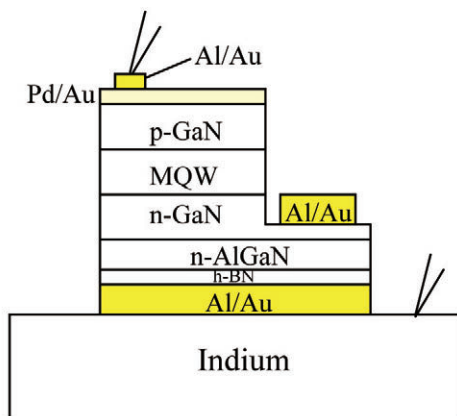


# NTT物性科学基礎研究所の研究活動

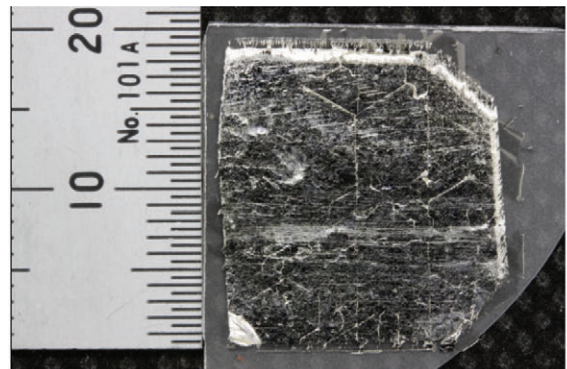
平成23(2011)年度  
Volume 22

2012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/>



転写された縦型発光ダイオード構造



転写されたAlGaN/GaNヘテロ構造写真

表紙の写真：

転写された縦型発光ダイオードからの電流注入青色発光写真

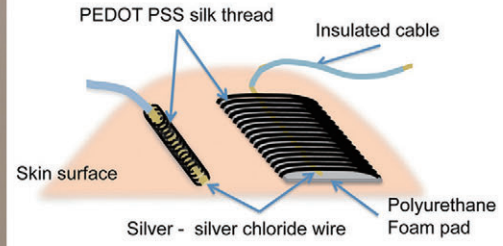
私たちは、六方晶窒化ホウ素が、窒化ガリウム系デバイス構造を他の基板に機械的に転写することができるリリース層を形成することができることを実証した。表紙の写真は、転写された縦型LEDからの電流注入青色発光を示す写真である。LED構造は、機械的に基板からリリースされ、電極をつけて、その後インジウムシート上に転写される。また、我々は、2センチメートルの正方形のAlGaN/GaNヘテロ構造を、サファイア基板から機械的にリリースし、他の基板に転写することに成功した。(14 ページ)



PEDOT-PSSシルク(右)と  
未コートシルク(左)



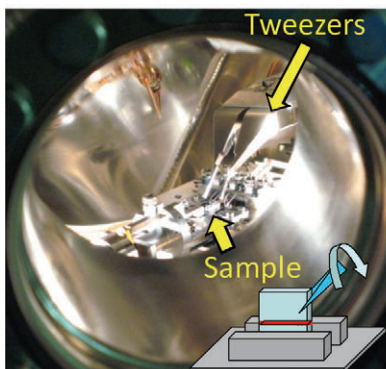
実体顕微鏡像



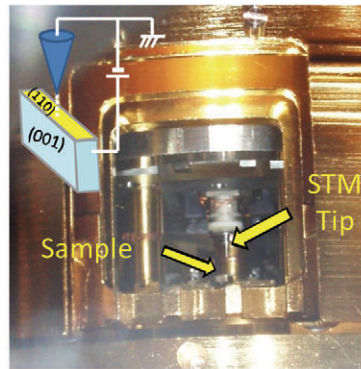
皮膚表面装着型の生体電極の構成

## 導電性高分子とシルク繊維の複合素材による 長期安定記録が可能な生体電極

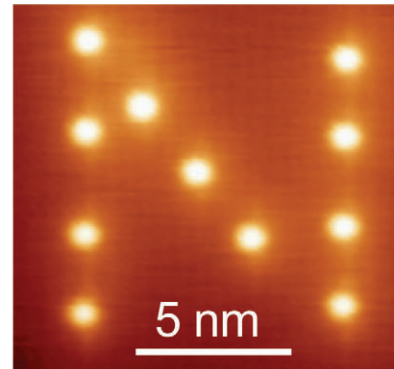
長期安定接続が可能なバイointerフェース（生体電極）を導電性高分子とシルク繊維の複合素材により実現した。導電性、親水性、生体親和性、耐水強度を有する本素材は、生体組織への直接接続による信号の送受信を可能にする。ナノバイオ研究をはじめ、ICTや健康・医療分野への応用が期待される。(23ページ)



超高真空中のへき開



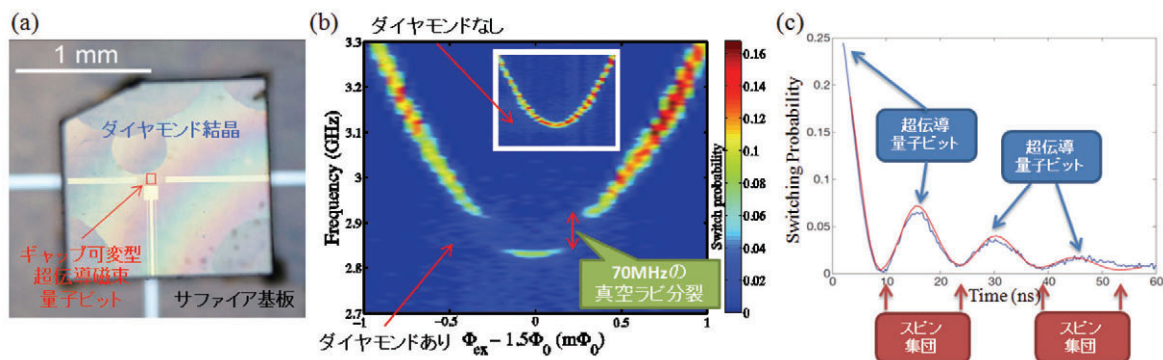
走査トンネル顕微鏡



In原子11個で書いた「N」

## InAs(110) 表面上の In 原子操作

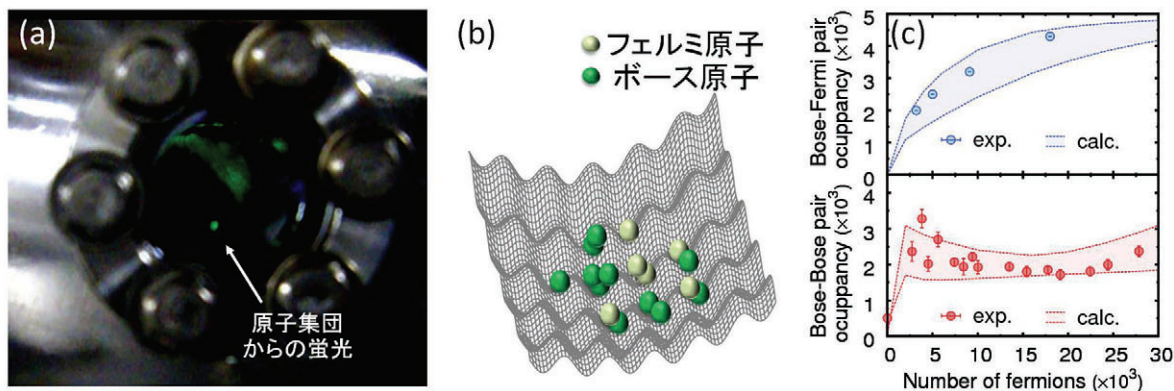
超高真空中のへき開により得られたInAs(110)表面において、走査トンネル顕微鏡を用い、Inの原子操作（置く・拾う・ずらす）に成功した。将来的には、原子スケールのデバイス作製が期待される。(30ページ)



(a) 超伝導・ダイヤモンド複合量子系。(b) 超伝導磁束量子ビットのマイクロ波を用いた分光測定。(c) 超伝導量子ビットとスピン集団間のコヒーレント振動 (真空ラビ振動)。

## ギャップ可変型超伝導磁束量子ビットとダイヤモンド中の電子スピン集団とのコヒーレント結合

制御性の良い超伝導量子ビットと、長いコヒーレンス時間が期待されるダイヤモンド結晶中の電子スピン集団との複合化が注目を集めている。本研究では、ギャップ可変型の超伝導磁束量子ビットとダイヤモンド結晶中のNVスピン集団とのコヒーレントな結合を実現した。さらに、両者間でエネルギー量子1個を繰り返し交換するコヒーレント振動の観測に成功した。この振動は、量子ビットとNVスピン集団間のメモリ動作の可能性を示すもので、長寿命量子メモリと結合した超伝導量子ビットの実現へ向けた第一歩である。(33ページ)



(a) 真空容器中の冷却原子気体。(b) 光格子中のボース-フェルミ混合気体の模式図。光格子はレーザーの干渉で作られる周期ポテンシャルである。(c) ペア占有測定に対する実験と理論の比較。理論解析は、実験パラメータ(温度)の見積りの誤差を考慮し、幅を持たせてある。

## 光格子中のボース・フェルミ混合原子気体が示す新奇量子相の探究

我々は京都大学と共同で、レーザー光を用いて作成した光格子と呼ばれる人工の結晶構造の中に、量子縮退領域まで冷却したボース原子とフェルミ原子の混合気体を閉じ込める事で、新奇な量子状態を観測する事に世界で初めて成功した。我々は、この系を取り扱う有効な解析手法を開発し、京都大学で行われた実験を定量的に再現した。更に、実験では直接測定の難しい物理量を理論的に解析し、どのような量子状態が実現しているかを特定することで、新奇量子相の出現を示すことができた。(35ページ)

## ごあいさつ



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

NTT 物性科学基礎研究所では、10~20 年後を見据え、速度・容量・サイズ・エネルギーなどの点で、従来のネットワーク技術の壁を越えるような新原理・新概念を創出することを目指して基礎研究を行っています。そして、この新原理・新概念を創出する過程で見出した有望技術を新しい産業の種とすることにより、中長期的な NTT 事業への貢献を行っています。これらのミッションを達成するため、物理、化学、生物、数学、電気電子、情報、医学などを専門とする幅広い分野の研究

者が、機能物質科学、量子電子物性、量子光物性に関する研究分野で研究を進めています。

研究を進める上では、NTT グループ内での研究協力はもちろんのこと、日本、米国、欧州、アジアの大学や研究機関と幅広く共同研究を行うことにより、『世界に開かれた研究所』としての役割を果たしています。そして、量子情報処理や原子操作に関する国際会議を他の研究機関と共催することにより、積極的な情報発信を行うとともに、世界中からの参加者と NTT 研究者との交流の場としても成果を上げております。なお、2011 年度は、残念ながら、毎年恒例の『サイエンスプラザ』を開催することができませんでしたが、今年度は再び開催する予定でありますので、皆様のご来場をお待ちしております。

以上のような活動を通じまして、NTT 事業のみならず、学術的な貢献も果たしてゆく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。

2012 年 7 月

牧本 俊樹

NTT 物性科学基礎研究所  
所長 牧本 俊樹



# 目 次

ページ

◆ 表紙	
◆ 転写された縦型発光ダイオードからの電流注入青色発光写真	
◆ カラー口絵 .....	I
◆ 導電性高分子とシルク繊維の複合素材による長期安定記録が可能な生体電極	
◆ InAs(110) 表面上の In 原子操作	
◆ ギャップ可変型超伝導磁束量子ビットとダイヤモンド中の電子スピン集団とのコヒーレント結合	
◆ 光格子中のボース・フェルミ混合原子気体が示す新奇量子相の探究	
◆ ごあいさつ .....	III
◆ NTT 物性科学基礎研究所 組織図 .....	1
◆ NTT 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
◆ GaN 系デバイスの機械的転写のためのリリース層としての層状窒化ホウ素	
◆ AlN/GaN 短周期超格子からの深紫外発光	
◆ 無限層構造超伝導体 (Sr,La)CuO <sub>2</sub> 高品質薄膜の MBE 成長	
◆ Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> パッシベーションによる水素終端ダイヤモンド FET の安定動作	
◆ グラフェンとナノフィンネットワークの MBE 成長	
◆ 通信波長帯発光材料エルビウムシリケートの作製とその発光特性	
◆ 単層エピタキシャルグラフェンの特異な抵抗の温度依存性	
◆ マイクロホール・アレイを用いた膜タンパク質の機能計測	
◆ 神経活動を励起するための刺激用多機能光ファイバ	
◆ 導電性高分子とシルク繊維の複合素材による長期安定記録が可能な生体電極	
◇ 量子電子物性研究部の研究紹介 .....	24
◆ 単一電子を利用した確率共鳴	
◆ シリコン単電子転送デバイスにおける転送精度の絶対評価	
◆ 結合機械共振器の反対称振動を用いた新しい電荷検出手法	
◆ 微小機械振動子の遠隔励振	
◆ $\nu = 5/2$ 分数量子ホール効果のスピン状態を解明	

- ◆ ALD 絶縁膜を用いた InAs/AlGaSb ヘテロ構造のゲート制御
- ◆ InAs(110) 表面上の In 原子操作
- ◆ GaAs 横型二重量子ドットにおける核スピン偏極に起因したヒステリシス伝導
- ◆ 超伝導磁束量子ビットを介した共振器と量子二準位系との結合
- ◆ ギャップ可変型超伝導磁束量子ビットとダイヤモンド中の電子スピン集団とのコヒーレント結合
- ◆ ラップゲート構造を有する  $\text{In}_{0.75}\text{Ga}_{0.25}\text{As}$  量子ポイントコンタクト

◇ 量子光物性研究部の研究紹介 .....	35
◆ 光格子中のボース・フェルミ混合原子気体が示す新奇量子相の探究	
◆ シリコンフォトニック結晶スローライト導波路における光非線形性増強	
◆ 連続発振半導体レーザからの GHz 繰返しフェムト秒光パルス発生	
◆ 表面弾性波による電子スピンの輸送と操作	
◆ グラフェンエッジのラマン分光で見える結合性・反結合性分子軌道	
◆ ナノプローブ・リソグラフィによる超高 Q 共振器の形成	
◆ 光ナノ共振器による超低消費パワー光 RAM 集積チップ	

## II. 資料

◇ 表彰受賞者一覧 (2011 年度) .....	43
◇ 報道一覧 (2011 年度) .....	45
◇ 学術論文掲載件数、国際会議発表件数および出願特許数 (2011 年) .....	47
◇ 国際会議招待講演一覧 (2011 年) .....	49



# NTT 物性科学基礎研究所 組織図

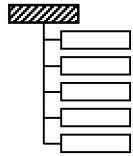
2012年3月31日付



# NTT 物性科学基礎研究所 所員一覽

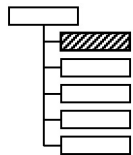
2012 年 3 月 31 日付  
(\* は年度途中までの在籍者)

## 物性科学基礎研究所



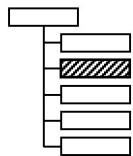
所長 **牧本 俊樹**

## ナノバイオ研究統括



主席研究員 **鳥光慶一**

## 企画担当

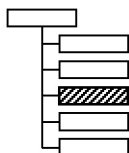


企画担当主席研究員 **寒川哲臣**

総括担当主任研究員 **武居弘樹**

研推担当主任研究員 **新家昭彦**

## 機能物質科学研究部



部長 **牧本俊樹**

補佐 河西奈保子

### 薄膜材料研究G

グループリーダー

#### 山本秀樹

嘉数 誠 *	小林康之	佐藤寿志
赤坂哲也	熊倉一英	谷保芳孝
Krockenberger, Yoshiharu		平間一行

### 低次元構造研究G

グループリーダー

#### 日比野浩樹

前田文彦	古川一暁	尾身博雄
鈴木 哲	神崎賢一	田邊真一
高村 真琴	村田祐也	

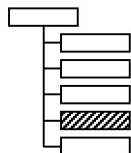
### 分子生体機能研究G

グループリーダー

#### 住友弘二

島田明佳	中島 寛	樫村吉晃
後藤東一郎	田中あや	塚田信吾

## 量子電子物性研究部



部長 **山口浩司**

補佐 山口 徹  
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  
山端元音

西口克彦  
Lansbergen, Gabriel

### ナノ加工研究G

グループリーダー

**山口浩司**

山崎謙治  
畑中大樹

小野満恒二  
Mahboob, Imran

岡本 創  
林 順三

### 量子固体物性研究G

グループリーダー

**村木康二**

蟹沢 聖  
林 稔晶  
日達研一  
佐久 規\*

佐々木 智  
太田 剛  
高瀬恵子

鈴木恭一  
熊田倫雄  
小林 嵩

### 超伝導量子物理研究G

グループリーダー

**仙場浩一**

中ノ勇人  
田中弘隆  
Zhu, Xiaobo

齊藤志郎  
角柳孝輔

狩元慎一  
松崎雄一郎

### スピントロニクス研究G

グループリーダー

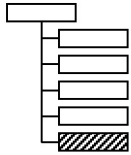
**赤崎達志**

原田裕一  
関根佳明

田村浩之  
入江 宏

山口真澄

## 量子光物性研究部



部長 **都倉康弘**

補佐 俵 毅彦

### 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

稲葉謙介

今井弘光

久保敏弘

井桁和浩

柴田浩行

玉木 潔

東 浩司

Munro, William John

丹治はるか

熊谷雅美

向井哲哉

橋本大祐

松田信幸

### 量子光デバイス研究G

グループリーダー

**寒川哲臣**

西川 正

小栗克弥

Zhang, Guoquiang

佐々木健一

後藤秀樹

石澤 淳

加藤景子

館野功太

眞田治樹

日達研一

### 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**

横尾 篤

角倉久史

小野真証

Birowosuto, Danang

倉持栄一

野崎謙悟

Kim, Jimyung

Xu, Hao

谷山秀昭

滝口雅人

## 上席特別研究員



### 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、NTT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NTT物性科学基礎研究所。平成13年より特別研究員、平成22年より上席特別研究員。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。量子細線、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。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。平成22年度文部科学大臣表彰科学技術賞(研究部門)受賞。平成22年より文部科学省国立大学法人評価委員。東京工業大学理学部物理学科連携客員教授を兼任。日本応用物理学会、APS、IEEE、OSA会員。



### 山口 浩司

昭和59年大阪大学理学部物理学科卒業。昭和61年同大学院理学研究科物理学専攻博士前期課程修了。同年日本電信電話(株)に入社。以来、電子線回折、走査型トンネル顕微鏡などの手法により、化合物半導体の表面物性を実験的に解明する研究に従事。約10年前より半導体ヘテロ接合構造を用いた微小機械素子の研究に取り組んでいる。平成5年工学博士。平成7~8年英国ロンドン大学インペリアルカレッジ客員研究員。平成15年独国 Paul Drude 研究所客員研究員。平成18年より東北大学理学部客員教授。平成20・21年度応用物理学会理事・常務理事。2011年国際マイクロプロセス・ナノテクノロジー国際会議組織委員長や2012年分子線エピタキシ国際会議論文委員長をはじめ、40以上の学会・国際会議委員を務める。平成元年度、平成16年度、平成22年度応用物理学会論文賞、MNC2008 Outstanding Paper Award、SSDM2011 Paper Award、2011年英国 Institute of Physics (IOP) Fellow、平成23年度井上學術賞受賞。現在、量子電子物性研究部長・ナノ加工研究グループリーダー兼務。応用物理学会、日本物理学会、IOP、IEEE会員。

## 特別研究員



### 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。平成22~23年応用物理学会理事。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ー。平成13~14年ドイツマックスプランク研究所(シュトゥットガルト)客員研究員。日本物理学会、応用物理学会会員。



### 谷保 芳孝

平成8年千葉大学工学部電気電子工学科卒業。平成13年同大学院自然科学研究科多様性科学専攻博士課程修了。同年、日本電信電話(株)NTT物性科学基礎研究所、リサーチアソシエイト。平成15年、同社入社、同所勤務。現在、同所機能物質材料研究部薄膜材料研究グループ主任研究員。ワイドバンドギャップ窒化物半導体、特に窒化アルミニウム(AIN)の結晶成長、物性、デバイス応用に関する研究に従事。平成23~24年スイス連邦工科大学ローザンヌ校(EPFL)客員研究員。平成13年に応用物理学会講演奨励賞、平成19年に14th Semiconducting and Insulating Materials Conference (SIMC-XIV) Young Scientist Award、平成23年に文部科学大臣表彰若手科学者賞、38th International Symposium on Compound Semiconductors (ISCS2011) Young Scientist Awardを受賞。応用物理学会会員。



**熊田 倫雄**

平成10年東北大学理学部物理学科卒業。平成15年同大学院理学研究科物理学専攻博士課程修了。同年日本電信電話(株)に入社、物性科学基礎研究所勤務。入社以来、半導体ヘテロ構造における量子電子物性の研究に従事。平成20年日本物理学会若手奨励賞受賞。日本物理学会会員。



**西口 克彦**

平成10年東京工業大学工学部電子物理工学科卒業。平成14年同大学大学院理工学研究科電子物理工学専攻博士課程終了。同年日本電信電話(株)に入社、物性科学基礎研究所勤務。現在、同所量子電子物性研究部ナノデバイス研究グループ主任研究員。入社以来、低消費電力化・新機能化を目指したナノ構造のシリコン・デバイスの研究に従事。平成20年9月フランス National Center for Scientific Research (CNRS) 客員研究員。平成12年に応用物理学会講演奨励賞、同年 International Conference on Physics of Semiconductors 2000, IUAP Young Author Best Paper Award、同年 Materials Research Society 2000 Fall Meeting, Graduate Student Award Silverを受賞。応用物理学会会員。



## アドバイザーボード (2011 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. Theodor W. Hänsch	Max-Planck-Institut für Quantenoptik, Germany
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

## 招聘教授／客員研究員（2011 年度）

氏名	所属	期間
Dr. Lars Tiemann	科学技術振興機構 (JST)	Apr. 2009 – Mar. 2012
田邊 孝純	慶應義塾大学	Jul. 2010 – Mar. 2012
楠戸 健一郎	国立情報学研究所 (NII)	Apr. 2011 – Mar. 2012
Dr. Mao-Chuang Yeh	University of Illinois at Urbana-Champaign, U.S.A.	May 2011 – Jun. 2011
Dr. Stefan Fölsch	Paul-Drud-Institute, Germany	Oct. 2011 – Nov. 2011
Dr. Trevor David Rhone	科学技術振興機構 (JST)	Feb. 2012 – Jan. 2013

## 海外研修生（2011 年度）

氏名	所属	期間
Roberto Lo Nardo	Palermo University, Italy	Jan. 2011 – Aug. 2011
Diego Sabbagh	University of Studies "Roma Tre", Italy	Jan. 2011 – Aug. 2011
Yibo Fu	University of Toulouse, France	Feb. 2011 – Sep. 2011
Yasir Makhdoom	University of British Columbia, Canada	May 2011 – Aug. 2011
Mohamed Oudah	University of Ottawa, Canada	May 2011 – Aug. 2011
Rahul S. Deshpande	Indian Institute of Technology Guwahati, India	Jun. 2011 – Jul. 2011
Gregory Webber	University of Victoria, Canada	Jul. 2011 – Dec. 2011
Hanna Le Jeannic	ESPCI ParisTech (École supérieure de physique et de chimie industrielles de la ville de Paris), France	Jul. 2011 – Dec. 2011
Melanie Marcel	ESPCI ParisTech (École supérieure de physique et de chimie industrielles de la ville de Paris), France	Jul. 2011 – Dec. 2011
Amaury Badon	ESPCI ParisTech (École supérieure de physique et de chimie industrielles de la ville de Paris), France	Jul. 2011 – Dec. 2011
Henri J. Suominen	The University of Edinburgh, Switzerland	Aug. 2011–
Vincent Nier	ESPCI ParisTech (École supérieure de physique et de chimie industrielles de la ville de Paris), France	Aug. 2011– Dec. 2011
Adrien Gourgout	ESPCI ParisTech (École supérieure de physique et de chimie industrielles de la ville de Paris), France	Sep. 2011 – Dec. 2011
Benjamin Pingault	ESPCI ParisTech (École supérieure de physique et de chimie industrielles de la ville de Paris), France	Sep. 2011 – Jan. 2012
Andy Berry	University of Victoria, Canada	Sep. 2011 –
Michael Firka	University of Victoria, Canada	Sep. 2011 –
Jingjing Huang	California Institute of Technology, U.S.A.	Sep. 2011 – Dec. 2011
Elan Grossman	Georgia Institute of Technology, U.S.A.	Jan. 2012 –
Bennett Eleazer	Georgia Institute of Technology, U.S.A.	Jan. 2012 –
Yong Fan Jiang	The University of British Columbia, Canada	Jan. 2012 –
Gediminas Dauderis	Vilnius University, Lithuania	Jan. 2012 –
Maria Anagosti	University of Gent, Belgium	Jan. 2012 –
Roger Molto Pallares	Chemical Institute of Sarria (IQS), Spain	Jan. 2012 –
Sanna Maria Rauhamäki	University of Jyväskylä, Finland	Jan. 2012 –
Alex Yang	The University of British Columbia, Canada	Jan. 2012 –
Shibin Thomas	Mahatma Gandhi University, India	Mar. 2012

## 国内実習生（2011年度）

氏名	所属	期間
渡邊 敬之	東北大学大学院	H23.04.01 ~ H24.03.30
相原 章吾	慶応義塾大学大学院	H23.04.01 ~ H24.03.31
鎌田 大	東京工業大学大学院	H23.04.01 ~ H24.03.31
代 俊	東京大学大学院	H23.04.01 ~ H24.03.31
榎本 尚之	東京大学大学院	H23.04.01 ~ H24.03.31
岡崎 雄馬	東北大学大学院	H23.04.01 ~ H24.03.31
国橋 要司	東北大学大学院	H23.04.01 ~ H24.03.31
大杉 廉人	東北大学大学院	H23.04.01 ~ H24.03.31
馬場 達也	東京理科大学大学院	H23.04.01 ~ H24.03.31
松本 俊一	東京理科大学大学院	H23.05.03 ~ H24.03.31
鈴木 元	東京理科大学大学院	H23.05.09 ~ H24.03.31
Mohammed Fauzi	東北大学大学院	H23.06.01 ~ H23.06.30
角井 貴信	横浜国立大学	H23.06.01 ~ H24.03.31
岩本 篤	徳島大大学院	H23.08.08 ~ H23.09.06
浅岡 類	東北大学大学院	H23.09.26 ~ H23.10.24
井上 仁人	九州大学大学院	H23.09.26 ~ H23.12.22
萩原 敦	電気通信大学大学院	H23.09.03 ~ H23.09.24
田中 貴之	北海道大学大学院	H23.09.03 ~ H23.09.30
野口 悠太	長岡技術科学大学	H23.10.11 ~ H24.02.17
宗高 大和	長岡技術科学大学	H23.10.11 ~ H24.02.28
作間 啓太	名古屋大学大学院	H23.10.19 ~ H23.12.28
大前 洸斗	長岡技術科学大学大学院	H23.10.03 ~ H23.12.22
安倍 嘉之	豊橋技術科学大学	H24.01.10 ~ H24.02.24

# 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、物質部では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、銅酸化物高温超伝導薄膜などの高性能薄膜材料から、受容体タンパク質などの生体分子にまで至っています。そして、独自の物質創製技術や制御技術、精密測定技術を基に、工学、理学、医学などを専門とした研究員が最先端の研究を行っています。

この1年では、BNを用いたGaN素子の転写法(メートル法)、エピタキシャルグラフェンの特異な抵抗特性、導電性高分子を用いた生体電極などの研究成果が得られました。

### 量子電子物性研究部

山口浩司

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

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

### 量子光物性研究部

都倉康弘

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

量光部のグループでは、ナノ構造における半導体光物性研究をベースにして、極微弱な光の量子状態制御、高強度極短パルス光による新物性探索、二次元フォト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、結合共振器光導波路における高効率な光非線形性の解明や、レーザで作った光格子中の原子気体の量子力学的挙動に関する理論的説明に成功しました。また、超音波による半導体中での電子スピンの輸送と回転操作の実現や、フォトニック結晶共振器を用いた4ビット集積型光RAMの極低パワー動作の実証など、様々な進展が見られました。

# GaN 系デバイスの機械的転写のためのリリース層としての層状窒化ホウ素

小林康之 熊倉一英 赤坂哲也 牧本俊樹  
機能物質科学研究部

窒化物半導体は、様々なデバイス応用を有する材料であり、幅広く研究されている。窒化物半導体における一つの実用的な目標は、十分な品質の窒化物半導体を直接成長することが困難な、大面積、フレキシブル、また低価格な基板上に、窒化物半導体デバイスを実現することである。いくつかの方法が、窒化物半導体デバイスを一つの基板から他の基板へ転写するために研究されているが、既存の方法は幾つかの重大なデメリットを有している。今回我々は、六方晶窒化ホウ素 (h-BN) が GaN 系デバイス構造を別の基板に機械的に転写可能なリリース層を形成できることを実証した [1]。

図1の写眞は、他のサファイア基板に接着している接合シート（この場合はインジウムシート）上の、約2 cm 平方の大きさの転写された AlGaIn/GaN ヘテロ構造である。AlGaIn が透明であるため、インジウムシートの表面が見えている。転写面積の大きさは、接合シートの大きさにより制御することができる。インジウムシートからはみ出した部分が明瞭に観察でき、AlGaIn/GaN ヘテロ構造が元のサファイア基板から機械的にリリースされたことを示している。クラックがない領域は、最大約1 cm 平方の大きさで観測され、h-BN を用いた機械的なリリースプロセスが最小のクラック形成で行えることを示している。次に、室温における転写された多重量子井戸 (MQW) 発光ダイオード (LED) からの電流注入発光について述べる。比較のために、同じ MQW LED 構造をサファイア基板上の典型的な低温 AlN バッファ層上に成長し、従来の MQW LED をリフトオフなしで作製した。転写された LED は明瞭な整流特性を示した。転写された MQW LED からの電流注入発光強度は、同じ電流において、低温 AlN バッファ層上の従来の LED からの電流注入強度と同程度か高い強度を示した。従来の LED と転写された LED の電流注入発光強度が同程度であるということは、転写された後も MQW が転写前の元の品質を保持していることを示している。我々はさらに縦型 LED を転写することに成功した。この縦型 LED は室温で青色発光を示した (図2)。

我々が報告した本手法は、様々な窒化物半導体デバイスを大面積、フレキシブル、または低価格な基板上に転写することへの道を切り開くものである。

[1] Y. Kobayashi, K. Kumakura, T. Akasaka, and T. Makimoto, *Nature* **484** (2012) 223.

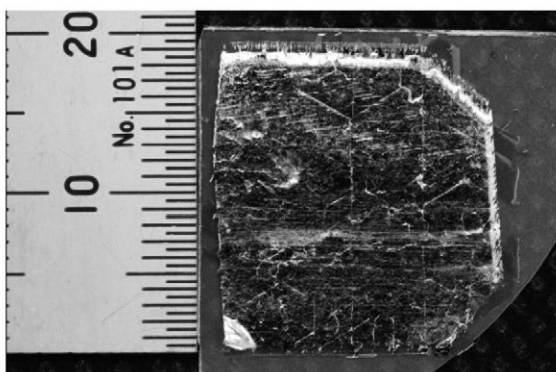


図1 別のサファイア基板へ転写された AlGaIn/GaN ヘテロ構造の写眞。

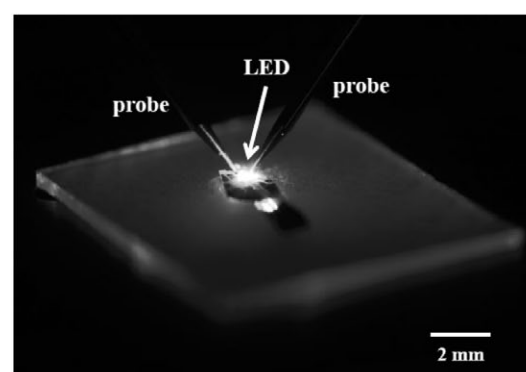


図2 転写された縦型 LED からの電流注入青色発光の写眞。

# AlN/GaN 短周期超格子からの深紫外発光

谷保芳孝 嘉数誠  
機能物質科学研究部

AlGaInは直接遷移型半導体であり、組成を変えることで発光波長を深紫外域の210 nm (AlN)から近紫外域の365 nm (GaN)まで任意に制御できるため、紫外発光ダイオード(LED)用材料として期待されている。現在のところ、深紫外LEDの発光効率は、近紫外LEDよりも低い。この原因のひとつに、AlGaInの価電子帯構造に由来する本質的な問題がある[1]。GaNの価電子帯の最上端には重い正孔帯が位置する。伝導帯と重い正孔帯間の光学遷移は、電場ベクトルEがc軸と垂直な場合に許容となるため(E $\perp$ c偏光)、GaNではC面からの発光が強い。一方、AlNの価電子帯の最上端には結晶場分裂正孔帯が位置する。伝導帯と結晶場分裂正孔帯間の光学遷移は、電場ベクトルEがc軸と平行な場合に許容となるため(E $\parallel$ c偏光)、AlNではC面からの発光は弱い。LEDは良好な結晶が得られるC面成長するため、高Al組成AlGaInを用いる深紫外LEDでは光取り出し面となるC面からの発光が弱く、発光効率が低いことがその問題である。この問題の解決へ向け、AlGaInとは異なり、AlN/GaN短周期超格子がC面から強い深紫外発光することを示す[2]。

AlN/GaN短周期超格子の透過電子顕微鏡(TEM)像を図1に示す。GaN井戸層の膜厚は0.48 nm (1.8分子層)、AlNバリア層の膜厚は1.82 nm (7.1分子層)である。GaNとAlNの界面は急峻であり、分子層オーダーで膜厚が精密に制御された超格子構造が成長していることがわかる。このようなAlN/GaN短周期超格子の発光特性をフォトルミネッセンス(PL)で評価した。GaN井戸層の膜厚を2.5分子層から0.9分子層まで薄くすると、量子サイズ効果により発光波長は275.8 nmから236.9 nmまで短波長化した。AlN/GaN短周期超格子とAlGaInの偏光特性を比較するため、PLの角度依存測定を行った(図2)。AlGaInではE $\parallel$ c偏光のためc軸方向への発光は弱い。一方、AlN/GaN短周期超格子ではc軸方向の発光が強い。この理由は、正孔の量子準位がGaNの重い正孔帯により形成されるため、電子と正孔の量子準位間の発光はGaNと同様にE $\perp$ c偏光しているからである。これら偏光特性の違いにより、AlN/GaN短周期超格子はAlGaInよりも4倍強い深紫外発光を示した。そこで、AlN/GaN短周期超格子を発光層とする深紫外LEDを作製したところ、実際のデバイス構造においてもC面から強い深紫外発光が得られた。

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

[2] Y. Taniyasu and M. Kasu, Appl. Phys. Lett. **99** (2011) 251112.

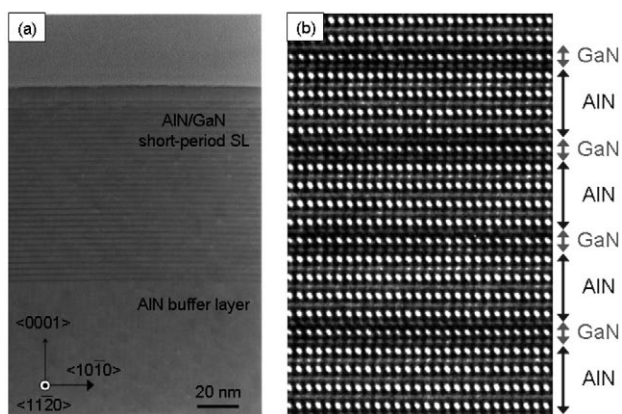


図1 (a) AlN/GaN短周期超格子の断面TEM像と  
(b) その高倍率像。

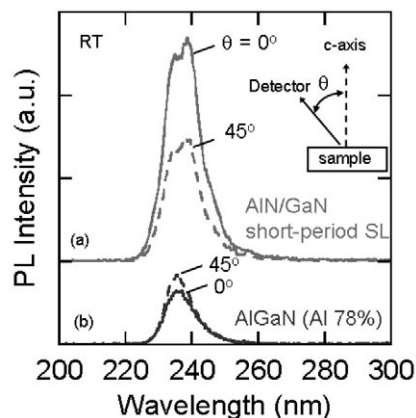


図2 (a) AlN/GaN短周期超格子と  
(b) AlGaInのPL角度依存性。



# 無限層構造超伝導体 (Sr,La)CuO<sub>2</sub> 高品質薄膜の MBE 成長

クロッケンバーガー賢治 作間啓太 山本秀樹  
機能物質科学研究部

無限層構造超伝導体 (Sr, La)CuO<sub>2</sub> は、Sr/La 層と CuO<sub>2</sub> 面のみからなる、構造が最も単純な銅酸化物超伝導体であり[1]、高温超伝導機構の研究上極めて重要な物質である。しかしながら、そのバルク試料の作製には一般に高压合成を要し、純良試料・単結晶の作製が困難である。薄膜合成であれば無限層構造自体は比較的容易に安定化できるが、良好な超伝導特性を示す試料の作製は、やはり難しい。NTTではMBE法により、金属的な抵抗率( $\rho$ ) - 温度( $T$ )特性を示し、 $T_c$ が40 Kを越す試料の作製に成功していたものの[2]、厳密なカチオン組成制御に加え酸素副格子の完全性が要求されるため、このような高品質薄膜を再現性良く作製することは、MBE法を用いた場合でも容易ではなかった。

今回、MBE法における成膜パラメータ(基板温度、蒸着組成、酸化雰囲気)のさらなる最適化を行って無限層構造薄膜を作製し、その構造や物性を調べた[3]。図1は、DyScO<sub>3</sub>(110)基板上に成長した(Sr,La)CuO<sub>2</sub>薄膜のX線逆格子マッピングである。無限層構造薄膜が、基板とコヒーレントに成長していることがわかる。薄膜の厚みが有限であることに由来するLaue Fringe (白矢印)が明瞭に観測されていることから、薄膜が膜厚全体にわたってコヒーレントに結晶性良く成長していることもわかる。これを裏付けるように、高分解能の透過電子顕微鏡観察でも、1000 nm<sup>2</sup>以上の領域にわたり、結晶性の乱れは見られなかった。図2に、この薄膜の磁気抵抗の温度依存性を示す。ゼロ磁場中で $T_c = 41$  Kで超伝導転移を示している。超伝導転移は、無限層構造の薄膜では初となるマイスナー効果の観測によっても確認された。薄膜は残留抵抗比RRR > 4と非常に良い金属性を示し、残留抵抗も約10  $\mu\Omega\text{cm}$ と非常に小さいため、Fermi面の形状についての情報を与えるShubnikov-de Haas効果等の実験が、無限層構造物質に対しても可能になると期待される。

- [1] M. G. Smith et al., Nature **351** (1991) 549.
- [2] S. Karimoto et al., Appl. Phys. Lett. **79** (2001) 2767.
- [3] Y. Krockenberger et al. Appl. Phys. Exp. **5** (2012) 043101.

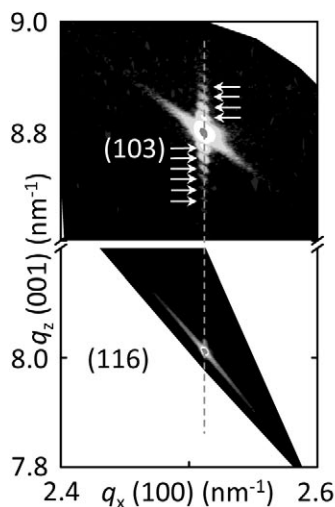


図1 DyScO<sub>3</sub>(110)基板上に成長したSr<sub>0.9</sub>La<sub>0.1</sub>CuO<sub>2</sub>薄膜の逆格子マッピング。

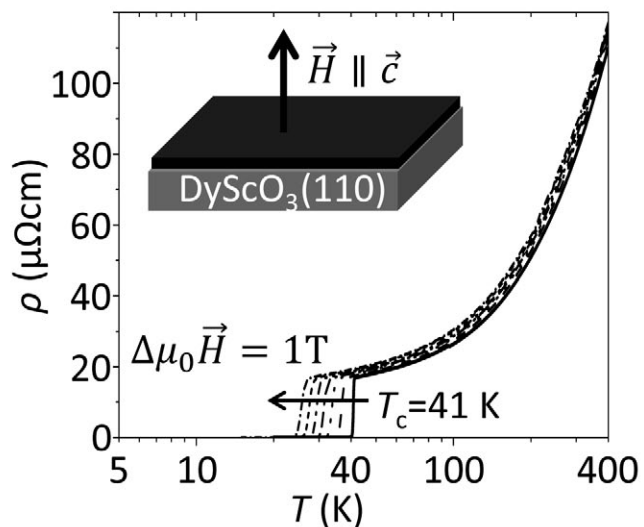


図2 種々の磁場下で測定されたSr<sub>0.9</sub>La<sub>0.1</sub>CuO<sub>2</sub>薄膜の電気抵抗率の温度依存性。磁場は、CuO<sub>2</sub>面に垂直に印加された。

# Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> パッシベーションによる水素終端ダイヤモンド FET の安定動作

平間一行<sup>1</sup> 佐藤寿志<sup>1</sup> 原田裕一<sup>2</sup> 嘉数誠<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>機能物質科学研究部 <sup>2</sup>量子電子物性研究部 <sup>3</sup>佐賀大学

ダイヤモンドは高い絶縁破壊電界やキャリア速度を兼ね備えた半導体であることから、高周波高出力電力デバイスへの応用が期待されている。我々はこれまでに水素終端ダイヤモンド表面近傍に形成する正孔蓄積層をチャンネルに利用したダイヤモンドFETを作製し、マイクロ波帯域における高い出力電力動作を報告している[1]。しかし高温環境では、正孔蓄積層を形成するために不可欠な二酸化窒素(NO<sub>2</sub>)等の吸着分子が脱離し、ドレイン電流が減少する問題があった。そこで我々は、水素終端ダイヤモンド表面に高濃度のNO<sub>2</sub>分子を吸着させて正孔を誘起後、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜でパッシベーションすることで、水素終端表面と吸着分子の熱的安定化を行った。Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜の形成には原子層堆積法(ALD法)を用いた。

図1(a)(b)は真空中で測定した正孔密度と移動度の温度依存性である。複数回測定を行った結果、再現性の良い正孔密度と移動度の温度依存性が得られている。正孔密度は-170℃から230℃の広い温度範囲でほぼ一定であり、約 $4 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ の高い値を示した[図1(a)]。一方、移動度は高温域で絶対温度のマイナス1乗に比例することがわかった[図1(b)]。これは水素終端表面の正孔が金属的に縮退していることを示していると思われる[2]。このように真空高温環境下で正孔密度が変化せず、信頼性の高い伝導性評価が可能になったことから、次にAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub> パッシベーションをダイヤモンドFETに適用した。

図2は、真空中200℃加熱中およびその前後の室温における、パッシベーションしたダイヤモンドFETのドレイン電流・電圧(I<sub>DS</sub>-V<sub>DS</sub>)特性である。200℃加熱前の最大ドレイン電流(I<sub>DSmax</sub>)は-200 mA/mmである。200℃加熱で最大ドレイン電流は-180 mA/mmに減少するが、室温まで温度を下げると加熱前の-200 mA/mmに回復した。閾値電圧は測定温度に依存せず、室温と200℃で+1Vであった。これはゲート電極近傍の正孔密度が変化していないことを示している。そのためI<sub>DS</sub>の温度依存性は移動度の温度依存性に対応する。このようにI<sub>DS</sub>-V<sub>DS</sub>特性は200℃加熱前後で変化がなく、初めて真空200℃のヒートサイクルで劣化のないダイヤモンドFETが実現した。

[1] M. Kasu et al., Electronics Lett. **41** (2005) 1249.

[2] M. Kasu, H. Sato, and K. Hirama, Appl. Phys. Express **5** (2012) 025701.

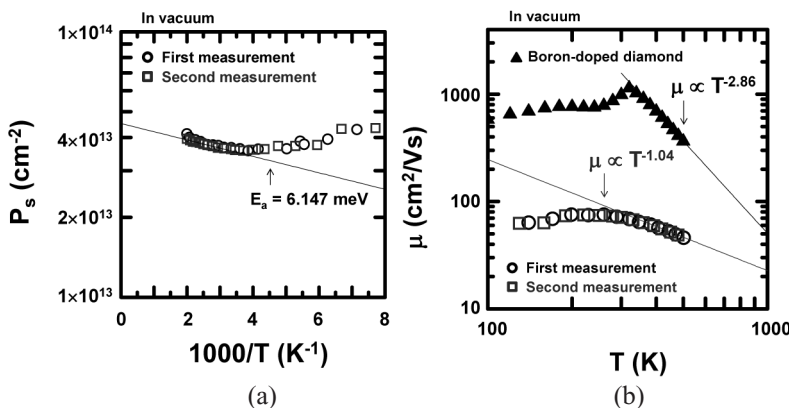


図1 ホール効果測定で評価した(a)正孔密度と(b)移動度の温度依存性。

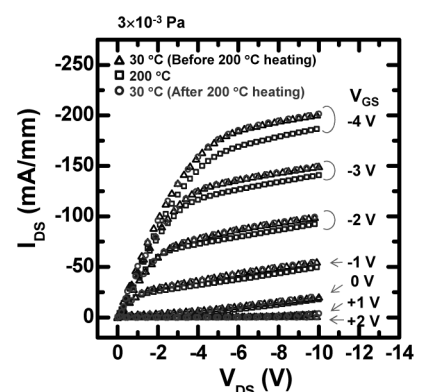


図2 真空中で測定したダイヤモンドFETのI<sub>DS</sub>-V<sub>DS</sub>特性。

# グラフェンとナノフィンネットワークの MBE 成長

前田文彦 日比野浩樹  
機能物質科学研究部

次世代エレクトロニクス材料として注目されているグラフェンにおいては、大規模集積化に向けた課題であるウエハスケールのグラフェン形成法の確立を目指して精力的に研究が進められている。そのため、我々はエタノールを解離した分子線を用いるガスソース分子線エピタキシャル成長(MBE)法によるグラフェン成長法を提案して[1]研究を進めている。そして、今回本成長法でグラフェンを成長した際に、ネットワーク状の構造物が生成することを見出し、この構造物の詳細について解析した[2]。

今回のMBE法によるグラフェンの成長では、Ar雰囲気中でSiC基板を高温に加熱して得られた1~2層のグラフェンを下地として、2000℃に加熱したWフィラメントによって解離したエタノールガスを成長材料として供給した。図1(a)に基板温度915℃で成長した後の原子間力顕微鏡(AFM)像を示す。この像より、基板表面にネットワーク状の構造が形成されていることが判る。さらに断面透過電子線顕微鏡観察(図2)により、このネットワークが基板から立ち上がった高さ5 nm程度のフィン状の1~2層のグラフェン(グラフェンナノフィン)で構成されていることが判明した。このような形状は異なるドメインが衝突した境界に形成されたと推定されるため、このフィンに囲まれた領域は単一ドメインであると考えられる。図1(b)に示すAFM像の断面解析によるフィンの間隔より、層状に成長したグラフェンのドメインサイズは100 nm程度であると見積もられる。また、このような開放端で厚さが原子層単位のフィン構造のネットワークは過去に報告はなく、今回初めて見出された構造である。幅1原子層となる究極の微細構造材料として、配線やデバイスに応用できると期待される。

本研究は科研費の援助を受けて行われた。

[1] F. Maeda and H. Hibino, Phys. Status Solidi B **247** (2010) 916.

[2] F. Maeda and H. Hibino, J. Phys. D: Appl. Phys. **44** (2011) 435305.

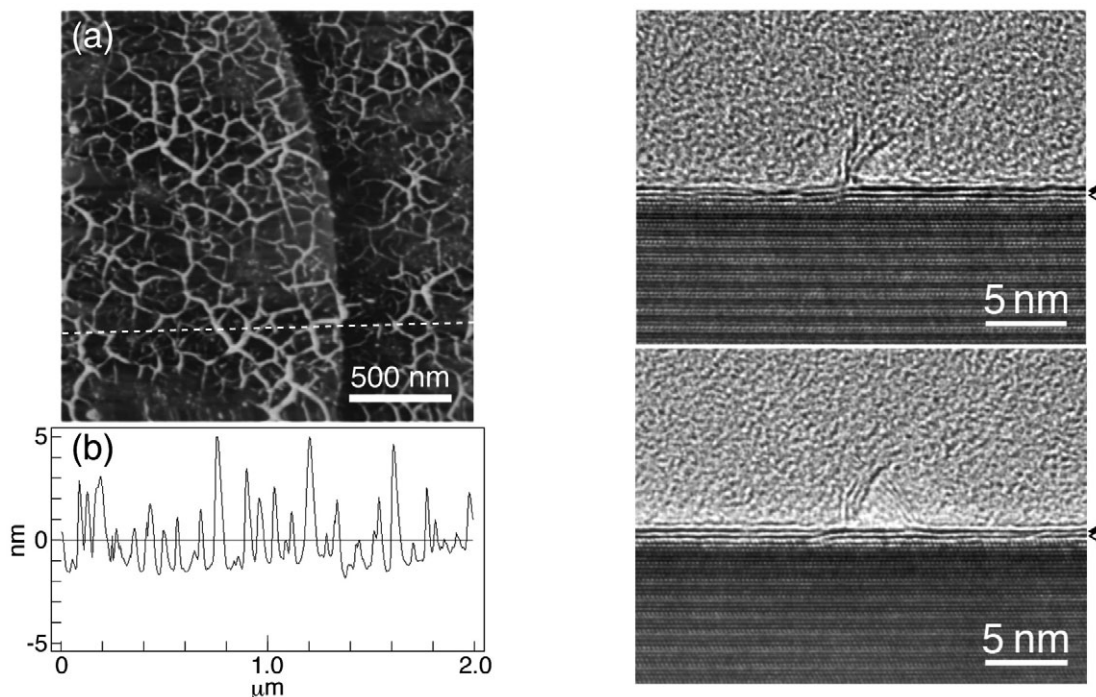


図1 成長後試料表面の(a)AFM像と(b)断面解析結果。

図2 MBE成長した試料の断面TEM像。

# 通信波長帯発光材料エルビウムシリケートの作製とその発光特性

尾身博雄 俵毅彦\*  
機能物質科学研究部 \*量子光物性研究部

最近シリコンフォトニクス用の通信波長帯の発光材料としてエルビウム化合物が注目を集めている。エルビウムシリケートはエルビウム化合物の一つであり、この結晶は $\text{Er}^{3+}$ イオンを $10^{22} \text{ cm}^{-3}$ 程度内包し、その量はシリコン中のエルビウムの固溶限界の約1,000倍に相当する。したがって、エルビウムシリケートは通信波長帯の $1.5 \mu\text{m}$ の近赤外光を発光する材料あるいは $1.5 \mu\text{m}$ の近赤外光を増幅する光アンプの材料として大きな可能性を秘めている。本研究では、シリコンフォトニクス用の通信波長帯の発光素子および導波路型光増幅器の開発を目指し、シリコン基板上にエルビウムシリケート膜を成長し、その光学特性を顕微フォトルミネッセンス(PL)法により評価した[1]。

実験では、シリコン熱酸化膜( $\text{SiO}_2$ )/Si基板上に酸化エルビウムをスパッタリング法により室温で成長し、その後、アルゴン雰囲気中で加熱処理を行うことにより $\text{Er}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2 \Rightarrow \text{Er}_2\text{SiO}_5$ の界面反応でエルビウムシリケート膜を作製した。ここで、熱処理によるエルビウムシリケートの形成は放射光斜入射X線回折によりその場で確認した。顕微PL測定における励起波長は $532 \text{ nm}$ とし、測定温度は $4\text{--}300 \text{ K}$ の範囲で変化させた。

図1(a)は、 $\text{SiO}_2$ /Si基板上に $1250^\circ\text{C}$ の熱処理により形成したエルビウムシリケートからのPLスペクトルである。この図から分かるように、 $\text{Er}_2\text{SiO}_5$ 膜の $\text{Er}^{3+}$ の4f軌道の $^4\text{I}_{13/2} - ^4\text{I}_{15/2}$ の遷移に対応する波長が $1.54 \mu\text{m}$ で発光することが確かめられた。図1(b)は波長 $1.54 \mu\text{m}$ のPL強度の温度依存性を示す。PL強度は $70 \text{ K}$ 以上では温度上昇に伴い増加しており、この振る舞いは通常の温度依存性とは異なっている。この異常な温度依存性は、温度増加にともない波長 $532 \text{ nm}$ の非共鳴励起光がフォノンの助けを借りて $\text{Er}^{3+}$ の4f軌道の $^2\text{H}_{11/2}$ 準位へと徐々に共鳴吸収され、そのため $\text{Er}^{3+}$ の $^2\text{H}_{11/2}$ 準位より下位の $^4\text{I}_{13/2} - ^4\text{I}_{15/2}$ 準位間の遷移の発光が増すという機構により説明することができる。一方、励起波長が共鳴吸収の条件、たとえば $980 \text{ nm}$ と $800 \text{ nm}$ の場合にはこのような異常な温度依存性は起こらない。以上の結果は、励起波長の適当な選択により $\text{Er}^{3+}$ イオンの温度消光の問題が解決できることを示している。

[1] H. Omi, T. Tawara, and M. Tateishi, AIP Advances 2 (2012) 012141.

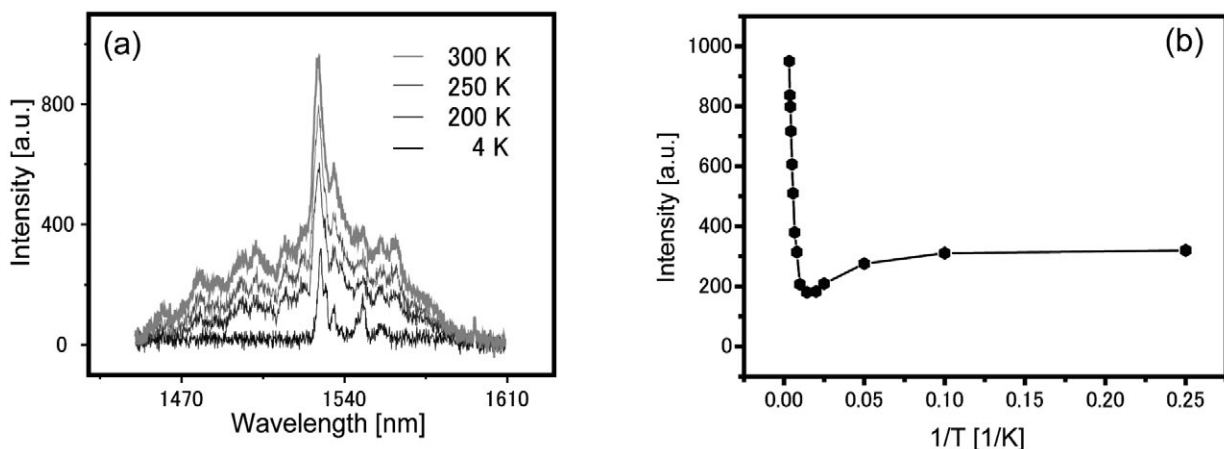


図1 エルビウムシリケート膜の $\text{Er}^{3+}$ からのPL (a)、PL強度の温度依存性 (b)。

## 単層エピタキシャルグラフェンの特異な抵抗の温度依存性

田邊真一<sup>1</sup> 関根佳明<sup>2</sup> 影島博之<sup>2</sup> 永瀬雅夫<sup>3</sup> 日比野浩樹<sup>1</sup>

<sup>1</sup>機能物質科学研究部 <sup>2</sup>量子電子物性研究部 <sup>3</sup>徳島大学

単層グラフェンはその特徴的な電子構造から、高移動度を有する電子材料として注目されている。その物性はグラファイトから剥離した単層グラフェンにおいて精力的に調べられているが、得られる単層グラフェンの大きさが小さいため、大面積かつ高品質なグラフェン成長法の確立が求められている。近年、Ar 雰囲気中で SiC(0001) を熱分解することで、SiC 基板上に広い面積で単層グラフェンがエピタキシャル成長できることが報告されており [1]、これまでに SiC 上単層グラフェンを用いたトップゲート型のホール素子において、両極性と量子ホール効果を 2 K において観測するなど成長した単層グラフェンが低温で良好な伝導特性を有することを確認している [2]。今回は単層グラフェンデバイスの室温動作に向けて、伝導特性の温度依存性を様々なキャリア濃度で調べた。

図 1 に 2~200 K における 4 端子抵抗のゲート電圧 ( $V_G$ ) 依存性を示す。図中の矢印のように、電荷中性点にあたるゲート電圧 ( $V_{\text{CNP}}$ ) 近傍では温度が上昇するにつれて抵抗が減少するのに対し、電荷中性点から離れたゲート電圧 (例えば  $V_G - V_{\text{CNP}} = 30$  V) では温度上昇と共に抵抗が増大する。このように 2 種類の抵抗の温度変化があることが分かった。電荷中性点付近ではキャリア濃度が少ないため、温度上昇と共に生じる熱励起されたキャリアが伝導に寄与することで抵抗が減少していると考えられる。一方、電荷中性点から離れたゲート電圧領域での抵抗増大は、図 2 に示すような温度上昇に伴う移動度低下が原因と推定される。図 2 の単層エピタキシャルグラフェン移動度の温度依存性を、温度依存しない散乱 (A)、グラフェンの音響フォノンによる散乱 (B)、グラフェン外部のフォノンによる散乱 (C) を考慮して解析した結果、高温領域では基板に由来すると考えられる外部のフォノンからの散乱が強く効いていることが分かった [3]。以上のことから、基板との相互作用を制御しフォノン散乱を抑えれば、温度による移動度低下を軽減できると期待される。

本研究は科研費の援助を受けて行われた。

[1] K. Emstev et al., Nature Mater. **8** (2009) 203.

[2] S. Tanabe et al., Appl. Phys. Express **3** (2010) 075102.

[3] S. Tanabe et al., Phys. Rev. B **84** (2011) 115458.

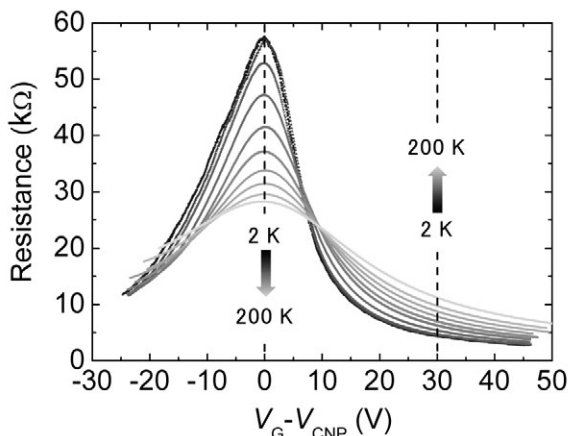


図 1 単層エピタキシャルグラフェンの 2~200 K における抵抗のゲート電圧依存性。

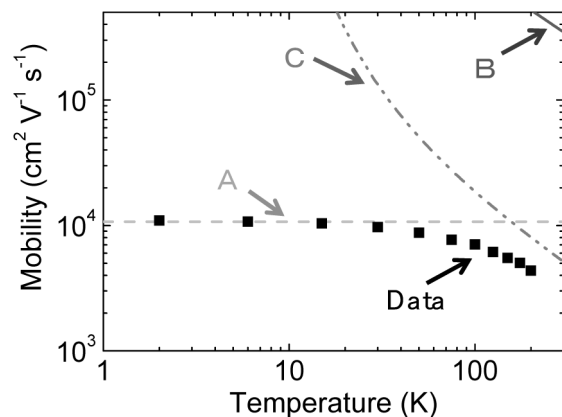


図 2 電子濃度  $6 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$  における移動度の温度依存性。

# マイクロホール・アレイを用いた膜タンパク質の機能計測

住友弘二 丹波之宏\* 檜村吉晃 田中あや  
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基本構造として、微小井戸構造を人工脂質膜でシールしたマイクロホール・アレイを構築した[1]。井戸内部には、イオン濃度により蛍光強度の変化する蛍光プローブ (fluo-4) を封入してある [図 1(a)]。開口部にオーバーハング形状を設けることにより、脂質二分子膜は長時間安定に保持でき、膜タンパク質の機能 (イオン透過) を、蛍光強度の変化として計測することを可能にしている。 $\alpha$ -ヘモリシンを導入した場合、脂質二分子膜内で拡散する膜タンパク質は会合することで7量体となり、ポア (イオンチャネル) を形成する。 $\text{Ca}^{2+}$  イオンがイオンチャネルを透過し、井戸外部から内部に流入することでイオン濃度が増加し、井戸内に封入したプローブの蛍光強度が増加する [図 1(b)-(d)]。多くの膜タンパク質を導入すれば、多くのイオンチャネルが形成され、蛍光強度の変化も速くなる [図 2]。一方、低濃度の場合には、わずかなイオンチャネルしか形成されないため、非常に緩やかな蛍光強度の変化を示す。

マイクロスケールの井戸の容積は非常に小さい (1~100 フェムトL) ため、わずかなイオンの透過が、井戸内部の濃度変化を引き起こし、非常に高感度な計測を実現している。数十 ions/sec/ $\mu\text{m}^2$  のイオン透過まで計測可能であり、それは一般的な電気生理計測法で測定される電流よりもずっと小さい。外部電位も加えられていないため、より自然な状態で計測されている。さらなるSN比の改善により、単一チャネルのイオン透過計測が期待される。マイクロホール・アレイを用いた微小なイオン透過は、細胞における局所的なイオン濃度変化を模倣しており、膜タンパク質の機能計測と、それによる生体信号伝達メカニズムの解明のための有効なツールとなり得る。高感度・高スループットのバイオセンサー・アレイの実現にも期待される。

[1] K. Sumitomo et al., Biosensors and Bioelectronics 31 (2012) 445.

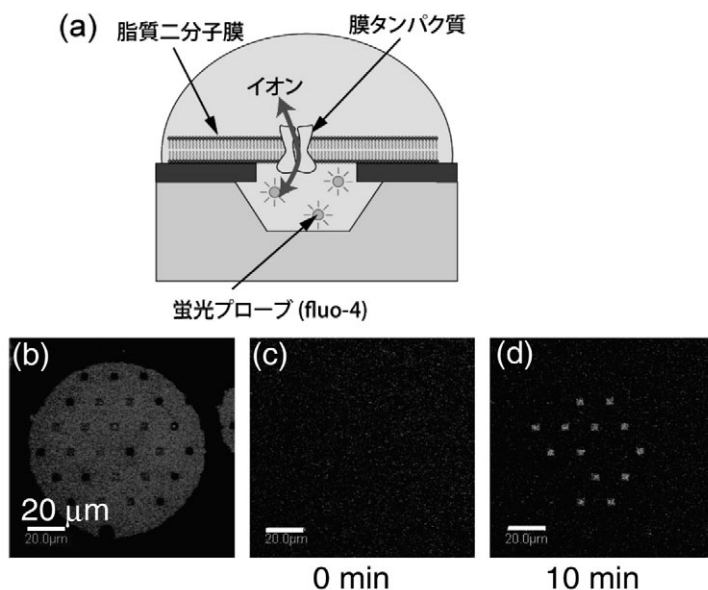


図1 (a)井戸をシールする脂質二分子膜のモデル図、(b)蛍光顕微鏡像 (脂質膜のパッチ)、イオン透過前 (c)後 (d)での蛍光プローブからの発光。

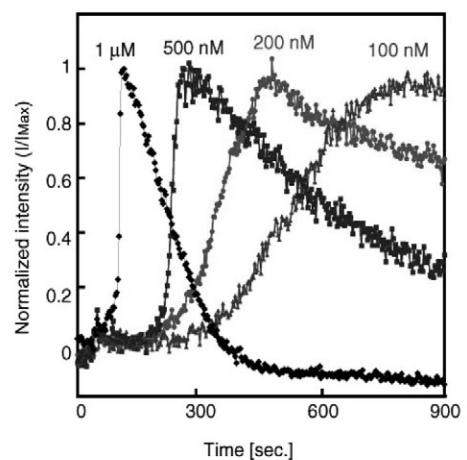


図2  $\alpha$ -ヘモリシンを導入した時の蛍光強度の時間変化 (導入濃度によるちがいは)。)

# 神経活動を励起するための刺激用多機能光ファイバ

島田明佳<sup>1</sup> 浅川修一郎<sup>2</sup> 中島和秀<sup>3</sup>

<sup>1</sup>機能物質科学研究部 <sup>2</sup>フォトンクス研究所 <sup>3</sup>アクセスサービスシステム研究所

紫外線光の照射により本来の生理活性を発揮するケージド化合物を用いた光刺激は、神経活動の局所的な励起に適している。一方電気刺激は、広範囲にわたる神経活動の励起に適している。今回我々は、本ファイバは光刺激、化学刺激、電気刺激の印加が可能な刺激用多機能光ファイバを開発した[1]。

本光ファイバは、コアの周囲に6個の空孔を有するホールアシスト型光ファイバ[2] (図1)とマイクロ流路から構成される(図2)。ケージド化合物の一種であるケージドグルタミン酸は電解質溶液に溶解されており、マイクロ流路を介して空孔より試料へ投与される。ケージドグルタミン酸は、光ファイバより照射された紫外線光により神経伝達物質のグルタミン酸が生成され、神経活動が励起される。一方電気刺激は、マイクロ流路および空孔を満たす電解質溶液を介して試料に印加する。神経活動は、カルシウムイオン濃度により蛍光強度が変化する指示薬(Fluo-4)を細胞内に導入して計測した。両者の刺激とも神経活動の励起をすることができたが、その刺激範囲はケージドグルタミン酸の場合は光ファイバの末端部に限局しているのに対し[図3(a)]、電気刺激は広範囲にわたって神経活動を励起した[図3(b)]。

本成果は、3種類の刺激印加を1本のファイバで実現するとともに、化学刺激の際に使用する薬物の量を激減することが可能となり、脳生理分野や医学分野への応用が期待される。

[1] A. Shimada et al., Neuroscience2011, 204.27, Washington DC, 2011.

[2] K. Nakajima et al., Photonics Technology Letters, IEEE 15 (2003) 1737.

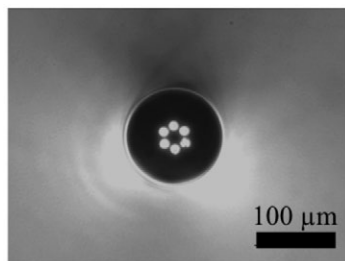


図1 ホールアシスト型光ファイバ断面図。

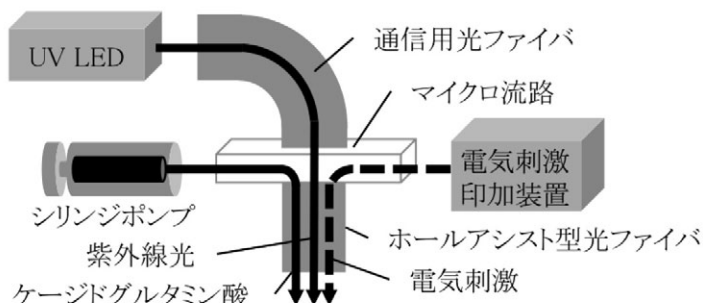


図2 刺激用多機能光ファイバ。

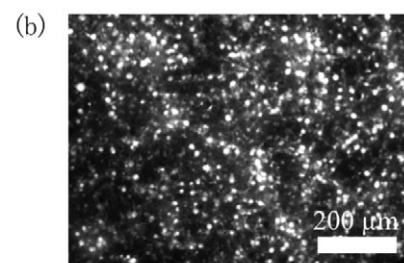
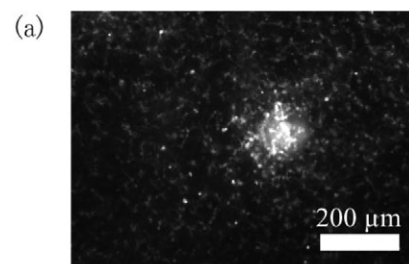


図3 カルシウムイオン指示薬で標識されたラット大脳皮質由来の神経細胞。(a)ケージドグルタミン酸で励起された神経活動。(b)電気刺激で励起された神経活動。

# 導電性高分子とシルク繊維の複合素材による 長期安定記録が可能な生体電極

塚田信吾 中島寛 鳥光慶一  
機能物質科学研究部

生体内の信号を送受信するバイオインタフェースはナノバイオ研究に必要不可欠である。バイオインタフェースには金属と電解質ペーストによる生体電極が広く使用されているが、検出感度や時間分解能に優れるものの、生体に与えるダメージや長期の記録の安定性に課題が残されている。

PEDOT-PSS (Poly (3,4-ethylenedioxythiophene) / poly (4-styrenesulfonic acid))は、高い導電性、親水性、生体適合性を特徴とする導電性高分子であり、次世代の生体電極用素材と考えられている。しかしPEDOT-PSSは吸水時の強度低下や加工上の制約により、汎用性のある生体電極は実現していなかった。今回、生体電極用の素材としてシルク繊維とPEDOT-PSSの複合素材を開発した[1]。PEDOT-PSSをシルク繊維表面に電気化学的に重合させ、さらにグリセロールを添加することにより、生体電極に求められる吸水時の引張強度（径280 μmの繊維束で1,000 CN）と導電性0.23 S/cm (2 Kohm/mm)を付与することができた（図1）。本複合素材を用いた生体電極は、電解質ペーストを必要とせず生体と直接長期間安定した信号の送受信が可能であり、測定信号の安定性は従来の医療用の生体電極に匹敵することを動物実験により確認した（図2）。

この複合素材は柔軟な繊維の特性を生かし紐や布状の電極の作製や、衣類への縫い込みも可能である。ナノバイオ研究をはじめ、ICTや健康・医療分野への応用が期待される。

[1] S. Tsukada et al., PLoS ONE 7(4) (2012) e33689.

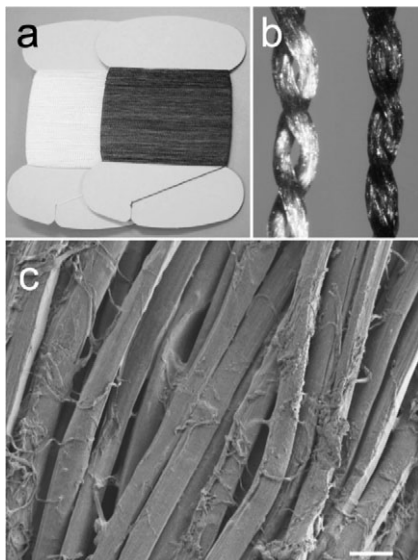


図1 a. PEDOT-PSSシルク繊維（右）と未コートシルク繊維（左） b. 同 実体顕微鏡像 c. PEDOT-PSSシルク繊維のSEM画像 (Scale bar 20 μm)。

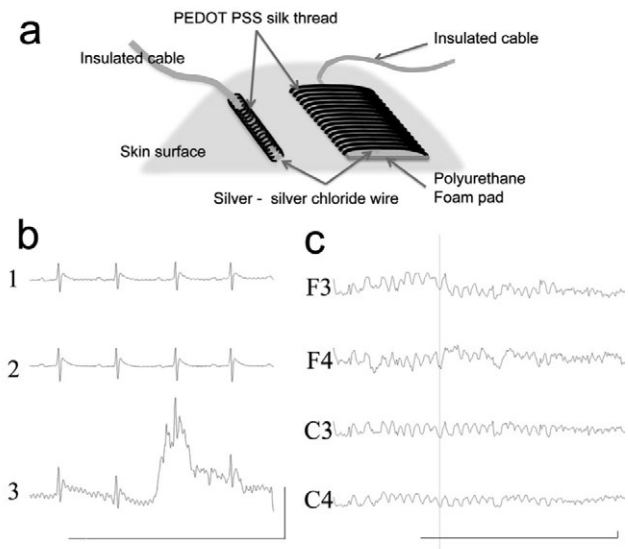


図2 a. 心電図用（右）と脳波用（左）の皮膚表面装着型生体電極の構成。b. 1. PEDOT-PSS silk電極。2. 医療用の銀塩化銀ゲル電極。3. テキスタイル電極から同時記録したラットの心電図 (Scale bar 1 sec 50 mV)。c. PEDOT-PSS silk電極で測定したラットの脳波 (Scale bar 1 sec 50 μV, F3, F4: 前頭部左, 右 C3, C4: 中心部左, 右)。



# 単一電子を利用した確率共鳴

西口克彦 藤原聡  
量子電子物性研究部

確率共鳴は、ノイズを重複した微小信号が系の反応し得る閾値を超えることによって、系が微小な信号に反応する現象である[1]。これは、生態系において効果的に働いているとされており、幅広い応用を目指した電子素子による実現が報告されている。しかし、いずれも特有の帯域を持ったノイズを意図的に印加したもので、任意の環境で実現するには、閉じた系で広帯域のノイズを利用することが求められていた。今回、我々は、トランジスタの単一電子伝導に起因するショット・ノイズを利用することによって高速な確率共鳴を実現した[2]。

素子は、単一電子を転送する細線FFT(T-FET)と電荷計(D-FET)で構成される(図1)。UGとLG2でLG1 両端のT-FET細線を反転させてソース(ES)とドレイン(Node)を形成し、LG1でT-FETを流れる単一電子の流れをコントロールする。電子はNodeに注入され、その電子をD-FETに流れる電流 $I_D$ の変化で検出する[3](図2)。この電子注入は $V_{LG1}$ とES電圧 $V_{ES}$ で制御が可能なT-FETに流れる電流 $e\langle\delta t\rangle$ (電子が注入される時間間隔 $\delta t$ の平均値)に相当し非線型特性を示す。一方、個別の電子注入に注目すると、 $\delta t$ のヒストグラムは指数関数的な特性となり(図2挿入図)、電子注入がランダムなタイミングで行われるショット・ノイズであることを示している。非線形特性とショット・ノイズ特性はFETの本質的な特徴ゆえ、数 ns オーダの $\delta t$ でも確認されており、これらを高速な確率共鳴を実現するために利用する。

入力信号 $S_{in}$ として矩形波をESに入力し、D-FETに流れる電流の微分値(nodeへの単一電子注入を意味する)を $S_{out}$ とすると、LG1電圧を変化させたとき、特定のLG1電圧で $S_{in}$ と $S_{out}$ の類似性(相関係数)が高くなることを確認した。これは単一電子伝導に起因するショット・ノイズによって確率共鳴が発現していることを意味する。一方、一定時間nodeに注入される電子数を $S_{out}$ とした際も、確率共鳴を利用できることを確認した。この方法は、電子注入時間が10 nsでも有効であり、ショット・ノイズを用いることによって得られる高速性を示している。これらの特徴を利用することで、通常では検出できない画像信号を高速に検出し、かつ画像のコントラストを改善できることを確認し(図3)、高速で高感度なセンサへの利用が期待できる。

- [1] L. Gammaitoni et al., Rev. Mod. Phys. **70** (1998) 223.
- [2] K. Nishiguchi and A. Fujiwara, Jpn J. Appl. Phys. **50** (2011) 06GF04.
- [3] K. Nishiguchi et al., Jpn J. Appl. Phys. **47** (2008) 8305.

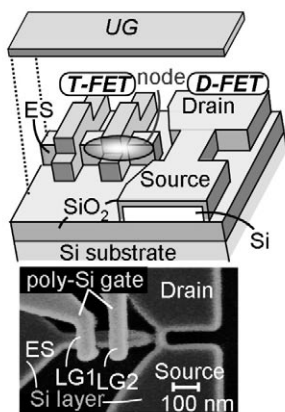


図1 素子構造。

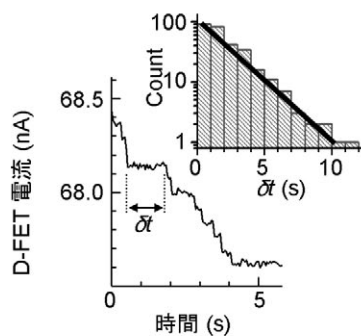


図2 単一電子転送の検出。  
挿入図は $\delta t$ のヒストグラム。

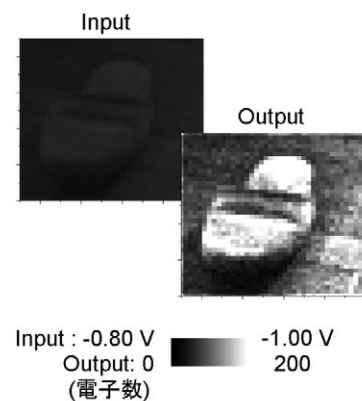


図3 確率共鳴による画像改善。

# シリコン単電子転送デバイスにおける転送精度の絶対評価

山端元音 西口克彦 藤原聡  
量子電子物性研究部

単電子転送は電子1個を正確に操作できる技術であり、超低消費電力回路や電流標準への応用が期待できる。単電子転送の転送精度は、ビットエラーや電流標準の不確定性を決定する重要な値であり、例えば標準応用では $10^{-8}$ 以下の十分低いエラーレートが必用である。今回、シリコン細線MOSFETを用いた高速単電子転送素子[1]において初めて、転送の絶対精度評価を行った[2]。

図1に素子の模式図を、図2に電子顕微鏡写真を示す。Si-on-insulator基板に形成した3つのシリコン細線MOSFET (FET1-3)から成る単電子転送素子と、細線MOSFET (S-FET)から成る高感度電荷計が集積された構造である。転送精度の絶対評価を行うため、まずFET3をOFFにし、ノード領域(Node)を形成した。その後、FET1、FET2、ソース(S)にパルス電圧を加え、ノードとソース間で単電子を往復させるシャトル単電子転送を行う。その際のノードの電子数をS-FETで検出しエラーを見積もる。この測定ではノードの平均電子数を読み取るため、低速の検出素子でも高速転送のエラーを評価することが可能であるが、今回は転送機構を詳細に調べるため、シングルショットの測定を行った。これにより単電子のノードへの捕獲過程とノードからの放出過程を分離して評価することが可能になった。

測定温度17 Kでのシャトル単電子転送検出の典型的な結果を図3に示す。検出電流( $I_{S-D}$ )の急峻な変化が単電子の捕獲、放出を示す。ここでは捕獲過程のエラーが2つ観測されている。この測定を長時間行い、捕獲、放出の最良のエラーレートを見積もるとそれぞれ2.1%および0.25%程度であった。前者は熱揺らぎを過程したモデルで説明することが可能で、さらなる構造の微細化や低温化で高精度化を実現できる可能性が示唆された。後者は熱揺らぎモデルで説明できず、パルス電圧の依存性等から、トラップ準位に起因していることがわかった。このトラップ準位を介した転送では低いエラーレートを示しており、高精度単電子転送へ利用できる可能性がある。

- [1] A. Fujiwara et al., Appl. Phys. Lett. **92** (2008) 042102.  
[2] G. Yamahata et al., Appl. Phys. Lett. **98** (2011) 222104.

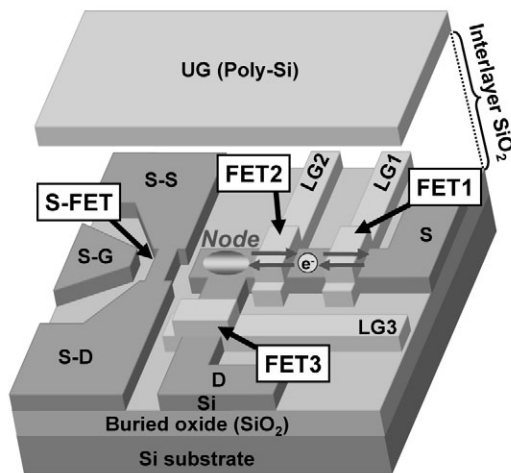


図1 単電子転送精度評価用素子の概略図。

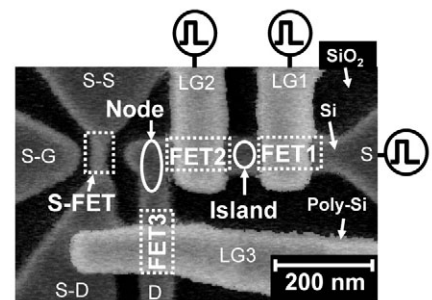


図2 素子の電子顕微鏡写真。

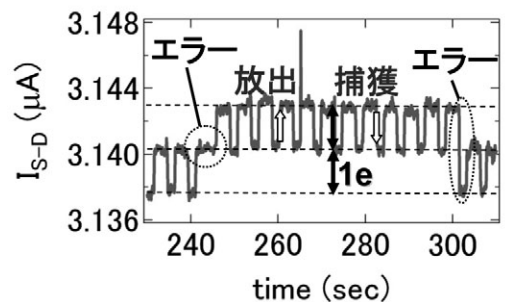


図3 シャトル単電子転送における電荷検出。

# 結合機械共振器の反対称振動を用いた新しい電荷検出手法

岡本創 小野満恒二 山口浩司  
量子電子物性研究部

微小機械共振器による高感度な電荷検出が近年注目を集めている[1]。機械共振を用いた電荷検出は室温環境における高感度な検出を可能とする有用な手法として期待されるが、その一方で、共振器の振動そのものが測定対象に及ぼす影響（反作用）が問題となる。本研究ではこの問題を回避する新しい手法として、互いに結合したGaAs微小機械共振器の反対称結合振動を用いた電荷検出手法を提案する。固有周波数の等しい2つの機械共振器が連結した構造では共振器同士が互いに逆位相で振動する反対称振動モードが現れるが、このモードは2つの機械共振器を同時に励振した場合には励起されず、共振器の振動は互いにキャンセルされる。このような初期状態において一方の共振器に電荷が作用すると、GaAsの圧電効果により周波数のデチューニングが起こり、反対称振動モードの振幅が現れる。このデチューニングによる振幅変化を検出することにより、初期振幅の極めて小さな状態を用いた、反作用の少ない電荷検出が可能となる。

実験に用いた素子はオーバーハングを介して機械的に結合した2つの両持ち梁 [図1(a), (b)] である。梁はAlGaAs/GaAs超格子（上層）、n-GaAs（中層）、i-GaAs（下層）の3層を有し、梁上にはショットキー電極が蒸着されている。2つの梁は基板下に設置したピエゾアクチュエータにより同時励振される。一方、梁へのレーザー照射により生み出される熱応力を用いると、梁の固有振動数を調整し、梁同士の振動が完全に結合した状態を生み出すことができる[2]。今、梁上の電極とn-GaAs層の間に電界がかかるとGaAsの圧電効果により梁の固有振動数は変化し、デチューニングが起こる [図1(c)]。これにより生ずる反対称振動モードの振幅変化をレーザー干渉計で検知することにより、梁に作用する微小な電荷を高感度に検出することが可能となる。我々はこの手法により、室温において $147e/Hz^{0.5}$ という高い電荷検出感度を得ることに成功した [図1(d)] [3]。本手法は電荷検出のみならず質量検出にも適用可能であり、振動による反作用を抑えた新しい高感度検出手法として注目される。

- [1] A. N. Cleland and M. L. Roukes, Nature **392** (1998) 160.
- [2] H. Okamoto et al., Appl. Phys. Express **2** (2009) 062202.
- [3] H. Okamoto et al., Appl. Phys. Lett. **98** (2011) 014103.

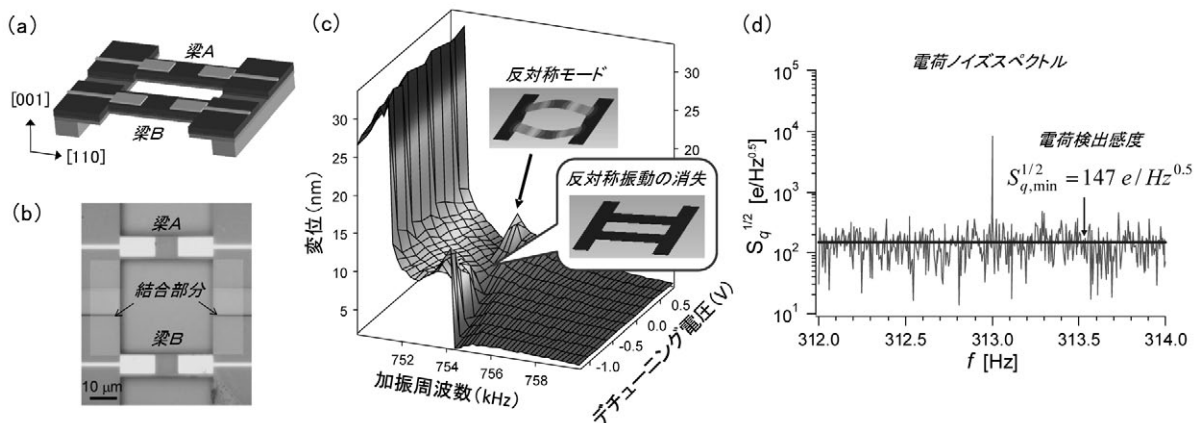


図1 (a) 結合機械共振器の模式図。(b) 結合機械共振器の光学顕微鏡像。(c) 反対称モードのDCデチューニング電圧依存性。(d) 加振周波数753.5 kHzにおける電荷ノイズスペクトル。

# 微小機械振動子の遠隔励振

畑中大樹 Imran Mahboob 山口浩司  
量子電子物性研究部

微小機械振動子は、その小さい質量と高い $Q$ 値により、高感度センサ[1]や機械演算デバイス[2]、量子効果の観測[3]等への応用のため昨今注目されている。その応用において、機械振動を電氣的に励振する手法が重要な要素技術となっているが、これまでの手法は振動子に形成した電極に直接電気信号を加えることにより振動を誘起するため、発生するジュール熱や電極の影響による機械特性の劣化が伴っていた。この問題を踏まえ、我々は直接的な電圧印加が不要な、高周波(RF)電磁波による新しい遠隔励振法を提案した[4]。

本研究で用いた微小機械振動子は、二次元電子ガス(2DEG)/金トップゲート(TG)電極から成るメサ構造を梁の両端に有しており、ガリウムヒ素(GaAs)/アルミニウムガリウムヒ素(AlGaAs)多層膜構造により作製した。また、その機械振動子の周囲にはRF電磁波のソースであるコイルを配置した(図1)。200 mK以下の極低温・高真空下において、機械振動子は172990.5 Hzの共振周波数を持つ(図1の挿入図)。一方、素子に印加されるRF電磁波の強度は、コイルの持つLC共鳴により強いRF周波数( $f_{\text{coil}}$ )依存性を持ち、図2の上図に示す反射強度が弱い周波数において、強いRF電磁波が照射される。素子に加えるRF電磁波を周波数( $f_{\text{AM}}$ )で振幅変調し、 $f_{\text{coil}}$ と $f_{\text{AM}}$ を変化させた時の、機械振動子の振幅を図2の下図に示す。共振周波数に近い $f_{\text{AM}}$ において機械振動子の共振が観測された。機械共振の発現する $f_{\text{coil}}$ がコイルのLC共鳴点とほぼ一致していることから、機械振動子がRF電磁波によって遠隔的に励振されている事が示される。本研究で提案した非接触型の遠隔励振法を用いれば、機械振動子に負荷をかけずにその励振が可能となり、機械共振器を用いた様々な分野への応用が期待される。

[1] A. N. Cleland and M. L. Roukes, Nature **392** (1998) 160.

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

[3] A. D. O'Connell et al., Nature **464** (2010) 697.

[4] D. Hatanaka et al., Appl. Phys. Lett. **99** (2011) 103105.

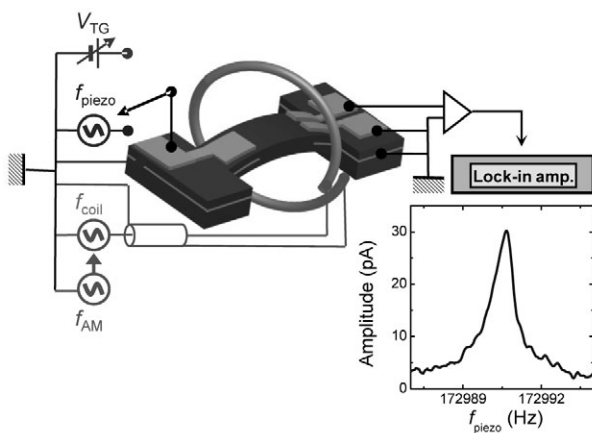


図1 微小機械振動子と測定セットアップの模式図。挿入図は機械振動子のピエゾ加振周波数( $f_{\text{piezo}}$ )応答。

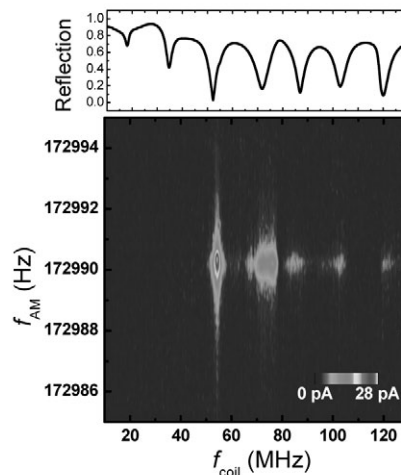


図2 コイルの反射率とRF強度-25 dBmのAM RF電磁波照射下における機械振動子のRF周波数依存性。

## $\nu = 5/2$ 分数量子ホール効果のスピンの状態を解明

Lars Tiemann<sup>1,2</sup> Gerardo Gamez<sup>1</sup> 熊田倫雄<sup>1</sup> 村木康二<sup>1,2</sup>  
<sup>1</sup>量子電子物性研究部 <sup>2</sup>科学技術振興機構

自然界の基本粒子はフェルミ粒子とボーズ粒子に分類されるが、そのちがいは2つの同種粒子を入れ替えたときに波動関数の符号が変化するかどうかによる。一方、多数の粒子が互いに相関をもって運動することであたかも一つの粒子のように振舞うことがあり、これを準粒子というが、2次元では、フェルミ粒子ともボーズ粒子とも異なる振る舞いをする準粒子の存在が原理的に可能である。特に非アーベリアン準粒子といわれる、2つを入れ替えると元の状態と異なる縮退した別の基底状態になってしまうという特異な性質を持った準粒子が理論的に予想されており、それを用いるとエラー発生率の非常に低い、まったく新しい手法の量子計算(トポロジカル量子計算)が可能になることから、理論・実験の両面で大きな関心を集めている[1]。

GaAs/AlGaAsなどの高純度半導体結晶のヘテロ界面に閉じ込められた電子(2次元電子)に低温で強い垂直磁場を加えたときに生じる分数量子ホール状態は、フェルミ粒子ともボーズ粒子とも異なる振る舞いをする準粒子をもつことが予想されている。特にランダウ準位占有率が $\nu = 5/2$ の状態(5/2状態)[2]は、非アーベリアン準粒子の存在可能性が指摘され、大きな注目を集めている。しかしながら5/2状態は他の状態と異なり、その起源は明らかになっておらず、提案されている波動関数のうち実験[3]と矛盾しないものの中には非アーベリアン準粒子を伴わないものも含まれている。我々は、波動関数によって電子のスピンの状態が異なることに着目し、抵抗検出核磁気共鳴法(図1)によって、5/2状態にある電子のスピンの状態がすべて磁場の方向に揃っていることを明らかにした[4]。この結果によって、提案された波動関数のうち、実験と一致するものは非アーベリアン準粒子を伴うものに絞られる。

[1] C. Nayak et al., Rev. Mod. Phys. **80** (2008) 1083.

[2] R. L. Willet et al., Phys. Rev. Lett. **59** (1987) 1779.

[3] I. P. Radu et al., Science **320** (2008) 899.

[4] L. Tiemann, G. Gamez, N. Kumada, and K. Muraki, Science **335** (2012) 828.

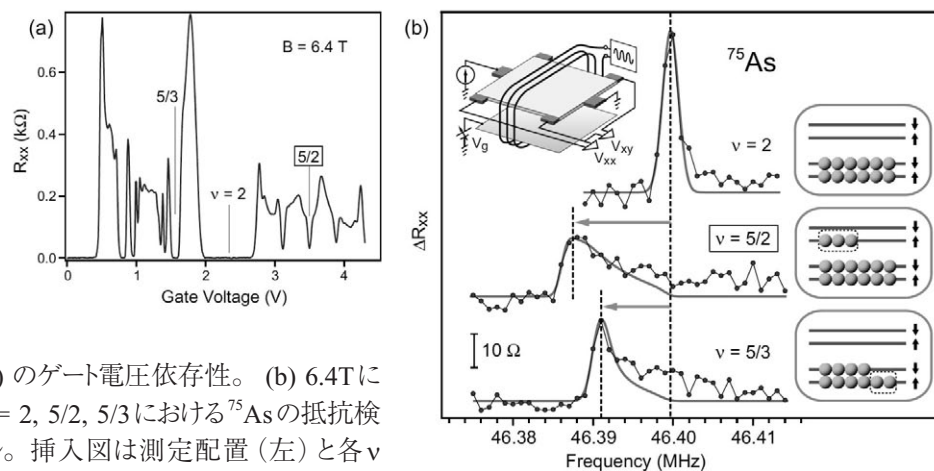


図1 (a) 縦抵抗 ( $R_{xx}$ ) のゲート電圧依存性。(b) 6.4Tにおいて測定した $\nu = 2, 5/2, 5/3$ における $^{75}\text{As}$ の抵抗検出NMRスペクトル。挿入図は測定配置(左)と各 $\nu$ におけるスピン配置を示す。

# ALD 絶縁膜を用いた InAs/AlGaSb ヘテロ構造のゲート制御

鈴木恭一 原田裕一 前田文彦\* 小野満恒二 山口 徹 村木康二  
量子電子物性研究部 \*機能物質科学研究部

InAs/AlGaSb ヘテロ構造は室温で高い移動度を持つことから、数十年来、高周波FET等の高速電子デバイスとして期待されてきた。しかしながら、デバイス応用に際してはAlGaSb障壁層やGaSbキャップ層の絶縁が不十分なため、ゲート制御に困難があった。これを克服するため、種々の方法でキャップ層とゲート金属間に絶縁膜を形成する試みがなされてきた。特に近年開発された原子層堆積法(ALD)は、様々な物質表面に高誘電率の絶縁酸化膜を薄く均一に形成することが可能であり、InAs/AlGaSbヘテロ構造への適用が期待されている[1、2]。

従来、InAs/AlGaSb系でALDゲート絶縁膜を形成する場合、GaSbキャップ層表面の自然酸化膜や絶縁膜との界面に生じる欠陥が電子トラップとなり、ゲート電界が打ち消され、効率が低下する問題があった。今回我々は、薄い塩酸による短時間の表面処理によって、ALDによるAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>絶縁膜形成後の電子トラップ密度を大幅に低減することに成功した(図1)[3]。これにより、InAs/GaSbヘテロ構造において、線形性に優れ、高効率な電子濃度制御が可能となった(図2)。

[1] J. E. Crowell, J. Vac. Sci. Technol. A **21** (2003) S88.

[2] I. J. Gelfand, S. Amasha, D. M. Zumbuhl, M. A. Kastner, C. Kadow, and A. C. Gossard, Appl. Phys. Lett. **88** (2006) 252105.

[3] K. Suzuki, Y. Harada, F. Maeda, K. Onomitsu, T. Yamaguchi, and K. Muraki, Appl. Phys. Express **4** (2011) 125702.

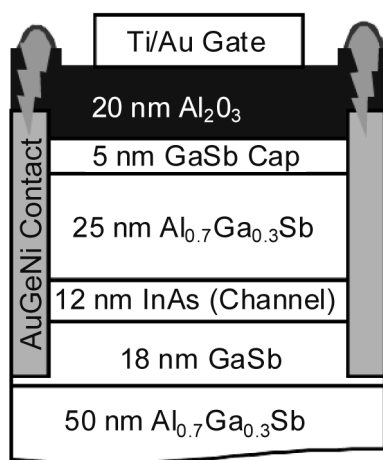


図1 ALDによるAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>ゲート絶縁膜とInAs/GaSbヘテロ構造。

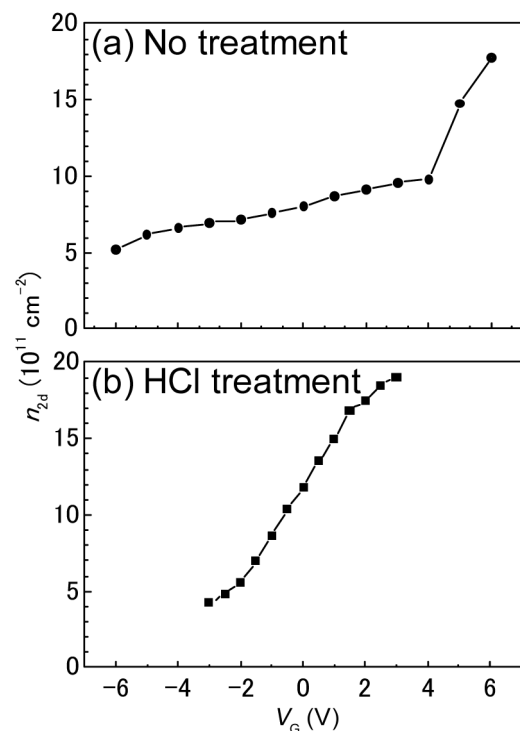


図2 ゲート電圧( $V_g$ )に対する電子濃度( $n_d$ )。(a)未処理。(b)薄い塩酸処理。

## InAs(110) 表面上の In 原子操作

鈴木恭一 Stefan Fölsch\* 蟹澤聖  
量子電子物性研究部 \*Paul-Drude-Institut

半導体デバイスのさらなる集積化、微細化、省電力化の究極として、原子スケールデバイスが期待されており、その実現に向けて、走査トンネル顕微鏡 (STM) による原子操作技術の向上が求められている。原子操作は STM 黎明期より金属上や IV 族半導体で行われているが、化合物半導体上での成功例は少ない。これまで我々は、InAs(111)A 面上において In 原子の垂直操作 (置く、拾う) に成功しているが [1]、今回我々は、へき開により得られた InAs(110) 面上において、In 原子の垂直操作に加え、横方向操作 (ずらす) に成功した [2]。

InAs(111)A 面では、最表面層が In 原子で構成され、操作される In 原子は表面再構成により生じるポテンシャルポケットに強く束縛される。これに対して、InAs(110) 面では、最表面層は同数の In と As 原子で構成されるため、表面再構成の影響は弱く、ポテンシャルポケットも浅い。その結果、束縛が弱く、非弾性トンネル励起および表面の反転非対称性により特定横方向 ([001] 方向) への原子操作が可能となる (図 1)。

多くの化合物半導体が InAs と同じ閃亜鉛鉱型結晶構造を持っており、へき開により容易に同様の (110) 平坦面を得ることができる。本研究を契機として、今後、様々な化合物半導体や、さらには、そのヘテロ構造断面上の原子操作への発展が期待される。

本研究は、戦略的国際科学技術協力推進事業日独研究交流「ナノエレクトロニクス」(JST-DFG) の支援を受けた。

[1] S. Fölsch, J. Yang, C. Nacci, and K. Kanisawa, Phys. Rev. Lett. **103** (2009) 096104.

[2] K. Suzuki, S. Flösch, and K. Kanisawa, Appl. Phys. Express **4** (2011) 085002.

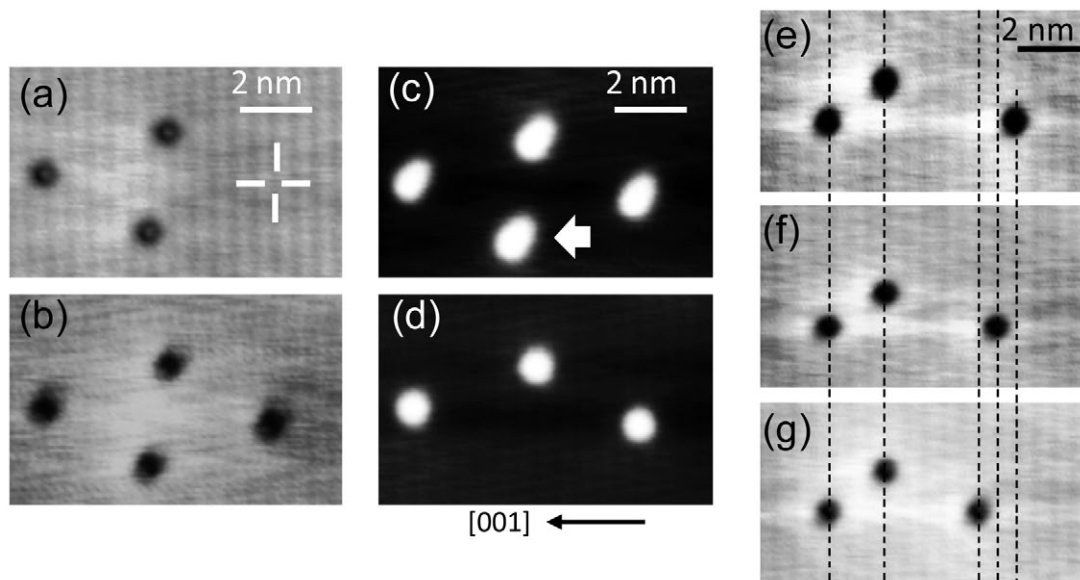


図1 InAs(110)表面上に置いたIn原子のSTM像。(a)、(b):黒点がIn原子。試料電圧 $-1.0$  Vにて探針を表面に近づけると、In原子が探針から表面上に移る。(c)、(d):白点がIn原子。試料電圧 $+1.0$  Vにて探針を目標の原子に近づけると、In原子が表面から探針へ移る。(e)-(g):黒点がIn原子。目標原子(一番右)上で探針-試料電圧を掃引すると、目標原子が1原子列ずつ[001]方向に移動する。

# GaAs 横型二重量子ドットにおける核スピン偏極に起因したヒステリシス伝導

小林嵩<sup>1,2</sup> 日達研一<sup>1</sup> 佐々木智<sup>1,2</sup> 村木康二<sup>1</sup>

<sup>1</sup>量子電子物性研究部 <sup>2</sup>東北大学

半導体量子ドット(QD)における電子スピンのダイナミクスは宿主半導体の核スピンに強く影響を受ける。そのため、半導体QDを用いたスピン量子ビットにおいては、核スピンの制御が非常に重要である。今回、我々はその制御性の高さからスピン量子ビットへの応用が有力視されているGaAs横型二重QD(DQD)において、核スピンの動的偏極を示す伝導信号を見出した[1]。さらに、この信号の磁場依存性はドット間の非対称な核スピン偏極を示唆しており、それを用いたスピン量子ビットの高速制御への応用が期待できる。

図1に測定に用いた試料[(a)]と、その少数電子領域でDQDを流れる電流 $I_{\text{dot}}$  [(b)]を示す。点線で示した台形内部では、2個のドットに同じ向きのスピンを持つ電子が1個ずつ詰まっているために伝導が抑制されるスピントラップ(SB)現象が生じている。

SB領域においては電子スピンの緩和することにより電流が流れるため、伝導はその緩和機構を反映する[2]。この機構を調べるため、図1(b)中の矢印で定義した $\varepsilon$ と面内磁場 $B_{\parallel}$ の関数として $I_{\text{dot}}$ を測定した。各 $B_{\parallel}$ で $\varepsilon$ を掃引した場合 [図2(a)] と各 $\varepsilon$ で $B_{\parallel}$ を上向きに掃引した場合 [図2(b)] では特性が異なり、後者の場合にのみ $\varepsilon < 0$ の広範囲にわたって伝導が現れている。図2(c)に示した異なる $B_{\parallel}$ の掃引方向に対する結果の比較から、この伝導が磁場の掃引方向に対してヒステリシスを示していることがわかる。この結果は、過去の異なる材料・形状のDQDでの報告[3]と同様に、磁場を上向きに掃引した際にDQD内で核スピンが動的に偏極されたことを示している。さらに、この伝導信号が磁場とともに少しずつ増大することから、DQD内の核スピン偏極が2個のドットのどちらか一方で強く生じていることが示唆される。

[1] T. Kobayashi et al., Phys. Rev. Lett. **107** (2011) 216802.

[2] F. H. L. Koppens et al., Science **309** (2005) 1346.

[3] K. Ono and S. Tarucha, Phys. Rev. Lett. **92** (2004) 256803; A. Pfund et al., Phys. Rev. Lett. **99** (2007) 036801; H. O. H. Churchill et al., Nature Phys. **5** (2009) 321.

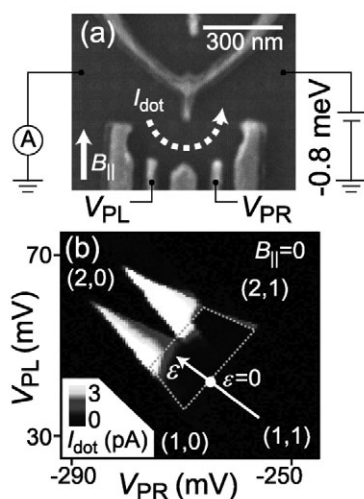


図1 (a)試料のSEM像、(b)少数電子領域における直流伝導特性。図中 $(m, n)$ は各領域における左右のドットの電子数を表す。

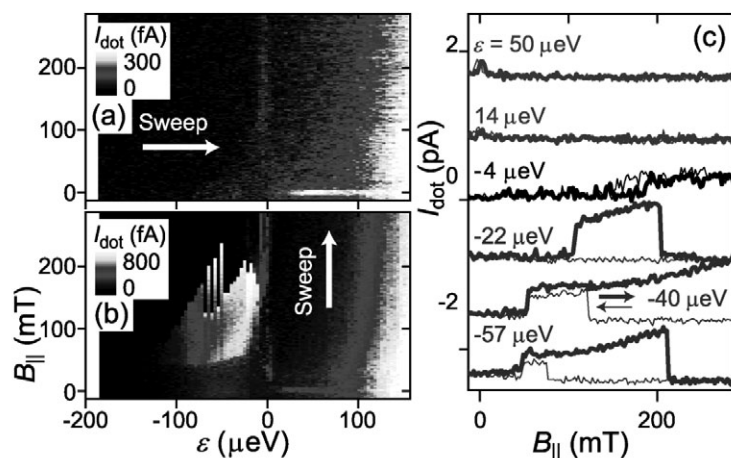


図2 SB領域周辺で(a) $B_{\parallel}$ を固定して $\varepsilon$ を掃引して測定した $I_{\text{dot}}$ 、および(b) $\varepsilon$ を固定して $B_{\parallel}$ を上向きに掃引して測定した $I_{\text{dot}}$ 。(c)いくつかの $\varepsilon$ で $B_{\parallel}$ を往復掃引して測定した $I_{\text{dot}}$ 。太い線は上向き、細い線は下向きの掃引の結果。



# 超伝導磁束量子ビットを介した共振器と量子二準位系との結合

Alexander Kemp 齊藤志郎 William John Munro\* 仙場浩一  
 量子電子物性研究部 \*量子光物性研究部

超伝導量子ビットの研究分野では、現在、超伝導共振器中のマイクロ波光子を介した多ビット化の実験が盛んに行われている[1]。また、超伝導量子ビットとその近傍にある量子二準位系(TLS)の結合も確認されている[2]。我々は、マイクロ波光子とTLSのエンタングル状態を、超伝導量子ビットを仲介して、オンデマンドに生成することに成功した[3]。

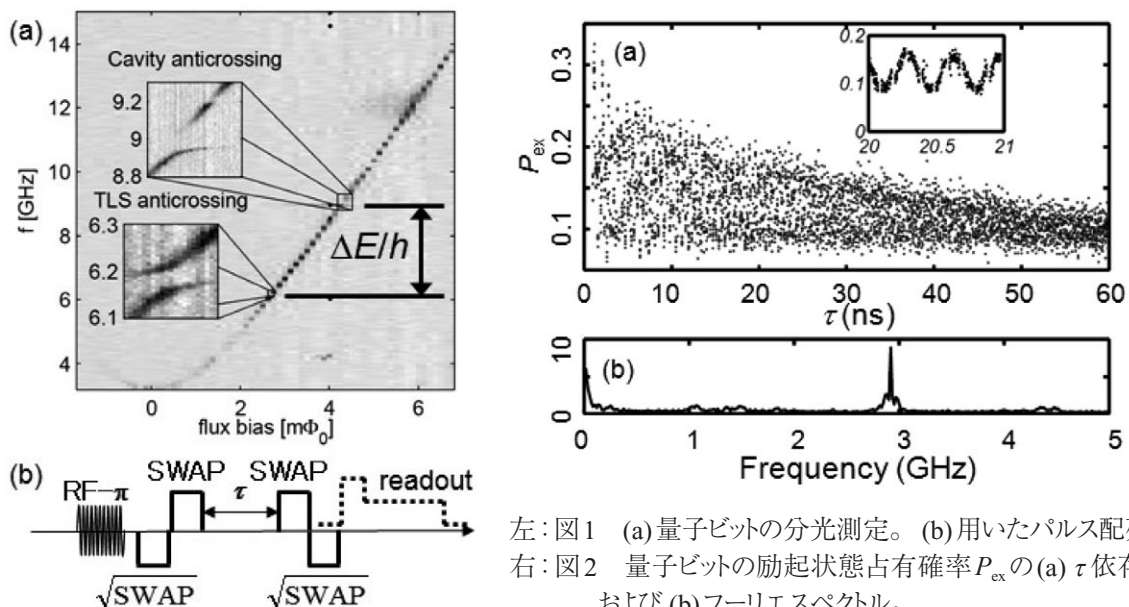
図1(a)に磁束量子ビットのマイクロ波による分光測定結果を示す。6.17 GHzと8.95 GHzに、それぞれTLSと共振器によるエネルギー反交差が見られる。量子ビットとの結合エネルギーは55 MHzと154 MHzである。磁束量子ビットの励起エネルギーは外部磁場により制御できるため、矩形パルス磁場により量子ビットと共振器中のマイクロ波光子(またはTLS)との任意のエンタングル状態を実現することができる。我々は、この矩形パルスを応用し、量子ビットを介したマイクロ波光子とTLSのエンタングル状態を実現した。

図1(b)に実験で用いたパルス配列を示す。まず量子ビットへのRF- $\pi$ パルスにより、系を励起状態 $|100\rangle$ に準備する。ここで状態は|量子ビット、TLS、共振器中マイクロ波光子>を表す。次に、 $\sqrt{\text{SWAP}}$ 矩形パルスにより、量子ビットとTLSを共鳴させ、量子ビットとTLSのエンタングル状態 $(|100\rangle + |010\rangle)/\sqrt{2}$ を作る。さらに量子ビットとマイクロ波光子を共鳴させるSWAP矩形パルスにより、エンタングル状態 $(|001\rangle + |010\rangle)/\sqrt{2}$ が実現される。その後、時間 $\tau$ だけ系を自由発展させることにより $|001\rangle$ と $|010\rangle$ の間には相対位相 $\phi = \Delta E \tau/\hbar$ が生じる。ここで、 $\Delta E$ は $|001\rangle$ と $|010\rangle$ のエネルギー差である。この状態を読み出すために、先程と逆の順番で2つの矩形パルスを印加すると、位相 $\phi$ の時間発展が量子ビットの励起状態占有率 $P_{\text{ex}}$ の振動として観測される(図2)。図2では $P_{\text{ex}}$ が周波数 $\Delta E/\hbar$ で振動しており、自由発展中にマイクロ波光子とTLSのエンタングル状態が実現されていたことが解る。

今後は、TLSを制御性の良い量子メモリへ置き換え、量子メモリを有する超伝導量子ビットの多ビット化を目指す。

本研究は科研費の援助を受けて行われた。

- [1] L. DiCarlo et al., Nature **467** (2010) 574.
- [2] R. W. Simmonds et al., Phys. Rev. Lett. **93** (2004) 077003.
- [3] A. Kemp et al., Phys. Rev. B **84** (2011) 104505.



左: 図1 (a)量子ビットの分光測定。(b)用いたパルス配列。  
 右: 図2 量子ビットの励起状態占有確率 $P_{\text{ex}}$ の(a)  $\tau$ 依存性、  
 および (b) フーリエスペクトル。

# ギャップ可変型超伝導磁束量子ビットとダイヤモンド中の電子スピン集団とのコヒーレント結合

Xiaobo Zhu<sup>1</sup> 齊藤志郎<sup>1</sup> Alexander Kemp<sup>1</sup> 角柳孝輔<sup>1</sup> 狩元慎一<sup>1</sup> 中ノ勇人<sup>1</sup>

William J. Munro<sup>2</sup> 都倉康弘<sup>1</sup> Mark S. Everitt<sup>3</sup> 根本香絵<sup>3</sup> 嘉数誠<sup>4</sup>

水落憲和<sup>5,6</sup> 仙場浩一<sup>1</sup>

<sup>1</sup>量子電子物性研究部 <sup>2</sup>量子光物性研究部 <sup>3</sup>国立情報学研究所 <sup>4</sup>機能物質科学研究部

<sup>5</sup>大阪大学 <sup>6</sup>PREST-JST

超伝導量子ビットは、制御性の良さや拡張性への期待から、量子演算素子の候補として注目され、数量子ビットでの状態操作や量子演算が実現されている。しかしながら、マクロな量子系である超伝導量子ビットは、外界との結合が強くコヒーレンス時間が短いという問題もある。そこで、ミクロな量子系である原子や分子の量子メモリとしての応用が注目されている。ダイヤモンド結晶中の窒素・空孔(NV)中心の電子スピンは、室温でミリ秒のコヒーレンス時間を示し、しかも、超伝導磁束量子ビットと相互インダクタンスを介して結合することが知られている。まさに、超伝導量子ビット用の最適な量子メモリ候補である。

NV中心の電子スピンを超伝導量子ビットの量子メモリとして利用するためには、両者のエネルギーを共鳴させる必要がある。そのために、最適動作点でのエネルギー制御が可能な、ギャップ可変型超伝導磁束量子ビットを開発した[1]。次に、高密度のNV中心を含むダイヤモンド結晶を準備し、サファイア基板の上に作製した磁束量子ビット試料上に貼り付け、超伝導・ダイヤモンド複合系を実現した。

図1に磁束量子ビットのマイクロ波を用いた分光測定結果を示す。2.88 GHzに見られる70 MHzの分裂は、磁束量子ビットとNVスピン集団との間の強結合を示している。この結合強度から、約 $6 \times 10^7$ 個の電子スピスが協調的に量子ビットと結合していることが解る。さらに、磁束量子ビットとNVスピン集団の間で、エネルギー量子1個を繰返し交換するコヒーレント振動(真空ラビ振動)の観測にも成功した(図2)。この振動は、量子ビットとNVスピン集団との間のメモリ動作を表しており、長寿命量子メモリを有する超伝導量子ビットの実現へ向けた第一歩である[2]。

本研究は科研費の援助を受けて行われた。

[1] X. Zhu et al., Appl. Phys. Lett. **97** (2010) 102503.

[2] X. Zhu et al., Nature **478** (2011) 221.

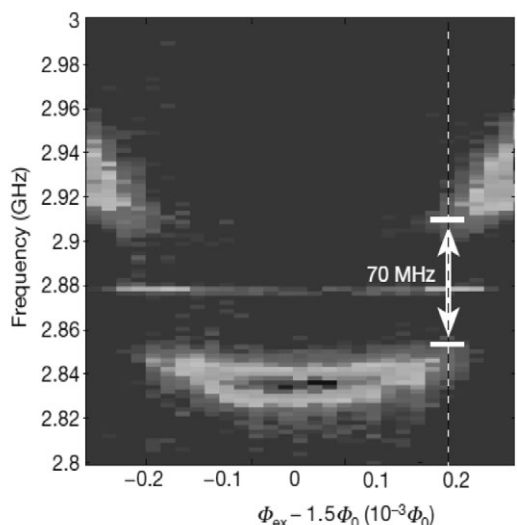


図1 超伝導・ダイヤモンド複合系の分光測定。

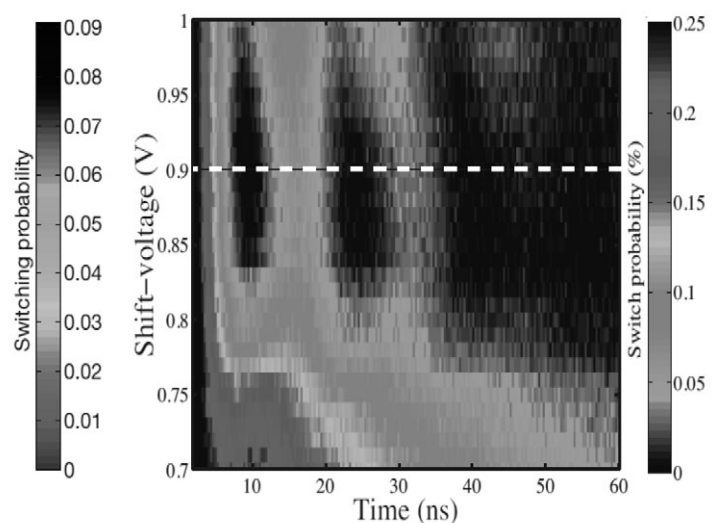


図2 超伝導・ダイヤモンド複合系において観測されたコヒーレント振動(真空ラビ振動)。

# ラップゲート構造を有する $\text{In}_{0.75}\text{Ga}_{0.25}\text{As}$ 量子ポイントコンタクト

入江宏 原田裕一 杉山弘樹\* 赤崎達志  
量子電子物性研究部 \*NTTフォトニクス研究所

高In組成InGaAsを用いて量子ポイントコンタクト(QPC)等の低次元量子構造を作製することで、InGaAsの材料特性を反映した新機能を付与することが出来る。例えば、QPC構造を通過する電子は、InGaAs中の強いスピン軌道相互作用を受け選択的スピン反転を生じることが理論的に予測されている[1]。これはInGaAs系QPCがスピン偏極生成素子として動作することを意味し、半導体スピントロニクスへの応用が期待される。また、高In組成InGaAsは、金属や超伝導体に対しショットキー障壁を形成しない。そのため、界面抵抗の少ない良質な超伝導・半導体接合が不可欠なアンドレーエフ反射の研究に用いられてきた。これを応用し、InGaAs系低次元量子構造と超伝導電極を組み合わせることにより、低次元性に由来した電子状態やスピン相関をアンドレーエフ反射によって検出できる可能性があり、基礎物理探求の観点から興味深い。我々は、高In組成InGaAsを用いたQPCの作製手法を改良することで、従来困難であった良好なQPC動作を実現した[2]。

QPC作製には、 $\text{In}_{0.75}\text{Ga}_{0.25}\text{As}$ を2次元電子ガス層に持つInGaAs/InAlAs/InPヘテロ構造基板を用いた。電子線リソグラフィおよびドライエッチングにより幅 $\sim 100$  nm、長さ $\sim 160$  nmの細線メサ加工を施した後、原子層堆積法(ALD)法により厚さ20 nmの $\text{Al}_2\text{O}_3$ を堆積する。ALD法の高い被覆性により、メサ上部だけでなく側壁にも均一な絶縁膜が形成され、3方向からの電界制御が可能となる。最後に、幅 $\sim 120$  nmのゲート電極を形成しQPCが完成する。図1に、本QPC構造の電子顕微鏡像と断面模式図を示す。図2には、低温かつ零磁場下におけるQPCの電気伝導特性を示す。電気伝導度が量子化伝導率 $2e^2/h$ を単位として階段状に変化しており、理想的なQPC動作が確認された。また、ラップゲート構造に由来する強い横方向閉じ込めにより、1次元チャネル間のエネルギー分離幅が増大し、30 K程度の高温までQPC動作することも明らかとなった。本手法は、量子ドット構造への拡張や超伝導電極間へのQPCの組込みが可能であり、スピン軌道相互作用や超伝導・半導体接合に関する新たな研究手法として発展が期待される。

本研究は科研費の援助を受けて行われた。

[1] M. Eto et al., J. Phys. Soc. Jpn. **74** (2005) 1934.

[2] H. Irie et al., Appl. Phys. Express **5** (2012) 024001.

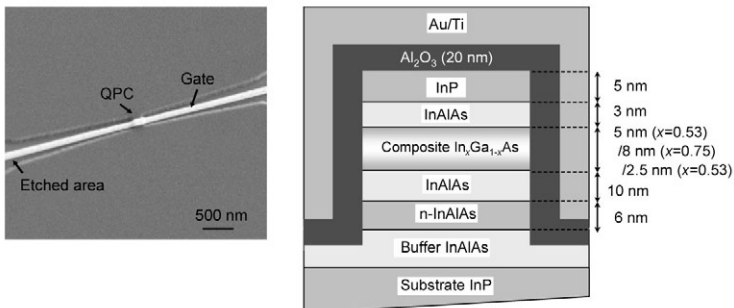


図1 ラップゲート型QPCの電子顕微鏡像と断面模式図。

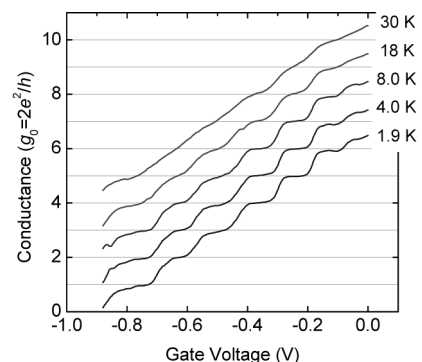


図2 電気伝導度のゲート電圧依存性。

# 光格子中のボース・フェルミ混合原子気体が示す新奇量子相の探究

稲葉謙介 山下眞  
量子光物性研究部

最近、真空チャンバー中の原子気体を、数10 nKの極低温まで冷却することが可能となってきた。このような極低温では、量子効果が系の性質を支配するが、冷却原子の制御性の高さを利用すれば、この量子効果を直接観測することができる。そのため、この系は、量子シミュレータと呼ばれ、物性物理を始め、素粒子や量子化学などの分野で注目されている[1]。中でも、光格子と呼ばれる、レーザの干渉によって作られた周期ポテンシャル中に閉じ込められたフェルミ原子は、金属結晶中の電子と同等に振る舞うため、物性分野に進展をもたらすことが期待されている[2]。格子欠陥や乱れのないこの系では、純粋な量子多体効果を解析できるため、普遍的な物性の追及に役立つ。また、電子を念頭に置いて得られた従来の知見を、拡張・一般化することも興味深い研究課題である。

我々は、京大・高橋研究室のグループと共同で、光格子中にボソンとフェルミオンの2種類の原子を混合した系について、実験・理論両面から解析を行った[3]。その結果、異種原子間の相互作用によって、固体物質では見られない新奇な量子相が誘起されることを明らかにした。ここでは、引力相互作用するボース・フェルミ混合系を解析した結果を簡単に紹介する。京大グループは、光会合分光測定を用いて、ボソンとフェルミオンのそれぞれのペア占有率を、両原子数の相対的な比を変化させながら測定した。我々は、実験パラメータを正確に反映できる理論解析手法を開発し、この実験の解析を行った。図1(a)、(b)に結果を、図1(c)に測定法の概要を示す。これらの結果から理論と実験は定量的な一致を見せていることが分かる。我々はさらに、実験で直接測定することが難しい物理量を数値的に解析し、フェルミオン数の増加とともに現れるボース-ボースペア占有率の非単調な振る舞い [図1(b)] は、複数の量子相の出現を反映していることを明らかにした。また、斥力相互作用を有する系も同様に解析し、多様な量子相が出現することが明らかになっている。今後は、このような量子相転移を測定・解析する技術を進展させ、量子多体効果の普遍的側面までの探求を目指す。

[1] I. Bloch, *Nature Phys.* **1** (2005) 23.

[2] M. Greiner and S. Fölling, *Nature* **453** (2008) 736.

[3] S. Sugawa, K. Inaba et al., *Nature Phys.* **7** (2011) 642.

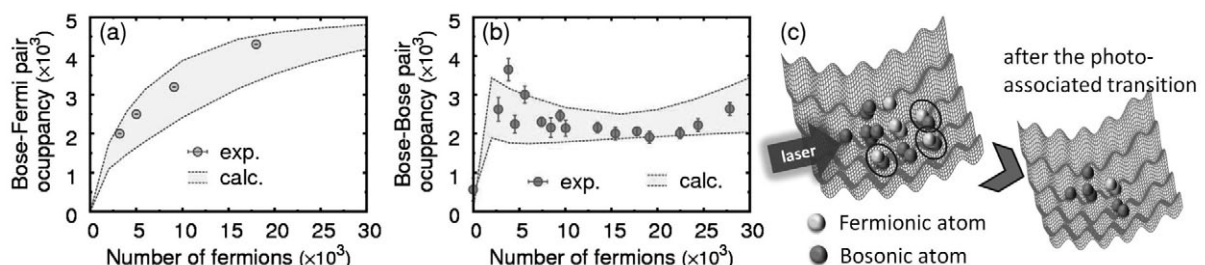


図1 (a) ボース-フェルミペア、および (b) ボース-ボースペア占有率の光会合分光による測定結果。ボソンの数は5,000個に固定されている。理論計算は、実験パラメータ(温度)の誤差を考慮して幅を持たせてある。(c) ボース-フェルミペア占有数測定の概要。入射レーザによって引き起こされる光会合過程により、同一格子点上の2原子から形成された分子は、光格子の閉じ込めから直ちに抜け出す。その後、減った粒子数をカウントする事でペア占有数が測定できる。また、入射光を変えることで、様々なペア占有を測定できる。

# シリコンフォトニック結晶スローライト導波路における光非線形性増強

松田信幸 原田健一 武居弘樹 倉持栄一 谷山秀昭 納富雅也  
量子光物性研究部

スローライト(SL)は物質中において群速度 $v_g$ が極端に小さくなった光を指す。SL効果により、媒質を伝搬する光はその進行方向に圧縮され、また媒質との相互作用時間も増大する。これにより光-物質相互作用が増強されるため、光によって光の状態を高速に制御する全光情報処理デバイスの低消費電力動作が期待される。我々はこれまで、高い $Q$ 値(100万程度)のSiフォトニック結晶(PC)共振器を大規模に連結し、チップ集積および通信波長帯での広帯域動作が可能なSL導波路を実現した[1]。今回我々は、前記PC-SL導波路における3次非線形光学効果を用いた全光波長変換実験を行い、減速効果による波長変換効率の増強に成功した[2]。

図1に示すSi-PC共振器結合型SL導波路( $v_g = c/36$ , 長さ0.42 mm)へ通信波長帯のポンプ光とシグナル光を入射し、コア媒質(Si)との相互作用による四光波混合過程を通じて生成される新たなアイドラ光が、SL帯域内で発生することを確かめた。また、シグナル光からアイドラ光への波長変換効率がポンプ光強度の二乗に比例することを確認し、本過程がポンプ光の二光子励起に伴う四光波混合過程によることを確認した(図2)。このグラフの傾きより、デバイスの非線形性の指標である非線形定数 $\gamma$ の値として18,600 /W/mを得た。この値は単一モード光ファイバの $10^7$ 倍である。一方、同様の導波路閉じ込め断面積を有するSi細線導波路[3]( $v_g = c/4.2$ )では $\gamma = 300$  /W/mが、従来型のSi-PC格子シフト型SL導波路[4]( $v_g = c/30$ )では $\gamma = 2,930$  /W/mがそれぞれ報告されている。本デバイスの $\gamma$ が極めて大きい理由として、SL効果により $\gamma$ が $(1/v_g)^2$ に比例して増大することと、PCナノ共振器ベースの導波路を用いたことによる強い空間モード閉じ込めの寄与が挙げられる。四光波混合による光波長変換効率は $\gamma^2$ に、また光カー効果による非線形位相シフトは $\gamma$ にそれぞれ比例することから、PC共振器結合型SL導波路が高効率な全光信号処理デバイスとなる可能性が示された。

本研究は科研費の援助を受けて行われた。

[1] M. Notomi, E. Kuramochi, and T. Tanabe, Nature Photon. **2** (2008) 741.

[2] N. Matsuda et al., Opt. Express **19** (2011) 19861.

[3] K. Harada et al., IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. **16** (2010) 325.

[4] C. Monat et al., IEEE. J. Sel. Top. Quantum Electron. **16** (2010) 344.

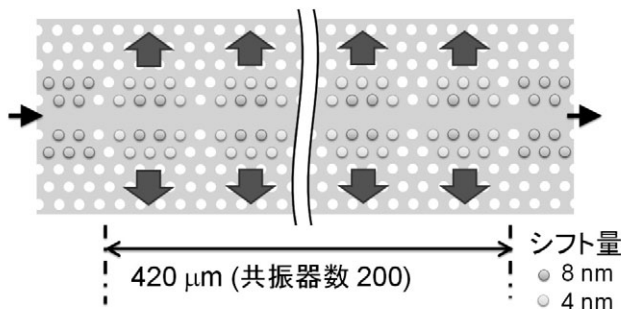


図1 シリコンフォトニック結晶結合共振器光導波路。

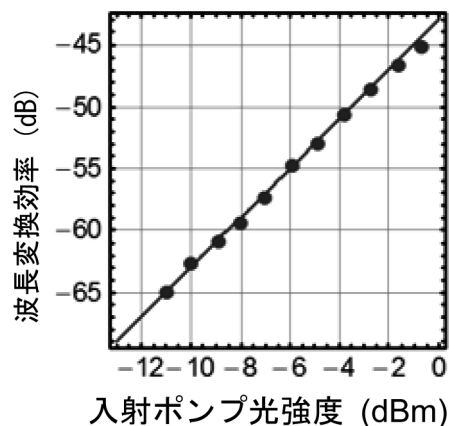


図2 四光波混合によるシグナル光からアイドラ光への波長変換効率。

# 連続発振半導体レーザからの GHz 繰返しフェムト秒光パルス発生

西川正 石澤淳  
量子光物性研究部

GHzの繰返しを持つフェムト秒レーザは、ナノメカ評価やナノバイオ観察のための多光子励起顕微鏡用の光源や高速光サンプリングやキャリアエンベロープオフセットロック広モード間隔光周波数コム[1]の実現に対して有用である。フェムト秒のパルス幅を持つ光パルス列を発生させる一般的な方法はモード同期方式によるものである。しかしながら、レーザの共振器長が繰返し周波数に対応するために、1 GHz以上の繰返しを持つフェムト秒光パルス列を発生させることは困難である。さらに、繰返し数と中心波長のチューニング範囲も狭い。そこで我々は、市販の光位相変調器と光強度変調器および標準的なシングルモードファイバを用いて、繰返しと中心波長が可変なGHz繰返し光パルス列を発生させる方法を提案した。

中心波長 1552 nmの連続発振半導体レーザ(CW LD)からの光の位相をRFシンセサイザーからの25 GHz正弦波で駆動する光位相変調器を用いて変調する。これにより、25 GHz繰返しの周期的なアップアンドダウンチャープが生じる。そして線形なダウンチャープ部分を光強度変調器で切り出すことにより、バンド幅24 nmのフラットな光周波数コムスペクトルを作ることができる。この光をシングルモードファイバで分散補償することにより、パルス幅230 fsの25 GHz繰返し光パルス列を発生させることに成功した。さらに、光ゲートにより繰返しを1 GHz(または250 MHz)に落としてからエリビウム添加光ファイバ増幅器(EDFA)により平均出力1 Wにまで増幅を行う。これによりEDFA内でのピーク強度は数kWに達し、自己位相変調効果によりスペクトルブロードニングが生じる。そしてスペクトル幅が広がったパルスを、長さ1 mのガラスブロックを用いて圧縮を行った。その結果、平均出力1 Wの、繰返し1 GHzでパルス幅120 fsおよび、繰返し250 MHzでパルス幅80 fsの光パルス列の発生に成功した[2]。図1には後者の場合のスペクトルおよび自己相関波形を示す。我々が知りうる限り、これはこの繰返し周波数において、CW LDをシード光に用いて発生させた光パルスの最短パルス幅である。我々の手法では、RFシンセサイザーの光変調器駆動周波数とシードに用いるLDの波長を変えることにより、繰返しと中心波長が広範囲に可変なサブ100 fsレーザを提供することが可能となる。これらの特徴により、我々が提案するレーザシステムは、様々な利用分野での重要なツールとなる。

- [1] A. Ishizawa, T. Nishikawa et al., *Electron. Lett.* **46** (2010) 1343.  
[2] A. Ishizawa, T. Nishikawa et al., *Optics Express* **23** (2011) 22402.

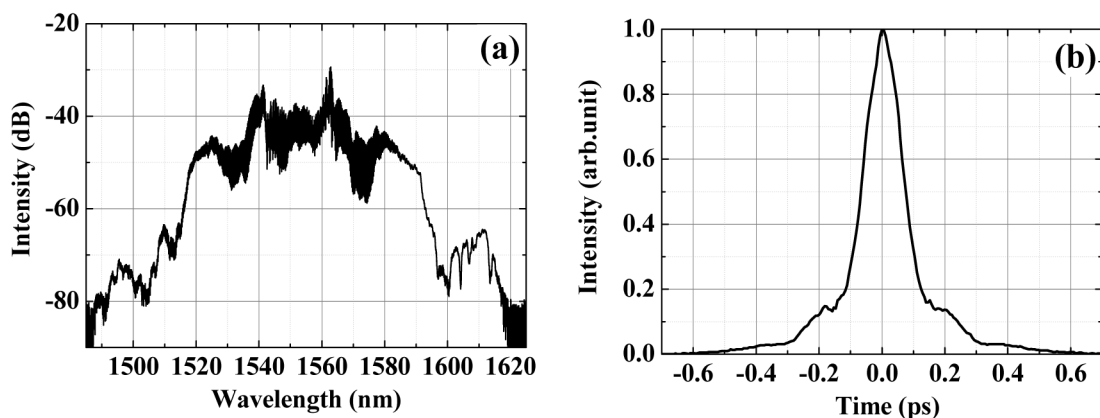


図1 250 GHzゲート利用時の(a)スペクトルおよび(b)自己相関波形。

# 表面弾性波による電子スピンの輸送と操作

眞田治樹 後藤秀樹 小野満恒二\* 寒川哲臣  
量子光物性研究部 \*量子電子物性研究部

電子スピンを離れた場所に運ぶ技術は、スピン軌道相互作用の物理の解明[1]に有用であるとともに、スピン情報の伝送を必要とするスピントロニクスへの応用[2]も期待されている。我々は、半導体中を伝搬させた表面弾性波(Surface Acoustic Wave: SAW)がつくる動的ワイヤや動的ドットを用いて、移動中のスピンのダイナミクスを調べる研究を行っている[3]。

動的ワイヤおよびドットは、厚さ20 nmのGaAs/AlGaAs(001)量子井戸内に発生させた。試料表面の楕形電極に高周波を印加すると、SAWが[-110]または[110]方向に速度 $v_{\text{SAW}} = 3$  km/sで伝搬する。その際、量子井戸内部に動的なピエゾ電場が誘起され、1次元の閉じ込めポテンシャル、すなわち動的ワイヤが形成され、速度 $v_{\text{SAW}}$ で移動する。また、直交する二波のSAWを干渉させると、ピエゾ電場が格子状に変調されることによって動的ドットが形成される。動的ドットは速度 $\sqrt{2} v_{\text{SAW}}$ で[010]方向に進行する。

輸送中のスピンドイナミクスは、ポンププローブ技術をベースとしたKerr顕微測定法によって計測した。円偏光のポンプ光を試料の固定した位置に照射すると、スピン偏極した電子が生成される。一方、直線偏光のプローブ光を別の位置に照射すると、その場所のスピに応じて反射光の偏光軸が $\theta_K$ だけ回転する。このプローブ光の照射位置をスキャンしながら $\theta_K$ を計測することで、輸送中のスピン分布を二次元イメージとしてとらえることができる。

図1は、実験によって得られたスピン輸送の二次元イメージである。無磁場下にもかかわらずKerr信号が振動していることから、スピン軌道相互作用によってスピンが歳差運動していることが推測できる。さらに、歳差運動周波数がSAW強度にも依存することが観測された(図2)。この結果を理論的に解析したところ、表面弾性波によって生じる動的な歪やピエゾ電場が、スピン軌道相互作用を変化させていることが明らかになった[3]。今後のスピントロニクス応用に向け、新しいスピン操作技術として期待できる。

本研究の一部は科研費の援助を受けて行われた。

- [1] Y. Kato et al., Nature **427** (2004) 50.
- [2] S. A. Wolf et al., Science **294** (2001) 1488.
- [3] H. Sanada et al., Phys. Rev. Lett. **106** (2011) 216602.

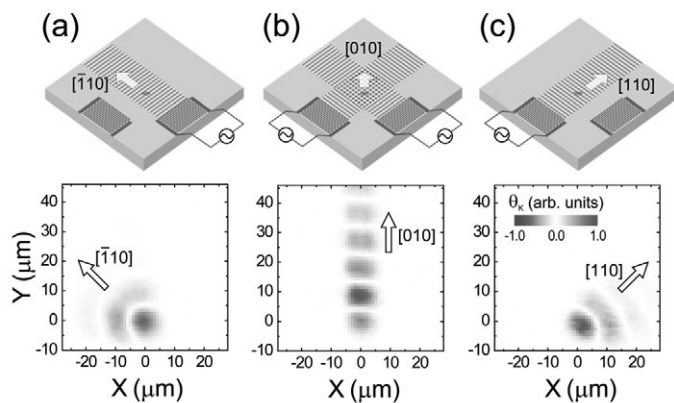


図1 スピン輸送の二次元イメージ。(a) [-110]方向に移動する動的ワイヤ、(b) [010]方向に移動する動的ドット、(c) [110]方向に移動する動的ワイヤ、で移動させたときの測定結果。

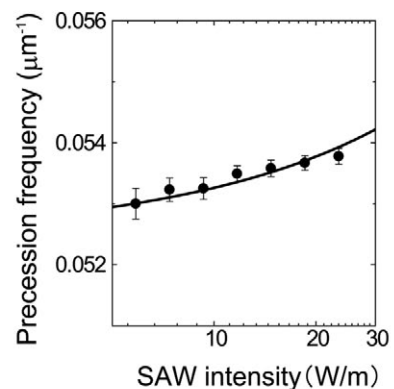


図2 動的ドットにおける歳差運動周波数のSAW強度依存性。実線は理論計算によるフィット。

# グラフェンエッジのラマン分光で見える結合性・反結合性分子軌道

佐々木健一 加藤景子 都倉康弘 鈴木哲\*  
量子光物性研究部 \*機能物質科学研究部

グラフェンは、従来の半導体にはなかった顕著な性質を持つ。その一つに擬スピンと呼ばれる分子軌道の自由度がある。通常、結合性軌道は反結合性軌道に比べエネルギー的に安定であるが、グラフェンはそれらが縮退している特殊な系であり、重ね合わせ状態を作るのにエネルギーを必要としない。この重ね合わせの自由度を、実スピンの方向がアップスピンとダウンスピンの重ね合わせで決まるように対応させたものが擬スピンである。我々はグラフェンの擬スピントロニクスを模索している。

アップスピンとダウンスピンを識別することはスピントロニクスの要であると同様に、擬スピントロニクスにおいても2つの擬スピン状態を識別することが重要である。実スピンの方向は磁場で変わるが、擬スピンの方向を変えるのはグラフェンに加えられる応力（ストレイン）である。物質にはフォノンという内在型ストレインがあり、擬スピン方向は電子とフォノンの相互作用により決定される。ラマン分光は擬スピンの方向の情報を得るのに適している。我々は、グラフェンエッジのラマン分光では、結合性・反結合性軌道に対応した2つの擬スピン状態が自動的に識別されることを見いだしたので報告する。

グラフェンエッジでラマンスペクトルをとると、Dバンドと呼ばれるスペクトルが現れる。Dバンド強度は強い偏光特性を有し、レーザーの入射電場がエッジに平行なときに最大強度、垂直のときに最小になる[1]。最小値は最大値のおよそ10%から20%くらいの値が報告されている。この偏光特性の起源を考察した結果、Dバンドが、炭素間結合の伸縮運動のみからなる特殊なフォノン（ストレイン）であるために、結合性・反結合性軌道とのみ選択的に強く結合することによるものであることを明らかにした[2]。つまり、グラフェンエッジに光をあててDバンドを観測することは、様々な擬スピン状態が寄与しえる可能性の中で、特に結合性・反結合性分子軌道に対応したアップ擬スピンとダウン擬スピンだけを選択的に観測していることと同じである[図1(a)]。

また、Dバンドが2つのサブピークに分裂すると予測している[図1(b)]。振動数の高いピークが結合性軌道、低い方が反結合性軌道の電子状態から励起される。この分裂により、アップ擬スピンとダウン擬スピンをラマン分光で識別することが可能である。このDバンド分裂の直接の観測例はまだないが、理論で期待される振舞を示すサブピークが所内のナノチューブの実験[3]で観測されており対応関係を精査中である。

- [1] C. Cashiragi et al., Nano Lett. **9** (2009) 1433.
- [2] K. Sasaki et al., Phys. Rev. B **85** (2012) 075437.
- [3] S. Suzuki and H. Hibino, Carbon **49** (2011) 2264.

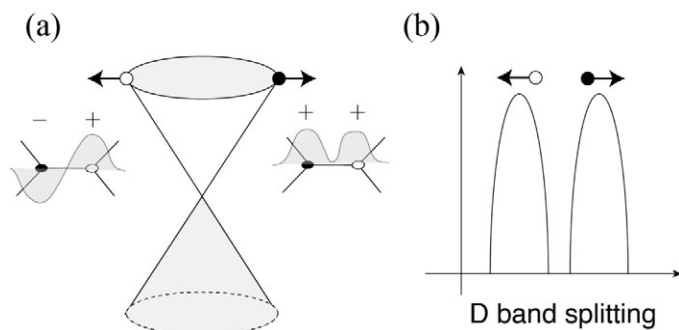


図1 (a)グラフェンのエネルギー分散関係。Dバンドのフォノンを選択的に放出する電子を黒丸と白丸で示した。これらの状態が結合性、反結合性分子軌道に対応した2つの擬スピニアップ、ダウン状態である。(b)Dバンドの分裂の概念図。



# ナノプローブ・リソグラフィによる超高 Q 共振器の形成

横尾篤 田辺孝純 倉持栄一 納富雅也  
量子光物性研究部

フォトニック結晶により実現される光共振器は、高い光閉じ込め性能 (Q 値) を持ち、低動作パワーの光デバイスや光集積回路を実現するための基本パーツとして注目されている。従来、フォトニック結晶共振器は、高精度な電子ビームリソグラフィとドライエッチングプロセスにより作製されているが、従来プロセスにおいては、光共振器などフォトニック結晶中に組み込む機能性部位を、作製プロセス開始前の CAD データ中にデザインする必要があり、フォトニック結晶構造を作製した後に、機能の追加や変更を行うことは困難であった。

我々は、微細な探針 (ナノプローブ) により、位置選択的に酸化物を形成するパターニング手法を使い、既存のシリコンフォトニック結晶線欠陥上に超高 Q 共振器を新規形成することに成功した (図 1) [1]。AFM リソグラフィ、もしくは、探針走査リソグラフィ (SPL) と呼ばれる本手法では、導電性探針と対象物との間に電圧を印加することで、陽極酸化反応による微細な酸化物パターン形成が可能である。フォトニック結晶表面への酸化物パターン形成や、フッ酸エッチングを使った酸化部位の除去による溝パターン形成により、局所的な屈折率変化を与えることができる。フォトニック結晶線欠陥におけるモードギャップ端周波数は、屈折率変化に対して敏感であるため、微小な屈折率変化 ( $\Delta n/n < 0.1\%$ ) によって加工部におけるモードギャップ端周波数を変化させることができ、非加工部におけるモードギャップ端周波数との差によって共振器を形成することができる [2]。SPL と HF エッチングにより共振器を形成したサンプルの光透過スペクトルの共振幅から Q 値を算出した結果、本手法によって微小なモード体積 ( $0.2 \mu\text{m}^3$ ) を有する超高 Q 共振器 ( $Q > 100$  万) が形成できることが確認された (図 2)。この共振器における光子寿命は  $1.25 \text{ ns}$  であることが確認されている。この結果は、フォトニック結晶構造作製後の追加加工により超高 Q 共振器を形成した初めての例であり、本手法によりフォトニック結晶線欠陥上の任意の位置に共振器を導入できることが証明された。さらに、本手法によるフォトニック結晶共振器において、従来プロセスによるフォトニック結晶共振器と同等の閾値パワーでの光双安定動作が可能であることが確認されており、光閉じ込め性能において、従来プロセスによるフォトニック結晶共振器と遜色ないことが示されている。以上の結果は、共通のフォトニック結晶基板上に SPL によりパターンを形成し任意の機能デバイスを提供する、光ユニバーサル基板コンセプトの実現可能性を示したものである。

[1] A. Yokoo, T. Tanabe, E. Kuramochi, and M. Notomi, *Nano Lett.* **11** (2011) 3634.

[2] M. Notomi and H. Taniyama, *Optics Express* **16** (2008) 18657.

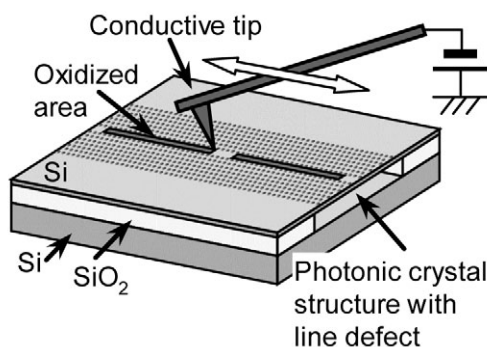


図 1 フォトニック結晶線欠陥への SPL による共振器形成。

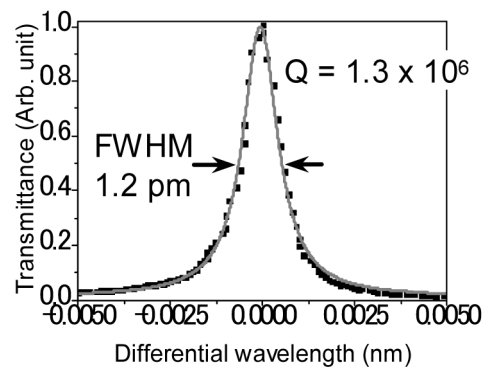


図 2 SPL と HF エッチングによりフォトニック結晶線欠陥上に形成された共振器の共振ピーク ( $Q = 130$  万)。

# 光ナノ共振器による超低消費パワー光 RAM 集積チップ

野崎謙悟 新家昭彦 松尾慎治\* 須崎泰正\* 瀬川徹\* 佐藤具就\*  
 高橋亮\* 納富雅也  
 量子光物性研究部 \*NTTフォトニクス研究所

光信号を電気に変換せずに保持可能な光ランダムアクセスメモリ (光RAM) は、光ルータ等の光情報処理での利用が期待できるが[1]、サイズと消費パワーの制約により最も実現困難な光素子の一つであった。本研究では、フォトニック結晶(PhC)ナノ共振器におけるキャリア非線形効果を利用し、極めて低消費パワーの光RAM集積チップを実現した[2]。InP薄膜によるPhC中に微小なInGaAsP層を局所的に埋め込んだヘテロ構造 [図1(a)] では、光とキャリアが共振器内に強く閉じ込められる。その結果、極めて低い光入力パワーでも光双安定現象が現れ [図1(b)]、光パルスの入射によってオン/オフの2状態を切り替えるメモリとして動作する。評価された最小メモリ動作パワーは30 nWと極めて低く、10  $\mu\text{m}^2$  以下に収まる微小サイズも含め、大規模集積に適した光メモリ素子といえる。

実際にこのPhC光RAMを半導体チップ上に集積し、40 Gbit/s光信号列のRAM動作を実証した [図1(c)]。4ビットの光信号列(1010または1101)は高速光シリアル/パラレル変換器により並列化され、個別に光RAMに書き込まれる。書き込み動作の500 ns後に読出し光パルスを入射させると、書き込みがされた光RAMからのみ光パルスが出力することが確認された。すなわち、4ビット・40 Gbit/sの光信号列が500 nsだけメモリ保持されたことを示している。このようなナノ光デバイスを集積し協調動作させた例はこれまでになく、世界で初めての光RAM集積チップの実証である。

本研究は情報通信研究機構(NICT)の委託研究「全光パケットルータ実現のための光RAMサブシステムの研究開発」の一環として行われた。

[1] M. Notomi et al., IET Circuits Devices & Systems **5** (2011) 84.

[2] K. Nozaki et al., Nature Photon. **6** (2012) 248.

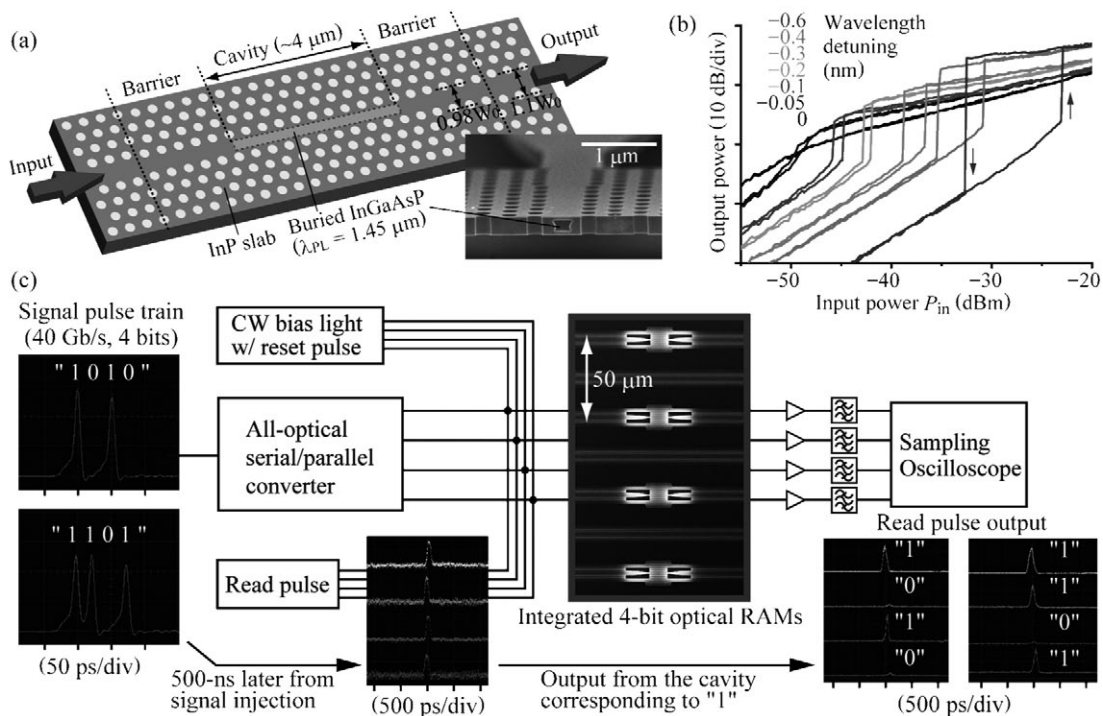


図1 (a)埋め込みヘテロ構造を持つフォトニック結晶ナノ共振器型の光RAM素子。(b)光入出力特性における光双安定現象。(c)チップ上に並列集積されたナノ共振器による4ビット光RAM動作。



## II. 資料

## 社外表彰受賞者一覧 (2011 年度)

平成 23 年度科学技術分野 の文部科学大臣表彰 若手科学者賞	谷保 芳孝	窒化アルミニウム半導体 の結晶成長と遠紫外発光 素子の研究	2011.4.20
The Institute of Physics (IOP) フェロー	山口 浩司	For personal contribution to the advancement of physics as a discipline and a profession	2011.5.18
The Young Scientist Award of the International Symposium on Compound Semiconductors 2011	谷保 芳孝	Seminal Contributions to the Growth of AlN and its Application to the Shortest Wavelength Light Emitting Diodes	2011.5.25
応用物理学会論文奨励賞	角柳 孝輔	Generation of Non-Classical Microwave Photon States in an Inductor; Capacitor Resonator Coupled to a Superconducting Flux Qubit	2011.8.30
An MOC Paper Award, the 7th Micropotics Conference	石倉 徳洋 (横浜国大)、 馬場 俊彦 (横浜国大)、 倉持 栄一、 納富 雅也	Ultrahigh-resolution tunable delay and its application to fast optical correlator	2011.11.2
第 28 回井上學術賞	山口 浩司	微細機械構造の量子力学 的振る舞いに関する先駆 的研究	2012.2.3
第 31 回応用物理学会 講演奨励賞	畑中 大樹	2DEG キャリア制御によ る機械振動子の高効率遠 隔励振	2012.3.15

## 社内表彰受賞者一覧（2011 年度）

日本電信電話株式会社 社長表彰	横山 春喜 小林 隆 渡邊 則之 熊倉 一英 廣木 正伸 小田 康裕	パワーデバイス用窒化ガリウム薄膜 結晶の事業化支援	2011.10.21
先端技術総合研究所 所長表彰 研究開発賞	齊藤 志郎 角柳 孝輔 Xiaobo Zhu 中ノ 勇人 狩元 慎一 田中 弘隆 William J. Munro 仙場 浩一	ジョセフソン量子回路を用いた量子 情報処理の新分野開拓	2011.12.21
物性科学基礎研究所 所長表彰 業績賞	Xiaobo Zhu 齋藤 志郎 Alexander Kemp 角柳 孝輔 狩元 慎一 中ノ 勇人 William J. Munro 都倉 康弘 嘉数 誠 仙場 浩一	ダイヤモンド NV 中心と超伝導磁束 量子ビットを用いた「量子メモリ」 の原理実証	2012.3.28
物性科学基礎研究所 所長表彰 業績賞	山下 眞 稲葉 謙介 Michael W. Jack	冷却原子系の理論解析手法の開発と 光格子中の新規な凝縮相の発見	2012.3.28
物性科学基礎研究所 所長表彰 業績賞	眞田 治樹 後藤 秀樹 小野満 恒二 寒川 哲臣	表面弾性波による光物性制御とスピ ン操作	2012.3.28
物性科学基礎研究所 所長表彰 業績賞	野崎 謙悟 新家 昭彦 納富 雅也 須崎 泰正 瀬川 徹 佐藤 具就 松尾 慎治 高橋 亮	フォトリック結晶共振器を用いた 4 ビット集積型 RAM サブシステムの 極低パワー動作の実証	2012.3.28
物性科学基礎研究所 所長表彰 論文賞	Xiaobo Zhu 齋藤 志郎 Alexander Kemp 角柳 孝輔 狩元 慎一 中ノ 勇人 William J. Munro 都倉 康弘 嘉数 誠 仙場 浩一	"Coherent coupling of a superconducting flux qubit to an electron spin ensemble in diamond," Nature 478, 221-224 (2011).	2012.3.28

## 報道一覧 (2011年度)

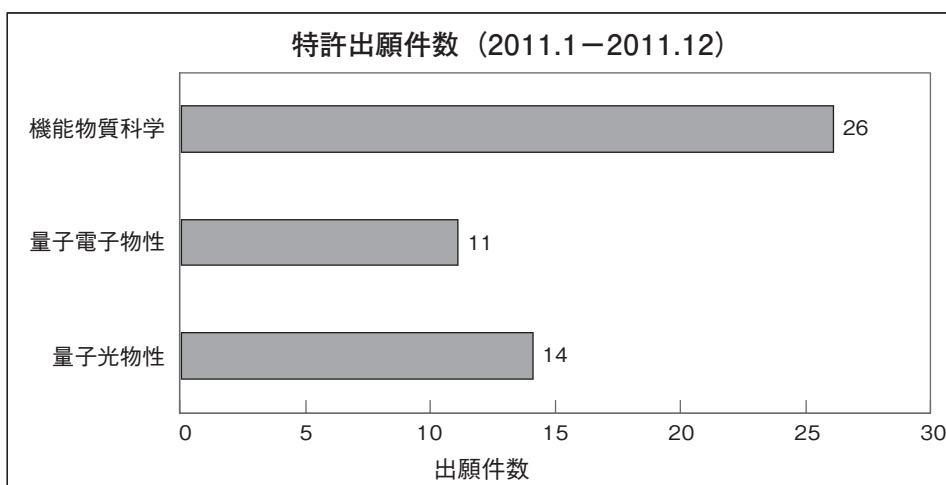
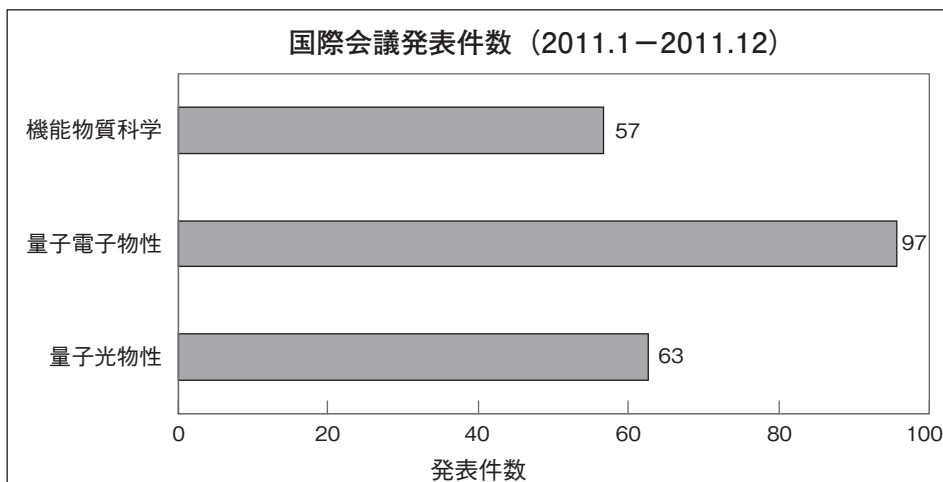
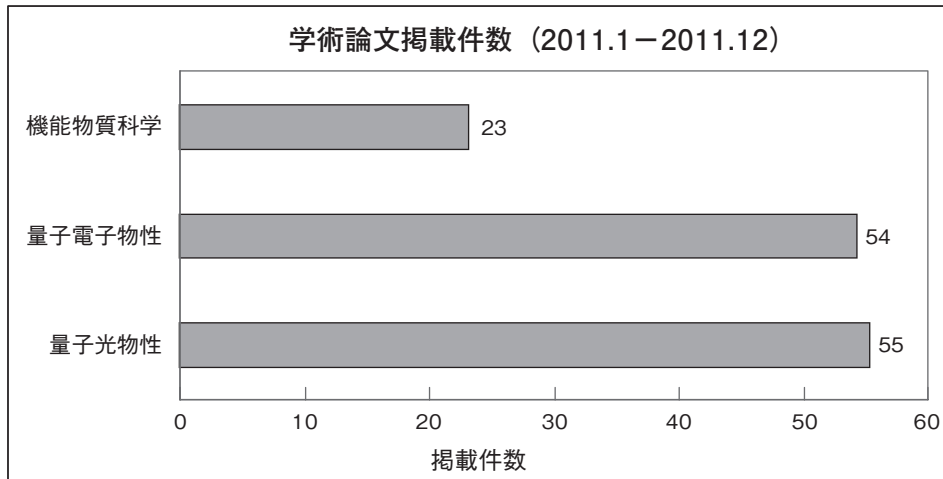
発表月日	発表媒体	見出し
5月31日	日刊工業新聞	超音波で電子スピン制御 NTT 東北大 新型半導体素子に道
6月2日	日経産業新聞	NTT など 「スピン」長時間制御 超音波で量子電算機へ期待
6月20日	日本経済新聞	10年後には電流使わない半導体？ 磁石の制御で情報処理
7月6日	半導体産業新聞	効率99.3%達成の GaN 通信分野で期待されるダイヤ
7月25日	日本経済新聞	新型半導体素子 電力ほぼゼロ 東大と NTT
8月1日	電経新聞	京大と量子技術で世界初の成果 NTT
8月8日	通信興業新聞	NTT と京大 極低温下で実現 物質の新しい量子状態
8月16日	京都新聞	科学特集掲載 光格子で量子状態作り成功
8月25日	日刊工業新聞	電子スピン制御技術開発
8月26日	化学工業日報	生体分子マイクロアレイ NTT 研が高集積化技術 土台の人工細胞膜形成 「自発展開」現象を利用
9月2日	日経産業新聞	深紫外光 LED 波長や発光、自在に制御 NTT が作り分け技術 殺菌や有害物分解
10月3日	通信興業新聞	NTT と東京大学 量子計算機に一步 “量子もつれ制御”に成功
10月13日	日刊工業新聞	「量子もつれ」振動を制御 量子メモリ 原理実験成功 NTT・阪大・国立情報学研
10月13日	日経産業新聞	量子メモリ実証成功 NTT など 複雑な計算に適応へ
10月17日	通信興業新聞	NTT など 量子コンピュータ、一步現実へ メモリ原理実験に成功

発表月日	発表媒体	見出し
1月11日	半導体産業新聞	「究極の半導体」を目指して ダイヤモンド研究の最前線
1月11日	半導体産業新聞	「究極の半導体」実用化への歩み
1月27日	日経産業新聞	自然界の「第3の粒子」 存在確率高まる NTT など実験で分析
1月27日	日刊工業新聞	「準粒子」の電子状態解明 NTT・JST 量子計算手法に一步
2月10日	科学新聞	NTT、JST トポロジカル量子計算実現へ期待 準粒子の存在が予想される電子状態解明
2月27日	日刊工業新聞	フォトニック結晶で光RAM 消費電力300分の1 NTT
2月27日	日経産業新聞	光通信、消費電力1/300 NTT 中継用光チップ試作
3月5日	朝日新聞	高速・節電の光メモリ開発
3月5日	通信興業新聞	NTTの研究所 世界初の「光RAM」 超小型・超低電力を実現



## 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（2011年）

2011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132件、国際会議の発表件数は217件です。また出願特許数は51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	(IF2010*)	件数
Physical Review B	3.774	18
Applied Physics Letters	3.841	16
Japanese Journal of Applied Physics	1.024	13
Physical Review Letters	7.622	12
Optics Express	3.753	11
Applied Physics Express	2.778	5
Physical Review A	2.861	4
Nature Physics	18.43	3
Nano Letters	12.219	3
New Journal of Physics	3.849	3
Nature	36.104	2
Nanotechnology	3.652	2
Nature Nanotechnology	30.324	1
ACS Nano	9.865	1
Journal of the American Chemical Society	9.023	1
Small	7.336	1
Proceedings of the IEEE	5.151	1
Carbon	4.896	1
Journal of Physical Chemistry C	4.524	1
Langmuir	4.269	1
Nature Communications	-	1

\*IF2010：インパクトファクター 2010 (出展：Journal Citation Reports, 2010)  
 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4.78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	37
2011 International Conference on Solid State Devices and Materials	19
Electronic Properties of Two-Dimensional Systems 19	12
24th International Microprocesses and Nanotechnology Conference	5
38th International Symposium on Compound Semiconductors	5
Conference on Lasers and Electro-Optics/Quantum Electronics and Laser Science Conference	5
International Symposium on Surface Science	5
22nd European Conference on Diamond, Diamond-Like Materials, Carbon Nanotubes and Nitrides	4
24th International Symposium on Superconductivity	4
Biophysical Society 55th Annual Meeting	4
ERATO Macroscopic Quantum Control Conference on Ultracold Atoms and Molecules	4
Frontiers in Nanoscale Science and Technology	4
Quantum Nanostructure and Nanoelectronics 2011	4

## 国際会議招待講演一覧 (2011年)

### I. 機能物質科学関連

- (1) H. Hibino, S. Tanabe, and H. Kageshima, "Growth and characterization of graphene on SiC", Graphene Workshop in Tsukuba 2011, Tsukuba, Japan (Jan. 2011).
- (2) H. Hibino, S. Tanabe, and H. Kageshima, "Growth, structure, and transport properties of epitaxial graphene on SiC " 8th International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices '11 (ALC'11) Seoul, Korea (May 2011).
- (3) M. Kasu, K. Hiram, and Y. Taniyasu "High-thermal-efficiency AlGaIn/GaN HEMTs on diamond", Asia-Pacific Workshop on Fundamentals and Applications of Advanced Semiconductor Devices, Daejeon, Korea (June 2011).
- (4) H. Hibino, S. Tanabe, and H. Kageshima, "Growth and electronic transport properties of monolayer and bilayer graphene on SiC", XX International Material Research Congress 2011 (IMRC 2011), Cancun, Mexico (Aug. 2011).
- (5) M. Kasu, K. Hiram, and Y. Taniyasu, "Nitride/diamond heterostructures -from growth to devices-", 22nd European Conference on Diamond, Diamond-Like Materials, Carbon Nanotubes and Nitrides (Diamond 2011), Garmisch-Partenkirchen, Germany (Sep. 2011).
- (6) A. Shimada, T. Iwata, N. Nakano, and K. Torimitsu, "CMOS LSI for excitation and measurement of neural activity with microelectrode array", 2011 International Conference on Solid State Devices and Materials, Nagoya, Japan (Sep. 2011).
- (7) M. Kasu and K. Hiram, "Diamond-based Electronic Device Technologies", International Conference on Carbon-based Nano-Materials and Devices, Suzhou, China (Oct. 2011).
- (8) H. Hibino, S. Tanabe, and H. Kageshima, "Carrier transport in epitaxial graphene grown on SiC(0001)", 3rd International Symposium on the Science and Technology of Epitaxial Graphene (STEG3), Saint Augustine, U.S.A. (Oct. 2011).
- (9) H. Omi, "Surface plasmon of gold nanorods in solutions", BIT's 1st Annual World Congress of Nano-S&T, Dalian, China (Oct. 2011).
- (10) Y. Krockenberger, "Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> thin films: What's next?", International Workshop for Young Researchers on Topological Quantum Phenomena in Condensed Matter with Broken Symmetries, Shiga, Japan (Nov. 2011).
- (11) K. Furukawa and J. Durao, "Donor-to-Acceptor Distance Dependent Fluorescence Resonance Energy Transfer Efficiency for Multiple Donors and Acceptors System Confined within 2-Dimensional Fluid of Supported Lipid Bilayer", International Symposium on Surface Science (ISSS-6), Funabori, Japan (Dec. 2011).

## II. 量子電子物性関連

- (1) H. Okamoto, D. Ito, K. Onomitsu, H. Sanada, H. Gotoh, T. Sogawa, and H. Yamaguchi, "Carrier-mediated opto-mechanical coupling in GaAs cantilevers", Frontiers in Nanoscale Science and Technology Workshop (FNST2011), Saitama, Japan (Jan. 2011).
- (2) H. Nakano, "Time-evolution during superconducting qubit measurement process", International Symposium "Nanoscience and Quantum Physics 2011" (nanoPHYS'11), Tokyo, Japan (Jan. 2011).
- (3) S. Saito, "Entanglement between macroscopic resonator and microscopic two level system through a flux qubit", The Third International Workshop on Dynamics and Manipulation of Quantum Systems (DMQS2010), Tokyo, Japan (Feb. 2011).
- (4) H. Nakano, "Energy flow and information flow in qubit measurement process", International Conference in Quantum Bio-Informatics Center (QBIC2011), Chiba Japan (Mar. 2011).
- (5) Y. Ono, M.A.H. Khalafalla, J. Noborisaka, G.P. Lansburgen, and A. Fujiwara, "Dopants in silicon transistors: transport and photoemission", CMOS Emerging Technologies Workshop, Whistler, BC, Canada (June 2011).
- (6) T. Shinada, M. Hori, Y. Ono, A. Komatsubara, K. Kumagai, T. Tanii, T. Endoh, and I. Ohdomari, "Control of dopant distribution by dingle-ion implantation and its impact on transconductance of FETs", 2011 Asia-Pacific Workshop on Fundamentals and Applications of advanced Semiconductor Devices (AWAD2011), Daejeon, Korea (June 2011).
- (7) T. Koga, T. Matsuura, S. Faniel, S. Souma, S. Mineshige, Y. Sekine, and H. Sugiyama, "Determination of spin-orbit coefficients and application to the spin-filter devices using InGaAs/InAlAs heterostructures", 2011 Asia-Pacific Workshop on Fundamentals and Applications of Advanced Semiconductor Devices (AWAD2011), Daejeon, Korea (June 2011).
- (8) H. Yamaguchi, I. Mahboob, H. Okamoto, and K. Onomitsu, "Heterostructure-based parametric resonator and its applications", The Second International Seminar on Nano-Electro-Mechanical Systems (NEMS2011), Toulouse, France (July 2011).
- (9) L. Tiemann, G. Gamez, N. Kumada, and K. Muraki, "The spin polarization of the  $\nu = 5/2$  fractional quantum Hall state", The 19th international Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Electron Systems (EP2DS19), Tallahassee, Florida, U.S.A. (July 2011).
- (10) H. Okamoto, D. Ito, T. Watanabe, K. Onomitsu, H. Sanada, H. Gotoh, T. Sogawa, and H. Yamaguchi, "Carrier-mediated opto-mechanical coupling in GaAs micromechanical resonators", 17th International Conference on Electron Dynamics in Semiconductors, Optoelectronics and Nanostructures (EDISON 17), Santa Barbara, CA, U.S.A. (Aug. 2011).
- (11) L. Tiemann, G. Gamez, N. Kumada, and K. Muraki, "The spin polarization of the  $\nu = 5/2$  fractional quantum Hall state", 26th International Conference on Low Temperature Physics (LT26), Beijing, China (Aug. 2011).
- (12) X. Zhu, S. Saito, A. Kemp, K. Kakuyanagi, S. Karimoto, H. Nakano, W. J. Munro, Y. Tokura, M. S. Everitt, K. Nemoto, M. Kasu, N. Mizuochi, and K. Semba, "Coupling an ensemble to a superconducting qubit", 26th International Conference on Low Temperature Physics (LT26), Beijing, China (Aug. 2011).
- (13) K. Semba, "Toward hybrid quantum systems ~ A quest for a quantum memory ~", Shonan Workshop Report on "Hybrid Quantum Devices", Kanagawa, Japan (Nov. 2011).

- (14) K. Semba, "Coherent coupling of a superconducting flux qubit to an ensemble of NV-centers in diamond", Quantum Technologies: Information, Communication and Computation, Tokyo, Japan (Nov. 2011).
- (15) T. Yamaguchi, H. Yamaguchi, and T. Iyoda, "Directed self-assembly of block copolymers toward single-digit nanolithography", 24th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC2011), Kyoto, Japan (Oct. 2011).
- (16) K. Muraki, "NMR measurement of the spin polarization in the  $\nu = 5/2$  fractional quantum Hall state and in the  $N = 1$  Landau level", Microsoft Station Q Fall Meeting, Santa Barbara, CA, U.S.A. (Dec. 2011).

### III. 量子光物性関連

- (1) K. Tateno, G. Zhang, H. Gotoh, and T. Sogawa, "Characterization of InP-related Nanowires", Frontiers in Nanoscale Science & Technology (FNST2011), Saitama, Japan (Jan. 2011).
- (2) M. Notomi, "Bi-layer Photonic Crystals for Optomechanics", SPIE Photonics West 2011, California, U.S.A. (Jan. 2011).
- (3) W.J. Munro, "Universal Continuous variable quantum computation: what is needed?", Royal Society International Scientific Seminar on Continuous Variable Quantum Computation: Prospects and Challenges (CVQC), Milton Keynes, U.K. (Feb. 2011).
- (4) M. Notomi, "fJ/bit nanophotonics for future ICT", International Conference of Nanophotonics, Shanghai, China (May 2011).
- (5) M. Notomi, "fJ/bit nanophotonics for future ICT", The 10th Japan-Sweden QNANO Workshop, Visby, Sweden (June 2011).
- (6) H. Takesue, "Entanglement generation using silicon wire waveguide", IEEE Summer Topicals, Montreal, Canada (July 2011).
- (7) K. Nozaki, T. Tanabe, A. Shinya, S. Matsuo, G. Sato, E. Kawaguchi, H. Taniyama, and M. Notomi, "Photonic crystal nanocavities toward on-chip low-power nanophotonic devices", IQEC/CLEO PR, Sydney, Australia (Aug. 2011).
- (8) S.J. Devitt, A.M. Stephens, W.J. Munro, and K. Nemoto, "The Optical Quantum Computer", SPIE, San Diego, U.S.A. (Aug. 2011).
- (9) W.J. Munro, S.J. Devitt, and K. Nemoto, "Designing quantum repeaters and networks", SPIE, San Diego, U.S.A. (Aug. 2011).
- (10) M. Notomi, "fJ/bit photonics platform based on photonic crystals", SPIE, San Diego, U.S.A. (Aug. 2011).
- (11) K. Azuma, "Quantum repeaters and computation built on a single module", Quantum Science Symposium 2011, Massachusetts, U.S.A. (Sep. 2011).
- (12) M. Notomi, K. Nozaki, S. Matsuo, A. Shinya, G. Sato, and H. Taniyama, "fJ/bit Integrated Nanophotonics based on photonic Crystals", ECOC, Geneva, Switzerland (Sep. 2011).
- (13) Y. Tokura, "Spin orbit interaction and spin accumulation in quantum dot systems", PIERS2011, Suzhou, China (Sep. 2011).

- (14) H. Takesue, "Quantum communication experiments using superconducting single-photon detectors", International Workshop on Nanowire Superconducting Single-Photon Detectors (NSSPD), Eindhoven, Netherlands (Sep. 2011).
- (15) T. Kubo, "Measurement Induced Backaction by Coupling with an Environment Containing a Quantum Dot as a Nanosensor", BIT's 1st Annual world Congress of Nano-S&T, Dalian, China (Oct. 2011).
- (16) M. Notomi, E. Kuramochi, H. Taniyama, T. Tanabe, K. Nozaki, A. Shinya, S. Matsuo, G. Sato, and E. Kawaguchi, "Modulated mode-gap cavities in various forms", IEEE Photonics Conference, Arlington, U.S.A. (Oct. 2011).
- (17) M. Notomi, "Integrated Nanophotonics for Green ICT", 12th RIES International Symposium, Hokkaido, Japan (Nov. 2011).
- (18) A. Yokoo, T. Tanabe, E. Kuramochi, and M. Notomi, "Nano-fabrication for photonic crystal functional device", 11th International Symposium on Advanced Organic Photonics, Seoul, Korea (Nov. 2011).
- (19) M. Notomi, K. Nozaki, S. Matsuo, A. Shinya, T. Sato, and H. Taniyama, "fJ/bit Integrated Nanophotonics Based on Nanocavities", SPIE Asia Communications and Optics Conference (ACP 2011), Shanghai, China (Nov. 2011).

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/