

## Short Report

### MEMS 用薄膜材料の機械特性評価のための小型材料試験機の開発

藤井達也<sup>1</sup>, 村上拓斗<sup>2</sup>, 呉勇波<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 秋田県立大学システム科学技術学部機械知能システム学科

<sup>2</sup> 元 秋田県立大学システム科学技術学部機械知能システム学科 (現 (株) ヨロズ)

<sup>3</sup> 元 秋田県立大学システム科学技術学部機械知能システム学科 (現 南方科技大学工学院機与能源工程系)

近年、半導体加工技術を基本とした微細加工技術の発達に伴い、マイクロ・ナノスケールの機械構造体を構成要素とするマイクロマシン (MEMS) が広く研究されている。高信頼性や長期安定性を有する MEMS の開発には、構成材料として用いられる薄膜材料の機械特性を精確に実測し、得られた知見をデバイス設計に反映することが必要である。しかし、薄膜材料は取り扱いが難しく、機械特性の定量計測における技術的難度は極めて高いのが現状である。本研究では、MEMS 用薄膜材料の機械特性を定量評価することを目的として、薄膜に対して引張負荷や曲げ負荷を付与可能な小型材料試験機を独自設計した。試験機設計と平行して、微小材料試験によるウエハ基板の欠陥評価技術を確立することを目的として、研削加工を施した単結晶シリコンウエハの 4 点曲げ試験を行い、機械特性に及ぼす表面粗さや表面ダメージの影響を検討した。その結果、単結晶シリコンの破壊強度には大きな加工プロセス効果が存在し、試験片の加工面に存在する研削痕への応力集中が破壊強度に影響を及ぼすことを示した。

**キーワード：** MEMS, 薄膜材料, 機械特性評価, 破壊強度, 微小欠陥, 表面ダメージ

近年、急速に発達した微細加工 (マイクロマシニング) 技術の恩恵を受け、マイクロ・ナノスケールの機械構造体を構成要素とするマイクロマシン (MEMS) の研究開発が進められている。MEMS デバイスは、小型、軽量、かつ低単価という特徴を有しており、情報・通信、運輸・家電、製造・計測、医療・バイオなどの幅広い分野への応用が期待されている。MEMS の最大の特徴は、電気信号の授受のみで仕事を行う半導体デバイスとは異なり、機械的に動作する可動部を持つことにある。すなわち、微小機械部品を有する MEMS の高信頼性化や長寿命化には、構成材料の使用寸法下における機械特性を実験的に十分調べ、得られた知見をデバイス設計に反映することが必要である。また、マイクロマシン材料には、単結晶シリコンのように機械特性の寸法効果の存在が知られている材料が数多くあり、薄膜材料試験の重要性は極めて高い (Tsuchiya, Tabata,

Sakata, & Taga, 1998 ; Namazu, Isono, & Tanaka, 2002 ; Tang et al., 2012)。

薄膜材料を対象とした機械特性評価法には、引張試験、曲げ試験、インデンテーション試験、バルジ試験などがある。中でも引張試験は、試験片全体に均一に応力が生じることから、高精度な機械物性の導出が可能である。しかし、これまでに報告されている微小材料試験の大半はサブミリスケール以上の寸法下で実施されており、マイクロ・ナノスケール寸法下での機械特性の実測例は非常に少ない。これは、計測対象のサイズが微小なために、応力-ひずみ関係の導出に必要な試験片の荷重と変位が小さく、その実測が技術的に困難なことにある。よって、これまでは使用する微小材料のバルク材もしくは類似材料のデータを設計パラメータとして適用されてきたケースが多く、その妥当性に疑問符が付く。したがって、マイクロ・ナノ構造体の機械信頼性評価に

は、機械物性を高精度に実測可能な新規材料評価技術の開発が不可欠となっている (Namazu, Nagai, Naka, Araki, & Inoue, 2011)。

本研究では、上記問題・課題を解決すべく、MEMS 用薄膜材料に対して引張負荷や曲げ負荷を付与可能な小型材料試験機を独自開発する。また、薄膜試験機の開発研究と併せて、微小材料試験によるウエハ基板の欠陥評価技術を確立することを目的として、研削加工した単結晶シリコンウエハの 4 点曲げ試験を行い、機械特性に及ぼす表面粗さや加工ダメージの影響を検討する。

### 薄膜材料試験機の開発

薄膜材料用小型試験機的设计にあたり、特に留意した点は次の通りである。

- 1) 試験機が小さく、様々な装置内に収まる寸法であること。
- 2) 試験片中心がずれないこと。
- 3) 試験機が 1～500  $\mu\text{m}$  厚さを標点部に持つ試験片に対して適用できること。

これらの必要事項を満たした上で試験装置を新設計した。図 1 に、設計した薄膜材料試験機の模式図を示す。試験装置は、駆動部、試験片保持部、荷重測定部、および変位測定部からなる。駆動部には PI 社製 PZT アクチュエータ P-845.20V、荷重測定部にはテック技販製微小荷重ロードセル TGRV08-2N、変位測定部には新光電機製差動変位計 (LVDT) 1500-9KV を選定し、仕様を決定した。試験片把持部にはメカニカルチャック方式を採用した (Namazu et al., 2011)。

試験装置は、PZT アクチュエータの性能を最大限発揮するため、変位増幅機構を有するハウジングケースを設けている。この機構は、てこの原理によって変位を増幅し、かつ変位方向を変換して試験片に負荷を与える。てこの回転運動を直進運動に変換するためにバネ構造を採用している。PZT アクチュエータは、伸張時にハウジングケースから反力を受けるため、その伸び量が減少する。ケース剛性を考慮して導出した PZT 最大変位量は 25.2  $\mu\text{m}$  となった。図 2 に示す解析モデルを用いて、最大変位量を負荷

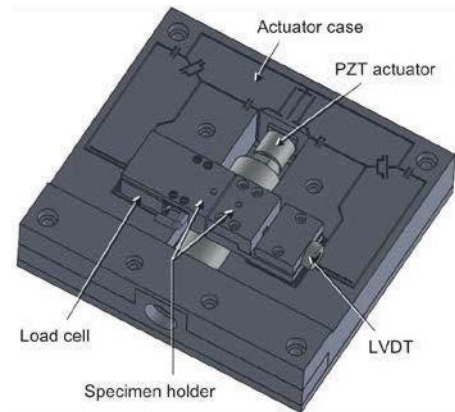


図1 設計した薄膜材料試験機の模式図

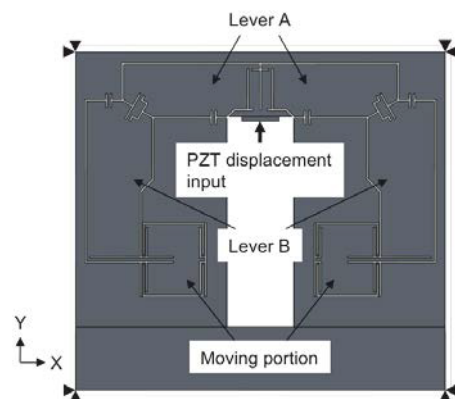
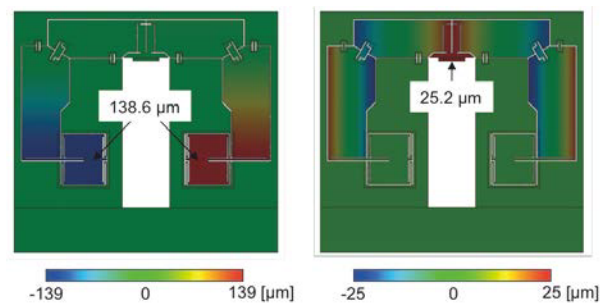


図2 PZT ハウジングケースの FEA モデル (上面図)



(a) X 軸方向の変位分布 (b) Y 軸方向の変位分布

図3 PZT ハウジングケースの FEA 結果

点に与えて有限要素解析 (FEA) を行った。図 3 (a)、(b) に、X、Y 軸方向の変位分布をそれぞれ示す。解析結果は以下の通りである。試験片保持部の変位は片側で 138.6  $\mu\text{m}$  となり、ステージ全体の最大変位は約 280  $\mu\text{m}$  となった。アクチュエータの変位量は約 11 倍に増幅されていることがわかる。なお、Z 軸方向の変位は 0.4  $\mu\text{m}$  と非常に小さく、この変位増幅機構が引張軸のずれに及ぼす影響は小さいものと考え

えられる。また、最大応力はバネ部固定端に生じ 72 MPa であった。この応力値は、ハウジングケースの材料として想定しているアルミニウム合金 7075-T6 の降伏応力の約 1/7 であり、塑性変形を生じない安全な値であると言える。今後、設計した薄膜試験機を実際に構築して微小欠陥評価に着手する。

#### 4 点曲げ試験による微小欠陥評価

##### 試験片作製と実験方法

本実験では、超音波援用化学的固定砥粒研削 (UF-CMG) 装置を用いて単結晶シリコンウエハの表面加工を行い、4 点曲げ試験片を作製した。試験片は、加工面が (100) 面、試験片の長手方向が [110] 方向となるように加工し、エッチド、UF-CMG 加工 (10, 100 分研削)、鏡面の 4 種類 (A, B, C, D) を作製した。図 4 に加工条件と試験片形状、図 5 に非接触表面形状測定機 (Zygo 社製 NewView600) を用いて測定した各試験片の表面性状を示す。同図より、UF-CMG 研削後のウエハ表面には筋状の加工痕が存在することがわかる。最後に、ダイサーを用いて加工後のシリコンウエハを所望の寸法に切断する。

図 6 に、4 点曲げ試験装置 (愛知工業大学 ナノテク研究室 提供) の外観写真を示す。試験装置は、駆動部、試験片保持部、荷重測定部、および変位測定部から構成されており、駆動部には PZT アクチュエータ、荷重測定部には微小荷重ロードセル、および変位測定部にはレーザ変位計を用いている。試験片を保持治具上に設置し、支持治具と負荷治具の 4 点で曲げを生じさせる。4 点曲げ試験は、負荷治具間において SFD が 0 であり、BMD が一定となるため、破壊強度のばらつきが小さくなるという利点がある。

##### 実験結果と考察

曲げ試験により得られた破壊荷重を用いてシリコンの破壊強度を算出し、ワイブル分布により整理した結果を図 7、ワイブル係数を表 1 にそれぞれ示す。ここで、図中における破壊確率  $P$  は対称試料累積分布を用いて算出した。試験結果より、UF-CMG 前後の試験片 A, B, C の結果には強度差が見られず、220 ~ 230 MPa 程度の破壊強度が得られた。一方、鏡面

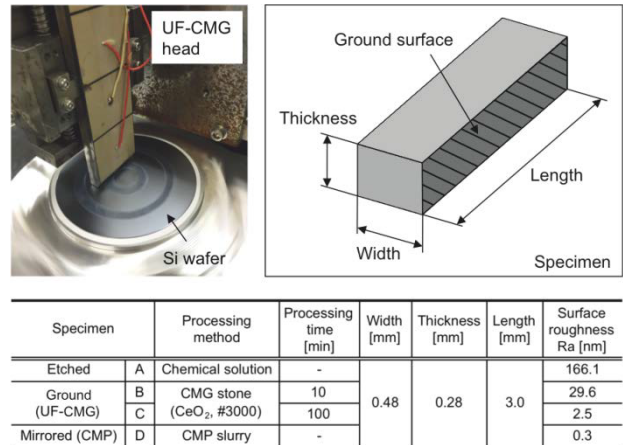


図 4 加工条件と試験片形状

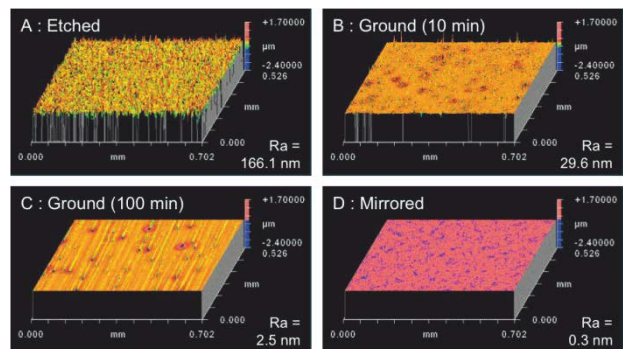


図 5 試験片表面性状

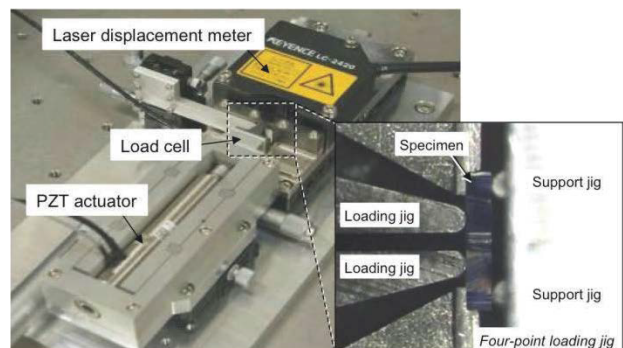


図 6 4 点曲げ試験装置の外観写真  
(愛知工業大学 ナノテク研究室)

の試験片 D の破壊強度に注目すると、その他の試験結果と比べて約 50.0 % 大きな値を示すことがわかる。これらの結果は、単結晶シリコンの破壊強度に表面性状 (加工方法) が大きな影響を与えることを示唆している。

図 5 に示す表面性状の測定結果より、試験片の加工面には表面荒れや研削痕が存在するため、これら表面ダメージへの応力集中が破壊強度に影響をもたらしたと考えられる。低破壊強度を示した UF-CMG



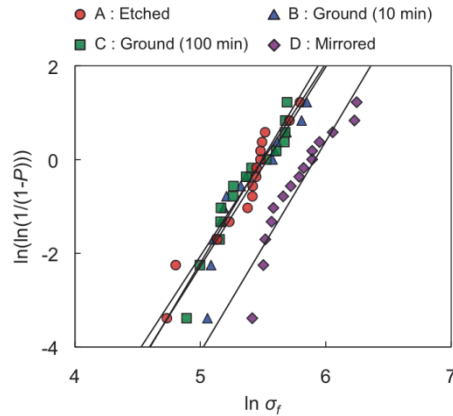


図7 破壊強度のワイブル分布

表1 試験結果のワイブル係数

Specimen	Etched	Polished (10 min)	Polished (100 min)	Mirrored
	A	B	C	D
Scale parameter $\sigma_b$ [MPa]	246	258	245	385
Shape parameter $\sigma_m$	4.11	4.25	4.48	4.49
Average of fracture strength $\sigma_B$ [MPa]	222	230	221	337
Young's modulus $E$ [GPa]	162.8	164.5	172.3	162.7
Number of test samples	15	15	15	15

後の試験片は加工面に存在する微小欠陥を起点として破壊に至り、高破壊強度を示した鏡面試験片は試験片角部に存在する欠けを起点として破壊に至るものと考えられる。

## 結 言

本研究では、MEMS 用薄膜材料の機械特性を定量評価することを目的として、薄膜に対して引張負荷や曲げ負荷を付与可能な小型材料試験機を独自設計した。試験機設計と平行して、微小材料試験によるウエハ基板の欠陥評価技術を確立することを目的として、研削加工した単結晶シリコンウエハの4点曲げ試験を行い、機械特性に及ぼす表面ダメージの影響を検討した。得られた知見を以下に示す。

- 1) 薄膜材料試験機を新設計した。試験機の変位増幅率は11倍、安全率は7となった。
- 2) 単結晶シリコンの破壊強度には加工プロセス効果が顕著に現れた。試験片の加工面には研削による加工痕が存在し、加工痕への応力集中が強度に影響を及ぼすことを示した。

## 謝 辞

本研究を遂行するにあたり、4点曲げ試験装置をお貸し頂きました愛知工業大学工学部教授 生津資大博士に深く感謝致します。

## 文 献

- Tsuchiya, T., Tabata, O., Sakata, J., & Taga, Y. (1998). Specimen size effect on tensile strength of surface-micromachined polycrystalline silicon thin films. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 7(1), 106-113.
- Namazu, T., Isono, Y., & Tanaka, T. (2002) Plastic deformation of nanometric single crystal silicon wire in AFM bending test at intermediate temperatures. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 11(2), 125-135.
- Tang, D-M., Ren, C-L., Wang, M-S., Wei, X., Kawamoto, N., Liu, C., Bando, Y., Mitome, M., Fukata, N., & Golberg, D. (2012) Mechanical properties of Si nanowires as revealed by in situ transmission electron microscopy and molecular dynamics simulations. *Nano Letters*, 12, 1898-1904.
- Namazu, T., Nagai, Y., Naka, N., Araki, N., & Inoue, S. (2011) Design and development of a biaxial tensile test device for a thin film specimen. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 134(1), 011009 (8 pages).

〔平成29年6月30日受付〕  
〔平成29年7月11日受理〕

## Development of Compact Material Testing Machine for Mechanical Characterization of Thin-Film Materials for MEMS

---

Tatsuya Fujii<sup>1</sup>, Takuto Murakami<sup>2</sup>, Yongbo Wu<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Department of Machine Intelligence and Systems Engineering, Faculty of Systems Science and Technology,  
Akita Prefectural University*

<sup>2</sup> *Formerly Department of Machine Intelligence and Systems Engineering, Faculty of Systems Science and Technology,  
Akita Prefectural University (Presently at Yorozu Co., Ltd.)*

<sup>3</sup> *Formerly Department of Machine Intelligence and Systems Engineering, Faculty of Systems Science and Technology,  
Akita Prefectural University (Presently at Department of Mechanical and Energy Engineering, College of Engineering,  
Southern University of Science and Technology)*

Along with the rapid progress of micromachining technologies, microelectromechanical systems (MEMS) have been studied for a variety of industrial applications. To improve the performance and reliability of MEMS, the mechanical characteristics of microstructures must be experimentally examined and the results reflected in the design of MEMS devices. Experimental evaluation of the mechanical properties of microstructures is rare compared to evaluations of electrical properties, because there are many technical difficulties in chucking specimens and measuring force and displacement during the experiment. In this article, we focus on the design of the tensile testing machine for thin-film materials. Also, the evaluation of surface damage using material testing technique is reported. Four-point bending tests of the single-crystal silicon wafer processed using the ultrasonic assisted chemical mechanical grinding are conducted and the influence of surface damage on mechanical properties is evaluated.

**Keywords:** MEMS, Thin-film material, Mechanical characterization, Fracture strength, Micro defect, Surface damage