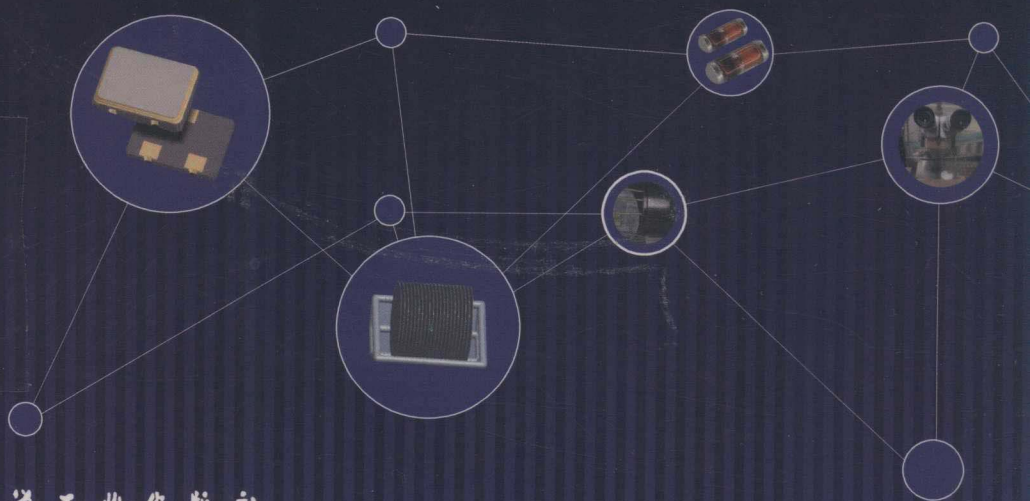


赵志桓 著

MIANXIANG RENGONG ZHINENG DE
CHAOXIAO TIEZHUANG QIJIAN

RELIABILITY DESIGN

面向人工智能的 超小贴装器件可靠性设计



化学工业出版社

MIANXIANG RENGONG ZHINENG DE
CHAOXIAO TIEZHUANG QIJIAN
KEKAOXING SHEJI

面向人工智能的 超小贴装器件可靠性设计

赵志桓 著



化学工业出版社

· 北京 ·

《面向人工智能的超小贴装器件可靠性设计》主要内容包括 2CK6642UB 芯片磷扩散掺杂、2CK6642UB 芯片硼扩散掺杂、芯片与 CLCC-3 (UB) 金属陶瓷管壳焊接工艺、超小 CLCC-3 (UB) 金属陶瓷器件封帽焊接、超小 2CK6642UB 型开关二极管器件可靠性试验。《面向人工智能的超小贴装器件可靠性设计》讨论了超小 CLCC-3 (UB) 金属陶瓷器件研究中一些基本的科学问题,为超小 CLCC-3 (UB) 金属陶瓷的生产制备及超小体积表面贴装元器件在航空航天、电子领域的应用奠定基础。

《面向人工智能的超小贴装器件可靠性设计》可供半导体、微电子、芯片的研究、制造、应用人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

面向人工智能的超小贴装器件可靠性设计/赵志桓
著. —北京: 化学工业出版社, 2019. 12

ISBN 978-7-122-35328-3

I. ①面… II. ①赵… III. ①人工智能-应用-半导体工艺-封装工艺 IV. ①TN305.94

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 223089 号

责任编辑: 李玉晖 金 杰

文字编辑: 陈 喆

责任校对: 李雨晴

装帧设计: 刘丽华

出版发行: 化学工业出版社

(北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装: 北京虎彩文化传播有限公司

710mm×1000mm 1/16 印张 10 $\frac{1}{4}$ 字数 180 千字

2020 年 1 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888

售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 78.00 元

版权所有 违者必究

此为试读, 需要完整 PDF 请访问: www.ertongbook.com

超小表面贴装器件具有体积小、重量轻、安装方便等特点，广泛应用于放大、开关及高频电路中，是计算机、雷达、通信发射机、航天飞行器、仪器仪表等系统大量使用的器件。

本书共分为7章，第1章面向人工智能超小表面贴器件的概述，主要介绍了超小表面贴器件的特点及相关的技术研究；第2章试验材料与研究方法，主要介绍了本书所用的技术研究分析方法；第3章2CK6642UB芯片磷扩散及分析，主要介绍了所依托的2CK6642UB产品的芯片制作磷扩散工艺主要影响；第4章2CK6642UB芯片硼扩散及分析，主要介绍了所依托的2CK6642UB产品的芯片制作硼扩散工艺主要影响；第5章2CK6642UB芯片焊接及分析，主要介绍了2CK6642UB芯片与超小表面贴器件管座的焊接技术；第6章2CK6642UB封帽焊接及分析，主要介绍了超小表面贴器件管座与盖板密封焊接技术分析；第7章2CK6642UB型硅开关二极管的可靠性考核，主要介绍了超小表面贴器件整体的电性能、环境性能的考核。

本书对面向人工智能的超小表面贴器件进行了系统的研究和分析，涵盖了生产工艺、生产技术、技术分析等各种科研成果，内容系统全面，叙述简明扼要，工艺通俗易懂。本书可以供从事超小表面贴装器件生产、使用的科研人员、工程技术人员和相关专业师生参考使用。

在此由衷感谢济南市半导体元件实验所的领导和技术人员、山东大学材料科学与工程学院陈传忠教授团队、山东大学微电子学院邢建平教授团队和山东农业工程学院机械电子工程学院电气教研室的老师们。

作者

2019年10月

第1章 概述 / 001

1.1 超小 CLCC (UB) 金属陶瓷管壳	003
1.1.1 超小 CLCC-3 (UB) 金属陶瓷基片技术研究进展	006
1.1.2 超小 CLCC-3 (UB) 金属陶瓷研究现状	007
1.2 开关二极管芯片	008
1.2.1 开关二极管晶体硅的掺杂	008
1.2.2 开关二极管国内外研究现状	012
1.2.3 中国现有开关二极管制造技术	012
1.3 超小 CLCC (UB) 金属陶瓷器件封装	013
1.3.1 电子封装技术国内外研究现状	013
1.3.2 金基合金焊料	015
1.4 主要研究内容	019

第2章 试验材料与研究方法 / 022

2.1 2CK6642UB 芯片制备与分析	022
2.1.1 试验材料	022
2.1.2 试验方法	022
2.1.3 测试方法	029
2.2 超小 CLCC-3 (UB) 金属陶瓷器件芯片焊接与分析	031
2.2.1 试验材料	031
2.2.2 试验方法	031

2.2.3	测试方法	033
2.3	超小 CLCC-3 (UB) 金属陶瓷器件封帽焊接与分析	035
2.3.1	试验材料	035
2.3.2	试验方法	035
2.3.3	测试方法	036
2.4	超小 2CK6642UB 型开关二极管器件可靠性考核	037
2.4.1	参照标准	037
2.4.2	可靠性考核	038

第3章 2CK6642UB 芯片磷扩散及分析 / 040

3.1	温度对磷扩散均匀性影响的仿真模拟	041
3.1.1	建立几何模型	041
3.1.2	建立有限元网格	044
3.1.3	求解器求解	045
3.1.4	均匀性分析	049
3.2	混合气体对比对磷扩散均匀性影响的仿真模拟	052
3.2.1	求解器求解	052
3.2.2	均匀性分析	053
3.3	石英舟位置对磷扩散影响均匀性的仿真模拟	056
3.3.1	建立几何模型	056
3.3.2	求解器求解	057
3.3.3	均匀性分析	058
3.4	高温液态源磷扩散试验	061
3.4.1	温度对磷扩散均匀性的影响	061
3.4.2	混合气体对比对磷扩散均匀性的影响	062
3.4.3	石英舟位置对磷扩散均匀性的影响	064
3.5	小结	065

第4章 2CK6642UB 芯片硼扩散及分析 / 066

4.1	2CK6642UB 芯片参数设计	067
4.1.1	2CK6642UB 芯片纵向参数设计	068
4.1.2	2CK6642UB 芯片横向参数设计	070
4.1.3	扩散总周长设计	070
4.1.4	版图设计	070
4.2	2CK6642UB 芯片硼扩散仿真模拟	072
4.2.1	求解器求解	072
4.2.2	均匀性分析	073
4.3	2CK6642UB 芯片硼扩散	075
4.4	硼掺杂硅片特性	076
4.4.1	硅片掺杂特性曲线	076
4.4.2	硅片方块电阻	080
4.5	扩散层微观组织结构	081
4.6	小结	084

第5章 2CK6642UB 芯片焊接及分析 / 086

5.1	正交试验设计与初步分析	087
5.1.1	芯片焊接接头剪切强度	088
5.1.2	芯片焊接接头 X 射线检测	089
5.1.3	芯片焊接接头截面形貌	089
5.2	焊接温度对芯片焊接接头的影响	091
5.2.1	芯片焊接接头表面及截面形貌	092
5.2.2	芯片焊接接头物相组成	093
5.2.3	芯片焊接接头微观组织结构	096
5.3	焊片与芯片面积比对芯片焊接接头的影响	100
5.3.1	芯片焊接接头表面及截面形貌	101

5.3.2	芯片焊接接头物相组成	102
5.3.3	芯片焊接接头微观组织结构	102
5.4	小结	106

第 6 章 2CK6642UB 封帽焊接及分析 / 107

6.1	正交试验设计与初步分析	108
6.1.1	封帽焊接水汽含量	109
6.1.2	封帽焊接样品 X 射线检测	110
6.1.3	封帽焊接接头截面形貌	110
6.2	焊接温度对封帽焊接接头的影响	113
6.2.1	封帽焊接接头表面及截面形貌	113
6.2.2	封帽焊接接头物相组成	115
6.2.3	封帽焊接接头微观组织结构	120
6.3	超小 CLCC-3 (UB) 封帽焊接检验	126
6.3.1	超小 CLCC-3 (UB) 封帽焊接气密性检验	126
6.3.2	超小 CLCC-3 (UB) 封帽焊接内部水汽含量检测	128
6.4	小结	129

第 7 章 2CK6642UB 型硅开关二极管的可靠性考核 / 131

7.1	功能性能分析	132
7.1.1	测试覆盖性分析	132
7.1.2	测试结果及产品对比	135
7.2	极限试验	147
7.2.1	步进功率极限试验	147
7.2.2	耐反向电压能力试验	148
7.2.3	交变温度应力极限试验	148
7.2.4	热冲击极限试验	148

7.2.5 随机扫频振动极限试验 149

7.3 寿命考核强化试验 149

7.4 失效情况 150

7.5 小结 150

参考文献 / 152

第 1 章

概 述

随着现代电子技术的快速发展,电子产品向小型化、便携化、多功能方向发展。电子产品的封装正在与电子产品的设计、制造一起共同推进电子信息化社会的发展。电子产品的封装材料应具备如下性能:热导率高,介电常数低,与半导体器件、硅片等的热胀系数匹配,密度低,机械强度高,加工性能优良等。电子封装材料基片基本分为塑料封装、金属封装、陶瓷封装和金属陶瓷封装。金属陶瓷封装作为一种气密性封装,热导率较高,是一种可靠性高的封装方式,常用于航天、航空等高可靠性场合。超小金属陶瓷表面贴装器件产品因其反向漏电流小、反向恢复时间短、体积小、重量轻等特点,在航空航天领域具有广泛的应用。

为实现 CLCC-3 (UB) (Ceramic Leaded Chip Carrier, UB 为无引线 B 型产品) 等金属陶瓷封装器件国产化自主制备,本书采用热扩散的方法向高纯硅片掺杂磷和硼,制备了 N 型 Si 及 P 型 Si,形成了 PN 结,用以制备 2CK6642UB 芯片。研究了磷扩散、硼扩散等工序的作用机理及对芯片质量的影响,研究了磷扩散均匀性及硼扩散工艺过程中温度、扩散时间等参数对硅片扩散层组织结构、扩散浓度深度关系以及方块电阻阻值的影响。采用共晶焊接技术,使用 AuGa0.03 焊料将 2CK6642UB 芯片与 CLCC-3 (UB) 底座进行了连接,并使用 AuSn20 焊料将 CLCC-3 (UB) 底座与封装盖板进行了连接,研究了温度、芯片与焊料尺寸的比例、时间、压力等工艺参数对芯片焊接接头微观组织结构与剪切性能的影响,分析了焊接接头中物相组成及其形成机理,并研究了超小 CLCC-3 (UB) 金属陶瓷器件封帽

焊接的工艺过程中的温度、氮气流量、时间、压力等工艺参数对封帽焊接接头微观组织结构与气密性的影响，分析了盖板焊接接头中物相组成及其形成机理，对超小 2CK6642UB 型开关二极管器件进行了可靠性考核。

扩散温度、氮气与氧气的混合气体配比及石英舟位置对磷扩散均匀性的影响较大。在 700~800℃ 范围内，随着扩散温度的提高，硅片表面均匀性也得到了提高；在 750℃ 扩散温度下，磷扩散均匀性的变化规律基本呈现先提高后降低的趋势，非载流氮气流量为 2.8~3.4L/min 时，硅片表面磷扩散最为均匀；在 750℃ 扩散温度下，非载流氮气流量为 2L/min，载流氮气为 0.8L/min，氧气为 0.65L/min 时，磷扩散均匀性的变化规律为石英舟越靠近气体入口，硅片磷扩散的均匀性越差，越靠近气体出口，硅片磷扩散的均匀性越好。

扩散温度较扩散时间对硼掺杂的影响更大。随着扩散温度的升高，B 的扩散深度与相应的浓度也随之增加；随着扩散时间的加长，扩散深度趋于某个极限值，而相应的 B 浓度随之变大。硅片表面的方块电阻阻值基本呈现出扩散温度越高，方块电阻阻值越小；扩散时间越长，方块电阻阻值越小的趋势。随着扩散温度的升高，扩散均匀性也得到提升。热扩散后，B 原子进入 Si 的晶格结构中，置换了 Si 原子，因 B 原子在 Si 中的失配因子较大，发生晶格畸变，使 Si 的晶格常数变小，并且造成较大应力，原子发生重新排列，B 原子以四方晶系的方式聚集结晶。

温度对芯片焊接接头剪切强度的影响最大。最佳工艺参数为焊接温度 400℃，焊片与芯片面积比为 1.2，焊接时间 15s，所施压力 20g^①，此时芯片焊接强度最好。改变焊接温度、焊片与芯片面积比等工艺参数均不改变接头的物相组成，焊接过程中发生 Au-Si 共晶反应，接头组织均为 Au+Si 的共晶组织，无 Au₇Si、Au₅Si、Au₃Si 等亚稳定相的存留，有利于稳定，可提高接头强度。在相同工艺条件下，焊接温度为 360℃ 及 380℃ 时，焊料熔化不够充分，组织中存在较多、较大的沟道式孔洞，力学性能较差；焊接温度为 400℃ 及 420℃ 时，焊料充分熔化润湿芯片，接头中弥散分布蜂窝状细小孔洞；焊接温度为 440℃ 时，焊料迅速熔化流失，不能形成良好的连接，并开始出现很多较大的孔洞。

温度对盖板焊接气密性的影响最大。最佳工艺参数为焊接温度 320℃，氮气流量 10L/min，焊接时间 120s，所施压力 120g，此时焊接效果最好，气密性最好。随着焊接温度的提高，封

① g 是质量单位，本书为与仪表显示一致采用这种表示方法，1kgf=9.8N。

帽焊接所用的 AuSn₂₀ 焊料原有的 Au、Sn、AuSn、Au₅Sn、AuSn₄ 以及 AuSn₂ 等物相中 Sn、AuSn₄、AuSn₂ 相继反应消耗殆尽, 最终仅剩脆性六方晶格 ζ' -Au₅Sn 与 δ -AuSn 的共晶相。焊缝与 Au/Ni 镀层界面, Ni 进入 Au₅Sn 与 AuSn 中形成 (Au, Ni)₅Sn 和 (Au, Ni)Sn, Au 进入 Ni₃Si₂ 相的晶格中取代部分 Ni 原子形成 (Ni, Au)₃Si₂ 三元化合物。超小 LCC-3 (UB) 封帽焊接器件在极限工作温度 175℃ 下储存, Ni 的扩散速度加快, 焊接接头界面反应加速, (Ni, Au)₃Sn₂ 层的厚度随工作时间延长而增大, 而 (Au, Ni)Sn 厚度逐渐减小。金属间化合物颗粒长大速度加快, 部分颗粒聚集长大为粗短棒状, 储存 340h 后, 金属间化合物三维生长, 晶粒增大, 且能满足生产要求的气密性规定。

超小 2CK6642UB 型开关二极管的可靠性考核。功能分析后, 国产器件在不同温度条件、相同电流条件下, 正向电压略大于进口器件; 在同样击穿电压条件下, 反向漏电流较进口器件小; 国产器件在起始较短加热时间条件下的热阻比进口器件的小, 其他测试参数数据水平相当。极限评价后, 其中步进功率试验和耐反向电压能力, 器件的余量分别能够达到规范值的 2 倍和 8 倍; 另外, 交变温度应力极限试验、热冲击极限试验和随机扫频极限试验器件的密封和参数均合格, 满足要求。寿命考核加强试验后, 包括 2000h 后继续追加 2000h, 并另取 22 只一起做寿命考核强化试验, 器件的密封和参数均合格, 满足要求。

1.1 超小 CLCC (UB) 金属陶瓷管壳

近年来, 航空、航天、电子等多个工业领域对超小体积表面贴装器件配套的需求快速增加, 大量采用进口产品, 迫切需要建立超小体积表面贴装器件相应的技术研发平台。超小体积表面贴装产品代表了小功率器件技术发展的方向, 获得了广泛的应用, 国家重点工程已经开始设计使用该类器件。

超小体积表面贴装晶体管体积小, 安装方便, 热阻小, 漏电流小, 温度特性好, 开关速度快, 适合放大、开关及高频应用^[1]。目前, 传统 A3-01B (B1) 与 A3-02B (B4)^[2] 型封装晶体管产品在航天、航空等领域上已大量使用。未来, 随着国产化及整机小型化要

求，超小体积表面贴装产品也将会得到更广泛应用。根据市场调研，在放大开关等电路中，为了减小整机重量和体积，采用的分立器件体积越来越小，对器件的长期可靠性提出了更高的要求^[3~5]。

CLCC-3 (UB) 表面贴金属陶瓷封装产品的可靠性高，应用需求大。在新型号产品设计中，应用超小 CLCC-3 (UB) 元器件可减轻重量和减小体积，并发挥表面贴封装器件的独特优势，在各种新型号整机上表现出良好的性能。

金属陶瓷封装中最小的 CLCC-3 (UB) 金属陶瓷封装外形，在功率相同或相近的情况下，其重量相当于有引线金属封装（如 A3-01B 型封装）元器件的 1/10，安装体积也仅为有引线金属封装器件的 1/10。超小体积 CLCC-3 (UB) 表面贴装器件由于在底面及侧面均存在焊接槽，因此既适用于规模化生产的自动焊接，也适用于手工焊接。

玻璃封装产品玻壳容易产生裂纹甚至断裂，这有导致器件失效的隐患，航天系统已在 2012 年规定航天飞行器中严禁使用玻璃封装的元器件。而超小 CLCC-3 (UB) 金属陶瓷表面贴封装与 DO-213AB (MELF)^[2] 玻璃封装器件重量和体积相当，线路板焊及刷三防涂料后不易产生裂纹，是很好的替代品。

CLCC-3 (UB) 金属陶瓷的尺寸如图 1.1 所示。CLCC-3 (UB)、A3-02B 与 A3-01B 外形对比如图 1.2 所示。CLCC-3 (UB)、SOT-23 与 MELF 外形对比如图 1.3 所示。

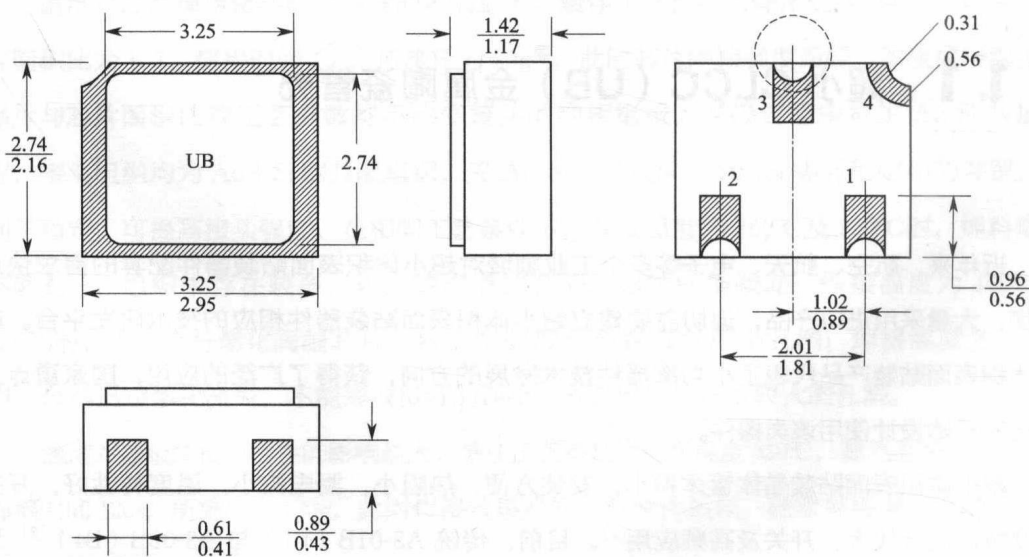


图 1.1 CLCC-3 (UB) 金属陶瓷的尺寸^[6]

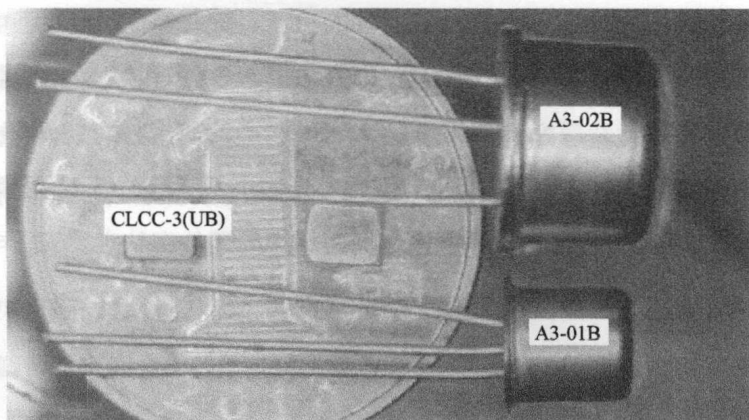


图 1.2 CLCC-3 (UB)、A3-02B 与 A3-01B 外形对比

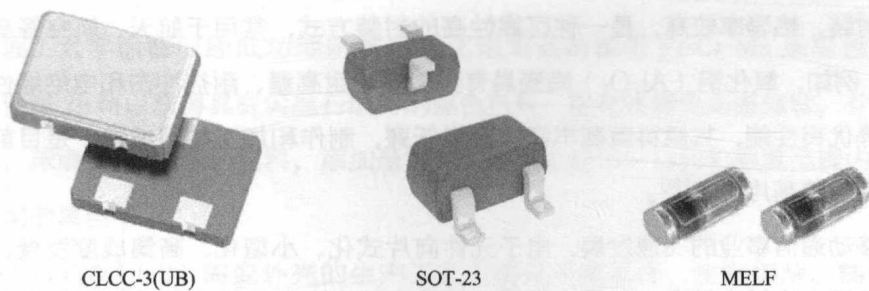


图 1.3 CLCC-3 (UB)、SOT-23 与 MELF 外形对比

CLCC-3 (UB) 与 A3-01B、A3-02B、MELF 及 SOT-23 等相类似封装的质量和体积对比如表 1.1 所示。

表 1.1 CLCC-3 (UB) 与 A3-02B 等相类似封装的质量和体积对比

封装形式	质量/g	体积/mm ³
CLCC-3(UB)	0.04	13
A3-01B	0.34	142
A3-02B	1.13	491
MELF	0.033	24.5
SOT-23	0.008	6.8

本书针对超小 CLCC-3 (UB) 金属陶瓷器件的设计, 研究芯片制备过程中磷扩散、硼扩散等工序的作用机理及对芯片质量的影响, 探索各工艺参数对芯片焊接机封帽焊接接头组织结构及性能的影响, 并探究其作用机制。通过本书的研究, 有望阐释超小 CLCC-3 (UB) 金属陶瓷器件研究中一些基本的科学问题, 为超小 CLCC-3 (UB) 金属陶瓷的生产制备提供一定的参考价值, 同时也为超小体积表面贴装元器件在航空航天、电子领域的应用奠定基础。

1.1.1 超小 CLCC-3 (UB) 金属陶瓷基片技术研究进展

电子封装材料基片大致可分为塑料封装、金属封装和陶瓷封装。其中陶瓷封装作为一种气密性封装, 热导率较高, 是一种可靠性高的封装方式, 常用于航天、航空等高可靠性场合^[7~9]。例如, 氧化铝 (Al_2O_3) 陶瓷具有强度高、耐高温、耐热冲击和电绝缘性及耐腐蚀能力强等优良性能, 其原料蕴藏丰富, 价格低廉, 制作和加工技术成熟, 是目前应用最广泛的陶瓷封装基片材料^[10]。

随着移动通信事业的飞速发展, 电子元件向片式化、小型化、高集成度发展, 对集成电路的封装要求也越来越高, 需要大批量、低成本地生产具有遮光特性的黑色陶瓷封装基板^[11]。例如采用黑色 Al_2O_3 陶瓷封装的晶体振荡器可使体积缩小到原来的 $1/100 \sim 1/30$ ^[12], 但目前该产品还大量依靠进口, 中国还无法生产, 主要是封装陶瓷基座的问题无法解决。由于涉及材料配方和生产工艺, 关于黑色陶瓷的制备报道较少。黑色陶瓷烧结温度高, 无法满足实际生产的需要, 许多黑色陶瓷封装的电子产品还依赖于进口^[13]。

与传统的陶瓷成形方法相比较, 流延法是一种比较新的技术, 也是一种在高技术陶瓷制造中被广泛接受的高精度方法^[14~16]。其发展速度也较快, 由原来单一的非水基流延, 到现在的水基流延以及由此发展起来的一系列新的工艺。该方法于 1947 年被 Howatt 等首次用来生产陶瓷片层电容器, 并于 1952 年取得专利^[17]。该方法的特点是:

- ① 设备简单, 生产效率高, 可连续操作, 自动化水平高;
- ② 坯体致密, 膜片弹性好, 致密度高;
- ③ 工艺稳定;

④ 生产的膜片厚度范围较宽且可控。

陶瓷基片流延技术从 20 世纪 60 年代至今已经得到了广泛应用，日本、德国、美国等国家相继推出叠片多层陶瓷基片及封装材料和工艺^[18~21]。其中针对超小的 CLCC-3 (UB) 金属陶瓷管壳，Nikko、Kyocera、Ceramtec 等公司已经掌握了核心制造技术^[22~24]。中国自 2000 年起，开始使用陶瓷基片制造的金属陶瓷管壳，每年的需求量呈直线上升趋势^[25~27]。目前中国的金属外壳厂家（如福建闽航电子有限公司、青岛凯瑞电子有限公司、江苏宜兴电子器件总厂等）也在逐步研发类似产品。

1.1.2 超小 CLCC-3 (UB) 金属陶瓷研究现状

西安理工大学徐雷已经成功地研制出氧化铝陶瓷基板用 Fe-Cr-Mn 系黑色色料，在 1250℃ 下保温 2h 可以获得具有尖晶石结构的黑色色料，能有效避免高温挥发，并呈现出良好的色泽，球磨 4h 后的黑色色料，添加量为 5% 时，在 1310~1330℃ 温度范围内烧结，可呈现出均匀的黑色^[28]。

国内 CLCC-3 (UB) 陶瓷外壳的生产工艺主要采用流延法，生瓷切割、熟瓷分离工艺，部分采用熟瓷切割工艺^[29]，CLCC-3 (UB) 金属管壳工艺流程如图 1.4 所示^[30]。

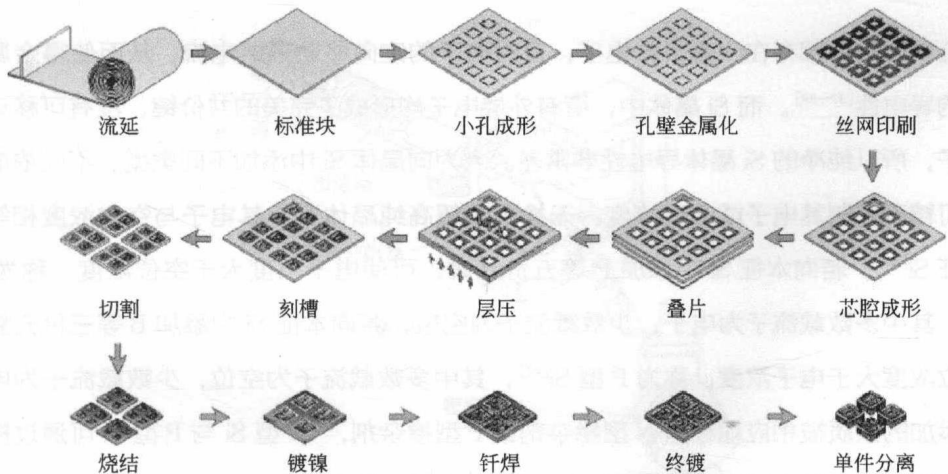


图 1.4 CLCC-3 (UB) 金属管壳工艺流程^[30]

目前, 福建闽航电子有限公司与江苏宜兴器件总厂共同承接超小 CLCC-3 (UB) 系列科研项目, 采用生瓷切割、熟瓷掰断工艺, 其生瓷阶段工艺路线与 NTK 相似, 采用生瓷预布电镀工艺线, 层压后根据导镀线位置进行预切割, 经烧结、电镀后, 熟瓷进行分离, 在分离过程中, 设计专用工装, 保证其瓷体外形尺寸一致性^[31~33]。中国电子科技集团公司第 55 研究所承研的声表类 CLCC 陶瓷外壳同样采用熟瓷分离工艺, 在生瓷加工过程中预设电镀线路, 进行大板的烧结装配。通过刻槽降低产品的分离接触面面积, 达到减少断面不平整的潜在隐患^[34, 35]。江苏宜兴器件总厂、中国电子科技集团公司第 13 研究所均具备了熟瓷分离的工艺线^[36]。掰断面的平整度是关乎产品尺寸一致性的最主要问题, 如何改善掰断面平整度, 提高产品尺寸一致性, 满足后道自动化需求仍需要进一步进行攻关。

1.2 开关二极管芯片

1.2.1 开关二极管晶体硅的掺杂

金属因其内部存在大量自由电子, 自由电子的定向移动形成电流, 从而使得金属具有良好的导电性^[37~39]。而 Si 晶体中, 所有外层电子均形成了完美的共价键, 没有可移动的自由电子, 所以纯净的 Si 晶体导电性非常差。人为向晶体 Si 中添加不同类型、不同浓度的杂质, 可精确控制其电子或空位浓度。无掺杂的超高纯晶体 Si, 其电子与空穴浓度相等, 称为本征 Si^[40]。若向本征 Si 中添加 P 等五价元素, 可使电子浓度大于空位浓度, 称为 N 型 Si^[41], 其中多数载流子为电子, 少数载流子为空位。若向本征 Si 中添加 B 等三价元素, 可使空位浓度大于电子浓度, 称为 P 型 Si^[42], 其中多数载流子为空位, 少数载流子为电子。这些添加的杂质被相应地称为 N 型掺杂剂或 P 型掺杂剂, N 型 Si 与 P 型 Si 可通过控制杂质的掺杂浓度对其电导率进行调控, 如式 (1-1)^[43] 所示。

$$\sigma = ne\mu \quad (1-1)$$