

出版基金资助出版

3D集成手册

——3D集成电路技术与应用

Handbook of 3D Integration
Technology and Applications of 3D Integrated Circuits

[美] 菲利普·加罗 (Philip Garrou)

[美] 克里斯多夫·鲍尔 (Christopher Bower) 主编

[德] 彼得·兰姆 (Peter Ramm)

赵元富 姚全斌 白丁 等 译

WILEY

 中国宇航出版社

基金资助出版

WILEY

3D 集成手册

——3D 集成电路技术与应用

Handbook of 3D Integration

Technology and Applications of 3D Integrated Circuits

[美] 菲利普·加罗 (Philip Garrou)

[美] 克里斯多夫·鲍尔 (Christopher Bower) 主编

[德] 彼得·兰姆 (Peter Ramm)

赵元富 姚全斌 白 丁 等 译



中国宇航出版社

·北京·

Copyright © 2008 WILEY - VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim. All Rights Reserved (including those of translation into other languages). Authorised translation from the English language edition published by John Wiley & Sons Limited. Responsibility for the accuracy of the translation rests solely with China Astronautic Publishing House Co., Ltd and is not the responsibility of John Wiley & Sons Limited. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyright holder, John Wiley & Sons Limited.

本书中文简体字版由著作权人授权中国宇航出版社独家出版发行，未经出版社书面许可，不得以任何方式抄袭、复制或节录本书中的任何部分。

著作权合同登记号：图字 01-2017-4422 号

版权所有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

3D 集成手册：3D 集成电路技术与应用 / (美) 菲利普·加罗 (Philip Garrou), (美) 克里斯多夫·鲍尔 (Christopher Bower), (德) 彼得·兰姆 (Peter Ramm) 著；赵元富等译. — 北京：中国宇航出版社，2017.5

书名原文：Handbook of 3D Integration: Technology and Applications of 3D Integrated Circuits

ISBN 978-7-5159-1300-1

I. ①3… II. ①菲… ②克… ③彼… ④赵… III. ①集成电路工艺—手册 IV. ①TN405-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 081711 号

责任编辑 侯丽平

责任校对 祝延萍 封面设计 宇星文化

出版
发行 **中国宇航出版社**

社址 北京市阜成路 8 号 邮编 100830
(010)60286808 (010)68768548

网址 www.caphbook.com

发行部 (010)60286888 (010)68371900
(010)60286887 (010)60286804(传真)

零售店 读者服务部
(010)68371105

承印 北京画中画印刷有限公司

版次 2017 年 5 月第 1 版
2017 年 5 月第 1 次印刷

规格 787 × 1092

开本 1/16

印张 47

字数 1144 千字

书号 ISBN 978-7-5159-1300-1

定价 198.00 元

本书如有印装质量问题，可与发行部联系调换

航天科技图书出版基金简介

航天科技图书出版基金是由中国航天科技集团公司于2007年设立的，旨在鼓励航天科技人员著书立说，不断积累和传承航天科技知识，为航天事业提供知识储备和技术支持，繁荣航天科技图书出版工作，促进航天事业又好又快地发展。基金资助项目由航天科技图书出版基金评审委员会审定，由中国宇航出版社出版。

申请出版基金资助的项目包括航天基础理论著作，航天工程技术著作，航天科技工具书，航天型号管理经验与管理思想集萃，世界航天各学科前沿技术发展译著以及有代表性的科研生产、经营管理译著，向社会公众普及航天知识、宣传航天文化的优秀读物等。出版基金每年评审1~2次，资助20~30项。

欢迎广大作者积极申请航天科技图书出版基金。可以登录中国宇航出版社网站，点击“出版基金”专栏查询详情并下载基金申请表；也可以通过电话、信函索取申报指南和基金申请表。

网址：<http://www.caphbook.com>

电话：(010) 68767205, 68768904

《3D 集成手册》 翻译工作人员名单

主 译 赵元富 姚全斌 白 丁

译 者 练滨浩 曹玉生 冯小成 林鹏荣 李应选
黄颖卓 贺晋春 木瑞强 胡培峰 吕晓瑞
姜学明 谢晓辰 文惠东 卢 峰 李冬梅
荆林晓 井立鹏 王德敬 刘建松 吴 鹏
唐 超 谢 东 邓智杰 樊 帆

序 言

许多读者看到《3D集成手册》的书名，无疑会期望这本包含两卷的书可以涵盖所有类型的3D器件和封装。尽管未采用半导体通孔（TSVs）技术的叠层封装和叠层芯片亦属于3D结构，但是我们主张将此类结构最终归为“3D封装”。本书主要关注“3D集成”技术和应用，我们将“3D集成”理解为在IC层之间通过垂直电互连对减薄和键合后硅集成电路的垂直集成。本书讨论的垂直互连大部分采用了硅通孔（TSVs）。

编者认识到“3D集成”这一名词没有明确定义。为什么不称之为《3D集成电路手册》、《3D硅集成手册》或者《垂直系统集成手册》？每一个命名都会各有利弊，但我们认为“3D集成”这一简单的术语已经为大多数研究人员所接受，采用新的术语未必可行。

本书旨在及时、客观地向工程师和科学家们提供该领域的全貌。虽然我们已经进行了较为详尽的描述，但仍然有一些技术方面未能涵盖。本书没有涵盖单片集成电路向3D集成电路的发展历程和异质材料的3D集成。当这些技术发展成熟后，新的版本中或将有所体现。本书分为五个部分：

- 第一部分为TSV工艺技术。这一部分主要包括：TSV深反应离子刻蚀、TSV激光钻孔、TSV侧壁绝缘、铜电镀以及铜和钨的化学气相淀积。

- 第二部分为晶圆减薄和键合技术。主要包括：硅片减薄和划片、晶圆对准与键合工艺技术及设备、聚合物键合和金属间化合物键合。

- 第三部分为全球范围内正在研究的各类集成工艺技术。该部分首先概述了3D集成领域的商业活动。随后，介绍了一些大学、研究所在3D集成方面特有的技术途径，主要包括弗朗霍夫IZM研究所、阿肯色大学、日本ASET联盟、CEA—LETI、MIT林肯实验室、IMEC、MIT和RPI。结尾部分介绍了3D集成技术的主创公司，包括Tezzaron，Ziptronix和Zycube。

- 第四部分为3D集成的设计、性能以及热管理，主要包括北卡罗来纳州立大学、弗朗霍夫IIS、林肯实验室和明尼苏达大学的3D集成设计技术。同时还介绍了Intel的3D电路测试技术和IBM的3D集成电路热管理技术。

- 第五部分为3D技术的具体应用。这部分分章论述了3D微处理器、3D存储器、传感器阵列、功率器件和无线传感器系统。

我们要感谢本书各章的所有作者，正是各章作者的贡献使得本书的编撰成为可能。我们也感谢作者们为各章节撰写评论，深深地感谢各位在每一章节所投入的时间和精力。同样也十分感谢为能按计划完成本书而给予了很大帮助的 Wiley-VCH 的各位同仁。

我们希望本书可以作为 3D 集成技术从业人员宝贵的知识来源。我们期待在过去几年取得的成果基础上，3D 集成领域下一个十年能取得振奋人心的成果。

2007 年 11 月

菲利普·加罗，RTP，北卡罗来纳州

克里斯多夫·鲍尔，RTP，北卡罗来纳州

彼得·兰姆，德国慕尼黑

贡献者名单

Sitaram Arkalgud

SEMATECH
2706 Montopolis Boulevard
Austin, TX 78741
USA

Brian Aull

Massachusetts Institute of Technology
Lincoln Laboratory
244 Wood Street
Lexington, MA 02420 - 9108
USA

Rozalia Beica

Semitool, Inc.
655 West Reserve Drive
Kalispell, MT 59901
USA

Robert Berger

Massachusetts Institute of Technology
Lincoln Laboratory
244 Wood Street
Lexington, MA 02420 - 9108
USA

Eric Beyne

IMEC
Kapeldreef 75
3001 Leuven
Belgium

Michiel A. Blauw

Eindhoven University of Technology
PO Box 513
5600 MB Eindhoven
The Netherlands

Christopher Bower

Semprius, Inc.
2530 Meridian Parkway
Durham, NC 27713
USA

Thomas Brunschwiler

IBM Zurich Research Laboratory
Advanced Thermal Packaging
Säumerstrasse 4
8803 Riischlikon
Switzerland

Susan Burkett

University of Arkansas
Department of Electrical Engineering
3217 Bell Engineering Center
Fayetteville, AR 72701
USA

James Burns

Massachusetts Institute of Technology
Lincoln Laboratory
244 Wood Street
Lexington, MA 02420 - 9108
USA

Tim S. Cale

Rensselaer Polytechnic Institute
Mailstop CII – 6015/CIE
110 8th Street
Troy, NY 12180 – 3590
USA

S. M. Chang

Industrial Technology Research
Institute of Taiwan
195 Chung Hsing Road
Chutung, Hsinchu
Taiwan 310, ROC

Barbara Charlet

CEA – LETI, MINATEC
Département Integration Hétérogène
Silicium
17, rue des Martyrs
38054 Grenoble Cedex 9
France

Nisha Checka

Massachusetts Institute of Technology
Lincoln Laboratory
244 Wood Street
Lexington, MA 02420 – 9108
USA

Chang – Lee Chen

Massachusetts Institute of Technology
Lincoln Laboratory
244 Wood Street
Lexington, MA 02420 – 9108
USA

Chenson Chen

Massachusetts Institute of Technology
Lincoln Laboratory
244 Wood Street
Lexington, MA 02420 – 9108
USA

Wouter Dekkers

NXP – TSMC Research Center
High Tech Campus 4
Mailbox WAG02
5656 AE Eindhoven
The Netherlands

Marc de Samber

Philips Applied Technologies
High Tech Campus 7
5656 AE Eindhoven
The Netherlands

Léa Di Cioccio

CEA – LETI, MINATEC
Département Integration Hétérogène
Silicium
17, rue des Martyrs
38054 Grenoble Cedex 9
France

R. Ecke

TU Chemnitz
Zentrum for Mikrotechnologien
Reichenhainer Straße 70
09126 Chemnitz
Germany

Günter Elst

Fraunhofer IIS
Design Automation Division
Zeunerstraße 38
01069 Dresden
Germany

Paul Enquist

Ziptronix
800 Perimeter Park, Suite B
Morrisville, NC 27560
USA

Andy Fan

Massachusetts Institute of Technology
Department of Electrical Engineering
77 Massachusetts Avenue
Cambridge, MA 02139
USA

Paul D. Franzon

North Carolina State University
Monteith GRC 443
ECE, Box 7914
Raleigh, NC 27695
USA

Philip Garrou

Microelectronic Consultants of North
Carolina
3021 Cornwallis Road
Research Triangle Park, NC 27709 – 2889
USA

Pascale Gouker

Massachusetts Institute of Technology
Lincoln Laboratory
244 Wood Street
Lexington, MA 02420 – 9108
USA

Ronald J. Gutmann

Rensselaer Polytechnic Institute
Mailstop CII – 6015/CIE
110 8th Street
Troy, NY 12180 – 3590
USA

David Henry

CEA – LETI, MINATEC
Département Integration Hétérogène
Silicium
17, rue des Martyrs
38054 Grenoble Cedex 9
France

Arne Heitmann

Qimonda AG
Gustav – Heinemann – Ring 212
81739 Munich
Germany

Thomas Herndl

Infineon Technologies
Operngasse 20b/32
1010 Vienna
Austria

David Heyes

NXP Semiconductors
Bramhall Moove Lane
Stockpat, Cheshire SK7 5B
UK

Thierry HILT

CEA - LETI
17, avenue des Martyrs
38054 Grenoble Cedex
France

Adrian Ionescu

Ecole Polytechnique Fédérale de
Lausanne
Institute of Microelectronics and
Microsystems
Electronics Laboratory
1015 Lausanne
Switzerland

Jean - Pierre Joly

CEA - LITEN, INES
Département des Technologies Solaires
50, avenue du Lac Léman
73377 Le Bourget du Lac
France

Craig Keast

Massachusetts Institute of Technology
Lincoln Laboratory
244 Wood Street
Lexington, MA 02420 - 9108
USA

Ervin (W. M. M.) Kessels

Eindhoven University of Technology
PO Box 513
5600 MB Eindhoven
The Netherlands

Armin Klumpp

Fraunhofer IZM
Hansastraße 27d
80686 Munich
Germany

Jeffrey Knecht

Massachusetts Institute of Technology
Lincoln Laboratory
244 Wood Street
Lexington, MA 02420 - 9108
USA

Werner Kröniger

Infineon Technologies AG
Postfach 10 09 44
93009 Regensburg
Germany

Yann Lamy

NXP - TSMC Research Center
High Tech Campus 4
Mailbox WAG02
5656 AE Eindhoven
The Netherlands

Patrick Leduc

CEA - LETI, MINATEC
Département Integration Hétérogene
Silicium
17, rue des Martyrs
38054 Grenoble Cedex 9
France

Paul Lindner

EV Group
Erich Thallner GmbH
DI Erich Thallner Straße 1
4782 St. Florian/Inn
Austria

W. C. Lo

Industrial Technology Research
Institute of Taiwan
195 Chung Hsing Road
Chutung, Hsinchu
Taiwan 310, ROC

James Jian - Qiang Lu

Rensselaer Polytechnic Institute
Mailstop CII - 6015/CIE
110 8th Street
Troy, NY 12180 - 3590
USA

T. M. Mak

Intel Corporation
2200 Mission College Blvd., SC 12 - 604
Santa Clara, CA 95052 - 8119
USA

Thorsten Matthias

EV Group
7700 South River Parkway
Tempe, AZ 85284
USA

Bruno Michel

IBM Zurich Research Laboratory
Advanced Thermal Packaging
Säumerstrasse 4
8803 Rüschlikon
Switzerland

Patrick Morrow

Intel Corporation
Mail Stop: RA3 - 252
5200 N. E. Elam Young Parkway
Hillsboro, OR 97124 - 6467
USA

Makoto Motoyoshi

ZyCube Co. Ltd.
ZyCube Sendai Lab.
519 - 1176 Aoba Aramaki, Aoba - ku,
Sendai - shi, Miyagi
985 - 0845 Japan

Sriram Muthukumar

Intel Corporation
Mail Stop: CH4 - 109
5000 W Chandler Blvd
Chandler, AZ 85226
USA

Pierre Nicole

THALES systèmes aéroportés
2 Avenue Gay Lussac
78851 Elancourt Cedex
France

Stefan Pargfrieder

EV Group
Erich Thallner GmbH
DI Erich Thallner Straße 1
4782 St. Florian/Inn
Austria

Robert Patti

Tezzaron Semiconductor Corp.
1415 Bond Street
Naperville, IL 60563
USA

Ulrich Ramacher

Infineon Technologies AG
Am Campeon 1 - 12
85579 Neubiberg
Germany

Peter Ramm

Fraunhofer IZM
Hansastraße 27d
80686 Munich
Germany

Rafael Reif

Massachusetts Institute of Technology
Department of Electrical Engineering
77 Massachusetts Avenue
Cambridge, MA 02139
USA

Thomas L. Ritzdorf

Semitoool, Inc.
655 West Reserve Drive
Kalispell, MT 59901
USA

Fred Roozeboom

NXP - TSMC Research Center
High Tech Campus 4
Mailbox WAG02
5656 AE Eindhoven
The Netherlands

Mihai Sanduleanu

Philips Applied Technologies
High Technology Campus 7
5656 AE Eindhoven
The Netherlands

Sachin S. Sapatnekar

University of Minnesota
Department of Electrical
and Computer Engineering
200 Union Street
Minneapolis, MN 55455
USA

Anton Sauer

Fraunhofer IZM
Hansastraße 27d
80686 Munich
Germany

Leonard Schaper

University of Arkansas
Department of Electrical Engineering
3217 Bell Engineering Center
Fayetteville, AR 72701
USA

Peter Schneider

Fraunhofer IIS
Design Automation Division
Zeunerstraße 38
01069 Dresden
Germany

Stefan E. Schulz

TU Chemnitz
Zentrum für Mikrotechnologien
Reichenhainer Straße 70
09126 Chemnitz
Germany

Charles Sharbano

Semitool, Inc.
655 West Reserve Drive
Kalispell, MT 59901
USA

Herbert Shea

Ecole Polytechnique Fédérale de
Lausanne
Institute of Microelectronics and
Microsystems
Electronics Laboratory
1015 Lausanne
Switzerland

Antonio Soares

Massachusetts Institute of Technology
Lincoln Laboratory
244 Wood Street
Lexington, MA 02420 - 9108
USA

Vyshnavi Suntharalingam

Massachusetts Institute of Technology
Lincoln Laboratory
244 Wood Street
Lexington, MA 02420 - 9108
USA

Kenji Takahashi

Toshiba Corp.
1 Komukai Toshiba - cho, Saiwai - ku,
Kawasaki - shi, Kanagawa
212 - 8583 Japan

Maaik Taklo

SINTEF ICT
Microsystems and Nanotechnology
Gaustadalléen 23
0373 Oslo
Norway

Chuan Seng Tan

Nanyang Technological University
School of Electrical and Electronic
Engineering
50 Nanyang Avenue
Singapore 639798
Singapore

Kazumasa Tanida

Toshiba Corp.
1 Komu Kai Toshihacho, Saiwai - Ku
Kawasaki - shi, Kanagawa
212 - 8583 Japan

Mark E. Tuttle

Micron Technology, Inc.
Mail Stop 1 - 717
8000 S. Federal Way
Boise, ID 83707 - 0006
USA

Brian Tyrrell

Massachusetts Institute of Technology
Lincoln Laboratory
244 Wood Street
Lexington, MA 02420 - 9108
USA

Eric (F.) van den Heuvel

Philips Applied Technologies
High Technology Campus 7
5656 AE Eindhoven
The Netherlands

Emile van der Drift

Delft University of Technology
PO Box 5053
2600 GB Delft
The Netherlands

Richard (M. C. M.) van de Sanden

Eindhoven University of Technology
PO Box 513
5600 MB Eindhoven
The Netherlands

Eric van Grunsven

Philips Applied Technologies
High Tech Campus 7
5656 AE Eindhoven
The Netherlands

Co Van Veen

Philips Applied Technologies
High Technology Campus 7
5656 AE Eindhoven
The Netherlands

Jan F. Verhoeven

Philips Applied Technologies
High Technology Campus 7
5656 AE Eindhoven
The Netherlands

Susan Vitkavage

Lockheed Martin
5600 Sand Lake Road
Orlando, FL 32819
USA

Keith Warner

Massachusetts Institute of Technology
Lincoln Laboratory
244 Wood Street
Lexington, MA 02420 - 9108
USA

Josef Weber

Fraunhofer IZM
Hansastraße 27d
80686 Munich
Germany

Werner Weber

Infineon Technologies AG
Am Campeon 1 - 12
85579 Neubiberg
Germany

Bruce Wheeler

Massachusetts Institute of Technology
Lincoln Laboratory
244 Wood Street
Lexington, MA 02420 - 9108
USA

Robert Wieland

Fraunhofer IZM
Hansastraße 27d
80686 Munich
Germany

Markus Wimplinger

EV Group
7700 South River Parkway
Tempe, AZ 85284
USA

Jürgen M. Wolf

Fraunhofer IZM
Gustav - Meyer - Allee 25
13355 Berlin
Germany

Bernhard Wundede

Fraunhofer IZM
Gustav - Meyer - Allee 25
13355 Berlin
Germany

Peter Wyatt

Massachusetts Institute of Technology
Lincoln Laboratory
244 Wood Street
Lexington, MA 02420 - 9108
USA

Donna Yost

Massachusetts Institute of Technology
Lincoln Laboratory
244 Wood Street
Lexington, MA 02420 - 9108
USA

目 录

第 1 章 3D 集成概述	1
1.1 引言	1
1.2 晶圆堆叠技术的发展	3
1.3 3D 封装与 3D 集成	3
1.4 非 TSV 的 3D 叠层技术	5
1.4.1 Irvine 传感器	5
1.4.2 超薄芯片叠层 (UTCS) (IMEC, CNRS, U. Barcelona)	6
1.4.3 富士通公司	6
1.4.4 Fraunhofer/IZM 研究所	8
1.4.5 3D Plus 公司与 Leti 公司	8
1.4.6 东芝公司系统封装模块	9
参考文献	10
第 2 章 3D 集成的驱动力	11
2.1 引言	11
2.2 电性能	11
2.2.1 信号传输速度	11
2.2.2 存储器的延迟	14
2.3 功耗与噪声	16
2.3.1 噪声	16
2.4 外形尺寸	16
2.4.1 非易失性存储器技术: 闪存	17
2.4.2 易失性存储器技术: 静态随机存取存储器 (SRAM) 与动态随机存取存储器 (DRAM)	17
2.4.3 CMOS 图形传感器	18
2.5 低成本	18