



主任研究員 石橋 幸治 (工博)
ISHIBASHI Koji (Dr. Eng.)

キーセンテンス：

1. 原子・分子とカーボンナノチューブでサブ10nmの極微細構造を作る。
2. 量子効果を利用した新しいナノデバイスを動かす。
3. テラヘルツ波を新しいメカニズムで検出するナノデバイスを作る。
4. プラズモニクスを有機光デバイスに生かす。
5. ナノデバイスに向けた新材料を探索する。

キーワード：

カーボンナノチューブ、半導体ナノワイア、単電子デバイス、量子ナノデバイス、テラヘルツ波検出、プラズモニクス、トポロジカル超伝導、スピン・軌道相互作用

研究概要

当研究室では、将来の新機能ナノエレクトロニクスの実現を目指して、サブ10nm級ナノ構造作製技術および新機能材料の開発、それらの新規物性の探索、そして、ナノデバイスへの応用に関する研究を行っている。さらに、ナノ構造を評価する独自手法の開発、新機能テラヘルツ (THz) 検出器の開発、プラズモニクスを利用して有機光デバイスの性能を向上させる研究も行っている。ナノデバイス用材料として、自己組織化的にサブ10nm構造が形成されるカーボンナノチューブ (CNT)、半導体 (シリコン、ゲルマニウム、III-V属半導体) ナノワイア、グラフェンさらに単一分子を利用し、トップダウン技術とボトムアップ技術の融合により CNT/分子ヘテロ構造や量子ドット構造、超伝導体との複合ナノ構造などを作製している。これらの構造において、電子のスピンや電荷、磁束さらに励起子を1個レベルで操作する技術を開発し、新機能を有する単電子デバイス、量子情報デバイス (量子ビット)、量子THz検出、スピントロニクス、プラズモニクスなどへ展開するための基礎研究を行っている。

1. ナノ構造作製技術の開発と評価 (南任、山口、飛田、富沢 *3、Norizzawati Mohd Ghazali*6、鈴木 *7、萩原 *7、島 *7、石橋)

現在の先端リソグラフィ技術で作製が可能なナノ構造は、小さくても20nm程度であり、実際の動作するデバイスはサブミクロン程度が普通である。この程度のデバイスサイズでは、極低温でしか量子効果が現れないし、仮に現れたとしてもそれを実用的なデバイスにすることは不可能である。ナノ構造を作製する方法には、このようなトップダウン技術とボトムアップ技術が考えられるが、これらを融合することが、実際に動作するデバイスを作製するのに必要である。本研究では、ボトムアップ的に作製される直径が10nm以下のカーボンナノチューブや半導体ナノワイアを **Building Block** とし、これらをデバイス化する技術の開発を行っている。同時に、究極の原子操作による人工ナノ構造を作製する技術の開発を行い、原子スケールで現れる特異な物性の探索を行っている。

本年度は、集束イオンビームを利用した多層カーボンナノチューブ中へのトンネル障壁の形成に関する研究において新たな進展があった。Ga集束イオンビームを電極間に架橋させた (中空に浮いた) 多層ナノチューブに照射することにより、比較的制御性良くトンネル障壁を形成できることが分かった。また、同じドーズ量でもナノチューブの直径が小さいほどトンネル障壁が大きくなることが分かった。

原子操作を用いた原子レベルナノ構造作成に関し、本年度は、新奇な物理現象の観察を目標に、原子操作を適用出来る物質系を拡げていくことに主眼を置いて実験を行った。これまで通常の水平方向の原子操作が困難であったPt(111)面上で、一度吸着種をSTMの探針に移してから目的の位置へ持って行き基板表面に戻す、垂直方向の原子操作の手法を確立した。この技術の適用により、原子操作を行える物質系が急激に増える可能性がある。

2. ナノ機能の探索とナノデバイスへの応用 (Deacon、松野、大野、岡本、Wang*2、Sun*1、前田 *7、鷹取 *5、寺林 *7、西野 *4、石橋)

トップダウン型のナノデバイスのみならず、10nm以下の直径を持つカーボンナノチューブや半導体ナノワイア、有機材料を **Building Block** として、量子ドットなどの機能性ナノ構造を作製し、単電子トランジスタや、単一スピンや単一電荷、超伝導状態コヒーレント制御、テラヘルツ検出、プラズモニクス

などへの展開を目指した研究を行っている。さらに新機能を求めて、酸化物におけるスピン軌道相互作用やトポロジカル超伝導接合の研究も行った。本年度の主な成果を下記に示す。

(1) シリコン FET 素子におけるスピン量子ビット制御

産総研との共同研究であるシリコントンネル FET 素子について、そのスピン量子ビット素子としての開発を引き続き行った。トンネル FET 構造において 2 つのスピン量子ビットを独立に制御し、これらの相関がスピントロニクス解除条件に現れることを確認した。また単一の量子ビットについて、その二準位系のエネルギー差をゲート電圧で高速に変調することで様々な量子干渉効果を観測した。この量子干渉パターンは共同研究を行っている F. Nori グループによる理論計算とよく一致を示した。これらの成果はシリコン技術をベースとした単一スピントロニクス、とりわけ磁気計測や将来のスピン量子情報への応用が期待できる。

(2) トポロジカルジョセフソン接合

トポロジカル絶縁体 (TI) を超伝導体で挟んだ S/TI/S 構造からなるジョセフソン接合では、マヨラナ粒子に関連して電流位相特性に 4π 周期のものが存在することが理論的に予想されている。本研究ではビュルツブルグ大学 (ドイツ) と共同研究で、TI 材料として HgTe 薄膜を用いたジョセフソン接合を作製し、そのマイクロ波応答を測定している。本年度は、HgTe の膜厚を制御して作製した 2 次元 TI を用いたジョセフソン接合のマイクロ波応答において、奇数次の消失したシャピロステップに加えて、接合から放射されるマイクロ波に通常のジョセフソン周波数の半分の周波数成分が現れることを観測し、マヨラナゼロモードの存在をより強く示唆する結果を得た。

(3) 酸化物薄膜におけるスピン軌道相互作用の解明と応用

固体中のスピン-軌道相互作用に由来する新しい学理と機能性の開拓を目指し、重い $5d$ 遷移元素イリジウム (Ir) を含む酸化物エピタキシャル薄膜をパルスレーザー堆積法 (PLD) により作製した。強磁性体 SrRuO₃ と非磁性体 SrIrO₃ との界面における磁気近接効果を SPring-8 BL39XU における X 線磁気円二色性により測定し、磁気近接効果が異常に小さいことを明らかにした。また、エピタキシャル界面でのスピンゼーベック効果の検証を目指して、ペロブスカイト強磁性体 La₂NiMnO₆ の作製ならびに強磁性共鳴シグナルの観測を行った。

(4) プラズモニックデバイスの開発

我々が開発した可視から赤外域の 3 オクターブにわたって強い吸収を持つメタマテリアル薄膜が持つ広帯域性、偏光無依存性、入射角無依存性のメカニズムを有限差分時間領域法を用いて解析した。特に偏光無依存性に関しては、種々の形状の金属ナノ粒子と、それと同じ形状を持つ金属薄膜に空けられた穴における局在プラズモン共鳴がバビネの原理を満足するためであることを見出した。

*1 国際特別研究員、*2 特別研究員、*3 研究員 (任期制)、*4 客員研究員、*5 JRA、*6 IPA、*7 研修生、*8 研究嘱託

Key Sentence :

1. Fabrication and characterization of molecular scale nanostructures
2. Physics in quantum nanodevices
3. Application of nanodevices for THz detection
4. Plasmonics applied for organic optical devices

Key Word :

carbon nanotubes, semiconductor nanowires, graphene, Si nano-transistor, single electron devices, quantum nanodevices, Terahertz detection, Oxide Spintronics, Plasmonics

Outline

To explore future nanoelectronics, we develop fabrication processes of sub-10nm structures, and study their electronic and optical properties to apply them to functional nanodevices. We use carbon nanotubes, semiconductor (Si/Ge, InAs, InSb et al.) nanowires, and functional molecules as building block of those nanostructures, as well as Si nano-transistor fabricated by the top down technology. We also fabricate atomic scale structures by atom manipulation techniques and study physics there. By combining the top-down and bottom-up technologies, we fabricate quantum dots, CNT/molecule

heterostructures, and semiconductor/superconductor hybrid nanostructures for use of single electron devices, quantum computing devices and new quantum THz detectors, and so on. We focus on the spin-orbit (SO) interaction to control the spins, and for that we explore new functional oxide materials with a large SO interaction. We also use plasmonic nanostructures to improve functionalities in the organic optical devices.

1. Device fabrication processes in nanoscale (Hida, Nantoh, Yamaguchi, Tomizawa*³, Norizzawati Mohd Ghazali*⁶, Suzuki*⁷, Hagiwara*⁷, Ishibashi)

To realize nanostructures with a size of several nm is difficult only with the conventional lithography techniques (top-down technology). A bottom-up technology in which the nanostructures with several nm are easily formed in a self-assemble manner is an attractive technique for the aim. However, to merge the two technologies is needed to really fabricate extremely nanostructures that can be applied for nanodevices. To do that, we are interested in carbon nanotubes and semiconductor nanowires that have a diameter of several nm and a length longer than micron, as building blocks of nanodevices.

The main achievement in this year is that we could demonstrate a reliable and reproducible tunnel barrier formation using a focused ion beam (FIB) applied to the suspended multiwall carbon nanotubes (MWCNTs). The technique could be useful to fabricate the nanomechanical resonator with the MWCNT with quantum dot in it. It was also found that the barrier characteristics depend on the diameter of the nanotubes even though the nanotube was irradiated with a same ion does. This finding is also true for the nanotube on the substrate.

Another effort for this year on the atom manipulation to fabricate the atomic scale nanostructures is as follows. We focused on extending the variation of the materials on which the technique is applicable aiming at observations of novel physical phenomena. On a Pt(111) surface, where ordinary atom manipulation in the horizontal direction is impossible, a vertical manipulation method has been established, *i.e.*, pick up an atom by a probe tip, move the tip to the target position, put down the atom on the surface. Employing this technique, the variation of the materials for the manipulation experiments can be extended, and rapid progress would be expected.

2. Physics of nanodevices (Deacon, Matsuno, Ohno, Okamoto, Wang*², Sun*¹, Maeda*⁷, Takatori*⁵, Nishino*⁴, Ishibashi)

Main achievement in this year is shown below.

(1) Spin qubit in silicon nanoFET devices

We continued the development as a spin qubit device based on silicon tunnel FET device, which is a collaborative research with AIST. In the tunnel FET structure, two spin qubits are independently controlled, and it is confirmed that these correlations appear in the lifting condition of the spin blockade. For a single qubit, various quantum interference effects were observed by modulating the energy difference of the two-level system with gate voltage at high speed. This quantum interference pattern showed a good agreement with the theoretical calculations by the F. Nori group conducting joint research. These results can be expected to be applied to single spintronics based on silicon technology, especially to magnetic measurement and future spin quantum information.

(2) Topological Josephson junctions

Topological insulators (TIs) sandwiched by superconductors are predicted to behave as a topological Josephson junction where a unique current-phase relation with a 4π periodicity associated with Majorana bound states exists. In collaboration with Laurence Molenkamp's group in University of Wurzburg, we fabricate the Josephson junction with a HgTe quantum well that has an adjusted thickness to be a 2 dimensional topological insulator. Similar to the case with the 3 dimensional TI Josephson junction, we could observe the missing odd steps in the Schapiro response in the 2D TI Josephson junction. Besides, we could observe the Josephson emission from the voltage state junction with half a frequency of the ordinary Josephson frequency, as predicted in the theory. This is another important indication for the Majorana bound states.

(3) Spin orbit interaction and its application in the oxide thin film materials

Focusing on new physics and functionality of spin-orbit interaction in solids, we fabricated oxide epitaxial thin films containing $5d$ transition metal Ir by pulsed laser deposition (PLD). We have

measured x-ray magnetic circular dichroism (XMCD) of interfaces consisting of ferromagnetic SrRuO₃ and nonmagnetic SrIrO₃ at SPring-8 BL39XU to find an unusually small magnetic proximity effect. We have also studied ferromagnetic resonance of highly insulating La₂NiMnO₆, which can be a potential component of Spin Seebeck devices.

(4) Plasmonic devices

We analyzed such optical properties as ultra-wideband, no polarization dependence, and no incident angle dependence of our developed metamaterial light absorbing film, whose absorption band ranged from visible to infrared, with the finite-difference time-domain method. We found the mechanism of no polarization dependence is caused by that the surface plasmon resonance in the metal nanoparticles with variety shape and the holes with the same shapes perforated in the metal film satisfy the Babinet's principle.

Principal Investigator

石橋 幸治 Koji Ishibashi

落合 勇一 Yuichi Ochiai
高柳 英明 Hideaki Takayanagi

森山 悟士 Satoshi Moriyama

根岸 良太 Ryota Negishi

Research Staff

岡本 隆之 Takayuki Okamoto

南任 真史 Masashi Nantoh

山口 智弘 Tomohiro Yamaguchi

大野 圭司 Keiji Ono

松野 丈夫 Jobu Matsuno

飛田 聡 Akira Hida

Deacon Russell Stewart

Wang Rui

Jian Sun

Huang Shaoyun

田畑 博史 Hiroshi Tabata

布施 智子 Tomoko Fuse

藤原 隆 Takashi Fujihara

清水 麻希 Maki Shimizu

西野 貴幸 Takayuki Nishino

伊東 芳子 Itoh Yoshiko

Hashim Abdul Manaf Bin

稲葉 工 Takumi Inaba

福田 隆史 Takashi Fukuda

小寺 哲夫 Tetsuo Kodera

Students

前田 幸祐 Kosuke Maeda,

富沢 啓 Hiroshi Tomizawa

鷹取 賢太郎 Kentaro Takatori

鈴木 克弥 Katsuya Suzuki

萩原 典之 Noriyuki Hagiwara

稲田 春来 Haruki Inada

島 龍之介 Ryuunosuke Shima

寺林 真輝 Masaki Terabayashi

Assistant and Part-timer

浅野 頼子 Yoriko Asano

坂井 陽子 Yoko Sakai

Visiting Members

上村 洸 Hiroshi Kamimura

菅野 卓雄 Takuo Sugano

終元 宏 Hiroshi Kukimoto

蒲生 健次 Kenji Gamo

長谷川 英機 Hideki Hasegawa

白木 靖寛 Yasuhiro Shiraki

布下 正宏 Masahiro Nunosita