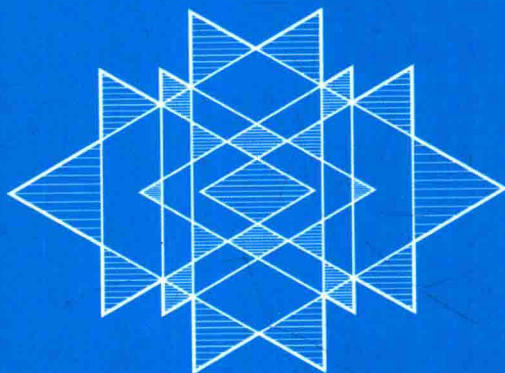


ISTE WILEY

微纳机电系统先进技术研究与应用丛书

纳机电系统

Nanoelectromechanical Systems



[法]

劳伦·特拉夫格 (Laurent Duraffourg)
朱利安·阿尔卡莫内 (Julien Arcamone)

著

曹 峥 译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



微纳机电系统先进技术研究与应用丛书

纳机电系统

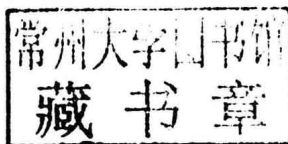
劳伦·特拉夫格 (Laurent Duraffourg)

[法]

著

朱利安·阿尔卡莫内 (Julien Arcamone)

曹峥 译



机械工业出版社

本书介绍了 MEMS (微机电系统) 向 NEMS (纳机电系统) 的演变、NEMS 的相关理论和技术以及相关的前沿研究。书中内容主要讨论了 NEMS 的机电特性、尺度效应带给 NEMS 的有趣性能以及目前的制造工艺, 为该领域目前和未来的研究提供了清晰的叙述。

本书针对性强、内容精练, 非常适合对 MEMS、NEMS 这一特定话题感兴趣的读者阅读, 同时也适合 MEMS、NEMS 技术人员和设计人员使用, 可供 MEMS、NEMS 专业的高年级本科生和研究生参考。

Copyright © 2015 ISTE Ltd

All Right Reserved. This translation published under license. Authorized translation from English language edition, entitled *Nanoelectromechanical Systems*, ISBN: 978-1-84821-669-3, by Laurent Duraffourg and Julien Arcamone, Published by John Wiley & Sons. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder.

本书中文简体字版由 Wiley 授权机械工业出版社独家出版。未经出版者书面允许, 本书的任何部分不得以任何方式复制或抄袭。

版权所有, 翻印必究。

北京市版权局著作权合同登记 图字: 01-2015-6954 号。

图书在版编目 (CIP) 数据

纳机电系统/(法) 劳伦·特拉夫格, (法) 朱利安·阿尔卡莫内著; 曹峥译. —北京: 机械工业出版社, 2018.3

(微纳机电系统先进技术研究与应用丛书)

书名原文: Nanoelectromechanical Systems

ISBN 978-7-111-59127-6

I. ①纳… II. ①劳… ②朱… ③曹… III. ①纳米技术-应用-机电系统-研究 IV. ①TM7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 023236 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 顾 谦 责任编辑: 顾 谦

责任校对: 张 征 封面设计: 马精明

责任印制: 张 博

三河市国英印务有限公司印刷

2018 年 4 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 9 印张 · 174 千字

0 001—2 800 册

标准书号: ISBN 978-7-111-59127-6

定价: 59.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线: 010-88361066 机工官网: www.cmpbook.com

读者购书热线: 010-68326294 机工官博: weibo.com/cmp1952

010-88379203 金书网: www.golden-book.com

封面防伪标均为盗版

教育服务网: www.cmpedu.com

译者序

作为众多行业产品的基本组件，MEMS（微机电系统）有着广泛的应用领域，如消费电子、汽车电子、工业控制、智能家居等，其市场规模在2014年已达到111亿美元。据预测，2020年全球MEMS产业将达到300亿美元。小型化所带来的优势促进了MEMS向NEMS（纳机电系统）的发展。因受到近年来智能移动设备、可穿戴设备以及物联网市场的驱动，与MEMS/NEMS相关的研究与日俱增，新兴器件和新技术层出不穷，MEMS乃至NEMS传感器件的应用前景将十分光明。

2015年，我国的MEMS器件市场规模占据全球市场的1/3，并处于高速增长状态。在国家自然科学基金“十三五”发展规划中，“微纳集成电路和新型混合集成技术”被列为信息科学部优先发展领域，体现出我国对于该研究领域的重点关注。随着国内在设计、制造、封装和测试等技术和工艺方面的日益成熟，我国在全球机电领域的竞争力不断增强，与发达国家的差距在逐渐缩小。

本书主要针对MEMS到NEMS的转变中遇到的尺度效应问题和相关的解决方案进行了讨论，对当前的制造工艺进行了介绍，并对未来的技术发展方向进行了展望。相比市面上的相关参考书籍，本书篇幅短小、内容精练、针对性很强。对于开展相关研究工作的人员来说，是一本非常实用的理论和技术参考书。

译者希望感谢负责本书引进工作的机械工业出版社的朋友们，以及几年来给予译者大力支持的家人。没有他们，本书与之前的几本译作均不可能顺利地完成并出版。谨以本书献给译者的先生、父母与公婆。

译者

原 书 前 言

自 Blaise Pascal 于 1642 年发明了第一台计算器（见图 1）以来，机械系统为工业革命作出了巨大的贡献，并继续在人们的日常生活中发挥着基础性的作用。

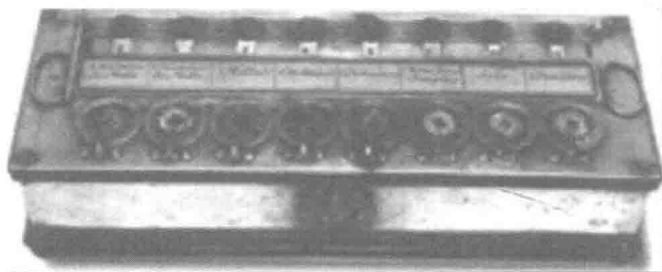


图 1 Pascaline 加法器（来源：IBM）

在 20 世纪 80 年代，机械系统发展到微米级，成为微机械系统。它们的横向尺寸范围从几微米到几百微米，厚度为 $10\mu\text{m}$ 。这些是换能器，它们的特别之处在于它们能将机械能（移动、约束）转换成电能。最有名的换能器是微陀螺仪和压力传感器，它们有着无数被普通公众所利用的应用（安全气囊、移动电话、游戏等）。微电机如图 2 所示。

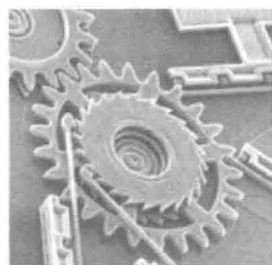


图 2 微电机（来源：MEMSX）

几年前，与电子技术结合的机械技术达到纳米级。纳米系统因此渗透到介观物理的世界，在尺寸 $1\text{nm} \sim 1\mu\text{m}$ 的分子或超分子尺度下工作。这些物体是能够测量物理学、化学或生物物理学中分子间的相互作用的最新探针。它们涵盖了大量的应用，从信号处理到超弱刺激的检测。具体而言，其较低的质量 ($10^{-18} \sim 10^{-15}\text{g}$) 使它们成为识别生物界内大分子或测量细胞强度的理想选择。这些组件的潜力暗示了它们将在医学诊断、环境监测和食品质量监测领域扮演重要的角色。本书将介绍纳米系统的理论和科技元素。希望本书能够成为未来读者的一个有用的工具，并为该领域当前和未来的研究提供一个尽管可能不够完整的蓝图。硅纳米线如图 3 所示。

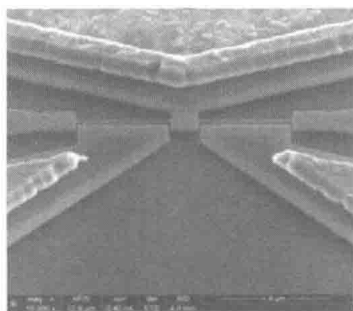


图 3 硅纳米线（来源：CEA - LETI）

Laurent Duraffourg

2015 年 4 月

物 理 常 数

ε_0 : 真空介电常数 ($8.85 \times 10^{-12} \text{F}$)

μ_0 : 真空磁导率 ($4\pi \times 10^{-7} \text{H} \cdot \text{m}^{-1}$)

h : 普朗克常数 ($6.62 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$)

$\hbar$: 约化普朗克常数 ($h/2\pi$)

k_B : 玻耳兹曼常数 ($1.38 \times 10^{-23} \text{J} \cdot \text{K}^{-1}$)

m_e : 电子质量 ($9.105 \times 10^{-31} \text{kg}$)

Da: 1 道尔顿原子质量单位 ($1.6605 \times 10^{-24} \text{kg}$)

e : 电子电荷 ($1.602 \times 10^{-19} \text{C}$)

N_A : 阿伏伽德罗常数 (6.022×10^{23})

c : 光速 ($2.997 \times 10^8 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

物 理 量

x 、 y 、 z : 位移 (m)

v_x 、 v_y 、 v_z : 速度 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

a_x 、 a_y 、 a_z : 加速度 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)

m : NEMS 的总质量 (kg)

m_{eff} : NEMS 的有效质量 (kg)

k : NEMS 的刚度 ($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)

k_b : 玻耳兹曼常数 ($\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$)

k_{eff} : NEMS 的有效刚度 ($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)

k_d : Duffing 刚度 ($\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$)

l : 长度 (m)

w : 宽度 (m)

t : 厚度 (m)

g : 静电间隙 (m)

E : 弹性模量 (P)

I : 转动惯量 (m^4)

σ : 约束 (P)

ε : 伸长率

ρ : 密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

T : 温度 (K)

ℓ : 平均自由程 (m)

q : 电荷 (C)

C_{th} : 热导 ($\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$)

G_{th} : 热导 ($\text{W} \cdot \text{K}^{-1}$)

R_{th} : 热阻 ($\text{W}^{-1} \cdot \text{K}$)

σ_{th} : 导热系数 ($\text{W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$)

N_a 、 N_d : 受体 (P)、供体 (N) 掺杂剂的水平 (cm^{-3})

R : 电阻 (Ω)

C : 电容 (F)

μ_e : 电迁移率 ($\text{m} \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)

ρ_e : 电阻率 ($\Omega \cdot \text{m}$)

$\Delta R/R$: 相对电阻变化

P_{th} : 热弹性耗散功率 (W)

P_e : 电耗散功率 - 焦耳效应 (W)

G 、 γ_G : 压阻应变系数

Q : 品质因数

f_1 : NEMS 的第 1 个机械模态的共振频率 (Hz)

f_n : NEMS 的第 n 个机械模态的共振频率 (Hz)

δf : 标称频率附近的频散 (Hz)

Δf : 相对标称频率的频率增加 (Hz)

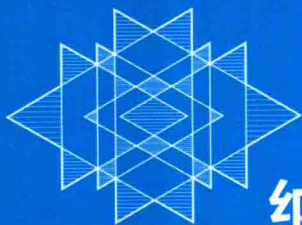
ω_1 : 角频率 ($2\pi f_1$)

ω_n : 角频率 ($2\pi f_n$)

目 录

译者序	
原书前言	
物理常数	
物理量	
第1章 从 MEMS 到 NEMS	1
1.1 微纳机电系统: 概述	1
1.2 小结	7
第2章 纳米尺度上的转导与噪声的 概念	9
2.1 机械传递函数	9
2.2 转导原理	14
2.2.1 纳米结构的驱动	15
2.2.2 检测	21
2.3 自激振荡与噪声	34
2.4 小结	39
第3章 NEMS 与其读出电路的 单片集成	41
3.1 简介	41
3.1.1 为什么要将 NEMS 与其读出 电路进行集成	41
3.1.2 MEMS - CMOS 与 NEMS - CMOS 之间的区别	42
3.2 单片集成的优势与主要 途径	43
3.2.1 集成方案及其电气性能的 比较	43
3.2.2 闭环 NEMS - CMOS 振荡器: 构建基于 NEMS 的频率传感器的 必不可少的组成模块	46
3.2.3 从制造技术的角度概述 主要成就	47
3.3 从转导的角度对一些显著 成就的分析	51
3.3.1 电容式 NEMS - CMOS 的 案例	51
3.3.2 压阻式 NEMS - CMOS 的 案例	55
3.3.3 替代途径	58
3.4 小结与未来展望	59
第4章 NEMS 与尺度效应	60
4.1 简介	60
4.1.1 固有损耗	64
4.1.2 外部损耗	65
4.2 纳米结构中的近场效应: 卡西米尔力	69
4.2.1 卡西米尔力的直观解释	69
4.2.2 问题	70
4.2.3 两个硅板之间卡西米尔力的 严格计算	72
4.2.4 纳米加速度计内卡西米尔力的 影响	76
4.2.5 本节小结	79
4.3 “固有”尺度效应的示例: 电传导定律	80
4.3.1 电阻率	80
4.3.2 压阻效应	85

4.4 光机纳米振荡器和 量子光机.....	93	上”和“自上而下”制造 工艺.....	114
4.5 小结	101	A.1 “自下而上”制造	114
第5章 结论与应用前景：从基础 物理到应用物理	102	A.2 “自上而下”制造	116
附录.....	114	附录 B 卡西米尔力详述	117
附录 A 针对纳米线的“自下而 上”和“自上而下”制造 工艺.....		参考文献.....	119



纳机电系统

Nanoelectromechanical Systems

关于作者

Laurent Duraffourg是法国格勒诺布尔的CEA-LETI实验室（Minatec校区）的资深科学家。他目前领导CEA-LETI的纳米光子学和光学传感器实验室。

Julien Arcamone是法国格勒诺布尔的CEA-LETI实验室的MEMS业务研发主管。他是NEMS器件领域的研究科学家。

本书主要针对MEMS到NEMS的转变中遇到的尺度效应问题和相关的解决方案进行了讨论，对当前的制造工艺进行了介绍，并对未来的技术发展方向进行了展望。相比市面上的相关参考类书籍，本书篇幅短小，内容精炼，针对性很强。对于开展相关研究工作的人员来说，是一本非常实用的理论和技术参考资料。



机械工业出版社微信公众号



E视界

传播电类内容提升专业知识



科技电眼

关注电类行业动态 聚焦前沿科技

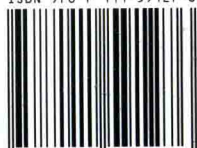
ISTE
WILEY

Copies of this book sold without a Wiley Sticker on the cover are unauthorized and illegal

上架指导 电气自动化

ISBN 978-7-111-59127-6

ISBN 978-7-111-59127-6



9 787111 591276 >

定价：59.00元

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com