



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

キーセンテンス：

1. 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。
6. イオンビームで表面を3次元に計測する。

キーワード：

カーボンナノチューブ、半導体ナノワイア、量子ナノデバイス、テラヘルツ技術、バイオセンサー、中速イオンビーム

研究目的

当研究室では、将来のナノエレクトロニクスを目指してナノメートル領域の極微細構造の作製技術の開発、新奇物性の探索とその新機能デバイスへの応用という観点から研究を進めている。ナノエレクトロニクスでは電子以外にも、光子やスピンさらにはさまざまな素励起を情報媒体として用い、さらにその量子状態や相互作用を多様性を持って制御することにより、さまざまな新機能性が発現する。また、材料の観点からは、従来の伝統的な半導体だけにとらわれず、カーボンナノチューブやフラーレン、さらには半導体ナノワイアなども視野へ入れ、機能発現に適した材料を選び、そのデバイス化のための独自のナノデバイスプロセスを開発する。具体的なナノデバイスとして、単電子デバイス、量子コンピューティングデバイスや分光機能を持つ超高感度テラヘルツ波検出デバイスなどを取り上げ、そのキーとなるナノデバイスを量子ドットなどで実現することを目指す。同時に、ナノ構造のエネルギースケールがテラヘルツ領域にあることに着目し、新しいテラヘルツ波の物性技術への応用やテラヘルツイメージング技術の開発、そして中速イオンビームを利用した表面計測技術の開発を行っている。

1. ナノ構造作製技術の開発 (飛田*1、田畑*1、根岸*1、森*2、豊川*、霜田*4、西野*4、菅原*5、浅倉*5、鈴木*5、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) 化学修飾を用いた分子スケール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。その一例として、ナノチューブの両端を化学的に修飾し、これらを化学結合させることで直径が100nm程度のつながったナノチューブリングを作製することに成功した。

(2) カーボンナノチューブ配向成長技術の開発

カーボンナノチューブデバイスの集積化を目指して、方向のそろったナノチューブを基板上に成長する技術を開発し、さらにそれをデバイスが作製可能な別の基板に貼り付けることに成功した。

(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。

(4) 高真空ナノチューブ作製技術の開発

通常CVD法で用いられる圧力よりも、数桁低い圧力でカーボンナノチューブを作製する技術を開発し、最適成長温度が、圧力の低下とともに下がることを実験的に観測し、それをモデル化することに成功した。

2. ナノ機能の探索とナノデバイスへの応用 (森*2、黄*1、森本*1、清水*4、Shin、Tarun*5、忽那*5、大家*5、小堺*5、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、新しいテラヘルツ量子検出器への応用を研究している。

(1) 高温動作単電子トランジスタの開発

カーボンナノチューブに局所的にイオンビームを照射することによりトンネル障壁を作製できることを利用して、液体窒素温度以上で動作する単電子トランジスタの作製に成功した。

(2) シリコンナノワイアを用いた量子ドットの作製

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、70nm 程度のナノワイアでは古典的なドットが形成できることがわかったが、直径が 10nm 程度になると、多重ドットの振る舞いを示すことがわかった。その理由として、直径が微細になると不純物原子の不活性化や界面への蓄積などがおこると考えられ、その解決法を模索中である。さらに、2重結合ドット構造の作製プロセスも開発している。

(3) ゲルマニウムナノワイアを用いた量子ドットの作製

ゲルマニウムはシリコンよりも高い移動度を有するため、シリコンよりも顕著な量子効果の発現が期待できる。しかし、ゲルマニウムの酸化物は水に溶けるため、デバイスプロセスが困難なことが課題である。本年度は、CVD 成長したゲルマニウムナノワイア表面にアルミナを堆積させ保護層として用いることで、デバイスプロセスに耐えうることがわかった。

(4) 超伝導電極を持つ InAs ナノワイアの作製

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。InAs 表面は空気中に出すと酸化しているようであり、金属を蒸着する前に化学的な処理を行うことにより、低抵抗な接触を得るプロセスを開発している。

(5) 超伝導電極を持つカーボンナノチューブの作製と電気特性

カーボンナノチューブは 1 次元物質であり、超伝導電極をつけた SNS 構造は、物理的、応用上大変興味深い。本研究では電極との結合を変え、電子波干渉パターンが現れる強結合の場合、クーロンブロックロードが弱く効いている場合と強く効いている場合の、3つの試料を作成し、極低温での電気特性を調べた。第1の場合では、超伝導電流および多重アンドレーエフ反射が観測された。第2の場合は、電極が正常状態の時近藤効果が観測され、超伝導状態になると超伝導電流は観測されず、多重アンドレーエフ反射のみが観測された。第3の場合は、超伝導ギャップの効果がクーロンダイヤモンドに現れることを観測した。

(6) カーボンナノチューブ量子ドットとテラヘルツ波との相互作用の研究 (森本^{*1}、河野、石橋)

カーボンナノチューブ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に相当することから、テラヘルツ波との量子的な相互作用を期待できる。ナノチューブ量子ドットに効率的にテラヘルツ波を照射するためにアンテナ構造を作製するプロセスを開発した。

3. ナノ構造計測技術の開発

(1) 検出器一体型のオンチップ近接場 THz プロープ (河野、石橋)

テラヘルツイメージングの分解能は、通常波長で決まるため、数十ミクロン程度である。本研究では、波長限界を超える分解能を達成するために、テラヘルツ近接場イメージングの実現を目指している。本年度は、テラヘルツ波を受光する GaAs/AlGaAs 2次元電子ガス (2DEG) の上に、波長以下の小さな穴をもつけ、そこを通過するテラヘルツ波が作る近接場を穴の下の 2DEG で効率よく検出するために、穴の直下にアンテナ構造を作りつけ、近接場光を増強させることができることを電磁界シミュレーションで確認した。さらに実際にデバイスを作製し、100 ミクロン程度のテラヘルツ波に対して、9 ミクロン程度の分解能を達成することに成功した。本プロープを試料上で走査し、局所的なテラヘルツ物性の研究への応用を目指している。

(2) 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 (森^{*2}、森本^{*1}、大村^{*5}、矢嶋^{*5}、石橋)

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 DWCNT-FET を生体分子を含む溶液に入れてると、生体分子によるソースドレイン電流の変化を観測することができた。

(3) 三次元中速エネルギーイオン散乱の開発 (小林、小山^{*6})

三次元中エネルギーイオン散乱 (3D-MEIS) をナノ構造体の構造解析のために開発している。3D-MEIS とは中エネルギー (100 keV) の短パルス (~2 ns) ビームを材料に入射させ、材料を構成する原子によって散乱された粒子を三次元 (位置敏感・時間分析型) 検出器により検出するものである。3D-MEIS は結晶性試料から散乱した粒子の二次元ブロッキングパターンと飛行時間の情報を得られるものである。本年度は装置の小型化を行い、4m の長さの装置を完成させた。完成させた装置の特性を調べるために Si 単結晶及び SiGe 薄膜の分析を行った。その結果、薄膜の構造 (ひずみ) 解析が十分に可能であることがわかった。

^{*1}基礎科学特別研究員、^{*2}ASI 研究員、^{*3}訪問研究員、^{*4}JRA、^{*5}研修生、^{*6}研究嘱託

Key Sentence :

1. Fabrication of sub 10nm 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
6. Medium energy ion scattering for 3-dimensional surface study

Key Word :

Carbon nanotubes, Semiconductor nanowires, Nanodevices, Terahertz, Bio-sensor, Ion scattering

Purpose of Research :

In this laboratory, we are working on fabricating nanoscale-structures that are not realized with conventional lithography techniques, exploring new physical properties in the structures, and trying to apply them to functional nanodevices. For this purpose, we are interested in carbon nanotubes and semiconductor nanowires, which are self-assembled and have extremely small diameters, as building blocks of nanostructures as well as conventional semiconductor materials. A basic structure of our interest is a quantum dot and a quantum wire. In the quantum dot structure, a single electron charging effect (Coulomb blockade effect) and a zero-dimensional confinement effect are important. The quantum wire with superconducting contacts is a new novel structure for new physics research and application. With these unique effects, we study single electron transport at low temperatures and try to apply the unique effects to nanoelectronic devices.

1. Device fabrication processes in nanoscale (Hida, Negishi, Tabata, Mori, Toyokawa, Shimoda, Nishino, Asakura, Suzuki, 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. The structures are observed and characterized with optical spectroscopy and scanning tunneling microscope (STM).

(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. The grown nanotubes could be transferred to another useful substrate for device fabrication, and in fact we could made single electron transistor with the technique.

(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, and succeed in measuring a conductance of an individual nanoparticle.

(4)Nanotube growth at ultra-low pressure

To lower the growth temperature of the nanotubes is an important issue for the practical nanotube based nanodevices. We have found that this can be possible by growing nanotubes at low pressure. The growth mechanism at lower temperature has been established.

2. Functionality in nanostructures and application to nanodevices (T. Mori, S. Y. Huang, T. Morimoto, M. Shimizu, S. K. Shin, J. Tarun, M. Oie, Kutsuna, T. Kozakai, Y. Kawano, T. Yamaguchi, K. Ishibashi)

(1) Single electron transistor (SET) operating at higher temperature

To operate SET at high temperature, it is important to reduce the self capacitance. We have found that it is mainly determined by the capacitance at source and drain electrodes. To reduce it, we have used low energy ion beam irradiation to form the tunnel barrier, in which case capacitance at nanotube-nanotube junctions become low. In fact, SETs operated in temperatures higher than liquid nitrogen.

(2) Quantum dots with Si nanowires

The important feature of the Si nanowire is that the width can be less than 10nm and the

surface is covered by a stable oxide layer. We have developed fabrication processes of quantum dots with Si nanowires with diameters larger than 30nm. For nanowires of the order of 10nm in diameter, the fabrication process needs to further investigation.

(3) Quantum dots with Ge nanowires

Germanium has a smaller effective mass than Si, so that the quantum effect becomes more important. However, the device process is not easy because Ge nanowires are easily resolved in water. To prevent this, we have developed a technique to cover them with Al₂O₃ grown by the atomic layer deposition technique.

(4) InAs nanowires with superconducting contacts

An InAs nanowire with superconducting contacts may be a new SNS (Super/Normal/Super) system that is interesting from both physics point of view and a new qubit application. We have developed to realize low contacts between the nanowire and the metal.

(5) Carbon nanotube with superconducting contacts

This system is a new SNS system with an extremely narrow "N" region. We have measured the transport properties of the system with different coupling strength, 1) very strong coupling 2) intermediate coupling 3) very weak coupling. In 1), we could see the Fabry Perot interference without Coulomb blockade effect, and could observe supercurrent as well as signatures of multiple Andreev scattering. In 2), the Kondo effect was observed when the contacts were in the normal state, and when the contacts were in superconducting states, no supercurrent was observed, but the multiple Andreev scattering was observed. In 3), only standard Coulomb diamonds were observed with a gap at V=0 due to the superconducting gap.

(6) Quantum terahertz (THz) response of carbon nanotube quantum dots

Carbon nanotube quantum dots have energy scale as an artificial atom in a range of THz frequencies. We have observed quantum response of carbon nanotube quantum dots to the THz wave. To increase the coupling efficiency between the THz and nanotubes, the fabrication process to form the antenna structures have been developed.

3. Development of inspection techniques in nanoscale

(1) All-in-one chip THz detector for near field THz imaging (Y. Kawano, and K. Ishibashi)

We have demonstrated higher resolution of THz imaging than that determined by the wave length. This was done by fabricating a small hole with an antenna structure on the GaAs/AlGaAs 2-dimensional electron gas that works as a detector. The probe will be used to study local physical properties of material surface.

(2) Biosensor application carbon nanotube transistor (T. Mori, T. Morimoto, K. Omura, S. Yajima, K. Ishibashi)

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.

(3) Development of three-dimensional medium-energy ion scattering equipments (T. Kobayashi, A. Koyama*⁶)

Three-dimensional medium-energy ion scattering (3D-MEIS) has been developed for crystallographic structure of nanomaterials. The system of 3D-MEIS is that a pulsed He⁺ ion beam with a pulse width of ~2 ns at a medium energy of 100 keV is used for an incident beam, the particles scattered by atoms in a sample are detected using a three-dimensional (position-sensitive and time-resolving) detector. 3D-MEIS provides information on the two-dimensional blocking pattern and flight times of particles scattered from a crystalline sample. Recently we developed a compact 3D-MEIS system with a length of 4 m. In order to examine the performance of the system, we have carried out experiments on single crystal Si samples and epitaxially grown SiGe films on Si substrate. The results reveal that the compact 3D-MEIS system is feasible to analyze the structure (strain) of thin films.

Staff

Head

Dr. Koji ISHIBASHI

Members

Dr. Takao SHIOKAWA

Dr. Shu WATANABE

Dr. Tomohiro YAMAGUCHI

Dr. Yukio KAWANO

Dr. Akira HIDA*¹

Dr. Shao Yun HUANG*¹

Dr. Hiroshi TABATA*¹
Dr. Takahiro MORI*²
Dr. Ryota NEGISHI*²

*1 Special Postdoctoral Researcher *2 Contract Researcher

Visiting Members

Dr. Sohachi IWAI
Mr. Masaru MIHARA
Dr. Takahiro MORIMOTO (JSPS)
Prof. Honqi Xu (Lund Univ. Sweden)
Prof. Bao Ping ZHANG (Xiamen Univ. China)
Dr. Yoshiko ITO
Dr. Yoichi ISHIWATA (Saga Univ.)
Dr. Hideyuki MAKI (Keio Univ.)
Prof. Yuichi OCHIAI (Chiba Univ.)
Prof. Hideki HASEGAWA (Hokkaido Univ.)

Trainees

Mr. Keiichi SHIMODA (Nagaoka Univ. Technol)
Ms. Maki SHIMIZU (Tokyo Univ. Sci.)
Mr. Nobuyuki YAMAZAKI (Chiba Univ.)
Mr. Mitsutoshi MAKIHATA (Tokyo Inst. Technol.)
Ms. Seiko TOYOKAWA (Tokyo Univ. Sci.)
Mr. Syunsuke SATO (Tokyo Univ. Sci.)
Mr. Hiroshi YOSHIDA (Tokyo Univ. Sci.)
Mr. Masahiro ASAKURA (Tokyo Univ. Sci.)
Mr. Masayuki SUGAHARA (Univ. Tokyo)
Mr. Kazuo OMURA (Tokyo Univ. Sci.)
Mr. Fuminori KUTSUNA (Tokyo Univ. Sci.)
Mr. Manabu OIE (Tokyo Univ. Sci.)
Mr. Takayuki SUZUKI (Tokyo Univ. Sci.)

Head

石橋 幸治 Koji Ishibashi

Members

塩川 高雄 Takao Shiokawa
小林 峰 Takane Kobayashi
渡部 秀 Shu Watanabe
平山 秀樹 Hideki Hirayama
山口 智弘 Tomohiro Yamaguchi
河野 行雄 Yukio Kawano
森 貴洋 Takahiro Mori

Special Postdoctoral Researchers

飛田 聡 Akira Hida
黄 少云 Shaoyun Huang
田畑 博史 Hiroshi Tabata
根岸 良太 Ryota Negishi
森本 崇宏 Takahiro Morimoto

Visiting Members

菅野 卓雄 Takuo Sugano
蒲生 健次 Kenji Gamo
長谷川 英機 Hideki Hasegawa
高柳 英明 Hideaki Takayanagi
落合 勇一 Yuichi Ochiai
三原 勝 Masaru Mihara
岩井 莊八 Sohachi Iwai
伊東 芳子 Yoshiko Itoh
Lee Chow
石渡 洋一 Yoichi Ishiwata
牧 英之 Hideyuki Maki
森山 悟士 Satoshi Moriyama
張 保平 Bao-ping Zhang

Trainees

霜田 恵一 Keiichi Shimoda
清水 麻希 Maki Shimizu
西野 貴幸 Takayuki Nishino
申 成權 Sung-Kwon Shin
Jean Raniog Tarun
浅倉 理啓 Masahiro Asakura
大村 一夫 Kazuo Omura
菅原 真之 Masayuki Sugawara
忽那 史徳 Fuminori Kutsuna
大家 学 Manabu Oie
鈴木 喬之 Takayuki Suzuki
上野 修平 Shuhei Ueno
小堺 達也 Tatsuya Kozakai
矢嶋 翔太 Shota Yajima
渋下 要 Kaname Shibushita
烏 彰孝 Akitaka Karasu
金 孝媛 Hyowon Kim
Jungwoo Song

Assistant and Part-timer

浅野 頼子 Yoriko Asano
豊川 聖子 Seiko Toyokawa