

金刚石材料对螺旋线慢波组件散热性能的影响*

刘燕文[†] 王小霞 朱虹 韩勇 谷兵 陆玉新 方荣

(中国科学院电子学研究所, 北京 100190)

(2013年7月25日收到; 2013年8月24日收到修改稿)

螺旋线慢波组件的散热性能是影响行波管输出功率、工作稳定性及可靠性的重要因素. 金刚石材料具有极高的导热性能, 将金刚石材料应用于螺旋线慢波组件的制备, 可以在一定程度上改善组件散热性能. 本文计算模拟分析了沉积金刚石薄膜的夹持杆、沉积金刚石薄膜的螺旋线以及金刚石夹持杆对慢波组件散热性能的影响. 结合实验和模拟对比研究, 使计算机仿真与实验测试紧密关联, 提高了计算机模拟研究准确性, 为金刚石材料在慢波组件中的应用提供了重要的参考依据.

关键词: 螺旋线行波管, 慢波组件, 散热性能, 金刚石

PACS: 44.10.+i, 42.81.Pa

DOI: 10.7498/aps.62.234402

1 引言

螺旋线行波管被广泛用于卫星通信、电子对抗和雷达的接收放大级或发射功率源^[1,2], 它的性能对这些系统具有决定性作用, 慢波组件又是决定行波管性能的关键部件, 寻求宽带、高效和导热性能更好的慢波结构对制备出高性能螺旋线行波管是至关重要的^[3,4]. 目前, 国内外许多研究机构都在进行螺旋线行波管散热方面的研究^[5,6]. 螺旋线支撑结构散热能力的研究, 一直是提高连续波行波管输出功率容量的主要方向, 例如文献^[7]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^[7]. 研究认为慢波组件中起支撑和绝缘作用的介质夹持杆的性能是关键因素^[8,9]. 与氧化铝、氧化铍及氮化硼相比, 金刚石的性能要优越得多, 金刚石的热导率大大高于目前常用的几种介质材料, 金刚石在通常温度下其导热率比无氧铜高5倍^[10,11]. 除导热性能外, 金刚石的机械强度、热膨胀系数、绝缘性能、介电常数、介质损耗等多种性能均比上述材料优良^[12,13]. 国外早在上世纪70年代, 就开始金刚石夹持杆的研究工作, 他们对

金刚石夹持杆的热导性能作了量化研究: 如它们的导热率, 以及介质-金属的界面热阻随温度、压力和表面光洁度的函数关系, 应用金刚石支撑的螺旋线结构能够达到165 W/in的功率容量^[14]. 80年代末, 美国对天然金刚石和化学气相沉积金刚石材料组成的慢波组件进行了研究, 取得了一些成果^[15,16]. 不过, 这此方法都具有耗费大、对设备要求严格、不容易实现等缺点. 为此, 我们提出将金刚石沉积在普通介质夹持杆表面和螺旋线表面的思路^[17], 这样即避免了使用纯金刚石介质夹持杆的上述缺点, 又弥补其他普通介质夹持杆热导率低的缺陷, 本文从理论上计算分析了沉积金刚石薄膜的夹持杆、沉积金刚石薄膜的螺旋线以及金刚石夹持杆对慢波组件散热性能的影响, 为金刚石材料在慢波组件中的应用提供了重要的参考依据.

2 慢波组件螺旋线的温度计算

螺旋线慢波结构如图1所示.

在本文实验研究和理论分析中, 慢波组件采用了蒙乃尔管壳、钼螺旋线和氧化铍、氮化硼、金刚石夹持杆. 采用三根夹持杆结构, 管壳与内部组件之间的配合间隙为0.005—0.01 mm, 装配方法使

* 国家自然科学基金(批准号: 61072025)和国家重点基础研究发展计划(批准号: 2013CB328900)资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: liuyanwen58@sina.com

用无变形热挤压方法^[18].

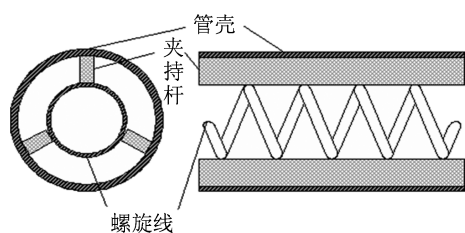


图1 螺旋线慢波结构示意图

在对慢波结构进行热分析时,首先需要明确针对螺旋线慢波结构热分析的物理环境和条件,热分析的对象是由金属螺旋线、陶瓷夹持杆和金属管壳组成的螺旋线慢波组件.由于螺旋线行波管属于真空封装,在真空条件下不存在对流情况;另外由于螺旋线和外部金属管壳的温度差不是很大,可以将来自螺旋线的辐射效果忽略,因此我们假定热量仅仅是通过传导方式,从螺旋线通过夹持杆向外到达真空封装的管壳.

当加入一定的耗散功率时,研究螺旋线慢波组件上的温度分布情况可以从热传导基本方程出发^[19]:

$$Q = kA \frac{\Delta T}{\delta}, \quad (1)$$

其中, Q 为传递的热量, A 为导热面积, δ 为导热路径, ΔT 为导热温差, k 为热导率.

螺旋线慢波结构具有一定的对称性,可以进行一维近似分析,该一维热分析主要是研究各个组件的温度差.根据导热基本定律,其一维数学表达式可以表示为

$$q = -k \frac{dT}{dx}, \quad (2)$$

其中, q 为热流密度, $q = \frac{Q}{A}$. 对(2)式进行一定变化,可以得到

$$dT = -\frac{q}{k} dx = -\frac{Q}{kA} dx. \quad (3)$$

2.1 螺旋线的温度差

将与一根夹持杆接触的三分之一段螺旋线近似展开,如图2所示,它的等效长度表示为 $l_h = \frac{\pi r}{3 \cos \phi}$.

在此段螺旋线内,传导的热量为一个周期螺旋线慢波组件的三分之一,分析的螺旋线部分为该段的一半,其导热面积为螺旋线的横截面,按照图2中标明热流的方向,将所有条件代入(3)式,可

以得到

$$dT_h = -\frac{2 \times 3}{k_h w \delta} \frac{Wp}{6k_h w \delta} dx = -\frac{Wp}{6k_h w \delta} dx. \quad (4)$$

对(4)式的两边进行积分,可以得到

$$\int_{T_{hmax}}^{T_{hmin}} dT_h = -\int_0^{l_h} \frac{Wp}{6k_h w \delta} dx. \quad (5)$$

所以,螺旋线上的温度差可以表示为

$$\Delta T_h = T_{hmax} - T_{hmin} = \frac{\pi r p}{18k_h w \delta \cos \phi} W, \quad (6)$$

其中, k_h 为螺旋线材料的热导率, r 为螺旋线的平均半径, p 为螺旋线的螺距, w 为螺旋线带宽, δ 为螺旋线的带厚, ϕ 为螺旋线的螺距角, W 为螺旋线的单位轴向长度的耗散功率.

2.2 夹持杆的温度差

夹持杆接受来自螺旋线的热量,然后传导给管壳,其导热情况可以按图3进行一维近似,该段夹持杆上传导的热量为一个周期螺旋线慢波组件的三分之一.

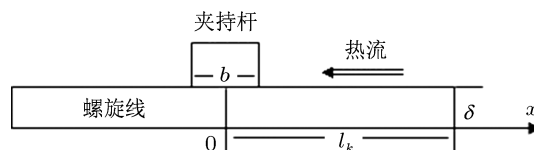


图2 螺旋线一维近似图

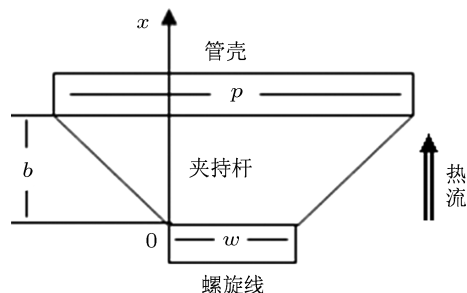


图3 夹持杆一维近似图

将等效导热面积近似为 $A_r = \frac{b}{2}(w + p)$, 代入(3)式可以得到

$$dT_r = -\frac{2Wp}{3k_r b(w + p)} dx. \quad (7)$$

对(7)式的两边进行积分,可以得到夹持杆温度差的表示式为

$$\Delta T_r = T_{rmax} - T_{rmin} = \frac{2hp}{3k_r b(w + p)} W, \quad (8)$$

其中, k_r 为夹持杆材料的热导率, h 为夹持杆的长度, p, w, b 分别为梯形夹持杆的底和高, W 为螺旋线的单位轴向长度的耗散功率.

因此由螺旋线和夹持杆组成的慢波组件由内向外的温差为

$$\Delta T_{hr} = \Delta T_h + \Delta T_r. \quad (9)$$

从(9)式并结合(6)和(8)式可以看出螺旋线材料的热导率 k_h 和夹持杆材料的热导率 k_r 越大, 则 ΔT_{hr} 也越小, 螺旋线慢波组件散热性能越好, 因此应选取热导率高的材料制作慢波组件的螺旋线和夹持杆. 金刚石的热导率可以达到 $2000 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 以上, 金刚石材料凭借其优异的热学性能, 受到了研究人员的广泛重视, 已经有许多研究机构将金刚石材料应用于行波管慢波组件的制备中.

3 螺旋线慢波组件的 ANSYS 热分析

高频损耗和电子注的轰击是行波管实际工作时螺旋线上热量产生的原因, 热源来自于螺旋线的内部和内表面. 在实验研究中, 利用文献 [18] 中所用的实验测评方法, 通过加入的电流和电压为螺旋线提供了热功率. 在利用 ANSYS 进行有限元分析时, 关于热负载方面, 可以使用生热率 (heat generation) 和热流密度 (heat flux) 来仿真实际的热负载.

向慢波组件中, 加入逐渐变化的热负载, 进行稳态或瞬态分析, 记录在不同条件时螺旋线的温度情况, 然后利用画图工具得到热负载与温度的对照关系图, 如图 4 所示. 该图给出了螺旋线温度与加热功率的关系对照情况.

使用 ANSYS 软件进行计算机模拟可以全面分析组件的各种因素对慢波结构的散热特性的影响. 通过所建立的散热特性评价体系进行实验, 使用理论计算方法进行适当的估算, 与计算机模拟仿真的结果进行比较分析, 可以得出能够有效提高螺旋线慢波组件散热性能的可行方案.

3.1 金刚石夹持杆慢波组件散热性能模拟分析

利用 ANSYS 仿真软件, 对采用金刚石夹持杆的慢波组件的散热性能进行模拟仿真研究, 并与采用氮化硼和氧化铍夹持杆的慢波组件进行比较. 研究中的慢波组件均由蒙乃尔管壳和钨螺旋线组成, 具有相同的结构和尺寸, 采用无变形热挤压法提供接触压力, 模拟分析的结果如图 5 所示.

由图 5 和表 1 中的结果可以看出, 当螺旋线的温度相同时, 与采用氧化铍夹持杆和氮化硼夹持杆

的组件相比, 采用金刚石夹持杆的组件可以多消耗 60%—85% 的加热功率, 因此采用全金刚石夹持杆可以有效地改善慢波组件的散热性能.

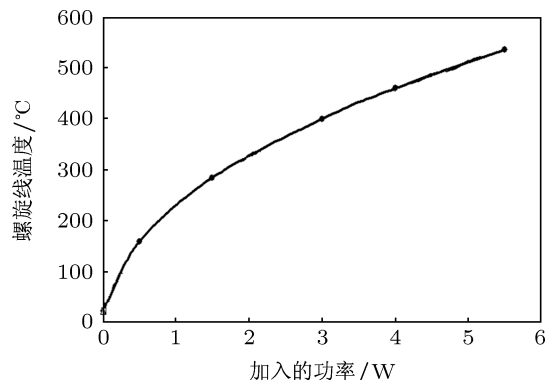


图 4 螺旋线温度与耗散功率对照图

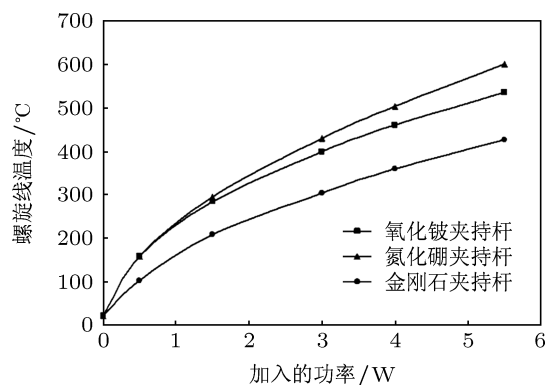


图 5 采用不同夹持杆的慢波组件散热性能模拟比较图

表 1 采用不同夹持杆的慢波组件螺旋线温度与加入的功率模拟结果对照表

| 螺旋线温度/°C | 消耗的功率/W | | |
|----------|---------|--------|--------|
| | 氧化铍夹持杆 | 氮化硼夹持杆 | 金刚石夹持杆 |
| 200 | 0.8281 | 0.8023 | 1.4164 |
| 300 | 1.7039 | 1.5538 | 2.9314 |
| 400 | 3.0011 | 2.6638 | 4.9065 |

利用现有的实验条件, 对采用氧化铍与氮化硼夹持杆的慢波组件进行实验测试, 并与模拟结果进行比较, 得到图 6.

比较图 6 中的实线和虚线可知, 实验研究的结果与计算机模拟研究的结果具有很好的一致性. 因此我们可以进行合理的推理: 金刚石夹持杆的实验结果与计算机模拟研究的结果也将具有很好的一致性.

但金刚石的加工非常困难, 而异形介质夹持杆加工更加困难, 并且金刚石的价格非常昂贵. 为此, 我们提出在介质夹持杆表面和螺旋线表面沉积金刚石薄膜, 这样即避免了采用纯金刚石介质夹持

杆的上述缺点, 又弥补其他介质夹持杆热导率低的缺陷.

3.2 沉积金刚石膜的夹持杆和螺旋线慢波组件散热性能模拟分析

首先分析在夹持杆的外表面沉积金刚石膜对慢波组件散热性能的影响情况. 组件的结构如图 7 所示.

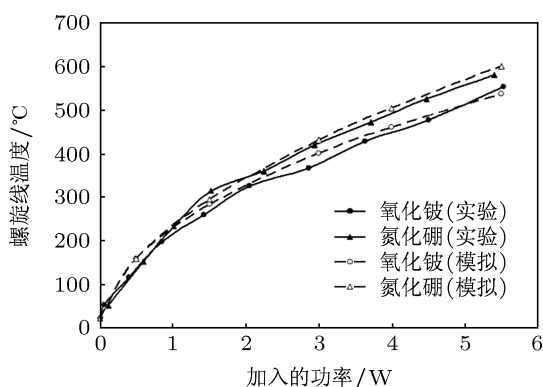


图 6 模拟与实验结果比较图

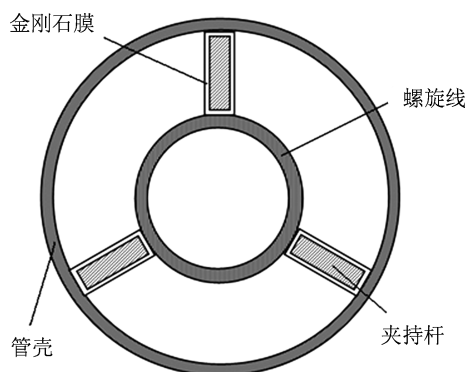


图 7 采用沉积金刚石膜夹持杆的慢波组件结构图

按照图 7 所示的慢波结构建立 ANSYS 仿真模型, 使用散热性能的综合热分析法对采用沉积金刚石膜夹持杆的慢波组件进行分析, 与采用普通夹持杆的慢波组件进行对比. 研究中的慢波组件均由钼螺旋线、蒙乃尔管壳和氧化铍夹持杆组成, 具有相同的结构和尺寸, 均以无变形热挤压方法提供装配压力. 在夹持杆外表面沉积 $5\ \mu\text{m}$ 的金刚石薄膜. 模拟研究的结果如图 8 和表 2.

由图 8 和表 2 可以看出, 在夹持杆沉积金刚石薄膜可以使慢波组件的散热性能得到很大提高. 当螺旋线达到相同的温度时, 采用沉积金刚石薄膜夹持杆的组件与采用普通夹持杆的慢波组件相比, 能够多消耗 30%—40% 的加热功率. 将金刚石薄膜沉

积在普通夹持杆的的表面在一定程度上降低了夹持杆的导热热阻, 并可以降低夹持杆与管壳和螺旋线接触处的热阻率, 其作用在高温段更加明显.

然后, 分析将金刚石薄膜沉积在螺旋线的外表面时对慢波组件散热性能的影响情况, 组件的结构如图 9 所示.

按照图 9 中的慢波组件结构建立模型, 进行计算机模拟分析, 研究的慢波组件的材料和结构尺寸与前面实验中的相同. 在螺旋线的外表面增加 $5\ \mu\text{m}$ 的金刚石膜. 分析结果如图 10 和表 3 所示.

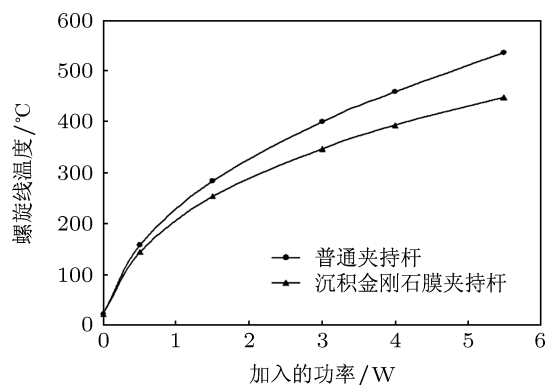


图 8 沉积金刚石薄膜的夹持杆对慢波组件散热性能的影响

表 2 沉积金刚石薄膜夹持杆和普通夹持杆的慢波组件螺旋线温度与加入的功率模拟结果对照表

| 螺旋线温度/°C | 消耗的功率/W | |
|----------|---------|-----------|
| | 普通夹持杆 | 沉积金刚石膜夹持杆 |
| 200 | 0.8281 | 1.0066 |
| 300 | 1.7039 | 2.2402 |
| 400 | 3.0011 | 4.1875 |

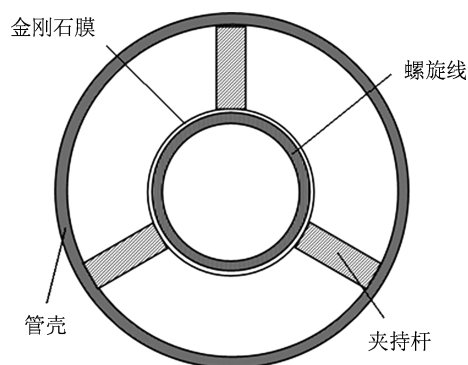


图 9 采用沉积金刚石膜螺旋线的慢波组件结构图

由图 10 和表 3 中的数据可以看出, 采用在螺旋线表面沉积金刚石薄膜可以在一定程度上提高螺旋线慢波组件的散热性能. 螺旋线达到相同温度, 采用沉积金刚石薄膜螺旋线的组件与采用普通螺旋线的慢波组件相比, 能够多消耗约 20% 的加热功率. 金刚石薄膜的采用在改善螺旋线与夹持杆处的

界面热阻的同时,还可以使螺旋线表面的热量迅速传导,不至于使热量聚集.

上述研究仅进行了模拟分析,限于实验条件没有进行相应的实验测试,为开展后续实验研究,本文分别研究了镀上 5 μm 的铜膜和金膜的纯钼螺旋线实验,慢波组件装配方法采用无变形热挤压工艺,所有组件的夹持杆和管壳都采用氧化铍和蒙乃尔.

在真空环境下,在螺旋线两端加直流电压,记录 3 个不同慢波组件的螺旋线的电流与电压的关系,计算出慢波组件的螺旋线电阻随加热功率的变化情况,图 11 和表 4 给出了螺旋线温度随耗散功率的变化情况.

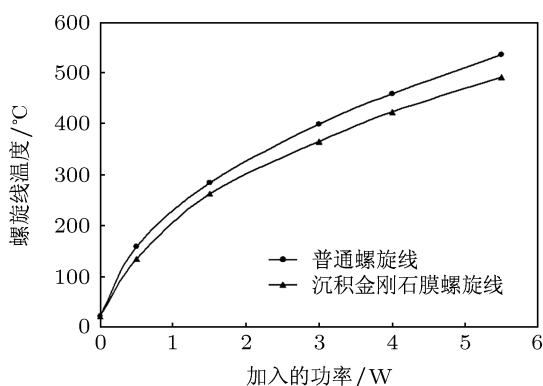


图 10 采用沉积金刚石膜螺旋线对散热性能的影响

表 3 沉积金刚石膜螺旋线和普通螺旋线的慢波组件螺旋线温度与加入的功率模拟结果对照表

| 螺旋线温度/°C | 消耗的功率/W | |
|----------|---------|-----------|
| | 普通夹持杆 | 沉积金刚石膜螺旋线 |
| 200 | 0.8281 | 1.0035 |
| 300 | 1.7039 | 2.0472 |
| 400 | 3.0011 | 3.6012 |

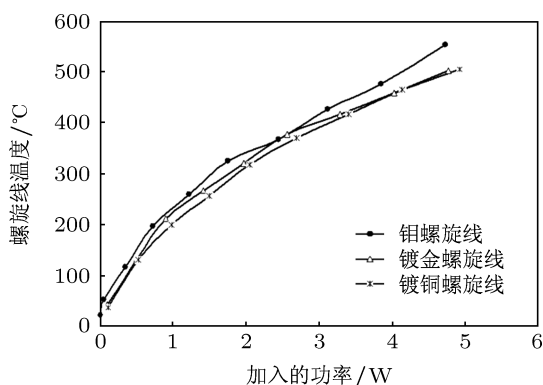


图 11 镀膜螺旋线对慢波组件散热性能影响的实验结果

结果表明采用镀金螺旋线和采用镀铜螺旋线的组件与采用普通钼螺旋线的慢波组件相比,螺旋线达到相同温度,采用镀金螺旋线和镀铜螺旋线的

组件可以多消耗约 5.51%—16.61% 的加热功率,采用镀铜螺旋线的组件的散热能力最好,而普通组件的最差.

利用 ANSYS 软件建立模型,对采用钼螺旋线、镀铜的钼螺旋线和镀金的钼螺旋线的慢波组件进行计算机模拟研究.仿真过程中使用组件模型具有相同的结构、尺寸、材料及装配方法.分析螺旋线温度随功率的变化情况,得到如图 12 和表 5 所示的研究结果.

表 4 镀膜螺旋线和普通螺旋线的慢波组件螺旋线温度与加入的功率实验结果对照表

| 螺旋线温度/°C | 消耗的功率/W | | |
|----------|---------|--------|--------|
| | 钼螺旋线 | 镀金螺旋线 | 镀铜螺旋线 |
| 200 | 0.8775 | 0.9755 | 1.0495 |
| 300 | 1.8062 | 1.9457 | 2.1064 |
| 400 | 3.289 | 3.4716 | 3.4857 |

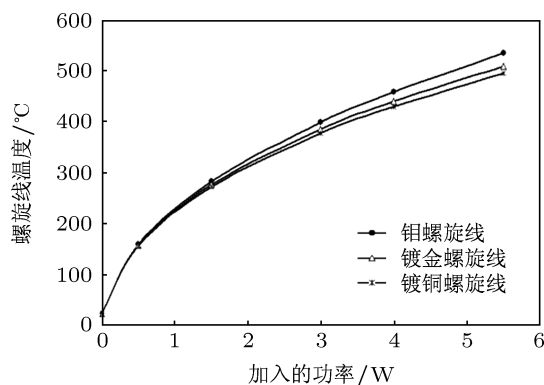


图 12 镀膜螺旋线对慢波组件散热性能影响的模拟结果

表 5 镀膜螺旋线和普通螺旋线慢波组件螺旋线温度与加入的功率模拟结果对照表

| 螺旋线温度/°C | 消耗的功率/W | | |
|----------|---------|--------|--------|
| | 钼螺旋线 | 镀金螺旋线 | 镀铜螺旋线 |
| 200 | 0.8281 | 0.8594 | 0.8793 |
| 300 | 1.7039 | 1.8113 | 1.8820 |
| 400 | 3.0011 | 3.251 | 3.4205 |

由图 12 和表 5 中的模拟结果可以看出,镀膜螺旋线的采用使慢波组件的散热性能得到了一定的改善.当螺旋线达到相同的温度时,采用镀金螺旋线与采用普通钼螺旋线的慢波组件相比可以多消耗约 3.78% 至 8.33% 的加热功率,采用镀铜薄膜螺旋线的慢波组件可以多消耗约 6.18% 至 13.97% 的加热功率.散热性能研究的实验结果与模拟结果具有很好的一致性,存在的差别主要与装配方法实施的一致性、测量误差和模拟时的条件设定有关.

由此我们可以进行合理的推理: 沉积金刚石薄膜的夹持杆和螺旋线慢波组件的实验结果与计算机模拟研究的结果也将具有很好的一致性, 即: 在夹持杆表面沉积金刚石薄膜的组件能够多消耗 30% 以上的加热功率; 在螺旋线表面沉积金刚石薄膜的组件能够多消耗约 20% 左右的加热功率. 以上仅研究了金刚石膜为 5 μm 时的情况, 随着金刚石膜厚度的增加, 其热导率将明显提高^[20], 因此随着沉积金刚石薄膜厚度的增加, 采用沉积金刚石膜螺旋线和夹持杆的慢波组件散热性能将会得到进一步的提高.

4 结论

本文通过理论计算、模拟仿真和实验测试等手段研究了不同材料的螺旋线、夹持杆对慢波组件散热性能的影响, 主要结论如下:

1. 以一定的预备实验为前提条件, 利用热传导公式推算出慢波组件散热性能的理论公式. 公式表明螺旋线材料和夹持杆材料的热导率越大, 则螺旋线慢波组件散热性能越好.

2. 通过实验测试和 ANSYS 软件仿真模拟分析的方法, 分析比较了在夹持杆和螺旋线表面沉积金刚石薄膜的慢波组件以及全金刚石夹持杆的慢波组件的散热性能.

3. 提出了在介质夹持杆和螺旋线表面沉积金刚石薄膜以提高慢波组件的散热性能的技术方案, 这样可以解决金刚石夹持杆的价格昂贵、加工难的困难. 仿真模拟分析结果表明: 当螺旋线达到相同的温度时, 采用沉积金刚石薄膜夹持杆和螺旋线的慢波组件与普通的慢波组件相比, 能够多消耗 20%—60% 的加热功率, 沉积金刚石膜螺旋线和夹持杆与全金刚石夹持杆一样可以有效改善慢波组件散热性能.

4. 测试了在螺旋线外表面镀高性能的金、铜金属膜以及采用氧化铍、氮化硼夹持杆的慢波组件散热性能, 实验结果与 ANSYS 软件仿真模拟分析结果具有很好的一致性; 由此可以进行合理的推理: 沉积金刚石薄膜的夹持杆和螺旋线慢波组件及全金刚石夹持杆的实验结果也将与计算机模拟研究的结果也将具有很好的一致性, 金刚石材料可以有效改善慢波组件散热性能.

- [1] Gerum W, Bruck M, Fischer G, Henry D, Rothacker H P 2005 *IEEE-Trans. on ED* **52** 669
- [2] Liao F J 1999 *Vacuum Electronics* (Beijing: Electronics Industry Press) (in Chinese) [廖复疆 1999 (北京: 电子工业出版社)]
- [3] Theiss A J, Meadows C J, True P B 2007 *IEEE Trans. on ED* **54** 1054
- [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] Crivello R, Richard W, Grow R 1988 *IEEE Trans. on ED* **35** 1701
- [7] Wei P, Zhou M G, Zhu L, Zhang J 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 317 (in Chinese) [韦朴, 周明干, 朱露, 张劲 2013 物理学报 **62** 317]
- [8] Liu Y W, Han Y 2011 *J. Vac. Sci. Technol.* **31** 424 (in Chinese) [刘燕文, 韩勇 2011 真空科学与技术学报 **31** 424]
- [9] Xu X, Wei Y Y, Shen F, Huang M Z, Tang T, Duan Z Y, Gong Y B 2012 *Chin. Phys. B* **21** 068402
- [10] Gu S S, Hu X J, Huang K 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 512 (in Chinese) [顾珊珊, 胡晓君, 黄凯 2013 物理学报 **62** 512]
- [11] Gotis Y G, Welz S, Ersoy D 2001 *Nature* **411** 283
- [12] Graebner J E, Hartnett T M, Miller R P 1994 *Appl. Phys. Lett.* **64** 2549
- [13] Zhang P Z, Li R S, Pan X J, Xie E Q 2013 *Chin. Phys. B* **22** 058106
- [14] Galdetskiy A V 2004 *International Vacuum Electronics Conference* 51
- [15] Chang X, Wu Q, Ben-Zvi L, Burrill A 2010 *Phys. Rev. Lett.* **105** 164801
- [16] Dayton J A, Mearini G T, Chen H 2005 *IEEE Trans. on ED* **52** 695
- [17] Liu Y W, Han Y 2010 *Chin. Patent* 200710064600.4 (in Chinese) [刘燕文, 韩勇 2010 中国发明专利 200710064600.4]
- [18] Liu Y W, Han Y, Zhao L 2009 *Acta Electr. Sin.* **31** 1757 (in Chinese) [刘燕文, 韩勇, 赵丽 2009 电子学报 **31** 1757]
- [19] Dai G S 2001 *Heat Transfer* (Beijing: Higher Education Press) (in Chinese) [戴钢生 2001 传热学 (北京: 高等教育出版社)]
- [20] Gu C Z, Wang C L, Jin Z S 1994 *Chin. Sci. Bulletin* **39** 93 (in Chinese) [顾长志, 王春蕾, 金曾孙 1994 科学通报 **39** 93]

Influence of diamond on heat dissipation capability of slow-wave structure of helix TWT*

Liu Yan-Wen[†] Wang Xiao-Xia Zhu Hong Han Yong
Gu Bing Lu Yu-Xin Fang Rong

(The Institute of Electronics, Chinese Academy of sciences, Beijing 100190, China)

(Received 25 July 2013; revised manuscript received 24 August 2013)

Abstract

The heat dissipation capability of the slow-wave structure (SWS) of the traveling-wave tube (TWT) is an important influencing factor that restricts the increase of the output power, the stability, and the reliability. Due to several unique and fascinating characteristics, the diamond material has been employed in the SWS manufacture to enhance the thermal conduction to a certain extent. The influences of the supporting rods deposited with diamond film, the helix deposited with diamond film, and the diamond supporting rods on the heat dissipation capability have been studied using theoretical, simulation, and experimental methods. This method is closely associated with the computer simulation in experimental test and increases the simulation accuracy. Valuable conclusions have been obtained.

Keywords: helix traveling-wave tube, slow-wave structures, heat dissipation capability, diamond

PACS: 44.10.+i, 42.81.Pa

DOI: 10.7498/aps.62.234402

* Project supported by the National Nature Science Foundation of China (Grant No. 61072025), and the National Basic Research Program of China (Grant No. 2013CB328900).

[†] Corresponding author. E-mail: liuyanwen58@sina.com