

NTT 物性科学基礎研究所の研究活動

平成 20(2008)年度

Volume 19

2009 年 7 月

日本電信電話株式会社
物性科学基礎研究所

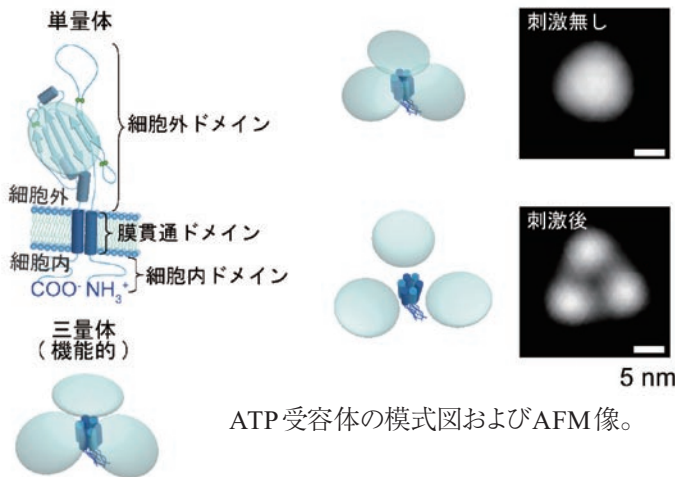
NTT Basic Research Laboratories

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

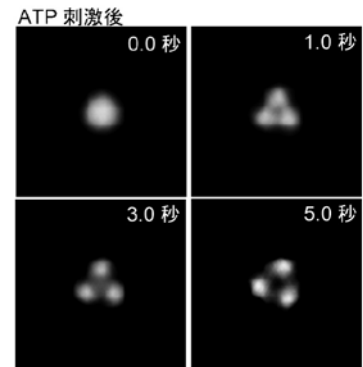
表紙の写真：

金ナノロッドの自己組織化によるアレイ化構造体

直径 10 nm、長さ 40 nm の円柱状の構造を有する金ナノロッドの様々なアレイ化構造体。金ナノロッド表面には脂質分子やポリマー分子などが修飾されている。それらの分子の自己組織化力を利用して、ナノの積み木を自在に組み上げることに成功した。ナノプラズモニック材料や分子レベルの超高感度バイオチップへむけた基盤材料として期待される。



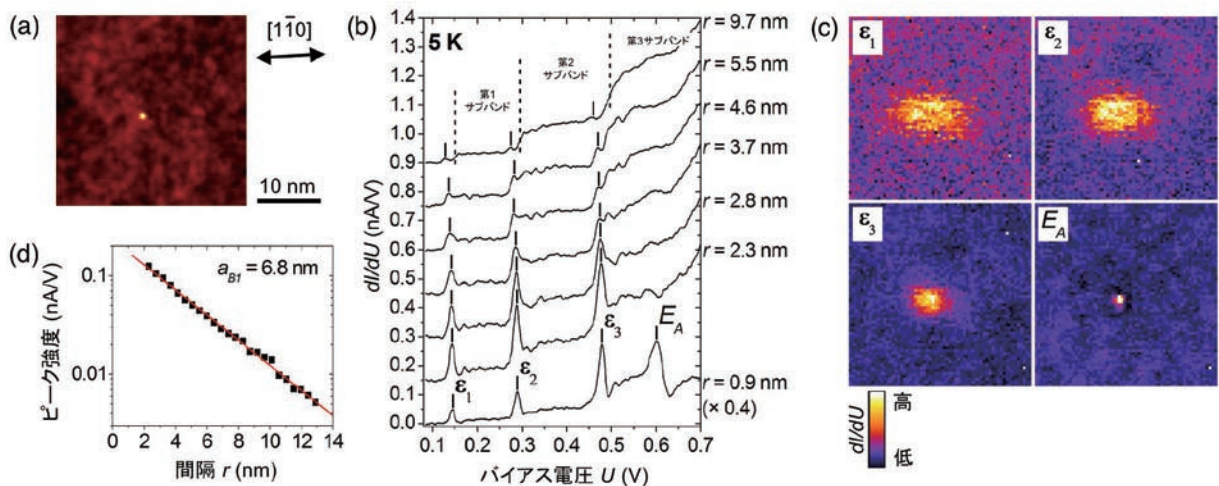
ATP 受容体の模式図およびAFM像。



ATP 受容体の構造変化観察。

高速原子間力顕微鏡による ATP 受容体の動的構造解析

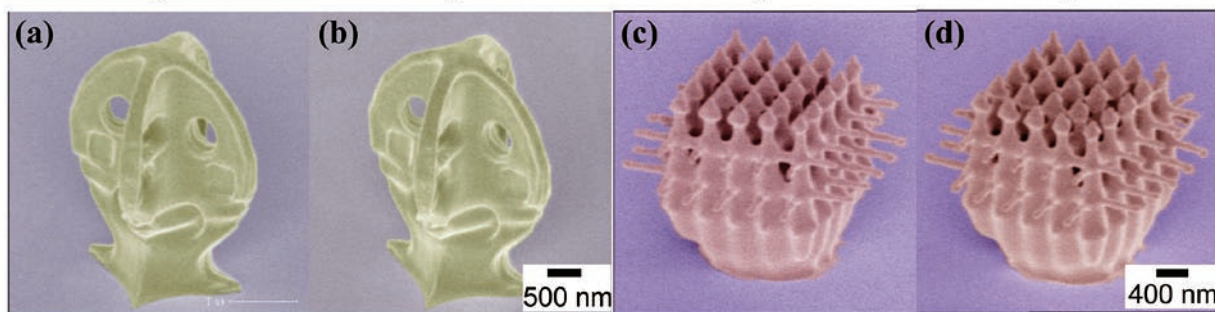
細胞内に存在する「受容体」と呼ばれるタンパク質の機能はホルモンなどの化学物質が受容体に結合することで起こる構造変化によって発揮される。例えば、受容体のうち、イオンチャネルと呼ばれるタイプの場合は化学物質が結合すると穴が開き、その中をイオンが通過することで機能を発揮する。原子間力顕微鏡 (AFM) を用いて、痛み感覚に関係するアデノシン三リン酸 (ATP) 受容体の表面構造および刺激に伴う構造変化の観察を行った (20 ページ)。



(a) 単一ドナー (輝点) の STM トポ像。(b) LDOS スペクトルのドナーからの距離 r 依存性。 $\epsilon_1 \sim \epsilon_3$ が束縛エネルギー準位を与える。(c) それぞれの束縛エネルギー準位における LDOS 像。(d) 最低準位 ϵ_1 に対応する LDOS 強度の r 依存性。これより Bohr 半径 (a_{B1}) が求まる。

水素原子様単一ドナーの Bohr 半径・束縛エネルギーの直接測定

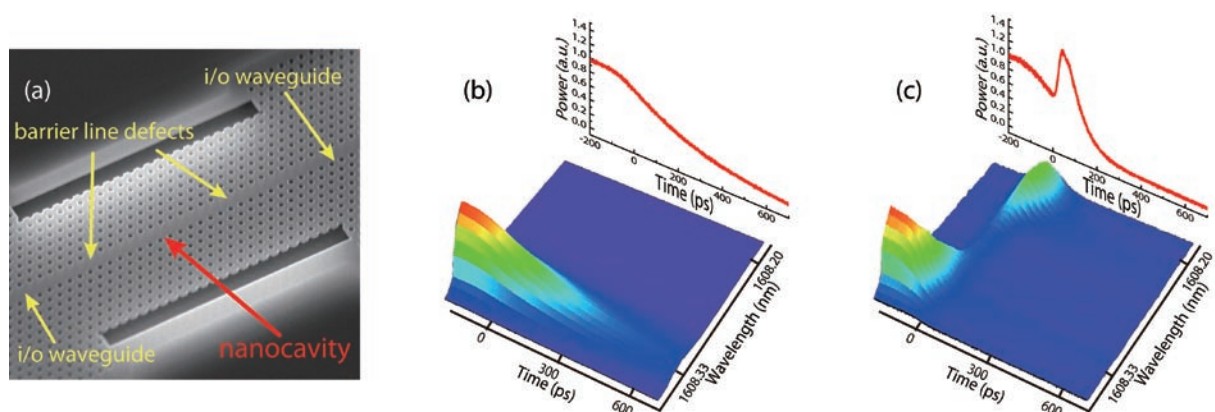
半導体デバイスに欠かせないドナー不純物の振る舞いは、水素原子モデルで近似できることが知られている。その基本特性は電子束縛エネルギーと Bohr 半径の2つで表現される。しかし、これまで単一ドナーについてこれらの物理量が測定されたことはなかった。我々は、半導体量子井戸表面の単一ドナーの近傍における局所状態密度 (LDOS) を低温走査トンネル顕微鏡 (STM) で観測することで、これらを同時に測定することに成功した (28 ページ)。



作製したポジレジストの3次元ナノ構造 [(a)、(b)] およびネガレジストの3次元ナノ構造 [(c)、(d)]。写真 (a)、(b) の組と (c)、(d) の組は各々ステレオグラムで、平行法による立体視が可能。

電子ビームリソグラフィによる3次元ナノ構造の作製

ナノテクノロジー応用が期待できる3次元ナノ構造形成について、電子ビーム(EB)リソグラフィを用いた技術を進展させた。3次元的な位置合わせ(3次元アライメント)の精度を10 nmオーダまで向上し、さらに電子散乱による近接効果を効果的に抑制する方法を実現することで、自由に3次元ナノ構造が作製できることをデモした(27ページ)。



(a) 作製した線欠陥幅変調フォトニック結晶微小光共振器の電子顕微鏡写真。共振器部分は僅かに穴の位置を線欠陥から外側にシフトしてある。(b)と(c)は時間周波数分解したフォトニック結晶光共振器に捕捉された後に出力導波路に結合した光の出力。背面には波長分解しない場合の出力時間波形を示している。(b) 共振器を変調しない場合。(c) 共振器を $t=0$ psのタイミングで変調した場合。共振器内の光が短波長にシフトすると同時に、短パルスとして高速に共振器から導波路に取り出されている。

断熱的波長変換による短パルス発生

フォトニック微小光共振器は長い光子寿命を持つので、光子を小さな領域に閉じ込めている間に、光子に対して何かしらの操作をすることが可能である。例えばギターの弦を弾いた後にその張力を変えたときに音色が変わるように、光を閉じ込めている間に共振器の屈折率を変えると、光の波長を断熱的に変換することができる。光の断熱的波長変換は物理的に興味深いだけでなく、それを利用すると共振器に閉じ込められた光を任意のタイミングで短パルスとして取り出すことが可能である。これらのデモンストレーションは光子メモリの実現に向けた重要な第一歩である(41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、通信における伝送の大容量化、絶対安全の実現といった課題を克服し、中長期的 NTT 事業への貢献を目指して研究を進めております。その課題解決を達成するために、(1) 既存の概念を根底からくつがえし変革を起こす科学技術の創出、(2) イノベーションに繋がる革新的技術の創出、(3) 萌芽研究の育成を柱として進めております。さらに、これらの成果は、普遍的知見の獲得などの学術的貢献としても大きな意義を持っていると考えています。

このような研究を進めるうえで、越えるべき研究開発のハードルはますます高くなり、さらに、そのスピードも求められています。激化する研究開発競争への対応として、グローバルな視点に立った対応が重要と考え、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頂けるように努めております。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一つと考え、内外の大学院生を積極的に受け入れ、年間で 30 名以上の学生が研究活動を行っています。また、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、この活動が、若手研究者に対する大きな刺激となり、将来の優秀な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、NTT 事業への貢献のみならず、学術的貢献も積極的に推進していく所存でございます。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。

2009 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
◆ カラー口絵	I
◆ 高速原子間力顕微鏡による ATP 受容体の動的構造解析	
◆ 水素原子様単一ドナーの Bohr 半径・束縛エネルギーの直接測定	
◆ 電子ビームリソグラフィによる 3 次元ナノ構造の作製	
◆ 断熱的波長変換による短パルス発生	
◆ ごあいさつ	III
◆ 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
◆ イオン注入と高温高压アニールにより作製したダイヤモンド FET	
◆ GaN 基板上に作製した高性能窒化物ヘテロ接合バイポーラトランジスタ	
◆ 非極性面 $\text{Al}_{1-x}\text{Ga}_x\text{N}$ (1 $\bar{1}$ 20) 薄膜 ($x < 0.2$) の面内歪の異方性	
◆ Ni (111) 基板上六方晶窒化ホウ素の MBE 成長	
◆ 走査プローブ顕微鏡によるナノ構造の光励起・電子励起発光の同時測定の実現	
◆ 単層カーボンナノチューブにおける直径依存性を示す水素吸着	
◆ エピタキシャル数層グラフェンの層数に依存した電子物性	
◆ 金ナノロッド配列構造の精密制御	
◆ 高速原子間力顕微鏡による ATP 受容体の動的構造解析	
◆ AFM による受容体タンパク質の脂質内局在に関する検討	
◆ ナノギャップ構造が脂質二分子膜の動的特性に与える影響	
◇ 量子電子物性研究部の研究紹介	23
◆ トランジスタを利用した単一電子・確率的情報処理回路	
◆ シリコントランジスタ中の単一ドーパントの位置同定	
◆ パラメトリックに加振された電気機械共振器におけるビット操作	
◆ SiC 基板上の数層グラフェンの局所導電率計測	
◆ 電子ビームリソグラフィによる 3 次元ナノ構造の作製	
◆ 水素原子様単一ドナーの Bohr 半径・束縛エネルギーの直接測定	
◆ シリコン単一量子井戸における電子-正孔共存系	
◆ ジョセフソン分岐増幅 (JBA) を用いた超伝導永久電流量子ビットの新しい測定法	
◆ 超伝導アトムチップの高安定性を実証	

- ◆ ジョセフソン永久電流量子ビットのシングルショット測定
- ◆ 低電子密度 2 次元電子系の非線形遮蔽・線形遮蔽領域の発光分光
- ◆ $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{In}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}$ ヘテロ構造における負の光伝導

◇ 量子光物性研究部の研究紹介	35
◆ 光格子にトラップされた冷却原子気体の数値シミュレーション	
◆ MgB_2 を用いた超伝導単一光子検出	
◆ シリコン細線導波路による高品質もつれ光子対発生	
◆ コリニア f - $2f$ 干渉計改善による光コムの高効率なキャリアエンベロープ オフセットロック	
◆ 励起子-共振器結合における共振モード発光と光子統計	
◆ 電荷制御量子ドットの磁気光学分光	
◆ 断熱的波長変換による短パルス発生	
◆ 超高 Q 共振器の幅狭化	
◆ 屈折率変調による超高 Q 共振器の動的形成と光のピン止め	

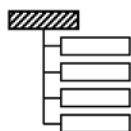
II. 資料

◇ サイエンスプラザ 2008	45
◇ ISNTT2009	46
◇ 第 5 回アドバイザリボード	47
◇ 表彰受賞者一覧	48
◇ 報道一覧	50
◇ 報道 (抜粋)	51
◇ 来訪者による講演一覧	54
◇ 学術論文掲載件数、国際会議発表件数および出願特許数	58
◇ 国際会議招待講演一覧	60

物性科学基礎研究所 所員一覧

2009 年 3 月 31 日付
(* は年度途中までの在籍者)

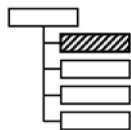
物性科学基礎研究所



所長

湯本 潤司

企画担当



企画担当

牧本 俊樹

総括担当

熊倉 一英
後藤 秀樹 *

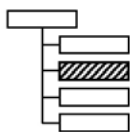
研推担当

古川 一暁
村木 康二 *

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)
丹波之宏 (静岡大学)

機能物質科学研究部



部長 **鳥光慶一**

補佐 鈴木 哲
尾身博雄*

薄膜材料研究G

グループリーダー

嘉数 誠

小林康之

赤坂哲也

植田研二

Kubovic, Michal

山本秀樹

熊倉一英*

西川 敦*

佐藤寿志

谷保芳孝

Tsai, Chiun-Lung

低次元構造研究G

グループリーダー

小林慶裕

前田文彦

鈴木 哲*

高木大輔

日比野浩樹

登倉明雄

尾身博雄

Sychukov, 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

河西奈保子

檜村吉晃

古川一暁*

島田明佳

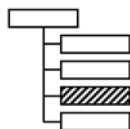
後藤東一郎

住友弘二

中島 寛

篠崎陽一

量子電子物性研究部



部長 **山口浩司**

補佐 山崎謙治
 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

小野行徳
登坂仁一郎

影島博之 西口克彦
Khalafalla, Mohammed A.H.

ナノ加工研究G

グループリーダー

山口浩司

永瀬雅夫
岡本 創
Singh, Vijay

山崎謙治＊ 山口 徹
小野満恒二 Mahboob, Imran

量子固体物性研究G

グループリーダー

村木康二

藤澤利正＊

蟹沢 聖
林 稔晶
高品 圭
Gamez, Gerardo

佐々木智＊ 鈴木恭一
太田 剛 熊田倫雄
Grove-Rasmussen, Kasper

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
狩元慎一
Wang, Ying-Dan＊
Kemp, Alexandre

向井哲哉
田中弘隆
山田義春
Zhu, Xiaobo

齊藤志郎
角柳孝輔
澤村英幸

スピントロニクス研究G

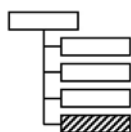
グループリーダー

赤崎達志

原田裕一
関根佳明

田村浩之 山口真澄

量子光物性研究部



部長 **都倉康弘**

補佐 佐々木智
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
原田健一

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

西川 正
舘野功太
石澤 淳
加藤景子

後藤秀樹
俵 毅彦
眞田治樹

鎌田英彦
小栗克弥
Zhang, Guoqiang

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
角倉久史

横尾 篤
谷山秀昭
野崎謙悟

倉持栄一
田辺孝純
Roh, Young-Geun

特別研究員



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)入社、光エレクトロニクス研究所勤務。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年より物性科学基礎研究所。現在同所量子光物性研究部フォトニ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、現在フォトニ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准教授。工学博士(東京大学)。2006/2007 IEEE/LEOS Distinguished Lecturer Award受賞。平成20年度学術振興会賞受賞。平成20年度日本学士院学術奨励賞受賞。日本応用物理学会、APS、IEEE/LEOS、OSA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)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、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年に日本応用物理学会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。日本応用物理学会、IEEE会員。

アドバイザーボード (2008 年度)

Name	Affiliation
Prof. Gerhard Abstreiter	Walter Schottky Institute, Germany
Prof. Boris L. Altshuler	Department of Physics, Columbia University, U.S.A.
Prof. Serge Haroche	Département de Physique, École Normale Supérieure, France
Prof. Mats Jonson	Department of Physics, Göteborg University, Sweden
Prof. Anthony J. Leggett	Department of Physics, University of Illinois at Urbana-Champaign, U.S.A.
Prof. Johan E. Mooij	Kavli Institute of Nanoscience, Delft University of Technology, the Netherlands
Prof. John F. Ryan	Clarendon Laboratory, University of Oxford, U.K.
Prof. Klaus von Klitzing	Max-Planck-Institut für Festkörperforschung, Germany
Prof. Theodor W. Hänsch	Max-Planck-Institut für Quantenoptik, Germany

招聘教授／客員研究員（2008 年度）

氏名	所属 期間
遊佐 剛	科学技術振興機構 (JST) さきがけ Apr. 2008 – Mar. 2009
古賀 貴亮	北海道大学大学院 情報科学研究科 准教授 Apr. 2008 – Mar. 2009
加藤 景子	物質・材料研究機構 (NIMS) Apr. 2008 – Jun. 2008
羽柴 秀臣	日本大学 量子科学研究所 助教 Apr. 2008 – Mar. 2009
宇都宮 聖子	情報・システム研究機構 国立情報学研究所 Apr. 2008 – Mar. 2009
内田 貴司	東洋大学工学部 助教 May 2008 – Mar. 2009
Dr. Chandra Ramanujan	University of Oxford, U.K. Nov. 2008 – Dec. 2008
Dr. Nicolas Clement	Institut of Electronics, Microelectronics and Nanotechnology (IEMN), France April 2008
Prof. Stephen Hughes	Department of Physics, Queen's University, Canada Sep. 2008 – Oct. 2008
Prof. Amnon Aharony	Ben-Gurion University of the Negev, Israel October 2008
Prof. Ora Entin-Wohlman	Ben-Gurion University of the Negev, Israel October 2008
Prof. Christos Flytzanis	École Normale Supérieure (ENS), France Nov. 2008 – Dec. 2008
Prof. Jocelyn Achard	University of Paris XIII, France Dec. 2008 – Jan. 2009

海外研修生（2008 年度）

氏名	所属	期間
Christoph Hufnagel	University of Heidelberg, Germany	Jun. 2006 –
Yosia	Nanyang Technological University, Singapore	Apr. 2007 – Apr. 2008
Edita Kirpsaite	Kaunas University of Technology, Lithuania	Jan. 2008 – Aug. 2008
John McGurk	Imperial College London, U.K.	Jan. 2008 – Aug. 2008
Miron Sadziak	Warsaw University, Poland	Jan. 2008 – Aug. 2008
Zhenzhong Wang	Chinese Academy of Sciences, China	Jan. 2008 – Dec. 2008
Thibaut Balois	École Normale Supérieure, France	Feb. 2008 – Jul. 2008
Thomas Panier	École Normale Supérieure, France	Feb. 2008 – Jul. 2008
Benjamin Miquel	École Normale Supérieure, France	Feb. 2008 – Jul. 2008
Samir Etaki	Delft University of Technology, the Netherlands	May 2008 – Dec. 2008
Taige Hou	MIT (Massachusetts Institute of Technology), U.S.A.	May 2008 – Aug. 2008
Jaap Kautz	University of Twente, the Netherlands	May 2008 – Aug. 2008
Christopher Jackson	University of Nottingham, U.K.	Jun. 2008 – Aug. 2008
Aurelien Peilloux	ESPCI (École Supérieure de Physique et de Chimie Industrielle), France	Jul. 2008 – Dec. 2008
Charline Froitier	ESPCI (École Supérieure de Physique et de Chimie Industrielle), France	Jul. 2008 – Dec. 2008
Paul Boniface	ESPCI (École Supérieure de Physique et de Chimie Industrielle), France	Jul. 2008 – Dec. 2008
Thomas Keen	University of Oxford, U.K.	Aug. 2008 – Aug. 2008
Ferry Prins	Delft University of Technology, the Netherlands	Sep. 2008 – Oct. 2008
Jelena Baranovic	University of Oxford, U.K.	Sep. 2008 – Oct. 2008
Maarten Nijland	University of Twente, the Netherlands	Jan. 2009 – Apr. 2009
Stefano Salvatore	Technical University, Milan, Italy	Sep. 2008 – Oct. 2008
Corentin Durand	University of Lille/ ISEN-Lille, France	Feb. 2009 – Jul. 2009
Pauline Renoux	INSA (Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse), France	Feb. 2009 –
Laurent-Daniel Haret	Institut d'Optique Graduate School, France	Feb. 2009 –

国内実習生（2008 年度）

氏名	所属	期間
宮本 瑞琴	湘南工科大学大学院	H20.4 ～ H21.3
酒井 裕司	東京理科大学大学院	H20.4 ～ H21.3
山谷 憲司	東京理科大学大学院	H20.4 ～ H21.3
日比野 訓士	慶應義塾大学大学院	H20.4 ～ H21.3
若原 弘行	慶應義塾大学	H20.4 ～ H21.3
和田 章良	東北大学大学院	H20.4 ～ H21.3
宮本 聡	慶應義塾大学大学院	H20.4 ～ H21.3
宮崎 康晶	慶應義塾大学大学院	H20.4 ～ H21.3
山田 都照	慶應義塾大学大学院	H20.4 ～ H21.3
野中 啓一郎	東京大学大学院	H20.4 ～ H21.3
田丸 耕二郎	東京大学大学院	H20.4 ～ H21.3
鎌田 雄仁	東北大学大学院	H20.4 ～ H21.3
日達 研一	東京大学大学院	H20.4 ～ H21.3
新海 剛	東京工業大学大学院	H20.4 ～ H21.3
小林 嵩	東北大学大学院	H20.4 ～ H21.3
楠戸 健一郎	東京大学大学院	H20.4 ～ H21.3
鎌田 大	東京工業大学大学院	H20.4 ～ H21.3
木村 啓太	東京大学大学院	H20.4 ～ H21.3
高橋 駿	東京大学大学院	H20.4 ～ H21.3
李 相潤	東京大学大学院	H20.4 ～ H21.3
岡崎 雄馬	東北大学大学院	H20.4 ～ H21.3
榊本 尚之	東京大学大学院	H20.4 ～ H21.3
新井田 佳孝	東北大学大学院	H20.4 ～ H21.3
木山 治樹	東京大学大学院	H20.4 ～ H21.3
井上 敦文	東京大学大学院	H20.4 ～ H21.3
金井 康	東京大学大学院	H20.4 ～ H21.3
高倉 樹	東京大学大学院	H20.4 ～ H21.3
長瀬 友宏	東京工業大学大学院	H20.4 ～ H21.3
影井 誠一郎	東京理科大学大学院	H20.4 ～ H21.3
鯉渕 良太	東京理科大学大学院	H20.4 ～ H21.3
森下 弘樹	慶應義塾大学大学院	H20.4 ～ H21.3
飯田 早苗	慶應義塾大学	H20.4 ～ H21.3
増山 博孝	東京理科大学大学院	H20.4 ～ H21.3
小口 寛彬	東京理科大学	H20.4 ～ H21.3

氏名	所属	期間
市古 雄城	東京理科大学大学院	H20.4 ～ H21.3
高橋 弘史	東京工業大学大学院	H20.4 ～ H21.3
鈴木 博之	東京工業大学大学院	H20.4 ～ H21.3
山本 高行	東京大学大学院	H20.4 ～ H21.3
深坂 紘行	奈良先端科学技術大学院大学	H20.5 ～ H21.2
北嶋 典仁	東京大学大学院	H20.5 ～ H21.3
小田 康彦	東京大学	H20.5 ～ H21.3
関 忠聖	大阪大学大学院	H20.7 ～ H20.9
久木田 達哉	大阪大学大学院	H20.8 ～ H20.8
上野 雄鋭	北海道大学大学院	H20.8 ～ H20.8
渡邊 敬之	東北大学大学院	H20.8 ～ H21.3
五十嵐 誠	東北大学大学院	H20.9 ～ H20.9
高波 翼	長岡技術科学大学	H20.10 ～ H21.2
大谷 孝史	長岡技術科学大学	H20.10 ～ H21.2
遠藤 洋紀	長岡技術科学大学	H20.10 ～ H21.2
森田 康平	九州大学大学院	H20.10 ～ H21.3
宮脇 哲也	東北大学大学院	H20.11 ～ H21.3
キョンボ・アントリュー・キリカ	北海道大学情報科学研究科	H20.12 ～ H21.3
川崎 公平	豊橋技術科学大学	H21.1 ～ H21.2
菅原 真之	東京大学大学院	H21.1 ～ H21.3

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（物質部）では、半導体などの無機物質から神経機能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、新しい原理に基づく革新的デバイスの創製、物質機能の解明、新機能の発現を中心に、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、ナノバイオ、ダイヤモンドデバイスについては、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。

物質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を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学との共同研究に基づく英国拠点を設置し、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ター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、2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、シリコン細線導波路からの高品質な量子もつれ光子対発生、電荷制御量子ドットの磁気光学分光、およびフォトリソグラフィ結晶高Q値共振器からの断熱的波長変換による短パルス発生などで進展が見られました。

イオン注入と高温高压アニールにより作製したダイヤモンドFET

植田研二 嘉数 誠
機能物質科学研究部

イオン注入法は幅広く用いられている半導体のドーピング法であるが、ダイヤモンドの場合は、イオン注入時に生成する損傷が従来の熱アニール法では回復せず、ドーパントが活性化しない。これは、ダイヤモンドが大気圧下で準安定相であり、熱アニール時に安定相であるグラファイトに変化するからである。現在までに我々は、高温高压 (HPHT) アニール法がイオン注入後のドーパントを活性化する手法として非常に有効であることを報告した[1]。今回我々は、HPHTアニールにより作製したホウ素(B)イオン注入層をチャンネル層に用いたFETを作製したので報告する[2]。

Ib (100) 基板上に作製したホモエピタキシャルCVDダイヤモンド薄膜に、Bイオンを加速電圧 60 keV、ドーズ量 $10^{15} \sim 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ の条件で注入し、ダイヤモンド安定条件下の 1350°C 、7 GPa の条件で、HPHTアニールを行った。次に、この薄膜を用いFETを作製した(図1)。ソース、ドレイン電極にはAu/Tiを用い、ショットキーゲート電極にはAlを用いた。また、RIEによりゲート下部をエッチングし、リセス構造とした。

ドーズ量の増加とともに、Bイオン注入薄膜のホール濃度は増加する傾向が見られ、Bドーズ量が $3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ の薄膜で、室温シートホール濃度および移動度は $1.6 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ および $41 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ となった。これらは、我々がこれまで用いてきた水素終端法とほぼ同等の値である。この薄膜を用いて作製したFETのDC電流－電圧特性を図2に示す。典型的なショットキー型FET特性を示し、最大ドレイン電流値は 0.15 mA/mm となった。図中、矢印で示すように、ドレイン耐圧 (V_{BR}) は 530 V ($E_{\text{BR}} = \sim 1.1 \text{ MV/cm}$) となり、BドーパCVDダイヤモンドショットキーダイオードで得られている値に匹敵する値が得られた。これらの結果は、HPHTアニールにより得られるB注入層が高品質であることを示している。

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, and T. Makimoto, Appl. Phys. Lett. **90** (2007) 122102.

[2] K. Ueda and M. Kasu, Physica Status Solidi (c) **5** (2008) 3175.

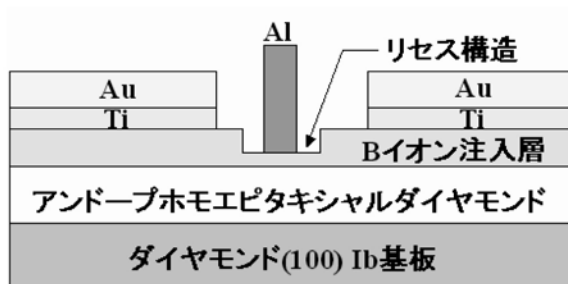


図1 Bイオン注入ダイヤモンドFETの断面構造図。

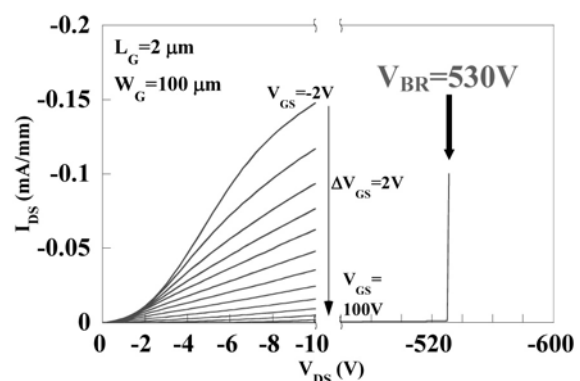


図2 Bイオン注入ダイヤモンドFETの電流－電圧特性。

GaN 基板上に作製した高性能窒化物ヘテロ接合バイポーラトランジスタ

熊倉一英 牧本俊樹
機能物質科学研究部

窒化物半導体とサファイア基板には、大きな格子不整合や熱膨張係数の差が存在する。GaNを成長するための最適な基板は、ホモ成長となるGaN基板であることは間違いない。デバイス応用の観点からも、GaN基板を使用する利点は、基板自体の転位密度が低いことや、基板の熱伝導が良いためハイパワー動作時に効率よく熱が放出されることが挙げられる。原理的にヘテロ接合バイポーラトランジスタ(HBT)は、均一な閾値を有し、高い電流密度で動作が可能である。また、ノーマリーオフ特性は、フェイルセーフシステムとして有利である。したがって、窒化物HBTはハイパワーデバイスとして有望である。本研究では、GaN基板上に作製した *pnp* AlGaIn/GaN HBT の、室温でのハイパワー動作について報告する。

図1に、サファイアとGaN基板上に作製した *pnp* AlGaIn/GaN HBT の室温での電流利得のコレクタ電流依存性を示す。GaN基板上のHBTは、コレクタ電流が30 mA時に最大電流利得が85であった。コレクターエミッタ電圧が30 V時の最大コレクタ電流密度は7.3 kA/cm²であり、最大許容損失は219 kW/cm²となる。電流利得とコレクタ電流密度はサファイア基板上的HBTと比べ増大している。計算した少数キャリアの拡散長は、電子線誘起電流測定から求めた結果とよく一致していることが明らかとなった[1]。これらの結果は、GaN基板上のHBTの輸送特性が、ベース層中の少数キャリアである正孔の拡散で律速されており、HBT中の転位密度が低いことで、電流利得が増大していることを示している。大きなエミッタ面積のHBTにおいても電流利得は47と高く、このHBTでは、図2に示すように、最大コレクタ電流は1 Aにまで達している。さらに、最大許容損失は30 Wに達し、単一のHBTでも優れた特性が得られた。このようにGaN基板上に作製したHBTが優れた特性を示すのは、転位密度が低く、高い熱伝導率を有するGaN基板の特性を効果的に活用したためである。

[1] K. Kumakura et al., Appl. Phys. Lett. **86** (2005) 052105.

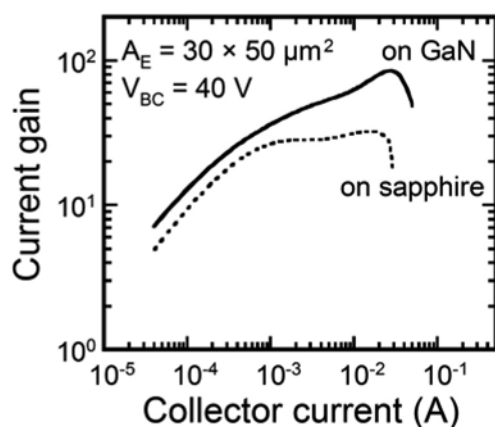


図1 GaNおよびサファイア基板上に作製したHBTの室温における電流利得のコレクタ電流依存性。

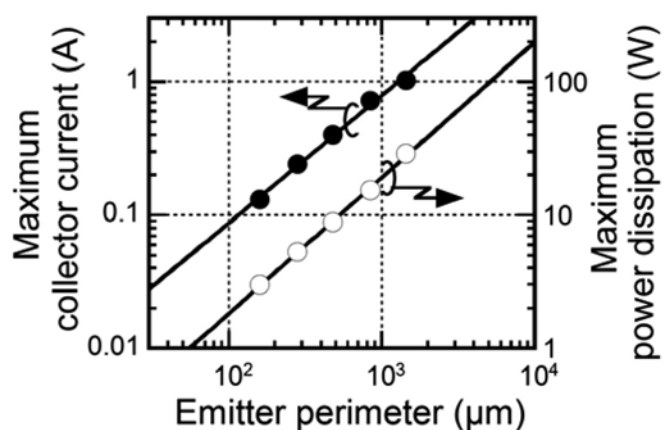


図2 GaN基板上に作製したHBTの最大コレクタ電流と最大許容損失のエミッタサイズ依存性。

非極性面 $\text{Al}_{1-x}\text{Ga}_x\text{N}$ ($1\bar{1}20$) 薄膜 ($x < 0.2$) の面内歪の異方性

赤坂哲也 小林康之 嘉数 誠
機能物質科学研究部

窒化物半導体薄膜では、従来の(0001)極性面に加えて、($1\bar{1}20$)や($1\bar{1}00$)といった非極性面が最近注目されている。極性面で問題となっていたピエゾ分極による量子井戸の発光効率の低下が、非極性面を用いることによって克服されるからである[1]。一方、SiC基板は窒化物半導体と格子不整合が小さく、電気や熱の伝導度が高い特徴があり、ヘテロエピタキシの基板として広く用いられている。ところが、SiC基板と非極性面窒化物半導体では格子定数差に異方性があり、格子整合条件が複雑となる。例えば、AlNはSiCに対してa軸は1%大きく、c軸は逆に1%小さい。本研究では、 $\text{Al}_{1-x}\text{Ga}_x\text{N}$ ($1\bar{1}20$) 薄膜 ($x < 0.2$) をSiC ($1\bar{1}20$) 基板上に作製し、格子定数、面内歪および結晶性の検討を行った。

ヘテロエピタキシでは、転位や積層欠陥の発生を抑えるために格子整合 (Pseudomorphic) 成長が重要となる。 $\text{Al}_{1-x}\text{Ga}_x\text{N}$ ($1\bar{1}20$) 薄膜の面内歪のGa組成依存性を図1に示す。Ga組成が0.06より小さい場合、 $[\bar{1}100]$ 方向の面内歪 ϵ_{xx} 、および、 $[0001]$ 方向の面内歪 ϵ_{zz} ともに、Pseudomorphicを示すそれぞれの実線に近く、Pseudomorphic成長をしている。これは、 $[\bar{1}100]$ 方向の圧縮応力と $[0001]$ 方向の引張応力がバランスするために実現された[2]。($1\bar{1}20$)面のX線ロッギングカーブ (XRC) 測定で得られた半値半幅 (FWHM) のGa組成依存性を図2に示した。 $[0001]$ 方向のチルト角の値は、(0001)面に平行な積層欠陥等の欠陥密度に対応しているが、Ga組成の増加とともに減少することが分かった。図1からも分かるとおり、Ga組成の増加とともに $[0001]$ 方向の面内歪 ϵ_{zz} が段々と小さくなるためである。

本研究では、 $\text{Al}_{1-x}\text{Ga}_x\text{N}$ ($1\bar{1}20$) 薄膜のPseudomorphic成長を実現した。さらに、非極性面窒化物半導体の面内歪はバンド構造や発光の偏光特性に影響を及ぼすため、本研究で得られた知見は非極性面を用いる発光素子の設計指針として用いることもできる。

[1] P. Waltereit et al., Nature **406** (2000) 865.

[2] T. Akasaka, Y. Kobayashi, and M. Kasu, Appl. Phys. Lett. **93** (2008) 161908.

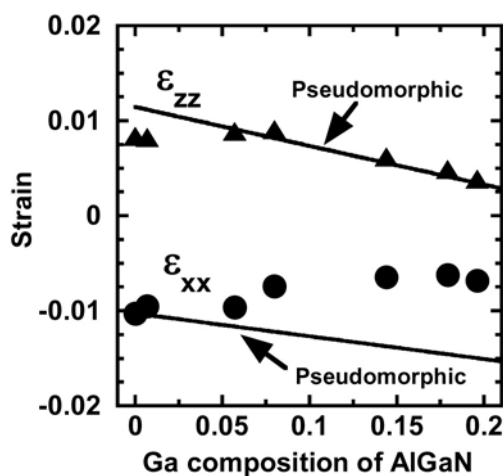


図1 $[\bar{1}100]$ 方向の面内歪、 ϵ_{xx} (●) と、 $[0001]$ 方向の面内歪、 ϵ_{zz} (▲) のGa組成依存性。

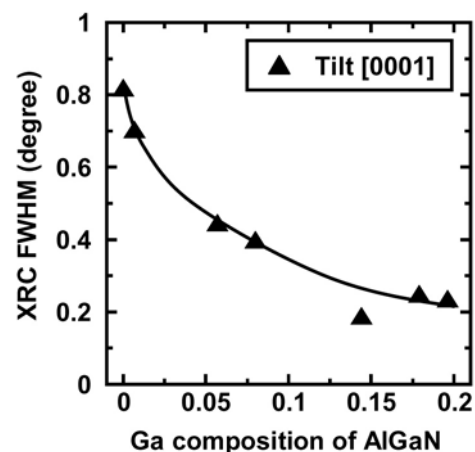


図2 $[\bar{1}100]$ 方向のチルト角のGa組成依存性。

Ni (111) 基板上六方晶窒化ホウ素の MBE 成長

Chiun-Lung Tsai 小林康之 赤坂哲也
機能物質科学研究部

六方窒化ホウ素 (*h*-BN) は、遠紫外領域の発光材料応用の可能性を有していることから、近年注目を集めている。単結晶 *h*-BN エピタキシャル成長は、有機金属気相成長法 (MOVPE) により実現されているが[1]、分子線エピタキシャル成長 (MBE) は、BN の MOVPE 成長において生じる原料間の気相反応が生じない利点を有する。しかしながら、MBE 法による BN 成長は、多結晶構造が得られているのみであり、MBE による *h*-BN エピタキシャル成長の報告は今までなかった。

我々は、今回 MBE による Ni (111) 基板上の *h*-BN エピタキシャル成長について報告する[2]。III 族および V 族原料には、電子銃より供給された固体ホウ素と RF プラズマソースより発生した活性窒素を用いた。図1は、膜厚 1000 Å の BN 成長後の Ni (111) 基板の $[\bar{1}10]$ 方向から観察した反射高速電子線回折 (RHEED) パターンである。表面再構成が生じていない強い (1×1) ストリークパターンが、MBE 成長 BN の成長初期から観測され、その (1×1) パターンは、膜厚 1000 Å の BN 成長終了まで持続的に観測された。成長温度 890°C において観測されたストリークパターンは、単結晶 *h*-BN エピタキシャル成長と原子レベルで平坦な成長表面を示している。

膜厚 1000 Å の *h*-BN エピタキシャル薄膜の X 線回折を図2に示す。Ni (111) 基板上の *h*-BN (0002) および *h*-BN (0004) からの回折ピークが、明瞭に観測され、Ni (111) 基板上に (0001) *h*-BN エピタキシャル成長が生じていることを示している。図2に挿入されたグラフは、*h*-BN (0002) の X 線ロッキングカーブであり、その半値幅は 0.61° であった。その半値幅はエピタキシャル薄膜としては最も狭い値であり、成長条件を最適化することによりさらに高品質化が期待される。RHEED と X 線回折から、*h*-BN と Ni (111) の配向関係は、 $[0001]_{h\text{-BN}} \parallel [111]_{\text{Ni}}$ 、 $[\bar{1}1\bar{2}0]_{h\text{-BN}} \parallel [\bar{1}10]_{\text{Ni}}$ および $[1\bar{1}00]_{h\text{-BN}} \parallel [\bar{1}\bar{1}2]_{\text{Ni}}$ である。今後、この MBE 成長 *h*-BN のバンド端近傍の発光特性の基礎物性評価が進展すると期待される。

[1] Y. Kobayashi et al., J. Crystal Growth **298** (2007) 325.

[2] C.L. Tsai et al., J. Crystal Growth (in press).

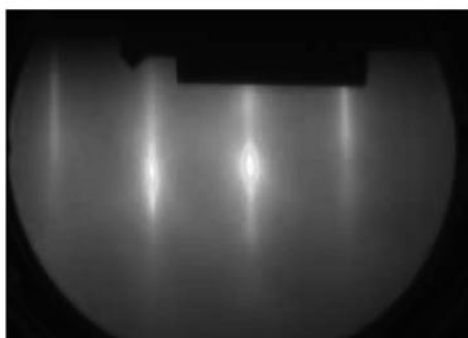


図1 BN(膜厚 1000 Å) 成長後の RHEED パターン。

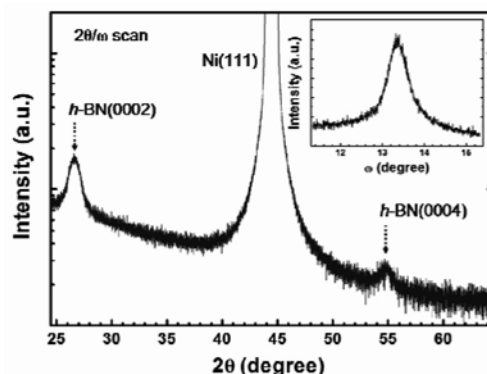


図2 *h*-BN エピタキシャル薄膜の 2θ/ω X 線回折と X 線ロッキングカーブ(挿入図)。

走査プローブ顕微鏡によるナノ構造の光励起・電子励起発光の同時測定の実現

尾身博雄 Ilya Sychugov 小林慶裕
機能物質科学研究部

ナノ構造の光学的・電氣的な特性はナノスケールで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。特に、光の回折限界を超えた分解能(約1 μm) でナノスケールの領域をプローブするためには、電子励起あるいは光励起により生じた近接場光を検出する必要がある。光励起の場合、通常、ナノ領域の近接場光は走査型近接場光学顕微鏡 (SNOM) により検出することができ、SNOMには開口型と非開口型の2つのタイプがある。開口型では、近接場光が検出できるものの、探針として誘電体を用いるため電氣的な測定には不向きである。逆に、非開口型のSNOMでは、探針として金属などを用いた場合には光照射によるプラズモン効果で探針先端に局所電場を増強させることができる。しかし、開口型SNOMとは異なり、発光測定において遠視野域での光学的な調整が必要となる。

一方、原子分解能を持つ走査トンネル顕微鏡 (STM) は半導体材料の場合にはトンネル電子が発光現象を引き起こすため電子励起の発光を測定することができる。

また、STMでは探針を試料へのトンネル電子を使ってスキャンするため通常のSNOMよりも探針を試料に近づけることができるという利点がある。また、トンネル電子による発光励起領域のサイズは約10 nm程度なので高い空間分解能の測定が期待できる。さらに、STMでは電子励起だけでなくホール励起もできるという利点がある。しかし、通常のSTM発光測定では探針として金属が使われるため、光の検出は遠視野域で行われることになり、近接場光の検出ができないという欠点がある。

今回、我々は光励起および電子励起により個々のナノ構造からの発光を近接場領域で高効率かつ高空間分解能で測定することを目的として、SNOM-STM発光装置を開発した。本装置では、金属を蒸着した透明ファイバースコープの先端に収束イオンビームによりナノスケールの開口を加工した探針(図1)をSTM動作させる。これにより通常のSNOMではできない光励起による高い集光効率の近接場発光測定と通常のSTMだけではできない電子励起による近接場発光の測定をナノスケールで同一領域に対して同時に測定することを実現した(図2) [1]。

[1] I. Sychugov, H. Omi, T. Murashita, and Y. Kobayashi, Nanotechnology **20** (2009) 145706.

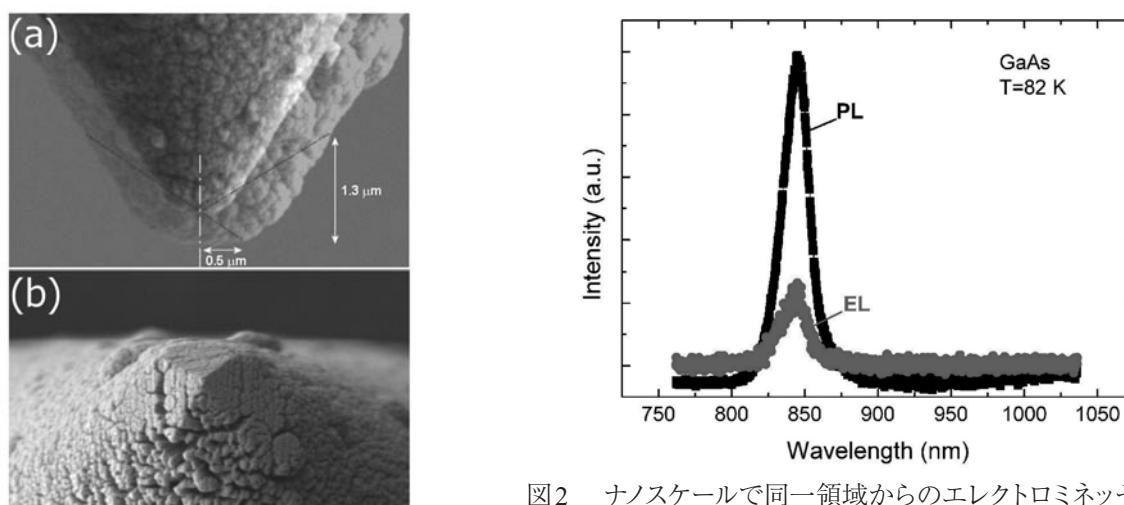


図1 開口型金属チップ。

図2 ナノスケールで同一領域からのエレクトロミネッセンス (EL) とフォトルミネッセンス (PL)。

単層カーボンナノチューブにおける直径依存性を示す水素吸着

登倉明雄¹ 前田文彦¹ 寺岡有殿² 吉越章隆² 高木大輔³ 本間芳和³

渡辺義夫⁴ 小林慶裕¹

¹機能物質科学研究部 ²日本原子力研究開発機構

³東京理科大学／CREST ⁴高輝度光科学研究センター

単層カーボンナノチューブ (SWNT) は、次世代エレクトロニクスの材料として非常に注目を集めているが、電子構造が構造に大きく依存するため特性がばらつく問題があり、SWNT 電子物性の制御は重要な課題の一つとなっている。我々は表面修飾により SWNT 構造を変調することが効果的な特性制御に結びつくと考えて研究を進めており、その材料として水素に着目した。細い SWNT において C-H 結合がより安定であること [1] や、水素の吸着量に依存してバンドギャップが変調されること [2] が理論的に予測されており、水素は特性変調の有力な候補である。さらに、結合の安定性の違いは、選択的な反応を意味し、直径に依存した特性制御につながる可能性がある。今回、表面修飾による特性制御の可能性を探るため、よく定義された条件下で原子状水素の SWNT への吸着に関する研究を行った。

原子状水素照射後にその場で測定した C1s の内殻準位スペクトルの解析により、図1に示すように吸着による C-H 結合が存在することが分かった。また、図2に示す原子状水素の照射前後に大気中で測定したラマン散乱スペクトルでは、SWNT の直径とラマンシフトの量が反比例する関係を持つ radial-breathing-mode (RBM) において、直径 1.2 nm 以下の細い SWNT からのピークが照射後に激しく減少している。すなわち、吸着によって引き起こされる構造変形が細い SWNT においてより起こりやすいことを示している。以上の結果は、水素原子は細い SWNT に選択的に吸着することを示しており [3]、水素吸着を利用することによって、ある径以下など特定の条件にある SWNT をターゲットとした特性制御の可能性を示唆するものである。

[1] T. Yildirim et al., Phys. Rev. B **64** (2001) 075404.

[2] K. A. Park et al., J. Phys. Chem. B **109** (2005) 8967.

[3] A. Tokura et al., Carbon **46** (2008) 1903.

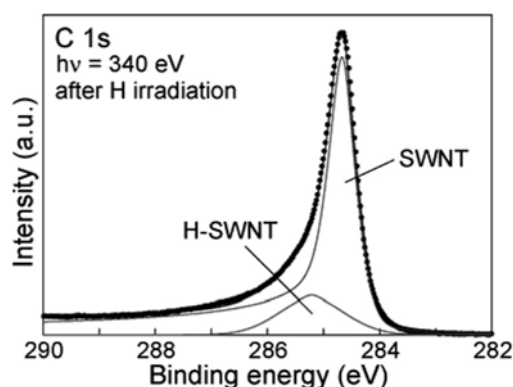


図1 水素照射後に測定したC1sスペクトルのピークフィッティング結果。

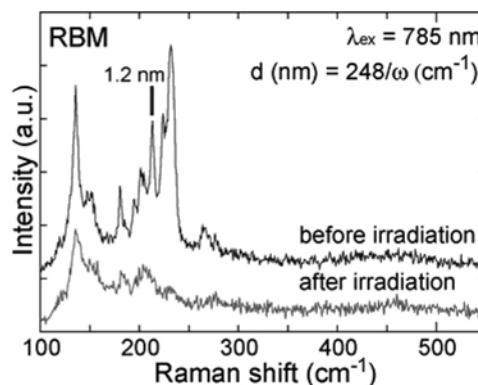


図2 水素照射前後におけるラマン散乱スペクトル(RBM領域)。

エピタキシャル数層グラフェンの層数に依存した電子物性

日比野浩樹 影島博之* 前田文彦
機能物質科学研究部 *量子電子物性研究部

グラフェンが、その優れた電気伝導特性から、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の熱分解により形成するエピタキシャル数層グラフェン(FLG)は、大面積化が可能で、デバイス集積に適しているが、層数の制御法が確立していない。そこで、我々は、低エネルギー電子顕微鏡 (LEEM) を用い、グラフェン層数をミクロスコピックに評価する手法を確立し、成長制御に用いてきた[1]。加えて、エピタキシャルFLGの電子デバイス応用には、基板がFLGの電子物性に及ぼす影響を理解することが不可欠である。基板の影響は電子物性の層数依存性として現れるため、今回、SPRING-8に設置された分光型光電子・LEEM (SPELEEM) を用い、FLGの電子物性がどのように層数に依存するかを調べた[2]。

図1は、6H-SiC (0001) 表面に成長したエピタキシャルFLGに、400 eVの放射光を入射した際に放出される二次電子を用いて結像した光電子顕微鏡 (PEEM) 像である。図1(b)に示した数字は、LEEMから求めたグラフェン層数を表している。二次電子PEEM像は、層数の異なる領域を区別可能であるが、コントラストはエネルギーとともに複雑に変化する。図2は、各層数の領域に対して、PEEM強度のエネルギー依存性から求めた二次電子放出スペクトルである。図2では、低エネルギー側の立ち上がり位置とスペクトル形状に顕著な層数依存性が見られる。二次電子の立ち上がり位置は、真空準位に対応する。1層グラフェンの仕事関数は、バルクのグラファイトに比較して、約0.3 eV低く、層数の増加に伴い、バルクの値に近づく。また、スペクトル形状の層数依存性は、FLGの層数が有限であることにより離散化した非占有電子状態から説明できる。同様の実験を、C1s内殻準位光電子についても行い、C1s結合エネルギーが層数に依存することが示された。以上の仕事関数とC1s結合エネルギーの層数依存性は、基板からの電子ドープ[3]による単純なエネルギー軸に沿うシフトではほぼ説明でき、エピタキシャルFLGの電子構造が大きく変調されることはないことが分かった。

- [1] H. Hibino et al., Phys. Rev. B **77** (2008) 075413; H. Hibino et al., e-J. Surf. Sci. Nanotechnol. **6** (2008) 107.
[2] H. Hibino et al., Phys. Rev. B **79** (2009) 125437.
[3] T. Ohta, A. Bostwick, T. Seyller, K. Horn, and E. Rotenberg, Science **313** (2006) 951.

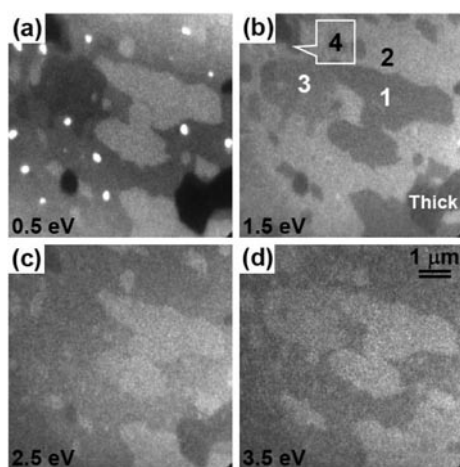


図1 6H-SiC (0001) 表面に成長したエピタキシャルFLGの二次電子PEEM像。

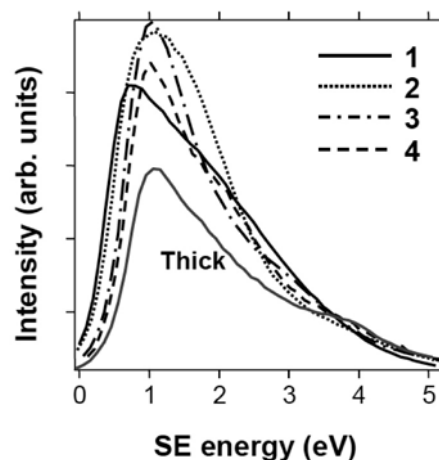


図2 エピタキシャルFLGからの二次電子放出スペクトル。

金ナノロッド配列構造の精密制御

中島 寛
機能物質科学研究部

棒状の金ナノ粒子である“金ナノロッド”は、粒子の構造アスペクト比に応じた局所表面プラズモン特性を示す[1]。また金ナノロッドを基板上で規則性良く集積化すると、個々の粒子のプラズモンが協同的に作用した物性が発現し、それを利用した次世代のナノ光・電子デバイス、バイオセンサなどの開発が指向されている。これらの機能を最大限に発揮するためには、金ナノロッドの集積構造を制御する“組織化技術”が重要な鍵を握る。今回、長さ40 nm、直径10 nmの金ナノロッド表面に、細胞膜の構成分子である脂質分子を修飾した新しいナノバイオ複合材料を合成した(図1)。脂質分子の高い自己組織化力を活かしたボトムアッププロセスにより、固体基板上で金ナノロッドの配列構造を形成させ、さらにその構造次元性、配向性、粒子間距離の精密制御を達成した[2]。

脂質分子で被覆した金ナノロッド複合体の溶液を、シリコン基板上に展開すると、複合体は1次元でside-to-sideに配列化したナノ構造体を形成する[図2(a)]。金ナノロッドの配列化は、表面の脂質分子が乾燥過程で自己組織化することにより誘起される。実際、隣接する金ナノロッド同士の粒子間は約5.0 nmの一定間隔を有し、脂質分子が粒子間で二分子膜構造を形成する距離に良く一致する。また乾燥方法を工夫すると、金ナノロッド複合体は基板上で高密度に集積し、規則的に2次元に配列化した構造体を形成する。その配列方向は、親水性シリコン表面では基板に平行であるのに対し[図2(b)]、疎水性シリコン表面では垂直に配列化する[図2(c)]。基板表面の組成－溶媒－脂質分子の間で作用する化学的親和力をうまく調節して、金ナノロッドの配向制御を実証した例である。

今回合成した金ナノロッドは、生体適合性のナノ材料である。そのため、金ナノロッド表面に膜タンパク質、酵素、抗体などの生体分子を結合し、機能させることもできる。今後、金ナノロッドがアレイ化した基板がもたらすラマンや蛍光などの分光信号の増強効果を活用し、単一分子レベルの生体反応が検出できる高感度バイオチップへの可能性を追求していく。

[1] D. P. Sprünken et al., J. Phys. Chem. C **111** (2007) 14299.

[2] H. Nakashima et al., Langmuir **24** (2008) 5654.

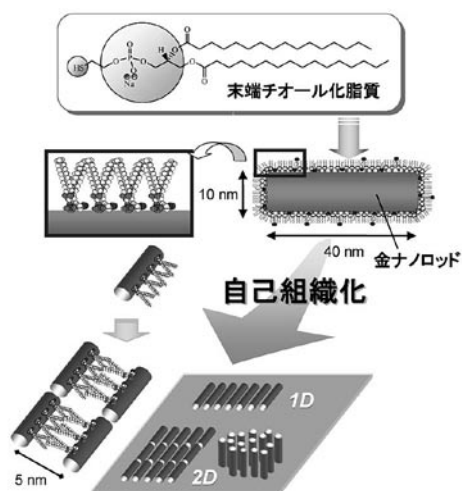


図1 脂質分子を修飾した金ナノロッド複合体とその自己組織化。

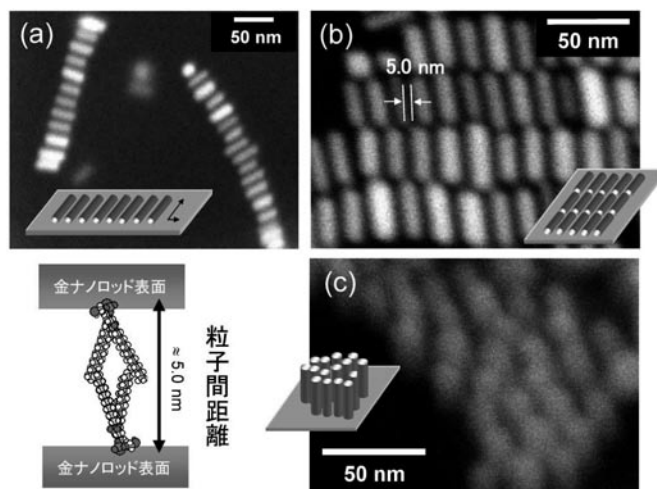


図2 金ナノロッド複合体の(a) 1次元、(b) 2次元平行、(c) 2次元垂直配列化構造。

高速原子間力顕微鏡による ATP 受容体の動的構造解析

篠崎陽一¹ 住友弘二¹ 津田 誠² 小泉修一³ 井上和秀² 鳥光慶一¹

¹機能物質科学研究部 ²九州大学 ³山梨大学

細胞内に存在する「受容体」と呼ばれるタンパク質の機能はホルモンなどの化学物質が受容体に結合することで起こる構造変化によって発揮される。例えば、受容体のうち、イオンチャネルと呼ばれるタイプの場合は化合物が結合すると穴が開き、その中をイオンが通過することで機能を発揮する。原子間力顕微鏡 (AFM) を用いて、痛み感覚に関係するアデノシン三リン酸 (ATP) 受容体の表面構造および刺激に伴う構造変化の観察を行った[1]。

株化細胞に ATP 受容体の遺伝子を多量に発現させ、その細胞の細胞膜からタンパク質を取り出した。取り出した ATP 受容体タンパク質はへき開したマイカ上に吸着させ、AFM で観察した。無刺激時の ATP 受容体は球状に近い構造をしていたが、刺激をしたものは3つ一組の構造(三量体構造)に変化していた(図1)。刺激前後の構造の違いが ATP 受容体の構造変化に由来するものかを調べるため、高速 AFM を用いて刺激に伴う ATP 受容体の構造変化を経時的に観察した(図2)。刺激前は ATP 受容体は球状に近い構造をしていた(図2、-2.5~0.0 s) が、刺激後速やかに構造を変化させ、三量体構造になった(図2、0.5 s)。刺激に伴う ATP 受容体の構造変化を詳細に解析したところ、活性化に伴う三量体への構造変化の後にさらに大きな変化をしており、3つの部分構造間の距離が増大し、中心に大きな穴状の構造が観察された(図2、2.0~5.0 s)。この構造変化が生理的な機能に相当する変化であるかを確認するため、蛍光分子を用いて ATP 受容体の分子透過度を測定した。ATP 受容体はカルシウムイオンを透過し、機能的であることを確認した。測定溶液中にカルシウムイオンがない状態で観察を行ったところ、より大きなサイズの蛍光分子であるエチジウムブロマイドの透過が確認された。カルシウムイオンが存在する場合にはエチジウムブロマイドの透過は全く観察されず、ここで観察された構造変化は、ATP 受容体が生理機能を発揮する際にイオンがその穴を通過する現象に相当することが明らかとなった。以上から、本研究では ATP 受容体の表面構造および生理機能に関連する構造変化の観察に成功した。今後は基板に作製した人工脂質膜[2]に受容体を再構成し、脂質との相互作用も含めた解析を進める予定である。

[1] Y. Shinozaki et al., PLoS Biol. (accepted).

[2] Y. Shinozaki et al., Jpn. J. Appl. Phys. **47** (2008) 6164.

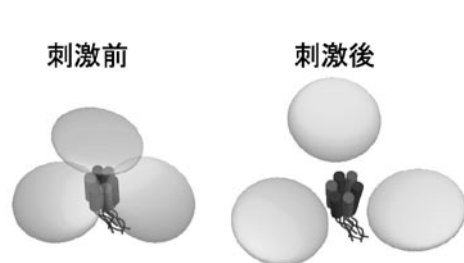


図1 刺激前後のATP受容体のモデル図。

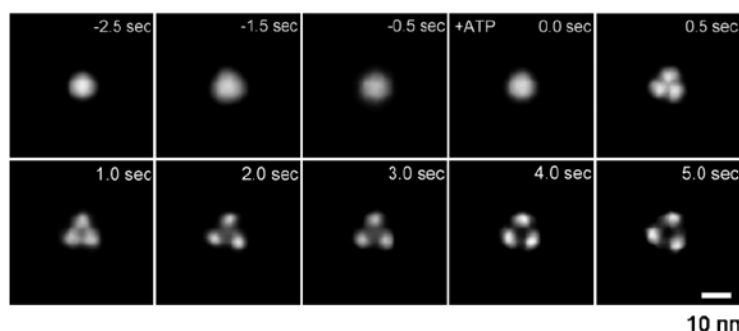


図2 刺激に伴うATP受容体の構造変化。

AFM による受容体タンパク質の脂質内局在に関する検討

河西奈保子 Chandra S. Ramanujan* Kamal Marwaha* John F. Ryan* 鳥光慶一
機能物質科学研究部 *University of Oxford

受容体タンパク質は生体膜内に存在して生物の活動に重要な役割を果たしている。受容体タンパク質は細胞外のシグナル分子(リガンド)と結合して、電気的あるいは化学的に細胞内に情報を伝達する微小でかつ非常に重要な素子である。生体膜は主に脂質分子からなっているが、近年、脳内のシナプスにおいて生体膜を構成する脂質膜が均一ではなく、その一部が特定の脂質分子が集まりラフト様構造と呼ばれる領域を形成しており、受容体タンパク質の密度や機能に影響を及ぼしている、という報告がなされ[1]、多くの関心を集めている。

本研究では、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、受容体タンパク質を再構成した際の局在について検討した。脂質は、シナプスの脂質膜を構成する脂質のうち4種類のリン脂質を異なる混合比で混合した。受容体タンパク質には神経伝達物質の受容体であるグルタミン酸受容体を用いた。グルタミン酸受容体は特に脳内で記憶や学習などを司る重要な受容体タンパク質である。

混合脂質からなる脂質膜をベシクルフュージョン法によってマイカ基板上に作製した。図1に示すとおり、マイカ基板上に高さが約5 nmの低い脂質ドメイン (LD) と、約7 nmの高い脂質ドメイン (HD) を観察することができた。HDの直径は100 nm程度であり、シナプスにおける脂質膜のラフト様構造と構造的に類似している可能性を示す。次に透析により混合脂質にグルタミン酸受容体の再構成を行った。図2に示すようにHDへより多くのグルタミン酸受容体が再構成されることが分かった[2]。このことは、脂質の組成が局在に影響を与えていることを示しており、シナプスにおいてラフト様構造へのグルタミン酸受容体の局在を示唆するものである。シナプスにおける情報伝達機構の解明に貢献するものと期待される。

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

[1] J.A. Allen et al., Nat. Rev. Neurosci. **8** (2007) 128.

[2] C.S. Ramanujan et al., 52nd Biophys. Soc. Meeting Abst. (2008) B363.

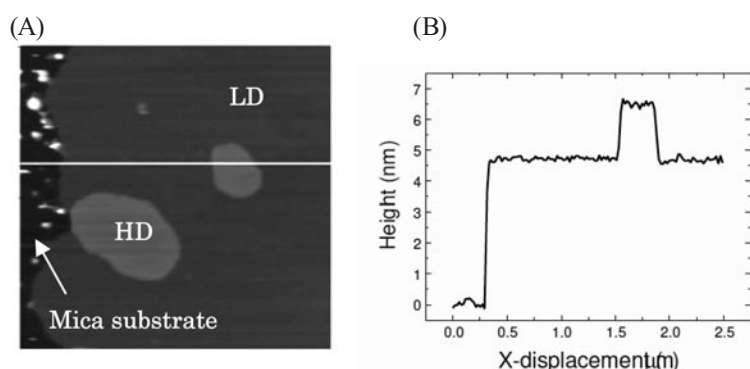


図1 マイカ上に形成した脂質膜の中のドメインのAFM像
(A、2.5 μm 角) と高さのプロファイル(B)。

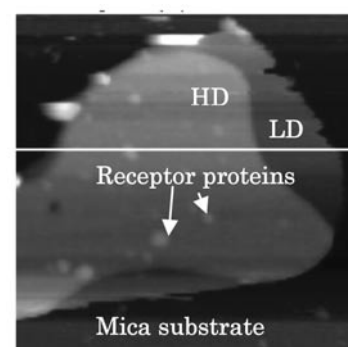


図2 受容体タンパク質を再構成した脂質ドメインのAFM像
(1 μm 角)。

ナノギャップ構造が脂質二分子膜の動的特性に与える影響

檜村吉晃 古川一暁
機能物質科学研究部

膜タンパク質を代表とする生体分子の機能発現には、生体膜が重要な役割を担っている。生体膜の基本構造である脂質二分子膜は、自己組織化によって固体表面上に人工的に作製することができ(自発展開)、膜内での流動性(側方拡散)があることも知られている。本研究では、これらの動的特性を利用して、ナノギャップ構造を持つ固体基板上での脂質二分子膜の成長を制御し、脂質膜を担体とした分子輸送における特異な効果を発見した[1]。

実験には、脂質分子として卵黄由来のL- α -ホスファチジルコリンを用い、そこに大きさの異なる蛍光色素(テキサスレッド、フルオレセイン、NBD)が結合した脂質分子を5 mol% 添加した。SiO₂ 表面に脂質二分子膜の成長のガイドとなる流路と金ナノギャップ構造 (10~200 nm) を作製した[図1(a)]。流路の両側に備えた井戸の一端に脂質分子を付着させ自発展開を開始させ、その時間発展を共焦点レーザ走査型顕微鏡で観察した。

図1(b)にフルオレセイン結合脂質分子を含む脂質二分子膜の時間発展の様子を示す。単一の脂質二分子膜が流路に沿って自発展開し、ナノギャップに到達する。10 nmの狭ギャップであっても、脂質膜は金パターンや流路壁を乗り越えることなく、ナノギャップを通過して自発展開を続けることが分かった。また、脂質膜の先端がナノギャップを通過 ($t=t_0$) して十分に時間が経過後の脂質膜の蛍光強度は、ナノギャップ前後で不連続に減少する振る舞いを観測した(図2)。この現象は、色素分子やナノギャップの大きさに依存することを見い出した。色素部位の大きさ(たかだか3 nm) と比べてナノギャップは十分に大きいにもかかわらず、色素分子はナノギャップに通過を妨げられていることが分かった。今後、ナノギャップを電極として用いることにより、電場の効果が脂質膜の自発展開に及ぼす効果を調べる。

[1] Y. Kashimura et al., Jpn. J. Appl. Phys. **47** (2008) 3248.

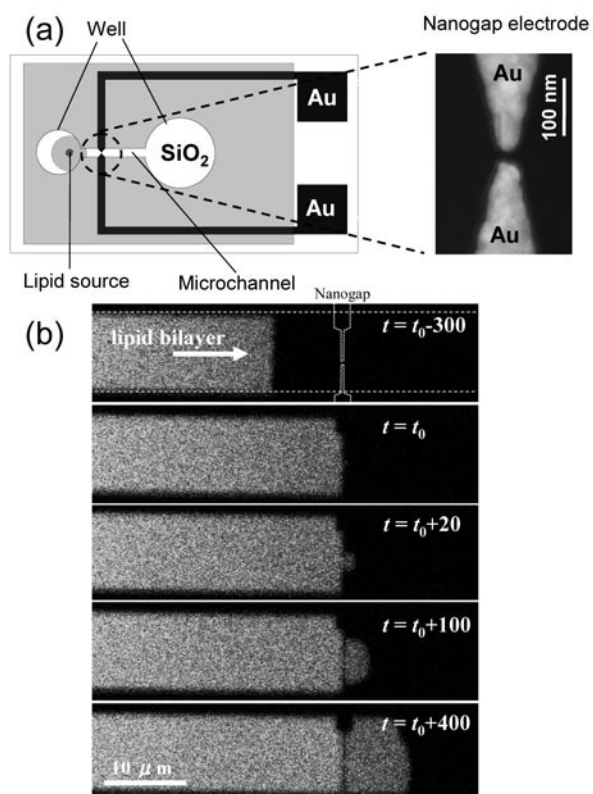


図1 (左) (a) デバイス構造、(b) フルオレセイン結合脂質を5 mol% 含む脂質二分子膜の時間発展。

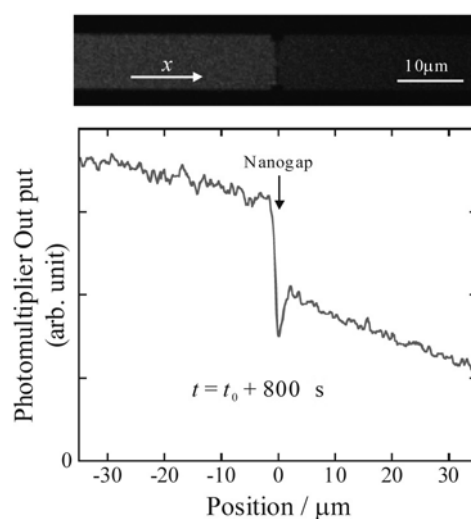


図2 ナノギャップ通過後、十分時間が経過した後のテキサスレッド結合脂質を5 mol% 含む脂質二分子膜の蛍光像および蛍光強度スペクトル。

トランジスタを利用した単一電子・確率的情報処理回路

西口克彦 小野行徳 藤原 聡
量子電子物性研究部

情報処理回路の性能向上は、トランジスタの縮小化によって実現されてきた。しかし、トランジスタの誤動作を防ぐため電源電圧を下げることは困難とされており、トランジスタに流れる電流密度は増え続け、消費電力増加の大きな原因となっている。今回我々は、電流密度を究極的に単一電子レベルまで減少させ、単一電子のランダムな動きを高品質な乱数として利用した融通性のある確率的情報処理回路を実現した[1]。

回路の基本素子はノンドープの絶縁膜上シリコンに形成した転送トランジスタ(T-FET)と電荷検出トランジスタ(D-FET)で構成される(図1)。T-FETは2層ゲート構造(UG, LG)を有しており、UGでT-FET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。2層ゲートを利用した動作により、通常のトランジスタで問題となっている欠陥に起因した電流リークが発生しないため、ESからMNへのLGによる電流制御が単一電子レベルで可能となった[1, 2]。MNに流れ込んだ単一電子は、MNと容量結合したD-FETの電流変化量で検出する(図2)。素子構造、動作条件の最適化により室温での単一電子検出を実現した[3]。単一電子がMNに注入されるタイミング δt の分布を評価することにより、単一電子の振る舞いがポアソン過程であることを確認した。これは同時にトランジスタのショットノイズをリアルタイムでモニタしたことを意味している。

ポアソン過程である単一電子のランダムな振る舞いは高品質な乱数として利用できる。今回はパターン認識回路に用いることで融通性のある回路動作を実現した。入力パターンと最も似ている参照パターンを選択する回路で、図3に示すように入力パターンとの類似性に応じた確率で参照パターンを選択する。また、この選択確率の分布はLGにより制御可能で、入力パターンが参照パターンと異なる場合でも、もっともらしい参照パターンを効率的に選択することが可能となる。これらの特徴を利用することで人間のように融通の利く回路動作が可能となり、パターン認識のみでなくデータ分類や最適化問題など多くのデータを扱う応用面などで高効率な動作が期待できる。

[1] K. Nishiguchi et al., Appl. Phys. Lett. **92** (2008) 062105.

[2] K. Nishiguchi et al., IEEE Electron Device Lett. **28** (2007) 48.

[3] K. Nishiguchi et al., Jpn. J. Appl. Phys. **47** (2008) 8305.

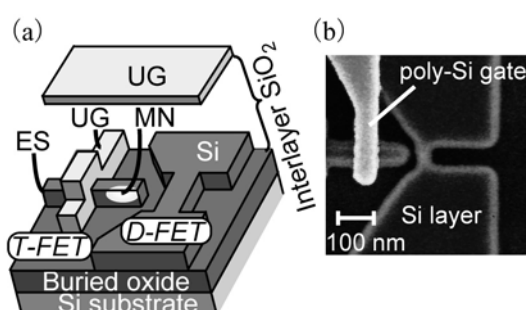


図1 シリコン・トランジスタを組み合わせた素子構造 (a)鳥瞰図 (b)電子顕微鏡写真。

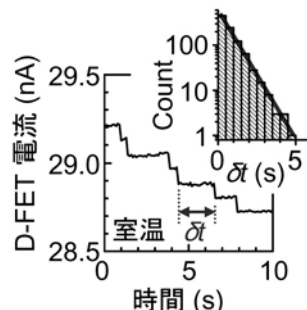


図2 単一電子電流のリアルタイム・モニタ。挿入図：単一電子がMNに注入されるタイミング δt のヒストグラム。

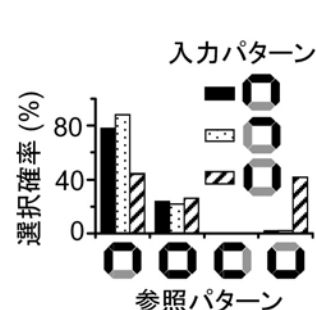


図3 融通性のあるパターン認識回路特性。入力パターンに類似した参照パターンを選択。

シリコントランジスタ中の単一ドーパントの位置同定

小野行徳 Mohammed A. H. Khalafalla 西口克彦 藤原 聡
量子電子物性研究部

電界効果トランジスタの微細化に伴い、トランジスタ中ドーパントの数や位置の揺らぎに起因した特性ばらつきが大きな問題となっている。一方、シリコン中の少数個のドーパントを利用した新しい電子デバイスの可能性も検討されはじめている。このため、トランジスタ中の単一のドーパントを検出し、その位置を特定し、さらには、電子状態を制御する技術の確立が重要となる。我々はこれまでに、トランジスタ中の単一ボロンの検出に成功するとともに、少数個のボロンを含むトランジスタの特性を詳細に調べてきた[1]。今回、単一のボロンの深さ方向の位置(酸化膜界面からの距離)を同定することに成功した[2]。

ゲート長が40 nmで、チャンネルにボロンをドーピングしたナノトランジスタを silicon-on-insulator 基板上に作製した[3]。作製においては、ソース、ドレインからチャンネルへのドーパント拡散を防ぐために、ソース、ドレインとチャンネルの間に電氣的に形成可能なリードを挿入した。これにより、極低濃度のチャンネルドーパントの影響を調べることが可能となった。図1は、フロントゲート(V_F)と基板ゲート(V_B)の関数として、 $d\text{Log}G/dV_F$ (G はコンダクタンス)を6 Kの温度で測定した結果である。ボロンを含まないトランジスタの結果[図1(a)]と比べると、単一ボロンを有するトランジスタでは、矢印で示されるコンダクタンス変調が新たに観測される。この変調は、ボロン原子による単一の正孔の捕獲に起因している。ボロン原子と各ゲートとの容量解析により、変調の現れる位置とパターンは、ボロン原子の界面からの距離に依存することが明らかとなった。図1(b)、(c)は、それぞれ、ボロン原子がフロントゲート界面近傍、およびシリコン層のほぼ中央に位置している場合の測定結果を示している。同様な容量解析を、ドレイン電圧をパラメータに行うことにより、横方向(チャンネルに沿って電流が流れる方向)の位置も調べることができると期待される。

本測定手法を発展させることにより、トランジスタ中の個々のドーパントの位置を特定する技術を確立できるものと期待される。

[1] Y. Ono et al., Appl. Phys. Lett. **90** (2007) 102106.

[2] M. A. H. Khalafalla et al., Appl. Phys. Lett. **91** (2007) 263513.

[3] Y. Ono et al., Appl. Surf. Sci. **254** (2008) 6252.

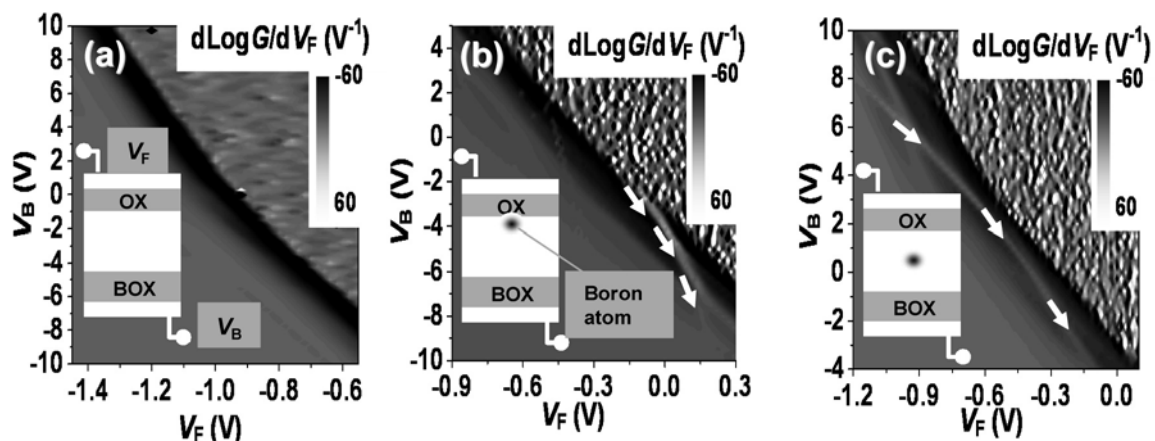


図1 コンダクタンス測定結果。(a)ボロン原子を含まない場合、(b)単一ボロン原子がフロント界面近傍にある場合、(c)シリコン層の中央にある場合。OX、BOXはフロントおよび基板ゲート酸化膜を表す。

パラメトリックに加振された電気機械共振器におけるビット操作

Imran Mahboob 山口浩司
量子電子物性研究部

19世紀の半ば、Charles Babbageはプログラム可能なコンピュータを世界で初めて提案した。彼が考案した「解析機関」と呼ばれるコンピュータは、トランジスタでも真空管でもなく、歯車やバネなどの機械部品により論理演算を行うものであった。それから約150年経った現在、コンピュータはシリコンに代表される半導体を用いたトランジスタにより構成されていることは周知の事実である。我々は、Babbageによる「機械部品によりコンピュータを構成する」という独創的な考え方を、現在のナノテクノロジー技術を用いて省エネルギーコンピュータとして復活させることを試みた。

このような「ナノ機械コンピュータ」実現への鍵となるアイデアは、同じく50年前に提案されたパラメトロンコンピュータである[1]。パラメトロンでは、パラメトリックに励振されたLC共振器において生じる位相の異なる2つの振動状態を、「0」および「1」のビット状態に対応させる。1950年代に日本において势力的に実用機が開発されたパラメトロンは、その後、速度や微細化の問題によりトランジスタに主役の座を奪われた。

我々は化合物半導体の変調ドープ構造により、圧電効果を用いてオンチップで振動の励振、検出、周波数の変調が可能な電気機械共振器を作製することに成功した。この素子では、周波数変調の機能を用いることにより機械振動のパラメトリック励振が可能であり、パラメトロンと同様に「0」および「1」のビット情報を操作できる[2, 3]。機械振動を維持するのに必要なエネルギーは極めて小さいため、桁違いに小さな電力で動作可能なコンピュータが将来的に実現できる可能性がある。

[1] E. Goto, Proc. IRE **47** (1959) 1304.

[2] I. Mahboob and H. Yamaguchi, Nature Nanotechnol. **3** (2008) 275.

[3] I. Mahboob and H. Yamaguchi, Appl. Phys. Lett. **92** (2008) 173109.

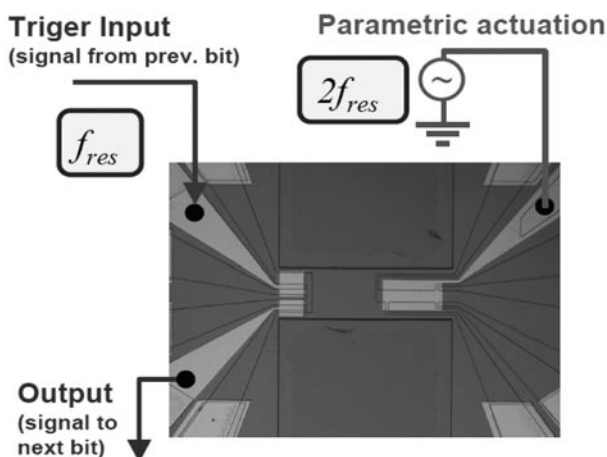


図1 GaAs/AlGaAsによる変調ドープ構造を用いて作製した電気機械共振器の顕微鏡写真。素子表面には金電極によるショットキーゲートが形成され、これに交流信号を加えることにより、パラメトロンと同様のビット動作が可能となる。

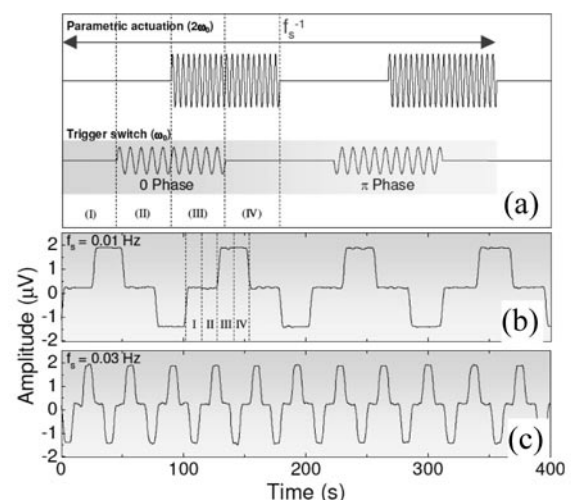


図2 (a)クロック周波数 f_s でビット動作させる際に電極に加える信号シーケンスの模式図。(b)および(c): (a)に示したシーケンスで信号を加えたときの出力信号[(b) および (c) は、それぞれ $f_s=0.01$ および 0.03 Hzの場合]。

SiC 基板上の数層グラフェンの局所導電率計測

永瀬雅夫 日比野浩樹* 影島博之 山口浩司

量子電子物性研究部 *機能物質科学研究部

グラフェンはその優れた電子物性に注目が集まり研究が盛んになっている。特にSiC基板上のエピタキシャルグラフェンは、従来の半導体プロセスとの互換性が高いため、Beyond CMOS向けの電子材料として有望である。近年、低エネルギー電子顕微鏡 (LEEM) を用いたSiC上グラフェンの高分解能層数同定技術が確立された[1]。この技術を用いることにより数層グラフェンの層数、および、形態を制御することが可能となった。我々が取り組んでいるグラフェン・シングルレイヤエレクトロニクスの実現に向けての次の重要な課題が、グラフェン成長後の電気的な特性の顕微的な評価である。この目的のため、これまでに走査プローブ顕微鏡 (SPM) のSiカンチレバー上に集積化した数種類のナノツールを開発してきた[2]。本稿では、ナノツールの1つである集積化ナノギャッププローブによるグラフェンのナノオーダー局所導電率の計測結果について述べる[3]。

図1は、ナノグラフェンの面内導電率像、および、個別のナノ構造の導電率プロファイルである。この試料のグラフェンの被覆率はLEEMの観察結果を用いて注意深く制御してある。集積化ナノギャッププローブによる局所導電率の計測結果からこれらのナノグラフェンは1層と2層からなることが分かった。計測に用いたナノツールでは30 nmのナノギャップに隔てられた2つのPt電極をカンチレバー上に集積化しているため、絶縁基板上のナノ構造であってもリソグラフィ等のプロセス工程を経ることなく電気特性の取得が可能である。図2はSiC上に均一に成長した2層グラフェンの局所導電率像である。LEEM観察からは2層グラフェンの単結晶ドメインがステップを越えて形成されていることが確認されている。一方、図2の導電率像、および、導電率プロファイルでは試料表面のステップ構造に由来する導電率低下が明瞭に観察される。ナノ分解能を有する導電率マッピング技術は、カーボンベースのシングルレイヤエレクトロニクスの実現に向けた有用な技術であることを示すことができた。

なお本研究の一部は科研費 (19320085、20246064) の助成を受けて行われた。

[1] H. Hibino et al., Phys. Rev. B **77** (2008) 075413.

[2] M. Nagase et al., Jpn. J. Appl. Phys. **46** (2007) 5639.

[3] M. Nagase et al., Nanotechnol. **19** (2008) 495701.

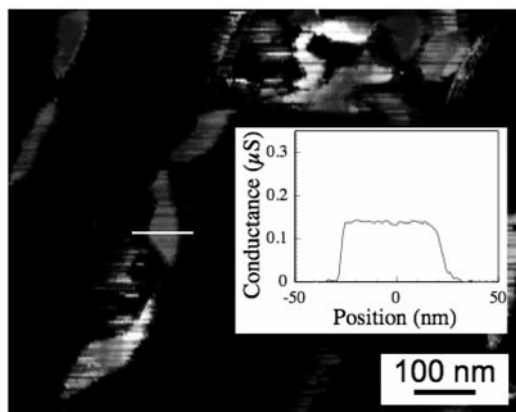


図1 SiC基板上ナノグラフェンの面内導電率像と導電率プロファイル。

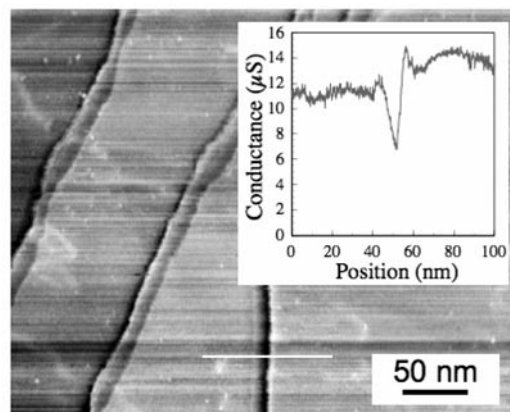


図2 集積化ナノギャッププローブによる2層グラフェンの局所導電率像とステップ構造部の導電率プロファイル。

電子ビームリソグラフィによる3次元ナノ構造の作製

山崎謙治 山口浩司
量子電子物性研究部

3次元ナノ構造を作成する技術は、NEMS (ナノ電気機械システム) やナノロボティクスなど種々のナノテクノロジー応用を目的として、重要性が増してきている。我々が開発してきた3次元電子ビームリソグラフィ (3D-EBL) は、解像度・加工速度などの点で他の3次元ナノ加工技術より優れているが、電子散乱による近接効果が大きいこと、また3次元アライメント精度 (位置精度) が十分でない、という問題があった。これらを解決する新しい手法を実現した。

3D-EBLによるレジスト材料加工の基本プロセスは、(1) 基板上的厚膜レジスト塗布、(2) 2次元EBLによるレジストブロック作製、(3) 試料回転と様々な方向からのEB描画、等からなる。この手法で複雑な3次元ナノ構造を作製するためには、全く異なった方向からのEB描画をレジストブロック中で3次元的に位置合わせすること、つまり3次元アライメントを高精度に実現することが必要であった。そのために、透過電子像を用いた、高精度の試料回転制御 (<1 mrad) と回転させた試料上への2次元描画の十分な位置精度を得る手法を新たに開発した[1]。図1は、10 nm オーダの3次元アライメント精度を実証する、ネガレジスト (水素化シルセスキオキサン、HSQ) 製の3次元ナノ構造である。ポジレジストを用いた場合、近接効果がより深刻になるが、目的となるレジスト構造の周囲に、散乱電子の一種である高速2次電子の飛程程度の寸法のバッファ領域 (EBを照射しない領域) を設けるといふ、新たな手法を開発した。バッファ領域は、次の3D-EB描画のステップで除去する。この手法により近接効果を低減し、厚さ方向の構造の制御性を大幅に改善することができた[2]。図2は、ポジレジスト (ポリメチルメタクリレート、PMMA) 製の3次元ナノ構造である。本手法により、高い構造自由度および高アスペクト比 (>10) を有する3次元ナノ構造が作製できることを実証した。

これらの手法により、3D-EBLの様々なナノテクノロジーへの応用の加速が期待できる。

本研究の一部は科研費 (20246064) の援助を受けて行われた。

[1] K. Yamazaki and H. Yamaguchi, J. Vac. Sci. Technol. B **26** (2008) 2529.

[2] K. Yamazaki and H. Yamaguchi, Appl. Phys. Exp. **1** (2008) 098001.

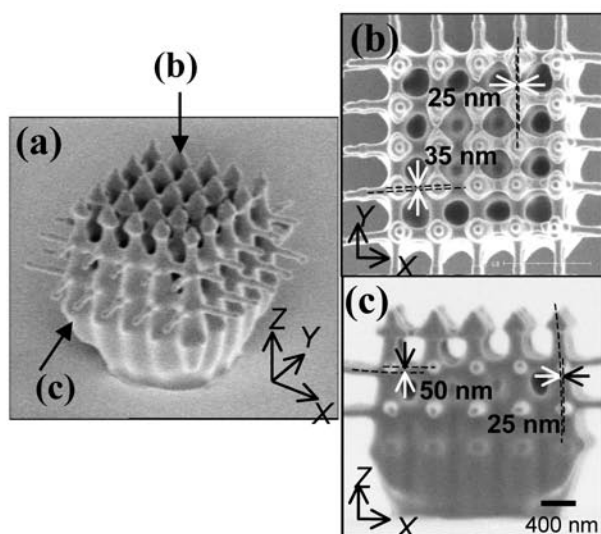


図1 ±X、±Y、Z方向からドット列を描画して作製した、HSQレジスト製3Dナノ構造。

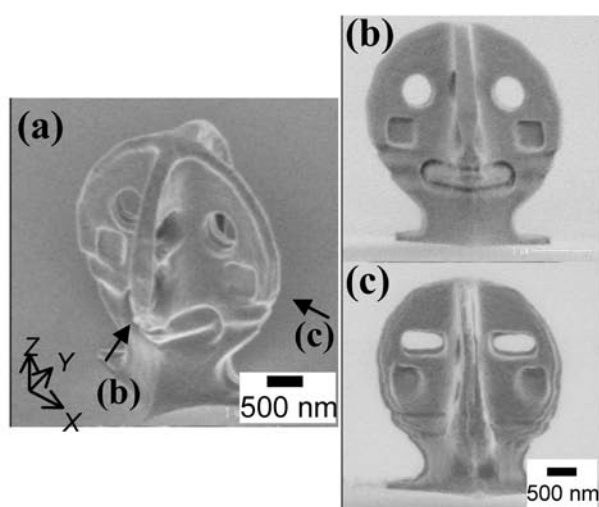


図2 近接効果を抑制するバッファ領域を設けて作製した、PMMAレジスト製ナノ構造。

水素原子様単一ドナーの Bohr 半径・束縛エネルギーの直接測定

Simon Perraud 蟹澤 聖 Zhao-Zhong Wang 藤澤利正
量子電子物性研究部

不純物は、半導体デバイス形成に欠かせない基本要素である。最も単純な近似では、半導体中の単一の不純物あるいは点欠陥は、水素原子と同様に記述することができる。この場合、本質的な物性値は、束縛エネルギーと Bohr 半径 (a_{BI}) の2つである。量子井戸 (QWs) 中の不純物は、 $a_{\text{BI}} \geq l$ の場合閉じ込めポテンシャルの影響を受ける。ここで l は、QW の井戸幅である。我々は、(111) A 基板上に不純物添加していない $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 表面 QW を分子線エピタキシャル成長法 (MBE) で形成した [1]。走査トンネル顕微鏡 (STM) を用いて走査トンネル分光 (STS) をこの QW に低温 (5 K) で適用し、QW 表面に自然形成されドナー不純物としてふるまう点欠陥を調べた。単一の点欠陥の近傍において、電子状態の局所状態密度 (LDOS) 分布を、ナノメートルスケールで測定した。QW 中における点欠陥の LDOS を測定することで、単一の欠陥の場合の束縛エネルギーと Bohr 半径を決定することができる。実験では、4 つの井戸幅 ($l=2, 6, 10$, および 14 nm) の QW について測定した。測定した束縛状態の LDOS の、点欠陥からの距離 r に依存した空間分布は、 $\exp(-2r/a_{\text{BI}})$ に比例する指数関数的減少を示し、 $1s$ 軌道の水素原子の波動関数と同様の性質を示した。図1に今回の STS 測定から得られた結果をまとめて示す。井戸幅 l が薄いほど、束縛エネルギー $E_1 - \varepsilon_1$ が大きく a_{BI} が小さくなり、電子はより強く点欠陥に束縛されることが分かる。ここで、 E_1 は QW 中の2次元サブバンドの下端を示し、 ε_1 は不純物束縛状態の基底準位を示す。束縛状態に対する量子閉じ込め効果は、予想どおり $a_{\text{BI}} \geq l$ において明瞭に観測された。STS 測定の結果を水素原子様の不純物状態に対する計算結果と比較すると、束縛エネルギーと Bohr 半径は QW 井戸幅の関数となり、変分法により計算した水素様不純物状態の場合 [2] と定量的に一致した。今回の実験結果を説明するために、計算が調整用のフィッティングパラメータを一切必要としない点は注目し値する。井戸幅 l の減少に伴う、 $E_1 - \varepsilon_1$ の増加(又はこれと等価な a_{BI} の減少) は、伝導帯の非放物線性によってさらに強められている。

[1] S. Perraud, K. Kanisawa, Z.-Z. Wang, and T. Fujisawa, Phys. Rev. B **76** (2007) 195333.

[2] G. Bastard, Phys. Rev. B **24** (1981) 4714.

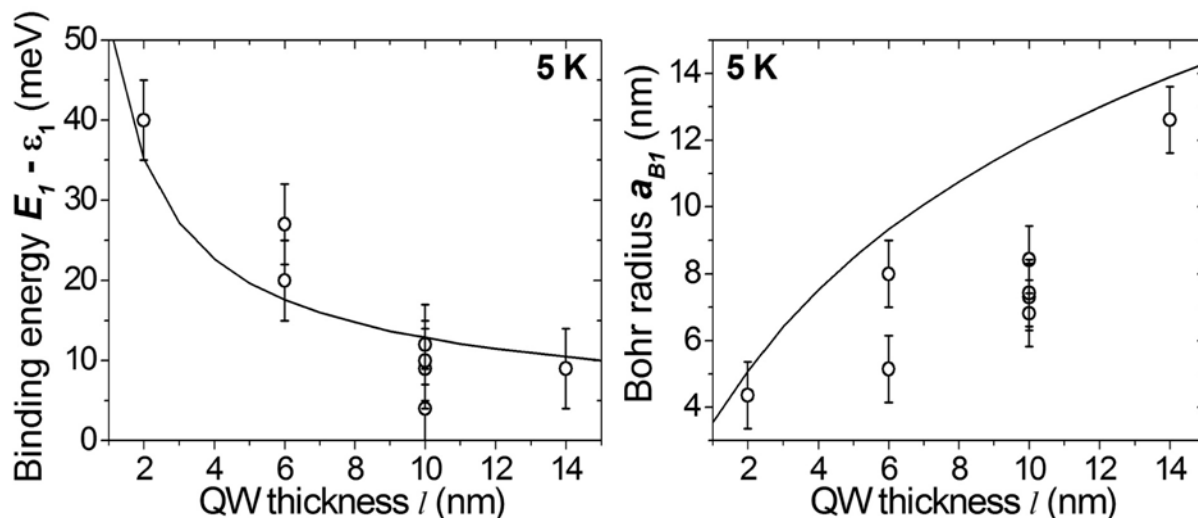


図1 束縛エネルギー ($E_1 - \varepsilon_1$) と Bohr 半径 (a_{BI}) の量子井戸幅 l 依存性。 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 量子井戸表面の各点欠陥における STS 測定による実験結果 (白丸) と水素原子モデルによる計算結果 (実線)。

シリコン単一量子井戸における電子－正孔共存系

高品 圭 村木康二
量子電子物性研究部

2次元電子系と2次元正孔系が近接して共存する系は励起子の超流動を実現させる可能性を有する系として注目されている[1]。本研究では、厚さ 40 nm のシリコン薄膜の各面近傍に2次元電子系と2次元正孔系を同時に形成し、各2次元系に独立に電極をとり、伝導特性を測定した[2]。

サンプルにはホールバーの形をしたSOI-MOSFET (Silicon-On-Insulator Metal-Oxide-Semiconductor-Field-Effect-Transistor) [図1(a)] を用いた。フロントゲート(n+ poly Si)、バックゲート(シリコン基板) 両方に電圧を印加することによって2次元電子と2次元正孔系を同時にSOI層の各界面に形成させた。各ホールバー端子を2つに分け、*p*型領域(B注入)、*n*型領域(P注入) を作ることによって2次元電子と2次元正孔系にそれぞれ独立な電極をとった[3] [図1(b)]。

低温、磁場中において四端子伝導測定を行うことによって[図1(d)、(e)]、キャリアの2次元性、構造内の実空間的な位置[図1(c)] 等を確認した。また、電子と正孔の二層間にバイアス電圧を加え、SOI層内における電界を制御することによってディスオーダーの効果や電子の谷分離[4] をさらに制御できることを示した。電子と正孔の間に生じる摩擦(ドラッグ) の測定も可能であることも示した[5]。本研究で実証した構造は、2次元電子－正孔系に関する研究に大きく貢献すると期待される。

- [1] Y. E. Lozovik and V. I. Yudson, JETP Lett. **22** (1975) 556.
- [2] U. Sivan, P. M. Solomon, and H. Shtrikman, Phys. Rev. Lett. **68** (1992) 1196.
- [3] K. Takashina et al., Extended Abstracts of the 2006 International Conference on Solid State Devices and Materials, Yokohama 2006, pp.830-831; K. Takashina et al., Jpn. J. Appl. Phys. **46** (2007) 2596; M. Prunnila et al., Appl. Phys. Lett. **93** (2008) 112113.
- [4] K. Takashina et al., Phys. Rev. Lett. **96** (2006) 236801.
- [5] K. Takashina et al., Appl. Phys. Lett. **94** (2009) 142104.

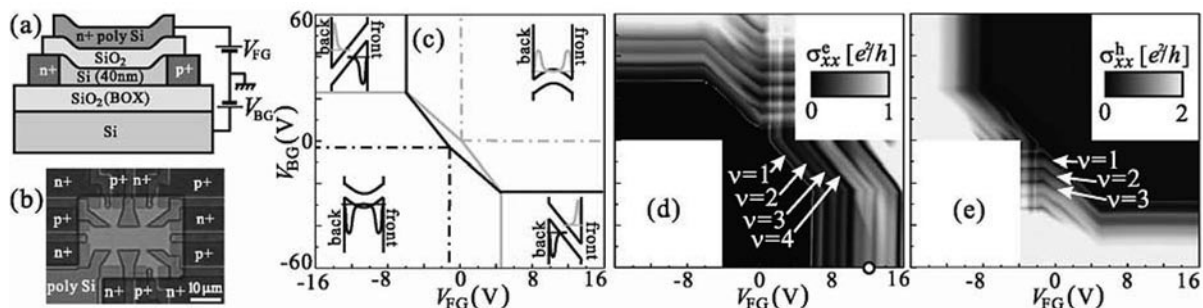


図1 (a) デバイスの断面図。(b) ホールバー素子の光顕微鏡写真。各端子は*p*型および*n*型電極に分かれている。(c) $V_{FG} - V_{BG}$ 面における閉じ込めポテンシャルの変化。(d)、(e) 試料に対し垂直に加えた磁場 15 T、温度 250 mK、電子－正孔層間バイアス $V_{eh}=0.6$ V における伝導特性。(d) *n* 型端子を用いて測定した2次元電子系の伝導率。(e) *p* 型端子を用いて測定した2次元正孔系の伝導率。

ジョセフソン分岐増幅 (JBA) を用いた超伝導永久電流量子ビットの新しい測定法

角柳孝輔 影井誠一郎* 鯉淵良太* 仙場浩一
量子電子物性研究部 *東京理科大学

超伝導磁束量子ビットは量子演算を行うための素子として有望視されているものの一つである。従来この磁束量子ビットの量子状態測定には磁束量子ビットの作る微小な磁場を SQUID で検出する方法が用いられてきた[1]。しかしこの方法は SQUID を電圧状態にするため、被測定系への反作用が大きくまた高速測定も難しいため、コヒーレンス時間内に複数回の測定を必要とする量子アルゴリズムの実行が困難という問題があった。そこで我々は非線形共振回路の示す双安定性を利用したジョセフソン分岐増幅 (JBA) [2]を用いた磁束量子ビットの状態測定を試みた。この方法はジョセフソン接合を電圧状態にしないので、量子非破壊測定など被測定系への反作用が極限まで小さい測定を高速に実現できる可能性がある。

我々は両端にキャパシタを備えた伝送線路共振器の中央に磁束量子ビットを囲む SQUID 構造を配置した試料を作製し、その透過特性を測定した。この共振器はジョセフソン接合の持つ非線形性のため、駆動マイクロ波電力の上昇とともに共振周波数が低周波側にシフトし、一定の駆動電力以上で共鳴スペクトラムに跳びを示した。これは2つの安定状態間の遷移であり、双安定状態が実現していることを意味している。2つの安定状態のうちどちらが実現するかは共振器の状態に依存するため、共振器と磁束量子ビットを磁氣的に結合させることにより量子ビットの状態を共振器の状態に反映させることができる。共振器の2つの共振状態はそれぞれ透過マイクロ波の位相と振幅が異なるため、透過マイクロ波信号をホモダイン検波することによって磁束量子ビットの状態を測定することができる。そこでパルスマイクロ波を入力し磁束量子ビットの状態の測定を試みた。図1はパルス測定に用いた測定系のブロック図と読み出しの例である。パルス状に切られたマイクロ波を JBA 回路を透過させ増幅した後、参照マイクロ波と干渉させて0度位相成分と90度位相成分を取り出す。これにより位相と振幅から2つの状態を明瞭に分離でき、磁束量子ビット状態の読み出しに成功した[3]。

本研究は、科研費 (18201018, 18001002) の援助を受けて行われた。

[1] Caspar H. van der Wal et al., Science **290** (2000) 773.

[2] I. Siddiqi et al., Phys. Rev. Lett. **93** (2004) 207002.

[3] K. Semba, K. Kakuyanagi et al., Quantum Information Processing **8** (2009) 199.

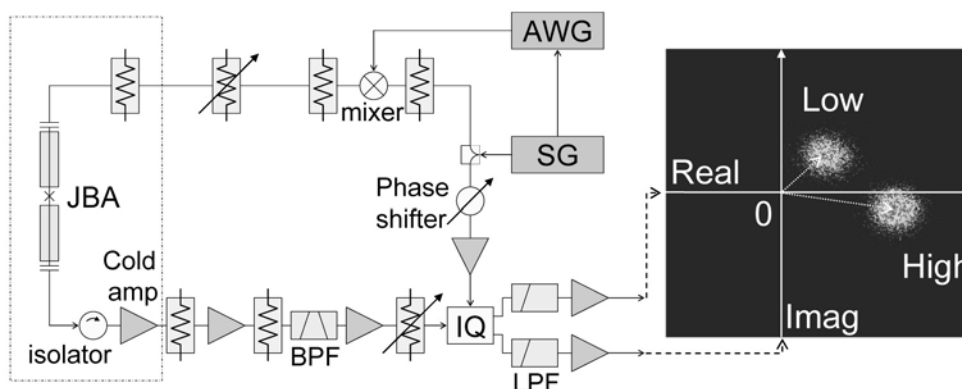


図1 JBAパルス測定装置のブロック図(左)と量子ビット状態の測定結果(右)。

超伝導アトムチップの高安定性を実証

向井哲哉 Christoph Hufnagel 清水富士夫*

量子電子物性研究部

*電気通信大学／NTTリサーチプロフェッサー

中性原子を全量子的に制御するには、原子を強く閉じ込めるトラップが不可欠である。固体表面上に微細加工された電気回路で作るマイクロ磁場トラップは、強い閉じ込めを作る有力候補だが、チップ近傍で顕著になる電磁氣的なノイズや熱的ノイズの影響により、原子の捕捉寿命が極端に短くなることが問題となっていた。この問題の解決を目指し、我々は超伝導永久電流アトムチップを開発し[1]、本年、大きな電流が流れている電線の近傍においても、超伝導アトムチップが安定であることを実証した。

この実験は、チップ表面から一定の距離に捕捉した原子数の時間的減衰を計測する方法で行った。チップ表面と原子トラップとの距離を正確に計測するため、図1のような反射像を用いた吸収計測法を用いている。実験に用いたアトムチップは図2のような超伝導 MgB_2 の閉回路である。図3は、トラップ原子数の減衰から計測した捕捉寿命の、チップ表面からの距離依存性を表している。この図から明らかなように、チップの近傍では、超伝導永久電流アトムチップの捕捉寿命が、従来の方法に比べ、1桁以上改善されていることが確認された。今後は超伝導回路の微細化により、量子化レベルへの原子閉じ込めを実現し、原子の全量子的制御に挑戦する予定である。

本研究の一部は、科学技術振興機構 CREST の援助を受けて行われた。

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

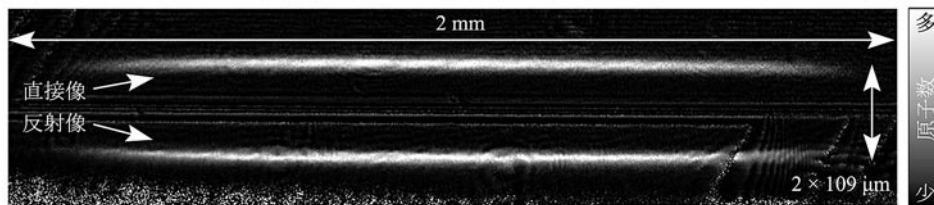


図1 チップの表面近傍に捕捉された原子集団の、反射像を用いた吸収計測画像の例。

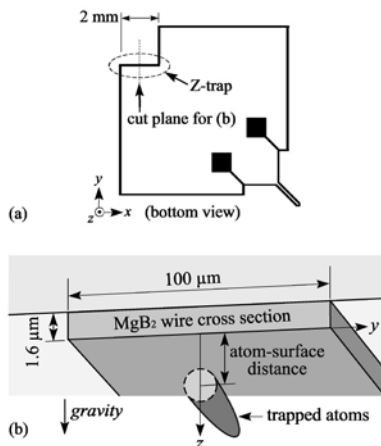


図2 (a) 超伝導永久電流アトムチップの電線パターン、および (b) 超伝導電線の断面形状とトラップとの位置関係。

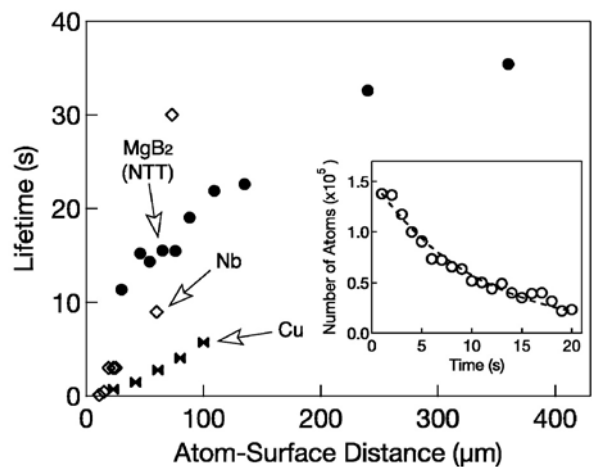


図3 捕捉寿命の距離依存性 [参考: Eur. Phys. J. D **51** (2009) 173, Phys. Rev. A **66** (2002) 041604.]。

ジョセフソン永久電流量子ビットのシングルショット測定

仙場浩一 田中弘隆 齊藤志郎 中ノ勇人
量子電子物性研究部

永久電流(磁束)量子ビットの状態読み出しに、私達はdc-SQUIDを使っている[1]。ジョセフソン接合のパラメータを注意して選べば図1(a) 内側のループは、実効的な単一の量子二準位系 (qubit) となる。系のハミルトニアンは $H_q = (\epsilon_f \sigma_z + \Delta \sigma_x)/2$ である。ここで $\sigma_{x,z}$ はパウリ行列を示す。ループ状の超伝導体ではフラクソイドが量子化されるため、超伝導電流が qubit ループを時計回りに流れる状態 $|R\rangle$ と、反時計回りに流れる状態 $|L\rangle$ が σ_z の2つの固有状態である。dc-SQUID 測定では σ_z に比例した応答が検出できる。図2(a) に dc-SQUID スwitchング電流の印加磁束 $f = \Phi_{\text{ext}}/\Phi_0$ 依存性を示す(Φ_0 は磁束量子 $h/2e$)。個々の点は平均していない1回1回の読み出しに対応する。古典的には安定な $|L\rangle$ 、 $|R\rangle$ 状態は量子トンネル Δ が存在すると不安定化するため、図2(b)に示す qubit のエネルギー固有状態 $|0\rangle$ 、 $|1\rangle$ は一般的には巨視的に識別可能な電流状態 $|L\rangle$ と $|R\rangle$ の重ね合わせ状態である。図2(e)に $\Delta \gg \epsilon_f \sim 0$ となる $f=1.5$ 磁束バイアスでの SQUID のスウィッチング電流分布を示す。 χ 字状の qubit ステップが明瞭に観測されている。分布幅が広い方が基底状態 $|0\rangle$ 他方が励起状態 $|1\rangle$ に対応する。これらのことから Φ_{ext} 磁束シフトパルスを援用すれば、スピンの重ね合わせ状態を Stern-Gerlach 装置で測定したように qubit の重ね合わせ状態を $|L\rangle$ 、 $|R\rangle$ 状態へとシングルショット (σ_z) 測定可能なことが分かる。この dc-SQUID 測定が有利な点は qubit と測定装置 dc-SQUID の相互作用の強さを自在に制御できることである。Stern-Gerlach の実験ではスピンと測定装置の相互作用の強さは固定されており、スピン固有状態間のエネルギー差よりも圧倒的に大きかったのである。このように、超伝導量子回路系では、量子測定の実時間制御を行える可能性がある。

[1] K. Semba et al., Quantum Information Processing 8 (2009) 199.

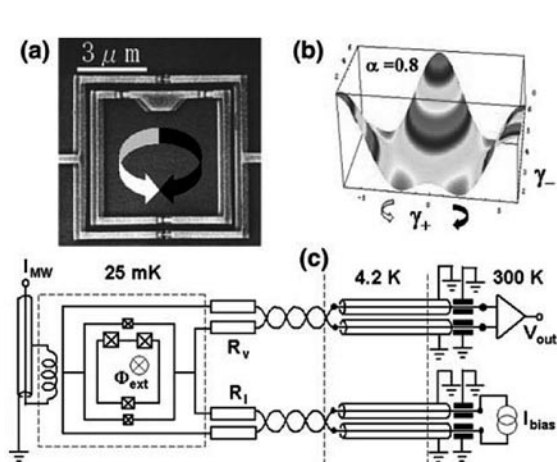


図1 (a) 超伝導 qubit (内側のループ) の走査電子顕微鏡写真 dc-SQUID (外側のループ) は qubit 状態測定装置。2つの矢印は qubit の電流状態 $|L\rangle$ 、 $|R\rangle$ を表す。(b) 位相空間での qubit のポテンシャル。(c) 測定系の模式図 qubit の測定温度は希釈冷凍機温度 25 mK。

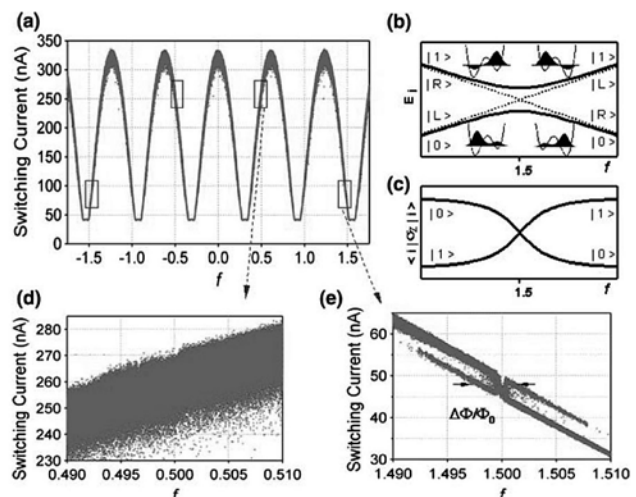


図2 (a) dc-SQUID 測定器のスウィッチング電流の磁束 f 依存性 $f = \Phi_{\text{ext}}/\Phi_0$ 、 Φ_{ext} は qubit ループを貫く外部磁束を表す。(b) qubit のエネルギー固有状態 $\{|0\rangle, |1\rangle\}$ と電流固有状態 $\{|L\rangle, |R\rangle\}$ 。(c) $|0\rangle$ と $|1\rangle$ の σ_z 測定期待値。(d) $f=0.5$ 付近の拡大図、(e) $f=1.5$ 付近の拡大図。

低電子密度 2 次元電子系の非線形遮蔽・線形遮蔽領域の発光分光

山口真澄¹ 野村晋太郎² 平山祥郎³ 田村浩之¹ 赤崎達志¹

¹量子電子物性研究部 ²筑波大学／NTTリサーチプロフェッサー ³東北大学

分子線エピタキシによって成長したGaAs量子井戸を用いて作製するゲート付非ドープ量子井戸では、ゲートバイアスによって電子を量子井戸に誘起することで、半導体試料において高品質な低密度2次元電子系を形成できる。低電子密度では電子間のクーロン相互作用の寄与によるウイグナ結晶化等の興味深い現象の発現が予想されているが、現実の試料ではランダムポテンシャルの寄与を無視することはできないため、誘起された電子によるランダムポテンシャルの遮蔽の効果が重要になる。

本研究では、ゲート付非ドープ量子井戸を用いてゲートバイアスによって電子密度を変えながら低温での発光分光測定を行い、電子誘起によるランダムポテンシャルの遮蔽状態の変化に伴う発光スペクトルの移り変わりを調べた[1]。量子井戸のバンド間光励起による発光スペクトル測定では、低バイアスで電子が誘起されていない状態から、バイアスによって2次元電子系が形成された状態にわたって連続的に変化を追うことができる。その発光スペクトルは励起子(X_0)、局在荷電励起子(X^-)から、2次元電子と光励起された正孔との再結合(2DES-hole)による発光へと変化する。図1では、この励起子から2DES-holeへの発光スペクトルの移り変わりを下から順に示している。その発光強度と線幅のゲートバイアスに対する変化を抽出すると、図2に示すように2段階の変化を示していることが明らかとなった。これは、電子が局在した領域から、ポテンシャルの谷にのみ電子が存在して不完全にランダムポテンシャルを遮蔽する領域(非線形遮蔽領域)、全体に2次元電子系が広がって有効にランダムポテンシャルを遮蔽する領域(線形遮蔽領域)へと状態が変化するためと考えられる。今回用いた試料のランダムポテンシャルは、試料の表面電荷に起因すると考えられ、表面から量子井戸までの距離を離れた試料においてランダムポテンシャルはさらに軽減されると期待される。

本研究の一部は科学技術振興機構CRESTの援助を受けて行われた。

[1] M. Yamaguchi et al., Phys. Rev. Lett. **100** (2008) 207401.

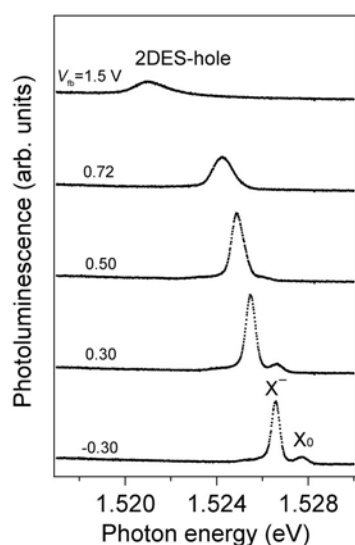


図1 ゲートバイアスによる電子誘起に伴う発光スペクトルの変化。

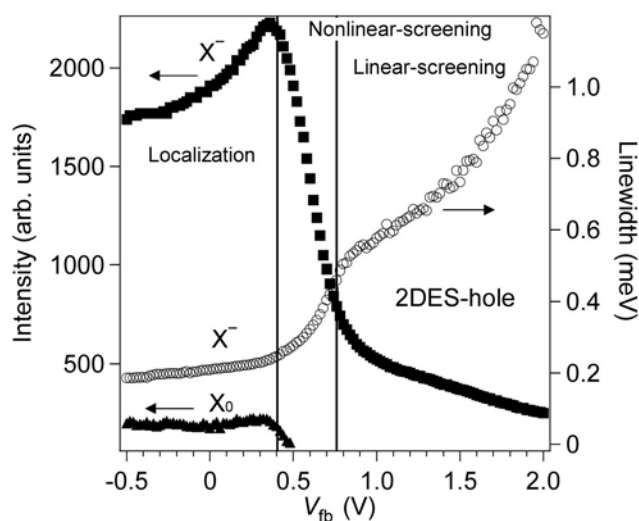


図2 ゲートバイアスに対する発光強度、発光線幅の変化。

In_{0.52}Al_{0.48}As/In_{0.7}Ga_{0.3}As ヘテロ構造における負の光伝導

赤崎達志¹ 山口真澄¹ 津村公平² 野村 晋太郎³ 高柳英明⁴

¹量子電子物性研究部 ²筑波大学

³筑波大学／NTTリサーチプロフェッサー ⁴東京理科大学

大きなRashba スピン-軌道相互作用を有するInGaAs系ヘテロ構造は、半導体スピントロニクスへの応用が期待されている材料である[1]。一方、半導体への光照射は、円偏光を用いると、スピン偏極したキャリアを選択的に生成可能で、スピン制御の手段として注目されている。我々は、In_{0.52}Al_{0.48}As/In_{0.7}Ga_{0.3}Asヘテロ構造中に形成される2次元電子ガス(2DEG)の光伝導特性を明らかにするため、Hall-bar構造を作製し、赤外線レーザー($\lambda=0.78$ 、 $1.3\ \mu\text{m}$)照射下での電子輸送特性の変化を評価した[2]。

ホール測定から得られる、光照射前の2DEGのシートキャリア濃度 n_{Hall} および移動度 μ は、1.8 Kにおいて、 $\sim 2.3 \times 10^{12}\ \text{cm}^{-2}$ と $\sim 161,000\ \text{cm}^2/\text{Vs}$ であった。レーザー光は、光ファイバーによりクライオスタットに導入され、0.5 Tの磁場下で、1.8 Kに冷却した試料に照射されている。我々は、レーザー光照射前後での、Hall電圧の変化を測定し、得られたHall電圧から、 n_{Hall} を評価した。図1は、レーザー光照射前後の n_{Hall} の時間変化を示している(波長:(a) $1.3\ \mu\text{m}$ 、(b) $0.78\ \mu\text{m}$)。この図から、In_{0.7}Ga_{0.3}Asチャネル層を励起する $1.3\ \mu\text{m}$ のレーザー光照射では、照射を開始すると、急激に2DEGのキャリア濃度が減少し、すぐに飽和することが分かる。また、照射を中止した後は、ゆっくりとキャリア濃度が増加し、1時間程度の時間を要して、照射前のキャリア濃度に戻っている。一方、In_{0.52}Al_{0.48}Asバリア層を励起する $0.78\ \mu\text{m}$ のレーザー光照射では、2DEGのキャリア濃度がわずかに増大した。これらの結果は、In_{0.52}Al_{0.48}As/In_{0.7}Ga_{0.3}Asヘテロ構造では、より長波長(低エネルギー)の光励起によって、負の光伝導が生じることを示しており、高エネルギーの光励起でのみ負の光伝導を観測したInAs/AlSbヘテロ構造に関する過去の報告とは異なっている[3]。この $1.3\ \mu\text{m}$ のレーザー光照射による負の光伝導は、光吸収により生じた電子が、In_{0.52}Al_{0.48}As層の深い電子トラップに捕捉される一方で、正孔はIn_{0.7}Ga_{0.3}Asチャネル層中の2DEGの電子と再結合し、2DEGのキャリア濃度を減少させたと考ええると定性的に理解できる。本研究の一部は科学技術振興機構CRESTの援助を受けて行われた。

[1] J. Nitta et al., Phys. Rev. Lett. **78** (1997) 1335.

[2] T. Akazaki et al., Physica E **40** (2008) 1341.

[3] Yu. G. Sadofyev et al., Appl. Phys. Lett. **86** (2005) 192109.

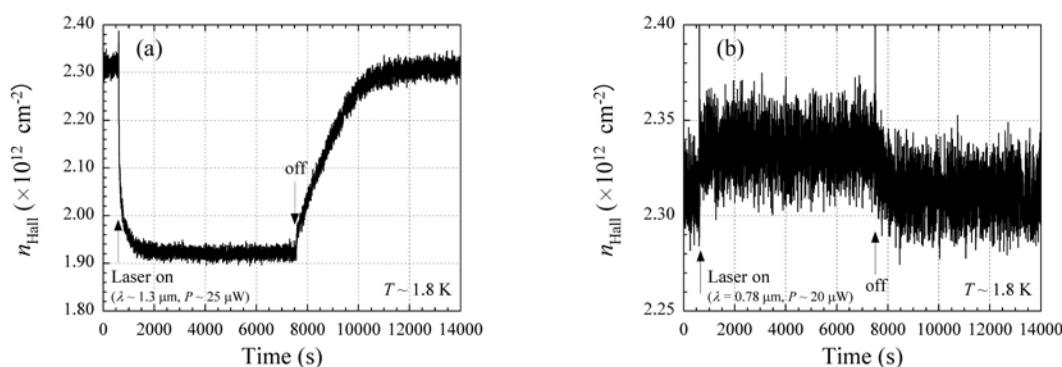


図1 レーザー光照射前後のシートキャリア濃度 n_{Hall} の時間変化。
[測定温度: 1.8 K、波長: (a) $1.3\ \mu\text{m}$ 、(b) $0.78\ \mu\text{m}$]

光格子にトラップされた冷却原子気体の数値シミュレーション

山下 眞
量子光物性研究部

1995年のボース・アインシュタイン凝縮の成功を機に数百ナノケルビンの極低温にまで冷却された中性原子気体の研究が大きな広がりを見せている。なかでもレーザ光を対向的に照射して気体内部に周期的ポテンシャルを誘起させる「光格子」と呼ばれる実験技術が近年大きな注目を集めている。図1に示すように原子はあたかもレーザ光で作られた人工結晶の中を運動する粒子のように振舞うため、高温超伝導などの多体効果に起因する物性物理の様々な問題が原子気体を通して解明できるものと期待されている。

我々は光格子中にトラップされた冷却原子気体を定量的に解析するため、グッツウィラー近似に基づいた高効率の数値解析法を開発した[1]。虚時間を導入し基底状態を逐次的に求めることにより、実際の実験と同程度の巨大なシステムを市販のパソコンでもシミュレーションすることが可能となった。この解析法の定量性を確認するため、3次元光格子中のボース凝縮体の特性を詳細に調べたMITグループの実験[2]を対象としたシミュレーションを行った（実験に即して原子数は30万、格子点数は56万としている）。図2(a)に光格子が浅く原子が超流動状態にある場合の各サイトでの平均原子数の分布を示す。磁場による緩やかな閉じ込めポテンシャルの影響で原子は上に凸の連続的な分布を示すことが分かる。一方、図2(b)は光格子が深く原子がモット絶縁体状態に相転移した場合の原子数分布である。原子間に働く強い斥力相互作用により各サイトでの平均原子数は1から5までの離散値となり、原子はステップ状に分布している。これは3次元光格子内で冷却原子がシェル構造を形成して分布していることを表している。図2の計算結果はいずれもMITグループの実験結果と良い一致を示し、我々の解析手法の優れた定量性が実証された。

本研究の一部は科学技術振興機構CRESTの援助を受けて行われた。

[1] M. Yamashita and M. W. Jack, Phys. Rev. A **79** (2009) 023609.

[2] G. K. Campbell et al., Science **313** (2006) 649.

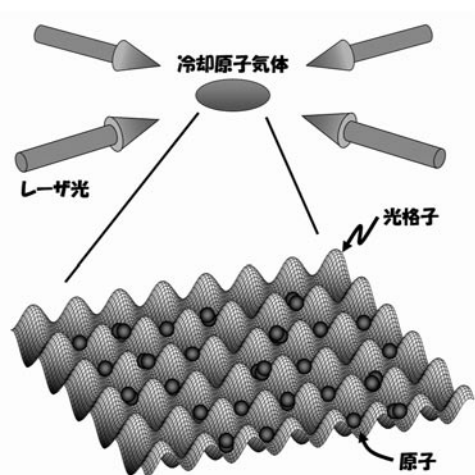


図1 光格子にトラップされた冷却原子気体の概念図。

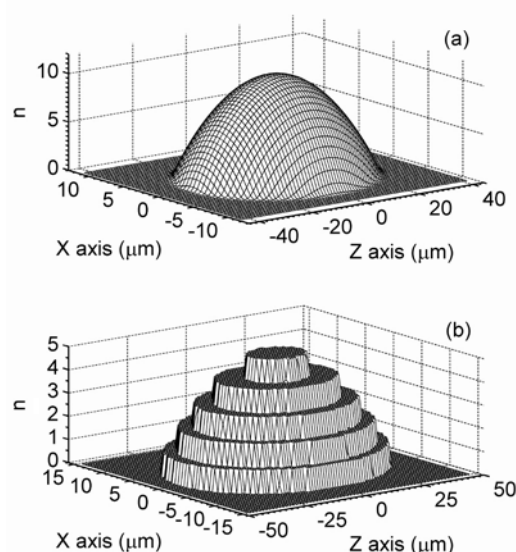


図2 3次元光格子中の原子数分布($y=0$ 面)：
(a) 超流動状態、(b) モット絶縁体状態。

MgB₂ を用いた超伝導単一光子検出

柴田浩行
量子光物性研究部

量子暗号通信は、盗聴が原理的に不可能な究極の通信であり、その実用化に向けた研究が勢力的に推進されている。現在、量子暗号通信における通信距離・速度は単一光子検出器の性能によって制限されており、その高性能化は急務である。最近、NbN 超伝導体を用いた超伝導ナノワイヤ単一光子検出器 (SSPD) が開発され、従来の半導体を用いた単一光子検出器より高性能であるため注目されている。この検出器は、高い時間分解能 (60 ps) と低暗計数率 (10 Hz) を特徴とし、これを用いると、量子鍵配送の伝送距離が従来型検出器を用いた場合の 2 倍 (200 km) に延長可能となる [1]。今回、我々は SSPD のさらなる高性能化を目指し、MgB₂ 超伝導体を用いた単一光子検出を試みた。MgB₂ は超伝導転移温度 (T_c) が 40 K と NbN の 16 K と比較して高く、また、電子-フォノン相互作用が強く緩和が早いいため、より高温動作、高速応答可能な単一光子検出が期待できる。

MgB₂-SSPD を得るためには、高品質な MgB₂ 極薄膜作製技術および MgB₂ ナノ微細加工技術を確立することが必須となる。我々は極薄膜作製に最も適した MBE 法を用いて、膜厚 10 nm で $T_c=20$ K を示す MgB₂ 極薄膜を得た。ナノ微細加工において、MgB₂ はエッチングガスが見つからないため、NbN で用いられているような化学的ドライエッチング法は利用できない。また、MgB₂ は成膜時に 300°C に加熱する必要があるため、通常のレジストを用いたリフトオフ法を用いることもできない。我々は、耐熱性のあるアモルファスシリコンとアモルファスカーボンの 2 層をレジストに用いたリフトオフ法を新たに開発し、200 nm 幅の MgB₂ ナノワイヤを得た。図 1 に示すように光ファイバから出射した光を MgB₂ 素子に集光し、バイアスを加えて光応答を測定した。光強度が強い場合、図 2 (a) に示すように入射光パルス (100 MHz) に対応したシグナルが得られる。一方、光強度を十分に弱めるとシグナルは間欠的となり、MgB₂ ナノワイヤは光子検出域動作することを明らかにした [図 2 (b), (c)] [2]。

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

[2] H. Shibata et al., IEEE Trans. Appl. Supercond. **19** (in press).

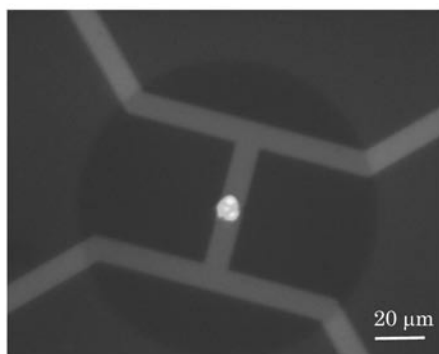


図1 光ファイバ照射された MgB₂ 超伝導ナノワイヤ。

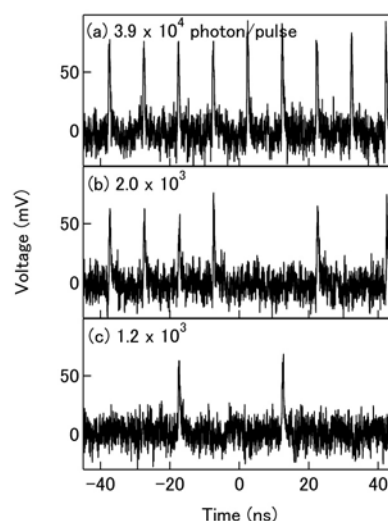


図2 光応答の入射光強度依存性。

シリコン細線導波路による高品質もつれ光子対発生

原田健一 武居弘樹 福田 浩* 土澤 泰* 渡辺俊文*

山田浩治* 都倉康弘 板橋聖一*

量子光物性研究部 *マイクロシステムインテグレーション研究所

近年、シリコン細線導波路 (SWW) の自然放出四光波混合を用いた $1.5\ \mu\text{m}$ 帯もつれ光子対発生の研究が盛んに行われている[1]。SWWからは、従来のもつれ光子対源に比べて非常に高品質なもつれ光子対を発生させることが可能である。今回この導波路を用いて明瞭度95%以上の二光子干渉波形を観測することができた[2]。

SWWはコアにSi、クラッドに SiO_2 を用いており、 $3\ \mu\text{m}$ SiO_2 層上にSi層を持ったSOI (silicon-on-insulator) 基板上に形成される。ナノスケールの極小コア径を有するため、導波路内での光強度を非常に強くすることが可能である[3]。これにより、 $1\ \text{cm}$ 程度の短い導波路でも高い効率で自然放出四光波混合過程を引き起こすことができる。

図1に、時間－位置もつれ光子対発生の実験系を示す。波長 $1551.1\ \text{nm}$ の連続光を光強度変調器(IM)によりパルス幅 $90\ \text{ps}$ 、パルス間隔 $1\ \text{ns}$ 、繰り返し周波数 $100\ \text{MHz}$ の2連パルスに変調し、光増幅器によって増幅した後にSWWに入射する。今回用いた導波路は $460\times 200\ \text{nm}$ のコア径を有し、長さ $1.15\ \text{cm}$ 、導波路損失 $1.0\ \text{dB}$ である。この導波路中の自然放出四光波混合により発生した時間－位置もつれ光子対は、fiber Bragg grating (FBG)によりポンプ光が除去された後、arrayed waveguide grating (AWG)によりポンプ波長から $\pm 3.2\ \text{nm}$ 離れたシグナル光子とアイドラー光子に分離され、それぞれ1-bit遅延PLC Mach-Zehnder干渉計に入力される。PLC干渉計の位相差は、干渉計の温度を制御することによって調整することができる。PLC干渉計から出力された光子は $100\ \text{MHz}$ のゲートモードで動作する光子検出器 (SPD1、2)によって同時計数計測される。

シグナル側の位相差を固定し、アイドラー側の位相差を変化させて同時計数を測定することで二光子干渉波形を観測することができる(図2)。2種類の波形はシグナル側の非直交の2基底に対する測定結果を表しており、明瞭度はそれぞれ96.3% (solid line)、95.2% (dashed line)であった。これにより $1.5\ \mu\text{m}$ 帯において高品質もつれ光子対が発生可能であることを確認した。

[1] H. Takesue et al., Appl. Phys. Lett. **91** (2007) 201108.

[2] K. Harada et al., Opt. Express **16** (2008) 20368.

[3] T. Tsuchizawa et al., IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. **11** (2005) 232.

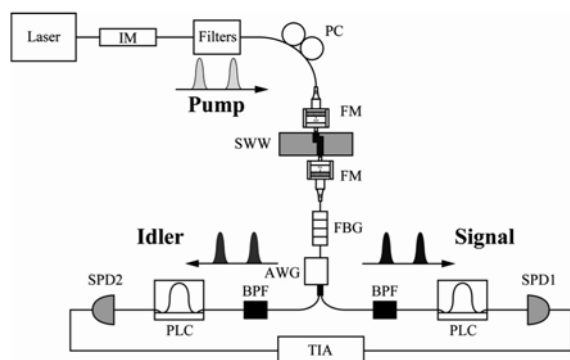


図1 時間－位置もつれ光子対発生の実験系。

PC: polarization controller, FM: focusing module,
BPF: band pass filter, TIA: time interval analyzer.

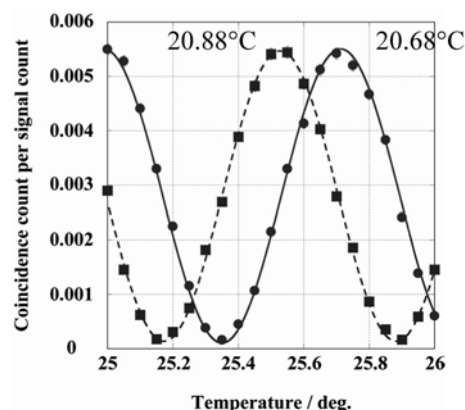


図2 二光子干渉波形。

コリニア f - $2f$ 干渉計改善による光コム的高效的な キャリアエンベロープオフセットロック

石澤 淳 西川 正 中野秀俊
量子光物性研究部

近年のレーザ技術の進展により、従来技術では制御不能で、不確定であったパルス間の搬送波包絡線位相のスリップ量(キャリアエンベロープオフセット、もしくはCEO)が新たに精密制御可能になった。また、CEOロックしたモード同期レーザは周波数領域で数百THzの周波数領域にわたって、高確度に周波数が確定した光周波数コムとなっている。光周波数コム1本1本の位相と振幅を自在に制御できれば、光の完全な任意電界波形整形が可能になり、物質のコヒーレント制御を行うための有用な光源になると期待できる。

光周波数コム1本1本の分離制御を実現する為にはアレイ導波路回折格子で分離可能な10 GHz以上のレーザの高繰り返し化が必要となる。その際、高繰り返し化により1パルス当りのエネルギーが低くなる為、より低いパルスエネルギーでCEO検出と制御を可能にすることが重要である。これまで我々は、非線形性の大きなテルライトフォトニック結晶ファイバ(PCF)と第二高調波発生効率が高い分極反転LiNbO₃リッジ導波路を用いて230 pJのファイバ入力パルスエネルギーでCEOロックすることに成功した[1]。しかし、テルライトPCFへのレーザ光の結合効率が悪く、約1 nJのレーザ出力が必要であった。今回、テーパー化したファイバとテルライトPCFを角度付きV溝接続することでレーザ光のPCFへの結合効率を改善し、遅延機構を用いない簡素なコリニア f - $2f$ 干渉計を用いる光学系(図1)を構築することによって、従来記録600 pJ[2]を更新する、500 pJの低いパルスエネルギーでCEOロックすることに成功した(図2) [3]。我々が提案した方法は低いパルスエネルギーでCEOロックに有用であり、かつ非常に簡素化された光学系を用いるため長時間の安定性に優れていると考えられる。

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

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

[3] A. Ishizawa et al., CLEO/IQEC 2009, Baltimore, U.S.A. (May 2009).

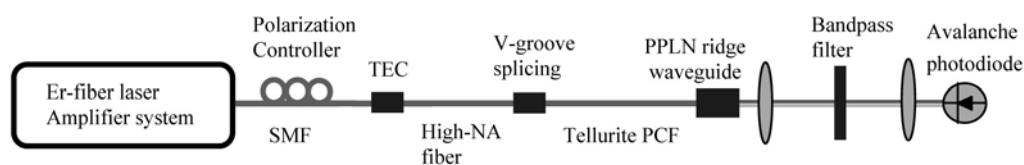


図1 低パルスエネルギーでCEOロックするための光学系配置図。 SMF: シングルモードファイバ TEC: 熱拡散。

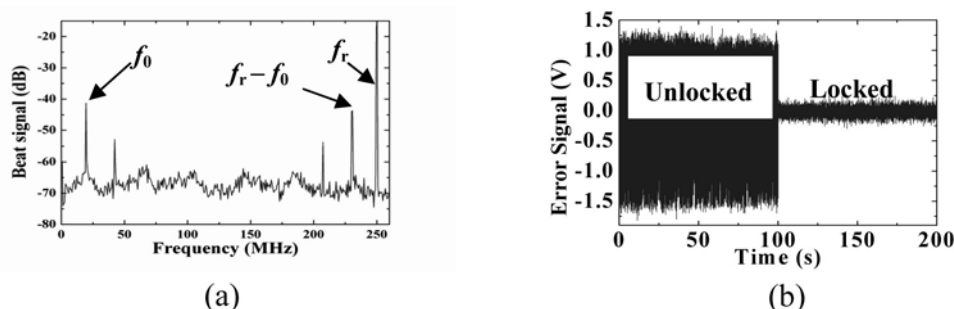


図2 (a) CEOロックしたときのCEO干渉信号。 f_0 はCEO周波数、 f_r は繰返し周波数
(b) 基準信号とCEO干渉信号の差分信号(右図)。

励起子－共振器結合における共振モード発光と光子統計

俵 毅彦 鎌田英彦 Stephen Hughes*
量子光物性研究部 *Queen's University

単一励起子と単一輻射場間の相互作用制御は、量子光学における学術的興味と量子情報処理に向けた単一光子光源等への応用の可能性などから近年盛んに研究が進められている[1]。半導体フォトニック結晶(PhC)を用いた最近の研究では、励起子－共振モード間のエネルギー差(離調)が大きいにもかかわらず、共振モードが強く発光するという興味深い現象が観測されている。我々はこのような共振モード発光の物理的起源とそれが単一光子発生に与える影響について実験的に調べた[2]。

試料としてInAs量子ドットを有するGaAsスラブにPhC共振器が作製された。図1の左側に温度4 Kにおける共振モード離調時のPL強度マップ(GaAsバリア励起)を示す。縦軸は離調のために供給した窒素ガスの供給回数を示す。これより離調が大きいにもかかわらず、強い共振モード発光が見られることが分かる。さらに共鳴時(ゼロ離調時)には、非共鳴時と比べ約9倍の発光強度の増強が観測された。

この共振モード発光が光子統計へ与える影響を明らかにするために、光子強度の2次の自己相関関数 $g^{(2)}(\tau)$ を測定した。非共鳴共振モードでは、 $g_C^{(2)}(0) \sim 1$ となり古典的統計を示した。これより共振モード発光はGaAsバリア中の深い欠陥準位が共振モードを介して光子放出をしていることが明らかとなった。また非共鳴励起子では $g_X^{(2)}(0) = 0.57$ のアンチバンチングが観測され、単一励起子による単一光子発生が生じていることが分かる。興味深いことに、励起子・共振モードがゼロ離調となる共鳴時にはより強い強度相関 $g_{C+X}^{(2)}(0) = 0.35$ を示した。この相互作用系では励起子－共振器結合が強い(約9倍の自然放出増強を有する)ことから、共鳴時には深い欠陥準位による共振モード発光が強く抑制されると同時に励起子からの単一光子発生レートが増強され、より非古典的な光子統計を示したものであると考えられる。これら実験結果は媒質依存マスター方程式モデルを用いて理論的にも説明できることが分かった。

本研究の一部は総務省SCOPEの援助を受けて行われた。

[1] 例えばK. Hennessy et al., Nature **445** (2007) 896.

[2] T. Tawara et al., Opt. Express **17** (2009) 6643.

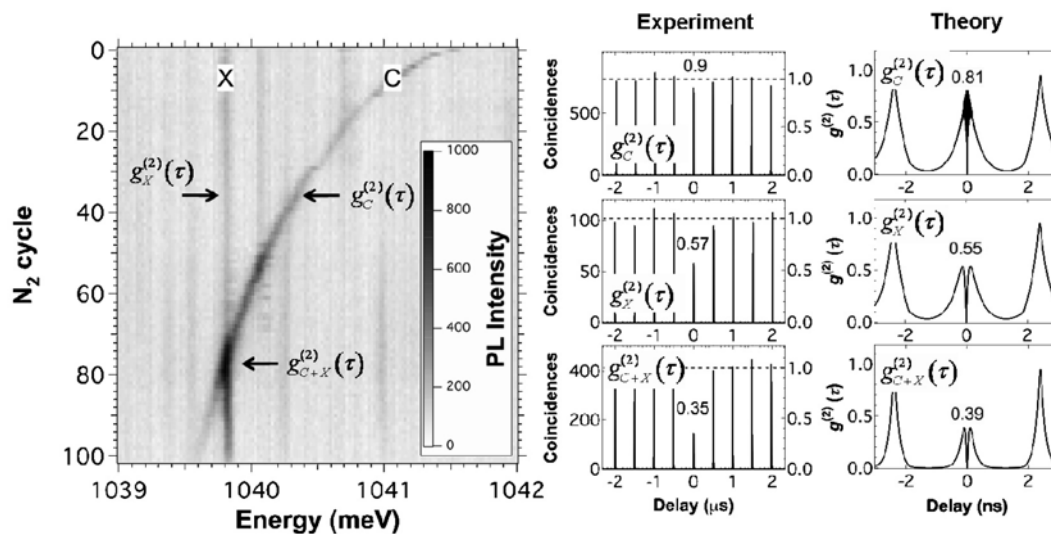


図1 温度4 Kにおける共振モード離調時のPL強度マップと光子強度の2次の自己相関関数。

電荷制御量子ドットの磁気光学分光

眞田治樹 寒川哲臣 後藤秀樹 都倉康弘 鎌田英彦
量子光物性研究部

半導体ナノ構造中のスピンは固体中での量子情報の担い手として期待されている。半導体中の単一スピンにアクセスする手段の一つとして注目されているのが、量子ドット中の負の Trion (電子2個と正孔1個で構成される粒子) を用いる方法であり、単一電子スピンの初期化や読み出しが可能となってきた [1, 2]。Trion のスピン特性は構成する電子・正孔の殻およびスピン配置と関連しているため、Trion 内部のクーロン・交換相互作用、およびそれらが決めるエネルギー構造が重要な情報を持つ。我々は量子ドット中の電子間および電子正孔間相互作用が外部磁場に強く依存することに着目し、電荷制御量子ドットのフォトルミネッセンス (PL) の磁場依存性を系統的に測定することにより、これまで Trion 研究の主な対象であった基底状態に加えて、励起状態の殻およびスピン配置について明らかにした [3]。

試料は厚さ 2.8 nm の GaAs/AlGaAs 量子井戸界面の単一原子層ゆらぎにより形成される量子ドットを内部に持つ *n-i* ショットキーダイオード構造であり、外部電圧でドット内電子数を制御できる。測定にはファラデー配置となるように超伝導マグネット中に配置されたクライオスタットを用い、低温 (6 K)、磁場中の顕微 PL スペクトルを測定した。

図1に示す零磁場における PL のバイアス依存性では、励起子、Trion の基底準位発光 (X^0 、 X^-) が明瞭に識別できる。図2の磁場依存性では、基底準位発光に加え、より複雑な磁場依存性を示す発光 A-E が観測された。2次元調和振動子モデルと配置間相互作用法を用い、Trion のエネルギー構造と各準位から単一電子への発光遷移の振動子強度を計算すると、A-E の発光ピークが、電子間、電子-正孔間相互作用の影響を受けた Trion の励起準位からの発光として説明できることが分かった。このようにして明らかになった Trion 励起状態は、これらを積極的に利用した単一スピン操作への応用が期待できる。

本研究の一部は科研費 (19310067) の補助を受けて行われた。

- [1] M. Atatüre et al., Science **312** (2006) 551.
- [2] D. Press et al., Nature **456** (2008) 218.
- [3] H. Sanada et al., Phys. Rev. B **79** (2009) 121303.

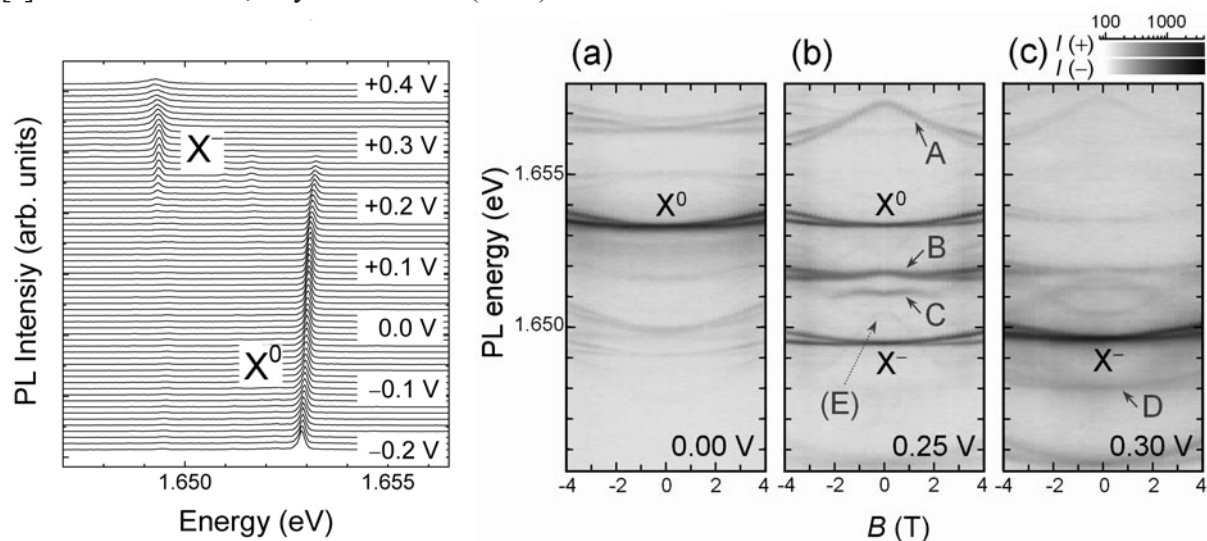


図1 零磁場における PL のバイアス依存性。

図2 (a)0 V、(b)0.25 V、(c)0.3 Vにおける PL の磁場依存性
右回り、左回り円偏光に対するデータを重ねて表示してある。

断熱的波長変換による短パルス発生

田辺孝純 納富雅也 谷山秀昭 倉持栄一
量子光物性研究部

フォトニック結晶微小光共振器を用いると光を μm^3 以下の小さな領域にns以上保持することが可能である[1]。光は高速であるが故「光子を捕捉している間に光子の性質(例えば波長)を操作する」という概念は従来あまり検討されてこなかった。しかし弦を弾いた後でも弦の張力を変えれば振動している弦の音色を変えられるように、光でも光子捕捉時間が十分長ければ、光を共振器に閉じ込めている間に共鳴波長を変化させて光の波長を変化させることが理論的には可能なはずである[2]。これを断熱的波長変換と呼ぶ。今回我々はそれを実験的に観測し、さらには断熱的波長変換を介して光を共振器から高速に取り出し非常に短いパルスを発生させることにも成功した[3]。チップ上に集積可能な高 Q 値微小光共振器から任意のタイミングで光を高速に取り出す実験は光メモリの実現に向けた第一歩である。

図1に今回用いた線欠陥幅変調共振器[1, 4]の電子顕微鏡像を示す。線欠陥のカットオフ波長が線欠陥幅に依存することを利用して、幅を狭めた線欠陥の一部の空気穴を外側にシフトさせて共振器を形成している。入出力光導波路は幅を広げた線欠陥を利用する。共振器に連続光を入射させて光を貯めた後、急に入力进行切ると共振器に蓄積されていた光が観測される。出力光を波長分解したのちに時間波形を測定した(図2)。共振器を変調させない場合は入射光波長のまま指数的に減衰するのに対して、0 psのタイミングで励起光をスラブ上面より照射して共振器の屈折率をキャリアプラズマ分散効果によって低減させると、共鳴波長がシフトして断熱的波長変換が起き共振器内の光波長が短波長に変換された。

今回用いたデバイスにおいて閉じ込められている光の波長が断熱的波長変換によって短波長にシフトすると、幅の狭い(幅98%)線欠陥のカットオフ波長に近づくため線欠陥による閉じ込め効果が緩くなり入出力導波路と強く結合するようになる。その結果もともと高 Q 値の共振器から高速に光を導波路に取り出すことが可能となる(図3)。実験より共振器に変調を加えると共振器中の光を元の光子寿命よりも早く導波路へと取り出せることが分かった。

フォトニック結晶微小共振器では光を長時間閉じ込められるので、断熱的波長変換過程を介して光の性質を操作でき、高 Q 値共振器から素早く光を取り出すことが可能となった。

- [1] T. Tanabe et al., Nature Photon. **1** (2007) 49.
- [2] M. Notomi et al., Phys. Rev. A **73** (2006) 051803.
- [3] T. Tanabe et al., Phys. Rev. Lett. **102** (2009) 043907.
- [4] E. Kuramochi et al., Appl. Phys. Lett. **93** (2008) 111112.

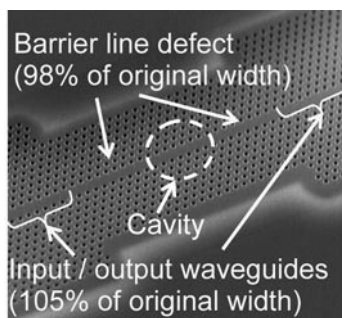


図1 線欠陥幅変調フォトニック結晶微小光共振器。

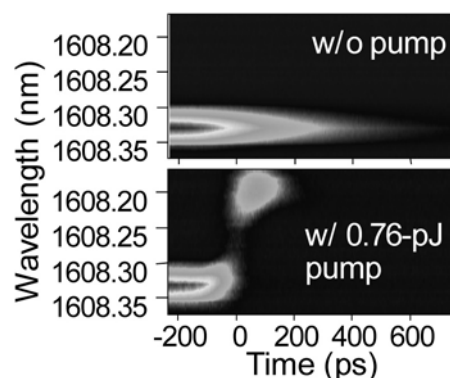


図2 出力光の波長分解時間波形(上) 変調なし(下) 変調あり。

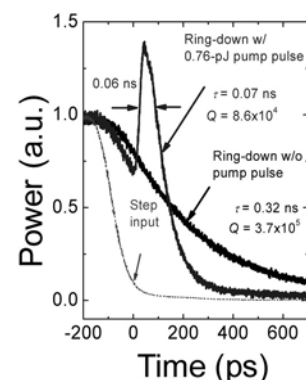


図3 変調のある場合とない場合の出力光の時間波形。

超高 Q 共振器の幅狭化

倉持栄一 谷山秀昭 田辺孝純 新家昭彦 納富雅也
量子光物性研究部

我々はフォトニック結晶(PhC) 幅変調線欠陥ナノ共振器により100万を超える Q 値を実現済みである[1]。PhC共振器最大の利点は共振モード体積が波長スケールと極めて小さいことであるが、従来の設計は光閉込にフォトニックバンドギャップを使うため厚いPhCバリア層を要し、実際の共振器サイズは波長スケールよりもはるかに大きくなる問題があった。

本研究では横方向の光閉込を長い空気スロットによる屈折率閉込で置き換えることを試みた。一方PhCバリア層は線欠陥方向のモードギャップ閉込を与えるために不可欠であるが、横方向の閉込は空気スロットが行うので薄くできる。本手法により従来設計の共振器の高 Q 値特性をPhCバリアを相当薄くしても維持できることを明らかにした。

図1にエアスロットを配置し中央で線欠陥幅変調を行った新設計によるSi-PhC共振器の電子顕微鏡像と共振モードスペクトルを示す[2]。作製プロセスの改良によりバリアが厚い場合の Q 値は180万に向上している。新設計ではバリアを4穴列($q=4$)まで薄くしても130万、さらに3穴列($q=3$)にしても52万の Q 値が得られた。図2に空気スロットの有無による Q 値のPhCバリア厚さ依存性の比較結果を示す。空気スロットなしではバリア厚が薄いと光がトンネル効果で漏れてしまい Q 値が低下してしまうが、空気スロットがあると屈折率閉込により漏れの増加を最小限に留められるので、 Q 値を維持できることを示している。ごく最近、共振器構造のさらなる最適化によりバリア厚3穴列で100万、2穴列でも32万の Q 値が得られた[3]。

本研究により、高 Q 共振器を含むPhCの実サイズを Q 値を維持したまま大幅に縮小することが可能になった。また、新共振器構造は共振器部分が細長いビーム構造になっているので、機械振動子などのMEMS構造への応用が容易で、輻射圧・勾配力等の光学的な応力を利用するOpto-mechanicsの研究への発展が期待される。

[1] Kuramochi et al., Appl. Phys. Lett. **88** (2006) 041112.

[2] Kuramochi et al., Appl. Phys. Lett. **93** (2008) 111112.

[3] Kuramochi et al., The 8th International Photonic & Electromagnetic Crystal Structures Meeting (PECS-VIII), Sydney, Australia (April 2009).

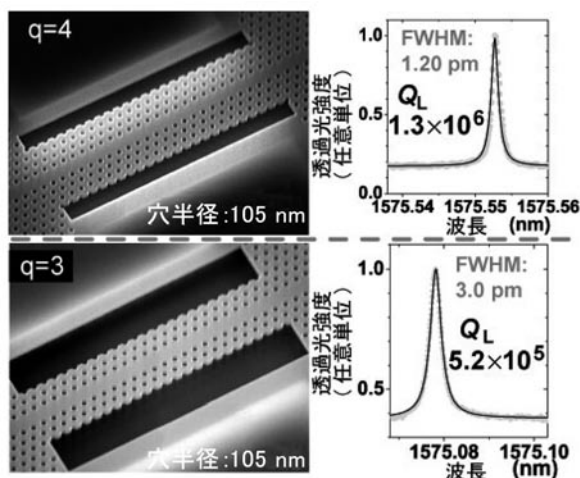


図1 バリア厚 q が4列、3列のときの各顕微鏡像と共振モードスペクトル。

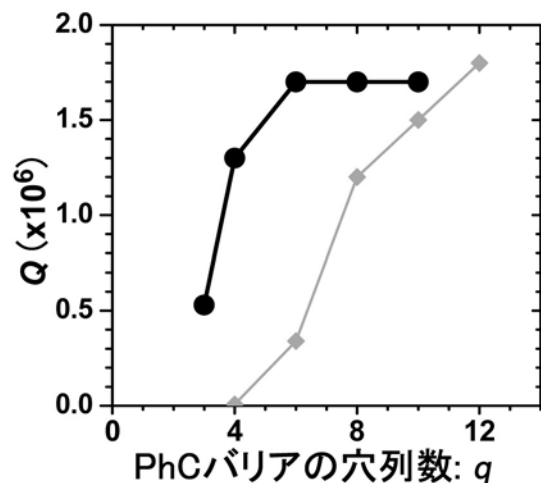


図2 実験 Q 値のPhCバリア幅依存性(エアスロットの有無の比較)。

屈折率変調による超高 Q 共振器の動的形成と光のピン止め

納富雅也 谷山秀昭
量子光物性研究部

近年、2次元フォトニック結晶の線欠陥導波路に、穴位置の数 nm シフト等のわずかの構造変調を加えることによって[図1(a)]、非常に高い Q 値の超小型光共振器が実現されてきた[1]。この閉じ込め原理は様々な系に適用可能であり、最近この原理を用いて、線欠陥導波路の周期的構造変調による大規模結合ナノ共振器の形成[2]や1次元フォトニック結晶の構造変調による超高 Q 共振器モードの発見[3]などの成果が達成されている。

今回、我々は図1(b)のように線欠陥導波路へ屈折率変調を与えることで、構造を変調することなく波長と同程度のサイズの高 Q 共振器が形成可能であることを数値計算により発見した。最も驚くべきことは、非常に小さな屈折率変化で非常に高い Q 値が達成できることである。例えば0.04%という小さな屈折率変化量でも1000万を超える Q 値が可能であり、0.3%の場合では Q 値は50億に達する[4]。

このような小さな屈折率変化は高速な光非線形効果により達成できるため、光パルスを局所的に照射することにより、動的に超高 Q 共振器を形成することが十分可能となる。この過程を用いると、試料に光を局所照射することにより、導波路内を走行する光パルスの一部をピン止めすることができる[4]。図2に数値シミュレーションによる光ピン止めの実現例を示す。丸く示した屈折率変調部分に存在していた光強度は、動的に形成された共振器モードにトラップされてピン止めされている。詳細な計算から、この過程は同時に動的に波長変換[5]が起これ、光が走行モードから共振器モードへ変換されていることが確認されている。

この結果は、小さな変調効果で、光の強い閉じ込めを自在に制御できることを意味しており、従来の光学デバイスでは不可能なデバイス動作の実現が期待される。

- [1] T. Tanabe et al., Nature Photon. **1** (2007) 49.
- [2] M. Notomi, E. Kuramochi et al., Nature Photon. **2** (2008) 741.
- [3] M. Notomi et al., Opt. Express **16** (2008) 11095.
- [4] M. Notomi and H. Taniyama, Opt. Express **16** (2008) 18657.
- [5] T. Tanabe et al., Phys. Rev Lett. **102** (2009) 043907.

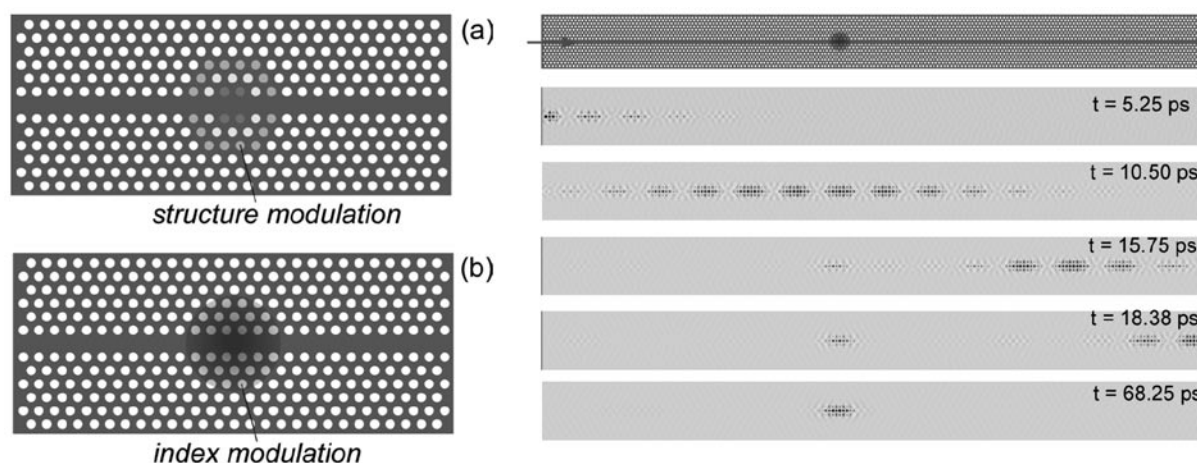


図1 線欠陥導波路の局所変調による共振器形成。(a) 構造変調 (b) 屈折率変調。

図2 線欠陥導波路の動的屈折率変調による光ピンニングのシミュレーション結果。

Ⅱ. 資料

サイエンスプラザ 2008

2008年11月21日(金)にNTT厚木研究開発センタにおいて、“ナノサイエンスが拓く量子の世界”と題した物性科学基礎研究所の公開イベント「サイエンスプラザ2008」を開催しました。本イベントは、研究所の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、皆様との有意義な議論の場とする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、各研究部長による研究方針と展示ポスターの概要の説明に続き、フォトニックナノ構造制御研究グループリーダーの納富雅也特別研究員によるシンポジウム講演会「光を止める、閉じ込める～フォトニック結晶による光制御～」を行いました。午後の部では、豊田工業大学副学長榊裕之先生に「ナノ空間の量子物理と21世紀の世界～これからの学術・技術のあり方を考える～」と題した特別講演を行って頂きました。講演後には熱心な質問が多数寄せられました。

ポスター展示では、フォトニクス研究所の9件とマイクロシステムインテグレーション研究所の7件も含め、計48件の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議論も行われ、多くの貴重なご意見を頂きました。毎年大変好評の「ラボツアー」については、できるだけ多くの方に参加して頂けるよう4つのコースを用意致しました。また、就職に興味のある学生の方を対象とした相談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」を行いました。ご来場頂いた方々と親交を深めるとともに、研究内容についての議論も引き続き行われました。

今回、大学等研究機関・一般企業・NTTグループの方々など180名を超える方々に参加頂き、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。ご来場頂きました方々には、心より感謝申し上げます。ポスター展示、ラボツアーの際やアンケートでお寄せ頂きました様々なご意見は次回のサイエンスプラザに活かしていきたいと思いをします。



「ナノスケールの輸送と技術」国際シンポジウム (ISNTT2009)

これまで物性科学基礎研究所では、半導体量子素子に関する国際会議 (NNCI: Nano-electronics, Nanostructures, and Carrier Interaction) とメソスコピック超伝導およびスピントロニクスに関する国際会議 (MS+S: Mesoscopic Superconductor and Spintronics) を開催し、好評を博してきました。昨今、量子情報処理やナノテクノロジーなどの分野において、これら両方の会議に関係する研究が大きく進展しており、これら2つの領域を横断した議論の場が重要となってきています。これらの分野の研究をより強く推進するため、これら2つの会議を統合した「ナノスケールの輸送と技術」国際シンポジウム (ISNTT2009: International Symposium on Nanoscale Transport and Technology 2009) が2009年2月20日から23日までの4日間、NTT厚木研究開発センタ講堂において開催されました。

議長はNTT物性科学基礎研究所の山口浩司(量子電子物性研究部長)と仙場浩一(超伝導量子物理研究グループリーダー) および藤澤利正(前量子固体物性研究グループリーダー: 現東京工業大学教授) が務めました。同分野をリードする国内外の著名な研究者が一堂に会し、最新の研究成果について活発な意見交換が行われました。特に重点的に議論された分野は半導体量子デバイス、超伝導量子ビット、ナノメカニクス、スピントロニクス、ナノエレクトロニクスなどです。

統合により会期も従来の3日間から4日間に延長され、イスラエル Weizmann 研究所の Heiblum 教授による基調講演や、ノーベル賞受賞者である Illinois 大学 Leggett 教授による特別講演をはじめとした、総勢25名に至る世界的に著名な招待講演者の講演が行われました。また、その他一般投稿として口頭・ポスターあわせて104件の発表が4日間で17のセッションにおいて行われ、これらの講演に対し世界14カ国より202名の参加者を得て4日間の会議は成功裏に終了しました。



第5回アドバイザリボード

2009年2月16日から18日の3日間、物性科学基礎研究所アドバイザリボードを開催しました。このボードは、外部の研究者によって研究成果ならびに研究計画を客観的に評価していただき、今後の研究マネジメントに反映させるために設置されました。最初の会議は2001年に開催され、その後は約3年ごとに開催され、今回で第5回目となります。今回の会議では、1名の新しいメンバをお迎えしました。

3日間の会議で、研究成果ならびに研究マネジメントに関し、貴重な提案と助言を頂きました。研究レベルは、以前と同様に世界的にハイレベルで、これを今後も維持し、成果をタイムリーに世界に向けて発信することが重要であるとのコメントを頂きました。また、人的リソース・研究予算の安定的な確保や、内外の研究協力の強化など、いくつかの改善点をご指摘頂きました。頂いた提言を、今後の研究所運営に積極的に活用していきます。

今回のボードでは、新たにポスターセッションを開催し、研究所のメンバとボードメンバとの意見交換の場を設けました。ボードメンバは、物性研研究者の研究に対する日ごろの姿勢を直接感じることができ、また研究所メンバは、著名な先生の研究に対する取り組み方を知ることができたとして好評でした。物性研およびNTT幹部との意見交換会では、内外の研究状況を鑑みた研究所運営について議論するよい機会となりました。次回の開催は、2年後を予定しております。



NTT Basic Research Labs.
Advisory Board Meeting

Walter Shottky, Hans Mooij, Peter Leggett, Boris Altshuler, Gerard Klaerner, Junji Gotoh, Naohisa Hara, John Lyn

February 16-18, 2009

Board Members	Affiliation	Research Field
Prof. G.Abstreiter	Walter Shottky	低次元半導体物理
Prof. B.Altshuler	Columbia Univ.	凝縮系物理
Prof. T.Hänsch	Max-Planck-Inst.	量子光学
Prof. S.Haroche	École Normale	量子光学
Prof. M.Jonson	Chalmers Univ. of Tech.	物性理論
Prof. T.Leggett	Univ. of Illinois	低温物性理論
Prof. H.Mooij	Delft Univ. of Tech	超伝導量子物理
Prof. J.Ryan	Univ. of Oxford	ナノバイオ
Prof. K.von Klitzing	Max-Planck-Inst.	半導体量子電子物性

社外表彰受賞者一覧

ITU-T Kaleidoscope Academic Conference: Innovations in NGN - Future Network and Services Best Paper Award, Second Place	武居 弘樹 本庄 利守 玉木 潔 都倉 康弘	Differential Phase Shift Quantum Key Distribution	2008.5.13
The 52nd International Conference on Electron, Ion, and Photon Beam Technology and Nanofabrication (EIPBN-2008) Micrograph Contest Best Video Award	山崎 謙治 山口 浩司	The Mini-faces of Egypt	2008. 5.28
第 32 回レーザー学会 業績賞 論文賞 (オリジナル部門)	小栗 克弥 岡野 泰彬 西川 正 中野 秀俊	超高速 XAFS 分光法によるフェ ムト秒レーザーアブレーションプ ルームの時空間発展ダイナミクス 計測	2008.5.30
応用物理学会 JJAP 論文賞	鈴木 恭一 蟹澤 聖 Simon Perraud 植木 峰雄 高品 圭 平山 祥郎	Imaging of Interference Between Incident and Reflected Electron Waves at an InAs/GaSb Heterointerface by Low-temperature Scanning Tunneling Spectroscopy	2008.9.2
応用物理学会 講演奨励賞	岡本 創	キャリア励起による GaAs カンチ レバーの Q 値制御と自励発振	2008.9.2
日本学術振興会 マイクロビーム アナリシス第 141 委員会 榊奨励賞	日比野 浩樹	表面電子顕微鏡を用いた結晶成長・ 表面相転移の動的観察	2008.9.16
日本学術振興会賞	納富 雅也	フォトニック結晶中の新奇な物理 現象の探索とその応用	2009.3.9
日本学士院学術奨励賞	納富 雅也	フォトニック結晶中の新奇な物理 現象の探索とその応用	2009.3.9

社内表彰受賞者一覧

アイデアコンテスト 2008 サービス部門最優秀賞 NGN アプリケーション 銅賞	山口 真澄 内山 健太郎 橋本 俊和 谷口 展郎 清水 健太郎	電話チャンネル的 タイムカプセルサービス	2008.11.21
先端技術総合研究所 所長表彰 研究開発賞	本庄 利守 武居 弘樹 井上 恭	差動位相シフト方式量子暗号	2008.12.18
先端技術総合研究所 所長表彰 報道特別賞	Imran Mahboob	微細な振動で演算を行う 板バネ半導体素子を開発	2008.12.18
物性科学基礎研究 所長表彰 業績賞	新家 昭彦 田辺 孝純 倉持 栄一 谷山 秀昭 納富 雅也 松尾 慎治 碓塚 孝明 佐藤 具就	フォトリック結晶による 光ビットメモリの実現	2009.3.19
物性科学基礎研究 所長表彰 業績賞	小野 行徳 Mohammed A.H. Khalafalla	単一ドーパントエレクトロニクスに 関する先駆的研究	2009.3.19
物性科学基礎研究 所長表彰 論文賞	Imran Mahboob	"Bit Storage and Bit Flip Operations in an Electromechanical Oscillator", Nature Nanotechnol. 3 (2008) 275.	2009.3.19
物性科学基礎研究 所長表彰 論文賞	西口 克彦	"Stochastic Data Processing Circuit Based on Single Electrons Using Nanoscale Field-effect Transistors", Appl. Phys. Lett. 92 (2008) 062105.	2009.3.19
物性科学基礎研究 所長表彰 論文賞	中島 寛	"Self-Assembly of Gold Nanorods Induced by Intermolecular Interactions of Surface-Anchored Lipids", Langmuir 24 (2008) 5654.	2009.3.19
物性科学基礎研究 所長表彰 功労賞	小栗 克弥 俵 毅彦 角倉 久史 岡本 創 柴田 浩行	実験室再配置における功績	2009.3.19
物性科学基礎研究 所長表彰 功労賞	登倉 明雄 小林 慶裕	カーボンナノチューブ ナノリスクへの対応	2009.3.19

報 道 一 覧

発表月日	発表媒体	見出し
4 月 10 日	日経産業新聞	2008 年度 技術トレンド調査 (第 1 回) 医療分野で重要成果目立つ (NTT は総合順位で 17 位)
4 月 14 日	日本経済新聞	消費電力、数百－数千分の一 超省エネの半導体素子 NTT が開発 携帯などに活用めざす
4 月 15 日	日刊工業新聞	板バネの微細振動で演算 NTT が半導体開発 1 ビット情報処理に成功
4 月 15 日	日経産業新聞	省エネ半導体素子 消費電力、数百－数千分の 1 に NTT 物性科研が開発
4 月 15 日	フジサンケイ ビジネスアイ	極小バネで超省エネ回路 NTT が新半導体素子を開発
4 月 21 日	日刊工業新聞	超伝導・光工学を融合 量子情報通信網の構築目指す 北海道大学・末宗幾夫教授
4 月 25 日	日経産業新聞	NTT、光メモリーを開発 フォトニック結晶で
4 月 25 日	日刊工業新聞	光メモリー NTT、持続時間 60 倍 フォトニック結晶利用 省電力回路実用化へ
4 月 28 日	日刊工業新聞	ナノテク温故知新
5 月 3 日	フジサンケイ ビジネスアイ	消費電力 100 分の 1 NTT が光メモリー新技術
5 月 3 日	中部経済新聞	微細バネで動く電子計算機開発 N T T 研究所が実験成功 振動の仕方で演算 消費電力は 1000 分の 1 に
5 月 5 日	朝日新聞	バネの振動でデジタル演算 NTT 研究所
5 月 12 日	大分合同新聞	バネで動くコンピューター
5 月 12 日	岩手日報夕刊	電算機素子にバネ NTT が基礎実験成功
5 月 19 日	愛媛新聞	バネで動くコンピューター 消費電力大幅に減 NTT 研実験成功
5 月 21 日	高知新聞	バネで動く電子計算機 消費電力 1000 分の 1 NTT 基礎実験に成功
5 月 21 日	信濃毎日新聞	バネで動くコンピューター 演算処理装置の素子に使用 「圧倒的に小さい消費電力」
5 月 26 日	秋田魁新聞	コンピューターに板バネ活用 振動で「0」「1」区別 NTT チームが実証 圧倒的な省電力実現も
5 月 28 日	産経新聞	小さな電力で大きな新技術 NTT、実用化に向けて開発急ピッチ
6 月 23 日	電経新聞	研究派 ダイヤモンド半導体 究極の技術で環境にも優しい
7 月 10 日	日経産業新聞	2008 年度 技術トレンド調査 (第 2 回) 立体画像表示に新フィルム (NTT は「新規性＋話題性」で 7 位)

発表月日	発表媒体	見出し
8月18日	日経産業新聞	超高速コンピューターに道 多量子ビット素子 東大などが開発
9月1日	日刊工業新聞	微細振動検出に成功 超伝導量子干渉素子 微小構造に加工
9月1日	日経産業新聞	100兆分の1メートルの振動検出 NTTなど技術開発 「量子現象」も観察
9月1日	日本経済新聞	100兆分の1メートルの振動検出 NTTなど手法開発
11月24日	日刊工業新聞	NTT 光信号速度 1/170 に減速 「スローライト」新構造開発
12月1日	日刊工業新聞	炭素材料「グラフェン」に脚光 NTT・IBM・富士通など 高い電気特性 企業が実用探る 次世代の超高速トランジスタ “ポストシリコン”に期待
12月1日	朝日新聞	光、最大170分の1に減速 NTT研究所が成功
2月13日	朝日新聞	若手6研究者に奨励賞

— 報道(抜粋) 2008 —

消費電力、数百—数千分の1

超省エネの半導体素子

[illegible]

NTTが開発
携帯などに活用めざす

正ですむ。ただ、演算速度は従来の方式より多少遅い。実際の演算するに当たっては、従来の方式で消費電力は従来の数倍、数千分の一程度になるという。今後は複数の素子をつなぎ実際に計算をするなどして開発を進める。

今回NTTは「MEMS（微小電気機械システム）技術」と呼ばれる微細加工技術などを使い、消費電力の少ない素子を実現した。

日本經濟新聞 2008.4.14

100兆分の1^{トル}の振動検出

NTTの物性科学基礎
フツ工科大学の研究チー
ムは、原子や電子の振る
舞いを調べる新しい手法
を開発、百兆分の一秒の

NTTなど
手法開発

振動を検出することに成功した。物理現象の詳細な観察のほか、分母D N Aデオキシリボ核酸の検出もできる。

三十一日付の英科学誌「ネイチャー・フィジックス(電子版)」に掲載された。

超電導量子干渉素子(SQUID)と呼ぶ超微細な磁気センサーとマイクロ波の微小な電圧板パルスを組み合わせた素子を使。バネの振動を磁気センサーで感知する仕組み。原子核の大きさよりもはるかに小さい、百分の一ほどで振動するバネの動きを検出した。ことに成功した。

日本経済新聞 2008.9.1

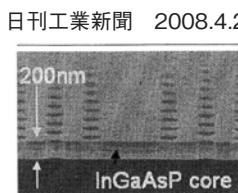
光メモリー
NTT、持続時間60倍
フォトニック
結晶利用 省電力回路実用化

NTは24日、人工的に作った微細な周期構造であるフォトリック結晶を使った光メモリーを開発したと発表した。従来のシリコンに対し、非線形効果が大いイソジウムムガロウムと素リンを材

料に使用。メモリーの持続時間が最大で150ナ秒（ナノは10億分の1）と従来比60倍にでき、実用上十分な性能をクリアして実用化が期待される。

さ200 μ 級の半導体結晶に、直径200 μ 級の空穴を420 μ 級周期で三角格子状に配置したフォトニック結晶を作れるレーザー・電気光学

○」で成果を発表する。



小さな電力で大きな新技術

NTTが通信システムの低消費電力化や高速化を実現する新技術の開発を急ピッチで進めている。今春には、特殊な結晶を使ってネットワーク上の光信号の動きを止めたり、膨大なデータを瞬時に選別して微量の電力で処理する技術を相次いで発表した。ネットワーク上を行き交う情報は爆発的な拡大を続けており、その処理効率をあげるための技術革新は、IT業界で待ったなしの課題になっている。

■光を閉じこめる

NTTは5月上旬、米サンノゼで開かれた電気工学の国際会議で、光ファイバーで送られてきた情報を電気信号に変換せず、そのまま処理できる「光メモリ」の性能を大幅に高める新技術を公開した。

光メモリは、光を通さない機能を持つ「フォトニック結晶」と呼ばれる素材を用い、数マイクロメートル（マイクロは100万分の1）の微小な空間に光を閉じこめることができる。従来技術では2・5ナノ（1ナノは10億分の1）秒しか光を保持できなかったが、NTTはインジウムやガリウムなどの化合物を配合し、保持時間を最長150ナノ秒まで延ばすことに成功。これにより、保持した光で直接、演算処理できるようになった。

この光メモリを、通信ネットワ

NTT、実用化に向けて開発急ピッチ

ーク上で情報を分配するルーターなどの機器に採用すれば、これまでの限界を超えて通信速度を高速化できる。消費電力は、従来の光メモリを利用した回路と比べ100分の1程度で済むという。

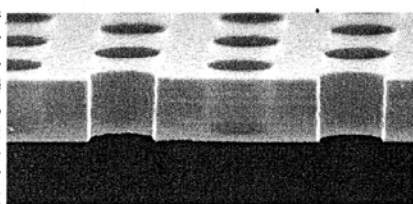
NTTは実用化に向け、情報保持時間をさらに延ばすよう、結晶の材料や構造の研究を進める計画だ。

■スパコンも省エネ

また4月には、英科学誌「ネイチャー・ナノテクノロジー」に、半導体材料で作った極小の板バネを振動させて「0」と「1」のデジタル信号を表す新型素子を発表した。

素子を次々に結合すればコンピューターのような演算回路になり、通常の半導体素子と比べ消費電力を数百～数千分の1程度に抑えられる。将来、微細加工技術で素子を小型化できれば、超省エネ型スーパーコンピューターにも応用できるとい

う。このほか、すでに実用化された技術もある。NTTとNTTエレクトロニクスが6月1日からサンプル販売する電送経路の切り替えスイッチ



フォトニック結晶の電子顕微鏡写真。直径1マイクロメートルに満たない微細な穴の配列に、光を閉じこめる（NTT提供）

は、最大毎秒40ギガビット（ギガは10億）の大容量通信を、わずか数マイクロワットの電力で切り替えられるのが特徴。インジウムリンと呼ばれる素材を使った半導体チップによって実現した。

例えば、ハイビジョン映像は信号の量が膨大なため、伝送路の切り替え処理の際に消費電力が大きいことが問題だったが、このスイッチを使えば電力消費を抑えられる。

■増え続ける消費電力

インターネット上では、ハイビジョン映像の伝送や、膨大な企業情報の処理など、サービスの高度化でデータ量増大は避けられない。

こうした中、各国政府はIT機器の消費電力削減へ取り組みを強化しており、業界の自主的な対応も求められている。NTTは目先の商品やサービスにとどまらず、10年後、20年後の実用化を目指す先端技術を含めて、長期的な視野で省エネ技術開発に取り組む構えだ。

産経新聞 2008.5.28

超高速コンピューターに道 多量子ビット素子 東大などが開発

東京大学の樽本清信教授らとNTT物理科学基礎研究所は、未来の超高速計算機「量子コンピューター」向けの新型素子を開発した。ガリウム・ヒ素製素子にコバルト製の微小な磁石を上から重ねた。同コンピューターの基本単位となる「量子ビット」のサイズは約

「0」「1」の両方の状態が存在している。開発したのは外から電圧をかけて内部の電子の状態を一つずつ制御する「量子ドット」と呼ぶ素子。磁場で中心部の電子のスピン（回転）の方向を制御して量子ビットを作る。量子ドットのサイズは約

「ビット」を、将来一千万以上扱えることも可能とされている。量子コンピューター実現に向けた新たなアプローチとして注目を集めそうだ。

これまでも十数回程度で作った研究はあるが、発熱などのため、量子コンピューターの実現に必要な数千万回まで増やすのは困難とされていた。量子コンピューターは量子ビットの働きで膨大な数のデータでも、同じ演算が同時に実行できる。高度な暗号解読や複雑なシミュレーション、データベース検索などを短時間でこなすことができる。

日経産業新聞 2008.8.18

NTT 光信号速度 1/170に減速 「スローライト」新構造開発

NTTは微小な領域で光信号が伝わる速度を極限まで落とす「スローライト」と呼ぶ媒体の新構造を開発した。光を閉じ込められる人工の周期構造「フォトニック結晶」に、小型共振器を組み込んで構成する。光を減速すれば高速な光信号も長い時間一定の空間にとどめておけるため、光を光のま

ま蓄えて記憶する光メモリなどに活用できる。科学技術振興機構のプロジェクト研究の成果。23日付の英科学誌「ネイチャー・フォトニクス」電子版に詳細を発表する。

シリコンのフォトニック結晶中に、光の波長とはほぼ同じ大きさである約0・1立方マイクロメートルの微小なナノ構造の共振器を約

200個組み込む。すると、空気中を伝わる光の速度に比べ、光信号の伝播速度を最大170分の1程度まで減速できる。従来より素子の面積を100分の1以下にし、光の透過率は100倍に向上した。損失も少ない。

単一の光子で情報処理を行う量子光情報処理などに応用を目指す。

日刊工業新聞 2008.11.24

く、この新構造は原子が結合した状態に似た特性を持つことも確かめた。スローライトは小型素子でも光を光のまま遅延でき、光メモリに応用可能。

また、光と物質の相互作用を強めるため、効率的に光処理ができ、低消費エネルギーで情報処理に適用できる。スローライトの実現にはこれまで光の小型共振器をつなぐ構造が目立っていたが、200個もの共振器を結合させて特性を高めた例はないという。

嘉數 誠

[illegible]

究極の技術で環境にも優しい

學。

図 1 高圧化・高出力素子の性能比較

高圧化・高出力素子の性能比較
高圧化 2:1
高電圧化 30:1
高電流化 3:1

(理論的な性能)

地球上で最も優れた
物理的特性を有する
「究極の半導体」

矢野の創環境、高圧・高出力電子
例 過位能星型超電圧高出力電子
宇宙空間(電圧、熱電、放射線)

しかし、究極の結晶は多くの欠陥や
不純物を有し、実用は容易ではなかった

3

NTT・IBM・富士通など

鉛の劣る材料として知られるラファイン(黒鉛)とこれから作る炭素材料「グラファイト」の研究が今、世界で大ブームだ。英国の研研グループが04年、グラファイトが高い電導性を持つことを初めて見だした。発見者星く、これを機に世界で研究「インバ」が勃発した。日本では同じ炭素材料であるカーボンナノチューブ(CNT)の勢に隠れ、やや存在感の薄いつつグラファイトが、例えば電導性パイプとして実用化を希望する企業が相次いで力強い研究を続けている。

(藤木信徳)

競争が激化
グローバルの関連分野は、
在、世界で自給をのべ
スで覆われていゝを、超
「20年前のものを、
腐ブイバー」を抱え、
ぶの競争が激化する。N
研究の最前線、

に期待

を駆使し、シリコ

(田中康晴)

バネが振動する仕組み

電圧をかけると振動

朝日新聞 2008.5.5

か10メートル(ナノは10億分の1)で、現在のトランジスタよりずっと少ない電力で動作する。山口清司・グループリーダーは「将来的には、いまの一万分の1の消費電力で動作するコンピュータを構築できる可能性がある」と託す。(田中康晴)

ナノツールでナノグラフェンの電気特性を測定

A transmission electron micrograph (TEM) showing a single carbon nanotube. The nanotube appears as a dark, elongated, cylindrical structure. A dashed rectangular box highlights a specific region of the nanotube. An inset image provides a magnified view of this region, showing the hexagonal lattice structure of the carbon nanotube wall. A scale bar in the inset indicates 50 nm.

て使う。だが、お
さん、僕は東北の
一地方には向い
ない。先生は東京
の美空ひばり教
育学校で、その
ルーツが、今シ
ン・オンに基づ
いて、低圧を形
成する手法高
級なるな成果も
ある。だが、今
は単体の特許生
サブパトヤンが
10億分り。早と
晩

[illegible]

う N 省農うげ

[illegible]

来訪者による講演一覧 (2008 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」
5 月 23 日	Prof. Erhard Kohn	University of Ulm, Germany "Recent Progress in Diamond Related Device Work at Ulm"
9 月 29 日	田中 悟 教授	九州大学 「SiC ナノ表面と表面自己改質によるヘテロ構造の形成」
9 月 29 日	林 賢二郎 氏	九州大学 「SiC 表面に形成した多層グラフェン膜の積層構造解析」
10 月 7 日	Prof. Jonathan Heddle	東京工業大学 "Bionanoengineering with Protein Rings"
10 月 14 日	水野 清義 准教授	九州大学 「低速電子回折による表面構造解析と微小領域プローブの開発」
12 月 12 日 12 月 19 日 12 月 26 日	Prof. Jocelyn Achard	Université Paris 13, France "Fundamentals of Diamond CVD Growth Process"
3 月 24 日	黒木 義彦 氏	ソニー株式会社 "Improvements in Motion Image Quality by High Frame Rate"

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15日	Dr. Nicolas Clément	University of Sciences and Technologies of Lille, France "Toward Electrical Detection of Single Molecules: Description of the Project and Presentation of Dynamic Electrical Transport and Noise in Molecular Junctions"
6月9日	水落 憲和 博士	筑波大学 産業総合技術研究所 "Generation and Retrieval of Entangled States from Single Spins in Diamond at Room Temperature"
6月23日	Dr. Simon J. Devitt	University of Cambridge, U. K. University of Melbourne, Australia "Subspace Confinement: How Good Is Your Qubit?"
7月2日	石黒 亮輔 博士	東京理科大学 「結晶粒界の超流動と Supersolid」
7月3日	Prof. Seth Lloyd	Massachusetts Institute of Technology, U.S.A. "Quantizing the Global Positioning System" "Quantum Computation and Photosynthesis"
7月29日	Prof. Cun-Zheng Ning	Arizona State University, U.S.A. "Semiconductor Nanolasers: Is There an End to Miniaturization?"
11月25日	初貝 安弘 教授	筑波大学 "Universality of the Zero Gap Semiconductors: From Graphene and d-wave Superconductors to Topological Insulators"
12月4日	Dr. Samuel Deléglise	École Normale Supérieure, France "Generation and Time-resolved Reconstruction of Cavity Field Quantum States"

12月17日	Prof. Saverio Pascazio	University of Bari, Italy "Antibunching and Correlations of Field-Emitted Electrons from a Superconductor"
1月19日	Prof. Jörg Schmiedmayer	Technische Universität Wien, Austria "Atom Chips"
2月23日	Prof. Wilfred G. van der Wiel	University of Twente, the Netherlands "Hybrid Organic-inorganic Systems for (Spin) Electronics"
2月26日	Prof. Klaus H. Ploog	Paul-Drude-Institut, Germany "Challenges in Materials Science for Sustainable Energy"
3月2日	神部 信幸 氏 CTO	NanoGram Corporation, U.S.A. 「『グローバルナノテクベンチャー』－技術革新を社会に役立てる道として－」

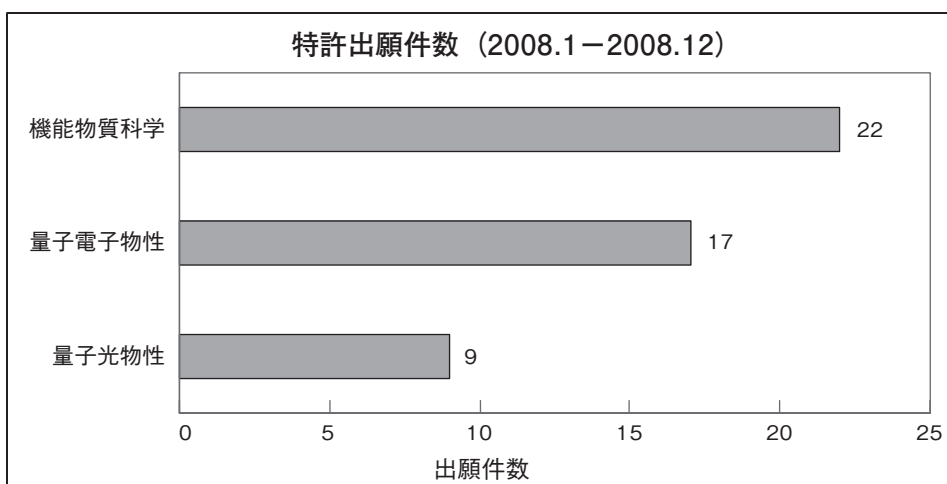
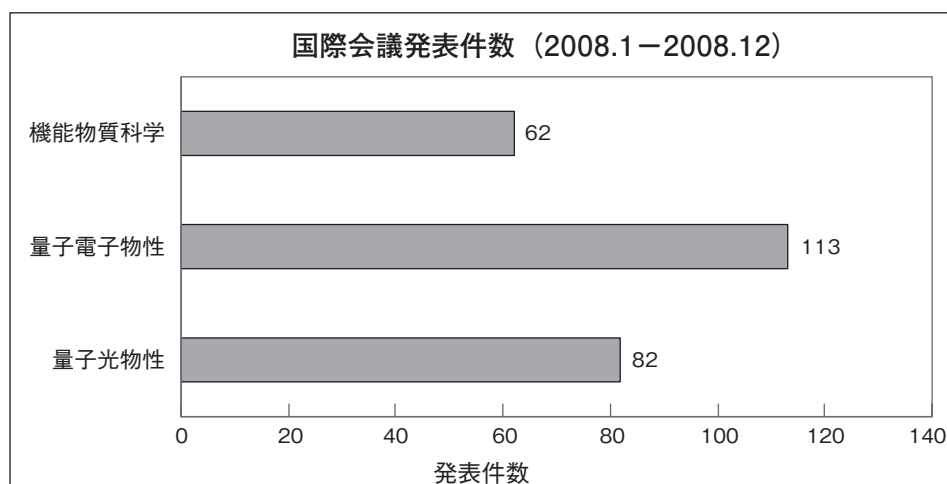
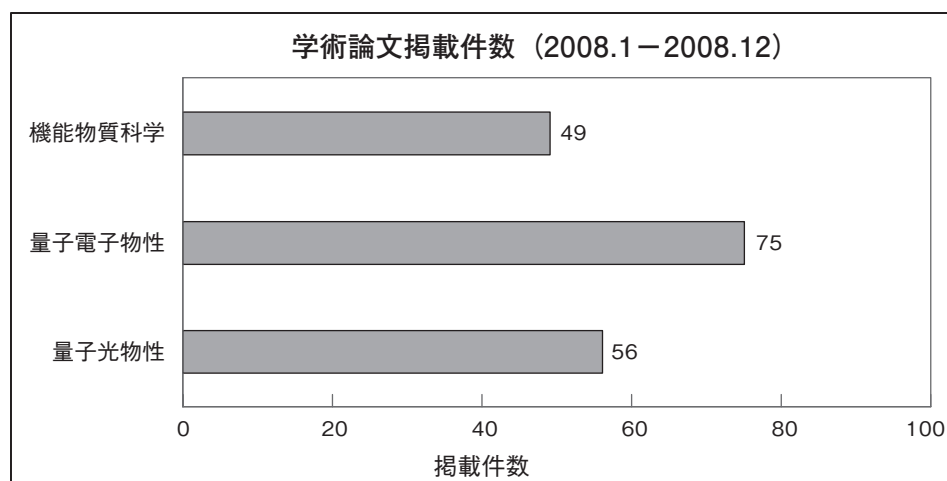
Ⅲ．量子光物性関連

講演日	講演者	講演者所属 「講演タイトル」
8月11日	尾崎 恒之 教授	University of Quebec, Canada "Unique High-order Harmonic Generation from Plasma at the Advanced Laser Light Source"
10月9日	Prof. Stephen Hughes	Queen's University, Canada "Unraveling the Light-matter Interactions of "Disorder-induced Scattering" and the "Strong-coupling Regime" in Semiconductor Nanostructures"
10月10日	Prof. Amnon Aharony	Ben-Gurion University of the Negev, Israel "Spin Filtering by a Periodic Spintronic Device"

10月15日	Prof. Ora Entin-Wohlman	Ben-Gurion University of the Negev, Israel "The Conductance of Superconducting-normal Hybrid Structures"
10月23日	Prof. Yong-Hee Lee	Korea Advanced Institute of Science and Technology, Korea "Spatial and Spectral Nano-control of Micro-resonators"
11月18日	Prof. Christos Flytzanis	École Normale Supérieure, France "Coherent Optically Driven Electron Charge/Spin Transport and Magnetic Ordering in Polar Photonic and Magnetophotonic Structures"
12月2日	宮田 耕充 博士	産業技術総合研究所 「金属型および半導体型単層カーボンナノチューブの光学的性質」
12月22日	井戸 哲也 博士	情報通信研究機構 「光周波数コムを受動光共振器によるパルス強度増強と光格子時計における $\text{Sr } ^1\text{S}_0\text{-}^3\text{P}_1$ 遷移」
1月7日	小澤 陽 氏	Max-Planck-Institut, Germany 「精密分光のための紫外領域光周波数コム」

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（2008 年）

2008 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180件、国際会議の発表件数は257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とおりです。

雑誌名	(IF2007*)	件数
Advanced Materials	8.191	1
Applied Physics Express	-	3
Applied Physics Letters	3.596	16
Applied Surface Science	1.406	6
Diamond and Related Materials	1.788	7
Japanese Journal of Applied Physics	1.247	19
Journal of Applied Physics	2.171	4
Langmuir	4.009	2
Nano Letters	9.627	3
Nanotechnology	3.31	3
Nature Nanotechnology	14.917	1
Nature Photonics	-	1
Nature Physics	14.677	5
Optics Express	3.709	12
Physica E-Low-Dimensional Systems & Nanostructures	0.834	19
Physical Review A	2.893	3
Physical Review B	3.172	16
Physical Review Letters	6.944	10

*IF2007：インパクトファクター 2007 (出展、Journal Citation Reports, 2007)

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3.07です。

国際会議の主な発表先と発表件数は以下のとおりです。

国際会議名	件数
The Conference on Lasers and Electro-Optics and the Quantum Electronics and Laser Science Conference	13
The IEEE Nanotechnology Materials and Device Conference 2008	10
International Symposium on Physics of Quantum Technology	10
International Symposium on Surface Science and Nanotechnology	10
The International Conference on the Physics of Semiconductors	9
25th International Conference on Low Temperature Physics	8
2008 International Conference on Solid State Devices and Materials	7
21st International Microprocesses and Nanotechnology Conference	6
The 9th International Symposium on Foundations of Quantum Mechanics in the Light of New Technology	6
13th Advanced Heterostructures and Nanostructures Workshop	4
The American Physical Society	4
18th International Conference on High Magnetic Fields in Semiconductor Physics and Nanotechnology	4
Mechanical Systems in the Quantum Regime, the Gordon Research Conferences	4
The 5th International Conference on Physics and Applications of Spin-related Phenomena in Semiconductors	4
The International Symposium on Graphene Devices: Technology, Physics, and Modeling	4
The 23rd Nishinomiya-Yukawa Memorial International Workshop	4
The 21st Annual Meeting of The IEEE Lasers & Electro-Optics Society	4
The 9th International Conference on Quantum Communication, Measurement and Computing	4
International Symposium on Growth of III-Nitrides	4

国際会議招待講演一覧 (2008)

I. 機能物質科学関連

- (1) H. Hibino, "Microscopic determination of number of graphene layers on SiC", Symposium on Surface and Nano Science 2008, Appi, Japan (Jan. 2008).
- (2) S. Suzuki and Y. Kobayashi, "Low-energy irradiation damage in single-walled carbon nanotubes: defect characteristics and electric property control", International Carbon Nanotube Conference in Nagoya University, Nagoya, Japan (Feb. 2008).
- (3) K. Torimitsu, Y. Shinozaki, and Y. Furukawa, "Magnesium effect on brain neural development", Gordon Research Conferences, Magnesium in biochemical processes and medicine, Ventura, U.S.A. (Mar. 2008).
- (4) K. Torimitsu, Y. Shinozaki, and Y. Furukawa, "Magnesium effect on rat brain neural development in vitro", European Magnesium Meeting 2008, Paris, France (May 2008).
- (5) Y. Taniyasu and M. Kasu, "Influence of dislocation on AlN deep-UV light-emitting diodes", 4th Asian Conference on Crystal Growth and Technology, Sendai, Japan (May 2008).
- (6) Y. Kobayashi, T. Akasaka, and T. Makimoto, "Boron Nitride Grown by MOVPE", 14th International Conference of Metalorganic Vapor Phase Epitaxy, Metz, France (June 2008).
- (7) K. Torimitsu, "Development of Nanobio Interface using Neurons and Receptor Proteins", Asia-Pacific Symposium on Nanobionics, Wollongong, Australia (June 2008).
- (8) A. Shimada, N. Kasai, and K. Torimitsu, "Conductive-Polymer Microelectrode Array for Neural Signal Measurements", 16th Annual International Conference on Composites/Nano Engineering, Kuming, China (July 2008).
- (9) H. Hibino, "Number-of-layers dependence of electronic properties of epitaxial graphene investigated by SPELEEM", 5th International Workshop on Nanoscale Spectroscopy and Nanotechnology, Athens, U.S.A. (July 2008).
- (10) H. Omi, D. P. Sprunken, K. Furukawa, H. Nakashima, I. Sychugov, Y. Kobayashi, and K. Torimitsu, "Determination of Aspect Ratio Distribution of Gold Nanorods from Absorption Spectra using Gans Theory", 16th Annual International Conference on Composites/Nano Engineering, Kuming, China (July 2008).
- (11) Y. Taniyasu and M. Kasu, "MOVPE Growth of Single-crystal Hexagonal AlN on Cubic Diamond", 2nd International Symposium on Growth of III-Nitride, Izu, Japan (July 2008).
- (12) M. Kasu, K. Ueda, H. Kageshima, and Y. Taniyasu "Challenges of Diamond-based Electronic Devices", International Conference on Electronic Materials 2008, Sydney, Australia (July 2008).
- (13) K. Torimitsu, Y. Shinozaki, A. Shimada, and Y. Furukawa, "Receptor based nano-bio research: application to medical bionics", Sir Mark Oliphant International Frontiers of Science and Technology Conference Series, Inaugural Conference on Medical Bionics, Lorne, Australia (Nov. 2008).
- (14) K. Torimitsu, "Receptor protein functions and its application for biomimetic device", The 5th Sweden-Japan Workshop on Bio-Nanotechnology, Stockholm, Sweden (Nov. 2008).
- (15) H. Hibino, H. Kageshima, M. Kotsugi, and Y. Watanabe, "Local work function measurements of epitaxial few-layer grapheme", 5th International Symposium on Surface Science and Nanotechnology, Tokyo, Japan (Nov. 2008).

- (16) K. Torimitsu, "Protein-based nanobio research for medical bionics", 8th International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration, Sendai, Japan (Dec. 2008).

II. 量子電子物性関連

- (1) Y. Ono, "Single boron detection in nano-scale SOI MOSFETs", The 2009 International Meeting for Future of Electron Devices, Kansai, Osaka, Japan (May 2008).
- (2) K. Kanisawa, "Imaging surface states bound to native donors at the epitaxial InAs surface", Nanoscale Spectroscopy & Nanotechnology 5 - Spin-Polarized Scanning Tunneling Microscopy 2, Athens, U.S.A. (July 2008).
- (3) A. Fujiwara and Y. Ono, "Single-Electron Device", ITRS(International Technology Roadmap for Semiconductors) -ERD (Emerging Research Devices) Workshop on Maturity Evaluation for Selected Beyond CMOS Emerging Technologies, San Francisco, U.S.A. (July 2008).
- (4) I. Mahboob and H. Yamaguchi, "The quantum Hall effect probed via a parametrically pumped electromechanical resonator", Frontiers of Low Temperature Physics, London, U.K. (Aug. 2008).
- (5) H. Yamaguchi and I. Mahboob, "Micro/Nanomechanical Systems for Information Processing", The 9th International Symposium on Foundations of Quantum Mechanics in the Light of New Technology, Saitama, Japan (Aug. 2008).
- (6) H. Yamaguchi, I. Mahboob, H. Okamoto, and K. Onomitsu, "Micro/Nanomechanical Systems Based on Semiconductor Heterostructures", The International Symposium on Compound Semiconductors, Rust, Germany (Sep. 2008).
- (7) Y. Ono, M. A. H. Khalafalla, A. Fujiwara, K. Nishiguchi, K. Takashina, S. Horiguchi, Y. Takahashi, and H. Inokawa, "Single-dopant effect in Si MOSFETs", IEEE Nanotechnology Materials and Device Conference, Kyoto, Japan (Oct. 2008).
- (8) K. Semba, "Cavity-QED with Quantum Superconducting Circuits", Quantum information, quantum coherence and related topics, Tokyo, Japan (Sep. 2008).
- (9) H. Nakano, S. Saito, K. Semba, and H. Takayanagi, "Quantum Analysis on Superconducting Qubit Readout with a Josephson Bifurcation Amplifier", Quantum Dynamics in Dots and Junctions: Coherent Solid State Systems, Riva del Garda, Italy (Oct. 2008).
- (10) K. Grove-Rasmussen, H. I. Jorgensen, T. Hayashi, P. E. Lindelof, and T. Fujisawa, "Electronic transport in carbon nanotube quantum dots", Korea Conference on Innovative Science and Technology, Phoenix Park, Korea (Oct. 2008).
- (11) H. Yamaguchi, "Novel Functionalities in Semiconductor-based Micro/Nanomechanical Systems", 21st International Microprocesses and Nanotechnology Conference, Fukuoka, Japan (Oct. 2008).
- (12) I. Mahboob and H. Yamaguchi, "Bit operation in a parametrically pumped electromechanical resonator", Nano Technology 2008, Ishikawa, Japan (Oct. 2008).
- (13) A. Fujiwara, K. Nishiguchi, Y. Ono, H. Inokawa, and Y. Takahashi "Silicon Single-Electron Devices and Their Applications", TND 2008 Technical Forum, Seoul, Korea (Oct. 2008).
- (14) T. Ota, T. Hayashi, and T. Fujisawa, "Quantum information processing devices with nano-scale semiconductor quantum dots", 1st Russian-Japanese Young Scientists Conference on Nanomaterials and Nanotechnology, Moscow, Russia (Oct. 2008).

- (15) K. Semba, "Quantum control of the flux qubit coupled to microwave photon system", Solid State Quantum Information, Pisa, Italy (Dec. 2008).
- (16) K. Grove-Rasmussen, "Quantum Transport in Carbon Nanotubes", Workshop on novel phenomena at nanoscale interface, Hsinchu, Taiwan (Dec. 2008).

III. 量子光物性関連

- (1) H. Takesue, "Quantum communication experiments using entangled photons generated in dispersion shifted fiber", LEOS Winter Topical Meeting of Nonlinear Photonics, Sorrento, Italy (Jan. 2008).
- (2) M. Notomi, T. Tanabe, E. Kuramochi, A. Shinya, and H. Taniyama, "Nonlinear and adiabatic control of light in a photonic crystal chip", LEOS Winter Topical Meeting of Nonlinear Photonics, Sorrento, Italy (Jan. 2008).
- (3) T. Tanabe, E. Kuramochi, A. Shinya, H. Taniyama, and M. Notomi, "Photonic crystal nanocavities with extremely long photon lifetime and their applications", The 6th Asia Pacific Laser Symposium, Nagoya, Japan (Jan. 2008).
- (4) S. Kawanishi, M. Tanaka, M. Ohmori, and H. Sakaki, "Photonic bandgap fiber for new wavelength range", Optical Fiber Communication Conference and Exposition/National Fiber Optics Engineers Conference, San Diego, U.S.A. (Feb. 2008).
- (5) M. Notomi, "Control of Light by Photonic Crystal Nanocavities", JST-DFG Workshop on Nanoelectronics, Aachen, Germany (March 2008).
- (6) M. Yamashita and M.W. Jack, "Number squeezing of an array of Bose-Einstein condensates trapped in a 1D optical lattice", 17th International Laser Physics Workshop, Trondheim, Norway (June 2008).
- (7) T. Honjo, S. W. Nam, H. Takesue, Q. Zhang, H. Kamada, Y. Nishida, O. Tadanaga, M. Asobe, B. Baek, R. Hadfield, S. Miki, M. Fujiwara, M. Sasaki, Z. Wang, K. Inoue, and Y. Yamamoto, "Entanglement-based BBM92 QKD experiment using superconducting single photon detectors", 17th International Laser Physics Workshop, Trondheim, Norway (June 2008).
- (8) T. Tanabe, A. Shinya, E. Kuramochi, and M. Notomi, "Nonlinear Switching in High-Q Photonic Crystal Nanocavities", Integrated Photonics and Nanophotonics Research and Applications, Boston, U.S.A. (July 2008).
- (9) S. Kawanishi, "Recent Progress in Photonic Crystal Fiber Technologies", Opto-Electronics and Communications Conference, Sydney, Australia (July 2008).
- (10) M. Notomi, T. Tanabe, E. Kuramochi, and H. Taniyama, "Slow Light Media Based on Ultrahigh-Q Nanocavities", OSA Topical Meeting on Slow and Fast Light, Boston, U.S.A. (July 2008).
- (11) H. Takesue, H. Fukuda, T. Tsuchizawa, T. Watanabe, K. Yamada, Y. Tokura, and S. I. Itabashi, "Entanglement generation using silicon wire waveguide", 5th International Conference on Group IV Photonics, Sorrento, Italy (Sep. 2008).
- (12) H. Takesue, K. Harada, H. Fukuda, T. Tsuchizawa, T. Watanabe, K. Yamada, Y. Tokura, and S. I. Itabashi, "Entanglement generation using silicon wire waveguide", International Conference on Quantum Optics and Quantum Information, Vilnius, Lithuania (Sep. 2008).
- (13) H. Nakano, A. Ishizawa, and K. Oguri, "Dependence of surface harmonics generation properties on carrier-envelope phase of few-cycle laser field", Advanced coherent light sources, Hilo, U.S.A. (Sep. 2008).

- (14) H. Takesue, H. Fukuda, T. Tsuchizawa, T. Watanabe, K. Yamada, Y. Tokura, and S. I. Itabashi, "Entangled photon-pair generation using silicon photonic wire waveguide", The IEEE Nanotechnology Materials and Device Conference, Kyoto, Japan (Oct. 2008).
- (15) M. Notomi, A. Shinya, T. Tanabe, E. Kuramochi, H. Taniyama, S. Matsuo, T. Kakitsuka, and T. Sato, "On-chip All-optical Processing Based on Photonic Crystal Nanocavities", Asia Optical Fiber Communication & Optoelectronic Exposition and Conference, Shanghai, China (Oct. 2008).
- (16) S. Kawanishi, "Recent Progress in Photonic Bandgap Fiber Technology", Asia Pacific Optical Communications, Hangzhou, China (Oct. 2008).
- (17) Y. Tokura, "Quantum spin transport in magnetic-field-engineered nano-structures", Spin Transport in Condensed Matter, The 23rd Nishinomiya-Yukawa Memorial International Workshop, Kyoto, Japan (Oct. 2008).
- (18) H. Takesue and T. Honjo, "Quantum communication experiments using telecom-band entangled photons", The 21st Annual Meeting of The IEEE Lasers & Electro-Optics Society, Newport Beach, U.S.A. (Nov. 2008).
- (19) K. Oguri, Y. Okano, T. Nishikawa, and H. Nakano, "Dynamic imaging of femtosecond laser ablation plume by using laser-generated soft x-ray", The 21st Annual Meeting of The IEEE Lasers & Electro-Optics Society, Newport Beach, U.S.A. (Nov. 2008).
- (20) H. Nakano, A. Ishizawa, and K. Oguri, "Interference between surface harmonics of carrier-envelope phase controlled few-cycle laser field", International Society for Photo-optical Instrumentation Engineers, Wuahn, China (Nov. 2008).
- (21) K. Tamaki, "Unconditional security proof of QKD and imperfections of devises", Updating Quantum Cryptography 2008, Tokyo, Japan (Dec. 2008).
- (22) Y. Tokura, "Latest progress in QKD experiments at NTT", Updating Quantum Cryptography, Tokyo, Japan (Dec. 2008).

編集 “NTT 物性科学基礎研究所の研究活動” 編集委員会

発行 日本電信電話株式会社
NTT 物性科学基礎研究所
編集委員会

〒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/