

导体厚度对 LTCC 电路微波性能的影响

侯清健, 张兆华, 胡永芳, 崔凯, 谢廉忠
(南京电子技术研究所, 南京 210039)

摘要: 贵金属导体占据低温共烧陶瓷(LTCC)成本的主要部分, 降低贵金属导体用量是控制 LTCC 成本的重要途径之一。采用不同目数的丝网印刷获得了不同厚度的金属导体, 研究了不同厚度导体对带状线的微波性能影响; 制作了低膜层厚度的 T/R 组件, 并测试了其的微波性能。研究表明, 导体厚度控制在 5 μm 以上对带状线的插入损耗和回波损耗影响较小, 对 T/R 组件输出功率和接收增益等关键指标影响也不大。通过控制导体厚度可以有效降低 LTCC 成本, 并且不影响 LTCC 电路的微波性能。

关键词: 低温共烧陶瓷; 微波电路; 带状线; 导体厚度; T/R 组件

中图分类号: TN61 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-0676(2021)04-0027-05

Effect of conductor thickness on microwave properties of LTCC circuits

HOU Qing-jian, ZHANG Zhao-hua, HU Yong-fang, CUI Kai, XIE Lian-zhong
(Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing 210039, China)

Abstract: Precious metal conductor is the main part of low temperature co-fired ceramic (LTCC) cost, so reducing the amount of precious metal conductor is one of the important ways to control the cost of LTCC. Metal conductors of different thickness were obtained by screen printing with different mesh count. The influence of different conductor thickness on the microwave properties of stripline was studied. The T/R module with low thickness was prepared and its microwave properties was tested. The results showed that the conductor thickness control above 5 μm has little effect on the insertion loss and return loss of the stripline, and has little effect on the key indicators such as the output power and receiving gain of the T/R module. Controlling the thickness of conductor film can effectively reduce the cost of LTCC without affecting the microwave properties of LTCC circuit.

Key words: LTCC; microwave circuit; stripline; conductor thickness; T/R module

低温共烧陶瓷(LTCC)微波多层电路具有体积小、重量轻、可靠性高、高频特性好等优点, 在通信、航空航天、军事、汽车电子、医疗等领域获得了广泛引用^[1-3]。LTCC 电路主要是通过印刷金、银钯等贵金属浆料, 并经过层压和烧结形成的。由于银离子迁移问题的影响, 目前在军事和航空航天领域, 一般不以银浆料作为导体, 而是使用稳定性更好的金作为导体。但是由于金的价格较高, 加上金价常年上涨, 因此 LTCC 成本越来越高, 严重限制了 LTCC 在军事、航空航天, 尤其是民用领域的使

用。为了控制 LTCC 成本, 降低金导体厚度是重要的途径之一。但是降低金导体厚度将导致电阻的增加, 加上趋肤效应的存在, 可能会影响微波电路传输性能。

为了获得导体厚度对微波传输性能的影响规律, 本文采用 LTCC 工艺制作了不同膜层厚度的带状线以及低膜层厚度的收/发组件(T/R 组件), 并测试了带状线和组件的微波性能, 从而为微波电路的设计提供依据。

1 原理和实验方法

1.1 电路原理

为实现产品的高密度、小型化、高可靠，相控阵雷达 T/R 组件多采用基于 LTCC 的多芯片微组装工艺技术。典型多通道 T/R 组件的原理框图如图 1 所示^[4-5]。

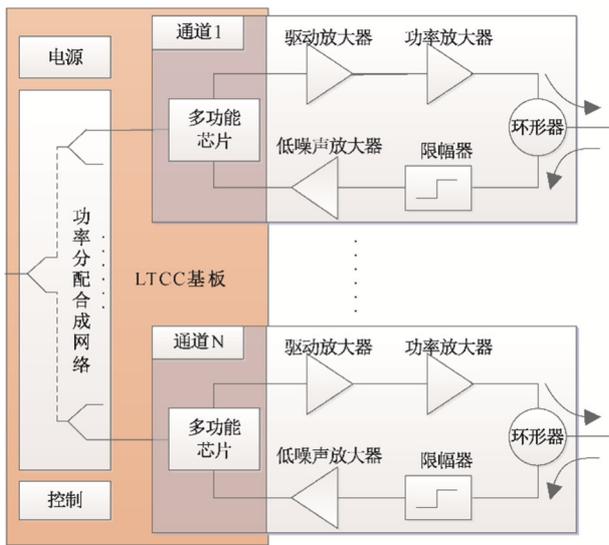


图 1 典型 T/R 组件原理框图

Fig.1 The principle block diagram of typical T/R module

射频经过功率分配/合成网络至每个收发通道，进行功率放大后经过环形器输出至天线单元，天线单元接收的微弱回波信号经过环形器后在接收通道限幅放大，通过功率分配/合成网络合成后输出，其中 LTCC 基板中集成了多功能芯片、波束控制电路及电源管理电路。为了便于芯片及阻容器件的贴装，降低数模信号的相关干扰，射频功率分配/合成网络及传输线多采用带状线形式集成到 LTCC 基板中。本文针对 LTCC 基板在收发组件中的应用情况，评估基板导体厚度对微波传输性能的影响，从带状线、T/R 组件两个层级开展相关对比验证。

1.2 电路设计

试验首先设计专门的带状传输线，评价不同导体厚度电路的回波损耗和插入损耗。在此基础上，采用不同膜层厚度 LTCC 基板制作某型雷达 X 波段 T/R 组件，测试组件的输出功率和接收增益。带状传输线如图 2 所示。样品尺寸为 40 mm×16 mm，中间为带状线，长 25 mm，宽 0.32 mm，两端变换为

带地共面波导传输线以方便测试。共面波导传输线两端长度各为 7.5 mm，传输线总长度 40 mm。

1.3 工艺流程及试验方法

带状线和组件基板采用 LTCC 工艺流程制作，工艺流程如图 3 所示。电路导体膜层厚度主要是由丝印网版、印刷参数、浆料决定的。在试验过程中，固定印刷参数和浆料，通过调节丝印网版来控制膜层厚度。丝网采用 300、400 和 500 目不锈钢丝网，并组合不同的乳胶厚度进行电路印刷。丝网主要指标列于表 1。

实验用生瓷带采用目前市面上常用的一款进口 LTCC 生瓷带，其介电常数为 $5.7 \pm 0.2 (@10 \text{ GHz})$ ，

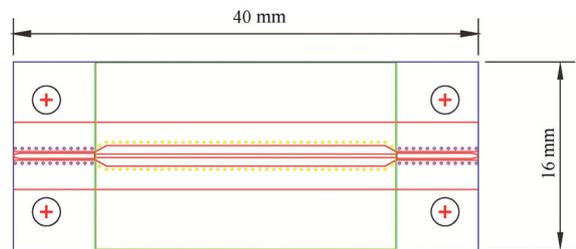


图 2 评价电路示意图

Fig.2 Schematic diagram of the Evaluation circuit

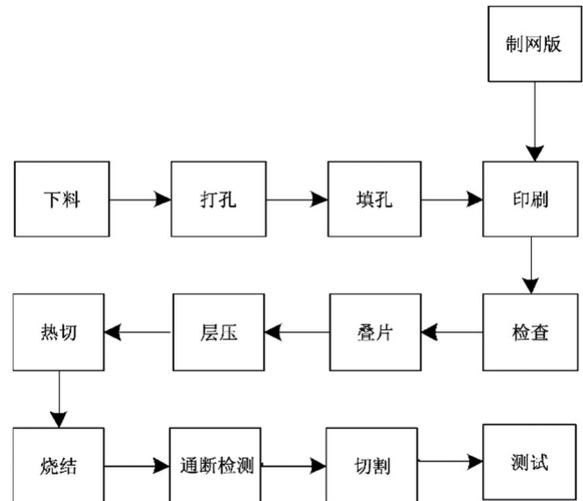


图 3 LTCC 工艺流程

Fig.3 The block diagram of LTCC process

表 1 丝网参数

Tab.1 Screen parameters

丝网目数	丝网线径/ 开口/ μm	丝网张 力/(N/cm)	丝网 厚度/ μm	乳胶 厚度/ μm	总厚 度/ μm
300	56/32	35	52	20	72
400	40/23	35	37	15	52
500	32/18	35	29	13	42

并使用其配套金浆料进行导体印刷，印刷后在 70°C、15 min 烘干。对样品进行层压和烧结，用砂轮切割机对样品进行切割，用扫描电子显微镜测量电路膜层厚度。用矢量网络分析仪及商用的 Soutwest 测试夹具测量电路的微波传输性能。

2 结果与讨论

2.1 带状线

不同丝网印刷导体厚度及电阻如表 2 所列。

表 2 不同丝网膜层厚度和电阻

Tab.2 Conductor thickness and resistance with different screen

编号	丝网(目)	膜层厚度/ μm	电阻/ Ω
1#	300	10.34	0.56
2#	400	8.50	0.67
3#	500	5.65	0.99

由表 2 可知，随着丝网目数增加，膜层厚度不断下降。这主要是由于随着丝网目数的提高，丝印网版的总厚度变薄，通过网版挤压下去的浆料数量(即过墨量)下降造成的。500 目丝网，其膜层厚度为 5.65 μm ，而常用的 400 目丝网，其膜层厚度为 8.5 μm 。相比 400 目丝网，500 目丝网印刷其膜层厚度可降低 33%。电阻与膜层的关系如下^[6]：

$$R = \rho L / (WH) \quad (1)$$

其中 R 为导体的阻值， ρ 为电阻率， L 为被测导体线的线长， W 为被测导体的宽度， H 为被测导体厚度。由式(1)可以看出，电阻与膜层厚度呈反比，因此膜层厚度降低，电阻阻值增加。3 种电路回波损耗和插入损耗如图 4~图 6 所示。1~26 GHz 的回波损耗以及 8 GHz 和 20 GHz 的插入损耗列于表 3。

表 3 不同膜层厚度回波损耗和插入损耗

Tab.3 Return loss and insertion loss with different conductor thickness

丝网目数	回波损耗(dB/cm)		插入损耗(dB/cm)	
	1~26 GHz		8 GHz	20 GHz
300	< -4.5		-0.105	-0.280
400	< -4.5		-0.114	-0.282
500	< -4.5		-0.120	-0.329

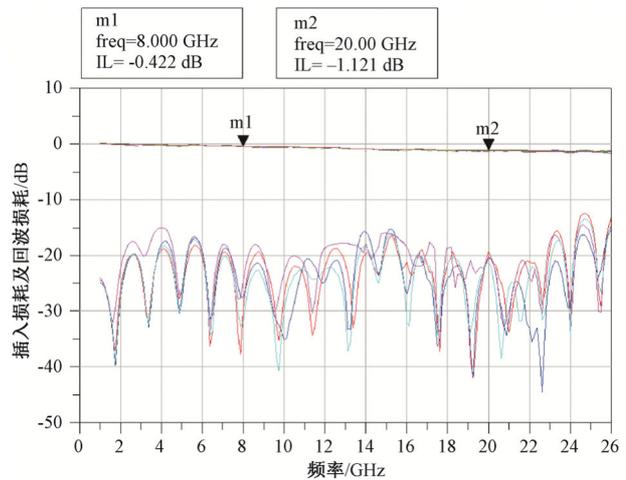


图 4 300 目样品测试结果

Fig.4 Test result of 300 mesh count

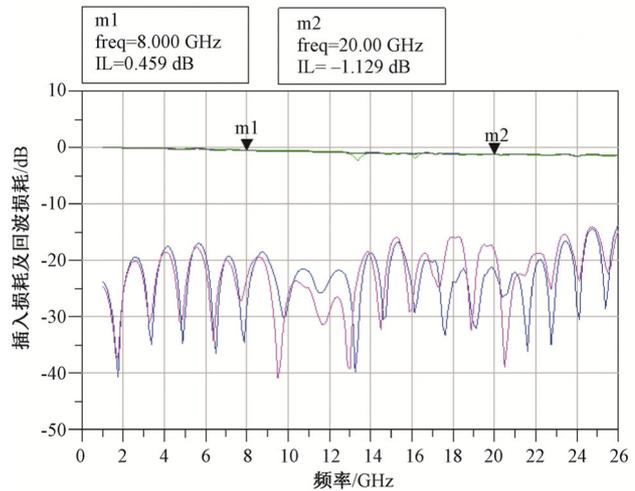


图 5 400 目样品测试结果

Fig.5 Test result of 400 mesh count

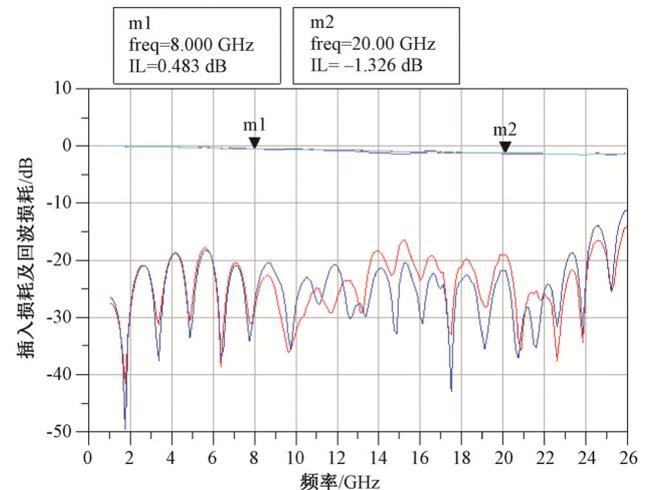


图 6 500 目样品测试结果

Fig.6 Test result of 500 mesh count

电路损耗与材料介电性能、传输电路的电阻直接相关^[7]。在传输线阻抗不变的情况下,介电常数越大,损耗越大,电阻越大,损耗也越大。而电阻又与膜层厚度呈反比,因此膜层厚度降低,电路损耗增加是正常现象。由图 4~6 以及表 3 可以看出,丝网目数从 300 目到 500 目,回波损耗在 1~26 GHz 范围内变化不明显,并且均小于 -4.5 dB/cm,插入损耗在 8 GHz 和 20 GHz 均随丝网目数的提高而变大,但在 8 GHz 测试时仅变大了 0.02 dB/cm;在 20 GHz 测试时仅变大了 0.05 dB/cm。导体膜层变化引起的单位长度损耗变化较小,不同膜层厚度都能满足带状线的设计要求。

2.2 X 波段 T/R 组件

随着频率的升高,导体中的交流电流趋向于分布在导体表面的现象称之为趋肤效应^[8]。趋肤效应导致导体等效横截面积变小,等效交流电阻增加,损耗功率也相应增加。趋肤效应导致电流分布于导体表面的厚度称为趋肤深度。电流密度(J)与趋肤深度(δ)的关系为:

$$J=J_0 e^{-(d/\delta)} \quad (2)$$

J_0 为直流电流密度, d 为导体厚度。由式(2)可知,63%的电流被限制在一倍的趋肤深度以内,99%的电流被限制在五倍的趋肤深度以内,因此当导体厚度大于 5 倍深度时,电流近似无耗传输。对于金导体,趋肤深度与频率的关系如图 7 所示^[9]。

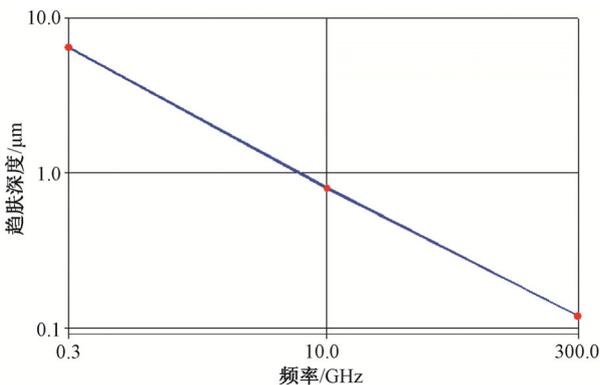


图 7 趋肤深度与频率的关系

Fig.7 Relation diagram of skin depth to frequency

在 X 波段(8~12GHz),电路趋肤深度约 0.8 μm ,要使射频电流近似无耗传输,根据 5 倍趋肤深度的设计要求^[10],金属膜层的厚度应至少达到 4 μm 以上。采用 300、400 和 500 目印刷的电路其膜层分别为 10.34、8.5 和 5.65 μm ,均在 4 μm 以上,因此从

理论上来说对组件的微波传输性能影响不大。

采用不同导体膜层厚度的 LTCC 基板装配 X 波段四通道 T/R 组件,进行输出功率、接收增益等关键指标对比测试,测试结果如图 8 和图 9 所示。

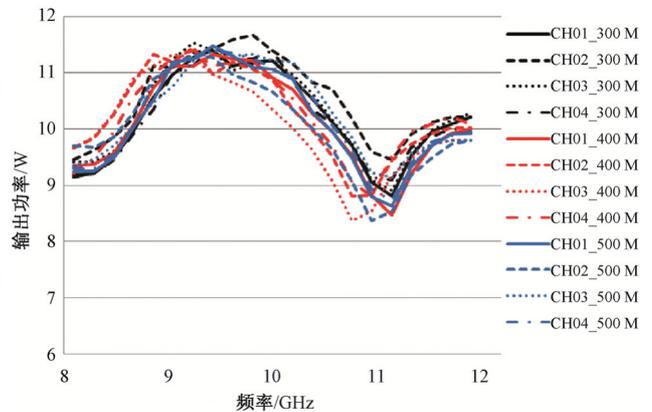


图 8 不同丝网印刷电路 T/R 组件输出功率

Fig.8 The output power of T/R module by screen printing with different mesh count

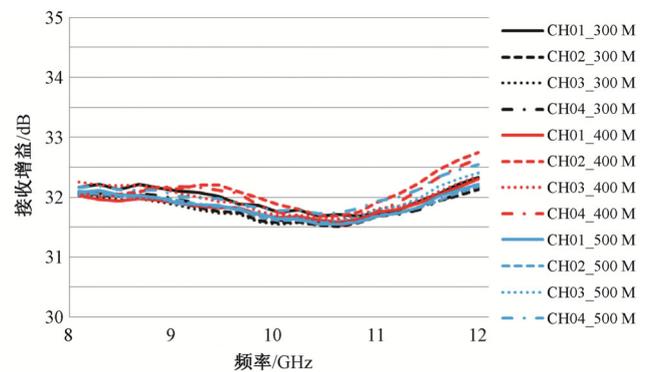


图 9 不同丝网印刷电路 T/R 组件接收增益

Fig.9 The receiving gain of T/R module by screen printing with different mesh count

由图 8 和图 9 可知,丝网目数从 300 目到 500 目,T/R 组件输出功率变化不到 1 W,并且均大于 8 W;接收增益变化不到 0.5 dB,并且均大于 30 dB,由导体膜层变化引起的 T/R 组件输出功率和接收增益变化较小,因此适当降低 LTCC 导体厚度对 T/R 组件的关键性能指标影响不大,可以满足使用要求。

3 结论

1) 用 3 种不同参数的丝印网版制作的带状线测试结果表明,网版参数对膜层厚度和电阻阻值有

较大影响,对电路损耗也有一定影响。随着丝网目数的增加,丝印网版的厚度变薄,过墨量下降,因此导体膜层下降,电阻阻值增加。同时随着膜层厚度下降,电路损耗有一定的增加,但总的变化幅度较小,可以满足带状线的设计要求。

2) 由于趋肤效应的影响,3种不同参数的丝印网版制作的 T/R 组件,其输出功率变化不到 1 W,接收增益变化不到 0.5 dB。适当降低导体厚度,保证膜层厚度 5 倍于趋肤深度,不会影响 T/R 组件的关键性能指标和使用要求。

参考文献:

- [1] 谢廉忠,严伟,房迅雷. 钙硼硅系 LTCC 生瓷带在收/发组件中的应用[J]. 电子机械工程, 2015, 31(2): 41-44.
XIE L Z, YAN W, FANG X L. Application of CaO-B₂O₃-SiO₂ system LTCC green tape in T/R module [J]. Electro-Mechanical Engineering, 2015, 31(2): 41-44.
- [2] 王瑞庭. 低温共烧陶瓷技术的现状和走向[J]. 真空电子技术, 2015(5): 6-10.
WANG R T. Present situation and developing trends of low temperature co-fired ceramic technology [J]. Vacuum Electronics, 2015(5): 6-10.
- [3] 钟慧,张怀武. 低温共烧陶瓷(LTCC): 特点、应用及问题[J]. 磁性材料及器件, 2003, 34(4): 33-35.
ZHONG H, ZHANG H W. LTCC technology: Characteristics, applications and problems [J]. Journal of Magnetic Materials and Devices, 2003, 34(4): 33-35.
- [4] 张光义. 相控阵雷达原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
ZHANG G Y. Principles of phased array radar [M]. Beijing: National Defence Industrial Press, 2009.
- [5] 胡明春,周志鹏,严伟. 相控阵雷达收发组件技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
HU M C, ZHOU Z P, YAN W. Technology of T/R module for phased array radar [M]. Beijing: National Defence Industrial Press, 2010.
- [6] 全国有色金属标准化委员会. 微电子技术用贵金属浆料测试方法方阻测定: GB/T 17473.3-2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
SAC/TC 243. Test methods of precious metals pastes used for microelectronics-determination of sheet resistance: GB/T 17473.3-2008 [S]. Beijing: Standard Press of China, 2008.
- [7] 廖承恩. 微波技术基础[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004.
- [8] 孙旦旦. 微波电感与雷达电路的研究与设计[D]. 北京: 北京邮电大学, 2018.
SUN D D. Research and design of microwave inductor and radar circuit [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2010.
- [9] DON CULLON, 丁志廉. 各种基板材料的表面涂覆对高频信号损失的影响[J]. 印制电路信息, 2002(4): 47-51.
CULLON D, DING Z L. Effects of surface finish on high-frequency signal loss using various substrate materials [J]. Printed Circuit Information, 2002(4): 47-51.
- [10] 孙兆鹏,严伟,方汉平. LTCC 滤波器性能改善的研究[J]. 信息化研究, 2010, 36(5): 34-36.
SUN Z P, YAN W, FANG H P. Study on the performance improvent of LTCC filter [J]. Informatization Research, 2010, 36(5): 34-36.