

⑦ 295-298

毫米波行波管电子枪设计

蔡绍伦 樊孝年

(北京真空电子技术研究所, 北京, 100016)

TN124

摘要 分析了毫米波行波管电子枪设计与厘米波行波管电子枪设计方法的不同特点, 并提出了新的设计方法。

关键词 毫米波, 行波管, 电子枪.

设计

引言

毫米波技术是 21 世纪最具发展前途的技术之一。毫米波行波管在未来的通信产业、生物工程以及雷达技术等领域都将发挥重要作用。

毫米波行波管的电子枪设计技术是毫米波行波管设计中的关键技术之一。毫米波行波管电子枪多采用低导流系数、高压缩比的电子枪。在这种电子枪的设计中出现了两个明显的变化, 即由原先在厘米波行波管电子枪设计中阳孔效应影响非常明显变得不很明显, 而在厘米波行波管中可以忽略不计的热初速效应在毫米波行波管电子枪设计中变得非常明显; 另外过渡区的设计中出现了新的变化。

根据上述变化我们提出了毫米波行波管电子枪的设计方法及其相应的计算公式, 这些方法和公式可为毫米波行波管电子枪的快速准确的设计提供帮助。

1 毫米波行波管电子枪的设计方法

毫米波行波管电子枪与厘米波行波管电子枪一样, 整个电子枪是由阴极, 阳极和聚焦极组成。下面根据毫米波电子枪的特点分述它们的设计方法。

1.1 阴极

阴极设计的关键数据是阴极直径和阴极面的收敛角 θ 。阴极直径的大小主要取决于阴极的发射电流密度 J_k 的取值范围和电子注的面积压缩比的取值范围, 在正常情况下, 阴极的直流电流发射密度 $J_k \leq 4A/cm^2$ 。

阴极收敛角 θ 的取值可按下式计算:

$$P = 14.67 \times 10^{-6} \times (1 - \cos\theta)/a^2, \quad (1)$$

式(1)中 P 为电子枪的导流系数 (μp), a 为 Langmuir 函数。式(1)表明, 对于 1 个导流系数 P 值, 可以由许多 θ 、 a 值组合而得, 但是欲获得电子注的良好层流性, 需合适的注腰大小以及足够远的腰点射程, 实际上毫米波行波管电子枪阴极收敛有一个最佳的取值, 当电子枪的导流系数 P 在 $0.01 \sim 0.10 \mu p$ 的范围内时, 电子枪导流系数 P 与收敛角之间可按如下公式

计算:

$$\theta(^{\circ}) = 107 \times (P - 0.01) + 3.3. \quad (2)$$

需要指出的是:对于某些特定情况,其电子枪的收敛角 θ 也可以偏离式(2)的计算值,当出现这种情况时,可适当的调整计算公式,来适应这种变化.

1.2 阳极

阳极的设计主要涉及阳孔大小,阳极头的位置以及阳极头的厚度.

阳极孔的大小在厘米波行波管中对电子注的参数影响较大,在毫米波行波管中阳孔大小如果开成同厘米波行波管相似的孔径,则这种孔径的阳孔效应可以忽略不计,但如果开得很大,比如阳孔孔径比阴极直径还大,这种阳孔的影响还是要考虑的,这在计算中要加以处理.

在毫米波行波管电子枪的阳孔设计中还要涉及到电子枪与磁场之间的过渡区选型问题,在厘米波行波管电子枪中基本上过渡区是正弦场型注入电子注,但在毫米波行波管电子枪的过渡区设计中,当电子注压缩比不是很高时应考虑余弦场注入电子注类型.

阳极头离阴极的相对距离可以按式(1)求得,即当电子枪的导流系数 P 一定,电子枪的收敛角按式(2)求得时,显然由Langmuir函数即可得出相应 α 值,而且 R_k/R_a 的值亦可随之求得.则阳极头离阴极中心的距离 $S_{kA} = R_k - R_a$ 也求得.

当阳极头为圆头型时,通常情况下圆头的半径约为1mm.

1.3 聚焦极

一般聚焦极的设计多用电解槽来确定,随着CAD技术的发展,当阴极、阳极形状与尺寸有基本数据之后,便可预设一聚焦极形状和尺寸,随后将边界数据送入计算机进行计算,如果计算结果使得电子注边界电位满足Langmuir分布,而且导流系数 P 以及电子注特性均符合预想要求,则设计成功,否则进行调整后再计算,直到满意为止.

2 电子注基本参数计算

分析了各个电极尺寸与形状的设计之后,对于一个导流系数 P 一定、电子注最小半径 R_{min} 要求一定、电子注最小截面离阳口的射程 Z_{min} 要求一定的电子枪,可以运用计算公式来确定主要的电子枪结构尺寸与电子注腰点的数据关系.

电子注最小截面半径 r_{min} 与阴极半径 r_k 之比可以表示为:

$$\frac{r_{min}}{r_k} = \frac{1}{(R_k/R_a)} \times \frac{1}{\cos\theta} \times e - R'_0. \quad (3)$$

式(3)中

$$R'_0 = 4.5(-\alpha)^2 \times n^2(R_k/R_a) \times \cos^2\theta(\beta^2/\delta^2), \quad (4)$$

式(3)中 R_k 为阴极曲率半径, R_a 为阳极曲率半径, θ 为阴极收敛角.式(4)中 α 为Langmuir函数值, $n(R_k/R_a)$ 为阳孔折射系数, β 为阴极实际收敛角 θ 与式(1)设定的收敛角 θ' 之间的正弦比值($\beta = \sin\theta/\sin\theta'$), δ 为毫米波行波管电子枪阳孔效应修正系数, $\delta = 1 + r_a/S_{kA}$, r_a 为阳孔半径.

式(3)计算的电子注最小半径 r_{\min} 与阴极半径 r_k 的比值是没考虑热初速效应的结果,但由于毫米波行波管电子枪中的热初速效应非常大,为此必须计算热速效应对电子注最小半径造成的增量值 σ ,为此可以表示为:

$$\frac{\sigma}{r_k} = 6.57 \times 10^{-3} \times \sqrt{\frac{T}{U_a}} \times \tau'(R_k/R_a) \times \frac{1}{\sin\theta}. \quad (5)$$

式(5)中 T 为阴极温度(K), U_a 为电子枪的阳极电压(V), τ' 为球型电子枪中热初速效应对应的增量函数^[1].

由式(2)和式(3)可求得考虑热初速效应之后的毫米波行波管最终电子注的最小半径 r'_{\min} 与阴极半径 r_k 之比为:

$$r'_{\min}/r_k = (r_{\min}/r_k) + (\sigma/r_k). \quad (6)$$

由式(6)可以求出电子注的面积压缩比 M^2 为

$$M^2 = (r_k/r'_{\min})^2. \quad (7)$$

电子注最小半径 r_{\min} 离开阳极口的距离 Z_{\min} 与阴极曲率半径 R_k 之比可以表示为:

$$\frac{Z_{\min}}{R_k} = \frac{3}{\sqrt{2}} \times \frac{[(-\alpha)^2]^{1/2}}{(R_k/R_a)} \times \frac{2}{\cos\theta} \times e^{-R'_0{}^2} \int_0^{R'_0{}^2} e^{u^2} du, \quad (8)$$

令
$$f(R'_0) = \int_0^{R'_0{}^2} e^{u^2} du,$$

通过计算机数值求解可以获得 $f(R'_0) \sim R'_0$ 的关系值(见图 1).

我们以美国休斯公司的 943H 8mm 行波管的电子枪为例^[1],用文中给出的结构尺寸来计算该电子枪的电子注的最小半径大小 r_{\min} 和最小半径离开阳口的距离 Z_{\min} 并与电子计算机计算结果作一对比.

943H 的已知数据有:电子枪导流系数 $P=0.0313\mu\text{p}$,电子枪的阳极电压 $U_a=21000\text{V}$,收敛角 $\theta=5.68^\circ$,阴极半径 $r_k=1.74\text{mm}$,阳极孔半径 $r_a=2.35\text{mm}$,阴极曲率半径 $R_k=17.58\text{mm}$.

由式(1)获得 $\alpha^2=2.35$,由式(2)获得 $\theta'=5.579^\circ$,显然 $\beta=\sin 5.68/\sin 5.58=1.018$, $\delta=1+(2.35/11.78)=1.2$.由 $R_k/R_a=2.92$,查折射系数曲线得 $n=0.57$.将上面的结果代入式(4)得 $R'_0{}^2=2.448$,代入式(3)得 $r_{\min}/r_k=0.03$,当阴极温度取 1250°K 时,并由 $\tau' \sim (R_k/R_a)$ 曲线查得 $\tau'=5.4$,由式(5)得 $\sigma/r_k=0.097$,代入式(6)可得考虑热初速之后的 $r'_{\min}/r_k=0.127$,即 $r'_{\min}=0.221\text{mm}$.

由式(4)得 $R'_0{}^2=2.448$,得 $R'_0=1.565$,查 $f(R'_0) \sim R'_0$ 曲线,得 $f(R'_0)=4.75$.然后代入式(8),得 $Z_{\min}/R_k=0.913$,即 $Z_{\min}=16\text{mm}$.

对 942H 进行计算得(见图 2): $P=0.0329\mu\text{p}$, $r'_{\min}=0.201\text{mm}$, $Z_{\min}=16.0\text{mm}$,且电位分布完全满足 Langmuir 分布,电子注层流性良好.

理论公式计算结果与计算机计算结果对比有很好的-一致性.

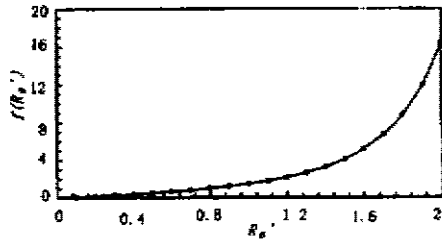


图1 $f(R'_0) \sim R'_0$ 的关系曲线
Fig. 1 Curve of $f(R'_0) \sim R'_0$

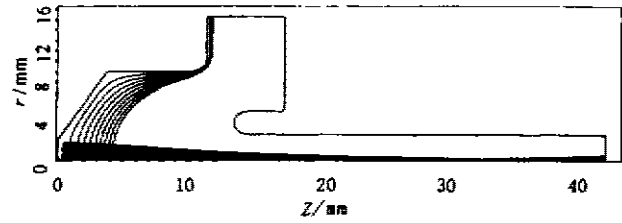


图2 943H 8mm 行波管电子枪的
电子注轨迹及电位分布
Fig. 2 Electron beam trajectories and equipotential
surfaces of the 943H 8mm TWT's electron gun.

3 结语

本文分析了毫米波行波管电子枪的特点,文中提出的设计方法有利于快速、准确地设计毫米波行波管的电子枪的结构尺寸,文中所列的计算方法可用来设计变化不大的派生电子枪,找出最佳的结构尺寸变化因素。

REFERENCES

- 1 Kennedy J B, Tammaru I, Wolcott P S. Study of 42 and 85 GHz coupled cavity traveling-wave tubes for space use. *NASA*, N78-11295, June, 1977: 48~58.

DESIGN OF THE ELECTRON GUN FOR MM-WAVE TWT_S

CAI Shao-Lun FAN Xiao-Nian

(Beijing Vacuum Electronics Research Institute, Beijing 100016, China)

Abstract The difference in the design of the electron gun for MM and CM wave TWT_S was analyzed. A new designing method was presented.

Key words millimeter wave, traveling-wave tubes, electron gun.