



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
5. プラズモニクスで有機光デバイスの性能を上げる。

#### 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、プラズモニクス

#### 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、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\*<sup>1</sup>、西野\*<sup>5</sup>、佐々、南任、渡部、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。さらに、2個の分子で3つのナノチューブを連結した量子ドット構造 (分子がトンネル障壁の役割を果たす) を作製することができた。

##### (2) 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 (布施\*<sup>1</sup>、ZH.Wang\*<sup>2</sup>、R. Wang\*<sup>2</sup>、久野\*<sup>8</sup>、林\*<sup>8</sup>、富沢\*<sup>8</sup>、鈴木\*<sup>8</sup>、平野\*<sup>8</sup>、石井\*<sup>8</sup>、和田\*<sup>8</sup>、Deacon、飛田、松野、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

金属触媒を利用した CVD 法で、ゲルマニウムナノワイアを薄いシリコンでくるんだコアシェル構造を作製することができる。この構造ではゲルマニウム/シリコン界面にホールガスが形成されていると考えられる。ホールは大きなスピン軌道相互作用を持つことから、超伝導電極で挟んだ場合にはマヨラナ粒子探索が可能な計となり、また、スピン軌道型量子ビットとしても利用することができる。本年は量子ドットを作製するプロセスを開発し、電気伝導特性の測定から伝導キャリアが実際にホールであることを確認した。

#### (2) 超伝導電極を持つ InAs, InSb 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。ナノワイアを超伝導電極では挟むとそこにアンドレーエフ束縛状態が形成されると考えられる。今年度は、系をマイクロ波回路導波路の中に組み込み、マイクロ波の透過を利用してその存在を確認することを試みた。また、ナノワイアはスピン軌道相互作用が強いため、マヨラナ粒子を探索できる場でもある。マヨラナ粒子の存在を確かめるために、マイクロ波照射による社ピロステップの測定を行ったが、確証のある結果は得られていない。

#### (3) カーボンナノチューブ量子ドットからの発光

カーボンナノチューブ量子ドットからの発光を初めて観測した。励起スペクトルには量子閉じ込めによるスペクトルに離散化が観測された。さらに、励起が強い場合には発光ピークのラビ分裂が観測され、ドレスタトムの形成が確認された。

### 3. デバイス応用 (岡本、鷹取、西野\*5、石橋)

#### 1) プラズモニクスのデバイス応用

厚さが数 10nm の金薄膜や銀薄膜に光を入射するとほとんどの光は反射されてしまう。しかし、その表面に色素分子の J 会合体をからなる薄膜を堆積すると、その吸収波長において大きな透過率を呈することを発見した。透過スペクトルの形状は典型的なファノ共鳴を示すことから、この現象は色素分子と金属表面を伝搬する表面プラズモンとの相互作用によるものと考えられる。また、有機薄膜太陽電池においてレアメタルを含む透明電極である酸化インジウムスズをプラズモニック構造を持つ金属薄膜電極で置き換えることを提案した。

\*1基礎科学特別研究員、\*2国際特別研究員、\*3ASI研究員、\*4協力研究員、\*5客員研究員、\*6JRA、\*7IPA、\*8研修生、\*9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, single electron devices, quantum nanodevices, Terahertz detection, Plasmonics

#### 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, InSb et al.) nanowires 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. We also use plasmonic nanostructures to improve efficiencies in the organic electroluminescent devices (OLED) and organic solar cells.

## **1. Device fabrication processes in nanoscale** (Hida, Nantoh, Zhou, Nishino, Sassa, 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. We have also fabricated carbon nanotube quantum dots with molecules as a tunnel barrier.

### (2) Characterization of carbon nanotubes by a scanning gate technique

Individual carbon nanotubes bridged between two metallic contacts was characterized by the scanning gate technique. It was found that the nanotube between the contacts was composed of several segments of unintentionally made quantum dots. This may be due to the defects or impurities in the nanotube, and the high quality nanotube is important to fabricate single quantum dots with carbon nanotube.

## **2. Physics of nanodevices** (Deacon, Hida, Yamaguchi, Fuse, Hayashi, Tomizawa, Suzuki, Hirano, Ishii, Wada, Ishibashi)

### (1) Quantum dots with Si/Ge core-shell nanowires

Si/Ge core-shell nanowires are attractive for quantum physics associated with the expected large spin-orbit interaction. We are making efforts to fabricate quantum dots in the Si/Ge core-shell nanowires with finger gates to the nanowire. To make good Ohmic contacts, nanowire growth conditions are carefully adjusted to have a thin Si shell. At the moment, device fabrication processes are being developed. From the gate voltage dependence, it was confirmed that holes were majority carriers in the channel.

### (2) InAs and InSb nanowires with superconducting contacts

InAs has a surface accumulation layer of electrons, so that it is easy to fabricate Ohmic contacts to it. When the superconducting contacts are deposited on it with a distance less than a few hundreds of nm's, a supercurrent flows and Andreev bound states are assumed to be formed. We try to detect the states by combining a loop that includes the SNS junction with a circuit resonator. These nanowires have a large spin-orbit interaction, so that Majorana Fermions might be detected in the system. To explore the possibility, we have demonstrated the Shapiro steps under microwave irradiation. Unfortunately, we have not observed any signature yet.

### (3) Optical properties of carbon nanotube quantum dots

We have observed an optical emission from carbon nanotube quantum dots with both ends terminated by molecules. The emission peak was affected by quantum confinement in the dot, and Rabi splitting was observed when the excitation intensity was increased.

### **3. Device application** (Okamoto, Kuno, Takatori, Ishibashi)

#### (1) Plasmonic devices

When light incidents onto a few ten nanometers thick gold or silver films, they reflect most of the energy. However, we found that when the metallic film was covered with a thin J-aggregated dye film, the transmittance was dramatically enhanced at the absorption-peak-wavelength. We consider that the phenomenon is caused by the interaction between the surface plasmons on the metallic surface and the dye molecules, because the transmission spectra exhibit clear Fano shapes. Additionally, we proposed an organic thin-film solar cell in which the transparent electrode, which contains rare metal, was replaced by a metallic thin film with a plasmonic structure.

***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