

CREST・さきがけ複合領域 中間・終了報告会

「素材・デバイス・システム融合による
革新的ナノエレクトロニクスの創成」

IoT/AI世代の
ナノエレクトロニクス・シーズ
デモやポスターを交えて17件

日 時

平成31年1月30日(水)
9時30分～17時10分

会 場

東京大学 駒場コンベンションホール
(駒場Ⅱキャンパス 生産技術研究所総合研究実験棟(An棟)2階)

代々木上原駅(小田急線・東京メトロ千代田線) 徒歩12分／東北沢駅(小田急線) 徒歩8分／
駒場東大前駅(井の頭線) 西口より徒歩10分／池ノ上駅(井の頭線) 徒歩10分

主催：国立研究開発法人 科学技術振興機構

ご挨拶

本 CREST・さきがけ複合領域は Si デバイスの微細化だけに頼らない形での革新的なナノエレクトロニクス基盤技術の創成を目指しています。これによって、今後ともナノエレクトロニクスが Internet of Things (IoT) や人工知能 (AI) などの進展を支え、エネルギー環境問題、少子高齢化問題、健康安全社会の実現、インフラの老朽化など、ローカルおよびグローバルな社会的課題を解決する一助として活用され続けることが期待できます。また、本領域では、ナノデバイス技術だけでなく、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の技術レイヤーの融合により、真のイノベーションを生み出すことを念頭に置き、ナノエレクトロニクスの総合的な革新を積極的に進めています。結果、多くの研究成果が生み出されていますが、本報告会では、その中で CREST 領域の 25 年度採択課題終了報告 3 件と 27 年度採択課題中間報告 4 件、そしてさきがけ領域 27 年度採択課題 (さきがけ三期生) 終了報告 10 件を集め、皆様にコンパクトにわかりやすくその研究成果、ナノエレクトロニクスのシーズをお伝えできればと期待しています。

研究総括 桜井 貴康

副研究総括 横山 直樹

プログラム

09:30 ～ 09:40 **開会の挨拶** 研究総括 桜井 貴康（東京大学）

09:40 ～ **CREST 終了報告** 座長：知京 豊裕（物質・材料研究機構）

09:40 ～ 10:00	「極細電荷チャネルとナノ熱管理工学による 極小エネルギー・多機能センサプラットフォームの創製」	
	CREST 内田 建	1
10:00 ～ 10:20	「極低消費電力集積回路のためのトンネル MOSFET テクノロジーの構築」	
	CREST 高木 信一	3
10:20 ～ 10:40	「炭素系ナノエレクトロニクスに基づく革新的な生体磁気計測システムの創出」	
	CREST 波多野 睦子	5

10:40 ～ **CREST 中間報告** 座長：田原 修一（光電子融合基盤技術研究所）

10:40 ～ 11:00	「デジタルデータの長期保管を実現する高信頼メモリシステム」	
	CREST 竹内 健	7
11:00 ～ 11:20	「超高速・超低電力・超大面積エレクトロクロミズム」	
	CREST 樋口 昌芳	9
11:20 ～ 11:40	「繊細な触覚を定量的に感知する「ナノ触覚神経網」の開発と 各種の手触り感計測技術への応用」	
	CREST 高尾 英邦	11
11:40 ～ 12:00	「共鳴トンネルダイオードとフォトニック結晶の融合による テラヘルツ集積基盤技術の創成」	
	CREST 富士田 誠之	13

12:00 ～ 13:30 **昼食** ホワイエでデモンストレーションの展示をしています。

13:30 ～ 13:35 挨拶（さきがけについて） 副研究総括 横山 直樹（富士通研究所）

13:35 ～ さきがけ終了報告 1 座長：森村 浩季（日本電信電話）／高井 まどか（東京大学）

13:35 ～ 13:55	「ポリマー配線を用いたニューラルネットワーク型情報回路の創成」	
	さきがけ 赤井 恵	15
13:55 ～ 14:15	「極限的エネルギー効率を有する超伝導可逆計算機の開発」	
	さきがけ 竹内 尚輝	17
14:15 ～ 14:35	「光干渉型分子間力センサによる高感度マルチバイオマーカー検出システム」	
	さきがけ 高橋 一浩	19
14:35 ～ 14:55	「移植用培養生体組織に搭載可能なナノエレクトロニクス」の創成」	
	さきがけ 藤枝 俊宣	21

14:55 ～ 15:05 休憩

15:05 ～ さきがけ終了報告 2 座長：平山 祥郎（東北大学）／福島 伸（東芝）

15:05 ～ 15:25	「電界書き込み型の超低消費電力磁気メモリの開発」	
	さきがけ 吉村 哲	23
15:25 ～ 15:45	「高移動度二次元酸化物構造による非散逸電流デバイスの創成」	
	さきがけ 高橋 圭	25
15:45 ～ 16:05	「極薄磁性酸化物中におけるスピン波位相干渉を用いた 多入出力演算素子の開発」	
	さきがけ 後藤 太一	27
16:05 ～ 16:25	「ナノカーボン光・電子量子デバイス開発と量子暗号通信応用」	
	さきがけ 牧 英之	29
16:25 ～ 16:45	「遷移金属酸化物のナノ空間 3 次元制御による 省エネルギー駆動機能選択的相変化デバイス創製」	
	さきがけ 服部 梓	31
16:45 ～ 17:05	「超低消費電力動作に向けたゲート絶縁膜の負性容量による 急峻スロープトランジスタ技術の開発とナノワイヤ構造への応用」	
	さきがけ 小林 正治	33

17:05 ～ 17:10 閉会の挨拶 JST 理事 後藤 吉正

【極細電荷チャネルとナノ熱管理工学による 極小エネルギー・多機能センサプラットフォームの創製】

内田 建（慶應義塾大学）

グラント番号：JPMJCR1331

1. 研究目標とねらい

本研究では、LSI と融合し、人々の生活に溶け込みながら、生体からの出力をはじめとする多種類の物質を選択的・電氣的に認識するセンサ技術を世界で初めて創出することを目的とし、その基盤技術の確立を行った。特に、ナノスケール特有のエネルギー効率の高い自己加熱を利用して、センサの消費エネルギーを3桁以上低減するとともに、センサにリフレッシュ機能・プログラム機能を付与する技術の開発を目指した。これらの技術により、これまで不可能であった選択的・電氣的に望みの標的物質を認識できるセンサを、圧倒的低エネルギーで実現することを目的とした。

2. 研究成果

開発した基盤技術は以下の4つに分類される。1) ナノ材料の熱管理工学による分子センサの低エネルギー化と多機能化技術、またシステムレベルでナノ熱管理工学を実現するアナログフロントエンド技術と無線による電力・データ伝送技術、2)

超分子構造のホスト・ゲスト反応を利用した新規な分子センサの提案と動作実証、3) ビッグデータ社会へ向けた大規模分子センサ配列の作製とセンサ信号を高速・高精度に読み出すフロントエンドの開発、4) 深層学習を分子センサに応用し、センシング対象を探索する技術と複数センサ出力から高精度の推論を行う技術、以上の基盤技術を開

発した。このうち、1)について、以下により詳しく説明をする。

1) ナノ熱管理工学を利用することで 1-1) 極低エネルギーで検出する酸化物ナノワイヤの分子センサと 1-2) 金属触媒で修飾したグラフェンによる多機能分子センサを開発した。1-1) 酸化物ナノワイヤ分子センサでは、ガスセンサを極低エネルギー化することで、フレキシブル・透明基板へさえもセンサを搭載可能とする技術を開発した。すなわち、ナノワイヤセンサの低い熱伝導率に着目し、パルス電圧印加による極短時間加熱法を開発することで、従来技術と比較して9桁程度の低エネルギーで窒素酸化物を検知する酸化物ナノワイヤセンサ技術を開発した。本技術を利用することで、我々の健康状態に関連した揮発性化学物質を、従来のような検査装置がある場所に行くことなく、身の回りの電子デバイスに組み込む可能性を開き、場所を選ばず、簡便かつ高感度に検知・収集する新しい科学技術へと発展することが期待できる。1-2) 金属触媒で修飾したグラフェンによる多機能分子センサの開発では、架橋グラフェンとパラジウム・ナノドットを用いた水素センサを作製し、1000 ppm 程度の

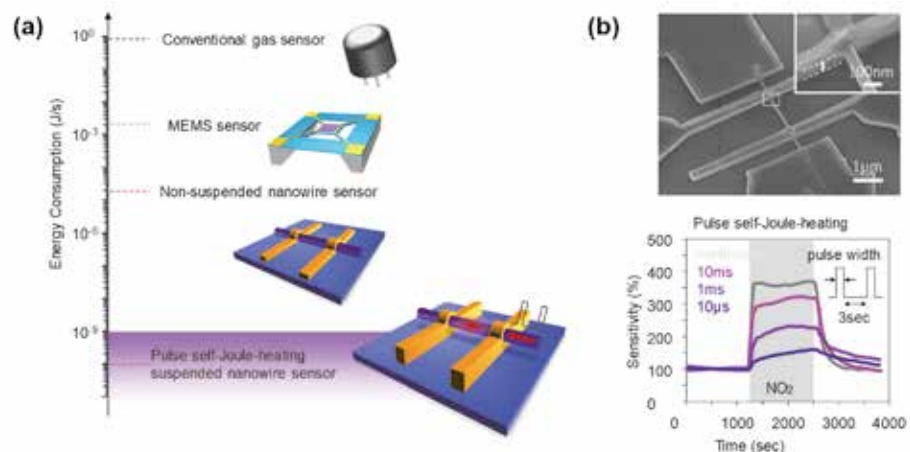


図 1. (a) 従来技術と本成果の消費エネルギーの比較。(b) 架橋酸化錫ナノワイヤデバイスの電子顕微鏡像およびパルス電圧印可自己加熱法による窒素酸化物検出特性。10 μs のパルス幅においても窒素酸化物が電流検知できている。

水分の大きな変動がある中で、わずか 10ppm の水素を 1 mW 程度の低エネルギーで検出した。ジュール熱で発生した熱をグラフェンに局在化し、センサ材料の温度を高効率かつ高速で変える技術を開発した。その結果、図 2 に示すように、高温での水素検出モードと、低温での水分検出モードを、たった1つのセンサで電気信号の大小で高速に切り替えられることをも実証した。

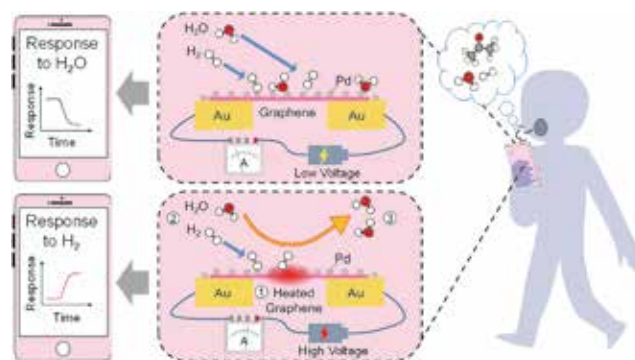


図 2. 開発したセンサの動作モードを表す図。低電圧では、多くの水分がセンサに付着し、水分センサとして機能する。高電圧では、水分が付着しないため水素センサとして機能する。

3. 研究成果の位置づけ

ナノスケール熱管理工学に基づく化学センサの劇的な省エネルギー化を世界に先駆けて示すことができた。また、外部ヒーターが不要になることで、熱耐性の低いフレキシブル・透明基板上でも酸化物をベースとするセンサの動作を実証できたことの意義は大きい。また、自己加熱により、単一のセンサに複数の機能を持たせることが可能であることを世界に先駆けて示すことに成功した。一方、大きな湿度変動がある中で、微量の水素のリアルタイム検知に成功した報告例は、当プロジェクト以外には無い。金属触媒の組み合わせや、自己加熱の温度をさらに高くすることで、より多様な機能を付与させることができると考える。図 3 には、腸の活動を示すマーカーである水素検出のベンチマーク。夾雑物（水、およびアンモニア）に対する選択性を横軸、検出下限濃度を縦軸に採った。本 CREST プロジェクトのデータを青色シンボルで示している。大気中 0.5ppm の水素を検出することが可能で水分の影響をほとんど受けない。他の報告を大きく凌駕している。

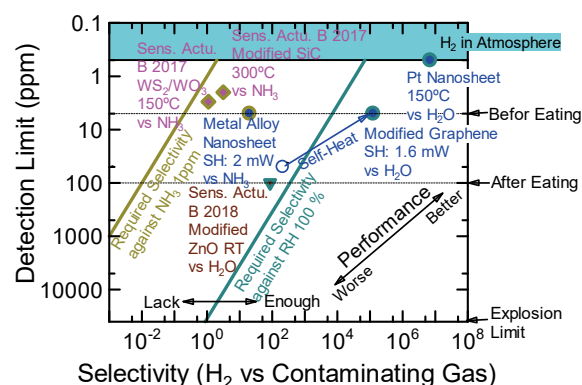


図 3. 水素センサのベンチマーク。検出下限と夾雑分子との選択性でプロットしている。

4. 今後の発展と期待

極低エネルギーの低分子を、極低エネルギーでリアルタイムに計測できるシステムを開発した。今後は、超長期間の動作安定性を確保するための材料・デバイス開発、動作モードの提案を行い、大量の高精度のデータを長期間にわたって取得できるシステムの開発を目指す。このようなシステムができれば、医療や農業などに貢献できると期待される。

5. 成果物のまとめ

査読付論文	国際会議招待講演	特許	受賞
81	49	4	29

- G. Meng *et al.*, *ACS Sensors*, **1**, 997, 2016.
- T. Yokoyama *et al.*, *ACS Appl. Nano Mater.*, **1**, 3886, 2018.
- T. Hosomi *et al.*, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **55**, 13427, 2016.

【極低消費電力集積回路のためのトンネル MOSFET テクノロジーの構築】

高木 信一（東京大学）

グラント番号：JPMJCR1332

1. 研究目標とねらい

極低消費電力の集積回路を実現するためには、低電圧で動作する 3 端子スイッチ素子の実現が必要である。この観点から、急峻な S ファクター(Subthreshold slope: SS) を実現するデバイスとして、量子力学的トンネル電流をゲート電圧で制御するトンネル FET (TFET) が注目されている。本研究では、60 mV/dec 以下の低い SS 値と高いオン/オフ電流比 (I_{on}/I_{off}) を同時に実現するために、最適な半導体材料や素子構造の提案とそれを実現するための作製方法の開発を行った。併せて、TFET に適した応用回路や設計技術の確立を目指した。

2. 研究成果

一番実用的な材料である Si チャネルを用いた TFET に関しては、EOT を 0.29 nm とすることができれば、 $7.5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ の高濃度ソース端にポケット領域を設けない単純構造において、 $I_{on}=3.8 \text{ } \mu\text{A}/\mu\text{m}$ 、平均 $S.S.=28\text{mV/dec}$ の優れた特性が得られることをシミュレーションにより示した (図 1(a))。また、III-V 族半導体である $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ を用いたトンネル FET において、急峻な不純物分布ができる Zn 拡散ソース接合と、トンネル電流を増大させながら接合リーク電流を抑えることができる量子井戸構造 (図 1(b)) を提案し、室温での S ファクターの最小値として、54 mV/dec. という MOSFET では実現できない値を実現した (図 1(c), (d))。更に、 ZrO_2 をゲート絶縁膜とする薄膜ゲートスタック (CET=1.1nm) を適用することで、49 mV/dec の SS 値を得ている。

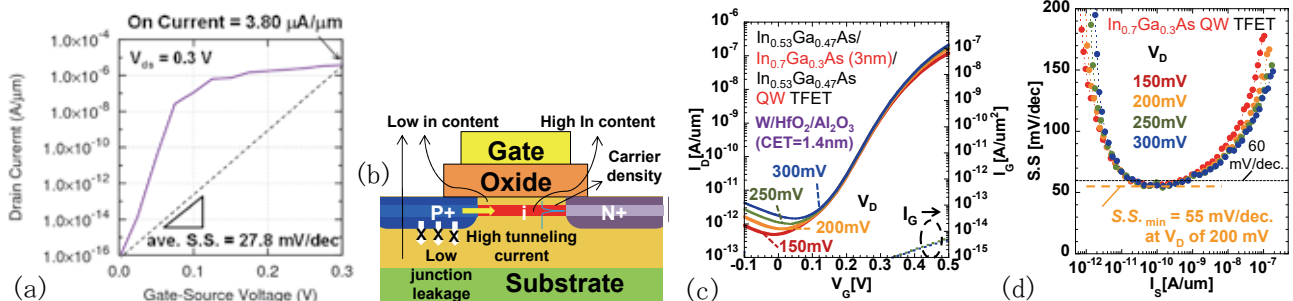


図 1(a) 極薄 EOT の Si TFET の I_d - V_g 特性の計算結果 (b) 量子井戸 InGaAs TFET の素子構造 (c) 試作し InGaAs 量子井戸 TFET の I_d - V_g 特性と (d) SS- I_s 特性

トンネル FET の性能を更に向上させるため、酸化物半導体と IV 族半導体によるタイプ II ヘテロ構造を用いた bi-layer 型 TFET を提案した (図 2(a))。トンネル距離は、酸化物半導体の膜厚で主に決まるので、短縮は比較的容易である。ゲート電圧により、状態密度のオーバーラップを直接制御でき、またチャネル全面にトンネル電流が流れるため、電流量を増大させることが可能である。シミュレーションにより、SS 最小値=1-2 mV/dec, 0.3V swing での SS=40-60 mV/dec, $I_{on}=100 \text{ } \mu\text{A}/\mu\text{m}$ の高い性能が実現できる (図 2(b)) ことを明らかにした。Si や Ge 基板上にレーザーアブレーション法により ZnO 薄膜を形成することにより、本 TFET の動作を実証した。実測の室温での SS の最小値は 71 mV/dec. (図 2(c)) と、理論予測値の約 6mV/dec. と比較してまだかなり大きい、今後、ZnO の膜質や膜厚均一性を改善することなどにより、優れたトンネル FET 特性が期待できる。

また、TFET を用いた有望な回路応用として、水晶発信器への適用を提案した (図 3)。上に述べた極薄

EOT を用いた Si TFET の電気特性を用いた回路シミュレーションを行い、Si CMOS よりも低消費電力が実現できることを明らかにした。

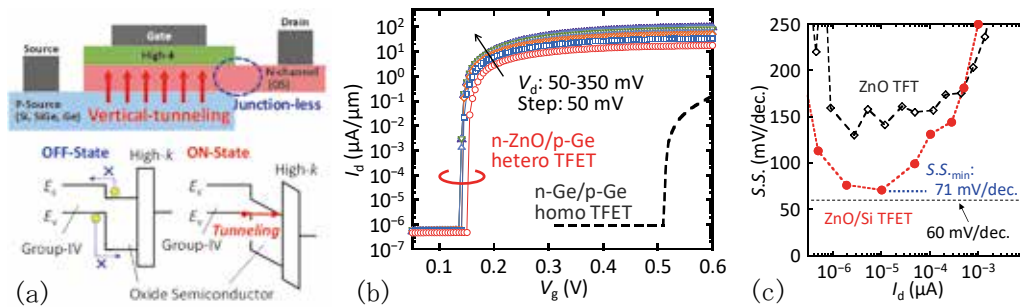


図 2(a) 酸化半導体と IV 族半導体によるタイプ II ヘテロ構造を用いた bi-layer 型 TFET 構造 (b) I_d - V_g 特性の計算結果 (c) 試作した ZnO/Si TFET の SS- I_d 特性の実験結果

3. 研究成果の位置づけ

TFET 特性のベンチマークを図 4 に示す。ここで、横軸は目標とする 0.3V 動作での I_{on}/I_{off} 比 (平均の SS 値)、縦軸は得られた最大 I_{on} としている。本研究で実現された TFET の特性は、他の報告と比較して、最も優れた特性とほぼ同等の性能を実現していることが分かる。一方で、最先端の CMOS にはまだ及ばないことから、今後、特に平均の SS 値を一層向上させることにより、CMOS では実現できない極低消費電力特性を示す回路の実現が期待される。

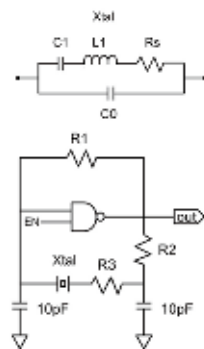


図 3 水晶発振器の等価回路

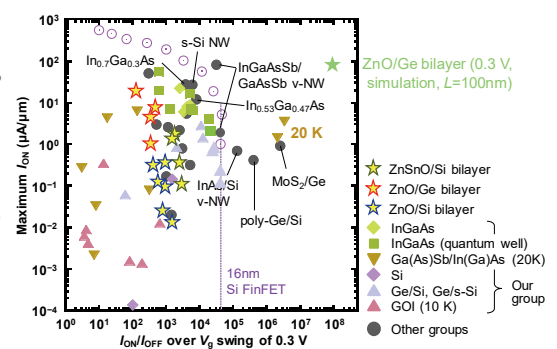


図 4 本研究及び他のグループの TFET 特性のベンチマーク

4. 今後の発展と期待

現在は、材料・プロセス・デバイス技術が成熟していないため、TFET の優れた性能を十分引き出すことができていないが、原理的に、MOSFET を越える極低電圧・極低消費電力動作が可能であり、まずは、高い I_{on} が要求される高速動作よりも、高速性が要求されない水晶発信器や低消費電力が優先される IoT 応用などに向けた集積回路への適用が期待できる。

5. 成果物のまとめ

査読付論文	国際会議招待講演	特許	受賞
135	47	7	18

・S. Takagi, D. H. Ahn, M. Noguchi, T. Gotow, K. Nishi, M. Kim and M. Takenaka, “Tunneling MOSFET technologies using III-V/Ge materials (invited)”, IEDM, p. 516, 2016.

・K. Kato, H. Matsui, H. Tabata, M. Takenaka and S. Takagi, “Proposal and demonstration of Oxide-semiconductor/(Si, SiGe, Ge) bilayer tunneling field effect transistor with type-II energy band alignment”, IEDM, p. 377, 2017.

・K. Kukita, T. Uechi, J. Shimokawa, M. Goto, Y. Yokota, S. Kawanaka, T. Tanamoto, H. Tanimoto and S. Takagi, “Simulation of planar single-gate Si tunnel FET with average subthreshold swing of less than 60 mV/decade for 0.3 V operation”, Jpn. J. Appl. Phys., 57, 04FD09, 2018.

【炭素系ナノエレクトロニクスに基づく革新的な生体磁気計測システムの創出】

波多野 睦子（東京工業大学・工学院院）

グラント番号：JPMJCR1333

1. 研究目標とねらい

ダイヤモンド中の窒素—空孔 (NV) センタは室温・大気中で単一スピンを操作・検出することが可能で、その状態を光検出磁気共鳴でイメージングできる特徴があり、量子センサとして注目されている。本研究の目標は、IoT、ライフ、環境エネルギー分野の卓越した学術領域と産業・社会の新たな価値創出を目指して、常温動作、高い感度・空間分解能を有するダイヤモンドセンサとプロトタイプを産官学レイヤ間の連携・融合チームで実現することにある。

スタート時に設定した目標は、下記である。

- ・中間目標：感度 $\sim \mu\text{T}/\sqrt{\text{Hz}}$ 、解像度 $\sim 1\text{mm}$
- ・最終目標：感度 $\sim \text{nT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 、解像度 $\sim 10\mu\text{m}$

2. 研究成果

目標と達成状況、及び空間分解能と磁気感度の関係と応用例を示した図1に示す。実線は、実績である。現状、高性能光学定盤上に構成したシステムによる感度は約 $30\text{ nT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 、解像度は約 300nm のナノスケールのセンサ、並びにマクロスケールのセンサで $3.6\text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ を実現し、最終目標を達成した。さらに試作したセンサを用いて革新的な生体磁気計測システムを創出することができた。実現のために開発したコア技術は、図中に示す通り、CVD 合成による高配向で表面近傍に NV センタを形成したダイヤモンドセンサ材料、pn 接合を適用したセンサデバイス、量子プロトコルを用いた計測、低ノイズシステムを開発し、細胞動態計測、ナノスケール NMR に適用し、有効性を確認した。さらにダイナミカルデカップリングによる量子フィルタ技術、小型モジュール技術を開発し、高感度のマクロスケールセンサを実現した。

図2は、開発した主なコア技術とレイヤ間融合による成果を示す。センサ感度向上技術構築に関して、(1) NV センタの高密度化（信号強度向上）、(2) NV 軸の高配向化（検出コントラスト向上）、(3) チタン薄膜と選択成長による微細構造で実現される蛍光検出効率向上、(4) 世界最先端の pn 接合をはじめとするダイヤモンドデバイス技術を適用した NV センタの電荷制御（信

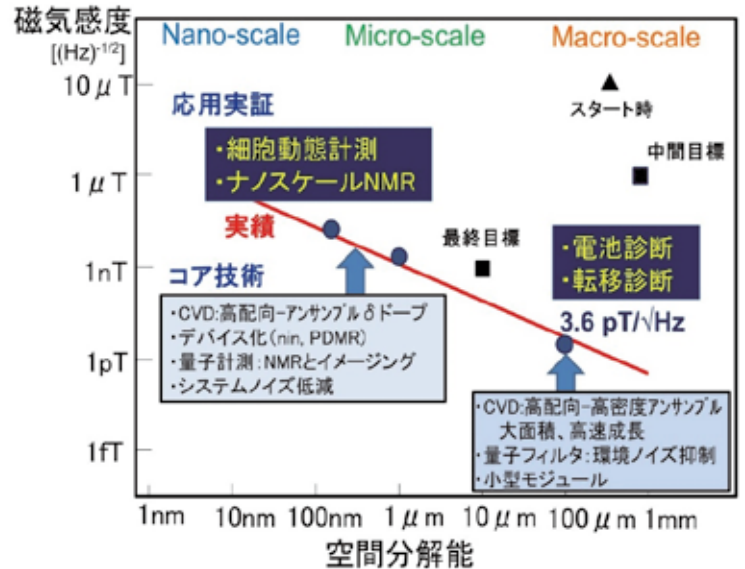


図1 性能目標と実績、及び開発したコア技術と応用



図2 開発したコア技術とレイヤ間融合による主な成果

号強度向上)、(5)高度量子計測による電子スピン位相緩和時間向上と雑音の狭帯域化を推進した。特に(1)(2)は、第一原理計算により配向メカニズムを物理的に解明し、オフ方向を制御した(111)基板上に窒素ドーパ CVD 法による成長技術を世界で初めて確立し、従来比 4~5 桁の高密度と 100%配向の両立を実現した。さらに(5)のダイナミックデカップリング法による高感度計測技術を適用し、空間分解能約 300 nm において 30nT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ の磁気感度を得た。さらに、本量子プロコル、ならびに表面数 nm に NV 軸が完全に配向した高密度 NV 層を形成した CVD センサ膜を用いて、(20 nm)³ 体積の微量なオイル中に含まれるフッ素と水素の NMR 信号の同時検出を実現した。また、(6) センサの集積化に有利となる、核スピンコヒーレンスの電氣的検出を実証した。医用や車載などを対象としたマクロスケールのセンサの高感度化を目的として、(7)Ar ガス導入による CVD 高速成長、また励起光・マイクロ波の均一照射に有効な(8)ダイヤモンド基板側面への光入射技術とコプレーナ型共振器アンテナを開発し、3.6pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ (研究開始時より 7 桁向上) の磁気感度を実現した。応用に関しては、ナノダイヤモンド粒子を用いて生体内のベクトル磁場計測技術を構築し、(9)線虫腸内回転運動計測(角度精度 1°)を世界で初めてデモを実現した。さらに、(10)高感度ダイヤセンサ、高精度計測、低ノイズシステムを統合し、超常磁性粒子の磁場イメージングを 19 秒の時間分解能で実現し、細胞動態のデモを実施した。磁性粒子で標識した細胞計測は、細胞の光障害を回避できる特長があるため、生体応用への新たなイメージング方法として発展が期待できる。さらに低炭素社会に重要なパワーエレの状態モニタリングの応用として、(11)NV センタへのシュタルク効果を用いたデバイス内部の電界ベクトル成分の検出を実現した。(12)開発した技術を搭載した小型デモシステム開発し、研究期間中に複数の企業との共同研究に発展させた。

表 1 磁気センサのベンチマーク

性能/機能	超電導 SQUID	ホール 素子	MR センサ	(本研究) ダイヤセンサ
室温・大気動作	× 極低温	○	○	○ 実証
感度 [$\sqrt{\text{Hz}}$]	◎ ($<10\text{fT}$)	×	○	◎◎ 3.6pT 実証 fTの可能性
ダイナミックレンジ	×	△	△	◎ 6桁以上
空間分解能	×	△	△	◎ スケーラブル nm~mmの実証
イメージング	×	×	×	◎ ベクトルイメージング
NMR・MRI	△	×	×	○ 原理検証

3. 研究成果の位置づけ

本研究で得られたダイヤモンドセンサと他の磁気センサ性能・機能の比較を表 1 に示す。常温・大気中で動作し、6 桁以上の広いダイナミックレンジで数 pT 以上の感度が得られること、ナノからマクロまでスケラブルな空間分解能を示す、イメージングができること、を実証した。デモの結果から、生体の動態計測、高機能非破壊検査など、2 次元・動的計測としてニーズが高いことがわかった。CREST スタート時以降、欧米を中心に中・豪・以などでダイヤ量子センサの研究が加速され、競争が激化している。しかし本研究で構築した材料やデバイスは差別化のコアであり世界をリードしている。

4. 今後の発展と期待

桜井 CREST の「技術レイヤ連携によりプロトを示す」進め方は可能性や課題を明確化し、異分野融合促進に有効であり、企業との共同研究にもつながった。国際的な競争力強化には、異分野、産業界含むさらに大きな体制の研究開発は必要である。一方でブレイクスルにつながる理論をも含む基礎研究は重要である。CREST の成果の社会への還元と基礎研究の先導は、文部科学省 Q-LEAP、内閣府 PRISM プロジェクトなどで、さらに進展させていく。

5. 成果物のまとめ

査読付論文	国際会議招待講演	特許	受賞
48	64	15	14

- T. Fukui et al., APEX 7, 055201, 2014 (論文賞受賞)
- H. Ishiwata et al., APL 111, 043103, 2017 (AIP ニュースにノミネート)
- T. Iwasaki et al., ACS Nano, 11, 1238, 2017 (新聞発表).

【デジタルデータの長期保管を実現する高信頼メモリシステム】

竹内 健（中央大学）

グラント番号：JPMJCR1532

1. 研究目標とねらい

本研究ではデジタルデータの長期保存を目的として、3種類のメモリ（ReRAM、フラッシュメモリ、ナノギャップメモリ）の高信頼化、長寿命化を行う。図1に各メモリのベンチマークを示す。不揮発性メモリは書き換え回数とデータ保持年数（寿命）にトレードオフがある。ReRAMに関しては、材料・デバイス・回路・誤り訂正符号（ECC）の全体統合により、100年超の高寿命化を行う。まず Step1 として、書き換え回数が少ない条件で 100 年以上の寿命を達成する。次に Step2 として、100 年以上の長寿命を保ちつつ、書き換え回数の増加を図る。次に、フラッシュメモリに関しては、長寿命化に適した ECC を開発し、データセンタのコールドストレージに向けた高信頼化技術を確認する。ナノギャップメモリに関しては、極めて高い温度（例えば 600℃ 以上）でも安定にデータ保持を実現することを目指す。更に、メモリチップ共通の周辺回路の中で、信頼性の観点から重要な配線の高信頼化の研究も実施する。

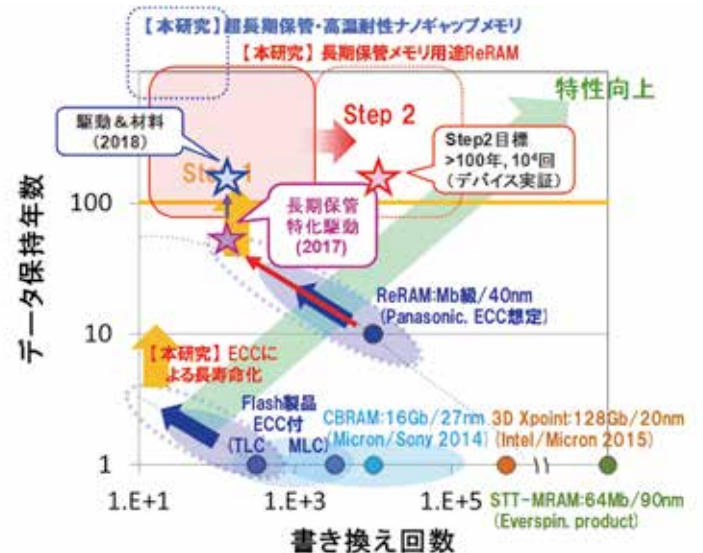


図1. メモリのベンチマークと本研究の目標

2. 研究成果

長期保管データ向け ReRAM では、保管劣化の定量モデルを確立し、保管劣化が統計的に予測できることを示した。また、劣化モデルに基づいて動作アルゴリズムおよび材料の観点から新技術を導入し、保管特性を向上させることにより、書き換え数が少ない条件では、100 年以上のデータ保管が可能であることを明らかにした（図2）。コールドストレージ向けフラッシュメモリでは、2次元、3次元メモリともに、長期のデータの寿命はトンネルフロントモデルで説明でき、寿命は2-3年であることを明らかにした。また今後主流になる3次元メモリでは、Lateral Migration が信頼性の問題になることも世界で初めて明らかにし、IEDM2017で発表した（図3）。ナノギャップメモリでは、電極金属を高融点材料とすることで、情報保持・動作温度ともに 600℃以上で有ることを示した。また、絶縁性基板の影響を検討し、改良することで、800℃を超える情報保持温度を有することが明らかになった（図4）。高信頼配線では、Fault Tree Analysis (FTA) の手法により、過去報告された配線信頼性に関する文献のテキストマイニングから、配線の超長期信頼性においては、吸湿防止の破れが様々な故障を誘起する要因となることを明らかにした。また粒界をずらして積層したグラフェン膜によって、吸湿による金属酸化のほぼ完全な防止を実証した（図5）。

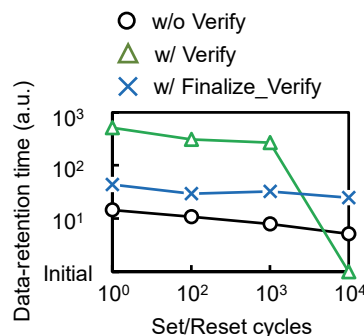


図2. ReRAMの長寿命化

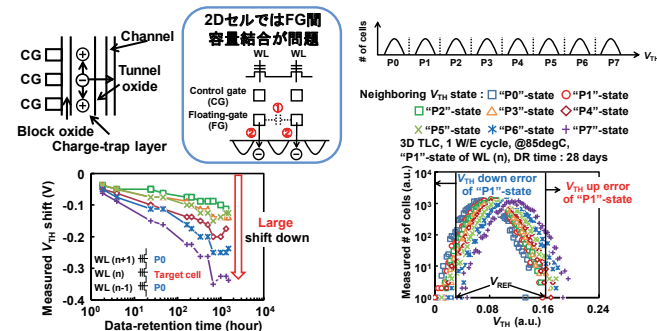


図3. 3次元 NAND 型フラッシュメモリの高信頼化

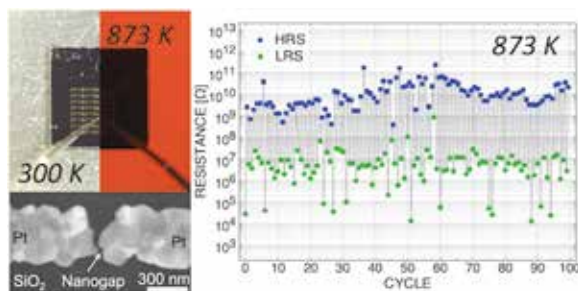


図4. 600°Cにおける Pt ナノギャップメモリの抵抗変化

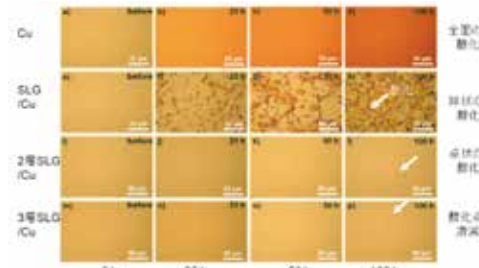


図5. グラフェンキャップによる銅配線表面の高温高湿保管特性

3.研究成果の位置づけ

図1に示すように、本研究で開発する長期保存 ReRAM、フラッシュメモリ、ナノギャップメモリは他に同レベルの高信頼メモリが存在しないため、他のメモリとの差別化も明確である。

4. 今後の発展と期待

高信頼 ReRAM は公文書（国会図書館等）、計測データ（天文・海洋）、映像データ（ハリウッド・放送局、医療画像データ、電子カルテなどの長期保管を目指す。今後、データの長期保存と高い書き換え回数を両立することで、より幅広い応用（スマートハウス、橋・トンネルなどのインフラ、ライフログ、車載、産業機器・ロボット等）への展開が可能になる。高信頼フラッシュメモリはデータセンタのコールドストレージ応用を狙う。ナノギャップメモリは工場・ライトレコーダー・害現場など、突発的な高温にさらされる環境下での利用が期待できる。

5.成果物のまとめ

査読付論文	国際会議招待講演	特許	受賞
25	19	4	7

・ Kyoji Mizoguchi, Shohei Kotaki, Yoshiaki Deguchi and Ken Takeuchi, “Lateral Charge Migration Suppression of 3D-NAND Flash by VTH Nearing for Near Data Computing,” IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM), pp. 465-468, December 2017.

・ Yasuhisa Naitoh, Hiroshi Suga, Takuya Abe, Kazuki Otsu, Yukiya Umeta, Touru Sumiya, Hisashi Shima, Kazuhito Tsukagoshi, and Hiroyuki Akinaga, “Thermal robustness evaluation of nonvolatile memory using Pt nanogaps”, Appl. Phys. Express 11, 085202 (2018).

・ Ploybussara Gomasang, Takumi Abe, Kenji Kawahara, Yoko Wasai, Nataliya Nabatova-Gabain, Nguyen Thanh Cuong, Hiroaki Ago, Susumu Okada, and Kazuyoshi Ueno, "Moisture Barrier Properties of Single-Layer Graphene Deposited on Cu Films for Cu Metallization", Jpn. J. Appl. Phys. 57, 04FC08 (2018).

【超高速・超低電力・超大面積エレクトロクロミズム】

樋口昌芳（物質・材料研究機構）

グラント番号：JPMJCR1533

1. 研究目標とねらい

本研究は、研究代表者らが見出したエレクトロクロミック特性を有する新素材「メタロ超分子ポリマー」（*Chem. Rec.* **2007**）に関して、素材、デバイス、システムの融合研究を推進することで、素材を生かした「新しい使い方、潜在的なニーズの創出」を目指します。

メタロ超分子ポリマーは、金属イオンと有機配位子が錯形成により、交互に繋がった超分子型ポリマーです。金属から有機物への電荷移動吸収が可視領域にあるためにポリマーは色を有します。このポリマーに、電位を印加すると、金属の酸化還元に伴って色が変わる現象（エレクトロクロミック現象）を見出しました（図1）

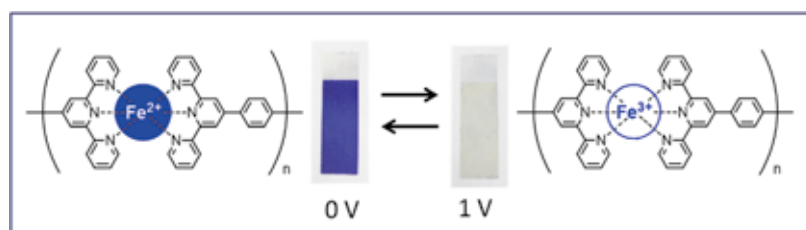


図1 メタロ超分子ポリマーのエレクトロクロミック特性（鉄とビスターピリジンからなるポリマー(polyFe)の場合、1 V vs. Ag/Ag⁺の電位を印加すると、ポリマーの色が青から無色に変化する）

本研究では、「新しい使い方、潜在的なニーズの創出」として、本ポリマーを用いたエレクトロクロミックデバイスの芸術応用を目指します。具体的には、素材及びデバイス開発を担当する物質・材料研究機構の樋口グループ、デバイスの電子回路駆動系の開発を担当する早稲田大学の大橋グループに加え、今年度より、美術応用を担当する多摩美術大学の濱田グループが参画し、素材の特性を生かしたデモ作品の作製を行います。本ポリマーのエレクトロクロミズムの特長である「メモリ性」（電源を切っても表示が続く特性）や「多色性」を生かして、従来の液晶や有機ELでは実現できない新しい表現方法を提示します。

2. 研究成果

エレクトロクロミックデバイスの芸術応用として、求められる課題、現状、次の展開について、図2にまとめました。メタロ超分子ポリマー（素材）に求められるのは、「色のきれいさ」と「透明性」になります。また、デバイスにおいては、省電力化、メモリ性、繰り返し駆動耐久性の向上が課題となります。

素材（ポリマー）の色は、電荷移動吸収の補色であるため、電荷移動の吸収波長で決まります。

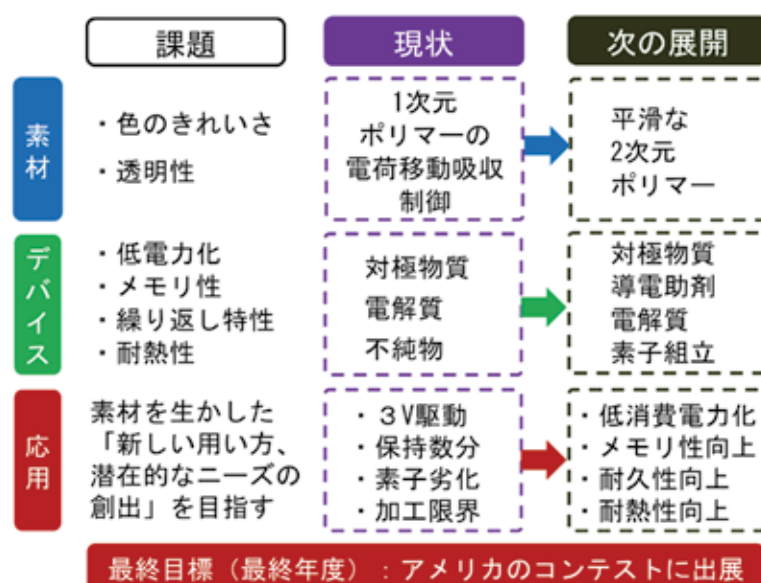


図2 素材、デバイス、応用の各項目に対する課題と現状、及び次の展開

この波長は、金属の d 電子から、有機配位子の π^* 軌道への遷移のエネルギーですので、ポリマーに含まれる金属イオン種や有機配位子の構造の違いによって、このエネルギー差（＝ポリマーの色）が変わります。我々は、鉄など様々な金属イオンをポリマー主鎖に導入し、そのエレクトロクロミック特性を調べています。最近、オスニウム (Os) をポリマーに導入することに成功し、あずき色と黄緑色の間での色変化を電気化学的に制御できることを見出しました（図 3）。

3. 研究成果の位置づけ

酸化タングステンやビオロゲンなど、様々なエレクトロクロミック物質がこれまで研究され、一部はボーイング 787 の窓などに採用されています。無機材料は一般に耐久性に優れ、有機材料はカラーバリエーションに優れています。メタロ超分子ポリマーは、多彩な色と耐久性を兼ね備えたハイブリッド材料であることが分かってきました。今後のエレクトロクロミックデバイス分野をけん引すると期待されます。

4. 今後の発展と期待

メタロ超分子ポリマーは、新しいタイプのポリマーとしてその基礎物性に注目が集まっています。一方、我々が見出したエレクトロクロミック特性は、調光ガラスをはじめ、現在行っている芸術作品など応用・実用化も期待されます。我々は、企業との共同研究、及びベンチャーの設立を通じて、世の中に製品として提供・普及させていくことを予定しています。

5. 成果物のまとめ

査読付論文	国際会議招待講演	特許出願	受賞
10	12	7	1

- M. K. Bera, C. Chakraborty, U. Rana, M. Higuchi, “Electrochromic Os(II)-Based Metallo-Supramolecular Polymers”, *Macromol. Rapid Commun.*, 1800415(1-6) (2018). (Selected to back cover)
- M. Eguchi, M. Momotake, F. Inoue, T. Oshima, K. Maeda, M. Higuchi, “Inert Layered Silicate Improves the Electrochemical Responses of a Metal Complex Polymer”, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 9, 35498-35503 (2017).
- C. Chakraborty, R. K. Pandey, U. Rana, M. Kanao, S. Moriyama, M. Higuchi, “Geometrically Isomeric Pt(II)/Fe(II)-Based Heterometallo-Supramolecular Polymers with Organometallic Ligands for Electrochromism and Electrochemical Switching of Raman Scattering”, *J. Mater. Chem. C*, 4, 9428-9437 (2016). (Selected to outside back cover, Open access)

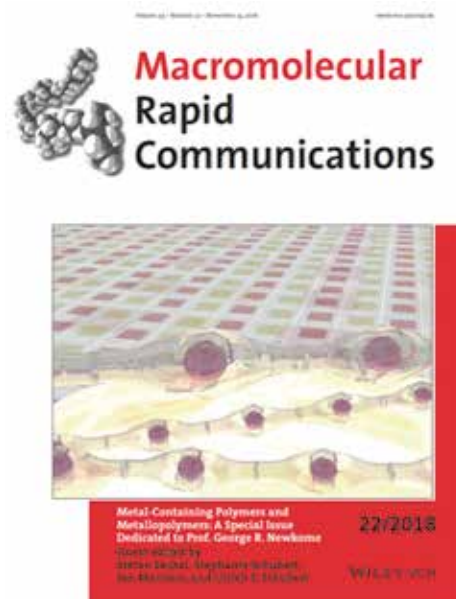


図 3 Os を用いたメタロ超分子ポリマーに関する論文

【繊細な触覚を定量的に感知する「ナノ触覚神経網」の開発と 各種の手触り感計測技術への応用】

氏名 高尾 英邦（香川大学）

グラント番号：JPMJCR1531

1. 研究目標とねらい

本プロジェクトでは、今日のエレクトロニクスでは実現されていない「人間の指先が持つ繊細な触覚」をセンシングシステムとして実現する。各種の手触り感を数値化できる計測システムの実現により、先進医療機器応用（図1）の様に新しい価値を創造する触覚センシング分野を創出してゆく。従来の触覚技術では観測不能であった微細な表面テクスチャに起因する「手触りの情報を取得する新領域の触覚」を計測可能なセンサと、その情報を低電力かつ効果的に処理するプロセッシング技術、さらに、人間が感じる手触り感や素材毎の違いを見分ける定量化モデルを統合し、指先の触覚神経網に代わる高い感度で手触り感の定量化を可能とする高分解能触覚センシング技術（ナノ触覚神経網）を構築する。



図1 指先感覚を持つナノ触覚技術の応用例

2. 研究成果

人間の指先皮膚にある「指紋」が取得する微細な表面凹凸や摩擦力振動を計測可能な高分解能触覚センサ（ナノ触覚センサ）を開発し、従来のセンサが計測できなかった微細表面テクスチャが持つ高密度の触覚情報をセンシング可能とした。図2は独立して機能する6つの指紋型ナノ触覚をシリコン上に集積化した最新のナノ触覚センサアレイと、それを用いた布地表面の触覚計測結果である。6本の独立した指紋型センサにより、「糸」と「編」の柔軟な表面構造に加えて、各点で生じる手触り摩擦の変化を空間的に視覚化可能とした。このナノ触覚センサが持つ能力を活かせば、判別が難しい毛髪の手触り感変化も識別可能である。同一の毛髪につ

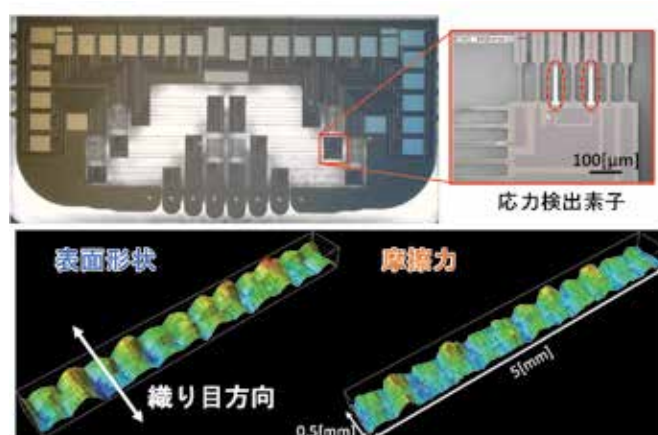


図2 指先を模したナノ触覚センサと布地（フリース編み）表面の高分解能触覚画像

いての手触り変化を「洗髪前」「シャンプー洗髪後」「石けん洗髪後」の三つの状態で計測した結果、キューティクル一枚毎に起因する微小な摩擦波形の変化を明確な特徴として捉えることができた。また、ナノ触覚センサと深層学習を組み合わせることで、人間の指先を上回る触覚の識別能力を実現することができる。微妙な手触りの違いがある7種類のティッシュペーパーについて、本技術は80%以上の高い正答率で未学習データを識別した。一方、人間の被験者で同様に識別した場合の正答率は平均30%前後であった。この場合においては、人間の指先を上回る精度で触覚判別を実施できたといえる。

3. 研究成果の位置づけ

本研究では、高解像触覚情報のセンシングが可能な各種のナノ触覚デバイスを開発し、一例として空間解像力 200nm、同時検出摩擦力 180 μ N に及ぶ高い触覚検知性能を実現している。これは他機関にて開発されている触覚センサがもつ 1mm 前後の空間解像力と比較して大幅に高い性能である（図 3 参照）。プロジェクトにおいて、サブミクロン領域の微小な凹凸を持つ表面の形状と摩擦の関係を初めて明らかにしたとともに、指先皮膚が持つ触覚能力を上回るセンシングデバイスの開発に成功した。また、ナノ触覚の信号が含む特徴量と官能評価結果を対比し、人間の感覚である「なめらかさ」等の手触り感を数値化することができた。従来、触感の評価に広く用いられてきた KES（風合い測定装置）で取得できなかった微細な領域の表面テクスチャ情報を取得可能になったことで、人間の感覚に合致する触覚評価が可能となったと考えられる。

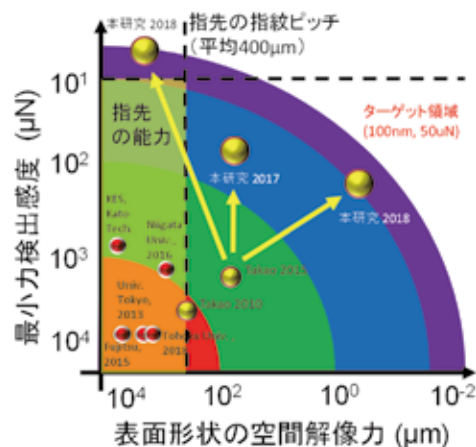


図 3 本研究における高分解能
ナノ触覚の性能と位置づけ

4. 今後の発展と期待

プロジェクト後半期は、最終目標である「手触り感の定量化（数量化）」にむけて、ナノ触覚デバイスの限界性能向上と、定量化が可能な触覚情報処理システムを構築し、ナノ触覚神経網へと展開する。高精細な触覚の定量化が実現されることで、指先の感覚を持つエレクトロニクスが生み出す新しい価値を持つアプリケーションやサービス、通信技術の創出へと繋がるであろう。これらは繊細な指先の感覚が求められる先進医療機器や介護・福祉製品の開発、職人の感覚による仕上げや素材の高級感判別、髪の毛や肌の手触りによる美容健康管理など、潜在的に幅広い需要が期待される。この新しい触覚センシング技術が社会へと浸透してゆくためには、ナノ触覚センサの供給を可能とする実用化の道を進んでゆくとともに、先進的な社会応用におけるナノ触覚技術の高い有効性について実証を続けることが不可欠である。

5. 成果物のまとめ

査読付論文	国際会議招待講演	特許	受賞
25	10	6	4

代表的論文：

- ・ Y. Maeda, K. Maeda, H. Kobara, H. Mori, H. Takao, “Integrated pressure and temperature sensor with high immunity against external disturbance for flexible endoscope operation”, Jap. J. App. Phys., Vol. 56, No. 4S-14, 2017.
- ・ 高尾英邦、森宏仁、前田祐作、綿谷一輝、寺尾京平、下川房男、前田光平、香西亮吾, “（招待論文）超低侵襲実装を志向する「細胞化センサ」”, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J101-C, No.1, pp.9-17, 2018.
- ・ K. Watatani, K. Terao, F. Shimokawa, H. Takao, “A Micro-Macro” Integrated Planar MEMS Tactile Sensor for Precise Modeling and Measurement of Fingertip Sensation, Proc. IEEE MEMS2017, pp. 223-226, 2017.

【共鳴トンネルダイオードとフォトニック結晶の融合によるテラヘルツ集積基盤技術の創成】

富士田 誠之(大阪大学)

グラント番号：JPMJCR1534

1. 研究目標とねらい

本研究は、図 1 に示すような体制でデバイス・材料・回路・システムの研究者が結集して、量子ナノエレクトロニクスデバイスと微細構造フォトニック材料、高周波回路実装技術、応用システム技術を融合させることで、電波と光波の間の未開拓の周波数を有するテラヘルツ電磁波を利活用可能にする集積デバイスシステムの学理を創成することをねらいとしている。単体の電子デバイスとして最も高い 1 THz を超える周波数でテラヘルツ波を発生可能な量子薄膜ナノ構造を有する小型電子デバイス共鳴トンネルダイオード(Resonant Tunneling Diode: RTD)に着目し、通信速度の限界を追求する。そして、テラヘルツ帯の集積技術の課題である伝搬損失を誘電体で構成される微細構造フォトニック結晶を導波路として利用するという光波的なアプローチで抑制し、RTD デバイスの性能を向上させ、テラヘルツ通信などのデモンストレーションを行うことが目標である。

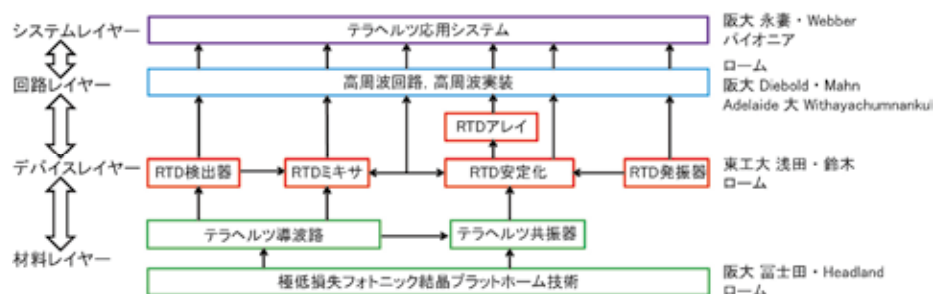


図 1 研究レイヤーと研究体制の関係。

2. 研究成果

RTD は、微分負性コンダクタンスを有する非線形の強い電流-電圧特性を有する高周波デバイスである。高度なデバイス設計に向けた基盤技術として、電子回路シミュレータに適用可能な独自の RTD 回路モデルの構築を行った。構築したモデルを活用し、RTD とアンテナをインピーダンス整合させる設計を行うことで、RTD デバイスの高出力化を行った。このようにして開発した RTD を用いて無線通信実験を行ったところ、本 CREST 研究以前には数年間更新されてこなかった RTD 送受信器による無線通信速度の記録を更新する 9 Gbit/s のエラーフリー通信を実現し、その高速かつ高品質な通信システムを反映して、非圧縮 4K 映像の無線伝送のデモンストレーションにも成功した。さらに、電流密度を高くできるウエハの導入による高出力化と変調回路の損失低減を施した 0.65 THz 帯 RTD 送信器によって、25 Gbit/s のエラーフリー通信を実現した。一方、発振状態にある RTD を受信器として利用することで高感度化を実現し、27 Gbit/s のエラーフリー通信を達成した。また、通信キャリア周波数のさらなる向上にむけて、これまで着目されてこなかったアンテナの材料損失を低減し、1.98 THz という単一の電子デバイスにおける世界最高の発振周波数を達成した。

フォトニック結晶導波路は、シリコンウエハを用いた平面構造であるとともに、0.3 THz 帯で 0.1 dB/cm 以下という金属線路よりも 2 桁以上の低損失性を有するため、テラヘルツ集積回路の基盤技術として有望である。そのため、RTD と融合させることで、RTD の発振状態の制御やアレイ動作、高効率な入出力インターフェースなどの機能を発現させることができる可能性がある。しかしながら、テラヘルツ帯で動作する RTD の大きさは数 μm 以下とフォトニック結晶導波路中の電磁界のスケールである数百 μm と比べて桁違いに小さいため、両者の高効率な結合は挑戦的課題である。本研究では、フォトニック結晶導波路中に電磁界の整合を可能とする金属パターンを形成した RTD チップを埋め込む構造を考案することで、50%を上回る高効率結合を実現した。そして、このようにフ

フォトニック結晶導波路と融合した RTD デバイスをテラヘルツファイバ通信システムへと応用した。低誘電率ポリマを用いた中空ファイバは、軽量かつフレキシブルなテラヘルツケーブルとして機能できる。特にファイバの径が小さい場合に低損失伝搬特性が期待できるが、高効率な入出力が課題となる。本研究では、フォトニック結晶導波路と一体形成したシリコンテーパー構造が中空ファイバへの高効率な入出力インターフェースとなることを見出した。その結果、RTD とフォトニック結晶の融合によって、0.3 THz 帯のファイバ通信を世界に先駆けて実現し、非圧縮 4K 映像の伝送に成功した。加えて、フォトニック結晶の低損失性を活用することで、フォトニック結晶導波路と集積化された Q 値 10,000 を超えるテラヘルツ微小共振器を実現した。RTD 発振器をこのように高い Q 値を有する共振器とフォトニック結晶導波路による高効率結合構造を介して強く結合させたところ、発振スペクトルが狭窄化し、発振周波数のバイアス電圧依存性が抑制された。これは、RTD の発振状態が元の電子回路の限界を超えてフォトニック結晶構造で制御されたことを意味する。

3.研究成果の位置づけ

本研究では、デバイスシステムの小型化が期待できる送信器が全て電子デバイスで構成される無線通信システムにおいて、実用的にエラーフリーといえる 10^{-11} 以下のビット誤り率が評価されたシステムとして、過去最高の通信速度を達成した。また、10 Gbit/s を超える高速通信として過去最高のキャリア周波数での無線通信を実現した。RTD 送信器のビット当たりの消費エネルギーは基本波テラヘルツ発振を反映して、10 pJ/bit 以下と周波数通信技術を用いたデバイスと比較して、一桁以上小さい。基本波発振の周波数も単体の電子デバイスとして、世界最高記録である。集積技術の基盤となるフォトニック結晶導波路の低損失性は金属平面線路と比較して二桁以上小さく、その低損失性を反映したテラヘルツ電子デバイスの制御と機能付加を世界に先駆けて実現した。

4. 今後の発展と期待

小型かつ低消費電力なテラヘルツデバイスの実現による携帯端末等、小型機器への超高速無線通信の実装に加え、テラヘルツファイバシステムの研究を進展させることで高速有線・無線通信双方が実装されたユニークなシステムが実現できる可能性がある。本研究のフォトニクス技術による電子デバイスの制御というコンセプトは、電子回路が性能を制限する高周波デバイスの性能向上につながるため、通信応用だけではなく、センシング応用も含めた 300 GHz を超えるような超高周波帯の電磁波資源の利活用を開拓し、促進させることが期待できる。

5.成果物のまとめ

査読付論文	国際会議招待講演	特許	受賞
41	27	4	4

•Sebastian Diebold, Kousuke Nishio, Yousuke Nishida, Jaeyoung Kim, Kazuisao Tsuruda, Toshikazu Mukai, Masayuki Fujita and Tadao Nagatsuma, “High-speed error-free wireless data transmission using a terahertz resonant tunnelling diode transmitter and receiver”, Electron. Lett., vol. 52, no. 24, pp. 1999–2001, 2016.

•Takeru Maekawa, Hidetoshi Kanaya, Safumi Suzuki and Masahiro Asada, “Oscillation up to 1.92 THz in resonant tunneling diode by reduced conduction loss”, Appl. Phys. Express, vol. 9, no. 2, pp. 024101-1–024101-4, 2016.

•Xiongbin Yu, Yasuo Hosoda, Tomoyuki Miyamoto, Katsunori Obata, Jaeyoung Kim, Masayuki Fujita and Tadao Nagatsuma, “Terahertz fibre transmission link using resonant tunnelling diodes integrated with photonic crystal waveguides”, Electron. Lett. 2019 (to be published).

【ポリマー配線を用いたニューラルネットワーク型情報回路の創成】

赤井 恵（大阪大学）

グラント番号：JPMJPR1521

1. 研究目標とねらい

近年、脳の優れた特性、高効率な消費電力性、環境適応力、認識力、判断力に学ぶ新しい情報処理技術が、既存のコンピュータではこなせなかった問題を解決するニューラルネットワーク型人工知能(AI)として盛んに利用され始めている。しかしながら、ニューラルネットワークが計算部とメモリが分離している現行のノイマン型計算機の中で動く以上、その更新すべき情報量の多さから莫大な電力を消費する定めから逃れられない。ニューラルネットワークをより効率的に、様々な現実の状況に適合させて利用する為には、現在の半導体技術を用いない新規な仕組みと材料を用い、ニューラルネットワークのアーキテクチャを全体的、もしくは部分的に物理的に構築した ” フィジカル AI ” 技術へのパラダイムシフトが求められている。

本研究は空間を自由に配線出来る可塑性を持った有機ポリマー材料を用い、ニューラルネットワークアルゴリズムを基礎とした情報認識回路の創成を提案する。本研究で用いる導電性高分子は、単量体溶液の中の指向性の高い重合反応として、神経細胞ニューロンのように溶液内自由空間をワイヤー状に成長する。ポリマーワイヤーは指定された電極端子間に指向性を持って成長し、その導電性を変化させ保持する「不揮発性の抵抗変化メモリ」であり、ニューラルネットワークの学習シナプス端子として利用することが出来る。

2. 研究成果

本研究では中でも制御性の高い PEDOT:PSS ワイヤー成長の機構解明と制御を目的として研究を進めた。強い指向性を持ったワイヤー状重合は、矩形波電圧印加直後の陽極先端の単量体酸化がまず起き、その後にワイヤー表面全体の成長が起っていることが径の周波数依存性から見出された。ワイヤー伸長に必要な電圧閾値は分子の一般的な酸化電位よりも数倍から数十倍と非常に大きい。これは連続的な重合を持続する為の単量体供給が熱対流によってもたらされ、一定値以上の電流量が必要となるからであると考えられる。一方で成長するワイヤ形状は電極から遠く離れても電極金属種に強く依存し、またワイヤーの電気伝導率も変化した。これらの金属依存性の傾向には法則が見いだされず、その要因は不明なままである。また、一定の高周波数高電圧条件を満たした場合に、電極間に複数本のワイヤーが成長させることが可能であることを発見した。これは、学習に必須な抵抗変化メモリとして利用可能な線形増加かつ大きな変化幅の抵抗変化を実現することに繋がった。

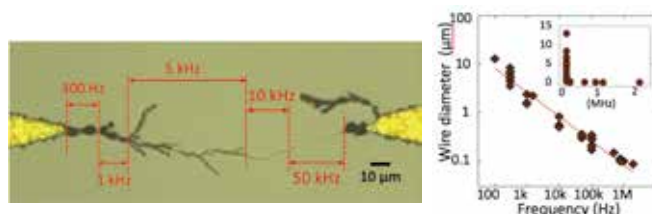


図1 周波数依存を示す光学顕微鏡像とワイヤー系依存性

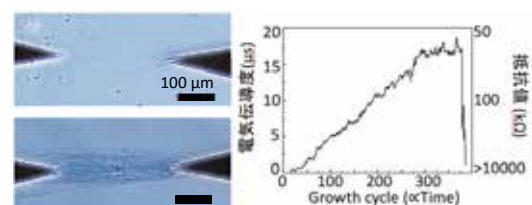


図2 多重架橋と、抵抗変化

次に機械学習を用いたポリマー配線ニューラルネットワークの構築を目指し、自作電気回路とマイコン制御による機械学習システムを構築し、教師あり単純パーセプトロンアルゴリズムを用い

た PEDOT:PSS ワイヤー4 入力 1 出力 AND OR 論理回路の作製を達成した。次に、電気回路基盤ボードとマイコン制御による 9×6 の双方向機械学習システムを構築し、54 対電極におけるオートエンコーダー回路を構築し、図 3 に示すような 9 ビット 3 文字の 3 ビットへの特徴抽出に成功した。

また、新機能材料探索の結果、カーボンナノチューブ(CNT)と分子を用いた、CNT/分子ランダムネットワークが、リカレントニューラルネットワークの一つである”リザーバー計算”となる可能性があることを示した。導電性ポリマー抵抗変化素子は数十から数百で十分機能するとされる”リザーバー計算の読み出し端子重み”の実現に最適であると考えられる。本研究の最終段階としては、将来の機器内実利用を想定し、90 端子を搭載した 2cm 角の PEDOT:PSS 抵抗変化メモリアレーチップを作製した。また、ポリマー以外の多彩な材料に適応が可能な 180 端子まで機械学習可能なシステムを構築した。

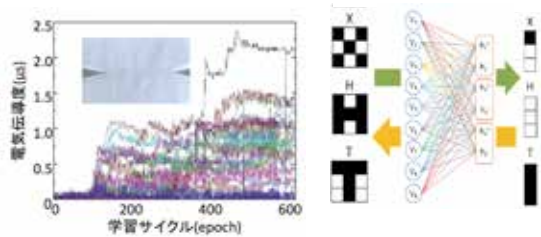


図 3 学習中の各ポリマーのコンダクタンス値変化(左)と、学習後ネットワークが獲得した信号変換結果(右)

3. 研究成果の位置づけ

フィジカルニューラルネットワーク構築を目的とする研究は、固体メモリスタのクロスバー構造を用いた研究が隆盛である。それらを含めても、機械学習による CMOS 以外の材料へのニューラルネットワーク構築の報告は、未だ 10 件未満と数が少なく、本研究結果はオートエンコーダーという高度なアルゴリズムの学習を有機材料という他に例を見ない材料で実現した貴重な結果である。

4. 今後の発展と期待

本研究で用いた PEDOT:PSS は、材料としての制御性や堅牢性も高く、機械学習によって成長させたネットワーク値を保持した抵抗素子は、機器等の中で安定に利用することが可能である。未来の世界には、汎用性はないがエッジユーザーによって簡単に安価に学習させられ、目的に先鋭化した小さな人工知能が必ず登場する。それらの基盤技術となるべく研究開発を続けていく。

5. 成果物のまとめ

査読付論文	国際会議招待講演	特許	受賞
5	4	0	0

- H. Tanaka, M. Akai-Kasaya, A. Termeh Yousefi, L. Hong, T. Asai, and T. Ogawa, et al., “A Molecular Neuromorphic Network Device consisting of Single-Walled Carbon Nanotubes complexed with Polyoxometalate” Nature Commun., 9, 2693 (2018).
- H. Fujii, A. Setiadi, Y. Kuwahara, and M. Akai-Kasaya, “Single walled carbon nanotube-based stochastic resonance device with molecular self-noise source “, Appl. Phys. Lett., 111, 133501 (2017).
- A. Setiadi, H. Fujii, S. Kasai, K. Yamashita, T. Ogawa, T. Ikuta, Y. Kanai, K. Matsumoto, Y. Kuwahara and M. Akai-Kasaya, “Room-temperature discrete-charge-fluctuation dynamics of a single molecule adsorbed on a carbon nanotube” , Nanoscale, 9, 10674 (2017) .

【極限的エネルギー効率を有する超伝導可逆計算機の開発】

竹内 尚輝 (横浜国立大学)

グラント番号: JPMJPR1528

1. 研究目標とねらい

「可逆計算機」は、熱力学的に可逆な過程で論理演算を行うことができる。つまり、準静的に動作させた際に、無限小の消費エネルギーで演算を行うことが可能である。このため可逆計算機は、究極的に高いエネルギー効率を有した計算機として考えられてきた。しかしながら、可逆計算機に関する研究は理論研究が先行しており、デバイスや回路等のハードウェアレベルでの研究例は非常に少ない。このような状況の下、私は超伝導体を用いた可逆論理ゲート（可逆計算機を構成する基本的なコンポーネント）を提案した。超伝導可逆論理ゲートは論理的にも物理的にも可逆なゲートであり、論理状態を準静的にスイッチさせることが可能である。そのため、準静的過程において、無限小の消費エネルギーで論理演算を行うことができる。本研究では、超伝導可逆論理ゲートを用いることで、究極的なエネルギー効率を有した可逆計算機の実現を目指す。

本研究は、最初に理論的な検討を行い、回路の可逆性と消費エネルギーの関係を明らかにする。次に、可逆計算機を設計するために必要な論理ゲートを含む、可逆セルライブラリを構築する。最終的に、可逆セルライブラリを用いて可逆 8-bit 加算器の設計、作製、及び動作実証を行い、可逆計算機をハードウェアレベルで実現する。また、消費エネルギーの評価を行い、極限的に高いエネルギー効率が可逆計算により得られることを示す。

2. 研究成果

本研究で用いる超伝導可逆論理ゲートは可逆磁束量子パラメトロン (RQFP) と呼ばれ、断熱磁束量子パラメトロン (AQFP) と呼ばれる超伝導ロジックにより構成される。AQFP は、80 年代に東京大学の後藤らによって開発された QFP を基に、論理状態のスイッチを断熱過程に近づけることで低電力化を実現したロジックである。本研究では、次の 4 つの研究テーマを遂行した: (A) AQFP ロジックの可逆性と消費エネルギーの関係の解明、(B) RQFP ゲートを含む可逆セルライブラリの構築、(C) 可逆加算器の設計と動作実証、(D)

AQFP ロジックの低電力及び高速動作実証。図 1 に、各研究テーマと成果の概要を示す（テーマ D を除く）。

テーマ A では、不可逆な AQFP 論理ゲートではどのようなメカニズムで非断熱的な消費エネルギーが生じるのか、不要

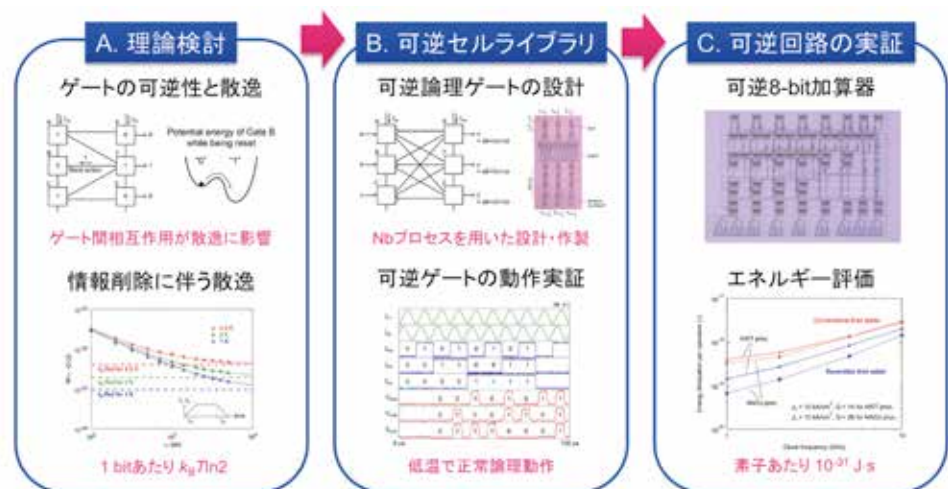


図 1. 研究テーマと成果の概要

な演算結果を消すためにはどの程度の消費エネルギーが生じるのか、等の理論的検討を行った。テーマ B では、RQFP ゲートの設計及び動作実証を行った。また、設計した RQFP ゲートを基に、AND や OR 等の基本的な論理演算を行う可逆ゲートを設計、さらに動作実証を行い、可逆論理ゲートにより構成されるセルライブラリを構築した。各可逆論理ゲートのレイアウト設計では、磁気シールドの導入など、ばらつきに対する対策を行った。テーマ C では、テーマ B で構築した可逆セルライブラリを用いて、可逆全加算器の設計と作製、及び動作実証を行った。さらに、可逆 8-bit 加算器の設計と作製を行った。可逆 8-bit 加算器の動作テストの結果については、報告会当日に発表する。また、可逆全加算器及び可逆 8-bit 加算器の消費エネルギーを数値計算により評価した。その結果、プロセスの改善を見込むと、素子あたりわずか $\sim 10^{-31}$ J·s の微小なエネルギー遅延積で動作することがわかった。テーマ D では、可逆ゲートを構成する AQFP ロジックの低電力性及び高速動作性を実験的に評価した。

3. 研究成果の位置づけ、今後の発展と期待

本研究により、超伝導ロジックである AQFP に可逆計算を導入することで、素子あたり $\sim 10^{-31}$ J·s という極めて小さなエネルギー遅延積で動作可能であることが示された。この値は、半導体 CMOS ($\sim 10^{-26}$ J·s) や従来型超伝導ロジックである RSFQ ($\sim 10^{-28}$ J·s) に比べて桁違いに小さい。また、例えば 100,000 接合規模 (D-Wave Systems 社の 2,000 量子ビットシステムに相当) の超伝導可逆回路を 5 GHz で動作させても、その消費電力はわずか ~ 0.3 μ W であり、希釈冷凍機の冷却能力 ($\sim \mu$ W) に収まる。この特徴を活かし、今後は、本研究で得られた超伝導可逆回路を、極低温下での超伝導アナログデバイス (光子検出器や量子ビット) を制御するためのデジタル信号処理回路として展開する。具体的には、科研費・基盤 (S) 「超伝導シングルフォトンカメラによる革新的イメージング技術の創出」(2018～2022 年度、代表: 寺井 (NICT)) では、超伝導光子検出器の読み出し回路として AQFP 及び RQFP を利用し、単一光子レベルの感度を有するイメージセンサの実現を目指す。原理実証として、シングルピクセルの光子検出器の状態を AQFP 回路で読み出せることを冷凍機中で実証した。また、NEDO「超電導パラメトロン素子を用いた量子アニーリング技術の研究開発」(2018～2022 年度、全体統括: NEC) では、超伝導量子ビットの制御回路として AQFP 及び RQFP を利用し、量子アニーリングマシンの実現を目指す。これらのアプリケーションに向けて、さきがけ終了後 2,3 年で、数 1,000～10,000 接合規模の可逆回路の動作実証を目指す。

4. 成果物のまとめ

査読付論文	国際会議招待講演	特許	受賞
11	4	1	1

- N. Takeuchi and N. Yoshikawa, “Minimum energy dissipation required for a logically irreversible operation,” *Physical Review E*, vol. 97, no. 1, p. 12124 (5pp), Jan. 2018.
- N. Takeuchi, T. Yamashita, S. Miyajima, S. Miki, N. Yoshikawa, and H. Terai, “Adiabatic quantum-flux-parametron interface for the readout of superconducting nanowire single-photon detectors,” *Optics Express*, vol. 25, no. 26, pp. 32650–32658, Dec. 2017.
- N. Takeuchi, Y. Yamanashi, and N. Yoshikawa, “Reversibility and energy dissipation in adiabatic superconductor logic,” *Scientific Reports*, vol. 7, p. 75 (12pp), Mar. 2017.

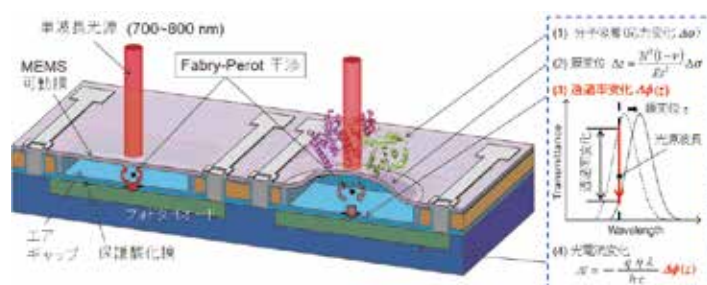
【光干渉型分子間力センサによる高感度マルチバイオマーカー検出システム】

高橋 一浩（豊橋技術科学大学）

グラント番号：JPMJPR1526

1. 研究目標とねらい

本研究では CMOS イメージセンサの各画素上に集積化した MEMS ファブリペロー干渉計を用いて、タンパク質をはじめとする生体分子同士にはたらく相互作用を可動膜の変形として伝達することにより、標識を用いずに分子を検出することを目的としている。センサ機能面への分子の吸着によるストレス変化を検出する本方式では、材料・トランスデューサ・信号処理回路の 3 つのアプローチによって、従来方式を 2 桁以上上回る超高感度分子間相互作用検出、および超ハイスループット分子スクリーニングが期待される。本提案では、センサの超高感度化により腫瘍マーカー基準値である 1 ng/mL の濃度を 1 分以内の検出、および 1000 ～1 万ピクセルの並列処理を目的とした。



2. 研究成果

図 1 光干渉型表面応力センサの模式図と信号変換原理

光干渉型表面応力センサにおいて可動膜として用いる材料は、ヤング率が高く変形量の小さい半導体に限定されず、ソフトマテリアルを用いて分子吸着に対する変形量を増大させることが可能である。また、表面応力センサは膜厚の 2 乗に反比例して検出感度が向上するため、可動膜の薄膜化による感度向上も期待できる。そこで可動膜材料として、ポリレン C、ポリスチレンーポリブタジエンーポリスチレントリブロック共重合体 (SBS)、グラフェンの 3 種類の膜をセンシング材料として作製を行い、各材料によって形成したサスペンデッド膜により MEMS 光干渉計の形成に成功した。特にサスペンデッドグラフェンを利用した表面応力センサでは、解析的な応力検出下限が従来の表面応力センサと比較し、3 桁向上できることが示唆された。サスペンデッドグラフェンを形成した光干渉計から得られた反射特性より、光干渉の理論式を用いて、基板と自立グラフェンとのギャップ長をパラメータとして数値計算を行ったところ、設計値に近い 375 nm の時に測定したスペクトルとの一致が見られ、ギャップ長を光干渉測定によって評価できることが分かった (図 2)。

光の干渉を利用する提案技術は、干渉スペクトルを鋭くするほど膜変位に対する透過率の変化は急峻になるため、信号変換効率は波長選択性の設計により向上することができる。可動膜の上部および下部基板上に反射率を向上する膜厚 50 nm の金ハーフミラーを一体化し、6.6 倍の信号変換効率を有するセンサの作製に成功した。

MEMS 光センサを CMOS イメージセンサの各画素上に形成することによって、多項目の分子を同時に、かつ短時間にスクリーニング処理することができる。CMOS 検出回路一体化型のセンサチップを作製し、光反射スペクトル変化とセンサ部で受光した光信号を信号処理回路で電流-電圧変化し、電圧-時間変化測定を行った。チップ

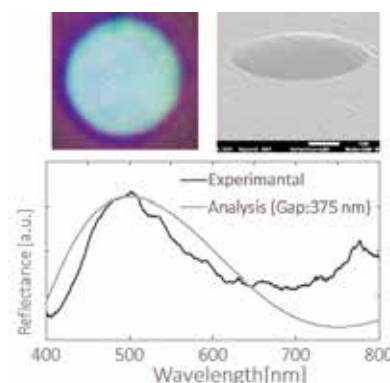


図2 グラフェンを用いた光干渉センサおよび干渉特性

をエタノール雰囲気中に暴露したときの反射光強度変化と、出力電圧の時間変化が一致していることから、膜の変形量を電圧で出力できていることが示せた。さらに、 32×32 イメージセンサを作製し、各画素に入射した光の強度変化を画像出力として取得可能な測定システムを構築した。

バイオマーカー分子の検出のため、ダイヤフラム直径 $300 \mu\text{m}$ の 150 nm PMMA/ 100 nm パリレン C 膜上でヒト血清アルブミン (HSA) をモデル分子として抗原抗体反応評価を行った。終濃度が 1 pg/ml になるように HSA 抗原溶液を滴下した場合の反射特性では、干渉ピークが 25 分経過後に約 35 nm レッドシフト、すなわち膜が膨らむ様子が得られた(図 3)。HSA の終濃度は $10^{-9} \sim 10^{-15} \text{ g/ml}$ として滴下 25 分後の最大波長シフト量を比較したところ、濃度に依って波長シフトが変化する様子が確認され、 1 fg/ml の抗原に対しても生理食塩水との有意差が示された。

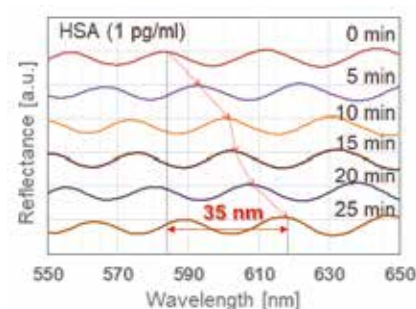


図 3 抗原抗体反応によるセンサの応答

3. 研究成果の位置づけ

ここで応答が確認できた濃度の検出下限値は、蛍光標識法で最も感度の良い digital ELISA に近い数値 (検出限界 60 ag/mL) であり、原理的に多項目の検出が不可能な digital ELISA 技術に対して、単素子でその検出下限に迫る値を取得できた。また、CMOS イメージセンサ技術との融合により、 32×32 アレイセンサの画像出力による解析システムの構築を実現し、マーカーのマルチ検出に向けたプラットフォームを確立できた。

4. 今後の発展と期待

提案する表面応力センサは分子の吸着によるストレス変化を検出する原理を用いているため、応答の原理的には、夾雑物の影響が少ない検出原理である。このため、血液サンプルの測定などを行い、夾雑物による影響を評価することにより、検査における前処理を経ずとも使用可能な簡易測定チップが実現できる。さらに、ユーザーのもとへセンサチップを供給するためには検出回路との一体化が必要である。そのためファウンダリ試作による検出回路上へ MEMS ポストプロセスを行ってバイオセンシング動作を実証し、ディスプレイザブル CMOS-MEMS チップの量産化によって、抗原抗体反応によるセンサ応答の並列処理を行うことができ、クリニックや自宅でのマーカー検査が可能な小型検査装置の開発が期待できる。

5. 成果物のまとめ

査読付論文	国際会議招待講演	特許	受賞
5	1	0	0

論文(原著論文)発表

1. H. Kumagai, N. Sato, S. Takeoka, K. Sawada, T. Fujie, and K. Takahashi, Applied Physics Express, vol. 10, no. 1, 011601 (2017)
2. K. Takahashi, H. Ishida, and K. Sawada, Applied Physics Letters, vol. 112, 041901 (2018)
3. T. Takahashi, T. Hizawa, N. Misawa, M. Taki, K. Sawada, and K. Takahashi, Journal of Micromechanics and Microengineering, vol.28, no. 5, 054002 (2018)

【移植用培養生体組織に搭載可能なナノエレクトロニクスの創成】

藤枝俊宣（東京工業大学）

グラント番号：JPMJPR152A

1. 研究目標とねらい

先進医療や医科学研究の高度化に向けて、生体への負担が少なく使用可能な医療機器を開発することは、QOL（Quality of Life）の向上のため、また、QOL 向上を支えるための高精度な生体情報収集を実現するうえで重要な課題である。とりわけ、我が国の強みであるナノエレクトロニクスや有機エレクトロニクスの進展を鑑みると、生体に安心安全に取り付け可能な医療機器の開発が期待される。この点において、埋め込み型や装着型デバイスを用いて無線通信による医療機器の制御・管理が可能になれば、疾病の診断や早期発見、あるいは、日常生活環境下での低侵襲な治療が実現すると期待される。本研究では、人工系において生体膜レベルの超薄性（膜厚：数十～数百ナノメートル）を有する高分子ナノ薄膜とプリンテッドエレクトロニクスを組み合わせることで生体組織の電子化を目指した。具体的には、①高分子の自己組織化と印刷技術を融合させることでナノ薄膜の電子化に向けた製造手法を確立した。次に、②ナノ薄膜上への電子回路や生体電極の実装および生体環境下での動作性を評価した。最終的には、③電子化ナノ薄膜を生体内に移植し、光操作や無線給電技術を利用した生体機能の計測や制御を試みた。

2. 研究成果

（1）生体接着性ナノ薄膜の開発と光がん治療への応用

医療用シリコーンゴム (PDMS) からなるナノ薄膜をグラビア印刷法にて調製し、生体模倣型高分子であるポリドーパミン (PDA) を表面修飾することで生体組織に対する接着性を付与した。この生体接着性ナノ薄膜を用いて近距離無線 (NFC) 発光式 LED チップ (赤・緑) をマウス皮下に埋植し、無線給電用アンテナ (13.56 MHz) を用いることで、体内で点灯させることに成功した (図 1)。

次に、光線力学療法 (PDT) で用いられる光増感剤 (フォトフリン, 8 mg/kg) を投与し、10 日間連続的に腫瘍に光照射した際の腫瘍サイズの変化を計測した。フォトフリン投与群において、埋植した LED 光源による局所的な光照射が腫瘍縮退効果を示すことを見出した。特に、今回使用した緑および赤色 LED の光強度 ($< 100 \mu\text{W}/\text{cm}^2$) は、従来の PDT で用いられているレーザー光の光強度 ($> 100 \text{mW}/\text{cm}^2$) の 1000 分の 1 であるため、正常組織の熱障害を回避し、かつ、局所的・持続的な抗腫瘍効果を示すことが可能なメトロノミック PDT を実現できた。

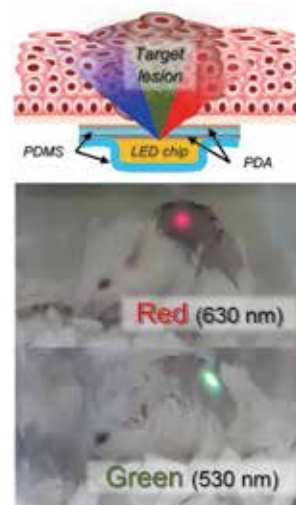


図1 光がん治療の概念と生体接着性ナノ薄膜を用いて無線 LED チップを埋め込んだ担腫瘍マウス

（2）ナノ薄膜からなる神経電極の開発

ポリ乳酸からなるナノ薄膜表面にインクジェット印刷にて微細配線 (幅約 $50 \mu\text{m}$) を印刷することで、脳組織に適応可能なインジェクタブル神経電極を開発した。ナノ薄膜の柔軟性を利用して直径 200-300 μm の針状電極に成型し、脳内に穿刺可能な固さに加工した (図 2)。この神経電極をラット脳内に穿刺して、単一神経細胞由来の *in vivo*

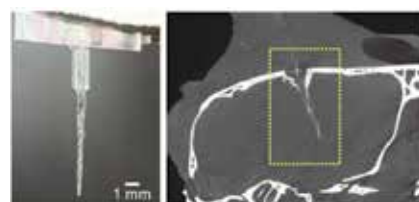


図2 ナノ薄膜から構成されるインジェクタブル神経電極

スパイクを計測した。マイクロ CT にて脳内の電極構造を観察したところ、針状の電極構造を維持したまま脳内に留まる様子が認められた。さらに、直径 500 μm の光ファイバにシート状神経電極を巻き付けることで、神経細胞への光刺激と活動電位のその場計測が可能なオプトロードを開発した。ChR2 発現ラットの海馬部にオプトロードを穿刺することで、青色光（波長：470 nm）による局所的な光刺激と単一神経細胞の *in vivo* スパイク計測を同時に実現した。

（3）ナノ薄膜状アンテナコイルからなる無線式発熱デバイスの開発

層状物質であるグラフェンフレークに着目し、ガラス基板上にインクジェット印刷にてグラフェンフレーク、次いで、金ナノインクを積層させたアンテナコイルを形成した。次に、ガラス基板からアンテナコイルを支持膜法にてポリ乳酸ナノ薄膜（膜厚 182 nm）に転写することで、柔軟性を有する薄膜状アンテナコイル（総膜厚：< 2 μm ）を作製した。この時、ファンデルワールス力で堆積するグラフェンフレーク層が分離することにより、印刷配線が導電性を維持したままガラス基板からナノ薄膜に転写される現象を見出した。さらに、ナノ薄膜状アンテナコイルにチップ LED を搭載することで薄膜状の発光デバイス（共振周波数：33.0 MHz）を作製した。デバイスは柔軟性に優れ、折り曲げた状態でも無線給電（20 V_{p-p}, 30 MHz, 2 倍増幅）にて青色 LED を点灯させることに成功した。本技術は、生体内への光源の設置や生体外からの無線通信による薬剤放出やセンサ作動に有用な技術になると期待される。

3. 研究成果の位置づけ

本研究では、硬いエレクトロニクスと柔らかい生体を繋ぐための「インターフェース」として、有機薄膜材料の力学特性に着目した。高分子ナノ薄膜とプリントエレクトロニクスを組み合わせることで、生体組織に取り付けて作動可能なデバイス（『プリントナノ薄膜』と命名）を創製し、生体機能の計測、制御ならびに無線給電技術を構築した。当該研究成果は生体とデバイスの融合に向けた基盤技術として、生体融合型デバイスの設計指針になるものと期待される。

4. 今後の発展と期待

本研究を通じて、生体とデバイスの融合に向けた基盤技術を構築できた。今後は、ナノエレ研究者（センサ・無線計測）や情報科学（ICT）分野の研究者と連携して異分野融合型の研究に挑戦したい。

5. 成果物のまとめ

査読付論文	国際会議招待講演	特許	受賞
15	10	8	4

・Yamagishi, K., Kirino, I., Takahashi, I., Amano, H., Takeoka, S., Morimoto, Y., Fujie, T. Tissue-adhesive wirelessly powered optoelectronic device for metronomic photodynamic cancer therapy. *Nat. Biomed. Eng.*, 3, 27-36 (2019). (DOI: 10.1038/s41551-018-0261-7).

・Kokubo, N., Arake, M., Yamagishi, K., Morimoto, Y., Takeoka, S., Ohta, H., Fujie, T. Inkjet-Printed Neural Electrodes with Mechanically Gradient Structure. *ACS Appl. Bio Mater.*, in press (DOI: 10.1021/acsabm.8b00574).

・Yamagishi, K., Takeoka, S., Fujie, T. Printed Nanofilms Mechanically Conforming to Living Bodies. *Biomater. Sci.*, in press (DOI: 10.1039/C8BM01290C).

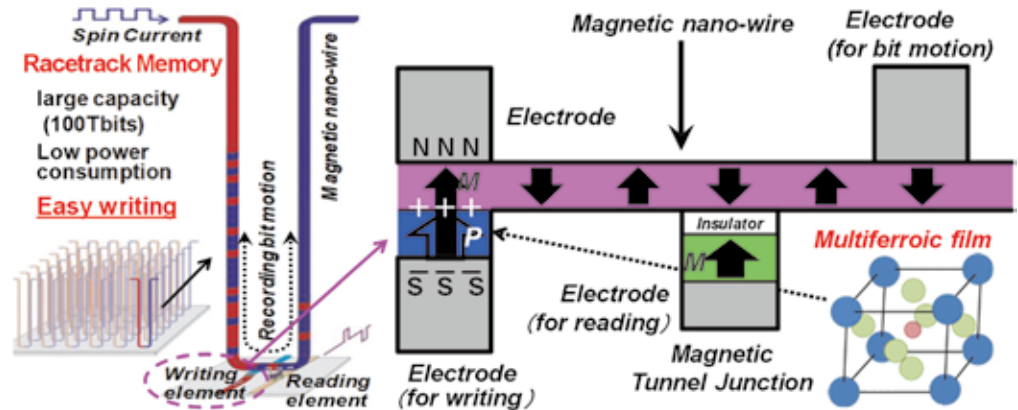
【電界書き込み型の超低消費電力磁気メモリの開発】

吉村 哲（秋田大学）

グラント番号：JPMJPR152C

1. 研究目標とねらい

超大容量・低消費電力稼働型の磁気メモリ（レーストラックメモリ）における、超低消費電力書き込みを可能にする新しい電界書き込み方式の動作検証を目的とし、強磁性・強誘電薄膜（電界書き込み素子に相当）と垂直磁気異方性を有する強磁性金属薄膜（ワイヤー状記録媒体に相当）からなる2層積層膜を作製し、それに電界のみを印加することで強磁性・強誘電薄膜の磁化方向変化を介して強磁性金属薄膜の磁化方向を反転（磁気転写）させることを本研究のねらいに位置付けている。

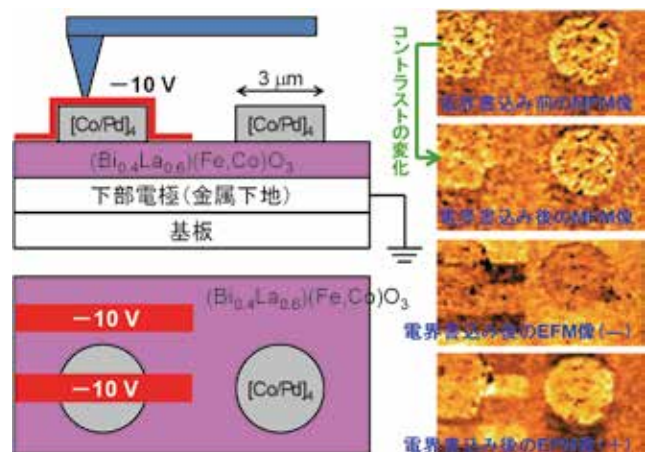
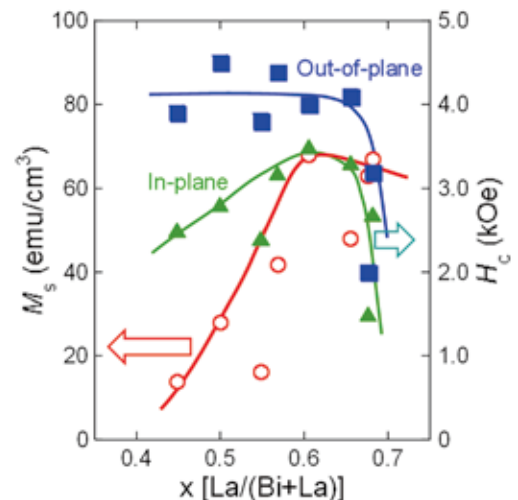


2. 研究成果

反応性パルス DC スパッタリング法や VHF プラズマ照射成膜などの特徴的な手法を用い、 BiFeO_3 における Bi に対して置換する元素を種々変化させて薄膜を作製した結果、右図のように、 $(\text{Bi}_{1-x}\text{La}_x)(\text{Fe}, \text{Co})\text{O}_3$ 薄膜において、磁気デバイス応用に有用な、大きな飽和磁化および保磁力、垂直磁気異方性、明確な強誘電特性（図無し）、を得ることに成功した。

そして、作製した $(\text{Bi}_{1-x}\text{La}_x)(\text{Fe}, \text{Co})\text{O}_3$ 薄膜において、電圧を印加した領域において明瞭な磁気コントラストが得られたことから、磁化が電圧により誘起されたことを確認した。また、その磁化の誘起が可能な最小サイズがメモリのワイヤー（記録媒体）幅と同程度の 300 nm 程度であった。よって、本材料はメモリ応用が可能と言える。

右図のように、 $(\text{Bi}_{1-x}\text{La}_x)(\text{Fe}, \text{Co})\text{O}_3$ 強磁性・強誘電薄膜上に、垂直磁気異方性を有する強磁性金属 $[\text{Co}/\text{Pd}]_4$ 薄膜パターンを成膜した2層積層膜を作製し、その一部に電圧を印加した。電圧印加前および印加されていない方の $[\text{Co}/\text{Pd}]_4$ パターンは、明瞭かつ微小な明暗のコントラストが見られて多磁区構造を形成している（消磁状態である）が、電圧印



加が施された[Co/Pd]₄パターンは、コントラストが無くなり一様に磁化したことが判った。これは、電圧印加で反転した強磁性・強誘電薄膜の磁化方向が強磁性金属薄膜の磁化に転写されたこと意味し、レーズトラックメモリにおける電界書き込み方式の動作検証に成功したと言える。

3. 研究成果の位置づけ

本研究と異なる「電圧印加による磁化方向制御」技術には、①磁歪材料と圧電材料とを組み合わせた積層体、②強磁性層／極薄絶縁層／強磁性層からなるトンネル型磁気抵抗積層膜、③ α -Cr₂O₃薄膜／強磁性層の積層膜、④BiFeO₃薄膜／強磁性層の積層膜、などの材料系が報告されているが、A. 電界印加のみで磁化反転が可能、B. 磁化反転に膜厚の制約は無い、C. 高いキュリー温度を有しており室温動作には問題ない、を全て満たす革新的で応用性に優れた材料系は、本強磁性・強誘電材料のみである。

また、強磁性・強誘電薄膜に関し、他報告に対する本研究の革新性や優位性は、以下の通りである。

- ・過去最大級もしくはそれ以上に大きな飽和磁化および保磁力、明確な垂直磁気異方性が得られた。
- ・局所電圧印加のみによるサブミクロンサイズでの磁気ドメイン(記録ビット)の静的誘起に成功した。
- ・極めて大きな磁気 Kerr 効果（レーザ波長 700nm で Kerr 回転角 2°）が得られた。

4. 今後の発展と期待

レーズトラックメモリの電界書き込み機能検証を真に検証するためには、2層積層膜への電界印加による強磁性金属薄膜の磁化の動的変化を観測する必要がある。そのためにまず、新規提案して構築および改造中の「電気磁気効果特性測定装置」を完成させ、印加電圧に対する磁気 Kerr 効果(磁化)の応答を測定する。その機能検証の次の段階として、超低消費電力での磁気ドメインの移動が可能なスキルミオンを強磁性金属薄膜に用いた2層積層膜を作製および評価し、デバイス性能の向上を図る。

また、本研究で得られた想定外の成果である、巨大な磁気 Kerr 効果を発現するもしくは軟磁気特性を有する強磁性・強誘電薄膜については、光磁気デバイスや磁気センサに応用でき、かつそれらを超低消費電力稼働化および多機能化をもたらす可能性がある。

5. 成果物のまとめ

査読付論文	国際会議招待講演	特許	受賞
3	4	2	1

・ S. Yoshimura, "Fabrication of ϵ -Fe₂O₃ multiferroic thin films with high coercivity and magnetization for electric-field writing magnetic recording", Proceedings of International Conference of Materials for Resources (ICMR, Akita, Japan, 2017), pp.490-493, (2017)

・ S. Yoshimura, Y. Sugawara, G. Egawa, and H. Saito, "Basic Study of Electric Field Induced Magnetization Reversal of Multiferroic (Bi_{1-x}Ba_x)FeO₃ Thin Films at Room Temperature for Magnetic Recording Technology", Journal of the Magnetics Society of Japan, Vol.42-2, p.11-14 (2018)

・ S. Yoshimura, and M. Kuppen, "Fabrication of highly qualified (Bi_{1-x}Ba_x)FeO₃ multiferroic thin films by using a pulsed DC reactive sputtering method and demonstration of magnetization reversal by electric field", Japanese Journal of Applied Physics, Selected Topics in Applied Physics, Vol.57, p.0902B7 (2018)

【高移動度二次元酸化物構造による非散逸電流デバイスの創成】

高橋圭（理化学研究所）

グラント番号：JPMJPR1527

1. 研究目標とねらい

電子デバイスにおけるエネルギーを消費しない非散逸電子流の応用は、世界が目指すべき持続可能社会にむけた課題であり物性物理学の主題の一つでもあります。強磁性トポロジカル絶縁体において最近実証された量子異常ホール効果の強磁性自発磁化により量子化する端電流状態が、エネルギーを消費しない非散逸流として応用可能であると注目しました。量子異常ホール効果では、強磁性磁区の磁壁に沿ってスピン偏極したカイラルエッジ流が生じています。この磁壁を外場で制御できれば非散逸電流で組まれた論理回路の量子化された情報を磁区のコントロールによって制御することができ、非散逸電流を使ったデバイスの可能性が広がります。最近、研究者は二次元領域だけ電子ドーピングしたデルタドーピング SrTiO₃ の二次元電子において、電子相関の強い *d* 電子で初めて量子ホール効果を実現しました。本研究では、ガスソース分子線エピタキシー（MBE）による高品質酸化物薄膜成長によって、SrTiO₃ の二次元電子を磁性体 EuTiO₃ との接合等で強磁性化し量子異常ホール効果の実現を目指しました。

2. 研究成果

酸化物薄膜構造により強磁性二次元電子を作製し、量子異常ホール効果を実現し将来の非散逸量子デバイスに道筋を与えることを目標に研究を進めました。反強磁性体 EuTiO₃ に La を置換して電子ドーピングした薄膜を、研究者が開発したガスソース MBE によって高品質化・高移動度化することを軸に、酸化物磁性半導体の量子伝導観察の実験を行いました。

研究の初期段階において、この系の異常ホール効果を詳細に調べました。格子定数の小さな LSAT 基板上に圧縮歪み薄膜の異常ホール効果において、磁化過程で磁化曲線から大きくずれる成分が発現することを見いだしました（図 1）。これは、圧縮歪みによって結晶場分裂した 2 種類のバンドが交差するワイル・ノードとフェルミエネルギーの位置関係が磁化過程において変化し、それに伴って異常ホール効果の値と符号が変化するためであることを解明しました。この成果はこれまで観測できなかった新しい異常ホール効果であり、論文（代表的論文(3)）で発表しましたが、この異常ホール効果の値自体は小さく量子化は困難であると分かりました。そこで、量子異常ホール効果実現の目標から、強磁性電子の磁場中での量子ホール効果の観察を実現し、新しい量子伝導現象を将来の非散逸量子デバイスに繋げることに目標を変えました。

量子伝導観察に向けて、SrTiO₃ 基板上に格子歪みのない薄膜を高温成長することによって高移動度化に成功しました。最高

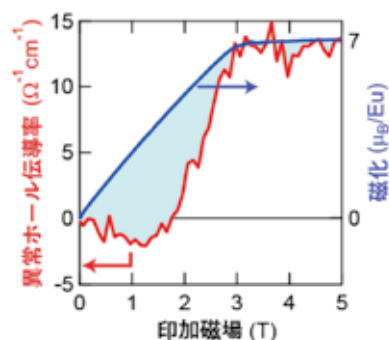


図 1：高移動度 EuTiO₃ 薄膜の異常ホール効果と磁化曲線。磁化に比例する異常ホール効果から外れる大きな成分が発現しています。

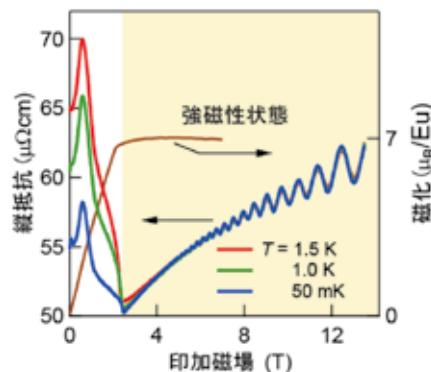


図 2：高移動度 EuTiO₃ 薄膜の磁気抵抗曲線。強磁性状態、5 T 以上で量子振動が明瞭に見えています。

移動度は $3200 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ に到達し、強磁性状態で磁気抵抗が振動するシュブニコフ・ハース (SdH) 振動の観察に成功しました (図 2)。バンド計算から伝導電子はスピンの完全に偏極していることが示唆され、SdH 振動の角度依存性からスピン偏極した 3 つの異なるバンドのうちの 2 つのバンドが振動に寄与していることが分かりました。この成果は、酸化物磁性半導体を高移動度化し量子伝導を観測した初めての結果で、今後、スピン偏極二次元電子の量子ホール効果という新たな現象の実現と強相関電子の量子伝導研究への展開が期待されます。

3. 研究成果の位置づけ

酸化物磁性半導体を高移動度化し量子伝導を初めて観測しました。これまで、清浄な半導体の世界で成功した例がなかった高移動度強磁性電子の量子伝導を初めて実現したと言えます。今後、スピン偏極二次元電子の量子ホール効果という新たな現象の実現と強相関電子の量子伝導研究への展開が期待されます。ここ数年で盛んになっているトポロジカル絶縁体やトポロジカル物質の量子物性研究の観点からは、電子相関の強い酸化物で実験的に量子物性研究を大きく進展させた成果と言えます。トポロジカル量子技術は文科省の平成 30 年度の戦略目標にも選定されており、今後飛躍的に発展していく科学技術と予想されます。次世代電子技術の主流が量子技術になり高度化した快適な社会を支えることが期待されるため、本研究成果はその基盤研究として価値あるものになると思います。

4. 今後の発展と期待

当初の目的の量子異常ホール効果の実現と非散逸流のデバイス検証は達成出来なかったものの、ガスソース MBE 酸化物薄膜のポテンシャルを生かした EuTiO_3 薄膜の高品質化により、これまで例のなかった磁性半導体に関する多くの成果が得られました。特に、スピン偏極電子による磁気抵抗量子振動の実現はスピンエレクトロニクス分野へのインパクトも大きく、二次元化による量子ホール効果の実現が期待されます。スピン偏極した電子から得られる分数量子ホール効果では新しい準粒子を作りだせる可能性も予想されます。

この成果には、スピン偏極した電子相関の強い電子系物質の高品質薄膜化が重要な役割を果たしました。今後、 EuTiO_3 や SrTiO_3 のチタン酸化物だけでなく、他の遷移金属酸化物の成長にこのガスソース MBE を応用します。これまで不純物や欠陥準位によって伝導が取り出せなかったトポロジカル電子状態、新量子物性研究を大きく進展させ、量子物性研究の基盤技術になることを期待します。

5. 成果物のまとめ

査読付論文	国際会議招待講演	特許	受賞
14	0	0	0

代表的論文

- Y. Matsubara, K. S. Takahashi, M. S. Bahramy, Y. Kozuka, D. Maryenko, J. Falson, A. Tsukazaki, Y. Tokura, and M. Kawasaki, “Observation of the quantum Hall effect in δ -doped SrTiO_3 ”, *Nature Communications* **7**, 11631 (2016).
- K. S. Takahashi, Y. Matsubara, M. S. Bahramy, N. Ogawa, D. Hashizume, Y. Tokura, and M. Kawasaki, “Polar metal phase stabilized in strained La-doped BaTiO_3 films”, *Scientific Report* **7**, 4631 (2017).
- K. S. Takahashi, H. Ishizuka, T. Murata, Q. Y. Wang, Y. Tokura, N. Nagaosa, M. Kawasaki, “Anomalous Hall effect derived from multiple Weyl nodes in high-mobility EuTiO_3 films”, *Science Advances* **4**, eaar7880 (2018).

【極薄磁性酸化物中におけるスピン波位相干渉を用いた多入出力演算素子の開発】

後藤 太一（豊橋技術科学大学）

グラント番号：JPMJPR1524

1. 研究目標とねらい

近年急激に成長する情報化社会は、より低消費電力、より高速、より小型な電子デバイスを要求していますが、これまでの半導体集積回路の微細化や高集積化による高性能化だけでは、これらの要求に対応しきれない現状にあります。これは、電子を移動することによって得られる「電流」を使う電子デバイスの宿命であり、そもそも電子を移動しないで動作するデバイスが実現できれば、大きな技術革新が期待できます。そこで、本研究では、電子を移動せずとも、電子中の自由度の一つであるスピンの位相を情報キャリアとして伝えるデバイスを作製することで、この現状の打開策を示すことを目指しています。

2. 研究成果

スピンの位相は、電気を通さない絶縁体中を波として伝わることができ、スピン波と呼ばれます。これまでのスピン波に関する研究で、スピン波が重なったときに強め合ったり弱め合ったりする位相干渉の現象は確認されていましたが、その演算素子としての機能の実証は不十分でした。また、演算素子の全ての機能を実現するのに不可欠な、否定論理積（NAND）と否定論理和（NOR）が実現されていませんでした。今回の研究では、電気を通さない磁石材料である「磁性絶縁体」として広く知られている磁性ガーネットという材料を、図1に示すようなフォークのような形に加工し、3つの枝からスピン波を入力し、接合点で位相干渉させ、幹の部分にその結果を出力することで、否定論理積と否定論理和の演算を実現しました。

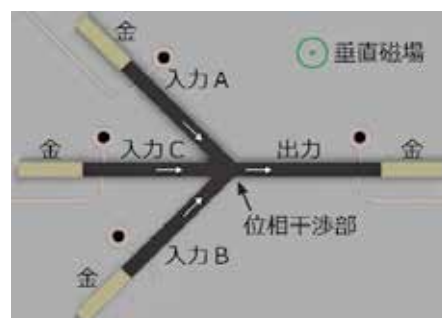


図1 今回作製した磁性ガーネットで作ったフォーク型のスピン波位相干渉演算素子

演算の結果は、スピン波の強さの情報ではなく、スピン波の位相の情報として、出力できるようにしました。これはつまり、この素子を次々と繋げることが可能になったことを意味し、組み合わせによって、より複雑な機能を作り出せるようになったことを表します。さらに、図2に示すように、1つの入力スピン波（今は入力C）の位相を変えることで、否定論理積と否定論理和を切り替えることも可能です。

さらに、このデバイスで使用した、磁性絶縁体の厚さを50ナノメートルまで薄膜化し、スピン波の波長を短縮することで、デバイスサイズを3桁以下に小型することにも成功しました。

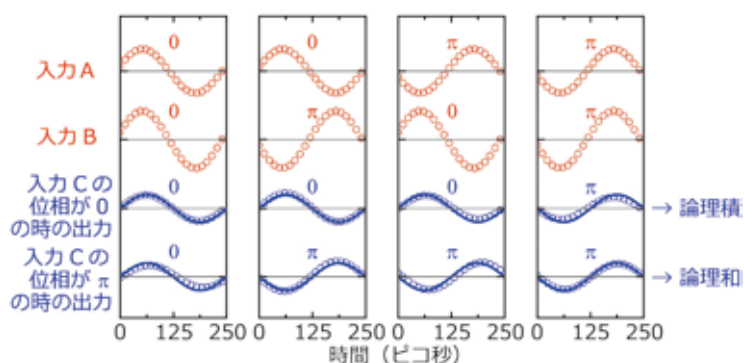


図2 スピン波位相干渉演算素子の各端子の位相

3. 研究成果の位置づけ

今回の成果デバイスと従来デバイスを比較し表1にまとめました。第1期の成果デバイスは、世界初の磁性絶縁体を使った前進体積モードのスピンの位相干渉素子に位置づけられます。さらに、極薄の磁性絶縁体を使うことで、スピン波の波長を短縮し、デバイスサイズを小型化し、第2期の成果デバイスとして発表しました。これは、低損失である特徴により、同サイズの位相干渉素子を導電体の磁性体を用いて作製したとき（従来デバイス）に比べ、出力が約100倍大きくなることを示しました。

表1 今回実証した磁性絶縁体（YIG）を用いたスピン波位相干渉演算素子の特性と従来素子の比較

	第2期の成果デバイス	第1期の成果デバイス	従来デバイス
スピン波導波路材料	YIG	YIG	パーマロイ
膜厚 (μm)	0.05	16	0.035
サイズ (mm ²)	4×10^{-3}	1×10^1	4×10^{-3}
入力電力 (mV)	350	200	490
最大出力 (mV)	9.80	6.31	0.366
最小出力 (mV)	1.06	1.30	0.028
アイソレーション値 (dB)	19	14	22
印加磁界 (Oe)	2800	3050	436
周波数 (GHz)	3.95	4.00	6.50
スピン波波長 (μm)	63	780	16
スピン波のモード	前進体積モード	前進体積モード	表面モード
発表先	Sci. Rep., 7, 7898 (2017)	Sci. Rep., 6, 30268 (2016)	Appl. Phys. Express 6, 063001 (2013)

4. 今後の発展と期待

今回の研究により、超低消費電力で、多くの入力情報を1箇所ですべて同時に同時処理可能な演算素子の実現への道が開けました。今回使ったスピン波は材料の薄膜化や電極の微細化によって、デバイスサイズの小型化が可能なことも示され、今回の実験結果を元にした、電流を流さないスピン波集積回路開発が進むと期待できます。本さがけ研究をきっかけに、国内材料メーカーとの共同研究がスタートしています。今後、本研究で培った知見および共同研究を進展させ、デバイスおよびシステムレイヤーの研究者・技術者・企業との連携を通し、社会実装することを目指します。

5. 成果物のまとめ

査読付論文	国際会議招待講演	特許	受賞
19	14	3	12

・N. Kanazawa, T. Goto, K. Sekiguchi, A. B. Granovsky, C. A. Ross, H. Takagi, Y. Nakamura, and M. Inoue, "Demonstration of a robust magnonic spin wave interferometer", *Scientific Reports*, **6**, 30268 (2016).

・N. Kanazawa, T. Goto, K. Sekiguchi, A. B. Granovsky, C. A. Ross, H. Takagi, Y. Nakamura, H. Uchida, and M. Inoue, "The role of Snell's law for a magnonic majority gate", *Scientific Reports*, **7**, 7898 (2017).

・T. Yoshimoto, T. Goto, K. Shimada, B. Iwamoto, Y. Nakamura, H. Uchida, C. A. Ross, and M. Inoue, "Static and dynamic magnetic properties of single-crystalline yttrium iron garnet films epitaxially grown on three garnet substrates", *Advanced Electronic Materials*, **4**, 1800106 (2018).

【ナノカーボン光・電子量子デバイス開発と量子暗号通信応用】

牧 英之（慶應義塾大学）

グラント番号：JPMJPR152B

1. 研究目標とねらい

近年の情報化社会の急速な進展に伴って、様々なサービスや機器とのやり取りがインターネットを介して行われる時代となり、従来にも増して、高いセキュリティーを確保した情報通信が要求される新たな時代を迎えた。現在のインターネット社会のセキュリティーを支える重要技術として暗号化技術があるが、現代暗号化技術は、素因数分解を用いた計算量安全性による暗号化技術であり、絶対的に安全な暗号化技術ではない。また、近年の量子コンピュータの急速な発展によって現代暗号は更なる脅威にさらされており、量子コンピュータを使えば素因数分解を短時間で処理可能となることから、現代の暗号は量子コンピュータで破られてしまう可能性が見出されている。そのため、量子コンピュータが実現しても破られることのない、絶対安全な暗号技術の実現が急務とされているが、高い安全性を有する暗号化技術の一つとして、量子暗号通信が注目されている。量子暗号通信は、光の最小単位である光子一個に情報を乗せることで、光子の持つ量子性（分割不可・複製不可）を用いて、絶対的に安全な暗号通信を実現する技術であり、量子力学の基礎研究や実用化可能な光通信技術として注目されている。

地上での量子暗号通信では、光ファイバー通信波長帯である波長 1.3μm 帯や 1.55μm 帯での長距離単一光子配信が用いられている。しかし、現状では、量子暗号自体は実用化しているものの、そのシステムは、ラックサイズと大型かつ超高価であり、さらに専用光ファイバー網を必要とするため極めてコストが高く、金融・国防・国家機関といった豊富な資金と極めて高い秘匿性を必要とする限られた用途のみで用いられており、一般光ファイバー網を介して一般ユーザーが利用可能な量子暗号システムの開発には全く目途が立っていない。一般ユーザーが利用可能な量子暗号システムの実現には、一般の電子機器に簡単に搭載可能な安価で小型のチップ上量子暗号素子を開発することから、室温・通信波長で動作する高品質な単一光子源といった光源技術に加えて、シリコンフォトリソなどのチップ高集積光技術との融合が必要となる。さらに、一般光ファイバー網を利用して広く量子暗号を利用するには、上記の光源技術に加えて、多者への量子暗号配信に必要な光スイッチ技術の構築、高効率な単一光子検出技術の構築も必要となるが、これら全ての技術は現代の固体半導体材料ベースの技術では実現困難なものばかりであり、上記の全ての技術に対してブレイクスルーとなるイノベーションを実現しない限りは、一般ユーザーが利用可能な量子暗号システムは実現できないのが現状である。そこで本研究では、上記イノベーションを実現する次世代の材料系としてナノカーボン材料に注目し、量子暗号の一般への普及に不可欠なデバイス技術をナノカーボンデバイスで実現するという極めてチャレンジングな研究に挑戦した。我々は、2015 年に、カーボンナノチューブ（CNT）を用いることで、「室温・通信波長帯」において単一光子発生が可能であることを世界で初めて示し、全物質系を含めても世界で初めて「室温かつ通信波長帯」の単一光子源を実演した（図 1）。しかし、一方で、ナノカーボンデバイスは、光通信を実演した例が世界でも全く無いなど、ナノカーボン材料の光通信材料としてのポテンシャルは、全くの未知数であった。そこで、本研究では、ナノカーボン材料を用いることで、一般ユーザー向け量子暗号技術実現のためのイノベーション構築を可能とする、量子暗号用光デバイス開発を進めた。

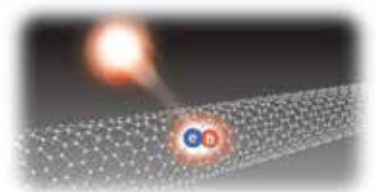


図 1 単一光子発生の概念図

2. 研究成果

本研究では、広く普及可能な一般向け量子暗号技術を可能にする、全く新しいナノカーボンデバイス開発を進めた。単一光子発生技術に関しては、カーボンナノチューブへの表面処理による励起子制御技術の構築を行った結果、様々な CNT の表面処理手法を確立するとともに、単一 CNT に対する波長可変レーザーを用いた光学測定手法による励起子評価技術も構築し、励起子発光制御に成功した。さらに、単一光子発生メカニズムの理論的解明も行い、高効率単一光子発生法も明らかにした。シリコンフォトニクスでは、ナノカーボン材料と融合可能な様々なシリコンフォトニクスデバイスの開発に成功するとともに、シリコンフォトニクスの独自測定技術も構築し、ナノカーボンとの融合による新しいシリコンフォトニクス素子が開発可能であることを示した。以上の成果に加えて、想定以上の成果として、グラフェンを用いた電流注入型発光素子の開発にも成功し、シリコンチップ上での高集積光源の開発に成功するとともに、世界初のナノカーボン光通信実験に成功し、ナノカーボン素子が光通信に応用可能であることを示した。さらに、CNT をテンプレートとして、超伝導ナノワイヤー素子を開発した結果、単一光子検出にも応用可能な世界最小クラスの線幅 10nm クラスの超伝導ナノワイヤーの開発に成功し、1 次元超伝導現象を観測した。以上の研究は、Nature Communications などの論文掲載や特許など多くの成果が得られた。



図2 研究成果の概要

3. 研究成果の位置づけ

本研究により、CNT による室温・通信波長帯での単一光子源とそのシリコンデバイスとの融合が示され、量子暗号システムのワンチップ化が期待されるとともに、光スイッチや超伝導ナノワイヤーによる多者配信や高感度受光が期待され、一般ユーザーが利用可能な量子暗号技術に関する成果が得られた。

4. 今後の発展と期待

近年、米国・欧州・日本・中国では、光ファイバーによる量子ネットワークを用いた地上間での量子暗号の実証、人工衛星からの光子による量子暗号の実演といった技術開発だけではなく、金融・国防・国家機関での量子暗号通信が実用化や、今年に入り世界1位の量子暗号通信企業の ID Quantique 社を韓国の SK テレコム社が買収するなど、産業界においても量子暗号技術の動きは活発になっている。我々の技術は、室温・通信波長帯で動作する単一光子源、シリコンチップ上量子暗号素子開発、多者配信や高感度単一光子検出により、一般向けの量子暗号実現を推進すると考えられ、量子暗号の一般への普及による安全・安心な社会に貢献することが期待される。

5. 成果物のまとめ

査読付論文	国際会議招待講演	国内招待講演	プレス・記事等	特許	受賞
7	4	8	16	6	1

- Y. Miyoshi, Y. Fukazawa, Y. Amasaka, R. Reckmann, T. Yokoi, K. Ishida, K. Kawahara, H. Ago, H. Maki, *Nature Communications*, 9, 1279 (2018).
- K. Masuda, S. Moriyama, Y. Morita, K. Komatsu, T. Takagi, T. Hashimoto, N. Miki, T. Tanabe, and H. Maki, *Appl. Phys. Lett.* 108 (2016) 222601.
- T. Kumagai, N. Hirota, K. Sato, K. Namiki, H. Maki, and T. Tanabe, *J. Appl. Phys.*, 123, 233104 (2018). 等

【遷移金属酸化物のナノ空間3次元制御による 省エネルギー駆動機能選択的相変化デバイス創製】

服部 梓（大阪大学産業科学研究所）

グラント番号：JPMJPR1529

1. 研究目標とねらい

遷移金属酸化物は電子間の相互作用が強い強相関電子系物質群であり、バナジウム、ニッケル、マンガンの酸化物でみられる金属-絶縁体相転移では、僅かな摂動(温度、磁場、キャリア濃度)で絶縁体状態は雪崩的に融解し、金属相、強磁性、高温超伝導へ相転移する。相転移に伴う抵抗変化は劇的で 10^3 - 10^5 にも及ぶため、エレクトロニクスとして制御して次世代デバイス創製を実現するという研究が盛んにおこなわれている。しかし強相関酸化物では通常の均質な半導体とは異なり、電子の性質特性は物質中で均一に分布せず、集合・相分離してナノ

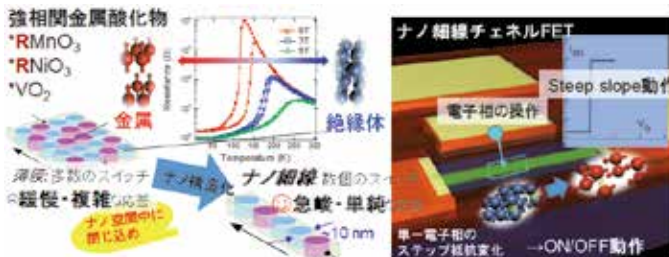


図 1 研究概要。強相関酸化物のナノ相分離現象を背景とし、ナノ構造化によりナノ電子相を隔離、電界効果により単一電子相の相転移を制御する。

メートルサイズのドメインとして存在し、この電子の集団的な振る舞いの結果できるナノ電子相の挙動が系全体の物性を決めている。ナノ電子相は 10-100 nm スケールで材料中に共存するためこれまで主流のバルク・薄膜研究では平均的な情報しか得られておらず、巨大相転移特性などの物性の起源は明らかでなく、またデバイスとしての制御技術も確立できていない。

研究者の独自ナノ構造作製技術により機能発現の最小単位であるナノ電子相ドメイン(10-100 nm)をナノ空間中に閉じ込め、隔離した状態で物性を抽出することで、抵抗の steep step 変化の観察に成功した。これは、相転移特性の起源であるナノ電子相ドメインの機能を抽出し、応答性が増加した効果をデバイス機能として取り込むことが出来ることを意味している。本研究では、独自のナノ構造化技術によりナノ空間中に電子相を閉じ込めることで電子相関効果の最小単位にアクセスし、ナノ電子相の相転移を電子制御する方法論を確立し、単一電子相の一次相転移に由来するステップ抵抗変化をデバイスの On/Off 動作に直結させることで、超省エネルギー駆動の steep slope 動作の実証に取り組んだ(図 1)。

2. 研究成果

金属-絶縁体転移を示す強相関酸化物(La,Pr,Ca)MnO₃(LPCMO)、VO₂、ReNiO₃(Re=Nd, Sm)を対象として、独自技術によりナノ電子相サイズ以下の数十-100 nm サイズのナノ構造体の創製に成功した。100 nm 線幅の VO₂ 細線において、試料サイズの減少により応答性が 30 倍以上向上した step 抵抗変化を実現した(図 2(b))。これは細線試料の測定領域内に含まれるナノ電子相数が約 160 個(図 2(a))から 10 個に減少したことに対応する。この結果は数十 nm サイズのナノ電子相が Steep Slope デバイスとしての機能を有することを示しており、ナノ構造のデザインによりナノ電子相数を規定することで、チャンネルの伝導特性を予測・操作できることを実証した。また、100 nm 線幅の NdNiO₃ 細線構造において初めて単一電子相の相転移に由来するステップ抵抗変化の観察に成功した。

ナノ電子相の電子制御技術構築のために、SmNiO₃をチャンネルとし、イオン液体をゲート絶縁体として用いた電界効果トランジスにおいて、抵抗変調の起源である酸化還元反応と V_g印加条件に依存した抵抗

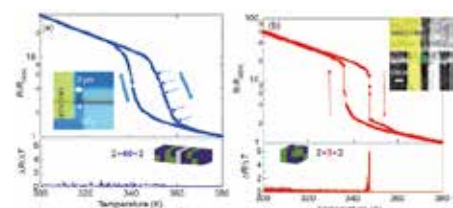


図 2 100 nm 線幅 VO₂ の RT 曲線(上段)と抵抗変化率(下段)。電極間距離(a)2・μm から(b)150 nm にすることで抵抗の急峻化がみられる。

変調率の定量的関係を明らかにした。これにより V_G 印加条件の選択で 3 桁に及ぶ広い範囲で任意の抵抗変調が得られ、多段階不揮発的かつ柔軟な変調動作を実現した。またチャネルサイズ低減により抵抗変調に必要なゲート電圧が大幅に低減 (3 V → 1 V) することが分かった。10–100 nm サイズの電子相であることに起因すると考えており、単一電子相の相転移の電界制御へと展開させるナノ細線チャネルデバイス化への有用な指針となる。上記の研究を通じてナノ構造創製技術の精度を、実験開始時の数十 nm から数 nm 以下へと格段に向上させ、サブ-シングル nm 精度での 3 次元立体造形技術を確立し、3 次元すべての方向で 10 nm サイズを持つナノデバイス構造が実現している。

3. 研究成果の位置づけ

強相関金属酸化物を対象としたほとんどの研究はマクロサイズの試料を対象としており、そのためナノ電子相(物性発現の最小単位)を考慮している例もあるが、直接的には相転移特性が制御できていない状況である。相転移や原子移動を制御することによる抵抗変化を用いた素子開発が盛んに行われている中、電子相転移の大きさ、即ち、ナノサイズのドメイン構造と同程度の素子サイズにした時に、その電子相転移そのものがどのように素子特性に反映されるのかについては、議論が不十分な状況であった。本研究の意義は、酸化物の微細加工に関する技術的課題を乗り越えることで、この疑問に答える道筋を示したところにある。課題としては、その相転移の電界印加の時間応答に関する知見を得られていないところであるが、研究の継続により、最新の IRDS ロードマップで提言されている、相分離を示す強相関電子系物質群のデバイス化、例えば Mott FET 具現化、への指針を与える成果になり得る。

4. 今後の発展と期待

これまで 3 次元構造の立体的な表面である側面構造を原子レベルで観察する手法は皆無であり、3 次元側面構造のサブ nm スケールでの計測評価法の確立と原子レベル制御した側面構造の創製の実証は、これまでの加工、造形、構造評価技術の常識を刷新する卓越した成果となる。デバイスの積層土台である基板構造を 2 次元平坦から 3 次元立体構造への転換を可能とするポテンシャルを秘めている。この 3 次元立体造形技術を、難加工材料であり微細化の実現が遅れている強相関金属酸化物群に適応することで、機能発現の最小単位であるナノ電子相の相転移の電界制御に成功した。魅力的ではあるが操作が難しく、これまでポテンシャルが十分に引き出せていなかった強相関金属酸化物に対して、その物性操作法を実証する先導的な立ち位置である。

目標としているナノ電子相の相転移の電界制御には、本研究で達成したチャネルサイズの微細化による単一電子相の一次相転移に由来した steep slope 動作のナノ空間中への閉じ込めに加え、ゲート絶縁層をイオン液体から高誘電率の固体ゲート層へと転換が必要であると考えられる。固体ゲートを介した電界効果による単一電子相の絶縁体→金属相転移を実現する電子相制御技術の構築を達成することにより、強相関電子系酸化物材料のナノデバイス展開が見込まれる。

5. 成果物のまとめ

査読付論文	国際会議招待講演	特許	受賞
5	5	0	1

- A. N. Hattori *et al.*, Appl. Phys. Express, 9, 085501 (2016).
- S. Tsubota, A. N. Hattori *et al.*, Appl. Phys. Express, 10, 115001 (2017).
- S. Takemoto, A. N. Hattori *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys., 57, 085503 (2018).

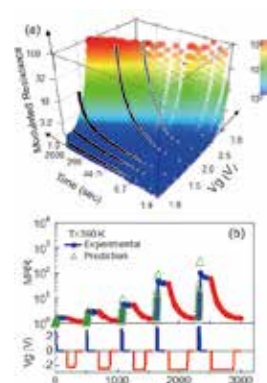


図 3 (a)SNO トランジスタの抵抗変調度。(b) ワイドレンジ抵抗変調制御。

【超低消費電力動作に向けたゲート絶縁膜の負性容量による 急峻スロープトランジスタ技術の開発とナノワイヤ構造への応用】

小林正治（東京大学生産技術研究所）

グラント番号：JPMJPR1525

1. 研究目標とねらい

本研究では環境発電で動作する IoT デバイス応用に向けた超低消費電力集積デバイス技術を開拓することをねらっている。

本研究の目標は、①高いオンオフ比を実現しリーク電流を削減しうる急峻サブスレショルド係数トランジスタである負性容量トランジスタ (NCFET) の動作原理を解明し、低電圧領域で従来トランジスタに比べて電流オンオフ比の 10 倍向上を実現する、②IoT 応用に向けたエネルギー効率のよい電源管理技術と大容量ストレージメモリとなりうる強誘電体 HfO_2 不揮発性メモリを提案し設計・実証を行う、ことである。

2. 研究成果

2-1. NCFET の急峻サブスレショルド係数発現メカニズムの解明と電流オンオフ比 10 倍向上の実証

NCFET は強誘電体ゲート絶縁膜の負性容量により表面ポテンシャルを増幅させトランジスタのサブスレショルド係数を従来の限界値 60mV/桁を超えて低減する技術である（図 2）。本研究では NCFET における急峻スロープ実現のメカニズムとして、強誘電体ゲート絶縁膜の自発分

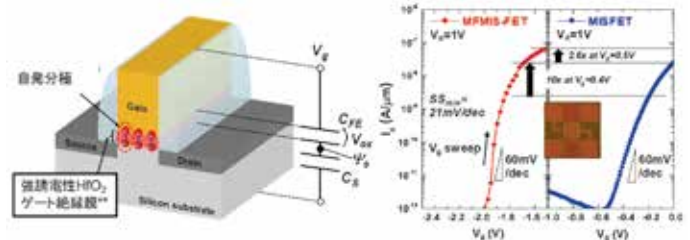


図2 強誘電体 HfO_2 を用いた NCFET の模式図と電流電圧特性

極反転が起こる際に基板の空乏層容量によって大きな脱分極効果が生じる過渡現象が原因であることを提唱し実験的に立証した。そして強誘電体 HfO_2 をゲート絶縁膜とする NCFET を実際に設計・試作、サブスレショルド係数 20mV/桁を実現、電流オンオフ比で通常のトランジスタに比べ 10 倍向上を示した。

2-2. ノーマリーオフコンピューティングに向けた強誘電体 HfO_2 不揮発性 SRAM (NVSRAM) の動作実証

従来の SRAM に不揮発性を付加した NVSRAM は、電源オフ時にもデータを SRAM に保持しておくことができ、オーバーヘッドなくモジュールを電源オンオフさせることができる有効な電源管理技術である。本研究では強誘電体 HfO_2 キャパシタを SRAM 内の 2 つのノードの一つずつ付加させた強誘電体 NVSRAM を提案した（図 3）。この NVSRAM は十分な動作マージンを確保しつつ、アクセス時間にペナルティのない、非常に簡易な動作モードと容易な集積化プロセスが特徴である。強誘電体 HfO_2 キャパシタを集積した NVSRAM を設計・試作、電源オンオフ前後のデータの待機・復帰動作実証に成功した。

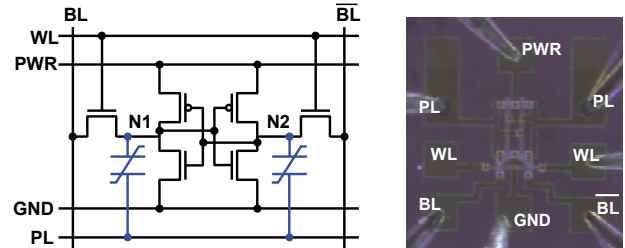


図3 強誘電体 NVSRAM の回路図と実際に強誘電体 HfO_2 キャパシタを集積して試作した NVSRAM の顕微鏡写真

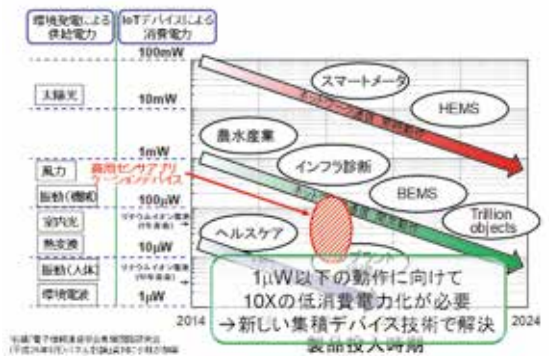


図1 IoT デバイスの消費電力と環境発電の生成電力

2-3. 強誘電体トンネル接合メモリの高オンオフ比と多値動作実証, およびスケーラビリティの検討

強誘電体トンネル接合 (FTJ) メモリは、電圧を印加して自発分極の向きを反転させることでトンネル障壁高さを変調し、低抵抗と高抵抗状態をスイッチングする新しい抵抗変化型メモリであり大容量ストレージメモリとして期待される (図4)。本研究では強誘電体 HfO_2 を用いた FTJ が高い抵抗オンオフ比を得るために金属-強誘電体-半導体電極型の FTJ を提案、設計指針を明らかにした。そして 4nm の強誘電体 HfO_2 で抵抗オンオフ比 30 以上と多値動作の実証に成功した。また非平衡グリーン関数法による電流計算手法を構築。20nm 径まで微細化可能であることを明らかにした。

3. 研究成果の位置づけ

本研究では NCFET で図5に示すように高いオンオフ比を実証したが、本研究で重要なのはこの高いオンオフ比を実現する NCFET の原理について理論的・実験的な裏付けを行ったことであり、将来の NCFET の設計に大きく貢献するものである。NVS RAM のプロトタイプ実証は従来の強誘電体材料とは異なるスケーラブルな集積化プロセスを世界で初めて示し実現可能性を示した点で重要である。開発した FTJ は図6に示すようにより低い書き込みパルス電圧で最も高い抵抗オンオフ比と多値動作を実現し、さらに理論的にスケーラビリティを示したことで、他のストレージクラスメモリと競合しうるメモリとしての可能性を開いた点で意義がある。

4. 今後の発展と期待 (成果を今後どのように発展させ、社会にいかにより還元しようとしているか)

NCFET は先端 CMOS だけでなく IoT への普及を目指してローコストなプレーナ型トランジスタへの適用も十分に考えられる。ヒステリシスや動作速度限界に関する課題を解決し、日本の半導体メーカーと実用化を目指した取り組みを行いたい。NVS RAM に関してはすでに微細 CMOS での設計を進めており、すでに HfO_2 または強誘電体を用いている半導体メーカーと実用化に向けた取り組みを行いたい。FTJ に関しては信頼性とセレクトなど研究課題が多いがローコストで高温動作可能な大容量メモリとして大きく期待される。メモリメーカーとも協働して混載メモリのブレイクスルーを目指す。以上のトランジスタ・メモリ技術は IoT デバイスの超低消費電力化に貢献し、それにより高度な IoT ネットワークが展開され、ビッグデータに基づく社会サービスの充実につながると期待される。

5. 成果物のまとめと代表的なジャーナル論文・国際会議論文

査読付論文	査読付国際会議	国際会議招待講演	特許	受賞
11	18	8	0	1

(1) [NCFET] Masaharu Kobayashi, Applied Physics Express: Review, 11, 110101 (2018), (2) [NVS RAM] Masaharu Kobayashi, Nozomu Ueyama and Toshiro Hiramoto, IEEE VLSI Symposium 2017, pp.156-157, (3) [FTJ] Fei Mo, Yusaku Tagawa, Takuya Saraya, Toshiro Hiramoto, and Masaharu Kobayashi, IEEE International Conference on Electron Device Meeting (IEDM) 2018, pp. 372-375.

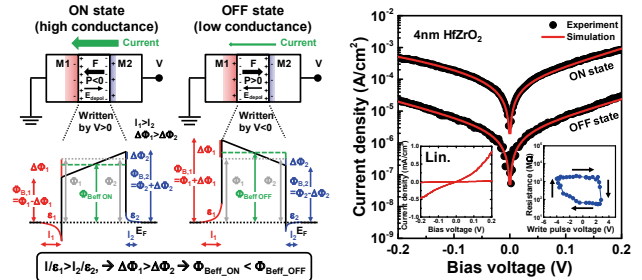


図4 (左) FTJ メモリセルの動作原理、(右) パルス電圧書き込みによるオン状態・オフ状態の読み出し電流特性

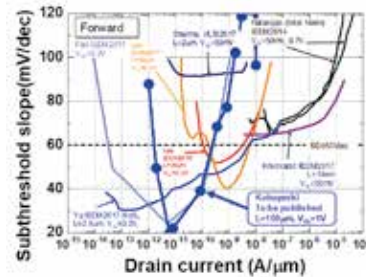


図5 NCFET のベンチマーク

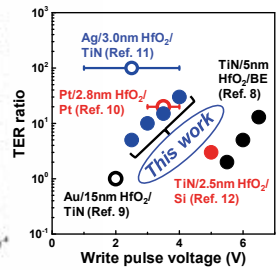


図6 FTJ のベンチマーク



国立研究開発法人 科学技術振興機構 戦略研究推進部
ナノエレ領域担当

〒102-0076 東京都千代田区五番町7 K's 五番町6F
TEL : 03-3512-3531 E-mail : crest@jst.go.jp