



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. 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、松野、南任、山口、富沢*5、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、これらからを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。単層カーボンナノチューブの両端を化学的に結合したリング構造を作製した。走査トンネル顕微鏡を用いてリングを観測すると、リング内の定在波の形勢を観測することができた。また、金属電極をつけて磁気抵抗効果を測定すると、電子波の干渉による AB 振動を観測することに成功した。

(2) 多層カーボンナノチューブを用いた2重結合量子ドットの作製

1本の多層カーボンナノチューブに局所的にアルゴンイオンビームを照射することによりトンネル障壁を形成する技術を開発している。これを用いて2重結合量子ドットを作製することが目的である。ナノチューブの電気的特性は製法に大きく依存するので、今年度は様々な方法で作製された市販の多層カーボンナノチューブの品質を電気伝導特性の観点から評価した。

2. ナノ機能の探索とナノデバイスへの応用 (Deacon、佐々、布施*3、Wang*1、藤原*2、前田*5、辻村*5、山崎*6、清水*6、石井*6、和田*6、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。この系では Rashba 型のスピン軌道相互作用が強いことが予想されており、電氣的制御が可能なスピン型量子ビットや超伝導電極をつけた場合のマヨラナ状態が現れる系として興味深い。本年度は、シェルやコアの厚さを変えながら量子ドットを再現性よく形成することを行った。

(2) 超伝導電極を持つ InAs, InSb ナノワイアの研究

自己組織化的に作製した InAs や InSb 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。アンドレーエフ束縛状態を観測する構造として、超伝導ループの一部をナノワイアで置き換えた構造において、ナノワイアの上にトンネル障壁を介して作製したプローブ電極を形成した構造を作製した。その他、クリーンな 1 次元チャネルを形成するための様々なプロセスを試みた。

(3) ナノデバイスと超伝導共振器のハイブリッド構造

人工 2 準位系からなる量子ナノデバイスと超伝導回路共振器の相互作用を調べる研究を行っている。人工原子の構造として、2 重結合量子ドットや超伝導ループを用いる。超伝導共振器の特性を希釈冷凍機温度で測定するシステムを立ち上げるとともに、共振器中に量子ナノデバイスを配置するデバイスプロセスを開発している。

(4) カーボンナノチューブ量子ドットからの発光とコヒーレント制御

カーボンナノチューブ量子ドットからの励起子発光の発光寿命の測定を行い、寿命が液体ヘリウム温度で、1ns 程度に及ぶことを明らかにした。時間をずらした 2 つのパルスを用いたポンプ・プローブ測定において、励起子干渉を観測し、これを利用して励起子発光をコヒーレントに制御することに成功した。

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

有機太陽電池の透明電極として最もよく用いられているのは酸化インジウムスズ(ITO)である。しかし、ITO は可撓性に乏しく、資源問題もつきまとう。我々は ITO の代わりにランダムに配置された直径 100nm の円開孔を持つ厚さ 30nm の銀薄膜を用いた有機薄膜太陽電池を開発した。本銀電極の光透過率は 30%程度と低いが、入射光は本構造が持つ空間周波数成分により、銀と活性層との界面における表面プラズモンに変換され、高効率で活性層に吸収される。その結果、得られた光電変換効率は ITO を用いた素子と同程度である。

*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 研修生、*7 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 and optical properties to apply them to functional nanodevices. We use carbon

nanotubes, semiconductor (Si/Ge, InAs, InSb 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. 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, Matsuno, Nantoh, Yamaguchi, Tomizawa*⁶, 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.

(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 fabricating molecular scale nanostructures with carbon nanotubes and molecules. We have succeeded in fabricating rings with individual single carbon nanotube rings. We have observed a standing wave pattern in the STM image of the ring and the AB magnetoresistance oscillations when the electrical contacts were fabricated and the current was flown.

(2) Fabrication of coupled quantum dots in multi-wall carbon nanotubes

To form tunnel barriers in an arbitrary position, the local ion beam irradiation technique has been developed to the multi-wall carbon nanotubes. With the technique, we like to fabricate coupled quantum dots for the THz detection. The transport characteristics depend on the quality of the nanotubes, so we have investigated the basic electrical transport in various commercially available nanotubes for further process.

2. Physics of nanodevices (Deacon, Sassa, Fuse*³, Wang*¹, Fujihara*², Maeda*⁶, Tsujimura*⁶, Yamazaki*⁶, Sjimizu*⁶, Ishii*⁶, Wada*⁶, 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. With this, the fast electrical control of the spin could be expected. The Rashba-type spin orbit interaction has been predicted in the core/shell structure. These make the system attractive for the spin qubit. We have been developing the device fabrication processes to fabricate coupled quantum dots as well as the growth and structural conditions in the CVD process.

(2) InAs and InSb nanowires with superconducting contacts

Nanowire/superconductor hybrid SNS structures are interesting in terms of the predicted Andreev bound states formed in the nanowire and a system to search for the Majorana states. For these purposes, to form the clean one-dimensional system and to control the interface between the nanowire and the superconductor are important. We are developing the device fabrication processes that meet the requirements. To detect the Andreev bound states, we have developed a technique to fabricate the structure in which the nanowire was embedded in a superconducting loop with the probe contact on top of the nanowire.

(3) Quantum devices combined with the superconducting circuit resonators

An atom-cavity interaction is one of the important subjects in quantum optics. Similar study could be done with the artificial atoms in a microwave circuit cavity. This opens up a new possibility of quantum devices in terms of controlling the quantum states and communication among different quantum devices. We have set up the microwave measurement system in which the sample can be

located in the dilution refrigerator. The device processes to set the quantum devices in the Nb based superconducting circuit cavity have been developed. A preliminary result was obtained in the microwave resonance measurement, which suggested the interaction between the nanowire-based coupled quantum dot and a cavity.

(4) Optical properties of carbon nanotube quantum dots

We have observed an optical emission from individual carbon nanotube quantum dots with both ends terminated by molecules. The emission peak was affected by quantum confinement in the dot. In the weak excitation condition, we have succeeded in observing exciton interference in the pump-probe measurements, and could control the exciton emission in a coherent manner.

3. Device application (Okamoto, Takatori^{*6}, Nishino^{*4}, Ishibashi)

(1) Plasmonic organic solar cells

Indium tin oxide (ITO) is most commonly used material for the transparent electrode of organic solar cells. However, ITO is brittle and suffers from resource problems. We developed an organic thin film solar cell that used a 30-nm thick silver film with randomly arranged holes with 100 nm diameter in place of the ITO electrode. Although the optical transmittance of the silver electrode is as low as 30%, the incident light is converted to the surface plasmons supported in the interface between the silver film and the active layer thanks to the spatial frequency components arising from the introduced nanostructure and then is efficiently absorbed by the active material. The obtained conversion efficiency is comparable to that of the cell with ITO.

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