

NTT 物性科学基礎研究所の研究活動

平成 18(2006)年度

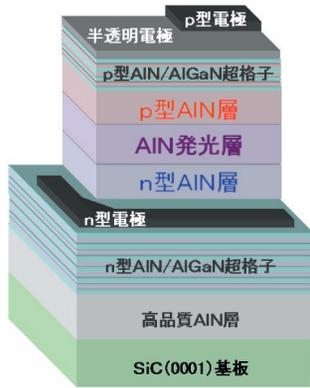
Volume 17

2007 年 9 月

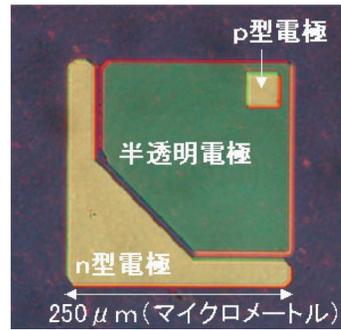
日本電信電話株式会社
物性科学基礎研究所

NTT Basic Research Laboratories

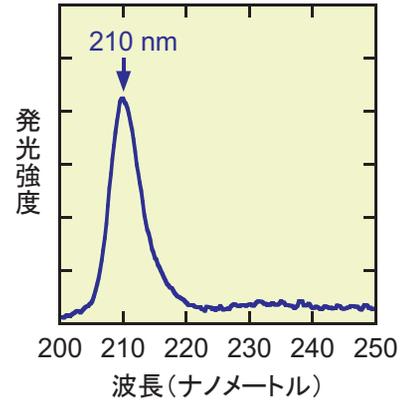
<http://www.brl.ntt.co.jp/>



LED素子構造



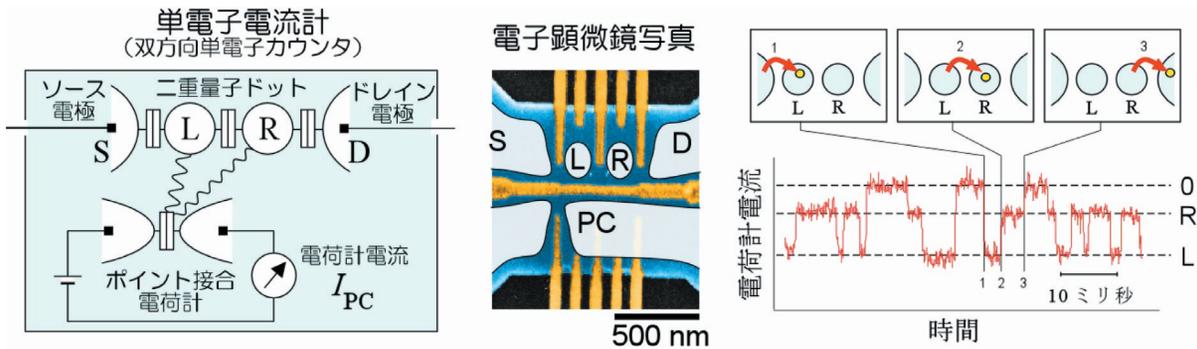
上面から見た写真



LEDからの最短波長発光

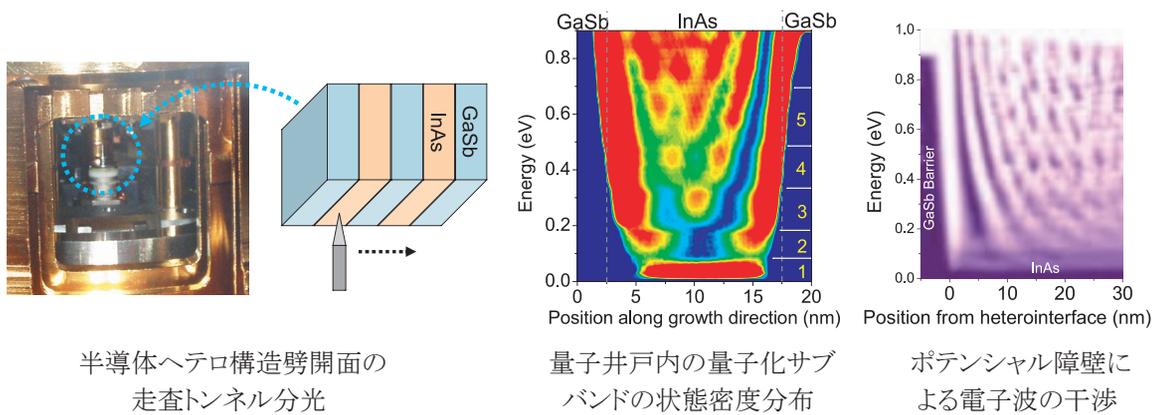
最短波長210nm窒化アルミニウム (AlN) 発光ダイオード

窒化アルミニウム (AlN) は、直接遷移型半導体中で最大のバンドギャップ6eVを有することから、波長210nmで発光する最短波長発光半導体として期待される。今回、我々は、世界に先駆け、AlNのp型およびn型ドーピングを実現し、AlN発光ダイオード(LED)の動作に成功した(18ページ)。



電流電子のカウンティング (単電子電流計)

電流電子の流れを1個ずつ計数することのできるカウンティング素子を作成し、単電子電流計として機能することを示した。化合物半導体の微細加工により、二重量子ドット(図中のLとR)とポイント接合電荷計を集積化し、二重量子ドットを流れる電子の位置を検出することに成功した。電荷計の電流は右図のような3値の間を飛び移る様子を示し、電子の動き(トンネル事象)を正確に検出することができる。このようなトンネル事象の個数を数えることにより究極的な電流計を実現した(34ページ)。



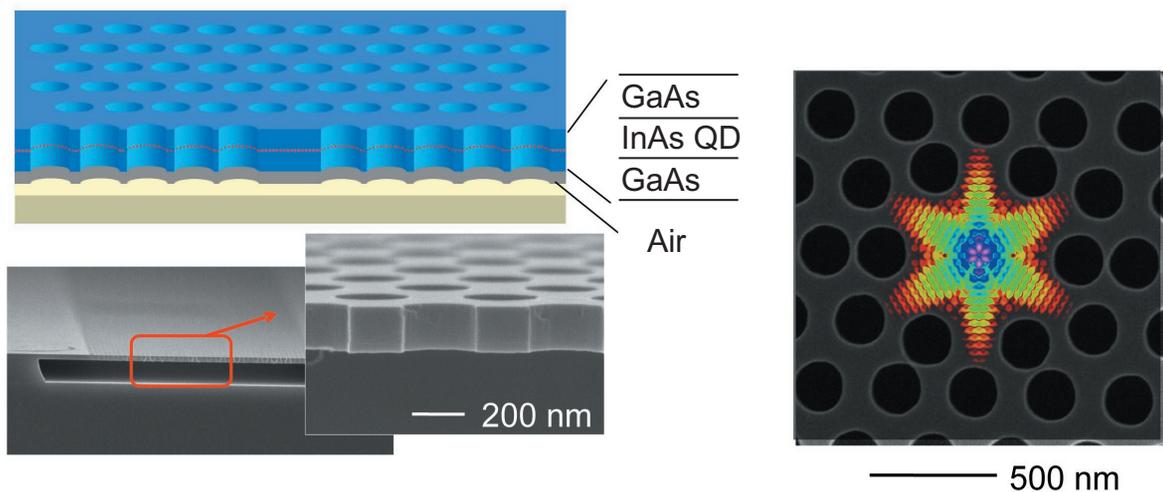
半導体ヘテロ構造劈開面の
走査トンネル分光

量子井戸内の量子化サブ
バンドの状態密度分布

ポテンシャル障壁に
よる電子波の干渉

半導体ヘテロ構造の実空間状態密度分布解析

半導体ヘテロ構造劈開面の走査トンネル分光により、ヘテロ構造内部の状態密度分布(波動関数の二乗に対応)の実空間観測に成功した。量子井戸内の量子化したサブバンド、単一ポテンシャル障壁による電子波の干渉、二重量子井戸における波動関数の結合等が明瞭に観測、可視化された。本手法を用いることで、一般的な電子、光デバイスについても、内部の波動関数解析が可能となる(35ページ)。



量子ドットの埋め込まれた
二次元フォトニック結晶スラブ構造

ナノ共振器構造(SEM像)と
その内部光電界強度(FDTD計算)

量子ドットフォトニック結晶ナノ共振器レーザ

量子ドットを有するフォトニック結晶ナノ共振器の極低閾値レーザ発振に成功した。これまで化合物半導体はSi系材料に比べ加工精度が低く、材料特有の吸収特性が共振器の光閉じ込めを劣化させていた。今回化合物半導体の加工精度を飛躍的に向上させ、材料の吸収特性を考慮した素子構造設計を行った。これにより量子ドットの自然放出のほとんどがレーザモードへ結合するようなレーザ発振動作の高効率化が実現した(45ページ)。

サイエンスから革新的技術まで



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誠にありがとうございます。

物性科学基礎研究所では、

- (1) ネットワーク・情報処理技術における処理能力・セキュリティーの壁を越える新原理・新コンセプトの創出
- (2) 中長期的なイノベーションにつながる基礎技術の開拓

を進め、中長期的NTT事業への貢献のみならず、普遍的知見の獲得など学術的貢献もミッションとして研究活動を進めております。その目的を達成する上で、研究成果をタイムリーかつ継続的に提供することが重要と考え、各研究テーマを

- (i) スピードを重視し、内外との連携により戦略的に展開を図るべきテーマ(重点研究)
- (ii) 重点テーマへの発展を期待した探索的な研究(探索研究)
- (iii) 従来技術から脱却し、破壊的イノベーションへと発展させるべきテーマ(革新的研究)

に分類、それぞれの状況に適したマネジメントを行うよう努めております。

重点研究のテーマでは、量子情報処理とナノバイオ研究を中心に進めております。前者は、量子力学の根幹である電子、あるいは光子の本質を解明し、量子暗号通信あるいは量子コンピューティングといった具体的な応用を設定、情報処理能力・セキュリティーの壁を凌駕しようというものです。物性科学基礎研究所では、これまで量子光学、半導体電子物性、半導体微細加工技術などの研究を進めており、半導体量子ドット、超伝導素子、冷却原子などの研究において多くの成果を上げております。それらの成果、知見をベースとして、さらに内外研究機関との連携により、量子暗号通信および量子コンピュータの可能性を検討しております。また、ナノバイオ研究では、神経科学・バイオ分子科学とナノテクノロジーの融合による新分野の創出を目指しており、分子・蛋白と人工ナノ構造との融合は、新しいデバイスの登場を期待させます。

また探索研究としては、ナノメートルスケールの微細構造において、その機械的運動と量子力学的電子状態を関連付け、機械的運動に現れる量子力学的側面について研究を進めております。また、カーボンナノチューブを所望の場所で切断するなど、ナノ構造を自在に操る技術、さらには電子のスピン状態の解明とその制御を目指したスピントロニクスなどの研究を推進しています。これらの探索研究については、将来の重点テーマへの弾込めとして、基礎研究を担う組織として最も重要視すべき項目と考えております。

さらに近い将来、既存の技術を駆逐するような革新的研究も進めております。例えば

ワイドギャップ半導体、単電子素子、フォトニック結晶デバイス、カーボン薄膜などの研究を推進し、既存技術にとって変わる技術の確立を目指しております。

これらの研究を行うにあたって、NTT の他研究所に加え、日本、米国、欧州、アジアの大学や研究機関と広く共同研究を行っており、多くの優れた成果を上げています。また、物性科学基礎研究所では、当厚木R&Dセンター内において国際シンポジウムを毎年開催しております。2007 年 2 月には、International Conference on Nanoelectronics, Nanostructures and Carrier Interactions を開催し、内外から 140 名以上の方々に参加して頂きました。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めております。

本冊子は 2006 年度の成果と研究活動についてご紹介しております。この小冊子をご覧頂き、研究交流促進の一助となれば幸いです。

2007 年 9 月

湯本 潤司

湯本 潤司

NTT 物性科学基礎研究所長

〒243-0198 神奈川県厚木市森の里若宮 3-1

電話：046 240 3300

FAX：046 270 2358

目次

ページ

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

I. 研究紹介

◆ 各研究部の研究概要	17
◆ 機能物質科学研究部の研究紹介.....	18
◆ 最短波長 210nm 窒化アルミニウム (AlN) 発光ダイオード	
◆ 最大発振周波数 120GHz のダイヤモンドFET	
◆ 高耐圧、低オン抵抗の n 型 GaN 基板上 InGaN/GaN 縦型ダイオード	
◆ 六方晶 BN ヘテロエピタキシャル層からの紫外発光	
◆ 金・銀・銅ナノ微粒子触媒からの単層ナノチューブ成長	
◆ 単層カーボンナノチューブ成長における金属微粒子触媒の化学状態解析	
◆ 表面原子ステップに配置した触媒ナノ粒子を用いたナノワイヤの位置制御	
◆ 自発展開する脂質二分子膜を分子の輸送担体に用いたマイクロ流路素子	
◆ ベシクルナノ配列の自己形成	
◆ 神経回路とのインターフェイス実現に向けた導電性高分子電極の開発	
◆ 金ナノロッドの自己集合によるイオンセンシング	
◆ ナノ空間における生体分子のテラヘルツ分光	
◆ 量子電子物性研究部の研究紹介.....	30
◆ データ保持時間の長いゲインセル・メモリ	
◆ シリコンナノトランジスタにおける単一ボロンの検出	
◆ 高いQを有するナノ機械共振器における電子位相の変調	
◆ 16nm 技術世代に向けたブロック共重合体リソグラフィ	
◆ 電流電子のカウンティング	
◆ 半導体ヘテロ構造の実空間状態密度分布解析	
◆ シリコン薄膜の量子伝導	
◆ 超伝導磁束量子ビットのデコヒーレンス	
◆ スピン軌道相互作用によるアハロノフ・キャッシャー効果	
◆ 磁性細線中に捕捉された磁壁の半導体・強磁性体ハイブリット構造を用いた検出	
◆ 磁束量子ビット・ナノメカニカル共振器の磁場による可変結合の提案	
◆ 量子光物性研究部の研究紹介	41
◆ 10 GHz クロックの量子暗号実験	
◆ もつれ光子対列を用いた差動位相量子鍵配送	
◆ 二体エンタングルメントから見た多体スピン系の量子相転移	
◆ (Al,Ga)As ナノワイヤ中に形成された GaAs 量子ドットの光学特性	
◆ 量子ドットフォトニック結晶ナノ共振器レーザー	

- ◆ フェムト秒レーザーアブレーションルームの時空間分解軟 X 線吸収分光
- ◆ フォトニック結晶微小光共振器の時間分解測定
- ◆ フォトニック結晶超高 Q 結合共振器導波路
- ◆ 超小型高 Q 共振器による光マイクロマシン

II. 資料

◆ 第 4 回アドバイザーボード	51
◆ 「ナノエレクトロニクス・ナノ構造・およびキャリア関連」国際シンポジウム	52
◆ 表彰受賞者一覧	53
◆ 報道一覧	56
◆ 報道(抜粋)	59
◆ 来訪者による講演一覧	62
◆ 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.....	66
◆ 国際会議招待講演一覧.....	68

表紙の写真:

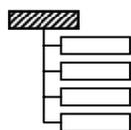
超高 Q 値フォトニック結晶微小光共振器の長時間光子捕捉

光は本質的に小さなところに閉じ込めたり、止めることが難しい。フォトニック結晶微小共振器を使って微小な空間に 1 ナノ秒という長い時間光子を捕捉した。中央の写真は超高 Q 値フォトニック結晶微小光共振器の電子顕微鏡写真で、左下が共振器中に捕捉された光の電界分布である。

物性科学基礎研究所 所員一覧

2007年3月31日現在
(*は年度途中までの在籍者)

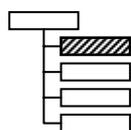
物性科学基礎研究所



所長

湯本 潤司

企画担当



企画担当主席研究員

横浜 至

総括担当主任研究員

後藤秀樹

研推担当主任研究員

村木康二

欧州研究協力担当
主幹研究員

原田裕一

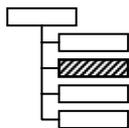
NTT R&D フェロー

山本喜久(スタンフォード大学、U.S.A)
高柳英明(東京理科大学)

NTTリサーチ・プロフェッサー

上田正仁(東京工業大学)
清水富士夫(JST-CREST、電気通信大学)
野村晋太郎(筑波大学)
井上 恭(大阪大学)

機能物質科学研究部



部長	鳥光慶一		
補佐	尾身博雄 味戸克裕 富田 勲	上野祐子 Rakchanok, Rungsawang*	

薄膜材料研究G

グループリーダー

牧本俊樹		
嘉数 誠	小林康之	佐藤寿志
赤坂哲也	熊倉一英	狩元慎一
谷保芳孝	植田研二	西川 敦
Tallaire, Alexandre		

低次元構造研究G

グループリーダー

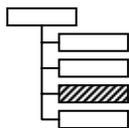
小林慶裕		
前田文彦	日比野浩樹	川村朋晃*
鈴木 哲	登倉明雄	Sychukov, Ilya

分子生体機能研究G

グループリーダー

鳥光慶一		
江幡啓介	古川一暁	住友弘二
河西奈保子	島田明佳	中島 寛
檜村吉晃	後藤東一郎	Nyberg, Tobias*
小林未明*	篠崎陽一	Rundqvist, Jonas

量子電子物性研究部



部長 **山口浩司**
平山祥郎*

補佐 小野行徳
唐沢 毅

ナノデバイス研究G

グループリーダー

藤原 聡
植松真司* 影島博之 西口克彦
Khalafalla, Mohammed

ナノ加工研究G

グループリーダー

山口浩司
永瀬雅夫 山崎謙治 山口 徹
林 順三 岡本 創 Mahboob, Imran
小野満恒二

量子固体物性研究G

グループリーダー

藤澤利正
蟹沢 聖 佐々木 智 鈴木恭一
林 稔晶 太田 剛 熊田倫雄
高品 圭 Renard, Vincent* Giudici, Paula

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 向井哲哉 田中弘隆
齊藤志郎 角柳孝輔 Wang, Ying-Dan
Kasper, Alexander*

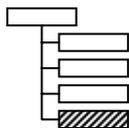
スピントロニクス研究G
グループリーダー

赤崎達志
原田裕一
山口真澄

田村浩之
小林俊之

関根佳明
羽柴秀臣

量子光物性研究部



部長 都倉康弘

補佐 横尾 篤

量子光制御研究G

グループリーダー

都倉康弘

清水 薫

山下 眞

森越文明

橋本大祐

井桁和浩

柴田浩行

本庄利守

Tobiska, Jens

熊谷雅美

武居弘樹

玉木 潔

量子光デバイス研究G

グループリーダー

中野秀俊

寒川哲臣

舘野功太

石澤 淳

Zhang, Guoqiang

西川 正

俵 毅彦

眞田治樹

鎌田英彦

小栗克弥

Cade, Nicholas*

フォトニックナノ構造研究G

グループリーダー

納富雅也

川西悟基

新家昭彦

Ju, Heongkyu*

倉持栄一

加藤正夫*

谷山秀昭

田辺孝純

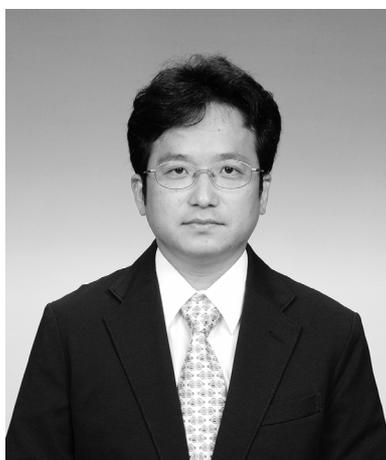
特別研究員



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式会社に入社。以来、分子線エピタキシによって形成した化合物半導体の表面物性を電子線回折、走査型トンネル顕微鏡などの手法により実験的に解明する研究に従事。最近では、半導体低次元構造の弾性的、機械的性質の研究に取り組んでいる。平成5年工学博士。平成7～8年ロンドン大学インペリアルカレッジ客員研究員。平成13～15年度NEDO国際共同研究チーム(Nano-elasticity)研究代表者。平成元年および平成16年日本応用物理学会論文賞受賞。応用物理学会、日本物理学会会員。平成18年より東北大学理学部客員教授。

特別研究員



藤澤 利正

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

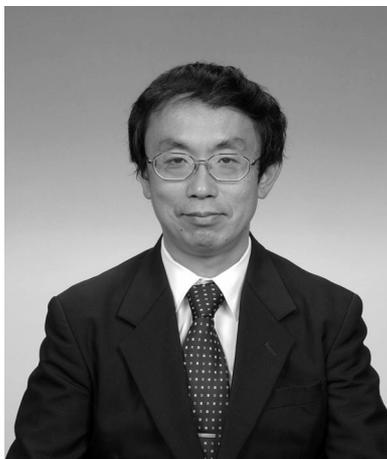
特別研究員



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光素子研究部勤務。平成 7 年から 8 年リンシェピング大学(スウェーデン)客員研究員。平成 11 年より NTT 物性科学基礎研究所。現在同所量子光物性研究部フォトニックナノ構造研究グループリーダー。入社以来一貫して人工ナノ構造による物質の光学物性制御およびデバイス応用の研究を行う。半導体量子細線、半導体量子箱の研究を経て、現在フォトニック結晶の研究に従事。平成 14 年より東京工業大学連携客員講座助教授。工学博士(東京大学)。2006/2007 IEEE/LEOS Distinguished Lecturer Award 受賞。JJAP 編集委員。日本応用物理学会、APS、IEEE/LEOS 会員。

特別研究員



嘉数 誠

昭和 60 年京都大学工学部電気工学科卒業。平成 2 年同京都大学大学院工学研究科博士 課程修了(電気工学専攻、工学博士)。同年日本電信電話株式会社(NTT)に入社。以来、走査型トンネル顕微鏡(STM)を用いたナノ構造作製技術、窒化アルミニウム(AIN)、ダイヤモンド電子デバイスの研究に従事。現在、NTT 物性科学基礎研究所機能物質研究部薄膜材料研究グループリーダー。平成 14~15 年ウルム大学(ドイツ)客員研究員。平成 13 年電子材料シンポジウム(EMS)アワード受賞。東京大学、東京理科大学、立命館大学非常勤講師、窒化物半導体国際会議(ICNS-5)、ニューダイヤモンドナノカーボン国際会議(NDNC)実行委員、日本学術振興会 132 委員会企業幹事などを歴任。現在、応用物理学会、電子情報通信学会、日本表面科学会会員。日本表面科学会編集委員。パリ第 13 大学招聘教授。平成 18 年より総務省 SCOPE「ダイヤモンド高周波電力デバイスの開発とマイクロ波・ミリ波帯電力増幅器への応用」プロジェクトリーダー。

アドバイザーボード（2006 年度）

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

招聘教授／客員研究員（2006 年度）

氏名	所属 期間
東田 昭雄	東京農工大学 June 05 – March 07
遊佐 剛	科学技術振興機構(JST) さきがけ October 05 – September 08
宮本 泰敬 (交流研究員)	日本放送協会放送技術研究所 December 05 – November 06
Prof. Yong-Hang Zhang	Arizona State University, U.S.A. January 06 – July 06
Dr. Goo-Hwan Jeong	科学技術振興機構(JST) CREST April 06 – July 06
古川 裕介	東京大学大学院 理学系研究科 May 06 – October 06
佐藤 健	東北大学 理学部 June 06 – July 06
割澤 伸一 助教授	東京大学大学院 工学系研究科 June 06 – March 07
小野満 恒二	早稲田大学 理工学術院 July 06 – September 06
Dr. Michael Stopa	Harvard University, U.S.A. August 06 – September 06
Dr. Kasper Grove-Rasmussen	University of Copenhagen, Denmark August 06 – December 06
Dr. Yuan-Liang Zhong	東京理科大学 理学部 September 06 – February 07
Dr. Yueh-Chin Lin	National Chiao Tung University, Taiwan R.O.C. November 06 – February 07

古賀 貴亮 助教授	北海道大学大学院 情報科学研究科 November 06 – December 07
山寄 明	明治大学 November 06 – March 08
Dr. Alexandre Kemp	科学技術振興機構(JST) CREST December 06 – December 07
Prof. Michel Devoret	Yale University, U.S.A. January 07 – February 07
Prof. Amnon Aharony	Ben Gurion University of the Negev, Israel January 07 – April 07
Prof. Ora Entin-Wohlman	Ben Gurion University of the Negev, Israel January 07 – April 07
Dr. Hongwu Liu	科学技術振興機構(JST) SORST February 07 – January 08

海外研修生（2006 年度）

氏名	所属 期間
Simon Perraud	University of Paris 6 / CNRS, France October 04 – September 07
Rebeca Alonso	"Miguel Hernández" University of Elche, Spain January 06 – August 06
Raphael de Gail	ENS (Ecole Normale Supérieure), France February 06 – April 06
Jean-François Morizur	ENS (Ecole Normale Supérieure), France February 06 – July 06
François Parmentier	ENS (Ecole Normale Supérieure), France February 06 – July 06
Benjamin Gaillard	INSA (Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse), France February 06 – September 06
Wan-Cheng Zhang	Chinese Academy of Sciences, China February 06 – August 06
Shih-Chieh Huang	National Chiao Tung University, Taiwan R.O.C. March 06 – September 06
Lars Tiemann	Max-Planck-Institut für Festkörperforschung, Germany March 06 – June 06
Christoph Hufnagel	University of Heidelberg, Germany June 06 – June 07
Tiffany Yeh	Rice University, U.S.A. June 06 – August 06

Arthur Goetschy	ESPCI (Ecole Supérieur de Physique et de Chimie Industrielles), France July 06 – December 06
Camille Janer	ESPCI (Ecole Supérieur de Physique et de Chimie Industrielles), France July 06 – December 06
Samir Etaki	Delft University of Technology, The Netherlands September 06 – December 06
Michailas Romanovas	Vilnius Gediminas Technical University, Lithuania January 07 – August 07
Joana Durao	Porto's University, Portugal January 07 – August 07
Ari Siitonen	University of Kuopio, Finland January 07 – August 07
Daan Sprunken	University of Twente, The Netherlands January 07 – August 07
Sylvain Sergent	INSA (Institut National des Sciences Appliquées de Rennes), France January 07 – August 07
Florian Domengie	INSA (Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse), France February 07 – September 07
Guillaume Vincent	INSA (Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse), France February 07 – September 07

国内実習生（2006年度）

氏名	所属(期間)
五十嵐 悠一	東京大学大学院 (H18.4～H19.3)
伊藤 大介	東北大学大学院 (H18.6～H19.3)
伊庭野 建造	慶応義塾大学 (H18.4～H19.2)
宇都宮 聖子	東京大学大学院 (H18.4～H19.3)
浦山 太一	慶応義塾大学大学院 (H18.11～H19.3)
江口 明大	九州大学大学院 (H18.9～H18.11)
枝元 真人	東京大学 (H18.6～H19.3)
遠藤 晋旦	東京理科大学大学院 (H18.4～H18.9)
大岩 顕	東京大学大学院 講師 (H18.4～H19.3)
大野 賢一	東京大学 (H18.7～H18.8)
大野 暁	慶応義塾大学大学院 (H18.4～H19.3)
小田 穰	東京大学大学院 (H18.4～H19.3)
小野 絢哉	筑波大学大学院 (H18.4～H19.3)
影井 誠一郎	東京理科大学 (H18.5～H19.3)
梶浦 亮	東京工業大学大学院 (H18.4～H19.3)
加藤 慶一	東京大学大学院 (H18.6～H19.3)
金子 嵩之	明治大学大学院 (H18.4～H19.3)
鎌田 雄仁	東北大学 (H18.5～H19.3)
姜 承求	筑波大学大学院 (H18.4～H19.3)

北村 陽介	東京大学大学院 (H18.4～H19.3)
楠戸 健一郎	東京大学大学院 (H18.8～H19.3)
Christo Buizert	東京大学大学院 研究生 (H18.4～H19.3)
郡司 まり香	慶応義塾大学大学院 (H18.4～H18.8)
小泉 良太	東京理科大学 (H18.11～H19.3)
項 大雨	東京大学 (H18.6～H19.3)
小寺 哲夫	東京大学大学院 (H18.4～H19.3)
小林 嵩	東北大学大学院 (H18.6～H19.3)
佐々木 洋輔	東京工業大学大学院 (H18.4～H19.3)
Jonathan Baugh	東京大学大学院 客員研究員 (H18.10～H19.3)
新海 剛	東京工業大学大学院 (H18.4～H19.3)
相馬 章宏	東京大学大学院 (H18.4～H19.3)
曾我部 敦士	湘南工科大学大学院 (H18.4～H19.3)
高橋 秀暢	豊橋技術科学大学 (H19.1～H19.2)
高道 洋行	東北大学 (H18.5～H19.3)
竹本 直弘	豊橋技術科学大学 (H19.1～H19.2)
田澤 雅也	東京理科大学大学院 (H18.4～H19.3)
田中 良祐	東京大学 (H18.6～H19.3)
田丸 耕二郎	東京大学 (H18.6～H19.3)
近森 峻	東京工業大学 (H18.4～H19.3)
鶴田 尚英	東京理科大学大学院 (H18.4～H19.3)
十時 詠吾	東京大学大学院 (H18.4～H19.3)

中野 弘雅	東京理科大学大学院 (H18.4～H19.3)
中村 知弘	湘南工科大学大学院 (H18.4～H19.3)
新井田 佳孝	東北大学 (H18.5～H19.3)
野口 由比多	大阪大学大学院 (H18.8～H18.9)
野中 啓一郎	東京大学大学院 (H18.6～H19.3)
橋本 惇一	横浜国立大学大学院 (H18.4～H19.3)
橋本 卓郎	芝浦工業大学大学院 (H18.10～H19.3)
早川 純一郎	東北大学 (H18.5～H19.3)
日達 研一	東京大学大学院 (H18.4～H19.3)
増山 博孝	東京理科大学 (H18.10～H19.3)
山口 貴雄	東海大学 (H18.4～H19.3)
宮本 瑞琴	湘南工科大学 (H18.4～H19.3)
森田 邦夫	東京理科大学 (H18.5～H18.9)
森竹 典子	長岡技術科学大学 (H18.10～H19.2)
藪内 真	慶応義塾大学大学院 (H18.4～H19.3)
山本 倫久	東京大学大学院 助手 (H18.4～H19.3)
渡邊 敬仁	東京工業大学大学院 (H18.8～H18.9)

I . 研究紹介

各研究部の研究概要

機能物質科学研究部

鳥光慶一

機能物質科学研究部では、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、情報通信技術において大きな変革をもたらす物質科学分野における学術的貢献を目指して研究を進めています。

この目標に向かって、薄膜材料、ナノチューブ、ナノバイオを中心とする、薄膜材料研究グループ、低次元構造研究グループ、分子生体機能研究グループの 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、超伝導を含む高性能薄膜材料からナノチューブを中心とするナノ構造体、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連携して行っています。これにより、情報流通社会における技術革新をもたらす機能物質の研究が可能となっています。

ナノバイオ分野は、物性基礎研ならびに本研究部における重点研究分野であり、英国拠点であるオックスフォード大学との共同研究を中心として、中国や他の研究組織と研究員の派遣交流をはじめとする密接な研究交流を進めています。

量子電子物性研究部

山口浩司

量子電子物性研究部(物性部)は 21 世紀の情報通信技術に大きな変革をもたらす半導体や超伝導体を用いた固体デバイスの研究を推進しています。特に将来の量子情報処理に向けた量子力学的な原理に基づくデバイス研究の着実な推進と関連する研究の促進に力を入れています。私たちは開かれた研究所を標榜し、多くの研究機関と協力して基礎研究に取り組んでいます。

物性部の5つのグループで進めている研究は、半導体や超伝導体のコヒーレント制御、半導体ヘテロ(ナノ)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、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、原子トラップ/光学、化合物半導体を用いた新しいナノメカニクスなどです。これらの研究は最先端のナノリソグラフィ、精密なナノ構造作製プロセス、高品質結晶成長、第一原理計算をはじめとした理論研究により支えられています。

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3つのグループでは、光の量子状態制御および光などによる物質の量子状態制御、極短パルス光による高速現象の解明や量子ドットなどナノ構造における半導体光物性、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、量子暗号の高性能化と量子もつれ光子対の生成、一万を超えるQ値の化合物フォトニックナノ共振器構造、および超高Q値フォトニック結晶共振器での光子寿命およびパルス遅延測定などで進展がみられました。

最短波長 210nm 窒化アルミニウム (AlN) 発光ダイオード

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、直接遷移型半導体中で最大のバンドギャップ 6eV を有することから、波長 210nm で発光する最短波長発光半導体として期待される。今回、我々は、世界に先駆け、AlN の p 型および n 型ドーピングを実現し、AlN 発光ダイオード (LED) の動作に成功した[1]。

AlN は、有機金属気相成長法により SiC (0001) 基板上にエピタキシャル成長した。我々は、高純度の AlN を成長するために気相中における Al と N 原料の副次的反応を抑制し、高純度化した AlN に Mg をドーピングすることで p 型伝導性[1]を、Si をドーピングすることで n 型伝導性[2]を得ることに成功した。図 1 に作製した AlN 発光ダイオードの構造を示す。p 型 AlN 層と n 型 AlN 層の間にアンドープ AlN 発光層を挿入しているのは、p 型 AlN 層へドーピングした Mg や n 型 AlN 層へドーピングした Si が関与する深い準位の発光を抑制するためである。p 型および n 型 AlN/AlGaIn 超格子は、p 型および n 型 AlN 層と電極との接触抵抗を低減するためのものである。

AlN 発光ダイオードに順方向電圧を印加したところ、図 2 に示すように、波長 210nm の遠紫外発光を観測した。これは、これまで報告されている半導体発光素子の中で最短波長の電流注入発光である。我々が CL と反射測定により同定した AlN のエキシトン遷移エネルギーとの比較から、図 2 で観測された遠紫外発光は AlN のバンド端遷移に由来することを確認している。

短波長の光ほど高エネルギーであることから、AlN 発光ダイオードは、現在、深刻に社会問題化しているポリ塩化ビフェニール (PCB) やダイオキシンなどの高安定な有害物質を分解する環境保全装置の光源への応用が期待される。今後は、AlN 発光ダイオードの実用化に向けて、AlN 結晶のさらなる高品質化とドーピングの高効率化を進め、AlN 発光ダイオードの発光効率の向上に努めていく。

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

[2] Y. Taniyasu, M. Kasu, and T. Makimoto, Appl. Phys. Lett. **89** (2006) 182112.

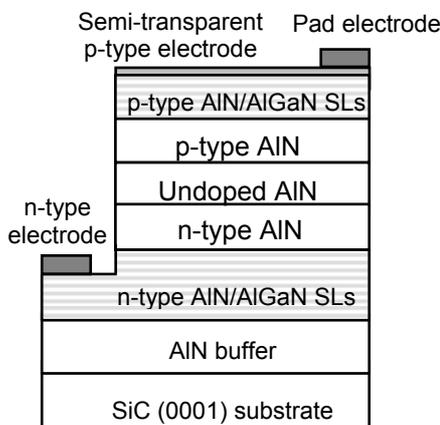


図1 AlN 発光ダイオードの構造

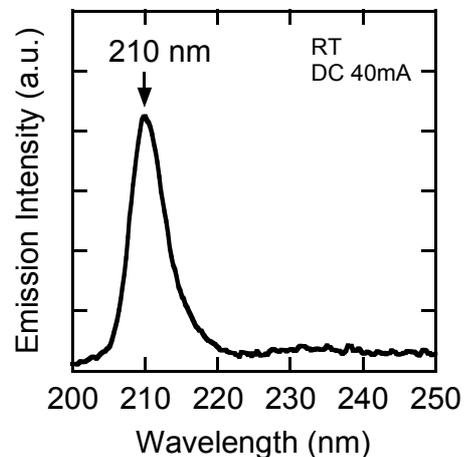


図2 AlN 発光ダイオードの発光スペクトラム

最大発振周波数 120GHz のダイヤモンドFET

植田研二 嘉数 誠
機能物質科学研究部

ダイヤモンドは高移動度(電子:4500、正孔:3800 cm^2/Vs)、高絶縁破壊電界強度($>10\text{MV}/\text{cm}$)、物質中最大の熱伝導度($22\text{W}/\text{cmK}$)等の優れた物性を持つことから高周波大出力デバイスとして期待されている。我々は現在までに、高品質ホモエピタキシャルダイヤモンド単結晶薄膜を用いてFETを作製し、動作周波数1GHzで出力電力密度 $2.1\text{W}/\text{mm}$ を得ている[1]。この値は携帯電話等の基地局に用いられる大電力出力素子として十分な値である。しかし、ホモエピタキシャルダイヤモンドのサイズは市販の高温高压合成基板のサイズで制約されるため、4mm角以下であり、半導体プロセスで要求される4インチに比べて極めて小さい。そこで、我々は、4インチまで大面積化可能な多結晶ダイヤモンドでもグレインサイズがデバイスサイズと同程度なら十分に応用できると考え、グレインサイズが十分に大きな高品質多結晶ダイヤモンド上にFETを作製し、高周波測定を行った。

使用した多結晶ダイヤモンドはCVD法により成長した自立膜である(寸法: $10\times 10\times 0.5\text{mm}$)。多結晶ダイヤモンド表面を水素終端化し、表面近傍に擬二次元正孔チャンネルを形成した後、Auを蒸着し、ソースおよびドレイン電極を形成した。電子ビーム露光と自己整合技術によりAlゲート電極($L_G=0.1\mu\text{m}$)を水素終端表面に形成し、FETを作製した(図1)。

多結晶ダイヤモンドFETの最大DCドレイン電流値(I_{DS})はゲート電圧(V_{GS})が -3.5V の時に $550\text{mA}/\text{mm}$ となった。この値は、ホモエピタキシャルダイヤモンド単結晶FETの最高値に匹敵する。また、相互コンダクタンス(g_m)は広い V_{GS} の範囲で $\sim 140\text{mS}/\text{mm}$ の値が得られた。図2に高周波特性を示す。電流利得($|h_{21}|^2$)、電力利得(U)の周波数特性の測定結果から $-6\text{dB}/\text{oct}$ の傾きで外挿して求めた遷移周波数(f_T)および最大発振周波数(f_{max})は120GHzとなり、別のバイアス条件で、 $f_T=45\text{GHz}$ が得られた。これらの値はダイヤモンドFETで最高値である[2]。

[1] M. Kasu, K. Ueda, H. Ye, Y. Yamauchi, et al., Electron. Lett. **41** (2005) 1249.

[2] K. Ueda, M. Kasu, Y. Yamauchi, et al., IEEE Electron Device Lett. **27** (2006) 570.

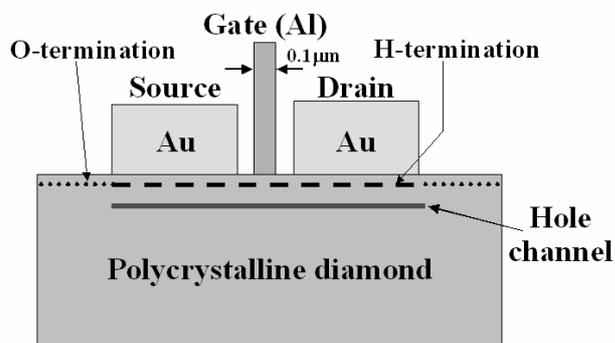


図1 多結晶ダイヤモンドFETの断面構造

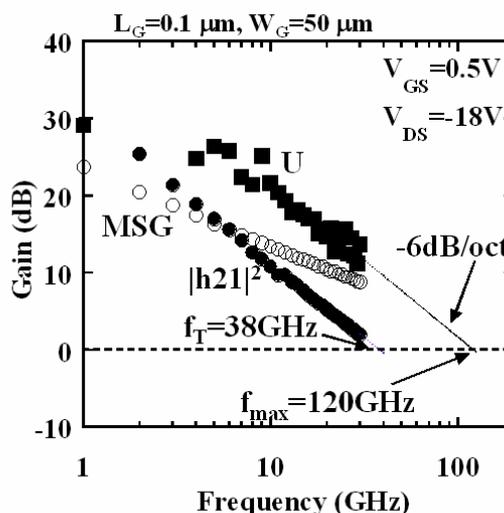


図2 FETの高周波特性

高耐圧、低オン抵抗の n 型 GaN 基板上 InGaN/GaN 縦型ダイオード

西川 敦 熊倉一英 牧本俊樹
機能物質科学研究部

窒化物半導体は大きなバンドギャップ、高い絶縁破壊電界を有することから、高温・高耐圧で動作する電子デバイスの材料として有望である。特に導電性基板を用いた縦型デバイス構造を作製することにより、さらなる低損失・大電流動作が可能となり、従来の半導体では実現できない低損失で動作するパワーデバイスの実現が期待される。

これまで、窒化物半導体を用いた縦型 pn ダイオードでは p 型 GaN 層が高抵抗であったり、ヘテロ基板上に窒化物半導体層を積層するためのバッファ層を挿入する必要があり、低抵抗デバイスの作製が困難であった。これに対して、我々は InGaN 層を p 型層として用いることで p 型層の低抵抗化を実現した。また、近年、結晶性の改善が著しい GaN 基板を用いることで、バッファ層が不要な p-InGaN/n-GaN 縦型ダイオードを作製し、高耐圧、低オン抵抗を実現することに成功した[1]。

試料は有機金属気相成長法により n 型 GaN 基板上に p-InGaN(膜厚 140 nm)/n-GaN(膜厚 1.8 μm 、3.6 μm)ダイオード構造を作製した。比較のために n 型 SiC 基板上にも同様のダイオード構造を作製した。図1に作製した pn ダイオードの逆方向電流-電圧特性を示す。GaN 基板上に GaN 層を作製することにより結晶性の改善が見られ、リーク電流が SiC 基板上に作製したダイオードと比較して 1/10 に低減できた。耐圧は主に n-GaN 層の膜厚によって決定されるが、SiC 基板上デバイスでは GaN 層を厚膜化すると結晶表面に亀裂(クラック)が生じ、デバイス性能が劣化する問題があった。一方、GaN 基板上デバイスでは良好な結晶性を維持したまま 3.6 μm の GaN が成長可能となり、571 V という高い降伏電圧(V_B)を得ることができた。高抵抗の要因となっていたバッファ層が GaN 基板上デバイスでは不要であることから、図 2 に示すようにオン抵抗(R_{on})は 1.23 $\text{m}\Omega\text{cm}^2$ と低減できた。このように高耐圧、低オン抵抗を実現したことにより、デバイスの高出力性能を表す指数(V_B^2/R_{on})は 265 MW/cm^2 と窒化物半導体縦型デバイスとして最高値を実現した。

[1] A. Nishikawa, K. Kumakura, and T. Makimoto, Appl. Phys. Lett. **89** (2006) 153509.

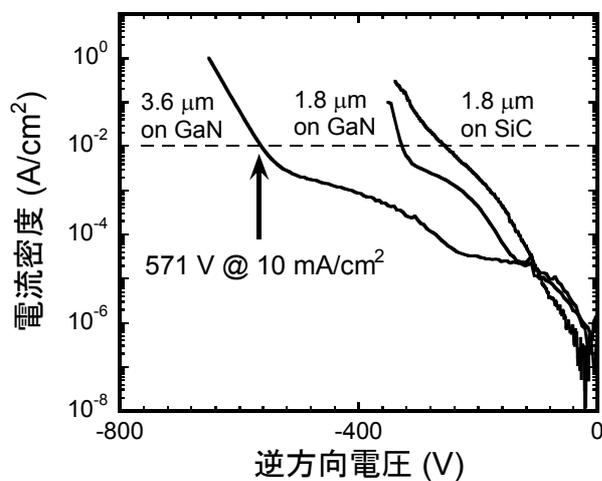


図1 逆方向電流-電圧特性

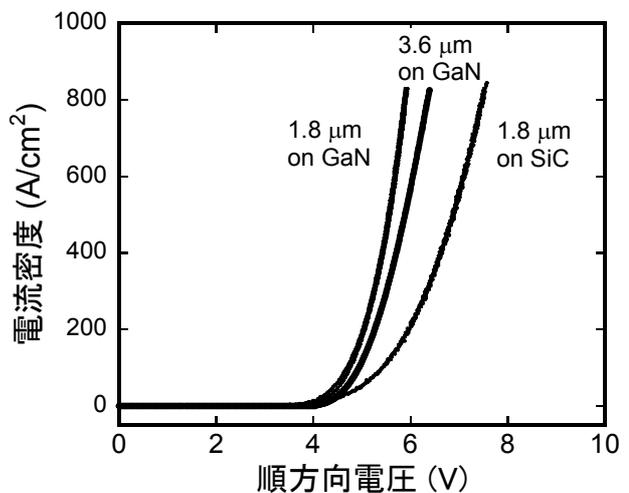


図2 順方向電流-電圧特性

六方晶 BN ヘテロエピタキシャル層からの紫外発光

小林康之 赤坂哲也 牧本俊樹
機能物質科学研究部

六方晶 BN(h-BN)は、励起子を利用した量子情報処理および深紫外領域の光デバイス応用に向けて有望な材料である。その光学特性の解明、pn 接合や量子井戸構造からなる光デバイス作製のためには、適切な基板上に高品質 h-BN 層を成長することが、不可欠である。過去数十年間、様々な方法で BN 薄膜が成長されている。しかしながら、これらの BN 薄膜から室温において紫外発光の報告はなかった。

近年、我々はトリエチルボロンとアンモニア(NH₃)を用いた流量変調エピタキシ法(FME)により、Ni(111)基板上に単結晶 h-BN ヘテロエピタキシャル層の成長に成功した[1]。ここでは、その h-BN ヘテロエピタキシャル層からの室温でのカソードルミネッセンス(CL)による波長 227nm のバンド端近傍(NBG)発光の観測について報告する[2]。

図 1 に NH₃ 流量 700sccm、NH₃ 供給時間 1, 2, 3 秒で FME 成長した h-BN の CL スペクトルを示す。5.47eV(227nm)にピークを有する NBG 紫外発光と 3.85eV(322nm)にピークを有するブロードな深い準位からの発光が、NH₃ 供給時間 3 秒で成長した h-BN 層から明瞭に観測される。室温でのこのような支配的な NBG 発光の観測は、我々の知る限り初めてである。NBG 発光ピーク強度は、NH₃ 供給時間の増加とともに単調に増加することから、より長い NH₃ 供給時間での h-BN 成長が、より強い NBG 発光を得るために望ましいことが分かる。

図 2 に、c 軸格子定数と(0002)h-BN X 線ロックンブカーブ(XRC)の半値幅(FWHM)の NH₃ 供給時間依存性を示す。3 サンプルの全ての c 軸格子定数は、バルク h-BN の値に一致する。NH₃ 供給時間を 1 秒から 3 秒に増加させると、XRC の FWHM は、1.5 から 0.7° に減少する。0.7° の FWHM は、今までに報告された中で最も狭い値である。長い NH₃ 供給時間での低成長速度とより大流量 NH₃ 供給が h-BN 層中の格子欠陥を減少させ、その結果としてより強い NBG 紫外発光に結びついたことを示している。

今回の結果は、h-BN 光デバイス実現の究極の目標に向けた第一歩である。

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

[2] Y. Kobayashi, et al., Phys. Stat. Sol. (b) **244** (2007) 1789.

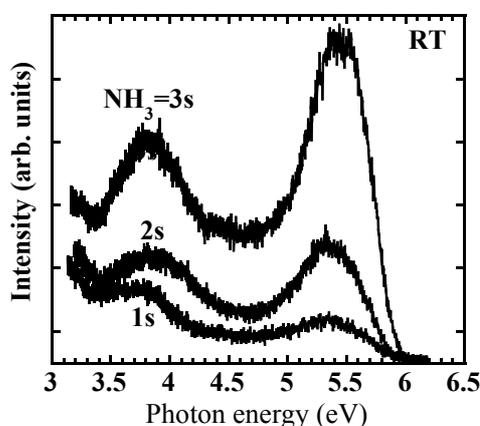


図1 FME 成長 h-BN 層の室温 CL スペクトル

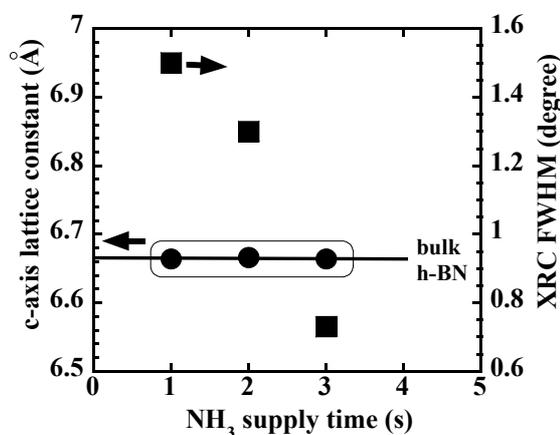


図2 格子定数とXRC FWHMのNH₃供給時間依存性

金・銀・銅ナノ微粒子触媒からの単層ナノチューブ成長

高木大輔¹ 日比野浩樹²

¹東京理科大学 ²機能物質科学研究部

金・銀・銅など従来カーボンナノチューブ (CNT) を生成しないと考えられていた様々な金属を触媒として、良質な単層の CNT を効率よく合成することに世界で初めて成功した[1]。CNT は、軽量、高強度、電熱伝導性の良さといった特長から、次世代の産業基盤を担う素材として期待され、盛んに研究されている。しかし生成メカニズムには未だ不明な点が多く、合成方法も研究途上にあるが、単層 CNT の合成には鉄族をはじめとする、炭素の溶解度が高く親和性のよい金属を触媒とすることが不可欠と考えられていた。本研究成果は、これまでの常識を覆し、図1の金・銀・銅のように、バルク状態ではほとんど炭素を溶解しない金属からも CNT が生成できることを示したもので、生成メカニズムの根幹に関わる発見であるとともに、新たな触媒種による制御性の高い CNT 合成方法の確立につながると期待される。

現在、実用化に向けた CNT 合成方法としては、エタノール等の炭素化合物の気体を高温でナノサイズの金属触媒に反応させて生成させる方法が主に用いられている。この方法で CNT を生成できる金属触媒は、これまで主に鉄属金属(鉄、コバルト、ニッケル)に限られていた。特に、炭素との親和性の低い金、銀、銅は単層 CNT を生成できない金属の代表とされ、生成機構もそのことを基準に考えられていた。今回の研究において、金、銀、銅のいずれであっても、①微粒子サイズを 1~3 nm と極めて小さくすること、②微粒子に清浄化処理を施して表面をクリーンな状態にすること(図2)、③高温でエタノールなどの炭素源ガスを供給すること、の3つの条件を満たすことにより、高い効率で単層 CNT を生成できることを見出した。得られた単層 CNT の品質や生成効率は従来の鉄属触媒に匹敵するか、条件によってはそれ以上となる。さらに、上記の条件を満たせば、金、銀、銅に限らず、様々な金属から単層 CNT が生成可能であることも判明している。これは、単層 CNT 生成の触媒としては鉄属元素の有する性質が必須ではないことを意味している。従来の生成機構は、鉄族金属の特性である炭素の取り込み・溶解と析出現象に基づいていたが、今回の成果は、そのような特性を必要としないモデル構築の必要性を示している。さらに、触媒種の多様化が実現されたことで、今後、寿命の長い触媒種の探索やチューブ構造を自在に制御できる合成方法の確立が期待される。また、非磁性触媒からの成長が可能となったことなどから、超伝導デバイスへの適用等、CNT の各種産業分野での用途拡大も見込まれる。

[1] D. Takagi, et al., Nano Lett. 6 (2006) 2642.

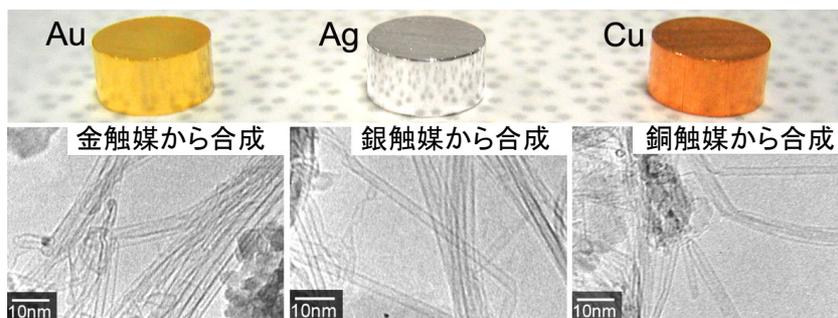


図1 金・銀・銅微粒子触媒から合成した単層 CNT の透過電子顕微鏡像

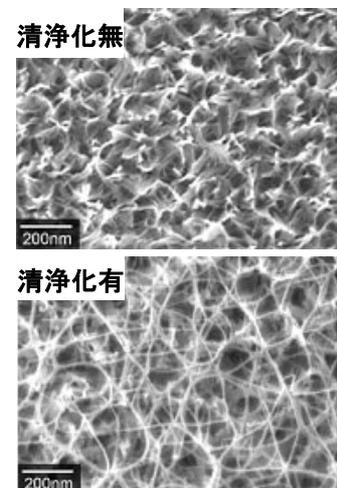


図2 金触媒での清浄化処理効果

単層カーボンナノチューブ成長における金属微粒子触媒の化学状態解析

前田文彦
機能物質科学研究部

炭素原子が蜂の巣状に整列したシートを丸めたナノメートルサイズのチューブである単層カーボンナノチューブ (CNT) は、シリコンテクノロジーの微細加工限界を超えるナノデバイスに求められる優れた物性を有する物質である。しかし、金属特性を示す CNT や直径に対応したバンドギャップの半導体特性を示す CNT が混在するため、これらを作り分けることが集積化に向けた大きな課題となっている。そこで、成長を制御して作り分けを実現する目的で成長機構の解明を進めている。ここで、CNT の成長では触媒となる金属微粒子が重要な役割を果たすため、その化学状態は成長機構を議論する上で重要な情報である。そこで、常圧に近い雰囲気が必要な気相成長による CNT 成長を超高真空が必要である光電子分光装置内で実現して、CNT 成長後の触媒金属微粒子の化学状態を明らかにした。[1,2]

図 1 に基板への蒸着後から加熱途中を経てエタノールを用いた単層 CNT の成長後に至るまでの触媒金属として用いた Co の内殻光電子スペクトルを示した。大気に曝すことにより酸化した蒸着膜を用いる通常の成長プロセスの場合 (*ex situ* deposition) には、加熱過程で Co_3O_4 から CoO に変化した後、CNT 成長後には完全に還元されて金属状態になることが分かる[1]。また、蒸着膜形成から成長まで大気に曝さず真空一貫で CNT を成長した場合 (*in situ* deposition) には、終始金属状態を維持していることが分かった[2]。即ち CNT 成長で最終的に安定な状態は金属の状態であり、触媒金属の炭化を必要とする成長モデルは不相当であることを示唆している。また、通常プロセスよりも真空一貫プロセスで成長した方が高い CNT の収率が得られた。このとき、炭素の内殻光電子の解析から、図 2 に示すように真空一貫プロセスの場合に多くの炭素が分解・堆積していることが分かった。この結果は、均一な金属 Co 微粒子の高い原料ガス分解能力が収率を高めていることを示すとともに、金属微粒子に取り込まれない炭素が大量に表面に存在していたことを示している。以上のように光電子分光以外の手段ではモニターが困難な CNT 成長時における触媒の化学状態に関する情報を得ることが可能となった。今後さらに解析を進めて成長機構を解明することにより成長制御法の確立を目指す。

[1] F. Maeda, et al., Jpn. J. Appl. Phys. **46** (2007) L148.

[2] F. Maeda, et al., Mater. Res. Soc. Symp. Proc. **96** (2007) 30963-Q05-04.

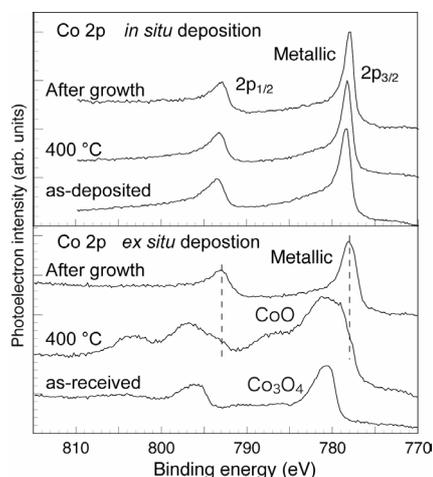


図1 成長前後の Co2p 光電子スペクトル

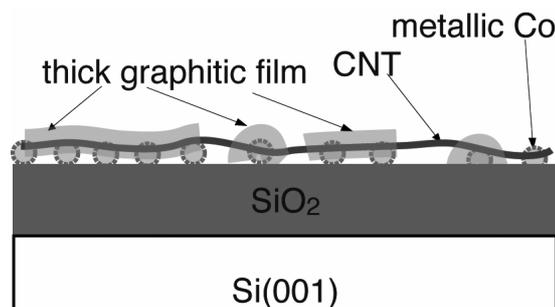


図2 成長後の表面状態の模式図

表面原子ステップに配置した触媒ナノ粒子を用いたナノワイヤの位置制御

日比野浩樹¹ 舘野功太²

¹機能物質科学研究部 ²量子光物性研究部

半導体ナノワイヤは、次世代のナノスケール電子・光デバイスの構成要素として注目を集めている。ナノワイヤのデバイス応用を考えたとき、それらをサイズ、構造、位置を制御して作製することが不可欠である。これは、VLS(vapor-liquid-solid)機構に基づくナノワイヤ形成では、金属ナノ粒子触媒の制御と密接に関係している。我々は既に、触媒の中でも最も一般的な Au に関して、Si(111)表面原子ステップをテンプレートとすることにより、AuSi 合金島のサイズや位置を制御できることを示している[1]。今回、ステップに配列した AuSi 合金島を触媒として、直立 GaP ナノワイヤの一次元配列を実現したので報告する[2]。

AuSi 合金島をステップに配列するために、超高真空中で、Si(111)表面に高温(~700°C)と低温(~400°C)の二段階で Au を蒸着した。その際、低エネルギー電子顕微鏡で島形成をリアルタイム観察することにより、島のサイズや密度を制御した。その後、試料を大気中に取り出し、何の前処理なく、有機金属気相エピタキシャル反応管へと導入した。我々は、Si(111)表面に直立 GaP ナノワイヤを成長する条件を探索し、(1)トリメチルガリウムと PH₃ の共供給、(2)異なる温度での二段階成長、(3)低 PH₃ 流量の三条件が不可欠であることを明らかにした。

図1は、数μm にわたって直線的に自己配列した直立ナノワイヤの走査電子顕微鏡(SEM)像である。ナノワイヤの一次元配列は、原子ステップに配列した AuSi 合金島がナノワイヤ成長触媒として機能したことを示している。また、SEM 像から、ナノワイヤがほぼ一定の長ささと径を持つことが分かる。図2は、ナノワイヤの透過原子顕微鏡(TEM)像とエネルギー分散形 X線分光(EDS)像である。ワイヤの底部では、Si と GaP の格子がなめらかに接合され、界面を貫通する欠陥は見られない。このことは、Si エレクトロニクスと III-V 半導体フォトニクスの融合を考えた際、重要な特質である。

ナノワイヤのサイズ・位置制御に向けた我々のアプローチは、トップダウン型の微細加工技術を一切含まない、純粋にボトムアップ型の自己形成手法である。自己形成は、低コスト、大面積、高品質等の潜在的メリットを有しているが、サイズや位置の制御性等に、未だ解決すべき課題が多い。本アプローチが、自己形成に基づくナノデバイス集積法の確立に大いに貢献することが期待される。

[1] H. Hibino and Y. Watanabe, Surf. Sci. **588** (2005) L233.

[2] K. Tateno, H. Hibino, H. Gotoh, and H. Nakano, Appl. Phys. Lett. **89** (2006) 033114.

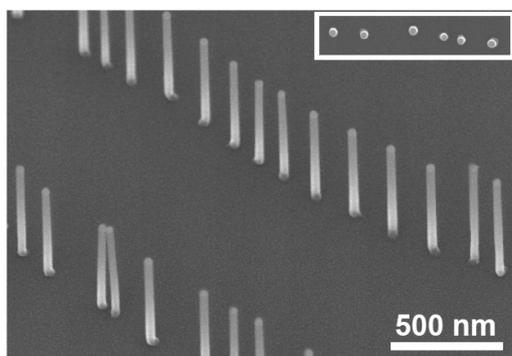


図1 GaP ナノワイヤの SEM 像。表面垂直から 38° 傾いた方向から撮影。挿入図は真上から見た SEM 像

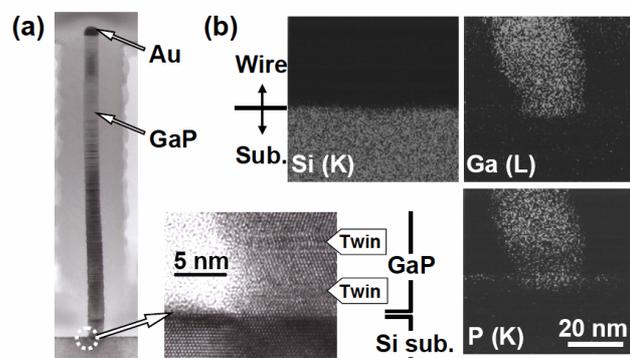


図2 (a) GaP ナノワイヤの TEM 像。(b) ワイヤ/基板界面領域の Si-K 線、Ga-L 線、P-K 線による EDS 像

自発展開する脂質二分子膜を分子の輸送担体に用いたマイクロ流路素子

古川一暁
機能物質科学研究部

脂質二分子膜の自発展開は、固液界面に生じるぬれ現象で、親水表面にスポット状に付着させた脂質分子のかたまりのすそ野から、自己組織化によって脂質二分子膜が一層のみ形成し、広がっていく過程である。我々は、あらかじめパターンを作製した表面上での自発展開挙動を調べ、親水表面である SiO₂ 上のみ脂質二分子膜が自発展開することを見出した。この現象を利用した新規マイクロ流路素子を提案し、動作実証してきた[1]。

素子の構造と動作原理を図 1 に示す。素子は幅 10μm 長さ 400μm のマイクロ流路部の両側に井戸を有する、フォトリソグラフィによって作製されたパターンを備える(図1A)。脂質二分子膜は、パターン中の親水表面のみ自発展開する。ふたつの脂質二分子膜が流路部の中央付近で衝突すると、それらは融合してひとつの脂質二分子膜を形成する。その後は、側方拡散が支配的となり、これによって分子が混合される(図1B)。本素子では、自発展開する脂質二分子膜が、埋め込まれた分子を基板上の目的の場所に輸送し、混合する、輸送担体の役割を果たす。これは、例えばガスクロマトグラフィーにおけるキャリアガスと同様の役割である。

提案の素子が分子間相互作用の検出に有用であることを、色素分子間の蛍光共鳴エネルギー移動反応(FRET)を用いて実証した。図 2 に示すように、ドナー分子(CC2)とアクセプタ分子(FITC)を含む脂質二分子膜を衝突させる。衝突後は、CC2およびFITCが衝突地点を中心に拡散し、左右対称に分布する。両者の発光の時間変化を測定すると、ふたつの分子が共存する領域において、ドナー蛍光の大きな消光が確認される。これはドナーの励起状態の緩和過程として、発光と FRET とが競合するためである。大きなドナー蛍光消光は、FRET 効率が高いことを示している。本素子によって、様々な色素間の FRET 効率や、そのドナー-アクセプタ間距離依存性の定量的な解析が可能になる。

今後、さらに輸送対象に酵素やタンパク質を加え、生体分子の相互作用解析へ本手法を応用していく。

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

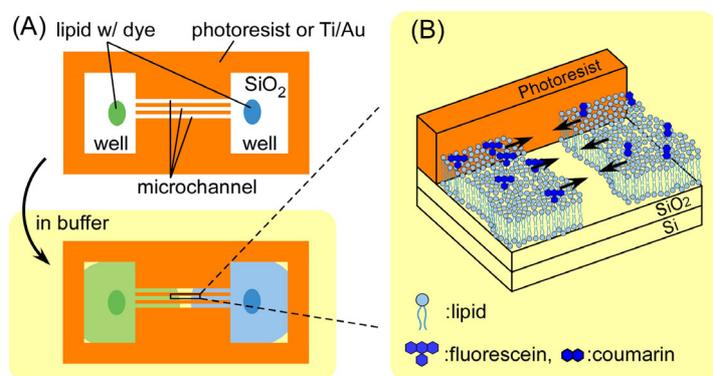


図1 デバイスの構造と動作。

分子を輸送する脂質には、卵黄由来の L-α-PC を用いている

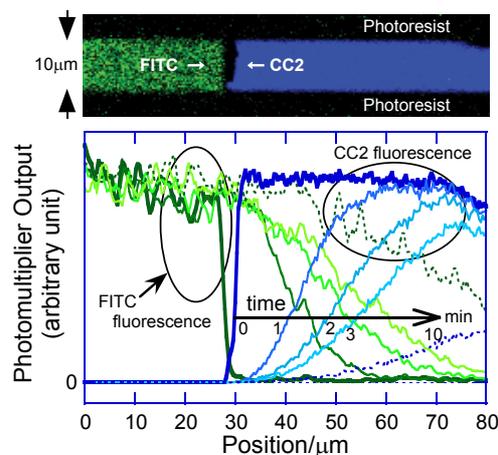


図2 FRET の時間発展観察。

L-α-PC 中に CC2, FITC 結合脂質分子をそれぞれ 5% 添加した

ベシクルナノ配列の自己形成

Chandra S. Ramanujan¹ 住友弘二² Maurits R. R. de Planque¹ 日比野浩樹²

鳥光慶一² John F. Ryan¹

¹オックスフォード大学 ²機能物質科学研究部

タンパク質の高密度配列を自己形成するための「ボトムアップ」技術を考案した。シリコン基板上に自己形成する金ナノドット配列をテンプレートに用いることにより、ベシクルの配列を制御することに成功した。従来のリソグラフィ等の「トップダウン」技術を用いることなく、安価で高密度なナノ配列の実現を可能にし、プロテオミクスや創薬に向けた応用が期待される。

まず、半導体表面におけるナノ構造形成制御技術を用いてテンプレートとなる金ナノドット配列を形成する。シリコン基板上では、10~20 nm の三次元 Au-Si 島は、表面上の原子ステップに沿って形成される[1]。リソグラフィを用いることなく、三次元島の位置やサイズの良く制御されたナノ配列の形成が可能である。一方、ベシクルを形成する脂質分子の一部をチオール化することにより、金原子への優先的な吸着を制御することも可能となる。図1に金表面に吸着したベシクルの AFM 像を示す。チオール基は表面の金原子と結合し、ベシクルを表面に固定する。このようにチオールでタグ付けしたベシクルを、金ナノドットを配列した表面に導入すると、そこに優先的に吸着する[2]。図1と同様のベシクルが、配列をなしている様子が観察されている(図2)。ナノ配列の形成と、その後のベシクルの吸着の両方が、完全に「ボトムアップ」技術によって制御されることを示した。100 nm からミクロンスケールでの、ベシクルの自己配列が可能となった。

脂質ベシクルは、それ単体だけではなくタンパク質をはじめとする生体分子のキャリアとして、デバイス応用に向けての展開が期待されている。現状の DNA マイクロアレイ技術では、300 μl に $10^5 \sim 10^6$ のプローブによるスクリーニングが行われている。今回の技術により構成されるナノ配列では、10 μl の液滴が 10^9 のナノドットをカバーすることに相当し、飛躍的な感度の向上が期待される。タンパクチップ構成に向けたキー技術の一つである、ベシクルにタンパク質を取り込み再構成する技術の確立も、現在進めている。

[1] H. Hibino and Y. Watanabe, Surf. Sci. **588** (2005) L233.

[2] C. S. Ramanujan, et al., Appl. Phys. Lett. **90** (2007) 033901.

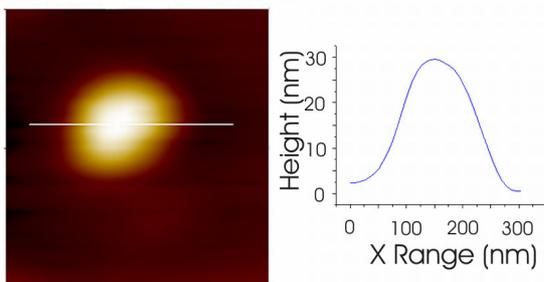


図1 金表面に吸着したベシクルの AFM 像 (液中タッピングモードで測定)とそのラインプロファイル

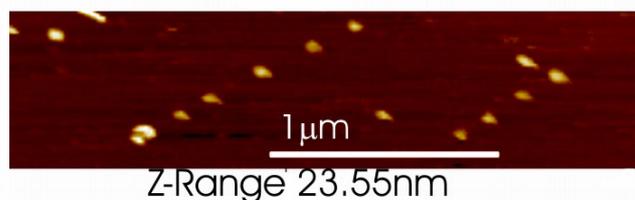


図2 金ナノドット配列への優先的吸着により構成されたベシクルのナノ配列

神経回路とのインターフェイス実現に向けた導電性高分子電極の開発

Tobias Nyberg 島田明佳 河西奈保子 鳥光慶一
機能物質科学研究部

大脳皮質由来の神経回路網とのインターフェイスとして用いるための導電性高分子電極(以下高分子電極という)を開発し、神経回路網に対する電気刺激とその応答に関する特性を調べた。

高分子電極は、Poly (3,4-ethylenedioxythiophene) poly (styrenesulfonate) (PEDOT-PSS) と Ethylenedioxythiophene (EDOT)の混合物を、インジウムスズ酸化物 (ITO) 製の平面型電極(以下 ITO 電極という)上で電気化学的に重合させて作られる。表面積が非常に大きい導電性高分子を用いることにより、従来の平面型電極の特性を向上させることができた[1]。

神経回路網に対する情報伝達は、電気刺激を印加することにより行われる。そこでまず電気刺激を印加したときの高分子電極の電気的特性を調べた。図1に高分子電極およびITO電極のボード線図を示す。低中周波領域における高分子電極のインピーダンス(○)は、ITO電極のインピーダンス(□)と比較して顕著に小さくなった。中周波領域における高分子電極の位相差(実線)も、ITO電極の位相差(破線)と比較して小さくなった。また電気刺激として電圧パルス印加したところ、出力電流の最大値は電圧パルスの大きさに比例することが分かった。

次にウイスター系ラット胎児(胎生 18 日)の大脳皮質神経細胞を電極上で分散培養し、神経回路網を形成した。培養開始後 5 日目から ITO 電極および高分子電極で自発的発火活動が観察され、神経回路網が成熟するにつれ発火頻度は上昇した。高分子電極を用いた低電圧刺激の効果を、ITO 電極と比較することにより評価した。すると図 2 に示すように、ITO 電極を用いて神経回路網を刺激するよりも低い電圧で、神経回路網の電気的活動を励起できることが分かった。高分子電極はこのような低電圧刺激を一ヶ月にわたって神経組織に印加することが可能で、しかも数ヶ月以上培養を行うことができた。これらの結果は、この導電性高分子電極が神経回路網とインターフェイスを実現するために必要な生体との高い親和性を有していることを示している。

[1] T. Nyberg, et al., J. Neurosci, Methods. **160** (2007) 16.

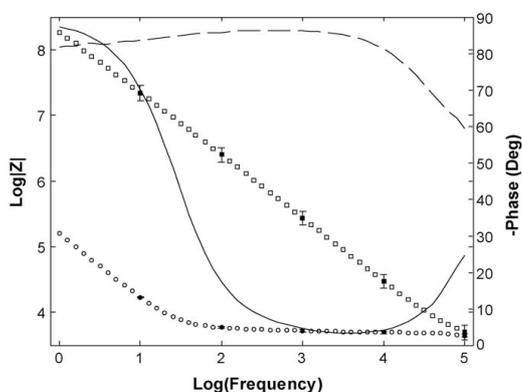


図1 高分子電極とITO電極のボード線図

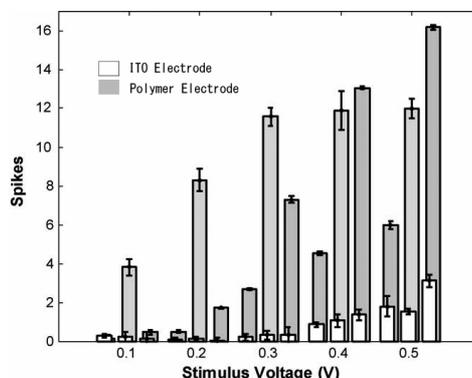


図2 刺激電圧と励起された活動電位の数の関係

金ナノロッドの自己集合によるイオンセンシング

中島 寛 古川一暁
機能物質科学研究部

棒状の金ナノ微粒子である金ナノロッドは、局所表面プラズモン共鳴による高い吸収特性を示し、その特性は金ナノロッドのアスペクト比(ロッド長/ロッド径)や溶液中での分散・凝集状態に大きく依存する。また金ナノロッドは、生体系に対して毒性が低いと見られ、光学特性を活かしたバイオアッセイ用ナノ材料として期待されている。

今回、長さ 40 nm、直径 10 nm の金ナノロッド表面に、陽イオンを捕捉識別するクラウンエーテル分子を化学結合させた新規ナノ複合材料を合成した。この材料は、生体内での重要な情報伝達物質であるナトリウムやカリウムなどの陽イオンを、選択的かつ高感度に検出するナノイオンセンサを実現可能とする。これまで、ナノロッド表面に機能性分子を修飾した複合材料はあまり知られていない。我々は、金と化学吸着性の高いチオール基を持つクラウンエーテル分子を合成し、金ナノロッド表面に固定化することで、溶液中に均一に分散したナノ複合材料を得た[1]。

図 1 に、金ナノロッド-クラウンエーテル複合体の溶液中に、ナトリウムまたはカリウムイオンを添加したときの金ナノロッドの吸収スペクトル変化を示す。15-クラウンエーテル-5 分子を表面修飾剤に用いた場合、ナトリウムイオンはクラウンエーテル1分子で捕捉されるが、よりイオン半径の大きなカリウムイオンは 2 つの分子間で挟持される(図 2)。後者では、金ナノロッドの凝集が生じ、表面プラズモン吸収特性に顕著な変化が現れる。この仕組みを利用し、陽イオンの選択的なセンシングが可能であることを示した。異なる空孔サイズのクラウンエーテルを修飾剤に用いれば、様々なイオン半径を有する陽イオンを選択的かつ定量的に検出可能である。

金ナノロッドは、ロッドの長さを調節することで、吸収波長を紫外～近赤外領域まで幅広く制御可能なため、ターゲット分子に応じて、望みの検出波長を自在に選択できる。今後は、金ナノロッドの表面にタンパク質や酵素などの機能性生体分子を修飾し、生体分子にとって透明で、かつ非破壊に分析できる表面プラズモン吸収帯を利用し、単一生体分子の高感度検出や生体マーカーとしての機能を追求していく。

[1] H. Nakashima, et al., Chem. Commun. (2007) 1080.

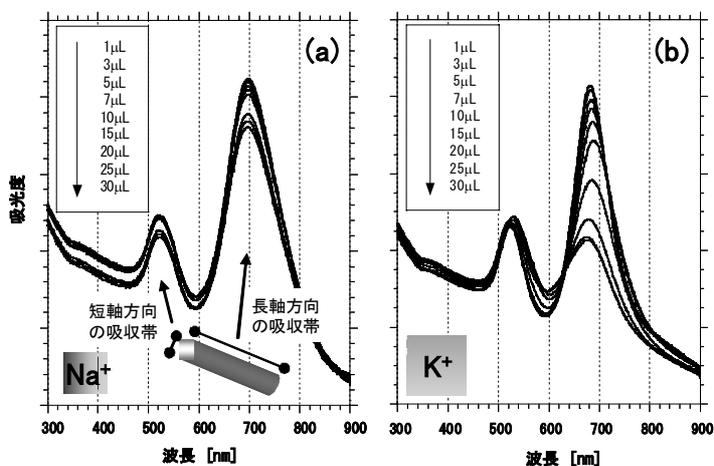


図1 (a) ナトリウムイオン、(b) カリウムイオン添加による金ナノロッドの吸収特性変化

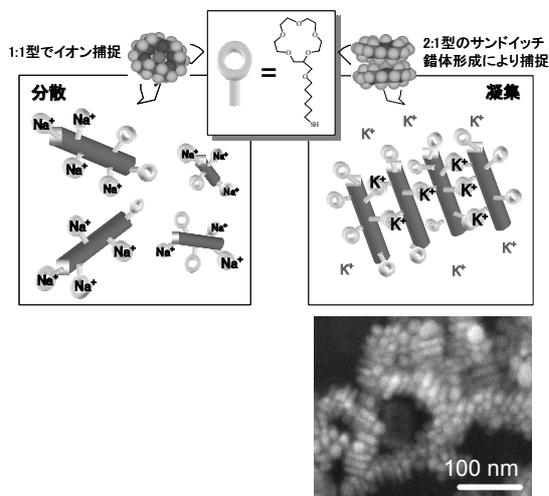


図2 イオン識別の仕組みと金ナノロッド凝集構造

ナノ空間における生体分子のテラヘルツ分光

味戸克裕¹ 上野祐子^{1,2} Rakchanok Rungsawang¹ 富田 勲^{1,3}

¹機能物質科学研究部

²NTT マイクロシステムインテグレーション研究所 ³NTT フォトニクス研究所

テラヘルツ(THz)波は 0.3–10THz 程度の周波数帯域を示し、プラスチック、紙、ゴム、木材、セラミックなど物質への透過性があり、分光法として分子間や分子内に働く弱い水素結合や Van der Waals 力などが関係する分子固有の振動情報が得られることで注目されている。室温に相当する 6THz (約 200cm⁻¹) 以下の遠赤外吸収分光を測定するのは、最近まで容易ではなかったが、THz 電磁波パルスを用いる THz 時間領域分光法(THz-TDS : Terahertz Time-Domain Spectroscopy)の進展によって、安定で感度良く測定可能となってきた[1]。

我々は、これまでアミノ酸や糖などの生体関連分子が THz 波領域に水素結合など分子固有の振動ピークを持っていることを明らかにし、新たな定量分析法として有効であることを示してきたが[2]、分子間と分子内の振動モードの区別は困難であった。そのため、図1に示すように分子レベルで配向している単結晶アミノ酸の角度依存 THz-TDS 測定を行い、非経験的分子軌道計算結果との比較によって、ほとんどのピークは分子間の水素結合と考えられるが、分子内振動モードはテラヘルツ波の偏光方向(90° 付近)と振動双極子モーメントの方向が一致するときのみ吸収の著しい増大が起こることが分かった[3]。

また、図2では異性体の有機酸を用いて結晶状態(ポリエチレンとの混合ペレット)とメソポーラスシリカの細孔中への吸着状態の THz スペクトルを比較した。その結果、ナノスケールの細孔への吸着により分子間水素結合の影響が低減されたフマル酸では大きな違いがあったのに対して、分子内に水素結合を持つマレイン酸ではほとんど変化がなかった[4]。このように、THz 分光はナノ空間での分子内・分子間の相互作用の情報が得られることが明らかとなった。これらの相互作用はタンパク質の高次構造を形成するのに深く関わっており、今後 THz 分光が分子レベルでの生体分析の新たな分野を切り開くことが期待される。

[1] K. Ajito, R. Rungsawang, I. Tomita, and Y. Ueno, *Electrochemistry* **74** (2006) 506.

[2] Y. Ueno, R. Rungsawang, I. Tomita, and K. Ajito, *Anal. Chem.* **78** (2006) 5424.

[3] R. Rungsawang, Y. Ueno, I. Tomita, and K. Ajito, *J. Phys. Chem. B*, **110** (2006) 21259.

[4] Y. Ueno, R. Rungsawang, I. Tomita, and K. Ajito, *Chem. Lett.* **35** (2006) 1128.

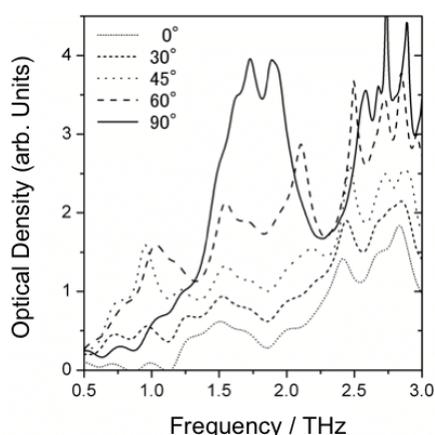


図1 L-システイン単結晶の角度依存 THz スペクトル。(0° では c 軸に THz 波の偏光が平行)

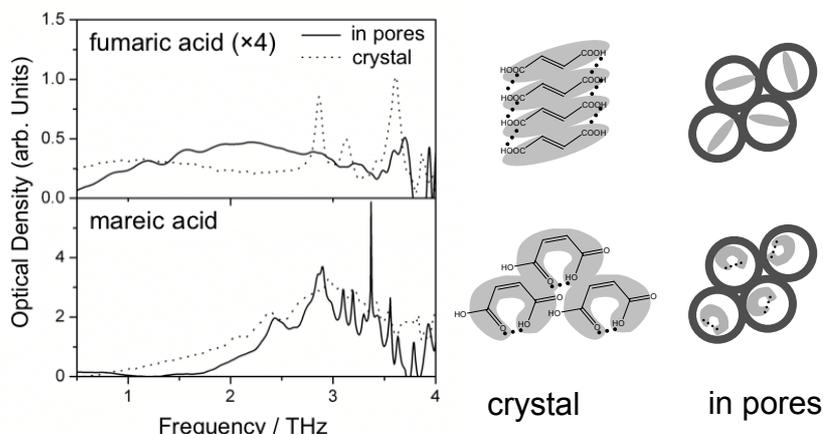


図2 結晶状態とメソポーラスシリカの細孔への吸着状態のフマル酸(上)とマレイン酸(下)の 77K で測定された THz スペクトルの比較

データ保持時間の長いゲインセル・メモリ

西口克彦 小野行徳 藤原 聡
量子電子物性研究部

キャパシタからなるメモリノード(MN)にデータを電荷として保持する DRAM(Dynamic Random Access Memory)はメモリ素子の代表格であり、その微細化により大容量化が進められてきた。しかし、電荷を蓄積する MN 容量を小さくすると蓄積電荷信号がノイズに埋もれてしまうため、さらに MN 容量を小さくすることが困難になっている。このため、素子微細化と同時に MN 容量を確保しなければならず、複雑な MN 構造や新たな材料を利用することが求められ複雑な作製方法やコスト上昇に繋がっていた。

これを解決する素子の1つがゲインセル・メモリであり、MN の蓄積電荷信号を直近のトランジスタで増幅することで、小さな MN 容量でもメモリ動作が可能となる。これにより、素子構造の簡素化だけでなく、情報処理回路との混載化による回路性能の向上が期待できる。しかし、MN 容量を小さくすると蓄積電荷量も減少するので、データ保持時間が短くなる(1秒以下)という問題が実用化を妨げていた。これは、MN 部に形成された pn 接合部で電子-正孔ペアが発生することが原因であった。この問題は通常の DRAM でも共通の課題であり、その対策として常にデータの再書き込み(リフレッシュ)を行っているため、消費電力の上昇のみでなくメモリ容量の利用効率を下げている。

今回我々は、pn 接合の無い MN 構造によりデータ保持時間の長いゲインセル・メモリを実現した[1]。図 1 は素子構造を示しており、ノンドープ絶縁膜上シリコン(SOI)に形成した電荷転送用トランジスタ(FET1)と検出用トランジスタ(FET2)で構成される。これらの上部を覆う上層ゲート(UG)で FET1 のアンドープ SOI チャンネルを反転させ、下層ゲート(LG)で FET1 を OFF にすることで FET1 チャンネルの先端に数十 aF 程度の MN を形成する。FET1 を ON・OFFして電子溜め(ER)-MN 間で電子蓄積(データ‘0’)・放出(‘1’)を行い、MN と容量結合した FET2 の電流変化によって蓄積電子信号を読み出す。従来の DRAM では FET1 と MN の接合部に pn 接合を形成しているが、本素子では pn 接合をノンドープチャンネルの反転層で置き換えているため、85°C で 10^4 秒のデータ保持特性が得られた(図 2)。

本素子により、リフレッシュ動作の頻度を数桁下げることが可能となり、それによる低消費電力化が可能となる。また、素子作製方法は SOI・LSI 作製技術をベースとしているので、情報処理回路との混載化も期待できる。

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

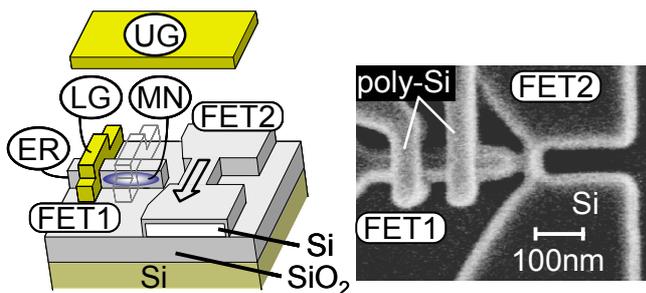


図1 ゲインセル・メモリの構造図

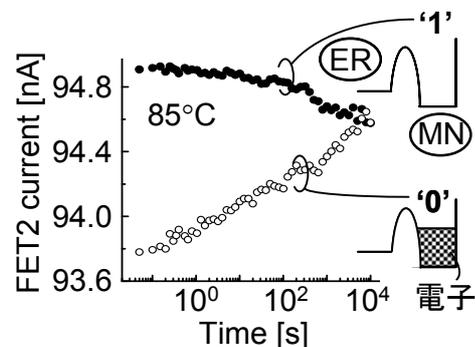


図2 データ保持特性

シリコンナトランジスタにおける単一ボロンの検出

小野行徳 西口克彦 藤原 聡
量子電子物性研究部

電界効果トランジスタは微細化の一途をたどり、これに伴い、トランジスタ中のドーパント数揺らぎに起因した特性ばらつきが大きな問題となっている。一方、シリコン中の少数個のドーパントを利用した新しい電子デバイスの可能性も検討されはじめている。このため、ドーパントがトランジスタ特性に及ぼす影響を深く理解するとともに[1-3]、単一のドーパントを検出し、その位置を特定し、さらには、電子状態を制御する技術の確立が重要となる。今回我々は、単一ドーパント制御技術確立の第一ステップとして、トランジスタ中の単一ボロンの検出に成功した[4]。

ゲート長とゲート幅がともに40nm で、チャンネルにボロンをドーピングしたナトランジスタ(ソース、ドレインも p 型)を silicon-on-insulator 基板上に作製した。作製においては、ソース、ドレインからチャンネルへのドーパント拡散を防ぐために、ソース、ドレインとチャンネルの間に電気的に形成可能なリードを挿入した。これにより、極低濃度のチャンネルドーパントの影響を調べることが可能となった。図1は、トランジスタ中の平均ボロン数が約1個(ドーピング濃度: $2 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$) の場合のコンダクタンス特性例である。矢印で示されている特性変調は、ドーピングされていないトランジスタでは観測されず、単一のボロンアクセプタに起因するものである。実際、ゲート電圧とドレイン電圧の関数として微分コンダクタンスをプロットした結果(図2)から、この特性変調が単一正孔の捕獲放出に起因していることが証明される。

コンダクタンス変調の基板電圧 (V_{BG}) 依存性は、ランダムドーピングに起因して測定するデバイスごとに異なっている(図1)。このことは、特性変調がドーパントの界面からの距離(深さ)に強く依存していることを示唆しており、本測定手法を発展させることにより、トランジスタ中の個々のドーパントの位置を特定する技術を確立できるものと期待される。

- [1] Y. Ono, et al., Jpn. J. Appl. Phys. **44** (2005) 2588.
 [2] Y. Ono, et al., Phys. Rev. B **74** (2006) 235317.
 [3] J. F. Morizur, et al., Phys. Rev. Lett. **98** (2007) 166601.
 [4] Y. Ono, et al., Appl. Phys. Lett. **90** (2007) 102106.

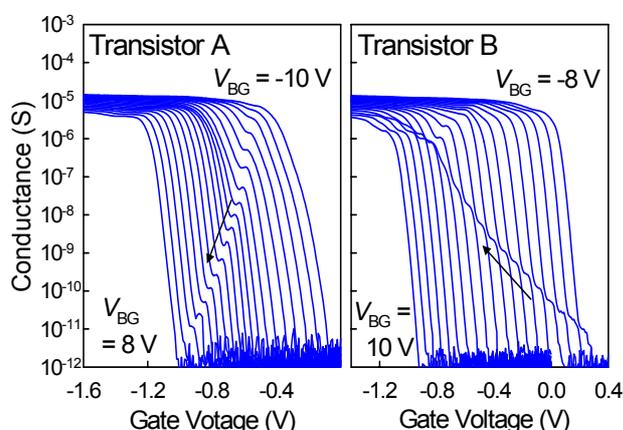


図1 平均ボロン数が約一個のトランジスタのコンダクタンス特性例 (測定温度:26K)

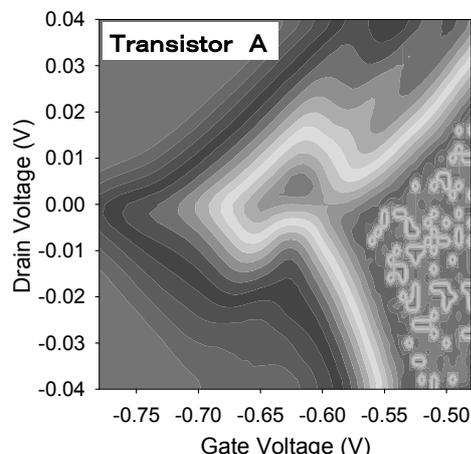


図2 微分コンダクタンスのゲート電圧ードレイン電圧依存性 (測定温度:6K)

高いQを有するナノ機械共振器における電子位相の変調

Imran Mahboob 山口浩司

量子電子物性研究部

ナノ電気機械システムと呼ばれる新しいカテゴリーの微細構造素子が、昨今注目を集めている。特にナノ機械共振器はエネルギー散逸が極めて低く、磁気モーメントや電荷、電子・核スピンなどの高感度検出素子としての応用が期待されている。また、電子間相互作用や電子・フォノン間相互作用など、低次元系において電子がエネルギーを散逸する基礎的過程を解明する上でも、ナノ機械共振器は重要なツールとなる。

ここでは、ナノ機械共振器を用いて量子細線における電子干渉を調べる手法に関して紹介する [1]。作製したナノ機械構造は、擬一次元電子系を有する InAs 細線を組み込んだ AlGaSb 梁である [図 1(a)]。この梁には加振用の Au 細線も組み込んであり、横磁場中で交流電流を流すことにより梁の上下運動を引き起こす。運動により発生した誘導起電力により測定した共振特性を図 1(b)に示す。共振周波数は 10.268 MHz、Q値は 12,000 である。

次に、この共振周波数付近における梁の運動を、梁の曲げによる InAs 細線の抵抗値変化(ピエゾ抵抗)により検出した。共振ピークはこの場合にも明瞭に確認されたが、共振周波数における抵抗値変化は、印加した磁場の関数として周期的に振動することが観測された [図 1(c)]。図1(d)はそのフーリエ変換であるが、明確な周期構造が確認される。一方、InAs 細線の抵抗値そのものは、コンダクタンス揺らぎと呼ばれる不規則な振動を磁場の関数として示し、電子が InAs 細線内で多くの経路を通じて複雑に干渉していることが理解される。これらの結果は、梁全体にわたっての平均的な電子干渉の状態を検出する磁気抵抗測定とは異なり、ピエゾ抵抗測定では小数の干渉ループのみの影響を局所的に抽出できていることを示唆している。

[1] I. Mahboob, et al., Appl. Phys. Lett. **89** (2006) 192106.

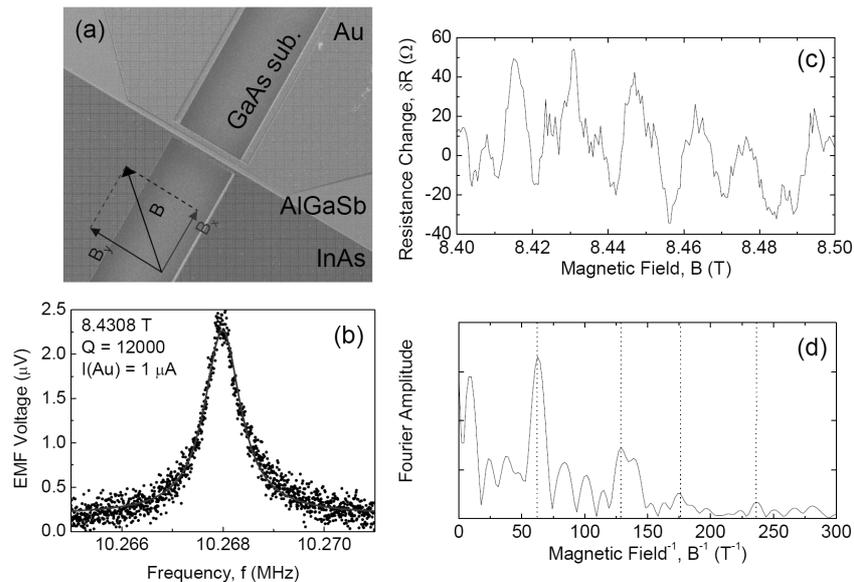


図1 (a) 作製した素子(8 μm 長 \cdot 1.5 μm 幅)の電子顕微鏡写真。(b) 誘導起電力により検出した機械的共振特性。(c) 共振周波数における InAs 細線の抵抗値変化の磁場依存性。(d) 抵抗値変化の磁場依存性のフーリエ変換。測定温度は全て 20 mK

16nm 技術世代に向けたブロック共重合体リソグラフィ

山口 徹 山口浩司
量子電子物性研究部

ブロック共重合体リソグラフィ(BCL)は、トップダウン・ボトムアップ融合型のナノパターンニング手法として注目されている。本手法は、ブロック共重合体のマイクロ相分離したナノドメインをリソグラフィのテンプレートとして用いることを特徴としている。既存のトップダウンリソグラフィはまもなく 22nm 技術世代において限界を迎え、革新的なパターンニング技術の開発が求められていることから、BCLの重要性は、近年非常に高まってきている。BCLの解像性は、ブロック共重合体の分子サイズのみにより決まるため、既存のリソグラフィの解像性をを超える大きな可能性を秘めているからである。最も重要な課題は、種々のマイクロ相分離ドメインの精密配向制御技術を確認することである。中でも、マイクロ相分離ドメインの一つであるラメラ構造は、そのライン形状、高いアスペクト比、パターン配置の自由度といったリソグラフィのテンプレートとしての多くの利点を有しており、ラメラ構造の配向制御を実現することが、将来の極微細ナノデバイス製作につながる非常に重要なステップとなる(図 1)。しかしながら、ラメラ界面を 2 方向に、すなわち基板表面に垂直に、かつトップダウンリソグラフィにより形成したガイドに対して平行に、配向させなければならないという技術的な課題があった。

我々は、レジストパターンを配向ガイドとして用いたグラフォエピタキシ技術を新たに考案し、ラメラ構造の精密配向制御に成功した[1]。グラフォエピタキシとは、基板表面の凹凸を利用して、ブロック共重合体マイクロ相分離ドメインのエピタキシャル成長を促す手法である。成功の鍵は、基板表面の中性化と親水性配向ガイドパターンの導入にある。これにより、基板表面および配向ガイドの側壁表面の親和性を独立に制御することが可能となり、ラメラ構造の垂直配向および横方向配向を同時に実現することができた。図 2 に示すように、スチレンとメチルメタクリレートの対称ブロック共重合体を用いて、HSQ レジストパターンからなる配向ガイド間に、3 層のラメラドメイン(ラメラ周期 L_a : 約 32nm)を横方向に配向させることに成功した。本手法により、配向ガイドのピッチよりも、狭い周期を持つラメラ構造を形成することが可能となった。本技術は、最先端のトップダウンリソグラフィ技術の解像性を大きく凌駕する 16 nm ($1/2 L_a$)技術世代以降の極限リソグラフィ技術としての展開が期待される。

[1] T. Yamaguchi and H. Yamaguchi, J. Photopolym. Sci. Technol. **19** (2006) 385.

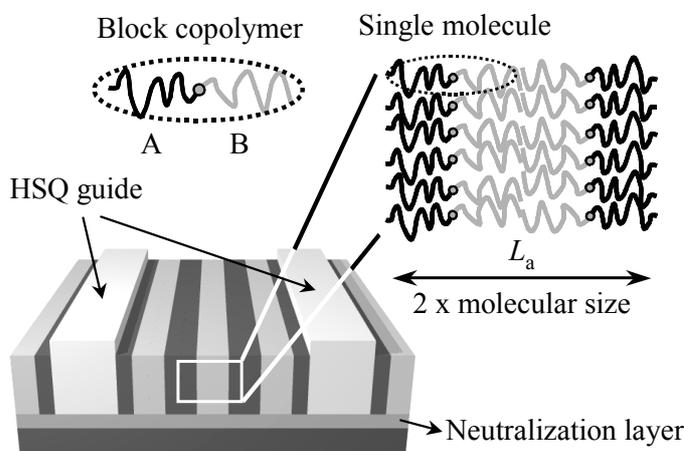


図1 ラメラ構造の横方向配向

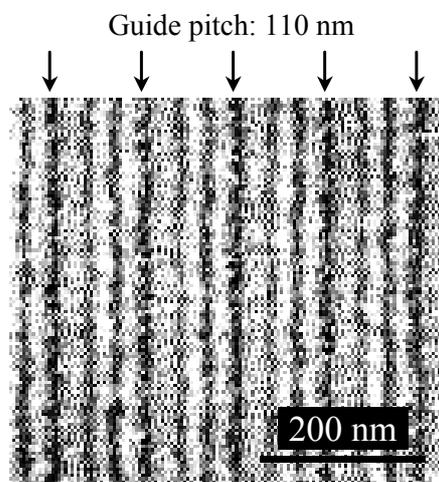


図2 配向ドメインの AFM 位相像

電流電子のカウンティング

藤澤利正
量子電子物性研究部

単電子カウンティング素子(口絵参照)は、1個1個の電子の流れを正確に測定できるため、様々な統計的手法によって“電流”を解析することができる。ここでは、非常に微弱な電流を測定できる単電子電流計としての応用と、電子間の相互作用に関する情報を得ることができる物性研究ツールとしての実験を紹介する[1]。

我々は、二重量子ドットを流れる電子を近接するポイント接合電荷計によって検出する単電子カウンティング素子を作成した(口絵参照)。ある時間(実験では 1.3 秒)に流れる正味の電子数を数えることにより、平均的な電流値を得ることができ、下図(a)のような構成によって、単電子トランジスタから流れる電流を測定し、図(b)のクーロン振動特性(電流ピークの繰返し)を観測した。得られた電流の雑音レベルは約3アトアンペア(毎秒電子20個分に相当)と従来の高感度電流計より3~4桁低いものであり、高感度な電流測定が可能になることが実証された。

また、単電子カウンティング素子によって平均電流以外の様々な情報を得ることができる。図(c)は連続して順方向に流れる電子の時間間隔のヒストグラムを示したもので、ゼロ間隔で立て続けに電子が流れる頻度が少ないアンチバンチング特性を示す。これは、電子間のクーロン相互作用に起因する単一電子トンネルの特徴を顕著に表すものである。また、図(d)は一定時間間隔に流れる電子数のヒストグラムを示しており、高次の雑音特性を明らかにすることに成功した。これらの統計的な手法により、電流に現れる相関を明らかにできると期待される。

[1] T. Fujisawa, et al., Science **312** (2006) 1634.

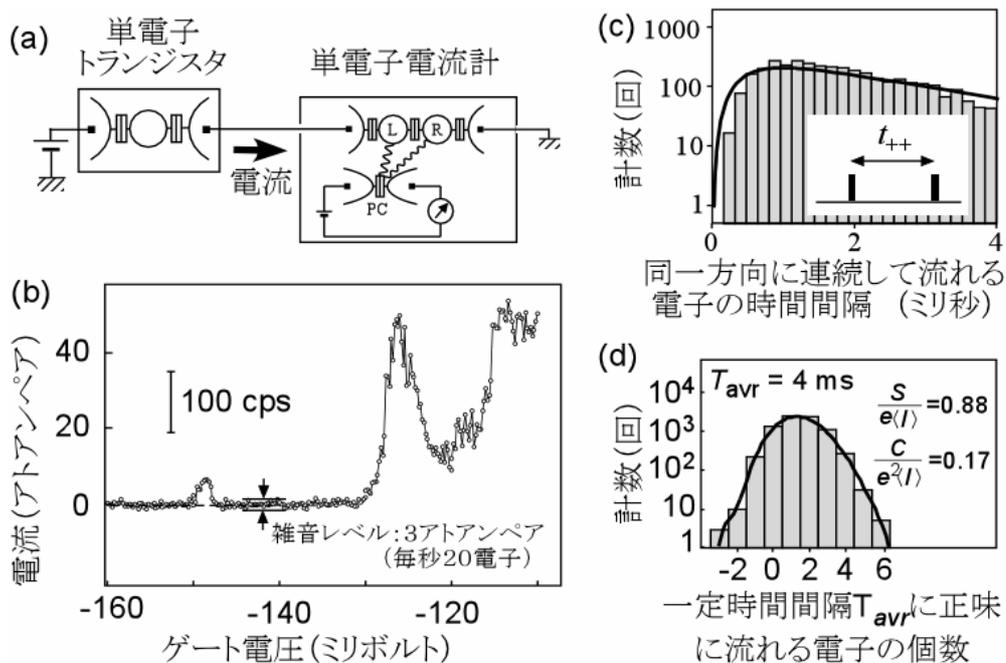


図 単電子計数実験。(a) 単電子電流計(量子ドット L と R およびポイント接合 PC より構成される)と単電子トランジスタとの接続例。(b) 測定された単一電子トンネル電流。(c) 単電子電流に現れる計数統計(アンチバンチング相関)。(d) 単位時間に流れる電子数(電流)のヒストグラム(2次の雑音 S と3次の雑音 C が計測される)

半導体ヘテロ構造の実空間状態密度分布解析

鈴木恭一¹ 蟹澤 聖¹ Simon Perraud^{1,2} Camille Janer^{1,3} 高品 圭¹ 藤澤利正¹
平山祥郎^{1,4}

¹量子電子物性研究部 ²CNRS ³ESPCI ⁴東北大学

高度の微細化、集積化に伴い、半導体デバイスでは、内部の量子力学的効果がデバイス全体の特性を支配するようになってきている。デバイスの正確な動作の実現や極微細領域の局所的な物性探索のためにも、ナノスケールの波動関数解析が望まれる。走査トンネル顕微鏡を用いた走査トンネル分光(STS)は、波動関数解析の有力な手法の一つで、試料-探針電圧に対するトンネル電流特性を調べることで、局所状態密度(波動関数の二乗に対応)をエネルギーの関数として知ることができ、さらに、探針を走査することで、状態密度の空間分布が得られる。

我々は、半導体ヘテロ構造劈開面についてSTS測定を行うことで(図1)、量子井戸に形成された量子化サブバンド(図2)[1]、単一ポテンシャル障壁による電子波の干渉(図3)[2]、二重量子井戸における波動関数結合(図3)[3]の観測に成功した。本手法は、ヘテロ構造一般に適用可能で、実際のデバイスにおける波動関数の実空間解析への応用が期待される。

- [1] K. Suzuki, et al., Phys. Rev. Lett. **98** (2007) 136802.
[2] K. Suzuki, et al., Jpn. J. Appl. Phys. **46** (2007) 2618.
[3] K. Suzuki, et al., J. Cryst. Growth **301-302** (2007) 97.

図1 清浄表面を得るために、試料は超高真空中($<2 \times 10^{-10}$ Torr)で劈開され、低温(4.8 K)走査トンネル顕微鏡へ搬送される

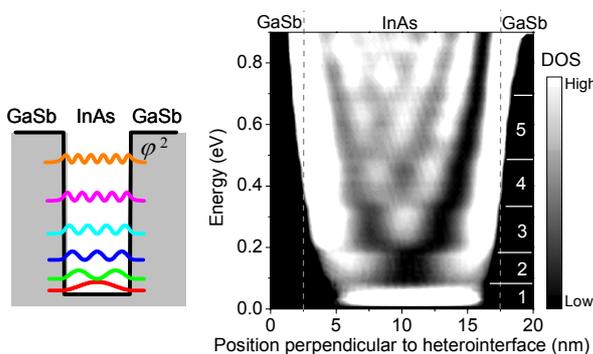
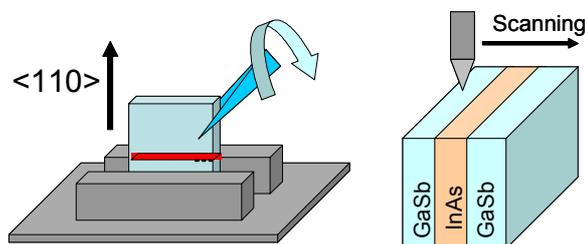


図2 InAs/GaSb 量子井戸のエネルギーに対する状態密度分布(DOS)。量子化した各エネルギーサブバンドに対応する DOS の定在波が明瞭に観測される

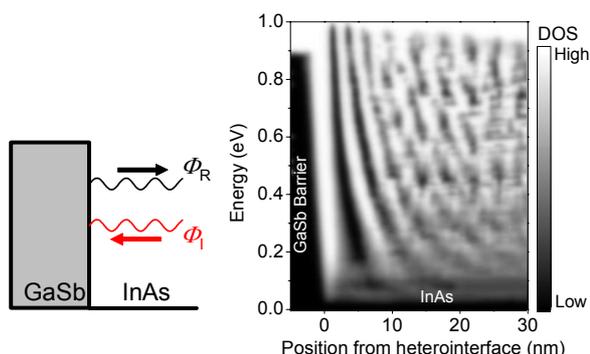


図3 InAs/GaSb 単一ヘテロ界面付近の状態密度分布(DOS)。GaSb 障壁へ入射する電子波と反射される電子波の干渉パターンが定在波として観測される

シリコン薄膜の量子伝導

高品 圭 小野行徳 藤原 聡 平山祥郎* 藤澤利正
量子電子物性研究部

現在、集積回路に幅広く用いられている MOSFET はシリコン(100)面上に形成された二次元電子系をベースにしている。(100)面の場合、伝導電子のエネルギーバンド分散において伝導体の底として電子が占有することができる等価な「谷」が2つ存在し、電子はどちらかの谷に等しい確率で存在する。強磁場と超低温を組み合わせた特殊な環境では2つの谷の間にエネルギー的な分離が生ずることが知られているが、そのエネルギーは通常1meV 程度と小さい。

我々は、SOI(Silicon on insulator)基板の一種である SIMOX(Separation by implanted oxygen)基板上に作成された薄膜 Si-MOSFET において、非常に大きな(10 倍以上)谷分離が起きることを見出した。さらに、結果的に生じるサブバンド構造がコンダクタンスにどのような影響を及ぼすかについて調べることによって、この谷分離が磁場を加えなくても明瞭に観測されることを示した (図)[1,2]。これらの結果は、シリコン薄膜構造では二次元電子系の面内運動、スピンの自由度に加えて、第三の自由度「谷自由度」の利用が可能であることを示している。

[1] K. Takashina, A. Fujiwara, S. Horiguchi, Y. Takahashi, and Y. Hirayama, Phys. Rev. B **69** (2004) 161304(R).

[2] K. Takashina, Y. Ono, A. Fujiwara, Y. Takahashi, and Y. Hirayama, Phys. Rev. Lett. **96** (2006) 236801.

*現所属:東北大学

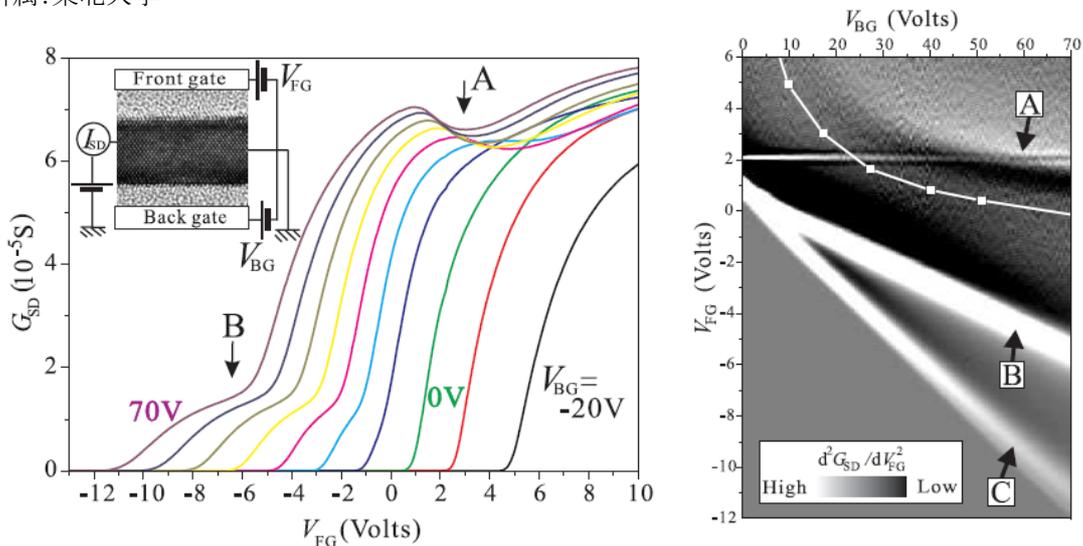


図 (左): SOI MOSFET のソースドレインコンダクタンス G_{SD} をフロントゲート電圧 V_{FG} の関数として示す。新しいサブバンドの出現により、散乱が増大し抵抗が大きくなる現象が明確に見られる。この実験では空間的なサブバンド(A)と谷分離によるサブバンド(B)の影響が両方現われる。図(右): G_{SD} の二回微分のグレースケールプロット。谷と空間的サブバンドがどのようにバックゲート電圧 V_{BG} に依存するかが分かる。A: 空間的な閉じ込めサブバンド、B: 谷分離によるサブバンド、C: コンダクタンスの立ち上がりによる構造。□は空間的サブバンド端が占有され始めるゲート電圧の計算値を表す

超伝導磁束量子ビットのデコヒーレンス

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

量子ビットで量子演算を行うためにはコヒーレンスが保たれた状態で一連の量子ゲート操作を行う必要がある。しかしながら、量子ビットは環境との相互作用があるためにそのコヒーレンスが時間とともに失われるデコヒーレンスが生じる。このデコヒーレンスの起源を明らかにすることは量子ビットのコヒーレンス時間を延ばす上でも重要な課題となっている。

超伝導磁束量子ビット(図1)は数的拡張性に優れる固体素子量子ビットの中でも有望な量子ビットの一つである。我々はこの超伝導磁束量子ビットのデコヒーレンスについて調べるために位相緩和時間(T_2)とエネルギー緩和時間(T_1)の磁場依存性を測定した [1]。緩和は環境との相互作用に伴うエネルギーの揺らぎによって引き起こされるため、その磁場依存性の測定からどのような磁場揺らぎがデコヒーレンスへ寄与しているかを知ることができる。

図2は縮退点($\Delta\Phi_{qb} = 0$)付近で測定した T_1 および T_2 を磁束量子(Φ_0)単位の磁場で表示したものである。 T_2 の値は縮退点に近づくにつれて長くなり縮退点で 250 ns に達した。一方、 T_1 は縮退点近傍でほぼ一様($T_1 \sim 140$ ns)である。一般に T_2 には純粋位相緩和(Γ_ϕ)の他に T_1 の寄与があり $1/T_2 = \Gamma_\phi + 1/(2T_1)$ の関係がある。得られた T_1 、 T_2 の値から縮退点でのコヒーレンス時間は主にエネルギー緩和によって抑えられていることが分かった。また純粋位相緩和の磁場依存性は $1/f$ 型の周波数分布を持つ磁場揺らぎによって説明できることが分かった。

これらのことから今後エネルギー緩和を引き起こす高周波揺らぎを抑え込むことによって超伝導磁束量子ビットのコヒーレンス時間の改善が期待されるので今後行っていく予定である。

[1] K. Kakuyanagi, et al., Phys. Rev. Lett. **98** (2007) 047004.

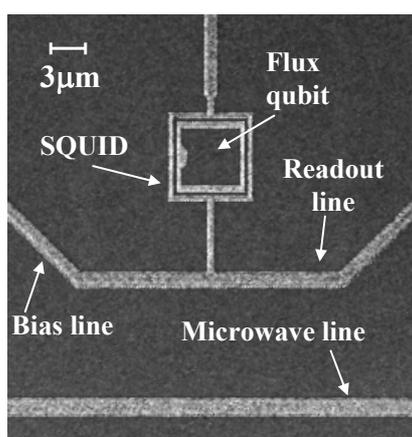


図1 超伝導磁束量子ビットの試料写真

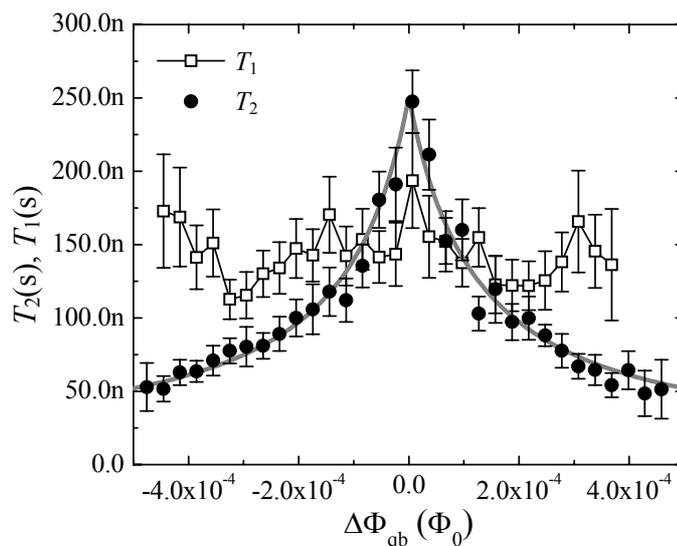


図2 T_1 、 T_2 の磁場依存性

スピン軌道相互作用によるアハロノフ・キャッシャー効果

Tobias Bergsten^{1,2} 小林俊之^{1,2} 関根佳明^{1,2} 新田淳作^{1,2,3}

¹量子電子物性研究部 ²CREST-JST ³東北大学

電子回路における電子のスピンを制御するスピントロニクスは、Datta らによって提案されたスピンFET[1]のような新機能デバイスを実現することができると期待されている。スピンは、電子の自転運動に例えられるように磁気的な性質を有するため、一般的にスピンを操作するには磁場が用いられる。一方で、スピンはスピン軌道相互作用による有効磁場を用いても操作することができる。これまでの研究から、半導体ヘテロ構造におけるスピン軌道相互作用はゲート電圧により制御可能であることが示されている[2]。そこで本研究では、ゲート電圧によりスピンの歳差運動を制御することで、電子波の位相を変化させる新しい干渉実験を行った[3]。これは、磁気モーメントを有する粒子の電場による干渉である、アハロノフ・キャッシャー(AC)効果である。

本研究で用いたデバイスは、ゲート電圧によりスピン軌道相互作用を 3 peVm 以上変化させることができる InAlAs/InGaAs/InP 量子井戸をリング配列構造に加工して作製した(図1)。ゲート電極は膜厚 50 nm の SiO₂ ゲート絶縁膜とともにリング配列上に形成した。

リング構造を右回りと左回りに伝播する電子波の位相差は、磁場(AB 効果、AAS 効果)および電場(AC 効果)により制御することができ、抵抗値の振動として観測される(図2)。電子はスピンの1/2のフェルミ粒子であるため、スピンの1回転(2 π)際差運動することで電子波の位相は π だけ変化する。そのためゲート電圧による抵抗値振動の周期は、リングを互いに逆方向に伝播した部分波が元の位置に戻ってきたときにスピンの回転角差が4 π 変化することに対応する。今回の干渉実験では、ゲート電圧によりスピン回転角差を12 π 以上にわたって精密に制御可能であることを示した。

このようなスピン軌道相互作用によるスピン制御はスピンFETの要素技術であり、また将来的にはスピン量子ビットの制御手法として量子情報技術への応用も期待される。

[1] S. Datta and B. Das, Appl. Phys. Lett. **56** (1990) 665.

[2] J. Nitta, T. Akazaki, H. Takayanagi, and T. Enoki, Phys. Rev. Lett. **76** (1997) 1335.

[3] T. Bergsten, T. Kobayashi, Y. Sekine, and J. Nitta, Phys. Rev. Lett. **97** (2006) 196803.

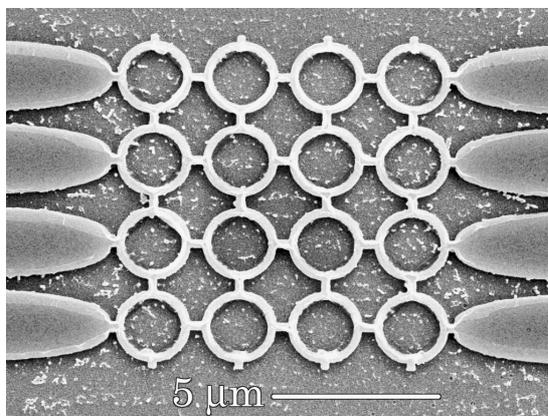


図1 InAlAs/InGaAs/InP 量子井戸を加工して作製したリング配列構造

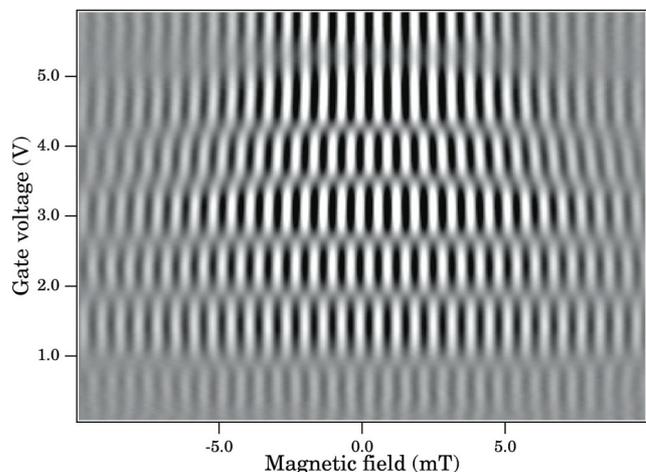


図2 AC効果(縦方向)およびAAS効果(横方向)による抵抗振動

磁性細線中に捕捉された磁壁の 半導体・強磁性体ハイブリット構造を用いた検出

関根佳明¹ 赤崎達志¹ 新田淳作^{2,3}

¹量子電子物性研究部 ²東北大学大学院工学研究科 ³CREST-JST

磁性細線中に捕捉された磁壁を半導体・磁性体ハイブリット構造の局所ホール効果を用いた素子により検出した。局所ホール効果は磁性体からの漏れ磁場を検出し、磁壁内部構造を調べられるため、head-to-head か tail-to-tail の磁壁かを区別することができた[1]。

磁性体が磁壁の運動を利用した論理回路や記憶素子が提案されるなど、磁壁の位置を検出し、その構造を調べることは重要である。本研究の半導体・磁性体ハイブリット構造を用いた局所ホール効果による磁壁の観測手法は、磁性体の形状に依存しない、温度変化が容易、信号が mV 程度と大きいなどの利点がある。試料には二次元電子ガスとして InGaAs、磁性細線として NiFe を用いた。図1(a)に試料の電子顕微鏡写真、(b)に模式断面図、(c)、(d)に tail-to-tail、head-to-head の磁壁がくびれに補足された試料の模式平面図を示す。NiFe 細線の片端を直角、他端を先細、真ん中にくびれを、そしてそれぞれの直下にホール素子を作製した。磁場は二次元電子ガスに平行かつ細線方向に印加した。磁壁はそのエネルギーを最低にするよう直角の端で生成されるため、磁場の印加方向により、head-to-head か tail-to-tail の磁壁を生成できる。生成された磁壁は先細の他端に向かって移動するが、くびれで捕捉される。磁壁生成や捕捉により、磁性細線からの漏れ磁場は変化するので、直下のホール素子により検出できる。図 2 に三つのホール素子のホール抵抗の磁場依存性を示す。ここで、 $\rho_{yx}1, 2, 3$ は直角、くびれ、先細のホール抵抗である。磁場 B を増加させると、22 mT で $\rho_{yx}1$ が、26 mT で $\rho_{yx}2$ が急激に変化する。そして 22 と 26 mT の間で、 $\rho_{yx}2$ が鋭い山を示す。これら $\rho_{yx}1, 2, 3$ の変化は、それぞれ磁場の生成、補足、消滅に対応している。磁場を減少させると同様のことが起こるが、 $\rho_{yx}2$ は鋭い谷を示し、tail-to-tail か head-to-head の磁壁かを区別することができた。この結果は、本素子構造を用いた磁壁の観測手法が、磁壁の運動特性を調べる有効な手法であることを示しており、磁壁デバイスの作製につながる成果である。

[1] Y. Sekine, et al., AIP Conference Proceedings **893** (2007) 1291.

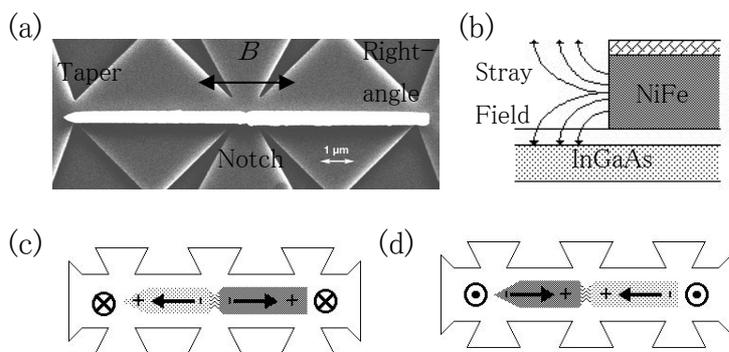


図1 (a) 試料電子顕微鏡像。(b) 試料断面図。
(c) tail-to-tail 磁壁、(d) head-to-head 磁壁の試料平面図

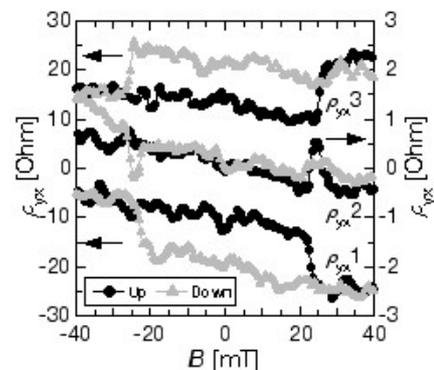


図2 ホール抵抗の磁場依存性。磁場方向によりくびれ($\rho_{yx}2$)に補足される磁壁構造が異なる

磁束量子ビット・ナノメカニカル共振器の磁場による可変結合の提案

Y. D. Wang 岡本 創 山口浩司 仙場浩一
量子電子物性研究部

超伝導永久電流量子ビットとしても知られる磁束量子ビットは、複数個(通常は3個)のジョセフソン接合を周上に配したマイクロメートル寸法の超伝導ループである。この磁束量子ビットは、量子情報処理を実現するための最も有望な候補の一つと考えられている。マイクロエレクトロメカニカル系(MEMS)よりも小さいナノエレクトロメカニカル系(NEMS)は、分子レベルでの微小変位や非常に小さな力の計測を可能にする技術を提供すると期待されている。一方、十分に高い振動数のナノメカニカル共振器(NAMR)は、低温では量子化された調和振動子として振舞う。この NAMR と相互作用する磁束量子ビット系は、双方の寸法やエネルギースケールが同程度であることや散逸の効果を十分小さく設計できることなど、固体素子系における全く新しいタイプの共振器量子電気力学を実現できる可能性があることから注目されていた。この考え方に立てば、将来 NAMR は複数個の磁束量子ビット操作の量子データベースの役割をも担える可能性もあると考えられている。NAMRと磁束量子ビットの相互作用のメカニズムを応用すれば、磁束量子ビットを NAMR の量子状態の生成や検出に使うことも可能となる。実験的には、磁束量子ビットのコヒーレンス特性は、急速に進歩しているにも関わらず、これまでに提案されてきたのは、NAMR とジョセフソン電荷量子ビットの系に関するもののみであった。

このような状況で、我々は、NAMR の機械的振動モードと超伝導(ジョセフソン/位相滑り)磁束量子ビットを流れる永久電流との能動的な可変結合機構を提案した[1]。図1に示すように、提案した機構を用いれば、相互作用は外部から印加された古典的磁場によって、その場で制御することが可能となる。我々が行った数値的評価から、この系は、強結合極限をも実現可能な固体素子系における新たな共振器量子電気力学系となることが判明した。提案した機構を用いて、新たな系での量子光学実験を実証することや、量子情報処理へ向けた量子ビットのコヒーレント操作が可能となる。さらに、この相互作用機構は超伝導ジョセフソン接合系が二準位系でなく、より一般に多準位量子系である場合にも適用可能である。

[1] F. Xue, Y. D. Wang, C. P. Sun, H. Okamoto, H. Yamaguchi, and K. Semba, *New J. Phys.* **9** (2007) 35.

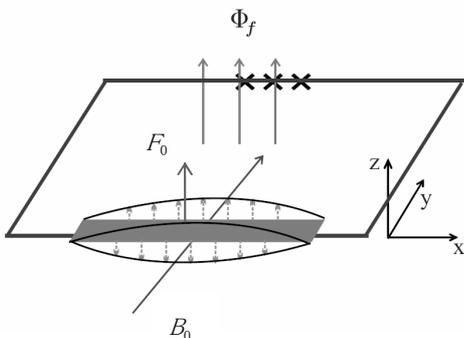


図1 ナノメカニカル共振器(NAMR:灰色の帯状部分)は3個のジョセフソン接合(×印)とともに、磁束量子ビットのループを形成する。このループを流れる永久電流と y 方向に印加された外部磁場 B_0 の働きで、NAMR 部分にはロレンツ力 F_0 が働く。このようにして、NAMR の z 方向の振動と磁束量子ビットを流れる永久電流の間に外部磁場で調節可能な結合が生じる

10 GHz クロックの量子暗号実験

武居弘樹¹ Eleni Diamanti² Carsten Langrock² Martin M. Fejer² 山本喜久²¹量子光物性研究部 ²スタンフォード大学

量子暗号システムの実用化のためには、鍵生成率の高速化が不可欠である。今回、周期分極反転ニオブ酸リチウム(PPLN)導波路中の周波数上方変換に基づく単一光子検出器(Up-conversion detector : UCD) [1]の低ジッタ化を行い、該検出器を用いて 10 GHz のクロック周波数における超高速量子暗号実験を行った[2]。

量子暗号プロトコルとして、差動位相シフト量子鍵配送プロトコル[3]を用いた。強制モード同期ファイバレーザから出力された中心波長 1551 nm、繰返し周波数 10 GHz、半値幅 10 ps のパルス列の各パルスの位相を 0 または π でランダムに変調した後、光減衰器によりパルス当たりの平均光子数を 0.2 に設定し、伝送用光ファイバに入力する。ファイバから出力されたパルス列は PLC マツハツェンダ干渉計に入力される。干渉計の 2 出力ポートから出力された光子は、それぞれ UCD に入力される。UCD においては、信号光子は波長 1319 nm のポンプ光と合波され、PPLN 導波路に入力される。導波路中の和周波発生過程により、信号光子は波長 700 nm 近辺の光子に波長変換される。光フィルタ系により残余ポンプ光などの雑音を抑圧した後、波長変換後の光子を低ジッタ Si APD により受信する。本検出器により、高い時間分解能で高速繰返しの光子パルス列を受信することが可能となる。

図 1 に幅 3 ps のパルスを入力した場合の UCD の検出信号ヒストグラムを示す。検出信号ジッタは、非常に小さな半値幅(約 30 ps)を持つ一方で、大きなテイルを持つことが観測された。UCD の量子効率を 0.3%、暗計数率を 750 cps (2 個の和)、タイムウィンドウ幅を 10 ps に設定し、10, 25, 75, 100 km のファイバを用いてシフト鍵生成実験を行った。100 km におけるシフト鍵生成率は 3.7 kbit/s であった。各ファイバ長における誤り率を図 2 の ■ で示す。ジッタのテイル特性のため、誤り率は 10%程度に制限された。一方、伝送距離を変化させても誤り率の変動は非常に小さい。これは、光源の短パルス化と、タイムウィンドウの狭幅化により、スロット当たりの信号と暗計数の比が向上したためである。暗計数に起因する誤り率の予測値(図 2 ●)は、100 km の伝送後も 1%未満に抑圧されている。よって、UCD ジッタのテイル特性の改善により、誤り特性の飛躍的改善が今後期待できる。

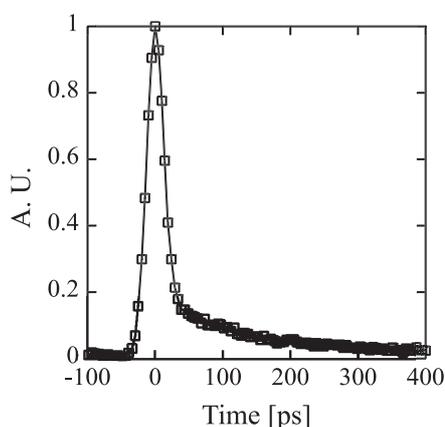
[1] C. Langrock, et al., Opt. Lett. **30** (2005) 1725.[2] H. Takesue, et al., Opt. Express **14** (2006) 9522.[3] K. Inoue, E. Waks, and Y. Yamamoto, Phys. Rev. Lett. **89** (2002) 037902.

図1 検出信号のヒストグラム

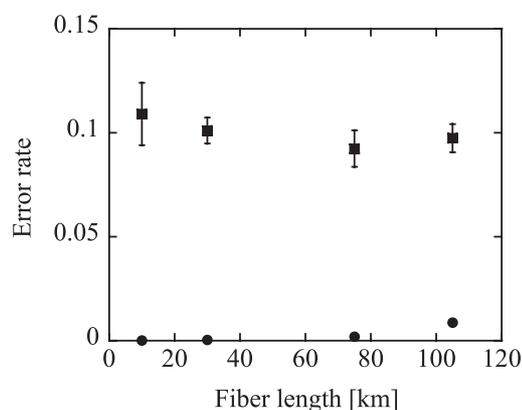


図2 ファイバ伝送距離と誤り率

もつれ光子対を用いた差動位相量子鍵配送

本庄利守¹ 武居弘樹¹ 井上 恭²

¹量子光物性研究部 ²大阪大学/NTT リサーチプロフェッサー

量子力学の原理に基づいて絶対安全な通信を提供する量子鍵配送の研究が盛んに行われている。我々は、コヒーレントな光パルス列の位相差にビット情報を載せる方式である差動位相シフト量子鍵配送(DPS-QKD)の研究を势力的に進めてきた。今回、次のステップとして、高度な量子鍵配送方式であるもつれ光子対を用いた量子鍵配送の研究に着手した [1]。

図1に実験構成を示す。波長 1551nm、繰返し 1GHz の光パルス列をポンプ光として分散シフトファイバに入れ、時間位置もつれ光パルス列を発生させた[2]。ラマン散乱によるノイズ光子の発生を抑えるために、分散シフトファイバは液体窒素で冷却している。シグナルとアイドラを分波した後、それぞれをアリスとボブに送付した。アリス側とボブ側では、それぞれ各パルスをランダムに 0 もしくは $\pi/2$ で位相変調した後、PLC Mach-Zehnder 干渉計を通過させた。双方の干渉計の位相差の和が 0 となるように調整すると、アリス、ボブの光子検出イベントの間には、次のような相関関係が現れる。

$$|\psi_f\rangle = \frac{1}{2\sqrt{2}} \{ (e^{i(\theta_a+\theta_b)} + 1) |A1\rangle |B1\rangle - (e^{i(\theta_a+\theta_b)} + 1) |A2\rangle |B2\rangle - i(e^{i(\theta_a+\theta_b)} - 1) |A1\rangle |B2\rangle - i(e^{i(\theta_a+\theta_b)} - 1) |A2\rangle |B1\rangle \}$$

θ_a と θ_b はアリスとボブの施した位相変調、 $|wn\rangle$ はアリス(A)、ボブ(B)が検出器 1 もしくは 2 で光子を検出する状態を表す。上述の相関関係を用いて、光子伝送後、古典チャネルを介してアリスとボブが光子を検出した時刻、施した位相変調を公開することにより、暗号鍵を生成する。

上述のセットアップを用いてシフト鍵の生成を行い、QBER 8.6%、シフト鍵生成レート 0.3bps を得た[3]。本成果は、本量子鍵配送方式の実現性を示すとともに、もつれ光子対を用いた量子通信の実現に向けた重要な第一歩を示す。

- [1] K. Inoue, Phys. Rev. A **71** (2005) 032301.
- [2] H. Takesue and K. Inoue, Opt. Express **13** (2005) 7832.
- [3] T. Honjo, H. Takesue, and K. Inoue, Opt. Lett. **32** (2007) 1165.

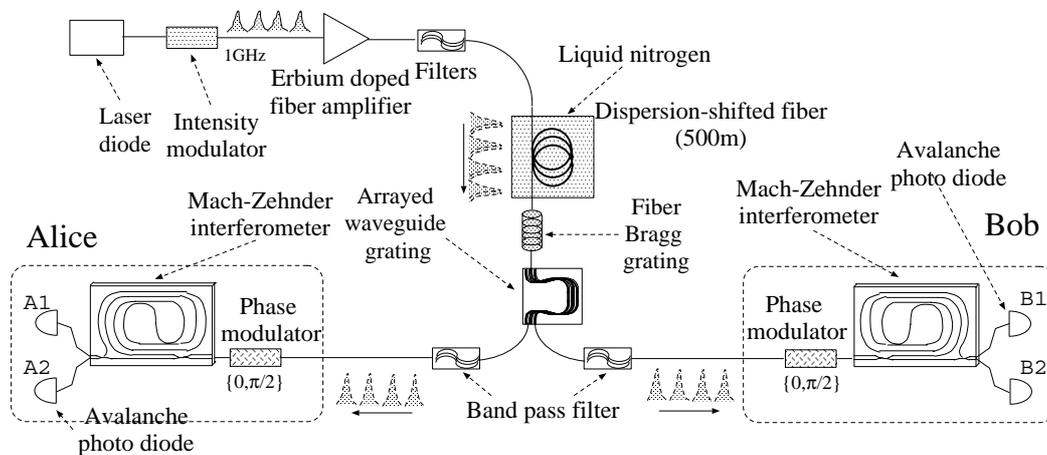


図1 セットアップ

二体エンタングルメントから見た多体スピンの量子相転移

清水 薫 川口 晃*
量子光物性研究部

相互作用する多数のスピンを一次元状に配列した系の量子力学的な振る舞いは、旧来より物性物理の基本模型として、また最近では一方向量子計算スキームの土台として大きな興味を持たれている。とりわけスピン間相互作用 J や外部磁場 h 等のパラメータの強弱がスピンを支配する不確定性原理と相俟って系の静的状態や応答特性をどのように変化させるのか、その物理的な機構を見通しの良い形で理解することは重要である。

今回我々は、近年の量子情報研究の知見である量子エンタングルメント(もつれあい)の定量化の方法を一次元量子スピン系の解析に導入することにより、系自体は多数個のスピンから構成されているにもかかわらず、系の量子状態は隣接するスピンについての四通りの異なるスピン相関の寄与の大小と、それらの間の位相差という少数個のパラメータによって、系統的かつ定量的に把握できることを見出した。具体的には、一次元の反強磁性イジング模型 $H = J \sum_i S_i^z S_{i+1}^z + h \sum_i S_i^z$ を取り上げ、 S^z についての無秩序相(横磁場 $h \rightarrow$ 大での常磁性相)から秩序相(相互作用 $J \rightarrow$ 大での反強磁性相)への量子相転移に伴う量子エンタングルメントの振る舞いを調べ[†]、その相転移点近傍における臨界的な挙動から、前述の四通りのスピン相関とその位相が、相転移を誘起し系を特徴づけるスピン量子揺らぎの定量的な記述に外ならないことを明らかにした[1]。これは以前には一般的な形では計算できなかった物理量である。

本研究の手法を一般化することにより、一見複雑に見える一次元や二次元のスピン系の量子力学的な挙動の本質を量子エンタングルメントという新たな視点から理解し、その操作や制御に役立てることができる。

[1] K. Shimizu and A. Kawaguchi, Phys. Lett. A **355** (2006) 176.

*現所属: Toyota Macs. Co. Ltd.

[†] ニスピンに還元した密度行列 ρ を古典相関部分 $\Lambda \rho_c$ と量子相関部分 $(1-\Lambda)\rho_q$ とに分解する(図1)。その際重み $(1-\Lambda)$ が最小化されるように ρ_c の四つの Bell 状態への分解方法(図2)を数値的に探索する。エンタングルメントの指標としてはコンカレンス $C(\rho)$ を採用。

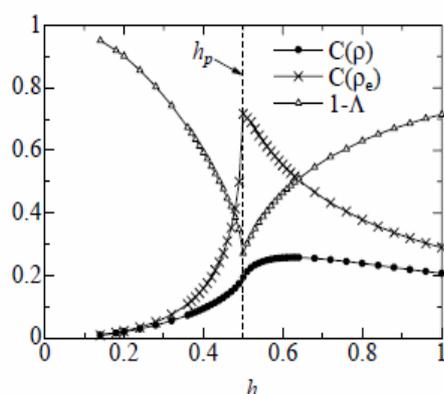


図1 コンカレンス $C(\rho)$ の磁場 h 依存性 ($h=0.5$: 相転移点)

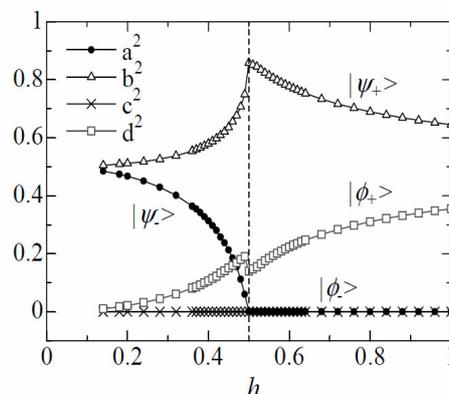


図2 四つの Bell 状態 (スピン相関) への分解

(Al,Ga)As ナノワイヤ中に形成された GaAs 量子ドットの光学特性

眞田治樹 後藤秀樹 館野功太 寒川哲臣 中野秀俊
量子光物性研究部

半導体ナノワイヤ構造はナノスケールのフォトニクス・エレクトロニクスデバイスへの応用上、魅力的な構造として注目されている。VLS (Vapor-Liquid-Solid) 法はナノワイヤを形成する手法の一つであり、幅広い半導体材料に対して用いることができる。最近では、VLS 法を用いると、単純な一次元構造の作製だけでなく、従来のヘテロ構造技術を導入することによりバンド構造エンジニアリングの面でも柔軟性を発揮することが分かってきている。今回我々は、VLS 法と通常の MOVPE 法を組み合わせた手法により GaAs/(Al,Ga)As ヘテロ構造を含むナノワイヤを作製し、量子ドット特有の励起子・励起子分子発光の観測に成功した[1]。

試料は、始めに VLS 法によるナノワイヤの成長中に GaAs/(Al,Ga)As ヘテロ接合を導入し、その後、表面再結合の影響を抑制するために、通常の MOVPE 法により (Al,Ga)As キャップ層でナノワイヤ全体を覆った[2]。図1は GaAs/(Al,Ga)As 系の代わりに GaAs/AlAs 系を用いた同様の構造の断面 SEM 像を示す。ナノワイヤの中に複数の量子ドット状の構造が形成されている様子が分かる。

図2は、フォトルミネッセンス(PL)スペクトルの励起光強度(P_{exc})依存性を示す。 $P_{exc} < 100$ W/cm²の領域において、A, B で示されるピークの積分強度がそれぞれ P_{exc} および P_{exc}^2 に対して線形的に増加することから、励起子、励起子分子の発光を示しているものと考えられる。さらに P_{exc} の増加に伴う励起子分子発光(ピークB)のレッドシフトや線幅増大については、VLS 法で作製した InAs/GaAs 系や Ga(As,P)/GaP 系の量子ドットの報告と類似しており、同手法による量子ドットに特有の性質であると考えられる。その他にも PL の強い偏光依存性も観測しており、形成されたナノ構造が大きな非対称性を有していることが予想される。これらのメカニズムを解明するためには、今後量子ドットの形状に関するさらなる考察が必要であるが、今回用いた方法が、GaAs/(Al,Ga)As 系のナノ構造の位置や光学特性を制御する有用な方法であることが明らかになった。

[1] H. Sanada, H. Gotoh, K. Tateno, and H. Nakano, Jpn. J. Appl. Phys. **46** (2007) 2578.

[2] K. Tateno, H. Gotoh, and Y. Watanabe, Appl. Phys. Lett. **85** (2004) 1808.

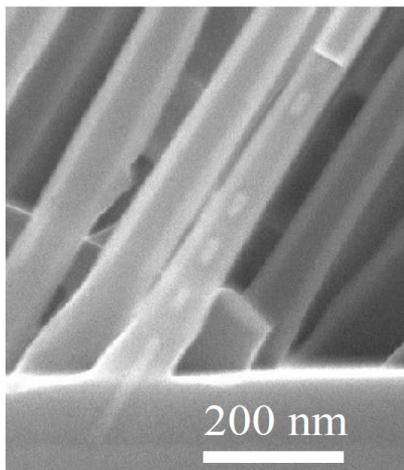


図1 GaAs/AlAs 系を用いたナノワイヤ中の量子ドット構造の断面 SEM 像

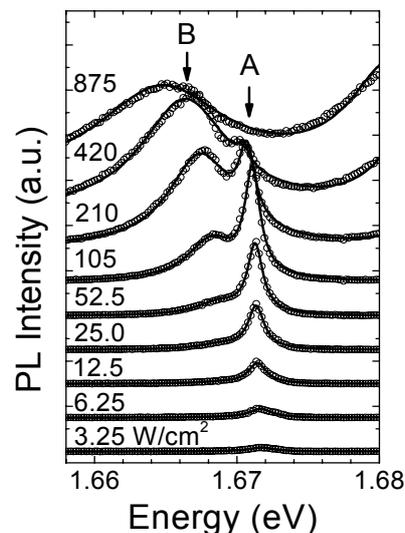


図2 温度 4 K における PL スペクトルの励起光強度依存性

量子ドットフォトニック結晶ナノ共振器レーザ

俵 毅彦¹ 鎌田英彦¹ Yong-Hang Zhang² 田辺孝純¹ 寒川哲臣¹

¹量子光物性研究部 ²アリゾナ州立大学

フォトニック結晶(PhC)ナノ共振器は非常に高い共振Q値と波長サイズ程度の小さなモード体積を有する。これは共振器内部の発光媒質の自然放出確率を飛躍的に増大させ、高効率かつ低消費パワーの光源を実現させる。このとき発光媒質に半導体量子ドット(QD)を用いることでキャリアのフォノン散乱や表面再結合を抑制でき、一層の高効率化につながる。このようなQD-PhCナノ共振器を用いたレーザは光集積回路の内部微小光源としての応用が期待されている。

QD-PhCナノ共振器には主にGaAsを中心とするIII-V族半導体ヘテロ構造が用いられている。しかしながら多くの場合において共振Q値は数千程度で、ナノ共振器の効果を得るには不十分であった。この原因として、組成の異なる複数の層を均一にエッチングしなければならない、高いQ値を得るための加工精度が十分ではなかったこと、また半導体面内方向へ光が共振する際ヘテロ構造各層での光吸収が大きな損失となることが考えられる。

今回我々は電子線描画レジストをドライエッチングマスクとして用い、ヘテロ各層との高選択比エッチング条件を見出すことで高い加工精度を実現した[1]。さらに量子ドット発光のヘテロ各層での再吸収効果を最小限に抑制する構造を提案し、10,000を超える共振Q値を達成した(図1)[2]。このような高Q値ナノ共振器における発光積分強度の励起光強度依存性およびその発光再結合寿命測定から、自然放出のレーザモードへの結合係数(β)が0.9程度の非常に高い効率でレーザ発振していることが観測された(図2)[3]。

本研究成果は高効率微小光源の実現に向けた構造設計・作製指針を与える重要なものであると考える。

[1] T. Tawara, et al., Jpn. J. Appl. Phys. Phys. **45** (2006) L917.

[2] T. Tawara, et al., IPRM2007, Matsue, Japan, May 2007.

[3] T. Tawara, et al., CLEO/QELS2007, Baltimore, USA, May 2007.

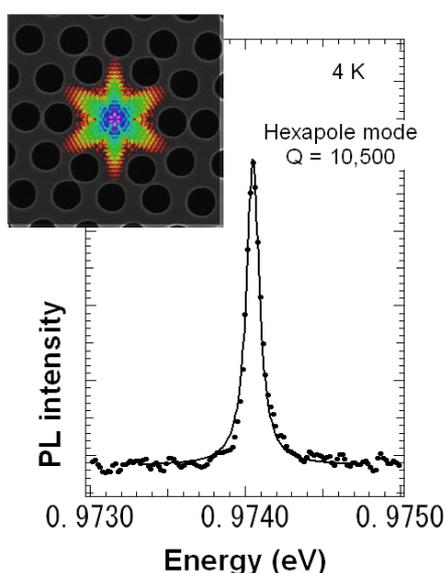


図1 共振モードからの量子ドット発光

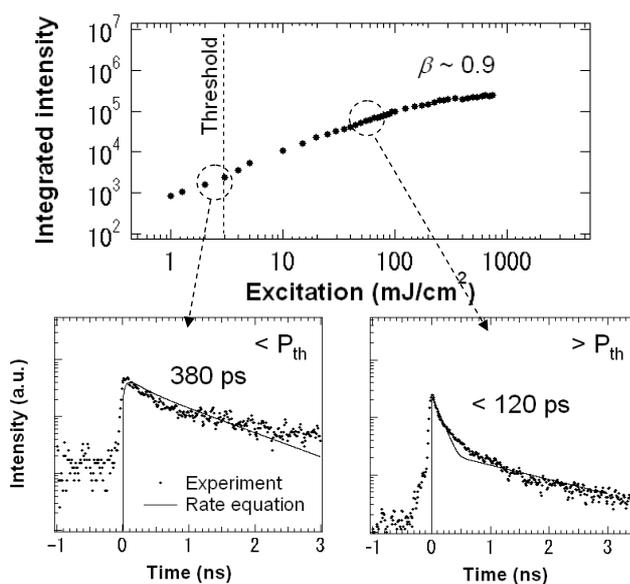


図2 レーザ発振特性

フェムト秒レーザーアブレーションプルームの時空間分解軟 X 線吸収分光

小栗克弥 岡野泰彬 西川 正 中野秀俊
量子光物性研究部

近年のレーザー励起X線源やシンクロトロン放射光源における超短パルスX線発生技術の進展に伴い、これらの光源を応用した時間分解 X 線計測技術が注目されている。この技術により、これまでの X 線分光では計測不可能であった非平衡系の結晶構造、原子間距離や配位状態、電子状態等の超高速ダイナミクスの計測が可能となり、従来の X 線科学と超高速光物理が融合した「超高速 X 線科学」分野の発展が期待されている[1]。我々は、これまでに開発した時間分解軟 X 線吸収分光法を拡張し[2]、時間変化と空間変化を同時に計測可能な時間空間分解軟 X 線吸収分光システムの開発を行った[3]。本計測法を、新たなレーザープロセス手法として注目されているフェムト秒レーザーアブレーション過程に適用し、本計測法がアブレーションプルームのような固相から気相までの相転移や結合の解離などを伴い時間空間共に複雑に変化する系の計測に有効であることを実証した[4]。

本システムの特徴は、フェムト秒レーザープラズマ軟 X 線のピコ秒領域の短パルス性と、Kirkpatrick-Baez 型軟 X 線顕微鏡の高空間分解能性を組み合わせることにより、時間・空間分解能、軟 X 線光量等の特性を向上させた点にある。軟 X 線結像光学系と透過型回折格子により、一次元空間情報とスペクトル情報が同時に取得可能である(図 1)。図 2 は、尖頭強度約 1.5×10^{14} W/cm² のフェムト秒レーザーパルスを Al テープに照射して発生させた Al アブレーションプルームの軟 X 線吸光度画像の時間発展を示している。Al プルームによる特徴的な吸収が遅延時間とともにターゲット表面から遠方に広がり、吸収の大きさも時間とともに増加することが分かる。プルームの $L_{II,III}$ 吸収端に着目すると、固体 Al の場合と比べて短波長側にシフトしている他、明瞭な時間・空間依存性が見られた。このような吸収端のシフトは、プルームを構成する主な粒子の違いに起因し、短波長側にシフトするほど多価のイオンに対応すると考えられる。以上のように、本計測法はアブレーションプルームの初期過程計測に有効であることが実証できた。

[1] Bressler and Chergui, Chem. Rev. **104** (2004) 1781.

[2] Oguri, et al., Appl. Phys. Lett. **87** (2005) 011503.

[3] Okano, et al., Rev. Sci. Instrum. **77** (2006) 046105.

[4] Okano, et al., Appl. Phys. Lett. **89** (2006) 221502.

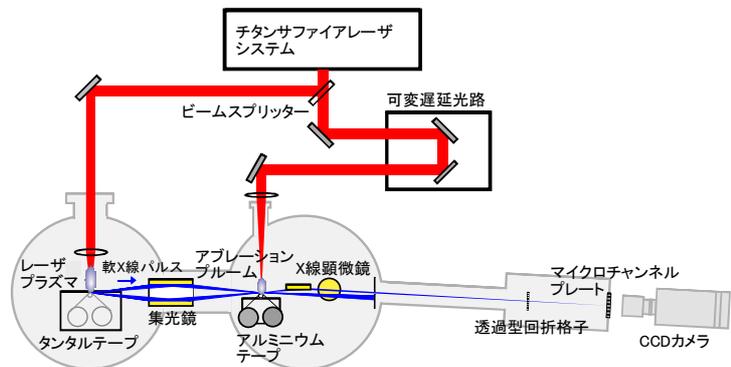


図 1 時空間分解軟 X 線吸収分光システム像

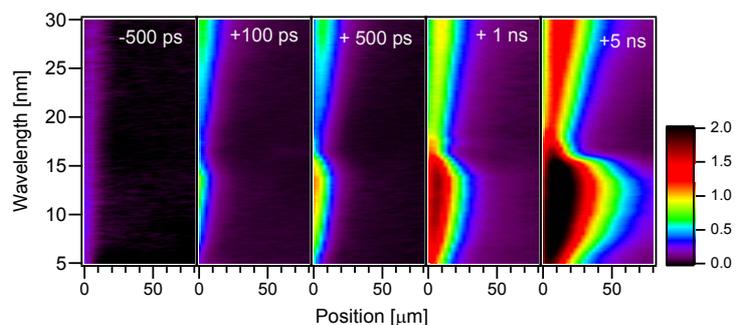


図 2 Al プルームの時間分解軟 X 線吸光度画像

フォトニック結晶微小光共振器の時間分解測定

田辺孝純 倉持栄一 新家昭彦 谷山秀昭 納富雅也
量子光物性研究部

高 Q 値フォトニック結晶微小光共振器は小さな入力光パワーで高い光子密度を実現することができるため、低エネルギーで動作する光スイッチ等への応用が期待されている[1]。線欠陥幅を局所的に変化させた構造を持つ図 1(a)の電子顕微鏡写真に示す幅変化型微小光共振器を用いると、極めて高い Q 値が得られることが分かっている[2]。点線で囲んでいる部分で線欠陥の幅にわずかに変化させており、その箇所にモードギャップ共振器が形成され光が局在化される。実際に共振器と共鳴する波長の光を入力導波路から入射させ、スラブ上面より光学顕微鏡にて像を観測すると図1(b)のように共振器部分に光が局在化していることが確認された。図 1(c)に示すのが波長可変光源を用いて測定した透過スペクトルであり、極めて狭い 1.3 pm の共鳴幅が得られた。この共鳴幅は Q 値 120 万に対応する。スペクトル幅測定の精度を向上させるために、抑圧搬送波単側波帯発生器を用いてレーザーの周波数を高精度に制御して透過スペクトルを測定した場合でも Q 値 120 万を確認できた[3]。

一方、高 Q 値共振器の光子寿命は長いため直接時間領域で Q 値計測を行うことが可能である。加えて、時間分解測定は共振器の動的な特性を調べるのに極めて有用な手法である。そこで我々は、リング・ダウン手法および時間相関単一光子計測法を組み合わせ、フォトニック結晶共振器の光蓄積特性を直接時間領域で評価した[4]。矩形波の光を共振器に入力して光を蓄積し、0 ns で入力光を突然切る。すると共振器に蓄積していた光が指数関数的に出力導波路側に漏れ出す。その漏れを時間分解計測し傾きを求めることで、光子寿命 1.01 ns を得た[図2(a)]。時間分解法による Q 値測定の再現性および精度を確認し[5]、光子寿命がスペクトル領域測定から得た Q 値 120 万と一致することを確認した。

また同様の共振器を用いてパルスの応答を測定したところ、パルス幅 1.9 ns の入力に対して 1.45 ns の遅延が得られることが確認された[図2(b)]。この値は誘電体中のスローライトとしては世界最小の群速度 5.8 km/s に対応し、光物質相互作用の増強や微小な光遅延回路研究への展開が期待できる結果である。

[1] T. Tanabe, et al., Appl. Phys. Lett. **90** (2007) 031115.

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

[3] T. Tanabe, et al., Electron. Lett. **43** (2007) 187.

[4] T. Tanabe, et al., Nat. Photonics **1** (2007) 49.

[5] T. Tanabe, et al., Opt. Express **15** (2007) 7816.

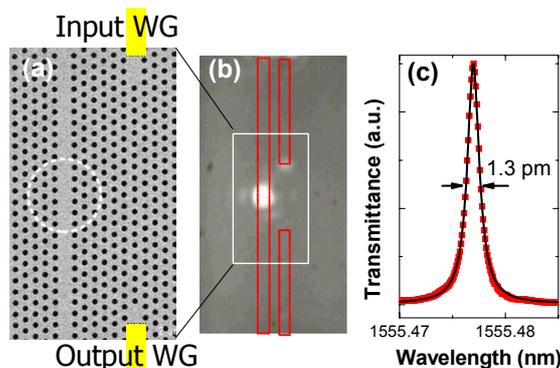


図1 (a) フォトニック結晶微小光共振器の電子顕微鏡像
(b) 光学顕微鏡像 (c) 透過スペクトル

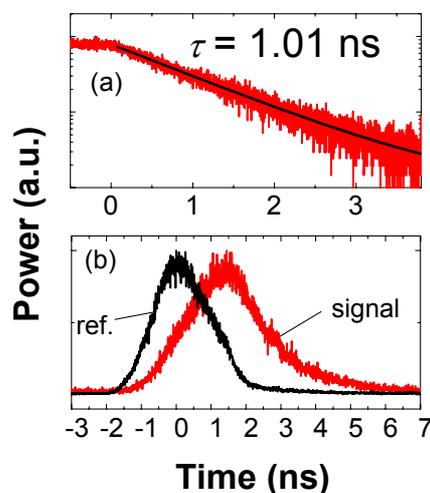


図2 (a) リングダウン計測結果
(b) 光パルスの遅延実験

フォトニック結晶超高Q結合共振器導波路

倉持栄一 田辺孝純 谷山秀昭 納富雅也
量子光物性研究部

結合共振器光導波路(Coupled Resonator Optical Waveguide : CROW)はスローライト光媒体の有力候補として注目されている[1]。極めて遅い群速度(v_g)と低導波路伝搬損失とを両立するためには光共振器の光閉込能力の指標であるQ値が極力高いことが望ましい。最近我々は、Siフォトニック結晶(PC)プラットフォーム上でそのような CROW を極めて小さなフットプリント(共振器一個当たりおよそ $3 \mu\text{m}$)にて実現できることを明らかにした。

図1(a)は電子線リソグラフィにより作製した PC-CROW の一例(共振器数: $N=3$)である。線欠陥幅変化型共振器[2]の採用により超高Q化(単一共振器で 1.2×10^6)を達成した[3]。CROW の透過スペクトルには鋭い共鳴ピークが明瞭に現れた(図1(b))。共鳴モードの分散関係は理論から予測される Cosine 関数と良く符合し、共振器間隔 L_{CC} が格子定数 420nm の7倍の場合、驚くべきことに $N=5 \sim 60$ までほぼ同一の帯域幅(極めて小さい結合係数: $\kappa \sim 7 \times 10^{-4}$)でフィッティングできた(図2)。そもそも PC-CROW として60個もの結合共振器を光が透過すること自体が初めての実現であり、超高Q共振器採用の効果と言える。PC-CROW の分散は L_{CC} により制御可能で(図3)、今回実現された最小の κ (3.3×10^{-4})は真空中の光速度のおよそ 5×10^{-3} 倍という極めて遅い導波路 v_g に対応する。

今回の結果は、フォトニック結晶ベースのCROWのスローライト光媒体への応用への可能性に希望を持てることを示したものである。

- [1] A. Yariv, et al., Opt. Lett. **24** (1999) 711.
 [2] E. Kuramochi, et al., Appl. Phys. Lett. **88** (2006) 041112.
 [3] T. Tanabe, et al., Opt. Express. **15** (2007) 7826.

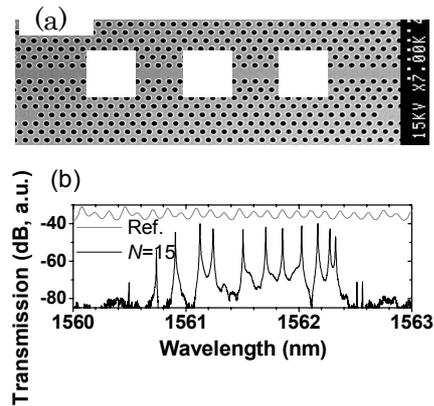


図1 (a) PC-CROW の電子顕微鏡像($N=3$, $L_{CC} = 9a$)。白枠内は共振器作成のためシフトした穴(構造は文献3参照)
 (b) PC-CROW の光透過スペクトル($N=15$, $L_{CC} = 7a$)

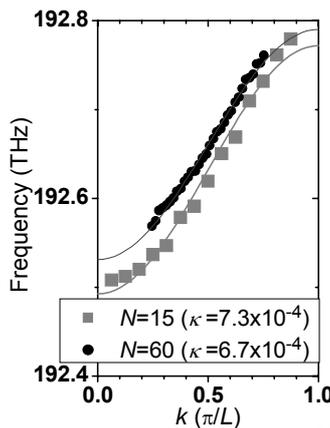


図2 PC-CROW の分散関係の比較($L_{CC} = 7a$)は共通、 $N=15$ と60とを比較

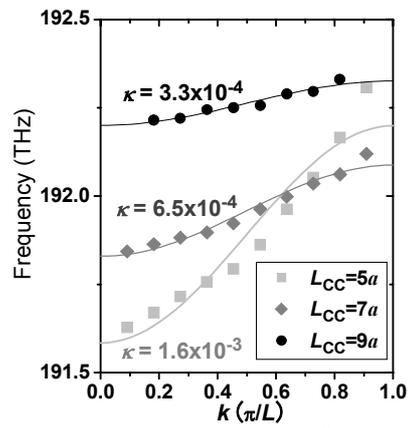


図3 PC-CROW の分散関係の L_{CC} による変化。 $N=10$ において比較

超小型高 Q 共振器による光マイクロマシン

納富雅也 谷山秀昭
量子光物性研究部

近年、フォトニック結晶を用いることによって、超小型でかつ非常に高い Q 値を併せ持つ光共振器が実現している[1]。このような光共振器では様々な光物質相互作用が増強されることが予想されているが、今回我々はある特殊な形状をしたフォトニック結晶超小型高 Q 共振器を用いることによって、光学エネルギーを非常に高効率に力学エネルギーに断熱的に変換できることを理論的に見出した[2]。この結果、非常に微弱な光によって物体を動かすことが可能になり、光による超高効率なマイクロマシン実現の可能性が示唆されている。

試料構造(図1)は我々が近年研究している超高 Q フォトニック結晶共振器構造[1]を中央で分割して二層に分けた構造となっている。この共振器の特徴は、層間距離を変えると共振器 Q 値が高い値に保たれたまま共振周波数が非常に大きく変化する点にある。この性質のために、系が断熱条件を満たしているとする(このとき電磁場エネルギーは共振周波数に比例)、共振器に蓄えられた光は巨大な輻射力(エネルギーの空間微分で与えられる)を発生する(1pJ 当たり約 1 μ N)。さらにこの共振器が長い光子寿命を持つため、この輻射力は大きな力学的仕事をするようになる。共振器中の光パルスが持つ光エネルギーが光子寿命内にどれだけ力学エネルギーに変換するかを求めると、図2のような結果になった。一般にこのような光 \rightarrow 力学エネルギー変換は(相対論的速度を持った光子ロケットのような例を除いて)光子が質量を持たないために非常に小さい(1兆分の1程度)。しかし、この共振器ではエネルギー変換効率は最大10%程度にも達しうることが分かる。このような超高効率のエネルギー変換は、超小型超高 Q 光共振器特有の現象である。

実はここで用いている光 \rightarrow 力学エネルギー変換では、光エネルギーの減少分だけ光の周波数が低くなっている。つまりこの過程を逆に用いると、力学運動により光の波長変換が可能となる。計算によれば中心波長の 20%以上という非常に大きな波長変換が可能であることが分かった。昨年、我々は超小型共振器の共振周波数を光子寿命内に動的に変化させることによって、断熱的に波長変換が可能であることを見出したが[3]、ここで用いている過程は実は同じ物理機構に基づいている。つまり非常に高効率な光マイクロマシンは、非常に高効率なオプトメカニカル波長変換素子として働くのである。

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

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

[3] M. Notomi, et al., Phys. Rev. **A73** (2006) 051803(R).

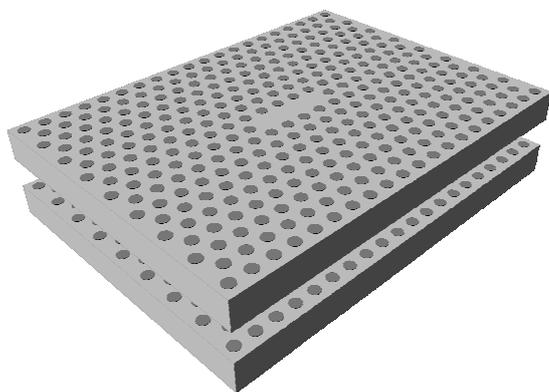


図1 二層構造フォトニック結晶共振器

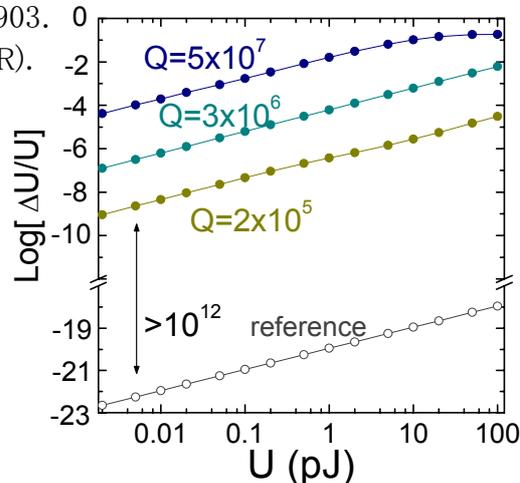


図2 光力学エネルギー変換効率

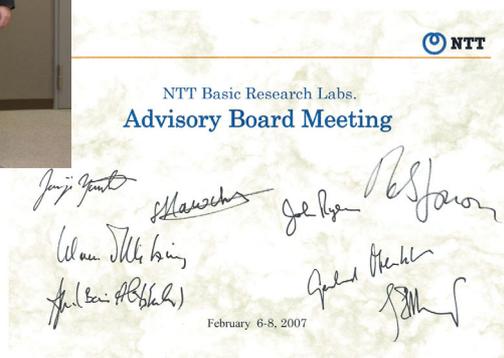
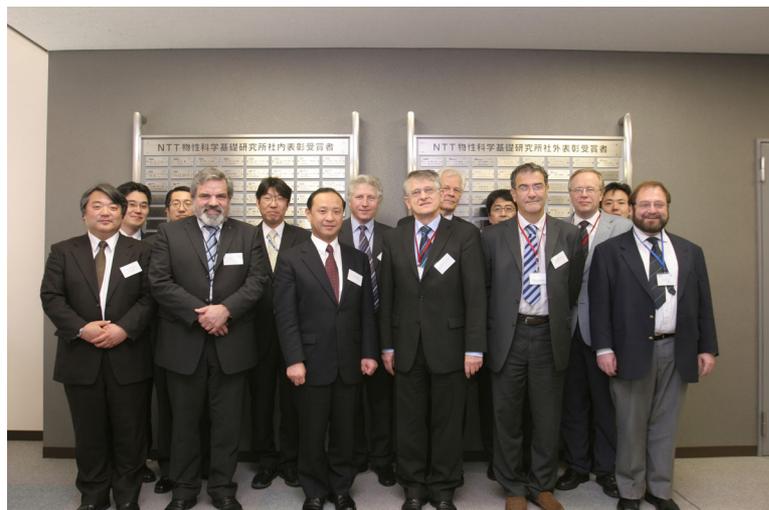
II. 資料

第 4 回アドバイザリボード

2007 年 2 月 6 日から 8 日の 3 日間、物性科学基礎研究所のアドバイザリボード会議を開催しました。この会議は、研究成果ならびに研究計画を客観的に評価して研究マネー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 1 年半ごとに開催され、今回は第 4 回目です。今回の会議では、1 名の新しいメンバをお迎えしました。

3 日間の会議で、研究成果ならびに研究マネージメントに関し、貴重な提案と助言をいただきました。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いただきました。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いただきました。いただいた提言を、今後の研究所運営に積極的に活用していきます。

今回のボードでは、研究所の若手研究者ならびに NTT 幹部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、若手研究者の研究に対する意欲を直接感じることができ、また若手研究者は、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を博しました。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、1 年半後を予定しております。



Board members	Affiliation	Research field
Prof. Abstreiter	Walter Shottky	低次元半導体物理
Prof. Altshuler	Columbia Univ.	凝縮系物理
Prof. Haroche	Ecole Normale	量子光学
Prof. Jonson	Chalmers UT	物性理論
Prof. Leggett	Univ. Illinois	低温物性理論
Prof. Mooij	Delft UT	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

「ナノエレクトロニクス・ナノ構造・およびキャリア相関」国際シンポジウム

2007年2月21日から23日までの3日間、NTT厚木研究開発センター講堂において、「ナノエレクトロニクス・ナノ構造・およびキャリア相関」国際シンポジウムが、NTT 物性科学基礎研究所と科学技術振興機構(JST)戦略的創造研究推進事業発展研究(SORST)の共催で開催されました。

非常に微細な「ナノスケール」の構造と、その中での電子の微視的な振る舞いは、これまでナノテクノロジーの発展とともに重要な研究対象となってきました。特に昨今では電子および核スピン、磁性、機械的・弾性的性質などの新しい自由度が加わり、構造の持つ機能性が増え、研究対象は大きく拡大しています。さらに、量子計算や量子暗号など、量子情報処理分野の研究が進展し、ナノ構造とそのエレクトロニクスは、それらを実現できる舞台として極めて重要な役割を担っています。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(量子電子物性研究部長)と藤澤利正(量子固体物性研究グループリーダー)および東北大学の平山祥郎教授らが議長を務め、ナノエレクトロニクス・ナノ構造・キャリア相関の3つをキーワードに開催されたもので、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。

21日は、湯本潤司・NTT 物性科学基礎研究所長の開会挨拶のあと、Prof. E. Yablonovitch (California 大 Los Angeles 校)の半導体スピンに基づいた量子情報処理に関する基調講演により会議は始まりました。この日はスピンのコヒーレント制御と量子情報処理、二次元電子系と金属絶縁転移、量子ドットにおける電子輸送に関して17件の口頭講演があり、さらに20件のポスター発表が行われました。22日は、ナノワイヤー・ナノチューブ、新しいヘテロ構造、スピントロニクスとスピン材料に関する15件の口頭講演と20件のポスター発表が、さらに23日には走査プローブ顕微鏡、電子相関と電子干渉、シリコンナノエレクトロニクス、スピン現象に関する15件の口頭講演が行われました。

参加者は145名を数え、非常に幅広い分野から多くの著名な研究者が参加し、ナノ構造およびそのエレクトロニクスとキャリア相関に関する質の高い講演、発表、および活発な議論が行われました。



社外表彰受賞者一覧

文部科学大臣表彰 若手科学者賞	藤原 聡	半導体分野におけるナノ構造の 物性制御とデバイス応用の研究	2006.04.18
35th Annual International Symposium on Multiple-Valued Logic (ISMVL-2005) Outstanding Paper Award	出川 勝彦 青木 孝文 樋口 龍雄 猪川 洋 高橋 庸夫	A Two-Bit-per-Cell Content-Addressable Memory Using Single-Electron Transistors	2006.05.19
レーザー学会第 26 回 年次大会 優秀論文賞	田辺 孝純	シリコンフォトニック結晶共振器を 用いた 5GHz 光パルス列変調	2006.05.31
European Materials Research Society (E-MRS) 2006 Spring Meeting Best Poster Presentation	尾身 博雄	Strain and Thermal Stability of Thin Silicon Overlayers on and between SiO ₂	2006.06.02
IEED/LEOS Distinguished Lecturer Award	納富 雅也	All-Optical Control of Photonic Crystals	2006.07.01

社外表彰受賞者一覧

<p>応用物理学会 JJAP 論文賞</p>	<p>堀口 誠二 藤原 聡 猪川 洋 高橋 庸夫</p>	<p>Analysis of Back-Gate Voltage Dependence of Threshold Voltage of Thin Silicon-on-Insulator Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor and Its Application to Si Single-Electron Transistor</p>	<p>2006.08.29</p>
<p>応用物理学会 講演奨励賞</p>	<p>田辺 孝純</p>	<p>超高 Q 値フォトニック結晶微小共 振器の実時間光子寿命測定</p>	<p>2007.03.27</p>

社内表彰受賞者一覧

先端技術総合研究所 所長表彰 研究開発賞	村木 康二 熊田 倫雄	「半導体ナノ構造を用いた核スピン 精密制御技術」	2007.2.15
先端技術総合研究所 所長表彰 報道特別賞	谷保 芳孝 嘉数 誠 牧本 俊樹	「世界最短波長 210nm の遠赤外発 光ダイオードの動作に成功(AIN)」	2007.2.15
物性科学基礎研究 所長表彰 業績賞	谷保 芳孝 嘉数 誠 牧本 俊樹	「窒化アルミニウムの高純度化およ びドーピング制御技術、発光素子 作製技術の確立」	2007.3.22
物性科学基礎研究 所長表彰 業績賞	西口 克彦 小野 行徳 藤原 聡 猪川 洋	「シリコン単電子輸送・検出素子の 室温動作技術の確立」	2007.3.22
物性科学基礎研究 所長表彰 論文賞	藤澤 利正	"Bidirectional counting of single electrons" Science Vol. 312, 1634 (2006).	2007.3.22
物性科学基礎研究 所長表彰 論文賞	西川 敦 熊倉 一英	"High critical electric field of AlGaN p-i-n vertical conducting diodes on n-SiC substrate" Appl. Phys. Lett. Vol. 88, 173508 (2006).	2007.3.22
物性科学基礎研究 所長表彰 論文賞	武居 弘樹 本庄 利守	"Differential phase shift quantum key distribution experiment over 105km fibre" New J. Phys. Vol. 7, 232 (2005).	2007.3.22
物性科学基礎研究 所長表彰 特別賞	原田 裕一	「英国における新しい共同研究スキ ーム立ち上げへの貢献」	2007.3.22

報道一覧

発表月日	新聞名 見出し
<hr/>	
I. 機能物質科学研究部	
<hr/>	
5 月 18 日	読売新聞 最短波長のLED NTT 研究所開発 DVD 大容量化など期待
5 月 18 日	日本経済新聞 紫外線 LED 世界最短波長を開発 NTT、ダイオキシン分解
5 月 18 日	毎日新聞 最短波長のLED開発 NTT 大容量の記憶装置に
5 月 18 日	東京新聞 最短波長のLED開発 NTT 研究チーム ダイオキシンの分解の光に
5 月 18 日	日経産業新聞 最短波長の紫外LED NTT、有害物質分解に応用
5 月 18 日	日刊工業新聞 NTT 210 ナノメートル最短の遠紫外光発光 窒化アルミLED試作
5 月 23 日	朝日新聞 世界最短波長のLED開発成功 NTT の研究所
11 月 27 日	化学工業日報 東京理科大-NTT、触媒で鉄族以外を適用、単層 CNT 合成に成功
11 月 29 日	日刊自動車新聞 東京理大本間教授ら、鉄族金属以外でのカーボンナノチューブを世界で初めて合成
12 月 8 日	科学新聞 カーボンナノチューブ合成 世界初 金・銀・銅を触媒に 東京理科大
12 月 12 日	日経産業新聞 単層ナノチューブ合成 金・銀・銅触媒で成功 東京理科大と NTT

II. 量子電子物性研究部

- 6 月 16 日 朝日新聞
電子 1 個の動きも計測 感度数万倍「究極の電流計」 NTT など実験成功
省電力の機器 開発に期待
- 6 月 16 日 日本経済新聞
電子 1 個の流れ測定 NTT など 超高感度の電流計
- 6 月 16 日 日刊工業新聞
NTT・東工大・JST 電子 1 個の動き捉える ナノ・量子分野応用に期待
- 6 月 23 日 科学新聞
電子 1 個 1 個の動き捕らえる NTT 単電子の電流計実現
- 6 月 28 日 日刊工業新聞
NTT 立体基板にレジスト均一塗布
- 7 月 14 日 日刊工業新聞
東大と NTT 固体中の電子結晶形成 結合量子細線 電流の向きで確認
- 7 月 14 日 日経産業新聞
「ウィグナー結晶」確認 東大などの研究チーム 極低温で電子実験
- 7 月 25 日 朝日新聞
「電子の結晶」を固体中初確認か 東大・NTT 研究所など実験
- 1 月 15 日 日経産業新聞
「量子ビット」安定計測 NTT など

Ⅲ. 量子光物性研究部

- 6 月 2 日 日経産業新聞
マイクロサイズの光スイッチ開発 NTT
- 12 月 23 日 日本経済新聞
光を減速 5 万分の 1 秒速 5800 メートルに
NTT、シリコン結晶を利用 光メモリーに道
- 12 月 24 日 毎日新聞
光の速さ 5 万分の 1 に抑制 NTT が成功 情報処理速度アップに光
- 12 月 25 日 日経産業新聞
光の速度 5 万分の 1 に NTT 光メモリーなどに応用
- 12 月 25 日 日刊工業新聞
1 ナノ秒間 光閉じ込め NTT 新共振器構造を開発
- 1 月 12 日 科学新聞
光を 1 ナノ秒蓄積 NTT が世界初 5 万分の 1 に光を減速
最高性能フォトニック結晶共振器で実現
- 1 月 16 日 朝日新聞
光、1 ナノ秒間蓄積 NTT と京大、それぞれ成功
- 1 月 23 日 東京新聞
ネイチャー専門誌 初めて日本で編集
- 2 月 6 日 東京新聞
盗聴もうできない？ 夢の通信「量子暗号」
- 3 月 1 日 日刊工業新聞
テクノ学び隊 光コンピュータに“光明”

報道(抜粋) (2006年度)

I. 機能物質科学研究部

東京理科大学の本間芳和教授とNTTの研究グループは、金、銀、銅をそれぞれ触媒にして単層カーボンナノチューブ(筒状炭素分子)を合成することに成功した。従来の鉄系触媒は寿命に限界があり、ナノチューブを長くできなかったが、これを克服できる成果だとしている。

単層ナノチューブ合成 金・銀・銅触媒で成功

て触媒に用いた。炉の中にエタノールを供給すると、触媒と反応して触媒を重点に成長させ、約10分間は単層カーボンナノチューブを合成すれば、こうしたことができた。現在、単層カーボンナノチューブを合成するには、鉄、コバルト、ニッケルなど鉄系の触媒を使う。数百度熱伝導性などに優れる。比を越える長いナノチューブを合成できず、ナノチューブが期待されている。

日経産業新聞 2006年12月12日

NTT 210ナノメートル最短の遠紫外発光窒化アルミLED試作

様の結晶作製法で作った高純度の窒化アルミ発光層を、p型半導体とn型半導体とを挟んだ構造を持つ。紫外光を発生するLEDを作製した。

日刊工業新聞 2006年5月18日

紫外線LED 世界最短波長を開発 NTT、ダイオキシン分解

NTTは十七日、二百ナノ(ナは十億分の一)以下の最も短い波長の紫外線を出す発光ダイオード(LED)を開発したと発表した。紫外線は波長が短いと有害物質の分解作用が生まれ、ダイオキシンやポリ塩化ビフェニール(PCB)も無害化できるという。五年後までに実用化する。

窒化アルミニウムから作った。LEDの性能を引き出すきれいな結晶構造にするのが難しかったが、原料ガスを高速で高温の基板に吹き付ける手法を採用し、マグネシウムやシリコンも添加する

びつたダイオキシンでも分解できるという。短い波長の紫外線が出せる水銀ランプと比較しても、LEDだと寿命が長く、廃棄時の処理にも困らない。研究成果は十八日付英科学誌ネイチャーに掲載される。

日本経済新聞 2006年5月18日

最短波長の紫外LED

NTT、有害物質分解に応用

NTTは十七日、世界最短の波長二百ナノ(ナは十億分の一)以下の紫外線を出す発光ダイオード(LED)を開発したと発表した。紫外線は波長が短いと有害物質の分解作用が生まれ、ダイオキシンやポリ塩化ビフェニール(PCB)も無害化できるという。五年後までに実用化する。

窒化アルミニウムを使うことで実現した。LEDの性能を引き出すきれいな結晶構造にするのが難しかったが、原料ガスを高速で高温の基板に吹き付ける手法を採用し、マグネシウムやシリコンも添加する

んだ構造。p型半導体にプラス、n型半導体にマイナスの電圧をかける。発光層にマイナスの性質を持つ電子と、電子とは逆にプラスの性質を持つホールと呼ばれるものが集まって結合し、発光する。窒化アルミニウムは電子とホールが結合する時に発生するエネルギーが大きいことが知られているが、きれいな結晶構造をつくるのが難しかった。ダイオキシンなどの有害物質を分解できるという。従来は水銀ランプで波長の短い紫外光を出して分解していたが、有害な水銀を使わない安全な手法になると期待している。

日経産業新聞 2006年5月18日

世界最短波長のLED開発成功 NTTの研究 世界で最も短い波長の光を出す発光ダイオード(LED)を、NTT物性科学研究所が開発した。材料に窒化アルミニウムを使ったのが特徴で、高容量DVDなどに用いられる。論文が英科学誌ネイチャーに掲載された。 LEDでこれまで最も短い波長は365ナノメートル(ナは十億分の一)で窒化ガリウムを使ったもの。今回は、210ナノメートルだ。どちらも紫外線で、目には見えない。窒化アルミニウムは、半導体の中で最短波長の光を出すことが理論的に予想されていたが、きれいな結晶をつくるのが難しかった。 DVDなどの光ディスクは、半導体レーザーの光で画像や音声を記録する。光の波長が短いほど、記録できる情報量が増える。今回の成果がレーザーに応用できれば、現在の3倍以上の大容量化が見込めるという。

朝日新聞 2006年5月23日

II. 量子電子物性研究部

「電子の結晶」を固体中初確認か

東大・NTT研究所など実験

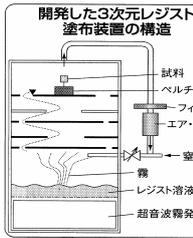
電子が結晶のように規則正しく整列する大規模

な状態「ウィグナー結晶」を固体中初確認した。東大とNTT物性科学基礎研究所などのチームが発表した。ウィグナー結晶は1934年に理論的に言われたが、検証実験が極めて難しく、固体中に存在が認められた例はほとんどない。固体中の電子は通常一方向に自由に動き回ることが、特殊な状況では見られる。電子が自由な状態から、特定の方向に動き回るときは、電子が結晶に変わったかのように見え、規則正しく整列する大規模な状態が確認された。

朝日新聞 2006年7月25日

NTT 立体基板にレジスト均一塗布

霧の粒と流れ制御



開発した3次元レジスト塗布装置の構造

NTTは立体基板の面にレジスト（感光性樹脂）を均一に塗布する技術を開発した。レジスト溶液を噴霧しながら、基板の凹凸に沿って流れをコントロールする装置を開発した。この装置は基板を載せて冷却すると表面が乾燥し、レジストが均一に成膜し、これを加工して回路パターンが形成される。従来の方法では、3次元構造の凹凸に均一に塗布することが難しく、高品質な回路パターンが得られなかった。NTTは、霧の粒と流れを制御する装置を開発し、均一な塗布を実現した。

光スイッチ製造簡略化

ウィグナー結晶はこれまで理論的には存在が予想されていたが、確認実験が極めて難しく、一度に確認された。研究チームは、電子が結晶に整列する状態を、電子の動きを制御することで実現した。この技術は、光スイッチの製造に大きく貢献する。従来の製造方法は、複雑な工程を必要としたが、この新技術により、製造工程が簡略化され、コスト削減が期待される。

日経産業新聞 2006年7月14日

電子1個の流れ測定

NTTなど超高度度の電流計

NTTと東京工業大で電流の大きさを測定する「電流計」を開発した。この電流計は、電子1個の動きを検出し、その電流を測定する。従来の電流計は、電流の平均値を測定するが、この新電流計は、電子1個の動きをリアルタイムで測定できる。これは、超高度度の電流計として、半導体デバイスや量子デバイスなどの研究に大きく貢献する。

日刊工業新聞 2006年6月28日

半導体の中に二つの電極を設け、間に電子ドットを三個並べる。電極の間に電子が移動するときに、電子ドットを順番に通す。ドット内の電子の有無を調べることで、電子の動きを測定する。この装置は、電子1個の動きを高精度で測定できる。これは、超高度度の電流計として、半導体デバイスや量子デバイスなどの研究に大きく貢献する。

日経産業新聞 2006年6月16日

電子1個の動きも計測

感度数万倍「究極の電流計」実験成功
電流を構成する電子1個ずつの動きを測る「究極の電流計」の実験が、NTTなどによって成功した。従来の電流計は、電流の平均値を測定するが、この新電流計は、電子1個の動きをリアルタイムで測定できる。これは、超高度度の電流計として、半導体デバイスや量子デバイスなどの研究に大きく貢献する。

省電力の機器 開発に期待
10個ほどが入る電子のたまり場「量子ドット」の大きさや形状を調整することで、電流の制御が可能になる。これは、省電力の機器の開発に大きく貢献する。従来の機器は、消費電力が多かったが、この新技術により、消費電力を大幅に削減できる。これは、省電力の機器として、半導体デバイスや量子デバイスなどの研究に大きく貢献する。

朝日新聞 2006年6月16日

「量子ビット」安定計測など

NTT物性科学基礎研究所とオランダ・デルフト工科大学の共同チームが、量子ビットの安定計測に成功した。量子ビットは、物質の電子の量子状態として実現されている。この研究は、量子ビットの安定計測を実現し、量子コンピューターの実現に大きく貢献する。従来の量子ビットは、安定性が低かったが、この新技術により、安定性を大幅に向上させることができる。これは、量子コンピューターの実現に大きく貢献する。

量子ビットの安定計測
量子ビットは、物質の電子の量子状態として実現されている。この研究は、量子ビットの安定計測を実現し、量子コンピューターの実現に大きく貢献する。従来の量子ビットは、安定性が低かったが、この新技術により、安定性を大幅に向上させることができる。これは、量子コンピューターの実現に大きく貢献する。

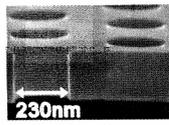
量子ビットの安定計測
量子ビットは、物質の電子の量子状態として実現されている。この研究は、量子ビットの安定計測を実現し、量子コンピューターの実現に大きく貢献する。従来の量子ビットは、安定性が低かったが、この新技術により、安定性を大幅に向上させることができる。これは、量子コンピューターの実現に大きく貢献する。

日経産業新聞 2006年1月15日

III. 量子光物性研究部

光、1ナ秒間蓄積

NTTと京大、それぞれ成功



長(時間)光を蓄積せよは100万分の1の赤外線が、体積0.1立方...

朝日新聞 2006年1月16日

マイクロサイズの光スイッチ開発

NTT

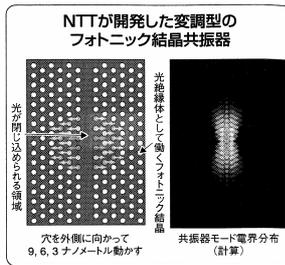
NTTは大きさがマイクロサイズという超小型の光通信システムの中核部...

超小型化で消費エネルギーが百分の一になる...

日本経済新聞 2006年6月2日

1ナ秒間光閉じ込め

NTT新共振器構造を開発



NTTはシリコン膜に新しい共振器構造を開発...

日刊工業新聞 2006年12月25日

穴の位置を局所的に動かすことで光を...

光の速さ5万分の1に抑制 NTTが成功 情報処理速度アップに光

NTTは、シリコン膜の特殊な結晶を使って光の速さを5万分の1に抑えることに成功した...

毎日新聞 2006年12月24日

来訪者による講演一覧 (2006 年度)

I. 機能物質科学関連

講演日	講演者	講演者所属 「講演タイトル」
5 月 29 日	Dr. Michael Jetter	University of Stuttgart, Germany 「Quantum dots for single photon applications」
5 月 29 日	Mr. Sarad Bahadur Thapa	University of Ulm, Germany 「Structural and spectroscopic properties of AlN layers grown by MOVPE」
6 月 6 日	Dr. Eric Mueller	Coherent Inc. 「Continuous-Wave THz Transceivers & CW Coherent High-Dynamic-Range THz Imaging」
7 月 7 日	Dr. Goo-Hwan Jeong	CREST 本間プロジェクト 「カーボンナノチューブの直径制御成長と機能化」
9 月 7 日	Prof. Wolfgang Stolz	Philipps-University, Germany 「Novel dilute nitride III/V-semiconductor laser system for the integration to Si-microelectronics」
9 月 15 日	Prof. Erhard Kohn	University of Ulm, Germany 「Diamond electronics will it be able to compete with III-Nitrides?」
10 月 6 日	加藤 俊顕 氏	東北大学 「プラズマ CVD 法による単層カーボンナノチューブの孤立垂直配向形成とそのプラズマ効果」
10 月 6 日	岡田 健 氏	東北大学 「DNA を用いた単層カーボンナノチューブの機能化」
10 月 26 日	Prof. Etienne Bustarret	CNRS-LEPES, France 「Superconducting B-doped diamond and related materials: recent progress」
2 月 1 日	Dr. Taisuke Ohta	E. O. Lawrence Berkeley National Laboratory, U.S.A. 「Controlling the Electronic Structure of Graphene Layers」

II. 量子電子物性関連

講演日	講演者	講演者所属 「講演タイトル」
5 月 16 日	室 清文 教授	千葉大学 「高感度・高分解能分光計測による極低温・強磁場における半導体ナノ構造のスピ凝縮相、スピダイナミクスの研究」
7 月 12 日	宇佐見 康二 博士	東京工業大学 「On "Quantumness" of Collective Spin Excitation」
8 月 1 日	Dr. Sebastian Hofferberth	University of Heidelberg 「Radio-frequency dressed state potentials for neutral atoms」
8 月 11 日	Dr. Jens Hefort	Paul Drude Institute, Germany 「Expitaxial Heusler alloys on GaAs substrates」
8 月 29 日	大塚 朋廣 氏	東京大学 「量子ドット複合系における二端子伝導度からの位相情報」
9 月 5 日	江藤 幹雄 教授	慶応義塾大学 「半導体量子ポイントコンタクトを用いたスピン注入の方法」
9 月 11 日	Dr. Kasper Grove-Rasmussen	Niels Bohr Institute, Denmark 「Electronic transport in Carbon Nanotubes with normal and superconducting leads」
9 月 12 日	Prof. Klaus Ploog	Paul Drude Institute, Germany 「Ferromagnetic Semiconductors for Spin Injection」
9 月 14 日	田仲 由喜夫 准教授	名古屋大学 「奇周波数クーパーペアと超伝導接合」
10 月 20 日	井原 章之 氏	東京大学 「T 型量子細線に形成された 1 次元電子ガスの発光および励起スペクトル」
10 月 26 日	Dr. Romain Danneau	University of New South Wales, Australia 「Spin related phenomena in ballistic hole quantum wires」
11 月 6 日	Prof. Alec Maassen van den Brink	理化学研究所 「Four-qubit superconducting quantum circuit」
1 月 22 日	Prof. Yasser Omar	Technical University of Lisbon, Portugal 「Generation of Entanglement in Quantum Wire」

		and Application to Single-Electron Transmittivity]
1 月 29 日	Prof. Michel H. Devoret	Yale University, U.S.A. 「Quantum-mechanical electrical circuits」
1 月 30 日	Prof. Michel H. Devoret	Yale University, U.S.A. 「Measurement of Dynamical Casimir Effect」
1 月 31 日	Prof. Michel H. Devoret	Yale University, U.S.A. 「Quantum Voting」
2 月 1 日	Prof. Michel H. Devoret	Yale University, U.S.A. 「QND fraction of JBA readout」
2 月 9 日	Prof. Hans Mooij	Delft University of Technology, Netherlands 「Quantum Information Processing Using Superconducting Circuit」
2 月 16 日	Dr. Fei Xue	理化学研究所 「Liquid-State NMR Based Quantum Computing & Cavity Quantum Electrodynamics in Solid-State System」
3 月 15 日	Prof. Lev B. Ioffe	The State University of New Jersey, U.S.A. 「Microscopic origin of low frequency noises in Josephson qubits」
3 月 15 日	Dr. Lara Faoro	The State University of New Jersey, U.S.A. 「The challenge of error correction in quantum computation」

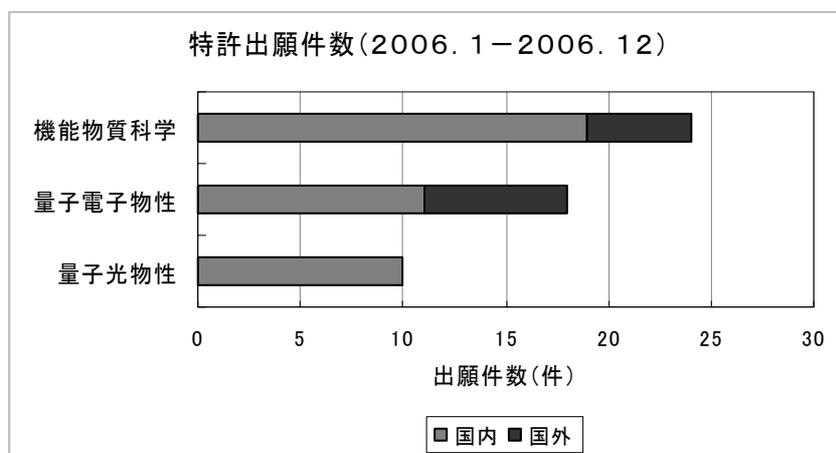
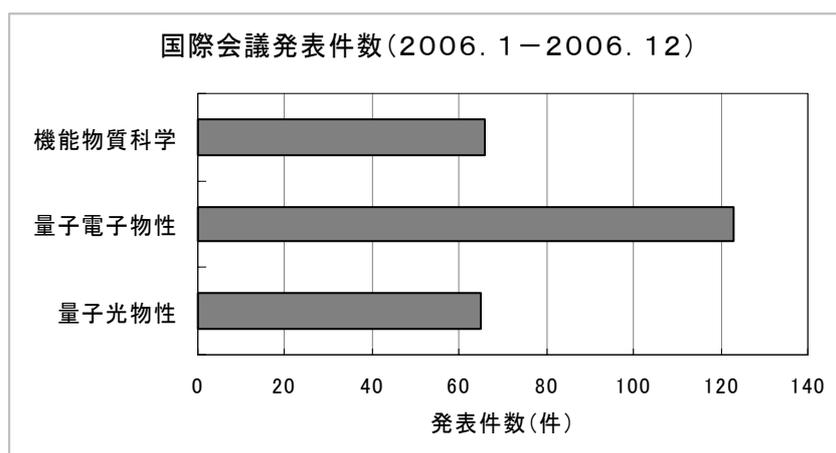
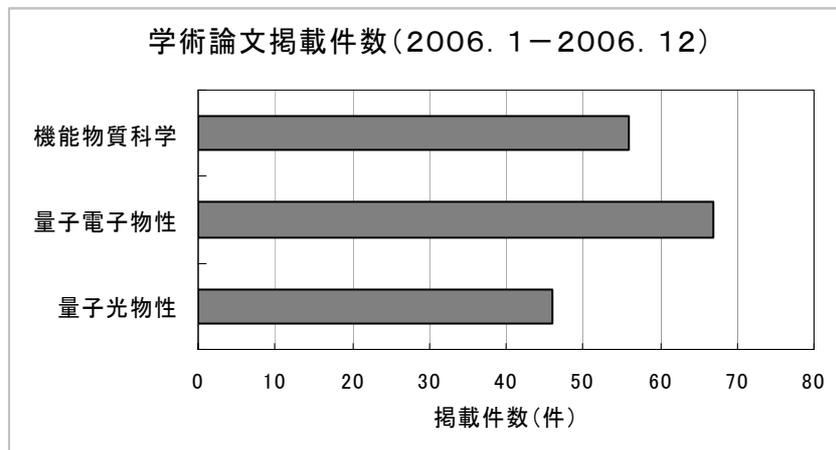
Ⅲ. 量子光物性関連

講演日	講演者	講演者所属 「講演タイトル」
4 月 11 日	市村 厚一 氏	東芝 研究開発センター 「固体での EIT とその量子情報処理への応用」
7 月 3 日	Prof. See Leang Chin	Laval University, Canada 「Some new applications using femtosecond laser filamentation in air」
8 月 21 日	Dr. Michael Stopa	Harvard University, U.S.A. 「Magnetic field control of exchange and noise immunity in double quantum dots」
10 月 23 日	Dr. Sergei Studenikin	National Research Council of Canada, Canada 「Role of magnetoplasmons in microwave induced resistance oscillations and zero-resistance states」

- | | | |
|-----------|----------------------------|--|
| 11 月 27 日 | Prof. Norbert Lutkenhaus | University of Waterloo, Canada
「Security key rates, upper bounds and limitations
in quantum key distribution」 |
| 12 月 4 日 | Prof. Daniel Gottesman | Perimeter Institute for Theoretical Physics,
Canada
「The threshold for fault-tolerant quantum
computation」 |
| 12 月 6 日 | Dr. Sae Woo Nam | National Institute of Standards and Technology,
U.S.A.
「Superconducting detectors for quantum
information applications」 |
| 12 月 22 日 | Dr. Hiroaki Terashima | 東京工業大学
「Relativistic Effects on the
Einstein-Podolsky-Rosen Correlation」 |
| 1 月 9 日 | Prof. Shun-Lien Chuang | University of Illinois, U.S.A.
「Slow Light in Quantum Dots and Quantum
Wells」 |
| 3 月 2 日 | Prof. Ora Entin-Wohlman | Ben Gurion University, Israel
「The magnetic structure of lanthanum titanate」 |
| 3 月 13 日 | Prof. Robert M. Westervelt | Harvard University, U.S.A.
「Imaging Electrons in Nanoscale Devices」 |

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（2006 年）

2006 年に国内外の月術論文誌(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 169 件、国際会議の発表件数は 254 件です。また出願特許数は 52 件になります。以下に分野別の件数を示します。



学術論文の主な掲載先と掲載件数は以下の通りです。

一般科学雑誌

雑誌名	(IF2006)*	件数
Science	(30.927)	3
Nature	(29.273)	1

学術論文誌

雑誌名	(IF2006)*	件数
Applied Physics Letter	4.127	21
Japanese Journal of Applied Physics	1.096	18
Physical Review B	3.185	11
Physica E	0.946	10
Physical Review Letters	7.489	9
Journal of Applied Physics	2.498	9
Optics Express	3.764	7
Physical Review A	2.997	7
Chemical Physics Letters	2.438	4
Diamond and Related Materials	1.988	4
Physica B	0.796	4
IEEE Electron Device Letters	2.825	3
Physica C	0.948	3
Nano Letters	9.847	1
Reports on Progress in Physics	8.893	1

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

研究所全体では、一論文当たりの平均インパクトファクターは 3.26 です。

国際会議の主な発表先と発表件数は以下の通りです。

国際会議名	件数
28th International Conference on Physics of Semiconductors (ICPS28)	21
2006 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2006)	21
International Symposium on Mesoscopic Superconductivity and Spintronics 2006 (MS+S2006)	19
Conference on Lasers and Electro-Optics Quantum Electronics and Laser Science Conference/ Quantum Electronics and Laser Science Conference (CLEO/QELS)	9
7th International Conference on the Science and Application of Nanotubes (NT06)	8
Frontiers in Nanoscale Science and Technology (FNST2006)	8
14th International Conference on Molecular Beam Epitaxy (MBE2006)	7
International Workshop on Nitride Semiconductors (IWN2006)	7
International Conference on Nanoscience and Technology (ICN+T2006)	6
12th Conference on Laser Optics (LO2006)	6
2006 Materials Research Society Fall Meeting (MRS 2006 Fall)	5
IEEE Lasers and Electro-Optics Society 19th Annual Meeting (LEOS2006)	5
1st Canada – Japan SRO-COAST Symposium on Ultrafast Intense Laser Science	4
19th International Symposium on Superconductivity (ISS2006)	4
VIth Recontre de Vietnam, Nanophysics: from Fundamentals to Applications	3
International Symposium on Ultrafast Intense Laser Science (ISUILS5)	3
International Symposium on Compound Semiconductors (ISCS2006)	3
International Conference on Raman Spectroscopy (ICORS2006)	3
American Chemical Society, 232nd National Meeting and Exposition (ACS)	3
2006 International Workshop on Dielectric Thin Films for Future ULSI Devices-Science & Technology (IWDTF2006)	3
2006 IEEE Silicon Nanoelectronics Workshop (SNW2006)	3

国際会議招待講演一覧 (2006)

I. 機能物質科学関連

- (1) H. Omi, "Step Pattern Formation during Molecular Beam Epitaxy", Symposium on Surface Physics 2006, Shizukuishi, Japan (Jan. 2006).
- (2) H. Hibino and M. Uwaha, "Instability of Steps During Ga Deposition on Si(111) ", Symposium on Surface Physics 2006, Shizukuishi, Japan (Jan. 2006).
- (3) H. Miyashita, I. Fujimoto, K. Hamada, K. Mikoshiba, and K. Torimitsu, "A High-Speed AFM Observation of Inositol 1,4,5-Trisphosphate Receptor Reconstituted into a Lipid Bilayer. ", VIII. Annual Linz Winter Workshop, Linz, Austria (Feb. 2006).
- (4) K. Ajito, "Laser-trapping Raman Spectroscopy of Neurotransmitters in Single Nerve Terminals", The 6th France-Japan Workshop on Nanomaterials, Sapporo, Japan (Mar. 2006).
- (5) M. Kasu, "Diamond RF Power Transistors: Present Status and Prospects", Materials Congress 2006, London, U.K. (Apr. 2006).
- (6) Y. Taniyasu, M. Kasu, and T. Makimoto, "Formation Mechanism of Threading Dislocations in AlN during MOVPE Growth", 13th International Conference on Metal Organic Vapor Phase Epitaxy (ICMOVPE-XIII), Miyazaki, Japan (May 2006).
- (7) K. Torimitsu, "NanoBioscience –Analysis of Neural Functions with Bio-Molecules–", 7th International Conference "Materials in Clinical Applications" of the Forum on New Materials, Sicily, Italy (Jun. 2006).
- (8) K. Ajito, R. Rungsawang, I. Tomita, and Y. Ueno, "Near-Infrared Raman and Terahertz Spectroscopy and Biological Molecule Imaging", 20th International Conference on Raman Spectroscopy (ICORS), Yokohama, Japan (Sep. 2006).
- (9) M. Kasu, K. Ueda, Y. Yamauchi, A. Tallaire, and T. Makimoto "Diamond-Based RF Power Transistors: Fundamentals and Applications", The 17th European Conference on Diamond, Diamond-Like Materials, Carbon Nanotubes, Nitrides and Silicon Carbide (Diamond 2006), Estoril, Portugal (Sep. 2006).
- (10) K. Torimitsu, "Neurons and Receptor Proteins for Nano-Bio Interface", The Nano-Bio-Cogno Convergence Seminar 2006: Valorization in Medicine and Healthcare (SOC-45), Leuven, Belgium (Sep. 2006).

- (11) H. Omi, "Step Instabilities on Vicinal Si(111) during Molecular Beam Epitaxy", 1st non-virtual meeting "Instabilities at Surfaces", Burgas, Bulgaria (Sep.-Oct. 2006).
- (12) Y. Taniyasu, M. Kasu, and T. Makimoto, "AlN deep-UV LEDs with a Wavelength of 210 nm", 6th Akasaki Research Center Symposium, Nagoya, Japan (Oct. 2006).
- (13) K. Torimitsu, "Role of Magnesium in Neural Process", 11th International Magnesium Symposium, Ise-Shima, Japan (Oct. 2006).
- (14) M. Kasu, K. Ueda, A. Tallaire, Y. Yamauchi, and T. Makimoto, "Diamond Transistors for RF Power Applications", Kobe University Frontier Technology Forum –Nano- and Photonics-Technology in Innovation–, Kobe, Japan (Nov. 2006).

II. 量子電子物性関連

- (1) T. Mukai, "Quantum Computation with Atoms: Practical Schemes and Problems", Post-COE Workshop on Cold Atoms: Fermion and Optical Lattice, Kyoto, Japan (Feb. 2006).
- (2) H. Takayanagi, S. Sasaki, S. Kang, S. Miyashita, T. Maruyama, H. Tamura, T. Akazaki, and Y. Hirayama, "Manipulation and Control of Spins in III-V Semiconductors by Gated Structures", 2006 RCIQE International Seminar, Sapporo, Japan (Feb. 2006).
- (3) Y. Ono, A. Fujiwara, K. Nishiguchi, Y. Takahashi, and H. Inokawa, "Single-Electron Transfer in Silicon: Towards Single-Dopant Electronics", 3rd International Workshop on Ubiquitous Knowledge Network Environment, Sapporo, Japan (Feb.-Mar. 2006).
- (4) K. Semba, "Coherent Control of a Flux-Qubit Coupled to a Quantum LC-Resonator", UNI Erlangen Winter Seminar on Superconductivity, Finkenberg, Austria (Mar. 2006).
- (5) T. Fujisawa, "Counting Statistics of Single-Electron Transport through a Double Quantum Dot", Capri Spring School on Transport in Nanostructures, Capri, Italy (Apr. 2006).
- (6) Y. Ono, K. Nishiguchi, K. Takashina, H. Inokawa, S. Horiguchi, and Y. Takahashi, "Impurity Conduction and its Control in SOI MOSFETs; Towards Silicon Single-Dopant Electronics", 2006 IEEE Silicon Nanoelectronics Workshop (SNW2006), Honolulu, Hawaii, U.S.A. (Jun. 2006).
- (7) T. Fujisawa, "Counting Statistics of Single Electron Transport through a Double Quantum Dot", IEEE Nanotechnology Materials and Devices Conference

- (IEEE-NMDC2006), Daejeon, Korea (Jun. 2006).
- (8) Y. Hirayama, "Single-Electron Manipulation and Detection in a Quantum Dot System", International Conference for Quantum Structure Science (ICQS-2006), Beijing, China (Jun. 2006).
- (9) K. Semba, J. Johansson, S. Saito, T. Meno, H. Tanaka, H. Nakano, M. Ueda, and H. Takayanagi, "Vacuum Rabi Oscillations Observed in a Flux Qubit LC-Oscillator System", Macroscopic Quantum Coherence and Computing (MQC2), Napoli, Italy (Jun. 2006).
- (10) M. Uematsu, "Oxygen Self-Diffusion in Silicon Dioxide: Effect of the Si/SiO₂ Interface", 2nd International Conference on Diffusion in Solid and Liquids (DSL2006), Aveiro, Portugal (Jul. 2006).
- (11) G. Yusa, K. Muraki, N. Kumada, K. Takashina, K. Hashimoto, and Y. Hirayama, "Nuclear Spin Control by a Point Contact", 28th International Conference on Physics of Semiconductors (ICPS28), Vienna, Austria (Jul. 2006).
- (12) K. Suzuki, K. Kanisawa, S. Perraud, M. Ueki, K. Takashina, and Y. Hirayama, "Observation of Subband Standing Waves in Superlattices by Low-Temperature Scanning Tunneling Spectroscopy", 28th International Conference on Physics of Semiconductors (ICPS28), Vienna, Austria (Jul. 2006).
- (13) H. Takayanagi, S. Saito, J. Johansson, H. Tanaka, H. Nakano, M. Ueda, and K. Semba, "Flux Qubit Coupled to an LC-Resonator", Materials and Mechanisms of Superconductivity High Temperature Superconductors VIII (M2S-HTSC-VIII), Dresden, Germany (Jul. 2006).
- (14) K. Muraki, "Interaction of Electron and Nuclear Spins in Quantum Wells", 17th International Conference on High Magnetic Fields in Semiconductor Physics (HMF-17), Wuerzburg, Germany (Jul.-Aug. 2006).
- (15) Y. Hirayama, "High Precision Control of Nuclear Spins in Semiconductor Nanostructures", 13rd International Conference on Superlattice, Nanostructures and Nanodevices (ICSNN-2006), Istanbul, Turkey (Jul.-Aug. 2006).
- (16) T. Fujisawa, "Counting Statistics of Single Electron Transport through a Double Quantum Dot", VIth Recontre de Vietnam, Nanophysics: from Fundamentals to Applications, Hanoi, Vietnam (Aug. 2006).
- (17) Y. Hirayama, S. Sasaki, and T. Fujisawa, "Non-Local Charge and Spin Interactions in Semiconductor Quantum Dot Systems", International Workshop "Tera- and

Nano-Devices: Physics and Modeling", Aizu-Wakamatsu, Japan (Aug. 2006).

- (18) G. Yusa, K. Muraki, N. Kumada, K. Takashina, K. Hashimoto, and Y. Hirayama, "Controlled Multiple Quantum Coherences of Nuclear Spins", 4th International Conference on Physics and Application of Spin-Related Phenomena in Semiconductors (PASPS-IV), Sendai, Japan (Aug. 2006).
- (19) K. Semba, J. Johansson, S. Saito, T. Meno, H. Tanaka, H. Nakano, M. Ueda, and H. Takayanagi, "Vacuum Rabi Oscillations Observed in a Flux Qubit LC-Oscillator System", VIth Recontre de Vietnam, Nanophysics: from Fundamentals to Applications, Hanoi, Vietnam (Aug. 2006).
- (20) H. Nakano, "Some theoretical aspects in Superconducting Flux-qubit systems", VIth Recontre de Vietnam, Nanophysics: from Fundamentals to Applications, Hanoi, Vietnam (Aug. 2006).
- (21) H. Takayanagi, T. Akazaki, S. Yanagi, and H. Munekata, "Transport Properties of Ferromagnetic Semiconductors with Superconducting Electrodes", International Workshop on Mesoscopic Superconductivity and Magnetism (MesoSuperMag 2006), Chicago, U.S.A. (Aug.-Sep. 2006).
- (22) K. Muraki, "Spin/Charge Fluctuations in Quantum Hall Bilayers -Nuclear Spin Relaxation and Coulomb Drag", Interactions, Excitations and Broken Symmetries in Quantum Hall Systems (QHSyst-06), Dresden, Germany (Oct. 2006).
- (23) K. Semba, "Josephson Junction Qubits", 2006 US-Japan Workshop on Quantum Information Science, Hawaii, U.S.A. (Oct. 2006).
- (24) K. Semba, "Superconducting Flux Qubit Coupled to an LC-Oscillator", 19th International Symposium on Superconductivity (ISS2006), Nagoya, Japan (Oct.-Nov. 2006).
- (25) H. Takayanagi, Y.-L. Zhong, and T. Akazaki, "Noise and Conductance Fluctuation due to Andreev Reflection", 19th International Symposium on Superconductivity (ISS2006), Nagoya, Japan (Oct.-Nov. 2006).

III. 量子光物性関連

- (1) Y. Tokura, "Coherent Single Electron Spin Control in a Slanting Zeeman Field", A workshop on Imaging at the Nanoscale, Quantum Information Processing, Nanophotonics, Nanoelectronics: Frontiers in Nanoscale Science and Technology (FNST), San Francisco, U.S.A. (Jan. 2006).

- (2) Y. Tokura, "Electron Spin Manipulation in Quantum Dot Systems", International Workshop on Electron Spin Resonance and Related Phenomena in Low Dimensional Structures, Sanremo, Italy (Mar. 2006).
- (3) Y. Tokura, "Interaction and Interference Effect in the Electron Current through Laterally Coupled Quantum Dots", International Seminar and Workshop on Non-equilibrium Dynamics in Interacting Systems, Dresden, Germany (Apr. 2006).
- (4) Y. Tokura, "Coherent Transport through Coupled Quantum Dots", MTI & CNM International Argonne Fall Workshop on Nanophysics VI, Nanoscale Superconductivity and Magnetism, Argonne, France (Nov. 2006).
- (5) M. Notomi, "Photonic Crystal Waveguides and Resonators", ePIXnet Winter School, Pontresina, Switzerland (Mar. 2006).
- (6) M. Notomi, "Light Control by Photonic Crystals", ePIXnet Winter School, Pontresina, Switzerland (Mar. 2006).
- (7) M. Notomi, E. Kuramochi, T. Tanabe, A. Shinya, and H. Taniyama, "All-Optical Control of Photonic Crystal Nanocavities", 2006 Optical Society of America Integrated Photonics Research and Applications Topical Meeting/ Nanophotonics Topical Meeting (OSA IPRA/NANO), Uncasville, U.S.A. (Apr. 2006).
- (8) M. Notomi, T. Tanabe, E. Kuramochi, A. Shinya, H. Taniyama, and S. Mitsugi, "Dynamic Control of Light by Photonic-Crystal Resonator-Waveguide-Coupled System", Conference on Lasers and Electro-Optics/ Quantum Electronics and Laser Science Conference (CLEO/QELS'06), Long Beach, U.S.A (May, 2006).
- (9) H. Nakano, K. Oguri, Y. Okano, and T. Nishikawa, "Picosecond Time-Resolved XAFS Measurements Using Femtosecond Laser-Produced Plasma X-Rays as a Probe," XII International Conference on Laser Optics (LO'06), St. Petersburg, Russia (Jun. 2006).
- (10) M. Notomi, E. Kuramochi, T. Tanabe, A. Shinya, and H. Taniyama, "All-Optical Control of Photonic Crystal Nanocavities", Journée Nationale Cristaux Photoniques, Marcoussis, France (Jun. 2006).
- (11) H. Nakano, K. Oguri, Y. Okano, and T. Nishikawa, "Time-Resolved XAFS Measurements Using Femtosecond Laser-Produced Plasma X-Rays", 1st Canada-Japan SRO-COAST Symposium on Ultrafast Intense Laser Science, Tokyo, Japan (Jul. 2006).
- (12) M. Notomi, E. Kuramochi, T. Tanabe, A. Shinya, and H. Taniyama, "All-Optical

- Control of Photonic Crystal Nanocavities", 11th OptoElectronics and Communications Conference (OECC2006), Kaohsiung, Taiwan R.O.C. (Jul. 2006).
- (13) M. Notomi, E. Kuramochi, T. Tanabe, A. Shinya, and H. Taniyama, "All-Optical Control Of Ultrasmall High-Q Photonic Crystal Nanocavities", Asia-Pacific Optical Communications Conference 2006 (APOC2006), Gwangju, Korea (Sep. 2006).
- (14) S. Kawanishi, "High-Speed Optical Transmission Technology Using All-Optical Signal Processing", Asia-Pacific Optical Communications Conference 2006 (APOC2006), Gwangju, Korea (Sep. 2006).
- (15) M. Notomi, E. Kuramochi, T. Tanabe, A. Shinya, and H. Taniyama, "All-Optical Switching and Dynamic Control of Light by Photonic Crystal Nanocavities", 2006 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2006), Yokohama, Japan (Sep. 2006).
- (16) K. Yamada, T. Tsuchizawa, T. Watanabe, H. Fukuda, H. Shinojima, T. Tanabe, and S.-I. Itabashi, "All-Optical Signal Processing Using Nonlinear Effects in Silicon Photonic Wire Waveguides", The 19th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society, (LEOS2006), Montreal, Canada (Oct.-Nov. 2006).
- (17) H. Nakano, K. Oguri, Y. Okano, and T. Nishikawa, "Femtosecond Laser-Induced Melting and Ablation Processes Observed by Picosecond-Time-Resolved XAFS Using Femtosecond Laser-Produced Plasma Soft X-Ray Pulses", 5th International Symposium on Ultrafast Intense Laser Science (ISUILS5), Lijiang, China (Nov. 2006).
- (18) K. Oguri, Y. Okano, T. Nishikawa, and H. Nakano, "Ejection of Liquid Aluminum Nanoparticles in Femtosecond-Laser-Ablation Plume Observed by Spatiotemporally-Resolved XAFS", 5th International Symposium on Ultrafast Intense Laser Science (ISUILS5), Lijiang, China (Nov. 2006).
- (19) M. Notomi, "All-Optical Control of Photonic Crystals", Photonic Crystal Meeting of IEEE Lasers and Electro-Optics Society (LEOS) Scottish Chapter, St. Andrews, U.K. (Nov. 2006).
- (20) A. Yokoo and H. Namatsu, "Nanoelectrode Lithography", 2006 Materials Research Society Fall Meeting (MRS 2006 Fall), Boston, U.S.A. (Nov.-Dec. 2006).
- (21) M. Notomi, "All-Optical Control of Light in Photonic Crystals", 2006 Symposium of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society (LEOS) Benelux Chapter, Eindhoven, The Netherlands (Dec. 2006).

編集 “NTT 物性科学基礎研究所の研究活動”編集委員会

尾身 博雄

影島 博之

谷山 秀昭

赤坂 哲也

林 稔晶

発行 日本電信電話株式会社(NTT)

物性科学基礎研究所

企画担当

〒243-0198 神奈川県厚木市森の里若宮 3-1

電話:(046)240-3312

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