

大功率微波环形器热流仿真

作者姓名¹谭雅琪, ^{1,2}朱铎丞, ¹杨阳, ¹黄卡玛

1. 电子信息学院, 四川大学, 成都市, 四川省, 中华人民共和国
2. 通讯作者邮箱: hczhu@scu.edu.cn

摘要: 随着电磁波应用功率的提高, 大功率环形器的电磁损耗不可忽视, 并造成环形器在工作过程中发生温度变化, 导致环形器性能出现不稳定状态。针对大功率环形器在工作过程中温度变化对性能的影响, 利用 COMSOL Multiphysics 对大功率环形器进行电磁-热-固体力学多物理场耦合分析。通过耦合分析得到环形器在不同散热条件时的温度分布、应力分布、形变情况, 以及当饱和磁化强度随温度变化时环形器的性能变化, 为大功率环形器的综合设计提供理论依据。

关键词: 环形器; 大功率器件; 热分析; 多物理场耦合

Abstract: With the improvement of the applied power of electromagnetic wave, the electromagnetic loss of high-power circulator can not be ignored, and the temperature changes during the operation of the circulator, which leads to the unstable performance of the circulator. Aiming at the influence of temperature change on the performance of high-power circulator, the multi physical field coupling analysis of electromagnetic field, thermal field and solid mechanical field of high power microwave circulator was carried out by COMSOL Multiphysics. Through coupling analysis, the temperature distribution, stress distribution and deformation of the circulator under different heat dissipation conditions are obtained, and the performance change of the circulator when the saturation magnetization changes with the temperature is obtained, which provides a theoretical basis for the comprehensive design of the high-power circulator.

Key words: circulator; high-power device; thermal analysis; multi physical field coupling

1. 引言

环形器作为一种单向环行传输电磁波的重要器件, 任意端口输入的电磁波都按某一固定方向环行传输至对应的输出端, 并对该过程中产生的反向电磁波信号进行衰减。[14,15]由于介电损耗和导电损耗的存在, 环形器在工作过程产生电磁能量损耗, 使得环形器自身温度升高[16,17]。在温度升高过程中, 环形器电磁参数、热参数以及固体力学参数随温度发生改变[16,17], 产生电磁-热-固体力学耦合, 影响环形器工作稳定性。

过去, 国内外对于大功率器件的热流研究并不全面, 很多研究往往止步于分析器件在工作过程中的发热情况, 对于发热带来的后续影响研究并未深入[1]。但是由于大功率器件所使用的大多数材料在电磁环境下存在损耗而产生热, 从而使自身温度升高。又因为器件材料的电磁参数往往为温度的函数, 随着器件自身的温度变化, 电磁参数随之变化, 从而引起器件内部电磁场分布变化。

随着电磁波技术的应用进一步向高功率峰值方向发展, 微波器件的工作功率增大[2], 人们开始重视大功率微波器件发热所带来的一系列影响, 出现了对大功率微波器件以及大功率微波电路等进行多场耦合分析的研究。例如: 姚列明、肖礼、杨中海等人与蒋伟、罗勇均对行波管进行了热分析 [3,4,5], 发现行波管在工作过程中由于温度升高产生形变, 从而影响行波管的性能; M. Lukic、K. Kim、Y. Lee 等人对多层贴片天线进行热分析[6], 金祖升、贺喜、施佳林等人对大功率微波天线阵列进行热分析[7], 韩广祥、文光俊、冯正勇对微波功放芯片的热分析[8], 发现这些器件在工作过程由发热会影响器件的材料参数与, 从而导致器件性能产生波动; L. M. de la Torre Rodríguez 等人通过仿真预测了微波滤波器在变化的工作温度及工作功率时的响应情况[9], 吴强、宁曰民对大功率微波合成器进行了温度场分析并进行热设计改进[10], 丁海兵、冯彤、李伟松对一种大功率连续波磁控管进行了高频电磁场与热应力场的耦合分析[11], H. Zhang、S. Chen、D. Ding 等人分别对天线阵列及半导体器件的热分析算法优化[12,13], 均为大功率器件的热设计提供了一定的理论参考。以上研究内容显示了对大功率器件进行热分析以及热设计的重要性, 但针对具有各项特异性电磁参数的器件, 尤其是大功率波导式环形器的热分析研究仍缺少实例。

因此，该研究针对工作频率为 3GHz、输入功率为 500W 的微波环形器，通过在 Comsol Multiphysics 中对微波环形器进行 3D 建模，建立多物理场耦合方程，对环形器在大功率作用下的温度、热应力、形变以及环形器性能变化情况进行分析，为大功率微波器件尤其是大功率微波环形器器件的热设计提供理论依据。

您可以在引言部分简要介绍论文的研究背景，并描述需要使用仿真解决的问题；还可以概述您将在论文中介绍的研究工作。

II. 多物理场建模

1. 几何建模

根据环形器的设计指标，建立环形器几何模型，从外至内依次为环形器周围空间、外壳、内腔以及铁氧体柱（如图 1）。

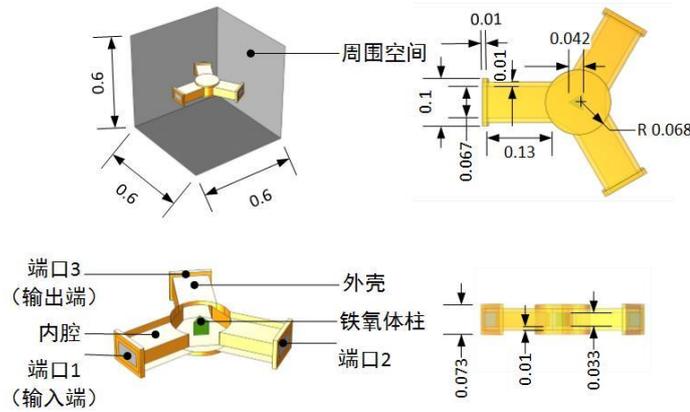


图 1 模型结构及尺寸（单位：m）

2. 控制方程

本研究中涉及到微波场与温度场、温度场与应力场的耦合。

在微波场中，采用麦克斯韦方程组对环形器内部的电磁场分布进行描述：

$$\begin{cases} \nabla \times \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \\ \nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \vec{B} = 0 \\ \nabla \cdot \vec{D} = \rho_e \end{cases} \quad (1)$$

式中 \vec{H} 为磁场强度， \vec{j} 为电流密度， \vec{D} 为电位移矢量， \vec{E} 为电场强度， \vec{B} 为磁感应强度， ρ_e 为电荷密度。麦克斯韦方程组在实际使用时，常简化为亥姆霍兹方程[18]：

$$\nabla \times \mu_r^{-1}(\nabla \times \vec{E}) - k_0^2 \left(\epsilon_r - \frac{j\sigma}{\omega \epsilon_0} \right) \vec{E} = 0 \quad (2)$$

式中 μ_r 为相对磁导率， k_0 为真空中波数， ϵ_r 为相对介电常数， ω 为角频率， ϵ_0 为真空中介电常数。

电磁功率损耗用 Q_e 表示，则电磁功率损耗可通过电场计算得到：

$$Q_e = \frac{1}{2} \omega \epsilon_0 \epsilon_r'' |\vec{E}|^2 \quad (3)$$

式中 ϵ_r'' 为相对介电常数虚部。

在温度场中，控制方程为导热微分方程[18]：

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - k \nabla^2 T = Q_e \quad (4)$$

式中 ρ 为材料密度， C_p 为材料比热容， T 为温度， t 为时间， k 为导热系数。
在应力场中，控制方程为热膨胀方程：

$$\epsilon_{th} = \alpha(T)(T - T_{ref}) \quad (5)$$

式中 ϵ_{th} 为膨胀量， $\alpha(T)$ 为材料热膨胀系数， T_{ref} 为参考温度。

3. 输入参数

模型的输入参数如表 1 所示。

设置外加于铁氧体柱上的偏置磁场 $H_0 = \frac{100 \times 10^3}{4\pi} (A/m)$ ，且输入功率沿逆时针方向从端口 1 环行至端口 3 输出，则铁氧体材料的相对磁导率满足如下表达式：

$$\mu_r = \begin{bmatrix} 1 + \chi_{xx} & \chi_{xy} & 0 \\ \chi_{yx} & 1 + \chi_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中， χ_{xx} 、 χ_{xy} 、 χ_{yx} 、 χ_{yy} 为偏置磁场 H_0 下铁氧体材料的复磁化率。

表 1 模型输入表[21,22]

属性	铁氧体	空气	铜
饱和磁化强度[A/m]	$\frac{680 \times 10^3}{4\pi}$	-	-
共振线宽[A/m]	$\frac{40 \times 10^3}{4\pi}$	-	-
有效损耗正切	0.0002	-	-
相对介电常数	$14.5 - j14.5 \times 0.0002$	1	1
相对磁导率	(10)	1	1
电导率[S/m]	0	0	5.998×10^7
恒压热容[CpJ/(kg*K)]	900	-	385
密度[kg/m ³]	4.9×10^3	-	8960
导热系数[W/(m/K)]	5	-	400
杨氏模量[Pa]	-	-	110×10^9
泊松比	-	-	0.35
热膨胀系数[1/K]	-	-	17×10^{-6}

4. 边界条件

4.1 电边界

在计算电磁场分布时，除环形器的馈电端口外，环形器外壳被认为是完美电导体，即外壳上的电场为 0，满足下列方程：

$$\vec{n} \times \vec{E} = 0 \quad (6)$$

式中 \vec{n} 为对应面的单位法向矢量。电磁波需要从环形器 1 端口馈入，故将 1 端口设置为激励端口，模式为 TE_{10} 模。设置 1 端口输入功率为 500W，功率馈入时长为 200min。

4.2 热边界

在计算传热的过程中，对环形器外壳、腔内空气、铁氧体柱进行固体传热分析，对周围空气进行流体传热分析。

对环形器外壳设置热通量边界满足[17,19,20]：

$$-\vec{n} \cdot \vec{q} = h(T_{air} - T) \quad (7)$$

式中 \vec{q} 为热流， h 为导热系数，取值为 $5W/(m^2 \cdot K)$ 。

环形器 3 个端口边界设置为热绝缘，满足下列方程[19,20]:

$$-\vec{n} \cdot \vec{q} = 0 \quad (8)$$

对环形器周围空气设置流入、流出及热通量边界。空气域底部设置为流入边界，空气流速分别设置为 0.1m/s、0.3m/s、0.5m/s、0.7m/s；空气域顶部为流出边界；四周为热通量边界，导热系数 h 取值为 $5W/(m^2 \cdot K)$ [20]。

被加热物体的初始温度设置为 293.15K。

4.3 固体力学边界

在计算热应力及形变时，对环形器外壳进行固体力学分析。

环形器 3 个端口的金属波导接头外边界设置为固定约束边界，满足下列方程：

$$\vec{u} = 0 \quad (9)$$

式中 \vec{u} 为位移。

III.结果与讨论

1. 饱和磁化强度不变时的环形器温度场分析

铁氧体饱和磁化强度不变时，环形器电磁功率损耗分布情况如图 2 所示，环形器电磁功率损耗集中于铁氧体柱。此时，环形器 S 参数分别为 $S_{11}(dB)=-24.591$ ， $S_{21}(dB)=-28.461$ ， $S_{31}(dB)=-0.66879$ 。

由于存在电磁功率损耗，根据式 (4)，铁氧体柱在大功率作用下温度迅速升高，并通过传热对环形器内腔的空气及外壳进行加热，使得模型各结构的温度有不同程度的上升（图 3、图 4）。对比有无外壳表面散热时的结果（图 4），环形器外壳的温度在 100min 时温度差值已达到 20K 左右；随着时间推移，两种情况下的温度差值逐渐增大，外壳散热的情况下环形器铁氧体柱及外壳温度接近稳态，但稳态温度分别高达 430K、350K。

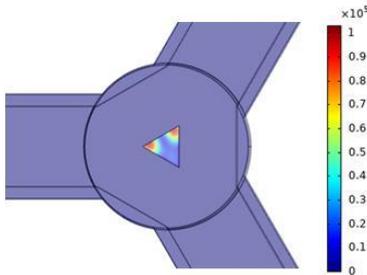


图 2 环形器电磁功率损耗分布（单位：W）

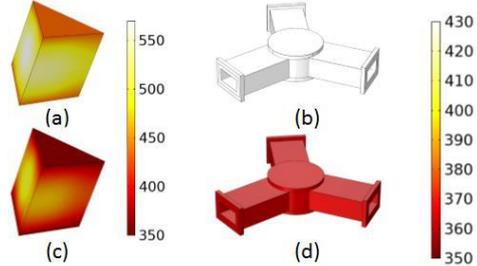


图 3 无散热及外壳表面散热时，铁氧体柱及外壳于 200min 时温度（单位：K）(a)(b)无散热 (c)(d)外壳表面散热

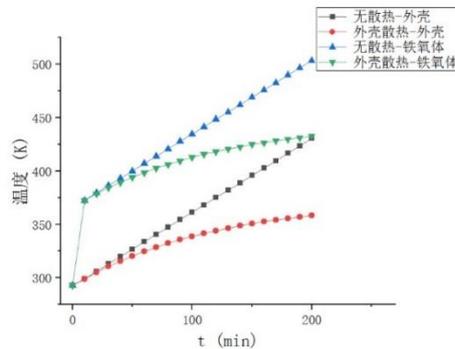


图 4 无散热及外壳表面散热时，铁氧体柱及外壳温度变化曲线

2. 饱和磁化强度不变时的环形器热应力及形变分析

随着环形器外壳温度的升高，外壳所受热应力以及形变均随温度升高而增大（图 5、图 6）。结合图 4 的外壳温度变化趋势，在有外壳散热的两种条件下可以看出环形器外壳所受应力大小及形变程度均在 100min 时出现明显差异，且差异随时间增大，与外壳温度变化趋势相对应。

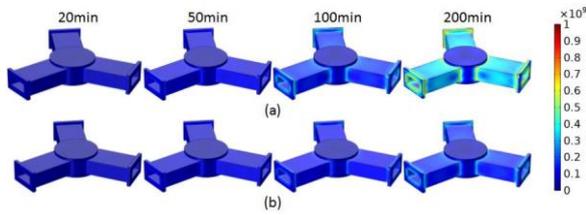


图5 环形器外壳所受热应力分布变化（单位：N/m²）

(a)无散热 (b)外壳表面散热

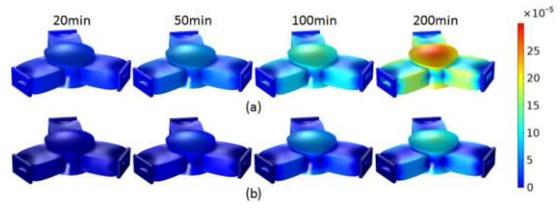


图6 环形器外壳变形情况（单位：m）

(a)无散热 (b)外壳表面散热

3. 饱和磁化强度对环形器发热的影响

在铁氧体材料的实际使用中，饱和磁化强度会随温度变化而变化[23]。在模型中，为了更好的贴合实际使用情况，采用分段函数对铁氧体材料饱和磁化强度随温度变化的特性进行描述。根据铁氧体材料的饱和磁化强度 M_s 的特性，结合原始值 $M_s=(680 \times 10^3)4\pi$ ，建立分段函数 M_s ，当温度 T 在 $293.15\text{K} \sim 680\text{K}$ 之间时 $M_s=680e^{-4/(4e-7\pi)}(1-0.00258*(T-293.15))$ ，当温度 T 低于 293.15K 时 $M_s=(680 \times 10^3)4\pi$ ，高于 680K 时为 0 （图 7）。根据图 7 对铁氧体柱的参数进行调整后，模型中的铁氧体柱及外壳的温度变化情况如图 8 所示，各部分温度变化趋势与图 4 相似，但最高平均温度明显降低。

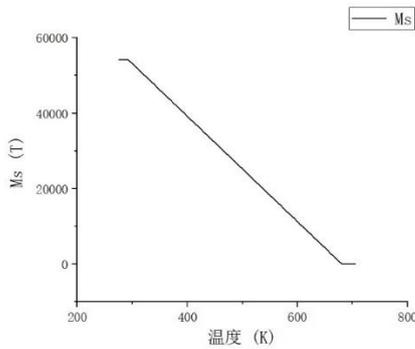


图7 铁氧体饱和磁化强度与温度的变化关系

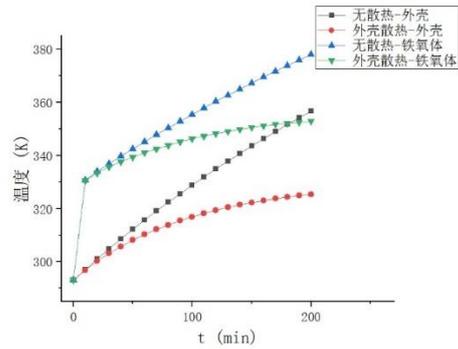
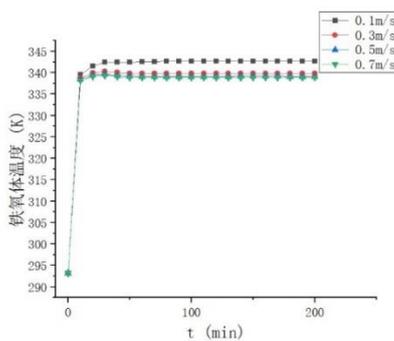


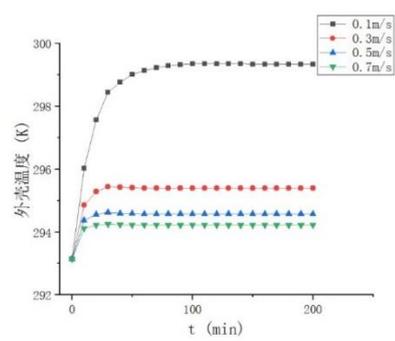
图8 饱和磁化强度随温度改变时，铁氧体及外壳温度变化曲线

4. 外部风冷对环形器发热及性能的影响

在饱和磁化强度随温度变化时，对环形器采用外部风冷的方式进行散热，风速分别为 0.1m/s 、 0.3m/s 、 0.5m/s 、 0.7m/s 。随着风速从 0.1m/s 至 0.7m/s 逐渐增大，环形器铁氧体柱及外壳的稳态温度都有不同程度的降低，且更快达到稳定状态（图 9）。200min 内，当风速为 0.1m/s 时，图 9 中铁氧体柱及外壳温度相较于图 8 的无散热的情况出现了稳态；相较于外壳散热的情况更快达到稳定状态，外壳的稳态温度明显的下降，变化量超过 20K ，但铁氧体柱的稳态温度没有出现明显下降。风速达到 0.3m/s 、 0.5m/s 、 0.7m/s 时，铁氧体柱的稳态温度相较于 0.1m/s 时均有下降，但差异不大，约为 3K 左右；外壳稳态温度则分别下降约 4K 、 5K 、 5.5K ，相邻风速结果的温度变化量逐渐减小。



(a)



(b)

图9 不同风速时，铁氧体柱及外壳温度变化曲线 (a)铁氧体柱(b)外壳

加入外部风冷后，环形器的 S 参数随铁氧体温度的变化呈现反向变化趋势（图 10），即随着铁氧体柱温度的升高，S 参数迅速恶化，待温度的基本稳定后，S 参数也基本保持稳定。对比铁氧体饱和磁化强度不变时的 S 参数，风速为 0.1m/s 时，环形器 S11、S21 均由 -25dB 左右增大至约 -12dB，S31 由 0.65dB 左右减小至约 -1dB；以风速为 0.1m/s 时的 S 参数为参考，当风速达到 0.3m/s、0.5m/s、0.7m/s 时，由于铁氧体柱稳态温度下降，环形器 S 参数有一定程度好转，但各个风速条件下差异不明显。

根据以上结果可知，风冷风速达到 0.3m/s 时已经能达到较好的散热效果，再增加风速对改善散热效果的作用不大；同时，由于风冷对不与外部空气直接接触的铁氧体柱的散热效果十分有限，增大风速对改善已经恶化的 S 参数效果并不理想。因此，对于该工作于 500W/3GHz 的大功率环形器，选择 0.3m/s 的风速对其进行散热为最佳选择。

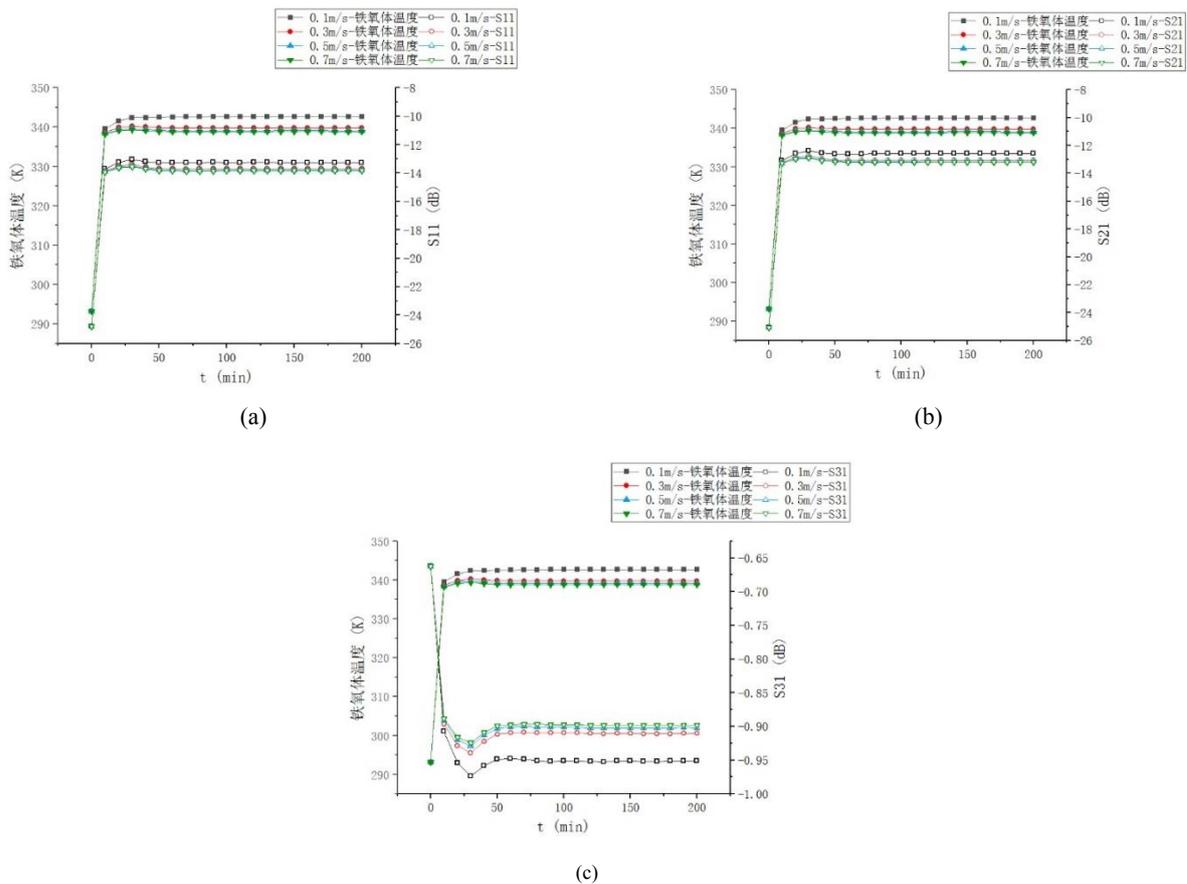


图 10 不同风速时，环形器 S 参数变化曲线 (a)S11 (b)S21 (c)S31

IV.结论

文通过对工作在 500W/3GHz 的大功率微波环形器进行电磁-热-固体力学耦合分析，且在分析过程中加入铁氧体的饱和磁化强度这一温度敏感型参数，得到了在不同散热条件下，环形器工作时内部铁氧体柱及外壳温度升高的变化趋势和变化量，同时还得到了环形器性能参数随铁氧体柱温度升高而趋向恶化这一对应关系及最佳散热风速。随着微波技术趋向于小型化、高功率化，如何保证大功率微波器件在高功率情况下的温度稳定性尤为重要，本研究成果可为今后大功率微波器件的设计提供一定的理论依据。

致谢

本研究受到 NSFC（项目批号：61951297），以及四川大学攀枝花市联合项目（项目批号：2019CDPZH-20）支持。

参考文献

1. J. M. Osepchuk, "A History of Microwave Heating Applications," in IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 32, no. 9, pp. 1200-1224, September 1984, doi: 10.1109/TMTT.1984.1132831.
2. 王广顺. 微波铁氧体的应用和技术发展[C]//中国电子学会. 第十六届全国微波磁学会议论文集. 2013:24-28.
3. 姚列明, 杨中海, 李斌, 等. 行波管收集极的热分析[J]. 强激光与粒子束, 2006(01):97-100.
4. 姚列明, 肖礼, 杨中海. 行波管电子枪阴极管件的热计算[J]. 强激光与粒子束, 2004(10):1317-1320.
5. 蒋伟, 罗勇. Ka 波段回旋行波管电子枪阴极热分析[J]. 微波学报, 2012, 28(4):81-84.
6. M. Lukic, K. Kim, Y. Lee, Y. Saito, et al, "Multi-physics design and performance of a surface- micromachined Ka-band cavity backed patch antenna," 2007 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference, Brazil, 2007, pp. 321-324, doi: 10.1109/IMOC.2007.4404272.
7. 金祖升, 贺喜, 施佳林, 等. 高功率微波照射下两种典型天线的热效应仿真分析[C]// 2016 年全国军事微波, 太赫兹, 电磁兼容技术学术会议. cnki, 2016.
8. 韩广祥, 文光俊, 冯正勇. 微波功率放大器芯片的热分析[J]. 电子技术应用, 2010, 36(012):48-50.
9. L. M. de la Torre Rodríguez, et al., "Predicting the effect of variations in ambient temperature and operating power on the response of a microwave filter," 2016 Loughborough Antennas & Propagation Conference (LAPC), Loughborough, 2016, pp. 1-5, doi: 10.1109/LAPC.2016.7807574.
10. 吴强, 宁曰民. 某大功率微波合成器的温度场分析及热设计改进[C]// 全国微波毫米波会议. 2011.
11. 丁海兵, 冯彤, 李伟松, 等. 一种大功率连续波磁控管的高频电磁场与热应力场耦合分析[J]. 广西科学, 2019(4).
12. H. Zhang, et al., "Massively Parallel Electromagnetic-Thermal Co-Simulation of Large Antenna Arrays," in IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, doi: 10.1109/LAWP.2020.3009164.
13. S. Chen, D. Ding, M. Yu, et al, "Electro-Thermal Analysis of Microwave Limiter Based on the Time-Domain Impulse Response Method Combined With Physical-Model-Based Semiconductor Solver," in IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 68, no. 7, pp. 2579-2589, July 2020, doi: 10.1109/TMTT.2020.2987557.
14. Fay C E, Comstock R L. Operation of the Ferrite Junction Circulator[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2003, MTT-13(1):15-27.
15. 穆祯宗. 微波铁氧体材料的现状与发展[J]. 中国新通信, 2018, 020(005):244.
16. 闫欢, 廖阳, 柯仙送, 等. 大功率高相位稳定性 P 波段铁氧体环行器研制[J]. 磁性材料及器件, 2018, 49(06):31-33+53.
17. 冯全源. 矩形波导铁氧体移相器的温度特性[J]. 磁性材料及器件, 2002, 33(004):1-3.
18. A. Leggieri, D. Passi, G. Felici, et al, "Multiphysics Design of a Magnetron High Power Transfer System," 2014 European Modelling Symposium, Pisa, 2014, pp. 466-472, doi: 10.1109/EMS.2014.16.
19. S. V. Mishakin and S. V. Samsonov, "An Approach to Thermal Analysis of Helically Corrugated Waveguide Elements of Vacuum Electron Devices," in IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 66, no. 12, pp. 5206-5211, Dec. 2018, doi: 10.1109/TMTT.2018.2873362.
20. 王昊, 石峰, 朱红伟, 等. 半导体器件多物理场计算中的热边界条件[J]. 强激光与粒子束, 2016, 28(11):117-121.
21. 马丽娟. MnZn 铁氧体烧结过程中温度场模拟[D]. 南京理工大学, 2010.
22. 罗明. LiZn 铁氧体温度特性及应用研究[D]. 电子科技大学, 2011.
23. 吴雨峰. NiCuZn 和 CuZnTi 铁氧体的温度特性研究[D]. 华中科技大学, 2015.