

NTT物性科学 基礎研究所の 研究活動

Research Activities in NTT Basic Research Laboratories

平成25(2013)年度

VOL.

24



日本電信電話株式会社 物性科学基礎研究所

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



機能性素材「hitoe」

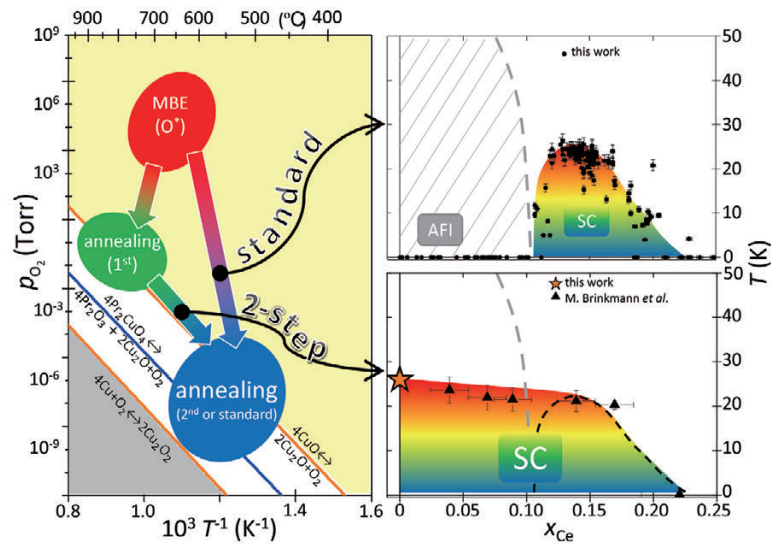


「hitoe」を利用した生体情報計測用ウェアと計測例

表紙の写真：

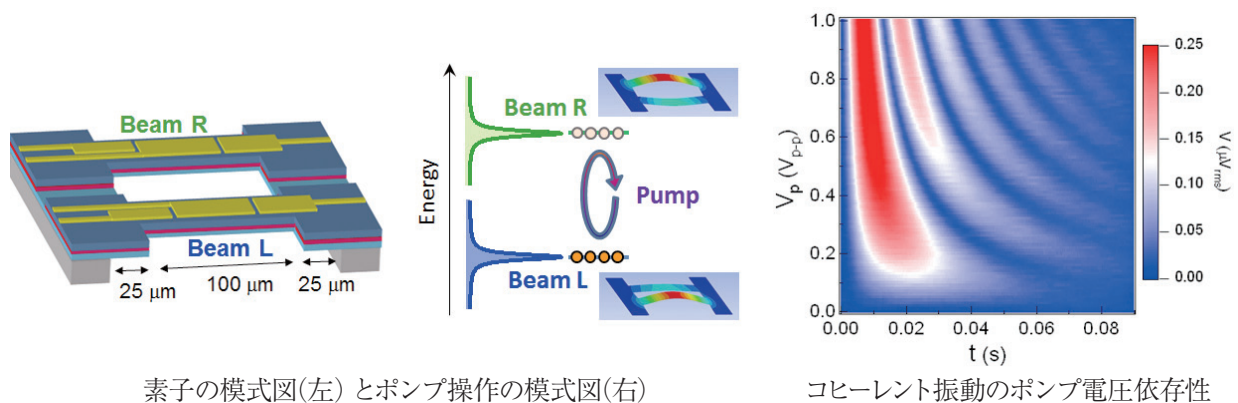
生体信号を取得するための機能性素材「hitoe」

東レ株式会社と共同で着衣するだけで心拍数・心電波形などの生体情報を取得できる機能素材“hitoe”を開発した。最先端繊維素材であるナノファイバに導電性高分子 PEDOT-PSS をコーティングすることで、導電性、柔軟性、生体適合性、耐久性に優れた機能性素材を実現した。“hitoe”を利用したウェアを着るだけで、心拍・心電図の常時モニタリングができる。(26 ページ)



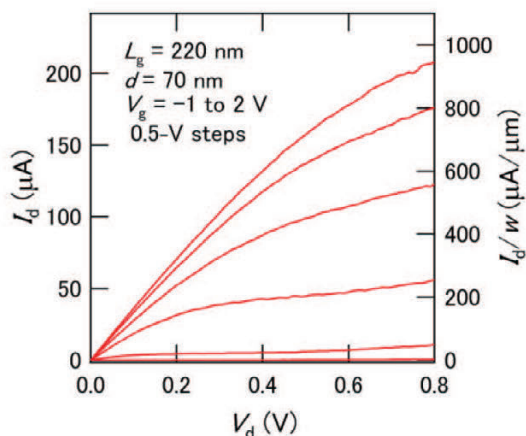
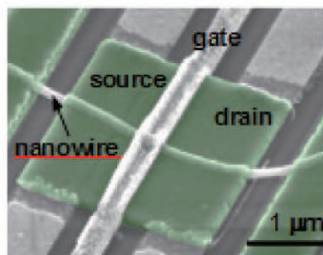
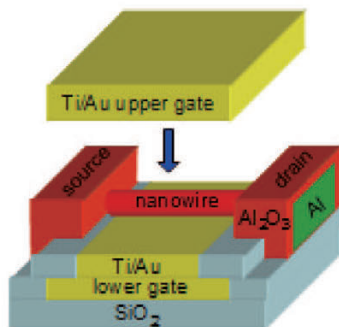
Pr₂CuO₄ に対するアニール経路と得られた電子相図の違い

$RE_{2-x}Ce_xCuO_4$ (RE は希土類元素)のように、平面4配位のCuO₂面を有する銅酸化物(通常、電子ドープ型超伝導体と呼ばれる)では、超伝導の発現に、試料合成後の還元アニールが必要なことが知られている。我々は、アニール経路によってPr_{2-x}Ce_xCuO₄の電子相図が大きく変わり、アニール経路を工夫する(2段階アニール)ことにより、ドープされていないPr₂CuO₄も超伝導化することを見出した[Y. Krockenberger et al., Sci. Rep. **3** (2013) 2235]。これは、ドープされていない銅酸化物は反強磁性絶縁体(AFI)であるという通説と相反する結果である。Brinkmannらによって報告された、CeドープされたPr_{2-x}Ce_xCuO₄に対するアニール経路の影響[M. Brinkmann et al., Phys. Rev. Lett. **74** (1995) 4927]も併せて考慮すると、Pr_{2-x}Ce_xCuO₄に対する電子相図は上図(右下)のようになる。(22ページ)



結合機械共振器におけるフォノンのコヒーレント操作

圧電的な周波数変調を用いたパラメトリックポンピングにより、GaAs結合機械共振器のコヒーレント操作に成功した。これは2つの機械共振器の差周波に合致した交流ポンプ電圧の印加により可能となり、ポンプフォノン吸収・放出を介して2つの共振器が交互に振動する“コヒーレント(Rabi) 振動”が観測される。この振動周期はポンプ強度に反比例し、印加電圧とポンプ時間の調節により機械共振器の振動を自在に制御することが可能となる。(31ページ)



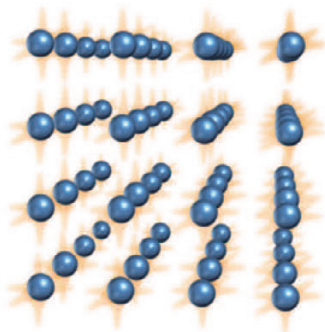
InAs ナノワイヤ FET の模式図(左) と走査型電子顕微鏡像(右)

室温におけるナノワイヤ FET の出力特性

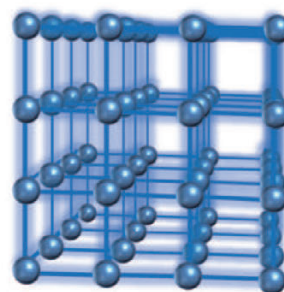
ゲートオーバーラップをもつ Gate-All-Around InAs ナノワイヤ FET

室温での易動度が大きい InAs のナノワイヤをチャネルとする電界効果トランジスタ (FET) を作製した。ゲート電極がチャネルを取り囲んだ Gate-All-Around 構造であり、電流制御性が優れている。さらにゲートがソース・ドレイン電極にオーバーラップしているため寄生抵抗が小さく、ナノワイヤ FET としてはトップクラスの ON 特性が得られている。(36 ページ)

光格子に束縛された原子集団



クラスタ状の量子もつれ

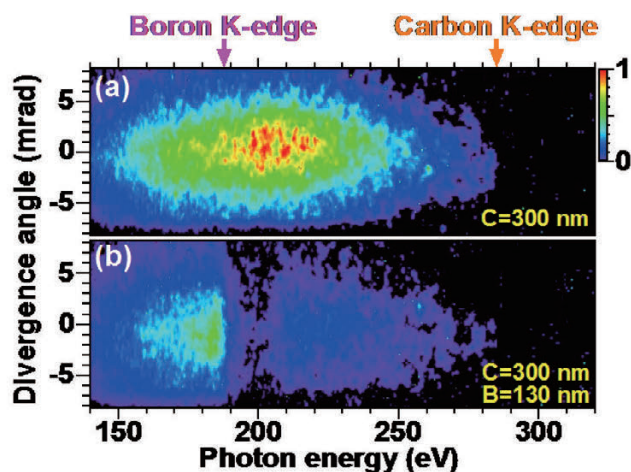


量子もつれ生成

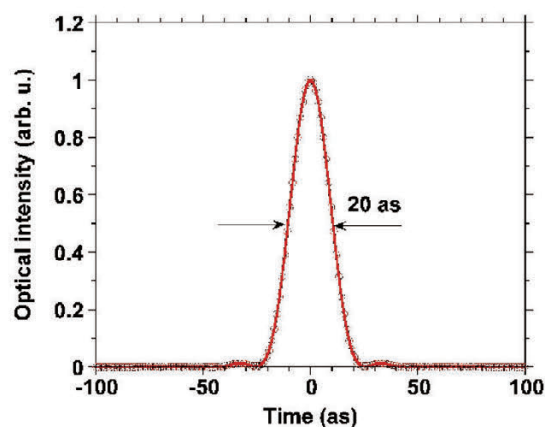
クラスタ状態生成の模式図

光格子中の冷却原子を用いたクラスタ状態生成法の提案

光格子は光で作る人工結晶であり、光の波長程度の間隔に 100 万個程度の冷却原子を周期的に捕捉できる。また、原子のもつ核スピンなどの内部自由度を量子ビットとして用いることができる。本研究では、レーザ光の照射やその強度調整だけの現在確立済みの実験技術を組み合わせることで、光格子中の原子間にクラスタ状態と呼ばれる大規模な量子もつれを、高精度かつ高速に生成する手法を提案した。この提案は、100 万ビット規模の量子計算実現につながる有望なアプローチとなる。(38 ページ)



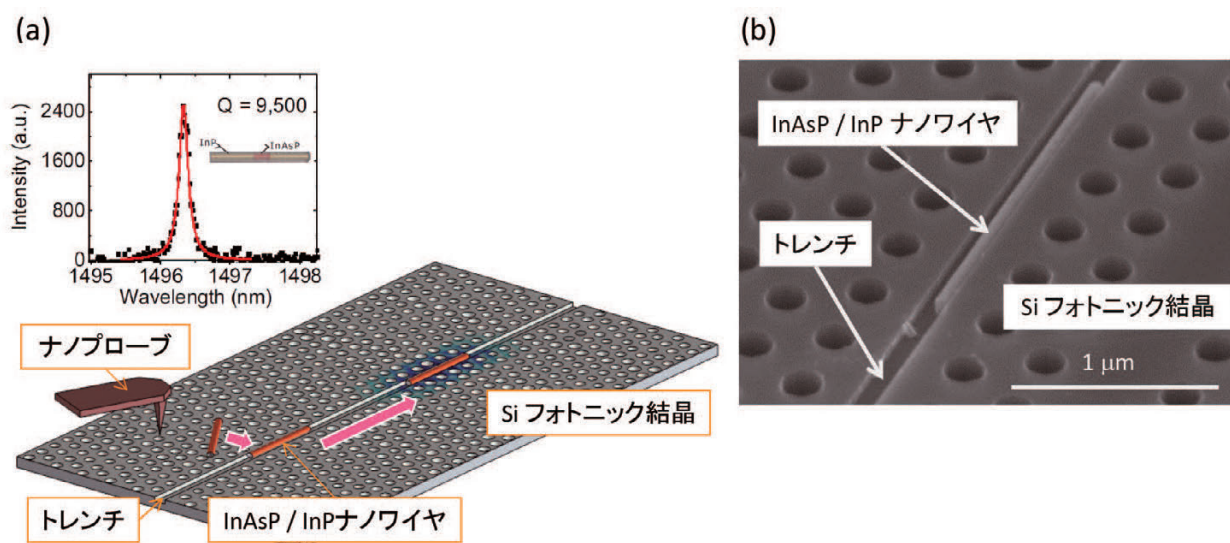
アト秒パルススペクトル分布。(a)炭素フィルタ透過後、
(b)炭素とホウ素フィルタ透過後。



フーリエ変換限界パルス幅

ダブルオプティカルゲート法を用いた炭素 K 吸収端 (284 eV) 領域の単一アト秒パルス発生

我々は、世界最小の基本波レーザーエネルギー (247 μJ) から、光子エネルギー 284 eV (波長: 4.4 nm) 領域のアト秒パルス発生に成功した。アト秒とは、100 兆分の 1 秒 (10^{-18} 秒) を指し、世界最短のパルスレーザー光源である。284 eV 領域のアト秒パルス光源は、炭素元素の K 殻電子を直接励起できる波長であるため、応用として生体分子を生きのまま観測できる期待がある。(43 ページ)



(a) フォトニック結晶線欠陥トレンチへのナノワイヤ導入による共振器形成の模式図。発光スペクトルはナノワイヤ導入により形成された共振器の共振ピークを示す。
(b) トレンチ内に配置されたナノワイヤの SEM 像。

半導体ナノワイヤと Si フォトニック結晶によるナノ共振器形成

線欠陥中にトレンチ構造をもつフォトニック結晶上で、微細な探針 (ナノプローブ) を使って、トレンチ内にナノワイヤを配置することで、共振器を新規形成することに成功した (最高 Q 値 9500)。さらに、トレンチ内でのナノワイヤ移動により共振器の位置を変更可能であることを実証した。また、パーセル効果により、III-V 族ナノワイヤとしては最も短い光子寿命 (91 ps) が達成された。(45 ページ)

ごあいさつ



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

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

研究を進める上では、NTT グループ内での研究協力はもちろんのこと、日本、米国、欧州、アジアの大学や研究機関と幅広く共同研究を行うことにより、『世界に開かれた研究所』としての役割を果たしています。我々は、若手研究者の育成も研究所としてのミッションの 1 つと考え、世界中から一流教授・研究者を講師としてお招きして『BRL スクール』を隔年で開催しております。2013 年 11 月には、“Nano and Quantum Science: Driving Tomorrow’s Technology” をテーマとしたスクールを当厚木 R & D センター内において実施し、世界 14 カ国の大学・研究機関から 35 名の博士課程の学生、若手研究者が参加しました。この活動が、若手研究者にとって研究活動への大きな刺激となり、将来の研究者育成に貢献できることを期待しております。また、スクールと並行して開催した、ナノスケール構造における物理と応用に関する国際シンポジウム『ISNTT2013』にも、多数の海外からの参加者を含め総勢 200 名の第一線で活躍する研究者が集結し活発な討議が行われました。

以上のような活動を通じて、NTT 事業への貢献のみならず、学術的貢献も積極的に推進してゆく所存でございます。今後とも一層のご指導・ご鞭撻を賜りますようお願い申し上げます。

2014 年 7 月

寒川 哲臣

NTT 物性科学基礎研究所
所長 寒川 哲臣

目 次

ページ

◆ 表紙	
◆ 生体信号を取得するための機能性素材「hitoe」	
◆ カラー口絵	I
◆ Pr_2CuO_4 に対するアニール経路と得られた電子相図の違い	
◆ 結合機械共振器におけるフォノンのコヒーレント操作	
◆ ゲートオーバーラップをもつ Gate-All-Around InAs ナノワイヤ FET	
◆ 光格子中の冷却原子を用いたクラスタ状態生成法の提案	
◆ ダブルオプティカルゲート法を用いた炭素 K 吸収端 (284 eV) 領域の単一アト秒パルス発生	
◆ 半導体ナノワイヤと Si フォトニック結晶によるナノ共振器形成	
◆ ごあいさつ	V
◆ NTT 物性科学基礎研究所 組織図	1
◆ NTT 物性科学基礎研究所 所員一覧	2
I . 研究紹介	
◇ 各研究部の研究概要	17
◇ 機能物質科学研究部の研究紹介	19
◆ イオンビームアシスト MBE 法による立方晶 BN 単結晶薄膜の成長	
◆ 選択成長 MOVPE による窒素極性 GaN (000-1) の核成長および螺旋成長	
◆ 非極性面への AlGaIn 量子井戸形成による深紫外発光強度の増大	
◆ 電荷移動絶縁体の下に隠れた超伝導の出現	
◆ 通信波長帯発光材料エルビウム-イットリウム化合物の作製と発光の広帯域化	
◆ 極薄六方晶 BN の合成とトンネル素子への応用	
◆ 基板上グラフェンの熱的不安定性	
◆ 生体信号を取得するための機能性素材「hitoe」	
◆ ナノバイオデバイスのための細胞骨格様プラットフォームの構築	
◆ 薬理学的刺激による単一イオンチャネル受容体の構造変化	
◇ 量子電子物性研究部の研究紹介	29
◆ 共振回路を用いた高速・高感度センサ	
◆ 極低温におけるシリコン単電子転送素子の精度評価	
◆ 結合機械共振器におけるフォノンのコヒーレント操作	

- ◆ 電気機械フォノンレーザ
- ◆ ハイブリッド量子系における量子状態の保存と読み出し
- ◆ 測定強度を変えた量子状態の射影操作
- ◆ 直接ギャップ半導体ヘテロ接合によるトポロジカル絶縁体の実現
- ◆ ゲートオーバーラップをもつ Gate-All-Around InAs ナノワイヤ FET
- ◆ 有機半導体 DNTT をベースとした MIS キャパシタの AC アドミッタンス

◇ 量子光物性研究部の研究紹介 38

- ◆ 光格子中の冷却原子を用いたクラスタ状態生成法の提案
- ◆ 結合共振器光導波路を用いた単一光子バッファ
- ◆ 実環境下での 90 km 量子鍵配送システムの長期安定性検証実験
- ◆ グラフェン／鉄上への InP ナノワイヤ成長
- ◆ カーボンナノホーンにおけるトポロジカルラマンバンド
- ◆ ダブルオプティカルゲート法を用いた炭素 K 吸収端 (284 eV) 領域の単一アト秒パルス発生
- ◆ コヒーレントフォノンを用いた量子ドット励起子の発光制御
- ◆ 半導体ナノワイヤと Si フォトニック結晶によるナノ共振器形成
- ◆ 微小な埋め込みヘテロ構造を含むフォトニック結晶 InGaAs 光ディテクタ
- ◆ 埋込みヘテロ構造フォトニック結晶からの自然放出光の増強と抑制

◇ ナノフォトニクスセンタの研究紹介 48

- ◆ 波長サイズ埋込活性層フォトニック結晶 (LEAP) レーザの低エネルギー直接変調
- ◆ フランツ・ケルディッシュ効果による導波路結合 Ge フォトダイオードの L バンド感度向上

II . 資料

◇ 第 6 回 NTT 物性科学基礎研究所スクール 51

◇ 国際シンポジウム ISNTT2013 の開催 52

◇ BRL セミナー講演一覧 (2013 年度) 53

◇ 表彰受賞者一覧 (2013 年度) 56

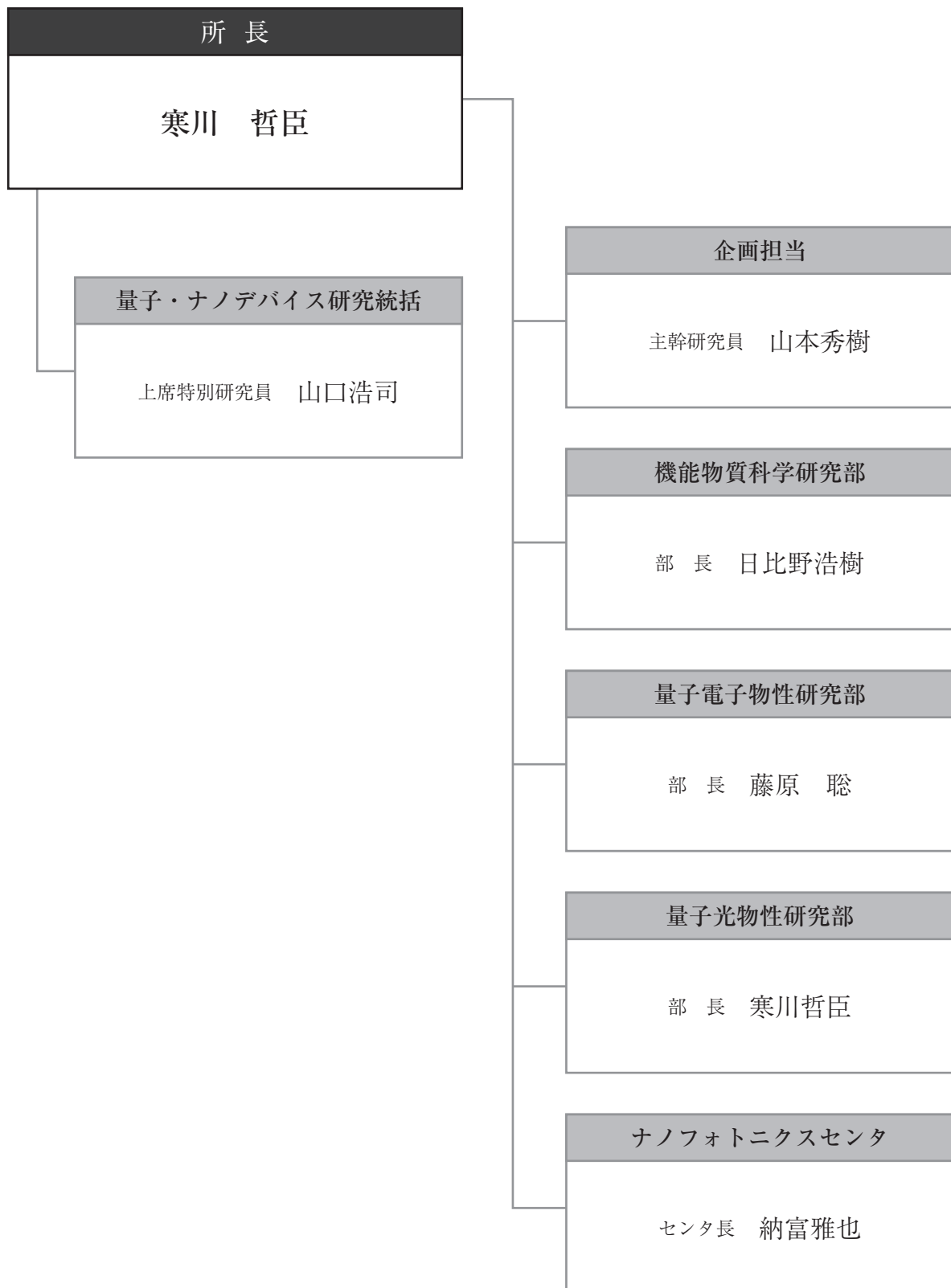
◇ 報道一覧 (2013 年度) 58

◇ 学術論文掲載件数、国際会議発表件数および出願特許数 (2013 年) 61

◇ 国際会議招待講演一覧 (2013 年) 63

NTT 物性科学基礎研究所 組織図

2014 年 3 月 31 日付



NTT 物性科学基礎研究所 所員一覧

2014 年 3 月 31 日付
(* は年度途中までの在籍者)

物性科学基礎研究所

所長 寒川 哲臣

量子・ナノデバイス研究統括



上席特別研究員 山口 浩司

企画担当



企画担当主幹研究員 山本 秀樹

総括担当主幹研究員 中島 寛

研推担当主任研究員 小栗 克弥

NTT リサーチプロフェッサー 都倉 康弘 (筑波大学)

機能物質科学研究部



部長 **日比野浩樹**

補佐 赤坂哲也

薄膜材料研究グループ

グループリーダー

山本秀樹

小林康之*

赤坂哲也

Krockenberger, Yoshiharu

廣木正伸

Banal, Ryan

熊倉一英

谷保芳孝

平間一行

佐藤寿志

小野満恒二

狩元慎一

Lin, Chia-Hung

低次元構造研究グループ

グループリーダー

日比野浩樹

前田文彦

尾身博雄

田邊真一*

村田祐也*

古川一暁

上野祐子

高村真琴

Orofeo, Carlo M.

鈴木 哲

関根佳明

Wang, Shengnan

Najar, Adel

分子生体機能研究グループ

グループリーダー

住友弘二

塚田信吾

後藤東一郎

河西奈保子

田中あや

樫村吉晃

大嶋 梓

量子電子物性研究部



部長 藤原 聡

補佐 林 稔晶

唐沢 毅

ナノデバイス研究グループ

グループリーダー

藤原 聡

影島博之

田中弘隆

知田健作

山口 徹

登坂仁一郎

西口克彦

山端元音

複合ナノ構造物理研究グループ

グループリーダー

山口浩司

原田裕一

齊藤志郎

岡本 創

畑中大樹

中ノ勇人

山口真澄*

角柳孝輔

樋田 啓

山崎謙治

Mahboob, Imran

松崎雄一郎

岡崎雄馬

量子固体物性研究グループ

グループリーダー

村木康二

蟹沢 聖

鈴木恭一

熊田倫雄

小林 嵩*

佐々木 智

林 稔晶

高瀬恵子

Rhone, Trevor David

田村浩之

太田 剛

入江 宏

量子光物性研究部



部長 **寒川哲臣**

補佐 向井哲哉

量子光制御研究グループ

グループリーダー

清水 薫

武居弘樹
柴田浩行
森越文明
橋本大祐
今井弘光
野田数人

熊谷雅美
山下 眞
玉木 潔
松田信幸
稲垣卓弘

井桁和浩
向井哲哉
稲葉謙介
東 浩司
Munro, William John

量子光デバイス研究グループ

グループリーダー

後藤秀樹

舘野功太
Zhang, Guoqiang
増子拓紀
佐々木健一

俵 毅彦
眞田治樹
日達研一

石澤 淳
加藤景子
国橋要司

フォトリックナノ構造研究グループ

グループリーダー

納富雅也

新家昭彦
谷山秀昭
滝口雅人
Xu, Hao*

横尾 篤
角倉久史
小野真証
Shakoor, Abdul

倉持栄一
野崎謙悟
Birowosuto, Danang*

ナノフォトニクスセンタ (NPC)



センタ長

納富雅也

フォトニックナノ構造研究チーム

納富雅也

倉持栄一

野崎謙悟

尾身博雄

松田信幸

新家昭彦

谷山秀昭

滝口雅人

俵 毅彦

横尾 篤

角倉久史

小野真証

柴田浩行

InP 系化合物デバイス研究チーム

松尾慎治

武田浩司

碓塚孝明

長谷部浩一

佐藤具就

藤井拓郎

シリコンフォトニクス研究チーム

山田浩治

西 英隆

土澤 泰

開 達郎

高磊（高橋 礼）

武田浩太郎

上席特別研究員



納富 雅也

昭和63年東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻修士課程修了。同年日本電信電話(株)入社、NTT光エレクトロニクス研究所勤務。平成7年から8年リンシェーピング大学(スウェーデン)客員研究員。平成11年よりNTT物性科学基礎研究所勤務。平成13年より特別研究員、平成22年より上席特別研究員。現在NTTナノフォトンクスセンタ長およびフォトリソナノ構造研究グループリーダー。入社以来一貫して人工ナノ構造による物質の光学物性制御およびデバイス応用の研究を行う。量子細線、量子箱の研究を経て、現在フォトリソ結晶の研究に従事。工学博士(東京大学)。2006/2007 IEEE/LEOS Distinguished Lecturer Award受賞。平成20年度学術振興会賞受賞。平成20年度日本学士院学術奨励賞受賞。平成22年度文部科学大臣表彰科学技術賞(研究部門)受賞。平成22年より文部科学省国立大学法人評価委員。2013年 IEEE Fellow。東京工業大学理学部物理学科連携客員教授を兼任。応用物理学会、APS、IEEE、OSA会員。



山口 浩司

昭和59年大阪大学理学部物理学科卒業。昭和61年同大学院理学研究科物理学専攻博士前期課程修了。同年日本電信電話(株)に入社。以来、電子線回折、走査型トンネル顕微鏡などの手法により、化合物半導体の表面物性を実験的に解明する研究に従事。約10年前より半導体ヘテロ接合構造を用いた微小機械素子の研究に取り組んでいる。平成5年工学博士。平成7~8年英国ロンドン大学インペリアルカレッジ客員研究員。平成15年独国 Paul Drude 研究所客員研究員。平成18年より東北大学理学部客員教授。平成20・21年度応用物理学会理事・常務理事。2011年国際マイクロプロセス・ナノテクノロジー国際会議(MNC)組織委員長をはじめ、これまで40以上の学会・国際会議委員を務める。平成元年度、平成16年度、平成22年度応用物理学会論文賞、MNC2008 Outstanding Paper Award、SSDM2011 Paper Award、2011年英国 Institute of Physics (IOP) Fellowship、平成23年度井上学術賞、平成25年度文部科学大臣表彰、応用物理学会フェローシップ受賞。現在、量子・ナノデバイス研究統括担当/複合ナノ構造物理研究グループリーダー。応用物理学会、日本物理学会、IOP、アメリカ物理学会、IEEE会員。



村木 康二

平成元年東京大学工学部物理工学科卒業。平成6年同大学院工学系研究科物理工学専攻博士課程修了。同年日本電信電話(株)に入社、基礎研究所勤務。平成11年より物性科学基礎研究所。入社以来、高移動度半導体ヘテロ構造の結晶成長とその量子電子物性の研究に従事。現在、NTT物性科学基礎研究所量子電子物性研究部量子固体物性研究グループリーダー。平成13~14年ドイツマックスプランク研究所(シュトゥットガルト)客員研究員。2010年半導体強磁場国際会議プログラム委員長、2011年2次元電子国際会議プログラム委員、2012年半導体強磁場国際会議プログラム委員などを歴任。平成20~25年科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業ERATO核スピンエレクトロニクスプロジェクト物理研究・結晶成長グループリーダー。平成21年より特別研究員、平成25年より上席特別研究員。日本物理学会、応用物理学会会員。

特別研究員



藤原 聡

平成元年東京大学工学部物理工学科卒業。平成6年同大学院工学系研究科物理工学専攻博士課程修了。同年日本電信電話(株)に入社、NTT LSI研究所勤務。平成8年にNTT基礎研究所、平成11年よりNTT物性科学基礎研究所。入社以来、シリコンナノ構造の物性制御とそのデバイス応用、単電子デバイスの研究に従事。平成24年4月より、NTT物性科学基礎研究所量子電子物性研究部長、ナノデバイス研究グループリーダー兼務。平成15~16年米国National Institute of Standards and Technology (NIST, Gaithersburg)客員研究員。平成22~23年に応用物理学会理事、平成25年に北大客員教授を務める。平成10年に国際固体素子・材料コンファレンス SSDM'98 Young Researcher Award、平成11年にSSDM'99 Paper Award受賞。平成15年、18年、ならびに25年に日本応用物理学会JJAP論文賞受賞。平成18年文部科学大臣表彰若手科学者賞受賞。応用物理学会、IEEE会員。



谷保 芳孝

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



熊田 倫雄

平成10年東北大学理学部物理学科卒業。平成15年同大学院理学研究科物理学専攻博士課程修了。同年日本電信電話(株)に入社、NTT物性科学基礎研究所勤務。入社以来、半導体ヘテロ構造における量子電子物性の研究に従事。平成20年日本物理学会若手奨励賞受賞、平成24年に文部科学大臣表彰若手科学者賞。日本物理学会会員。



西口 克彦

平成10年東京工業大学工学部電子物理工学科卒業。平成14年同大学大学院理工学研究科電子物理工学専攻博士課程終了。同年日本電信電話(株)に入社、NTT物性科学基礎研究所勤務。現在、同所量子電子物性研究部ナノデバイス研究グループ主任研究員。入社以来、低消費電力化・新機能化を目指したナノ構造のシリコン・デバイスの研究に従事。平成20年9月フランス National Center for Scientific Research(CNRS)客員研究員、平成24-25年オランダデルフト工科大学客員研究員。平成12年に応用物理学会講演奨励賞、同年 International Conference on Physics of Semiconductors 2000、IUAP Young Author Best Paper Award、同年 Materials Research Society 2000 Fall Meeting, Graduate Student Award Silver、平成25年応用物理学会優秀論文賞、平成25年度科学技術分野の文部科学大臣表彰若手科学者賞の各賞を受賞。応用物理学会会員。



齊藤 志郎

平成7年東京大学工学部物理工学科卒業。平成12年同大学院工学系研究科物理工学専攻博士課程修了。同年、日本電信電話(株)NTT物性科学基礎研究所、リサーチアソシエイト。平成15年、同社入社。入社以来、超伝導を用いた量子情報処理を目指し、超伝導磁束量子ビットの研究に従事。現在、量子電子物性研究部超伝導量子物理研究グループ主任研究員。平成17~18年オランダデルフト工科大学客員研究員。平成16年に応用物理学会講演奨励賞。平成24年5月より東京理科大学客員准教授。日本物理学会、応用物理学会会員。



武居 弘樹

平成6年大阪大学基礎工学部電気工学科卒業。平成8年同大学院基礎工学研究科物理系専攻博士前期課程修了。同年日本電信電話(株)に入社、NTTアクセス網研究所(現アクセスサービスシステム研究所)に勤務し、波長多重アクセスネットワークなどの研究に従事。平成15年よりNTT物性科学基礎研究所。以来、光通信波長帯における量子光学、量子通信の研究に取り組んでいる。平成14年、博士(工学)(大阪大学)。平成16年~17年スタンフォード大学客員研究員。現在、量子光物性研究部量子光制御研究グループ主幹研究員。平成20年ITU-T Kaleidoscope Academic Conference: Innovations in NGN - Future Network and Services, Best Paper Award、平成22年度科学技術分野の文部科学大臣表彰若手科学者賞の各賞を受賞。IEEE、応用物理学会会員。



Imran Mahboob

平成13年シェフィールド大学にて理論物理学修士課程を修了。窒化物半導体の電子物性に関する研究にて平成16年ワーウィック大学物理学博士課程を修了。平成17年より日本電信電話（株）NTT物性科学基礎研究所、量子電子物性研究部にてリサーチアソシエイト、平成20年よりリサーチスペシャリスト、平成24年より主任研究員。現在、同複合ナノ構造物理研究グループに所属。入社以来、デジタル信号処理への応用と非線形ダイナミクスの探索に向けた電気機械共振器の研究に従事。平成13年にClarke Prize in Physicsを受賞、平成15年にPhysics of Semiconductors and Interfaces ConferenceにてYoung Scientist Awardを受賞。

アドバイザーボード (2013 年度)

氏名	所属
Prof. Gerhard Abstreiter	Walter Schottky Institute, Technical University of Munich, Germany
Prof. John Clarke	Department of Physics, University of California, Berkeley, U.S.A.
Prof. Evelyn Hu	School of Engineering and Applied Sciences, Harvard University, U.S.A.
Prof. Mats Jonson	Department of Physics, University of Gothenburg, Sweden
Prof. Sir Peter Knight	Department of Physics, Imperial College/The Kavli Royal Society International Centre at Chicheley Hall, U.K.
Prof. Anthony J. Leggett	Department of Physics, University of Illinois, U.S.A.
Prof. Allan H. MacDonald	Department of Physics, The University of Texas, Austin, U.S.A.
Prof. Andreas Offenhäusser	Institute of Complex Systems, Forschungszentrum Julich, Germany
Prof. Halina Rubinsztein-Dunlop	School of Physical Sciences, University of Queensland, Australia
Prof. Klaus von Klitzing	Max Planck Institute for Solid State Research, Germany

招聘教授／客員研究員（2013 年度）

氏名	所属	期間
仙場 浩一	国立情報学研究所 (NII)	Apr. 2013 – Mar. 2014

海外研修生（2013 年度）

氏名	所属	期間
Ruaridh Forbes	University of Edinburgh, U.K.	Jul. 2012 – Apr. 2013
Pawel Pactwa	AGH University of Science and Techonology, Poland	Sep. 2012 – Aug. 2013
Justin Yan	The University of British Columbia, Canada	Jan. 2013 – Aug. 2013
Thomas Ziebarth	University of Victoria, Canada	Jan. 2013 – Aug. 2013
Joey Chau	University of Toronto, Canada	Jan. 2013 – Dec. 2013
Punn Augsornworawat	McGill University, Canada	Jan. 2013 – Dec. 2013
Amedee Lacraz	ESPCI ParisTech (École supérieure de physique et de chimie industrielles de la ville de Paris), France	Apr. 2013 – Aug. 2013
Anthony Park	The University of British Columbia, Canada	May 2013 – Dec. 2013
Jing Wang	Georgia Institute of Technology, U.S.A.	May 2013 – Dec. 2013
Samuel Metais	ESPCI ParisTech (École supérieure de physique et de chimie industrielles de la ville de Paris), France	Jul. 2013 – Dec. 2013
Simon Yves	ESPCI ParisTech (École supérieure de physique et de chimie industrielles de la ville de Paris), France	Jul. 2013 – Dec. 2013

氏名	所属	期間
Nicolas Perrissin	ESPCI ParisTech (École supérieure de physique et de chimie industrielles de la ville de Paris), France	Jul. 2013 – Dec. 2013
Malo Tarpin	ESPCI ParisTech (École supérieure de physique et de chimie industrielles de la ville de Paris), France	Jul. 2013 – Dec. 2013
Sophie De La Vaissiere	ESPCI ParisTech (École supérieure de physique et de chimie industrielles de la ville de Paris), France	Jul. 2013 – Dec. 2013
Louise Waterston	University of Edinburgh, U.K.	Jul. 2013 –
Paul Knott	University of Leeds, U.K.	Sep. 2013 – Dec. 2013
Rick Lu	University of Waterloo, Canada	Sep. 2013 –
Anna Fomitcheva Khartchenko	University of Barcelona, Spain	Sep. 2013 –
Jose Alberto Rodriguez Santamaria	University of Burgos, Germany	Sep. 2013 –
Krzysztof Jan Gibasiewicz	Warsaw university of Technology, Poland	Sep. 2013 –
Gianfranco D'Ambrosio	Politecnico di Milano, Italy	Sep. 2013 –
Logan G. Blackstad	Georgia Institute of Technology, U.S.A.	Sep. 2013 –
Peter Karkus	Budapest University of Technology and Economics, Hungary	Sep. 2013 –
Henry Pigot	The University of British Columbia, Canada	Jan. 2014 –
Ryan Neufeld	University of Waterloo, Canada	Jan. 2014 –
Adrian Salmon	Georgia Institute of Technology, U.S.A.	Jan. 2014 –
Andrew Tin	McGill University, Canada	Feb. 2014 –

国内実習生（2013 年度）

氏名	所属	期間
代 俊	東京大学大学院	H25.04.01 ～ H26.03.31
大杉 廉人	東北大学大学院	H25.04.01 ～ H26.03.31
松本 俊一	東京理科大学	H25.04.01 ～ H26.03.31
鈴木 元	東京理科大学	H25.04.01 ～ H26.03.31
佐藤 貴彦	東京大学大学院	H25.04.01 ～ H26.03.31
ヌルエミー ビンティ	東京電機大学	H25.04.01 ～ H26.03.31
後藤 貴大	東京電機大学	H25.04.01 ～ H26.03.31
野口 圭祐	東京工業大学	H25.04.01 ～ H26.03.31
角井 貴信	横浜国立大学	H25.04.01 ～ H26.03.31
山口 量彦	東京理科大学	H25.04.01 ～ H26.03.31
田中 亨	早稲田大学	H25.04.30 ～ H26.03.31
吉成 正人	東京理科大学	H25.05.07 ～ H26.03.31
鈴木 賢一	東京電機大学	H25.06.01 ～ H26.03.31
伏見 亮大	慶應義塾大学大学院	H25.06.26 ～ H26.03.31
田中 咲	慶應義塾大学大学院	H25.07.22 ～ H25.08.16
井上 賢太	筑波大学大学院	H25.08.19 ～ H25.09.13
ツァイ ハン	東北大学大学院	H25.10.01 ～ H26.03.31
守屋 和樹	東京大学大学院	H25.10.01 ～ H26.03.31
叶内 慎吾	長岡技術科学大学	H25.10.11 ～ H26.02.14
高木 翔平	長岡技術科学大学	H25.10.11 ～ H26.02.26
田中 咲	慶應義塾大学大学院	H25.10.21 ～ H26.03.31
テオ ドン シェン	豊橋技術科学大学	H26.01.08 ～ H26.02.24
玉城 智啓	東洋大学大学院	H26.01.08 ～ H26.03.31

I . 研究紹介

各研究部の研究概要

機能物質科学研究部

日比野浩樹

機能物質科学研究部（物質部）では、原子・分子レベルで物質の構造を制御することにより、新しい物質や機能を創造し、物質科学分野における学術貢献を行うとともに、情報通信技術に大きな変革を与えることを目指しています。

この目標に向かって、3つの研究グループが、広範囲な物質を対象として研究を進めています。その範囲は、窒化物半導体、グラフェンから、酸化物高温超伝導体、さらには、受容体タンパク質などの生体物質に至り、高品質薄膜成長技術や物質の構造と物性を精密に測定する技術をもとに最先端の研究を推進しています。

この1年では、従来絶縁体と考えられてきたノンドープの銅酸化物に超伝導を発現させるアニール処理が、ミクロにどのような状態変化をもたらすのかを明らかにするとともに、ダイヤモンド基板上での立方晶BN単結晶薄膜の成長およびCo薄膜上での六方晶BN単層膜の成長に成功しました。また、東レ株式会社と共同で、着衣するだけで生体信号を高感度に取り得できる機能素材「hitoe」の実用化に成功しました。

量子電子物性研究部

藤原 聡

量子電子物性研究部（物性部）は、将来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。高品質薄膜結晶の成長技術やナノメータスケールの微細加工技術など「ものづくり」技術を開発しながら、単電子、メカニクス、量子、スピンなどの新しい自由度に基づく物性の探索を行い、それらを利用した低消費電力デバイス、量子情報処理デバイス、高感度センサなどの革新デバイスの創出を目指しています。

今年は、電気機械共振器におけるフォノンレージング、結合機械共振器でのフォノンのコヒーレント操作、超伝導・ダイヤモンドハイブリッド量子系における量子状態の保存と読み出しに成功いたしました。また、InAs/GaSbヘテロ接合における2次元トポロジカル絶縁相の観測、単電子転送の精度評価と機構解明、RF-FETセンサの室温動作、ゲートオーバーラップ型InAsナノワイヤFETの高電流駆動などの研究で進展がありました。

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

量光部のグループでは、半導体量子ドットやナノワイヤなどのナノ構造光物性研究をベースにして、極微弱な光の量子状態制御、高強度極短パルス光による新物性探索、超音波やフォトリック結晶を応用した光物性制御などの研究が行われています。

この1年で、フォトリック結晶共振器を数百個結合した結合共振器光導波路中のスローライト効果を用いて単一光子バッファを実現することに成功しました。また、実環境下での90 km量子鍵配送システムの長期安定性の検証実験や光格子中の冷却原子を用いた量子クラスタ状態生成法の理論研究などでも進展がありました。その他、コヒーレントフォノンを用いた量子ドット励起子の発光制御およびダブルオプティカルゲート法を用いた炭素K吸収端（284 eV）領域の単一アト秒パルス発生にも成功しております。

ナノフォトリックスセンタ

納富雅也

ナノフォトリックスセンタ(NPC)は、ナノフォトリックス技術を駆使して、様々な機能を持つ光デバイスを大量・高密度に集積する大規模光集積技術の確立、および光情報処理の消費エネルギーの極限的な低減を目指す革新研究を行うために、物性科学基礎研究所、フォトリックス研究所及びマイクロシステムインテグレーション研究所の中でナノフォトリックスに関わる研究チームにより、2012年4月に設立されました。

本年は、光集積技術に関する研究では、III/V族半導体ナノワイヤとシリコンフォトリック結晶による新しいタイプのナノ共振器の形成、さらにモード多重伝送用ファイバとの接続をめざしたシリコン基板上多層配列導波路の実現に成功しました。また、ナノ光デバイスの研究として、ナノ光受光器の実現、電流注入レーザにおける極低消費エネルギー動作を達成をしました。さらにフォトリック結晶ナノ共振器中の量子井戸構造の発光を高速化することにも成功しました。

イオンビームアシスト MBE 法による立方晶 BN 単結晶薄膜の成長

平間一行 谷保芳孝 狩元慎一 Yoshiharu Krockenberger 山本秀樹
機能物質科学研究部

立方晶窒化ホウ素(*c*-BN)は大きなバンドギャップエネルギー (6.3 eV)を有するため、同じく sp^3 結合の窒化物半導体 (AlN、GaN、InN) とのヘテロ接合による高耐压電子デバイスや紫外発光デバイスへの応用が期待される。BN では sp^2 結合の六方晶構造 (*h*-BN) が安定相で、準安定相である *c*-BN 薄膜の成長は一般に困難であるが、成長時のイオン照射が *c*-BN 相の気相成長に有効であることが知られている。そこで本研究では、イオンビームを照射することが可能な MBE (イオンビームアシスト MBE) を用いて BN の成膜に取り組み、単結晶薄膜を得た。さらに成膜パラメータを変えて相図を作成し、*c*-BN 薄膜の成長機構を考察した。

BN 薄膜は格子整合性の良いダイヤモンド (001) 基板上に成長させた。ボロンは EB 加熱により、窒素はイオンソースから N^{2+} イオンの形で Ar^+ イオンとともに供給した。イオンの加速電圧 (V_{acc}) を 200-450 V、成長温度 (T_g) を 400-820°C と変化させて、生成相に関する相図を作成した。いずれの場合も窒素／ボロン供給比 (V/III) は > 1 とした。

図1は $V_{acc} = 280$ V、 $T_g = 750^\circ\text{C}$ 、V/III = 1.6 の条件で成長した BN 薄膜の断面 TEM 像と制限視野電子線回折 (SAED) 像である。成長初期から単結晶 *c*-BN (001) 薄膜がエピタキシャル成長していることがわかる。このことは成長中の RHEED 像 (図2) からも確認された [1]。この単結晶 *c*-BN 薄膜をテンプレートとして、 V_{acc} と T_g を変化させて BN 薄膜を再成長した際の生成相を図3に示す。 $V_{acc} < 220$ V (region I) では、RHEED 像はすぐにハローパターンとなった。FT-IR スペクトルで sp^2 結合に由来する吸収ピークが見られたことから、成長した BN 薄膜は主に乱層構造の *h*-BN [turbostratic-BN (*t*-BN)] である。 $V_{acc} = 280$ V (region II) の場合、単結晶テンプレートと同じ RHEED パターンが観察されたことから、単結晶 *c*-BN 薄膜がテンプレート上に継続して成長している。 $V_{acc} > 450$ V (region III) では、ダイヤモンド基板の RHEED パターンが現れたことから、BN 薄膜は成長せず、テンプレートのエッチングが起きていることが示唆される。生成相は 400-820°C の範囲では T_g に依存していないことから、BN 薄膜の結晶構造は主に V_{acc} によって決定されると言える。Region II 内の条件で成長した *c*-BN 薄膜の膜厚は、供給したボロン原子の量から想定される膜厚 (160 nm) の約 1/5 (約 30 nm) であり、約 80 % のボロンが成長中にイオンによってエッチングされていることがわかった。以上より、*c*-BN 成長領域では、『*c*-BN 相のエッチング速度 $<$ *c*-BN 相の形成速度 $<$ *t*-BN 相のエッチング速度』の関係が成立し、*c*-BN 相が選択的に形成していると考えられる [1]。

本研究の一部は科研費の援助を受けて行われた。

[1] K. Hirama et al., Appl. Phys. Lett. **104** (2014) 092113.

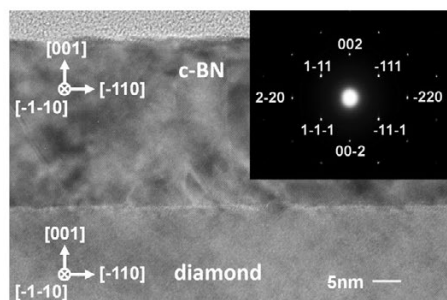


図1 単結晶 *c*-BN (001) 薄膜の断面 TEM 像と制限視野電子線回折像。

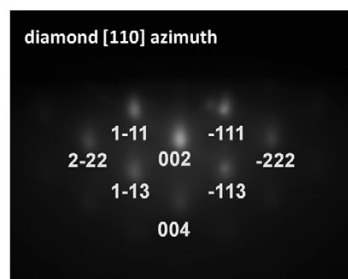


図2 単結晶 *c*-BN (001) 薄膜の RHEED 像。

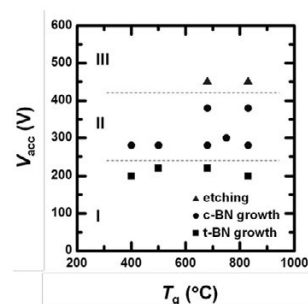


図3 イオンビームアシスト MBE 成長における BN 薄膜の成長相図。

選択成長 MOVPE による窒素極性 GaN (000-1) の核成長および螺旋成長

林 家弘 赤坂哲也 山本秀樹
機能物質科学研究部

原子層レベルで全く段差がない窒化物半導体ステップフリー面を用いれば、極めて急峻なヘテロ界面を有する量子素子の実現することが期待される。我々はこれまでに、MOVPE 選択成長法を用いて、III 族極性 GaN(0001) ステップフリー面を実現した[1]。ここで、高温での成膜により適した窒素極性 GaN(000-1) ステップフリー面が得られれば、それを土台として InN や $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ の高温成長が可能となり、従来困難であった窒化物半導体を用いた赤色や近赤外の高効率発光素子の実現に繋がると考えられる。ところが、窒素極性 GaN(000-1) 面成長の最適化はこれまで十分に検討されておらず、平坦な表面は得られていなかった。本研究では、窒素極性 GaN(000-1) ステップフリー面の形成へ向け、MOVPE 選択成長法を用いて、窒素極性 GaN(000-1) 面の成長機構を調べた。

GaN 薄膜の成長は、MOVPE 選択成長法を用いて窒素極性 GaN(000-1) バルク基板上行った。基板には大きさ $1\text{ }\mu\text{m}$ の六角形状開口部を多数設けた SiO_2 マスクを蒸着してある。原料ガスとしてアンモニアとトリメチルガリウム(TMG)を用いた。成長温度は 1015°C である。

図1は、ほぼステップフリーとなった窒素極性 GaN(000-1) 面の AFM 像である。分子層ステップが1-2本観察される以外は巨大な原子テラスによって表面がおおわれている。この六角形の領域では、らせん転位が全くないために核成長モードで結晶成長が進行した。一方、同じ試料において、らせん転位がある六角形状開口領域では、GaN が、螺旋成長モードで成長した。窒素極性 GaN(000-1) 面の核成長および螺旋成長速度の TMG 流量依存性を図2に示す。核成長速度は TMG 流量を大きくしても極めて遅い。その一方で、らせん成長速度は急激に増加する[2]。核成長速度が遅いことは、表面過飽和度が小さくて核生成頻度が低いことを意味している。この低い核生成頻度がステップフリー面に近い極めて平坦な窒素極性 GaN(000-1) 面を得るために重要であると考えられる。

本研究は科研費の援助を受けて行われた。

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

[2] C.H. Lin, T. Akasaka, and H. Yamamoto, Appl. Phys. Express 6 (2013) 035503.

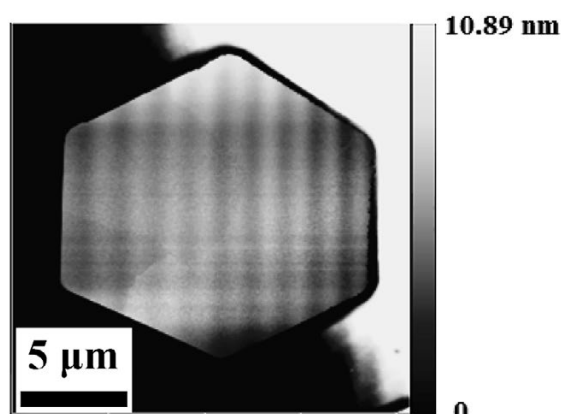


図1 ほぼステップフリーである窒素極性 GaN(000-1) 面の AFM 像。縦縞は光学的ノイズである。

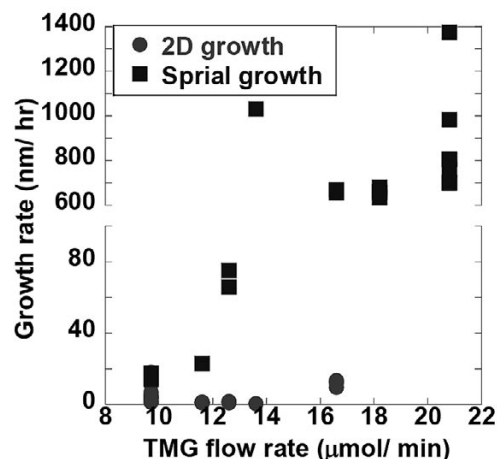


図2 窒素極性 GaN(000-1) 面の核および螺旋成長速度の TMG 流量依存性。

非極性面への AlGaN 量子井戸形成による深紫外発光強度の増大

Ryan Banal 谷保芳孝 山本秀樹
機能物質科学研究部

深紫外発光半導体である高Al組成AlGaNのバンド間遷移は、光の電場 E が c 軸方位と平行な場合($E \parallel c$)に許容となる。この光学遷移選択則により、AlGaNでは、C面からの発光は弱く、M面やA面からの発光が強くなるが(図1) [1]、従来、AlGaNは良質な結晶が比較的得やすいC面上に成長されてきたため、AlGaN系深紫外発光ダイオード(LED)の光取り出し効率が本質的に低かった。さらに、極性面であるC面上に形成したAlGaN量子井戸では、量子井戸面と垂直方向に内部電場が発生する。この内部電場により、電子と正孔が空間的に分離する量子閉じ込めシュタルク効果(QCSE)が生じるため、発光再結合確率が低下する(図2)。一方、非極性面であるM面やA面上に形成した量子井戸では、量子井戸面と垂直方向には内部電場が発生しないため、高い発光再結合確率が期待される[2]。本研究では、非極性M面上にAlGaN量子井戸を成長し、その発光特性を極性C面AlGaN量子井戸と比較した[3]。

非極性M面および極性C面AlGaN量子井戸は、M面およびC面AlN基板にMOVPE法を用いてエピタキシャル成長した。図3はそれらAlGaN量子井戸のフォトルミネッセンス(PL)スペクトルである。M面AlGaN量子井戸はC面AlGaN量子井戸よりも強い深紫外発光を示した。偏光特性の評価から、M面およびC面AlGaN量子井戸の発光はともに $E \parallel c$ 偏光しているが、M面のほうがC面よりも強く偏光していることがわかった。また、C面AlGaN量子井戸の発光波長はM面AlGaN量子井戸よりも長波長側にシフトしている。これは、C面AlGaN量子井戸ではQCSEに由来するバンド傾斜により、QCSEの影響がないM面AlGaN量子井戸よりも、遷移エネルギーが減少(発光波長が長波長化)するためと考えられる。非極性M面AlGaN量子井戸では、(1)強い $E \parallel c$ 偏光性、(2)QCSEの影響がない、の2点により、従来の極性C面AlGaN量子井戸よりも強い深紫外発光が得られると言える。

本研究の一部は科研費の援助を受けて行われた。

[1] Y. Taniyasu et al., Appl. Phys. Lett. **90** (2007) 261911.

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

[3] R. Banal et al., Appl. Phys. Lett. (2014) submitted.

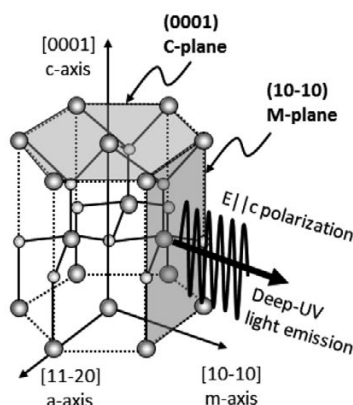


図1 AlGaN結晶からの偏光発光。

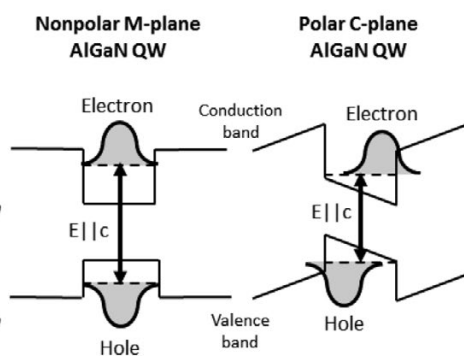


図2 M面およびC面AlGaN量子井戸のバンド図。

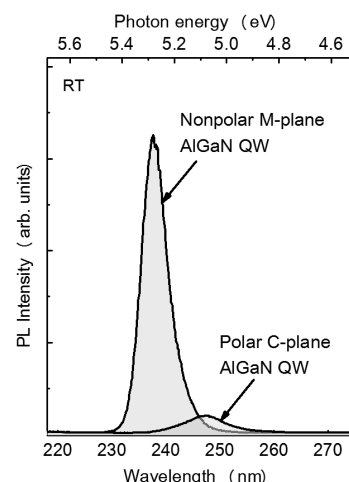


図3 M面およびC面AlGaN量子井戸のPLスペクトル。

電荷移動絶縁体の下に隠れた超伝導の出現

Yoshiharu Krockenberger 山本秀樹
機能物質科学研究部

多くの研究者による懸命な研究にも関わらず、高温超伝導には未だに謎が多く残っている。たとえば、ホールドーピング型の超伝導は、元素置換によるドーピングで発現するが、電子ドーピング型ではドーピングだけでは発現しない。この謎を解くにあたっては、ホールドーピングと電子ドーピングが、異なる配位の CuO_2 面で実現している（前者は5配位か6配位、後者は4配位）ことにも特に留意する必要がある。後者では、ドーピング量に依らず、超伝導発現に試料合成後の還元アニールを要し、また物性がドーピング量よりもアニールの条件に大きく依存することが知られている。このような物質科学的な複雑さが、長年に亘り、物質本来のもつ物性を見えにくくし、銅酸化物における超伝導を記述する有効な理論モデルの構築を妨げてきた面があることは否めない。実際、我々は、ドーピングされていない母物質は電荷移動型絶縁体であるという長年の常識に反し、4配位の CuO_2 面をもつ銅酸化物では、適切なアニール処理を施すことで、ドーピングされていない物質でも超伝導が発現することを報告してきた[1]。

精密に最適化されたアニール（2段階アニール）によってもたらされたこの結論は、超伝導機構の議論に大きな影響を与えられ一方、実際に、アニールによって結晶中で起きる構造変化は非常にわずかなものである。図1に示されるように、 Pr_2CuO_4 の面内の格子定数（ a 軸長）はas-grown、アニール1段階目、アニール2段階目で不変であり、面間の格子定数（ c 軸長）のみが、2段階目のアニール後に短くなる。これは、面間に存在していた過剰酸素（頂点酸素）がアニールによって取り除かれるためである[2]。このわずかな頂点酸素の有無が、この物質の電氣的・磁氣的性質を大きく変え、金属-絶縁体転移のトリガーとなる点が、最も重要な点である。電子ドーピング量、より正確には Pr^{3+} サイトの Ce^{4+} 置換量によって、この頂点酸素の脱離ポテンシャルが変わり、正規サイトの酸素を欠損させずに取り除くことの難しさが変わる（Ce置換量が小さいほど難しい）。我々の見出した2段階アニール法は、正規の酸素サイトを欠損させずに過剰の頂点酸素を取り除くことを現実的に可能とした合成手法であると言え、これにより物質本来のもつ物性を発現させることができた[1, 3]。

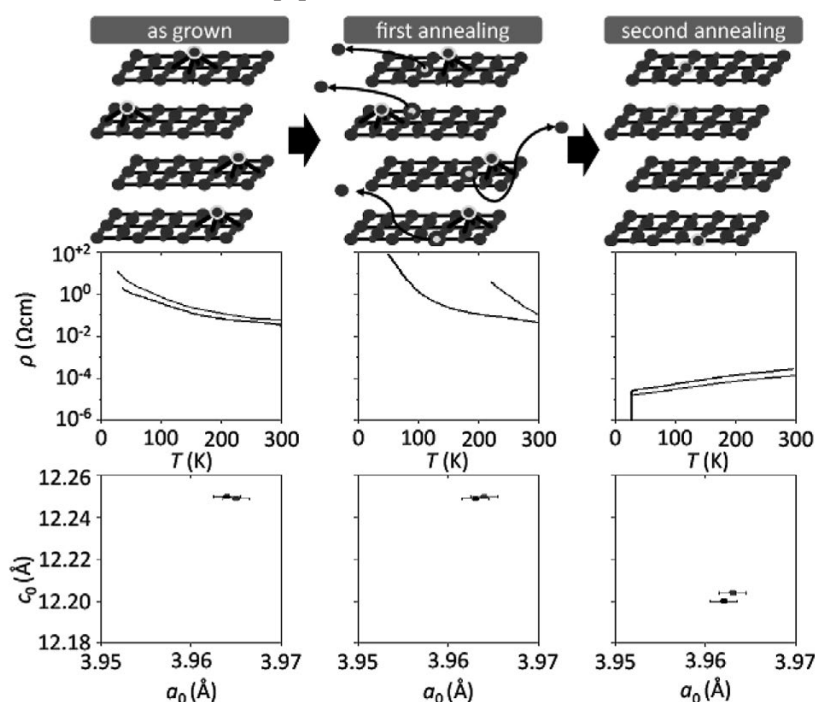


図1 還元アニール各段階での Pr_2CuO_4 のミクロな状態に対するモデル。各段階での抵抗率の温度依存性と格子定数も示した[3]。

- [1] Y. Krockenberger et al., Phys. Rev. B **85** (2012) 31.
- [2] P. G. Radaelli et al., Phys. Rev. B **49** (1994) 15322.
- [3] Y. Krockenberger et al., Sci. Rep. **3** (2013) 2235.

通信波長帯発光材料エルビウム－イットリビウム化合物の作製と発光の広帯域化

尾身博雄 俵 毅彦*
機能物質科学研究部 *量子光物性研究部

エルビウムシリケート(Er_2SiO_5 , $\text{Er}_2\text{Si}_2\text{O}_7$)、酸化エルビウム(Er_2O_3)などのエルビウム化合物は、光利得材料としてシリコンフォトニクス分野で大きな注目を集めている。これらの化合物には通信波長帯のCバンド(1.5 μm 帯)で発光する Er^{3+} イオンが大量(約 10^{22} cm^{-3})に存在し、シリコン基板上で高利得の導波路型増幅器の実現が期待できるからである。しかし、エルビウム化合物では、結晶中の Er^{3+} の数が多過ぎるため濃度消光により Er^{3+} の発光効率が著しく低下してしまう。一方、 Er^{3+} とほぼ同じイオン半径(0.9 Å)をもつイットリビウムイオン(Yb^{3+})は Er^{3+} の発光に対して感光材として機能することはよく知られている。そこで、我々はエルビウム化合物にイットリビウムを添加することにより、濃度消光の低減と Er^{3+} イオンの高効率発光とを同時に達成することを目的として、シリコン基板上にエルビウム－イットリビウムの混晶化合物を形成し、その発光特性を明らかにした[1]。

図1は、Si(100)基板上にRFスパッタリング法により室温で成長した Yb_2O_3 (80 nm)/ Er_2O_3 (10 nm)/ Yb_2O_3 (20 nm)サンドイッチ構造からの放射光斜入射X線回折パターンである。この図からわかるように、Ar雰囲気中の熱処理により、900℃では $\text{Er}_x\text{Yb}_{2-x}\text{O}_3$ が、1000℃では $\text{Er}_x\text{Yb}_{2-x}\text{O}_3$ に加え $\text{Er}_2\text{Yb}_{2-x}\text{Si}_2\text{O}_7$ が、1100℃では $\text{Er}_x\text{Yb}_{2-x}\text{O}_3$ の多結晶の膜が形成される。図2は、波長1.5 μm の Er^{3+} からのフォトルミネッセンス(PL)スペクトルの熱処理温度依存性を示す。熱処理温度が950℃の場合に高強度かつ発光帯域幅の広いPLスペクトルが得られた。X線回折、PL測定、断面透過電子顕微鏡／エネルギー分散型X線分光の結果を総合的に分析した結果、この温度での Er^{3+} イオンからの高強度で広帯域なPL発光はSi基板上でのEr-Yb混晶酸化物とEr-Yb混晶シリケートの同時形成に起因することがわかった。これらの結果は通信波長帯で高効率・広帯域な導波路型増幅器をシリコン基板上で実現するための重要な知見である。

[1] H. Omi, Y. Abe, M. Anagnosti, and T. Tawara, AIP Adv. 3 (2013) 042107.

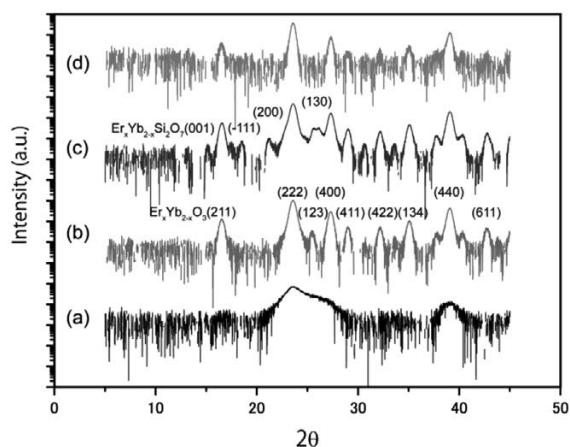


図1 斜入射X線回折パターン。(a)成長後、(b)900℃、(c)1000℃、(d)1100℃の熱処理後。

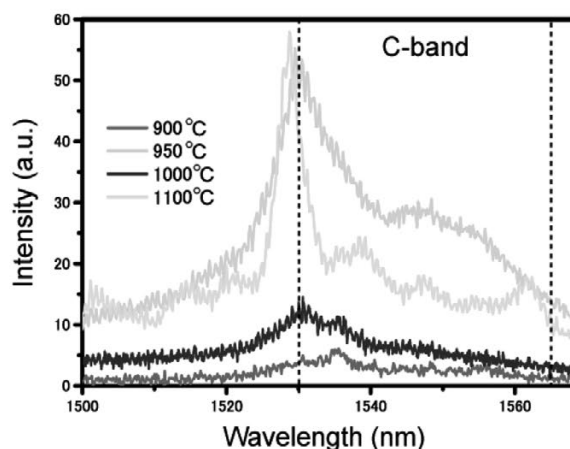


図2 PLスペクトルの熱処理温度依存性。励起波長は980 nm。

極薄六方晶 BN の合成とトンネル素子への応用

Carlo M. Orofeo 鈴木 哲 影島博之* 日比野浩樹
機能物質科学研究部 *量子電子物性研究部

原子層厚さの六方晶窒化ホウ素(h -BN)の作製技術が近年著しく進歩した。薄い h -BNは、トンネルトランジスタやスピントロニクス素子のトンネルバリア層など、様々な潜在的応用を有している。このため、 h -BNを、層数を制御して合成する技術は大切である。本稿では、サファイア基板に保持されたヘテロエピタキシャルCo薄膜上での大面積の単層 h -BNの成長を報告する。

h -BN成長は、アンモニアボラン($\text{NH}_3\text{-BH}_3$)を原料に、低圧の化学気相堆積(CVD)法を用いて行った[1]。我々は、 h -BN成長初期において、向きが反転した2種類の三角形の h -BN島が形成されることを観測した(図1(b))。 h -BN島のエッジは窒素原子で終端されるため、向きの異なるドメインの接合部には欠陥が形成される。また、 h -BN成長は単層ではほぼ自己停止し、2層目以降はドメイン境界などの欠陥部にパッチ状に形成されることを見出した。さらに、低エネルギー電子顕微鏡(LEEM)を使って、 h -BNの層数を10 nm程度の空間分解能でデジタルに決定する手法も開発した。LEEMによる層数決定には、転写や断面加工のような付加的プロセスを必要としないという利点もある。図1(a)は1~2層厚さの h -BNの低エネルギー電子の反射率スペクトルである。電子線は、層数に依存した特定のエネルギーで、 h -BN層中の量子化された電子状態を介して、 h -BNを共鳴的に透過する。このため、反射率スペクトルに振動構造が現れる。図1(a)の2層 h -BNのスペクトルにおいて、2.5 eV付近の極小が共鳴的透過に対応する。第一原理計算から、振動の位置が h -BNのバンド構造と関連していることも明らかにした。

次に、 SiO_2 上やプラスチック上に、合成した h -BNを金属電極でサンドイッチしたトンネル素子を作製し、トンネルバリア特性を評価した(図1(c)) [2]。トンネル素子の I - V 特性は、ゼロバイアス付近では線形で、高バイアス下では指数関数的な、トンネル現象に特徴的な振る舞いを示した。トンネル効果の理論式に基づく解析から、バリア高さが ~ 2.5 eVで、絶縁破壊強度が $3.78 \pm 0.83 \text{ GVm}^{-1}$ と見積もられた。これらの値は、単結晶基板から剥離した h -BNと同程度である。加えて、CVD法で合成した h -BNは容易にスケールアップが可能のため、トンネルバリア応用に大きなポテンシャルを有している。

[1] C. M. Orofeo, S. Suzuki, H. Kageshima, and H. Hibino, Nano Res. **6** (2013) 335.

[2] C. M. Orofeo, S. Suzuki, and H. Hibino, J. Phys. Chem. C **118** (2014) 3340.

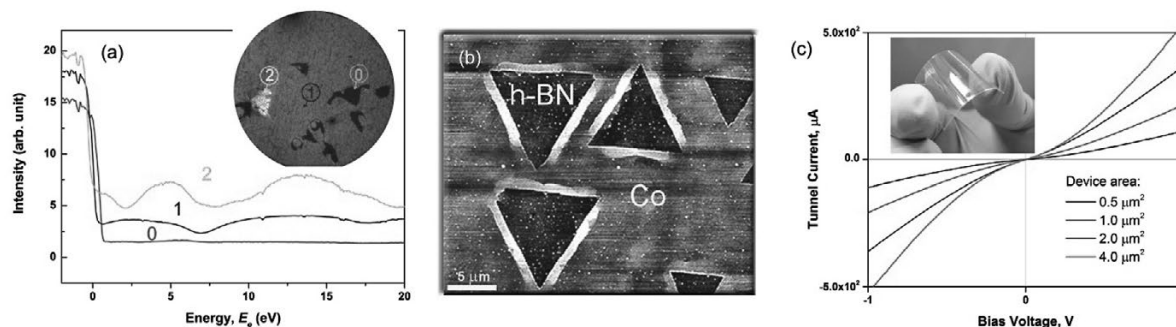


図1 (a) Co薄膜上にCVD成長させた h -BNの電子反射率スペクトル。挿入図は対応するLEEM像。数字は層数を表現(0は基板)。(b) Co薄膜上に成長した三角形の h -BN島のAFM像。(c) 異なる面積の金属/ h -BN/金属トンネル素子の I - V 特性。挿入図はフレキシブル基板(PEN)上に作製した素子の光学顕微鏡像。

基板上グラフェンの熱的不安定性

鈴木 哲
機能物質科学研究部

グラフェンは炭素の蜂の巣格子で構成された単原子層厚の薄膜である。炭素原子間は強固な sp^2 結合で結びついているため、一般にグラフェンは熱的、化学的に非常に安定であると考えられている。しかしながら、実際に作製される基板上に転写されたグラフェン試料は一般に基板、電極金属、環境中の気体分子、プロセス中に保護膜として用いられるポリマーの残渣などと接触しており、状況は複雑である。今回我々は、汎用的に用いられている手法を用いて合成、転写された基板上グラフェン試料が高真空中の加熱に対して不安定であることを明らかにするとともにその原因について考察した[1]。

本研究ではグラフェンの成長、転写ともに汎用的に用いられている手法を用いた。メタンを原料とするCVD法により銅箔上に単原子層グラフェンを成長した。保護膜としてPMMAをスピコートした後、塩化鉄水溶液中で銅箔をエッチングし、水中で基板上にPMMA / グラフェンを転写した。最後にアセトン中でPMMA膜を除去した。図1に SiO_2 基板上に転写されたグラフェンの高真空中加熱前後のラマンスペクトルを示す。加熱に伴い、GおよびDバンド領域にブロードなスペクトルが現れていることがわかる。このブロードなスペクトルは、グラフェン中の欠陥生成によりラマン散乱の選択則が緩和されたことを示唆している。図2にAu基板上に転写されたグラフェンの加熱前後のO 1s XPSを示す。O 1s強度は加熱するとすぐに半分程度に減少するが、その後は加熱温度を上げてほぼ一定強度を保たれる。また結合エネルギーからこれらの酸素は H_2O や O_2 の状態にあると考えられる。これらの結果はグラフェンと基板の間に H_2O や O_2 などの酸素を含む分子が挿入されていることを示している。ラマン測定で観測されたグラフェンの劣化はグラフェンがこれらの分子と高温で反応して欠陥が生成されるためと考えられる。

[1] S. Suzuki, C. M. Orofeo, S. Wang, F. Maeda, M. Takamura, and H. Hibino, J. Phys. Chem. C **117** (2013) 22123.

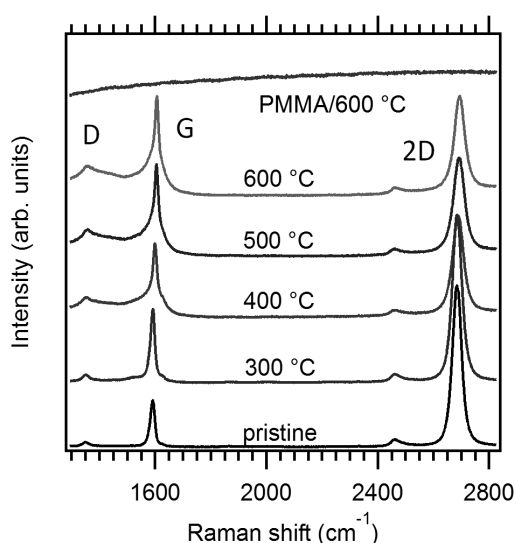


図1 SiO_2 基板上に転写されたグラフェンの高真空中加熱前後のラマンスペクトル。

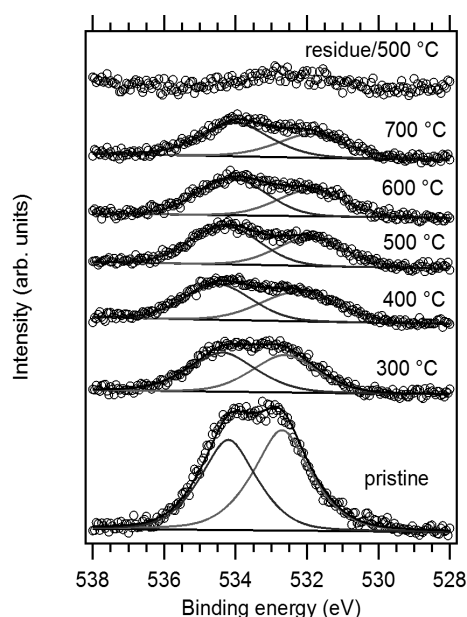


図2 Au基板上に転写されたグラフェンの高真空中加熱前後O 1s XPS。

生体信号を取得するための機能性素材「hitoe」

塚田信吾 河西奈保子 小泉 弘¹ 藤井孝治²
機能物質科学研究部 ¹マイクロシステムインテグレーション研究所
²先端技術総合研究所

我々はこれまで導電性高分子(PEDOT-PSS)と繊維を複合化することで、フレキシブルで生体親和性の高い生体電極を実現してきた[1]。今回、東レ株式会社と共同で、最先端繊維素材であるナノファイバ(繊維径 700 nm) 生地、PEDOT-PSSを特殊コーティングすることで、耐久性に優れ、生体信号を高感度に検出できる機能素材「hitoe」の実用化に成功した。

図1に従来の繊維と今回の技術の違いを示す。PEDOT-PSSで繊維の表面を薄くコーティングすることにより、柔軟性や通気性、肌触りなどの繊維そのものの特性を残したままで導電性が与えられる。繊維径の非常に細いナノファイバを用いることで、PEDOT-PSSでコーティングされる表面積が増大し導電性の向上や、洗濯耐久性を実現している。さらに、皮膚との接触点が増大し、肌になじみやすく接触抵抗を減少させている。現在一般的に使用されている医療用電極で必須であった導電性ペーストを用いることなく、生体信号を高感度に検出することが可能になった。「hitoe」をシャツに配置すれば(図2)、シャツを着るだけで心電図や心拍などの生体情報を得ることができる。

「hitoe」は肌へのフィット性や通気性などを兼ね備えており、この素材を使用した生体情報計測用ウェアを着用することによって、日常生活の様々なシーンにおいて心拍数や心電波形などの生体情報を快適かつ簡単に計測できるようになる。着用者が負担に感じることなく、日常の生体情報をモニタリングすることで、スポーツ、エンターテインメント、健康増進、医療応用等の幅広い分野での応用に期待できる。

[1] S.Tsukada, H.Nakashima, and K.Torimitsu, PLoS ONE **7(4)** (2012) e33689.

一般衣料向け PET
繊維径: 15 μm

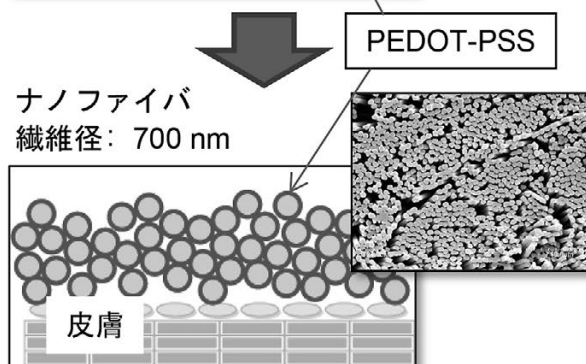
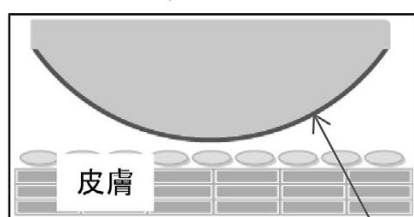


図1 従来の繊維とナノファイバの違い。

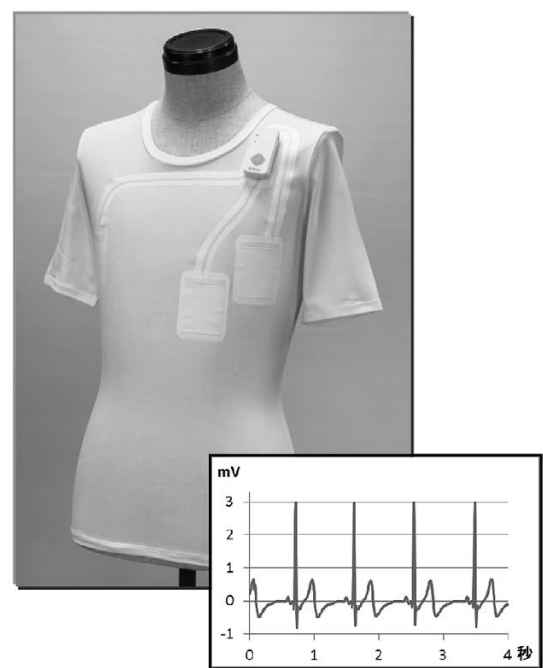


図2 「hitoe」を用いた心電・心拍計測用インナー(東レと共同開発)と心電波形例。

ナノバイオデバイスのための細胞骨格様プラットフォームの構築

田中あや 中島 寛 樫村吉晃 住友弘二
機能物質科学研究部

生体機能を利用したデバイスの開発は、バイオセンシングや創薬など様々な分野での応用が期待されている。我々は、生体分子を用いたナノバイオデバイスの構築を目指し、マイクロホールを有したシリコン基板上に架橋脂質二分子膜を作製し、そこに挿入されたイオンチャネルの機能計測に成功している [1]。しかしながら、架橋脂質二分子膜は機能計測中に崩壊してしまうなど、安定性に問題があった。細胞内では、細胞膜の形態安定化や運動、膜輸送などの機能制御を、細胞質領域の裏打ちタンパク質やそれと相互作用する膜骨格が行っていることが知られている。今回我々は、細胞内の骨格構造と類似した性質を有するハイドロゲルに着目し、これをマイクロホール内へ封入することで、架橋脂質二分子膜の崩壊を防ぎ長期間安定に保持するための支持体とすることに成功したので報告する (図 1(a)) [2]。

実験には、マイクロホール (直径 1、2、4、8 μm 、深さ 1 μm) を備えたシリコン基板を用いた。この基板に緑色蛍光を発するカルセインを含むハイドロゲル前駆体水溶液を滴下し、その直後に、赤色蛍光色素のローダミンを含む巨大脂質ベシクルを基板上に展開した。前駆体をゲル化した後に、マイクロホール外の過剰なハイドロゲルを除去した。

マイクロホール基板の蛍光顕微鏡観察結果を図 1(b)と(c)に示す。脂質二分子膜に含まれる赤色の蛍光とハイドロゲル内の緑色の蛍光が同一のマイクロホール上で観察された。同じ場所を原子間力顕微鏡 (AFM) で観察したところ、マイクロホール内にハイドロゲルが充填していることを確認した (図 1(d))。また、ハイドロゲルに支持された脂質二分子膜の赤色蛍光は、基板上で 2 週間以上観察された。以上の結果から、架橋脂質二分子膜を利用することでハイドロゲルをマイクロホール内に封入することができ、ハイドロゲルが支持体として働くことによって脂質二分子膜が長期間安定に保持できることが示された。

ハイドロゲルは構成物の化学的組成をコントロールすることで、様々な機能を付与することができる。そのため、マイクロホール内のハイドロゲルを機能化することにより、人工細胞骨格構造の構築、脂質二分子膜やイオンチャネルの機能制御など、デバイスの機能化が期待できる。

[1] K. Sumitomo et al., Biosens. Bioelectron. **31** (2012) 445.

[2] A. Tanaka, H. Nakashima, Y. Kashimura et al., Jpn. J. Appl. Phys., **53** (2014) 01AF02.

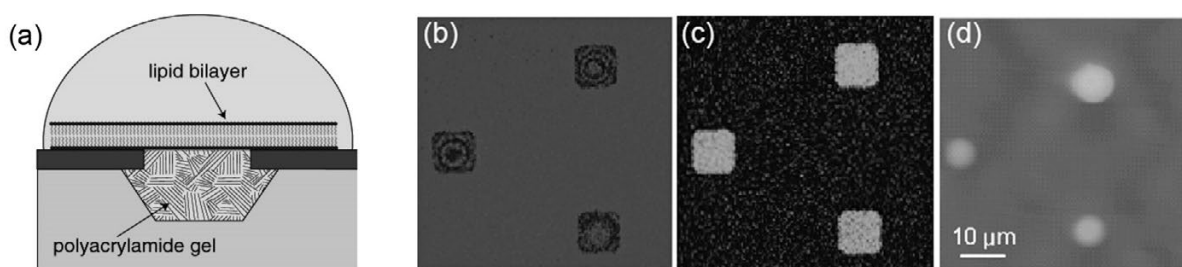


図 1 ハイドロゲルによって支持された脂質二分子膜。(a)ハイドロゲル封入マイクロホールの模式図。
(b)脂質膜の蛍光像。(c)脂質膜とハイドロゲルの蛍光像の重ね合せ。(d)AFMによる形状像。

薬理的刺激による単一イオンチャネル受容体の構造変化

篠崎陽一* 田中あや 河西奈保子
機能物質科学研究部 *山梨大学

我々はこれまで『ナノバイオデバイス』の創製を目指した研究を進めている。ナノバイオデバイスは、生体機能の検出・制御を可能とする微小デバイスであり、新規な科学的知見・治療方法・創薬の創出につながる新しい素子である。本報告では、マイカ基板上に支持された脂質膜中に再構成したイオンチャネル受容体について薬理的刺激による構造変化を高速原子間力顕微鏡（高速AFM）により検討した[1]。高速AFMはナノメートルスケールの空間分解能、80 ms/frameの時間分解能を有するプローブ顕微鏡で、タンパク質の構造変化の観察に理想的な方法である。

本研究はN-methyl-D-aspartate型のリガンド作動性のイオンチャネル型グルタミン酸受容体（GluNR）について検討を行った。これはラットの大脳皮質の神経細胞から精製した受容体で、あらかじめ架橋脂質膜に再構成し電気生理計測法を用いてチャネル活性を確認したものである。

近年の構造に関する研究からGluNRはリガンド結合部位（LBD）とN末端ドメイン（NTD）が2回対称であり、dimer-of-dimersと呼ばれる2つの二量体からなる構造を有していると言われている（図1(a)）。脂質膜に再構成していない単一のGluNRの観察結果から、2つのサドル型の粒子（NTD）と1つの球状粒子（膜貫通ドメイン、TMD）を確認することができた（図1(b)）。さらに数十分間にわたる構造観察により、GluNRのNTDはフレキシブルな構造をもつことがわかった（図1(c)）。

次に、支持膜中に再構成したGluNRの細胞外ドメインについてリガンドによる構造変化を定量的に検討した。リガンドがない状態で四量体構造を有するNTDは、複数の構造、たとえば、サブユニットが分離していない構造、2回あるいは4回対称・dimer-of-dimersなど複数の構造を示した。アゴニスト処理を行うと、NTDの柔軟性が小さくなりdimer-of-dimers構造を示すものが増え、アゴニスト処理時間を30分以上にすると、NTDダイマ間の距離が長くなった。そのダイマ間距離の増加はアンタゴニストによる前処理で抑制されることがわかった（図2）。

これらの結果は、GluNRは細胞外の部位がフレキシブル・ダイナミックであること、またシリコン基板上の支持脂質膜に再構成した後も、外因性の薬物刺激により構造が制御されていることを、受容体が活性を有する状態で、単一受容体を対象として初めて観察したものである。

[1] Y. Shinozaki, A. Tanaka, and N. Kasai, et al., Appl. Phys. Express 7 (2014) 027001.

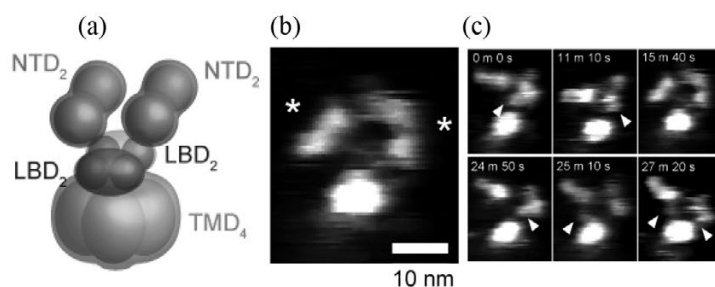


図1 脂質膜に再構成していないGluNRの構造。(a)予想される四量体構造。(b)2つのNTDダイマに該当するサドル型構造(*)。(c)同一GluNRの連続観察画像(矢はLBD)。

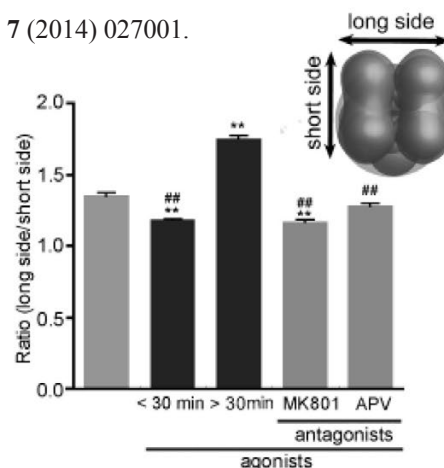


図2 脂質膜に再構成したGluNRの薬理的刺激による構造変化。

共振回路を用いた高速・高感度センサ

西口克彦 山口浩司 藤原 聡 Herre S. J. Zant* Gary A. Steele*
量子電子物性研究部 *Delft University of Technology

トランジスタはLSI回路の主要素子であり、その微細化によってLSIの性能が向上してきた。一方、微細なトランジスタは高感度な電荷センサとしても利用できる[1]。我々は、数十 nm のチャネルをもつ Si トランジスタ(FET) (図 1(a)) を用いて室温で単一電子を検出することに成功しており[2]、これまで単一電子を 1bit とする回路[3]や計数統計分析[4]、MEMS 信号検出[5]などに利用してきた。しかし、チャネルが小さいため抵抗が大きくなり、動作速度が数十～百 kHz 程度に限られてきた。今回、我々はトランジスタに共振回路を接続し、高周波信号の反射特性をモニタすることで動作速度を 20 MHz まで改善することに成功した[6]。

図 1(b)に示す様にFETにインダクタ L を接続するとFETの寄生容量 C_s とでLC共振回路が構成される。回路の共振周波数 $1/(2\pi LC_s)$ に近い周波数 f_{carrier} の信号 S_{carrier} をcouplerを介して回路に印可すると、回路の反射特性に応じた反射信号 S_{ref} が得られる。このとき、FETのゲート端子に周波数が $f_{\text{gate}} (= 10 \text{ MHz})$ の信号 S_{gate} を印可すると、FETチャネル抵抗とともに回路の反射特性が変調される。その結果、 S_{ref} のスペクトラム特性には、 S_{carrier} に起因する信号の両脇に S_{gate} に起因する2つのサイド・ピークが現れる。今回、 S_{gate} として単一電子信号に相当するパワーの信号を加えており、これらサイド・ピークの出現は S_{gate} に印可された単一電子信号の検出を意味する(図2)。LC共振回路は反射特性に応じて S_{carrier} を一定期間蓄積することができるので、その範囲内で高速に S_{gate} を検出できる。また、同様の手法を用いる他の素子と比較しSi FETには数桁大きいパワーを印可することができるので、大きなサイド・ピーク信号が得られる。一方、サイド・ピークの周波数 $f_{\text{carrier}} \pm f_{\text{gate}}$ 付近では、通常問題となる低周波数領域での $1/f$ ノイズを実質的に除去できるためS/N特性が改善する。結果として、高速に微小な信号を検出することが可能となり、20 MHzで感度 $\sim 10^{-4} e/\text{Hz}^{0.5}$ という性能を室温で実現した。なお、 S_{ref} と S_{carrier} をミキサに入力することで、 $f_{\text{carrier}} \pm f_{\text{gate}}$ に現れるサイド・ピークをもとの周波数 f_{gate} に戻すことができ、任意の波形の S_{gate} を検出できる。これらの特徴により、室温で動作する高速・高感度なセンサとして幅広い利用が期待できる。

本研究の一部は最先端・次世代研究開発支援プログラムの助成を受けて行われた。

- [1] M. H. Devoret and R. J. Schoelkopf, Nature **406** (2000) 1039.
[2] K. Nishiguchi et al. Jpn. J. Appl. Phys. **47** (2008) 8305.
[3] K. Nishiguchi et al. Appl. Phys. Lett. **88** (2006) 183101.
[4] K. Nishiguchi, Y. Ono, and A. Fujiwara, Appl. Phys. Lett. **98** (2011) 193502.
[5] I. Mahboob et al. Appl. Phys. Lett. **95** (2009) 233102.
[6] K. Nishiguchi et al. Appl. Phys. Lett. **103** (2013) 143102.

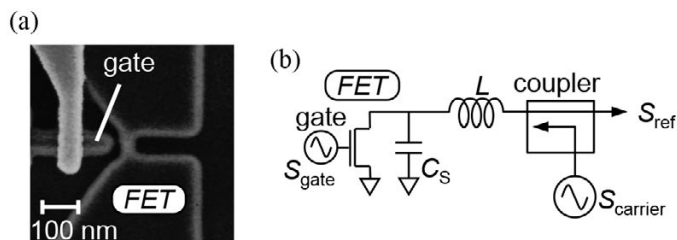


図1 (a)単一電子検出トランジスタの電子顕微鏡写真。
(b)LC回路と組み合わせた等価回路。

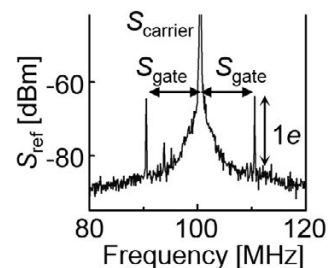


図2 単一電子検出を示す S_{ref} スペクトラム。

極低温におけるシリコン単電子転送素子の精度評価

山端元音 西口克彦 藤原 聡
量子電子物性研究部

単電子転送は1個の電子を正確に操作する技術であり、超低消費電力素子や電流標準等への応用が期待されている。応用へ向け、転送エラーレート 10^{-8} 以下の高い転送精度が必要である。これまで我々は、シリコン単電子転送素子の転送精度絶対評価を報告したが、比較的高温($T = 17$ K)での測定であったため、エラーレートは 10^{-2} 程度であった[1]。今回は転送精度絶対評価を極低温($T = 30$ mK)で行い、 10^{-4} 程度のエラーレートを達成した。さらに、理論的にはエラーレートは 10^{-8} オーダーまで下がる可能性があることを確認した[2]。

図1に素子の概略図を示す。Silicon-on-insulator基板上にLG1、LG2、LG3をゲート電極とする3つの細線トランジスタからなる単電子転送素子と、UGをゲート電極とする細線トランジスタからなる電荷検出素子を作製した。LG3に正電圧を、LG1とLG2にパルス電圧を印加すると、LG1-LG2間の単電子島を介してソースドレイン間に転送電流が流れる。さらに、LG3に負電圧を印加しノードを形成した状態で、ソースにパルス電圧を印加すると、単電子をノード-ソース間で往復させることができる。その際のノードの電子数変化を、電荷検出素子に流れる電流 I_s の変化で読み取ることで転送エラーを評価した。

本実験では2つの電子を転送する際の転送エラーを評価した。図2(a)に2電子を往復させた際の I_s の変化を示す。急峻な I_s の増減は2電子のノードへの放出・注入に対応する。図に示すようなエラーをカウントしエラーレートを見積もった結果、 10^{-4} 程度と以前より2桁改善した。エラーの原因はパルス電圧に起因する素子の実効温度(T_{eff})上昇であることも判明した。さらに、転送電流の理論的フィッティング(図2(b))よりエラーレートの下限值を見積もった。パルス電圧振幅を減少させて素子の実効温度を降下させると、転送機構が変化し、それに伴いエラーレートの下限值も下がっていくことがわかった。実効温度が低い領域($T_{\text{eff}} \sim 5$ K)では、 10^{-8} オーダーの極めて低いエラーレートとなる可能性が示唆された。

本研究の一部は最先端・次世代研究開発支援プログラムの助成を受けて行われた。

[1] G. Yamahata, K. Nishiguchi, and A. Fujiwara, Appl. Phys. Lett. **98** (2011) 222104.

[2] G. Yamahata, K. Nishiguchi, and A. Fujiwara, Phys. Rev. B **89** (2014) 165302.

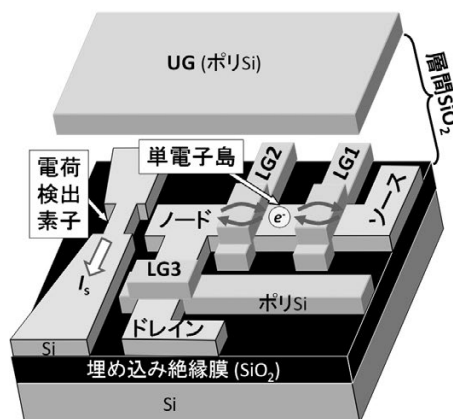


図1 単電子転送精度評価素子の概略図。

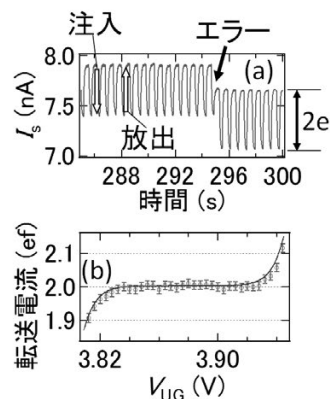


図2 (a)転送電子数カウント結果の一例。
(b)転送電流(丸)とフィッティング(線)の一例。

結合機械共振器におけるフォノンのコヒーレント操作

岡本 創 Mahboob Imran 小野満恒二* 山口浩司
量子電子物性研究部 *機能物質科学研究部

片持ち梁や両持ち梁など半導体の微小な板ばね構造は、超小型かつ高集積化可能なスイッチ・センサ・メモリなど多様な用途に期待されるナノ機械共振器として注目される。そのような機械共振器が複数連結した構造では、互いの振動が相関し、結合系特有のダイナミクスが現れる。この結合振動を利用した信号増幅器や論理演算素子などが最近報告され、結合ナノ機械共振器への関心が大きく高まっている。しかしながら、ナノ機械共振器間の結合は通常弱く、隣接共振器間でエネルギー（フォノン）を自在にやり取りする“コヒーレント操作”を実現するのはこれまで困難であった。

これに対して、最近我々は、圧電的な周波数変調によるパラメトリックポンピング[1]を用いてGaAs結合機械共振器（Beam LとBeam R、図1(a)）のコヒーレント操作を実現することに成功した[2]。これは2つの機械共振器の差周波に合致した交流ポンプ電圧の印加により可能となり（図1(b)、(c)）、ポンプフォノンの吸収・放出過程を介して2つの共振器が交互に振動する“コヒーレント(Rabi)振動”が観測される（図1(d)）。この振動周期はポンプ強度に反比例し（図1(d)）、印加電圧とポンプ時間の調節により共振器の振動を自在に制御することが可能となる。たとえば、振動エネルギーが隣の共振器へ完全に移った時刻でポンプを止めることにより、機械共振器の振動を本来の減衰時間よりも桁違いに速く止めることが可能となる[3]。このパラメトリックポンピングによるコヒーレントフォノン操作は、ナノ機械共振器の高速連続動作や隣接共振器への高速情報転送を可能とする新技術として期待される。

本研究は科研費の援助を受けて行われた。

[1] I. Mahboob, K. Nishiguchi, H. Okamoto, and H. Yamaguchi, Nature Phys. **8** (2012) 387.

[2] H. Okamoto et al., Nature Phys. **9** (2013) 480.

[3] H. Yamaguchi, H. Okamoto, and I. Mahboob, Appl. Phys. Express **5** (2012) 014001.

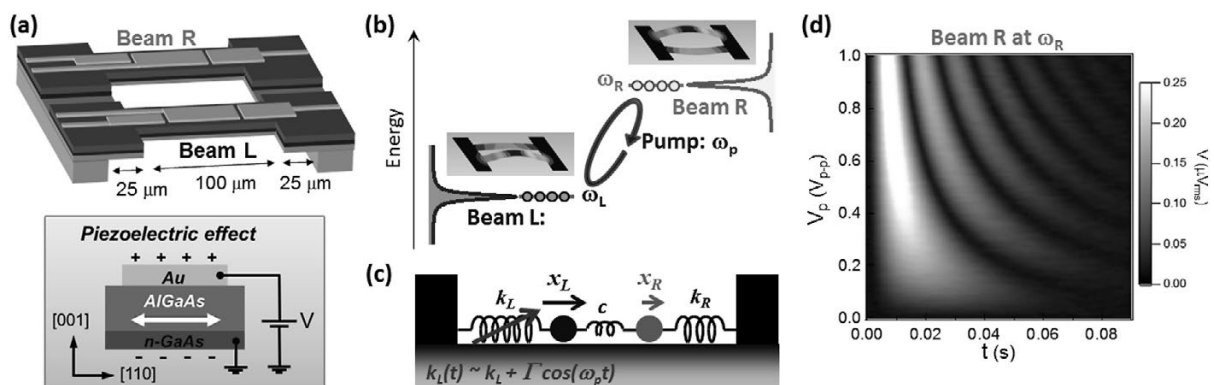


図1 (a) 素子の模式図と圧電効果の様子。各共振器は400 nm厚*i*-GaAs、100 nm厚*n*-GaAs、300 nm厚AlGaAs、60 nm厚Au電極からなる。圧電効果を用いた素子の駆動やポンプ、振動の検出が可能である。(b) Beam LとBeam Rの振動モードとパラメトリックポンピングによるフォノン過程の模式図。Beam Rの周波数はBeam Lの周波数(293.93 kHz)よりも440 Hz高い。この差周波に相当する交流ポンプ電圧をBeam Lに印加することにより2つの共振器間でのコヒーレントなエネルギー（フォノン）移動が可能となる。(c) 等価ばねモデルにおけるポンプ操作の模式図。(d) 周波数 ω_R におけるBeam Rの時間応答測定により観測されるコヒーレント振動のポンプ電圧依存性。

電気機械フォノンレーザ

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

レーザと類似の動作をフォノンに対して実現しようとする試みは、レーザが発明された当初から多くの検討がなされてきた。しかし、レーザにおいて用いられる原子の離散準位ならびにキャビティをフォノンに対して構成することは容易ではなく、その実現は困難であった。

我々は、レーザと類似の動作をフォノンに対して実現する舞台として、電気機械共振器を用いた(図1(a))。電気機械共振器では原子の離散準位に相当する離散的な振動モードが存在する。この中で高周波ならびに中周波の2つのモード(ω_H と ω_M)を離散準位、共振の鋭い低周波モード(ω_L)をキャビティとして用いた(図1(b))。これら3つの準位はエネルギー保存則を満たす($\omega_H = \omega_M + \omega_L$)。

圧電効果を用いて電氣的に高周波モードを励振すると、このモードにフォノンが蓄積するが、それが中周波モードに遷移する際に放出するエネルギーにより、キャビティにフォノンが生成される(図1(b))。中周波モードに比較してキャビティの寿命がずっと長いためフォノンの誘導放出が生じ、高周波モードから中周波モードへの遷移が促進される。この増幅作用によるゲインが十分高くなり閾値を超えると発振が起き、キャビティ(低周波)モードにおいて幅 80 mHz の鋭い機械振動が観測された(図1(c)) [1]。

このフォノンに対する「レーザ」動作は光 Brillouin 散乱と呼ばれる現象と類似しており、光子に対して適用できる概念が、電気機械共振器を用いることによりフォノンに対しても実現できることを示している。本成果は極めて精度の高い機械振動を用いた新しい技術への応用が期待される[2]。

[1] I. Mahboob et al., Phys. Rev. Lett. **110** (2013) 127202.

[2] Viewpoint: Lasers of Pure Sound, J. T. Mendonça, Physics **6** (2013) 32.

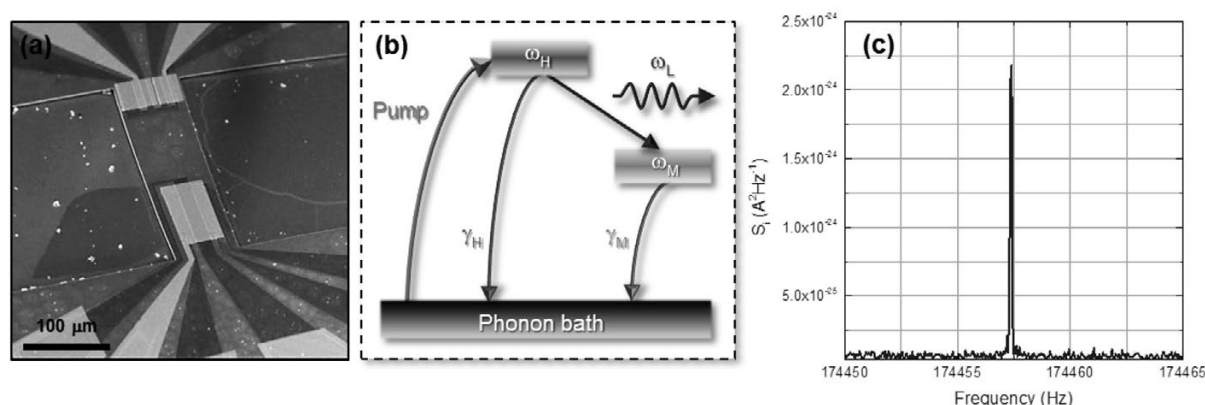


図1 (a) 実験に用いた電気機械共振器の電子顕微鏡写真。中央に見える部分は下地基板から離間しており、上下に振動する。明るく見える部分は金電極であり、ここに電圧を印可することにより共振器の振動を引き起こす。(b) 動作を示す模式図。高周波モード(ω_H)を励振する(pump)と、そのモードにフォノンが生成される。このフォノンが中周波モード(ω_M)に遷移する際に放出するエネルギーを低周波モードに一致させることにより、低周波モードにおいて発振が生じる。(c) 高周波モードをバンド幅 70 Hz のノイズ信号によって励振したときに、低周波モードにおいて観測された発振スペクトル。80 mHz という極めて狭い発振線幅が観測された。

ハイブリッド量子系における量子状態の保存と読み出し

齊藤志郎¹ Xiaobo Zhu¹ Robert Amusüss^{1,3} 松崎雄一郎¹ 角柳孝輔¹ 下岡孝明⁴

水落憲和⁴ 根本香絵⁵ William J. Munro² 仙場浩一^{1,5}

¹量子電子物性研究部 ²量子光物性研究部

³TU Wien ⁴大阪大学 ⁵国立情報学研究所

人工原子として振る舞う超伝導量子ビットは、制御性・拡張性への期待から精力的に研究が進められている。しかし、そのコヒーレンス時間は天然の量子二準位系である電子スピン、核スピンには遥かに及ばない。一方、これらスピン系は環境から良く隔離されているため、制御・拡張が難しい。そこで、両者の利点を取り入れたハイブリッド系の研究が注目を集めている。我々は、ダイヤモンド結晶中の窒素—空孔(NV)中心に基づく電子スピン集団を、超伝導磁束量子ビットの量子メモリへと応用する研究を進めている。まず、磁束量子ビットをNVスピン集団と共鳴させるために、ギャップ可変型磁束量子ビットを開発し[1]、両者間の強結合・コヒーレント振動の観測に成功した[2]。しかし、スピン集団のコヒーレンス時間が短く、量子情報を保存するまでには至らなかった。そこで、我々はダイヤモンド結晶に面内磁場(2.6 mT)を印加し、結晶歪のデコヒーレンスへの影響を低減することで、量子ビットに準備した任意の量子状態を、スピン集団に書き込み、保存し、そして読み出すことに成功した[3]。

図1(a)の挿入図に、励起状態を転写、保存、読み出すためのパルス配列を示す。まず、量子ビットをスピン集団から離調し、マイクロ波 π パルスにより励起状態 $|1\rangle_{\text{qb}}|0\rangle_{\text{ens}}$ を準備する。次に、両者を共鳴させるスワップパルスを印加し、励起を量子ビットからスピン集団に転写する($|0\rangle_{\text{qb}}|1\rangle_{\text{ens}}$)。この状態で、励起状態をスピン集団に時間Tだけ保存し、再びスワップパルスを印加することで励起を量子ビットに戻し、量子ビットの状態を読み出す。図1(a)は、スピン集団の励起状態が保存時間に対して減衰していく様子を示しており、減衰時間は $T_1^* = 20.8 \text{ ns}$ と見積もられた。図1(b)は、スピン集団に重ね合わせ状態 $|0\rangle_{\text{qb}}(|0\rangle_{\text{ens}} + |1\rangle_{\text{ens}})$ を保存した実験結果を表しており、スピン集団に対するラムゼー干渉実験に相当する。この結果から、重ね合わせ状態に対する減衰時間は $T_2^* = 33.6 \text{ ns}$ と見積もられた。以上の実験から、励起確率と位相、すなわち任意の量子情報をスピン集団に保存できることが示された。

本成果は、超伝導量子ビット用の長寿命量子メモリ実現に向けた第一歩であり、今後、ダイヤモンド結晶の特性向上を図り、メモリの長寿命化を目指す予定である。

本研究はFIRSTおよびNICTの援助を受けて行われた。

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

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

[3] S. Saito, et al., Phys. Rev. Lett. **111** (2013) 107008.

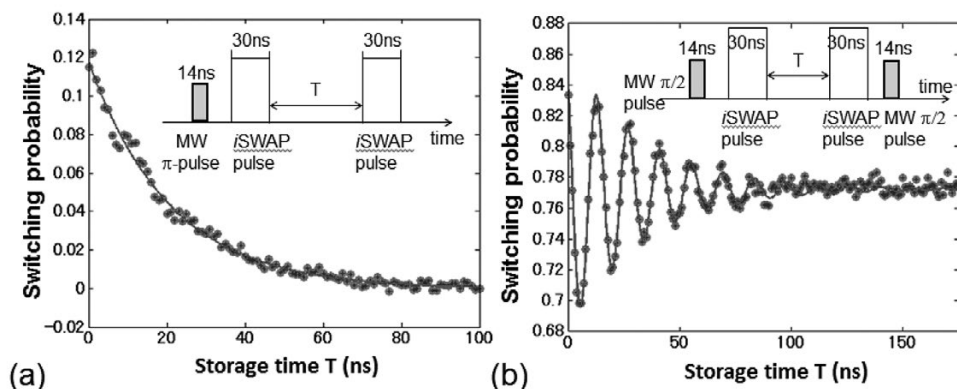


図1 量子メモリ動作の実証。(a) 励起状態 $|1\rangle$ の保存 (b) 重ね合わせ状態 $|0\rangle+|1\rangle$ の保存。

測定強度を変えた量子状態の射影操作

角柳孝輔 中ノ勇人 仙場浩一* 齊藤志郎
量子電子物性研究部 *国立情報学研究所

複数のジョセフソン接合を含む超伝導ループのエネルギーは、離散化し特に $\Phi = 0.5\Phi_0$ の外
部磁場のもとで基底状態と励起状態以外を無視でき量子二準位系とみなすことができ、超伝
導磁束量子ビットと呼ばれている。このような量子系では0と1に対応する基底状態と励起状態
だけではなく2つの状態の重ね合わせ状態を実現することができる。この重ね合わせ状態に対
して測定を行うと、量子状態は基底状態か励起状態のどちらかに確率的に射影される。超伝
導量子ビットを用いることによって超伝導回路上で重ね合わせ状態を作り、測定を行うことがで
きる。

我々は超伝導磁束量子ビットを読み出すために、非線形共振器の双安定状態を利用する
ジョセフソン分岐読み出し法を使っている。この方法では超伝導量子ビットと非線形共振器を結
合させ、量子ビットの状態に応じて非線形共振器の収束状態を変化させることにより、読み出し
を行っている。この読み出し方法は高速読み出しが可能であり、読み出しの反作用が少ないと
いう利点がある。この測定系で量子状態の測定がどのように行われるのかを知るために今回
我々は、読み出しパルスの強度を変えて測定を行うことで、測定の強さを変えたときにどのように
射影が起きるのかを確かめる実験を行った[1]。

まず基底状態から回転操作により任意の重ね合わせ状態を作る。次に読み出しパルスの強
度を変えて量子ビットに照射する。このとき、射影が行われると基底状態と励起状態の混合状
態になるが、射影が行われない場合は純粋状態を保つことが期待される。この2つの状態を
区別するために回転操作を行った後に状態測定を行い終状態の読み出しを行った。実験は
熱励起を抑えるため数十 mK の低温で行った。通常読み出しパルスの振幅を基準としてパ
ルス振幅を変えて射影が起こる際のデフュージングを示す量 α を測定した結果が図1である。
パルス振幅が $h = 0.9$ で α が急激に減少している様子がわかる。これは測定強度を強くしていく
と突然射影が起こることを意味している。この実験結果はジョセフソン分岐読み出しの理論解
析[2]を支持する結果となっている。

[1] K. Kakuyanagi, S. Kagei, R. Koibuchi, S. Saito, A. Lupaşcu, K. Semba, and H. Nakano, New J. Phys. **15**
(2013) 043028.

[2] H. Nakano, S. Saito, K. Semba, and H. Takayanagi, Phys. Rev. Lett. **102** (2009) 257003.

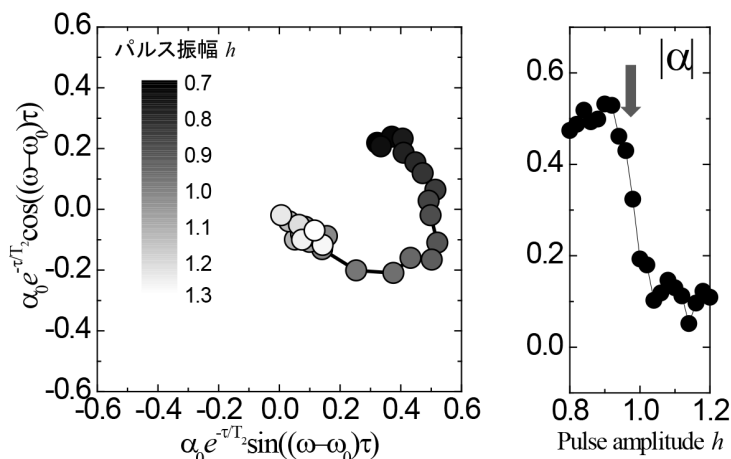


図1 射影指示量 α の測定強度依存性。

直接ギャップ半導体ヘテロ接合によるトポロジカル絶縁体の実現

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

金属、絶縁体、半導体といった従来の物質の分類に当てはめることのできない新しい物質の形態として、トポロジカル絶縁体(TI)が注目を浴びている。TIは、逆向きのスピンをもつ対向した電子流で構成される表面チャネル（三次元TI）、エッジチャネル（二次元TI）をもつことを特徴とし、チャネル内ではスピン反転を伴う後方散乱が禁止される。このことから、スピントロニクス素子や無散逸な伝導を利用した低消費電力素子としての応用が期待されている。

これまで知られているTIは、材料自体のバンド構造に伝導帯-価電子帯の重複をもつものに対して、我々は、一般的なIII-V族半導体であるInAsとGaSbを用い、ヘテロ接合（異種物質どうしの結晶成長）により人工的に二次元TIを実現した[1]。今後、高度に発展した半導体技術の適用により、TIの産業応用が期待される。また、これを契機に、様々な物質のヘテロ接合による新たなTI物質の探索が促進される。

図1はInAs/GaSbヘテロ構造による二次元TI実現の様子で、ヘテロ接合によりInAsの伝導帯とGaSbの価電子帯のエネルギーが重複したところにスピン-軌道相互作用が働き、TIバンド構造となる。

[1] K. Suzuki, Y. Harada, K. Onomitsu, and K. Muraki, Phys. Rev. B **87** (2013) 235311.

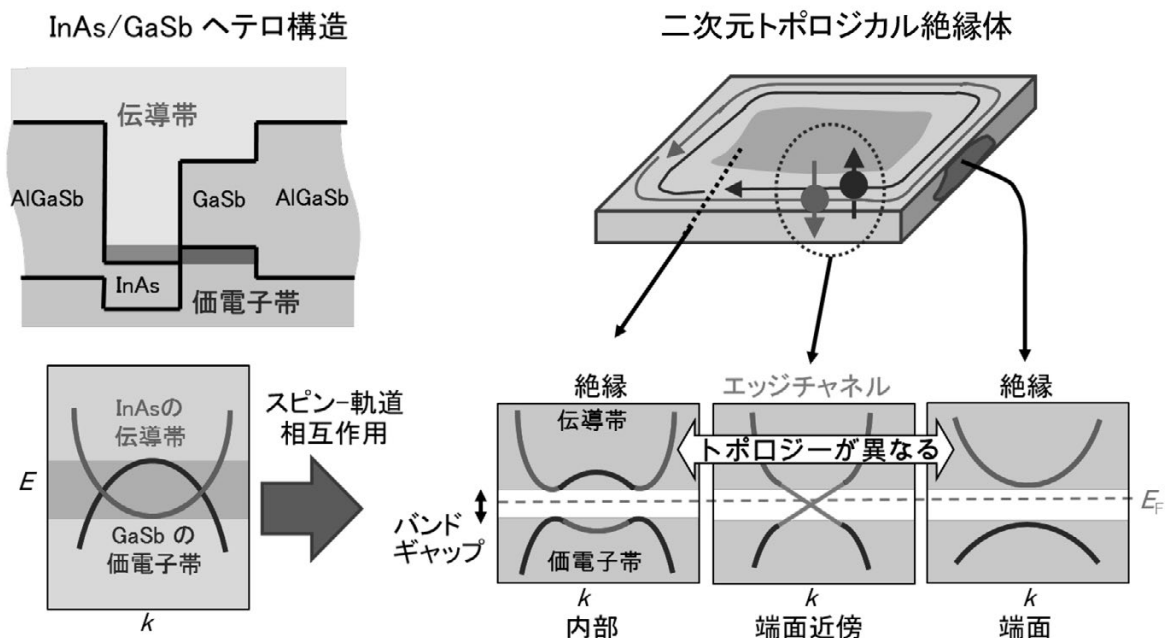


図1 InAs/GaSbヘテロ構造によるTI実現の様子。

ゲートオーバーラップをもつ Gate-All-Around InAs ナノワイヤ FET

佐々木智 舘野功太* 章 国強* 原田裕一 齊藤志郎 藤原 聡
寒川哲臣* 村木康二
量子電子物性研究部 *量子光物性研究部

結晶成長により得られる半導体ナノワイヤは、次世代ナノデバイスの構成材料として近年注目を集めている。特にInAsは高移動度のナローギャップ材料であることに起因して、これを伝導チャネルとする電界効果トランジスタ(FET)においては大きな駆動電流が得られる。さらに、ナノワイヤをゲート電極で完全に取り囲んだGate-All-Around (GAA) 構造を採用するとゲート電界による電流制御性が改善し、高ON/OFF比のFETが実現できると期待される。今回我々は、ゲート電極を2段階で形成することにより横型GAA InAsナノワイヤFETを作製し、特にゲート電極がソース・ドレイン電極とオーバーラップした構造において、ナノワイヤFETとしてトップクラスのON特性を実現した[1]。

図1は作製したInAsナノワイヤFETの模式図と走査型電子顕微鏡像である。成長後のナノワイヤ表面は原子層堆積法(ALD)を用いて、厚み6 nmの Al_2O_3 絶縁膜で被覆しておく。デバイス作成用のSi基板には図1のような段つき断面形状を有する下層ゲート電極を形成しておき、この上にナノワイヤを転写する。ナノワイヤ両端部分にEBリソグラフィによって電極パタンを形成し、アルゴンクリーニングによってナノワイヤ表面の酸化膜を除去後、ナノワイヤを大気に曝さずにAlを蒸着し、低接触抵抗のソース・ドレイン電極を形成した。ソース・ドレイン電極の表面は酸化して Al_2O_3 絶縁膜にしておき、この上から上層ゲート電極をソース・ドレイン電極にオーバーラップするように蒸着すると、ナノワイヤが上下層のゲート電極に挟まれたGAA構造が完成する。図2は、室温におけるドレイン電流(I_d)–ドレイン電圧(V_d)特性をゲート電圧 V_g を変えながら測定した出力特性で、閾値0.39 Vのn型FETとなっている。ここで、ナノワイヤチャネルの直径 d は70 nm、ゲート長 L_g は220 nmである。ドレイン電流をナノワイヤの周長 $w = \pi d$ で規格化した値も同時に示す。ドレイン電圧0.5 Vにおける規格化相互伝導度 g_m/w は0.55 S/mmと、均一のInAsナノワイヤをチャネルとするFETとしてはこれまでの最高値となっている。このような優れたON特性は、GAA構造によるゲート電界制御性の改善とゲートオーバーラップ構造による寄生抵抗の低減を同時に達成したことによる。

[1] S. Sasaki, G. Zhang, K. Tateno, H. Suominen, Y. Harada, S. Saito, A. Fujiwara, T. Sogawa, and K. Muraki, Appl. Phys. Lett. **103** (2013) 213502.

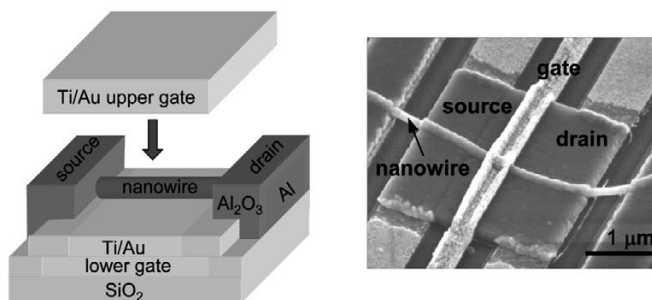


図1 InAsナノワイヤFETの構造模式図(左)と走査型電子顕微鏡像(右)。

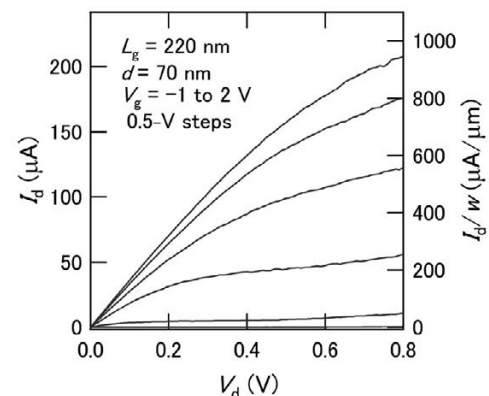


図2 室温におけるナノワイヤFETの出力特性。

有機半導体 DNTT をベースとした MIS キャパシタの AC アドミッタンス

林 稔晶
量子電子物性研究部

有機半導体 dinaphtho[2,3-b:2',3'-f]thieno[3,2-b]thiophene (DNTT)をベースとした金属・絶縁体・半導体キャパシタ (MIS キャパシタ) のアドミッタンス $Y (= G + j\omega C)$ を測定し、このデバイスにおけるキャリア・ダイナミクスの周波数依存性について研究した[1]。MIS キャパシタのデバイス構造は Al (50 nm) / AlO_x (4 nm) / DNTT (30 nm) / Au (90 nm) である。図1にデバイスの光学顕微鏡写真を示す。Yは、インピーダンス測定器のLow端子をAu電極に、High端子をAl電極につないで測定した。図2はDC電圧を-2.5 V印加したときの Y/ω の虚部(C)と実部(G/ω)の周波数スペクトルである。図2からわかるように、Cのスロープは G/ω のピークに対応しており、Cと G/ω はお互いに相補的な関係にあることがわかる。

次に、異なるコンタクト形状をもつ様々なデバイスを測定した。その解析によると、高周波ピーク P_H のピーク高さはトップコンタクトの面積に比例し、低周波ピーク P_L のピーク高さはAuに覆われていないAlゲート上のDNTTの面積に比例することがわかった。このことから、 P_H はトップコンタクトからその直下のDNTT / 絶縁体界面へのキャリア注入に起因しており、 P_L はトップコンタクト直下からAlゲート上のDNTT全体に広がるドリフト電流に起因していることがわかった。また、キャリアの拡散方程式を数値的に計算することによって、 P_L を非常によく再現することができることがわかった。このフィッティングにおいて移動度はパラメータの1つとして用いられる。各ゲート電圧におけるスペクトルをフィッティングすることによって、蓄積領域(-2.5 V)から閾値下領域(-1.1 V)までの移動度を求めることができた。

[1] T. Hayashi, N. Take, H. Tamura, T. Sekitani, and T. Someya, J. Appl. Phys. **115** (2014) 093702.

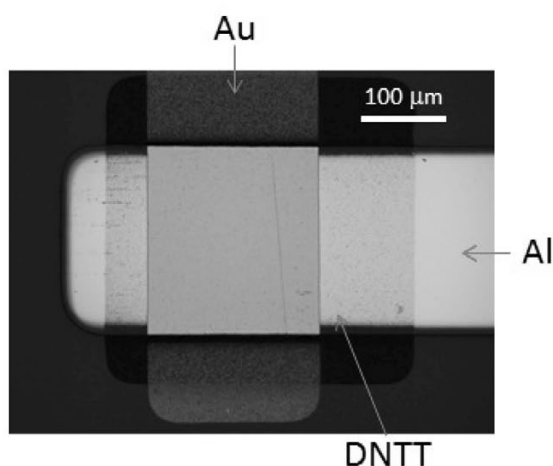


図1 DNTTをベースとしたMISキャパシタの光学顕微鏡写真。

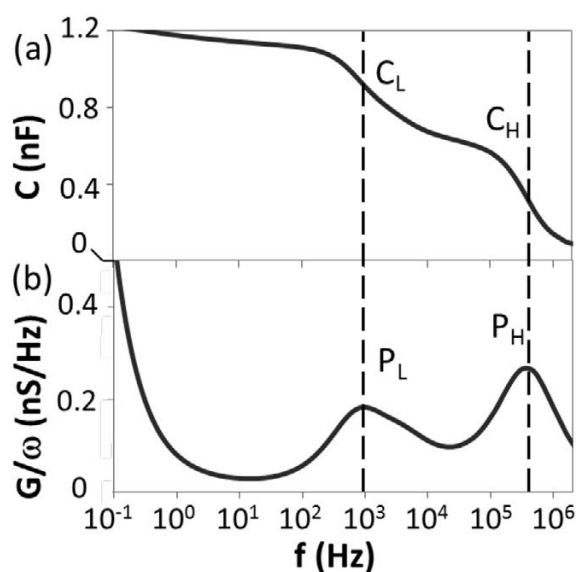


図2 MISキャパシタのキャパシタンス・スペクトル(a)、およびコンダクタンススペクトル(b)。

光格子中の冷却原子を用いたクラスタ状態生成法の提案

稲葉謙介 徳永裕己* 玉木 潔 井桁和浩 山下 眞
量子光物性研究部 *NTTセキュアプラットフォーム研究所

光格子は、多数の冷却原子を周期的に捕捉することが可能な、レーザ光の干渉で作られる人工結晶である。補足した原子のもつ核スピンなどの内部自由度を量子ビットとして用いれば、100万ビット規模の量子計算機も実現可能である。しかしながら、そのためには原子スピン間に量子もつれを高精度に生成する必要があるが、このような技術は未確立である。そこで、本研究では、レーザ光の照射やその強度調整などの単純な操作を組み合わせることで実現可能な量子もつれ生成手法を、理論的に提案した[1]。また、数値シミュレーションによって提案手法の性能を検討し、クラスタ状態と呼ばれる大規模な量子もつれを高精度かつ高速に生成可能であることを示した。以下に、提案手法の一部を概説する。

本提案では、光格子中のフェルミ原子の超微細構造などの（擬似的な）スピン自由度を量子ビットとして用いる。フェルミ原子特有のバンド絶縁体相転移などを利用すれば、各格子点に1原子ずつ閉じ込められた状態を容易に生成できるが、このときは離れた格子点にある原子スピン間に量子もつれはない（図1(a)）。ここに、レーザ光の追加照射などの操作を行うことによって、原子の量子状態を記述するハミルトニアンをデザインし、スピン相関を制御すれば量子もつれを生成できる（図1(b)）。しかし、原子のハミルトニアンは、スピンだけでなく軌道や格子占有数などの内部自由度を有する。このような余分な自由度が関与する量子状態の存在は、スピン間の量子もつれ生成の精度を下げるエラー要因となる。従来提案されていた手法では、そのエラーを避けるため、時間をかけて量子もつれ生成を行う必要がある（図2(a)）。このことは実用上の大きな欠点である。本提案では、レーザを追加して、光格子を特定の形に変化させることで誘起できる共鳴的な軌道間遷移を利用する。これによって、高速に量子もつれ生成が可能である反面、エラー要因である余分な量子状態が出現する。我々は、このエラー出現メカニズムを解明し、さらに、エラー振動ともつれ生成振動を同期させることを提案した（図2(b)）。これによって、高速かつ高精度な量子もつれ生成が可能となった。このような、エラー要因となり得る余分な自由度まで含めたハミルトニアンをデザインする新手法は、光格子中の原子を用いた量子計算実現につながると期待できる。

[1] K. Inaba, et al, Phys. Rev. Lett. **112** (2014) 110501.

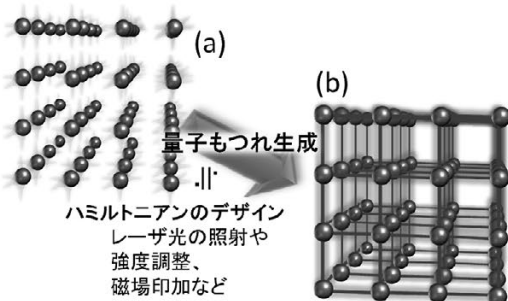


図1 (a) 光格子に1つずつ束縛された原子集団、(b) その原子間に作られたクラスタ状の量子もつれ。レーザ光照射などの操作で原子のハミルトニアンをデザインして、量子もつれを作る。

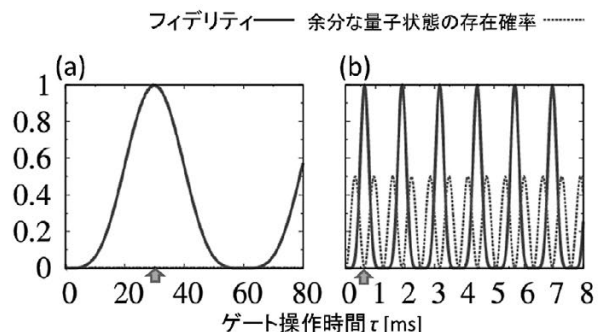


図2 (a)従来法、(b)新手法の数値シミュレーション結果。(実線)生成した状態と望む量子もつれ状態との一致度を示すフィデリティ、(破線)エラー要因となる、余分な量子状態の存在確率。矢印が示す時間でゲート操作をやめることで、高精度の量子もつれが生成できる。

結合共振器光導波路を用いた単一光子バッファ

武居弘樹 松田信幸* 倉持栄一* William J. Munro 納富雅也*
量子光物性研究部 *NTTナノフォトニクスセンタ

光導波路技術を用いた量子情報システムの集積化が注目を集めている。既に、もつれ光源、量子回路、光子検出器などの導波路上の集積化が報告されている。これらの機能に加え、光子のバッファをチップ上に備えることにより、柔軟に再構成可能な集積化量子光回路の実現が期待できる。今回、シリコンフォトニック結晶モードギャップ共振器を400個結合した結合共振器光導波路(CROW)中のスローライト効果を用いて単一光子バッファを実現した[1]。

実験系を図1に示す。波長1551.1 nm、パルス幅20 psの光パルスを経路500 mの分散シフトファイバ(DSF)に入力し、自然放出四光波混合により量子相関光子対を発生する。出力されたシグナル光子(波長1546.70 nm)はレンズファイバによりCROWを含む導波路に結合された後、超伝導単一光子検出器(SSPD)により検出される。アイドラ光子(波長1555.53 nm)はSSPDにより直接検出される。両SSPDの検出信号を時間間隔測定器に入力し、同時計数測定を行う。使用したCROWの概要を図1のインセットに示す[2]。本実験では、格子定数 $a=420$ nm、共振器間隔 $5a$ 、共振器数400(全長840 μm)のCROWを用いた。また、同一のチップ上に備えられた、CROW部分がフォトニック結晶線欠陥導波路により置き換えられた参照導波路を時間遅延の基準として用いた。

シグナル光子がそれぞれCROWおよび参照導波路を透過した場合の同時計数測定ヒストグラムを図2の○および□で示す。CROWによりシグナル光子に付与された時間遅延のため、同期計数ピークが 151.1 ± 0.5 psシフトした。この結果は、単一光子パルスがCROW中では光速の約1/59の群速度で伝搬していることを示している。また、CROW通過後のシグナルとアイドラ間の強度相互相関 $g_{si}^{(2)}(0)$ は 3.25 ± 0.06 と観測され、CROWによるバッファ後にも非古典的な強度相関が保持されていることが確認できた。本実験に加え、チップ温度の変化による50 psの時間遅延量チューニングを確認した。また、時間位置もつれ状態がCROW中で保持可能であることを実験的に示した。

[1] H. Takesue, N. Matsuda, E. Kuramochi, W. J. Munro, and M. Notomi, Nature Commun. **4** (2013) 2725.

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

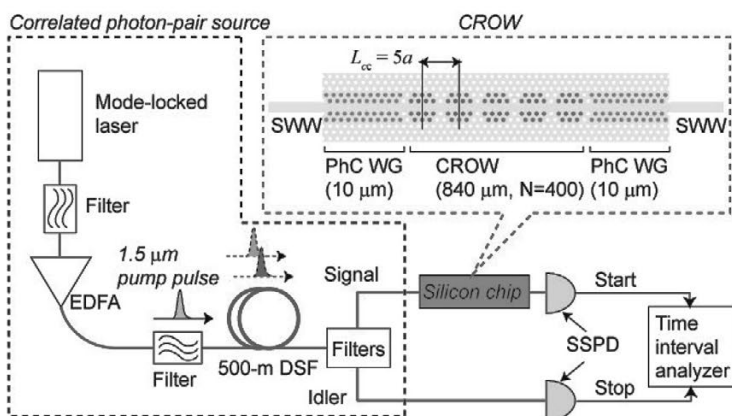


図1 実験系。

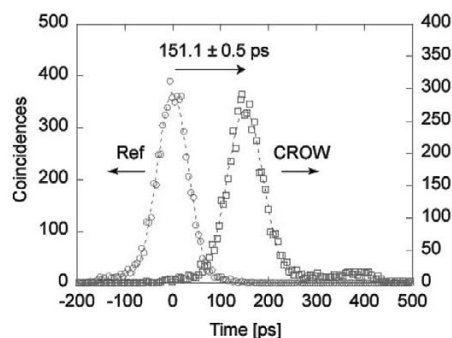


図2 時間間隔測定ヒストグラム(同時係数ピーク付近)。

実環境下での 90 km 量子鍵配送システムの長期安定性検証実験

清水 薫 玉木 潔 本庄利守*

量子光物性研究部 *NTTセキュアプラットフォーム研究所

量子力学の原理によって安全性が保証された暗号鍵を、光ファイバで長い距離配送するための差動位相量子鍵配送システムについて、実際に首都圏に敷設された試験用光ファイバ伝送路に接続し(図1)、長期間に亘ってその動作安定性を検証した。これは2010年秋に行われた東京 QKD (Quantum Key Distribution: 量子鍵配送) ネットワークの実証実験[1]に続く試みである。その結果、実環境下での90 km伝搬と30 dBにおよぶ伝送損失にも関わらず、完全自動運転のもとで25日間に亘って安全鍵の安定な配送を達成するに至った[2]。システムの仕様は下記の通り。外部変調のクロックは1 GHz、光源と検出器には、それぞれ1.5 mm帯微弱レーザ光と超伝導単一光子検出器を使用。伝送路は地下と架空が半々を占める。ふるい鍵の平均生成レートは11 kbps、量子ビット誤り率(QBER)は2.6 %であった(図2(a))。そして安全鍵の生成レートの1時間の平均値は1.1 kbps、変動幅は ± 0.5 kbps であった(図2(b))。安全性の評価では一般個別攻撃による鍵盗聴までを想定している。

気象データとの比較により、敷設環境の時間変動が鍵配送性能に及ぼす影響が明らかになった。強い風が间断なく吹くような場合に、稀に安全鍵の供給が一時停止することはあるものの、システムは概ね安定であった。さらに、光パルス変調器の長時間連続動作がもたらす想定外の動作不安定の機構も明らかになった。この問題の解決の方策も検討している。

本研究は、独立行政法人情報通信研究機構(NICT)の協力のもとに実施された。

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

[2] K. Shimizu, T. Honjo, M. Fujiwara, T. Ito, K. Tamaki, S. Miki, T. Yamashita, H. Terai, Z. Wang, and M. Sasaki, J. Lightwave Technol. **32** (2014) 141.

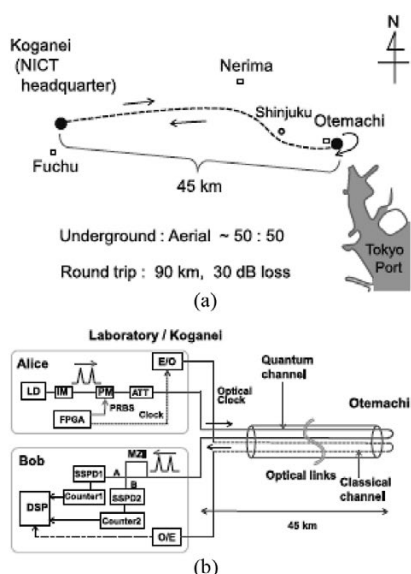


図1 実験系の構成。(a) 90-km敷設光ファイバの配置、(b) 差動位相量子鍵配送システムの構成。

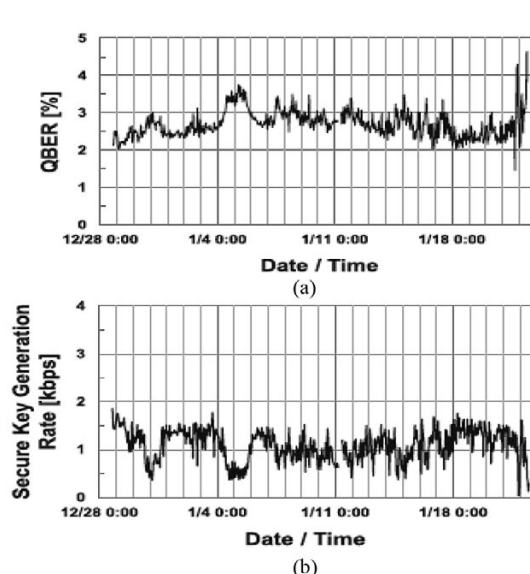


図2 25日間に亘る実験データ: (a) QBER (b) 安全鍵生成率の時間変動(1時間平均)。

グラフェン／鉄上への InP ナノワイヤ成長

舘野功太 章 国強 後藤秀樹
量子光物性研究部

最近、Cu フォイル上にロールツウロール法によってグラフェンを大面積に作製する報告がなされている。グラフェンは $200,000 \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ を超える高い移動度を有し、フレキシブル基板等に転写することで、伸縮、折り畳み可能で透明な電子、光デバイスが実現可能となる[1]。ここでは SiC(0001) 基板上と Fe 上に形成されたグラフェン上への InP ナノワイヤについて報告する。VLS (vapor-liquid-solid) 成長法はフリースタンディングのナノワイヤを形成する手法である。ナノワイヤ成長はナノサイズの金属触媒微粒子中で進行する。この特徴を利用して、グラフェン上に p-n 接合、量子ドットやコア・シェル構造等を作製し、新しいフレキシブルデバイスを実現する。

成長は減圧横型の MOVPE (MetalOrganic Vapor Phase Epitaxy) 装置を用いた。原料は TMI (trimethyl-indium)、TBP (tertiarybutylphosphine) を使用した。触媒として金微粒子を用いた[2]。構造は SEM (Scanning Electron Microscopy) と TEM (Transmission Electron Microscopy) を主に用いて観察した。III-V 族ナノワイヤは [111]B 方向に成長しやすい。図 1 にグラフェン／SiC(0001) 基板上に成長した InP ナノワイヤと In 球を示す。ナノワイヤが垂直に成長していることから、2D のグラフェン表面に (111)B 面が形成されることがわかった。しかしながら、TBP の低い分解効率から、幾つかの Au 微粒子では結晶の InP が生じず、In 球となる。これはグラフェン表面に TBP を分解する活性サイトが少ないことと、In 原子との結合が弱いことに起因すると思われる。我々は、また、フレキシブルデバイス応用のためにグラフェン／金属上の InP ナノワイヤ成長も検討した。Cu、Ni、Fe で検討したところ、グラフェン／Fe 上でのみ InP ナノワイヤ成長に成功した。Cu と Ni では P との反応性が高く、表面モロロジーが大きく変化したため、ナノワイヤ成長に至らなかった。Fe は C と様々な化合物を形成し、スチールと呼ばれる強度の高い状態となる。このスチール形成がその後の InP ナノワイヤ成長を可能にしたものと考えられる。図 2 にサボテンの針状に成長したグラフェン／Fe マイクロワイヤ上 InP ナノワイヤを示す。低温で CL (CathodoLuminescence) を確認することができた。この系は将来的にナノワイヤのフレキシブルデバイス応用に有望であると考えられる。

[1] S. Bae et al., Nature Nanotech. **5** (2010) 574.

[2] K. Tateno et al., Jpn. J. Appl. Phys. **53** (2014) 015504.

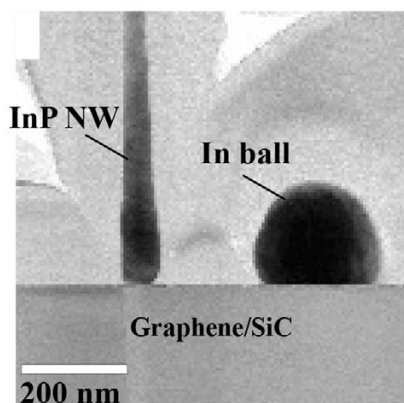


図1 グラフェン／SiC(0001)上 InP ナノワイヤと In 球の Bright-field (BF) TEM 像。

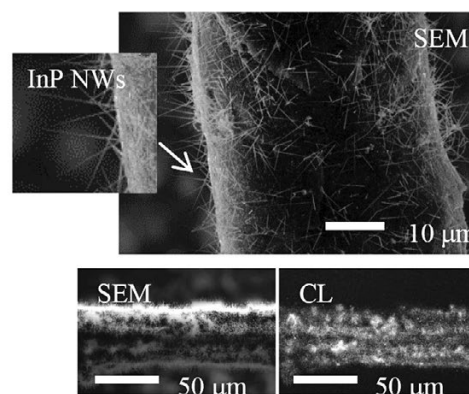


図2 グラフェン／Fe マイクロワイヤ上 InP ナノワイヤの SEM 像と CL 像 (下は 14 K で測定)。

カーボンナノホーンにおけるトポロジカルラマンバンド

佐々木健一 関根佳明* 舘野功太 後藤秀樹
量子光物性研究部 *機能物質科学研究部

グラフェンは炭素原子がハニカム構造を形成している二次元シートである。基本となる六角形の中には2つの炭素原子(A原子とB原子)がある。他方、ブリュアンゾーンにおいても2つの波数(K点とK'点)の近傍だけが電流などに寄与する。これらA、B原子、K、K'点の4つの自由度の関連を理解することが重要である。我々は、これらの自由度が混ざり合う効果をラマン分光の観点から探究しており、トポロジーに起因した新奇なラマン過程を見出したので報告する。

グラフェンのエッジでは、4つの自由度が大変興味深い振舞をする。エッジ構造は対称性の観点からアームチェアとジグザグに分類され、特にアームチェアエッジでは、AB原子が等価に現れる。一方、電子がアームチェアエッジで散乱されるとKからK'に状態が変化する。この波数変化は、グラフェンエッジのラマンスペクトルから検証することができる。Dバンドと呼ばれる格子振動モードがあり、波数がKからK'に変化しないと励起されないという選択則があるため、Dバンドの有無はアームチェアエッジに直接対応する[1]。図1はエッジDバンドの励起過程を模式的に表したものである。

5員環や7員環などの位相欠陥では、AB原子を大域的に定義することができないことを反映し、電子が位相欠陥のまわりを一周すると波数がKからK'に変化することが知られており、Dバンドの波数選択則が満たされる可能性がある。詳細に解析した結果、位相欠陥近傍に光励起されたキャリアの経路に関する巻き数(winding number)に依存した新奇なDバンドが存在することがわかった。このDバンドの励起メカニズムにはトポロジーが関わっており、エッジDバンドと区別するためにトポロジカルDバンドと命名した[2]。図2はトポロジカルDバンドの励起過程を模式的に表したもので、エッジが無い(電子の非弾性散乱はない)にも関わらず、欠陥の回りをキャリアがまわるだけで、Dバンドが生じるのが興味深い。トポロジカルDは、エッジDとフォノンの波数が異なり、ラマンシフトや光励起波長依存性などにより、区別可能である。

[1] K. Sasaki, Y. Tokura, and T. Sogawa, Crystals **3** (2013) 120.

[2] K. Sasaki, Y. Sekine, K. Tateno, and H. Gotoh, Phys. Rev. Lett. **111** (2013) 116801.

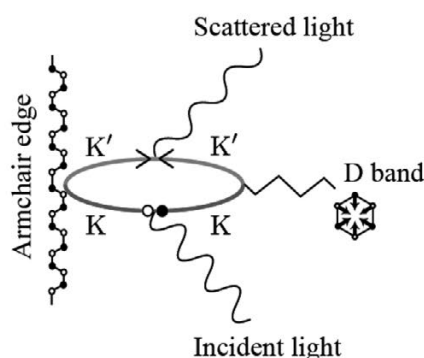


図1 アームチェアエッジにおけるDラマンバンドの励起過程: ●(○)は電子(ホール)を表す。

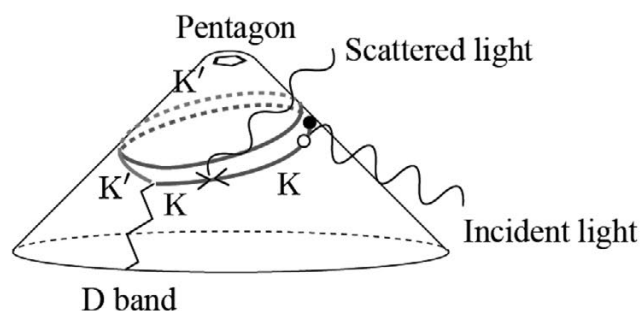


図2 5員環におけるトポロジカルDバンドの励起過程。

ダブルオプティカルゲート法を用いた炭素 K 吸収端 (284 eV) 領域の 単一アト秒パルス発生

増子拓紀 山口量彦 小栗克弥 後藤秀樹
量子光物性研究部

炭素を構成元素として含むグラフェン・ナノチューブ等の無機化合物や、生体分子等の有機化合物は、炭素のK殻と呼ばれる電子の吸収【光子エネルギー:284 eV (波長:4.4 nm)】を通して、それらの性質を解明することができる。我々が研究を行っているアト秒 (10^{-18} 秒:as) パルスレーザは、世界で最も短いストロボ光源である。応用例として、生体分子が光照射により死滅する時間よりもパルス幅が短いため、生体分子を生きたまま観測できる期待がある。このパルス発生には、 1.4×10^{15} W/cm² 以上の高強度基本波レーザが要求されるため[1]、その強度以下からのパルス発生を避けることが、重要な要素技術となる。我々は、楕円偏光場と二波長合成場を組み合わせたダブルオプティカルゲート(DOG)法を用いて時間制御を施し、アト秒パルス成分を選択的に取り出すことに成功した[2]。

基本波レーザ (エネルギー:247 μ J、中心波長:780 nm、パルス幅:7 fs) に、DOG 法を用いて 1.3 fs の時間ゲートを施した。その後、基本波はヘリウムガスを充填したガスセル (圧力:1.2 bar、相互作用長:300 μ m) に集光され、発生したアト秒パルスのスペクトルは、軟X線分光器 (284 eV 領域において分解能:3.8 eV) により観測された。図1は、(a)炭素300 nmフィルタ透過後、(b)炭素300 nmとホウ素130 nmフィルタ透過後のスペクトル分布を示す。炭素とホウ素K殻の吸収端が明確に観測され、これは世界最小の基本波レーザエネルギー (247 μ J) からの 284 eV パルス発生成功を意味している。また、DOG 法はアト秒パルスを時間的に切り出し単一化する効果も兼ねており、超白色スペクトル発生 (光子エネルギー帯域:140 eV 以上) が可能である。そのスペクトル帯域から、パルス幅は20アト秒にも到達すると見積もられ (図2)、世界最短記録である80アト秒パルス[3]よりも圧倒的に短い。1原子時間単位 (24アト秒) を超える極限の超高速パルスは、炭素K殻電子の励起・緩和・相関現象を明らかにし、多種の応用に適用するために重要な光源である。

- [1] Z. Chang et al., Phys. Rev. Lett. **79** (1997) 2967.
[2] H. Mashiko et al., Appl. Phys. Lett. **102** (2013) 171111.
[3] E. Goulielmakis et al., Science **320** (2008) 1614.

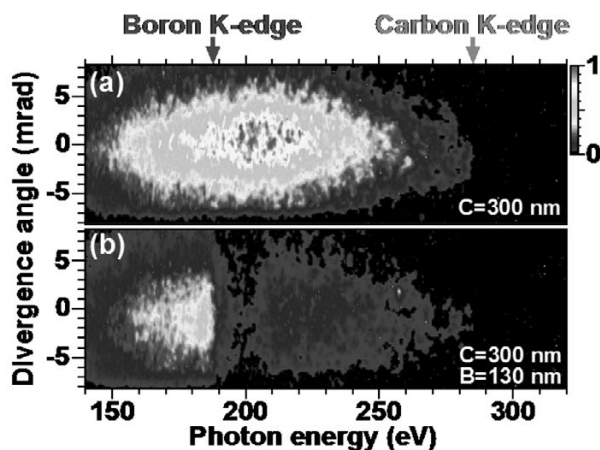


図1 アト秒パルスのスペクトル分布。(a)炭素フィルタ透過後、(b)炭素とホウ素フィルタ透過後。

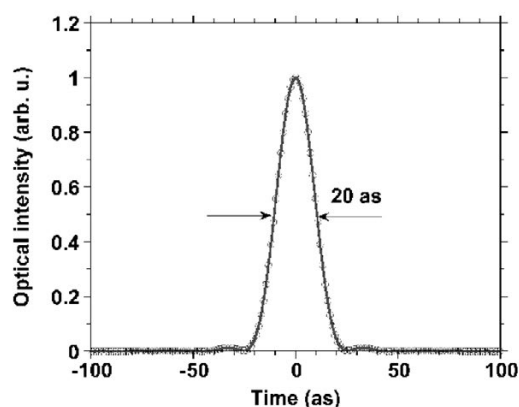


図2 フーリエ変換限界パルス幅。

コヒーレントフォノンを用いた量子ドット励起子の発光制御

後藤秀樹 眞田治樹 山口浩司* 寒川哲臣
量子光物性研究部 *量子電子物性研究部

半導体ナノ構造である量子ドットは、レーザをはじめとする従来デバイスの性能向上とともに、次世代の量子情報処理デバイスの実現に貢献することが期待されている。量子ドットでは、電子と正孔が結合した励起子と言われる粒子が通常の半導体より安定に存在する。この励起子は、量子状態の効率的な保持が可能のため、量子情報の基本ゲートとして動作する可能性がある。ゲート動作には、励起子状態を制御・操作が必要であるがその手段として、光、電場、磁場が利用されてきた。本研究では、量子ドット近傍の金属薄膜に光を照射することで発生させたコヒーレントなフォノンもその手段となりうることを明らかにした[1]。

量子ドットは、GaAsがAlGaAsで囲まれた構造で、GaAs(001)基板上に作製した量子井戸構造において、GaAs量子井戸(4.2 nm)とAlGaAs障壁層界面に形成される。実験では、パルスレーザ(時間幅 150 fsec, 繰返し 80 MHz, 波長 750 nm)を励起光とした顕微フオルミネセンス(PL)法を用いて、単一ドットからのPLを測定した。励起光は2つに分岐し、1つは量子ドットでの励起子生成に用い(Laser PL)、もう1つ(Laser Metal)は試料表面のTi薄膜(膜厚 100 nm)の照射に用いた(図1)。図2は得られたPLスペクトルで、量子ドットにレーザを照射し、金属薄膜を照射するレーザパワー(Laser Metal)を変化させた結果である。量子ドットのみレーザを照射した場合(0 mW)は、A-Dの領域でスペクトルが見られるが、金属にレーザを照射すると、E-Gが支配的になる。スペクトル変化は、パワー増加に対して不連続的であることから、レーザ照射によってもとの励起子状態とは異なる状態から発光することが示唆される。また、光干渉計を用いた実験も行い、金属薄膜に光を照射すると、フォノン発生に伴う光干渉信号も得られた。以上から、金属薄膜にレーザを照射すると、コヒーレントなフォノンが発生して量子ドットの励起子状態と相互作用し、新しい状態を発生させたと解釈できる。このフォノンは照射するパルスレーザで制御可能であり、量子ドット中の励起子操作の手段となることがわかった。

[1] H. Gotoh, H. Sanada, H. Yamaguchi, and T. Sogawa, Appl. Phys. Lett. **103** (2013) 112104.

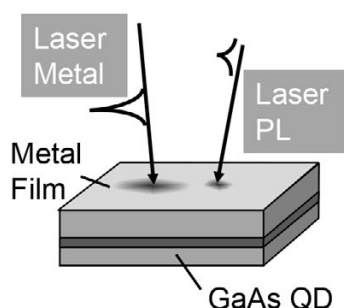


図1 GaAs量子ドット(QD)と試料付近の実験配置。

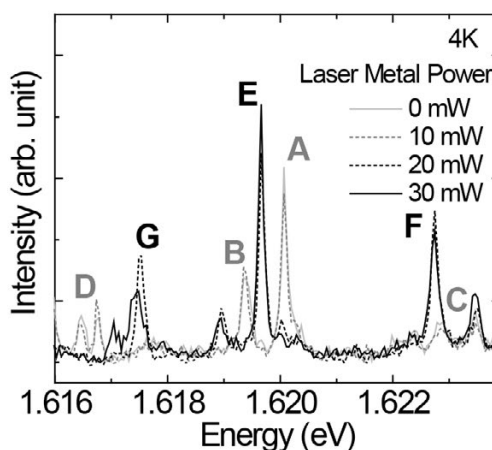


図2 QDの発光スペクトルのLaser Metal強度依存性。

半導体ナノワイヤと Si フォトニック結晶によるナノ共振器形成

横尾 篤^{1,2} Muhammad Danang Birowosuto^{1,2} 章 国強² 館野功太²

滝口雅人^{1,2} 倉持栄一^{1,2} 谷山秀昭^{1,2} 納富雅也^{1,2}

¹NTT ナノフォトニクスセンタ ²量子光物性研究部

半導体ナノワイヤは、構造サイズを直径 100 nm 以下とすることが可能であり、特に、III-V 族ナノワイヤにおいては、成長プロセスのコントロールにより、コア・シェル構造、多層ヘテロ構造、p-i-n 接合構造などを容易に導入できることから、小型で消費エネルギーの低い光デバイスの実現が期待される。しかしながら、半導体ナノワイヤのサイズが光波長と比べて小さすぎるために、光閉じ込めが困難であるという問題があった。一方、Si フォトニック結晶では、波長オーダーの光閉じ込めが実現されているが、光活性な材料を導入するためには、埋め込み成長などのプロセスが必要であり、材料を自由に選択することができなかった。

我々は、線欠陥中にトレンチ構造をもつフォトニック結晶上で、微細な探針で微小物体を動かす手法 (AFM マニピュレーション) を使って、トレンチ内にナノワイヤを配置することで、共振器を新規形成することに成功し、さらに、トレンチ内でのナノワイヤ移動により共振器の位置を変更可能であることを実証した (図 1) [1]。この共振器は、フォトニック結晶線欠陥におけるモードギャップ端周波数が屈折率変化に対して敏感であることを利用して、ナノワイヤ導入による局所的な屈折率変化によって形成されたモードギャップ共振器である [2, 3]。InAsP/InP ヘテロ構造ナノワイヤ (長さ 2620 nm、直径 85 nm) を周期 416 nm のフォトニック結晶線欠陥中のトレンチ (幅 150 nm、深さ 75 nm) に導入したサンプルにおいて最高 Q 値 9500 ($\lambda = 1.5 \mu\text{m}$) が得られている。また、ナノワイヤの移動により共振器 Q 値が変化することを使って、同一のナノワイヤが Q 値の異なる環境に置かれた際の発光寿命の変化を評価することが可能となり、パーセル効果により Q 値の増大とともに光子寿命が短くなることが確認された。Q 値 5200 の共振器において、III-V 族ナノワイヤとしては最も短い光子寿命 (91 ps) が達成されている。

以上の結果は、共通のフォトニック結晶基板上に異種材料を導入すると同時に、機能性をもった共振器を形成し任意の機能デバイスを提供する、光ユニバーサル基板コンセプトの実現につながるものである。

- [1] M. D. Birowosuto, A. Yokoo, G. Zhang, K. Tateno, E. Kuramochi, H. Taniyama, M. Takiguchi, and M. Notomi, *Nature Mater.* **13** (2014) 279.
- [2] M. Notomi and H. Taniyama, *Optics Express* **16** (2008) 18657.
- [3] M. D. Birowosuto, A. Yokoo, H. Taniyama, E. Kuramochi, M. Takiguchi, and M. Notomi, *J. Appl. Phys.* **112** (2012) 113106.

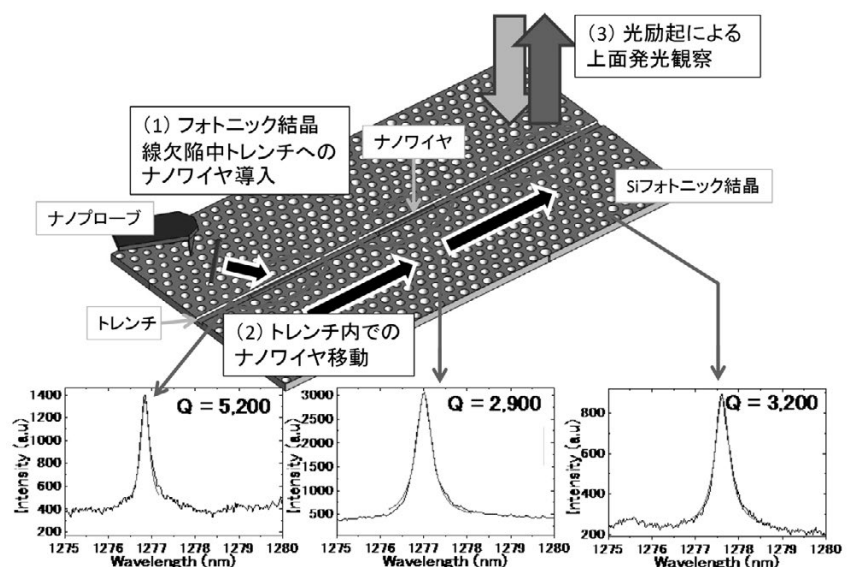


図 1 AFM マニピュレーションを用いたフォトニック結晶線欠陥トレンチへのナノワイヤ導入による共振器形成とナノワイヤのトレンチ内移動による共振器位置移動の模式図、および、各位置におけるナノワイヤからの発光スペクトル。

微小な埋め込みヘテロ構造を含むフォトニック結晶 InGaAs 光ディテクタ

野崎謙悟 松尾慎治* 武田浩司* 佐藤具就* 倉持栄一 納富雅也
量子光物性研究部 *NTT フォトニクス研究所

現在、CMOS チップ間光リンクやオンチップ光処理に向けたチップ内光リンクの研究が展開されており、CMOSと融合可能な高速・高効率なフォトディテクタ(PD)の実現が要求されている。pin 接合をもつPDでは、その接合容量を著しく低減できれば、RC 時定数を劣化させることなく高い負荷抵抗を連結させることができる。これにより、熱雑音低下による高感度化、ならびに出力電圧の増加が可能となり、結果として光源を含めた光リンク全体の消費電力抑制が期待される。それに加え、理想的には、電気増幅器を除いてもCMOS 駆動が可能な“レーザレスPD”を構成することも期待できる。我々はこれらの目的に向けて、微小なナノ構造PDの実現を目指している。

強い光閉じ込めが可能なフォトニック結晶(PhC)導波路では、PD 全長が短くても高い量子効率が得られるため、pin 接合長もまた短くでき、微小容量化に向いている。図1はPhC 導波路型 pin-PD の構造図とSEM 写真である[1]。InP スラブのPhC 導波路中に微小な InGaAs 吸収層(長さ約 $3.4\ \mu\text{m}$) が埋め込まれており、その両サイドへの Zn 拡散、Si イオン注入により横方向 pin 接合が形成されている。逆バイアス電圧印可下 ($-1\ \text{V}$) において、PhC 導波帯域内の波長の CW 光を入力したときの光電流を図2(a)に示す。このときの光-電流変換効率は約 $1\ \text{A/W}$ であり、十分高い効率が得られた。すなわち埋め込み界面でのキャリア捕獲や非発光再結合などの悪影響がなく効率的に光電流の生成がなされていることを示す。図2(b)は、 $2^{31}-1$ の疑似ランダム光信号入力に対するアイパターンであり、ビットレート $10\ \text{Gb/s}$ 程度の高速応答が得られた。今後、RC 時定数の低減による更なる高速化とともに、負荷抵抗の連結によるオンチップ光-電圧変換も可能と考えられ、将来のチップ内光リンクに向けた低エネルギーかつ微小な光受信器の実現が期待される。

[1] K. Nozaki, S. Matsuo, K. Takeda, T. Sato, E. Kuramochi, and M. Notomi, Opt. Express **21** (2013) 19022.

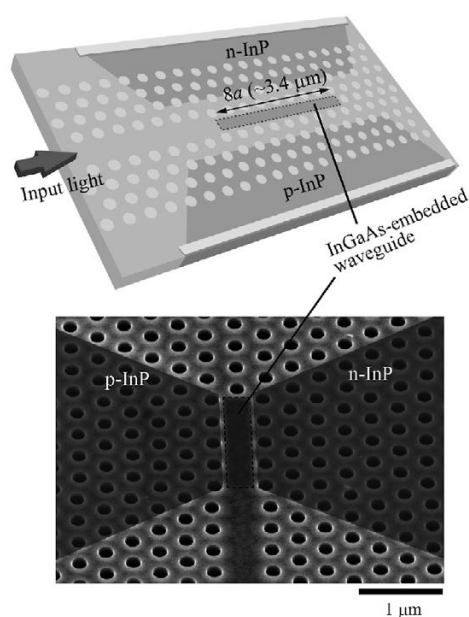
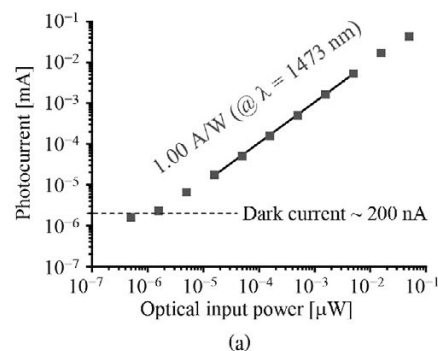
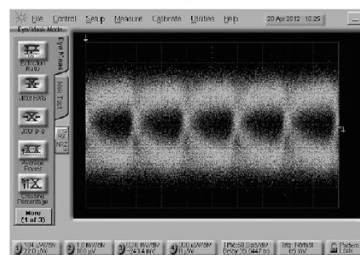


図1 素子構造とSEM写真。(a) PhC 導波路型光ディテクタの構造図。(b) 作製した素子のSEM写真。n, pドープ領域は色を濃くして表している。



(a)



(b)

図2 素子特性。(a) バイアス電圧 $-1\ \text{V}$ のときの光入力パワーに対する光電流特性。(b) $10\ \text{Gb/s}$ 光信号に対するアイパターン。

埋込みヘテロ構造フォトニック結晶からの自然放出光の増強と抑制

滝口雅人^{1,2} 角倉久史^{1,2} Muhammad Danang Birowosuto^{1,2} 倉持栄一^{1,2} 佐藤具就^{1,3}
武田浩司^{1,3} 松尾慎治^{1,3} 納富雅也^{1,2}

¹NTT ナノフォトニクスセンタ ²量子光物性研究部 ³NTT フォトニクス研究所

近年、チップスケールの光インターコネクションやチップ内光ネットワークの研究が盛んに行われている。様々なナノデバイスの中でも、フォトニック結晶共振器は非常に小さなモード体積と高Q値をもち、高速に変調できるレーザやLEDが実現可能であることから、有望な候補となっている。そこで我々は、超高速で高効率なナノフォトニクス素子を実現するために、フォトニック結晶の内部に量子井戸を埋め込んだ素子を用いて（図1）、自然放出光の制御に関する研究を行っている。一般的な量子井戸を用いた発光制御の研究はこれまで数多く行われてきたが、活性層が面内全体にあるために、キャリアの拡散やフォトニック結晶の穴での表面再結合の影響が避けられなかった。したがって、明瞭な自然放出光制御に関する報告は量子ドットを用いた素子が中心であった。しかし、埋め込み量子井戸は、活性層が共振器内部にのみ存在し、キャリアの閉じ込めが強く、非発光表面再結合を非常に小さくすることのできるため、非常に鮮明な自然放出光制御が実現できる。

本研究では[1]、低温下にて(4K)異なる格子定数の素子を用い共振周波数をシフトさせ、発光レートの増強と抑制を測定した。図2(a)は非共鳴条件(1406 nm)での発光寿命、共鳴条件(1430 nm)での発光寿命、参照用の量子井戸からの発光寿命である。このとき、励起用レーザの強度は100 nWと、素子のレーザ発振閾値よりも1/10程度低い。また、測定に用いたL2共振器は $Q=4200$ である（図2(b)）。図2(a)が示すように、共鳴での発光寿命は明らかに高速化されており、その寿命0.2 nsは参照用のBH-QWと比べて3.8倍速い。非共鳴の発光寿命は6 nsであり、これは7.5倍発光が抑制されている。この、共鳴と非共鳴の発光寿命を比べるとそのコントラストは30倍程度あり、非常に大きい発光寿命の制御ができたことがわかる。この値は、既存の量子井戸フォトニック結晶素子と比べても最も大きく、量子ドット素子と同程度であることがわかった。この結果は、高速化ができていると同時に、高効率デバイスが実現できていることを示唆している。

[1] M. Takiguchi, H. Sumikura, M. D. Birowosuto, E. Kuramochi, T. Sato, K. Takeda, S. Matsuo, and M. Notomi, Appl. Phys. Lett. **103** (2013) 091113.

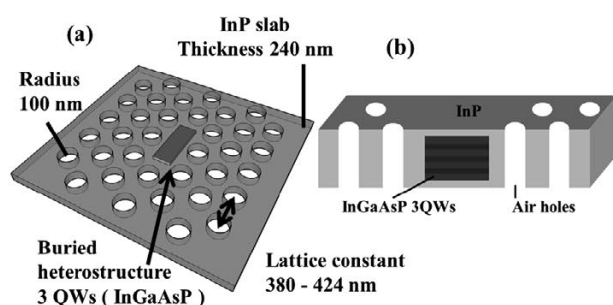


図1 (a) L2共振器の概念図。(b) L2共振器断面の概念図。

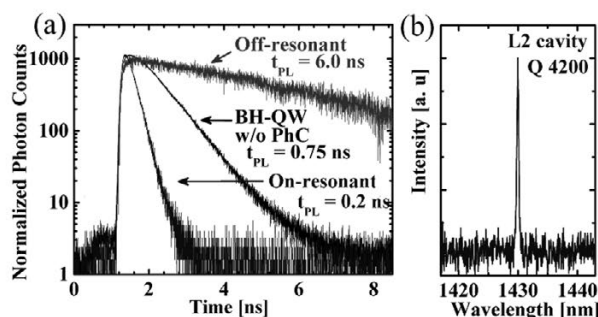


図2 (a) L2共振器の共鳴、非共鳴、フォトニック結晶構造のない参照用量子井戸($0.80 \times 0.30 \times 0.15 \mu\text{m}^3$)からの時間分解測定。(b) L2共振器の共鳴スペクトル。

波長サイズ埋込活性層フォトニック結晶 (LEAP) レーザの 低エネルギー直接変調

武田浩司^{1,3} 佐藤具就^{1,3} 新家昭彦^{2,3} 倉持栄一^{2,3}
納富雅也^{2,3} 長谷部浩一^{1,3} 碓塚孝明^{1,3} 松尾慎治^{1,3}

¹NTTフォトニクス研究所 ²量子光物性研究部 ³NTTナノフォトニクスセンタ

現在CMOSチップ上に光配線を形成し、コア間および素子間等の通信を光で行うオンチップ光インターコネクションの研究が様々な研究機関で進められている。そこで用いられる光源には、1ビット当たり10 fJ以下という、超低消費エネルギーでの動作が求められる[1]。我々はこのオンチップ、またチップ間の光通信に用いる光源として、波長サイズ埋込活性層フォトニック結晶 (LEAP) レーザを開発しており[2]、今回その素子単体の動作エネルギーを直接変調動作において評価した結果を報告する。

素子の作製手順は[3]に報告したものと類似しており、埋込活性層に対してイオン注入と熱拡散によって横方向pn接合を形成した。電子線描画とドライエッチングによりフォトニック結晶穴を形成し、ウェットエッチングでエアブリッジ構造を作製した。

素子の25℃における光出力－電流－電圧(L-I-V)特性を図1に示す。発振しきい値電流は32 μA であり、注入電流300 μA における最大光出力は39.3 μW であった。これは導波路と測定に用いた先球ファイバとの結合損失約8 dBを差し引いた値である。次に、素子を10 Gb/sの擬似ランダム信号 $2^{31}-1$ で駆動し、サンプリングオシロスコープでアイパターンを取得した結果を図2に示す。素子からの出力光はEDFAによって増幅してから評価した。明瞭なアイ開口と、消光比約10 dBが得られた。この動作に必要な注入電流量はわずか80 μA であり、消費エネルギーは10 fJ/bit以下が達成された。

本研究の一部は独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の助成事業の一環として行われた。

- [1] D. A. B. Miller, proc. IEEE **97** (2009) 1166.
- [2] K. Takeda et al., Nature Photon. **7** (2013) 569.
- [3] S. Matsuo et al., JSTQE **19** (2013) 4900311.

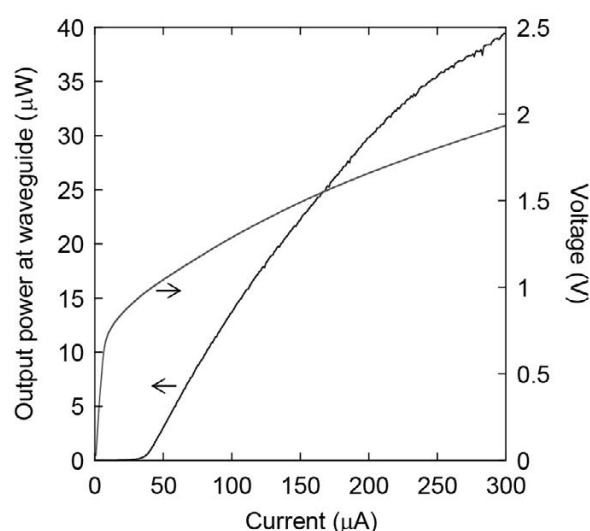


図1 LEAPレーザのL-I-V特性。

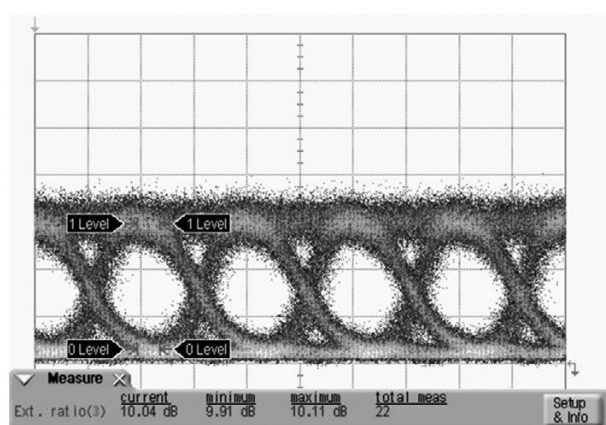


図2 80 μA 注入時アイパターン。

フランチ・ケルディッシュ効果による導波路結合 Ge フォトダイオードの L バンド感度向上

武田浩太郎 開 達郎 土澤 泰 西 英隆 高磊 福田 浩¹ 山本 剛¹

石川靖彦² 和田一実² 山田浩治

NTT ナノフォトニクスセンタ ¹NTT マイクロシステムインテグレーション研究所 ²東京大学

ゲルマニウム(Ge)を用いたフォトダイオード(Ge-PD)は、Geの吸収限界波長が1580 nm程度であることから、Lバンド(1565 nm – 1625 nm)の長波長側においては感度が低下することが報告されている[1]。そのため当該波長での感度上昇がLバンド通信へのGe-PDの適用へは不可欠である。感度上昇の手段の1つにフランチ・ケルディッシュ(FK)効果が挙げられる。FK効果は高電界印加によって光吸収係数が変化する現象であり、Geにおいても波長1580 nm付近での光吸収係数の上昇が報告されている[2]。さらにアバランシェ効果も感度上昇に有効であるとされる。アバランシェ効果は高電界印加で起こる電子雪崩による感度増幅であり、波長とは独立した現象であるため増幅率は波長に依存しない。本研究では上記2つの効果を利用してLバンドにおけるGe-PDの感度を上昇させること、またその現象を解析することを目的とした。

本研究では導波路結合型Ge-PDを用いて高バイアス駆動条件下で、Lバンドでの感度を測定した。Geメサは幅10 μm 、厚さ1 μm 、長さ50 μm で数10 nmのSi層で覆われている。電圧は15 Vまで印可し、暗電流は2 V印可時で117 nA、15 V印可時で111 μA にまで達した。光電流から暗電流を引き、入力光パワーで割って算出した各電圧におけるGe-PDの感度-波長特性を図1に示す。Ge-PDはLバンド全帯域において感度1.14 A/W以上を示した。また電圧11 V前後で感度が急激に増大し、雪崩増幅を起こしていることが確認できた。アバランシェ効果の影響を取り除くため、増幅率 M_{av} で規格化した各電圧における感度-波長特性を図2に示す。感度は電圧印可によって長波長になるほど増加した。また、図2中の実線が示す通りこの挙動は、FK効果による感度変化の計算結果と一致した。すなわちGe-PDは15 V印可時にFKおよびアバランシェ効果によって感度を上昇させたことが明らかになった。さらに図3 (a)に示すようにバイアス電圧と波長1640 nmでの最少受光感度をプロットするとFK効果は最少受光感度の向上に寄与するが、アバランシェ効果は高い暗電流のため、感度が上昇しても最少受光感度の向上に寄与しないことがわかった。しかし、図3 (b)に示すように暗電流を1/50まで抑えればアバランシェ効果による寄与が見えるため、暗電流を抑制すればアバランシェ効果によっても最少受光感度が向上することが明らかになった。

以上是高電界下、LバンドでのGe-PDの感度上昇の由来を明らかにした世界初の成果であり、本成果によってGe-PDのLバンド通信適用への端緒を開くことができた。

[1] C. T. DeRose, et al., Opt. Express **19** (2011) 24897.

[2] T. Y. Liow, et al., in Proc. OFC, no OM3K. **2** (2013).

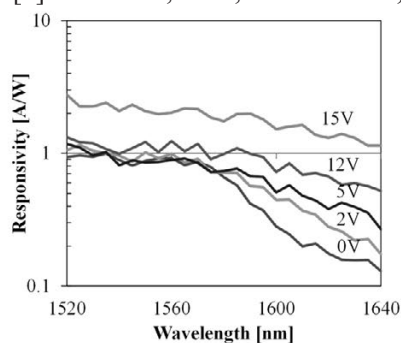


図1 各電圧におけるGe-PDの感度-波長特性。

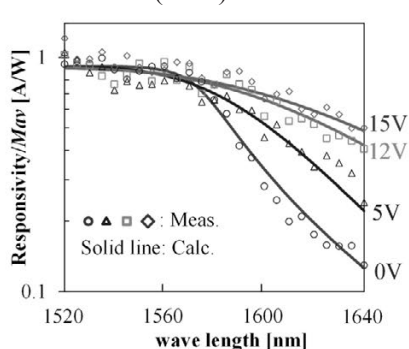


図2 増幅率 M_{av} で規格化した各電圧における感度-波長特性。

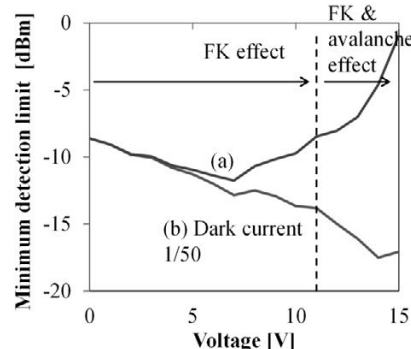


図3 バイアス電圧に対する波長1640 nmでの最少受光感度。

Ⅱ. 資料

第6回 NTT 物性科学基礎研究所スクール

NTT物性科学基礎研究所では、物性研究分野の若手研究者の育成と、海外の若手研究者へのビジビリティの向上を目的として、2013年11月24日から11月26日まで、NTT厚木研究開発センタで、第6回NTT物性科学基礎研究所スクール（NTT-BRLスクール）を開催しました。6回目となるNTT-BRLスクールでは、現在物性研が精力的に研究を進めている「ナノ・量子サイエンス ～明日のテクノロジーを拓く～」をテーマに、海外の著名な大学・研究機関の教授を招き、14ヶ国35名の学生（主に大学院博士課程学生）が参加しました。

初日には、John Clarke教授（米、University of California, Berkeley）による「超伝導量子干渉素子(SQUID)の理論と応用」に関する講義がありました。Clarke教授の講義は、スクールの初日、2日目に行われ、超伝導サイエンスの歴史、基礎原理から、宇宙や医学に至る応用用途まで幅広く、ご紹介いただきました。また、初日の午後には、寒川哲臣物性研所長から研究所の概要が紹介された後、物性研の研究者による講義も行われました。山口浩司上席特別研究員から「化合物半導体ヘテロ構造を用いたマイクロ／ナノメカニカル素子」について、村木康二上席特別研究員から「固体中のトポロジカル量子効果」について、納富雅也上席特別研究員から「超低消費電力化にむけたナノフォトリクス」について講義が行われました。2日目午後および3日目午前には、Oliver Schmidt教授（独、IFW Dresden）から「量子ドットの基礎と展望」、「新しいナノの世界を拓くナノメンブレン素子」の講義が行われました。2日目の午後には、物性研が所有する研究設備や装置を見学するラボツアーを実施し、物性研の最近の成果概要を紹介しました。その後、厚木研究開発センタに近い丹沢山塊に属する大山にエクスカッションに出かけました。参加者は、ライトアップされた紅葉や丹沢山系から流れる良質な水を使った豆腐料理を堪能し、大変満足な様子でした。3日目午前には、Jonathan Finley教授（独、Walter Schottky Institute）から「量子ドット中の電子・スピンドYNAMICS」に関する講義が行われました。3日目午後には、今回共催した物性研が主催する国際会議ISNTT 2013にスクール学生も参加し、夕刻には合同ポスターセッションを開催しました。学生が各自の大学での研究内容について発表し、学生同士、講師の先生方、NTT研究者との間で、活発な議論がなされました。NTT-BRLスクールとISNTTとの合同Partyでは、ポスターセッションで優れた発表を行った学生に贈られるベストポスター賞の発表などで大いに盛り上がり、世界の研究者との親睦を深めました。NTT物性研は、今後もこのような交流の場を提供し、物性・材料分野の研究交流、人材育成への積極的な取り組みを継続していきます。



国際シンポジウム ISNTT2013 の開催

NTT物性科学基礎研究所は、2013年11月26日から29日まで、NTT厚木研究開発センターにおいて国際シンポジウム「ナノスケールの輸送と技術」International Symposium on Nanoscale Transport and Technology 2013 (ISNTT2013) を開催しました。世界16か国から208名の研究者が参集し、ナノテクノロジーと量子・ナノデバイスに関する活発な議論がなされました。物性科学基礎研究所では、1998年以来、様々なトピックスをテーマに国際会議を開催してきましたが、2009年より、半導体、超伝導体、新材料を用いた量子デバイスやナノテクノロジーの各分野の交流を深め、新しいアイデアの創出を促進するため、異種材料分野を統合したシンポジウムとしてISNTTを隔年で開催しています。ハイブリッド物理系をイメージしたロゴを採用した今回のシンポジウムは、藤原聡（量子物性研究部長）、山口浩司（複合ナノ構造物理研究グループリーダー）、村木康二（量子固体物性研究グループリーダー）を共同議長とし、世界トップレベルの研究者を招聘し、各分野の最新の情報が交換できる場となることを目的に企画されました。

26日、27日、29日のそれぞれの冒頭の基調講演として、米国・カリフォルニア大学のAndrew Cleland教授が超伝導量子ビットについて、中国・精華大学のQi-Kun Xue教授がトポロジカル絶縁体の異常量子ホール効果について、東京大学の樽茶清悟教授が飛行型半導体量子ビットについて講演を行いました。また、4日間にわたる計13の口頭発表セッションにおいては、ナノデバイス、トポロジカル絶縁体、ナノメカニクス、半導体・超伝導量子ビット、単電子デバイス、グラフェン、量子スピンホール効果、スピントロニクス、光物性などの最先端の分野において世界レベルで活躍する17名の招待講演を含む48件の口頭発表がなされました。また、26日、27日のポスターセッションでは計71件の発表が行われました。その一部はNTT-BRLスクールとのジョイント開催であったこともあり、会場は、若手研究者、学生など多くの人と活気に溢れ、活発な議論がなされました。シンポジウム全体を通して、刺激的な研究交流を行うことができたと参加者から好評を得ることができました。



BRL セミナー講演一覧（2013 年度）

講演日	講演者名	所属 講演タイトル
5 月 10 日	奥山 倫 博士研究員	慶應義塾大学 半導体二重量子ドットによる光学フォノンレーザー
5 月 21 日	Prof. Andrea Fiore	Eindhoven University of Technology, the Netherlands Towards fully integrated quantum photonic circuits
5 月 24 日	金澤 輝代士 氏	京都大学 非熱的非ガウス揺らぎに駆動されるエネルギー輸送
6 月 12 日	Prof. Mark Sanquer	CEA-INAC-SPSMS, France The coupled atom transistor: a first realization with shallow donors implanted in a trigate silicon nanowire
6 月 19 日	石井 順久 助教	東京大学 BIBO 結晶を用いた光パラメトリックチャープ増幅器による数サイクル、高強度赤外光パルス発生とそれを用いた電場波形敏感水の窓高次高調波発生
7 月 5 日	Dr. Alex S. Clark	University of Sydney, Australia Nonlinear quantum photonics: generating and manipulating single photons
7 月 10 日	Prof. Marko Loncar	Harvard University, U.S.A. Group IV Photonics: From Silicon to Diamond "Si optomechanics and Diamond nanophotonics"
7 月 11 日	Mr. Takuro Ideguchi Mr. Simon Holzner	Max-Planck-Institute of Quantum Optics, Germany Adaptive dual-comb spectroscopy
9 月 3 日	Dr. Michael Jack	Scion, New Zealand From cold atoms to warm molecules
9 月 6 日	齋藤 暁 助教	国立情報学研究所 Impracticability of coherent computing and annealing machine models
9 月 11 日	Prof. Igor Aharonovich	University of Technology, Sydney (UTS), Australia Wide bandgap semiconductors for Nanophotonics
9 月 11 日	Prof. Benoit Hackens Dr. Sébastien Faniel Dr. Frederico Martins	Université catholique de Louvain, Belgium Imaging and manipulating quantum transport at the nanometer scale

講演日	講演者名	所属 講演タイトル
9 月 13 日	Dr. Hari Dahal	American Physical Society, U.S.A. APS publications and peer-review in PRB
9 月 26 日	Dr. Shota Kita	Harvard University, U.S.A. Optomechanical Nanobeam Transducers towards Ultrahigh Resolution Mass Spectrometry
10 月 24 日	平山 博之 教授	東京工業大学 エピタキシャル成長によって形成されたシリセン
10 月 31 日	Prof. Gerard J. Milburn	The University of Queensland, Australia Single photon opto-mechanics
11 月 5 日	Prof. Peide Ye	Purdue University, U.S.A. 2D Materials and Devices beyond Graphene
11 月 5 日	Prof. Andrew White	The University of Queensland, Australia Intriguing chemists and upsetting computer scientists using light and mirrors
11 月 7 日	吉井 賢資 主任研究員	日本原子力研究開発機構／岡山大学 新規マルチフェロイック物質 RFe_2O_4 (R: 希土類) の発見と最近の研究から
11 月 11 日	Dr. Nicolas Clément	CNRS, France Emergence of 0D Ion-Sensitive Field Effect Transistors -A new tool for energy harvesting and electrical study of single biomolecules ?-
11 月 13 日	Prof. Pawel Hawrylak	National Research Council of Canada, Canada Electron-electron interactions, topology and transport and optical spin blockade in semiconductor and graphene quantum dots
11 月 21 日	Dr. Neill Lambert	理化学研究所 Non-equilibrium QED: from nano-mechanics to hybrid devices
12 月 5 日	山田 康博 博士	東京大学 Resolution Effects on Current Measurement in Nanoscale Systems
12 月 10 日	Dr. Ed Gerstner	Executive editor of Nature Communications, U.K. Nature open access journals seminar

講演日	講演者名	所属 講演タイトル
12 月 16 日	中山 和之 助教	福岡大学 Manipulation of Spontaneous Emission with Quasi-periodic Metamaterials
12 月 19 日	Dr. Gregor Koblmüller	Technical University Munich, Germany Progress in arsenide-based nanowires and their devices
1 月 16 日	Dr. Daryl Beggs	The University of Bristol, U.K. Optical delay in silicon photonic crystal waveguides: accelerating slow-light
1 月 23 日	Prof. Jing Kong	Massachusetts Institute of Technology, U.S.A. Synthesis and applications of graphene and related nanomaterials
2 月 5 日	Prof. Michael Trupke	The Vienna University of Technology, Austria Diamond defects for sensing and quantum applications
2 月 21 日	澤田 桂 特別研究員	理化学研究所 放射光科学総合研究センター 光学と力学と電気回路のアナロジーによる Berry 位相理論
3 月 3 日	Prof. Isabelle Zaquine	Telecom ParisTech, France Multi-user entanglement distribution at telecom wavelength
3 月 10 日	Dr. Michael R. Vanner	The University of Queensland, Australia Experimental non-linear optomechanical measurement of mechanical motion
3 月 12 日	Dr. Erwann Bocquillon	Ecole Normale Supérieure, France Electron quantum optics in quantum Hall edge channels
3 月 26 日	Dr. Mandar Deshmukh	Tata Institute of Fundamental Research, India Probing phase transitions in nanoscale correlated systems showing MIT and CDW physics using nanomechanics

社外表彰受賞者一覧（2013 年度）

平成 25 年度科学技術分野 の文部科学大臣表彰 科学技術賞 研究部門	山口 浩司	化合物半導体ヘテロ構造を用いた 光電気機械融合素子の研究	2013.4.16
平成 25 年度科学技術分野 の文部科学大臣表彰 若手科学者賞	西口 克彦	ナノスケール半導体デバイスの高 機能化の研究	2013.4.16
応用物理学会フェロー表彰	山口 浩司	化合物半導体ヘテロ構造のメカニ カル素子応用に関する先駆的研究	2013.9.16
第 35 回 応用物理学会 論文賞	西口 克彦 藤原 聡	Single-Electron Stochastic Resonance Using Si Nanowire Transistors	2013.9.16
ヒューマンコミュニケー ション賞	山口 真澄	離れた家族をつなぐコミュニケー ションの事例研究 電話チャンネルを用いた 5 年間の 記録	2013.12.19
6th International Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials Best Presentation Award	林 家弘	N-face GaN (000-1) films grown by group-III source flow-rate modulation epitaxy	2014.3.6
応用物理学会 講演奨励賞	田邊 真一	SiC 上グラフェンのダメージフリー 転写	2014.3.17
第 61 回応用物理学会 Poster Award	後藤 貴大 石澤 淳 西 英隆 松田 信幸 高 磊 日達 研一 西川 正 山田 浩治 寒川 哲臣 後藤 秀樹	分散制御シリコン導波路を用いた オンチップスーパーコンティニウ ム光	2014.3.18

社内表彰受賞者一覧（2013 年度）

先端技術総合研究所 所長表彰 研究開発賞	眞田 治樹 国橋 要司 小野満 恒二 後藤 秀樹	高品質半導体ヘテロ構造における 無磁場移動スピン共鳴の研究	2013.12.20
物性科学基礎研究所 所長表彰 業績賞	西口 克彦 藤原 聡	室温動作シリコンナノデバイスの 新機能実証	2014.3.27
物性科学基礎研究所 所長表彰 業績賞	横尾 篤 Danang Birowosuto Guoqiang Zhang 館野 功太 倉持 栄一 滝口 雅人 納富 雅也	ナノマニピュレーションによるナ ノワイヤ・ナノフォトニクス融合 技術の創製	2014.3.27
物性科学基礎研究所 所長表彰 論文賞	Yoshiharu Krockenberger 入江 宏 松本 理 山神 圭太郎 三橋 将也 東田 昭雄 内藤 方夫 山本 秀樹	"Emerging superconductivity hidden beneath charge-transfer insulators" Scientific Reports 3, 2235 (2013)	2014.3.27
物性科学基礎研究所 所長表彰 論文賞	Imran Mahboob 西口 克彦 藤原 聡 山口 浩司	"Phonon Lasing in an Electro- mechanical Resonator" Physical Review Letters 110, 127202 (2013)	2014.3.27
物性科学基礎研究所 所長表彰 論文賞	佐々木 健一 関根 佳明 館野 功太 後藤 秀樹	"Topological Raman Band in the Carbon Nanohorn" Physical Review Letters 111, 116801 (2013)	2014.3.27
物性科学基礎研究所 所長表彰 功労賞	小野満 恒二 林 稔晶 鈴木 恭一	液体窒素供給配管の耐久性・安全 性の大幅向上と費用低減への貢献	2014.3.27
物性科学基礎研究所 所長表彰 奨励賞	畑中 大樹	半導体微小機械共振器における新 構造素子の研究	2014.3.27
物性科学基礎研究所 所長表彰 奨励賞	日達 研一	周波数安定化光コム光源のための 光非線形効果の研究	2014.3.27

報 道 一 覧 (2013 年度)

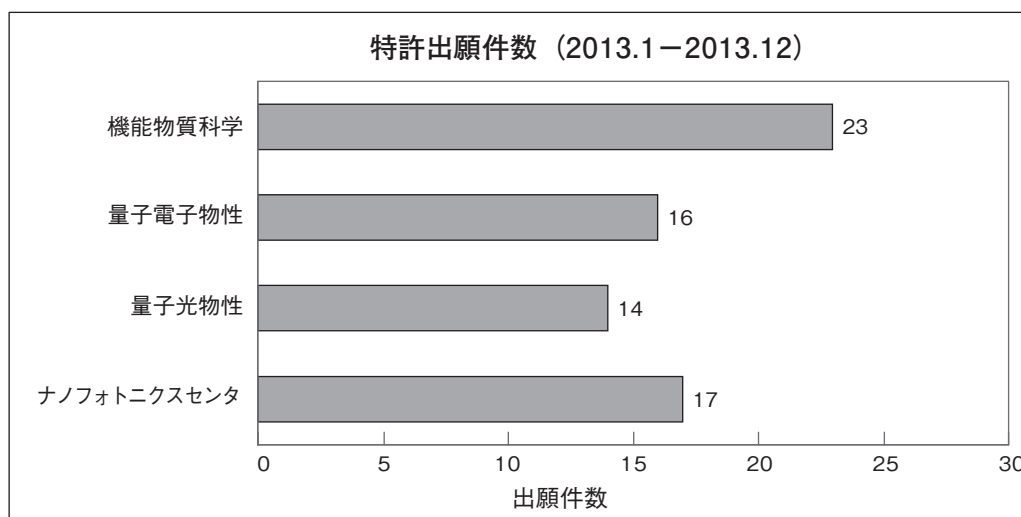
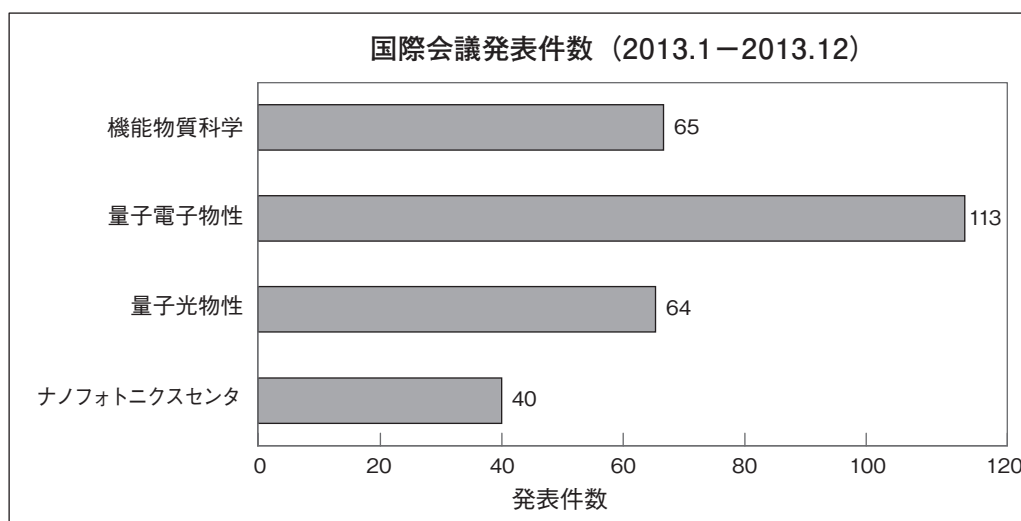
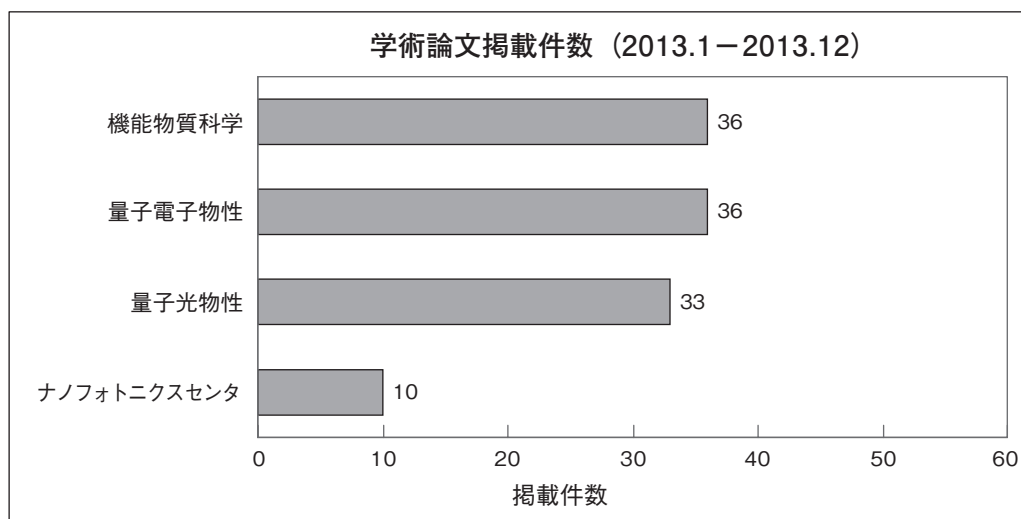
発表月日	発表媒体	見出し等
4 月 19 日	日経産業新聞	NTT、MEMS 活用 高精度超音波、半導体で 発振器小さく顕微鏡応用へ
5 月 15 日	日刊工業新聞	グラフェン「量子ホール効果」 東大など 光領域でも確認
5 月 17 日	日経産業新聞	光でも量子ホール効果 グラフェン 通信部品に応用期待 東大
6 月 6 日	電経新聞	研究派 NTT 物性科学基礎研究所 塚田 信吾氏 生体信号を長期間安定的に記録する技術 着るだけで心拍・心電図の測定が可能に
6 月 27 日	日刊工業新聞	グラフェン 必要箇所だけ成長 東北大など シリコン融合素子に道
7 月 5 日	日刊工業新聞	大学活用法 (41) 企業の産学連携戦略 NTT ヒット率の向上が急務
9 月 25 日	日経産業新聞	産業再興 目覚めよ知財力③ 突破力生むマッチング
10 月 8 日	科学新聞	誤り耐性量子コンピュータ NII と NTT 理論的な統合評価手法確立
10 月 21 日	通信興業新聞	量子コンピュータの評価手法 NTT など 世界で初めて確立
10 月 21 日	朝日新聞	量子コン性能に評価手法
11 月 13 日	日刊工業新聞	NTT 物性研 半導体チップ集積の量子素子開発 光子を正確に同期化
11 月 13 日	日経産業新聞	光子の進み方そろえる NTT 「量子」高速計算に期待
11 月 25 日	通信興業新聞	量子コンピュータの要素技術 NTT 研究所が開発
12 月 16 日	朝日新聞	光子扱いやすくする装置

発表月日	発表媒体	見出し等
1月 1日	日刊工業新聞	量子コンピューター 難問も数秒で SF 世界現実に
1月 31日	毎日新聞	体調測定シャツで 東レなど共同開発
1月 31日	日経産業新聞	肌着で心拍・心電図測定 東レ・NTT・ドコモ 機能素材を開発
1月 31日	東京新聞	NTT・東レが新素材開発 服着るだけで心拍数を測定 体の電気信号を感知
1月 31日	日刊工業新聞	着るだけで心拍数測定 東レ・NTT が機能素材 ウェアラブル端末向け
1月 31日	日本経済新聞	着るだけで心拍測定 NTT と東レ、新素材 スポーツシャツに応用
1月 31日	産経新聞	着るだけで心拍数を測定 東レと NTT 開発
1月 31日	フジサンケイ ビジネスアイ	着るだけで心電図など測定 東レと NTT 機能素材を開発
2月 3日	電経新聞	ドコモがサービス化に意欲 NTT と東レ 生体情報を取得できる機能素材を実用化
2月 4日	朝日新聞	着るだけで心拍数が分かる NTT と東レが開発
2月 5日	電波タイムズ	NTT・東レが共同開発 生体情報を取得する機能素材 “hitoe” 着衣するだけで心拍数など計測可能 ドコモが新素材活用のサービスを提供
2月 5日	朝日小学生新聞	着るだけで心拍数がわかる 電圧とらえる生地
2月 7日	科学新聞	着るだけで生体情報を連続計測 東レ、NTT が新機能素材実用化 —ドコモがウェアラブルサービスを年内に提供—

発表月日	発表媒体	見出し等
2月10日	通信興業新聞	NTT グループと東レ 着るだけで心拍数計測 新しい機能素材を開発
2月17日	通信興業新聞	NTT が共同研究 朝永－ラッティンジャー流体 励起素過程の観測に成功
2月18日	日本経済新聞	NTT 光速の量子暗号 気体原子に保存
2月18日	日経産業新聞	東レ、次の魔法シャツ 健康データ自動転送
2月21日	日刊工業新聞	ナノワイヤと光結晶で集積 NTT 光素子実現に一步
2月25日	日本経済新聞	NTT スパコン大きさパソコン並みに
3月18日	日本経済新聞	大量原子の配列 高速計算可能に
3月18日	日経産業新聞	大量の原子に磁石性質 NTT など模擬実験 超高速計算に道
3月18日	日刊工業新聞	NTT 量子もつれを制御 量子計算機実現へ一步
3月24日	通信興業新聞	NTT 量子コンピュータに新手法 5年以内に測定型実現
3月25日	朝日新聞	指に 瞳に 未来を装着 国際見本市 東京で開幕 ウェアラブル端末 日本発も続々
3月28日	科学新聞	100万ビット規模の量子コン実現へ期待 NTT 世界初の新手法を確立

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（2013 年）

2013 年に国内外の学術論文誌（英文）に掲載された学術論文の件数は、物性科学基礎研究所全体で 115 件、国際会議の発表件数は 282 件です。また出願特許数は 70 件になります。以下に分野別の件数を示します。



学術論文の主な掲載先と掲載件数は以下のとおりです。

雑誌名	(IF2012*)	件数
Applied Physics Letters	3.794	16
Physical Review B	3.767	16
Japanese Journal of Applied Physics	1.067	8
Optics Express	3.546	7
Applied Physics Express	2.731	6
Nature Communication	10.015	5
Journal of Crystal Growth	1.552	5
Physical Review A	3.042	4
Physical Review Letters	7.943	3
New Journal of Physics	4.063	3
AIP Advances	1.349	3
Nature Physics	19.352	2
Scientific Reports	2.927	2
Journal of Applied Physics	2.21	2
Nature Nanotechnology	31.17	1
Nature Photonics	27.254	1
Reports on Progress in Physics	13.232	1
Nano Letters	13.025	1
ACS Nano	12.062	1
Nano Research	7.392	1
Chemical Communications	6.378	1
Journal of Physical Chemistry C	4.814	1
Journal of Biological Chemistry	4.651	1
Optics Letters	3.385	1
Ultramicroscopy	2.47	1

*IF2012：インパクトファクター 2012

研究所全体では、一論文当たりの IF は 4.40 です。

国際会議の主な発表先と発表件数は以下のとおりです。

国際会議名	件数
International Symposium on Nanoscale Transport and Technology 2013 (ISNTT2013)	31
40th International Symposium on Compound Semiconductors & 25th International Conference on Indium Phosphide and Related Materials (ISCS & IPRM 2013)	18
20th International Conference on Electronic Properties of TWO-Dimensional Systems (EP2DS-20)	17
The 10th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim, and The 18th OptoElectronics and Communications Conference / Photonics in Switching 2013 (CLEO-PR & OECC/PS 2013)	15
The Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO/QELS 2013)	13
JSAP-MRS Joint Symposia 2013	10
APS March Meeting 2013	8
Recent Progress in Graphene Research 2013	8

国際会議招待講演一覧 (2013 年)

I. 機能物質科学研究部関連

- (1) H. Yamamoto, Y. Krockenberger, and M. Naito, "Development of New Superconductors Tailored by MBE", Electronic Materials and Applications 2013 (EMA2013), Orlando, U.S.A. (Jan. 2013).
- (2) Y. Taniyasu, J. -F. Carlin, A. Castiglia, R. Butté, and N. Grandjean, "Lattice-Matched AlInN/GaN Heterostructures: n- and p-type Doping and UV-LEDs", SPIE Photonics West 2013, San Francisco, U.S.A. (Feb. 2013).
- (3) Y. Taniyasu "AlN-Based UV/Visible Light-Emitting Devices", 5th GCOE International Symposium on Photonics and Electronics Science and Engineering, Kyoto, Japan (Mar. 2013).
- (4) Y. Krockenberger, H. Irie, B. Eleazer, and H. Yamamoto, "Superconductivity Research Advanced by New Materials and Spectroscopies", ICC-IMR International Workshop Superconductivity Research Advanced by New Materials and Spectroscopies, Sendai, Japan (July 2013).
- (5) Y. Krockenberger, H. Irie, B. Eleazer, and H. Yamamoto "Competing Electronic Interactions Driven by Oxygen Coordination in Two-Dimensional Cuprates", International Symposium on Science Explored by Ultra Slow Muon 2013 (USM2013), Shimane, Japan (Aug. 2013).
- (6) F. Maeda, "Graphene Growth on Graphene by Molecular Beam Epitaxy", Crystal & Graphene Science Symposium-2013 on 'Crystal Engineering to Graphenes, Fullerenes, Carbon Nanotubes & Semiconductors', Boston, U.S.A. (Sep. 2013).
- (7) H. Hibino, S. Tanabe, M. Takamura, and Y. Murata "Electronic Transport Properties and Nanostructure Self-Organization of Quasi-Freestanding Graphene on SiC", 5th International Conference on Recent Progress in Graphene Research (RPGR 2013), Tokyo, Japan (Sep. 2013).
- (8) H. Omi "Real Time Grazing Incidence X-ray Diffraction from Erbium Doped Material Growing on Si Substrate", JSAP-MRS Joint Symposia 2013, Kyoto, Japan (Sep. 2013).
- (9) F. Maeda and H. Hibino "Growth of Graphene by Molecular Beam Epitaxy Using Cracked Ethanol and Ethylene", Topical Workshop on MBE-grown graphene, Berlin, Germany (Sep. 2013).
- (10) H. Hibino, C. M. Orofeo, and S. Suzuki "Fabrication and Characterization of BN/Graphene Heterostructures", 9th International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices '13 (ALC'13), Hawaii, U.S.A. (Dec. 2013).
- (11) K. Sumitomo, N. Kasai, A. Tanaka, Y. Kashimura, T. Goto, A. Oshima, and S. Tsukada, "Nanobiodevice that Consists of Membrane Proteins and an Artificial Lipid Bilayer", 2013 EMN Fall Meeting, Orlando, U.S.A. (Dec. 2013).
- (12) K. Kumakura, Y. Kobayashi, M. Hiroki, T. Makimoto, T. Akasaka, and H. Yamamoto "Mechanically Transferred GaN-Based Optical and Electronic Devices", The International Semiconductor Device Research Symposium (ISDRS2013), Maryland, U.S.A. (Dec. 2013).

II. 量子電子物性研究部関連

- (1) H. Yamaguchi, H. Okamoto, and I. Mahboob, "Strong Coupling and Time-Domain Control in Electromechanical Parametric Resonators", Tohoku-Harvard Joint Workshop New Directions in Materials for Nanoelectronics, Spintronics and Photonics (10th RIEC International Workshop on Spintronics), Sendai, Japan (Jan. 2013).
- (2) I. Mahboob, "Phonon-Cavity Electromechanics in the Strong Coupling Regime", Interdisciplinary Workshop on Quantum Device, Tokyo Japan (Jan. 2013).
- (3) H. Yamaguchi, I. Mahboob, and H. Okamoto, "Strong Modal-Coupling and Parametric Control in Electromechanical Resonators", The 8th ASRC international workshop on "Spin Mechanics", Tokai, Japan (Feb. 2013).
- (4) N. Kumada, S. Tanabe, H. Hibino, H. Kamata, M. Hashisaka, K. Muraki, and T. Fujisawa, "Transport of Edge Magnetoplasmons in Graphene", Korea-Japan joint workshop, Daejeon, Republic of Korea (Apr. 2013).
- (5) S. Saito, X. Zhu, R. Amsuss, Y. Matsuzaki, K. Kakuyanagi, T. Shimooka, N. Mizuochi, K. Nemoto, W. J. Munro, and K. Semba, "Superconducting Qubit Spin Ensemble Hybrid System", Asia Pacific workshop on Quantum Information Science (APWQIS 2013), Tokyo, Japan (May 2013).
- (6) K. Muraki, "NMR Spectroscopy of FQH Liquid and Solid Phases in the First", Symposium on Quantum Hall Effects and Related Topics, Stuttgart, Germany (June 2013).
- (7) K. Muraki, "NMR Probing of Fractional Quantum Hall Liquid and Wigner Solid Phases", 20th International Conference on Electronic Properties of TWO-Dimensional Systems (EP2DS-20), Wroclaw, Poland (July 2013).
- (8) I. Mahboob, "An Electromechanical Phonon Laser", The 18th International Conference on Electron. Dynamics in Semiconductors, Optoelectronics and Nanostructures (EDISON18), Matsue, Japan (July 2013).
- (9) I. Mahboob, "Phonon-Lasing in an Electromechanical 3-Mode System", Tsukuba Nanotechnology Symposium 2013 (TNS'13), Tsukuba, Japan (July 2013).
- (10) K. Kanisawa, "Electronic Processes in Adatom Dynamics at Epitaxial Semiconductor Surfaces Studied Using MBE-STM Combined System", 17th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy (ICCGE-17), Warsaw, Poland (Aug. 2013).
- (11) H. Yamaguchi, I. Mahboob, and H. Okamoto, "Nonlinear Phonon Dynamics in GaAs/AlGaAs Electromechanical Resonators", 10th Topical Workshop on Heterostructure Microelectronics (TWHM 2013), Hakodate, Japan (Sep. 2013).
- (12) H. Yamaguchi, I. Mahboob, and H. Okamoto, "Coherent Manipulation and Phonon Lasing in Electromechanical Resonators", International Centre for Theoretical Physics Workshop "Frontiers of Nanomechanics", Trieste, Italy (Sep. 2013).
- (13) A. Fujiwara, "Silicon-Based Nanodevices for Diverse Applications", 39th International Conference on Micro and Nano Engineering (MNE 2013), London, United Kingdom (Sep. 2013).
- (14) H. Yamaguchi, H. Okamoto, T. Watanabe, and Y. Okazaki, "Mechanical Systems Coupled to Semiconductor Quantum Structures", CeNS Workshop 2013, Nanosciences: Great Adventures on Small Scales, Venice, Italy (Sep. 2013).

- (15) S. Saito, X. Zhu, R. Amsuss, Y. Matsuzaki, K. Kakuyanagi, T. Shimooka, N. Mizuochi, K. Nemoto, W. J. Munro, and K. Semba, "Quantum Hybrid System of Superconducting Flux Qubit and Diamond Spin Ensemble", JSAP-MRS Joint Symposia 2013, Kyoto, Japan (Sep. 2013).
- (16) K. Muraki, "Resistively Detected NMR Study of Correlated Electrons in a GaAs Quantum Well: Fractional Quantum Hall States and More", 2013 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2013), Fukuoka, Japan (Sep. 2013).
- (17) Y. Takahashi, H. Takenaka, T. Uchida, M. Arita, A. Fujiwara, and H. Inokawa, "High-Speed Operation of Si Single-Electron Transistor", The Electrochemical Society Meeting (224th ECS Meeting), San Francisco, U.S.A. (Oct. 2013).
- (18) T. Fujisawa, H. Kamata, M. Hashisaka, N. Kumada, K. Muraki, and H. Hibino, "Plasmon Wavepacket in Edge Channels of GaAs and Graphene", Quantum Science Symposium Asia-2013, Tokyo, Japan (Nov. 2013).
- (19) H. Yamaguchi, I. Mahboob, H. Okamoto, and Y. Okazaki, "Coherent Manipulation and Lasing Operation in Micromechanical Phonon Cavities", International Symposium on Advanced Nanodevices and Nanotechnology (ISANN2013), Hawaii, U.S.A. (Dec. 2013).

III. 量子光物性研究部関連

- (1) W. J. Munro, X. Zhu, R. Amsüss, Y. Matsuzaki, K. Kakuyanagi, T. Shimooka, N. Mizuochi, K. Semba, S. J. Devitt, K. Nemoto, and S. Saito, "Quantum Computation, Communication and Interfaces Using NV Centers: Hybridisation of Superconducting Flux Qubits with Diamond Ensembles", Workshop on Diamond - Spintronics, Photonics, Bio-applications, Hong Kong, People's Republic of China (Apr. 2013).
- (2) N. Matsuda, "Ultra-Narrowband Nonlinear Wavelength Conversion Using Coupled Photonic Crystal Nanocavities", Conference on Lasers and Electro-Optics - International Quantum Electronics Conference (CLEO / EUROPE - IQEC 2013), Munich, Germany (May 2013).
- (3) N. Matsuda, "Monolithic Source of Telecom-Band Polarization Entanglement on a Silicon Photonic Chip", The 10th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim, and The 18th OptoElectronics and Communications Conference / Photonics in Switching 2013 (CLEO-PR & OECC/PS 2013), Kyoto, Japan (June 2013).
- (4) T. Sogawa, and H. Sanada, "Spin Transport and Manipulation by Surface Acoustic Waves", 12th conference of Asia-Pacific Physics Conference (APPC12), Makuhari, Japan (July 2013).
- (5) M. Yamashita, K. Inaba, and H. Tsuchiura, "Collapse and Revival Dynamics of Spin-1 Bosons in Optical Lattices", 22nd International Laser Physics Workshop (LPHYS '13), Prague, Czech Republic (July 2013).
- (6) W. J. Munro, X. Zhu, R. Amsüss, Y. Matsuzaki, K. Kakuyanagi, T. Shimooka, N. Mizuochi, K. Semba, K. Nemoto, and S. Saito, "Hybrid Quantum Systems: A Route Forward for Distributed Information Processing", 5th biennial Conference on Quantum Information and Quantum Control (CQIQC-V), Toronto, Canada (Aug. 2013).
- (7) W. J. Munro, X. Zhu, Y. Matsuzaki, A. M. Stephens, K. Nemoto, and S. Saito, "Hybridization of Superconducting Flux Qubits and Diamond Ensembles: A Route to Local Gates for Quantum Repeaters", SPIE Optics + Photonics 2013, San Diego, U.S.A. (Aug. 2013).

- (8) H. Shibata, "MBE Growth of MgB₂ for Superconducting Single-Photon Detector", 2013 Energy Material & Nanotechnology Meeting (2013 EMN FALL), Beijing, People's Republic of China (Sep. 2013).
- (9) K. Azuma, "What is Really Required in Quantum Repeaters?", Quantum Science Symposium Asia-2013, Tokyo, Japan (Nov. 2013).
- (10) H. Shibata, "Quantum Key Distribution over 70dB Channel Loss Using SSPD with Ultralow Dark Count Rate", Quantum Science Symposium Asia-2013, Tokyo, Japan (Nov. 2013).
- (11) H. Sanada, Y. Kunihashi, H. Gotoh, K. Onomitsu, M. Kohda, J. Nitta, P. V. Santos, and T. Sogawa, "Manipulation of Electron Spin Coherence Using Acoustically Induced Moving Dots in Semiconductors", International Symposium on Advanced Nanodevices and Nanotechnology (ISANN2013), Hawaii, U.S.A. (Dec. 2013).
- (12) K. Tamaki, "Research Activities in Tokyo QKD Network ~From Field Test to Security Proof~" Quantum Information Technologies Madrid Consortium, Madrid, Spain (Dec. 2013).

IV. ナノフォトニクスセンタ関連

- (1) H. Fukuda, T. Tsuchizawa, H. Nishi, R. Kou, T. Hiraki, K. Takeda, K. Wada, Y. Ishikawa, and K. Yamada, "Silicon, Silica, and Germanium Photonic Integration for Electronic and Photonic Convergence", SPIE Photonics West 2013, San Francisco, U.S.A. (Feb. 2013).
- (2) S. Matsuo, "Monolithically Integrated Optical Link Using Photonic Crystal Laser and Photodetector", 25th International Conference on Indium Phosphide and Related Materials (IPRM 2013), Kobe, Japan (May 2013).
- (3) M. Notomi, "Towards Femtojoule-per-bit Optical Communication in a Chip", 15th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON 2013), Cartagena, Spain (June 2013).
- (4) K. Yamada, "Silicon Photonics for Optical Interconnects and Telecom Applications", 2013 Vail Computer Elements Workshop, Denver, U.S.A. (June 2013).
- (5) K. Yamada, T. Tsuchizawa, H. Nishi, R. Takahashi, T. Hiraki, K. Takeda, H. Fukuda, Y. Ishikawa, K. Wada, and T. Yamamoto, "High-Performance Photonic Integrated Circuits Based on Si-Ge-silica Monolithic Photonic Platform", The 10th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim, and The 18th OptoElectronics and Communications Conference / Photonics in Switching 2013 (CLEO-PR & OECC/PS 2013), Kyoto, Japan (June 2013).
- (6) T. Sato, K. Takeda, A. Shinya, K. Nozaki, H. Taniyama, K. Hasebe, T. Kakitsuka, M. Notomi, and S. Matsuo, "Ultralow-Threshold Electrically Driven Photonic-Crystal Nanocavity Laser", The 10th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim, and The 18th OptoElectronics and Communications Conference / Photonics in Switching 2013 (CLEO-PR & OECC/PS 2013), Kyoto, Japan (June 2013).
- (7) T. Sato, K. Takeda, A. Shinya, K. Nozaki, H. Taniyama, K. Hasebe, T. Kakitsuka, M. Notomi, and S. Matsuo, "Electrically Driven Photonic-Crystal Lasers Using an Ultra-Compact Embedded Active Region", IEEE Photonics Society Summer Topical Meeting Series 2013, Hawaii, U.S.A. (July 2013).
- (8) T. Kakitsuka, "Current-Injection Photonic-Crystal Lasers with Ultra-Low Power Consumption", 12th Chitose International Forum on Photonics Science and Technology (CIF12), Chitose, Japan (July 2013).

- (9) M. Notomi, "Enhanced Light-Matter Interactions in Photonic Crystal Nanocavities for Ultralow-Power Photonics", SPIE Optics + Photonics 2013, San Diego, U.S.A. (Aug. 2013).
- (10) H. Fukuda, K. Takeda, T. Hiraki, T. Tsuchizawa, H. Nishi, R. Kou, Y. Ishikawa, K. Wada, T. Yamamoto, and K. Yamada, "Large-Scale Silicon Photonics Integrated Circuits for Interconnect and Telecom Applications", The 10th International Conference on Group IV Photonics (GFP 2013), Seoul, Republic of Korea (Aug. 2013).
- (11) M. D. Birowosuto, H. Sumikura, A. Yokoo, M. Takiguchi, and M. Notomi, "Light-Matter Interaction of Quantum Dots and Nanowires in Novel High-Q Photonic Crystal Cavities at Telecom Wavelength", 34th Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS 2013), Stockholm, Sweden (Aug. 2013).
- (12) H. Sumikura, M. D. Birowosuto, and M. Notomi, "Quantum Optical Devices Based on Photonic Crystal Nanocavities", 34th Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS 2013), Stockholm, Sweden (Aug. 2013).
- (13) T. Sato, K. Takeda, A. Shinya, K. Nozaki, H. Taniyama, K. Hasebe, T. Kakitsuka, M. Notomi, and S. Matsuo, "High Temperature Operation of Lambda-Scale Embedded Active-Region Photonic-Crystal Lasers", IEEE Photonics Conference 2013 (IPC 2013), Washington, U.S.A. (Sep. 2013).
- (14) S. Matsuo, T. Sato, and K. Takeda, "Photonic Crystal Laser for Optical Interconnects", Frontiers in Optics/Optical Society of America 2013 (FiO/OSA 2013), Orland, U.S.A. (Oct. 2013).
- (15) M. Notomi, "Toward fJ/bit Optical Communication in a Photonic Crystal Chip", Frontiers in Optics/Laser Science (FiO/LS 2013), Florida, U.S.A. (Oct. 2013).
- (16) K. Yamada, "Si-Ge-Silica Monolithic Photonics Integration Platform for Telecommunications Applications", Silicon Photonics Forum, Kaohsiung, Taiwan (Nov. 2013).
- (17) M. Notomi, "Enhanced Spontaneous Emission from Nanocavities, Nanowires, and Nano-Emitters", SPIE Micro+Nano Materials, Devices, and Applications 2013, Melbourne, Australia (Dec. 2013).

編集 “NTT 物性科学基礎研究所の研究活動” 編集委員会

発行 日本電信電話株式会社
NTT 物性科学基礎研究所
編集委員会

〒243-0198 神奈川県厚木市森の里若宮 3-1

電話：(046) 240-3312

URL：http://www.brl.ntt.co.jp/