

毫米波带状注电子枪的设计方法

唐先锋, 段兆云*, 王战亮, 唐涛, 魏彦玉, 官玉彬

(电子科技大学物理电子学院微波电真空器件国家级重点实验室, 四川成都 610054)

摘要:利用理论分析和仿真模拟相结合的方法对带状电子注的产生进行了系统的研究,并提出了一种带状注电子枪的设计方法.首先通过理论分析,提出了一种计算带状注电子枪结构参数的迭代算法,即根据注电压、注电流、电子注腰处半厚度、阴极半厚度和阴极宽度,计算出带状注电子枪的阴极柱面半径、阴阳极间距、阳极柱面半径和射程等主要参数;在此基础上,通过仿真模拟,为毫米波真空电子器件设计了一种带状注电子枪.

关键词:带状电子注;带状注电子枪;真空电子器件

中图分类号:TN102, TN103 **文献标识码:**A

The design method of millimeter-wave sheet-beam electron gun

TANG Xian-Feng, DUAN Zhao-Yun*, WANG Zhan-Liang, TANG Tao,
WEI Yan-Yu, GONG Yu-Bin

(National Key Laboratory of Science and Technology on Vacuum Electronics School of Physical Electronics,
University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: Sheet-beam formation has been studied using the combination method of theory analysis and simulation verification. A design theory of the sheet-beam electron gun has been proposed. The beam voltage, the beam current, the half-thickness of beam at the waist position, the half-thickness of the cathode, and the width of the cathode are used to calculate the parameters of the sheet-beam electron gun such as the cathode cylindrical radius, the anode-cathode spacing, the anode cylindrical radius, and the throw. Then through simulation, the sheet-beam electron gun for millimeter-wave vacuum electron devices are set up based on the theoretical results.

Key words: sheet electron beam, sheet-beam electron gun, vacuum electron devices

PACS: 41.75.-i, 41.75.Fr, 41.85.-p, 41.90.+e

引言

近年来,随着军用和民用科技的发展,对高频率、高功率器件的需求越来越迫切,为了在与其他器件如半导体器件的竞争中占据优势,真空电子器件急需向毫米波和太赫兹方向发展.然而,在对“O”型真空电子器件的研究中发现,由于尺寸共渡效应,随着工作频率的增加,高频结构的尺寸将变得越来越小,进而其内部传输的电子注尺寸越来越小,一方面,电子注越细小使得空间电荷力越强,导致电子注的聚焦越困难;另一方面,由于电

流密度不可能无限制的增加,器件的功率容量必然受到限制.因此,圆形注“O”型真空电子器件向高频率方向发展时,其应用前景受到了极大的限制.为了使真空电子器件更好地应用在毫米波以及太赫兹领域,带状电子注受到了极大的关注.带状电子注是指横截面长宽比较大的电子注(一般在10:1以上),相对于圆形电子注而言,带状电子注在一个维度上保持与工作频率相匹配的尺寸,而在另一个维度上得到了很大的扩展,因此它具有更大的相互作用区域,在相同的阴极发射电流密度下可以传输更大的电流,进而可以大幅度提高

收稿日期:2013-10-15,修回日期:2014-10-02

Received date: 2013-10-15, revised date: 2014-10-02

基金项目:国家自然科学基金(61471091, 61125103);中央高校基本科研业务费专项资金(ZYGX2010X010)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China(61471091, 61125103);Fundamental Research Funds for the Central Universities of Ministry of Education of China(ZYGX2010X010)

作者简介(Biography):唐先锋(1988-),男,四川安岳人,博士研究生,主要研究领域为带状注真空电子器件、太赫兹辐射源. E-mail: txf_2012@163.com

* 通讯作者(Corresponding author):E-mail: zhyduan@uestc.edu.cn

器件的功率,并且具有较低的空间电荷效应^[1-3].正因为如此,带状注真空电子器件的相关研究如带状电子注的产生、带状电子注的稳定传输和带状注真空电子器件的整管研制等已经成为了目前真空电子领域的研究热点.其中,带状电子注的产生正是首先需要解决的关键问题.

1940年,皮尔斯研究发现设计适当形状的聚焦极代替同轴二极管中去掉的部分可以保证电子轨迹沿二极管的半径方向传播,同时提出了可以利用同心球形二极管和同轴圆柱二极管分别设计圆形注电子枪和带状注电子枪^[4].在皮尔斯理论的基础上,1981年,Vaughan提出了计算圆形注电子枪结构参数的迭代综合法^[5],利用该方法可以快速准确地算出圆形注电子枪的主要结构参数,从而使得圆形注电子枪的设计变得简单.然而由于带状电子注传输的不稳定性^[6],其相关的研究长期被搁置,随着周期磁场被证明能够有效地聚焦带状电子注,近年来,带状电子注的产生和稳定传输^[7-8]以及带状注行波管、返波管、速调管和扩展相互作用速调管等方面的研究工作在国内外得到了广泛的开展^[9-13],作为带状注真空电子器件的电子源,带状注电子枪的研究显得尤为重要.然而,目前并没有一套设计毫米波带状注电子枪的理论.因此,本文在皮尔斯理论的基础上提出了带状注电子枪的结构参数的一套理论计算方法,并通过三维电磁软件 CST^[14]的仿真模拟,为毫米波真空电子器件如行波管、返波管等设计了带状注电子枪.

1 带状注电子枪的基本理论

根据电子运动情况的不同,可以将带状注电子枪分为三个区域:区域 I 是指阴极和阳极之间的空间,该区域内电子注在聚焦极的作用下沿着阴极柱面半径方向运动;区域 II 是指阳极孔附近的区域,该区域内电子注在阳极孔透镜的作用下发散;区域 III 是指从阳极孔后面直到电子枪出口,即阳极通道内的空间,该区域内电子注在自身空间电荷力的作用下发散.带状注电子枪的三个区域示意图如图 1 所示,下面分别对带状电子注在三个区域的不同情况进行理论分析.

1.1 同轴圆柱二极管区域的理论分析

在外半径为 R_c ,内半径为 R_a ,长为 l 的同轴圆柱二极管中,其外圆柱面为阴极,电位为 0,内圆柱为阳极,电位为 U_a ,电子将沿圆柱的半径做直线运动.设圆柱二极管的总电流为 I_l ,在圆柱坐标系下,

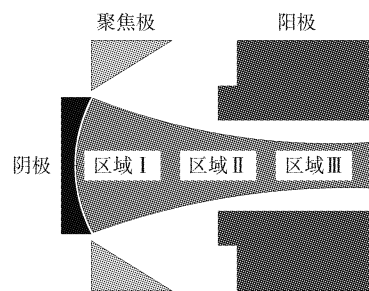


图1 带状注电子枪的示意图
Fig. 1 The overview of the sheet-beam electron gun

一维空间电位满足如下的泊松方程:

$$\nabla^2 U = \frac{1}{R} \frac{d}{dR} \left(R \frac{dU}{dR} \right) = -\frac{\rho(R)}{\epsilon_0} \quad (1)$$

文献 15 给出了上述泊松方程的解为:

$$I_l = \frac{8\pi\epsilon_0 l \sqrt{2\eta}}{9} \frac{U_a^{\frac{3}{2}}}{R_a [-\beta]^2} \quad (2)$$

其中, ϵ_0 为真空中的介电常数, η 为电子的荷质比, $[-\beta]$ 具有如下的表达式:

$$[-\beta] = \ln \frac{R_c}{R_a} + 0.4 \left(\ln \frac{R_c}{R_a} \right)^2 + 0.09167 \left(\ln \frac{R_c}{R_a} \right)^3 + 0.01424 \left(\ln \frac{R_c}{R_a} \right)^4 + \dots \quad (3)$$

为了设计带状注电子枪,从圆柱二极管的外圆柱面截取中心角为 2θ (角度制) 的弧面作为带状注电子枪的阴极,理论发射电流为:

$$I_{l\theta} = I_l \frac{2\theta}{360} = \frac{8\pi\epsilon_0 l \sqrt{2\eta}}{9} \frac{U_a^{\frac{3}{2}}}{R_a [-\beta]^2} \frac{\theta}{180} \quad (4)$$

1.2 阳极孔区域的理论分析

由于阳极孔是发散透镜,当电子注穿过阳极孔时,电子注会在其作用下发散,阳极孔透镜示意图如图 2 所示.

将阳极孔看成近似的薄透镜,设电子注到达阳极孔之前,其边缘轨迹与轴线的夹角为 θ ;电子注穿

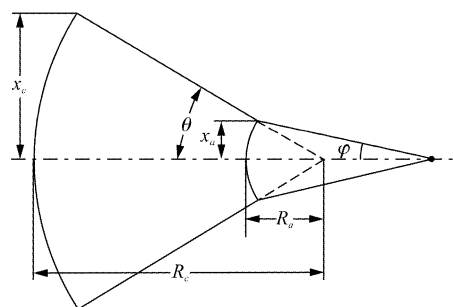


图2 阳极孔的透镜示意图
Fig. 2 The overview of the anode aperture lens

过阳极孔之后,其边缘轨迹与轴线的夹角为 φ .在阳极未开孔的情况下,得到 θ 与 φ 的关系如下^[16]:

$$\sin\varphi = \sin\theta\left(1 - \frac{R_a}{F}\right), \quad (5)$$

上式中 F 为薄透镜的焦距.对于带状电子注的宽边,由于几乎没有被压缩,因此其进入透镜的角度 θ 为0度,根据上式得到 φ 也为0度.对于带状电子注的窄边,由于进入透镜的角度 θ 不为0度,因此需要研究其发散情况的具体表达式.根据薄透镜的理论,可知焦距的表达式如下:

$$F = -\frac{4U_a}{|E_1 - E_2|}, \quad (6)$$

其中, E_1 和 E_2 分别表示阳极孔内部和表面的电场强度.在阳极开孔的情况下, E_1 和 E_2 会发生变化,导致焦距发生变化,因此需要对焦距进行修正,使其满足实际的情形.其修正关系如下:

$$\sin\varphi = \sin\theta\left(1 - \frac{R_a}{F/\Gamma}\right). \quad (7)$$

文献16给出了修正因子 Γ 的值为1.1.将上式展开得到如下表达式:

$$\sin\varphi = \sin\theta\left\{1 - \Gamma\left[\frac{1}{6} + \frac{1}{3(-\beta)}\left(1 + 0.8\left(\ln\frac{R_c}{R_a}\right) + 0.275\left(\ln\frac{R_c}{R_a}\right)^2 + 0.05697\left(\ln\frac{R_c}{R_a}\right)^3\right)\right]\right\}. \quad (8)$$

1.3 阳极通道区域的理论分析

在阳极通道内,电子注在自身空间电荷力的作用下发散.在阳极通道内的带状电子注中,取一段长为 Δz ,宽为 l ,厚度为 $2x$ 的长方体,其示意图如图3所示.由于带状电子注的宽度和长度都远大于厚度,则有 $E_x = E_y = 0$.假定带状电子注具有均匀的空间电荷密度 ρ_0 .

根据高斯定理和运动学关系可以得到边缘电子的轨迹方程^[17]:

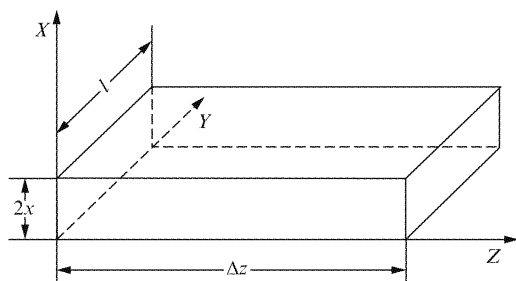


图3 带状电子注轮廓图

Fig. 3 The profile of sheet electron beam

$$\frac{d^2x}{dz^2} = \frac{I}{4\varepsilon_0 l \sqrt{2\eta} U^{\frac{3}{2}}} = \frac{P}{4\varepsilon_0 l \sqrt{2\eta}}, \quad (9)$$

其中, P 表示电子枪的导流系数, $P = I/U^{\frac{3}{2}}$.阳极孔处电子注的半厚度 x_a 即为电子注的初始半厚度;电子注经阳极孔透镜作用后进入阳极通道内,电子注边缘轨迹与轴线的夹角 φ 即为电子注的初始入射角,其满足关系: $\frac{dx}{dz}|_{z=0} = -\tan\varphi$.求解上述方程,得到:

$$x = \frac{P}{4\varepsilon_0 l \sqrt{2\eta}} z^2 + (-\tan\varphi)z + x_a. \quad (10)$$

令 $\frac{dx}{dz} = 0$,得到注腰处到阳极孔处的轴向距离 z_m 和注腰处电子注的半厚度 x_m 的表达式:

$$z_m = \frac{2\varepsilon_0 l \sqrt{2\eta}}{P} \tan\varphi, \quad (11)$$

$$x_m = -\frac{\varepsilon_0 l \sqrt{2\eta}}{P} (\tan\varphi)^2 + x_a. \quad (12)$$

2 带状注电子枪的理论设计

2.1 输入参数

在带状注真空电子器件中,器件的工作电压、功率、频率以及带状电子注的长宽比一般是作为设计指标给出的;同时,受阴极工艺和材料的限制,阴极发射电流密度不能任意选择,因此该值也作为已知量.首先,根据器件的工作电压和功率可以确定电子注的注电流和注电压;其次,根据尺寸共渡效应,器件的频率决定了高频结构的尺寸,进而约束了带状电子注的厚度,同时注腰处电子注厚度即为进入高频结构中的带状电子注的初始厚度;最后,根据阴极发射电流密度、带状电子注的长宽比以及电流可以确定阴极宽度和阴极厚度.

因此,在该设计理论中,为了简化带状注电子枪的设计,将注电压 U 、注电流 I 、电子注注腰处半厚度 x_m 、阴极半厚度 x_c 和阴极宽度 l 这五个量作为带状注电子枪的输入参数.

2.2 迭代算法

在该迭代算法中,选取阳极孔处电子注半厚度 x_a 作为迭代变量,反复迭代得到 x_a 的精确值,进而计算出带状注电子枪的阴极柱面半径 R_c 、阳极柱面半径 R_a 、阴阳极间距 d 、射程 Z_w 等主要结构参数.

首先,由于阳极孔处电子注半厚度 x_a 介于阴极半厚度 x_c 和注腰处半厚度 x_m 两者之间,因此取两者的平均值作为阳极孔处电子注半厚度 x_a 的初始

值,即:

$$x_a = (x_c + x_m)/2 \quad (13)$$

根据图 2 中的几何关系,得到:

$$\frac{R_c}{R_a} = \frac{x_c}{x_a} \quad (14)$$

利用上式可计算出 R_c/R_a 的值. 进一步根据式(3)可求出 $[-\beta]$ 的值.

将式(12)变形,得到:

$$\tan \varphi = \left[\frac{P}{\varepsilon_0 l \sqrt{2\eta}} (x_a - x_m) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

又将式(8)变换,得到:

$$\sin \theta = \sin \varphi \left\{ 1 - \Gamma \left[\frac{1}{6} + \frac{1}{3(-\beta)} \left(1 + 0.8 \left(\ln \frac{R_c}{R_a} \right) + 0.275 \left(\ln \frac{R_c}{R_a} \right)^2 + 0.05697 \left(\ln \frac{R_c}{R_a} \right)^3 \right) \right] \right\}^{-1} \quad (16)$$

将上述求得的 $[-\beta]$ 和 θ 的值代入式(4)中,变形得到:

$$x_{a1} = \frac{8\pi\varepsilon_0 l \sqrt{2\eta}}{9} \frac{U_a^{\frac{3}{2}}}{I_l [-\beta]^2} \frac{\theta}{180} \sin \theta \quad (17)$$

对比式(13)和式(17),根据设定的初始值 x_a , 经过一系列运算得到新的值 x_{a1} , 为了使迭代结果收敛,将 x_{a1} 与 x_a 作如下运算后得到 x_{an} :

$$x_{an} = x_a (x_a/x_{a1})^{\frac{1}{4}} \quad (18)$$

将 x_{an} 作为新的初始值代入式(13),如此反复迭代得到精确的 x_a .

2.3 输出参数

根据求得的 x_a , 利用式(14)、(15)和(16)可求出 θ . 再根据所求得的 x_a 和 θ , 计算阴极柱面半径:

$$R_c = x_c / \sin \theta \quad (19)$$

以及阳极柱面半径:

$$R_a = x_a / \sin \theta \quad (20)$$

进一步得到阴阳极间距:

$$d = R_c - R_a \quad (21)$$

根据式(11)得到带状注电子枪的射程:

$$Z_w = d + \frac{2\varepsilon_0 l \sqrt{2\eta}}{P} \left[\frac{P}{\varepsilon_0 l \sqrt{2\eta}} (x_a - x_m) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (22)$$

3 带状注电子枪的仿真设计

利用上述理论方法,为 W 波段的带状注真空电子器件仿真设计带状注电子枪,其输入参数值如下:

$U = 20 \text{ kV}; I = 500 \text{ mA}; x_c = 1 \text{ mm}; x_m = 0.2 \text{ mm}; l = 5 \text{ mm}.$

利用上述带状注电子枪设计理论的方法计算得到带状注电子枪的主要结构参数如下:

$x_a = 0.33 \text{ mm}; \theta = 5.03^\circ; R_c = 11.4 \text{ mm}; d = 7.7 \text{ mm}; Z_w = 16.4 \text{ mm}.$

根据理论计算的结果,建立带状注电子枪的仿真模型,带状注电子枪 X-Z 平面的剖面图和 Y-Z 平面的剖面图分别如图 4(a)和(b)所示.

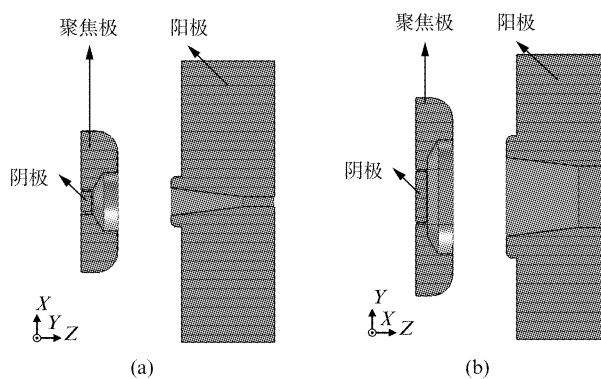
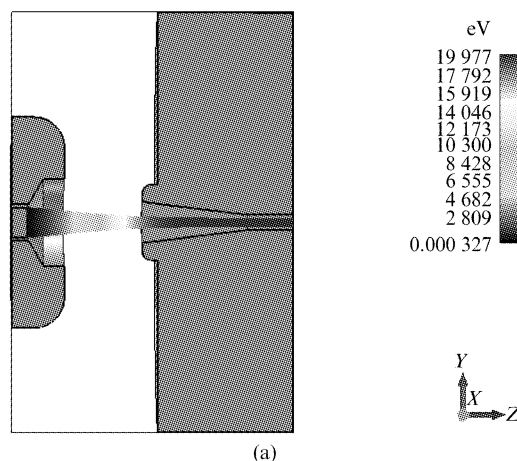


图 4 带状注电子枪(a) X-Z 平面的剖面图, (b) Y-Z 平面的剖面图

Fig. 4 The side view of the sheet beam electron gun at (a) X-Z plane, and (b) Y-Z plane

仿真得到带状注电子枪的电子轨迹在 X-Z 平面和 Y-Z 平面的剖面图分别如图 5(a)和(b)所示. 从图中可以看出,带状电子注的宽边边缘电子轨迹几乎平行于 Z 轴;其窄边边缘的电子轨迹逐渐靠近并趋于平行于 Z 轴.

图 5 仅描述了带状电子枪的电子轨迹示意图,为了进一步知道带状电子注的层流性和横截面形状,截取不同 Z 轴位置处电子注的横截面,得到在不同位置处带状电子注的横截面形状如图 6 和图 7 所示.



(a)

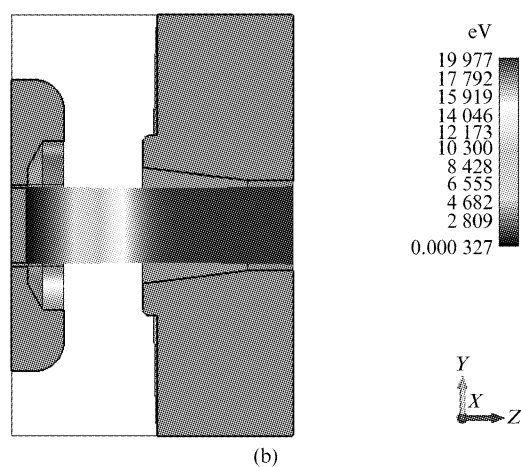


图5 电子轨迹(a) X-Z平面剖面图,(b) Y-Z平面剖面图

Fig.5 The electron trajectory at (a) X-Z plane, and (b) Y-Z plane

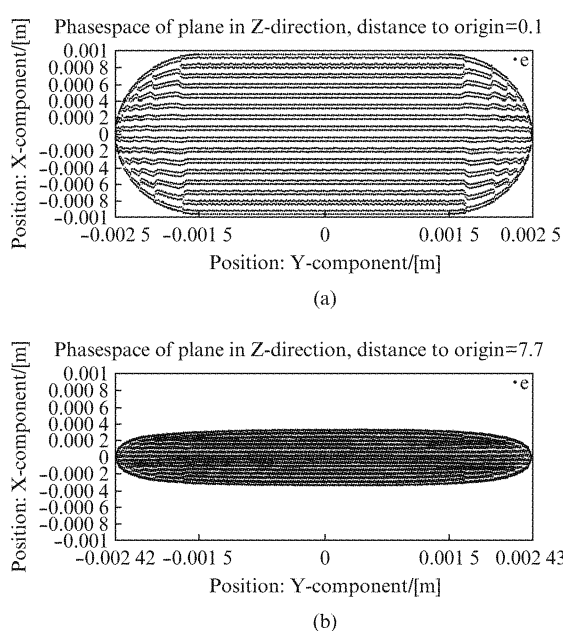


图6 带状电子注在(a)阴极表面横截面图,(b)阳极孔处横截面图

Fig.6 The beam cross sections at (a) the surface of the cathode, (b) the anode aperture

图6(a)和(b)分别给出了在阴极表面和阳极孔处带状电子注的横截面图. 阳极孔处,带状电子注的尺寸为 $4.85\text{ mm} \times 0.67\text{ mm}$,这与理论结果 $5.0\text{ mm} \times 0.66\text{ mm}$ 吻合,说明从阴极表面到阳极孔处的这段空间,所设计的聚焦极,平衡了电子注的空间电荷力,保证了带状电子注沿着圆柱半径方向传播.从图6(a)和(b)可以看出,在这段区域内,带状电子注的宽边尺寸只有很小的变化,而窄边的尺寸沿着圆柱半径方向逐渐减小.

图7(a),(b)和(c)分别给出了在 $Z = 16\text{ mm}$, $Z = 16.7\text{ mm}$ 和 $Z = 17.7\text{ mm}$ 处带状电子注的横截面图.在这三个位置处,带状电子注的横截面尺寸分别为 $5.0\text{ mm} \times 0.42\text{ mm}$, $5.05\text{ mm} \times 0.41\text{ mm}$ 和 $5.1\text{ mm} \times 0.41\text{ mm}$.

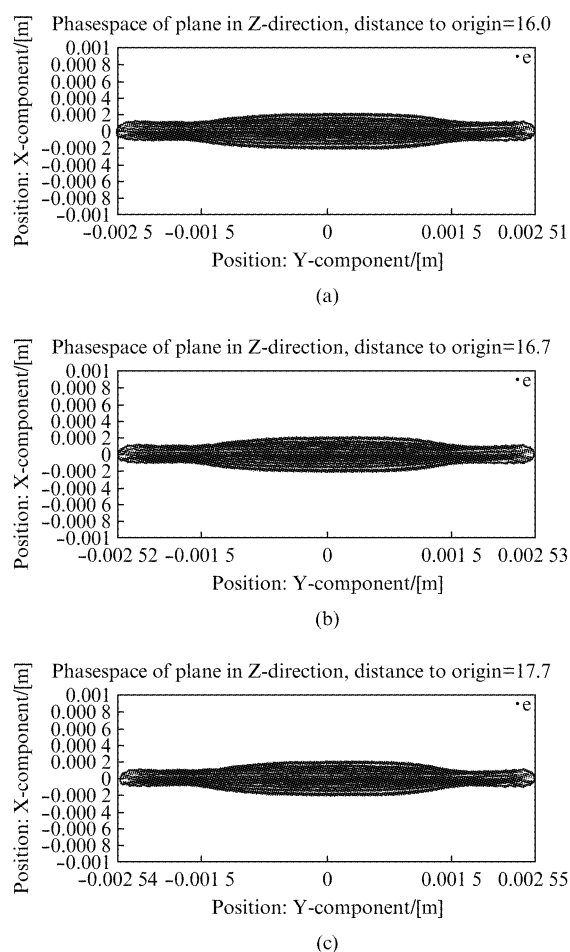


图7 带状电子注在(a) $Z = 16\text{ mm}$, (b) $Z = 16.7\text{ mm}$, (c) $Z = 17.7\text{ mm}$ 处的横截面图

Fig.7 The beam cross sections at (a) $Z = 16\text{ mm}$, (b) $Z = 16.7\text{ mm}$, and (c) $Z = 17.7\text{ mm}$

对比图7(a)和(b)可以看出,在 $Z = 16\text{ mm}$ 和 $Z = 16.7\text{ mm}$ 处,带状电子注的窄边尺寸很相近,说明在 $Z = 16\text{ mm}$ 后,电子注的窄边变化得很缓慢;对比图7(b)和(c)可以看出,在 $Z = 16.7\text{ mm}$ 和 $Z = 17.7\text{ mm}$ 处,带状电子注的窄边尺寸相同,因此 $Z = 16.7\text{ mm}$ 可以近似为带状电子注的注腰位置,进一步可以得到带状注电子枪的射程约为 $Z_w = 16.7\text{ mm}$,注腰处电子注尺寸为 $5.05\text{ mm} \times 0.41\text{ mm}$,这与理论结果相吻合.另外,从图7中还可以看出,带状电子注宽边中央的厚度要大于边缘的厚度.这是由于带状电子注的空间电荷场 E_x 随着 Y 的绝对

值增加(即带状电子注宽边沿 Y 轴由中心向边缘扩展)而减小^[18]. 因此,越接近带状电子注宽边的边缘, E_x 越小,即电子注在 X 方向的电荷排斥力越小,进而导致电子注在边缘的厚度小于中央的厚度.

进入阳极通道前,聚焦极作用和空间电荷力相平衡,带状电子注的边缘轨迹沿着圆柱二极管的半径方向传播;进入阳极通道后,聚焦极作用消失,这种平衡被打破,带状电子注窄边在阳极孔透镜和空间电荷力作用下,逐渐发散并偏离圆柱二极管的半径方向,最终在 $Z = 16.7$ mm 处达到注腰位置,仿真结果验证了理论计算.

通过图 6 和图 7 中可以看出,从阴极表面到注腰位置,带状电子注被均匀地压缩,且具有较好的层流性,压缩比约为 5. 另外,仿真得到的电流大小为 520 mA,这与理论设计值 500 mA 也基本一致.

4 磁场的实现方法

利用通电螺线管产生均匀磁场的方法来获得带状电子注的聚焦磁场,通过调整螺线管的电流大小和匝数,使得产生的纵向磁场大小为 0.2 T,以保证电子注的传输距离达到 100 mm. 同时通过适当增大电子注的填充比来减小“Diocotron”不稳定性^[19],从而保证带状电子注的稳定传输.

5 结论

通过理论和仿真,提出了一种带状注电子枪从结构参数的计算到仿真模拟的设计方法. 利用该方法可以快速地计算出带状注电子枪的主要结构参数如阴极柱面半径、阴阳极间距和射程等,大大缩短了带状注电子枪的设计过程. 同时,利用该方法计算的结果,设计了一种 W 波段的带状注电子枪,并得到了带状注电子枪的电子轨迹、不同位置处电子注横截面尺寸、射程和电流等结果. 通过对比发现仿真结果与理论计算结果吻合良好,这表明了该设计方法的正确性. 本文所提出的方法为快速地设计带状注电子枪从而发展毫米波、太赫兹波段的带状注真空电子器件奠定了理论基础.

References

- [1] Booske J H, Basten M A, Kumbasar A H. Periodic magnetic focusing of sheet electron beams [J]. *Physics of Plasmas*, 1994, **1**(5): 1714 - 1720.
- [2] Humphries S, Russell S, Carsten B, et al. Focusing of high-perveance planar electron beams in a miniature wiggler magnet array [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2005, **33**(2): 882 - 891.
- [3] Tang X F, Duan Z Y, Guo X, et al. Ellipse-shaped electron gun for W-band sheet beam devices [C]. *IEEE International Vacuum Electronics Conference*, Monterey, USA, 2012: 385 - 385.
- [4] Pierce J R. Rectilinear electron flow in beams [J]. *Journal of Applied Physics*, 1940, **11**: 548 - 554.
- [5] Rodney J, Vaughan M. Synthesis of the pierce gun [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1981, **28**(1): 37 - 41.
- [6] Cutler C C. Instability in hollow and strip electron beams [J]. *Journal of Applied Physics*, 1956, **27**(9): 1028 - 1029.
- [7] Tang X F, Sha G W, Duan Z Y, et al. Sheet electron beam formation and transport in the uniform magnetic field [C]. *IEEE International Vacuum Electronics Conference*, Paris, France, 2013: 1 - 2.
- [8] Panda P C, Srivastava V, Vohra A. Staggered closed PCM for stable rectangular sheet electron beam transport [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2013, **60**(9): 2918 - 2923.
- [9] Shin Y-M, Baig A, Barnett L R, et al. System design analysis of a 0.22-THz sheet-beam traveling-wave tube amplifier [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2012, **59**(1): 234 - 240.
- [10] Wang Z L, Cong Y B, Wei Y Y, et al. High-power millimeter-wave BWO driven by sheet electron beam [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2013, **60**(1): 471 - 477.
- [11] Wang J X, Barnett L R, Luhmann N C Jr, et al. Electron beam transport analysis of W-band sheet beam klystron [J]. *Physics of Plasmas*, 2010, **17**: 043111.
- [12] Ruan C J, Li Q S, Wang S Z, et al. Experimental Investigation on sheet electron beam transport with electron beam measuring and analyzing system developed in IECAS [C]. *IEEE International Vacuum Electronics Conference*, Paris, France, 2013: 1 - 2.
- [13] Pasour J, Nguyen K, Wright E, et al. Demonstration of a 100-kW Solenoidally focused sheet electron beam for millimeter-wave amplifiers [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2011, **58**(6): 1792 - 1797.
- [14] CST software, copyright CST, Darmstadt, Germany.
- [15] Langmuir I, Blodgett K B. Currents limited by space charge between coaxial cylinders [J]. *Physical Review*, 1923, **22**: 347 - 356.
- [16] Danielson W E, Rosenfeld J L, Saloom J A. A detailed analysis of beam formation with electron guns of the Pierce type [J]. *The Bell System Technical Journal*, 1956, **35**: 375 - 420.
- [17] HU Yin-Fu, XING Jun-Yi, WU Xian-Ping, et al. The calculation of cylindrical cathode gun zonal injection and the simulation [C]. 17th China Vacuum Electronics Conference, (胡银富, 邢俊毅, 邬显平, 等. 柱面阴极带状注电子枪的计算与模拟: 第十七届中国真空电子学会会议], 湖北宜昌, 2009: 429 - 432.
- [18] Booske J H, McVey B D, Antonsen T M Jr. Stability and confinement of nonrelativistic sheet electron beams with periodic cusped magnetic focusing [J]. *Journal of Applied Physics*, 1993, **73**(9): 4140 - 4155.
- [19] Nguyen K T, Pasour J A, Antonsen T M Jr, et al. Intense sheet electron beam transport in a uniform solenoidal magnetic field [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2009, **56**(5): 744 - 752.