

迴旋电子注速度零散的实验研究*

蔡 熙 章

(北京真空电子器件研究所)

提 要

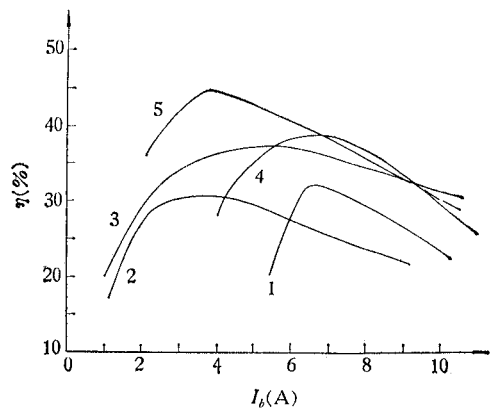
本文简要叙述了速度零散对迴旋管主要参量的影响;文中讨论了减小速度零散的措施;给出了一种测量迴旋电子注速度零散的新方法,该方法是利用一组高精度的径规和多瓣收集极,来精确测出迴旋电子注的横向速度分布。该方法与目前国内外所用的拒斥场法、针孔收集极法相比,最大优点是测量结果不受空间电荷效应的影响,并能测出迴旋管实际工作状态下电子注的速度零散。为了全面的表征电子注的性能,引入了相对密度-速度零散的概念。实验是在一台特殊设计的分析器上进行的。

一、概 述

迴旋管是一种利用电子迴旋脉泽机理的新型微波器件。它在通信和受控热核反应等方面有着广阔的使用前景。但目前在迴旋管的研制工作中,急待解决的问题之一就是改进电子枪的设计,以减小速度零散,提供高质量的电子注。理论计算和实验结果都表明速度零散对迴旋管的性能有很大影响。国内外对这一问题作了不少理论探讨和计算机模拟,获得的结果综合于图1^[1-4]、图2^[5]、图3^[6]和图4^[7]。

综上所述可知,研究电子注的速度分布,对于进一步改进迴旋管电子注的性能是十分重要的。许多专家认为,要改进迴旋管电子枪在很大程度上取决于能否精确测出电子注中电子的速度零散。关于速度零散的实验研究工作已有一些报道^[8-11],测量速度零散的方法多半是基于拒斥场原

理,基于这一原理的测量方法,在测量空间内会发生被拒斥的电子反转,而被反转的电子,必然会破坏系统原来的状态,同时还会增强空间电荷效应,使测量精度大大降低。因此测



1——文献 [1], 2, 3——文献 [2],
4——文献 [5], 5——文献 [4]

图 1 电子注电流 I_b 对管子效率 η 的影响

Fig. 1 Relations between electron beam current and efficiency

* 1982年7月16日收到。

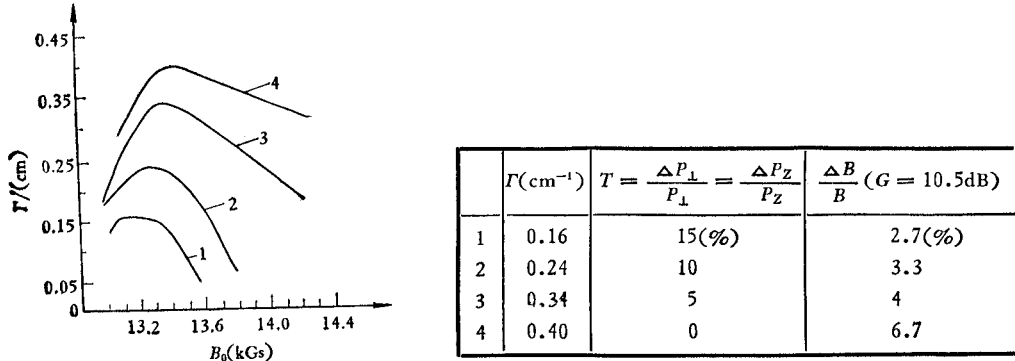


图 2 不同速度零散情况下,增长率 $\Gamma/(\text{cm})$ 与外加磁场 (B_0) 的关系

Fig. 2 Relations between growth rate and magnetic field at different velocity spread

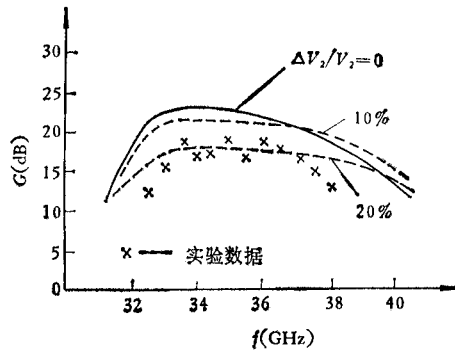


图 3 不同速度零散情况下,管子的增益 G 与频率 f 的关系

Fig. 3 Relations between gain and frequency at different velocity spread

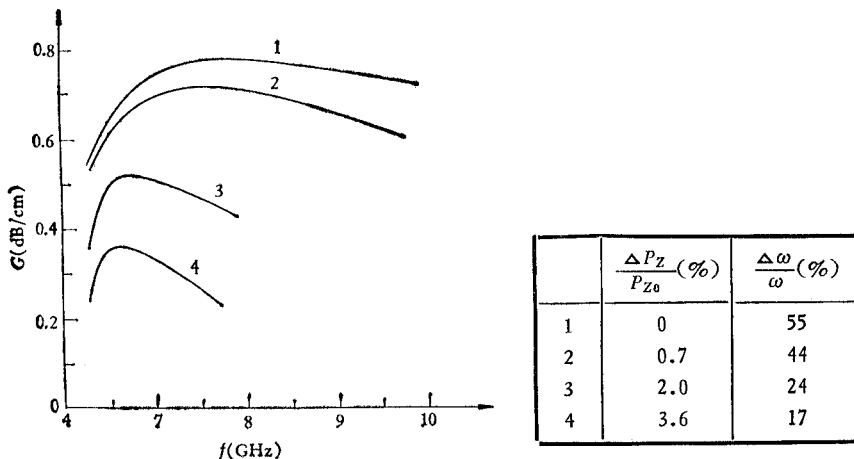


图 4 在不同速度零散情况下,慢波回旋放大管的增益 G 和率频 f 的关系

Fig. 4 Relations between gain and frequency at different velocity spread for slow-wave gyrotron amplifier

量时所用的电流要比器件实际的工作电流小很多,通常为朗谬尔电流的二十分之一。尽管苏联人多次改进这类实验装置,如增加具有扇形切口的圆柱状膜片,但栅网前仍有电子反转,电子注原始状态还是受到了干扰。近来,美国也加强了速度零散的实验研究工作^[12],在第六届红外和毫米波会议上,发表了用针孔收集极法测量迴旋行波放大器速度零散的实验结果^[13]。该方法的缺点是调节机构太复杂,没有高精度的真空调节装置就得不到正确的结果。

为了测量实际运用情况下迴旋电子注的速度零散,本文提出了一种新方法,它是利用放置在互作用腔体内的多通道径规(详见第三节),在不改变电子注状态的情况下,同时测量电子注某一横截面上电子的横向速度。测量时不会使电子发生反转,同时电子流在径规通道内也不会形成阻止电流流通的最低电位,因此不会引起新的空间电荷效应。

二、减小速度零散的措施

速度零散小的电子注是迴旋管获得高效率的关键。在实践中我们认识到,只要设计的场分布合理,电极形状合适,电极安排确当,就可以得到性能良好的电子枪。

1. 合理的场分布 从阴极发射出来的电子在外加电场和磁场的共同作用下到达互作用腔,同时完成速度的转换。所以电场、磁场的分布直接影响着电子注的性能。图5给出了控制阳极电压和电子注电流为常数时,腔体电压的变化对电子注特性的影响。从图5可见,当腔体电压增高时,由于纵向电场分量的增强,平均横向能量按线性减小。外层电子的横向能量基本上保持不变,有部分电子反转。内层电子的横向能量降低比平均能量降低的更快,这使电子注的速度零散迅速增大。这清楚地表明合理的场分布是使速度零散小的重要条件。

电子计算机模拟计算和实验结果还表明,阴极区磁场分布对电子注性能有较大的影响^[14]。某些磁场分布(如阴极区为线性增长的磁场)可使电子注中部分电子具有很大的横向速度,但速度零散也很大。另一些磁场分布,电子注的速度零散很小,但横向速度没有达到设计要求。作者利用使阴极区磁场达到最佳分布的方法,获得了较满意的结果:电子注的横向能量为总注能的80%左右;导流系数小于 $1\mu\text{P}$ 时,速度零散小于1%;导流系数小于 $3\mu\text{P}$ 时,速度零散约为5%。大量的热测结果表明,阴极区磁场的均匀区不宜太短,磁场的上升点相对于阴极的位置有一最佳距离,在此情况下可获得最大的输出功率。在8mm迴旋管测试中,我们改变阴极区磁场分布可使输出功率增加1倍。表1为同1支管子,在电压、电流近似相同的情况下获得的测试数据。

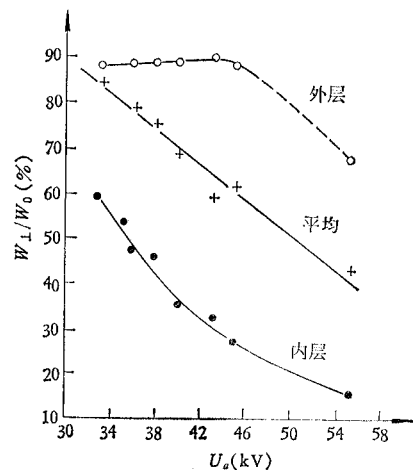


图5 腔体电压变化对电子注特性的影响

Fig. 5 Effect of resonator voltage on the features of beam

表 1 Tab. 1

阴极温度 (°C)	U_a (kV)	U_c (kV)	主磁场电流 (A)				副磁场电流 (A)				P (kw)
			I	II	III	IV	I	II	III	IV	
1020	32.0	16.0	950	430	450	630	-290	198	75	125	24.5
1000	32.8	17.6	850	450	450	640	-275	0	200	294	52.0

2. 特定的电极形状 随着微波加热研究工作的进展, 希望迴旋管能提供更大的功率, 这要求电子枪能给出较大的注电流。但是当注电流增大时, 横向速度会明显降低, 速度零散会急剧增大。图 6 给出了初期设计的电子枪的速度零散与注电流的关系曲线。由此可见, 空间电荷效应是导致速度零散增大的根本原因。通过改变电极形状(包括电极相对位置、电极与磁场轴线的夹角), 不仅能改变电场分布, 而且还能补偿空间电荷效应造成的电子注的内外层电子运动状态的差别, 使速度零散大大减小。不同的电极结构, 速度零散的最小值所对应的注电流也不同。图 7 给出了改进设计的电子枪的速度零散与注电流的关系曲线。对于改进设计的电子枪, 在腔体电压为 50kV、工作电流为 11A 时, 速度零散约为 5%, 这已足以满足迴旋快波器件的要求。

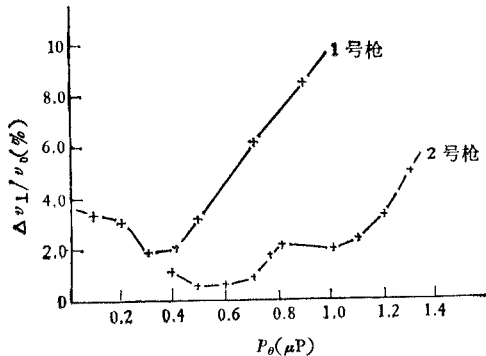


图 6 原设计的电子枪的速度零散与注电流的关系曲线

Fig. 6 Effect of electron beam current on transverse velocity spread for early designed gun

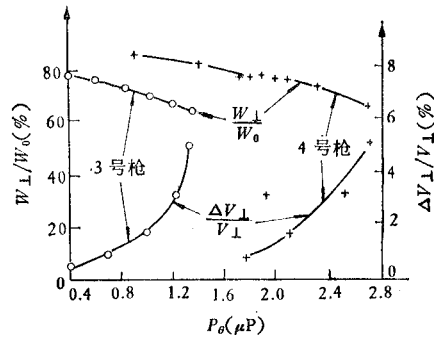


图 7 改进设计的电子枪的速度零散和横向能量与注电流的关系曲线

Fig. 7 Effect of electron beam current on transverse energy and transverse velocity spread for carefully designed gun

三、新方法的工作原理和实验装置

从第一节可知, 拒斥场法的最大缺点是反转电子扰乱了电子注的原始状态, 同时还增大了空间电荷效应。因此新方法从原理上应避开拒斥场, 而使实验条件与管子的工作条件相一致。电子到达相互作用腔入口处时, 速度转换已经完成, 开始进入均匀磁场区的等电位空间, 所以各个电子将围绕特定的导引中心作螺旋运动。因此在电子前进的通道上放一个测量电子迴旋半径的“尺子”(这个特定的尺子我们称之为径规), 测出不同电子的拉莫尔半径 r_L , 我们也就知道了不同电子所具有的横向速度(因为磁场强度是已知的), 进而就可求出电子注的速度零散。由于电子注中同一横截面上各处电子的速度分布、密度

分布可以认为是相同的,所以只要把不同尺寸的径规排列在同一横截面的圆周上,当电子注通过径规所在截面时,就可测出电子注的速度分布。由于径规与相互作用腔体相联结(同电位),所以径规前没有拒斥场,只要电子注进入相互作用腔的入口时,电子的水平速度不为零,就不会发生电子反转,不会引起新的空间电荷效应,电子注的原始状态就不会受到干扰。为了防止二次电子发生,径规的端面用特殊工艺进行处理。另外由文献[15]中的图 17.7 的曲线可以看出,当工作电压为 20—50kV 时,铜的二次电子发射系数约为 0.45—0.50,而且迴旋运动的电子的纵向、横向速度分量都小于全速度,所以二次电子的影响可以不予考虑。

在一般情况下,相互作用腔体的轴向长度为 4—7 个工作波长,腔体内高频场的分布为高斯分布或变态高斯分布。由于径规处在腔体的端头,所以径规通道内的高频场幅值极小,电子与高频场的相互作用很微弱。

我们还知道,空心电子注电子通道壁与电子注内边界之间的相对电位降可用下式表示^[15]

$$\frac{\Delta U}{U} \approx 0.015P_{\mu} \left[1 - \frac{(r_1/r_2)^2}{1 - (r_1/r_2)^2} \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^2 + \ln \left(\frac{r_a}{r_2} \right)^2 \right], \quad (1)$$

其中 r_1 为电子注的内边界半径, r_2 为电子注的外边界半径, r_a 为相互作用腔体(也就是漂移管)半径, P_{μ} 为导流系数。很明显,当 $r_1 \rightarrow 0$ 时,相对电位降仅为导流系数的 1.5% 倍。迴旋管电子枪的导流系数一般不大于 $1\mu P$, 对于工作于基波的 8mm 振荡管来说, r_1/r_2 一般在 0.5—0.8 之间,所以相对电位降为 0.7—0.2% P_{μ} 。括弧中最后一项表征渡越通道壁与电子注外边界之间的电位降,对于径规通道 $r_2 \rightarrow r_a$, 最后一项近似为零。同时通道内的空间电荷密度远小于入口处前面电子注内部的空间电荷密度。这是因为只有迴旋电子的导引中心在径规通道的中央,拉莫尔半径小于二分之一通道宽度的电子才能从通道内通过,所以径规通道内不会形成阻止电流流通的最低电位。

综上所述,可见径规法对电子注原始状态几乎没有影响,比拒斥场法要优越得多。测量时,电子枪的工作状态可以与管子的使用情况完全相同(电流、电压、磁场),这样我们就可以获得管子工作情况下电子注的速度零散的数据。因为速度零散的大小将随电流、电压、磁场、磁压缩比的不同而变化,因此用径规法测量速度零散更具有实际价值。与文献[13]所用的针孔收集法相比,新方法的实验装置结构简单,测量一条分布曲线的全部时间不超过 1 小时,每条实验曲线有 8 个实验数据,所以实验数据可靠。

实验装置是特殊设计的磁控型电子注分析器^[16]。如图 8 所示: 1——电子注分析器, 2——径规, 3——和径规通道一一对应的多瓣收集极, 4——通向电流放大器的电流引出杆。

分析器的各电极系统可分别调节,相对移动。调节机构均采用金属波纹管连结,真空密封性能好,不启动冷阱,系统真空度可达 $3-5 \times 10^{-8}$ mmHg。磁场轴线相对于 X、Y、Z 三个方向均可自由调节。系统配有半自动磁场测试仪、摄影用的光学系统、测量电子注参数的多种专用部件,以保证实验可靠。

测量时,根据需要选取不同尺寸的径规。径规的测量精度可达 $2\mu m$, 它有 7 个到 10 个矩形通道。通道的径向高度 D (图 8), 保证在不同的磁压缩比下不截获电子。径规在

轴线方向的长度为 $l \approx 1.5\lambda_z$ (电子迴旋波长 λ_z 为电子在一个迴旋周期内沿 Z 轴方向所前进的距离), 目的在于防止杂乱电子通过径规通道, 到达收集极而引起测量误差. 径规后面是收集电子流用的多瓣收集极, 图 9 是它的实物照片. 它是由陶瓷基底、Ni-Mo-Au 特殊的金属片和引出杆一道经真空封接而成. 它被封接在管体上, 有良好的气密和耐热性能. 它收集的电子则由引出杆送至电流放大器放大 (因为高能 and 低能电子的比例很小, 不经放大不易读准确.)

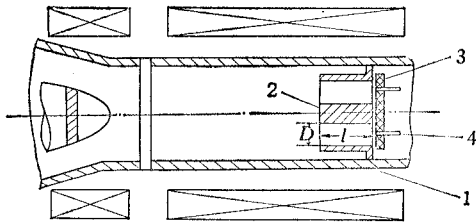


图 8 测量速度零散的实验装置图

Fig. 8 Schematic diagram of the experimental device

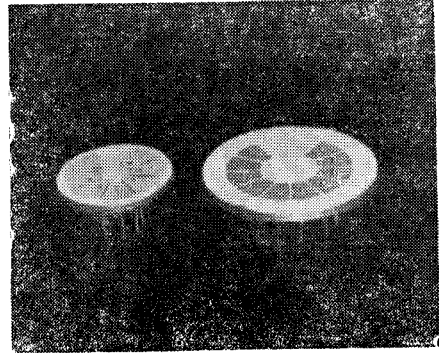


图 9 多瓣收集极实物照片

Fig. 9 Photo of multi-lobe collector

四、径规的主要尺寸的选取

径规是测量装置的关键部件. 它的设计必须以符合测量要求为准则, 同时还应考虑加工的可能性, 当然以越易加工越好, 这就是设计的出发点. 电子迴旋波长 λ_z (参看第三节定义) 主要是由电子进入相互作用腔时具有的纵向 (即平行于 Z 轴方向) 速度决定的, 而电子的纵向速度又与许多复杂的因素有关, 如阴极与控制阳极和相互作用腔体的相对位置, 电子穿越非均匀磁场区, 受到绝热或近似绝热的压缩等等, 这些参量之间的关系很难用数学公式表示. 作者对大量计算机模拟数据进行了统计、分析, 总结出能与实际情况基本符合的、各种不同纵向速度下的计算 λ_z 的经验公式:

1. 横向速度大于 70% v_0 时,

$$\lambda_z = 212 \frac{\sqrt{U_c}}{B_0} \cdot \frac{\sqrt{v_0^2 - v_{\perp}^2}}{v_0^2}, \quad (2)$$

其中 U_c 为控制阳极电压 (V), B_0 为相互作用区磁场 (Gs). v_{\perp} 和 v_0 分别为横向速度和全速度.

2. 横向速度为 50—70% v_0 时,

$$\lambda_z = 212 \frac{\sqrt{U_c + U_a \cdot \sin \varphi}}{B_0} \cdot \frac{\sqrt{v_0^2 - v_{\perp}^2}}{v_0^2}, \quad (3)$$

其中 φ 为相互作用腔端头到阴极的连线与 Z 轴的夹角 ($^{\circ}$), U_a 为相互作用腔体 (收集极) 的电压 (V).

3. 横向速度小于 $50\% v_0$ 时,

$$\lambda_z = 212 \frac{\sqrt{U_c} + \sqrt{U_a}}{2B_0} \cdot \frac{\sqrt{v_0^2 - v_{\perp}^2}}{v_0^2} \quad (4)$$

从(2)–(4)式可以看出, 电子进入互作用区后, 电子在一个迴旋周期内沿 Z 轴方向所通过的距离(迴旋波长)与磁场压缩区的几何尺寸和特性无关, 因为它们对进入均匀磁场区的电子注的纵向速度没有影响. 迴旋波长与纵向速度成正比, 纵向速度越大它受腔体电压的影响也越大.

径规通道径向高度 D 是根据不同磁压缩比下电子的导引中心的位置确定的. 目前大多数磁控注入枪的磁压缩比为 4–8, 所以通道的径向高度

$$D = \left(\sqrt{\frac{1}{\alpha_1}} - \sqrt{\frac{1}{\alpha_2}} \right) R_K + 2r_{L\max}, \quad (5)$$

其中 α_1 和 α_2 分别为最小和最大磁压缩比, R_K 为阴极半径, $r_{L\max}$ 为磁压缩比为 α_2 时电子的拉莫尔半径.

五、速度零散的测量和实验结果的讨论

1. 为了调整磁场轴线和电子注中心的相对位置(尽可能使磁场的轴线与电子注中心重合), 以免由于系统对中不好使部分电子被径规截获. 所以, 应先在腔体上加较低的电压, 使收集极各瓣均可接收到电流, 并使

$$\frac{I_1}{y_1} = \frac{I_2}{y_2} = \dots = \frac{I_{10}}{y_{10}}, \quad (6)$$

其中 y_1, y_2, \dots, y_{10} 为径规沿圆周方向的宽度, 其大小是顺序递增.

2. 增高腔体电压或增大磁压缩比, 使 v_{\perp} 增大, 直到 $I_1 \rightarrow 0$ (即 $2r_L = y_1$) 为止, 记录下收集极各瓣的电流, 各瓣的电流将依次相差

$$\Delta I_n = I_n - I_{n-1}, (n = 1, 2, \dots, 10). \quad (7)$$

3. 根据测量的 ΔI_n 和对应的 r_L 作密度-速度 ($\Delta I_n - r_L$) 分布曲线如图 10 所示. 然后根据 ΔI_{\max} 求出电子的拉莫尔半径的中心值 r_{L0} .

为了便于讨论, 定义如下参量.

(1) 冷电子注电流

$$I_0 = \Delta I_{\max} \cdot 80\%. \quad (8)$$

(2) 优劣系数

$$D_0 = I_0 \cdot \Delta y / \sum_{n=1}^{10} I_n \cdot y_n, \quad (9)$$

式中 Δy 为 I_0 所对应的宽度. 可以看出, D_0 的物理意义是电子注横向速度中心值附近的

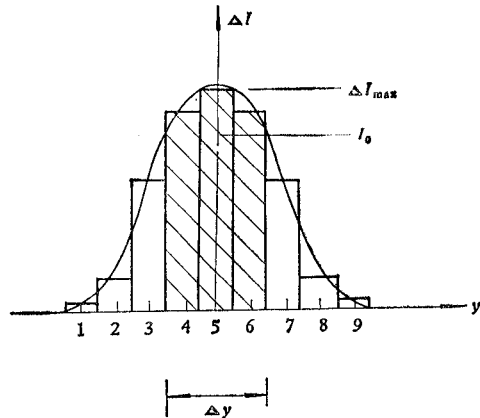


图 10 电子注密度-速度分布曲线
Fig. 10 Density-velocity distribution curve of electron beam

电子所占的百分比。 D_0 越大,表示电子注的质量越好。

(3) 相对密度-速度零散

$$\varepsilon = \frac{\Delta I_n \cdot |y_n - y_{n-1}|}{r_{L0} \cdot \left(\sum_{n=1}^{10} I_n \right)} \quad (10)$$

引用这一参量是因为电子注中不同速度的电子所占的比例是不同的, 仅用速度零散的概念不能全面地表征电子注的性能。

在表 2 与表 3 中,列出了两组实验数据,它们是由同一支电子枪在不同的磁场分布情况下测得的。表中的 $v_{\perp 0}^*$ 是用公式 $v_{\perp 0} = \left(\frac{B_0}{B_K} \right)^{3/2} \cdot \frac{E_k}{B_0}$ 求得的,其数值比实验值大是因为公式推导时,未考虑空间电荷效应,把电子注视为单能的缘故。由表 2 与表 3 可以看出,对于均匀磁场(表 2), 电子的横向速度 v_{\perp} 随电压线性增大,速度零散比较小。这与用荧光屏法所观察到的结果是一致的。由于磁压缩比选得比较小 ($\alpha = 4.25$), 所以 v_{\perp} 都较小。测量结果与理论计算的单能电子的拉莫尔半径相比,阴极区为均匀磁场时,相对误差一般在 5% 以内,个别数据接近 10%, 这说明实验具有很高的精度。还应指出,我们给出的 $\Delta v_{\perp} = v_{\perp \max} - v_{\perp \min}$ 。如果规定 $\Delta v_{\perp} = |v_{\perp 0} - v_{\perp}|$, 那么速度零散只有原来的

表 2 阴极区为均匀磁场分布

Tab. 2 Cathode in uniform magnetic field

编号	U_a (kV)	U_c (kV)	r_{L0} (mm)	v_{\perp} (10^7 m/s)	v_{\perp}/v_0 (%)	$\Delta v_{\perp}/v_{\perp}$ (%)	$v_{\perp 0}^*$ (10^7 m/s)
1	8.8	4.0	0.52	2.20	39.6		2.30
2	9.6	4.4	0.55	2.42	41.6	13.4	2.53
3	12.0	5.8	0.69	3.03	46.7	20.0	3.33
4	12.8	6.2	0.72	3.16	47.1	12.4	3.56
5	13.6	6.4	0.785	3.45	49.9	10.0	3.68
6	14.4	7.0	0.82	3.60	50.6		4.20

表 3 阴极区为非均匀磁场分布

Tab. 3 Cathode in non-uniform magnetic field

编号	U_a (kV)	U_c (kV)	r_{L0} (mm)	v_{\perp} (10^7 m/s)	v_{\perp}/v_0 (%)	$\Delta v_{\perp}/v_{\perp}$ (%)	$v_{\perp 0}^*$ (10^7 m/s)
30	9.6	4.4	0.558	2.45	42.2		2.53
31	11.2	5.4	0.585	2.57	41.0	44.4	3.10
32	12.6	6.2	0.69	3.03	45.0	29.0	3.56
33	14.4	7.0	0.72	3.16	44.4	27.6	4.02
34	16.0	7.4	0.80	3.50	46.6		4.25

一半左右,相对误差则更小。

本项工作是在吴鸿适教授指导下完成的;俞士萱、樊兴荣、李桐惺、顾茂生等同志参加了研制工作;测量工作是由测试组部分同志协助完成的;在此一并表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- [1] 朱锦林等,三公分迴旋管的实验研究,第一届毫米波亚毫米波学术年会,1981年。
- [2] K. R. Chu.,成都电讯工程学院讲学讲义,1981年。
- [3] 维里安公司,迴旋管产品介绍,1980年。
- [4] Ю. В. Быков, *Радиофизика*, **18** (1975), 1066.
- [5] J. L. Seftor et al., *IEEE Trans. on QE*, **QE-15**(1979), 848.
- [6] K. R. Chu et al., *IEEE Trans. on ED*, **ED-28**(1981), 866.
- [7] L. R. Barnett et al., Sixth Int. Conf. on Infrared and Millimeter Wave, W-1-2, 1981.
- [8] Е. Г. Шустик, *Радиофизика*, **13** (1970), 1800.
- [9] П. Е. Димранг, *Радиофизика*, **15**(1972), 1247.
- [10] Е. Г. Авдошник, *Радиофизика*, **16**(1973), 605.
- [11] И. И. Антаков, *Радиофизика*, **18** (1975), 1196.
- [12] K. W. Arnold et al., ORNL/SUB-33200/1, Hughes, 1980.
- [13] J. M. Baird et al., Sixth Int. Conf. on Infrared and Millimeter Wave, W-2-7, 1981.
- [14] 蔡熙章,迴旋管磁控注入电子枪研究的新进展,电子管技术,1981年,第3—4期,第74页。
- [15] И. В. Алямовский, *Электронные Пучки и Члектронные Пушки*, Москва, 1966.
- [16] 张殿杰等,磁控型电子注分析器,第一届毫米波亚毫米波学术年会,1981年。

EXPERIMENTAL STUDY OF VELOCITY SPREAD IN A CYCLOIDING ELECTRON BEAM

Cai Xizhang

(Beijing Vacuum Electron Device Research Institute)

The effect of velocity spread on the main parameters of gyrotron oscillators is described briefly. Measures to reduce the velocity spread are discussed. A new method of measuring velocity spread of electrons in a cycloiding electron beam is given. By use of a high precision radial-gauge with multi-section collector, the beam transverse velocity distribution can be accurately measured. This method is characterized by the fact that the space charge effect will not interfere with the experimental results, so the beam transverse velocity spread in a gyrotron under actual operating condition can be determined. Thus the method is superior to the "retarding-field method" and "pin-hole-camera method". A special equipment is designed for this measurement.