

多层低温共烧陶瓷技术

Multilayered Low Temperature
Cofired Ceramics (LTCC)
Technology

〔日〕今中佳彦 (Yoshihiko Imanaka) 著
詹欣祥 周 济 译

74.6
9



科学出版社
www.sciencep.com

多层低温共烧陶瓷技术

Multilayered Low Temperature
Cofired Ceramics(LTCC)
Technology

[日]今中佳彦(Yoshihiko Imanaka) 著
詹欣祥 周 济 译

科学出版社

北 京

78/74.6
丁-9

图字:01-2009-7218

内 容 简 介

本书全面介绍了低温共烧陶瓷(LTCC)技术,给出了大量20世纪80年代富士通和IBM美国公司开发的大型计算机用铜电路图层的大面积多层陶瓷基板的工程图表。全书共10章。第1章绪论,概述了低温共烧陶瓷技术的历史、典型材料、主要制造过程等。第2章至第9章分为两大部分,第一部分为材料技术,包括第2章至第4章,论述了陶瓷材料、导体材料及辅助材料的特性和应用;第二部分为工艺技术,包括第5章至第9章,细致地描述了各工序特点、工艺条件、控制、在制品评价、缺陷防止和产品可靠性等诸多问题。最后,在第10章,展望了低温共烧陶瓷技术的未来发展。

本书适合从事电子、材料等领域研究、开发和生产的技术人员参考阅读,也可作为高等院校相关专业的研究生、本科生教材使用。

Translation from the English language edition:
Multilayered Low Temperature Cofired Ceramics (LTCC) Technology by
Yoshihiko Imanaka
Copyright © 2005 Springer Science+Business Media, LLC
All Rights Reserved

图书在版编目(CIP)数据

多层低温共烧陶瓷技术/(日)今中佳彦著;詹欣祥,周济译. —北京:科学出版社,2009

书名原文: Multilayered Low Temperature Cofired Ceramics (LTCC) Technology

ISBN 978-7-03-026198-4

I. 多… II. ①今…②詹…③周… III. 陶瓷-烧成 IV. TQ174.6

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第226714号

责任编辑:牛宇锋/责任校对:钟 洋

责任印制:赵 博/封面设计:耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010年1月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2010年1月第一次印刷 印张:10 1/4

印数:1—2 500 字数:189 000

定价:45.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

中文版寄语

对于中国的读者能够使用本书，我由衷地感到高兴，并对在翻译方面作出努力的各位表示深深的谢意。

最近 10 年，计算机、手机等信息设备持续以令人瞠目结舌的势头不断发展和进化，并逐渐成为我们生活中必不可少的工具。目前，低温共烧陶瓷 (low temperature cofired ceramics, LTCC) 作为重要的电子部件被安装在这些信息设备当中，对于信息产业的发展作出了巨大的贡献。

从最初开始撰写原稿以来，为了使读者充分了解 LTCC，并在实际中加以活用，我们锐意致力于创作。本书面向从包括大学生在内的材料初学者到材料专业技术人员等广大读者，是一本网罗了从 LTCC 基础到材料技术、制造工艺的技术书籍。相信对于中国众多的技术人员而言，这将是一本有用的 LTCC 教科书。

如今，在 LTCC 领域存在着相当多的潜在价值，未来该领域将持续进行技术改良，对实现各种信息设备的小型化、高性能化不断作出贡献。我们热切期待本书的中文版能唤起中国的材料、电子部件、封装研发人员及技术人员对 LTCC 的兴趣与热情，并以本书中所述的内容为基础，在中国进行更高层次的技术革新，创造全新的 LTCC，为促进人们过上更幸福美满的生活而作出贡献。

通过本书，我获得了与中国的陶瓷技术人员、研究人员交流的机会，对此向参与出版的各位表示深切的谢意。

此外，欢迎读者畅言对本书的意见与建议。相信本书及本技术将因您的反馈而变得更加充实。

今中佳彦

2009 年 1 月 于神奈川县厚木市

中文版序

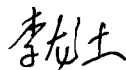
近半个世纪以来,半导体集成技术成为对人类社会影响最为深远的重大技术创新之一。这一技术的迅猛发展使得人类进入了今天这个高度信息化的社会。目前,半导体集成技术仍以每 18 个月集成度翻一番(所谓的“摩尔定律”)的速度向前发展。

然而,半导体器件仅仅是电子元器件的一部分(有源器件),另一部分用量巨大、种类繁多、功能各异的元器件是无源元件。这些元件的核心材料是各类功能陶瓷材料。事实上,早在发明半导体之前,一些功能陶瓷材料,如高介电常数陶瓷、铁氧体等就已经被应用于一些电子元件。然而,与基于半导体技术的有源器件的飞速发展相比,基于功能陶瓷技术的无源元件的发展要缓慢得多。尽管世界各国的科学家和技术人员在无源元件的小型化方面进行了大量卓有成效的努力,但无源元件的集成化却一直是电子元器件技术发展的“瓶颈”。目前的整机系统中,无源元件和有源器件的比例达 20:1 至 100:1,无源元件构成了整机产品中体积、重量和安装成本的主要部分。

近年来出现的低温共烧陶瓷(LTCC)技术有望打破这种局面,它使无源元件的集成成为可能,因此将对未来电子元件制造技术产生重要影响。LTCC 技术是集互联、无源元件和封装于一体的多层陶瓷制造技术,其基本原理及技术特征是将多层陶瓷元件技术与多层电路图形技术相结合,利用低温烧结陶瓷与金属内导体在 900℃ 以下共烧,在多层陶瓷内部形成无源元件和互联,制成模块化集成器件或三维陶瓷基多层电路。该技术为无源电子元件的集成和高密度、系统级电子封装提供了理想的平台。

LTCC 技术的兴起引起了国内外产业界和学术界的高度关注。然而,由于作为前沿技术的高度敏感性和保密性,国际上在相当长的时间缺乏系统介绍这一技术的专著。值得庆幸的是,LTCC 技术的重要开拓者之一、日本富士通公司的今中佳彦先生出版了这本资料翔实、内容丰富、文字简洁的《多层低温共烧陶瓷技术》,对相关领域的研究、开发和生产具有重要的参考价值。

本书由詹欣祥高级工程师和周济教授翻译成中文。相信中文版的出版将对我国 LTCC 技术产业发展和人才培养起到推动作用。



中国工程院院士

清华大学材料科学与工程系教授

2009 年 10 月

译者序

新世纪初的几年，译者应邀参与了国内一企业的微波介质频率器件的开发工作。这期间，为了适应新的电子元器件时代来临对元器件所提出的小型化、多功能化和高频化的要求，实现无源器件多层化、多层器件片式化、片式元件集成化的目标，在探索的道路上与低温共烧陶瓷技术结下了不解之缘。译者深知这一技术在电子器件集成化、模组化进程中的作用和地位，因此在项目完成后，还断不了情结，随时关注着我国这一技术的发展。

2008 年春天，有幸见到英文电子版《多层低温共烧陶瓷技术》一书，真是如获珍宝。这是目前世界上唯一一本系统论述低温共烧陶瓷技术的专著。本着此书对致力于结合早期低温共烧陶瓷技术原理而创新的工作将有所贡献的思考，译者产生了将此书翻译成中文的念头。在清华大学周济教授的热情鼓励和极力支持下，译者在古稀之年以“活到老，学到老”自勉，努力朝着“信、达、雅”的方向，开始了翻译工作。

低温共烧陶瓷技术是近年发展起来的令人瞩目的整合组件技术，目前已成为无源集成的主流。本书作者在 20 世纪 80 年代就参与了富士通大型计算机用低温共烧陶瓷基板的研究和开发，为这一技术的发展迈出了至关重要的一步。

材料、设计、设备是低温共烧陶瓷技术的三大关键，本书重笔论述了材料及制造工艺，并结合当前的研究，展望了低温共烧陶瓷技术的未来。书中给出了大量的技术开发工程图和技术数据，字里行间透露出作者丰富的经验。

本书蕴含着丰富的技术资源，可作为材料科学与工程专业的学生的参考教材，对从事工业制造、设计和陶瓷工程的技术人员也是一本不可多得的好书。

在本书的成书过程中，得到了许多专家、教授的支持和帮助，李龙土院士在百忙中为此书作序，译者在此一并致以衷心的感谢和崇高的敬意。

由于译者外语和专业水平有限，文中难免有疏漏和不足之处，衷心希望读者批评指正。

詹欣祥

2009 年 4 月

序

近年来,随着移动网络系统应用的迅速扩大,低温共烧陶瓷(LTCC)技术作为一种极具吸引力的电子元器件和基板制造技术正推进着各种电子设备,如蜂窝电话、个人数字助理(PDA)和个人电脑等无线语音和数据传输系统的小型化、轻量化、高速和多功能化的进程。低温共烧陶瓷中用的电路配线材料是高频导损小、电阻低的 Cu、Ag 和 Au 金属材料,而且低温共烧陶瓷的介电损耗也比有机材料的介电损耗小。这就使低温共烧陶瓷特别适合高速数据通信所要求的高频电路应用。

20 世纪 80 年代期间,美国和日本的计算机和陶瓷材料制造商深入地进行了低温共烧陶瓷技术的研究和开发,为当今和未来通信技术迈出了至关重要的一步。当时富士通和 IBM 美国公司生产了用于大型计算机的铜电路图层的大面积多层陶瓷基板(满足富士通的 250mm×250mm 60 层的规格)。作者参与了这种基板的开发和生产。从制造的观点来看,当时的技术水平远高于目前低温共烧陶瓷产品的技术水平。这种基板是通过主机对制造参数进行极其精确的控制而生产的。

然而,对于这种高水平低温共烧陶瓷技术,当时并没有任何相关书籍出版,作者担心这种技术被遗忘。因此,为使其能够保存下来,作者对低温共烧陶瓷技术进行了系统总结,作为入门基础。本书给出了大量的上述富士通大型计算机用基板的技术开发工程图,并添加了解理解本书所需的基本科学素材。

在日本,我们有一古老的中国古语:“活到老,学到老”,那就是说,为了掌握新的知识和技术一直学到发白须长。梅开鲜二度,老树发新枝,低温共烧陶瓷技术的应用,就像流行音乐一样,将传播于全世界。作者希望,此书对致力于结合早期低温共烧陶瓷技术原理而创新的工作将有所贡献。

作者本人是一位从事低温共烧陶瓷技术研究和开发的工程师,目前从事另一新技术的开发。此书是初版,所及技术不一定完整,技术也在不断进步,以后再作修改和补充,使之成为更好的技术资源。

今中佳彦

日本 厚木市

2004 年 7 月 24 日

目 录

中文版寄语

中文版序

译者序

序

第 1 章 绪论	1
1.1 历史回顾	1
1.2 典型材料	2
1.3 主要制造过程	3
1.4 典型产品类型	4
1.5 低温共烧陶瓷的特性	6
1.5.1 高频特性	6
1.5.2 热稳定性(低热膨胀, 良好热阻)	7
1.5.3 无源元件集成	8
1.6 有关公司材料发展的趋势	9
1.7 本书侧重点	11
参考文献	12

第一部分 材料技术

第 2 章 陶瓷材料	17
2.1 导言	17
2.2 低温烧结	18
2.2.1 玻璃的流动性	19
2.2.2 玻璃的晶化	21
2.2.3 玻璃的起泡	24
2.2.4 玻璃与氧化铝之间的反应	26
2.3 介电特性	27
2.3.1 介电常数	27
2.3.2 介电损耗	28
2.4 热膨胀	30
2.5 机械强度	31

2.5.1 玻璃相的强化	32
2.5.2 耐热冲击	34
2.6 热传导	36
参考文献	37
第3章 导体材料	40
3.1 引言	40
3.2 导电油墨材料	41
3.3 氧化铝陶瓷的金属化方法	42
3.3.1 厚膜金属化	42
3.3.2 共烧金属化	44
3.4 导电性	45
3.5 共烧相配性	46
3.6 附着	49
3.7 抗电徙动	50
3.8 胶结性	53
参考文献	54
第4章 电阻材料和高介电材料	57
4.1 引言	57
4.2 电阻器材料	57
4.2.1 氧化钽/玻璃材料	59
4.2.2 氧化钽的热稳定性	61
4.3 高介电常数材料	63
参考文献	67

第二部分 工艺技术

第5章 粉料准备和混合	71
5.1 引言	71
5.2 无机陶瓷材料	71
5.3 有机材料	72
5.3.1 黏结剂	74
5.3.2 可塑性	76
5.3.3 分散剂和料浆的分散性	77
参考文献	79
第6章 流延	81
6.1 引言	81

6.2 流延设备	81
6.3 料浆特性	82
6.4 生片	84
6.4.1 生片的特性要求	84
6.4.2 生片的评价方法	85
6.4.3 影响生片特性的各种因素	88
6.4.4 生片微结构	94
6.4.5 生片外形尺寸的稳定性	96
6.5 冲过孔	97
参考文献	98
第7章 印刷和叠层	100
7.1 印刷	100
7.1.1 丝网规格	101
7.1.2 印刷工艺条件	101
7.1.3 油墨特性	102
7.1.4 生片特性	104
7.2 填过孔	104
7.3 叠层	105
7.3.1 叠层过程技术	105
7.3.2 叠层过程中出现的缺陷	108
7.3.3 防止分层	111
参考文献	114
第8章 共烧	115
8.1 铜的烧结	116
8.2 控制烧结收缩	117
8.2.1 陶瓷	117
8.2.2 铜/陶瓷	119
8.3 烧结行为和烧结收缩率失配	119
8.3.1 ΔT 的影响	120
8.3.2 ΔS 的影响	122
8.4 铜的抗氧化和黏结剂的排出	124
8.5 零收缩技术	129
8.6 共烧过程和未来的低温共烧陶瓷	130
参考文献	131

第 9 章 可靠性	132
9.1 低温共烧陶瓷的热冲击	133
9.2 低温共烧陶瓷的热膨胀和剩余应力	134
9.3 低温共烧陶瓷的热传导	137
参考文献	137
第 10 章 低温共烧陶瓷的未来	139
10.1 引言	139
10.2 未来低温共烧陶瓷技术的发展	139
10.2.1 材料技术开发	140
10.2.2 工艺技术	142
10.3 后-低温共烧陶瓷技术的背景	144
10.3.1 后-低温共烧陶瓷技术的气浮沉积法	147
10.3.2 气浮沉积陶瓷薄膜目前状况和未来发展前景	148
参考文献	149

第 1 章 绪 论

随着当今移动电话的爆炸性增长,用移动电话作为无线终端设备来传输文本和图像数据的通信技术也持续不断地发展。同时,宽带和高频技术的各种应用也在不断涌现。800MHz、1.5GHz 和 2GHz 频率的移动电话也正在日益转向高频。无线局域网的蓝牙(2.45GHz)和电子公路收费系统(5.3GHz)等也已进入商业应用。2GHz 或更高的频率也在不断扩大应用^[1,2]。10GHz 或更高频率的准毫米波也正在起步引入无线局域环路(WLL, 20~30GHz)和汽车用的雷达中(50~140GHz)^[3]。为了实现这种高频无线通信技术的进一步发展,系统方案与硬件技术的共同发展将在推动移动终端设备的多功能化、高性能化和超小型化的进程中发挥重要的作用。例如,配备有蓝牙、全球卫星定位系统和无线局域网等多功能的移动终端设备相继问世,为了遏制因此而增加的电路尺寸,迫切需要将各种高频功能和无源器件置入基板内部,而不是安置在它的表面。此外,为了开通高速数据通信,人们正期待着满足高频和宽带要求且高频损耗小的电子器件和基板的及早实现^[4,5]。

由于低温共烧陶瓷(LTCC)易于与不同特性的材料相结合,这就有可能实现元件的集成和将不同特性的元件置入陶瓷内部。此外,将低损耗金属埋入低温共烧陶瓷中作为导体是可能的,和其他材料,如树脂等材料比较,陶瓷的高频介电损耗小,从而使其有可能制造低损耗的器件。另外,低温共烧陶瓷的热膨胀系数比树脂材料和其他陶瓷材料低,对于大规模集成电路器件的高密度封装,就有着极优良的内连可靠性的优点。由于这些原因,低温共烧陶瓷技术被认为在未来高频应用中,用做器件的集成和基板是极有希望的技术。

1.1 历史回顾

多层陶瓷基板技术源于 20 世纪 50 年代末期美国无线电(RCA)公司的开发,现行的基本工艺技术(用流延法的生片制造技术、过孔形成技术和多层叠层技术)在当时就已被应用^[6~8]。其后,IBM 公司在这一技术领域居领先地位,该公司在 80 年代初商业化的主计算机的电路板(基板:33 层和 100 倒装芯片粘接大规模集成电路器件)是这一技术的产物^[9~11]。因为这些多层基板是用氧化铝绝缘材料和导体材料(Mo、W、Mo-Mn)在 1600℃ 的高温下共烧的,故而称为高温共烧陶瓷(HTCC),以区别于后来开发的低温共烧陶瓷。从 20 世纪 80 年代的中期开

始, 研究人员致力于提高大型计算机的速度, 并把此作为提高大型计算机性能的关键, 从而使高密度安装应用的多层陶瓷基板得到进一步改善。为了提高高密度安装电路板的配线密度, 使用了精细的导线, 结果线路电阻增大, 信号被显著衰减。因此必须使用低电阻的材料(Cu、Au 或者类似材料)配线。另外用倒装芯片的方法, 直接连接裸露的大规模集成电路器件时, 如果基板的热膨胀不与硅器件的热膨胀($3.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)接近, 就会导致互连线的不良连接。因此, 具有低热膨胀(陶瓷)的绝缘材料是必不可少的。此外, 为了实现信号的高速传输, 必须保证陶瓷有低的介电常数。20 世纪 90 年代初期, 许多日本和美国的电子厂商和陶瓷厂商开发了满足上述要求的多层基板^[12,13] (图 1.1)。其中, 富士通和 IBM 公司用铜布线材料和低介电常数陶瓷制造的多层基板首先成功地进入商业应用^[14,15]。从 20 世纪 90 年代的后半期至今, 移动通信设备(主要是移动电话)中应用的电子器件、模块等的主要应用已转向高频无线方面。对于以大规模集成电路器件的高密度安装为目的的多层电路板, 陶瓷的低热膨胀是它的最大优点。而且, 就高频通信应用而言, 陶瓷的低传输损耗是其主要特点, 陶瓷的低介电损耗优点使其胜过其他一切材料。

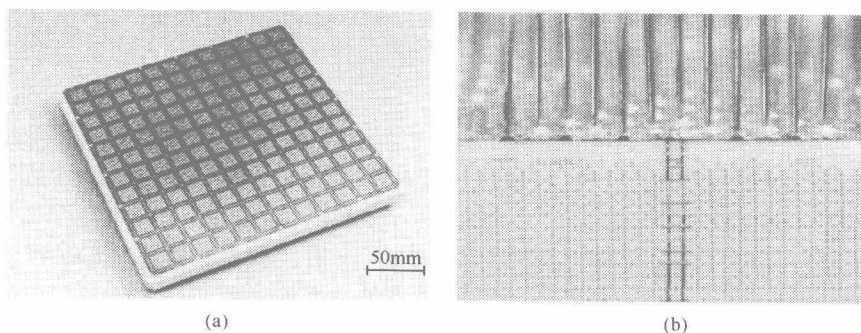


图 1.1 (a)富士通生产的计算机主机用多层陶瓷电路板(尺寸: $245\mu\text{m} \times 245\mu\text{m}$, 52层)和 (b)电路板及内部铜导线的截面图(孔径: $80\mu\text{m}$, 导线线宽: $80\mu\text{m}$, 行距: $100\mu\text{m}$, 每层电介质材料厚度: $200\mu\text{m}$)

1.2 典型材料

顾名思义, 低温共烧陶瓷是陶瓷和金属线在低温下一同烧成的, 它的主要材料是金属和陶瓷。低温共烧陶瓷所用的金属是高电导材料(Ag、Cu、Au 及其合金, 如 Ag-Pd、Ag-Pt、Au-Pt 等)。如表 1.1 所示, 它们的熔点都较低, 约为 1000°C 。因为陶瓷材料要和金属一同共烧, 精确控制温度在金属的熔点($900 \sim 1000^{\circ}\text{C}$)以下是非常必要的。为了保证在低温共烧条件下有高的烧结密度, 通常

在组分中添加无定形玻璃、晶化玻璃、低熔点氧化物等来促进烧结。图 1.2 所示的玻璃和陶瓷复合材料是一种典型的低温共烧陶瓷材料。除此之外，还有晶化玻璃，晶化玻璃和陶瓷的复合物及液相烧结陶瓷，都是众所周知的材料。

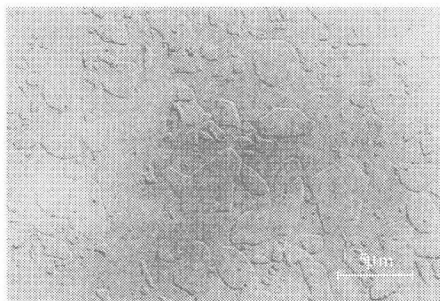


图 1.2 氧化铝含量*为 20%(体积分数)的玻璃/氧化铝复合材料
复合材料的介电常数为 5.6，热膨胀系数为 $3.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ，热导率为 $2.4\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ，弯曲强度为 200MPa

表 1.1 低温共烧陶瓷和高温共烧陶瓷主要材料比较

	陶 瓷		导 体	
	材 料	烧结温度/ $^{\circ}\text{C}$	材料	熔点/ $^{\circ}\text{C}$
低温共烧陶瓷	玻璃/陶瓷复合物 结晶玻璃 结晶玻璃/陶瓷复合物 液相烧结陶瓷	900~1000	Cu	1083
			Au	1063
			Ag	960
			Ag-Pd	960~1555
			Ag-Pt	960~1186
高温共烧陶瓷	氧化铝陶瓷	1600~1800	Mo	2610
			W	3410
			Mo-Mn	1246~1500

1.3 主要制造过程

多层陶瓷基板的基本制造过程如图 1.3 所示^[16]。首先，陶瓷粉末和有机黏结剂混合配成乳状料浆。用刮刀法将料浆流延成陶瓷薄片(生片)，这种生片烧结前柔软如纸。生片各层间开有导电过孔，采用丝网印刷方法用导电糊膏将线路图

* 无特殊说明时，本书所指含量均为质量分数。

案印在生片上。印刷的生片按层排列，加热并施加压力，以实现叠层（生片中的树脂在叠层胶接时起到胶的作用）。导体金属和陶瓷一同煅烧，排出其中的有机胶，最终获得陶瓷基板。最重要的一点是，注意制造过程中最终产品的尺寸精度和材料质量的变化。同时，过程条件必须设定，以保证工件每一工序的微观和宏观结构是均质的。而且，叠层和共烧技术往往涉及两种以上不同介电特性的陶瓷片，电阻器的共烧形成过程就是众所周知的一例^[17]。

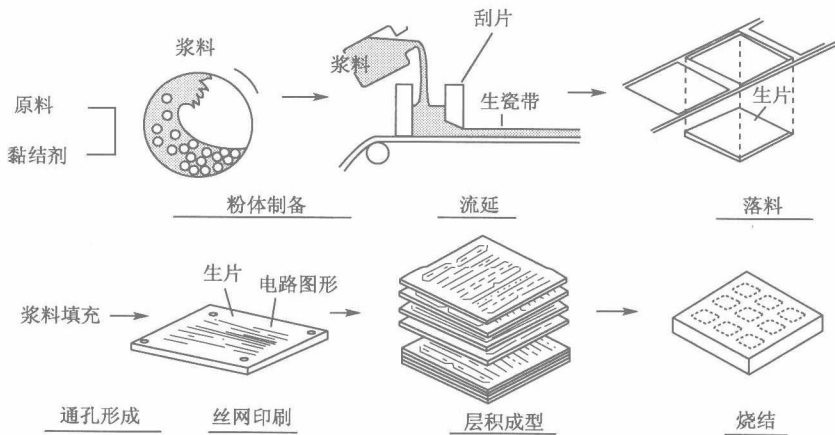


图 1.3 典型的多层陶瓷基板的制造过程

1.4 典型产品类型

图 1.4 示出了装有全球卫星定位系统的双波段移动电话的方框图。其传输过程如下：首先由数-模转换器将说话声音的模拟信号转换成数字信号，再用混合器将其与高频成分混合，此时整个频率被提高了。随后用表面波滤波器滤去噪声，再通过放大器将信号加强，最后由天线将信号发射出去。低温共烧陶瓷可以用来制作实现这一过程所需的分立器件，如耦合器（在功率放大器输出侧控制功率放大器的输出增益）、巴伦（转换平衡和不平衡阻抗的器件）。同样，低温共烧陶瓷也可用于制作图中所划分的电路模块（天线转换模块、前端模块和功率放大模块）。另外，低温共烧陶瓷还可用于表面波滤波器的封装。因此，有许多低温共烧陶瓷产品已进入高频移动通信终端设备的电路中。可以预期，电路图中虚线所划星罗棋布的器件也终将用低温共烧陶瓷模块。低温共烧陶瓷产品可分成三个类型，如表 1.2 所示，即分立器件、基板和封装及模块。所有类型的产品目前都在商业化的无线通信中得到应用。

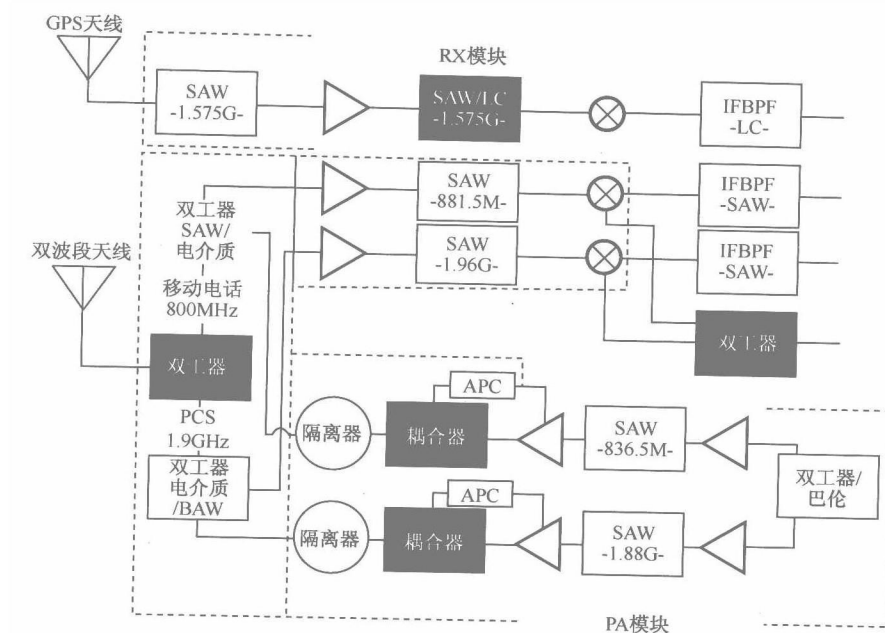


图 1.4 装有全球卫星定位系统的移动电话(CDMA, PCS)框架图

RX 模块：接收模块；SAW：表面波；BAW：体波；IFBPF：中频带通滤波器；PA 模块：功率放大器模块；PCS：个人通信业务；APC：自动功率控制

表 1.2 低温共烧陶瓷产品的分类

类 型	产 品
模 块	前端模块
	接收模块
	汽车电源控制(自动增益控制)耦合器模块
封装/基板	功率放大器(PA)模块
	表面波器件封装
表面贴装器件(SMD)	带通滤波器(BPF)
	低通滤波器(LPF)
	巴伦
	耦合器
	双工器
	天线

1.5 低温共烧陶瓷的特性

在集成无源器件方面,和印刷树脂板相比,低温共烧陶瓷有三大优势,即高频特性、热稳定性和电容量。在高频应用中,低温共烧陶瓷也非常适合制作集成基板和电子器件。

1.5.1 高频特性

高频传输损耗($1/Q$)可用介电损耗($1/Q_d$)和导体损耗($1/Q_c$)的关系来表示,如图 1.5(a)所示,介电损耗是传输线路中导体和地线之间所积累电荷的损耗,频率升高,使电流泄漏增大,导体中电流流动受阻。介电损耗通常以下面公式表示:

$$1/Q_d = \frac{20\pi \log e}{\lambda_g} \tan \delta = 2.73 \frac{f}{C} \sqrt{\epsilon_r} \tan \delta \quad (\text{dB/m})$$

式中, λ_g 为波长; f 为频率; C 为光速; ϵ_r 为介电常数; $\tan \delta$ 为介电损耗角。

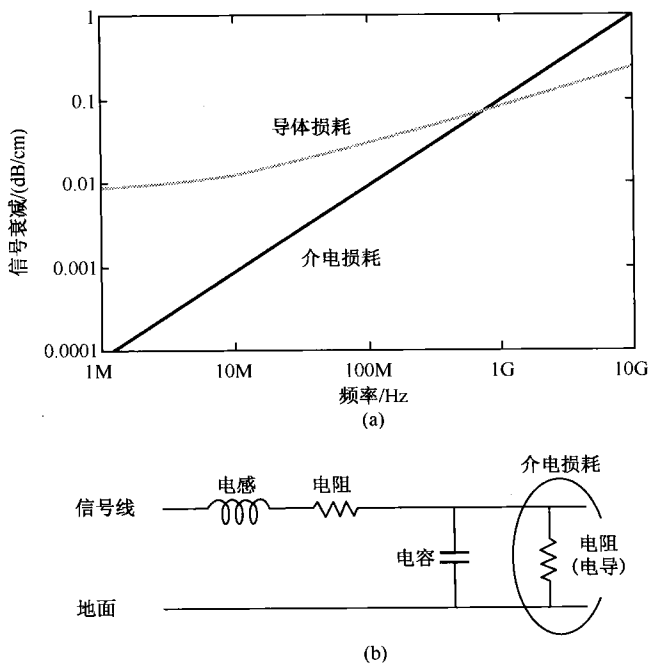


图 1.5 (a)介电损耗和导体损耗的频率属性和(b)电路中的介电损耗

然而,导体损耗取决于导体的电阻(表面电阻)。当频率增高时,电流有集中