

少数キャリアの拡散を利用した反応拡散デバイス

Reaction-diffusion devices using minority-carrier transport

高橋 基容 大矢 剛嗣 浅井 哲也 雨宮 好仁

Takahashi Motoyoshi, Oya Takahide, Asai Tetsuya, Amemiya Yoshihito

北海道大学 工学部

Department of Electrical Engineering, Hokkaido University

1. はじめに

化学反応と物質拡散が混在した非平衡-開放システムを反応拡散系という。この系は自然界の各所に存在しており、微生物や体細胞が行う情報伝達と情報処理の舞台になっている。この反応拡散系を電子デバイスで模倣する有力な手法は、半導体の少数キャリア拡散現象を利用することである(末尾文献)。本稿では半導体 pn 接合と電子回路を組み合わせた少数キャリア反応拡散デバイスを提案する。

2. 反応拡散系のモデル

反応拡散系は化学的な非線形振動子が多数集合した反応場としてモデル化できる。各振動子は微小な空間領域内の化学反応に対応する。近接する振動子どうしは物質拡散を介して相互に作用し、系全体として複雑な挙動を生じる。これを半導体上で模倣するには、まず pn 接合をもつ非線形振動子を多数用意して配列する。次に、近接する振動子どうしが pn 接合の少数キャリア拡散によって相互作用するように構成すればよい。

3. 少数キャリア反応拡散デバイス

提案する反応拡散デバイスの基本部分を図1に示す。n 形半導体の基板に p 形の島を配列する。この p 形島が(後述の電子回路と組み合わせると)非線形振動子となる。いま p 形島に電流が流れ込むと、そこから n 形基板に少数キャリア(正孔)が注入されて周囲に拡散する。拡散した正孔は周囲の p 形島に入ってその電位を上げる。このように少数キャリア拡散を媒体として p 形島が相互に結合する。反応拡散系のダイナミクスを模倣するためには「周囲からの正孔拡散で p 形島の電位が上がったとき、その p 形島に電流を流して多量の正孔を周囲に拡散させる」という自己触媒的作用があればよい。

4. 自己触媒作用のための電子回路

それぞれの p 形島に電子回路を付けて自己触媒的作用を持たせる。その回路例を図2に示す。これは不応期をもつ単安定の振動回路である。いま回路につながる p 形島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。これに容量結合しているノード3の電位も同時に下がるので、M2 がオンとなり p 形島に電流が流れる(正孔が注入されて周囲に拡散)。そのあと M3 の電流によってノード3の電位が電源電圧 V_{dd} に戻り正孔注入が止まる。それに遅れて M4 の電流(M3 の電流より小さく設定)によりノード2の電位が少しずつ上昇して V_{dd} に戻る。ノード2の電位が低いうちは p 形島に再入力があっても M2 がオンにならないので、その期間は不応期となる。

5. 少数キャリア波の伝搬と衝突

多数の p 形島を一次元配列して少数キャリア波の挙動をシミュレーション解析した(n 形基板/p 形島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)。図3と図4に結果を示す。図3は各 p 形島の直下における正孔濃度の時間変化である。一次元配列された p 形島の一端にトリガの正孔を入れると、そこから正孔の密度波が他端に向かって伝搬していく。図4は一次元配列の両端にトリガを入れたときの挙動を示す。両端で発生した正孔の密度波が中央で衝突して消滅する。このように、半導体の少数キャリア拡散現象を利用して反応拡散系を模倣することができる。

(文献) Asai T., et al., *Chaos, Solitons & Fractals*, **20**, 863-876 (2004).

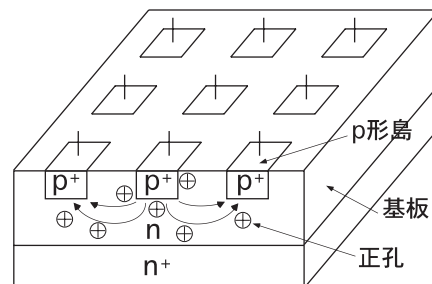


図1 反応拡散デバイスの基本部分

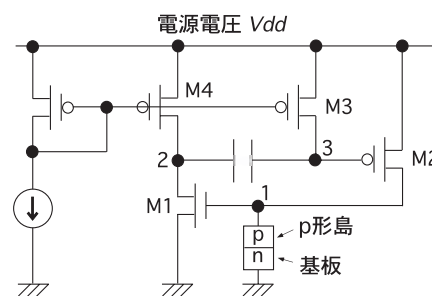


図2 自己触媒作用を持つ電子回路

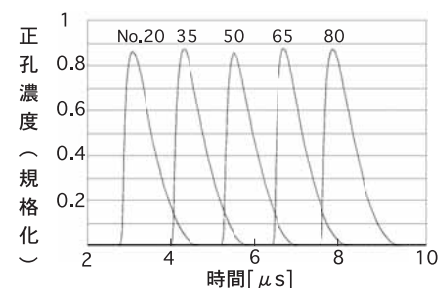


図3 p 形島の一次元配列を伝搬する正孔密度波 (図中 No は p 形島の番号)

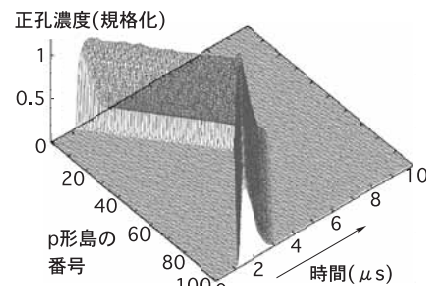


図4 正孔密度波の衝突と消滅