



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) 単層カーボンナノチューブの極低温走査ゲート法による評価

1本の単層カーボンナノチューブの電気伝導を測定すると多くの場合、ナノチューブ内の欠陥や不純物のために複数のトンネル障壁が形成される。その結果、このナノチューブは多重量子ドット列となり大きな抵抗を持つことから電流を測定することが困難となる。このような多重量子ドット列を局所的に評価するために極低温における走査ゲート法の適用を試みた。その結果、いくつかのドットの間の結合の様子を評価することができた。

##### (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。本年度は形成されるトンネル障壁の高さや幅と抵抗の関係を電流の温度依存性から評価した。また、2重ドットの形成を示すハニカム型の電荷安定図を得た。

#### 2. ナノ機能の探索とナノデバイスへの応用 (Deacon、佐々、Wang\*1、前田\*5、辻村\*5、山崎\*6、清水\*6、和田\*6、徳永、岡本、鷹取\*6、西野\*4、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、低抵抗コンタクト形成プロセスやボトム型フィンガーゲートでトンネル障壁を形成するプロセスを開発し、2重結合量子ドットを形成することに成功した。

#### (2) 超伝導電極を持つナノワイアの研究

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、超伝導マイクロ波回路共振器中にループ構造を組み込む構造の作製プロセスの開発を行った。特に、高い Q 値を得るために 1/4 波長共振器の作製プロセスの開発を行った。

#### (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。今年度は、InSb、InAs、Ge/Si ナノワイアで作製した 2重結合量子ドットを共振器中に設置し、2重ドットのクーロンブロック効果共振特性を観測することに成功した。しかし、結合のメカニズムは明らかではない。

#### (4) 光応答性有機材料の開発

光強度によって屈折率に変化を生じる材料は、受動モード型の光波変調技術に欠かせない。アゾフォトクロミック分子は、光励起による分子構造変化を通して光感受率が大きく変化するため、光波変調材料として有望である。しかしながら固体状態における分子構造変化のダイナミクスは十分に明らかになっていない。本年度は、屈折率と吸収係数について偏光依存性の時間変化を測定するための実験系開発に取り組んだ。最終的にモデル分子を用いた薄膜試料により期待したデータ取得に成功した。来年度は新規アゾ化合物によって、より詳細な測定を行う予定である。

#### (5) 有機媒質における表面エキシトンポラリトン

誘電率が負である媒質と正である媒質との界面には表面ポラリトンと呼ばれる表面電磁波が担持される。この表面ポラリトンは電磁場をその波長より小さな空間に閉じ込めることができるという特長を持つ。本研究では、表面エキシトンポラリトンがシアニン色素会合体の表面に担持されることを見いだした。これは我々が知る限り初めての有機媒質によって担持される表面エキシトンポラリトンである。

---

\*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) Characterization of individual single-walled carbon nanotubes by the scanning gate microscope  
When electrical transport properties are measured for the individual single-walled carbon nanotubes (SWNTs), complicated single electron transport properties are usually observed because of unwanted tunnel barriers formed in the SWNT and at the SWNT/metal contacts. The scanning gate microscope measurements were carried out at milli-Kelvin temperature in an individual SWNT which showed the multi-dot behavior in simple transport measurements. The coupling properties of the quantum dots which were unintentionally formed were characterized.

(2) Fabrication of coupled quantum dots in multi-wall carbon nanotubes  
To form tunnel barriers in an arbitrary position, the local ion (or atom) 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. We have characterized the barrier that is formed by the technique, by measuring temperature dependence of the resistance of an individual MWNT that included a single tunnel barrier.

### 2. Physics of nanodevices (Deacon, Sassa, Wang\*1, Maeda\*6, Tsujimura\*6, Yamazaki\*6, Sjimizu\*6, Wada\*6, Tokunaga\*6, Okamoto, Takatori\*6, Nishino\*4, Ishibashi)

(1) Quantum dots with Si/Ge core-shell nanowires  
Si/Ge core-shell nanowires are attractive for studying quantum physics associated with the expected large spin-orbit interaction. With this, the fast electrical control of the spin could be expected. The large Rashba-type spin orbit interaction has been predicted in the core/shell structure. These make the system attractive for the spin qubit. We have developed a technology to form the coupled quantum dots with finger gates and to realize low contact resistance. We could form coupled quantum dots that showed the typical double-dot charge stability diagram.

(2) 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. To probe the bound states, we are developing a process technology to incorporate the SNS structures with a nanowire in the superconducting microwave cavity. At this moment, we could fabricate the half and quarter wavelength resonators and could observe the resonance in a dilution refrigerator temperature.

(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 developed a process to fabricate coupled quantum dots with InSb, InAs, or Ge/Si core-shell nanowires, and incorporated in the half-wavelength microwave cavity. We could observe the single electron transport in resonance measurements as well as transport measurement.

(4) Development of photo-responsive organic materials

The key for a passive mode-type light modulation technology should lie in materials that can present photo-induced refractive index changes. Azo-type photochromic molecules are promising candidate for the large change of optical susceptibility with structural changes of molecules. The dynamics of molecule changes in solid states, however, has not been understood well. In this fiscal year, we have proceeded with the development of systems to measure temporal changes of refractive indices and absorption coefficients with respect to injected light polarizations. As a result, anticipated signals were successfully obtained from films incorporating reference azo dyes. A detailed study with newly synthesized azo dyes is planned in the next year.

(5) Surface exciton polaritons supported by an organic medium

Surface electromagnetic waves, called surface polaritons, are supported by interfaces between negative-permittivity media and positive-permittivity media. Surface polaritons can be confined in a volume whose dimension is much smaller than the wavelength in vacuum. We demonstrated that surface exciton polaritons could be supported by the surface of J aggregates of cyanine dyes. As far as we know, these surface exciton polaritons are the first ones supported by organic materials.

### ***Principal Investigator***

石橋 幸治      Koji Ishibashi

長谷川 英機      Hideki Hasegawa

白木 靖寛      Yasuhiro Shiraki

布下 正宏      Masahiro Nunosita

落合 勇一      Yuichi Ochiai

高柳 英明      Hideaki Takayanagi

### ***Research Staff***

岡本 隆之      Takayuki Okamoto

南任 真史      Masashi Nantoh

佐々高史      Takafumi Sassa

山口 智弘      Tomohiro Yamaguchi

大野 圭司      Keiji Ono

松野丈夫      Jobu Matsuno

飛田 聡      Satoshi Hida

Deacon Russell Stewart

折井 孝彰      Takaaki Orii

布施智子      Tomoko Fuse

Wang Rui

三原 勝      Masaru Mihara

Kotthaus Jorg Peter

森山 悟士      Satoshi Moriyama

河野 行雄      Yukio Kono

根岸 良太      Ryota Negishi

Huang Shaoyun

藤原 隆      Takashi Fujihara

西野 貴幸      Takayuki Nishino

張 保平      Bao-ping Zhang

伊東 芳子      Itoh Yoshiko

岩井 莊八      Iwai Sohachi

### ***Students***

前田 幸祐      Kosuke Maeda,

富沢 啓      Hiroshi Tomizawa

辻村 翔      Sho Tsujimura

和田 賢二      Kenji Wada

鷹取 賢太郎      Kentaro Takatori

山崎 祐志      Yuji Yamazaki

清水 智樹      Tomoki Shimizu

徳永 啓佑      Keisuke Tokunaga

### ***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

柊元 宏      Hiroshi Kukimoto

蒲生 健次      Kenji Gamo