

## 生体の神経系と共生する電子デバイスと集積回路方式

### Electronic Devices and Integrated Circuit Architecture towards Symbiosis with Biological Nerve Systems

○ 森江 隆 (九工大・生命体工)

○ Takashi Morie (Kyushu Inst. Tech.)

E-mail: morie@brain.kyutech.ac.jp

本講演では、生体神経系と適合し、脳での情報処理を補完または拡張するようなデバイス・回路を開発するための課題や設計指針について議論したい。

生体の神経細胞や神経回路を電子回路で忠実に模倣しようとする試みは古くからあり、ニューロモルフィック・ハードウェアとして現在も活発に研究が行われている [1]。しかし、神経細胞の複雑な非線形特性を忠実に模倣しようすると回路の構成要素が膨大になり、大規模なネットワークを構成することができない。現在でも神経細胞のどの機能が脳の情報処理に本質的に関与しているかが完全に分かっていないので、どこまで忠実に模倣するかは各研究者に依存しており、積分発火型の簡単なモデルから、高度な非線形特性を有するモデルまで、さまざまな回路実装が試みられてきている。

脳・神経系は基本的にはスパイクパルスで情報をやりとりしているので、スパイクで入出力するデバイスを用いることが自然である。すなわち、スパイクニューロンモデルに基づく回路方式が適している。電源供給（電池）の観点から、デバイスは超低消費電力であることが望ましい。

近年、従来のフォンノイマン方式のクロック同期型デジタルプロセッサとは異なるアーキテクチャに基づくニューロモルフィック・デジタル集積回路が開発されている [2]。このチップでは、スパイク信号が入力されると処理が進行するデータ駆動方式で低消費電力化を実現している。シナプス荷重は1ビットだが、いくつかの結合パターンを扱えるように工夫しており、生体の神経細胞の様々な発火パターン（バースト発火など）を再現できるように設計されている。

一方で、さらに高集積・低消費電力化を狙うには、新デバイスを用いたアナログ回路方式が望ましいと考えられる。生体の神経系は100Hz オーダでスパイク信号をやりとりするが、集積回路ではこのような低速で動作させる方がむしろ難しい。MOS トランジスタのゲート容量や配線容量は大きくても pF のオーダなので、1ms 以上の時定数を得るには、GΩ オーダ以上の高抵抗が必要になる。これは MOS トランジスタのサブスレッショルド領域を利用すれば可能だが、しきい値ばらつきの影響を受けやすいという問題がある。そこで、超低電力デバイスを実現するには、電流をできるだけ流さない高抵抗素子が必要である。これに関して、筆者らはトンネル電流を用いるナノディスクアレイ (NDA) と FinFET を用いた時間領域積和演算デバイスを開発している [3]。

制御されたノイズ（ゆらぎ）を含むことも生体神経系とのインターフェースには重要と考えられる。ナノデバイスは確率的トンネル現象により、ゆらぎをデバイス自体で自然に作り出せる利点がある。スパイクタイミングに情報を持たせる方式では、振幅との相対的な関係でゆらぎ量を制御することができる [4]。

学習・記憶機能を持たせるためにはアナログメモリ素子が必要である。近年、メモリスタとも称される抵抗変化型メモリ (ReRAM) 素子が注目され、研究が進められている。これに関して、近年の ReRAM 素子の応用例を紹介し、ばらつき低減などの課題を指摘する。

#### 参考文献

- [1] F. Grassia et al., *Frontiers in neuroscience* **5**, 134 (2011).
- [2] P. A. Merolla et al., *Science* **345**, 668 (2014).
- [3] T. Tohara et al., *Appl. Phys. Express* **9**, 034201 (2016).
- [4] T. Morie et al., *ASP-DAC 2014*, pp. 185–190.