



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 (飛田、南任、山口、富沢*7、Norizzawati Mohd Ghazali*6、鈴木*7、萩原*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進展があった。Ga集束イオンビームを照射することにより、カーボンナノチューブ中に形成したトンネル障壁の評価を行い、トンネル障壁高さと、ドーズで制御可能な室温での抵抗が強い相関を示すことを示した。さらに、2つのトンネル障壁を導入した試料では、高い再現性をもって単一電子トランジスタを作製することができた。これにより複数の単電子トランジスタからなる集積デバイス実現への可能性を示した。

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

シリコン FET 素子についてそのスピン量子ビットの開発を行った。トンネル FET 構造において単一の深い不純物/欠陥準位の電子スピンをパルスマイクロ波によりコヒーレントに制御した。こ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。また MOSFET 素子において、強く結合した 2 つの電子スピンの電流検出磁気共鳴とそこにあらわれるスピン起動相互作用との相関効果を見出した。共鳴信号の位置および強度とスピン起動相互作用の強度は共同研究者による理論とよい一致を示した。

(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。本研究ではピュルツブルグ大学 (ドイツ) と共同で、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たところ、 4π 周期に起因する奇数次 (10 以下) が欠損したシャピロステップを観測した。

(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堆積法 (PLD) により作製した。二層膜 $\text{SrRuO}_3\text{-SrIrO}_3$ において SrTiO_3 基板からのバックゲートを用いることで、異常ホール効果とトポロジカルホール効果の両方に顕著な電界効果を観測した。これらは実空間と波数空間でのトポロジーに関連する輸送現象であり、電界が界面におけるスピン-軌道相互作用を通してトポロジーを制御していることを示唆している。強磁性体とゲート絶縁膜との間に強いスピン-軌道相互作用を持つ物質を挟み込む構造は他のスピン-軌道関連現象の電界制御にも有効であると考えられる。

(4) プラズモニックデバイスの開発

誘電体を金属薄膜で挟み込んだ Metal-Insulator-Metal (MIM) 構造において、片側の金属をランダム凹凸構造を導入するした薄膜とすることで、入射角依存性と偏光依存性なしに 3 オクターブ以上の超広帯域にわたって高い光吸収が実現できることを見出した。本構造は作製法としてコロイダルリソグラフィを用いており、金属としては安価なアルミニウムが利用できるため、安価に容易に大面積化できるという特長も合わせ持つ。

*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*7, 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 show a reliability and reproducibility of the tunnel barrier formation process in the MWCNT with focused ion beam (FIB) irradiation. We showed that the barrier height had a strong correlation with room temperature resistance which was controlled by the dose. In double barrier samples, the single electron transistor was demonstrated with high reproducibility, which makes it possible to fabricate more complex and functional integrated devices with several SETs.

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

Main achievement in this year is shown below.

(1) Spin qubit in silicon nanoFET devices

We developed spin quantum bit in silicon FET device. In Tunnel FET structure, we have coherently manipulate single electron spin single deep defect/impurity by use of pulsed microwaves. This results can be applied single spintronics based on silicon technology, especially for magnetometer and for spin-based quantum information processing. We have also found, in MOSFET device, an electron spin resonance (ESR) signal for strongly coupled two-electron spins and an effect of spin-orbit interaction on ESR. The observed ESR spectrum agree with the theory by the collaborators.

(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. We have studied a microwave response (Schapiro steps) of the junction, and found the missing odd steps under the low microwave frequencies.

(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 studied electric-field effect of transport properties in $\text{SrRuO}_3\text{-SrIrO}_3$ bilayers to find both topological and anomalous Hall effects are electrically modulated only when SrIrO_3 is located between the ferromagnet and a gate dielectric, manifesting the validity of inserting strong SOC materials; the gate electric field is possibly tuning SOC at the interface and eventually the topological properties of the system. The structure used in this study is applicable to electric-field control of other SOC-related phenomena.

(4) Plasmonic devices

We found that a Metal-Insulator-Metal (MIM) structure of which one side metal is a thin film with randomly arranged nanobumps shows ultra wideband light absorption. The absorption band has three octave band width with no angular dependence of incidence nor polarization dependence. Since this structure can be fabricated with colloidal lithography and use inexpensive aluminum as metal, it is very easy to fabricate large area devices at low cost.

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

Huang Shaoyun

南任 真史 Masashi Nantoh

田畑 博史 Hiroshi Tabata

佐々高史 Takafumi Sassa

布施 智子 Tomoko Fuse

山口 智弘 Tomohiro Yamaguchi

藤原 隆 Takashi Fujihara

大野 圭司 Keiji Ono

清水 麻希 Maki Shimizu

松野丈夫 Jobu Matsuno

西野 貴幸 Takayuki Nishino

飛田 聡 Akira Hida

伊東 芳子 Itoh Yoshiko

Deacon Russell Stewart

Hashim Abdul Manaf Bin

Wang Rui

稲葉 工 Takumi Inaba

Jian Sun

福田 隆史 Takashi Fukuda

Students

前田 幸祐 Kosuke Maeda,

富沢 啓 Hiroshi Tomizawa

鷹取 賢太郎 Kentaro Takatori

徳永 啓佑 Keisuke Tokunaga

石田 俊 Takashi Ishida

鈴木 克弥 Katsuya Suzuki

萩原 典之 Noriyuki Hagiwara

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