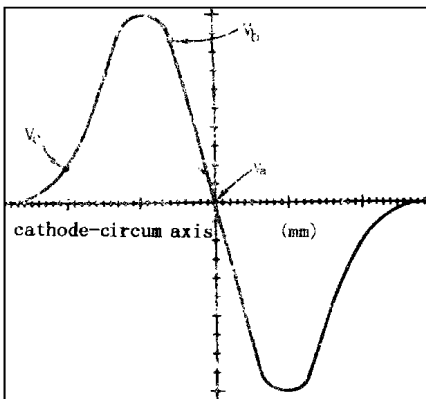


Fig. 5 The output of the alignment system detector

detector output

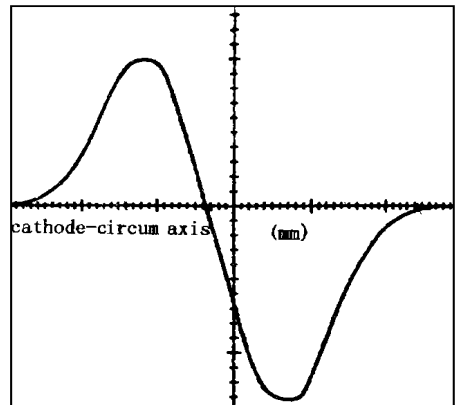


Fig. 6 The output of the alignment system detector (the detector axes deviate)

图5中表示四象限光电池的位置关于管轴对称。在实际中是不可能如此的,实际探测器输出的信号形状如图6。最大和最小输出没有相同幅值。最大、最小幅值的不同对于阴极-四象限光电池靶面中心的非同轴度是非常敏感的。因此,精密的阴极-四象限光电池靶面准直度能通过移动图像探测器直至最大值和最小值幅值相等来获得。最优的阴极位置通过定位位于最大值和小值之间的零点来找到(探测器被准直后)。当阴极轴相对于管轴移动时,探测器输出的信号斜率很大,因此能获得很高的精度。

光学系统包括: 0.25mW He-Ne 激光器, 四象限光电池, 阴极, 磁聚焦管。阴极包括一个中心有直径为 $0.04 \pm 0.005\text{mm}$ 的孔的凹面。磁聚焦管总长0.5m, 包括一排0.2mm 直径、厚18mm 的磁聚焦圈。

3 装配原理及数据处理

该项技术的实际上是用激光器和四象限光电池来准直毫米波管的阴极和磁聚焦圈。其基本原理如图1所示。首先用 YAG 激光器在阴极中心一直径 $0.04 \pm 0.005\text{mm}$ 小孔, 要求小孔轴线通过阴极凹面的球心。然后使 He-Ne 激光器的光束与阴极垂直(用当激光束通过阴极小孔产生的衍射图样来确定激光束与阴极垂直。), 使激光光束和阴极准直, 因为激光光束直径大约是阴极的小孔直径的六倍, 因此只须使激光光束与阴极垂直, 即可保证通过小孔的激光光束的轴线与阴极小孔的轴线重合, 第二步是使激光光束/阴极与探测器靶面准直。将探测器置于二维可调台面上, 让激光光束照射到探测器靶面上, 如图图4, 在 X、Y 维方向移动探器, 可得到四个独立的电压输出, 计算出 $S = [(A1 + A3) - (A2 + A4)] / [A1 + A2 + A3 + A4]$, 当 S 为零时, 说明激光光束在这 Y 方向已调节好。然后调节探测器在 X 方向的位置使 $S = [(A1 + A2) - (A3 + A4)] / [A1 + A2 + A3 + A4]$ 为零, 这说明激光光束/阴极在 Y 方向的位置调好, 此时激光光束/阴极已与探测器靶面中心准直。第三步是使枪管与阴极准直。将枪管放入阴极和探测器靶面之间的五维调节架上, 调节枪管的空间位置, 使 S 和 S 为零, 即可使枪管与阴极准直。

四象限光电池输出的四个独立的电压信号 A1、A2、A3 和 A4 分别送入外围电路进行处理, 滤除噪声。如果还要送入计算机进行处理, 可先通过图象卡进行二值化处理。和外围电路或计算机计算出的 $S = [(A1 + A3) - (A2 + A4)] / [A1 + A2 + A3 + A4]$ 和 $S = [(A1 + A2) - (A3 + A4)] / [A1 + A2 + A3 + A4]$ 的值并显示在表针、数显或计算机上, 通过看最终输出是否为零来确定是否准直。

阴极与枪管之间的准直精度由激光光束和阴极的准直度、激光束/阴极和探测器靶面的准直度、探测器四个象限的感光均匀度、二维调节平台的精度、五维调节架的精度、激光束的温漂和大气扰动、隔振系统等因素决定。探测器四个象限电池感光的不均匀度是系统误差, 可通过四象限光电池误差曲线来修正减小输出的 A1、A2、A3、A4 的误差, 计算总误差时可略去。激光光束和阴极的准直度可调节达 $\Delta 1 = \pm 0.0005\text{mm}$, 激光束/阴极和探测器靶面的准直度可调节达 $\Delta 2 = \pm 0.0005\text{mm}$ (由 HP 激光干涉仪测得), 二维调节平台的精度为 $\Delta 3 = \pm$

0.001mm, 五维调节架的精度为 $\Delta 4 = \pm 0.001\text{mm}$, 激光束的温漂产生的误差为 $\Delta 5 = \pm 0.001\text{mm}$ 。总的误差为:

$$\Delta = \sqrt{\Delta 1^2 + \Delta 2^2 + \Delta 3^2 + \Delta 4^2 + \Delta 5^2}$$

$$1] = \sqrt{1^2 + 1^2 + 2^2 + 2^2 + 2^2} = 3.7(\mu\text{m})$$

另外, 由信号处理电路和外界干扰引进一些误差。但可使阴极—管体的轴线准直度在微米读数精度范围取得, 可达 $\pm 5\mu\text{m}$ 。

图7显示出在毫米波管上取得的数据。低噪声使阴极—磁聚焦管的轴线准直可达 $5\mu\text{m}$ 。

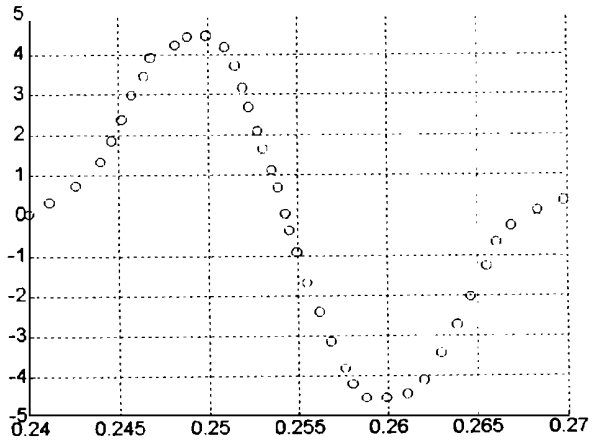


Fig. 7 Detector output and cathode position data

4 阴极—磁聚焦管的准直

简化的枪管的交叉截面图显示在图8中。阴极支架径向调节是通过二维调节架来实现的。磁聚焦管被置于阴极前, 激光器垂直照射阴极以便最大光强通过阴极小孔。

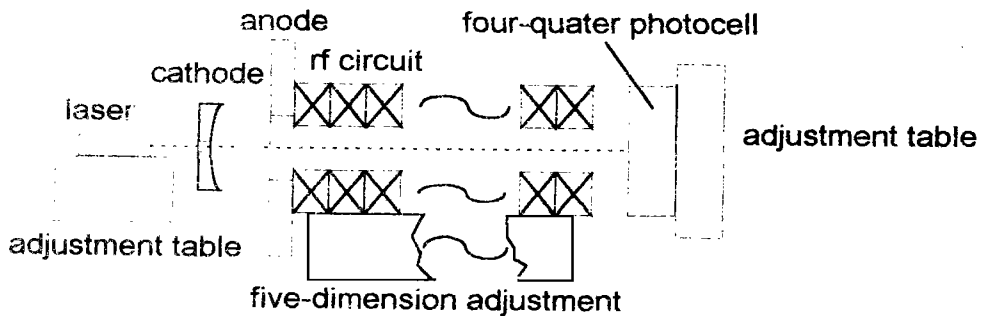


Fig. 8 The alignment of the cathode and rf circuit

He-Ne 激光器置于阴极后部以便激光器和阴极同时调整。在磁聚焦管被安装在毫米波管上之前, 激光器对于阴极上的小孔是准直的, 通过小孔有最大光强。

阴极中小孔是通过 YAG 切割激光器来产生的。 $0.04 \pm 0.008\text{mm}$ 直径的小孔在 2mm 厚的阴极凹面底部被打出。激光器调整在阴极底的几何中心 0.02mm 范围内。四象限光电池被置于二维调节平台上。每一维都有 $2\mu\text{m}$ 的调节精度。该装置置于接受器被最终安装的地方。

激光器成功地实现了电子枪管的阴极和管体之间的准直。激光器光斑在阴极上的尺寸大约是阴极孔六倍。阴极发射率在应用中没有发现由于激光器在阴极底部切的孔而降低。今后的毫米波管将会使激光准直技术实现高精度装配。

参 考 文 献

- 1 严瑛白. 物理光学. 北京: 机械工业出版社, 1989
- 2 清华大学光电技术与仪器教研组. 精密计量与测量. 北京: 清华大学出版社, 1996
- 3 孙培懋, 刘正飞. 光电技术. 北京: 机械工业出版社, 1992
- 4 Shaw G R, Savard P. Estimation of the alignment errors in the SAECG. Proceedings of the Annual Conference on Engineering in Medicine and Biology, IEEE, 1993, 15pt2: 713~714
- 5 Fukuda M, Suzuki M, Shibayama A. Improvement of alignment accuracy of an SR stepper. Microelectronic Engineering, 1994, 23(1-4): 189~192

The Application of Ultra-high Precision Alignment Technique to Millimeter-wave Harmodtron Assembly

YOU Zheng, YANG Ren, LIU Xing-Zhan, DONG Bin

(The Precision Instrument Department of Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract

This paper gives a high precision technique, which use to adjust electron cathode and rf circuits concentricity for high frequency millimeter-wave applications. These rf circuits, with diameter 0.2mm, must be aligned from the cathode to the collector. A laser alignment system can measure and adjust the concentricity from cathode to rf circuits. The laser beam through the pinhole in the cathode and the rf circuits was received by a photodetector in the collector area. This technique is simple and can adjust the concentricity very well.

Key words: Laser beam, Four-quadrant photocell, Concentricity, Cathode, rf circuit

尤 政 男, 1963年12月生。1985年毕业于华中理工大学机械制造专业获工学学士学位。1987年于华中理工大学精密测试及仪器专业获工学硕士学位。1990年于华中理工大学精密测试及仪器专业获工学博士学位。1990博士后, 副教授, 并先后担任清华大学精仪系副主任(科研), 国家光盘工程研究中心副主任, 系学术委员会副主任、校学术委员会委员等职。近年来的科学研究工作主要集中于精密工程领域, 特别是微米/纳米技术的研究。学术成果主要包括三个方面: 1. 超精表面的测试分析技术的研究; 2. 大尺寸超精密测量技术的研究; 3. 光学传感技术的研究。1989年获国家教委科技进步一等奖(乙类), 1990年获国家教委科技进步二等奖(甲类), 1989年获湖北省优秀科技论文一等奖, 1995年获国家教委科技进步二等奖, 1992年超精表面粗糙非接触测量装置, 获国家专利。1991年获国家教委和国务院学位委员会授予的“做出突出项献的中国博士学位获得者”称号。1995年获国家教委霍英东青年教师基金资助。