

機関番号：82110

研究種目：基盤研究 (A)

研究期間：2007～2010

課題番号：19206105

研究課題名 (和文) 高エネルギーイオンビームの直描式微細加工による 3D ナノ構造の創製

研究課題名 (英文) PRODUCTION OF 3D-NANO-STRUCTURES BY MICRO-FABRICATION WITH DIRECT EXPOSURE OF HIGH-ENERGY ION BEAMS

研究代表者

神谷 富裕 (KAMIYA TOMIHIRO)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・放射線高度利用施設部・課長

研究者番号：70370385

研究成果の概要 (和文)：

ナノデバイスあるいはマイクロマシン創製の基盤技術として、MeV 以上の高エネルギーイオンマイクロビームの特長を活かした 3D ナノ構造創製技術を開発した。研究では、研究代表者自らが開発した各種のマイクロビーム装置を駆使し、その多様性、高空間分解能、高密度エネルギー付与、および長飛程の特長を活かし、それらを組み合わせてマスクレス描画する技術を開発し、ナノ細線を含む 3 次元微細構造の創製に見通しを得た。

研究成果の概要 (英文)：

3D nano-fabrication technology making the best use of the feature of the high energetic ion microbeam of MeV or more was developed for the nano-device or the micro-machine production. In this study, various microbeam systems, which we previously developed to have the features of high spatial resolution, of high-density local energy deposition and of long range, were utilized to establish a maskless multi-exposure technique for the ion beam lithography. We obtained the prospect for the creation of three dimensional micro-structures including nano-wires.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	5,900,000	1,770,000	7,670,000
2008年度	12,400,000	3,720,000	16,120,000
2009年度	8,700,000	2,610,000	11,310,000
2010年度	8,300,000	2,490,000	10,790,000
年度			
総計	35,300,000	10,590,000	45,890,000

研究分野：原子力学

科研費の分科・細目：放射線科学・

キーワード：ナノデバイス、マイクロマシン、マイクロビーム、3D ナノ構造創製、マスクレス描画、ナノ細線

1. 研究開始当初の背景

イオンマイクロビーム技術について研究代表者等は、所属機関である独立行政法人日本原子力研究開発機構（以下原子力機構）高崎量子応用研究所に保有する加速器施設 TIARA の各種加速器からの多様なイオンビームにおいて世界最高レベルのビーム性能を達成

し、マイクロ PIXE 等の高空間分解能イオンビーム分析技術や、単一イオンを高精度に狙った位置に打ち分けるシングルイオンヒット技術を確立し、生物細胞や半導体素子に対するイオン照射効果の研究に寄与してきた。一方、近年のマイクロビーム形成技術の進展に伴い、100 nm レベルのビーム空間分解能が

実現し、局所的かつ高 LET・長飛程の特徴を活かした高アスペクト比によるレジスト露光能力が注目され、シンガポール大学の Watt 教授等のグループが中心となって世界各国でプロトンビームによるマスクレス描画技術であるプロトンビームライティング (PBW) の開発が進んできた。わが国では本研究の連携研究者でもある芝浦工業大学の西川教授等のグループがいち早くこの技術に着目し、既にマイクロビーム装置を有する研究代表者らと協力して技術開発を行い、高アスペクト比構造パターンの創成に成功していた (図 1)。

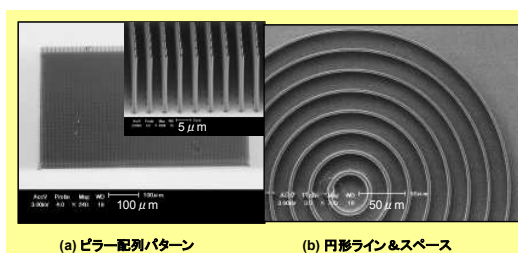


図 1 PBW による高アスペクト比マスクレス加工の例[6]。レジスト材は、SU-8(マイクロケム社製)。1.7MeV のプロトンマイクロビームを使用。

一方、TIARA の重イオンマイクロビームでは、10～数百 MeV 級重イオンで生物細胞や半導体素子の特定部位を狙い撃つためにシングルイオンヒットによる 1 μm 精度での自在な照射パターン形成を実現していた。本研究の連携研究者である大阪大学の関教授は、高エネルギー重イオンが、軽イオンよりもさらに高 LET であり、物質中での直進性も高いことから、電子ビーム露光などに用いられるネガ型レジスト (高分子架橋反応により照射部位が残る) に対するシングルイオンヒットでも露光し、高分子ナノ細線形成に有効であることに着目していた。

2. 研究の目的

本研究では、PBW において描画に用いるマイクロビームの飛程がレジスト層の厚さ以下のビーム条件での露光を組み合わせることにより、オーバーハングや梁など中空構造を有する 3 次元加工が可能であることに着目し、図 2 の様にシングルイオンヒットオーバ

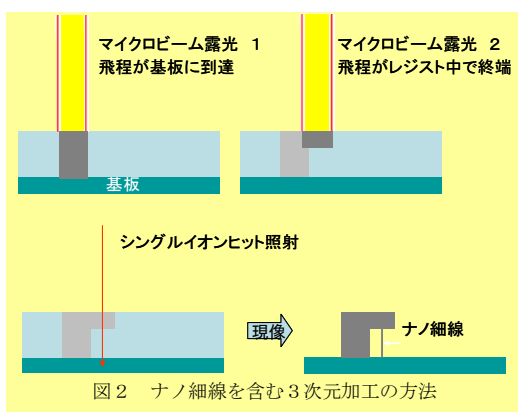


図 2 ナノ細線を含む 3 次元加工の方法

ーハングと基板の間にナノ細線をハープのように空中に張り渡した構造、即ちナノワイヤを含む 3D 微細構造を形成する技術を開発する。

このため、以下の 3 課題に取り組んだ。

(1) **感度及び空間分解能の評価** イオンビーム露光におけるレジスト材として主としてネガ型レジストの SU-8 (マイクロケム社製) について高アスペクト比加工についてその適正を評価検討する。イオンマイクロビーム照射に対する感度及び空間分解能をナノレベルで評価・測定するため、ビーム自身の空間分解能の向上とともにその評価精度向上を合わせて図る。

(2) **3 次元加工プロセスの実証** イオンビームの飛程をイオン種あるいはビームエネルギーを変えることにより 2 段階以上に変化させて、それぞれの照射パターンを重ね合わせる事により露光し中空構造を創出できることを確認する。オーバーハング構造、梁構造あるいは基板からの遊離構造として、回転体、歯車等の加工も試みる。

(3) **ナノ細線の製作・評価** 前出の中空構造 (オーバーハング) の製作プロセスに高エネルギー重イオンによるシングルイオンヒット照射による露光プロセスを加えると、現像後オーバーハングと基板間に空中ナノ細線が残る事が期待できるが、これが実現するレジスト材料、露光条件、イオン種、エネルギー等の条件を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) **感度及び空間分解能の評価・測定** 約 20 μm 程度の膜厚のネガ型レジスト SU-8 (マイクロケム社製) に対して、主に 3MeV 水素イオンマイクロビームを用いてライン&スペース等のパターン描画実験を行った。製作パターンの電子顕微鏡観察により感度及びビームサイズに対する線幅の関係を測定することにより空間分解能を評価した。

(2) **3 次元加工プロセスの実証** 当初炭素イオンビームを使用する予定であったが、水素イオンビームのエネルギーを 3MeV と 1MeV の 2 段階で変化させても期待する効果があることがわかったので、軽イオンマイクロビームを用いて行った。異なった照射パターンを重ね合わせて露光して橋梁構造のような 3 次元的な中空構造を創出できることを電子顕微鏡観察により確認した。

なお、複数の条件での描画の重ね合わせ精度の向上に必要な精密試料ステージを導入し、描画の重ね合わせ精度を向上させ、より精密な中空構造を創出した。実際には図 5 に示すように軸受け付の回転体あるいは歯車を製作した。

(3) **ナノ細線の製作・評価** 高エネルギーマイクロビーム装置にシングルイオンヒッ

トシステムを導入し、3次元露光による橋梁構造と基板間にナノ細線を規則的に張るための、多重露光実験を行った。この際、シングルイオンの検出には薄膜試料を透過したイオンが粒子検出器によって検出することにより行った。加工した試料の観察には、光学顕微鏡の他走査電顕を使用した。

4. 研究成果

(1) **感度及び空間分解能の評価** 図3に、典型的な加工例を示す。線量は $1.6 \times 10^6 \text{mm}^{-2}$ 、線幅は、ビームサイズより大きくなり、その差は照射密度に依存することが明らかになった。また弱い線量で照射した場合、現像後の構造体の機械的強度も低下することを確認した。一方、空間分解能の評価のため、まずマイクロビームサイズの評価用にプロトンビーム描画技術と電鍍技術を利用して製作したニッケル標準試料を用いた計測により、 μm のビームサイズを計測した。

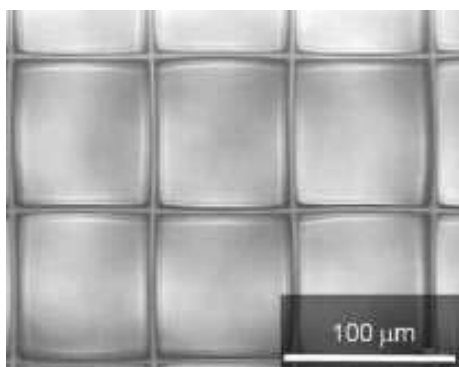


図3 3 MeV 水素イオンマイクロビームで描画した格子パターン

(2) **3次元加工プロセスの実証** マイクロビームによる多重露光においてエネルギーを2段階で変化させて、異なった照射パターンを重ね合わせて露光するための精密試料ステージを整備し、ビーム走査と試料ステージ制御法を開発した。これにより高アスペクト比3次元加工の特色を活かし、太陽歯車を中心



図4 2種類のエネルギーのマイクロビーム描画により形成した遊星歯車構造

に遊星歯車と内歯車が回転する遊星歯車の作製に成功した(図4)。

(3) **ナノ細線の製作・評価** 予め軽イオンマイクロビームを用いた多重露光により橋梁構造に描画した試料を、高エネルギー重イオンマイクロビーム装置の試料ステージに設置することにより、既に描画されたパターンに正確に照準して260MeVNeイオンのシングルイオンを照射する技術を開発した。これまでのところ、同イオンではシングルイオンによりもたらされるLETが低いために、十分な架橋反応をレジストに導入することができず、生成したナノ細線は現像や観察の段階で流失したり破壊されたりする結果となっている。しかし、シングルイオンヒットの手法で複数のイオンを集中してスポット照射すると、その数に依存して円柱構造が形成される条件が見出された。これにより、1個の入射で十分なエネルギー付与が得られるイオン種を用いた照射により、目的とする世界初のナノ細線を含む三次元構造の創製に見通しが得られた。

(4) **まとめと展望** 本研究開発を通じ、TIARAのマイクロビームを複数使用した多重描画技術は確立した。この他技術的にはレジストを塗布する基盤の選定、前処理や後処理、現像の方法等にかかなりの試行錯誤が要求された。さらに電子顕微鏡による観察方法についても、かなり特殊な条件だしが求められることが明らかとなった。今後は、本課題に手整備した装置を用い、本研究期間に得られた知見を基に、実際にシングルイオンにより形成されたナノワイヤを含む3次元構造体の創製する技術開発を継続する予定である。

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5件)

- ① T. Kamiya, K. Takano, T. Satoh, Y. Ishii, H. Nishikawa, S. Seki, M. Sugimoto, S. Okumura and M. Fukuda, “Microbeam complex at TIARA: Technologies to meet a wide range of applications”, Nucl. Instr. Meth. 査読有、B, in press.
- ② T. Kamiya, K. Takano, Y. Ishii, T. Satoh, M. Oikawa, T. Ohkubo, J. Haga, H. Nishikawa, Y. Furuta, N. Uchiya, S. Seki, M. Sugimoto, “Fabrication of nanowires by varying energy microbeam lithography using heavy ions at the TIARA”, Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section B-Beam Interactions with Materials and Atoms,

査読有、267 (2009) 2317-2320.

〔学会発表〕(計 16 件)

発表者(代表)名、発表標題、学会等名、発表年月日、発表場所

- ① K. Takano, "Local nano-processing of epoxy resin systems by single ion hits with writing", 12th International Conference on Nuclear Microprobe Technology and Applications (ICNMTA2010), 2010年7月29日、ドイツ、ライプツヒ
- ② K. Takano, "Curing Reaction of SU-8 Negative-type Photoresist by MeV Ion Beam Lithography", 27th International Conference of Photopolymer Science and Technology Conference (ICPST-27), 2010年6月24日、千葉

〔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

6. 研究組織

(1) 研究代表者

神谷 富裕 (KAMIYA TOMIHIRO)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・放射線高度利用施設部・課長
研究者番号：70370385

(2) 研究分担者

西川 宏之 (NISHIKAWA HIROYUKI)

芝浦工業大学・工学部・教授
研究者番号：40247226
(H20→H22：連携研究者)

関 修平 (SEKI SHUHEI)

大阪大学大学院・工学研究科・教授
研究者番号：30273709
(H20→H22：連携研究者)

杉本 雅樹 (SUGIMOTO MASAKI)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・量子ビーム応用研究部門・研究主幹
研究者番号：90354943
(H20→H22：連携研究者)

石井 保行 (ISHII YASUYUKI)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・放射線高度利用施設部・研究副主幹
研究者番号：00343935

佐藤 隆博 (SATO TAKAHIRO)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・放射線高度利用施設部・研究副主幹
研究者番号：10370404
(H21→H22：連携研究者)

大久保 猛 (OHKUBO TAKERU)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・放射線高度利用施設部・研究職
研究者番号：40446456
(H20→H22：連携研究者)

芳賀 潤二

独立行政法人日本原子力研究開発機構・放射線高度利用施設部・出向職員
研究者番号：00414566
(H20より出向元に帰社のためH19年度のみ)

(3) 連携研究者

()

研究者番号：