少数キャリア拡散を利用したCMOS反応拡散デバイス

A CMOS reaction-diffusion devices using minority-carrier transport in semiconductors

高橋 基容　大矢 剛嗣　廣瀬 哲也　浅井 哲也　雨宮 好仁
Takahashi Motoyoshi, Oya Takahide, Hirose Tetsuya, Asai Tetsuya, Amemiya Yoshihito
北海道大学 工学部
Department of Electrical Engineering, Hokkaido University

1. はじめに

反応拡散系の動作をシリコン LSI で模倣することにより、新しい情報処理システムを開拓できる可能性がある。その目標に向けて、先に CMOS 回路と少数キャリア拡散を組み合わせた反応拡散デバイスの構成法を提案した（文献）。本稿では、活性因子と抑制因子の2変数を少数キャリア濃度で表して拡散させる改良構造を提案する。

2. 少数キャリア反応拡散デバイス

一次元の反応拡散系を例にとり、デバイスの構造を図1に示す。活性因子と抑制因子の二つの拡散場をもつ。それぞれの拡散場はn形シリコン基板上のp形セルの配列からなる。活性因子の拡散場のセル（活性セル）と抑制因子の拡散場のセル（抑制セル）は一対でCMOS 回路に接続され、化学反応を模倣する非線形振動子として動作する。いま一つのセルが基板に少数キャリア（正孔）を注入すると、その正孔は拡散して周囲のセルに入ってそれらの電位を上げる。したがって少数キャリア拡散を媒体としてセルが相互に結合する。反応拡散ダイナミクスを模倣するためには、各セルは次のように動作すればよい：(1) 活性セルは周囲から正孔を受けると活性化され、多量の正孔を基板に注入する。そのとき、対となる抑制セルも正孔を基板に注入する；(2) 抑制セルが周囲から正孔を受けると、対となる活性セルの活性化が抑制される。

3. 化学反応を模擬する CMOS 回路

上記の動作を実現するCMOS回路の構成を図2に示す。活性セルに周囲から正孔が流入するとノード1の電位が上がる。するとM1がオンとなりノード2の電位が下がる。これによりM2がオンとなり活性セルに電流が流れる（正孔が注入され周囲に拡散して活性因子として働く）。同時にM3もオンとなり、ノード3の電位は徐々に上昇する。したがってM4がオンとなり抑制セルに電流が流れる（拡散した正孔は抑制因子として働く）。するとノード4の電位が上がりM5がオンになって活性セルの電流を抑える。同時にM6もオンになり抑制セルの電流も抑えられる。周囲から抑制セルに正孔が流入したときにもノード4の電位が上がって活性化が抑制される。

4. 活性因子、抑制因子の拡散速度と伝播の様子

少数キャリア密度波の挙動をシミュレーション解析した。図3に一例を示す（セル配列の部分はラテラル形バイポーラトランジスタと見なしてモデル化）。活性セル配列の左端にトリガの正孔を入れると、正孔密度波が発生して右方向に伝搬する。図は活性セル直下の正孔濃度の時間変化を示したものである。活性因子と抑制因子の拡散係数比はセル間の距離（図1の $W1$ と $W2$）で等価的に調節できる。

図3(a)は抑制因子の拡散係数が小さいときであり、正孔密度波が右方向に伝搬している。一方、図3(b)は抑制因子の拡散係数が大きい場合である。トリガされた振動子の放出した抑制因子が速やかに拡散して隣接振動子の活性化を抑え込むために波が伝播しない。図3(c)は抑制因子と活性因子の拡散係数がほぼ等しいときである。この場合は、各セルで発生した抑制因子が少しずつ重畳されて増加しながら波とともに移動する。あるところで抑制因子の総量がしきい値を越えてセルの活性化を抑える。そのため、左から伝播してきた波が途中で急に消滅する。

（文献）高橋, 他, 電子情報通信学会総合大会, A-2-17, 2004 年 3 月.

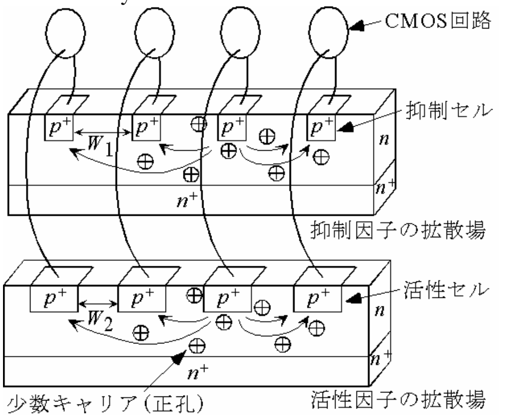

図1　反応拡散デバイスの構造。二つの拡散場とCMOS回路からなる。

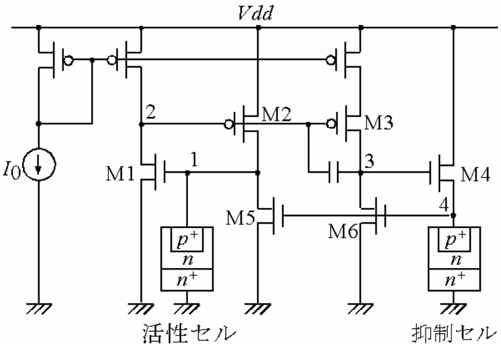

図2　化学反応を模擬するCMOS回路。

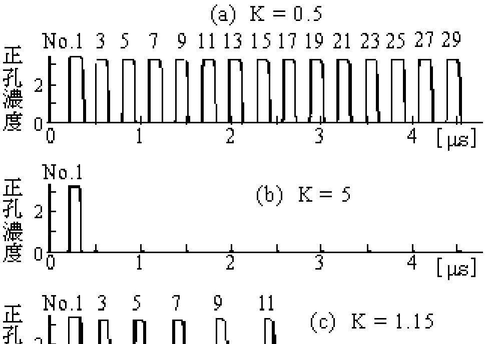

図3　セル配列を伝播する活性因子の正孔密度波。各セル直下の正孔濃度（規格化）の時間変化を示したもの。図中 No は振動子の番号。拡散係数比 K = (抑制因子の拡散係数)/(活性因子の拡散係数)。