

W 波段带状注速调管电子光学 及注波相互作用系统

阮存军*, 王树忠, 韩莹, 张小锋, 陈姝媛

(中国科学院电子学研究所 中国科学院高功率微波源与技术重点实验室, 北京 100190)

摘要:通过冷流模型理论对均匀场聚焦带状电子注的传输进行了研究,结果表明,通过增强聚焦磁场并提高电子注填充高度因子,可以有效降低 Diocotron 不稳定性并实现长距离的稳定传输.结合理论研究,对均匀场聚焦带状注电子光学系统进行了三维仿真设计与优化,利用自主开发的二维非线性注波相互作用程序 SBK2D,对 W 波段带状注速调管进行了初步分析,结果为输出峰值功率 69 kW、效率 24%、增益 37dB、3dB 带宽 100 MHz.研制出的具有高机械对准精度的带状注速调管电子束管,带状注截面 10 mm × 0.5 mm,且在电子注电压 20 ~ 82 kV,电流 0.50 ~ 4.27 A,长度 100 mm 的漂移通道内电子注传输直流通过率达到 98% 以上,高于之前在 90 mm 漂移通道内获得的 95% 的实验结果.

关键词:带状电子注;速调管;Diocotron 不稳定性;注波相互作用;SBK2D;直流通过率
中图分类号:TN129 **文献标识码:**A

The electron optics system and beam-wave interaction for novel W-band sheet beam klystron

RUAN Cun-Jun*, WANG Shu-Zhong, HAN Ying, ZHANG Xiao-Feng, CHEN Shu-Yuan
(Key Laboratory of High Power Microwave Sources and Technologies,
Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: The cold fluid model theory was used for studying the transport and its instability for the sheet electron beam in the uniform magnetic field. The results show that if the focusing magnetic field and the filling factor of the beam in tube are increased, the Diocotron instability will be decreased to achieve a transportation in a long distance. Based on above results, 3D simulation method was employed to design and optimize the electron optics system for the W-band sheet beam klystron. 2D macro-particle model for sheet electron beam was proposed to develop a beam-wave interaction simulation program code for SBK, named SBK2D. The beam wave interaction processes in the W-band SBK with 8 multi-gap cavities are calculated using the SBK2D. The simulation indicated that a 69 kW peak power output at high frequency with efficiency of 24%, gain of 37 dB, and 3dB bandwidth of 100MHz at 3 dB can be derived. The W-band sheet beam tube was manufactured according to the design. The transmission rate and cross-section experiments were performed with the beam voltage in the range of 20 ~ 82 kV, beam current of 0.5 ~ 4.27 A, and the length of tunnel of 100mm. More than 98% transmission rate with the beam cross-section about 10mm × 0.5mm were obtained.

Key words: sheet electron beam; klystron; Diocotron instability; beam wave interaction; SBK2D; transmission rate

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

引言

带状注速调管(Sheet Beam Klystron, SBK)通过

采用宽高比值很大的薄片状截面电子束,使其能够在维持较小注内空间电荷力的前提下传输强流电子注,并降低了对阴极发射电流密度以及聚焦磁场的要求。

收稿日期:2011-09-08,修回日期:2012-03-02

Received date: 2011-09-08, revised date: 2012-03-02

基金项目:国家自然科学基金(60501019,10775139,60971073)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China (60501019, 10775139, 60971073).

作者简介(Biography): 阮存军(1974-),男,甘肃天水人,博士,研究员,主要研究领域为新型带状注速调管、分布作用速调管等方向. E-mail: ruancunjun@tsinghua.org.cn.

* 通讯作者(Corresponding author): E-mail: ruancunjun@tsinghua.org.cn.

同时,通过采用平面过模高频结构和多间隙腔注波相互作用系统,突破了几何尺寸与工作频率的共度性,可使其工作于毫米波及太赫兹频段,并获得很高的功率输出.但是,带状电子注长距离稳定传输,及其在过模多间隙腔中注波相互作用系统的设计,是开展 SBK 研究与应用必须解决的基础科学问题与瓶颈技术.

SBK 的概念在 1938 年由俄罗斯的 Kovalenko 提出.此后的 60 多年里,美国、俄罗斯和法国对这种新型器件的理论和仿真设计进行了研究,但进展相对缓慢^[1-2].近年来,基于毫米波、亚毫米波和太赫兹频段真空功率源的发展,带状注技术及其器件的研究在国际上引起了广泛关注.2009 年,美国 CPI 研制成功了 X 波段首支具有一定功率输出的 SBK,其设计输出峰值功率为 5 MW,但由于束流通过率仅为 63% 左右,最后只获得了 2.67 MW 的输出功率^[3];美国 UC Davis 于 2010 年设计出了 W 波段 SBK,峰值输出功率 50 kW 左右^[4].作为带状注器件向高频段发展的重要方向,美国 NRL 于 2009 年设计出了 220 GHz 带状注扩展相互作用速调管(SBEIK),带状注宽高比 19,工作电压 16.5 kV,工作电流 520 mA,采用一个 8 间隙输入腔,两个 7 间隙中间腔和一个 8 间隙输出腔,输出功率为 453 W^[5].此外,UC Davis 和 NRL 正在开展 220 GHz 宽频带带状注行波管的研究工作^[6-7],并将 MEMS 和 UV LIGA 等微加工技术应用于高频及注波相互作用系统的加工中,这也成为带状注器件向太赫兹频段发展的重要趋势.

1 带状电子注传输理论及其稳定性的研究

带状电子注的冷流模型理论以电子运动方程、连续性方程和泊松方程为基础,假设带状注是稳态层流,可以得到其传输的包络方程、密度分布和空间电荷场分布等特征.同时,利用这种理论可以进行带状注在均匀磁场中传输的 Diocotron 不稳定性研究^[8].椭圆截面带状注传输过程中,其包络及旋转角度都随着 z 变化,如图 1 所示.旋转坐标系中的带状注运动方程为^[8-9]:

$$\frac{d\theta}{ds} = \frac{a^2\alpha_y - b^2\alpha_x}{a^2 - b^2}, \quad (1)$$

$$\frac{d^2a}{ds^2} - \left[\frac{b^2(\alpha_x^2 - 2\alpha_x\alpha_y) + a^2\alpha_y^2}{a^2 - b^2} - \frac{eB_0\alpha_y}{\gamma m_0\beta c} \right] a - \frac{e^2N}{\gamma^3 m_0\beta^2 c^2 \varepsilon_0 \pi (a+b)} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{d^2b}{ds^2} - \left[\frac{a^2(\alpha_y^2 - 2\alpha_x\alpha_y) + b^2\alpha_x^2}{a^2 - b^2} - \frac{eB_0\alpha_x}{\gamma m_0\beta c} \right] b - \frac{e^2N}{\gamma^3 m_0\beta^2 c^2 \varepsilon_0 \pi (a+b)} = 0,$$

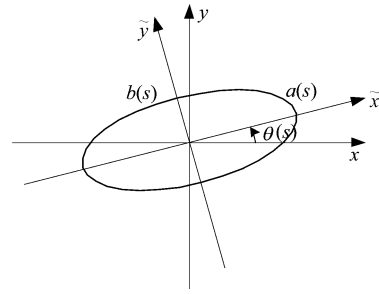


图 1 椭圆截面带状注传输中旋转坐标系

Fig. 1 Rotating coordinates for the transport of ellipse cross-section sheet electron beam

$$-\frac{e^2N}{\gamma^3 m_0\beta^2 c^2 \varepsilon_0 \pi (a+b)} = 0, \quad (3)$$

$$\frac{d}{ds}(a^2\alpha_y) - \frac{ab^3(\alpha_x - \alpha_y)}{a^2 - b^2} \frac{d}{ds}\left(\frac{a}{b}\right) - \frac{eB_0}{\gamma m_0\beta c} a \frac{da}{ds} = 0, \quad (4)$$

$$\frac{d}{ds}(b^2\alpha_x) - \frac{a^3b(\alpha_x - \alpha_y)}{a^2 - b^2} \frac{d}{ds}\left(\frac{b}{a}\right) - \frac{eB_0}{\gamma m_0\beta c} b \frac{db}{ds} = 0, \quad (5)$$

其中 θ 为旋转角, a 和 b 为电子注在旋转坐标系中的坐标.

根据上述理论,针对研究的 W 波段 SBK,椭圆截面带状注长轴 10 mm,短轴 0.5 mm,传输通道宽度和高度分别为 15 mm 和 1 mm,电子注电压分别为 20、40、60、80 kV,对应电流分别为 0.50、1.49、2.78 和 4.12 A,均匀场聚焦磁感应强度 0.3T 左右,传输距离 100 mm 时,带状注在 x - z 平面和 y - z 平面的包络轨迹和旋转角度变化数值计算结果如图 2 所示.可以看出,对于上述参数,带状注传输包络轨迹稳定,且随着电子注电压增大,传输包络脉动波长和振荡幅值增大.同时,带状注截面旋转角随传输距离的增加而递增,在电子注电压较低时,截面倾斜的角度变化较缓,且振荡幅度较小,随着电压增加,其倾斜角和振荡幅度均增大.可以看出,由于计算得到的旋转角度数值较小,因此在传输一定距离时不会由于电子注截面旋转而发生被通道壁截获的情况,可以忽略传输过程中角度旋转的影响.

对于无限宽的相对论带状注,假设以恒定的速度 $\beta_0 c$ 沿 z 方向传输,可以得到 Diocotron 不稳定性的特征值方程为^[8]:

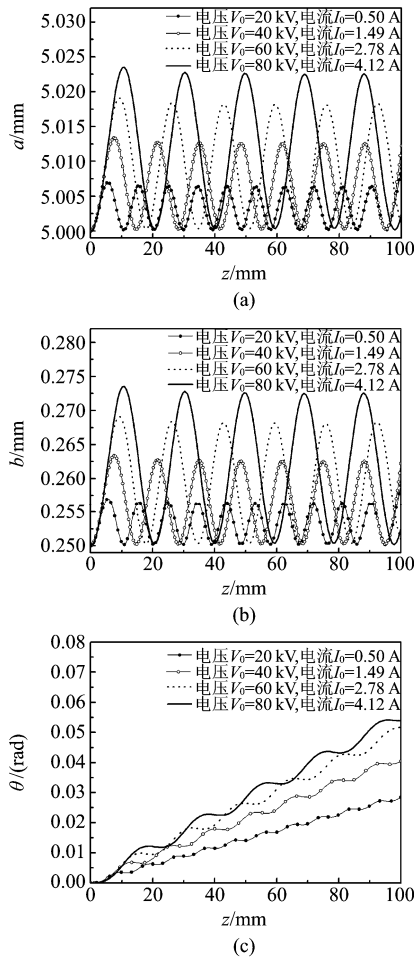


图2 带状电子注在不同电压和电流时的运动轨迹包络 $a(z)$ 、 $b(z)$ 和旋转角度 $\theta(z)$ 的变化

Fig. 2 The envelope and its rotating angle for the transport of sheet electron beam with different voltage and current

$$\frac{\partial}{\partial y} \left[\left(1 - \frac{\omega_p^2}{\gamma_b^2 v^2} \right) \frac{\partial}{\partial y} \delta\psi \right] - k_x^2 \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\gamma_b^2 v^2} \right) \delta\psi = - \frac{k_x \delta\psi}{\Omega - k_x v_{0x}} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\omega_p^2 \omega_c}{\gamma_b^2 v^2} \right), \quad (6)$$

其中 $v^2 = (\Omega - k_x v_{0x})^2 - \omega_c (\omega_c + \partial v_{0x} / \partial y)$, $\Omega = \omega - \beta c k_x$ 是多普勒频移, $\omega_p^2 = e^2 n_b / \gamma_b m \epsilon_0$ 为等离子体频率的平方, $\omega_c = e B_0 / \gamma_b m$ 是电子回旋频率, k_x 是 Diocotron 不稳定性的微扰在 x 方向的波数, $v_{0x} = -2\omega_D y$ 是 x 方向的初始剪切速度, $\omega_D = \omega_p^2 / 2\gamma^2 \omega$ 是 Diocotron 频率. 微扰电势 $\delta\psi$ 在金属通道壁处为零, 在电子注边缘处连续. 求解该特征值方程可以得到带状注传输的色散关系, 当 $\text{Im}(\Omega) > 0$ 时, 带状注将出现 Diocotron 不稳定性, $\text{Im}(\Omega)$ 越大, 微扰增长率越大, Diocotron 不稳定性越明显.

利用前述参数, 图3给出了不同直流电压带状注在 $k_x = 0.5$ 时 $\text{Im}(\Omega)$ 随均匀聚焦场大小变化的计算结果, 此处 k_x 取较小的实数以考虑不稳定性的低频微扰分析. 可以看出, 在聚焦磁场较小时, $\text{Im}(\Omega)$ 数值较大, 带状注出现 Diocotron 不稳定性较明显; 随着聚焦磁场的增强, $\text{Im}(\Omega)$ 减小, Diocotron 不稳定性也逐渐减小; 在聚焦磁感应强度 B_0 增加到 0.3T 以上时, $\text{Im}(\Omega)$ 趋近于 0, 带状注也趋于稳定. 由此可见, 通过增加聚焦磁场来抑制 Diocotron 不稳定性是一种可行的方法.

图4给出了均匀磁场聚焦磁感应强度保持 0.3T 不变时, 在不同 ω_c / ω_D 情况下, $\text{Im}(\Omega)$ 随电子注填充高度因子变化的计算结果. 可以看出, 带状注截面宽度不变, 当注高度较小时, 随着电子注填充高度因子增大, $\text{Im}(\Omega)$ 减小, Diocotron 不稳定性也减小; 当填充高度因子达到某一特定阈值时, $\text{Im}(\Omega)$ 趋于零, 带状注也趋于稳定. 因此, 可以通过增加电子注在束流传输通道中的填充高度因子来抑制带状注传输中的 Diocotron 不稳定性.

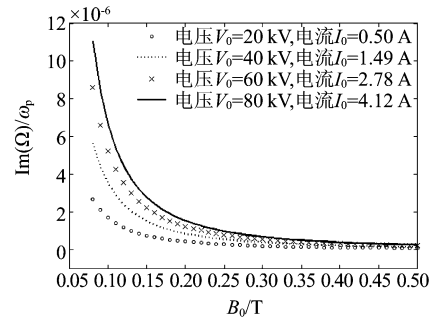


图3 带状注振荡频率虚部随聚焦磁场 B_0 变化关系

Fig. 3 Variation of $\text{Im}(\Omega)$ for the sheet beam with the uniform focus magnet B_0 at different electron voltage

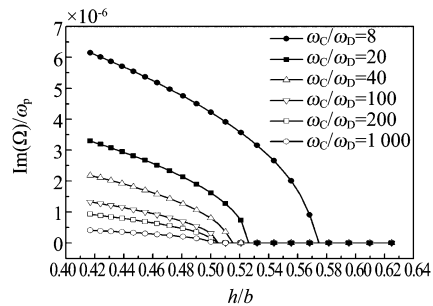


图4 带状注振荡频率虚部随填充高度因子变化关系

Fig. 4 Variation of $\text{Im}(\Omega)$ for the sheet beam with the filling factor at different ω_c / ω_D

2 W 波段 SBK 电子光学系统的设计

为了对前述的带状电子注传输理论分析结论进行验证,对应用于 W 波段 SBK 的电子光学系统进行了三维仿真计算,表 1 给出了关键的设计参数. 带状注电子枪采用椭圆柱面阴极,通过静电一维压缩后产生椭圆截面带状注,阴极宽高比为 2.5 : 1,带状注截面宽高比 20 : 1. 选择带状注截面为 10 mm × 0.5 mm,漂移通道为 15 mm × 1 mm,电子注传输时的填充高度因子为 0.5,同时场聚焦磁感应强度 B_0 为 0.30 T,以满足 Diocotron 不稳定性抑制的条件. 图 5 给出了利用三维仿真软件优化的带状注电子枪一维压缩后的束流轨迹,以及成形一定距离后的电子注截面形状. 可以看出,在 yz 平面,带状注实现了均匀压缩和成形;在 xz 平面,电子注也基本维持其传输形状不变. 在距离阴极表面 0.4 mm 处,成形的电子注截面为 10 mm × 4 mm;在距离阴极表面约 30 mm 处,电子注截面约为 10 mm × 0.5 mm.

表 1 椭圆截面带状注电子光学系统设计参数
Table 1 Design parameters for the electron optical system with sheet electron beam of ellipse cross-section

参数名称	设计值
椭圆阴极截面(长轴×短轴)/mm ²	10×4
阴极电流密度/(A/cm ²)	12.7
电子注截面/mm ²	10×0.5
电子注电压 V/kV	80
电子注电流 I/A	4
电子注电流密度/(A/cm ²)	101.6
漂移通道/mm ²	15×1
漂移管长度 L/mm	100
轴向均匀磁感应强度 B_0 /T	0.30

为了对电子枪压缩和成形的带状电子注进行传输,可以采用两种聚焦方式:一种是 PCM 或 Wiggler 的周期永磁聚焦系统,另一种为均匀场聚焦系统. 研究表明,采用 PCM、Wiggler 等周期永磁聚焦系统是实现带状注传输的一种有效途径,可以抑制带状注 Diocotron 不稳定性,以实现长距离传输,且容易实现器件小型化. 但采用永磁周期聚焦方式难以克服周期磁铁磁化的波动,使得磁场周期与电子注的位置匹配非常敏感;周期聚焦磁场传输带状注存在着临界截止电压 V_b ,无法实现低于 V_b 的低能量电子注的传输^[10];此外,周期永磁聚焦所能获得的磁场强度有限,难以实现高电流密度电子注的传输. 而采用线包产生的均匀磁场聚焦是实现强流带状注传输与应用的另一种技术途径,由于线包可以产生很强的

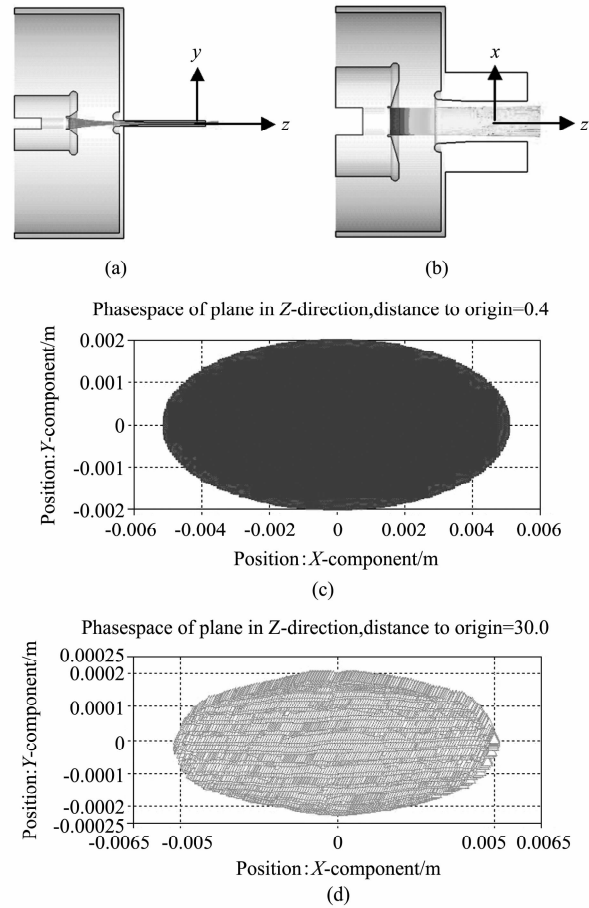


图 5 通过电子枪压缩成形带状注的轨迹图和截面 (a) yz 平面轨迹, (b) xz 平面轨迹, (c) $z = 0.4$ mm 处电子注截面, (d) $z = 30$ mm 处电子注截面

Fig. 5 Trajectory and cross-section for the sheet electron beam during its compression and formation (a) trajectory in yz plan, (b) trajectory in xz plan, (c) cross-section at $z = 0.4$ mm, and (d) cross-section at $z = 30$ mm

均匀场,无周期磁场匹配灵敏性的限制,使得这种方式可以克服采用周期聚焦方式时的困难,能实现高电流密度电子注的传输,同时无传输截止电压限制. 为此,本文采用均匀场聚焦带状电子注的方案开展了相关研究工作.

理论研究表明,带状电子注在均匀聚焦场中稳定传输的距离为^[11]:

$$L_d(\text{cm}) > v_z \frac{\omega_c}{\omega_p^2} \approx 800 \gamma_b^3 \beta_z^2 \frac{B_0(\text{kG})}{J_b(\text{A/cm}^2)}, \quad (7)$$

其中 L_d 为电子注稳定传输的距离, ω_c 为电子回旋频率, ω_p 为相对论电子注等离子体频率, γ_b 为相对论品质因子, β_z 为归一化电子注轴向速度, B_0 为聚焦磁感应强度大小, J_b 为电子注电流密度. 根据表 1 给出的参数,在轴向均匀聚焦磁感应强度为 0.30 T

时,由式(7)得到电子注在磁场中可以稳定传输的距离为 98 mm 左右. 设计中选择带状注漂移通道长度为 100 mm, 兼顾了带状注的稳定传输, 以及满足 SBK 相互作用长度的要求.

图 6 给出了带状注电压 80 kV、电流 4 A、均匀场聚焦磁感应强度 B_0 为 0.30 T, 在 15 mm \times 1 mm 漂移通道内传输 100 mm 距离时, 通过三维 PIC 软件优化仿真得到的带状注传输轨迹图. 可以看出, 所设计的电子光学系统及其均匀场聚焦方式, 很好地抑制了 Diocotron 不稳定性, 并获得层流性和波动性良好、能稳定传输且直流通过率达到 100% 的带状电子注.

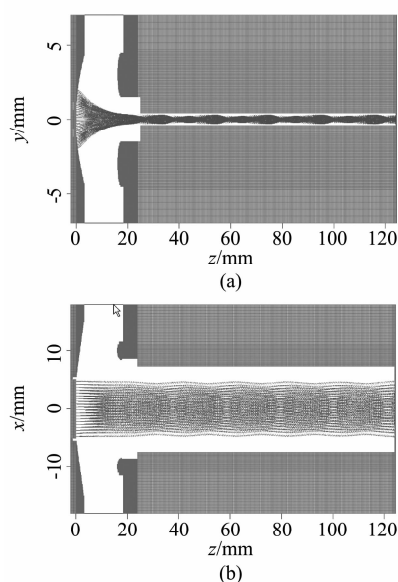


图 6 均匀聚焦磁场中带状注传输轨迹图 (a) yz 平面轨迹, (b) xz 平面轨迹

Fig. 6 Trajectory of sheet beam transport in the uniform magnetic field (a) trajectory in yz plan, and (b) trajectory in xz plan

3 W 波段 SBK 注波相互作用的计算

SBK 的注波相互作用计算涉及到非轴对称大平面谐振腔结构, 较长的注波相互作用距离, 以及复杂的多间隙腔结构等. 我们自主开发出了专用于 SBK 的二维注波相互作用计算程序 SBK2D. 在该程序中, 依据带状电子注大宽高比的特性, 建立了二维窄带宏粒子模型, 并采用格林函数法对电子注空间电荷力进行分析; 对于哑铃型谐振腔间隙电磁场, 通过端口近似法对感应电流、电压和间隙阻抗进行求解; 对于注波相互作用过程, 则采用运动电流求解算法和粒子推进算法进行求解. 开发出的 SBK2D 程序已成功应用

于 X 波段输出功率 100 MW 的 SBK 注波相互作用分析与计算中, 并与三维 PIC 程序计算结果进行了比较, 全面验证了该程序计算结果的可靠性^[12]. 因此, 本文将 SBK 2D 程序应用于 W 波段 SBK 的设计, 以便对其输出特性进行初步的研究.

设计的 W 波段 SBK 注波相互作用系统, 带状注电压为 75 kV, 电流为 3.9 A, 电子注截面 10 mm \times 0.5 mm, 注波相互作用长度 100 mm, 并将一个电子波长内电子划分为 4 \times 30 个宏粒子进行计算. 图 7 给出了设计的八个谐振腔的注波相互作用系统, 其中一个单间隙谐振腔作为输入腔, 三个单间隙腔和三个三间隙谐振腔作为中间腔, 一个五间隙谐振腔作为输出腔. 利用三维高频仿真软件优化设计单间隙腔、三间隙腔和五间隙腔的结构、间隙场分布及其轴向电场幅值, 如图 8 所示. 将各腔得到的 Q 、 R/Q 、 Q_e 等高频参数, 以及电场幅度离散值导入到 SBK2D, 通过大量计算并优化高频参数和各腔体位置, 得到的八个谐振腔的轴向位置分别在 0、15、30、45、63、78、90 和 99 mm 处, 计算得到的注波相互作用输出参数如图 9 所示.



图 7 设计的 W 波段 SBK 注波相互作用系统
Fig. 7 Designed beam wave interaction system for W-band SBK

图 9(a) 给出了带状注在 yz 平面的运动轨迹, 可以看到每个腔中高频电场对电子注的调制作用, 第一腔最弱, 从第三腔开始调制作用逐渐增强, 较好地体现了电子注与谐振腔高频场相互作用过程. 在末前腔和输出腔, 由于发生了强烈的能量交换导致电子注轨迹发生很大变化, 甚至可能被谐振腔壁截获. 图 9(b) 给出了电子注的相轨迹, 它反映了电子从密度均匀入射至依次受到各谐振腔的调制而逐渐出现群聚的变化过程. 可以看出, 当电子注刚进入相互作用区时, 共有 30 条相轨迹, 是因为将电子注沿轴向划分为 30 个矩形薄片. 每个矩形薄片沿 y 方向又划分的 4 个窄带, 刚开始时其相轨迹重合, 随着轴向距离的增加, 重合的相轨迹开始分裂为两条 (位于上下半平面对称位置处的窄带相轨迹重合). 随着相互作用距离的进一步增加, 电子注群聚逐渐明显, 并在输出腔处出现强烈群聚.

图 9(c) 给出了输出功率随输入的变化关系, 可

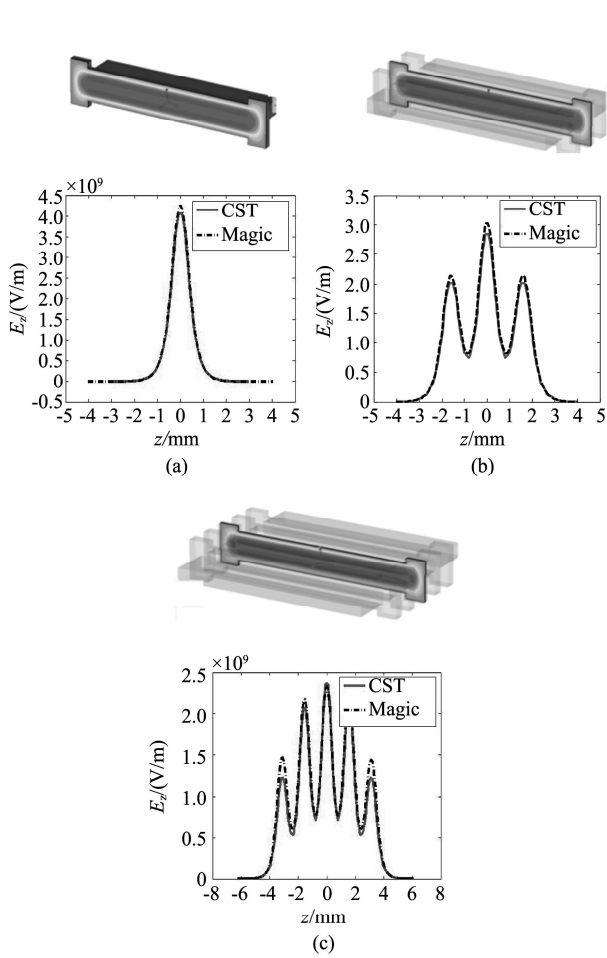


图 8 仿真设计得到的 W 波段 SBK 哑铃型谐振腔场分布及轴向相对电场幅值 (a) 单间隙腔, (b) 三间隙腔, (c) 五间隙腔

Fig. 8 Simulation of electric field distribution of dumbbell resonant cavity for W-band SBK with (a) single gap cavity, (b) three gap cavity, and (c) five gap cavity

可以看出,随着输入功率增加,输出功率也逐渐增加,并在输入功率达到 10 W 时逐渐达到 69 kW 的饱和值,功率增益约 37dB,相互作用效率 24%. 图 9 (d) 给出了输入功率一定时,得到的输出功率随工作频率的变化关系,当工作频率偏离中心频率较多时,输出功率急剧下降,当在中心频率附近时,输出功率变化较为平稳,3 dB 带宽约 100 MHz 左右.

4 W 波段 SBK 电子注成形与传输的实验验证

依据上述的理论研究及三维仿真物理设计,得到了 W 波段 SBK 束管工程结构. 为了进一步提高带状电子注传输的直流通过率,对整管各组件的工艺技术进行了改进,得到了比前期研制的束管更有效的准直装配模具和焊接流程,以便大大提高小尺

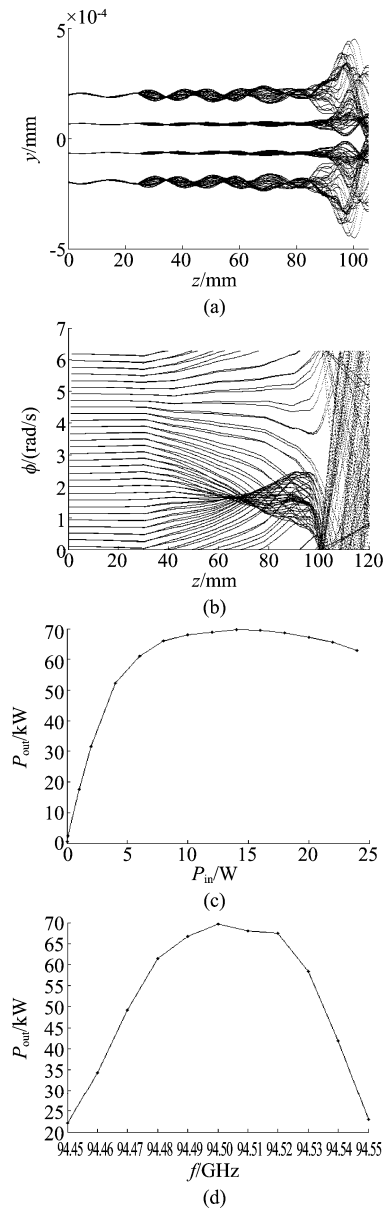


图 9 W 波段 SBK 输出参数的计算结果 (a) 窄带宏粒子在 y-z 平面的运动轨迹, (b) 窄带宏粒子沿 z 轴的相轨迹, (c) 输出功率随输入功率的变化, (d) 输出功率随频率的变化

Fig. 9 Calculated output parameters for the W-band SBK using SBK2D (a) trajectories of micro-particle in y-z plane, (b) phase of micro-particle along z direction, (c) output power versus input power, and (d) output power versus frequency

寸长距离电子通道的对准和装配精度^[8]. 之后,通过将装配好的阴极、聚焦极、阳极头、过渡段、收集极等关键组件进行整管焊接和烘排,研制出了改进型的高真空密封 SBK 电子束管.

为了对研制出的改进型电子枪产生的带状注截面进行测试,将其放入动态真空系统中,通过电子束轰击 YAG:Ce 晶体产生荧光辐射的方法直接获得截

面形状^[8],测试结果如图 10 所示. 探测电子注截面的晶体置于距离阴极 30 mm 处,得到的束流截面约为 10 mm × 0.5 mm,该结果优于前期得到的 10 mm × 0.7 mm 实验结果^[8],也与仿真得到的电子注截面基本一致.

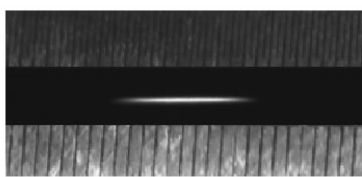


图 10 带状电子注成形后实验测试得到的电子注截面
Fig. 10 Measured cross-section for the sheet electron beam

为了获得带状电子注长距离传输特性,对研制出的 SBK 束管直流通率进行了测试. 采用严格校准的互感线圈法进行电流测量. 图 11(a) 给出了测试现场的束管及其电磁聚焦系统,图 11(b) 给出测试过程中典型的阴极电压,以及阴极、管体和收集极电流测试波形. 可以看出阴极总发射电流与收集极电流基本一致,而由于管体电流非常小,在波形上只能看到干扰本底信号. 详细测试结果表明,在聚焦磁场强度为 0.30 T,工作电压 20 ~ 82 kV,电子注电流 0.50 ~ 4.27 A 的范围内,电子枪导流系数可保持在 0.18 微朴左右,且在 100 mm 长的漂移通道内电子注直流通率达到 98% 以上,该结果优于本研究组前期在 90 mm 漂移通道内直流通率 95% 的实验结果^[8]. 研制成功的高直流通率束管可以直接应用于 SBK 的研制中.

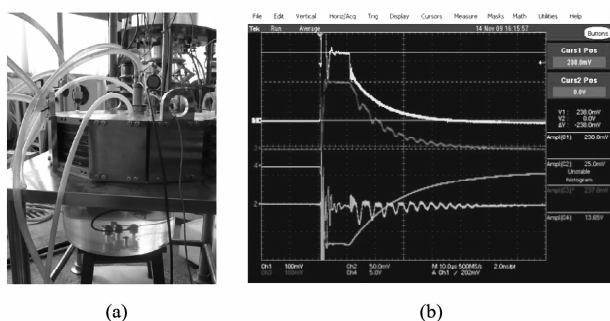


图 11 均匀场聚焦带状注束管的测试及其结果 (a) 带状注束管测试现场, (b) 直流特性测试电压及电流波形
Fig. 11 Experiment result for the sheet electron beam tube with uniform magnetic field (a) test of sheet electron beam tube, (b) waveform for the voltage and current

目前,W 波段 SBK 束管虽然已研制成功,但具有毫米波功率输出 SBK 的研制与工程实现还远未

能达到,原因如下:(1)用于初步参数选择和快速计算的二维注波相互作用程序 SBK2D 已开发出来,但是,能精确确定其几何结构与物理设计的三维 PIC 仿真设计程序,仍然不能有效解决带状注速调管的复杂建模,如仿真设计中的高精度计算,高硬件资源消耗,以及大容量计算问题;(2)W 波段 SBK 中小尺寸高精度的高频调谐机构,以及微米级尺寸和精度要求的平面高频相互作用结构的加工、装配和焊接等关键技术正在探索中. 因此,本文目前尚不能给出具有一定输出性能 W 波段 SBK 实验结果,这也是后续的研究工作重点.

5 结论

结合理论和三维仿真技术研究,对应用于 W 波段 SBK 的电子光学系统进行了详细的设计. 同时,自主编写了用于大信号二维非线性注波相互作用程序 SBK2D. 通过详细的设计计算与优化,完成了具有八个多间隙相互作用腔的 W 波段 SBK 的初步计算,得到的输出功率 69 kW、增益 37 dB、注波相互作用效率 24%、3 dB 带宽 100 MHz. 同时,已经研制出了具有高直流通率的 W 波段 SBK 束管. 测试结果表明,成形的带状注束流截面达到了 10 mm × 0.5 mm,并在工作电压 20-82 kV,电流 0.5 ~ 4.27 A 时,带状电子注直流通率达到了 98% 以上. 目前,由于精确三维仿真设计、小尺寸高精度的微机械加工,以及装配和焊接等关键技术正在攻关中,因此具有毫米波功率输出的 W 波段 SBK 的研制正在进行中. 本研究工作是将新型带状注技术应用于毫米波真空电子器件的初步尝试,对推动这种器件向毫米波、亚毫米波和太赫兹频段发展具有一定的意义并奠定了基础.

REFERENCES

- [1] Eppley K R, Hermannsfeldt W B, Miller R H. Design of a wiggler-focused, sheet beam klystron [C], *IEEE 1987 Particle Accelerator Conference*, Washington D C. 1987:1809 - 1811.
- [2] Yu D, Wilson P. Sheet-beam klystron RF cavity [C], *IEEE 1993 Particle Conference*, 1993: 2681-2683.
- [3] Cusick M, Atkinson J, Balkcum A, et al. X-band sheet beam klystron (XSBK) [C], *2009 IEEE International Vacuum Electronics Conference*, Rome, Italy, 2009: 296 - 297.
- [4] Shin Y M, Wang J X, Barnett LR, et al. Particle-in-cell simulation analysis of a multicavity W-band sheet beam klystron [J]. *IEEE Trans Electron Devices*, 2011, **58**(1): 251 - 258.
- [5] Nguyen K T, Pasour J A, Wright E L et al. Design of a G-band sheet-beam extended-interaction klystron [C], *2009 IEEE International Vacuum Electronics Conference*, Rome, (下转第 522 页)

通过反演地物、光谱靶标反射率对定标精度进行了定量评价,对于带宽 7 nm 左右的无人机载成像光谱仪外场光谱定标的精度可以达到 0.1 nm,一般优于 0.5 nm.

REFERENCES

- [1] Davis C O, Bowles J, Leathers R A, *et al.* Ocean PHILLS hyperspectral imager: design, characterization, and calibration[J]. *Optics Express*, 2002, **10**(4): 210 – 221.
- [2] Gu Y F, Wang C, Wang S Z, *et al.* Kernel-based regularized-angle spectral matching for target detection in hyperspectral imagery[J]. *Pattern Recognition Letters*. 2011, **32**(2): 114 – 119.
- [3] Tiwari K C, Arora M K, Singh D. An assessment of independent component analysis for detection of military targets from hyperspectral images[J]. *Original Research Article International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2011, **13**(5): 730 – 740.
- [4] Zhang L F, Yan L, Yang S W. Narrowband vegetation index performance using the AVIRIS hyperspectral remotely sensed data[J]. *Proc. SPIE*, 2006. 6419: 64190M1 – M7.
- [5] Barry P S, Shepanski J, Segal C. Hyperion on-orbit validation of spectral calibration using atmospheric lines and on-board system[J]. *Proc. SPIE*, 2002, 4480: 231 – 235.
- [6] Guanter L, Richter R, Moreno J. Spectral calibration of hyperspectral imagery using atmospheric absorption featuresp [J]. *Applied Optics*. 2006, **45**(10): 2360 – 2370.
- [7] Montgomery H, Che N Z, Parker K, *et al.* The algorithm for MODIS wavelength on-orbit calibration using the SRCA [J]. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, **38**(2): 877 – 884.
- [8] Gao B C, Montes M J, Davis C O. A curve fitting technique to improve wavelength calibrations of imaging spectrometer data[J]. *Proc. 11th Annu. JPL Airborne Earth Sci. Workshop*, 2002: 99 – 105.
- [9] Gao B C, Montes M J, Davis C O. Refinement of wavelength calibrations of hyperspectral imaging data using a spectrum-matching technique[J]. *Remote Sensing of Environment*. 2004, **90**: 424 – 433.
- [10] Nevillea R A, Sun L X, Staenza K. Detection of spectral line curvature in imaging spectrometer data [J]. *Proc. SPIE*. 2003, 5093: 144 – 154.
- [11] Green R O, Pavri B E, Chrien T G. On-orbit radiometric and spectral calibration characteristics of EO-1 hyperion derived with an underflight of AVIRIS and in situ measurements at Salar de Arizaro, Argentina[J]. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*. 2003, **41**(6): 1194 – 1203.
- [12] Wang T X, Yan G J, Ren H Z, *et al.* Improved methods for spectral calibration of on-orbit imaging spectrometers [J]. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing* 2010, **48**(11): 3924 – 3931.

(上接 516 页)

- Italy, 2009: 298 – 299.
- [6] Shin Y M, Baig A, Gamzina D *et al.* MEMS fabrication of 0.22 THz sheet beam TWT circuit [C], 2010 *IEEE International Vacuum Electronics Conference*, Monterey, California, USA, 2010: 185 – 186.
- [7] Shin Y M, Barnett L R, Baig A, *et al.* 0.22 THz sheet beam TWT amplifier: system design and analysis [C], 2010 *IEEE International Vacuum Electronics Conference*, Bangalore, India, 2011: 61 – 62.
- [8] Ruan C J, Wang S Z, Han Y, *et al.* Investigation on focus and transport characteristics for the high transmission rate sheet electron beam [J], *Acta Phys. Sin.* (阮存军, 王树忠, 韩莹, 等. 高传输通过率带状电子注聚焦与传输特性的研究, *物理学报*), 2011, **60**(8): 084105 – 1 – 13.
- [9] Zhou J, Bhatt R, Chen C P. Cold-fluid theory of equilibrium and stability of a high-intensity periodically twisted ellipse-shaped charged-particle beam [J]. *Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams*, 2006, **9**(3): 304401 – 1 – 9.
- [10] Nguyen K T, Pasour J A, Antonsen T M, *et al.* Intense sheet electron beam transport in a uniform solenoid magnetic field [J]. *IEEE Trans Electron Devices*, 2009, **56**(5): 744 – 752.
- [11] Gokhale A, Vyas P, Panikar J, *et al.* Numerical investigation of space charge electric field for a sheet beam electron beam between two conducting planes [J]. *PRAMANA journal of physics*, 2002, **58**(1): 67 – 77.
- [12] ZHANG Xiao-Feng, RUAN Cun-Jun, LUO Ji-Run, *et al.* Beam-wave interaction and simulation program for sheet beam klystron [J], *Acta Phys. Sin.* (张小锋, 阮存军, 罗积润, 等. 带状注速调管注波相互作用及其计算程序的研究, *物理学报*), 2011, **60**(6): 068402 – 1 – 10.