

## 螺旋线镀膜对慢波组件散热性能影响的研究

韩勇<sup>①②</sup> 刘燕文<sup>①</sup> 丁耀根<sup>①</sup> 刘濮鲲<sup>①</sup> 路春华<sup>①</sup> 王晓燕<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

<sup>②</sup>(中国科学院研究生院 北京 100039)

**摘要:** 该文研究了镀膜螺旋线的使用对慢波组件散热性能的影响。估算了采用镀膜螺旋线后, 组件散热能力的改善情况。利用 ANSYS 软件进行了计算机模拟热分析, 分析了螺旋线采用镀铜膜, 镀金膜, 镀金刚石膜对慢波组件散热性能的影响。最后, 对镀铜和镀金螺旋线的慢波组件进行了实验研究。实验结果与理论分析非常一致。

**关键词:** 行波管; 螺旋线; 表面镀膜; 散热性能; 接触热阻

中图分类号: TN124

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)08-2029-04

## Effect of Plated Helix on Heat Dissipation Capability of the Slow-Wave Circuit

Han Yong<sup>①②</sup> Liu Yan-wen<sup>①</sup> Ding Yao-gen<sup>①</sup> Liu Pu-kun<sup>①</sup> Lu Chun-hua<sup>①</sup> Wang Xiao-yan<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

<sup>②</sup>(Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** The effect of plated helix on heat dissipation capability of the slow-wave circuit is studied in this paper. With the plated helix, the improvement of the heat dissipation capability of the slow-wave circuit is estimated and evaluated. ANSYS is used to simulate the thermal conduction in the components. The influence of helices coated with copper film, gold film, diamond film upon the heat dissipation is analyzed and verified with computer simulation. Finally, several experimental tests are performed in some slow-wave circuits with copper plated helix and gold plated helix. The tests show good agreement with the theoretical analysis.

**Key words:** Traveling-Wave Tube; Helix; Surface coating; Heat dissipation capability; Thermal contact resistance

### 1 引言

螺旋线行波管被广泛应用于通信、雷达和电子对抗系统等多种场合。行波管慢波结构的热特性是其各种特性中一项非常重要的指标, 它不仅是决定行波管平均输出功率的主要因素, 也是直接影响着行波管工作的稳定性与可靠性的重要因素<sup>[1]</sup>。当螺旋线行波管工作时, 螺旋线由于高频损耗和聚焦特性不好的电子注轰击而受热, 这部分热量由夹持杆传送到管壳, 然后耗散出去<sup>[2]</sup>。慢波结构中的热量主要以热传导为主要传热方式, 在对慢波结构进行热分析时, 可以近似忽略热辐射的影响。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。找到一个有效的增强螺旋线上热量传出的方法, 可以很好地改善整管的特性。众所周知, 在慢波结构散热过程中, 材料的导热能力和接触表面的接触热阻是影响组件热量传输的主要因素。为降低螺旋线上的高频损耗, 研究人员采取了对螺旋线进行镀膜的处理。本文主要从理论和实验方面来研究镀膜螺旋线的运用是否对慢波组件的散热能力产生了影响, 以及影响的程度。

### 2 慢波组件螺旋线的热分析

(1)螺旋线上热传导的理论研究 在螺旋线慢波系统工作时, 螺旋线的温度是否正常是至关重要的。产生在螺旋线上的热量主要是沿径向以热传导的方式向外传输的。

根据热传导导热的基本方程:

$$Q = kA\Delta T / \delta \quad (1)$$

如图1建立螺旋线, 取两根夹持杆之间的一段螺旋线进行分析, 将所研究的螺旋线展开, 如图2所示, 考虑使用三根夹持杆的情况, 夹持杆与螺旋线接触处的宽度为  $2b$ , 螺旋线模型的等效长度为  $L = \pi r / (3 \cos \phi)$ , 设材料的热导率  $k$ , 考虑实际情况, 并结合模型, 对图2中的慢波结构进行热传导的分析。

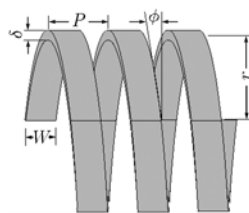


图1 螺旋线模型图

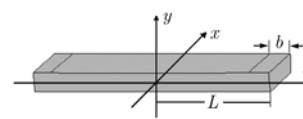


图2 部分螺旋线展开图

根据螺旋线模型的热传导特征,在  $x$  方向上无温度梯度,螺旋线的温度分布只与方向  $y$  和  $z$  有关,则在笛卡儿参考系中可以列出<sup>[3]</sup>:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial^2 y} + \frac{\partial^2 T}{\partial^2 z} + \frac{W \sin \phi}{k \delta w} = 0 \quad (2)$$

其中  $W$  为单位长度上的生热功率,单位是  $W/m$ 。

利用对称性,可以得到模型在  $z$  方向和  $y$  方向的边界条件。利用边界条件,并结合实际情况,分析与研究螺旋线模型,可以解得

$$T(y, z) = T_0 + \frac{W}{kw} \left[ \frac{P(L-b)^2}{3bL} T_{\Sigma}(y, z) - \frac{\sin \phi}{2\delta} z^2 \right] \quad (3)$$

其中  $T_{\Sigma}(y, z) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin\left(\frac{n\pi(L-b)}{L}\right) \left[ \operatorname{ch}\left(\frac{n\pi y}{L}\right) \operatorname{sh}\left(\frac{n\pi z}{L}\right) \right]}{\left(\frac{n\pi(L-b)}{L}\right)^2 \left[ \operatorname{sh}\left(\frac{n\pi \delta}{2L}\right) + \operatorname{ch}\left(\frac{n\pi \delta}{2L}\right) \right]} \cdot \cos\left(\frac{n\pi z}{L}\right)$ 。

螺旋线的最高温度主要出现在图 2 中的原点处,即两根介质杆所夹持螺旋线的中间部位。由式(3)可以看出,螺旋线的温度主要受到螺旋线材料的热导率( $k$ )、螺旋线的尺寸( $\delta, w, r, P, \phi$ )和与夹持杆的连接情况( $b$ )的影响。采用高热导率的材料和增大螺旋线的体积都可以有效降低螺旋线的温度。夹持杆对螺旋线温度的影响在公式中主要体现在与螺旋线的接触面积上。

(2)镀膜处理对有效热导率的影响 在不改变螺旋线结构和尺寸的前提下对螺旋线表面进行镀膜处理,铜和金的热导率明显要高于钼,镀膜必将带来螺旋线导热能力的变化。

将导热问题作一维近似,取螺旋线轴向的剖面,分析如图所示的  $R-R$  模型(矩形填充物-矩形基体模型)的有效热导率<sup>[4,5]</sup>。

对于纯矩形介质模型,如图 3 所示,应用热传导基本方程得到:

$$Q = kw \Delta T / \delta = \Delta T / R \quad (4)$$

所以可知,热导率

$$k = \delta / (wR) \quad (5)$$

分析图 4 所示的螺旋线模型,利用式(5),运用电模拟的方法,得出如图 5 所示的热阻网络,则可以求出相应的导热热阻  $R_1, R_2$  和  $R_{12}$ 。

整个单元的总热阻为

$$1/R_s = 1/R_2 + 1/(R_{12} + R_1 + R_{12}) + 1/R_2 \quad (6)$$

将  $R_s$  代入式(5)中,可以得到有效热导率:

$$k_s = \frac{\delta}{wR_s} = \frac{2ak_2}{w} + \frac{k_1 k_2 \delta (w-2a)}{2awk_1 + k_2 w (\delta-2a)} \quad (7)$$

其中  $k_1$  为钼的热导率,  $k_2$  为镀膜的热导率。式(7)中  $k_2$  的值要比  $k_1$  大很多,加入镀膜后其等效热导率将会有所增加。

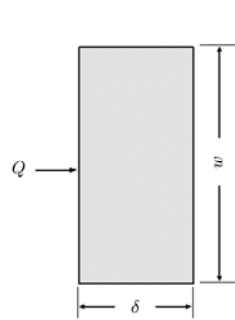


图3 一般模型图

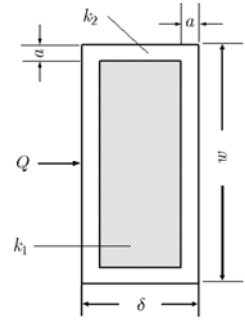


图4 螺旋线剖面模型图

(3)镀膜处理对接触热阻的影响 在螺旋线表面镀膜后改变了与夹持杆的接触材料,需要考虑镀膜与夹持杆接触的情况。这种情况的变化,直接影响着接触热阻的大小。螺旋线与夹持杆处的接触热阻对螺旋线上热量的散出起到了重要的作用。建立楔形接触面模型推算接触热阻,如图 6 所示。

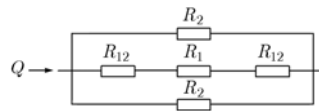


图5 等效热阻网络图

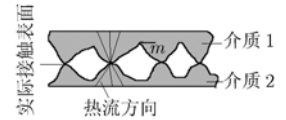


图6 接触表面模型图

根据图 6,考虑实验条件,利用力学原理中实际接触面积与名义接触面积之比等于接触面挤压应力与材料硬度之比,可以得到计算接触热阻的半经验公式<sup>[6]</sup>:

$$R_s = 0.8 \frac{\sigma}{Akm} \left( \frac{P}{H} \right)^{-0.95} \quad (8)$$

其中  $A$  为名义接触面积,  $P$  为接触压强,  $H$  为材料硬度,  $\sigma$  为表面轮廓均方根偏差的等效值,  $m$  为表面轮廓平均斜率的等效值,  $k$  为热导率的等效值。

控制实验条件,对组件采用同样的挤压方式进行装配,即接触压强近似相同。由于镀膜热导率大于钼带的热导率,有效热导率  $k$  将会变大,这有利于降低接触热阻。表面轮廓的平均斜率  $m$  可以假设为一定值。这样影响接触热阻的表面粗糙情况就只有表面轮廓均方根偏差  $\sigma$ 。 $\sigma$  为有效值,它主要与两个接触的微观情况有关。图 7 给出了钼带螺旋线和镀膜螺旋线的表面形貌图。



(a) 钼螺旋线表面形貌图

(b) 镀膜螺旋线表面形貌图

图7 螺旋线表面形貌图

由图 7(a)和 7(b)可以看出铜膜表面的粗糙程度明显优于纯的钼带表面,铜膜表面轮廓均方根偏差比较小,所以采用了镀膜表面后,有效值  $\sigma$  变小,这也十分有助于降低接触热阻。另外,铜膜的硬度  $H$  相对于钼来说小很多。综合考虑以上的各个因素的变化,采用表面镀铜膜的螺旋线可以较为有效地降低螺旋线与夹持杆接触处的接触热阻。

### 3 慢波组件散热性能的模拟实验研究

根据前面的理论推理,利用 ANSYS 软件建立模型,进行计算机仿真计算。加入载荷,观察对螺旋线施加不同加热功率时,螺旋线的最高温度的变化情况。比较各个采用了不同螺旋线的组件在散热性能方面的差异。所建立的组件模型使用相同结构和材料的夹持杆和管壳,相同的装配方法,钼螺旋线表面的镀膜厚度为  $5\mu\text{m}$ ,纯钼螺旋线和镀膜螺旋线的厚度均为  $0.1\text{mm}$ 。如图 8 所示,建立慢波组件的模拟实验模型。

由图 9 可知,与未镀膜螺旋线相比,在耗散同样多的加热功率时,采用镀铜螺旋线可以使整体螺旋线的温度降低了  $5.6\% \sim 9.9\%$ ;采用镀金螺旋线可以将螺旋线的温度降低  $4.3\% \sim 8.0\%$ ;采用镀金刚石薄膜的螺旋线可以使螺旋线温度降低  $18.0\% \sim 23.9\%$ 。采用了镀铜和镀金螺旋线组件的散热能力差别很小,镀铜螺旋线的组件稍微优越一点,两条变化曲线几乎重合。金刚石具有极好的导热性质,这个属性可以很好地提高螺旋线的有效热导率  $k_s$ ,从而加强了螺旋线的导热能力。另外,金刚石膜的表面经过处理后可以达到相当平滑的程度,虽然其硬度  $H$  较高,但是其表面粗糙情况可以有效地降低  $\sigma$ ,所以其接触热阻也可以得到一定的改善。实验结果中显示,金刚石薄膜的利用明显改善螺旋线受热后的温度变化。模拟仿真时,忽略了材料由于受热的膨胀情况,材料膨胀会使各组件接触更加紧密,从而也降低了接触热阻。所以该模拟可能与真实情况略有偏差。

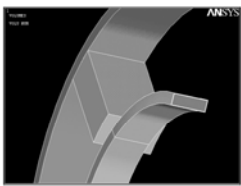


图 8 慢波组件模拟图

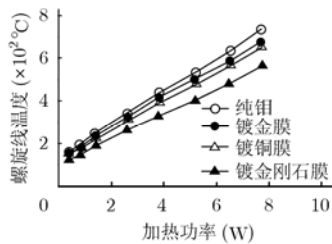


图 9 组件螺旋线温度随加热功率的变化图

### 4 慢波组件散热性能的实验评价

为了更好地说明与验证理论结果,我们对现行的慢波组件进行了实验测量。分别在纯钼螺旋线表面镀上  $5\mu\text{m}$  的铜膜和金膜,采用无变形热挤压的方法将慢波组件装配。所有组件都采用 BeO 夹持杆和 Monel 管壳,在真空环境下测量。

给螺旋线提供直流加热功率,观察记录 3 个不同慢波组件的螺旋线的平均温度随耗散功率的变化情况。使用图 10 所示的 3 种螺旋线进行散热研究实验。结果如图 11 所示。

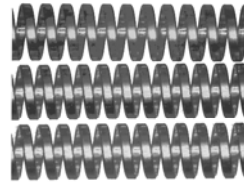


图 10 实验用螺旋线外观图

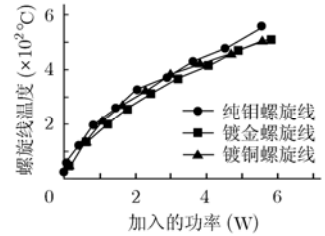


图 11 组件螺旋线温度随加热功率的变化图

由图 11 可以看出,镀铜膜和镀金膜的效果相仿,这与模拟情况较为相似。镀铜螺旋线对螺旋线上热量的传导要好于镀金螺旋线,镀膜螺旋线的散热均要强于普通的纯钼带螺旋线。在相同的加热功率的情况下,采用镀金螺旋线可以降低温度  $2.1\% \sim 6.8\%$ ,采用镀铜螺旋线可以降低温度  $4.3\% \sim 8.9\%$ 。这个结果与理论结构较为相似,只是都略微偏低一些,同时,由表 1 中的比较也可以看到一定的差异,这主要是由于两方面的原因导致的,一是组件的实际装配,不可能达到完全一致的情况,其接触处受到的压力会略有差别;二是螺旋线温度的实际测量存在一定的误差。尽管如此,实验与理论模拟反映的情况相同,结果也基本一致。

表 1 相同加入功率时的温度比较表

加入功率(W)	螺旋线最高温度(°C)			
	纯钼螺旋线	钼螺旋线镀金	钼螺旋线镀铜	
3	模拟数据	370	348	341
	实验数据	378	370	362
4	模拟数据	445	420	411
	实验数据	450	425	418

### 5 结束语

不论是镀铜膜还是镀金膜,或是其他新型的材料,镀膜层的高热导率以及低的表面粗糙程度可以提高螺旋线上热量的散出,降低螺旋线与夹持杆接触处的接触热阻,进而使螺旋线上热量更多更快的传导出去。实验表明在加热功率相同的条件下,螺旋线行波管慢波组件采用镀铜螺旋线可以将螺旋线的温度降低  $2.1\% \sim 6.8\%$ ,采用镀金螺旋线可以将螺旋线温度降低  $4.3\% \sim 8.9\%$ 。这个结果与理论分析的结果比较一致。由理论分析的结果可以估计,采用金刚石镀膜螺旋线可以将螺旋线温度降低  $18\% \sim 23.9\%$ 。将金刚石薄膜应用在螺旋线上,将对慢波组件的散热具有很好的帮助。适当

的采用镀膜螺旋线可以在一定程度上提高螺旋线行波管慢波组件的散热性能,这是一种具有可行性的方案。

### 参考文献

- [1] Rocci J. Thermal-structural reliability assessment of helix TWT interaction circuit using finite element analysis. Aerospace and Electronics Conference, New York, 1993: 731-737.
  - [2] Sauseng O, and Manoly A E, *et al.* Thermal properties and power capability of helix structures for millimeter waves. International Electron Devices Meeting, New York, 1978: 534-537.
  - [3] Crivello R, *et al.* Thermal analysis of PPM-focused rod-supported TWT helix structures. *IEEE Trans. on Electron Devices*, 1988, 35(10): 1701-1720.
  - [4] Verma L S, Shrotriya S, and Chaudhary D. Thermal conduction in two-phase materials with spherical and non-spherical inclusions. *J. Physics D*, 1991, 24(5): 1729-1737.
  - [5] Springer G S and Tsai S W. Thermal conductivities of unidirectional materials. *J. Comp. Materials*, 1967, 1(3): 166-173.
  - [6] Kunkel S H and Peck W M. Predicting thermal contact resistance in circuit card assemblies. InterSociety Conference on Thermal Phenomena, Texas, 1994: 91-100.
- 韩 勇: 男, 1981年生, 博士生, 研究方向为螺旋线行波管慢波结构的散热性能。
- 刘燕文: 男, 1964年生, 副研究员, 硕士生导师, 研究方向为电子发射。
- 丁耀根: 男, 1942年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为高功率微波电子信息系统与器件、微波器件与电路的计算机模拟。
- 刘濮鲲: 男, 1965年生, 研究员, 教授, 博士生导师, 研究方向为大功率微波毫米波器件、高功率微波与信息对抗技术。