

平成 30 年 5 月 22 日現在

機関番号：14501

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2017

課題番号：15K13409

研究課題名(和文)多価イオンによる量子ビット作成

研究課題名(英文)production of quantum bit using highly charged ions

研究代表者

櫻井 誠 (Sakurai, Makoto)

神戸大学・理学研究科・准教授

研究者番号：90170646

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：多価イオンはその大きな内部エネルギーによりイオンの入射事象を確実に把握することができる。本研究では、この多価イオンのユニークな性質を単一イオン注入(SII)に応用し、独自のイオン入射位置制御機構を新たに開発することにより、高精度・高確度のドーパント原子1個の入射法を確立し、SIIによる信頼性の高い量子ビット作成法の実現に展開することを目的とし、その第一段階として、従来多価イオン照射と照射後の表面のSTM観察を別の真空系で行っていたものを、照射とSTM観察が同時に行えるように工夫した装置「その場STM」を設計・製作した。

研究成果の概要(英文)：By virtue of its potential energy, the implantation event of single ion can be detected with 100% probability if a highly charged ion (HCI) is injected into a surface. In the present study, utilizing the unique property of HCI for single ion implantation technique (SII), we set the objective for realization of technique to inject single ion with high reliability and accuracy, and to produce quantum bit using ion beam technology. As the first step of the research, we developed a new positioning system of HCI injection on a surface, which makes it possible to perform ion injection and observation of scanning tunneling microscopy in an identical vacuum system.

研究分野：表面物理学

キーワード：多価イオン 量子ビット 内部エネルギー 単一イオン注入 走査トンネル顕微鏡

1. 研究開始当初の背景

多価イオンはそのイオン生成に必要な電離エネルギーの総和である内部エネルギー（ポテンシャル）をもつ。そのエネルギーは価数とともに急増しウラン 92 価イオンでは 800keV に達する。多価イオンが固体表面に入射すると、この内部エネルギーが固体との相互作用で解放され数十から数百の二次電子が放出される。

固体中に量子ピットを作成する研究では、ドーパント原子となるイオンを高純度のシリコンやダイヤモンドに打ち込む手法が用いられる (B.E.Kane, Nature **393** (1998) 133-137, P. Neumann et al. Nature Physics **6** (2010) 249-253)。将来、量子ピットを集積して量子コンピュータを構成するには、イオンを1個1個ナノメートル精度で決められた位置に順次打ち込む技術の確立が必要である。つまり、固体の表面近傍にナノメートルの位置精度で原子1個を入射させる技術（単一イオン注入；Single Ion Implantation (SII)）の確立は、固体量子コンピュータの実現に向けて、重要かつ困難な技術課題の一つである。

従来の1価（あるいは2価）イオンを 50kV 程度の加速電圧で打ち込む方法は、イオン1個の入射事象の検知についての確度が 90%程度にとどまり、入射事象を 100%確実に検知することは困難である (T. Shinada et al. Jpn. J. Appl. Phys., **38** (1999) 3419-3421)。これに対し多価イオンを用いると、100%近い検知が可能であることが我々の研究により確かめられた (N. Yoshiyasu et al. Jpn. J. Appl. Phys., **45** (2006) 995-997)。この理由は、上で述べた多価イオンの大きな二次電子収率にある。即ち多数の二次電子を荷電粒子検出器で捕捉すると大きな電気パルスとなって確実に検知されるためである。

また、多価イオンの内部エネルギーは、イオンの運動エネルギーとは無関係であるため、入射多価イオンの運動エネルギーを低く（たとえば 1keV）することにより、入射後の固体中における玉突き衝突に起因するドーパント原子の位置のばらつきを抑えることができる。

2. 研究の目的

本研究では、上記の多価イオンのユニークな性質を SII に応用し、独自のイオン入射位置制御機構を新たに開発することにより、高精度・高確度のドーパント原子1個の入射法を確立し、SII による信頼性の高い量子ピット作成法の実現に展開する。

3. 研究の方法

神戸大学で独自に開発した、高性能の多価イオン源 KobeEBIS で発生させた多価イオンを、本研究で開発するイオン入射位置制御機構を用いてシリコンなどの試料表面に、入射位置を規則的に変えながらイオンを1個ずつ入射させる。入射事象の検知には2次電子検出器を用いる。格子点状に入射させた試料の表面を、試料を移動させることなく走査ト

ンネル顕微鏡 (STM) で観測し、照射痕の画像を検査し、入射位置のばらつき、イオン1個の入射検知の確度（イオンが入射したにもかかわらず2次電子を検知できていないケースがどれくらいあるか）を評価する。

4. 研究成果

平成 27 年度では、上記の照射と STM 観測を同時に行うことができる、「その場 STM」の主要部分を製作した。「その場 STM」とは、従来多価イオン照射と照射後の表面の STM 観察を別の真空系で行っていたものを、照射と STM 観察が同時に行えるように工夫した装置である。STM 用に製作された piezoアクチュエーターを購入し、これを XY の 2 次元方向に移動可能な超音波モーターで駆動される粗動機構の上に取り付け、イオン入射位置制御の機能を持たせた装置を製作した。図 1 に製作した STM を示す。



図 1 製作したその場 STM

piezoアクチュエーターの駆動には既存の STM 制御用コントローラを用いた。piezoアクチュエーターの他端には電解研磨で製作したタングステンチップを取り付け、対向する位置に作動マイクロメーターと積層 piezoアクチュエーターでアプローチ機能を持たせた試料ステージを設置し STM を構成した。粗動機構と piezoアクチュエーターは将来イオンビーム照射時のビーム経路を確保するための空間を設けている。

また、STM（試料アプローチ機構、piezoアクチュエーター、XY 粗動機構）は除振のた

め自作の渦電流ダンパーの上に設置してある。

製作した粗動機構と piezoアクチュエーターの動作は、それぞれレーザー干渉変位計とグラファイト表面の STM 像の観察で評価し、良好に動作することを確認した。

平成 28 年度では、前年度に開発した「その場 STM」を収納する真空容器、多価イオンを真空容器内に搬送するビーム輸送系を製作した。

STM 観察を真空中で行うためには、まず STM チップと試料の距離をトンネル電流が流れる程度まで近づけるアプローチ機構が必要であり、大気中での動作を想定して平成 27 年度に製作し、使用したアプローチ機構を改良する必要がある。本年度はこれを考慮した、特殊なぞき窓を備えた真空容器と、イオン源から水平方向に搬送される多価イオンビームを、ビームの特性を損なうことなく垂直方向に偏向させる四極ベンダー、および除振機構を備えた、真空系の支持架台を製作した。研究費が限られているため、真空容器などの製作に必要な材料（ステンレス製パイプなど）と工具を購入し、必要な加工（機械加工、溶接）を行い、真空容器などを自作した。



図 2 製作した四極ベンダー

図 2 に製作した四極ベンダーを示す。真空容器の底面に設置している。また、多価イオン源からこの真空容器に多価イオンビームを発散させることなく輸送することが必要であるが、既存の装置（イオン源、ビームラ

イン、偏向磁石、既存の照射室）に、新たにこの真空容器を既存の照射室と逆側に増設するため、偏向磁石の向きを変えイオンビームの偏向方向を 180° 変える必要がある。このためビームダクトを改造し、偏向磁石から新しい真空容器にビームを輸送する静電レンズ系を製作した。

平成 29 年度では、このビーム輸送系の性能評価を行った。新しい真空容器にイオン銃を取り付け、Ar イオンが四極ベンダーで 90° 偏向される条件を測定し、軌道シミュレーションと比較した。

またこれと並行して、多層カーボンナノチューブ (MWCNT) を幅 1 ミクロンの 2 電極 (ソースとドレイン) に架橋したものに多価イオンを照射した。この試料の極低温での電圧電流特性を測定したところ、単一量子ドットの特徴である、クーロンブロックドやクーロンダイヤモンド特性が観測された。図 3 は多価イオンを照射した MWCNT において観測されたクーロンダイヤモンドを示す。

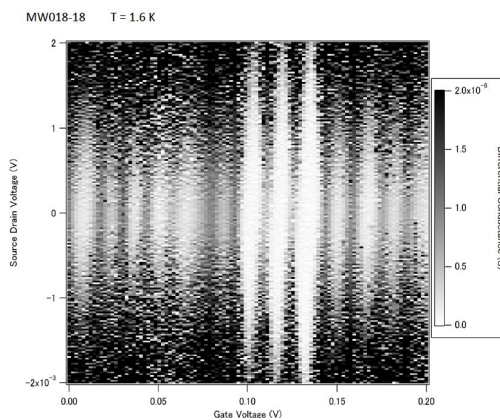


図 3 多価イオン照射 MWCNT で観測されたクーロンダイヤモンド

本研究期間内に試料表面に多価イオンを 1 個ずつ入射させる技術を確認するには至らなかったが、本助成によりそのために必要な各種のパーツを製作することができ、将来の多価イオンによる量子ビット生成実現のための足掛かりとすることができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 6 件)

櫻井誠, 宮本貴裕, 佐々木康二, 加藤太治, 坂上裕之, 多価イオン照射による固体表面の発光, J. Vac. Soc. Jpn. 査読有, 58 (2015) 147-149.

<http://doi.org/10.3131/jvsj2.58.147>

M. Sakurai, D. Kato, H.A. Sakaue, Y. Hishinuma, S. Sasaki and T. Miyamoto, Irradiation effects on reactor relevant material surfaces by slow highly charged ion beam, Annual report of national institute for fusion science, 査読無, (2015) 417.

本多信一, 田口英次, 櫻井誠, カーボンナノチューブへの多価イオン照射効果, 大阪大学超高压電子顕微鏡センター2015年度年報, 査読無, (2016).

M. Sakurai, K. Sasaki, T. Miyamoto, D. Kato and H. A. Sakaue, Potential Effects in the Interaction of Highly Charged Ions with Solid Surfaces, e-J. Surf. Sci. Nanotech. 査読有, **14** (2016) 1-3.

<http://doi.org/10.1380/ejssnt.2016.1>

M. Sakurai, K. Sasaki, T. Miyamoto, N. Nishida, D. Kato, H.A. Sakaue, Y. Hishinuma, and T. Tanaka, Annual report of national institute for fusion science, 査読無, (2016) 405.

西田 尚史, 櫻井 誠, 別宮 晃治, 鈴木 健太, 山内 亜香音, 加藤 雅基, 藤原 侑也, 本多 信一, 寺澤 倫孝, 李 奎毅, 照井 通文, 多価イオン照射した多層カーボンナノチューブのポテンシャル効果, J. Vac. Soc. Jpn. 査読有, **61** (2018) 162-165.

<https://doi.org/10.1380/vss.61.162>

〔学会発表〕(計 13 件)

M. Sakurai, D. Kato, H.A. Sakaue, S. Honda and M. Terasawa, Potential effects in the interaction of highly charged ions with solid surfaces, CCMR2015, 2015.6.16, 釜山 (韓国)

宮本貴裕, 佐々木康二, 島田卓哉, 西田尚史, 山根康宏, 櫻井誠, 加藤太治, 坂上裕之, 多価イオン照射による Er_2O_3 発光の分光測定, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 2015.9.16,

坂上裕之, 加藤太治, 村上泉, 関西大学 (大阪府) 峯田翔太, 季冠億, 酒井康弘, 古屋謙治, 剣持貴弘, 佐々木康二, 宮本貴裕, 櫻井誠, 本橋健次, タングステン金属表面へのプロトン照射による反射水素 H 線強度及び偏光度の空間分布測定, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 2015.9.17, 関西大学 (大阪府)

M. Sakurai, K. Sasaki, T. Miyamoto, N. Nishida, T. Tokui, D. Kato, H.A. Sakaue, S. Honda, R. Tamura, M. Terasawa, Potential effect in the interaction of highly charged ions with materials, 第 16 回イオンビームによる表面・界面解析特別研究会, 2015.12.5, 奈良女子大学 (奈良県・奈良市)

出野 文哉, 山下 拳太郎, 関岡 嗣久, 本多 信一, 西田 尚史, 徳井 太央貴, 佐々木 康二, 宮本 貴裕, 櫻井 誠, 新部 正人, 寺澤 倫孝, 平瀬 龍二, 泉 宏和, 吉岡 秀樹, 庭瀬 敬右, 田口 英次, 多価イオン照射孤立多層カーボンナノチューブの構造評価, 第 63 回応用物理学会春季学術講演会, 2016.3.20, 東京工業大学 (東京都・目黒区)

M. Sakurai, Toward quantum bit generation using single highly charged ion implantation, CCMR2016, 2016.6.21, Songdo Convensia (韓国・仁川)

M. Sakurai, Nano-scale surface modification and analysis using highly charged ions, BIT 's 6th Annual World Congress of Nano Science & Technology, 2016.10.28, Holiday Inn Singapore Atrium (シンガポール)

N. Nishida, K. Betsumiya, T. Tokui, K. Suzuki, M. Sakurai, T. Sakurai, S. Honda, M. Terasawa, D. Kato, H.A. Sakaue, T. Ikeda, Studies on interaction of highly charged ions with surface using Kobe EBIS, Symposium on Surface Science & Nanotechnology -25th Anniversary of SSSJ Kansai, 2017.1.24, 京都市国際交流会館(京都府・京都市)

M. Kato, Y. Fujiwara, S. Honda, M. Terasawa, M. Niibe, M. Sakurai, N. Nishida, T. Tokui, K. Suzuki, K. Betsumiya, K. Niwase, and K. -Y. Lee, Irradiation effect in multi-walled carbon nanotubes by highly charged ions, Symposium on Surface Science & Nanotechnology -25th Anniversary of SSSJ Kansai, 2017.1.24, 京都市国際交流会館(京都府・京都市)

西田 尚史, 徳井 太央貴, 佐々木 康二, 宮本 貴裕, 櫻井 誠, 出野文哉, 山下 拳太郎, 加藤 雅基, 寺澤 倫孝, 本多 信一, 多価イオン照射による多層カーボンナノチューブの構造変化, 第 77 回応用物理学会秋季学術講演会, 2016.9.15, 朱鷺メッセ (新潟県・新潟市)

櫻井誠, 多価イオン表面相互作用, H28 年度 核融合科学研究所プラズマ・ナノ物質研究会, 2017.3.7, 核融合科学研究所 (岐阜県・土岐市)

M. Sakurai, S. Honda, M. Terasawa, Structural and electric modification of nano-carbon materials using highly charged ions, Collaborative Conference on 3D & Materials Research 2017, 2017.6.20, 済州島 (韓国)

N. Nishida, K. Betsumiya, M. Sakurai, T. Sakurai, S. Honda, M. Terasawa, M. Kato, Y. Fujiwara, K.-Y. Lee and T. Terui, Structural and Magnetic Modification of Nano-carbon Materials using Highly Charged Ions, The 8th International Symposium on Surface Science, 2017.10.24, つくば国際会議場 (茨城県)

〔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
<http://www2.kobe-u.ac.jp/~msakurai/>

6．研究組織

(1)研究代表者

櫻井 誠 (SAKURAI Makoto)
神戸大学・大学院理学研究科・准教授
研究者番号：90170646