

単電子回路を用いた反応拡散デバイスとその応用

Reaction-diffusion device consisting of single-electron circuits

大矢 剛嗣 高橋 良幸 浅井 哲也 雨宮 好仁
OYA Takahide TAKAHASHI Yoshiyuki ASAI Tetsuya AMEMIYA Yoshihito

北海道大学 工学部
Department of Electrical Engineering, Hokkaido University

1. はじめに

次世代の集積システムに向けて、反応拡散系の持つ機能的な性質を模擬した新しいデバイスを開拓したい。ここでは単電子回路で反応拡散デバイスを構成し、シミュレーションによってその動作を示す。さらに、応用分野の一つとして経路探索への適用についても述べる。

2. 反応拡散系

反応拡散系は化学反応と物質拡散が混在した非平衡-開放状態の化学系である。強い非線形性を持つために系全体として複雑な挙動を示す(図 1)[1]。反応拡散系は、図 1 のように「波動の伝搬」と「衝突による波動の消滅」の現象を発生する。この性質は機能的な情報処理に応用できる。

3. 単電子反応拡散デバイス

3.1 反応拡散ダイナミクスの電子デバイス化

反応拡散系は化学的な非線形振動子の集合体とみなすことができる(図 2)。各振動子は微小な空間領域内の化学反応に対応する。近接の振動子どうしは、物質拡散により相互に影響し合う。

反応拡散系を電子デバイスで実現するためには、非線形の振動子(化学反応)と振動子の相互作用(物

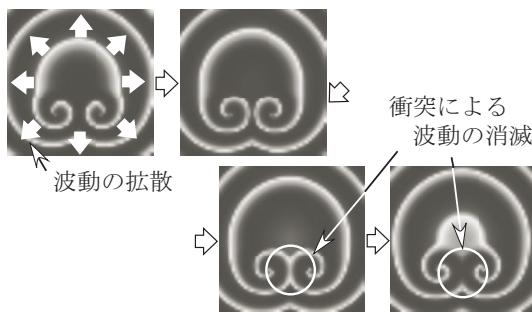


図 1 反応拡散系が示す非線形波動の現象

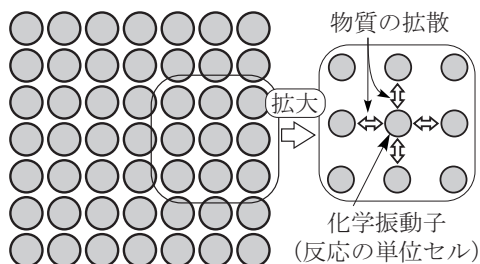


図 2 反応拡散系のモデル—化学振動子の集合体

質拡散)を電子回路で模擬すればよい。ここでは、高い集積度を実現するために量子ドットを用いた単電子デバイスの使用を考える。近年、一つの大きさが数 nm の量子ドットを多数集積する技術が確立されるようになった。この量子ドット一つ一つを単電子振動子として相互作用させるようなデバイスを構成することにより、反応拡散系の挙動を電子的に模擬することができる。

3.2 単電子振動子

反応拡散デバイスの単位要素となる単電子の非線形振動子を図 3(a)に示す。量子ドットと接地の間にトンネル接合を一つ設け、量子ドットとバイアス電圧 V_d の間には多数のトンネル接合を直列に連結する。この振動子はクーロンブロック効果が生じる低温下で図 3-右図のような非線形の振動を生じる。バイアス電圧の値によって、自励振動(図 3(b))と単安定振動(図 3(c))が実現できる。

3.3 振動子の結合

反応拡散系では隣接する非線形振動子が相互に作用している。ここでは単電子振動子の容量結合で相互作用を実現する。例として、単安定の単電子振動子を一次元に連結した系を図 4(a)に示す。このとき振動子のバイアス電圧は正負を交互に与える。これは、隣接した振動子の間で電位変化を伝搬させるためである。この一次元系的一端にト

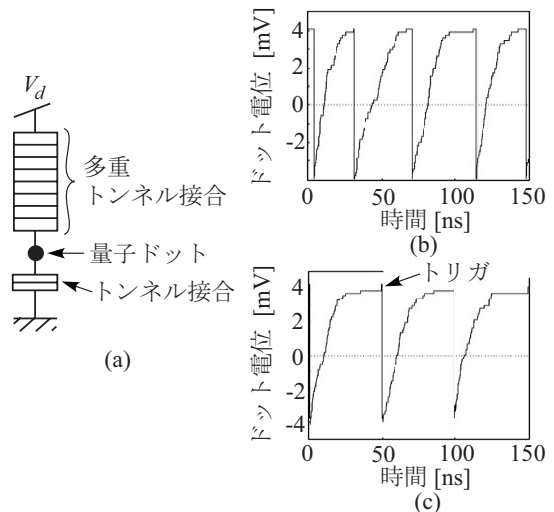


図 3 量子ドットの単電子振動子 : (a) 回路構成, (b) 自励振動(振動モード)— $V_d = 8.5$ mV, (c) 単安定振動(興奮モード)— $V_d = 7.8$ mV

リガを与えると、量子ドットの電位変化が波として伝搬していく(図4(b))。

3.4 反応拡散デバイスの構成

上記の単電子振動子を多数用意してマトリクス状に配置連結することで単電子反応拡散デバイスを構成する(図5)。いま系を興奮モード(各振動子が単安定状態)に設定し、外部から擾乱を加えると「波動の伝搬」と「衝突による波動の消滅」が観察できる。シミュレーション結果を図6に示す。ここでは、 $+V_d$ のバイアス電圧が加わっている振動子(200×200個)のドット電位をグレースケールで表現(高電位を白、低電位を黒として表現)している。

4. 反応拡散デバイスを用いた経路探索

経路探索とは、たとえば迷路などの道順を判断してゴールまで到達することである[2]。普通は総当り的に探索せざるを得ないので効率が悪い。近年、この経路探索に波動情報処理(波動の性質を用いた情報処理)を導入する方法が提案された[3]。これは「波動の伝搬」と「衝突による波動の消滅」を巧みに利用する。この方法によれば効率的に解を求められる可能性がある(図7)。そこで単電子の反応拡散デバイスにおける波動を利用して経路探索を行うことを考えた。

経路探索を実行するために、まず、与えられた迷路をデバイス上に模擬する。すなわち、デバイス上に迷路を描き、迷路の「壁」や「障害物」となる部分は、振動子に加えるバイアス電圧を電子トンネルが起こらない程度に低く設定する。「通路」となる部分は、振動子が興奮モードになるようなバイアス電圧を加える。次に、スタート地点にトリガを与えて波動を発生させる。そうすると、電位変化の波動が迷路を伝播してゴールまで到達する。このシミュレーション結果を図8に示す。

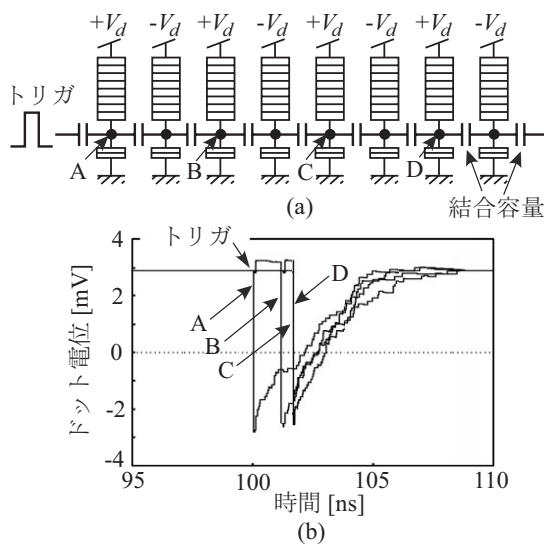


図4 単電子振動子の連結：(a) 回路構成，(b) 動作—電位変化が伝搬する

スタート地点からゴールまでの波動の流れを調べることにより、迷路の経路を知ることができる。

5. まとめ

単電子回路を用いた反応拡散デバイスを提案した。これはデバイス上に波動の伝搬、衝突、消滅を観測できる。また、波動情報処理の考えを取り入れたデバイスの応用分野を検討した。このデバイスは次世代の新しい集積システムの一部を担うものと期待できる。

参考文献 (いずれも一例を挙げる)

- [1] 三池, 森, 山口, “非平衡系の科学 : 反応・拡散系のダイナミクス,” 講談社, 1997.
- [2] <http://www.informatics.tuad.ac.jp/tenji/tenji03/shiragami-lab/199970120/3.doc>
- [3] Hiratsuka M. et al., IEEE trans. Circuit and Systems-I, 46, 294, 1999.

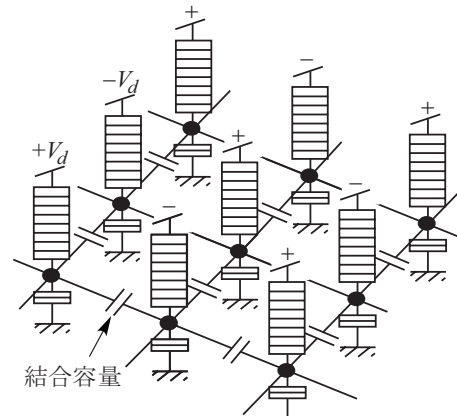


図5 単電子反応拡散デバイスの構成

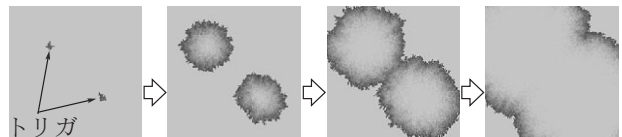


図6 単電子反応拡散デバイスの動作

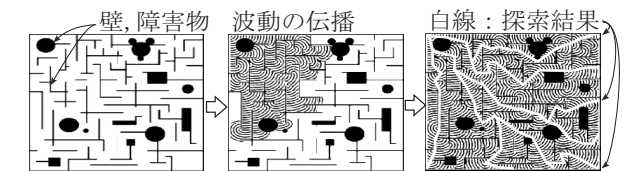


図7 波動を用いた経路探索の例(Hiratsuka, 2002)

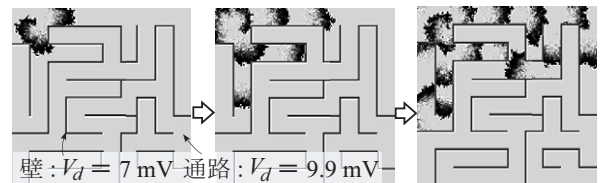


図8 単電子反応拡散デバイスによる経路探索