



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

キーセンテンス：

1. 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. カーボンナノチューブでバイオセンサーを作る

キーワード：

カーボンナノチューブ、半導体ナノワイア、グラフェン、単電子デバイス、量子ナノデバイス、テラヘルツ波検出

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の開発、それらにおける新規物性の探索、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) 検出器の開発を行っている。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、省エネルギー・高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 検出デバイスなどへ応用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、Zhou*¹、西野*⁵、南任、渡部、石橋)

現在の先端リソグラフィ技術で作製可能なナノ構造は、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、これらからデバイス化する技術の開発を行っている。今年度行った研究と主な成果を以下に示す。

(1) 化学修飾を用いたカーボンナノチューブナノ構造の作製

表面を化学的に修飾可能なカーボンナノチューブでは、化学的な手法を用いてナノチューブ自身で分子レベルのナノ構造を作製することも試みている。ナノチューブと分子のヘテロ接合を作製し、ナノチューブの両端を分子で終端した構造の電子状態の走査トンネル顕微鏡による観察に成功し、分子によって閉じこめポテンシャルの制御が可能であることを示した。今年度は、さらに、カーボンナノチューブ量子ドットからの発光を観測した。

(2) 自己組織化分子定規法を用いたナノギャップ作製法の開発

究極の単分子デバイスの作製を目指して、自己組織化法を利用した分子定規法を用い、10nm以下の金属電極のナノギャップを作製する技術を確認した。本手法を利用して、数ナノメートルレベルの電極間隔をもつ半導体ナノワイア/超伝導体 SNS 接合作製のためのデバイスプロセスを開発している。

(3) 走査ゲート法によるカーボンナノチューブの評価

ナノチューブを量子ドットに応用する場合、その品質の評価が重要である。ナノチューブ中に誘起されている欠陥や不純物は散乱ポテンシャルとして働き、量子ドット動作を妨げる。そこで、McGill 大学と共同で、電極をつけた1本のナノチューブを希釈冷凍機温度で走査ゲート法を用いて評価した。その結果、欠陥に由来すると思われる散乱ポテンシャルによって自発的に量子ドットが形成されていることがわかった。

2. ナノ機能の探索とナノデバイスへの応用 (Huang^{*4}、森本^{*4}、西尾^{*1}、布施^{*1}、Wang^{*2}、Shin^{*7}、Tarun^{*8}、久野^{*8}、林^{*8}、富沢^{*8}、鈴木^{*8}、平野^{*8}、石井^{*8}、西村^{*8}、山口、石橋)

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、超伝導電流のコヒーレント制御を目指した研究を行っている。また、これらの量子ドットの人工原子としてのエネルギースケールが、テラヘルツ領域にあることを利用して、テラヘルツ波を光子として検出する、新しいテラヘルツ波量子検出器への応用を研究している。

(1) シリコン、ゲルマニウムナノワイアを用いた量子ドットの研究

触媒を用いた CVD 法で直径が 10nm 以下から 100nm 程度までのナノワイアを作製し、それに電極をつけることにより、単電子トランジスタを作製することを試みた。今年度は有効質量が Si よりも小さく、より大きな量子効果が期待できる Ge ナノワイアを用いてトップゲート型量子ドットを作成するプロセスを開発した。この手法により、十分に大きな負のゲート電圧をかけると電子数をゼロにまですることが可能となった。ただし、この場合、ドットは不純物が作る不規則ポテンシャルにより偶然形成されることがわかった。

(2) 超伝導電極を持つ InAs ナノワイアの研究

触媒金属を用いた MOCVD (有機金属気相成長法) で作った InAs ナノワイアに超伝導電極をつけ、超伝導電流を流すことを目指している。この SNS 構造を含むリングを用いて新しい量子ビットを作製することが目的である。今年度は、量子ビット構造とマイクロ波回路の強結合を実現することを目指し、予備実験として作製したマイクロ波回路共振器を希釈冷凍機に設置し、その共振特性を調べた。

(3) 強磁性体電極を持つシリコンナノワイアの研究

強磁性体電極からシリコンナノワイアへのスピン偏極電子注入を目指して、強磁性体電極を持つシリコンナノワイアの電気伝導を調べた。本年度は非局所測定におけるスピン信号の温度依存性を調べ、スピン信号が温度の上昇とともに急速に減衰することを観測した。このことは、温度が高くなるとスピン偏局していない熱励起された電子のトンネルが支配的になることによることを明らかにした。

(4) 2層カーボンナノチューブのバンドギャップの研究

2層カーボンナノチューブは内層が外層で保護されているため、内層の電気伝導は欠陥や不純物の効果が小さいと思われる。しかし、内層と外層の特性 (半導体か金属) は全くランダムと思われる。そこで、内層と外層の半金属性の組み合わせによる典型的な電流のゲート電圧依存性を明らかにした。また、ゲート酸化膜として HfO をつけることにより、p 型伝導から両極性を示すようになることから、バンドギャップの直径依存性を実験的に決めることができた。

(5) ナノデバイスのテラヘルツ検出器への応用に関する研究

ナノデバイスをテラヘルツ波検出器に応用するためには、テラヘルツ波とナノデバイスを効率的に結合させる必要がある。そのために、テラヘルツ波に対するアンテナ構造をナノデバイス上に作製し、その効果を調べた。磁場中の 2次元電子ガス基板上にメッキ法を用いてブルザイアンテナを作製し、2次元電子ガスの抵抗をテラヘルツ検出に用いたところ、アンテナをつけることにより検出信号が数倍上昇した。

^{*1} 基礎科学特別研究員、^{*2} 国際特別研究員、^{*3} ASI 研究員、^{*4} 協力研究員、^{*5} 客員研究員、^{*6} JRA、^{*7} IPA、^{*8} 研修生、^{*9} 研究嘱託

Key Sentence :

1. Fabrication and characterization of molecular scale nanostructures
2. Physics and demonstration of quantum nanodevices
3. Application of nanodevices for THz detection

Key Word :

carbon nanotubes, semiconductor nanowires, graphene, single electron devices, quantum nanodevices, Terahertz detection

Outline

To explore future nanoelectronics, we develop fabrication processes of sub-10nm structures, and study their electronic properties to apply them to functional nanodevices. We use carbon nanotubes, semiconductor (Si, Ge, InAs et al.) nanowires, graphene and functional molecules as building block of those nanostructures. With a combination of the top-down and bottom-up technology, 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.

1. Device fabrication processes in nanoscale (Hida, Nantoh, Zhou, , Nishino, Watanabe, Ishibashi)

To realize nanostructures with a size of several nm is difficult only with 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 a attractive technique for the aim. However, to merge the two technology 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.

(1) Fabrication of molecular scale nanostructures with carbon nanotubes

One of the unique features of the carbon nanotube is a possible chemical modification of its surface. By using the feature, we are developing to fabricate molecular scale nanostructures with carbon nanotubes and molecules. We have succeeded in realizing carbon nanotube-molecule heterostructures, and observed electronic states in the individual carbon nanotube terminated by molecules. Besides, we have observed photoluminescence originating from confined states in the nanotube quantum dot.

(2) Nanogap fabrication with novel self-assembled molecular lithography technique

To realize a nanogap less than 10nm in a controlled manner is important for measurements of a molecular scale nanoparticle and a single molecule. For this purpose, we have developed a technique with the novel self-assembled molecular lithography technique. The technique is applying for the fabrication of superconducting contacts on the InAs nanowire with a sub-10nm gap.

2. Physics and application of nanodevices (Huang, Morimoto, Nishio, Fuse, Shin, Tarun, Kuno, Hayashi, Tomizawa, Suzuki, Hirano, Ishii, Nishimura, Yamaguchi, Ishibashi)

(1) Quantum dots with Si and Ge nanowires

We have developed fabrication processes of quantum dots with Si and Ge nanowires with diameters as large as 30nm. We have focused on the Ge nanowire for the quantum dot applications since it has a smaller effective mass, which leads to the larger quantum effect. In the top gated quantum dot, we have succeeded in realizing zero-electron in the dot by applying large negative gate voltage.

(2) InAs nanowires with superconducting contacts

An InAs nanowire with superconducting contacts may be a new SNS (Super/Nomal/Super) system that is interesting from both physics point of view and a new qubit application. We have observed a supecurrent in the structures as well as multi-Andreev reflection effect in the subgap region. To investigate the energy spectrum of the Andreev qubit, we are preparing microwave transmission experiments in the dilution refrigerator.

(3) Si nanowires with ferromagnetic electrodes

To study the transport of the spin polarized electrons in the Si nanowires, we have measured the electrical resistance in the two terminal (local) and four terminal (non local) geometries. We have studied a temperature dependence of the spin signal which decreased drastically as the temperature was increased. It was found that the decrease comes from the increasing contribution

of the thermally activated spin-unpolarized electrons, as the temperature is increased.

(4) Energy gap of the double-wall carbon nanotubes

The inner tube and the outer tube of the double-wall carbon nanotubes may have arbitrary chirality, so they can be semiconducting and metallic. We have found characteristic gate voltage dependence of the source-drain current, depending on the combination of the semiconducting and metallic inner and outer tube. Using the ambipolar characteristics that appears when a HfO layer is deposited on top of the nanotube, we were able to estimate a diameter dependence of the band gap.

(5) Terahertz detection with nanodevices

To enhance the coupling between the nanodevice and terahertz (THz) wave, we have fabricated antenna structures on top of GaAs/AlGaAs two-dimensional electron gas detectors. THz signal was enhance by several times in the antenna coupled device, compared with the device without antenna.

Principal Investigator

石橋 幸治 Koji Ishibashi

菅野 卓雄 Takuo Sugano

森山 悟士 Satoshi Moriyama

落合 勇一 Yuichi Ochiai

Research Staff

河野 行雄 Yukio Kono

渡部 秀 Shu Watanabe

根岸 良太 Ryota Negishi

山口 智弘 Tomohiro Yamaguchi

西野 貴幸 Takayuki Nishino

黄 少云 Shaoyun Huang

Fedorov Arkady

飛田 聡 Satoshi Hida

黄 晟寓 Sungwoo Hwang

南任 真史 Masashi Nantoh

張 保平 Bao-ping Zhang

森本 崇宏 Takahiro Morimoto

伊東 芳子 Itoh Yoshiko

西尾 隆宏 Takahiro Nishio

岩井 莊八 Iwai Sohachi

布施智子 Tomoko Fuse

王 志海 Zhihai Wang

周 昕 Xin Zhou

三原 勝 Masaru Mihara

Students

Jean Tarun Laniog

平野 正城 Masashiro Hirano

林 尚生 Naoki Hayashi

富沢 啓 Hiroshi Tomizawa

鈴木 利一 Riichi Suzuki

久野 晃弘 Akihiro Kuno

石井 雅人 Masato Ishii

Assistant and Part-timer

申 成權 Sung-Kwon Shin

浅野 頼子 Yoriko Asano

坂井 陽子 Yoko Sakai

Visiting Members

上村 洸 Hiroshi Kamimura

長谷川 英機 Hideki Hasegawa

蒲生 健次 Kenji Gamo

布下 正宏 Masahiro Nunosita

高柳 英明 Hideaki Takayanagi