

螺旋线慢波结构夹持性能测试方法研究

韦朴¹⁾ 周明干²⁾ 朱露¹⁾ 张劲¹⁾ 王雪峰¹⁾ 吕东亚²⁾
陈宁²⁾ 杨明华²⁾ 孙小菡^{1)†}

1) (东南大学, 电子器件与系统可靠性中心, 南京 210096)

2) (中国电子科技集团第十二研究所, 北京 100015)

(2012年10月31日收到; 2012年11月23日收到修改稿)

提出了一种由螺旋线慢波结构热分布特性来获知其夹持性能的方法. 设计了基于光纤光栅和热电偶的分布式温度测试平台, 计算和分析了光纤光栅等测温元件对慢波结构散热特性的影响. 搭建了实验系统, 研制了分布式微型光纤光栅温度传感阵列, 并对某型 X 波段行波管慢波结构进行对比测试. 结果表明, 实验获得的温差曲线可准确判别慢波结构夹持性能的优劣, 且不破坏器件结构与性能.

关键词: 慢波结构, 夹持特性, 散热能力, 光纤光栅传感阵列

PACS: 44.10.+i, 42.81.Pa

DOI: 10.7498/aps.62.094401

1 引言

螺旋线行波管是一种宽频带、高功率的微波器件, 在通信、雷达和电子对抗系统中具有广泛的应用^[1,2]. 慢波结构是螺旋线行波管中能量交互的关键部件, 其性能直接决定了整管性能的优劣^[3,4]. 其中, 散热特性是慢波结构的一项重要指标, 它不仅限制了行波管的平均输出功率, 也是影响行波管工作稳定性和可靠性的重要因素. 慢波结构散热特性的优劣取决于组件夹持特性^[5], 由螺旋线与夹持杆、夹持杆与管壳间的接触热阻表征.

目前主要采用热电偶测试慢波结构的散热性能. 该方法虽然准确, 但是操作复杂, 且会对行波管结构产生破坏^[6]. 文献[7]通过检测螺旋线电阻值推断其内部的温度, 但该方法难以判断螺旋线不同位置处的散热性能. 同时, 由于螺旋线慢波结构组件生产大量采用手工制作, 难以保证批量生产结构夹持性能的一致性. 因此若提出并发现一种新方法, 在不破坏螺旋线组件结构和性能的前提下, 快速测试其沿线接触热阻, 直接判别其夹持性能, 就可进行部件的前期筛选与改进, 从而大大提高生产效率,

保证整管可靠性.

由于螺旋线直径较小, 传统的温度传感器难以检测其温度分布. 光纤光栅 (FBG) 温度传感器是最近十多年出现的一种新型光纤传感器件, 具有体积小、抗电磁干扰、可分布检测、灵敏度高等优点^[8]. 利用光纤微加工工艺, 可以将多个微型 FBG 传感器以波分复用的形式串联在一根光纤中^[9].

本文提出了基于微型 FBG 分布式温度传感阵列的螺旋线慢波结构夹持特性测试方法. 该方法实现了对螺旋线慢波结构夹持特性快速、准确的测试, 并且不对器件产生任何影响. 基于该方法设计了夹持性能测试实验平台, 利用 ANSYS 分析论证了实验平台的正确性和可靠性, 搭建了测试系统, 并完成了对样管的测试.

2 测试方法

当螺旋线发热时, 热量由螺旋线通过夹持杆传导至管壳, 慢波结构由内至外的温差可以表示为^[5]

$$\Delta T_{\text{SWS}} = \Delta T_{\text{h}} + \Delta T_{\text{r}} + \Delta T_{\text{s}} + \frac{pW}{N\omega b}\rho_1 + \frac{W}{Nb}\rho_2, \quad (1)$$

其中, ΔT_{h} , ΔT_{r} , ΔT_{s} 分别是螺旋线、夹持杆和管壳内外的温度差; ρ_1 和 ρ_2 分别为螺旋线与夹持杆接

† 通讯作者. E-mail: xhsun@seu.edu.cn

触处以及管壳与夹持杆接触处的界面热阻率, p 是螺距, ω 是螺旋线的带宽, b 是夹持杆的宽度, W 是单位轴向长度的耗散功率. 由 (1) 式可知, 慢波结构的温差受其界面热阻的影响. 而界面热阻率可以使用以下半经验公式表示 [10]:

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{\sigma_1 k_2}{\sigma_2 k_1} \left[\frac{P_2 H_1}{P_1 H_2} \right]^{0.95}, \quad (2)$$

其中, σ_1 和 σ_2 分别是螺旋线与夹持杆接触处和管壳与夹持处表面粗糙度的均方根, k_1, k_2 和 H_1, H_2 分别为两接触处的热导率的均方根和较软材料的微硬度, P_1, P_2 为接触处所受的压强. 由 (2) 式可知, 慢波结构界面热阻的大小, 除了与其自身的材料相关外, 还与慢波结构各个器件之间的夹持特性有关.

由 (1) 式, (2) 式可知, 对于某一确定型号的行波管而言, 其慢波结构夹持性能直接决定了其接触热阻, 而该型号慢波结构的接触热阻又可以由螺旋线和管壳之间的温差直接反映. 因此, 本文提出了一种通过检测慢波结构热特性分布来判断其夹持性能优劣的方法. 在螺旋线发热过程中, 实时监测螺旋线和管壳不同位置处的温度变化, 并通过螺旋线和管壳之间的温差判断该位置的夹持性能. 显然, 对于一个夹持特性良好的器件, 不同位置处螺旋线和管壳的温差曲线应该是相近的. 而对于同一型号的器件, 也应该有相类似的温差曲线.

测试平台如图 1 所示. 拟采用给螺旋线通电的方式使其发热. 为了避免螺旋线寄生电感的影响, 采用直流电加载, 电流大小视螺旋线电阻而定. 传感阵列 Sensor 1 和 Sensor 2 中包含了若干个温度传感器, 分别放置于螺旋线和管壳的位置 A、位置 B 和位置 C 等若干处, 用于检测慢波结构不同位置处的温度变化.

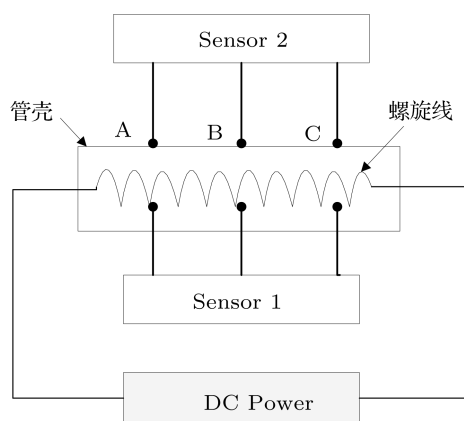


图 1 测试平台原理图

实时测量螺旋线的温度分布是该方法能否实现的关键. 由于螺旋线的内径非常小, 传统的温度传感器难以在不破坏行波管结构的情况下测量出螺旋线内部的温度分布. 因此, 设计了微型 FBG 温度传感阵列. 如图 2 所示, 传感阵列以波分复用的方式在一根光纤上刻写多个 FBG, 在对栅区进行封装后 [11], 放置于螺旋线测温点处. 光纤的一端通过一个 2×2 耦合器分别连接至扫描激光器和信号处理单元. 信号处理单元解调 FBG 传感器的反射光谱, 获得传感器温度信息后送至终端 PC 机.

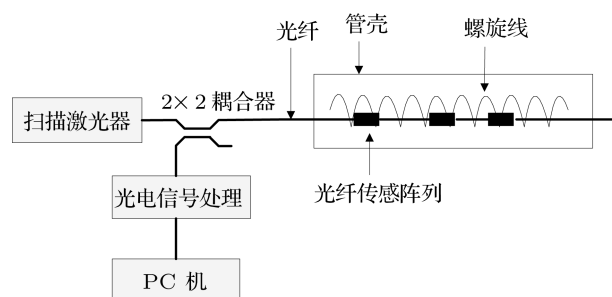


图 2 光纤光栅传感阵列用于螺旋线温度检测

传感阵列 sensor 2 由工业热电偶组成. 将传感器探头紧贴管壳, 其位置与 FBG 传感器一一对应. 为了降低传感器自身对慢波结构温度分布的影响, 应尽可能减少传感器与管壳的接触面积, 同时对接触面施加一定的压力, 从而降低传感器与管壳之间的接触热阻.

3 测试平台对螺旋线慢波结构散热性能的影响

放置于螺旋线和管壳的温度传感器对慢波结构温度分布影响的大小是该方法是否可行的关键. 采用有限元分析软件 ANSYS 根据实际尺寸对螺旋线慢波结构和温度传感器进行建模, 分析传感器对慢波结构的影响. 图 3 所示是待测某型螺旋线慢波结构和传感器的实际尺寸模型. 慢波结构的螺旋线、夹持杆和管壳分别由钨、氧化铍和镍铜合金组成, 接触面根据实际情况加载界面热阻率. 图 3(a) 是慢波结构的基本模型, 其中螺旋线和管壳的内、外半径分别为 0.66 mm, 0.78 mm 和 2.05 mm, 3.2 mm. 在螺旋线中放置了光纤传感器, 光纤半径为 0.3 mm. 光栅部分封装后半径增加至 0.45 mm, 采用钢作为封装材料.

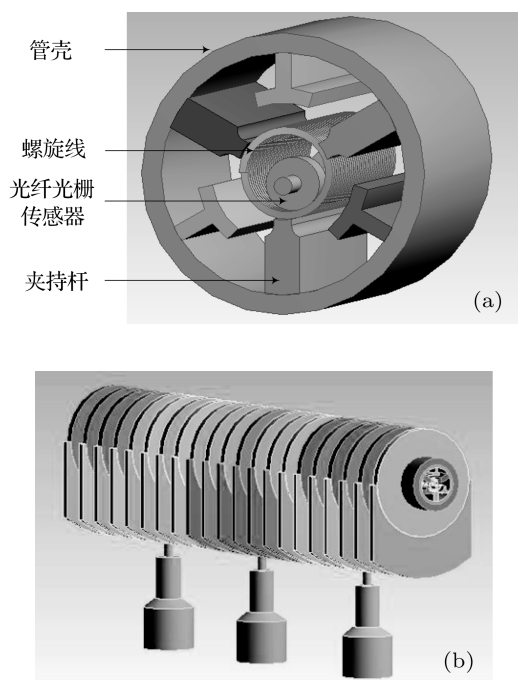


图3 ANSYS模型 (a) 基本慢波结构; (b) 实际结构

图3(b)在(a)基础上添加了极靴、散热片和热电偶传感器,为实际用于仿真的器件模型.热电偶传感器模型依据实际设计的传感器进行建模.传感器同样采用金属钢作为封装材料,其探头的直径约为1 mm.模型计算中涉及的几种材料的部分属性见表1所示.

表1 所用材料的部分属性

| 材料 | 导热系数/(W/m·K) | 比热/(J/kg·K) | 密度/(kg/m ³) |
|------|--------------|-------------|-------------------------|
| 钨 | 174 | 269 | 19350 |
| 氧化铍 | 290 | 944 | 2850 |
| 镍铜 | 17.4 | 427 | 8800 |
| 铁 | 50 | 460 | 7800 |
| 钢 | 60.5 | 434 | 7850 |
| 二氧化硅 | 1.3 | 1000 | 2300 |

根据实际的实验情况给螺旋线加载功率.计算放置传感器前后螺旋线和管壳的温度变化.螺旋线加载功率100 s内,放置传感器前后螺旋线、管壳温度差如图4所示.可见,螺旋线、管壳温差均先减少后增加,且趋势相同,温差在1 °C以内.因此,若试验测试得出,放置传感器后螺旋线与管壳温差大于5 °C以上,此影响可不计.

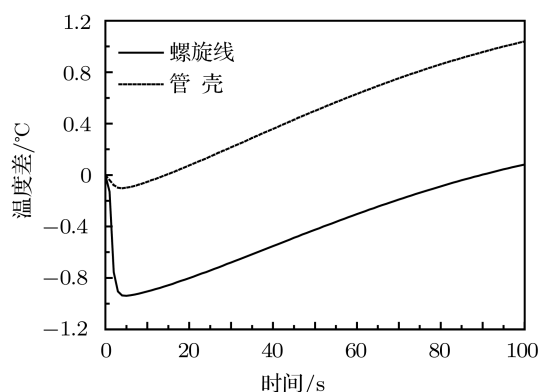


图4 传感器对散热性能的影响

4 实验及结果讨论

根据图1的结构搭建了螺旋线慢波结构夹持性能实验测试系统.系统分为三个模块:电源模块、螺旋线测温模块和管壳测温模块.各个模块通过Labview平台进行控制.

针对某型X波段行波管的慢波结构设计了专用微型FBG温度传感阵列.其裸光纤半径为0.15 mm,加紧包层后半径增加至0.3 mm.光纤传感阵列的涂覆层和紧包层均采用聚酰亚胺材料,保证传感器的测温范围从室温扩展至200 °C.传感阵列采用波分复用技术,在同一根光纤了刻写了三个FBG,栅区长度为5 mm,峰值反射率为50%.对栅区采用半圆形钢管进行传感器封装,钢管长度为9 mm,传感器之间间距为10 mm. FBG传感阵列通过光纤光栅解调仪(sm225-500, MOI Co.Ltd)获得检测的温度信息,解调仪检测频率为1 Hz,波长检测精度2 pm.图5(a)为该温度传感阵列在25 °C时的反射光谱,其中心波长分别为1534.836 nm, 1544.648 nm和1554.871 nm.解调仪根据传感器的反射光谱确定其中心波长后,依据传感器中心波长随温度的变化关系即可获得传感器检测的温度值,如图5(b)所示.

管壳测温模块采用NI公司的热电偶测温模块USB-9213实现对热电偶传感器的控制.传感器布置在FBG传感器对应位置,检测这三个点的温度变化.

采用该实验平台对某型X波段行波管的螺旋线慢波结构(试样一)进行测试.其螺旋线电阻为0.89 Ω,其他参数与图3仿真设置的参数相同.施加4A的电流10 s内螺旋线及其管壳不同位置的温度随时间变化曲线如图6(a), (b), (c)所示.图中“直线”和“虚线”分别是螺旋线和管壳的温度.加

电后,螺旋线发热,其温度快速升高.在10 s内,螺旋线的温度从26 °C升高至近35 °C.热量从螺旋线传导至管壳,也导致了管壳的温度从26 °C升高至约29 °C.此外,如图6(d)所示,螺旋线和管壳之间的温差也随时间呈现出上升趋势,10 s内其温差从0 °C上升至约7 °C.以位置A曲线作为基准,位

置B和位置C的温差曲线与基准的均方根误差分别仅为0.4148和0.7119,最大误差分别为2.05和3.40.这表明三条温差曲线符合度较好,试样一的三个位置处的夹持特性基本一致.同时可见,放置传感器后螺旋线与管壳温差大于5 °C,可忽略传感器对测试结果的影响.

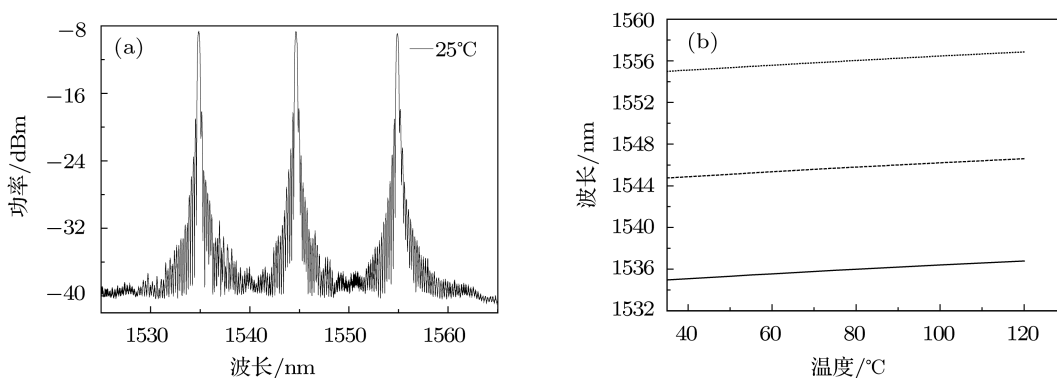


图5 光纤光栅传感阵列反射光谱及其传感特性 (a) 光纤光栅阵列25 °C时的反射光谱; (b) 传感器中心波长随温度的变化

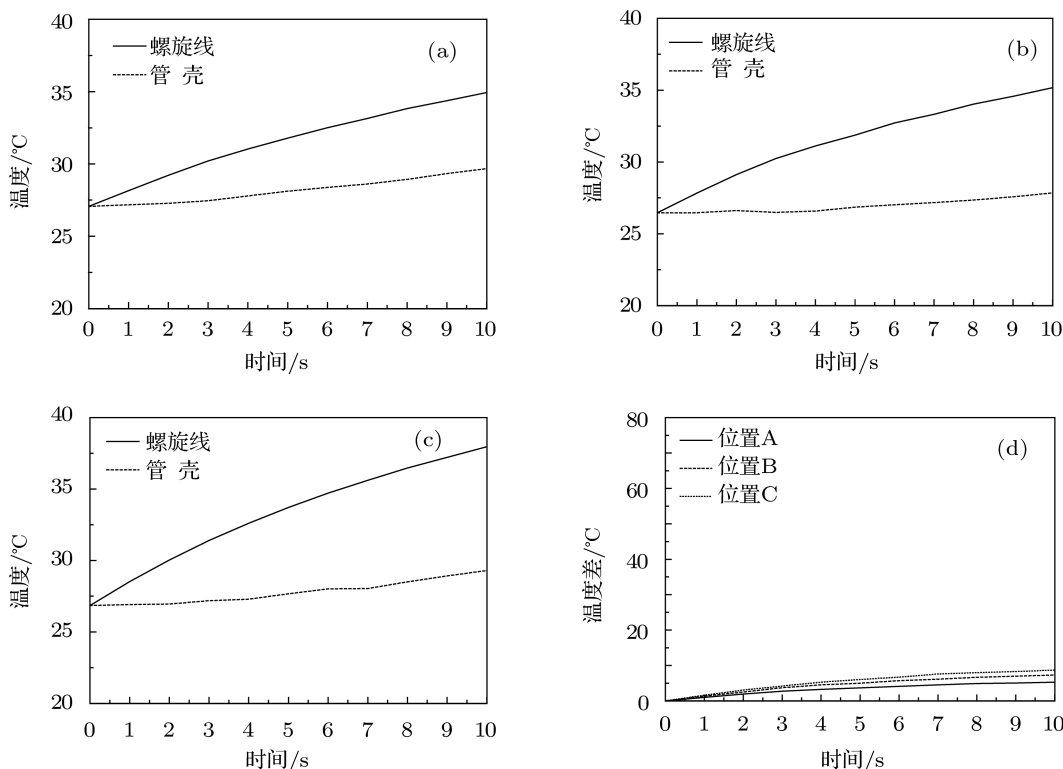


图6 夹持正常的慢波结构不同位置的温度曲线 (a) 位置A处温度曲线; (b) 位置B处温度曲线; (c) 位置C处温度曲线; (d) 三个位置的温差曲线

选用另一支同型号的并已知夹持特性较差的慢波结构(试样二)作为对比,检测结果如图7所示.通电10 s内,螺旋线的温度从室温迅速升高至60 °C以上,而管壳的温度几乎没有变化.图7(d)是

慢波结构不同位置的温差曲线,该温差曲线与试样一相比有较大的差异,10 s后位置A, B和C的温差分别达到了20 °C, 40 °C和70 °C.位置A, B, C的温差曲线与“试样一”位置A的温差曲线的均方根

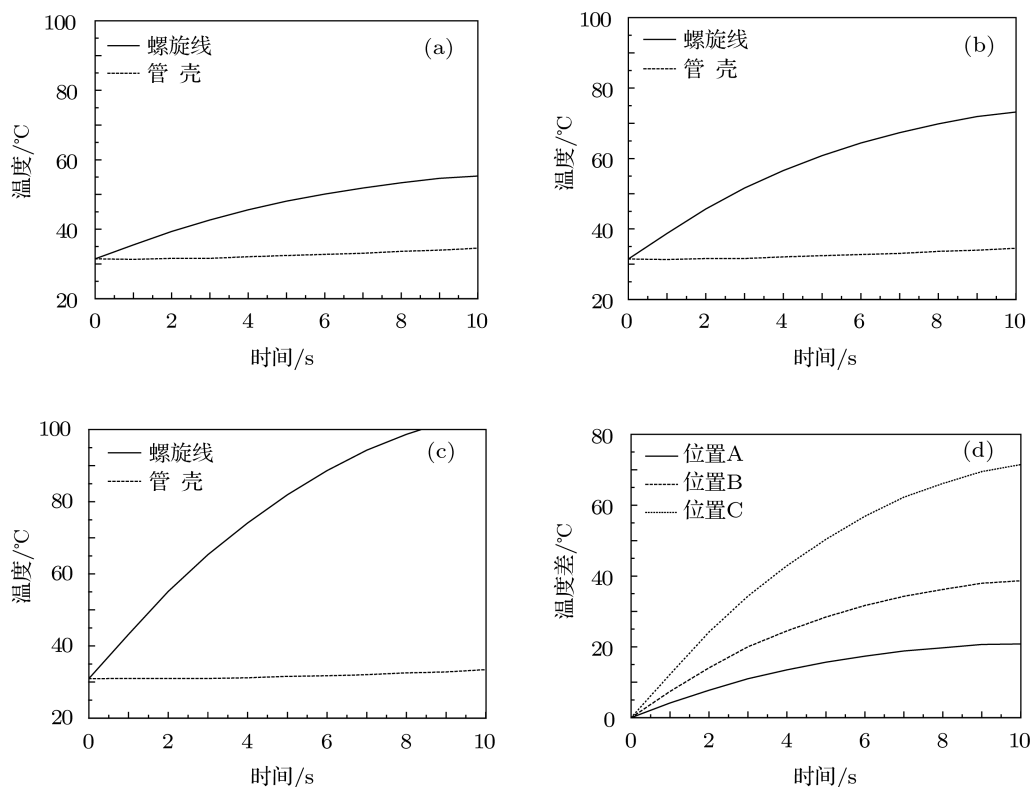


图7 夹持异常的慢波结构不同位置温度曲线 (a) 位置 A 处温差曲线; (b) 位置 B 处温差曲线; (c) 位置 C 处温差曲线; (d) 三个位置的温差曲线

误差分别为 3.4576 和 7.2571 和 14.0146, 最大误差达到了 15.6574 和 33.4014 和 66.2031, 误差扩大了近 10 倍. 这表明“试样二”的温差曲线与“试样一”相比有较大的差异, 也证实了“试样二”的夹持性能较差, 具有较高的界面热阻. 另外, 图 7(d) 中还可以发现三条温差曲线相互差异也很大, 位置 A 与位置 B, C 的温差曲线的均方根误差和最大误差分别达到了 3.8001, 10.5598 和 17.8735, 50.6752, 这又表明“试样二”器件内部不同位置的夹持性能的一致性较差, 其中位置 C 处的界面热阻大于位置 A 和位置 B 处.

5 结论

本文提出了一种螺旋线慢波结构夹持性能快

速测试方法. 该方法通过实时监测螺旋线和管壳的温度分布判断器件的夹持性能. 研制了慢波结构分布式温度测试平台, 该平台基于直流输电方式加热螺旋线, 采用微型 FBG 传感阵列和热电偶检测螺旋线和管壳不同位置处的温度变化. 基于 ANSYS 分析了测试平台对慢波结构温度分布的影响, 论证了实验数据的可靠性. 最终, 搭建了实验测试平台, 并对某型螺旋线慢波结构进行测试. 实验结果表明, 慢波结构不同位置处温差曲线可以有效判别器件夹持性能的优劣, 且不破坏器件的结构和性能. 微型分布式 FBG 传感阵列适合用于行波管生产过程关键部件参数测量. 该方法在螺旋线慢波结构的测试和工艺质量控制中起到重要作用.

- [1] Crivello R, Grow R W 1988 *IEEE Trans. on ED* **35** 1701
 [2] Gerum W, Bruck M, Fischer G, Henry D, Rothacker H P 2005 *IEEE Trans. on ED* **52** 669
 [3] Chong C K, Davis J A, Le Borgne R H, Ramay M L, Stolz R J, Tamashiro R N, Vaszari J P, Zhai Z L 2005 *IEEE Trans. on ED* **52** 653

- [4] Ghosh T K, Challis A J, Jacob A, Bowler D, Carter R G 2008 *IEEE Trans. on ED* **55** 668
 [5] Han Y, Liu Y W, Ding Y G, Liu P K 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1806 (in Chinese) [韩勇, 刘燕文, 丁耀根, 刘濮鲲 2009 物理学报 **58** 1806]
 [6] Zhao X Q, Zhang G X, Sun X H, Ding D, Xie K 2004 *Acta Electronica Sinica* **32** 1029 (in Chinese) [赵新群, 张国兴, 孙小蕊, 丁东, 谢锴

- 2004 电子学报 32 1029] [7] Han Y, Liu Y W, Ding Y G, Liu P K 2007 *IEEE Trans. on ED* 54 1562
[8] Culshaw B, Kersey A 2008 *IEEE J. Lightwave Technol.* 26 1064
[9] Qiao X G, Jia Z A, Fu H W, Li M, Zhou H 2004 *Acta Phys. Sin.* 53 494 (in Chinese) [桥学光, 贾振安, 傅海威, 李明, 周红 2004 物理学报 53 494]
[10] Kunkel S H, Peck M W 1994 *InterSociety Conference on Thermal Phenomena* Washington DC, USA, May 4–7, 1994, 91
[11] Felli F, Brotzu A, Caponero M A, Paolozzi A 2008 *IEEE Sensors Journal* 8 1299

A testing method for assembled performances of helix slow-wave structure with a supported rod

Wei Pu¹⁾ Zhou Ming-Gan²⁾ Zhu Lu¹⁾ Zhang Jing¹⁾ Wang Xue-Feng¹⁾
Lü Dong-Ya²⁾ Cheng Ning²⁾ Yang Ming-Hua²⁾ Sun Xiao-Han¹⁾†

1) (Research Center for Reliability of Electronic Devices and Systems, Southeast University, Nanjing 210096, China)

2) (Beijing Vacuum Electronic Research Institute, Beijing 100015, China)

(Received 31 October 2012; revised manuscript received 23 November 2012)

Abstract

In this paper, a novel testing method for the assembled performances of the helix slow-wave structure (SWS) with a supported rod is proposed based on heat distribution of SWS. A distributed temperature testing platform using fiber Bragg grating (FBG) and thermocouple is designed, and the influence of thermal sensors on the heat dissipation capability of the SWS is analyzed means of ANSYS. The experimental system including a distributed micro FBG sensor array is set up to test the assembled performance of SWS of the X-band TWT. The results show that the assembled performances of the SWS can be effectively obtained by the tested curve of temperature difference.

Keywords: slow-wave structure, assembled performance, heat dissipation capability, fiber Bragg grating sensor array

PACS: 44.10.+i, 42.81.Pa

DOI: 10.7498/aps.62.094401

† Corresponding author. E-mail: xhsun@seu.edu.cn