

令和 6 年 5 月 27 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01777

研究課題名(和文)イオン液体をイオン種としたマルチ集束イオンビームの研究

研究課題名(英文)Study of multi focused ion beam using ion species generated from ion liquid

研究代表者

桑野 博喜 (Kuwano, Hiroki)

東北大学・未来科学技術共同研究センター・学術研究員

研究者番号：50361118

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：新しく考案した高機能マルチ集束イオンビーム(M-FIB)を開発し、マスクレスでエッチング、ドーピングなどの多種多様なナノレベルの高機能加工が自由に行える新しいナノ加工法を研究開発することが目的である。

MFIBを試作して、イオン種としてイオン液体を適用し電圧 電流特性などのイオン源の特性を把握した。イオン液体イオン源アレイの設計・作製技術、イオンレンズアレイの設計・作製技術、イオン液体イオンビームの集束化、などの技術を確立し、100本のビームアレイを形成した。本集束イオンビームによるSi基板エッチングを行い、一本のビームで 10 μ m, エッチング深さ8 μ m程度の微細孔が実現できることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

新しいナノデバイスの研究開発および実用化のために、高機能で自由なナノレベルの3次元加工を高生産効率で行うことが求められている。ナノインプリント技術や機械加工技術、半導体微細加工技術等が存在するが、パターン形状や機能が限定的である欠点がある。本研究課題では高機能マルチ集束イオンビーム(M-FIB)を開発し、マスクレスでエッチングなどの多種多様なナノレベルの高機能加工が自由に行える新しいナノ加工(以下、「高機能ナノ自由加工」と称する)法を研究開発することにより新しいナノデバイスを実現し、新しい学術分野および新産業創生を図ることである。

研究成果の概要(英文)：we develop a micromachined fluorine-based ion source (IS) for nano-/micro-processing applications. Our proposed structure composed an out-of-plane Si micro-emitter surrounded by four segmented annular micro-channels. The segmented channels were implemented to control the ionic liquid (IL) supplied flow to the tip emitter, enabling to broaden the working regime and overcome the droplet emission which was observed in the conventional ionic liquid ion source (ILIS). The 1-ethyl-3-methylimidazolium tetrafluoroborate (EMIM-BF₄) IL was used to produce reactive fluorine-based ions. The ILIS enabled to emit the fluorine-based ions without droplets for a wide range of voltage supply from 1.8 kV to 5 kV. The ion source was demonstrated for patterning Si structure with the maximum etching rate of 150 μ m³· μ A⁻¹·min⁻¹. Finally, an etched Si profile of 10 μ m and 8 μ m in depth is realized by the system.

研究分野：MEMS、NEMS

キーワード：集束イオンビーム イオン液体 MEMS シリコン

1. 研究開始当初の背景

本研究の目的である自由なナノレベルの高機能加工として、幾つかの候補がある。例えばナノインプリントであるが、型に嵌めるという意味で自由な加工とは言い難く機能的にも限定的な加工法である。また、従来の Ga を用いた一筆書き集束イオンビーム(FIB: Focused Ion Beam)は、エッチングについてはナノレベルで自由な加工が可能であるが、イオン種が Ga と固定されているので表面修飾やイオン注入などは極めて限定的である。また、エッチングにしても一本の集束イオンビームの一筆書きであり加工能率は極めて悪くまた、Ga 汚染も存在する。さらに液体金属イオン源による FIB 装置は高価であり、生産装置に使用すると何桁もの加工コスト増となるので、量産的な加工プロセスが可能とは考えられず、解析のための断面形成や部分的な加工に留まっている。

2. 研究の目的

新しいナノデバイスの研究開発および実用化のために、高機能で自由なナノレベルの3次元加工を高生産効率で行うことが求められている。ナノインプリント技術や機械加工技術、半導体微細加工技術等が存在するが、パターン形状や機能が限定的である欠点がある。本研究課題では高機能マルチ集束イオンビーム(M-FIB)を開発し、マスクレスでエッチング、ドーピング、表面修飾、高機能薄膜形成などの多種多様なナノレベルの高機能加工が自由に行える新しいナノ加工(以下、「高機能ナノ自由加工」、と称する)法を研究開発する。本研究の最終目的はマルチ集束イオンビーム装置を開発し高機能ナノ自由加工により新しいナノデバイスを実現し、新しい学術分野および新産業創生を図ることである。

3. 研究の方法

(1) イオン種としてイオン液体を適用し電圧-電流特性などのイオン源の特性把握、メカニズム解明、(2) イオン液体イオン源アレイの設計・作製技術、(3) イオンレンズアレイの設計・作製技術、イオン液体イオンビームの集束化、(4) イオン液体集束イオンビームによるエッチング、薄膜形成、表面修飾などの加工特性把握とメカニズム解明、の検討を行う。イオン液体の種類は、Si 基板のエッチングを想定して構成元素中に Si と反応する F 成分に着目して選定する。イオン液体イオン源アレイ、イオンレンズアレイは Si のマイクロマシニングを中心としたバッチプロセスを中心に検討する。比較のために Si 以外の W などの線材によりエミッタを形成して、イオン源電圧・電流特性を明らかにする。

4. 研究成果

Si マイクロマシニングを用いて電界放出型イオン源を用いて多数の集束イオンビームを同時に稼働させてエッチング、ドーピング、表面修飾など多彩な加工をマスクレスで行うマルチ集束イオンビーム(FIB)装置を図1のように考案した。

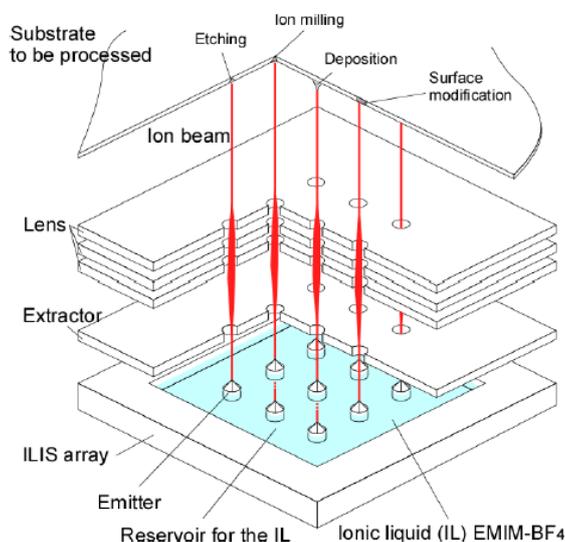


図1 考案した Si マイクロマシニングを用いて作製するマルチ集束イオンビーム装置

図2にイオン液体を用いた電界放出型イオン源の構成を示す。イオン種として用いるイオン液体用の液溜とエミッタ先端に導くマイクロ流路と一体化されている。

FIBのマルチイオン源、イオンレンズ、イオンプール、マイクロ流路をそれぞれ一括作製するMEMS技術を開発した。Si基板上に多数の集束イオンビーム(FIB)イオン源を作製しイオンレンズ系、イオン液体リザーバ・4分割流路と合わせて一体化することに成功した。その作製法を図2に示す。エミッタ先端にイオン液体を制御性良く導くために幅10 μm のマイクロ流路がエミッタ近傍に形成される。Siエミッタの直径は50 μm 、長さは220 μm である。SiマイクロマシニングによるSiエミッタの作成法を図3に示す。図4に図3の方法により作製した10x10(=100個)のSiエミッタの光学写真、およびSEM写真を示す。エミッタ近傍にイオン液体リザーバからイオン液体をエミッタ先端に供給するマイクロ流路が形成されている、

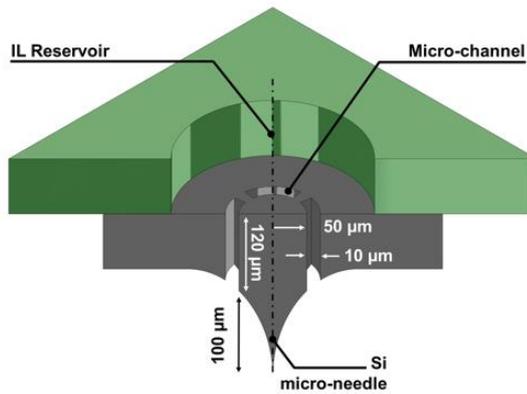


図2 Siマイクロマシニングによるエミッタの構成

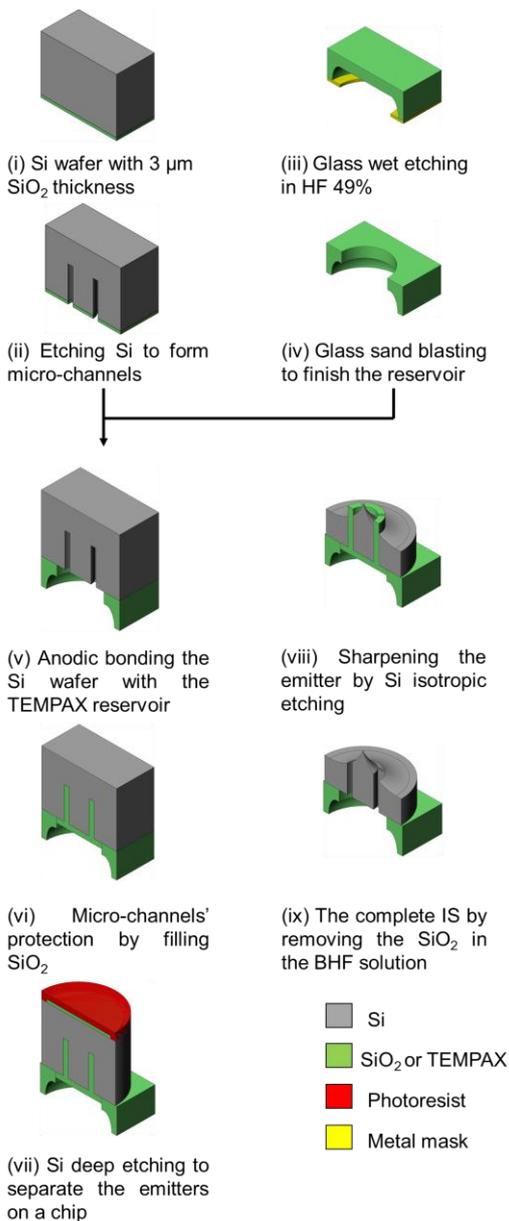


図3 Siエミッタの作製プロセス

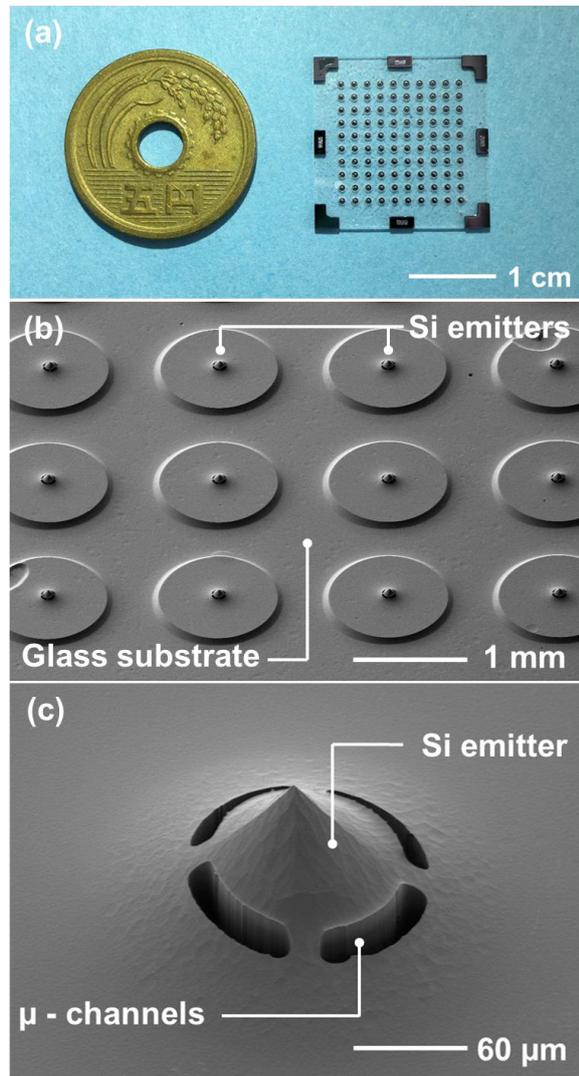


図4 10x10(=100個)のSiエミッタ。a) 光学写真。b)、c) SEM写真。

図5にイオン液体の一種である EMIM-BF₄ をイオン種として用いた場合のイオンビーム電流と印加電圧の関係を示す。エミッタ印加電圧 4.7~6kV の範囲で安定なイオン電流の射出が可能であることを図5により明らかにした。Si 基板を被加工物として EMIM-BF₄ 集束イオンビームによりエッチングしたエッチング痕を図6に示す。Si 基板上に作製した 10x10=100 個のイオン源アレイをレンズ系と一体化することによりプロトタイプ型マルチ FIB を構成し、Si 基板を被加工物として最小径 1 μm 程度のエッチングが可能であることを実証した。フッ素含有のイオン液体 EMIM-BF₄ によるエッチング率は 17 atoms/ion、BMIM-PF₆ では 54 atoms/ion と Ga イオンビームの場合の 1.3 atoms/ion と比べて極めて高エッチング率であり生産効率が高いことを明らかにした。

以上により、マルチ集束イオンビーム装置について MEMS 技術を用いて極めて安価に実現することができる可能性を示した。一筆書きであった従来装置に比し、イオン液体をイオン種とした 100 本の集束イオンビームを用いることによりエッチングでは 1000 倍~5000 倍以上の高効率でエッチングが可能であることを実証した。この他ドーピングおよび表面修飾などの各種加工もマスクレスで可能である

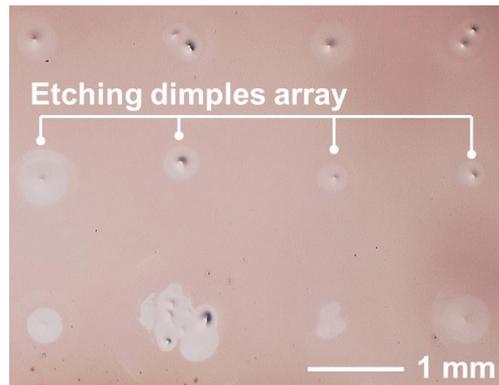
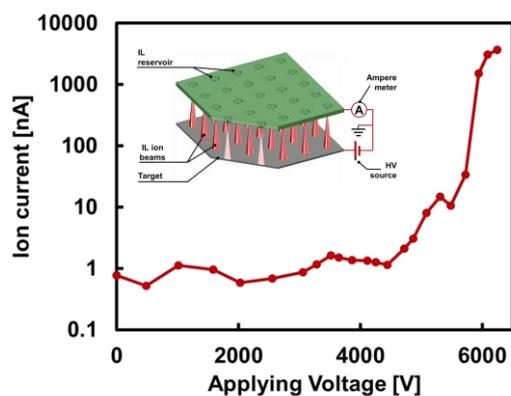


図5 マイクロマシニングにより作製した Si エミッタの EMIM-BF₄ をイオン種とした場合のイオン電流-電圧特性

図6 Si 基板を被加工物として EMIM-BF₄ マルチ集束イオンビームによりエッチングした時のエッチング痕

さらに図6の 100 個のエッチングディンプルから 1 個を詳細に検討した結果を図7に示す。エッチングディンプル形状、エッチング穴深さを AFM で計測した結果である。この結果から穴径は最深部で約 φ10 μm、エッチング深さ約 8 μm 程度である。100 本のビームで全てエッチングが確認されたわけではないが、半数以上でこの程度の微細孔が作製されることが確認された。

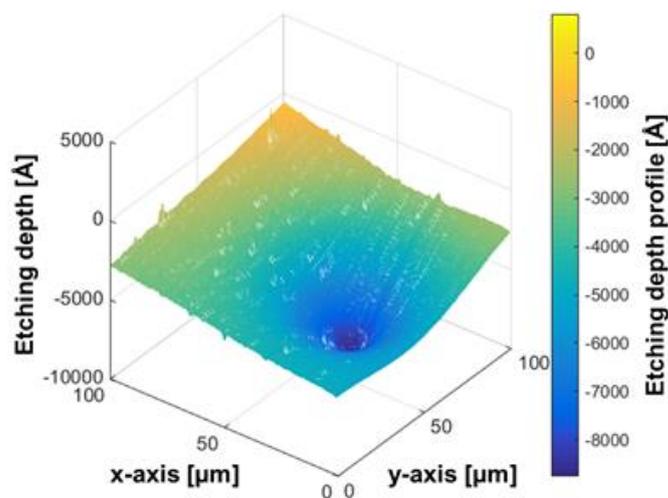


図7 加速電圧 5kV、イオン電流流 2.1 μA の液体金属イオン源で 60 分 Si 基板を照射した時のエッチング痕 (AFM による)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Hiroki Kuwano, Le Van Minh, Nguyen Van Chnh, Takahito Ono	4. 巻 2022
2. 論文標題 A MICROMACHINED IONIC LIQUID ION SOURCE WITH FLOW-CONTROLLED SEGMENTED ANNULAR CHANNELS	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE International conference on MEMS 2021 in IEEE Xplor	6. 最初と最後の頁 14-17
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 1件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Hiroki Kuwano, Le Van Minh, Nguyen Van Chinh
2. 発表標題 Focused Ion Beam Array using Ion Liquid
3. 学会等名 CIMTEC 2022（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Le Van Minh, Nguyen Van Chinh, Hiroki Kuwano
2. 発表標題 EMIM-BF4 multi-ion sources of micromachined Si external wetted emitters with fluidic feeding-flow confinement: from microfabrication to Si etching evaluation
3. 学会等名 The 69th JSAP Spring Meeting 2022
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 桑野博喜	4. 発行年 2022年
2. 出版社 シーエムシー出版	5. 総ページ数 287
3. 書名 オンサイトエネルギー	

〔産業財産権〕

〔その他〕

マイクロマシニングを用いたイオン源の作製
<http://www.nanosys.mech.tohoku.ac.jp/research/research.html>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	LE VAN MINH (Minh Le Van) (60765098)	東北大学・未来科学技術共同研究センター・特任准教授 (11301)	
研究分担者	小野 崇人 (Ono Takahito) (90282095)	東北大学・工学研究科・教授 (11301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------