



国际电气工程先进技术译丛

WILEY

喷墨打印 微制造技术

Inkjet-Based Micromanufacturing

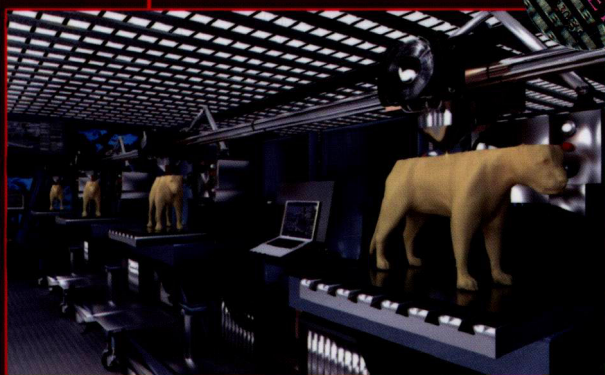
[德] 简 G.考文科 (Jan G. Korvink)

[英] 帕特里克 J.史密斯 (Patrick J. Smith)

[韩] 申东勇 (Dong-Youn Shin)

编著

汪浩 孙玉绣 等译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

本书特色

喷墨打印技术不仅能用于在纸上打印墨水，它还能在微-纳米技术领域实现更简单、更快速、更可靠的制造过程。现在喷墨打印喷头本身是精确的装置，它将流体液滴以程序化且重复性图案沉积在多种基板表面，经过适当的修饰和调整，能实现如薄膜晶体管、聚合物显示器以及光电器件等装置的制造。而且，喷墨打印技术促进了保健监护领域所需的柔性RFID发射机应答器（如在自动化后勤和微型灵敏器件方面）的大规模生产。



国际电气工程先进技术译丛

喷墨打印微制造技术

[德] 简 G. 考文科 (Jan G. Korvink)

[英] 帕特里克 J. 史密斯 (Patrick J. Smith) 编著

[韩] 申东勇 (Dong - Youn Shin)

汪浩 孙玉绣 等译



机械工业出版社

喷墨技术在过去的十年中，主要作为打印机技术出现在家庭和办公市场，现在喷墨打印被大众所熟悉和接受。在过去的十年里，喷墨技术已成为公认的技术领域的高级制造工具，尤其是在微制造领域。本书介绍了喷墨打印微制造技术的概况、热喷墨及后期处理技术，并附有理论和模型解释，以及喷墨打印技术在各个领域的应用，为研究人员在解决微制造技术方面出现的具有挑战性问题时提供良好的参考。

本书将吸引从事微电子加工工程、机械工程、化学工程等相关的微电路、燃料电池、光电器件等专业的研究生和科研人员。本书涉及的主要内容包括喷墨打印微制造技术，热喷墨技术、理论和模型，无机墨水用于塑料电子器件的后打印过程应用，喷墨打印用墨水形成，喷墨打印制造电路板，射频识别天线以及喷墨打印 MEMS 等内容。

译者序

喷墨打印技术这种原本应用在家庭和办公室里的打印技术，已成为了当今公认的技术领域的高级制造工具，尤其是在微制造领域。应用喷墨技术可将所需材料喷洒到需要的地方，经过后期处理后得到性能稳定的“喷墨”打印产品，为光电器件产品领域提供了更为先进的制备技术。为了能够更好地将喷墨打印用于各类功能薄膜的制备上，有必要对其工作原理进行了解，并结合建模和仿真研究喷墨过程的动态特性。在本书中，诸位作者均具有深厚的相关研究背景，并参考了大量的期刊论文、会议论文集资料，讲述了喷墨打印技术在各个领域的最新应用进展。

喷墨技术是涉及流体力学、电学、材料学、物理学等众多学科的综合技术。本书介绍了喷墨打印微制造技术的概况、热喷墨及后期处理技术，并附有理论和模型解释，以及喷墨打印技术在各个领域的应用，为研究人员在微制造技术方面出现的具有挑战性问题的解决提供良好的参考。这将吸引从事微电子加工工程、机械工程、化学工程等相关的微电路、燃料电池、光电器件等专业科研人员。本书也可以用作教材或者作为参考学习喷墨打印微制造的基本原理、微制造技术、模型和理论解释、喷墨打印在太阳能电池和电路板设计等方面的应用实例，且书中附有生动的插图模型和原理。期望本书的出版对国内相关领域的发展有所帮助。如果能做到这一点，译者们将非常欣慰和受鼓舞。

本书由北京工业大学汪浩老师（第1~11章）和天津师范大学孙玉绣老师（第12~21章）共同翻译完成，全书由汪浩老师统稿，秦茜、白彦、王彬、张健、盛术楠、陈亚、王志哲、吕修亮、邓思旭、王先明、张欣、吴春卉、赵博文、田晓萌、沈强、傅丛丛、郭瑞梅、杨帆也参与了本书部分内容的翻译工作。机械工业出版社顾谦老师为本书的翻译、编辑、加工、出版付出了辛勤的劳动，在此深表谢意。由于时间仓促以及译者的知识面有限，译文中难免有疏漏或欠妥之处，恳请读者批评指正。

译者

作者名单

V. Auzelyte

Microsystems Laboratory
Ecole Polytechnique Federale de
Lausanne (EPFL)
1015 Lausanne
Switzerland

Man-In Baek

LG Electronics Inc. PRI.
19-1 Cheongho-ri
Jinwi-myeon Pyeongtaek-si
Gyeonggi-do 451-713
South Korea

Kenneth A. Brakke

Susquehanna University
Mathematics Department
514 University Avenue
Selinsgrove, PA 17870-1164
USA

J. Brugger

Microsystems Laboratory
Ecole Polytechnique Federale de
Lausanne (EPFL)
1015 Lausanne
Switzerland

Hanna Haverinen

University of Oulu
P.O. Box 4500
90014 Oulu
Finland

and

King Abdullah University of
Science and Technology (KAUST)
Materials Science and
Engineering, Electrical
Engineering
Solar and Photovoltaics
Engineering Research Center
Thuwal 23955-6900
Kingdom of Saudi Arabia

Maikel F.A.M. van Hest

National Center for Photovoltaics
National Renewable Energy
Laboratory
1617 Cole Boulevard
Golden, CO 80401-3393
USA

Michael Hong

LG Electronics Inc. PRI.
19-1 Cheongho-ri
Jinwi-myeon Pyeongtaek-si
Gyeonggi-do 451-713
South Korea

Ghassan E. Jabbour

University of Oulu
P.O. Box 4500
90014 Oulu
Finland

and

Arizona State University
School of Mechanical, Aerospace,
Chemical and Materials
Engineering
7700 South River Parkway
Tempe, AZ 85284
USA

and

Arizona State University
Advanced Photovoltaics Center
7700 South River Parkway
Tempe, AZ 85284
USA

and

King Abdullah University of
Science and Technology (KAUST)
Materials Science and
Engineering, Electrical
Engineering
Solar and Photovoltaics
Engineering Research Center
Thuwal 23955-6900
Kingdom of Saudi Arabia

Park Jang-Ung

UNIST (Ulsan National Institute
of Science and Technology)
School of Nano-Bioscience and
Chemical Engineering
School of Mechanical and
Advanced Materials Engineering
100 Banyeon-ri, Eonyang-eup
Ulju-gun
689-798 Ulsan
South Korea

Alexander Kamyshny

The Hebrew University of
Jerusalem
Institute of Chemistry
Casali Institute of Applied
Chemistry
Edmond Safra Campus
Givat-Ram
Jerusalem 91904
Israel

Hans Kuerten

Eindhoven University of
Technology
Department of Mechanical
Engineering
Den Dolech 2
P.O. Box 513
5600 MB Eindhoven
The Netherlands

Kye-Si Kwon

Soonchunhyang University
Department of Mechanical
Engineering
646, Eupnae-ri, Shinchang-myeon
Asan-si, Chungcheongnam-do
336-745
South Korea

Shlomo Magdassi

The Hebrew University of
Jerusalem
Institute of Chemistry
Casali Institute of Applied
Chemistry
Edmond Safra Campus,
Givat-Ram
Jerusalem 91904
Israel

Jooho Moon

Department of Materials Science
and Engineering
Yonsei University
50 Yonsei-ro Seodaemun-gu
Seoul, 120-724
Korea

Naoki Morita

Fuji Xerox Co., Ltd.
Marking Technology Laboratory
2274 Hongo
Ebina, 243-0494
Japan

Aoife Morrin

Dublin City University
School of Chemical Sciences
National Centre for Sensor
Research
Collins Avenue
Dublin 9
Ireland

K. Pataky

Microsystems Laboratory
Ecole Polytechnique Federale de
Lausanne (EPFL)
1015 Lausanne
Switzerland

Jolke Perelaer

Friedrich-Schiller-University Jena
Laboratory of Organic and
Macromolecular Chemistry
(IOMC)
Humboldtstraße 10
D-07743 Jena
Germany

Heather A.S. Platt

National Center for Photovoltaics
National Renewable Energy
Laboratory
1617 Cole Boulevard
Golden, CO 80401-3393
USA

John A. Rogers

University of Illinois at
Urbana-Champaign
Department of Materials Science
and Engineering
Department of Chemistry
Department of Mechanical
Science and Engineering
1304 W. Green Street
61801 Urbana
USA

Ulrich S. Schubert

Friedrich-Schiller-University Jena
Laboratory of Organic and
Macromolecular Chemistry
(IOMC)
Humboldtstraße 10
D-07743 Jena
Germany

Dong-Youn Shin

Pukyong National University
Department Printing and
Information Engineering
San 100, Yongdang-dong
Nam-gu
Busan, 608-739
South Korea

Daniel Siregar

Eindhoven University of
Technology
Department of Mechanical
Engineering
Den Dolech 2
P.O. Box 513
5600 MB Eindhoven
The Netherlands

Patrick J. Smith

The University of Sheffield
Department of Mechanical
Engineering
Kroto Research Institute
Broad Lane, Sheffield
S3 7HQ
UK

Keunghy Song

Department of Materials Science
and Engineering
Yonsei University
50 Yonsei-ro Seodaemun-gu
Seoul, 120-724
Korea

Jonathan Stringer

The University of Sheffield
Department of Mechanical
Engineering
Kroto Research Institute
Broad Lane, Sheffield
S3 7HQ
UK

Vivek Subramanian

University of California Berkeley
Department of Electrical
Engineering and Computer
Sciences
Berkeley, CA 94720-1770
USA

Thomas Sutter

Dow Electronic Materials
455 Forest Street
Marlborough, MA 01752
USA

Anke Teichler

Friedrich-Schiller-University Jena
Laboratory of Organic and
Macromolecular Chemistry
(IOMC)
Humboldtstraße 10
D-07743 Jena
Germany

David Wallace

Vice President MicroFab
Technologies, Inc.
1104 Summit Ave. ste 110
Plano
TX 75074
USA

Herman Wijshoff

Ocè Technologies B.V.
P.O. Box 101
5900 MA Venlo
The Netherlands

目 录

译者序

作者名单

第 1 章 喷墨微制造技术综述	1
1.1 简介	1
1.2 喷墨技术	1
1.2.1 连续式 (CIJ) 喷墨打印技术	1
1.2.2 按需式 (DOD) 喷墨打印技术	2
1.3 流量要求	3
1.4 图案形成: 流体/基板相互作用	4
1.5 微制造	5
1.5.1 简介	5
1.5.2 微制造的局限与机遇	6
1.5.3 喷墨打印技术在微制造中的优势	7
1.6 喷墨打印技术在微制造中应用的举例分析	8
1.6.1 化学传感器	8
1.6.2 光微机电系统器件	9
1.6.3 生物 MEMS 器件	10
1.6.4 装配和组装	11
1.7 小结	12
致谢	12
参考文献	12
第 2 章 应用图案化喷墨打印技术进行材料组合筛选	16
2.1 简介	16
2.2 喷墨打印——从明确的点到均匀的面	17
2.3 喷墨打印的薄膜族群	21
2.4 有机太阳能电池组合模板材料	24
2.5 小结与展望	30
参考文献	30
第 3 章 热喷墨技术	35
3.1 热喷墨技术的发展史	35
3.2 喷墨打印机与电子影印打印机的市场前景	36
3.3 各种热喷墨打印头的结构	37

3.4	热喷墨技术快速沸腾原理的研究	38
3.5	热喷墨技术喷绘机理	40
3.6	热喷墨 (TIJ) 的基本喷射行为	41
3.6.1	输入能量的特点	41
3.6.2	频率特性	42
3.6.3	温度的影响	42
3.7	模拟分析热喷墨行为	43
3.7.1	基于有限元方法的圆柱热传导计算 (有限元分析软件: Ansys)	43
3.7.2	基于有限微分法的射流自由边界计算 (软件: Flow3D)	43
3.8	热喷墨技术可靠性问题	44
3.9	热喷墨技术现状和展望	45
	参考文献	46
第4章	高分辨率电流体动力喷墨	48
4.1	简介	48
4.2	打印系统	48
4.3	喷射运动控制	49
4.4	按需打印模式	50
4.5	多用途喷墨材料和分辨率	52
4.6	在电子和生物领域的应用	54
4.7	高分辨率打印过程中的电荷	58
	参考文献	59
第5章	压电喷墨中的串扰	61
5.1	简介	61
5.2	电串扰	61
5.3	直接串扰	61
5.4	压力诱导串扰	64
5.5	声学串扰	66
5.6	打印头共振	68
5.7	残余振动	70
	参考文献	71
第6章	打印行为模式	73
6.1	简介	73
6.1.1	液滴和最终液滴半径的影响	73
6.1.2	室温打印液滴蒸发	75
6.1.3	墨滴、线、薄膜的形态控制	76
6.2	小结	79
	参考文献	80

第7章 喷墨打印液滴干燥	82
7.1 简介	82
7.2 液滴干燥建模	82
7.2.1 流体模型	83
7.2.2 润滑近似	84
7.2.3 溶质浓度	85
7.2.4 蒸发速度	86
7.2.5 数值算法	87
7.3 小结	87
7.3.1 液滴形状演变	88
7.3.2 薄膜层厚	88
7.3.3 扩散影响	90
致谢	91
参考文献	91
第8章 用于制备塑料电子产品的无机墨水的后打印流程	93
8.1 简介	93
8.1.1 喷墨打印	93
8.1.2 印制电子产品	93
8.2 喷墨打印和金属墨水后打印流程	94
8.2.1 金属选料	94
8.2.2 后打印流程转化为无机先驱墨水	96
8.2.3 传统烧结技术	97
8.2.4 替代和选择性烧结方法	97
8.2.5 室温烧结	99
8.3 小结与展望	101
致谢	102
参考文献	102
第9章 视觉监控	106
9.1 简介	106
9.2 测量设置	106
9.3 图像处理	108
9.4 喷墨速度测量	112
9.5 喷头标准化和状态监测	116
9.6 半月板运动测量及其应用	118
参考文献	120
第10章 声学监测	121
10.1 简介	121

10.2	自传感	121
10.3	测量原理	121
10.4	液体形成、补充和润湿	125
10.5	污垢	127
10.6	气泡	128
10.7	打印头控制	131
	参考文献	132
第 11 章	喷射性能均衡	134
11.1	液滴体积动态均衡	134
11.1.1	液滴观测组件	135
11.1.2	通过体积控制均衡	135
11.1.3	液滴体积测量和均衡过程	136
11.1.4	速度均衡	138
11.1.5	液体动态均衡方法中的问题	139
11.2	固着液滴的液滴体积均衡	141
11.2.1	均衡液滴体积的固着液滴测量	141
11.2.2	固着液滴测量和均衡过程结果	142
11.2.3	固着液滴测量和均衡过程的有效性	142
11.2.4	采用透光率的液滴体积均衡过程	144
11.2.5	采用透光率的液滴体积均衡过程结果	145
	补充书目	146
第 12 章	喷墨打印墨水配方	147
12.1	简介	147
12.2	墨水配方	148
12.2.1	功能材料	149
12.2.2	溶剂	150
12.2.3	热熔(相变)墨水	151
12.2.4	紫外荧光墨水	151
12.3	墨水参数和添加剂	152
12.3.1	流变学控制	152
12.3.2	表面张力调节	152
12.3.3	电解质和 pH 值	153
12.3.4	发泡和消泡	153
12.3.5	湿润剂	154
12.3.6	粘接剂	154
12.3.7	杀菌剂	154
12.3.8	喷墨墨水配方实例	154
12.4	喷射性能	155
12.4.1	液滴形成	155

XII 喷墨打印微制造技术

12.4.2 墨水延迟	156
12.4.3 可恢复性	156
12.4.4 墨水供应	157
12.5 墨水与基板之间的作用	157
12.6 非图像应用	158
12.7 小结	159
参考文献	159
第 13 章 喷墨打印中颜色过滤器制造的问题	162
13.1 简介	162
13.2 背景介绍	162
13.3 打印技术的比较	165
13.4 液滴体积改变的印制带	169
13.5 亚像素填充表面设计能量条件	174
13.6 其他技术问题	181
13.7 小结	182
参考文献	182
第 14 章 喷墨打印在高密度像素 RGB 杂化量子点 LED 中的应用	185
14.1 简介	185
14.2 背景	186
14.3 试验工序与结果	188
14.3.1 液滴形成的作用	188
14.3.2 原子力显微镜	189
14.3.3 电致发光	193
14.4 喷墨打印高密度的 RGB 像素矩阵	195
14.5 小结	200
致谢	200
参考文献	200
补充书目	202
第 15 章 喷墨打印金属氧化物薄膜晶体管	203
15.1 简介	203
15.2 金属氧化物半导体材料	203
15.3 喷墨打印相关问题	205
15.3.1 墨水打印适印性	205
15.3.2 基板预热温度影响	206
15.4 退火过程中液相到固相的转化	210
15.5 全氧化物无定形晶体管	214
15.6 小结	216
参考文献	217

第 16 章 喷墨打印制备印制电路板	219
16.1 简介	219
16.2 传统打印制备印制电路板流程	219
16.3 喷墨打印制备印制电路板的难点	221
16.4 图形标记过程	222
16.4.1 成本对比	223
16.4.2 图形打印材料	224
16.5 内层铜电路图案结构	224
16.5.1 铜蚀刻抗蚀剂材料	225
16.5.2 基板修饰	226
16.6 铜耐电镀抗蚀剂	227
16.7 喷墨打印实现废物减少	229
16.8 阻焊层打印	229
16.9 金属墨水	233
16.10 PCB 制造的理论印制举例	234
16.11 数字打印替代喷墨制造	235
16.12 在 PCB 上喷墨打印的未来应用	235
参考文献	236
第 17 章 光伏器件	238
17.1 简介	238
17.2 器件结构	239
17.3 小面积和大面积打印光伏器件	242
17.4 商业喷墨打印制备光伏产品	246
17.5 小结与展望	248
参考文献	249
第 18 章 喷墨打印电化学传感器	252
18.1 简介	252
18.2 喷墨打印传感器制造	254
18.3 喷墨打印传感器组件	255
18.3.1 基板	255
18.3.2 操作跟踪	256
18.3.3 传感器材料	256
18.3.4 生物分子	260
18.4 喷墨打印传感器的应用	261
18.5 未来商业计划	263
缩略语	264
参考文献	264

第 19 章 射频识别标签天线	267
19.1 简介	267
19.1.1 RFID 简介	267
19.1.2 打印 RFID 天线产品的应用	270
19.2 打印天线	272
19.2.1 HF 标签天线要素	272
19.2.2 UHF 标签天线要素	273
19.2.3 天线打印应用	274
19.2.4 打印天线的材料	275
19.3 打印天线的现状和展望	279
参考文献	279
第 20 章 喷墨打印 MEMS	281
20.1 简介	281
20.2 光刻和蚀刻	281
20.2.1 光刻	281
20.2.2 蚀刻	282
20.3 直接材料沉积	282
20.4 光学 MEMS	285
20.5 MEMS 封装	288
20.6 功能化和新颖应用	289
20.7 小结	291
参考文献	291
第 21 章 基于无机纳米粒子对基板和连接器喷墨打印在印制电路方面的应用 ...	295
21.1 简介	295
21.2 基板与连接器的金属离子喷墨打印	296
21.2.1 基板与连接器喷墨打印在微电子领域的应用	296
21.3 高分辨率喷墨打印	299
21.3.1 表面润湿和墨水修饰	299
21.3.2 减小印制液滴直径	300
21.3.3 物理表面处理	304
21.3.4 喷墨打印的离子凝胶	305
21.4 小结与展望	307
致谢	308
参考文献	308

第 1 章 喷墨微制造技术综述

David Wallace

1.1 简介

在过去的十年里，喷墨技术已作为主要的打印技术在家庭以及小型办公室/家庭办公室（SOHO）中占有举足轻重的地位，并且该技术已为大众所熟知。并且，在制造业领域，尤其是微制造业，喷墨打印技术已经作为高效的工具发挥着重要作用^[1]。作为能更加详细地讨论和介绍后续内容的引言部分，本章将简要地介绍喷墨技术的背景；讨论必要流量和图案形成原理；讨论微制造的特点及喷墨作为工具的潜力；讨论喷墨技术应用领域的广度，其中包括一些显著的举例；以及讨论该技术存在的问题、挑战和将来的潜在应用。

1.2 喷墨技术

喷墨技术不是一个单一的技术，而是具有不同技术的集成，这些技术拥有类似的功能：精确地产生自由运动的流体液滴。精确指的是液体的体积、液体产生的时间、液体运动的速度以及运动轨迹的方向。根据施加的特定技术，液体产生的直径范围、速度范围、频率范围以及精确度都将相当大地改变。关于不同的喷墨技术以及它们之间的关联的介绍已经超出本章的范围，下面只是一个简单的阐述，喷墨技术的物理^[2,3]以及实际应用^[4]的全面综述可供感兴趣的读者进一步仔细了解。

1.2.1 连续式（CIJ）喷墨打印技术

从喷嘴中流出的液体形成相同大小的液滴的现象最早在 1833 年被 Savart^[5]发现，并且非黏性射流和黏性射流情况下，分别由 Lord Rayleigh^[6,7]和 Weber^[8]用数学方法进行了描述。在连续喷墨模式技术里，液体在压力驱动下通过一个直径通常为 50 ~ 80 μm 的孔洞，并且在表面张力的作用下分裂成均匀的液滴，这一过程通过直径扰动^[9,10]或表面张力扰动^[11]的放大来实现。压电驱动机被用做驱动直径扰动，而微型加热器是用做驱动表面张力扰动^[12]。从喷嘴中脱落的一滴油墨在可变电场的作用下，获得了电子。在静电场下，这些带电的液滴直接落在基板的指定位置，即捕捉器或几个指定位置之一的基板上^[13]。