

文章编号 : 1001-4322(2006)12-2030-05

毫米波行波管电子光学系统的设计*

殷海荣, 宫玉彬, 魏彦玉, 黄民智, 路志刚, 王文祥

(电子科技大学 物理电子学院, 成都 610054)

摘 要 : 利用基于虚边界元法的 VBGUN 程序和基于边界元法的 MOM 程序 ,对一折叠波导毫米波行波管的电子光学系统进行了设计。设计过程中使用计算相关性系数的方法调节参数 ,通过计算敏感性系数以考察加工误差带来的影响。设计过程显示 :低导流系数、小束腰、高压缩比的毫米波电子枪的层流性与电极尺寸相关性很大 ,易受到加工误差的影响 ,聚束系统的设计难点在于轴上峰值磁感应强度要受到漂移管半径的限制 ,这一点可以通过提高工作电压和降低电流来平衡 ,因此它的设计必须与慢波结构的设计同时进行。

关键词 : 行波管 ; 电子枪 ; 电子光学系统 ; 周期永磁聚束系统 ; 虚边界元方法

中图分类号 : TN124 文献标识码 : A

毫米波段行波管慢波结构十分微小 ,电子注通道大小很有限。由于一般慢波结构的平均耦合阻抗随着电子注通道半径的增加而降低 ,这进一步限制了电子注通道的尺寸。在 30 ~ 40 GHz 频段内 ,电子注通道半径一般小于 1 mm ,这要求电子注束腰不得大于 0.5 mm。对于小束腰电子注 ,为了获得更大功率 ,同时兼顾行波管的寿命 ,就应提高电子注压缩比和电流密度^[1-3]。若要减轻行波管的整体质量 ,电子注电压又将受到限制 ,电子枪的导流系数也会相对较高。因此毫米波电子枪电子注密度高 ,面积压缩比高 ,导流系数相对较高 ,电子注束腰和整体外形尺寸小。这些特点给设计增加了难度。周期永磁聚束系统轴上的峰值磁场主要由磁周期和磁环内径决定。相对较大的磁环内径以及短的磁周期限制了轴上峰值磁场 ,而高密度电子注的聚束则需要较高的峰值磁场 ,这一对矛盾在毫米波电子光学聚束系统的设计中十分突出。毫米波电子枪整体尺寸小 ,阴阳极距离近 ,磁场往往要渗透到阴极区域。这一点在进行电子枪设计时必须考虑到。在利用模拟软件进行设计的初期 ,需要反复调整电极形状、磁材料和磁极形状以达到要求。本文利用自行设计的电子枪程序 VBGUN 和磁场程序 MOM ,对一个主频 35 GHz 折叠波导行波管的电子光学系统进行了设计。

1 虚边界元法、VBGUN 程序和 MOM 程序

1.1 虚边界元法和 VBGUN 程序

虚边界元法^[4,5]能够避免无源区域的两类奇异积分 ,它在实边界(图 1 中 Γ_1)之外设虚边界(图 1 中 Γ_2) ,并将实边界视为形式边界 ,将虚边界当成实边界并在虚实边界上剖分相同单元数。假定虚边界上分布有面电荷 ,利用实边界上已知的电位和空间电荷电流密度算出虚边界上各个单元的面电荷值 ,然后利用格林函数就可以很快算出整个空间的电位分布。计算时 ,虚边界形状尽量与实边界保持一致 ,当实边界存在尖锐折角时 ,对虚边界相应位置应进行圆滑处理。虚实边界的距离范围为

$$\partial U_i / \partial n - \partial U'_i / \partial n' < d_i < -3U_i \partial n / \partial U_i \quad (1)$$

式中 d_i 为相应第 i 个虚实边界单元的最小距离 ; U 和 U' 分别为实虚边界单元电位 ; n 和 n' 为实虚边界相应单元的外法线方向。VBGUN 的电子发射模型为 3/2 次方定律的空间电荷限制流发射 ,考虑热初速度时 ,电子速度分布满足高斯分布 ,电子轨迹的计算使用四阶龙格-库塔法对运动方程进行求解。

1.2 MOM 程序

MOM 假定磁材料是均匀的 ,且软磁材料均为纯铁 ,其饱和磁感应强度通过输入参数给出。将软磁和永磁材料都剖分为众多单元 ,每单元的磁场分布由所假定的分布于单元表面的电流决定。当整体磁材料剩磁已知

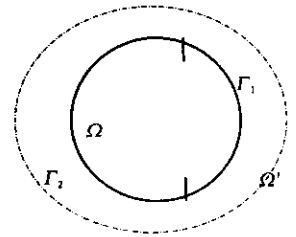


Fig. 1 Real , virtual boundary and dummy boundary

图 1 实虚边界和形式边界

* 收稿日期 2006-05-22 ; 修订日期 2006-10-11
基金项目 国家自然科学基金资助课题(60532010) 教育部新世纪优秀人才支持计划资助课题
作者简介 殷海荣(1974—) ,男 ,博士生 ,从事毫米波放大器的研究 ; yhr555@sohu.com。

时,单元的矢量磁化强度 M 由计算得到的永磁体中心的磁感应强度所决定。单元表面的电流密度矢量为

$$J = \nabla \times M \tag{2}$$

假定存在一无散矢量 A ,使得磁感应强度 $B = \nabla \times A$ 。当面电流密度已知后,有

$$A = \frac{\mu_0 I}{\pi} \left\{ \frac{1}{2r} \sqrt{(z - z_0)^2 + (r + r_0)^2} [K(p) - E(p)] - \frac{1}{\sqrt{(z - z_0)^2 + (r + r_0)^2}} K(p) \right\} \tag{3}$$

式中 $K(x)$ 和 $E(x)$ 分别为第一、二类椭圆积分 I 为面电流 μ_0 为磁感应常数 z_0, r_0 为源点坐标 z, r 为场点坐标,因子 $p = 2 \sqrt{rr_0} / \sqrt{(r + r_0)^2 + (z - z_0)^2}$ 。这样,整个空间的磁感应强度就被唯一确定。该算法使用了磁感应定律,不像有限元法和有限差分法那样,要对整个区域进行迭代计算^[6],因此计算速度快,适合工程设计。

2 设计前的准备和基本参数的确定

拟设计的折叠波导行波管的目标中心工作频率为 35 GHz,带宽 15% 通过慢波结构设计,得到其工作电压为 8.5 ~ 10.5 kV,拟使用的电流为 150 mA,阴极发射电流密度不超过 3 A/cm²,电子注通道半径为 0.3 mm,束腰半径要求在 0.2 mm 以内。为此选择最低电压 8.5 kV 作为初步设计工作电压,束腰半径为 0.15 mm,计算得到阴极截半径为 1.25 mm,面积压缩比为 64,导流系数 0.191 41 $\mu\text{A}/\text{V}^{3/2}$ 。由于电子通道为圆形,使用 Pierce 电子枪,首先进行解析设计以确定电子枪电极和磁系统的基本参数。在考虑热初速度的情况下,由 Pierce 曲线得到阴阳极曲率半径比,再通过朗缪尔函数确定阴极半锥角,从而算出阴阳极半径,确定阴阳极距离,最后对阴极半锥角进行适当加大以保证层流性。最终得到的设计数据如表 1 所示,其中 θ 为阴极半锥角 φ 为阳极半锥角 R_c 为阴极曲率半径 R_a 为阳极曲率半径 D_{ca} 为阴阳极距离。

表 1 电子枪解析设计结果

Table 1 Design results of the electron gun

$\cos\theta$	R_c/mm	R_a/mm	D_{ca}/mm	$\cos\varphi$
0.983 4	6.891	2.932	3.926	0.102 3

表 2 永磁聚束系统的解析设计结果

Table 2 Design results of the permanent magnetic focus system

P_m/mm	B_B/T	B_m/T	D_h/mm	L_r/mm
6.1	0.222	0.308	0.2	0.2

设计永磁聚束系统时,首先利用电子枪导流系数计算电子注的等离子体波长,本例取等离子体波长与磁周期的比为 2。然后利用导流系统和阳极电压以及注腰半径确定布里渊磁场,从理论上说,聚束场可以取大于布里渊值的任一值,本例折衷考虑波动与聚束效果,取布里渊流的 $0.8 \times \sqrt{3}$ 倍为目标聚束磁场峰值。再利用文献[6]的方法初步确定磁环和极靴尺寸。最后得到的永磁聚束系统的解析设计结果如表 2 所示。其中 P_m 为磁场的周期 B_B 为布里渊磁感应强度 B_m 为峰值磁感应强度 D_h 为极靴头间距 L_r 为磁环厚度。

3 电子枪的初步设计

初步设计时不考虑渗透磁场的作用,得到电子枪电极的具体尺寸和形状如图 2 所示。对电极各个尺寸进行微调,目的是得到符合要求的、层流性良好的和足够射程的电子注。在调整过程中,记录下每一次调整的尺寸和计算结果,对各个电极尺寸进行了相关性分析。相关性系数为

$$\xi_{(S,P)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(P_{a_i} - P_{b_i})(S_{a_i} + S_{b_i})}{(P_{a_i} + P_{b_i})(S_{a_i} - S_{b_i})} \tag{4}$$

式中 $\xi_{(S,P)}$ 为因量 S 与果量 P 的相关性系数; S_a, S_b 分别为变化后和变化前的因量; P_a, P_b 分别为变化后和变化前的果量; n 为总计算次数。计算得到电子枪的主要相关性系数如表 3 所示。果量 p_{uv} 为导流系数 Z_m 为束腰位置 R_m 为束腰半径 N_{layer} 为计算 100 条轨迹时交叉轨迹的条数。可以看到,阴阳极距离与这 4 个果量的相关性都很强。因此,调节阴阳极距离只在解析设计后的第一步进行,调整它可以很快将导流系数调整在所需要的值。微调的任务是在保证不改变导流系数和束腰大小的情况下,将层流性调整到符合设计要求。

由表 3 可以看到 D_2, D_3 和 R_3 与层流性的相关性系数相对很大,因此首先调整这 3 个因量的值,使层流性达到最好。但这又必然导致导流系数发生改变,需要调整其它参量予以补偿。其它因量中,由于 R_2 与导流系数的相关性相对较高,因此这时通过调节 R_2 使导流系数达到需要值,所产生的层流性变化由调节相关性更低的其它参数予以补偿。基于这一思路反复调节,直至达到所需要的理想效果。

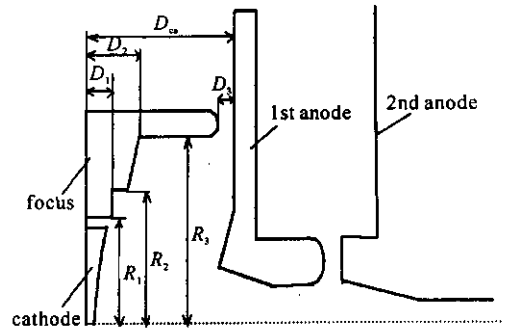


Fig. 2 Preparatory design of the electron gun

图 2 初步设计得到的电子枪形状

表 3 电子枪的相关性系数
Table 3 Relativity coefficient of of the electron gun

P	ξ with different S						
	D_1	R_1	R_2	R_3	D_2	D_{ca}	D_3
p_{uv}	-0.17	0.19	1.02	2.11	-0.2	-2.62	1.89
Z_m	0.087	-0.99	-0.075	1.37	-0.5	1.7	1.27
R_m	-0.67	1.33	5	6.88	-4.3	-5.26	8.75
N_{layer}	2	-0.5	-4	-16.5	11	10.7	22

由于实际加工必然产生加工误差,因此需要对所设计的枪进行敏感性分析。由相关性系数可以定性地看出所设计电子枪的敏感参量。但是敏感性系数是根据参数变化百分比来定义的,而加工误差是在某一固定范围内变化的,为了确切地得到敏感性关系,重新定义敏感性系数

$$\xi_{(SP)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{2(P_{a_i} - P_{b_i})}{(P_{a_i} + P_{b_i})(S_{a_i} - S_{b_i})} \delta \right| \quad (5)$$

式中 δ 为平均加工误差,本例取 0.03 mm,其余参数的定义与式(4)相同。根据计算结果,得到的各敏感性系数如表 4 所示。可以看到,导流系数和束腰位置对各个因量加工误差的敏感性较低,加工误差主要影响束腰半径和层流性。 D_1 、 D_2 、 D_3 和 R_3 的加工误差对层流性的影响尤其明显。其中 D_1 因为与阴极发射表面距离近,它的变化极大地影响阴极表面附近电位的均匀性,因此发射电流密度的均匀性受到很大影响,从而影响到层流性。 D_1 的这一影响可以通过尺寸缩短予以削弱,当 D_1 短于阴极弧半径时,层流性对加工误差的敏感性系数可以降到 5% 以下。因此在设计时应当尽量使 D_1 不超过阴极弧半径的长度。

表 4 电子枪的敏感性系数

Table 4 Sensitivity coefficient of the electron gun

P	ζ with different S						
	D_1	R_1	R_2	R_3	D_2	D_{ca}	D_3
p_{uv}	1.7%	0.38%	1.72%	0.75%	1.37%	1.82%	2.01%
Z_m	0.87%	1.88%	0.125%	1.48%	2.24%	1.48%	2.33%
R_m	6.7%	2.6%	8.89%	7.6%	1.55%	5.6%	7.5%
N_{layer}	20%	2.2%	6.67%	20%	17.2%	9.3%	27.3%

D_2 、 D_3 和 R_3 的改变将引起整个枪区场分布的改变,从而破坏阴极表面附近电位分布的均匀性,引起层流性改变。特别对于毫米波电子枪,枪区空间较小,电场较高, D_2 和 R_3 微小的改变将引起电场分布的较大改变,表现出很高的敏感性系数。目前,这两个因素的影响在一般的电子枪设计中无法避免,只能依靠提高加工精度来控制。但是,文献[5]精心设计了一种阴阳极距离可调的特殊结构,将 D_2 和 R_3 引起的变化通过调节阴阳极距离予以抵消。这种方法的好处在于它不会过多地改变层流性和其它参量,而缺点是加工难度较大。除此之外,可以通过在聚束极上加一可调电压来保证导流系数和调节层流性。为了分析这一方法,图 3 列出了聚束极电压改变正负 50 V 时各个果量的变化量。

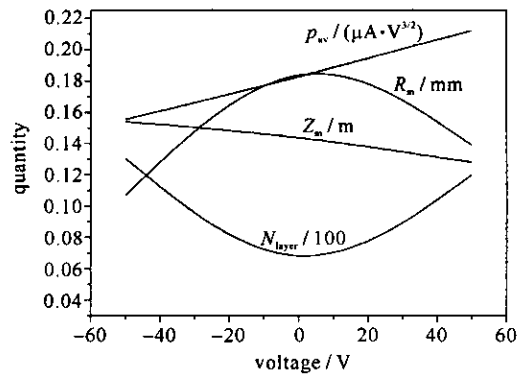


Fig. 3 Effect of focus electrode voltage

图 3 聚束极电压变化的影响

聚束极电压变化时,导流系数和束腰位置的变化都是单向的,而层流性和束腰半径的变化则是二次的。可见,对于这类毫米波电子枪,虽然可以利用聚束极电压的变化来保证导流系数和获得所需要的束腰大小,但却是以牺牲层流性为代价的。

4 磁聚束系统的初步设计

对于周期永磁聚束系统,由于边缘效应的存在,磁环第一和第二以及最末 2 个周期的工作状态与其它磁环有很大的区别,而其它磁环的工作状态则相对统一。因此,设计时可以只设计最初和最末 2~4 个周期以减小计算量。当设计场用到漂移管聚束时,可以将中间稳定分布的场进行周期延展,以适应漂移管的长度。本例只

设计最初 3 个周期和最末 2 个周期的磁场。

本例中,慢波结构的折合半径为 3.25 mm,屏蔽筒厚度取 0.5 mm,利用前面的解析设计结果,整个磁聚束系数的各个参量得以确定。首先不考虑磁环的边缘效应,即将各个磁环和极靴设为同样大小。计算时,通过调整磁材料的形状参数,以期获得最大的轴上峰值磁场。同样利用上述的相关性分析方法进行分析,这里的果量相对简单,只有轴上峰值磁场一个,所得到的相关性系数列在表 5 中。

表 5 中 R_{ci} 为磁环内径, R_{co} 为磁环外径, T_h 为极靴头高度。磁聚束系统的相关性系数与结构本身的相关性非常大,它不能用以与其它结构进行横向比较。而且,相关性系数还与因量取点密度分布有很大关系,当因量取值主要分布在小量时,呈正相关的相关性参数(相关性系数为正值)会偏小,而呈负相关的相关性参数(相关性系数为负值)的绝对值会偏大。本例中,为避免随意性,磁环厚度和极靴头间距在允许的取值范围内均匀取 10 点,磁环内径和极靴头高度在以解析设计值为中心的 ± 1 mm 范围内取 10 点,磁环外径在磁环内径(除去磁环内径这一个点)至 10 倍磁环厚度的高度范围内取 10 点,其点的分布密度和半径的倒数满足线性条件。

由表 5 可以看到,轴上峰值磁场与周期和磁环内径以及极靴头高度紧密相关,而与其它因量相关性不大。虽然可以通过增加磁环高度的办法来增加峰值磁场,但是增加量十分有限。本例中,解析设计结构的稳定磁工作周期的轴上峰值磁感应强度仅有 0.189 T,这个值低于布里渊值,因此远远不能满足需要。造成这个结果的原因主要是慢波结构半径限制了磁环内径的最小取值。由于慢波结构半径无法减得更小,因此只能依靠增加磁周期长度来增加磁场值,这一方法增大了电子注波动。对于本例,要达到 0.385 T 的轴上峰值磁感应强度,磁周期必须大于 16 mm,而电子注不能接受这么大的磁周期,因此需要重新考虑设计方案。

等离子体波长和布里渊磁场值分别为

$$\lambda_p \approx 35.92(R_m / \sqrt{p_{uv}}), \quad B_B \approx 8.2(\sqrt{p_{uv}U}/R_m) \quad (6)$$

式中: U 为阳极电压。可以看到,增大束腰半径会使等离子体波长增大和布里渊磁场减小,这一点十分有利于设计。另外,升高阳极电压和减小电流也会使等离子体波长增大和布里渊磁场减小。为了保证输出功率不变,可以同时升高阳极电压和减小电流。通过权衡,将束腰增大为 0.35 mm,工作电压升高为 9.5 kV,与之相适应的电流为 0.134 A。这样,布里渊值变为 0.152 T,目标轴上峰值磁感应强度为 0.211 T,磁周期 9.4 mm。再次通过上述设计步骤,验证峰值磁感应强度。然后,适当调整第一和第二以及最末 2 个磁环和极靴的形状以使磁场分布基本均匀。

5 电子光学系统的整体设计

由于电子枪长度小,磁场不容易被完全屏蔽而不渗透到阴极。另外,也并不需要将阴极完全屏蔽,因为要得到层流性良好的相互作用电子注,电子注在第一个磁场峰值处必须具有适当的角频率^[5],而浸没流使电子角频率有了更大的调节余地。浸没流电子注的层注性不但与电子在第一磁场峰值处的角频率有关,还与这一点的位置有关。第一磁场峰值一般加在束腰附近,然而加入渗透磁场后束腰位置要发生新的变化,因此只有通过计算反复进行调整。电子角频率与渗透场的大小和分布有关,这也只能依靠观察计算结果来进行调整。当进行合理调整后,加入渗透磁场的电子注层流性会优于未加磁场的层流性。

图 4 为电子枪区的束流轨迹,计算轨迹为 100 条,横坐标 Z 为电子束流动方向,纵坐标 R 为电子光学系统的径向尺寸。阴极发射总电流为 0.137 A,流通率为 100%。阴极发射电流密度的最大差异是平均发射电流密度的 26%。这个值对于非毫米波电子枪来说较大,但是本设计中的较优值。对于压缩比较高和束腰较小的电子枪,中间区域的发射电流密度较小是一个有利因素,它使得经会聚后近轴区域的电流密度不致过大,便于磁聚束系统工作。束腰半径为 0.33 mm,束腰位于 Z 轴 25.2 mm 处。设计结果达到了预期目的。

图 5 显示了相互作用区和收集极区的电子轨迹,总电子轨迹数为 801 条。收集极不包含降压电路。相互作用区内,电子注波动最大半径 0.382 mm,最小半径 0.341 mm,平均半径 0.362 mm,波动半径 0.041 mm,波动半径是平均半径的 11.3%,本例电子光学系统的层流性良好。在经过加工之后,加工误差会对各个设计结果参量产生一定的影响,但这些影响可以通过调节第一阳极电压予以部分补偿。

表 5 磁聚束系统的相关性系数

Table 5 Relativity coefficient of magnetic focus system	
S	ξ
L_r	0.044
R_{ci}	-1.03
R_{co}	0.16
D_h	0.01
T_h	-1.07
P_m	1.58

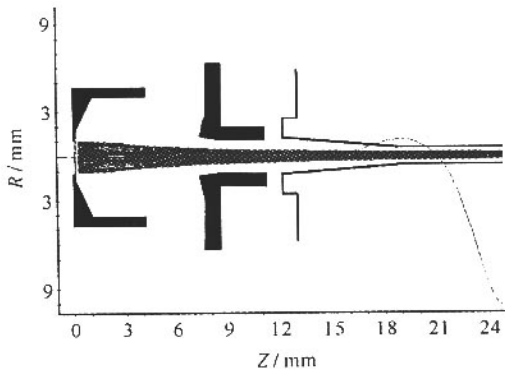


Fig. 4 Trace of the e-beam in the gun

图 4 电子枪中的电子轨迹

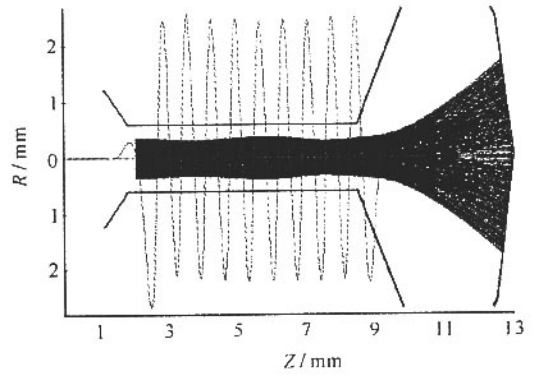


Fig. 5 Trace of the e-beam in the interaction tube and the collector

图 5 互作用区和收集极区的电子轨迹

6 结 论

本文利用电子枪程序 VBGUN 和磁场程序 MOM 对一毫米波折叠波导行波管电子枪进行了全程设计。设计过程中,通过定义相关性系数和敏感性系数避免参数调整的盲目性。设计表明,峰值磁场有可能成为毫米波行波管设计的一个制约因素,因此慢波设计过程必须与电子光学系统的设计同步,以使二者相互适应和协调,避免工作的重复。由于设计过程要进行反复调整,因此计算速度快的软件在工程设计中显得十分方便。最终设计的电子枪阴极发射总电流为 0.137 A,流通率为 100%,阴极发射电流密度的最大差异是平均发射电流密度的 26%,束腰半径为 0.33 mm,束腰位于 Z 轴 25.2 mm 位置处。互作用区内,电子注波动最大半径 0.382 mm,最小半径 0.341 mm,平均半径 0.362 mm,波动半径 0.041 mm,波动半径是平均半径的 11.3%,电子光学系统的层流性良好,设计达到了预期目的。

参考文献:

- [1] Gong Y B, Wang W X, Liu S G, et al. Small signal theory of a ridge-loaded ring-plane traveling wave tube[J]. *Int J of Electronics*, 2002, **91**(1): 202-205.
- [2] Sharma R K, Srivastava V. Low convergent confined-flow Pierce gun for a space TWT[J]. *Int J Electronics*, 2004, **91**(2): 97-105.
- [3] Whaley D R, Armstrong C M, Gannon B, et al. Sixty-percent-efficient miniature C-band vacuum power booster for the microwave power modul[J]. *IEEE Trans on Plasma Science*, 1998, **26**(7): 912-921.
- [4] 殷海荣, 宫玉彬, 魏彦玉, 等. 强流电子枪数值分析的虚边界元方法[C]//中国电子学会真空电子学分会文集. 2005: 353-356. (Ying H R, Gong Y B, Wei Y Y, et al. The method of virtual boundary element for power electron gun//Proc of Vacuum Electronics Branch of Chinese Electronics Academy. 2005: 353-356)
- [5] Burgess G J, Mahajerin E A. A comparison of the boundary element and superposition methods[J]. *Comput and Struct*, 1984, **19**(6): 597.
- [6] 储璇雯, 谢志行. 电子磁场及电离子光学系统数值分析[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1991: 157-256. (Chu X W, Xie Z X. Numerical analysis of electromagnetic field, electron and ions. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1991: 157-256)

Design of electron optics system of electron gun for millimeter-wave TWT

YIN Hai-rong, GONG Yu-bin, WEI Yan-yu, HUANG Min-zhi, LU Zhi-gang, WANG Wen-xiang

(School of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: An electron gun and a magnetic-focus system for folded waveguide millimeter-wave traveling wave tube (TWT) were designed by electron gun code (VBGUN) based on visual boundary element method and magnetic field code (MOM) based on boundary element method. A definition of relative coefficient was used to optimize parameters, and a sensitive coefficient was defined to review the effect of fabrication-errors. The design results show that this kind of gun is easily affected both by the shape of the electrodes and the fabrication-errors. The maximum magnetic field on axis is limited by the dimension of the slow wave structure. This is the main problem for the focus system design of the folded waveguide TWT, which can be solved by augmenting the working voltage or decreasing the beam current. Consequently the electron optics system design must be synchronized with the slow wave structure.

Key words: Traveling wave tube; Electron gun; Electron optics system; Period permanent magnet focus system; Visual boundary element method