

# 磁束量子回路によるスパイクニューロンデバイス

SPIKING NEURON DEVICES CONSISTING OF SINGLE-FLUX-QUANTUM CIRCUITS

上野憲一  
Ken UENO

廣瀬哲也  
Tetsuya HIROSE

浅井哲也  
Tetsuya ASAI

雨宮好仁  
Yoshihito AMEMIYA

北海道大学大学院情報科学研究科  
Department of Electrical Engineering, Hokkaido University

## 1 まえがき

磁束量子 (以下 SFQ) 回路を用いたニューロンデバイスを提案する。このデバイスは、スパイクタイミング動作を表現する積分発火型ニューロンモデル (integrate-and-fire model) を回路化したものである。入力により内部状態 (積分ループ列の電流値) が増加し、その内部状態がしきい値を越えると SFQ パルスを出力する。遅延時間 0.2 ns 以下の高速で動作する。

## 2 回路の構成と動作

提案するニューロンデバイスの回路構成を図 1 に示す。入力回路、積分回路、出力回路の 3 ブロックからなる。これらは大まかに見て生物ニューロンの樹状突起、細胞体、軸索に対応する。入力回路は他のニューロンデバイスから SFQ パルスを受けとって積分回路に伝送する。積分回路はその SFQ を蓄積してしきい値判定の動作を行なう。

積分回路は積分ループ列に SFQ を蓄積し、その蓄積数が所定値になったとき出力回路にパルスを送り出す。図の例では LA1 のループから LA5 のループまでが積分ループ列である。SFQ が各ループに 1 個ずつ LA5 のループまで蓄積されたとき、励振インダクタ LB1 を通じて出力回路にパルスが送られる。それを受けて出力回路は SFQ パルスを他のニューロンデバイスに送り出すとともに、逆極性の SFQ パルスを積分ループ列に注入して積分ループ内の SFQ をすべて消去する (内部状態をリセットする)。

積分ループ列は減衰抵抗 R1 を有し、受け取った SFQ を蓄積するとともに、ループ電流を一定の時定数で減衰させて SFQ を一つずつ消滅させる。したがって、時間あたりの入力パルス数が少ないときには、消滅数が入力数を上回るために SFQ は蓄積されず出力はない。入力パルス数が多ければ蓄積数がしきい値に達して出力が発生する。このようにして積分発火型ニューロンモデルにおける減衰積分器 (leaky integrator) の動作を模擬する。

## 3 動作シミュレーション

ニューロンデバイスの動作シミュレーション例を図 2 に示す。興奮性入力に SFQ パルス列 (グラフ上段) を加えたときの内部状態 (グラフ中段) と出力 (グラフ下段) を示したものである。入力と出力は回路ノードの電位で表示し、内部状態は各積分ループに流れる電流の総和で表してある。入力パルス列の間隔が長くパルスが疎なときには、内部状態はしきい値に到達できず出力はない (図の領域 A)。入力パルスがなければ内部状態は時間とともに減少する。一方、短時間内にパルスが連続入力したと

きには、内部状態が閾値に到達して出力パルスが発生し (図の領域 B)、同時に内部状態がリセットされる (図の領域 C)。図の例では、内部状態が閾値を越えてから出力パルスが発生し内部状態のリセットが終るまでの時間は 150 ps であった。

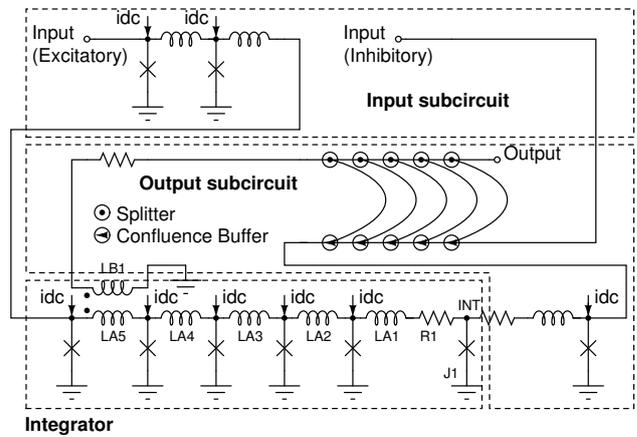


図 1 SFQ 回路によるスパイクニューロンデバイス。idc はバイアス電流。ジョセフソン接合 J1 の臨界電流値は他の接合よりも大。LA5 と LB1 は結合している。

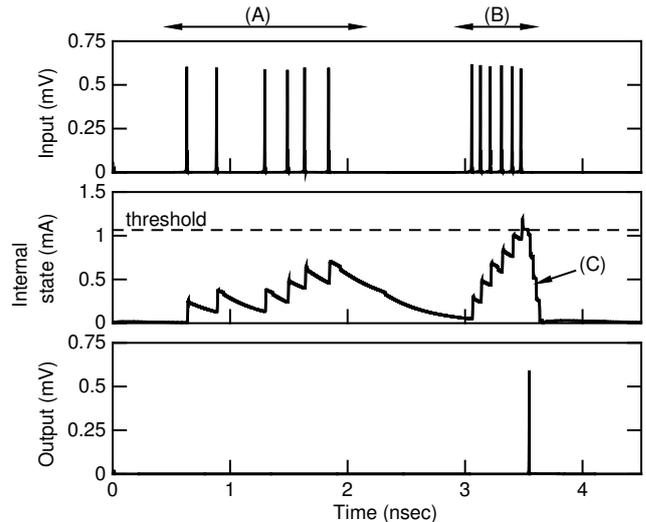


図 2 動作シミュレーション例。興奮性入力パルス (グラフ上段)、内部状態 (グラフ中段)、および出力パルス (グラフ下段)。疎なパルス入力では出力なし (A)。密なパルス入力的时候は出力が発生し (B)、そのあと内部状態がリセット (C)。