

新型大功率毫米波螺旋线行波管高频系统研究

李斌 朱小芳 廖莉 杨中海 曾葆青 姚列明
(电子科技大学物理电子学院 成都 610054)

摘要: 该文探讨了 CVD 金刚石材料在宽带毫米波螺旋线行波管中的应用, 研究了两类非杆状新型 CVD 金刚石夹持的螺旋线高频结构, 利用 MAFIA 分析了它们的色散特性、耦合阻抗和衰减常数, 与传统的矩形 BeO 夹持杆和矩形 CVD 夹持杆高频结构进行了对比, 最后将这两类新型高频结构替代国内某毫米波行波管(26-40GHz)中的矩形 BeO 夹持杆螺旋线高频结构, 利用“宽带大功率行波管 CAD 集成环境”中的注波互作用模块分析了其大信号工作特性。结果表明, 分立 CVD 金刚石夹持高频系统兼顾了超宽带和大功率, 同时由于金刚石直接和螺旋线及金属翼片大面积接触, 该结构还具有极好的散热能力, 是一种有重要应用前景的高频结构。

关键词: 毫米波行波管; 高频系统; 金刚石; 注波互作用

中图分类号: TN124.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)08-2019-04

Study of Novel Slow Wave Circuit for Millimeter Wave Power Helical TWT

Li Bin Zhu Xiao-fang Liao Li Yang Zhong-hai Zeng Bao-qing Yao Lie-ming
(School of Physical Electronics, Univ. of Elec. Sci. and Tech. of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: CVD diamond material, applying in broad band millimeter wave helical Traveling Wave Tube (TWT), is discussed. Two kinds of novel helical slow wave circuit, supported by CVD diamond, are presented. Dispersion, interaction impedance and attenuation of these circuits are simulated by MAFIA, compared with circuit supported by BeO rods. Nonlinear beam and wave interaction of the TWTs, replaced slow wave circuit supported by BeO rods with new circuit, are analyzed using BWI module in TWTCAD Integral Framework, which is a suite of helix TWT design code. The results show that Stud-Diamond helical slow wave circuit has broader band and excellent cooling capability is implied, it should has important apply to broad band millimeter wave power helical TWT.

Key words: Millimeter wave traveling wave tubes; Slow wave circuit; Diamond; Beam and wave interaction

1 引言

螺旋线慢波电路具有很宽的工作频带, 然而其功率容量却很有限^[1]。在连续波工作情况下, 其平均输出功率最高只能达到千瓦量级。限制其功率容量的主要原因是体积及散热问题。螺旋线尺寸非常小, 高频耗散将使螺旋线可能由于温度过高而变形甚至烧断。为了有效提高其输出功率, 可能的的方法是降低慢波电路的高频损耗, 或提高慢波电路的散热能力。

氧化铍(BeO)作为一种绝缘材料, 同时具备较高的热导率, 室温下热导率 300 W/mK; 较低的介电常数 6.8。从而成为最常用的一种螺旋线夹持杆材料。但氧化铍夹持杆的热阻会随着温度的上升而迅速上升, 散热能力将急剧下降。另外氧化铍粉末有很强的毒性, 给研究和生产带来了一定的困难。

金刚石具有良好的绝缘和导热性能, 是目前已知导热性能最好的材料, 室温下热导率 2400 W/mK, 为铜的 6 倍; 同时也是优良的绝缘材料, 介电常数 5.0-5.5, 介质损耗 10^{-4} ,

优于BeO。将其作为螺旋线行波管夹持系统非常有应用前景^[2]。采用天然金刚石作为夹持材料, 1983 年瓦里安公司(Varian)成功研制了一支 28GHz的TunneLadder行波管^[3]; 1989 年休斯公司(Hughes Electron Dynamics)成功研制了一支 18GHz的螺旋线行波管^[4]。这两个器件都具有极高的性能, 然而由于采用昂贵的大颗粒天然金刚石材料及复杂的加工装配工艺, 所以未能得到推广应用。

由于化学气相沉积(CVD)工艺的不断进步, 获得 1mm 左右的人造金刚石成为可能。近年来, 国内外学者开始采用 CVD 金刚石作为螺旋线的夹持系统。黄明光^[5]将清华大学研制的矩形 CVD 金刚石夹持杆用于 8 毫米行波管, 获得了优于 BeO 夹持杆的结果。陈乐^[6]将矩形 CVD 金刚石夹持杆替代氮化硼(BN)夹持杆获得了更好的结果。J A Dayton^[7]将金刚石沉积在螺旋线部分表面, 同时结合激光微加工技术提出了一种在工艺上可行的分立金刚石夹持螺旋线高频系统。Galdetskiy^[8]将金刚石沉积在螺旋线整个外表面, 提出了一种散热能力极佳的全金刚石夹持螺旋线高频系统。

本文采用矩形 BeO, 矩形 CVD 金刚石夹持杆和新型金刚石夹持系统, 设计了几种毫米波螺旋线行波管高频系统, 对比了它们的性能, 分析了各自的特点, 为研制大功率毫米

波螺旋线行波管提供了参考设计方案。

2 建模

本文以国内某 26–40GHz 毫米波行波管为原型, 在原有传统高频系统基础上设计了几种新型金刚石夹持高频系统, 对比分析了它们的高频特性。本文使用 CST 公司的 MAFIA^[9] 建立了所有的模型, 并分析其高频特性。

2.1 矩形 BeO, 矩形 CVD 金刚石夹持杆高频系统建模

高频系统模型为采用 3 根矩形 BeO 或矩形 CVD 金刚石夹持螺旋带, 其结构如图 1(a) 所示。

2.2 分立金刚石夹持高频系统建模

在 MAFIA 中建立的分立金刚石夹持高频系统模型如图 1(b) 所示。其工艺过程^[7]简述如下: 在一个钼圆柱筒上, 等分沉积(CVD)3 条金刚石条, 然后采用激光切割工艺, 切割钼筒可得到分立金刚石夹持螺旋线, 接着将内壁焊接了等分 3 条钎铜合金金属翼片的管壳, 采用铜焊工艺在真空室中将钎铜合金金属翼片与金刚石焊接在一起, 最后将管壳焊接后就得到了分立金刚石夹持高频系统。

2.3 全金刚石夹持高频系统建模

在 MAFIA 中建立的全金刚石夹持高频系统模型如图 1(c) 所示。其工艺过程^[8]简述如下: 首先设计一个如图 2(a) 所示的模具, 该模具为在一个半径等于螺旋线内半径的圆柱体上有一道螺旋带状脊, 螺旋带脊的螺距等于螺旋线的螺距, 高度大于螺旋线外半径, 然后将螺旋线绕在该磨具的槽中(图 2(b)、2(c)), 接着采用化学气相沉积(CVD)工艺, 在其整个工件外表面沉积一层金刚石(图 2(d)), 最后将模具刻蚀掉就得到了全金刚石夹持高频系统(图 2(e)、2(f))。

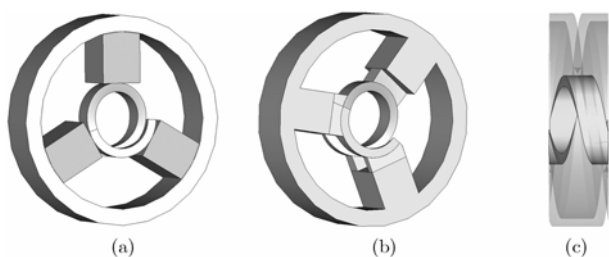


图 1 矩形杆夹持高频系统(a), 分立金刚石夹持高频系统(b), 全金刚石夹持高频系统(c)

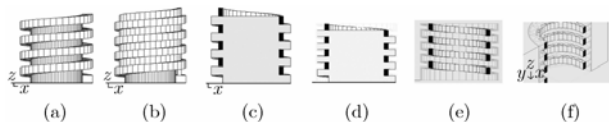


图 2 全金刚石夹持高频系统的工艺过程

3 模拟结果

本文首先采用 MAFIA 模拟计算了上述所有结构高频系统, 获得了它们的色散特性、轴向相互作用耦合阻抗和衰减常数, 然后采用“宽带大功率行波管 CAD 集成环境”(简称 TWTCAD) 中注波相互作用模块^[10–12] 计算了它们的大信号非线性特性, 最后和部分实验结果进行了对比。

3.1 色散

利用 MAFIA 的准周期边界条件, 通过设置不同的单周期相移, 求解相应的本征频率, 可获得系统的色散特性:

$$\frac{v_p}{c} = \frac{\omega}{\beta c} = \frac{2\pi fL}{c\phi_0} \quad (1)$$

其中 L 为螺距, ϕ_0 为单周期相移, f 是与 ϕ_0 对应的本征频率。

3.2 相互作用阻抗

对螺旋线行波管, 电子注主要与基波同步。基波耦合阻抗 K_0 定义为

$$K_0 = \frac{E_{z0}E_{z0}^*}{2\beta_0^2 P} = \frac{E_{z0}E_{z0}^*}{2\beta_0^2 \omega_1 v_g} = \frac{E_{z0}E_{z0}^* L}{2\beta_0^2 W v_g} \quad (2)$$

其中 P 为系统的平均功率流, w_1 为单位长度内电磁平均储能, $\beta_0 = \phi_0/L$ 为纵向相位传播常数, v_g 为波的群速, W 为一个周期内系统的电磁平均储能; E_{z0} 为基波轴向电场。

3.3 衰减常数

衰减常数定义为

$$\alpha = \frac{1}{2} \frac{P_1}{P} = \frac{1}{2} \frac{P_L}{W v_g} (Np/m) \quad (3)$$

其中 P_1 为单位长度内系统的损耗功率, P_L 一个周期内系统的损耗功率。

从图 3 可以看出, 采用矩形 CVD 金刚石夹持杆代替传统的 BeO 夹持杆后, 管子的带宽没有变化, 只是相速度变高了, 耦合阻抗略有升高, 衰减略有降低。模拟结果和理论分析及实验结果是一致的, 因为 CVD 金刚石夹持杆和 BeO 夹持杆相比, 对这些参数的影响仅仅是因为介电常数变小了。故此, 采用 CVD 金刚石夹持杆代替 BeO 夹持杆后, 工作电压上升, 输出功率增加, 增益变高, 文献[5, 6]证实了这一结论。采用 CVD 金刚石夹持杆的最大好处是其散热能力相比 BeO 夹持杆有很大的提高, 但由于目前主要是采用矩形金刚石夹持杆, 夹持杆和螺旋线的接触仍然是一条线, 金刚石的散热能力未能得到充分发挥。

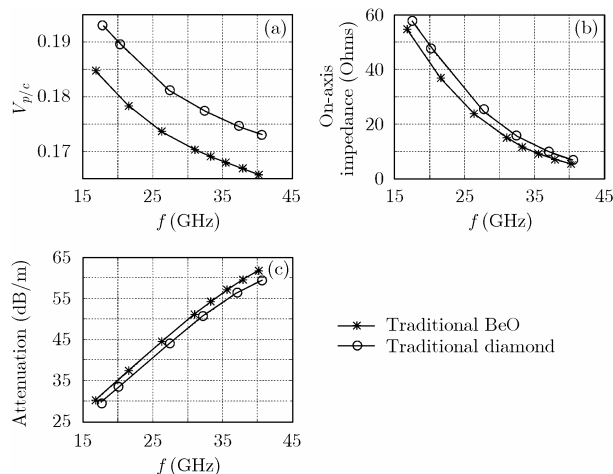


图 3 矩形 BeO 杆和矩形 CVD 金刚石杆高频系统的色散特性(a), 耦合阻抗(b), 衰减常量(c)

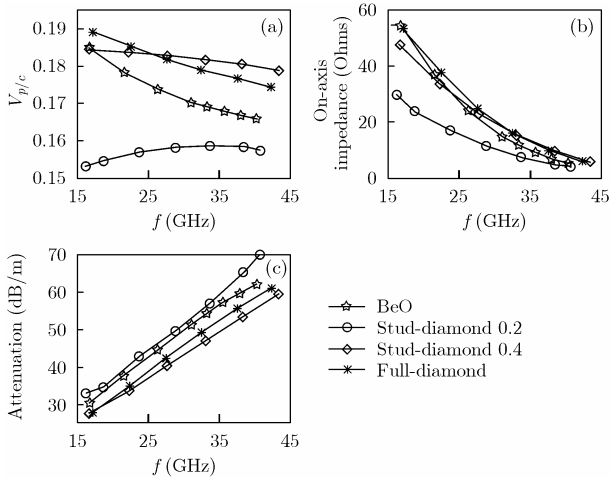


图 4 BeO 夹持杆、分立金刚石、全金刚石夹持高频系统的色散特性(a), 耦合阻抗(b), 衰减常量(c)

图 4 表明, 采用全金刚石夹持系统代替 BeO 夹持杆后, 带宽略有增加, 同时耦合阻抗略微升高, 衰减略微下降。表 1 模拟对比了在 26-40GHz 工作带宽下, 采用 BeO 夹持杆和全金刚石夹持高频系统的输出功率、增益和电子效率情况。结果表明全金刚石夹持系统在输出功率、增益和电子效率方面与 BeO 夹持杆相比有一定优势, 而且由于金刚石和螺旋线及管壳大面积接触, 可以推断其散热能力极强, 此类结构在大功率螺旋线行波管中可能有重要的潜在应用前景。

采用分立金刚石夹持系统代替 BeO 夹持杆后, 带宽有显著的扩展, 当金刚石的高度等于螺旋线到管壳之间距离的 20%时(即 Stud-Diamond 0.2), 呈负色散特性, 色散曲线非常平坦, 但耦合阻抗在频率低端有明显的下降; 当金刚石的高度等于螺旋线到管壳之间距离的 40%时(即 Stud-Diamond

0.4), 色散曲线极为平坦, 而耦合阻抗几乎没有下降。可以预期, 采用分立金刚石夹持系统后, 管子的带宽将显著增加。表 2 模拟了在 18-40GHz 工作带宽下, 全金刚石结构和分立金刚石结构的输出功率和增益情况。结果表明, Stud-Diamond 0.4 结构的高频系统兼顾了超宽带和大功率, 同时由于金刚石直接和螺旋线及金属翼片大面积接触, 可以推测该结构有极好的散热能力。此类结构可能在大功率超宽带毫米波螺旋线行波管中有重要的应用前景。

4 结束语

由于天然金刚石过于昂贵且加工困难, 而 CVD 金刚石制备工艺日益成熟, 使 CVD 金刚石有可能在行波管中得到广泛应用。本文对比分析了采用传统矩形 BeO 杆夹持、矩形 CVD 金刚石杆夹持、分立 CVD 金刚石夹持和全 CVD 金刚石夹持的螺旋线高频系统, 使用 MAFIA 分析了它们的色散特性、耦合阻抗和衰减常数, 并利用 TWTCAD 中的注波互作用模块分析了它们的非线性特性。研究表明, 采用矩形 CVD 金刚石夹持杆代替 BeO 夹持杆, 可以增加输出功率、增益和电子效率, 同时可以有效改善行波管散热情况; 采用全 CVD 金刚石夹持系统代替 BeO 夹持系统, 可以提高输出功率、增益和电子效率, 同时由于 CVD 金刚石和螺旋线及管壳大面积接触, 该结构散热能力极佳; 采用分立 CVD 金刚石夹持系统代替 BeO 夹持系统, 可以大大展宽工作带宽, 同时可以保持高耦合阻抗, 该结构兼顾了超宽带和大功率, 同时由于金刚石直接和螺旋线及金属翼片大面积接触, 该结构还有极好的散热能力, 是一种有重要应用前景的高频结构。

表 1 BeO 夹持杆和全金刚石夹持高频结构大信号非线性特性

高频结构	电压 (V)	26GHz				33GHz				40GHz			
		Pin	Pout	Gain	η	Pin	Pout	Gain	η	Pin	Pout	Gain	η
		(mW)	(W)	(dB)	(%)	(mW)	(W)	(dB)	(%)	(mW)	(W)	(dB)	(%)
BeO	7950	6	30.22	37.01	6.33	2	39.83	42.98	8.35	70	33.77	26.82	7.08
Full diamond	8900	3	39.97	41.24	7.48	2	46.34	43.64	8.68	30	42.61	31.51	7.98

表 2 全金刚石、Stud-Diamond 0.2 和 0.4 高频结构大信号非线性特性

高频结构	电压 (V)	18GHz				29GHz				40GHz			
		Pin	Pout	Gain	η	Pin	Pout	Gain	η	Pin	Pout	Gain	η
		(mW)	(W)	(dB)	(%)	(mW)	(W)	(dB)	(%)	(mW)	(W)	(dB)	(%)
Full diamond	8900	80	26.55	25.21	4.97	3	41.16	41.36	7.71	30	42.61	31.51	7.98
Stud-Diamond 0.2	7070	50	40.41	29.06	9.53	8	37.68	36.72	8.88	55	24.27	26.43	5.72
Stud-Diamond 0.4	9350	20	63.34	35.01	11.29	2	55.59	44.43	9.91	35	47.89	31.35	8.54

然而,文献[7]报道的分立 CVD 金刚石夹持系统的加工工艺比较复杂,其中采用了激光微加工工艺等,为了使该结构更容易实现,有必要进一步研究较简单的加工工艺,如采用类似全 CVD 金刚石生长方式可能可以有效降低分立 CVD 金刚石夹持系统的工艺难度,我们下一步将对这种 CVD 金刚石制备方式进行研究。

参 考 文 献

- [1] Gilmour A S Jr. Principles of Traveling Wave Tubes. Norwood, MA: Artech House, 1994, chapter 12.
- [2] 谢扩军. 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. 电子学报, 2000, 28(9): 85-87.
- [3] Jacquez A, Karp A, and Scott A. A millimeter-wave tunnel Ladder TWT. IEDM Tech. Dig., 1983: 129-132.
- [4] Tamashiro R N and Aldana S L. 60 percent efficient K-band TWT using new diamond rod technology. IEDM Tech. Dig., 1989: 187-190.
- [5] 黄明光. 人造金刚石在毫米行波管中应用分析. 中国电子学会真空电子学分会第 15 届学术年会, 昆明, 2005: 12-15.
- [6] 陈书, 陈君乐, 杨钢. 人造金刚石作行波管夹持杆的实验. 中国电子学会真空电子学分会第 15 届学术年会, 昆明, 2005: 34-38.
- [7] Dayton J A Jr, Mearini G T, Chen H, and Kory C L. Diamond-studded helical traveling wave tube. *IEEE Trans. on Electron Device*, 2005, 52(5): 695-701.
- [8] Galdetskiy A V. Helix slow-wave structure with diamond support for power TWTs. 6th International Vacuum Electronics Conference, Noordwijk, Netherlands, 2005: 471-472.
- [9] The MAFIA Collaboration. MAFIA User Manual Version 4.0.25, Germany: CST Inc, 2000.
- [10] Yang Zhonghai and Li Bin *et al.* Application and Validation of the TWTCAD Integrated Framework. ICMMT 2004, Beijing, China, 2004: 723-726.
- [11] 廖莉, 杨中海等. TWTCAD 系统框架设计与软件验证. 中国电子学会真空电子学分会第 15 届学术年会, 昆明, 2005: 312-315.
- [12] 李斌, 杨中海等. TWTCAD 注波相互作用 CAD 设计与实现. 中国电子学会真空电子学分会第 15 届学术年会, 昆明, 2005: 332-335.

李 斌: 男, 1974 年生, 博士, 副教授, 主要研究领域为微波电子学、相对论电子学、计算电磁学等.

朱小芳: 女, 1977 年生, 博士生, 从事微波电子学和微波器件理论与 CAD 技术的相关研究.

廖 莉: 女, 1974 年生, 讲师, 主要从事微波电子学和微波器件理论与 CAD 技术的相关研究.

杨中海: 男, 1944 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 国家有突出贡献的中青年专家, 主要研究领域为相对论电子学、微波电子学、等离子体电子学、真空微电子学等.