



公益社団法人  
日本セラミックス協会

日本セラミックス協会  
第26回秋季シンポジウム

先進フォトニクス材料の創成と展開

次世代デバイスのための  
フォトニクス・イノベーション

佐藤勝昭（JST研究開発戦略センターフェロー）

JST さきがけ次世代デバイス元研究総括



# はじめに

---

- ▶ CMOSを超える次世代デバイスの要素技術としてフォトニクス  
の利用が期待されています。
- ▶ JSTさきがけ「革新的次世代デバイスを目指す材料とプロセス」  
領域では、2007年～2013年のあしかけ6年にわたり、次世  
代デバイスを目指す材料・プロセスの開発に取り組みました。
- ▶ デバイスイノベーションに向けての多くの画期的な成果が得  
られましたが、この講演では、そのうち、Siラマンレーザ、高感  
度Ge光検出素子、室温動作ダイヤモンド量子情報デバイス、  
光応答性単電子デバイス、GaN非線形光学素子、超高速光  
磁気記録など、フォトニクスにおける研究成果を紹介します。
- ▶ また、JSTの戦略的創造研究推進事業さきがけのご紹介も  
兼ねたいと存じます。



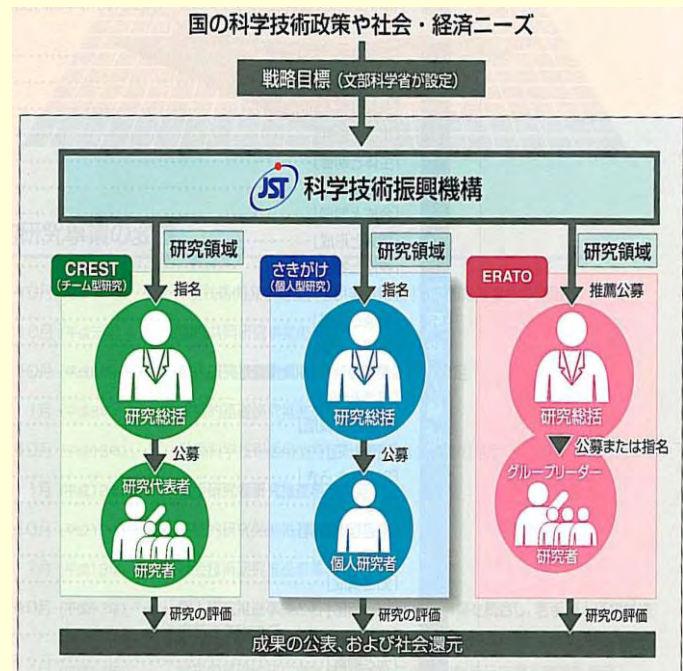
## 制度(System)

さきがけについて

戦略目標/戦略目標の背景

# 「さががけ」について

- ▶ JSTは、国の政策や社会的経済的ニーズをふまえ、国の定めた戦略目標の達成にむけた目的指向型の基礎研究プログラム「戦略的創造研究推進事業」を実施しています。
- ▶ これには、ERATO, CREST, さががけの3タイプがあります。
- ▶ さががけは、研究総括のもと、公募で採択された研究者が行う個人型の研究です。
- ▶ 科研費は、多様な学術の振興を図るために、個々の研究者の自由な発想による提案の中から選ばれた学術的に優れた独創的・先駆的な研究に対する補助金です。
- ▶ さががけ・CRESTは、国の政策目標にそったイノベーションのシーズを創成するために、研究総括のもと、研究内容に応じた形で研究者を動員して、集中的に研究を推進するJSTの事業です。



## 戦略目標名:

### 新原理・新機能・新構造デバイス実現のための材料開拓 とナノプロセス開発

- ▶ 本戦略目標は既存のシリコンデバイスの特性を超越する新概念・新構造に基づく次世代デバイスの創製を目指すものであり、「ナノ・材料」分野の戦略重点科学技術のうち、次の3つに密接に関係する。
  - ▶ ①イノベーションを生む中核となる革新的材料・プロセス技術
  - ▶ ⑤デバイスの性能の限界を突破する先端的エレクトロニクス
  - ▶ ⑨ナノ領域最先端計測・加工技術
- ▶ 背景としては、ITRS2005に代表される国際的な動向があります。

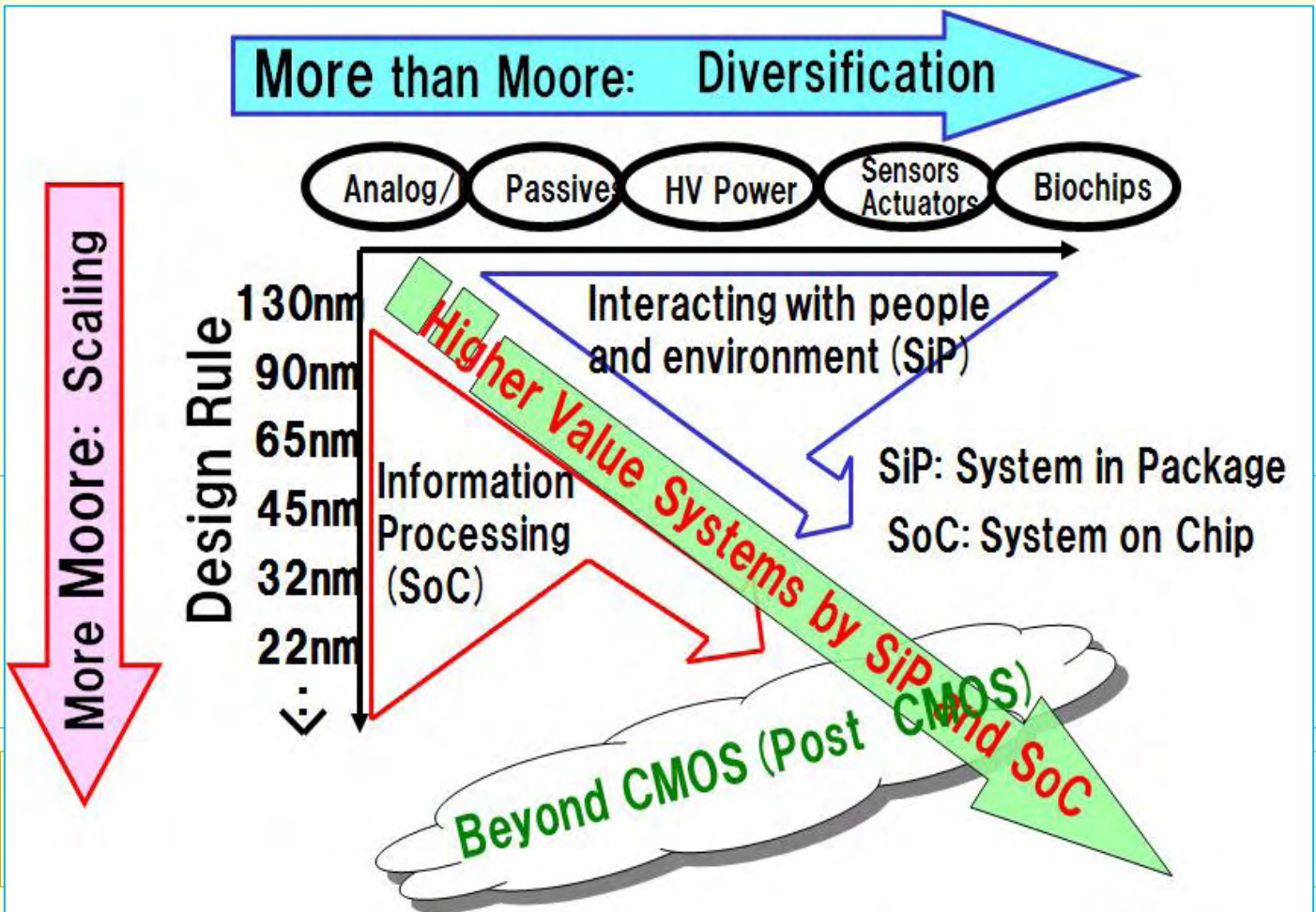
## 戦略事業実施期間中に達成を目指す研究開発目標

- この戦略では、下記の技術領域における**材料開拓**とデバイス化に向けたプロセス開発により、次世代ナノエレクトロニクスデバイスの実現につながるイノベーションを創出することを目標とする。
  - 非シリコン系半導体**(Ga-As, In-Sbなどの化合物半導体、GaN, AlN、ダイヤモンドなどのワイドギャップ半導体)による従来のCMOSを超える次世代デバイス用材料の開拓とプロセス開発
  - 光・電気・磁気機能の多元的な融合・変換**を利用して新規なデバイスの構築を可能にする材料の開拓とプロセス開発
  - ナノレベル・分子レベルでの加工**により新規なデバイスの構築を可能にする材料の開拓とプロセス開発
  - 薄く、軽量で、湾曲性・屈曲性ならびに耐衝撃性を有する携帯デバイス用の材料開拓とプロセス開発

## 戦略目標が出されたいきさつ

- ▶ この戦略目標は、2005年にITRSロードマップが、半導体デバイスの微細化が-halfピッチ22nmの極限を迎えるに当たって掲げた3つの戦略、すなわち、
  - ① Mooreの法則をさらに伸ばす「More Moore」
  - ② 従来の半導体デバイスにない機能を付加する「More than Moore」
  - ③ シリコンCMOSを超える新しい原理を取り入れる「Beyond CMOS」のうち、beyond CMOSに焦点を当て、その材料開拓とプロセス開発を進めることを目標として策定されたものでした。

# ITRS roadmap 2005





## 体制(Actor)

領域および総括の選定  
領域アドバイザーの選定



## 領域アドバイザーの人選

- 領域アドバイザーは、研究総括を支え、課題の採択、領域の運営、研究面のアドバイスを分担していただきました。
  - アドバイザーの人選に当たっては、以下を考慮しました。
    - 領域のねらい記載の研究分野を網羅するように**広い研究分野**から選任する。
    - 選考会議・領域会議にできるだけ出席できる**時間をとれる方**を選任する。
    - 若く優秀な研究者をアドバイスできる**指導力**を持っている方を選任する。
    - 大学関係者だけでなく、企業、独法など**広い研究機関**の関係者を選任する。
    - **女性**を含めること。

# 領域アドバイザー

領域アドバイザー名	所属	現役職	選任時の職	専門	備考
栗野 祐二	慶応義塾大学	教授	富士通研究所	半導体デバイス・ナノカーボン	
岡本 博	東京大学	教授	東京大学	強相関	元さきがけ研究者
小田 俊理	東京工業大学	教授	東京工業大学	半導体デバイス	元さきがけ研究者
工藤 一浩	千葉大学	教授	千葉大学	有機デバイス	
五明 明子	科学技術振興機構	研プロ主任調査員	日本電気株式会社	半導体結晶工学	
小森 和弘	産業技術総合研究所	副研究部門長	産業技術総合研究所	光物性	元CREST研究代表者
高梨 弘毅	東北大学	教授	東北大学	スピントロニクス	
谷垣 勝己	東北大学	教授	東北大学	ナノカーボン・スピントロニクス	元さきがけ研究者
名西 徳之	立命館大学	教授	立命館大学	ワイドギャップ半導体デバイス	
波多野 睦子	東京工業大学	教授	日立製作所	半導体デバイス	
藤巻 朗	名古屋大学	教授	名古屋大学	超伝導工学	元CREST研究代表者

結果的に、さきがけ経験者3名(岡本、小田、谷垣)およびCREST経験者2名(小森、藤巻)が含まれており、自身の経験を踏まえた適切なアドバイスをいただけ、領域運営に効果的でした。

研究分野も、研究総括が把握するスピントロニクスを始め、半導体、ナノカーボン、強相関係、光、超伝導、有機など広い分野の研究者を人選でき、目的にかなったアドバイザーの参加を獲得できました。

## 運営(Management)

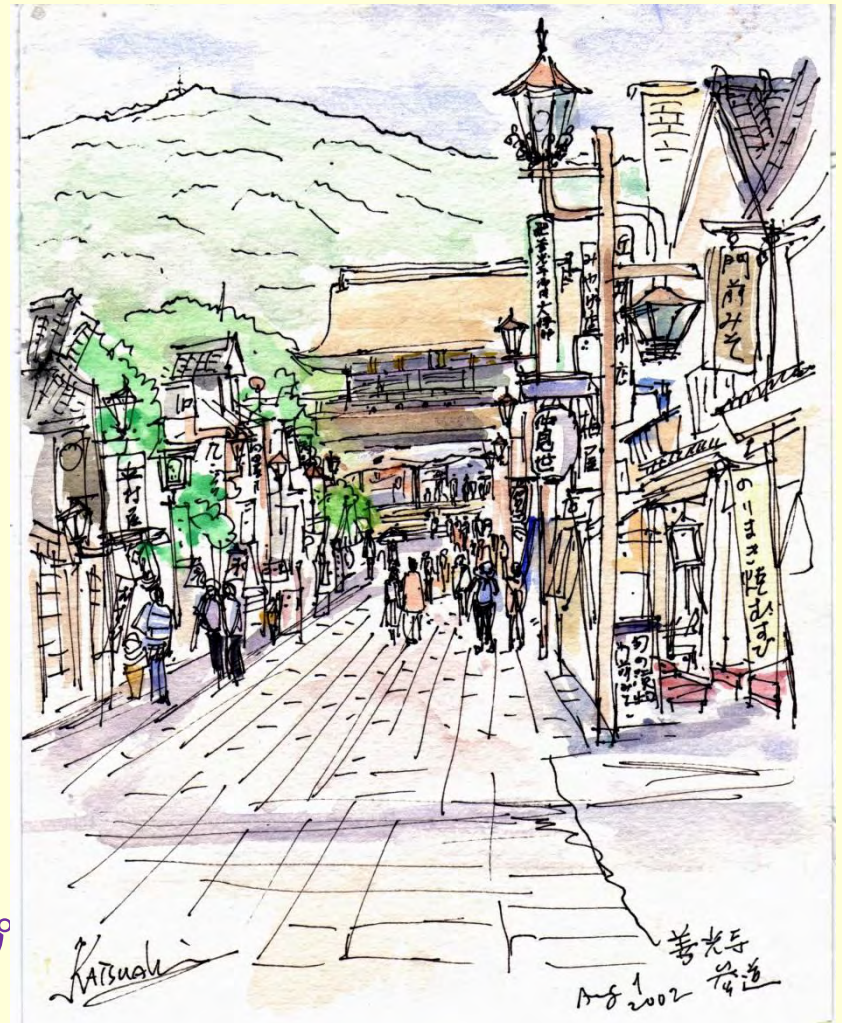
公募・選考・採択

領域の運営

サイトビジット

領域会議・ミニワークショップ

アウトリーチ



# 組織体制



研究総括



事務局  
泉技術参事  
前田事務参事

研究推進部スタッフ  
横田→橋本

研究者



Yuji Awano



Hiroshi Okamoto



Shunri Oda



Kazuhiro Kudo



Akiko Gomyo

領域アドバイザー  
11名



Kazuhiro Komori



Koki Takanashi



Katsumi Tanigaki



Yasushi Nanishi



Akira Fujimaki



Mutsuko Hatano

## 募集にあたっての研究総括の方針

- ▶ この研究領域は、CMOSに代表される既存のシリコンデバイスを超える革新的な次世代デバイスを創成することを目標として、環境やエネルギー消費に配慮しつつ高速・大容量かつ高度な情報処理・情報蓄積・情報伝達を可能とする新しい材料の開拓およびプロセスの開発を図る挑戦的な研究を対象とするものです。
- ▶ 具体的には、高移動度ワイドギャップ半導体材料、スピントロニクス材料、高温超伝導体を含む強相関係材料、量子ドット材料、ナノカーボン材料、有機半導体材料などが挙げられますが、これらに限らず、将来のデバイス化を見据えた新しい材料または構造及びプロセスの開拓に向けた独創的な研究が含まれます。

## 選考について

- 選考については、戦略目標に沿って領域の概要にあるように広い分野から採択できるように配慮しました。
- **初年度**は、研究総括の専門分野であるスピントロニクスに関する応募が7割をしめ、採択者もスピントロニクスに関するテーマの研究者が多数となりました。
  - **第2年度**は、領域アドバイザーを等通じて広くワイドギャップ半導体関係の研究者に周知していただき、その分野の応募が増えました。
  - **最終年度**は採択者が少なかった分子および有機関係のテーマについて、積極的に公募を周知し、結果として有機／分子に関する研究テーマの課題を採択することができました。
  - **全体として、当初計画した研究分野の課題を網羅**できました。

# 書類審査・面接審査の2段階評価

- ▶ 研究総括は、アドバイザーの意見を参考に審査の方針を決め膨大な応募書類を書類審査しました。
  - ▶ 各申請課題は3名以上の査読者によって評価しました。申請者と所属が異なり利害関係のないアドバイザーまたは外部評価者によってきわめて厳正に査読。このため、他領域に比べ多くの外部評価者をお願いしました。ダイバーシティにも配慮しました。挑戦的課題を採択するため、評価がBBBなど平均的なものよりACCなどAが1つでもあるものを優先しました。書類審査で、採択数の2倍程度の候補者を選考し面接することになりました。
- ▶ 面接審査では挑戦性と計画の妥当性を厳しく審査
  - ▶ 単純な合議制ではなく研究総括のリーダーシップのもとで、特徴ある研究者を厳選しました。
- ▶ 研究者採択の段階でプロジェクトの成否は60%決まるといって過言ではないでしょう。



書類選考会



面接選考会



## 採択課題と研究者 第1期生 (応募108, 採択11)

研究者	所属(採択時)	課題名
葛西 誠也	北大准教授	確率共鳴を利用した新しい情報処理のためのナノデバイスと集積化
齊藤 英治	慶大講師	誘電体スピントロニクス材料開拓とスピン光機能
白石 誠司	阪大准教授	分子を介したスピン流の制御
高橋有紀子	NIMS主研	スピントロニクスデバイス用室温ハーフメタルの探索
谷山 智康	東工大准教授	スピン偏極の外的操作制御とチューナブルスピン源の創製
塚本 新	日大講師	フェムト秒パルス・レーザによる超高速スピン制御・計測
深田 直樹	NIMS主研	縦型立体構造デバイス実現に向けた半導体ナノワイヤの開発
村上 修一	東工大准教授	デバイス応用に向けたスピン流と熱流の結合理論
安田 剛	九大助教	$\pi$ 共役高分子鎖内の超高速電荷輸送を利用した有機トランジスタ
山口 明啓	慶大助教	ナノ磁性体集結群の新奇な磁気特性の究明
若林 克法	広大助教	計算科学手法によるナノカーボン素子の設計と物性予測

# 採択課題と研究者 第2期生 (応募98, 採択10)

研究者	所属(採択時)	課題名
片山 竜二	東大助教	極性ワイドギャップ半導体フォトリックナノ構造の新規光機能
川山 巖	阪大助教	ナノ構造制御した光生成磁束量子デバイスの創製
寒川 義裕	九大准教授	オンチップ光配線用窒化物基板の創製とシステム熱設計支援
小林 航	早大助教	サーモエレクトロニクスを指向した基礎材料の開発
須崎 友文	東工大准教授	ワイドギャップ酸化物における界面機能開発
竹中 充	東大准教授	光配線LSI実現に向けたGeナノ光電子集積回路の開発
中岡 俊裕	東大特任准教授	量子ドットを用いた単電荷・スピン・光機能融合デバイス
浜屋 宏平	九大助教	Si系半導体ナノ構造を基礎とした単一電子スピントランジスタの開発
福村 知昭	東北大講師	ワイドギャップ強磁性半導体デバイス
水落 憲和	筑波大講師	ワイドギャップ半導体中の単一常磁性発光中心による量子情報素子

## 採択課題と研究者 第3期生 (応募120, 採択12)

研究者	所属(採択時)	課題名
海住 英生	北大助教	スピン量子十字素子を用いた新規な高性能不揮発性メモリの創製
組頭 広志	東大准教授	ナノキャパシタ構造を用いた低環境負荷メモリの開発
高橋 和	阪府大講師	フォトニック結晶ナノ共振器シリコンラマンレーザーの開発
富岡 克広	JST専任	Si/III-V族半導体超ヘテロ界面の機能化と低電力スイッチ素子の開発
中野 幸司	東大助教	分子配列制御による有機トランジスタの高性能化
中村 浩之	阪大特任助教	誘電体トランジスタを用いたスピン操作
西永 慈郎	早大助教	有機・無機半導体ヘテロ構造を用いた新規デバイスの開発
野口 裕	千葉大助教	光制御型有機単一電子デバイスの開発
野田 優	東大准教授	各種ナノカーボン構造体の自在実装
東脇 正高	NICT主研	III族酸化物/窒化物半導体複合構造の界面制御とデバイス応用
町田 友樹	東大准教授	グラフェン量子ドットを用いた新機能素子の実現
山本 浩史	理研専任研	電子相関を利用した新原理有機デバイスの開発研究者

総研究費: 13億6600万円

1課題あたり研究費: 4140万円

# 研究分野

熱



Wataru Kobayashi



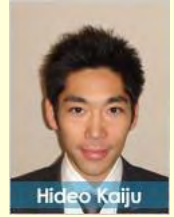
Yoshihiro Kangawa



Shuichi Murakami



Hiroyuki Nakamura



Hideo Kaiju



Jiro Nishinaga



Tomoki Machida



Naoki Fukata



Seiya Kasai



Takeshi Yasuda



Hiroshi Yamamoto



Masataka Higashiwaki



Hiroshi Kumigashira



Katsuhiko Tomioka



Tomotomi Susaki



Suguru Noda



Yutaka Noguchi



Arata Tsukamoto



Ryuji Katayama



Koji Nakano

スピン



Masashi Shiraishi



Katsunori Wakabayashi



Akinobu Yamaguchi



Eiji Saitoh



Y.K. Takahashi



Kohei Hamaya



Iwao Kawayama



Tomoyasu Taniyama



Tomoteru Fukumura



Toshihiro Nakaoka



Narikazu Mizuochi

電荷



Yasushi Takahashi

光

# 研究対象

酸化物



Yasushi Takahashi



Naaki Fukata



Yoshihiro Kangawa



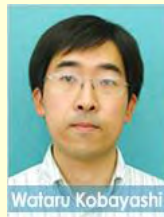
Katsuhiro Tomioka



Tomoteru Fukumura



Tomofumi Susaki



Wataru Kobayashi



Eiji Saitoh



Norikazu Mizuochi



Masataka Higashiwaki



Toshihiro Nakaoka



Ryuji Katayama



Mitsuru Takenaka

誘電体

半導体



Hiroyuki Nakamura



Seiya Kasai



Kohei Hamaya



Hideo Kajju



Hiroshi Kumigashira

有機



Takeshi Yasuda



Hiroshi Yamamoto



Masashi Shiraishi



Katsunori Wakabayashi



Jiro Nishinaga



Shuichi Murakami



Akinobu Yamaguchi



Tomoyasu Taniyama

ナノカーボン



Koji Nakano



Yutaka Noguchi



Tomoki Machida



Suguru Noda



Iwao Kawayama

超伝導



Arata Tsukamoto

金属

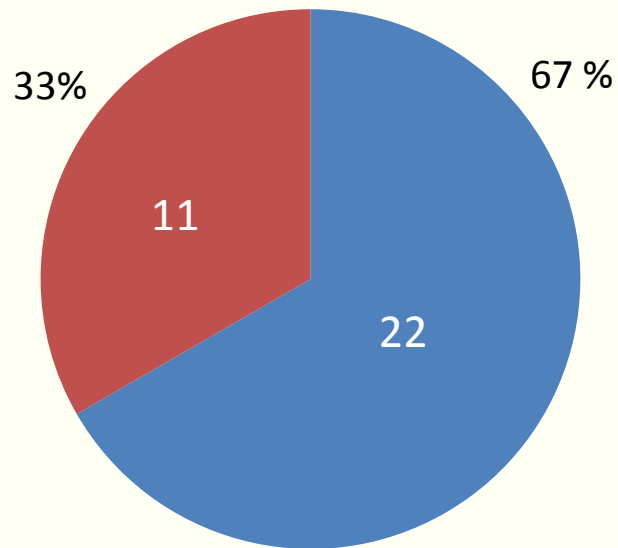


Y.K. Takahashi

# 採択状況(1)採択時役職

## 採択時

採択時にパーマネントポジションで  
なかった方は5名



- 准教授・主幹研究員ほか
- 講師・助教・ポスドクほか

## 採択状況(2)研究者が所属する機関

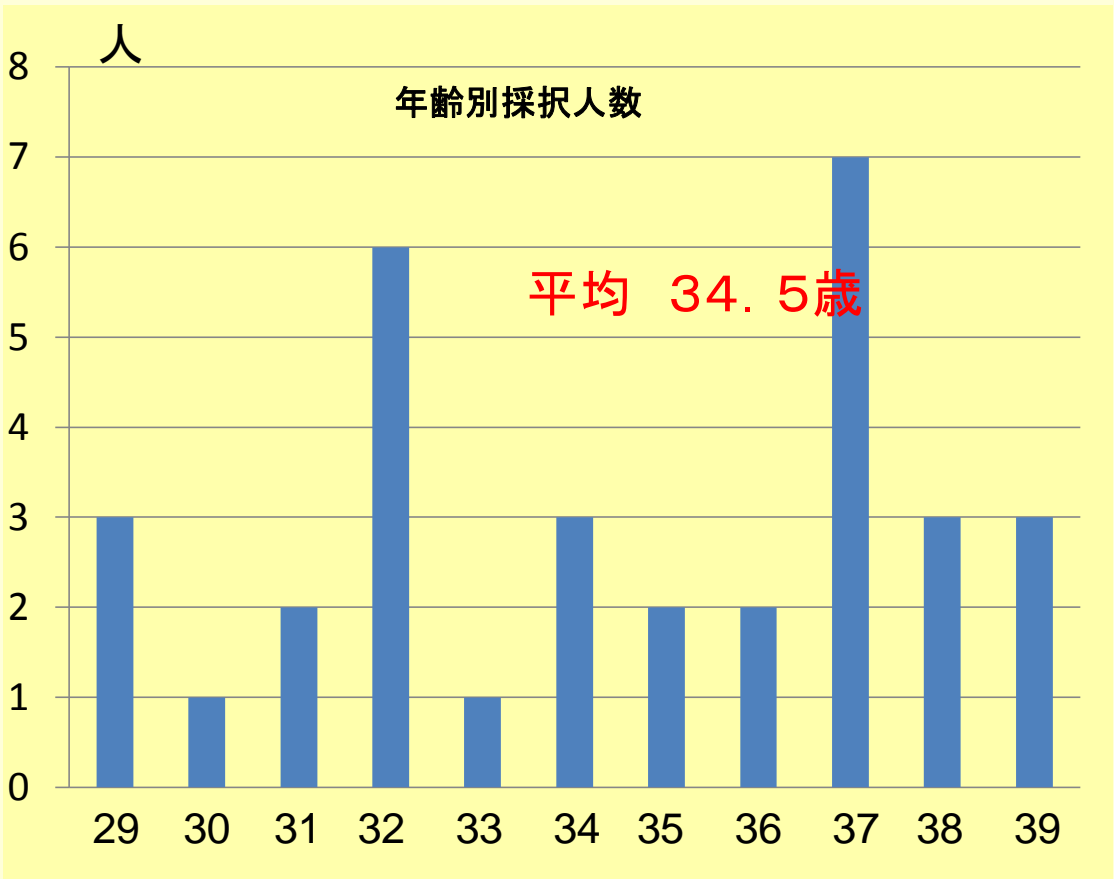
	国大	私大	公大	独法*
開始時	22 (旧帝大16)	5	1	5
終了時	19 (旧帝大13)	5	1	8
現在	19 (旧帝大13)	4	2	8

\*JST専任研究者を含みます

所属機関は全国に分布



# 採択状況(3) 採択時年齢分布

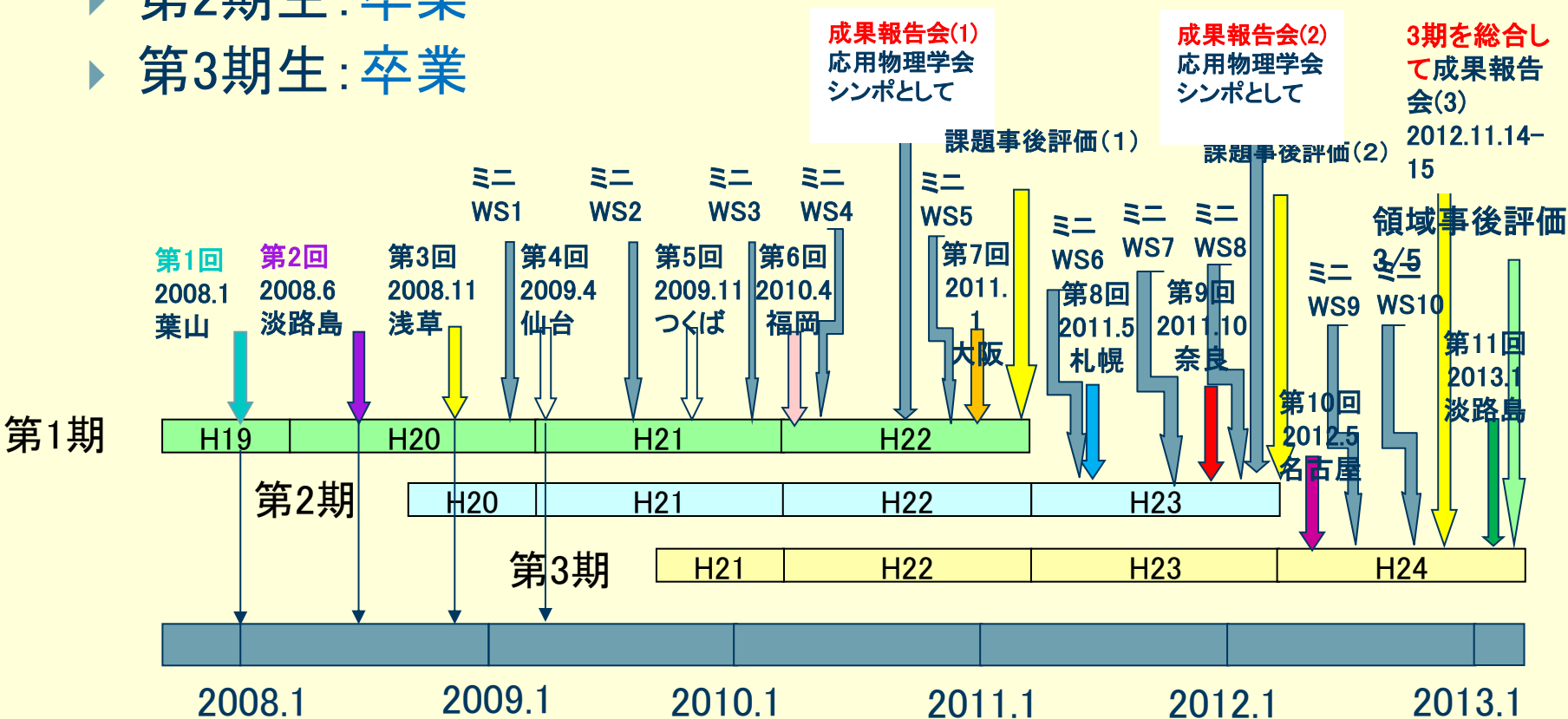


男性 32人  
女性 1人



# さきがけ佐藤領域の歩み

- ▶ 第1期生: 卒業
- ▶ 第2期生: 卒業
- ▶ 第3期生: 卒業



# サイトビジット

研究開始直後および異動や配置替えの時のサイトビジットに加え、**最終年度**に研究の進捗状況把握と残期間の研究方針検討のため、**サイトビジット**を行っている。また、**技術参事**による研究状況確認のための**サイトビジット**も  
行っている。

## 研究開始直後

33回(1期生11回、2期生10回、3期生12回)

## 異動／配置換え後

(別の訪問機会にすることもあり)

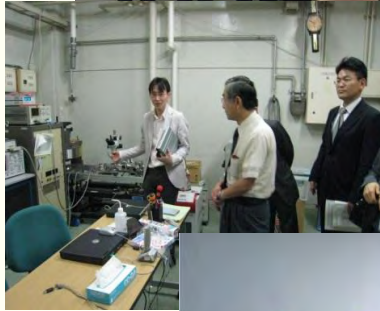
11回(1期生5回、2期生5回、3期生1回)

## 最終年度

29回(1期生8回、2期生9回、3期生12回)

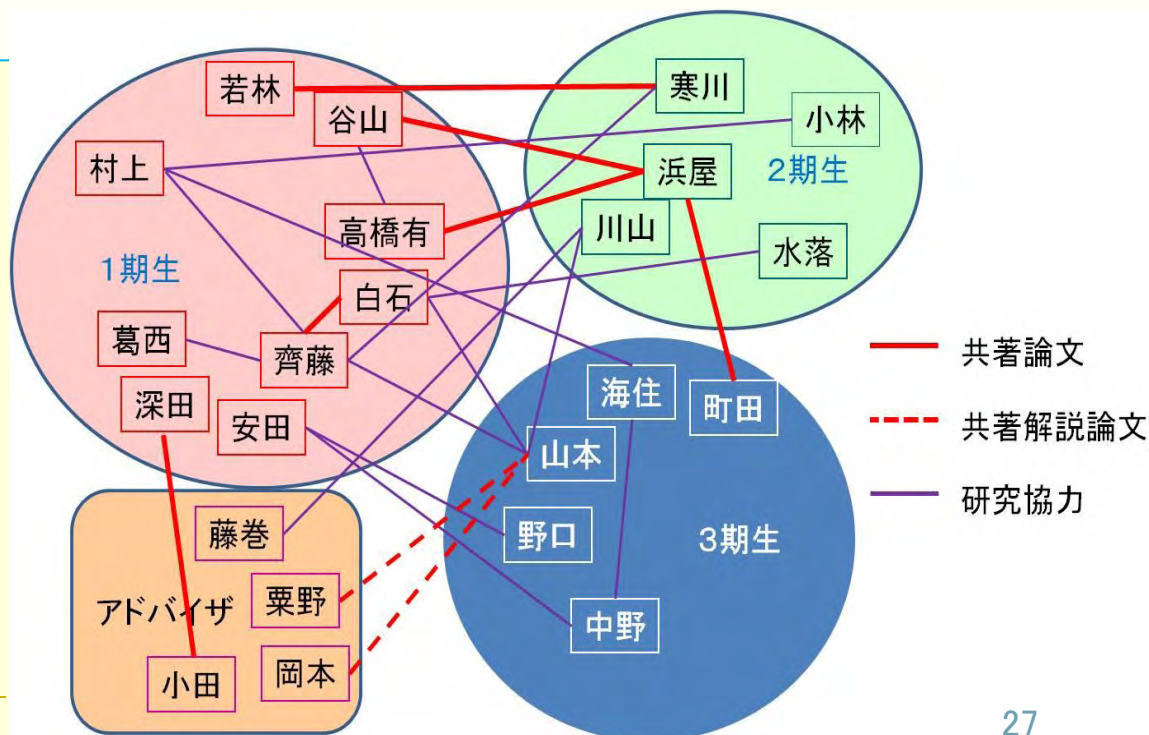
## 技術参事による状況調査

7回



# 共同研究の推進

研究者自身の自主的な共同研究活動に任せることなく、研究総括自ら提案し、積極的な共同研究を模索しました。たとえば、第2回ミニワークショップにおいては、スピン回路の新研究領域の可能性を議論したり、領域会議において積極的な協力研究の提案を行いました。また、領域内にとどまることなく、研究に必要であれば、外部の研究者を紹介して、さきがけ研究を進める方向づけをしました。



# 共同研究の成果

研究者	協力者	内容	論文等
浜屋宏平	谷山智康	Fe <sub>3-x</sub> Mn <sub>x</sub> Si/Ge薄膜の磁気特性の測定	Phys. Rev. Lett. 102, 137204 (2009).
高橋有紀子	浜屋宏平	Co <sub>2</sub> FeSiのスピンの偏極率測定	J. Appl. Phys. (submitted).
寒川義裕	若林克法	SiC表面におけるグラフェン成長の初期過程の研究	Jpn. J. Appl. Phys 50 [3] 038003-1 (2011).
浜屋宏平	町田友樹	強磁性電極/量子ドットにおけるスピンのブロッケイドに支配された電気伝導の観測	Phys. Rev. Lett. 102, 236806 (2009).
齊藤英治	白石誠司	分子性半導体単結晶への強磁性共鳴誘起純スピンの注入	Phys. Rev. Lett., accepted.
山本浩史	栗野アドバイザー	モットFETの室温動作	日本応用物理学会 (2011/9/1)
山本浩史	岡本アドバイザー	光誘起モット転移	日本物理学会 (2013/3/26)
深田直樹	小田アドバイザー	ナノワイヤーのスピンのバルブ	J. Appl. Phys. 109, 07C508 (2011). Applied Physics Express 5 045001 (2012).

# 海外との共同研究

研究者	機関名	国名
葛西誠也	中国科学院 呉南健教授、 賈銳准教授	中国
	Prof.N.G. Stocks (Univ. of Warwick)	英国
	Prof. S. W. Hwang (Korea Univ.)	韓国
	Prof. L. B. Kish (Texas M&A Univ.)	米国
齊藤英治	Dr. T. Trypinotis (ケンブリッジ大)	英国
	デルフト大学	オランダ
	サラゴサ大学	スペイン
	ケンブリッジ大学	英国
白石誠司	Prof. Hillebrands (Univ. Kaiserstrautern)	ドイツ
	Prof. Cuniberti教授 (Techn.Univ. Dresden)	ドイツ
	Dr. V. Dediu (ISMN-CNRボ ローニャ)	イタリア
	Prof.Appelbaum(Maryland 大学).	米国
塚本新	Prof. R. Kawakami(カリフォル ニア大学リバーサイド校)	米国
	Prof. Theo Rasing (Radbout Univ)	オランダ
	York大学	英国
	放射光施設BESSYII	ドイツ

研究者	機関名	国名
深田直樹	ジョージア工科大	米国
	ボローニャ大学	イタリア
村上修一	Prof. G. Bihlmayer (ユー リヒ国際研究機構)	ドイツ
安田剛	Prof. Dr. W. Brütting (Univ.Augsburg, )	ドイツ
若林克 法	Manfred Sigrist (スイス連 邦工科大学教授)	スイス
	Young-Woo Son (KIAS)	韓国
	Roman Fasel 教授 (EMPA)	スイス
寒川義 裕	Dr. M.Epelbaum (Erlangen-Nürnberg大)	ドイツ
小林航	M. Peyrard教授	
	G. Casati教授	
	Prof. M.Karppinen (ヘルシ ンキ工科大学)	フィン ランド
水落憲和	Dr. A. Pautrat (クリス マツト研究所)	フラン ス
	Prof. Wrachtrup (シュ トゥットガルト大学)	ドイツ
	Prof. F. Jelezko (ウルム 大)	ドイツ
	Dr. A. Gali (ブダペスト科 学技術・経済大学)	ハン ガリー

研究者	機関名	国名
須崎友文	ウィスコンシン大	米国
	Dr.Vlado Lazarov (York大学)	英国
竹中充	Prof. Miller (Stanford大学)	米国
	Dr. Radamson (KTH)	スウェー デン
海住英生	Prof. J.F. Donegan (Trinity College Dublin )	アイルラ ンド
中村浩之	Prof. Harold Hwang (スタンフォード大 学)	米国
野口裕	Prof. W. Wruetting (アウグスブルク大)	ドイツ
	Prof. C. D. Frisbie (ミネソタ大)	米国
	Prof. W. Bruetting (アウグスブルク 大)	ドイツ
野田優	Dr. Noe (Rice大)	米国
	Prof. Wardle (MIT)	米国
東脇正高	Dr. K. Ploog (元 Paul Drude Institut 所長、)	ドイツ



# 領域会議

さきがけでは、年2回の領域会議を行うことになっています。本領域では、交通の便はよく、しかし討論に集中できるように都市中心部から離れている場所で開催しました。討論の時間を可能な限り増やすため、会議、宿泊、食事等

回	開催日	開催地	会場	特別講演	イベント
1	08.1.13	湘南国際村	IPC生産性国際交流センター		
2	08.6.5	淡路島	淡路夢舞台国際会議場	名西 徳之	
3	08.1.30	東京都	浅草セントラルホテル		「ナノ製造」との合同会議
4	09.4.23	仙台市	KKRホテル仙台	高梨弘毅	
5	09.11.26	つくば市	東雲ホテル	工藤 一浩	「物質と光作用」と領域交流
6	10.4.16	福岡市	チサンホテル博多	小田俊理	「界面の構造と制御」と領域交流
7	11.1.11	大阪市	チサンホテル新大阪	藤巻 朗	「光創成」「界面」と領域交流
8	11.6.1	千歳市	ホテルグランドテラス	栗野祐司	
9	11.10.31	大和郡山	ビジネスホテル大御門		CREST「次世代デバイス」と領域交流
10	12.5.14	名古屋市	邦和セミナープラザ	波多野睦子	「ナノシステム」と領域交流
11	13.01.14	淡路島	淡路夢舞台国際会議場	岡本 博	

ほぼ毎回、アドバイザーに、各分野の最先端の話題について講演してもらいました。

# 領域会議は異分野交流の場

- ▶ 領域会議では、最新の研究成果のナマの情報が報告され、研究者同士がつっこんだ意見交換をします。研究総括とアドバイザーがメンター役を果たします。
- ▶ 渡しきりのファンディングではなく、研究結果が**厳しい議論**にさらされるので、研究者は非常に**活性化**します。
- ▶ 採択までは互いに知らなかった異分野の研究者間に、**交流**を通じて、**研究協力の芽**がはぐくまれます。



研究者同士の議論が活発

夜遅くまで研究論議が続く



フルメンバー33名が3日にわたって熱い討論と研究交流を行う。

# ミニワークショップ

佐藤領域の  
独自取り組み



領域会議では、研究者の持ち時間が少なく、十分な議論ができません。これを補うため、研究総括は、発表を2～3人の話題提供者に限定して、深く突っ込んで議論する場を設けました。

原則として、複数の研究者からの自発的提案により、事務局が設定します。共同研究や、今後の研

	日程	場所	話題提供者	テーマ
第1回	2009.2.26	JST三番町ビル	塚本、山口	スピンドYNAMIX
第2回	2009.7.7	東北大金研	葛西、齊藤	確率共鳴とスピントロニクス
第3回	2010.2.24	JST三番町ビル	浜屋、福村	半導体と磁性
第4回	2010.5.12	JST三番町ビル	白石、野田、町田	ナノカーボン
第5回	2010.2.9	JST三番町ビル	村上、小林、海住	熱物性
第6回	2011.4.11	JST三番町ビル	須崎、東脇、片山	ワイドギャップ
第7回	2011.10.14	JST上野事務所	水落、中岡	量子通信
第8回	2012.1.23	JST五番町ビル	西永、野口、中野	有機デバイス
第9回	2012.7.19	JST五番町ビル	高橋(和)、竹中	光インタコネクション
第10回	2012.10.18	JST五番町ビル	富岡、中村	ナノデバイス



# 研究総括によるアウトリーチ

年月日	講演	学会塔
2007/12	講演「結晶工学が拓く次世代材料－若手研究者への期待」	応用物理学会結晶工学分科会年末講演会
2008/3	講演「JST・さきがけ”革新的次世代デバイスを目指す材料とプロセス”について」	応用物理学会学術講演会シンポジウム(デバイスイノベーションに向けたナノエレクトロニクス研究の新展開)
2009/10/5-10	招待基調講演「革新的次世代デバイスの研究開発」	第5回機能性材料国際会議(International conference Functional Materials 2009(ICFM2009) (Simferopol, Ukraine))
2010/9/28-30	招待チュートリアル講演「次世代デバイスを目指すスピントロニクス」	第17回三元及び多元化合物国際会議 (Baku Azerbaijan)
2011/2/16-18	The role PRESTO program played in oriented basic research	JST戦略的創造研究事業の第2回国際的評価委員会
2011/6/16	「さきがけ」研究が果たしてきた役割	JSTシンポジウム「世界を魅せる日本の課題解決型基礎研究」
2011/6/21-24	さきがけの紹介	国際会議MORIS2011 (Nijmegen Netherlands)
2011/12/8-10	招待チュートリアル講演「磁性とスピントロニクスの基礎」	第10回スピントロニクス入門セミナー（京都）
2012/8/26-9/4	招待基調講演「JSTさきがけ”革新的次世代デバイス”の研究成果」	18th ICTMC (Salzburg, Austria)

# プレスリリース

- ▶ JSTの広報課の協力で研究成果の公開を積極的に行いました。
  - ▶ 成果をプレス発表したり、プレスレクチャーしたりするためのお手伝いを研究総括主導で行いました。
  - ▶ 総括は、JSTの月刊誌JST Newsでの成果や研究者の紹介に努めました。
- ▶ サイエンスニュースとして動画でも発信しました。
  - ▶ 科学コミュニケーションセンターの動画配信専門スタッフの協力を得ました。



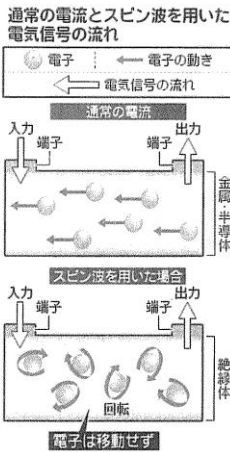
# プレス発表

年月日	研究者	タイトル
2007/10/31	深田直樹	『～半導体素子の3次元立体化による高性能化技術の確立～ 「シリコンナノワイヤ」《研究最前線》
2009/12/28	高橋和	光ナノ共振器を高度化 -Q値記録を更新-
2010/3/11	齊藤英治	「絶縁体に電気信号を流すことに成功」
2010/7/15	深田直樹	「直径20nmのゲルマニウムナノワイヤでの不純物分光に成功」-一次世代縦型トランジスタ材料の新しい評価技術の確立-
2011/2/4	深田直樹	『1/50000 mmの直径のシリコンナノワイヤ中で上純物の挙動を捕らえることに成功 * 次世代縦型トランジスタおよびナノワイヤ太陽電池材料の実現に向けて *』
2011/5/27	福村知昭	「電圧で磁気を制御できる新しいトランジスタの開発に成功」 -室温での電氣的な磁性のスイッチングに道-
2011/7/15	組頭広志	「強相関電子を2次元空間に閉じ込めることに成功—新たな高温超伝導物質の実現や、電子素子作りに道を拓く—」
2011/10/12	水落憲和	量子メモリの原理実験に成功 - ダイヤモンドと超伝導量子ビットを直接組み合わせたハイブリッド系の量子状態制御に世界で初めて成功 -
2011/12/12	高橋和	「光閉じ込める「フォトニック結晶」内 光のキャッチボール成功」
2011/12/19	高橋和	「光メモリー2個連動」
2012/1/13	高橋和	「次世代高機能チップ実現へ一歩」
2012/1/16	深田直樹	ナノシリコンを使って太陽電池発電量を100倍にできる技術を開発した
2012/2/19	高橋和	「光を自由にやりとり 京大院 野田教授ら技術開発」
2012/4/13	水落憲和	「ダイヤモンドLEDで光子を1個ずつ室温発生させることに世界で初めて成功～盗聴不可能な量子暗号通信への応用に道～」
2012/6/7	富岡克広	「トランジスタの理論限界を突破 次世代省エネデバイス実現へ」

# 夢の8割省エネ

金属や半導体に電流を流すと、電子の移動に伴い発熱してエネルギーが失われ、省エネ化の妨げになっていた。高藤教授らは電気を発生出す電子の自励「スピン」を音出し、高藤教授は(60年)電子から電子へスピンが伝わり、スピン波と電流を相互に変換できることを発見。今回初めて理論を応用した。

研究チームはI-Cチップなどに使われる絶縁体の一種の「磁性イオン」を用いた絶縁体を用いて、絶縁体表面に電流を流し、その電流が白き絶縁体の表面でスピン波を発生させ、スピン波は反対側の白金の端子まで到達し、電流を発生させた。この方法だと電子は



## 東北大研究所 実験に成功

移動せず、発熱によるエネルギー損失は激減した。高藤教授は「パソコンが次第に熱くなるように、電流による発熱は大きなエネルギー損失を起す。絶縁体を使うと電流伝達の問題の根本的解決法だと話している。」

通信インフラに革新も  
大谷 最近、東京大教授(物性物理学)の話、スピン波と電流の相互変換など前半は絶縁体も含まれず、絶縁体は摩擦抵抗の担い手として考えられてもいなかった。それを克服した今回の成果は革新的だ。エネルギーロスの少ない情報通信技術として注目されているのは間違いない。研究が進めば通信インフラに大きな革新をもたらすだろう。

# 絶縁体で電気信号伝達

電気を運ぶ「絶縁体」の物質に、電気を流す方法で電気の層を通すことで、東北大金属材料研究所の高藤英治教授(物性物理学)らのチームが世界で初めて成功した。I-C(単個電子)チップに使う場合、銅線に比べエネルギー消費量が極めて小さくなる。今後、革新的な省エネルギー技術の開発につながりそうだ。(日経 英科学誌「ネイチャー」で発表)

# 電子含む金属酸化物の膜

100原子層積み重ね技術  
原子層積み重ね技術は、開裂した。冷却を必要としない。電圧がゼロになる高温超伝導エピソードのとき、電圧の半がなくなる効果。技術を用いた。装置内の不純物を極限まで除去。技術

「省エネルギー」加減器研究 東京大学の基礎研究センターが、金属酸化物の膜を100原子層積み重ねる技術を開発した。これは、従来の半導体よりも100倍も省エネが可能で、室温超伝導を実現できる。この技術は、省エネ型電子デバイスや、室温超伝導体への応用が期待されている。

## 室温超電導へ期待

と膜の材料の最適化を求め、精密な制御が可能で、酸化物の膜を原子層積み重ねる技術を開発した。これは、従来の半導体よりも100倍も省エネが可能で、室温超伝導を実現できる。この技術は、省エネ型電子デバイスや、室温超伝導体への応用が期待されている。

# 先端人



東大 正高氏

# 日本発、産業展開に意欲

「省エネ型電子デバイス」の開発に意欲を示す正高氏は、この技術が産業展開に大きく貢献することを期待している。また、この技術は、省エネ型電子デバイスや、室温超伝導体への応用が期待されている。

## 半導体の集積回路

# 消費電力10分の1

「省エネ型電子デバイス」の開発に意欲を示す正高氏は、この技術が産業展開に大きく貢献することを期待している。また、この技術は、省エネ型電子デバイスや、室温超伝導体への応用が期待されている。

## 北大など素子開発

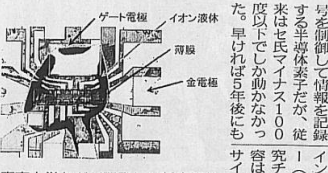
「省エネ型電子デバイス」の開発に意欲を示す正高氏は、この技術が産業展開に大きく貢献することを期待している。また、この技術は、省エネ型電子デバイスや、室温超伝導体への応用が期待されている。

## 光子を発生

「省エネ型電子デバイス」の開発に意欲を示す正高氏は、この技術が産業展開に大きく貢献することを期待している。また、この技術は、省エネ型電子デバイスや、室温超伝導体への応用が期待されている。

## 消費電力ほぼゼロに

「省エネ型電子デバイス」の開発に意欲を示す正高氏は、この技術が産業展開に大きく貢献することを期待している。また、この技術は、省エネ型電子デバイスや、室温超伝導体への応用が期待されている。



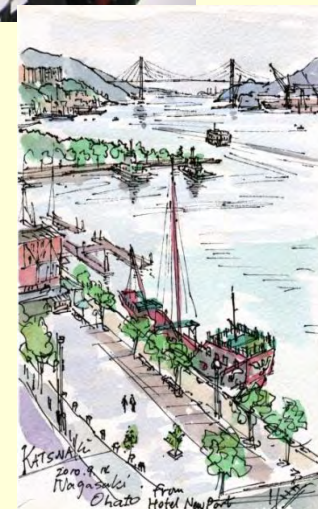
「省エネ型電子デバイス」の開発に意欲を示す正高氏は、この技術が産業展開に大きく貢献することを期待している。また、この技術は、省エネ型電子デバイスや、室温超伝導体への応用が期待されている。

# 成果報告会



## ▶ 応用物理学会シンポジウムの中で実施

- 第1期生：第71回 応用物理学会学術講演会  
（長崎大学 2010.9:150名）  
次世代革新的デバイス創成を指向した物理とテクノロジーの探索
- 第2期生報告会：第59回応用物理学会関係  
連合学術講演会（早稲田大学2012.3:150名）  
ポストケーリング時代における次世代革新的デバイス  
および材料の探索



# 成果報告会(最終年度)

次世代革新的デバイスのパラダイムシフトを目指

- ▶ 最終年度<sup>して</sup>の成果報告会は、2012.11.14～15に、富士ソフトアキバホールで開催。
- ▶ スピントロニクス分野および半導体分野の著名な研究者2名(大谷・平本教授)に、次世代デバイス領域の研究の現状についての特別講演をお願いしたほか、終了した1期、2期の研究者も含め、2日間にわたって討議を行いました。
- ▶ 単独開催にもかかわらず140名にのぼる研究者が参加し、質疑応答も多く行われ、参加者からは大変良かったという評価をいただきました。



## JSTとTIAの意見交換会(12/27)

- ▶ JSTの戦略創造事業の成果を切れ目なくイノベーションにつなげるべきだとの中村理事長の意向を受けて、JSTさきがけ「次世代デバイス」領域とCREST「革新材料・プロセス」領域の研究者と、産総研GNC、LEAP、PETRAのメンバーとの初めての意見交換会がつくばの産総研構内にあるTIA(つくばイノベーションアリーナ)において行われました。



研究の成果(Product)

アウトプット(Output)

アウトカム(Outcome)

インパクト(Impact)





## 外部発表・特許件数(採択別)

	論文		口頭		出版物		招待講演		合計 (除特許)	国内 出願	海外 出願
	国際	国内	国際	国内	国際	国内	国際	国内			
H19採択	194	8	159	234	1	37	107	75	815	26	5
H20採択	77	5	97	159	0	6	42	23	409	10	2
H21採択	68	10	95	176	6	7	46	24	432	16	9
<b>合計</b>	<b>339</b>	<b>23</b>	<b>351</b>	<b>569</b>	<b>7</b>	<b>50</b>	<b>195</b>	<b>122</b>	<b>1656</b>	<b>52</b>	<b>16</b>

# 外部発表 特許(期別)

	論文		口頭		出版物		招待講演		合計 (除特許)	国内 出願	海外 出願
	国際	国内	国際	国内	国際	国内	国際	国内			
07下合計	28	1	9	26	0	5	11	5	85	4	1
08上合計	18	3	14	29	0	4	7	10	85	6	1
08下合計	26	0	27	36	1	5	16	11	122	5	0
09上合計	30	1	51	66	0	2	16	14	180	4	2
09下合計	45	1	52	100	1	10	19	22	250	5	1
10上合計	47	3	49	92	0	7	34	22	254	5	2
10下合計	51	6	39	68	0	10	20	16	210	3	0
11上合計	41	1	51	35	1	2	16	1	148	13	1
11下合計	32	4	24	66	1	5	20	4	156	5	1
12上合計	19	2	24	38	2	0	18	13	116	2	7
12下合計	2	1	9	13	1	0	14	4	44	0	0
13上合計	0	0	2	0	0	0	4	0	6		
<b>合計</b>	<b>339</b>	<b>23</b>	<b>351</b>	<b>569</b>	<b>7</b>	<b>50</b>	<b>195</b>	<b>122</b>	<b>1656</b>	<b>52</b>	<b>16</b>

# 特許出願

PCT出願 抜粋

- 特に、成果が大きなものについては包括的なパッケージを検討するなど、積極的に取り組みました。

- ▶ 国内52
- ▶ 海外16

- 

内／外	研究者	出願番号	出願日	発明の名称	発明者
外	葛西誠也	12/920091	2008/09/02	信号再生装置	葛西 誠也(100%)
外	葛西誠也	PCT/JP2008/065758	2008/09/02	信号再生装置	葛西 誠也(100%)
外	齊藤英治	PCT/JP2009/060225	2009/06/04	誘導体スピントロニクスデバイス及び情報伝達方法	齊藤英治、内藤建一、梶原瑛祐、安藤和也
外	齊藤英治	PCT/JP2009/060317	2009/06/05	熱電変換素子	齊藤英治、内藤建一、梶原瑛祐、中山裕康
外	野田優	PCT/JP2012/054810	2012/2/27	基板上へのグラフェンの製造方法、基板上のグラフェン、および基板上グラフェンデバイス	野田優(70%)、高野宗一郎(30%)
外	富岡克広	PCT/JP2010/005862	2011/04/25	トンネル電界効果トランジスタおよびその製造方法	富岡克広(45%)、田中智隆(10%)、福井孝志(45%)
外	富岡克広	PCT/JP2010/003762	2010/6/4	発光素子および製造方法	富岡克広、福井孝志

# 主な受賞・表彰

氏名	年月日	名称			
齊藤英治	2008.11.12	第10回Sir Martin Wood賞	高橋有紀子	2011.5.13	第32回本多記念研究奨励賞
	2011.2.3	第7回学術振興会賞		2012.4.17	平成24年度科学技術分野の 文部科学大臣表彰 若手科学 者賞
	2011.2.14	第7回日本学士院学術奨励賞			
	2011.12.2	第25回IBM科学賞	水落憲和	2012.9.28	第2回永瀬賞
	2011.4.12	平成23年度 科学技術分野の 文部科学大臣表彰 若手科学 者賞	若林克法	2010.4.6	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
	2011.4	第10回船井学術賞			
村上修一	2010.2.19	第31回本多記念研究奨励賞	浜屋宏平	2011.4.12	平成23年度科学技術分野の 文部科学大臣表彰 若手科学 者賞
	2010.10.6	第12回Sir Martin Wood賞	中岡俊裕	2012.4.17	平成24年度科学技術分野の 文部科学大臣表彰 若手科学 者賞
	2011.12.2	第25回IBM科学賞			
	2012.12.18	第9回日本学術振興会賞	福村知昭	2011.2.3	第7回学術振興会賞
	2010.4.6	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			

## (1)スピントロニクス of 成果

- ▶ 齊藤研究者: 絶縁体におけるスピン流の概念を確立、また、スピンゼーベック効果を発見
- ▶ 白石研究者: グラフェンにおいて純スピン流の注入と、巨大磁気抵抗効果を室温で検証しました。
- ▶ 福村研究者: 室温磁性半導体 $\text{TiO}_2:\text{Co}$ において、電界制御による磁性の変化を実現
- ▶ 浜屋研究者: シリコンスピントロニクスの分野において、スピン注入の問題点を明らかに
- ▶ 高橋有紀子研究者: 世界最高のスピン偏極度をもつホイスラー合金ハーフメタルを創出

## (2) フォトニクス of 成果

- ▶ 高橋和研究者: フォトニック結晶のもつ高いQ値を使い、シリコンラマンレーザの発振に成功
- ▶ 竹中研究者: Geチャネル高性能MOSTランジスタとGeフォトディテクタをモノリシックに集積化
- ▶ 水落研究者: ダイヤモンドLEDを用いて室温で動作する量子情報通信用の単一光子光源を創出
- ▶ 塚本研究者: サブピコ秒の超高速光誘起磁化反転機構を解明、次世代磁気記録の原理を確立

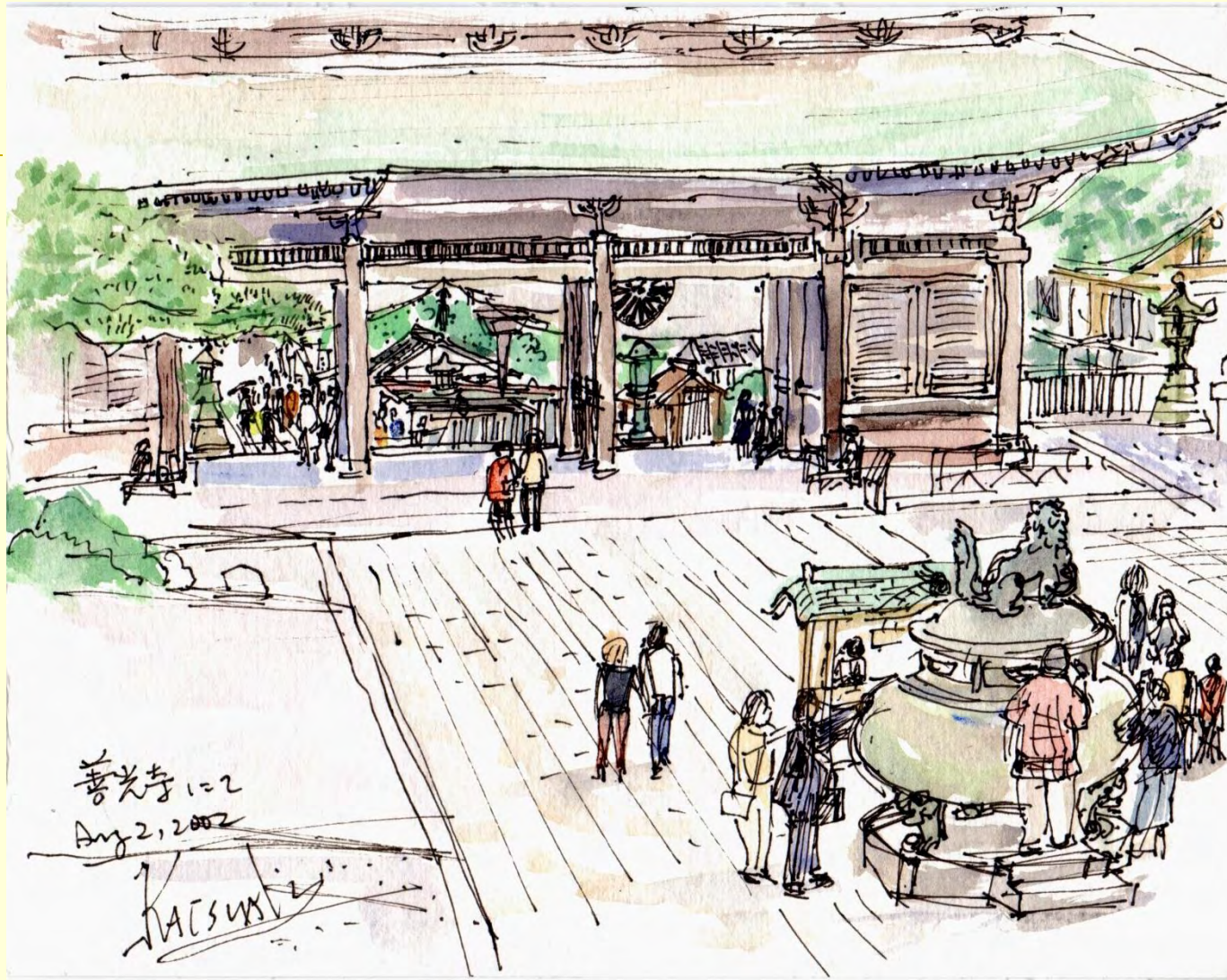
### (3) ナノエレクトロニクスの成果

- ▶ 富岡研究者: Si/InAs ナノワイヤトンネルFETにおいて世界最高性能のSS値21mV/decを達成
- ▶ 深田研究者: Si ナノワイヤにおける微量不純物の同定に成功
- ▶ 葛西研究者: ノイズ添加による確率共鳴を用いてIII-V族 ナノワイヤトランジスタの応答改善に成功した。

## (4) 有機分子エレクトロニクスの成果

- ▶ 山本研究者：有機系で世界で初めてとなる相転移トランジスタの作製に成功
- ▶ 野口研究者：有機分子被覆金ナノ粒子（数nmφ）と微小色素分子を用いた単電子素子を創製。
- ▶ 西永研究者：GaAsの結晶中に欠陥なしにC<sub>60</sub>を導入、電荷の蓄積・放出を利用した新規量子デバイス作製の可能性があることを明らかに。
- ▶ 町田研究者：グラフェン量子ドットを用いて高感度テラヘルツ検出器を実現
- ▶ 野田研究者：新手法“エッチング析出法”を考案、石英ガラス上に金属フリーグラフェンを直接形成することに成功しました。





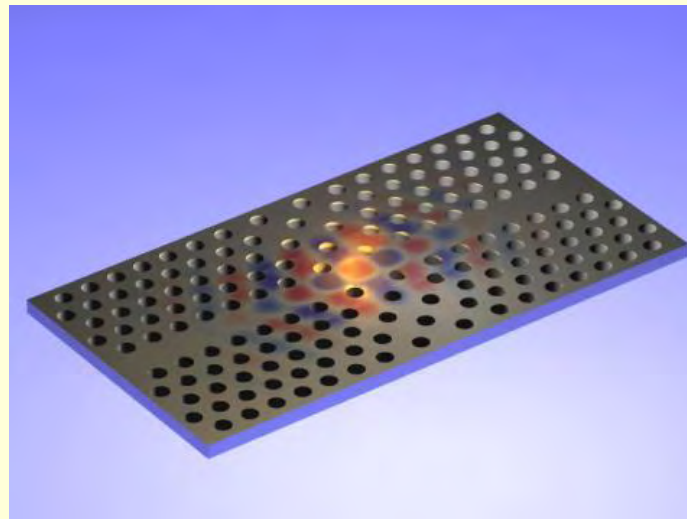
## フォトニクス的成果抜粋



# フォトニック結晶ナノ共振器シリコン ラマンレーザの開発

研究のねらいは極微小サイズと超高Q値を併せ持つフォトニック結晶ナノ共振器を用いて極微小・超省電力Siラマンレーザ素子を実現することである。

CMOSチップ上の光集積回路の実現に向けた新たな道筋を与えると同時に、様々なシリコン微小光素子研究を誘発すると期待される。



高橋 和



# 開発の経緯

---

- ▶ シリコン集積回路の大規模化・高機能化にともない金属配線での信号遅延と消費電力が深刻化している。この解決手段として光電子集積回路が注目されるが、間接遷移型半導体であるSiはレーザ動作や光増幅の実現が困難なため、III-V族半導体との混載が模索されてきた。
- ▶ 2002年インテルは誘導ラマン散乱を用いる光増幅方法を提案し、2005年Siリブ型導波路を用いたSiラマンレーザを開発したがcmサイズと大きく、チップ内配線にはほど遠いものであった。



# フォトニック結晶を利用したラマンレーザ

---

- ▶ 高橋研究者は、Q値の高いフォトニック結晶をナノサイズ共振器として用いることによるラマンレーザを提案した。
  - ▶ Siのラマンシフトと一致した15.6 THzの周波数差を持ち、可能な限り高いQ値を持ち、微小体積だけでなく高いラマン散乱確率が得られる電磁界分布を持つ2つの共振モードを合わせ持つ構造が必要
  - ▶ 電磁界計算から入射側には奇パリティの電磁界分布を有し、出射側には偶パリティの電磁界分布を有する場合に、強い結合が生じてラマンレーザが実現することを予測し、フォトニック結晶構造を設計・作製した。
  - ▶ この結果、インテルデバイスの1万分の1以下のサイズと、1万分の1以下のエネルギーで動作するSiラマンレーザを実現した)。これはSi光配線に大きな革新をもたらすもので、世界的に注目されている。
- 



# サンプル構造

ラマン散乱確率はバンド間遷移確率よりも更に低いため、強励起と長い共振器長が必要となり、このデバイスの小型化・低閾値化は大きく進展しなかった。この問題を解決するためにカギとなるのが、光と物質の相互作用を高めることが可能な高Q値微小共振器を用いることである。すでに、ナノ共振器としては

世界最高Q値  
数百万をSiを用いて  
実現している。  
図1aに示すような  
素子を作製した。  
Siのラマン  
テンソルと  
図1c,dの電磁界  
分布を考慮して、  
図1eに示すように  
[100]方位にナノ  
共振器を作製した。

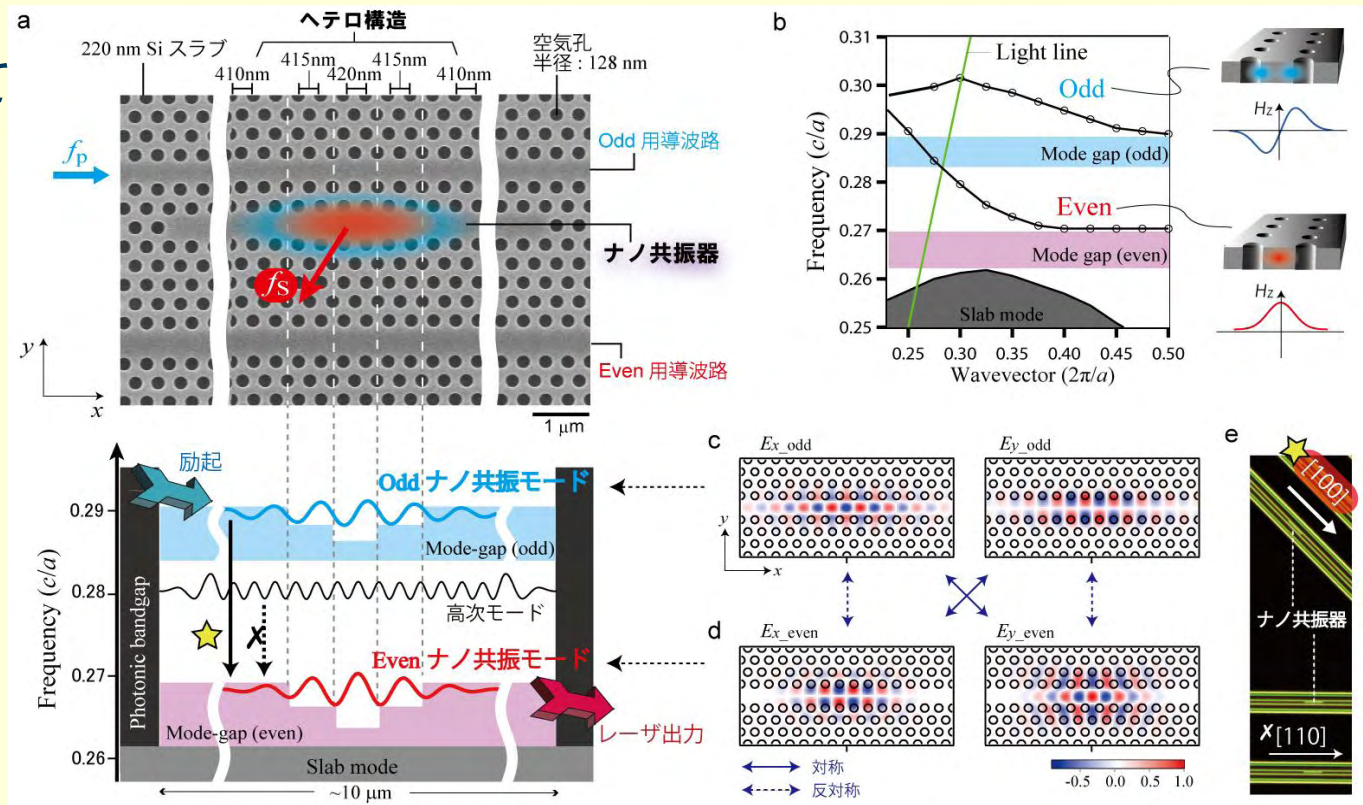


図1. (a) 作製したナノ共振器周辺の電子顕微鏡像とナノ共振器のバンド構造と共振モードの模式図. (b) ナノ共振器のバンド図. (c),(d) oddナノ共振モードとevenナノ共振モードの電磁界分布. (e) サンプルの光学顕微鏡像

# ラマン散乱測定

図2(c) は、odd共振モードを約1 mWの入射強度で励振した時の共振器からのラマン散乱スペクトルである(挿入図はラマン散乱のイメージ)。

励起強度依存性を調べたところ、僅かではあるが、共鳴ラマンピークの非線形な増強が確認され、初めて誘導ラマン散乱の兆候を捉えることに成功した。

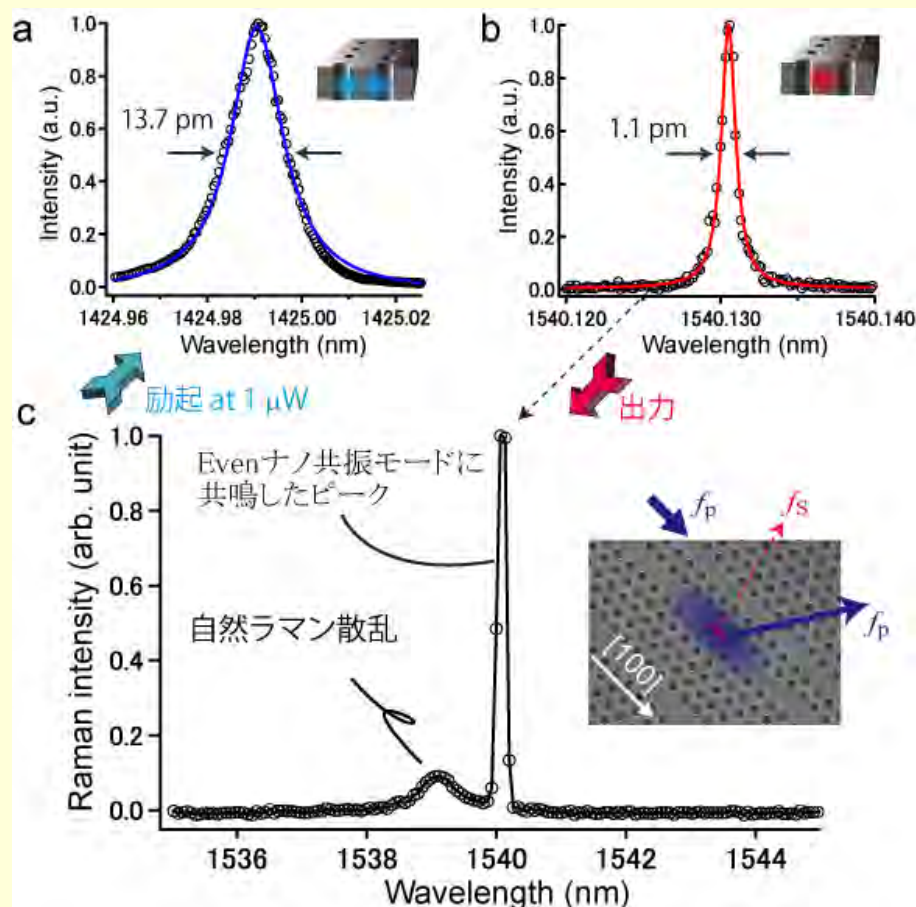
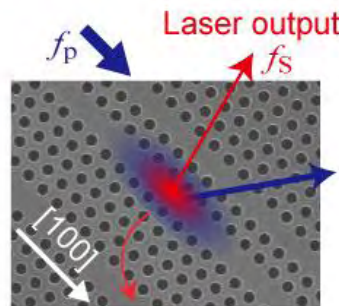
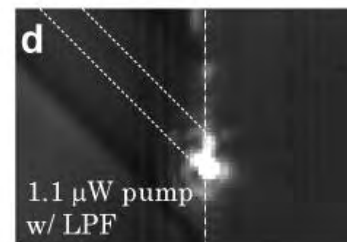
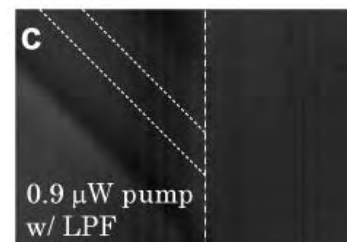
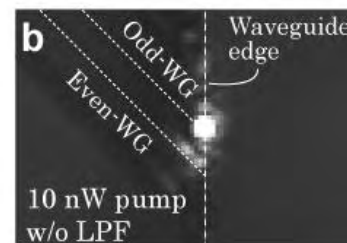
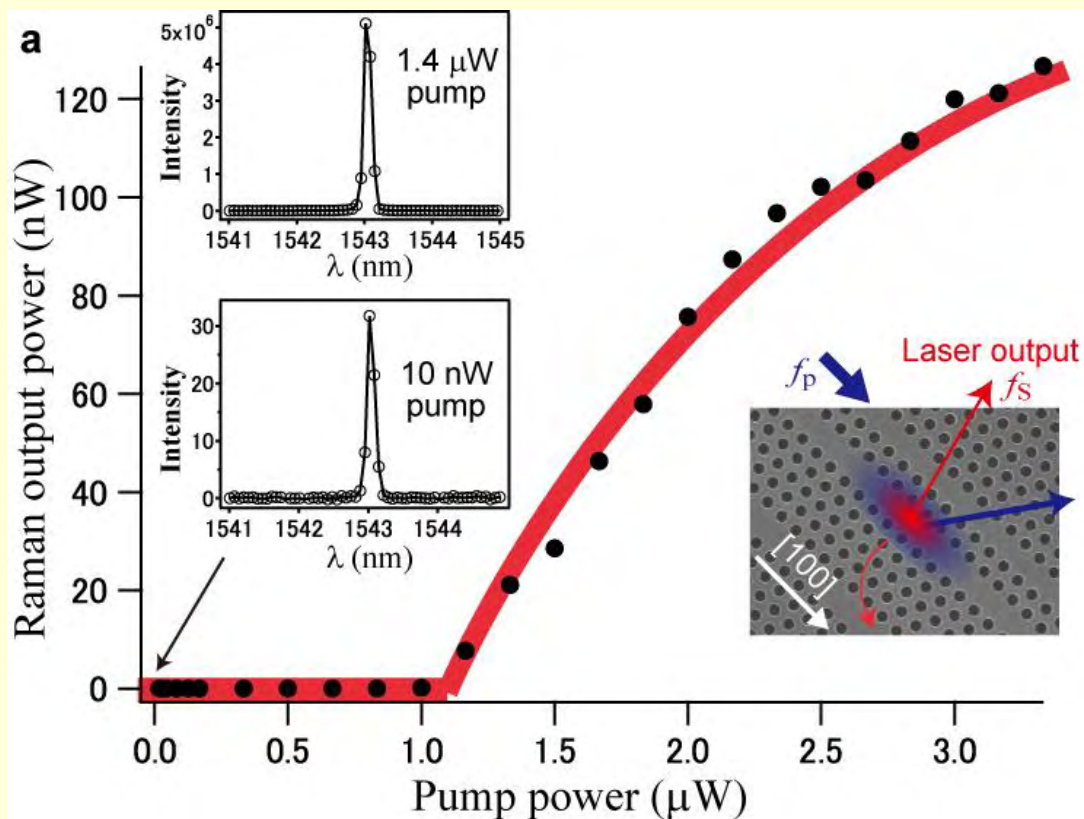
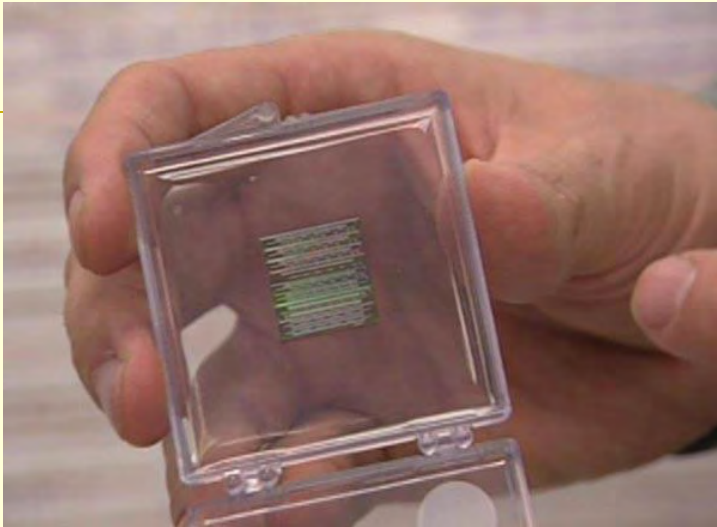


図2. (a),(b) oddナノ共振モードとevenナノ共振モードの共振スペクトル。(c) oddナノ共振モードを励振した時のラマンスペクトル

# 連続レーザ発振

下図のように、連続レーザ発振を達成した。また、写真に示すように、ラマンレーザ発振による回路動作も確認した。

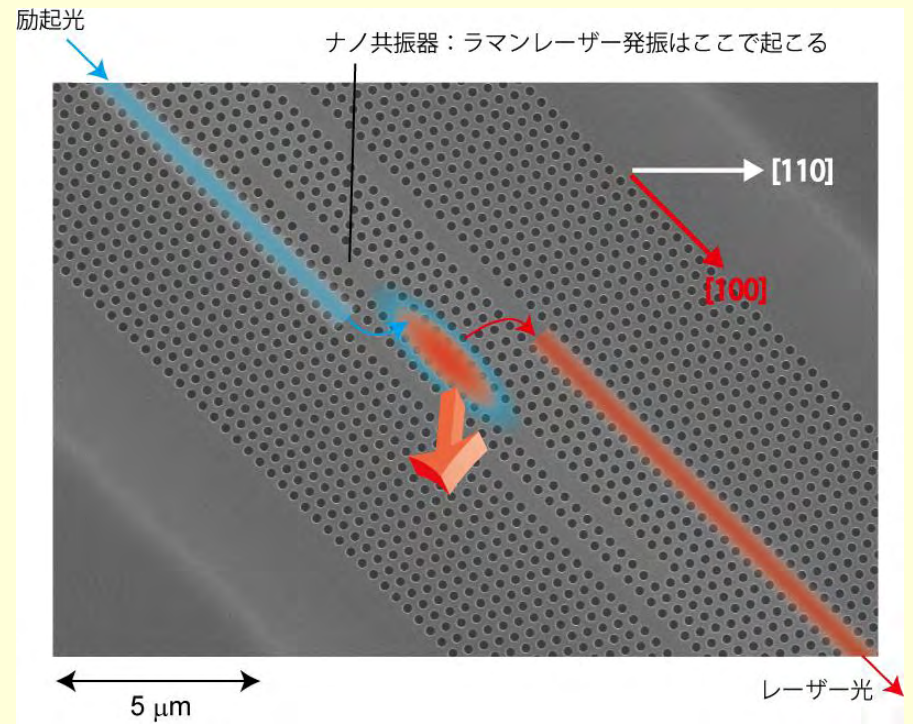




インテルのラマンレーザーチップ  
8個のっている



開発したラマンレーザーチップ  
数百個載せられる





# 光配線LSI実現に向けたGeナノ光電子集積回路の開発

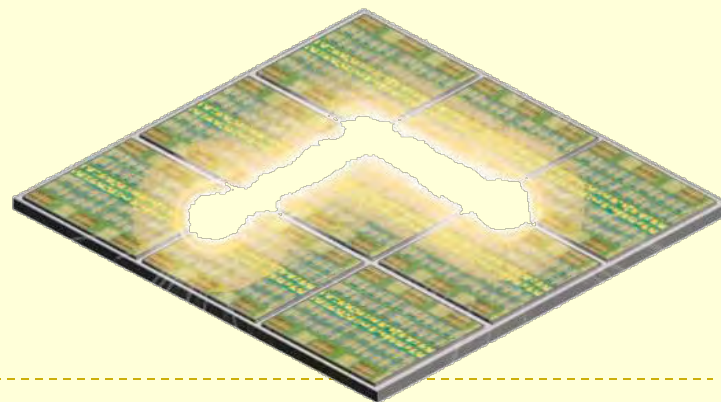
Si基板上にGeをチャネル材料とした高性能MOSトランジスタとGeフォトディテクタをモノリシックに集積化することで、スケーリング則破綻後においても高性能化を可能とする光配線Ge LSIの実現を目指す。



スーパーコンピュータをワンチップ化した超高性能LSIや高度な光信号処理が可能な光ルーターチップなどを実現するための基盤技術を確立



竹中 充



# 高性能Ge CMOSの作製

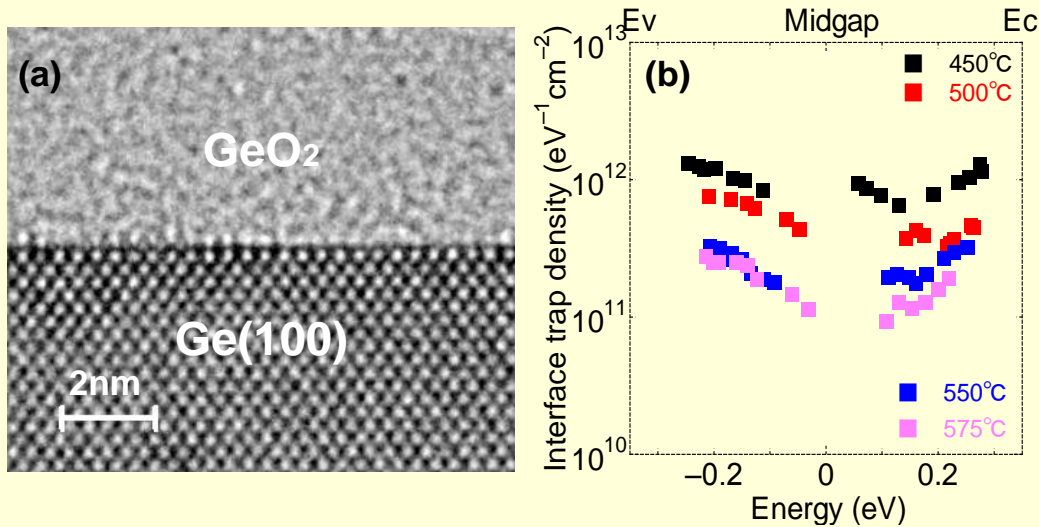


図1. 高温熱酸化GeO<sub>2</sub>/Ge MOS界面特性

Geを高温で熱酸化



伝導帯近傍においても  
極めて界面準位が低い  
GeO<sub>2</sub>/Ge MOS界面が実現

TBAsを用いた気相ドーピング法  
を確立



- ・イオン注入より1桁遅い拡散速度
- ・低ダメージプロセス

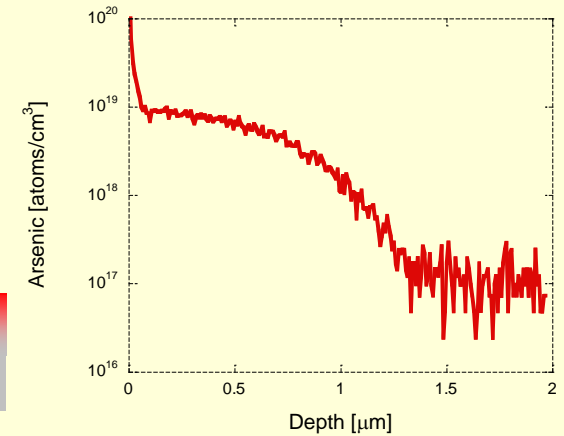
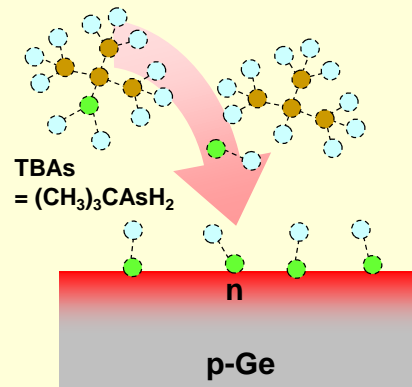


図2. TBAsを用いた気相ドーピングおよび  
Ge中におけるAs分布

# 高性能Ge CMOSの実現

- ・トランジスタのオン・オフ比は世界最高の5桁以上の値
- ・実効移動度がSiを上回る性能を世界で初めて実証

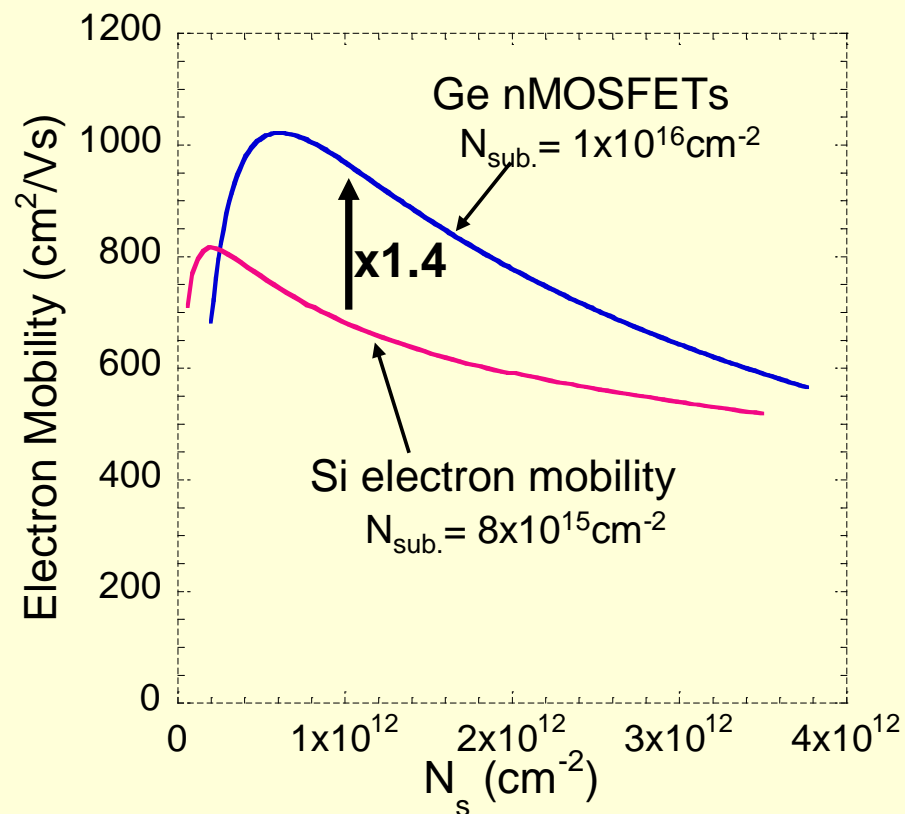
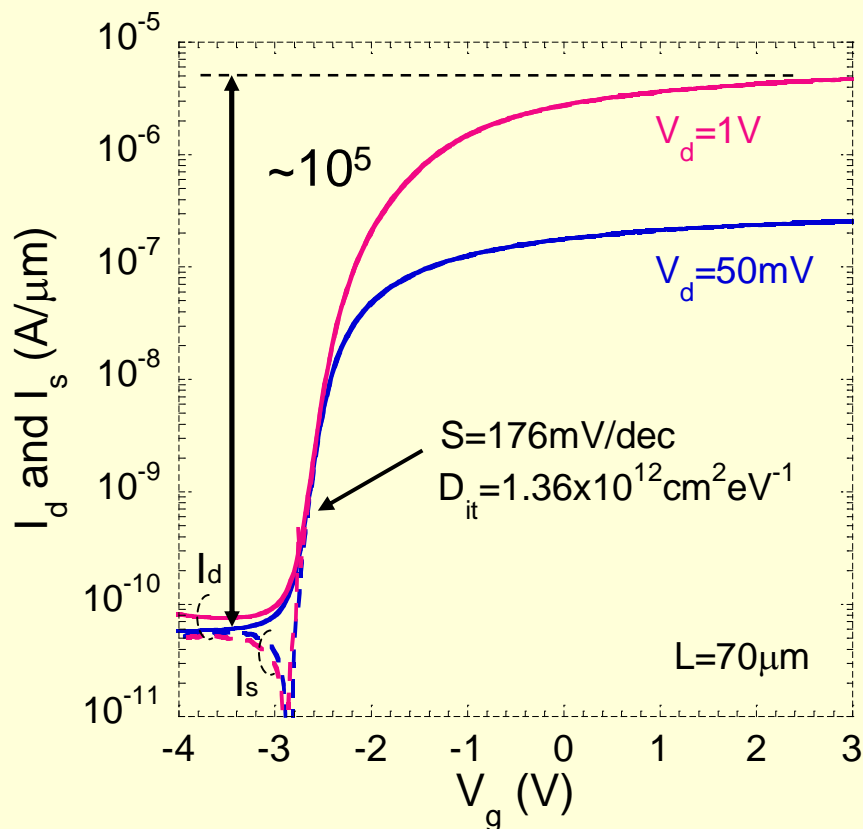


図3. 気相拡散で形成したGe n型トランジスタの電気特性および実効移動度

# Geフォトディテクタ

- ・熱酸化GeO<sub>2</sub>（Ge表面をパッシベーション）
- ・気相ドーピング技術（イオン注入と較べて2桁程度、接合リークを抑制）



1 nA以下の暗電流が実現可能であることを世界で初めて示す(図4)

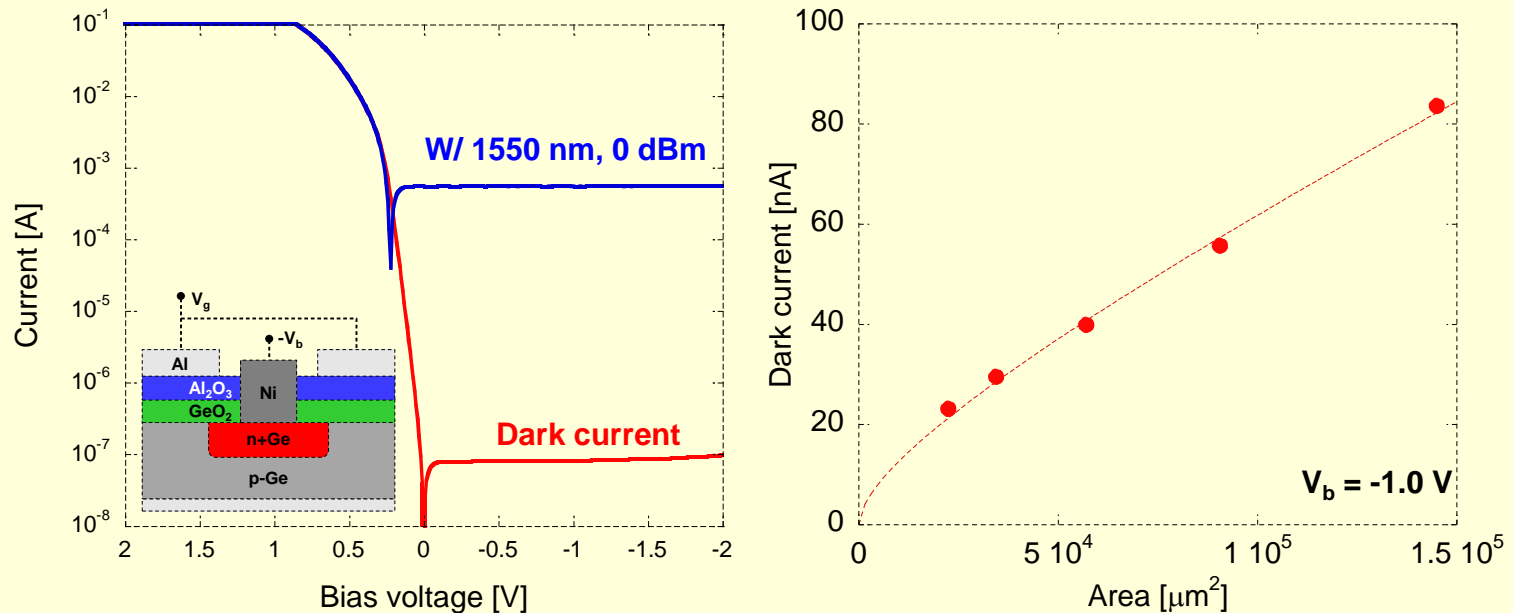


図4. 気相拡散で形成したGeO<sub>2</sub>/Ge PD電気特性および暗電流特性

## Geフォトディテクタ

---

- ▶ 次に、気相ドーピング法と熱酸化GeO<sub>2</sub>によるGe表面不活性化技術をGeフォトディテクタに適用し、これまで実用化の障害になっていた接合リーク電流をFig.2に示すように、従来法と比較して2桁程度抑制し、素子面積が小さい導波路型フォトディテクタにおいて1 nA以下の暗電流が実現可能であることを世界で初めて示した)。さらに、酸化濃縮を用いて高品位Ge膜をSi基板上に集積する技術の確立にも成功したので、光配線Ge LSIを実現するすべての要素技術が準備された。

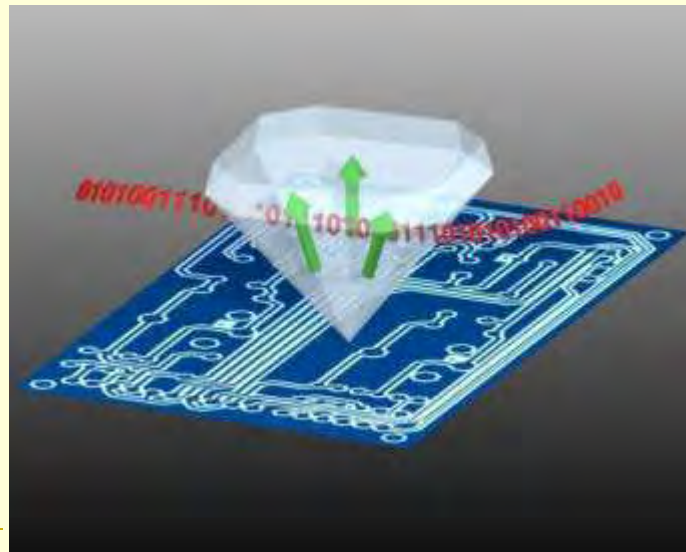



# ワイドギャップ半導体中の単一常磁性 発光中心による量子情報素子

室温動作が期待でき、コヒーレンス時間の長いスピンをもつ発光中心(常磁性発光中心)を有するダイヤモンド等のワイドギャップ半導体に注目し、通信に用いられる“光”と計算や記録に用いられる“スピン”を量子ビットとして用い、**室温動作、多量子ビット化、電氣的制御、量子もつれ状態の生成と操作の実現を目指す。**



水落 憲和



- 
- ▶ これまでの量子情報通信技術では、単一光子源として極低温に冷却する必要がある量子ドットや有機分子を用いてきた。
  - ▶ 水落研究者は、ダイヤモンドに含まれるNV中心(窒素と炭素空孔の複合欠陥)の束縛エネルギーが室温の熱エネルギーより十分大きく室温で動作することに着目、産総研の協力により作製したダイヤモンドLED(高品位の人工ダイヤモンド薄膜をp型およびn型の人工ダイヤモンドで挟んだpin接合LED)において、電流注入でNV中心を発光させ、室温における単一光子発生 of 電気的な制御に世界で初めて成功した。これは、量子情報通信実現を加速すると期待される大きな成果である。
- 
- 

# 室温で初めての電流注入による単一光子発生

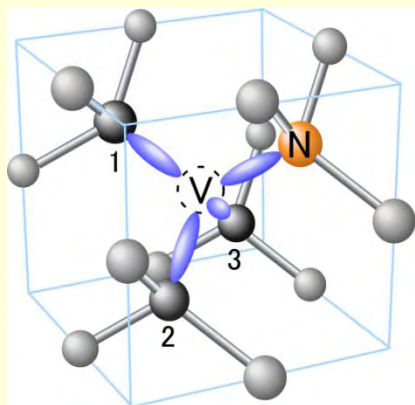


図1、ダイヤモンド中のNV中心  
室温でも非常に安定

初の電流注入で室温動作する単一  
光子発生



- 単一キャリアと単一光子のインターフェイス
- 発光とスピン状態の光による操作（初期化）の独立かつ並行操作
- 発光機構の違いにより局所的な操作などへの期待

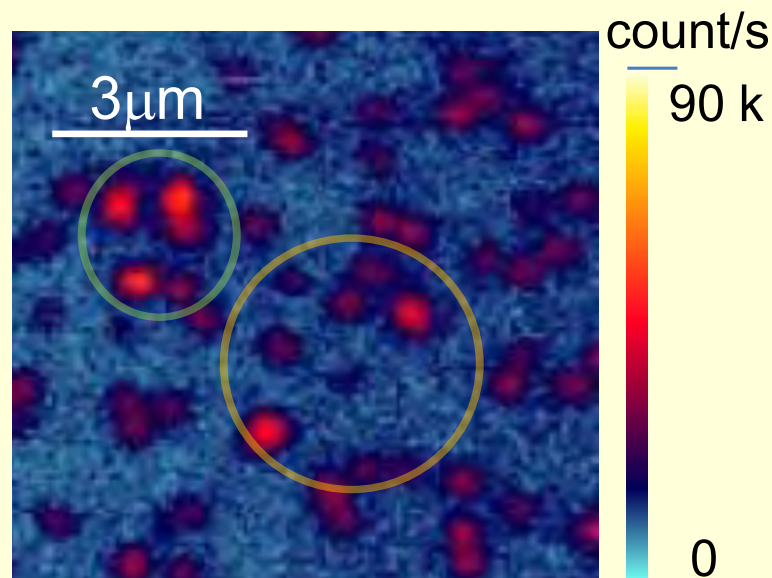


図2 単一NV中心のEL像. いくつもの単一のNV中心が電流注入により発光している様子が観測されている



# 多量子ビット系における量子情報処理研究

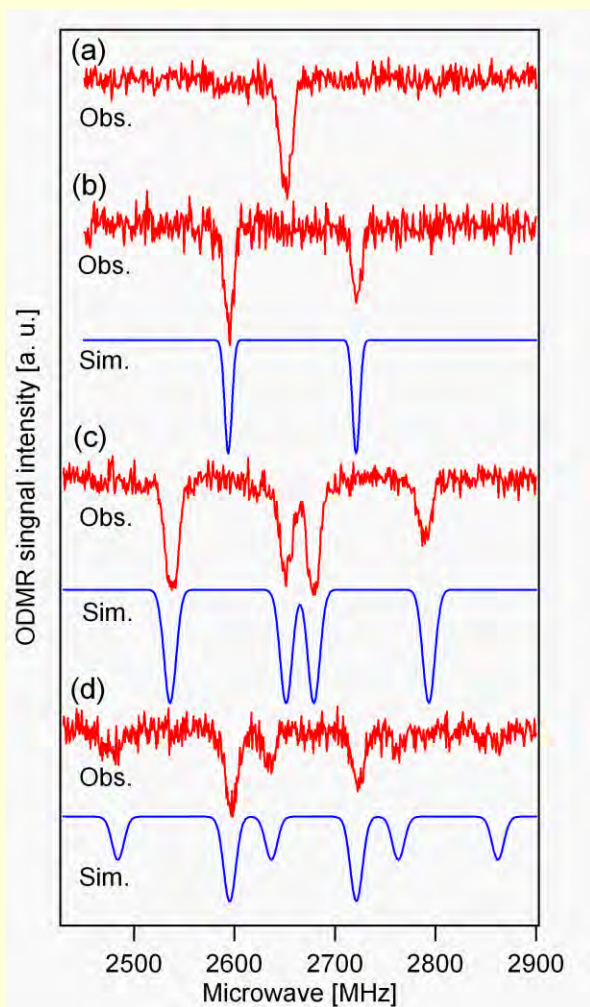


図3、3つの最近接炭素原子のうち(a)0個、(b)1個、(c)2個、(d)3個が $^{13}\text{C}$ と帰属される光検出磁気共鳴(ODMR)スペクトルとシミュレーションスペクトル

核スピン3つと電子スピン1つの4量子ビットからなる系における量子もつれ状態の生成に成功。

固体系における量子もつれを生成した量子ビット数としては最高数であり、室温で実現。

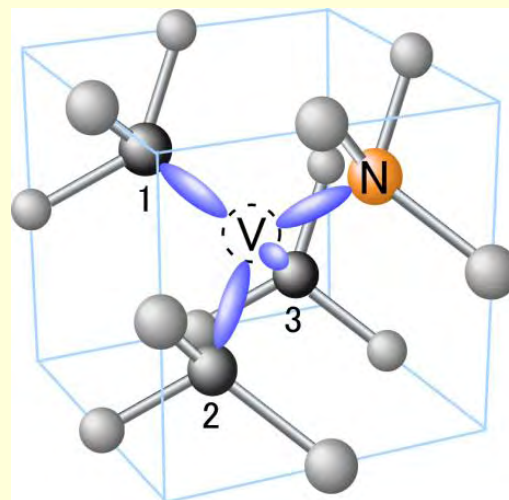


図4、Nは窒素原子. Vは空孔(V). 1-3でラベルされた炭素原子が空孔からの最近接炭素原子

## その他の成果

- ・ダイヤモンド・超伝導量子ビットハイブリッド系の量子状態制御

超伝導量子ビットとNV中心のスピン間との相互作用及び状態間の振動を観測。

超伝導量子ビットの重ね合わせ状態をダイヤモンド結晶中のNVスピン集団へ保存した後に再び読み出せることを意味しており、量子状態を保存可能な量子メモリの実現にとって、ダイヤモンドが極めて有望な候補であることを実証。*Nature Photonics*に掲載。

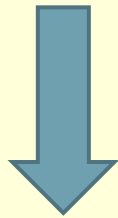
- ・SiCにおける常磁性発光中心に関する研究

室温で光検出磁気共鳴を観測。ダイヤモンド以外で室温でナノ粒子でのスピン観測は初めて。



# 量子ドットを用いた単電荷・スピン・光機能融合デバイス

- ・超低消費電力のための「単電子制御技術」、
- ・超高速信号処理、伝送が可能な「光と電子の融合技術」、
- ・新原理動作を実現するための「スピン自由度の制御技術」



1つの素子において融合

- ・単電子素子
- ・光通信技術
- ・スピントロニクス

異分野の架け橋となる、デバイスプラットフォームを提供する



中岡 俊裕

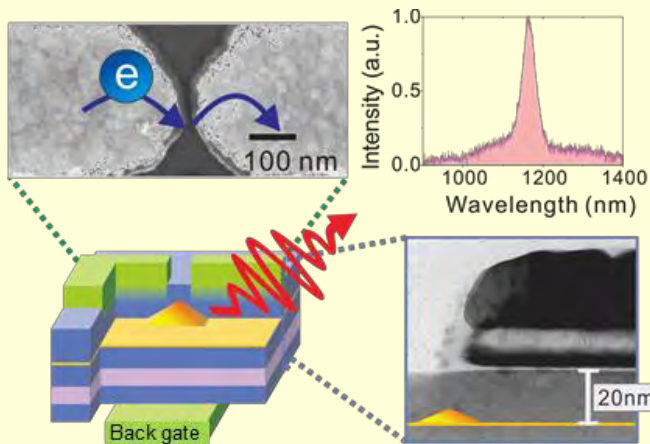


# 概要

中岡研究者は、従来の自己形成量子ドットで困難であった単電子伝導と発光制御を両立させる横型素子、および単一光子発生と電子制御を両立させる縦型素子の2種類の素子を作製した。

## 横型素子

単電子伝導と発光制御を両立させる。



## 縦型素子

単一光子発生と電子制御を両立させる。

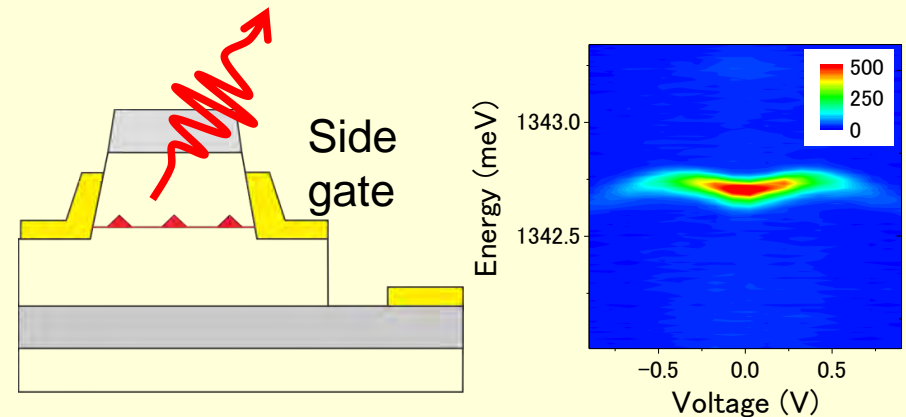



図1: 横型素子の模式図と発光スペクトル

図2: 縦型素子の模式図と発光スペクトル

- 
- ▶ 横型素子においては、発光効率を高めるため、量子ドットを通常の発光素子と同様バリア層中に埋め込んだ。この状態での電気コンタクトが課題であったが、微小金属拡散技術によって電極とドットの間トンネル接合をつくることにより電流注入発光に十分な電流密度を確保し良好な発光特性を示す単電子トンネル伝導素子の製作に成功した。
  - ▶ この素子の単電子動作を示すクーロンダイヤモンドと、光特性を示してある。
- 
- 

# 横型素子

図3より、単電子トランジスタとして動作していることがわかる。  
本素子独自の特徴として、この単電子トンネル伝導素子からの良好な発光  
(図1)がみられる。



発光観測時においても、  
ゲートにより量子ドット内の  
量子準位とフェルミ準位を  
相対的に制御可能。



単電子輸送と発光制御との  
両立を横型素子を用いて実証。

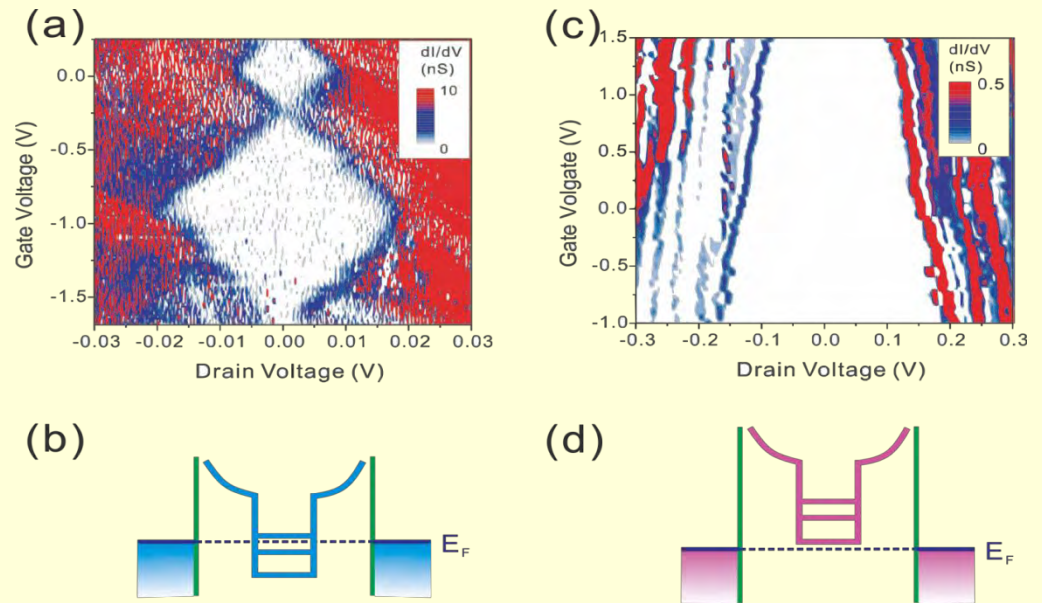



図3: (a)AuGeベース横型素子の微分コンダクタンス  
(4 K)と(b)バンド模式図。(c)Ti/Auベース横型素子の  
微分コンダクタンスと(d)とそのバンド模式図。



- 
- ▶ 一方、縦型素子においては、単一光子発生を確認するとともに、サイドゲートにより発光波長が制御できることを確認した)。単一光子発生と電子制御の両立を実現した画期的な成果です。
  - ▶ サイドゲート制御型量子ドット単一光子素子は「離れた2素子間の量子もつれ」生成素子に応用できる。
  - ▶ 量子情報通信の中継器には2素子間の2光子間量子干渉を使うが、これまで波長を一致させることが困難なため干渉の実現が困難であったが、今回開発した波長可変素子によってこれが達成できるようになり、長距離量子情報通信に道を開いた。
- 
- 

# 縦型素子

光子相関測定により、サイドゲートによる発光波長制御下においても単一光子発生していることを示した。

また本縦型素子において、これまで困難であった面内電場による電子制御を実現した。本素子は初めて縦横双方への電圧印加を可能とするものである。



縦型素子によって波長可変単一光子発生と横電場電子制御を達成した。

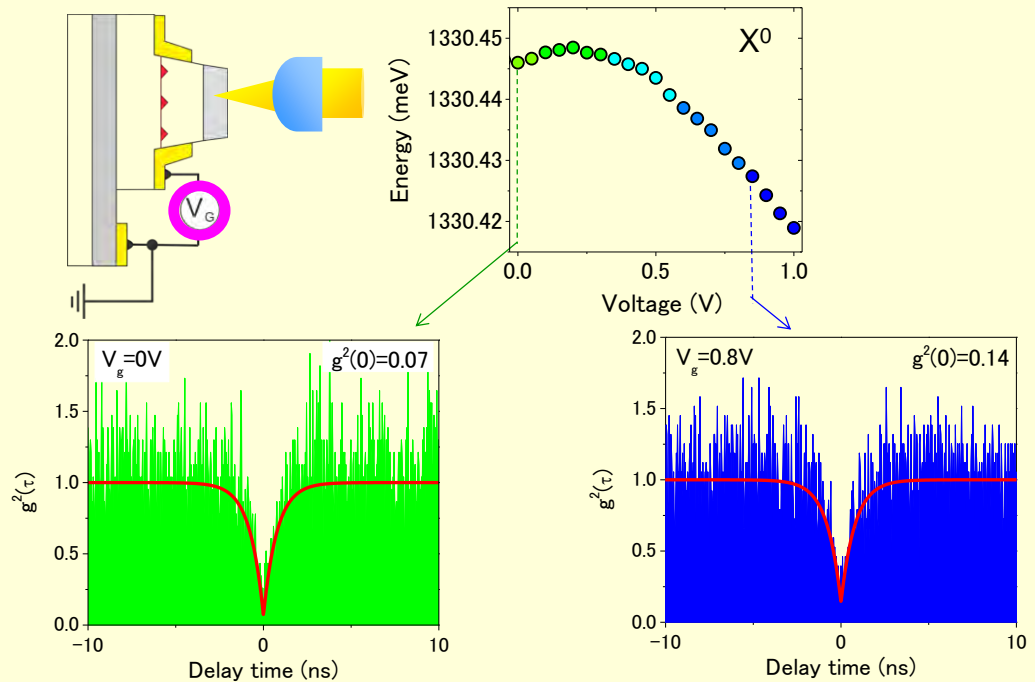


図4: ゲート制御単一光子発生の素子図と発光波長シフト。図下は各ゲート電圧における光子相関ヒストグラム。



# フェムト秒パルス・レーザによる超高速スピン制御・計測

目的: 革新的超高速情報記録を目指す  
(a)高速応答材料 と (b)新規高速記録原理

特徴: 超短パルス光を利用し

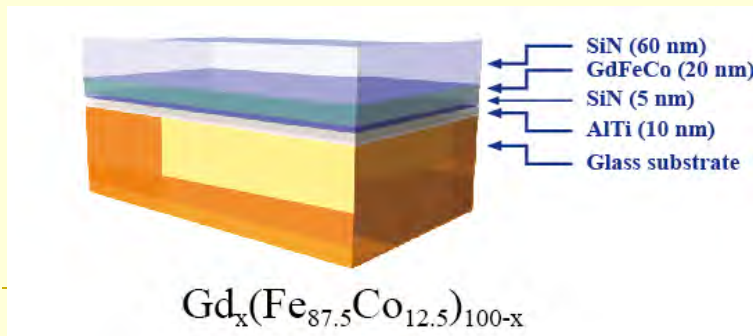
(a) 超高時間分解能応答特性計測  
+フェリ磁性体の補償現象利用

(b) 磁気光学効果の逆効果による、光高速スピン制御

注目材料: GdFeCo 金属フェリ磁性体  
従来型光磁気記録用媒体材料

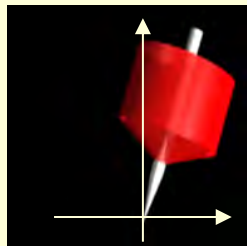


塚本 新



# 磁化応答速度増大:フェリ磁性角運動量補償現象

角運動量を有する物体  
(例:回転しているコマ)  
トルクが働く→歳差運動

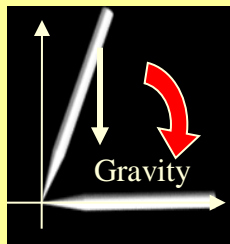


コマの質量に働く重力  
→ コマを倒すトルク

磁気モーメントに働く磁場  
→ 磁化反転トルク



角運動量保存則により  
歳差運動を生じる  
→反転時間:長



角運動量を持たない  
(回転が無い)  
→反転時間:短

★磁化モーメントは有するが  
角運動量は持たない磁性体

フェロ磁性体 不可能

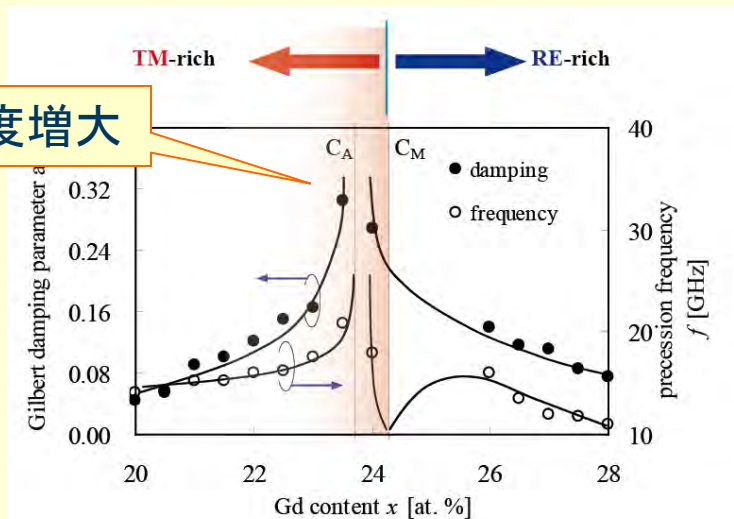
$$\mathbf{L} = -\mathbf{M} / \gamma$$

フェリ: 副格子磁化反結合  
強結合 副格子 $\gamma$ 値が異なる

$$\mathbf{L}_{net} = -(\mathbf{M}_{RE} / \gamma_{RE} - \mathbf{M}_{TM} / \gamma_{TM})$$

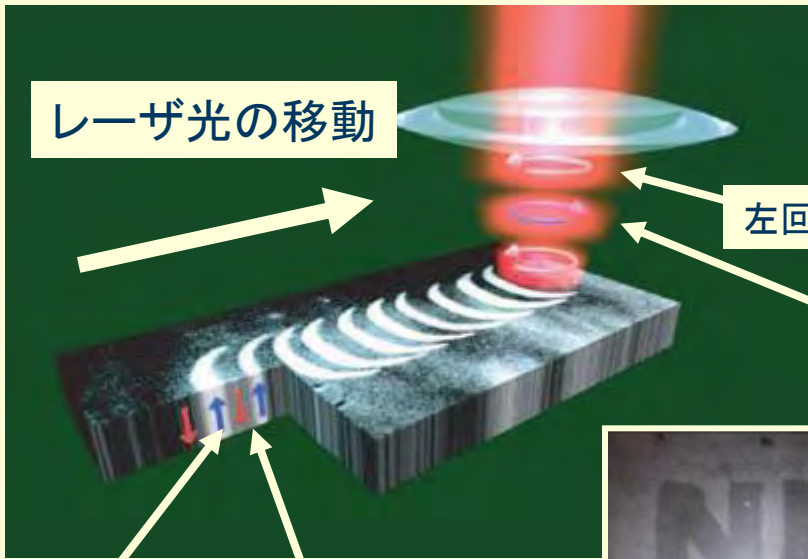
$$\mathbf{M}_{net} = \mathbf{M}_{RE} - \mathbf{M}_{TM}$$

応答速度増大



角運動量補償現象を確認

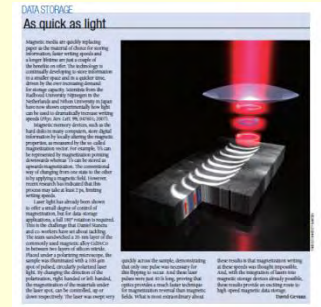
# 新規高速記録原理：円偏光変調 光直接磁気記録



光により磁場印加と等価な効果



Nature Photonics



上向き磁化 下向き磁化



右回り円偏光

PRL 99, 047601 (2007)  
Radboud Univ. との共同研究

外部磁界無し

40 fsの円偏光照射のみで  
完全磁化反転

偏光カイラリティ → 最終磁化状態  
一対一対応

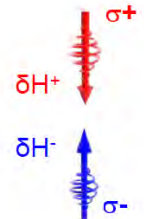
磁気光学効果の逆効果  
逆ファラデー効果

$$\mathbf{H}(0) = (\chi/16\pi)[\mathbf{E}(\omega) \times \mathbf{E}^*(\omega)]$$

Axial field of light

Magneto-optical  
susceptibility

Electric field of light



# 新奇なスピンドYNAMICS: 超高速磁化反転過程における過渡的フェロ状態の出現

基底状態で反強磁性的に結合した副格子  
スピン集団



反転する過程において  
過渡的強磁性状態が  
出現する現象を発見

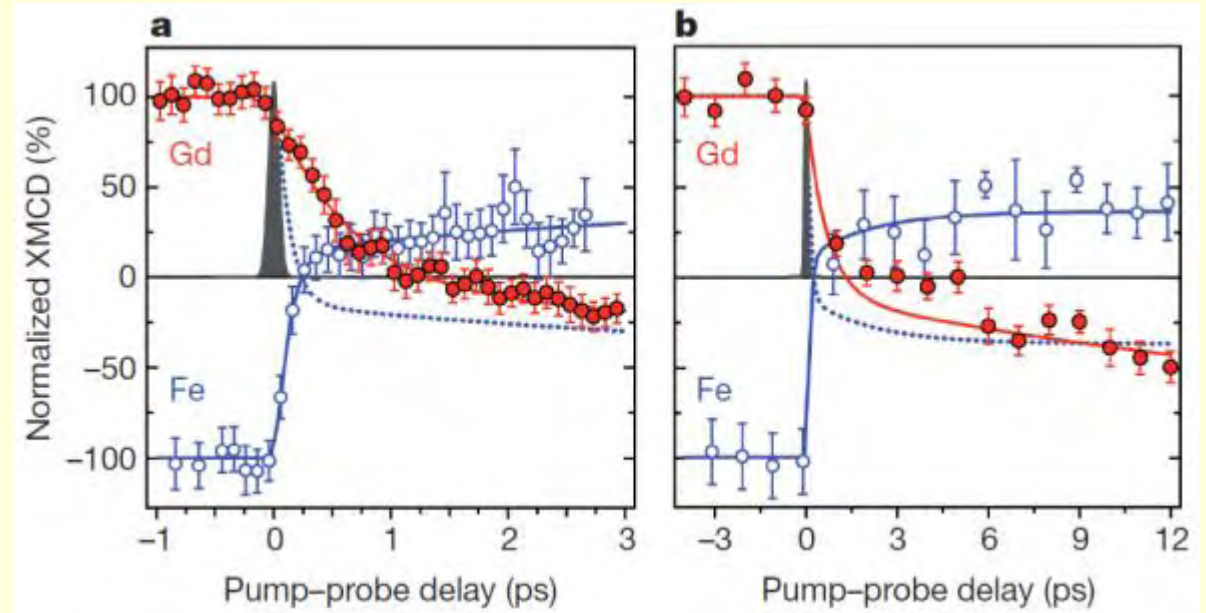


図2 軟X線円二色性計測によるFeとGd磁気モーメントの元素分解ダイナミクス<sup>4)</sup>。Fe(○)とGd(●)磁気モーメントの過渡ダイナミクス。励起後a: 3 ps およびb: 12 ps 時間スケール。



# 極性ワイドギャップ半導体フォトニックナノ構造の新規光機能

研究のねらいは、分極効果の積極的な利用により材料系の新規光機能を実証。

非線形光学特性に注目し、量子光学応用に向けた導波路型波長変換素子の開発を行った。

図1 に示す三種の導波路構造による疑似位相整合 (QPM) を提案し、高効率な波長変換を実現。



片山 竜二

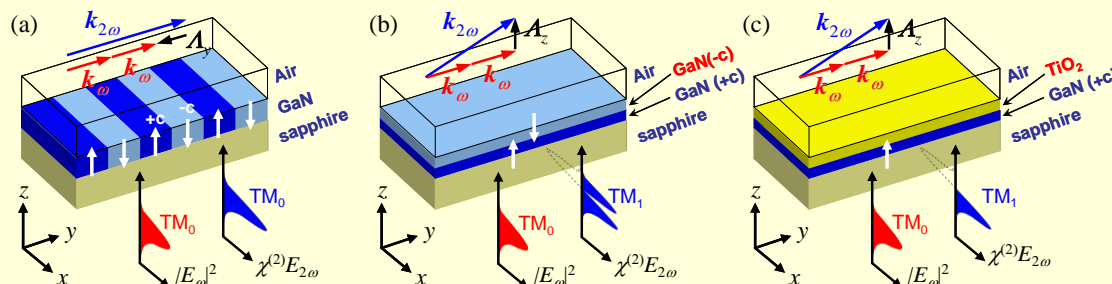


図1 窒化物導波路構造と位相整合法: (a) 縦QPM、(b) 横QPM、(c) 線形・非線形横QPM

# 周期的極性反転GaN導波路の作製

結晶の表裏( $\pm c$ 極性)を周期的に反転したGaN導波路の作製に成功。

ケルビン力顕微鏡(KFM)ならびにピエゾ力顕微鏡(PFM)を用いて評価し、周期的に極性反転したGaN導波路の作製を確認。

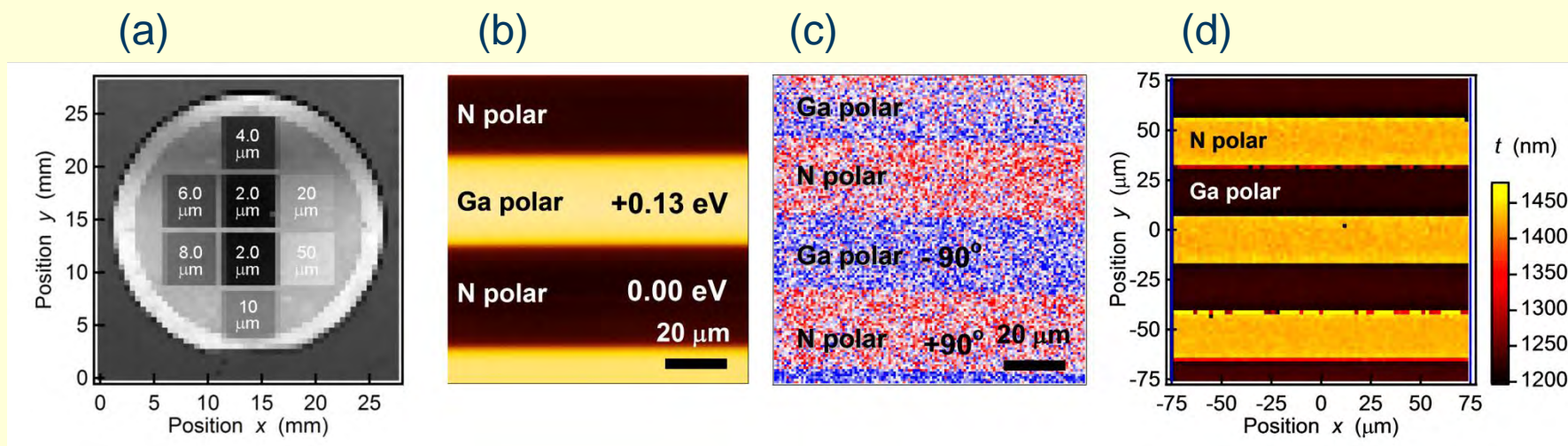


図2 周期的極性反転GaN導波路の(a)パターン、(b) KFM像、(c) PFM像、(d)膜厚分布像

# 周期的極性反転GaNスラブ導波路からの第二高調波発生

高効率な第二高調波発生に成功。

基本波波長850 nmにおける高調波強度の角度依存性から、入射基本波はグレーティングの+4次回折により $TM_0$ 導波モードに結合し、高調波の $TM_0$ 導波モードが+7次回折により結合し出射する過程であることが分かった(図3 (a))。

偏光、基本波パワー依存性(図3(c))、チューニング特性から、二次非線形光学過程であることを確認。

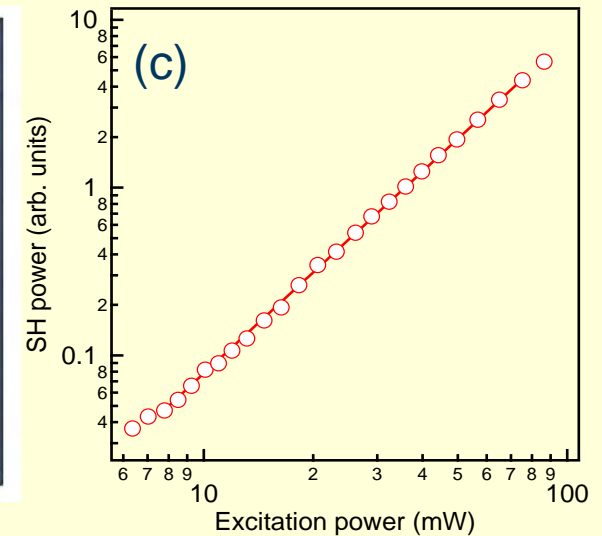
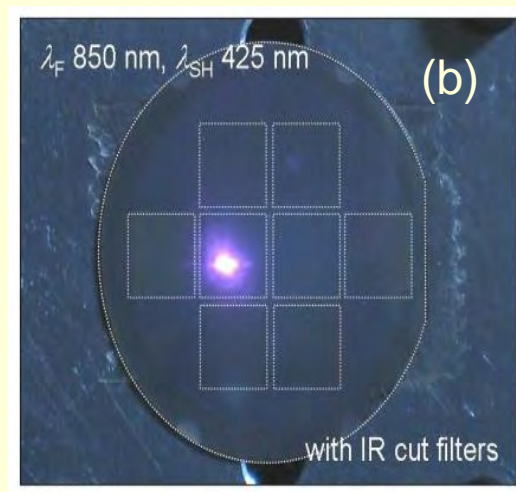
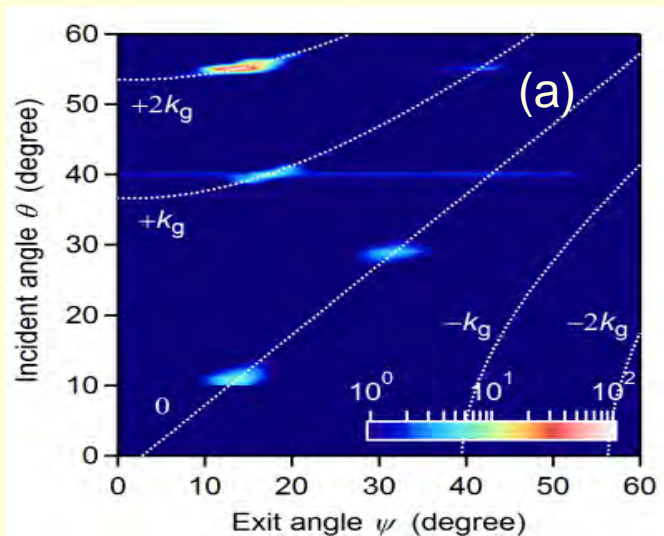


図3 (a) 第二高調波強度の角度依存性、(c) 第二高調波発生の遠視野像、  
(c) 基本波パワー依存性

# TiO<sub>x</sub>/SiO<sub>2</sub>およびTiO<sub>x</sub>/GaN導波路

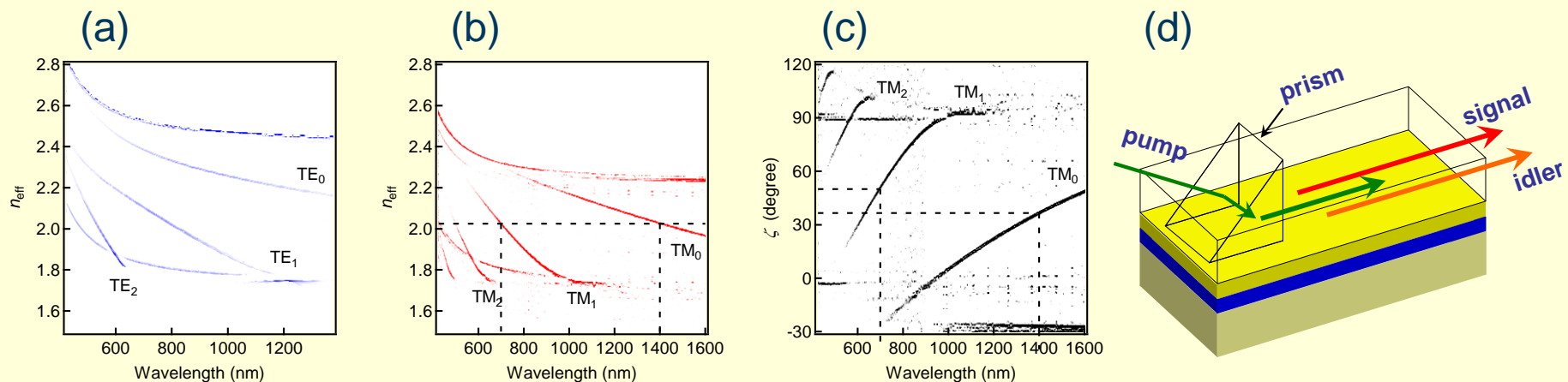
TEおよびTM導波モード分散と、TMモード共鳴角の波長依存性(図4(a-c))から、両モードともに導波モードが存在することを確認。



導波路として機能することを実証。



光パラメトリック発生の実験ジオメトリを提案(図4(d))。



▶ 図4 TiO<sub>x</sub>/Ga<sub>N</sub>導波路の  $m$ -line測定結果:(a) TEモード分散、(b) TMモード分散、  
(c) TMモード共鳴角の波長依存性、(d) 光パラメトリック発生の実験ジオメトリ



# 戦略目標の達成に資する成果

## (1) 非シリコン系半導体による beyond-CMOS材料の開拓

- InAsナノワイヤ縦型トランジスタ(富岡)
- Ge-nMOSFET(竹中)
- C<sub>60</sub>ドープGaAs薄膜(西永)
- Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>パワーデバイス(東脇)
- GaNの極性反転制御によるSHG(片山)

## (2) 光・電気・磁気機能の多元的な融合・変換利用による新規デバイス材料の開拓

- スピン流デバイス(齊藤)
- ダイヤモンドNVセンター(水落)
- 室温強磁性半導体(福村)
- 高いスピン分極率材料(高橋有)
- 超高速光磁気記録(塚本)

## (3) ナノレベル・分子レベルでの加工により新規デバイスの構築を可能にする材料の開拓

- シリコンラマンレーザ(高橋和)
- グラフェン量子ドット(町田)
- ナノギャップ単電子デバイス(野口)

## (4) 薄く軽量で湾曲性・屈曲性ならびに耐衝撃性を有する材料の開拓

- 有機強相関FET(山本)
- 誘電体上のグラフェン成長(野田)
- グラフェンスピントロニクス(白石)
- アセン系有機半導体の設計と作成(中野)

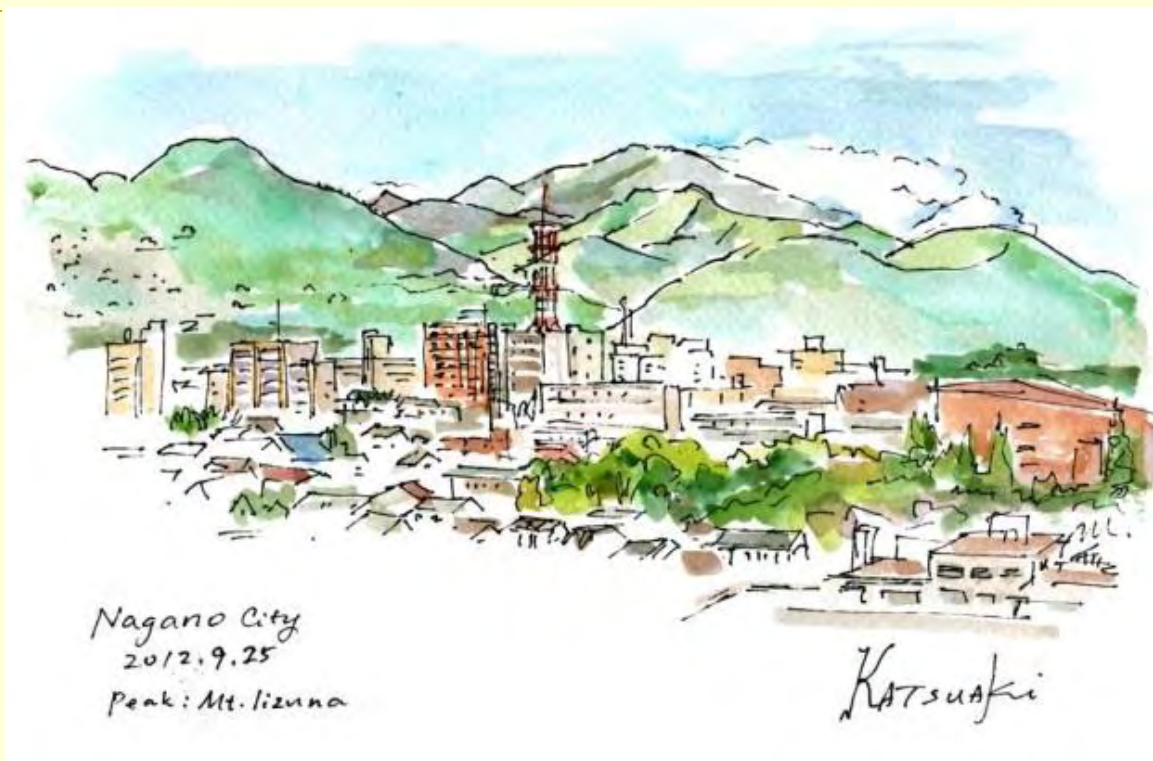
# 産業技術への展開

研究者	交流者	交流内容
葛西誠也	NTT物性科学基礎研究所 西口克彦氏	単電子ダイナミクス計測とその確率的動作の情報処理応用について討論
葛西誠也	パナソニック先端技術研究所上田路人氏	確率共鳴理論解析法に関する解説
葛西誠也	豊田中央研究所	確率共鳴の基礎に関する共同研究
白石誠司	TDK	Si中の純スピン流の創成・Hanle効果の観測に成功。成果発表済み。
高橋有紀子	NECの大嶋博士	磁壁電流駆動メモリ用の薄膜のスピン偏極率測定
安田剛	出光興産株式会社	共同研究契約を締結(平成20年10月1日～平成21年9月30日、さきがけ研究に使用する有機半導体供給のため)
若林克法	Hosik Lee(NEC)、宮本良之(NEC)	グラフェンナノリボンにおける磁性状態の理論に関する論文執筆
寒川義裕	日本サーマルコンサルティングの浦山憲雄氏	ドイツのLinseis社に示差熱分析によるその場観察が可能なAlN成長坩堝ユニットの開発を斡旋
須崎友文	浜松ホトニクス	LaAlO <sub>3</sub> /SrTiO <sub>3</sub> 積層構造による仕事関数制御表面について訪問あり(非公開情報)

研究者	交流者	交流内容
竹中充	Wissmar氏(スウェーデンACREO社)	酸化濃縮や、それを利用した歪印加技術についての議論
竹中充	住友化学	酸化濃縮基板に関する共同研究
水落憲和	NTT物性科学基礎研究所超伝導量子物理研究グループ(リーダ: 仙場浩一博士)	共同研究
野口裕	IBM research Zurich, Nanotechnology group (Leader: Dr. H. Riel)	研究室見学とセミナー発表
野田優	民間企業1社	グラフェンの公知技術に関する共同研究
野田優	民間企業複数社	CNT技術に関する共同研究
東脇正高	タムラ製作所	Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 系半導体素子についての共同研究(特許出願(PCT/JP2012/072896、PCT/JP2012/072897、PCT/JP2012/072899、PCT/JP2012/072900、PCT/JP2012/072902))
東脇正高	20社あまりの国内外の企業の訪問を受け、6社に関しては、共同研究協議中	Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub> パワーデバイス研究開発 82

# おわりに

- ▶ さきがけ次世代デバイスは5年半の期間に、多くのアウトプットがあり、スピントロニクス、フォトニクス中心にイノベーションに資する多くのアウトカムが得られました。
- ▶ 研究意欲が旺盛な平均年齢35歳の若い研究者たちが、適切な額の助成と熱く語り合える場を与えられ、志の高い研究者たちと接して想像以上に大きく成長しました。
- ▶ このようなさきがけ研究領域の場に研究総括として立ち会う機会を得たことは、私にとって何物にも代えがたい経験でした。
- ▶ 本領域を支えた研究者たち、アドバイザー各位、領域事務所、研究推進、広報、科学コミュニケーションを支えるJSTの職員各位に深く感謝します。



▶ ご清聴ありがとうございました。