

文章编号: 2095-4980(2017)04-0534-05

140 GHz 兆瓦级回旋管高斯模式输出窗设计

李志良, 冯进军, 刘本田, 张 杨

(中国电子科技集团公司 第12研究所 微波电真空器件国家级重点实验室, 北京 100015)

摘 要: 根据热核聚变用140 GHz回旋振荡管研制需要, 对高斯模式输出窗进行研究。以化学气相沉积金刚石作为输出窗片的材料, 通过理论分析, 优化设计出低反射、低吸收高斯模式输出窗片的尺寸, 获得窗片半径和厚度分别为46 mm和1.8 mm。通过理论分析各参数对高斯模式透射率的影响, 并利用FEKO软件进行计算验证, 获得高斯模式输出窗设计参数, 从而为热核聚变用回旋振荡管的研究打下技术基础。

关键词: 回旋振荡管; 高斯模式; 输出窗; 化学气相沉积金刚石

中图分类号: TN129

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201704.0534

Design of Gaussian mode output windows for 140 GHz MW gyrotron

LI Zhiliang, FENG Jinjun, LIU Bentian, ZHANG Yang

(Vacuum Electronics National Laboratory, The 12th Research Institute of CETC, Beijing 100015, China)

Abstract: According to the requirements of 140 GHz gyrotron oscillator in thermonuclear fusion, the study for Gaussian mode output windows is conducted. Chemical Vapour Deposition(CVD) diamond is chosen as the output window material, the size of low reflective and absorption window is designed by theoretical analysis, a radius and thickness of the diamond window are 46 mm and 1.8 mm, respectively. In this paper, the influence on the transmission of Gaussian mode and else parameters are analyzed by using theoretical analysis and FEKO software; finally, the design parameters of Gaussian mode output window are obtained. This work has laid a technical foundation in the application of the gyrotron for thermonuclear fusion.

Keywords: gyrotron oscillator; Gaussian mode; output windows; Chemical Vapour Deposition diamond

输出窗是回旋器件中非常重要的部件, 其作用在于保持器件内真空的前提下, 把功率尽可能多地通过介质窗片输出。它的好坏直接影响整管的测试性能, 甚至整管研制的成败^[1-4]。如果窗片的反射率大, 在输出功率较高情况下, 返回到器件高频系统的功率将显著上升, 从而引起寄生模式在高频系统内自激振荡, 降低器件的高频输出功率和模式纯度, 最终可能导致器件不能正常稳定地工作。如果窗片设计不合理, 会导致输出窗片的损坏, 造成管内真空系统的破坏^[5]。本文以140 GHz兆瓦级回旋振荡管输出窗作为研究内容, 选择化学气相沉积金刚石作为输出窗片的材料, 在高斯模式通过该窗片的条件下, 设计并分析窗片的性能, 为热核聚变用回旋振荡管的研究打下技术基础, 同时, 其设计方法也适用于其他频段高斯输出窗的设计和分析。

1 高斯模式输出窗片的设计

回旋振荡管通过准光模式变换器, 把高阶工作模式转换为可在空间中能高效传输的高斯模式(HE₁₁), 并通过输出窗输出到其他连接系统中。输出的高斯模式可近似2种模式: 即TE₁₁模和TM₁₁模的混合模式, 其中TE₁₁模的相对功率约占混合模式总功率的84%, 而TM₁₁模的相对功率约占混合模式总功率的16%^[6], 图1给出了理想HE₁₁模式在窗片上的能量分布。

为研究输出窗的输出特性, 可采用场匹配方法来分析工作模式在窗片内外的场分布及反射和透射特性。由于回旋管高频系统输出的高斯模式的辐射方向为垂直于输出窗片, 对圆波导中高斯模式垂直通过输出窗的反射波和

收稿日期: 2016-09-22; 修回日期: 2016-12-19

基金项目: 科技部国家磁约束核聚变能发展研究专项资助项目(2013GB11003); 国防科技重点实验室基金资助项目(9140C0502011021)

透射波, 菲涅尔(Fresnel)折射与反射定律仍然适用, 且分析方法简单^[7-9]。

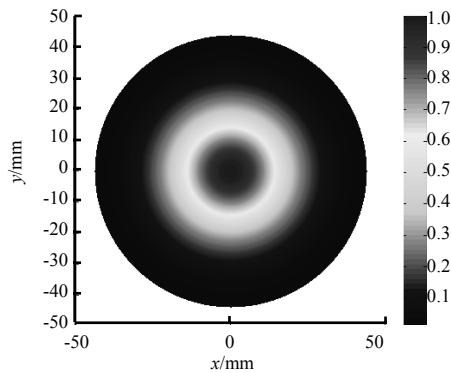


Fig.1 Energy field pattern of Gaussian mode
图 1 高斯模式的能量分布

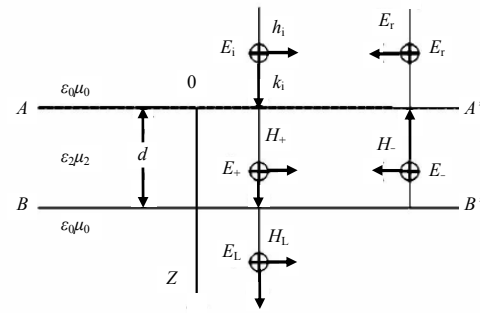


Fig.2 Reflection and transmission of incident wave when it is perpendicular to the surface of window
图 2 电磁波垂直于输出窗的反射和透射

假设 2 种均匀介质的介电常数及磁导率分别为 ϵ_1, ϵ_2 和 μ_1, μ_2 , 根据 Fresnel 定律可得垂直入射的反射系数及透射系数分别为:

$$R = \left(\sqrt{\epsilon_1 \mu_2} - \sqrt{\epsilon_2 \mu_1} \right) / \left(\sqrt{\epsilon_1 \mu_2} + \sqrt{\epsilon_2 \mu_1} \right) \quad (1)$$

$$T = 2\sqrt{\epsilon_1 \mu_2} / \left(\sqrt{\epsilon_1 \mu_2} + \sqrt{\epsilon_2 \mu_1} \right) \quad (2)$$

由于输出窗片是具有一定厚度的介质, 输出窗两侧分别为空气和真空, 因而微波在穿过窗片时, 将在 2 个界面发生一系列的反射和透射, 图 2 给出了电磁波垂直于输出窗的反射和透射情况^[7]。窗片两侧的介电常数和磁导率分别为 ϵ_0 和 μ_0 。本文选择化学气相沉积金刚石作为输出窗片材料, 在 140 GHz 频率处, 其相对介电常数为 $\epsilon_2 = 5.67$, 损耗角正切为 $\tan \delta = 2 \times 10^{-5}$ 。由式(1)和式(2)得窗片的反射系数和透射系数分别为: $R_{AA'} \approx -0.4085$, $R_{BB'} \approx -0.4085$, $T_{AA'} \approx 0.5915$, $T_{BB'} \approx 1.4085$ 。其中入射面的反射系数 $R_{AA'}$ 为负值, 说明入射波从真空入射到窗片时, 反射波产生 π 相位突变。假设输出窗的厚度为 d , 电磁波在窗片内来回一次产生的相位差为:

$$\delta = 2d \sqrt{\left(\frac{2\pi f}{c} \right)^2 \epsilon_r - \left(\frac{x_{mn}}{r_{ow}} \right)^2} \quad (3)$$

式中: x_{mn} 为对应模式的特征根; r_{ow} 是输出窗的半径; ϵ_r 为窗片材料的介电常数; f 和 c 分别表示工作频率和在材料中的光速。

假设入射波的幅值为 1, AA' 平面的反射系数为 r_1 。当 $\delta = 2p\pi$ ($p=1, 2, 3, \dots$) 时, 反向波的幅值为 0, 透射波的幅值为 1, 即从高频系统出来微波经过输出窗时反射回去的微波完全相互抵消, 输出的微波完全透过了窗片而没有反射, 得到无反射输出窗的窗片厚度。

由于 HE_{11} 模式中 TE_{11} 模占 84%, 故计算窗片厚度时可以只考虑 TE_{11} 模, 即取 $x_{mn}=1.841$, 窗片半径选择为 $r_{ow}=44$ mm, $p=4, d=1.8$ mm。在不考虑介质吸收的情况下, 则输出窗反射率为:

$$R = \frac{2r_1^2 \left[1 - \cos \left(2d \sqrt{\left(\frac{2\pi f}{c} \right)^2 \epsilon_r - \left(\frac{x_{mn}}{r_{ow}} \right)^2} \right) \right]}{1 + r_1^4 - 2r_1^2 \cos \left(2d \sqrt{\left(\frac{2\pi f}{c} \right)^2 \epsilon_r - \left(\frac{x_{mn}}{r_{ow}} \right)^2} \right)} \quad (4)$$

图 3 给出了工作在 HE_{11} 模式下, 中心频率为 140 GHz 的回旋振荡管金刚石输出窗片反射率 R 随输出窗片厚度变化的曲线。由图可知, 对于无反射输出窗, 反射率对窗片的厚度误差较为敏感, 当窗片厚度误差在 2% 以内, 反射率小于 5%, 随着误差增大, 反射率将会迅速上升。如果输出窗片厚度误差为 5%, 则反射率 $R=0.23$, 这将严重危害回旋振荡管的稳定工作, 所以输出窗片的厚度计算必须严格按照反射定律等各式计算。图 4 为输出窗片反射率与频率的关系, 由图可见, 金刚石输出窗的频率带宽大于 2 GHz, 反射率小于 0.01, 可以满足所研制回旋振荡管在 140 GHz 附近频率的调谐

表 1 140 GHz 高斯模式输出窗片初始设计参数
Table 1 Design goal for the 140 GHz Gaussian mode output window

parameter	value
f /GHz	140
radius of output window r_{ow} /mm	44~50
radius of Gaussian mode r_g /mm	21
permittivity ϵ_r	5.67
loss tangent $\tan \delta$	2×10^{-5}

变化。根据准光模式变换器输出高斯波束结果, 可以给出该窗片的初始设计参数, 如表 1 所示。

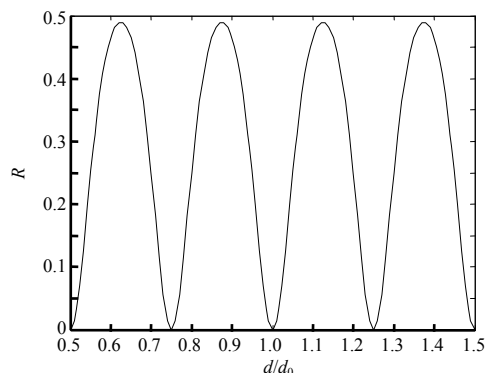


Fig.3 Reflectivity of output windows versus thickness
图 3 输出窗片反射率与厚度的关系

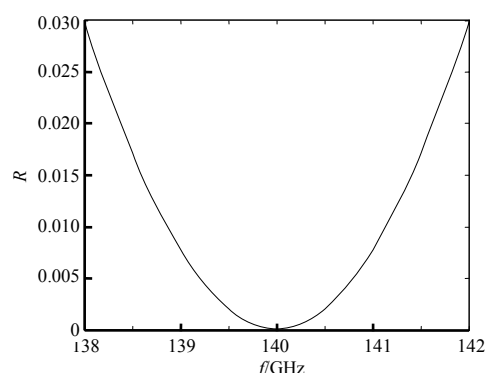


Fig.4 Reflectivity of output windows versus frequency
图 4 输出窗片反射率与频率的关系

2 输出窗片透射率 FEKO 软件计算结果

对于上述理论计算结果, 可以利用三维全波仿真软件—FEKO 来计算优化高斯模式输出窗性能。首先需要解决高斯模式如何产生问题, 本文利用 Matlab 软件编制高斯场分布, 定义窗片大小及波束半径条件下, 经过模拟计算后导入 FEKO 软件作为输出窗端口高斯场源, 如图 5 所示, 可见输入端口的场分布为高斯场分布。

以高斯场作为场源, 分别研究窗片厚度、介电常数、损耗角正切、窗片半径、束斑半径等因素对窗片的影响, 以及高斯模式透过金刚石窗片的传输情况。

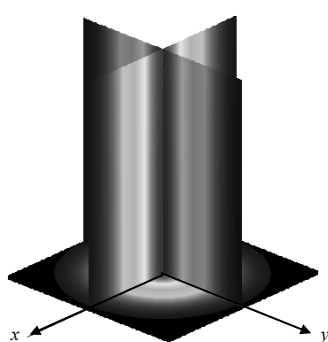


Fig.5 Gaussian field and distribution curve in port of output window
图 5 输出窗端口的高斯场源及分布曲线

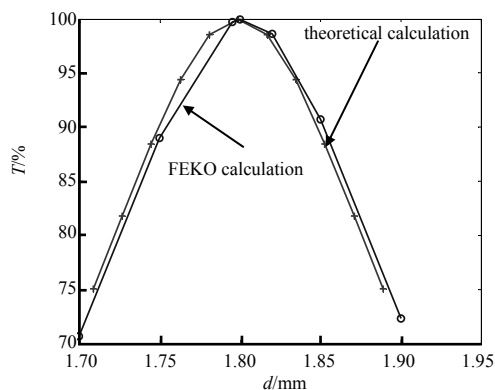
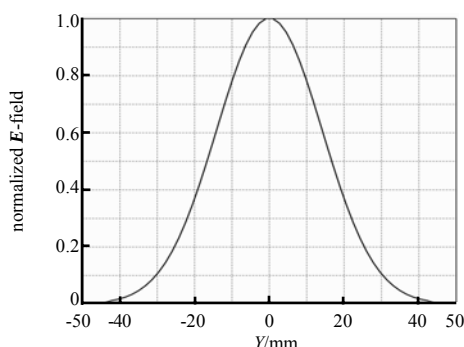


Fig.6 Transmission rate of output windows versus thickness
图 6 输出窗透射率随窗片厚度的分布曲线

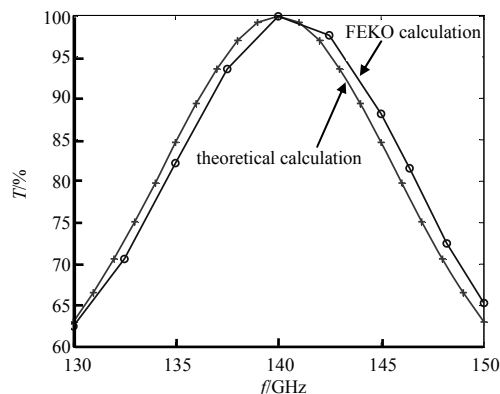


Fig.7 Transmission rate of output windows versus frequency
图 7 输出窗透射率随频率的分布曲线

图 6 给出了不同窗片厚度情况下, 分别利用 FEKO 软件和上节理论计算获得的高斯模式透过窗片的透射率计算结果。从图中可以看出, 两者计算结果一致, 由于取点所限, FEKO 计算曲线不太平滑; 另外, 在窗片厚度

为 1.8 mm 时, 高斯模式透过窗片的效率最高, 因此选择金刚石窗片的厚度为 1.8 mm。

图 7 和图 8 给出了不同频率和介电常数情况下, 分别利用 FEKO 软件和理论计算获得的高斯模式透过窗片的透射率计算结果。从图中可以看出, 两者计算结果一致; 另外, 在窗片的厚度为 1.8 mm 条件下, 当窗片工作在 140 GHz 频率处, 以及介电常数取 5.67 时, 高斯模式透过窗片的效率最高。

另外还利用 FEKO 软件研究了其他参数对窗片传输的影响, 包括损耗角正切、窗片直径尺寸。同时对软件采用网格大小对收敛性进行了分析, 最后研究了高斯模式大小对窗片传输效率的影响。图 9~图 11 分别给出了输出窗透射率随损耗角正切、窗片半径和高斯模式波束半径的分布曲线, 由图可见, 窗片透射率随损耗角正切、窗片半径和高斯模式半径变化不大; 且经过计算, 窗片透射率随网格大小变化不大, 可以认为计算结果达到收敛状态。

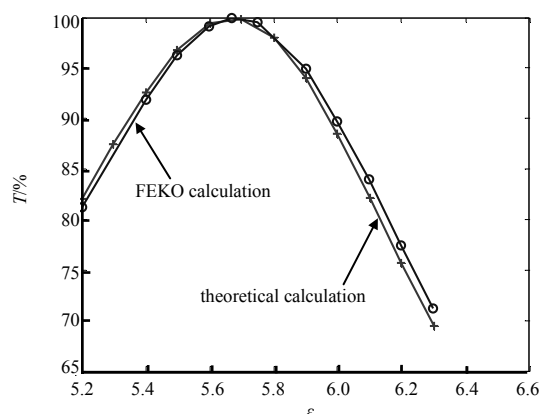


Fig.8 Transmission rate of output window versus permittivity
图 8 输出窗透射率随介电常数的分布曲线

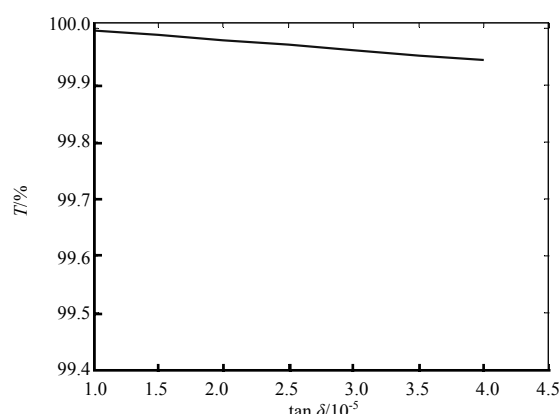


Fig.9 Transmission rate of output window versus loss tangent
图 9 输出窗透射率随损耗角正切的分布曲线

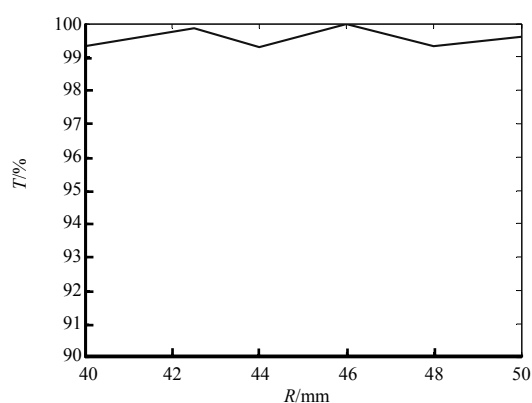


Fig.10 Transmission rate of output window versus radius
图 10 输出窗透射率随窗片半径的分布曲线

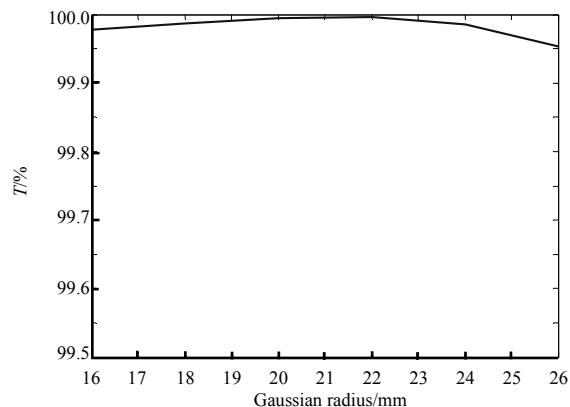


Fig.11 Transmission rate of output window versus Gaussian radius
图 11 输出窗透射率随波束半径的分布曲线

根据上述计算, 可确定高斯模式输出窗片的参数, 窗片工作频率为 140 GHz 时, 选择金刚石窗片厚度为 1.8 mm, 介电常数为 5.67, 损耗角正切为 2×10^{-5} , 窗片半径根据工程需要选为 46 mm, 波束半径为准光模式变换器输出的高斯模式半径尺寸(21 mm), 其最后设计参数结果见表 2。

3 结论

本文结合热核聚变用 140 GHz 回旋振荡管研制需要, 以化学气相沉积金刚石作为输出窗片的材料, 通过理论分析并编程计算, 优化设计出高斯模式输出窗片的尺寸, 获得窗片半径和厚度分别为 46 mm 和 1.8 mm。利用 FEKO 软件和 Fresnel 理论分析了各参数对高斯模式透射率的影响, 两者结果比较一致, 获得高斯模式输出窗的设计参数及设计方法, 从而为热核聚变用回旋振荡管的研究打下技术基础。

表 2 140 GHz 高斯模式输出窗片设计参数

Table 2 Design parameters for the 140 GHz Gaussian mode output window

parameter	value
f/GHz	140
radius of output window r_{ow}/mm	46
radius of Gaussian beam r_g/mm	21
thickness d/mm	1.8

参考文献:

- [1] HEIDINGER R,DAMMERTZ G,MEIER A,et al. CVD diamond windows studied with low-and high-power millimeter waves[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2002,30(3):800-807.
- [2] BRANDON J R,COE S E,SUSSMANN R S,et al. Development of CVD diamond RF windows for ECRH[J]. Fusion Engineering and Design, 2001,53(1):553-559.
- [3] KASUGAI A,SAKAMOTO K,TAKAHASHI K,et al. 1 MW and long pulse operation of Gaussian beam output gyrotron with CVD diamond window for fusion devices[J]. Fusion Engineering and Design, 2001,53(1):399-406.
- [4] ALARIA M K,BERA A,SINHA A K. Design and development of RF window for high power gyrotron[C]// Proc. IEEE IVEC, Monterey,USA:[s.n.], 2016:497-498.
- [5] 曾旭,王峨锋,李莉莉,等. 3 mm 回旋行波管微波等离子体化学气相沉积金刚石输出窗[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(11):113003-1-113003-5. (ZENG Xu,WANG E'feng,LI Lili,et al. Microwave plasma chemical vapor deposition diamond output window for 3 mm gyro-traveling wave tube[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014,26(11):113003-1-113003-5.)
- [6] DENISOV G G,ALEXANDROV N L,BOGDASHOV A A,et al. Experiments on HE_{11} mode excitation by paraxial wave beams[C]// 21th Int. Conf. Infrared and Millimeter Waves. Berlin,Germany:[s.n.], 1996.
- [7] 罗勇,李宏福,徐勇,等. 低反射低吸收高平均功率回旋管输出窗的设计[J]. 强激光与粒子束, 2004,16(11): 1425-1428. (LUO Yong,LI Hongfu,XU Yong,et al. RF windows of low reflectivity and absorption for high average power gyrokystrons[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2004,16(11):1425-1428.)
- [8] 何晟,邓艳波,李儒礼. 高斯模式输出窗的热分析[J]. 真空电子技术, 2015(3):12-16. (HE Cheng,DENG Yanbo,LI Ruli. The thermal analysis of output HE_{11} mode windows[J]. Vacuum Electronics, 2015(3):12-16.)
- [9] 陈辉,王丽,徐勇,等. Ka波段高功率回旋行波管输出窗的优化设计和功率容量的研究[J]. 真空科学与技术学报, 2015,35(4):474-479. (CHEN Hui,WANG Li,XU Yong,et al. Design optimization of output window for high power Ka-band gyrotraveling wave tube and its power capacity[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2015,35(4):474-479.)

作者简介:



李志良(1979-),男,安徽省宿州市人,高级工程师,主要研究方向为高功率微波、毫米波与太赫兹回旋器件.email:lizhiliang100@163.com.

冯进军(1966-),男,山西省运城市人,研究员,博士生导师,研究方向为毫米波/太赫兹真空功率器件、真空微电子学、微波管 CAD 和高功率回旋器件等.

刘本田(1971-),男,河南省安阳市人,研究员,主要从事高功率毫米波回旋管的理论和实验研究.

张 杨(1989-),男,山西省大同市人,工程师,主要从事高功率毫米波回旋管的理论和实验研究.