

行波管夹持杆微波等离子体化学气相沉积金刚石厚膜改善散热性能研究

谢扩军

(电子科技大学, 成都 610054)

摘 要: 采用微波等离子体化学气相沉积法在行波管 Al_2O_3 夹持杆上沉积金刚石厚膜, 取代传统有毒的氧化铍陶瓷杆, 用于宽带大功率行波管改善其散热性能。经材料性能测试、慢波组件装配及性能测试, 获得了较好的实验结果: 导热率大于 12W/cm , 介电常数为 $5.0 \sim 5.5$, 介质损耗为 1×10^{-3} , 体积电阻率大于 $10^{13} \text{ } \Omega\cdot\text{cm}$; 慢波组件导热性能与同结构的 BeO 组件相比提高 3.0 倍。整管冷测参数全部合格; 整管热测在 C 波段测得 $P_o = 95\text{W}$, $G = 35\text{db}$ 。

关键词: 微波等离子体; 化学气相沉积; 夹持杆; 金刚石; 行波管; 散热性能

中图分类号: TN124.2; TN304.18; O484.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2000) 09-0085-03

A Study on MPCVD of Thick Diamond Film on TWT Rod to Improve the Heat Dissipation

XIE Kuo-jun

(University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: Thick diamond films were synthesized on Al_2O_3 rod using a microwave plasma chemical vapor deposition technique, which can be taken over the traditional BeO rod and used in the wide-band high power TWT to improve the heat dissipation greatly. After material tests and evaluation, parts assembly and tests, we've got the first good results as follows: Thermal conductivity: $> 12\text{W/cm}$, ten times better than BeO Rod; dielectric constant: $= 5.0 \sim 5.5$; RF loss: $\tan \delta < 1 \times 10^{-3}$; resistivity: $> 10^{13} \text{ } \Omega\cdot\text{cm}$; slow wave parts assembly thermal test: 3.0 times better than BeO. The first TWT with diamond rods has passed all cold tests and has got following hot test results: $f = 4 \sim 8\text{GHz}$, $P_{out} = 95\text{W}$, $G = 35\text{db}$.

Key words: microwave plasma; CVD; support rod; diamond; TWT; heat dissipation

1 引言

微波功率模块(MPM)是当今最具发展前景的军用微波电真空器件之一,用于军事通讯、电子对抗和相控雷达等装备中,它是未来军事电子装备的重要器件。如何进一步缩小体积,提高互作用效率,增加输出功率,拓宽频率,向毫米波甚至更短波长发展,以及提高寿命和可靠性等均直接关系到现代雷达和电子对抗的整机性能更新,具有重要的国防战略意义。MPM技术关键之一是小型化行波管,要求行波管有很高效率和良好的散热能力,体积很小。

多年来螺旋线行波管的平均功率或连续波功率受螺旋线散热能力的限制。为了改善螺旋线的散热能力,往往采用高导热的介质材料来夹持螺旋线。作为高导热的介质材料,BeO陶瓷夹持杆在很大程度上使这一能力得到了改善,但是,BeO由于其毒性^[1],给研究和生产造成了很大的困难,而且其导热率仅为铜的1/4,导热效果不是十分理想,也曾有人想用热解BN陶瓷来代替BeO,虽然BN无毒,但其强度和导热率仍不理想,

与这些材料相比,金刚石的性能却要优越得多,金刚石的导热率大大高于目前常用的几种介质材料,尤其是a型金刚石,在通常温度下其导热率比无氧铜高5倍,而且除导热性能外,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。据资料报道^[2~4],美国雷声公司在七十年代就开始在行波管输出段用立方体天然金刚石颗粒夹持以提高散热性能的研究,他们将输出段的每圈螺旋线焊上三个0.5毫米立方体的金刚石来夹持,其导热能力大约是普通夹持螺旋线的4倍。美国著名的休斯(Hughes)公司于1991年发表政府报告,宣布他们成功研制了一只用金刚石片夹持的K波段高性能大功率行波管953H,他们实际采用的是昂贵的大颗粒天然金刚石经精心切片研磨成0.127mm(厚) \times 0.762mm(宽) \times 3.05mm(长)的若干金刚石片,然后采用15~20片小片组合成76mm长的矩形长杆,再用以夹持螺旋线(输出段,长度76mm),输入段仍用BeO杆夹持,长度60mm,没有中间段,其介质加载因数(DLF)值从通常BeO

杆的 0.7 增加到了 0.85, 使该管在 1720GHz 频段上获得了输出功率大于 75W, 电子效率优于 16%, 总效率达 54.6%, 增益大于 40db 的优良性能, 这一参数应是国际先进水平的, 也是迄今为止世界上第一个采用金刚石片研制成功的高性能行波管, 但由于采用特别昂贵的天然金刚石材料及其精密加工工艺, 所以未能得到推广应用。

2 可行性分析

(1) 金刚石热导率最高, 室温下的热导率 $2400\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$, 为铜的 6 倍; 热膨胀系数最低, 约为 $0.8 \times 10^{-6}/\text{K}$, 因而具有极为优良的抗热冲击性能; 电阻率大于 $10^{14}/\text{cm}$, 是优良的绝缘体, 介电常数为 5.0~5.5, 介质损耗 10^{-4} , 化学性能稳定, 耐腐蚀性能好。(2) 化学气相沉积 (CVD) 的金刚石薄膜具有与天然立方金刚石 (a 型) 完全相同的结构, 因而也具有与天然立方金刚石完全相同的性能。(3) 金刚石薄膜可直接沉积在硅和陶瓷等多种材料上, 设计出适合杆状气相沉积金刚石薄膜的反应腔后, 可以用化学气相沉积法直接在 BeO 、 Al_2O_3 等陶瓷夹持杆上沉积金刚石膜。(4) 可以在硅片上沉积 $0.5 \sim 1.0\text{mm}$ 厚的金刚石膜, 将金刚石厚膜从基底剥离后, 可用激光将金刚石厚膜切割成符合行波管夹持杆装管尺寸要求的金刚石杆。(5) 按照螺旋线夹持杆的热传导方程: $q = k_0/l + b(T_1 + T_2)/2(T_1 - T_2)$, 为了使行波管内热量尽快散掉, 希望 k_0 大, 而小, $(T_1 - T_2)$ 大, 即在管子结构设计允许下, 尽可能采用导热率 k_0 大而直径小的夹持杆, 并增大夹持杆两边的温差。金刚石的 k_0 比 BeO 的高一个数量级, 比 Al_2O_3 高二个数量级。如果其它条件相似, 选用金刚石作夹持杆的行波管的散热量将比使用 BeO 的高一个数量级, 比使用 Al_2O_3 高二个数量级。因此, 本研究用性能与天然立方金刚石相近而成本低廉且易于成型的 MPCVD 金刚石取代价格高昂的天然立方金刚石, 应用于行波管改善散热性能, 必将对提高我国行波管技术水平, 减小器件的尺寸与重量, 提高行波管的效率和综合性能, 更好满足现代军事技术的需要起到积极作用。具有特别重要的国防意义和广泛的应用前景。

3 实验

3.1 微波等离子体化学气相沉积 (MPCVD) 金刚石

在各种等离子体中微波等离子体有许多优良的性能, 如电离度高, 电子密度可达 $10^{11} \sim 10^{15}/\text{cm}^3$; 微波和等离子体特性均可有效地控制, 无内部电极, 可避免污染, 微波等离子体化学气相沉积的金刚石膜质量较高。因此在本项目的研究中, 我们采用微波等离子体化学气相沉积法, 按照下列两种实验方案开展工作: (1) 为了适合于杆状材料的 MPCVD 沉积金刚石薄膜, 利用螺旋线慢波结构设计了一套适合杆状气相沉积金刚石薄膜的反应腔, 在 Al_2O_3 夹持杆外表面沉积金刚石薄膜。(2) 采用文献 4 的实验装置在 $\phi 75\text{mm}$ 的硅片上沉积 $0.5 \sim 1.0\text{mm}$ 厚的金刚石膜, 将金刚石厚膜从基底剥离后, 用激光将金刚石厚膜切割成符合行波管夹持杆装管尺寸要求的金刚石杆。沉积工艺的典型条件如表 1。金刚石厚膜的 SEM 照片和 RAM 谱图如图 1、图 2 所示, 从图可看出, 晶形结构较好; 在

1332cm^{-1} 有较强的金刚石特征峰, 在 1552cm^{-1} 有较弱的无定形碳的宽谱峰。

表 1 沉积工艺的典型条件

工作压力	工作气体	CH_4 浓度	$\text{CH}_4 + \text{H}_2 + \text{O}_2$	微波功率	温度
10^{-4} 托	$\text{CH}_4 + \text{H}_2 + \text{O}_2$	0.5 ~ 5 %	100SCCM	850 ~ 1500W	700 ~ 1000



图 1 金刚石厚膜的 SEM 照片

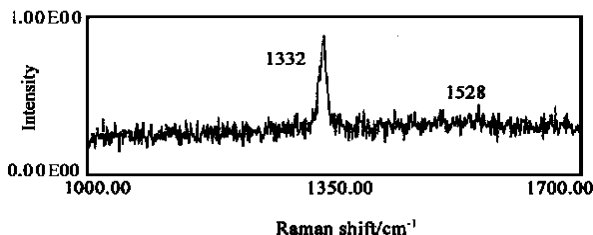


图 2 金刚石厚膜的 RAM 谱

3.2 材料性能测试

夹持杆沉积金刚石后, 实测其导热系数达 $12\text{W}/\text{cm}\cdot^\circ\text{C}$, 介电常数约为 5.0~5.5, 比行波管常用的 BeO 杆 ($\epsilon = 6.5$) 低约 15~20%, 这对行波管的设计和性能非常有利, 体积电阻率大于 $10^{13}/\text{cm}$, 介质损耗为 1×10^{-3} , 偏高。见表 2。

表 2 材料介电性能

参数	样品	
	MPCVD 金刚石杆	BeO 夹持杆
	$\phi 1.0$	1.0×1.5
相对介电常数 ϵ_r	5.00 ~ 5.30	6.40 ~ 6.50
介质损耗 $\tan \delta$ (10^{-2})	0.090 ~ 0.150	0.065 ~ 0.075
导热系数 ($\text{W}/\text{cm}\cdot^\circ\text{C}$)	10 ~ 12	2.43
体积电阻率 (cm)	10^{13}	10^{13}

3.3 行波管装管实验

3.3.1 慢波组件实验

目前能制得的 CVD 金刚石杆长为 60mm, 只能采用拼接方式完成, 因该管结构系翼形无氧铜管壳, 采用机械强力打点径向固定, 因此拼接方式不会影响整管装配性能, 在试验管中, 去掉了中段慢波结构, 只有输入和输出段, 因而缩短了长

度(总长为 251mm),其余电子极、收集极和输入、输出结构组件,全部选用某现成行波管的结构和零部件。用沉积金刚石膜的 Al_2O_3 夹持杆、CVD 金刚石膜矩形夹持杆以及 BeO 陶瓷夹持杆,装配了三只不带集中衰减器的透明慢波结构组件,利用这三只慢波组件,采用

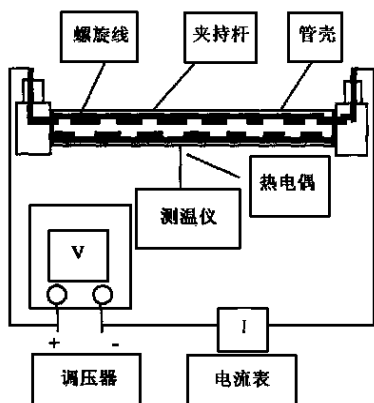


图 3 行波管慢波组件热性能测试示意图
如图 3 所示模拟散热方法,测得散热并比较其导热性能,结果如图 4 所示。

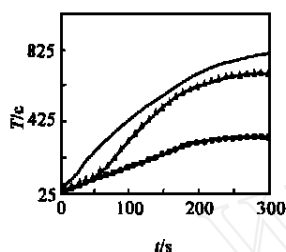


图 4 慢波组件传热速度比较

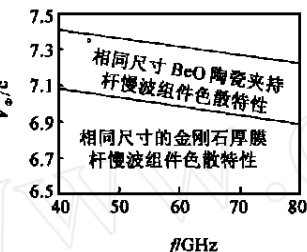
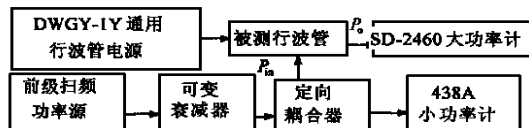


图 5 BeO 杆和金刚石杆慢波组件的色散特性

3.3.2 TWT 电参数测试

用俄罗斯的 TWT 电参数测试系统在 4.0~8.0GHz 频带范围内测试慢波组件的色散特性,慢波结构色散特性如图 5 所示,由色散特性曲线可见,用 CVD 金刚石夹持杆代替 BeO 杆之后,色散特性的趋势几乎完全相同,说明对其行波管的频带特性,几乎没有影响。用 HP 公司的矢量网络分析仪(HP8350)测试其输入、输出 VSWR 匹配特性除输出段个别点 VSWR 最大为 2.2 外,频带内其它各点的 VSWR 均 < 1.6,能满足行波管的性能要求。



Boonton 2000 (4-8GHz) SHK-4 (4-18GHz)

图 6 行波管热测方法示意图

表 3 被测管热测输出功率和饱和增益随频率变化特性

频率 f (GHz)	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0
输出功率 P_0	59	59	60	64	69	74	85	89	95
饱和增益	17	20	22	24	25	26	29	30	35

热测工作参数:灯丝电压: $V_f = 9.4\text{V}$ 灯丝电流 $I_f = 1.77\text{A}$

阳极电压: $V_a = 8172\text{V}$ 阳极电流 $I_a = 0\text{mA}$

聚焦极电压: $V_g = 300\text{V}$ 螺旋线电压: $V_h = 9597\text{V}$

螺旋线电流 $I_h = 2.5\text{mA}$ 收集极电压: $V_c = 7050\text{V}$

收集极电流 $I_c = 330\text{A}$

3.3.3 整管热测

整管装配工艺从装架、冷测、焊接、检漏、排气、外装到老炼热测,全部按某行波管已定型的工艺完成,在实际实验中,以上工艺一次性顺利完成。采用如图 6 所示的某行波管已定型的工艺热测方法在 4.0~8.0GHz 频带内测试行波管输出功率和饱和增益与频率的关系数据如表 3。

4 结论

(1) 用 CVD 方法制造的金刚石夹持杆,其单根杆所测导热系数达 $10 \sim 12\text{W/cm} \cdot ^\circ\text{C}$,比 BeO 材料高 6 倍,装成慢波组件之后,其导热性能比同结构的 BeO 组件高 3.0 倍。实际上从材料本身的导热率测量来看,我们合成的 CVD 金刚石的导热率远大于 BeO,约是它的 6 倍,这在慢波组件的传热速率测量中没有明显反映出来,其主要原因是:我们所测的是夹持杆与管壳(即金刚石与无氧铜)的综合热传导速率。在装管时是靠机械强力打点径向固定,打点使管壳与夹持杆,夹持杆与螺旋线接触,结合不够紧密,两界面间的热阻较大。热电偶与管壳接触不够紧密,测量方法不够严密。(2) 从这次测得的慢波结构组件的色散特性和慢波组件的输入输出匹配特性结果完全证明行波管设计参数只需稍作调整,就可在带宽、同步电压等主要特性方面获得同样甚至更好的结果。(3) 整管初步热测结果:整管在 4.0~8.0GHz 带宽内得到输出功率 95W,增益 35db,仅接近氧化铍管的性能,整管热测性能不十分理想。初步分析是由于这次制造的金刚石杆的纯度不够,介质损耗角过大,从而引起整管分布损耗过大所致。(4) 在 CVD 金刚石厚膜,取代传统有毒的氧化铍瓷杆,用于宽带大功率行波管改善其散热性能。无论理论分析还是试验研究,均表明该种新材料夹持杆能满足大功率行波管的设计和工艺技术要求,通过实验探索出了一条基本可行的工艺技术路线。为今后在宽带大功率行波管中逐步推广使用这一新材料、新技术打下了良好的基础,具有广阔的应用前景。(5) 若能进一步提高 CVD 金刚石杆的纯度和沉积速率,降低介质损耗和生产成本,将使这一新材料、新技术在行波管研制和生产中成为理想的介质材料。

作者简介:



谢扩军 副教授,1965 年生,1990 年毕业于成都科技大学无机非金属材料系,获硕士学位,现从事无机非金属材料、微波能、微波等离子体、真空微电子等领域的应用基础研究,已发表学术论文 20 余篇。

参考文献:

- [1] 刘联宝. 电子工业用 BeO 瓷的性能与钨毒防护 [J]. 电子管技术, 1978. 1.
- [2] R. T. Webb. Ten years of TWT progress [J]. Electronics & Power February, 1985, 2: 120 - 124. (下转第 77 页)

其中 $z(m, n)$, $o(m, n)$ 分别为原图像和处理后图像像素点 (m, n) 的灰度值; s_1, s_2 为图像的用像素表征的图像的长和宽, 本文中均为 256. 由图 4 和表 1 可以看出, 融合后的图像不仅在视觉效果还是在噪声特性上都有了很大的改善.

表 1 仿真过程各图像性质比较

指标	高斯噪声图像			脉冲噪声图像			乘性噪声图像			融合后		
	PSNR	MSE	MAE	PSNR	MSE	MAE	PSNR	MSE	MAE	PSNR	MSE	MAE
滤波前	14.3462	2390.31	39.5573	12.6051	3569.20	25.6907	18.8166	853.953	24.9189	19.7445	689.660	20.9445
滤波后	20.4810	582.071	18.9949	24.5756	226.735	6.32167	24.7353	218.550	11.0711	24.0935	253.358	11.4244
分类后	20.8842	530.465	18.0728	25.5067	182.982	7.50854	24.7738	216.620	10.9417	26.2199	155.272	8.7873

5 结论

本文提出了一种基于一维自组织特征映射神经网络的图像融合算法. 它利用一维的像素特征量直接进行二维图像信号处理, 能很好地完成多幅带有噪声图像的融合, 尤其对于图像中的物体的区分非常有效. 同时, 由仿真结果可以看出, 在对来自同一景物的多幅图像进行融合之前进行图像的预处理可以极大地提高融合的效果.

参考文献:

[1] D. L. Hall, J. Llinas. An introduction to multisensor data fusion [J]. Proc. of IEEE, 1997, 85(1) : 6 - 23.

[2] W. Wan, D. Fraser. Multisource data fusion with multiple self-organizing maps [J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 1999, 37 (3) : 1344 - 1349.

[3] Deepa Kundur, Dimitrios Hatzinakos. A novel approach to multispectral blind image fusion [J]. SPIE, 1997, 3067 : 83 - 93.

[4] Pongsak Ajjimarange. Neural network model for fusion of visible and infrared sensor outputs [J]. SPIE, 1988, 1003 : 153 - 160.

[5] J. Desachy, L. Roux. Numeric and symbolic data fusion : a computing approach to remote sensing images analysis [J]. Pattern Recognition Letters, 1996, 17(13) : 1361 - 1378.

[6] 黄煦涛, 胡光锐, 郑志航, 戚飞虎译. 二维数字信号处理 [M]. 北京 : 科学出版社, 1985 : 202 - 272.

[7] Kohonen. Self-organized Formation of Feature Maps [M]. Cybern. Syst. Recognit. , Learn, 1984 : 3 - 12.

作者简介:



张兆礼 1972 年生. 1998 年毕业于华北工学院电子工程系, 获硕士学位. 现在哈尔滨工业大学自动化测试与控制系攻读博士学位. 主要从事神经网络、传感器信息处理的研究工作.

孙圣和 (见本期第 12 页)

(上接第 87 页)

[3] Tamashiro, R. N. ; Aldana, S. L. 60 percent k-band TWT using a new diamond rod technology [A]. International Electron devices Meeting 1989. Technical Digest (Cat. No. 89CH2637-7) : 187 - 190.

[4] Aldana, S. L. ; Tamashiro, R. N. High efficiency 20GHz traveling wave tube development for space communications [R]. Final report , Report No : NAS1. 26 : 187160 ; NASA-CR-187160 , Date : Oct. 91 : 2 - 1 ~ 2 - 8.

[5] 谢扩军, 季天仁, 刘盛纲. 多功能微波等离子体应用基础研究设备 [J]. 电子科技大学学报, 1996, 25(4) : 403 - 407.