

文章编号: 2095-4980(2013)04-0522-05

0.22 THz 微电真空折叠波导行波管的聚焦磁场研究

张 芳^{1,2}, 董志伟^{1,2}

(1.北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100094; 2.中国工程物理研究院 太赫兹研究中心, 四川 绵阳 621999)

摘 要: 在 0.22 THz 微电真空折叠波导行波管放大器(FWG-TWT)的设计中, 为了保证在电子枪中产生的、具有所需电流密度的电子注能够稳定、成型地注入相互作用区, 并维持较高的电子通过率, 需仔细设计磁场聚焦系统。本文在 FWG-TWT 中使用螺线管线圈和周期永磁聚焦系统(PPM) 2 种磁场结构来实现电子束流的稳定注入和传输。通过三维仿真软件对此电子光学系统进行模拟计算, 重点考察了磁场的初始位置、磁感应强度峰值以及磁体厚度等对电子束传输特性的影响。仿真结果表明, 在合理的参数范围内, 电子注静态通过率可以接近 100%, 波动很小, 能够实现束流的稳定注入和传输。

关键词: 太赫兹; 0.22 THz; 折叠波导行波管; 聚焦磁场

中图分类号: TN102

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201304.0522

Research on the magnetic focusing system for 0.22 THz FWG-TWT

ZHANG Fang^{1,2}, DONG Zhi-wei^{1,2}

(1.Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100094, China; 2.Terahertz Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: In the design of 0.22 THz Folded Waveguide Traveling-Wave Tube(FWG-TWT) which acts as an amplifier in terahertz sources, a magnetic focusing system is employed to ensure the beam from the electron gun moving into the beam-wave interaction region with high passing rate. The paper studies two kinds of magnetic focusing system, including solenoid and Periodic Permanent Magnet(PPM). Three-dimensional software is used to simulate the model and analyze how such parameters as magnetic pole position, period, flux density, even magnet pole's thickness determine the beam's transmission. The results show that the static passing rate of electron beam in the tunnel can almostly achieve 100%, with a small oscillating range of beam.

Key words: terahertz; 0.22 THz; Folded Waveguide Traveling-Wave Tube; magnetic focusing system

太赫兹波通常指频率在 0.1 THz~10 THz(波长在 3 mm~30 μm)范围内的电磁辐射。相对于其他波段的电磁波, 比如红外和微波, 人们对太赫兹波相关的认识和应用还比较匮乏。然而太赫兹波具有的宽带性、相干性、低能性、穿透性等独特性能, 使其在通信、雷达、电子对抗、电磁武器、天文学、医学成像、无损检测、安全检查等领域产生了深远影响。美国、澳大利亚以及欧洲、亚洲的许多国家的企业、大学和科研机构纷纷投入到太赫兹的研发热潮之中。目前国内多家研究机构也开展了太赫兹领域的相关研究。在太赫兹相关的各类研究中, 太赫兹源是关键。从微波频段向太赫兹低端频段拓展, 借助微机电(MEMs)加工技术研制大功率太赫兹辐射源是产生太赫兹的方法之一^[1-2]。

在太赫兹雷达、通信等重大应用前景下, 太赫兹微电真空折叠波导行波管(FWG-TWT)作为太赫兹源中的信号放大器引起了学者们的关注, 可实际研制工作却遇到了很多困难和挑战。在 0.22 THz 折叠波导行波管放大器的理论分析和设计过程中, 为了保证在电子枪中产生的大电流密度、小横向尺寸的电子注能够稳定、成型地注入流通管, 并维持较高的电子通过率, 从而进行充分的束-波互作用, 磁场聚焦系统的设计非常重要。本文分别尝试在 FWG-TWT 中使用螺线管线圈和周期永磁聚焦系统(PPM)2 种磁场结构来实现电子束流的聚焦, 通过理论分

收稿日期: 2012-12-27; 修回日期: 2013-01-10

基金项目: 中国工程物理研究院太赫兹科学技术研究中心资助项目; 国家高技术发展计划资助项目

析和数值仿真来研究 2 种磁场的特性及其对电子束的聚焦效果。

1 螺线管线圈聚焦系统

基于文献[1]中设计的 Pierce 枪, 电子枪结构如图 1 所示, 电子束从阴极发出, 进入阳极孔内传输, 阳极孔径 r_a 为 0.2 mm, 电子束参数: 束流 I_a 为 20 mA, 束压 U_a 为 18.4 kV, 束半径 r_w 为 0.1 mm, 电子枪和磁场聚焦系统都在三维程序中一体化建模仿真, 充分考虑了各种因素对于电子注聚焦效果的影响^[1]。

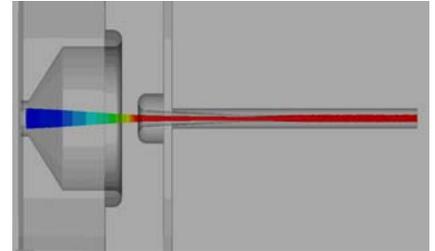


Fig.1 Gun structure
图 1 电子枪结构示意图

本小节分析了螺线管线圈产生的磁场对于电子注的聚焦效果。

1.1 设计原理

假设阴极完全磁屏蔽, 所加磁场是用以抵消空间电荷作用力和离心力, 电荷受力平衡时所加的磁场是 Brillouin 磁场。Brillouin 磁场值为^[2]:

$$B_B = \frac{0.83 \times 10^{-3} \cdot I_a^{1/2}}{r_w U_a^{1/4}} \tag{1}$$

式中: I_a 为电子束电流; U_a 为电子束电压; r_w 为电子束半径。电子注敏感且不稳定, 通常使聚焦磁场有部分通过阴极, 然后再加入大于 Brillouin 磁场值(2 倍至 3 倍)的磁场, 使得电子注稳定传输。加入螺线管线圈磁场的结构示意图及其产生的磁场分布示意图分别如图 2、图 3 所示, 不同于均匀轴向磁场, 螺线管线圈产生的磁场在空间为不均匀分布, 纵向轴线上的磁场分布如图 4 所示。

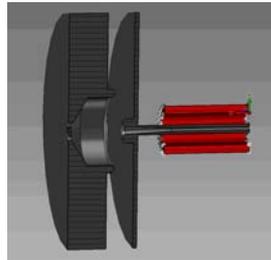


Fig.2 Pierce gun with solenoid magnetic field
图 2 加入螺线管线圈型磁场后的电子枪结构图

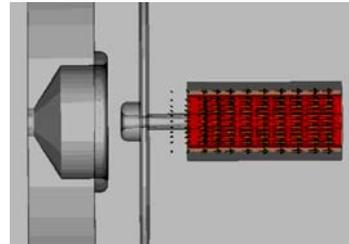


Fig.3 Magnetic field
图 3 磁场强度矢量分布图

1.2 仿真结果分析

针对螺线管线圈磁场模型, 重点仿真 2 项内容: 1) 磁感应强度对于电子注聚焦效果的影响; 2) 磁感应强度确定, 分析加入磁场的初始位置变化时电子注的聚焦效果。通过式(1)计算得到 Brillouin 磁感应强度约为 0.1 T。

1) 磁感应强度对于电子注聚焦效果的影响

加入螺线管线圈聚焦磁场后, 电子枪纵向轴线上的磁场分布如图 4 所示, 图 4(a)~图 4(d)为加入不同磁感应强度时的 4 种情况, 磁场初始点处(坐标 $z=11.9$ mm)的磁感应强度分别约为 Brillouin 磁场的 1~4 倍。横坐标是以电子枪阴极为原点(单位为 mm), 至电子枪的末端总长 23 mm, 纵坐标为磁感应强度, 单位为 T。

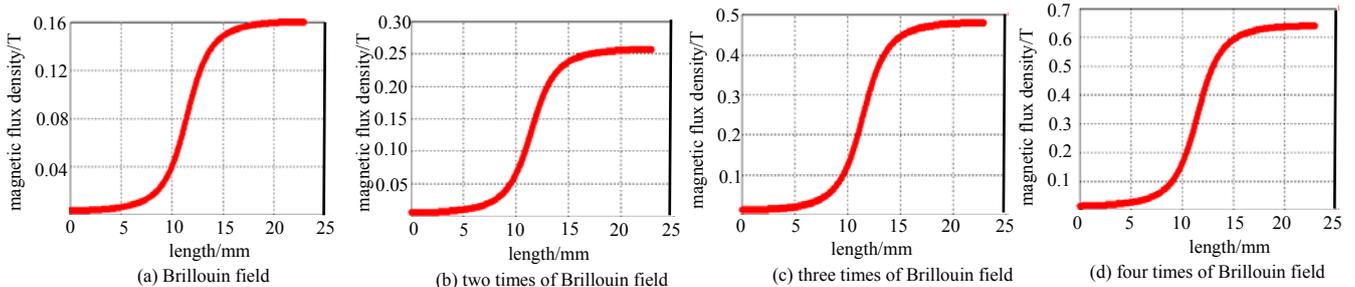


Fig.4 Magnetic field distribution in the central line of gun

图 4 电子枪纵向中心轴线上的磁场分布

加入螺线管线圈聚焦磁场后电子注的轨迹如图 5 所示, 可以看出, 磁感应强度约为 Brillouin 磁场的 1 倍时,

电子注没有聚焦, 当磁感应强度约为 2~4 倍 Brillouin 磁场时, 电子束发生聚焦, 电子通过率为 100%, 磁感应强度越大, 电子注稳定性越好, 但电子注脉动波长变短。

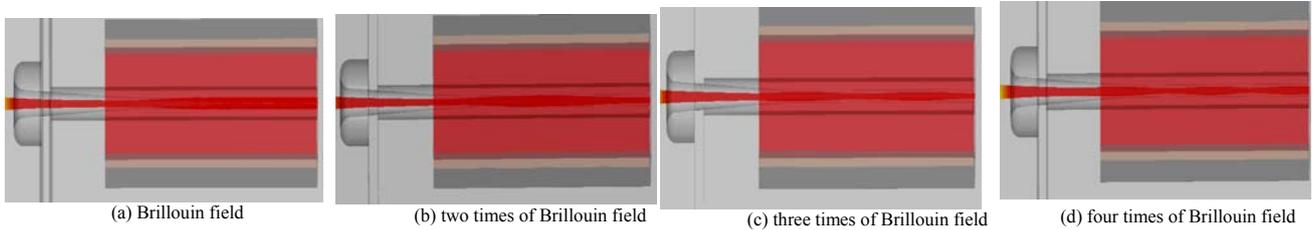


Fig.5 Electron flow of different magnetic field values

图 5 不同磁场幅值时的粒子束轨迹示意图

2) 磁场初始位置对于电子注聚焦效果的影响

未加入磁场时的电子注轨迹如图 1 所示, 在坐标 $z=11.9\text{ mm}\sim 12.9\text{ mm}$ 范围内, 电子注的轨迹都很平滑, 在此平滑区前后, 设置不同的磁场初始位置, 仿真观察与分析电子注的聚焦效果, 电子注轨迹如图 6 所示, 可以看出, 束流变化敏感。不同的磁场初始位置, 电子注的波动性不同, 但电子注都可以稳定注入和传输, 若磁场初始位置超出该范围, 电子注的波动性变大, 电子通过率降低。

2 周期永磁聚焦系统

周期永磁聚焦系统具有体积小、重量轻、不消耗电源功率、杂散磁场小及使用方便等优点, 被广泛用于各种行波管^[3-4]。

2.1 设计原理

对于理想周期永磁聚焦系统, 纵向轴上的 z 方向磁场分布为余弦分布, 通常表示为:

$$B_z = B_p \cos \frac{2\pi z}{L} \quad (2)$$

式中: B_p 为磁场峰值; L 为磁场周期长度。

若使电子注的波动性最小, 推导出 $B_p = \sqrt{2}B_B$ 。许多文献中提到, 根据经验, 峰值应取 $B_p = (1.5 \sim 2) \cdot \sqrt{2}B_B$ 。按照束半径归一化后, 边缘电子轨迹方程为:

$$\frac{d^2 R}{dT^2} + \alpha(1 + \cos 2T)R - \frac{\beta}{R} = 0 \quad (3)$$

式中: 磁场参量 $\alpha = 2.8 \times 10^8 \frac{B_p^2 L^2}{U_a}$; 空间电荷参量 $\beta = 1.53 \times 10^3 P \frac{L^2}{r_w}$; R 为电子注边缘到轴心的相对距离。当 $\alpha = \beta$ 时, 磁场聚焦效果最好。 β 越大, 电子注的波动性越大, 当 $\beta < 0.66$ 才能实现聚焦^[3-6]。

2.2 仿真结果分析

在三维软件中建立电子枪和 PPM 磁场模型, 分析电子注在静态电磁场中的聚焦特性。永磁聚焦周期结构如图 7 所示, 永磁体为片状结构, 轴向磁化方向相斥排列, 在纵向轴线上产生的 z 方向磁场如图 8 所示, 磁场分布为正弦波形, 横坐标单位为 mm, 纵坐标单位为 T。通过对此电子光学系统进行模拟计算与分析, 重点考察了磁场的分布构型、初始位置、磁感应强度峰值和磁体厚度等对电子束传输特性的影响。

1) 永磁体初始位置

对于低导流系数, 高面积压缩比的电子枪和电子注的初始横向速度对于其聚焦效果影响很大, 横向速度很大

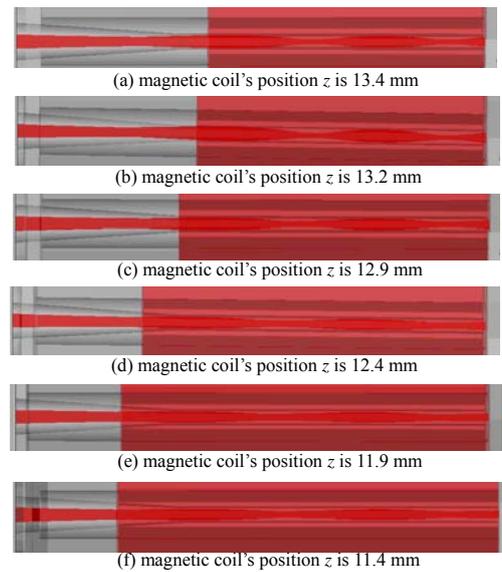


Fig.6 Beam trajectory while magnetic pole positions are different
图 6 磁场初始位置不同时的粒子束轨迹示意图

时则不能聚焦^[7-8]。对于理想的恒定磁场而言,磁场初始位置应位于电子注束半径最小的地方^[7-8]。对于周期永磁聚焦系统,本文尝试调整磁场初始位置前后移动, z 坐标在 $[-10,14]$ mm 范围内,加入磁场前电子注轨迹相对平滑,加入磁场后,电子注都能稳定注入和传输,超出该坐标范围,电子注波动变大,静态通过率降低。

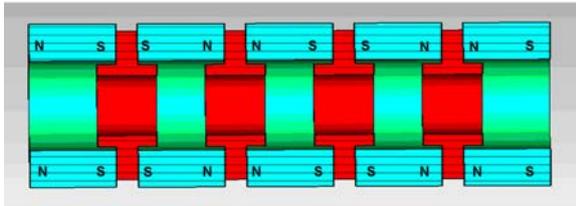


Fig.7 PPM structure
图 7 永磁聚焦周期结构图

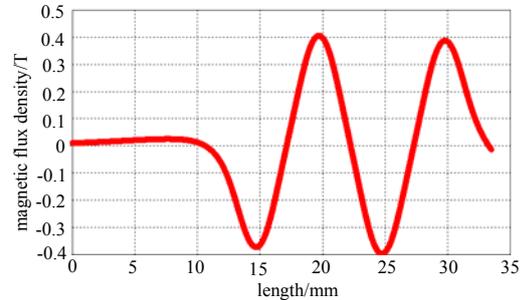


Fig.8 B_z in the central line while magnetic period length is 10 mm
图 8 磁场周期长度为 10 mm 时纵向轴线上的 z 方向磁场强度

2) 磁感应强度

当磁场周期长度不变,纵向轴线上磁感应强度峰值变化时,电子注聚焦效果不同。理论上分析,纵向轴线磁感应强度必须在一定范围内取值,磁感应强度峰值过小或过大,都不能达到聚焦效果。磁感应强度峰值过小,磁场对于电子注的会聚力不足以抵消空间电荷的发散力,则电子注迅速发散;磁感应强度峰值过大,电子注的波动性变大,其静态通过率也很低。通过仿真分析可得,本文设计的周期永磁聚焦系统需要的纵向轴线的磁感应强度在 0.3 T~0.5 T 范围内,聚焦效果较好。另外仿真发现,磁感应强度峰值越大,在波动性变大的同时,电子注脉动波长变小。

3) 磁场过渡区的设计

第 1 个 PPM 结构的磁场峰值的大幅度变化对于电子注的传输影响很大,则磁场的过渡区设计存在一定的必要性。通过适当减小第一个或两个永磁片的磁感应强度,使得纵向轴线上的第一个磁场峰值相对平缓,从而减小了电子注的波动,提高了电子注的通过率。

4) 永磁体片的不对称性

制作工艺或装配公差所引起的永磁体片的不对称性对于电子注传输的影响特别大^[9-10]。仿真中发现,把磁场聚焦系统相对于电子通道上移 0.1 mm,电子注的轨迹如图 9 所示,电子注向上偏移,通过率较低。

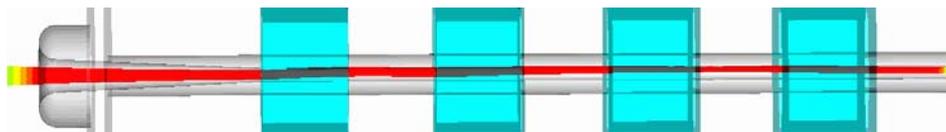


Fig.9 Electron flow while PPM moves up
图 9 PPM 上移后的粒子束轨迹示意图

5) 永磁片厚度

永磁体磁场和 PPM 结构周期长度确定时,通过对不同磁片厚度的模型仿真,看到纵向轴线的磁感应强度峰值 B_z 相对于磁片厚度 d 和磁场周期长度 L 比值的关系如图 10 所示,从图中看出磁片越厚,磁感应强度峰值越大。

3 结论

本文尝试了 2 种磁场聚焦系统来实现电子注的聚焦,并进行了对比研究。对于螺线管线圈,分析了磁感应强度和初始位置对于电子注聚焦效果的影响:磁感应强度越大,聚焦效果越好,电子注波动性变得频繁;磁场初始位置应该在电子注横向速度最小的地方。对于周期永磁聚焦系统,与螺线管线圈磁场区别最大的一点是,纵向轴线上的磁感应强度必须在一定的取值范围内才能够达到聚焦效果:磁感应强度过小,电子注不能聚焦;磁感应强度过大,电子注波动性变大,通过率降低。本文通过仿真分析,总结了磁场初始位置、磁感应强度峰值、过渡区以及磁体厚度等参数对于电子注聚焦效果的影响,对于磁场聚焦系统的设计有一定的参考意义。

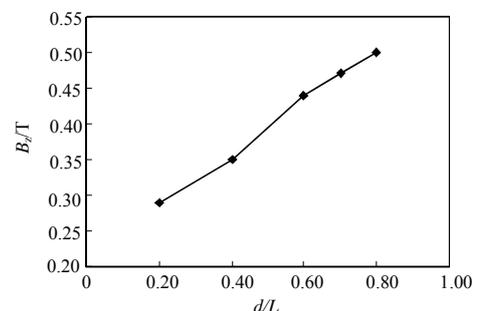
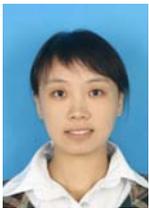


图 10 B_z in the central line vs. magnetic pole thickness
图 10 纵向轴线磁场强度与永磁极片厚度的关系图

参考文献:

- [1] 张芳,董焯,董志伟,等.微电真空折叠波导行波管放大器的电子枪设计[J]. 信息与电子工程, 2011,9(3):320-323. (ZHANG Fang, DONG Ye,Dong Zhiwei,et al. Design of electron gun for vacuum microelectronic FWG-TWT amplifier[J]. Information and Electronic Engineering, 2011,9(3):320-323.)
- [2] Gilmour A S. Principles of Traveling Wave Tubes[M]. Boston:Artech house, 1994.
- [3] 廖平,杨中海,雷文强,等. 周期永磁聚焦电子注性能计算机模拟[J]. 强激光与粒子束, 2004,16(1):68-72. (LIAO Ping,YANG Zhonghai,LEI Wenqiang,et al. Computer simulation of electron beam characteristics focused by periodic permanent magnets[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2004,16(1):68-72.)
- [4] Santra M,Kumar L. An improved analysis of PPM focusing structures including the effect of magnetic saturation in the iron pole pieces[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2009,56(5):974-979.
- [5] Wang Z L,Gong Y B,Wei Y Y. The conditions for stable sheet electron beams transport in periodic permanent magnet fields[J]. Infrared Milli. Terahz. Waves, 2010(31):649-658.
- [6] 廖平,杨中海,雷文强. 微波管电子枪三维粒子模拟研究[J]. 强激光与粒子束, 2004,16(3):353-355. (LIAO Ping,YANG Zhonghai,LEI Wenqiang. Study on 3-D MAFIA PIC simulation for microwave tube electron gun[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2004,16(3):353-355.)
- [7] 王兵. 行波管电子枪的设计与模拟[D]. 成都:电子科技大学, 2006. (WANG Bing. Design and simulation of traveling wave tube electron gun[D]. Chengdu:University of Electronic Science and Technology of China, 2006.)
- [8] 黄鳌. 皮尔斯电子枪的 PIC 模拟[D]. 成都:电子科技大学, 2006. (HUANG Ao. PIC simulation of Pierce electron gun[D]. Chengdu:University of Electronic Science and Technology of China, 2006.)
- [9] Sharma R K,Sharma A K,Pant B D,et al. Design and development of 100 GHz Folded Waveguide TWT[C]// IEEE International Vacuum Electronics Conference. Monterey,CA:[s.n.], 2010:505-506.
- [10] 张芳,董志伟,董焯. 140 GHz多束折叠波导行波管仿真分析[J]. 强激光与粒子束, 2012,24(4):989-992. (ZHANG Fang, DONG ZhiWei,DONG Ye. Simulation of 140 GHz multi-beam folded waveguide traveling-wave tube[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012,24(4):989-992.)

作者简介:



张 芳(1984-),女,河北省保定市人,硕士,助理研究员,研究方向为太赫兹源器件的理论分析与数值模拟.email:fangzhang328@163.com.

董志伟(1962-),男,河北省滦县人,博士,研究员,研究方向为高功率微波技术.