

文章编号: 2095-4980(2014)06-0788-05

340 GHz 返波振荡器输能窗的设计与实验

唐 烨, 冯进军

(中国电子科技集团公司 12 所 大功率微波电真空器件技术国防科技重点实验室, 北京 100015)

摘 要: 为 340 GHz 返波振荡器设计了输能窗, 并对其进行了设计分析及仿真模拟计算。计算结果表明, 该窗在 327 GHz~347 GHz 频段内的反射系数优于 30 dB。对窗片进行金属化, 焊接输能窗, 封接出气密性良好的输能窗, 对输能窗进行测试。测试结果表明, 该窗在 333 GHz~367 GHz 频段内反射系数优于 10 dB, 其中, 在 336 GHz~344 GHz 频段内优于 15 dB, 传输损耗 7 dB 左右。对模拟结果与实测结果的偏差进行了分析, 为进一步优化输能窗奠定基础。

关键词: 太赫兹; 返波振荡器; 盒型窗; 反射系数; 传输损耗

中图分类号: TN124

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201406.0788

Design of the window used in 340 GHz Back-ward Wave Oscillator

TANG Ye, FENG Jin-jun

(Beijing Vacuum Electronics Research Institute Vacuum Electronics National Laboratory, No.12 Research Institute, China Electronics Group Corporation, Beijing 100015, China)

Abstract: The 340 GHz window for Back-ward Wave Oscillator(BWO) is studied in the paper. The simulation results show that the reflect coefficient(S_{11}) is better than 30 dB from 327 GHz–347 GHz. The window is metalized and airtight. The test results of the window show that the S_{11} is better than 10 dB from 333 GHz–367 GHz, and better than 15 dB from 336 GHz–344 GHz; the loss of the transmission is about 7 dB. The difference between simulation and test is analyzed, which is helpful for the improvement of the window.

Key words: terahertz; Back-ward Wave Oscillator; window; reflect coefficient; transmission loss

返波振荡器是微波电真空器件的一种, 它利用慢波结构上的返波与电子注相互作用而产生微波振荡。这种器件的主要特点是可在很宽的频带内实现频率调谐。340 GHz 返波振荡器作为信号源, 在产生清洁能源的热核聚变中, 对等离子体密度起伏的检测尤为重要。因此, 为返波振荡器设计匹配良好, 传输损耗小的输能窗有重要的意义。在该频段输能窗的设计面临窗片薄、尺寸小、金属化难等难题, 如果完全按照“缩尺原理”计算, 在该频段, 设计的宽带输能窗的窗片厚度只有 0.05 mm, 如此薄的窗片在机械强度和真空度的维持等方面都难以保证^[1]。考虑到实际应用, 即该输能窗的实际工作带宽仅为 20 GHz, 而 20 GHz 带宽对于 340 GHz 频段而言是窄带, 因此可以考虑设计稍厚的窗片, 检验是否可满足设计要求。

为保证该输能窗的气密性, 对窗片金属化封接宽度有严格的要求。如果金属化封接的宽度窄, 焊接困难, 难以封接出气密性良好的输能窗, 该频段窗片尺寸及圆波导尺寸都很小, 因此封接宽度没有过多的余量。且封接的厚度若不均匀, 易产生反射较强的点, 这些对输能窗的性能都有影响, 设计时需全面考虑。

本文为 340 GHz 返波振荡器设计了输能窗, 对窗片进行了金属化, 封接出气密性良好、可实用的 340 GHz 输能窗, 并对该窗进行了测试。

1 设计与仿真计算

考虑到该频段损耗较大, 在窗片的选择上, 需选择介电常数低、微波损耗小的输能窗。金刚石具有低介电常数、低微波损耗、高硬度、高导热率等特性, 能满足太赫兹电真空器件对介质材料的要求。金刚石材料的介电常数为 5.6, 实验数据测得损耗角正切最优值在 145 GHz 仅为 6×10^{-6} , 170 GHz 为 8×10^{-6} ^[2-3], 因此选取金刚石

收稿日期: 2014-08-14; 修回日期: 2014-09-27

材料作为介质片材料(金刚石材料为多晶结构)。盒形窗结构由于结构简单、工艺成熟等优点而被采用。

在微波工作室软件中建立模型,如图 1 所示,对窗片的尺寸、圆波导的尺寸进行优化设计。模拟时设置金刚石的介电常数为 5.6(这一数值是在 W 波段得到并验证的。随着频率的增加,介电常数会稍有变化,但目前对该频段下的介电常数无法测量,只能沿用 5.6 这一数值进行模拟计算),340 GHz 处的损耗角正切为 0.000 3。分别在理想导体及考虑损耗的情况下(损耗材料设置为电导率 1×10^7 S/m),对反射系数及传输损耗进行仿真模拟,模拟结果见图 2、图 3。

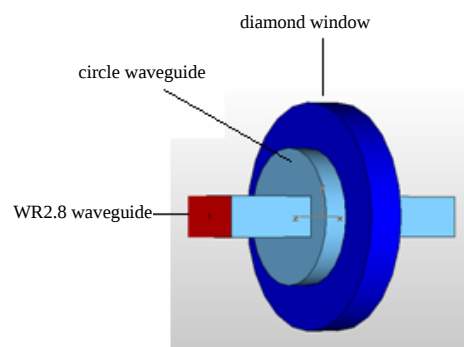
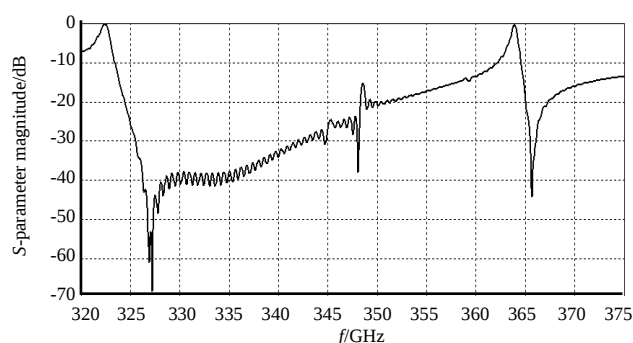
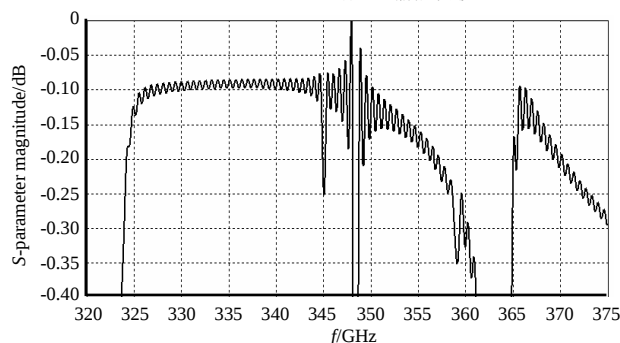


Fig.1 Model of the window in CST

图 1 CST 下的盒型输能窗模型



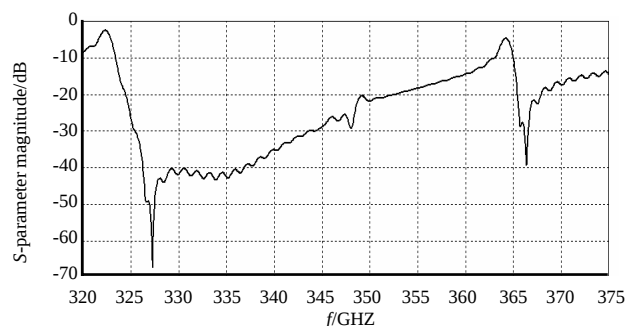
(a) simulation result of the S_{11} without loss



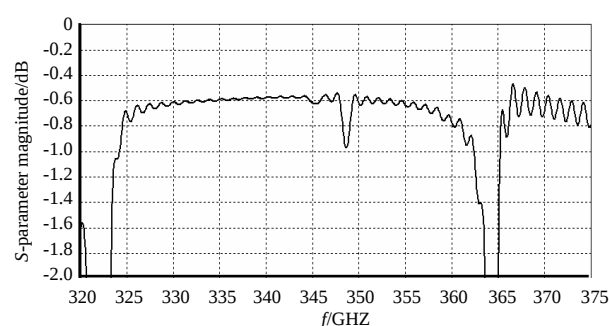
(b) simulation result of the S_{21} without loss

Fig.2 Simulation result of S_{11} and S_{21} without loss

图 2 无损耗时对 S_{11} 及 S_{21} 的模拟结果



(a) simulation result of the S_{11} with loss



(b) simulation result of the S_{21} with loss

Fig.3 Simulation result of S_{11} and S_{21} with loss

图 3 考虑损耗时对 S_{11} 及 S_{21} 的模拟结果

不考虑损耗时,反射的模拟结果如图 2(a)所示,327 GHz~347 GHz 频段内反射系数优于 30 dB,在大约 322 GHz,364 GHz 处有较强的反射。分析原因,可能是由于窗片厚度在该频点处引起了尖峰。损耗模拟结果如图 2(b)所示,输能窗在 327 GHz~345 GHz 频段内损耗大约为 0.06 dB,在 347 GHz 处损耗增加,这与模拟 S_{11} 参数结果在 347 GHz 处开始匹配变坏是一致的;并且在 323 GHz,364 GHz 两点处损耗较大,这也与 S_{11} 在该两点处匹配不好相一致。考虑损耗时,反射系数整体略有变坏,尤其是在 323 GHz,364 GHz 两点比较明显;传输损耗的影响则更为明显,在 327 GHz~345 GHz 频段内损耗为 0.6 dB,为不考虑损耗时的 10 倍。

2 实验结果及误差分析

对窗片进行金属化,封接输能窗,得到气密性良好的 340 GHz 盒型窗,如图 4 所示。对其性能进行测试,采用 Agilent N5245A 型矢量网络分析仪及频率扩展模块,如图 5 所示。



(a) metaled diamond window



(b) sealed window

Fig.4 Window of the 340 GHz BWO

图 4 封接后的金刚石窗片及气密性良好的输能窗



Fig.5 Agilent N5245A vector network analyzer and the frequency extended model for test

图 5 测试时采用的 Agilent N5245A 型矢量网络分析仪及频率扩展模块

测试原理如图 6 所示, 由于该矢量网络分析仪两侧端口为 WR2.2 标准波导口, 而实测端口为 WR2.8 标准波导口, 因此需要进行过渡。在 325 GHz~375 GHz 频段内共取 401 点进行逐点测量。为了更好地测试输能窗的性能, 测试前, 首先对过渡波导的传输损耗进行测试, 测试结果如图 7 所示。测试结果表明, 过渡波导自身存在 2.5 dB 左右的损耗。

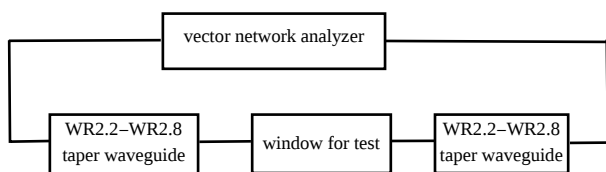


Fig.6 Block diagram of the test theory

图 6 测试原理框图

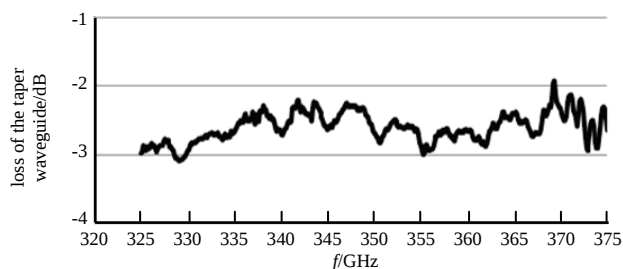


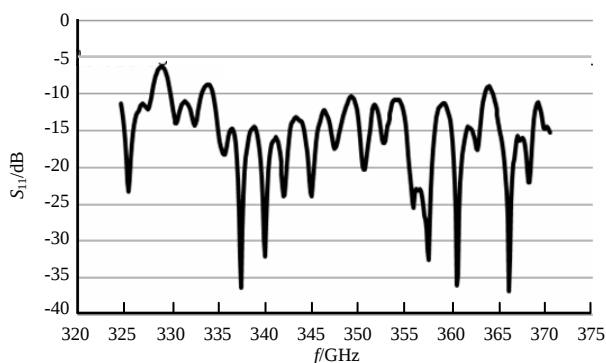
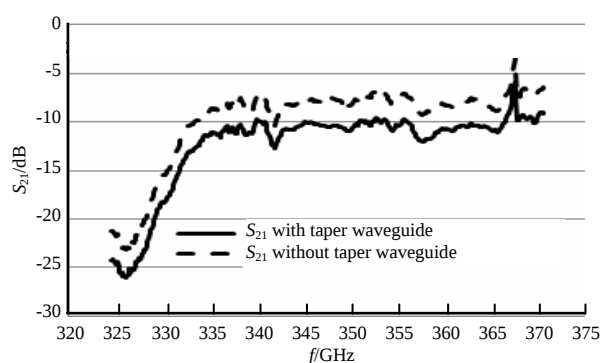
Fig.7 Loss of the taper waveguide

图 7 过渡波导的损耗

对输能窗反射系数的测试结果如图 8 所示, 测试结果表明, 329 GHz, 367 GHz 处有较强的反射点, 这与模拟结果基本一致。在 333 GHz~367 GHz 频段内反射系数优于 10 dB, 其中, 在 336 GHz~344 GHz 频段内优于 15 dB, 实测结果较模拟结果稍差。分析原因, 是由于实际窗架加工尺寸的偏差以及与窗片配合的装配误差引起的。由于测试条件有限, 无法在焊接之前对输能窗的性能进行测试, 选取最优的上下窗架及窗片组合进行焊接, 只能盲选一对窗架与窗片进行配合并焊接, 焊接得到气密性良好的输能窗进行测试。因此窗在焊接前的性能未知, 焊接过程中焊料的流散对输能窗性能的影响也未知。

对损耗测试的结果表明, 该窗损耗较大, 如图 9 所示, 在 335 GHz~370 GHz 频段内有 7 dB 损耗, 分析产生如此大损耗的原因: a) 在 340 GHz 频段内, 微波传输的损耗较大, 仅在波导中传输损耗就为 2.5 dB 左右, 在窗

架中也存在相当大的损耗,模拟时只能输入电导率这一参量,而无法根据实际加工零件的粗糙度进行具体设置;b)测试时各连接件之间存在损耗,由于该矢网的接口为WR2.2,而设计的输能窗标准波导口为WR2.8,因此需要连接过渡波导,连接的过程中会产生损耗;c)模拟时窗片损耗角正切值设置为0.0003,而实际加工出的窗片由于其成分、纯度等因素,其真实的损耗角正切值无法准确确定,因此也会存在使损耗增加的因素;d)焊料的流散情况对损耗也有一定的影响,由于该波导口尺寸非常小,为 $0.71\text{ mm} \times 0.355\text{ mm}$,无法观察到焊料的流散情况,正常的工艺流程应为焊接前对匹配以及损耗分别进行测试,焊接后再对匹配及损耗分别进行测试,以了解焊接过程中匹配及损耗的变化情况,但由于测试条件有限,只能直接盲选焊接进行测试,因此无法了解焊接过程对匹配及损耗造成的影响;e)窗片表面洁净程度对损耗角正切值影响很大,表面洁净度对面损耗也存在影响,据资料显示,当表面洁净度不同时,在6 GHz频段处其面损耗的损耗角正切值可能会由0.4增至2.5^[4],因此表面洁净程度对输能窗传输损耗的影响还是很大的,该窗由于封接前未考虑表面洁净程度,现已封接好,只能进行简单的处理,以使其表面尽量洁净。

Fig.8 Test result of S_{11} 图8 实测 S_{11} 结果Fig.9 Test result of S_{21} 图9 实测传输损耗 S_{21}

在这里还需指出的是,如图6所示,在被测件中与两端过渡波导相连接的还有WR2.8直波导,直波导由于加工的粗糙度等原因,会存在一定的损耗,如果对该直波导的损耗进行测试,对近似估算目前加工零件在340 GHz频段的损耗是有帮助的,同时也可以指导模拟计算中损耗的设置。但该工作没有进行,因此测试中得到的损耗是含有2个直波导的损耗。

3 结论

本文设计了340 GHz输能窗,对设计出的结构进行了加工、装配,封接出气密性良好的输能窗,在矢量网络分析仪下对输能窗的反射系数、传输损耗进行了测试,测试结果表明,反射系数与模拟结果基本一致,而传输损耗较模拟值偏大,分析了损耗较大的原因,为进一步优化输能窗奠定基础。

致谢

本项目测试在东南大学毫米波国家重点实验室进行,感谢东南大学毫米波国家重点实验室对本项目测试的大力支持。

参考文献:

- [1] 杜英华,丁明清,胡银富,等. 太赫兹行波管倍频器用金刚石输能窗研究[J]. 真空电子技术, 2013(3):21-24. (DU Ying-hua, DING Ming-qing, HU Yin-fu, et al. Study of diamond transmission windows used in THz TWT frequency multiplier[J]. Vacuum Electronics, 2013(3):21-24.)
- [2] Garin B M, Kupnin A N, Parkhomenko M P, et al. Losses in low diamonds at m range[C]// 23rd Int. Conf. Infrared and Millimeter Waves. Colchester, U.K.: [s.n.], 1998:230-231.
- [3] Heidinger R, Sporl R, Thumm M, et al. CVD diamond windows for high power gyrotrons[C]// 23rd Int. Conf. Infrared and Millimeter Waves. Colchester, U.K.: [s.n.], 1998:230-231.
- [4] Roland Heidinger. CVD diamond windows studied with low and high power millimeter waves[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2002, 30(3):800-807.

(下转第 797 页)