

平成22年 5月31日現在

研究種目：若手研究 (B)  
 研究期間：2008～2009  
 課題番号：20760075  
 研究課題名 (和文) ラマン分光と薄膜二軸引張試験技術によるマイクロ・ナノ構造体の応力  
 定量評価法の開発

研究課題名 (英文) Development of stress measurement method using Raman spectroscopy  
 and biaxial tensile testing for micro/nanoscale structures

## 研究代表者

生津 資大 (NAMAZU TAKAHIRO)  
 兵庫県立大学・大学院工学研究科・准教授  
 研究者番号：90347526

研究成果の概要 (和文)：薄膜用二軸引張試験装置を設計・開発し、ラマン分光器のステージに組み込んで、一軸・二軸引張負荷下における単結晶 Si のマイクロ・ナノ構造体周辺のラマンシフトの計測を行った。その結果、一軸と二軸の引張負荷を加えた状態では、得られた構造体周辺のラマンシフトマップは異なり、構造体周辺には多軸応力場ができていたことを視覚的にとらえることに成功した。また、得られたラマンシフトパラメータ (ピークシフト、強度、半値幅) と有限要素解析に基づく応力成分・大きさを比較することで、各パラメータと応力とは相関があることを確認した。この技術により、マイクロ～ナノサイズの単結晶 Si 構造体の応力分布ならびに成分を、詳細に計測できる可能性があることがわかった。

研究成果の概要 (英文)：We have designed and developed bi-axial tensile tester for film specimens, and obtained Raman spectra of micro/nanoscale single crystal silicon structures under uniaxial and biaxial stress states. As the results, Raman shift map around the Si structure under biaxial stress state was different from that under uniaxial stress state. By comparing Raman spectral parameters with stress components and its magnitude, we have confirmed that the parameters were correlated with stress components and magnitude. Integration of biaxial tensile testing with Raman spectroscopy enables us to precisely evaluate stress distribution of single crystal silicon structures in MEMS.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2009年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：MEMS, 半導体

科研費の分科・細目：機械材料・材料力学

キーワード：応力, 引張試験, ラマン分光, 単結晶 Si

## 1. 研究開始当初の背景

近年、MEMS の開発が盛んに行われてい

る。これまで、数多くの MEMS が作製されているが、その信頼性評価はほとんど行われ

ていないのが現状である。MEMS デバイスの信頼性評価技術として重要なことは、1)マイクロ・ナノ構造体の応力・歪みの定量評価を非破壊で実施することが可能なこと、2)応力・歪みの絶対量のみならず、方向（成分）をも定量評価できること、3)MEMS デバイスの各部に生じる応力・歪みの大きさ・成分をマッピングすることが可能なこと、等であると考えられる。また、これらマイクロ・ナノ構造体に対する応力・歪みの大きさ・成分の定量評価は、MEMS 分野だけでなく、電子デバイス分野でも切望されている技術課題である。例えば、歪 Si 等のナノ配線の応力・歪み状態を正確に把握することができ、かつ、電気特性との関係を導き出すことができれば、より電気特性の優れたナノ配線構造体を人為的に作り出すことができる可能性があり、電子デバイスの更なる性能向上の実現に繋がる。しかしながら、これらを実現可能な計測・評価技術は世界中を見ても皆無と言ってよく、MEMS および電子デバイスの性能・信頼性向上のためには、これらマイクロデバイスに対する高精度な応力・歪みの計測・評価技術を新たに提案・開発することは必須の課題である。

## 2. 研究の目的

目的は、MEMS および電子デバイスの性能・信頼性評価試験の要素技術となり得るマイクロ・ナノ構造体の応力・歪み成分評価手法を、世界に先駆けて提案・開発することである。具体的には、薄膜等のマイクロ・ナノスケール寸法を有する微小試験片に対して二軸方向の引張応力を高精度に与えることが可能な二軸薄膜引張試験技術を新開発し、種々の応力・歪み状態を作り出したシリコン系材料のマイクロ・ナノ構造体に対してレーザーラマン分光その場計測を行うことで、応力・歪み量ならびにこれらの成分の定量評価を実現可能な試験技術を確認する。

## 3. 研究の方法

図 1 に、開発した二軸引張試験装置を示す。この装置は、引張負荷を与えるための PZT アクチュエータ、荷重計測用ロードセル、変位計測用差動変圧器、試験片取付治具をそれぞれ 4 つずつ設けており、試験片の中心位置を移動させずに、一軸もしくは二軸の引張負荷を与えることができる。図 2 に示す試験片は、十字形状の試験片部、試験片固定穴部、Si スプリング部、フレームから構成されている。試験片部には高さ 200nm の突起構造が形成され、引張負荷により、不均一な応力分布を生じさせることができる。

以上の実験システムにより、単結晶 Si 試験片に任意の一軸もしくは二軸引張応力を与え、そのときの応力分布をラマン分光で計

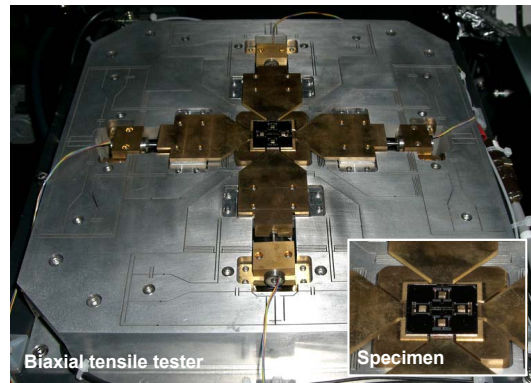


図 1 開発した二軸引張試験装置

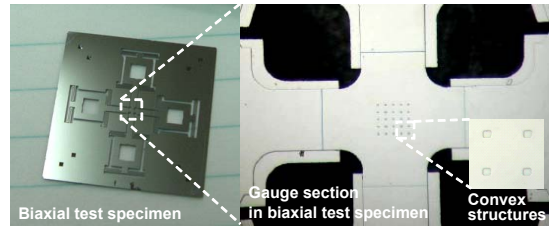


図 2 単結晶 Si の二軸引張試験片

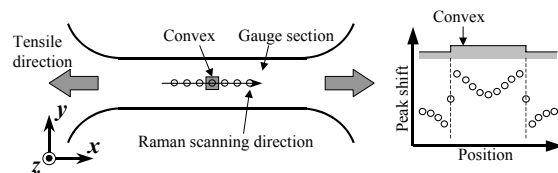


図 3 ラマン計測実験の模式図

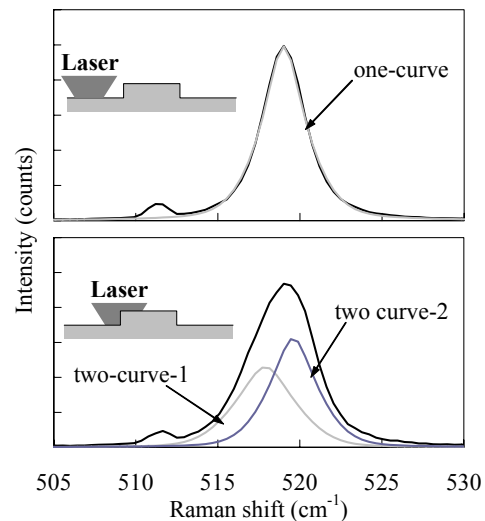


図 4 ラマンスペクトルの一例

測した（図 3）。そして、得られたスペクトルパラメータ（ピークシフト、ピーク強度、半値幅）と有限要素解析から得られた応力成分ならびにその大きさを比較し、どのスペクトルパラメータがどの応力成分と相関があるかを調べた。

## 4. 研究成果

図 4 に、平面ならびに突起エッジ部でのラ

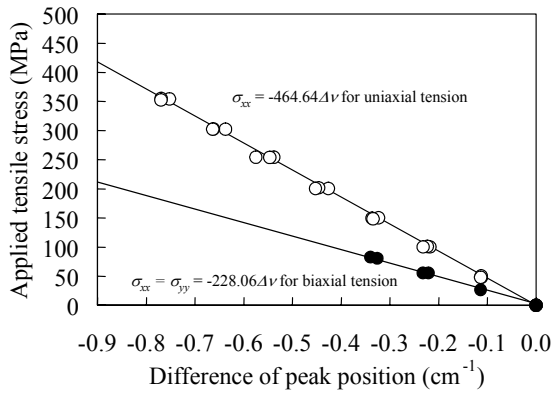


図5 応力とピーク位置との関係

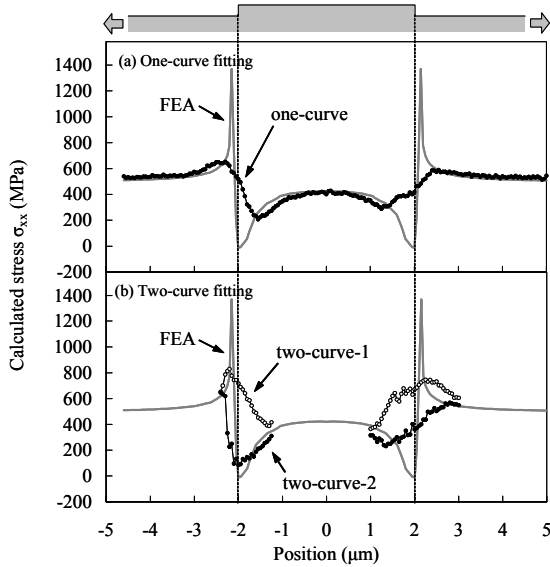


図6 構造体周辺のラマン応力分布

マンスペクトルの代表例をそれぞれ示す。平面部では、スペクトルのピークはシャープであるが、突起エッジ部のピークは比較的ブロードであった。平面部のスペクトルは1カーブで、エッジ部のそれは2カーブでそれぞれフィッティングし、ピークシフトを求めることとした。

図5に、一軸および二軸引張応力下でのラマンスペクトルピーク位置と応力との関係を示す。いずれも、線形関係にあることがわかる。一軸応力の場合、 $1\text{cm}^{-1}$ だけピーク位置が移動する際に応力が464MPa変化するのに対し、二軸応力ではその約半分の228MPaだけ変化することを確認した。この検量線を用いて、構造体周辺の応力分布の可視化を試みた。

図6に、構造体周辺のラマン応力分布と、有限要素解析から得られた応力分布との比較を示す。図より、構造体エッジ部において、応力の絶対値は大きく変化していることがわかる。また、1カーブフィッティングの場合、平面部でのラマン応力は有限要素解

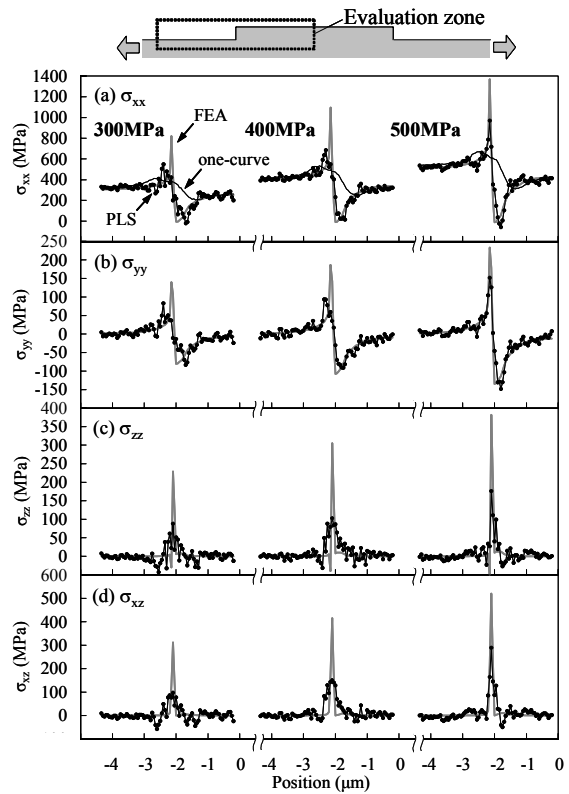


図7 部分最小二乗法を用いた応力成分ごとの応力分布

析で得られた応力とほぼ一致しているが、構造体エッジ部では大きく異なる結果を示した。一方、2カーブフィッティングで得られた情報から突起部周辺の応力分布を求めた結果、1カーブフィッティングのそれより、構造体エッジ部で有限要素解析の応力と良い一致を示した。これより、マイクロ・ナノスケールの突起構造体周辺の応力分布をラマンで計測する際には、スペクトルを2つのカーブでフィッティングするほうが良いことがわかった。

本研究では、構造体周辺の応力成分とラマンスペクトルパラメータとの相関を調べるため、部分最小二乗法を用いてデータフィッティングを行った。その結果を図7に示す。これより、構造体エッジ部の応力成分 $\sigma_{xx}$ 、 $\sigma_{yy}$ 、 $\sigma_{zz}$ 、 $\sigma_{xz}$ は、ラマンスペクトルパラメータの情報に含まれることがわかった。とくに、せん断応力 $\sigma_{xz}$ までもラマンスペクトルから実測できたことは世界初の知見であり、本手法がMEMSに含まれる単結晶Siのマイクロ・ナノ構造体周辺の応力分布を定量的に可視化するのに優れていることを実証できた。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計2件)

- ① T. Namazu and Y. Isono, “Fatigue Life Prediction Criterion for Micro-Nanoscale Single-Crystal Silicon Structures”, IEEE/ASME J. Microelectromech. Syst., Vol. 18, 129-137, 2009. (査読有)
- ② M. Komatsubara, T. Namazu, Y. Nagai, S. Inoue, N. Naka, S. Kashiwagi, and K. Ohtsuki, “Raman Spectrum Curve Fitting for Estimating Surface Stress Distribution in Single-Crystal Silicon Microstructure”, Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 48, 04C021(CD-ROM), 2009. (査読有)

[学会発表] (計2件)

- ① N. Goami, N. Yamashita, N. Araki, S. Kakinuma, K. Nishikata, N. Naka, K. Matsumoto, T. Namazu, and S. Inoue, “Uniaxial Tensile Testing System for Quantitative Stress Analysis in Silicon Oxide Thin Films by Cathodoluminescence Spectroscopy”, The 2008 International Conference on Solid State Devices and Materials, SSDM 2009, Sendai, Japan, 2009.
- ② Y. Kaibara, H. Fujii, T. Namazu, Y. Tomizawa, K. Masunishi, and S. Inoue, “Mechanical Degradation Mechanism of Aluminum-Alloy Structural Films Evaluated by Environment-Controlled Tensile Testing”, 15th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, Transducers 2009, Denver, Colorado, USA, 2009.

[その他]

ホームページ等

<http://www.eng.u-hyogo.ac.jp/mse/mse12/index.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

生津 資大 (NAMAZU TAKAHIRO)

兵庫県立大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：90347526

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし