



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. テラヘルツ波を物性研究に利用する
4. 新しい高解像度テラヘルツイメージング技術を開発する
5. 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、テラヘルツ技術、バイオセンサー

#### 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) 検出器の開発や THz 近接場イメージング技術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、 $\text{III-V}$  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。また、THz 波の波長限界を上回る近接場を利用した高分解能 THz イメージングシステムを開発し、これを固体の THz 物性研究への応用を目指している。

#### 1. ナノ構造作製技術の開発 (飛田<sup>\*1</sup>、Zhou<sup>\*2</sup>、豊川<sup>\*</sup>、西野<sup>\*4</sup>、塩川、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。今年度は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。

##### (2) カーボンナノチューブ配向成長と集積デバイス作製への応用

これまでに開発した配向成長した単層カーボンナノチューブを用いて、容量的に結合した2つの量子ドットを作製するプロセスを開発し、2つのドット間のような量的結合の観測に成功した。

##### (3) 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。従来、Au や Pt にしか適用できなかった分子定規法を一般的な金属に適用する技術を開発し、XPS 法によってプロセスをモニタすることにより、金属の表面酸化を避けることが重要であることがわかった。

## 2. ナノ機能の探索とナノデバイスへの応用 (Huang\*1、森本\*1、西尾\*1、清水\*4、Shin\*5、Tarun\*6、林\*6、富沢\*6、鈴木\*6、小堺\*6、平野\*6、山口、河野、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。この結果、30nm 程度の直径の Si ナノワイアはクーロン振動に量子的な振る舞いを示し、さらに大きな量子効果が期待できる Ge ナノワイアでは電子数の偶奇性効果を観測し、スピン量子ビットへの応用可能性を明らかにすることができた。

### (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。アルゴンスパッタを電極形成に取り入れることにより、超伝導電流の効果を観測することに成功した。さらに、マイクロ波応答を測定しジョセフソン接合として、動作していることを確認した。

### (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。2 端子測定による局所配置ではスピンバルブ効果を、また、4 端子測定による非局所配置では、従来、金属で観測されているよりも大きな非局所電圧を観測した。

## 3. ナノ構造計測技術の開発 (森本\*1、矢嶋\*6、久野\*6、石橋)

### (1) 2 層カーボンナノチューブ電界効果トランジスタのバイオセンサーへの応用

2 層カーボンナノチューブ (DWCNT) の大きなゲート電圧特性を利用して、表面に吸着した生体分子を検出する技術の開発を行っている。単層カーボンナノチューブと DWCNT の混ざったナノチューブから、高濃度で DWCNT を分離し (東京理科大との共同研究)、1 本の DWCNT で FET を作製した。この際、原子層成長法を用いてトップゲート構造を作製することに成功した。

---

\*1 基礎科学特別研究員, \*2 ASI 研究員, \*3 訪問研究員, \*4 JRA, \*5 IPA, \*6 研修生, \*7 研究嘱託

### Key Sentence :

1. Fabrication of molecular scale nanostructures
2. Demonstration of quantum nanodevices
3. Application of terahertz wave to material science
4. High resolution terahertz imaging technique
5. Carbon nanotubes for bio-sensor application

### Key Word :

carbon nanotubes, semiconductor nanowires, graphene, single electron devices, quantum nanodevices, Terahertz detection and sensing, bio-sensor

### 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. Besides, we are interested in THz properties of solid state materials and development of the near field THz imaging system. Surface analysis with the medium energy ion beam scattering is also our research target. 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, Negishi, Zhou, Toyokawa, Nishino, Watanabe, Shiokawa, 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.

#### **(2) Growth technique for aligned carbon nanotubes for integrated nanodevice fabrication**

To grow the aligned nanotubes is a important issue to fabricate integrated nanodevices. We have succeeded in it by the methanol CVD (Chemical Vapor Deposition) with a use of quartz substrate. With the aligned carbon nanotubes, we have succeeded in fabricating capacitively coupled quantum dots, and demonstrated the operation.

#### **(3) 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 process has been monitored by the XPS, and it was found that to avoid the surface oxidation of the metal surface is important for the process.

### **2. Functionality in nanostructures and application to nanodevices** (Huang, Morimoto, Shimizu, Shin, Tarun, Hayashi, Tomizawa, Suzuki, Kozakai, Hirano, Kawano, 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. Si nanowire dots showed indication of the quantum nature revealing the non-uniform Coulomb peak height. For Ge nanowire quantum dots, the even-odd effect in the number of electrons has been observed, indicating that they may be used for the spin qubit.

#### **(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. The microwave response have shown the Josephson junction behaviors.

#### **(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 foru terminal (non local) geometries. In the former configulation, the spin-valve effect was observed, and in the latter geometry, a large non local voltage was observed, compared with standard metallic systems.

### **3. Development of inspection techniques in nanoscale** (Morimoto, Yajima, Kuno, Ishibashi)

#### **(1) Biosensor application carbon nanotube transistor**

The carbon nanotube FET may be used for biosensor application. We have fabricated FETs with individual double-wall carbon nanotubes (DWCNTs), because the DWCNT-FET is considered to have a larger transconductance than that of the single-wall carbon nanotube FET. The preliminary sensor operation has been demonstrated by measuring the change in the source drain current when the DWCNT was put in the solution that includes the biomolecule. To improve the performance, we have developed devices with top-gate structures.

***Principal Investigator***

石橋 幸治      Koji Ishibashi

坂井 陽子      Yoko Sakai  
浅野 頼子      Yoriko Asano***Research Staff***塩川 高雄      Takao Shiokawa  
小林 峰      Takane Kobayashi  
渡部 秀      Shu Watanabe  
山口 智弘      Tomohiro Yamaguchi  
河野 行雄      Yukio Kono  
黄 少云      Shaoyun Huang  
飛田 聡      Satoshi Hida  
田畑 博史      Hiroshi Tabata  
根岸 良太      Ryota Negishi  
森本 崇宏      Takahiro Morimoto  
西尾 隆宏      Takahiro Nishio  
布施智子      Tomoko Fuse  
王 志海      Zhihai Wang  
周 昕      Xin Zhou  
三原 勝      Masaru Mihara***Visiting Members***長谷川 英機      Hideki Hasegawa  
蒲生 健次      Kenji Gamo  
高柳 英明      Hideaki Takayanagi  
菅野 卓雄      Takuo Sugano  
森山 悟士      Satoshi Moriyama  
落合 勇一      Yuichi Ochiai  
牧 英之      Hideyuki Maki  
石渡 洋一      Yoichi Ishiwata  
根岸 良太      Ryota Negishi  
張 保平      Bao-ping Zhang  
伊東 芳子      Itoh Yoshiko  
岩井 莊八      Iwai Sohachi***Students***清水 麻希      Maki Shimizu  
西野 貴幸      Takayuki Nishino  
野口 卓也      Takuya Noguchi  
申 成權      Sung-Kwon Shin

Jean Tarun Laniog

矢嶋 翔太      Shota Yajima  
小堺 達也      Tatsuya Kozakai  
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***Assistant and Part-timer***

豊川 聖子      Seiko Toyokawa