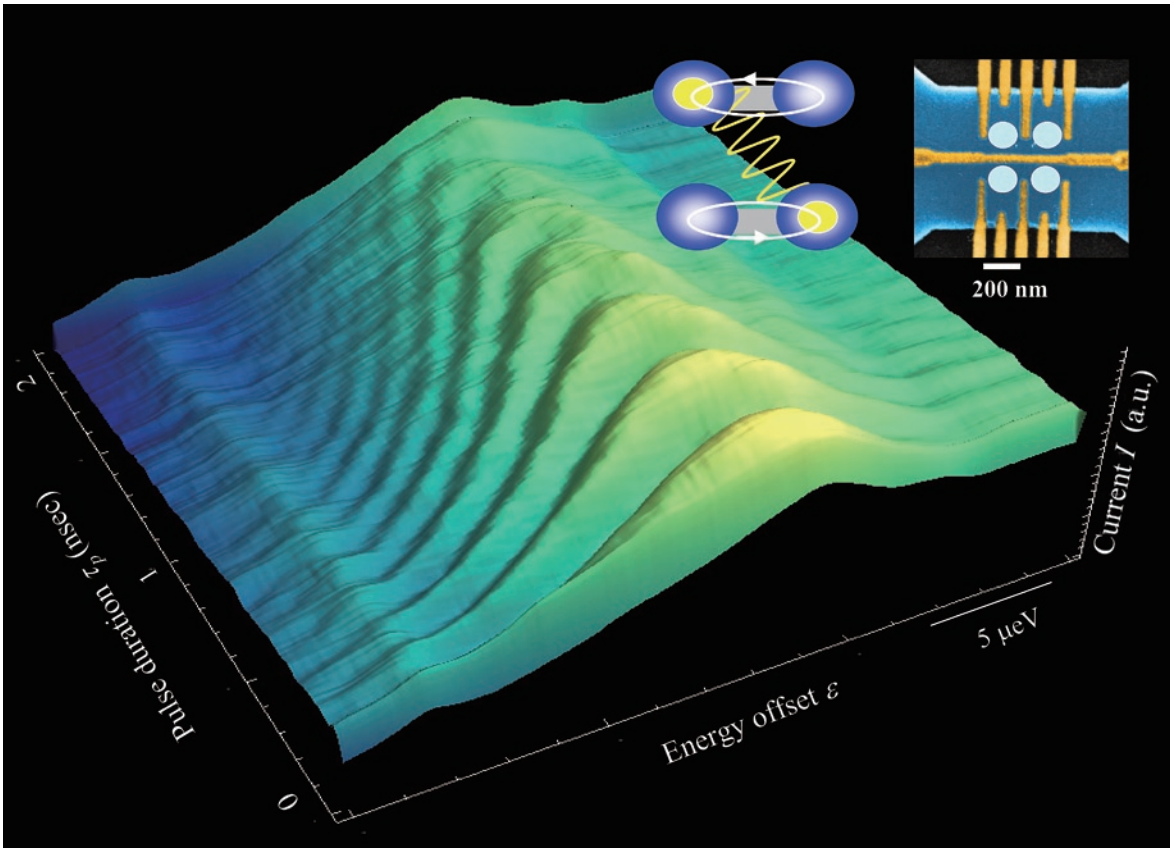
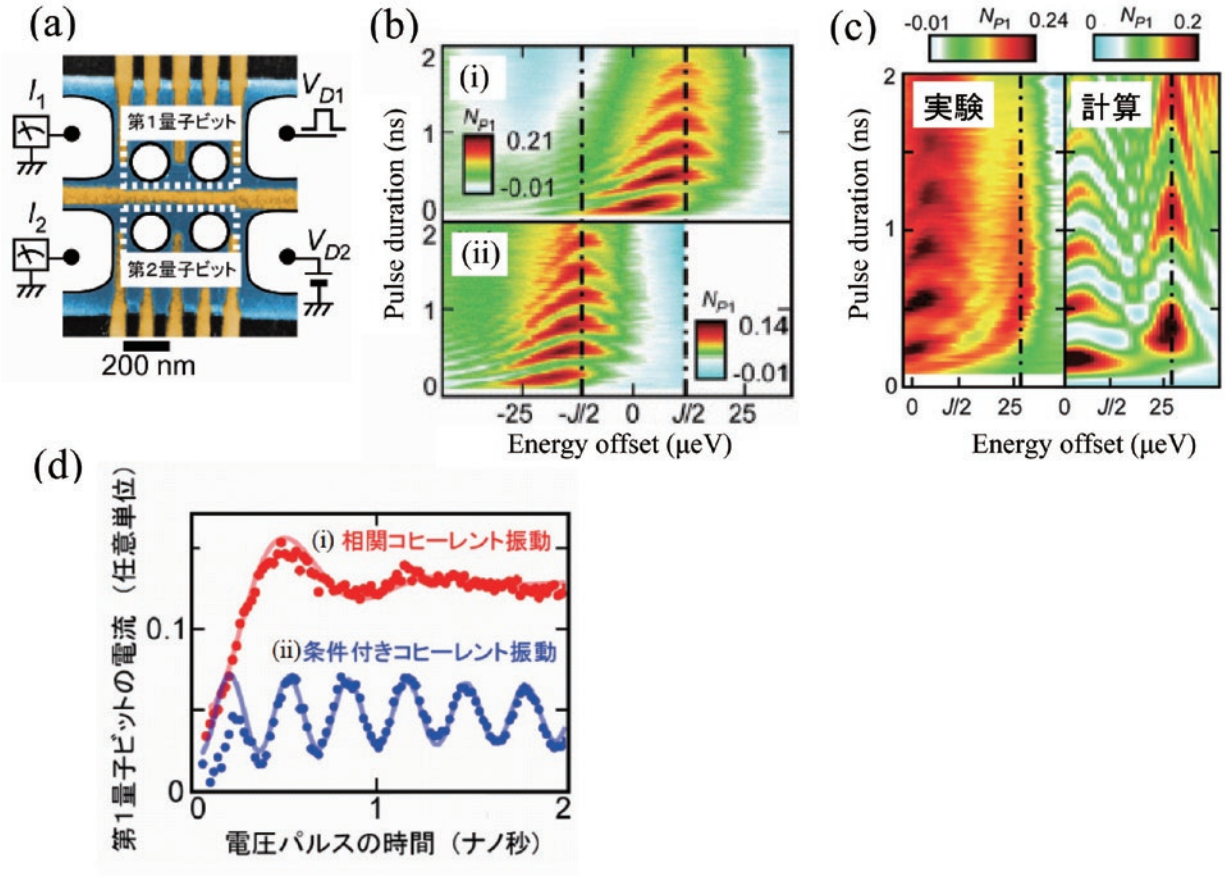


NTT物性科学基礎研究所の研究活動

平成21(2009)年度
Volume 20

2010年7月

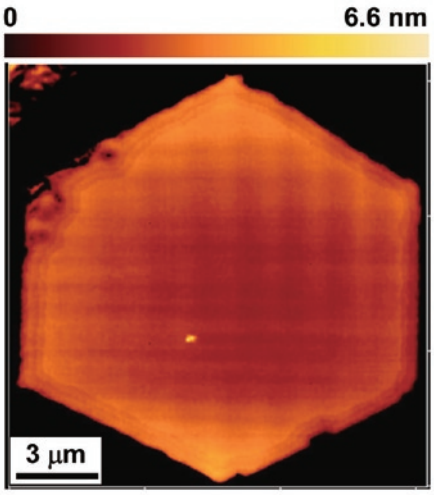
日本電信電話株式会社
物性科学基礎研究所
NTT Basic Research Laboratories
http://www.brl.ntt.co.jp/



表紙の写真：

結合半導体電荷量子ビットによる 2 量子ビット演算

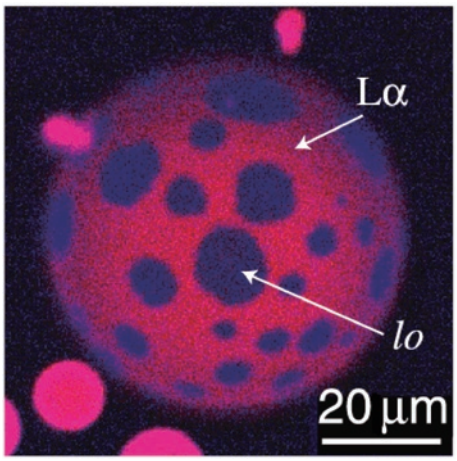
2 量子ビット演算は量子アルゴリズムを実行する上で必要な演算であり、従来の素子では加算や乗算等の演算を行う制御反転演算と 2 つの量子ビットの情報を交換する交換演算のどちらか 1 種類の演算しか実現されていなかった。我々は制御反転演算や交換演算などの複数の機能的な 2 量子ビット演算をそれぞれシングルステップで実現できる素子を開発し、実験的に実証した。(a) 2 量子ビット素子の電子顕微鏡写真。(b) 第 1 量子ビットの条件付きコヒーレント振動。(i) と (ii) はそれぞれ第 2 量子ビットが |1>、|0> の場合。(c) 第 1 量子ビットの相関コヒーレント振動（一点鎖線の部分）。右図と左図はそれぞれ数値計算結果と実験結果を示す。(d) 第 1 量子ビットの相関コヒーレント振動 (i) と条件付きコヒーレント振動 (ii)。それぞれ (c) と (b) の一点鎖線の部分の振動に対応する（31 ページ）。



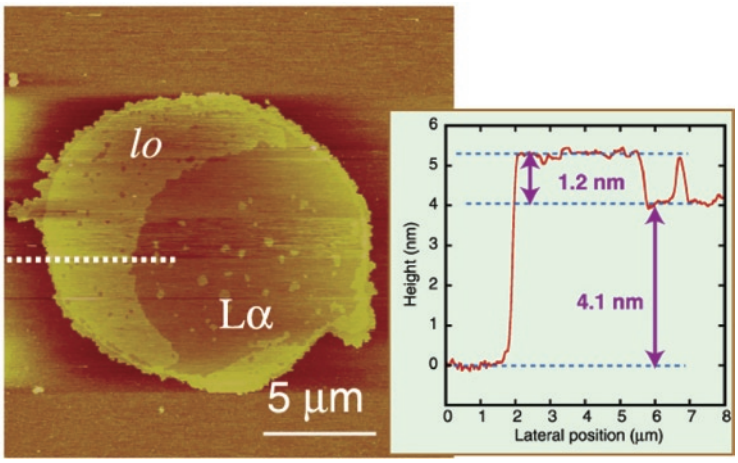
原子間力顕微鏡像。

MOVPE 選択成長法により作製したステップフリー GaN 表面

MOVPE選択成長法により、一辺の長さが8ミクロン（直径16ミクロン）の領域に、GaNのステップフリー面（1分子層の段差も存在しない究極的な平滑面）を初めて形成した。本成果は、窒化物半導体のヘテロ界面を単原子の精度で急峻にすることにより、発光素子の高効率化や、共鳴トンネルダイオードやカスケードレーザ等のサブバンド素子の実現に寄与することが期待される。さらに、窒化物半導体の2次元核成長過程を初めて実験的に捉え、その成長機構を詳細に検討した（16ページ）。



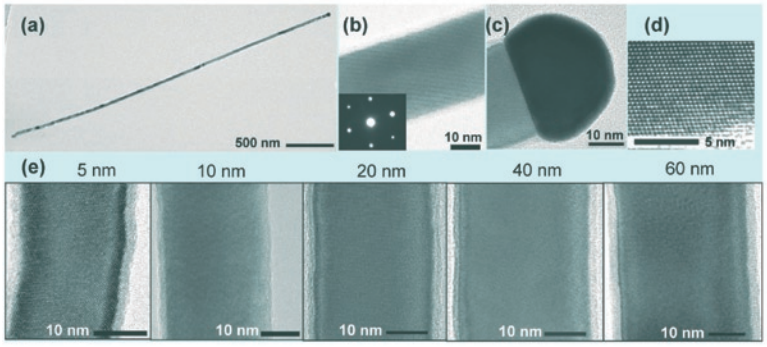
巨大脂質膜リポソームでの秩序液体相ドメイン形成（蛍光顕微鏡像）。



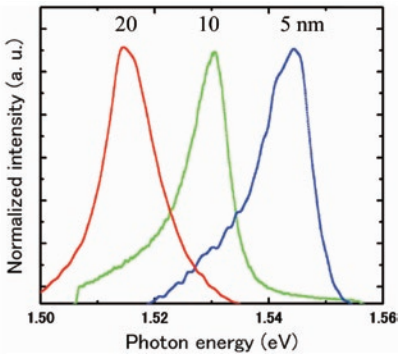
基板支持脂質二重膜におけるドメイン形成（AFM像）。

巨大脂質膜リポソームにおける秩序液体相ドメイン形成

生体内での膜タンパク質の機能発現に重要な役割を担っているドメイン構造（ラフト様構造）を、巨大脂質膜リポソーム(GUV)を用いることで形成した。基板上で展開すれば、ミクロンスケールのドメイン構造を安定に形成できる。ナノバイオデバイス構築に向けた、膜タンパク質の配置や機能制御の可能性を示している（23ページ）。



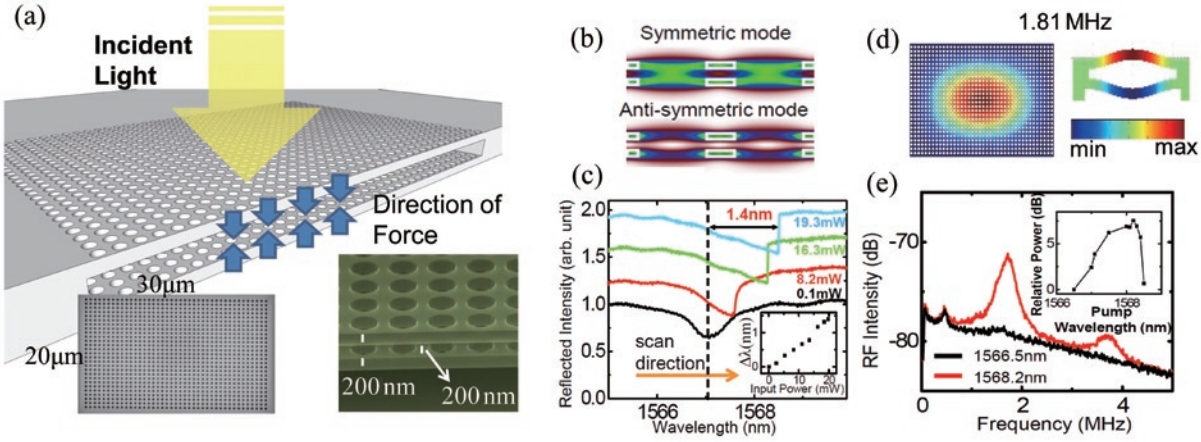
GaAs NWの透過電子顕微鏡写真。(a) 単一NW。(b), (c) 単一NW中心と先端付近の高倍率像。(d)NW側面の高倍率像。(e) サイズの異なる金粒子を用いたNW。



サイズの異なるGaAs NWのフォトルミネッセンススペクトル。

直径が制御されたフリースタンディングGaAsナノワイヤと光学特性に現れる量子効果

半導体ナノワイヤ(NW)は半導体ナノ構造の1つであり、新しい電子および光デバイス実現に貢献する可能性があるため、注目を集めている。NWは、新しいナノ構造を構成する基本的な構造体となることや、特徴的な量子細線構造を実現することも期待されている。フリースタンディング型のNWの新しい応用を追求するため、GaAs NWのサイズ制御について検討し、その光学特性を調べた。電子顕微鏡写真で明らかなように、異なるサイズの金粒子を用いることで、NWのサイズ制御が可能であることが分かった。また、フォトルミネッセンス測定で、量子効果の観測に成功した。これは、NWの光学特性における量子サイズ効果や、量子細線構造での新規物性の解明に貢献することが期待される（39ページ）。



(a) 二層構造のフォトニック結晶の概念図およびSEM像（力は対称モード励起の場合）。(b) フォトニックバンド端モード。(c) 反射スペクトルの入射光強度依存性。(d) 共鳴モードと結合する機械振動の基本モード。(e) 反射光のRFスペクトル。

二層フォトニック結晶による巨大な光力学結合効果の実現

二層構造のフォトニック結晶を世界で初めて実現し、巨大な光力学結合効果が発現することを観測した。厚さ200 nmの空気層を有する厚さ200 nmの2枚のInPフォトニック結晶スラブの作製に成功し、そのフォトニックバンド端共鳴モードの巨大なシフトが観測された。これは共鳴モードで生じる強い輻射圧によるスラブの変位が原因であり、巨大な輻射圧の発生は非常に強い光力学結合効果に起因する。その効果が大きいため、二層構造の機械振動モードの微小なブラウン運動も光学的に観測されている（42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、NTT 事業の未来を支える新たな価値の創造のみならず、普遍的知見の獲得などの学術的貢献もミッションとして、機能物質科学、量子電子物性、量子光物性という 3 つの研究分野において、研究活動を行っております。

研究を進める上で、グローバルな競争力の強化が重要と考え、その施策の 1 つとして NTT の他研究所や、日本のみならず諸外国の大学や研究機関との幅広い連携、共同研究を積極的に進めております。また、『サイエンスプラザ』や量子物理に関する『国際会議』を開催し、私どもの活動をご理解頂くとともに、それに対する忌憚のないご意見を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 1 つと考え、世界中の一流教授・研究者を講師とした『BRL スクール』を隔年で開催しており、2009 年 11 月に実施したスクールでは、世界 9 カ国の大学・研究機関から 35 名の博士課程の学生、若手研究者が参加しました。この活動が、若手研究者にとって研究活動への大きな刺激となり、将来の研究者育成に貢献できることを期待しております。

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

2010 年 7 月

横浜 至

NTT 物性科学基礎研究所
所長　横浜　至

目　次

ページ

◆ 表紙
- ♦ 結合半導体電荷量子ビットによる 2 量子ビット演算

◆ カラー口絵 …… Ⅰ
- ♦ MOVPE 選択成長法により作製したステップフリー GaN 表面
- ♦ 巨大脂質膜リポソームにおける秩序液体相ドメイン形成
- ♦ 直径が制御されたフリースタンディング GaAs ナノワイヤと光学特性に現れる量子効果
- ♦ 二層フォトニック結晶による巨大な光力学結合効果の実現

◆ ごあいさつ …… Ⅲ

◆ 物性科学基礎研究所　組織図 …… 1

◆ 物性科学基礎研究所　所員一覧 …… 2

Ⅰ. 研究紹介

◇ 各研究部の研究概要 …… 13

◇ 機能物質科学研究部の研究紹介 …… 14
- ♦ NO_2 吸着による水素終端ダイヤモンド FET の高周波化
- ♦ 単結晶 AlN (0001) / ダイヤモンド (111) ヘテロ構造
- ♦ MOVPE 選択成長で作製したステップフリー GaN 薄膜
- ♦ MBE 薄膜の精密アニールによる母物質超伝導体 RE_2CuO_4 の合成
- ♦ ガスソース MBE 法によるグラフェン成長
- ♦ Si 熱酸化における反応界面の安定－不安定転移
- ♦ エピタキシャルグラフェンの積層ドメイン
- ♦ ダイヤモンドからのカーボンナノチューブ合成
- ♦ 神経活動とマグネシウム
- ♦ 巨大脂質膜リポソームを用いたナノバイオデバイス構築
- ♦ 0.18 μm CMOS プロセスを用いたブレインマシンインターフェース用 LSI チップの研究

◇ 量子電子物性研究部の研究紹介 …… 25
- ♦ 金フローティングゲートを共有したシリコン細線イオン感応トランジスタ
- ♦ トンネル分光による薄層 SOI-MOSFET 内サブバンドの観測
- ♦ ブロック共重合体の自己組織化を用いた 2 次元パターニング

♦ 光による結合ナノ機械共振器の周波数チューニング
♦ $\nu_T = 1$ 二層系における真性エネルギーギャップと励起子凝縮
♦ 横結合二重ドットにおけるファノ－近藤効果
♦ 結合半導体電荷量子ビットによる 2 量子ビット演算
♦ ジョセフソン分岐増幅器による量子ビット測定過程の量子ダイナミクス理論
♦ 超伝導磁束量子ビット･共振器系における制御 NOT ゲートの提案
♦ 半導体量子ドットにおける近藤効果のスピン蓄積による制御

◇ 量子光物性研究部の研究紹介 …… 35
♦ PPLN 導波路中のカスケード 2 次非線形光学効果を用いた
時間位置もつれ光子対の発生
♦ 光格子中にトラップされた冷却フェルミ原子気体の有限温度解析
♦ 超伝導アトムチップの損失のメカニズム
♦ サブ 10 フェムト秒レーザによる p 型 Si のコヒーレント
フォノンダイナミクスの観測
♦ 直径が制御されたフリースタンディング GaAs ナノワイヤと
光学特性に現れる量子効果
♦ 表面弾性波によって形成したダイナミック量子ドットの発光特性
♦ フォトニック結晶ナノ共振器によるサブフェムトジュール全光スイッチ
♦ 二層フォトニック結晶による巨大な光力学結合効果の実現
♦ 二光子吸収を用いた 1.55 μm 帯全シリコンフォトニック結晶受光器

Ⅱ . 資料

◇ サイエンスプラザ 2009 …… 45

◇ 第 5 回 NTT 物性科学基礎研究所スクール …… 46

◇ 表彰受賞者一覧 …… 47

◇ 報道一覧 …… 49

◇ 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 …… 50

◇ 国際会議招待講演一覧 …… 52

物性科学基礎研究所　組織図

所　長

横浜　至

ナノバイオ研究統括

主席研究員　鳥光慶一

企画担当

主席研究員　牧本俊樹

機能物質科学研究部

部　長　牧本俊樹

量子電子物性研究部

部　長　山口浩司

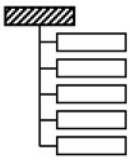
量子光物性研究部

部　長　都倉康弘

物性科学基礎研究所　所員一覧

2010 年 3 月 31 日付
（* は年度途中までの在籍者）

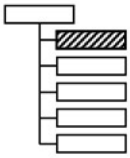
物性科学基礎研究所



所長　**横浜　至**

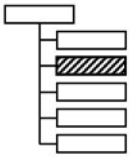
湯本潤司 *

ナノバイオ研究統括



主席研究員　**鳥光慶一**

企画担当

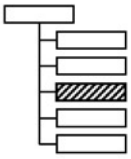


企画担当　**牧本俊樹**

総括担当　熊倉一英
研推担当　古川一暁

NTT リサーチプロフェッサー　清水富士夫（JST-CREST、電気通信大学）*
野村晋太郎（筑波大学）
井上　恭（大阪大学）

機能物質科学研究部



部長　**牧本俊樹**
鳥光慶一＊

補佐　鈴木　哲

薄膜材料研究Ｇ

グループリーダ　**嘉数　誠**

小林康之	山本秀樹	佐藤寿志
赤坂哲也	谷保芳孝	Tsai, Chiun-Lung＊
Kubovic, Michal＊	平間一行	

低次元構造研究Ｇ

グループリーダ　**日比野浩樹**

前田文彦	尾身博雄	神﨑賢一
登倉明雄	田邉真一	高木大輔

分子生体機能研究Ｇ

グループリーダ　**鳥光慶一**

江幡啓介	住友弘二	河西奈保子
島田明佳	中島　寛	樫村吉晃
後藤東一郎	篠崎陽一	田中あや

量子電子物性研究部

部長　**山口浩司**

補佐　山崎謙治
唐沢　毅

ナノデバイス研究Ｇ

グループリーダ　**藤原　聡**

小野行徳　影島博之　西口克彦
登坂仁一朗　Khalafalla, Mohammed A.H.＊

ナノ加工研究Ｇ

グループリーダ　**山口浩司**

永瀬雅夫　山口　徹　岡本　創
小野満恒二　Mahboob, Imran　林　順三

量子固体物性研究Ｇ

グループリーダ　**村木康二**

蟹沢　聖　鈴木恭一　林　稔晶
太田　剛　熊田倫雄　高瀬恵子
日達研一　高品　圭　Gamez, Gerardo
Grove-Rasmussen, Kasper＊　佐久 規

超伝導量子物理研究Ｇ

グループリーダ　**仙場浩一**

中ノ勇人　齊藤志郎　狩元慎一
田中弘隆　角柳孝輔　Kemp, Alexandre
Zhu, Xiaobo

スピントロニクス研究Ｇ

グループリーダ　**赤崎達志**

原田裕一　田村浩之　山口真澄
関根佳明

量子光物性研究部

部長　　**都倉康弘**

補佐　　佐々木智

量子光制御研究Ｇ

グループリーダ　**都倉康弘**

清水　薫	井桁和浩	熊谷雅美
山下　眞	柴田浩行	向井哲哉
武居弘樹	森越文明	本庄利守
玉木　潔	橋本大祐	原田健一
稲葉謙介		

量子光デバイス研究Ｇ

グループリーダ　**寒川哲臣**

中野秀俊	西川　正	後藤秀樹
鎌田英彦	舘野功太	俵　毅彦
小栗克弥	石澤　淳	眞田治樹
Zhang, Guoquiang	加藤景子	

フォトニックナノ構造研究Ｇ

グループリーダ　**納富雅也**

横尾　篤	倉持栄一	新家昭彦
谷山秀昭	田辺孝純	角倉久史
野崎謙悟	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。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及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13年より21年まで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年度日本学術振興会賞受賞。平成20年度日本学士院学術奨励賞受賞。平成22年より文部科学省国立大学法人評価委員。日本応用物理学会、IEEE、APS、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。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。

村木　康二

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、基礎研究所勤務。平成11年より物性科学基礎研究所。入社以来、高移動度半導体ヘテロ構造の結晶成長とその量子電子物性の研究に従事。現在、NTT物性科学基礎研究所量子電子物性研究部量子固体物性研究グループリーダ。平成13~14年ドイツマックスプランク研究所（シュトゥトガルト）客員研究員。日本物理学会、日本応用物理学会会員。

アドバイザリボード（2009 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, De l'Ecole 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 Festkörperforschung, Germany

招聘教授／客員研究員（2009 年度）

氏名	所属 期間
Prof. Alexander Tzalenchuk	National Physical Laboratory, U.K. Apr. 2009 – May 2009
Dr. Stefan Folsch	Paul-Drud-Institute, Germany Oct. 2009 – Nov. 2009
Prof. Christos Flytzanis	Laboratoir Pierre Aigrain Ecole Normale Supérieure, France Sep. 2009 – Dec. 2009
古賀　　貴亮	北海道大学大学院 情報科学研究科　准教授 Jan. 2007 – Dec. 2009
羽柴　　秀臣	日本大学　量子科学研究所　助教 Jul. 2008 – Mar. 2010
Dr. Lars Tiemann	科学技術振興機構 (JST) Apr. 2009 – Mar. 2010
宇都宮　聖子	情報・システム研究機構 国立情報学研究所 May 2009 – Mar. 2010
知崎　　陽一	産業技術総合研究所（産総研） Feb. 2010 – Mar. 2010

海外研修生（2009 年度）

氏名	所属	期間
Christoph Hufnagel	University of Heidelberg, Germany	Jun. 2006 – Jun. 2009
Stefano Salvatore	Technical University, Milan, Italy	Jan. 2009 – Aug. 2009
Maarten Nijland	University of Twente, the Netherlands	Jan. 2009 – Apr. 2009
Corentin Durand	University of Lille/ ISEN, France	Feb. 2009 – Jul. 2009
Pauline Renoux	INSA (Institut National des Sciences Appliquées deToulouse), France	Feb. 2009 – Aug. 2009
Laurent-Daniel Haret	Institut d'Optique Graduate School, France	Mar. 2009 – Aug. 2009
Jelena Baranovic	University of Oxford, U.K.	May 2009 – Jun. 2009
Chia-Yuan Chang	National Chiao-Tung University, Taiwan	May 2009 – Feb. 2010
Chien-Yao Lu	University of Illinois at Urbana-Champaign, U.S.A.	May 2009 – Aug. 2009
Paul-Christiaan Spruijtenburg	University of Twente, Enschede, the Netherlands	May 2009 – Oct. 2009
Man-Hong Yung	University of Illinois at Urbana-Champaign, U.S.A.	Jun. 2009 – Jul. 2009
Paul Nation	Dartmouth College, Hanover, New Hampshire U.S.A.	Jun. 2009 – Aug. 2009
Timothee Martiel	ESPCI (Ecole Supérieure de Physique et de Chimie Industrielle), France	Jul. 2009 – Dec. 2009
Emmanuel Flurin	ESPCI (Ecole Supérieure de Physique et de Chimie Industrielle), France	Jul. 2009 – Dec. 2009
Myrtille Hunault	ESPCI (Ecole Supérieure de Physique et de Chimie Industrielle), France	Jul. 2009 – Dec. 2009
Stefano Pugnetti	Scuola Normale Superiore-Pisa, Italy	Aug. 2009– Sep. 2009
Oliver Pirquet	University of Victoria, Canada	Sep. 2009 –
Arianna McAllister	University of Ottawa, Canada	Sep. 2009 –
Jessica Sparks	University of Waterloo, Canada	Sep. 2009 –
Fabio Massimo Zennaro	Politecnico di Milano, Italy	Jan. 2010 –
Gary Wolfowicz	ENS (Ecole Normale Supérieure de Cachan), France	Jan. 2010 –
David Framil Carpeno	Complutense Univeristy of Madrid, Spain	Jan. 2010 –
Jan Fiala	Czech Techinical University in Prague, Czech Republic	Jan. 2010 –

氏名	所属	期間
Juan Manuel Agudo Carrizo	UPV (Polytechnic University of Valencia), Spain	Jan. 2010 –
Romain Duval	INSA (Institut National des Sciences Appliquées deToulouse), France	Feb. 2010 –
Raymond Davis	Royal Holloway, University of London, U.K.	Feb. 2010 – Mar. 2010
Aimée Broughton	University of Oxford, U.K.	Feb. 2010 – Mar. 2010
Laura Spencer	University of Oxford, U.K.	Feb. 2010 – Mar. 2010
Kylie Ellis	The University of Adelaide, Australia	Mar. 2010 –
Yuichiro Matsuzaki	University of Oxford, U.K.	Mar. 2010 –

国内実習生（2009 年度）

氏名	所属	期間
酒井　裕司	東京理科大学大学院	H21.4.1 ～ H22.3.31
山谷　憲司	東京理科大学大学院	H21.4.1 ～ H22.3.31
若原　弘行	慶應義塾大学大学院	H21.4.1 ～ H22.3.31
和田　章良	東北大学大学院	H21.4.1 ～ H22.3.31
森田　康平	九州大学大学院	H21.4.1 ～ H22.3.31
宮本　聡	慶応義塾大学大学院	H21.4.1 ～ H22.3.31
山田　都照	慶応義塾大学大学院	H21.4.1 ～ H22.3.31
北嶋　典仁	東京大学大学院	H21.4.1 ～ H22.3.31
小田　康彦	東京大学大学院	H21.4.1 ～ H22.3.31
渡邉　敬之	東北大学大学院	H21.4.1 ～ H22.3.31
小林　嵩	東北大学大学院	H21.4.1 ～ H22.3.31
岡崎　雄馬	東北大学大学院	H21.4.1 ～ H22.3.31
楠戸　健一郎	東京大学大学院	H21.4.1 ～ H22.3.31
桝本　尚之	東京大学大学院	H21.4.1 ～ H22.3.31
鎌田　大	東京工業大学大学院	H21.4.1 ～ H22.3.31
長瀬　友宏	東京工業大学大学院	H21.4.1 ～ H22.3.31
高橋　駿	東京大学大学院	H21.4.1 ～ H22.3.31
木山　治樹	東京大学大学院	H21.4.1 ～ H22.3.31
井上　敦文	東京大学大学院	H21.4.1 ～ H22.3.31
金井　康	東京大学大学院	H21.4.1 ～ H22.3.31
高倉　樹	東京大学大学院	H21.4.1 ～ H22.3.31
高田　真太郎	東京大学大学院	H21.4.1 ～ H22.3.31
藤田　高史	東京大学大学院	H21.4.1 ～ H22.3.31
近藤　裕祐	東京大学大学院	H21.4.1 ～ H22.3.31
米田　淳	東京大学大学院	H21.4.1 ～ H22.3.31
鯉渕　良太	東京理科大学大学院	H21.4.1 ～ H22.3.31

氏名	所属	期間
森下　弘樹	慶応義塾大学大学院	H21.4.1　～ H22.3.31
森川　祐	筑波大学大学院	H21.4.1　～ H22.3.31
髙橋　弘史	東京工業大学大学院	H21.4.1　～ H22.3.31
宮脇　哲也	東北大学大学院	H21.4.1　～ H22.3.31
大岩　顕	東京大学大学院　講師	H21.4.1　～ H22.3.31
山本　倫久	東京大学大学院　助手	H21.4.1　～ H22.3.31
Monica Crasiun	東京大学大学院　ポスドク	H21.4.1　～ H21.10.31
Saverio Russo	東京大学大学院　ポスドク	H21.4.1　～ H21.10.31
Russell Deacon	東京大学大学院　ポスドク	H21.4.1　～ H22.3.31
Allison Giles Daniel	東京大学大学院　ポスドク	H21.4.1　～ H22.3.31
Bäuerle Christopher	東京大学大学院　ポスドク	H21.4.1　～ H21.6.27
関　忠聖	大阪大学大学院	H21.5.18 ～ H22.2.17
原田　大雅	慶応義塾大学大学院	H21.8.3　～ H21.8.28
山神　圭太郎	長岡技術科学大学	H21.10.5 ～ H22.2.19
立石　基	長岡技術科学大学	H21.10.5 ～ H22.2.26
塩谷　広樹	東京大学大学院	H22.1.12 ～ H22.3.31

Ⅰ．研究紹介

各研究部の研究概要

機能物質科学研究部　牧本俊樹

機能物質科学研究部（物質部）では、原子・分子レベルでの物質制御・配列制御に基づく新物質の創製・新機能デバイスの構築および生体機能を利用した革新的デバイスの提案を中心に、情報通信技術に大きな変革を与えることを目指して研究を進めています。

この目標に向かって、3つの研究グループが、広範囲な物質材料を対象とした研究を進めています。その範囲は、窒化物半導体、ダイヤモンド、グラフェン、超伝導などの高性能薄膜材料から、Auナノロッドなどのナノ材料、さらには、受容体タンパク質などの生体分子に至り、独自の物質創製技術や制御技術、精密測定技術を基に最先端の研究を行っています。

また、国内外の数多くの大学との共同研究を推進しており、特に、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次元フォトニック結晶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、2つのシリコン細線導波路からの量子もつれ光子対の量子干渉、横方向成長の半導体ナノワイヤ、およびフォトニック結晶ナノ共振器によるサブフェムトジュールの制御エネルギーで動作する光スイッチなどで進展がみられました。

NO_2 吸着による水素終端ダイヤモンド FET の高周波化

Michal Kubovic　嘉数誠
機能物質科学研究部

ダイヤモンドは最高の絶縁破壊電界、熱伝導率と高いキャリア速度を兼ね備えた半導体であり、そのデバイス基盤技術ができれば，究極の高周波電力デバイスが実現する。我々は、これまで水素終端ダイヤモンドFETで世界最高の遮断周波数(f_T:45 GHz, fmax:120 GHz)、高周波電力密度（1 GHzで2.1 W/mm）を報告してきた[1]。しかしダイヤモンドFETで用いている水素終端というp型ドーピング法の機構が明らかでなく、制御もできていなかった。

我々は、大気中にも存在するNO_2が水素終端表面での正孔生成に決定的な要因であることを見出し、そのp型ドーピング機構を実験的に解明した。さらに図1に示すように、人工的に用意した濃度300 ppmのNO_2を吸着させたところ、従来より約1桁高い2.3×10^{14} cm^{-2}の2次元正孔濃度を得ることができた[2-4]。次に、本技術を用いて高周波トランジスタを作製したところ、正孔濃度が増加しソース抵抗が低減したことにより、大気中の従来のFETに比べ1.8倍のドレイン電流［図2(a)］、1.5倍の電力利得遮断周波数(f_{maxU})を得ることができた。これによりダイヤモンドFETを実用化に一歩近づけることができた。

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

[1] M. Kasu, K. Ueda, Y. Yamauchi et al., Diamond Relat. Mater. **16** (2007) 1010.
[2] M. Kubovic and M. Kasu, Appl. Phys. Express **2** (2009) 086502.
[3] M. Kubovic, M. Kasu, and H. Kageshima, Appl. Phys. Lett. **96** (2010) 052101.
[4] M. Kubovic, M. Kasu, H. Kageshima, and F. Maeda, Diamond Relat. Mater. (in press).

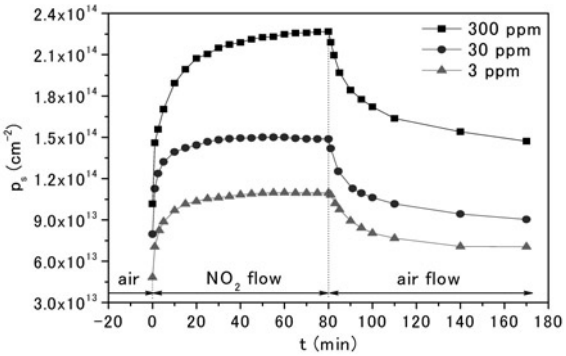


図1　NO_2吸着、解離による正孔濃度の変化。

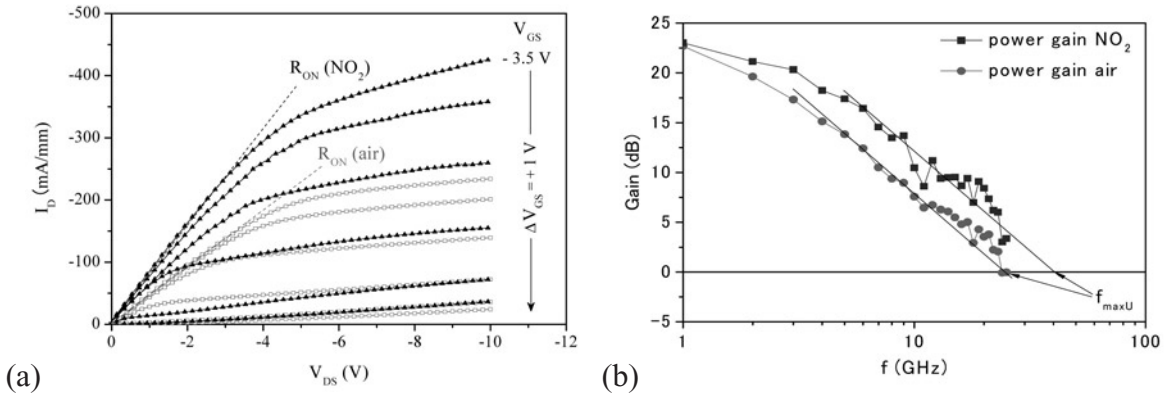


図2　NO_2吸着前後の水素終端ダイヤモンドの (a)ドレイン電流電圧特性，(b)ユニラテラル電力利得の周波数依存性。

単結晶 AlN (0001) /ダイヤモンド (111) ヘテロ構造

平間一行　谷保芳孝　嘉数誠
機能物質科学研究部

窒化アルミニウム (AlN) のバンドギャップ (6 eV) はダイヤモンド (5.5 eV) よりも広く、さらにダイヤモンドで困難なn型ドーピングが容易である。一方、ダイヤモンドは窒化物半導体で困難なp型ドーピングが容易である。両者の特徴を組み合わせることで、それぞれ単独では実現困難な高効率の遠紫外発光素子や高周波高出力FETなどの新規デバイスが期待できる。この新規デバイスの作製には、ダイヤモンド基板上での単結晶AlN成長が不可欠である。ダイヤモンド（立方晶）とAlN（六方晶）は結晶構造が異なるため、ダイヤモンド (001) 基板上に成長したAlNには回転ドメインなどの複数のドメイン構造が形成され[1]、これまで単結晶AlN成長は実現していなかった。

そこで我々は、六方晶AlN (0001) 面と原子結合構造が類似のダイヤモンド(111)面上にAlNを成長した。図1にダイヤモンド (111) 基板上に成長したAlNの (0002) 面および $(10\bar{1}1)$ 面のX線極点図を示す。AlN (0002) 面の極点図ではc軸配向を示すピークのみが観測された。AlN $(10\bar{1}1)$ の極点図では、そのc軸配向した六方晶AlNの6つの等価な $(10\bar{1}1)$ 面からのピークのみが観測された。これより、ダイヤモンド (111) 面を利用することによりダイヤモンド基板上での単結晶AlN成長に初めて成功した[2]。

単結晶AlN (0001) /ダイヤモンド (111) ヘテロ界面構造の断面TEM観察より、成長初期からAlN [0001] 方位がダイヤモンド [111] 方位に配向した単結晶AlNが成長しており、また界面は非常に急峻であることがわかった（図2）。このヘテロ界面ではC-N結合 (3.1 eV/bond) とC-Al結合 (2.6 eV/bond) の2つ結合が考えられるが、結合エネルギーの高いC-N結合が形成するため、AlN薄膜はAl極性になる。

AlN (0001) /ダイヤモンド (111) ヘテロ構造の面内配向関係は $[10\bar{1}0]$ AlN ‖ $[1\bar{1}0]$ ダイヤモンドであったが、この格子不整合 (−28.8 %) は、$[11\bar{2}0]$ AlN ‖ $[1\bar{1}0]$ダイヤモンドの場合の格子不整合 (23.4 %)よりも大きい。それぞれの配向関係における結合密度は2.7×10^{14} cm^{-2}、2.2×10^{14} cm^{-2}であり、$[10\bar{1}0]$ AlN ‖ $[1\bar{1}0]$ ダイヤモンドの方が結合密度が高いため、界面エネルギーは低くなる。これより、面内配向関係 $[10\bar{1}0]$ AlN ‖ $[1\bar{1}0]$ ダイヤモンドのヘテロ界面が形成される。

[1] K. Hirama, Y. Taniyasu, and M. Kasu, Jpn. J. Appl. Phys. **49** (2010) 04DH01.
[2] Y. Taniyasu and M. Kasu, J. Cryst. Growth **311** (2009) 2825.

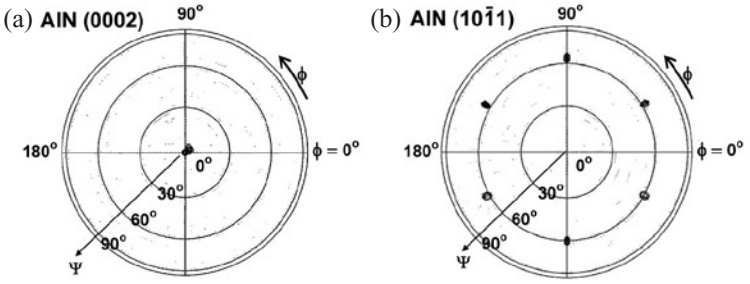


図1　ダイヤモンド基板上に成長したAlN薄膜のX線極点図
(a) AlN (0002) 面, (b) AlN $(10\bar{1}1)$ 面。

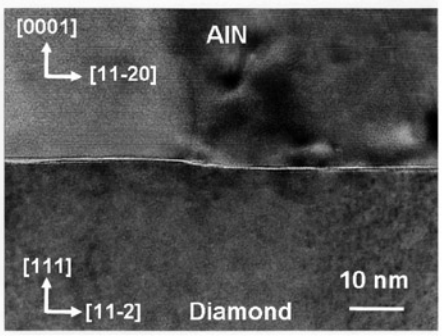


図2　単結晶AlN/ダイヤモンド界面の断面TEM像。

MOVPE 選択成長で作製したステップフリー GaN 薄膜

赤坂哲也　小林康之　嘉数誠
機能物質科学研究部

GaNをはじめとする窒化物半導体では、成長機構の解明、界面揺らぎのないヘテロ構造の作製、および、サブバンド素子への応用の見地から、原子レベルで平坦な表面やヘテロ界面の実現が望まれる。しかしながら、従来は螺旋・混合転位に起因するスパイラル成長のため、窒化物半導体の表面は高密度のモノレーヤステップで構成されていた。本研究では、低転位密度のGaN基板を用い、さらに、成長条件を最適化することにより、1分子層の段差もない単一のテラスで構成された完全平坦面（ステップフリー面）を有するGaN薄膜を得ることに成功した[1]。

転位密度が10^6 cm^{-2}以下である単結晶GaN (0001) 基板の表面にSiO_2マスクを形成した後、フォトリソグラフィにより1辺が8 μm（直径16 μm）の正六角形の開口部を開けた。これを基板としてGaN薄膜の有機金属気相エピタキシ (MOVPE) による選択成長 (SA-MOVPE) を行った。原料ガスは、アンモニアおよびトリメチルガリウム (TMG) である。

TMG流量26 μmol/min、基板温度940°Cで選択成長したGaN薄膜の表面のAFM像を図1に示す。周辺部に数層のモノレーヤステップが見られるが、GaN表面は単一のテラスでほぼ覆われている。一方、同一の成長条件で、（選択成長ではなく）通常成長したGaN表面は、ステップ間隔が0.1 μm程度の高密度のモノレーヤステップから構成されていた（図2）。さらに、選択成長した場合でも、成長条件がずれていると、GaN表面には数10本のモノレーヤステップが存在した。

このように、GaN基板の転位密度、成長領域制限（選択成長）、および、成長条件という3つの条件を整えることにより、GaNにおいても大きさ16 μm程度のステップフリー面を作製することが可能になった。

[1] T. Akasaka, Y. Kobayashi, and M. Kasu, Appl. Phys. Express **2** (2009) 091002.

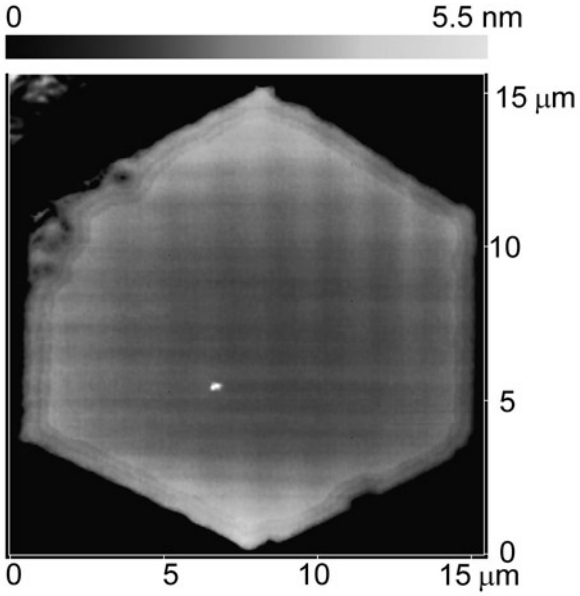


図1　SA-MOVPEにより得られたステップフリー GaN表面のAFM像。

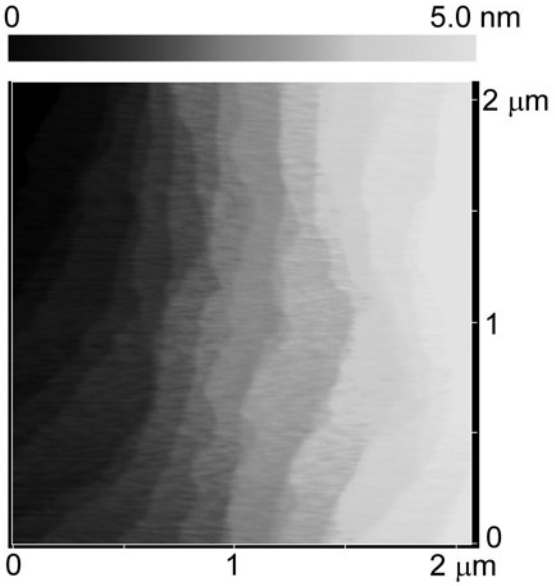


図2　成長領域を制限しない通常のMOVPEにより得られたGaN表面のAFM像。

MBE 薄膜の精密アニールによる母物質超伝導体 RE_2CuO_4 の合成

山本秀樹　松本理*　山神圭太郎　内藤方夫*
機能物質科学研究部　*東京農工大学

銅酸化物超伝導体の母物質は例外なくモット絶縁体で、高温超伝導の発現にはこのモット絶縁体への電子/正孔ドーピングが必須であると考えられてきた。これに対し、我々は、平面4配位のCuO_2面を持つ電子ドープ超伝導体T'-$RE_{2-x}Ce_xCuO_4$（RE：3価の希土類イオン、Ce：4価のドーパント）では、合成条件を最適化することにより、$x = 0$の母物質でも超伝導が発現し、そのT_c (~30 K)は、電子ドープした場合($x > 0$)よりも高いことを報告してきている[1]。T'構造母物質における30 K級超伝導は、Metal Organic Decomposition (MOD) 薄膜で得られたものである[1]。これは4配位CuO_2面を持つ銅酸化物での超伝導発現に必須である「CuO_2面の酸素を保ったままinterstitialな不純物酸素を除去する」という相反する要請が、グレインサイズの小さいMOD薄膜で比較的容易に実現されるためであると考えられるが[2]、それ故に、他の手法による追試が難航していた。そこで、母物質超伝導体試料作製プロセスに対する理解を深め、他手法による追試を容易にすることを目的として、$SrTiO_3$ (001)基板上にMBE成長したT'-RE_2CuO_4 (RE = Pr, Nd) 薄膜に対し、精密ポストアニールによる不純物酸素除去処理条件の検討を行った。

図1に、成膜・ポストアニールの手順と関係するパラメータを示す。母物質の超伝導化には、MOD薄膜の場合と同様、2段階の還元プロセス（不純物酸素除去プロセス）が必要であった。図1中の還元アニール時間をt_a = 1h、t_{red} = 10 minと固定し、アニール時の酸素分圧、温度を系統的に変化させたところ、図2のようにMBE成長したRE_2CuO_4 (RE = Pr, Nd) 薄膜においても超伝導が観測された[3]。

本研究を通して得られた知見を、母物質超伝導体のバルク試料合成や全UHVプロセスによる薄膜超伝導試料作製に活用することにより、酸素量の定量や光電子分光による電子状態の直接観測が可能となり、高温超伝導機構解明のベースとなる真の電子相図の確立へ繋がると期待される。

[1] O. Matsumoto et al., Phys. Rev. B **79** (2009) 100508; Physica C **469** (2009) 924.
[2] O. Matsumoto, A. Tsukada, H. Yamamoto, T. Manabe, and M. Naito, Physica C (in press).
[3] H. Yamamoto, A. Tsukada, O. Matsumoto, and M. Naito, Physica C (in press).

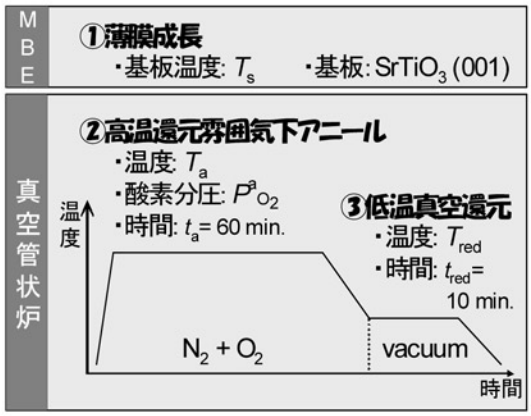


図1　RE_2CuO_4 MBE薄膜の成膜・還元手順とパラメータ。

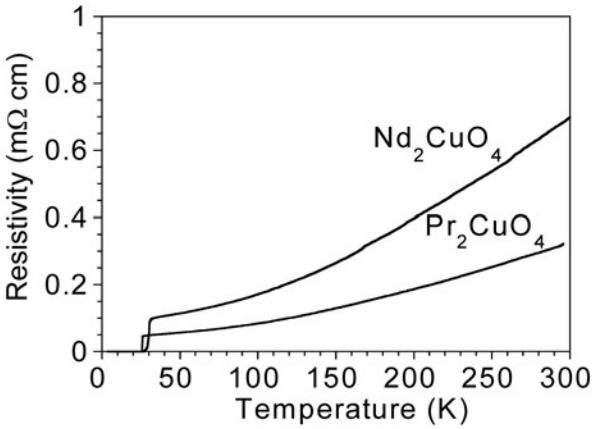


図2　Nd_2CuO_4、Pr_2CuO_4 MBE薄膜のρ-T特性。

ガスソース MBE 法によるグラフェン成長

前田文彦　日比野浩樹
機能物質科学研究部

グラフェンは、室温において最も高い移動度を示すなど、次世代エレクトロニクス材料の有力な候補となる高いポテンシャルが次々と示されてきている。しかし、その実用化には大規模集積化に適した大面積・高品質な薄膜形成が大きな課題となっており、ウエハサイズのグラフェン薄膜を形成する研究が精力的に進められている。そこで、新たなグラフェン形成法として分子線エピタキシャル (MBE) 法に基づく成長法を提案した。この成長法は、既存のSiCの熱分解法[1]や触媒能を持つ金属を用いた化学気相成長法[2]とは異なり、特定の基板に制約されないという特長を持つとともに、ドーピングやヘテロ成長への展開も見込まれる。今回、ホモエピタキシャル成長を試み、この成長法について原理確認を行った。[3]

実験では、6H-SiC (0001) を超高真空中で高温に加熱することによって約3層のグラフェンを形成した基板を620°Cに加熱して、2000°Cに加熱したタングステンフィラメントを用いて解離させたアルコールを成長材料として供給し、グラフェンの成長を試みた。その結果、成長後のその場X線光電子分光 (XPS) によって、グラファイト状の物質が約4原子層堆積できたことが判った。さらに、図1に示す成長後の透過電子顕微鏡像では、6~7層の層状の構造が認められ、XPSで見積もった膜厚とほぼ等しい層数分が増加していることが判った。さらに成長前後のRaman分光法スペクトルを測定したところ、図2に示すとおり、グラフェン膜厚の増加に対応する2Dバンド形状の変化とGバンド強度の増加が認められた。一方、欠陥の存在を示すDバンドピークの著しい増大も観測された。この欠陥は、エッジの存在に起因するもので単結晶領域が小さいことを示すものと推測される。以上の結果は、結晶性改善という課題は残るものの、数原子層のグラフェンを成長できたことを示すもので、本成長法で原理的にはグラフェンの成長が可能であることを示すことができた。

[1] A. J. van Bommel, J. E. Crombeen, and A. van Tooren, Surf. Science **48** (1975) 463.
[2] L. C. Isett and J. M. Blakely, Surf. Science **58** (1976) 397.
[3] F. Maeda and H. Hibino, Phys. Status Solidi B **247** (2010) 916.

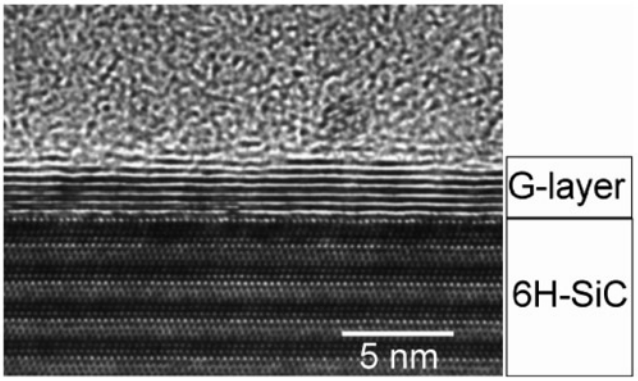


図1　MBE成長後の透過電子顕微鏡像。

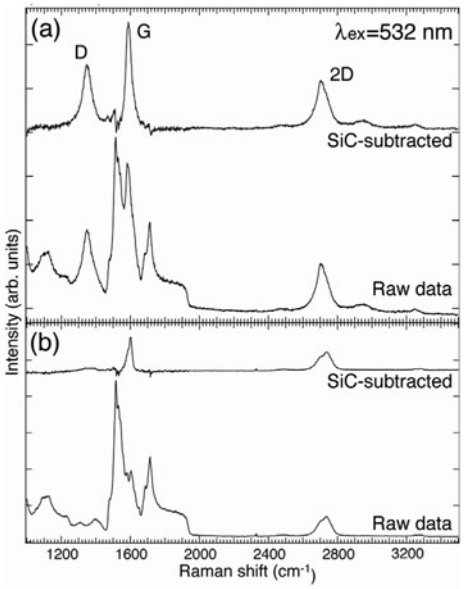


図2　(a) MBE成長後と (b) 参考のため示した3層の熱分解グラフェンのRamanスペクトル。

Si 熱酸化における反応界面の安定－不安定転移

尾身博雄　影島博之*
機能物質科学研究部　*量子電子物性研究部

SiO_2/Si (001) 界面はシリコンおよびシリコン関連のナノテクノロジおいて最も重要な界面の1つである。したがって、その重要性のゆえに酸化により引き起こされるシリコン表面および酸化膜界面でのラフネスのメカニズムを解明するために多くの研究がなされてきている[1, 2]。この研究では、アルゴン酸素ガス雰囲気中で高温熱酸化した酸化膜とシリコン基板との界面の形態を酸化温度、酸化時間、基板のミスカットを関数として、原子間力顕微鏡 (AFM) と放射光X線反射率測定 (XRR) により系統的に調べた[3]。熱酸化後エッチングにより熱酸化膜を除去したSi (100) 基板をAFM観察した結果から、熱酸化温度が1150°C以下で界面ラフネスは顕著に変化しないこと［図1の領域(I)：安定化領域］、1150-1250°Cでステップテラス構造が界面に形成することによりラフネス (RMS) が急激に増加すること［図1の領域(II)：不安定化領域］、酸化温度が1250°C以上では基板のミスカット (< 4°) に依存せず平坦化する［図1の領域(III)：安定化領域］ことが分かった。この酸化温度に依存した反応界面の安定化−不安定化転移の現象は熱酸化膜の粘性温度に密接に関連している。すなわち、熱酸化膜全体の歪み量、界面領域の歪み量により界面のラフネスが変化することを示唆している。XRRによる非破壊測定の結果はこの温度に依存性した界面形態の不安定化−安定化転移が酸化膜内の歪みの緩和機構に依存していることを支持している。確かに、図2に見られるようにXRRで求めたラフネスは、AFMで得られた結果と同様に酸化温度1150°Cから1250°Cまで急激に増加し［図2の領域(II)］、1250°Cで最大となり、その後徐々に減少する［図2の領域(III)］。さらに、XRR測定では酸化膜の表面、酸化膜と中間層の界面のラフネスの酸化膜依存性を同時に求めることができ、その結果はシリコンとシリコン酸化膜の界面のラフネスが酸化膜内での歪み解放の機構に支配されていることを示している。

[1] *Fundamental Aspects of Silicon Oxidation*, edited by Y. J. Chabal (Springer, 2001).
[2] H. Omi, H. Kageshima, and M. Uematsu, Phys. Rev. Lett. **97** (2006) 01602.
[3] H. Omi, H. Kageshima, T. Kawamura, M. Uematsu, Y.Kobayashi, S. Fujikawa, Y. Tsusaka, Y. Kagoshima, and J. Matsui, Phys. Rev. B. **79** (2009) 245319.

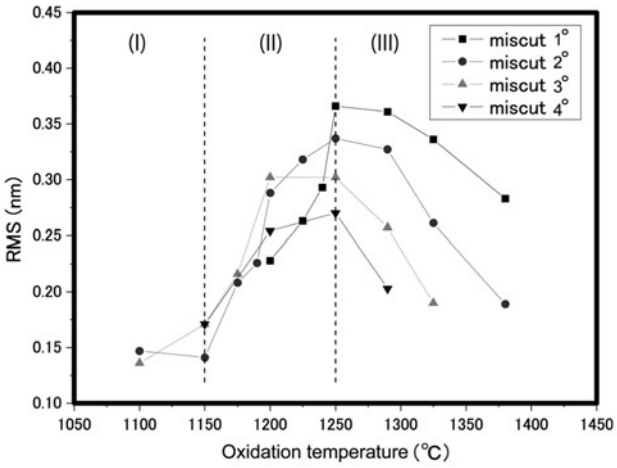


図1　RMS vs　熱酸化温度。

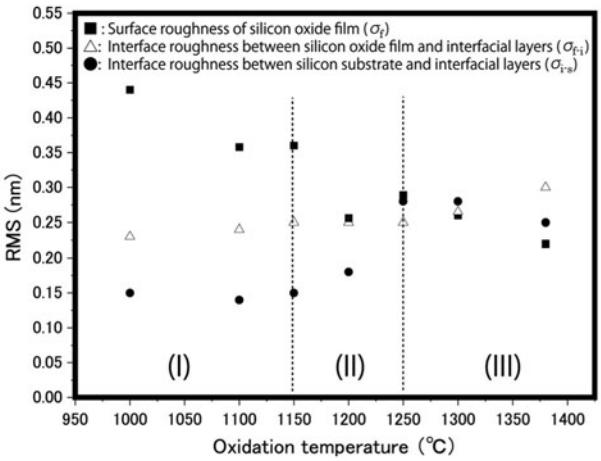


図2　XRR測定により得られた表面、界面ラフネス。

エピタキシャルグラフェンの積層ドメイン

日比野浩樹[1]　水野清義[2]　影島博之[3]
[1]機能物質科学研究部　[2]九州大学　[3]量子電子物性研究部

数層グラフェン (FLG) 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FLGは、容易にスケールアップが可能で、デバイス集積の観点で有望である。我々は、これまでに、低エネルギー電子顕微鏡 (LEEM) により、エピタキシャルFLGの層数をミクロに決定する技術を確立し[1]、数μmサイズで層数の均一な2層グラフェンの成長に成功してきた。今回は、暗視野LEEM法を用いて明らかになった、2層グラフェンに現われるドメイン構造を報告する[2]。

図1に、4H-SiC (0001) 基板上に成長した主に2層のグラフェンのLEEM像を示す。2層グラフェンは、(0,0) 鏡面反射ビームを用いた明視野LEEM像［図1(a)］では、均一に見えるものの、グラフェンの (1,0) および (0,1) 回折ビームを用いた暗視野LEEM像［図1(b)、(c)］には、2種類のドメインが観察される。それらのコントラストは、(1,0) と (0,1) 暗視野LEEM像において反転しており、2層グラフェンが3回対称な2種類のドメインを含んでいることがわかる。1層グラフェンは6回対称で、単位胞中に2個の炭素原子（AとB）を含む。一方、2層グラフェンは、図2の模式図で示すように3回対称で、A原子の真上へB' 原子が積層するAB積層と、B原子の真上へA' 原子が積層するBA積層（AC積層と呼ぶことが多い）の2種類の積層構造を取りうる。従って、実験で観察された2種類のドメインは、ABおよびAC積層に対応することが推察される。そこで、連続的に電子線のエネルギーを変化させながら取得した暗視野LEEM像から、2種類のドメインの暗視野LEEM像強度のエネルギー依存性を測定し、バルクグラファイトに対して計算した (1,0) および、(0,1) の低エネルギー電子回折強度のエネルギー依存性と比較した。両者は良い一致を示し、2層グラフェンが積層ドメインを含むことが明らかとなった。積層ドメイン構造は、FLG中のキャリアの伝導特性に影響を及ぼすことが考えられ、今後、その形成メカニズムの解明と単一ドメイン化に取り組む。

本研究は科研費の援助を受けて行われた。

[1] H. Hibino et al., Phys. Rev. B **77** (2008) 075413.
[2] H. Hibino et al., Phys. Rev. B **80** (2009) 085406.

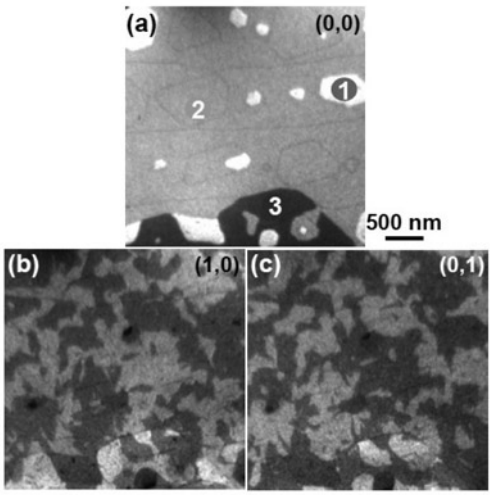


図1　エピタキシャルFLGの(a)明視野LEEM像、(b)と(c)暗視野LEEM像。(a)中の①から③は層数。電子線のエネルギーは、(a)約5 eV、(b)と(c)約58 eV。

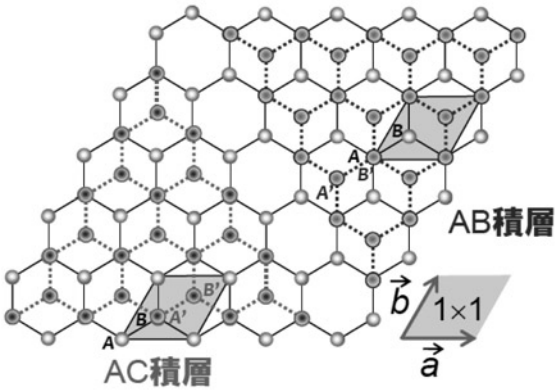


図2　2層グラフェンの積層構造。

ダイヤモンドからのカーボンナノチューブ合成

高木大輔　小林慶裕＊
機能物質科学研究部　＊大阪大学

単層カーボンナノチューブ (CNT) を、同じ炭素の同素体であるダイヤモンドを触媒として合成することに世界で初めて成功した。CNTは、軽量、高強度、電・熱伝導性の良さといった特長から、次世代の産業基盤を担う素材として期待されている。これまで、単層CNTの効率的な合成には、鉄やレアメタルであるコバルト、ニッケル、また、貴金属である金、銀、プラチナなどが触媒として用いられてきた。しかしながら、これらの金属触媒粒子には、単層CNT成長温度において、高密度化させると凝集・融合し失活する、基板と反応して失活する、液体の状態になるため単層CNTの構造制御（カイラリティ制御）が困難という問題がある。このため、金属触媒粒子を用いたCNT合成においては、高密度成長、カイラリティ制御に関する有用な指針が立てられていない。ダイヤモンドを触媒としたCNT合成は、凝集・融合や粒子の液化の問題とは無縁で、制御性の高いCNT合成法の確立に繋がると期待される。

今回の研究において、化学気相成長(CVD)法でダイヤモンドを成長核としてCNT合成を行うためには、(1) 5 nm以下の直径を持つダイヤモンドを使用する[1]、(2)表面に形成されているグラファイトを取り除き、清浄化する、(3)炭素源としてエタノール蒸気やアセチレンなどの熱分解が起こりやすいガスを用いるという3つの条件が不可欠であることを見出した[2]。図1(a)-(b)に示された透過電子顕微鏡像と、図1(c)に示された図1(b)のフーリエ変換像から、単層CNTがダイヤモンドから合成されたことが確認できる。図1(d)の走査電子顕微鏡像は、凝集状態にあるナノダイヤモンド粒子からもCNTが合成可能なことを示しており、ナノダイヤモンド粒子がCVD雰囲気中において、固相を保っており、粒子同士が融合しないことを意味する。このことは、ダイヤモンドからのCNT成長では、金属粒子で一般的な炭素原子がバルク拡散を介して供給されるCNT成長機構とは異なり、炭素原子の固体粒子上の表面拡散が支配的な役割を果たしていることを示唆している。

ダイヤモンド粒子は低コストで合成でき、CNT成長に対する活性が金属と同様に高い。加えて、上記のような、金属が有しえない性質を持つため、将来的に金属の代替という役割だけでなく、ダイヤモンドの特徴を用いた単層CNTの精細な構造制御が行える可能性がある。

[1] E. Ōsawa, Diamond. Relat. Mater. **16** (2007) 2018.
[2] D. Takagi et al., J. Am. Chem. Soc. **131** (2009) 6922.

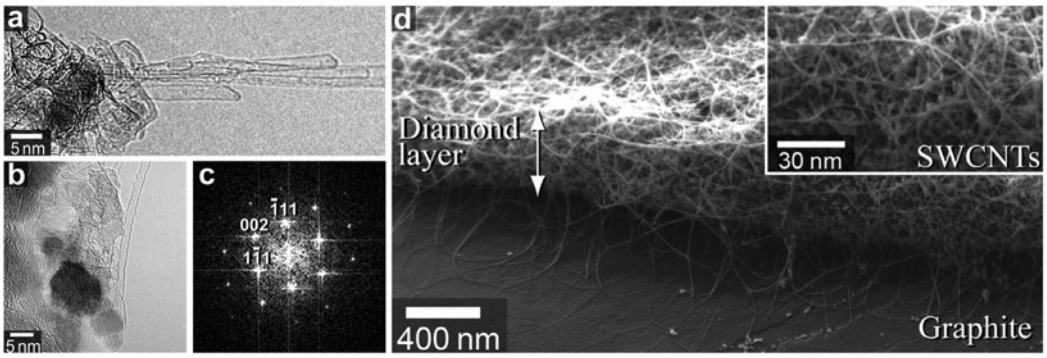


図1　ナノダイヤモンド粒子を用いたCNT合成。

神経活動とマグネシウム

鳥光慶一
機能物質科学研究部

生体機能において、マグネシウムはカルシウム同様重要な役割を担っている。マグネシウムの作用を理解することは、神経活動の制御において極めて有益であると考える。中枢神経系の神経活動においては、興奮性の神経伝達物質であるグルタミン酸のNMDA受容体に対する抑制作用などが広く知られているが、神経機能との関連性を示す研究は未だ多くないのが現状である[1]。本研究では、ラット大脳皮質および海馬の初代培養神経細胞に対する低濃度マグネシウムの影響を、フローサイトメーターを用いた光学的電位測定及び、共焦点レーザ顕微鏡を用いた細胞内カルシウム測定により検討した。

図1に大脳皮質細胞の膜電位に対するマグネシウム濃度依存性を示す。膜電位計測には、脱分極により蛍光強度が増加するオキソノール系の蛍光色素$DiBAC_4(3)$を用いた。通常のマグネシウム濃度である2 mMから、濃度の低下とともに膜電位は増加し、脱分極状態になることが明らかとなった[2, 3]。また、細胞内カルシウム濃度測定により細胞の発達とマグネシウムの関連性について調べたところ、培養開始後12日目でマグネシウム濃度に対する応答がピークを迎え、それ以降は徐々に減少すること、そして0.7 mM前後を境に反応が大きく変わるものの、0.5 – 0 mMの低濃度領域では培養日数に依らず応答が観測されること等が明らかになった（図2）[2, 3]。

同様の傾向は海馬神経細胞でも観測されるものの、マグネシウム濃度に対する応答のピークが異なるなど、部位（大脳皮質と海馬等）によるマグネシウム作用の違いが認められた[3]。発達過程での応答性の違いを考慮すると、受容体等の分布が異なることなどが示唆される。今後さらに、細胞内マグネシウム濃度の測定を進め、神経活動と細胞内マグネシウム濃度の関連性について研究を進めていく予定である。

[1] K. Torimitsu, N. Kasai, and Y. Furukawa, Clin. Calcium **14** (2004) 26.
[2] 古川、鳥光、マグネシウム **27** (2008) 75.
[3] Y. Furukawa, N. Kasai, and K. Torimitsu, Magnes. Res. **22** (2009) 174S.

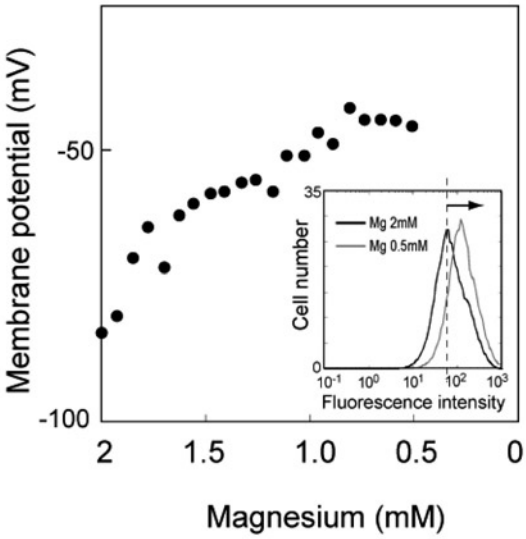


図1　大脳皮質細胞の膜電位に対するマグネシウム濃度依存性。

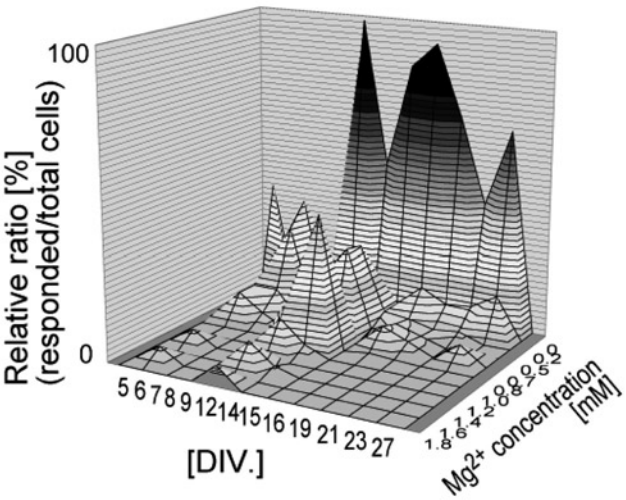


図2　細胞内カルシウム濃度測定による発達とマグネシウム濃度相関（大脳皮質細胞）。

巨大脂質膜リポソームを用いたナノバイオデバイス構築

住友弘二　Arianna McAlliste　丹波之宏＊　篠崎陽一　鳥光慶一
機能物質科学研究部　＊鈴鹿高専

膜タンパク質の機能を利用したナノバイオデバイスの構築を目標として、膜タンパク質の機能発現の場を、ナノ加工を施したシリコン基板上に構築することを目指している[1]。その作製において、直径が数10ミクロンの巨大脂質膜リポソーム (GUV: Giant Unilamellar Vesicle) を用いることとした。

GUVは、そのサイズからも単純化した細胞膜モデルとしてとらえられる。GUVの脂質膜にイオンチャンネル（グラミシジンA）を導入した場合の、イオン透過の様子を蛍光強度変化で捉えた例を示す（図1）。GUV内部には、pHによって蛍光強度が変化する蛍光プローブ(pyranine)を内包している。GUV外部の環境を変化させると（pHを変化させると）、脂質膜にあるイオンチャンネルを1価の陽イオンが透過し、時間とともにGUV内部のpHが変化していることを示している。

このようなGUVを、Si基板上に形成したミクロンスケールの井戸の上で展開することにより、井戸内部に蛍光プローブを脂質二分子膜で閉じ込めた（図2）。GUVを展開した後、井戸外部の溶液を置換することで、余分な蛍光プローブは除去してある。基板支持膜パッチの外周部ではシールされない井戸(*a*)も見られるものの、それ以外では多くの部分で井戸がシールされ、内部に閉じ込められたプローブからの蛍光が観察されている(*b*)。井戸の開口部にオーバーハング形状を設けることで、効率よく、また安定に脂質二分子膜で井戸をシールすることを可能にしている。井戸に閉じ込められたプローブからの蛍光は、1時間以上の間変化することがなく、流出することなく安定に存在することが確認されている。薬液投入により、井戸外部の環境変化（pH変化）により図1に示すのと同じような、イオン透過に伴う蛍光イオン強度の変化を観測した。井戸内外の間における水素イオンの濃度勾配は、イオンチャンネルを通したイオン透過を引き起こし、井戸内部のpHが変化する。シリコン基板上に、膜タンパク質の機能測定に有効な井戸が形成されていることを示している。

今後、微小電極を組み込むことにより、イオン透過を蛍光強度変化とイオン透過電流の両方で解析を行う。さらには、オン－オフを膜タンパク質で制御するようなデバイスの構築へと進めていく。

[1] Y. Shinozaki et al., Appl. Phys. Express **3** (2010) 027002.

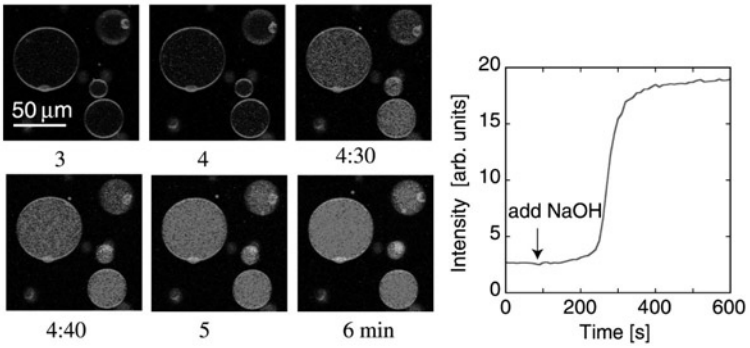


図1　巨大脂質膜リポソームにおけるイオンチャンネル機能計測（蛍光強度変化）。

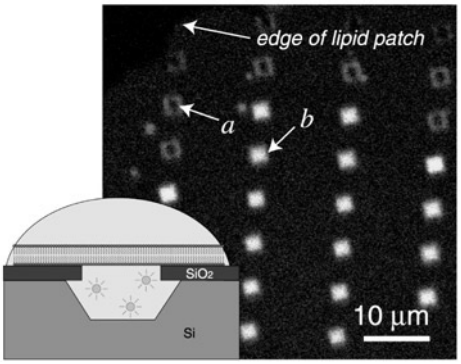


図2　ミクロンスケールの井戸に蛍光プローブを脂質二分子膜でシール。

0.18 μm CMOS プロセスを用いた ブレインマシンインターフェース用 LSI チップの研究

島田明佳　山口昌也*　中野誠彦*　鳥光慶一
機能物質科学研究部　*慶應義塾大学

近年、脳と機械の情報通信を目指すブレインマシンインターフェースの研究が、神経科学や医療分野で進んでいる。そのほとんどは片方向通信であるが、我々は多点電極(MEA)を介した脳と機械の相互通信が可能なブレインマシンインターフェースの研究を進めている[1]。この相互通信の実現には、脳の情報処理メカニズムの解明とともに、脳に対する電気的刺激信号の印加と脳の神経細胞由来の電気的活動信号計測が可能なデバイスが必要となる。しかも生体への装着による生体のストレス軽減のため, こうしたデバイスは無線化および小型化が望まれる。今回は0.18 μm CMOSプロセスを用いて小型で可搬性の高い16 ch刺激信号印加・活動計測システムを2.5 mm角のLSIチップで実現した[2]。

本チップは、デジタル・アナログ回路を混載することにより、刺激信号印加・活動計測システムのワンチップ化を行っている。チップ構成は、図1のように刺激印加部(Stimulation Block)、計測部(Measurement Block)、モード切替え部(Mode Change Block)の3つに分かれている。刺激印加部は最小時間幅10 μs、4 bitの解像度の矩形波を組み合わせることにより、任意の刺激信号波形が生成できる。計測部では、16 ch前置増幅器により増幅された電気的活動信号を、マルチプレクサ(MUX)により40 kS/sのサンプリングレートで1 chに時間多重できる。モード切替え部では、刺激印加部のデータを元に生成された制御信号により、刺激印加と増幅の2つのモードを切り替えることができる。図2は、MEA上に分散培養されたラット大脳皮質由来の神経細胞に対してある電極を介して刺激信号を印加したときの応答を、別の電極によって計測した結果を示す。刺激信号印加後数十 ms後に励起された神経細胞の電気的活動が計測できていることを示している。

今後はLSIチップに対する入出力の無線化を行い、より可搬性を高めたブレインマシンインターフェースの実現を目指す。

[1] A. Shimada et al., SFN 2008, Washington, D.C. U.S.A. (Nov. 2008).
[2] M. Yamaguchi et al., Jpn. J. Appl. Phys. Accepted.

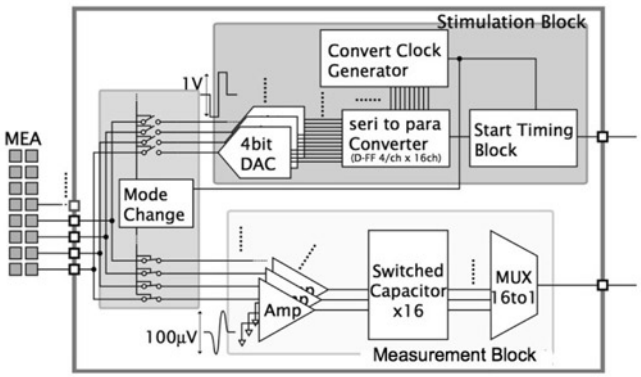


図1　16 ch刺激信号印加・活動計測用LSIチップの回路図。

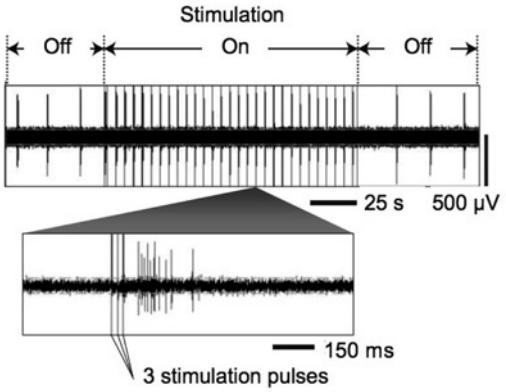


図2　刺激信号印加により励起された神経細胞の電気的活動。

金フローティングゲートを共有した シリコン細線イオン感応トランジスタ

西口克彦　山口徹　藤原聡
量子電子物性研究部

電界効果トランジスタ(FET)は高感度電荷計としての機能を有するため、イオン感応FET(ISFET)と称され、その高速動作や高集積度といった特徴を生かしPHセンサ、バイオ・センサなどといった応用に利用されている。これまで我々はナノメートルオーダのシリコン細線をチャネルとするFETを作成し、室温での単一電子検出に成功している[1]。このFETを高感度ISFETとして利用することで単一分子の検出などが期待できるが、通常は多数のノイズ環境下で利用されることから、そのノイズ対策が必要となる。今回は、ノイズ環境下での高精度な単一分子検出を目指し、ISFETを金フローティングゲートで容量結合した。フローティングゲートを共有するISFETで同時に発生する電流変化をモニタすることで、金に付着した物質に起因する信号を特定できることを確認した[2]。

素子はSOI基板を用いて作製し、ベース基板をバックゲート電極とする4つのISFETで構成される（図1）。ISFETのSOIチャネルは非常に小さい（数十 nm）ため、単一電子検出が可能な感度を持つ。3本のSOIチャネル上部にTi（厚さ: 5 nm）を挟んでAu (20 nm)を形成することにより、Auに付着した帯電物質をISFETの電流変化として検出する。今回は、Octadecane Thiol (ODT)を分散させたテトラヒドロフラン(THF)をスポイトで素子表面に落とし、4つのISFET電流I_1、I_2、I_3、I_4をモニタした。THFを素子表面に落して完全に蒸発させたところ、ODTの濃度に応じて電流－バックゲート電圧特性がシフトした。負に帯電したODTがISFETチャネル上部に付着したためと考えられる。次に、THFが蒸発する間、一定のゲート電圧で電流をモニタしたところ、Auフローティングゲートがチャネルを覆っているI_2, I_3およびI_4では、同時に発生する電流変化（図2の矢印部分）が観測され、I_1では確認されなかった。これは、帯電物質がAuゲートに付着し、Auと容量結合した3つのISFETに対してのみ影響を与えたためと考えられる。チャネルがAuと容量結合していないI_1と一緒に比較することで、バックグラウンド・ノイズに埋もれたAuゲート上の物質による信号を特定することが可能となる。一方、I_1は量子化された値で揺らいでおり、単一のODTを検出している可能性を示している。

[1] K. Nishiguchi, Jpn. J. Appl. Phys. **47** (2008) 8305.
[2] K. Nishiguchi, Appl. Phys. Lett. **94** (2009) 163106.

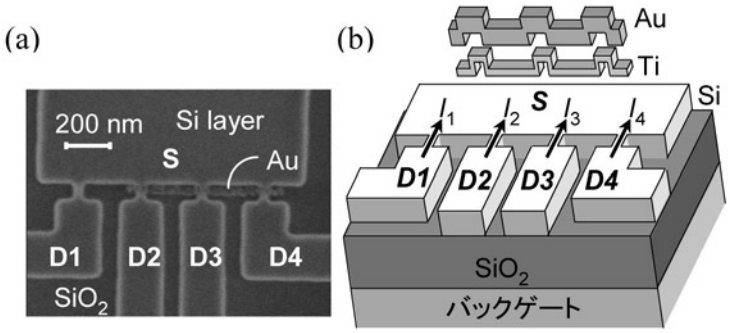


図1　金フローティングゲートを共有したISFETの構造
(a) 電子顕微鏡写真。(b) 鳥瞰図。

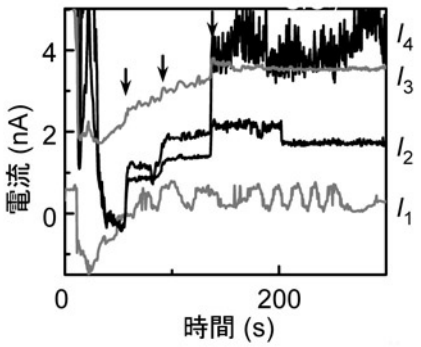


図2　ODTを含むTHFを素子に落とした時、ISFETに流れる電流の変化。

トンネル分光による薄層 SOI-MOSFET 内サブバンドの観測

登坂仁一郎　西口克彦　影島博之　小野行徳　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、古典的なトランジスタの動作原理は量子効果の顕在化により破綻しつつある。一方、量子効果を有効に利用し、従来のシリコンデバイスにはない機能を付加する試みが検討されて始めている[1, 2]。このため、最も基本となる量子効果の1つである閉じ込め効果をシリコンにおいて理解・検証していくことは重要である。今回、我々はシリコン酸化膜に閉じ込められた薄層SOI (silicon-on-insulator) 内に形成された高次に及ぶサブバンドをトンネル分光により観測することに成功した[3]。

サブバンドの観測は、2層ゲート構造を持つ 2 nmのトンネル酸化膜(t_{OX})を有するSOI-MOSFET（図1）において行った。図2にSOI膜厚 25 nmおよび10 nmのデバイスの下層ゲート電流(I_{LG}) − 下層ゲート電圧(V_{LG}) 特性を示す。$V_{LG} > 0$において、dI_{LG}/dV_{LG}に明瞭な構造は確認できないが、$V_{LG} < 0$において、dI_{LG}/dV_{LG}に細かいピーク構造が確認できる。SOIの膜厚の減少に伴いピーク間隔が増加しており、観測されたピーク構造は、閉じ込めによりSOI内に形成されたサブバンドに起因していることを示している。より定量的にピーク構造の起源を探るため、薄層SOI内の固有状態の計算を行った［図3(a)］。その結果、下層ゲートフェルミ面とSOIの4重縮退谷の固有値が交わる下層ゲート電圧で実験のピーク位置が良く再現された［図3(b)］。4重縮退谷は2重縮退谷に対し谷縮退度が高く、また面内運動有効質量が大きいため、より大きな状態密度を有する。また、トンネル電流はトンネル確率と終状態密度に比例するため、実験結果のピーク構造は、4重縮退谷へのトンネルが際立って観測されたためと捉えることが可能である。これらの結果から薄層SOI-MOSFETの固有状態が、ゲートを用いたトンネル分光により観測可能であることを明らかにした。

[1] K. Uchida et al., J. Appl. Phys. **102** (2007) 074510.
[2] S. Saito et al., Jpn. J. Appl. Phys. **45** (2006) 679.
[3] J. Noborisaka et al., Appl. Phys. Lett. **96** (2010) 112102.

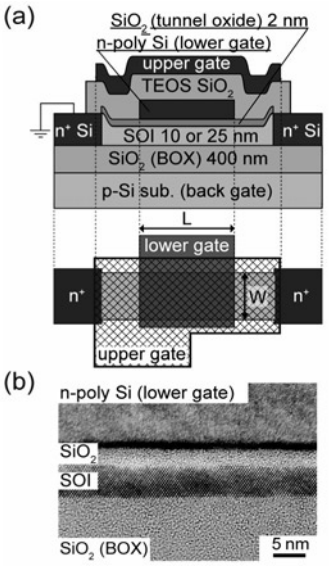


図1　(a)デバイス構造図。(b) 透過電子顕微鏡像。

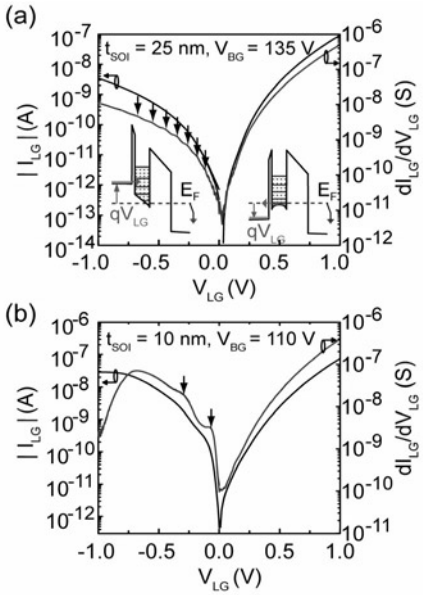


図2　トンネル電流およびコンダクタンス測定結果。(a) SOI = 25 nm。(b) SOI = 10 nm。

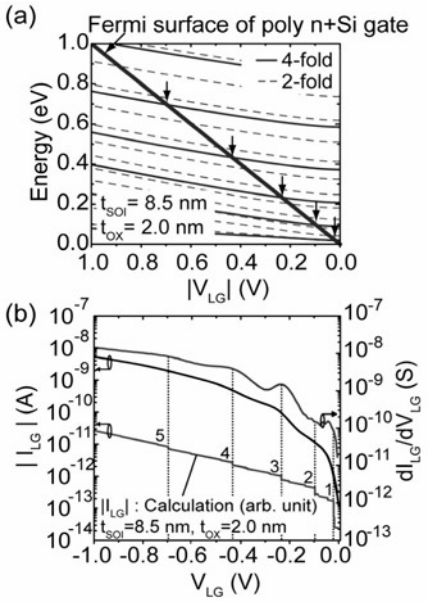


図3　(a)サブバンド計算結果。(b)トンネル電流計算と実験の比較。

ブロック共重合体の自己組織化を用いた２次元パターニング

山口徹　山口浩司
量子電子物性研究部

ブロック共重合体リソグラフィは、16 nm技術ノード以降のパターニング手法として注目を浴びている。本技術をデバイス作製へと適用するためには、ブロック共重合体ミクロ相分離構造のドメイン界面の配向を精密に制御することにより、2次元パターニングを実現することが最大の課題である。我々は、ネガ型レジストである水素化シルセスキオキサン(HSQ)を配向ガイドとして用いたグラフォエピタキシ手法により、ポリスチレン(PS)とポリメチルメタクリレート(PMMA)からなるブロック共重合体の垂直ラメラ構造の2次元パターニングに成功した[1]。実現の鍵は、(1)基板表面の中性化と、(2)電子線露光技術により精密に形成した2次元の親水性配向ガイドパターンの導入、の2つである。それぞれラメラ相の垂直配向、および面内2次元配向を誘起するのに重要な役割を果たしている［図1(a)］。

直角配向ガイドを用いることにより、4周期分の垂直ラメラ相（16 nmハーフピッチ）を強制的に直角に曲げることができる［図1(b)］。注目すべきは、本構造がブロック共重合体のみの純粋な系で形成できていることであり、ブロック共重合体自身が持つドメイン形状・周期における高い柔軟性により実現されている。六角形配向ガイドを用いることにより、同軸シリンダ相も形成することが可能である［図1(c)］。特に、配向ガイドのピッチを変えることにより、PSとPMMAリングの層数を精密に制御できる。このような精密配向制御は、ブロック共重合体の自己組織化（ボトムアップ）と高精度電子線露光技術により形成された配向ガイド（トップダウン）の長所を最大限に生かすことにより初めて成し遂げられるものである。さらに、これらの湾曲したラメラ相や同軸シリンダを下地基板へ転写可能である［図1(d)］。本技術により、最先端のトップダウン技術が及ばない極限解像領域において、ブロック共重合体リソグラフィのナノデバイス作製への適用が可能になると期待される。

[1] T. Yamaguchi and H. Yamaguchi, Adv. Mater. **20** (2008) 1684.

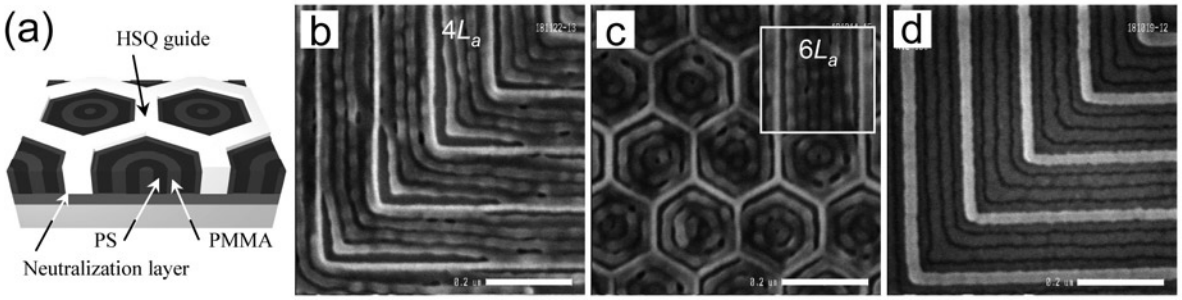


図1　(a) 六角形配向ガイドにおける自己組織化構造の模式図。(b, c) PMMA相を除去した後に残存したPS相の直上走査電子顕微鏡(SEM)像；(b)直角配向ガイド。(c)六角形配向ガイド。(d)エッチング後のパターンの直上SEM像。スケールバーはすべて200 nm。

光による結合ナノ機械共振器の周波数チューニング

岡本創　小野満恒二　山口浩司
量子電子物性研究部

昨今、結合機械共振器に関する研究が注目を集めている。同期現象などの興味深い物理現象に加え、振動モードの局在化を利用した質量センサなど、その様々な応用可能性に期待が高まっている[1-3]。結合機械共振器における振動の結合状態は機械共振器間の固有振動数の差によって決まる。よって構成共振器の固有振動数を個別に制御することが結合機械共振器を取り扱う上で非常に重要となる。我々は、光照射による熱応力効果により機械共振器の固有振動数を変調し、結合共振器における振動の結合状態を制御することに成功した。また、本手法により機械共振器同士の完全な結合状態を実現した[4]。

実験に用いた素子は長さ40 μm、幅10 μm、厚さ0.8 μmの2つの両持ち梁から成る（図1）。2つの梁はエッチングによって形成されるオーバーハングを介して機械的に結合している。梁はAlGaAs/GaAs超格子（上層）、*n*-GaAs（中層）、*i*-GaAs（下層）の3層を有し、梁に蒸着した金電極と*n*-GaAs層の間に交流電圧をかけることにより、圧電的に2つの梁を個別加振することができる。梁の振動は照射レーザ (He : Ne) の反射光をドップラー干渉計により検出する。また、照射レーザ強度の調節により、梁のばね定数を変化させ、機械共振器の周波数をチューニングすることができる。測定は室温・真空中で行った。

梁1を加振した場合の梁2の共振特性におけるレーザ強度依存性を図2に示す。図には2つの共振ピークが見られるが、これらは2つの梁の振動が互いに結合した2つの結合振動モードである。そのモード周波数はレーザ強度(P)に依存し、P = 64 μWにおいて2つのモードは反交差する（図2）。この反交差点において2つの梁は完全に結合し、低周波側モードと高周波側モードはそれぞれ完全な対称結合振動と完全な反対称結合振動となる。つまり本手法により、結合ナノ機械共振器の完全なチューニングが可能となる。チューナブルな結合ナノ機械共振器の実現は、高感度センサ応用や結合機械共振器のダイナミクスを探る上で重要となる。

[1] S. Shim et al., Science **316** (2007) 95.
[2] C. Pierre, J. Sound Vib. **139** (1990) 111.
[3] M. Spletzer et al., Appl. Phys. Lett. **88** (2006) 254102.
[4] H. Okamoto et al., Appl. Phys. Express. **2** (2009) 062202.

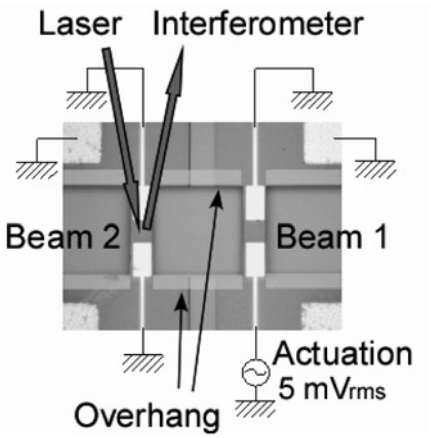


図1　結合ナノ機械共振器とセットアップ概略。

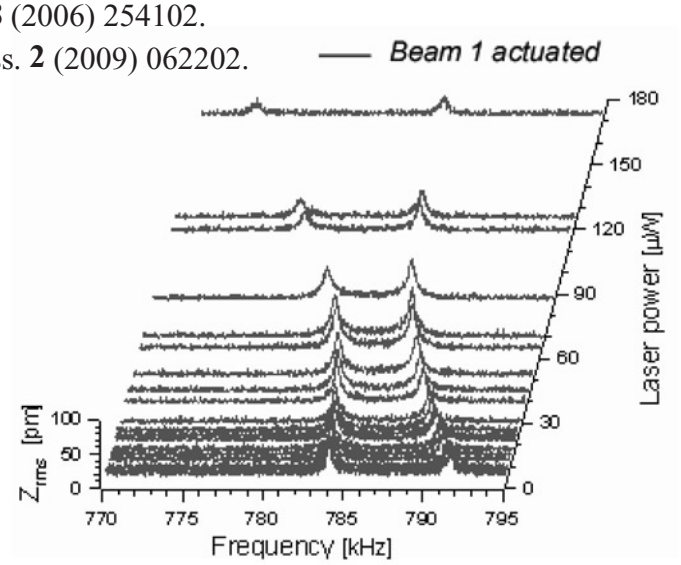


図2　結合振動モードのレーザ強度依存性。

$\nu_T = 1$ 二層系における真性エネルギーギャップと励起子凝縮

Paula Giudici　村木康二　熊田倫雄　藤澤利正
量子電子物性研究部

2次元電子系2層を20-30 nm程度の距離で近接させた系（二層系）は、異なる層にいる電子間の相互作用により1層系にはない特異な性質を示す。特に2次元面に垂直に加えた磁場によって生じる巨視的に縮退した離散エネルギー準位（ランダウ準位）を、各層で電子がちょうど半分ずつ満たすようにすると（各層の占有率1/2、総占有率$\nu_T = 1$）、2層間の距離dが小さく層間の相互作用が強い場合、励起子超流動と考えられる2層で逆向きの電流が無散逸に流れるなどの興味深い現象が報告されている[1]。一方、層間距離dが十分大きく2層が独立にふるまう場合には系は金属的な性質を示し、電子が磁束量子と結合して生じた複合粒子が各層でフェルミ面を形成しているものと考えられている。

これら2つの大きく異なる電子状態間で起こる量子相転移の性質は理論的にも実験的にも興味を引いてきたが、最近の我々の研究によって、GaAs二重量子井戸に垂直に磁場を加えるという通常の実験条件では金属相が完全にスピン偏極していないため、実験的に観測される相転移はゼーマンエネルギーに支配された1次転移となり、スピン自由度が存在しない場合に予想される量子相転移とは性質が異なることが明らかになった[2]。本研究では、試料に対して磁場を傾けゼーマンエネルギーを大きくすることで、スピン自由度が関与しない本来の相転移の性質を調べた[3]。ゼーマンエネルギーを大きくしていくと励起子凝縮相のエネルギーギャップは面間の電子間距離dと面内の電子間距離l_Bの比だけで決まる値（真性エネルギーギャップ）をとり（図1）、その大きさは金属相と励起子凝縮相のエネルギー差の2倍に一致した（図2）。この結果は、この相転移が2次転移であり、凝縮相が金属相から励起子形成によって生じていることを示唆している。

[1] M. Kellogg, J. P. Eisenstein, L. N. Pfeiffer and K. W. West, Phys. Rev. Lett. **93** (2004) 036801.
[2] P. Giudici, K. Muraki, N. Kumada, Y. Hirayama, and T. Fujisawa, Phys. Rev. Lett. **100** (2008) 106803.
[3] P. Giudici, K. Muraki, N. Kumada, and T. Fujisawa, Phys. Rev. Lett **104** (2010) 056802.

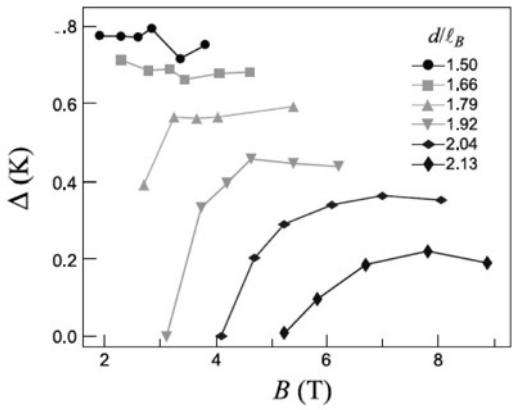


図1　各d/l_Bの値における励起子凝縮相のエネルギーギャップのトータル磁場依存性。

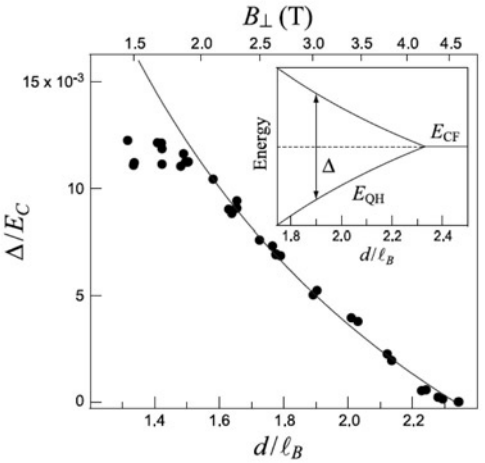


図2　エネルギーギャップのd/l_B依存性と二状態間のエネルギー差x 2（実線）。

横結合二重ドットにおけるファノー近藤効果

佐々木智　田村浩之
量子電子物性研究部

固体中の局在スピンが伝導電子との間にスピン一重項状態を形成する多体相関現象が近藤効果で、近年各種パラメータを自在に制御できる量子ドットにおいて著しく研究が進展してきた。特に二重ドットにおいては、単一ドットにおける近藤効果と、ドット間のスピン一重項形成との競合などの興味深い現象が理論的に予想されているが、実験的にはまだ十分に研究されていない。他方、ファノ効果は、連続的なチャネルと離散的なチャネルの間の量子干渉効果に由来する普遍的な現象で、両チャネルを介する伝導係数の相対的な大きさに応じて、共鳴波形が非対称なピークからディップに至るまで変化する。

本研究では、互いにトンネル結合した2つの量子ドットの内、片方のドットのみが直接ソース・ドレイン電極と結合した横結合二重量子ドット（図1）をGaAs/AlGaAs 2次元電子ガスを静電的に閉じ込めることによって形成し、近藤効果とファノ効果の競合を観測した[1]。図2は41 mKで測定した電気伝導度のゲート電圧依存性を示す。ドット1の電子数変化に対応するクーロン振動ピークが3本強く観測されており、黒い三角で示した下のクーロンブロッケード谷においては近藤効果により伝導度が増大している。ここで、ドット2に含まれる電子数が変化する際のドット1のクーロンブロッケード谷の伝導度に着目すると、上の非近藤谷においては白い矢印で示すように極大、下の近藤谷においては黒い円で示すように極小となっている。これらの特性は、連続状態的なドット1の近藤効果（一般にはコトンネル）と、ドット2の離散準位を介した伝導との干渉によるファノ共鳴と解釈することができる。特に、近藤谷における共鳴ディップは近藤効果とファノ共鳴の競合を反映するもので興味深い。以上の特性は、スレーブ・ボゾン平均場近似による理論計算によって定性的に再現されている[2]。

[1] S. Sasaki et al., Phys. Rev. Lett. **103** (2009) 266806.
[2] H. Tamura and S. Sasaki, Physca E **42** (2010) 864.

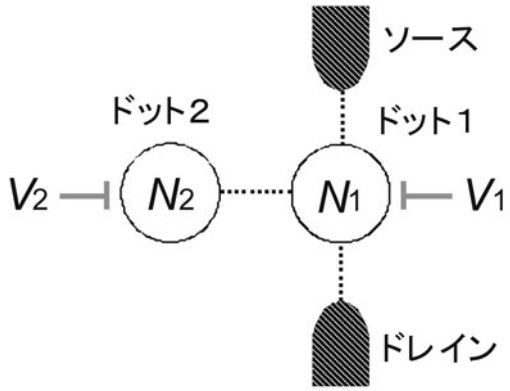


図1　横結合二重量子ドットの模式図。

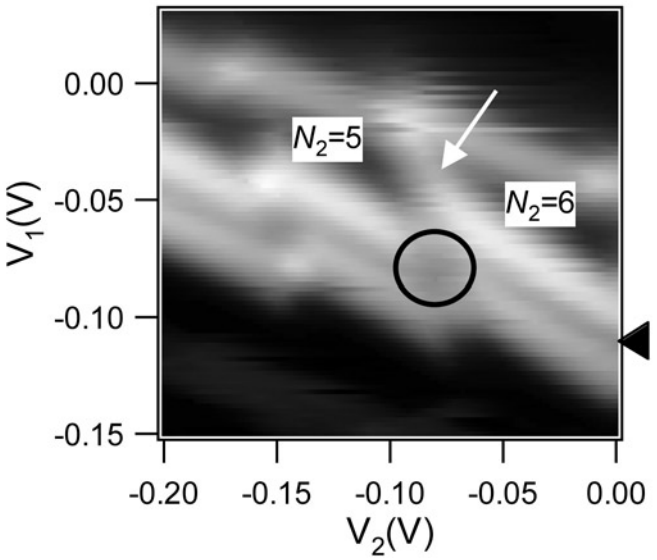


図2　ファノー近藤効果を示す電気伝導度のゲート電圧依存性。白が高い伝導度に対応する。

結合半導体電荷量子ビットによる２量子ビット演算

太田剛　新海剛＊　林稔晶　藤澤利正＊
量子電子物性研究部　＊東京工業大学

量子力学の原理に基づく並列計算を利用した量子コンピュータは従来のコンピュータをはるかに凌ぐ計算能力が期待されている。近年は量子アルゴリズムを実行する上で必要な2量子ビット演算の実現に向けた研究が進展している。これまでに超伝導電荷量子ビットにおいては、加算や乗算等の演算を行う制御反転演算が実現され、半導体を用いた電子スピン量子ビットにおいては、2つの量子ビットの情報を交換する交換演算が実現されている[1, 2]。従来の素子ではどちらか1種類の演算しか実現されていなかった。有限なコヒーレンス時間の中で演算を行うためには複数の演算をより小数ステップで効率的に行うことが必要であると考えられる。我々は制御反転演算や交換演算などの複数の機能的な2量子ビット演算をそれぞれシングルステップで実現できる素子を開発し、実験的に実証した[3]。

図1は素子の模式図である。二重量子ドットからなる電荷量子ビットを2つ集積化し、2量子ビット操作の実験を行った。それぞれの量子ビットは電気的に絶縁されており、独立に伝導特性を測定することができる。11本のゲート電極に印加する電圧を調整することにより2つの量子ビットのパラメータを調整することができる。第1量子ビットに高速電圧パルスを印加し、量子ビットを流れる電流を測定する。第1量子ビットにおいて左（右）のドットに電子がいる場合を|0>（|1>）と表記すると|0>と|1>の重ねあわせ状態の生成を示すコヒーレント振動が観測される。量子ビット間の静電結合（クーロン相互作用）により、第1量子ビットの伝導特性は第2量子ビットの電荷状態に強く依存する。この静電結合を用いて一次のトンネル過程に起因する条件付きコヒーレント振動を観測し、制御回転(CROT)演算を実現した（図2）。さらに、量子ビットのパラメータを制御して二次のトンネル過程を用いることにより相関コヒーレント振動を観測し、交換(SWAP)演算を実証した（図3）。

本研究の一部は総務省SCOPEの援助を受けて行われた。

[1] T. Yamamoto et al., Nature **425** (2003) 941.
[2] J. R. Petta et al., Science **309** (2005) 2180.
[3] G. Shinkai et al., Phys. Rev. Lett. **103** (2009) 056802.

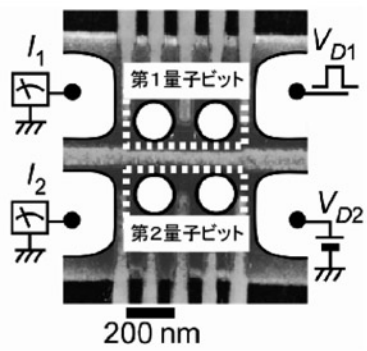


図1　半導体量子ドットを用いた2量子ビット素子。

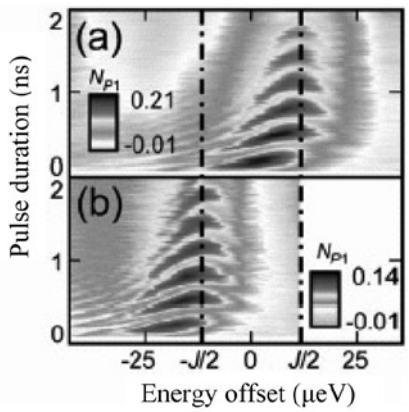


図2　第1量子ビットの条件付きコヒーレント振動。(a)と(b)はそれぞれ第2量子ビットが|1>、|0>の場合。

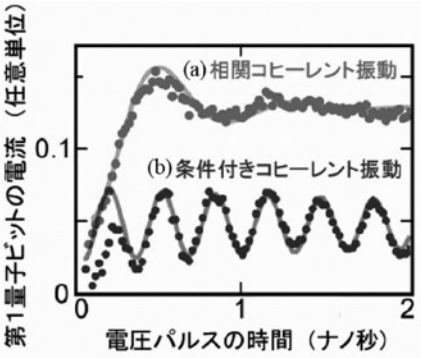


図3　(a) 第1量子ビットの相関コヒーレント振動。(b)は図2の条件付きコヒーレント振動を示す。

ジョセフソン分岐増幅器による
量子ビット測定過程の量子ダイナミクス理論

中ノ勇人　角柳孝輔　齊藤志郎　仙場浩一　髙柳英明*
量子電子物性研究部　*東京理科大学応用物理学科

量子ビットの状態読み出しは、典型的な「プローブを用いた量子測定」である。今回我々は、実際に実験も行っている、ジョセフソン分岐増幅器 (JBA) をプローブとする超伝導磁束量子ビットの読み出し過程を、量子ダイナミクスとして理論的に分析することに成功した。

JBAは非線形共振器であり、駆動振動数や駆動振幅など動作パラメータのわずかな違いによって、2種類の振動モード（低振幅モード　G状態、と　高振幅モード　E状態）のどちらの共振状態をとるかが決定する。これをプローブとして量子ビットと相互作用させると、量子ビットの状態（ミクロな情報）に依存する実効的な動作パラメータのわずかな変化を、2種類の共振モードの違い（マクロな情報）として増幅して読み出すことができる[1]。この方法は、測定後の量子ビットの状態に対する破壊の程度が小さく、量子情報処理に適している。このミクロからマクロへの情報変換過程は、まぎれもなく、量子ビットとJBAの合成系の量子力学に従った時間発展（量子ダイナミクス）であるが、我々はその過程を理論的に明らかにした[2]。特に、量子ビットの状態が重ね合わせであるときに、読み出しがどうやって確率的な射影になるのかが重要である。JBAを駆動し始めると、量子ビットとの実効的な相互作用が徐々に強くなり、ユニタリーな時間発展によって量子ビットとJBAが相関を持つ2つの状態のエンタングルした状態が形成される（$0 < t < \tau_1$：図1, 2参照、以下同様）。この2つの状態のJBAは、やがてE状態へと転移するものとそのままG状態に留まるものであり、結合している量子ビットは、それぞれ基底状態gおよび励起状態eである。駆動をさらに強くすると、この一方だけがE状態への遷移を開始し、その瞬間にJBAへのデコヒーレンスが急激にエンタングル状態を破壊する ($t \sim \tau_2$)。こうして、量子ビットとJBAの合成系は、「量子ビットがg　JBAがE」と「量子ビットがe　JBAがG」のマクロに異なった2状態のどちらか一方が実現している混合状態になる ($t \sim \tau_3$)。このときのJBAの状態を通常の古典的な方法で測定すれば、判別されたJBAの状態に応じて量子ビットの状態も決まる。

[1] I. Siddiqi et al., Phys. Rev. Lett. **93** (2004) 207002.
[2] H. Nakano, S. Saito, K. Semba, and H. Takayanagi, Phys. Rev. Lett. **102** (2009) 257003.

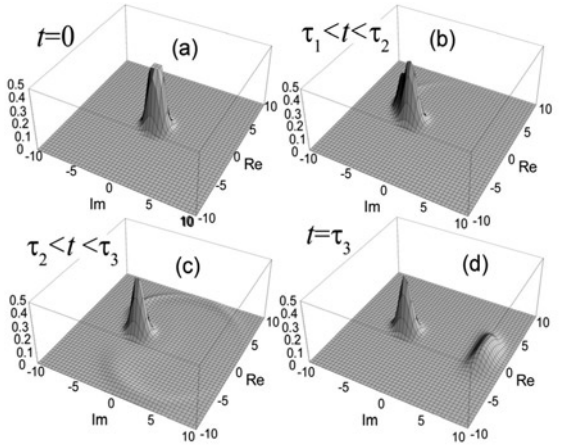


図1　JBAの状態の時間発展　(a)→(b)→(c)→(d)（Q表示）。

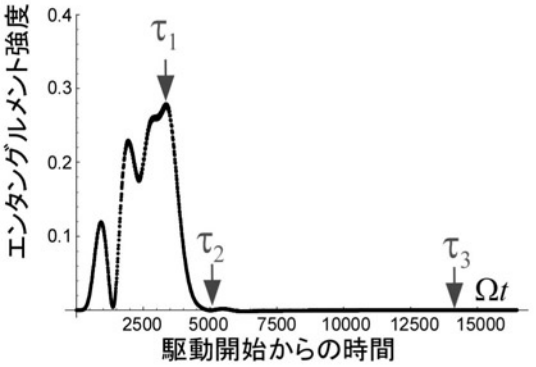


図2　量子ビットとJBAの間のエンタングルの強さの時間変化。

超伝導磁束量子ビット・共振器系における制御 NOT ゲートの提案

齊藤志郎　Todd Tilma*　Simon J. Devitt*　根本香絵＊　仙場浩一
量子電子物性研究部　＊国立情報学研究所

超伝導量子ビットは、操作性、拡張性、コヒーレンス時間の観点から、量子コンピュータの基本要素である量子ビット候補として注目を集めている[1]。我々は、超伝導共振器を量子バスとして用い、1つのバスに複数量子ビットが結合している系［図1(a)］に着目した。この系では、隣り合った量子ビットのみが結合する1次元状に並んだ量子ビット列とは異なり、離れた量子ビット間のゲート操作が容易になるという利点がある。我々は、この系において制御NOTゲートを実現するパルス配列を提案し、そのゲート精度を評価した[2]。その結果、2量子ビットの場合98.8 %、3量子ビットの場合98.0 %のプロセスフィデリティ FP [3]を得た。

図1(a)に超伝導LC共振器と結合した、超伝導磁束量子ビットの模式図を示す。各量子ビットは、相互インダクタンスを介して共振器と結合し、マイクロ波パルス照射用の制御ラインを有する。この結合により、各量子ビットの2準位間の遷移周波数は、共振器の状態に応じて僅かに変化する。我々は、この変化を利用した制御NOTゲートを提案した。図1(b)は、2量子ビットの場合のパルス配列である。パルスの特性は、上から周波数 (C: Carrier frequency, BSB: Blue sideband frequency)、長さ($\pi/2$, π)、位相(0, π, φ)で表されている。制御ビットと共振器に対するBSBパルスの間隔Tと位相φを最適化することにより、デコヒーレンスのない理想的な条件下で、F_P=98.8 %を得た。本研究では、制御ビット、標的ビット、共振器の周波数をそれぞれ、6 GHz、5 GHz、10 GHz、各ビットと共振器の結合を0.1 GHzとした。さらに、7 GHzの周波数を有する第3の量子ビットを加えた場合でも、非常に高いF_P = 98.0 %を示し、本提案の拡張性の高さが分かる。制御NOTゲートに要する時間は200 nsであり、磁束量子ビットのコヒーレンス時間4 μsと比較すると十分短い。実際に、デコヒーレンスの影響を考慮すると（図2）、実験で得られている最高の条件($Q = 1\times10^6$, $\Gamma_1 = \Gamma_2 = 0.25$ MHz)では、90.3 %のF_Pを得た。さらなるF_Pの向上にはコヒーレンス時間の改善、系の設計・パルス形状の最適化が望まれる。

本研究は科研費の援助を受けて行われた。

[1] J. Clarke and F. K. Wilhelm, Nature **453** (2008) 1031.
[2] S. Saito, T. Tilma, S. J. Devitt, K. Nemoto, and K. Semba, Phys. Rev. B **80** (2009) 224509.
[3] I. L. Chuang and M. A. Nielsen, J. Mod. Opt. **44** (1997) 2455.

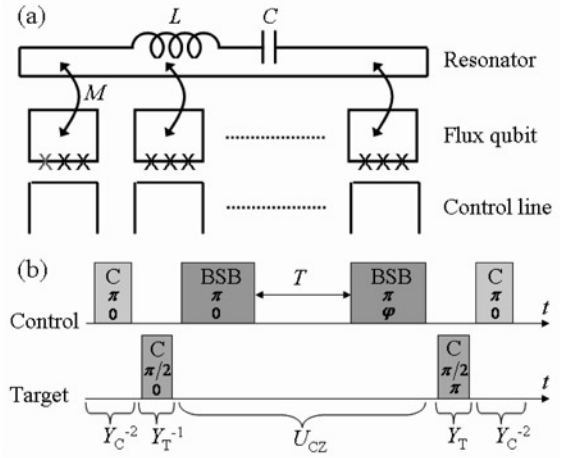


図1　(a) 超伝導磁束量子ビット・共振器系。
(b) 制御NOTゲートを実現するパルス配列。

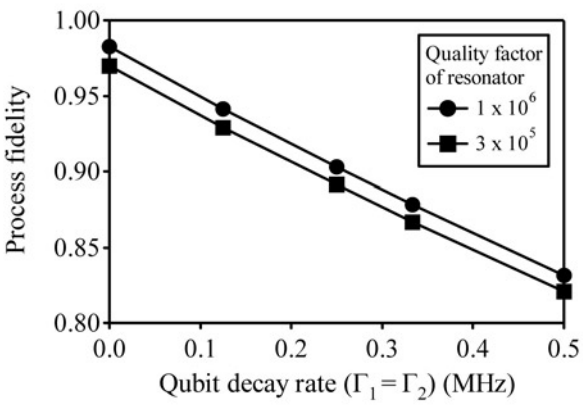


図2　プロセスフィデリティへのデコヒーレンスの影響。

半導体量子ドットにおける近藤効果のスピン蓄積による制御

小林俊之[1]　鶴田尚英[1,2]　佐々木智[1]　藤澤利正[1]　都倉康弘[3]　赤崎達志[1,2]
[1]量子電子物性研究部　[2]東京理科大学　[3]量子光物性研究部

半導体量子ドットに閉じ込められた局在電子のスピンは、周囲の伝導電子のスピンと強く相互作用することで、スピン一重項のコヒーレントな量子多体状態を形成する。これは近藤効果として知られ、温度、電場、磁場などのパラメータに敏感に反応して状態が変化することが知られている。近藤効果では局在電子と伝導電子のスピンが共に重要な役割を果たすため、伝導電子のスピンが片方に偏極すると近藤効果は著しく抑制されることが予想される。しかしながら、100 %近い高いスピン偏極状態を形成する技術はこれまで確立されておらず、伝導電子のスピン蓄積が、近藤効果に及ぼす影響についてこれまで実験的に調べることはできなかった。今回、我々は強磁場中の量子細線におけるスピンフィルタの特性を向上させることで、90 %以上スピン偏極したスピン偏極電流を生成した。また量子ドットの片方の電極に上向きスピンのみを蓄積することで、近藤効果が連続的に変調される様子を観測することに成功した[1]。

近藤効果では、フェルミエネルギーの伝導電子が共鳴的に局在電子と相互作用するため、電極の化学ポテンシャルμの位置に近藤状態密度(KDOS)が形成される（図1）。KDOSはμと連動しているため、量子細線から量子ドットにスピン偏極電流を注入し、上向きスピンのμのみを変化させると、上向きスピンのKDOSのみがシフトしKDOSのスピン分裂幅が変化する。KDOSの位置は、量子ドットの微分コンダクタンス g_D のピーク位置として測定することができた（図2）。

[1] T. Kobayashi et al., Phys. Rev. Lett. **104** (2010) 036804.

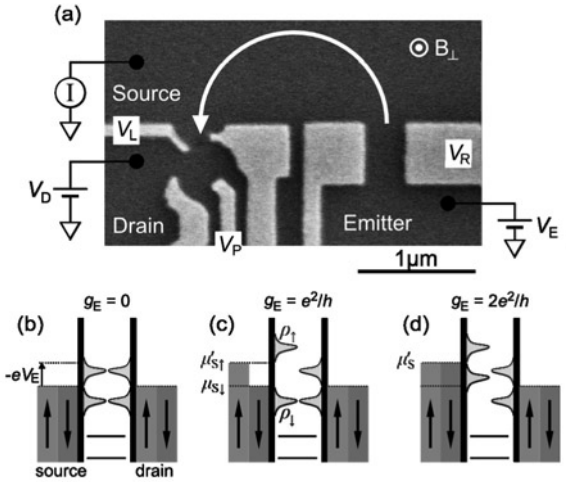


図1　(a)デバイスの走査電子顕微鏡像と測定方法。ゲート電極により左側に量子ドット、右側に量子細線が形成される。(b)-(d)量子細線の伝導度g_Eを0、e^2/h、$2e^2/h$に固定してV_Eを印加した場合の化学ポテンシャルμと近藤状態密度ρ。

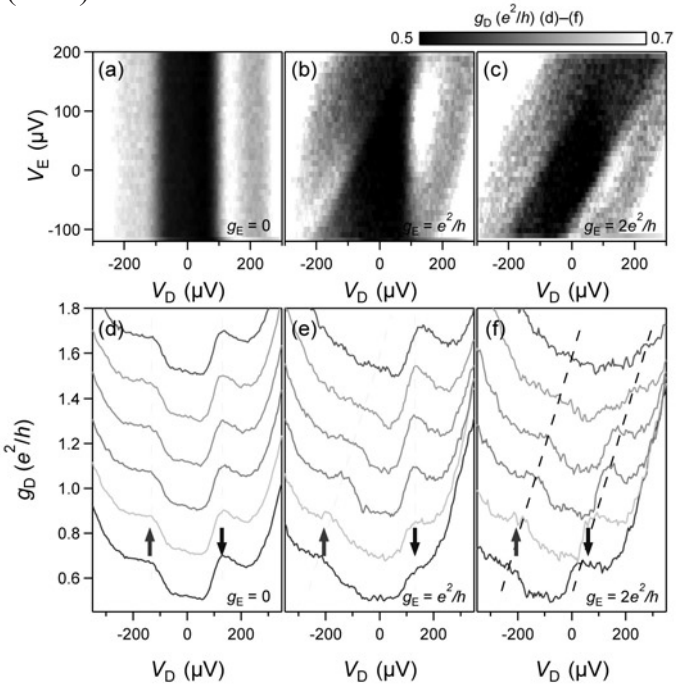


図2　近藤状態密度(KDOS)に起因する伝導度ピークがV_Eに対してシフトする様子。量子細線の伝導度g_Eがe^2/hの場合はV_Eによって上向きスピンのμのみがシフトするため、上向きスピンに起因した伝導度ピークのみがシフトする。

PPLN 導波路中のカスケード 2 次非線形光学効果を用いた時間位置もつれ光子対の発生

Myrtille Hunault　武居弘樹　忠永修＊　西田好毅＊　遊部雅生＊
量子光物性研究部　＊NTT フォトニクス研究所

周期分極反転ニオブ酸リチウム (periodically-poled lithium niobate: PPLN) 導波路中のカスケード2次非線形光学効果は1.5 μm帯における波長変換の手法としてよく知られており[1]、最近ではスクイズド光の発生にも用いられている[2]。 今回、PPLN導波路中のカスケード2次非線形光学効果を用いて1.5 μm帯の時間位置もつれ光子対を発生した。

実験系を図1に示す。波長1551.1 nmの連続光を強度変調器により幅100 ps、繰り返し500 MHzのパルス列に変調する。パルス列は光増幅器により増幅され、光フィルタにより自然放出雑音を抑圧した後、PPLN導波路に入力される。導波路中では、1.5 μm帯パルス列をポンプとする second harmonic generation (SHG)により780 nmのパルス列が発生する。同時に、発生した780 nmパルス光をポンプとする spontaneous parametric downcoversion (SPDC) により量子状態が$\frac{1}{\sqrt{N}}\sum_{k=1}^{N}|k\rangle_x|k\rangle_i$と表される連続的時間位置もつれ光子対[3]が発生する。ここで、$|k\rangle_z$はk番目の時間スロット、モードz (=s: シグナル、i: アイドラ) に光子が存在する状態を示し、Nはコヒーレンスが保持されているポンプパルス数である。導波路から出力した光子は、誘電体多層膜フィルタによりシグナル／アイドラ光子に分離され、それぞれ1ビット遅延干渉計に入力される。干渉計から出力された光子は単一光子検出器により受信される。干渉計の位相差を変化させ、二光子の同時検出率を測定することにより二光子干渉波形を得る。

二光子干渉実験の結果、明瞭度97 %の二光子干渉波形を観測した（図1右上）。これにより、本手法を用いて高品質な量子もつれ光子対源を構成可能であることが確認できた。

[1] M. H. Chou et al., IEEE Photon. Technol. Lett. **11** (1999) 653.
[2] K. Hirosawa et al., Phys. Rev. A **80** (2009) 043832.
[3] H. de Riedmatten et al., Phys. Rev. A **69** (2004) 050304(R).

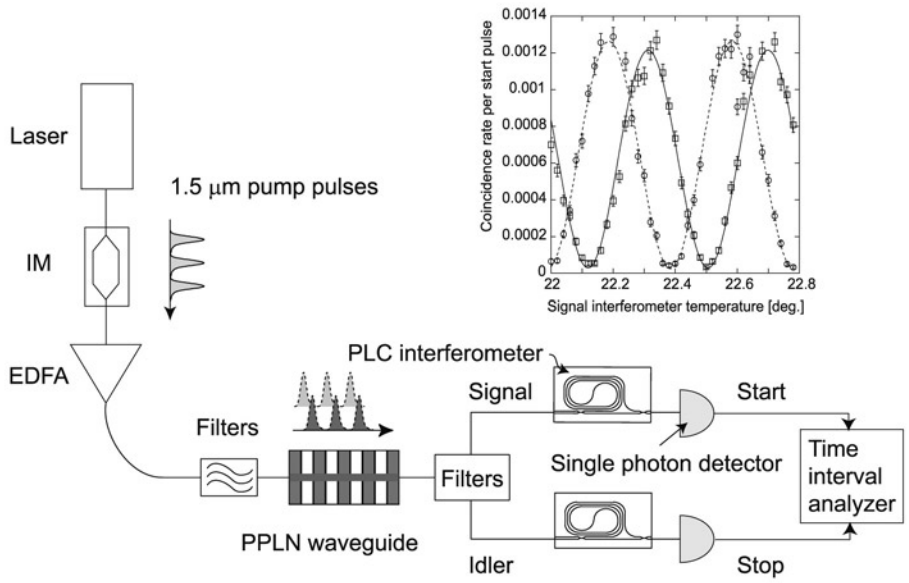


図1　実験系（右上は二光子干渉波形）。

光格子中にトラップされた冷却フェルミ原子気体の有限温度解析

稲葉謙介　山下眞
量子光物性研究部

制御性が非常に高い光格子中の冷却原子気体は、量子シミュレータと呼ばれており、多体効果を解析する理想的な系として知られている。実際、^{40}Kフェルミ原子を用いた光格子系において、モット転移が実現され話題となった[1]。最近では、高温超電導体のメカニズムのさらなる解明にもつながるため、光格子系において反強磁性秩序状態を観測することに注目が集まっている。最近の実験技術の急速な進展に伴って、この観測の実現に期待が高まっている。そこで、実験に先駆けた理論的解析によって、光格子中の反強磁性転移について詳細な知見を得ることが必要とされている。しかしながら、光格子系特有のトラップポテンシャルの効果を考慮することは非常に困難であるため、この問題を取り扱うための信頼できる理論解析手法はこれまでなかった。

このような背景のもと、本研究では、2次元光格子に閉じ込められた2成分の内部自由度を有するフェルミ原子気体の反強磁性転移について解析した[2]。まず、自己エネルギー汎関数法を拡張し、光格子系を調べるための新たなアルゴリズムを開発した。この手法は、有限温度の強相関電子系を取り扱う強力な手法として知られていたが、従来のアルゴリズムでは、閉じ込めポテンシャルを考慮した解析は困難であった。我々はこの問題を解決し、拡張した自己エネルギー汎関数法を、2次元光格子系に適用し、様々な熱力学的な物理量を解析した。得られた結果は、先行研究によって得られていた実験・理論の解析と良い一致を示すことが分かった。そして、2次元光格子系の反強磁性転移について詳細な解析を行った。その結果、図1に示すように、反強磁性秩序は、モット状態になりやすいポテンシャルの底から徐々に発達することが分かった。最後に、系統的な解析により、光格子系の反強磁性転移温度を見積もり（図2）、観測に有利な高い転移温度を有するパラメータ領域が存在することを見出した。

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] U. Schneider et. al., Science **322** (2008) 1520; R. Jordens et al., Nature **455** (2008) 204.
[2] K. Inaba and M. Yamashita, submitted to Phys. Rev. A.

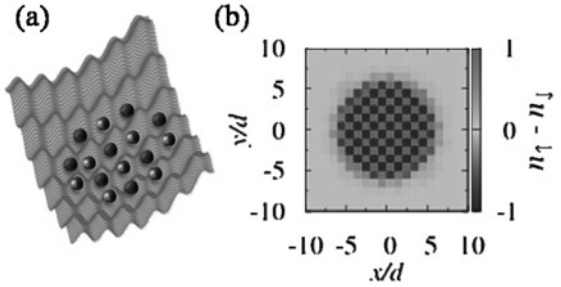


図1　(a) 光格子系の反強磁性秩序状態を示す模式図。(b) 数値計算によって求めた磁化の空間分布。転移温度以下の温度領域において解析を行った。

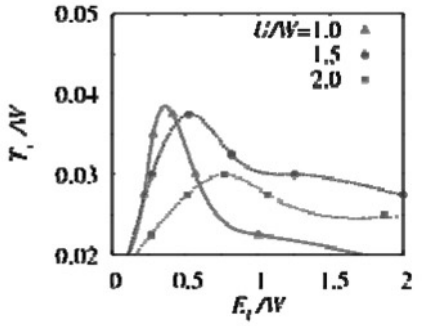


図2　反強磁性転移温度 T_c。相互作用の強さUおよび、トラップを特徴づけるエネルギーE_tを系統的に変化させている。バンド幅Wをエネルギーの単位にしている。

超伝導アトムチップの損失のメカニズム

向井哲哉　Christoph Hufnagel　清水富士夫＊
量子光物性研究部　＊電気通信大学

中性原子を用いた量子演算を実現するには、原子を強く、かつ、安定に捕捉する技術が不可欠である。チップ表面に加工した微細な回路が作るポテンシャルで原子を捕捉するアトムチップは、実用的なリソースで原子を強く閉じ込められると考えられることから、量子制御の重要デバイスとして期待されている。アトムチップを用いた量子デバイスを開発する第一歩は、チップ表面からのノイズの影響を克服することである。我々は、スピン反転損失を何桁も改善できると期待される超伝導回路を用いることで、この問題の解決を試みている。昨年度までに我々は、チップ上の超伝導永久電流により原子を捕捉し[1]、捕捉寿命を1桁改善することに成功した。しかしながら、我々の実験結果は、超伝導アトムチップのトラップ損失のメカニズムが、従来のアトムチップとは異なることを示唆していた。本年度は、その超伝導アトムチップのトラップ損失のメカニズムを解析し、その詳細を明らかにした[2]。

はじめに、我々はトラップ高さのバイアス磁場依存性を計測することで、超伝導線内部での電流分布を解析した（図1）。磁束の侵入の有無によって異なる電流分布から計算した結果を実験結果と比較することで、磁束の侵入が明らかになった。

次に、トラップの損失率のトラップ高さ依存性（図2）を解析したところ、トラップの損失率は、同じ永久電流を用いた測定では一定の関数に従うが、いったん永久電流を消去して再度永久電流を読み込むと、別の関数に従うことが明らかになった。これらの実験事実から、我々は超伝導体に侵入した磁束が樹枝形状となることで、局所的にトラップポテンシャルを変形させ、磁場ゼロの点を生じ、その点でスピン反転損失を起こしているという結論に至った。また、超伝導体に侵入する磁束が樹枝形状になることは、超伝導ディスクを用いた新しい原子トラップによる実験によっても確認することに成功した[3]。

本研究の一部は科学技術振興機構CREST、および、科研費の援助を受けて行われた。

[1] T. Mukai, C. Hufnagel et al., Phys. Rev. Lett. **98** (2007) 260407.
[2] C. Hufnagel, T. Mukai, and F. Shimizu, Phys. Rev. A **79** (2009) 053641.
[3] F. Shimizu, C. Hufnagel, and T. Mukai, Phys. Rev. Lett. **103** (2009) 253002.

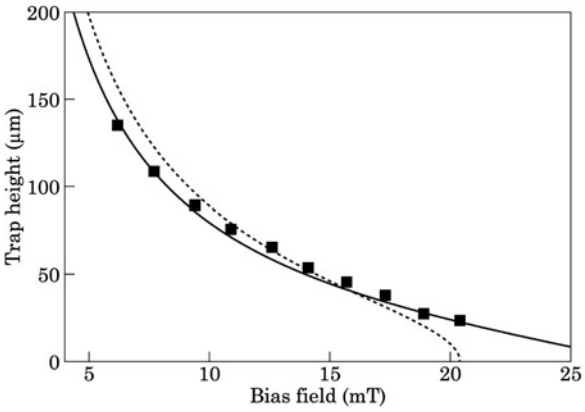


図1　トラップ高さのバイアス磁場依存性。■が実験結果で、実線および点線は、それぞれ磁束の侵入が有る場合と無い場合の計算結果である。

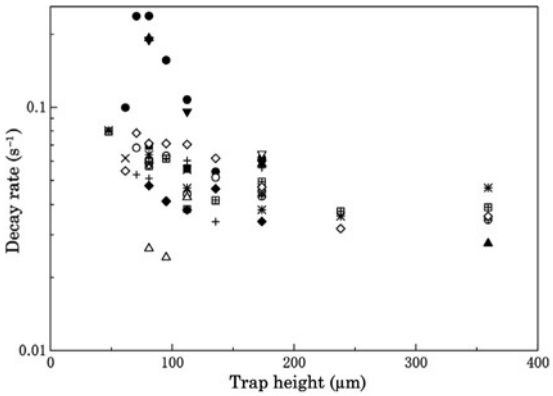


図2　トラップ損失率のトラップ高さ依存性。異なる印は、異なる日に得たデータを示している。永久電流は、それぞれの日に数回駆動している。

サブ10フェムト秒レーザによるp型Siの コヒーレントフォノンダイナミクスの観測

加藤景子　石澤淳　小栗克弥　後藤秀樹　中野秀俊
量子光物性研究部

コヒーレントフォノンとは、格子振動より十分に短い時間幅を有するパルスレーザによって駆動される、位相の揃ったフォノンのことである。コヒーレントフォノンの測定では格子振動の時間変化を直接観察できることから時間領域分光法と呼ばれ、従来のラマン散乱、赤外吸収などの周波数領域分光法に対して相補的な情報を得ることができる。

Siでは、p型ドーパントの添加によってフェルミ面を価電子帯へシフトさせると、k空間上で非等方なバンド構造を反映したラマンスペクトルが観測されている[1]。そこで我々はp型Siにおいてコヒーレントフォノンの観測を行い、非等方な分布を有するキャリアによって支配されるコヒーレントフォノンのダイナミクスについて調べた[2]。

パルス幅10 fs、中心波長780 nmのチタンサファイアレーザを用いて、ポンプ・プローブ法による過渡反射率測定を行った。サンプルとしてp型Si（キャリア濃度3×10^{19}–1.5×10^{20}/cm^3）と、ドープしていないSi（ノンドープSi）を用いた。

図1にノンドープSiとp型Siの過渡反射率測定の結果を示す。ポンプ光とプローブ光の干渉による反射率変化が現れ、続いてコヒーレントフォノンに由来する振動成分が観測された。さらにp型Siでは、非等方な分布を有するキャリアの減衰成分が観測された［図(b)点線］。これはp型ドーパントによってフェルミ面が価電子帯に下がり、k空間上で非対称な分布を有する重いホールのバンド構造[2]を反映してホールが生成した結果と考えられる。また、コヒーレントフォノンの振動を$\cos(\omega_0 t + \phi)$（ω_0はフォノンの振動数、ϕは初期位相）にフィットしたところ（挿入図黒実線）、p型Siでは非等方な分布を有するホールによって初期位相ϕがcosine型へシフトすることが分かった。

本研究は科研費の援助を受けて行われた。

[1] F. Cerdeira, T. A. Fjeldly, and M. Cardona, Phys. Rev. B, **8** (1973) 4734.
[2] K. Kato, A. Ishizawa, K. Oguri, K. Tateno, T. Tawara, H. Gotoh, and H. Nakano, Jpn. J. Appl. Phys. **48** (2009) 100205.

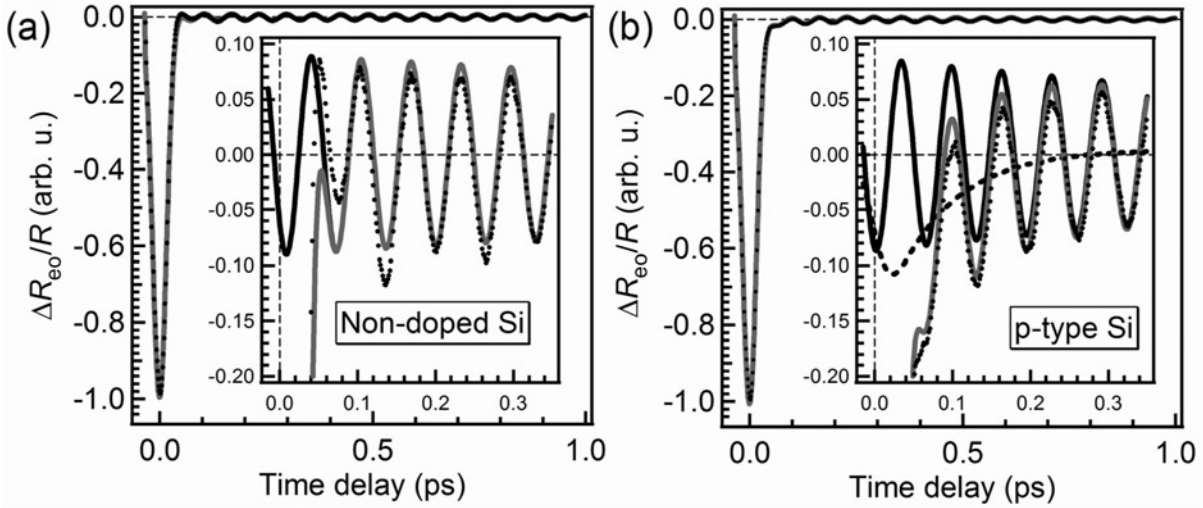


図1　(a) ノンドープSiと (b) p型Siの過渡反射率。挿入図は時間0付近の拡大図。灰色線はフィッティングの結果、黒実線はコヒーレントフォノンの成分、黒点線は非等方なキャリアの減衰成分、黒丸は実験結果を示す。

直径が制御されたフリースタンディング GaAs ナノワイヤと光学特性に現れる量子効果

Guoquiang Zhang　舘野功太　眞田治樹　後藤秀樹
量子光物性研究部

半導体ナノワイヤ(NWs)は半導体ナノ構造の1つであり、新しい電子・光デバイス実現に貢献する可能性があるため、注目を集めている。NWは、新しいナノ構造を構成する基本的な構造体となることや、特徴的な量子細線構造を実現することも期待されている。フリースタンディング型と呼ばれるNWの新しい応用を追求するため、直径が制御されたGaAs NWを作製し、その光学特性を調べ、明瞭な量子効果の観測に成功した。

NWは、有機金属気相成長装置を用いて、金を触媒とする気相−液相−固相（VLS）モードで作製した[1]。触媒として直径が制御された金粒子 (5, 10, 20, 40, 60 nm) を用いることで、GaAs NWのサイズ制御を試みた。作製したNWの透過電子顕微鏡写真を図1に示す[2]。NWの成長温度を、通常の気相成長で用いられる温度より低くすることで、格子欠陥の極めて少ないNWの作製に成功した［図1(a)-(d)］。また、図1(e)から明らかなように、NWの直径が金粒子のサイズに応じて異なっていることから、NWのサイズ制御が可能であることが分かった。図2は、このNWの光学特性を顕微フォトルミネッセンス (PL) によって調べた結果である[3]。図2(a)は単一NWのPLスペクトルで、金粒子サイズが小さくNWの直径が小さいほど発光エネルギーが大きくなっており、量子閉じ込め効果が明瞭に現れている。図2(b)は、偏光分離PLスペクトルである。PLは偏光方向と、ナノワイヤの方向に強く依存していることが分かる。この結果から、NWでは、従来の量子細線構造とは異なり、屈折率と量子閉じ込め効果の両方の異方性を持つ構造であることが示唆される。以上の結果は、GaAs NWの光学特性のサイズ効果や、量子細線構造での新規物性の解明に貢献することが期待される。

[1] G. Zhang et al., J. Appl. Phys. **103** (2008) 014301.
[2] G. Zhang et al., Appl. Phys. Lett. **95** (2009) 123104.
[3] G. Zhang et al., Jpn. J. Appl. Phys. **49** (2010) 015001.

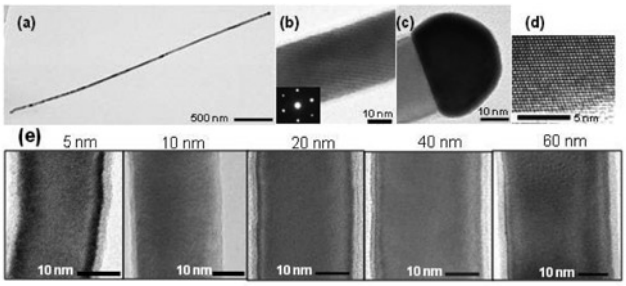


図1　GaAs NWのTEM写真。(a) 単一NW (b),(c) 単一NW中心と先端付近の高倍率像。(b)の挿入図は回折像で、Zinc-Blend構造を示している。(d) NW側面の高倍率像。(e)サイズの異なる金粒子を用いたNW。

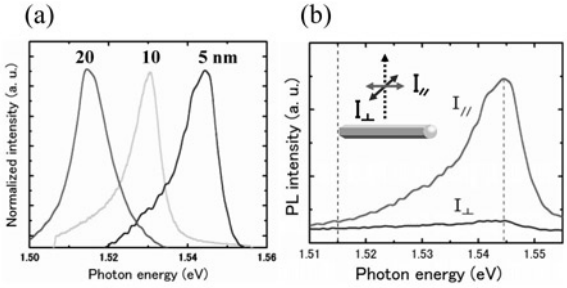


図2　(a) 3種類の金粒子を用いて成長したGaAs NWのPLスペクトル。(b) 偏光分離PLスペクトル、赤い破線は、バルクGaAsのPLエネルギー。

表面弾性波によって形成したダイナミック量子ドットの発光特性

寒川哲臣　眞田治樹　後藤秀樹
量子光物性研究部

量子井戸構造 (QW) に表面弾性波 (surface acoustic wave: SAW) を伝搬させることによって、1次元または2次元の横方向バンド構造変調を実現することが可能となる[1, 2]。本研究では、直交方向の2つのSAWが干渉することによって形成されるGaAs/AlAsダイナミック量子ドット (dynamic quantum dot: DQD) における励起子発光ダイナミックスに注目している。

GaAsなどのピエゾ物質においては、SAW伝搬に伴い、歪によるバンドギャップの変化が起きることに加えて、強いピエゾポテンシャルの変調が生じることが知られている。また、結晶構造のD_{4d}対称性のために、直交したSAWの干渉によって2種類のDQDアレーが形成されることが報告されている[3]。図1(a)は格子変位の面内成分の模式図であり、黒または灰色の○はピエゾポテンシャルの変調によって形成されたポテンシャルドットの位置を、黒または灰色の□は歪によりバンドギャップが極小・極大となる歪ドットの位置を示している。

SAW (820 MHz) と同期した励起パルス光源を用いることにより、動いているDQDからのフォトルミネッセンス (PL) の空間分布を低温 (4K) において測定した[1]。図1(b)に、6.3 nmのQW層からのPLピーク（SAWを印可しない場合のピークエネルギーは1.630 eV）よりも低エネルギー側となる1.623 eVの発光に対する空間分布の測定結果を示す。PL偏光度(ρ)は$\rho = (PL_{[1\text{-}10]} - PL_{[110]}) / (PL_{[1\text{-}10]} + PL_{[110]})$と定義し、$PL_{[1\text{-}10]}$、$PL_{[110]}$は図1(a)に示すようにそれぞれSAW伝搬方向のPL偏光成分である。図1(b)、(c)ともに四角格子状のドットアレーが現れているのが分かる。図1(b)の強いPL発光を示す位置はバンドギャップが広がった歪ドット［図1(a)における黒い□］に対応する。また、図1(c)において正（負）の偏光度を示す位置は、図1(b)のバンドギャップが広がった歪ドット間の[1–10]（[110]）方向の鞍点に位置しており、図1(a)におけるポテンシャルドットの位置（黒または灰色の○）に対応している。

[1] T. Sogawa et al., Phys. Rev. B **80** (2009) 075304.
[2] T. Sogawa et al., Appl. Phys. Lett. **91** (2007) 141917.
[3] F. Alsina et al., Solid State Commun. **129** (2004) 453.

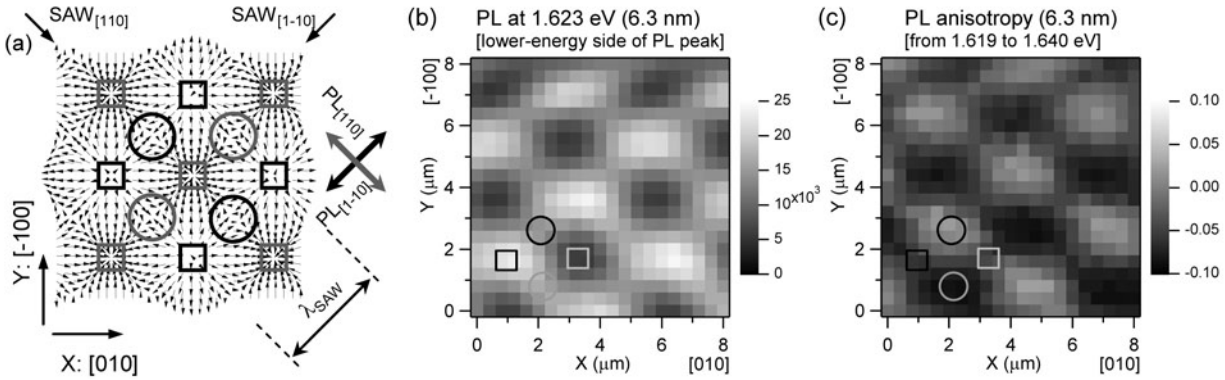


図1　(a) 格子変位の面内成分の模式図。○はポテンシャルドット、□は歪ドットを示す。 (b) PLピークよりも低エネルギー側発光に対する空間分布の測定結果。 (c)PL偏光度の空間分布測定結果。プラス符号は[1-10]方向の偏光に対応。

フォトニック結晶ナノ共振器によるサブフェムトジュール全光スイッチ

野崎謙悟　田辺孝純　新家昭彦　松尾慎治*　佐藤具就*　谷山秀昭　納富雅也
量子光物性研究部　*NTTフォトニクス研究所

フォトニック結晶 (PhC) により形成される高Q値と微小体積Vを有する光ナノ共振器は、光と物質の強い相互作用を可能にするため、様々なアクティブ機能素子の低パワー動作が期待される。例えば、光によるキャリア励起により非線形屈折率変化を起こし、別の光の経路をスイッチングするといった全光制御が可能であるが[1]、制御に必要な光エネルギーはV/Qに比例するため、PhCナノ共振器は非常に有効な母体となる。本研究では、強いキャリア非線形性を示すInGaAsPをベースとして、極めて微小なPhCナノ共振器を形成することにより、従来SiおよびGaAs系PhC共振器で実証されていた全光スイッチに比べて非常に低いエネルギーでの光制御を実現した[2]。

図1(a)、(b)は作製した素子の上面写真と光透過スペクトルである。2つの円孔をわずかにシフトさせることで形成されるH0共振器は、PhC共振器の中でも特に微小であり、理論計算されたモード体積は0.025 μm^3である。ポンプ－プローブ法により測定されたスイッチ動特性を図2に示す。プローブ光の波長をモードピークに合わせた場合、プローブ光の透過率はポンプ光と重なった瞬間に低下し（スイッチオフ動作）、一方、プローブ光波長をモードの短波長側に合わせた場合は逆に透過率は増加する（スイッチオン動作）。これはキャリア非線形により共鳴モードが短波長シフトするためである。微小モードによる局所的なキャリア生成と高速なキャリア拡散のため、最小スイッチング時間窓は20 psと短い。3 dBの消光比に必要なポンプ光エネルギーは約0.4 fJであり、これは従来の全光スイッチに比べて2桁以上低い値である。

本成果により、PhCナノ共振器は低消費電力、高速、高密度にオンチップ集積可能な光制御素子として優位であることが示され、光スイッチだけでなく、光メモリや光検出器、変調器などあらゆる光エレメントへの展開が期待される。

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] T. Tanabe et al., Appl. Phys. Lett. **87** (2005) 151112.
[2] K. Nozaki et al., Nature Photon. (in press).

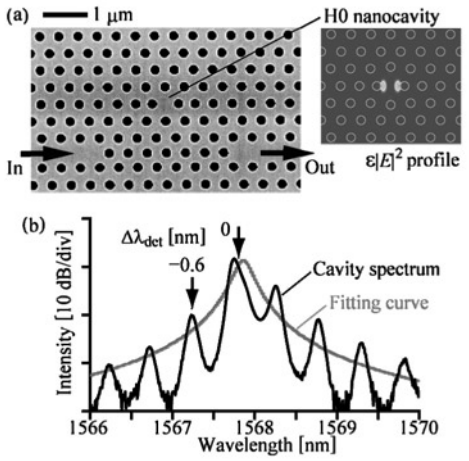


図1　(a) H0ナノ共振器のSEM写真と計算された共鳴モード分布。(b) 透過スペクトルとフィッティング曲線。

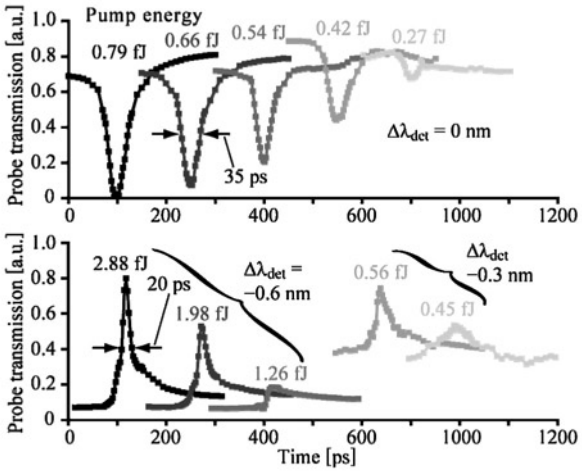


図2　スイッチ動特性。上と下のプロットはそれぞれスイッチオフ動作とスイッチオン動作。$\Delta\lambda_{det}$はプローブ光波長の共鳴モードピークからの差。

二層フォトニック結晶による巨大な光力学結合効果の実現

Young-Geun Roh　田辺孝純　新家昭彦　谷山秀昭　倉持栄一
松尾慎治＊　佐藤具就＊　納富雅也
量子光物性研究部　＊フォトニクス研究所

光と物質間の力学的相互作用は物理学において重要なテーマであり、近年フォトニック構造における光・機械共振モード間の結合が注目されている。我々は2006年に空気層を有する二層構造のフォトニック結晶にいて巨大な輻射力が生成できることを理論予測していたが[1]、本研究ではその二層構造のフォトニック結晶を世界で初めて実現し、巨大な光力学結合効果が発現することを観測した[2]。

この研究では、空気層200 nmを有する2枚のInP層（厚さ200 nm）に周期750 nm、穴径540 nmの正方格子のフォトニック結晶を電子ビーム描画、ドライ・ウエットエッチング、超臨界乾燥手法で作製した（図1）。30×20 μmの領域に作製された二層フォトニック結晶に対して垂直入射光の反射スペクトルを測定したところ、1567 nm, 1457 nm付近に二層フォトニック結晶の2つの共鳴モード（面に垂直な軸に対して、対称および反対称のパリティを持つモード）の存在が確認された。図2に対称モードの反射スペクトルの入力パワー依存性の測定結果を示す。入力パワーを増加すると、共鳴波長が大きくredshiftし、13 mWの入力パワーに対して0.9 nmのシフトが観測された。このシフトは対称共鳴モードで生じる輻射力（引力）によるスラブの変位が原因と考えられ、各スラブの1.8 nmの変位に相当する。反対称モードに関しては、逆のblueshiftが観測されていることから、このシフトが熱光学効果によるものではないことが確認された。上記の変位に対応する力は10.8 nN、振器内の単位エネルギーで発生する力は F/U = 0.4 μN/pJ と見積もられ、非常に大きい光力学結合効果が得られていることが分かった。光力学結合効果が大きいため、二層構造の機械振動モード［図3(a)］の微小なブラウン運動も観測されている［図3(b)］。

[1] M. Notomi et al., Phys. Rev. Lett. **97** (2006) 023903.
[2] Y. Roh et al., Phys, Rev. B **81**. (2010) 121101(R).

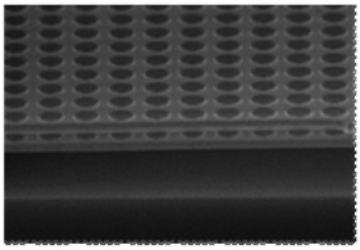


図1　作製した二層構造のフォトニック結晶のSEM写真。

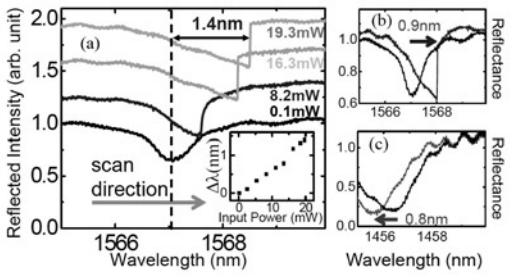


図2　(a) 対称モードの反射スペクトル。(b),(c) 各モードの同時反射測定結果 (Pin = 13 mW)。

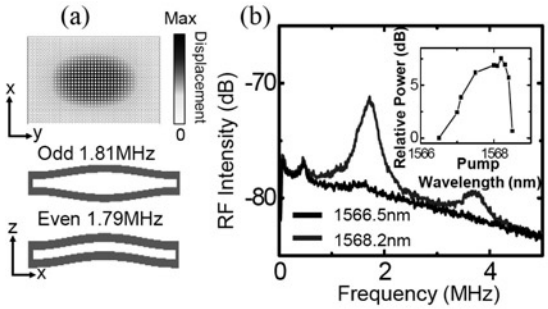


図3　(a) 二層構造の基本振動モード。(b) ブラウン運動による反射光の変調スペクトル。

二光子吸収を用いた 1.55 μm 帯全シリコンフォトニック結晶受光器

田辺孝純　角倉久史　谷山秀昭　新家昭彦　納富雅也
量子光物性研究部

シリコン(Si)は電子集積回路に広く用いられているが、潜在的に光集積回路にも適した材料である。実際に通信波長帯の光に対しては透明であるために、特性の良い導波路や光共振器がSiチップ上に作製されるようになった。しかし通信波長帯の光に対しては透明であるため、そのままでは1.55 μm帯の光受光器は作製できない。そこで、ゲルマニウムをSi上に集積する手法が盛んに研究されているが、ゲルマニウムとSiは4 %の格子不整合を有し、そのために暗電流を低減させることが簡単ではない[1]。また、Siにイオン注入して欠陥準位を生成し、それを介して光を検出する全Si検出器も研究されているが、欠陥に起因する暗電流が大きい[2]。一方、全Siで光検出器を作製できれば、極めて優れた結晶性を利用した低暗電流な検出器を作製できると期待されるが、1.55 μmの光を検出するためには二光子吸収(TPA)が必要であり、その効率は高くない。そこで、極めて強い光閉じ込めを有するフォトニック結晶(PhC)微小光共振器を用いて微小な光の検出を実現させた[3]。

図1に示すpin構造を集積したSi-PhC微小光共振器を作製した。作製した微小光共振器のQ値は4.3×10^5で透過率は24 %だった［図2(a)挿入図］。–3 Vの逆電圧を印加時の暗電流は僅か–15 pAであった。この条件で測定した光電流を図2(a)に示す。共振器の光の閉じ込めが極めて強いため、僅か10^{-8} Wの光入力で二光子吸収電流が検出された。一光子で電子が1つ生成する条件をQE=100 %とすると1.17 μWの光入力の時にQE≈10 %が得られた。透過率を考慮すると共振器中の光の約44 %が吸収されたことになる。全Si検出器においてこのように高い吸収効率が得られるのはPhCの高Q値のおかげである。

次に本検出器を用いて0.1 Gb/sの光信号の検出実験を行った［図2(b)］。共振器に共鳴する波長の光のみ電気信号として検出された。本実験結果はこの素子が、シリコンチップ集積受光器として期待できることを示している。

[1] S. Assefa, F. Xia, and Y. Vlasov, Nature **262** (2010) 80.
[2] M. Geis et al., Opt. Express **17** (2009) 5193.
[3] T. Tanabe et al., Appl. Phys. Lett. **96** (2010) 101103.

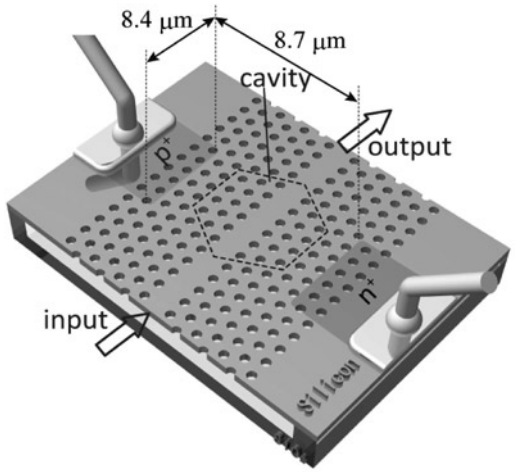


図1　作製したpin集積フォトニック結晶微小光共振器ディタクタの図。

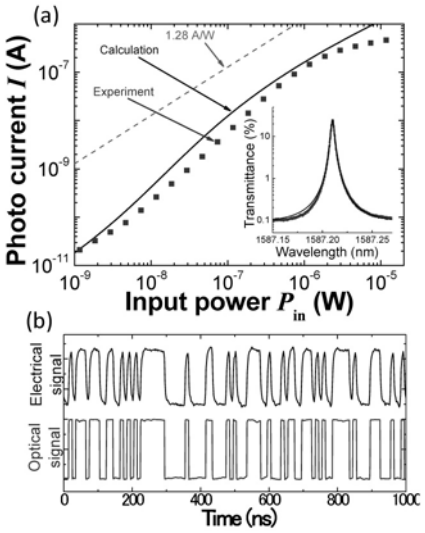


図2　(a) 入力光パワー対光電流および透過スペクトル。(b) 0.1-Gb/s受光実験。

Ⅱ. 資料

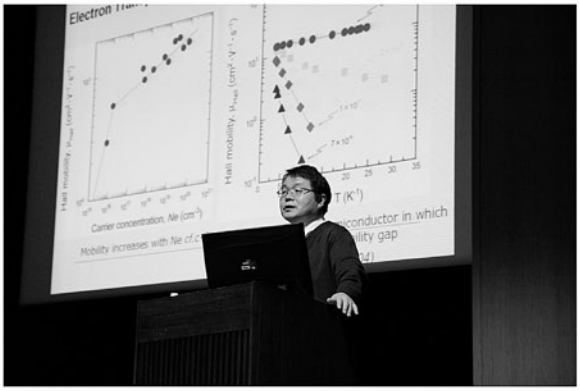
サイエンスプラザ 2009

2009年11月27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2009」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、横浜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、量子固体物性研究グループリーダの村木康二特別研究員によるシンポジウム講演会「半導体ナノ構造における電子相関～電子から本来のチームプレーを引き出す～」を行いました。午後の部では、東京工業大学教授細野秀雄先生に「材料探求の醍醐味～宝の山を目指して～」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ていました。

ポスター展示では、マイクロシステムインテグレーション研究所による6件と、フォトニクス研究所の7件を含めました、計44件の最新の研究成果について、研究の概要からそのオリジナリティやインパクト、今後の展望などを詳しく紹介しました。具体的な研究内容に関しても談論風発し、多くの貴重なご意見を頂くことが出来ました。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5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グループのなど224名の方々にご参加頂き、お陰様を持ちまして、盛況のうちに終了することが出来ました。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ます。



第5回 NTT 物性科学基礎研究所スクール

NTT物性科学基礎研究所（物性研）では、材料物性分野の若手研究者の育成と海外の若手研究者へのビジビリティ向上を目的として、2009年11月24日から11月27日まで、NTT厚木研究開発センタにて、第5回NTT物性科学基礎研究所スクール（NTT-BRLスクール）を開催しました。今回が第5回目となるNTT-BRLスクールですが、現在物性研が精力的に進めている研究と関わりの深い「最先端材料の研究開発」をテーマに、海外の著名な大学教授、国内のトップレベルの研究者を招き、9ヶ国33名の学生（主に大学院博士課程学生）が参加しました。

初日には、NTT物性科学基礎研究所所長から研究所の概要が紹介された後、Klaus Ploog教授（独、Paul-Drude研究所 前所長）による「情報記録のための最先端材料」に関する講義がありました。Ploog教授の講義は、スクール期間中の毎日行われ、エコの観点から材料科学に基づいた持続可能なエネルギーに関しても紹介されました。また、1日目の午後には、染谷隆夫教授（東京大学）による、「エレクトロニクス、ディスプレイ、LEDsに向けた有機材料」の講義も行われました。また、物性研の研究者による講義も行われました。2日目の午前に山口浩司物性部長から「化合物半導体を用いたマイクロ／ナノメカニカル素子」に関する講義が行われ、2日目午後および3日目午前には納富雅也特別研究員から「人工誘電体の展望」、4日目午前には、牧本俊樹物質部長から「III族窒化物半導体を用いた最先端デバイス」の講義が行われました。講義に続き、2日目には参加した学生や若手研究者によるポスターセッションが開催されました。参加学生が自分の大学での研究内容について発表し、学生、講師の先生方、NTTの研究者との間で活発な議論がなされました。2日目と3日目は物性研の紹介を行いました。まず、研究設備や装置を見学してもらうためラボツアーを実施し、研究部長から各研究部の研究内容と最近の成果概要を紹介しました。最終日には、同時に開催していたサイエンスプラザに参加し、各研究者から個別の研究を紹介しました。スクール最後のFarewell Partyでは、ポスターセッションで優れた発表を行った学生に贈られるベストポスター賞の発表などで大いに盛り上がるとともに、学生たちはお互いに連絡先を交換するなど親睦を深めました。私たちは、今後も、このような交流の場を提供し、物理・応用物理学分野の研究交流、人材育成への積極的な取り組みを継続していきます。

社外表彰受賞者一覧

International symposium on purinergic signalling in new strategy of drug discovery (Fukuoka Purine 2009)	篠崎　陽一	Localization of P2X4 receptors in lipid raft-like structure of in vitro model of cell membrane	2009.7.25
応用物理学会講演奨励賞	角柳　孝輔	ジョセフソン分岐増幅 (JBA) 回路を用いた磁束量子ビットの高可視性測定	2009.9.8
日本表面科学会	物性科学基礎研究所	表彰状	2009.10.28
3rd International Symposium on Nanomedicine The Best Poster Award	篠崎　陽一	Direct Visualization of Single Receptor Dynamics: the Relationship between Molecular Scturcture and Physiology/Pathology	2009.11.5
MNC 2008 Outstanding paper Award	K. Tamaru K. Nonaka M. Nagase H. Yamaguchi S. Warisawa S. Ishihara	Direct actuation of GaAs membrane using microprobe of SPM	2009.11.16
MNC 2008 Young Authors Award	K. Tamaru	Direct actuation of GaAs membrane using microprobe of SPM	2009.11.16
日本電子材料技術協会 優秀賞	若原　弘行	発光・電気伝導の同時測定によるカーボンナノチューブからの励起子・自由キャリア電界発光観測	2009.11.20
独立行政法人日本学術振興会 半導体界面制御技術第１５４委員会	物性科学基礎研究所	感謝状	2009.11.20
フラーレン・ナノチューブ学会 飯島賞	高木　大輔	ダイヤモンドナノ粒子を用いたカーボンナノチューブ合成	2010.3.3

社内表彰受賞者一覧

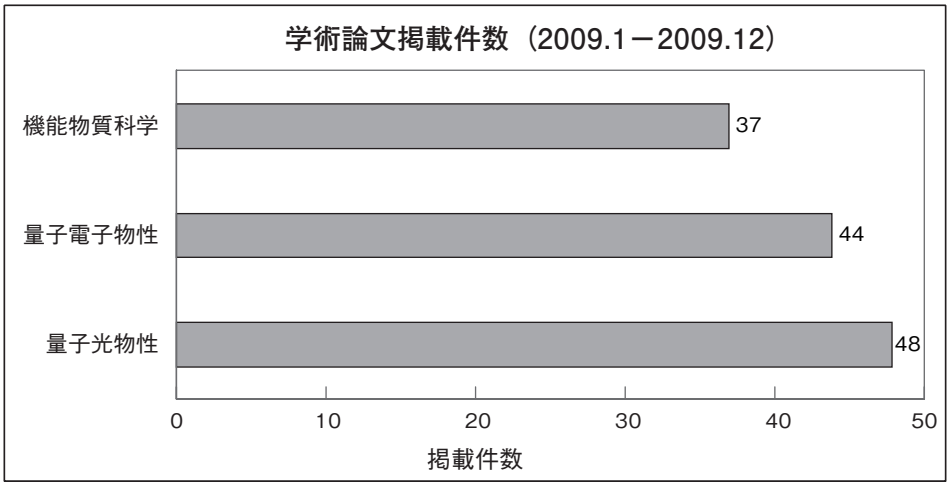
先端技術総合研究所 所長表彰 研究開発賞	Mahboob Imran 岡本　創 小野満　恒二 山口　浩司	半導体メカニカル共振器による新機能素子の実現	2009.12.9
先端技術総合研究所 所長表彰 功労賞	山口　真澄 鈴木　恭一 小野　行徳	液体ヘリウムの新しい管理システム導入による回収率の大幅な改善と固定費の削減	2009.12.9
物性科学基礎研究所 所長表彰 業績賞	藤澤　利正 新海　剛 林稔　晶 太田　剛	2 量子ビット構造を用いた新機能素子の開拓	2010.3.26
物性科学基礎研究所 所長表彰 業績賞	篠崎　陽一 河西　奈保子 住友　弘二 鳥光　慶一	原子間力顕微鏡による受容体タンパク質の構造解析に関する研究	2010.3.26
物性科学基礎研究所 所長表彰 業績賞	高木　大輔 小林　慶裕	新規カーボンナノチューブ成長触媒材料の開拓	2010.3.26
物性科学基礎研究所 所長表彰 論文賞	田辺　孝純 納富　雅也 谷山　秀昭 倉持　栄一	"Dynamic Release of Trapped Light from an Ultrahigh-Q Nanocavity via Adiabatic Frequency Tuning", Phys. Rev. Lett. **102** (2009) 043907.	2010.3.26
物性科学基礎研究所 所長表彰 論文賞	日比野　浩樹 影島　博之 永瀬　雅夫 小林　慶裕 山口　浩司	"Microscopic thickness determination of thin graphite films formed on SiC from quantized oscillation in reflectivity of low-energy electrons", Phys. Rev. B **77** (2008) 075413.	2010.3.26
物性科学基礎研究所 所長表彰 論文賞	玉木　潔	"Unconditional security of the Bennett 1992 quantum-key-distribution scheme with a strong reference pulse", Phys. Rev. A **80** (2009) 032302.	2010.3.26
物性科学基礎研究所 所長表彰 奨励賞	岡本　創	光による微小機械共振器の振動制御	2010.3.26

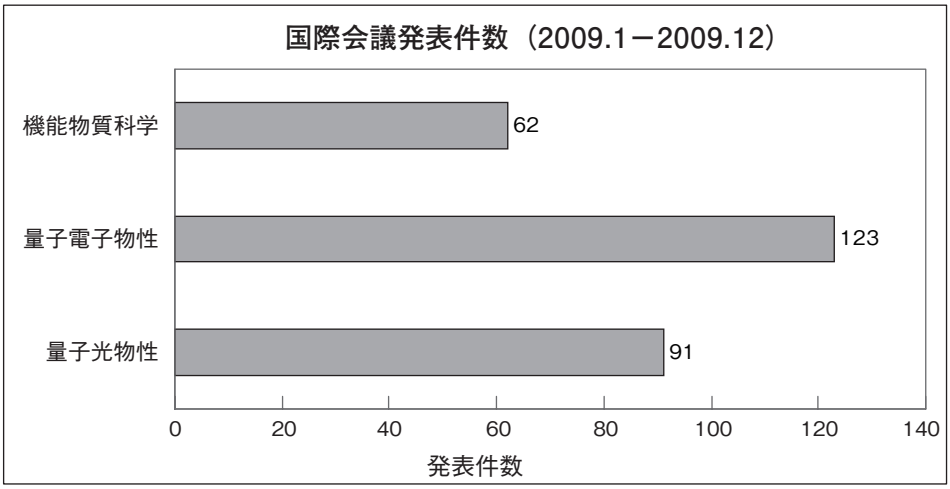
報 道 一 覧

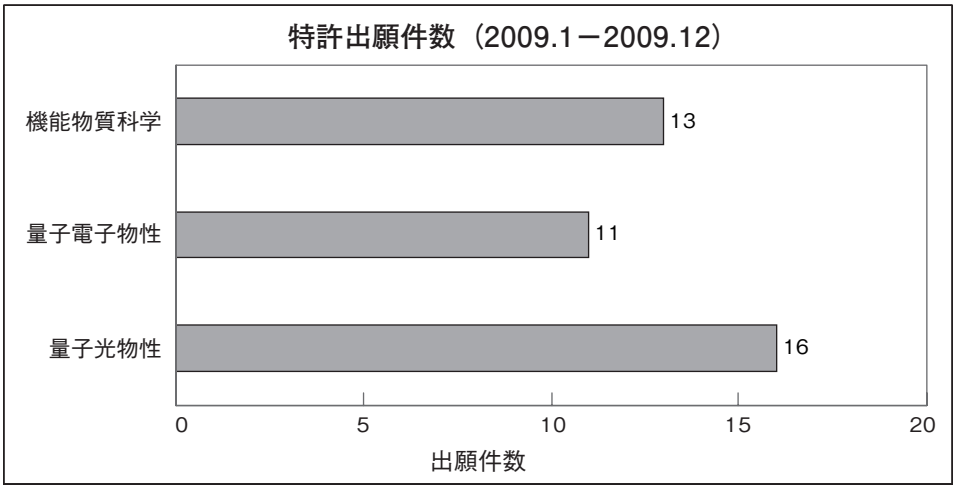
発表月日	発表媒体	見出し
4 月 14 日	日経産業新聞	蘭ナノテク産学連携トップに聞く　10 年で 130 億円投資 日本企業と交流強化
5 月 14 日	日刊工業新聞	ナノレベル観察新技術　ATP の変化解明
5 月 25 日	日経産業新聞	受容体の動き、連続観察　原子間力顕微鏡を使用
5 月 26 日	日刊工業新聞	ナノテクの主役交代へ　CNT からグラフェンに 半導体向け研究活発化
7 月 12 日	日本経済新聞	宇宙旅行、エレベーターで　ロケットを代替要素技術にメド
7 月 23 日	日経産業新聞	ダイヤで「究極の半導体」 実用化へ“原石”磨く NTT 次世代の通信支える
7 月 23 日	日経産業新聞	新たな主役　普及目前　大容量通信、半導体素材に脚光
7 月 28 日	日刊工業新聞	電荷量子ビット集積　多機能演算素子を開発 NTT と東工大
7 月 28 日	日経産業新聞	1 素子で演算 2 種　量子コンピューター向け　NTT 東工大
8 月　7 日	日本経済新聞	量子暗号通信　初の実証実験　三菱電機や NEC
9 月　7 日	日本経済新聞	高機能の炭素素材「グラフェン　実用化へ研究加速」 富士通電機や NTT など　環境・新エネで期待
9 月 19 日	日本経済新聞	量子暗号、数年で実用化へ　NTT、世界最速を実現
10 月　6 日	日経産業新聞	カーボンナノチューブ　ダイヤからにょきにょき
12 月　7 日	日刊工業新聞	グラフェントランジスタ　次世代素子実用化競う LSI・太陽電池を高性能化　性能シリコンの 100 倍
1 月　4 日	日経産業新聞	速度損なわず情報伝送　NTT 研　光ルータへ一歩

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（2009 年）

2009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129件、国際会議の発表件数は276件です。また出願特許数は40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	(IF2008*)	件数
Applied Physics Letters	3.726	11
Physical Review B	3.322	11
Applied Physics Express	-	9
Japanese Journal of Applied Physics	1.309	9
Optics Express	3.88	9
Physical Review Letters	7.18	8
Physical Review A	2.908	7
International Journal of Modern Physics B	0.558	5
Nanotechnology	3.446	4
Journal of the American Chemical Society	8.091	1
The Journal of Physical Chemistry B	4.189	1
Nature Physics	16.821	1
PLoS Biology	12.683	1
Reports on Progress in Physics	12.09	1
Small	6.525	1

*IF2008：インパクトファクター 2008（出展、Journal Citation Reports, 2008）
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3.58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
International Symposium on. Nanoscale Transport and Technology 2009	42
The 18th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems	24
2009 International Conference on Solid State Devices and Materials	17
29th Conference on Lasers and Electro Optics and the 27th International Quantum Electronics Conference	9
The 12th International Superconductive Electronics Conference	7
International Symposium on Advanced Nanodevices and Nanotechnology	6
14th Narrow Gap Semiconductor and Systems	6
14th International Conference on Modulated Semiconductor Structures	6
22nd International Microprocesses and Nanotechnology Conference	6
Materials Research Society Meeting	5
The European Conference on Lasers and Electro-Optics and the XIth European Quantum Electronics Conference	4
2009 American Physical Society March Meeting	4
Neuroscience 2009	4
13th International Conference on Silicon Carbide and Related Materials	4
Silicon Nanoelectronics Workshop	4
International Symposium on Nanomedicine	4
17th International Colloquium on Scanning Probe Microscopy	4
Asia-Pacific Workshop on Fundamental and Application of Advanced Semiconductor Devices	3
8th International Conference on Nitride Semiconductor	3
The 22nd Annual Meeting of the IEEE Photonics Society	3
International Union of Physiological Science 2009	3
SPIE Photonics West 2009	3
International Symposium on Nanoscience and Quantum Physics 2009	3
The 9th International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity	3
Emergent Phenomena in Quantum Hall Systems 3	3
The 9th European Conference on Applied Superconductivity	3
The 36th International Symposium on Compound Semiconductors	3

国際会議招待講演一覧 (2009)

I. 機能物質科学関連

(1) H. Omi, H. Kageshima, S. Uematsu, T. Kawamura, Y. Kobayashi, S. Fujikawa, Y. Tsusaka, Y. Kagoshima, and J. Matsui, "Stability-instability transition of reaction fronts in thermal silicon oxidation", Symposium on Surface and Nano Science 2009, Shizukuishi, Japan (Jan. 2009).

(2) Y. Taniyasu and M. Kasu, "Recent progress in AlN deep-UV light-emitting diodes: physics and device structure", SPIE Photonics West, San Jose, U.S.A. (Jan. 2009).

(3) M. Kasu, "Nitride semiconductors and diamond", Ambient GCOE Research Exchange Seminar, "Wide Gap Semiconductor; the presence and its future" Waseda Univ, Japan. (Mar. 2009).

(4) M. Kasu, K. Ueda, Y. Taniyasu, and K. Michal, "Progress of diamond semiconductor technologies: doping and heterostructures", 3rd Industrial Diamond Conference, Paris, France (Apr. 2009).

(5) H. Omi, T. Kawamura, and Y. Kobayashi, "Advanced SOI interface characterization using grazing incidence X-ray diffraction", 215th The Electrochemical Society Meeting, San Francisco, U.S.A. (May 2009).

(6) D. Takagi, Y. Kobayashi, and Y. Homma, "Single-walled carbon nanotube growth from nanosized diamond particles by chemical vapor deposition", New Diamond and Nano Carbons Conference 2009, Traverse City, Michigan, U.S.A. (June 2009)

(7) S. Suzuki and Y. Kobayashi, "Defect engineering in single-walled carbon nanotubes", 25th International Conference on Defects in Semiconductors, St.Petersburg, Russia (July 2009).

(8) K. Torimitsu, "Effect of Mg2+ on rat neural activity in vitro", 12th International Magnesium Symposium, Lasi, Romania (Sep. 2009).

(9) H. Hibino, H. Kageshima, and M. Nagase, "Structure and electronic properties of epitaxial graphene grown on SiC studied by surface electron microscopy", 22nd International Microprocesses and Nanotechnology Conference, Sapporo, Japan (Nov. 2009).

(10) K. Furukawa, "Supported lipid bilayer formation at interface", International Symposium on Nanomedicine, Okazaki, Japan (Nov. 2009).

(11) M. Kasu, "Ultimate widegap semiconductors: diamond and aluminum nitride", Joint NTUU "KPI" and NTT seminar, Kiev, Ukraine (Nov. 2009).

(12) K. Torimitsu, "Understanding receptor protein structure and functions for biomimetic device", 3rd International Symposium on Nanomedicine, Okazaki, Japan (Nov. 2009).

(13) H. Hibino, H. Kageshima, and M. Nagase, "Microscopic evaluations of structure and electronic properties of epitaxial graphene", 7th International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices, Hawaii, U.S.A. (Dec. 2009).

II. 量子電子物性関連

(1) K. Muraki, "Spin-dependent phase diagram in bilayer 2D electron systems", APS March Meeting 2010, Oregon, U.S.A. (Mar. 2009).

(2) M. Nagase, H. Hibino, H. Kageshima, and H. Yamaguchi, "Novel microscopies for graphene on SiC", 2009 RCIQE (Research Center for Integrated Quantum Electronics) International Seminar, Sapporo, Japan (Mar. 2009).

(3) H. Yamaguchi, "Micro/Nanomechanical systems based on compound semiconductor heterostructures", Frontiers in Nanoscale Science and Technology 2009 (FNST 2009), Boston, U.S.A (May 2009).

(4) K. Muraki, "New lights on the ground-state phase diagrams of bilayer electron systems", Emergent Phenomena in Quantum Hall Systems 3 (EPQHS-3), Capannori (Lucca), Italy (Jun. 2009).

(5) M. Nagase, H. Hibino, H. Kageshima, and H. Yamaguchi, "Metrology of microscopic properties of graphene on SiC", 2009 Asia-Pacific Workshop on Fundamentals and Applications of Advanced Semiconductor Devices, Busan, Korea (Jun. 2009).

(6) H. Yamaguchi,"Heterostructure-based micro/nanomechanical systems", The 18th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS), Kobe, Japan (Jul. 2009).

(7) K. Semba, J. Johansson, K. Kakuyanagi, H. Nakano, S. Saito, H. Tanaka, and H. Takayanagi, "Quantum state control, entanglement, and readout of the Josephson persistent current qubit", Solid State Based Quantum Information Processing 2009 (QIP 2009), München, Germany, (Jul. 2009).

(8) H. Yamaguchi, "Compound semiconductor micro/nanomechanical systems", 8th Topical Workshop on Heterostructure Microelectronics (TWHM2009), Nagano, Japan (Aug. 2009).

(9) A. Fujiwara, K. Nishiguchi, and Y. Ono, "Single-electron devices based on silicon nanowire MOSFETs", 10th Trends in Nanotechnology International Conference (TNT 2009), Barcelona, Spain, (Sep. 2009).

(10) A. Fujiwara, K. Nishiguchi, and Y. Ono, "Silicon nanowire MOSFETs and their application to single-electron device", International Conference on Nanoscience and Technology, China 2009 (ChinaNANO 2009), Beijing, China (Sep. 2009).

(11) Y. Ono, M. Khalafalla, S. Horiguchi, K. Nishiguchi, and A. Fujiwara, "Identification of single boron acceptors in nanowire MOSFETs", 2009 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2009), Sendai, Japan (Oct. 2009).

(12) I. Mahboob and H. Yamaguchi, "Electromechanical systems for memory and logic devices", 2009 International Conference on. Solid State Devices and Materials (SSDM 2009). Sendai, Japan, (Oct. 2009).

(13) H. Kageshima, H. Hibino, and M. Nagase, "Epitaxial graphene growth using LEEM and first-principles", 13th International Conference on Silicon Carbide and Related Materials (ICSCRM 2009), Nürnberg, Germany, (Oct. 2009).

(14) K. Semba, "Control of entanglement and quantum superposition of superconducting persistent current qubit few photon system", 22nd International Symposium on Superconductivity 2009 (ISS 2009), Tsukuba, Japan, (Nov. 2009).

(15) K. Semba, "Superconducting qubit as an entanglement generator", Quantum Technologies: Information and Communication (QTIC 2009), Tokyo, Japan (Dec. 2009).

(16) M. Nagase, H. Hibino, H. Kageshima, and H. Yamaguchi, "Microscopic characterization of few-layer graphene on SiC", International Symposium on Advanced Nanodevices and Nanotechnology (ISANN 2009), Hawaii, U.S.A. (Dec. 2009).

(17) M. Nagase, H. Hibino, H. Kageshima, and H. Yamaguchi, "Microscopic characterization of few-layer graphene on SiC using an integrated nanogap probe", 17th International Colloquium on Scanning Probe Microscopy (ICSPM 17), Izu, Japan (Dec. 2009).

III. 量子光物性関連

(1) M. Notomi, "Manipulating light by ultrahigh-Q nanocavities", Nanomata 2009, Tirol, Austria (Jan. 2009).

(2) T. Tanabe, A. Shinya, E. Kuramochi, H. Taniyama, and M. Notomi, "All-optical switches and bistable devices using high-Q photonic crystal nanocavities", SPIE Photonics West 2009, San Jose, U.S.A. (Jan. 2009).

(3) M. Notomi, "Evolution of modulated mode-gap cavities", SPIE Photonics West 2009, San Jose, U.S.A. (Jan. 2009).

(4) K. Tateno, Q. Zhang, and H. Nakano, "Heterostructures in GaP-based free-atanding nanowires on Si substrates", SPIE Photonics West 2009, San Jose, U.S.A. (Jan. 2009).

(5) H. Nakano, A. Ishizawa, and K. Oguri, "Dependence of harmonics generation properties on carrier-envelope phase of few-cycle laser field", COAST/CORAL Symposium on Ultrafast Intense Laser Science, Karuizawa, Japan (Mar. 2009).

(6) H. Takesue, "Telecom-band entanglement swapping using high-speed singlephoton detectors based on sinusoidally-gated InGaAs/InP avalanche photodiodes", SPIE Defence, Security + Sensing 2009, Advanced Photon Counting Techniques III, Orland, U.S.A. (Apr. 2009).

(7) M. Notomi, "Strong light confinement with and without periodicity", The 8th International Photonic and Electromagnetic Crystal Structures Meeting (PECS-VIII), Sydney, Australia (Apr. 2009).

(8) H. Takesue, K. Harada, H. Fukuda, T. Tsuchizawa, T. Watanabe, K. Yamada, Y. Tokura, and S. Itabashi, "Silicon photonics in quantum communications", The Conference on Lasers and Electro-Optics and The Quantum Electronics and Laser Science Conference (CLEO/QELS), Baltimore, U.S.A. (May 2009).

(9) M. Notomi, "Adiabatic frequency tuning of ultrahigh-Q nanocavities", The 8th International Symposium on Electrical Transport and Optical Properties of Inhomogeneous Media, Crete, Greek (Jun. 2009).

(10) T. Honjo, A. Uchida, K. Amano, K. Hirano, H. Someya, H. Okumura, K. Yoshimura, P. Davis, and Y. Tokura, "Differential-phase-shift quantum key distribution experiment using fast physical random bit generator with chaotic semiconductor lasers", 18th International Laser Physica Workshop, Barcelona, Spain (Jul. 2009).

(11) T. Tanabe, M. Notomi, H. Taniyama, and E. Kuramochi, "Recent progress of dynamically tuned photonic crystal nanocavities", 18th International Laser Physics Workshop, Barcelona, Spain (Jul. 2009).

(12) M. Yamashita, M. W. Jack, K. Inaba, K. Igeta, and Y. Tokura, "Gutzwiller study of Bose-Fermi mixtures trapped in three-dimensional optical lattices", 18th International Laser Physics Workshop, Barcelona, Spain (Jul. 2009).

(13) M. Notomi, E. Kuramochi, and T. Tanabe, "Manipulating slow light by ultrahigh-Q nanocavites and their coupled arrays", OSA Topical Meeting on Slow and Fast Light 2009, Honolulu, U.S.A. (Jul. 2009).

(14) K. Tawara, S. Hughes, and H. Kamata, "Cavity mode emission in weakly coupled quantum-dot-cavity system:Photon statistics and mode attraction", Photons and Spins in Nanostructures, Sapporo, Japan (Jul. 2009).

(15) M. Yamashita, A. Yamamoto, and N. Kawakami, "DMRG study of ultracold fermionic atoms in optical lattices", Workshop on Matrix Product State Formulation and Density Matrix Renormalization Group Simulations, Kobe, Japan (Aug. 2009).

(16) H. Taniyama, E. Kuramochi, and T. Tanabe, Y-G. Roh, M. Notomi, "High-Q air-slot photonic crystal cavities", 9th International Conference on Numerical Simulation of Optoelectronic Devices, Gwangju, Korea (Sep. 2009).

(17) A. Shinya, S. Matsuo, K. Nozaki, T. Tanabe, E. Kuramochi, T. Satou, T. Kakitsuka, and M. Notomi, "All-optical memories based on photonic crystal nanocavities", Photonics in Switching 2009, Pisa, Italy (Sep. 2009).

(18) M. Notomi, E. Kuramochi, T. Tanabe, and H. Taniyama, "Manipulating slow light by ultrahigh-Q nanocavites and their coupled arrays", Frontiers in Optics 2009, San Jose, U.S.A. (Oct. 2009).

(19) H. Nakano, K. Oguri, Y. Okano, and T. Nishikawa, "Dynamics of femtosecond-laser-ablated liquid-alminium nanoparticles probed by means of spatiotemporally resolved X-ray-absorpion fine-structure spectroxcopy", 10th International Conference on Laser Ablation, Singapore, Singapore (Nov. 2009).

(20) H. Takesue, "Quantum communication experiments using telecom-band entangled photons", International Conference on Quantum Information and Technology (ICQIT), Tokyo, Japan (Dec. 2009).

(21) H. Nakano, K. Oguri, and A. Ishizawa, "High-order harmonics of carrier-envelope phase controlled few-cycle laser pulse for time-resolved spectroscopy", 5th Asian Symposium on Intense Laser Science, Hanoi, Vietnam (Dec. 2009).

(22) M. Notomi, "Manipulation of light by photonic crystals", International Conference on Quantum Information and Technologies, Tokyo, Japan (Dec. 2009).

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/