

半導体の少数キャリア拡散を利用したCMOS反応拡散デバイス

A Novel Reaction-Diffusion System based on Minority-Carrier Transport in Semiconductors

浅井 哲也, 山田 崇史, 雨宮 好仁

Tetsuya Asai, Takashi Yamada, and Yoshihito Amemiya

北海道大学工学部 電子工学科

Department of Electrical Engineering, Hokkaido University

1 はじめに

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いう。こ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。

2 反応拡散デバイスの構成

反応拡散系の特徴の一つに化学波の伝搬がある。この現象は、反応物質の濃度が自己触媒的に増加して媒質中を拡散し、その近傍で連鎖反応が起こることに起因する。この仕組みを模擬するために、半導体内を拡散する少数キャリアを1種類の反応物質と見なす。反応が起きたデバイス（少数キャリアが局所的に増大）周辺を少数キャリアが拡散し、それによって近傍の反応デバイスが連鎖的に反応するような構成をとればよい。提案する反応デバイスの構成を図1に示す（CMOSプロセスを利用）。pMOSトランジスタを介して電荷がキャパシタに蓄積される。p+領域の電圧が上がってpnpnデバイス（波線A下）の降伏電圧を越えると、p基板中の少数キャリア（電子）が自己触媒的に増加する。その結果、キャパシタの蓄積電荷量とほぼ等量の少数キャリアが基板中に発生して拡散する。このデバイスを図中y軸に沿って多数配置して一次元反応拡散デバイスを構成する。一つの反応デバイスから発生・拡散した少数キャリアが近傍のデバイスを反応させ、その連鎖反応によって、少数キャリアの波が反応拡散デバイス上に伝搬する。

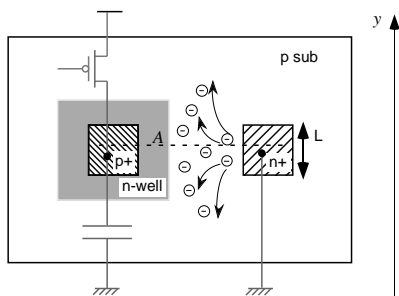


図1 反応デバイスのレイアウト（上面図）

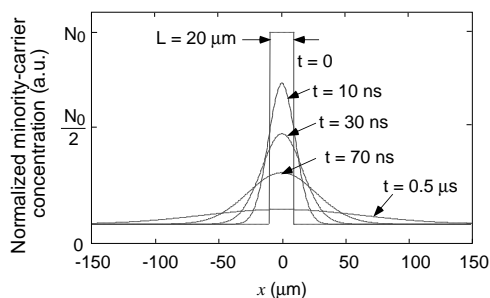


図2 単位反応デバイスにおける少数キャリア拡散

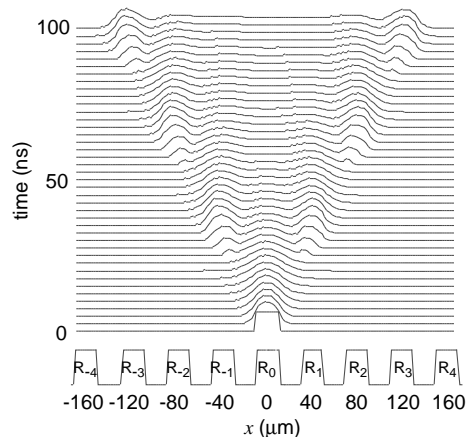


図3 1次元反応拡散デバイスの動作シミュレーション例

3 動作シミュレーション結果

はじめに、単体の反応デバイスで発生する少数キャリアの拡散現象を確認した。時刻 $t = 0$ で pnpn デバイスが on 状態となったときの少数キャリア分布の時間変化を図2に示す（n+領域のサイズ L : $20 \mu\text{m}$ 、デバイス on 時の少数キャリア密度: N_0 、他のデバイスパラメータは典型値を利用）。少数キャリアの拡散によって N_0 の10%が外部から与えられたときに pnpn デバイスが on 状態になると仮定すると、このデバイスを一次元配置して連鎖反応を起こすためには、反応デバイスの間隔 (D) を $40 \mu\text{m}$ 以下にする必要がある。図3に $L = D = 20 \mu\text{m}$ とした場合の反応拡散デバイスの動作例を示す（デバイス領域: R）時刻 $t = 0$ で中央のデバイス (R_0) が少数キャリアを発生し、それが周囲に拡散する。時刻 $t \approx 25 \text{ ns}$ で近傍のデバイス (R_1 と R_{-1}) が on 状態となり、先の R_0 と同様に少数キャリアを発生した。これらの連鎖反応により、少数キャリアの密度波が反応拡散デバイスを伝搬することが確認できた。なお、デバイスの不応期間（緩和振動周期）は $1.6 \mu\text{s}$ 程度であった。