



“十三五”学术文库系列

获国家自然科学基金(61601374)资助

基于LTCC技术的 毫米波天线研究

王金洪 著



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

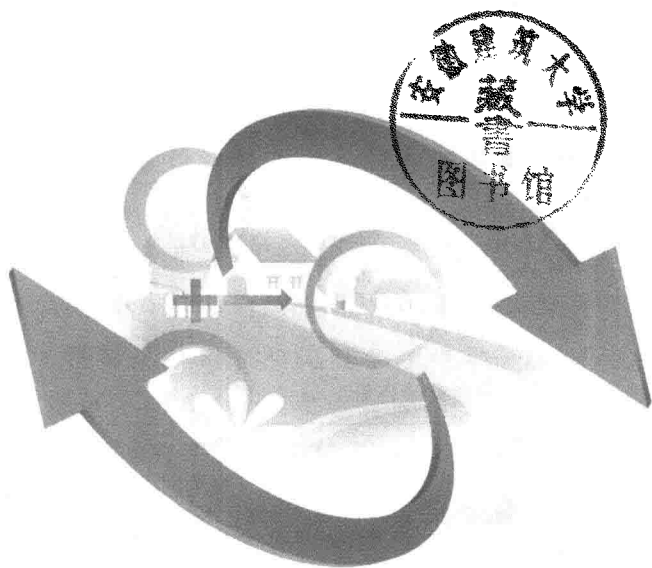


“十三五”学术文库系列

获国家自然科学基金(61601374)资助

基于LTCC技术的 毫米波天线研究

王金洪 著



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

基于 LTCC 技术的毫米波天线研究/王金洪著. —西安:
西安交通大学出版社, 2017. 12(2018. 8 重印)
(“十三五”学术文库系列)
ISBN 978-7-5693-0340-7

I. ①基… II. ①王… III. ①毫米波传播-微波
天线-研究 IV. ①TN822

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 311353 号

书 名 基于 LTCC 技术的毫米波天线研究
著 者 王金洪
责任编辑 魏照民

出版发行 西安交通大学出版社
(西安市兴庆南路 10 号 邮政编码 710049)
网 址 <http://www.xjtupress.com>
电 话 (029)82668357 82667874(发行中心)
(029)82668315(总编办)
传 真 (029)82668280
印 刷 北京虎彩文化传播有限公司

开 本 700mm×1000mm 1/16 印张 9.625 字数 174 千字
版次印次 2017 年 12 月第 1 版 2018 年 8 月第 2 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5693-0340-7
定 价 62.00 元

读者购书、书店添货、如发现印装质量问题,请与本社发行中心联系、调换。
订购热线:(029)82665248 (029)82665249
投稿热线:(029)82668133
读者信箱:xj_rwjg@126.com

版权所有 侵权必究

前 言

为了满足当前信息社会对无线电频谱资源的迫切需求,现代通信、雷达、制导及导航等系统的工作频率已逐步由微波频段扩展到毫米波频段,并且其集成度越来越高,体积越来越小,这就对天线的小型化提出了更高的要求。低温共烧陶瓷(LTCC)技术凭借其多层结构的优势为毫米波天线实现小型化提供了技术支撑,采用 LTCC 技术制成的毫米波天线具有高集成度、体积小、重量轻、成本低、使用领域广泛等优点。目前,LTCC 天线已成为国内外研究热点课题之一。本书研究的主要内容包括:

1. 基于 LTCC 技术的喇叭型微带天线研究

利用传输线模型分析了 LTCC 缝隙耦合贴片天线的辐射机理,并分析了各个设计参数对天线性能的影响。针对微带天线增益较低的缺点,提出了采用层叠矩形环来模拟喇叭天线的辐射进而提高微带天线增益的方法。利用 LTCC 的多层技术,设计了一个喇叭型微带天线,在传统微带贴片天线的上方增加层叠的逐渐张开的矩形环作为引向器来引导电磁波向边射方向辐射。分析表明通过合理选取寄生环的尺寸及位置,能够使得电磁波经过多次反射后,在边射方向上相互叠加,在反方向上相互抵消,从而有效地提高了天线的增益。实验结果表明,该天线在 36.7GHz 的中心频率上获得了 8.1dBi 的较高增益(包含了馈电部分的损耗),比单个贴片天线的增益提高了 3dB 左右。相比于常用的采用平面阵列天线来提高增益的方式,这种方法可以大大减小天线的体积。

2. 基于 LTCC 技术的多层寄生贴片天线研究

针对微带天线带宽窄及增益相对较低的缺点,提出了采用 V 型寄生贴片或 E 型寄生贴片来同时改善微带天线带宽和增益的方法。在 LTCC 多层基板上分别设计了一个 V 型寄生贴片天线和一个 E 型寄生

贴片天线。V型寄生贴片天线采用呈V字形张开的层叠寄生贴片作为引向器来引导电磁波进行定向辐射,从而提高天线的增益;同时,寄生贴片自身与地面也形成谐振腔,其谐振频率与主辐射贴片的谐振频率相互靠近时,两个谐振带宽相互交叉,从而展宽了天线的带宽。E型寄生贴片天线则在主辐射贴片的上方增加四个E型寄生贴片,寄生贴片一方面作为引向器引导电磁波进行定向辐射来提高天线增益,另一方面,寄生贴片上的缝隙使得寄生贴片上的电流路径加长,对应的谐振频率降低。该谐振频率与主辐射贴片的谐振频率相互靠近时,天线的带宽也得到了展宽。实验结果表明,V型寄生贴片天线获得了16%的相对带宽,并在中心频率35GHz处实现了8dBi的增益;E型寄生贴片获得了28%的相对带宽,带宽内各频点的增益均大于6dBi,在36GHz处获得最大值7.1dBi。以上面两种天线为阵元,分别设计了一个二元E型寄生贴片天线阵、一个四元V型寄生贴片天线阵以及一个八元低副瓣波束扫描阵,这些天线阵也都获得了较宽的带宽和较好的辐射性能。

3. 基于LTCC技术的高性能准八木天线研究

针对传统八木天线带宽窄、不易集成并且很难应用在微波毫米波频段的特点,提出了两种采用多层结构的引向单元来提高准八木天线辐射性能的方法。利用LTCC的多层技术,在毫米波频段分别设计了一个准八木振子天线和一个准八木环形天线。这两种准八木天线的引向器都是多层结构的,可以获得比平面准八木天线的引向器更好的引向作用,从而使准八木天线在端射方向上获得了更高的增益。

4. 基于LTCC技术的同层过渡研究

针对垂直过渡经常出现通孔错位而引入较大传输损耗的缺点,提出了两种结构新颖的同层过渡结构对天线进行馈电,提高了天线设计的可靠性。采用微带线到带状线的同层过渡结构对喇叭型微带天线进行馈电,采用微带线到共面带状线的同层过渡(同时起到了巴伦的作用)对多层准八木天线馈电。这两个过渡具有尺寸小、结构简单、工作频带宽以及损耗低等优点,这非常有利于实现小型化、高性能的LTCC天线。

著者

2017年6月

Preface

To meet the urgent requirement of radio frequency spectrum for the current information society, the operation frequency of modern communication, radar, guidance and navigation systems has extended from microwave band to millimeter-wave (MM-wave) band, furthermore, their integration level becomes higher and higher, and their volume becomes smaller and smaller, which brings forward higher requirements on the miniaturization of the antenna. Low temperature co-fired ceramic (LTCC), which has the advantage of multilayer structure, provides the technical support for the miniaturization and high performance of the MM-wave antenna. The MM-wave antenna fabricated with LTCC technology has the advantages of high integration level, compact size, light weight, low cost, wide application, etc. Nowadays LTCC antenna has become one of the research hot-spot in the world. The specific research contents of this dissertation are concluded as follows:

1. Study on horn-like antenna based on LTCC technology

The radiation mechanism of the aperture-coupled microstrip antenna in LTCC substrate is analyzed with transmission line model, and the effects of the design parameters on antenna's performance are also presented. In order to overcome the microstrip antenna's disadvantage of low gain, the method of using stacked rectangular rings to imitate the radiation of the horn antenna, and then improving its gain is proposed. A horn-like microstrip antenna is designed by using LTCC technology; stacked rectangular rings are added above the radiation patch in traditional microstrip antenna, which flare gradually to direct the antenna radiation at broadside direction as directors. The analysis shows the electromagnetic energy is enhanced at broadside direction and weakened at backside direction when the dimensions of the stacked rectangular rings are chosen appropriately, and then the gain of the antenna is improved. The measured result shows that the

proposed antenna achieves a high gain of 8.1 dBi (including the loss of the feeding parts), which is about 3 dB higher than a single patch antenna without using stacked rectangular rings. This approach can improve the gain of the microstrip antenna without increasing its size obviously as compared with the traditional method of employing planar array antenna.

2. Study on multilayer parasitic patch antenna based on LTCC technology

To overcome the shortcomings of the narrow band and low gain of microstrip antenna, the method of employing V-type or E-type parasitic patches to enhance its gain and bandwidth simultaneously is proposed. A V-type and an E-type parasitic patch antenna are designed with LTCC multilayer technology, respectively. In V-type parasitic patch antenna, flared stacked strips are employed as directors to guide the electromagnetic wave radiating toward broadside direction, thus improving antenna's gain; at the same time, the stacked strips also form resonant cavities with the ground plane, the bandwidth of the antenna is broadened when the resonant frequency of these resonant cavities moves close to that of the main patch. In E-type parasitic patch antenna, four E-shaped patches are added above the four corners of the main patch, which not only play the role of directors to guide the antenna radiation toward broadside direction, but also increase the length of the current path which introduces a lower resonant frequency. When this frequency is close to the resonant frequency of the main patch, the bandwidth of the antenna will be widened. The measured results show that the V-type parasitic patch antenna achieves a relatively wide bandwidth of 16%, and high gain of 8 dBi at center frequency of 35 GHz; the E-type parasitic patch antenna obtains an extremely large bandwidth of 28%, an average gain over 6 dBi within the operation bandwidth and peak gain of 7.1 dBi at 36 GHz. By using these two antennas as elements, a two-element E-type parasitic patch array, a four-element V-type parasitic patch array and a eight-element beam scanning array with low sidelobes are designed, and all these arrays achieve wide bandwidth and good radiation performance.

3. Study on multilayer quasi-Yagi antenna based on LTCC technology

Since the traditional Yagi-Uda antenna has narrow bandwidth, also it is difficult to be integrated and applied in microwave and millimeter-wave frequencies, two methods of using multilayer directors to improve the performance of the qua-

si-Yagi antenna are proposed. A quasi-Yagi dipole antenna and quasi-Yagi loop antenna are designed at millimeter-wave band with LTCC multilayer technology, respectively. Due to the multilayer structure of the directors, these two quasi-Yagi antennas obtain better director effect than planar quasi-Yagi antenna, so higher gain can be achieved at end-fire direction.

4. Study on coplanar transition based on LTCC technology

To overcome the shortcoming of introducing high transmission loss by using vertical transition due to the misalignment of the via holes, two novel coplanar transition structures are proposed to feed the antennas, then the reliability of the antenna design is improved. The horn-like microstrip antenna is fed by a microstrip-to-strip line transition, while the multilayer quasi-Yagi antenna is fed by a microstrip-to-CPS (coplanar strips) transition, which also plays the balun role. These two transitions have advantages of compact size, simple structure, wide operation bandwidth and low losses, which are very conducive to design compact and high performance antenna on LTCC substrate.

Author

June 2007

目 录

第 1 章 绪 论

1.1 毫米波的特点及应用	(1)
1.2 LTCC 技术简介	(3)
1.3 基于 LTCC 技术的毫米波天线的特点	(5)
1.4 毫米波 LTCC 天线的国内外发展动态	(6)
1.4.1 国外发展动态	(6)
1.4.2 国内发展动态	(20)
1.5 本著的研究内容和结构安排	(21)

第 2 章 基于 LTCC 技术的缝隙耦合贴片天线研究

2.1 引 言	(24)
2.2 LTCC 缝隙耦合贴片天线的工作原理	(24)
2.3 LTCC 缝隙耦合贴片天线的分析方法	(26)
2.4 LTCC 缝隙耦合贴片天线的设计步骤	(28)
2.5 LTCC 缝隙耦合贴片天线的设计与参数分析	(31)
2.6 基于 LTCC 技术的圆极化缝隙耦合贴片天线	(36)
2.7 小 结	(41)

第 3 章 基于 LTCC 技术的喇叭型微带天线研究

3.1 引 言	(42)
3.2 提高 LTCC 微带天线增益的方法	(42)
3.2.1 抑制表面波的激励	(42)
3.2.2 采用寄生单元作为引向器	(44)
3.2.3 采用背腔式结构	(44)
3.3 喇叭型微带贴片天线的结构设计	(44)
3.3.1 馈电结构设计	(45)
3.3.2 背腔式结构的设计	(46)
3.3.3 矩形环的设计与参数分析	(47)
3.3.4 实验结果分析	(51)

3.4 采用过渡结构和 H 形耦合缝隙的喇叭型微带天线	(55)
3.4.1 采用 H 形耦合缝隙的喇叭型微带天线	(55)
3.4.2 微带线到带状线的同层过渡结构	(59)
3.4.3 天线整体	(61)
3.5 小 结	(63)

第 4 章 基于 LTCC 技术的多层寄生贴片天线研究

4.1 引 言	(64)
4.2 常用的展宽 LTCC 微带天线带宽的方法	(64)
4.2.1 降低等效谐振电路的 Q 值	(65)
4.2.2 引入多个谐振回路	(66)
4.2.3 使用宽带匹配技术	(68)
4.2.4 采用阵列技术	(68)
4.3 基于 LTCC 技术的 V 型寄生贴片天线设计	(68)
4.3.1 天线结构设计	(68)
4.3.2 层叠寄生贴片的设计	(70)
4.3.3 实验结果分析	(71)
4.3.4 超宽带 V 型寄生贴片天线	(74)
4.4 基于 LTCC 技术的 E 型寄生贴片天线设计	(77)
4.4.1 增加寄生贴片后的天线性能	(77)
4.4.2 寄生贴片开缝后的天线性能	(79)
4.4.3 E 型寄生贴片天线的结构	(81)
4.4.4 E 型寄生贴片天线的测试结果分析	(84)
4.5 天线阵列设计	(87)
4.5.1 四元 V 型寄生贴片天线阵	(87)
4.5.2 二元 E 型寄生贴片天线阵	(90)
4.5.3 基于 V 型寄生贴片天线的低副瓣波束扫描阵列	(94)
4.6 小 结	(99)

第 5 章 基于 LTCC 技术的准八木天线研究

5.1 引言	(100)
5.2 传统八木天线与微带准八木天线的工作原理	(100)
5.2.1 传统八木天线的工作原理	(100)
5.2.2 微带准八木天线的工作原理	(102)

5.3 基于 LTCC 技术的多层准八木振子天线	(105)
5.3.1 天线结构设计	(105)
5.3.2 微带线到共面带状线的过渡结构	(108)
5.3.3 参数分析	(109)
5.3.4 实验结果分析	(112)
5.4 基于 LTCC 技术的多层准八木环形天线	(115)
5.4.1 天线结构设计	(115)
5.4.2 参数分析	(118)
5.4.3 实验结果分析	(122)
5.5 小 结	(125)
第 6 章 总结与展望	
6.1 本著的主要内容与创新点	(126)
6.1.1 基于 LTCC 技术的喇叭型微带天线研究	(126)
6.1.2 基于 LTCC 技术的多层寄生贴片天线	(127)
6.1.3 基于 LTCC 技术的多层准八木天线的研究	(127)
6.1.4 基于 LTCC 技术的同层过渡研究	(128)
6.2 对未来工作的展望	(128)
6.2.1 表面波的抑制	(128)
6.2.2 测试环境的考虑	(128)
6.2.3 阵列天线的实现	(129)
参考文献	(130)

第 1 章 绪 论

1.1 毫米波的特点及应用

电子频谱资源是一种极为宝贵的信息资源,而目前微波及以下频段的频谱资源极为紧张,已经无法满足当今信息社会各种电子系统对电子频谱的迫切需求,当前各种电子系统的工作频率已经逐渐从微波频段扩展到了毫米波频段,尤其是军用电子系统,毫米波频段已经成为其开拓的主要频段,目前毫米波技术的研究工作也主要是围绕军用电子系统的研制来开展的^[1-2]。

毫米波一般是指频率范围在 30~300GHz 范围内的电磁波,对应的波长范围为 10~1mm,实际应用中常把毫米波的低端降至 26GHz。在电磁频谱中,毫米波介于微波(3~30GHz)和亚毫米波(大于 300GHz)之间,兼容了微波和光波的一些特点。相比微波频段,毫米波的主要特点是波长短、可用频带宽以及传播特性受大气影响较大。当电磁波通过地球大气时,会与大气中的各种气体分子和微小颗粒发生相互作用,在频率比较低时,这种影响相对较小,而在毫米波频段时,这种作用就变得非常明显,并且随频率变化。其中,由氧分子和水分子谐振引起的选择性吸收和散射最为显著^[3]。图 1-1 给出了毫米波在大气中传播时衰减的平均值,其中实线为海平面处的衰减系数,虚线为海拔 4km 处的衰减系数。

因此,根据大气衰减的情况可以将毫米波波段划分为传输波段和吸收波段。传输波段又称为大气窗口,对应的中心频率分别为 35GHz, 94GHz, 140GHz 和 220GHz,鉴于以 35GHz 为典型值的八毫米波段以及以 94GHz 为典型值的三毫米波段具有相对较强的大气穿透能力,所以目前很多毫米波系统都工作在这两个频段。吸收波段对应的中心频率分别为 22GHz, 60GHz, 120GHz 和 183GHz,这几个大气高衰减频段也成为保密通信的首选工作频段。本书设计的毫米波 LTCC 天线主要工作在 35GHz 这个窗口频段。表 1-1 归纳了毫米波的主要特点及应用^[4]。

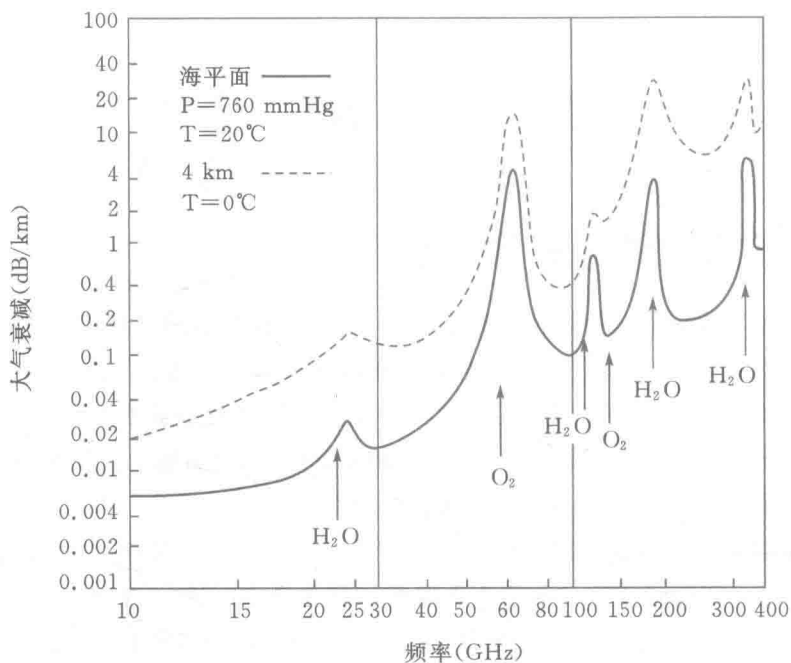


图 1-1 晴朗天气水平传播的毫米波的单程衰减

表 1-1 毫米波的主要特点及应用

	波长短	频带宽	传播特性
优点	1. 容易实现窄波束、高增益的天线,因而分辨率高,抗干扰性好; 2. 多普勒频移大,测速灵敏度高; 3. 器件尺寸小,更容易实现小型化和轻量化。	1. 信息容量大; 2. 为大量器件的同时工作提供了不相互干扰的通道; 3. 宽带光谱能力可以用来抑制多径效应和杂乱回波。	1. 大气窗口处传输损耗小(相对于光波); 2. 吸收峰时可用于保密通信; 3. 穿透烟、雾、灰尘能力强,进行全天候工作(相对于红外、激光)。
缺点	1. 器件加工精度要求高; 2. 器件价格昂贵。		1. 传播衰减严重; 2. 易受气候环境的影响。

续表 1-1

	波长短	频带宽	传播特性
应用	1. 通信(吸收峰处的短程保密通信和大气窗口处的长距离主干线通信等); 2. 雷达(低仰角精密跟踪雷达及成像雷达等); 3. 精确制导(导弹的末制导系统等); 4. 遥感(高分辨率的辐射计); 5. 射电天文学; 6. 波谱学等其他应用。		

1.2 LTCC 技术简介

低温共烧陶瓷(low temperature co-fired ceramic, LTCC)技术是多芯片组件(Multi-chip module, MCM)技术中的一种多层布线基板技术^[5-7],最初由美国的休斯公司于1982年开发。LTCC技术主要是相对以往的高温共烧陶瓷(high temperature co-fired ceramic, HTCC)技术而言的。LTCC技术将陶瓷粉制成厚度精确且致密的生瓷带,再在生瓷带上经过激光打孔、微孔注浆、精密导体浆料印刷等工艺制作出需要的电路,并将电阻、电容、电感、滤波器、天线等无源器件埋入其中,然后将多层基片层叠起来构成多层电路,在900°左右的温度进行烧结,最后将IC及其他有源器件表贴在基板的表层,制成三维结构的高密度电路模块^[8-16]。

LTCC的工艺流程主要包括流延、打孔、通孔填充、印刷导体、叠层热压、切片、排胶、共烧及检测等多道工序^[17-25],如图1-2所示。完成以上所有工序后便获得所需要的LTCC多层电路,如图1-3所示。

LTCC技术凭借自身的诸多优点,在军用和民用领域都获得广泛的应用。相比于其他一些多层电路板技术,LTCC技术具有以下优点^[26-29]:

(1)采用具有高电导率的金、银、铜等金属作为导体材料,有利于提高电路的品质因子;

(2)可以使用不同介电常数的材料来满足不同的应用需求,如高介电常数有利于电路的小型化,低介电常数有利于改善传输信号的延迟;

(3)使用的陶瓷材料具有优良的高频高Q特性,非常适合用于高频应用;

(4)高密度的导体布线能力:目前可以实现50 μm 的最小导体线宽和线间距,0.075mm的最小层间通孔直径;

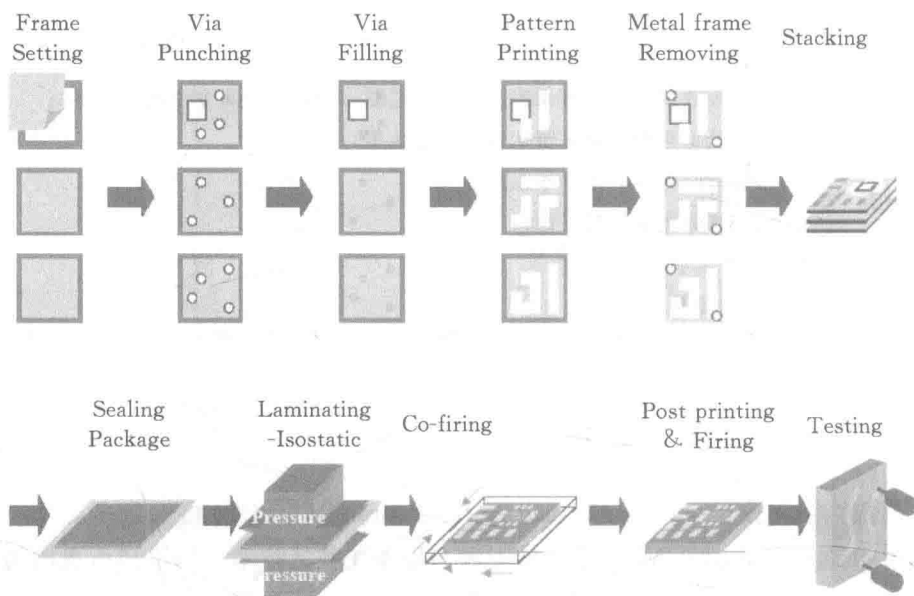


图 1-2 LTCC 技术的工艺流程图

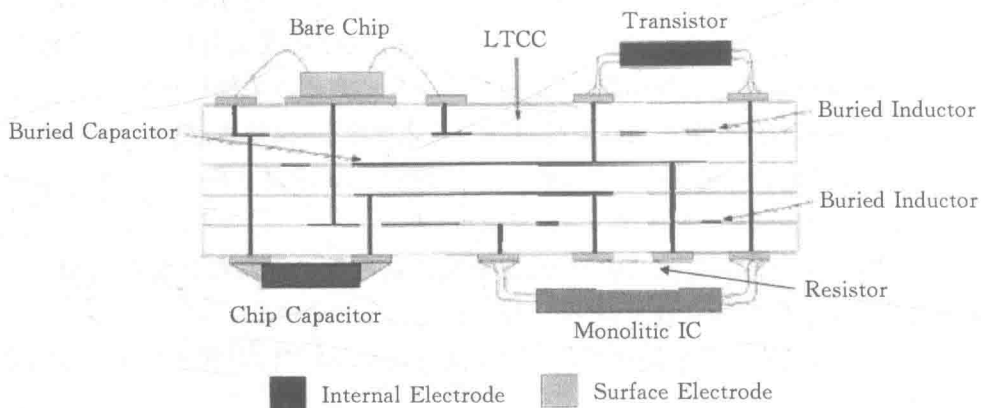


图 1-3 LTCC 多层电路结构示意图

(5) LTCC 电路模块可靠性高,密封性好,受周围环境的影响不明显;

(6) 可以制作层数很多的电路基板,将大量的无源器件埋置在基板内部,减少了基板表面需要贴装的器件数量,大大提高了电路的集成密度;

(7) 加工过程中可以多层并行加工,而且在烧结前可以对每一层的布线及通孔连接进行检查,有利于提高多层基板的质量和成功率,提高生产效率,降低生产成本;

(8) LTCC 基板具有良好的温度特性(热膨胀系数及共振频率温度系数较低),并且其热膨胀系数可设计成与硅、砷化钾或铝相匹配,有利于裸芯片组装;

(9) LTCC 技术可承受大电流,大功率,比普通的 PCB 板更能适应高温环境。

1.3 基于 LTCC 技术的毫米波天线的特点

上文中介绍的毫米波的诸多优点,使得毫米波电路与系统在无线通信、雷达、遥感、精确制导及导航等领域得到了广泛的应用。而随着大规模集成电路、新型电子材料和高密度封装互连技术的快速发展,电子业界对毫米波电子设备的体积、重量、性能、成本等方面提出了更加苛刻的要求。而天线作为毫米波电子设备中的重要组成部分,其电性能和物理结构对整个毫米波电子设备的性能和尺寸起着至关重要的作用。目前,许多应用于毫米波系统的有源、无源电子器件在小型化方面取得了巨大的进步,而天线往往成为整个系统中最为笨重的部件,这成为了限制毫米波设备小型化和集成化的一大瓶颈。然而,天线的小型化往往是以牺牲其他某些性能指标为代价的,尤其是传统的平面结构的天线,由尺寸减小引起的某些性能指标的恶化更为严重。因此,解决毫米波天线高性能与小型化之间的矛盾已经迫在眉睫,即在满足毫米波系统电性能指标的基础上,尽可能提高毫米波天线与系统的集成水平,并减小天线的体积和重量。若能采用新技术、新材料及新结构,充分利用天线占用的有限空间,尤其是纵向上的空间(如三维结构的多层天线),可以有效地解决毫米波天线性能与体积之间的矛盾。基于 LTCC 技术的三维毫米波天线将新技术、新材料与新结构有机地结合在一起,为实现毫米波天线的高性能、小型化和集成化提供了有效的途径。

1) 基于 LTCC 技术的毫米波天线的优点

LTCC 成熟的多层技术使得天线的结构更加多样化,从二维扩展到了三维,这大大增加了毫米波天线设计的灵活性。采用 LTCC 技术实现的毫米波天线具有以下优点:

(1) 尺寸相对较小。LTCC 的多层技术使得天线可以在三维结构上布局,从而

使天线结构更加紧凑。即能够在保证天线性能的前提下有效缩小天线的尺寸。

(2)与系统的集成度高。利用 LTCC 技术很容易将天线与其他毫米波器件集成在同一块 LTCC 基板中,实现整个系统的集成化。

(3)可靠性较好。由于 LTCC 具有高耐温、耐湿性及高气密性等特性,使得 LTCC 毫米波天线更能适应恶劣的工作环境。

(4)容易实现低成本。LTCC 技术是平行加工技术,基板的各层可以并行加工,加工效率较高;并且 LTCC 工艺便于自动化大规模生产。

2) 基于 LTCC 技术的毫米波天线的缺点

尽管基于 LTCC 技术的毫米波天线有以上突出的优势,但也存在一些不足之处:

(1)LTCC 材料的高介电常数对天线辐射性能和带宽特性有一定的负面影响。高介电常数的介质不仅在 LTCC 表面激励起较大的表面波,表面波在介质边缘处的辐射将严重影响天线的辐射性能,而且使微带类天线的带宽变得更窄。

(2)加工误差较大导致天线性能的恶化。加工误差的来源有两个:一是 LTCC 基板在烧结过程中收缩率控制的误差,当 LTCC 基板的面积较大、层数较多时,收缩率控制误差的累积可能导致通孔错位而使导体开路或短路。二是加工过程中随着环境的变化,导致 LTCC 的材料特性(介电常数、损耗角正切等)产生偏差。

(3)LTCC 基板使用的陶瓷材料使得天线的机械强度较差。

综上所述,基于 LTCC 技术的毫米波天线可以充分利用 LTCC 技术多层结构的优势,将天线的结构从二维扩展到三维,能够在有效缩小天线的尺寸的同时,天线的带宽及辐射特性等性能指标仍可满足毫米波系统的要求。LTCC 技术为毫米波天线实现小型化、轻量化、低成本等提供了有效的技术途径。

1.4 毫米波 LTCC 天线的国内外发展动态

1.4.1 国外发展动态

早在 20 世纪 80 年代初,美国就率先对 LTCC 技术展开了一系列的研究工作,特别是在军用领域更是投入了大量的人力、物力和财力。研究初期主要应用于低频电路及数字电路,直到 90 年代初期,才被用来研制高集成度的微波和毫米波电路系统,之后便迅速在雷达和通信等领域获得广泛应用^[11]。近年来,毫米波技术日趋成熟,电子业界对毫米波电子系统的小型化、集成化及可靠性提出更高的要求,LTCC 凭借其卓越的电气性能与多层结构优势能够满足这一新的要求。因此,