

News Letter

CREST・さきがけ ナノエレクトロニクス研究領域

Vol.2

Jan. 2015

Contents

-
- P.2 IoT 時代に貢献する融合技術創出を期待
超低電圧デバイス技術研究組合 (LEAP) 増原利明
-
- P.3 研究領域の紹介
-
- P.4 平成26年度採択研究概要
-
- P.5 高感度生体磁気センサに向けたダイヤモンド NV センタの1軸方向制御
東京工業大学大学院理工学研究科 波多野睦子
-
- P.6 極低消費電力回路のための Ge/ひずみ Si トンネル MOS トランジスタの開発
東京大学大学院工学系研究科 高木信一
-
- P.7 近藤状態によって散乱される電子波の位相測定に初めて成功
東京大学大学院工学系研究科 山本倫久
-

IoT時代に貢献する融合技術創出を期待



増原利明

超低電圧デバイス技術研究組合 (LEAP) 専務理事

2000年代後半から、日本のエレクトロニクス・IT産業、半導体デバイス産業は産業構造変化を先取りできずに後退し、現在も構造変革途上の企業が多い状況にあります。要因はいくつか挙げられますが、スマートフォンの進展と機能拡大による市場と応用の変化、ファウンドリ・ファブレス分業によるコスト構造変化、オープンイノベーション研究開発進展などです。

変化は止まっておらず、今後、あらゆるIT機器がネットに接続されるIoT、ビッグデータの世界と向かいつつあります。その方向は、医療、健康、安全、災害、食糧、交通、社会インフラなど、IT機器、センサ、ウェアラブル、モバイル端末からの多量データと、クラウドコンピューティングの世界が連携するIoTパラダイムです。Diamandis-Kotlerの言葉を借りるなら“Abundance”でしょうか。ICデバイスでも、Moore則による2倍/年の機能集積化を微細化で実現していた単純スケールアップ時代は、技術面、経済面で過ぎ去りつつあります。IoTの世界では、脳や神経の信号処理に迫るCMOS低電圧化、そのための素子ばらつき、リーク電流制御、フレキシブル・三次元実装、実世界信号のセンサとA/D変換、無線アクセス、電力供給など機能のヘテロ集積の低コストでの実現が重要になっています。まさに「材料・デバイス・ナノシステム融合」のパラダイムへと向かいつつあります。この変化をリードするには、技術だけでなく、新しい事業モデルやエコシステムも構築する必要があります。

LEAPでは、経済産業省と新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託により、グリーンITとIoT社会を実現するため、低電圧動作にフォーカスした新しいデバイス・技術開発を行っています。今までにFD-SOIの一種であるSOTB(Si On Thin Buried-oxide) CMOSで、バルクCMOSに比較して、しきい電圧ばらつき1/2以下、基板バイアスでリーク電流を3桁低減(比)を実現、SOTB CMOSとバルク

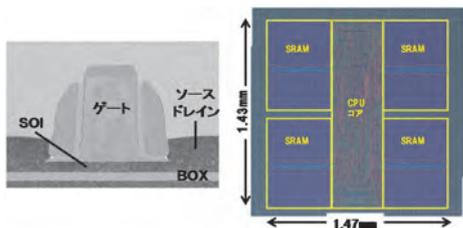


図1 SOTB トランジスタとマイコンチップ

CMOSをハイブリッド集積したマイコンCPUを0.35V、10pJ級のエネルギーで動作させました(図1)。また、超低電圧動作可能な不揮発メモリとして3つのデバイスを開発しています。CPUのキャッシュ用途に向け 10^{15} 回以上リード・ライト可能なSTT-MRAMを開発しました。また、製造後論理構成可能なロジックに向け、原子スイッチ(Complementary Atom-Switch, CAS)を開発、FPGAによる製造後論理構成と比較して1/4の小面積を実現、0.3Vでの動作も確認しました(図2)。さらに、上位のストレージクラスメモリを可能とする超格子GeTe/Sb₂Te₃メモリ、TRAM(Topological Switching RAM)を開発し、1V以下のセット、リセットを確認しました。フラッシュメモリの三次元化を実現するグラフェンやカーボンナノチューブ配線技術も開発しており、これらによるSSDの実現に貢献します。

本“CREST・さきがけ”では、材料・デバイス・ナノシステム融合を標榜し、極めて多彩な研究が展開されています。融合を行うには、応用対象システム・機器へのフォーカスした研究のレイヤ間整合を行うことや、産業界や他プロジェクトとの補完・連携も必要でしょう。いわば、研究チームが奏でるいくつかの旋律を、作曲家、指揮者である研究総括が統合することが重要です。音楽にフーガという形式がありますが、多声音楽のポリフォニーのような研究かも知れません。2014年のノーベル物理学賞は「高輝度・低消費電力白色光源を可能とした高効率青色LEDの発明」に対して、赤崎勇氏、天野浩氏、中村修二氏に授与されました。青色LEDという革新的技術の発明と、その独創が白色照明の革新へ貢献したからに他なりません。本領域研究においても、研究総括の明快な指揮により、社会と産業界に大きな創造のインパクトと変革のエネルギーを与える産業技術が生まれることを期待します。

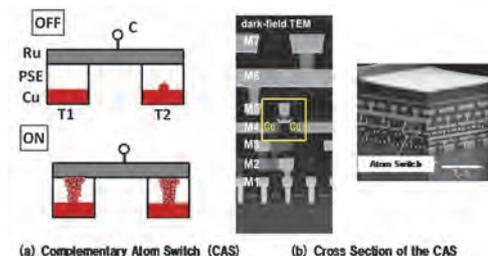


図2 製造後構成可能ロジックに用いる原子スイッチ (CAS)

研究領域の紹介



研究総括
桜井貴康
(東京大学 生産技術研究所 教授)



副研究総括
横山直樹
(富士通研究所 フェロー)

本研究領域では以下の点に配慮しながら領域を運営し、ナノエレクトロニクスの新たな革新的基盤技術を創成することを目指しています。

- ・ ナノ材料、ナノデバイス、設計・回路、アーキテクチャ、システムなどの複数技術レイヤーの融合
 - ・ 桁違いの低エネルギーの実現や新規機能の創出
 - ・ デモンストレーションの達成、企業参画の歓迎
- ※さきがけでは、実デバイスによるデモンストレーションを必須としない。



CREST・さきがけ合同キックオフミーティング



本研究領域では CREST・さきがけ採択者に集まっていたいただき、研究開始にあたって、研究領域の目標や主旨を周知するとともに、お互いの研究内容を発表することで研究者間の連携を促進するキックオフミーティングを開催しています。

ミーティング後は意見交換の場を用意し、個別に活発な議論が展開されています。CREST・さきがけ複合領域の特徴を活かして、CREST 間、さきがけ間の連携のみならず、CREST・さきがけ間の連携も進めています。

また、本研究領域の課題募集は 3 回を予定しており、来年度が最後の課題募集となります。

さきがけ領域会議



さきがけでは研究総括・アドバイザー・さきがけ研究者が集まる泊りがけの領域会議を年2回開催しています。

会議ではさきがけ研究の進捗状況について深い議論が行われています。また、外部より講演者を招いて、さきがけ研究者への期待をお話いただいています。今回は CREST 「二次元機能性原子・分子薄膜の創製と利用に資する基盤技術の創出」研究領域の黒部篤研究総括にお話をいただきました。

領域会議をきっかけに、普段、学会では会う機会のない分野の異なるさきがけ研究者同士も共同研究へ発展しています。また、さきがけ研究者同士に留まらず、アドバイザーとの共同研究も行われています。

平成26年度採択研究概要

CREST 1

異種機能コデザインによるテラヘルツ帯ビデオイメージングデバイスの開発

浅野種正

九州大学大学院
システム情報科学研究科
教授



電波と光の性質を併せ持つテラヘルツ電磁波を利用すると、煙の中の人を見るなど、これまでのカメラでは見えなかった物を見ることができ、災害救助、犯罪防止、資源探査、医療、創薬など多くの分野で新しいサービスを提供できます。本研究では電子が高速に移動できる半導体を素材とする高性能トランジスタと極限まで雑音を低減したLSIを先進の常温実装技術で融合し、電磁波感度を従来比500倍に高め、実用的なテラヘルツビデオカメラ用撮像デバイスを創出します。

さががけ 1

スピンを利用したニューロモルフィックシステムの理論設計

荒井礼子

(独) 科学技術振興機構
さががけ研究者



ヒトの脳や神経細胞の働きにヒントを得たニューロモルフィックシステムは、膨大で曖昧・不完全な情報を低消費電力で処理できる新しい情報処理技術として大きな可能性を持っています。本研究では電子のスピンを利用したナノメートルサイズの磁性体デバイスを用い、スピンドYNAMISの制御理論に基づいた理論設計を行うことで、超低消費電力で動作する新規ニューロモルフィックシステムの実現を目指します。

さががけ 5

ひずみ誘起ゲージ場を用いた単原子層膜の伝導制御とエレクトロニクス応用

友利ひかり

(独) 科学技術振興機構
さががけ研究者



炭素の単原子層であるグラフェンには、格子ひずみによって擬似的なペットルポテンシャルやスカラーポテンシャルが生じるという特殊な性質があります。本研究では、この性質を利用して、格子ひずみの空間分布を制御することによって、高移動度を維持しつつ、グラフェントランジスタの実用化に十分な大きさの伝導ギャップを創出するための基礎技術を開拓します。これにより、単原子層を用いたナノエレクトロニクスの実現に貢献します。

さががけ 9

ナノ膜厚ポリマー絶縁膜を利用した全印刷型基板レス有機集積回路の創成

福田憲二郎

山形大学大学院
理工学研究科
助教



有機エレクトロニクスの大きな特長である「柔軟性」と「大面積」を生かすことで、新たなエレクトロニクス分野が可能となります。本研究では従来の構成層である「基板」「電極」「絶縁膜」「半導体層」のうち、ナノ膜厚の絶縁膜に基板としての役割を付与することで「基板」層を除去します。この手法を全印刷工程で行うことによって、超薄型・超軽量・超柔軟な大面積エレクトロニクスを実現させることが可能となります。

CREST 2

ピアスイッチの実現によるアルゴリズム・処理機構融合型コンピューティングの創出

橋本昌宜

大阪大学大学院
情報科学研究科
准教授



専用ハードウェア化による高いエネルギー効率、ソフトウェア実装と同等の設計生産性、低い設計・初期製造コストを実現するアルゴリズム・処理機構融合型コンピューティングを創出します。ピアスイッチと呼ぶ不揮発スイッチデバイスを開発し、再構成可能チップの性能と面積効率を格段に向上させます。ユーザアルゴリズムは、再構成可能チップ上に専用処理機構として実現し、プロセスが抱えるフォン・ノイマン・ボトルネックを根本的に解決します。

さががけ 2

定性的モデリングに基づいたシリコン神経ネットワークプラットフォーム

河野 崇

東京大学
生産技術研究所
准教授



脳神経系は自分で学習し、複雑な情報処理を高速に実行できる超低消費エネルギー情報処理システムです。さらに、何十年もの間特段のメンテナンスなしに動きつづけます。この情報処理を模倣した電子回路システム(シリコン神経ネットワーク)のプラットフォームを構築し、超低消費電力で明示的なプログラムなしで複雑な情報を自律的・高速に処理できるロバストな次世代情報処理システムの基礎技術の確立を目指します。

さががけ 6

2層グラフェンのギャップ内準位解析と複層化界面制御による準位低減

長汐晃輔

東京大学大学院
工学系研究科
准教授



既存のSiO₂/Si系における界面準位との比較をもとに、層状物質系、特に2層グラフェンでのギャップ内準位の起源という本質的な問題に様々な解析手法を適応し取り組みます。様々なゲートスタック構造における系統的な比較をもとに界面準位の起源を明確にし、低減への指針を明確にします。最終的に、室温で高移動度とHigh on/offを両立させることを研究目標とします。

さががけ 10

マイクロ波・光領域における量子オプトメカニカルシステムの構築

山崎歴彦

東京大学
先端科学技術研究センター
助教



本研究はNEMSデバイスと量子操作技術を融合することにより、その性能を飛躍的に高めることを目的とします。光・マイクロ波両領域での電磁波を用いた量子オプトメカニカルシステムを構築し、電磁波による振動子の操作、もしくは振動子による電磁波の操作を単一量子(単一光子、単一フォノン)レベルで行います。古典デザイン自由度の高さと量子操作を駆使した量子ナノデバイスの構築を通して新奇な知見と応用の可能性を探求します。

CREST 3

ナノ慣性計測デバイス・システム技術とその応用創出

益 一哉

東京工業大学
フロンティア研究機構
教授



「ナノG(加速度)計測」が産み出す新機能実現を目指します。デバイス・回路・モジュールレベルではCMOS-MEMS異種機能集積プロセスとその統合解析・設計技術による慣性センサの超小型化、超低消費電力化とこれを利用したナノGレベルの超高感度計測を行います。材料レベルでは慣性センサに利用するAu合金錘のナノ結晶構造制御による機械的性質制御、さらに応用レイヤでは人体動態計測とその意味理解に基づくヘルスケア応用、また産業用展開に取り組みます。

さががけ 3

磁性規則合金を用いた新機能的スピントルク発振素子の創製

関 剛斎

東北大学
金属材料研究所
助教



異なる金属原子が規則的に空間配列した規則合金を用いると、無秩序合金には無い機能的性を発現させることが可能となります。本研究では、ホイスラー合金という磁性規則合金を材料の軸とし、磁気渦(ポルテックス)構造とその動的挙動を制御することで、高速応答かつ高集積可能な超高感度スピントルク発振型磁気素子の実現に取り組みます。そして、新しい動作原理に基づく磁気センサの基礎技術の構築を目指します。

さががけ 7

フッ化物ユニバーサル高誘電体極薄膜材料の創出

長田貴弘

(独) 物質・材料研究機構
国際ナノアーキテクトニクス研究拠点 MANA研究者



本研究は、誘電率40以上のフッ化物高誘電体極薄膜材料(フッ化物High-k)を創出し、MOS構造でSiO₂換算等価膜厚0.5nm以下、低リーク素子の実現を目指します。フッ化物High-kは、一種の材料で多様な次世代チャネル材料(Ge、InGaAsなど)と界面反応層が無い直接接合形成の可能性があり、これまでに無いユニバーサルな高機能High-k材料としてIT機器の消費電力の劇的な低減が期待できます。

さががけ 4

電気磁気創発現象による電磁波制御デバイスの創生

高橋陽太郎

東京大学大学院
工学系研究科付属量子エレクトロニクス研究センター 特任准教授



将来、無線通信では情報の更なる大容量化にともなう電磁波の高周波化により、既存のデバイスの延長では対応できない領域に到達すると考えられます。電気磁気創発現象であるエレクトロマグノンと呼ばれる全く新しいスピンの応答を利用することで、100ギガヘルツを超える高周波領域での電磁波制御デバイスの基礎技術の創生に挑戦し、新しい機能性を持つインテラクター、吸収材、偏光素子への展開を目指します。

さががけ 8

超高強度テラヘルツ光のナノ空間制御と物性制御技術への応用

廣理英基

京都大学
物質-細胞統合システム拠点
准教授



外場によって凝縮系の電子スピンやイオン原子の大振幅運動を誘起し、これまで探索されてこなかった大振幅駆動領域で発現する新たな物質状態への操作技術は、社会的要請が高まる超高速エレクトロニクスのブレークスルーとして期待されています。本研究では世界最高強度のテラヘルツ光をナノスケール領域で極限的に増大させる技術を開発し、究極的な超高速電子デバイス開発に資する新規電子材料の電場・磁場誘起現象を探索します。

高感度生体磁気センサに向けた ダイヤモンド NV センタの1軸方向 制御



CREST 研究代表者 (平成25年度採択)
波多野睦子
東京工業大学大学院理工学研究科・教授

研究の目的、社会的意義

生物・医用分野では、細胞計測から、MRI・脳磁・心磁等の生体計測まで、高感度磁気センサのニーズがあります。これらの応用で共通して求められるのは、常温で動作し、単位面積当たり高い感度を有することにより高い空間分解能を実現でき、2次元イメージングが可能であることです。これらのニーズに適合する磁気センサモジュールを開発することが本プロジェクトの目標です。本研究では、室温固体中で優れたスピン特性を持つことが知られているダイヤモンドの窒素-空孔 (NV) センタを用いており、他のセンサと比較して表 1 に示すような優位性が期待できます。しかしダイヤモンド中において NV センタは 4 方向にランダム配向するため、感度向上の問題になっていました。本研究では、ダイヤモンド膜を (111) 面基板上に化学気相成長 (CVD) させることで、99% 以上の NV センタを [111] 軸の 1 方向に制御できることを実証し、高感度センサのコア技術が得られました。

研究成果の内容

ダイヤモンド中において NV センタは一般に 4 方向にランダムに配向します (図 1)。ここで第一原理計算により、(111) 面基板上に堆積するダイヤモンド膜中の NV センタの方向制御のメカニズムを解明し、NV センタが [111] 軸方向へ揃う可能性を見出しました。NV センタの方位は光検出磁気共鳴スペクトルにより観測されます。従来のダイヤモンド中では N-V 軸が 4 方向を向いた光検出磁気共鳴信号スペクトルが観測されます (図 2 青線)。一方、今回実現した (111)-CVD ダイヤモンド中の NV センタの磁気共鳴スペクトルでは、[111] 軸に相当する信号のみが現れており (図 2 赤線)、NV センタが [111] 軸方向に制御されていることを確認しました。多数の単一 NV センタの観測やアンサンブル系での統計的な解析により、99% 以上の NV センタが [111] 軸方向に向いていることを検証しました。

図 3 に示すように、このような NV センタを 1 軸に制御する技術により、磁気共鳴スペクトルのピークの高さ (深さ) が 4 倍になることから、磁気センサとしての感度が少なくとも 4 倍になります。また NV センタの集合体としての特性が磁気に対してリニアに揃うことから、微弱から強い磁場まで、またナノスケールからミリスケールまでのスケーラブルな磁気イメージングを行うことが可能となります。このことは、ナノエレクトロニクスを適用したデバイスによる磁気センサ高感度化に特に有効となります。

今後の展開

NV センタによる微細高感度磁気イメージングの分野では、これまでに $100\text{nT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 程度の感度が実現されています。当チームは、今後、1 軸 NV センタ高密度化と、ナノエレクトロニクスを適用したデバイスにより、 $1\text{nT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 程度までの高感度計測実現を目指します。そしてこれらの技術の実用化のために、材料・デバイス・信号処理・モジュール化技術の開発を CREST チーム総力で推進し、高い感度と空間分解能をもつ 2 次元磁気イメージング実現を目指します。

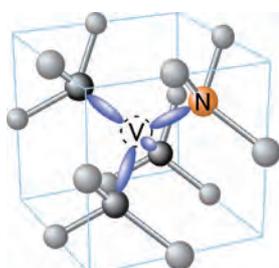


図1 ダイヤモンド中の NV センタとその配向

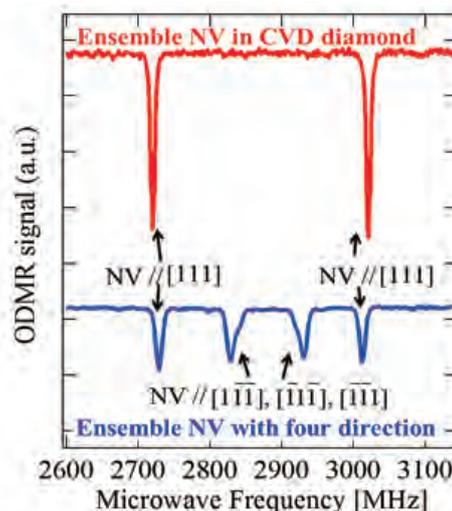


図2 アンサンブル NV センタの光検出磁気共鳴スペクトル (ODMR)。青線は従来のダイヤモンドの結果であり、NV センタがランダムに 4 方向を向くことを示す 4 つのピークが見られる。赤線は今回実現した (111) 面上に成長させたダイヤモンドから得られた結果であり、[111] 軸方向のみに NV センタが配向していることを示すピークが得られている。

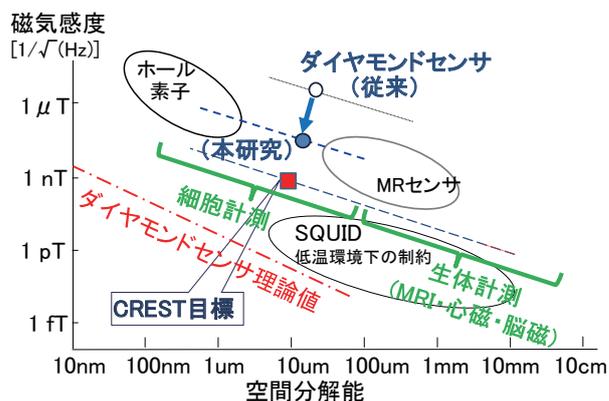


図3 ダイヤモンドセンサ開発目標 (他センサとの比較)

表1 開発するセンサの特徴

性能 \ センサ	SQUID	MR-センサ	ダイヤモンドセンサ (本研究)
感度	◎	△	○
常温大気中動作	×	○	○
空間分解能	×	○	○
2次元検出 (磁場ベクトル可視化)	×	△	○

掲載論文

- T. Fukui, Y. Doi, T. Miyazaki, Y. Miyamoto, H. Kato, T. Matsumoto, T. Makino, S. Yamasaki, R. Morimoto, N. Tokuda, M. Hatano, Y. Sakagawa, H. Morishita, T. Tashima, S. Miwa, Y. Suzuki, and N. Mizuochi, "Perfect selective alignment of nitrogen-vacancy centers in diamond", Appl. Phys. Express 7, 055201, (2014) "SPOTLIGHTS" 論文
- T. Miyazaki, Y. Miyamoto, T. Makino, H. Kato, S. Yamasaki, T. Fukui, Y. Doi, N. Tokuda, M. Hatano, and N. Mizuochi, "Atomistic mechanism of perfect alignment of nitrogen-vacancy centers in diamond", Appl. Phys. Lett. 105, 261601 (2014)

極低消費電力回路のための Ge/ひずみ Si トンネル MOS トランジスタの開発



CREST 研究代表者（平成25年度採択）
高木 信一
東京大学大学院工学系研究科・教授

研究の目的、社会的意義

近年急激に増加している IT 機器の消費電力の低減には、LSI 中で使われる MOSFET の電源電圧の低減が焦点の課題です。しかし、従来の MOSFET では、オンとオフの状態を低電圧で切り替えることが困難なため、電源電圧を下げられず、低消費電力化に限界があるという本質的問題があります。この問題を解決可能な新原理素子として、トンネル電流をゲート電圧により制御するトンネル FET が注目されています。本研究は、その最適な構造や材料が明らかになり、極低電圧動作に優れた素子特性を実現することを目的としています。

研究成果の内容

トンネル FET において、オン電流とオフ電流の差を大きくするためには、電子の量子力学的トンネリングを起こすエネルギー障壁幅を非常に薄くすること、さらにこのトンネル電流を大きくすることができる材料上の工夫をすることが必要です。図 1 は今回、実現したトンネル FET のデバイス構造を示しています。従来から MOS トランジスタのチャンネルとして用いられている Si に、引張り応力を加えたひずみ Si と Ge のヘテロ界面を用い、トンネリングを起こすソース領域を高濃度の Ge、チャンネル材料をひずみ Si としました。その結果、主流で用いられている模型（プレーナ）構造で、さらに現在の集積回路プロセスに馴染みやすい材料を用いながらも、極めて薄いエネルギー障壁幅を形成することに成功しました。得られた素子の電気特性を図 2 に示します。良好な電界効果トランジスタ特性を示すとともに、わずかな電圧変化で急激に電流を切り替えることと、大きなオン電流とオフ電流の比を得ることの両方を同時に実現することに成功しました。

加えて、今回のトンネル FET の基板側に電圧を加えることにより、トンネル FET のオン電流が大きく向上できることも見いだしました。結果として、電流を一桁変化させるために必要なゲート電圧の変化量である S 係数と呼ばれる電流変化の急峻性の尺度において、最小値 29 mV/decade (decade は電流一桁の分の意味)、またオン電流とオフ電流の比が 4×10^7 というこれまでのトンネル FET で最も大きい値を実現しました。

トンネル FET は、将来の極低消費電力集積回路に必須の素子として、企業や国立研究機関、大学などの間でしのぎを削る研究開発が世界的に進められています。今回の研究成果は、インテルやベルギーの先端半導体研究機関である imec、カリフォルニア大パークレー校、スタンフォード大などから報告されているトンネル FET の特性を上回る性能を実現しています。

今後の展開

ドレイン領域の工夫やゲート絶縁膜の更なる薄膜化など作製工程の最適化、更に、その伝導機構の定量的理解の深耕による素子構造の最適化を進めることにより、一層の性能向上が期待されます。結果として、この素子により、電源電圧を、現行トランジスタのおよそ 0.9V から 0.3V 程度以下にまで低下しても動作しうる集積回路を実現する上での道筋を開き、IT 機器の大幅な省電力化が期待されます。また、本素子では待機電力も低減できるためバッテリー不要な集積回路など IoT 時代のキーデバイスと

なる可能性を秘めています。

CREST では最先端デバイスの研究開発とともに、アプリケーションを念頭に回路を含め、体系的なデザインも進めています。

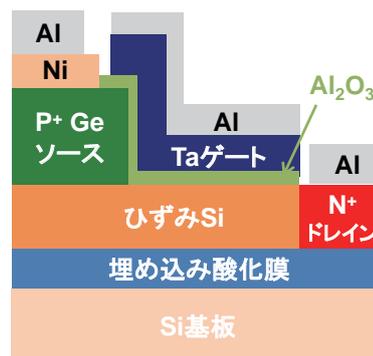


図 1 今回実現したトンネル FET 素子構造

高濃度 p 型にドーパされた Ge がひずみ Si のチャンネル上に形成され、ゲート絶縁膜として Al_2O_3 と Ta からなるゲート電極が、またひずみ Si 中には高濃度 n 型のドレイン領域が形成されている。

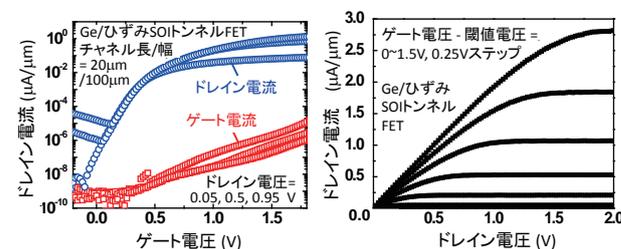


図 2 今回作製したトンネル FET の電流 - 電圧特性

左はドレイン電流とゲート電圧の関係を、右はドレイン電流とドレイン電圧の関係（パラメータは、ゲート電圧）を示す。

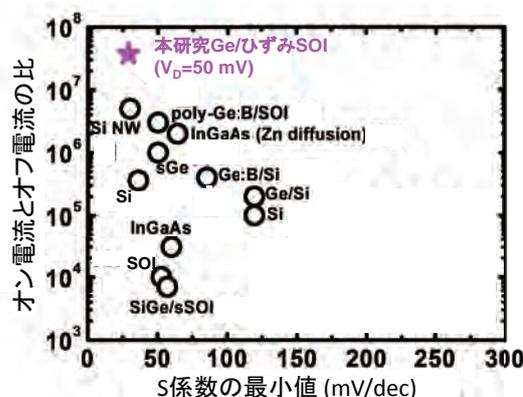


図 3 作製した素子のベンチマーク（他の研究グループから報告されているトンネル FET との特性の比較）

横軸は S 係数の最小値、縦軸はオン電流とオフ電流の比を示す。○は他の研究グループの報告結果、★は、今回の研究成果である。

掲載論文

M.-S. Kim, Y. Wakabayashi, R. Nakane, M. Yokoyama, M. Takenaka, and S. Takagi, "High I_{on}/I_{off} Ge-source ultrathin body strained-SOI Tunnel FETs - impact of channel strain, MOS interfaces and back gate on the electrical properties", Tech. Dig. International Electron Device Meeting (IEDM) (2014) p. 331-334

プレスリリース URL

<http://www.jst.go.jp/pr/announce/20141215-3/index.html>

近藤状態によって散乱される電子波の位相測定に初めて成功



さきがけ研究者（平成25年度採択）

山本 倫久

東京大学大学院工学系研究科・講師

研究の目的、社会的意義

量子力学の原理に従う電子デバイスでは、波動関数の振幅の2乗で表される電荷の確率密度に加え、波動関数の位相が重要な役割を果たします。電子波の位相を精密に制御、観測する技術は、これまで検証が難しかった固体中の量子力学的な効果を、微視的視点から解明する際にも有用です。本研究では、独自に開発した電子波干渉計を用いて、電子の持つ磁気（スピン）が関与する多電子の量子力学的な相互作用効果の代表例である「近藤効果」における散乱問題を検証しました。

研究成果の内容

1964年に近藤淳によって初めて理論提唱された近藤効果は、局在スピンとそれを取り囲む多数の伝導電子との間の相互作用によって、局在スピンの磁気が打ち消される現象（遮蔽）です。近藤効果は、超伝導と共に多電子の相互作用効果（多体相関）の代表例として知られ、その理解が物性科学の進展に大きく寄与してきました。近藤状態の微視的な性質に着目すると、電子スピンの関わる多体相関を有する物質の性質や機能の多くを、微視的な視点から解明、予言することができます。15年程前に、量子ドット中の電子スピン（＝単一の局在スピン）が電極の伝導電子との相互作用によって近藤効果をもたらすことが確認されると、局在スピンのエネルギー準位、電極との結合による準位の広がり、準位の縮退などを自在に制御して電気伝導に反映させる実験が行われるようになりました。その結果、単一の局在スピンを単位とする近藤効果の微視的な描像が次々と明らかにされてきました。

しかし、近藤効果の最も基本的な性質である「近藤の位相シフト」は、その予言から40年にも渡って未検証のまま残されていました。これは、単一局在スピンの近藤状態によって散乱される電子の波動関数の位相が90度ずれる現象です。この現象は、共鳴的なスピンの遮蔽という近藤効果の微視的な性質を最も強く反映したもので、世界中の研究者から注目を集めました。しかし、その検証には固体中の電子波の精密且つ信頼性の高い位相測定技術が必要で、検証は成功していませんでした。

技術的な困難を克服して精度の高い位相測定を初めて実現したことが本研究の成功の鍵となりました。本研究では、電子波の位相を取り出す二重スリット実験が後方散乱を受けないことを前提とすることに着目し、後方散乱の影響を確実に排除できる2経路干渉計を開発しました（図1）。そして、干渉計の中に量子ドットを埋め込み、そこに局在電子スピンを閉じ込めました。低温で局在電子スピンと周囲の伝導電子との結合を電気的に制御すると、スピンの遮蔽された近藤状態が生じます。近藤状態の散乱位相を干渉計を用いて測定することにより、「近藤の位相シフト」の検証実験に初めて成功しました。実験では、位相シフトの詳細な振る舞いが、驚くほど高い精度で得られています（図2）。

アハロノフボーム（AB）干渉計を用いて同様の位相測定を試みた過去の実験では、後方散乱の影響によって信頼性を欠く結果を基に「量子ドット系の近藤の位相シフトは理論予測の90度になるとは限らない」と間違っって結論付けられたことさえありました（表1参照）。本研究によって、近藤の位相シフトという長年の課題が初めて解決されました。

今後の展開

本研究では、電子波の位相の精密測定を実現しました。また、開発された2経路干渉計では、電子波の位相をゲート電圧によって任意に精密に調整できるため、量子演算回路への応用が期待できます。今後は干渉の可視度を高め、量子力学の原理に従う電子デバイスとして集積することが目標となります。ここでは、本研究で利用した一粒子干渉に加え、量子もつれを生成する二粒子干渉を制御することが求められます。

近藤効果に関しては、今後は他の量子結合を組み合わせた複合系へと研究対象を広げる必要があります。単一量子単位で位相を含めて系の状態を制御する本研究の手法を用いて、複雑な量子相関の本質に迫ります。その結果は、物質開発から量子デバイス開発に至る多くの分野に影響を与えるでしょう。

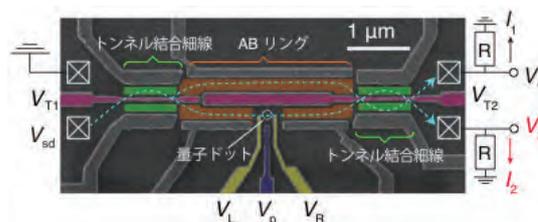


図1 本研究で用いた2経路干渉計の試料の電子顕微鏡写真と測定模式図。ゲート電極に負の電圧を印加することによってその直下の領域が空乏化し、ゲート電極間に一次元の電子導通路（点線）が形成される。下側の経路から注入した電子波の存在確率は、左側のトンネル結合細線（ビームスプリッター）において上下の経路に等分割される。アハロノフボームリング（ABリング）において、電子波は上下の経路で異なる位相を獲得する。右側のトンネル結合細線において、これらの波が干渉し、出力（どちらの経路から電子が出てくるか）が決まる。すなわち、ABリングにおける上下の経路の位相差に応じて出力電流 I_1 、 I_2 が逆位相で振動する。ABリングの中には量子ドットが埋め込まれていて、ゲート電圧によって近藤状態に調整できる。量子ドットを通過する電子が獲得する位相は、出力電流 I_1 、 I_2 から得られる。

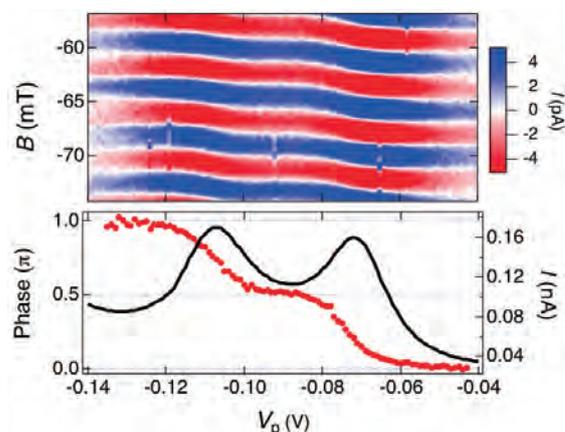


図2 近藤状態にある量子ドットを通過する電子が獲得する位相の測定結果。上図は、AB振動（ I_1 - I_2 のうちの磁場の関数として振動する成分）を量子ドットの準位を調製するゲート電圧 V_p （図1参照）をパラメータとして示したもの。下図は、上図の結果をもとに位相変化を V_p の関数として抽出したもの（赤線）。黒線は量子ドットを流れる電流値 I を示していて、ふたつのピークは量子ドット内の局在準位とフェルミ面が一致する場合に対応する。これらのピーク間の V_p では量子ドットに局在スピンの閉じ込められることによって近藤状態が形成され、そこでは位相変化が90度に固定されている。

表1 AB干渉デバイスの比較。本研究で開発した2経路干渉計と従来の多端子ABリング、量子ホール端状態を利用した電氣的マッハツェンダー（MZ）干渉計を比較した。本研究で用いた2経路干渉計でのみ、ナノ構造における信頼性の高い位相測定が可能である。

	本研究の2 経路干渉計	多端子 AB リング	電氣的 MZ 干渉計
後方散乱	無し	有り	無し
ナノ構造	挿入可	挿入可	挿入困難
低磁場動作	○	○	×
位相測定	高信頼性	低信頼性	不可

掲載論文

S. Takada, C. Bäuerle, M. Yamamoto, K. Watanabe, S. Hermelin, T. Meunier, A. Alex, A. Weichselbaum, J. von Delft, A. Ludwig, A. D. Wieck and S. Tarucha, "Transmission phase in the Kondo regime revealed in a two-path interferometer" *Physical Review Letters* 113, 126601 (2014), doi: 10.1103/PhysRevLett.113.126601.

プレスリリースURL

<http://www.t.u-tokyo.ac.jp/epage/release/2014/20140922003.html>

〔連絡先〕

戦略研究推進部 グリーンイノベーショングループ
〒102-0076 東京都千代田区五番町7 K's 五番町
TEL:03-3512-3531 FAX:03-3222-2066