

高等学校教材

厚膜混合集成电路

吕乃康 樊百昌 编著

西安交通大学出版社

内 容 简 介

本书综述了厚膜技术和厚膜电路在微电子学中的地位、作用、发展简史、发展动向和电路的制造与应用；较详细地论述了各种厚膜材料和元器件的特性、厚膜电路的设计和热设计以及厚膜浆料和厚膜电路无源网络的制造技术；讨论了厚膜电路的组装和封装技术。

本书适合高等院校工科电子类专业作教材，同时也适于从事厚膜材料、元器件和混合集成电路的研究、设计、制造和应用等方面的工程技术人员使用。此外，也可供从事电子线路及仪器设计人员和电子系统的专业管理干部参阅。

高 等 学 校 教 材 厚 膜 混 合 集 成 电 路 吕乃康 樊百昌 编著 责任编辑 刘宏珊

*

西安交通大学出版社出版
(西安市咸宁路28号)
西安7226印刷厂印装
陕西省新华书店发行 各地新华书店经售

*

开本787×109 1/32 印张10.25 字数：214千字
1990年6月第1版 1990年6月第1次印刷
印数：1——2000
ISBN7-6605-0341-1/TN·17 定价：2.05元

目 录

前 言

第一章 概 述

- 1.1 厚膜技术在微电子学中的地位 (1)
- 1.2 厚膜技术 (7)
- 1.3 厚膜电路 (11)
- 1.4 厚膜电路的制造 (14)
- 1.5 厚膜电路的应用 (17)

第二章 厚膜元件与材料

- 2.1 厚膜基板 (25)
- 2.2 厚膜导体与材料 (39)
 - 2.2.1 概述 (39)
 - 2.2.2 贵金属厚膜导体 (40)
 - 2.2.3 贱金属厚膜导体 (46)
 - 2.2.4 聚合物厚膜导体 (50)
 - 2.2.5 感光性厚膜导体和其他厚膜导体 (51)
 - 2.2.6 厚膜导体的附着机理 (52)
- 2.3 厚膜电阻及材料 (57)
 - 2.3.1 厚膜电阻的结构和导电机理 (57)
 - 2.3.2 厚膜电阻器的主要参数及基本性能 (65)

2.3.3	厚膜电阻的材料组成和颗粒大小对电阻性能的影响	(76)
2.3.4	贵金属厚膜电阻材料	(84)
2.3.5	贱金属厚膜电阻材料	(87)
2.3.6	聚合物厚膜电阻材料	(91)
2.4	厚膜介质材料	(93)
2.4.1	概述	(93)
2.4.2	交叉及多层布线介质	(95)
2.4.3	电容器介质及厚膜电容器	(97)
2.4.4	包封介质	(99)
2.4.5	聚合物厚膜介质	(100)
2.5	厚膜铁氧体磁性材料及厚膜电感器	(101)
2.6	其他厚膜材料	(102)
2.7	芯片状元器件	(103)
2.7.1	芯片状无源元件	(104)
2.7.2	芯片状有源器件	(113)
2.8	其他厚膜元器件	(115)

第三章 厚膜电路的设计

3.1	厚膜电路的线路转换	(116)
3.1.1	电子系统的划分	(118)
3.1.2	厚膜电路的设计程序	(119)
3.2	厚膜电路的图形设计	(120)
3.2.1	厚膜电阻器的设计	(121)
3.2.2	厚膜电容器的设计	(126)
3.2.3	厚膜电感器的设计	(130)

3.2.4	导电带、焊接区和交叉区的设计·····	(133)
3.2.5	平面化总体布图的设计原则·····	(135)
3.3	厚膜电路的寄生效应·····	(141)
3.4	厚膜电路的多层化布线设计·····	(144)
3.5	厚膜电路的噪声设计·····	(153)
3.5.1	厚膜电阻器的噪声特性·····	(153)
3.5.2	厚膜电路的噪声电压设计·····	(155)
3.6	厚膜电路计算机辅助设计 (CAD)简介·····	(159)

第四章 厚膜电路的热设计

4.1	厚膜电路的散热方式及热阻分析·····	(164)
4.1.1	散热方式与散热基本公式·····	(164)
4.1.2	厚膜电路的热阻分析·····	(170)
4.2	厚膜电路的热阻计算·····	(174)
4.2.1	厚膜电路的内热阻计算·····	(174)
4.2.2	厚膜电路的外热阻计算·····	(180)
4.2.3	厚膜电路的瞬态热阻·····	(186)
4.3	厚膜电路的散热结构设计·····	(190)
4.3.1	厚膜电路散热结构设计的基本原则·····	(191)
4.3.2	厚膜功率电路中功率晶体管的几种散热 结构·····	(193)
4.4	厚膜功率电路的热设计方法·····	(198)
4.5	厚膜功率电路外散热器的设计·····	(201)
4.5.1	外配散热器的设计原则·····	(201)
4.5.2	平板散热器与型材散热器的设计·····	(202)
4.6	厚膜电路的热检测·····	(205)

4.6.1	晶体管热阻的测试法·····	(205)
4.6.2	红外线显微热测量仪测试法·····	(206)
4.6.3	热敏涂料测试法·····	(206)

第五章 厚膜电路无源网络制造

5.1	概述·····	(208)
5.2	厚膜浆料的特性和制备·····	(211)
5.2.1	浆料的流变特性·····	(211)
5.2.2	厚膜浆料的组成·····	(215)
5.2.3	浆料的制备与检验·····	(229)
5.3	厚膜元件的印刷·····	(232)
5.3.1	丝网印刷·····	(233)
5.3.2	丝网印刷原理及印刷参数对厚膜特性的影响·····	(235)
5.3.3	细线印刷和多层化印刷技术·····	(243)
5.4	其他厚膜成膜技术·····	(248)
5.5	厚膜元件的干燥和烧结·····	(251)
5.5.1	厚膜元件的干燥·····	(251)
5.5.2	厚膜元件的烧结·····	(252)
5.5.3	红外烧结技术·····	(262)
5.5.4	聚合物厚膜的固化·····	(265)
5.6	厚膜元件的微调技术·····	(266)
5.6.1	元件微调·····	(266)
5.6.2	功能微调·····	(271)

第六章 厚膜电路的组装与封装

6.1 厚膜电路的互连技术·····	(273)
6.1.1 合金键合技术·····	(273)
6.1.2 固相键合技术·····	(279)
6.1.3 共熔键合技术·····	(283)
6.1.4 导电胶粘接·····	(285)
6.2 外贴元器件与芯片的组装·····	(288)
6.2.1 引线与膜层互连·····	(288)
6.2.2 芯片组装技术·····	(289)
6.3 厚膜电路的封装·····	(297)
6.3.1 厚膜电路的封装技术·····	(297)
6.3.2 厚膜电路的封装结构·····	(300)
思考题与习题·····	(303)
主要参考文献·····	(311)

第一章 概 述

1.1 厚膜技术在微电子学中的地位

微电子学和微电子技术是一门使电子元件和电子系统小型化的科学和技术。具体说，微电子学是对电子系统、设备、部件、元器件、工艺和材料进行综合微型化设计的研究的一门学科；而微电子技术，除了设计、制造微型电子组件、集成电路和功能器件等技术外，还包括集成电路和由集成电路构成的微电子系统的应用技术。集成电路则是微电子技术的一个重要方面，它是将组成电路的有源和无源元器件（晶体管、二极管、电阻、电容和电感等）及其互连线一起制作在半导体基片或绝缘基板上（或中），直接构成一个完整的具有一定功能的微型电路。按照制造工艺的不同，集成电路可分为半导体、薄膜、厚膜和混合集成电路。

半导体集成电路是采用外延、氧化、光刻、扩散、蒸发和离子注入等半导体技术，将构成电路的电子元器件及互连导线一起制作在半导体基片上（或中），构成一个不可分离的整体电路。

薄膜集成电路是利用真空蒸发、溅射、光刻等薄膜技术，将构成电路的电子元器件及连线，以薄膜的形式制作在绝缘基板上所构成的整体电路。薄膜的厚度通常在 $1\mu\text{m}$ 以

下。

厚膜集成电路是采用丝网印刷、喷涂和烧结（或聚合）等厚膜技术，将组成电路的电子元器件及其连线，以厚膜的形式制作在绝缘基板上所构成的整体电路。膜的厚度一般为几至几十微米，比薄膜的厚。

混合集成电路则是采用半导体、薄膜和厚膜技术相结合而制成的集成电路。它还可以分为单片混合集成、薄膜混合集成、厚膜混合集成和微波混合集成电路。

厚膜一词，虽来自膜的厚度，但厚膜、薄膜的概念并非单指膜的厚薄，而主要还是指它们所代表的不同工艺特征。厚膜技术是指用丝网印刷或喷涂等方法，将导体浆料和电阻浆料，通过掩模在绝缘基板上制成所需的图形，再经过加热（烧结或固化）而制出厚膜元件和集成电路的技术。它区别于薄膜的蒸发和溅射等制造技术。虽然厚膜和薄膜技术在制造无源元件方面比较成熟，但在制造有源器件方面目前尚未达到实用阶段，所以用厚、薄膜技术制造的集成电路都是采用外贴晶体管、二极管或半导体集成电路芯片的厚膜或薄膜混合集成电路。（以下简称半导体、厚薄和薄膜电路）

半导体、薄膜和厚膜技术各有特长，但也各有其短，因此用这三种技术制造的集成电路各有其优缺点。半导体电路的主要优点是集成度高、体积小、重量轻、功耗小、可靠性高、寿命长、生产效率高、成本低和适于大量生产，但难以制造出高精度和高阻值的电阻、大容量电容、电感等元件以及大功率、大电流、耐高压和高频等特殊用途的电路，而且电路的设计周期长、修改设计困难、工艺装备复杂和不

适应灵活多品种的小批量生产等。

薄膜电路的主要优点是无源元件的精度高、参数范围广、稳定性高、可靠性好、元件间绝缘良好、高频特性好、电路设计灵活性大，但用薄膜技术制出的晶体管和二极管等有源器件还未达到实用程度，且工艺装备较复杂、成本较高、也难以制成大功率元器件和进行高密度组装。

厚膜电路的优点主要是无源元件的参数范围广、精度较高、性能稳定可靠、元件间绝缘良好、高频特性好、易于制造出高压、大电流和大功率电路、电路设计灵活性大、生产成本低、适于自动化和多品种小批量生产、生产设备投资小，但其主要缺点是用厚膜技术还不能制出达到实用化程度的有源器件。此外，无源元件的特性和精度方面较薄膜元件差些。

半导体、薄膜和厚膜集成电路之间的比较如表1-1所示。它们的无源元件性能列于表1-2。

表1-1 三种集成电路的比较

电路种类	半导体电路	薄膜电路	厚膜电路
项目			
设计电路的难易程度	选择和设计电路的自由度受到限制，修改设计困难	选择和设计电路的自由度大，修改设计容易	选择和设计电路的自由度大，修改设计很容易
试制周期	约3个月	约20天	约10天
组装密度 (个/cm ³)	10 ⁴ ~10 ⁵	10 ² ~10 ³	10 ² ~10 ³

续表

项目 \ 电路种类	半导体电路	薄膜电路	厚膜电路
可靠性失效率 (1/个·h)	$10^{-6} \sim 10^{-8}$	$10^{-6} \sim 10^{-7}$	$10^{-6} \sim 10^{-7}$
最大电阻值	10~90kΩ	1MΩ	10MΩ
最大电容量	约500pF	约2.2μF	约1μF
最大电感量	只能等效地实现	约100μH	约100μH
元件精度	低	最高	高
功耗	小	中	大
高频和高速性能	元件本身性能比分立元件稍差。电路寄生效应大，不适于微波应用。增益带宽乘积约100MHz	元件本身性能比分立元件稍差，但适合作集成电路，寄生效应减小，适于微波应用。增益带宽乘积1000MHz	同左，微波应用比薄膜差些。增益带宽积400MHz
温度和射线影响	大	最小	小
生产成本	大批量生产成本低，不宜于小量生产	成本较高，如果批量生产，成本就下降	成本较低，批量生产成本也下降
适用的电路	产量高的数字电路，脉冲电路，标准化的模拟电路，差动放大器，含源元件多的电路等	需要阻值较高、元件精度很高的电路，超高频电路，模拟电路，含无源元件多的电路等	需要高阻值、高精密元件的电路，超高频电路，高压、大功率电路，模拟电路，含无源元件多的电路等

表1-2 三种电路的无源元件性能比较

元件种类	项目	电路种类		
		半导体电路	薄膜电路	厚膜电路
电阻器	阻值范围 (Ω)	10~90k	1~900k	约1~10M
	精度 (%)	约 $\pm 10\sim 30$	$\pm 0.1\sim 0.01$	$\pm 1\sim 0.2$
	TCR (ppm/ $^{\circ}\text{C}$)	500~2000	可达 ± 10	可达 ± 50
	功耗 (W/cm ²)	0.1~0.9	1~9	10~90
	非线性	小	很小	小
	噪声 (dB)	-20~0	-20以下	-20~10
	老化稳定性 (%)	0.1~0.9	0.1以内	1~9
	可靠性 (Fit)	10以下	5以下	90以下
电容器	容量范围	10~500pF	10pF~2.2 μF	10pF~1 μF
	精度 (%)	10~20	< ± 5 (用表面安装可达1)	< ± 10 (同左)
	TCC (ppm/ $^{\circ}\text{C}$)	50~1000	10~500	300~1000
	绝缘电阻 (M Ω)	40以上	40以上	40以上
	老化稳定性 (%)	1~9	1~9	1~9
	可靠性 (Fit)	10以下	5以下	20以下
电感器	电感量范围 (μH)	—	0.001~100	0.05~100
	品质因数	—	50~100	30~60

在以上三种电路中，目前大量投产的主要是半导体电

路，其次是厚膜和薄膜电路。但如上所述，其中任何一种集成电路都很难完全满足电子技术领域中的各种不同要求，因此在实际应用中，往往需要几种集成电路互相补充、取长补短，才能较好地满足各种电子设备的技术要求。在设计和制造电子系统时，应该根据电子设备的具体要求和应用特点，合理地选择其中最合适的集成电路，以达到既能充分发挥各种不同集成电路的特长，又能使电子设备获得最佳的技术、经济效果。

目前，半导体电路主要是生产和发展以电子计算机和数字控制系统为主要对象的数字电路，以及对无源元件无特殊要求的线性模拟电路。薄膜电路主要用于对无源元件性能要求高、参数范围宽或者无源元件数量品种很多的线性模拟电路，高精度、高稳定、低噪声电路，微波集成和功能复杂的集成电路。厚膜电路则主要是生产和发展高压、大电流、大功率、耐高温、抗辐射的混合集成电路，对无源元件性能要求高、参数范围很宽或无源元件数量品种很多的线性模拟电路，微波集成电路，高密度、多层布线的多功能混合集成电路以及大量普及的低成本民用混合集成电路。

用半导体技术制作的IC、MSI、LSI等芯片，其本身不能发挥要求的功能。要从这些有源器件获得必要的功能，必须用厚薄膜技术形成界面电路，将MSI、LSI与外部电路连接起来。由于在一块基板上安装多个LSI时，其互连线将随芯片数成指数函数增加，在这种情况下只靠平面布线是不够的，故需采用多层布线。而厚膜技术能实现薄膜不大可能的多导体层、重叠式三维布线，以处理复杂电路。因此，厚膜技术是目前形成这种电路的最合适技术。这种技术在计算机

等电子设备中得到了广泛应用。

目前看来，厚膜技术在构成电路中起最重要作用的是互连技术，其次是制作电子元器件和封装技术。因而只要在一个系统中有互连不同技术制作的元器件时，厚膜技术就能充分发挥其作用，并能很好地满足电子设备要求的提高组装密度、降低成本、实现大规模和多功能化的需要。

1.2 厚膜技术

厚膜技术起源于古代，但应用到电路上只不过几十年的历史。早在我国的隋唐时期就已发明了印刷术。它是我国古代四大发明之一，当时用来印刷佛经、日历和诗文等。随后，在陶瓷制品的装饰上也采用了印烧技术。即在素烧的瓷器上涂上一层无色釉料，然后再刷上三色的氧化物涂料，经高温烧结后，就形成色彩非常艳丽的三彩陶瓷。这就是闻名于世的“唐三彩”。

在国外，最早采用类似工艺将陶瓷金属化是在20世纪30年代，即在陶瓷制品上涂以很细的铁和钼粉，然后在一定气氛下进行高温烧结，形成金属化层，用以密封焊接。

厚膜技术最早应用到电路上是在20世纪40年代。当时，采用陶瓷基板，涂上银导体和碳电阻浆料制成无源网络，再装上小型电子管，就构成了原始厚膜混合电路，在军事上获得应用。

厚膜技术在40年代末期晶体管问世后，得到了进一步发展，并实现了电子电路的微型化。50年代后期，随着晶体管的大量使用和钎银浆料的研制成功，厚膜微电路的性能得

到了很大提高。这时厚膜电路才开始在工业和消费品的生产中付诸实用，并进一步发展成为在一块陶瓷基板上用厚膜技术制作厚膜元件和互连导体，外贴微型晶体管的厚膜混合集成电路。这时，厚膜技术获得了较快的发展。

50年代末60年代初，由于半导体单片集成电路的问世，使厚膜电路的发展受到了很大影响。但随着半导体集成技术的发展和成熟，其不足之处也随之暴露出来。人们发现，半导体电路虽有不少优点，但它并不能完成一切电子功能。同时，半导体IC只有靠厚薄膜技术才能获得必要的复杂功能，因此半导体技术的发展又强烈地促进了厚膜技术的发展。从而，厚膜电路又得到了进一步发展。

1965年美国IBM公司首先在360系列计算机系统中使用了厚膜电路并取得了成功后，厚膜技术便得到了更迅速的发展，并进入了大量应用的成熟阶段。与此同时，厚膜技术在材料、工艺、高稳定性电阻浆料的生产上有了很大发展。

70年代中期，由于厚膜导体浆料和介质材料方面的新进展，使厚膜细线工艺和多层布线技术有了新的突破，厚膜电路的组装密度得到了极大提高。它借助半导体集成的新工艺，运用了二次集成技术，将大规模半导体集成电路芯片直接组装在厚膜电路基板上，从而使厚膜集成技术的发展出现了新的飞跃，进入了大规模集成阶段。到80年代，由于超大规模集成电路和人工智能微电脑的出现，航天、通信技术的惊人发展，对电子电路制造技术提出了更高的要求，而厚膜技术是能够满足其要求的主要技术之一。它能够将超大规模半导体集成芯片、厚薄膜精密阻容网络、分立元器件，利用多层布线技术组装成为能够完成复杂功能的超大规模功能块，从而使厚

膜集成技术成为综合性很强的一门高技术。

用厚膜技术可以制造出很复杂的电路，但它的基本制造工序较简单，其制造电路元器件的主要工序是：配制浆料、印刷、烧结、阻值或容量微调、封装、测试，如图1-1所示。下面对其中的主要工序稍加说明，以便有一初步概念。

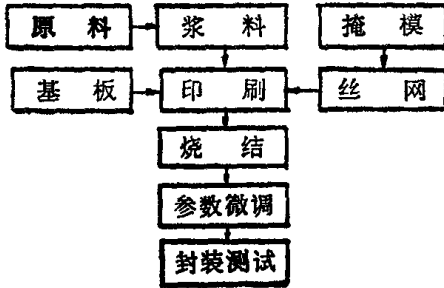


图1-1 厚膜技术基本制造工序

1. 配制浆料 浆料是由厚膜材料粉末分散在有机载体中制成的一种可以印刷的浆状物。载体是由有机树脂和溶剂组成。厚膜材料通常是玻璃粉和金属或其氧化物等。根据浆料的组成，将已细化的各种粉料混合，再加适量载体，使粉料均匀分散于载体之中，然后再进行研磨，以获得结构均匀的分散体系，即浆料。

2. 印刷 印刷是厚膜浆料在基板上成膜的基本技术。厚膜的丝网印刷类似于一般装饰涂料的印刷技术。先将基板放在丝网的下面，把浆料置于丝网之上，然后用刮板以一定的速度和压力推动浆料移动，使其通过丝网上的掩模图形而到达基板，于是便得到所需图案。印好的图案经烘干后再烧结。

3. 烧结 烧结也称烧成，是厚膜技术的重要工序之

3. 烘干后的厚膜图形经过烧结后才能成为具有一定电性能的厚膜元件。整个烧结过程包括升温、最高温度下保温和降温几个阶段。在烧结过程中将发生有机溶剂挥发，树脂烧掉，玻璃粉料的熔融，厚膜材料的分解、化合、与其他材料的反应等一系列物理化学变化，最后在基板上形成具有一定强度和电性能的膜层。厚膜元件的质量与烧结条件（包括烧成曲线和烧结气氛）有密切关系。不同材料的最佳烧结条件应根据试验来确定。

4. 微调 微调是指厚膜元件烧结后，对其阻值或容量进行微量调整的方法。元件的微调通常是用激光或喷砂等方法改变其几何尺寸，以达到预定的标称值和所需精度。微调对于电阻器来说通常是使阻值上升，而对电容器则使容量下降。微调技术的选择要根据微调的效率、精度和对元件性能的影响来确定。

5. 封装 封装就是把制成的元器件保护在一定的外壳中，以防潮、防振和防止环境气氛与辐射对元器件性能的影响，但也要考虑到元器件的散热问题。一般有半密封和全密封两种封装。半密封是采用有机材料来进行封装，如塑料封装和环氧树脂灌封；而全密封是用金属外壳进行熔焊封装或陶瓷外壳用玻璃密封封装等。在制造厚膜电路的元器件时，不需单独进行封装，必要时在元器件上涂一层低温玻璃等材料作保护层。

从以上工序中可以看到，厚膜技术的最大优点在于工艺简单、灵活、容易控制，生产成本低、投资少。这些都是优于薄膜技术之处，而其中一个最重要的特点就是能够利用厚膜介质材料制作交叉层，进行多层布线，制造多层组件和多