

平成 30 年 6 月 18 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05713

研究課題名(和文) MEMS静電駆動マイクロシャッタのマルチスリット多天体分光器応用

研究課題名(英文) MEMS Electrostatic Micro-shutter Arrays for Astronomical Multi-Object Spectrographs

研究代表者

高橋 巧也 (Takahashi, Takuya)

東京大学・生産技術研究所・技術専門職員

研究者番号：60451879

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、東京大学が南米チリアタカマ高地に建設中の大型赤外線望遠鏡に搭載予定の分光器を、MEMS技術を用いて可変マルチスリット化することを目的とする。本研究ではこれまでに、貼り合わせシリコン基板(SOI基板)の両面をマイクロ加工し、幅100 $\mu\text{m}$ 、長さ1000 $\mu\text{m}$ 、厚み1.25 $\mu\text{m}$ の静電駆動シャッタを設計、製作し、大気中および真空中における静電駆動特性を測定した。さらに、シャッタ数3 $\times$ 3のサブユニットを用いて、X方向、Y方向の電気配線のみで任意の1点のシャッタ開閉動作を制御するパッシブマトリクス方式についての検証を行い、提案している制御方法で目的の動作を実現可能であることが確認できた。

研究成果の概要(英文)：Astronomical multi-object spectrographs (MOSs) are becoming a powerful tool for the deep survey of the galaxies. As an alternative method to the conventional MOSs (metal slit-masks), we have proposed a MEMS (microelectromechanical system) shutter array that can be operated to open and close the individual shutter plate, where more than 8,000 shutter elements are tiled to make an electrically addressed MOSs plate.

An SOI (silicon-on-insulator) with a 1.25- $\mu\text{m}$  active layer is patterned the shutter plate of 1 millimeter by 0.1 millimeter by the deep reactive ion etching (DRIE). In a vacuum and cryogenic environment, we have measured the robustness against the thermal stress of the developed visored shutter structure and the electrostatic drive characteristic. Finally, we have reported the passive matrix method which can be selected the arbitrary shutters by the X-row and Y-column electrodes with the 3 $\times$ 3 shutter matrix sub units.

研究分野：半導体マイクロマシニング

キーワード：ナノマイクロ加工 赤外線天文学

1. 研究開始当初の背景

現在の分光天文学の分野では、限られた時間内により多くの銀河を観測するための手法としてマルチスリット型の多天体分光器が広く用いられているが、この方式の場合、観測対象が変わるたびにスリット板を準備して装着し、使用温度の100Kに再冷却する必要があるので、機動的な天文台観測が難しい。このため、分光天文学においてはマルチスリットを状態可変にした効率のよい多天体分光技術が強く望まれている。そこで本研究では、MEMS技術によって製作したシャッタアレイを印加電圧の静電駆動により個別に開閉制御し、可変型のマルチスリットを構成する手法を採用した。

2. 研究の目的

本研究は「MEMS静電駆動マイクロシャッタのマルチスリット多天体分光器応用」と題し、東京大学が南米チリ共和国アタカマ高地に建設中の遠方銀河観測用天体望遠鏡の分光器を、MEMS技術を用いて可変マルチスリット化することを目的とする。MEMS可変マルチスリットにより、従来の分光器に必要であったスリット板の交換・冷却の時間が劇的に短縮され、天文台運用の人的・物的なコストの軽減と観測効率の飛躍的向上が期待される。また、東京大学が南米チリ共和国のアタカマ高地に計画中のTAO望遠鏡は、標高5639mにあるため、可能な限り観測を無人化・遠隔操作化する必要がある。また、本研究の実現により、分光器にはMEMS型の可変マルチスリット搭載が世界標準となり、我が国の天文学研究が世界をリードする地位を獲得できることが期待される。

3. 研究の方法

本研究では、貼り合わせシリコンSOI基板の両面を半導体マイクロマシニング技術により加工し、静電駆動型のマイクロシャッタアレイを製作する。天文分光器に搭載する可変マルチスリットアレイには、4cmの面積内に8000素子相当のシャッタが必要になるため歩留まりの良い製作方法が必要である。まずは現状のプロセス技術の改善としてパリレンを中間保護膜に使用した高歩留まりのMEMSプロセスを実現し、それにより製作した歩留まり90%程度の良品チップをタイル貼りして、8000素子に大規模化する手法をとる。また、任意位置シャッタの静電駆動開閉動作の実現のために、シャッタ構造、ひさし構造、基板の3層を電極に活用し、X方向、Y方向に張り巡らせた電気配線のみで40列×200行のうち任意の1点について開閉を制御するパッシブマトリクス方式を採る。さらに、実際の分光器内での動作特性を予測し、低温におけるシャッタの反りなどの問題を解決するために、クライオ真空チャンバを用いた温度100K環境におけるMEMSシャッタ動作特性の評価

を実施する。

4. 研究成果

本研究ではこれまでに、半導体シリコンマイクロマシニング加工技術を用いて、図1に示すように、貼り合わせシリコン基板(SOI基板)の両面をマイクロ加工しさらに開口部のギャップ上部に迷光遮断用の金属庇を被せた構造の静電駆動シャッタを製作し、大気中さらには真空中においてシャッタ閉から開またはシャッタ開状態保持を制御可能な可変マルチスリットの静電駆動特性計測に成功している。

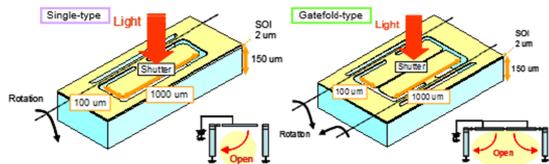


図1 MEMS静電駆動マイクロシャッタ

図2に示すように、SOI基板表面のシャッタ構造は横1列に接続されており、基板下部電極との電位差によりシャッタは列ごとに下部基板に引き付けられ90度回転する。また、ギャップ上部に被せられた庇構造は縦一列に接続されており、これらも共通の上部電極として利用できる。シャッタと庇間の電位差によりシャッタ回転方向とは逆向きの静電引力が発生し、選択的にシャッタ閉状態を保持できる。

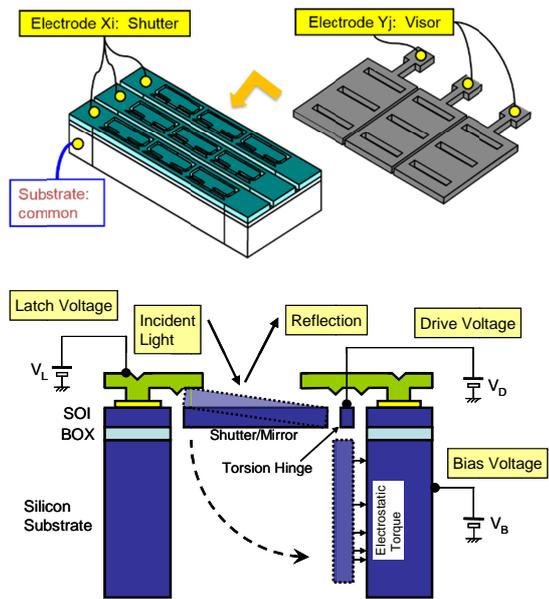


図2 庇付きマイクロシャッタ動作原理

シャッタと庇、下部基板それぞれに印加する電圧の大きさタイミングを制御することで任意のシャッタ開閉、さらには開状態の保持(静電ラッチ)が可能となる。印加電圧タイミングチャートの解析結果を図3に示す。上側の小さいヒステリシスはシャッタ 庇

間のラッチ動作を表し、15Vでプルインした後に電圧を下げていきおよそ5Vまでラッチ状態を保持できることを示す。また、下側の大きいヒステリシスはシャッタ下部基板間の回転動作（OPEN/CLOSE）を表し、200V程度でプルインし、20V程度まで下げてもシャッタ開状態を保持できることを示している。3系統の電極を使用することにより、シャッタ閉状態および開状態を選択できるという解析結果が得られた。大電圧が必要なタイミングはシャッタを開状態にする瞬間のみであり、駆動用の制御回路を簡略化するうえでも有用な方法となる。

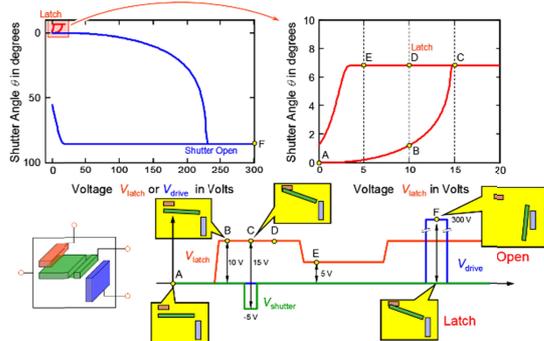


図3 印加電圧タイミングチャート解析

半導体シリコンマイクロマシニングの流れを図4に示す。本研究のデバイスは全6枚のフォトリソで製作される。シリコン貼り合わせ基板（SOI基板）にシャッタ構造をパターニングし、その上に銅を犠牲層としたニッケルのブリッジ構造を電解めっきにより形成し、これを底および上部電極として使用する。また、プロセス歩留まり向上のため、裏面の工程に入る前に、表面にパリレンの保護膜を成膜する。

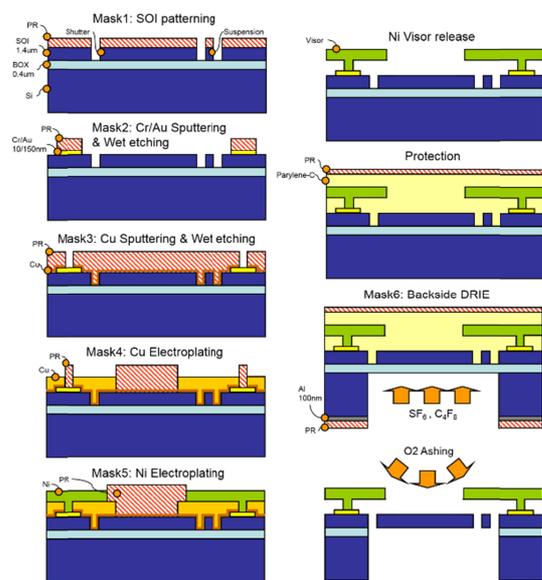


図4 シリコンマイクロマシニングプロセス

図5に製作したニッケル底付きMEMSシャッタアレイのSEM写真を示す。横方向のシャッタ40行×縦方向のニッケル底10列で400素子のデバイスとなっている。

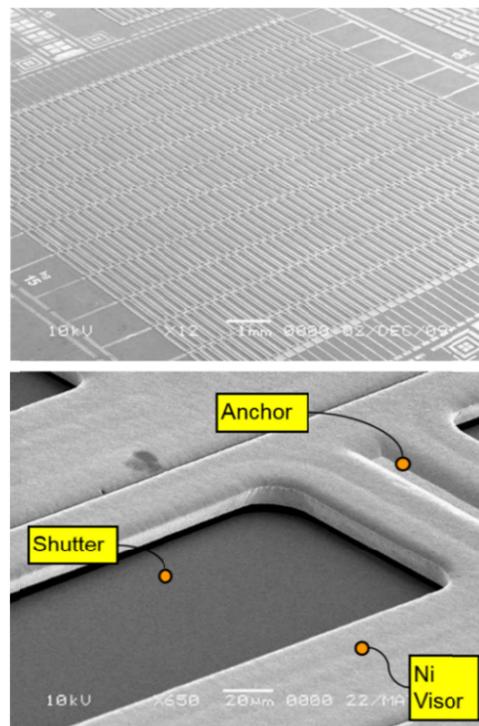


図5 底付きシャッタアレイのSEM画像

本研究ではこれまでに、製作したMEMSシャッタをクライオ真空チャンバ内に設置しておよそ100Kまで冷却した場合のシャッタや底構造の反り、破壊などについて物性評価を行っているが、電圧を印加しての静電駆動試験はまだ行っていなかった。今回はシャッタ1列の小規模アレイについて、真空中かつ低温環境下での駆動試験を行った結果を図6に示す。プルイン電圧120V、ラッチ電圧20Vと大気中での測定とほぼ同じ結果を得られた。シリコン半導体は低温下ではキャリア密度が極端に低下して静電駆動に必要な導電性が確保できないことを懸念していたが現状では特に問題は確認されなかった。

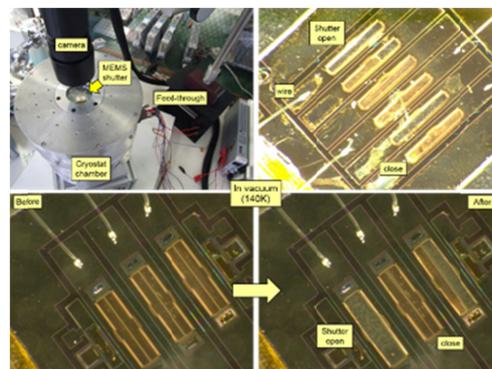


図6 温度100K環境下におけるMEMSシャッタ駆動試験

図7には温度100Kに冷却した場合の庇構造への影響を示す。室温で製作したデバイスを低温環境下に持ち込んだ場合でもシリコンのシャッタ構造には変化がほとんど見られなかったが、庇構造とそのアンカー部分には3種類の金属を使用しているため異種材料の熱膨張係数の違いによる応力変化にアンカー部分の金属薄膜が耐え切れず破損し、庇構造がシャッタから剥がれてしまった。デバイス設計を変更し、FILL FACTORは犠牲になるが庇構造の上下端以外にも無数のアンカー構造を配置することにより、冷却時の応力変化による庇構造の剥離について対処可能であることが確認できた。

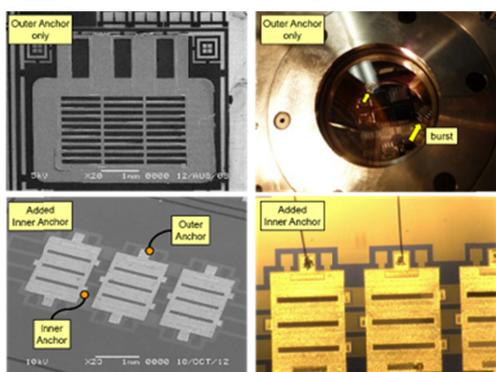


図7 温度100K環境下における庇構造への影響

3行×3列の小規模シャッタマトリクスを製作し、それを用いて本研究で提案しているパッシブマトリクス方式の検証を行った結果を図8に示す。シャッタ3個で1行ずつ、庇3個で1列ずつ、それぞれグループ化されており、各行列の外側1箇所のみワイヤを接続し電気配線をしている。これらと下部電極を含めた3系統の電極への電圧印加によって、シャッタ個々に電気配線を必要とせずに任意の1点のシャッタについて制御可能となる。

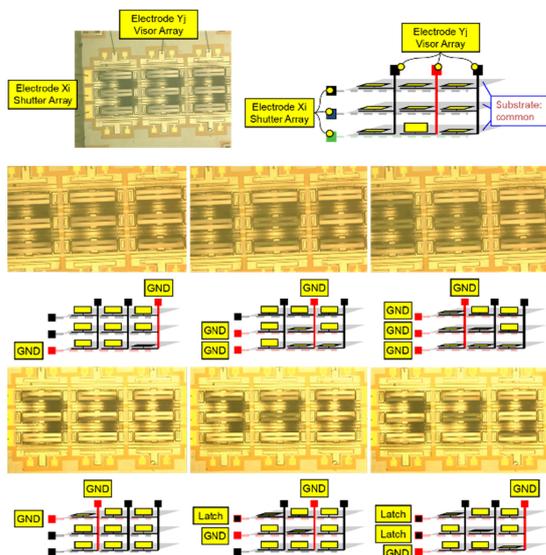


図8 MEMSシャッタアドレッシング試験(3行×3列)

具体的には、まずシャッタ1行のみについてシャッタ開もしくは閉状態を区別するようにX方向、Y方向への印加電圧を設定しておき、下部電極にプルインに必要な電圧を印加し目的のシャッタのみを開く。次の行を選択する前に開状態のシャッタにはラッチ保持用の電圧を印加しておき、順次シャッタ行ごとに選択を繰り返していく事で、複数のマトリクスに対して任意のパターンを選択可能となる。

以上まとめると、本研究では遠方銀河観測用天体望遠鏡の分光器をMEMS技術により可変マルチスリット化することを目的とし、静電駆動型のマイクロシャッタアレイを考案しその静電駆動特性の解析を行い、実際にシリコン半導体マシニングプロセスを用いて小規模シャッタアレイを製作し、天体望遠鏡実機における観測環境のもとでの静電駆動特性を評価するとともに、個々の電気配線を必要とせずにシャッタ個々の開閉動作を可能とする制御方式を提案し実際にその有用性を確認したものであり、最終的に大面積化し実機開発を目指す際の基礎を確立した研究である。

## 5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計1件)

1. 高橋巧也、三田 信、本原顕太郎、小林尚人、柏川伸成、藤田博之、年吉 洋、「近赤外分光器用MEMS静電駆動マイクロシャッタアレイ」 国立天文台研究集会第7回 可視赤外線観測装置技術ワークショップ2017、2017年11月16日～17日、京都大学益川ホール。

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

高橋巧也 (TAKAHASHI, Takuya)  
 東京大学・生産技術研究所・技術専門職員  
 研究者番号：60451879

### (2)連携研究者

年吉 洋 (TOSHIYOSHI, Hiroshi)  
 東京大学・先端科学技術研究センター・教授  
 研究者番号：50282603

本原顕太郎 (MOTOHARA, Kentaro)  
 東京大学・理学系研究科・准教授  
 研究者番号：90343102

小西真弘 (KONISHI, Masahiro)  
 東京大学・理学系研究科・特任助教  
 研究者番号：50532545