

「電子・光子等の機能制御」
平成10年度採択研究代表者

鳳 紘一郎

(東京大学新領域創成科学研究科 教授)

「量子スケールデバイスのシステムインテグレーション」

1. 研究実施の概要

大規模集積システムの量子領域までのスケールリングを視野に入れて、量子現象もしくはこれと相似の現象を用いて大量のデータを高速に処理し実時間で柔軟な判断のできる計算システムの開発を目的とする。

その演算部として、量子コンピュータと同等性能の、NP問題をも解けるプロセッサをシリコン技術の枠内で実現するねらいで、量子コンピューティングのエミュレーションを行うハードウェアエンジンをFPGAによって試作し、3量子ビットのGroverアルゴリズムを実行してその精度等の評価を行った。

メモリとの間を仲介するエージェントとして、蓄積パターンとのマッチングをなるべく簡潔に集積したハードウェアで共鳴的に行う共鳴形知的エージェントの研究を進め、頭部レントゲン写真画像の特定の骨格部位を認識できる機能を実証した。

大容量メモリとしては単電子効果と電子クラスタを組み合わせた電子クラスタメモリの開発を進め、特性を調整できる集積単電子メモリの実験に成功した。

これらのユニット間をプログラマブルに連結できる電子場デバイスの可能性を追求するため、エア・ブリッジ形Si細線を試作してその電気的特性を評価し、自然酸化膜や吸着層によって伝導度を大幅に変調できることを見出した。

今後はまずこれらの要素デバイスの中で、本来の意味での量子現象のいずれが、どの程度まで寄与できるかを見極め、全体システムとしての協調の方向を探って行きたい。

2. 研究実施内容

(1) 量子コンピューティングのハードウェア・エミュレーション

量子コンピューティングの原理を参照しつつ、同等の性能をシリコン技術で到達可能なハードウェアで実現することを目的として、量子コンピュータ内部での波動状態の時間発展を集積回路を用いてエミュレートする実験を進めている。昨年度に引き続き、量子ビットの重ね合わせ状態を複数の周波数成分を持った交流信号の重ね合わせで表し、それに対するユニタリ変換操作をFIRフィルタと周波数番地の循環的付け替えによって行う、スペクトラム・コンピュータと名付けたエ

ミュレーション・エンジンを設計し、具体例としてGroverのアルゴリズム（大規模のファイル探索用に提唱されている）を3量子ビット（状態数 $N = 2^3=8$ ）で実行する試験機をFPGAを用いて構成した。理論上は、Walsh-Hadamard変換と選択的反転を組み合わせたユニタリ変換を、 N を越えない回数、すなわちこの場合2回行っただけで、8つの候補解の中で正解に15:1の重みがつく筈であり、実験では2回の変換で図1に示す結果となった（ $i=3$ を正解とした例）。正解以外に確率が分配される様子は、実験機で使用する有効桁数と丸めのやり方を変えると異なる。こうした誤りの確率に影響を及ぼす要因の分析を進めている。

(2) 共鳴型知的エージェント

人間の認識や判断に近い機能を行うハードウェア原理として、量子的効果あるいはそのアナロジーとしての共鳴現象の利用を探索している。その原理は、入力情報 x_1, \dots, x_i を、蓄積してある多数の知識パターン M （例えば画像情報の場合テンプレート）と比較して、最も一致度の高いものを共鳴的に選択し出力するシステムである。昨年度に引き続き検討しているシステムはCMOSで構成され、テンプレートはアナログEEPROMに記憶されていて、Winner-Take-All回路で最も一致度の高いものが選択される。今年度は、入力事象を表現するベクトルを、次元は下げても必要な特徴を保持して、当面の応用に最適な形に選ぶことに注力した。具体例としては昨年度着手した手書き文字の認識に加えて、頭部レントゲン写真における特定の骨格部位の検出を対象として実験を行い、後者については矯正歯科学の演習に使えるほどの的中率が得られている。今後ハードウェアの集積度を上げて行く過程で、量子的な共鳴を利用した場合の有効性を探索して行く予定である。

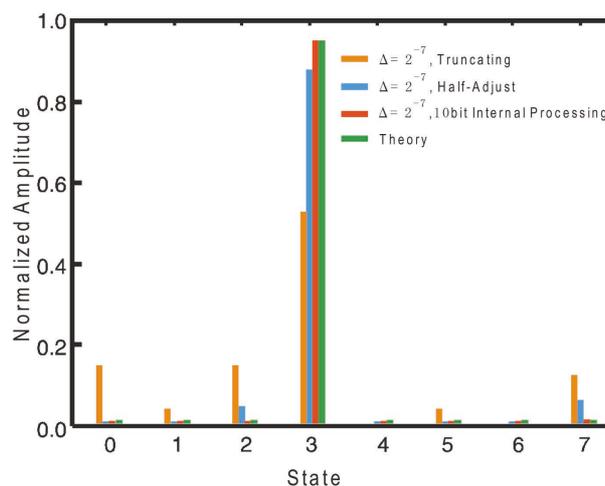


図1 Groverの量子計算アルゴリズムの、FPGAによるエミュレーションの実験結果（各Stateにおける棒グラフは左から、Truncating, Half-Adjust, 10 bit internal processing, 理論値、の順）

(3) 電子クラスターメモリ

シリコン量子ドットを利用して数十から数百個の電子で動作する電子クラスターデバイスおよびメモリを開発し、超低消費電力でしかもエラー率の少ない多値メモリや多機能デバイスに応用することを目的として、昨年までにCVD法により直径8nm程度のシリコン量子ドットを形成し、室温動作のMOSFETメモリを試作した。今年度は単電子トランジスタと本メモリ構造を組み合わせて、単電子デバイスの特性を外部から微調整することに成功した(図2および3)。この方法により、単電子デバイス特有の背景電荷の問題を解決することができる。さらに、このデバイス微調整の手法を用いて2個の単電子デバイスを集積化し、それぞれのデバイスを独立に制御する方法を開発した。また、集積化により、方向性電流スイッチという機能を作り出すことに実験的に成功した。今後は電子数十個を正確に制御するメモリデバイスの構造とその特性について実験とシミュレーションの両面から研究を進めていく予定である。

(4) 電子場デバイス

電子に作用する微視的な場(電子場)を空間的・時間的に変調することにより、要素素子レベルで柔軟な処理機能を発現できる新しい素子の可能性を実証することを目的としている。実験的にSOI構造に対してマイクロマシン技術を適用することにより、中空に架かる(エア・ブリッジ形の)最小線幅20nm, 厚さ40nmのSi細線を得ることができた。その電流・電圧特性は最初のohmic部分に続いて顕著な山形のピークを描いて負性抵抗を示し、さらに高電圧では電流が一定になる。またヒステシスや時効効果も著しい。これらはSiの自然表面の酸化膜や、表面吸着層との相互作用によるSi表面空乏層の厚み変化に原因があると考えられるが、エアブリッジ細線において空乏層による著しい伝導度変調が見出されたことは、多彩な機能素子としての働きを期待させるものである。

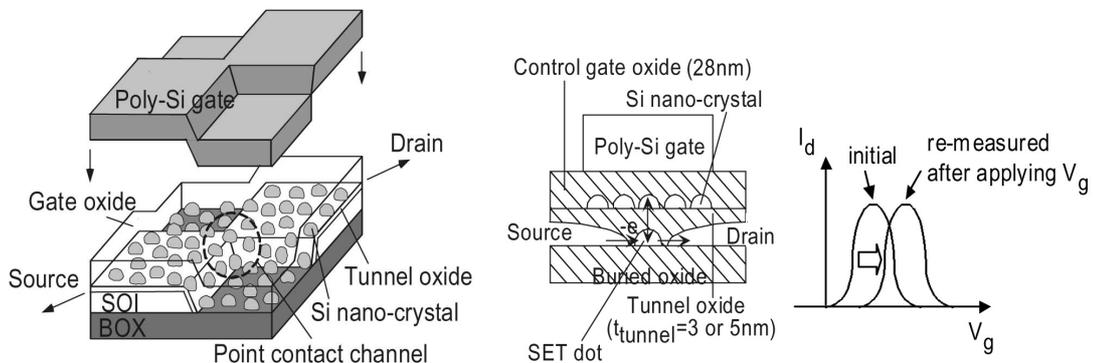


図2．特性を調整できる集積単電子デバイスの構造

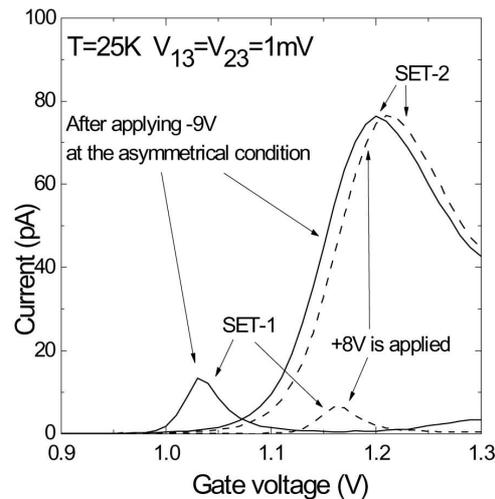


図3 . 単電子デバイスの特性調整の実験結果

3 . 主な研究成果の発表 (論文発表)

S. O'uchi, M. Fujishima and K. Hoh: "Emulation of Quantum Computing by Finite Impulse Responses", Extended Abstracts of 1999 International Conference on Solid State Devices and Materials, pp.96-97, Toshi Center (Tokyo), September 1999.

N. Takahashi, H. Ishikuro, and T. Hiramoto, "A Directional Current Switch Using Silicon Single Electron Transistors Controlled by Charge Injection into Silicon Nano-Crystal Floating Dots", 1999 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM), Washington D.C., USA, pp. 371 - 374, December, 1999.

E. Nagata, N. Takahashi, Y. Yasuda, T. Inukai, H. Ishikuro and T. Hiramoto, "Characteristic Distributions of Narrow Channel Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect-Transistor Memories with Silicon Nanocrystal Floating Gates", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 38, No. 12B, pp. 7230 - 7232, Dec. 1999.

N. Takahashi, H. Ishikuro and T. Hiramoto, "Control of Coulomb Blockade Oscillations in Silicon Single Electron Transistor Using Silicon Nano-Crystal Floating Gates", Appl. Phys. Lett., Vol. 76, No. 2, pp. 209 - 211, Jan. 2000.

H. Fujii, S. Kanemaru, T. Matsukawa and J. Itoh: "Air-Bridge-Structured Silicon Nanowire and Anomalous Conductivity", Appl. Phys. Lett., Vol. 75, No. 25, pp.3986-3988, 20 Dec. 1999.

H. Fujii, S. Kanemaru, T. Matsukawa and J. Itoh: "electrical Characteristics of Air-Bridge-Structured Silicon Nanowire Fabricated by Micromachining a Silicon-on-Insulator Substrate", Jpn. J. Appl. Phys, Vol. 38, No. 12B, pp.7237-7240, Dec. 1999.