

## 量子ナノ構造による反応拡散コンピューティング

† 北海道大学大学院工学研究科, ‡ 北海道大学量子集積エレクトロニクス研究センター

浅井 哲也<sup>\*,†</sup>, 大矢 剛嗣<sup>†</sup>, 雨宮 好仁<sup>†</sup>, 福井 孝志<sup>‡</sup>

【文部科学省/科学研究費補助金 学術創成研究費】

有機金属気相成長高密度量子ナノ構造による単電子集積エレクトロニクス

「反応拡散系—非平衡状態の化学反応系」を量子ナノ構造上で模倣し、情報処理に応用することを試みる。それによって、生命現象の根底にある「生命らしさ—成長や自己組織化などの生き生きとしたダイナミクス」を取り入れた新しい情報処理ハードウェアを構成する。

反応拡散系とは、物質の化学反応と拡散の舞台となる散逸性媒体の総称であり、図1に示すような時空間パターン（輝度 = 特定の化学物質の密度）を創り出す。これらの密度波は空間（図の例では二次元平面上）を伝搬し、衝突により消滅する。上記の特徴を情報処理に応用した演算方式が「反応拡散コンピューティング」と呼ばれるものである。

反応拡散系を多数のセルが集合した反応場であると考え（図2）。各セルは物質の拡散を介して相互に影響し共鳴や引き込みを生じるものとする。この系を電子的に模倣するためには、セルの反応ダイナミクスとそれらの相互作用を模倣するデバイスを構成すればよい。ここではセルの高密度集積を狙い、量子ドットデバイスを利用する。量子ドットセル回路の構成を図3(a)に示す。量子ドットセルは、クーロンブロック効果が生じる低温下で、自励振動 [図3(b)] と興奮 [図3(c)] の振る舞いを示す（バイアス電圧の与えかたによって動作モードが変化する）。これらのセルを図4(a)に示すように容量結合する（拡散に相当）。セルのバイアス電圧は正負を交互に与える。この一次元系の一端にトリガを与えると、セル内部の電位変化が波として伝搬する（図4）。これらのセルを二次元マトリクス状に配置連結することで（図5）、反応拡散系の特徴である「密度波の伝搬」と「衝突による波の消滅」が模倣できる。この「量子ドット反応拡散デバイス」のシミュレーションの一例を図6に示す。

量子ドット反応拡散デバイスを用いた反応拡散コンピューティングの例として、経路探索を挙げる（図7）。迷路の「壁」や「障害物」となる部分で、セルのバイアス電圧を（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、セルが興奮モードになるバイアス電圧をかける。スタート地点にトリガを与えて波を発生させると、セルの電位変化の波がゴールまで到達する（図8）。これらの波の流れから、迷路の解が得られる。

上述の応用以外にも、画像処理（輪郭抽出・階調反転）やパターン修復などの応用が考えられる。現在は、量子ドット反応拡散デバイスをマクロスケールで模倣するCMOSデバイスを構成し、その上で動作確認を行っている。本講演ではそれらの結果も併せて述べる。

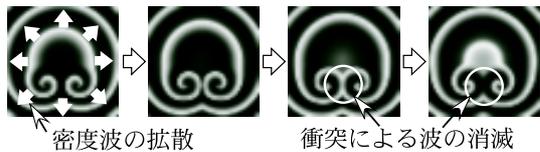


図1 反応拡散系が示す挙動

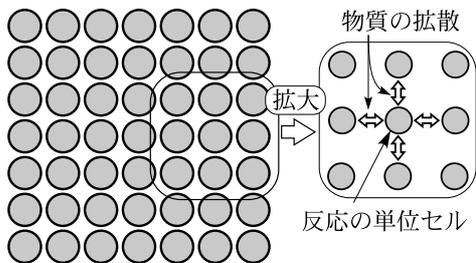


図2 反応拡散系の離散空間モデル

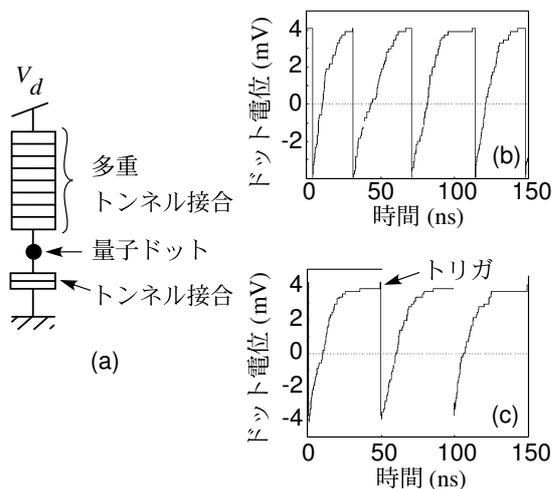


図3 単電子セル; (a) 回路構成, (b) 振動モード:  $V_d = 8.5$  mV, (c) 興奮モード:  $V_d = 7.8$  mV

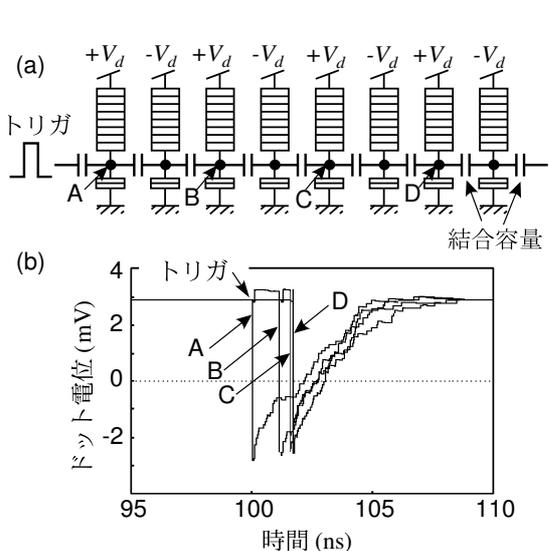


図4 単電子セルの連結; (a) 回路構成, (b) セル電位変化の伝搬

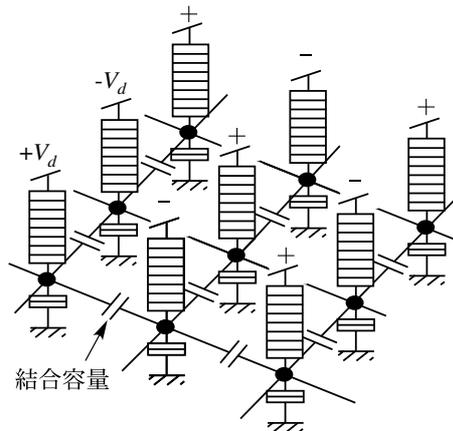


図5 単電子反応拡散デバイスの構成

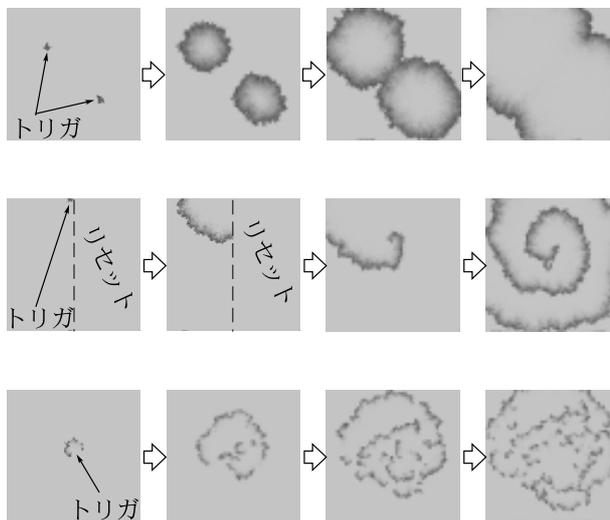
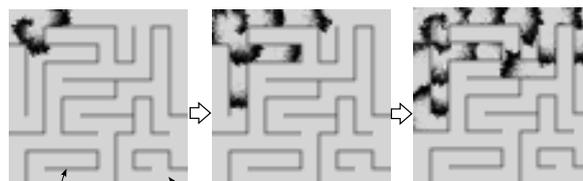


図6 単電子反応拡散デバイスの動作



(M. Hiratsuka, et al. IEEE Trans. Circuit and Systems-I, 46, 294, 1999)

図7 波の伝搬を用いた経路探索の例



壁:  $V_d = 7$  mV, 通路:  $V_d = 9.9$  mV

図8 量子ドット反応拡散デバイスによる経路探索 (シミュレーション)