

CREST・さきがけ複合領域 二期生 CREST 中間・さきがけ終了報告会
「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」

材料・デバイスから システムまで、IoT/AI世代の ナノエレ技術シリーズ13件！

日 時

平成30年1月29日(月)
9時30分～17時50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・さきがけ複合研究領域は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二期生たちの中間報告3件とさきがけ二期生たちの終了報告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 開会挨拶 研究総括 桜井 貴康（東京大学）

09:40～ セッション1（基礎・材料レイヤー） 座長：水谷 孝（中部大学）

09:40～10:10	「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」	
	さきがけ 山崎 歴舟……………	1
10:10～10:40	「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」	
	さきがけ 長汐 晃輔……………	3
10:40～11:10	「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」	
	さきがけ 友利 ひかり……………	5

11:10～11:20 休憩

11:20～ セッション2（デバイスレイヤー／センサー・CMOS応用）

座長：笹川 崇男（東京工業大学）

11:20～11:55	「ナノ慣性計測デバイス・システム技術とその応用展開」	
	CREST 益 一哉……………	7
11:55～12:25	「磁性規則合金を用いた新機能性スピントルク発振素子の創製」	
	さきがけ 関 剛斎……………	9
12:25～12:55	「フッ化物ユニバーサル高誘電体極薄膜材料の創出」	
	さきがけ 長田 貴弘……………	11

12:55～13:55 昼食

13:55～ セッション3（デバイスレイヤー／テラヘルツ応用）

座長：石内 秀美（先端ナノプロセス基盤開発センター）

13:55～14:30	「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」	
	CREST 浅野 種正……………	13
14:30～15:00	「電気磁気創発現象による電磁波制御デバイスの創生」	
	さきがけ 高橋 陽太郎……………	15
15:00～15:30	「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」	
	さきがけ 廣理 英基……………	17

15:30～15:40 休憩

15:40～ セッション4（システム・回路レイヤー） 座長：森村 浩季（NTT）

15:40～16:15	「ビ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」	
	CREST 橋本 昌宜……………	19
16:15～16:45	「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」	
	さきがけ 河野 崇……………	21
16:45～17:15	「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」	
	さきがけ 荒井 礼子……………	23
17:15～17:45	「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」	
	さきがけ 福田 憲二郎……………	25

17:45～17:50 閉会挨拶 副研究総括 横山 直樹（富士通研究所）

【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 歴舟（科学技術振興機構）

グラント番号：JPMJPR1429

1. 研究目標とねらい

近年勢いを増す量子コンピュータの研究・開発に伴い、量子エレクトロニクスや量子情報処理という分野における量子操作技術も更なる発展を遂げている。一方、マイクロ・ナノメカニクス分野においても様々な微小デバイスの研究・開発が盛んに行われている。本研究では上記二つの「量子」と「メカニクス」という分野を融合することにより、従来型古典デバイスの問題点を克服しその性能を飛躍的に高めるとともに、新たな量子系を創出することを目的とする。

本研究では電磁波とメカニカル振動子が結合したオプトメカニクスという物理系を構築する。ピエゾ効果・光弾性効果・輻射圧など様々な振動子－電磁波間の結合が考えられるが、これらオプトメカニカルな結合を用いることで電磁波による振動子の操作・制御、またその逆が可能となる。量子領域と呼ばれるような単一光子や単一フォノンで、これらの操作・制御を行うことにより、マクロな大きさを持つメカニカル振動子の新奇な量子状態生成や量子制御が可能となる。マクロ振動子の量子状態というのは、量子観測問題など量子物理の原理解明にも新たな知見を与えるため学術的に興味深く、その応用においても新たな機能を持つ量子デバイスの創出が期待される。本研究ではその一つとしてオプトメカニクスを用いた量子トランスデューサの構築を目指す。量子トランスデューサはコヒーレントなマイクロ波・光波長変換を可能とし、多くの量子コンピュータを光配線でつなぐ量子情報ネットワークの基盤技術として必須である。振動子を媒介とした高効率でコヒーレントなマイクロ波・光波長変換を行う。

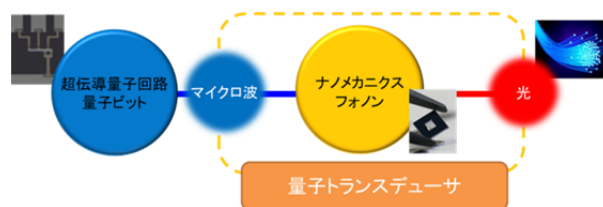
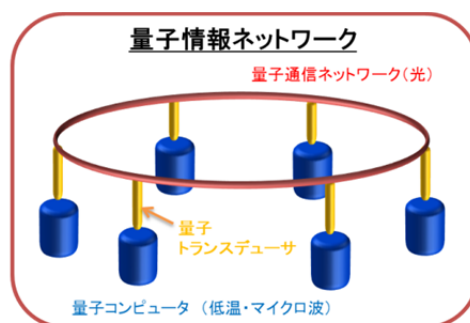


図 1：オプトメカニクスを用いた量子トランスデューサの概念図

2. 研究成果と位置づけ

本研究では二つの異なるメカニカル振動子を用いて研究を進めた。まず初めに行ったのが Si_3N_4 薄膜を用いたオプトメカニクスの構築である。 Si_3N_4 薄膜振動子（図 2a）を用いたオプトメカニクスを光共振器（図 2b）とマイクロ波共振器（図 2c）で作製、レーザー冷却手法を用いた振動子モードの冷却実験を行った。光領域オプトメカニクスではモード温度 $300\text{K} \rightarrow 50\text{mK}$ 、マイクロ波領域では希釈冷凍機を用いた極低温下で実験を行い $22\text{mK} \rightarrow 20\text{ }\mu\text{K}$ までの冷却が観測された。マイクロ波の実験では冷却後の振動子フォノン占有数が $n=0.51$ と観測され、量子振動基底状態までの冷却が確認された。またこの系では、マイクロ波共振器モード

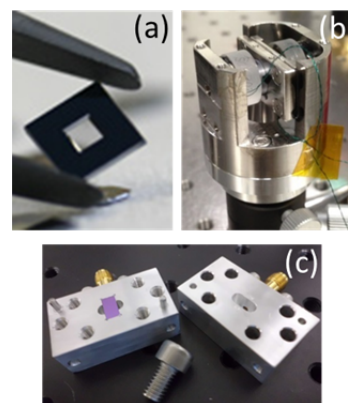


図 2： Si_3N_4 薄膜を用いたオプトメカニクス

を介して二つの異なる振動モードを結合させることで振動モード間の強結合を観測した。これは量子情報のコンテキストで、振動モード状態に転写された量子情報が散逸するよりも速く二つのモード間での情報転送が可能な事を示している。上記の薄膜を用いた実験では世界でも数少ない振動基底状態までの冷却などが達成されたが、薄膜が脆く実験系の構築が困難である、振動モードの周波数の低さが量子ビットの寿命と整合性が無い、などの問題が浮き彫りとなったため異なる振動子を模索した。

次に固体表面を伝搬する表面弾性波(SAW)を振動子として用いた実験を行った。高い周波数の SAW の励起は比較的容易であり、極低温の実験では水晶において Q 値が 10^6 と非常に高性能な SAW の共振器が作製可能な事がわかった。図 3 にある光共振器と SAW

を結合させた SAW オプトメカニクスでは SAW フォーカシングによる結合強度の増大や、光弾性効果に特有なテンソル的結合を積極的に用いた、光偏光による SAW-光の結合の“スイッチング”を確認した。本実験は SAW を用いた共振器オプトメカニクスの初の実験報告となっている。現在この実験の発展形として SAW-光結合の増大を図るための、Whispering Gallery モードを用いた実験(図 3c)、及び SAW 基板上に作製した光導波路と SAW を結合させた実験(図 3d)を進めている。

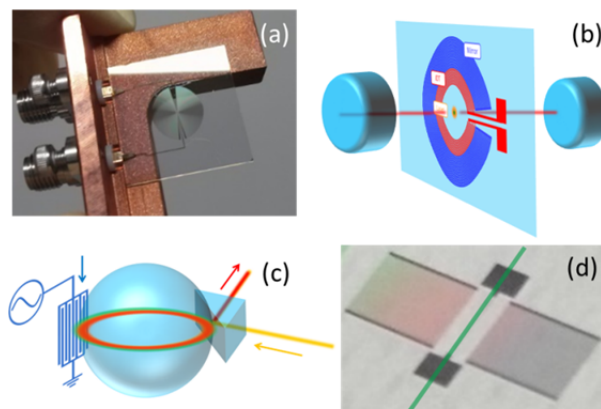


図 3：(a)実際の SAW 共振器と、(b)同回路を用いた SAW オプトメカニクスの概念図。下は各々 (c)Whispering Gallery モード、(d)光導波路を用いた SAW オプトメカニクス実験

3. 今後の発展と期待

マクロな大きさの振動子の量子操作を伴う量子メカニクスは、量子エレクトロニクスの中でも最も新しい分野の一つである。その分野に日本でいち早く参入できたことは非常に意義が大きい。この数年で世界的にもメカニクスを用いた量子トランスデューサの構築が行われてきたが、変換効率が低い、バンド幅が狭いなどの困難がありまだ発展途上である。我々の SAW を用いたオプトメカニクスは導波路や光ファイバなどとの相性も良く、極低温デバイスである量子トランスデューサとしてのポテンシャルに期待が持たれる。また SAW は異なる歪結合により他の固体量子系（量子ドット、NV 中心など）とのハイブリッド化が容易に思われる。今後様々な量子系との結合が考えられ多方面への応用可能性があるのではと考えている。

4. 成果物のまとめ

査読付論文	国際会議招待講演	国内会議招待講演
1	1	2

- A. Noguchi *et al.*, “Ground state cooling of a quantum electromechanical system with a silicon nitride membrane in a 3D loop-gap cavity”, New J. Phys. **18**, 103036 (2016).
- A. Okada *et al.*, “Cavity optomechanics with surface acoustic waves”, arXiv:1705.04593.

【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）

グラント番号：JPMJPR1425

1. 研究目標とねらい

Siにおける短チャネル効果を克服するための新しいチャネル材料として原子層厚さの2層グラフェンの潜在的な高い可能性を界面の理解に基づき最大限引き出すことが本研究の目的である。外部電界印加により2層グラフェンは0.3 eV程度のギャップが形成されることが理論的に示唆されているが、“いわゆる”ギャップ内準位(D_{it})が存在し、その準位をキャリアが最近接ホッピング伝導するため室温で $I_{on/off}$ が低いことが問題であった。既存の SiO_2/Si 系における界面準位との比較をもとに、“層状物質系における界面をどのように理解すればよいか、またギャップ内準位の起源は何か？”という本質的な問題に対して、1.9 eVのギャップを有する MoS_2 との比較を踏まえながら、様々なゲートスタック構造における系統的な比較を基に議論する。2004年以降急速な研究の広がりにも関わらず実験的にはグラフェンFETの理想的な特性限界に対する共通認識は得られていない。本課題は、応用上必須である集積化とは一線を画し、単一デバイスにおける理想的な特性限界を実証することを目指した。

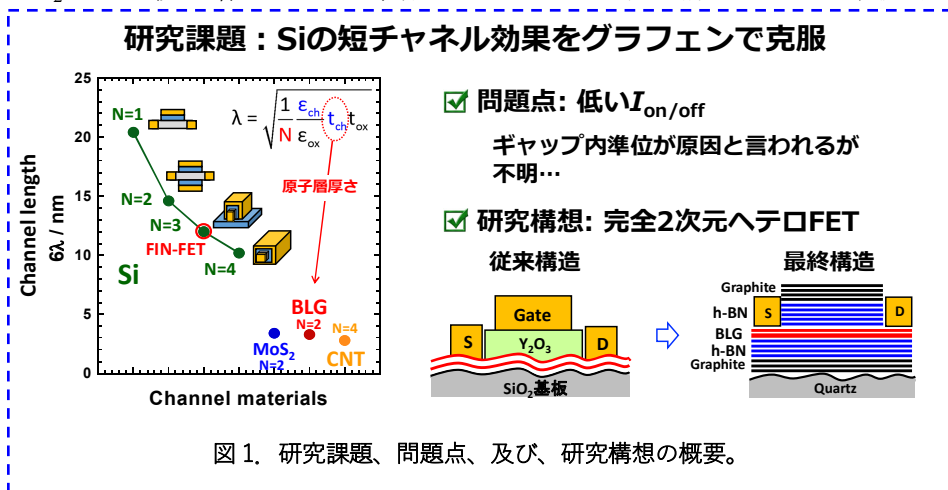
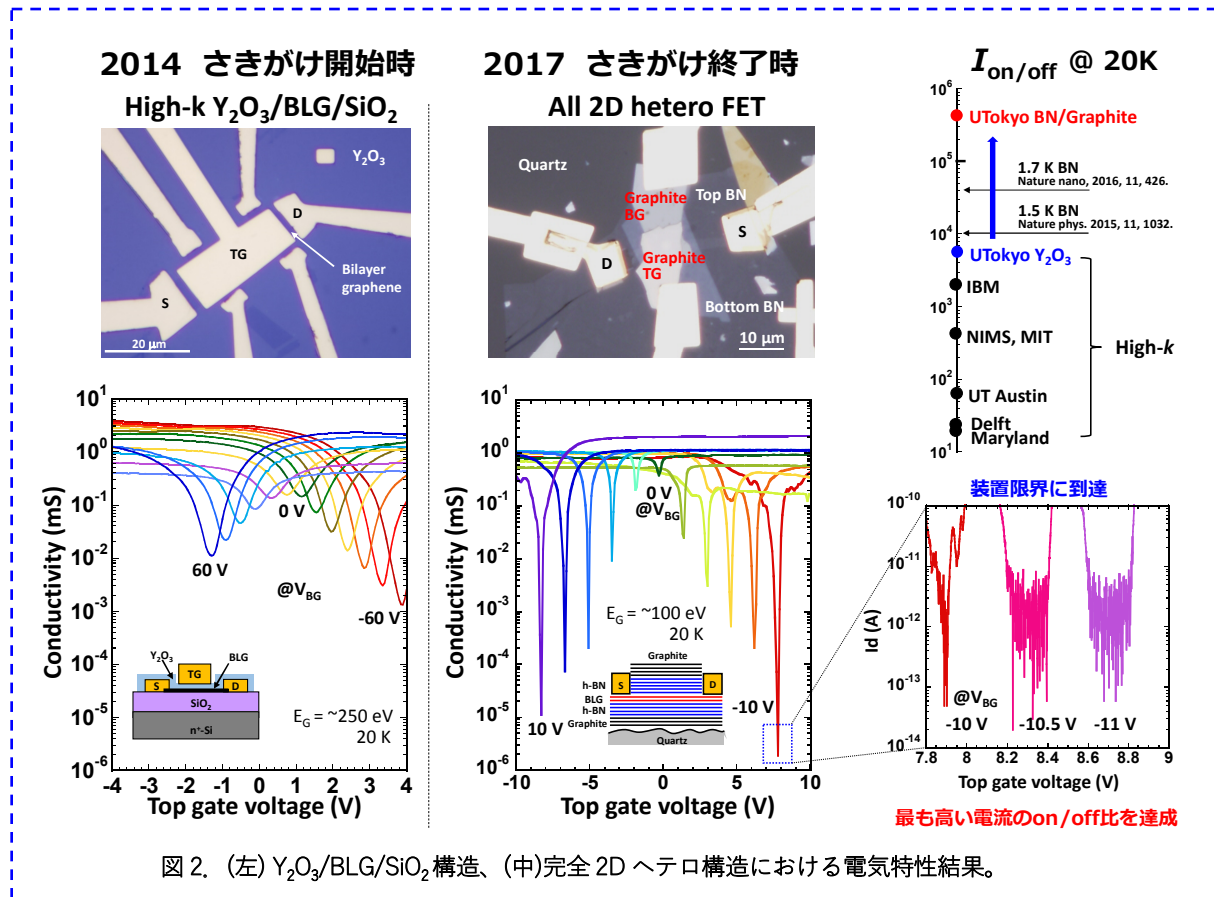


図1. 研究課題、問題点、及び、研究構想の概要。

2. 研究成果と位置づけ

図2はこれまでの結果をまとめたものである。 SiO_2/Si 基板上に2層グラフェンを転写し、high- k Y_2O_3 を堆積したFETデバイス(図2左)の場合、大きな電界を印加し最大ギャップの~250 meVに到達したが、電流のon/off比は20 Kにおいて3桁程度であった。ただし、100気圧もの圧力でhigh- k Y_2O_3 を酸化することで、高電界印加、低リークの絶縁膜形成に成功しており、high- k を用いた2層グラフェンの研究においては、最も高いon/off比を達成している。また、容量の周波数解析から D_{it} が $\sim 10^{13} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ と非常に高いことが分かった。期待したほどの電流のon/off比が得られなかった理由は、 SiO_2 上の荷電不純物によるポテンシャルの分布が電界によって形成されるバンドギャップに空間的ばらつきを生じ、offが取れないためと考えられる。そこで、20 μm 程度のへき開2次元単結晶を複層化する装置を立ち上げ、転写技術を確認した。層状絶縁体のh-BNとグラファイトをバックゲート電極として用いることで(図右)、 SiO_2 上の荷電不純物を完全にスクリーニングすることができ、バンドギャップの空間的ばらつきを低減することが可能になる。しかしながら、トップゲートの金属電極は微結晶化し、仕事関数の面方位依存性として上部からの空間的なポテンシャル分布を与えることが電子線後方散乱回折法による解析結果からわかった。そこで、最終的にゲートスタックすべてを2次元層状物質で構成することで、ポテンシャル揺らぎを低減し、電流のon/off比を 5×10^5 まで向上させることに成功した。さらに解析の結果、酸化物基板上でのポテンシャルの揺らぎは30 meV程度と大きく SiO_2/Si 界面における固定電荷分布による揺らぎと同程度であるが、h-BN/グラファイトで複層化した場合、ポテンシャルの揺らぎは~1 meV程度にまで低減できることが分かった。また、このような系においては、容量の周波数依存性は観測されず清浄界面を達成できていることが理解できる。

以上より、*h*-BN の誘電率が 3~4 と小さいため、高電界の印加によりリークするため最大ギャップ形成には至らないものの、完全 2 次元層状系でゲートスタックを組むことにより、単一デバイスにおいては、~100meV 程度の空間的に均一なギャップ形成が可能であることを実証した。



3. 今後の発展と期待

2 層グラフェンのギャップ形成機構を考えた場合、外部からのポテンシャル揺らぎに非常に敏感であることから、*h*-BN と通常のアモルファス high-*k* 酸化物は荷電不純物を多く含むため適用できない。High-*k* 単結晶酸化物ナノシートとの複層化によりポテンシャル揺らぎを小さく保ったまま高電界印加の可能性が期待できる。また一方で、100 meV とギャップは小さいものの外部電界により可変であること、ポテンシャル揺らぎを 1 meV 程度に抑えることができることから、InSb の 0.17 eV 以下のギャップを有する光起電力型赤外検出素子が存在しないことを踏まえると、光起電力型の赤外検出素子としての今後の応用展開が期待できる。

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
13	14	0	1

代表的論文

- S. Kurabayashi, and K. Nagashio, "Transport properties of the top and bottom surfaces in monolayer MoS_2 grown by chemical vapor deposition", *Nanoscale*, 2017, 9, 13264-13271.
- K. Kanayama, and K. Nagashio, "Gap state analysis in electric-field-induced band gap for bilayer graphene", *Sic. Rep.* 2015, 5, 15789.
- Y. Hattori, K. Watanabe, T. Taniguchi, and K. Nagashio, "Layer-by-layer dielectric breakdown of hexagonal boron nitride", *ACS nano*, 2015, 9, 916.

【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（科学技術振興機構）

グラント番号：JPMJPR1424

1. 研究目標とねらい

炭素原子が蜂の巣格子状に並んだグラフェンは、原子一層分の厚さしかない究極の薄膜である。グラフェンは円錐型の伝導帯と荷電子帯が頂点で接した線形の分散関係を持つので、伝導電子・ホールはシリコンをはるかに凌ぐ卓抜した移動度を示す。このことからグラフェンは次世代エレクトロニクス材料として期待されているが、高速トランジスタのチャンネル材料として用いるためには、本来金属伝導を示すグラフェンにバンドギャップを誘起する必要がある。

グラフェンのバンドギャップ形成手法として、これまでグラフェンのナノリボン化や二層グラフェンに対する垂直電場の印加などが研究されてきたが、今なお良好な性質を持つバンドギャップの形成には至っていない。本研究では、グラフェンの格子ひずみを用いた新しいアプローチでグラフェンのバンド（伝導）ギャップ生成を目指す。

グラフェンには、格子ひずみによってゲージ場が生じるという特殊な性質がある。特にひずみ分布に空間変化がある場合には、ゲージ場の一つであるベクトルポテンシャルも空間的に変化するために（擬似）磁場が生じ、グラフェン中のキャリアは磁場が存在するかのように振舞う（図1）。この擬似磁場を用いたグラフェンへのバンド（伝導）ギャップ形成の理論研究は2010年のF. Guineaらの報告（F. Guinea *et al.*, Nat. Phys. **6**, 30 (2010)）をきっかけに発展してきたが、ひずみの空間分布を制御しつつ伝導特性を評価できる有効な実験手段がこれまで存在しなかったために、その実験的検証は手付かずの状態にあった。本研究では我々独自の技術によってこの問題を解決し、ひずみによるバンド（伝導）ギャップ形成を実証する。さらにひずみグラフェンでできたトランジスタを実用化することを最終目標として、応用に十分な大きさのギャップの生成方法の確立、デバイス作製のための周辺技術の整備を行うことで、ひずみグラフェントランジスタの基盤技術の確立に挑む。

本研究では、これまで理論で提案されている、①局所1軸ひずみを用いた方法と②周期ひずみを用いた方法の2種類のギャップ生成手法に着目して研究を行った。

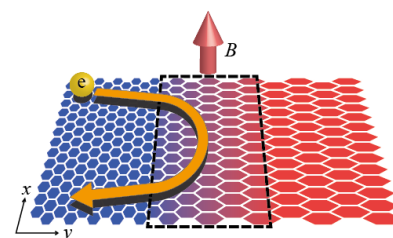


図1：ひずみの空間変化による擬似磁場生成の模式図。

2. 研究成果と位置づけ

グラフェン電界効果トランジスタ(FET)構造において、格子ひずみを用いた2種類の方法（①局所1軸ひずみ、②周期ひずみ）によって伝導（バンド）ギャップを実現した。方法①では、基板から浮かせたグラフェンに対する局所ひずみ印加など複数の方法に挑戦し、最終的に、微細加工により凹構造、凸構造を形成した2組の六方晶窒化ボロン(hBN)薄膜でグラフェンを挟みこむ方法を用いて、伝導ギャップ形成の条件である『平均自由行程の増大』と『空間変化のあるひずみの導入』を両立させ、5 meVの伝導ギャップの実現に初めて成功した。ただし、ギャップ値をさらに劇的に増大させるためのhBN膜の加工は困難であることから、方法①によって実用化に十分な大きさのギャップを生成する

ためには、今後更なる技術的なブレークスルーが必要であると感じている。手法②では FET の固定電極作製と周期ひずみ導入を両立できる試料作製手法を開発し、これまで STM による状態密度測定でしか観測されていない周期ひずみ誘起のバンドギャップを固定電極を持つ FET 構造において初めて観測した（図 2）。観測したギャップ値は 2.4 meV と小さいものの、周期の微細化によってギャップ値を容易に実用化に十分な大きさまで増大させることが可能である。また、我々の測定ではわずか 3 周期（図 2 (a)）でもバンドギャップが観測されたことから、デバイスの微細化が可能であると期待される。さらに、グラフェンが露出していることから、トップゲートの形成や分子ドーピングも容易である。したがって、周期ひずみによるバンドギャップ形成がトランジスタ実現には有利であると考えられる。

また、グラフェンひずみを用いたバンドギャップ生成ではバンドギャップの大きさがひずみの結晶方位に大きく依存することから、ひずみの結晶方位の決定法の開発に取り組んだ。その結果、従来手法と比較してより簡便で精度の高いひずみ方位決定法の開発に成功した。

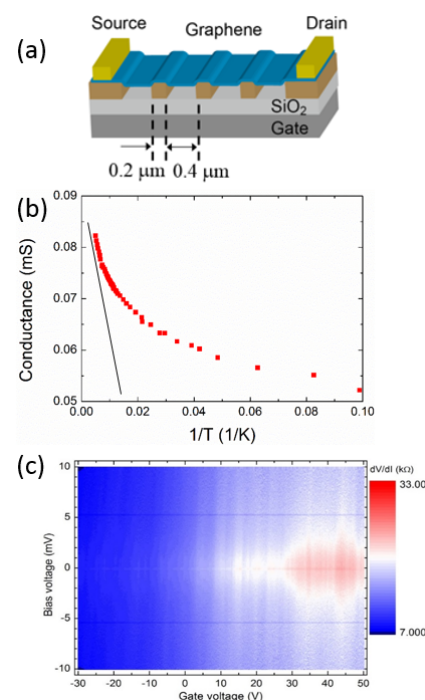


図 2：周期ひずみを導入したグラフェン FET。(a) 試料構造、(b) 最小コンダクタンスの温度依存、(c) 微分抵抗のバイアス・ゲート電圧依存。

3. 今後の発展と期待

上述の通り、これまでの研究で、局所一軸ひずみよりも、周期ひずみによるバンドギャップ形成がグラフェントランジスタの実現に有利であるとの結論を得た。バンドギャップの増大やデバイスの微細化に関しては、電子線リソグラフィによるトップダウン的手法のみでなく、ボトムアップ手法も組み合わせることで、比較的容易に目標を達成できると考えており、すでにその研究に着手している。さらに、トップゲートの形成、分子ドーピングによる p-チャネル、n-チャネル形成も既存技術で対応できるので、うまく進めば、ひずみグラフェンの電界効果トランジスタを実用化できる日は結構間近に迫っているのではないかと期待している。

また、グラフェンの格子ひずみによって生じた擬似磁場は、時間反転対称性を持つ点、ナノスケールの領域に局在できる点、数 100 テスラに及ぶ巨大磁場も可能である点で、従来のマグネットによって生じる磁場とは性質を異にする。この擬似磁場をうまく制御することで、基礎物性科学、応用技術の両面で新しい分野が開拓できる可能性がある。

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
0	0	0	1

【ナノ慣性計測デバイス・システム技術とその応用展開】

益 一哉 (東京工業大学)

グラント番号：JPMJCR1433

1. 研究目標とねらい

本提案では「ナノ G*計測」が産み出す新機能実現を目的とします。目標性能としてミリ G (10^{-3} G) からマイクロ G (10^{-6} G) オーダーの加速度を測定可能な新たな慣性計測デバイス・システム技術を開発し、その応用分野を創出します。

具体的な応用技術として、本研究で開発するナノ G 計測慣性センサ・システムを用いて身体運動の計測・意味理解を行い、パーキンソン病、レビー小体型認知症の早期診断、発見へ展開します。将来的には、人とモノの動きの高精度検出とそのデータ利活用による運動制御は、インフラや交通でのエネルギー消費低減など、運動に伴うエネルギー消費の低減に繋がります。

(*G: 地上重力加速度、 $1\text{ G} \div 9.8\text{ m/s}^2$)

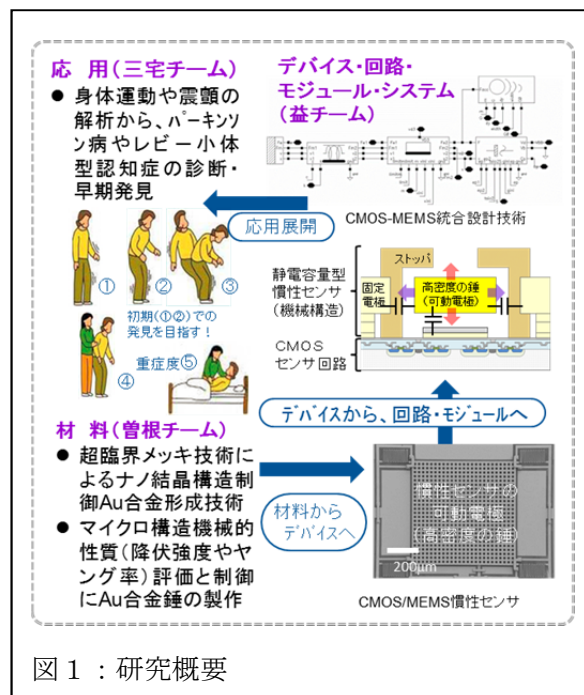


图 1：研究概要

2. 研究成果と位置づけ

【慣性センサ G】加速度センサの検出性能は錘の質量に比例するため、錘サイズ小型化と検出分解能向上にトレードオフが生じます。従来の MEMS 加速度センサは、高い検出分解能を得るために錘サイズが増大し、小型化が困難でした。そこで本研究では、高密度 Au 錘を用いて錘質量に反比例するブラウンian・ノイズを低減した MEMS デバイス構造を新たに提案し、試作・評価しました。ノイズ実測値は $10 \mu\text{G}/\sqrt{\text{Hz}}$ 以下であり、従来加速度センサと比較して 1 桁以上の低ノイズ化に成功しました。

本研究では、Au 錘の小型・高分解 MEMS デバイスを CMOS-LSI 上に半導体微細加工技術と電解金めっきを用いてワンチップ集積化し、超小型・超高分解能加速度センサの汎用化技術の実現見通しを得ました。

【材料グループ】本研究グループは、様々な電解めっき手法により金及び金合金を作成し、その機械的材料評価を行うことで、MEMS 応用に足る信頼性と機械的強度を有する金めっき材料の開発を行っています。まず、シアン浴、非シアン浴の純金のめっきを行い、その後非シアン浴でのパルスめっきを試み、欠陥の少ない平滑な金めっき皮膜を得ました。その後、我々のグループで近年開発しためっき金属の微小材料試験法により機械的特性評価を行いました。その結果、通常の前めっき法で得られる金の降伏強度は 600MPa、パルスめっきでは 800MPa と非常に高い値を取る事を明らかにしました。この値は純金の結果の 4 倍以上であり、金めっきが MEMS に利用可能であることを示しています。また、リソグラフィーにより金/チタンマイクロカンチレバーを作製した結果、金/チタン構造体が極めて高い構造安定性を有することが明らかになりました。

【診断グループ】本研究グループは、高感度慣性センサの応用創出の一例として、パーキンソン病（PD）の重症度ステージ分類を取り上げ、それを実現するウェアラブル診断支援システムの構築に取り組んでいます。従来は医師が目視によって行っていましたが、それをセンサを用いて定量的かつ簡便に実施す

ることは臨床的にも大きい意義が存在するからです。具体的には、PD 患者の運動障害に注目し、それを可視化するための運動計測システムと運動分析システムを構成し、それに基づいて重症度ステージの自動分類を可能にする意味理解システムの開発を進めました。

PD の運動障害には歩行障害、姿勢障害、震戦の 3 種類がありますが、現状で最も開発が進んでいるのは歩行障害の場合です。運動計測システムとしては患者の両足首に慣性センサを固定するウェアラブル装具や通信方法の開発が完了し、運動分析システムとしては加速度データに加え実験室座標におけるセンサの傾き（オイラー角）を考慮した 3D の足首運動軌道推定アルゴリズムが完成しています。意味理解システムとしては、歩行中の足首運動軌道の主成分分析に基づいて歩幅と足首持ち上げ量の 2 つの特徴量に注目するパターン分類が可能になっています。これらの結果、PD の重症度ステージ分類の分類精度として、健常高齢者と軽度 PD 患者（HY1～2）のあいだで 90%を越える極めて高い分類精度を達成できました。これは歩行障害に注目した分類としては世界最高の精度であり、臨床的にも実用化可能な水準にあります。

3. 今後の発展と期待

高感度慣性センサによる高精度の運動計測によって早期診断支援システムへの道が開かれることは、臨床技術としての側面からも、社会的・経済的側面からも非常にインパクトの強い成果です。

まず臨床的な側面からインパクトとしては、不可逆的な神経変性を伴う疾患の早期診断に道が開かれることです。特に、小型の高感度慣性センサから構成されるウェアラブルなシステムとして構築することで、高齢者の日常生活の中での日々の計測が可能になり、発症直後の極めて軽微な運動障害のステージでの検出が容易に実現できます。これは本システムによって世界で初めて実現されました。

次に社会的・経済的側面からのインパクトとしては、上記の早期診断支援システムの展開によって医療費が大幅に抑制される効果です。例えば PD 患者は 60 歳以上で 100 人に約 1 人発症し、国内に HY3 以上の重症の患者が約 14 万人存在し年々増加しているなかで、その発症を軽減できることは経済的にも非常に大きい意義があります。

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
18	15	5	10

【代表的論文】

- ・ D. Yamane, T. Konishi, H. Toshiyoshi, K. Masu, and K. Machida, "A Sub-1G MEMS Sensor," ECS Transactions, vol. 66, issue 5, 2015, pp.131-138.
- ・ C.-Y. Chen, M. Yoshida, T. Nagoshi, T.-F. M. Chang, D. Yamane, K. Machida, K. Masu, and M. Sone, "Pulse Electroplating of Ultra-Fine Grained Au Films with High Compressive Strength," Electrochemistry Communications, Vol.67, 2016, pp.51-54.
- ・ K. Hori, Y. Hirobe, S. Orimo, H. Sawada, A. Inaba, Y. Miyake, "Diagnosis Support System of Parkinson's Disease Based on Gait Trajectory", The 16th International Conference on Biomedical Engineering, Singapore, Dec. 7-10, 2016.

【磁性規則合金を用いた新機能性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）

グラント番号：JPMJPR1422

1. 研究目標とねらい

本研究課題では、高スピン分極率を有する「磁性規則合金」を材料の軸として、磁気モーメントの渦状構造である「ボルテックス構造」を制御し、電流励起の磁気ボルテックス運動を利用した「ボルテックス型スピントルク発振」を実現することを主目的とする（図 1）。そして、ボルテックス型スピントルク発振の高性能化に取り組む。さらに、スピントルク発振の発振周波数が磁場に依存して変化する特徴に着目し、微小磁場を検出でき高速応答かつ高集積可能な磁場センサへの

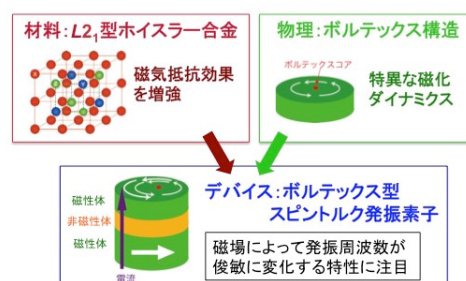


図 1 本研究課題のコンセプト

の応用を視野に入れ、超高感度スピントルク発振型磁気センサの実現に資する要素技術の確立を目指す。

スピントルク発振とは、磁気抵抗素子に直流電流を通電させて磁化のダイナミクスを誘起することで、高周波電圧が得られる現象である。現在のところ、全て金属層から構成される巨大磁気抵抗（GMR）型とトンネル障壁層を有するトンネル磁気抵抗（TMR）型の 2 種類のスピントルク発振素子が検討されており、GMR 型は TMR 型と比較してノイズを低減できると期待される。しかしながら、従来材料を用いた GMR 型のスピントルク発振素子は、pW オーダの発振出力しか得られていない、発振線幅の制御が不十分であるため Q 値が 1,000 程度であるなどの課題を抱えている。そのため、スピントルク発振素子を磁場センサへ応用するためには、発振出力、Q 値、さらに周波数敏捷性の大幅な向上が不可欠である。本研究課題では、高スピン分極材料であるホイスラー合金の大きな MR 効果と磁気ボルテックスのダイナミクスを利用することで、発振の高出力化と運動の安定化を図り、磁場センサ応用に向けた課題の解決を狙う。

2. 研究成果と位置づけ

A. ホイスラー合金薄膜における磁気ボルテックスの形成

$\text{Co}_2(\text{Fe}, \text{Mn})\text{Si}$ ホイスラー合金は高いスピン分極を有する材料であるが、磁気ボルテックスが安定に形成されるかは自明ではなく、形成するための条件も明らかではなかった。そこで、 $\text{Co}_2(\text{Fe}, \text{Mn})\text{Si}$ エピタキシャル薄膜から円形ディスクを作製したところ、図 2 に示すように、磁気ボルテックスの形成を直接観測することに成功した。さらに、磁気構造の相図を作成して、従来の Fe-Ni 合金と同等の磁気ボルテックスの安定性を有していることを明らかにした。高スピン分極ホイスラー合金においても磁気ボルテックスを安定形成できることを実験的に示したのは本研究が初めてであり、ボルテックス発振素子の発振層を設計するための重要な知見が得られた。

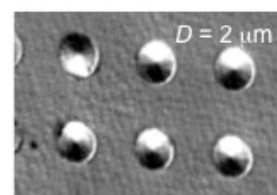


図 2 $\text{Co}_2(\text{Fe}, \text{Mn})\text{Si}$ 円形ディスクの磁気渦構造。

B. ホイスラー合金層を有するボルテックス型スピントルク発振素子の開発

A で得られた知見をもとに、図 3(a) に模式的に示した $\text{Co}_2(\text{Fe}, \text{Mn})\text{Si}$ ディスクを発振層とする面垂直通電型 GMR 素子を作製し、ボルテックス型スピントルク発振（図 3(b)）に成功した。発振出力は最大でおよそ 10 nW に達し、Q 値 4,000 という値を実現した。Co や Fe-Ni 合金などの従来材料のボルテックス型

発振の出力が pW オーダであることを考慮すると、高スピン分極の $\text{Co}_2(\text{Fe, Mn})\text{Si}$ を用いたことで、出力向上と高 Q 値を同時に実現することに成功した。さらに、発振特性の合金組成依存性や、ボルテックスコアの大振幅運動が励起されていることを明らかにした。以上より、本研究課題では、ホイスラー合金層を用いたボルテックス発振に成功し、高出力と高 Q 値を同時に得られることを示した。

C. ボルテックス型スピントルク発振の特性向上とノイズ評価

発振の更なる高 Q 値化を目指して磁化運動の安定化を図るために、上下ホイスラー合金層に磁気ボルテックスを形成させたダブルボルテックス構造を作製したところ、Q 値が 23,000 まで増大し、 $1 \times 10^9 \text{ T/Hz}$ の周波数敏捷性を得ることに成功した。また、シングルボルテックス構造の発振素子においてノイズスペクトルを測定したところ、TMR 型のスピントルク発振素子よりもノイズを低減できることが示された。

D. 磁気ボルテックスダイナミクスの解明と新機能性の創出

磁気ボルテックスの新しい機能性を創出する目的で、基本的なダイナミクスの機構解明に取り組み、高周波磁場とスピントルクで誘起されるボルテックスダイナミクスに違いがあることを明らかにした。さらに、新機能性の一つとして、界面で磁氣的に交換結合した異種磁性層の交換結合膜を利用し、磁気ボルテックス誘起の低エネルギー磁化反転技術を構築した。

3. 今後の発展と期待

本研究課題では、ホイスラー合金層を用いることでボルテックス発振の高出力化、高 Q 値化、高敏捷性、さらには低ノイズという成果が得られた。これらは、超高感度磁気センサの実現に向けた要素技術と成り得るが、実際の応用のためには依然として特性改善が不可欠である。例えば、新しい高スピン分極材料の適用や素子構造の改良により、発振出力の大幅な改善も期待できる。それにより磁気センサとしての高感度化を実現できれば、ポータブルな生体磁気センサなどへの応用の道筋も見えて来るものと期待される。

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
12	6	2	2

・ T. Yamamoto, **TS** *et al.*, “Magnetic vortex in epitaxially-grown $\text{Co}_2(\text{Fe, Mn})\text{Si}$ alloy”, *Appl. Phys. Lett.* **108**, 152402-1-5 (2015).

・ T. Yamamoto, **TS** *et al.*, “Vortex spin-torque oscillator using $\text{Co}_2\text{Fe}_x\text{Mn}_{1-x}\text{Si}$ Heusler alloys”, *Phys. Rev. B* **94**, 094419-1-9 (2016).

・ W. Zhou, **TS** *et al.*, “Vortex-dynamics-mediated low-field magnetization switching in an exchange-coupled system”, *Phys. Rev. B* **94**, 220401(R)-1-5 (2016).

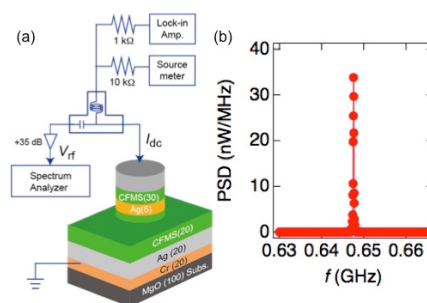


図 3 (a)素子構造と測定系の模式図および(b)発振スペクトル。

【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（国立研究開発法人物質・材料研究機構）

グラント番号：JPMJPR1426

1. 研究目標とねらい

研究の目的は、半導体界面の機能向上と漏れ電流低減により IT 機器の消費電力の劇的な低減を材料レベルから実現することである。このために、チャンネル材料を問わず適用可能なフッ化物高誘電体 (High-k) ゲート絶縁膜材料の開発を行った。High-k 絶縁膜は、従来型トランジスタの要素構造の金属-絶縁体-半導体 (MIS) 構造のみならずヘテロ接合を用いたトンネル FET などの新電子素子にも必要とされる。現在、実用化されている High-k 材料は、 HfO_2 をはじめとする酸化物であり、課題として、i) 低誘電率界面酸化層形成、ii) 酸素欠損生成、iii) ワイドギャップ半導体から Ge まで対応可能なバンドアライメントを実現する材料がないことが挙げられる。これらに対し、high-k 材料の直接接合、メタルゲートによる酸素拡散抑制などの間接的な方法で微細化・低消費電力化に対応する研究がされてきたが、従来手法の延長では、問題解決が困難な素子スケールに到達しつつある。これらの問題に対して、我々は材料の観点から本質的な問題解決を目指した。その材料は、フッ化物高誘電体材料である。材料選択指針は 3 つある。1) 電気陰性度差が大きくイオン性が強い。2) 価数制御により欠陥が発生しても自己整合的に電荷中性を維持が期待される。

3) イオン半径差が選択できて結晶化・結晶構造の制御が可能。これらに対して II 族フッ化物と希土類 (RE) フッ化物材料が有力であり、表 1 に示す様に光学材料で報告のあるバルク物性値からも高誘電率が期待できる。フッ化物は、従来ワイドバンドギャップで高い機械硬度を示すことから光学材料として用いられてきた。この材料を電子材料への応用の視点から検討すると、電気陰性度が酸素より大きくイオン性が大きくなることから結合が強く界面反応が少なく、界面欠陥が少ない可能性がある。また、ワイドバンドギャップであることは化合物半導体などともバンド整合性が高いことが期待でき本質的なリーク電流低減も期待できる。以上から本研究で目指すフッ化物材料は、図 1 に示す従来の絶縁膜では実現できなかった高誘電率とワイドバンドギャップを両立する新材料となることが期待できる。

表 1 絶縁膜の観点でのフッ化物と既存酸化物 high-k 材料との物性値比較

	RE酸化物 $\text{HfO}_2/\text{La}_2\text{O}_3$	新規酸化物 $\text{TiO}_2/\text{SrTiO}_3$	REフッ化物 $\text{LaF}_3, \text{CeF}_3$	II族フッ化物 $\text{MgF}_2, \text{BaF}_2$
誘電率	15~25	>80	30~50	~10
バンドギャップ	~5eV	3~4eV	5~8eV	5~8eV
イオン性	中	小	大	大
バンドオフセット	1.0eV	0	?	?
界面酸化	中	小	無	無

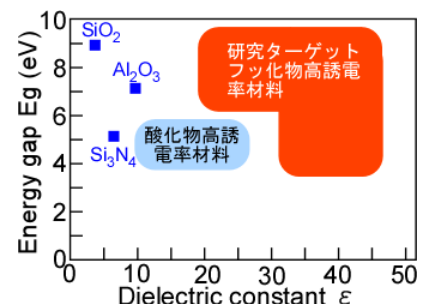


図 1. 本研究で開発するフッ化物絶縁膜材料で期待される誘電率及びバンドギャップの既存材料との比較

2. 研究成果と位置づけ

本研究では、従来は光学材料であったフッ化物結晶の電子材料応用の検討を行った。フッ化物は、高誘電率とワイドバンドギャップを両立し、既存酸化物 high-k を超える物性値を示した。また非酸化物半導体と接合界面に酸化層が無い直接接合形成を実現した。以下に実施内容と成果の抜粋を示す。

2-1) フッ化物材料の基礎物性評価

電子材料の視点での物性データが乏しいフッ化物のバンドギャップ (Eg)、半導体材料とのバンドアラ

イメント評価を光電子分光法で実施した。特に LaF_3 は $E_g=9.4 \text{ eV}$ 、 GaN との接合界面では、伝導帯間エネルギー差が 4.2 eV と、従来材料の Al_2O_3 に対して 2 倍程度の耐圧向上が期待できる。

2-2) Ge 基板上的 CeF_3 系絶縁膜検討

CeF_3/Ge -MIS 構造を作製評価した結果、界面での GeO_x 層の形成は確認されなかった。しかし、フッ化物中への Ge の拡散による界面特性と漏れ電流特性の劣化を誘起した。これに対して、NIMS の熱拡散理論のデータベースとコンビナトリアル手法を用いることで MgF_2 パッシベーション層が Ge の拡散制御に有効である事を見だし、フッ化物での MIS 動作を実現した。

2-3) GaN 上の LaF_3 系絶縁膜検討

GaN は、次世代パワー半導体として研究が進んでおり、高電圧動作の観点から高誘電率・ワイドバンドギャップの絶縁膜が求められている。本研究では LaF_3/GaN -MIS 構造を作製評価した。界面に酸化層が確認されず半導体上への直接成長に成功した(図 2)。その容量-電圧特性では、20 を超える誘電率と界面準位密度 $1.2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}\text{eV}^{-1}$ の MIS キャパシタ動作を示した(図 3)。現状、界面準位密度では、 SiO_2 や Al_2O_3 に対して若干劣るがバンドギャップとバンドアライメントの観点では図 1 の期待される領域にあり、既存材料では実現できない特性である。しかし、絶縁性は、 $+3\text{V}$ の電圧印加状態で $5 \times 10^{-4} \text{ A/cm}^2$ と高い漏れ電流値を示しており、パワー半導体素子用途には不十分な絶縁性であり、今後、絶縁性の向上が必要である。

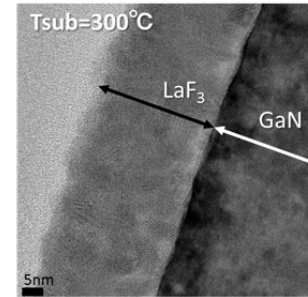


図 2. LaF_3/GaN 構造の断面透過電子顕微鏡像

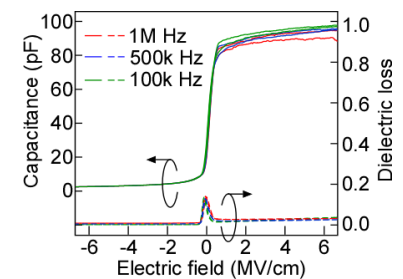


図 3. 150 nm-Pt/16 nm- $\text{LaF}_3/\text{GaN}/10 \text{ nm-Ti}/150 \text{ nm-Pt}$ 構造の容量-電圧特性 (最大 $\pm 10\text{V}$ を試料に印可)。

3. 今後の発展と期待

本研究で、フッ化物 High-k 材料がバンドギャップと高誘電率の両立を実現できる材料であることが示され、半導体に対して直接接合形成を実現した。しかし、絶縁性については課題が残っており、これは材料の組み合わせによる界面欠陥構造に由来することが示唆する結果を得ており、実験での熱処理・組成制御を組み合わせた界面制御の試みと併せて計算科学による界面欠陥形成と電子状態の相関についての検討も実施している。本材料は、高い絶縁性の実現でき、特にこれから需要が伸びるパワー半導体分野や、極薄膜素子への応用が期待でき、IT 機器の消費電力化・高機能化に寄与できる材料となり得ると期待する。

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
3	2	3	0

T. Nagata, K. Kobashi, Y. Yamashita, H. Yoshikawa, C. Paulsamy, Y. Suzuki, T. Nabatame, A. Ogura, T. Chikyow, “Ge incorporated epitaxy of (110) rutile TiO_2 on (100) Ge single crystal at low temperature”, Thin Solid Films, 591, 105 (2015).

Y. Suzuki, T. Nagata, Y. Yamashita, T. Nabatame, A. Ogura, T. Chikyow, “Effect of Y and Mn doping into rutile type TiO_2/Ge stack structure by combinatorial synthesis”, Japanese Journal of Applied Physics, 56, 06GF11 (2017).

【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）

グラント番号：JPMJCR1431

1. 研究目標とねらい

テラヘルツ (THz、10 の 12 乗ヘルツ) 付近の周波数をもつ電磁波は、紙やプラスチック、煙等を透過する一方で金属や水に吸収される、薬剤等の中の特定の物質に吸収される、生体に損傷を与え難いなどの特徴をもつため、セキュリティ、医療、創薬、災害救助、天文など多くの分野で新しいサービスを提供でき、新産業を創出できる潜在性をもつ。特に、1THz 付近の電磁波を用いたイメージングは、革新的な応用を提供できるものとして大きな期待が寄せられている。

しかし、1THz 付近に感度をもち、実時間で映像表示が可能なイメージセンサーの開発は困難を極めていいる。これは、この周波数域の電磁波が、技術的にちょうど光と電波の狭間にあるためと言える。具体的には、赤外線カメラ用途に開発された、光を熱に変換して検知する方式のセンサーは、テラヘルツ波のエネルギーが小さいために周波数が 3THz 以下になると急激に感度が低下する。一方、マイクロ波・ミリ波の電波をアンテナ受信してイメージングする試みも進められているが、従来型の CMOS 半導体技術の延長ではシリコンの物性制限により感度の向上に大きな壁がある。

本研究は、従来よりも感度を 2 桁以上向上させ、実用的な 1THz 帯イメージングデバイスを開発することを目指す。具体的には、高利得アンテナ、高移動度トランジスタ検波器、低雑音 CMOS 読み出し回路を常温接合技術で集積化した積層型撮像素子を開発する(図 1)。

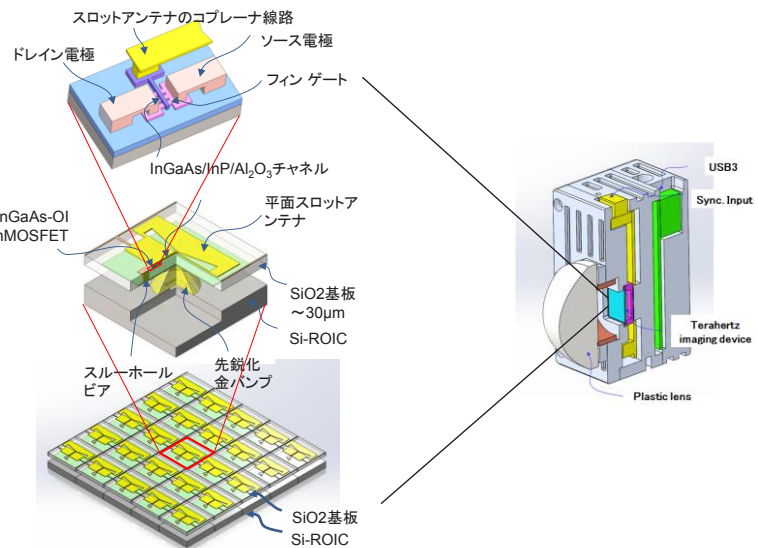


図 1：イメージングデバイスの構成図

2. 研究成果と位置づけ

2.1 高利得アンテナ

一方向に優れた感度をもち集積回路化が可能な平面型アンテナを開発した。図 2 に開発したアンテナの感度の方角依存性を示す。標準的な出力インピーダンスである 50 Ω に整合し、1THz に最大利得をもつアンテナを設計し、ガラス基板を用いたプロセス開発を行い試作した。実測で約 6dBi (約 4 倍) の利得をもつことを検証した。この値は目標の 5dBi (約 3 倍) を超えるものであり、設計解析結果からは、

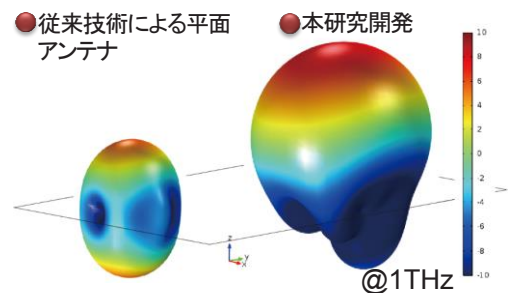


図 1：イメージングデバイスの構成図

これをさらに 10dBi まで向上できることもわかった。

2.2 高移動度トランジスタを用いた検波器

検波器として、ガラス基板上の高移動度トランジスタを用いた二乗検波器を開発した。ガラス基板上に回路を構成するのは、入射するテラヘルツ波の吸収を抑制するためである。そのため、InP 基板上にエピタキシャル成長させた InGaAs 系多層ヘテロ構造をガラス基板上にトランスファー(移載)し、それを用いてトランジスタを作製するプロセスを開発した。一方、従来は考慮されてこなかったしきい値電圧以下での動作の理論解析の結果、感度指標である雑音等価電力 NEP (noise equivalent power)は、トランジスタの移動度、チャネル長に加えて S 値(サブスレッショールド スロープ)にも大きく依存することがわかった。これらの有効性能指標を最大化できるトランジスタのチャネル構造を考案し、試作した。そのトランジスタ検波器の検波特性の例を図 3 に示す。

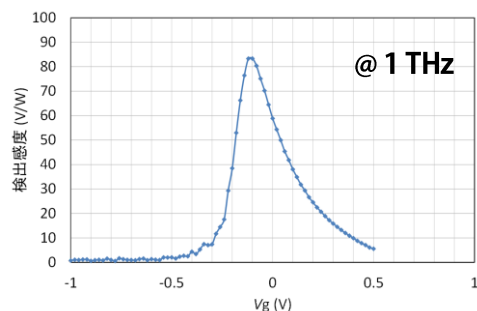


図 3：1 THz 波の検波出力

2.3 低雑音 CMOS 読み出し集積回路

絵素(ピクセル)ごとに検波器バイアス、同期増幅、アナログ-デジタル変換器を備えた読み出し集積回路(ROIC)を 180nm CMOS プロセスで設計・試作し、要素機能を検証した。

2.4 成果の位置づけ

デバイスの要素機能の開発とその性能検証を行った結果、各要素は感度向上目標を超える性能を達成できた。世界の主要研究機関でテラヘルツイメージセンサーの開発が進められる中、本研究の要素機能性能は図 4 に示すように、素子レベルでは周波数と感度の双方で先駆的な位置づけにある。

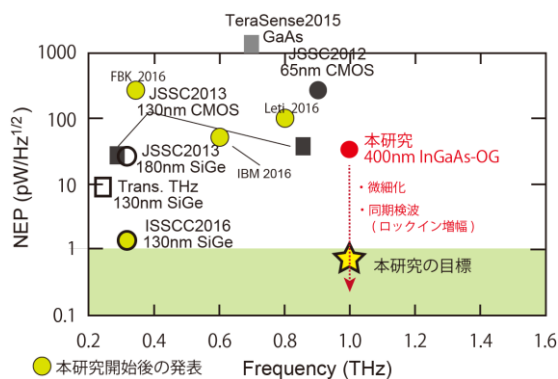


図 4：テラヘルツイメージングデバイスの開発状況

3. 今後の発展と期待

集積化を推し進め、イメージセンサーとして動作実証することに最優先に取り組む。一方、1THz 域ならではの応用に分光イメージングがある。それを実現するのに有効な広帯域アンテナを新たに考案した。これらを組み合わせて、テラヘルツイメージセンサーの有効性をデモンストレーションしていく。

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
24	8	2	4

- Eiji Kume et. al. "InAs MOS-HEMT power detector for 1.0 THz on quartz glass", 2017 EDTM, p. 196.
- H. Kanaya, et. al. "4x4 planar array antenna on indium phosphide substrate for 0.3-THz band application", SPIE Photonics West 2017, p.101031N1.
- K. Sekiguchi, et. al. "Investigation of sensitivity of square-law detectors for radio wave imaging", AWAD 2016, p. 247.

【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）

グラント番号：JPMJPR1423

1. 研究目標とねらい

マイクロ波技術は、放送や無線 LAN、携帯端末での高速通信、レーダーなど多方面で社会を支える科学技術の重要な柱であり、将来的には 100 ギガヘルツを超える帯域の高周波電磁波を利用するための技術の確立が多方面から期待されている。テラヘルツ帯は可視（ペタヘルツ）とマイクロ波（ギガヘルツ）の中間に位置する周波数を持つ電磁波の帯域を指し、この帯域での無線通信では 100 Gbps を超える超高速通信など情報の大容量化を支える基盤技術となることが期待されている。しかし、テラヘルツ帯は未踏の領域ともいわれており、電磁波の発生・検出、また様々な電磁波操作技術が未確立であるという大きな問題がある。本研究では、テラヘルツ光制御の新しい技術を確認するための研究を行った。着目したのはマルチフェロイクスと呼ばれる新しい磁性材料である。このマルチフェロイクスは、磁性に由来した強誘電性を持つことから新しい物質機能が発現する舞台として近年盛んに研究されている。マルチフェロイクスのもう一つの特徴は、テラヘルツ帯にエレクトロマグノンと呼ばれる光の振動電場に応答する磁気共鳴を持つ点である。エレクトロマグノンは非相反方向 2 色性と呼ばれるアイソレーター効果など様々な光学効果を示すことが近年の研究から明らかになっている。このようなテラヘルツ光に対する応答や様々な光学効果は、将来のテラヘルツ技術の基盤技術となることが期待できる。しかし、エレクトロマグノンは現在その材料が非常に限られておりしかも極低温に限られているなど課題も多い。本研究ではこのような課題を克服し、室温でのエレクトロマグノンの実現、光学効果によるテラヘルツ光の制御の効率化、新しいテラヘルツ帯での光学現象の実現など、様々なテラヘルツ特性を開拓・解明することを目指す。これらのエレクトロマグノンのテラヘルツ特性はテラヘルツ光の吸収材、偏光素子、アイソレーターや偏光制御素子、高い効率を持つテラヘルツ検出素子などへの展開が期待される。

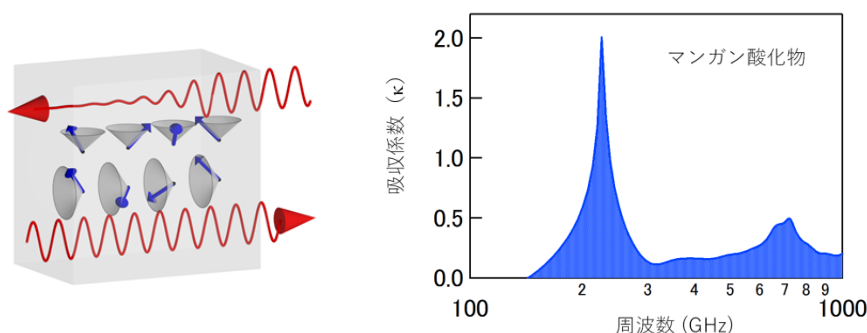


図 1：スピンの構造によっておこる非相反方向 2 色性（左図）とマンガン酸化物のテラヘルツ帯におけるエレクトロマグノンのスペクトル（右図）

2. 研究成果と位置づけ

テラヘルツ帯の新しい共鳴現象であるエレクトロマグノンを室温で実現するために、マルチフェロイクス材料のひとつである Y 型ヘキサフェライトに着目した。エレクトロマグノンが期待できる「らせん型」の磁性相が室温で存在している物質を選び 1 THz を中心とした共鳴が室温で現れることを明らかに

した。また磁場を印加することで、磁性の制御を介したエレクトロマグノン共鳴の生成・消滅が可能であることを明らかにした。更により効果的なテラヘルツ帯の光吸収の制御のために Y 型ヘキサフェライトの組成を調整することで、オンオフ的な共鳴強度の制御、また通常の磁気共鳴の 10 倍以上の効率を持つ共鳴周波数の磁場制御を室温を含む広い温度域で実現した。一方で、エレクトロマグノンと磁性相の相関を明らかにすることで、共鳴の周波数特性を明らかにした。光学効果としてアイソレーター等に用いられているファラデー効果、カイラルな物質に固有の自然旋光性、電気磁気光学効果である非相反方向 2 色性、磁気カイラル効果、旋光性複屈折というさまざまな応答をエレクトロマグノンにおいて実現した。ファラデー効果では、Y 型ヘキサフェライトにおいてテラヘルツ光の偏光回転がエレクトロマグノン共鳴によって効果的に増強されることを明らかにした。ここでは 1.6 ミリの試料の透過光で最大 45 度の回転角が得られた。また銅酸化物のらせん型磁性相で出現するエレクトロマグノンを用いて、自然旋光性による偏光回転が現れることを明らかにし、電圧のみで回転の符号の制御を実現した。このとき、厚さ 1 ミリの試料において透過光の回転角は 10 度程度であり、磁場を印加する必要はなく、より容易な偏光制御が可能であることを実証した。非相反方向 2 色性は光の吸収が光の進行方向によって変化する現象であるが、上記の銅酸化物において最大 25% の吸収係数の変化を示す方向 2 色性と磁気カイラル効果を実現した。また、電圧パルスの印加による方向 2 色性の符号の反転を実現した。

3. 今後の発展と期待

本研究では、大きなテラヘルツ応答を持つエレクトロマグノンの室温化の成功と、様々な光学応答の実現とその制御を実証した。今後は、これらを組み合わせることで、多彩な光学現象を室温で実現することを目指す。磁性に由来したカイラリティや極性を用いた、様々な光学応答をテラヘルツ帯で実証したが、これらを他の波長領域、例えば可視域や近赤外領域へ広げる。磁性に由来していることの利点として、柔軟な外場応答を示すことがあげられる。これは電圧制御が可能な様々な帯域の光制御の新しい手法となることが期待できる。

4. 成果物のまとめ

下記のような表をつくって数をご記入ください。

査読付論文	国際会議招待講演	特許	受賞
6	3	0	1

・Y. Takahashi, S. Kibayashi, Y. Kaneko, and Y. Tokura, Versatile optical magnetoelectric effects by electromagnons in MnWO₄ with canted spin-spiral plane, Physical Review B 93, 180404 (R) (2016).

・R. Masuda, Y. Kaneko, Y. Yamasaki, Y. Tokura, and Y. Takahashi, Role of commensurability of spin order for optical magnetoelectric effect with electromagnons in multiferroic YMn₂O₅, Physical Review B 96, 041117(Rapid Communications) (2017) (selected as Editor's suggestion).

・T. Kurumaji, Y. Takahashi, J. Fujioka, R. Masuda, H. Shishikura, S. Ishiwata and Y. Tokura, Optical magnetoelectric resonance in a polar magnet (Fe,Zn)₂Mo₃O₈ with axion-type coupling, Physical Review Letters 119, 077206 (2017).

【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 化学研究所）

グラント番号：JPMJPR1427

1. 研究目標とねらい

近年の急速な情報通信技術の高速化と大容量化の要請から、半導体電子デバイスにおけるメモリー素子の最小加工寸法は 10nm 程度にまで進み、電荷蓄積やトランジスタにおける電流制御が従来の半導体材料では十分に行えない「微細化の限界」が問題となっている。従来の物理的な限界を突破し新たな固体メモリーや超高速エレクトロニクスの開発において、材料のナノスケール物性（導電性、磁性、光学特性）を局所的、高速、効率的かつ劇的に変化させ、その物理現象を理解することが極めて重要である。材料の物性を制御する方法として、試料に電極を装着し高電場を印加する方法や、超短パルスレーザーなどのパルス光を用いる方法が利用されている。しかし、電極を用いて DC 電場を印加する方法では印加時間がナノ秒と緩慢となり試料に熱的破壊効果を引き起こす。また、可視光領域の超短秒レーザーでは、パルス持続時間の間に電場は数サイクルの振動を繰り返すためその効果は打ち消し合い、有効的な電場効果をもたらさず効率的な物性制御をしばしば妨げている。

そこで本研究では、ピコ秒 (10^{-12} 秒) の持続時間しか持たない世界最高強度のテラヘルツ (THz) 光源を最適化し、従来の DC 電場や超短パルスレーザー技術では不可能な新たな物性制御技術を開発する。これにより、THz 周波数帯で動作する次世代の超高速電子デバイス開発に資する電場・磁場誘起現象を探索しその学理を構築する。とくに THz 光を金属マテリアル構造と結合しマイクロ・ナノスケールの近接場領域に閉じ込めることで電磁場強度を極限的に増大し、高効率で高速な新たな物性制御技術を開発する。

2. 研究成果と位置づけ

A. 反強磁性体の磁化制御

絶縁性反強磁性体は THz 帯域に達する高周波磁気応答を示し、高速磁気光学素子やスピンドバイスへの利用が期待される。磁気スイッチングなどへの応用を考える際には非線形領域におけるスピンドYNAMIXの理解が重要であるが、従来十分な強度の THz 磁場発生が困難なために物理的機構は未解明であった。本研究では高強度の THz パルス電場パルスをスプリットリング共振器 (SRR) に照射し、傾角反強磁性体 HoFeO_3 単結晶内部に共鳴的な磁場増強をもたらし、非線形な磁化応答、さらに超高速な磁化制御を目指し研究を行った。SRR 構造は LC 共振周波数が試料の反強磁性共鳴 (AF モード) の周波数 (0.57 THz) に一致するように設計した。実験では、高強度 THz パルス照射後の磁化変化を時間分解磁気カー効果により測定した。低強度励起の場合では磁化振動の周波数が全時間にわたりほぼ一定であるのに対し、高強度励起では大きな周波数シフトが出現することが観測された。高強度励起における周波数シフトは大振幅駆動された磁化運動の非調和性に由来することを解明し、超高速磁化反転の実現に向けた重要な知見を得ることができた。

B. カルコゲナイト化合物の THz 電場誘起相変化

カルコゲナイト化合物の 1 つである $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ (GST) は、光励起によってアモルファス相から結晶相を双方向に相変化可能な材料であり、これまで CD や DVD 等の光記録材料として広く利用されてきた。電圧パルスでも相変化を伴う電気信号のスイッチングが可能なため、近年、電子デバイスにおける不揮発性メモリー材料としての応用研究が精力的に行われている。従来の電気回路技術を用いる方法では電圧パルスの時間幅は 100ps 程度である。THz 帯で動作するデバイス開発を行う上で、ピコ秒程度の時間幅の高電

場パルス下での相変化ダイナミクスを調べることは極めて重要である。本研究では、メタマテリアル構造により 2MV/cm まで増強した THz 電場パルスを GST 試料に印加することにより、印加した THz 電場方向に沿ってアモルファスが 1 次元的に結晶化することをはじめて観測した。印加するパルス数と結晶成長の過程を系統的に測定した結果、電場方向への 1 次元的な結晶成長は、THz 電場で誘起された結晶相の先端で電場集中が生じ、結晶化を促進することが原因であることを明らかにした。すなわち THz 周波数帯の電磁場で高速スイッチング動作させた場合には、従来のナノ秒からマイクロ秒に及ぶ電場パルスによる相変化とは異なり、熱拡散の影響が著しく抑制されることを明確に示している。本手法が THz 帯で動作するデバイス開発における重要なツールになることを示している。

C. THz ドレスト状態の生成と光信号変調

エレクトロニクス技術の高周波極限である THz 周波数帯で動作する高速光変調素子の実現には、THz 光電場下での固体中電子系の光学応答の理解が重要である。特に、半導体中の励起子は大きな振動子強度をもち THz 光と強く相互作用するため大きな光学変調が期待される。本研究では、位相安定な狭帯域 THz 光源を利用することで励起子のサブサイクル応答を観測し、THz 光と励起子が強く結合したドレスト状態がコヒーレントな光学応答の起源であることを明らかにした。GaAs 中励起子の最低励起状態である 1s 状態と 2p 状態よりも少し小さいフォトンエネルギーを持つ THz 光を試料に入力すると、励起子準位と THz 光が結合して新たにドレスト状態が生成される。ドレスト状態は印加した THz フォトンエネルギー分だけ等間隔に離れた位置に複数のエネルギー準位を持ち、各準位は量子的な重ね合わせ状態にある。実験では THz 電場に応じて変化する試料の周期的な吸収変化を測定し、ドレスト状態からのサイドバンド放射に起因することを確認した。本研究は光電場の位相をドレスト状態の波動関数の位相に直接転写可能なことを示したはじめての実験例であり、多波長光強度変調素子や任意の時間形状を持つ光パルスを生成する光シンセサイザー技術への応用が期待される。

3. 今後の発展と期待

高強度 THz パルス発生技術という新たな手法を用いることによって、超高速エレクトロニクス・スピントロニクスにおいて重要な高電場・磁場現象の観測に成功し、従来の GHz 帯を超えた THz 帯で動作する光・電子デバイス開発において重要な知見を得た。これらの現象をナノスケールで顕在化し観測するために、THz パルスをトンネルバイアスに利用した時間分解 STM の開発を行っている。これによりナノスケールの物性制御技術を実現するとともに、太陽電池材料や電気発光デバイスにおけるナノ界面で生じるキャリア拡散や電荷分離過程といった従来不可能であった光電変換現象の解明に向けた測定技術が実現される。

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
8	3	0	1

- A. T. Tarekegne, *H. Hirori et al., “Impact ionization dynamics in silicon by MV/cm THz fields”, New J. Phys. **19**, 123018/1-7(2017).
- K. Uchida, *H. Hirori et al., “Subcycle optical response caused by a terahertz dressed state with phase-locked wave functions”, Phys. Rev. Lett. **117**, 277402/1-5(2016).
- *H. Hirori et al., “Dynamical nonlinear interactions of solids with strong terahertz pulses”, J. Phys. Soc. Jpn. **85**, 082001/1-12(2016) (Invited review paper).

【ビ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）

グラント番号：JPMJCR1432

1. 研究目標とねらい

デバイスの微細化・高集積化に伴う ASIC 開発費の高騰や、電子機器製品サイクルの短縮による短納期、少量多品種生産、頻繁な仕様変更への対応要求等を背景として、FPGA に代表される再構成可能回路に対する期待が高まっている。本研究では、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 NRE コストのすべてを実現する新たなアルゴリズム・処理機構融合型コンピューティングを創出し、その実現に不可欠なビアスイッチ FPGA を開発する。ビアスイッチ FPGA は、従来 FPGA の性能ボトルネックである SRAM 型スイッチを、不揮発性メモリの一種であるビアスイッチで置換した FPGA である（図 1）。ビアスイッチは不揮発で高いオンオフ比を持つ原子スイッチと選択用のバリスタが積層されたデバイスで、配線層に小さなフットプリントで集積することができる。ビアスイッチの開発により、FPGA の実装密度や性能を飛躍的に向上させ、格段のエネルギー効率向上を達成する。

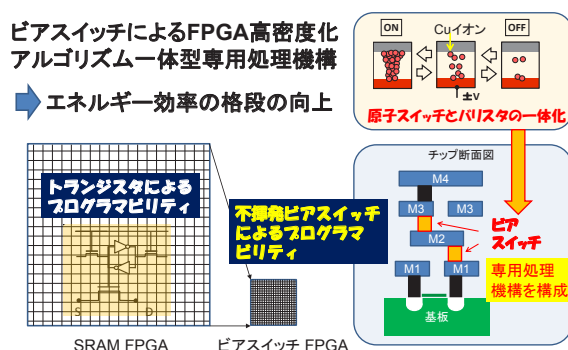


図1: 研究目的と概要

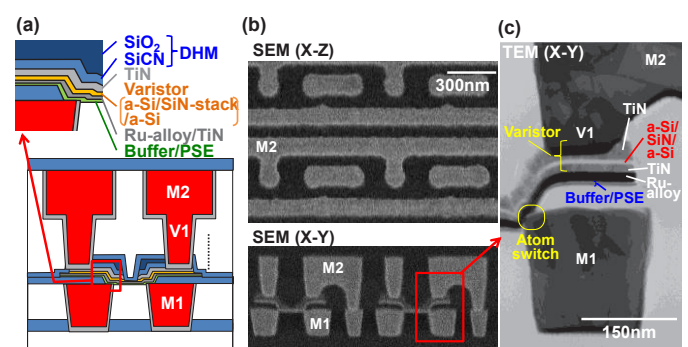


図2: ビアスイッチ

2. 研究成果と位置づけ

原子スイッチとバリスタにより構成されるビアスイッチを開発した（図 2）[1]。原子スイッチは電極間に電圧を印加することで架橋の形成・消失が可逆的に繰り返せる素子である。信号端子と制御端子の間に閾値以上の電圧（プログラミング電圧）が印加されるとバリスタが導通し、原子スイッチにプログラミング電流が流れる。65nm の銅配線上に大規模（50x20）クロスバースイッチを設計および試作し、プログラムと信号伝達の実証を行った[2]。試作した 50x20 クロスバースイッチにおいて、ビアスイッチの特長であるマルチファンアウト含んだプログラムと信号伝達を確認した（図 3）。

ビアスイッチ FPGA は図 4 のように CLB (Configurable Logic Block) を敷き詰めた構造を有し、各 CLB は縦横の配線の交点にビアスイッチを配置したクロスバースイッチ回路および論理ブロックからなる[3]。クロスバースイッチ回路では、縦横配線間および配線—論理ブロック間の接続をビアスイッチにより切り換える。論理ブロックでは、組み合わせ回路や順序回路を構築する。列方向に複数のスイッチがオンすることで十分な配線性を有し、信号配線は双方向に利用できる。配線クロスバースイッチ下のトランジスタ領域を論理ブロックの高機能化に活用し、LUT と演算器を含む混合粒度アーキテクチャを採用する。ビアスイッチのスイッチサイズが $18F^2$ と小さいことにより、SRAM 型スイッチをビアスイッチに置換することで FPGA の面積効

率や性能が飛躍的に向上する。SRAM を用いた FPGA と比較してビアスイッチ FPGA のクロスバー密度は 26 倍高く、配線エネルギーを一桁削減ができる見通しを得た[3] (図 5)。

提案アーキテクチャ向けの設計自動化フローを開発し、例として画像アプリケーションをマッピングした。古典的な FPGA に対応する細粒度の演算器アレイならびに単方向の配線資源からなるアーキテクチャと比較したところ、混合粒度とすることでアレイ面積を 50%削減し、双方向配線によりさらに 51%の面積削減を達成することができた。

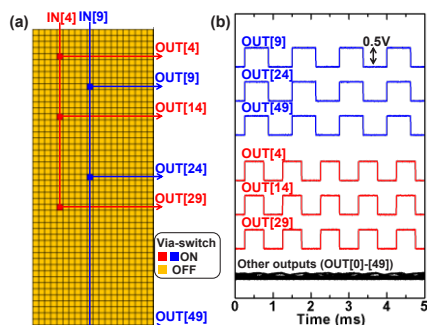


図3: クロスバーの動作検証

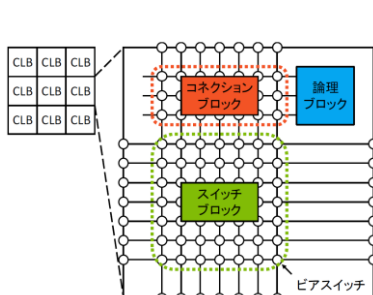


図4: ビアスイッチFPGAの基本構造

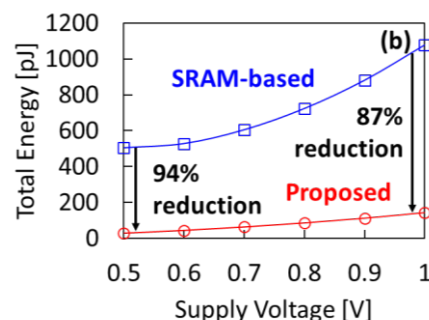


図5: 配線消費エネルギー比較

3. 今後の発展と期待

アーキテクチャのドメイン最適化を進めて、CPU や GPU に比べて格段にエネルギー効率が高い専用処理機構がマッピングできるアーキテクチャの完成を目指す。ASIC に肉薄するエネルギー効率や性能の再構成可能デバイスを実現する。

ビアスイッチ FPGA の高エネルギー効率動作は、画像認識等の IoT インフラ技術のエッジデバイス搭載や、極低電力が望まれる人体センサを含むウェアラブルデバイスの格段の進化をもたらす。スイッチの不揮発性を活用すると、機器制御に用いられてきたフラッシュマイコンをアルゴリズム一体型処理機構がプログラムされた FPGA に置き換えることが可能となる。人工知能関連では、高精度かつ高性能な深層学習の推論処理が組み込みシステム上で実現可能になり、実問題に対する応用分野の拡大に貢献する。エッジ端末でも学習を可能にし、組み込みシステムによる分散学習やオンライン学習など新たな応用範囲の拡大にもつながる。

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
12	4	4	4

- [1] N. Banno, et al., "A Novel Two-Varistors (a-Si/SiN/a-Si) Selected Complementary Atom Switch (2V-1CAS) for Nonvolatile Crossbar Switch with Multiple Fan-Outs," *Technical Digest of IEDM*, 2015.
- [2] N. Banno, et al., "50x20 Crossbar Switch Block (CSB) with Two-Varistors (a-Si/SiN/a-Si) Selected Complementary Atom Switch for a Highly-Dense Reconfigurable Logic," *Technical Digest of IEDM*, 2016.
- [3] J. Hotate, et al., "A Highly-Dense Mixed Grained Reconfigurable Architecture with Overlay Crossbar Interconnect Using Via-Switch," *Proc. of FPL*, 2016.

【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）

グラント番号：JPMJPR1523

1. 研究目標とねらい

本研究課題の目標は、超低消費電力シリコン神経ネットワークシステムを構築するための基礎技術の開発である。近年、エネルギー環境問題や、社会システムの複雑化、高齢化などの社会情勢により、情報化社会基盤に対して、省エネルギー化、急増・多様化する情報の高速で柔軟な処理、知能化等による生活支援などが求められている。特に、急速に複雑化が進む情報システムは、複雑な情報を低電力で処理する必要性に加え、人手によるプログラミングの信頼性の限界、可用性とメンテナンス性の限界という問題を抱えている。これに対し脳神経系は、デジタルコンピュータの不得意とする複雑な情報処理を適応的に、かつ、省エネルギーで実行できるが、この能力は自律的に獲得され、長期間自己修復により機能が維持される。従って、脳神経系を模倣した新しい情報処理システムの基盤技術を確立することで、現代の情報システムの限界を解決できると期待されている。

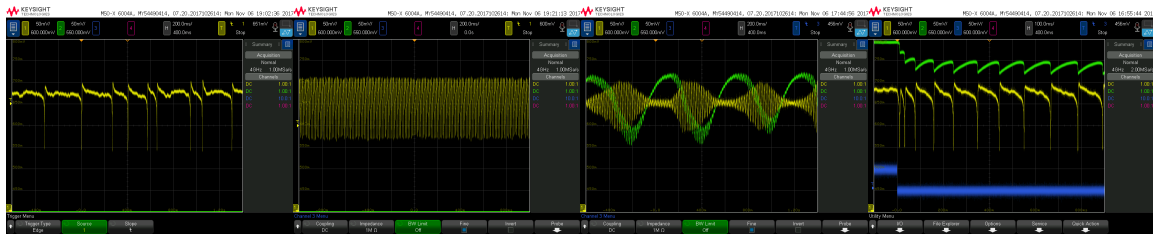
本研究課題で扱うシリコン神経ネットワークは、現行の人工知能の技術基盤である人工ニューラルネットワークと異なり、脳神経系の電気生理学的活動をリアルタイムあるいは高速に再現する電子回路であり、脳神経系と同等の機能を実現できる新しい技術として期待されている。脳神経系に匹敵する情報処理システムを実現するためには、脳神経系に存在する多種多様な神経細胞の複雑な活動が情報処理に寄与する原理を知る必要があるが、これは脳科学上の難題の一つであり、工学的立場からは「構築による解析」のアプローチによる解明に貢献する必要がある。そこで本研究課題では、脳神経系の様々な神経活動を模倣できる超低消費電力ニューロン回路（シリコンニューロン）及びシナプス回路（シリコンシナプス）を開発する共に、多種多様な神経活動がどのような情報処理に寄与しうるかについて理論的考察を加え、シリコン神経ネットワークの基盤技術を開発した。

2. 研究成果と位置づけ

本研究課題では、非線形動力学システムの解析手法を応用した独自の回路設計手法を発展させ、安価なプロセスを用い超低消費電力で動作するシリコンニューロン及びシナプスを開発した。MOSFETのサブスレッショルド領域における特性曲線を組み合わせることで、様々な神経活動を定量的に再現できる3変数の微分方程式を設計、集積回路実装することでシリコンニューロン回路を構築した。本回路はTSMC 25 μ プロセスにより製造され、平均消費電力5ナノワット未満で動作し、大脳皮質や視床、脳幹にある様々な神経細胞の活動を再現できる。神経生理学実験の一つである電圧固定実験の原理を応用したフィードバックアンプを内蔵しており、これを用いて特性評価をしながらバイアス電圧を調整し、製造誤差やトランジスタの二次効果などの影響を補償し、目的の神経活動を再現することができる。他研究グループではこれまでに、2ナノワット程度の電力で1あるいは2種類程度のシンプルな神経活動のみを再現可能な回路が開発されている。これに対し、本研究課題で構築した回路は、これらの回路の神経活動を含む6種類の神経活動を実現可能である。また、他研究グループでは本回路と同等以上の神経活動を再現するために100マイクロワット以上の消費電力が必要である。本回路の代表的実験波形例を図1に示す。本研究課題で構築したシリコンシナプスは、神経細胞の膜容量とシナプス電流のスケールを考慮して設計することで、

〔図 1〕 シリコンニューロン回路の代表的動作例

(左よりファーストスパイクング・クラス 1、同クラス 2、楕円バースティング、レギュラースパイクング)



定常消費電力 2 ピコワット、スパイクあたり消費電力 0.5 ～ 1.5 ピコワット程度の消費電力で 4 種類のアミノ酸シナプスの特性の再現に成功した。他研究グループの代表的シリコンシナプスでは定常消費電力が評価されておらず比較できないが、スパイクあたりの消費電力が 7 ピコワット以上と大きい上、本回路で再現可能なシャuntingインヒビションを再現できない。

理論面から、脳神経系に存在する 2 種類の神経スパイクが情報処理に寄与するメカニズムについて明らかにした。再帰結合のある神経ネットワークにおける自己想起型連想記憶など神経スパイク間の同期が重要な情報処理では F S のクラス 2 が有利であることを既に指摘していたが、そのメカニズムが位相応答曲線に由来することを明らかにするとともに、フィードフォワードネットワークにおけるパターン認識では F S のクラス 1 が有利であることも指摘することで、これまでの研究で軽視されてきた神経スパイクの生成メカニズムが情報処理に重要な役割を担っていることを示し、シリコン神経ネットワークで情報処理システムを構築する基礎理論及び理論脳科学の進歩に貢献した。

3. 今後の発展と期待

本研究課題で開発した回路では、シナプス伝達効率の記憶素子としてデジタルメモリを使用した。今後の研究では、現在急速に発達中の不揮発性メモリを用いることにより回路の小型化とともに、コンパクトなオンライン学習回路の開発を目指す。また、本研究課題の成果は長期的には脳に匹敵する情報処理システムの基盤技術となるが、短期的にはエッジコンピューティングの発展への貢献が期待できる。例えば本研究成果では、ランダムな神経スパイク列に埋もれた時空間パターンを学習できるパターン認識をシリコン神経ネットワークで実現しうることを示したが、本研究成果のシリコン神経ネットワーク回路技術を用いて実装することで、安価で S N 比の悪いセンサの出力からノイズに埋もれた情報を探し出す超低消費電力プリプロセッサなどが実現可能であると期待できる。

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
5	4	0	1

・ T. Kohno, et al., “A configurable qualitative-modeling-based silicon neuron circuit”, Nonlinear Theory and Its Applications, IEICE, Vol. 8, No. 1, pp. 25-37, 2017.

・ F. Grassia, et al., “Spike pattern recognition using artificial neuron and Spike-Timing-Dependent Plasticity implemented on a multi-core embedded platform”, Journal of Artificial Life and Robotics, Accepted.

・ T. Kohno, and K. Aihara, “A three-variable ultralow-power analog silicon neuron circuit”, Proc. 2016 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications, pp. 190-193, 2016.

【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（産業技術総合研究所）

グラント番号：JPMJPR1421

1. 研究目標とねらい

脳や神経細胞（ニューロン）の働きをまねた情報処理システム（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超並列に処理できる新規情報処理基盤として期待されている。シリコンデバイスの微細化・集積化が限界に近づいている現状を打破するためにも、新しい動作原理に基づく新規デバイスの中核としたニューロモルフィックシステムを構築することは極めて有効である。

本研究ではスピントルク発振器（STO）と磁壁型メモリの“人工ニューロン”からなる低消費電力なニューロモルフィックシステムの理論設計を目的とした（図1）。具体的には、(1)人工ニューロンに適したSTOおよび磁壁型メモリの理論設計と、(2)それらを用いた画像分離システムのデモンストレーションおよび (3)ニューラルネットワークの理論提案を行なった。

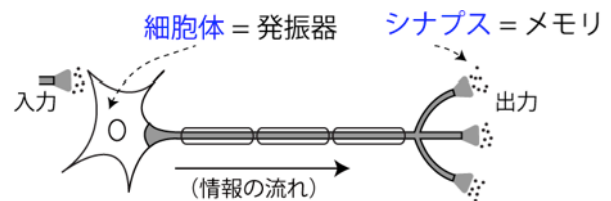


図1: ニューロンの模式図。ナノサイズの発振器とメモリで高集積化・低消費電力化を狙う。

2. 研究成果と位置づけ

(1) 人工ニューロンに適したSTOと磁壁型メモリの理論設計

STOを演算素子として用いる場合、素子断面が小さく無磁場で発振することが望ましい。本研究では、従来の発振層とは異なる磁性材料を用いることで外部磁場なしでの発振が可能であることを解析的に示した[1]。さらに、外部摂動に対するSTOの応答を調べることで、提案したSTOとある種の生体ニューロンが同じ発振特性をもつことを明らかにした[2]。実デバイスと生体ニューロンの対応づけを通して、両分野の知見を生かした研究展開が期待できる。その一例として雑音誘起同期現象を調べた結果、生体ニューロンの位相応答から予期される挙動をSTOも示すことがわかった[2]。

磁壁型メモリの磁壁を固定する新手法として、磁気異方性定数と交換スチーフネス定数の空間変調を提案した[3]。素子本体に切り込みを入れる従来の方法と比較して、単純な構造のまま多値化レベルをあげることが可能になると期待できる。

(2) 位相同期を用いた画像分離システムのデモンストレーション

位相同期実験を効率的・安定的に実施するには、発振特性のそろったSTOを選別することが重要である。本研究では自動高周波測定システムを構築し、ウエハ上の全vortex型STOの発振特性評価を行なった。その結果、電気・磁気特性に関する静的な素子ばらつきは小さいに関わらず、発振周波数や発振強度に関する動的な素子ばらつきが大きいことがわかった。しかしながら位相同期に適した10MHz以下の周波数差を持つSTOは現プロセスでも十分数作製できており、効率よい選別もできるようになった。

さらに、パワーデバイダ(分配器)を用いた近接結合モデル回路を考案した。次近接以降のSTOともわずかながら結合しうるが、本回路で画像分離の基本状態である部分同期状態を実現できることを実験的

に確認した。近接結合による位相同期実験に成功したことは、静的・動的特性のそろった高品質な STO が作製できていることを示している。

(3) スピントロニクス素子を用いたニューラルネットワークの理論設計

振動現象をニューラルネットワークに用いる場合、外力によって同期状態を制御できる機構が必要である。本研究では、ジャロシンスキー守谷相互作用により逆相同期状態を誘起できるスピン波結合スピントルク発振器を提案した(図 2(a))。提案素子に外力として振動磁場を印加すると、磁場強度に依存して同期度を制御できることを明らかにした。さらに提案素子を用いたニューラルネットワークの性能を手書き数字認識課題で評価した結果、認識率 75%を得ることができた(図 2(c))。学習工程の最適化などにより認識率向上の余地は十分あると考えられる。図 2 (b)の構成における全振動子素子の動作電力は発振効率を悪く見積もっても 1μJ 未満であり、TrueNorth(IBM)と比較しても低消費電力素子としての期待が持てることがわかった。

3. 今後の発展と期待

ニューラルネットワークには重み素子も必要である。磁壁型素子や他の新規抵抗素子などと組み合わせた研究により、低消費電力な非ノイマン型情報処理基盤の構築を目指したい。

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
6	0	2	0

代表的論文(3報)

[1] H. Arai, R. Matsumoto, S. Yuasa, H. Imamura, “Spin-torque-induced oscillation at zero bias field in a magnetoresistive nano-pillar with a free layer with first- and second-order uniaxial anisotropy ” ,Applied Physics Express 8, 083005 (2015).

[2] H. Arai and H. Imamura, “Stochastic Phase Synchronization of Perpendicularly Magnetized Spin-Torque Oscillators With the Second-Order Uniaxial Anisotropy” , IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS 53, 6100705, (2017).

[3] H. Arai and H. Imamura, “Control of domain wall thickness by spatial modulation of uniaxial anisotropy and exchange stiffness parameters” , Japanese Journal of Applied Physics 54, 030307 (2015).

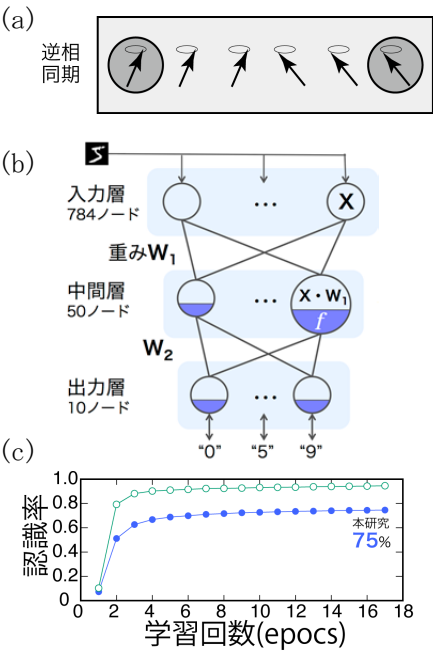


図2(a) 提案素子の磁化ダイナミクス模式図。(b) 3層ニューラルネットワーク。(c) 学習の推移。活性化関数にシグモイド関数を用いた学習結果(緑)。本研究(青)

【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（国立研究開発法人理化学研究所）

グラント番号：JPMJPR1428

1. 研究目標とねらい

本研究での究極の目標は極限まで薄いエレクトロニクスを実現することにある。すべてのレイヤーを合わせた膜厚をとって $1\ \mu\text{m}$ 以下になるようなナノ膜厚有機エレクトロニクスを実現することで、無意識的な装着感、極限まで高められた密着感を実現することを目指す。上記のためのアプローチとして、薄膜エレクトロニクスの従来の構成レイヤーである「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」レイヤーを除去するものである。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（図 i）。



図 1: 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の概略図。

2. 研究成果と位置づけ

①基板レス有機集積回路の実現

絶縁膜として、ポリクロロパラキシリレン (Parylene-SR) を用い、基板レス構造の有機トランジスタを実現した。総膜厚は $350\ \text{nm}$ であり、世界で最も薄い有機トランジスタ構造である。このように極限の薄さ・軽さを有するため、装着感なく体表面に存在可能である（図 2b）。この基板レストランジスタの伝達特性を図 2c に示す。駆動電圧 $10\ \text{V}$ で移動度 $0.37\ \text{cm}^2/\text{Vs}$ であり、これは基板のある有機トランジスタと比較して遜色のない値である。このように、基板レス構造を有することで有機トランジスタとしての性能を保持しながら極限の薄さを実現することができると示された。

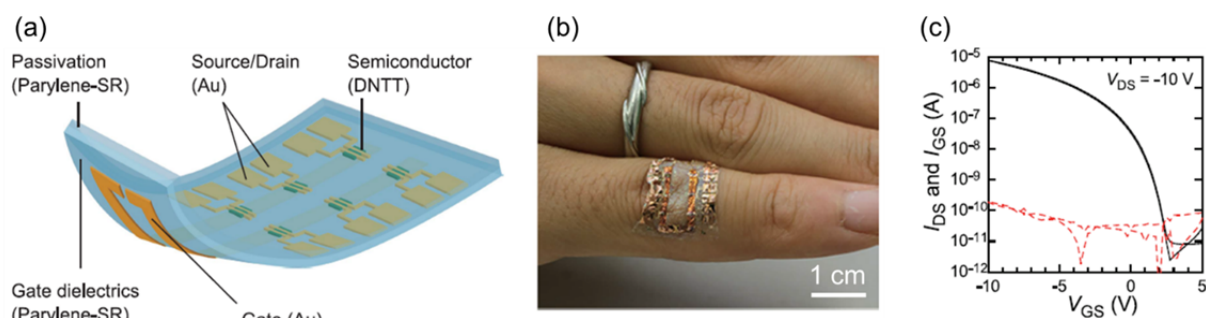


図 2: (a) 基板レス有機トランジスタの断面構造図。総厚みは $350\ \text{nm}$ である。(b) 基板レストランジスタを指に装着している様子。(c) 基板レストランジスタの伝達特性。

②洗濯可能な超薄型有機太陽電池

上記の有機トランジスタや集積回路を駆動させるための超薄型有機太陽電池の研究も同時並行で行った。超柔軟で極薄の有機太陽電池を作製し、大気中・水中の保管でも劣化なく動作させることに成功した(図 3a)。2枚のゴムで超薄型エレクトロニクスを挟み込むという新たなアイデアによって、伸縮可能でありながら水にも強いというこれまでにない機能を実現することに成功した。作製した超薄型有機太陽電池は、ガラス支持基板から剥離した状態でも、擬似太陽光(出力 100 mW/cm²)照射時におけるエネルギー変換効率 7.9%という高いエネルギー変換効率を達成した(図 3b)。さらに、このデバイスは約 50%までつぶしても安定的に駆動し、非常に高い機械的柔軟性を持つことも確認できた(図 3c)。

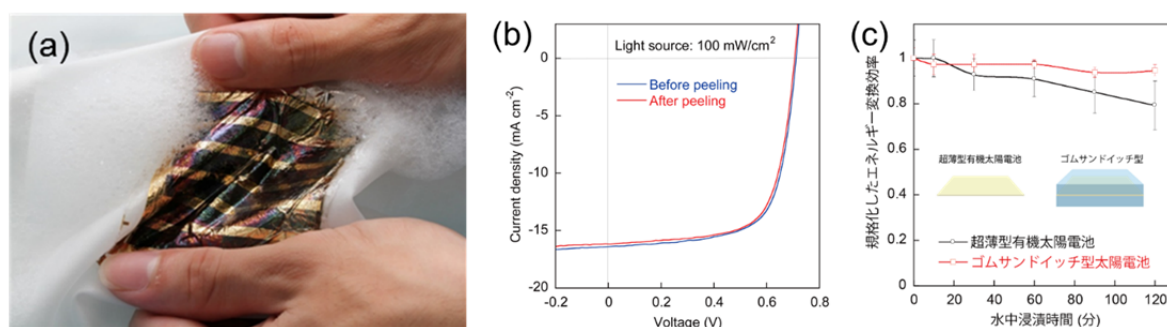


図 3: (a) 衣服上に貼り付けた超薄型有機太陽電池の洗濯写真。(b) 太陽電池の電流電圧特性。(c) 水中への浸漬時間によるエネルギー変換効率の変化。

3. 今後の発展と期待

上記で得られた成果は実際に企業からの関心を幾つか頂いている。いずれの技術においても長期安定性という重要な課題を解決しながら、企業との適切な連携の元で産業化への取り組みを加速させていく。将来的にはウェアラブル・オンスキンデバイス実現のために本技術を活用することが期待される。

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
8	5	4	0

・ H. Jinno, K. Fukuda, X. Xu, S. Park, Y. Suzuki, M. Koizumi, T. Yokota, I. Osaka, K. Takimiya, T. Someya, “Stretchable and waterproof elastomer-coated organic photovoltaics for washable electronic textile applications”, *Nature Energy*, 2, 780–785 (2017).

・ K. Fukuda, T. Sekine, R. Shiwa, T. Morimoto, D. Kumaki, and S. Tokito, “Free-standing Organic Transistors and Circuits with Sub-micron Thicknesses”, *Scientific Reports*, 6, 27450 (2016).

・ K. Fukuda, Y. Yoshimura, T. Okamoto, Y. Takeda, D. Kumaki, Y. Katayama, and S. Tokito, “Reverse-Offset Printing Optimized for Scalable Organic Thin-film Transistors with Sub-micrometer Channel Lengths”, *Advanced Electronic Materials*, 1, 201500145 (2015).



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