

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

## 表紙の写真:100 ビットを超えるフォトニック結晶光 RAM チップ

従来技術では小型化と低消費電力化が困難であった光のメモリ(光 RAM)の高集積化 にフォトニック結晶技術により取り組んでいる。今回 100 個以上のナノ共振器を集積し た長さ 1.1 ミリメートルのシリコンフォトニック結晶を作製し、100 個を超える光 RAM を集積し低パワーで動作することに初めて成功した。(45 ページ)



128 個のナノ共振器をシリコンチップ上に集積した光 RAM の電子顕微鏡像と波長多重光 RAM 動作の概念図。



高Q値ナノ共振器中で増強される高速な carrier plasma 効果により光双安定現象を発現し、"0"、 "1"を記憶する。



集積光 RAM チップ上の異なる2セットの連続4光 RAM における4ビットランダムパルス列の 書込後の読出結果(InP ベースフォトニック結晶による同様の集積光 RAM にて)。

## 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。また、研究所の一般公開である『サイエンスプラザ』、若手研究者育成のための 『BRLスクール』、そして国際シンポジウム『ISNTT』などのイベントも定期的に開催しております。

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。

2015年7月

寒川哲臣

NTT 物性科学基礎研究所 所長 寒川 哲臣

- ◆ 表紙
  - ◆100ビットを超えるフォトニック結晶光 RAM チップ

### ♦ ごあいさつ

#### I. 研究紹介

- - ◆ *h*-BN を用いたエピタキシャルリフトオフおよび転写による AlGaN/GaN HEMT の自己発熱 効果の抑制
  - ◆ 遷移金属ダイカルコゲナイド薄膜の MBE 成長
  - ◆構造異性化により超伝導体にも絶縁体にもなる La2CuO4
  - ◆ シリコン上に成長した Er-Tm シリケイトからの第2 および3 通信波長帯での同時発光
  - ◆ ラマン分光による同位体ラベリングされた化学気相成長グラフェンのトポロジカル欠陥の 可視化
  - ◆ オンチップ型 FRET グラフェンアプタセンサを用いたタンパク質の多成分検出
  - ◆ ナノホールアレイ薄膜層による架橋脂質膜の形成
  - ◆ 神経細胞と導電性表面の界面 SEM 観察
  - ◆ 脂質二分子膜でシールした微小井戸構造を用いた低ノイズバイオセンサのプラット フォーム
- - ◆ 微小 DRAM におけるエネルギー等分配則の破れ~熱ノイズの単電子分解能分析~
  - ◆ シリコンにおける直接・間接光学遷移の電界制御
  - ◆ シリコン中の単一トラップ準位を介した高速単電子転送
  - ◆ 一次元フォノニック結晶の動的制御
  - ◆ 電気機械共振器における2モードスクイージング
  - ◆ 長寿命量子メモリ構築のための新しいアプローチ
  - ♦ グラフェンにおけるエッジマグネトプラズモン共鳴とその減衰特性
  - ◆ 半導体/超伝導ハイブリッド量子ポイントコンタクトにおけるジョセフソン結合
  - ◆ 核磁気共鳴による強磁場中ウィグナー結晶の観測

- - ♦ 多層 Lieb 光格子系におけるフラットバンド強磁性
  - ◆ 極低暗計数超伝導光子検出器による 72 dB 伝送損失下での量子鍵配送
  - ◆ シリコン-石英モノリシック光導波路を用いた量子相関光子の発生と分離
  - ◆ 不完全な光源を用いたロス耐性のある量子暗号
  - ◆ ダイヤモンドを用いたスケーラブルな分散型量子情報の設計
  - ◆ 単一アト秒パルスを用いた内殻電子の運動計測
  - ◆ 自己触媒法による InP/InAs ヘテロナノワイヤの作製および光学特性
  - ◆ 酸化エルビウム単結晶薄膜におけるエネルギー移動
  - ◆ 100 ビットを超える光 RAM チップ
  - ◆ 光ナノ共振器による単層カーボンナノチューブのラマン散乱増強
  - ◆ ナノアンテナに結合したナノワイヤにおける発光増強
- - ◆ 波長サイズ埋込活性層フォトニック結晶(LEAP)レーザの Si 基板上室温連続発振
  - ◆ 三次元 SiOx 導波路プラットフォームによるモノリシック集積ファイバモード合分波器

## Ⅱ. 資料

$\diamond$	第8回アドバイザリボード
$\diamond$	サイエンスプラザ 2014
$\diamond$	BRL セミナー 一覧
$\diamond$	表彰受賞者一覧
$\diamond$	報道一覧
$\diamond$	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年度)60
$\diamond$	学術論文掲載件数、国際会議発表件数および出願特許数(2014年度)61
$\diamond$	学術論文出版一覧······63
$\diamond$	国際会議招待講演一覧

所 長	
寒川哲臣	
	企画担当
量子・ナノデバイス研究統括	主幹研究員 山本秀樹
上席特別研究員 山口浩司	
	機能物質科学研究部
	部長 日比野浩樹
	重子電子物性研究部
	 部長 藤原 聡
	量子光物性研究部
	部長 後藤秀樹
	ナノフォトニクスセンタ
	センタ長 納富雅也
	L

## 物性科学基礎研究所 所員一覧

2015 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担当



山口浩司

上席特別研究員

## 企画担当



企画担当主幹研究員

総括担当主幹研究員

研推担当主幹研究員

山本秀樹

中島 寛

齊藤志郎

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

前田文彦

薄膜材料研究グループ

グループリーダ

#### 山本秀樹

熊倉一英	佐藤寿志	赤坂哲也
谷保芳孝	小野満恒二	
Krockenberger, Yo	shiharu	廣木正伸
狩元慎一	平間一行	西中淳一
Banal, Ryan G.*	奥村宏典	

## 低次元構造研究グループ

グループリーダ

#### 日比野浩樹

前田文彦	上野祐子	古川一暁
鈴木 哲	尾身博雄	佐々木健一
関根佳明	髙村真琴	Wang, Shengnan
Orofeo, Carlo M.*	Najar, Adel	大伴真名歩

## 分子生体機能研究グループ

グループリーダ

#### 住友弘二

塚田信吾	河西奈保子	樫村吉晃
後藤東一郎	田中あや	大嶋 梓
手島哲彦		

## 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	藤原 聡		
	山口 徹	林 稔晶	西口克彦
	田中弘隆	登坂仁一郎	山端元音
	知田健作		
複合ナノ構造物理研究グルー	-プ		
グループリーダ	山口浩司		
	原田裕一	山崎謙治	Mahboob, Imran
	岡本 創	角柳孝輔	松崎雄一郎
	畑中大樹	樋田 啓	太田竜一
量子固体物性研究グループ			
グループリーダ	村木康二		
	蟹沢 聖	佐々木智	田村浩之
	鈴木恭一	太田 剛	熊田倫雄
	高瀬恵子	入江 宏	Rhone, Trevor David
	Couedo, Francois		

## 量子光物性研究部



部長

後藤秀樹

補佐

向井哲哉

量子光制御研究グルーフ	J
-------------	---

グループリーダ

/月/1、兼		
武居弘樹	井桁和浩	柴田浩行
山下 眞	向井哲哉	稲葉謙介
松田信幸	橋本大祐	今井弘光
稲垣卓弘	野田数人	

## 理論量子物理研究グループ

グループリーダ

# Munro, William John玉木 潔 森越文明 東 浩司Knee, GeorgeFurrer, Fabian

## 量子光デバイス研究グループ

グループリーダ

#### 後藤秀樹

舘野功太	俵 毅彦	小栗克弥
石澤 淳	Zhang, Guoqiang	眞田治樹
加藤景子	増子拓紀	日達研一
国橋要司		

## フォトニックナノ構造研究グループ

グループリーダ

 納富雅也

 新家昭彦
 横尾 篤
 倉持栄一

 谷山秀昭
 角倉久史
 野崎謙悟

 滝口雅人
 小野真証
 Shakoor, Abdul\*

 Smith, Devin
 Tian, Feng

## ナノフォトニクスセンタ



センタ長

納富雅也

#### フォトニックナノ構造研究チーム

舘野功太	Zhang, Guoqiang	
俵 毅彦	柴田浩之	松田信幸
滝口雅人	小野真証	尾身博雄
谷山秀昭	角倉久史	野崎謙悟
新家昭彦	横尾 篤	倉持栄一

## ナノ構造集積機能デバイス研究チーム

松尾慎治	山田浩治	土澤泰
硴塚孝明	荒井昌和	佐藤具就*
長谷部浩一	武田浩司	西 英隆
高橋 礼	武田浩太郎	岡崎功太
開達郎	中尾 亮	藤井拓郎

## 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式会社に入社。入社以来一貫して人工 ナノ構造による物質の光学物性制御及びデバイス応用の研究を行 う。量子細線、量子箱の研究を経て、現在フォトニック結晶の研究に 従事。工学博士(東京大学)。NTT 光エレクトロニクス研究所勤務。 平成7年~8年リンシェピング大学(スウェーデン)客員研究員。平成 11年よりNTT 物性科学基礎研究所勤務。平成13年より特別研究 員、平成22年より上席特別研究員。同年、文部科学省国立大学法 人評価委員。平成25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。現在、NTT ナノフォトニクスセンタ長/量子 光物性研究部、フォトニックナノ構造研究グループリーダ。2006/2007 IEEE/LEOS Distinguished Lecturer Award、平成20年度学術振興会 賞、平成20年度日本学士院学術奨励賞、平成22年度文部科学大 臣表彰科学技術賞(研究部門)の各賞を受賞。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式 会社に入社。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14年より特別研 究員。平成23年より上席特別研究員。平成7~8年ロンドン大学イン ペリアルカレッジ(イギリス)客員研究員。平成15年 Paul Drude研究 所(ドイツ)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。平成 23 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。現在、量子・ナノデ バイス研究統括担当/量子電子物性研究部、複合ナノ構造物理研 究グループリーダ。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、平成 23 年度井上学術賞、平成 25 年度文部科学大臣 表彰の各賞を受賞。 平成 23 年 Institute of Physics (IOP) Fellowship (イギリス)、平成25年応用物理学会フェローシップ。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 式会社に入社、NTT 基礎研究所勤務。平成 11 年よりNTT 物性科学 基礎研究所。入社以来、高移動度半導体へテロ構造の結晶成長と その量子電子物性の研究に従事。平成 21 年より特別研究員。平成 25 年より上席特別研究員。平成 13~14 年マックスプランク研究所 シュトゥトガルト(ドイツ)客員研究員。平成 22 年半導体強磁場国際 会議プログラム委員長、平成 23 年二次元電子国際会議プログラム 委員、平成 24 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 20~27 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。現在、量子電子物性研究部、量子固体物性研究グ ループリーダ。日本物理学会、応用物理学会会員。





平成2年富山医科薬科大学(現・富山大学)医学部卒業。同年4 月医師免許取得。平成15年医学博士(筑波大学)。平成15年~17 年カリフォルニア大学サンディエゴ校(アメリカ)客員研究員。平成22 年より日本電信電話株式会社 NTT 物性科学基礎研究所、リサーチ スペシャリスト。平成25年、同社に入社。入社以来一貫して、脳神経 細胞の情報伝達に関する機構解明・活動制御の研究に従事、導電 性高分子・繊維複合素材を核にしたウェアラブル型・埋め込み型生 体電極の研究を行う。平成26年より上席特別研究員。現在、機能物 質科学研究部、分子生体機能研究グループ主幹研究員。Society for Neuroscience、日本生理学会、応用物理学会、日本神経科学 会、日本循環器学会、日本整形外科学会会員。

## 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式会 社に入社、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 19 年より特別研究員。平成 15~16 年アメリカ国立標準技術研究所(アメリ カ)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 海道大学客員教授。現在、量子電子物性研究部長/量子電子物性 研究部、ナノデバイス研究グループリーダ。平成 10 年国際固体素子・ 材料コンファレンス SSDM'98 Young Researcher Award、平成 11 年 SSDM'99 Paper Award、平成 15 年、18 年、並びに 25 年日本応用物理 学会 JJAP 論文賞、平成 18 年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、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 電話株式会社 NTT 物性科学基礎研究所、リサーチアソシエイト。平成 15年、同社に入社、同所勤務。入社以来、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 22年より特別研究員。平成23~24年スイス連邦工科大学ローザンヌ 校(スイス)客員研究員。現在、機能物質科学研究部、薄膜材料研究 グループ主任研究員。平成13年応用物理学会講演奨励賞、平成19 年14th Semiconducting and Insulating Materials Conference にて Young Scientist Award、平成23年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 International Workshop on Nitride Semiconductors にて Best Paper Award の各賞を受賞。応用物理学会 会員。





#### 熊田 倫雄

平成10年東北大学理学部物理学科卒業。平成15年同大学院理学 研究科物理学専攻博士課程修了。同年、日本電信電話株式会社に 入社、NTT 物性科学基礎研究所勤務。入社以来、半導体へテロ構造 における量子電子物性の研究に従事。平成22年より特別研究員。平 成25~26年 CEA Saclay (フランス)客員研究員。現在、量子電子物性 研究部、量子固体物性研究グループ主任研究員。平成20年日本物 理学会若手奨励賞受賞、平成24年文部科学大臣表彰若手科学者賞 の各賞を受賞。日本物理学会会員。



#### 西口 克彦

平成10年東京工業大学工学部電子物理工学科卒業。平成14年同 大学大学院理工学研究科電子物理工学専攻博士課程終了。同年、 日本電信電話株式会社に入社、NTT 物性科学基礎研究所勤務。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23年より特別研究員。平成20年9月フランス 国立科学研究センタ(フランス)客員研究員。平成24~25年デルフト 工科大学(オランダ)客員研究員。現在、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。平成12年応用物理学会講演奨励 賞、International Conference on Physics of Semiconductors 2000、 IUAP Young Author Best Paper Award、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、日本電信電話株式 会社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、超伝導量子物理研究グループ勤務。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。平 成24年より特別研究員。平成17~18年デルフト工科大学(オランダ) 客員研究員。平成24年5月より東京理科大学客員准教授。現在、量 子電子物性研究部、複合ナノ構造物理研究グループ主幹研究員。平 成16年応用物理学会講演奨励賞を受賞。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 話株式会社に入社、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14年博士(工学)(大阪大学)。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25年より特別研究員。平成16年~17年ス タンフォード大学客員研究員。平成26年アメリカ国立標準技術研究所 (アメリカ)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。現在、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(イギリス)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(イギリス)物理学博士課程を修了。平成17年 日本電信電話株式会社NTT物性科学基礎研究所、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、同 社に入社。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25年よ り特別研究員。現在、量子電子物性研究部、複合ナノ構造物理研 究グループ主任研究員。平成13年 Clarke Prize in Physics、平成15 年 Physics of Semiconductors and Interfaces Conference にて Young Scientist Award の各賞を受賞。アメリカ物理学会会員。



#### 眞田 治樹

平成 17 年東北大学大学院工学研究科電子工学専攻博士後期課 程修了。同年、日本電信電話株式会社に入社、NTT 物性科学基礎 研究所に勤務。入社以来、半導体低次元構造における光・スピン 物性、およびその量子情報応用に関する研究に従事。平成 26 年よ り特別研究員。平成 27 年よりチャルマース工科大学(スウェーデ ン)客員研究員。現在、量子光物性研究部、量子光デバイス研究 グループ主任研究員。平成 17 年応用物理学会講演奨励賞、平成 22 年 SSDM Paper Award、平成 26 年度東北大学電気通信研究所第 4 回 RIEC Award の各賞を受賞。応用物理学会会員。



#### Yoshiharu Krockenberger

平成 14 年ミュンヘン工科大学(ドイツ)にて超伝導体のトンネル分光 の研究によりDiploma(修士号に相当)を取得。その後、マックスプランク 固体物理学研究所シュツットガルト(ドイツ)にて強相関電子系の遷移 金属酸化物の研究に従事し、同研究により、平成 18 年ダルムシュタッ ト工科大学(ドイツ)にて博士号を取得。同年、独立行政法人産業技術 総合研究所強相関電子技術研究センタ、リサーチサイエンティスト。平 成 20 年、独立行政法人理化学研究所交差相関物性科学研究グルー プ、リサーチサイエンティスト。平成 22 年、日本電信電話株式会社に 入社、NTT 物性科学基礎研究所に勤務。入社以来、新超伝導物質 および強相関電子系における競合秩序の研究に従事。平成 26 年よ り特別研究員。現在、機能物質科学研究部、薄膜材料研究グルー プ主任研究員。平成 25 年応用物理学会超伝導分科会研究奨励賞を 受賞。アメリカ物理学会、アメリカ材料科学会、応用物理学会会 員。

## アドバイザリボード

氏名	所属
Prof. Gerhard Abstreiter	Walter Schottky Institute, Germany
Prof. John Clarke	University of California, Berkeley, U.S.A.
Prof. Evelyn Hu	Harvard University, U.S.A.
Prof. Mats Jonson	University of Gothenburg, Sweden
Prof. Sir Peter Knight	Imperial College London, U.K.
Prof. Anthony J. Leggett	University of Illinois at Urbana-Champaign, U.S.A.
Prof. Allan H. MacDonald	The University of Texas at Austin, U.S.A.
Prof. Andreas Offenhäusser	Forschungszentrum Jülich, Germany
Prof. Halina Rubinsztein-Dunlop	The 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

氏名	所属	期間
Prof. Christos Flytzanis	École Normale Supérieure / The Centre National de la Recherche Scientifique (ENS/CNRS), France	June 2014 - July 2014
Dr. Paulo Santos	Paul Drude lustitute for Solid State Electronics, Germany	Oct. 2014 - Dec. 2014
Dr. Jason Brown	University of Oxford, U.K.	June 2014 - June 2014

## 海外研修生

氏名	所属	期間
Louise Waterston	University of Edinburgh, U.K.	July 2013 - July 2014
Rick Lu	University of Waterloo, Canada	Sep. 2013 - Apr. 2014
Anna Fomitcheva Khartchenko	University of Barcelona, Spain	Sep. 2013 - Aug. 2014
Jose Alberto Rodriguez Santamaria	University of Burgos, Germany	Sep. 2013 - Aug. 2014
Krzysztof Jan Gibasiewicz	Warsaw University of Technology, Poland	Sep. 2013 - Aug. 2014
Gianfranco D'Ambrosio	Politecnico di Milano, Italy	Sep. 2013 - Aug. 2014
Logan G. Blackstad	Geogia Institute of Technology, U.S.A.	Sep. 2013 - Aug. 2014
Peter Karkus	Budapest University of Technology and Economics, Hungary	Sep. 2013 - Aug. 2014
Adrian Salmon	Geogia Institute of Technology, U.S.A.	Jan. 2014 - July 2014
Henry Pigot	The University of British Columbia, Canada	Jan. 2014 - Aug. 2014
Ryan Neufeld	University of Waterloo, Canada	Jan. 2014 - Aug. 2014
Andrew Tin	McGill University, Canada	Feb. 2014 - Dec. 2014

氏名	所属	期間
Roxana Filip	University of Ottawa, Canada	May 2014 - Dec. 2014
Josh Kuo	The University of British Columbia, Canada	May 2014 - Dec. 2014
Christophe Rainville	McGill University, Canada	May 2014 - Dec. 2014
Shane Dooley	University of Leeds, U.K.	June 2014 - Sep. 2014
Matt Edmonds	University of Bath, U.K.	June 2014 - Dec. 2014
Thomas McManus	University of Bath, U.K.	July 2014 - Dec. 2014
Flore Castellan	ESPCI ParisTech, France	July 2014 - Dec. 2014
Pierre-Alix Carles	ESPCI ParisTech, France	July 2014 - Dec. 2014
Amaury Dodel	ESPCI ParisTech, France	July 2014 - Dec. 2014
Remi Dupuy	ESPCI ParisTech, France	July 2014 - Dec. 2014
Tony Jin	ESPCI ParisTech, France	July 2014 - Dec. 2014
Hadrien Duprez	École Polytechnique de Montréal, Canada	May 2014 -
Sophia Chan	University of Edinburgh, U.K.	June 2014 -
Aleksandra Krajewska	University of Edinburgh, U.K.	July 2014 -
Clemens Todt	Technical University Dresden, Germany	Sep. 2014 -
Aleix Llenas	Polytechnic University of Catalonia Barcelona Tech, Spain	Sep. 2014 -
Dorota Kowalczyk	Gdansk University of Technology, Poland	Sep. 2014 -
Silviu Dinulescu	University Politehnica of Bucharest, Romania	Sep. 2014 -
Akie Watanabe	The University of British Columbia, Canada	Jan. 2015 -
Mats Powlowski	Corcodia University, Canada	Jan. 2015 -

## 国内実習生(2014年度)

氏名	所属	期間
ツァイ ハン	東北大学	H26.4.1~H27.3.31
吉成正人	東京理科大学	H26.4.1~H27.3.31
守屋和樹	東京大学	H26.4.1~H27.3.31
佐藤孝亮	京都大学	H26.4.1~H27.3.31
田中亭	早稲田大学	H26.4.1~H27.3.31
佐藤貴彦	東京大学	H26.4.1~H27.3.31
田中 咲	慶應義塾大学	H26.4.1~H27.3.31
大杉廉人	東北大学	H26.4.1~H27.3.31
玉城智啓	東洋大学	H26.4.1~H27.3.31
後藤貴大	東京電機大学	H26.4.1~H27.3.31
鈴木賢一	東京電機大学	H26.4.1~H27.3.31
山口量彦	東京理科大学	H26.4.1~H27.3.31
常川雅人	東京工業大学	H26.4.1~H27.3.31
野口圭祐	東京工業大学	H26.4.1~H27.3.31
伏見亮大	慶應義塾大学	H26.4.1~H27.3.31
生頼拓也	東京理科大学	H26.5.7~H27.3.31
芦川耶眞登	東北大学	H26.8.1~H27.3.31
堀尾眞史	東京大学	H26.9.1~H26.11.28
石島 歩	九州大学	H26.8.18~H26.9.12
中西航平	三重大学	H26.8.18~H26.9.12
田中良昌	北海道大学	H26.8.18~H26.9.12
森田大地	筑波大学	H26.8.1~H26.9.1
有月琢哉	徳島大学	H26.8.5~H26.9.1
堺朝比古	長岡技術科学大学	H26.10.10 $\sim$ H27.2.20
チャン ミン ティエン	長岡技術科学大学	H26.10.10~H27.2.13
堀尾眞史	東京大学	H26.12.1~H27.3.31
坂本良作	豊橋技術科学大学	H27.1.8 $\sim$ H27.2.25
中根孝弥	豊橋技術科学大学	H27.1.8~H27.2.25
伊藤基	豊橋技術科学大学	H27.1.8 $\sim$ H27.2.25
神谷建	大阪大学	H27.1.5~H27.3.31
遠藤 傑	慶應義塾大学	H27.1.13~H27.3.31
永久保祐紀	東京大学	H27.2.9~H27.2.22

# 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、GaAs や GaN をはじめとする典型的な化合物半導体から、グラフェン などの二次元構造物質、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 質にまで至り、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ベース に、最先端の研究を推進しています。

この1年では、ミリメートルサイズの膜厚1層の単結晶グラフェン薄膜のCVD成長に成功 したほか、六方晶窒化ホウ素(*h*-BN)の劈開性を利用してGaNベースの薄膜素子を基板か ら剥離して転写させる技術を発展させ、電子デバイスにおける自己発熱効果の抑制を達成 しました。また、東レ株式会社と共同で昨年度実用化した、着衣により生体信号を高感度に 取得できる機能性生体電極「hitoe」がGOLDWIN社から商用化されました。

#### 量子電子物性研究部

藤原 聡

量子電子物性研究部では、半導体、超伝導体、あるいは異種材料ハイブリッド系の新規 物性を開拓し、将来の ICT 社会に大きな変革をもたらす固体デバイスの創出を目指してい 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ベースとなる 「ものづくり」技術を軸足に、単電子、メカニクス、量子、電子相関、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・極限デバイスの開発に挑戦しています。

今年は、一次元フォノニック結晶の動的制御、核磁気共鳴による強磁場中ウィグナー結 晶の観測、シリコン中の単一トラップ準位を介した高速単電子転送、超伝導量子ビット・ダイ ヤモンド複合系におけるダーク状態の観測などに成功しました。また、電気機械共振器に おける2モードスクイージング、シリコンにおける直接光学遷移の電界制御、グラフェンにお けるエッジマグネトプラズモン共鳴などの研究でも進展がありました。 量子光物性研究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。

量子光物性研究部のグループでは、半導体量子ドットやナノワイヤなどのナノ構造にお ける光物性研究、極微弱な光の量子状態制御と量子情報への応用、高強度極短パルス光 による新物性探索、超音波やフォトニック結晶を応用した光物性制御などの研究がおこな われています。

この1年で、アト秒光パルス技術を用いて、世界最速レベルのシャッタースピードで動く 電子のストロボ撮影に成功しました。また、極低暗計数超伝導光子検出器による量子鍵配 送や、実験で検証可能な条件を仮定した量子暗号の理論研究などでも進展がありました。 その他、Si系集積回路および酸化エルビウムにおける量子的光学特性の解明や自己触媒 法を用いた新しい半導体ナノワイヤのヘテロ構造の作製に成功しております。

#### ナノフォトニクスセンタ

納富雅也

ナノフォトニクスセンタは、ナノフォトニクス技術を駆使して、様々な機能をも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、2012 年 4 月に設立され、現在、 NTT 物性科学基礎研究所および NTT 先端集積デバイス研究所の中でナノフォトニクスに 関わる研究チームにより構成されています。

本年は、ナノフォトニクス集積技術の成果として、フォトニック結晶ナノ共振器を高密度に 集積することにより100ビットを超える光RAM(ランダムアクセスメモリ)を実現したほか、新し い技術分野として、半導体ナノワイヤとプラズモニックナノアンテナの結合系による発光増 強、カーボンナノチューブを装荷したフォトニック結晶共振器によるラマン増強、といった成 果もあがりました。また、デバイス応用分野においては、シリコン基板上に作製したフォトニッ クナノ共振器レーザの室温連続発振を達成し、三次元多層導波路構造を用いた空間モー ド分波器も実現しております。

## h-BN を用いたエピタキシャルリフトオフおよび転写による AIGaN/GaN HEMT の自己発熱効果の抑制

#### 廣木正伸 熊倉一英 小林康之\* 赤坂哲也 牧本俊樹\*\* 山本秀樹 機能物質科学研究部

窒化物半導体材料は、その高い絶縁破壊電界から高出力デバイスとしての応用が期待 されている。しかし、大電流動作時には発熱によって出力が低下する、いわゆる自己発熱効 果が生じる。そのため、高い動作出力を得るためには放熱特性を向上させる必要がある。例 えば、熱伝導率の高い基板上にデバイス構造を作製することでこの問題を避けることができ る。しかし、一般に、熱伝導率の高い基板は、GaN との格子不整合あるいは熱膨張係数差 が大きく、結晶の高品質化や厚膜化が困難である。放熱性向上のための新たな手法として、 我々は、高熱伝導材料への窒化物半導体デバイスの転写を試みた。*h*-BN を基板と窒化物 半導体成長層の間に挿入し、基板をエピタキシャルリフトオフするという手法である[1]。この 手法により、InGaN/GaN 多重量子井戸構造を有する発光ダイオードを In シートへ転写し、 強い発光特性が得られることを確認した[2]。今回、AlGaN/GaN 高電子移動度トランジスタ (HEMT)を *h*-BN/サファイア基板上に作製し、エピタキシャルリフトオフおよび銅板への転写 を行い、自己発熱効果を抑制できることを確認した[3]。

図1に、基板から剥離前および銅板へ転写後の AlGaN/GaN HEMT の *I-V* 特性を示す。 いずれにおいても、良好なピンチオフ特性および飽和特性が得られた。剥離前のデバイス では、顕著な負性抵抗、すなわちドレイン電圧の増加に伴うドレイン電流の減少がみられた。 一方、転写後は、このよう電流減少が抑えられることが分かった。負性抵抗は自己発熱効果 に起因している。サファイア基板(熱伝導率,  $\kappa$  = 40 W/m K)から銅板( $\kappa$  = 390 W/m K)への 転写により、放熱性が向上したと考えられる。図2に、1W出力動作中の試料の熱分布を示 す。転写前では、およそ温度50°Cのホットスポットが現れたのに対し、転写後では動作領域 の温度は30°C とほぼ室温と同等の温度であった。この結果は、*h*-BN を用いたエピタキシャ ルリフトオフ・転写技術が、窒化物半導体デバイスの放熱性改善および出力特性の向上に 有効であることを示している。

現所属:\*弘前大学,\*\*早稻田大学

- [1] Y. Kobayashi et al., Nature 483, 223 (2012).
- [2] T. Makimoto et al., Appl. Phys. Express 5, 07102 (2012).
- [3] M. Hiroki et al., Appl. Phys. Lett. 105, 193509 (2014).



## 遷移金属ダイカルコゲナイド薄膜の MBE 成長

## 小野満恒二 Aleksandra Krajewska Ryan Neufeld 前田文彦 熊倉一英 山本秀樹 機能物質科学研究部

遷移金属ダイカルコゲナイド(TX<sub>2</sub>)は、グラファイトに代表される層状物質の一つで、弱い van der Waals力で層間が結合している。TとXの組み合わせにより、絶縁体・半導体から金 属まで様々な性質を示す物質が存在することが知られている。この中で、我々は半導体の MoSe<sub>2</sub>に注目して研究を進めている。

本研究では、GaAs(111)B基板上に、原子層ステップが確認できる平坦なGaAsバッファ層 を成長し、その表面をSe終端した後、ウェハスケールで層数制御したMoSes薄膜を分子線 エピタキシ(MBE)成長した。図1は走査透過電子顕微鏡(STEM)によるMoSe2の直接観察の 一例である。図から、MoSe2がGaAsの1分子層ステップを乗り越えて横方向に成長している ことがわかる。図1は2層のMoSe2に対するSTEM像であるが、成長時間を変えることにより、 様々な層数のMoSeっを得ることができる。このような層数の異なるMoSeっに対してラマン測定 を実施し、スペクトルの層数依存性を調べた。測定は、GaAs(111)B上に成長した約1層,約 2層および4層以上のMoSeっに加え、参照試料としてSe終端したGaAs(111)Bに対しても行っ た。図2にAlgピーク付近のラマンスペクトルを示す。これまでの剥離したバルク単結晶に対 する研究から、MoSe2の層数が増えると、層間相互作用により、Algピークが高波数側にブ ルーシフトすること、3層以上のMoSe2では異なる位相の振動により、A12ピークがスプリットす ることが知られている[1]。我々のMBE成長した薄膜の測定で得られたラマンスペクトルでも、 層数が増えるにしたがってAlgピークがブルーシフトしており(図2)、ピーク位置から見積もら れる層数は、STEM像で直接観測される層数とよく整合していた。一方、MBE成長した薄膜 に対する測定では、ピークの明確なスプリットは確認できなかった。これは、試料が面内で 局所的に次の層の初期形成核を含み、層数が±1層程度揺らいでいるためと考えられる。

本研究の結果は、MBE法という、高品質な半導体薄膜の作製に従来から用いられてきた 手法により、ウェハスケールで層数を制御したMoSe2薄膜を作製できることを意味している。 今後、この手法を用いて他のTX2層状物質を成長することにより、様々なTX2を組み合わせ たヘテロ構造の実現へと繋がることが期待される。

[1] P. Tonndorf et al., Opt. Express 21, 4908 (2013).



図1 GaAsステップ付近のMoSe2の断面STEM 像。Se 終端した GaAs 上では、MoSe2は二次 元成長することが可能で、さらにGaAsステップ を乗り越えることができる。



図2A<sub>1g</sub>付近のラマンスペクトル。層数が増えるに従い、高波数側にピークシフトする。

## 構造異性化により超伝導体にも絶縁体にもなる La<sub>2</sub>CuO<sub>4</sub>

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

銅酸化物高温超伝導体は、あまねくドープされたモット絶縁体であり、高温超伝導は、ノンドープの反強磁性絶縁体にキャリアドープすることで発現すると考えられてきた。このような描像は、高温超伝導の舞台であるCuO2面に電子あるいはホールをドープしたときの電子状態を、ドーピングと温度の関数として示した電子相図にもとづいて形成されたものである。しかしながら、この電子相図のホール側は酸素5配位や6配位の銅からなるCuO2面、電子側は酸素4配位の銅からなるCuO2面に対して行われた実験の結果から構築されたという事実-すなわち配位の違いーは重要視されていなかった。5配位ないし6配位のCuO2面での超伝導発現がドーピングによるものであることは確立しているが、近年、4配位のCuO2面では、ドーピングではなく酸素副格子の完全性が本質的な役割を果たしていることが明らかになってきている[1]。本稿の成果は、ノンドープ状態で配位の違いが電子状態に与える影響を、同一組成式La2CuO4をもち、構造が異なる異性体を用いて明らかにしたものである。

La<sub>2</sub>CuO<sub>4</sub>の熱力学的安定相は、T相と呼ばれる K<sub>2</sub>NiF<sub>4</sub>構造をもつ相で、酸素 6配位の 化合物であるが、本研究では、分子線エピタキシ(MBE)法を用いることで、組成式 La<sub>2</sub>CuO<sub>4</sub> を有し、銅への酸素配位が異なる3種の単結晶薄膜試料を作製した。この作り分けには、成 膜温度と並んで基板の種類が本質的に重要であり、4、5、6配位の T'相、T\*相、T相の La<sub>2</sub>CuO<sub>4</sub>薄膜を成長した基板は、それぞれの相と面内の格子定数が極めて近い SrLaAlO<sub>4</sub>, DyScO<sub>3</sub>, PrScO<sub>3</sub>である。X線回折による逆格子マップから、薄膜はすべて基板とコヒーレン トに成長していることがわかっている。

図1に、配位の異なる3種のLa<sub>2</sub>CuO<sub>4</sub>薄膜の抵抗率の温度依存性を示す。6配位のT 相と5配位のT\*相は、抵抗率の絶対値が大きくその温度係数も負で、絶縁体/半導体的な 振る舞いを示している。これに対し、4配位のT'相は、金属的電気伝導を示し、転移温度  $T_c \sim 28 \text{ K}$ で超伝導転移している[2,3]。これは、LaをPrに置き換えたT'-Pr<sub>2</sub>CuO<sub>4</sub>での酸 素エンジニアリングによる超伝導化[1]ともコンシステントである。本研究の結果は、同一組 成式の化合物の電子状態が、配位という属性によって支配され、絶縁体から超伝導体まで 変化することを意味しており、超伝導機構の理解に重要な手掛かりを与えると考えられる。

[1] Y. Krockenberger et al., Sci. Rep. 3, 2235 (2013).

[2] Y. Krockenberger et al., J. Phys. Soc. Jpn. 83, 114602 (2014).

[3] Y. Krockenberger et al., Appl. Phys. Express 7, 063101 (2014).



図1 抵抗率の温度依存性: (a) T-La<sub>2</sub>CuO<sub>4</sub>、(b) T\*-La<sub>2</sub>CuO<sub>4</sub>、(c) T'-La<sub>2</sub>CuO<sub>4</sub>。

## シリコン上に成長した Er-Tm シリケイトからの 第2および3通信波長帯での同時発光

尾身博雄<sup>1,3</sup> Maria Anagnosti<sup>1</sup> 俵 毅彦<sup>2,3</sup> <sup>1</sup>機能物質科学研究部<sup>2</sup>量子光物性研究部<sup>3</sup>NTT ナノフォトニクスセンタ

光ファイバ通信におけるデバイスの微細化およびコスト低減への強い要請を背景に、高 効率なシリコンレーザの研究開発が活発に行われている。その一例として、光ファイバ通信 に必要なレーザの動作波長である C 帯およびその隣接帯(1530-1565 nm)で発光する分離 した2つのドーパントからの異なる2波長の同時発光を利用して波長の異なる2つのレーザ を1つのレーザとして機能させる研究が進められ、実際に、ErとTm、Nd、Yb、Hoの発光を 使った2波長レーザを作製した例が報告されている。しかし、通信波長帯での2波長レーザ および広帯域光導波路型増幅器をシリコン基板上で実現するためのEr-Tm 共添加ホスト結 晶の報告はほとんどなかった。

我々は、Si 基板上に形成した多結晶  $Er_xTm_{2-x}SiO_5 \ge Er_xTm_{2-x}Si_2O_7$  中に含まれる  $Tm^{3+}$ イオンから波長が 1300-1470 nm、 $Er^{3+}$ イオンから波長が 1530 nm のシャープな発光を同時に 観測することに成功した(図 1)。また、この多結晶中の  $Er^{3+}$ イオンが 1530 nm の発光だけで なく、 $Tm^{3+}$ イオンの 1300 nm の発光の感光材としても機能していることを示した(図 2)。さら に、励起波長が 532 nm のとき、 $Er^{3+} \ge Tm^{3+}$ イオンの高いエネルギー準位間で起こる共鳴的 なエネルギー移動により O  $\ge S+C$ 帯での同時発光が起こること、励起波長が 785 nm のとき、 S  $\ge C$ 帯の 2 波長帯でシャープに同時発光することを明らかにした。

本成果は、Er-Tm シリケイト混晶膜の形成が、C 帯の広帯域化に有効であるだけでなく、 OとS+C帯での同時発光も実現する可能性を示しており、今後、結晶成長条件の最適化、 発光効率の改善によりシリコン基板上での2波長帯レーザ素子、導波路型光増幅器の作製 に繋がると期待される。

[1] M. Anagnosti, H. Omi, and T. Tawara, Opt. Mat. Express 4, 1747 (2014).



図 1 Si 上に成長した Er<sub>2x</sub>Tm<sub>2-2x</sub>SiO<sub>5</sub> と Er<sub>2x</sub>Tm<sub>2-2x</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 膜からの PL スペクトル。



図 2 Tm<sup>3+</sup>と Er<sup>3+</sup>のエネルギーレベルと 可能な遷移。

## ラマン分光による同位体ラベリングされた化学気相成長グラフェンの トポロジカル欠陥の可視化

## Shengnan Wang 鈴木 哲 日比野浩樹 機能物質科学研究部

近年、大面積グラフェンを成長する手法として化学気相成長(CVD)法が注目を集めている[1]。しかし CVD 成長で得られたグラフェンは通常面内の向きが様々なドメインがトポロジカル欠陥を介して繋がった多結晶となっている。これらのトポロジカル欠陥、特に結晶粒界が大面積 CVD グラフェンの電気的、機械的特性を支配している。このため、CVD グラフェンのトポロジカル構造を評価する有効な手段を確立することは、基礎、応用研究の両面から非常に重要である。

今回我々は、マイクロラマン分光により CVD グラフェンのトポロジカル欠陥を観測する同 位体ラベリング法を開発した[2]。本手法では、主に<sup>12</sup>C から成る標準的な単層グラフェンの 成長に引き続き、水素と同位体炭素(<sup>13</sup>C)原料が連続的に供給される。水素のエッチング効 果と触媒効果により、加熱された銅基板上で<sup>12</sup>C と<sup>13</sup>C 原子の交換反応が起こる。図 1(a)に 示すように、<sup>12</sup>C と<sup>13</sup>C 格子の格子振動エネルギーの違いを利用してラマン分光により同位 体ラベリングされたグラフェン試料中の<sup>12</sup>C および<sup>13</sup>C グラフェンを観測することができた。図 1(b)に示すように、<sup>13</sup>C リッチの領域はマイクロメートルスケールの<sup>12</sup>C 領域を囲む網目構造 を形成している。また低速電子顕微鏡(LEEM)の暗視野像で同じ場所を観察した結果を図 1(c)に示す。<sup>13</sup>C リッチの領域は結晶粒界に対応していることが明瞭にわかる。これらの結果 は、多結晶 CVD グラフェンにおいて炭素原子の交換反応が結晶粒界で優先的に起こって いることを示している。同位体ラベリング法は CVD グラフェンのトポロジカル欠陥を評価する 簡便で有効な手法であり、今後グラフェンの成長メカニズムの解明に資することが期待され る。

[1] S. Wang et al., Appl. Phys. Lett. 103, 253116 (2013).

[2] S. Wang et al., Nanoscale 6, 13838 (2014).



図 1 (a) 同位体ラベリングされたグラフェン試料のラマンスペクトル。<sup>12</sup>C と<sup>13</sup>C 両方を含む部分(黒線)と <sup>12</sup>C のみの部分(赤線)。(b) 同位体ラベリングされたグラフェン試料の <sup>13</sup>C-2D バンドラマン散乱強度マッ ピング。(c) (b)の場所の暗視野 LEEM 像。異なる色と数字は異なる結晶粒の方向を表す。

## オンチップ型 FRET グラフェンアプタセンサを用いたタンパク質の多成分検出

上野祐子 古川一暁 機能物質科学研究部

グラフェンおよびそれらの誘導体表面では、表面に近接した分子との相互作用に応じた エネルギー移動反応が生じる。このエネルギー移動反応を、生体分子に特異的な反応と組 み合わせて可視化すれば、バイオセンサなどの生体分子インターフェースを構築することが できる。私たちは、固体表面に固定した酸化グラフェン(Graphene Oxide, GO)を用いて、タン パク質を選択的かつ高感度に検出する GO アプタセンサの構築に成功した(図1左)[1]。さ らに、表面に固定化されているという特長を活かして、マイクロ流路を搭載したオンチップ型 GO アプタセンサを実現し、これが複数の異なる検体に対する応答の定量比較や濃度依存 測定において威力を発揮することを示した[2,3]。

生体分子認識に用いる核酸アプタマ(特定の分子に選択吸着する1本鎖 DNA/RNA)は、 種々の環境下で安定な物質であり、適用できる標的分子の種類の多様性にも優れる。種々 の標的分子に対応するアプタマを用いて、血液凝固に関与するタンパク質であるトロンビン、 前立腺特異抗原(PSA)、インフルエンザウイルス外被糖タンパク質(ヘマグルチニン)の検出 に成功し、センサの汎用性を確認した。このうち、トロンビンと PSA の2種類のアプタマを同 ーチップ上にアレイ化し、多成分同時検出に成功した(図1右)[3]。また、分子認識機能を 損なうことなく、自由自在な分子設計による機能化が可能であることも、アプタマの大きな魅 力である。これにより、所望の機能を有する様々な分子プローブの創生が実現できる。これ までに、分子設計によりオンチップ型 GO アプタセンサの高感度化に成功し、マイクロデバイ ス技術を用いた定量的な比較実験から、その効果を実証した[2]。

[1] K. Furukawa et al., J. Mater. Chem. B 1, 1119 (2013).

[2] Y. Ueno et al., Chem. Commun. 49, 10346 (2013): Featured on cover.

[3] Y. Ueno et al., Anal. Chim. Acta 866, 1 (2015): Featured on cover.



図1(左) FRET グラフェンアプタセンサの動作原理。(右)同一チップでの多成分検出。

## ナノホールアレイ薄膜層による架橋脂質膜の形成

田中あや<sup>1</sup> 樫村吉晃<sup>1</sup> 倉持栄一<sup>2</sup> 住友弘二<sup>1</sup> <sup>1</sup>機能物質科学研究部<sup>2</sup>量子光物性研究部

我々はこれまで生体分子の機能を利用したナノバイオデバイスの構築に関する研究を進めてきている。シリコン基板上の微小井戸を脂質二分子膜でシールし、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、ナノバイオデバイスとして活用するためには、生体内と同程度の環境変化に長時間耐えられるように、脂質二分子膜の安定性を向上する事が必須である。ナノホールアレイを形成した薄膜層で、微小井戸を覆う事により、安定な架橋脂質二分子膜の形成に成功したので報告する[2]。

電子ビームリソグラフィによりナノホールアレイを薄膜層(熱酸化膜)に形成し、その下の Si 基板を選択的にエッチングすることにより、微小井戸構造を形成した。その形状から、 「ペッパーシェイカー構造」と名付けた(図1)。エッチング条件を選ぶことで、開口径に関係 なく微小井戸の容量を生体内のシナプスと同程度にできる。また、ナノホールの開口径 (100 nm)は、実際の細胞膜において細胞骨格で囲まれたドメインサイズと同程度に設計し た。ペッパーシェイカー構造上で巨大ベシクルを展開したときの蛍光顕微鏡像を図2に示 す。微小井戸の中に緑色に発光する蛍光プローブが封入され、脂質二分子膜でシールさ れている事がわかる[図2(b)]。一つの微小井戸に数百個のナノホールを形成しているが、 一つでもシールが壊れると蛍光プローブは流失してしまう(矢印 B)。それでも、架橋膜の 開口径を小さくすることでその安定性が向上し、ほとんどの微小井戸で脂質膜シールが成 功している。さらにナノホールをアレイ化する事で、一つ一つの架橋膜の開口径は小さくし ながら、脂質二分子膜の架橋部の総面積を十分に維持し、ナノバイオデバイスの構築に 必要な膜タンパク質の導入を可能にしている。脂質膜のシール効率の向上と同時に、ナノ バイオデバイスの寿命の延長にも効果があり、10日間後にもほとんどの微小井戸で封入し たプローブからの蛍光が観察された。

このような安定な脂質二分子膜でのシールは、膜タンパク質の機能解析をはじめ、生体 内物質輸送や各種の生体内での現象の解析に有効なナノバイオデバイス構築に期待され る。

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

[2] A. Tanaka et al., Appl. Phys. Express 7, 017001 (2014).



図 1 ペッパーシェイカー構造。(a) Top view。 (b) Side view。 (c) 断面 SEM 像。

図2 蛍光顕微鏡像。(a) 脂質二分子膜。 (b) 微小井戸内に封入された蛍光プローブ。

## 神経細胞と導電性表面の界面 SEM 観察

後藤東一郎 河西奈保子 住友弘二 機能物質科学研究部

近年注目されている、神経-ナノ構造融合デバイスでは、単一神経細胞の軸索を成長パターンに沿って制御して成長する。そして、細胞の活動電位などの電気信号は導電性材料 を介して高精度に検出される。従って、細胞と導電性表面との界面に関する情報は、細胞 を高効率に成長制御し、その活動電位を解析するうえで重要である。しかし、この細胞と導 電性材料の界面についての研究の報告例は少ない。これは、光学顕微鏡では、細胞と基 板の界面の高精細かつ直接的な評価が難しいからである。そこで我々は、導電性表面に成 長した細胞の FIB(focused ion beam)/SEM による断面加工と SEM 観察により、神経細胞と 導電性表面の界面構造を調べた。また、培養した神経細胞の蛍光観察も併用して、細胞と 基板表面の親和性についても調べた[1]。

本研究では、ラットの大脳皮質から採取した神経細胞を2種の導電性薄膜(ITO: indium tin oxide と Ti)上にそれぞれ培養した。培養した細胞は蛍光染色して、細胞の成長状態を 蛍光顕微鏡で観察した。さらに、脱水と固定化の後に凍結乾燥を行った細胞試料を用いて、 室温で FIB/SEM 実験を行った。

図 1(a)、(b)は ITO および Ti 表面上の神経細胞の蛍光像である。ITO 薄膜上では細胞体 (Soma)が凝集して、神経突起が直線的に伸びている。これは神経細胞と ITO との親和性が 低いことを意味している。一方、Ti 薄膜上の神経細胞では、ITO 薄膜上で見られた細胞の 凝集が見られず、神経突起の直線的な伸長もない。これは神経細胞と Ti が高い親和性を 有していることを意味する。次に ITO と Ti にそれぞれ培養した神経細胞の断面を FIB/SEM を用いて観察した[図 1(c)、(d)]。ITO 上で成長した神経細胞では、ITO 表面と細胞体の界 面に広い間隙が観察された。これは神経細胞が ITO 表面とほとんど接していないことを意味 している。一方 Ti 上では、細胞体が Ti 表面に密着している状態の界面構造が観察され、 蛍光実験で見られた Ti の生体親和性の高さを反映していると考えられる。

本技術を応用することにより、神経細胞と基板の界面構造の詳細な評価が可能となり、高 い選択性や空間分解能をもつ神経細胞の成長制御および、導電性ナノ構造上の神経活動 電位の定量解析に有用な情報を得ることが期待できる。

[1] T. Goto et al., J. Nanosci. Nanotechnol. (accepted)



図1(a) ITO表面に培養した神経細胞の蛍光像。(b) Ti表面に培養した神経細胞。(c) ITO 薄膜上の神経細胞の断面 SEM 像。(d) Ti 薄膜上の神経細胞の断面 SEM 像。

## 脂質二分子膜でシールした微小井戸構造を用いた低ノイズバイオセンサの プラットフォーム

#### 樫村吉晃 住友弘二 機能物質科学研究部

我々は基板上の微小井戸構造を脂質二分子膜でシールし、チャネルタンパク質を再構成することによって、シナプス情報伝達を模倣したナノバイオデバイスの実現を目指している。これまでに我々は、光学的手法によるチャネルタンパク質の機能計測について報告してきた[1]。しかしながら、実際には、基板と脂質膜の間に存在する薄い水層からのイオンリークがあり、単一タンパク分子レベルの微小なチャネル電流を検出するような高感度センシング実現のためには、解決すべき課題となっている。そこで本研究では、微小井戸を囲む金リング構造を新たに設け、その上に自己組織化膜(SAM)を作製することによってイオン拡散のブロック層とし、高ギガオームシーリングの形成、デバイスの低ノイズ化を検討した[2]。

底部に電極を備えた微小井戸(直径2 μm、深さ1 μm)をシリコン基板上に作製した。井戸 の周囲に金のリング構造を作製した[図1(a)]。この基板をoctadecanethiol中に浸漬させ、金 表面へのSAM形成を行った。この基板上で巨大脂質膜ベシクル(DPhPC: Cholesterol = 4: 1 + Rhod-DPPE 1mol%)を展開し、微小井戸を脂質膜でシールした。

図1(b)は緑色蛍光色素を封入した微小井戸の蛍光像(赤は脂質膜)である。金リング内 側をレーザで消光したところ、蛍光回復が観察されたことから、脂質分子の側方拡散は維持 されており、図1(c)で示した膜構造が実現されていると考えられる。図2は従来型デバイス (金リングなし)と金リング付きデバイスを用いて、微小井戸内にCa<sup>2+</sup>インジケータ(fluo-4)を 封入し、蛍光強度の経時変化を観測した結果である。従来型デバイスでは、時間経過ととも に蛍光強度の増大が見られた。これは、基板と脂質膜の間の水層からCa<sup>2+</sup>が流入してきた ためであると考えられる。一方、金リング付きデバイスでは、蛍光強度の変化はほとんど見ら れなかった。これは、新たに導入した金リング上のSAM構造によりCa<sup>2+</sup>の流入が防がれたた めであると考えられる。膜抵抗の測定をしたところ、従来型デバイスでは4-10 GΩ、金リング 付きデバイスでは20-100 GΩ以上と1桁程度のシール抵抗の向上が見られた。バックグラウ ンドノイズ(rms)もそれぞれ、2.7 pA、1.3 pAと有意な減少が見られ、金リング付き構造が低ノ イズ・高感度なセンシングに有効であることが示された。



[1] K. Sumitomo, Y. Kashimura et al., Biosens. Bioelec. 31, 445 (2012).

[2] Y. Kashimura, K. Sumitomo et al., ISSS-7, 3PN-27 (2014).



図1 デバイス構造。(a) 金リング構造の SEM 像。(b) 脂質膜でシー ルした微小井戸の蛍光像。(c) SAM 上に展開した脂質膜の模式図。 図 2 従来型および金リング付きデ バイスにおける Ca<sup>2+</sup>インジケータの 蛍光強度変化。

NTT 物性科学基礎研究所の研究活動 Vol. 25 (2014 年度) 27

## 微小 DRAM におけるエネルギー等分配則の破れ ~熱ノイズの単電子分解能分析~

#### 西口克彦 Pierre-Alix Carles 藤原 聡 量子電子物性研究部

多くの電子機器で使われる集積回路は、トランジスタの縮小化によって性能が向上してきた。しかし、トランジスタの縮小化により相対的にノイズの影響が大きくなっている。例えば、単一の電子が意図しない場所に捕獲されることに起因するランダム・テレグラフ・ノイズは、トランジスタの縮小化によって顕著になったノイズで、メモリ回路などの誤動作に繋がる。また、電子がもつ電荷「粒子」という性質に起因するノイズ(ショット・ノイズ)も、回路動作への影響が大きくなると予想されている。このように、トランジスタの微細化によって、ノイズを単一電子レベルで分析し理解することが重要となっている。今回、我々は、DRAMを使って、最も本質的なノイズである熱ノイズの分析を単一電子レベルで行った[1,2]。

熱ノイズを分析するため、DRAMに電荷信号を検出するセンサを接続する(図1)。このセ ンサは、単一電子を検出する感度をもつことから、キャパシタ内の電子数を数えることができ る。図2はセンサの出力信号の一例で、電子がキャパシタに出入りすることで電子数が揺ら いでいる様子、つまり単一電子レベルの熱ノイズを表している。この電子数揺らぎは、センサ を構成するトランジスタの電流特性を用いることで、電圧揺らぎに変換することができる。通常、 この電圧揺らぎの広がりを表す分散値  $V_{var}^2$ は  $k_B T/C(k_B: ボルツマン定数, T: 温度, C:キャパ$ シタ容量)となることが知られている。これは、各々の電子が平均kgT/2の熱エネルギーをもつ というエネルギー等分配則が成立することを意味する。図3はCとVvar<sup>2</sup>の関係を示しており、 C > 10 aF では  $V_{\text{var}}^{2}$  は  $k_{\text{B}}T/C$  に近い値となる一方、C < 10 aF では、 $V_{\text{var}}^{2}$  は  $k_{\text{B}}T/C$  から大きく ずれることがわかる。Cが大きく、キャパシタに電子を蓄積するために要する帯電エネルギー  $E_{\rm C} = e^2/2C$  (e:素電荷)が熱エネルギー $k_{\rm B}T/2$  より小さいときは、熱エネルギーによって電子 がキャパシタを出入りする。しかし、Ec > kBT/2 では、帯電エネルギーの効果により、電子が キャパシタに入ることが困難になるため、電子数揺らぎ、つまり Vyar<sup>2</sup> が小さくなる。また、 DRAM に印可する電圧 Vによっては、電子が1つ出入りする際に必要とされるエネルギー がゼロになる。このときは小さい熱エネルギーでも電子が出入りするため、電子数揺らぎは大 きくなる。このように、Cが小さくEc>kBT/2となるときには、エネルギー等分配則が破れ、一般 的に知られる kgT/C で得られる値よりもノイズが増減することとなる。これは、電子デバイス全 般に当てはまることから、今後の電子デバイスの縮小化において重要な知見になる。

[1] K. Nishiguchi et al., Nanotechnology **25**, 275201 (2014).

[2] P. -A. Carles et al., Jpn. J. Appl. Phys. 54, 06FG03 (2015).


#### シリコンにおける直接・間接光学遷移の電界制御

#### 登坂仁一郎 西口克彦 藤原 聡 量子電子物性研究部

バルクシリコンの伝導帯は複数のエネルギー極小点をもつ多バレー構造を取り、間接光 学遷移型のバンド構造をもつ。一般に光子が担う運動量は、結晶中の電子がもつ運動量に 比ベ小さく、シリコンの伝導・価電子帯の極小点に存在する電子・正孔間の双極子遷移では、 運動量保存則が成立しないため効率的な発光は困難である。今回我々は、通常の酸化膜 界面で観測されるバレー分離に対し一桁以上大きな巨大バレー分離を発現する特殊な Si/SiO2 界面[1]で、直接・間接光学遷移のゲート電界制御を実現した[2]。通常の Si/SiO2 界 面では、バレー分離は拡張ゾーン有効質量理論により記述され[3]、その大きさはゲート電界 と SiO2 ポテンシャルによる実空間上の電子波動関数の閉じ込めにより調整が可能である。こ の理論の拡張を行うと、直接光学遷移の強さはバレー分離の大きさにほぼ比例して増加す ることが予想され、巨大なバレー分離を発現する特殊な Si/SiO2 界面では、強い直接光学遷 移に伴う発光が得られ、その大きさがゲート電界により調整可能であることが期待される。

本研究で用いたデバイスは、井戸幅 4.3 または 6 nm の Si/SiO<sub>2</sub> 量子井戸をもつ電界効果 トランジスタで、高温(1350°C)長時間(40 時間)熱処理を行った SIMOX (separation by implantation of oxygen) (001)基板を用いて作製した。巨大バレー分離は、SIMOX 基板の 埋め込み酸化膜(BOX)界面に電子を押し付けた際に発現することが知られている。このデ バイスでは、正孔・電子をシリコン量子井戸に注入するため、p/n 両型のコンタクトを形成して いる(図 1)。上面(FG)/裏面(BG)の 2 つのゲートを利用し、量子井戸の電子・正孔波動関数 の空間分布を調整する。図 2 に典型的な電流注入発光の裏面電圧( $V_{BG}$ )依存性を示す。  $V_{BG} < 0$  では、バルクシリコンで支配的な TO (Transverse optical)フォノンを介した間接光学 遷移が強く現れる。この領域でのバレー分離の大きさ(2 $\Delta$ )は最大で数 meV である。一方、 ゲートの極性を反転させ  $V_{BG} > 0$  とすると直接光学遷移(NP)に伴う発光が支配的となり、バ ルクの直接光学遷移に対し 800 倍の直接光学遷移強度が得られた。このときバレー分離 はおよそ 30 meV である。この結果から、バレー分離を調整することで、シリコンにおける直 接・間接光学遷移をゲート電界により調整可能であることが示された。

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行われた。

- [1] K. Takashina et al., Phys. Rev. Lett. 96, 236801 (2006).
- [2] J. Noborisaka et al., Sci. Rep. 4, 6950 (2014).
- [3] F. J. Ohkawa and Y. Uemura, J. Phys. Soc. Jpn. 43, 907 (1977).



# シリコン中の単ートラップ準位を介した高速単電子転送

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 個の電子をクロック信号に合わせ正確に運ぶ技術であり、電流標準や低 消費電力情報処理への応用が期待されている。電流標準応用では、GHz 以上の高速動作 時にエラー率が 10<sup>-8</sup> 以下となる必要がある。これまで、電気的に形成された量子ドットを利用 した単電子転送が幅広く研究されてきたが、大きな活性化エネルギーをもつトラップ準位を利 用すると更なる高精度動作が期待できる。しかし、その高速動作の可能性は自明ではなかっ た。今回シリコン中のトラップ準位を介した 3.5 GHz の高速単電子転送を達成した[1]。

図 1(a)に素子の概略図を示す。電子線描画を利用し、数十ナノメートル幅のシリコン細 線上に2層の多結晶シリコンゲート電極を形成した。下層のゲート電極(G1、G2)はシリコン 細線中にポテンシャル障壁を作るために利用した。上層のゲート電極は G1-G2 間のポテ ンシャルを変調するために利用した。作製した素子の中で G1 の右下の端に単一のトラッ プ準位(界面トラップに起因する可能性大)が存在するものを選定し、そのトラップ準位を 介した単電子転送電流を温度 17 K で測定した。転送を行うためには、G2 に固定の負電 圧を印加しポテンシャル障壁を形成した状態で、G1 に高周波電圧(周波数 f)を印加しポ テンシャル障壁を変調する[図1(b)の電子ポテンシャル図参照]。G1直下の障壁が低い際 に単電子がソースからトラップ準位に捕獲され、高い際にトラップ準位からドレインに単電 子が放出されることになる。結果として、転送電流値は ef(e:電気素量)となる。詳細な測定 から、捕獲過程では十分にG1直下の障壁を低くし放出過程ではトラップ準位の位置に大 きな電界を加えることで、捕獲・放出を高速化できることがわかった。これは高周波信号振 幅を十分大きくすることで達成できる。このような条件で高周波信号の周波数を上昇させ、 図 1(c)に示すように最高で 3.5 GHz の高速動作を達成した。さらに、高速動作時の転送精 度は市販の電流計では計測不可能なほど良好(10-3以下のエラー率)であることがわかっ た。理論的には1 GHz で 10<sup>-8</sup>以下のエラー率になる可能性がある。今後はこのトラップ準 位を介した転送の絶対精度評価[2]を行うことで、高精度高速単電子転送の実証を行い電 流標準への応用を目指す。

本研究の一部は最先端・次世代研究開発支援プログラム(GR103)の助成を受けて行われた。

- [1] G. Yamahata, K. Nishiguchi, and A. Fujiwara, Nature Commun. 5, 5038 (2014).
- [2] G. Yamahata, K. Nishiguchi, and A. Fujiwara, Phys. Rev. B 89, 165302 (2014).



図 1 (a) 素子の概略図。(b) トラップ準位を介した転送時の電子ポテンシャル図。 (c) トラップ準位を介した高速単電子転送(*T* = 17 K)。

# ー次元フォノニック結晶の動的制御

畑中大樹<sup>1</sup> Imran Mahboob<sup>1</sup> 小野満恒二<sup>2</sup> 山口浩司<sup>1</sup><sup>1</sup> 量子電子物性研究部<sup>2</sup>機能物質科学研究部

フォノニック結晶(PnC)は異なる弾性体の周期構造により構成された人工結晶である。この 周期構造に起因するフォノニックバンドギャップ効果を介して、音や振動、熱等のフォノンの 空間制御が可能になる[1]。近年、フォノンの学術的・産業的有用性をさらに高めるために、 フォノンを制御キャリアとして活用する新しいフォノニック情報処理デバイスの研究が活発化 している。その実現には、PnC によるフォノンの空間制御技術に加え、動的制御技術の確立 も必要不可欠となる。しかしながら、これまで提案されたほぼ全ての PnC は受動的な特性の みを示し、伝搬特性をその外部操作により変調可能な動的制御特性を有していなかった。こ の問題を解決するために、我々は電気的に弾性特性の変調が可能な電気機械振動子を単 位素子に用いた一次元 PnC 導波路を作製し、フォノン伝搬の動的制御性を実現した [2]。

一次元 PnC は、GaAs (5 nm)/Al<sub>0.27</sub>Ga<sub>0.73</sub>As (95 nm)/Si-GaAs (100 nm)へテロ構造薄膜 を有する電気機械振動子の一次元アレイより構成されている。さらに、その導波路内には、 フォノンの動的制御を実現するための制御用機械振動子が、隣接する機械振動子間の間 隔を広げることによって導入されている[図 1(a)]。この一次元 PnC 構造は、導波路上に配 置した周期孔から希フッ化水素酸溶液を流し込み、犠牲層[Al<sub>0.65</sub>Ga<sub>0.35</sub>As (3 µm)]をエッチ ングすることによって形成されている。導波路右端の金電極に周波数 5.74 MHz の交流電 圧を印加すると、圧電効果によって弾性振動(フォノン)が誘起される。発生したフォノンは 制御用機械振動子を通って導波路を伝わり、導波路左端に到達する[図 1(b)の破線]。同 時に、制御用機械振動子へ周波数 1.86 MHz の交流電圧を印加すると、引き起こされる強 い局所的な振動によって非線形弾性効果が誘起される。この結果、導波路上のフォノンの 伝達特性が変調され、導波路左端で周波数 5.74 MHz のフォノンが観測されなくなる[図 1(b)実線]。

この一次元 PnC 導波路によって、フォノンの動的制御が可能となり、フォノンを制御キャリ アに用いた新しい高機能フォノニック信号処理デバイスの実現が期待できる。

本研究は科研費の援助を受けて行われた。

[1] M. Maldovan, Nature **503**, 209 (2013).

[2] D. Hatanaka et al., Nature Nanotech. 9, 520 (2014).



図 1 (a) 制御用機械振動子を含む一次元 PnC。(b) 導波路を進行するフォノンの制御用機械振動子によるスイッチング。

## 電気機械共振器における2モードスクイージング

Imran Mahboob 岡本 創 山口浩司 量子電子物性研究部

光子の量子もつれ状態について、これまで多くの実験的研究は行われてきた。このような 実験が可能になったのは、光子に対する2モードスクイーズド状態がパラメトリック周波数下 方変換を用いて生成できることに起因する。もし同様の手法がマクロ系の物質において実 現できれば、日常的な物体の量子力学的な性質という、量子力学の本質に迫る研究を展開 することが可能となる。しかし、その重要性にもかかわらず、これまでマクロ系の物質に対す る2モードスクイーズド状態の生成には成功していない。その理由は、それを生み出す上で カギとなる非線形相互作用が、マクロ系物質に対して実現が難しかったためである。

このような課題に対し、我々は、化合物半導体による機械共振器 [図1(a)] において、非 縮退パラメトリック増幅を用いた周波数下方変換を実現することに成功した。この素子では、 非線形相互作用を電気機械的に制御することが可能であり、2つの異なる機械振動モード 間で、相関した熱励起フォノンの増幅・圧縮が可能である [図1(a)]。熱励起フォノンの増 幅においては、20 dB以上のゲインが得られ、一方、圧縮による熱励起フォノンの抑制率とし て5 dBの値が得られた。さらに、2つのモード間で生成されたフォノンの相互相関[図1(c)]を 調べたところ、ほぼ100%に近い相関係数が得られた[1]。これらの結果は、単一フォノン領 域においては、本手法によりフォノンの量子もつれが生成できる可能性を示している。 本研究の一部は科研費の援助を受けて行われた。

(a) = (b) = (b)

[1] I. Mahboob et al., Phys. Rev. Lett. 112, 167203 (2014).

図1 (a) 実験に用いたGaAs結合機械共振器の電子顕微鏡写真と、有限要素法で得られた2つの振動モードの 模式図。 左側は対称振動モード(S)、右側は反対称振動モード(A)を示す。(b)測定された振動振幅のノイズ分布。 横軸は正弦成分、縦軸は余弦成分。同じ振動モード(X<sub>S</sub>:Y<sub>S</sub>)をプロットした場合、等方的なノイズ分布が見られる が、異なる振動モード(X<sub>A</sub>:Y<sub>S</sub>)をプロットした場合、ノイズに強い相関がみられた。これは2モードスクイージングが 実現できていることを示している。(c) それぞれの振動モードの余弦・正弦成分の間の相関係数。本来独立であ るはずのX<sub>A</sub>とY<sub>S</sub>、ならびにX<sub>S</sub>とY<sub>A</sub>のノイズ間において、60%程度の相関がみられる。この値はポンプの増加とと もに100%に漸近する。

# 長寿命量子メモリ構築のための新しいアプローチ

Xiaobo Zhu<sup>1</sup> 松崎雄一郎<sup>1</sup> Robert Amusüss<sup>1,3</sup> 角柳孝輔<sup>1</sup> 下岡孝明<sup>4</sup> 水落憲和<sup>4</sup> 根本香絵<sup>5</sup> 仙場浩一<sup>1,5</sup> William J. Munro<sup>2</sup> 齊藤志郎<sup>1</sup> <sup>1</sup>量子電子物性研究部<sup>2</sup>量子光物性研究部 <sup>3</sup>ウィーン工科大学<sup>4</sup>大阪大学<sup>5</sup>国立情報学研究所

異なった量子系を結合させてハイブリッド系を構築する手法は、それぞれの系における 長所を利用できるため、量子コンピュータ実現のための有望な方法である。超伝導磁束量 子ビットとダイヤモンド中のスピン集団の結合は、そのようなハイブリッド素子のひとつであ る[1-3]。超伝導磁束量子ビットはプロセッサとして、スピン集団はメモリとしての役割を果た すことが期待されている。この系においては、起源が不明な長寿命状態が実験的に観測さ れることが知られていた[1, 2]。長寿命な状態は、その起源がわかればメモリとして使うこと ができるが、理論的になぜこのような長寿命状態が現れるかは明らかにされていなかった。

我々はこの長寿命状態の起源を理論的に解明し、この状態がダイヤモンド中のダーク状態であることを示した[4]。ダーク状態は弱めあう量子干渉効果をもつため量子ビットとの結合が小さく、その状態から生じる信号を実験で検出することは一般的には難しい。我々は、超伝導・ダイヤモンドのハイブリッド系においては、環境からのランダム磁場とダイヤモンド結晶の歪みにより、そのような弱めあう量子干渉効果が低減され、通常は検出の難しいダーク状態の観測が可能になっていることを示した。さらに実験的に、このダーク状態の寿命が150 ns 程度であることを示した。従来の手法ではダイヤモンド中のスピンの寿命は20 ns 程度であったため[3]、ダーク状態を量子メモリとして利用することができれば、寿命を7倍程度改善することが可能となる。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る。本研究は FIRST および NICT の援助を受けて行われた。

[1] Y. Kubo et al., Phys. Phys. Lett. 105, 140502 (2010).

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

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

[4] X. Zhu et al., Nature Commun. 5, 3424 (2014).



図 1 超伝導・ダイヤモンドのハイブリッド系のエネルギーダイヤグラムと分光測定結果。分光測定において、ダーク状態に対応するシャープな共鳴線が、線幅の太い二つの共鳴線の間に観測されている。

#### グラフェンにおけるエッジマグネトプラズモン共鳴とその減衰特性

熊田倫雄<sup>1,3</sup> Preden Roulleau<sup>3</sup> Benoit Roche<sup>3</sup> 橋坂昌幸<sup>4</sup> 日比野浩樹<sup>2</sup> Ivana Petković<sup>3</sup> D. C. Glattli<sup>3</sup>

<sup>1</sup>量子電子物性研究部 <sup>2</sup>機能物質科学研究部 <sup>3</sup>CEA Saclay <sup>4</sup>東京工業大学

二次元系に磁場を加えることによって現れる量子ホール状態では、電流は一次元的に試料端に沿って伝搬するエッジチャンネル中を流れる。このエッジチャンネルを利用して様々な量子伝導研究がなされている。エッジマグネトプラズモン(EMP)はエッジチャンネルにおける電荷の集団運動であり、EMPの散逸や伝搬特性を調べることはエッジチャンネルでより強固な量子効果を得るために重要である。本研究では、グラフェンにおける EMP の分散および散逸を測定した[1]。

実験で用いた試料は SiC を熱分解することによって得られたグラフェンを円形に加工した ものである。グラフェンに静電的に結合した高周波電極が2つ取り付けられており[図1(a)]、 その1つに電圧パルスを印加することにより EMP を励起する。励起された EMP はグラフェ ン中を周回し、もう一方の高周波電極を通して検出される。様々な周波数での EMP の透過 強度を測定することによって得られた EMP の分散関係は、電荷キャリア間の相互作用により 非線形となることがわかった [図1(b)]。分散関係の傾きから求められる伝搬速度は 1.7×10<sup>6</sup> m/s であり、この値は EMP の飛行時間測定から得られた値[2]と一致している。こ の速度はフェルミ速度(10<sup>6</sup> m/s)より速く、電荷は個々の電子によってではなく、集団運動で ある EMP として伝搬していることを示している。EMP の減衰時間は EMP がグラフェンを周 回しながら減衰していく様子を時間の関数として測定することにより求められる[図1(c)]。減 衰時間の周波数や温度依存性から、EMP の減衰はグラフェン中の局在状態との結合によ るものであると同定された。また、得られた減衰時間は他の二次元系(GaAs/AlGaAs ヘテロ 構造など)での値より大きく、グラフェンはエッジチャンネルを用いた量子伝導測定やプラズ モン応用に向けて有用な材料であることを示している。

[1] N. Kumada et al., Phys. Rev. Lett. **113**, 266601 (2014).

[2] N. Kumada et al., Nature Commun. 4, 1363 (2013).



図1(a) 試料概略図。グラフェンは円形にエッチングされ、2つの高周波電極が取り付けられている。 (b) エッジマグネトプラズモンの分散関係。測定温度は4K、磁場は10T。(c) エッジマグネトプラズモン 伝搬の時間依存性。エッジマグネトプラズモンはグラフェン中を端に沿って周回しながら減衰する。

# 半導体/超伝導ハイブリッド量子ポイントコンタクトにおけるジョセフソン結合

入江 宏<sup>1</sup> 原田裕一<sup>1</sup> 杉山弘樹<sup>2</sup> 赤崎達志<sup>1</sup> <sup>1</sup>量子電子物性研究部 <sup>2</sup>NTT 先端集積デバイス研究所

フェルミ波長程度の幅をもつバリスティックな一次元導体では、伝導モードの離散化によ り電気伝導度が2e<sup>2</sup>/hの整数倍をとることが知られている。このことは散乱が全くない場合で も電気伝導度が物理定数のみで決まる有限の値に留まることを意味する。一方、導体を超 伝導体に置き換えた場合、2つの超伝導体が点接触する超伝導量子ポイントコンタクトには 超伝導電流が流れ、そのとき単一伝導モードあたりの臨界電流値が eΔ/h となることが理論 的に示されている(Δは超伝導ギャップ)[1]。この超伝導版の電気伝導の量子化は、理論の 提唱から 20年以上が経過した今も、その実験的な実証例は数限られている [2]。今回、良 好なゲート制御性をもつ半導体量子ポイントコンタクト(QPC)と超伝導体を組み合わせたハ イブリッド QPC を用い、ジョセフソン電流の量子化の観測を試みた[3]。

実験には、 $In_{0.75}Ga_{0.25}As$  二次元電子ガスをベースとした QPC に超伝導 Nb 電極を結合させた素子を用いた。図1に素子構造の模式図を示す。Nb 電極に挟まれた InGaAs 中では、Nb 界面におけるアンドレーエフ反射によってボゴリューボフ準粒子が生成される。この準粒子が超伝導体の位相情報を伝達することで、Nb 電極間にジョセフソン結合が生じ超伝導電流が流れる。ジョセフソン結合に関与する伝導モード数はゲートにより制御可能であり、これにより伝導モード数とジョセフソン電流の関係が得られる。実験で得られた 20 mK における最大ジョセフソン電流( $I_c$ )とゲート電圧( $V_g$ )の関係を図 2 に示す。 $V_g$ に対して  $I_c$ が階段状に変化しており、伝導モードの離散化によりジョセフソン電流が量子化されている様子が明瞭に観測されている。単一伝導モードあたりの  $I_c$ は 10.3 nA であり、Nb の超伝導ギャップ( $\Delta \sim 1.27$  meV)から予想される値 125 nA よりも小さい。このことは Nb/InGaAs の界面に超伝導ギャップの抑制された界面状態が生じていることを示唆している[3]。(伝導モード数1および2における $I_c$ の抑制は、有限温度による効果であり本質的なものではない。)

本成果では、ハイブリッド QPC において半導体一次元チャネルを介したジョセフソン結合 を実現し、ジョセフソン電流の量子化を明瞭に観測することに成功した。

本研究は科研費の援助を受けて行われた。

- [1] C. W. J. Beenakker and H. van Houten, Phys. Rev. Lett. 66, 3056 (1991).
- [2] H. Takayanagi et al., Phys. Rev. Lett. 75, 3533 (1995).
- [3] H. Irie et al., Phys. Rev. B 89, 165415 (2014).



図1 ハイブリッド量子ポイントコンタクト。



図2 ジョセフソン臨界電流の量子化。

#### 核磁気共鳴による強磁場中ウィグナー結晶の観測

**Trevor David Rhone**<sup>1,2</sup> Lars Tiemann<sup>1,2</sup> 柴田尚和<sup>3</sup> 村木康二<sup>1,2</sup> <sup>1</sup>量子電子物性研究部<sup>2</sup>科学技術振興機構<sup>3</sup>東北大学

強磁場中の二次元電子系では運動エネルギーが凍結されるため、電子間相互作用に よって多彩な量子相が現れる。分数量子ホール効果が終端する低占有率領域では電子 がウィグナー結晶を形成していると考えられているが、その実験的証拠はマイクロ波吸収に おける固体に特徴的な振動モードの観測など間接的なものに限られていた。本研究では 固体を特徴づけるものとして並進対称性の破れに着目する。電子の結晶化によって生じる ナノメートルスケールでの確率密度の変化を抵抗検出 NMR によって検出し、相互作用に よって局在化した電子の空間的な広がりなど微視的な情報が得られることを示す[1]。

磁場 6.4 T における縦抵抗の占有率依存性と測定された <sup>75</sup>As の NMR スペクトルを図 1 に示す。電子系が分数量子ホール液体状態にある占有率v = 1/3 では、観測されたスペクトルは系が一様と仮定した場合のシミュレーションと良く一致する。一方、v < 1/3 やv = 2 の近傍では電子系が一様と仮定したモデルでは実験を説明することができない。これに対し、電子やv = 2 に付け加えた電子/正孔がウィグナー結晶を形成していると仮定したモデルを用いると実験を極めて良く再現することができる。実効的な占有率が等しい $v = 1.9 \ge 2.1$  でスペクトルの形状が異なるのはランダウ準位指数による一電子波動関数の違いを反映しており、NMR によってナノメートルスケールでの確率密度の変化を検出できることを示している。

[1] L. Tiemann<sup>\*</sup>, T. D. Rhone<sup>\*</sup>, N. Shibata, and K. Muraki, Nature Phys. **10**, 648 (2014).

(\*: These authors contributed equally to this work.)



図1 (a) 縦抵抗の占有率依存性。(b)-(d) 様々な占有率における<sup>75</sup>As の抵抗検出 NMR スペクトル。横軸は 占有率2の場合の共鳴周波数に対するシフト量。破線は二次元電子系が一様でスピン偏極していると仮定し た場合のシミュレーション。実線はウィグナー結晶が形成されていると仮定した場合のモデルによるフィッティン グ。挿入図は占有率(b) 0.2、(c) 1.8、(d) 2.1 における電子配置の模式図。

# 多層 Lieb 光格子系におけるフラットバンド強磁性

野田数人<sup>1,2</sup> 稻葉謙介<sup>1,2</sup> 山下 眞<sup>1,2</sup> <sup>1</sup>量子光物性研究部<sup>2</sup>科学技術振興機構

近年、数10 nK という極低温の中性原子集団を、光格子と呼ばれる人工の結晶構造に導入 することが可能となった。高い制御性を有するこの系は、量子多体問題のシミュレータとして注 目されている。最近では特に、電子物性を模した、フェルミ原子による量子磁性シミュレータの 実現に向けて理論・実験両面から活発な研究が行われている。中でも、京都大学・高橋義朗 教授の研究室では Lieb 光格子[図 1(a)]を実現し、世界的に注目を集めている。二次元 Lieb 格子のバンド構造には、平坦な分散をもつバンド(フラットバンド)が存在し、この特殊な 構造を利用した磁気秩序(フラットバンド強磁性)の発現が厳密に示されている(Liebの定理 [1])。このように、Lieb 格子は、古くから理論研究の対象であったが、光格子を用いて初め て実現された。これにより、世界初のフラットバンド強磁性の観測が期待されている。

我々は、実験では多層 Lieb 光格子[図1(b)](層の枚数をLとする)が実現していることに 注目し、層状構造が磁気秩序に与える影響を理論的に解析した[2]。その結果、層の枚数 が奇数(L = 2l - 1, l は自然数)の場合と偶数(L = 2l)の場合で磁気秩序の性質が大きく 異なることを明らかにした。図 2 に、原子間相互作用を変化させた場合の、平均磁化(磁気 秩序のオーダパラメータ)のふるまいを示す。奇数層(L = 2l - 1)の場合[図 2(a)]には、非 常に弱い相互作用でも磁化が突然大きな値を取ることがわかる。これは、1 層(L = 1、上述 の二次元 Lieb 格子)の場合と同じく、フラットバンド強磁性が発現していることを示している。 また、この図は、二次元系(L = 1)から三次元系( $L \to \infty$ )へ、磁気秩序状態が漸進的に変化 することを示唆している。これにより、二次元での発現が知られていたフラットバンド磁性が 三次元でも発現することが明らかとなった。一方、偶数層(L = 2l)の場合[図 2(b)]は、弱い 相互作用領域での磁気秩序発現が抑えられ、有限の相互作用から磁化が滑らかに発達す る。この磁気秩序発現に必要な相互作用は、層数が増えるごとに弱くなる。これは、層数を 増やしていった極限の三次元系( $L \to \infty$ )においては、偶奇の違いは解消され、フラットバン ド磁性が現れることを意味している。実験では、数十層の多層系( $L \gg 1$ )が実現するので、 偶奇性は解消され、三次元的なフラットバンド磁性の観測が期待できる。

本研究は科学技術振興機構 CREST および科研費の援助を受けて行われた。

[1] E. H. Lieb, Phys. Rev. Lett. 62, 1201 (1989).

[2] K. Noda, K. Inaba, and M. Yamashita, Phys. Rev. A. 90, 043624 (2014).



図 1 (a) Lieb 格子、および (b) 多層 Lieb 格子の模式図。

図2 層数Lの多層 Lieb 格子 [(a) L = 2l - 1 および (b) L = 2l]に おける磁化(磁気秩序発現を特徴づけるオーダパラメータ)の相互作 用依存性。絶対零度、ハーフフィリングにおいて解析を行った[2]。

#### 極低暗計数超伝導光子検出器による 72 dB 伝送損失下での量子鍵配送

柴田浩行<sup>1</sup>本庄利守<sup>2</sup>清水 薫<sup>1</sup> <sup>1</sup>量子光物性研究部<sup>2</sup>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量子鍵配送(QKD)の実用化のためには、 鍵配送距離の長距離化が重要である。NTT では以前、低雑音、高速動作が可能な超伝導 単一光子検出器(SSPD)を用いて、200 km の光ファイバ(伝送損失 42.1 dB)上における QKDを実証している[1]。今回、SSPD性能の大幅な向上に成功し[2]、これを用いて336 km の光ファイバ(伝送損失 72 dB)における QKD を達成した[3]。これは、QKD 実験における 鍵配送距離の世界記録である。

QKD では、通常極微弱な単一光子を情報の担い手としている。光ファイバ長の増加と共 に損失が増大し、シグナルがノイズに埋もれてしまうと鍵配送が不可能となる。このため、長 距離化には出来るだけ信号雑音比(S/N 比)の良い単一光子検出器が必要である。我々は、 SSPD における暗計数(光が入射していないときに現れるノイズパルス)の原因は、SSPD 素 子に光ファイバを通じて照射される室温の黒体輻射であることを見出し、黒体輻射を除去す るため、3 K に冷却された光バンドパスフィルタを導入した[2]。この方法により暗計数率を 3 桁低下させることに成功した。図1に冷却フィルタを導入した SSPD の検出効率および暗計 数率のバイアス電流依存性を示す。バイアス電流 21.5 μA において検出効率 4.4%、暗計数 率< 0.01 cps となり、SSPD の S/N 比を 30 dB 以上向上させることが可能となった。

本 SSPD を用いて、実績のある差動位相シフトプロトコルにもとづいた QKD 実験 を行なった[3]。一般的個別攻撃に対する結果を図 2 に示す。損失 72 dB(ファイバ長 336 km)においても誤り率(QBER)は充分に低く、シフト鍵から安全鍵を生成するこ とが可能である。

[1] H. Takesue et al., Nature Photon. 1, 343 (2007).

[2] H. Shibata, K. Shimizu, H. Takesue, and Y. Tokura, Appl. Phys. Express 6, 023101 (2013).

[3] H. Shibata, T. Honjo, and K. Shimizu, Opt. Lett. 39, 5078 (2014) : Selected for Spotlight on Optics.



図1 極低暗計数 SSPD の検出効率(η)および 暗計数率(DCR)。



# シリコン-石英モノリシック光導波路を用いた 量子相関光子の発生と分離

松田信幸<sup>1,2</sup> 西 英隆<sup>2,3</sup> 土澤 泰<sup>2,3</sup> William J. Munro<sup>1</sup> 武居弘樹<sup>1</sup> 山田浩治<sup>2,3</sup> <sup>1</sup> 量子光物性研究部 <sup>2</sup>NTT ナノフォトニクスセンタ<sup>3</sup>NTT 先端集積デバイス研究所

光子を用いたスケーラブルな量子情報処理システムの実現のため、その要素素子を光 チップ上へ集積化する研究が注目を集めている。特に光導波路技術を用いることで、バ ルク光学素子を用いた自由空間光学系では得ることが困難な、微小な素子サイズおよび 高安定な光子干渉計を利用することができる。これまで、光子発生源[1]、光量子演算回 路[2]、単一光子検出器[3]のそれぞれの素子について独立にチップ上への実装が行わ れてきた。今後はこれら素子の間の集積・相互接続が重要となる。今回、量子相関光子 対の発生素子と、それら光子を分離し次段の量子回路へ接続するためのインターフェー スとを兼ね備える回路を一つのシリコン基板上に実現した[4]。

図 1(a)に回路の模式図を示す。量子相関光子の発生には、シリコン導波路中の自発四 光波混合過程を用いる。シリコン導波路の高い光非線形性により、光通信波長帯の励起パ ルスを入射させることで、周波数非縮退の光子対が効率的に発生する。この光子対は、次 段のアレイ導波路回折格子(AWG)によって異なる出力導波路へと波長分離[図 1(b)]される。 光子対源以外の部分における雑音光子の発生を抑制するため、AWG のコアとして光非線 形性の極めて小さな石英系材料(SiO<sub>x</sub>)を用いた。本素子は、シリコンと石英という二つの異 なるコア材料からなり、異種導波路モノリシック集積技術[5]を用いて単一のシリコン基板上 に作製された。この素子を用い、チップ上で量子相関光子対の発生と分離を行うことに成功 した[図 1(c)]。また、AWGを構成するSiOx 導波路においては余分な雑音光子が全く発生 していないことが確認された。

AWG の出力導波路を接続インターフェースとして用いることで、光量子演算回路へのオンチップ集積が可能である。また、本素子は、量子暗号通信のためのコンパクトな光子対発 生装置としても用いることができる。

[1] N. Matsuda et al., Sci. Rep. 2, 817 (2012).

[2] A. Politi et al., Science **320**, 646 (2008).

[3] W. H. Pernice et al., Nature Commun. 3, 1325 (2012).

[4] N. Matsuda et al., Opt. Express 22, 22831 (2014).

[5] H. Nishi et al., Appl. Phys. Express 3, 102203 (2010).



図 1 (a) 相関光子対発生源(シリコン導波路)と分離回路(SiOx 導波路)とのモノリシック集積回路の模式図。(b) AWG の透過スペクトル。(c) 2 つの AWG 出力ポートからの同時計数測定結果。

#### 不完全な光源を用いたロス耐性のある量子暗号

玉木 潔<sup>1</sup> Marcos Curty<sup>3</sup> 加藤 豪<sup>2</sup> Hoi-Kwong Lo<sup>4</sup> 東 浩司<sup>1</sup>
 <sup>1</sup>量子光制御研究部 <sup>2</sup>NTT コミュニケーション科学基礎研究所
 <sup>3</sup>ヴィーゴ大学 <sup>4</sup>トロント大学

量子暗号は、送受信者間に暗号鍵と呼ばれるランダムなビット列を共有するための方法 であり、盗聴者が如何なる盗聴を行っていても暗号鍵の情報漏えい量を送受信者が任意に 小さく設定できることを長所とする。このような非常に高い安全性を得るためには、送受信者 が用いる量子暗号装置が、安全性理論の要求通りに作動することが必要となる。例えば、最 もよく使われている BB84 方式[1]の場合、送信者が用いる位相変調器は各光パルスに対し て $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ の4値の位相変調の中から1つをランダムに選択し変調を施すことが要 求されるが、実際の位相変調の値がこれらの4値の値を厳密に実現していることはなく、雑 音などの影響でこれらの値からずれてしまう。

これらの量子暗号装置の作動誤差は非常に小さいので安全性には影響がそれほどない ように思えるが、そうではない。量子暗号通信では、通信路に光子損失があるので、100 km での量子暗号通信の場合大まかにいって 1000 個の光パルスのうち 1 個しか受信者は 検知できない。盗聴者はこの大きな光子損失を用いて、作動誤差を上手く利用できたときの み受信者に光パルスを送りつけるなどして、実質的に作動誤差を拡張できる可能性を否定 できない。この心配は既存理論では実際に起きてしまっていることであった[2]。図 1(a)は、 送受信者の通信距離を横軸に取り、縦軸には1パルス当たりの暗号鍵生成率をプロットした ものであるが、実線は送信機の位相変調器に誤差が全くない場合であり、破線と点線が誤 差がある場合であるが(破線は約3.6°の誤差があり、点線は7.2°の誤差を仮定している)、わ ずかな誤差が通信距離に大きな影響を与えていることがわかる。

我々は、不完全な送信状態が通信距離に及ぼす影響を劇的に下げるための方法を提案 した[3]。これは、これまでの BB84 では捨てることになっているデータを有効活用することに よって可能になった。図1(b)は、図1(a)のデータと同じ実験パラメータに対して、我々の証明 にもとづいた暗号鍵生成率を表しており、実線、破線、点線が殆ど重なっている、つまり送 信状態の影響が殆どないことが見て取れる。さらに我々の証明からは、4 つの状態が必要と 思われてきた BB84 は実は 3 つの状態で十分であることも帰結された。

本研究は FIRST および NICT の援助を受けて行われた。

[1] C. H. Bennett and G. Brassard, Proceedings of IEEE International Conference on Computers, Systems, and Signal Processing, IEEE Press (New York), 1984, pp. 175-179.

[2] D. Gottesman et al., Quant. Inf. Comput. 5, 325 (2004).

[3] K. Tamaki et al., Phys. Rev. A 90, 052314 (2014).



図1 暗号鍵生成率 vs 通信距離。(a) 既存理論[1]に基づく生成率。(b) 我々の理論[2]にもとづく生成率。

# ダイヤモンドを用いたスケーラブルな分散型量子情報の設計

William J. Munro<sup>1</sup> Michael Trupke<sup>2</sup> Simon J. Devitt<sup>3</sup> Ashley M. Stephens<sup>3</sup> Burkhard Scharfenberger<sup>3</sup> Kathrin Buczak<sup>2</sup> Tobias Nöbauer<sup>2</sup> Mark S. Everitt<sup>3</sup> Jörg Schmiedmayer<sup>2</sup> 根本香絵<sup>3</sup>

1量子光物性研究部 2ウィーン工科大学 3国立情報学研究所

物理と情報は相互に密接に繋がっている。実際、現在においては、究極の情報処理 デバイスは、量子力学の原理を利用したものであることが広く認識されている。そのよう な情報処理の原理検証は、これまでに様々な物理系で行われ、その可能性が示されて きた[1]。しかしながら、これらはすべてエラーを考慮することが必要であり、現在の技術 からスケーラブルな量子コンピュータや量子通信への道を見いだすことが必要である。 本研究では、負に電荷した窒素空孔中心(NV)ダイヤモンドと光共振器からなる単純な 量子モジュールと、そのアーキテクチャを設計した。モジュール間は、光ファイバでつな がれ、単一光子を介してクラスタ状態を生成することが出来るようになっている。このクラ スタ状態は、トポロジカル量子情報処理のための基盤である。このアーキテクチャによっ て、現在の技術を用いて数個のモジュールから大規模な量子情報処理へと大規模化を 可能にする方法を示した[2]。

この方法の中核となる光子と電子スピン間が光共振器を介して相互作用するモジュールを図 1(a)に示した。電子スピンは核スピンと相互作用をもつ。核スピンは、量子情報の格納や処理を実行するための長時間量子メモリとして用いられる。電子スピンは核スピンと光子の間のインターフェースとして働く。光ファイバネットワークから送られている単一光子を用いて、2 つのモジュール間のエンタングルメントを生成する[図 1(a)]。この方法では、50/50 ビームスプリッタを用いて単一光子を 2 つの経路に分岐し、それぞれがその先に繋がっているモジュールで相互作用(電子スピンの状態が|1>のときに条件的に位相を獲得する)する。それぞれのモジュールより反射されてきた光はビームスプリッタで再び合成され、ダークポートへ出てきた光を測定する。光子が検出された場合、2 つのモジュールの電子スピン間のエンタングルメントが生成されたことがわかる。エンタングルメントは、核スピンへ格納されることで、モジュール間に長時間安定なエンタングルメントのリンクを確保することができる。同様のエンタングルメント生成方法を、他のモジュールとのエンタングルメント生成へと拡張することで、大規模なクラスタ状態[図 1(b)]を生成することが可能となる。これは、ユニバーサルな量子コンピュータや長距離量子通信に重要なリソースである。

本研究の一部は NICT の援助を受けて行われた。

[1] T. D. Ladd et al., Nature 464, 45 (2010).

[2] K. Nemoto et al., Phys. Rev. X 4, 031022 (2014).



図1 NV 中心を用いた量子アーキテクチャ。(a) 単一光子の干渉を用いた2つの量子モジュール間のエンタングルメント(挿入図は NV 中心のエネルギーレベルを示す)。(b) 多数のモジュール間にエンタングルメントを配信し、ユニバーサルな量子コンピュータと量子通信に重要となる 3D クラスタ状態を生成する。

#### 単一アト秒パルスを用いた内殻電子の運動計測

增子拓紀 山口量彦 小栗克弥 後藤秀樹 量子光物性研究部

我々は、より高速な物理現象を探索し、従来より高速で動作する光スイッチの動作原理へ と繋げるため、アト秒(10<sup>-18</sup> 秒)という世界最短級のパルス幅をもつパルスレーザ発生技術と、 それを用いた超高速物理現象の計測技術の研究を進めている。電子は、「外殻電子」と「内 殻電子」に分類でき、「内殻電子」は通常、光情報処理デバイス等で利用している「外殻電 子(=価電子)」よりも1桁以上高いエネルギーを持ち、その運動(双極子応答)も100万倍~ 10億倍高速である。従って、「内殻電子」の動きを正確に計測し、自在に操ることが可能とな れば、極めて高速な光情報処理技術の動作原理に繋がる可能性がある。

我々がもつ世界最短級の単一のアト秒パルス発生技術と、スペクトル位相干渉法を組み 合わせることで、高速な挙動をもつ「内殻電子」のダイナミクスを観測することに成功した。図 1に入力する単一アト秒パルスにより誘起されたネオン原子中の内殻電子が作る双極子応 答を示す。この双極子応答により発生する光放射と単一アト秒パルスとのスペクトル干渉波 形を計測することで、双極子の振動周期・位相・緩和時間といった電子運動を決定すること ができる。結果として、緩和時間は 35 fs(10<sup>-15</sup> 秒)と求められ、これは外殻電子(価電子)が 通常もつ ns(10<sup>-9</sup> 秒)の緩和時間よりも、100 万倍以上高速である。また、双極子の振動周 期はわずか 90 as である。本結果は、原理上、10 PHz (10<sup>15</sup> Hz)以上の超高速応答デバイス を実現できる可能性を示唆しており、半導体材料中においても内殻電子の応答を観測・操 作することが実現すれば、新たな物性研究に大きく貢献するものと期待される。

[1] H. Mashiko, T. Yamaguchi, K. Oguri, A. Suda, and H. Gotoh, Nature Commun. 5, 5599 (2014).



図1 単一アト秒パルスを用いたネオン原子中における内殻電子の双極子応答の計測結果。

#### 自己触媒法による InP/InAs ヘテロナノワイヤの作製および光学特性

Guoqiang Zhang 舘野功太 後藤秀樹 量子光物性研究部

半導体ナノワイヤは、フォトニクス、エレクトロニクス、エネルギー変換などの分野において 次世代のビルディングブロックとなっている。ナノワイヤ研究の一つの重要な課題は、優れ た光学特性を有する半導体へテロ構造のナノワイヤの実現である。その作製法には、既存 のSiデバイスと組み合わせるため、CMOS互換であることが求められている。ナノワイヤは、 ボトムアップ気相-液相-固相(VLS)手法を用いて作製される場合、通常、金微粒子が触媒 として使用されるため、これは通常の CMOS プロセスで許容されない。また、金は不純物と してナノワイヤに取り込まれる可能性も大きい。

ここでは、金微粒子を使用しない、1.1-1.6 µmの発光波長をもつ多層構造の InAs/InP系 ヘテロ構造ナノワイヤの実現について報告する。我々は、インジウム粒子を用いた自己触媒 法の VLS 法を使用してこのヘテロ構造ナノワイヤを実現した[1-3][図 1(a)、(b)]。成長温度を 通常の半導体成長条件より低い 320℃程度とした。この成長温度で、ヘテロ界面での原子 拡散を押さえ、インジウム液滴内の貯留効果を弱めることにより、従来非常に難しいと思わ れていた原子レベルで急峻な InP/InAs の界面の形成を可能にした[図 1(c)]。

VLS 手法は、厚さの制御性が高いため、このヘテロナノワイヤの発光波長は InAs 層の 厚さの制御によって、1.3-1.5 µm の通信波長範囲をカバーすることができる。 ナノメートル オーダの空間解像度をもつカソードルミネッセンス(SEM-CL)を用いて、単一ナノワイヤの 厚さの異なる InAs 発光層の光学特性を評価した。図2はその結果で、厚さの異なる InAs が ナノワイヤの特定の位置で発光し[図 2(b)-(f)]、それぞれ異なる CL エネルギーを示し [図 2(a)]、その波長は通信波長帯を含んでいる。自己触媒へテロナノワイヤは金微粒子を用い ず、低温で作製可能であるため、既存の Si デバイスとの複合構造の実現が期待できる。

[1] G. Zhang et al., Appl. Phys. Express 5, 055201 (2012).

[2] G. Zhang et al., AIP Advances 3, 052107 (2013).

[3] G. Zhang et al., Nanotechnology 26, 115704 (2015).



図1 (a)、(b) InP 基板上に成長した多層ヘテロ 構造もつ InAs/InP ナノワイヤの SEM 像(tilt: 38°)。(c) InP/InAs ヘテロ界面の高分解 HAADF-STEM 像。水平矢印は成長方向を示 す。垂直矢印は界面の位置を示す。



図2 SEM-CL 分析結果。(a) 単一 InAs/InP ヘテロナ ノワイヤの発光スペクトル。(b) 単一ナノワイヤの SEM 像およびナノワイヤヘテロ構造の概念図。(c)-(f) 図 (a)にある発光ピークの単色マッピング像。

#### 酸化エルビウム単結晶薄膜におけるエネルギー移動

俵 毅彦<sup>1,3</sup> 尾身博雄<sup>2,3</sup> 後藤秀樹<sup>1</sup>
 <sup>1</sup>量子光物性研究部<sup>2</sup>機能物質科学研究部<sup>3</sup>NTT ナノフォトニクスセンタ

希土類イオンは外界から電気的に遮蔽された 4f 電子軌道を有し、母体結晶の違いなどの外部環境や温度に左右されない確定的離散量子準位を形成するため、近年量子情報操作のための優れたプラットフォーム材料として期待されている。我々は通信波長光子と相互作用しSi 基板上にエピタキシャル成長が可能な酸化エルビウム(Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)単結晶薄膜の Er 4f 軌道内電子のダイナミクスに着目し、量子情報操作材料として有望であることを明らかにした。

図1に作製された Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜の断面 TEM 像と単位格子構造の模式図を示す。Si 基板上に欠陥のない Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 単結晶薄膜が得られている[1]。この結晶中の Er イオンは構造対称性から異なる2 つのサイト(C<sub>2</sub>および C<sub>3i</sub>)を占め、結晶場の違いから4f 軌道は異なるエネルギー構造をもつため、各サイトの各準位を選択的に励起することが可能である。この結晶のPhotoluminescence excitation (PLE)測定のカラープロットを図2に示す。C<sub>2</sub>サイトのエネルギー準位(例えば Y<sub>3</sub>)を選択的に励起した際、同一のC<sub>2</sub>サイトからではなく、空間的に離れたC<sub>3i</sub>からのみ(Y'<sub>1</sub>-Z'<sub>1</sub>遷移)発光が観測された。これは異なるサイト間で双極子の及極子相互作用、あるいは波動関数の重複によるエネルギー移動が生じていることを示している。レート方程式解析により、このエネルギー移動時間(8  $\mu$ s)はC<sub>2</sub>サイトでの発光緩和時間(100  $\mu$ s)にくらべ非常に早い事が分かった。理論上量子操作はナノ秒程度で完了すると見積もられており、エネルギー移動はそれよりも十分遅いため、Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> は量子情報操作プラットフォーム材料として有望であることが示された[2]。

本成果は、Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>単結晶薄膜を用いた量子情報操作実現に向けた第一歩であり、今後、 単結晶薄膜の特徴を生かした混晶化による Er イオン間距離およびエネルギー移動の制御 を行い、Si 基板上の量子情報操作素子の実現を目指す。

本研究は北海道大学との共同研究による成果であり、科研費の援助を受けて行われた。

[1] H. Omi et al., Jpn. J. Appl. Phys. 51, 02BG07 (2012).

[2] T. Tawara et al., Appl. Phys. Lett. 102, 241918 (2013).



図 1(左)Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>単結晶薄膜の断面 TEM 像と(右)単位格子の模式図。 図 2(左)Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>のエネルギー準位構造と(右)PLE カラープロット。

# 100 ビットを超える光 RAM チップ

倉持栄一<sup>1,2</sup> 野崎謙悟<sup>1,2</sup> 新家昭彦<sup>1,2</sup> 武田浩司<sup>2,3</sup> 佐藤具就<sup>2,3</sup> 松尾慎治<sup>2,3</sup> 谷山秀昭<sup>1,2</sup> 角倉久史<sup>1,2</sup> 納富雅也<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>量子光物性研究部 <sup>2</sup>NTT ナノフォトニクスセンタ <sup>3</sup>NTT 先端集積デバイス研究所

光メモリは全光ルーティング・全光信号処理チップに不可欠の素子であり、特に前者は通信・データセンタの大容量ネットワークに加え、大規模集積 CMOS チップ内/間光インタコネクトにも適用できる。光伝送の電子チップへの導入により、集積度が増すほど深刻になる データ転送のコスト(電力・熱・配線面積・時間)を解決できると期待されている。我々は既に フォトニック結晶高 Q 値ナノ共振器により超小型光 RAM の超低パワー(30 nW)動作を達成 したが[1]、その高密度多ビット集積を可能とする技術は確立されていなかった。

今回新たに3点欠陥ナノ共振器(L3)を採用し、多数の穴を規則的に調整する新設計により Q 値を 10 倍増加した[図 1(a)][2]。同共振器の狭線幅、増強されたキャリアプラズマ双安 定性、広いモード間隔により、各光 RAMへの読出書込アクセスを波長多重により実現する ことが可能になり、128 bit のモノリシック集積光 RAM を 128 個の直列 L3 配列と1 本のサイド結合導波路による単純な構成で実現した[図 1(b)][3]。各共振器の結晶周期を 30 GHz の 波長間隔を設定するため 408 nm から 424 nm まで 0.125 nm ずつ変調し、共振器間隔を 20 周期とした。128 bit 集積光 RAM チップの長さはわずか 1.1 mm に収まった。この高精度 L3 共振器配列を含む Si フォトニック結晶チップを電子線リソグラフィにて作製した。各共振器 (光 RAM)の共振波長に合わせバイアス光を与えながら、set/reset パルスにより"1"と"0"の状態を切り替えることで、動作を確認した。図1(c)に示す通り、105ビットの光 RAM 動作が実証 された。従来の数ビットからの画期的な大容量化と共に、全ビット合計 30 mW という低消費 電力化も達成した。さらに本技術をより高度な InP 系埋込へテロ構造ナノ共振器に導入する ことで、より低消費電力で秒単位の時間で多ビット光 RAM 動作することを確認した[3]。

この精緻なナノフォトニクスの勝利により、1000ビット光 RAM までのモノリシック集積と、並列集積との組み合わせによる100万素子を1チップに集積した大規模光集積回路への道が拓かれた。

- [1] K. Nozaki et al., Nature Photon. 6, 248 (2012).
- [2] E. Kuramochi et al., Opt. Lett. **39**, 5780 (2014).
- [3] E. Kuramochi et al., Nature Photon. 8, 474 (2014).



図 1 100 ビットを超える光 RAM チップ。(a) 多数穴変調の新 L3 共振器。(b) 電子顕微鏡像。 (c) 105 ビットからの光出力("1"/"0"の明瞭なコントラスト)。

#### 光ナノ共振器による単層カーボンナノチューブのラマン散乱増強

角倉久史<sup>1,2</sup> 倉持栄一<sup>1,2</sup> 谷山秀昭<sup>1,2</sup> 納富雅也<sup>1,2</sup> <sup>1</sup>量子光物性研究部<sup>2</sup>NTT ナノフォトニクスセンタ

カーボンナノチューブは、低次元量子閉じ込め効果に由来する強い電子・フォノン相互 作用によって強い自然ラマン散乱を示すことが知られており、大きなラマンゲインをもつこと が示唆されている。そこで本研究では、高Q値の光ナノ共振器とカーボンナノチューブを用 いて低閾値動作を特徴とするラマンナノレーザの実現を目的として、Q 値 1100 のフォトニッ ク結晶共振器による半導体性単層カーボンナノチューブ(SWCNT)の自然ラマン散乱増強 を試みた。図 1(a)は点欠陥型シリコンフォトニック結晶共振器に SWCNT を塗布した試料を 示しており、共振器上にSWCNTがランダムに配置されていることがわかる。また図1(b)は波 長 940 nm のレーザ励起時における試料のストークスラマンスペクトルであり、1600 cm<sup>-1</sup>付近 に SWCNT の G<sup>+</sup>モードによる強いラマンピークが見られる。そこで波長可変レーザによって 励起波長を変化させて、このG<sup>+</sup>ラマンピークを共振器の共振波長に合わせた。そのとき得ら れた試料のラマンスペクトルと G<sup>+</sup>ラマンピーク強度のラマン散乱波長依存性を図 1(c)、(d) に示す。試料のフォトルミネッセンス測定によって求められた共振器ダイポールモードの共 振波長 1117 nm と G<sup>+</sup>モードのラマン散乱波長が一致したとき、ラマンピーク強度は共鳴的 に増大することがわかった。この結果は、フォトニック結晶共振器によって SWCNT の自然ラ マン散乱が増強されたことを示している[1]。さらにSWCNTの励起効率やラマン散乱光の放 射効率を考慮すると、平坦なシリコン薄膜上に対して共振器では SWCNT のラマン強度が 約 100 倍増強されていることがわかった。これは、共振器によってラマン散乱光の放射効率 が約20倍、光の状態密度が約5倍増大したことに起因していると考えられる。

今後は、SWCNT との結合効率がより高いエアスロット型共振器を作製し、SWCNT の誘 導ラマン散乱の観測やラマンナノレーザの動作実証を目指す。

[1] H. Sumikura et al., Appl. Phys. Lett. 102, 231110 (2013).



図1 (a) 半導体性単層カーボンナノチューブを塗布した点欠陥型シリコンフォトニック結晶共振器の走 査電子顕微鏡写真。 (b) 試料を波長 940 nm のレーザで励起したときのストークスラマンスペクトル。(c) 試料のストークスラマンスペクトル励起波長依存性。フォトルミネッセンス測定で得られた共振器モードの スペクトルも示す。 (d) G<sup>+</sup>ラマンピーク強度のラマン散乱波長依存性。

#### ナノアンテナに結合したナノワイヤにおける発光増強

小野真証<sup>1,3</sup> 倉持栄一<sup>1,3</sup> Guoqiang Zhang<sup>1</sup> 角倉久史<sup>1,3</sup> 原田裕一<sup>2</sup> David Cox<sup>4</sup> 納富雅也<sup>1,3</sup> <sup>1</sup>量子光物性研究部<sup>2</sup>量子電子物性研究部

<sup>3</sup>NTT ナノフォトニクスセンタ <sup>4</sup>National Physical Laboratory, U.K.

低消費で小型、かつ高速な光デバイスには活性領域の小さな量子ドットやナノワイヤ等のナノ発光体は良い候補である。一方で、そのサイズの小ささから光と効率的に相互作用させることは難しい。そこで、我々は光の回折限界を破るプラズモニクスに注目し、bowtie型のナノアンテナによる光物質相互作用増強の実現を目指して研究を進めてきた。bowtie ナノアンテナのモードは数十 nm の領域に局在しており、ナノ発光体との親和性は高い。しかしながら、その小さな領域へナノ発光体を正確に配置することは困難であり、多くの報告で発光体は単に構造上に分散されているに留まっていた[1]。本研究では、集束イオンビーム装置内に組み込んだナノマニピュレータを駆使することによって単一 InP ナノワイヤを金のbowtie ナノアンテナのギャップ部に配置し、結合系を作製することに成功した[図 1(a)]。さらに、作製した結合系において大きな発光増強を観測した[2]。

ナノアンテナは熱酸化 Si 基板上に作製した。その後、電子顕微鏡観察下でナノマニピュレーションによって単一ナノワイヤをナノアンテナのギャップ部に配置した[図 1(b)]。光学特性は 80 K にてフォトルミネッセンス(PL)測定によって評価した。励起波長は 636 nm とし、発光波長は 875 nm であった。図 2 は PL の強度マップを示しており、ここでは、励起、発光の偏光成分をそれぞれ分解した。*E*<sub>1</sub>(*E*<sub>1</sub>/)はナノアンテナに対して垂直(平行)な偏光である。また、PL 強度(*I*)はナノアンテナから離れた点 R での強度(*I*<sub>R</sub>)で規格化されている。黒破線は励起、検出ともに *E*<sub>1</sub>偏光のときに得られた PL 強度であり、赤実線は *E*<sub>1</sub>/偏光のときのものである。アンテナ位置での *I*/*I*<sub>R</sub> は *E*<sub>1</sub>偏光に対してほぼ 1 であったが、*E*<sub>1</sub>/偏光に対しては 6.1 であった。この結果はナノアンテナによって発光が大きく増強されていることを示している。励起レーザ径がアンテナモードよりも大きいことを考慮すると、アンテナ部での増強度は 110倍に上ることがわかった。得られた増強度は励起と発光の増強が重畳されることによって与えられており、数値解析結果も実験結果と良い一致を示した。さらに数値解析においては、ナノワイヤとナノアンテナの相互作用が増強度をさらに増大させていることを示す結果が得られた。本研究ではサブ波長のナノワイヤをサブ波長のナノギャップへ正確に配置する技術を確立し、プラズモニック構造を有効に活用することで発光増強の実現に成功した。

[1] A. Kinkhabwala et al., Nature Photon. **3**, 654 (2009).

[2] M. Ono et al., 2014 IEEE Photonics Conference, WH2.1 (2014).



図1 (a) 試料構造。(b) 作製試料の SEM 像。ここでは、直径 60 nm、長さ7 µm のナノワイヤを配置した。



図2 PL 強度分布。挿入図は SEM 像であり、アンテナ位置とリファレンス位置を表示。

#### 波長サイズ埋込活性層フォトニック結晶(LEAP)レーザの Si 基板上室温連続発振

武田浩司<sup>2,3</sup> 佐藤具就<sup>2</sup> 藤井拓郎<sup>2,3</sup> 倉持栄一<sup>1,2</sup>

納富雅也<sup>1,2</sup> 長谷部浩一<sup>2,3</sup> 硴塚孝明<sup>2,3</sup> 松尾慎治<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>量子光物性研究部 <sup>2</sup>NTT ナノフォトニクスセンタ <sup>3</sup>NTT 先端集積デバイス研究所

CMOS プロセッサのマルチコア化が進み、CMOS コア間での通信容量向上が求められている。現在の電気配線による通信容量や消費電力の限界を打破するため、様々なオンチップ光インターコネクションの研究が進められている[1]。我々はこのオンチップやチップ間の光通信用光源として、InP 基板を用いて波長サイズ埋込活性層フォトニック結晶(LEAP)レーザを研究してきた[2]。今回 CMOS 集積への第一歩として、LEAPレーザをSi 基板上に形成し室温連続発振を得た結果を報告する。

素子の作製手順は[3]に報告したものと類似している。結晶成長および横方向 pn 接合プロセスは InP 基板上で行い、微小な埋込活性層を形成した。その後 InP 基板上に SiO<sub>2</sub>を成膜し、その表面を化学機械研磨(CMP)によって平坦化した。上記プロセスを経た 2 インチ InPウエハを同径の Si 基板にウエハ接合し、InP 基板側を研磨およびエッチングで除去する ことにより、厚さ 250 nm の III-V 薄膜を Si 基板上に形成した。その後電子線リソグラフィとドライエッチングにより二次元フォトニック結晶を形成し、電極工程を経て素子の完成となる。 試作した素子の模式図を図 1 に示す。

素子に室温において DC 電流を注入し、ウエハ上方から顕微鏡対物レンズおよび光ファ イバで発光した光を評価した。光出力-電流-電圧(L-I-V)特性を図2に示す。我々はSi 基板 上においても LEAP レーザの室温連続発振を実現し、発振しきい値電流 31 µA を得た。こ のしきい値電流は、現時点においてあらゆる Si 基板上半導体レーザの中で最小値となる。 また素子は単一モード発振をしており、発振波長は1501 nm であった。これは LEAP レーザ が InP ウエハ上のみならず Si 基板上でも動作することを示しており、我々は本成果が CMOS チップ上光通信実現に向けた重要な一歩と考えている。

0.3

- [1] D. A. B. Miller, Proc. IEEE 97, 1166 (2009).
- [2] K. Takeda et al., Nature Photon. 7, 569 (2013).
- [3] K. Takeda et al., Opt. Express 22, 702 (2014).



図1 Si 上 LEAP レーザの模式図。

2

Voltage (V)

# 三次元 SiOx 導波路プラットフォームによる モノリシック集積ファイバモード合分波器

開 達郎<sup>1,2</sup> 土澤 泰<sup>1,2</sup> 西 英隆<sup>1,2</sup> 山本 剛<sup>2</sup> 山田浩治<sup>1,2</sup> <sup>1</sup>NTT ナノフォトニクスセンタ<sup>2</sup>NTT 先端集積デバイス研究所

空間多重伝送技術は、マルチモードファイバの各伝搬モード上に光信号を多重することで、周波数利用効率を飛躍的に向上させる技術として期待されている。その伝送系では、 各モードを光学的に合分波するモード合分波器が必要となるが、空間光学型やファイバ型 の素子は集積性、安定性に乏しく、空間多重度増大に伴いネットワークコストを維持すること が困難となる。そこで、本研究では、高集積、低コスト化が容易な三次元 SiOx 導波路プラッ トフォームを用いて作製したオンチップ集積型モード合分波器を報告する。

図 1(a)に3 モード合分波器の概略図を示す。異なる屈折率を有する2 層 SiOx 導波路コ アを用いて三次元導波路構造が構成される。下層、上層コアの屈折率をそれぞれ 1.50、 1.49、層間膜厚を2.0 µm とした場合の電界分布計算結果を図 1(a)中に示す。ファイバ結合 端面(0 mm)では各ファイバモードと素子は低損失に結合し、各コア幅をテーパで変化させ た後(3 mm)は各モード光強度がそれぞれ異なるコアに集中する。各コアを分離し(3.2 mm)、 コア 3、4を多モード干渉計で合波することで(3.7 mm)、LP01、LP11a、LP11b モードはそれ ぞれシングルモード導波路ポート1、3、2 に接続される。本設計の素子サイズは約 0.6 mm<sup>2</sup>、 損失は 2.3 dB 以下、モード間クロストークは-11 dB 以下である。本素子は、200℃以下で広 範囲の屈折率制御が可能な SiOx 膜を用いて作製されることで、導波路積層時の熱ダメージ 低減、および Si プラットフォーム上集積が可能となる [1, 2]。図 1(b)に作製素子における各 ファイバモード光入射に対する出力光 near-field pattern (NFP)の測定結果を示す。概ね計 算結果と整合する NFP を示しており、出力光のモード間クロストークは-6.4 dB 以下であった。 本結果は、三次元 SiOx 導波路モード合分波器の原理動作を示すものであり、今後は作製 プロセス改善による低クロストーク化、および、Si/Ge アクティブ素子との一体集積を目指す。

[1] T. Hiraki et al., Elec. Lett. 51, 74 (2014).
[2] T. Hiraki et al., Proc. in OFC2015 W1A.2 (2015).



図1(a) モード合分波器の概略図および電界分布計算結果。(b) 各ファイバモード入射に対する出力光 near-field pattern (NFP)測定結果。

# Ⅱ. 資料

# 第8回アドバイザリボード

2015年1月26日から28日の3日間、物性科学基礎研究所アドバイザリボードを開催しました。 このボードは、外部の研究者によって研究成果ならびに研究計画を客観的に評価していただき、今後の研究マネジメントに反映させるために設置されました。最初の会議は2001年に開催され、その後は約2年ごとに開催され、今回で第8回目となります。今回の会議では、前回と同様のボードメンバーのうち、9名のメンバーに参加いただきました。

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

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



Board members	Affiliation	Research field
Prof. Abstreiter	Walter Shottky Inst.	低次元半導体物理
Prof. Clarke	Univ. California, Berkeley	超伝導量子干渉デバイス
Prof. Hu	Harvard Univ.	ナノデバイス
Prof. Jonson	Univ. of Gothenburg	低次元系物性理論
Prof. Knight	Imperial College London	量子光学·原子光学理論
Prof. Leggett	Univ. Illinois at Urbana-Champaign	低温物性理論
Prof. MacDonald	The Univ. Texas at Austin	凝縮系物理学理論
Prof. Offenhäusser	Forschungszentrum Jülich	ナノバイオエレクトロニクス
Prof. Rubinsztein-Dunlop	Univ. Queensland	量子エレクトロニクス
Prof. von Klitzing	Max Planck Inst.	半導体量子電子物性

January 26-28, 2015

ONTT

2014年11月21日(金)にNTT厚木研究開発センタにおいて、"未来への扉を開くフロンティアサイエンス"と題した物性科学基礎研究所の公開イベント「サイエンスプラザ2014」を開催いたしました。 本イベントは、研究所の最新の研究成果について内外の方々に広く紹介するとともに、皆様との有意義な議論の場とすることを目的としております。

講堂において行われた講演会の午前の部では、寒川所長による開会の挨拶、物性科学基礎研 究所、デバイスイノベーションセンタ/先端集積デバイス研究所、および、コミュニケーション科学 基礎研究所の各研究企画部長による研究方針と展示ポスターの概要の説明に続き、ナノフォトニ クスセンタの納富雅也上席特別研究員によるシンポジウム講演会「フォトニック結晶による光デバイ スの極限追究」を行いました。午後の部では、香取秀俊先生(東京大学大学院教授/理化学研究 所香取量子計測研究室主任研究員)に「光格子時計が浮き彫りにする相対論的な時空」と題した 特別講演を行って頂きました。講演後には活発な質疑応答もありました。

ポスター展示では、ナノフォトニクスセンタの4件、デバイスイノベーションセンタ/先端集積デバイス研究所の10件、コミュニケーション科学基礎研究所の2件を含め、計38件の最新の研究成果について紹介しました。また今回初めて、共同研究実施機関のポスターの発表も29件行いました。研究の概要から、そのオリジナリティやインパクト、今後の展望を詳しく説明するとともに、研究内容についてかなり突っ込んだ議論も行われました。毎年大変好評の「ラボツアー」については、学生・一般の方を含めできるだけ多くの方に参加して頂けるよう8つのコースを用意致しました。全ての講演・展示・公開を終えた後、夕刻からは社内食堂にて懇親会を行いました。ご来場頂いた方々と親交を深めるとともに、研究内容についての議論も引き続き行われました。

今回、大学等研究機関・一般企業・NTTグループ等から217名の方々にご参加頂き、お陰様を持ちまして、盛況のうちに終了する事が出来ました。ご来場頂きました方々には、心より感謝申し上げます。ポスター展示、ラボツアーの際やアンケートでお寄せ頂きました様々なご意見は次回のサイエンスプラザに活用させて頂きます。



講演日	講演者名	所属 講演タイトル
4月10日	藤井克司 教授	東京大学/理化学研究所
	中村振一郎 特別招聘研究員	人工光合成を使った物質変換
		物質・材料研究機構 国際ナノアーキテクトニクス
4月11日	若山裕博士	研究拠点
		分子によるトンネル電流制御
		iTHES 理化学研究所
4月17日	Dr. Robert Johansson	Entangled-state generation in nanomechanical resonators
		and optomechanical-like coupling in microwave circuits
		CEA Saclay, France
4月22日	久保結丸 博士	Hybrid Quantum Circuit with a Superconducting Qubit
		and an Electron Spin Ensemble
		École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL),
5日8日	武村尚友 氏	Switzerland
5710H	<b>此</b> 们内久	VCSEL の光子相関測定と半導体微小共振器ポラリ
		トンの非線形分光
5月14日	Prof. Alberto Morpurgo	University of Geneva, Switzerland
		Transport through suspended graphene
		École Normale Supérieure, France
6月27日	Prof. Christos Flytzanis	Ultrafast high THz-field photo-driven carrier dynamics
		and transport
7月2日	Prof. Christos Flytzanis	École Normale Supérieure, France
		Nanophononics: a nonlinear battleground par excellence
	早瀬潤子 准教授	慶應義塾大学
7月16日		半導体2準位系集合体を用いた量子インターフェー
		スおよび量子センサー
	Dr. Justin Waugh	University of Colorado at Boulder, U.S.A.
7月17日		Spin-Orbital Texture of Topological Insulators $Bi_2X_3$ (X =
		Se,Te)
		静岡大学
7月28日	天明二郎 名誉教授	ZnO 系混晶の酸素ラジカル MOCVD 成長と光デバイ
		ス(LED/PD/PV)展開
8月4日	須田 亮 教授	東京理科大学
		非共軸光波混合による高次高調波発生

建设口	建定老夕	所属	
·		講演タイトル	
		三重大学	
9月1日	湊元幹太 講師	バキュロウイルス膜融合による巨大組換えプロテオ	
		リポソームの作製	
0 日 4 日	沙川貴大 准教授	東京大学	
<b>7</b> 月 日	伊藤創祐氏	情報と熱力学	
0 8 5 8	山田加大「氏	慶応義塾大学	
9月3日	石國加奈氏	狭線幅光周波数コムを用いたデュアルコム分光	
		Weizmann Institute of Science, Israel	
10月8日	井上博之 博士	Observation of neutral modes in fractional quantum Hall	
		regime	
		Paul Drude Institute for Solid State Electronics, Germany	
10月23日	Dr. Paulo V. Santos	Acoustic control and manipulation of quantum wells	
		excitons	
10日21日	万百 杂 博士	理化学研究所	
10月31日	個原 氏 侍工	Quantum dynamics of magnons in optical lattices	
		The National Enterprise for nanoScience and	
		nanoTechnology, Italy	
10月31日		Exploring the physics of one-dimensional systems by	
		scanning gate microscopy	
		The National Enterprise for nanoScience and	
10日31日	村田祐井 博士	nanoTechnology, Italy	
10 Л Л П	们田加亚一侍工	Correlation between morphology and transport properties	
		of quasi-free-standing monolayer graphene	
		Paul Drude Institute for Solid State Electronics, Germany	
11月10日	Dr. Stefan Fölsch	Generating and probing semiconductor quantum	
		structures with single-atom precision	
		Eidgenössische Technische Hochschule Zürich,	
11月19日	Prof. Klaus Ensslin	Switzerland	
		Non-local transport in InAs-GaSb quantum wells	
11日26日	宇佐見康二 准教授	東京大学	
11 月 20 日	山崎歴舟 助教	Quantum transducers with collective excitations in solid	
11日27日	Prof Barbaros Özwilmaz	National University of Singapore, Singapore	
11月21日	1101. Darbaros Ozyminaz	From Graphene to Phosphorene	

1月8日Dr. Peter S. TurnerUniversity of Bristol, U.K.1月9日望月祐志 教授 福澤 薫 助教立教大学/日本大学 フラグメント分子軌道法と応用事例1月14日碁盤晃久 博士California Institute of Technology, U.S.A.1月14日碁盤晃久 博士1 次元フォトニック結晶における強い光-原子 相互作用1月14日森田 健 准教授ギ導体中の電子スピン制御に向けた 高強度テラヘルツパルス発生1月22日Prof. Silvija GradečakMassachusetts Institute of Technology, U.S.A. Semiconductor neorwing for approx
1月8日Dr. Peter S. TurnerUniversity of Bristol, U.K.1月9日空射祐志教授 室利祐志教授 福澤 薫助教立教大学/日本大学 フラグメント分子軌道法と応用事例1月14日碁盤晃久博士California Institute of Technology, U.S.A.1月14日春田 健 准教授千葉大学 半導体中の電子スピン制御に向けた 高強度テラヘルツパルス発生1月22日Prof. Silvija GradečakMassachusetts Institute of Technology, U.S.A. Semiconductor procession
1月8日Dr. Peter S. TurnerExperimental Demonstration of Quantum Data Compression1月9日望月祐志教授 道澤 薫 助教立教大学/日本大学 フラグメント分子軌道法と応用事例1月14日碁盤晃久 博士California Institute of Technology, U.S.A.1月14日碁盤晃久 博士1次元フォトニック結晶における強い光-原子 相互作用1月14日森田 健 准教授千葉大学1月14日和田 健 准教授半導体中の電子スピン制御に向けた 高強度テラヘルツパルス発生1月22日Prof. Silvija GradečakMassachusetts Institute of Technology, U.S.A. Semiconductor prepruing for anomy and ligations
Compression1月9日望月祐志 教授立教大学/日本大学福澤 薫 助教フラグメント分子軌道法と応用事例1月14日碁盤晃久 博士California Institute of Technology, U.S.A.1月14日碁盤晃久 博士1次元フォトニック結晶における強い光-原子相互作用千葉大学1月14日森田 健 准教授千葉大学1月22日Prof. Silvija GradečakMassachusetts Institute of Technology, U.S.A.2日Prof. Silvija GradečakSomiconductor propusition for operational for operation of the propusition for operational f
1月9日       望月祐志教授       立教大学/日本大学         福澤薫助教       フラグメント分子軌道法と応用事例         1月14日       碁盤晃久博士       California Institute of Technology, U.S.A.         1月14日       碁盤晃久博士       1次元フォトニック結晶における強い光-原子 相互作用         1月14日       森田健准教授       千葉大学         1月14日       森田健准教授       千葉大学         1月22日       Prof. Silvija Gradečak       Massachusetts Institute of Technology, U.S.A.
1月14日福澤 薫 助教フラグメント分子軌道法と応用事例1月14日碁盤晃久 博士California Institute of Technology, U.S.A. 1 次元フォトニック結晶における強い光-原子 相互作用1月14日森田 健 准教授千葉大学1月14日森田 健 准教授半導体中の電子スピン制御に向けた 高強度テラヘルツパルス発生1月22日Prof. Silvija GradečakMassachusetts Institute of Technology, U.S.A. 
1月14日碁盤晃久 博士California Institute of Technology, U.S.A.1月14日碁盤晃久 博士1次元フォトニック結晶における強い光-原子 相互作用1月14日森田 健 准教授千葉大学 半導体中の電子スピン制御に向けた 高強度テラヘルツパルス発生1月22日Prof. Silvija GradečakMassachusetts Institute of Technology, U.S.A. Semiconductor personal for approxy applications
1月14日       碁盤晃久 博士       1次元フォトニック結晶における強い光-原子         相互作用        千葉大学         1月14日       森田 健 准教授       千葉大学         1月22日       Prof. Silvija Gradečak       Massachusetts Institute of Technology, U.S.A.         Semiconductor penewing for approximations       Semiconductor penewing for approximations
相互作用       1月14日 森田健准教授       千葉大学       1月22日       Prof. Silvija Gradečak       Massachusetts Institute of Technology, U.S.A.       Semiconductor penewing for approximations
1月14日森田健准教授千葉大学 半導体中の電子スピン制御に向けた 高強度テラヘルツパルス発生1月22日Prof. Silvija GradečakMassachusetts Institute of Technology, U.S.A. Semiconductor personal conductor perso
1月14日       森田健准教授       半導体中の電子スピン制御に向けた         高強度テラヘルツパルス発生       高強度テラヘルツパルス発生         1月22日       Prof. Silvija Gradečak       Massachusetts Institute of Technology, U.S.A.         Semiconductor penewires for approximation on listications       Semiconductor penewires for approximations
高強度テラヘルツパルス発生       1月22日     Prof. Silvija Gradečak       Massachusetts Institute of Technology, U.S.A.       Semiconductor popowizes for operations
1月22日 Prof. Silvija Gradečak Massachusetts Institute of Technology, U.S.A.
1月22日 Prof. Silvija Gradecak Semiconductor popowires for operational applications
Semiconductor nanowires for energy applications
MicroLink Devices, U.S.A.
1月22日 Dr. Rao Tatavarti Large Area Inverted Metamorphic (IMM)
ELO Solar Cells
Imperial College London, U.K.
3月2日 Mr. Samuele Grandi Waveguide coupling of single photons from a solid state
emitter: from room temperature to cryogenic condition
University of Science and Technology of China, China
3 月 10 日 Prof. Qiang Zhang Quantum Key Distribution with Realistic Devices
(独)日本原子力研究開発機構
真空紫外領域における超高速ダイナミクス研究の展
3月11日 板倉隆二 博士 開:強励起固体表面の時間分解反射スペクトル測定
と超高速イオン化した原子のコヒーレンスに関する
考察
University of Leeds, U.K.
3月17日 Dr. Nicolò Lo Piparo Long-distance quantum key distribution with imperfect
devices

# 社外表彰受賞者一覧

表彰名	受賞者名	受賞題目	受賞年月日
平成 26 年度科学技術分野 の文部科学大臣表彰 若手科学者賞	岡本創	量子ナノメカニカルセンシング 技術の研究	2014.4.15
Conference on LED and Its Industrial Application (LEDIA '14) Young Researcher's Paper Award	Ryan G. Banal	Nonpolar M-Plane AlGaN Deep-UV LEDs	2014.4.24
Multidisciplinary Digital Publishing Institute Entropy Best Paper Award 2014	Katherine L. Brown William J. Munro Vivien M. Kendon	Using Quantum Computers for Quantum Simulation	2014.4.30
 分光イノベーション賞	上野祐子	NTT での研究を通じた 分光学の産業上の有用性の実証	2014.5.29
Fellowship of the Optical Society of America (OSA)	William J. Munro	Research in Quantum Optics and Quantum Information Processing.	2014.10.27
Award for Encouragement of Research in International Union of Materials Research Societies, International Conference in Asia (IUMRS-ICA)	平間一行	Nitride/diamond heterostructure systems - from growth to devices -	2014.10.31
Research Institute of Electrical Communication RIEC Award	眞田治樹	スピン軌道相互作用を利用した 電子スピン共鳴	2014.11.28
電子情報通信学会 エレク トロニクスソサイエティ レーザ量子エレクトロニク ス研究会 奨励賞	野崎謙悟	微小な埋込みヘテロ構造をもつ フォトニック結晶導波路型 InGaAs 光ディテクタの検討	2014.12.19
応用物理学会 講演奨励賞	稻垣卓弘	KTN 結晶の電界誘起相転移を 用いた低電圧駆動の光位相変調	2015.3.11

# 社内表彰受賞者一覧

表彰名	受賞者名	受賞題目	受賞年月日
先端技術総合研究所 所長表彰 研究開発賞	山端元音 西口克彦 藤原 聡	単電子操作・検出を用いた高精度・ 高感度エレクトロニクスの研究	2014.12.5
先端技術総合研究所 所長表彰 報道特別賞	藤井 季 治 小 瀬 小 塚 田 島 西 西 天 明 二 ( 大 野 町 二 ( 二 ( 二 ( 二)) ( 二) ( 二) ( 二) ( 二) (	着るだけで生体情報の連続計測を 可能とする機能素材"hitoe"の開発 及び実用化について	2014.12.5
物性科学基礎研究所 所長表彰 業績賞	畑中大樹 Imran Mahboob 小野満恒二 山口浩司	化合物半導体を用いた 動的フォノニック結晶の提案と実証	2015.3.27
物性科学基礎研究所 所長表彰 業績賞	Trevor David Rhone Lars Tiemann Gerardo Gamez 村木康二	高移動度2次元電子系における 強相関電子状態の実現とその物性解明	2015.3.27
物性科学基礎研究所 所長表彰 論文賞	登坂仁一郎 西口克彦 藤原 聡	"Electric tuning of direct-indirect optical transitions in silicon" Scientific Reports <b>4</b> , 6950 (2014)	2015.3.27
物性科学基礎研究所 所長表彰 環境貢献論文賞	谷保芳孝	"An aluminium nitride light-emitting diode with a wavelength of 210 nanometres" Nature <b>441</b> , 325 (2006)	2015.3.27
物性科学基礎研究所 所長表彰 功労賞	太田<	~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	2015.3.27
物性科学基礎研究所 所長表彰 奨励賞	角倉久史	シリコン中の銅不純物における 巨大な Cavity QED 効果の実現	2015.3.27

報道一覧

掲載月日	掲載紙	見出し
4月9日	日経産業新聞	超高速演算のコンピューターに道 NTT など 量子もつれ 新状態
4月9日	日刊工業新聞	量子コンピューター性能向上 NTT など 寿命 7.5 倍の現象解明
4月14日	通信興業新聞	<b>NTT</b> など 「量子コンピュータ」に新発見 実用化への関門突破?
4月25日	科学新聞	量子コンピューター実現期待 長寿命量子メモリ構築へ 新しいアプローチを発見 NTT、NII、阪大チームが成果 世界初 「ダーク状態」発現メカニズム解明
5月26日	日刊工業新聞	NTT、光メモリー開発 10 年後めど実用化 100 ビット超の集積型
5月27日	日本経済新聞	光メモリー 消費電力 1/100 NTT 電気信号に変換不要
6月6日	科学新聞	100 ビット超の集積型光メモリ NTT が世界で初めて実現 情報通信の消費電力激増を根本的に解消
6月11日	日本経済新聞	孫の鼓動スマホで聞ける NTT 西 表情なども同時に表示
6月11日	毎日新聞	大塚愛さんが心音を楽曲に NTT 西が企画
6月11日	日経産業新聞	NTT 西、1 万人の心音で曲作り
6月11日	産経新聞	1万人の心音集め大塚愛さんが楽曲 NTT 西
6月11日	フジサンケイビジネスアイ	NTT 西×大塚愛さん 1万人の心音集めて楽曲に
6月11日	日刊工業新聞	NTT 西がプロジェクト 1万人の「心音」 楽曲に♪ (ハート)
6月16日	日刊工業新聞	NTT 弾性振動を電気制御 MEMS 技術利用 フォノニック結晶作製
6月17日	日経産業新聞	NTT 固体材料の振動制御 電子素子 部分冷却で省エネヘ
6月17日	朝日新聞	心音集めて作曲 NTT 西が企画 大塚愛さん参加
6月20日	科学新聞	スマート光ハートビートプロジェクト NTT 西日本が展開 1万人の気持ち『心音』で体感 大塚愛さんがオリジナル曲制作
6月23日	フジサンケイビジネスアイ	NTT 世界初 100 ビット超の光 RAM 開発 情報通信の大幅省エネ可能に
6月30日	日刊工業新聞	誤差、原子1個未満 NTT が半導体量子ドット
7月1日	日本経済新聞	配線幅、原子1個分 NTT など LSI 集積度 1000 倍も

掲載月日	掲載紙	見出し
7月14日	日経産業新聞	温度差で半導体駆動 東大、実用化へ フォノン制御 発電に活用
7月21日	日刊工業新聞	世界初 電子の結晶化観測 NTT と JST が成功 高純度半導体使用 新しい物性開拓 期待
7月23日	日経産業新聞	電子 結晶状に並べる NTT など 半導体 特性評価に応用
7月28日	通信興業新聞	NTT 半導体量子ドット作成 「究極の精度」に成功
7月28日	通信興業新聞	NTT 研究所 微細化技術を推進 電子結晶をミクロ観測
7月28日	電経新聞	NTT と JST がウィグナー結晶を明らかに NMR で電子の結 晶化を観測
10月6日	電経新聞	『hitoe』を活用し『Runtastic for docomo』 究極のウェアラ ブルサービス着るだけで身体データなどを測定。 NTT ドコモが 12 月から提供
10月7日	日本経済新聞	NTT 物性科学基礎研究所 LSI 消費電力 100 分の 1 以下
10月7日	日刊工業新聞	NTT 単電子転送 高速化 トラップ準位利用
10月7日	日経産業新聞	NTT が新技術 シリコン LSI 電力 1/100
12月15日	通信工業新聞	スマホでトレーニングをサポート NTT ドコモが新サービス提供 着衣型のウェアラブル 「hitoe」と連動
12月17日	日刊工業新聞	NTT と東京理科大 内殻電子観測に成功 アト秒パルス使用
12月18日	日経産業新聞	NTT 研、コンピューター基礎技術 演算速度 1000 倍に 原子にレーザー 電子の動き利用
12月19日	日本経済新聞	着るだけで心拍数測定 ゴールドウインがウエア 胸に端末、スマホで確認
12月19日	朝日新聞	心拍数測れるスポーツ着
1月11日	産経新聞	「着る端末」心拍数を計測 NTT グループ・東レ「hitoe(ヒトエ)」
1月12日	フジサンケイビジネスアイ	着るだけで心拍数計れる機能素材NTT、東レと共同開発「hitoe」
1月29日	朝日新聞	NTT と東京理科大 電子の動き 閃光で観測
3月24日	日本経済新聞	ピンクダイヤで生体分子解明へ
3月24日	日刊工業新聞	量子センサー感度10倍 NTTなど ダイヤ中の電子スピン利用

# 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年度)

2013 年度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118件、国際会議の発表件数は283件です。また、出願特許数は61件になります。 以下に研究組織別の件数を記します。







# 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(2014年度)

2014 年度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103件、国際会議の発表件数は171件です。また、出願特許数は61件になります。 以下に研究組織別の件数を記します。







## 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	IF2013 <sup>*</sup>	件数
Physical Review B	3.664	10
Japanese Journal of Applied Physics	1.057	9
Optics Express	3.525	7
Applied Physics Letters	3.515	7
Physical Review A	2.991	7
Applied Physics Express	2.567	6
Nature Communications	10.742	4
Journal of Crystal Growth	1.693	4
Physical Review Letters	7.728	3
Scientific Reports	5.078	3
Optics Letters	3.179	3
Nature Nanotechnology	33.265	2
Nature Photonics	29.958	2
Nanotechnology	3.672	2
New Journal of Physics	3.671	2
Journal of Lightwave Technology	2.862	2
Journal of Applied Physics	2.185	2
Journal of the Physical Society of Japan	1.475	2
Nature Physics	20.603	1
Nano Letters	12.940	1
ACS Nano	12.033	1
Chemistry of Materials	8.535	1
Physical Review X	8.463	1
Nanoscale	6.739	1
Analytica Chimica Acta	4.517	1

\*IF2013:インパクトファクター2013 研究所全体では、1 論文当たりの平均 IF は 4.927 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
The Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO 2014)	13
The 7th International Symposium on Surface Science (ISSS-7)	12
2014 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2014)	9
APS March Meeting 2015	9
27th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2014)	7
The International Symposium on Compound Semiconductors (ISCS 2014)	5
32nd International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS)	4
International Union of Materials Research Societies (IUMRS-ICA 2014)	4
## 学術論文出版一覧

- (1) T. Akasaka and H. Yamamoto, "Nucleus and Spiral Growth Mechanisms of Nitride Semiconductors in Metalorganic Vapor Phase Epitaxy", Jpn. J. Appl. Phys. **53**, 100201 (2014).
- H. Akazawa and Y. Ueno, "Low-Temperature Crystallization and High-Temperature Instability of Hydroxyapatite Thin Films Deposited on Ru, Ti, and Pt Metal Substrates", Surf. Coatings Technol. 266, 42-48 (2015).
- (3) M. Anagnosti, H. Omi, and T. Tawara, "Simultaneous Light Emissions from Erbium-Thulium Silicates and Oxides on Silicon in the Second and Third Telecommunications Bands", Opt. Mater. Express 4, 1747-1755 (2014).
- (4) R. Asaoka, H. Tsuchiura, M. Yamashita, and Y. Toga, "Density Modulations Associated with the Dynamical Instability in the Bose-Hubbard Model", J. Phys. Soc. Jpn. **83**, 124001 (2014).
- (5) R. G. Banal, Y. Taniyasu, and H. Yamamoto, "Deep-Ultraviolet Light Emission Properties of Nonpolar M-Plane AlGaN Quantum Wells", Appl. Phys. Lett. **105**, 053104 (2014).
- (6) M. D. Birowosuto, G. Zhang, A. Yokoo, M. Takiguchi, and M. Notomi, "Spontaneous Emission Inhibition of Telecom-Band Quantum Disks Inside Single Nanowire on Different Substrates", Opt. Express 22, 11713-11726 (2014).
- (7) T. Byrnes, D. Rosseau, M. Khosla, A. Pyrkov, A. Thomasen, T. Mukai, S. Koyama, A. Abdelrahman, and E. Ilo-Okeke, "Macroscopic Quantum Information Processing Using Spin Coherent States", Opt. Commun. 337, 102-109 (2015).
- (8) M. Curty, F. H. Xu, W. Cui, C. C. W. Lim, K. Tamaki, and H. K. Lo, "Finite-Key Analysis for Measurement-Device-Independent Quantum Key Distribution", Nature Commun. 5, 3732 (2014).
- (9) J. Dai, R. Kometani, K. Onomitsu, Y. Krockenberger, H. Yamaguchi, S. Ishihara, and S. Warisawa, "Direct Fabrication of a W-C SNS Josephson Junction Using Focused-Ion-Beam Chemical Vapour Deposition", J. Micromech. Microeng. 24, 055015 (2014).
- (10) M. S. Everitt, S. Devitt, W. J. Munro, and K. Nemoto, "High-Fidelity Gate Operations with the Coupled Nuclear and Electron Spins of a Nitrogen-Vacancy Center in Diamond", Phys. Rev. A 89, 052317 (2014).
- (11) S. Fölsch, J. Martinez-Blanco, J. S. Yang, K. Kanisawa, and S. C. Erwin, "Quantum Dots with Single-Atom Precision", Nature Nanotechnol. 9, 505-508 (2014).
- (12) A. Fushimi, H. Taniyama, E. Kuramochi, M. Notomi, and T. Tanabe, "Fast Calculation of the Quality Factor for Two-Dimensional Photonic Crystal Slab Nanocavities", Opt. Express 22, 23349-23359 (2014).
- (13) T. Goto, Y. Harada, D. Cox, and K. Sumitomo, "Fabrication of a Ring Structure at the Aperture of a Hole for the Efficient Suspension of a Lipid Bilayer", Jpn. J. Appl. Phys. 53, 096503 (2014).
- (14) H. Gotoh, H. Sanada, H. Yamaguchi, and T. Sogawa, "Nonlinear Optical Spectra Having Characteristics of Fano Interferences in Coherently Coupled Lowest Exciton Biexciton States in Semiconductor Quantum Dots", AIP Adv. 4, 107124 (2014).

- (15) H. A. Hafez, I. Al-Naib, K. Oguri, Y. Sekine, M. M. Dignam, A. Ibrahim, D. G. Cooke, S. Tanaka, F. Komori, H. Hibino, and T. Ozaki, "Nonlinear Transmission of an Intense Terahertz Field Through Monolayer Graphene", AIP Adv. 4, 117118 (2014).
- (16) H. A. Hafez, I. Al-Naib, M. M. Dignam, Y. Sekine, K. Oguri, F. Blanchard, D. G. Cooke, S. Tanaka, F. Komori, H. Hibino, and T. Ozaki, "Nonlinear Terahertz Field-Induced Carrier Dynamics in Photoexcited Epitaxial Monolayer Graphene", Phys. Rev. B 91, 035422 (2015).
- (17) K. Hasebe, T. Sato, K. Takeda, T. Fujii, T. Kakitsuka, and S. Matsuo, "High-Speed Modulation of Lateral p-i-n Diode Structure Electro-Absorption Modulator Integrated with DFB Laser", J. Lightwave Technol. 33, 1235-1240 (2015).
- (18) M. Hashisaka, T. Ota, M. Yamagishi, T. Fujisawa, and K. Muraki, "Cross-Correlation Measurement of Quantum Shot Noise Using Homemade Transimpedance Amplifiers", Rev. Sci. Instrum. 85, 054704 (2014).
- (19) M. Hashisaka, T. Ota, K. Muraki, and T. Fujisawa, "Shot-Noise Evidence of Fractional Quasiparticle Creation in a Local Fractional Quantum Hall State", Phys. Rev. Lett. **114**, 056802 (2015).
- (20) D. Hatanaka, I. Mahboob, K. Onomitsu, and H. Yamaguchi, "Phonon Waveguides for Electromechanical Circuits", Nature Nanotechnol. 9, 520-524 (2014).
- (21) D. Hatanaka, I. Mahboob, K. Onomitsu, and H. Yamaguchi, "Mechanical Random Access Memory in a Phonon Circuit", Appl. Phys. Express 7, 125201 (2014).
- (22) T. Hiraki, T. Tsuchizawa, H. Nishi, T. Yamamoto, and K. Yamada, "Low-Loss and Polarisation-Insensitive Interlayer Coupler on Three-Dimensional SiO<sub>x</sub>-Waveguide Platform", Electron. Lett. **51**, 74-76 (2015).
- (23) T. Hiraki, H. Fukuda, K. Yamada, and T. Yamamoto, "Small Sensitivity to Temperature Variations of Si-Photonic Mach-Zehnder Interferometer Using Si and SiN Waveguides", Front. Mater. **2**, 26 (2015).
- (24) M. Hiroki, K. Kumakura, Y. Kobayashi, T. Akasaka, T. Makimoto, and H. Yamamoto, "Suppression of Self-Heating Effect in AlGaN/GaN High Electron Mobility Transistors by Substrate-Transfer Technology Using h-BN", Appl. Phys. Lett. 105, 193509 (2014).
- (25) T. Hoshi, N. Kashio, H. Sugiyama, H. Yokoyama, K. Kurishima, M. Ida, H. Matsuzaki, and H. Gotoh, "A Simple Method for Forming Compositionally Graded In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As<sub>1-y</sub>Sb<sub>y</sub> Base of Double-Heterojunction Bipolar Transistors Modulating CBr<sub>4</sub>-Doping-Precursor Flow in Metalorganic Chemical Vapor Deposition", Appl. Phys. Express 7, 114102 (2014).
- (26) T. Hoshi, N. Kashio, H. Sugiyama, H. Yokoyama, K. Kurishima, M. Ida, H. Matsuzaki, M. Kohtoku, and H. Gotoh, "MOCVD-Grown Compressively Strained C-Doped In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As<sub>1-y</sub>Sb<sub>y</sub> with High-In/Sb Content for Very Low Turn-on-Voltage InP-Based DHBTs", J. Cryst. Growth **404**, 172-176 (2014).
- (27) H. Imai, K. Inaba, H. Tanji-Suzuki, M. Yamashita, and T. Mukai, "Bose-Einstein Condensate on a Persistent-Supercurrent Atom Chip", Appl. Phys. B **116**, 821-829 (2014).
- (28) R. Inoue, H. Takayanagi, T. Akazaki, K. Tanaka, H. Sasakura, and I. Suemune, "Carrier Flow and Nonequilibrium Superconductivity in Superconductor-Based LEDs", Appl. Phys. Express 7, 073101 (2014).

- (29) H. Irie, Y. Harada, H. Sugiyama, and T. Akazaki, "Josephson Coupling Through One-Dimensional Ballistic Channel in Semiconductor-Superconductor Hybrid Quantum Point Contacts", Phys. Rev. B 89, 165415 (2014).
- (30) T. Ito, H. Gotoh, M. Ichida, and H. Ando, "Evaluation of Hole-Spin Superposition in GaAs/AlGaAs Quantum Wells Through Time-Resolved Photoluminescence Measurements", Appl. Phys. Lett. 104, 252406 (2014).
- (31) J. R. Johansson, N. Lambert, I. Mahboob, H. Yamaguchi, and F. Nori, "Entangled-State Generation and Bell Inequality Violations in Nanomechanical Resonators", Phys. Rev. B **90**, 174307 (2014).
- (32) K. Kanisawa, "Electronic Processes in Adatom Dynamics at Epitaxial Semiconductor Surfaces Studied Using MBE-STM Combined System", J. Cryst. Growth **401**, 381-387 (2014).
- (33) N. Kasai, R. Lu, T. Goto, A. Tanaka, S. Tsukada, Y. Harada, and K. Sumitomo, "Observation of Neuronal Death in Vitro by SEM and Optical Microscopy", e-J. Surf. Sci. Nanotech. 12, 179-184 (2014).
- (34) Y. Kashimura, K. Sumitomo, and K. Furukawa, "Electrostatic Control of the Dynamics of Lipid Bilayer Self-Spreading Using a Nanogap Gate", Mater. Res. Express 1, 035404 (2014).
- (35) P. A. Knott, W. J. Munro, and J. A. Dunningham, "Attaining Subclassical Metrology in Lossy Systems with Entangled Coherent States", Phys. Rev. A **89**, 053812 (2014).
- (36) P. A. Knott, T. J. Proctor, K. Nemoto, J. A. Dunningham, and W. J. Munro, "Effect of Multimode Entanglement on Lossy Optical Quantum Metrology", Phys. Rev. A **90**, 033846 (2014).
- (37) K. M. Kojima, Y. Krockenberger, I. Yamauchi, M. Miyazaki, M. Hiraishi, A. Koda, R. Kadono, R. Kumai, H. Yamamoto, A. Ikeda, and M. Naito, "Bulk Superconductivity in Undoped T'-La<sub>1.9</sub>Y<sub>0.1</sub>CuO<sub>4</sub> Probed by Muon Spin Rotation", Phys. Rev. B **89**, 180508 (2014).
- (38) R. Kou, Y. Kobayashi, K. Warabi, H. Nishi, T. Tsuchizawa, T. Yamamoto, H. Nakajima, and K. Yamada, "Efficient-and Broadband-Coupled Selective Spot-Size Converters with Damage-Free Graphene Integration Process", IEEE Photon. J. 6, 6600409 (2014).
- (39) Y. Krockenberger, B. Eleazer, H. Irie, and H. Yamamoto, "Superconducting- and Insulating-Ground States in La<sub>2</sub>CuO<sub>4</sub> Structural Isomers", J. Phys. Soc. Jpn. **83**, 114602 (2014).
- (40) Y. Krockenberger, H. Irie, J. Yan, L. Waterston, B. Eleazer, K. Sakuma, and H. Yamamoto, "Superconductivity in Cuprates with Square-Planar Coordinated Copper Driven by Hole Carriers", Appl. Phys. Express 7, 063101 (2014).
- (41) N. Kumada, R. Dubourget, K. Sasaki, S. Tanabe, H. Hibino, H. Kamata, M. Hashisaka, K. Muraki, and T. Fujisawa, "Plasmon Transport and Its Guiding in Graphene", New J. Phys. **16**, 063055 (2014).
- (42) N. Kumada, P. Roulleau, B. Roche, M. Hashisaka, H. Hibino, I. Petkovic, and D. C. Glattli, "Resonant Edge Magnetoplasmons and Their Decay in Graphene", Phys. Rev. Lett. **113**, 266601 (2014).
- (43) E. Kuramochi, E. Grossman, K. Nozaki, K. Takeda, A. Shinya, H. Taniyama, and M. Notomi, "Systematic Hole-Shifting of L-Type Nanocavity with an Ultrahigh Q Factor", Opt. Lett. 39, 5780-5783 (2014).

- (44) E. Kuramochi, K. Nozaki, A. Shinya, K. Takeda, T. Sato, S. Matsuo, H. Taniyama, H. Sumikura, and M. Notomi, "Large-Scale Integration of Wavelength-Addressable All-Optical Memories on a Photonic Crystal Chip", Nature Photon. 8, 474-481 (2014).
- (45) C. H. Lin, T. Akasaka, and H. Yamamoto, "N-Face GaN(0001) Films Grown by Group-III-Source Flow-Rate Modulation Epitaxy", Jpn. J. Appl. Phys. **53**, 11RC01 (2014).
- (46) H. K. Lo, M. Curty, and K. Tamaki, "Secure Quantum Key Distribution", Nature Photon. **8**, 595-604 (2014).
- (47) I. Mahboob, H. Okamoto, K. Onomitsu, and H. Yamaguchi, "Two-Mode Thermal-Noise Squeezing in an Electromechanical Resonator", Phys. Rev. Lett. **113**, 167203 (2014).
- (48) S. Mamyouda, H. Ito, Y. Shibata, S. Kashiwaya, M. Yamaguchi, T. Akazaki, H. Tamura, Y. Ootuka, and S. Nomura, "Circularly Polarized Near-Field Optical Mapping of Spin-Resolved Quantum Hall Chiral Edge States", Nano Lett. 15, 2417-2421 (2015).
- (49) H. Mashiko, T. Yamaguchi, K. Oguri, A. Suda, and H. Gotoh, "Characterizing Inner-Shell with Spectral Phase Interferometry for Direct Electric-Field Reconstruction", Nature Commun. 5, 5599 (2014).
- (50) N. Matsuda, P. Karkus, H. Nishi, T. Tsuchizawa, W. J. Munro, H. Takesue, and K. Yamada, "On-Chip Generation and Demultiplexing of Quantum Correlated Photons Using a Silicon-Silica Monolithic Photonic Integration Platform", Opt. Express 22, 22831-22840 (2014).
- (51) N. Matsuda, E. Kuramochi, H. Takesue, and M. Notomi, "Dispersion and Light Transport Characteristics of Large-Scale Photonic-Crystal Coupled Nanocavity Arrays", Opt. Lett. 39, 2290-2293 (2014).
- (52) S. Matsuo, T. Fujii, K. Hasebe, K. Takeda, T. Sato, and T. Kakitsuka, "Directly Modulated DFB Laser on SiO<sub>2</sub>/Si Substrate for Datacenter Networks", J. Lightwave Technol. **33**, 1217-1222 (2015).
- (53) A. Mizutani, K. Tamaki, R. Ikuta, T. Yamamoto, and N. Imoto, "Measurement-Device-Independent Quantum Key Distribution for Scarani-Acin-Ribordy-Gisin 04 Protocol", Sci. Rep. 4, 5236 (2014).
- (54) Y. Momiuchi, K. Yamada, H. Kato, Y. Homma, H. Hibino, G. Odahara, and C. Oshima, "In Situ Scanning Electron Microscopy of Graphene Nucleation During Segregation of Carbon on Polycrystalline Ni Substrate", J. Phys. D 47, 455301 (2014).
- (55) Y. Murata, T. Mashoff, M. Takamura, S. Tanabe, H. Hibino, F. Beltram, and S. Heun, "Correlation between Morphology and Transport Properties of Quasi-Free-Standing Monolayer Graphene", Appl. Phys. Lett. 105, 221604 (2014).
- (56) M. Naito, K. Uehara, R. Takeda, Y. Taniyasu, and H. Yamamoto, "Growth of Iron Nitride Thin Films by Molecular Beam Epitaxy", J. Cryst. Growth **415**, 36-40 (2015).
- (57) A. Najar, H. Omi, and T. Tawara, "Scandium Effect on the Luminescence of Er-Sc Silicates Prepared from Multi-Nanolayer Films", Nanoscale Res. Lett. **9**, 356 (2014).
- (58) A. Najar, H. Omi, and T. Tawara, "Effect of Structure and Composition on Optical Properties of Er-Sc Silicates Prepared from Multi-Nanolayer Films", Opt. Express 23, 7021-7030 (2015).

- (59) K. Nemoto, M. Trupke, S. J. Devitt, A. M. Stephens, B. Scharfenberger, K. Buczak, T. Nobauer, M. S. Everitt, J. Schmiedmayer, and W. J. Munro, "Photonic Architecture for Scalable Quantum Information Processing in Diamond", Phys. Rev. X 4, 031022 (2014).
- (60) K. Nishiguchi, Y. Ono, and A. Fujiwara, "Single-Electron Thermal Noise", Nanotechnology 25, 275201 (2014).
- (61) J. Noborisaka, K. Nishiguchi, and A. Fujiwara, "Electric Tuning of Direct-Indirect Optical Transitions in Silicon", Sci. Rep. 4, 6950 (2014).
- (62) K. Noda, K. Inaba, and M. Yamashita, "Flat-Band Ferromagnetism in the Multilayer Lieb Optical Lattice", Phys. Rev. A **90**, 043624 (2014).
- (63) K. Nozaki, E. Kuramochi, A. Shinya, and M. Notomi, "25-Channel All-Optical Gate Switches Realized by Integrating Silicon Photonic Crystal Nanocavities", Opt. Express **22**, 14263-14274 (2014).
- (64) K. Oguri, T. Tsunoi, K. Kato, H. Nakano, T. Nishikawa, K. Tateno, T. Sogawa, and H. Gotoh, "Dynamical Observation of Photo-Dember Effect on Semi-Insulating GaAs Using Femtosecond Core-Level Photoelectron Spectroscopy", Appl. Phys. Express 8, 022401 (2015).
- (65) M. Okada, T. Sawazaki, K. Watanabe, T. Taniguchi, H. Hibino, H. Shinohara, and R. Kitaura, "Direct Chemical Vapor Deposition Growth of WS<sub>2</sub> Atomic Layers on Hexagonal Boron Nitride", ACS Nano 8, 8273-8277 (2014).
- (66) H. Okamoto, W. Izumida, Y. Hirayama, H. Yamaguchi, A. Riedel, and K. J. Friedland, "Mechanical Resonance Characteristics of a Cylindrical Semiconductor Heterostructure Containing a High-Mobility Two-Dimensional Electron Gas", Phys. Rev. B 89, 245304 (2014).
- (67) H. Okamoto, I. Mahboob, K. Onomitsu, and H. Yamaguchi, "Rapid Switching in High-Q Mechanical Resonators", Appl. Phys. Lett. **105**, 083114 (2014).
- (68) H. Okamoto, S. Suzuki, H. Narita, T. Tawara, K. Tateno, and H. Gotoh, "Deep-Level Transient Spectroscopy Characterization of In(Ga)As Quantum Dots Fabricated Using Bi as a Surfactant", Jpn. J. Appl. Phys. 53, 06JG11 (2014).
- (69) C. M. Orofeo, S. Suzuki, Y. Sekine, and H. Hibino, "Scalable Synthesis of Layer-Controlled WS<sub>2</sub> and MoS<sub>2</sub> Sheets by Sulfurization of Thin Metal Films", Appl. Phys. Lett. **105**, 083112 (2014).
- (70) P. P. Rohde, K. R. Motes, P. A. Knott, J. Fitzsimons, W. J. Munro, and J. P. Dowling, "Evidence for the Conjecture that Sampling Generalized Cat States with Linear Optics Is Hard", Phys. Rev. A 91, 012342 (2015).
- (71) O. Ryong-Sok, M. Takamura, K. Furukawa, M. Nagase, and H. Hibino, "Effects of UV Light Intensity on Electrochemical Wet Etching of SiC for the Fabrication of Suspended Graphene", Jpn. J. Appl. Phys. 54, 036502 (2015).
- (72) S. Sakuragi, T. Sakai, S. Urata, S. Aihara, A. Shinto, H. Kageshima, M. Sawada, H. Namatame, M. Taniguchi, and T. Sato, "Thickness-Dependent Appearance of Ferromagnetism in Pd(100) Ultrathin Films", Phys. Rev. B 90, 054411 (2014).
- (73) K. Sasaki, H. Gotoh, and Y. Tokura, "Valley-Antisymmetric Potential in Graphene Under Dynamical Deformation", Phys. Rev. B 90, 205402 (2014).

- K. Sasaki and N. Kumada, "Effects of Screening on the Propagation of Graphene Surface Plasmons", Phys. Rev. B 90, 035449 (2014).
- (75) S. Sasaki, K. Tateno, G. Zhang, H. Pigot, Y. Harada, S. Saito, A. Fujiwara, T. Sogawa, and K. Muraki, "Self-Aligned Gate-All-Around InAs/InP Core-Shell Nanowire Field-Effect Transistors", Jpn. J. Appl. Phys. 54, 04DN04 (2015).
- (76) B. Scharfenberger, W. J. Munro, and K. Nemoto, "Coherent Control of an NV<sup>-</sup> Center with One Adjacent <sup>13</sup>C", New J. Phys. 16, 093043 (2014).
- (77) A. Shakoor, K. Nozaki, E. Kuramochi, K. Nishiguchi, A. Shinya, and M. Notomi, "Compact 1D-Silicon Photonic Crystal Electro-Optic Modulator Operating with Ultra-Low Switching Voltage and Energy", Opt. Express 22, 28623-28634 (2014).
- H. Shibata, "Fabrication of a MgB<sub>2</sub> Nanowire Single-Photon Detector Using Br<sub>2</sub>-N<sub>2</sub> Dry Etching", Appl. Phys. Express 7, 103101 (2014).
- (79) H. Shibata, T. Honjo, and K. Shimizu, "Quantum Key Distribution over a 72 dB Channel Loss Using Ultralow Dark Count Superconducting Single-Photon Detectors", Opt. Lett. **39**, 5078-5081 (2014).
- (80) H. Sumikura, E. Kuramochi, H. Taniyama, and M. Notomi, "Ultrafast Spontaneous Emission of Copper-Doped Silicon Enhanced by an Optical Nanocavity", Sci. Rep. 4, 5040 (2014).
- (81) M. Takamura, H. Okamoto, K. Furukawa, H. Yamaguchi, and H. Hibino, "Energy Dissipation in Edged and Edgeless Graphene Mechanical Resonators", J. Appl. Phys. 116, 064304 (2014).
- (82) K. Takeda, T. Hiraki, T. Tsuchizawa, H. Nishi, R. Kou, H. Fukuda, T. Yamamoto, Y. Ishikawa, K. Wada, and K. Yamada, "Contributions of Franz-Keldysh and Avalanche Effects to Responsivity of a Germanium Waveguide Photodiode in the L-Band", IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 20, 3800507 (2014).
- (83) K. Takeda, T. Sato, T. Fujii, E. Kuramochi, M. Notomi, K. Hasebe, T. Kakitsuka, and S. Matsuo, "Heterogeneously Integrated Photonic-Crystal Lasers on Silicon for On/Off Chip Optical Interconnects", Opt. Express 23, 702-708 (2015).
- (84) H. Takesue, "Entangling Time-Bin Qubits with a Switch", Phys. Rev. A 89, 062328 (2014).
- (85) K. Tamaki, M. Curty, G. Kato, H. K. Lo, and K. Azuma, "Loss-Tolerant Quantum Cryptography with Imperfect Sources", Phys. Rev. A **90**, 052314 (2014).
- (86) S. Tanabe, K. Furukawa, and H. Hibino, "Etchant-Free and Damageless Transfer of Monolayer and Bilayer Graphene Grown on SiC", Jpn. J. Appl. Phys. **53**, 115101 (2014).
- (87) S. Tanabe, M. Takamura, Y. Harada, H. Kageshima, and H. Hibino, "Effects of Hydrogen Intercalation on Transport Properties of Quasi-Free-Standing Monolayer Graphene", Jpn. J. Appl. Phys. 53, 04EN01 (2014).
- (88) K. Tateno, G. Q. Zhang, and H. Gotoh, "Etching Effect of Tertiary-Butyl Chloride During InP-Nanowire Growth", J. Cryst. Growth **402**, 299-303 (2014).
- (89) L. Tiemann, T. D. Rhone, N. Shibata, and K. Muraki, "NMR Profiling of Quantum Electron Solids in High Magnetic Fields", Nature Phys. 10, 648-652 (2014).

- (90) T. Uchida, M. Arita, A. Fujiwara, and Y. Takahashi, "Coupling Capacitance between Double Quantum Dots Tunable by the Number of Electrons in Si Quantum Dots", J. Appl. Phys. 117, 084316 (2015).
- (91) Y. Ueno, K. Furukawa, K. Matsuo, S. Inoue, K. Hayashi, and H. Hibino, "On-Chip Graphene Oxide Aptasensor for Multiple Protein Detection", Anal. Chim. Acta **866**, 1-9 (2015).
- (92) S. N. Wang, S. Suzuki, and H. Hibino, "Raman Spectroscopic Investigation of Polycrystalline Structures of CVD-Grown Graphene by Isotope Labeling", Nanoscale **6**, 13838-13844 (2014).
- (93) K. Warabi, R. Kou, S. Tanabe, T. Tsuchizawa, S. Suzuki, H. Hibino, H. Nakajima, and K. Yamada, "Optical Absorption Characteristics and Polarization Dependence of Single-Layer Graphene on Silicon Waveguide", IEICE Trans. Electron. E97-C, 736-743 (2014).
- (94) N. Watase, M. Hashisaka, K. Muraki, and T. Fujisawa, "Single-Electron Counting Statistics with a Finite Frequency Bandwidth", Jpn. J. Appl. Phys. **53**, 04EJ01 (2014).
- (95) K. Yamada, T. Tsuchizawa, H. Nishi, R. Kou, T. Hiraki, K. Takeda, H. Fukuda, Y. Ishikawa, K. Wada, and T. Yamamoto, "High-Performance Silicon Photonics Technology for Telecommunications Applications", Sci. Technol. Adv. Mater. 15, 024603 (2014).
- (96) K. Yamada, T. Tsuchizawa, H. Nishi, R. Kou, T. Hiraki, K. Takeda, H. Fukuda, K. Okazaki, Y. Ishikawa, K. Wada, and T. Yamamoto, "Silicon-Germanium-Silica Monolithic Photonic Integration Platform for High-Performance Optical Data Communication Systems", ECS Trans. 64, 749-759 (2014).
- (97) M. Yamagishi, N. Watase, M. Hashisaka, K. Muraki, and T. Fujisawa, "Spin-Dependent Tunneling Rates for Electrostatically Defined GaAs Quantum Dots", Phys. Rev. B **90**, 035306 (2014).
- (98) G. Yamahata, K. Nishiguchi, and A. Fujiwara, "Gigahertz Single-Trap Electron Pumps in Silicon", Nature Commun. 5, 5038 (2014).
- (99) G. Yamahata, K. Nishiguchi, and A. Fujiwara, "Accuracy Evaluation and Mechanism Crossover of Single-Electron Transfer in Si Tunable-Barrier Turnstiles", Phys. Rev. B 89, 165302 (2014).
- (100) G. Yamahata, T. Karasawa, and A. Fujiwara, "Gigahertz Single-Hole Transfer in Si Tunable-Barrier Pumps", Appl. Phys. Lett. **106**, 023112 (2015).
- (101) R. M. Yunus, M. Miyashita, M. Tsuji, H. Hibino, and H. Ago, "Formation of Oriented Graphene Nanoribbons over Heteroepitaxial Cu Surfaces by Chemical Vapor Deposition", Chem. Mat. 26, 5215-5222 (2014).
- (102) G. Q. Zhang, K. Tateno, M. D. Birowosuto, M. Notomi, T. Sogawa, and H. Gotoh, "Controlled 1.1-1.6 μm Luminescence in Gold-Free Multi-Stacked InAs/InP Heterostructure Nanowires", Nanotechnology 26, 115704 (2015).
- (103) X. B. Zhu, Y. Matsuzaki, R. Amsüss, K. Kakuyanagi, T. Shimo-Oka, N. Mizuochi, K. Nemoto, K. Semba, W. J. Munro, and S. Saito, "Observation of Dark States in a Superconductor Diamond Quantum Hybrid System", Nature Commun. 5, 3524 (2014).

## 国際会議招待講演一覧(2014年1月~2015年3月)

#### I. 機能物質科学研究部

- (1) H. Omi and T. Tawara, "MBE Growth and Optical Properties of Rare Earth Oxides on Si(111)", Symposium on Surface and Nano Science 2014 (SSNS'14), Furano, Japan (Jan. 2014).
- (2) Y. Kobayashi, K. Kumakura, T. Akasaka, H. Yamamoto, and T. Makimoto, "Application of BN for GaN devices", Photonics West 2014, San Francisco, U.S.A. (Feb. 2014).
- (3) H. Yamamoto, Y. Krockenberger, and M. Naito, "Augmented Methods for Growth and Development of Novel Multi-Cation Oxides", Photonics West 2014, San Francisco, U.S.A. (Feb. 2014).
- (4) Y. Krockenberger, H. Irie, K. Sakuma, B. Eleazer, J. Yan, L. Waterston, and H. Yamamoto, "Emerging Superconductivity Hidden beneath Charge-Transfer Insulators", 2014 MRS Spring Meeting & Exhibit, San Francisco, U.S.A. (Apr. 2014).
- (5) Y. Kobayashi, K. Kumakura, T. Akasaka, H. Yamamoto, and T. Makimoto, "Layered Boron Nitride as a Release Layer for Mechanical Transfer of GaN-Based Devices", 2014 IEEE Silicon Nanoelectronics Workshop, Honolulu, U.S.A. (June 2014).
- (6) M. Hiroki, K. Kumakura, Y. Kobayashi, T. Akasaka, H. Yamamoto, and T. Makimoto, "GaN on *h*-BN Technology for Release and Transfer of Nitride Devices", 2014 4th IEEE International Workshop on Low Temperature Bonding for 3D Integration LTB-3D 2014, Tokyo, Japan (July 2014).
- (7) H. Kageshima, H. Hibino, H. Yamaguchi, and M. Nagase, "Theoretical Studies of Graphene on SiC", The 6th IEEE International Nanoelectronics Conference (IEEE INEC 2014), Sapporo, Japan (July 2014).
- (8) K. Furukawa and Y. Ueno, "Graphene Oxide-Based FRET Aptasensor Fabricated and Integrated on Solid Support", 248th ACS National Meeting & Exposition, San Francisco, U.S.A. (Aug. 2014).
- (9) H. Hibino, "Low-Energy Electron Microscopy of Graphene and Hexagonal Boron Nitride", International Union of Materials Research Societies - The IUMRS International Conference in Asia 2014 (IUMRS-ICA 2014), Fukuoka, Japan (Aug. 2014).
- (10) K. Hirama, Y. Taniyasu, S. Karimoto, Y. Krockenberger, M. Kasu, and H. Yamamoto, "Nitride/Diamond Heterostructure Systems - from Growth to Devices -", International Union of Materials Research Societies - The IUMRS International Conference in Asia 2014 (IUMRS-ICA 2014), Fukuoka, Japan (Aug. 2014).
- (11) H. Hibino, W. Shengnan, C. M. Orofeo, and S. Suzuki, "Growth, Characterization, and Functionalization of Graphene and Hexagonal Boron Nitride", 2014 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2014), Tsukuba, Japan (Sep. 2014).
- (12) K. Furukawa and Y. Ueno, "Protein Detection on Graphene Derivative Surface", KJF International Conference on Organic Materials for Electronics and Photonics, Tsukuba, Japan (Sep. 2014).
- (13) M. Hiroki, K. Kumakura, Y. Kobayashi, T. Akasaka, T. Makimoto, and H. Yamamoto, "Epitaxial Lift Off of GaN Heterostructure by BN Insertion", 2nd Intensive Discussion on Growth of Nitride Semiconductors (IDGN-2), Sendai, Japan (Oct. 2014).

- (14) Y. Ueno and K. Furukawa, "On-Chip FRET Aptasensor Built on the Graphene Oxide Surface", The 7th International Symposium on Surface Science (ISSS-7), Matsue, Japan (Nov. 2014).
- (15) K. Sumitomo, "Nanobiodevice for Mimicking Synaptic Connections", 7th International Symposium on Advanced Plasma Science and Its Applications for Nitrides and Nanomaterials / 8th International Conference on Plasma-Nano Technology & Science (ISPlasma2015/IC-PLANTS2015), Nagoya, Japan (Mar. 2015).

### II. 量子電子物性研究部

- (1) K. Muraki, "Imaging Fractional Quantum Hall Liquids and Controlling Disorder Effects on the v = 5/2 State", Mauterndorf winterschool 2014, Mauterndorf, Austria (Feb. 2014).
- (2) H. Yamaguchi, I. Mahboob, and H. Okamoto, "Nonlinear Dynamics and All Mechanical Phonon Lasing in Electromechanical Resonators", 2014 IEEE International Frequency Control Symposium (IEEE IFCS), Taipei, Taiwan (May 2014).
- (3) H. Yamaguchi, D. Hatanaka, H. Okamoto, and I. Mahboob, "Nonlinear Phonon Dynamics in Coupled Electromechanical Resonators", Spin Mechanics 2, Sendai, Japan (June 2014).
- (4) I. Mahboob, H. Okamoto, and H. Yamaguchi, "A Correlated Electromechanical System", NEMS 2014
  International Seminar on Nanomechanical Systems, Paris, France (June 2014).
- (5) A. Fujiwara, K. Nishiguchi, and G. Yamahata, "Silicon Nanowire MOSFETs for Diverse Applications", The 6th IEEE International Nanoelectronics Conference (IEEE INEC 2014), Sapporo, Japan (July 2014).
- (6) H. Yamaguchi, D. Hatanaka, I. Mahboob, and H. Okamoto, "Nonlinear Electromechanical Resonators", The 6th IEEE International Nanoelectronics Conference (IEEE INEC 2014), Sapporo, Japan (July 2014).
- (7) S. Saito, "Superconducting Flux Qubit Spin Ensemble Hybrid System", Workshop on diamond quantum science and technology, Queensland, Australia (Aug. 2014).
- (8) N. Kumada, "Transport Properties of Edge Magnetoplasmons in Graphene", The International Conference on Solid Films and Surfaces (ICSFS), Rio de Janeiro, Brasil (Sep. 2014).
- (9) I. Mahboob, K. Nishiguchi, A. Fujiwara, and H. Yamaguchi, "Phonon-Lasing (and Mode Cooling) in an Electromechanical Resonator", 27th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2014), Fukuoka, Japan (Nov. 2014).
- (10) H. Yamaguchi, D. Hatanaka, I. Mahboob, and H. Okamoto, "Opto/Electromechanical Resonators Based on GaAs/AlGaAs Heterostructures", 2014 International Electron Devices and Materials Symposium (IEDMS 2014), Hualien, Taiwan (Nov. 2014).
- (11) N. Kumada, "Shot Noise Generated by Graphene p-n Junctions in the Quantum Hall Effect Regime", GDR Physique Quantique Mésoscopique, Aussois, France (Dec. 2014).

- (12) H. Yamaguchi, I. Mahboob, H. Okamoto, and D. Hatanaka, "Nonlinear Phonon Dynamics in Electromechanical Resonators", School & Discussion Meeting on Frontiers in Light-Matter Interactions, Kolkata, India (Dec. 2014).
- (13) K. Muraki, "Probing Disorder and Nnonlinear Screening in Quantum Hall Systems Using NMR", DiRT2D 2015: Disorder and its Role in Transport in 2D systems, Okinawa, Japan (Jan. 2015).
- (14) K. Muraki, "NMR Probing of Wigner Solids in High Magnetic Fields", International Symposium on Quantum System and Nuclear Spin Related Phenomena, Miyagi, Japan (Feb. 2015).
- (15) T. D. Rhone, "NMR Probing of Quantum Electron Solids in High Magnetic Fields", APS March Meeting 2015, San Antonio, U.S.A. (Mar. 2015).

#### III. 量子光物性研究部

- (1) W. J. Munro, A. M. Stephens, S. J. Devitt, K. A. Harrison, and K. Nemoto, "The Role of Memories in Quantum Networks", Quantum Information and Measurement 2014, Berlin, Germany (Mar. 2014).
- (2) H. Sanada, Y. Kunihashi, H. Gotoh, K. Onomitsu, M. Kohda, J. Nitta, P. V. Santos, and T. Sogawa, "Coherent Manipulation of Electron Spins in Acoustically Induced Moving Dots", International Conference on Quantum Dots (QD 2014), Pisa, Italy (May 2014).
- (3) K. Oguri, H. Mashiko, K. Kato, T. Sogawa, and H. Gotoh, "Ultrafast Spectroscopy Based on High-Order Haromonic Sources for Sub-Cycle Dynamics in Solids", Shanghai Tokyo Advanced Research Symposium on Ultrafast Intense Laser Science (STAR5), Miyazaki, Japan (May 2014).
- (4) K. Shimizu, "Cheat-Sensitive Commitment of a Classical Bit via Two-Way Quantum Communication", The twenty third annual International Laser Physics Workshop (LPHYS'14), Sofia, Bulgaria (July 2014).
- (5) K. Sasaki, "Theory of Topological Raman Band in Graphene", International Union of Materials Research Societies - The IUMRS International Conference in Asia 2014 (IUMRS-ICA 2014), Fukuoka, Japan (Aug. 2014).
- (6) H. Shibata, "Fabrication and Characterization of Superconducting Nanowire Single-Photon Detector", 27th International Symposium on Superconductivity, Tokyo, Japan (Nov. 2014).

# IV. ナノフォトニクスセンタ

- (1) S. Matsuo, "Directly Modulated Photonic Crystal Lasers for Computercom Applications", Photonics West, San Francisco, U.S.A. (Feb. 2014).
- (2) T. Sato and S. Matsuo, "Ultralow Power Consumption Photonic Crystal Nanocavity Lasers", International workshop on emerging photonic technologies for access/metro networks, Paris, France (Mar. 2014).
- (3) S. Matsuo, K. Takeda, and T. Sato, "Directly Modulated Photonic Crystal Wavelength-Scale Cavity Lasers", SPIE Photonics Europe 2014, Brussels, Belgium (Apr. 2014).
- (4) S. Matsuo, "Photonic Crystal Lasers for Computercom Networks", European Conference on Integrated Optics (ECIO 17th) and the MicroOptics Conference (MOC 19th), Nice, France (June 2014).
- (5) K. Nozaki, E. Kuramochi, A. Shinya, S. Matsuo, T. Sato, and M. Notomi, "Ultralow-Power and Integrated Operation of All-Optical Switches/Memories in a Photonic Crystal Chip", 16th International Conference on Transparent Optical Networks, Graz, Austria (July 2014).
- (6) A. Shinya and M. Notomi, "Integrated Nanophotonics Technology Toward fJ/bit Optical Communication in a Chip", 14th International Forum on Embedded MPSoC and Multicore, Margaux, France (July 2014).
- (7) A. Shinya and M. Notomi, "Nanophotonics Technology Toward Optical Logic Circuits", 15th International Forum on MPSoC for Software-Defined Hardware, Ventura, U.S.A. (July 2014).
- (8) K. Nozaki, E. Kuramochi, A. Shinya, S. Matsuo, T. Sato, and M. Notomi, "Integrated All-Optical Memories/Switches in a Photonic Crystal Chip", Advanced Photonics 2014, Barcelona, Spain (July 2014).
- (9) A. Yokoo, M. D. Birowosuto, M. Takiguchi, G. Zhang, K. Tateno, E. Kuramochi, H. Taniyama, and M. Notomi, "Semiconductor Nanowire Induced Nanocavity in Si Photonic Crystals", The 14th International Symposium on Advanced Organic Photonics (ISAOP-14), Osaka, Japan (Nov. 2014).
- (10) K. Yamada, T. Tsuchizawa, H. Nishi, R. Kou, T. Hiraki, K. Takeda, M. Usui, K. Okazaki, H. Fukuda, Y. Ishikawa, K. Wada, and T. Yamamoto, "Si-Ge-Silica Photonic Integration Platform for High-Performance Photonic Systems", Asia Communications and Photonics Conference, Shanghai, China (Nov. 2014).
- (11) M. Notomi, "Ultralow-Power Photonic Processing by Integrated Nanophotonics", The 5th International Topical Meeting on Nanophotonics and Metamaterials, Seefeld, Austria (Jan. 2015).
- (12) K. Takeda, K. Honda, T. Takeya, K. Okazaki, T. Hiraki, T. Tsuchizawa, H. Nishi, R. Kou, H. Fukuda, M. Usui, H. Nosaka, T. Yamamoto, and K. Yamada, "Comprehensive Photonics-Electronics Convergent Simulation and Its Application to High-Speed Electronic Circuit Integration on a Si/Ge Photonic Chip", Photonics West 2015, San Francisco, U.S.A. (Feb. 2015).

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
〒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/