

超伝導位相量子ビットを用いた量子人工シナプスの理論

Theory of quantum artificial synapses using a superconducting phase quantum bit

広大総合科¹, 旭川医大物理² ○(B)上藤 真吾¹, (M1)片山 春菜¹, 藤井 敏之², 畠中 憲之¹

Hiroshima Univ.¹, Asahikawa Medical Univ.², ○Shingo Uefuji¹, Haruna Katayama¹,

Toshiyuki Fujii², Noriyuki Hatakenaka¹

E-mail: shingo.1027.takkyuu@gmail.com

【研究の背景】シナプスは、生体内においてニューロン間を繋ぎ、信号を伝達する働きを担う神経伝達系における基本要素である。これまでに提案されている人工シナプスは、古典的な物理学に従う古典人工シナプスであった。しかし、ナノテクノロジーの発展に伴いデバイスを支配する基本原理は、古典から量子へと変遷している。このような背景において、量子力学を動作原理に持つ人工シナプスは未だ提案されていない。これは、量子力学が線形な体系であるのに対し、シナプスの働きを実現するためには、活性化関数の非線形性が必要であるため、シナプスを量子力学的効果を用いて実装することが難しいためである。

【研究の目的・概要】本研究の目的は、シナプスの数理モデルの中でも、入力された信号を記憶し、その総和が閾値を超えると発火するという積分発火の機能を有する量子人工シナプスを提案することである。(1) 記憶性を持たせるために、超伝導位相量子ビット内におけるラビ振動現象を用いる (Fig. 1(A) 参照)。これは、位相量子ビットに信号が入力されたとき、その信号の振幅に比例するラビ振動数 Ω_0 で基底状態から励起状態に粒子の確率密度が遷移することを利用し、励起状態の確率密度 ρ_{11} という形で入力信号の情報を記憶させる。次に、(2) 入力される信号の総和に発火の閾値を設定するために Repeat-Until-Success(RUS) 回路を用いる。これにより、活性化関数としてシグモイド関数を生成し、シナプスの働きに必要な非線形効果を取り入れる [1]。

【結果】超伝導位相量子ビットに対して、内部緩和を取り入れたマスター方程式を基にした減衰ラビ振動の解析より、励起状態の確率振幅の入力信号に対する応答を解析と数値の両面から計算を行った。Fig. 1(B) が入力信号 (電場 E) の振幅, (C) がその入力に対する応答で、励起状態に粒子が存在する確率密度 ρ_{11} を表している。また、(D) はシナプス発火を示す図である。Fig. 1(B), (C) より、振幅の小さな信号であっても、それが確率密度の形で蓄積され、(D) において閾値に達した時にシナプス発火している様子を示している。

【結論】超伝導位相量子ビット内のラビ振動及び RUS 回路を用いて、入力信号に対する記憶性を持ち、積分発火の機能を有した量子力学にその動作原理を持つ量子人工シナプスを提案した。特に、記憶装置として用いているラビ振動に内部緩和の効果を取り入れることで、信号が入力されないとき、 ρ_{11} が減少するという形で、忘れる機能を持ち合わせたより現実的な機能を持った量子人工シナプスになると期待される。

[1] Y. Cao, G. G. Guerreschi and A. Aspuru-Guzik, arXiv:1711.11240 (2017).

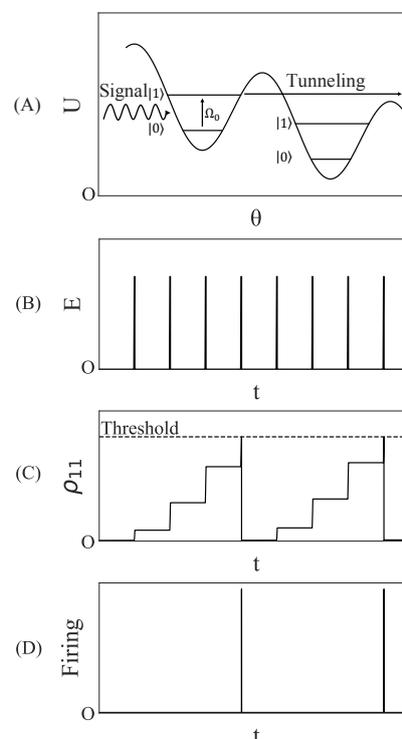


Fig. 1 (A) phase qubit

(B) input signals (C) probability density of excited state (D) synapse firing