

微纳技术著作丛书

用于恶劣环境的 碳化硅微机电系统

Rebecca Cheung 著
王晓浩 唐飞 王文弢 译

4
1

7882



科学出版社

www.sciencep.com

微纳技术著作丛书

用于恶劣环境的碳化硅 微机电系统

Rebecca Cheung 著

王晓浩 唐 飞 王文弢 译

科学出版社

北 京

图字:01-2009-2769 号

内 容 简 介

碳化硅以其优异的温度特性、电迁移特性、机械特性等,越来越被微电子和微机电系统研究领域所关注,不断有新的研究群体介入这一材料及其应用的研究。本书是目前译者见到的唯一一本系统论述碳化硅微机电系统的著作,作者是来自英国、美国从事碳化硅微机电系统研究的几位学者,他们系统综述了碳化硅生长、加工、接触、腐蚀和应用等环节的技术和现状,汇聚了作者大量的经验和智慧。

本书可供从事微电子、微机械研究的科研人员参考阅读,也可以作为研究生专业课程教材或参考书目。

Copyright © 2006 by Imperial College Press. All rights reserved. This book, or parts thereof, may not be reproduced in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or any information storage and retrieval system now known or to be invented, without written permission from the Publisher.

Simplified Chinese translation arranged with Imperial College Press, United Kingdom.

图书在版编目(CIP)数据

用于恶劣环境的碳化硅微机电系统/(英)张(Cheung, R.)著;王晓浩,唐飞,王文弢译. —北京:科学出版社,2010.3

(微纳技术著作丛书)

ISBN 978-7-03-026862-4

I. ①用… II. ①张…②王…③唐…④王… III. ①半导体材料-微电子技术-研究 IV. ①TN4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 035689 号

责任编辑:王志欣 孙 芳 / 责任校对:赵桂芬
责任印制:赵 博 / 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>

新 蕾 印 刷 厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010 年 3 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2010 年 3 月第一次印刷 印张:8 1/4

印数:1—2 500

字数:154 000

定价:35.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

译者序

2007~2008年,我在德国柏林工业大学微传感器与执行器中心访问研究期间,Obermeier教授研究小组正在进行碳化硅(SiC)微机电系统(MEMS)压力传感器的研究,我的同事Schellin专门研究SiC传感器上的金属化问题,该中心是国际上最早开展SiC MEMS研究的单位之一,本书作者之一Zappe也来自该中心,2002年在该中心获得博士学位。

我在该中心并没有从事SiC的相关研究,但是,环境的熏陶和诸多到该中心访问的国内学者对该中心SiC MEMS的兴趣促使我一直关注该方面的研究。回国后,又接触到国内一些应用部门对SiC传感器有明确的迫切需求,让我萌生开展此方面研究的想法。在查阅资料的过程中,深感很欠缺系统介绍SiC MEMS的资料。后有幸见到本书,觉得如果能够翻译本书并介绍给国内同行,也是对这一领域的微薄贡献,望能对国内同行有所帮助。

本书前言和第1章由王晓浩翻译,第2章由王晓浩和徐初隆翻译,第3章由唐飞和严子林翻译,第4章由唐飞和王文弢翻译,第5章由王文弢和严子林翻译,王晓浩完成所有图表翻译。全书由王晓浩和唐飞统稿。因专业背景不同,书中可能有部分专业词汇翻译不准,望读者海涵。

在本书翻译过程中,向我校新型陶瓷与精细工艺国家重点实验室的张勇副教授咨询了材料方面的知识,并向我校分析中心张四纯博士和德国洪堡大学的多英昕博士咨询了化学方面的知识。就本书原文中的个别问题,我与本书作者Rebecca Cheung取得了联系,得到了他详尽的回答。德国柏林工业大学的Obermeier教授和Schellin博士也给了我很多帮助。在此向他们一并表示感谢。

由于译者水平有限,书中难免存在不妥之处,敬请读者批评指正。

王晓浩

2010年元旦于清华大学

前 言

首先,我要感谢所有对本书作出贡献的专家。没有他们,就不可能有本书。我也要向苏格兰微电子中心的同行表示最深切的感谢,他们用多种方法为本书第1章描述的科学和技术作出了贡献。编写这样一本关于 SiC MEMS 手稿的目的是把最新的信息浓缩成易于被学术界和商业公司接受的书的形式。本书总结了与恶劣环境应用 SiC MEMS 相关的高质量信息,供从事此领域及相关研究的学生、学者和科研人员使用。我也希望本书能够对整个 MEMS 领域的发展贡献力量。

MEMS 是微小尺度的机械器件/传感器,其有非常广泛的应用,如小型化的加速度传感器和压力传感器、模仿蟋蟀纤毛的风速传感器、用于生物医学的微流体泵等。与 Si 相比, SiC 的主要优点自然是材料的机械和化学稳定性。一旦这些材料性能在高温和恶劣环境等应用中体现出来,就将对科学和工程的促进产生推动,导致最终产品的出现。本书阐述从 SiC 材料的发明到最终应用到 MEMS 中整个过程中相关的科学和技术。

本书分别在 SiC 加工、生长、接触和腐蚀等技术和工艺现状方面做了精彩阐述,并在最后一章论述了 SiC MEMS 的应用。

Rebecca Cheung

爱丁堡, 2005

目 录

译者序

前言

第 1 章 SiC MEMS 概述	1
1. 简介	1
2. SiC 材料性能	2
3. 制作微机电(MEM)器件	3
4. 表面改性	6
5. SiC MEMS 的频率调谐	8
6. MEMS 的机械测试	9
7. 应用举例	10
8. 小结	10
参考文献	10
第 2 章 SiC MEMS 沉积技术	14
1. 概述	14
2. 与 SiC 沉积相关的问题	15
3. APCVD	16
4. PECVD	19
5. LPCVD	20
6. LPCVD SiC 薄膜的掺杂	25
7. 其他沉积方法	27
8. 小结	28
参考文献	28
第 3 章 与 SiC 接触开发相关的问题综述	32
1. 概述	32
2. 热稳定性	32
3. p 型 SiC 的欧姆接触	43
4. 使用 Ni 的欧姆接触	51
5. 肖特基接触缺陷的影响	58

6. 小结	60
参考文献	62
第4章 SiC 的干法刻蚀	68
1. 概述	68
2. 等离子刻蚀基础	69
3. SiC 的等离子刻蚀	74
4. 等离子体化学	76
5. 掩膜材料	78
6. 近期发展及未来展望	80
7. 小结	81
参考文献	81
第5章 SiC MEMS 的设计、性能和应用	85
1. 概述	85
2. SiC MEMS 器件	91
3. 结论和展望	109
参考文献	111
附录	121

第 1 章 SiC MEMS 概述

Rebecca Cheung
School of Engineering and Electronics
King's Buildings
University of Edinburgh
Edinburgh, EH9 3JL, Scotland, UK
E-mail: r.cheung@ed.ac.uk

本章简要介绍 SiC 的基本性能及与 MEMS 常用半导体材料相比使用 SiC 的优势,以后的章节是精彩和广泛的讲解。本章内容限定在爱丁堡大学在 SiC MEMS 领域近期开展的研究范围内,讨论了几个 SiC MEMS 加工相关的工艺,以及需要解决的几个问题,以体现 SiC 作为应用于恶劣环境的 MEMS 材料的潜力。

1. 简介

世界范围内的整个 MEMS 市场已经超过了 100 亿美元,而在 5 年前还只是 1 亿美元^[1]。确定的市场包括汽车、医疗、通信、工业、运输和环境,以及家用电器和玩具等消费品。目前,最成功的 MEMS 传感器是基于 Si 的,如触发安全气囊用的传感器和喷墨打印机的喷墨头。另一方面,商用 SiC MEMS 器件尚处于襁褓期,市场也处于朦胧阶段。然而,未来的 SiC MEMS 市场会是非常广泛的,将占据整个 MEMS 市场相当的份额,因为 SiC 不可替代的材料性能,包括宽带隙、高的机械强度、高的热传导率、高熔点、抗腐蚀,用 SiC 制作的器件更具坚固性。与相应的 Si 器件相比,这些 SiC MEMS 器件可以在高温和恶劣环境下工作^[2,3]。SiC 传感器可以产生大的影响的潜在市场包括以下几个方面:

(1) 射频(RF)MEMS 领域。与使用 Si 制作的器件相比,使用 SiC 制作而应用于军事、商用无线通信、导航和传感系统的 RF 和毫米波器件,包括微型开关、可变电容、微制造电感、微制造天线、微型波导线和谐振器,具有工作频率、功率使用容量和稳定性方面的潜在优势。

(2) 应用于石油工业的压力传感器。目前,石油钻探规程已经修改,以防止传感器在高振动环境下受到损伤。

2)。但是,这里也有另一种方法来放置这些球,如面3中的虚线圆。这些晶面堆积的顺序决定了密堆积结构的类型和它们的对称性。根据约定的命名,SiC多型体用在一个晶胞内Si-C双层的数量来表示,附加字母C、H或R代表立方、六方和菱形对称性。例如,6H六方晶格基胞有6层Si-C双面,排列顺序是1,2,3,1,3,2,1,2,3,1,3,2;3C晶格排列顺序是1,2,3,1,2,3;2H-SiC相当于1,2,1,2;4H-SiC是1,2,1,3,1,2,1,3。

虽然所有SiC多型体具有相同的原子构成,但是,它们的电性能是不同的。例如,SiC的带隙可以从3C-SiC的2.3eV到4H-SiC的3.4eV。尽管带隙最小,3C-SiC却具有最高的电子迁移率($1000\text{cm}^2/\text{Vs}$)和饱和漂移速度(10^7cm/s),部分原因是由它的立方晶体对称性决定的。

SiC也具有优异的机械性能,尤其是硬度和耐磨性。在硬度方面,SiC的莫氏硬度是9,不亚于其他高硬度材料,如金刚石(10)和黄玉(8)。在耐磨性方面,SiC的耐磨性是9.15,作为对比,金刚石是10, Al_2O_3 是9.00。大部分酸都不能腐蚀SiC,只有熔融的(大于 600°C)碱金属氢氧化物(如KOH)可以腐蚀它。SiC不会熔化,只在 1800°C 左右的时候会升华。SiC表面可以通过构造热氧化 SiO_2 层来钝化,氧化速率与Si相比要慢得多。上述性能通常情况下与晶体类型无关。本书在附录的表中列出了3C-SiC、Si和6H-SiC几种材料的基本材料性能对比,从中可以发现SiC MEMS与Si MEMS相比在恶劣环境应用中具备的巨大潜力。

3. 制作微机电(MEM)器件

要想制作一个MEM器件,很多环节都需要考虑,包括生长需要的材料层、设计、工艺、封装和测试等。SiC以多种形式存在,包括单晶、多晶和无定型态。在不同的基底上可以生长不同结晶度的SiC,证明包括SiC薄膜的大量多层结构能够实现,而且系统中最终器件的工艺依赖于各层的设计和应用。下面各章很好地阐述了用于MEMS的SiC薄膜生长和工艺的约束和可行性。下面将讨论MEMS常用的两类工艺(体微加工和表面微加工)。

3.1. 微制造工艺

3.1.1. 体微加工

常用的体微加工技术也可以用于单晶、多晶或无定型SiC。对于单晶SiC,SiC必须直接生长在Si上面。这种情况下,正面和背面微加工都是可行的,如图2所示。因为SiC的高耐腐蚀性,大部分常用的各向异性湿法腐蚀液可以用于去除Si基底。

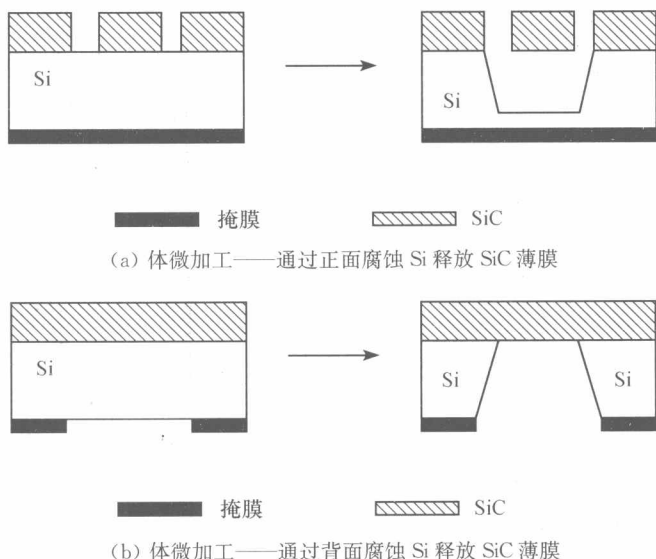
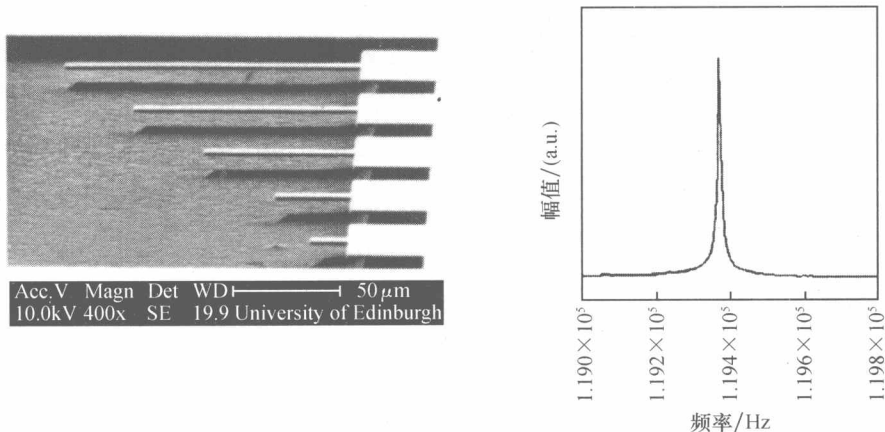


图 2

为了加强可靠性和可控性^[7~11],爱丁堡的研究小组为 Si 上的 3C-SiC 谐振器开发了全干法体微加工腐蚀工艺^[12],他们开发了使用 SF_6/O_2 混合气的一步式感应耦合等离子(inductive coupled-plasma, ICP)腐蚀工艺,用于加工直线谐振器。SiC 谐振器在释放悬臂梁和悬桥结构以前,就通过 Si 各向异性腐蚀加工出来了,是通过各向异性腐蚀 Si 得到的。悬臂梁和悬桥的谐振频率介于 120kHz 和 5MHz 之间,决定于器件的尺寸,如图 3 和图 4 所示。



左图为 SiC 悬臂梁阵列,长度分别为 25、50、100、150、200 μm ,使用一步式干法腐蚀工艺释放,右图为 200 μm 梁对应的频率响应曲线

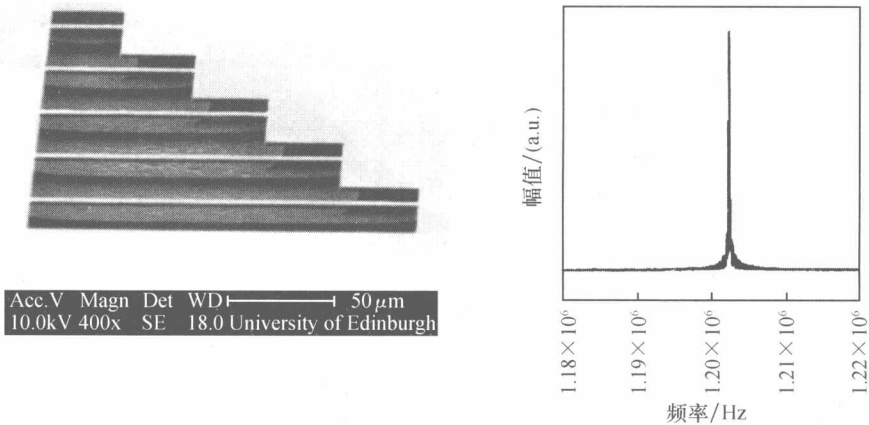


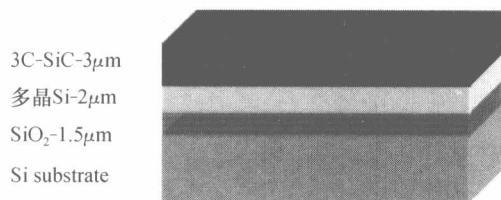
图 4

左图为 SiC 悬桥阵列, 长度分别为 50、100、150、200、250 μm, 使用一步式干法腐蚀工艺释放,

右图为 200 μm 悬桥对应的频率响应曲线

3.1.2. 表面微加工

因为在多层结构里面生长和加工 SiC 薄膜成为可能, 所以, 可以设计和加工复杂的 MEMS 器件, 并应用在很多领域。与体微加工中的湿法和干法释放类似的工艺也可以用于表面微加工。例如, 在多晶 Si 层上生长或者在氧化层上沉积的多晶 SiC 可以作为结构层使用, 相应的多晶 Si 或 SiO₂ 是其下的牺牲层, 如图 5 所示。当多晶 Si 作为牺牲层的时候, 可以使用 KOH、TMAH 或者我们开发的干法腐蚀试剂释放 SiC 谐振器, 氧化层在牺牲层腐蚀的时候用于保护它下面的 Si^[13], 如图 6 所示。图 7 是我们加工的一个 200 μm 长的谐振器在 66.65 kHz 基频下用静电激振振幅与施加的 V_{dc} 和 V_{ac} 的关系曲线^[13]。在相似的多层结构中制作电容驱动谐振器与压阻应力计^[13~18]是加速度计^[19,20]和压力传感器^[21~25]等更复杂的 MEMS 的基础。此外, 我们研制了第一个可以使用电热驱动的 3C-SiC 悬臂梁谐振器^[26]。

图 5 多层 SiC/多晶 Si/SiO₂/Si 结构

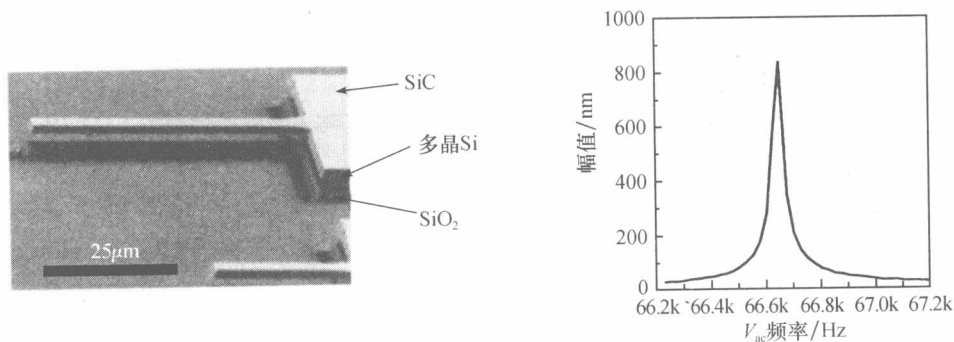


图6 在多层材料结构中加工的悬臂梁及其基频曲线

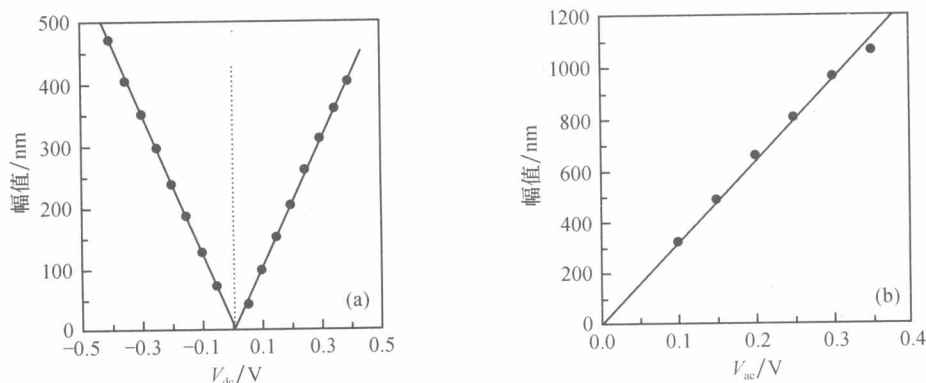


图7 200 μm 长悬臂梁的振幅 Z 与输入电压的关系

图(a)中 $V_{ac}=0.3\text{ V}$, 图(b)中 $V_{dc}=0.2\text{ V}$, 输入交流信号的频率是 66.65 kHz, 实线是数据点的线性拟合

4. 表面改性

最近有报道称 MEM 器件的表面微结构会破坏其响应, 尤其是品质因子^[27]。我们利用 X 射线光电能谱技术, 研究了使用 SF_6/O_2 进行 ICP 腐蚀 4H-SiC 后微观尺度下的表面改性^[28,29], 分析和研究了在不同腐蚀条件下 C 1s 和 F 1s 谱, 结论显示, 在腐蚀过的 SiC 表面同时存在共价键和 C-F 半离子键, 这可能是因为等离子体内存在活性的 F 离子。在 C 1s 谱中, C-F 基的强度随着混合气中 O_2 的浓度升高而降低, 如图 8(a) 所示。等离子体中高浓度的 O_2 会消耗 C 原子, 因此, 留下与 F 反应的 C 原子减少, 导致 C 1s 谱中 C-F 基随着 SF_6/O_2 混合气中 O_2 浓度的增加而变弱。

图 8(b) 是 SiC 在不同 O_2 浓度的 SF_6/O_2 混合气中腐蚀的 F 1s 谱。可以看到, 随着 O_2 比例的增加, F 1s 量从共价转变成了 C-F 半离子键。从小图中可以看出, $I_{\text{semi-ionic}}/I_{\text{covalent}}$ 比值随着 O_2 比例的增加而增加; 也可以看出, 在干法腐蚀 SiC

时,为了获得较高的 SiC 腐蚀速率,需要优化混合气的 O_2 比例和流速。另外,提高 ICP 系统的卡盘能量和降低其工作压力也可以使腐蚀加速。如图 9 所示, SiC

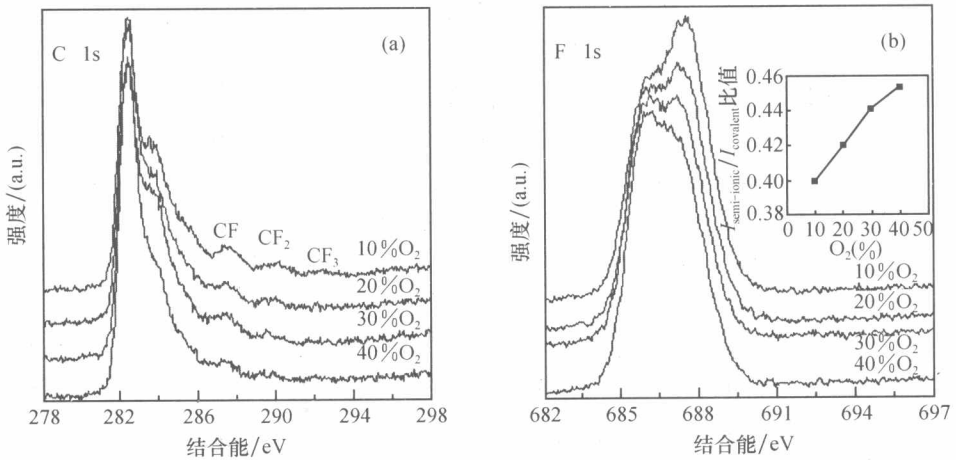


图 8 在不同浓度 O_2 的 SF_6/O_2 混合气中腐蚀过后的 SiC 表面

图(a)为 C 1s 光电能谱;图(b)为 F 1s 光电能谱,其中的小图显示 $I_{\text{semi-ionic}}/I_{\text{covalent}}$ 比与 O_2 浓度呈函数关系

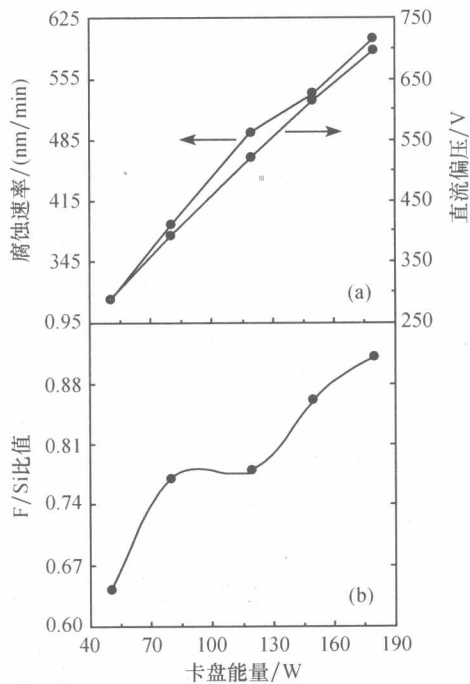


图 9

图(a)为腐蚀速率和偏压的关系;图(b)为 F/Si 比例和卡盘能量的关系

(SF_6 流速 6sccm, O_2 流速 15sccm, 压力 5mT)

的腐蚀速率和 F/Si 比值与直流偏压和卡盘能量呈函数关系,直流偏压和卡盘能量越高,腐蚀速率越高,随着卡盘能量及偏压的增加,F 的含量增加。

从图 10(a)中可以看到,C-F 键的强度随着卡盘能量的增加而增加,尤其是 CF_2 键。另外, CF_3 键只在卡盘能量 180W 的曲线上能够看到,而在其他 2 个低卡盘能量下腐蚀的样品上不明显。从这些现象可以知道,随着组分 F 浓度的提高,C-F 键的生成按照 CF 、 CF_2 、 CF_3 顺序,这也与氟化碳生长薄膜的研究相一致。

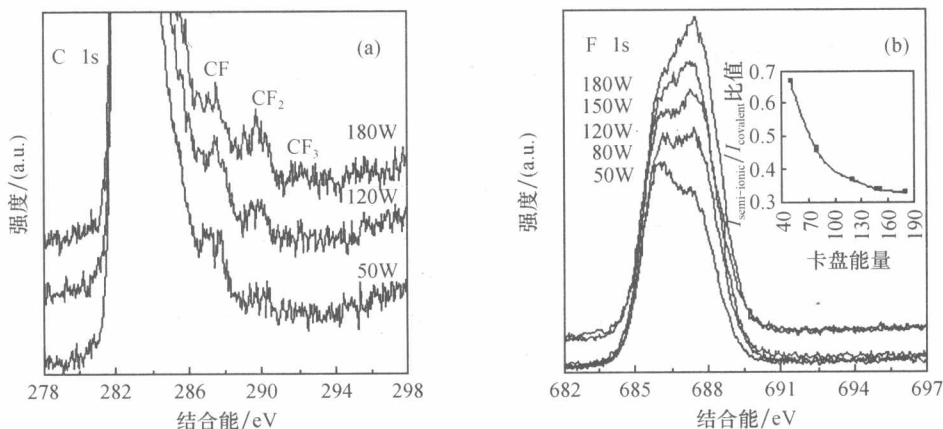


图 10 不同卡盘能量下 SiC 表面

图(a)为 C 1s 光电能谱;图(b)为 F 1s 光电能谱,小图显示 F 1s 光电能谱中 $I_{\text{semi-ionic}}/I_{\text{covalent}}$ 比与卡盘能量呈函数关系

与图 9(b)中组分 F 浓度增加相对应,图 10(b)中的 F 1s 光电能谱清晰地显示了随着施加的卡盘能量和腐蚀速率的提高半离子键到 C-F 共价键转换的降低。因为半离子键和 C-F 共价键之间电子行为的差异^[30],根据我们的观察,在低腐蚀速率工艺下得到的 SiC 表面可以比高腐蚀速率下得到的表面具有更高的导电性。

在研究 F 1s 光电能谱与卡盘能量、压力和 SF_6 流速的函数关系的时候,发现在大多数情况下,F 的相对浓度和 $I_{\text{semi-ionic}}/I_{\text{covalent}}$ 比随着腐蚀速率的提高而降低。这种表面下的微观表面改性会影响 MEM 器件的性能,如质量因子^[27]。另外,与 SiC 复杂的腐蚀机理相关,SiC 腐蚀表面 C-F 共价键和半离子键的种类和数量能影响 SiC 电子器件的性能^[31],这从我们近期 ICP 腐蚀后的 4H-SiC 肖特基二极管研究中可以得到^[32,33]。肖特基接触的工艺诱导损伤在第 3 章中也进行了讨论。

5. SiC MEMS 的频率调谐

最近,我们研究小组使用聚焦离子束(FIB)沉积铂(Pt)演示了 SiC MEM 谐振器的谐振频率调谐能力^[34],如图 11 和图 12 所示。Pt 面积为 $13 \times 5 \mu\text{m}^2$,厚度范围

为 $0.3 \sim 3.1 \mu\text{m}$, 室温下沉积在悬臂梁和桥式谐振器上。SiC 悬臂梁(如图 11 所示)和桥(如图 12 所示)的谐振频率可以通过增加或去除谐振器上的 Pt 层而改变 12%, 在需要的时候提供灵活的谐振频率调谐。

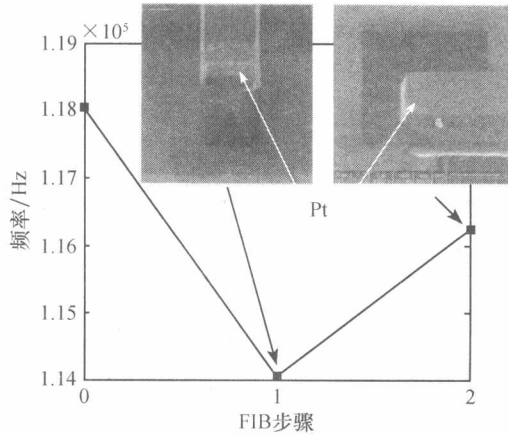


图 11 SiC 悬臂梁($15 \mu\text{m}$ 宽)调谐导致频率改变
(FIB 步骤 1: Pt 沉积; FIB 步骤 2: Pt 磨削)

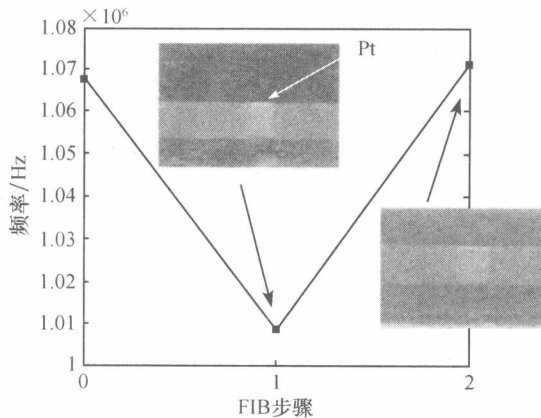


图 12 SiC 桥($15 \mu\text{m}$ 宽)调谐导致频率改变
(FIB 步骤 1: Pt 沉积; FIB 步骤 2: Pt 磨削)

6. MEMS 的机械测试

集成 MEMS 除了要进行电子测试等各种其他形式的测试外,还要进行机械测试,如尺寸测量、动态和静态测试。光学技术可以采用非破坏性的方法对 MEMS 器件进行测试和精密调整。图 13 是一个包括用于动态测量的激光测振仪、用于静

态测量的表面形貌仪、用于激光烧蚀的 Nd:Yag 激光器的工作站原理图。本工作站的详细操作规程可参见文献[35]。

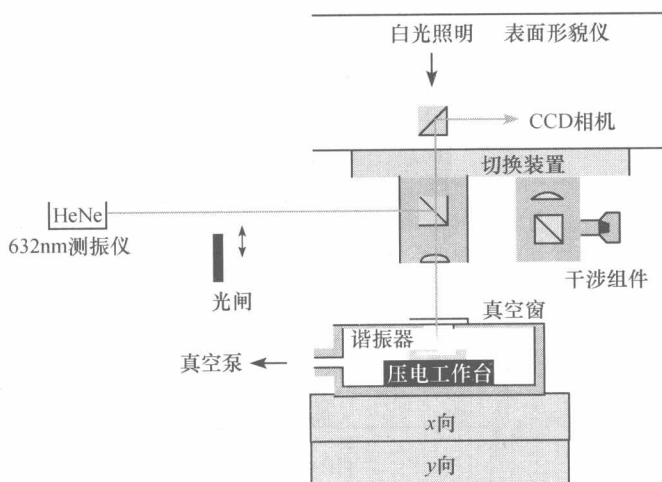


图 13 谐振器性能表征光学工作站

7. 应用举例

虽然在过去 10 年里面对 SiC MEMS 的研究和开发投入了大量的努力,但还有很多方面尚待完成,尤其是优化与 Si 兼容的工艺,以减少商业化的成本。面向未来 SiC MEMS 应用的巨大推动力来自其与高温电子器件的集成灵活性。MEMS 和电子器件可以单片集成、在高温下和恶劣环境下工作的可能性无疑会促进 SiC MEMS 的商业化前景。

8. 小 结

本章介绍了 SiC 作为 MEMS 材料应用于恶劣环境的潜力,总结了当前爱丁堡对 SiC MEMS 的研究。SiC MEMS 的未来是光明的,尤其是企业界开始商业化 SiC 产品^[41],并且生长、腐蚀、接触工艺不断发展。当 MEMS 和电子器件的集成实现后, SiC MEMS 真正的潜在应用也会随之实现。

参 考 文 献

1. Hensler, R., Electronics, ca Publications, Research Report # GB270, BCC, (2002).
2. Mehregany, M., Zorman, C. A., Rajan, N. and Wu, C. H., *Proceedings of IEEE*, **86**, (1998),