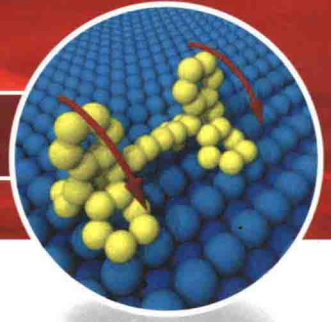




科爱传播  
KE AI COMMUNICATIONS

· 导读版 ·

材料科学与应用进展

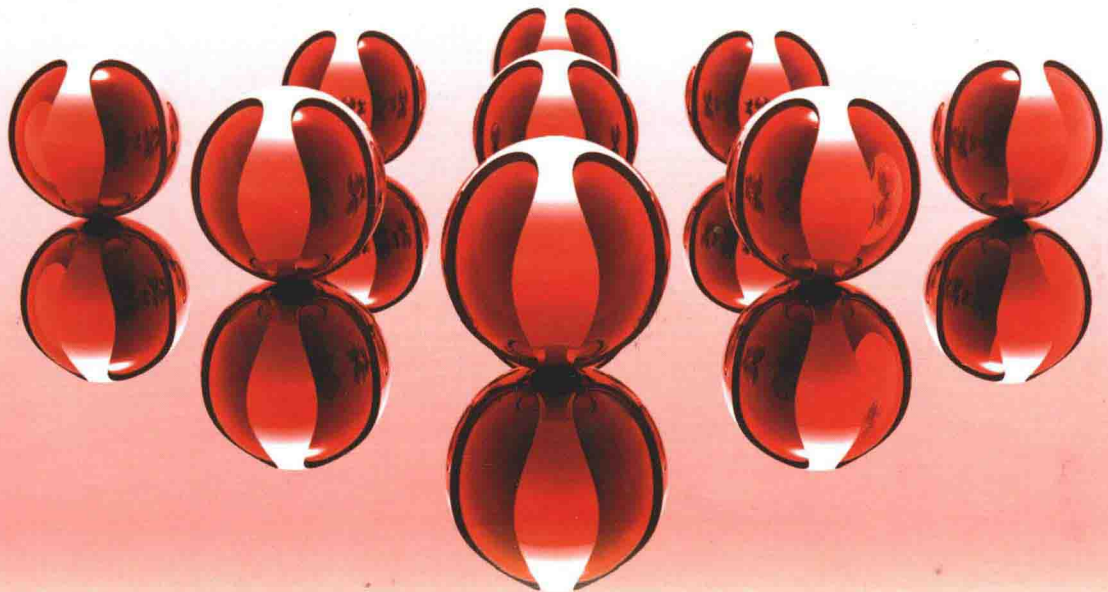


Thin Film Shape Memory Alloys  
Fundamentals and Device Applications

# 形状记忆合金薄膜

## 基础与器件应用

Shuichi Miyazaki  
Yong Qing Fu  
Wei Min Huang



CAMBRIDGE

原版引进



科学出版社



· 导读版 ·

本书的前言和目录均已译成中文，正文保留英文原文，另附北京大学工学院先进材料与纳米技术系郑玉峰教授，以及复旦大学力学与工程科学系霍永忠教授所作精彩导读。

形状记忆合金 (SMAs) 是指严重变形后，如果对其进行加热，能够恢复原来形状的一类材料。这类材料具有很多优异的性能。形状记忆合金的独特的性能使得形状记忆合金在作为智能材料与功能材料方面的应用备受关注。最近，SMAs薄膜已成为一种在微机电系统 (MEMS) 和生物医学应用中具有良好前景和高性能的表现的材料。

在各种SMAs薄膜中，TiNi薄膜是最具发展潜能的一种。本书介绍了TiNi形状记忆合金薄膜的性能、制备及特征，重点关注最新技术的发展及其在MEMS和生物器件中的应用。本书既涵盖了该学科的基本技术和理论，适合于初学者阅读；同时又介绍如薄膜沉积、后处理、薄膜的实际应用等知识，因此它又适合于有一定基础的学者阅读。

科学出版社 科爱传播

<http://www.kbooks.cn>  
[editor@kbooks.cn](mailto:editor@kbooks.cn)

销售分类建议：材料学

本版本只限于在中华人民共和国境内销售

**CAMBRIDGE**  
UNIVERSITY PRESS  
[www.cambridge.org](http://www.cambridge.org)

[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

ISBN 978-7-03-033246-2



9 787030 332462 >

定价：136.00 元



科爱传播  
KE'AI COMMUNICATIONS

材料科学与应用进展

# 形状记忆合金薄膜 基础与器件应用

Thin Film Shape Memory Alloys  
Fundamentals and Device Applications

科学出版社



材料科学与应用进展

# Thin Film Shape Memory Alloys

Fundamentals and Device Applications

## 形状记忆合金薄膜

基础与器件应用

SHUICHI MIYAZAKI

University of Tsukuba, Japan

YONG QING FU

Heriot-Watt University, Edinburgh

WEI MIN HUANG

Nanyang Technological University, Singapore

科学出版社

北京

图字:01-2011-8100号

Thin Film Shape Memory Alloys: Fundamentals and Device Applications (ISBN 978-0-521-88576-8) by Shuichi Miyazaki, Yong Qing Fu, and Wei Min Huang first published by Cambridge University Press 2009

All rights reserved.

This reprint edition for the People's Republic of China is published by arrangement with the Press Syndicate of the University of Cambridge, Cambridge, United Kingdom.

© Cambridge University Press & Science Press 2009

This book is in copyright. No reproduction of any part may take place without the written permission of Cambridge University Press and Science Press.

This edition is for sale in the People's Republic of China (excluding Hong Kong SAR, Macau SAR and Taiwan Province) only.

此版本仅限在中华人民共和国境内(不包括香港、澳门特别行政区及台湾地区)销售。

#### 图书在版编目(CIP)数据

形状记忆合金薄膜:基础与器件应用=Thin Film Shape Memory Alloys; Fundamentals and Device Applications; 英文/(日)宫崎修等著. —北京:科学出版社, 2012. 1

(材料科学与应用进展)

ISBN 978-7-03-033246-2

I. 形… II. 宫… III. 薄膜-形状记忆合金-研究-英文 IV. TG139

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 280789 号

责任编辑:田慎鹏/责任印制:钱玉芬

封面设计:耕者设计工作室

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>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2012 年 1 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2012 年 1 月第一次印刷 印张:31 1/4

字数:738 000

定价:136.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 导 读 一

对于 TiNi 形状记忆合金薄膜的研究始于 1990 年, 当时美国贝尔实验室的 Walker 等将 TiNi 薄膜的制备和微机械加工工艺结合在一起, 但他们使用的薄膜是沉积态的非晶结构。同年, 镍钛合金公司的 Busch 等首次确证了晶态 TiNi 薄膜中的形状记忆效应。随后人们发现相对于块体材料, TiNi 形状记忆合金薄膜更有发展潜力: 厚度较小、面积较大的薄膜材料散热能力和冷却效率提高, 增加了 SMA 器件形变回复的响应速度; 薄膜的电阻率高, 改善了器件对温度和应力检测的灵敏度; 同时, 薄膜还具有回复率高、回复力大等优秀的记忆特性并易于集成化制造。研究形状记忆合金薄膜材料的工艺与组织和性能之间的关系, 开发薄膜材料性能的测试方法与设备, 测量和积累薄膜性能的基础数据, 研制新型的性能优异的形状记忆合金复合梯度薄膜, 拓宽形状记忆合金薄膜的应用范围等各方面的工作已成为形状记忆合金薄膜研究者关注的前沿课题。(摘自章磊、谢超英、吴建生,《材料导报》, 2006, 第 20 卷, 第 2 期, 109-113)

自从 1994 年在美国加州成立了国际形状记忆与超弹性技术委员会, 陆续地在美国、欧洲和亚洲召开了形状记忆与超弹性技术的国际会议多次, SMST-94、SMST-97、SMST-2000、SMST-SMM-2001、SMST-2003、SMST-2006、SMST-2007、SMST-2008、SMST-2010, 这些文集中或多或少有形状记忆合金薄膜应用方面的文章报导。同时在国际马氏体相变会议文集中也有形状记忆合金薄膜的理论文章报导, 在材料科学、微机电系统、传感器和驱动器相关的多种国际刊物上也有大量的形状记忆合金薄膜的文章。

2009 年由剑桥大学出版社出版的这本《形状记忆合金薄膜—基础与器件应用》, 是形状记忆合金薄膜材料研究领域的第一本著作。该书由来自日本、英国、新加坡、瑞士、德国、中国香港、中国台湾、美国、韩国的 28 名作者共同完成, 三位主编分别为日本的 Shuichi Miyazaki、英国的 Yong Qing Fu 和新加坡的 Wei Min Huang, 作者们均为形状记忆合金薄膜研究领域的杰出学者, 有多年的形状记忆合金研究经验, 本书的主体内容分别是这些作者在相关研究领域多年的重要研究成果的反映, 相关的每章内容所涉及的参考文献可以反映该主题相关的最新文献进展。

本书的特点是分为形状记忆合金薄膜的基础篇和应用篇两大块内容, 前 9 章重点介绍溅射沉积 TiNi 基 SMA 薄膜的基础问题, 包括概述、马氏体相变基础、沉积技术、Ti/Ni 多层膜、薄膜的显微结构、晶化行为、力学性能及应力演化以及包括离子注入及激光退火等先进的 SMA 薄膜后处理技术; 后 10 章重点介绍

TiNi 基 SMA 薄膜在 MEMS 和生物医学领域的应用, 包括微阀、微泵、微笼、微镜等。前面的基础部分便于读者了解形状记忆合金薄膜的基础理论、制备技术和性能表征手段, 后面的应用部分便于读者明白如何实际应用形状记忆合金薄膜进行器件设计, 并可以借鉴作者们研发的实物样品图片和技术参数, 拓展新的应用领域。

我国的材料科学工作者在形状记忆合金的研究方面也取得了很多重要的进展, 在国际形状记忆合金的基础研究和应用研究领域取得了很多可喜的成绩。先后有多家国内的研究机构从事形状记忆合金薄膜材料研究, 包括传统的温度响应的 TiNi 基形状记忆合金薄膜, 以及以 NiMnGa 为代表的新型磁控形状记忆合金薄膜, 都有国内专家在研究。同时形状记忆合金薄膜的应用也得到了我国一些科研单位的关注, 在民用和军用上都有单位在开发相关产品。本书适合国内的大专院校及研究单位从事形状记忆合金材料和产品研发的科研人员和有关科技工作者作为参考书, 读者应具备材料科学与工程专业的基本理论知识和实验技能, 尤其是形状记忆合金相关的马氏体相变理论基础和薄膜制备与表征技术的理论基础。

本书的主要缺点在于书的题目过大, 实际上主要的内容是 TiNi 基形状记忆合金薄膜材料, 并未涉及其他合金体系。此外, 本书的章节之间的联系缺乏衔接, 很多章节之间是独立的, 互相之间在少许内容上甚至有少量重复, 究其原因是因为各个章节分别有不同的作者编写, 在通稿上很难进行有效的删减。所以提醒读者可以就所关心的问题, 重点阅读相关章节, 然后再根据作者给出的参考文献进行按图索骥, 查到相关的文献原文, 获取更多的信息量。对国内读者而言, 阅读该书的难点可能在于书中有一些理论公式, 需要专门的知识才能看懂。

在已经出版的一些著作中, 也有涉及到形状记忆合金薄膜的内容, 比如赵连城, 蔡伟, 郑玉峰著, 《合金的形状记忆与超弹性》, 国防工业出版社, 2002, ISBN 7-118-02627-1; 郑玉峰, Yinong LIU 著, 《工程医用镍钛合金》科学出版社, 2011 (印刷中), 读者可以作为对照阅读或互补阅读。

郑玉峰

北京大学工学院先进材料与纳米技术系

## 导 读 二

科学出版社引进英国剑桥大学出版社 2009 年出版的《形状记忆合金薄膜：基础与器件应用》(*Thin Film Shape Memory Alloys: Fundamentals and Device Applications*)。该书由日本的宫崎修 (Shuichi Miyazaki)、英国的 Yong Qing Fu 和新加坡的 Wei Min Huang 等三位专家主编，同时汇聚了美国、欧洲与亚洲 9 个国家和地区的近 30 名该领域的国际知名专家作为其 19 章、近 500 页专著的作者，内容涵盖了当前形状记忆合金薄膜的制备、性能分析及其工程应用等各个方面的最新进展。由此不难看出本书的三大特点：全面性、权威性和前沿性。

关于形状记忆合金的专著，国内已经出版了不少。既有翻译国外学者的，如由张春才、苏佳灿主译，第二军医大学出版社 2003 年出版，也是英国剑桥大学出版社 1998 年出版的，日本 Kazuhiro Otsuka 与美国 Clarence Marvin Wayman 主编的《形状记忆材料》(*Shape Memory Materials*)。也有我国的专家学者编写的，如徐祖耀等《形状记忆材料》(上海交通大学出版社，2000 年)、赵连成、蔡伟和郑玉峰等《合金的形状记忆与超弹性》(国防工业出版社，2002 年)以及郑玉峰、赵连城《生物应用镍钛合金》(科学出版社，2004)。但是如果我们将本书与十年前同样由剑桥出版社出版的《形状记忆材料》相比较，可以很明显地看出近十年形状记忆合金研究及其应用的发展趋势。前一本书还有大量的章节总结了对于形状记忆效应与超弹性的基本特性及其产生的原因，而今这些问题已经都得到较完美的解答，不再是研究的主要方向了。因此，本书中仅有一章总结了相关的理论，以利于全书的完整性，也为那些对此理论不够熟悉的读者提供一个简明的介绍。而在前一本书中的配角，只是作为形状记忆合金的一种可能形态的薄膜成为了近十年形状记忆材料领域最重要的研究对象，并在工程应用中得到了最大的重视，也就理所当然地成为了本书的主角。

回顾形状记忆合金的发展历史是一部有趣而又典型的科技发展史。目前可以确认的、最早期的相关报道是约 80 年前 (1932 年) 瑞典科学家 Olander 的发现。此后沉寂了约 30 年几乎无人知晓，直到 1963 年美国海军实验室的 Buehler 等人的再次发现，并命名为形状记忆合金，自此获得了广泛的关注。这样的故事在科技发展史上并非少见，每人都可以从其中引伸出许多的感慨。不过，历史的事件应该要放到历史中去解读，这就必须要注意到 1939 年爆发的第二次世界大战，以及当时的金属材料制备技术和工程技术水平等制约因素。从后两个原因也可以部分的解答为何十年前的形状记忆合金薄膜还只是一个配角，而现在已经当仁不让地成为该类材料研究与应用中的主力军了。时势造英雄这句话，也可以用在形

状记忆合金的发展过程中。正是由于材料制备技术的发展，尤其是金属材料真空冶炼技术的成熟使得性能稳定和优异的 TiNi 形状记忆合金的制备不再困难，由此引发了 20 世纪六七十年代对该合金的大量研究。而八九十年代智能材料系统与结构作为机械、土木与航空航天等工程领域的一个未来发展方向的提出则催生了它的一波研究和应用的高潮，从此形状记忆合金不仅是金属材料学家的宠儿，也成为工程师的一个有力武器，还得到了物理学家、力学家甚至数学家的关注。同样也是由于金属薄膜制备技术的发展和完善，才使得形状记忆合金薄膜的登场成为可能。而 20 世纪 90 年代以来工程器件微型化的发展趋势，尤其是微机电系统 (MEMS) 的广泛应用则造就了它成为当前形状记忆材料研究和应用的主角。这也使得本书的出版十分及时和必要，相信其全面、权威和前沿的特点会使得它能替代那本十年前同样由剑桥大学出版社出版的《形状记忆材料》，成为未来十年里这个研究领域中最重要和最被广泛引用的参考书，也能成为其他各个研究领域的研究工作者了解和使用这种材料的最好的工作手册。而它深入浅出的编写风格也能为众多初学者提供很好的入门知识。

纵观全书，可分为两大部分，前 9 章着重于形状记忆合金薄膜的制备与性能分析，而后 10 章则重点讨论了形状记忆合金薄膜的诸多工程应用。其中第 1 章和第 10 章分别是这两大部分的综述，而第 2 章和第 11 章则介绍了这两大部分涉及内容的基础理论知识。与块体材料完全不同，形状记忆合金薄膜的制备目前主要是通过磁控溅射的方法获得的，第 3、4 两章对此进行了十分详尽的介绍。溅射获得的薄膜并不具有形状记忆效应，必须要进行热处理。相关方法及由此获得的具有形状记忆效应薄膜的力学性质是接下来两章的内容。而第一部分剩余的三章分别对薄膜内的残余应力、离子注入改性及激光退火处理等特殊而又十分重要的问题和方法分别进行了讨论。而本书的后八章则对当前形状记忆合金薄膜主要的工程应用都进行了十分详尽的介绍。显然，微机电系统 (MEMS) 和生物医学领域这两大当前形状记忆合金的主战场也必然成为了本书所关注的重点。

总之，由近三十名国际权威专家执笔撰写的《形状记忆合金薄膜：基础与器件应用》全面和系统地总结了该领域最前沿的研究成果。广泛但不泛泛、深入而不深奥，是一本难得的好书。

霍永忠

二零一一年十一月十二日

于复旦光华东楼

## 前 言

形状记忆合金 (SMAs) 是指严重变形后, 如果对其进行加热, 能够恢复原始形状的一类材料。这类材料具有很多优异的性能, 例如, 高的重量比功率 (力体积比)、加热/冷却过程中能够诱发大的相变应力与应变、伪弹性 (或超弹性)、高阻尼能量、良好的化学稳定性及生物相容性等。这些独特的性能使得形状记忆合金在作为智能材料与功能材料方面的潜在应用倍受关注。最近, 形状记忆合金薄膜也已经成为一种在微机电系统 (MEMS) 与生物医学应用中具有良好前景和高性能表现的材料。

在各种形状记忆合金薄膜中, TiNi 基薄膜最具有应用潜力, 它们通常是采用溅射方法制备而成。其他制备方法还包括: 激光烧蚀法、离子束沉积、电弧离子镀、等离子喷涂、快速蒸发法等。这些方法虽在文献中报导多次, 但却存在许多问题。众所周知, 溅射 TiNi 薄膜的相变温度、形状记忆行为与超弹性对其冶金学因素 (合金成分、污染、热机械处理、退火及时效处理等) 与溅射条件 (多靶共溅射、靶功率、气压、靶基距、沉积温度、衬底偏压等) 及使用条件 (加载条件、室温和环境、散热条件、加热/冷却速率、应变速率等) 非常敏感。

MEMS 系统用 TiNi 薄膜的主要优点在于其高的功率密度、大的位移及驱动力、低的操作电压等。SMA 薄膜单位体积的输出功率超过了所有其他的微驱动材料和机构。MEMS 系统中应用 SMA 薄膜还有利于简化运动机制从而增加设计的灵活性, 并可实现清洁、无摩擦、无振动的运动。SMA 薄膜在相变过程中, 伴随有力学、物理、化学、电学及光学性能的显著变化, 如屈服强度、弹性模量、硬度、阻尼性能、形状恢复特性、电阻率、热导率、热膨胀系数、表面粗糙度、蒸汽渗透性及介电常数等。此外, TiNi 薄膜对环境的改变非常敏感, 包括热场、应力场、电场以及磁场的变化非常敏感, 因此是一种可用于微型传感器的理想材料。

因为 TiNi 薄膜在驱动过程中能够提供大量输出力和位移, 所以它在 MEMS 系统中的应用多集中在微驱动器方面。目前具有代表性的微驱动器包括: 微泵、微阀、微钳、弹簧、微型垫片、微型定位器和微型振动器等。TiNi 基合金微泵和微阀的应用前景很广泛, 包括植入式药物输送、化学分析及分析仪器等。另外, 微系统的微组装、微创外科手术中的内窥镜及细胞内的药物注射微操纵器等一系列的应用则要求实现高精度地定位, 并操控小的甚至是微小的物体。

TiNi 薄膜优异的生物相容性使其在具有广阔市场并且不断发展的生物医学领域中表现出良好的应用前景。目前, TiNi 薄膜在微创手术、微型支架及生物

MEMS 的应用受到了越来越多的关注。利用 TiNi 薄膜制成的微型驱动器可用于药物灌注，或者放置在人体的关键部位用以促进循环。超弹性 TiNi 薄膜亦有望作为兼容元件用于 MEMS 和生物医用器械。

近年来，TiNi 基 SMA 薄膜及其微驱动器取得了很大的进展。这主要是由于 MEMS 与生物医学领域对新型驱动器和生物医学应用急剧增加的需求推动了其迅速发展。因此，我们有必要及时综合评述有关高质量高性能的 TiNi 薄膜制备及其技术应用的重要问题，本书的目的就在于此。我们相信本书是第一本关于 TiNi 薄膜的书，它不仅包括了 SMA 薄膜的最新技术（制备及表征），还包括了 SMA 薄膜的应用，尤其是在 MEMS 及医学器械中。本书不仅为想进一步了解该领域的读者提供入门介绍，更可作为技术手册，为具有一定基础的读者提供更多的相关知识。为更好地理解 SMA 薄膜相关的技术基础问题和跟踪该技术与应用的前沿问题，本书可作为重要的参考书。

本书自然地分为两部分，分别为技术部分（第 1 到第 9 章）和应用部分（第 10 到第 19 章）。第一部分集中讲述溅射沉积 TiNi 基 SMA 薄膜的基础问题，包括概述（第 1 章）、马氏体相变基础（第 2 章）、沉积技术（第 3 章）、TiNi 多层膜（第 4 章）、薄膜的显微结构、晶化行为、力学性能及应力演化（第 5~7 章）以及包括离子注入及激光退火等先进的 SMA 薄膜后处理技术（第 8、第 9 章）。第二部分讲述了基于 TiNi 基 SMA 薄膜的应用，主要集中在 MEMS 和生物医学领域。这一部分包括了各种应用的概述（第 10 章），形状记忆微驱动器的原理及模拟（第 11 章），微阀、微泵、微笼、微镜等 MEMS 器件、医用超弹性薄膜和薄膜复合材料微驱动器（第 12~19 章）。

最后，编者要衷心感谢完成本书的卓越的、国际化的作者群体，还要特别感谢剑桥大学出版社的迈克尔·凯里博士与莎伦·马修斯小姐对本书出版所提供的帮助。

（郑玉峰 译）

# Contributors

**P. J. Buenconsejo**

University of Tsukuba, Japan

**M. Cai**

University of Houston, USA

**G. P. Carman**

University of California, Los Angeles, USA

**H. Cho**

Oita University, Japan

**C. Y. Chung**

City University of Hong Kong, China

**Y. Q. Fu**

Heriot-Watt University, UK

**R. Gotthardt**

Swiss Federal Institute of Technology, Lausanne, Switzerland

**W. M. Huang**

Nanyang Technological University, Singapore

**X. Huang**

Yale University, New Haven, USA

**M. H. Hong**

Data Storage Institute, Singapore

**A. Ishida**

National Institute for Materials Science, Japan

**A. D. Johnson**

TiNi Alloy Company, USA

**H. Y. Kim**

University of Tsukuba, Japan

**M. Kohl**

Forschungszentrum Karlsruhe, IMT, Germany

**T. Lagrange**

University of California, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, USA

**H. -J. Lee**

Sungkyunkwan University, Korea

**J. K. Luo**

University of Bolton, UK

**R. L. De Miranda**

University of Kiel, Germany

**S. Miyazaki**

University of Tsukuba, Japan

**K. P. Mohanchandra**

University of California, Los Angeles, USA

**S. E. Ong**

Nanyang Technological University, Singapore

**E. Quandt**

University of Kiel, Germany

**A. G. Ramirez**

Yale University, New Haven, USA

**Y. C. Shu**

National Taiwan University, Taiwan

**M. Tomozawa**

University of Tsukuba, Japan

**C. Zamponi**

University of Kiel, Germany

**S. Zhang**

Nanyang Technological University, Singapore

# Preface

Shape memory alloys (SMAs) are materials that, after being severely deformed, can return to their original shape upon heating. These materials possess a number of desirable properties, namely, high power to weight (or force to volume) ratio, thus the ability to induce large transformation stress and strain upon heating/cooling, pseudoelasticity (or superelasticity), high damping capacity, good chemical resistance and biocompatibility, etc. These unique features have attracted much attention to the potential applications of SMAs as smart (or intelligent) and functional materials. More recently, thin film SMAs have been recognized as a new type of promising and high-performance material for microelectromechanical system (MEMS) and biological applications.

Among these SMA films, TiNi based films are the most promising ones. They are typically prepared by a sputtering method. Other technologies, e.g., laser ablation, ion beam deposition, arc plasma ion plating, plasma spray and flash evaporation, have also been reported in the literature, but with some intrinsic problems. It is well known that the transformation temperatures, shape memory behaviors and superelasticity of the sputtered TiNi films are sensitive to metallurgical factors (alloy composition, contamination, thermomechanical treatment, annealing and aging processes, etc.), sputtering conditions (co-sputtering with multi-targets, target power, gas pressure, target-to-substrate distance, deposition temperature, substrate bias, etc.), and the application conditions (loading conditions, ambient temperature and environment, heat dissipation, heating/cooling rate, strain rate, etc.).

The main advantages for MEMS applications of TiNi thin film include high power density, large displacement and actuation force, low operation voltage, etc. The work output per unit volume of thin film SMA exceeds that of all other microactuation materials and mechanisms. Application of SMA films in MEMS also facilitates the simplification of mechanisms with flexibility in design and creation of clean, friction free and non-vibrating movement. The phase transformation in SMA thin films is accompanied by significant changes in the mechanical, physical, chemical, electrical and optical properties, such as yield stress, elastic modulus, hardness, damping, shape recovery, electrical resistivity, thermal conductivity, thermal expansion coefficient, surface roughness, vapor permeability and dielectric constant, etc. TiNi thin films are sensitive to environmental changes

such as thermal, stress, magnetic or electrical fields, and thus should be ideal for applications in microsensors as well.

Since TiNi films can provide a large force and/or large displacement in actuation, most applications of TiNi films in MEMS are focused on microactuators. Micropumps, microvalves, microgrippers, springs, microspacers, micropositioners and microrappers are typical among others that have been realized. TiNi based micropumps and microvalves are attractive for many applications, for instance, implantable drug delivery, chemical analysis and analytical instruments, etc. Grasping and manipulating small or micro-objects with high accuracy is required for a wide range of important applications, such as microassembly in microsystems, endoscopes for microsurgery, and drug injection micromanipulators for cells.

The good biocompatibility of TiNi films is promising for their biological applications, which is a huge market at present and is still growing. At present, increasing attention has been paid to the use of TiNi thin film for minimally invasive surgery, microstents and bioMEMS applications. Microactuators made of TiNi thin films may be used to infuse drugs, or be placed in strategic locations in the body to assist circulation. TiNi SMA thin films, in the superelastic state, are also promising as compliant elements in MEMS and biological devices.

The development of TiNi based SMA thin films and their microactuators has achieved considerable progress in recent years. This was largely driven by a fast expansion of, in particular, MEMS and biological communities, in which the demand for novel actuators and biological applications has been growing dramatically. As such, a timely review of the important issues pertaining to the preparation of high quality and high performance shape memory TiNi thin films and the technical applications of these films is necessary. This book aims to serve this purpose. We believe that this is the first book dedicated to thin film TiNi SMAs; it covers not only the state-of-the-art technologies for thin film SMAs (preparation and characterization), but also their applications, in particular, in MEMS and biomedical devices. This book should naturally serve not only as an introduction to those who want to know more about this exciting field, but also as a technical handbook for those who have some knowledge but want to know more. Hence, it is an essential reference book both for a better understanding of the fundamental issues in technical aspects and for catching up with the current developments in technologies and applications in new frontiers.

The book is naturally divided into two parts, namely, technologies (from Chapter 1 to Chapter 9) and applications (Chapter 10 to Chapter 19). The first part is focused on the fundamental issues of sputter-deposited TiNi based SMA thin films, covering a general overview (Chapter 1); the basics of martensitic transformation (Chapter 2); deposition technologies (Chapter 3), Ti/Ni multi-layer thin films (Chapter 4); microstructure, crystallization, mechanical properties and stress evolution in thin film SMA (Chapters 5 to 7); as well as advanced post-treatment of thin film SMA including ion implantation and laser annealing (Chapters 8 and 9). The second part is devoted to the device applications based on TiNi based SMA thin film, focusing mainly on MEMS and biological applications.

It covers: an overview of applications (Chapter 10); theory and simulation of shape memory microactuators (Chapter 11); MEMS devices of microvalves, micro-pumps, microcages, micromirrors, superelastic thin film for medical applications, and thin film composite microactuators (Chapters 12 to 19).

The editors express their heartfelt thanks to the distinguished international team of contributors whose scientific efforts unite to form this book. We also express special thanks to the staff, Dr. Michelle Carey and Miss Sarah Matthews, at Cambridge University Press for their assistance.

# Abstracts of chapters

## 1 Overview of sputter-deposited TiNi based thin films

S. MIYAZAKI, Y. Q. FU AND W. M. HUANG

**Abstract:** The motivation for fabricating sputter-deposited TiNi base shape memory alloy (SMA) thin films originates from the great demand for the development of powerful microactuators, because actuation output (force and displacement) per unit volume of thin film SMA exceeds those of other microactuation mechanisms. Stable shape memory effect and superelasticity, which are equivalent to those of bulk alloys, have been achieved in sputter-deposited TiNi thin films. Narrow transformation temperature hysteresis and high transformation temperatures were also achieved in TiNiCu and TiNi(Pd or Hf) thin films, respectively. In the meantime, unique microstructures consisting of non-equilibrium compositions and nanoscale precipitates in the matrix have been found in Ti-rich TiNi thin films that were fabricated from an amorphous condition by annealing at a very low temperature. Several micro-machining processes have been proposed to fabricate the prototypes of microactuators utilizing TiNi thin films. This chapter will review the recent development of the above-mentioned topics relating to sputter-deposited TiNi based thin films. Some critical issues and problems in the development of TiNi thin films are discussed, including preparation and characterization considerations, residual stress and adhesion, frequency improvement, fatigue and stability, and thermomechanical modeling. Recent developments in the microdevices based on SMA thin films are also summarized.

## 2 Martensitic transformation in Ti-Ni alloys

S. MIYAZAKI

**Abstract:** The basic characteristics of the martensitic transformation of Ti-Ni shape memory alloys are described. They include the crystal structures of the parent and martensite phases, the recoverable strain associated with the martensitic transformation, the transformation temperatures, the temperature and orientation