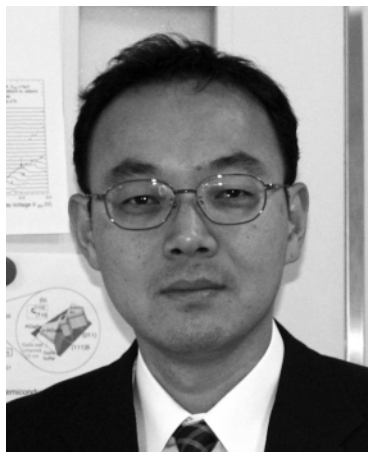


有機金属気相選択成長による 量子ナノ構造の作製と応用

— 単電子トランジスタの作製から回路応用まで —

本久 順一

北海道大学 量子集積エレクトロニクス研究センター 助教授



ナノ構造は、その作製技術から応用に至るまで、広く注目を集めている。その一例として、量子ドットを用いた単電子トランジスタは、超高密度・超低消費電力という利点を有し、将来のエレクトロニクスや情報通信技術を支える素子として期待されている。本研究においては、有機金属気相成長法による選択成長を用いて、量子ドット 量子細線結合構造アレイおよび単電子トランジスタを作製する技術を確立した。作製された単電子トランジスタにおける電子の輸送現象を評価・探索すると共に、単電子トランジスタを集積化した単電子論理回路を作製し、その基本動作を確認した。

1. 研究の背景

近年、ナノテクノロジーという言葉に代表されるように、原子の尺度であるナノメートルの寸法を持つ構造が、その材料や作製から応用に至るまで注目を集めている。その一例として、量子ドット、あるいはそれを利用した単電子トランジスタ¹、さらに単電子集積回路は、単電子輸送という物理面での興味と共に、低消費電力・超高密度集積化の可能性を秘めており、将来のエレクトロニクス・情報通信技術を支える素子として期待される。この時、強い量子閉じ込めを有する微細な量子ドット、および量子ドットとトンネル障壁を介して結合した細線構造を実現すること、さらに、特に応用面において、これら量子ナノ構造の位置を制御しながら高密度に作製し、集積化するための技術が求められている。しかし、現在、単体の単電子トランジスタの作製については、すでに多数報告されているが、多くの場合、ドットとソース・ドレイン間の位置、すなわちトンネル障

壁の正確な制御が困難であるため、少数の例を除き集積化がほとんど進んでいない。

壁の正確な制御が困難であるため、少数の例を除き集積化がほとんど進んでいない。

2. 研究の成果

受賞者の研究グループでは、有機金属気相成長 (MOVPE) 法²を利用し、成長前の基板結晶の一部を絶縁物マスクで覆い、マスクのない部分にのみ成長を行うという、選択成長技術 (図1(a,b)参照) を用いて、様々な量子ナノ構造の作製と評価、

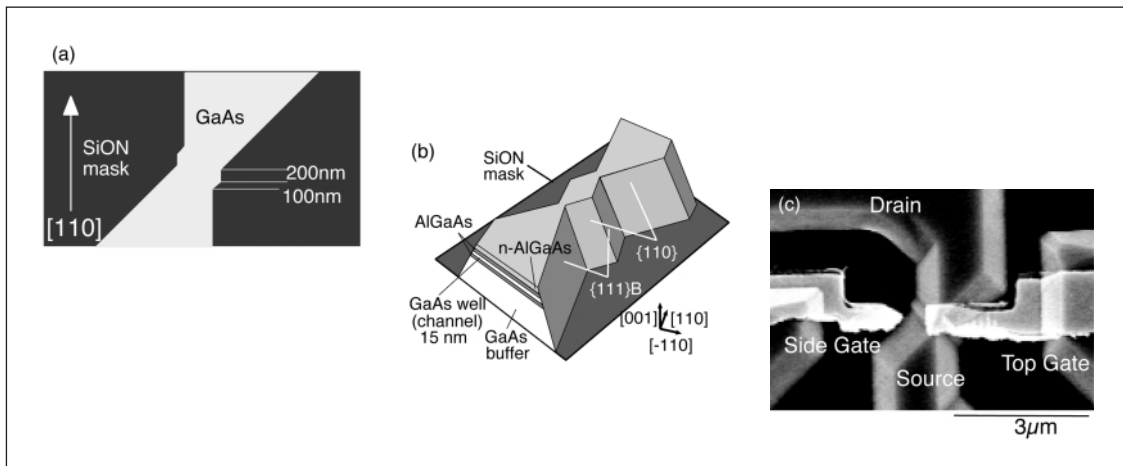


図1 MOVPE選択成長を用いた単電子トランジスタの作製法の概念図。(a) GaAs (001) 基板を SiON 等の絶縁物マスクで覆い、その一部をジグザグ状に窓開けする。その後、(b) MOVPE 法によりマスクのない部分に選択的に結晶成長を行う。この時、結晶が持つ性質を反映して、加工された寸法よりも小さな量子細線構造が成長層上部に形成される。窓開けを行ったマスクパターンに対応して、中央に量子ドットが形成され、量子ドットはくびれ部分に形成されたトンネル障壁を介して、量子細線に接続されており、これにより単電子トランジスタが形成される。(c) 実際に作製したトランジスタ構造の電子顕微鏡写真。ドット近傍にゲート電極を2つ形成している。

および素子応用に関する研究を行ってきた。

受賞者の代表的な成果は以下のとおりである。

MOVPE選択成長により、半導体量子ドットと量子細線構造が結合した構造、およびその結合構造をネットワーク状に並べたアレイを作製した。そして、その結合構造を、**図1(c)**に示すような単電子トランジスタへと応用することに成功した。

作製された単電子トランジスタを用いて、量子ドットを介する電気伝導現象を詳細に調べた。帯電効果による単電子輸送現象を確認し、作製された量子ドットにおいて、非常に強い量子閉じ込めが実現されていることを確認した。また、量子ドット中の電子と電極中の電子とを強くスピンを通じて結合させた場合に、磁性不純物を含む金属において観測されるのと同様の、スピン $S=1/2$ の近藤効果³を観測した。さらに、強磁場中でのスピン1重項 3重項縮退に起因する $S=1$ の近藤効果、さらに、スピン1重項 3重項縮退が僅かに解けた状態で発現する新しい近藤効果(2段階近藤効果)を世界で初めて観測した。

選択成長技術を用いて、2個の単電子トランジスタを同一基板上に作製し、集積化することにより、**図2**に示した2分決定グラフ(BDD)論理⁴に基づく論理回路へと適用した。まず、基本回路要素である単電子BDDノード素子の動作を確認した。そして、**図2(b)**のようにBDDノード素子を2つ組み合わせることにより、**図2(c)**のような集積回路を作製し、2つの入力信号に対するAND/NAND論理回路の動作を確認した。

以上の成果は、量子ドットにおける物理に関して新たな知見を得ると同時に、量子ドットの作製技術・単電子輸送現象の集積回路応用技術の発展に、大きく寄与した。

3. 今後の展開

本研究におけるナノ構造の形成技術は、結晶成長によるボトムアップ技術と、半導体微細加工というトップダウン技術の融合と言え、マスクパターンを工夫することにより、様々な量子ナノ構造が形成できる。その一例として、現在、ナノワイヤ構造や、量子計算の基本構成要素である量子ビットへの適

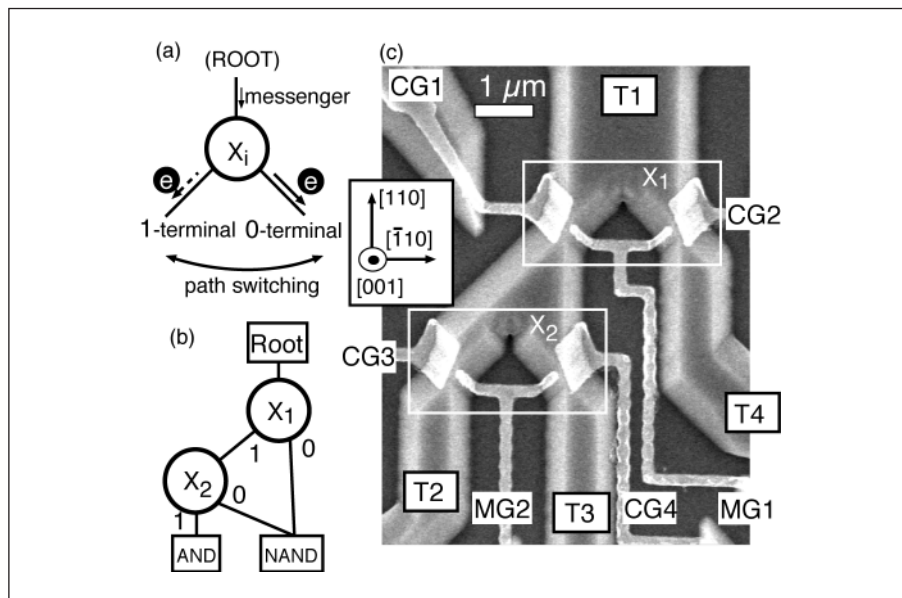


図2 (a)BDDノード素子の動作原理と、(b)BDD論理をベースにしたAND/NAND回路のグラフ表現、(c)MOVPE選択法で作製した4つの単電子トランジスタからなるAND/NAND回路の電子顕微鏡像。単電子トランジスタが4個作製されており、白い四角で囲った部分がBDDノード素子に対応する。

用を目的として、強い閉じ込め効果を有する結合量子ドット構造の作製へと研究を展開している。これらは、作製法だけでなく、物理面から応用面までも含めて、ナノテクノロジーの進展に寄与すると考えられる。一方、単電子トランジスタは、高温で安定に動作させ

るためにも、素子サイズの縮小化を図る必要があるが、より多数の素子を集積化し、超低消費電力・超高密度の集積回路の実現を目指した研究へと展開することが期待される。

補足説明

1 単電子トランジスタ

電子間に作用するクーロン反発力を利用して、電子1個のみでスイッチのオン・オフを制御することのできるトランジスタ。ゲート電位を制御し、孤立した微小な導体島(ドット)に電子を1個付与することで、導体島の電位が上昇して、オン・オフが繰り返される。電子を1個1個制御しつつ素子に流れる電流を制御することができるため、超消費電力という点が最大の特徴である。また、導体島が小さくて容量が小さいほど電位の上昇量が大きいので、安定な動作のためには、ナノメートルサイズの導体島を制御良く作製することが重要である。

2 有機金属気相成長(MOVPE)法

分子線エピタキシー(MBE)法と並び、代表的な化合物半導体薄膜の作製方法。有機金属を主な原料とし、それを気体状態で供給して、半導体基板上で熱分解させることにより半導体結晶の薄膜を成長させる。量産性に優れており、作製された薄膜は、半導体レーザー、発光ダイオード、高移動度トランジスタ、ヘテロバイポーラトランジスタ等、情報通信分野の急速な進歩をハード面で支えている素子へと、広く用いられている。

3 近藤効果

少量の磁性不純物を含んだ金属の電気抵抗が、極低温において極小値を取る現象。局在した不純物の有するスピンのこの現象に関与している。量子ドットは、ある条件を満たせば、磁性不純物としての特徴を示すので、量子ドットを有する単電子トランジスタでも近藤効果が観測される。

4 2分決定グラフ(BDD)論理・BDDノード素子

ある論理入力に対する回路の出力を、2又のグラフに基づいて表現する論理。**図2(a)**のように、1つの入力端子(幹)と2つの出力端子(枝)およびそれらの接点(ノード)

から構成される。ノードでは、幹から入ってきたメッセージャーを、ノードへの論理入力に応じて、左右いずれかの枝に振り分け、そのいずれかにメッセージャーが出力されるかによって、論理出力0/1の判定を行う。この振り分け作業を行うのがBDDノード素子であり、本研究では2つの単電子トランジスタを組み合わせる(**図2(c)**の白四角で囲った部分)ことにより、BDDノード素子を構成し、さらにBDDノード素子を組み合わせることにより、**図2(b)**に示したAND/NAND回路だけでなく、様々な論理回路が構成できる。また、単電子BDD論理では、電子1個をメッセージャーとして用いることができる。

References(参考文献)

- 【1】F. Nakajima, Y. Ogasawara, J. Motohisa, and T. Fukui: "GaAs dot-wire coupled structures grown by selective area metalorganic vapor phase epitaxy and their application to single electron devices", J. Appl. Phys. 90, 2606(2001).
- 【2】J. Motohisa, F. Nakajima, T. Fukui, W.G. van der Wiel, J.M. Elzerman, and S. De Franceschi, and L. P. Kouwenhoven: "Fabrication and Low-Temperature Transport Properties of Selectively Grown Dual-Gated Single-Electron Transistors", Appl. Phys. Lett. 80, 2797(2002).
- 【3】W.G. van der Wiel, S. De Franceschi, J.M. Elzerman, S. Tarucha, L.P. Kouwenhoven, J. Motohisa, F. Nakajima and T. Fukui: "Two-stage Kondo effect in a quantum dot at high magnetic field", Phys. Rev. Lett. 88, 126803(2002).
- 【4】F. Nakajima, Y. Miyoshi, J. Motohisa, and T. Fukui: "Single-electron AND/NAND Logic circuits based on a self-organized dot network", Appl. Phys. Lett. 83, 2680(2003).