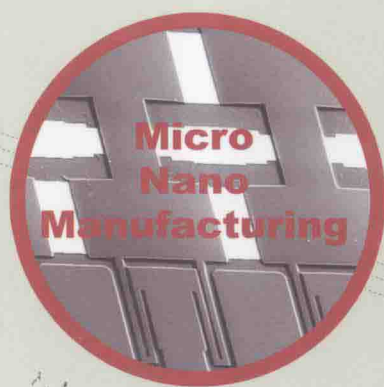


微纳制造的基础研究学术著作丛书

M i c r o N a n o M a n u f a c t u r i n g

射频微机电系统的 理论、设计、制备及应用

张海霞 缪旻 方东明 著



科学出版社

微纳制造的基础研究学术著作丛书

射频微机电系统的 理论、设计、制备及应用

张海霞 缪 旻 方东明 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

射频微机电系统技术是微机电系统的重要组成部分,本书主要从理论、设计、加工、封装和应用等方面介绍射频微机电系统器件与系统,结合作者及其团队近年来在相关领域的研究成果,详细分析和阐述传输线、天线、可调电感、可变电容、开关、滤波器、移相等核心器件的基本原理、主要类型、设计方法、加工技术、性能测试和典型应用等,为读者勾勒出射频微机电系统技术较为全面的技术基础、研究现状和发展趋势。

本书可作为微米纳米技术领域高年级本科生、研究生和教师的参考用书,并可供相关的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

射频微机电系统的理论、设计、制备及应用/张海霞,缪旻,方东明著.
—北京:科学出版社,2014.1
(微纳制造的基础研究学术著作丛书)
ISBN 978-7-03-038996-1

I. ①射… II. ①张… ②缪… ③方… III. ①微电子技术-射频系统-研究 IV. ①TN4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 254955 号

责任编辑:刘宝莉 孙伯元 / 责任校对:邹慧卿

责任印制:张 倩 / 封面设计:陈 敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014 年 1 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

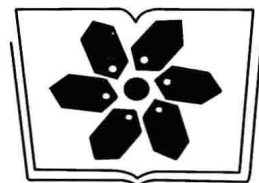
2014 年 1 月第一次印刷 印张:27

字数:524 000

定价:135.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)





中国科学院科学出版基金资助出版

《微纳制造的基础研究学术著作丛书》编委会

顾 问： 姚建年、解思深、熊有伦、钟掘、温诗铸、李同保、田中群

主 编： 卢秉恒

副主编： 王国彪、雒建斌、黎明

编 委：(按姓氏笔画排序)

丁 汉(华中科技大学)

丁玉成(西安交通大学)

刘 冲(大连理工大学)

刘 明(中国科学院微电子研究所)

孙立宁(苏州大学)

孙洪波(吉林大学)

朱 荻(南京航空航天大学)

张其清(中国医学科学院)

李圣怡(国防科学技术大学)

李志宏(北京大学)

苑伟政(西北工业大学)

姜 澜(北京理工大学)

段吉安(中南大学)

夏善红(中国科学院电子学研究所)

郭东明(大连理工大学)

顾长志(中国科学院物理研究所)

崔 铮(中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所)

黄文浩(中国科学技术大学)

董 申(哈尔滨工业大学)

蒋庄德(西安交通大学)

《微纳制造的基础研究学术著作丛书》序

随着人们认识世界尺度的微观化,制造领域面临着面向极小化的挑战,其基础研究正经历着从可视的厘米、毫米尺度向基于分子、原子的纳米制造技术过渡。纳米制造科学是支撑纳米科技走向应用的基础。国家自然科学基金委员会(以下简称基金委)重大研究计划项目“纳米制造的基础研究”瞄准学科发展前沿、面向国家发展的重大战略需求,针对纳米精度制造、纳米尺度制造和跨尺度制造中的基础科学问题,探索制造过程由宏观进入微观时,能量、运动与物质结构和性能间的作用机理与转换规律,建立纳米制造理论基础及工艺与装备原理。重点研究范围包括基于物理/化学/生物等原理的纳米尺度制造、宏观结构的纳米精度制造、纳/微/宏(跨尺度)制造、纳米制造精度与测量、纳米制造装备新原理等。本重大研究计划旨在通过机械学、物理学、化学、生物学、材料科学、信息科学等相关学科的交叉与融合,探讨基于物理/化学/生物等原理的纳米制造新方法与新工艺,揭示纳米尺度与纳米精度下加工、成形、改性和跨尺度制造中的尺度效应、表面/界面效应等,阐明物质结构演变机理与器件的功能形成规律,建立纳米制造过程的精确表征与计量方法,发展若干原创性的纳米制造工艺与装备原理,为实现纳米制造提供坚实的理论基础,并致力提升我国纳米制造的源头创新能力。正如姚建年院士指出的那样:该重大研究计划意义重大,通过原始创新性研究,旨在推动机械工程学科在基础性、前沿性等方面不断进展,在国际上取得重要地位,在某一领域形成中国学派。同时,他强调了纳米制造研究内容的创新性、学科交叉性、项目实施的计划性等,并期望在基础研究领域产生重大突破,取得重大成果。

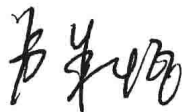
《微纳制造的基础研究学术著作丛书》是科学出版社依托基金委“纳米制造的基础研究”重大研究计划项目,经过反复论证之后组织、出版的系列学术著作。该丛书力争起点高、内容新、导向性强,体现科学出版社“三高三严”的优良作风。丛书作者都曾主持过重大研究计划“纳米制造的基础研究”项目或国家自然科学基金其他相关项目,反映该研究中的前沿技术,汇集纳米制造方面的研究成果,形成独特的研究思路和方法体系,积累丰富的经验,具有创新性、实用性和针对性。

《微纳制造的基础研究学术著作丛书》涉及近几年来我国围绕纳米制造科学的国际前沿、国家重大制造工程中所遇到的基础研究难题等方面所取得的主要创新研究成果,包括表面纳米锥的无掩模制造及光电特性,光刻物镜光学零件纳米精度制造基础研究,铜互联层表面的约束刻蚀化学平坦化新方法,大尺度下深纹纳米结构制造方法与机理表征,基于为加工技术的微纳集成制造原理及方法研究,微纳流

控系统跨尺度兼容一体化集成制造基础研究,微/纳光学阵列元件的约束刻蚀剂层加工技术与系统的基础研究,等等。

毫米制造技术的应用,带动了蒸汽工业革命,推动了英国的振兴;微米制造技术的发展,带来了信息工业革命,带领美国的崛起;纳米制造技术也必将引领第三次工业革命的浪潮,我国的纳米制造业若能把握住历史的机遇,必将屹立于浪潮之巅,为实现中华民族的伟大复兴贡献出强劲的力量。

作为基金委重大研究计划项目“纳米制造的基础研究”的指导专家组组长,我深信《微纳制造的基础研究学术著作丛书》的及时出版,必将推动我国纳米制造学科的深入发展,在难题攻克、人才培养、技术推动等方面发挥显著作用。同时,希望广大读者提出建议和指导,以促进丛书的出版工作。



2013年10月28日

前 言

射频微机电系统 (radio frequency micro electro mechanic system, RF MEMS) 技术是微机电系统的重要组成部分, 本书主要介绍应用于微波射频通信领域的各种 MEMS 元器件和可调谐器件, 如天线、电感、电容、开关、滤波器等, 详细介绍它们的分类、设计、制作、性能以及面临的问题, 对应用较广的 RF MEMS 电感、电容、开关、移相等重点进行了阐述和分析, 并介绍这些元器件的封装和应用实例。

本书共分十章, 涵盖从基础理论到 RF MEMS 器件的设计、加工与封装和应用, 各章节的主要内容如下:

第一章介绍 RF MEMS 基础, 从介绍 MEMS 技术入手, 详解 RF MEMS 的概念和内涵、技术特点、发展历史、核心器件、常用的工艺技术以及典型应用, 从而勾画出 RF MEMS 较为全面的图像。

第二章介绍了 RF MEMS 常用的软件仿真工具, 如 ANSYS, ConventorWare, Intellisense, HFSS, MicroWave Studio, COMSOL 等, 为后面 RF MEMS 器件和系统的设计和分析做准备。

第三章介绍 RF MEMS 可以采用的物理传输线形式及其基本原理, 主要包括已经在微波电路中得到应用的平面化传输线和微波特性优良、在毫米波应用中难以替代的鳍线等准平面化传输线, 此外, 还探讨由于微加工工艺的引入所诞生的各种新型平面、准平面传输线和片上波导结构。

第四章介绍 RF MEMS 电感, 这是 RF 领域最为重要的基础元件之一, 从电感的主要分类、特征参数入手, 对 MEMS 电感进行全面阐述, 并以平面螺旋电感、螺线管电感、可调电感等几类常见且常用的电感为例, 进行设计、计算、加工和测试的详细分析, 包括栅型电感、螺旋电感、螺线管电感和可调电感等, 以及利用 MEMS 加工工艺制作的螺旋电感、螺线管电感和静电驱动的可调电感, 重点是可调电感的可调机制探讨以及三种电感的微加工工艺方法。

第五章探讨可变电容, 这也是 RF MEMS 的核心器件之一, 详细介绍基于微加工技术可变电容的分类、关键参数以及常用的平行板可变电容的设计、加工与测试技术。

第六章讲述 RF MEMS 开关, 详细介绍开关的分类典型结构、模拟分析技术以及新材料和新工艺的应用。

第七章介绍利用 MEMS 方法制作微型化的滤波器, 具体分析和介绍各种结构

的射频滤波器,以及如何进一步满足小体积、轻重量的系统要求。

第八章介绍 RF MEMS 移相器,突出其体积小、重量轻、可批量制造、可与 IC 集成、加工成本低、可靠性高、功耗低、无谐波失真等特点。

第九章讲述 RF 天线,着重讨论适合于 SOC 和 SIP 平台的、采用微加工技术制作的几种微天线结构(微带贴片天线、微机械毫米波/亚毫米波/THz 天线、微机械可重构天线等)的原理与关键技术要素。

第十章主要探讨 RF MEMS 的封装,即如何将 RF MEMS 器件以及有源 IC 通过引线键合、倒装焊等微连接技术和微组装技术,装配到特定的基板上,并完成内部和对外的互连,对其进行保护,从而构成一个可以进一步焊接到电路板卡上的器件或模块。

本书所涉及的主要内容来源于射频微机电系统器件基础研究的结果,是作者及其所在单位多年来主持(参与)相关项目的最新研究成果。研究得到了 973、863、国家自然科学基金、教育部重大项目、重点实验室基金等研究项目的资助。参加单位有北京大学、上海交通大学、北京信息科技大学、中国科学院电子学研究所等。缪旻、方东明等为撰写组主要成员。本书撰写过程中得到了项目组所有研究者的大力支持和帮助,出版过程中凝聚了科学出版社多位同志的心血,在此表示衷心的感谢!作者还特别感谢支持开展纳机电器件基础研究工作的各位领导、专家和同行。

由于时间仓促,书中难免存在不足,热忱希望读者对本书批评指正。

目 录

《微纳制造的基础研究学术著作丛书》序

前言

第一章 RF MEMS	1
1.1 MEMS 概述	1
1.2 RF MEMS 简介	3
1.3 RF MEMS 发展历史	4
1.4 RF MEMS 常用工艺	9
1.4.1 体硅工艺	9
1.4.2 表面硅工艺	10
1.5 RF MEMS 应用	12
1.5.1 在可重构电路中的应用	13
1.5.2 在手持式无线系统中的应用	15
1.5.3 在基站中的应用	16
1.5.4 在无线能量传输中的应用	18
参考文献	20
第二章 RF MEMS 设计与仿真	25
2.1 ANSYS	25
2.1.1 主要功能	26
2.1.2 分析实例:平行板电容	26
2.2 CoventorWare	28
2.2.1 主要功能	28
2.2.2 分析实例:可调电容	29
2.3 IntelliSuite	31
2.3.1 主要功能	31
2.3.2 分析实例:RF 开关	32
2.4 HFSS	34
2.4.1 主要功能	34
2.4.2 分析实例:矩形波导腔体天线	36
2.5 CST Microwave Studio	38
2.5.1 主要功能	39

2.5.2 分析实例:喇叭天线	39
2.6 COMSOL	40
2.6.1 主要功能	40
2.6.2 分析实例:梳齿电容	41
参考文献	42
第三章 RF MEMS 传输线	43
3.1 概述	43
3.1.1 传输线的基本原理	43
3.1.2 传输线的分类与参量	44
3.1.3 传输线的损耗	46
3.2 微带线	47
3.2.1 概述	47
3.2.2 有效介电常数、特性阻抗的计算	49
3.2.3 微带线的损耗	50
3.2.4 表面波和高次模式的影响	50
3.3 带状线	51
3.3.1 概述	51
3.3.2 传播常数、特征阻抗的计算	52
3.3.3 带状线的损耗	53
3.4 槽线	54
3.4.1 概述	54
3.4.2 波长及特性阻抗的计算	54
3.5 鳍线	56
3.5.1 概述	56
3.5.2 波导波长及特性阻抗的计算	56
3.6 共面波导	58
3.6.1 概述	58
3.6.2 特性阻抗、有效介电常数及介质损耗的计算	59
3.7 微机械平面传输线	60
3.7.1 薄膜支撑传输线	60
3.7.2 微屏蔽传输线	62
3.7.3 LIGA 微机械传输线	64
3.7.4 V 型槽共面波导和 W 型槽共面波导	65
3.7.5 抬高型和覆盖型共面波导	67
3.7.6 带隔离薄膜的有限接地共面波导	68

3.7.7 浅槽型共面波导	68
3.8 微机械波导	69
3.8.1 概述	69
3.8.2 内嵌于 LTCC 基板的微机械波导	71
参考文献	80
第四章 RF MEMS 电感	83
4.1 MEMS 电感的分类	83
4.1.1 栅型电感	83
4.1.2 螺旋型电感	84
4.1.3 螺线管型电感	86
4.1.4 可调电感	90
4.2 电感的关键参数	94
4.2.1 电感量	94
4.2.2 品质因数	95
4.2.3 损耗机制	95
4.3 平面螺旋电感	96
4.3.1 平面螺旋电感的设计	97
4.3.2 平面螺旋电感的加工	99
4.3.3 平面螺旋电感的测试分析	100
4.4 螺线管电感	102
4.4.1 螺线管电感的设计	103
4.4.2 螺线管电感的加工	107
4.4.3 螺线管电感的测试分析	110
4.5 可调电感	112
4.5.1 可调电感的设计	112
4.5.2 可调电感的加工	114
4.5.3 可调电感的测试分析	116
参考文献	117
第五章 RF MEMS 可变电容	124
5.1 可变电容的分类	124
5.1.1 平行板可变电容	124
5.1.2 三极板可变电容	126
5.1.3 梳齿式可变电容	127
5.1.4 其他类型的可变电容	129
5.2 可变电容的关键参数	131

5.3 平行板可变电容	133
5.3.1 可动极板的形变分析	133
5.3.2 可变电容的动力学分析	140
5.3.3 刻蚀孔对可变电容的影响	144
5.4 平行板可变电容的加工	149
5.4.1 关键工艺	149
5.4.2 工艺流程	150
5.5 平行板可变电容的测试分析	152
参考文献	154
第六章 RF MEMS 开关	158
6.1 RF MEMS 开关的分类	158
6.2 RF MEMS 开关的关键参数	160
6.3 横向 RF 开关	161
6.3.1 横向 RF 开关的研究现状	161
6.3.2 横向热驱开关的工作原理	164
6.3.3 隔离结构设计	165
6.3.4 驱动结构设计	168
6.3.5 其他部分的设计	172
6.4 RF 开关的加工	174
6.5 RF 开关的测试方法	176
6.5.1 直流性能测试	176
6.5.2 RF 传输性能测试	178
6.5.3 可靠性测试	180
6.6 RF 开关的性能分析	181
6.6.1 直流性能分析	181
6.6.2 RF 性能分析	183
6.6.3 可靠性	185
6.6.4 性能总结	186
参考文献	186
第七章 RF MEMS 滤波器	190
7.1 RF MEMS 滤波器的分类	190
7.2 滤波器的关键参数	194
7.3 无源 LC 滤波器	196
7.4 RF MEMS 滤波器	200
7.4.1 设计思路	200

7.4.2 仿真计算	202
7.5 RF MEMS 滤波器的加工	206
7.6 测试分析	208
参考文献	212
第八章 RF MEMS 移相器	214
8.1 移相器的分类	214
8.2 微机械移相器	217
8.2.1 非线性延迟线原理	217
8.2.2 分布式微机械移相器的电路模型、损耗和移相方式	223
8.3 微机械分布式移相器的器件设计	229
8.3.1 基于体硅微机械工艺的移相器基本单元设计	229
8.3.2 总体结构与参数的确定	232
8.3.3 GND 导体宽度有限时的 CPW 特性分析	235
8.3.4 模拟驱动时移相器的电路设计、性能分析及高频电磁仿真	238
8.3.5 移相器的数字驱动及其高频电磁仿真模型	248
8.3.6 微机械桥膜结构的机械特性分析	250
8.3.7 移相器的静态驱动特性分析	253
8.4 微机械分布式移相器的加工和测试	254
8.4.1 基于体硅工艺的微机械分布式移相器微加工流程及样品	254
8.4.2 应力和悬空桥膜厚度的检测及桥膜应力所致变形的测量	255
8.4.3 微机械移相器的静态驱动特性测试	260
8.4.4 微机械移相器高频测试原理	264
参考文献	272
第九章 RF MEMS 天线	275
9.1 微带贴片天线	275
9.1.1 基本原理	276
9.1.2 馈电技术	279
9.1.3 带宽的扩展	282
9.1.4 圆极化技术	288
9.1.5 紧凑化天线	291
9.1.6 有源器件与天线的集成	293
9.2 微机械毫米波/亚毫米波/THz 天线	296
9.2.1 平面化的微机械毫米波/亚毫米波天线	298
9.2.2 微机械毫米波喇叭天线	301
9.2.3 THz 天线	304

9.3 微机械可重构天线	309
9.3.1 基本原理	311
9.3.2 频率可重构天线	312
9.3.3 方向图可重构天线	315
9.3.4 频率和方向图可同时重构的天线	316
9.3.5 多功能可重构天线	318
参考文献	319
第十章 RF MEMS 封装	322
10.1 MEMS 封装	323
10.1.1 RF 封装的特点和作用	324
10.1.2 RF 封装的主要类型	325
10.1.3 常用封装材料	326
10.1.4 片到封装及芯片内部的互连	327
10.2 器件级封装	330
10.2.1 常见封装形式	330
10.2.2 外观及引脚形式	336
10.2.3 基板技术	340
10.2.4 封装的内互连与 I/O	342
10.2.5 气密性封装技术	355
10.3 圆片级封装技术	374
10.3.1 圆片级盖帽封装	374
10.3.2 微屏蔽和原位自封装	380
10.4 系统级封装	381
10.4.1 二维 RF MCM	384
10.4.2 3D RF SIP	385
10.4.3 可埋入有源/无源元件的柔性基板技术	401
10.4.4 集成无源器件	403
10.5 前沿技术与挑战	404
参考文献	405
索引	408

第一章 RF MEMS

RF MEMS 是 MEMS 技术的一个重要分支,在过去的几十年里得到了飞速的发展,本书的第一章将从介绍 MEMS 技术入手,详解 RF MEMS 的概念和内涵、技术特点、发展历史、核心器件、常用的工艺技术以及典型应用,勾画出 RF MEMS 技术较为全面的图像。

1.1 MEMS 概述

微机电系统(micro electro mechanical system, MEMS),是集物理、化学和生物等的传感器、执行器与信息处理和存储为一体的微型集成系统,泛指那些采用大批量微加工方法制造的微小型器件和集成系统,如图 1.1 所示。

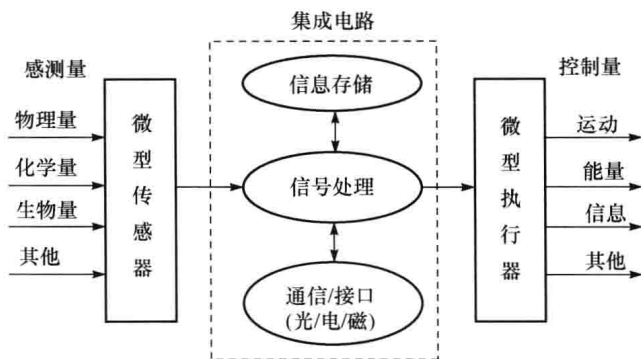


图 1.1 MEMS 的定义

从广义上讲, MEMS 是集微机械、传感器、执行器、电源、电路、信号处理、智能控制等于一体的系统,通过感知运动、光、电、声、热、磁等自然界信号,将这些信号转换成可以被广泛的电子系统识别和处理的电信号,从而将外部世界与电子世界有机地联系起来,它既具有强大的系统性和拓展性,又具有体积小、重量轻、能耗低、性能优异等特点,在民用和军事领域都有着广泛的应用。

MEMS 的发展要追溯到 20 世纪 50 年代。1959 年,著名物理学家 Feynman^[1] 在其演讲“*There is plenty room at the bottom*”中提出了系统微型化的概念,并预言了这一技术的广阔应用前景,拉开了各类微小型机械和系统的研究序幕。20 世纪 60 年代到 70 年代,硅的各向异性腐蚀技术的出现催生了第一款微型压力传感

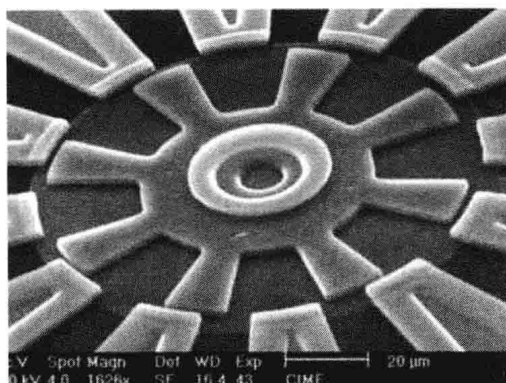


图 1.2 加州大学伯克利分校的第一个硅静电马达

器^[2];80 年代,薄膜淀积技术的发展让微机械表面硅工艺得到了快速开发和广泛应用,1987 年美国加州大学伯克利分校(UC Berkeley)的 Muller^[3]等研制成功了世界上第一个微型硅静电马达,如图 1.2 所示,震惊学术界,不但让 MEMS 正式成为一个专业名词,也在世界范围内点燃了 MEMS 研究的烽火,此后, MEMS 成为各国科研的一个重要领

域,并且涌现出了一大批具有影响力的科学家和研究团队,其中,美国加州大学伯克利分校的 Muller,日本东北大学(Tohoku University)的 Esashi,荷兰德尔福特理工大学(TU Delft)的 Middelhoek 和美国麻省理工学院(MIT)的 Senturia 等最为具有代表性,由于他们在 MEMS 领域的卓越贡献,且四位教授姓氏的首写字母恰好组成 MEMS 一词,一时被传为业内佳话。

在过去的几十年里, MEMS 的科研成果在产业界遍地开花,其中以微加速度计、微型陀螺仪、微型压力传感器、打印头与数字微镜阵列 DMD 等为代表系列核心产品,在汽车电子、消费类电子、国防、航空航天与生物医疗等行业发挥了重要作用并得到广泛应用,逐渐形成了一个蓬勃发展的新兴产业,为信息时代的下一个大发展带来了契机。图 1.3 概括了过去 60 年里 MEMS 技术及其产业的发展历程。

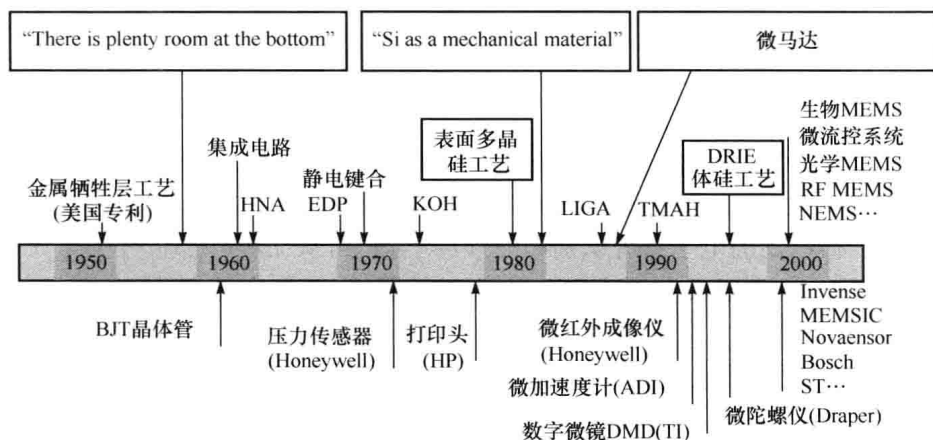


图 1.3 MEMS 的发展历程