

半導体量子細線および量子箱構造の作製・物性・応用に関する研究動向

Current Research Activities in Fabrication, Physics, and Applications of Quantum Wire and Related Structures

榎 裕之*
Hiroyuki SAKAKI

1. 研究の背景と量子超薄膜ヘテロ構造

電子の量子力学的波長 λ ($\sim 100 \text{ \AA}$) と同程度の寸法の半導体微細構造の内部では、電子の波動性が顕在化するため、従来の半導体では見られないさまざまな物性や機能が出現する。特に近年著しい進歩を遂げた結晶成長技術を駆使して、原子層 ($\sim 3 \text{ \AA}$) 単位で膜厚を制御した各種の超薄膜とその積層ヘテロ構造が作られ、新物性の解明が進むと共に、種々の新デバイスが実現されつつある。

たとえば、1976年本研究者らによって開始された超薄膜ヘテロ構造の界面に沿う2次元電子伝導の研究は、1978年にベル研究所における高い電子移動度を示す変調ドープ構造へと発展し、さらには富士通研究所における超高速トランジスタ (HEMT) の誕生へと展開し、現在では低雑音マイクロ波トランジスタとして日米で商品化されるに至っている。このほかにも超薄膜を用いた半導体レーザもその高効率性のゆえに高出力レーザとして商品化され、エレクトロニクス応用の新分野を切り拓きつつある。さらに、共鳴トンネル効果やシュタルク効果など学術研究の対象に留まっていた量子力学的現象も新しいデバイスとして使用できる見通しが得られつつある。

2. 量子細線および量子箱を用いたデバイスの提案と実現のための課題

電子の波動性を制御し、これを利用していく試みは、これまで超薄膜構造を対象として進められてきた。今後はこうした研究の継続的發展に加えて、未踏分野の探索が重要となろう。本研究者らは、新しい発展性の望める分野として、電子の閉じ込めの次元性をさらに高めた構造を探索すべきことを、1975年以来提唱し、種々の新デバイスを提案し、解析を行ってその可能性を示してきた。たとえば、(1) 超薄膜の膜厚 L_z を一定の周期 Λ で変えた「表面超格子デバイス」を1975年に提案し、膜内の2次元電子が面内でブラッグ反射を起こすために、負性抵抗や特異な入出力特性を持つトランジスタとして機能するこ

とを予測・解析した。また(2) 電子を2方向に閉じこめた量子細線を提案解析し、電子の弾性散乱が抑制されるため $10^7 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 以上の超高電子移動度が達成できる可能性とこれを用いたトランジスタの特異な機能を論じた(1980年)。さらに、1982年には、(3) 量子細線や量子力学的な寸法の箱構造を、半導体レーザの活性層に用いた新しい量子井戸レーザをArakawaと共に提案・解析して、発振しきい値電流の低減や温度依存性の抑制に極めて有効であることを示してきている。

これらの新デバイス構造は、提言した時点では、微細加工技術上の制約のために、実現が困難視され、机上の空論と考えるか、遠い将来のテーマと見なす考えが支配的であった。しかし、これらの提案が刺激となって、実験的努力を開始する研究者が米国を中心に現れ、最近では本研究所を含めて日本でも多くの研究者の関心と努力を集めつつある。いわば、固体物理やエレクトロニクスの最新テーマとして流行の兆候さえ見られるようになった。今回、こうした状況を考慮して、米国での研究の動向を調べるとともに、将来の方向に関する討論を目的とした調査旅行を行った。以下はその調査報告である。主たる情報は、「微細加工の物性と化学に関するゴードン・コンファレンス」(1986年7月7日～11日、於ニューハンプシャー州ウォルフエボロ)での講演と討論をとおして得たものと、その後訪問したマサチューセッツ工科大学のグループとの討論に基づいているが、その後を得た情報もあわせて示してある。

3. 超微細半導体構造の形成と物性解明の研究の現状

3-1 形成法の原理とその分類

電子の量子力学的な波動性を顕在化させるには、横幅が 1000 \AA 以下の構造を作る必要がある。できれば 100 \AA ほどの寸法の構造を 10 \AA 以下の誤差で作りたい。現在までに多くの試みがなされ、この領域へ手がかかり始めている。それらを大別すると以下のものがある。

- (A) 電子ビーム (EB) で描画し、追加工を施すもの。
- (B) (集束した) イオンビーム (IB) で描画し、このと

*東京大学生産技術研究所 第3部

き物質に局所的な改質や除去を行うもの(改質とは、多結晶化や混晶化あるいは酸化や不純物の導入などを意味する)。

- (C)レーザ・ビーム(LB)で干渉露光により格子縞を形成し、追加加工を施すもの。
- (D)急峻な段差を含む構造を作り、その側面上へ蒸着膜や酸化膜を形成して、その厚さをパターン寸法とするもの。
- (E)結晶の主軸からずらした表面に生じる原子寸法のステップ(段差)を利用して、局所的な結晶成長を行うことにより構造を形成するもの。
- (F)厚さ100Åほどの超薄膜の積層構造を作り、その断面を露出させ、その面上に反転層などを形成する方法。
- (G)(A)~(D)の方法で作製したパターンをX線で他の材料へ転写した後に追加加工を施すもの。

などである。ここで「追加加工」とは、形成するパターンに従って(I)選択的な除去、(II)選択的な堆積、(III)選択的な改質、などを行うことである。

以下に、現在進行中の研究に用いられている加工法と得られた知見について述べる。

3-2 量子細線の形成の試みとその伝導特性の研究

ベル研究所のスコッチポルらは、Si MOS FETの超薄膜チャネルの横幅 W を前節の(A-I)の方法で、2000Åから400Åまで細かくした細線を形成しその伝導特性を調べている。その伝導率を磁場やゲート電圧の関数として調べると、不規則的なゆらぎが再現性よく見られ、これが複数の経路を経た電子波の干渉に起因するものであること(普遍的な伝導率のゆらぎ)を結論づけている。同様の結果は、GaAs/AlGaAsヘテロ構造細線について、ケンブリッジ大学やベル研から、またGaAs細線を対象として阪大や東大からも報告されてきている。

さて、1対の量子力学的細線を用いて、リングを作ると、電子波がリングを周回または半周した後に干渉する可能性が生じる。このとき、電子波の位相がリングを貫く磁束の影響を受けるため、伝導率が磁場の作用で周期的に変化し、その周期が磁束の単位で(h/e)または($h/2e$)となることが予測される。エール大学のウィンドとブローらは金属リングでこの予測を裏付ける実験を行い、電子の散乱の多少に応じて、(h/e)と($h/2e$)のうち一方の周期成分が支配的となることを示した。後者はアハラノフボーム効果と呼ばれている。同様の実験は、金属を用いてウェブ(IBM)らによって、またGaAs/AlGaAs系を用いてチャン(ベル研究所)やグッタ(パデュー大学)らによっても報じられている。なお、2経路の波の干渉は静電界によっても制御できる可能性があり、これを高感度(微小信号用)トランジスタとして利用できる可能性がグッタらによって指摘されている。

100本以上の量子細線を並列に接続した場合、平均化の

作用のため、前述の伝導率の普遍的なゆらぎの成分が抑制される。マサチューセッツ工科大学のグループはシリコンMOSトランジスタのゲートの部分に工夫を加え、周期2500Åの金属格子をゲートとした素子を作り、伝導率のゲート電圧依存性に1次元電子状態に伴う構造が生じることを報じている。この際用いた手法は、レーザの干渉露光法で作製した格子縞に、金属を選択的に堆積させてマスクパターンを作製し、X線を用いて転写し、再度金属を選択堆積する方法である。MITのこのグループは過去10年近く、X線露光技術の研究の先導的役割りを果たしてきており、研究施設に、手作りの工夫をこらした露光装置がさりげなく設置・利用されている点に感銘を受けた。

筆者らの提案・解析した表面超格子デバイスは、MITのこのグループが早くから関心を示し、製作の努力を続けている。前述の量子細線を並置した構造において、電流を細線と垂直な方向に流せば、表面超格子効果が期待される。この考えに従って、アントニアディス(MIT)らは、1985年に伝導率のゲート電圧依存性や異方性を調べ、観測された構造が表面超格子の効果として説明できると主張している。同様の実験は、GaAs/AlGaAs系を材料として筆者らやNTTの椿らによっても進められつつある。また、ハンブルグ大学のグループは類似の構造において、量子単位間の光学遷移を観測したことを報じている。これらの研究は、いずれも周期が2000Å以上の表面超格子を対象としており、真に超格子効果を反映した現象であるか否かにつき慎重な判断が必要と思われる。

3-3 量子細線および量子箱構造の形成の試みと光学特性解明の研究

前述のように、電子と正孔とが量子細線や量子箱に閉じ込められれば、レーザのしきい値電流やその温度依存性が低減されるなど、種々の利点が期待される。このため、作製の試みが活発化しつつある。以下にその現状について述べる。

GaAsと(AlGa)Asからなる超薄膜の量子井戸を電子ビームレジストで覆い、細線のパターンを描画した後、反応性イオンエッチング法で選択的な除去を行えば、量子細線や量子箱状の構造を形成することができる。ベル研究所のペトロフらおよびベル通信研究所のクレイグヘッドらは、300~500Åの寸法の量子細線や量子箱構造を作り、蛍光スペクトルを調べている。前者は、加工後に露出部分を(AlGa)Asで被覆することにより、後者は加工時の条件を最適化することにより、加工損傷に伴う発光効率の低下を防止して、ある程度の発光強度を確保した。しかし、蛍光スペクトルには量子単位に起因する構造は見いだされるには至っていない。この事実は、光学応用において、加工に伴って露出される面の安定化が極めて重要であることを示している。

加工の際、表面が露出するのを防ぐために、ベル研のペトロフとNTTの岡本らは、量子井戸超薄膜の一部を選択的に混晶化させる手法を独立に提案している。この方法では、GaAsと $(Al_xGa_{1-x})As$ からなるサンドイッチ型の量子井戸の一部に、Gaイオンの注入により結晶欠陥を発生させ、この状態で試料を加熱することにより、両物質を局部的に混晶化させて $(Al_yGa_{1-y})As$ 領域を形成している。両者とも、観測される蛍光スペクトルに一連の構造が生じることを見だしており、量子細線による1次元電子状態の発生に起因するものと解釈している。ただし、この手法で導入される欠陥は注入領域の外側にまで広がりを持って分布しており、混晶化領域と非混晶化領域との界面を急峻にすることは極めて困難となる。したがって、この方法で作らうる細線の最小断面寸法は500Åほどに留まるものと思われる。

4. 課題と展望—結びに代えて—

以上述べたように、量子細線や量子箱に関する研究は内外の多くの研究機関で活発に進められるようになってきている。しかしながら、達成された寸法は数百オングストロームの領域にあり、多くの量子状態の関与した現象がかるうじて見え始めた段階に留まっている。今後この分野で期待される現象と機能を実現していくには、寸法100~300Åの構造を0~30Åほどの誤差で作し、しかも作製に伴う結晶欠陥や界面凹凸の発生を十分に抑制できる技術を創り上げていくことが必要であろう。こうした技術上の要請を満たす方法としては、§2と§3で述べたように種々の可能性が候補となるが、現在までは、電子(またはイオン)ビームを用いたリソグラフィー技術を高度化する方向が開発の中心となってきている。今後は、この方向とは別に、リソグラフィー技術とは別の原理で寸法制御をする試みも精力的に検討される必要がある。

たとえば、筆者が1980年に提案したように、 $(AlGa)As$ とGaAsとの積層構造で量子井戸を作り、これにV字型の溝を掘り込み、その端面の部分にFET構造を形成してやれば、電子をGaAs超薄膜が端面と接する部分にのみ

誘起することができるものと期待される。同様の考えは、最近になってIBMのEsakiやベル研究所のLuryiらによっても議論され、量子細線の形成の一形成法として注目されている。これまで、この考えが実証されるに至っていない理由は、V字溝の端面を形成するときに多くの結晶欠陥が発生して端面での電子伝導を困難にしていることにある。今後、その原因の解明と除去の研究が進めば、ひとつのブレイク・スルーとなるものと期待される。

リソグラフィに頼らずに、超微細構造を形成する第2の方法としては、§3-1(E)で述べた方法がある。この方法は、結晶の主軸からわずかに(たとえば θ ラジアン)だけ傾けた方向を表面とする結晶基板には、周期 Λ が $(a/\sin\theta)$ であり、高さが一原子層 a ($\approx 2.8\text{\AA}$)の原子ステップが生じる事実を利用するものである。カリフォルニア大学のペトロフらは、こうした基板にGaAsとAlAsとを0.5原子層ずつ交互に成長させた場合、成長がすべてステップの端部で進行すれば、太さが $\Lambda/2$ のGaAsとAlAsの細線を横に並べた構造が形成できる可能性を指摘している。この手法は、(a)原子ステップが均一に形成されることと、(b)結晶成長がすべてステップ端で進行する条件が整って、初めて実現可能となるものである。最近NTTの福井らにより、これを示唆するデータが得られつつあるが、明瞭に検証されるに至っていない。ただし、これらの結晶成長の詳細が解明されて制御されれば、極めて有力な加工法となるものと判断される。

以上述べたように、横方向の寸法が100Åほどの微細構造への関心が世界的に高まりつつあり、その形成法・物性の予測と解明・デバイス応用に関する理論上・実験上の研究が活発化しつつある。今後解決すべき課題は大きいですが、地道な努力を行えば、この新分野を肥沃な土地に発展させることができよう。

本稿は、生産技術研究奨励会の三好研究助成を受けて行った調査を基にして記したものである。末筆ながら、研究の調査を可能にするとともに本分野の将来を考える機会を与えて頂いたことに、深く御礼を申し上げたい。

(1987年12月4日受理)