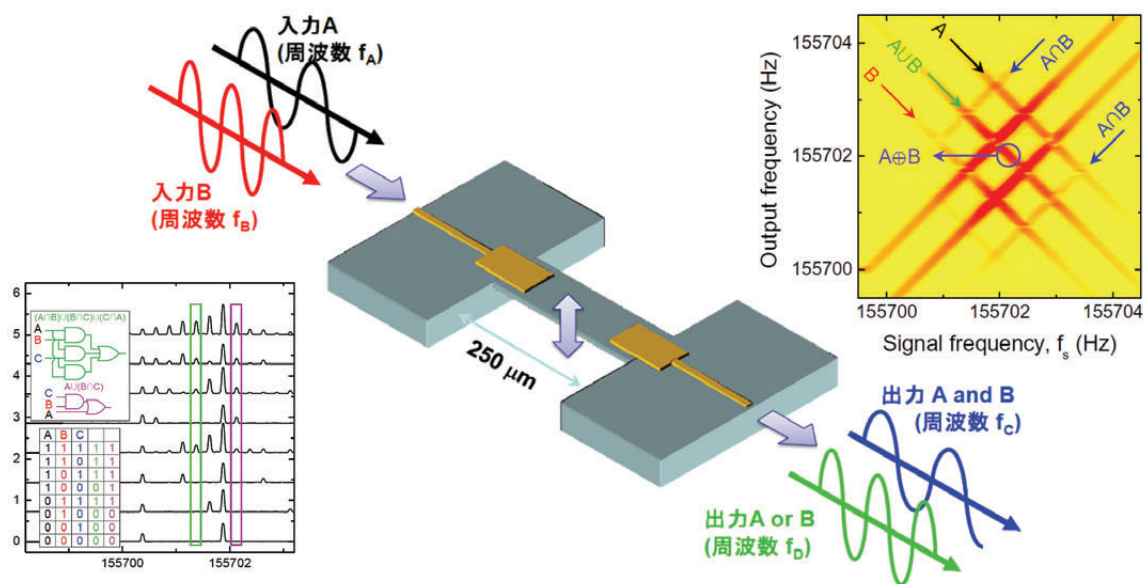


NTT物性科学基礎研究所の研究活動

平成22(2010)年度
Volume 21

2011年7月

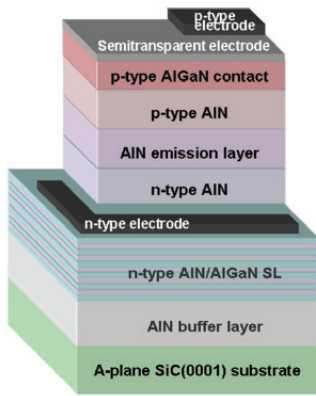
日本電信電話株式会社
物性科学基礎研究所
NTT Basic Research Laboratories
<http://www.brl.ntt.co.jp/>



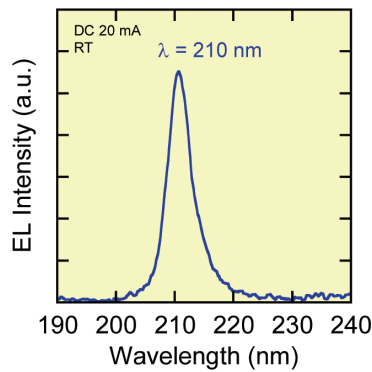
表紙の写真：

電気機械共振器を用いたパラメトリック周波数変換とロジック演算

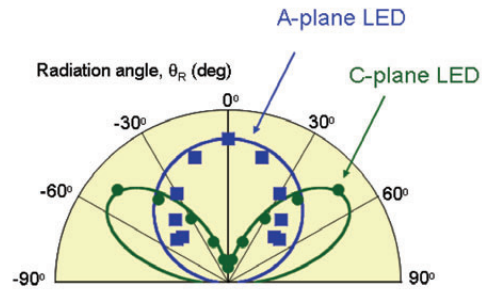
ナノスケールの機械的振動を用いた論理デバイスを実現した。A および B の2つの入力、それぞれ異なる周波数、 f_A および f_B 、の電圧信号として電極に印加される。この信号は機械的振動を引き起こし、混合された結果 f_C および f_D の周波数を持つ振動に変換される。 f_C の振動は A および B が入力された場合、 f_D の振動は A あるいは B のどちらかが入力されたときに生成され、それぞれ A and B および A or B の論理ゲートに対応する。3 入力ゲートを構成することも可能である。(27 ページ)



A面AlN LED構造



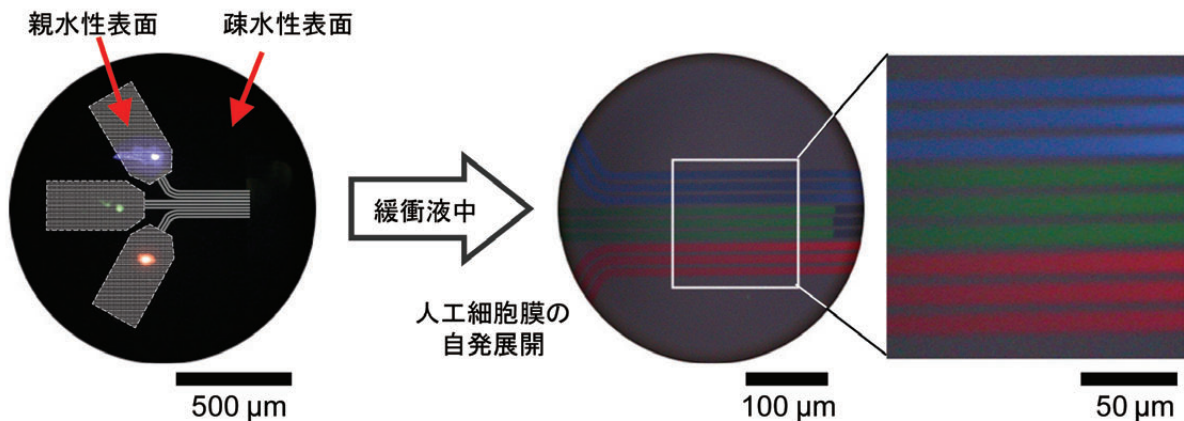
発光スペクトル



放射特性

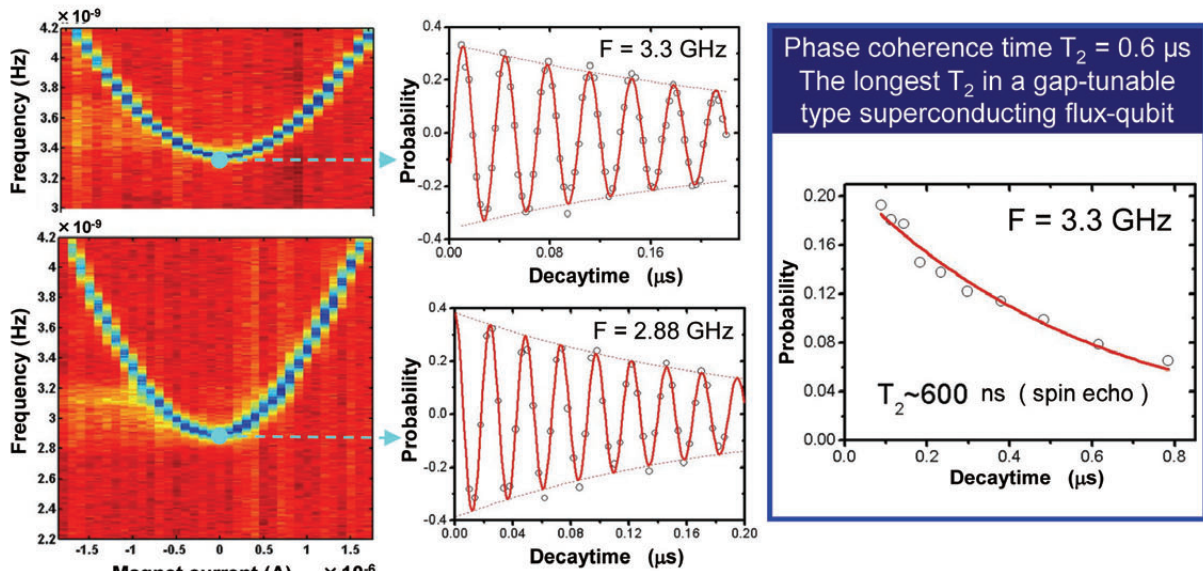
AlN 遠紫外発光ダイオードの高効率化

半導体で最も短い波長210 nmで遠紫外発光する窒化アルミニウム (AlN) は、特異な価電子帯構造 (負の結晶場分裂エネルギー) を持つため、従来の半導体材料にはない特定の結晶面 (A面) から強く発光する特性を有する。これまでのAlN遠紫外発光ダイオード(LED)は、他の窒化物半導体と同様に良質な結晶を成長しやすいC面LED構造であったが、今回、AlN特有の発光特性を活かしたA面LED構造を作製し、LED表面からの強い遠紫外発光を得た。(16ページ)



高度に集積化可能な人工細胞膜マイクロアレイ

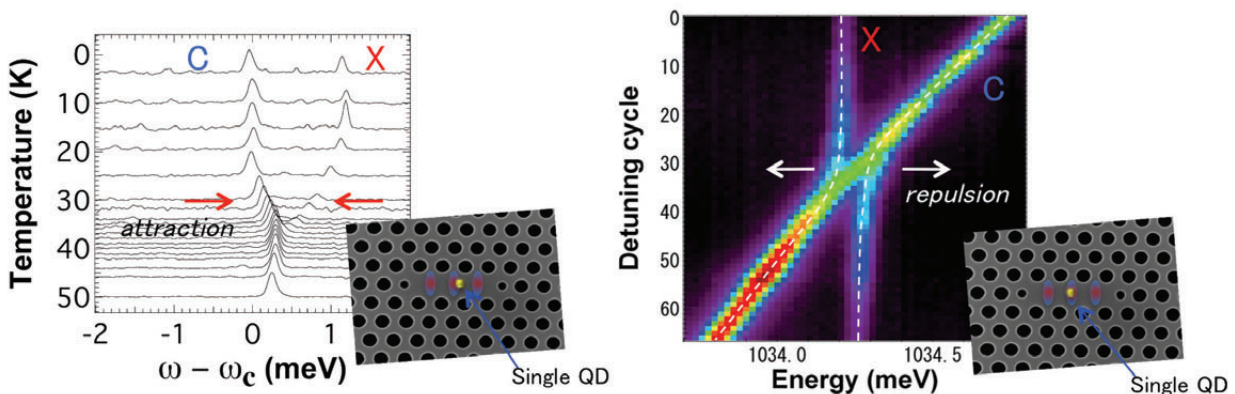
ハイスループットなバイオチップ用のプラットフォームとして重要な、人工細胞膜マイクロアレイの新規作製法を開発した。上図は10 μm幅の人工細胞膜を、それぞれ5 μmの距離を離して配置したマイクロアレイの蛍光顕微鏡像である。赤、緑、青の蛍光はそれぞれ組成の異なる人工細胞膜を示している。本手法によれば、従来法に比べて集積度を原理的に100倍以上向上させることが可能となる。(18ページ)



異なる最適動作点(周波数)で観測された Ramsey 干渉縞とエコー法で測定した位相緩和時間。

トンネルエネルギー可変型磁束量子ビットのコヒーレント制御

磁束量子ビットを構成する最小のジョセフソン接合を DC-SQUID で置き換え、トンネルエネルギーをその場で制御できる素子のコヒーレント動作に成功した。従来技術では、素子作製時に固定されていた互いに逆廻りの超伝導電流状態間のトンネルエネルギーが可変なこの素子では、量子ビットのエネルギー(動作周波数)をナノ秒の時間スケールで調節できる。デコヒーレンスの主因と考えられる磁束ノイズが最小の動作点に量子ビットを留めたまま、動作周波数を変えることが可能である。Ramsey 干渉とエコー法による測定から、この種の素子では最も優れたコヒーレンスが確認された。この素子を用いれば、量子バスを介した量子ゲートの研究や、量子メモリの研究が飛躍的に進展することが期待される。(31 ページ)



弱結合状態における PL スペクトル(mode attraction)。

強結合状態における PL カラーマップ(非交差分散を伴う Rabi 分裂の消失)。

単一量子ドットを用いた共振器量子電磁力学

単一の量子ドット(QD)をフォトニック結晶共振器に埋め込み、QD 励起子(X)と共振器(C)の相互作用 - 共振器量子電磁力学(cQED) - 効果について調べた。相互作用が弱い(弱結合)状態では、XとCのモードが引き合う現象を見出した。また相互作用が強い(強結合)状態では、非交差分散を伴う Rabi 分裂の形成・消失現象を観測した。これらは固体二準位系に特有な励起子位相緩和などに起因する新たな cQED 現象である。(39 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は、将来の情報通信の課題に向き合い、それらの課題を克服し、NTT 事業の未来を支える新たな価値の創造を目指しています。また、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おり、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、私どもの研究内容を紹介させていただく『サイエンスプラザ』や、ナノサイエンス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。

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。

2011年6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	
◆ 電気機械共振器を用いたパラメトリック周波数変換とロジック演算	
◆ カラー口絵	I
◆ AlN 遠紫外発光ダイオードの高効率化	
◆ 高度に集積化可能な人工細胞膜マイクロアレイ	
◆ トンネルエネルギー可変型磁束量子ビットのコヒーレント制御	
◆ 単一量子ドットを用いた共振器量子電磁力学	
◆ 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
◆ MBE 法によるロバストな超伝導特性を示す Pr_2CuO_4 の作製	
◆ MOVPE 選択エピタキシを用いた GaN の核およびスパイラル成長機構の解明	
◆ AlN 遠紫外発光ダイオードの高効率化	
◆ 単結晶ダイヤモンド基板上に成長した AlGaIn/GaN HEMT	
◆ 高度に集積化可能な人工細胞膜マイクロアレイ	
◆ ドープされた単層ナノチューブのキャリア濃度の評価	
◆ 1層および2層エピタキシャルグラフェンの電気伝導特性	
◆ 人工細胞膜を利用した固体表面上での生体分子マニピュレーション	
◆ 受容体タンパク質を構成するサブユニット構造の観察	
◆ 人工細胞膜の自発展開の静電的制御	
◇ 量子電子物性研究部の研究紹介	24
◆ 振動ポテンシャル障壁を越える単電子共鳴活性化現象	
◆ グラフェンの磁気電気効果と熱電効果の理論検討	
◆ リンドープ SOI-MOSFET の電流注入発光における巨大シュタルク効果	
◆ 電気機械共振器を用いたパラメトリック周波数変換とロジック演算	
◆ GaAs カンチレバーにおけるキャリアを介した光-機械結合	
◆ 量子ホール領域におけるエッジマグネトプラズモンの電圧制御	

- ◆ 半導体二重量子ドットにおけるトンネルダイナミクスの広帯域キャパシタンス測定
- ◆ トンネルエネルギー可変型磁束量子ビットのコヒーレント制御
- ◆ 超伝導量子ビットと結合した LC 共振器における非古典的光子状態の生成
- ◆ 超伝導量子ビットを用いた量子ゼノン効果
- ◆ 逆近接効果を考慮したアンドレーフ反射分光による $p\text{-In}_{0.96}\text{Mn}_{0.04}\text{As}$ のスピン偏極度評価
- ◆ 低密度 2 次元電子系の発光分光

◇ 量子光物性研究部の研究紹介	36
◆ 二硼化マグネシウムナノ細線による通信波長帯単一光子の検出	
◆ 東京 QKD ネットワーク	
◆ 2 重量子ドットにおける近藤効果と電流雑音	
◆ 単一量子ドットを用いた共振器量子電磁力学	
◆ VLS 法による GaAs 基板上横方向ナノワイヤ	
◆ 金属型カーボンナノチューブのコヒーレントフォノン	
◆ 高性能 1 次元フォトニック結晶シリコン / SOI ナノ共振器	
◆ GPGPU を利用した FDTD 計算の高速化	

II . 資料

◇ サイエンスプラザ 2010	45
◇ 「ナノスケールの輸送と技術」国際シンポジウム (ISNTT2011)	46
◇ 第 6 回アドバイザーボード (2010 年度)	47
◇ 表彰受賞者一覧 (2010 年度)	48
◇ 報道一覧 (2010 年度)	50
◇ 学術論文掲載件数、国際会議発表件数および出願特許数 (2010 年)	52
◇ 国際会議招待講演一覧 (2010 年)	54

NTT 物性科学基礎研究所 組織図

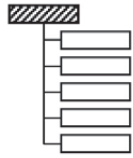
2011年3月31日付



NTT 物性科学基礎研究所 所員一覽

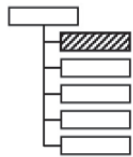
2011年3月31日付
(*は年度途中までの在籍者)

物性科学基礎研究所



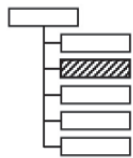
所長 **横浜 至**

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

熊倉一英*

研推担当主任研究員 新家昭彦

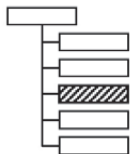
古川一暁*

NTT リサーチプロフェッサー

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**

補佐 河西奈保子
鈴木 哲*

薄膜材料研究G

グループリーダー

山本秀樹

嘉数 誠 *

嘉数 誠

佐藤寿志

谷保芳孝

平間一行

小林康之

赤坂哲也

Krockenberger, Yoshiharu

山本秀樹 *

熊倉一英

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

鈴木 哲

古川一暁

神崎賢一

尾身博雄

田邊真一

分子生体機能研究G

グループリーダー

鳥光慶一

住友弘二

中島 寛

篠崎陽一 *

河西奈保子 *

檜村吉晃

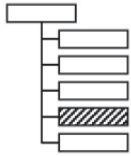
田中あや

鳥田明佳

後藤東一郎

塚田信吾

量子電子物性研究部



部長 **山口浩司**

補佐 山口 徹
山崎謙治*
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
岡本 創
林 順三

山口 徹*
畑中大樹

小野満恒二
Mahboob, Imran

量子固体物性研究G

グループリーダー

村木康二

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
Gamez, Gerardo*

超伝導量子物理研究G

グループリーダー

仙場浩一

中ノ勇人
田中弘隆
Zhu, Xiaobo

齊藤志郎
角柳孝輔

狩元慎一
Kemp, Alexandre

スピントロニクス研究G

グループリーダー

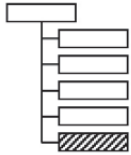
赤崎達志

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
佐々木 智*

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
向井哲哉
玉木 潔
松田信幸
久保敏弘

井桁和浩
柴田浩行
本庄利守
橋本大祐

Munro, William John

熊谷雅美
武居弘樹*
森越文明
東 浩司
稲葉謙介

量子光デバイス研究G

グループリーダー

寒川哲臣

中野秀俊
鎌田英彦
小栗克弥
Zhang, Guoqiang

西川 正
舘野功太
石澤 淳
加藤景子

後藤秀樹
俵 毅彦*
眞田治樹

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
谷山秀昭

Roh, Young-Geun*

Birowosuto, Danang

倉持栄一
角倉久史

Kim, Jimyung

新家昭彦*
野崎謙悟

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。

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NTT物性科学基礎研究所。入社以来、シリコンナノ構造の物性制御とそのデバイス応用、単電子デバイスの研究に従事。現在、物性科学基礎研究所量子電子物性研究部ナノデバイス研究グループリーダー。平成15~16年米国National Institute of Standards and Technology (NIST, Gaithersburg) 客員研究員。平成10年に国際固体素子・材料コンファレンスSSDM'98 Young Researcher Award、平成11年にSSDM'99 Paper Award受賞。平成15年および平成18年に日本応用物理学会JJAP論文賞受賞。平成18年文部科学大臣表彰若手科学者賞受賞。日本応用物理学会、IEEE会員。



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NTT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。



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年応用物理学会理事。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13年に応用物理学会講演奨励賞、平成19年に2007 Semiconducting and Insulating Materials Conference Young Scientist Award、平成23年に文部科学大臣表彰若手科学者賞を受賞。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、NTT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。

アドバイザーボード (2010 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（2010 年度）

氏名	所属	期間
羽柴 秀臣	日本大学 量子科学研究所 助教	Apr. 2010 – Mar. 2011
Dr. Lars Tiemann	科学技術振興機構 (JST)	Apr. 2010 – Mar. 2011
田邊 孝純	慶應義塾大学理工学部電子工学科 専任講師	Apr. 2010 – Mar. 2011
Prof. David Cox	University of Surrey, U.K.	Apr. 2010 – Jun. 2010
Prof. Tobias Nyberg	Royal Institute of Technology, Sweden	Jul. 2010 – Aug. 2010
Ms. Katherine Brown	University of Leeds, U. K.	Sep. 2010
Dr. Stefan Fölsch	Paul-Drud-Institute, Germany	Oct. 2010
Prof. Johan Elisa Mooij	Delft University of Technology, The Netherlands	Oct. 2010 – Nov. 2010
Prof. Yuli V. Nazarov	Delft University of Technology, The Netherlands	Nov. 2010
Prof. Amnon Aharony	Ben Gurion University of the Negev, Israel	Jan. 2011 – Feb. 2011
Prof. Ora Entin-Wohlman	Ben Gurion University of the Negev, Israel	Jan. 2011 – Feb. 2011
Dr. Daniel Paul Collins	University of Oxford, U. K.	Jan. 2011 – Feb. 2011
植田 暁子	Ben Gurion University, Israel	Jan. 2011 – Feb. 2011
小田原 玄樹	早稲田大学 理工学術院 先進理工学部 応用物理学科	Feb. 2011 – Mar. 2011

海外研修生（2010年度）

氏名	所属	期間
Oliver Johan Pirquet	University of Victoria, Canada	Sep. 2009 – Apr. 2010
Jessica Sparks	University of Waterloo, Canada	Sep. 2009 – Apr. 2010
Arianne McAllister	University of Ottawa, Canada	Sep. 2009 – Aug. 2010
Fabio Massimo Zennaro	Politecnico di Milano, Italy	Jan. 2010 – Aug. 2010
Gary Wolfowicz	Ecole Normale Supérieure (ENS) de Cachan, France	Jan. 2010 – Aug. 2010
David Framil Carpeno	Complutense Univeristy of Madrid, Spain	Jan. 2010 – Aug. 2010
Jan Fiala	Czech Technical University in Prague, Czech Republic	Jan. 2010 – Aug. 2010
Juan Manuel Agudo Carrizo	Polytechnic University of Valencia (UPV), Spain	Jan. 2010 – Aug. 2010
Romain Duval	INSA (Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse), France	Feb. 2010 – Aug. 2010
Kylie Ellis	The University of Adelaide, Australia	Mar. 2010 – Apr. 2010
松崎 雄一郎	University of Oxford, U.K.	Mar. 2010 – Apr. 2010
Shaun Lee	University of British Columbia, Canada	May. 2010 – Dec. 2010
Nadege Kaina	ESPCI (Ecole Supérieure de Physique et de Chimie Industrielle), France	July. 2010 – Dec. 2010
Quentin Wilmart	ESPCI (Ecole Supérieure de Physique et de Chimie Industrielle), France	July. 2010 – Dec. 2010
Antoine Gaume	ESPCI (Ecole Supérieure de Physique et de Chimie Industrielle), France	July. 2010 – Dec. 2010
Mohamed Oudah	University of Ottawa, Canada	Sep. 2010 – Sep. 2011
Yasir Makhdoom	University of British Columbia, Canada	Sep. 2010 – Sep. 2011
Jessica Planade	ESPCI (Ecole Supérieure de Physique et de Chimie Industrielle), France	Sep. 2010 – Dec. 2010
Jelena Baranovic	University of Oxford, U.K.	Nov. 2010 – Dec. 2010
Roberto Lo Nardo	Palermo University, Italy	Jan. 2011 – Aug. 2011
Diego Sabbagh	University of Studies "Roma Tre", Italy	Jan. 2011 – Aug. 2011
Bas van den Broek	Delft University of Technology, The Netherlands	Jan. 2011 – Mar. 2011
Yibo Fu	University of Toulouse, France	Feb. 2011 – Sep. 2011

国内実習生（2010年度）

氏名	所属	期間
森田 康平	九州大学大学院	H22.4.1 ~ H23.3.31
相原 章吾	慶応義塾大学大学院	H22.4.1 ~ H23.3.31
小田 康彦	東京大学大学院	H22.4.1 ~ H23.3.31
渡邊 敬之	東北大学大学院	H22.4.1 ~ H23.3.31
高倉 樹	東京大学大学院	H22.4.1 ~ H23.3.31
塩谷 広樹	東京大学大学院	H22.4.1 ~ H23.3.31
小林 嵩	東北大学大学院	H22.4.1 ~ H23.3.31
岡崎 雄馬	東北大学大学院	H22.4.1 ~ H23.3.31
楠戸 健一郎	東京大学大学院	H22.4.1 ~ H23.3.31
榎本 尚之	東京大学大学院	H22.4.1 ~ H23.3.31
鎌田 大	東京工業大学大学院	H22.4.1 ~ H23.3.31
森川 祐	筑波大学大学院	H22.4.1 ~ H23.3.31
高橋 弘史	東京工業大学大学院	H22.4.1 ~ H23.3.26
国橋 要司	東北大学大学院	H22.4.1 ~ H23.3.31
稲葉 工	東京理科大学大学院	H22.4.15 ~ H23.3.30
馬場 達也	東京理科大学	H22.5.10 ~ H23.3.31
梅 裕太	東北大学大学院	H22.8.9 ~ H22.9.3
鈴木 聡一郎	弘前大学	H22.8.9 ~ H22.9.3
加藤 拓己	東北大学大学院	H22.8.11 ~ H22.9.7
三橋 将也	長岡技術科学大学	H22.10.4 ~ H23.2.18
相場 崇	長岡技術科学大学	H22.10.4 ~ H23.2.18
桐生 貢	長岡技術科学大学	H22.10.4 ~ H23.2.25
上田 雄二	早稲田大学大学院	H22.10.4 ~ H22.12.27
武井 優典	東京理科大学	H22.10.13 ~ H23.3.31

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、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、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。

この1年では、窒化アルミニウムの発光特性、グラフェンの電気伝導特性、受容体タンパク質の構造観察において、大きな研究の進展が見られました。

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、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、二硼化マグネシウムナノ細線による通信波長帯単一光子の検出、量子鍵配送のフィールド実験、カーボンナノチューブのコヒーレントフォノン観測、初めてアトジュール領域の消費エネルギーで動作する光スイッチなどの進展が見られました。

MBE 法によるロバストな超伝導特性を示す Pr₂CuO₄ の作製

山本秀樹 クロッケンバーガー賢治 松本理* 山神圭太郎 三橋将也 内藤方夫*
機能物質科学研究部 *東京農工大学

銅酸化物高温超伝導体は、一般にドーパされたモット絶縁体（電荷移動絶縁体）と考えられているが、我々は、 T' -RE_{2-x}Ce_xCuO₄ (RE は希土類イオン)の母物質($x = 0$)が超伝導性を示すことを報告している[1, 2]。この違いは、 T' 構造銅酸化物の物性が複雑な酸素化学によって支配されていることに起因すると考えられる。母物質が超伝導体か絶縁体かは、高温超伝導機構を理解する上で本質的で、高品質試料を用いた更なる研究が必要であるとの観点から、我々はMBE成長したPr₂CuO₄の超伝導化に取り組んだ。

Pr₂CuO₄の超伝導化には、二段階アニール法による成膜後の還元処理が必要であったが、アニール条件の系統的な最適化により、 $T_c = 26$ K ($\Delta T_c < 0.5$ K)で金属的な伝導特性($\rho_{RT} = 400 \mu\Omega\text{cm}$, RRR = 10)を持つ試料が得られた(図1)。抵抗率は第2ステップのアニール温度が $T_{\text{red}} = 475\text{--}500^\circ\text{C}$ のとき最低の ρ (30 K) $\sim 40 \mu\Omega\text{cm}$ となり、最高の $T_c \sim 26$ Kも $T_{\text{red}} = 500^\circ\text{C}$ の試料で得られた。図2に、試料表面に平行に磁場を印加して測定した磁化の温度依存性を示す。明瞭な反磁性信号($T_c^{\text{onset}} = 23$ K)が観測されており、超伝導性がロバストなものであることが分かる。これは、特別なアニール法により、ほぼ理想的な酸素副格子が実現し、母物質の持つ本来の物性が現れたためと考えられる。このような観測結果は、 T' 構造を持つ銅酸化物の母物質は、必ずしもMott絶縁体（電荷移動絶縁体）ではないという最近の理論的な研究結果[3, 4]とも整合する。

- [1] O. Matsumoto et al., Phys. Rev. B **79** (2009) 100508R.
[2] H. Yamamoto et al., Solid State Commun. **151** (2011) 771.
[3] C. Weber et al., Nature. Phys. **6** (2010) 574; Phys. Rev. B **82** (2010) 125107.
[4] H. Das and T. Saha-Dasgupta, Phys. Rev. B **79** (2009) 134522.

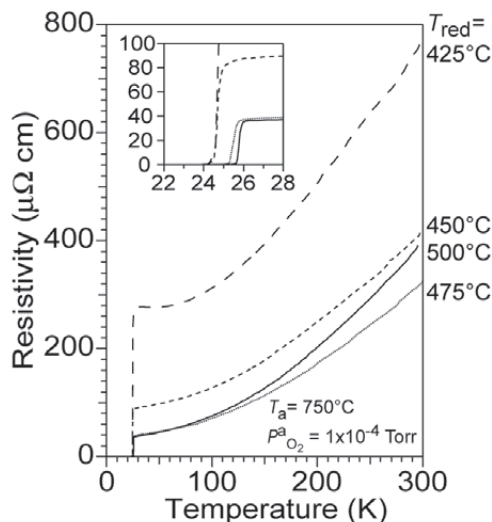


図1 Pr₂CuO₄ 薄膜の ρ - T 特性の T_{red} (二段階アニール法における第2ステップのアニール温度) 依存性。試料は、 T_{red} でのアニールに先立ち、第1ステップで $P_{\text{O}_2}^a = 1 \times 10^{-4}$ Torrの還元雰囲気下で、 $T_a = 750^\circ\text{C}$ でアニールされている。

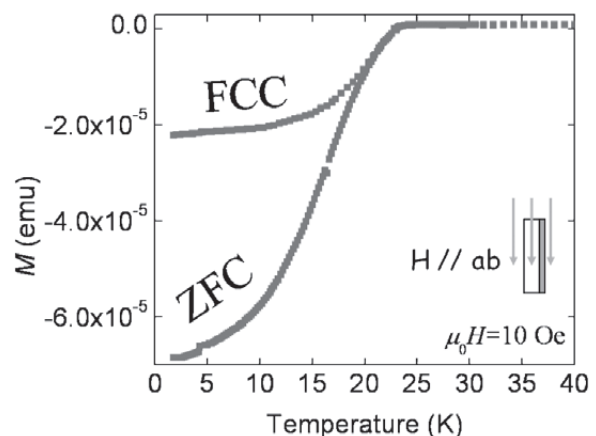


図2 抵抗率測定で最も高い T_c を示したPr₂CuO₄薄膜の磁化(M) - 温度(T)特性。膜厚1000Åの薄膜において、シールド反磁性に加えマイスナー反磁性も明瞭に観測されている。

MOVPE 選択エピタキシを用いた GaN の核および スパイラル成長機構の解明

赤坂哲也 小林康之 嘉数誠
機能物質科学研究部

結晶の成長様式には核成長や螺旋成長モードがあることが知られており、一般的な結晶成長ではこれら2つの成長モードが混在している。本研究では、窒化物半導体の GaN に関して、純粋な核成長や螺旋成長モードを実現することにより、結晶の成長機構を実験的に明らかにすることを検討した。

転位密度が低い GaN(0001) 基板の表面に SiO₂ 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、有機金属気相成長装置(MOVPE)を用いて GaN 薄膜の選択エピタキシを行った。原料ガスは、アンモニアおよびトリメチルガリウムである。GaN 薄膜の表面は原子間力顕微鏡 (AFM) で観察した。

マスクの開口部内に螺旋転位や混合転位が全くない場合、純粋な核成長により GaN のステップフリー面 (1 分子層の段差も存在しない平滑面) が形成された[1]。一方、マスクの開口部内に螺旋転位や混合転位が存在すると、これらの転位を中心に螺旋成長が起こり、表面には成長スパイラルが観察された (図1)。成長スパイラルのステップ間隔から、成長の駆動力である過飽和度を見積もることができる。図2に示したのは、このようにして求めた過飽和度と、核成長、および、螺旋成長モードにおける成長速度の関係をプロットしたものである[2]。過飽和度の増加に対して、螺旋成長速度は2次関数的に増加する一方、核成長速度は非常に小さな値を持つことが分かった。また、図中の実線、および、破線は、結晶成長速度の過飽和度依存性を予測する BCF 理論[3]を用いた、螺旋成長、および、核成長速度のフィッティング結果であるが、実験結果とよく一致している。

本手法を用いることで、GaN のステップフリー面を実現することができたうえ、一回の成長で同一の基板上に、純粋な核成長と螺旋成長モードを実現し、その成長機構を詳細に検討することが可能となった。

- [1] T. Akasaka et al., Appl. Phys. Express **2** (2009) 191002.
- [2] T. Akasaka et al., Appl. Phys. Lett. **97** (2010) 141902.
- [3] W. K. Burton et al., Phil. Trans. Roy. Soc. A **243** (1951) 299.

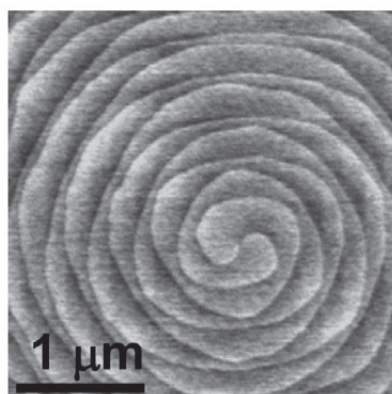


図1 成長スパイラル中心付近の AFM 像。

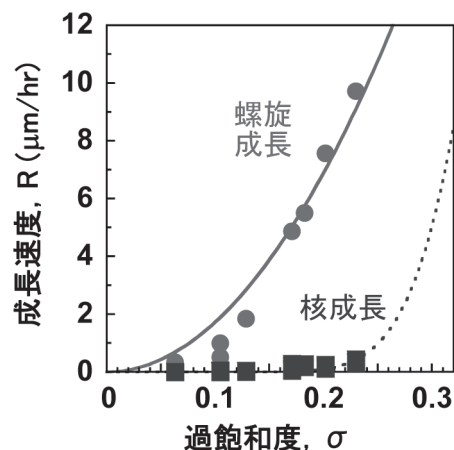


図2 螺旋および核成長速度の過飽和度依存性。

AlN 遠紫外発光ダイオードの高効率化

谷保芳孝 嘉数誠
機能物質科学研究部

窒化アルミニウム (AlN) は、直接遷移型半導体で最大のバンドギャップ 6 eV を有することから、波長 210 nm で発光する最短波長発光半導体として期待されている。我々は、これまでに、AlN の p 型および n 型ドーピングを実現し、波長 210 nm の遠紫外発光ダイオード (LED) の動作に成功した [1]。今回、AlN 遠紫外 LED のバンド端発光の起源を同定し、バンド端発光強度が結晶面に大きく依存する AlN の特性を活かした高効率 LED 構造を提案する。

まず、AlN の pn 接合による C 面 LED 構造を有機金属気相成長 (MOVPE) 法により C 面 SiC 基板上に成長した。今回、ドナーとして働く窒素空孔によるアクセプタの補償を抑制するため、p 型 AlN 層を高アンモニア流量で成長したところ、正孔濃度は 1 桁増加し、LED の発光効率は従来の 8×10^{-6} から 1×10^{-4} % まで増加した [2]。強度が増大した波長 210 nm のバンド端発光ピークを解析した結果、結晶場分裂正孔バンドに由来するエキシトン発光 (FX_{CH}) が支配的であり、その低エネルギー側に FX_{CH} の LO フォノンレプリカ、高エネルギー側に重い正孔 / 軽い正孔バンドに由来するエキシトン発光 ($FX_{HH/LH}$) を観測した (図 1)。格子歪みが価電子帯構造に与える影響を考慮し、 FX_{CH} と $FX_{HH/LH}$ のエネルギー差から、AlN の結晶場分裂エネルギー Δ_{CR} を -165 meV と同定した。この負の結晶場分裂エネルギーにより、 p_z ライクな状態を持つ結晶場分裂正孔バンドが価電子帯最上端に位置するため、バンド端発光の電場ベクトル E は c 軸方位に偏光する ($E \parallel c$)。この結果、AlN では C 面からの発光は弱く、C 面と垂直な A 面からの発光が強い。

AlN や GaN など窒化物半導体では、C 面成長の場合に良質な結晶が得られやすいため、C 面 LED 構造が作製されてきた。しかし、AlN では $E \parallel c$ 偏光により、LED 表面を従来の C 面から A 面にすることで、光取り出し効率を増加できる。我々は、A 面 SiC 基板を用いることで A 面 LED 構造を成長し、C 面 LED と同じく波長 210 nm の電流注入発光に成功した [3]。そして、A 面 LED は、従来の C 面 LED と異なり、表面方向 ($\theta_R = 0^\circ$) から強く発光することを確認した (図 2)。この結果は AlN 遠紫外 LED の高効率化に A 面 LED 構造が有望であることを示している。

[1] Y. Taniyasu, M. Kasu, and T. Makimoto, *Nature* **441** (2006) 325.

[2] Y. Taniyasu and M. Kasu, *Appl. Phys. Lett.* **98** (2011) 131910.

[3] Y. Taniyasu and M. Kasu, *Appl. Phys. Lett.* **96** (2010) 221110.

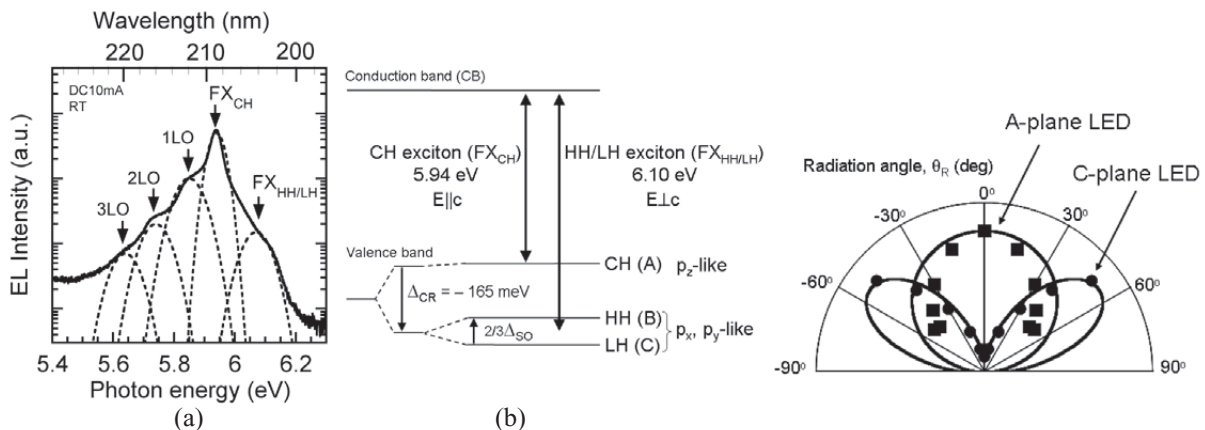


図1 (a) AlN LED の発光スペクトルと (b) AlN のバンド間遷移。

図2 A 面と C 面 AlN LED の放射特性。

単結晶ダイヤモンド基板上に成長した AlGaIn/GaN HEMT

平間一行 谷保芳孝 嘉数誠
機能物質科学研究部

AlGaIn/GaN 高電子移動度トランジスタ(HEMT)は高周波高出力デバイスへの応用が期待されているが、現在その出力電力密度は基板材料の熱伝導率に大きく制限されている。単結晶ダイヤモンドは物質中最高の熱伝導率(~22 W/cmK)を有しているため、ダイヤモンド上に AlGaIn/GaN HEMT を作製できると、格段に高い高周波出力電力動作が期待できる。しかし、ダイヤモンドはダイヤモンド構造、窒化物半導体はウルツ鉱構造と結晶構造が異なるため、ダイヤモンド基板上への窒化物半導体の単結晶成長は非常に困難である。最近、我々は窒化物半導体の(0001)面と類似の原子配列を有するダイヤモンド(111)面方位基板を用いることにより、ダイヤモンド基板上への単結晶 AlN(0001) 薄膜の成長に成功した[1、2]。

そこで単結晶 AlN をバッファ層として用いて、半絶縁性ダイヤモンド(111)基板上に AlGaIn/GaN HEMT 構造を有機金属気相成長(MOVPE)法により成長した。まずダイヤモンド基板を水素雰囲気、高温 1200°C でサーマルクリーニングしてアモルファス表面層を除去し、続いて AlN バッファ層(180 nm)、クラックの形成を防ぐための AlN/GaN 多層膜(20周期 AlN:3 nm/GaN:17 nm)、GaN 層(600 nm)、AlN スペース層(1 nm)、Al_{0.25}Ga_{0.75}N バリア層(30 nm)、GaN キャップ層(4 nm)の順に成長した。X線回折測定によりダイヤモンド基板上の AlGaIn/GaN HEMT 構造の単結晶成長を確認した。AlGaIn/GaN HEMT 構造における二次元電子ガスの形成はホール効果測定により確認した。室温でのシートキャリア密度は $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 、電子移動度は $730 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ であった。

ダイヤモンド基板上に作製したゲート長 $3 \mu\text{m}$ の AlGaIn/GaN HEMT の最大ドレイン電流は 220 mA/mm であり、良好なピンチオフ特性が得られた。図1は AlGaIn/GaN HEMT の高周波小信号特性である。電流利得 ($|H_{21}|^2$)、最大安定電力利得(MSG)、最大有能電力利得(MAG)の周波数依存性から得られた遷移周波数(f_T)と最大発振周波数(f_{max})は、それぞれ 3 GHz、7 GHz であった。次にダイヤモンドと SiC 基板上に同一構造の AlGaIn/GaN HEMT を作製し、直流動作時のデバイス温度を比較した。図2(a)はデバイス温度測定の設定アップ、図2(b)(c)はそれぞれダイヤモンドと SiC 基板上に作製した AlGaIn/GaN HEMT の側面の温度分布である。直流 2 W 動作時にダイヤモンド基板上ではデバイス温度上昇が 13°C (23°C から 36°C) であったのに対して、SiC 基板上では 23°C (23°C から 46°C) と高く、ダイヤモンド基板がデバイス温度上昇の抑制に有効であることを確認した。デバイス温度のドレイン損失依存性から算出したダイヤモンド基板上の AlGaIn/GaN HEMT の熱抵抗は 4.1 Kmm/W であり、SiC 基板上の AlGaIn/GaN HEMT の熱抵抗 (7.4 Kmm/W) の約 1/2 である [図2(d)] [3]。この低い熱抵抗は、単結晶ダイヤモンドの高い熱伝導率に由来する。以上より、単結晶ダイヤモンド基板上の AlGaIn/GaN HEMT は高出力動作に有望なデバイス構造であることを確認した。

[1] Y. Taniyasu and M. Kasu, J. Cryst. Growth **311** (2009) 2825.

[2] K. Hirama, Y. Taniyasu, and M. Kasu, J. Appl. Phys. **108** (2010) 013528.

[3] K. Hirama, Y. Taniyasu, and M. Kasu, Appl. Phys. Lett. **98** (2011) 162112.

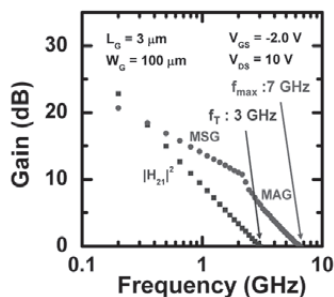


図1 ダイヤモンド基板上に成長した AlGaIn/GaN HEMT の高周波小信号特性。

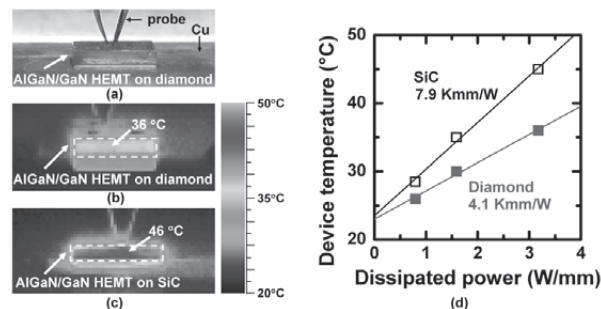


図2 (a) デバイス温度分布測定の設定アップ (b) 直流 2 W (3.2 W/mm) 動作時のダイヤモンドと (c) SiC 基板上に作製した AlGaIn/GaN HEMT のデバイス温度分布 (d) デバイス温度のドレイン損失依存性。

高度に集積化可能な人工細胞膜マイクロアレイ

古川一暁
機能物質科学研究部

DNA チップに代表される生体分子のマイクロアレイは、網羅的解析を特徴とするバイオチップとして幅広く応用されている。ハイスループットなマイクロアレイの開発には、生体分子をその機能を維持したまま、集積度高く固体表面に固定化する技術が必須である。われわれはそのプラットフォームとして重要な人工細胞膜マイクロアレイの新規作製法を開発した。さらに本作製法を用いてバイオセンサを構築し、その動作を確認した。

人工細胞膜の形成には、自発展開と呼ばれる固液界面における脂質分子の自己組織化現象を利用した。われわれの手法は、固体表面に作製した親水/疎水パターンによって、人工細胞膜の自発展開位置を制御することを特徴とする[1]。このとき、パターンを工夫することによって、マクロな領域から開始した自発展開をミクロな領域へ、それぞれの成分が混合することなく、導くことができる。この手法で、組成の異なる10 μm 幅の人工細胞膜を、それぞれ5 μm の距離を離して配置したマイクロアレイを作製した(口絵)。ベシクル融合法と呼ばれる溶液プロセスを利用した従来手法と比較すると、本手法は人工細胞膜マイクロアレイの集積度を原理的に100倍以上向上させることが可能である[2]。

本手法で作製したマイクロアレイを用いたバイオセンシングの原理確認のため、ビオチン結合脂質分子を添加した人工細胞膜の一部を含むマイクロアレイを作製した。これを赤色発光色素が結合したstreptavidin溶液に浸漬し、その前後での蛍光の変化を観察した。streptavidin浸漬前の図1(a)ではNBD由来の緑色蛍光のみ観察された。浸漬後90分経過した図1(b)では、streptavidinの特異結合が生じた結果、ビオチンを含む細胞膜が赤色蛍光を示した。ビオチンを含まない人工細胞膜領域からの赤色発光は限定的で、生体分子特異的なセンシングが可能であることを実証した。

本研究は科研費の援助を受けて行われた。

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

[2] K. Furukawa and T. Aiba, Langmuir **27** (2011) 7341.

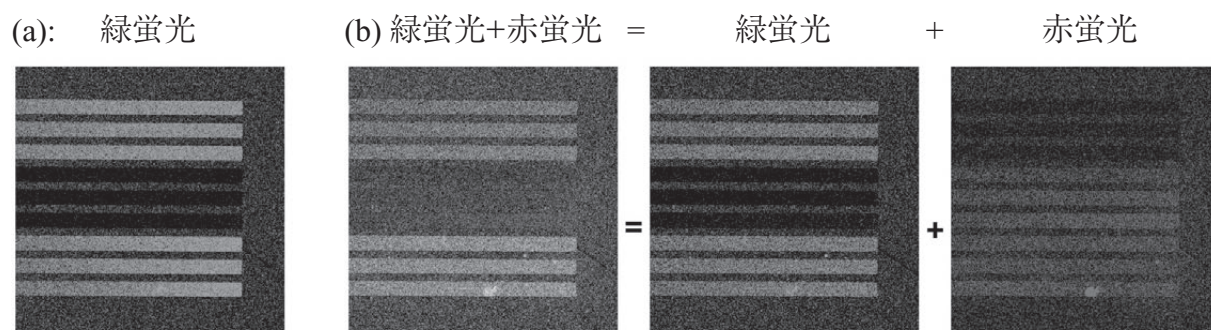


図1 作製した人工細胞膜マイクロアレイ。細胞膜の主成分は卵黄から抽出した脂質分子であり、上段3本にはNBD結合脂質1モル%、中段3本にはビオチン結合脂質1モル%、下段3本にはそれらの両方を混合した。(a)streptavidin溶液浸漬前、(b)90分浸漬後のレーザ共焦点顕微鏡像。緑色蛍光はNBD由来、赤色蛍光はstreptavidinに結合した色素由来である。

ドーピングされた単層ナノチューブのキャリア濃度の評価

鈴木哲 日比野浩樹
機能物質科学研究部

熱化学気相成長(CVD)法は単層カーボンナノチューブ(SWNT)の合成手法として広く用いられている。しかしながら、ドーピングされたSWNTの直接合成は未だ十分に研究が進んでいない。ドーピングされたSWNT研究のさらに重要な問題点はドーピングの評価手法が確立していないことである。特にSWNT中のキャリア濃度を直接計測することは困難であり、従ってこれまでの報告ではキャリア濃度の評価は行われていなかった。今回我々は、ホウ素(B)、窒素(N)を含む原料を用い、B、NドーピングSWNTのCVD合成を行うとともに、キャリア注入によるラマンスペクトルの変化を観測し、ドーピングされたキャリア濃度の評価を行った[1]。

B、Nの原料としてホウ酸トリイソプロピル($C_9H_{21}BO_3$)とベンジルアミン(C_7H_9N)をそれぞれ用いた。これらの物質は炭素源としても作用する。 SiO_2/Si 基板上に担持したCo薄膜を触媒にしてこれらの原料からB、NドーピングSWNTをCVD合成することができた。また図1に示すように、2つの原料を同時に供給してBNドーピングSWNTを合成できることを明らかにした。

透過電子顕微鏡観察、およびラマン散乱(radial breathing mode: RBM)測定から直径が1-2 nmのSWNTが生成していることが分かった。図2にB、N、およびBNドーピングSWNT、並びにドーピングしていないSWNTのGバンドのラマンスペクトルを示す。ドーピングの種類によらずドーピングSWNTのGバンドがドーピングされていない試料に対して高波数側へ $3-6\text{ cm}^{-1}$ だけシフトすることが観測された。ドーピングの種類(電子あるいはホールドーピング)に依らないこのGバンドの高波数側へのシフトは、半導体SWNT中のフェルミレベルのシフトによる電子-格子相互作用の変化がフォノンエネルギーを変化させたためと考えられる。元々Gバンドフォノンは電子格子相互作用によるコーン異常の効果によって低波数側にシフトしている。フェルミレベルのシフトは電子格子相互作用を減少させ、従ってコーン異常の効果を減少させる。結果としてキャリアドーピングによるフェルミレベルのシフトはGバンドの高波数化を引き起こす。この効果が顕わになるのは半導体SWNT中のフェルミレベル位置が価電子帯あるいは伝導電子帯に達した時である。従って図2に示す結果はドーピングされたSWNT中のフェルミレベルが価電子帯、あるいは伝導電子帯中に位置していることを示している。Gバンドのシフトの大きさからキャリア濃度を見積もることもできる。SWNTの平均直径が $\sim 1.5\text{ nm}$ であることを考えると、見積もられるキャリア濃度は0.4-0.8%という非常に大きな値となった。

[1] S. Suzuki and H. Hibino, Carbon 49 (2011) 2264.

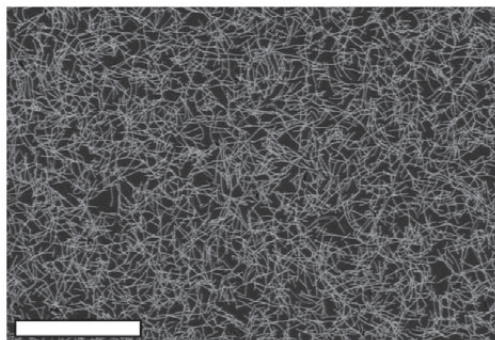


図1 BNドーピングSWNTのSEM像。
スケールバーは5 μm 。

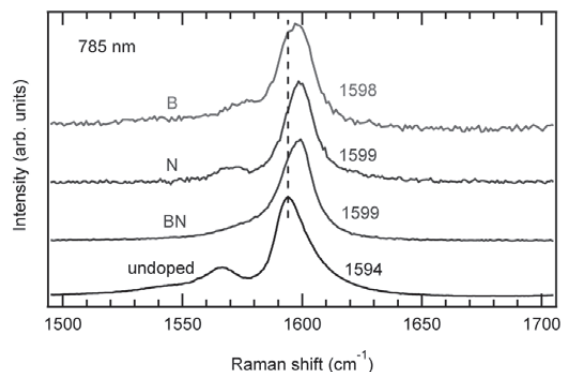


図2 B、N、BNドーピングSWNT、およびドーピングしていないSWNTのGバンドスペクトル。数字はピーク位置。励起光波長は785 nm。

1層および2層エピタキシャルグラフェンの電気伝導特性

田邊真一¹ 関根佳明² 影島博之² 永瀬雅夫³ 日比野浩樹¹

¹機能物質科学研究部 ²量子電子物性研究部 ³徳島大学

1層グラフェンと2層グラフェンは、高速デバイスや論理デバイスなどの材料として期待されているが、一般的に用いられているグラフェンの製法であるグラファイトの剥離法で得られるグラフェンの大きさは数十マイクロメートル角程度であり、大面積で得られ難いという問題がある。我々はグラフェンのウエハスケール成長法として、エピタキシャル成長が可能なSiCの熱分解法に注目しており、SiC(0001)のAr雰囲気中のアニールによって1層グラフェンを、超高真空中のアニールにより2層グラフェンを作り分けることに成功している。成長したグラフェンの特性を調べるため、これらをチャンネルとしたトップゲート素子を作製し、その特性を調べた。

図1は1層グラフェン素子における、面直方向の磁場に対する縦抵抗、およびホール抵抗の磁場依存性である。ホール抵抗は1層グラフェン特有の抵抗値で磁場に対して一定となり、その時の縦抵抗は極小値をとる。さらに高磁場では縦抵抗がゼロになることから、量子ホール効果を観測できたことが分かる。また、ゲート電圧(V_g)によってキャリア濃度を減少させると移動度は増加し、 $3 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ のキャリア濃度で2 Kでは $10,000 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 以上と、 SiO_2 上に転写した剥離1層グラフェンに匹敵する移動度を得た[1]。図2は2層グラフェンの2 Kから300 Kまでの抵抗のゲート電圧依存性である。全ての温度において抵抗は電荷中性点で極大値をとり、その抵抗値は温度に強く依存することが分かった[2]。これはSiC基板との相互作用によって開いたバンドギャップに起因する。以上のように、成長した1層グラフェンで高品質グラフェンでしか得られない量子ホール効果を観測し、2層グラフェンで論理デバイス应用到に重要なバンドギャップを検出したことは、SiC熱分解法が高品質なグラフェンを成長する手法として有望であることを物語っている。

本研究は科研費の援助を受けて行われた。

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

[2] S. Tanabe et al., Jpn. J. Appl. Phys. **50** (2011) 04DN04.

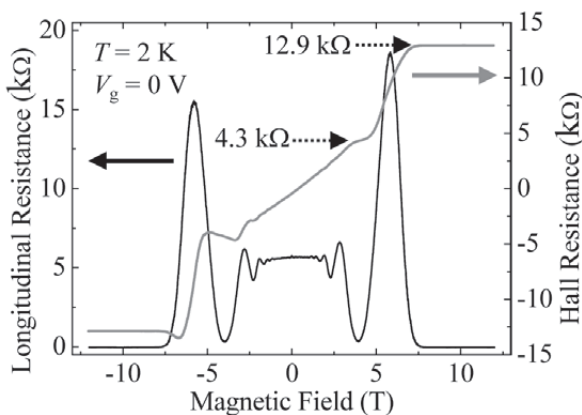


図1 1層グラフェンの縦抵抗とホール抵抗の磁場依存性。

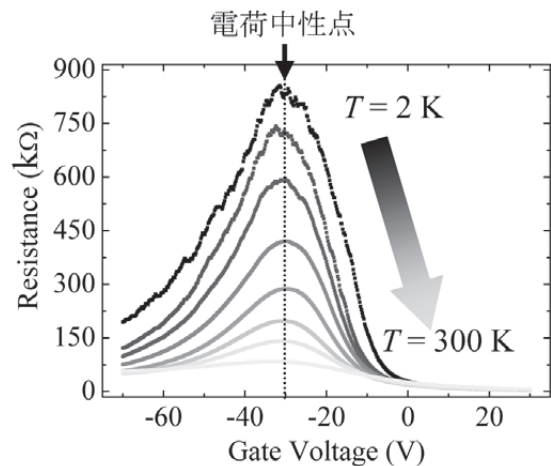


図2 2層グラフェンの2 Kから300 Kまでの抵抗のゲート依存性。

人工細胞膜を利用した固体表面上での生体分子マニピュレーション

中島寛 古川一暁
機能物質科学研究部

生体分子を利用した素子開発において、生体分子の機能や構造を保持したまま、基板上で分子を安定に担持できる“バイオインタフェース”の構築は重要な技術要素である。また、基板上で生体分子の位置・密度・配向が制御できれば、超高感度バイオセンサやインプラント型バイオチップなど、多様な生体機能素子へむけた設計指針を示すことができる。今回、バイオインタフェースを担う材料として、細胞を構成する細胞膜に着目した。シリコンやガラスなどの固体基板上に、人工的に作製した細胞膜（人工細胞膜）を堆積させ、膜上の特定の位置に生体分子を固定化する、あるいは望みの位置に生体分子を輸送する、新たな生体分子マニピュレーション技術を見出した[1]。

細胞膜は、主にリン脂質分子 (lipid) から構成される。人工細胞膜では、用いる lipid 種によって、膜の流動性を制御することができる。本研究では、室温で高/低流動性を有する人工細胞膜を作り分け、さらに特定のアミノ酸 (ヒスチジン基) を末端に持つタンパク質を特異吸着する“ニッケル錯体含有リン脂質分子 (Ni-lipid)”を膜中に混合し、人工細胞膜をデザインした。図1(a), (b)に、DSPC (低流動性 lipid) と Ni-lipid からなる人工細胞膜の AFM 像を示す。両 lipid を 50 % ずつ含む膜では、DSPC が局所的に集合したドメイン構造を形成し、Ni-lipid はドメイン以外の領域に均一に分布する。各 lipid 領域の高さの差は、わずか 1 nm である。また膜中のドメインパターンは、各 lipid の混合比によって大きく変化する。この膜上に、末端ヒスチジン基を有する緑色蛍光タンパク質 (GFP) を吸着させると、Ni-lipid の領域のみに選択的に GFP が固定化することが蛍光顕微鏡像から明らかとなった [図1(c), (d)]。一方、DOPC (高流動性 lipid) と Ni-lipid からなる人工細胞膜は、均一な膜構造を形成し、高い流動性を有する。この膜は、溶液中で厚さ 5 nm の単分子膜を自発的に成長させる性質があり[2]、これを利用したタンパク質の分子輸送をはじめて実証した。図2は、マイクロ流路内を輸送される GFP の時間発展観察像である。この輸送特性は、既知の人工細胞膜拡散モデル [速度 (v) = (β /時間 (t))^{1/2}] と良く一致し、その展開速度係数 (β) は 10.4 $\mu\text{m}^2/\text{s}$ であった。

人工細胞膜からなるバイオインタフェースは、生体分子間の情報伝達を解析する細胞膜モデル場として利用することも可能である。生体素子開発へむけた基盤材料開発とともに、基礎科学の側面からも、バイオインタフェースのポテンシャルを追求していく。

[1] H. Nakashima et al., Langmuir **26** (2010) 12716.

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

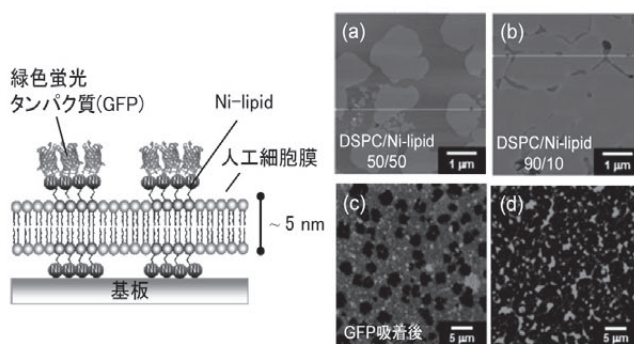


図1 人工細胞膜のパターン形成とタンパク質の位置選択的吸着。

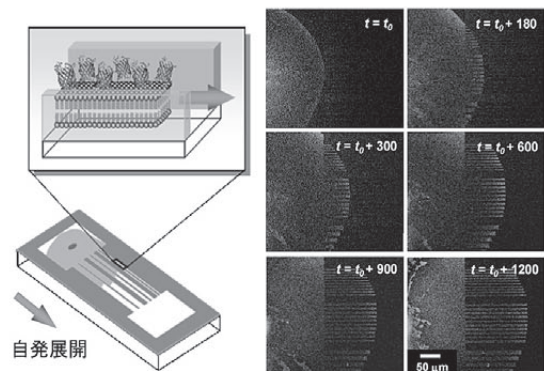


図2 人工細胞膜の自発展開を利用したタンパク質の分子輸送。

受容体タンパク質を構成するサブユニット構造の観察

河西奈保子 田中あや Chandra S. Ramanujan*
機能物質科学研究部 *オックスフォード大

受容体タンパク質は生体膜内に存在して生体内の情報伝達に重要な役割を果たしている。受容体タンパク質は細胞外にあるシグナル分子(リガンド)と結合して、電気的もしくは化学的に細胞内に情報を伝達する微小でかつ高選択性を持つ素子である。また、多くの受容体タンパク質は複数の単一タンパク質(サブユニット)の会合体である。受容体タンパク質の構造は主にX線結晶構造解析やクライオ電子顕微鏡法により検討されているが、受容体タンパク質が活性を有する状態での構造観察はほとんど行われていない。

我々は、タンパク質一分子を観察することができる解像度を有し、溶液中での観察が可能な原子間力顕微鏡(AFM)を用い、イオンチャネル型受容体タンパク質を、溶液中、すなわち受容体タンパク質が活性を持った状態で観察した。

強制発現させた昆虫細胞から受容体タンパク質を精製し(図1)、透析法を用いて脂質二分子膜へ再構成した。再構成後の試料をAFMの試料台であるマイカ基板上に静置したあと観察溶液で洗浄し、基板に吸着した試料を観察した。透析により脂質二分子膜中に再構成された受容体が観察できた。抗体反応を用いた検討から、N末端が基板の上方を向いた状態で再構成されていることを確認した。さらに本受容体を拡大して観察したところ、この受容体を構成している4つのサブユニットと考えられる4つの構造物が観察され(図2)、さらに、これらのサブユニットは、脂質二分子膜中で様々な形状を有していることが分かった。この結果から活性を有する受容体タンパク質が刺激を与えない状態でも熱揺らぎなどにより構造を変化させていることが初めて分かった[1]。

本研究の一部は、英国 Bionanotechnology IRC および 科研費の援助を受けて行われた。

[1] N. Kasai et al., BBA Gen. Subj. **1800** (2010) 655.

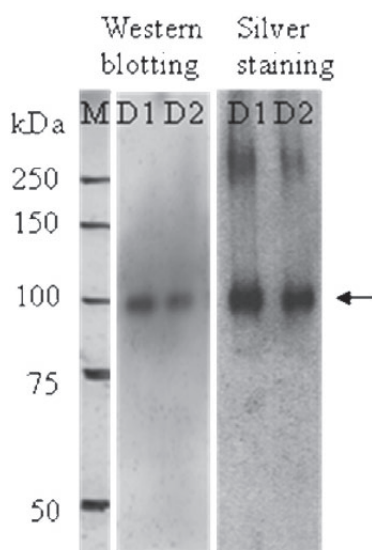


図1 精製したイオンチャネル型受容体の電気泳動による分析。

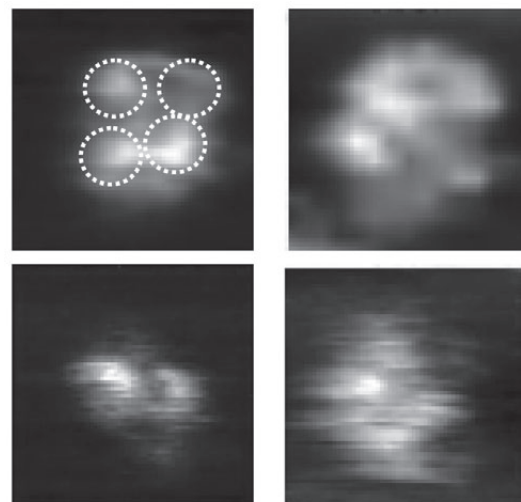


図2 脂質二分子膜中に再構成されたイオンチャネル型受容体のサブユニット構造のAFMによる観察(100x100 nm)。サブユニット位置を丸で記す。

人工細胞膜の自発展開の静電的制御

檜村吉晃 古川一暁
機能物質科学研究部

生体膜の基本構造である脂質二分子膜は、固体基板上に自己組織化により自発的に形成させることができる。我々はこの人工細胞膜の自発展開特性を利用して、ナノギャップ構造が脂質分子や膜に埋め込んだ分子の運動性に及ぼす影響について調べてきた[1、2]。本研究では、ナノギャップ構造を電極として利用し、ここに印加した電圧が自発展開挙動に及ぼす影響を検討した[3]。

卵黄由来の脂質 Egg-PC と Egg-PG の混合物（モル比 7:3）に、色素結合脂質 Texas Red-DHPE を 1 mol% 添加した。SiO₂ 基板上に幅 10 μm の流路とその両端に脂質の収容部を作製した。流路内にナノギャップ電極を備え、電極間に直流電圧を印加した。収容部の一端に試料を付着させ、0.1–100 mM NaCl を含む緩衝液中に浸漬させ自発展開の時間発展を観察した。

図1は流路に沿って自発展開する人工細胞膜の蛍光顕微鏡像である（電解質 100 mM NaCl, ナノギャップ幅 5 nm）。ナノギャップ通過前は電圧印加による影響は見られなかったが [図1(a)、(b)]、膜の先端がナノギャップに到達すると、電圧印加時に自発展開が停止する挙動が観測された [図1(c)、(d)]。印加電圧を 0 V とすると膜は自発展開を再開した [図1(e)-(g)]。この自発展開の停止/進行の挙動は、印加電圧の ON/OFF によって繰り返し観測された [図1(h)-(l)]。この振る舞いには、ナノギャップ間における電気二重層（電解質濃度に依存）の存在が重要な寄与をしていることが、電気ポテンシャル計算や電解質濃度依存性の実験から明らかになった。すなわち、マクロなスケールでは電解質溶液中における電場は対イオンの効果により打ち消されてしまうが、ギャップの幅 (d) が電気二重層の厚さ (D) と同程度まで小さくなると (100 mM NaCl 水溶液で $D \sim 1$ nm)、ナノギャップ間に有効な電場が形成される。この強い電場により脂質分子がナノギャップ間に静電トラップされ、分子の供給がなくなるために自発展開が停止する (図2) [3]。これはナノギャップを分子ゲートとして用いた初めての例であり、ナノバイオデバイスの要素技術として大きな期待が持たれる。

本研究は科研費の援助を受けて行われた。

- [1] Y. Kashimura et al., Jpn. J. Appl. Phys. **47** (2008) 3248.
- [2] Y. Kashimura et al., Jpn. J. Appl. Phys. **49** (2010) 04DL15.
- [3] Y. Kashimura et al., J. Am. Chem. Soc. **133** (2011) 6118.

図1 (右) 人工細胞膜の自発展開の時間発展。

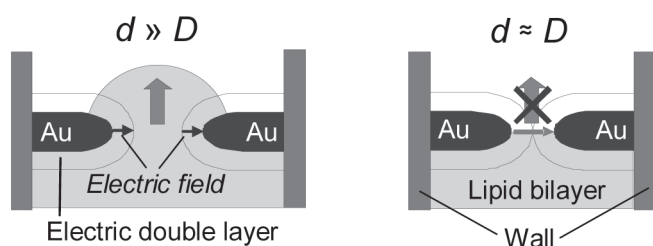
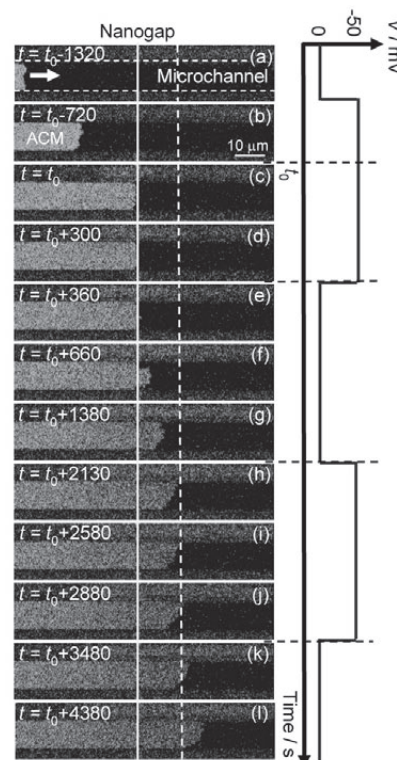


図2 (上) 人工細胞膜の静電トラップのメカニズム。

振動ポテンシャル障壁を越える単電子共鳴活性化現象

宮本聡^{1,2} 西口克彦¹ 小野行徳¹ 伊藤公平² 藤原聡¹
¹量子電子物性研究部 ²慶応大学

電子1個1個の操作が可能な単電子転送デバイスは、電流標準や低消費電力回路への応用が期待されている。一方、比較的温度の高い条件では、古典的なブラウン粒子としての電子のダイナミクスを調べるのに適した系となっている。本研究では、時間に対して振動するポテンシャル障壁を越える粒子が示す共鳴活性化現象[1]に着目し、単電子系での観測を行った。共鳴活性化は、障壁の振動周期と粒子の平均脱出時間のオーダーが一致するとき起こると理論的に予測されているが、トンネルダイオードの双安定状態などマクロスピックな系での観測に限られていた。

測定デバイスは、シリコンナノ細線と微細ゲートで構成される単電子転送デバイスである。図1(a)にデバイスの電子顕微鏡像、図1(b)に転送動作のポテンシャル模式図を示す。ソース側の微細ゲートにクロック信号を入力して転送を行う単電子ラチェット[2]の手法を採用し、ソースからクーロン島へ単電子を捕獲し、ドレイン側へ放出する。その際、適切なゲート電圧条件を選ぶことにより、放出過程において図1(c)のように熱活性化が支配的となる状況を得ることができる。さらに、障壁を形成するゲートにrf信号 A_{rf} (周波数 f_{rf})を導入し、障壁に変調 U_m を与える。単電子転送の測定は、温度16 K、クロック周波数 $f_{RC}=16.6$ MHzで行った。単電子放出過程における平均脱出時間 τ_{avg} は、転送電流の電子放出時間 t_{GIL} (転送クロックがlowレベルである時間)依存性を解析することにより見積もった。図2に τ_{avg} の f_{rf} 依存性を示す。ゲート電圧 V_{G1L} を調節し τ_{avg} のオーダーを変化させているが、いずれの場合も τ_{avg} は $1/\tau_{avg}$ 付近の周波数で共鳴的減少を示し、その共鳴周波数 f_{RES} は τ_{avg} が短いほど、高周波数側にシフトしている。これらの振舞いは、障壁に与えられた周期的変調と単電子の確率的な脱出過程の同期により事象発生確率が増大する共鳴活性化現象として理解することができる[3]。

- [1] C. R. Doering and J. C. Gadoua, Phys. Rev. Lett. **69** (1992) 2318.
 [2] A. Fujiwara, K. Nishiguchi, and Y. Ono, Appl. Phys. Lett. **92** (2008) 042102.
 [3] S. Miyamoto et al., Phys. Rev. B **82** (2010) 033303.

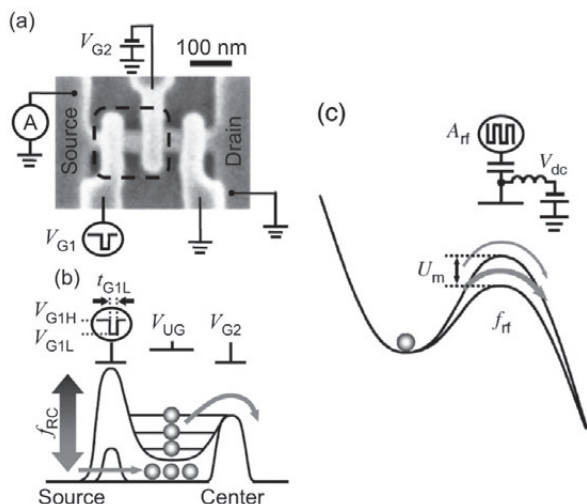


図1 (a)デバイスの電子顕微鏡像。(b)単電子転送のポテンシャル模式図。(c)振動障壁からの単電子脱出過程。

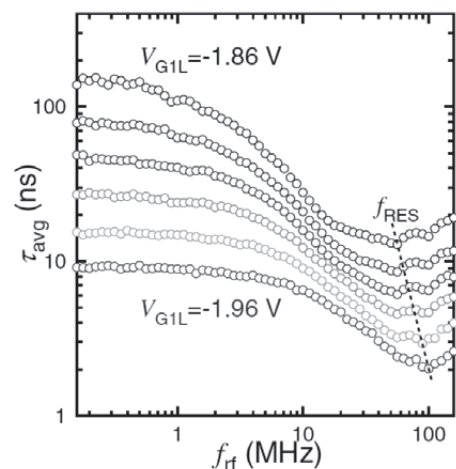


図2 平均脱出時間と障壁変調周波数との関係。 V_{G1L} により障壁高さの平均値を変化させている。

グラフェンの磁気電気効果と熱電効果の理論検討

影島博之¹ 日比野浩樹² 永瀬雅夫³ 関根佳明¹ 山口浩司¹
¹量子電子物性研究部 ²機能物質科学研究部 ³徳島大学

グラフェンは原子1層の薄さの2次元シートという特異な構造を持ち、様々な新しい物性・機能が期待できることから、理論により潜在能力探索を行った[1-3]。

磁気電気効果は、外部電界によって磁性を制御する効果である[1, 3]。グラフェンの端はジグザグ構造を持つと磁性を示すことが理論予測されているが、SiO₂上に貼り付ける通常の自立グラフェンでは磁性の発現のために端を水素終端する必要がある、実現が難しい。一方、SiC(0001)表面を高温で熱することで形成されるエピタキシャルグラフェンは、形成初期に島状のグラフェンが形成されるため、これを制御することによってジグザグ構造の端を多く含んだ構造を得ることが期待できる。形成過程から判断すると、SiC上のグラフェン島はCのsp²-σ結合に切れ目がどこにもない特異な構造を有し、端を水素終端する必要がない(図1)。しかも、下地SiCとの相互作用によって、グラフェンは負に帯電している。ジグザグ構造を持ったグラフェン端が磁性を示すためには電気的中性が必要なため、外部にゲート電極を用意し、電界効果によって電荷を中和するように正電荷を注入することで、磁性を発現させることができ、磁気電気効果を示すことが期待できる(図1)。

熱電効果は温度差から電位差を作る効果であり、この効果を使って廃熱利用発電が期待されている[2, 3]。従来のSiO₂上に貼り付けられたグラフェンにおいて熱電変換効率を示す指数ZT₀は10⁻³程度と遠く実用化に及ばないレベルであるが、しかしグラフェン上吸着物を1/1000に抑え、下地SiO₂起源の遠隔光学フォノン散乱を抑制することができれば、実用化の判断基準となるZT₀>1を電荷中性点近傍で実現可能である(図2)。グラフェンは、資源豊富で安価であり、融点も高く、ゲートでp/n極性を制御でき、しかも無害、軽量であることから、熱電効果材料としての期待度は高いと結論できる。

本研究の一部は科研費の補助を得て行われた。

- [1] H. Kageshima et al., Appl. Phys. Express **3** (2010) 115103.
- [2] H. Kageshima, Jpn. J. Appl. Phys. **49** (2010) 100207.
- [3] H. Kageshima et al., Jpn. J. Appl. Phys., in press.

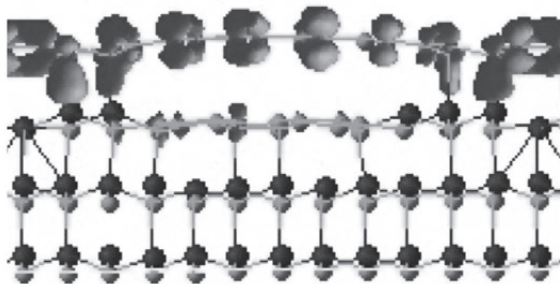


図1 SiC(0001)上ジグザググラフェンナリボンの原子構造と+8e帯電時のスピン偏極分布。大きい丸はSi原子、小さい丸はC原子。

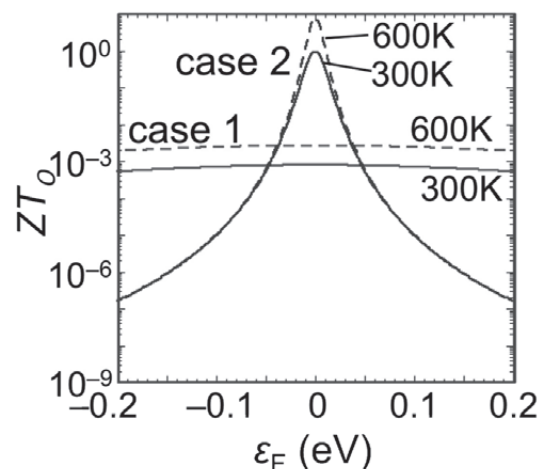


図2 グラフェンの熱電変換指数ZT₀のフェルミエネルギーε_F依存性。従来時(case 1)とキャリア散乱抑制時(case 2)。

リンドープ SOI-MOSFET の電流注入発光における巨大シュタルク効果

登坂仁一郎 西口克彦 小野行徳 影島博之 藤原聡
量子電子物性研究部

近年、Si中リン原子の電子状態は、固体量子コンピュータへの応用の観点から注目を集めている。本稿では、10 nm以下のSilicon On Insulator (SOI)チャネルを有するリンドープSOI-MOSFETにおける電流注入発光(EL)において、巨大なシュタルク効果を観測したので報告する[1]。

デバイスは、図1(a)に示すリンドープポリシリコンからなるトンネルゲートを有するSOI-MOSFETである。評価を行ったデバイスのSOIの膜厚(t_{SOI})は、8.5および25 nmとした。上面ゲート酸化膜厚(t_{FOX})および背面ゲート酸化膜厚(t_{BOX})は、それぞれ2および400 nmである。図1(b)にデバイスのポテンシャル図を示す。また、SOI層はデバイス作製時の熱処理により 10^{17}cm^{-3} 程度のリンドープが行われている。ELスペクトルは、温度80 Kにて評価を行った。電子は、上面ゲートより注入され、同時に p^+ コンタクトより正孔がSOI層に注入される。図2(a)は、 $t_{\text{SOI}} = 25\text{ nm}$ のデバイスにおけるELスペクトルの背面ゲート電圧(V_{BG})依存性である。EL強度は、 V_{BG} が増加するに従い急速に減少している。これは、 V_{BG} を増加させるとSOI層に電界が加わり、電子はSOI/BOX界面に分布し、正孔と大きく分離するためと考えられる。一方 $t_{\text{SOI}} = 8.5\text{ nm}$ のデバイスでは、ELスペクトルは複雑な振る舞いを見せている[図2(b)]。このデバイスでは、中性ドナーと自由正孔の再結合発光に伴う $D^0\text{-h}$ ピークは、 $V_{\text{BG}} = 136\text{ V}$ 時に50 meVに及ぶ巨大なシュタルクシフトを示した。EL強度は、 $t_{\text{SOI}} = 25\text{ nm}$ のデバイスがほぼゼロとなる V_{BG} においても高い値を示し、その後 $V_{\text{BG}} = 80\text{ V}$ を超えた辺りから急速な減少を示した[図2(c)]。急速なEL強度の減少は、強い束縛状態からの電子解離により説明が可能である。SOI膜厚が薄いデバイスでは、SOIに形成される三角井戸ポテンシャル内の準位がリン束縛準位に対し高いエネルギーを取る。したがって、薄いデバイスでは、リンに束縛された電子は、容易には解離しないため、SOI膜厚が異なるデバイスで急速なEL強度減少を示す電界に差が現れたものと考えられる。

[1] J. Noborisaka et al., Appl. Phys. Lett. **98** (2011) 033503.

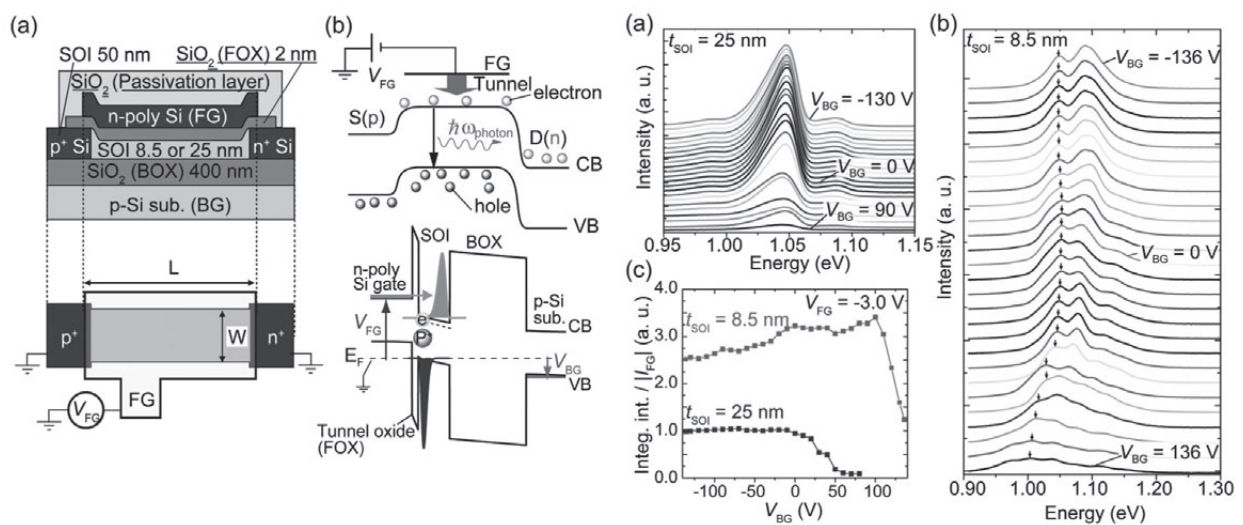


図1 (a)デバイス側面図(上)。デバイス上面図(下)。(b)ソース・ドレイン間のポテンシャル図(上)。上面ゲートから背面ゲートにわたるポテンシャル図(下)。

図2 (a)ELスペクトルの V_{BG} 依存性($t_{\text{SOI}} = 25\text{ nm}$)。 (b) ($t_{\text{SOI}} = 8.5\text{ nm}$) 矢印は、 $D^0\text{-h}$ ピークを示す。 $|V_{\text{BG}}| = 136\text{ V}$ を除き V_{BG} は10 Vステップである。 (c) EL積分強度の V_{BG} 依存性。

電気機械共振器を用いたパラメトリック周波数変換とロジック演算

Imran Mahboob Emmanuel Flurin 西口克彦 藤原聡 山口浩司
量子電子物性研究部

現代のコンピュータを構成する基本素子として、半導体集積回路が用いられていることは周知の事実であるが、世界で最初に提案されたコンピュータが機械装置であったことは、あまり知られていない [1]。Mooreの法則が限界に近づき、省エネルギー素子の重要性が高まる昨今、ナノスケールの機械を用いたコンピュータの研究が注目されている。しかし、様々な試みにもかかわらず、任意のブール代数を表現できる汎用的な論理素子は未だ実現されていないのが現状である。我々は、電気機械共振器における非縮退パラメトリック増幅を用い、このような演算を実現できる素子を新たに提案した [2, 3]。

非縮退パラメトリック増幅は量子光学の分野で広く用いられ、光の周波数（波長）変換を可能とする技術である。高い周波数(f_p)のポンプ光と、低い周波数(f_s)のシグナル光より、Kerr効果などの非線形過程を用いて異なる周波数のアイドラー光(f_i)を生成する。ここでエネルギー保存則より、アイドラー光の周波数は $hf_i = hf_p - hf_s$ で与えられる(h はプランク定数)。

我々は、この概念を微小な機械共振器 (図1) に対して適用し、機械的な論理演算を実現した。まず、入力情報に対応する複数の2値情報を、異なる周波数のナノメートルスケールのポンプ振動として共振器に印加する。次に、これとは独立にシグナル振動を印加すると、機械共振器の有する非線形性により様々な周波数のアイドラーが生成される。これらはそれぞれ異なる論理演算の出力に対応するが、重要な点は、これらが単純に2入力1出力の基本論理ゲートだけでなく、それらの複合演算も表現できることである。さらには、それらの複数の演算は、たった一個の素子で並列に処理を行うことが可能である (図2)。これらの結果はナノ機械コンピュータによる論理演算が高い並列処理性を有することを示しており、従来の技術とは全く異なる特徴を持った新しい演算システムとして期待される。

[1] <http://www.sciencemuseum.org.uk/onlinestuff/stories/babbage.aspx>

[2] I. Mahboob et al., Nature Commun. **2** (2011) 198.

[3] I. Mahboob et al., Appl. Phys. Lett. **97** (2010) 253105.

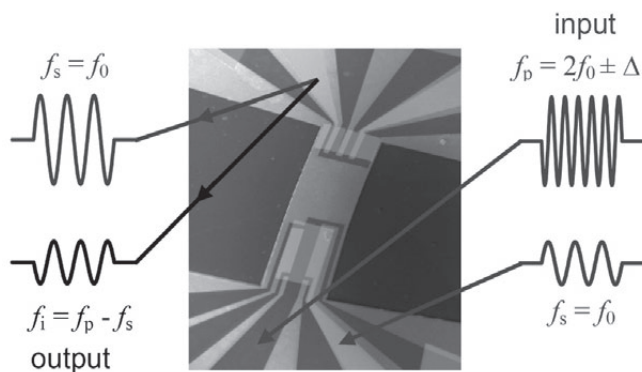


図1 実験に用いた電気機械パラメトリック増幅器の電子顕微鏡写真。交流電圧を電極に印加すると、圧電効果により面直方向の振動が引き起こされる。シグナル振動 (周波数: f_s) とポンプ振動 (周波数: f_p) を加えることにより、その差周波の振動がアイドラー振動 (周波数: f_i) として生成される。

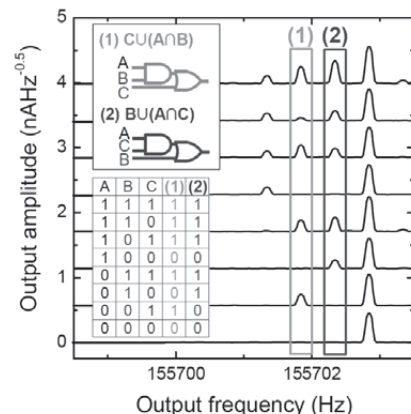


図2 3つのポンプ振動 (A、BおよびC) を異なる周波数として加えたときの出力スペクトル。CU(A∩B)およびBU(A∩C)の2つの出力が同時に得られており、並列複合論理演算が実現されている。

GaAs カンチレバーにおけるキャリアを介した光-機械結合

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

近年、マイクロメカニカル素子における光-機械結合が注目されている[1、2]。光キャビティにより生み出される放射圧や光熱応力によりメカニカル素子は反作用を受け、振動の増幅や自励発振、また減衰や振動モードの冷却が実現する[1、2]。これに対して、最近我々は光キャビティを必要としない新しい光-機械結合を見出した[3、4]。これは光励起により生み出されるキャリアを介した光-機械結合であり、バンドギャップ波長近傍のcwレーザ照射によりGaAsカンチレバーの振動振幅が変化する。以下ではn-GaAs/i-GaAs 2層構造カンチレバー [図1(a)] において観測されたキャリアを介した光-機械結合について述べる。

この新しい光-機械結合は励起キャリアにより生み出される圧電効果に起因している。光励起された電子と正孔は2層構造による内部電界により空間的に分離し、カンチレバーを構成するGaAsに圧電応力が生ずる。この光圧電応力がカンチレバーに反作用を与え、カンチレバーの熱振動は影響を受ける。[110] 方位を向いたカンチレバーではこの反作用が正のフィードバックを与え、熱振動は増幅する [図1(b)]。またレーザ強度が閾値を超える ($P_{ex} > 10 \mu\text{W}$) とダンピングが消え、カンチレバーは自励振動する [図1(b)]。一方、[-110] 方位を向いたカンチレバーでは圧電効果が逆向きとなるため負のフィードバックが生み出され、振動の減衰が起こる [図1(c)]。この光圧電効果によるフィードバックは歪による光吸収変化に大きく依存しており、歪に敏感な吸収端近傍のレーザ波長 ($\lambda_{ex} = 840 \text{ nm @ } 50 \text{ K}$) において反作用は増強される[4]。このキャリアを介した光-機械結合は、従来の光-機械結合に比べ半導体光デバイスとの融合性において大きな利点がある。また、キャリアの動的過程や歪効果、キャリアに関連したエネルギー散逸などの半導体特性を研究するツールとしても期待される。

- [1] I. Favero and K. Karrai, Nature Photon. **3** (2009) 201.
- [2] C. H. Metzger and K. Karrai, Nature **432** (2004) 1002.
- [3] H. Okamoto et al., Appl. Phys. Express **2** (2009) 035001.
- [4] H. Okamoto et al., Phys. Rev. Lett. **106** (2011) 036801.

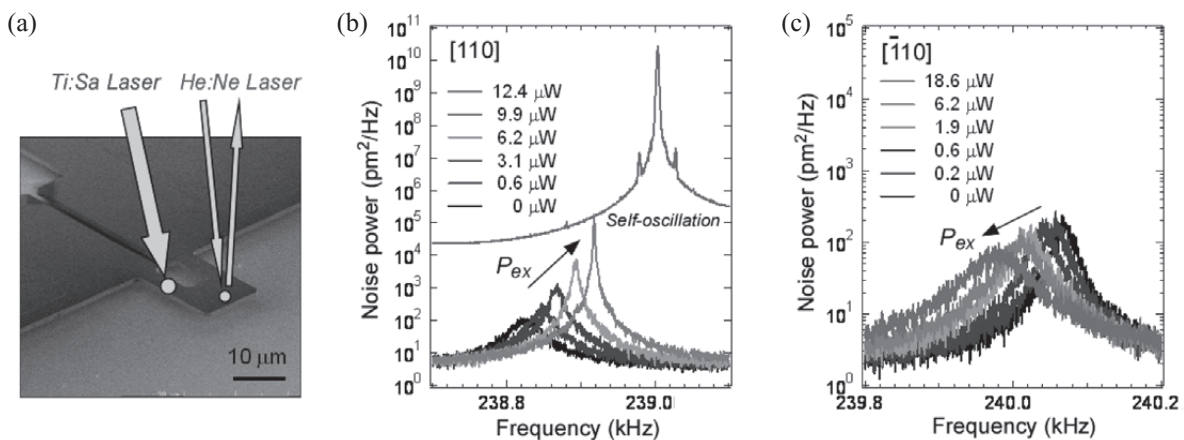


図1 (a)カンチレバーのSEM像。カンチレバーは100 nm厚のn-GaAsと200 nm厚のi-GaAsからなる2層構造を有する。Ti:Sa cwレーザは歪の大きなカンチレバーの足部に照射。カンチレバーの熱振動はHe:Ne cwレーザを用いてレーザ干渉計により検出。測定は真空中、50 K。(b) [110] 方位カンチレバーと(c) [-110] 方位カンチレバーにおける変位ノイズパワースペクトルのレーザ強度依存性 ($\lambda_{ex} = 840 \text{ nm}$)。

量子ホール領域におけるエッジマグネトプラズモンの電圧制御

鎌田大^{1,2} 太田剛¹ 村木康二¹ 藤澤利正²

¹量子電子物性研究部 ²東京工業大学

2次元電子系に垂直に強い磁場を加えると、ローレンツ力によって電子は試料端に沿って伝播するようになる。量子ホール領域においては、試料内部ではフェルミレベルは磁場によって離散化したエネルギー準位のギャップ中にあるため、試料の両端にあるチャンネル間の後方散乱は抑制され、そのためエッジチャンネルは散逸を伴わない理想的なコヒーレント1次元チャンネルとなる。これまでにエッジチャンネルによって定義された様々な干渉計を用いた量子光学実験の電子版が実証されており、それによって電子のコヒーレント伝導特性や量子統計性を調べることが可能となった。これらの実験は、さらにエッジチャンネルを量子チャンネルとして、量子状態をデバイスサイズと同等の巨視的な距離に渡って伝送する可能性を示唆している。そのためには、電子の群速度は制御すべき重要なパラメータの1つである。

我々は飛行時間測定によって量子ホール領域におけるエッジマグネトプラズモン(EMP)の群速度を調べた[1]。ソース電極に電圧パルスを加えることで $t=0$ において生成したEMPは、量子ポイント接合(QPC)に向かって試料端に沿って伝搬する。QPCに別のパルスを加え一時的にQPCを開くことで、ある遅延時間 t_d で到着したEMPをドレイン電流 I_{DS} として選択的に検出することができる(図1)。我々は、金属ゲートによって定義されたエッジに沿って伝搬するEMPの群速度が、ゲートに印加した電圧 V_G に強く依存することを見出した(図2)。金属ゲートは面内の電界を遮蔽し、それによって群速度が遅くなるため、観測された群速度の V_G による変化は、金属ゲートによる遮蔽効果の変化を反映しているものと理解することができる。ここで遮蔽の強さが変化するの、 V_G によってゲートとエッジチャンネルの距離が変化するためである。

[1] H. Kamata, T. Ota, K. Muraki and T. Fujisawa, Phys. Rev. B **81** (2010) 085329.

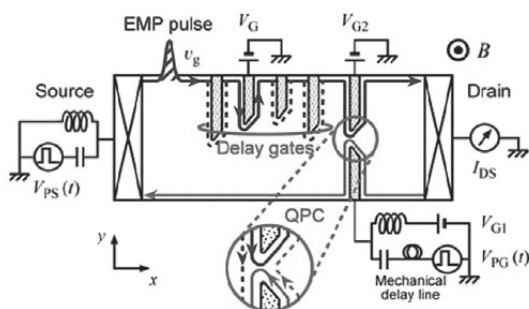


図1 (a) 試料構造と測定配置の概略図。ソース電極に短い電圧パルス $V_{PS}(t)$ を加えEMPを生成する。別の電圧パルス $V_{PG}(t)$ をQPCに加えることで局所ポテンシャルを検出する。2つの電圧パルスの時間間隔は機械的な遅延ラインによって調節する。ソース電極とQPCの間の4つの遅延ゲートは経路長を追加するために用いる。

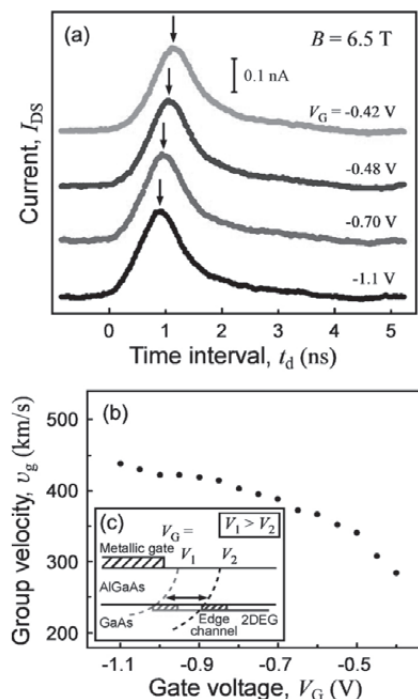


図2 (a) 様々な V_G に対する I_{DS} の t_d 依存性。(b) 群速度 v_g の V_G 依存性。(c) 試料構造断面の概略図。

半導体二重量子ドットにおけるトンネルダイナミクスの広帯域 キャパシタンス測定

太田剛 林稔晶 村木康二 藤澤利正*
量子電子物性研究部 *東京工業大学

量子ドットの電子状態を調べる手法の1つとしてキャパシタンス測定が挙げられる。我々は、二重量子ドットと量子ポイントコンタクト(QPC)に独立に高周波電圧を印加することにより高速キャパシタンス測定を行った[1]。図1(a)に実験の模式図を示す。二重量子ドットに高周波電圧 $V_{DQD}(t)$ を印加すると、ドットのポテンシャルが変調され、ドット間の電荷移動に起因する電荷 $Q_{DQD}(t)$ が生じる。QPCのコンダクタンスが $Q_{DQD}(t)$ に比例するトンネル領域においてQPCにも同じ周波数、位相の高周波電圧 $V_{QPC}(t)$ を印加すると、QPCを流れる平均電流 $\langle I_{QPC} \rangle$ をロックイン検出することができる。 $\langle I_{QPC} \rangle$ は電流ピークもしくはディップとして観測され、2つの高周波電圧の位相差が 0° のときはキャパシタンスに比例し、 90° のときはコンダクタンスに比例する。ドットのゲート電圧を変化させながら $\langle I_{QPC} \rangle$ を測定するとバックグラウンド成分を伴った電流ピーク(もしくはディップ)が現れる。バックグラウンドは素子構造で決まるキャパシタンス成分によるが、ピーク(ディップ)は電子のトンネリングによって生じた $Q_{DQD}(t)$ に起因する。図1(b)はゲート電圧を変化させたときのキャパシタンス信号をプロットしたものである。ここでの動作周波数は1 kHzである。弱結合ドットに特徴的なハニカム型の電荷安定状態が見える。ドットがトンネル結合した領域では、ドット間の量子力学的結合を反映した量子キャパシタンスを測定することができる。図1(c)はドット間トンネル結合の大きさを変えたときのキャパシタンス信号の変化を示したものである。トンネル結合が小さくなるにつれて、ブロードなディップから鋭いディップへと変化する。量子キャパシタンス C_Q は、ゲート電圧 V_G に対してエネルギー E の二回微分($C_Q \equiv d^2 E / dV_G^2$)として表されることから、観測されたディップ形状はエネルギーバンドの形状を反映していることが分かる。この量子キャパシタンスを測定することで1電子状態の結合・反結合軌道、2電子状態のスピン一重項・三重項状態を識別できることが期待される。

本研究の一部は総務省SCOPEの援助を受けて行われた。

[1] T. Ota et al., Appl. Phys. Lett. **96** (2010) 032104.

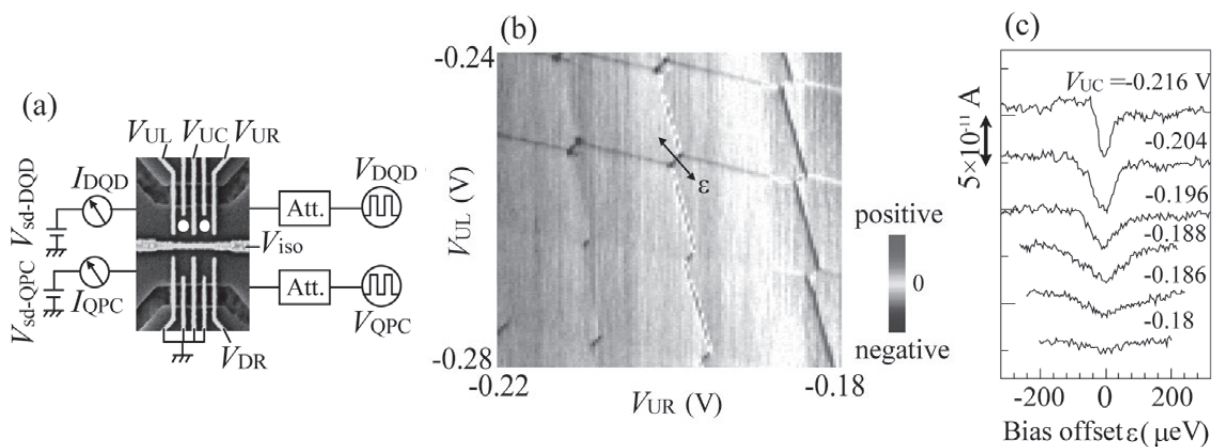


図1 デバイスの模式図(a)、ドットのゲート電圧 V_{UR} と V_{UL} を変化させたときの $\langle I_{QPC} \rangle$ のプロット(b)、 V_{UC} を用いてドット間トンネル結合を変化させたときの C_Q の変化(c)。 ϵ は準位間のバイアスオフセット。

トンネルエネルギー可変型磁束量子ビットのコヒーレント制御

Xiaobo Zhu Alexander Kemp 齊藤志郎 仙場浩一
量子電子物性研究部

超伝導磁束量子ビットは、量子プロセッサの構成要素として有望視されている。回路を巡る超伝導電流間のトンネル過程を試料に備わった2つの制御ラインから随時調節可能なこの改良型の量子ビットではトンネルエネルギーの可変制御に加えて σ_x 結合も可能となった。この改良に伴い、磁束量子ビットの様々な応用の可能性が拓かれた。例えば、複数量子ビットに拡張可能なON/OFF比の大きなスケラブルな量子バス実現の可能性[1]や、 σ_x 結合を用いた量子非破壊測定可能な固体デバイスへの発展などである[2]。

最近、私達は磁束量子ビットを構成する最小のジョセフソン接合をDC-SQUIDで置き換えることにより、超伝導磁束量子ビットのトンネルエネルギーのその場制御の実証に成功した。量子ビット近傍に備え付けた制御ラインへ電流パルスを印加することで、nsの時間スケールで量子ビットのトンネルエネルギーを数GHz程度変えることが可能である(図1)。

量子ビットの基底状態と第一励起状態間でのラビ振動は、最も基本的な量子ビットのコヒーレント状態制御である。図2(a)に、量子ビットの最適磁束動作点で観測されたラビ振動を示す。測定は、2つの制御ラインを流れる電流をそれぞれ一定に保つことで、トンネルエネルギーを所望の値に保ち、量子ビットのエネルギーに共鳴したマイクロ波パルスの照射時間を変えて行った。これらパルス列の直後の読み出しパルスによって、量子ビットの状態測定を行う。即ち、状態読み出しまでの一連のパルス列を各条件下で2000回繰り返すことにより、基底状態と第一励起状態の比占有確率を測定できる。照射する共鳴マイクロ波の強度を変えながら測定を行い、図2(b)に示すようにラビ周波数がマイクロ波強度に線型に依存することを確認した。この振動がラビ過程に起因することを裏付けるものである[3]。

[1] Y. D. Wang, A. Kemp, K. Semba, Phys. Rev. B **79** (2009) 024502.

[2] Y. D. Wang, X. Zhu, and C. Bruder, Phys. Rev. B **83** (2011) 134504.

[3] X. Zhu, A. Kemp, S. Saito, and K. Semba, Appl. Phys. Lett. **97** (2010) 102503.

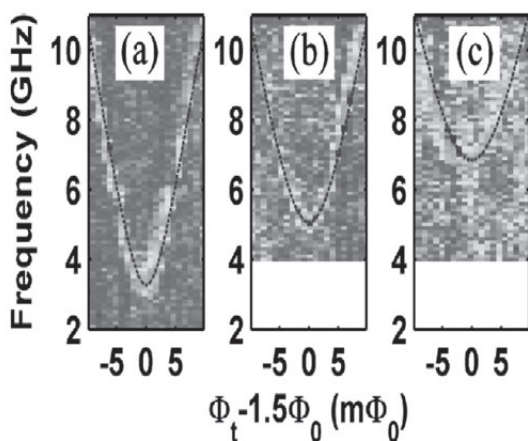


図1 超伝導磁束量子ビットのエネルギースペクトル
トンネルエネルギー共鳴周波を(a) 3GHz、(b)
5GHz、(c) 7GHzと変化させた場合。

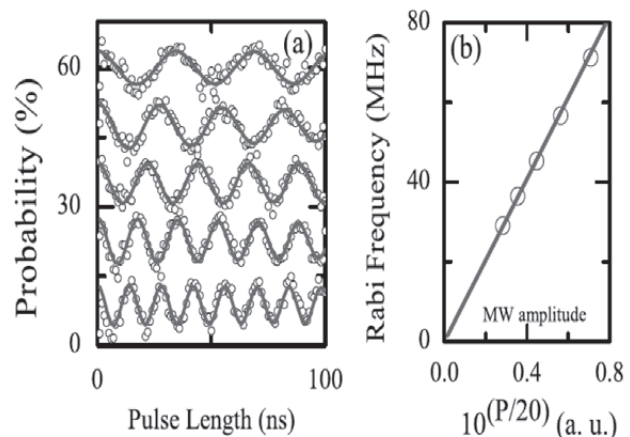


図2 (a) 最適磁束バイアスにおいて共鳴マイクロ波強度を変えて測定したラビ振動。(b) 観測されたラビ振動数のマイクロ波強度に対する線型依存性。

超伝導量子ビットと結合した LC 共振器における非古典的光子状態の生成

角柳孝輔 齊藤志郎 中ノ勇人 仙場浩一
量子電子物性研究部

量子演算に利用可能な量子状態を保持する量子メモリの実現のためには量子ビットから量子メモリへの量子情報の移送手段の確立と光子数状態（特に1光子状態）の生成が必要である。しかしながらLC共振器を共鳴条件にあるマイクロ波で励起する方法では、古典的なコヒーレント状態が生じ、光子数状態の生成は困難であった。そこで超伝導量子ビットからLC共振器に光子を移すことによって非古典的光子状態生成を試みた。

用いた試料では超伝導磁束量子ビットを囲むように配置したラインインダクタとキャパシタからなるLC共振器が磁氣的に量子ビットと結合している（図1）。量子ビットと共振器との結合エネルギーは360 MHzである。このように結合エネルギーを大きくすることが可能なことは超伝導量子ビットの利点の1つである。この量子ビット-LC共振器の系で、量子ビットを励起したのち非断熱的に磁場を動かす。LC共振器と量子ビット間での共鳴条件を使うことによって量子ビットの光子は量子ビットと共振器の間で真空ラビ振動と呼ばれる量子振動を生ずる。この振動を時間領域で制御し光子が共振器中に移った時に断熱的に磁場を戻すことで量子ビットから共振器への光子の移送が実現できる。この過程を繰り返すことによって量子ビットから光子を1個ずつ共振器に移すことが可能である。こうして生成した光子状態は理想的には光子数状態となる。この量子振動の周期は光子数に依存するので時間領域での振動の解析により共振器の光子数分布を調べることができる。

図2はこの方法によって1個と2個の光子を共振器に入れた場合に得られた光子数の分布である。エネルギー緩和や制御パルスの不完全性などのために理想的な光子数状態とは異なるものの古典的な励起方法で生じ得るポアソン分布とは明確に異なる非古典的光子状態生成に成功した[1]。この成果は、超伝導LC共振回路の量子性を積極的に利用したものであり、高Q共振器を用いた量子メモリの可能性への発展が期待される。

[1] K. Kakuyanagi et al., Appl. Phys. Express 3 (2010) 103101.

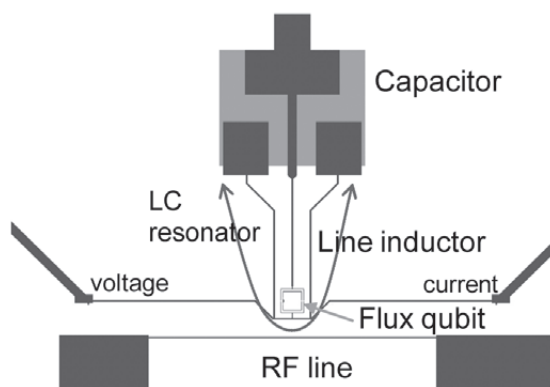


図1 LC共振器と磁束量子ビットの試料デザイン。

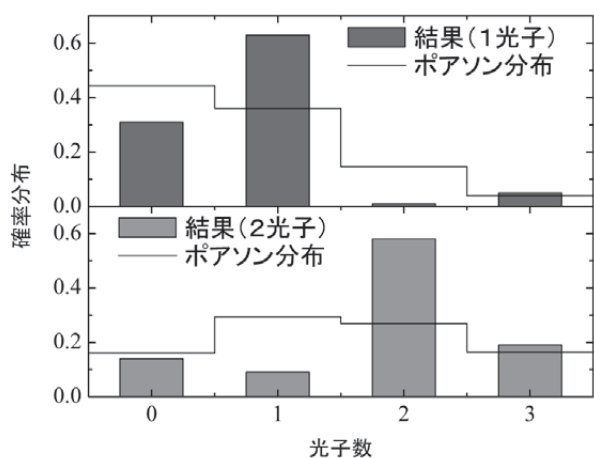


図2 1光子と2光子を移送した時に得られた光子数分布とそれぞれの平均光子数に対応するポアソン分布。

超伝導量子ビットを用いた量子ゼノン効果

松崎雄一郎 齊藤志郎 角柳孝輔 仙場浩一
量子電子物性研究部

量子力学が予言する興味深い現象の1つに、量子ゼノン効果と呼ばれる、頻繁な測定により不安定系の減衰を抑制する現象が挙げられる[1]。ノイズの相関時間より短い時間領域では不安定系は二次関数的に減衰することが知られており、この時間領域で測定を繰り返すことで量子ゼノン効果は起こるとされている[1]。しかしながらほとんどのノイズの相関時間は、現在の技術で構成できる測定器の時間分解能よりも短く、そのため二次関数的な減衰の観測は一般的には困難である。この事実が量子ゼノン効果の実証を困難にし、実際に不安定系に対する量子ゼノン効果が実験的に観測された例はまだ1つしか存在しない[2]。

我々は、不安定系に対する量子ゼノン効果を、超伝導量子ビットを用いて実証する方法を理論的に提案した[3] (図1)。量子ビットは通常、「エネルギー緩和」と「位相緩和」の2つの減衰過程を持つ。超伝導量子ビットにおいては、エネルギー緩和過程は指数関数的な減衰を示すものの、位相緩和は主に相関時間が無限大である1/fノイズ (fは周波数をあらわす) によって引き起こされるため、二次関数的な減衰を観測することが比較的容易であると考えられる。我々はマスター方程式を解き、エネルギー緩和時間が位相緩和時間よりも十分に長ければ、測定回数を増やすことで状態を目的のヒルベルト空間に射影する確率 (成功確率) を上げられることを示した (図2)。また、ポストセレクションをせずに測定を行った場合でも、測定頻度を上げることで位相緩和を抑えることが可能になることを示した。これらの結果は、超伝導量子ビットを用いることで、現在の技術でも量子ゼノン効果は実証可能であることを示している。

- [1] B. Misra et al., J. Math. Phys. **18** (1997) 756.
- [2] M. C. Fischer et al., Phys. Rev. Lett. **87** (2001) 040402.
- [3] Y. Matsuzaki et al., Phys. Rev. B. **82** (2010) 180518.

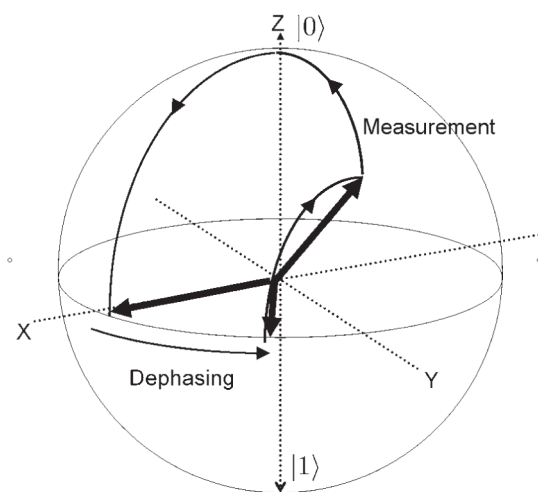


図1 超伝導量子ビットを用いて量子ゼノン効果を観測するためのスキーム。

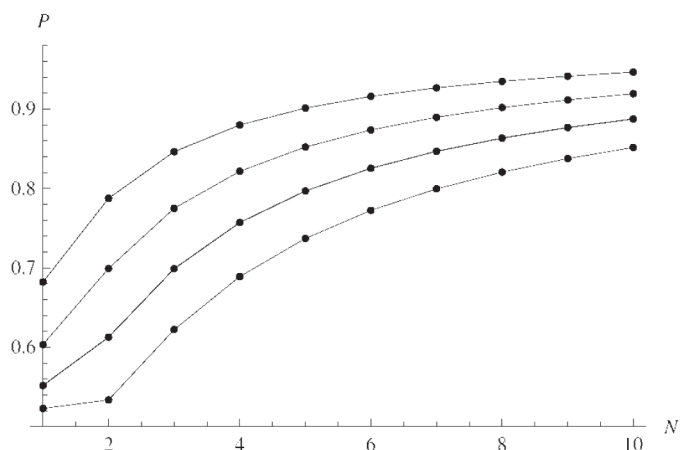


図2 上から順に、 $t=20, 25, 30, 35$ (ns)の時間間隔で、 N 回射影測定を行ったときの成功確率(P)のプロット。

逆近接効果を考慮したアンドレーフ反射分光による $p\text{-In}_{0.96}\text{Mn}_{0.04}\text{As}$ のスピン偏極度評価

赤崎達志¹ 横山毅人² 田仲由喜夫³ 宗片比呂夫² 高柳英明^{4,5}

¹量子電子物性研究部 ²東京工業大学 ³名古屋大学 ⁴東京理科大学 ⁵NIMS-MANA

超伝導体／強磁性体(S-F)接合は、超伝導と強磁性体中のスピン偏極との競合により新しい量子現象が期待されるため、基礎物性、応用の両面から大いに興味を持たれている。例えば、スピン偏極を考慮したAndreev反射分光を利用して、強磁性体中のスピン偏極度を実験的に見積もる実験が行われている[1]。しかしながら、S-F接合を正確に評価するためには、強磁性体中の交換場が超伝導体中に染み出すことで超伝導体中のペアポテンシャルが弱められる効果、所謂「逆近接効果」の存在も考慮しなければならない。我々は、従来考慮されていなかった逆近接効果がS-F界面でのスピン依存輸送特性やスピン偏極度評価にどのような影響を及ぼすかを検討している。

今回、強磁性半導体である $p\text{-In}_{0.96}\text{Mn}_{0.04}\text{As}$ を用いたS-F接合(図1)を作製し、その輸送特性を評価した。用いた $p\text{-In}_{0.96}\text{Mn}_{0.04}\text{As}$ は、 $\sim 10\text{ K}$ 以下で顕著な異常Hall効果が観測され、強磁性に転移した。図2に各温度でのNb/ $p\text{-In}_{0.96}\text{Mn}_{0.04}\text{As}$ 接合の微分コンダクタンスのバイアス電圧依存性(dI/dV - V)を示す。Nb電極の T_c ($\sim 8.2\text{ K}$)以下で、Nbの超伝導ギャップ電圧以下に相当する領域に微分コンダクタンスの減少が観測された。これは、 $p\text{-In}_{0.96}\text{Mn}_{0.04}\text{As}$ 中のスピン偏極キャリアによってAndreev反射が抑制されたことに起因している。我々は、Andreev反射に関するBlonder-Tinkham-Klapwijk理論[2]にスピン偏極と逆近接効果の影響を取り入れたモデルを提案し、実験結果と比較することにより、 $p\text{-In}_{0.96}\text{Mn}_{0.04}\text{As}$ のスピン偏極度 P の評価を行った。実験と計算結果の比較から、 0.5 K での $p\text{-In}_{0.96}\text{Mn}_{0.04}\text{As}$ の P 値は、 0.725 と見積もられ(図3)、温度とともに徐々に減少していくことが分かった。

本研究の一部は、科研費22103002の助成を受けたものである。

[1] R. J. Soulen Jr. et al., Science **282** (1998) 85.

[2] G. E. Blonder et al., Phys. Rev. B **25** (1982) 4515.

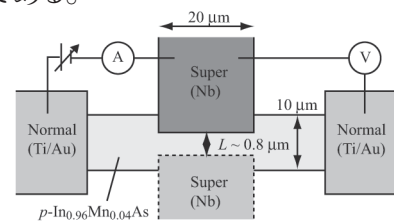


図1 Nb/ $p\text{-In}_{0.96}\text{Mn}_{0.04}\text{As}$ 接合(模式図)。

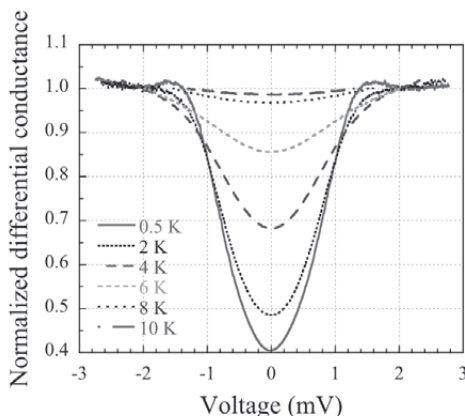


図2 各温度での規格化した微分コンダクタンスのバイアス電圧依存性。

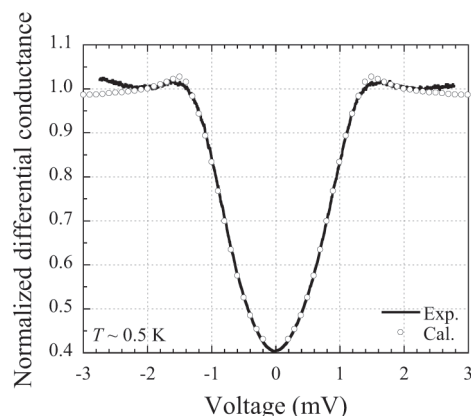


図3 0.5 K での規格化した微分コンダクタンスのバイアス電圧依存性(モデルと実験結果の比較)。実線: 実験データ、白丸: 計算結果。計算には、 $Z = 0.25$, $P = 0.725$ を用いている。

低密度 2次元電子系の発光分光

山口真澄 野村晋太郎* 田村浩之 赤崎達志
量子電子物性研究部 *筑波大学

低温での2次元電子系の発光スペクトルには試料のポテンシャル揺らぎが反映される。GaAs量子井戸の電子密度を制御して発光分光を行うことにより、2次元電子の金属絶縁体転移近傍のランダムポテンシャルの遮蔽に伴う変化を見出した[1]。本研究では、試料の表面と裏面にゲートを設けたGaAs量子井戸を用いて電子密度と電界を独立に制御し、電子密度の増加に伴う電子の空間的広がりを反映する不均一発光線幅の減少効果を観測した。

量子閉じ込めシュタルク効果により、同じ電子密度の発光スペクトルであっても電界の大きさに依存して発光エネルギーは大きく異なる(図1)。一方で、このエネルギーシフト量は井戸幅に依存し、量子井戸幅の一原子層の揺らぎのために発光スペクトルの不均一線幅は電界によって増大する。約 $4 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ の電子密度を境にして、それより低い電子密度では、位置による井戸幅の違いを反映した不均一線幅は電界とともに増大する。これは、量子井戸中の電子はリモート電荷が作るランダムポテンシャルの影響により空間的に不均一に存在しており、量子井戸からの発光スペクトルはそれぞれの位置での発光スペクトルの積分となるためである。一方、電子密度がより大きく井戸幅揺らぎの空間スケールを超えて電子が広がった場合には、電子の感じるポテンシャルは空間的に平均化されるため電界に依存した不均一線幅は消失する。

図2に示した発光線幅の電界に対する傾きは、電子密度の増加に伴って減少し $6 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ 以上では無くなっている。これは、2次元電子系がポテンシャル揺らぎと量子井戸幅揺らぎの長さスケールを超えて空間的に広がったことに対応している。

本研究は科研費の援助を受けて行われた。

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

[2] M. Yamaguchi et al., Physics Procedia **3** (2010) 1183.

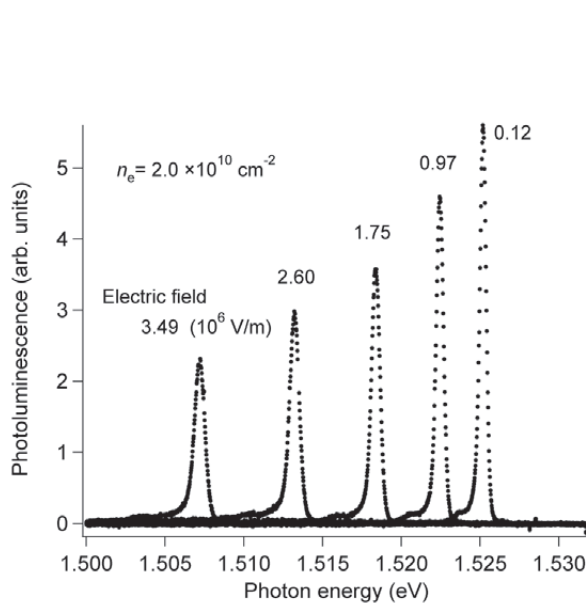


図1 電界の異なる電子密度 $2 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ における、発光スペクトル。

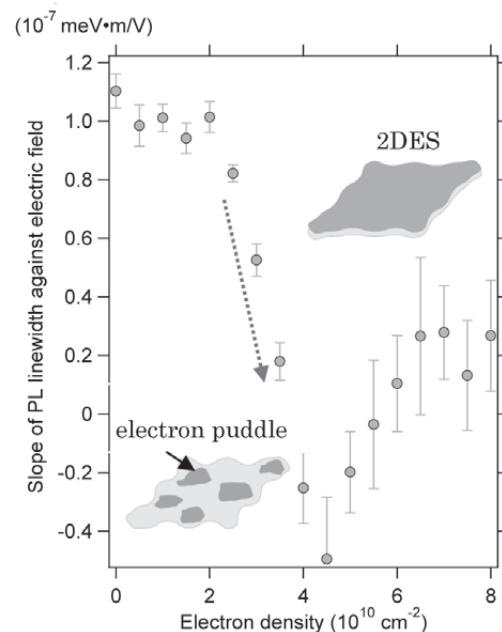


図2 電界に対する発光線幅の変化率の電子密度依存性。

二硼化マグネシウムナノ細線による通信波長帯単一光子の検出

柴田浩行 武居弘樹 本庄利守 赤崎達志* 都倉康弘
量子光物性研究部 *量子電子物性研究部

二硼化マグネシウム(MgB₂)は、金属・金属間化合物の中で最も高い $T_c=39$ Kを有し、2元素系で単純な結晶構造を持つことから次世代の超伝導材料として期待されている。これまでに我々は、MgとBの蒸着レートを各々精密に制御可能な分子線エピタキシャル成長(MBE)装置を用いるとMgB₂の超薄膜が成長できること、アモルファスカーボンレジストとして用いると高温成長を必要とするにも係わらずリフトオフ法が適応可能であることを報告してきた[1]。今回我々は、幅100 nm、高さ10 nmのMgB₂ナノ細線を作製し、この細線は可視～通信波長帯の広い波長域において単一光子を検出可能であることを明らかにした[2]。

図1に作製したMgB₂ナノ細線のAFM像を示す。均一なナノ細線が得られており、電気伝導特性も良好な超伝導特性を示す。ナノ細線にバイアスを加え極微弱なコヒーレント光を照射した測定の結果を図2に示す。一般的にコヒーレント光に含まれている光子数はポアソン分布をしているため、極微弱光下において1パルス当り1個の光子が含まれている確率は平均光子数、すなわち光強度に比例する。したがって、1パルス当り1光子の検出が可能なナノ細線では出力パルス数と光強度は比例することが予想される。図2(a)より波長405 nmの光を照射した場合の結果は理論値($n=1$)によく一致しており、この細線は単一光子数検出可能であることが判る。一方、波長1560 nmの通信波長帯では、低バイアス下において出力パルス数は光強度の二乗($n=2$)に比例している。これは1560 nmでは光子1個の持つエネルギーが低いため1パルス当り1個の光子が含まれている場合は出力パルスが現れず、2個以上の光子が含まれている場合にのみ出力パルスが現れることを意味する。バイアスを上げると出力パルス数は光強度に比例($n=1$)し、波長1560 nmにおいても単一光子検出可能であることが分かる。今後はMgB₂ナノ細線を利用して量子情報通信用の単一光子検出器を作製する。

本研究は科研費の援助を受けて行われた。

[1] H. Shibata et al., IEEE Trans. Appl. Supercond. **19** (2009) 358; H. Shibata et al., Physica C **470** (2010) S1005.

[2] H. Shibata et al., Appl. Phys. Lett. **97** (2010) 212504.

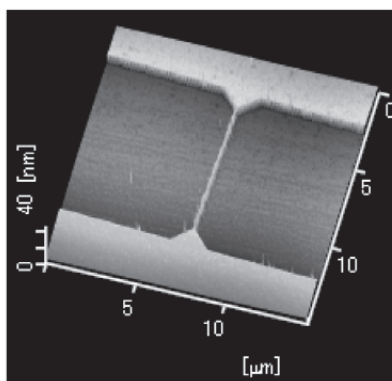


図1 MgB₂ナノ細線のAFM像。

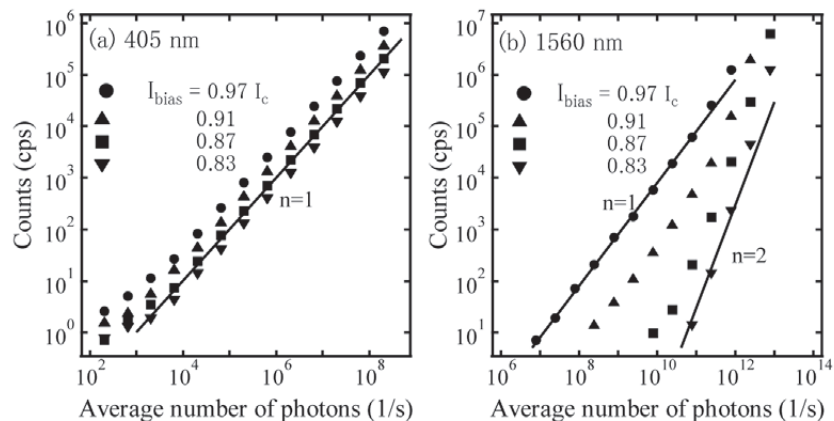


図2 MgB₂ナノ細線の光検出特性 (a) 405 nm、(b) 1560 nm。

I_{bias} はバイアス電流、 I_c は臨界電流を表す。

東京 QKD ネットワーク

玉木潔 本庄利守 武居弘樹 都倉康弘
量子光物性研究部

NICTからの受託研究を引き受けた3社NTT、NEC、三菱電機、そして受託研究とは別に欧州からAIT、Id Quantique、東芝欧州研究所が各社の量子鍵配送(QKD)装置を東京の光ファイバー網で相互接続し、試験運用を開始した。これを東京QKDネットワークと呼ぶ。

量子鍵配送は、第三者に情報を漏らさずに安全に通信を行うために必要な秘密鍵、というランダムなビット列を配布するための手段である。この配送方式では、量子力学という誰にも変えることができない自然法則を利用することによって盗聴を防ぎ、通信装置さえ理論通りに動けば、原理的に絶対に破ることができない暗号として期待されている。

東京QKDネットワークはNICTの都心とその近傍に敷設された光通信テストベットネットワークJGN2plus上の6つのノードからなり(図1)、その内の2つのノード間では動画伝送がリアルタイムで行える鍵生成速度を有する。NTTは長距離伝送である約90 kmの通信(小金井-大手町間の往復)を担当し、2 kbpsの秘密鍵生成率を達成した。

NTTが今回の東京QKDネットワークで実装した差動位相シフト量子鍵配送(DPS-QKD)プロトコル[1]は、NTTとスタンフォード大が共同で提案したQKD方式で、システムの構成が簡略であり、したがって実装が容易、という特徴を持つ方式である。

QKD装置を高速で動作させるためにField-Programmable Gate Arrayを用いて1GHzクロックでの乱数発生、高速信号発生、および高速メモリアクセスを実現し、NICTが開発した超伝導体を用いた単一光子検出器の偏波依存性を消すために偏波調整フィードバック機構を実装した。この実験装置から得られたシフト鍵は、NECが開発した鍵蒸留基盤によるデータ処理を経て秘密鍵に変換され、ネットワーク上の暗号通信に使われる。

これらの高速化や安定化の対策により、約8日間にわたるシフト鍵生成を確認し、約18 kbpsのシフト鍵生成率を達成した。このシフト鍵を鍵蒸留基盤に入力することにより、約2 kbpsの生成率で秘密鍵が生成できた(図2) [2]。

本研究はNICTの援助を受けて行われた。

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

[2] M. Sasaki et al., Opt. Express **19** (2011) 10387.

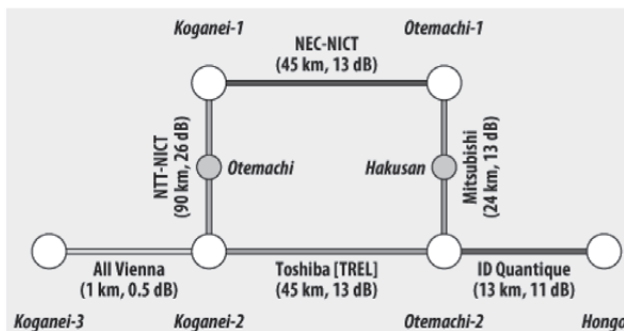


図1 ネットワークの概略図。

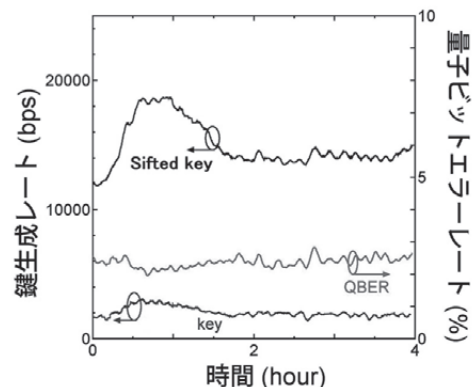


図2 シフト鍵生成レート、秘密鍵生成レート、量子ビットエラーレートの時間変動。

2 重量子ドットにおける近藤効果と電流雑音

久保敏弘 都倉康弘
量子光物性研究部

半導体量子ドット系における近藤効果は、様々なパラメータを実験的に制御することが可能である。そのため、従来の磁性金属における近藤効果では実現できない状況を作り出し、新しいタイプの近藤効果も発見されてきた[1]。2重量子ドット系においては、電子がどちらのドットにいるかを擬スピンとして定義することができる。これまで我々は、スピン自由度のない2重量子ドットにおける擬スピン近藤効果について理論的に調べてきた[2]。

本研究ではスピンの自由度も考慮し、図1に示されるような並列結合2重量子ドットにおけるスピン・擬スピン近藤効果を非平衡グリーン関数法に基づいたスレーブ・ボゾン平均場理論を用いて、絶対零度の条件下で調べた。図2、3に示す2つの数字の組(N_1, N_2)はドット1とドット2の平均電子数を表す。図2には様々な電荷安定条件における線形コンダクタンスの結果を示す。(1,0)、(0,1)の境界上のような擬スピン近藤効果が発現する領域において、特に大きな変化が見られないことが分かる。このことから、通常の電気伝導測定から擬スピン近藤効果の特徴を掴むことが困難であることが理解できる。これに対し、電荷揺らぎを反映する物理量である電流雑音を様々な電荷安定条件において低バイアス電圧 ($eV_{SD}/\eta\Gamma = 0.1$, Γ は電極・ドット間結合強度) 条件下で調べた結果を図3に示す。擬スピン近藤効果は電荷(配置)の揺らぎと関係するため、擬スピン近藤効果が発現する領域で電流雑音が最大となる[3]。ここまでは、電極を介したドット間のコヒーレント間接結合[4]がない状況を考えてきたが、今度は電極を介したドット間のコヒーレント間接結合がスピン近藤効果に及ぼす影響について調べた。2つのドットに電子が1つずつ詰まっている状況では、電極とドットの間トンネル過程の4次摂動から導かれる運動交換結合が反強磁性的であることを示した。これまでは、コヒーレント間接結合が軌道に与える効果については議論されてきたが、スピンに対するこのような反強磁性的な運動交換相互作用は本研究で初めて明らかにされた[3]。この結果、コヒーレント間接結合が有限の場合には、(1,1)領域におけるスピン近藤効果が抑制される。

本研究は科学技術振興機構ICORP、内閣府FIRST、および科研費の援助を受けて行われた。

[1] S. Sasaki et al., Nature **405** (2000) 764.

[2] T. Kubo et al., Phys. Rev. B **77** (2008) 041305(R).

[3] T. Kubo et al., Phys. Rev. B **83** (2011) 115310.

[4] T. Kubo et al., Phys. Rev. B **74** (2006) 205310.

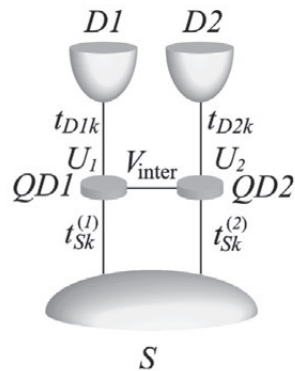


図1 並列結合2重量子ドットの模式図。

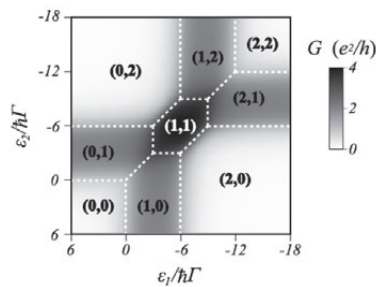


図2 様々な電荷安定条件における線形コンダクタンス。

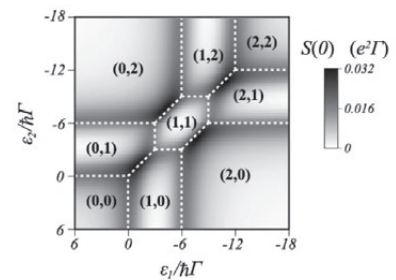


図3 様々な電荷安定条件における電流雑音 ($eV_{SD}/\eta\Gamma = 0.1$)。

単一量子ドットを用いた共振器量子電磁力学

俵毅彦 鎌田英彦 Stephen Hughes*
量子光物性研究部 *クイーンズ大学

固体電子二準位系を用いた共振器量子電磁力学(cQED)は、単一光子レベルでの非線形相互作用の発現や光子-物質間の量子情報の変換など、量子情報処理デバイスへの応用が期待されている。一方で従来用いられてきた真空中にトラップされた原子・イオンとは二準位系を取り囲む環境が異なり、その光学応答の解釈は単純ではない[1]。本研究ではcQEDの代表的な現象である自然放出レートの増強(弱結合状態)や輻射場と二準位系間の可逆的エネルギー交換(強結合状態)における固体二準位系特有の光学応答を見出し、そのメカニズムを明らかにした。

電子二準位系として自己組織化半導体量子ドット(QD)が、スラブ型フォトニック結晶ナノ共振器中に埋め込まれた。ターゲットとなるQDが電磁界強度の最大値から僅かにずれた場所に位置する場合(図1:弱結合状態)のPLスペクトルでは、温度変化に伴いQD励起子(X)・共振モード(C)ともにピーク位置がシフトする。しかし相互作用がない場合(点線)にくらべ弱結合状態ではそれぞれのピークが引き寄せ合う新たな現象(mode attraction)が観測された[2]。またターゲットQDが電磁界強度の最大値にある場合(図2)、そのPL強度マップの離調依存性は強結合状態の特徴であるRabi分裂を伴う非交差分散を示す。このとき励起強度を増加させると、分裂ピークの中央から新たなピークが出現しRabi分裂を消失させるが、非交差分散は維持されている。これら従来のcQEDでは説明できない弱・強結合両状態における現象に対し理論解析を行った結果、QD励起子の大きな位相緩和とスラブ型共振器構造からの光放射特性に由来する固体系cQEDの特有の現象[3]であることが分かった。

本研究の一部は総務省SCOPEの援助を受けて行われた。

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

[2] T. Tawara et al., Opt. Express **18** (2010) 2719.

[3] S. Hughes et al., Opt. Express **17** (2009) 3322.

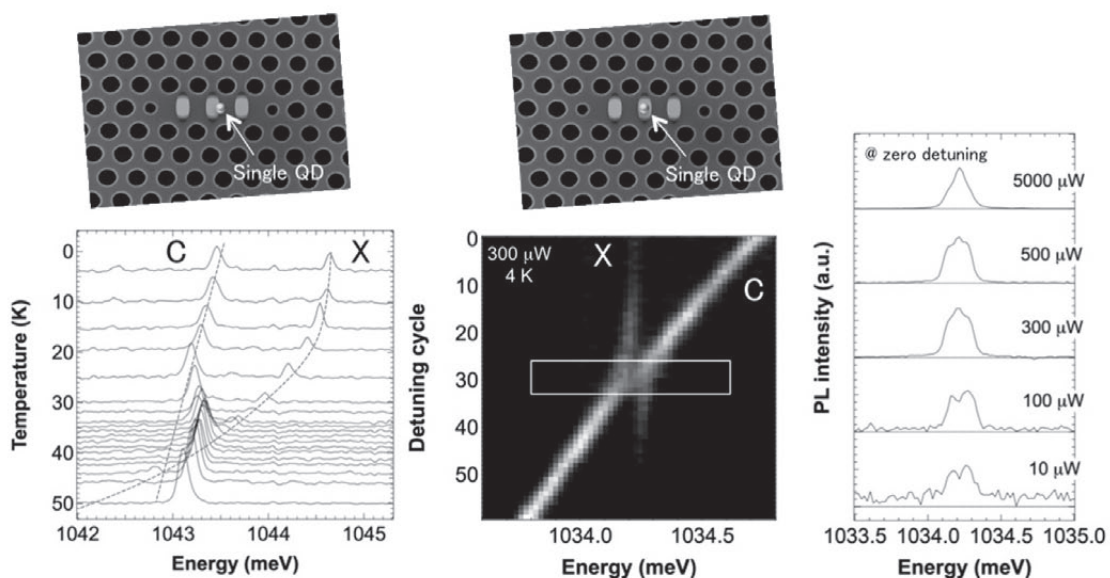


図1 弱結合領域でのPLスペクトルの温度依存性。

図2 強結合領域でのPLカラーマップとゼロ離調スペクトルの励起強度依存性。

VLS 法による GaAs 基板上横方向ナノワイヤ

Guoqiang Zhang 館野功太 後藤秀樹 寒川哲臣
量子光物性研究部

半導体ナノワイヤは電子デバイスやフォトニックデバイスからバイオ、医療まで様々な応用が期待されている[1]。従来のナノワイヤの集積化の方法は主に2つの方法が挙げられ、1つはパターン基板上に選択的に自立して成長したナノワイヤをそのまま用いる方法と、もう1つは基板に成長したナノワイヤを別の基板に分散させて配列させる方法である。後者はプロセス工程でナノワイヤに汚染物が付着しやすい欠点があるため、前者の方法が望ましい。しかし、自立したナノワイヤにデバイス動作させるための電極等を形成することは技術的に非常に困難である。一方、あらかじめ基板上に横に成長されているナノワイヤならば、ナノワイヤを大気にさらすことなく、比較的容易に電極形成までの一貫したプロセスを行える可能性がある。私たちは気相エピタキシー (VPE)を用いた Vapor-Liquid-Solid (VLS)法でGaAs基板上に横方向にナノワイヤ成長する方法を開発し、サイズや位置、組成に関して制御可能であることを示してきた[2, 3]。

はじめにVLS法成長の触媒として金微粒子を用い、(311)B基板上の<110>方向成長GaAsナノワイヤについて調べた。図1はその断面透過電子顕微鏡(TEM)写真である。ナノワイヤ先端に金微粒子があり、これを触媒に成長が進んでいる様子が見られた。このことから金微粒子サイズと密度によってナノワイヤのサイズと密度とを制御できることが分かる。また、電子ビーム(EB)リソグラフィにより金微粒子を配置することにより、ナノワイヤを位置制御することができる。図2はその原子間力顕微鏡(AFM)像である。ナノワイヤは図の矢印で示されたはじめの金微粒子の位置から成長が始まっていることが分かる。バンドギャップ制御およびデバイス実現のためにはヘテロ構造が不可欠である。成長中にInを導入することでInGaAsナノワイヤも横方向成長が可能であることを確認した[3]。このような平面上に形成されるナノワイヤは、将来的に電子、光デバイスへの新たな発展をもたらすことが期待できる。

[1] L. Samuelson, Mater. Today **6** (2003) 22.

[2] G. Zhang, K. Tateno, H. Gotoh, and H. Nakano, Nanotechnology **21** (2010) 095607.

[3] G. Zhang, K. Tateno, H. Gotoh, and T. Sogawa, Appl. Phys. Express **3** (2010) 105002.

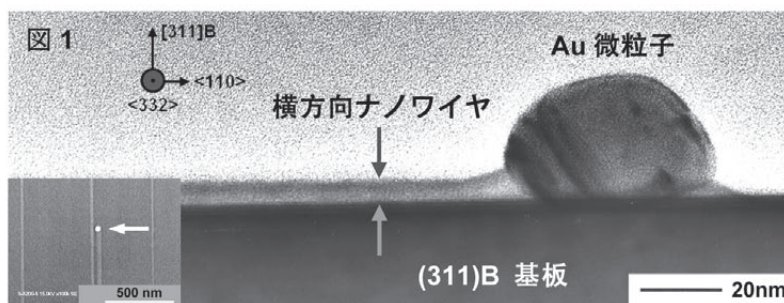


図1 (311)B基板上に横方向成長したGaAsナノワイヤの断面TEM写真(ナノワイヤの先端位置にAu触媒微粒子である)と、基板表面のSEM写真(左下、矢印は金触媒微粒子)。

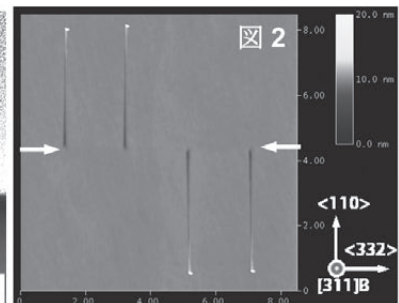


図2 金微粒子を配列させて横方向成長したGaAsナノワイヤのAFM像。成長後金微粒子はナノワイヤの先端の位置まで移動した。

金属型カーボンナノチューブのコヒーレントフォノン

加藤景子 小栗克弥 寒川哲臣
量子光物性研究部

単層カーボンナノチューブ(SWCNT)は、そのキラリティに応じて半導体または金属になる。特に金属型SWCNTは擬一次元構造に由来して、バリスティック輸送特性を示すことが知られているが、その実現にあたってはキャリア・フォノン散乱がボトルネックとなる。金属型SWCNTが有する高い電気伝導特性を活かすためには、フォノンの特性を理解することが重要である。フォノンの振動周期より短い時間幅を有する超短パルスレーザーを用い、位相を揃えて振動するコヒーレントフォノンを励起すれば、格子振動の実時間観測が可能となる。一般的に、SWCNTは半導体と金属の混合物であるため、光照射によって様々なキラリティのSWCNTが同時に励起され、特定のキラリティのSWCNTに関する詳細な情報を得ることや、精密な制御が困難になる。そこで本研究では、遠心分離法によって選別した金属型SWCNT [1]を用い、コヒーレントフォノンの詳細について調べた[2]。

パルス幅 10 fs、中心波長 780 nm の Ti:sapphire レーザを光源とし、ポンプ・プローブ法による過渡反射率測定 (図1) を行った。金属型SWCNTの過渡反射率は、時間0の付近に自由電子の励起に由来する鋭い応答を示し、キャリア・キャリア散乱によって 30 fs 程度で減衰することが分かった。その後、コヒーレントフォノンに由来する周期的な振動 (図1 挿入図) が観測された。フーリエ解析によって (図2)、(i)SWCNTの直径が伸縮振動するラジアルブリージングモード(RBM)、(ii)欠陥に由来するDモード、(iii)炭素伸縮振動に由来するGモードのコヒーレントフォノンが生成されていることが分かった。Gモードは縦光学・横光学フォノンに対応して分裂した構造を有しており、縦光学フォノンモードはキャリアとの相互作用によって非対称なスペクトルを示すことが分かった。分離したSWCNTを用いることで、金属型SWCNT特有の自由電子の超高速光応答、ならびにコヒーレントフォノンとキャリアとの相互作用を観測することができた。

本研究の一部は科研費の援助を受けて行われた。

[1] K. Yanagi et al., Appl. Phys. Express **1** (2008) 034003.

[2] K. Kato et al., Appl. Phys. Lett. **97** (2010) 121910.

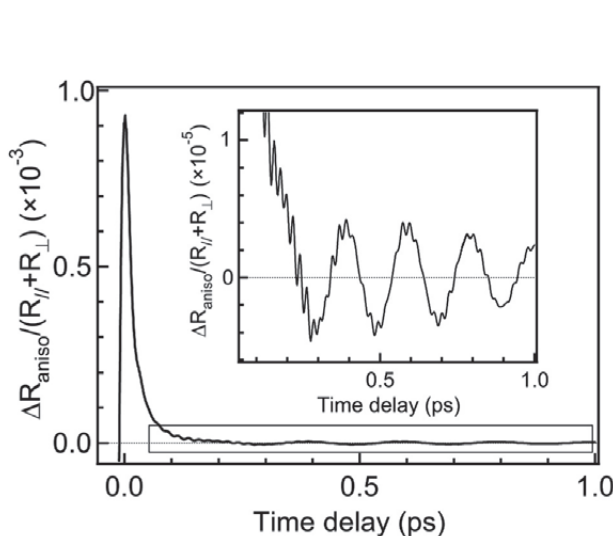


図1 金属型カーボンナノチューブの過渡反射率変化、およびその拡大図 (挿入図)。

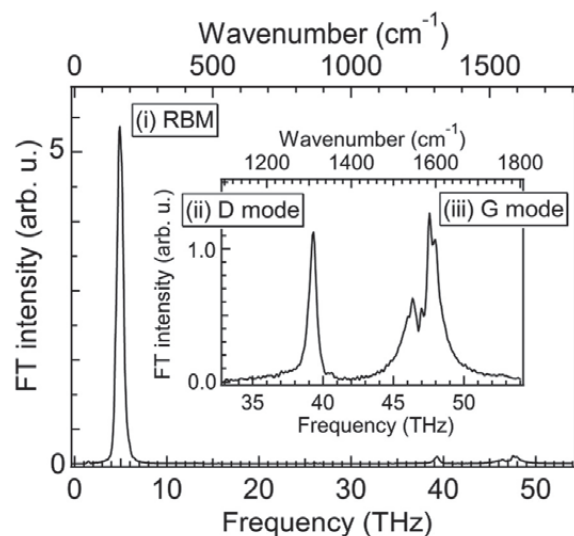


図2 金属型SWCNTの過渡反射率のフーリエスペクトルとその拡大図 (挿入図)。

高性能1次元フォトニック結晶シリコン／SOI ナノ共振器

倉持栄一 田邊孝純 Laurent-Daniel Haret 谷山秀昭 納富雅也
量子光物性研究部

SOI (Silicon on Insulator) 基板の上にパタニングしたサブミクロンシリコン細線光導波路中に適切な直線孔列を設けるとナノ共振器となることが良く知られている。1次元(1D)フォトニック結晶(PhC)ナノ共振器の一種であるそれは最も単純な構造と最小のフットプリントを有するものとして注目されてきた。既に大きく発展し広く普及している2次元(2D)ナノ共振器と比べ、その1Dナノ共振器には Q 値が大きく見劣りするという課題があった。本研究において我々は2Dナノ共振器で採用し大きな成功を収めたモードギャップ閉込手法を適用することで、1Dナノ共振器においても超高 Q 値を実現する解を見出した[1]。

長方形断面孔(R)及び円孔(C)からなる1Dナノ共振器を検討した。共振器下の埋込酸化膜(BOX)を除去するエアブリッジ構造(AB)と残したままのSOI構造の2通りを検討した。モードギャップを導入するため孔サイズを連続的に変調した。3次元有限領域時間差分法(FDTD)による電磁界解析を行い、RとCで 10^8 を超える超高 Q 値を達成し、またCではモード体積 V が $1(\lambda/n)^3$ より小さくなる設計を見出した(図1) [1, 2]。特筆すべきはSOI構造でもおよそ 10^8 もの Q 値が得られたことで、1Dナノ共振器固有の特性といえる。数値解析結果は、実験によりC-SOIにて36万、C-ABにて72万の Q 値を得たことで実証できた(図2) [2] (AB: エアブリッジ構造; 共振器直下のBOXを除去)。

空気が熱の絶縁体の作用をするためAB型1Dナノ共振器は大きな熱抵抗を有し、それを数値シミュレーションで確認している。そのような共振器においては熱光学非線形が著しく増強される。我々は光励起パワーを変える測定においてこれまで報告された中で最小の熱光学双安定しきいパワーとなる $1.6 \mu\text{W}$ をR-AB型ナノ共振器(光学 Q 値22万)にて実験的に観測した(図3) [3]。基本構造が大きく異なることから、高 Q 値1Dナノ共振器には従来のナノ共振器と異なる固有の特性や応用が期待できる。

本研究の一部は科学技術振興機構CRESTの援助を受けた。

[1] M. Notomi et al., Opt. Express **16** 11095 (2008).

[2] E. Kuramochi et al., Opt. Express **18** 15859 (2010).

[3] L. D. Haret et al., Opt. Express **17** 21108 (2009).

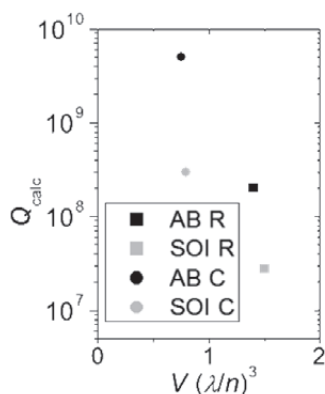


図1 数値解析で得られた Q 値と V 。

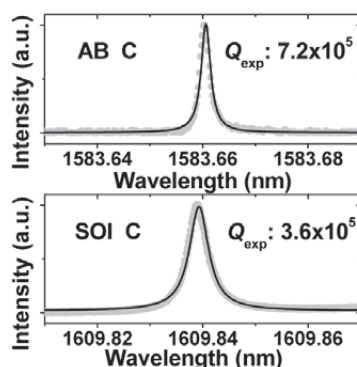


図2 ナノ共振器高 Q モードのスペクトル(実験)。

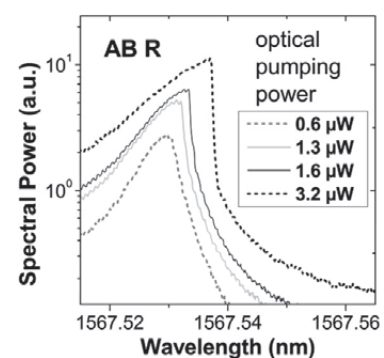


図3 熱光学双安定を示す共振器スペクトル。

GPGPU を利用した FDTD 計算の高速化

谷山秀昭 下川辺隆史* 青木尊之* 納富雅也
量子光物性研究部 *東京工業大学

マクスウェル方程式の数値的な解法である Finite-Difference Time-Domain (FDTD) 法は、光学微細構造における光の解析から素子構造の設計において重要なツールとしての位置を占めている。しかし、この手法による計算プログラムは、大容量のメモリと長時間の計算を必要とするため適用範囲は制限されてきた。今回我々は、スーパーコンピュータに搭載されるなど近年急速に注目を集めている General-Purpose Graphics Processing Unit (GPGPU) をアクセラレータとして用いることにより、FDTD 計算の高速化を行うことを検討した。

FDTD 法では、電磁場の時間積分計算において大量のメモリアクセスが発生する。通常の CPU による計算の場合、そのメモリアクセスの遅さが高速化の妨げとなっている。それに対し、GPU は CPU と比較してメモリに高速にアクセスできる。しかし GPU を利用する場合でも、一部の計算を CPU で行うとなると GPU から CPU に大量のデータを転送しなければならず、計算時間よりも転送時間の方が長くなってしまふことがある。このデータ転送の回数を減らし、可能な限り GPU 内で計算を行うようにコーディングすることで、GPU 本来の高いメモリバンド幅と複数プロセッサによる高い演算性能を引き出した。

図 1(a) に示した 3 点欠陥フォトニック結晶スラブ共振器に対して、3 次元 FDTD 法を用いてその共振モードを計算した [図 1(b)]。その際、CPU のみを使用した場合と GPU を利用した場合で計算時間を比較した結果を図 2 に示す。使用した CPU は Intel Xeon/W3580 3.33 GHz、GPU は NVIDIA Tesla C1060 と GeForce GTX 480 である。なおプログラミング環境として CUDA を用い、計算は全て倍精度で行なった [1]。図に示されたように、CPU だけの計算と比較して、GPU を利用することで最大で 18 倍程度の高速化が達成できた。また Tesla に対して、GTX 480 が 2.5 倍程度早いのは、メモリバンド幅と L1 キャッシュの違いによると推測される。

[1] H. Taniyama et al., PIERS 2011, 1A9-K-14, March (2011).

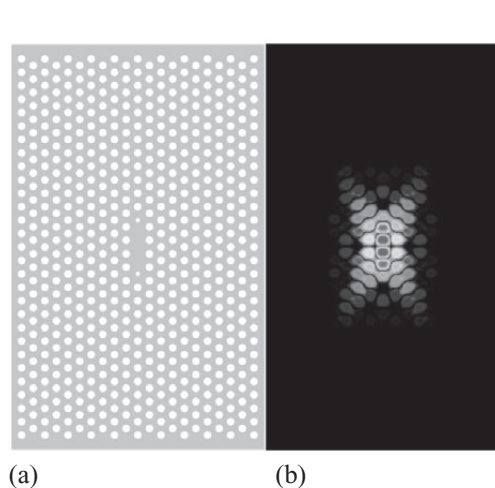


図 1 (a) フォトニック結晶スラブ共振器とその (b) 共振モード。

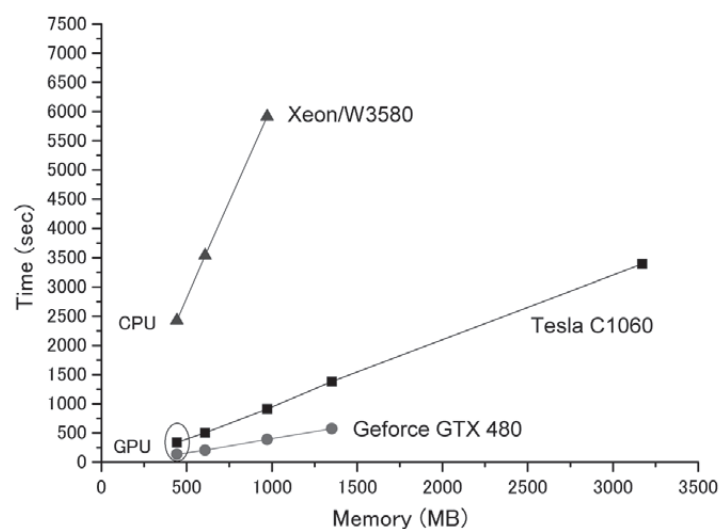


図 2 CPU および GPU の計算時間と必要とするメモリサイズ。

II. 資料

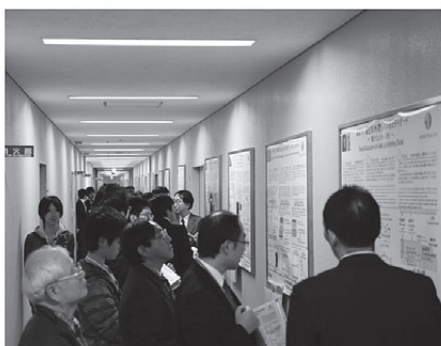
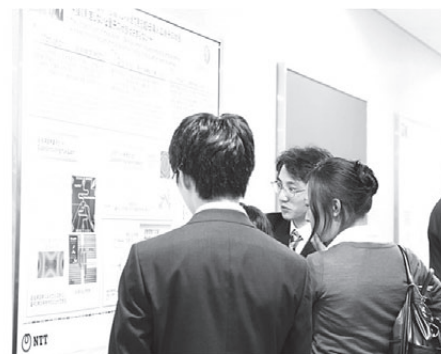
サイエンスプラザ 2010

2010年11月25日(木)にNTT厚木研究開発センタにおいて、“未来への扉を開くフロンティアサイエンス”と題したNTT物性科学基礎研究所の公開イベント「サイエンスプラザ2010」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、NTT物性科学基礎研究所各研究部長およびマイクロシステムインテグレーション研究所・フォトンクス研究所・コミュニケーション科学研究所各研究企画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、機能物質科学研究部の谷保芳孝特別研究員によるシンポジウム講演会「窒化物半導体による遠紫外発光ダイオード～新規半導体の物性制御とデバイス応用に向けて～」を行いました。午後の部では、東京工業大学理事・副学長 伊澤達夫先生に「光ファイバ通信とガラスの科学」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の6件、フォトンクス研究所の8件、コミュニケーション科学研究所の2件を含め、計45件の最新の研究成果について紹介しました。研究の概要から、そのオリジナリティやインパクト、今後の展望を詳しく説明するとともに、研究内容についてかなり突っ込んだ議論も行われ、多くの貴重なご意見を頂きました。毎年大変好評の「ラボツアー」については、学生・一般の方を含めできるだけ多くの方に参加して頂けるよう7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グループなど242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事が出来ました。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っております。



「ナノスケールの輸送と技術」国際シンポジウム (ISNTT2011)

2011年1月11日から14日までの4日間、NTT厚木研究開発センター講堂において「ナノスケールの輸送と技術」国際シンポジウムが開催されました。ナノスケールの半導体や超伝導体における輸送特性は、固体をベースにした量子コンピュータや単電子素子、ナノメカニカル素子、スピントロニクス素子などの様々な革新的デバイス技術に繋がる可能性から、世界的にも多くの研究が進められています。本シンポジウムは、これらの分野の研究をより推進するためにNTT物性科学基礎研究所の山口浩司（量子物性研究部長）と仙場浩一（超伝導量子物理研究グループリーダー）、ならびに赤崎達志（スピントロニクス研究グループリーダー）等が中心になって企画されたもので、同分野をリードするNTT物性科学基礎研究所を中心に国内外の著名な研究者が一堂に会し、最新の研究成果について活発な意見交換を行うことを目的として開催されました。

11日は、横浜至・NTT物性科学基礎研究所長の歓迎・開会の挨拶のあと、Prof. Charles Marcus (Harvard大) が量子ドットにおける電子スピンと核スピンの制御に関するプレナリー講演を行いました。さらに、ナノメカニクス、単電子素子、超伝導量子ビットに関して6件の招待講演と4件の口頭講演があり、夕刻には33件のポスター発表が行われました。

12日は、グラフェン、単一原子素子、コヒーレント輸送と量子ホール効果、メゾスコピック超伝導に関する7件の招待講演と8件の口頭講演があり、夕刻には35件のポスター発表が行われました。

13日は、ナノメカニクス、超伝導量子ビット、半導体量子ドットと量子ビットに関する6件の招待講演と6件の口頭講演があり、最終日の14日にはナノSQUIDとスピントロニクス、エッジチャネル、ナノ構造の光学的特性に関しての4件の招待講演と9件の口頭講演が行われました。

参加者は、193名 [NTT関係者82名を含む] を数え、ナノスケールの輸送と技術に関する質の高い講演、発表、議論を十分に楽しみました。

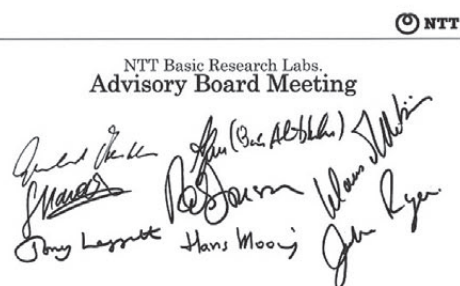
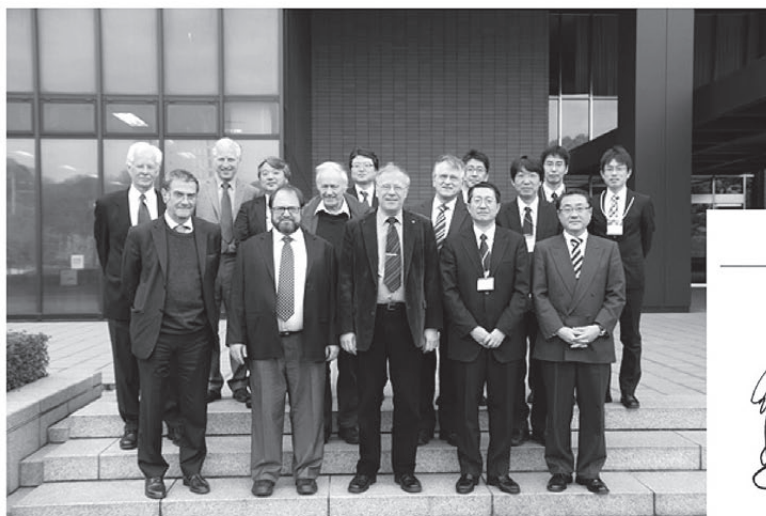


第6回アドバイザリボード (2010年度)

2011年2月14日から16日の3日間、NTT物性科学基礎研究所アドバイザリボードを開催しました。このボードは、外部の研究者によって研究成果ならびに研究計画を客観的に評価していただき、今後の研究マネジメントに反映させるために設置されました。最初の会議は2001年に開催され、その後は約2年ごとに開催され、今回で第6回目となります。

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

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



February 14-16, 2011

Board members	Affiliation	Research field
Prof. Abstreiter	Walter Shottky Inst.	低次元半導体物理
Prof. Altshuler	Columbia Univ.	凝縮系物理
Prof. Hänsch	Max-Planck-Inst.	量子光学
Prof. Haroche	Ecole Normale	量子光学
Prof. Jonson	Göteborg Univ.	物性理論
Prof. Leggett	Univ. Illinois	低温物性理論
Prof. Mooij	Delft Univ. Tech.	超伝導量子物理
Prof. Ryan	Univ. Oxford	ナノバイオ
Prof. von Klitzing	Max-Planck-Inst.	半導体量子電子物性

社外表彰受賞者一覧 (2010 年度)

平成 22 年度科学技術分野 の文部科学大臣表彰 科学技術賞 研究部門	納富 雅也	フォトニック結晶による 新しい光伝搬・光閉じ込 めの研究	2010.4.13
平成 22 年度科学技術分野 の文部科学大臣表彰 若手科学者賞	武居 弘樹	光通信波長帯における高 速・長距離量子暗号通信 の研究	2010.4.13
日本学術振興会ナノプロ ブテクノロジー奨励賞	篠崎 陽一	高速 AFM を用いた受容 体タンパク質の構造変化 観察	2010.8.4
The 19th International Conference on the Application of High Magnetic Fields in Semiconductor Physics and Nanotechnology (HMF-19): Best Poster Award for Young Researchers	高瀬 恵子	Density-imbalance Stability Diagram of the $\nu T=1$ Bilayer Electron System at Full Spin Polarization	2010.8.6
第 27 回日本結晶成長学会 論文賞	嘉数 誠	有機金属気相成長素過程 の研究と高効率窒化アル ミニウム素子への応用	2010.8.8
応用物理学会優秀論文賞	岡本 創 伊藤 大介 小野満 恒二 寒川 哲臣 山口 浩司	Controlling Quality Factor in Micromechanical Resonators by Carrier Excitation	2010.9.14
第 32 回 (2010 年度) 応用物理学会論文賞 (応用物理学会優秀論文賞)	林 雄二郎 (北大) 田中 和典 (浜松ホトニ クス, JST) 赤崎 達志 (NTT 物性基 礎研, JST) 定 昌史 (北大) 熊野 英和 (北大, JST) 末宗 幾夫 (北大, JST)	Superconductor-based Light Emitting Diode: Demonstration of Role of Cooper Pairs in Radiative Recombination Processes	2010.9.14
International Conference on Solid State Devices and Materials Paper Award	H. Okamoto D. Ito K. Onomitsu H. Sanada H. Gotoh T. Sogawa H. Yamaguchi	Carrier-induced Dynamic Backaction in GaAs Micromechanical Resonators	2010.9.22
第 24 回ダイヤモンドシ ンポジウム ポスターセッ ション最優秀賞	平間 一行	単結晶 n 型 AlN/p 型ダイ ヤモンドヘテロ接合ダイ オード	2010.11.18

社内表彰受賞者一覧 (2010 年度)

先端技術総合研究所 所長表彰 研究開発賞	松尾 慎治 野崎 謙悟 新家 昭彦 佐藤 具就 川口 悦弘 谷山 秀昭 田邊 孝純 礒塚 孝明 チェン チンファイ 納富 雅也	フォトニック結晶による超低消費エ ネルギーレーザーおよび光スイッチ の研究	2011.1.19
先端技術総合研究所 所長表彰 功労賞	岡本 稔 江幡 啓介 山田 浩治 板橋 聖一 前田 文彦	3号館クリーンルーム設備改修と SOR 撤去	2011.1.19
物性科学基礎研究所 所長表彰 業績賞	日比野 浩樹 影島 博之 田邊 真一 永瀬 雅夫	エピタキシャルグラフェンの成長と 評価	2011.3.29
物性科学基礎研究所 所長表彰 業績賞	佐々木 智	量子ドットにおける近藤効果の研究	2011.3.29
物性科学基礎研究所 所長表彰 業績賞	本庄 利守 玉木 潔 武居 弘樹	東京 QKD ネットワーク実証実験へ の貢献	2011.3.29
物性科学基礎研究所 所長表彰 功労賞	住友 弘二 前田 文彦	大型固定資産除却による研究スペー ス確保への貢献	2011.3.29
物性科学基礎研究所 所長表彰 論文賞	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	"Sub-femtojoule All-optical Switching using a Photonic-crystal Nanocavity," Nature Photonics 4, 477 (2010).	2011.3.29
物性科学基礎研究所 所長表彰 論文賞	中ノ 勇人 齊藤 志郎 仙場 浩一	"Quantum Time Evolution in a Qubit Readout Process with a Josephson Bifurcation Amplifier," Phys. Rev. Lett. 102 , 257003 (2009).	2011.3.29
物性科学基礎研究所 所長表彰 論文賞	稲葉 謙介 山下 眞	"Time-of-Flight Imaging Method to Observe Signatures of Antiferromagnetically Ordered States of Fermionic Atoms in an Optical Lattice," Phys. Rev. Lett. 105 , 173002 (2010) .	2011.3.29
物性科学基礎研究所 所長表彰 奨励賞	角柳 孝輔	ジョセフソン分岐増幅技術を用いた 低侵襲量子状態測定	2011.3.29

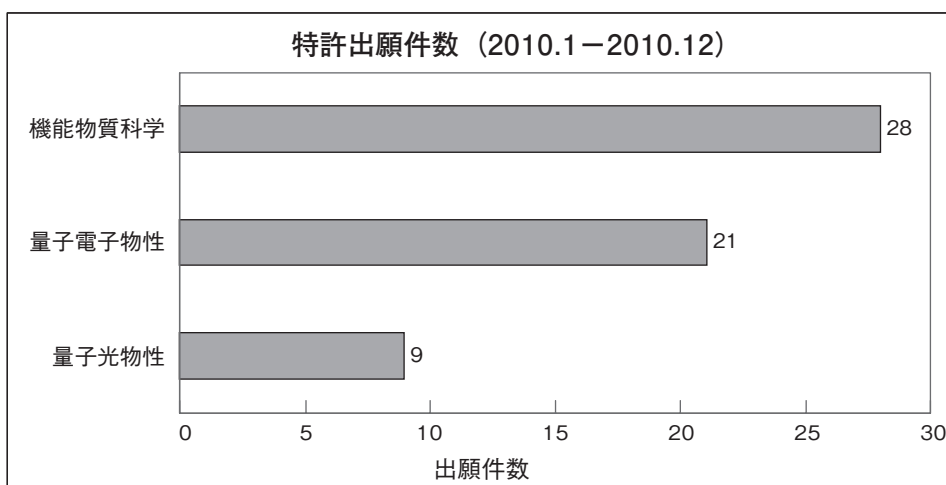
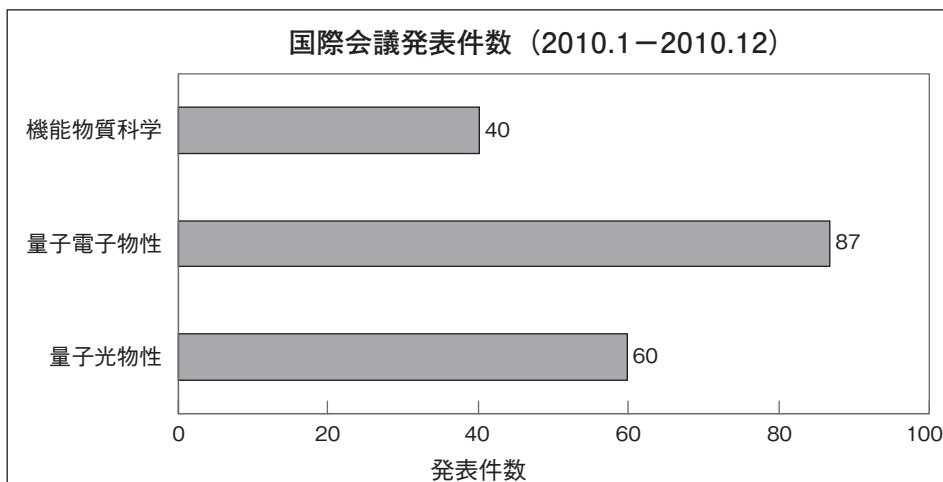
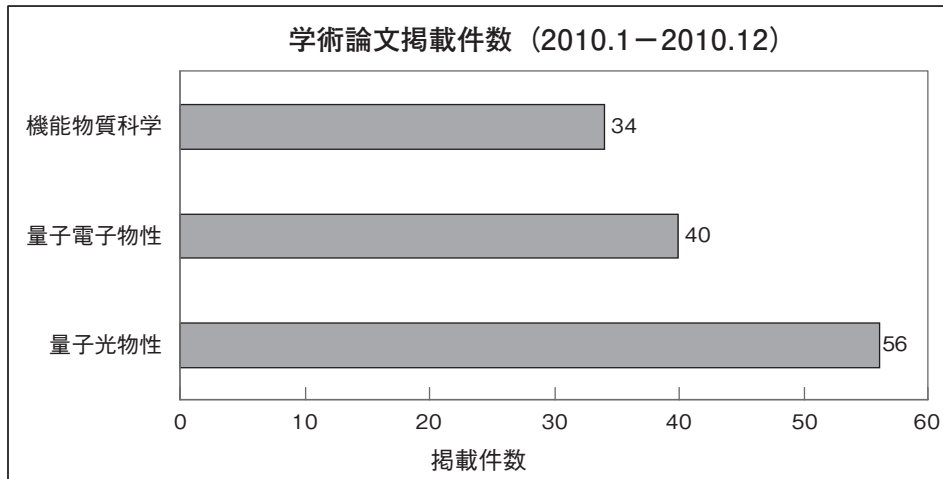
報道一覧 (2010年度)

発表月日	発表媒体	見出し
5月 3日	日経産業新聞	光スイッチ 消費エネ大幅削減 NTT、1/200に 微細化で集積も
5月 12日	日刊工業新聞	半導体に原子積み上げ NTT、ナノ構造で新技法
5月 17日	通信興業新聞	光スイッチの消費エネルギー 世界最小化に成功 NTT など
6月 2日	日刊工業新聞	光スイッチ 微小エネルギーで動作 NTT フォトニック結晶で
7月 8日	日経産業新聞	情報暗号化する新素子 北大など 超電導・LED 応用
7月 17日	日本経済新聞	富士通や NTT 新型炭素材技術
7月 18日	日本経済新聞	薄くて透明 炭素材料に新顔 壁に張るパソコンなど期待
8月 3日	日刊工業新聞	最小電力レーザー開発 フォトニック結晶使用 NTT CMOS 集積化可能に
8月 3日	日経産業新聞	半導体レーザー 消費エネルギー 1/10 NTT 光回線の基盤技術に
9月 3日	日経産業新聞	携帯電話向け量子暗号 三菱電、鍵共有型ソフト
9月 3日	日本経済新聞	盗聴不可能な「量子暗号」技術 三菱電機、携帯に応用
10月 14日	日本経済新聞	光 LSI 向け新素材 特定周波数だけ反射 東大・NTT
10月 15日	日刊工業新聞	量子暗号ネットワーク 動画配信実験に成功 NEC など 世界標準獲得目指す
10月 15日	日経産業新聞	TV 会議 「量子暗号通信」で伝送 情通機構 NEC・東芝など参加
10月 15日	毎日新聞	テレビ会議盗聴 暗号で不可能に 情報通信研究機構

発表月日	発表媒体	見出し
10月15日	電波新聞	情報通信研究機構 盗聴、解読不可の量子暗号ネット 最長90 ^{キロ} の試験運用 NEC、三菱などと協力
10月15日	日本経済新聞	盗聴不能な量子暗号通信 TV会議で伝送試験 情報通信機構やNECなど
10月15日	電気新聞	NICTなど 量子暗号ネットワーク 都内で試験運用へ
10月15日	毎日新聞(大阪)	TV会議盗聴防ぐシステム 情報通信機構
10月15日	化学工業日報	NICTなど試験運用開始 世界初量子暗号テレビ会議 伝送距離・速度・大幅向上 14年実用化目指す
10月18日	電経新聞	絶対に破られない暗号 量子暗号ネットワークで多地点テレビ会議 NICT NTTやNECらと世界初の試験運用
10月20日	電波タイムズ	NICTなど量子暗号ネットワーク試験運用を開始 絶対に盗聴できない“究極の暗号”アピール
10月22日	科学新聞	量子暗号通信の実用化へ 試験運用を日本で開始 －世界初の動画通信を公開－
10月25日	日本情報産業新聞	量子暗号で実証実験 テレビ会議システム開発 NICT/NEC/三菱電機/NTT
10月25日	映像新聞	量子暗号ネットワークを構築 NICT, NTTなどが試験運転 伝送距離90km、100kbps達成
12月16日	日経産業新聞	NTT、シリコン発光 波長幅広く 1素子で大容量通信可能
2月16日	日刊工業新聞	ナノマシンコンピューター実現へ 板バネの振動で演算 NTT
2月25日	科学新聞	ナノマシンコンピュータ実現へ期待 微細な板バネの振動利用 1個で複数論理演算を同時に NTT
3月21日	日刊工業新聞	スピン軌道相互作用 大きさ 精密に決定 北大とNTT 次世代素子の開発加速

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（2010年）

2010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130件、国際会議の発表件数は187件です。また出願特許数は58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	(IF2009*)	件数
Applied Physics Letters	3.554	15
Applied Physics Express	2.223	13
Japanese Journal of Applied Physics	1.138	13
Physical Review B	3.475	10
Physical Review Letters	7.328	9
Physical Review A	2.866	5
Optics Express	3.278	3
Nature Photonics	22.869	2
Optics Letters	3.059	2
Reviews of Modern Physics	33.145	1
Reports on Progress in Physics	11.444	1
Carbon	4.504	1
Journal of Physical Chemistry C	4.224	1
Langmuir	3.898	1
Nanotechnology	3.137	1
IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics	3.064	1
Biochimica et Biophysica Acta, General Subjects	2.958	1
Nature Communications	-	1

*IF2009：インパクトファクター 2009 (出展、Journal Citation Reports, 2009)

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3.13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
2010 International Conference on Solid State Devices and Materials	13
The 37th International Symposium on Compound Semiconductors	12
30th International Conference on the Physics of Semiconductors	11
Quantum Nanostructures and Spin-related Phenomena	9
23rd International Microprocesses and Nanotechnology Conference	8
Updating Quantum Cryptography and Communications 2010	8
The 6th International Conference on the Physics and Applications of Spin Related Phenomena in Semiconductors	6
16th International Conference on Molecular Beam Epitaxy	5
CLEO/QELS	5
International Symposium on Physics of Quantum Technology	5
Materials Research Society Meeting	4
Gordon Research Conference	4
The 19th International Conference on High Magnetic Fields in Semiconductor Physics and Nanotechnology	4
10th International Conference on Quantum Communication	3
Adv. Func. 3D control. Quantum Structures	3
European Materials Research Society	3
Photonic and Electromagnetic Crystal Structures 2010	3
The 6th International Workshop on Nano-scale Spectroscopy and Nanotechnology	3
International Symposium on Graphene Devices 2010	3

国際会議招待講演一覧 (2010年)

I. 機能物質科学関連

- (1) K. Torimitsu, "Nanobiodevice architecture using receptor protein", International Conference on Nanoscience and Nanotechnology (ICONN 2010), Sydney, Australia (Feb. 2010). (Plenary)
- (2) K. Torimitsu, Y. Shinozaki, N. Kasai, A. Shimada, K. Sumitomo, C. Ramanujan, and J. F. Ryan, "Understanding the structure and functions of receptor proteins", International Conference on Nanoscience and Nanotechnology (ICONN 2010), Sydney, Australia (Feb. 2010).
- (3) H. Hibino, H. Kageshima, and M. Nagase, "In-situ surface electron microscopy observations of growth and etching of epitaxial few-layer graphene on SiC", International Workshop on in situ characterization of near surface processes 2010, Eisenerz, Austria (May 2010).
- (4) K. Torimitsu, Y. Shinozaki, N. Kasai, A. Shimada, and K. Sumitomo, "Receptor protein based nanobio-interface", Asia-Pacific Symposium on Nanobionics, Wollongong, Australia (June 2010).
- (5) K. Torimitsu, Y. Shinozaki, N. Kasai, A. Shimada, K. Sumitomo, and Y. Furukawa, "Analysis of receptor conformation and its functional relations for biomimetic device", International Conferences on Modern Materials & Technologies 2010, Montecatini Terme, Italy (June 2010).
- (6) K. Hirama, Y. Taniyasu, and M. Kasu, "N-type conduction of single-crystal Si-doped AlN (0001) layer grown on diamond (111) substrate", The 37th International Symposium on Compound Semiconductors, Takamatsu, Japan (June 2010).
- (7) K. Torimitsu, Y. Shinozaki, Y. Furukawa, N. Kasai, and K. Sumitomo, "Conformational nanostructure analysis of receptor protein and its application for biomimetic device formation", Gordon Research Conferences, Tilton, U.S.A. (July 2010).
- (8) T. Akasaka, Y. Kobayashi, and M. Kasu, "Step-free GaN hexagons grown by selective-area MOVPE", The 3rd International Symposium on Growth of III-Nitrides, Montpellier, France (July 2010).
- (9) M. Kasu, "Surface kinetics and growth modes in metalorganic chemical vapor deposition (MOCVD) and their applications to aluminum nitride (AlN)", 16th International Conference on Crystal Growth (ICCG-16)/14th International Conference on Vapor Phase Epitaxy (ICVGE-14), Beijing, China (Aug. 2010).
- (10) H. Hibino, "Dynamics of Si surface morphology/Epitaxial graphene growth on SiC surfaces", The 14th International Summer School on Crystal Growth (ISSCG-14), Dalian, China (Aug. 2010).
- (11) Y. Shinozaki, "Dynamic structural changes in single receptor protein observed with fast-scanning atomic force microscopy", 9th International Conference on Non-Contact Atomic Force Microscopy, Ishikawa, Japan (Aug. 2010).
- (12) H. Hibino, "Surface electron microscopy of epitaxial graphene", 2nd International Symposium on the Science and Technology of Epitaxial Graphene, Amelia Island, U.S.A. (Sep. 2010).
- (13) H. Hibino, H. Kageshima, S. Tanabe, and M. Nagase, "Growth, structure, and transport properties of epitaxial graphene on SiC", International Symposium on Graphene Devices 2010, Sendai, Japan (Oct. 2010).
- (14) K. Torimitsu, "Functional analysis of receptor protein for biomimetic device formation - structure and function -", 4th International Symposium on Nanomedicine (ISNM2010), Okazaki, Japan (Nov. 2010).

II. 量子電子物性関連

- (1) H. Yamaguchi, I. Mahboob, H. Okamoto, and K. Onomitsu, "Micro/nanoelectromechanical systems for advanced semiconductor devices", 2010 International RCIQE/CREST Joint Workshop, Sapporo, Japan (Mar. 2010).
- (2) Y. Ono, A. H. Khalafalla, K. Nishiguchi, and A. Fujiwara, "Single dopant effects in silicon nano transistors", Single Dopant Control (SDC2010), Leiden, Netherlands (Mar. 2010).
- (3) Y. Ono, M. A. H. Khalafalla, K. Nishiguchi, and A. Fujiwara, "Single dopant effects in silicon nano transistors", The 2010 International Symposium on Atom-scale Silicon Hybrid Nanotechnologies for 'More-than-Moore' & 'Beyond CMOS' Era, Southampton, U.K. (Mar. 2010).
- (4) A. Fujiwara, K. Nishiguchi, and Y. Ono, "Single-electron transfer technology using Si nanowire MOSFETs", The 2010 International Symposium on Atom-scale Silicon Hybrid Nanotechnologies for 'More-than-Moore' & 'Beyond CMOS' Era, Southampton, U.K. (Mar. 2010).
- (5) K. Semba, "Manipulation of entanglement in the heterogeneous quantum system", 5th International Workshop on "Advances in Foundations of Quantum Mechanics and Quantum Information with Atoms and Photons" ad memoriam of Carlo Novero & the 3rd Italian Quantum Information Science Conference (V Quantum 2010 & 3rd IQIS2010), Torino, Italy (May 2010).
- (6) H. Yamaguchi, I. Mahboob, H. Okamoto, and K. Onomitsu, "Challenge for electromechanical logic systems using compound semiconductor heterostructure", 2010 Asia-Pacific Workshop on Fundamentals and Applications of Advanced Semiconductor Devices (AWAD2010), Tokyo, Japan (June 2010). (Plenary)
- (7) Y. Okazaki, S. Sasaki, and K. Muraki, "Spin/pseudospin Kondo effect in a capacitively coupled parallel double quantum dot", 30th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS2010), Seoul, Korea (July 2010).
- (8) H. Yamaguchi, H. Okamoto, Y. Maruta, S. Ishihara, and Y. Hirayama, "Mechanical to electrical energy transduction using a micromechanical 2DES cantilever", 16th International Conference on Molecular Beam Epitaxy (MBE2010), Berlin, Germany (Aug. 2010).
- (9) K. Kanisawa, "Structure of a single hydrogenic defect in a semiconductor quantum well", Gordon Research Conference: Defects in Semiconductors (GRC), New London, U.S.A. (Aug. 2010).
- (10) H. Kageshima, H. Hibino, M. Nagase, Y. Sekine, and H. Yamaguchi, "Theoretical study on functions of graphene", The 2nd International Symposium on Graphene Devices: Technology, Physics, and Modeling (ISGD 2010), Sendai, Japan (Oct. 2010).
- (11) H. Kageshima, "Mechanism of nanochannel formation processes: thermal oxidation of Si nanostructures and graphene formation on SiC", International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology (ICSICT2010), Shanghai, China (Nov. 2010).
- (12) H. Kageshima, H. Hibino, M. Nagase, Y. Sekine, and H. Yamaguchi, "Theoretical study on growth, structure, and physical properties of graphene on SiC", Japan-Korea Symposium on Surface and Nanostructure 9th (JKSSN9), Sendai, Japan (Nov. 2010).
- (13) T. Yamaguchi, H. Yamaguchi, and T. Iyoda, "Graphoepitaxy of diblock copolymers for lithographic application", 23rd International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC2010), Fukuoka, Japan (Nov. 2010).

- (14) H. Yamaguchi, "Quantum effects of motion", Japanese-American Frontiers of Science (JAFoS2010), Chiba, Japan (Dec. 2010).
- (15) K. Nishiguchi and A. Fujiwara, "Single-electron applications using nano-wire MOSFETs", 2010 Workshop on Innovative Devices and Systems (WINDS2010), Hawaii, U.S.A. (Dec. 2010).

III. 量子光物性関連

- (1) H. Nakano, K. Oguri, and A. Ishizawa, "Dependence of the broadband spectrum of high-order harmonics driven by a few-cycle laser pulse on carrier-envelope phase", 4th Asian Workshop on Generation and Applications of Coherent XUV and X-ray Radiation, Pohang, Korea (Jan. 2010).
- (2) M. Notomi, "Low-power nanophotonic components based on photonic crystals", SPIE Photonics West, San Francisco, U.S.A. (Jan. 2010).
- (3) M. Notomi, "Nonlinear and adiabatic control of light by photonic crystals", 2nd International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics (META'10), Cairo, Egypt (Feb. 2010) (Plenary).
- (4) K. Oguri, T. Okano, T. Nishikawa, and H. Nakano, "Dynamics of femtosecond laser ablation plume studied with ultrafast x-ray absorption fine structure imaging", The International High-Power Laser Ablation Conference, Santa Fe, U.S.A. (Apr. 2010).
- (5) M. Notomi, E. Kuramochi, T. Tanabe, and H. Taniyama, "Manipulating light with photonic crystal nanocavities and their coupled arrays", SPIE Photonics Europe, Brussels, Belgium (Apr. 2010).
- (6) T. Nishikawa, A. Ishizawa, A. Mizudori, H. Takara, H. Nakano, A. Takeda, and M. Koga, "Approach to achieving a wider mode spacing carrier-envelope phase-locked frequency comb at telecommunications wavelength region", The 2th Shanghai Tokyo Advanced Research Symposium on Ultra Intense Laser Science (STAR2), Xiamen, China (May 2010).
- (7) A. Shinya, S. Matsuo, T. Kakizuka, T. Segawa, G. Sato, E. Kawaguchi, and M. Notomi, "Low-power and high-speed operation of ultra-small photonic crystal nanocavity laser based on InGaAsP/InP buried heterostructure", Conference on Lasers and Electro-Optics, San Jose, U.S.A. (May 2010).
- (8) K. Nozaki, T. Tanabe, A. Shinya, S. Matsuo, G. Sato, T. Kakizuka, E. Kuramochi, M. Notomi, and H. Taniyama, "Extremely-low-power nanophotonic devices based on photonic crystals", Photonics in Switching 2010, Monterey, U.S.A. (July 2010).
- (9) M. Notomi, "Photonic crystal for green ICT?", Photonics and Electromagnetic Crystal Structures (PECS IX), Granada, Spain (Sep. 2010).
- (10) T. Honjo, H. Takesue, and Y. Tokura, "Quantum key distribution/communication research in NTT", Updating Quantum Cryptography and Communication (UQCC) 2010, Tokyo, Japan (Oct. 2010).
- (11) W. Munro, "Scalable quantum repeaters and quantum networks", Updating Quantum Cryptography and Communication (UQCC) 2010, Tokyo, Japan (Oct. 2010).
- (12) H. Nakano, K. Oguri, A. Ishizawa, and T. Nishikawa, "Ultrafast time-resolved spectroscopy using x-ray pulses driven by femtosecond laser pulses", 6th Asian Symposium on Intense Laser Science (ASILS 6), Beijing, China (Oct. 2010).

- (13) K. Tateno, G. Zhang, H. Gotoh, and T. Sogawa, "Characterization of quantum dots in III-V semiconductor nanowires", 6th International Workshop on Nano-Scale Spectroscopy & Nanotechnology (NSS6), Kobe, Japan (Oct. 2010).
- (14) H. Takesue, "Single-photon frequency downconversion experiment", Photonics Global, Singapore, Singapore (Dec. 2010).
- (15) H. Nakano, K. Oguri, A. Ishizawa, and T. Nishikawa, "High-order harmonics of carrier-envelope phase controlled few-cycle laser pulse for probing dynamics of photo-excited solid surface", International Symposium on Ultrafast Intense Laser Science, Hawaii, U.S.A. (Dec. 2010).

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/