

金属纳米粒子薄膜对辐射散热的影响的研究

韩 勇^{1,2}† 刘燕文¹ 丁耀根¹ 刘濮鲲¹

¹ 中国科学院电子学研究所, 中国科学院高功率微波源与技术重点实验室, 北京 100190)

² 中国科学院研究生院, 北京 100049)

(2009 年 3 月 10 日收到, 2009 年 5 月 4 日收到修改稿)

通过分析不同螺旋线慢波组件的散热性能, 研究了金属纳米粒子薄膜的采用对辐射散热性能的改善作用. 利用实验测试和模拟仿真的方法, 分析比较了采用普通金属管壳、沉积普通金属铱膜管壳和沉积纳米铱膜管壳的慢波组件的导热能力. 结合实验数据, 准确地推算出几种研究材料的热辐射发射率, 并利用模拟仿真给予了验证. 实验结果和模拟结果具有很好的一致性. 研究表明, 与普通金属材料相比, 金属纳米粒子薄膜具有较强的热辐射能力, 能够改善器件的散热性能.

关键词: 金属纳米粒子薄膜, 辐射散热, 散热性能

PACC: 6500, 4440, 4410

1. 引言

纳米材料具有许多传统材料无法媲美的奇异特性和非凡的特殊功能, 因此在各行各业中都有广泛的应用^[1-3]. 纳米材料尺寸小, 可与电子的德布罗意波长、超导相干波长及激子玻尔半径相比拟. 尺度下降使得纳米体系包含的原子数大大降低, 宏观固定的准连续能带消失了, 而表现为分立的能级, 量子尺寸效应十分显著. 这使得纳米材料的光、热、电、磁等物理性质与常规材料不同, 从而出现了许多新奇特性质^[4,5]. 随着现代科技的飞速进步, 微波电真空器件的性能和技术指标也取得了巨大进步, 但随之也带来了高的热负载^[6,7]. 微波电真空器件的散热性能不仅是决定其平均输出功率的重要因素, 也是直接影响其工作的稳定性与可靠性的重要因素. 当器件工作在真空环境时, 外部的辐射散热便成为热量散出的主要方式^[8]. 将纳米材料应用于电真空器件中, 可以改善其散热能力, 并使部分性能得到进一步提升.

2. 金属纳米粒子薄膜的制备

本研究主要采用溅射法制备金属纳米粒子薄膜. 利用该方法可以制备多种纳米金属, 其中包括高熔点和低熔点金属, 并且能够制备多组元的化合物

纳米微粒.

实验中, 金属纳米粒子薄膜的具体制备过程为: 将被沉积的样品放入直流磁控溅射台内, 抽真空, 并在 100—400 °C 温度下对样品进行烘烤; 当真空度达到 8×10^{-4} Pa 以上时, 充入惰性气体, 使真空度降低, 气压升高. 其中使用的惰性气体可以是氩气或氮气. 当压强达到 5—30 Pa 时, 打开直流溅射电源, 对金属靶进行溅射 10—30 min; 由于真空室内气压较高, 这时被溅射出的原子相互碰撞而形成较大的原子团, 即纳米粒子颗粒. 纳米粒子颗粒在样品表面沉积, 形成纳米金属薄膜. 如图 1 中使用扫描电镜显示的形貌图所示, 粒子直径为 20 nm, 薄膜的厚度为 400 nm. 选用可以在空气中耐一定温度的铱作为金属靶材.

降低溅射时的气体压强, 可以制备出普通金属铱薄膜. 图 2 和图 3 给出了在相同比例尺下气体压强为 0.5 Pa 时所制备的金属铱薄膜和 10 Pa 时所制备的纳米铱薄膜的形貌图.

由图 2 和图 3 中可以看出, 气压为 0.5 Pa 时, 薄膜的表面十分光滑, 制备了金属铱原子薄膜. 随着气体压强的增大, 原子薄膜变成了纳米粒子薄膜, 纳米粒子的粒径随着气体压强的增大而增大, 这是因为随着气体压强的增大, 铱原子与气体原子的碰撞次数将增多, 延长了铱原子到达样品的时间和路径, 从而增大了铱原子之间的碰撞概率, 使落到样品上的

† E-mail: hanyuzha@126.com

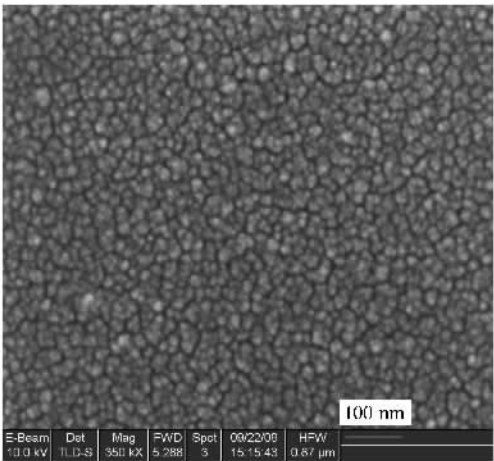


图1 纳米钛薄膜 SEM 形貌图

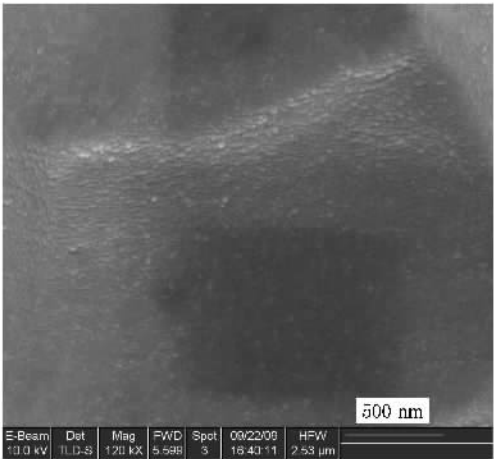


图2 0.5 Pa 时的金属钛膜 SEM 形貌图

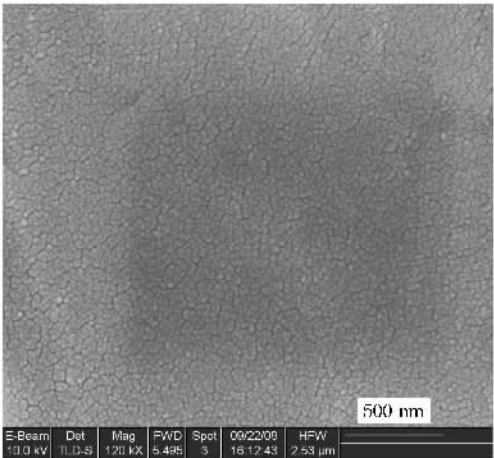


图3 10 Pa 时的纳米钛膜 SEM 形貌图

纳米粒子的粒径增大.

螺旋线行波管凭借其宽频带和高增益等方面的优点,在当今微波电真空器件中占据着重要的地位^[9].慢波组件是行波管中能量交换的关键部分.本文通过将金属纳米粒子薄膜沉积在螺旋线慢波组件中管壳的外表面,研究其对热辐射能力的影响.为了比较不同管壳的散热性能,在低气压下(0.5 Pa 左右),另制备了沉积具有同样厚度的普通金属钛膜的慢波组件.图4给出了三种经过不同处理的管壳的实物图.

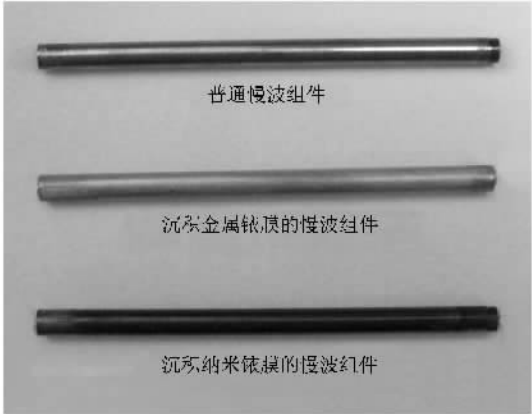


图4 管壳经过不同处理的慢波组件实物图

由图4中可以看出,沉积金属钛膜的慢波组件的外表面颜色很浅,呈淡淡的银白色,沉积纳米薄膜的组件的外表颜色较深,呈黑色,符合金属纳米粒子应具有的颜色.

3. 对热辐射影响的实验测试

在真空环境中,向慢波组件的螺旋线中提供逐

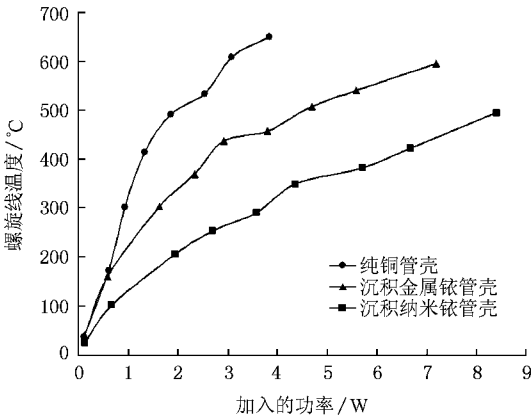


图5 铜管壳的散热性能的实验比较图

渐增加的直流功率,使组件的温度升高^[10].此时,管壳向外界的辐射散热便是最主要的散热途径.通过考察不同慢波组件的散热性能,也就是记录螺旋线温度随加入热功率的变化情况,比较不同管壳的热辐射散热能力.分别针对铜管壳和蒙乃尔管壳进行了两组实验.均将管壳进行了沉积金属铱膜和沉积纳米铱膜的处理.对采用不同管壳的慢波组件的实验研究结果如图 5 和表 1 中所示.

表 1 铜管壳组件温度与功率实验对照表

螺旋线温度/℃	消耗的功率/W		
	纯铜管壳	金属铱管壳	纳米铱管壳
200	0.6741	0.8770	1.8743
300	0.9357	1.6141	3.7149
400	1.2869	2.5963	6.1434

比较图 5 和表 1 中的数据可以看出,采用了沉积纳米铱膜管壳的慢波组件的散热性能比采用普通铜管壳的组件提高了约 3—4 倍,而采用一般金属铱膜管壳的组件的散热性能只提高了 1 倍左右.金属纳米粒子薄膜的采用有效的提高了管壳的辐射散热能力,从而使热量更好的散出.

对采用蒙乃尔管壳的慢波组件的实验研究结果如图 6 和表 2 中所示.

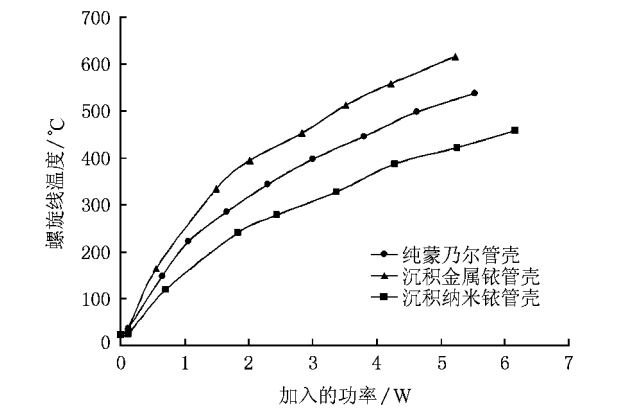


图 6 蒙乃尔管壳的散热性能的实验比较图

表 2 蒙乃尔管壳组件温度与功率实验对照表

螺旋线温度/℃	消耗的功率/W		
	纯蒙乃尔管壳	金属铱管壳	纳米铱管壳
200	0.9337	0.7457	1.4515
300	1.8161	1.3024	2.8580
400	3.0486	2.0901	4.6367

比较图 6 和表 2 中的结果可以看出,采用了沉

积纳米铱膜管壳的慢波组件的散热性能比采用普通蒙乃尔管壳组件提高了约 55% 左右,而采用沉积金属铱膜管壳的组件的散热性能反而下降了 30% 左右.在这两组实验中,采用沉积纳米铱薄膜管壳的慢波组件均表现出最佳的散热性能,纳米铱膜有效的改善了管壳外部的辐射散热能力.

实验中,管壳外部的辐射散热是组件热量传出的主要方式.辐射出的热量可以表示为

$$P_r = \epsilon \sigma_0 T^4 S, \tag{1}$$

其中, σ_0 为黑体辐射常数, S 为辐射表面面积, T 为辐射表面的温度, ϵ 为表面的辐射发射率.

当慢波组件的温度达到稳定时,加入的热功率与辐射散出的相同,只要知道管壳外表面的温度,便可以由(1)式求出不同管壳外表面的辐射发射率.管壳外表面的温度可以在实验中测量.推算实验中制备的几种螺旋线慢波组件的管壳外表面的辐射发射率得到,金属纳米铱膜辐射发射率大约为 0.85,而镀铱膜的辐射发射率仅为 0.28 左右,铜和蒙乃尔的发射率分别为 0.13 和 0.45.金属纳米铱薄膜的辐射发射率比其他材料都高出许多,而镀金属铱膜的发射率比铜高,却低于蒙乃尔.

4. 对热辐射影响的模拟分析

根据实验条件设定计算机模拟仿真,将推算出的材料辐射发射率应用于仿真模型中,使用 ANSYS 进行模拟研究,比较采用不同管壳的慢波组件的散热性能,并对实验结果进行模拟验证.按照实际情况设定模拟实验,得到如图 7 和表 3 中所示的研究

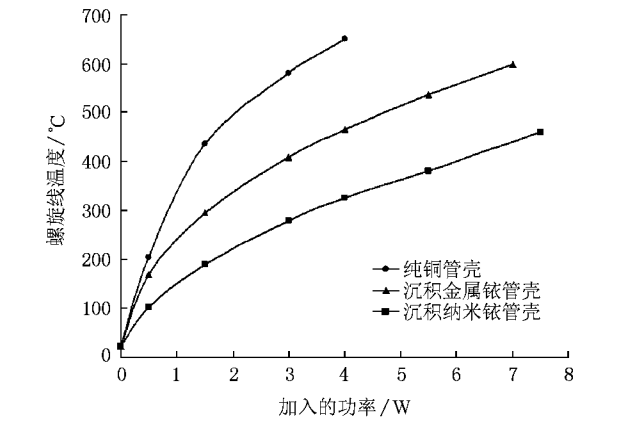


图 7 铜管壳的散热性能的模拟比较图

表 3 铜管壳组件温度与功率模拟对照表

螺旋线温度/℃	消耗的功率/W		
	纯铜管壳	金属铱管壳	纳米铱管壳
200	0.4853	0.7513	1.6760
300	0.9154	1.5675	3.4427
400	1.3456	2.8969	5.9765

比较图 7、图 8 和表 3、表 4,模拟结果与实验结果具有很好的一致性. 将由实验推算得到的材料的辐射发射率应用于仿真模型中,准确地反映了材料的热辐射性能. 纳米金属粒子薄膜与普通的金属薄

表 4 蒙乃尔管壳组件温度与功率模拟对照表

螺旋线温度/℃	消耗的功率/W		
	纯蒙乃尔管壳	金属铱管壳	纳米铱管壳
200	0.8281	0.5072	1.3571
300	1.7039	1.1861	2.8077
400	3.0011	2.1208	4.7904

膜的辐射散热能力具有较为明显的差别. 模拟和实验研究均表明金属纳米粒子薄膜的采用可以有效地提高组件的辐射能力,从而改善组件的散热性能.

5. 结 论

通过将金属纳米粒子薄膜利用溅射法沉积在螺旋线慢波组件中管壳的外表面,研究了其对热辐射能力的影响. 研究表明,采用了沉积纳米铱膜管壳的慢波组件的散热性能比采用普通铜管壳的组件提高了约 3—4 倍,比采用普通蒙乃尔管壳组件提高了约 55% 左右. 结合实验数据,将推算得到的发射率应用于仿真模型中进行模拟研究,得到了与实验结果十分符合的模拟分析结果. 研究表明,金属纳米粒子薄膜在改善电真空器件散热性能中,具有很好的应用前景.

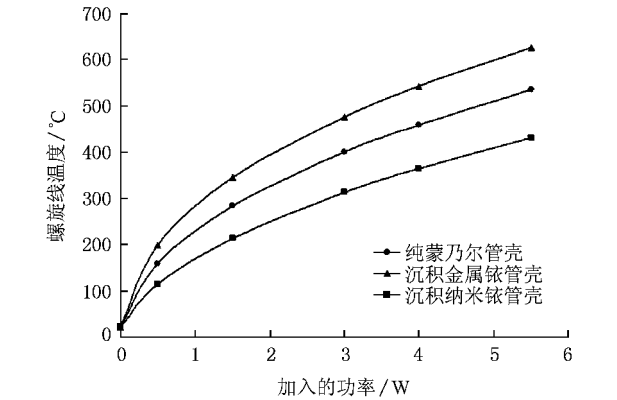


图 8 蒙乃尔管壳的散热性能的模拟比较图

[1] Wang L , Wang H B , Wang T , Li F S , 2006 *Acta Phys . Sin .* **55** 6515 (in Chinese)[王 丽、王海波、王 涛、李发伸 2006 物理学报 **55** 6515]

[2] Liu X G , Geng D Y , Meng H , Shang P J , Zhang Z D 2008 *Appl . Phys . Lett .* **92** 173117

[3] Chatterjee A , Kalia R K , Nakano A , Omeltchenko A , Tsuruta K , Vashishta P 2000 *Appl . Phys . Lett .* **77** 1132

[4] Chen C J , Bridger K , Winzer S R , Schirmer C 1998 *J . Appl . Phys .* **63** 3786

[5] Bringa E M , Caro A 2006 *Appl . Phys . Lett .* **89** 023101

[6] Dayton J A , Mearni G T , Chen H 2005 *IEEE Trans . on ED* **52** 695

[7] Xiao L , Su X B , Liu P K 2006 *Acta Phys . Sin .* **55** 5150 (in Chinese)[肖 刘、苏小保、刘濮鲲 2006 物理学报 **55** 5150]

[8] Han Y , Liu Y W , Ding Y G , Liu P K 2008 *Heat Mass Trans .* **45** 93

[9] Ghosh T K , Challis A J , Jacob A 2008 *IEEE Trans . on ED* **55** 668

[10] Han Y , Liu Y W , Ding Y G , Liu P K 2007 *IEEE Trans . on ED* **54** 1562

Effect of the nanoparticulate metal film on heat radiation

Han Yong^{1,2†} Liu Yan-Wen¹⁾ Ding Yao-Gen¹⁾ Liu Pu-Kun¹⁾

1 ¶ *Key Laboratory of High Power Microwave Sources and Technologies, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*

2 ¶ *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

(Received 10 March 2009 ; revised manuscript received 4 May 2009)

Abstract

The effect of the nanoparticulate metal film on the heat radiation performance has been studied by evaluating the thermal conduction of different helix slow-wave structures(SWS). The heat dissipation capabilities of the SWSs with normal barrel , with normal Ir film deposited barrel and nano-Ir deposited barrel have been analyzed and compared by experiments and simulations . With the measured data , the radiation emissivities of the employed materials have been estimated , and the accuracy has been verified by computer simulation . The experimental results and the simulation results make perfect agreement , suggesting that the nanoparticulate metal film gives much better heat radiation performance .

Keywords : nanoparticulate metal film , heat radiation , heat dissipation capability

PACC : 6500 , 4440 , 4410

† E-mail hanyuzha@126.com