



丸文学術賞 受賞者

矢嶋 起彬

九州大学 大学院システム情報科学研究院 准教授

LSI高度化に向けた酸化物における積層膜の 界面電荷制御とプロトン伝導の応用開拓 -新材料と神経回路アーキテクチャによる超省エネ情報処理-

研究の背景

昨今、増え続けるデータ量に対して情報処理の消費電力が急増しており、エッジからクラウドのあらゆる階層で電子回路の低消費電力化が喫緊の課題となっている。そこでシリコン技術に代わる新原理コンピューティングが模索されているが、現実的にシリコンの技術力や汎用性を置き換えるのは難しいと言わざるを得ない。むしろ次世代の省エネ技術として真に求められているのは、シリコン技術を基礎としつつも従来の延長線上にはないブレークスルーの技術で情報処理の裾野を広げて行くことであろう。そのような考えのもと、本研究では、シリコン技術に機能性酸化物という新材料と神経回路の斬新なアーキテクチャを導入することで、従来とは全く異なる方向から超省エネ情報

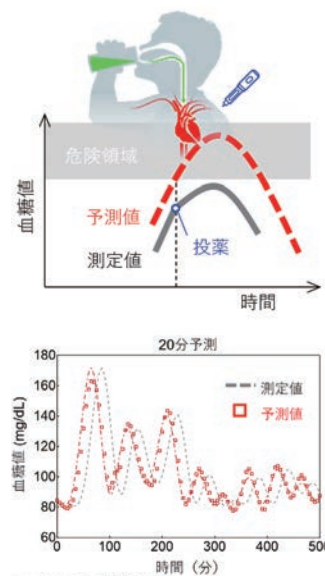
処理技術を構築した(図1)。

研究の成果

まず、機能性酸化物のポテンシャルを最大限引き出すため、情報処理デバイスの基盤となる「界面技術」の開発を行った。シリコンデバイスの特性は界面の電子エネルギーによって決まるが、酸化物デバイスでは酸化物界面に固有の「イオン電荷」を活用することで電子エネルギー(バンドオフセット)を自在に変調でき、図2のようにデバイスの電気特性を制御できることを明らかにした^[1]。さらにこの技術を利用して、シリコンではよく知られている縦型トランジスタを初めて酸化物で作製し、デバイス動作で重要となる非平衡電子の新しい評価手法を確立した^[2]。

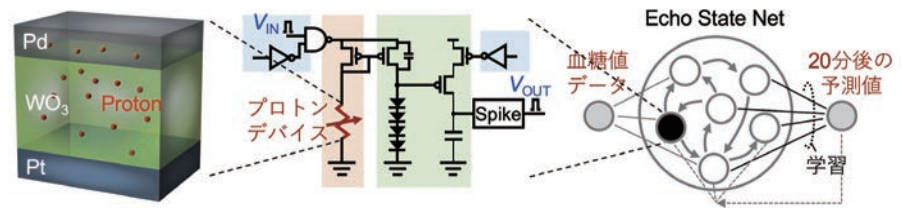
次に、こうした酸化物の知見を基に、情報処理の根幹であるトランジスタの研究に取り組み、図3のような酸化物相転移を用いた電界効果トランジスタの動作実証に初めて成功した^[3]。相転移現象の利用はトランジスタの低電圧化の一手法として1990年代から世界中で試みられ、技術的な難しさが指摘されてきたが、本研究では急峻な酸化バナジウムの相転移と、高誘電率な酸化チタン絶縁膜との、相性の良さに着目する事で、図1左下のような0.1V級のスイッチング動作に成功した^[4,5]。さらにその延長で酸化物相転移を用いた種々のアナログ回路技術を提案し^[6-8]、電子回路が普遍的に持つ電力と遅延とのトレードオフを、材料特性によって回避できることを初めて明らかにした。

図4 血糖値データの学習とリアルタイム予測^[10]



最後に、デバイス機能を情報処理につなげるため超省エネ電子回路の研究に取り組み、特に神経回路の優れた情報処理方法を参考にした電子制御技術を開発した(図1右下)^[9]。そして、この技術を応用することで、従来は最低でも数Wの電力を要した学習機能を、sub- μ Wにまで劇的に省エネ化できることを示し、実際に図4のように血糖値データの学習と異常検知を行った^[10]。ここでのポイントは、生物の神経回路が、電子回路とは全く異なり、身の回りの時系列データをアナログデータのままストリーミング処理して効率よく学習して

図5 プロトン素子を用いたアナログ回路と、それを基に構築した学習回路^[10]



いるという点である。神経回路はイオンや分子に情報を載せることで様々な時間スケールでストリーミング処理を実現しており、電子デバイスだけでは速すぎてこれを模倣することは難しかったが、本研究では図5のように酸化物中のプロトン(水素イオン)に情報を載せたデバイスを活用することでこの問題を解決した。

将来の展望

酸化物相転移の低電圧動作や、低電力と速度の両立、そして酸化物のイオン自由度は、全てシリコンには本質的に存在しない特長であり、シリコン技術を補完するように適材適所に活用することができる。例えば、相転移材料の非線形応答を活用すればほぼゼロ電力かつ高速なイベント駆動型センサを実現できる可能性があるし、それを2次元状に敷き詰めれば高密度かつ高性能な電子皮膚へとつながっていく。また神経回路は、デバイス-回路-アーキテクチャの全ての階層で独自に最適化された情報処

理システムであり、そこからシリコンとは相補的な新技術がもたらされる。実際に神経回路が膨大なスパイク信号の時空間情報を短期記憶によってストリーミング処理する手法は、今後のIoT社会において情報ネットワークに垂れ流される余剰データを激減する可能性を秘めている。シリコンを情報処理分野の幹とすれば、機能性酸化物や神経回路アーキテクチャはそこから広大に広がる枝葉である。それらはシリコン技術と共進化しながら、今後の情報化社会を学術・産業の両面から支える新たな基盤となることが期待される。

謝辞

本研究は多くの方々のご支援・ご協力のもとに行われました。指導教員及び上司として長年お世話になったStanford大学(当時東京大学)のHarold Hwang教授と東京大学名誉教授の鳥海明先生をはじめ、国内外の共同研究者の先生方・企業の皆様にこの場をお借りして心より感謝申し上げます。

図1 研究の全体像

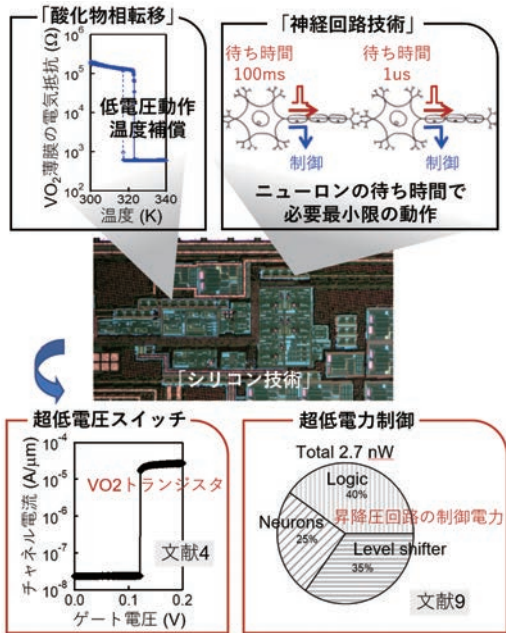


図2 SrRuO₃(金属)/Nb:SrTiO₃(半導体)接合の
(a)イオン配列制御と、(b)電気特性変化^[1]

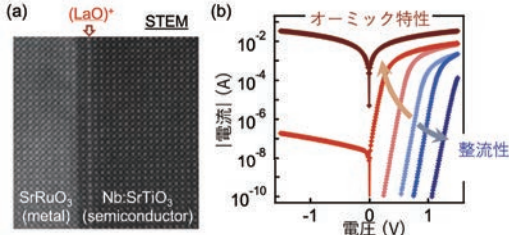
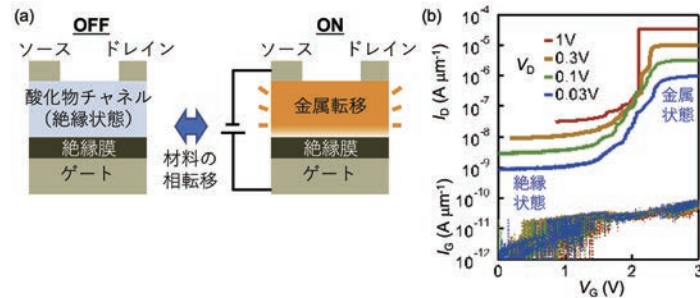


図3 (a) モットトランジスタのON/OFFスイッチングの模式図
(b) 実際に作製したVO₂モットトランジスタの伝達特性^[4]



References(参考文献)

- [1] Takeaki Yajima, Yasuyuki Hikita, Makoto Minohara, Christopher Bell, Julia A. Mundy, Lena F. Kourkoutis, David A. Muller, Hiroshi Kumigashira, Masaharu Oshima, Harold Y. Hwang, Nature Commun. 6, 6759, (2015).
- [2] Takeaki Yajima, Yasuyuki Hikita, Harold Y. Hwang, Nature Mater. 10, 198-201 (2011).
- [3] Takeaki Yajima, Tomonori Nishimura, Akira Toriumi, Nature Commun. 6, 10104 (2015).
- [4] Takeaki Yajima, Akira Toriumi, Adv. Electron. Mater. 8, 2100842 (2021).
- [5] Takeaki Yajima, Yusuke Samata, Satoshi Hamasuna, Satya Prakash Pati, Akira Toriumi, NPG Asia Materials 15, 39 (2023).
- [6] Takeaki Yajima, Tomonori Nishimura, Akira Toriumi, International Electron Devices Meeting (IEDM) Technical Digest 2016, 858-861 (2016).
- [7] Takeaki Yajima, Tomonori Nishimura, and Akira Toriumi, IEEE Symposium on VLSI Technology and Circuits (VLSI Technology) 2018, 27-28 (2018).
- [8] Takeaki Yajima, Takahisa Tanaka, Yusuke Samata, Ken Uchida, Akira Toriumi, International Electron Devices Meeting (IEDM) Technical Digest 2019, 903-906 (2019).
- [9] Takeaki Yajima, Sci. Rep. 12, 1150 (2022).
- [10] Satya Prakash Pati, Yifan Geng, Satoshi Hamasuna, Kantaro Fujiwara, Tetsuya Iizuka, Hisashi Inoue, Isao Inoue, Takeaki Yajima, Commun. Mater. 5, 177 (2024).