

TCAD 技術を活用した半導体量子ビットシミュレータの開発

Development of Simulator for Semiconductor Quantum Bit Design utilizing TCAD

産総研 ○浅井栄大、飯塚将太、池上努、服部淳一、福田浩一、岡博史、加藤公彦、太田裕之、森貴洋

AIST ○Hidehiro Asai, Shota Iizuka, Tsutomu Ikegami, Junichi Hattori, Koichi Fukuda, Hiroshi

Oka, Kimihiko Kato, Hiroyuki Ota, and Takahiro Mori

E-mail: hd-asai@aist.go.jp

近年、大規模並列データ処理における量子計算の優越性の一例が報告され[1]、量子計算機の開発が急速に進展している。半導体量子ビットは、数 nm スケールまで微細化した最先端の製造プロセスによる高集積化が期待できるため、基本素子の有力な候補の一つになっている。更に、シリコンスピン量子ビットに関しては 99.9% もの高いゲート操作忠実度も報告されており[2]、「集積性」と「忠実度」の両方において、高い可能性を秘めている。しかし現在、量子ビットの設計は各技術者の経験則的設計に依存している部分が多く、現状では半導体量子チップで動作するビット数は数個に過ぎない。大規模集積化に向けて開発を加速するためには、従来型半導体素子における TCAD シミュレータに相当する「量子ビット設計シミュレータ」の存在が不可欠となる。

半導体量子ビットの設計においては「量子ビット領域」と同時に、量子ビットを取り巻く「半古典的デバイス領域」を扱う事が重要となる。量子ビット状態制御のためのゲート電圧の印加は、外部の半古典領域のキャリア及びポテンシャル分布も同時に変化させ、その変化はビットの閉じ込めポテンシャルに影響を与える。そのため、量子ビット状態の解析には量子的な振る舞いを示す「量子ビット領域」と「半古典デバイス領域」を自己無撞着に扱うシミュレーションが必要となる。

そこで本研究では、産総研で開発された半古典デバイスシミュレータ (Impulse TCAD) [3] に量子ビットモジュールを融合する形で半導体量子ビットシミュレータのプロトタイプの開発を行った [4]。図 1 に本シミュレータでテスト計算を行ったデバイス構造を示す。このシミュレータでは、シュレディンガー方程式から求められる量子ドット領域 (図 1 の点線で囲まれた部分) の電子分布と、ドリフト拡散方程式とポアソン方程式から求められる外部領域のキャリア分布及びポテンシャル分布が整合するまで繰り返し計算を行う。最終的に得られた量子ビット状態から「ビットの容量」、「トンネル結合強度」、「制御電磁波とビット状態の結合強度」を計算し、単一電子輸送やラビ振動の計算までを行う。図 2、3 に計算した電荷安定図と量子ビット操作の Chevron パターンの一例を示す。本シミュレータでは同一のプラットフォームでマイクロマグネットによる傾斜磁場分布の計算も可能となっており、講演ではマグネット位置に依存する Chevron パターンの計算例についても報告する。

【謝辞】本研究は、文部科学省光・量子飛躍フラッグシッププログラム(Q-LEAP) JPMXS0118069228 及びJSPS科研費JP20K04635の助成を受けて行われた。【参考文献】 [1] F. Arute *et al.*, Nature 574, 505 (2019). [2] J. Yoneda *et al.*, Nat. Nanotechnol. 13, 102 (2018). [3] T. Ikegami, *et al.*, J. Comp. Elec. 18, 534-542 (2019). [4] H. Asai *et al.*, ETDM 2021 accepted.

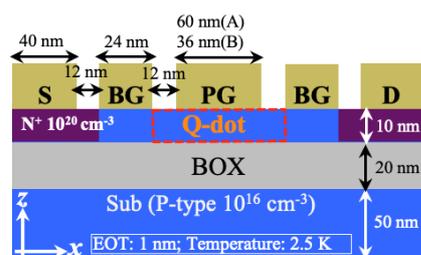


Fig. 1. Schematic figure of the silicon spin qubits employed in this work. The Q-dot region is set to the SOI region under the gate oxide of plunger gate (PG) sandwiched by the barrier gates (BGs).

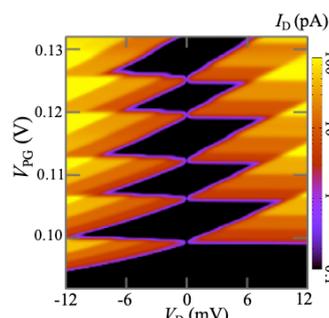


Fig. 2. Charge stability diagrams: I_D , as functions of V_{PG} and V_D . Coulomb-diamond structures are successfully simulated.

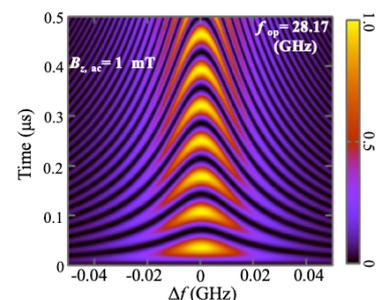


Fig. 3. Demonstration of spin operation (Rabi oscillation) for $B_z = 1$ T.