

用于微波电子枪的双重入腔 及其阴极结构

黄永章 吴钢

(中国科学院高能物理所应用部, 北京 100080)

1993年4月1日收到

摘 要

介绍一台用于热阴极微波电子枪的双重入驻波腔及其阴极结构。根据微波枪束品质要求,首先定出腔体基本参数,然后报告了腔形、场分布、谐振频率、耦合度等的设计考虑,并给出腔体测量结果,最后介绍了阴极结构的设计。

关键词 微波电子枪,微波腔,微波测量,阴极。

1 微波电子枪简介

在电子直线加速器中,用微波枪替代常规的直流枪可大幅度地减小束流的发射度^[1]。在直流枪中,直流场强一般为 8MV/m,而在微波腔中,场强可达数百 MV/m,如此高的加速电场可将电子快速地加速到相对论速度;因为空间电荷力的大小与 γ^2 成反比,从而极大地减小空间电荷力对电子束初始发射度的破坏。

用于北京自由电子激光器^[2]微波电子枪的输出束流能量大于 1MeV,而直流枪能量通常为 100keV,在微波电子枪中的空间电荷

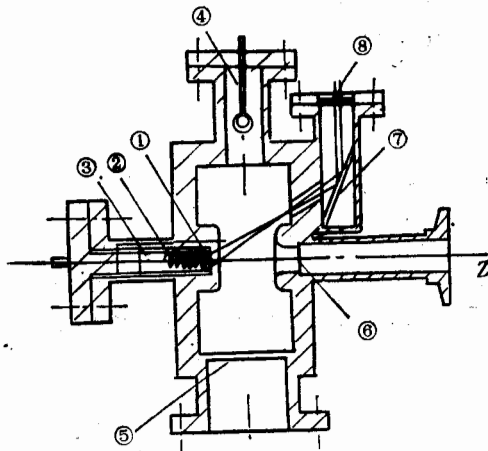


图 1(a) 微波腔及阴极结构简化示意

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。

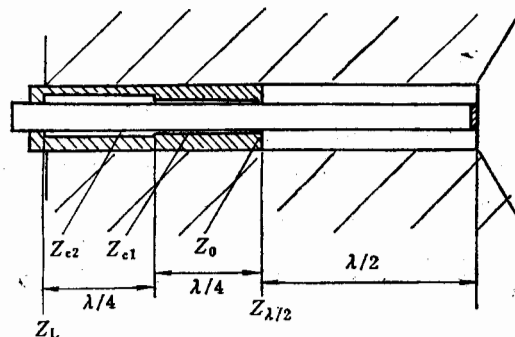


图 1(b) 阴极结构及不同位置的阻抗

Z_{c1} 、 Z_{c2} 均为特性阻抗

力只有在直流枪中的 1/15。图 1 是微波电子枪腔体，阴极结构等的简图。腔体是工作在 TM_{010} 模的双重入式驻波谐振腔，腔鼻伸入腔内增大了轴线电场强度，图 2 是腔内场分布示意。由于腔内微波场强随时间周期变化，阴极连续发射的电流只能在正半周期内被拉出并被加速，在这些电子中，大约一半的电子不能获得足够的能量而到达腔出口，将被反向加速至阴极，这些反轰电子把能量传递给阴极而增大阴极的发射。图 3 是在不同的微波相位发射的电子在腔内运动时能量

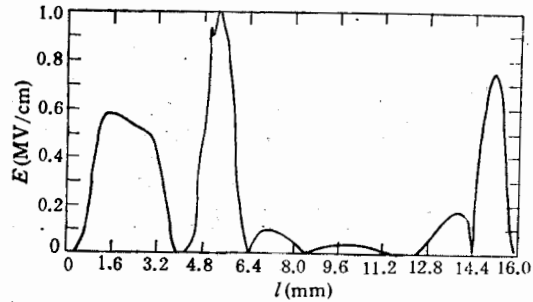


图 2 轴上 (横坐标 0—3.8mm) 电场分布及始于阴极附近沿顺时针方向至轴线 (横坐标 3.8—16.0mm) 的表面电场分布

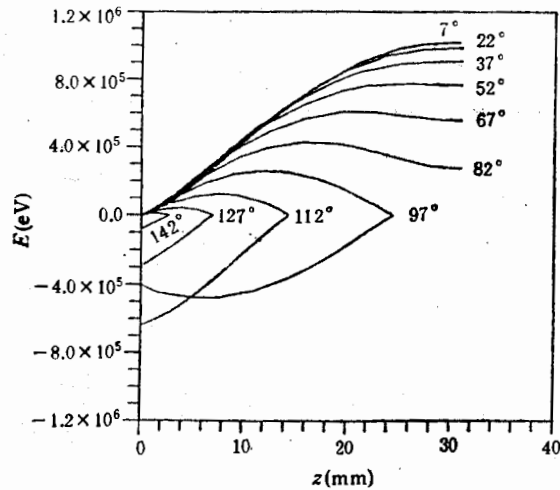


图 3 电子能量 E 在不同相位下与轴向位置 z 的对应关系

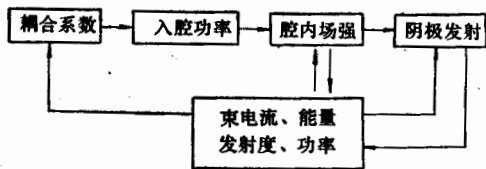


图 4 腔内各主要物理量相互作用关系框图

的变化，“负”能量表示反轰电子。

微波电子枪是微波腔与阴极的结合，电子束作为中介物通过能量交换把微波场和阴极发射联系在一起，因此就使微波电子枪中所有的物理量：阴极温度、微波场强、功率耦合、电子束能量、流强等强烈地

互相影响，图 4 是腔内主要物理量之间的相互作用关系简图，图中反映出微波枪的两个最重要的特点，反轰电子改变阴极发射，电子束流强影响微波功率耦合。

在微波腔体的设计阶段要求充分考虑到上述特点，通过大量计算得出微波腔体设计的基本参数为：脉冲发射流强 $I = 500-700\text{mA}$ ，有效束流能量 $E = 1-1.2\text{MeV}$ ，有效束流归一化发射度 $\epsilon_n \sim 30\pi\text{mmrad}$ ，腔体工作频率 $f = 2856\text{MHz}$ ，腔体品质因数 $Q_0 = 10000$ ，腔体功率耦合度 $\beta \sim 4$ 。

2 腔体形状的设计

腔体的形状决定腔内电场分布,从而也完全决定了出腔束流的品质。腔体形状的设计,原则上要满足以下要求:轴线上场强尽可能地高,以便很快提高束流能量,抑制空间电荷力的影响;在腔内,最大场强受限于腔壁上发生的电击穿,所以要求腔壁与轴线上场强之比要小;邻近阴极的腔鼻形状应根据造成尽可能低的发射度的出腔电子束而选择;腔长可权衡如下:长一些的腔可获得高一些的电子能量,短一些的腔可减小反轰电子的数量。

本文论述的腔形主要参考了美国斯坦福大学 J. Madey 的实验腔^[3],并根据实际情况做了修改,即把束流孔的直径由 5mm 变为 7mm,这样鼻锥形状和腔直径也就相应地需要修改以保证腔的谐振频率不变。采用 SUPERFISH 程序^[4]进行场形和频率的计算,图 5 显示了计算和实测的轴上电场分布;轴上电场分布和从邻近阴极开始沿顺时针方向直到轴线的腔表面电场分布,参见图 2,其中轴上峰值场强与腔表面峰值场强之比为 0.6。

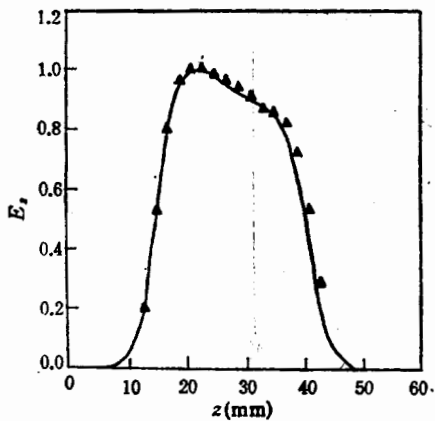


图5 相对单位的轴上电场分布计算值与测量值的比较
——计算值; ▲测量值。

邻近阴极的腔鼻角度是 60° , 选取这个角度是为了以径向的电场力去补偿空间电荷力,从而使腔给出最小的束流发射度。

在腔体形状设计完成后,编辑了 TRGUN 程序计算束流品质^[5],在轴上峰值场强 $E_p = 500\text{kV/cm}$ 时,计算得脉冲平均电流 $I = 500\text{mA}$,最高能量 $U_{\max} = 1\text{MeV}$,束流功率 $P_b = 450\text{kW}$,发射度 $\epsilon_n = 4\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$. 计算表明腔体形状满足设计要求。

3 耦合度、耦合孔的考虑

微波枪腔体和直线加速器腔体一样都存在束流和功率之间的相互作用,但前者的作用更强烈些,腔中束流的大小不仅影响其自身能量的获得,而且强烈地影响腔内功率的馈送,即腔耦合度。当腔与微波传输线相连接时,有如下公式,

$$1/Q_L = 1/Q_0 + 1/Q_e, \quad \beta = Q_0/Q_e. \quad (1)$$

式中 β 为腔耦合度, Q_0 、 Q_e 、 Q_L 分别为腔体的固有、外观和有载品质因数。当腔内存在束流时,(1)式成为:

$$1/Q_L = 1/Q_0 + 1/Q_e + 1/Q_b. \quad (2)$$

定义 $1/Q'_0 = 1/Q_0 + 1/Q_b$, 则有 $\beta' = Q'_0/Q_e$, 为充分利用微波功率,使 $\beta' = 1$, 这样就有

$$\beta = 1 + Q_0/Q_b. \quad (3)$$

按 Q 值的定义,可得

$$\beta = 1 + P_b/P_L. \quad (4)$$

此处 P_b 是束流功率, P_L 是腔体的欧姆损耗, 显然 β 反映了腔体带负载能力的大小, β 越大则产生的束流功率越大. 因此在设计时希望 β 值大一些, 以输出大于 500mA 的电流, 使设计留有余量. Q_0 越大, 在同样功率下腔内场强越高, 采用无氧铜作腔体时, Q_0 可达 10000. SUPERFISH 计算在 $Q_0 = 10000$ 时, $P_L = 264\text{kW}$; 当 $I = 700\text{mA}$, $U_{\max} = 1.2\text{MeV}$ 时, TRGUN 计算束功率为 756kW, 因此取 $\beta \approx 4$ 做为耦合度设计值. 这时, 腔体耦合孔大小的选择就变得十分重要, 它不仅影响耦合度, 也会使频率发生很大变化.

在耦合孔较小时, 耦合度近似与直径的 6 次方成正比, 在设计中参考了其它研究工作所做的 S 波段驻波腔的耦合孔与 β 的关系, 把耦合孔的大小确定为 2.2cm, 最后的冷测结果表明, 耦合孔的尺寸非常合适. 为计算耦合孔对谐振频率的影响, 采用三维程序 MAFIA^[6] 进行计算, 结果表明, 耦合孔的存在使腔频率减小 15MHz, 因此需适当减小腔体直径以使频率保持不变.

4 对称孔、激光孔及场测量装置

耦合孔的存在破坏了腔中场的轴对称性, 在耦合孔的一边, 电场强度较弱一些; 根据 Maxwell 方程, 电场分量 E_x 在 x 方向的变化将会导致磁场分量 B_y 的出现, B_y 偏转电子束; 由于电子束团存在能量差, 从而就造成 x 方向发射度的增长, 束团在 x 方向的横向偏角增长如下式所示^[7]

$$\Delta p_x/p_x = \frac{ec}{U\omega} \left\langle \frac{\partial E_x}{\partial x} \right\rangle \langle \cos \varphi \rangle \Delta z \quad (5)$$

式中 U 是电子束能量, ω 是圆频率, Δz 是场畸变区域, φ 是加速相位. 从中可见, 在 U 的增大有限度的情形, 为减小偏角, 在微波枪中必须考虑减小 $\left\langle \frac{\partial E_x}{\partial x} \right\rangle$.

SLAC 在建造 2 英里直线加速器时对这一问题进行过深入研究, 他们的测量表明, 在有耦合孔时, 轴线附近 1cm 范围内电场变化 10%, SLAC 采用偏置耦合器方法使场的对称性提高至 0.1%. 但这个方法需要做大量的精确测量, 结合具体情况, 我们采用在耦合孔对称处开孔的方法. 此法相对简单, 只要保证谐振频率不变即可.

对称孔处外接一段截止波导, 根据所需衰减量 A 决定截止波导的长度

$$L = 0.0183\lambda A / \sqrt{(\lambda/\lambda_c)^2 - 1}, \quad (6)$$

其中 λ_c 是截止波导的波长. 在截止波导处, 设计了一套腔内场强监测装置, 如图 1(a) 所示. 它利用小环耦合出截止波导的微波功率, 监测腔内场强的稳定性. 对称孔对频率的影响与耦合孔相同.

为了实现激光加热阴极的设想, 需要在腔体上附加一套光路将激光束引向阴极表面, 见图 1(a). 光脉冲通过真空窗到达导向镜, 导向镜以 32° 入射角使激光束照射到 LaB₆ 阴极表面. 用 MAFIA 程序计算激光孔对频率的影响仅为 0.4MHz.

5 腔体冷、热测量

在腔体加工完成后,可以采用标准微扰测量技术测量其电场分布^[6],

$$E(x) = \left[\frac{\Delta f(x)}{\Delta f_p} \right]^{1/2} E_p, \quad (7)$$

式中 E_p 、 Δf_p 分别为峰值场强和峰值频率偏移。以金属小球作微扰体测量腔体轴线上的电场分布,结果示于图 5,可见实测结果与计算的场分布完全相符。为测量傍轴区纵向场

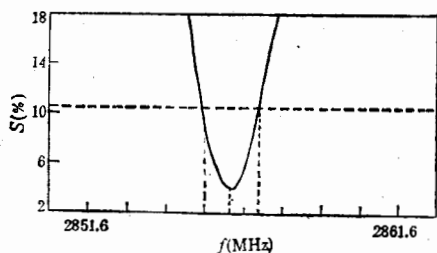


图 6 谐振频率 f 与驻波比 S 的测量结果

率 f ,品质因数 Q 及耦合度 β ,结果见图 6。

在腔内有束流时,耦合度可以通过测量腔体的入射、反射功率获得,

$$P_{re}/P_{in} = 1 - 4\beta/(1 + \beta)^2. \quad (8)$$

图 7 是实测耦合度随电子束流强度的变化曲线,在最佳耦合时,束流强度为 500mA,此时能量最高为 1.2MeV。

分布的对称性,微扰体既要有方向性,又不能太长而反映不出纵向分布,还要具有足够的频偏。经过试验,最后选择直径 0.6mm,长 4.8mm 的金属细针。由于腔体结构限制,可测范围只在轴附近 ± 3 mm,在测量精度内未发现轴附近存在轴向场分布的不对称性,这表明场形的轴对称性好于 1%。

采用测量驻波比的方法冷测腔体的谐振频率

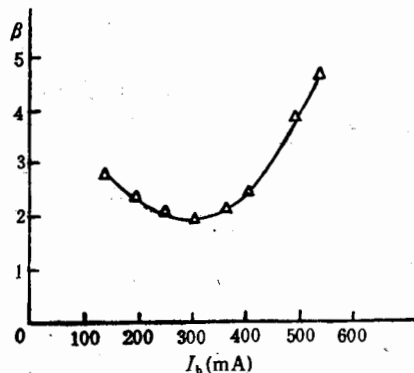


图 7 耦合度 β 与束流强度 I_b 的关系

6 阴极结构

阴极位于微波腔的一个端口之内,为提高

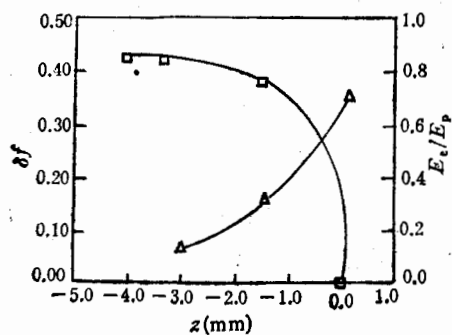


图 8

□阴极位置 z 与频率偏移 δf 的关系, \triangle 阴极表面场与轴线峰值场之比 E_s/E_p 随 z 的变化。

阴极的加热效率,阴极与腔壁之间必须绝热良好;从微波要求看,阴极处又必须与腔壁之间有良好的电接触(阻抗近似为 0),以保证在阴极表面的场分布与计算分布相同。为解决这个矛盾,采用 $\lambda/2$ 传输线结构,见图 1(b)。如果阴极杆在 $\lambda/2$ 点与腔壁处的阻抗为 0,则从微波场角度看,阴极处与腔壁阻抗也为 0。

阴极在腔内必然会改变腔体的谐振频率,同时阴极附近的场强也与没有阴极时不同。通过 SUPERTISH 程序可以计算频率偏移,阴极表面场强随阴极位置而变化,计算结果如图 8

所示。频率的冷测结果与计算一致。

7 小 结

本文详述了用于微波电子枪的双重入式驻波腔及其阴极结构的设计、制造及测量结果。1990年初,腔体完成后即投入微波电子枪的实验研究,其间又解决了一系列技术问题,使出腔电子束品质逐步提高,截止到1992年底,微波电子枪性能全面达标,在出腔电流500mA时,能量达1.2MeV;腔轴上峰值电场为60MV/m,表面峰值场强为102MV/m;束流发射度 $20\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ 。

参 考 文 献

- [1] C. Travier, SERA/90-219/RFG, RFG Note 07, LAL, France(1990).
- [2] Xie Jialin, et al., *Nucl. Instru. & Meth. in Phys. Res.*, **A272** (1988) 40.
- [3] G.A. Westenskow and J.M.J. Madey, HEPL Technical Note, TN-86-1, 1986.
- [4] K. Halbach and R.F. Holsinger, *Particle Accelerators*, **7**(1976)213.
- [5] 黄永章,北京自由电子激光器用热阴极微波电子枪的理论及实验研究和束流输运线的设计与制造,中国科学院高能物理研究所博士论文,1991.
- [6] R. Klatt, et al., *MAFIA user guide*, May., 1988.
- [7] G.A. Loew, et al., *IEEE. NS-12* (1965)580.
- [8] E.L. Ginzton, «*Microwave Measurements*» McGraw-Hill book Company Inc. (1957).

An Re-entrant Cavity and Its Cathode Structure for the Thermionic Microwave Gun

Huang Yongzhang, Wu Gang

(Application Division, Institute of High Energy Physics, Academia Sinica Beijing 100080)

Received on April 1, 1993

Abstract

This paper introduces a single cell re-entrant cavity and its cathode structure used in the thermionic microwave gun. The essential parameters of the cavity are chosen according to the requirements of produced electron beam. We report design consideration on cavity shape, field distribution, resonant frequency and coupling coefficient. Then we give the cold RF measurement results. The cavity is successfully used in the gun. Results of simulations is presented and is compared with measurements.

Key words thermionic microwave gun, RF cavity, RF measurement, cathode structure.