

NTT 物性科学基礎研究所の研究活動

平成 19(2007)年度

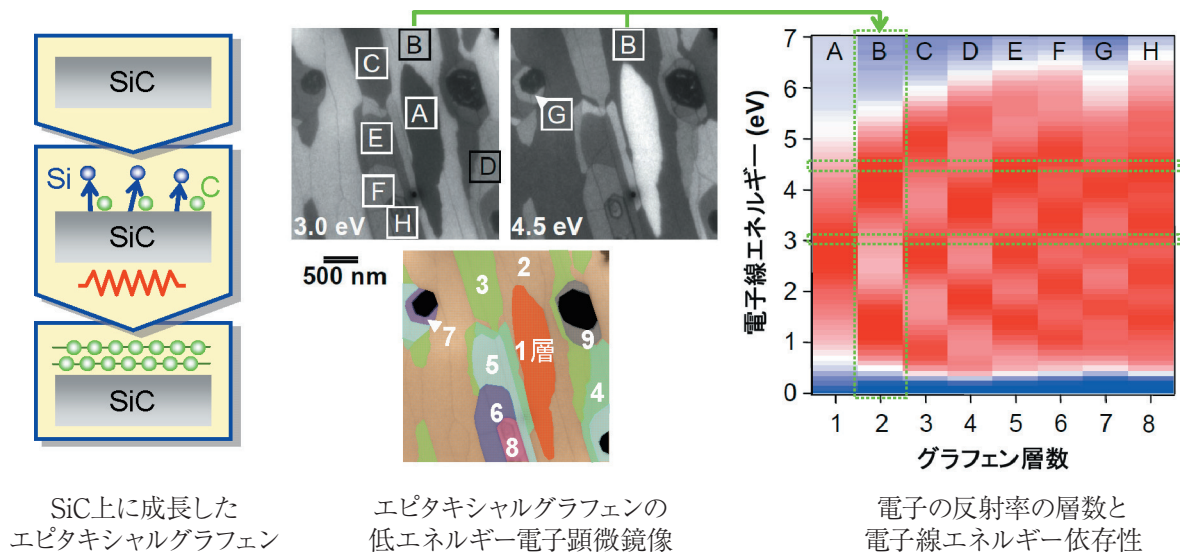
Volume 18

2008 年 7 月

日本電信電話株式会社
物性科学基礎研究所

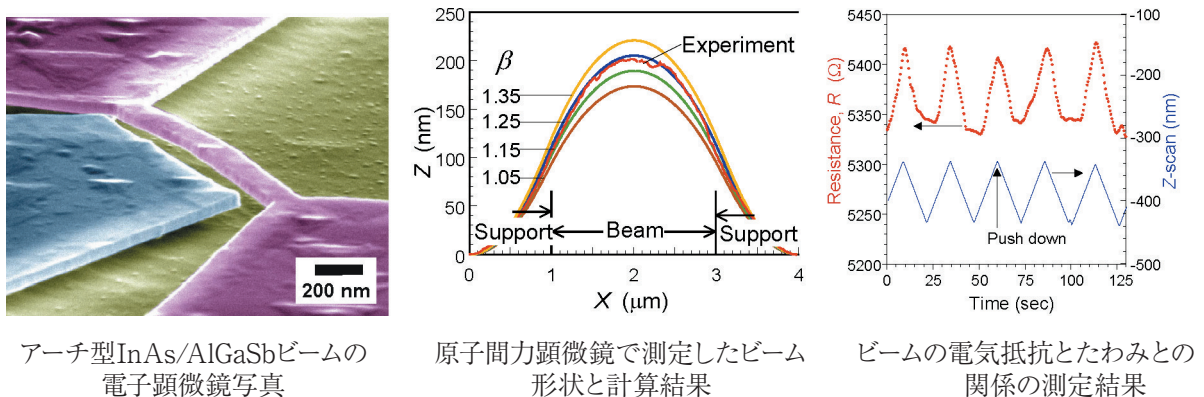
NTT Basic Research Laboratories

<http://www.brl.ntt.co.jp/>



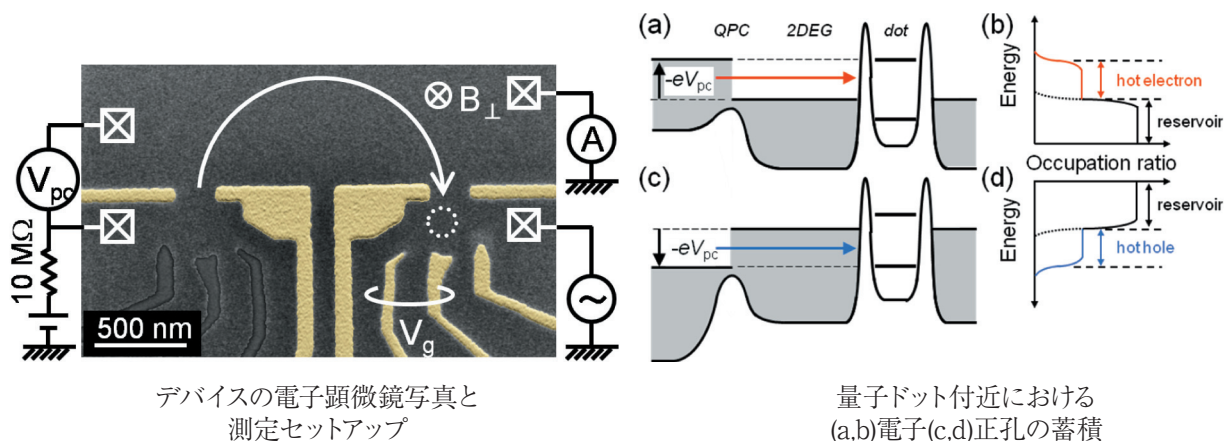
SiC 上に成長したグラフェンの層数評価

グラフェンが、次世代エレクトロニクス材料として注目を集めている。SiC基板を加熱して成長したエピタキシャルグラフェンは、容易にスケールアップでき、デバイス集積に適している。そこで我々は、所望の層数のグラフェンを大面積に成長する手法の実現に不可欠な、エピタキシャルグラフェンの層数を成長後その場でミクロに評価する技術を確認した。グラフェン層数は、低エネルギー電子顕微鏡を用いて測定した電子の反射率に現れる量子的な振動から決定する (19ページ)。



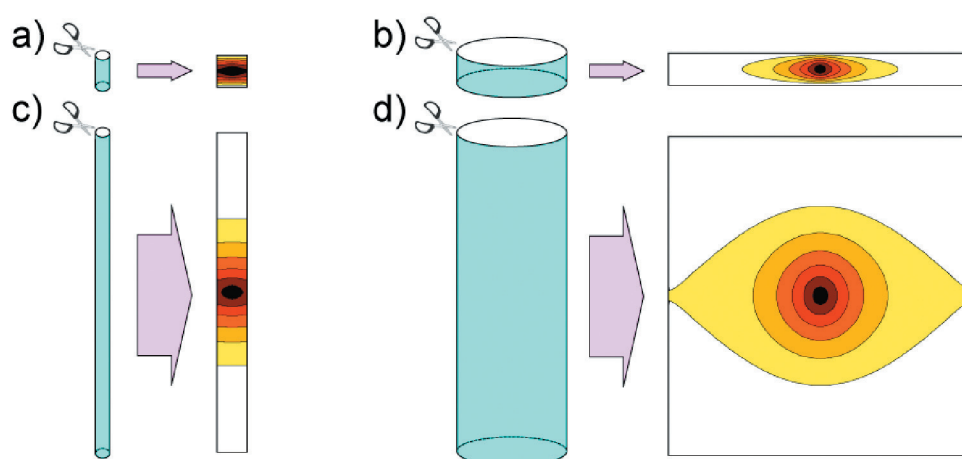
InAs/AlGaSb ヘテロ構造ナノビームの圧電効果の影響

超高感度センサなどとして期待されている、化合物半導体を用いたナノ電気機械システムにおいて、その重要な特性である圧電抵抗 (メカニカルな歪みによる電気抵抗変化) を測定・解析した。得られたInAs/AlGaSbヘテロ構造ナノ・ビーム (梁) の圧電抵抗は、ビームの形状 (アーチ型か平坦か) に大きく依存し、これは圧電効果を考慮した圧電抵抗の計算結果により説明可能であることが分かった。これにより、薄膜ヘテロ構造のメカニカル特性における圧電効果の重要性が明らかになった (26ページ)。



量子ドットを用いた非平衡キャリアのエネルギー分布測定

半導体量子ドットは、電子をナノメートルサイズの極微な領域に閉じ込めることができるため、その内部で電子がとることができるエネルギーは原子のように量子化している。この量子化されたエネルギー準位はゲート電圧で容易に制御することができるため、量子ドットは電子のエネルギー分析器（スペクトロメータ）として用いることができる。今回我々は、量子ドットを用いて量子細線から出射したバリステックかつ非平衡な電子・正孔のエネルギーを分析した。量子細線としてはゲート電極で形成された量子ポイントコンタクトを用い、電圧を印加することで熱い電子または正孔を出射させた。出射した電流は、垂直磁場によるフォーカシング法を用いて再度集束させ、そのエネルギーを分析した。ちょうど量子ドットのエネルギー準位に一致したエネルギーを持つ電子・正孔が入射すると、それらは量子ドットを透過することができるため、電流として検出された（31ページ）。



4種類のアノチューブ構造の展開図上に描いた励起子波動関数の分布

人為構造における励起子のトポロジー

アノチューブ構造中の励起子が、アノチューブのサイズに依存して多彩なトポロジー状態を取ることを理論計算により示した。この現象は励起子自身が持つ特徴的なサイズと構造のサイズとの関係によって、境界条件が励起子に及ぼす影響が異なることによるものである。さらに、チューブサイズを固定してもチューブ内外を埋める障壁材料の誘電率制御によって励起子波動関数のトポロジー転移が実現できることも示した（35ページ）。

ごあいさつ



日頃より、私ども NTT 物性科学基礎研究所の研究活動に多大なご支援・ご関心をお寄せ頂きまして、誠にありがとうございます。

物性科学基礎研究所では、中長期的 NTT 事業への貢献のみならず、普遍的知見の獲得などの学術的貢献もミッションとして、機能物質科学、量子電子物性、量子光物性という 3 つの研究分野において、研究活動を行っております。

研究を進めるうえで、グローバルな競争力の強化が重要と考え、その施策の 1 つとして NTT の他研究所や、日本のみならず諸外国の大学や研究機関との幅広い連携、共同研究を積極的に進めております。また、『サイエ

ンスプラザ』や量子物理に関する『国際会議』を開催し、私どもの活動をご理解頂くとともに、それに対する忌憚のないご意見を今後の活動に活かすよう努めております。さらに、若手研究者の育成も研究所としてのミッションの 1 つと考え、世界中の一流教授・研究者を講師とした『BRL スクール』を隔年で開催しており、2007 年 11 月に実施したスクールでは、世界 12 カ国の大学・研究機関から 35 名の博士課程の学生、若手研究者が参加しました。この活動が、若手研究者にとって研究活動への大きな刺激となり、将来の研究者育成に貢献できることを期待しております。

これらの活動を通じて、開かれた研究所としての使命を果たすとともに、本研究所での成果を広く世界に発信するよう努力を致す所存でございますので、今後とも一層のご指導・ご鞭撻を賜りますようお願い申し上げます。

2008 年 7 月

湯本 潤司

NTT 物性科学基礎研究所
所長 湯本 潤司

目 次

ページ

物性科学基礎研究所 所員一覧.....	1
---------------------	---

I. 研究紹介

◆ 各研究部の研究概要	11
◆ 機能物質科学研究部の研究紹介	12
◆ AlN 遠紫外 LED の負の結晶場分裂エネルギーによる偏光特性	
◆ イオン注入と高温高压アニールによるダイヤモンドへのドーピング	
◆ ダイヤモンド FET の擬二次元正孔チャンネル	
◆ GaN/InGaN ダブルヘテロ接合バイポーラトランジスタの高温動作特性	
◆ CVD 成長温度でのカーボンナノチューブの Raman スペクトル測定と カイラリティ帰属	
◆ カーボンナノチューブの低エネルギー照射損傷	
◆ 走査トンネル電子・近接場光学顕微鏡の開発と高効率・高分解能チップの設計	
◆ SiC 上に成長したグラフェンの層数評価	
◆ 原子間力顕微鏡による膜タンパク質の弾性測定	
◆ 二次元空間に閉じ込められた色素分子間の FRET 効率の定量解析	
◆ 膜に埋め込んだ受容体タンパク質の一分子観察	
◆ 量子電子物性研究部の研究紹介	23
◆ Si 細線 MOSFET を用いた単電子ラチェットによるナノアンペア電荷ポンプ	
◆ シリコン・ナノトランジスタを用いた赤外線検出	
◆ 電子系が引き起こす機械的摩擦の検出	
◆ InAs/AlGaSb ヘテロ構造ナノビームのピエゾ抵抗への圧電効果の影響	
◆ 核スピンを用いた 2 層量子ホール系における電子スピン状態測定	
◆ 半導体量子井戸における局在状態パーコレーションのイメージング	
◆ 超伝導永久電流アトムチップ	
◆ 複数の磁束量子ビットの選択可能な長距離結合スキーム	
◆ 量子ドットを用いた非平衡キャリアのエネルギー分布測定	
◆ ゲート付き量子井戸の電子と正孔の有効質量の密度依存性の測定	
◆ 量子光物性研究部の研究紹介	33
◆ 200 km の光ファイバ上での量子鍵配送実験	
◆ 偏波無依存化した周波数上方変換型単一光子検出器を用いた差動位相シフト量子鍵 配送のフィールド実験	
◆ 人為構造における励起子のトポロジ	
◆ 通信波長帯単一光子の LiNbO ₃ 導波路による周波数上方変換と高効率・低暗計検出	
◆ InAs ナノワイヤチャンネル電界効果トランジスタ	
◆ 通信波長帯絶対位相制御光周波数コムの高パルスエネルギー閾値化	
◆ 高 Q 化合物半導体フォトリソニック結晶共振器の実現	

- ◆ フォトニック結晶共振器全光ビットメモリ動作
- ◆ 大規模結合共振器におけるスローライト伝播

II. 資料

◆ 第4回 NTT 物性科学基礎研究所スクール	43
◆ サイエンスプラザ 2007	44
◆ 表彰受賞者一覧	45
◆ 報道一覧	47
◆ 報道 (抜粋)	48
◆ 来訪者による講演一覧	52
◆ 学術論文掲載件数、国際会議発表件数および出願特許件数	56
◆ 国際会議招待講演一覧	58

表紙の写真：

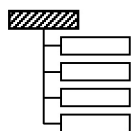
超伝導永久電流アトムチップ

ピストルの弾丸のように激しく飛び回る原子も、百万分の一にまでレーザ冷却すれば、重力によって落下する。このような冷却原子を、超伝導ループを流れる永久電流の安定な磁場で閉じ込めることに成功した。その様子は、原子の影を投影する方法で明らかにした。なお、本研究の一部は、(独) 科学技術振興機構 CREST の援助を受けて行われた。

物性科学基礎研究所 所員一覧

2008 年 3 月 31 日現在
(* は年度途中までの在籍者)

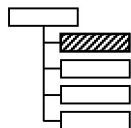
物性科学基礎研究所



所長

湯本 潤司

企画担当



企画担当主幹研究員

牧本 俊樹
横浜 至 *

総括担当主任研究員

後藤 秀樹

研推担当主幹研究員

村木 康二

欧州研究協力担当
主幹研究員

原田 裕一 *

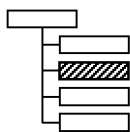
NTT R&D フェロー

山本喜久 (スタンフォード大学、U.S.A.)
高柳英明 (東京理科大学)

NTT リサーチプロフェッサー

清水富士夫 (JST-CREST、電気通信大学)
野村晋太郎 (筑波大学)
井上 恭 (大阪大学)

機能物質科学研究部



部長

鳥光慶一

補佐

尾身博雄

味戸克裕 *

上野祐子 *

富田 勲 *

薄膜材料研究 G

グループリーダー

嘉数 誠

牧本俊樹 *

小林康之

山本秀樹

佐藤寿志

赤坂哲也

熊倉一英

狩元慎一 *

谷保芳孝

植田研二

西川 敦

Tsai, Chiun-Lung

Kubovic, Michal

低次元構造研究 G

グループリーダー

小林慶裕

前田文彦

日比野浩樹

鈴木 哲

登倉明雄

Sychugov, Ilya

分子生体機能研究 G

グループリーダー

鳥光慶一

江幡啓介

古川一暁

住友弘二

河西奈保子

島田明佳

中島 寛

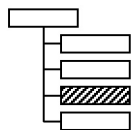
檜村吉晃

後藤東一郎

篠崎陽一

Rundqvist, Jonas *

量子電子物性研究部



部長 **山口浩司**

補佐 小野行徳
唐沢 毅

ナノデバイス研究G

グループリーダー

藤原 聡

影島博之

西口克彦

Khalafalla, Mohammed

ナノ加工研究G

グループリーダー

山口浩司

永瀬雅夫

林 順三

Mahboob, Imran

山崎謙治

岡本 創

Singh, Vijay

山口 徹

小野満恒二

量子固体物性研究G

グループリーダー

藤澤利正

蟹沢 聖

林 稔晶

高品 圭

Grove-Rasmussen, Kasper

佐々木 智

太田 剛

Giudici, Paula *

鈴木恭一

熊田倫雄

Gamez, Gerardo

超伝導量子物理研究G

グループリーダー

仙場浩一

中ノ勇人

田中弘隆

Wang, Ying-Dan

向井哲哉

齊藤志郎

山田義春

狩元慎一

角柳孝輔

スピントロニクス研究G

グループリーダー

赤崎達志

原田裕一

山口真澄

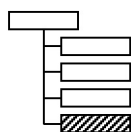
田村浩之

小林俊之 *

関根佳明

羽柴秀臣

量子光物性研究部



部長 **都倉康弘**

補佐 横尾 篤

量子光制御研究G

グループリーダー

都倉康弘

清水 薫

山下 眞

森越文明

橋本大祐

井桁和浩

柴田浩行

本庄利守

Tobiska, Jens *

熊谷雅美

武居弘樹

玉木 潔

量子光デバイス研究G

グループリーダー

中野秀俊

寒川哲臣 *

舘野功太

石澤 淳

西川 正

俵 毅彦

眞田治樹

鎌田英彦

小栗克弥

Zhang, Guoquiang

フォトニックナノ構造研究G

グループリーダー

納富雅也

川西悟基

新家昭彦

Roh, Young-Geun *

倉持栄一

田辺孝純

谷山秀昭

角倉久史

特別研究員



藤澤 利正

昭和 61 年東京工業大学理学部応用物理学科卒業。平成 3 年同大学院総合理工学研究科物理情報工学専攻博士課程修了（工学博士）。同年日本電信電話株式会社（NTT）に入社。以来、集束イオンビーム・電子ビーム露光による半導体微細構造の作製、半導体量子ドットの輸送特性、単一電子ダイナミクスの研究に従事。現在、NTT 物性科学基礎研究所量子電子物性研究部量子固体物性研究グループリーダー。平成 9～10 年デルフト工科大学（オランダ、デルフト）客員研究員。平成 15 年 6 月より、東京工業大学大学院理工学研究科客員助教授（併任）。平成 15 年 10 月サーマーティンウッド賞受賞。平成 17 年 3 月日本学術振興会賞受賞。応用物理学会、日本物理学会。



納富 雅也

昭和 63 年東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻修士課程修了。同年日本電信電話株式会社（NTT）入社、NTT 光エレクトロニクス研究所光素子研究部勤務。平成 7 年から 8 年リンシェーピング大学（スウェーデン）客員研究員。平成 11 年より NTT 物性科学基礎研究所。現在同所量子光物性研究部フォトリックナノ構造研究グループリーダー。入社以来一貫して人工ナノ構造による物質の光学物性制御およびデバイス応用の研究を行う。半導体量子細線、半導体量子箱の研究を経て、現在フォトリック結晶の研究に従事。平成 14 年より東京工業大学連携客員講座助教授。工学博士（東京大学）。2006/2007 IEEE/LEOS Distinguished Lecturer Award 受賞。日本応用物理学会、APS、IEEE/LEOS 会員。



藤原 聡

平成元年東京大学工学部物理工学科卒業。平成 6 年同大学院工学系研究科物理工学専攻博士課程修了。同年日本電信電話株式会社（NTT）に入社、LSI 研究所勤務。平成 8 年に基礎研究所、平成 11 年より物性科学基礎研究所。入社以来、シリコンナノ構造の物性制御とそのデバイス応用、単電子デバイスの研究に従事。現在、NTT 物性科学基礎研究所量子電子物性研究部ナノデバイス研究グループリーダー。平成 15～16 年米国 National Institute of Standards and Technology (NIST、Gaithersburg) 客員研究員。平成 10 年に国際固体素子・材料コンファレンス SSDM'98 Young Researcher Award、平成 11 年に SSDM'99 Paper Award 受賞。平成 15 年および平成 18 年に応用物理学会 JJAP 論文賞受賞。平成 18 年文部科学大臣表彰若手科学者賞受賞。応用物理学会、IEEE 会員。

アドバイザリボード（2007 年度）

氏名	役職 所属
Gerhard Abstreiter	Professor Walter Schottky Institute Germany
Boris L. Altshuler	Professor Department of Physics Columbia University, U.S.A.
Serge Haroche	Professor Département de Physique De l'Ecole Normale Supérieure, France
Mats Jonson	Professor Department of Physics, Göteborg University, Sweden
Anthony J. Leggett	Professor Department of Physics University of Illinois at Urbana-Champaign, U.S.A.
Johan E. Mooij	Professor Kavli Institute of Nanoscience Delft Delft University of Technology, The Netherlands
John F. Ryan	Professor Clarendon Laboratory University of Oxford, U.K.
Klaus von Klitzing	Professor Max-Planck-Institut für Festkörperforschung Germany

招聘教授／客員研究員（2007 年度）

氏名	役職 所属
遊佐 剛	科学技術振興機構 (JST) さきがけ October 05 ～
割澤 伸一 准教授	東京大学大学院 工学系研究科 May 07 – March 08
Dr. Kasper Grove-Rasmussen	University of Copenhagen July 07
古賀 貴亮 准教授	北海道大学大学院 情報科学研究科 November 06 ～
山嵜 明	明治大学 November 06 – March 08
Dr. Alexandre Kemp	科学技術振興機構 (JST) CREST December 06 – March 08
Dr. Hongwu Liu	科学技術振興機構 (JST) SORST February 07 – March 08
Dr. Chandra Ramanujan	University of Oxford April 07
Dr. Takashi Uchida	科学技術振興機構 (JST) CREST April 07 – March 08
Dr. Qiang Zhang	Stanford University June 07 – July 07
Prof. Shmuel Gurvitz	Weizmann Institute July 07 – September 07
Assoc. Prof. Hongxiang Li	Chinese Academy of Sciences August 07 – October 07
Dr. Na Young Kim	Stanford University November 07 – December 07
Dr. Keiko Kato	物質・材料研究機構 (NIMS) December 07 – June 08

海外研修生（2007 年度）

氏名	所属	期間
Simon Perraud	University of Paris 6 / CNRS, France	Oct. 04 – Sep. 07
Christoph Hufnagel	University of Heidelberg, Germany	June 06 – June 07
Michailas Romanovas	Vilnius Gediminas Technical University, Lithuania	Jan. 07 – Aug. 07
Joana Durao	University of Porto, Portugal	Jan. 07 – Aug. 07
Ari Siitonen	University of Kuopio, Finland	Jan. 07 – Aug. 07
Daan Sprunken	University of Twente, The Netherlands	Jan. 07 – Aug. 07
Sylvain Sergent	INSA (Institut National des Sciences Appliquées de Rennes), France	Jan. 07 – Aug. 07
Florian Domengie	INSA (Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse), France	Feb. 07 – Sep. 07
Guillaume Vincent	INSA (Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse), France	Feb. 07 – Sep. 07
Yosia	Nanyang Technological University, Singapore	Apr. 07 – Apr. 08
Marcus Eichfelder	Institut für Halbleiteroptik und Funktionelle Grenzflächen, Germany	June 07 – Oct. 07
Stephane Salib	ESPCI (Ecole Supérieure de Physique et de Chimie Industrielle), France	July 07 – Aug. 07
Akira Matsudaira	University of Illinois at Urbana-Champaign, U.S.A.	May 07 – July 07
Matthieu Delbecq	ESPCI (Ecole Supérieure de Physique et de Chimie Industrielle), France	July 07 – Dec. 07
Charlie Koechlin	ESPCI (Ecole Supérieure de Physique et de Chimie Industrielle), France	July 07 – Dec. 07
Edita Kirpsaite	Kaunas University of Technology, Lithuania	Jan. 08 – Aug. 08
Miron Sadziak	Warsaw University, Poland	Jan. 08 – Aug. 08
John McGurk	Imperial College London, U.K.	Jan. 08 – Aug. 08
Zhenzhong Wang	Chinese Academy of Sciences, R.O.C.	Jan. 08 – Dec. 08
Thibaut Balois	Ecole Normale Supérieure, France	Feb. 08 – July 08
Thomas Panier	Ecole Normale Supérieure, France	Feb. 08 – July 08
Benjamin Miquel	Ecole Normale Supérieure, France	Feb. 08 – July 08
Justin Pinkney	University of Oxford, U.K.	Feb. 08 – Mar. 08
Paul Köcher	University of Oxford, U.K.	Feb. 08 – Mar. 08

国内実習生（2007 年度）

氏名	所属	期間
五十嵐 悠一	東京大学大学院	H19.4 ～ H20.3
伊藤 大介	東北大学大学院	H19.4 ～ H20.3
宇都宮 聖子	東京大学大学院	H19.4 ～ H20.3
浦山 太一	慶応義塾大学大学院	H19.4 ～ H20.3
大岩 顕	東京大学大学院（講師）	H19.4 ～ H20.3
小田 穰	東京大学大学院	H19.4 ～ H20.3
影井 誠一郎	東京理科大学大学院	H19.4 ～ H20.3
梶浦 亮	東京工業大学大学院	H19.4 ～ H20.3
加藤 慶一	東京大学大学院	H19.4 ～ H20.3
金子 嵩之	明治大学大学院	H19.4 ～ H20.3
鎌田 雄仁	東北大学大学院	H19.4 ～ H20.3
楠戸 健一郎	東京大学大学院	H19.4 ～ H20.3
小林 嵩	東北大学大学院	H19.4 ～ H20.3
Jonathan Baugh	東京大学大学院（客員研究員）	H19.4 ～ H19.8
新海 剛	東京工業大学大学院	H19.4 ～ H20.3
田澤 雅也	東京理科大学大学院	H19.4 ～ H20.3
田丸 耕二郎	東京大学大学院	H19.4 ～ H20.3
近森 峻	東京工業大学大学院	H19.4 ～ H20.3
鶴田 尚英	東京理科大学大学院	H19.4 ～ H20.3
十時 詠吾	東京大学大学院	H19.4 ～ H20.3
野中 啓一郎	東京大学大学院	H19.4 ～ H20.3
橋本 卓郎	芝浦工業大学大学院	H19.4 ～ H20.3
日達 研一	東京大学大学院	H19.4 ～ H20.3
増山 博孝	東京理科大学大学院	H19.4 ～ H20.3
山口 貴雄	東海大学大学院	H19.4 ～ H20.3
宮本 瑞琴	湘南工科大学大学院	H19.4 ～ H20.3
藪内 真	慶応義塾大学大学院	H19.4 ～ H20.3
山本 倫久	東京大学大学院（助手）	H19.4 ～ H20.3
鎌田 大	東京工業大学大学院	H19.4 ～ H20.3
能政 広毅	東京工業大学大学院	H19.4 ～ H20.3
市古 雄城	東京理科大学大学院	H19.4 ～ H20.3
鈴木 博之	東京工業大学大学院	H19.4 ～ H20.3

氏名	所属	期間
鯉渕 良太	東京理科大学	H19.5 ～ H20.3
宮本 聡	慶應義塾大学大学院	H19.5 ～ H20.3
木村 啓太	東京大学大学院	H19.5 ～ H20.3
高橋 駿	東京大学大学院	H19.5 ～ H20.3
李 相潤	東京大学大学院	H19.5 ～ H20.3
森下 弘樹	慶應義塾大学大学院	H19.5 ～ H20.3
山本 高行	東京大学大学院	H19.6 ～ H20.3
水野 智行	慶應義塾大学大学院	H19.6 ～ H20.3
尾崎 秦野	東京大学	H19.6 ～ H20.1
中井 康貴	東京大学	H19.6 ～ H20.3
酒井 裕司	東京理科大学	H19.6 ～ H20.3
山谷 憲司	東京理科大学	H19.6 ～ H20.3
宮崎 康晶	慶應義塾大学大学院	H19.6 ～ H20.3
榊本 尚之	東京大学大学院	H19.7 ～ H20.3
岡崎 雄馬	東北大学大学院	H19.8 ～ H20.3
朱 雷	東京大学大学院	H19.8 ～ H19.8
山戸 一郎	東京大学	H19.8 ～ H19.8
新井田 佳孝	東北大学大学院	H19.8 ～ H20.3
岩井 裕樹	大阪大学大学院	H19.9 ～ H19.9
日比野 訓士	慶應義塾大学大学院	H19.10 ～ H20.3
向縄 嘉律哉	長岡技術科学大学	H19.10 ～ H20.2
山田 都照	慶應義塾大学	H19.11 ～ H20.3
小笠原 良晃	京都大学大学院	H19.11 ～ H19.12
松本 武徳	東海大学大学院	H19.12 ～ H20.2
上野 栄治	東海大学大学院	H19.12 ～ H20.2
佐藤 淳一	東海大学大学院	H19.12 ～ H20.2
Monica Craciun	東京大学大学院（ポスドク）	H19.12 ～ H20.3
Saverio Russo	東京大学大学院（ポスドク）	H19.12 ～ H20.3
高橋 弘史	東京工業大学大学院	H19.12 ～ H20.3
畠腹 幸平	豊橋技術科学大学	H20.1 ～ H20.2
山本 篤史	大阪大学大学院	H20.2 ～ H20.3
和田 章良	東北大学大学院	H20.2 ～ H20.3

I . 研究紹介

各研究部の研究概要

機能物質科学研究部

鳥光慶一

機能物質科学研究部では、半導体などの無機物質から神経関連物質などの有機物質に至るまでの広範囲な物質群をカバーする領域において、新しい機能を有する物質の創製、そしてそれら新物質や生体機能を用いた新しい原理に基づく革新的デバイス創製を中心に、物質科学分野における学術的貢献を目指して研究を進めています。特に、ダイヤモンドデバイス、ナノバイオについては、研究部の重点研究分野として積極的に研究を進めています。

本研究部に所属する研究グループは、物質材料とともに独自の物質制御技術や精密測定技術など通じて互いに有機的に連携されています。これによって、互いの研究領域や手段が融合し、情報流通社会における技術革新をもたらす機能物質の研究が可能となります。ナノバイオでは、2004年10月よりオックスフォード大との共同研究に基づく英国拠点を設立し、領域における研究推進を積極的に進めています。

量子電子物性研究部

山口浩司

量子電子物性研究部(物性部)は、21世紀の情報通信技術に大きな変革をもたらす半導体や超伝導体を用いた固体デバイスの研究を推進しています。特に、高い技術力を誇る薄膜結晶の成長技術やナノメートルスケールの微細加工技術を武器に、これらの材料を用いて作製したナノデバイスの研究に力を入れています。

物性部の5つのグループで進めている研究は、単一電子の正確でダイナミックな制御、低消費電力を実現するナノデバイス、ナノスケール構造体の力学的特性を用いたナノメカニクス素子、半導体や超伝導体のコヒーレント制御、半導体ナノ・ヘテロ構造におけるキャリア相関、アトムチップによる原子操作、電子スピンや核スピンの操作を目指したスピントロニクス、などです。これらの研究を支える最先端のナノリソグラフィ、高品質結晶成長や第一原理計算をはじめとした理論研究についても活発に研究を進めています。

量子光物性研究部

都倉康弘

量子光物性研究部(量光部)は光通信技術や光情報処理技術に大きなブレークスルーをもたらす革新的基盤技術の提案、ならびに、量子光学・光物性分野における学術的貢献を目指して研究を進めています。

量光部のグループでは、ナノ構造における半導体光物性研究をベースにして、極微弱な光の量子状態制御、高強度極短パルス光による新物性探索、二次元フォトリソグラフィによる超小型集積光回路などの研究が行われています。

この1年で、量子もつれ光子対による量子暗号、高品質ナノワイヤの光学特性、および超高Q値フォトリソグラフィ結晶の結合共振器導波路などで進展がみられました。

AlN 遠紫外 LED の負の結晶場分裂エネルギーによる偏光特性

谷保芳孝 嘉数 誠
機能物質科学研究部

窒化アルミニウム(AlN) は、直接遷移型半導体で最大のバンドギャップ6 eVを有することから、波長210 nmで発光する最短波長発光半導体として期待される。我々は、これまでに、世界に先駆け、AlNのp型およびn型ドーピングを実現し、発光ダイオード(LED) の動作に成功した。今回、AlN LEDの発光機構を明らかにするため、その放射特性を評価した。

アンドープAlN発光層をn型SiドーパAlN層とp型MgドーパAlN層で挟んだLED構造をSiC(0001) 基板上に有機金属気相成長法により成長した。図1に、AlN LEDの発光スペクトルの放射角度依存性を示す。放射角度 θ は、デバイス表面方向であるAlNのc軸[0001]方位から検出方向へのなす角度とした。放射角度を増加すると、波長210 nmのAlNのバンド端発光強度は増加した。この理由を調べるため、図2に示すように、バンド端発光強度と放射角度の関係の解析をした。図中の実線は各偏光度Pにおける計算値である。P = 1は光の電場ベクトルEがc軸と平行に偏光している場合($E//c$)、P = -1は光の電場ベクトルEがc軸と垂直に偏光している場合($E \perp c$)、P = 0は無偏光の場合を示している。測定値は P = 0.995の計算値と良く一致し、バンド端発光は $E//c$ に強く偏光していることが分かる。これにより、AlNでは、c軸方向への発光は弱く、c軸と垂直方向への発光は強くなるため、図1で観測したように、c軸からの放射角度が増加すると、発光強度が増加することが分かった[1]。

この強い偏光性の起源は、AlNのバンド構造により説明できる。AlNは強いイオン性により結晶格子が大きくゆがんでいる。このため、結晶場分裂エネルギーが負となり、価電子帯の最上端には、 Γ_{7V} バンドが位置する。この価電子帯 Γ_{7V} と伝導帯 Γ_{7C} 間の光学遷移選択則は、 $E//c$ は許容、 $E \perp c$ はほぼ禁制となるため、バンド端発光は $E//c$ に強く偏光する。AlNの結晶場分裂エネルギー $\Delta_{CRY} = -230$ meVとスピン軌道相互作用エネルギー $\Delta_{SO} = 20$ meVから $E//c$ と $E \perp c$ 偏光の光学遷移確率を計算して偏光度を求めると0.997であり、上記の値と良く一致した。このように、我々は、負の結晶場分裂エネルギーにより、AlNからの発光は強く偏光していることを明らかにした。

本研究の一部は科学研究費補助金若手研究(A) (No.19686003) の援助によるものである。

[1] Y. Taniyasu, M. Kasu, and T. Makimoto, Appl. Phys. Lett. **90** (2007) 261911.

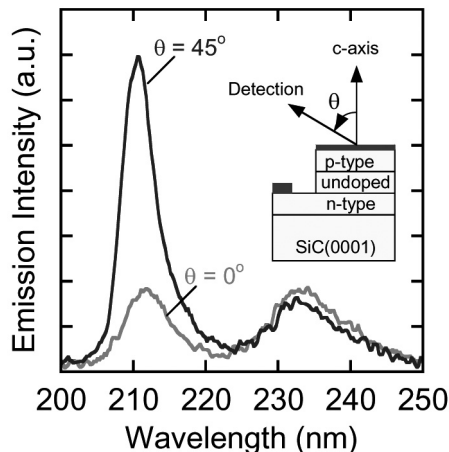


図1 AlN発光ダイオードの放射特性

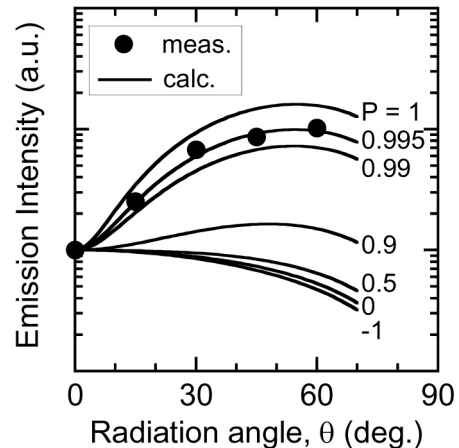


図2 発光強度と放射角度の関係

イオン注入と高温高压アニールによるダイヤモンドへのドーピング

植田研二 嘉数 誠
機能物質科学研究部

イオン注入は半導体のドーピング法として幅広く用いられているが、高エネルギープロセスである為、イオン注入時に結晶に大きな損傷が生じるという問題がある。SiやGaAsの場合、この損傷は、真空アニール等の熱アニールにより容易に回復できる。しかし、ダイヤモンドの場合、イオン注入時の損傷は熱アニールでは回復せず、ドーパントが十分に活性化しない。これは、ダイヤモンドが低圧下では準安定相(図1)であり、熱アニール時やイオン注入時に安定相であるグラファイトに変化するからである。そこで我々は、イオン注入時の損傷回復を、ダイヤモンド相が安定である高压下でアニールすることにより試みた[1, 2]。

マイクロ波プラズマCVD法により、(100)ダイヤモンドIb基板上にホモエピタキシャルダイヤモンド薄膜を1～3.5 μm 成長した。その後、ホモエピタキシャル薄膜にホウ素(B) イオンを加速電圧60 keV、ドーズ量 $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ の条件で注入し、～7 GPaの圧力下でアニールを行い、ドーパントの活性化を行った。また、同条件でB注入した薄膜の熱アニール(真空アニール) も行い、両者の特性の比較を行った。

図2に、ホール測定から得られたBのドーピング効率(活性化したドーパントの濃度に対するドーピング濃度の比率) のアニール温度依存性を示す。高温高压アニールを用いた場合、Bのドーピング効率はアニール温度の上昇とともに指数関数的に増加し、1400 $^{\circ}\text{C}$ で7.1%となった。一方、熱アニール(真空アニール) を用いた場合、ドーピング効率は線形に増加し、1400 $^{\circ}\text{C}$ で0.73%となった。このように、高温高压アニールを用いた場合、従来手法より10倍高いドーピング効率が得られた。また、室温移動度は $632 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ が得られたが、この値はイオン注入法により作製されたBドープダイヤモンド薄膜で最高値である。これらの結果は、高温高压アニールがイオン注入したドーパントの活性化に非常に有効であることを示している。

なお、この研究の一部は総務省SCOPE「ダイヤモンド高周波電力デバイス」プロジェクトの委託で行われた。

[1] K. Ueda, M. Kasu, A. Tallaire, and T. Makimoto, *Diamond Relat. Mater.* **15** (2006) 1789.

[2] K. Ueda, M. Kasu, and T. Makimoto, *Appl. Phys. Lett.* **90** (2007) 122102.

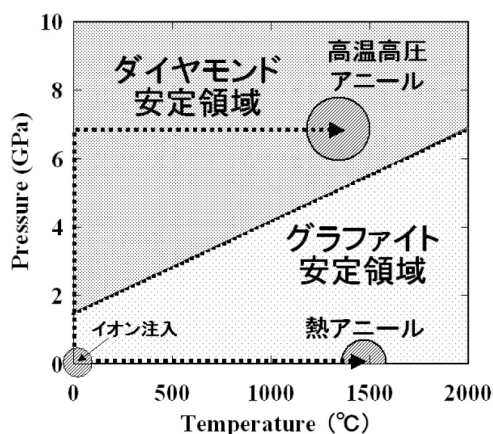


図1 炭素の相図における高温高压アニールと熱アニール条件の比較

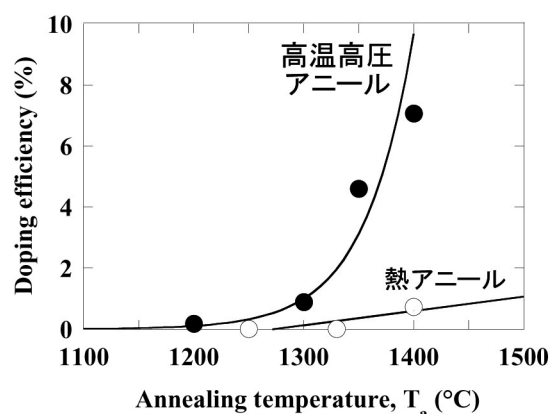


図2 Bのドーピング効率のアニール手法による比較

ダイヤモンド FET の擬二次元正孔チャンネル

嘉数 誠 植田研二
機能物質科学研究部

ダイヤモンドは、半導体の中で最も優れた高周波電力デバイス特性を示すことが予想されている。我々は、ゲート長 $0.1\ \mu\text{m}$ のFETの高周波小信号特性から電流利得遮断周波数(遷移周波数 f_T)として45 GHz、電力利得遮断周波数(最大発振周波数 f_{MAX})として120 GHzという高い値を得ている。また高周波大信号特性測定(1 GHz) から最大出力電力密度 P_{OUT} として2.1 W/mmを得ている。しかしこのFETで用いられている水素終端のp型ドーピング機構やダイヤモンドFETの動作原理は分かっていなかった。そこで高周波特性測定結果を解析し、それらの解明を試みた。

図1は、Sパラメータ測定結果から求めたゲート容量 C_{GS} 、相互コンダクタンス g_m のゲート電圧 V_{GS} 依存性である[1]。 V_{GS} が $-0.5 \sim -2.0\ \text{V}$ の範囲で、 C_{GS} が一定になることが分かった。この特性は、ゲート金属と二次元正孔チャンネルとの間に、正孔に対するエネルギー障壁(界面層)が存在することを示している。ゲート電圧に対して界面層容量は一定だからである。これらの特性から、図2のようなダイヤモンドFETのバンドダイヤグラムが導かれた。実際のデバイス作製プロセスでは、Alゲート金属は水素終端ダイヤモンドに直接蒸着しているが、デバイスはMISFET的な振る舞いをするということが分かった。

図1から一定になる C_{GS} 値は $0.037\ \text{pF}$ であり、ゲート面積当り $0.74\ \mu\text{F}/\text{cm}^2$ になる。この値からダイヤモンド、 Al_2O_3 の比誘電率を仮定し、界面層の厚さを見積もると $7 \sim 10\ \text{nm}$ になった。断面TEM観察を行ったところ、厚さ $7 \sim 10\ \text{nm}$ の界面層がAlゲート金属と水素終端ダイヤモンドの間に自然形成していることを確認し、我々の測定結果を裏付けることができた[2]。

本研究の一部は総務省SCOPE「ダイヤモンド高周波電力デバイス」プロジェクトによるものである。

[1] M. Kasu, et al., Appl. Phys. Lett. **90** (2007) 043509.

[2] M. Kasu, et al., Diamond and Relat. Mater. **17** (2008) in press.

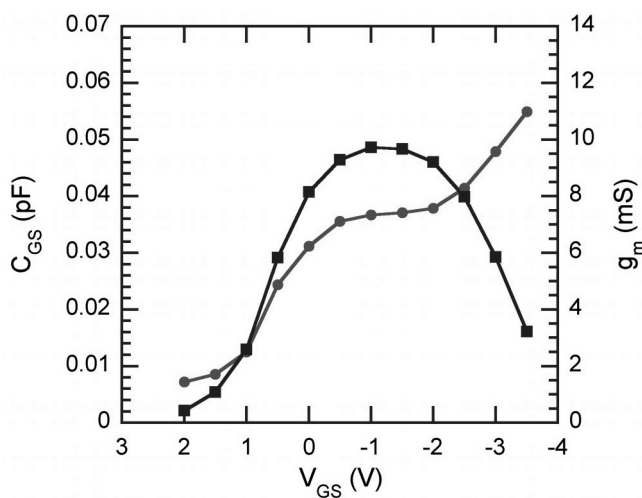


図1 ダイヤモンドFETのゲート容量と相互コンダクタンスのゲート電圧依存性

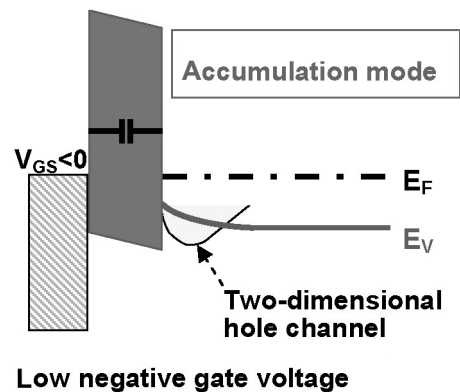


図2 ダイヤモンドFETのバンドダイヤグラム

GaN/InGaN ダブルヘテロ接合バイポーラトランジスタの高温動作特性

西川 敦 熊倉一英 牧本俊樹
機能物質科学研究部

窒化物半導体を用いた電子デバイスはワイドギャップ材料の特性により、従来のGaAsやSiを用いたデバイスと比較して、高温・高耐圧における動作が期待される。我々はこれまでnpn型GaN/InGaNダブルヘテロ接合バイポーラトランジスタ(DHBT)を作製し、室温において2000を超える高い電流利得と 270 kW/cm^2 という窒化物半導体電子デバイスとして最大の電力密度動作を示してきた[1, 2]。今回、この素子の高温動作特性を調べるために、室温から 300°C までの電流-電圧特性の温度依存性の測定を行った[3]。

測定した試料は有機金属気相成長法を用いて、SiC基板上にAlNバッファ層、n-GaNサブコレクタ層($1 \mu\text{m}$)、n-GaNコレクタ層(500 nm)、組成傾斜InGaN層(30 nm)、p-InGaNベース層(100 nm)、n-GaNエミッタ層(40 nm)を積層した。p-InGaNベース層のIn組成は7%であり、エミッタ電極サイズは $50 \times 30 \mu\text{m}^2$ とした。

図1にエミッタ接地電流-電圧特性を示す。ベース電流ステップは $50 \mu\text{A/step}$ である。温度上昇により電流利得は減少するが、図1に示すように 300°C においても最大電流利得が308と高温においても高い値が得られることが分かった。最大電流密度は 5.5 kA/cm^2 と高く、大電流動作が期待できる。図2に最大電流利得の温度依存性を示す。最大電流利得は温度上昇により、活性化エネルギーを 0.13 eV とする指数関数的に減少することが分かった。温度上昇による電流利得の減少の要因がベース層からエミッタ層へのホールの逆方向注入電流であるとする、活性化エネルギーが価電子帯バンドオフセットの値 0.06 eV となるが、今回得られた値はこの値よりも大きく、p型層のホールキャリアの活性化エネルギー(0.12 eV)とほぼ等しいことから、窒化物半導体HBTにおける電流利得減少はベース層のホール濃度が温度上昇により増加し、ベースにおける再結合電流が増加することが原因であることが示された。

- [1] T. Makimoto, K. Kumakura, and N. Kobayashi, Appl. Phys. Lett. **83** (2003) 1035.
 [2] T. Makimoto, Y. Yamauchi, and K. Kumakura, Appl. Phys. Lett. **83** (2004) 1964.
 [3] A. Nishikawa, K. Kumakura, and T. Makimoto, Appl. Phys. Lett. **91** (2007) 133514.

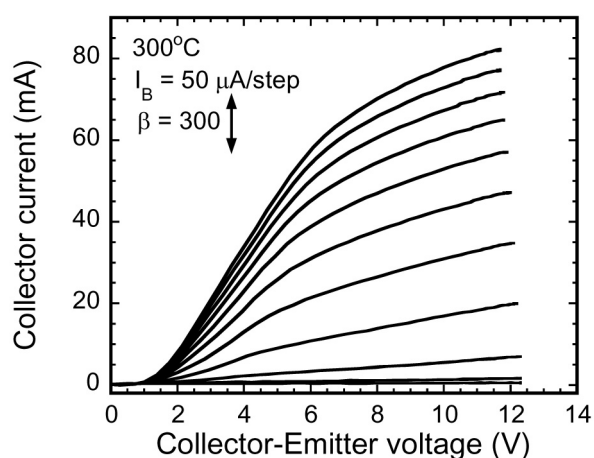


図1 エミッタ接地電流-電圧特性

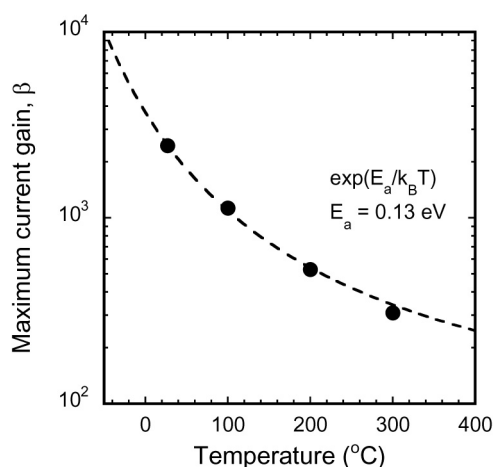


図2 最大電流利得の温度依存性

CVD 成長温度でのカーボンナノチューブの Raman スペクトル測定とカイラリティ帰属

内田貴司 小林慶裕
機能物質科学研究部

カーボンナノチューブ(CNT)の材料としての面白さは、グラフェンシートの巻き方すなわちカイラリティに依存して電子状態が金属的にも半導体的にもなり得ることである。CNTデバイス実用化には、特定のカイラリティを持つCNTの合成が必須である。これまで我々は、カイラリティ作り分けを目的として、成長過程のその場Raman観察によるCNT成長機構の解析を進めてきた。Ramanスペクトルは物質の振動状態を観察するため温度に敏感である。数百℃の成長温度において、その場Raman観察による成長機構の詳細な解析を行うためには、CNTのRamanスペクトルにおける温度効果を十分に理解しなければならない。

図1はCVD成長後のCNT試料の原子間力顕微鏡像である。CNTは熱酸化Si基板上に成長している。この試料ではそれぞれのCNTがほぼ孤立した状態にあることが分かる。図2に、室温における光学遷移エネルギーとradial breathingモード(RBM)波数との関係をCNTのカイラリティごとに示すKatauraプロットと、室温とCVD成長温度(720℃)において観察されたRamanスペクトルのRBM領域を示す。室温におけるスペクトルは、Katauraプロットとの対応により図2(b)のようにカイラリティが帰属できる。一般的に、Ramanスペクトルでは温度上昇に伴い、ピーク波数の低波数シフトやピーク強度の減少などが観測される。本研究の場合も、CVD成長温度では、室温のスペクトルに比べてピーク波数が低波数側にシフトしている。一方、ピーク強度については、210 cm⁻¹付近のピークのように、温度上昇とともに増大するものも観測される。これは、光学遷移エネルギーが温度上昇とともに減少し、共鳴条件が変化したためと考えられる。すなわち図2(a)のように、Katauraプロット中の各点は温度上昇とともに低波数側・低エネルギー側にシフトすることが分かる。この結果から、CVD成長温度で顕著に観察されるピークについても図2(b)のようにカイラリティ帰属が可能となった[1]。

本研究は、その場Raman観察によるカイラリティを識別した成長機構の解析に寄与するものである。今後さらに解析を進め、成長機構を解明しカイラリティ制御成長を実現する。

[1] T. Uchida, et al., Appl. Surf. Sci., in press.

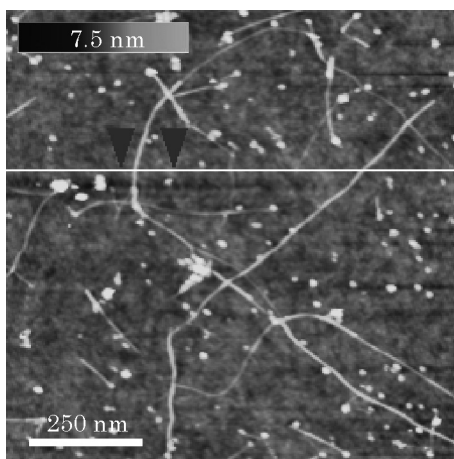


図1 CVD成長したCNT試料表面の原子間力顕微鏡像

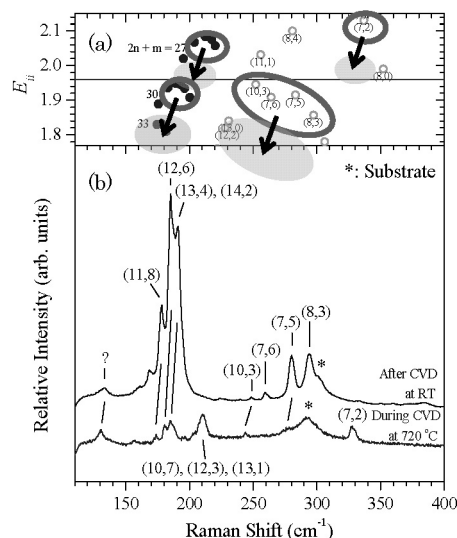


図2 (a) Katauraプロット、(b) 室温とCVD成長温度におけるRamanスペクトルとカイラリティ帰属

カーボンナノチューブの低エネルギー照射損傷

鈴木 哲 小林慶裕
機能物質科学研究部

カーボンナノチューブは、ナノメートルオーダーの微細な径を有し、良好な電氣的、化学的、機械的特性を持つことから次世代のナノエレクトロニクス材料として期待されている物質である。これまでに我々は、カーボンナノチューブが低エネルギーの電子や光子の照射により損傷を受けること、適度な損傷によりナノチューブの電気特性が金属的から半導体的、さらに絶縁体的にと大きく変化することを報告してきた[1]。今回我々は、欠陥生成メカニズムや欠陥構造を探索するため、低エネルギー照射によって生成する欠陥の性質を明らかにした。

高エネルギー粒子の照射により発生するノックオン損傷では、弾き出された原子が消失するためアニールしても元の状態に戻ることはない。一方低エネルギー照射損傷は、回復させることができることが大きな特徴の1つである[2]。図1に光子照射前後およびアニール後のナノチューブの呼吸振動のラマンスペクトルを示す。呼吸振動の周波数はナノチューブ径に依存し、細いナノチューブほど高い周波数で振動する。照射後には損傷により一部の太いナノチューブを除いてほぼスペクトルが消失するが、アニールによって強度が回復することが分かる。この結果は、低エネルギー照射損傷の場合、欠陥生成に伴い炭素原子数は保存していることを示している。さらに、損傷や回復はナノチューブ径に強く依存し、細いナノチューブほど損傷を受けやすく(図1)、回復もしにくいこと、損傷の回復する温度は非常に低く、室温あるいはそれ以下の温度でも回復が起こることが明らかとなった。また、損傷の回復過程を電気伝導度を用いて観測することにより、欠陥修復の活性化エネルギーは約1 eVと求められた(ただし直径に依存する) [3]。一方、分光した真空紫外線の照射実験から、欠陥生成に必要なエネルギーは約6 eVであることが分かった。欠陥の生成、修復のエネルギーダイアグラムは図2のようにまとめられる。今後は欠陥構造の決定と欠陥エンジニアリングによるナノチューブデバイスの制御を図る。

[1] A. Vijayaraghavan, et al., Nano Lett. **5** (2005) 1575.

[2] S. Suzuki and Y. Kobayashi, Chem. Phys. Lett. **430** (2006) 370.

[3] S. Suzuki and Y. Kobayashi, J. Phys. Chem. C **111** (2007) 4524.

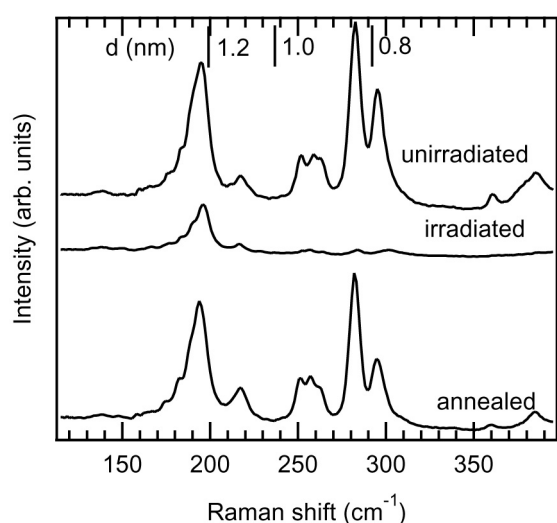


図1 照射前後、およびアニール後のナノチューブのラマンスペクトル

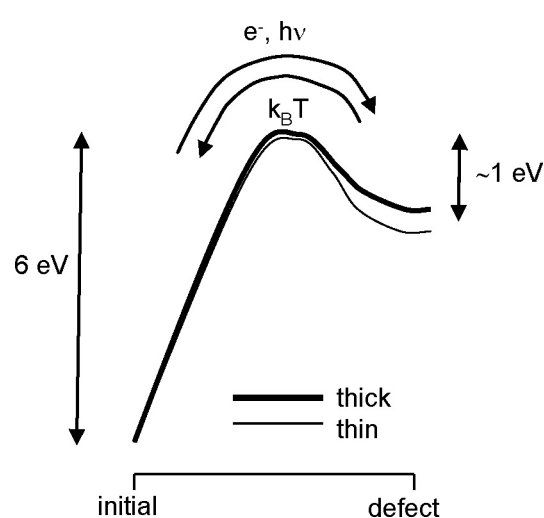


図2 欠陥生成、修復のエネルギーダイアグラム

走査トンネル電子・近接場光学顕微鏡の開発と 高効率・高分解能チップの設計

Ilya Sychugov 尾身博雄
機能物質科学研究部

ナノ構造の光学的、電気的特性はナノ構造からの発光や電流をプローブすることにより評価することができる。一般に、光の回折限界(約1 μm)を超える空間分解能でナノ領域をプローブするためには、近接場型の電磁相互作用が必要となる。近接場光学顕微鏡(SNOM)はこのような近接場の分光応用に対して光による励起と集光を同時に可能とするが、この装置は光ファイバをアパチャーとして利用しているため電流の測定には不向きである。一方、原子分解能を持つ走査トンネル電子顕微鏡(STM)はトンネル電流により材料を発光させることができる。したがって、ナノスケールで電気的かつ光学的なプローブを実現するためには、これらの2つの顕微鏡の機能を兼ね備えた走査型のチップを設計する必要がある(図1)。

我々はチップの形状(図2の D 、 H 、 L 、 θ_1 、 θ_2)がその性能に及ぼす効果を評価するために、有限要素法(FEM)によりチップの透過率を様々な動作領域に対してシミュレートした。その結果、SNOM励起モードに対するチップの透過率はチップの形状(θ_1 と θ_2)に大きく依存していることが分かった。図2に見られるように、約2桁に及ぶ強度変調が励起光による干渉の結果としてチップ内に発生している。さらに、チップを覆うように金属の遮蔽膜を設け、その開口部の大きさが光の集光効率に及ぼす効果をSTM発光モードに対してシミュレートした。これらのシミュレーションに基づき集光効率と空間分解能(開口窓の大きさ)の相関からチップの形状を最適化することができることが分かった[1]。

我々はナノ構造(量子井戸、量子ドットなど)の光学的かつ電子的な特性を高分解能で同時評価することを目指し、本装置の開発を進めている。

[1] I. Sychugov, H. Omi, T. Murashita, and Y. Kobayashi, Appl. Surf. Sci., in press.

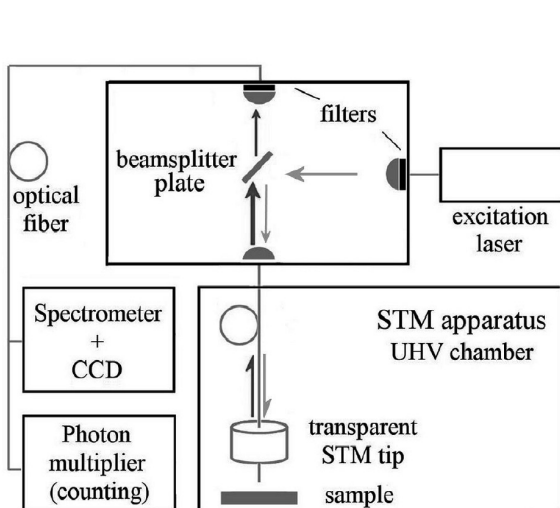


図1 装置図

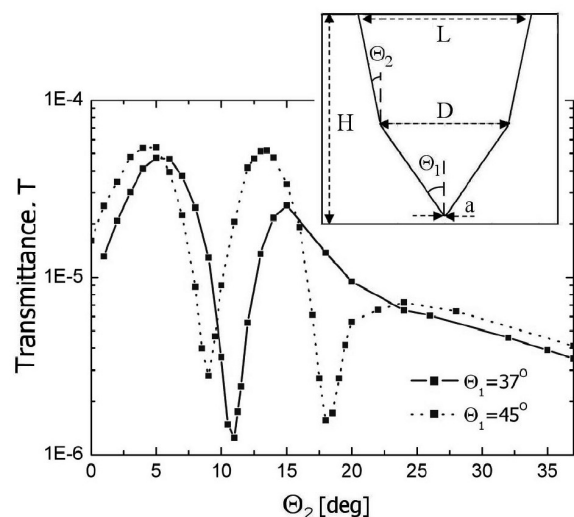


図2 チップの透過度の計算結果

SiC上に成長したグラフェンの層数評価

日比野浩樹¹ 影島博之²¹機能物質科学研究部 ²量子電子物性研究部

1~10層程度の極薄グラファイト膜であるグラフェン*が、次世代エレクトロニクス材料として注目を集めている[1]。これまで、グラフェンのデバイス特性は、バルクグラファイトから剥離したグラフェン片[1]とSiC基板を加熱して成長したエピタキシャルグラフェン[2]に対して調べられてきた。エピタキシャルグラフェンはウェハスケールでの成長が可能で、デバイス集積に適している。しかしながら、集積デバイスへの応用には、所望の層数のグラフェンを大面積に成長する必要がある。そこで我々は、この目的の達成に不可欠な、エピタキシャルグラフェンの層数をミクロに評価する技術を確立したので報告する[3]。

SiC上に成長したエピタキシャルグラフェンの層数は、低エネルギー電子顕微鏡(LEEM)を用いて測定した電子の反射率のエネルギー依存性に現れる量子的な振動から決定する。図1は、4H-SiC(0001)基板に成長したグラフェンのLEEM像であり、電子の鏡面反射率をマッピングしたものに对应する。図1から、グラフェンが電子反射率の異なる複数の領域からなり、それらの相対的な強度がエネルギーに依存することが分かる。図2は、図1中のA-H領域の反射率のエネルギー依存性であり、反射率の振動を明瞭に示している。

電子のバンド構造は、バルクグラファイトでは連続的であるが、グラフェンにおいては、その厚さが有限であるため、離散的となる。離散的なエネルギーレベルと電子線のエネルギーが一致すれば、電子は共鳴的にグラフェンを透過するため、反射率が減少する。したがって、グラフェン層数は、反射率のエネルギー依存性に現れるディップの数から直接的に求まる。我々は、タイトバインディング計算および第一原理計算から求めたエネルギーレベルが、反射率のディップの位置を再現することから、この層数評価法が正しいことを明らかにした。LEEMによりグラフェン層数を、成長後その場でミクロに評価する技術は、エピタキシャルグラフェンの成長制御に大いに貢献することが期待される。

本研究は科学研究費補助金基盤研究(B) (No. 19310085) の援助を受けて行われた。

*グラフェンは本来、グラファイトシート一層のことであるが、ここでは1~10層程度の極薄グラファイト膜をグラフェンと総称する。

[1] K. S. Novoselov and A. K. Geim, Nature Materials **6** (2007) 184.

[2] C. Berger, et al., Science **312** (2006) 1191.

[3] H. Hibino, et al., Phys. Rev. B **77** (2008) 075413; H. Hibino, et al., e-J Surf. Sci. Nanotechnol. **6** (2008) 107.

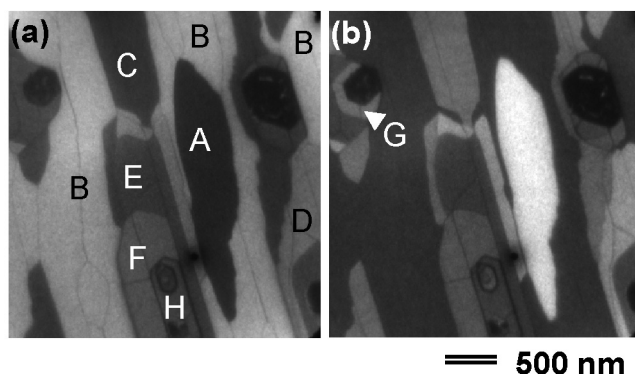


図1 エピタキシャルグラフェンのLEEM像。入射電子線エネルギーは(a) 3.0、(b) 4.5 eV

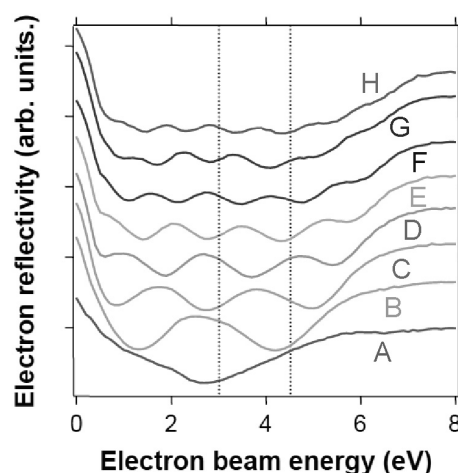


図2 図1中のAからHの領域の電子反射率のエネルギー依存性

原子間力顕微鏡による膜タンパク質の弾性測定

住友弘二¹ Ari M. Siitonen¹ Chandra S. Ramanujan² 篠崎陽一¹

¹機能物質科学研究部 ²オックスフォード大

原子間力顕微鏡(AFM)を用いて、ナノ構造上を架橋した紫膜(光感受性タンパク質であるバクテリオロドプシンを含む)の力学特性を調べた。生体膜の特性を、基板の影響を受けずに測定することに成功した。このような膜タンパク質と脂質膜から構成される生体膜は、単分子バイオセンサをはじめとした多くのデバイス応用が期待される重要なナノ構造であり、その力学特性を知ることは、デバイス構築のために不可欠である。

X線リソグラフィによって作製した100 nmスケールのトレンチ構造上に、紫膜をKCl緩衝溶液中で吸着させて、架橋構造を形成した。AFMを用いたイメージングでその場所を特定し、架橋部分において力-変位曲線を測定し、紫膜の弾性を評価した。図には、弾性測定を行う(a)前と(b)後の、架橋紫膜のAFM像を示す。また、この時得られた力-変位曲線を(c)に示す。測定前後において、紫膜がテラス上に吸着してナントレンチを架橋した状態を維持し続けていることが分かる。一方、弾性測定においてAFM探針がつけた痕跡(図(b)中の矢印)が、明確に観察されている。AFM探針が表面に接触した後、力の増加とともに膜は伸張されたわみ、最終的に2 nN付近の力で膜に損傷を与えている。損傷を与えるまでの、力-変位曲線は膜の弾性を直接反映している。テラス上で固定した膜を、AFM探針が押すことで膜が伸張するモデルでこの曲線を計算した。実験で得られた曲線とフィットさせることにより、紫膜のヤング率は 8 ± 1 MPaと見積もられた[1]。

生体膜の力学特性を、AFMを用いて、より自然な状態で定量的に測定できることを示した。架橋した膜の中でタンパク質は、基板に固定されることなく、生体内と同じように機能することが期待される。今後、タンパク質の置かれた環境(溶液条件等)や、外的刺激に応じた特性の変化の解析が期待される。

本研究の一部は、戦略的国際科学技術協力推進事業(JST)の援助を受けて行われた。

[1] Ari M. Siitonen, et al., Appl. Surf. Sci., in press.

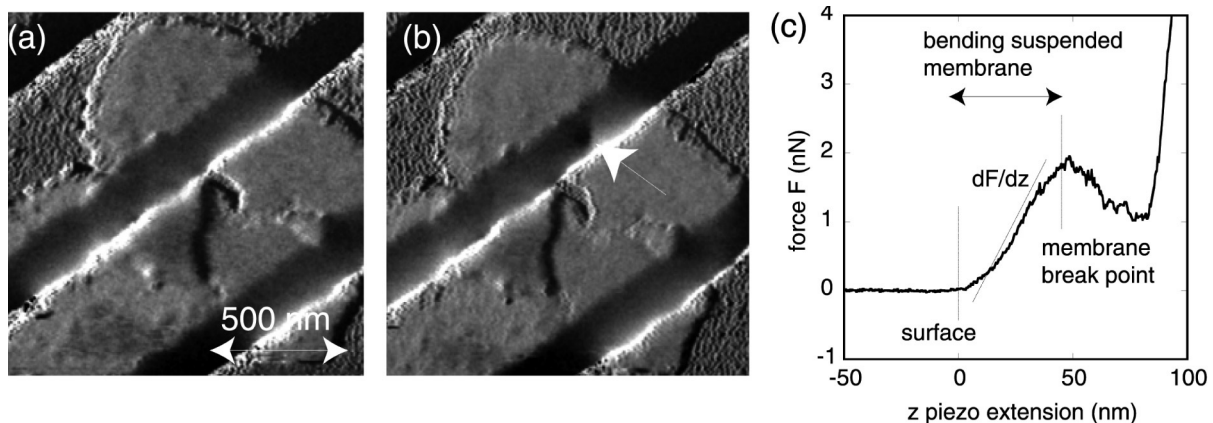


図 トレンチを架橋した紫膜のAFM像：力学測定の前(a)と後(b) (c) その時得られた力-変位曲線

二次元空間に閉じ込められた色素分子間の FRET 効率の定量解析

古川一暁
機能物質科学研究部

細胞膜の基本構造である脂質二分子膜は、固液界面で自己組織化により自発的に形成される。我々はこれまでに、自発展開と呼ばれるこの特長を利用したマイクロ流路素子を提案し、蛍光共鳴エネルギー移動反応(FRET)を用いてその動作を確認してきた [1]。本研究では、この素子をFRET効率の定量的な決定に応用した[2]。

実験には、色素としてNBD(ドナー)、Texas Red(アクセプタ)が結合した脂質分子を1モル%含む卵黄由来脂質分子L- α -PCを用い、幅10 μm の直線パターンの両側から自発展開させた。2つの膜が衝突した直後($t = 0$ とした) から600秒後までの共焦点顕微鏡像を図1Aに示す。観察条件は、NBD: 488 nm励起、505 ~ 525 nm蛍光観察、Texas Red: 543 nm励起、610 nm以上の蛍光観察、である。図1Bには、測定した蛍光強度の幅方向平均を、横軸 x を実測の距離に対応させてプロットした。このとき、衝突地点を $x = 0$ とおいた。

自発展開膜の衝突後、2つの膜は融合され、NBD、Texas Redが側方拡散により二次元空間である膜内で混合される。さらに蛍光強度を幅平均することで、拡散挙動を一次元拡散方程式の解で表せる[2]。また、色素結合脂質の初期濃度はともに1モル%濃度で、側方拡散速度はほぼ等しいと考えると、衝突後の膜内では、2つの色素の濃度の和は各点 x で1モル%となる。これらの合理的な仮定の下、図1Bのデータを解析した結果、ドナー-アクセプタ濃度比とFRET効率との相関の精度よい決定が可能になった(図2)。二次元空間に束縛された複数のドナー、アクセプタが関与するFRET効率を算出するモデルを適用し、本実験結果から求めたフェルスター半径は5.3 nmであり、既知の値とよく一致した[2]。

[1] K. Furukawa, et al., Lab Chip **6** (2006) 1001.

[2] K. Furukawa, et al., Langmuir **24** (2008) 921.

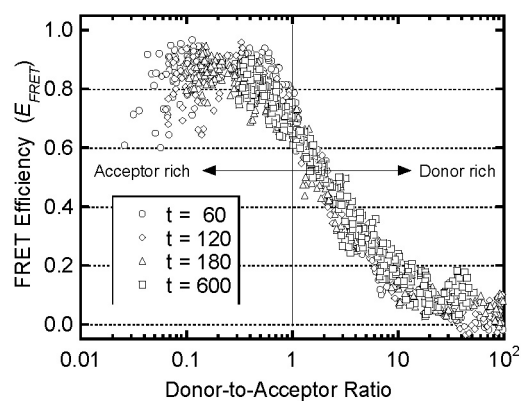
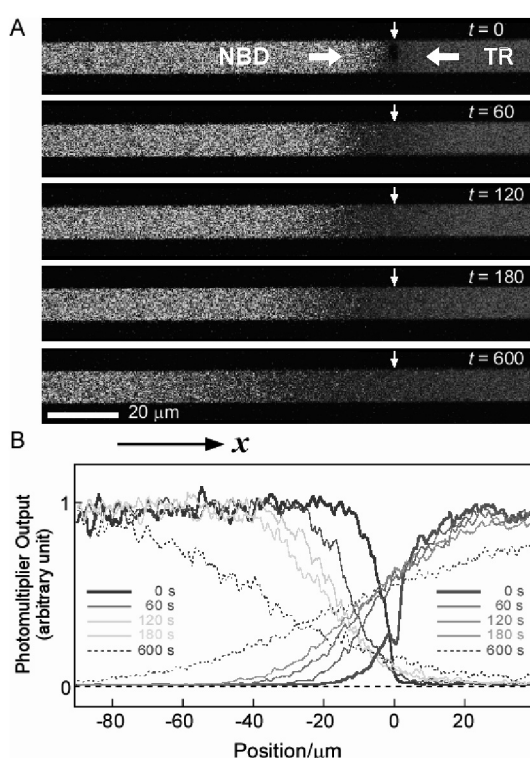


図2 (上) 図1の結果より求めたFRET効率のドナー-アクセプタ比依存性

図1 (A) NBD、Texas Red (TR) 結合脂質を1モル%含む脂質二分子膜が自発展開し衝突した直後($t = 0$) から600秒後までの共焦点顕微鏡像。(B) 蛍光強度の幅方向平均値。衝突地点を $x = 0$ とおいた

膜に埋め込んだ受容体タンパク質の一分子観察

河西奈保子¹ Chandra S. Ramanujan²

¹機能物質科学研究部 ²オックスフォード大

イオンチャネル型受容体は、主に脳の神経細胞における情報伝達において重要な役割を果たす膜タンパク質である。その作動メカニズムは、リガンドと呼ばれる因子の結合によって受容体の中央部に内包するイオンチャネルが開き、イオンを流すことによって、電氣的に信号を伝達するというものである。その構造は主にX線結晶構造解析などにより検討されているが、機能と構造の関係にはまだ多くの解明すべき点が残されている。

我々は、タンパク質一分子を観察することができる解像度を有し、溶液中での観察が可能な原子間力顕微鏡(AFM)を用い、イオンチャネル型受容体タンパク質(図1)の構造と機能の相関を、溶液中(活性を持った状態)で検討した。受容体タンパク質は生体内では脂質膜に埋め込まれた状態で機能しているが、その構造変化を検討するために、受容体タンパク質は人工脂質二分子膜に再構成した。

強制発現させた昆虫細胞から精製した受容体タンパク質を、透析法を用いて、人工脂質二分子膜へ再構成した。透析前(図2A)の試料をAFMによって観察すると、小さな脂質ドメインの端部にタンパク質が観察されたが、透析後(図2B)は、大きな脂質ドメイン中央部に、多くの単一の受容体が観察され、透析による再構成によって単一の受容体タンパク質の構造観察に適した試料を作製できることが分かった。さらに本受容体を拡大して観察したところ、この受容体を構成している4つのタンパク質(サブユニット)と見られる4つの構造物が観察された。この4つの構造物は、脂質二分子膜に再構成した受容体を上面から観察したものである。

この結果から活性を有する受容体タンパク質の構造を観察できることが分かった[1]。今後はリガンド結合による構造変化をリアルタイムで観察することが期待される。

本研究の一部は、英国Bionanotechnology IRCおよび独立行政法人化学技術振興機構戦略的国際化学技術協力推進事業の援助を受けて行われた。

[1] N. Kasai, et al., Neurosci. Res. **58** (2007) S193.

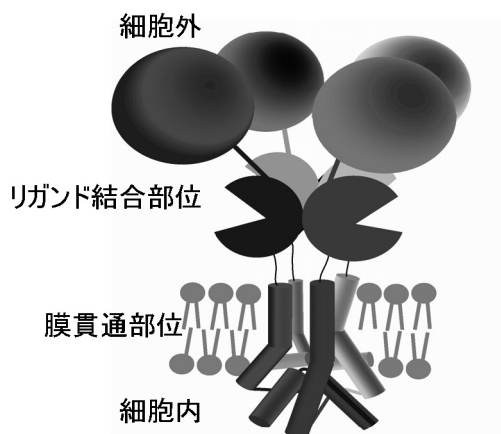


図1 観察した受容体タンパク質の模式図

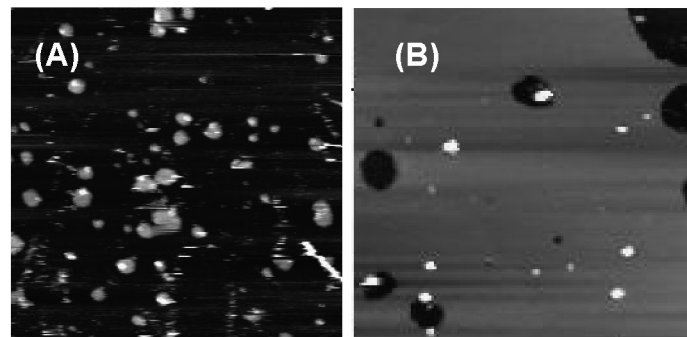


図2 透析前(A)後(B)の受容体タンパク質と脂質のAFM像。黒色部：マイカ基板、灰色部：人工脂質二分子膜、白点：受容体タンパク質

Si 細線 MOSFET を用いた単電子ラチェットによるナノアンペア電荷ポンプ

藤原 聡 西口克彦 小野行徳
量子電子物性研究部

電子1個1個を正確に操作する単電子転送は、量子電気標準や単電子集積回路への応用が期待されている。金属ベースの単電子ポンプやターンスタイルの場合、トンネル接合に金属酸化物を用いるため、トンネル抵抗は固定となる。一方、半導体の場合、ゲート電界誘起トンネルバリアを利用できるため、抵抗ならびにRC時間を調節可能となり、高速動作に有利である。我々は、2本の微細ゲートを有するSi細線MOSFETのそれぞれのゲートに、位相のずれた2つのAC信号を加えるターンスタイル動作により、100 MHzの単電子転送を実現したが[1]、標準量子トライアングルの実験にはナノアンペア以上の電流が必要となるため、さらなる高速動作が望まれていた。

今回我々は、1つのAC信号のみの簡便な動作で単電子転送を可能とする単電子ラチェットを提案し、ナノアンペア電荷ポンプを実現した[2]。単電子の捕獲と放出を行うポケットポテンシャルを内包する非対称ポテンシャルを用いているため、ソース・ドレイン間にバイアスがない条件でも、方向性の単電子転送が可能となる。図1(a,b)にデバイスの電子顕微鏡像と単電子ラチェットの動作模式図を示した。中央の微細ゲートに周波数 f のAC信号を印加し、Si細線中に振動バリアを形成し、右側のゲートには固定の負電圧を加え、一定高さのバリアを形成する。2本のゲートに挟まれた領域が単電子島として機能し、ソースから単電子を捕獲し、ドレインへ放出する。1周期当りの転送電子数は、デバイスを幅広く覆う上層ゲートで制御する。図1(c)に、温度20 Kにおける転送電流の上層ゲート電圧(V_{UG})、ドレイン電圧(V_D)依存性を示す。単電子転送に起因する電流プラトー($I = mef$, m : 整数)が明瞭に観測され、ドレイン電圧の極性にかかわらず方向性の単電子転送が実現されている。図2に $f = 2.3$ GHzにおけるナノアンペア転送電流の特性を示す。転送誤差は今のところ 10^{-2} 程度と見積もられるが、電流プラトーの形状に単電子捕獲の非断熱性が影響を与えていることが分かり、今後の高精度転送化に向けて有益な知見を得た。今後、転送機構の解明と高精度化を進めることにより、高電流の電流標準の実現が期待できる。本研究の一部は、科学研究費補助金基盤研究(No. 16206038, 19310093)の援助を受けて行われた。

[1] A. Fujiwara, et al., Appl. Phys. Lett. **84** (2004) 1323.

[2] A. Fujiwara, et al., Appl. Phys. Lett. **92** (2008) 042102.

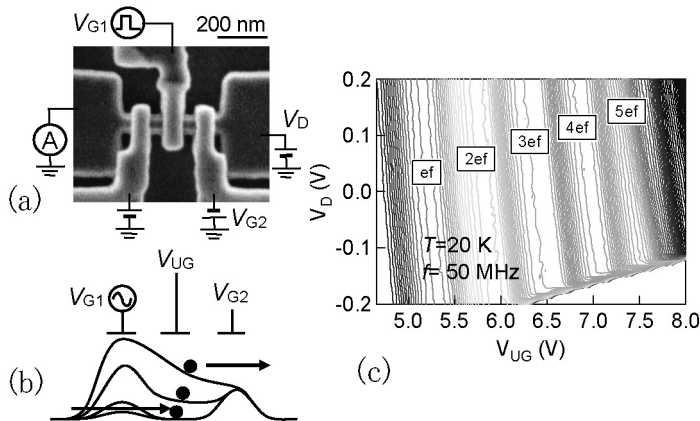


図1 (a) デバイスの電子顕微鏡像 (b) 単電子ラチェットの動作模式図 (c) 転送電流の等高線プロット

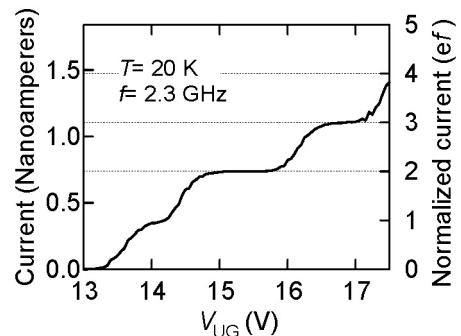


図2 単電子転送の2.3 GHz動作

シリコン・ナノトランジスタを用いた赤外線検出

西口克彦 藤原 聡 小野行徳 山口浩司
量子電子物性研究部

近年のIT産業発展により、様々な分野でセンサが利用される機会が増えている。最も身近なセンサとして、シリコン材料を用いたフォトダイオードやCCDセンサなどのイメージセンサが挙げられる。これらのセンサは、シリコンのバンドギャップ以上のエネルギーを持つ可視光信号がシリコン中に電子と正孔のペアを誘起することによって動作する。シリコンを用いているので、その微細加工技術によるセンサの高画素数化が大きな特徴といえる。一方、可視光より波長の長い赤外線は、リモートセンサや材料分析、温度センサなどといった多くの用途があるにもかかわらず、シリコン・センサが利用される機会は極めて少ない。赤外線のエネルギーがシリコンのバンドギャップより小さく電子と正孔を誘起できないためである。

今回、我々は新たな原理を利用することにより、シリコン・トランジスタを利用して赤外線検出を実現した[1]。図1はその素子構造を示しており、ノンドープ絶縁膜上シリコンに形成した赤外線吸収トランジスタ(FET1)と電荷検出トランジスタ(FET2)で構成される。FET1は2層構造のゲート(UG、LG)で構成され、UGを用いてFET1細線を反転して電子を誘起し、LGでエネルギーバリアを形成することにより、電子ソース(ES)と電荷蓄積ノード(MN)を形成する。赤外線が照射されるとES内の電子が励起され、その一部がLGで形成されたエネルギーバリアを超えてMNに蓄積される(図2)。MNに蓄積された電子の電荷信号はMNと容量結合し高電荷検出感度を有するFET2で増幅される。

図2は赤外線照射、未照射時のFET2に流れる電流を示しており、いずれも時間とともに階段状に一定変化量で減少している。これは単一電子がMNに蓄積されて、FET2がその微小な電荷信号を観測可能なレベルまで増幅していることを意味する。赤外線照射により電子がMNに蓄積される頻度が増えるのは、赤外線で励起されたES内の電子がLGによるエネルギーバリアを超えてMNに蓄積されるためで、赤外線検出が可能であることを示している。また、励起エネルギーの大きい短波長の赤外線照射でMNへの電子蓄積頻度が増加するので、LGによるエネルギーバリアの調整で検出する赤外線の波長選択性を制御できる。さらに、赤外線で励起される電子数はUGで制御するES中の電子密度に比例するので、UGで赤外線検出感度を制御することも可能となった。本素子は、新しい原理によりシリコン材料による赤外線検出を可能とするものであり、ゲート電極による検出特性制御という新機能を有するので、集積化に有利なシリコン・センサの応用分野を広げることが期待できる。

[1] K. Nishiguchi, et al., Appl. Phys. Lett. **90** (2007) 223108.

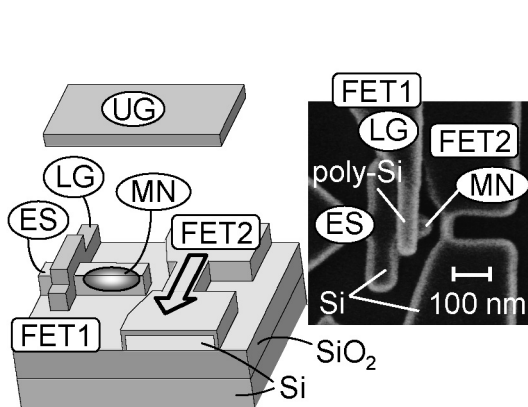


図1 赤外線検出素子の構造図

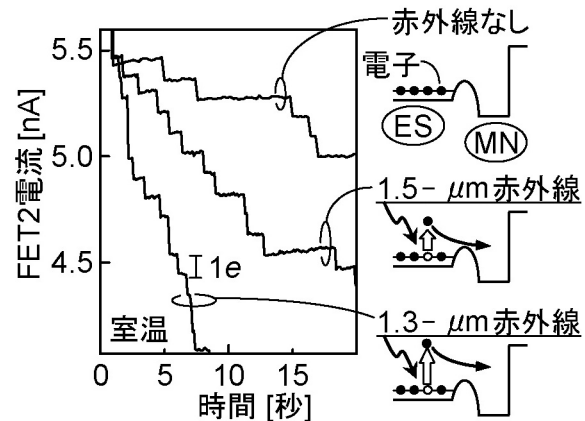


図2 赤外線検出特性

電子系が引き起こす機械的摩擦の検出

山口浩司¹ 岡本 創¹ 石原 直² 平山祥郎^{1,3}

¹量子電子物性研究部 ²東京大学 ³東北大学

我々は、マイクロ・ナノ機械構造に低次元半導体構造を組み込むことにより、電子の振る舞いを調べる新しい物性研究の手法を提案している。この手法により、電子輸送特性に対する歪みの影響の解明[1]や、電子磁化の検出などに成功している。今回、高移動度変調ドーピング構造をカンチレバーに組み込み (図1)、量子ホール系における磁気ピエゾ抵抗値を評価した。その結果、局在・非局在転位における著しい歪み効果や、カンチレバーの機械的運動に対して電子系が引き起こす摩擦の影響を調べることに成功した[2]。

低温における移動度が約240万 cm^2/Vs の二次元電子系からなるホール素子を、長さ200 μm 、幅60 μm 、厚さ1.3 μm のカンチレバーの根元に組み込んだ(図1)。この素子をピエゾ加振素子に取り付け、希釈冷凍機内でカンチレバーの共振周波数近傍で加振した際の抵抗値の変化、すなわちピエゾ抵抗の磁場依存性を測定した。電子が局在状態から非局在状態へ変る磁場領域で極めて大きなピエゾ抵抗が確認された。得られたピエゾ抵抗はゲージ率にして25,000と極めて大きな値であり、通常の値より2桁以上高い。

また、この磁場域付近でのカンチレバーの共振スペクトルを図2に示すが、共振幅(Q値)が磁場により大きく変化することが確認された。電子状態が非局在状態から局在状態に移るにつれ、Q値が著しく上昇している。これはカンチレバーの振動における機械的摩擦が電子系によって引き起こされており、量子ホール状態では電子の引き起こす摩擦が減少することを示している。

本研究は科学研究費補助金基盤研究(A) (No.16206003)の援助を受けて行われた。

[1] H. Yamaguchi, et al., Appl. Phys. Lett. **86** (2005) 052106.

[2] H. Yamaguchi, et al., Jpn. J. Appl. Phys. **46** (2007) L658.

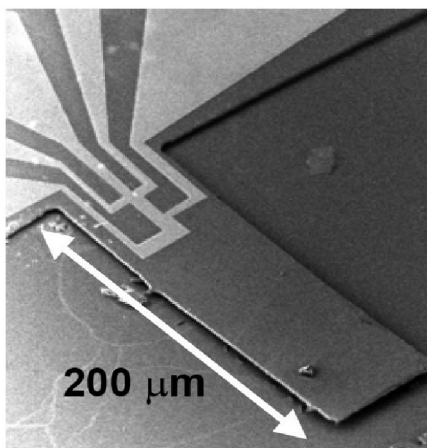


図1 作製したカンチレバー素子

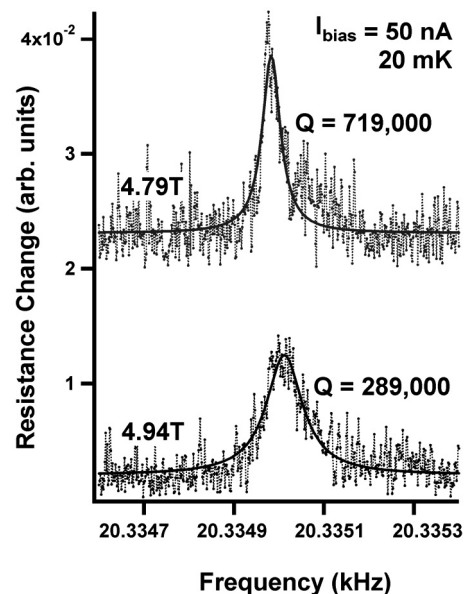


図2 機械共振特性の磁場依存性

InAs/AlGaSb ヘテロ構造ナノビームの圧電効果の影響

山崎謙治¹ Samir Etaki² Herre S. J. van der Zant² 山口浩司¹¹量子電子物性研究部 ²デルフト工科大学

ナノ電気機械システム(NEMS)は、超高感度センサ、新原理デバイス等が作製できる可能性があることから、近年注目が集まっている。我々のグループでは、既にInAs/AlGaSbヘテロ構造を用いたメカニカルシステムについて、量子効果を利用することで大幅に感度を向上することに成功している。しかし、そのような系の圧電抵抗(メカニカルな歪みによる電気抵抗変化)の基本的なメカニズムについては、まだ良く分かっていないことが多い。そこで、我々はInAs/AlGaSbのNEMSを作製し、その圧電抵抗を測定・解析した。その結果、NEMSの圧電抵抗は圧電効果によって大きく影響を受けることが強く示唆され、薄膜ヘテロ構造のメカニカル特性における圧電効果の重要性を初めて明らかにした。

図1は、作製したInAs/AlGaSbナノ・ビーム(梁)の原子間力顕微鏡(AFM)像である。InAsとAlGaSbの膜厚は、各15 nmと35 nmだった。このように、犠牲層エッチングの量によって、ビームはアーチ型か平坦になる。つまり、エッチング量が多い場合、格子不整合に起因する応力によって、ビームの左右の取付け部が上方に巻き上げられ、これらの間のビームがアーチ型になる。AFMの探針でビームを押し下げることで圧電抵抗を測定したところ、ビーム形状(平坦かアーチ型か)に大きく依存した結果が得られた。抵抗変化と歪みから導出されるゲージ因子は、ふつう材料の特性を反映するが、この結果からはビーム形状に応じて正負の符号が反転し、かつバルクについて報告されている値よりもはるかに大きな値(絶対値)となった(表参照) [1]。この現象を理解する試みとして、ヘテロ構造薄膜の圧電抵抗を圧電効果を含め計算したところ、圧電効果を考慮するかしないかで結果が大きく異なることが分かった(図2)。つまり、このようなヘテロ構造薄膜を変形した場合、圧電効果によって、ビーム表面に電荷が誘起され抵抗が変化する。また、伝導層が薄くキャリアが少ない場合に、より大きな効果が得られることが示された。さらに、アーチ型と平坦なビームにおけるゲージ因子の正負の符号反転も、圧電効果を考慮した計算結果と符合し、よって大まかに実験結果を説明できた。

このような結果はNEMSのメカニカルな理解を進め、より効果的なデバイスを設計・作製するために有用となる。

本研究の一部は、科学研究費補助金基盤(A) (No.16206003) およびDutch NWO VICI-grantの援助を受けて行われた。

[1] K. Yamazaki, S. Etaki, H. S. J. van der Zant, and H. Yamaguchi, J. Cryst. Growth **301-302** (2007) 897.

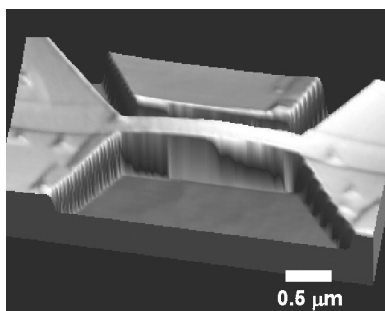


図1 作製したアーチ型
InAs/AlGaSbビーム
(50 nm) 厚のAFM像

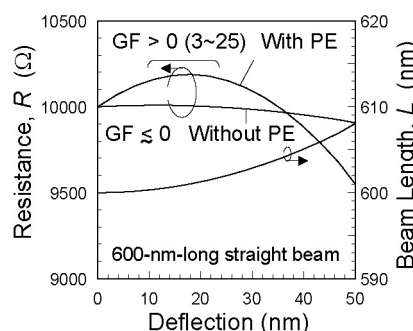


図2 圧電効果(PE)ありとなしの
場合の抵抗の計算結果

表 ゲージ因子
($GF = (\Delta R/R) / (\Delta L/L)$)
の測定結果

	GF
This study	Arched beam
	600-nm long
	2-μm long
	Straight beam
	500-600-nm long
	1-μm long
	Bulk InAs
	-0.9

核スピンを用いた2層量子ホール系における電子スピン状態測定

熊田倫雄¹ 村木康二¹ 平山祥郎²¹量子電子物性研究部 ²東北大学

半導体ヘテロ構造によって形成された高移動度二次元電子系に磁場を加えることによって生じる量子ホール系は、運動エネルギーがランダウ量子化されることにより多数の電子が単一の運動エネルギーを持つ理想的な低次元強相関系である。特に、二次元電子系を2層近接配置した2層系では、層の自由度に関するエネルギーギャップをゲートにより外部から制御することにより、多彩な量子ホール磁性と呼ばれる自発的対称性の破れを伴った状態が現れる。我々は2層量子ホール系における核磁気共鳴(NMR)測定技術確立し、量子ホール磁性状態における電子スピン物性を調べている[1-3]。

NMR測定は電子スピン状態を測定するのに有効な手段である。ただし、低次元系では核スピンの数が少ないために、核スピンが作る磁場を測定する通常のNMR技術を用いることができない。そこで、我々は核スピンを電流により動的に偏極し、その偏極率を二次元電子系の電気抵抗により高感度に検出する方法を用いて測定を行った。その結果、2層系 $\nu=2$ 量子ホール状態には強磁性状態、傾角反強磁性状態、スピン一重項状態と3種類の磁性状態が存在することを明らかにした[3]。特に、傾角反強磁性状態では、50 mKという極低温においても電子スピンは凍らず揺らぎ続けるという二次元系特有の現象を明らかにした[2]。これは高移動度半導体において実現された、不純物や結晶の異方性による影響のない、理想的な連続的対称性を持った二次元系で実験を行った結果である(図)。

この成果は、半導体量子構造において電子状態を制御し、それをNMR測定により観測するという実験手法が低次元物性の解明に有効であることを示している。

[1] N. Kumada, et al., Phys. Rev. Lett. **94** (2005) 096802.

[2] N. Kumada, K. Muraki, and Y. Hirayama, Science **313** (2006) 329.

[3] N. Kumada, K. Muraki, and Y. Hirayama, Phys. Rev. Lett. **99** (2007) 076805.

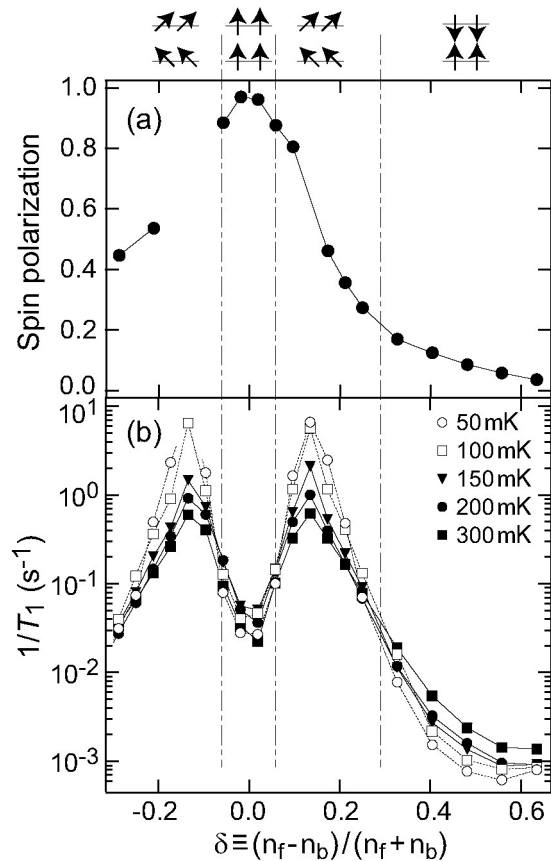


図 NMR測定によって求めた2層系 $\nu=2$ 量子ホール状態における(a) 電子スピン偏極率および(b) 核スピン緩和速度。核スピン緩和速度は電子スピン揺らぎの大きさによって決定される

半導体量子井戸における局在状態パーコレーションのイメージング

Simon Perraud^{1,2} 蟹澤 聖¹ Zhao-Zhong Wang² 藤澤利正¹¹量子電子物性研究部 ²LPN-CNRS

半導体ヘテロ構造中の二次元電子系(2DES)は、量子閉じ込め状態や電子密度などの重要なパラメータを制御できるという優れた特徴を持っている。最近我々は、*n*型の半導体 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ の(111)A清浄表面では、フェルミ準位のピン留めが発生しないことを見いだした[1]。したがって、(111)A方位の基板表面に形成した $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 薄膜による量子井戸(QW)を用いれば、電子密度が制御された2DESのQW中での振る舞いを超高真空(UHV)中において走査トンネル分光法(STS)で評価できることになる。この方法は、乱雑さを含む2DESの性質をナノメートルスケールの分解能で調べることを可能にする。乱雑さに起因する効果は、半導体構造中の多体现象などの電子物性を理解するうえで非常に重要である。

複数のサブバンドを持つ $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ 表面QWを格子が整合するInP(111)A基板上に分子線エピタキシャル成長法で成長し、このQW中の電子の局所状態密度(LDOS)分布をUHV環境において5 Kの低温でSTS測定した。伝導帯において観測されたLDOSは、明瞭な階段関数型のエネルギー依存性を示し、設計どおりに2DESの複数のサブバンドが存在することが分かる(図)。観測するエネルギーによっては、LDOS分布は乱雑ポテンシャルが存在することによる強い空間揺らぎを示した。この乱雑ポテンシャルにより多重散乱した電子波動関数の量子力学的干渉効果によって、局在状態が形成される。エネルギー上昇に伴い、局在状態のパーコレーション現象が、各サブバンドの端部で観察された。我々はこのパーコレーション現象を、半古典的モデルにより説明した。観測された乱雑ポテンシャルの起源は、QWの最表面に乱雑に分布する自然形成された点欠陥であることが実験により明らかとなった[2]。

本研究の一部は、科学研究費補助金基盤研究(A) (No.16206003) の援助を受けて行われた。

[1] S. Perraud, et al., Appl. Phys. Lett. **89** (2006) 192110.

[2] S. Perraud, et al., Phys. Rev. B **76** (2007) 195333.

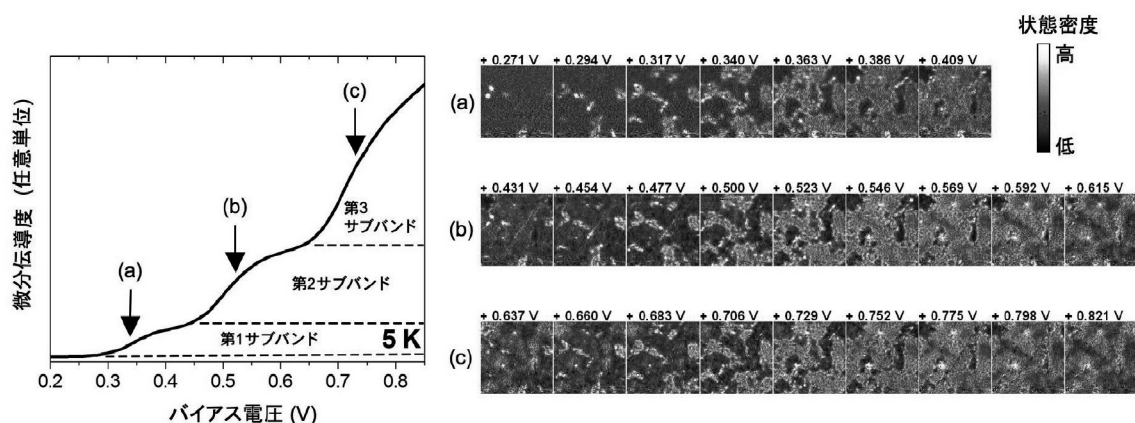


図 InGaAsによる表面QWの214 nm × 214 nmの領域をUHV環境、5 Kの低温にてSTS測定し、平均して得られた微分伝導度(dI/dU) スペクトル。矢印は各サブバンドにおいて、半古典モデルで計算したパーコレーションの閾値を示す。図中の dI/dU の空間分布は、(a) 禁止帯から第1サブバンドへ、(b) 第1サブバンドから第2サブバンドへ、(c) 第2サブバンドから第3サブバンドへの遷移が発生する領域のバイアス電圧依存性を示している

超伝導永久電流アトムチップ

向井哲哉¹ Christoph Hufnagel¹ 清水富士夫²¹量子電子物性研究部 ²電気通信大学／NTTリサーチプロフェッサー

中性原子は、一粒を1つの単位として、その内部状態を制御することで量子デバイスとして利用することが期待されている。この量子デバイスの実現には、個々の原子の内部エネルギー状態とともに、外部自由度である原子の運動状態を制御して、空間的に捕捉することが重要である。通常室温(300 K)で熱平衡状態にある原子は、およそ時速千キロメートルで動き回るガスの状態であるが、レーザ冷却技術を用いることで、人の歩行速度よりも遅く、温度にすると100 μ K以下にまで瞬時に冷却することができる。ここまで冷却された原子は、巨視的な物体と同様に、重力による落下が顕著になる。

磁気モーメントがゼロでない原子には、磁場に反発する状態が存在するため、電流が発生する磁場で重力に打ち勝つポテンシャルをつくることにより、原子を空間的に捕捉することができる。このような電流がつくる磁場のポテンシャルは、多数の原子を一度に捕捉することには大きな成功を収めているが、単一の原子を捕捉することには未だ成功していない。その原因は、単一の原子を捕捉する急峻な磁場ポテンシャルをつくるのに適した電流の極近傍では、電流に起因するノイズの影響が顕著であり、原子の捕捉寿命が極端に短くなるという問題に直面するからである。

今回、私たちはこのようなノイズの問題を改善して、単一の原子を捕捉することが高く期待されている超伝導永久電流アトムチップを開発し、原子を捕捉することに世界で初めて成功した。サファイア基板上に MgB_2 超伝導薄膜の閉ループ回路をつくり、その回路を流れる2.5 Aの超伝導永久電流が発する磁場と、外部から加えた補助磁場により、図1のように、およそ50万個のルビジウム原子をチップの表面から300 μm の位置に捕捉したこと確認した。さらに私たちは、本来極めて安定な超伝導永久電流を、レーザにより高速で定量的に制御する技術の開発にも成功している(図2) [1]。

今後は、回路パターンを微細化し、単一原子の捕捉へと発展することで、量子デバイスの実現を目指す。

本研究の一部は、(独) 科学技術振興機構CREST「量子情報処理システムの実現を目指した新技術の創出」の援助を受けて行われた。

[1] T. Mukai, C. Hufnagel, et al., Phys. Rev. Lett. **98** (2007) 260407.

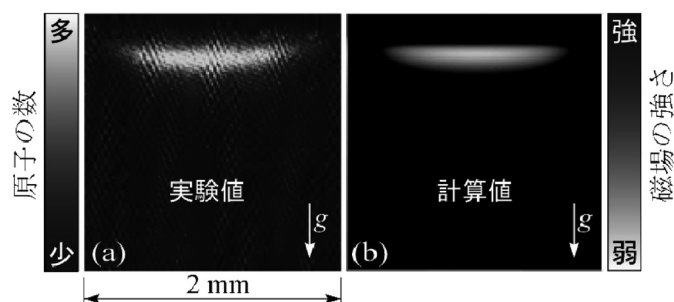


図1 捕捉した原子集団の(a) 実験値と(b) 計算値

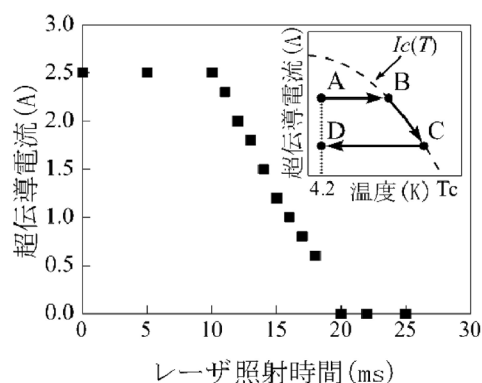


図2 レーザで永久電流を制御

複数の磁束量子ビットの選択可能な長距離結合スキーム

中ノ勇人¹ 角柳孝輔¹ 仙場浩一¹ 上田正仁²

¹量子電子物性研究部 ²東京工業大学／NTTリサーチプロフェッサー

量子計算機は、量子ビットと呼ばれる2状態素子を単位要素として、それを多数集めて構成される。量子計算機の実現にとって最も重要な要求、すなわち、コヒーレンス時間(量子状態の重ね合わせが維持される時間)内に計算を行うには、多数の量子ビットの中から任意の2つを随意に選択し、それらの間で2ビット量子演算を実行できると非常に有利である。特に、2つの量子ビットが空間的に隣り合っていないなくても演算が可能であることが強く望まれる。しかし、通常、2量子ビット演算はビット間の物理的な相互作用を利用するため、他のビットに影響を与えないようにすることや、空間的に離れた2つの間で演算を行うのは多くの困難を伴う。

我々は今回、超伝導量子ビット系に対して、そのような2ビット演算を可能とする構造と操作原理を考案し、その物理的特性を理論解析によって明らかにした(図1)[1]。全ての量子ビットは同一の超伝導共振回路(LC共振回路や伝送線路)と相互作用しているが、個々の量子ビットの共鳴振動数は直接の相互作用が無視できるよう十分に離れている。この共振回路を介した間接的な相互作用を利用して、上に述べた機能を実現する。

ある特定の2つの量子ビット(共鳴振動数 ω_1 、 ω_2) のみの間で2ビット演算を行わせるには次のようにする。共振回路にジョセフソン接合を使えば、接合に流す直流バイアス電流(I_b)によって共鳴振動数 ω_r が可変であることが重要である。ここで、共振回路の共鳴振動数を $\omega_r \sim (\omega_1 + \omega_2)/2$ にチューニングし、外部から、 $\omega_{ex} \sim (\omega_2 - \omega_1)/2$ の振動数のマイクロ波を印加すると、2光子ラビ振動という過程によって、共振回路の状態は変化せずに2つの量子ビットの間の関係だけを変化させる、すなわち、2ビット演算を行うことができるようになる(図2)。 ω_r 、 ω_{ex} に関して、上の2つの条件を同時に満足する2つの量子ビットだけしか反応できないので、共振器とマイクロ波をうまくチューニングすることで多数の量子ビットの中から特定の2つだけを選択できる。また、共振回路の大きさはLC回路でも1 mm程度[2]、伝送線路ならさらに長距離離れた量子ビットを媒介することができるので、空間的に離れた量子ビットの2ビット演算が可能となる。

本研究はJST-CREST、科研費補助金(No.18201018、18001002)の援助を受けて行われた。

[1] H. Nakano, K. Kakuyanagi, M. Ueda, and K. Semba, Appl. Phys. Lett. **91** (2007) 032501.

[2] J. Johansson, S. Saito, T. Meno, H. Nakano, M. Ueda, K. Semba, and H. Takayanagi, Phys. Rev. Lett. **96** (2006) 127006.

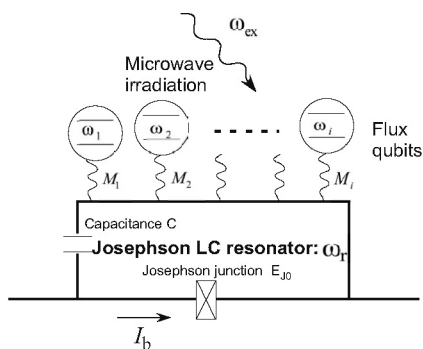


図1 量子ビット結合器の構造

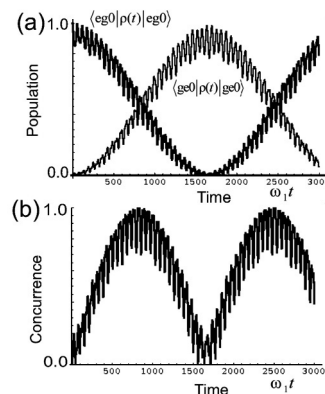


図2 2量子ビット演算の例(量子もつれ形成)

量子ドットを用いた非平衡キャリアのエネルギー分布測定

小林俊之^{1,4} 鶴田尚英^{1,3,4} 佐々木 智¹ 藤澤利正¹ 都倉康弘² 赤崎達志^{1,4}¹量子電子物性研究部 ²量子光物性研究部 ³東京理科大学 ⁴JST-CREST

半導体量子ドットは、電子をナノメートルサイズの極微な領域に閉じ込めることができるため、その内部で電子がとることができるエネルギーは原子のように量子化している。この量子化されたエネルギー準位はゲート電圧で容易に制御することができるため、量子ドットは電子のエネルギー分析器(スペクトロメータ)として用いることができる。

今回我々は、量子ドットを用いて量子細線から出射したバリステックかつ非平衡な電子・正孔のエネルギーを分析した(図1)。量子細線としてはゲート電極で形成された量子ポイントコンタクトを用い、電圧を印加することで熱い電子または正孔を出射させた。出射した電流は、垂直磁場によるフォーカシング法を用いて再度集束させ、そのエネルギーを分析した(図2)。ちょうど量子ドットのエネルギー準位に一致したエネルギーを持つ電子・正孔が入射すると、それらは量子ドットを透過することができるため、電流として検出される。そのためそのような条件では量子ドットの微分コンダクタンスがピークを示し、クーロンダイヤモンドのように観測される(図3)。

出射されたキャリアのエネルギーが低い場合は分布がほとんど広がらないが、エネルギーを1 meV程度まで上げると電子・電子散乱によりエネルギーが緩和し、分布が広がる様子が確認された[1]。今回の結果は、量子ビット間の量子情報転送実験を行う際に重要になると考えられる。

[1] T. Kobayashi, et al., Phys. Stat. Sol. (c) 5 (2008) 162.

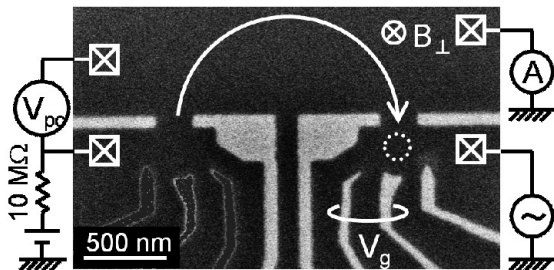


図1 デバイスの電子顕微鏡写真と測定セットアップ

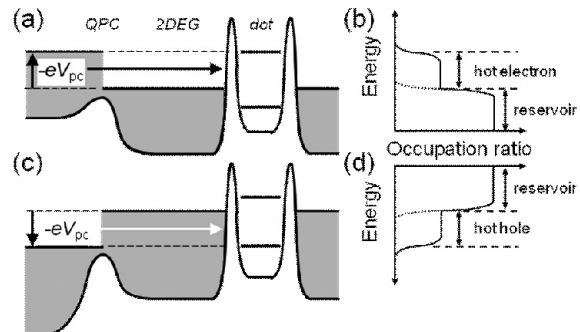


図2 量子ドット付近における(a,b) 電子(c,d) 正孔の蓄積

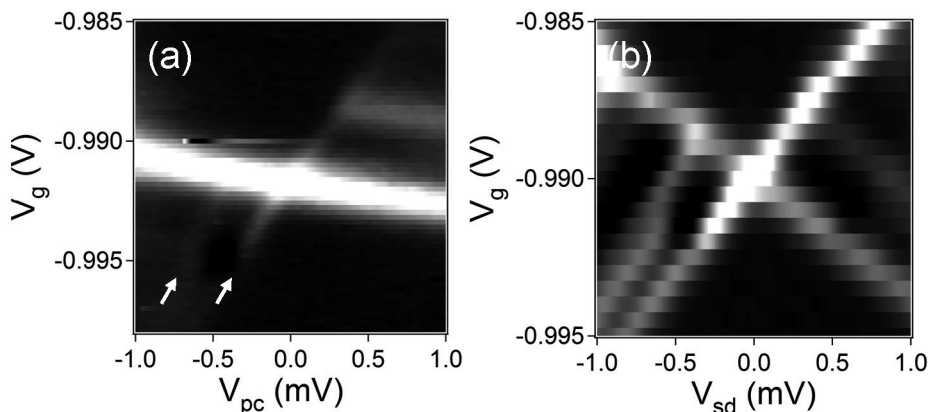


図3 (a) 非平衡キャリアが量子ドットの準位を透過することによる伝導度ピーク
(b) 通常のソース・ドレイン電圧印加によるクーロンダイヤモンド

ゲート付き量子井戸の電子と正孔の有効質量の密度依存性の測定

山口真澄^{1,2} 野村晋太郎^{2,3}¹量子電子物性研究部 ²CREST-JST ³筑波大学／NTTリサーチプロフェッサー

電子移動度を制限する要因として、ドナーイオンによる散乱、表面局在電荷による散乱、界面散乱、バルク不純物散乱、が挙げられる。低電子密度領域で特に問題にされるのは従来の半導体ヘテロ接合試料では不可避のドナーイオンによる散乱である。最近、低電子密度領域での有効質量やスピン感受率の増大がシュブニコフドハース振動の測定により観測され注目を集めているが、これらの現象は低電子密度領域で電子間相互作用が大きく寄与することに起因しているため、低移動度の試料では上記の散乱を強く受けるために観測が難しい。我々が用いているゲート付き量子井戸はドナー層がなく、低電子密度でも高移動度が維持されるうえに、ゲートによって電子密度を連続的に制御できるという特長を持つ。我々は、従来の電気伝導による測定とは別に、発光測定によって金属相から絶縁体相にわたる連続的なスペクトルの変化を測定し、従来よりも広い電子密度範囲にわたって電子と正孔の有効質量を決定した[1]。

低磁場領域において、複数観測されるランダウ準位の発光ピーク間隔(図1) から電子と正孔の有効質量を求めることで $n_s < 1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ において電子密度の低下に伴う電子の有効質量の増大が示された(図2)。また、正孔の有効質量も電子密度の低下に伴い増大することが示され、 $n_s < 3 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ の領域で正孔が局在していることが判った。

我々はこのゲート付き量子井戸を用いて、電子間相互作用によって極低電子密度領域で現れるスピン偏極状態の検出を目指している。

[1] S.Nomura, et al., Phys. Rev. B **76** (2007) 201306R.

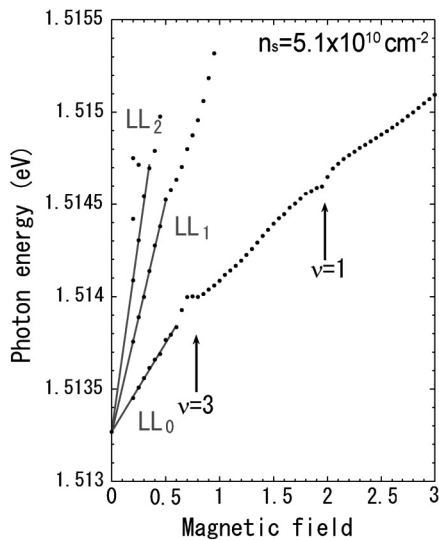


図1 ランダウ準位による発光ピーク

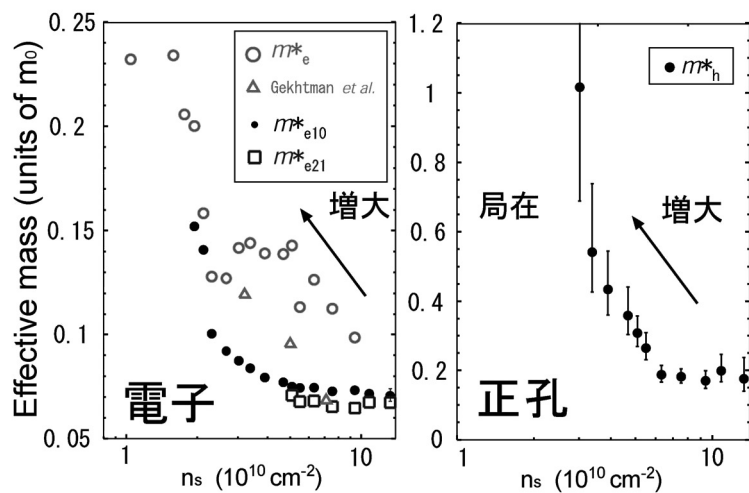


図2 電子と正孔の有効質量の変化

200 km の光ファイバ上での量子鍵配送実験

武居弘樹¹ S. W. Nam² Q. Zhang³ R. H. Hadfield² 本庄利守¹ 玉木 潔¹ 山本喜久³
¹量子光物性研究部 ²NIST ³スタンフォード大学

量子鍵配送(QKD)の実用化のためには、鍵配送距離と鍵生成率の増大は重要な課題である。今回、世界最速となる10 GHzクロック周波数のQKDシステムと、低雑音、高時間分解能の光子検出が可能な超伝導単一光子検出器(SSPD)を用いて200 kmの光ファイバ上でのQKDに成功した[1]。これは、QKD実験における鍵配送距離の世界記録である。

差動位相シフト(DPS)プロトコル[2]に基づいて図1の実験系を構築した。送信者アリスは、レーザからの連続光を高速強度変調器により変調して10 GHz繰り返しの光パルス列を生成し、位相変調器により各パルスの位相を0または π でランダム変調した後、減衰器によりパルス当りの平均光子数が0.2となるよう光強度を減衰させ、光ファイバ伝送路を介して受信者ボブに送付する。ボブは、受信したパルス列を1ビット遅延干渉計に入力して隣接パルスを干渉させる。パルス間の位相差が0(π)であれば光子は干渉計のポート1(2)から出力され、SSPD1(2)で受信される。ボブは、光子を受信した時刻を通常の通信手段によりアリスに通知する。これにより、該時刻においてボブが観測した位相差情報を両者で共有し、One time pad暗号の鍵として使用することができる。

SSPDは、超伝導状態にある窒化ニオブの細線に臨界電流より少し小さいバイアス電流を印加した状態で光子を入射すると、超伝導状態が壊れ、マクロスコピックな電圧変化が発生することを利用して光子を検出するものである。量子効率も現在のところ1%程度であるが、暗計数率が10 Hz程度と低いため、長距離のQKD実験に適している。また、約60 psという高い時間分解能を有し、10 GHzクロック周波数の高速QKDシステムに適用可能である。

実験の結果得られた一般的個別攻撃[3]に対して安全な鍵生成率と伝送距離との関係を図2に示す。200 kmのファイバ長において安全鍵を生成した。また、105 kmの伝送距離において従来の記録を2桁上回る17 kbit/sの鍵生成率を得た。

本研究の一部は、科学技術振興機構CRESTおよび情報通信研究機構の支援を受けて行われた。

[1] H. Takesue, et al., Nature Photonics **1** (2007) 343.

[2] K. Inoue, E. Waks, and Y. Yamamoto, Phys. Rev. Lett. **89** (2002) 037902.

[3] E. Waks, H. Takesue, and Y. Yamamoto, Phys. Rev. A **73** (2006) 012344.

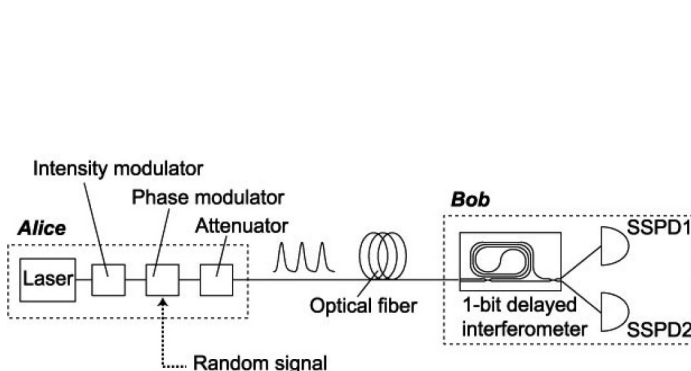


図1 実験系

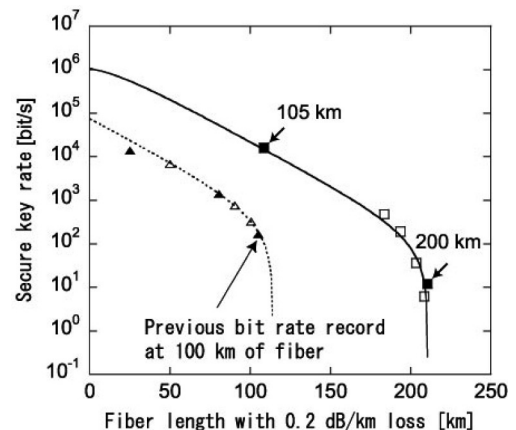


図2 安全鍵生成率と伝送距離

偏波無依存化した周波数上方変換型単一光子検出器を用いた 差動位相シフト量子鍵配送のフィールド実験

本庄利守¹ 山本秀人² 山本貴司²

鎌田英彦¹ 西田好毅³ 忠永 修³ 遊部雅生³ 井上 恭⁴

¹量子光物性研究部 ²NTT未来ねっと研究所

³NTTフォトンクス研究所 ⁴大阪大学/NTTリサーチプロフェッサー

量子力学の原理に基づいて絶対安全な通信を提供する量子鍵配送の研究が盛んに行われている。我々は、微弱なコヒーレント光パルス列の位相差にビット情報を載せる方式である差動位相シフト量子鍵配送(DPS-QKD)の研究を勢力的に進めてきた[1-2]。今回、実環境でのフィービリティを示すため、偏波無依存化した周波数上方変換型単一光子検出器を用いてDPS-QKDのフィールド実験を実施した[3]。

送信側では、0もしくは π のランダムな位相変調を施したコヒーレントな光パルス列(波長1551 nm、繰返し1 GHz)を0.2光子/パルスまで減衰させ、光ファイバ伝送路に送出した。17.6 kmの敷設光ファイバを伝播させた後、受信側では、1ビット遅のPLC Mach-Zehnder干渉計を通過させ、その出力を図1に示すような偏波無依存化した周波数上方変換型単一光子検出器2台用いて光子検出を行った。本検出器では、入力光パルスを偏波ビームスプリッタ(PBS)で縦および横偏波成分に分離し、後者を縦偏波への変換した後、干渉を避けるための遅延を加え、双方を50:50カップラで合波する。偏波状態の揃った光パルスを、ポンプ光とともに、LiNbO₃周期分極反転デバイス(PPLN)へ入力し、和周波発生過程により短波長の光子に変換する。フィルタ、プリズムなどによりポンプ光を除去した後、シリコンAPDで光子検出を行う。光子検出イベントは、時間間隔測定器により記録した。

以上のセットアップにより差動位相シフト量子鍵配送の長時間安定性試験を実施した。その結果、約6時間にわたりシフト鍵生成レート120 kbps、QBER 3.14%で安定した鍵配送を行うことができた。本成果は、差動位相シフト量子鍵配送が実環境でも安定した動作が可能であることを示す。

本研究の一部は、情報通信研究機構(NICT)の支援を受けて行われた。

[1] K. Inoue, et al., Phys. Rev. A **68** (2003) 022317.

[2] H. Takesue, et al., New J. Phys. **7** (2005) 232.

[3] T. Honjo, et al., Opt. Express **15** (2007) 15920.

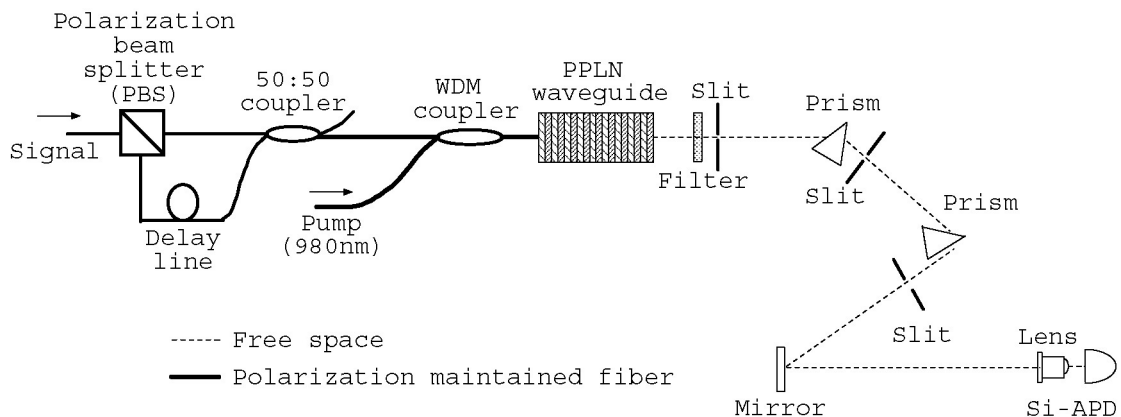


図1 偏波無依存化した周波数上方変換型単一光子検出器

人為構造における励起子のトポロジー

熊谷雅美
量子光物性研究部

人為構造における一電子波動関数のトポロジーは散乱などの擾乱がなければ構造だけによって決定される[1]。これに対し、励起子波動関数のトポロジーは構造に加え、励起子の相対運動の拡がり方にも強く依存する。我々はこのことに着目し、人為構造における励起子波動関数のトポロジー転移について薄いナノチューブ構造を用いて調べてきた[2]。

理論計算によりナノチューブ中の励起子波動関数がチューブの構造に対応して多彩な分布を見せる(口絵参照)ことを示すとともに、そこでの円周長の制御による波動関数変化の起源がトポロジー転移であることを明らかにした。通常の量子井戸構造では、量子閉じ込めエネルギーは閉じ込め領域が小さいほど増大する。これに対し、円周方向につながったトポロジーを持つナノチューブ構造では、図1のようにチューブの円周長を小さくすると量子閉じ込めエネルギーが減少することが示された。これは、円周長が小さくなることによって励起子が円周方向につながり、励起子の基底状態波動関数のトポロジーが線分と同じものから円周と同じものへ転移して、量子閉じ込めの効果が消失したことによるものである。

また、人為構造自体を変化させるのではなくチューブ内・外にある障壁領域の誘電率を外部制御することで励起子のサイズを変化させることにより、励起子波動関数のトポロジー転移を起こすことが可能であることを示した。図2は、チューブ内・外にある障壁領域の実効的誘電率を12から3まで減少させたときの励起子の基底状態波動関数の変化を示したものである。実効的誘電率の低下に伴い、円周方向に広がっていた波動関数が円周の一部に局在していくことが見て取れる。このことは、励起子の性質を決定するパラメータ(材料の物性定数など)を利用して構造自体の変化なしに励起子のトポロジー制御が可能となることを意味しており、トポロジーという新しい概念を利用した新機能デバイスの動作原理の創生が期待できる。

[1] M. Kumagai and T. Ohno, Solid State Commun. **83** (1992) 837.

[2] M. Kumagai, et al., Solid State Commun. **145** (2008) 154.

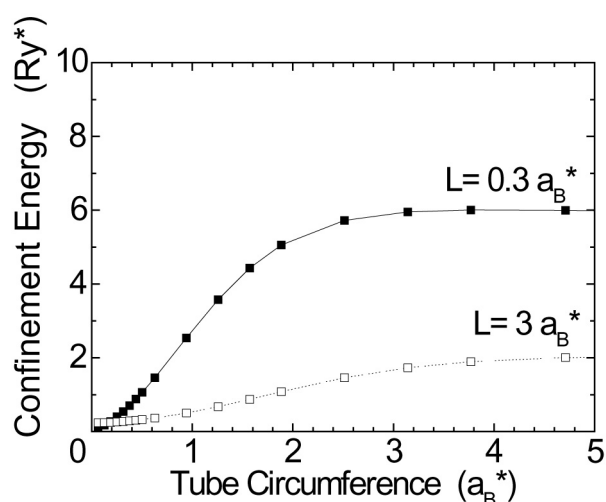


図1 閉じ込めエネルギーの円周長依存性

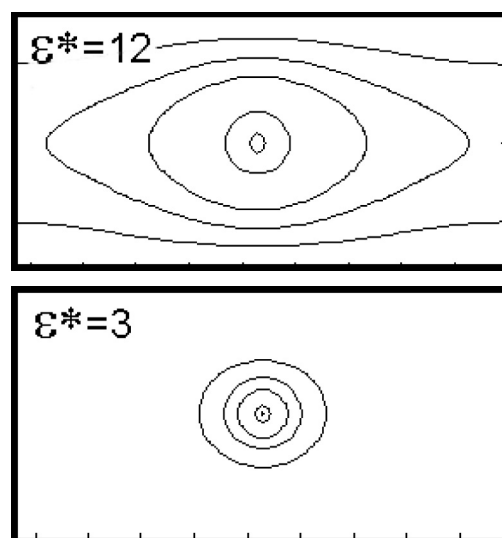


図2 励起子波動関数の誘電率依存性

通信波長帯単一光子の LiNbO_3 導波路による周波数上方変換と 高効率・低暗計検出

鎌田英彦
量子光物性研究部

近年、盗聴や漏洩に対して安全な電気通信への需要の拡大によって量子力学に基づく新しい世代の情報通信技術の開発速度が加速している。量子鍵配送(QKD)は無条件に安全な通信ネットワークの実現における重要な技術になりえると予想されている。これらを背景に、単一光子やエンタングル光子対の生成技術が重要視されるようになった。最近、周期的分極反転構造を有する LiNbO_3 (LN) 非線形導波路での高効率周波数変換を利用し、光子波長を可視域に変換し、可視域で動作する高効率光子検出器で検出する方法が試されている。周期的分極反転構造は、和周波発生に関わる3つの光波の波数のミスマッチをその周期で補償するため、位相整合条件を大幅に緩和する。我々は、1550 nmより長い波長のポンプ光を用いて、1550 nm帯の光子を変換し検出するデバイスを検討し、高効率での周波数と低雑音検出を実証した[1]。

我々のデバイスは1810 nmのポンプ光のもとで1550 nm帯の光を910 nmに変換する。導波路の作製は、周期的分極反転を施したLN(PPLN) ウェハと LiTaO_3 クラッドウェハとを直接接合し、7 μm 厚、6 ~ 8 μm 幅の導波路をdicing sawで加工することでなされた。

1550 nm帯の光子の変換効率として、26 mWポンプにおいて約40%を得た(図1、2)。ポンプ光の波長を1550 nm帯より長い側に設定したことで、ポンプ光による導波路内でパラメトリック自然放出による1500 nm帯の光子発生は抑圧されるため、ポンプレーザに付随する1500 nm帯の光子を注意深く抑圧することにより、寄生的な変換光子の発生を大幅に低減することが可能になった。これにより、暗計数率として 10^2 sec^{-1} 以下が得られた(図2)。ファイバ・導波路の結合65 ~ 70%、Si-APDの量子効率~ 57%を考慮すると、全体での光子検出効率34 ~ 40%を 10^2 sec^{-1} 以下が期待できる。

この研究の一部は情報通信研究機構(NICT)の援助を受けて行われた。

[1] H. Kamada, M. Asobe, T. Honjo, H. Takesue, Y. Tokura, Y. Nishida, O. Tadanaga, and H. Miyazawa, Opt. Lett. **33** (2008) 639.

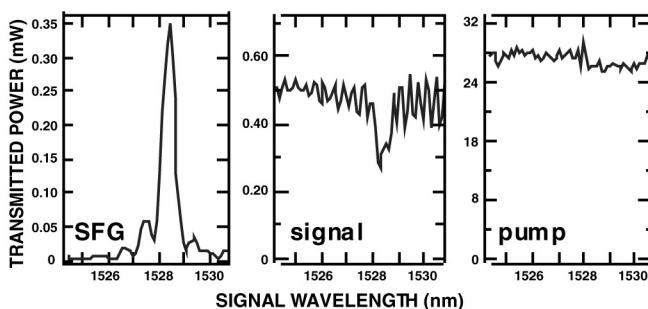


図1 SFG出力パワー(左)、導波路端でのシグナル光(中)、ポンプ光(右)の透過パワー。測定温度は24 $^{\circ}\text{C}$

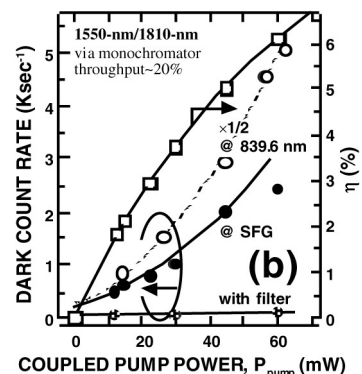


図2 光子検出効率・暗計数率と1810 nmポンプ光のパワーの関係：スループットは約20%(Si-APD効率57%を含む)。暗計数は、ポンプ光から付帯的な雑音光子を除いて 10^2 sec^{-1} 以下

InAs ナノワイヤチャンネル電界効果トランジスタ

Guoqiang Zhang 舘野功太 中野秀俊
量子光物性研究部

ナノワイヤは電子デバイスやフォトニクスからバイオや医療の分野まで幅広く応用が期待されている[1]。特に半導体ナノワイヤはナノスケールの電子デバイスにおいて重要な要素となると考えられる。InAsは高い移動度を有するので高速デバイスとして有望である。我々はナノワイヤチャンネル電界効果トランジスタ(FET)を再現良く作製するプロセス技術を立ち上げ、InAsナノワイヤチャンネルFETを作製してその特性を評価した[2]。

低圧(76 Torr)の有機金属気相成長用反応系において金コロイド粒子を触媒としたInAsナノワイヤのVapor-liquid-solid成長を行った[3]。原料はトリメチルインジウムとアルシンを用いた。成長したInAsナノワイヤは積層欠陥のないWurtzite構造であることを透過電子顕微鏡により確認した。このナノワイヤをSiO₂/Si(SiO₂の厚さ: 500 nm)の基板の上に分散した後、Ni/Au電極を電子ビームリソグラフィにより形成し、高速昇温炉を用いて300 °C 30秒アニールを行った。図1にいくつかの電極を有したナノワイヤチャンネルFETを示す。

作製したInAsナノワイヤチャンネルFETはSi基板層をゲート電極として用い、室温DC特性を半導体パラメータアナライザで評価した。図2に2端子と4端子の I_d - V_d 特性を示す。ナノワイヤの抵抗を比較すると、コンタクト抵抗は小さく、抵抗率は $2.0 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{cm}^2$ であった。図3はドレイン電圧を変えたときの I_d - V_g 特性である。ゲート電圧を変えたときの特性の変化からナノワイヤはn型であることが分かる。このナノワイヤチャンネルFETの最大伝達コンダクタンス(g_m)は V_d が0.1 Vのときに0.24-0.36 μS の範囲であった。FETデバイスにおいては規格化伝達コンダクタンス $g_m^* = g_m/w_g$ (w_g はチャンネル幅)は重要な性能指数の1つである。 g_m^* は0.1 Vにおいて2.5-3.7 mS/mmの範囲であった。FET特性から電子濃度(N)と移動度(μ)は $N=2.3\text{-}5.8 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 、 $\mu=1.29\text{-}1.53 \times 10^3 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ であった。今後さらなる特性向上と、機能的な量子デバイスを目指す。

本研究は科学研究費補助金基盤研究(A)(No. 16206003、18310074)の援助を受けて行われた。

[1] Y. Li, et al., Mater. Today **9(10)** (2006) 18; C. Thelander, et al., ibid. **9(10)** (2006) 28; P. J. Pauzauskie and P. Yang, ibid. **9(10)** (2006) 36.

[2] G. Zhang, et al., ISCS2007, Kyoto, Japan, Oct. 2007, p. 142.

[3] G. Zhang, et al., J. Appl. Phys. **103** (2008) 014301.

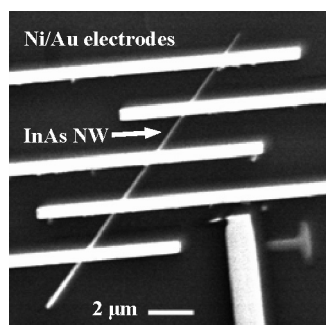


図1 InAs ナノワイヤチャンネルFET

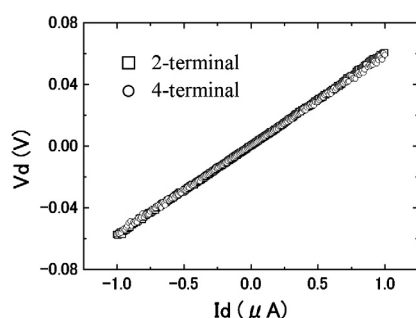


図2 2端子と4端子における V_d - I_d 特性

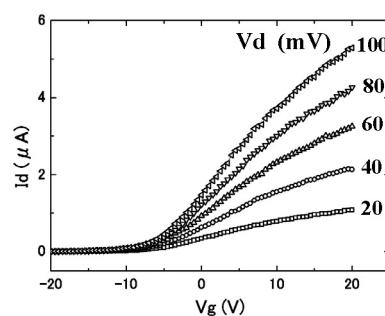


図3 ドレイン電圧を変えたときの I_d - V_g 特性

通信波長帯絶対位相制御光周波数コム(lowパルスエネルギー閾値化)

石澤 淳 西川 正 中野秀俊
量子光物性研究部

モード同期レーザの隣り合うパルス間の絶対位相(もしくはキャリアエンベロープ位相)のスリップ量はキャリアエンベロープオフセット(CEO)と呼ばれる。近年、モード同期レーザ技術の著しい進展により、CEOロックした光周波数コムが実現され、セシウム原子時計等のマイクロ波基準信号を元に正確に固定された周波数間隔と位置を持つ光周波数基準光源が得られるようになり、周波数軸上の“光のものさし”として光周波数計量分野に飛躍的な進歩をもたらした。この超高精度な波長を持つ光周波数コムを小型化し、さらに各モード1本1本の光コムを分離して自在に制御することが実現できれば、超精密分光や次世代コヒーレント通信等の新たな応用分野が飛躍的に広がる。

現在、CEO検出に必要なオクターブ帯域光発生のために、ファイバレーザベースのものでは増幅段を要し、小型化を難しくしている。また、高繰り返し周波数レーザは1パルス当りのパルスエネルギーが低くなるために高繰り返し化を難しくしている。したがって、小型化や高繰り返し化のために低パルスエネルギーでCEOロックすることが極めて重要である。

今回我々は、帯域1オクターブ以上のスーパーコンティニウム(SC)光発生の低エネルギー閾値化とCEO検出用マッハツェンダ(MZ)型干渉計における第二高調波発生の高効率化に着目し、高非線形分散シフトテルライトフォトニック結晶ファイバ(PCF)とPPLNリッジ導波路を使用した。レーザの偏光方向、テルライトPCFの長さおよびコア径を変化させて低パルスエネルギーでSC光発生の最適条件を見出し、従来記録200 pJを上回る、80 pJの低い入力パルスエネルギーで帯域1オクターブのSC光発生に成功した(図1)。この結果は、ファイバレーザ発振器だけで帯域1オクターブのSC光発生が可能であることを示している。一方、CEO信号はテルライトPCFから出力するSC光長波長成分の第二高調波とSC光短波長成分の干渉信号から検出する。テルライトPCFから出力するSC光スペクトルからCEO検出に最適な波長は965 nmであると判断し、MZ干渉計にPPLNリッジ導波路を設置して第二高調波発生の高効率化を行った結果、従来記録600 pJ[1]を上回る、230 pJの低い入力パルスエネルギーでCEOロックすることに成功した(図2) [2]。今後はPCFへの結合効率の改善等を行い、ファイバレーザ発振器のみで通信波長帯絶対位相制御光周波数コムの実現を目指す。

[1] I. Hartl, et al., Opt. Express **13** (2005) 6490.

[2] A. Ishizawa, et al., Opt. Express **16** (2008) 4706.

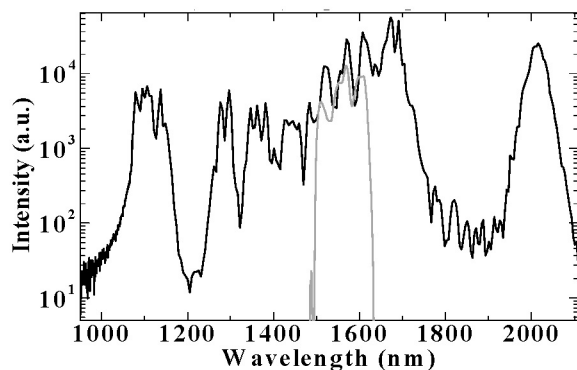


図1 帯域1オクターブのSC光スペクトル(黒色)と入射光スペクトル(灰色)

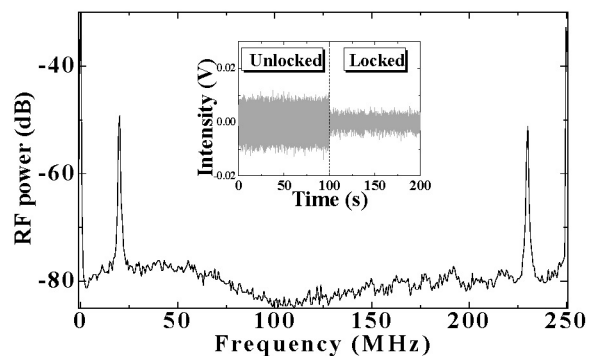


図2 CEOビート信号(黒色)とエラー信号(灰色)

高Q化合物半導体フォトニック結晶共振器の実現

新家昭彦¹ 松尾慎治² Yosia¹ 田辺孝純¹ 倉持栄一¹ 俵 毅彦¹ 館野功太¹ 佐藤具就²
 碓塚孝明² 納富雅也¹

¹量子光物性研究部 ²NTTフォトニクス研究所

フォトニック結晶(PhC)は光の波長程度の周期性を持つ人工構造で、将来の光集積回路のプラットフォームとして期待されている。特にPhCをベースとする光共振器は、モード体積が $0.1 \mu\text{m}^3$ 程度と極めて小さく、光閉じ込めの強さの指標であるQ値が極めて高い。これまで我々はSiを用いたPhC共振器の技術を用い、光を強く閉じ込める、光の伝播速度を究極まで遅くする、光の物質相互作用を増強する、など、従来の光技術の弱点を打破する新しい光制御技術の開発を目指してきた。今回我々は、今後の新しい光制御技術への展開を念頭に、通信波長帯における非線形光学効果が大きいなどSiにはない特徴を持つInGaAsPやAlGaAsなどの化合物半導体への展開を行った。

図1はInGaAsP-PhCの電子顕微鏡写真と、InGaAsP、およびAlGaAs-PhC共振器の共鳴スペクトルである。作製されたPhCはドライエッチングで直径200 nmの空気穴を三角格子状に開けた構造で、この部分は $1.55 \mu\text{m}$ 付近の波長において光の通過を許さない光絶縁体として機能する。その中に穴の開いていない直線状の領域と直線の両脇の穴を数nmシフトさせて直線幅を広げた領域があり、直線領域は光の配線に相当する光導波路、直線幅を広げた領域は光を閉じ込める共振器として機能する[1]。今回我々が作製した共振器のQ値は、InGaAsPにおいて13万(同材料で世界最高)、AlGaAs-PhCにおいて69万(Si以外で世界最高)であり、これまでの記録をおおよそ1桁更新することに成功した。今後これらの高Q共振器を、超低パワー動作の全光メモリ[2]などのアクティブ素子や、極めて高効率なオプトメカニカル波長変換素子[3]などに展開していく。

本研究は、情報通信研究機構(NICT)の受託研究の一環として行われた。

[1] E. Kuramochi, et al., Appl. Phys. Lett. **89** (2006) 241124.

[2] T. Tanabe, et al., Opt. Lett. **30** (2005) 2575.

[3] M. Notomi, et al., Phys. Rev. Lett. **97** (2006) 023903.

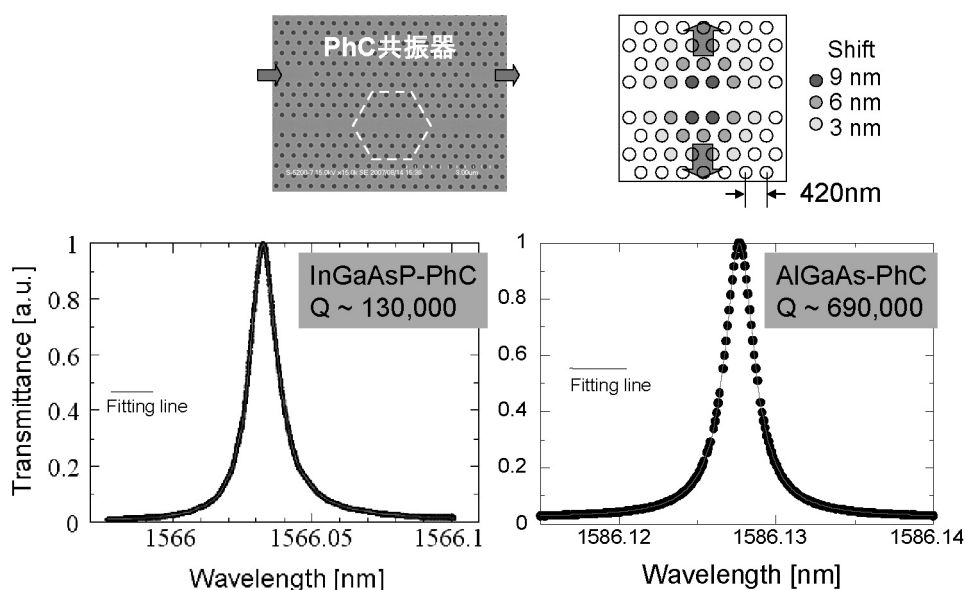


図1 InGaAsPおよびAlGaAs PhCs-PhC共振器の共鳴スペクトル

フォトリック結晶共振器全光ビットメモリ動作

新家昭彦¹ 松尾慎治² Yosia¹ 田辺孝純¹ 倉持栄一¹ 佐藤具就² 碓塚孝明²
納富雅也¹

¹量子光物性研究部 ²NTTフォトリックス研究所

我々は、Siをベースとするフォトリック結晶(PhC)で構成される共振トンネルフィルタ構造に着目し、様々なデバイスを開発している。本構造は、単一モード導波路と超小型共振器が高Q値を維持しながら高効率にカップルしているユニークな構造であり、共振器内の極めて高い光子密度により低パワーでも非線形光学効果を効率よく導き出すことが可能で、極めて低パワーで動作する全光メモリを実現できる[1]。ただ、Siの通信波長帯における非線形光学効果は小さく、結果としてメモリ保持時間を長くすることは極めて困難であった。この問題を解決するため、我々はInGaAsPをベースとするPhC共振器を開発し、極めて低パワーでかつメモリ保持時間の長い全光ビットメモリの開発に成功した。

図1にPhC共振器のビットメモリ動作を示す[2]。メモリの初期状態はOFFでメモリからはローレベルの光信号が出力されている(灰色線)。導波路よりビット情報書き込み用の光セットパルス(パルス幅100 ns)が入力されると、メモリがON状態に切り替わり、ハイレベルの光信号が出力される(黒線)。光パルス信号が消えた後もON状態が継続しており、書き込んだビット情報が正しく記憶されていることを確認できる。このメモリ保持時間は最長150 nsであり、2.5 nsのメモリ保持時間しかなかったSi-PhC共振器光メモリよりも格段に長い。また、メモリ状態を持続させるために必要なバイアス光パワーは40 μ Wであり、Si-PhCメモリに比べて約1桁、従来の双安定レーザ型光メモリの消費電力(数mW程度)に比べ約2桁低いパワーで動作可能である。本成果は、従来困難であった、チップ内集積化可能で超小型・低消費電力の光メモリ実現の可能性を示すものであり、将来の光パケットスイッチなどへの集積光メモリとして期待できる技術である。

本研究は、情報通信研究機構(NICT)の受託研究の一環として行われた。

[1] T. Tanabe, et al., Opt. Lett., **30** (2005) 2575.

[2] A. Shinya, et al., CLEO/QELS2008, San Jose, U.S.A., May 2007

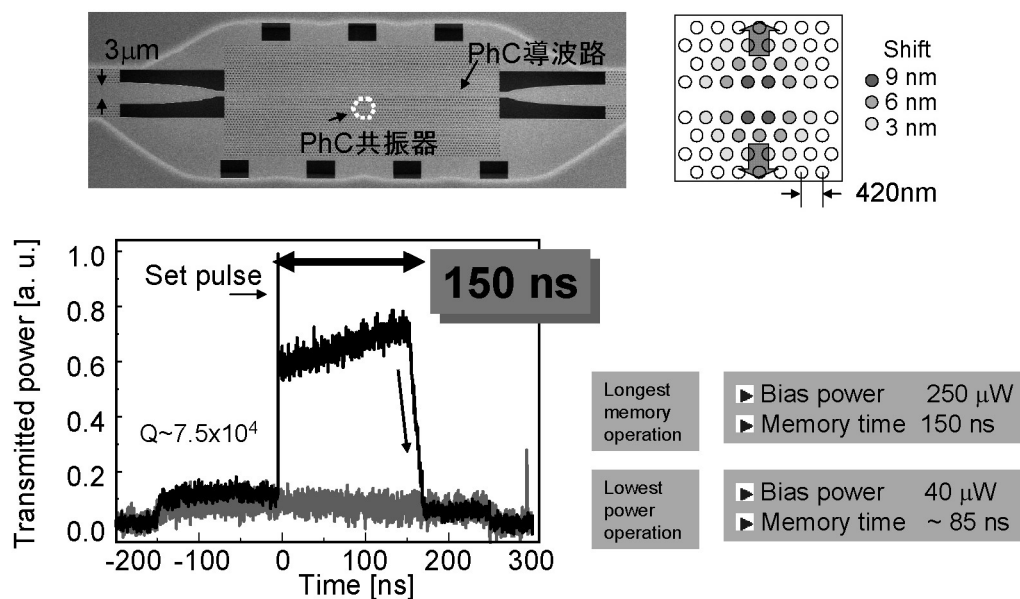


図1 InGaAsP-PhC共振器の全光ビットメモリ動作

大規模結合共振器におけるスローライト伝播

倉持栄一 田辺孝純 谷山秀昭 納富雅也
量子光物性研究部

スローライト光媒体の有力候補である結合共振器光導波路(Coupled Resonator Optical Waveguide: CROW) [1]をQ値およそ100万のシリコンフォトニック結晶(PC)共振器[2]で構成し、共振器数 N が100以上の大規模結合導波路を低損失で実現できること、また極めて遅い群速度(v_g)に相当する導波路分散を実現できることを実証してきた[3]。次の課題は広帯域かつフラットトップの透過帯域を実現し短い光パルスを実際に低群速度で歪みなく伝搬させることである。CROWと外部入出力導波路との結合を最大化するため間隔 L_{CW} を最小化するとともにインライン結合を採用し、共振器間隔を重みづけ(アポダイズ化)した(図1)。その結果CROWの透過帯域の特性は飛躍的に改善され、共振器固有の線幅よりはるかに広い連続的でフラットトップに近いものになった(図2)。実際に半値幅16 psの短パルスを伝搬させると $N=30$ で35 ps、 $N=60$ で75 psの明瞭な遅延が得られ、CROWの分散関係から決まる v_g (真空中の光速の0.0085倍)と良い一致を示した(図3)。CROW伝搬後の損失もパルス波形の歪みも十分小さい。パルスの半値幅の数倍に及ぶ遅延は他のスローライト媒体では実現し難いもので、PC-CROWの高速光通信用広帯域スローライト媒体としての可能性・優位性を実証した結果であるといえる[4]。

この研究の一部は科学技術振興機構CRESTの援助を受けた。

- [1] A. Yariv, et al., Opt. Lett. **24** (1999) 711.
 [2] E. Kuramochi, et al., Appl. Phys. Lett. **88** (2006) 041112.
 [3] E. Kuramochi, et al., CLEO/QELS2007, Baltimore, U.S.A., May 2007, 2.
 [4] E. Kuramochi, et al., CLEO/QELS2008, San Jose, U.S.A., May 2008, 3.

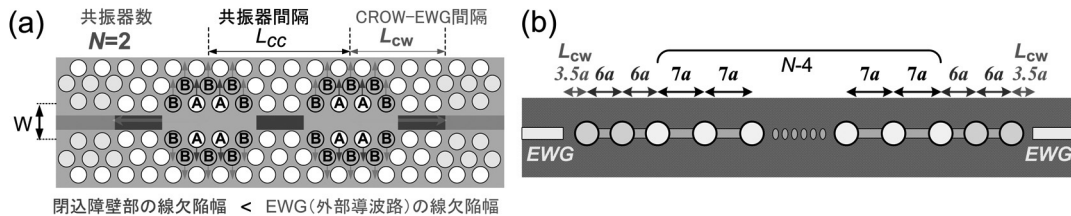


図1 (a) インライン結合構造。(b) 本研究で採用したPC-CROW構造(格子定数 $a=420$ nm, 穴半径110 nm, Si厚205 nm)。穴A/Bは矢印方向に8 nm/4 nmシフトした

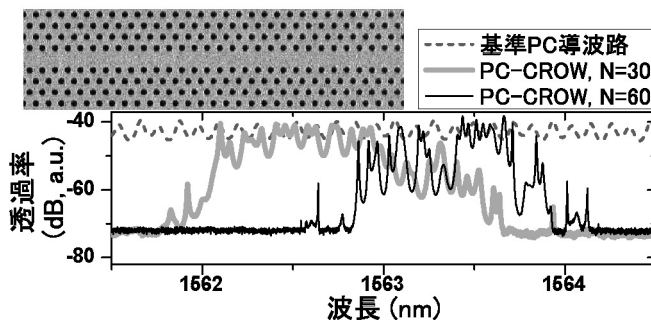


図2 PC-CROWの透過帯域のスペクトル

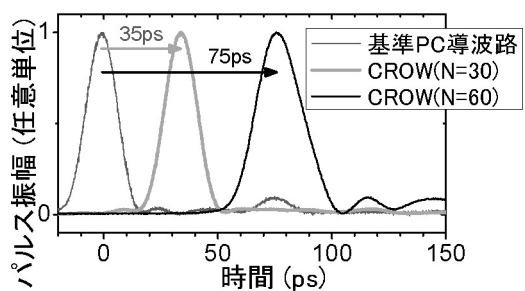


図3 導波路透過後の光パルス時間分解波形の比較(PC-CROW対基準PC導波路)

Ⅱ. 資料

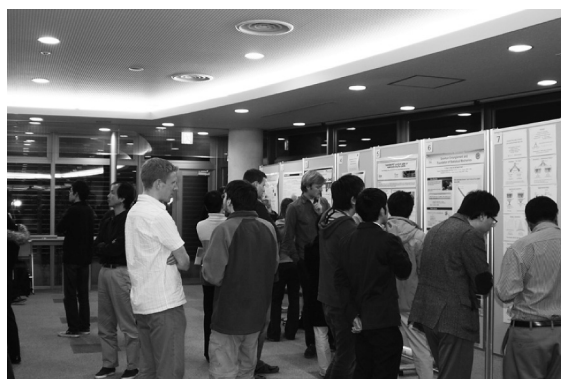
第4回 NTT 物性科学基礎研究所スクール

NTT物性科学基礎研究所では、物性物理学分野の若手研究者の育成と海外の若手研究者へのビジビリティ向上を目的として、2007年11月19日から11月22日まで、NTT厚木研究開発センタで、第4回NTT物性科学基礎研究所スクール(NTT-BRLスクール)を開催しました。第4回となる今回のNTT-BRLスクールでは、現在NTT物性基礎研が精力的に進めている研究と関わりの深い「量子情報技術の現状と今後」をテーマに、海外の著名な大学教授、国内のトップレベルの研究者を招き、12カ国35名の学生(主に大学院博士課程学生)が参加しました。

初日には、NTT物性基礎研所長から研究所の概要が紹介された後、Yoshihisa Yamamoto教授(米、スタンフォード大)による「量子情報技術の最近の進展」に関する講義がありました。Yamamoto教授の講義は、2日目、3日目の午前中にも行われ、量子情報技術の基礎理論、現在の進展状況と将来の見通しが紹介されました。教授のグループが発表した最新の成果も紹介されました。また、2日目の午後には、Jaw-Shen Tsai博士(日本、NECナノエレクトロニクス研究所)による、「超伝導量子ビット」の講義も行われました。今回初の試みとして、NTT物性基礎研の研究者による講義も行われました。1日目の午後に藤澤利正特別研究員から「量子ドットにおける単一電荷とスピンのダイナミクス」が行われ、2日目午後には仙場浩一グループリーダーから「Josephson回路における量子電磁力学」、3日目午後には、向井哲哉主任研究員から「超伝導永久電流アトムチップ」の講義が行われました。2日目には、講義に続き、参加した学生や若手研究者によるポスターセッションが開催されました。参加学生が自分の大学での研究内容について発表し、学生、講師の先生方、NTTの研究者との間で、活発な議論がなされました。3日目の講義後と4日目には、NTT物性基礎研の紹介を行いました。まず、研究設備や装置を見学してもらったためラボツアーを実施し、研究部長から各研究部の研究内容と最近の成果概要を紹介しました。続いて、同時に開催していたサイエンスプラザに参加し、各研究者から個別の研究を紹介しました。



スクール最後のFarewell Partyでは、ポスターセッションで優れた発表を行った学生に贈られるベストポスター賞の発表などで大いに盛り上がりとともに、学生は連絡先を交換するなど親睦を深めました。NTT物性基礎研は、今後もこのような交流の場を提供し、物理・応用物理学分野の研究交流、人材育成への積極的な取り組みを継続していきます。



サイエンスプラザ 2007

2007年11月22日(木)にNTT厚木研究開発センタにおいて、NTT物性科学基礎研究所の公開イベント「サイエンスプラザ2007」を“ナノサイエンスが拓く量子の世界”と題して開催しました。本イベントは、最新の研究成果について、内外の方々に広く紹介するとともに、ディスカッションを通して様々なご意見をいただくことを目的としています。

講堂において行われた講演会の午前の部では、湯本所長による開会の挨拶に続き、各研究部の部長から研究方針と展示ポスターの概要説明を行いました。午後の部では、物性科学基礎研究所の特別研究員2名によるシンポジウム講演会を開き、「単一電子状態の制御と観測」(藤澤利正 特別研究員)、「シリコンナノデバイスによる単電子制御」(藤原 聡 特別研究員)の演題で講演を行いました。いずれの講演会も盛況で、講演後には熱心な質疑応答が行われました。

ポスター展示では、今回、フォトニクス研究所とマイクロシステムインテグレーション研究所の成果4件も含め、計34件、最新の研究成果について紹介しました。研究の概要から、そのオリジナリティやインパクト、今後の展望を詳しく説明するとともに、研究内容についてかなり突っ込んだディスカッションも行われ、多くの有意義なご意見を頂きました。毎年大変ご好評を戴いている「ラボツアー」については、今回は4つの見学項目についてそれぞれ5回実施し、できるだけ多くの方に参加していただけるよう配慮しました。また、今回は初の試みとして、就職に興味のある学生の方を対象とした就職説明コーナーを開設しました。全ての講演・展示・公開・説明会を終えた後、夕刻からは社内食堂にて「懇親会」を行い、ご来場いただいた方々と親交を深めることで有意義なディスカッションの場となりました。

大学等研究機関・一般企業・NTTグループの方々など、200名を超える方々に参加いただき、お陰様を持ちまして、盛況のうちに終了することができました。ご来場いただきました方々には、心より感謝申し上げます。今後も、ポスター展示、ラボツアー等でいっただいディスカッションや、アンケートに寄せられた様々なご意見にお応えできるよう、先進的な研究に精力的に取り組んでいます。



社外表彰受賞者一覧

Photonic & Electromagnetic Crystal Structures (PECS) VII First Place Poster Award	倉持 栄一	Low Loss Long Coupled Resonator Optical Waveguides Realized Using Ultrahigh-Q Photonic Crystal Resonators	2007. 4. 10
14th Semiconducting and Insulating Materials Conferences (SIMC XIV) Young Scientist Award	谷保 芳孝	For Outstanding Contributions in Developing and Implementing Aluminum Nitride Deep-ultraviolet Light-emitting Diodes	2007. 5. 17
第31回レーザー学会 業績賞 論文賞 (オリジナル部門)	田辺 孝純 新家 昭彦 川西 悟基 納富 雅也	シリコンフォトニック結晶共振器を用いた全光スイッチおよび5 GHz RZ (Return to Zero) 光パルス列変調	2007. 5. 31
12th Optoelectronics and Communication Conference IEEE/LEOS Japan Chapter Student Award	山口 貴雄	Fabrication and Optical Properties of Hybrid-type Pillar Microcavity	2007. 7. 11
SSDM Young Researcher Award	西川 敦	High Critical Electric Field Exceeding 8 MV/cm Measured Using AlGaIn p-i-n Vertical Conducting Diode on n-SiC Substrate	2007. 9. 19
SSDM Paper Award	寒川 哲臣 後藤 秀樹 平山 祥郎 佐久 規 Paulo V. Santos Klaus H. Ploog	Optical Properties of Dynamically-modulated Dots and Wires Formed by Surface Acoustic Waves	2007. 9. 19
The 6th Annual Scientific American 50	田辺 孝純	Storing Photons in a Photonic Crystal	2007. 11. 30
Gordon Research Conferences: Magnesium in Biochemical Processes & Medicine Best Poster Presentation Award	鳥光 慶一 篠崎 陽一 古川 由里子	Magnesium Effect on Brain Neural Development	2008. 3. 13
日本発明振興協会 考案功労賞	島田 明佳 (有限会社 テストロニクス)	細線伸び計及びこれを用いた計測装置	2008. 3. 18
日本物理学会 若手奨励賞	熊田 倫雄	核スピン測定による二層量子ホール系の電子スピン状態の解明	2008. 3. 23

社内表彰受賞者一覧

先端技術総合研究所 所長表彰 研究開発賞	藤原 聡 西口 克彦 小野 行徳 山崎 謙治	シリコンナノMOSFETを用いた単電 子操作・検出技術の確立	2007. 12. 13
先端技術総合研究所 所長表彰 報道特別賞	田辺 孝純 納富 雅也 倉持 栄一 新家 昭彦 谷山 秀昭	光の伝播速度を5万分の1以下にするこ とに成功	2007. 12. 13
物性科学基礎研究 所長表彰 業績賞	齊藤 志郎 Jan Johansson 角柳 孝輔 目野 誉喜 中ノ 勇人 仙場 浩一	超伝導量子回路を用いた量子電磁力学 の実証	2008. 3. 17
物性科学基礎研究 所長表彰 業績賞	鈴木 恭一 蟹沢 聖	劈開面走査トンネル分光による電子波 干渉効果の研究	2008. 3. 17
物性科学基礎研究 所長表彰 業績賞	横尾 篤 生津 英夫	ナノ電極リソグラフィの考案と実証	2008. 3. 17
物性科学基礎研究 所長表彰 論文賞	向井 哲哉	"Persistent Supercurrent Atom Chip", Phys. Rev. Lett. 98 (2007) 260407.	2008. 3. 17
物性科学基礎研究 所長表彰 功労賞	山口 真澄 鈴木 恭一 伊藤 博之 上島 弘史 小野 行徳	Webを用いた管理システムの構築に よる液体ヘリウム回収率の大幅な改善	2008. 3. 17
物性科学基礎研究 所長表彰 功労賞	佐々木 智	物性基礎研電子ビーム露光システムの 整備	2008. 3. 17

報 道 一 覧

発表月日	新聞名	見出し
I. 機能物質科学研究部		
4月 5日	日経産業新聞	21世紀の気鋭 五感 人工的に再現 センサー開発に手応え
1月 7日	日経産業新聞	ダイヤモンド製トランジスタ 最速120ギガヘルツで動作
1月25日	日経産業新聞	紫外線LED 発光強度6倍 NTTの物性科学基礎研 半導体の結晶面改良 有害物質の無害化に道
1月29日	日刊工業新聞	早大とNTT 情報通信で組織的連携 研究・人材育成の窓口一元化
2月 4日	日経産業新聞	ナノサイズ金素材 体内分子を検出 NTT物性科研 医療応用に期待
II. 量子電子物性研究部		
6月30日	日本経済新聞	超伝導使う新素子 量子コンピュータに道
7月 2日	日経産業新聞	原子の動き磁力で制御 量子コンピューター向け
7月 2日	日刊工業新聞	真空中の原子安定補足 量子コンピューター実現に道
7月13日	日経流通新聞	超高速計算の量子コンピューター
10月11日	日経産業新聞	継続的な技術開発に高評価 2007年度技術トレンド調査(第3回) 低コスト大容量メモリー触媒の貴金属量を半減 得意分野に力発揮
12月 7日	日刊工業新聞	横浜市大 NTT物性科研と協定 ナノテク関連の教育充実
1月16日	日刊工業新聞	超伝導効果で効率発光 量子情報通信向け 北大などがLED
1月21日	日経産業新聞	LED 超伝導で光20倍強く 北大など 量子暗号通信に応用
1月22日	日経産業新聞	赤外線シリコンで検出 -NTTが高感度素子試作-
III. 量子光物性研究部		
6月 2日	日本経済新聞	盗聴困難な「量子暗号」NTT、倍の200キロ伝送
6月 4日	朝 日 新 聞	「量子暗号」実用化に道
6月 4日	日刊工業新聞	世界最速10GHzの量子暗号 光ファイバーで200km配送
6月 4日	日経産業新聞	量子暗号通信 伝送距離200キロ達成 NTTなど世界最長記録に
8月17日	日刊工業新聞	量子暗号通信 数十kmで実用化にめど 日大、NTTとシステム
11月22日	日刊工業新聞	量子多体现象 超高速で計算処理
1月18日	科 学 新 聞	フォトニック・アモルファス・ダイヤモンド 光を3次的に閉じ込め 周期性持たない構造発見 東大生産研

Ⅲ. 量子光物性研究部

盗聴困難な「量子暗号」

NTT、**倍の200_千口伝送**

NTTの国立情報学研究所、米国立標準技術研究所の所長グループは、原理的に盗聴が不可能とされる「量子暗号通信」実験で、従来記録の二倍にあたる二百キロの長距離伝送に成功した。通信速度は遅いが、東京・静岡間を上回る距離でも利用可能なことが実証できた。将来、金融機関や政府が機密情報を扱う通信需要に対応できるようにする。二日付の英科学誌

機密通信需要にらむ

「ネイチ・フオート・ワズ」
に発表する。

星野暗号通信は情報を光子（光の粒）にせよ送る。第三者が途中でのぞき見ると光の状態が必ず変化する。そのため、盗聴が検知できる。解説難な安全性の極めて高い暗号技術として国内外で研究開発が進んでいる。

NTTなどは今回、実験室内で設置した「百ミリの光ファイバー」を使って毎秒10¹⁰回の通信速度で情報を伝送した。高速で光子を送信する装置と高感度に光子を検出する装置を組み合わせ実現した。従来の通信距離記録はロスアラモス研究所などの百ミリだった。

量子暗号通信

数十kmで実用化にめど

日大、NTTとシステム

日大が井上総理
 教授にN・T・共同
 長を研究した。光通信
 帯の光を直接接続し
 着る法的な近距離使
 える用本物の量暗号
 通信用語照システ
 30倍上の速度で通信
 出器用いて、従来の
 着る成果。都部のう
 タスターと高いビル
 に、内部で電波を増幅

る機構を持つ「ヒューズ」・「ガム」・「ビス」の雪崩降伏フォトダイオード（APD）を使った単一光検出器を開発。高速に光信号を処理できる低雑音増でいた。これに今回、変動位相シフトした方式を組み合わせるとして、500psの超高速検出器を開発した。長さ15μmの光ファイバを通信路としクロック周波数500MHzで、伝送速度を行った。通信速度を表す「安全33dB配分」を毎秒0.33dBで「促来より大幅に高速化する」ことに成功。通信速度最大65μm/s通信距離を拡張することが可能とい。

APDを利用しない単一光子検出器では、 10^{-6}

の通信距離で安全鍵を

日刊工業新聞 2007.8.17

日本經濟新聞 2007.6.2

送率が毎秒0.46ビットという世界最高記録があるが、ノイズが発生するなど実用化には課題があった。今回は実用的なAPDを使いながら、世界記録と同水準の通信速度を達成できたことになる。

フォトリック・アモルファス・ダイヤモンド

光を3次元的に閉じ込め
周期性持たない構造 発見

東大生産研

新奇の御創製を表現し期待されている光の文意を、たゞ効能を述べたフットニック結晶。この果はたゞて、フットニック結晶の周知に由するといふ考え方が誤であつたが、これを覆し、周知性を主とする光に注目し、効能をモルガニク構造と表現することが殆どされた。東京工学生産技術研究所の川上圭一准教授、豊田佑太大教授、N・T物性科学基礎研究所の納羅雄也フルーリアーの研究グループによって達成された。

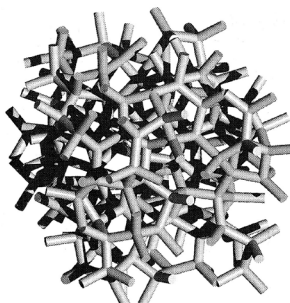
そもそもフットニック結晶は、結晶構造をまた設け、Gを付したフットニック結

・アモルファス・ダイオード (PAD) 構造に付けたという。

PADの光状態密度算結果では、誘電体丸材質はシリコン(比誘

[illegible][illegible]

枝川圭一准教授



フォトニック・アモルファス・ダイヤモンド

科学新聞 2008.1.18

科学新聞 2008.1.18

来訪者による講演一覧 (2007 年度)

I . 機能物質科学関連

講演日	講演者	講演者所属 「講演タイトル」
4月24日	Dr. Chandra S. Ramanujan	University of Oxford, U.K. 「The NTT Oxford Collaboration: Studying Biological Systems Using Atomic Force Microscopy」
5月 8日	Dr. Simon Koblar	University of Adelaide, Australia 「Stem Cell Therapy for Improvement in Stroke Outcome」
5月18日	Prof. Robert Vink	University of Adelaide, Australia 「Role of Magnesium in Brain Damage and the Receptor Relation」
5月29日	牧 英之 博士	慶應義塾大学 「カーボンナノチューブのキャリア注入制御・バンドギャップ制御」
6月 1日	Prof. Erhard Kohn	University of Ulm, Germany 「Electronic Diamond Surface Characteristics」
6月14日	塚田 信吾 教授	日本伝統医療科学大学院大学 「生体内インピーダンス計測による生体情報モニタリング 経絡の科学的解明から臨床応用へ」
9月18日	Dr. Achillefs Kapanidis	University of Oxford, U.K. 「Studying Biomachines and Biosensors Using Single-molecule Fluorescence」
10月24日	Prof. David J. Rogers	University of Technology of Troyes, France 「Use of ZnO Thin Films as Sacrificial Templates for MOVPE and Chemical Lift-off of GaN」
10月25日	山本 希美子 博士	東京大学 「血管内皮P2X4を介した循環機能調節」
11月16日	須田 淳 准教授	京都大学 「ステップ高さ制御によるSiC基板上AlN成長層の高品質化および非極性面SiC上への新規ポリタイプAlNの成長」
12月18日	寒川 誠二 教授	東北大学 「ダメージフリー中性粒子ビームプロセスが拓く先端ナノデバイス」

Ⅱ．量子電子物性関連

講演日	講演者	講演者所属 「講演タイトル」
4月 9日	森本 崇宏 氏	千葉大学 「非局所伝導を用いた「0.7構造」へのアプローチ」
7月25日	Prof. Gerald Bastard	National Center for Scientific Research, France 「Quantum Cascade Lasers in a Magnetic Field」
7月26日	Dr. Kris Helmerson	National Institute of Standards and Technology, U.S.A. 「Vortices and Persistent Currents in Bose-Einstein Condensates」
8月21日	Prof. Robert H. Blick	University of Wisconsin-Madison, U.S.A. 「Nano-electromechanical Systems」
8月22日	Prof. Hongqi Xu	Lund University, Sweden 「Symmetry, Spin Hall Effect and Zitterbewegung in Electron Waveguides with Spin-orbit Interaction」
10月 9日	小川 哲生 教授	大阪大学 「半導体量子細線における光学利得発生とキャリア間相互作用：遮蔽ハートリーフォック近似と動的平均場近似」
10月22日	Dr. Henning Riechert	Qimonda AG, Germany 「GaN and Si Nanowires: Growth Studies and Transistor Results」
10月29日	Prof. Alexey Ustinov	University of Erlangen-Nuremberg, Germany 「Temperature-induced Decoherence in Josephson Phase Qubits」
11月 5日	Prof. Klaus H. Ploog	Paul Drude Institute, Germany 「III-Nitrides Seem to be Good for Everything」
11月 2日	Prof. Hong Zhang	Sichuan University, China 「Oxygen Adsorption on the Ir (111): A First Principle Study」
11月 8日	Dr. William D. Oliver	Massachusetts Institute of Thechnology, U.S.A. 「Mach-Zehnder Interferometry and Microwave-induced Cooling in Persistent-current Qubits」
11月 8日	Dr. Tristan Meunier	Delft University of Technology, the Netherland 「Relaxation and Coherent Manipulation in Spin Qubits」

11月22日	Mr. Erik Lucero	University of California, Santa Barbara, U.S.A. 「Recent Advances in Josephson Phase Qubits : High Fidelity Gates, Quantum Memory, and Bell Violation」
12月 5日	古賀 裕明 博士	物質・材料研究機構, 日本学術振興会特別研究員 「第一原理計算による薄膜・ナノ構造成長素過程 の研究」
12月13日	Dr. Tiefu Li	NEC-RIKEN, Tsinghua University, China 「Making Use of Suspended Metal Nanostructures」
12月18日	Prof. Vladimir Antonov	Royal Holloway, University of London, U.K. 「Toward Passive Terahertz Imaging」
12月25日	Mr. Zhongchang Wang	東京大学 「First-principles Study toward the Understanding of Ag ₂ S Atomic Switch」
1月30日	定 昌史 博士	北海道大学 「超伝導発光ダイオードの実現にむけて: GaAs 系における接触抵抗の低減と伝導帯制御」
2月25日	Dr. Alberto Morpurgo	Delft University of Technology, the Netherland 「Quantum Transport through Graphene Single- and Double-layers」
3月17日	森下 弘樹 氏	慶應義塾大学 「Electrically Detected Electron and Nuclear Spin Resonance of Phosphorus in Silicon」

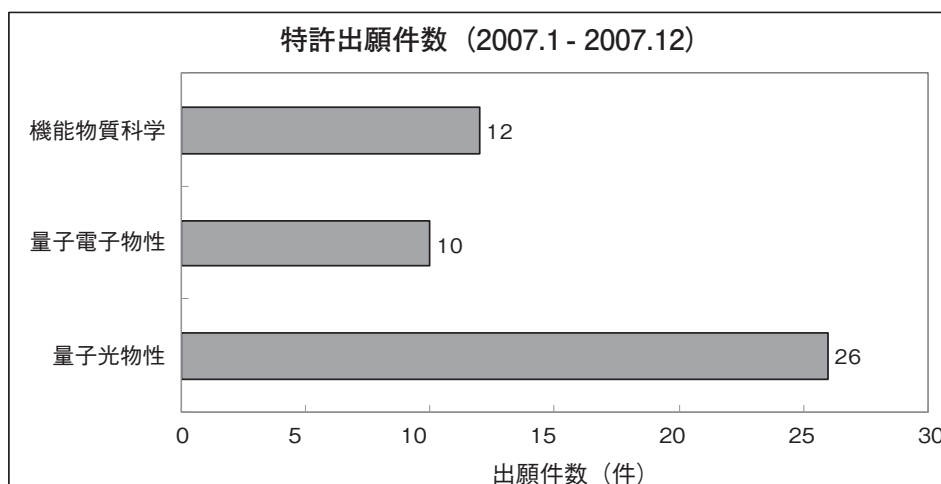
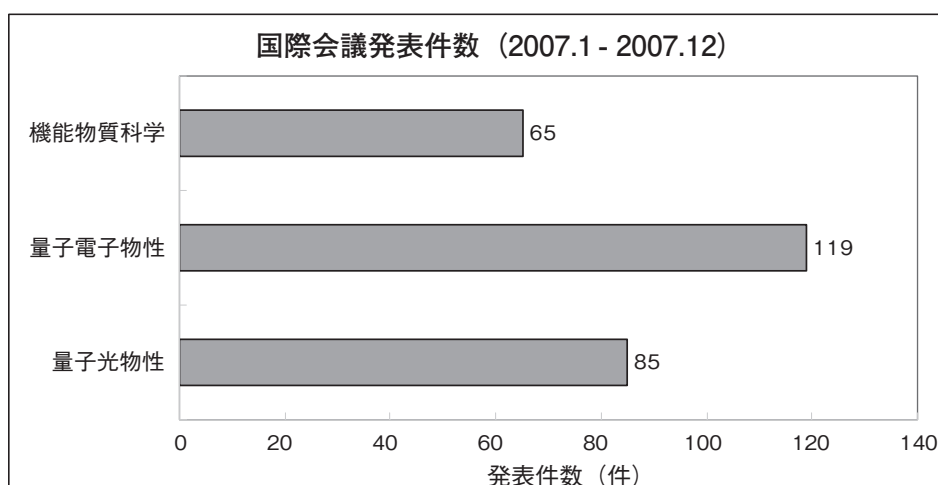
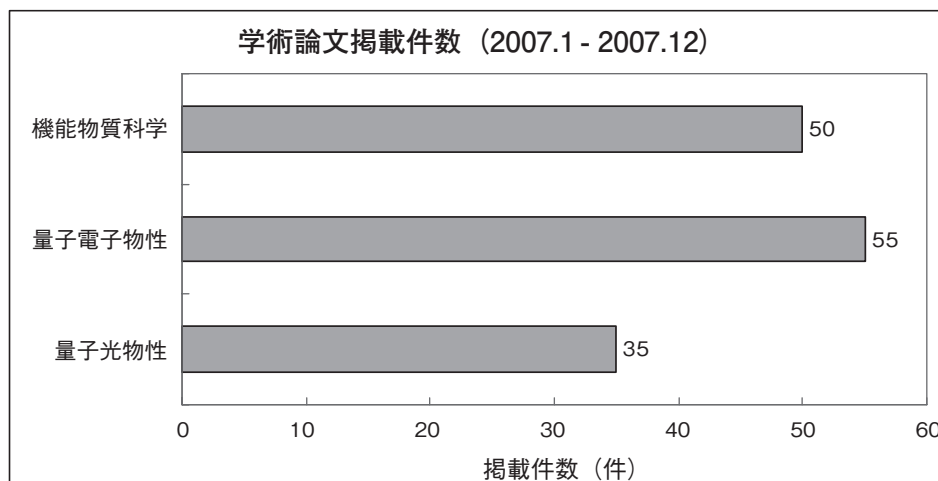
Ⅲ．量子光物性関連

講演日	講演者	講演者所属 「講演タイトル」
4月 6日	Prof. Robert M. Westervelt	Harvard University, U.S.A. 「Integrated Circuit / Microfluidic Chips for the Manipulation of Biological Cells」
5月15日	Mr. Hong C. Nguyen	University of Sydney, Australia 「Enhanced Kerr Nonlinearity in As ₂ Se ₃ Chalcogenide Fiber Tapers with Sub-wavelength Diameter」
5月31日	越野 和樹 准教授	東京医科歯科大学, JSTさきがけ 「Use of the Classical Input for Solving the Two-photon Nonlinear Dynamics」
6月22日	Dr. Qiang Zhang	Stanford University, U.S.A. 「Experimental Quantum Teleportation of a Two-qubit Composite System」

6月27日	川上 則雄 教授	京都大学 「Orbital Kondo Effect in Quantum Dot Systems - Application of the Exact Solution -」
8月 3日	Prof. Shmuel Gurvitz	Weizman Institute, Israel 「Lapse of Transmission Phase and Electron Molecules in Quantum Dots」
8月 8日	藤井 達也 博士	東京大学 「Formula of Shot Noise in a Mesoscopic Conductor Based on Keldysh Formalism」
8月22日	Prof. Shmuel Gurvitz	Weizman Institute, Israel 「Quantum Mechanical Approach to Decoherence and Relaxation Generated by Fluctuating Environment」
9月10日	Prof. Xin-Qi Li	Chinese Academy of Science, China 「Particle-number-resolved Master Equation to Quantum Transport, Quantum Measurement, and Quantum Control」
10月22日	Dr. Paulo V. Santos	Paul Drude Institute, Germany 「Control of Photons and Excitons Using Surface Acoustic Waves」
11月 9日	雨宮 智宏 氏	東京大学 「導波路型アイソレータのための強磁性金属/化合物半導体複合デバイス」
11月26日	Mr. Odilon D. D. Couto Jr.	Paul Drude Institute, Germany 「Spin Transport and Relaxation in (110) GaAs Quantum Wells Using Surface Acoustic Waves」
11月30日	Dr. Andrew Shields	Toshiba Research Europe Ltd., Cambridge Research Laboratory, U.K. 「Single Photon Technology for Quantum Information Applications」
1月 9日	Dr. Jean Benoit Heroux	東京大学 「Characterization of GaMnAs by Time-resolved Mid-infrared Transmittance and THz Emission」
1月29日	Dr. Renato Renner	Swiss Federal Institute of Technology, Switzerland 「Symmetries and Cryptography」
2月27日	Mr. Tony Pisano	NP Photonics, U.S.A. 「Recent Status in Optical Fiber Lasers in Telecom-band」
3月17日	向井 孝彰 教授	大阪市立大学 「ファイバブラッググレーティングを持つ半導体レーザーの変調特性」

学術論文掲載件数、国際会議発表件数および出願特許件数（2007年）

2007年に国内外の学術論文誌（英文）に掲載された学術論文の件数は、物性科学基礎研究所全体で140件、国際会議の発表件数は269件です。また出願特許数は48件になります。以下に分野別の件数を示します。



学術論文の主な掲載先と掲載件数は以下の通りです。

雑誌名	(IF2006*)	件数
Applied Physics Letters	3.977	26
Chemical Communications	4.521	1
IEEE Electron Device Letters	2.716	2
IEEE Transactions on Electron Devices	2.052	2
Japanese Journal of Applied Physics	1.222	19
Journal of Applied Physics	2.316	3
Journal of Crystal Growth	1.809	12
Journal of the American Chemical Society	7.696	1
Nano Letters	9.960	2
Nature	26.681	1
Nature Photonics	-	2
Nature Physics	12.040	1
Neuroscience Research	1.953	2
New Journal of Physics	3.754	3
Optics Express	4.009	7
Physica E-Low-Dimensional Systems & Nanostructures	1.084	4
Physical Review B	3.107	9
Physical Review Letters	7.072	9

*IF2006：インパクトファクター 2006（出展、Journal Citation Reports,2006）

研究所全体では、一論文当たりの平均インパクトファクターは3.23です。

国際会議の主な発表先と発表件数は以下の通りです。

国際会議名	件数
International Conference on Nanoelectronics, Nanostructures and Carrier Interactions	27
International Conference on Electronic Properties of Two-dimensional Systems and Modulated Semiconductor Structures	24
The 34th International Symposium on Compound Semiconductors	17
2007 International Conference on Solid State Devices and Materials	13
9th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures	10
Frontiers in Nanoscale Science and Technology Workshop	9
2nd International Symposium on Nanometer-Scale Quantum Physics	7
The American Physical Society	7
The Conference on Lasers and Electro-Optics and the Quantum Electronics and Laser Science Conference	7
17th International Vacuum Congress, 13th International Conference on Surface Science and International Conference on Nano Science and Technology	7
International Symposium on Advanced Nanodevices and Nanotechnology	7
Fourth International Conference on Molecular Electronics and Bioelectronics	4
The 1st Conference of New Diamond and Nano Carbons	4
Silicon Nanoelectronics Workshop	4
The 3rd Workshop of the UK-Japan Bionanotechnology Collaboration	4
15th International Conference on Nonequilibrium Carrier Dynamics in Semiconductors	4
Asian Conference on Quantum Information Science	4
20th International Symposium on Superconductivity	4

国際会議招待講演一覧 (2007)

I. 機能物質科学関連

- (1) H. Omi, T. Kawamura, Y. Kobayashi, S. Fujikawa, Y. Tsusaka, K. Kagoshima, and J. Matsui, "Strain Analysis of Semiconductor Nanoscale Thin Films by Grazing Incidence X-ray Diffraction", Symposium on Surface and Nano Science 2007, Appi, Japan (Jan. 2007).
- (2) K. Furukawa, "FRET Observation Using Lipid-flow Chip", International Mini-symposium of Surface Forces, Matsushima, Japan (Mar. 2007).
- (3) K. Kumakura, A. Nisikawa, and T. Makimoto, "Nitride-based Heterojunction Bipolar Transistors for High-power and High-temperature Electronics", The 4th International Symposium on Ubiquitous Knowledge Network Environment, Sapporo, Japan (Mar. 2007).
- (4) Y. Taniyasu, M. Kasu, and T. Makimoto, "AlN p-n Junction UV-LEDs", The 3rd Asia-Pacific Workshop on Widegap Semiconductors, Jeonju, Korea (Mar. 2007).
- (5) M. Kasu, K. Ueda, A. Tellaire, and T. Makimoto, "Diamond RF Power Transistors", 2nd International Industrial Diamond Conference, Rome, Italy (Apr. 2007).
- (6) K. Torimitsu, "Functional Analysis of Neurons and Receptor Proteins for Device Application", 1st International Symposium on Nanomedicine from Basic to Applications, Okazaki, Japan (Apr. 2007).
- (7) Y. Taniyasu, M. Kasu, and T. Makimoto, "AlN Deep-ultraviolet Light-emitting Diodes", 14th Semiconducting and Insulating Materials Conference, Arkansas, U.S.A. (May 2007).
- (8) Y. Taniyasu, M. Kasu, and T. Makimoto, "AlN Deep-UV Light-emitting Diodes by MOVPE", 12th European Workshop on Metalorganic Vapour Phase Epitaxy, Slovakia, Bratislava (Jun. 2007).
- (9) K. Ueda and M. Kasu, "Diamond Transistors for RF Power Amplifiers", IEEE MTT-S International Microwave Symposium, Hawaii, U.S.A. (Jun. 2007).
- (10) K. Ajito, "Terahertz and Raman Spectroscopy for Biological Applications", 2007 SURA Terahertz Applications Symposium, Washington, DC, U.S.A. (Jun. 2007).
- (11) H. Omi, "Scaling and Universality of Morphological Transition at the $\text{SiO}_2/\text{Si}(001)$ Interface", Gordon Research Conference on Thin Film and Crystal Growth Mechanisms, South Hadley, U.S.A. (Jun. 2007).
- (12) K. Ajito, "Terahertz and Raman Biospectroscopy", 3rd Asian and Pacific Rim Symposium on Biophotonics, Cairns, Australia (Jul. 2007).
- (13) Y. Taniyasu, M. Kasu, and T. Makimoto, "AlN Deep-UV Light-emitting Diodes", 18th European Conference on Diamond, Diamond-Like Materials, Carbon Nanotubes, and Nitrides, Berlin, Germany (Sep. 2007).
- (14) K. Torimitsu, "Protein Nanobio Device and its Configuration", 33rd International Conference on Micro- and Nano- Engineering, Copenhagen, Denmark (Sep. 2007).
- (15) M. Kasu, K. Ueda, H. Kageshima, and Y. Taniyasu, "Diamond RF FETs and Other Applications in Electronics", The 34th International Symposium on Compound Semiconductors, Kyoto, Japan (Oct. 2007).
- (16) K. Torimitsu, "Receptor Protein Analysis and Neurological Functions for Nanobio Interface", The 2nd Neural Stem Cells & Frontier Technologies for Brain Repair Workshop combined with The 2nd Australian Workshop on Computational Neuroscience, Adelaide, Australia (Dec. 2007).

II. 量子電子物性関連

- (1) K. Semba, "Vacuum Rabi Oscillations Observed in a Flux Qubit LC-oscillator System", American Physical Society March Meeting, Denver, U.S.A. (Mar. 2007).
- (2) K. Muraki, N. Kumada, and Y. Hirayama, "Low Frequency Spin Dynamics in a Quantum Hall Canted Antiferromagnet", American Physical Society March Meeting, Denver, U.S.A. (Mar. 2007).
- (3) K. Kanisawa, "Imaging Donor States in Semiconductor Structures", Frontiers in Nanoscale Science and Technology Workshop (FNST2007), Tokyo, Japan (Mar. 2007).
- (4) G. Shinkai, T. Hayashi, Y. Hirayama, and T. Fujisawa, "Electrostatic Coupling Between Two Double-quantum Dots : Toward Two-qubit Manipulation", Quantum Information Processing on Quantum Dots, Windermere, U.K. (Apr. 2007).
- (5) H. Kageshima, M. Uematsu, T. Akiyama, and T. Ito, "Microscopic Mechanism of Silicon Thermal Oxidation Process", ECS Meeting, 2007 Spring, Chicago, U.S.A. (May 2007).
- (6) H. Tamura, M. Yamaguchi, S. Nomura, T. Akazaki, T. Maruyama, S. Miyashita, and Y. Hirayama, "Simultaneous Measurement of Photoluminescence and Capacitance Spectra in a GaAs Quantum Well", Optical Properties of Low-Dimensional Systems, Ottawa, Canada (May 2007).
- (7) K. Nishiguchi, Y. Ono, A. Fujiwara, H. Inokawa, and Y. Takahashi, "Room-temperature-operating Single-electron Devices Using Silicon Nanowire MOSFET", 2007 Asia-Pacific Workshop on Fundamentals and Applications of Advanced Semiconductor Devices, Jeonju, Korea (Jun. 2007).
- (8) N. Kumada, K. Muraki, and Y. Hirayama, "NMR Study of a Canted Antiferromagnet in a Bilayer Quantum Hall System", International Conference on Electronic Properties of Two-dimensional Systems, Geneva, Italy (Jul. 2007).
- (9) I. Suemune, H. Kumano, Y. Hayashi, K. Tanaka, T. Akazaki, M. Jo, and Y. Idutsu, "Controlled Photon Generation Processes from Semiconductor Quantum Dots and their Applications", The 34th International Symposium on Compound Semiconductors, Gwangju, Korea (Sep. 2007).
- (10) C. Hufnagel, T. Mukai, and F. Shimizu, "Manipulation of Cold Atoms on a Superconductive Atom Chip", BOSE-EINSTEIN CONDENSATION 2007- Frontiers in Quantum Gases -, Sant Feliu de Guixols (Costa Brava), Spain (Sep. 2007).
- (11) Y. Ono, M. Khalafalla, K. Nishiguchi, K. Takashina, A. Fujiwara, S. Horiguchi, H. Inokawa, and Y. Takahashi, "Charge Transport in Boron-doped Nano MOSFETs : Towards Single-dopant Electronics", Fifth International Symposium on Control of Semiconductor Interfaces, Tokyo, Japan (Nov. 2007).
- (12) I. Suemune, H. Kumano, Y. Hayashi, K. Tanaka, T. Akazaki, M. Jo, and Y. Idutsu, "Photon Generation Processes from Semiconductor Quantum Dots: Their Control and Applications", 8th Chitose International Forum, Chitose, Japan (Nov. 2007).
- (13) H. Yamaguchi, I. Mahboob, H. Okamoto, and K. Onomitsu, "Micromechanical Devices for Characterizing Electron Behavior in Quantum Systems", International Symposium on Advanced Nanodevices and Nanotechnology, Hawaii, U.S.A. (Dec. 2007).
- (14) K. Muraki, "Nuclear Spin Manipulation in Semiconductor Nanostructures", Microelectronics, MEMS, and Nanotechnology 2007, Canberra, Australia (Dec. 2007).
- (15) I. Suemune, H. Kumano, Y. Hayashi, K. Tanaka, T. Akazaki, M. Jo, and Y. Idutsu, "Possibility of Semiconductor-based Single Photon Sources for Quantum Information Networks", International Conference on Microwaves and Optoelectronics, Aurangabad, India (Dec. 2007).

III. 量子光物性関連

- (1) M. Notomi, "Adiabatic Wavelength Conversion and Optomechanical Energy Conversion in Photonic Crystal Cavities", Photonics West, San Jose, U.S.A. (Jan. 2007).
- (2) H. Nakano, K. Oguri, Y. Okano, and T. Nishikawa, "Femtosecond Laser-induced Ablation Processes Observed by Picosecond-time-resolved XAFS Using Femtosecond Laser-produced Plasma Soft X-ray Pulses", The 2nd Canada-Japan SRO-COAST Symposium on Ultrafast Intense Laser Science, Quebec, Canada (Mar. 2007).
- (3) M. Notomi, A. Shinya, T. Tanabe, E. Kuramochi, and H. Taniyama, "Photonic-Crystal-Based Chip-Scale Optical Integration", Optical Fiber Communication Conference/National Fiber Optic Engineers Conference, Anaheim, U.S.A. (Mar. 2007).
- (4) M. Notomi, T. Tanabe, E. Kuramochi, H. Taniyama, and A. Shinya, "All-Optical Control of Light in Ultrahigh-Q Photonic Crystal Cavities", International Symposium on Photonic and Electromagnetic Crystal Structures VII, Montrey, U.S.A. (Apr. 2007).
- (5) M. Notomi, T. Tanabe, E. Kuramochi, A. Shinya, and H. Taniyama, "All-Optical Control of Light in Ultrahigh-Q Photonic Crystal Cavities", The European Conference on Lasers and Electro-Optics and the International Quantum Electronics Conference, Munich, Germany (Jun. 2007).
- (6) H. Nakano, "Spatiotemporally Resolved XAFS Measurement using Femtosecond Laser Plasma Soft X-ray", 3rd Asian Symposium of Intense Laser Science, Cameron Highlands, Malaysia (Jul. 2007).
- (7) M. Notomi, T. Tanabe, E. Kuramochi, H. Taniyama, and A. Shinya, "Dynamic Control of Light in High-Q Photonic Crystal Nanocavities", OSA Topical Meeting of Nonlinear Optics, Cona, U.S.A. (Jul. 2007).
- (8) M. Yamashita, "Metal-insulator Transition in the Three-dimensional Hubbard Model with Harmonic Confinement", 16th International Laser Physics Workshop, Leon, Mexico (Aug. 2007).
- (9) T. Honjo, H. Takesue, H. Kamada, K. Nishida, O. Tadanaga, M. Asobe, and K. Inoue, "Long-distance Distribution of Time-bin Entangled Photon Pairs over 100 km Using Frequency Up-conversion Detectors", 16th International Laser Physics Workshop, Leon, Mexico (Aug. 2007).
- (10) M. Notomi, T. Tanabe, E. Kuramochi, A. Shinya, and H. Taniyama, "Photonic Crystal Nanocavities: Slow Light, All-optical Processing, Wavelength Conversion, Optical MEMS", Group IV Photonics 2007, Tokyo, Japan (Sep. 2007).
- (11) Y. Tokura, "Latest Achievement in QKD Experiments at NTT", Updating Quantum Cryptography 2007, Tokyo, Japan (Oct. 2007).
- (12) H. Takesue, "R&D of Quantum Relay Technology at NTT", Updating Quantum Cryptography 2007, Tokyo, Japan (Oct. 2007).
- (13) M. Notomi, "Photonic Quasicrystal Distributed Feedback Lasers", The First International Congress on Advanced Electromagnetic Materials for Microwaves and Optics, Rome, Italy (Oct. 2007).
- (14) M. Notomi, "Control of Light in Photonic Crystals", Korea Photonics Conference, Jeju, Korea (Nov. 2007).
- (15) Y. Tokura, "Single Spin Manipulation by Electric Field in a Quantum Dot", 2nd International Workshop on Materials Science and Nano-Engineering, Awaji, Japan (Dec. 2007).
- (16) M. Notomi, T. Tanabe, E. Kuramochi, H. Taniyama, and A. Shinya, "Dynamic Control of Light by Photonic-Crystal Nanocavities", International Symposium on Advanced Nanodevices and Nanotechnology Waikoloa, Hawaii, U.S.A. (Dec. 2007).
- (17) M. Notomi, T. Tanabe, E. Kuramochi, H. Taniyama, and A. Shinya, "Dynamic Control of Light by Photonic-Crystal Nanocavities", The 5th International Conference on Advanced Materials and Devices, Jeju, Korea (Dec. 2007).

編集 “NTT 物性科学基礎研究所の研究活動” 編集委員会

尾身 博雄

河西 奈保子

鈴木 恭一

森越 文明

大谷 瑞紀

発行 日本電信電話株式会社
NTT 物性科学基礎研究所
企画担当

〒243-0198 神奈川県厚木市森の里若宮 3-1

電話：(046) 240-3312

URL：http://www.brl.ntt.co.jp/