

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 4 月 22 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24656087

研究課題名(和文) 顕微ラマン分光を用いたMEMS共振構造体の時間分解局所応力測定

研究課題名(英文) Time-resolved local-stress measurement of MEMS resonating structure using micro Raman spectroscopy

研究代表者

土屋 智由 (Tsuchiya, Toshiyuki)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：60378792

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円、(間接経費) 930,000円

研究成果の概要(和文)：振動によって周期変化するシリコン製のMEMS構造体振動子の局所応力を計測するための時間分解顕微ラマン分光を実現することを目的として、プルインを用いた静電駆動MEMSチョッパーを提案、試作、評価した。静電駆動アクチュエータの可動部のおもりにスリットを形成し、ガラス基板上のシャッターと組み合わせ、駆動によりON/OFFを切り替える。このデバイスを市販の顕微ラマン分光装置の入射光学系に挿入し、ラマン分光の励起光を時間変調させ、振動子の駆動と同期させることで応力をストロボスコピックに時間分解を実現する。試作した両側駆動チョッパーの切り替え時間は50μ秒以下であり、応用可能であることを示した。

研究成果の概要(英文)：A pull-in type electrostatic optical chopper using silicon-on-glass (SOG) wafer was proposed, fabricated, and tested to develop time-resolved micro-Raman spectroscopy for measuring local dynamic stress of silicon micro-electro-mechanical system (MEMS) resonators. The moving mass of electrostatic actuator made of the silicon device layer of SOG wafer is used as an optical chopper. The silicon mass has many slits where the incident laser light penetrates. At the OFF-state, the penetrated light terminated at aluminum shields on the glass substrate. By actuating the mass by electrostatic parallel plate electrodes, the penetrated light goes through the chopper (ON-state). Inserting the chopper to the micro Raman spectroscope, time-resolved analysis will be realized. The mechanical and optical responses of the chopper were measured. The double-side-drive type of chopper has a response time of around 50 us, which is good enough for the application.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械材料・材料力学

キーワード：動的局所応力計測 シリコン 顕微ラマン分光 光チョッパー 静電アクチュエータ 振動子

1. 研究開始当初の背景

単結晶シリコンを機械構造体として用いる MEMS デバイスは加速度、角速度センサなど力学量センサや光ディスプレイ、光通信システムなどにおける小型ミラーデバイスなど様々な分野で実用化が進んでいる。しかしながら、単結晶シリコンは脆性材料であり、長期信頼性を保証する上で微細構造に加わるひずみ、応力の評価は重要である。微小な構造体に加わる応力を直接測定することは困難であるので、従来は有限要素法などによる数値計算による応力評価が広く用いられている。しかしながら、数値計算手法では局所応力の評価は応力集中の評価が困難であり、実測による評価も数値計算による評価の妥当性を確認するためには重要である。単結晶シリコンの数ミクロン領域の応力場を測定する手法として、顕微ラマン分光が広く用いられている。酸化、拡散プロセスによって導入されるひずみの評価は、信頼性、デバイス特性の評価に重要な役割を果たしている。MEMS 分野においても単軸引張試験におけるひずみ測定手法の一つとして顕微ラマン分光を用いることが提案されている。しかし、これらは静的あるいは準静的な応力の測定であり、実用のデバイスで印加される動的な(振動)応力場の測定はラマン分光の測定時間から考えると困難であった。近年、10 kHz 以上で振動する MEMS 構造体に対するラマン分光測定が提案者などから報告されている。これらは、振動周期に対して測定が遅いため、応力に比例したスペクトルの変位ではなく、その時間積分の結果として、スペクトルの広がりとして観測されている。この手法によっても、ある程度の定量性をもって応力場を計測することは可能であるがスペクトルの広がりを解析するのが複雑であり、瞬間的な応力を測定できることが望まれる。

2. 研究の目的

本研究では MEMS (微小電気機械システム) で用いられる微細な単結晶シリコンの機械構造体に印加される応力を動的にかつ局所的に計測、評価する手法を開発することを目的とする。具体的には振動する単結晶シリコン MEMS デバイスの支持梁の応力を顕微ラマン分光で測定する。このときに励起光を振動変位に同期させて変調し、ストロボ顕微鏡と同様の手法で特定の位相におけるラマン散乱光を観察し、動的に変化する応力場を時間領域で観察しようというものである。さらに、本研究の特徴として、レーザー励起光の変調を、光 MEMS デバイスすなわち微小なミラーあるいはチョッパで行うことを提案する。

3. 研究の方法

(1) 時間分解顕微ラマン分光システムの構成
本研究で提案する時間分解計測システムの

概要を Fig. 1 に示す。市販の顕微ラマン分光装置(堀場製作所, LabRAM HR-800)の入射光学系にチョッパを挿入し, MEMS 振動子の駆動信号に同期させたパルス状の駆動信号を供給する。チョッパの駆動により, 振動子の任意の位相に同期したパルス状の励起光を照射し, 発生するラマン散乱光を分光することで, その位相における応力を計測することが可能となる。本研究では, 周波数 1 kHz 程度の MEMS 振動子を対象として, チョッピングのパルス幅として 100 μ s を実現するデバイスを開発する。

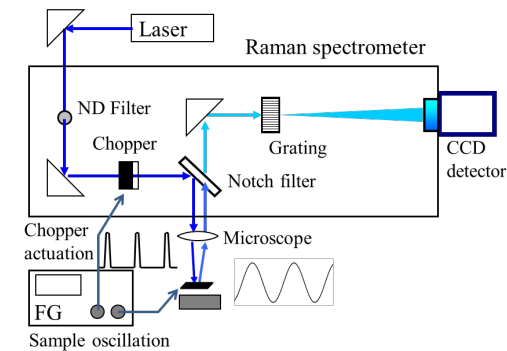


Fig. 1. Time-resolved micro Raman spectroscopy

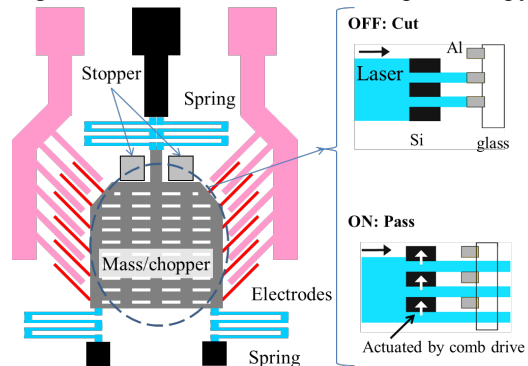


Fig. 2. Schematics and operation principles

(2) MEMS 光チョッパ: 上記の仕様に基づいて考案したチョッパのデバイス構造を Fig. 2 に示す。これはラマン分光器の入射光学系に設置されたフィルタなどを挿入する治具に取り付けることを意図している。チップサイズは 3 mm 角とした。取付位置での光径は約 250 μ m であるのでチョッパの直径を 500 μ m と設定した。透明なガラス基板上にシリコン層(厚さ 15 μ m)を接合した Silicon on glass (SOG)ウエハを用いる。シリコンの構造は Fig. 2 右のようにチョッパ部は 3 μ m 幅のスリットを多数形成したシリコン板であり, これらを 4 本の梁で支持している(黒い部分が基板に固定されている)。チョッパは左右の斜めに配置した並行平板電極で固定電極に電圧を印加して駆動した。プルイン動作させることで高速駆動するが, 電極でプルインしないようにストッパを形成している。設計変位は 3 μ m である。ガラス基板側には後述するセルフアライメントプロセスで板の開口部に一致した位置に Al の遮光膜があり, チョッパ

の駆動原点では光が透過せず(OFF), 電圧を印加して変位すると隙間から光が透過する(ON)。

(3) 作製プロセス: Silicon on Insulator (SOI)とガラス基板を陽極接合し, SOI の支持基板と埋め込み酸化膜を除去して得られた SOG 基板を用いてデバイスを作製した。プロセスフローを Fig. 3 に示す。犠牲層エッチングは気相フッ酸を用いて, 付着を防止した。リリース後にアルミを全面に EB 蒸着した。Si 上に形成した膜は配線用の電極として利用し, スリットを通してガラス基板上に形成した膜は遮光膜となる。

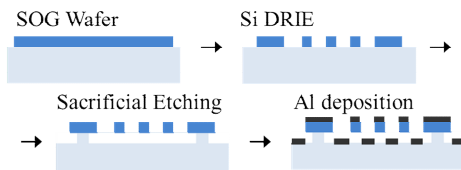


Fig. 3. Fabrication process

4. 研究成果

(1) 片側駆動型 MEMS 光チョッパ: 試作したデバイスを Fig. 4 に示す。全面にアルミを蒸着しているので全体が銀色に見える。駆動による変位を左図に示した。DC 電圧駆動では 25V 程度の電圧でプルイン, リリースを繰り返し行うことが可能であった。

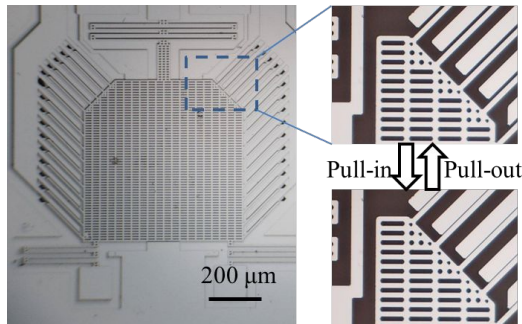


Fig. 4. Fabricated chopper device

この構造に対して変位をストロボスコープ顕微計測システム (Polytec, MSA-500) で測定し, また, 実際に顕微ラマン分光装置に組み込み, 試料位置にフォトダイオードを設置してその出力を測定して光量の測定を試みた

Fig. 5a は時間 0 で 24V を印加した時のプルイン時の変位, Fig. 5b はプルイン直前の変位 0.72 μm に駆動して, 時間 0 で電圧を OFF にしたときの変位である。実際には矩形波で繰り返し駆動して, ある時間遅れでの画像をパターンマッチングで変位を計測している。ON(プルイン時)の応答速度は 50μs 程度で, 目標の応答速度を得られたが, OFF 時には変位 0 の付近で振動し, 静定までに 1~2 ms かかる応答を得た。OFF 時はばねの復元力でつ

り合い位置に戻る動作で, ストップ等がないために減衰振動が発生している。

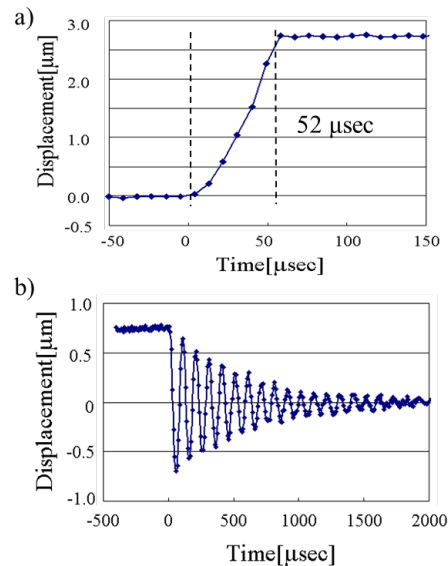


Fig. 5. Step response

このことは試料位置での光量測定の結果 (Fig. 6) から確認された。周期 1.2 ms, デューティ比 10%の駆動パルスに対して, 最初の応答のパルス幅はそれとほぼ同等で立ち上がり, 立下りも十分な速さであるが, 減衰振動に対応した透過光があり, このままでは時間分解顕微ラマン分光に用いることができないとの結論に至った。また, OFF 時にも ON 時の 30%程度の光量が透過しており, 消光比(ON/OFF 時の光量比)が 2.3 と小さい。原因として蒸着時にチョッパがずれてしまっていること, 犠牲層エッチングによるガラス表面の荒れなどが考察される。

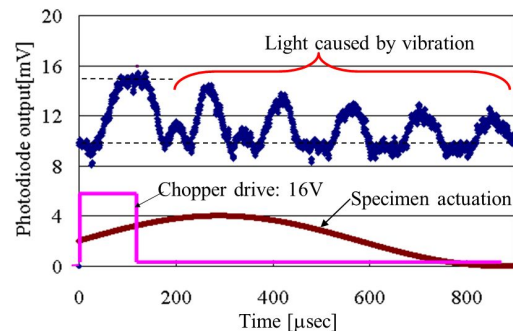


Fig. 6. Modulated light intensity at specimen.

このデバイスで共振周波数 838 Hz の Si の片持ち梁面外曲げ振動子の駆動による梁部の応力の測定を試みた。パルスを発生する位相を変化させ, シリコンのラマンスペクトルを測定したが, 位相変化に対して有意な差は見られなかった。減衰振動を防止するようなデバイス構造の改良と, OFF 時の漏れ光の低減が必要である。

(2) 両側駆動型 MEMS 光チョッパ: 前項目で

述べた片側駆動型 MEMS 光チョッパの課題を解決するために、新しいデバイス構造、作製プロセスを提案する。特徴は以下の通りである。

- 立下り時のオーバーシュートを防ぐための両側駆動する上下対称の構造。
- ギャップをシリコン側に形成し、表面荒れが生じるガラス基板のエッチングを回避
- Al スリットのリソグラフィ加工による遮光性の向上。

提案したデバイス構造の模式図を Fig. 7 に示す。両側駆動構造とすることによって、立下り時においても立上り時と同様の応答が期待できる。両側駆動をするためには、立上り側、立下り側それぞれに電圧を印加し、可動部はグラウンドに接続する必要がある。そこで立上り側、立下り側、可動部の電極パターンを作製する。

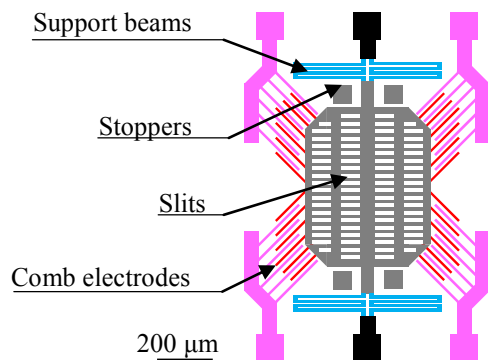


Fig. 7. double-side-drive optical chopper

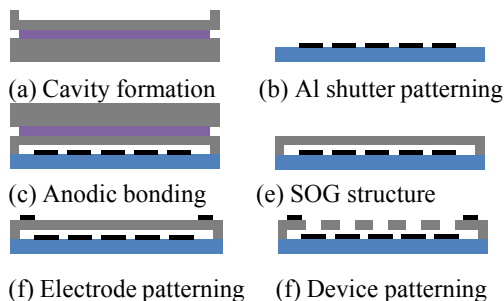


Fig. 8. Fabrication process

さらに Si をエッチングして空洞(キャビティ)を作製することにより、ガラスエッチングによるリリースをする必要がない構造とした。この作製プロセスの模式図を Fig. 8 に示す。また、プロセス変更による利点を以下にまとめる。

・従来の片側駆動型 MEMS 光チョッパはガラスエッチングにより可動部をリリースした。そこであらかじめ SOI デバイス層に空洞(キャビティ)を作製し、接合後デバイス形状をパターンニングすることでガラスエッチングすることなく可動部をリリースすることができる。

・従来のプロセスではリリース後に Al 蒸着を行っていたため、スリットの幅は Al シャ

ッターと同じであった。しかし提案するプロセスでは、アライメント接合前に Al シャッターをリフトオフで作製することにより、自由に幅を設定できる。Al シャッターをスリットよりわずかに大きくすることによって、スリットと Al シャッターのずれを許容できる。また、光の回折による漏れも低減できる、といった利点が挙げられる。

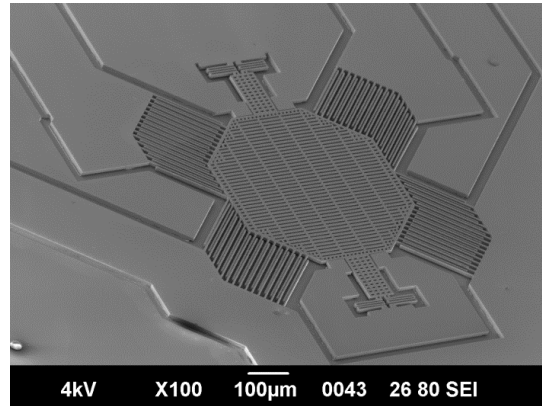


Fig. 9. Fabricated double-side-drive chopper

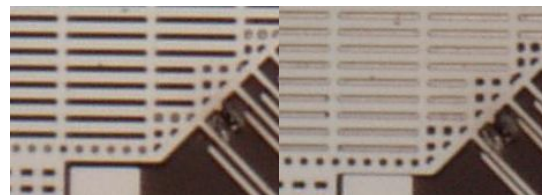


Fig. 10. On (left) and off (right) state of the chopper.

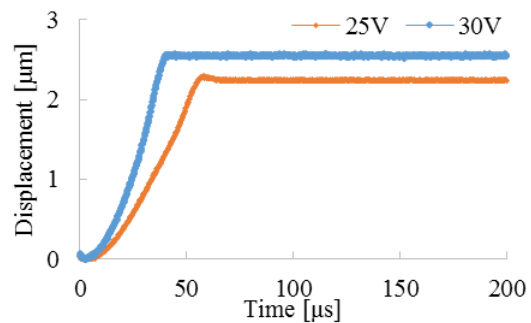


Fig. 11. Step response of double-side-drive chopper.

このプロセスで作製したチョッパを Fig.9 に示す。また、チョッパを駆動したときのスリット部の画像を Fig.10 に示した。スリット部の開閉が適切に行われていることが確認できている。さらに、ON、OFF 時の応答を fig.11 に示した。減衰振動の影響が非常に小さい駆動が確認でき、応用可能であることを示した。

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0件)

〔学会発表〕(計2件)

谷山彰, 小北雄亮, 平井義和, 田畑修, 土屋智由, 時間分解顕微ラマン分光のためのプルイン型 MEMS 光チョッパの動作特性, 日本実験力学学会 2013 年度年次講演会, 由利本荘市文化交流館, 由利本荘, 2013 年 8 月 20-23 日, pp. 129-131.

小北雄亮, 谷山彰, 平井義和, 田畑修, 土屋智由, 時間分解顕微ラマン分光による Si 振動子の動的応力測定のための両側静電駆動型 MEMS 光チョッパ, 第 30 回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, 電気学会, 仙台国際センター, 仙台, 2013 年 11 月 5-7 日, 5PM3-PSS-013

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計0件)

○取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.nms.me.kyoto-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

土屋 智由 (TOSHIYUKI TSUCHIYA)

京都大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 60378792

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし