

半導体の少数キャリアを利用した反応拡散デバイス

山田 崇史 浅井 哲也 雨宮 好仁

† 北海道大学工学部 電子工学科
〒 060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目

E-mail: †{yamada,asai,amemiya}@sapiens-ei.eng.hokudai.ac.jp

あらまし 化学反応における興奮状態の波（化学波）の拡散/伝搬現象は、生命に代表される非平衡・開放システムの典型的な振る舞いである。非平衡状態において（液状やガス状の媒体を介した）分子の反応と拡散が混在する系を反応拡散系と呼び、そこでは化学物質と媒体が共に「生きた」状態にある。これを固体である半導体を用いて具現化し、生命現象に基づいた新しい情報処理分野を開拓したい。本稿では、反応拡散系における分子とその拡散を半導体の少数キャリアとその拡散に見立てて構成した半導体デバイス（反応拡散デバイス）を提案し、少数キャリアの密度波（化学波に相当）の拡散/伝搬現象を計算機シミュレーションにより示す。

キーワード 反応拡散系, 反応拡散チップ, 半導体デバイス, 集積回路, 非線形アナログ回路

Reaction-Diffusion Devices using Minority-Carrier Transport in Semiconductors

Takashi YAMADA, Tetsuya ASAI, and Yoshihito AMEMIYA

† Department of Electrical Engineering, Hokkaido University
Kita 13, Nishi 8, Kita-ku, Sapporo, 060-8628, Japan

E-mail: †{yamada,asai,amemiya}@sapiens-ei.eng.hokudai.ac.jp

Abstract The reaction-diffusion (RD) system is a lively, dynamic system in which the reaction and diffusion of chemical species coexist under a nonequilibrium condition. The purpose of this work is to construct artificial RD system in *solid-state medium*, and to develop practical applications based on the vital phenomena. To imitate the chemical RD system in solid-state devices, we propose an idea to use the minority carriers in the semiconductors as diffusion substances. We show that the RD device produced propagating waves of minority carriers on the basis of a substrate-depleted reaction, by extensive numerical simulations.

Key words Reaction-Diffusion System, Reaction-Diffusion Chip, Semiconductors, Integrated Circuits, Nonlinear Analog Circuits

1. はじめに

本稿は反応拡散系を模する半導体デバイスの構成に関するものである。

近年急速に発達したデジタルプロセッサは、半導体集積回路の代名詞になりつつある。プロセッサの内部では極めて秩序的な演算が行われており、正確なタイミング制御と決して間違いを起こさない演算デバイスが必要不可欠である。その一方でたとえば生体の脳は、(半導体デバイスと比べると)かなり曖昧なデバイスを用いて、デジタルプロセッサが不得意な情報処理(認知・判断など)を高速に行っている。そこで、生物のような「自然によって創られた情報処理体」を半導体集積回路の上に実現して、デジタルプロセッサの構成とは全く異なる新しい集積回路の研究分野を開拓したい。そのための最も直接的方法は、情報処理体の構造を縮小して集積回路の上に焼き直すことである。もちろん、どのようなものでも焼き直せるわけではなく、集積回路化に適した、かつ我々の生活の役に立つような情報処理体を模索することが重要になる。Belousov-Zhabotinsky (BZ) 反応 [1] に代表される反応拡散系はその数少ない候補の一つである。BZ 反応に限らず、最も簡単な反応拡散モデルでさえ、線形システムでは決して起こりえない多種多様な時空間ダイナミクス(螺旋パターンの発生が有名であろう)をつくりだす。このような多様性に魅せられて、反応拡散系の情報処理への応用も多数試みられてきた。たとえば、輪郭抽出などの画像処理 [2], [3], 最適経路探索 [4], 化学ダイオードに基づく論理演算 [5] などが提案され、実証もされている。本来、自分自身のために存在する自然系が、(目に見える形で)我々に役立つことが示されたのである。もし反応拡散系が集積回路化に適したものであれば、上記のような応用が期待できるだけでなく、たとえば自然界では起こりえないような反応拡散現象を人工的に起こして、それに基づく新たな応用も期待できそうである。そこで、反応拡散系を集積回路化してその可能性を探りたい。

ところで、反応拡散系は物質やエネルギーの流れをとともなう非平衡・開放系であり、その現象は液状や気体状の非平衡な媒質中で観測されるものである。したがって、たとえばゲル媒質上で反応と拡散を繰り返しながら物質が移動して空間パターンを作り出す、などといった現象は、半導体上では観測できそうにない(固体では分子や原子レベルでの動きがないため)。筆者らが近年提唱した「反応拡散チップ」は、

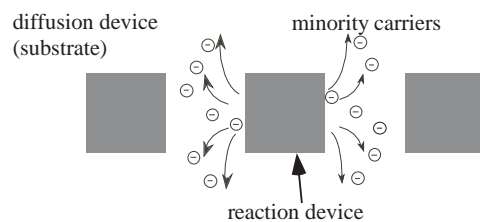


図 1 反応拡散デバイスの概略図

抵抗回路網または容量結合によって、電圧の拡散または分圧によって化学物質の拡散を間接的に表現した [6], [7]。もし、固体中を移動できる物質があれば、それを化学物質と見なして、より直接的に反応拡散系を模擬できそうである。半導体中を移動できる物質、すはわちそれは電子(正孔)である。半導体の少数キャリア(電子または正孔)は拡散やドリフトによって半導体内を移動でき、その流れをもって、たとえばゲル媒質上を拡散する化学物質の流れを表すことにする。実際、少数キャリアの連続の式は、反応拡散方程式と非常によく似たものである。この考えに基づいて、本稿では(自己触媒的に少数キャリアを増倍させる) pnpn デバイスを用いて少数キャリアを発生させ、それが周囲に拡散してさらなる連鎖反応を引き起こすような半導体反応拡散デバイスを提案する。

2. デバイス構造

半導体の特徴の一つは、不純物を混入したり、光や熱、電場を与えることによってその電気伝導性が変わることである。この電気伝導を担っているのが電子と正孔(キャリア)である。半導体中のキャリアのうち、濃度(密度)の低いものを少数キャリアと呼ぶ。p 形半導体では電子よりも正孔の濃度が高いため、電子が少数キャリア、正孔が多数キャリアである(n 形半導体ではその逆)。少数キャリアは、(化学物質があたかも媒質中を拡散するように)キャリア密度の勾配に従って拡散する。そこで、半導体中の少数キャリア拡散現象を利用して化学反応系を模擬するデバイス(反応拡散デバイス)を設計することにした。

図 1 に提案する反応拡散デバイスの概要を示す。反応拡散系の空間を離散化すると、各々の離散点では反応方程式(非線形常微分方程式)に従って物質の濃度が変化し、近接する離散点同士は相互に結合し、拡散方程式(偏微分方程式)に従って反応物質を拡散させる。この離散点を反応方程式に従って少数キャ

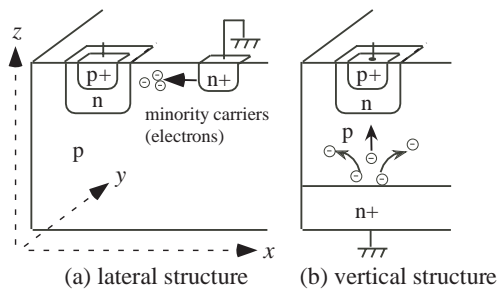


図 2 pnpn ダイオードの構成法

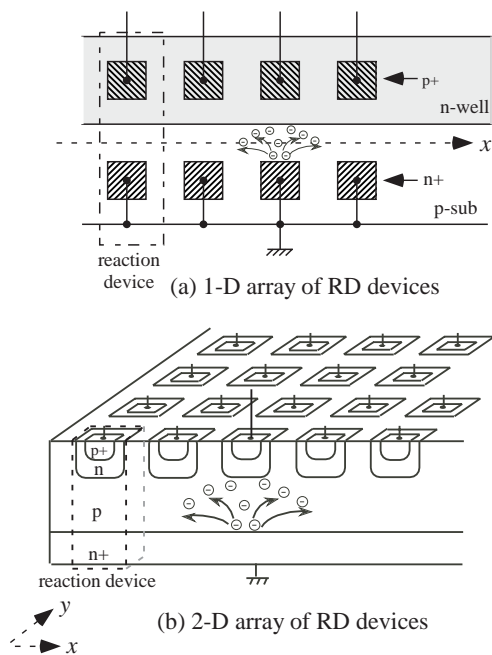


図 3 反応デバイスを配置した反応拡散デバイス

リアが変化するデバイスで構成し、このデバイス間を少数キャリアが拡散できる半導体で相互結合すると反応拡散系を模擬した半導体デバイスが実現できる。各々の離散点で少数キャリアのダイナミクスを生成する素子を反応デバイス、少数キャリアを拡散させる半導体を拡散デバイスと呼ぶことにする。

少数キャリアを利用した素子に pnpn ダイオードがある。pnpn ダイオードはオン状態とオフ状態の二つの安定状態をもったスイッチングデバイスで、(1) オフ状態からオン状態にかけて少数キャリア生成する、(2) 外部から少数キャリアを注入することで内部状態が変化するといった特徴をもつ。pnpn ダイオードを用いると、外部から拡散してきた少数キャリアによって反応するデバイスを作ることが可能である。

pnpn ダイオードの構成法はいくつか考えられるが、本稿では二つの構造を示す(図 2)。図 2(a) は pnpn ダイオードを紙面横方向に構成した例である。この構造の利点は CMOS プロセスを用いて製作が

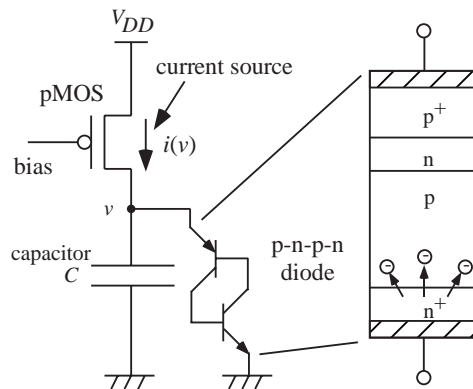


図 4 反応デバイスの回路図

可能なことであるただし、実際の CMOS プロセスでは、基板表面に LOCOS やチャンネルストップを形成するため、少数キャリアが拡散できないのでこの構造を作る際には pnpn ダイオードの p 領域に LOCOS やチャンネルストップを形成しないようにしなければならない。また図 2(b) は反応デバイスを敷き詰めた平面に対して垂直に pnpn ダイオードを構成した例である。

pnpn ダイオードの p 領域に発生する少数キャリアを拡散させたい。そのためには拡散デバイスを pnpn デバイスの少数キャリアが発生している p 領域と結合させればよい。図 2(a) の構造では n 領域と n+ 領域で囲まれた p 領域に少数キャリアが発生しているので少数キャリア拡散は y 軸方向のみに限定される。つまり、この構造では反応デバイスを y 軸方向に配置した一次元反応拡散デバイスを構成できる。一方図 2(b) の構造では、x 軸方向 y 軸方向に少数キャリアを拡散できるため、反応デバイスを x-y 平面に敷き詰めた二次元反応拡散デバイスを構成できる。図 3 にこれらの反応デバイスを配置した反応拡散デバイスの構造を示す。図 3(a) は一次元反応拡散デバイスの例、図 3(b) は二次元反応拡散デバイスの例である。

pnpn ダイオードに付加回路を加えることで、少数キャリア密度を反応方程式で記述できるデバイスを実現できる。この反応デバイスの回路を図 4 に示す。反応デバイスを pnpn ダイオードと MOS トランジスタ、キャパシタで構成する。pnpn ダイオードはその両端に電圧をかけたときに電流が流れるオン状態とほとんど流れないオフ状態がある。オフ状態の pnpn ダイオード両端に電圧をかけた状態では以下のような現象が起こる。p 領域へ種となる電子が流れ込むと、電位の高い n 領域へと流れる。n 領域に電子が流れ込むと、p+ 領域の正孔が n 領域へ引き寄せられ

る。p+領域は正孔の濃度が高いので、n領域に多数の正孔が引き寄せられる。この余剰正孔がバイアス電圧によりp領域へ移動すると、それによってn+領域から多数の電子が引き出される。つまり、p領域に電子を注入すると、その電子は(上記のプロセスを通して)自己触媒的に増倍する。この増加速度が少数キャリアの再結合による減少速度よりも速くなるとpnpnダイオードに貫通電流が流れる。この状態がpnpnダイオードのオン状態である。pnpnダイオードの両端の電圧を上げる、または外部からp領域に少数キャリアを注入すると少数キャリア(電子)が自己触媒的に増加し、pnpnダイオードはオン状態となる。オフ状態からオン状態に遷移するときのpnpnダイオード両端の電圧を降伏電圧と呼ぶ。

ところで、自然界における反応拡散系では(例えば物質の濃度が)固有のリズムで振動する振動モードと、安定状態において外部から刺激が加えられると内部状態が急激に変化し再び安定状態へと戻る興奮モードの二つの動作モードがある。反応デバイスは電源電圧の値を変えることで、この二つのモードの切り替えを実現している。反応デバイスは電源電圧を降伏電圧 V_b よりも高くすると振動モードで動作し、 V_b よりも低くすると興奮モードで動作する。その理由を二つモードでの回路動作とともに説明する。

振動モードにおいてデバイスは次のような動作をする。まずバイアス電流 $i(v)$ がキャパシタに電荷を蓄積し、キャパシタの電位 v が上昇する。振動モードにおいて電源電圧は降伏電圧 V_b よりも高いため、キャパシタの電位 v は V_b に達する。降伏電圧に達すると前述のプロセスで少数キャリアは自己触媒的に増加し、pnpnダイオード間を貫通電流が流れる。この少数キャリアが自己触媒的に増加した状態を興奮状態と呼ぶ。ダイオードがオン状態になると、キャパシタに蓄積されていた電荷は電流となってpnpnダイオードに流れる。p領域に発生した少数キャリアは正孔と再結合して減少する。少数キャリア密度が低くなれば、pnpnダイオードは再びオフ状態となる。しかしバイアス電流によってキャパシタの電位が上昇するため、再結合によりpnpnダイオードがオフする前に降伏電圧に達すればpnpnダイオードはオン状態を維持する。オン状態を維持するかオフ状態へと遷移するかはバイアス電流およびキャパシタ容量で決まるチャージ時定数 τ_0 とキャリアの再結合時定数 τ のバランスで決まる。反応デバイスはオン状態とオフ状態を交互に繰り返すので、チャージ時定数を再結合時定数よりも大きくする($\tau_0 > \tau$)。pnpn

ダイオードがオフになると再びバイアス電流によるキャパシタの電荷の蓄積が起こる。振動モードでは反応デバイスがこのサイクルを繰り返すことで、少数キャリア密度、キャパシタ電圧に一定周期の振動パターンが発生する。

興奮モードにおいてデバイスは次のような動作をする。キャパシタの電位 v はバイアス電流 $i(v)$ によって上昇するが、バイアス電流は v が V_{DD} に達すると0となる。なぜならpMOSトランジスタを用いた電流源はゲートソース間電圧($bias - V_{DD}$)、ソースドレイン電圧($V_{DD} - v$)によって電流値が変化し、特にソースドレイン電圧が小さい領域では電流が減少してしまうからである。ここではpMOS電流源のこの特性をうまく利用して反応デバイスの興奮モード動作を実現している。キャパシタの電位 v は電源電圧まで達するとバイアス電流が流れなくなるため V_b まで上昇することができない。キャパシタ電位はこの状態で安定し、少数キャリアも変化しない。この状態を休止状態と呼ぶ。

休止状態にあるデバイスは外部から少数キャリアを注入すると興奮状態へ遷移する。注入による少数キャリアの増加量が再結合による減少量よりも多ければ、振動モードと同様に少数キャリアが自己触媒的に増加し興奮状態となる。興奮状態になった後は振動モードと同様に少数キャリアが再結合により減少するので、pnpnダイオードはオフ状態となる。この期間中に外部から少数キャリアが注入された場合を考える。このとき注入で増加した少数キャリアもまた再結合により減少するだけなので、注入したキャリアによって状態変化は起こらない。つまり興奮状態から少数キャリアが十分減少するまでは外部からの刺激によって興奮することはない。この状態を不応状態と呼ぶ。pnpnダイオードがオフ状態になると再びキャパシタに電荷の蓄積が起こり、電源電圧付近までキャパシタ電位が上昇した後状態が変化しない休止状態となる。これは神経細胞に見られる「休止→興奮→不応→休止」の状態遷移と同様な現象である。

反応デバイスの状態を反応方程式で記述する。キャパシタ、MOSトランジスタ、pnpnダイオードが接続しているノードにおける節点方程式をたてると

$$C \frac{dv}{dt} = i(v) - \frac{v}{r(v, n)}, \quad (1)$$

となる。ここで C はキャパシタの容量、 v はキャパシタの電位、 $i(v)$ はバイアス電流である。また $r(v, n)$ はpnpnダイオードの非線形抵抗をモデル化したも

ので、内部状態(少数キャリアの濃度 n) と外部入力(ダイオードにかかる電圧 v) によって値が変化する。少数キャリア密度 n が低いときには抵抗 $r(v, n)$ は一定の高い値を取り、少数キャリア密度 n が高いときには電圧 v の増加に対して指数関数的に減少する関数である。この式は、キャパシタに蓄積される電荷の時間変化がバイアス電流と pnpn ダイオードの電流で決まることを意味する。

p 領域の少数キャリア密度の時間変化はオン状態で発生するキャリア密度と再結合で減少するキャリア密度の差となる。バイアス電流 $i(v)$ はキャパシタから pnpn ダイオードに流れる電流に比べ無視できるほど小さくしている。そのため、キャパシタに蓄積された電荷量とほぼ等量の少数キャリアが p 領域に発生すると仮定する。この仮定を用いると少数キャリア密度の時間変化は

$$q \frac{dn}{dt} = -q \frac{n}{\tau} + \frac{v}{r(v, n)}, \quad (2)$$

となる。ここで q は電荷素量 [1.6×10^{-19} (C)], τ は少数キャリアの再結合時間である。

これまでは空間上の一点についての記述である。実際にはこの点を空間上に多数並べて拡散を行なう。方程式を空間の偏微分方程式に拡張する。拡散デバイス中での少数キャリア密度は、反応デバイス中とは異なり拡散と電子と正孔の再結合により変化する。反応デバイスがつくる電界によるドリフトの影響を無視すると、拡散デバイス中での少数キャリア密度の状態は

$$\frac{\partial n}{\partial t} = D_n \nabla^2 - \frac{n}{\tau} \quad (3)$$

に従う。ここで D_n は p 領域での少数キャリア(電子)の拡散係数 ($= \mu k T / q$) である。

3. シミュレーション結果

提案した反応デバイス単体の特性と、反応デバイスを多数配置した一次元と二次元の反応拡散デバイスの特性を計算機シミュレーションで調べた。

3.1 反応デバイス単体のシミュレーション

式(1)(2)の n, v を、それぞれ CV_{DD}, V_{DD} で規格化した無次元変数 N, V を用いて、反応デバイス単体の動作を数値計算により確認した。そのダイナミクスは

$$\frac{dV}{dt_1} = k i(V) - \frac{V}{\tau_1(V, N)}, \quad (4)$$

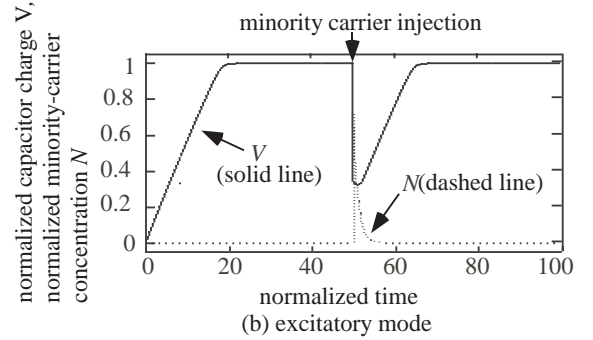
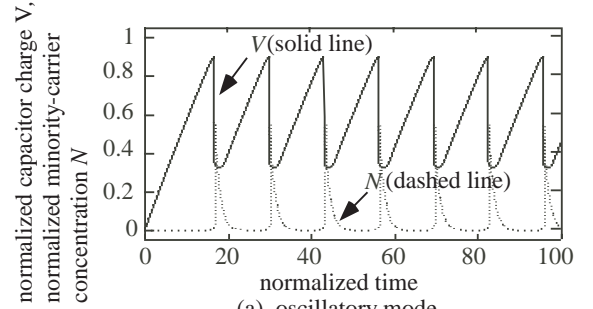


図5 反応デバイスの動特性

$$\frac{dN}{dt_1} = -N + \frac{V}{\tau_1(V, N)}, \quad (5)$$

で表される。ここで、 $k i(V)$, t_1 , τ_1 はそれぞれ、無次元化した電流 [$k = \tau / (C V_{DD})$], 規格化した時間 ($t_1 = t / \tau$), 無次元した pnpn ダイオードの時定数 [$\tau_1 = C r(v, n) / \tau$] である。

図5に(4)(5)の数値計算結果を示す。図5(a)に振動モードにおける規格化キャパシタ電位 V とキャリア密度の時間応答を示す。振動モードでは V が電源電圧に達する前 ($V < 1$) に pnpn ダイオードがオン状態に遷移している。2章で述べたように、発生した少数キャリアは再結合で消費され、ダイオードがオフ状態となる。以降、この過程を繰り返す、反応デバイスは振動するための条件 ($\tau_0 > \tau$) において周期的な非線形振動を発生することを確認した。

図5(b)に興奮モードにおける時間応答を示す。興奮モードでは、外部から少数キャリアの流入がない限り、pnpn ダイオードはオフ状態にあるため、キャパシタの電位 V と少数キャリア密度 N は一定の値 $(V, N) = (1, 0)$ に収束する。この計算では $t_1 = 50$ において外部から少数キャリアの注入を行なった。休止(オフ)状態にある反応デバイスに少数キャリアを注入すると、少数キャリアが自己触媒的に増加し pnpn ダイオードはオン状態となる。前述の興奮-不応状態を経て再び安定な状態(休止状態)へと遷移することを確認した。

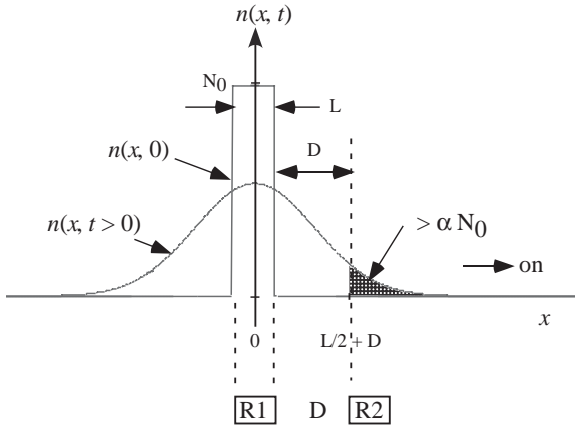


図 6 拡散による R2 のオン条件

3.2 拡散デバイスのシミュレーション

反応デバイス同士を拡散デバイスで相互結合することにより、近傍デバイスにオフ状態からオン状態への遷移、すなわち興奮状態の伝播が行われる。この動作を確認するとともに、反応・拡散デバイスのサイズといった定量的な議論をするために拡散デバイスのシミュレーションを行った。

図 3(a) の一次元反応拡散デバイスにおける (3) のインパルス応答は

$$g(x) = \frac{1}{\sqrt{4\pi D_n t}} \exp\left(-\frac{x^2}{4D_n t} - \frac{t}{\tau}\right) \quad (6)$$

である。これを用いて近傍デバイスのスイッチング条件を求めた。図 6 に少数キャリアの拡散の様子を示す。図の横軸は空間、縦軸は少数キャリア密度を表す。反応デバイスの幅を L 、反応デバイス間の距離 (= 拡散デバイスの幅) を D とする。また N_0 は初期濃度分布であり $N_0 = CV_{DD}/qs$ (s は反応デバイスの面積) とする。

初期状態 $t = 0$ において中心の反応デバイス (R1) がオン状態となり、少数キャリアが発生したと仮定する。このとき座標 x 、時刻 t における少数キャリア分布 $n(x, t)$ は $t = 0$ における濃度分布と (6) の畳み込み

$$n(x, t) = \frac{N_0}{2} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \left[\operatorname{erf}\left(\frac{x+x_0}{\sqrt{t_0}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{x-x_0}{\sqrt{t_0}}\right) \right],$$

で表せる。ここで $x_0 = L/2$ 、 $t_0 = 4D_n t$ である。図 7 に典型的なシリコン半導体の物理パラメータを与え、かつデバイスの幅 L を $20 \mu\text{m}$ とした時の計算結果を示す [$D_n = 39 \text{ cm}^2/\text{s}$ ($\mu_n = 1500 \text{ cm}^2/\text{V s}$), $\tau = 1 \mu\text{s}$]。

反応デバイスがオン状態になるために必要な少数

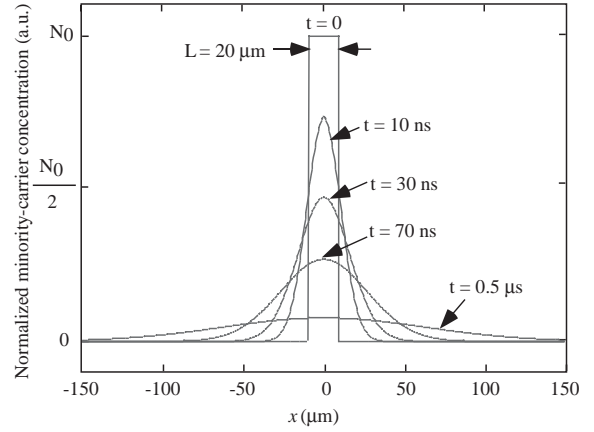


図 7 単体の反応デバイスにおける少数キャリア拡散

キャリア密度を、発生したキャリア密度の α 倍と定義すると必要なキャリア密度は αN_0 となる。反応デバイス (図 6 の R1) で生成された少数キャリアが近傍のデバイス (図 6 の R2) をオン状態にスイッチさせるためには、 $x \geq L/2 + D$ に到達するキャリア密度 (図 6 の斜線部の面積) が αN_0 以上であると仮定する。反応デバイスがオン状態になるために必要な少数キャリア密度 αN_0 の値は、半導体材料、不純物濃度、デバイス形状などから決まる。デバイスのサイズ (L) と α がわかれば、近傍デバイスをオンする拡散デバイスの幅を決定できる。

3.3 反応拡散デバイスのシミュレーション

図 2 の y 軸方向または x, y 軸方向に反応デバイスを敷き詰めて構成した一次元および二次元反応拡散デバイスのシミュレーションを行った。反応デバイスにおける規格化キャパシタ電位とキャリア密度の時間変化は、(4)(5) の反応方程式で表される。拡散デバイス中における少数キャリア密度の時間変化は (3) より

$$\frac{\partial N}{\partial t_1} = \tau D_n \nabla^2 N - N, \quad (7)$$

で表される。また、拡散デバイスにはキャパシタが存在しないので

$$\frac{dV}{dt_1} = 0, \quad (8)$$

となる。これらの方程式を FDTD 法を用いて数値的に解いた。以下のシミュレーションでは $\alpha = 0.1$ 、 $D = 20 \mu\text{m}$ 、その他のパラメータは図 7 での値を用いた。その結果を以下に示す。

9 個の反応デバイスを一方向に配置した反応拡散デバイスの計算結果を図 8 に示す。この計算では興

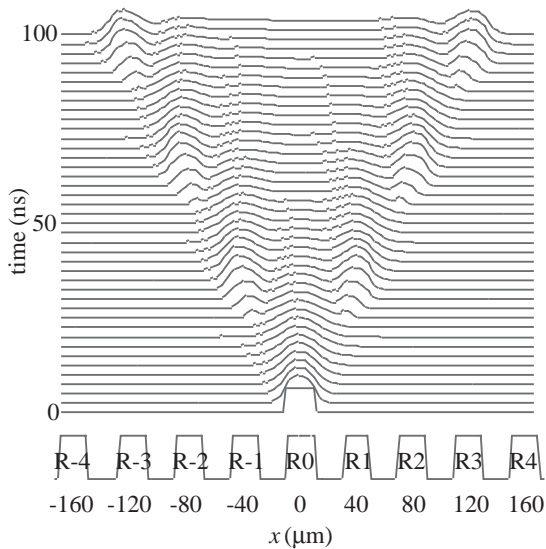


図 8 一次元反応拡散デバイスのシミュレーション結果

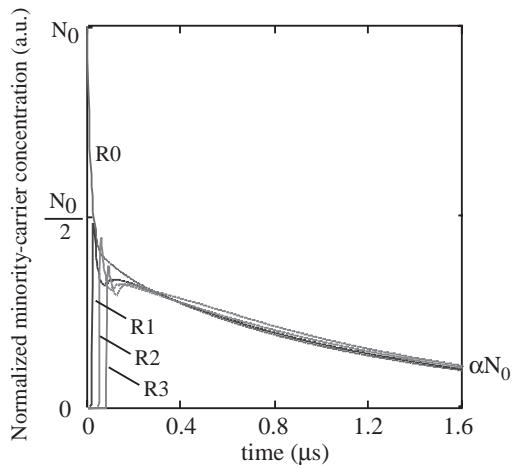


図 9 反応デバイス中心における少数キャリア数の時間変化

興奮波が伝搬していくことを確認するために、すべての反応デバイスを興奮モードで動作させた。図の横軸は空間、縦軸は時間を表す。反応デバイスの位置を R で表す。初期状態として中心デバイス (R_0) のみに少数キャリアを与えた。時間の経過とともに少数キャリアはデバイス外へ拡散し、 $t \approx 25$ ns において近傍デバイスがオン状態となることを確認した。オン状態となった近傍デバイス (R_1, R_{-1}) から生成された少数キャリアも拡散で移動し、 $t \approx 50$ ns においてさらに近傍デバイス (R_2, R_{-2}) がオン状態となる。この構造では 25 ns 程度の時間スケールで少数キャリアの密度波が伝播することが確認できた。

図 9 に四個の反応デバイス (R_0 - R_3) の中心点における少数キャリア密度の時間変化を示す。2 章で述べたように興奮状態となった後の反応デバイスは不応状態をもつ。すなわち内部の少数キャリア密度が

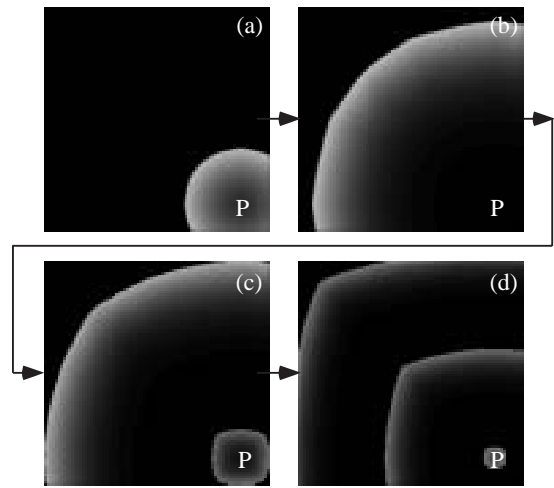


図 10 二次元反応拡散デバイスのシミュレーション結果 (興奮波の伝播)

αN_0 になるまで、外部から少数キャリアを注入されても pnpn ダイオードがオン状態にならない。グラフから不応期の時間はマイクロ秒のオーダー (少数キャリアのオーダー) であることがわかる。これは近傍の反応デバイスをオン状態にさせるためにかかる時間の数 100 倍の時間である。

次に二次元反応拡散デバイスの計算を行った。200 × 200 個の興奮モード反応デバイスを格子状に配置した場合の計算結果を図 10 に示す。図では少数キャリア密度をグレイスケールで表現している (黒: $N = 0$, 白: $N = 1$)。図 10 中の P 点には外部から周期的に少数キャリアを注入している。時間の経過とともに少数キャリアの密度波が同心円状に伝播することを確認した。興奮波が伝播してくると、休止状態と興奮状態、興奮状態と不応状態が接する状況になるので、興奮状態にあるデバイスから少数キャリア拡散によって休止状態のデバイスへのみ興奮波が伝播する。興奮系の反応拡散場において、直線上の反応デバイスを興奮状態にすれば平面波が、一点の反応デバイスを興奮状態にすると同心円状の密度波が形成される。この計算結果から注入した点 P から拡散と連鎖反応を起こしていると言える。

また、観測された同心円が歪んでいるのは、興奮波の形状が反応デバイスの配置に強く依存するからである。少数キャリアが拡散する時間に対して興奮状態である時間が非常に短いため、第二近傍のデバイス (正方格子では斜め方向にあるデバイス) が興奮状態にあるときには、第一近傍のデバイス (正方格子では上下左右のデバイス) は興奮状態を終えて不応状態にあるからである。

図 11 は図 10 と同じ系に、外部からの少数キャリア

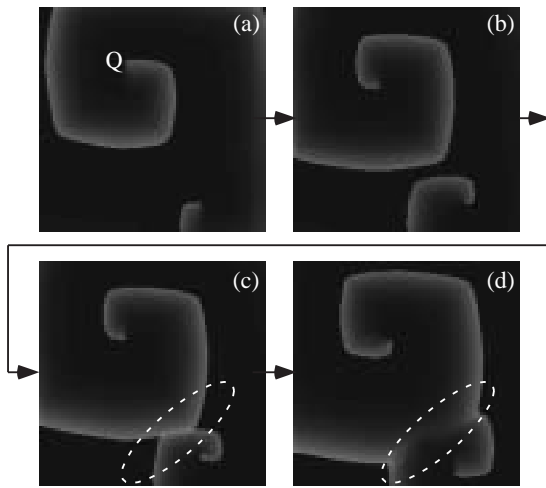


図 11 二次元反応拡散デバイスのシミュレーション結果 (らせん波の生成)

アを注入せず、少数キャリアの密度パターンを初期値として与えた場合の計算結果である。初期パターンとして、成長した同心円パターンを切り抜いたパターンを与えた。うずの中心(コア)(図 11(a)の Q)では、興奮(オン)状態のデバイスと休止(オフ)状態のデバイス、不応(外部から刺激を受けてオンしない)状態が同時に接している状況にある。不応状態のデバイスは興奮状態では遷移せず、休止状態にあって興奮状態のデバイスに接しているものが興奮状態へと遷移する。その結果として、Q点を回り込みながら興奮波(螺旋波)を形成する。この螺旋パターンも前述の同心円パターンと同様に反応拡散系に特徴的なものである。

図 11の結果で注目すべき点は、二つの波が衝突するとその両方が消失することである(図 11(c), (d)の点線で囲まれた部分)。この現象は以下のように理解できる。既に述べたように興奮波が伝播するには波の進行方向のデバイスは休止状態でなければならない。二つの波が衝突すると、互いの進行方向には興奮または不応のデバイスしか存在しないため、波は伝播できない。興奮波の後には不応波が伝播しているので、これまでの波の進行方向と逆向きに伝播することもできない。結果的に衝突した興奮波は不応状態を経て消失する。この現象は重ね合わせが成り立つ線形システムでは見ることのできない、基質・消費系に見られる特徴的な現象である。

4. ま と め

我々は反応拡散系がもつ自己触媒反応と拡散現象を模擬する新しい半導体デバイスの開発を行った。この反応拡散デバイスは、これまで提案してきたデ

バイスとは異なり拡散現象に相似な半導体の物理現象を利用したものである。相似性を生かすことで素子数の少ない、集積回路化に適した反応拡散デバイスが実現できた。このような反応拡散系を模擬するハードウェアを作ることにより、ソフトウェアによる反応拡散系よりも高速に、化学物質の反応(ウェットウエア)よりも再現性のよい反応拡散系が実現できそうである。また、提案したデバイスは振動・興奮の動作モードを切り替えるといった、自然界では起こりえないような反応拡散現象を作り出すことも可能である。人工反応拡散系をつくることで、自然界では起こりえない反応拡散現象に基づいた新たな応用分野を開拓することができるかもしれない。

文 献

- [1] G. Nicolis and I. Prigogine, *Self-organization in Nonequilibrium Systems — From Dissipative Structures to Order through Fluctuations*. John Wiley & Sons, Inc., 1977.
- [2] L. Kuhnert, K. I. Agladze, and V. I. Krinsky, "Image processing using light-sensitive chemical waves," *Nature*, Vol. 337, pp. 244-245, 1989.
- [3] M. Hiratsuka, T. Aoki, and T. Higuchi, "Pattern formation in reaction-diffusion enzyme transistor circuits," *IEICE Trans. Fundamentals*, Vol. E82-A, No. 9, pp. 1809-1817, 1999.
- [4] O. Steinbock, A. Toth, and K. Showalter, "Navigating complex labyrinths: Optimal paths from chemical waves," *Science*, Vol. 267, pp. 868-871, 1995.
- [5] I. Motoike and K. Yoshikawa, "Information operations with an excitable field," *Phys. Rev. E*, Vol. 59, pp. 5354-5360, 1999.
- [6] H. Kato, T. Asai, and Y. Amemiya, "Reaction-diffusion neuro chips: analog CMOS implementation of locally coupled Wilson-Cowan oscillators," in *Proc. of the 5th Int. Conf. on Cognitive and Neural Systems*, P2-41, 2001.
- [7] Y. Nishimiya, T. Sunayama, T. Asai, and Y. Amemiya, "Reaction-Diffusion Chip based on Cellular-Automaton Processing," in *Proc. of Int. Symp. Nonlinear Theory and its Applications*, Vol. 2, pp. 593-596, 2001.