

平成 30 年 6 月 15 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H02113

研究課題名(和文) 強相関電子系の電界効果とモットFETのプロトタイプ開発

研究課題名(英文) Field effect control of correlated electron systems for a prototype of Mott FET

研究代表者

井上 公 (INOUE, ISAO)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス・製造領域・主任研究員

研究者番号：00356502

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 27,100,000円

研究成果の概要(和文)：HfO₂(20nm)/パリレン(6nm)の積層膜をゲートに用いてモットトランジスタの作製に成功したが、スイッチング速度が異常に遅かった。しかし「遅い素子」は脳型回路研究で重要であることを知り、SrTiO₃ (STO)のFETで人工ニューロンとシナプスの作製を試みたところ、脳型回路研究に新分野を切り開く新概念素子が作製できた。低温でSTOの誘電率は急増するが強誘電転移は起きない。STO FETには低温で2種類のキャリアが現れ、ホール効果の異常と近藤効果が同時出現する。酸素同位体置換でSTOは強誘電体になるが、金属状態だと転移せず超伝導転移温度が上昇する。強誘電と物性の関係をさらに研究中である。

研究成果の概要(英文)：Mott transistors with the HfO₂(20nm)/Parylene-C(6nm) double-layer gate insulator were made, but the switching speed was too slow (<0.5Hz) to replace the present field effect transistors (FET). However, the slow switching device would be what has been highly expected for the neuromorphic electronics. Indeed, we have successfully developed artificial synapses and neurons using our FET with a single-crystalline SrTiO₃ (STO) channel. We have opened a path to novel neuromorphic electronics with the insulator to 2D metal transition. Our STO FET shows both the nonlinear Hall effect and the Kondo effect below 50K. The appearance of two types of carriers at lower temperatures is crucial for the phenomena, and the two-carrier appearance would be related to the drastic enhancement of the dielectric constant of STO at low temperatures. We also found the superconductivity of STO is enhanced by the oxygen isotope exchange, which makes STO ferroelectric if it is insulating. Need further investigation.

研究分野：物性物理学

キーワード：チタン酸ストロンチウム 電界効果トランジスタ ホール効果 近藤効果 強誘電 超伝導 人工ニューロン 人工シナプス

1. 研究開始当初の背景

(1) ムーアの法則に従えば2021年には集積回路内の電界効果トランジスタ(FET)の数(≒150億)が人間の脳のニューロン数を凌駕することになると言われていました。しかし実際のところは微細化と集積化はもう限界に達しています。現在のFETのチャンネル(反転層)はドーパントによる空乏層(バンドの曲がり)が起源なのに、易動度とのトレードオフでドーパント数(FET 1個あたり2021年には約10個)はもう増やせず、通常のチャンネルは形成できないのです。ゆえに国際半導体技術ロードマップは、従来の素子と異なる設計思想の強相関エレクトロニクス、スピントロニクス、光コンピュータ技術等が限界後の鍵になると予想していますが、迫り来る微細化の壁を前にした現状では、「従来の素子設計ルールのまま微細化しても動作」する、つまり「現在のp型n型チャンネルを他の物質に置き換えるだけでそのまま微細化しても動作」するFETの開発こそが急務となっています。

(2) ここで強く要請されるのは「ドーパント数に依存しないFET」であることです。強い電子相関が引き起こす金属絶縁体転移(モット転移)の利用はその最有力候補だと考えられています。しかしモット絶縁体はキャリアが各原子サイトに局在してイオン結晶のように振る舞うため元素欠損が起こりやすい物質です。電場によってモット転移を制御する以前に、電場による元素欠損の増減によってチャンネルの動作が決まってしまうようでは、再現性の良いFET動作は望めません。したがって、モット絶縁体をFETに用いるには大きなブレークスルーが必要だとされてきました。

2. 研究の目的

(1) 研究代表者の井上は平成24~26年度の科研費基盤研究(A)で、FETのゲート絶縁膜と酸化物チャンネルとの間にジクロロジパラキシリレン(®パリレンC、以下単にパリレン)の層を挟む方法を提案しました。その結果、酸化物チャンネル表面の元素欠損が実際にパリレンで抑制されることがわかり、高易動度の電子が高濃度に誘起されることを実証できました。そこでこの方法をモット絶縁体に適用し「モットFET」の開発を進めることを本研究の目的に決めました。

(2) このパリレンを用いた「二層絶縁膜」という方法は「電界で電子相を制御する」という物性物理のテーマに「乱れを伴わない理想的な実験手法」をもたらしました。研究代表者らはすでにイオン液体の作る電気二重層を用いた電界効果[引用文献①-③]や強誘電体の分極を用いた電界効果[引用文献④]で物性を制御する研究にも取り組んできましたが、これらの方法では連続的な電場変調

ができず(前者はイオン液体が固化しない高温領域でのみ可能)、界面の電気化学変化や元素混成の影響もあり量子臨界現象の探求には適していませんでした。しかし、SrTiO₃上にパリレンのみのゲート絶縁体でFETを作製すると、2次元絶縁体金属転移[引用文献⑤]と超伝導[引用文献⑥]が観測できることを確認しており、上記の二層絶縁膜を用いたFETの動作検証にも成功していました[引用文献⑦]。さらに、この「二層絶縁膜」という電界による真の物性制御の手段を獲得したことで、従来の物理では理解困難な新現象が見つかり始めました。対象はモット絶縁体に限りません。例えば、電界誘起したSrTiO₃の金属相はキャリア濃度が低いところでは空間的に不均一に分布しフィラメントを形成することが明らかになりました。半導体中における“spatiotemporal”なフィラメント形成は良く知られていますが、極低温での量子現象との関係はわかっていません。またモット絶縁体中にフィラメントが生じると、多階調に抵抗値が変化し、電圧印加の履歴により神経回路のシナプスに似た性質を示す[引用文献⑧]こともわかってきました。

(3) これらの現象を十分に理解することが新原理FET創出の強力な駆動力となることは間違いありません。そこで本研究では単に「モットFET」の開発を進めるのではなく、基礎研究と応用研究の研究者が強いコラボレーションを築き、両者の最前線の課題に挑戦するのだということをもう一つの目的に掲げました。

3. 研究の方法

(1) 本研究ではゲート絶縁膜として、6 nm程度のパリレンと20 nm程度のHfO₂の二層構造を用いたFET[産業財産権②]を作製します(図1)。

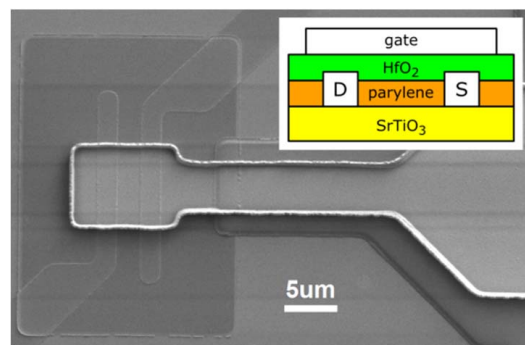


図1. 作製したFET素子の走査電子顕微鏡(SEM)像。チャンネル長は2 μmである。ホール効果の測定などにはこの写真とは異なるFET素子(20 μmのチャンネル長に電圧を測るプローブを6本挿入)を使用した。チャンネル周囲の色が濃い領域にHfO₂の層があり、HfO₂層の外側では、ゲート電極の下にSiO₂の層を挿入してある。これはワイヤーボンディングの際に基板に与えるダメージを小さくするためである。挿入図は、断面の模式図である。上部からゲート電極(白)、20 nm厚のHfO₂(緑)、6 nmのパリレン(橙)、ソース・ドレイン電極(白)、そしてこの図ではSrTiO₃単結晶基板(黄)である。

(2) 本研究では当初、チャンネルにNdNiO₃やSmCoO₃などのモット転移を引き起こす物質

を使ってFETを作製しました。イオン液体を使った時と同様に電場によるモット転移が起きることはわかったものの、残念なことに、通常の半導体トランジスタに比べてスイッチングの速度が極端に遅いということも判明しました。レーザーなどを用いて絶縁体金属相転移を引き起こすと、局所的な電子相転移が高速に起こるという例は数多く報告されているのですが、電場を用いてデバイスでこれを引き起こす場合、酸化物が顕著に見られる大きな誘電率の影響が避けられません。構造相転移や格子との相互作用なども大きく影響します。これはモット転移に限らずSrTiO₃の絶縁体金属相転移でも同じように見られます。図2はSrTiO₃をチャンネルに用いたFETのドレイン電流 I_D の位相のずれをゲート電圧 V_{GS} の切り替え周波数に関してプロットしたのですが、周波数がただか0.4 Hz程度で、 I_D の変化が V_{GS} の変化に追従できなくなっているのがよくわかります。

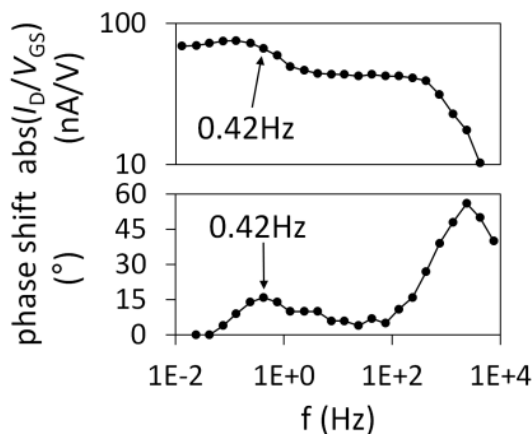


図2. 二層絶縁膜を用いて作製したSrTiO₃ FETのドレイン電流 I_D が、ゲート電圧 V_{GS} の周波数 f にどこまで追従できるかをプロットしたもの。0.42 Hzで、すでに位相差が15°も生じている。SrTiO₃の絶縁体-二次元金属相転移をデバイスに応用しようとしても、このようにスイッチング速度が非常に遅いので、通常の半導体デバイスを置き換える形では使用できないことがわかった。

(3) ところが、後述のように、このSrTiO₃の絶縁体金属転移を用いたFETは従来の半導体のトランジスタでは実現できない様々なユニークな性質を示します。それらは神経の機能を模倣した「ニューロモルフィック素子」として非常に優秀な性質であることもわかりました。さらに「スイッチング速度が遅い」ということも、逆説的ですが、従来の半導体トランジスタでは実現できない、まさに特筆すべき特徴であることも判明しました。したがって我々は、「モットトランジスタを含む酸化物FETの応用に最も適した分野はニューロモルフィックだ」と判断し、SrTiO₃の絶縁体金属転移を用いたFETを用いて、その可能性を切り開くことに研究方針を変更しました。

(4) SrTiO₃は遷移金属酸化物ですが、もともとキャリアとなる電子や正孔をもっていないバンド絶縁体、いわゆる真性半導体です。

SrTiO₃は遷移金属酸化物としては例外的に純良で大きな単結晶が作製できて、原子レベルで平坦な表面を持つ単結晶基板が市販されています。低温でSiO₂の数万倍にもなる非常に巨大な誘電率を示しますが強誘電体転移は起こさず、そこに0.01%ほどのわずかな電子ドーピングをした時にのみ超伝導を示します。大きなスピン軌道相互作用を持ち、他の物質との接合による界面では空間対称性の破れでスピン軌道相互作用がさらに増大し(ラシュバ効果)、異常な物性を示します。つまりSrTiO₃はモット絶縁体ではないものの、十分に興味深い物性物理の基礎研究の対象なのですが、我々はそこにさらにニューロモルフィック素子としての新しい可能性を付け加えます。

(5) 本研究ではまず、ミクロンスケールのFET素子をフォトリソグラフィーで作製するプロセスを確立しました。次に、パリレンの膜厚をnmオーダーに制御する方法を開発しました。さらに本研究のデバイスだけに特化した問題ではありますが、重要なこととして、適切なフォトレジストを選択して下部電極にバリが立たないようにする必要がありました。パリレンのエッチングの方法も開発する必要がありました。パリレン上に積層させるhigh- k 酸化物薄膜の選択とその積層方法も開発しました。さらにニューロモルフィック素子としての研究のために素子や電極パッドの形状、ビアホールの形成方法などについても検討を重ね、フォトリソグラフィー用のマスクの改良を続けました。これらは全て国際特許として出願しています [産業財産権②]。

(6) 本研究では、さらに、作製したSrTiO₃ FETの特性を室温から4 Kまでで評価し、ゲート制御によって絶縁体から2次元金属への連続的な相転移がゲート電場制御によって生じることを確認します。低温域での物性についても検証します。さらに誘電率と超伝導の関係性を調べるために酸素同位体¹⁸Oで置換したSrTi¹⁸O₃の単結晶にLaをドーピングしてキャリアを注入し、希釈冷凍機を用いて超伝導転移温度を探索します。また、SrTiO₃ FETについて、ニューロモルフィック素子としての動作を検証します。

4. 研究成果

(1) SrTiO₃ FETのチャンネルの面抵抗を温度の関数としてプロットすると図3に示すようになります。ゲート電圧が小さいときは面抵抗が非常に大きな絶縁体ですが、 $V_{GS} \gtrsim 3.5$ Vになると、金属的な挙動を示します。このときの面抵抗の値は量子抵抗(Mott-Ioffe-Regel limit)の値にほぼ等しくなります($R_{\square} \cong h/e^2$)。これは絶縁体だったチャンネルが、ゲート電場の印加によって、室温付近で二次元金属に相転移したことを示すもので

す [主な発表論文の②]。High electron mobility transistor (HEMT)のようにチャンネルの内部構造を作り込んだり、もともと2次元の層状物質を使ったわけではないのに、室温付近でこのような二次元金属の挙動が見られるFETデバイスというのは例がありません。しかも絶縁体から二次元金属への相転移(抵抗値が室温で6桁以上変化する)をゲート電場のみで連続的に制御できるというのは非常に大きなアドバンテージです。

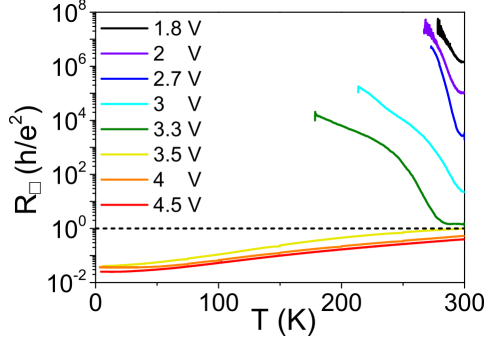


図3. SrTiO₃ FETのチャンネルの面抵抗 R_{\square} の温度依存性。 $V_{GS}=3.5\text{ V}$ で $R_{\square}\cong h/e^2$ となるが、ここを境に電気抵抗の温度依存性が絶縁体から金属のものに変化する。二次元金属は量子抵抗 h/e^2 が最大抵抗値になる(Mott-Ioffe-Regel limit)ということ考えると、SrTiO₃ FETのチャンネルは室温付近で二次元金属になっていると考えられる。

(2) このゲート絶縁体とSrTiO₃の界面に現れる二次元金属相ですが、温度を下げると $R_{\square}\ll h/e^2$ となるので、低温域では三次元金属へと徐々に変化していくのだと考えられます。つまり室温付近では界面付近のみにキャリアが閉じ込められているのですが、低温になるほどSrTiO₃のバルクへとキャリアの分布が広がっていくのです。その様子を、ホール抵抗 R_{xy} の磁場 B に対する振る舞い(図4)から窺い知ることができます。通常 R_{xy} は B の1次関数になり、その係数がホール係数になりますが、SrTiO₃ FETの場合は、低温になるほど R_{xy} が B の非線形な関数になっていきます($\pm 3\text{ T}$ あたりに折れ曲りが見られるのがわかります)。強磁性転移して内部磁場が発生すると実効的な B の値が変化するので、同様な折れ曲りが出現しますが、SrTiO₃ FETの場合は B に関するヒステリシスが見られません。磁気抵抗にも、強磁性転移して内部磁場が発生しているような変化は見られ

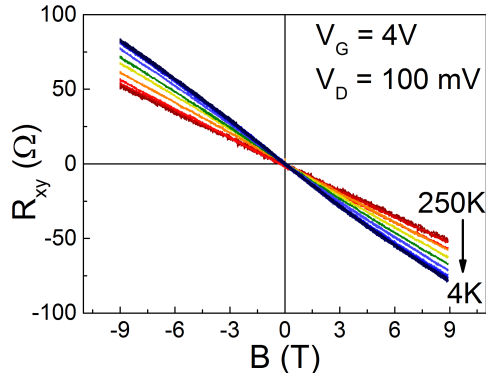


図4. SrTiO₃ FETのチャンネルのホール抵抗 R_{xy} の磁場依存性。温度を下げると $R_{xy}=R_H B$ (R_H はホール係数)の線形関係が崩れ、 $\pm 3\text{ T}$ あたりに折れ曲りが出現する。

ません。したがってSrTiO₃ FETでは低温域でキャリアが2種類に増加していると考えるのが妥当なようです。

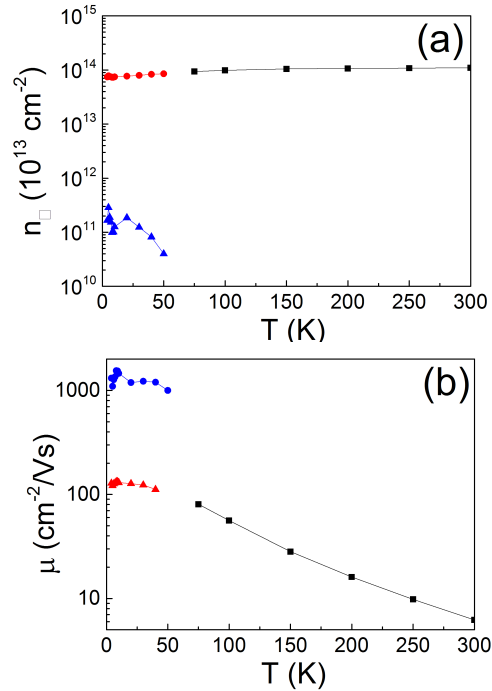


図5. 図4のデータを2キャリアモデルで解析した結果。同じ2キャリアモデルを用いて磁気抵抗のデータも解析しており、ここに示すパラメータで両方を矛盾なく説明できた。(a) キャリア面密度 n_{\square} の温度変化。(b) キャリア移動度 μ の温度変化。50 K以下で、 n_{\square} が3桁以上少ないものの μ が1桁大きいキャリア(図中の青い点)が出現している。

(3) そこで、キャリア移動度 μ とキャリア面密度 n_{\square} が異なる2つのキャリアが存在するというモデルを用いてホール抵抗のデータを解析したところ、実験データは非常によく再現できて、図5に示す結果が得られました。50 K以下でデータに折れ曲りが出現するのに伴って、 n_{\square} は3桁以上少ないものの、 μ が1桁大きいキャリア(図5中の青い点)が出現しているのがわかります。これは室温ではTiの $3d_{xy}$ バンドのみにかかっていたフェルミエネルギーが、低温でSrTiO₃の誘電率 ϵ が急激に増大するために $3d_{yz}$ 、 $3d_{zx}$ バンドがフェルミエネルギーよりも下がってしまう、つまりフェルミ面のトポロジカルな変化によるLifshitz転移が原因だと考えることができます(引用文献⑨)。この場合、低濃度で高移動度のキャリアは「よりバルク方面に分布する $3d_{yz}$ 、 $3d_{zx}$ バンドのキャリア」です。界面付近はゲート絶縁体のパレンが存在しますし、ゲート電場が掛かっているので散乱が大きく移動度はバルクより小さくなる考えられるので、解析結果も良く説明できます。ただし金属化したチャンネルの場合、キャリアの面密度は $\sim 10^{14}\text{ cm}^{-2}$ もあり、すでにLifshitz転移は起きてしまっていると考えた方が良いでしょう。もう一つの解釈としては、低温になると ϵ が急激に増大するので「3つのTi $3d$ バンドのサブバンド」のエネルギーが下がってきてキャリアが入ってくるという案です(引用文献⑩)。サブバ

ンドはよりバルク中に分布するので2キャリアのような状態になる(引用文献⑩)と考えることもできます。このシナリオならばLifshitz転移は必要ありません。どちらの案が正しいか、今後、磁気抵抗の角度依存性などを測定することで、さらに理解を深める必要があります。

(4) また、2キャリアになる温度域で近藤効果が出現することもわかりました。これが磁性不純物によるものであれば、キャリア濃度が増えると近藤温度は下がるはずですが、この系では逆に上昇していきます。この近藤効果と2キャリアとの関係もまだ不明のままです。今後の研究で解明していかねばなりません。

(5) 上記のようにSrTiO₃の大きな誘電率変化は興味深い研究対象です。そこで酸素同位体¹⁸Oで置換したSrTi(¹⁶O_{1-z}¹⁸O_z)₃ (z > 0.3)で見られる強誘電転移が、キャリアドーブしたSrTiO₃のバルクで見られる超伝導とどのように関連しているかを調べるために、Sr_{1-x}La_xTi(¹⁶O_{1-z}¹⁸O_z)₃の単結晶を製作し、希釈冷凍機を用いて超伝導転移温度の変化を探索しました(図6)。超伝導転移温度が同位体置換によって上昇しており、これは通常の超伝導の同位体効果とは正反対です。同位体置換で強誘電転移を示すはずがLaドーブで金属化したために強誘電転移できなくなり、そのせいで超伝導転移温度が低濃度域では(数%とかいうレベルではなく)3倍以上も上昇するというのは驚きの結果でした。現在も詳細な測定を続けていて、論文投稿を準備中です。

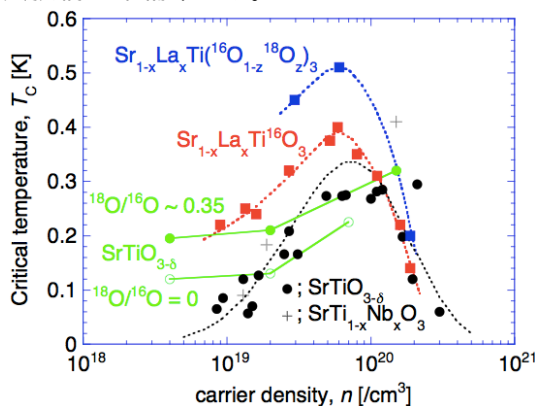


図6. 超伝導転移温度(T_C)とキャリア濃度(n)の関係。SrTiO_{3-δ}(黒丸)およびSrTi_{1-x}Nb_xO₃(+) [C. S. Koonce *et al.*, Phys. Rev. 163, 380 (1967)]と、SrTiO_{3-δ}(¹⁸O/¹⁶O=0が白丸、0.35が緑の丸) [A. Stucky *et al.*, Sci. Rep. 6, 37582 (2016)]は文献データを引用した。本研究の結果はSr_{1-x}La_xTi(¹⁶O_{1-z}¹⁸O_z)₃ (z=0が赤丸、z~0.6が青の四角)である。酸素同位体置換による T_C の大きな増大が見られる。

(6) SrTiO₃ FETに限らず、我々は当初の目的である絶縁体-金属相転移を電場制御するデバイスを目指しましたが、どれもスイッチング速度が非常に遅く(1Hz以下)、さらに金属相が不均質(フィラメント形成)に生じるため「電流電圧特性に履歴」が伴います。期待外れの結果かと思いましたが、さらに研

究を進めるうちに面白い特性に気づきました。履歴に伴う残留抵抗がパルス電圧印加で連続的に制御されるのです。さらに時定数を持つ(volatile)ためパルス間隔によっても制御できます。前者はシナプス、後者はニューロンに似た性質であり、同じSrTiO₃ FETが人工シナプスにも人工ニューロンにもなりました(図7)。「生体を対象にして動作する脳型電子回路」では時定数が大きいということが非常に重要になります。SrTiO₃ FETは絶縁体-二次元金属相転移を用いた全く新概念の脳型素子ですが、脳型電子回路の研究に非常に大きな役割を果たすことがわかってきました。本研究の延長として我々はすでにその研究を開始したところです。

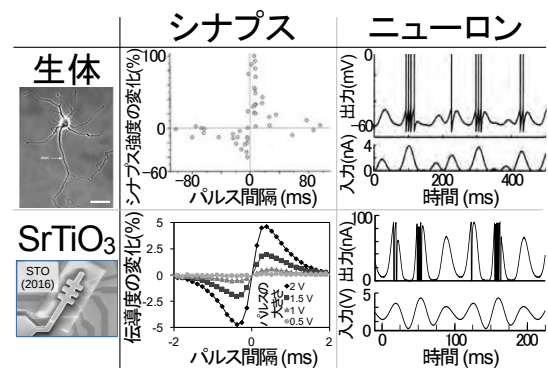


図7. ネズミの海馬のシナプスとニューロンの特性 [G. -Q. Bi and M. -M. Poo, J. Neurosci. 18, 10464 (1998).]を、我々がSrTiO₃ FETを用いて製作した人工シナプスと人工ニューロンの特性と比較した図。シナプスの特性はパルス間隔に対してシナプス強度が変化するSTDTPと呼ばれるもので、ニューロンの特性は入力値によってニューロンが発火するLIFと呼ばれるものである。どちらも本物によく似ている。

< 引用文献 >

- ① P. -H. Xiang, H. Yamada (3番目), I. H. Inoue (5番目, 他6名), Advanced Materials, Vol.25, 2013, pp.2158-2161
- ② M. Nakano, K. Shibuya (他5名), Nature, Vol.487, 2012, pp.459-462
- ③ S. Asanuma, H. Yamada (3番目), I. H. Inoue (5番目, 他9名), Applied Physics Letters, Vol.97, 2010, pp.142110/1-3
- ④ H. Yamada, M. Marinova (他11名), Scientific Reports, Vol.3, 2013, pp.2834/1-6
- ⑤ H. Nakamura, I. H. Inoue (3番目, 他4名), Applied Physics Letters, Vol.89, 2006, pp.133504/1-3
- ⑥ H. Nakamura, I. H. Inoue (5番目, 他6名), Journal of Physical Society of Japan, Vol.78, 2009, pp.083713/1-4
- ⑦ A. B. Eyvazov, I. H. Inoue, P. Stoliar (他3名), Scientific Reports, Vol.3, 2013, pp.1721/1-5
- ⑧ P. Stoliar, M. Rozenberg (他4名), Physical Review B, Vol.90, 2014, pp.045146/1-6
- ⑨ A. Joshua, S. Pecker (他3名), Nature Communications, Vol.3, 2012, pp.1129/1-7
- ⑩ A. Raslan, P. Lafleur, W. A. Atkinson, Physical Review B, Vol.95, 2017, pp.054106/1-14

- ⑪ Z. Chen, H. Yuan (他6名)、Nano Letters、Vol.16、2016、pp.6130-6136

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計18件)

- ① P. Stoliar, A. Schulman, A. Kitoh, A. Sawa, I. H. Inoue, STDP synapse with outstanding stability based on a novel insulator-to-metal transition FET、Proc. 2017 IEEE International Electron Devices Meeting、査読有、2017、pp.36.4.1-36.4.4 doi: 10.1109/IEDM.2017.8268506
- ② A. Schulman, A. Kitoh, P. Stoliar, I. H. Inoue, Sign-changing non-monotonic voltage gain of HfO₂/Parylene-C/SrTiO₃ field-effect transistor due to percolative insulator to two-dimensional metal transition、Applied Physics Letters、査読有、Vol.110、2017、pp.13502/1-4 doi: 10.1063/1.4973739
- ③ C. C. Sow, S. Yonezawa, S. Kitamura, T. Oka, 他、Current-induced strong diamagnetism in the Mott insulator Ca₂RuO₄、Science、Vol.358、2017、pp.1084-1087 doi: 10.1126/science.aah4297
- ④ N. Kumar, A. Kitoh, I. H. Inoue, Anomalous Enhancement of the Sheet Carrier Density Beyond the Classic Limit on a SrTiO₃ Surface、Scientific Report、査読有、Vol.6、2016、pp.25789/1-7 doi: 10.1038/srep25789
- ⑤ H. Yamada, A. Tsurumaki-Fukuchi, M. Kobayashi, 他、Strong Surface-termination Effect on Electroresistance in Ferroelectric Tunnel Junctions、Advanced Functional Materials、査読有、Vol.25、2015、pp.2708-2714 doi: 10.1002/adfm.201500371

〔学会発表〕(計31件)

- ① P. Stoliar, A. Schulman, A. Kitoh, I. H. Inoue, Implementation of both synapse and neuron on a field-induced insulator-to-2d metal transition device with SrTiO₃ channel、International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA2017) (招待講演)、2017
- ② P. Stoliar, A. Schulman, A. Kitoh, M. Rozenberg, I. H. Inoue, Multichannel Conduction and Kondo Effect in Solid-Gated SrTiO₃、IUMRS ICAM 2017(招待講演)、2017
- ③ A. Schulman, P. Stoliar, A. Kitoh, A. Sawa, I. H. Inoue, STDP synapse with outstanding stability based on a novel insulator-to-metal transition FET、IEEE

International Electron Devices Meeting (IEDM2017)、2017

〔産業財産権〕

出願状況(計2件)

- ① 名称: Variable gain amplifier
発明者: Isao Inoue, Pablo Stoliar, Alejandro Schulman
権利者: National Institute of Advanced Industrial Science and Technology
種類: 特許
番号: PCT/JP2016/004120
出願年月日: 2016年09月09日
国内外の別: 国外
- ② 名称: 電界効果トランジスタおよびその製造方法
発明者: 井上 公
権利者: 国立研究開発法人産業技術総合研究所
種類: 特許
番号: PCT/JP2017/001543
出願年月日: 2016年01月27日
国内外の別: 国外

〔その他〕

ホームページ

<https://staff.aist.go.jp/i.inoue/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

井上 公 (INOUE, Isao)

産業技術総合研究所・エレクトロニクス・製造領域・主任研究員
研究者番号: 0036502

(2)研究分担者

押川 正毅 (OSHIKAWA, Masaki)

東京大学・物性研究所・教授

研究者番号: 50262043

富岡 泰秀 (TOMIOKA, Yasuhide)

産業技術総合研究所・エレクトロニクス・製造領域・上級主任研究員

研究者番号: 60357572

山田 浩之 (YAMADA, Hiroyuki)

産業技術総合研究所・エレクトロニクス・製造領域・主任研究員

研究者番号: 00415762

渋谷 圭介 (SHIBUYA, Keisuke)

産業技術総合研究所・エレクトロニクス・製造領域・主任研究員

研究者番号: 00564949

白川 直樹 (SHIRAKAWA, Naoki)

産業技術総合研究所・エレクトロニクス・製造領域・総括研究主幹

研究者番号: 60357241

(3)研究協力者

SCHULMAN, Alejandro、鬼頭 愛 (KITO, Ai)、STOLIAR, Pablo、ROZENBERG, Marcelo、YE, Justin、岡 隆史 (OKA, Takashi)、SHARONI, Amos