

热阴极微波电子枪*

谢家麟¹⁾ 高杰 黄永章 张仁善 王友智
(中国科学院高能物理研究所, 北京)

摘 要

本文首先介绍了高亮度注入器热阴极微波电子枪的发展情况和工作原理。然后对有关的物理及设计问题进行了讨论, 给出部分模拟计算结果。并描述了实验研究的装置, 给出了微波枪产生的电子束流强, 能谱等实验结果, 该结果达到了设计要求。最后, 讨论了热阴极微波枪存在的问题及改进方向。

一、引 言

由于自由电子激光、直线对撞机、小型直线加速器、高功率微波电子器件等方面的需要, 强流, 低发射度, 微微秒级脉宽的电子枪注入器成为近年来许多实验室的研究课题。研究主要沿着三条不同的技术路线进行。一是对常规的电子枪注入器加以改进, 如提高电子枪高压, 使用次谐波聚束器, 或再采用低频预加速, 高频切割, 磁压缩等综合措施以提高性能^[1-3]; 二是使用光阴极微波电子枪, 由强激光照射光阴极如 Cs₃Sb、CsK₂Sb 等以发射电子, 再由谐振腔中的强电场加速形成束团, 束团宽度由激光脉冲控制^[4,5]; 三是使用 LaB₆ 热阴极微波枪, 由热发射产生电子, 微波场加速形成束团, 束宽由腔中的粒子动力学决定^[6]。表 1 给出了这三条技术路线典型范例的性能指标。

表 1 不同方案电子枪注入器的性能指标(S 波段)

实验室	类型	能量 MeV	电 流 A	脉 宽 ps	电 荷 nC	发射度 mm-mrad.	参考文献	备注
法国 ORSAY -CLIO	改进常规	3	~35	15	~0.3	25 π	[7]	设计值
美国 BNL -ATP	光阴极 微波枪	4.5	~200	5	~1	5-10	[5]	设计值
美 STANFORD 国-SPRL	热阴极 微波枪	~1	10-30	4	~0.1	~10 π	[6]	实验值

不难理解, 上述三种方法各有利弊。第一种在常规的基础上改进, 只把现有的技术加以扩展, 不牵涉新的技术领域, 应该说比较成熟。但电子枪高压为击穿所限, 因而难以避

本文 1989 年 8 月 16 日收到。

* 国家自然科学基金资助课题。

1) 中国高等科学技术中心。

免强流电子束在聚束等过程中发射度的增长,使亮度受到限制。另外,此方案的设备复杂,投资较大。第二种方案因光阴极发射电流密度可达 200 A/cm^2 以上,并且束流脉宽可由激光控制在射频的几度范围,相位的变化影响较小,故亮度潜力很大,可以说是当前最先进的方案。但它的工作除需要倍频锁模强激光外,光阴极的工作条件苛刻,如真空度要优于 10^{-10} 托,照射后温度要低于 100°C 等,寿命也短。第三种方案的结构相对简单,但因发射电子的能量是连续的而必须使用动量分析器加以过滤。它是目前经过实践考验的最高亮度的自由电子激光注入器。它的峰值脉冲电流虽不如光阴极,但已满足一般要求。故在北京红外自由电子激光装置中加以采用^[7]。本文是对这种微波电子枪初步研究的结果。

二、微波枪工作原理及模拟计算

微波电子枪^[8]的基本组成部分是一个谐振腔,高功率微波在腔内激励准 TM_{010} 型驻波场,当阴极取向与轴向电场同向时,阴极发射的电子将得到加速。图1是谐振腔的结构示意图,其有关参数可用 SUPERFISH 程序计算得到。

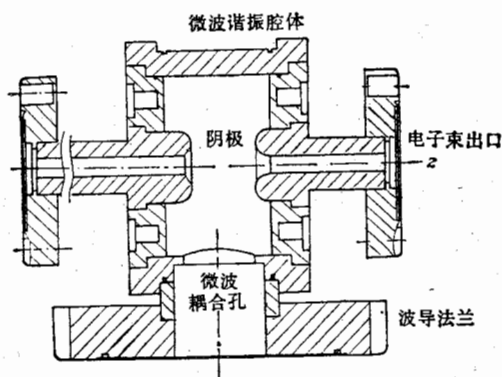


图1 谐振腔的结构示意图

阴极采用单晶 LaB_6 , 热电子发射由 Richardson 方程描述:

$$J_0 = AT^2 e^{-\phi/kT}, \quad (1)$$

式中 J_0 为发射电流密度, A 为 Richardson 常数, T 为绝对温度, ϕ 为逸出功, k 是 Boltzman 常数, 就我们使用的阴极而言, $A = 73 \text{ A/cm}^2 \cdot \text{K}^2$, $\phi = 2.68 \text{ eV}$ 。由于阴极表面微波电场的存在, 位垒将会降低, 从而导致电子发射增加, 即所谓 Schottky 效应^[9]。故实际发射电流密度可写做:

$$J = J_0 e^{4.403 \sqrt{E_0 \sin \varphi} / T}, \quad (2)$$

式中 E_0, φ 分别为轴向微波场振幅和相位。

电子由阴极发射后, 受腔内电磁场及空间电荷力的作用而运动, 从而决定了出腔时六维相空间的分布状态。考虑到腔的轴对称性, 电子的运动方程可写为^[10]:

$$\begin{aligned} d\gamma/dz &= \frac{1}{m_0 c^2} F_z; & d\varphi/dz &= \frac{2\pi}{\lambda} \gamma / \sqrt{\gamma^2 - 1}; & dPr/dz &= \frac{1}{\beta c} Fr. \\ Pr &= m_0 \gamma \beta c \frac{dr}{dz}; & \varphi &= \omega t + \varphi_0; & F_z &= -e E_z^{\text{rf}} \sin \varphi; \end{aligned} \quad (3)$$

$$Fr = -e [E_r^{\text{rf}} - \beta c B_\phi^{\text{rf}} + E_r^{\text{sc}}].$$

式中 γ, β, m_0 分别为电子的相对质量、速度和静止质量, $E_z^{\text{rf}}, E_r^{\text{rf}}, B_\phi^{\text{rf}}$ 分别为微波电磁场的强度, E_r^{sc} 为径向空间电荷场。微波场由 SUPERFISH 计算, 空间电荷场可用均匀柱

模型近似。

电子束团的归一化发射度根据下式计算：

$$\epsilon_{rn} = [(\langle p_r^2 \rangle \langle r^2 \rangle) - \langle p_r r \rangle^2]^{1/2}$$

式中 $\langle \quad \rangle$ 表示对束团的某部分求平均。

由轴对称性得到 $\epsilon_{xn} = \epsilon_{yn} = \frac{1}{2} \epsilon_{rn}$ 。

图 2 表示了不同相位发射的电子在微波场作用下获得的能量。点划线表示反轰电子的能量。出腔电子的一部分，通过动量分析器的选择，注入到加速器中加速，这部分电子的能量较高，发射度较小，流强较大。其他的电子将被动量分析器滤掉。反轰电子是有害的。

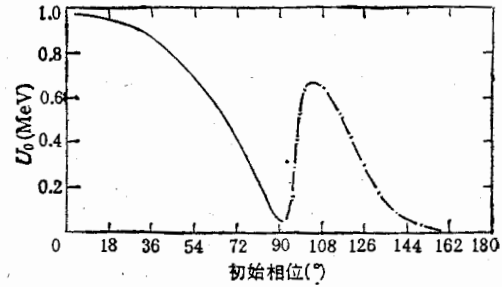


图 2 电子能量随初始相位的变化曲线(点划线表示反轰能量)

为与实验结果相比较，图 3、图 4 分别给出计算得到的腔电流及束流最大能量随腔内场强的变化曲线，图 5 给出出腔束流的能谱曲线。图 6 示出的则是发射度随束团初始中心

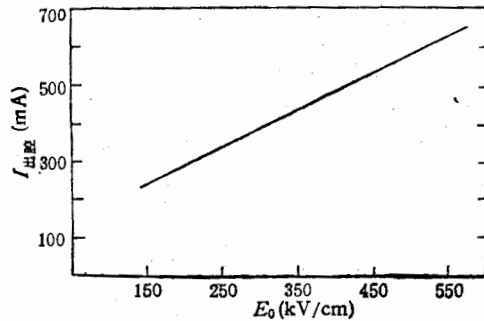


图 3 出腔电流随腔内场强幅值的变化
阴极直径 $\phi = 4\text{mm}$
阴极温度 $T_c = 1773\text{K}$

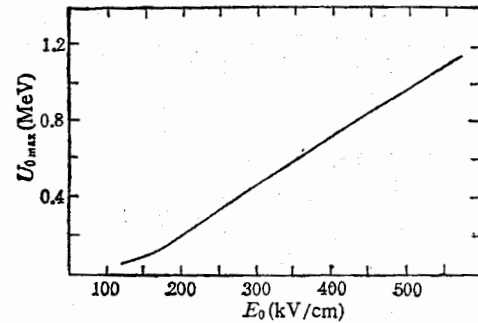


图 4 束流最大能量随腔内场强幅值的变化

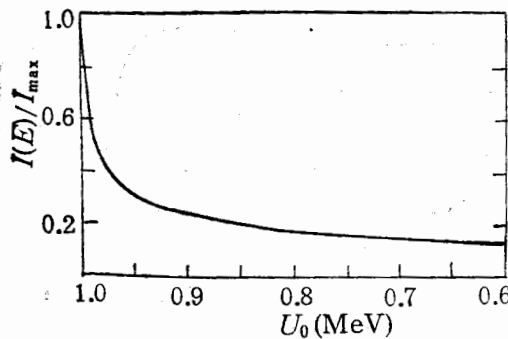


图 5 束团能谱的计算结果。
 $E_0 = 500\text{kV/cm}$ $T_c = 1773\text{K}$

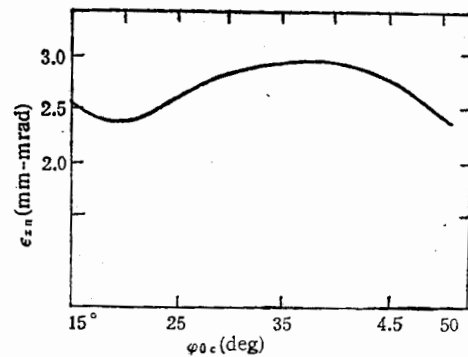


图 6 发射度随束团初始中心相位的变化曲线。
 $\Delta\phi = 30^\circ$ $E_0 = 500\text{kV/cm}$

相位的变化曲线,在这里,假定的束团初始宽度为 30° 。从图中可知,发射度是很小的,这主要是因为加速场强很高的缘故。从以上曲线看出,束团的能量、流强、发射度与初始相位有极密切的联系。

三、实验装置及实验结果

为了研究微波电子枪的性能,已经建成了一套微波电子枪实验系统,并基本上完成了原型枪的实验。该系统包括谐振腔、阴极支撑系统、热子及反馈控制回路、 α 磁铁、束流运输系统、束测系统、微波系统、真空系统等。这里,只简要介绍整个系统及主要部件的功能,并给出原型枪的主要实验结果。

1. 实验系统总体描述

图 7 为微波电子枪实验系统示意图。频率为 2856 MHz 的微波功率经环流器、衰减器等馈至腔内,微波功率的测量通过 50 dB 定向耦合器来完成。阴极发射

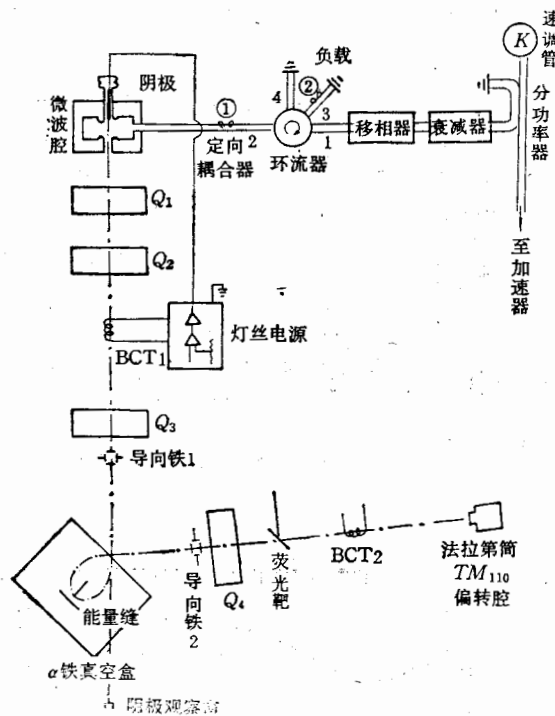


图 7 原型微波枪实验装置示意图

的电子经微波场加速后形成束团,这个束团经过动量分析器,即 α 磁铁的选择,聚束至 4 ps 宽后,就可注入加速管。同时, α 磁铁又可以用于测能谱。系统中安放了四块四极磁铁 ($\theta_1 - \theta_4$) 对束流聚焦,两组导向磁铁调节束心位置。束流变压器 BCT₁ 用以测量腔出口的脉冲平均流强,并把这个信号反馈至阴极热子电流,从而可以自动稳定枪的输出电流。BCT₂ 测量 α 铁出口脉冲平均电流,即注入电流。由荧光靶,摄象机,显示器,计算机等组成的图象数据监测系统,可以实时显示束团截面位置,并可用于测量发射度。束团的相宽则可通过束流线末端的 TM₁₁₀ 偏转腔加以测定。

2. α 磁铁

α 磁铁因电子在其中的运动轨迹呈 α 形而得名^[11],它是微波电子枪的另一重要组成部分。其工作原理可用图 8 来说明。在 $z \geq 0$ 区域有恒定梯度的磁场 $\nabla B = \partial B / \partial z$,可以证明,电子以 $\theta_i = 40.7^\circ$ 入射时,其出射角 $\theta_o = 40.7^\circ$,即电子完成了消色散偏转。且电子轨迹与 z 轴的交点为

$$z = 75\sqrt{\beta\gamma/\nabla B} \text{ (cm)}. \quad (4)$$

根据上式,由 ∇B 及 z 就可算出电子能量 U 。若在 $z < z_1$ 及 $z > z_2$ 处放置挡板,就可以选择所需能量的电子。另一方面,不同能量的电子在 α 铁中运动轨迹的长度 l 是不同的,因此,它们所需的时间 $\tau = l/\beta c$ 也不同,这就使得磁压缩成为可能,压缩量由下式给出

$$\Delta\tau = \frac{l}{\beta c} \cdot \frac{1}{\beta^2 \gamma} \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{\gamma^2} \right) \cdot \Delta\gamma. \quad (5)$$

在实验中,调节 α 铁的梯度 ∇B , 高低能挡板位置 z_1 及 z_2 , 便可以选择束流的能量 U , 能散 ΔU 和相宽压缩量 $\Delta\tau$ 。

3. 原型枪实验结果

利用上述实验装置对原型枪进行了测试,下面给出表征该枪性能的一些主要结果。在微波枪的实验中,用了大量的时间解决工艺问题,如耐高温的热子结构、LaB₆ 阴极的制备工艺(曾试用等离子体喷涂,多晶及单晶结构等)、工作条件(如真空要求,微波功率、脉宽、触发频率等)、反轰抑制方法等等。此处限于篇幅,不能详述。这些实践经验为今后的工作打下了良好的基础。

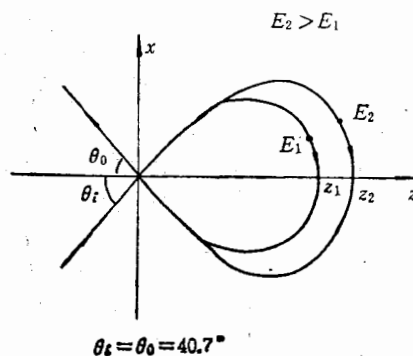
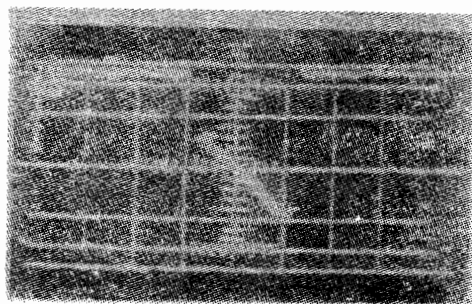
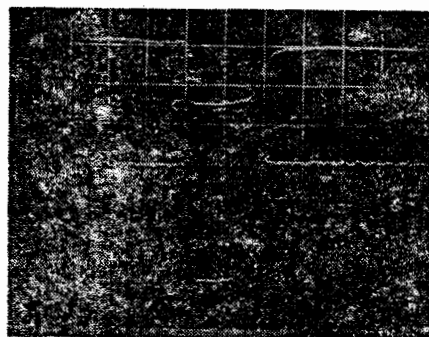


图 8 不同能量的电子在 α 磁铁内的运动轨迹



(a) 平面阴极的束流波形 ($\mu\text{s}/\text{格}$)



(b) 空心阴极的束流波形 ($1\mu\text{s}/\text{格}$)
上部为微波包络,下部为 BCT 波形

图 9 BCT₁ 测量的束流波形照片

图 9 示出的是用 BCT₁ 测得的束流波形。图 9(a) 中的斜坡是由于束流反轰造成阴极温度上升,导致束流在宏脉冲内随时间增长;图 9(b) 则是用空心阴极得到的束流波形,束流相对很平坦,这表明反轰减小,主要原因是部分反轰电子从空心阴极中穿过而未与阴极碰撞。

图 10 绘出的是束流强度随微波功率平方根的变化。在不考虑束流负载时,腔内场强与功率的平方根成正比,因此图中曲线也近似反映了出腔电流与腔内场强的关系,与计算结果图 3 相比是定性符合的。图 11 绘出的是束流最高能量随微波功率平方根的变化,可与图 4 相比较。图 12 绘出了用 α 铁测量的束流能谱。考虑到低能电子在束流传输系统中的损失,以及曲线的分辨率 $\Delta U/U$ 较低,所得能谱形状与图 5 是完全吻合的。

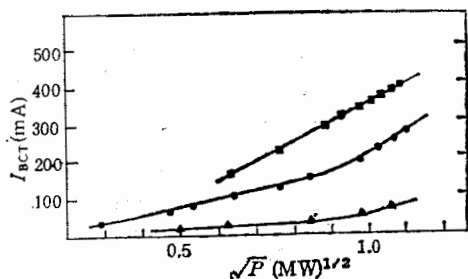


图10 BCT 电流随馈入腔内功率的变化,
(I_c 为热子电流) ■ $I_c = 5.5\text{ A}$ ● $I_c = 5.0\text{ A}$
▲ $I_c = 4.5\text{ A}$

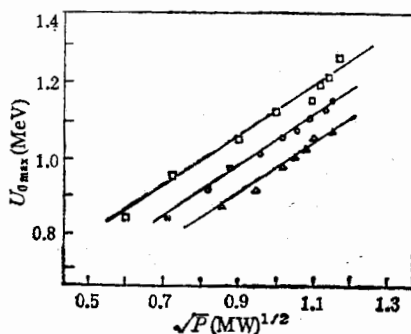


图11 束流最高能量随入腔功率的变化,
(I_c 为热子电流) □ $I_c = 5.0\text{ A}$, ○ $I_c = 5.2\text{ A}$,
△ $I_c = 5.4\text{ A}$

下面列出这台微波枪的主要参数:

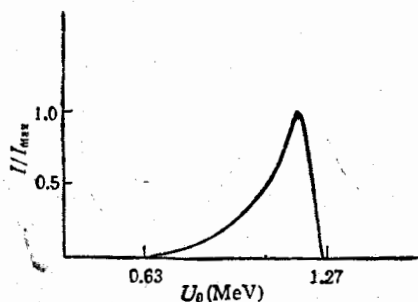


图12 实测的电子束能谱曲线
 $I_c = 5.0\text{ A}$, $P = 1.44\text{ MW}$

宏脉宽 4—5 μs ;
脉冲平均电流 $\sim 500\text{ mA}$;
可达能量 $> 1\text{ MeV}$;
预计压缩至 4 ps 时脉冲流强 $\sim 20\text{ A}$.

四、存在的问题及改进方向

前面提到,微波电子枪是目前国际上自由电子激光装置中使用的亮度最高的注入器。我们制成的热阴极微波电子枪的性能初步满足了使用要求,同时也发现了这种注入器所存在的问题以及

可能改进的方向。

首先,微波电子枪有从整体优化设计的问题,即如何设计谐振腔形状和尺寸、阴极工作温度、阴极位置、腔耦合孔大小、激励功率以及束传输系统、 α 磁铁等各种参数,以使束团的流强、能散度、发射度和微脉冲宽度等能达到产生自由电子激光的最佳性能指标。这个问题显然比较复杂,需要进行大量的模拟计算和实验研究,是一个重要的长远研究课题。

在当前的实际工作中,微波电子枪的一个局限性是由于反轰而限制了可使用脉冲的宽度。反轰的直接效应是引起阴极的温升,这个温升又分为两部分,一是阴极平均温度的上升 ΔT_c , 它可以用减小热子电流来加以补偿,对微波枪工作影响不大;另一是阴极在宏脉冲内的温度上升 δT_c , 这将直接导致宏脉冲内发射电流的变化,由于束流负载效应,从而又将引起脉冲

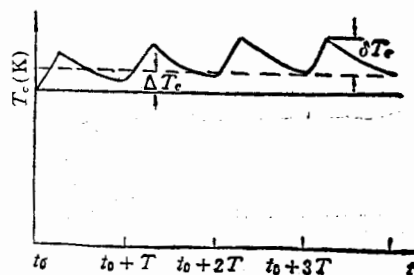


图13 计算阴极温升的示意图

内束流能量的变化,这就破坏了自由电子激光的稳定工作条件,这是我们最不希望的。根据上面的分析,阴极温度变化可用图 13 定性说明其中 T_c 是阴极温度, T 是工作周期, t_0 是初始时间根据传热计算模型和实验结果分析, $\delta T_c \sim 3 \text{ K}/\mu\text{s}$, 引起的电流变化 $\delta I/I \sim 4\%/\mu\text{s}$ 。

为了寻求减小反轰的途径,曾尝试了各种方法,如采用空心阴极; 磁场偏转反轰电子等。特别是采用空心阴极取得了极为明显的效果。克服反轰的另一个可能途径是在宏脉冲期间,使阴极温度以一定速率下降,以补偿由于反轰导致的温度升高,这在原则上可以用激光加热来实现^[12]。

五、结 束 语

热阴极微波枪是一种新型电子注入器,它利用谐振腔中的高场强加速电子,从而大大削弱了空间电荷的作用,使束流品质得以提高。然而对它的研究还远没有成熟,还需要进行大量的工作,特别是如何减小反轰甚至利用反轰,是很有实际意义的课题。

通过不断反复改进,我们对于热阴极微波枪的研究取得较大进展,已能产生具有足够流强和能量的电子束,预期发射度也能达到设计指标。

由于热阴极微波电子枪结构紧凑,投资较少,它对于加速器小型化,自由电子激光器实用化等领域都具有广泛的应用前景。

本工作的阴极加工得到中科院北京科仪厂曾朝伟同志的协助,微波功率系统、真空系统,束测系统分别得到韩斌、林绍波、杨学平、曲树桐、袁勤良等同志以及自由电子激光室全体同志的大力协助,在此一并致谢。

参 考 文 献

- [1] T. I. Smith, 1986 Linear Accelerator Conference Proc. p. 421.
- [2] R. H. Miller, et al., submitted to 1989 IEEE Particle Accelerator Conference.
- [3] A. Yaremian, et al., submitted to 1989 IEEE Particle Accelerator Conference.
- [4] R. L. Sheffield, et al., *Nuclear Instrument and Method*, **A272** (1988), 22.
- [5] K. T. McDonald, Princeton Univ. Report, DOE/ER/3072-43 Mar. 1988.
- [6] G. A. Westenskow and J. M. J. Madey, *Laser and Particle Beams*, **V2** (1984), 233.
- [7] Xie Jialin, et al., *Nuclear Instrument and Method*, **A272** (1988), 40.
- [8] G. A. Westenskow, et al., Owner's Manual for the Microwave Electron Gun, Stanford Univ. HEPL TN-86-1 (1986).
- [9] K. R. Spangerberg, *Vacume Tubes*, McGraw Hill book Co. Inc. (1948), p. 47.
- [10] K. J. Kim, RF and Space Charge Effects in Laser-Driven RF Electron Gun, LBL-25807 (Aug. 1988).
- [11] H. A. Enge, *Review of Science Instrument*, **V34** (1963), 385.
- [12] 谢家麟,“激光加热阴极的考虑” IHEP/FEL/88-11.

THERMIONIC CATHODE MICROWAVE ELECTRON GUN

XIE JIALIN GAO JIE HUANG YONGZHANG

ZHANG RENSHAN WANG YOUZHI

(Institute of High Energy Physics, Academia Sinica, Beijing)

ABSTRACT

The principle and development of the thermionic cathode microwave electron gun used as the injector of a high brightness RF linac are introduced. The numerical computations of the beam current, energy spread and emittance are given. The set-up to test the gun is described and some experimental results are reported. Finally, the article concluded with a discussion of the existing problems and the possible improvements of its performance.