

「超高速・超省電力高性能ナノデバイス・システムの創製」

平成 14 年度採択研究代表者

大谷 俊介

(電気通信大学 教授)

「多価イオンプロセスによるナノデバイス創製」

1. 研究実施の概要

高価数多価イオンは、それ自身膨大なポテンシャルエネルギー E_p を持っている。例えば、本研究で使用している裸のヨウ素イオン(I^{53+})では、 E_p は 200 keVにまで達する。一価のヨウ素イオン(I^+)のそれが、たかだか 10 eVであることから、高価数多価イオンの E_p の大きさがわかる。高価数多価イオンが固体と相互作用したとき、莫大なポテンシャルエネルギーは短時間(<10 fs)に固体表面に付与される。この高価数多価イオンのユニークな特性を使って、固体表面にナノプロセスを誘き起こし、10 nm 程度またはそれ以下のサイズ領域での、加工技術の確立、新物質層の形成を目指している。

2. 研究実施内容

a) 様々な標的材料に対する多価イオン照射効果

固体表面から多価イオンに遷移する電子の多くは、伝導帯・価電子帯から供給されるので、多価イオン照射効果は、標的材料のバンド構造・電気伝導性などに強く依存すると考えられる。過去の研究では、スパッタリング収率の観測が網羅的に行われ、酸化物標的に対する 2 次イオン収率が、半導体や金属のそれに比べて、大きくなることがわかった。この結果から、標的表面への大きな改質効果、すなわち加工効果が期待され、「多価イオン衝突表面の直接的な観察」が望まれた。ところが、これまでの表面観察では、清浄表面を容易に作製・観察できるサンプルに限られていた(グラファイトやマイカなど)。そこで、超高真空環境下でイオン照射表面を“その場”観察できる操作型トンネル顕微鏡(STM)を使って、様々な清浄表面に対する多価イオン照射効果を調べた。その結果、金属表面(Au(111)表面)には改質効果が認められない一方で、半導体や酸化物ではイオン1個の衝突で表面ナノ領域が構造変態することが明らかとなった。代表的な例として、図1に、“1個”のヨウ素多価イオン(価数~50)衝突によって、(a) Si(111)-(7×7)、(b) Si(100)-(2×1)、(c) TiO₂(110)表面上に生成した照射痕のSTM像を示す。半導体Si表面上の照射痕は、大きさが直径約 5 nm、深さ 0.3 nm 程度のクレーター構造であるのに対し、酸化物 TiO₂の場合、クレーターというよりはむしろ、外輪山をともなったカルデラのような形状をしていることがわかった(直径 12 nm、深さ 2nm)。直接的な観察方法を使って得られたこの結果は、酸化物に対する多価イオン表面改

質効果が半導体のそれよりも大きいことを明確に示している。

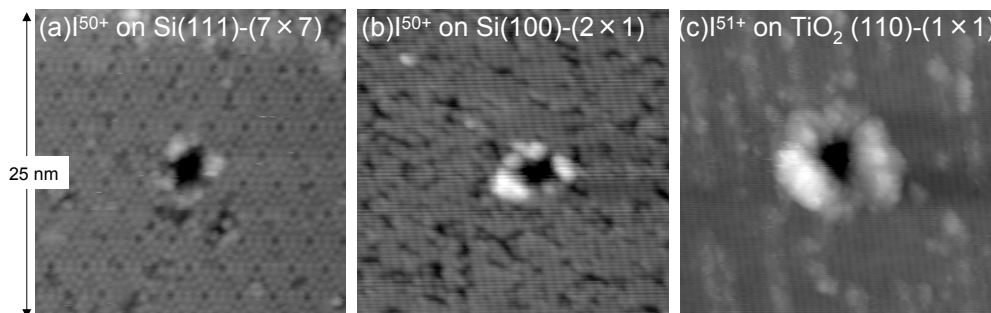


図 1：“1 個”のヨウ素多価イオン(価数~50)衝突によって生成した照射痕の STM 像。(a) Si(111)-(7×7), (b) Si(100)-(2×1) (c) TiO₂(110)-(1×1)。

b) 多価イオン照射による表面ナノ領域における化学反応性付与

1 個の多価イオンが固体表面に衝突すると、多くの 2 次イオンや中性粒子が放出され、図 1 に示したような照射痕が形成される。表面原子がスパッターされたことにより、多価イオン照射痕には、多くのダングリングボンドが存在すると考えられる。このことは、化学的に極めて安定な表面(例えば高配向性グラファイト, HOPG)に対して、1 個の多価イオン衝突によって、ナノメートル領域の活性点を生成できることを示唆している。図 2(a)は、I³⁰⁺イオンを照射した HOPG 表面の STM 像である。多価イオンが衝突した位置が白い斑点状に見える。この表面に、Bis-MSB(色素分子)を数分子層蒸着した。図 2(b)は分子蒸着後の HOPG 表面の STM 像である。照射痕のサイズが(a)とくらべると大きくなっていることがわかる。図 2(b)の非照射領域を観察した結果、HOPG の原子像が確認された(c)。これらの結果は、Bis-MSB が照射痕の周りに選択的に吸着していることを示している。

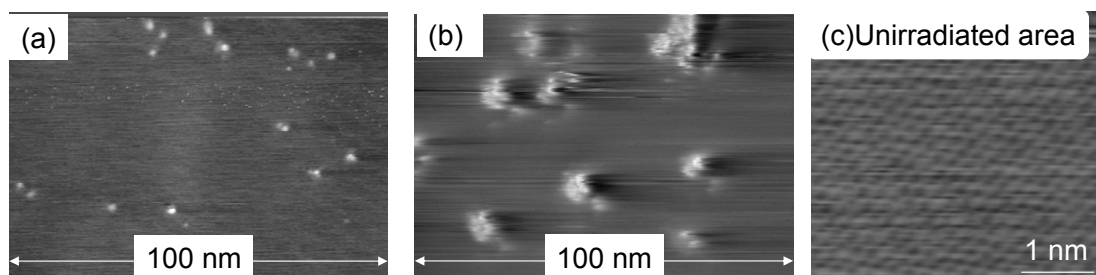


図 2：(a) HOPG 表面上に生成した I³⁰⁺多価イオン照射痕。(b) Bis-MSB 蒸着後の HOPG 表面。(c) 図 (b) 中の非照射領域の拡大像。

c) デバイス創製専用小型イオン源の改良と多価イオン照射技術の開発

合目的型小型多価イオン源の改良、特に、電子ビームの大電流運転、多価イオンビームの高強度化を図ると共に、このイオン源をビームラインに接続した。その結果、Ar¹⁰⁺イオンビームを約 10 nA 引き出せるまでになった。今後、運転時のイオン源内に存在する不純物成分の分圧を下げることにより、高価数イオンの生成・引き出しの高効率化を目指す。

多価イオン照射装置を試作した(図 3). この装置は, 多孔もしくは単孔マスクを使って, 多価イオンビームをナノサイズに切り取ることができる. マスクと試料の位置関係は7軸ゴニオメータをつかって制御可能である. 現在, 多価イオンビームの減速・収束技術, マスクの精密位置制御技術, STMによる照射表面評価法を統合した, 多価イオンの周期照射技術の確立を目指している.

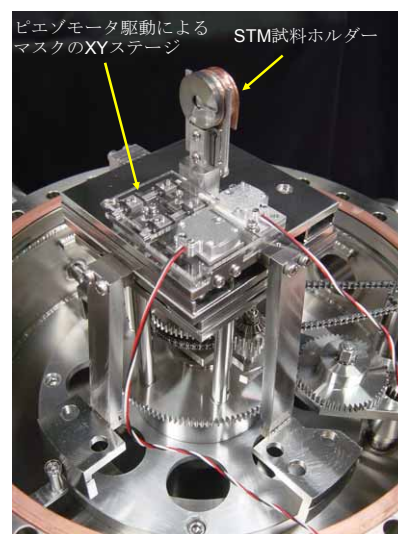


図 3: 多価イオン周期的照射ステージ. 7軸ゴニオメータを使い, マスクと試料の位置を調整.

3. 研究実施体制

(1)「A」グループ

①研究者名

大谷俊介(電気通信大学 教授)

②研究項目

- ・半導体表面ナノ加工法の実証実験
- ・多価イオン誘起2次元ナノ物質相の創製

概要:ここでの研究は当プロジェクトの主体をなすもので, Tokyo EBIT と呼ばれる多価イオン生成装置を駆使し, 様々な種類の多価イオンを生成し, それを低速ビームとして制御しつつ半導体表面などに照射する実験を行う. そして, 照射後に生成されたナノ構造の光物性研究と半導体表面ナノ加工法の基礎研究を行う. また, 当研究員は下記の小型イオン源立ち上げにも協力する.

(2)「B」グループ

①研究者名

櫻井 誠(神戸大学 助教授)

②研究項目

- ・小型多価イオン源の基本性能の評価
- ・周期照射技術の確立

概要:前年度に製作した小型多価イオン源は, 運転時の圧力上昇により多価イオンビーム強度が制限されるという問題点が明らかになった. 排気系増強などによる改善を行い, 所期の目標性能達成を図る. 並行して, マスクを使ってナノメートルサイズに多価イオンビームを切り取り, 標的材料に照射できる技術開発を行う.

4. 研究成果の発表等

(1) 論文発表(原著論文)

- M. Tona, S. Takahashi, H. Watanabe, N. Yoshiyasu, N. Nakamura, C. Yamada, M. Sakurai, T.

- Terui, S. Mashiko, and S Ohtani:
“Nano-Crater Formation on a Si(111)-(7×7) Surface by Slow Highly Charged Ion Impact”,
Surf. Sci. **601** (2007) 723.
- H. Watanabe, H. Tobiyama, A. P. Kavanagh, Y. M. Li, N. Nakamura, H. A. Sakaue, F. J. Currell, and S. Ohtani:
“Dielectronic recombination of He-like to C-like iodine ions”, Phys. Rev. A **75** (2007) 012702.
- H. Watanabe, S. Takahashi, M. Tona, N. Yoshiyasu, N. Nakamura, M. Sakurai, C. Yamada, and S. Ohtani:
“Dissipation of potential energy through x-ray emission in slow, highly charged ion-surface collisions”, Phys. Rev. A **74** (2006) 042901.
- C. Yamada, K. Nagata, N. Nakamura, S. Ohtani, S. Takahashi, T. Tobiyama, M. Tona, H. Watanabe, N. Yoshiyasu, M. Sakurai, A. P. Kavanagh, and F. J. Currell:
“Injection of metallic elements into an electron-beam ion trap using a Knudsen cell”, Rev. Sci. Instrum. **77** (2006) 066110.
- H. A. Sakaue, K. Hosaka, H. Tawara, I. Yamada, N. Nakamura, S. Ohtani, A. Danjo, M. Kimura, A. Matsumoto, M. Sakurai, and M. Yoshino:
“Total Electron Transfer Cross Sections for Highly Charged Ion-Alkali Metal Atom Collisions”, J. Plasma Fusion Research **7** (2006) 195.
- M. Tona, H. Watanabe, S. Takahashi, N. Nakamura, N. Yoshiyasu, M. Sakurai, T. Terui, S. Mashiko, C Yamada, and S. Ohtani:
“Nano-Fabrication on a Si Surface by Slow Highly Charged Ion Impact”, Nucl. Instrum. Methods B, **256** (2007) 543.
- N. Nakamura, H. Tobiyama, H. Nohara, D. Kato, H. Watanabe, F. J. Currell, and S. Ohtani:
“Investigation of resonant inner-shell processes with an electron beam ion trap”, Radiation Phys. and Chem. **75** (2006) 1749.
- H. Tobiyama, H. Nohara, A. P. Kavanagh, N. Nakamura, H. Watanabe, H. A. Sakaue, Y. Li, D. Kato, F. J. Currell, C. Yamada, and S Ohtani:
“Interference between dielectronic and radiative recombination in electron-highly charged Bi collisions”, J. Phys.: Conf. Ser. **58** (2007) 239.
- N. Nakamura, H. Tobiyama, H. Nohara, A. P. Kavanagh, H. Watanabe, H. A. Sakaue, Y. Li, D. Kato, F. J. Currell, C. Yamada, and S. Ohtani:
“Resonant Electron Processes with Open-Shell Highly Charged Ion Targets”, J. Phys.: Conf. Ser. **58** (2007) 267.
- M. Tona, H. Watanabe, S. Takahashi, Y. Fujita, T. Abe, S. Jian, N. Nakamura, N. Yoshiyasu, C. Yamada, M. Sakurai, and S. Ohtani:

- “Observation of HCI-induced nanostructures with a scanning probe microscope”, J. Phys.: Conf. Ser. **58** (2007) 331.
- H. Watanabe, T. Abe, Y. Fujita, J. Sun, S. Takahashi, M. Tona, N. Yoshiyasu, N. Nakamura, M. Sakurai, C. Yamada, and S. Ohtani:
“X-ray emission in slow highly charged ion-surface collisions”, J. Phys.: Conf. Ser. **58** (2007) 339.
- Y. Mitsuda, B. E. O’Rourke, N. Nakamura, Y. Kanai, S. Ohtani, and Y. Yamazaki:
“SPM observation of slow highly charged ion induced nano-dots on highly oriented pyrolytic graphite (HOPG)”, J. Phys.: Conf. Ser. **58** (2007) 351.
- C. Yamada, K. Nagata, N. Nakamura, S. Ohtani, S. Takahashi, T. Tobiyama, M. Tona, H. Watanabe, N. Yoshiyasu, M. Sakurai, A. P. Kavanagh, and F. J. Currell:
“Injection of refractory metals into EBIT using a Knudsen cell”, J. Phys.: Conf. Ser. **58** (2007) 403.
- A. P. Kavanagh, J. D. Gillaspay, D. G. Hirst, M. H. Mendenhall, N. Nakamura, S. Ohtani, H. Watanabe, and F. J. Currell:
“Radiation from K-shell filling in highly charged ions: a driver for resonant combination cancer therapy?”, J. Phys.: Conf. Ser. **58** (2007) 439.

(2) 特許出願

平成 18年度特許出願:0 件 (CREST 研究期間累積件数:2件)