

氏 名	みやたけ たかひろ <b>宮武 岳洋</b>
学位(専攻分野)	博 士 ( 工 学 )
学 位 記 番 号	博 甲 第 614 号
学 位 授 与 の 日 付	平成 23 年 9 月 26 日
学 位 授 与 の 要 件	学位規則第 4 条第 1 項該当
研 究 科 ・ 専 攻	工芸科学研究科 生命物質科学専攻
学 位 論 文 題 目	<b>Polarized Raman spectroscopy for the spatially and tensor-resolved stress analysis of silicon microdevices</b> (偏光顕微ラマン分光法によるシリコンマイクロデバイスの微小領域応力成分分離評価)
審 査 委 員	(主査)教授 PEZZOTTI Giuseppe 教授 森脇一郎 教授 荒木栄敏

### 論文内容の要旨

単結晶シリコンは、半導体技術の誕生から現在にいたるまで、IC や MEMS などのマイクロ電子デバイスの最も主要かつ一般的な構成材料である。微細化が進むこれらのシリコンマイクロデバイスにおいて、成膜、パターニング、接合、切断、そしてパッケージングなどの多種多様な製造プロセスで発生する残留応力が性能や信頼性に与える影響は大きくなっている。マイクロデバイスに発生する残留応力を定量的に評価することは、デバイスの設計高度化や品質向上の点から必要不可欠であるが、このような微小領域の応力状態を評価することができる汎用的な測定手法はいまだ存在していない。現在、直接的な測定の代用として、有限要素法 (FEM) シミュレーションによる評価が一般的に実施されている。しかし、有限要素法による解析結果は、あくまで設計通りの構造が「理想的に」形成されている場合の応力状態である。微細加工によって完成する実際の構造は、スキヤロップなどにより、微視的には必ずしも設計通りとはなっていないため、有限要素法シミュレーションのみではデバイスに発生する残留応力を正確に見積もることはできないのが現状である。

本博士論文は、シリコンマイクロデバイスにおける「実際の」「評価したいその場所の」応力状態を正確に評価できる計測手法として、偏光顕微ラマン分光法の応用が有効であることを示すものである。

まず、偏光顕微ラマン分光法によって単結晶シリコンのフォノン変形ポテンシャル係数（結晶内部の応力とラマンピークシフト量の関係を示す材料定数）を高精度に較正し、較正した値の妥当性を定量的に示した。これにより、ラマン分光法によるシリコンの応力測定の精度を向上させることができた。また、較正手法として、mm スケールの手法（ボールオングルーピング曲げ荷重による既知応力を較正に使用）と、μm スケールの手法（ビックアース圧痕周辺に発生する既知応力を較正に使用）の 2 種類を開発した。これは、バルク材料を作製不可能で、微小な材料しか入手できないようなシリコン以外のダイヤモンド構造結晶材料においても、フォノン変形ポテンシャル係数を導出できるようにすることを視野に入れたものである。

次に、試料測定面に対して偏光顕微ラマン分光法の光学配置を面内回転させた際のラマンピーカシフト量の変化を測定することにより、平面応力状態における応力テンソル 3 成分（垂直応力成分 $\sigma_{xx}$ 、 $\sigma_{yy}$ とせん断応力成分 $\sigma_{xy}$ ）を分離評価する手法を開発し、実際に MEMS の陽極接合残留応力評価用 TEG チップの応力測定に適用した。

以上のように、今回開発した正確なフォノン変形ポテンシャル係数較正手法と応力成分の分離評価手法により、シリコンマイクロデバイスの「実際の」複雑な応力状態が正確に評価できるようになった。これによって得られる応力状態の情報は、マイクロデバイスの構造や材料、製造プロセスパラメータの設計における重要な指針としての利用が期待できる。

## 論文審査の結果の要旨

微細かつ可動の構造を有する MEMS (Micro Electro Mechanical Systems)においては、製造プロセスで発生する残留応力がデバイスの性能や信頼性に大きく影響する。現在、このような残留応力をシミュレーションなどによって推定しているが、実際の現象と合致しない場合も多い。顕微ラマン分光法による微小領域応力可視化技術を深耕することにより、MEMS デバイスに発生している残留応力を実測して実際の応力状態を把握することを可能とし、MEMS デバイスの設計力向上への早期の寄与を図ることが研究のねらいである。本論文では、MEMS の最も主要な構成部材である単結晶シリコン材料について検討を行い、ひずみが加わったシリコン単結晶の振動の運動方程式から応力(ひずみ)テンソル各成分と各フォノン振動モードの波数シフト量(フォノン振動数変化)の関係について導出を行っている。ひずみによる結晶のバネ定数の変化しやすさを示すフォノン変形ポテンシャル係数を、バルクを作製できない微小材料においても導出できる手法を開発し、さらに、顕微ラマン分光装置を用いて偏光測定を実施することにより各フォノン振動モードの波数シフト量を選択測定し、この測定結果に有限要素法による応力解析シミュレーションを援用することによって応力テンソルを導出し、平面応力状態、さらには三次元応力状態における応力成分分離評価をより精度よく実施することを目指している。以上より、本論文は学術的および工業的にも興味深く、極めて有用であると高く評価できる。本論文の基礎となった 3 編の学術論文は全て、申請者が筆頭著者であり、内 2 編はレフェリー制度を有する学術論文に掲載され、残りの 1 編も掲載予定である。他にも参考論文が 4 編ある。

(学位論文の基礎となった論文リスト)

1. **T. Miyatake**, A. A. Porporati, and G. Pezzotti, Spatially and tensor-resolved Raman analysis for the determination of phonon deformation potentials on the microscopic scale in Si single-crystal, *Journal of Applied Physics*, 105, 113514-1-8 (2009).

2. **T. Miyatake** and G. Pezzotti, Tensor-resolved stress analysis in silicon MEMS device by polarized Raman spectroscopy, *Physica Status Solidi a*, 208[5], 1151-1158 (2011).

3. **T. Miyatake** and G. Pezzotti, Validating Raman spectroscopic calibrations of phonon deformation potentials in silicon single-crystal: a comparison between ball-on-ring and micro-indentation methods, *Journal of Applied Physics*, Manuscript ID, JAP: MS#JR11-4162, accepted for publication (2011).

(参考論文)

1. M. Deluca, **T. Miyatake**, A. A. Porporati, K. Yamada, S. Yamada, and G. Pezzotti, A new insight into

polarized Raman piezo-spectroscopy of silicon single-crystals: I, Theory, Proceedings of *10th Japan International SAMPE Symposium & Exhibition (JISSE-10)*, MMC,CMC,C/C,HT Appl-1-2, 1-6 (2007).

2. **T. Miyatake**, M. Deluca, K. Yamada, A. A. Porporati, , S. Yamada, and G. Pezzotti, A new insight into polarized Raman piezo-spectroscopy of silicon single-crystals: II, Applications, Proceedings of *10th Japan International SAMPE Symposium & Exhibition (JISSE-10)*, MMC,CMC,C/C,HT Appl-1-3, 1-6 (2007).

3. 宮武 岳洋, 齊藤 公昭, 山田 清高, 青木 亮, 別處 和也, ジュセッペ ペツツオッティ, 顕微ラマン分光法による陽極接合残留応力の定量化, パナソニック電工技報, 58[1], 40-46 (2010).

4. A. Porporati, **T. Miyatake**, K. Schilcher, W. Zhu, G. Pezzotti, Ball-on-ring test in ceramic materials revisited by means of fluorescence piezospectroscopy, Journal of the European Ceramic Society, 31[12], 2031-2174 (2011).