

半導体の少数キャリア拡散を利用した神経細胞デバイスの構成

A Novel Neuron Device using Minority-Carrier Transport in Semiconductors

山田 崇史, 浅井 哲也, 雨宮 好仁

Takashi Yamada, Asai Tetsuya and Amemiya Yoshihito

北海道大学 工学部

Department of Electrical Engineering, Hokkaido University

1 はじめに

神経インパルスは神経細胞の内外へのイオンの移動によって生じる。このイオンの振る舞いは反応拡散方程式で記述できる。我々は新たな情報処理の開拓を目指し、半導体の物理現象を利用して反応拡散方程式を解く集積回路の開発を行なっている [1]。本稿では細胞内のイオンを少数キャリアに見立てた神経細胞デバイスを提案し、その構成要素であるイオンチャンネルデバイスのスイッチング特性を計算機シミュレーションにより示す。

2 神経細胞デバイスの構成

提案する神経細胞デバイスの概念図を図1に示す。神経細胞デバイスは、細胞膜に相当する絶縁体 (SiO_2) によって p 形半導体が囲まれた構造である。絶縁体を貫通するチャンネルデバイスは細胞内の電圧 (膜電位) に応じてイオンに相当する少数キャリアの通過を制御する。

提案するイオンチャンネルデバイスを図2に示す。K チャンネルではゲートが開くと K イオンは細胞外に流出する。膜電位が上昇するとコンダクタンスが増加し、イオンの流出量は増加する。K チャンネルデバイスの pnpn ダイオードは V_p が高くなるか細胞内の少数キャリア密度が高くなるとオン状態となり、細胞外に少数キャリアが発生する。pnpn ダイオードがオン状態となるときに細胞内外の少数キャリアが n 領域へ流入するため、細胞内の少数キャリアは減少する。pnpn ダイオードがオン状態の時には C_m から電荷が放電され、膜電位 V_m が減少する。 M_1 の電流は膜電位 V_m の上昇に伴って増える。そのため、膜電位を高くすると V_p の増加速度が上がり、チャンネルデバイスの (平均) コンダクタンスは高くなる。

Na チャンネルは膜電位が上昇するとゲートを開く。これにより細胞内に Na を流入し、膜電位が増加する。pnpn ダイオードは、p 領域の少数キャリアが増加するか V_p が低くなるとオン状態となる。このとき膜電位 V_m は増加する。また Na チャンネルはコンダクタンスが高くなった後、膜電位によらずコンダクタンスが減少する不活性状態が存在する。この特性を以下のように実現した。デバイスが休止状態において、 V_{dq} は M_2 の電流によって電源電圧値に達している。pnpn ダイオードがオン状態となると、 C_v から電荷が放電されるため V_{dq} は減少する。Na チャンネルデバイスも K チャンネルデバイスと同様に膜電位 V_m を上げると M_1 の電流が増加し、コンダクタンスが増加する。コンダクタンスが増加に伴い V_{dq} は減少し、pnpn ダイオードのしきい電圧を下回るとコンダクタンスは 0 となる。

3 シミュレーション結果

数値計算により Na, K イオンチャンネルデバイス単体の特性を確認した。 u, w は電源電圧で規格化した V_p, V_m 、 v は pnpn ダイオード中の少数キャリア数を表す。 u が pnpn ダイオードのしきい値に達するとダイオードがオン状態となり少数キャリアを発生する。またダイオードがオン状態となると、K チャンネルデバイスでは w の減少、Na チャンネルデバイスでは w の増加という期待通りの動作が見られた。K チャンネルでは w の減少によって M_1 の電流が減少し、コンダクタンスが低くなることを確認した。また Na チャンネルデバイスにおいて w が大きくなってもコンダクタンスが 0 となる不活性状態が実現できていることを確認した。

参考文献

- [1] 山田, 浅井, 雨宮, "半導体の少数キャリアを利用した反応拡散デバイス," 信学技報, NLP2001-132, (2002)

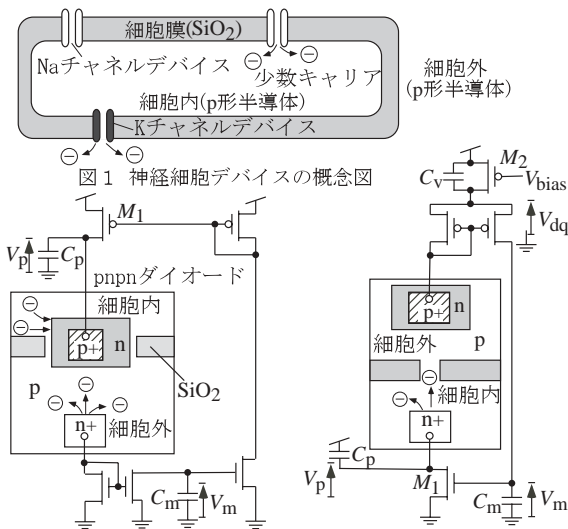
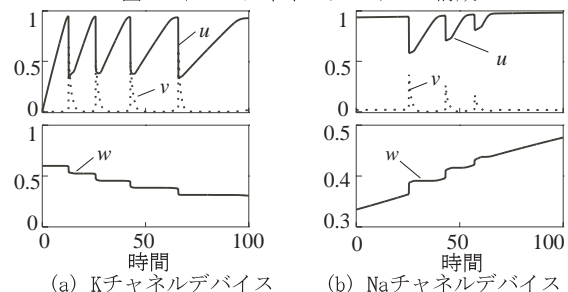


図1 神経細胞デバイスの概念図
図2 イオンチャンネルデバイスの構成



(a) Kチャンネルデバイス (b) Naチャンネルデバイス
図3 チャンネルデバイスの動特性