

機関番号：16201

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2013

課題番号：23651139

研究課題名(和文)シリコン結晶異方性プラズマエッチング技術の開発

研究課題名(英文)Development of Crystalline Anisotropic Plasma Etching for Single Crystal Silicon

研究代表者

鈴木 孝明 (Suzuki, Takaaki)

香川大学・工学部・准教授

研究者番号：10378797

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円、(間接経費) 900,000円

研究成果の概要(和文)：本論文では、結晶異方性プラズマエッチングを用いた複雑3次元シリコン構造の提案として、カンチレバーと微細針を作製した。提案する方法は、従来法に比べて少ない工数・装置数で簡便に製作でき、カンチレバー製作においては、従来法とほぼ同一の歩留りで、製作時間を5分の1に短縮でき、提案する加工法の有用性を示した。また、単一のドライエッチング装置での複雑3次元シリコン構造製作の可能性を示した。今後、単一装置での新たな3次元シリコン構造の提案を行うと共に、結晶異方性プラズマエッチングのメカニズム解明を進め、より制御性の高い加工技術へと展開をする。

研究成果の概要(英文)：In this study, we propose a novel fabrication process for complicated three-dimensional silicon microstructures using the crystalline anisotropic plasma etching of the single crystal silicon with an ordinary RIE process under the normal temperature. The proposed process combined of the conventional isotropic, the conventional vertical anisotropic, and the crystalline anisotropic silicon plasma etchings achieves the complicated microstructures under all dry process with single RIE machine with single mask. To confirm the validity of the proposed process, we demonstrated to fabricate a cantilever and a micro needle for bio-application. In the case of the cantilever, the cantilever released from a substrate was fabricated at 1/5 processing time of the conventional process. It is possible that the complicated three-dimensional silicon microstructures are fabricated in single dry etching equipment.

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：ナノ・マイクロ科学(マイクロ・ナノデバイス)

キーワード：マイクロファブリケーション 単結晶シリコン ドライエッチング 結晶異方性 カンチレバー

### 1. 研究開始当初の背景

MEMS ( Micro Electro-Mechanical Systems ) は、システムの小型化、信頼性向上、また、新たな機能を実現するデバイスとして期待されている。近年、デバイスの高機能化に伴い、デバイス形状および加工プロセスの複雑化が進んでおり、歩留り向上の観点からも簡便なプロセスが要求されている。

MEMS デバイスの多くは、元になる半導体製造技術と、電子回路との整合性の観点から、シリコンウエハが良く用いられている。これらのシリコンデバイスにおいて、複雑な形状を得る方法としては、グレイスケールマスクを用いた3次元レジスト形状を製作しドライエッチングで加工を行う方法や、マイクロローディング効果を利用した方法が提案されている。グレイスケールマスクは、一括でレジストの3次元形状が得られるが、設計の段階でリソグラフィのシミュレーションや、マスク製作に特殊な装置が必要であるためプロセスが複雑になる。また、マイクロローディング効果を利用した3次元形状製作方法では、単一マスクで曲面形状などが作製できるが加工形状に制限があり、たとえば、中空構造体の製作は困難である。

一方で、我々は、シリコン結晶異方性プラズマエッチング法を提案している。このなかで、従来の常温下のドライエッチング法では報告がなかった加工形状製作例を示してきたが、この加工法は、一般的な反応性イオンエッチング装置を応用した方法であることから、従来の条件を用いれば、同装置で等方性や垂直異方性加工も可能である。

そこで本研究では、シリコンドライエッチング装置を用いた、複雑3次元シリコン構造の新たな製作方法を提案する。具体的には、汎用のシリコンドライエッチング装置を用いて、プラズマエッチングにおける加工条件を様々に変更することにより、結晶異方性・等方性・垂直異方性のプラズマドライエッチングを組み合わせ、複雑3次元シリコン構造を単一のマスクパターンから製作する方法を提案する。応用例として、加工中のステップングを抑制しながら短時間で加工するカンチレバー試作と、先端形状を微細に変化できる微細針の試作を行い、単一マスクパターンを用いた複雑3次元シリコン構造製作技術としての可能性・有用性を検証する。

### 2. 研究の目的

本研究では、単結晶シリコンの加工技術として、プラズマプロセスにより結晶異方性ドライエッチングを行う方法を提案する。従来、シリコンの結晶異方性エッチングは、特殊な薬液によるウェットプロセスのみで行われてきた。ウェットエッチングから汎用性が高いプラズマドライエッチングに変更できれば、危険な薬液を操作する必要がなく安全であり、化学薬品の使用を非常に少なくできる。

また、解像度、洗浄性、加工制御性、自動化容易性、電子回路との適合性が向上する。さらに、従来にない複雑な3次元マイクロ構造を製作することもできる。

### 3. 研究の方法

#### (1) 結晶異方性プラズマエッチング

本研究では、プラズマエッチングによる単一装置での複雑3次元シリコン構造作製の可能性を検討した。従来のプラズマエッチングによるシリコンウエハの加工は、等方性エッチングとドイツの Robert Bosch GmbH 社によって提案された垂直異方性エッチングが一般的であり、加工形状に制限があった。

プラズマエッチングの主な加工メカニズムは、イオンによる物理的エッチングとラジカルによる化学的エッチングの2つのエッチングメカニズムが混在していることが知られており、エッチング特性は複雑になる。我々は、そのエッチングメカニズムに着目し、これまでに、物理的エッチングを抑制し、エッチングエネルギーが低い条件下で結晶異方性が支配的になると、非常に高い再現性・精度でシリコンの結晶異方性ドライエッチングが可能となることを発表してきた。そこで、この結晶異方性プラズマエッチングと、従来の等方性・垂直異方性の加工方法を組み合わせることで、プラズマエッチング装置と単一のマスクパターンのみによって、加工における自由度を向上させ、より複雑な構造製作が可能になると考えた。本研究では、加工技術の適用例として、微細針とカンチレバーの製作を試みた。

#### (2) 微細針の製作方法

加工技術の適用例として、バイオ、医療分野への応用が進められている微細針アレイを試作した。本研究では、図1に示すような、BOSCH プロセスと結晶異方性プラズマエッチングを組み合わせた簡便なプロセスを提案した。まず、フォトリソグラフィによりマスクパターンをパターンニング後、RIE でエッチングを行い微細針の先端部を形成した後、BOSCH プロセスによって深堀を行う(100 $\mu$ m)。最後に硫酸化過水洗浄で、レジストを除去し、針形状を製作する。

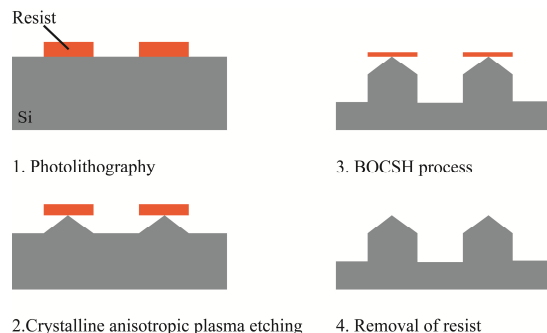


図1 微細針のプロセスフロー

### (3) カンチレバーの製作方法

提案する加工技術の適用例の一つとして、複雑なデバイス形状の一つである中空構造体である、アクチュエータやバイオセンサとして用いられるカンチレバー形状の製作を行った。我々は、提案するドライエッチング技術を適用することによって、アンダーカットを抑えた結晶異方性加工によるカンチレバー構造と、スティッキングを防ぐことができるドライエッチングによる歩留り向上の両立が可能と考えた。

まず、製作方法の違いによるカンチレバーの形状比較のために、結晶異方性プラズマエッチング、結晶異方性ウェットエッチング、等方性プラズマエッチングを用いて、それぞれの製作方法でカンチレバーを製作した。本研究で製作したデバイスの製作プロセスのうち、提案するドライプロセスのプロセスフローを図2に示す。

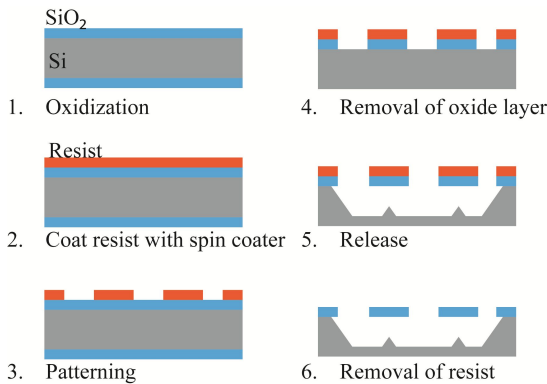


図2 ドライエッチングによるカンチレバーの製作方法

## 4. 研究成果

### (1) 微細針の加工形状評価

微細針について、エッチング中の加工パラメータを変更することで、プラズマエッチング装置のみで加工を行うことができる可能性を評価した。加工後の微細針の形状を図3に示す。初めの結晶異方性プラズマエッチングにより上部の尖った形状ができており、次のBOSCHプロセスによって下部の基板に対して垂直な形状ができていることが分かる。以上の結果から、結晶異方性・等方性・垂直異方性など加工形状を組み合わせることで、単一マスクパターンから、プラズマエッチング装置のみで複雑な3次元シリコン構造を製作できた。

さらに、微細針の先端部を製作する際の加工条件による先端部の形状変化について評価したところ、等方性エッチングで加工した針の表面形状が荒れていた。これは、結晶異方性エッチングに比べ、低圧力下で加工を行ったため、イオンによるエッチングエネルギーが増大したためだと考えられる。また、針の先端部を比較したところ、結晶異方性を用いて先端部を製作した針の方が、鋭く尖った

形状が表れていた。これは、結晶方位に沿ってエッチングが進行していくため、等方性エッチングよりも先端部の形状がしやすいためではないかと考えられる。今回、製作した針形状は、単一マスクを用いてプラズマエッチング装置の加工パラメータを変更するだけで製作しており、単一装置による複雑3次元構造製作の可能性を示すことができた。

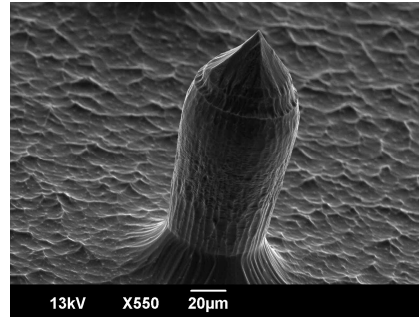
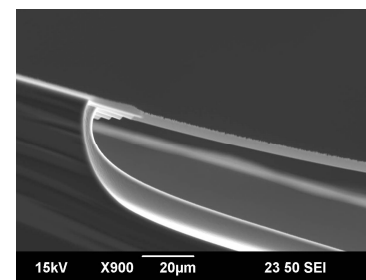


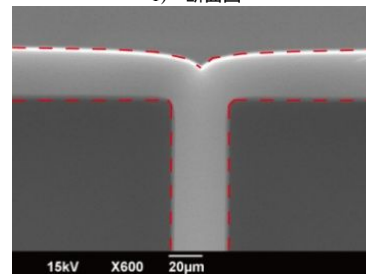
図3 製作した微細針のSEM像

### (2) カンチレバーの製作結果

提案する加工方法で製作したカンチレバーの固定端部の断面図と上面図のSEM写真を図4に示す。上面図に示した赤い破線は、SiO<sub>2</sub>膜がシリコンウエハからリリースされた部位を示している。この結果から、結晶異方性プラズマエッチングを用いると、等方性ドライエッチングで加工を行った際に生じた固定端部の加工面が鋭く尖る形状を抑えられていることが分かる。これは、結晶異方性エッチングにより、シリコンの結晶方位の違いによって、エッチングレートの違いが生じ、加工形状を制御できた結果であると考えられる。また、エッチング工程以降で、結晶異方性ウェットエッチングを用いた製作方法は、455minの加工時間がかかるのに対して、結晶異方性プラズマエッチングでは100minの加工時間で製作できており、高速・簡便な加工法といえる。



1) 断面図



2) 上面図

図4 カンチレバー構造のSEM写真

## 5. 主な発表論文等

### 〔雑誌論文〕(計3件)

H. Yamashita, K. Terao, H. Takao, F. Shimokawa, F. Oohira, and T. Suzuki, Integration of Angular Rate Sensor on Large Deflection Polymer-MEMS Mirror, Proceedings of IEEE Optical MEMS & Nanophotonics Conference, 査読有, pp. 69-70, 2013.

DOI: 10.1109/OMN.2013.6659063

J. Suzuki, T. Miura, K. Terao, H. Takao, F. Shimokawa, T. Namazu, F. Oohira, and T. Suzuki, Dual-Axis Polymer-MEMS Mirror Made of Photosensitive Nanocomposite, Proceedings of IEEE Optical MEMS & Nanophotonics Conference, 査読有, pp. 101-102, 2013.

DOI: 10.1109/OMN.2013.6659079

赤松幹夫, 寺尾京平, 高尾英邦, 下川房男, 大平文和, 鈴木孝明, 多層塗布による高精度厚膜スプレーコート法の開発, 電気学会論文誌(E), 査読有, Vol.133, No.5, pp.170-176, 2013.

DOI: 10.1541/ieejsmas.133.170

### 〔学会発表〕(計22件)

植田勇作, 中原佐, 寺尾京平, 高尾英邦, 下川房男, 大平文和, 小寺秀俊, 鈴木孝明, 感光性磁気ナノ複合材料を用いた電磁マイクロポンプの開発, 第22回MAGDAコンファレンス in 宮崎, 2013年12月2~3日, 宮崎観光ホテル。(優秀ポスター講演論文賞受賞)

山下紘史, 寺尾京平, 高尾英邦, 下川房男, 大平文和, 鈴木孝明, Si/Polymer ヒンジを組み合わせた2軸 Hybrid-MEMS ミラー, 電気学会 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, 2013年11月5~7日, 仙台国際センター。

藤村仁也, 寺尾京平, 高尾英邦, 下川房男, 大平文和, 鈴木孝明, 真空 UV キュア法によるレジストプラズマ耐性の評価とその応用, 日本機械学会 2013年度年次大会, 2013年9月9日, 岡山大学津島キャンパス。

鈴木孝明, かがわ発マイクロマシン技術, かがわ健康関連製品開発フォーラム第3回セミナー(招待講演), 2013年2月13日, 香川産業頭脳化センター。

鈴木孝明, Assembly-free 3D lithography for bio-microsystems, The 2nd Regional Innovation Strategy Symposium 2012 Novel devices applicable to bioclinicalmedical fields(招待講演), 2012年11月02日, 香川大学。

藤村仁也, 三嶋利幸, 寺尾京平, 高尾英邦, 下川房男, 大平文和, 鈴木孝明, 結晶異方性プラズマエッチング法を用いた複雑3次元構造の製作, 第29回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, 2012年10月22-24日, 北九州国際会議場。

三嶋利幸, 寺尾京平, 高尾英邦, 下川房男, 大平文和, 鈴木孝明, RIEプロセスを用いたシリコン結晶異方性エッチング, 第28回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, 2011年9月26-27日, タワーホール船堀。

### 〔図書〕(計1件)

鈴木孝明(分筆), 薄膜塗布技術と乾燥トラブル対策, 多層塗布による高精度厚膜スプレーコート法の開発(第7章, 第11節), 株式会社 技術情報協会, 2013年8月, ISBN978-4-86104-490-8。

### 〔その他〕

ホームページ等

<http://www.eng.kagawa-u.ac.jp/~suzuki/>

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

鈴木孝明(SUZUKI Takaaki)

香川大学・工学部・准教授

研究者番号: 10378797

### (2)連携研究者

大平 文和(OOHIRA Fumikazu)

香川大学・工学部・准教授

研究者番号: 80325315

下川 房男(SHIMOKAWA Fusao)

香川大学・工学部・准教授

研究者番号: 90580598

高尾 英邦(TAKAO Hidekuni)

香川大学・工学部・准教授

研究者番号: 40314091