

大阪大学大学院 基礎工学研究科
物理系専攻 電子光科学分野
固体電子工学講座 蒲生研究室



研究室紹介

蒲生 健次*

Osaka University, Graduate School of Engineering Science,
Department of Physical Science, Division of Advanced Electronics
and Optical Science, Area of Solid State Electronics, Gamo Group

Key Words : Nanometer Processing, Quantum Functional Device, Focused Ion Beam,
Quantum Structure, Single Electron Transistor

1. はじめに

大学院重点化のための改組により旧電気工学科の岡本博明教授と蒲生の二講座が、合同して当講座を構成している。連携をとりつつ二つの研究グループが独自のテーマで活動しており、キーワードは岡本教授のグループではアモルファス半導体や光電変換デバイス、また我々のグループではナノメートルプロセスや量子化機能デバイスである。

ここでは、固体電子工学講座のうち、スタッフ四名と大学院生約十名からなる我々のグループについて紹介する。高度情報化社会を支える半導体デバイス、とりわけ集積回路の発展に先駆する半導体の微細加工技術の進展の一翼を担って、長年我々の研究グループは電子、光、イオンビームプロセスを用いた超微細加工とこれを応用した先端デバイスの研究を進めてきた。電子ビームリソグラフィでは、8nmのパターンの形成にすでに80年代半ばに成功しているが、これは電子ビームレジストの分子サイズで決まる解像限界に近い。このようなプロセスにより作製された超微細構造では、量子効果やメゾスコピック現象また一電子の帯電エネルギーに支配されるク

ロン・ブロッケードが観測できるようになる。これらは従来のデバイスと動作原理を異にする量子化機能デバイスの出現を期待させものであり、その実現を目指している。

2. 研究の概要

2.1 ナノメートルプロセス

電子ビームリソグラフィについては、汎用の電子線レジストの本質的な解像限界に達しており、課題は様々な試料構造を実現するためのデバイス技術としての完成度の向上に移っている。図1はこの方法を用いて作製した試料の例で、ヘテロ構造半導体表面に形成した10本のAuPdショットキーゲートにより3つの直径300nm以下の量子ドットを作製するためのものである。ここで各電極の線幅と間隔はともに100nm程度である。

イオンビームは、リソグラフィ、不純物ドーピン

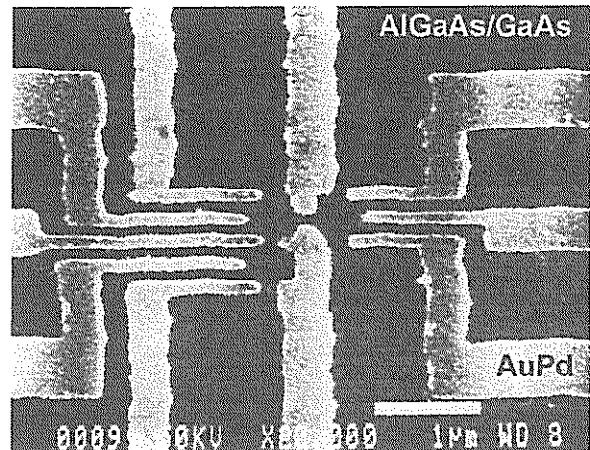


図1 ショットキーゲート(線幅, 間隔 ~100nm)を用いて作製した量子ドット

* Kenji GAMO
1940年3月30日生
1968年大阪大学・大学院工学研究科・
電子工学専攻・博士課程修了
現在、大阪大学大学院・基礎工学研
究科・物理、教授、工学博士、半導
体工学・超微細加工技術・量子化機
能デバイス
TEL 06-6850-6300
FAX 06-6850-6341
E-Mail gamo@ee.es.osaka-u.ac.jp



グ、エッチング、薄膜堆積などさまざまな半導体プロセスを可能とする。集束イオンビーム(FIB)プロセスは、従来は微細化のため必須であるマスクを使用せずリソグラフィ工程を省いて、半導体の任意の場所を選択的に特性制御するもので、プロセス技術の長年の夢を実現できる。この分野では装置とプロセスの開発の両面で世界に先駆ける成果を挙げており、種々のイオンが得られる液体合金イオン源と質量分析器を搭載したFIBシステムの設計は、その後市販された装置に取り入れられ広く用いられている。また減速光学系を開発し、100eV以下の低エネルギーFIBを実用化している。独自に開発したマスクレスFIB誘起エッチングやデポジションは超LSIのマスクや回路の補修・診断に不可欠な技術となるなど、FIBプロセスは様々な分野に普及している。

FIBプロセスは超高真空のもとで行われるため、清浄な表面界面を保ちつつ他のプロセスと複合化できる。FIBによる高解像度の面内加工と、結晶成長による積層方向の組成制御を組み合わせ3次元微細構造を作製するため、図2に示す高エネルギーおよび低エネルギーFIBプロセス装置と分子線結晶成長装置を超高真空試料搬送系で結合したシステムを開発した。これを用いて、GaAs/AlGaAsヘテロ構造系における高品質の変調ドープ構造や埋め込み構造を選択的に作製することが大きな課題である。このためイオン注入および再成長プロセスについて研究を進め、イオンビームの低エネルギー化によるイオン注入効率の改善や誘起欠陥の低減を実証している。このほか、FIBを用いたナノメートルエッチング、薄膜堆積、酸化膜形成の一連のプロセスを連続して行い、微小トンネル接合の試作に応用している。

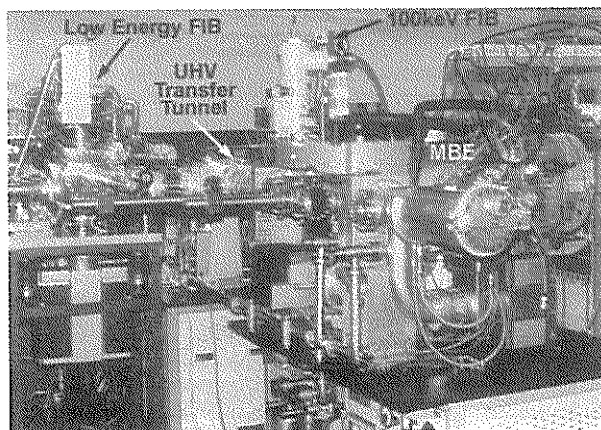


図2 集束イオンビーム(FIB)装置と分子線結晶成長(MBE)装置を組み合わせたその場プロセスシステム

2.2 量子化機能デバイス

a) メゾスコピック系の電子物性

電子の特性的な寸法である非弾性散乱長、弾性散乱長、フェルミ波長に匹敵する微細構造(メゾスコピック系)では、電子の運動が制約を受け様々な量子効果が現れる。

電子波の干渉に由来する同一の試料と測定条件では再現性をもつ磁気指紋と呼ばれる伝導度の揺らぎや、リング試料におけるアハラノフ・ボーム効果を観測し、その構造依存性を明らかにした。また磁気抵抗の解析から、メゾスコピック系に特有な伝導度の非局所性や、非弾性散乱長の温度、電子密度、試料構造依存性などの詳細な研究を行った。

弾道性伝導では、弾性散乱長 $10\mu\text{m}$ 以上の高品質2次元電子ガス系から作製した線幅500nm以下の量子細線十字路において、電子の直進性に起因した負の曲り抵抗を初めて見出した。これは弾道性伝導をもっとも直接的に示す実験結果として知られている。このほかポイントコンタクトにおける抵抗の量子化や電子の磁気集束など弾道性輸送に特徴的な現象を観測し、量子輸送の多様性を明らかにしてきた。

これらの物性的研究と平行して、高い変調度が期待できる電子波結合デバイスを提案し、理論的にその設計条件と動作特性を求め、実験的な検証を進めている。

b) 単電子デバイス

微細構造系では、電荷の離散性すなわち電子1個

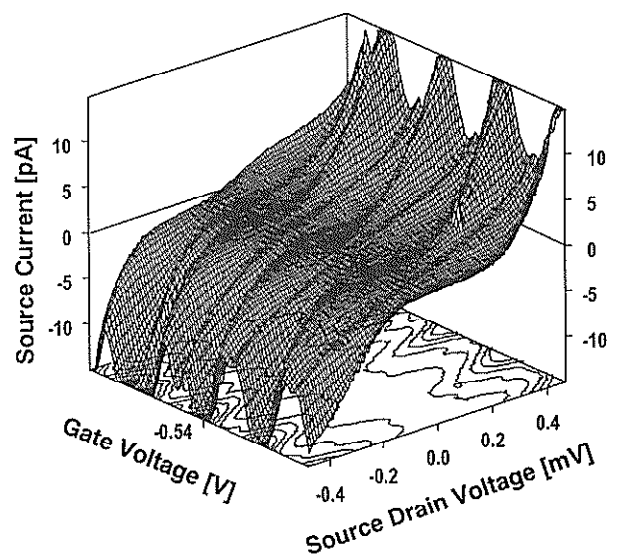


図3 直列量子ドットの電流電圧特性とそのゲート電圧依存性

の存在が有意なエネルギー差を与えるために、輸送現象に影響が現れる。これに着目したものが単電子デバイスであり、代表的なものはクーロン・ブロッケードを利用する単電子トランジスタ(SET)である。電子が1個単位で制御できることは究極の電子デバイス機能であり、高密度集積化や低消費電力が期待できる。我々のグループでは通常の容量結合型のSETのほかに、抵抗結合型や環境インピーダンス制御型など新しい動作モードを持つSETデバイスを提案実証している。図3は、図1に示した試料の左側2個の直列量子ドットについて、極低温における電流電圧特性を測定した結果で、特徴的なクーロン・ブロッケードによる非線形性がみられる。個々の量子ドットがある定まった電子数をもつブロッケード領域がゲート電圧に依存して周期的に現れ、ドットの電子数が1個ずつ増減することを示す。またバイアス電圧により、量子ドットと電極のエネルギーが相対的に変化しクーロン・ブロッケードが破れる様子がわかる。量子ドット間の結合を増すと、2つの孤立したドットから単一の大きなドットに移行することを明らかにした。現在は単電子デバイスを作製し、100mK以下の極低温での動作を確認した段階であり、単体SETの増幅度の向上、集積化、高温動作など課題が山積している。今後、材料と構造設計およびプロセス技術を総合して、ロジック、メモリー、qubitなどのデバイスとしての可能性を追求していきたい。

c) 微細磁性体

磁性金属多層膜における巨大磁気抵抗の発見と、その実用化を契機として微細系の磁性に関心が集ま

り、電子スピンを利用したデバイスや超高密度磁気記録の開発が進められている。我々のグループでは、単層および多層磁性材料における構造微細化による磁区制御の可能性を明らかにするため、微細磁性細線について電流磁気効果の観測を手がかりに磁化過程とその構造依存性を研究している。さらにスピン注入による磁化のスイッチングや微小トンネル接合におけるスピン依存トンネル現象の観測とそのデバイス応用を目指している。

3. おわりに

微細加工とりわけナノメートルプロセス技術は、今後もエレクトロニクスの発展を支える基本技術として、ますますその重要性を増すと考えられる。すでに確立されている10nmレベルの微細加工技術を、目的構造およびデバイスに応じて最適化することにより、さらに広範な応用面を開拓し研究成果の蓄積を生かしていきたい。微細構造系において顕著となる電子の波動性、弾道性および電荷の離散性は、物性的な関心のみでなく、微細化の限界に直面する従来の半導体デバイスの動作原理に代わる新しいデバイス機能として注目されており、これに基づく量子化機能デバイスの開発は挑戦的な課題である。

ナノテクノロジーが今世紀の中核的科学技術として位置づけられ、研究の気運が高まっている。その具体的な姿はまだ明確ではないが、高度に進展し成熟が進む材料科学における新たな展開の方向であるかもしれない。これらの状況も考慮しながら、我々が開発してきたナノメートルプロセスを用いてなんらかの貢献ができればと考えている。

