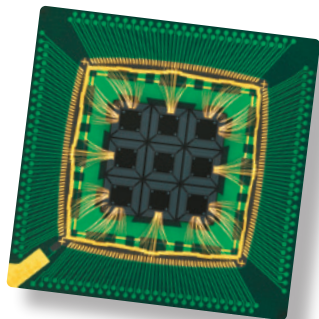




微电子 金相制备

Struers
Ensuring Certainty

Application Notes

在过去 25 年间,电子设备的开发和生产技术实现了持续快速的发展。以前,电子设备和消费品庞大而笨重,其中包含的元件单独连线到大型印刷电路板上。如今,电子设备的便携性推动着微型化发展,随着计算机、手机和相机的大小减小,这些设备也获得了大量功能。微电子技术的发展使得元件微型化成为可能,微电子技术的核心是集成电路 (IC)。IC 大大减少了对作为电子电路基本组成部分的单个电子元件 (电阻器、电容器、晶体管等) 的需求。与有线电路相比,IC 的优势在于尺寸和重量限制减少、可靠性提高、成本降低以及电路性能提升。

集成电路是在一小片半导体材料 (通常是硅) 上将完整电子电路的有源元件

(如晶体管和二极管等) 和无源元件 (如电阻器和电容器) 组合 (集成) 在一起的设备 (图 1 和图 2)。这种设备被称为芯片。芯片将众多晶体管、电容器和其他电子元件的功能相结合,这些元件相互连接以执行复杂电路的任务。相互连接芯片的设计和制造被称为封装 (见下文)。这些芯片组件镶嵌在插入电子单元的印刷电路板上 (图 3)。

元件均为批量生产,因此质量控制通常限于热循环测试,以检测故障零件。然而,要对芯片组件进行开发、设计和失效分析,需要元件的金相横截面,以检查微通孔、裂缝、空洞、焊球、导电层和连接等。金相学也用于不同阶段的生产点检。由于这些元件非常小,因此需要特殊的制备方法和设备以确保获得制备和观察这些金相样品所需的精度。

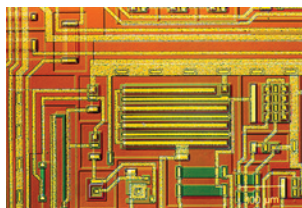


图 1: 中心处具备导电引线、晶体管、电阻器、通孔和电容器的线性集成电路的细节

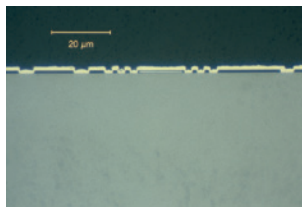
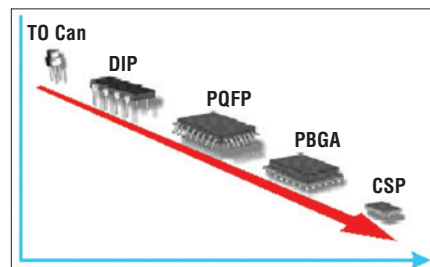


图 2: 具有 IC 导电引线的硅晶圆的横截面



IC 封装进化。图片提供: Tessera

金相制备过程中的难点

制备用于金相检验的微电子元件的主要难点在于样品几何形体较小。IC 微小而复杂,在制备方面面临极大挑战。在制备过程中需要考虑三维因素,并且需要时间、精度和耐心才能得到具有代表性的结果。下面是制备过程中的一些常见难点:

切割: 晶圆、玻璃、陶瓷出现破裂和裂缝

镶样: 机械变形和热损坏

研磨: 玻璃纤维或陶瓷等脆性成分断裂 (图 4)。

抛光: 软金属层拖尾。由于元件中材料硬度不同而导致起伏 (图 5)。焊料中剩余的碳化硅和金刚石颗粒 (图 6)。

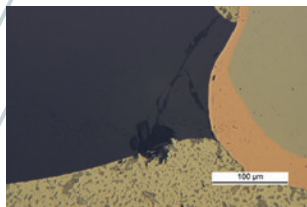


图 4: 粗磨碳化硅箔/砂纸导致玻璃二极管中出现裂缝和断裂

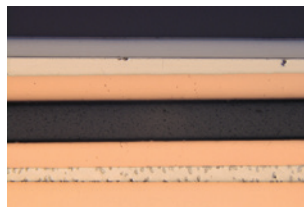


图 5: 由于材料硬度不同而打造抛光过程中出现起伏

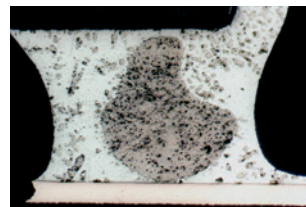


图 6: 焊料中的金刚石颗粒

解决方案:

使用特殊工具和自动化设备快速切割、研磨和抛光至目标。

使用冷镶嵌。

使用金刚石在刚性研磨盘上精磨并在硬抛光布上抛光。

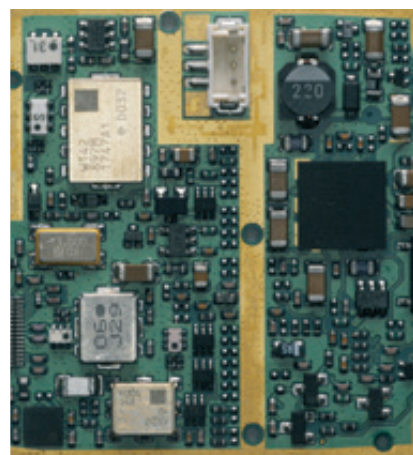


图 3: 镶嵌在印刷电路板上的元件

微电子的生产工艺和应用

芯片组件的生产是非常复杂的流程，涉及不同的专业制造商，从新元件构思到实现最终产品，各个步骤之间环环相扣。下文简要介绍了芯片组件的基本生产步骤：

设计

如果电子设备制造商决定制造一款新产品，则将需要微电子元件来提供所需的设备功能和特性。新元件制造包括芯片设计，芯片设计的一部分包括封装设计选择。制造商可自行设计元件，也可外包给专业设计公司或芯片制造商。

原型制作

通常将制造和测试大量原型，以检查新元件是否具备所需特性。在该阶段，金相学起到重要作用，因为必须从金相学的角度处理和评估大量横截面。这些金相调查只能由设备制造商、芯片制造商和/或封装公司执行。

芯片生产

芯片代工厂或“制造厂”根据芯片设计进行制造。芯片的基材是由单晶（通常是硅）切割而成的晶圆。

封装

芯片必须相互连接并组装才能正常工作。这些相互连接的设计与制造被称为“封装”。在制造流程结束时，使用塑料或陶瓷覆盖相互连接以及接线、焊球、导电层。晶圆被切割成单独的晶片并以不同方式封装（图 7）。有两种主要的相互连接技术：打线和球栅阵列（BGA）。要获得极致紧凑度，可以采用倒装芯片技术，即在芯片和 PCB 之间直接相连。

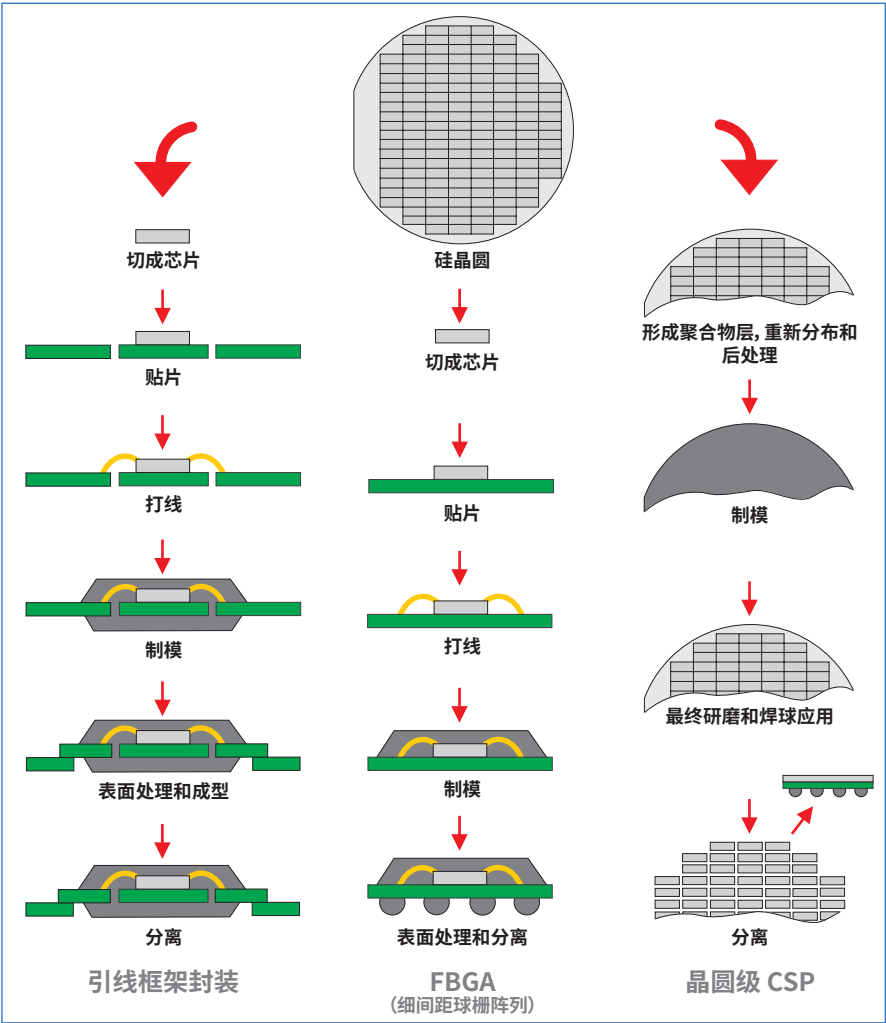


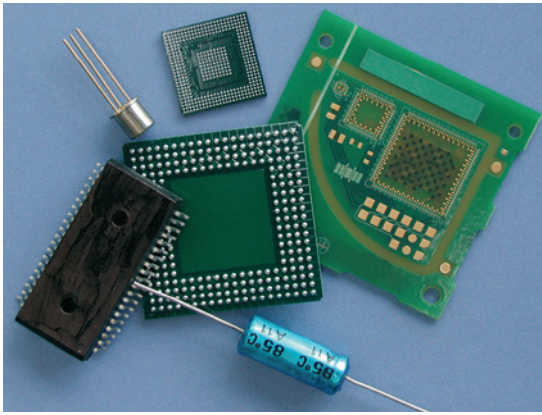
图 7: 不同芯片封装方法

测试

在制造流程的此阶段，通过热循环进行批量质量控制。这是挑出故障元件的最终测试。

应用

微电子广泛应用于多种产品，例如通信、数据处理和消费品。例如，一辆汽车可能包含多达 150 部计算机。然而，微电子正越来越多地用于非传统应用领域，新应用不断增加，包括在超市使用每个产品上的超薄柔性芯片自动扫描货物。



各种微电子元件



新应用不断增多，包括在超市中使用每个产品上的超薄柔性芯片自动扫描货物

微电子制备过程中的难点

对于给定样品，金相检验的其中一个主要要求是查看封装内的特定区域。“边磨边看”直至目标出现并且准备好抛光，这种手动方法十分耗时。在研究或失效分析中，错过目标通常意味着失去独特和/或成本高昂的样品。

在微电子元件中，具有不同特性的各种材料被封装在一起：玻璃、陶瓷、金属和聚合物(图 8)。这些材料的不同组合需要进行制备，以展示这些材料的个体特性，但不引入任何人为因素，例如金属和聚合物拖尾或者玻璃或陶瓷损坏。这一点尤其重要，因为微电子调查包括不同类型的评估，在这些评估中，制备时引入的人为因素可导致结论错误。执行下列检查中的一些：

空洞、夹杂和裂缝等缺陷的大小和分布(图 9)。
材料及其交界面的结合与附着。
封装中不同零件的尺寸和形状：层厚、接线、弯月形焊点。
陶瓷中的孔隙率和裂缝。
平整度和边缘保护尤其重要，因为不同材料之间的非常薄的层通常必须在高放大倍率下进行检验(图 10 a 和 10 b)。

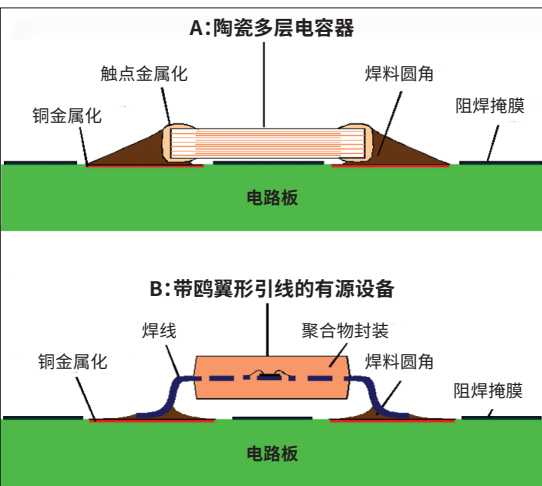


图 8: 微电子元件材料成分的示例

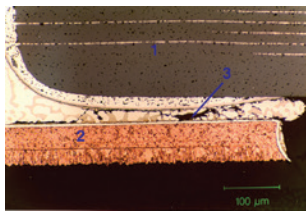
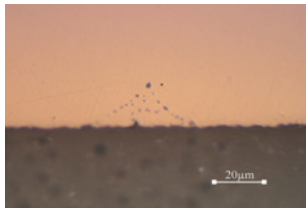
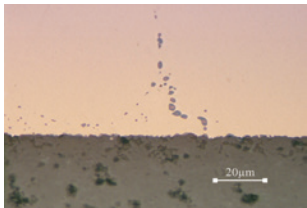


图 9: 焊接到电路板铜金属化(2)上的多层电容器(1)。疲劳裂缝(3)穿过焊料连续扩散



10 a



10 b

图 10 a 和图 10 b: 在高放大倍率下，含铜的陶瓷显示出平整度差异：
a) 使用碳化硅箔/砂纸进行初始精磨 b) 使用金刚石在 MD-Largo 精磨盘上进行初始精磨

建议

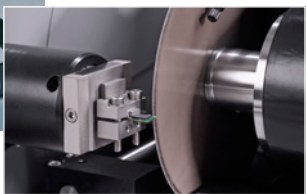
微电子的大部分金相调查在横截面上执行，并且提及的过程是针对横截面的。然而，一些特殊调查可能需要平行截面，对于这种情况，大部分建议也适用。

如上所述，微电子元件横截面的其中一个主要目标是展示元件中的特定目标区域。在切割和研磨过程中，应非常谨慎地去除材料。对于这两个过程，可使用多种技巧，下文描述了一些手动、半自动和自动方法。自动化程度越高，击中目标的成功率越大。

切割: 根据需调查的样品类型，可以在各种精度的切割机上进行切割。例如，手机或安装有各种元件的电路板可使用中型机器进行横切，操作员像在 Secotom 上一样手动推动设备通过切割轮。建议使用用于切割塑料的电镀金刚石磨轮 (E1D20) 或树脂粘结金刚石磨轮 (B0D20)。如果待切割的元件较大，则可使用 Secotom (此时使用相同类型的切割轮，但尺寸可为直径 20 mm 或 15 mm 以便进行精细切割)。对于切开的单个微小或脆性元件，建议使用 Accutom (可使用较小的切割轮)。要将零件或元件保持在一起以避免机



Secotom



Accutom

械损坏，可能需要在切割前进行镶样，具体取决于元件或组件的尺寸或脆性。

在任何情况下，切割应当放置在距离要观测的实际区域足够远的地方，以避免可能对其造成任何直接损坏。在切片之后可以仔细地研磨剩余的材料。该初始步骤需更仔细地执行，这样陶瓷、芯片和玻璃中出现裂缝或者各层或焊点之间出现层离的可能性就越低。

镶样: 基于其成分以及脆性，微电子部件不适于热压缩镶嵌，因此需要持续进行冷镶嵌。不建议使用产生高固化温度的冷镶嵌树脂，因为热量可能影响焊料和聚合物，并且树脂的高收缩率可能导致硅晶圆出现裂缝。安装方法取决于所用的分析方法。对于针对光学显微镜的常规镶嵌，使用透明的环氧树脂 (ProntoFix、EpoFix)。如果必须填充空洞和孔洞，建议进行真空浸渍。在光学显微镜下使用长通蓝色和短通橙色滤光器时，将荧光染料 (Epo-Dye) 与环氧树脂混合使得空洞和裂缝呈现良好的反差。对于非常小的通孔，建议使用易于流动到孔洞中、粘性低的透明树脂。使用 Struers TargetSystem 时，元件可直接镶嵌在用于目标制备的特殊样品支架上。

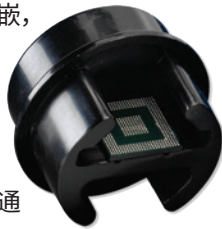


表 1
微电子元件的制备方法，
已镶嵌，直径 30 mm

研磨和抛光

对于平行截面和横截面,可使用手动、半自动或全自动研磨和抛光方法,具体取决于元件尺寸和待制备的样品数量。一般情况下,应避免使用粗磨料进行粗磨,因为这可能损坏脆性材料并导致软金属严重变形(参见图 4)。要获得出色的平整度,建议使用金刚石在刚性研磨盘 (MD-Largo) 上精磨,而不是在碳化硅箔/砂纸上研磨。之后,在丝绸上进行金刚石抛光可很好地保持平整度。如果软金属中镶嵌有磨料颗粒,则需要延长金刚石抛光时间,直至颗粒被去除。使用硅胶 (OP-U 不干型悬浮液) 进行最终抛光时,应尽量快速,以免出现起伏。

手动和半自动目标制备

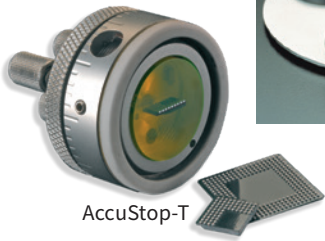
对于非封装晶圆和封装品的手动制备,使用手动“边磨边看”方法时,Tripod 工具非常有用。对于此方法,颗粒大小为 30 μm 至 0.05 μm 的磨料膜镶嵌在玻璃板上,并且对样品进行了手动研磨和抛光。

对于手动和半自动控制的材料去除以及使用碳化硅箔/砂纸进行的目标制备,AccuStop 和 AccuStop-T 是适用于镶嵌和未镶嵌微电子元件的专用样品夹具座。AccuStop-T 具有倾斜功能,可以对准目标,例如一行焊球,以使其能够全部同时研磨至同一平面。

Tripod



样品夹具座板上的 AccuStop



研磨

靠近目标使用 AccuStop 在碳化硅箔/砂纸 #320、#500 和 #1000 上进行手动或半自动研磨之后,将样品插入自动机器,使用金刚石进行精磨和抛光。

步骤		FG		
	表面	MD-Largo		
	磨料	类型	金刚石	
		规格	9 μm	
	悬浮液/润滑剂	DiaPro Allegro/ Largo 9		
	转速	150		
	力 [N]/试样	30		
	时间(分钟)	4		
抛光				
步骤		DP 1	DP 2	OP*
	表面	MD-Dac	MD-Nap	MD-Chem
	磨料	类型	金刚石	二氧化硅
		规格	3 μm	1 μm
	悬浮液/润滑剂	DiaPro Dac 3	DiaPro Nap R 1	OP-U 不干型悬浮液/ OP-S 不干型悬浮液
	转速	150	150	150
	力 [N]/试样	20	20	15
	时间(分钟)	3	1	0.5
* 可选步骤				

当若干个试样经过手动研磨或使用 AccuStop 以半自动方法研磨至目标之前约 50 μm 后,从 AccuStop 中取下试样并传送到半自动机器,作为单个样品进行精磨和抛光。表 1 示出了单个样品在 Tegramin 上进行半自动精磨和抛光的制备方法。



TargetSystem

自动目标制备

对于自动控制的材料去除和制备,Struers TargetSystem 在制备之前对准并测量样品。针对可见目标和隐藏目标,可对已镶嵌和未镶嵌样品的横截面及平行截面进行研磨和抛光。激光测量系统确保达到 ±5 μm 的精度,去除速率在制备过程中自动重新计算。



图 11:用于定位和测试可见目标的 Target-Z 视频

研磨

步骤		PG	FG	
	表面	金刚石垫	MD-Sat	
	磨料	类型	SiC	金刚石
		规格	#320	9 μm
	悬浮液/润滑剂	水	DiaPro Allegro/Largo 9	
	转速	300	150	
	力 [N]/试样	35	40	
	去除 (μm) 时间 (分钟)	通过系统计算	20 μm	

抛光

步骤		DP 1	DP 2	OP*
	表面	MD-Dac	MD-Nap	MD-Chem
	磨料	类型	金刚石	二氧化硅
		规格	3 μm	1 μm
	悬浮液/润滑剂	DiaPro Dac 3	DiaPro Nap R 1	OP-U 不干型悬浮液/ OP-S 不干型悬浮液
	转速	150	150	150
	力 [N]/试样	25	20	10
	去除 (μm) 时间 (分钟)	15 μm	1	0.5

* 可选步骤

对于具有可见目标的样品,可基于视频进行对准和测量(图 11 和 13);而对于具有隐藏目标的样品,可基于 X 射线进行对准和测量(图 12)。TargetSystem 随后将预先计算要去除的材料数,并在最终目标平面之前约 35 μm 处自动停止粗磨步骤。

精磨步骤使样品到达目标之前约 15 μm,两个抛光步骤则去除试样预定义目标平面的剩余材料(图 14)。总制备过程(包括切割)耗时 45-60 分钟。表 2 示出了微电子元件自动目标制备的数据。

蚀刻

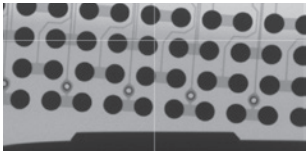


图 12: X-射线显示具有隐藏目标的样品

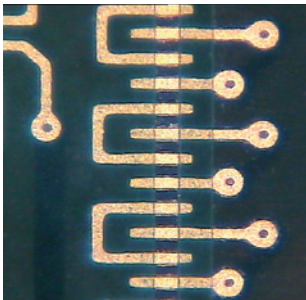


图 13: 视频显示具有可见目标的样品

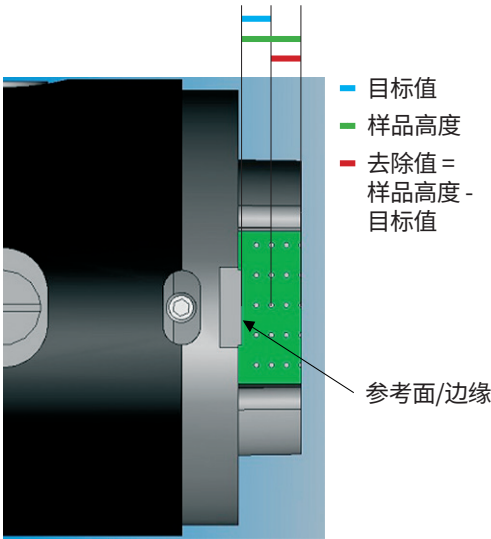


图 14: 装有样品的夹具座指示自动测量和计算的距离

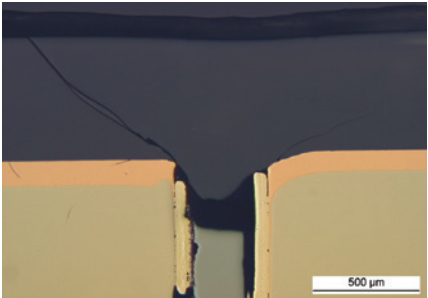
表 2:
微电子元件目标制备的制备方法

元件中不同材料的反射光之间的差异通常提供足够的对比,因而不需要进行蚀刻。使用硅胶进行最终抛光导致焊料和铜被轻微侵蚀,尤其是在使用 OP-S 不干型悬浮液(而非侵蚀性较小的 OP-U 不干型悬浮液)执行最终抛光步骤时。
在 OP-S 不干型悬浮液中添加少量过氧化氢 (3%) 将增强这种侵蚀效果,以至于能够看到结构。如果 OP-S 不干型悬浮液抛光步骤的时间超过 30 秒,则很快将发生过度蚀刻。建议在 30 秒后检查样品并根据需要逐渐延长抛光时间。

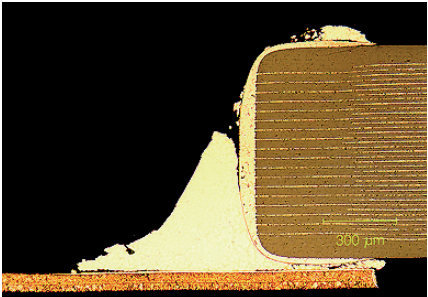
适用于铜和铜合金的蚀刻剂:
25 ml 水
25 ml 氢氧化铵
0.5 -10 ml 过氧化氢 (3%)

使用不同照明方法也可增强结构对比。暗场有助于找到陶瓷中的裂缝;微分干涉对比和偏振光也能够提高对比或增强特定材料结构的颜色,并且可实现更好的结构解释。

微电子元件典型微观结构的示例



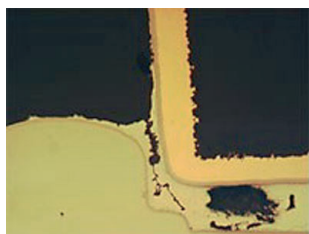
检测二极管中的裂缝



老化陶瓷多层电容器的截面,焊接连接中出现疲劳裂缝



电镀通孔焊接中的大空洞。50 倍



电镀通孔焊接中的空洞和裂缝。200 倍

Struers ApS

Pederstrupvej 84
DK-2750 Ballerup, Denmark
Phone +45 44 600 800
Fax +45 44 600 801
struers@struers.dk
www.struers.com

NETHERLANDS

Struers GmbH Nederland
Zomerdijk 34 A
3143 CT Maassluis
Tel.: +31 (10) 599 7209
Fax: +31 (10) 599 7201
netherlands@struers.de

NORWAY

Struers ApS, Norge
Sjøskeggenveien 44C
1407 Vinterbro
Tel.: +47 970 94 285
info@struers.no

AUSTRIA

Struers GmbH
Zweigniederlassung Österreich
Betriebsgebiet Puch Nord 7
5412 Puch
Tel.: +43 6245 70567
austria@struers.de

POLAND

Struers Sp. z o.o.
Oddział w Polsce
ul. Jasnogórska 44
31-358 Kraków
Tel.: +48 12 661 20 60
Fax: +48 12 626 01 46
poland@struers.de

ROMANIA

Struers GmbH, Sucursala Bucuresti
Str. Preciziei nr. 6R
062203 sector 6, Bucuresti
Tel.: +40 (31) 101 9548
Fax: +40 (31) 101 9549
romania@struers.de

SWITZERLAND

Struers GmbH
Zweigniederlassung Schweiz
Weissenbrunnstrasse 41
CH-8903 Birmsdorf
Tel.: +41 44 777 63 07
Fax: +41 44 777 63 09
switzerland@struers.de

SINGAPORE

Struers Singapore
627A Aljunied Road,
#07-08 BizTech Centre
Singapore 389842
Tel.: +65 6299 2268
Fax: +65 6299 2661
struers.sg@struers.dk

SPAIN

Struers España
Camino Cerro de los Gamos 1
Building 1 - Pozuelo de Alarcón
CP 28224 Madrid
Tel.: +34 917 901 204
Fax: +34 917 901 112
struers.es@struers.es

FINLAND

Struers ApS Suomi
Sahaajankatu 20-22 A6
00880 Helsinki
Tel.: +358 (0)207 919 430
finland@struers.fi

SWEDEN

Struers Sverige
Box 20038
161 02 Bromma
Tel.: +46 (0)8 447 53 90
Fax: +46 (0)8 447 53 99
info@struers.se

UNITED KINGDOM

Struers Ltd.
Unit 11 Evolution @ AMP
Whittle Way, Catcliffe
Rotherham S60 5BL
Tel.: +44 0845 604 6664
Fax: +44 0845 604 6651
info@struers.co.uk

USA

Struers Inc.
24766 Detroit Road
Westlake, OH 44145-1598
Tel.: +1 440 871 0071
Fax: +1 440 871 8188
info@struers.com

AUSTRALIA & NEW ZEALAND

Struers Australia
27 Mayneview Street
Milton QLD 4064
Australia
Tel.: +61 7 3512 9600
Fax: +61 7 3369 8200
info.au@struers.dk

BELGIUM (Wallonie)

Struers S.A.S.
370, rue du Marché Rollay
F- 94507 Champigny
sur Marne Cedex
Tel.: +33 1 5509 1430
Fax: +33 1 5509 1449
struers@struers.fr

BELGIUM (Flanders)

Struers GmbH Nederland
Zomerdijk 34 A
3143 CT Maassluis
Tel.: +31 (10) 599 7209
Fax: +31 (10) 599 7201
netherlands@struers.de

CANADA

Struers Ltd.
7275 West Credit Avenue
Mississauga, Ontario L5N 5M9
Tel.: +1 905-814-8855
Fax: +1 905-814-1440
info@struers.com

CHINA

Struers Ltd.
No. 1696 Zhang Heng Road
Zhang Jiang Hi-Tech Park
Shanghai 201203, P.R. China
Tel.: +86 (21) 6035 3900
Fax: +86 (21) 6035 3999
struers@struers.cn

CZECH REPUBLIC & SLOVAKIA

Struers GmbH Organizační složka
vědeckotechnický park
Přilepská 1920,
CZ-252 63 Roztoky u Prahy
Tel.: +420 233 312 625
Fax: +420 233 312 640
czechrepublic@struers.de
slovakia@struers.de

GERMANY

Struers GmbH
Carl-Friedrich-Benz-Straße 5
D- 47877 Willich
Tel.: +49 (0) 2154 486-0
Fax: +49 (0) 2154 486-222
infoservice@struers.de

FRANCE

Struers S.A.S.
370, rue du Marché Rollay
F-94507 Champigny
sur Marne Cedex
Tel.: +33 1 5509 1430
Fax: +33 1 5509 1449
struers@struers.fr

HUNGARY

Struers GmbH
Magyarországi Fióktelep
2040 Budaörs
Szabadság utca 117
Phone +36 (23) 80 60 90
Fax +36 (23) 80 90 91
hungary@struers.de

IRELAND

Struers Ltd.
Unit 11 Evolution @ AMP
Whittle Way, Catcliffe
Rotherham S60 5BL
Tel.: +44 0845 604 6664
Fax: +44 0845 604 6651
info@struers.co.uk

ITALY

Struers Italia
Via Monte Grappa 80/4
20020 Arese (MI)
Tel.: +39-02/38236281
Fax: +39-02/38236274
struers.it@struers.it

JAPAN

Struers K.K.
Takanawa Muse Bldg. 1F
3-14-13 Higashi-Gotanda,
Shinagawa
Tokyo
141-0022 Japan
Tel.: +81 3 5488 6207
Fax: +81 3 5488 6237
struers@struers.co.jp

应用说明

微电子金相制备

Elisabeth Weidmann, Anne Guesnier, Hans Bundgaard, Struers A/S, 丹麦哥本哈根

鸣谢

图 1、图 8、图 9 的图片提供: F. W. Wulff, T. Ahrens, Fraunhofer-Institut für Siliziumtechnologie, Quality and Reliability, D-25524, Itzehoe, Germany

图 4、图 5、图 6、图 10 a、图 10 b 的图片提供: Katja Reiter, Mario Reiter, Thomas Ahrens, Institute für Siliziumtechnologie, Modulintegration, D-25524, Itzehoe, Germany

参考文献

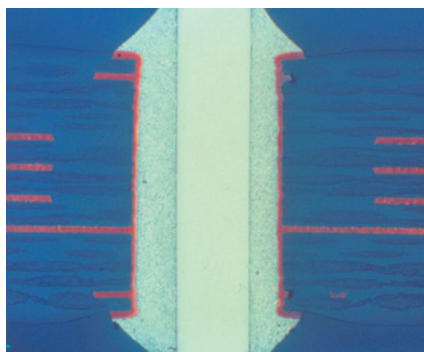
Structure 32, 1998, Microstructure and material analysis for electronic packaging (电子封装的微观结构和材料分析), F. W. Wulff, T. Ahrens, Fraunhofer-Institut für Siliziumtechnologie, Quality and Reliability, D-25524, Itzehoe, Germany

Structure 34, Special aspects of metallographic preparation of electronic and microelectronic devices (电子和微电子设备金相制备的特殊因素), Katja Reiter, Mario Reiter, Thomas Ahrens, Institute für Siliziumtechnologie, Modulintegration, D-25524, Itzehoe, Germany

Struers Structure 28, 1995, Accurate, metallographic preparation of blind, buried and filled holes in printed circuit boards (印刷电路板中盲孔、埋孔和填充孔的准确金相制备)。

Struers Structure 13, 1986, Anschliffe an elektronischen Bauteilen und Komponenten。

有所提及 Struers 设备、配件和耗材的详细信息, 请参见 www.struers.com 或联系当地 Struers 代表。



总结

随着集成电路的不断发展, 电子设备微型化已成为可能, 这减少了作为电子电路基本组成部分的单个电子元件的需求。金相学在芯片组件的设计、研发和故障分析方面发挥着重要作用。这些微电子元件截面的金相分析制备非常耗时, 需要耐心和技能才能对元件内的特定目标进行研磨和抛光。此外, 设备和元件中使用的不同材料, 例如金属、玻璃和陶瓷, 具有不同特性, 这导致制备十分困难。

特殊工具有助于改善微电子元件的手动和半自动制备。对于自动目标制备, Struers TargetSystem 能够快速精确地研磨并迅速抛光至目标。为避免软硬层与材料之间出现起伏, 建议在刚性研磨盘上进行金刚石研磨并在硬布上进行金刚石抛光。

术语表

BGA:	球栅阵列
CSP:	芯片级封装
DIP:	双列直插式封装
FBGA:	细间距球栅阵列
IC:	集成电路
PBGA:	塑料球栅阵列
PCB:	印刷电路板
PQFP:	塑料方形扁平封装
TO Can:	晶体管外形罐