

◆ 半導体超薄膜における電子物性とデバイス応用に関する研究 ◆

1. 半導体超薄膜ヘテロ構造と量子効果

トランジスタや半導体レーザーなどの半導体デバイスは、シリコンやガリウムヒ素など半導体材料に固有な物性を巧みに利用してさまざまな機能を達成している。これらのデバイス機能を越えた新しいデバイスの実現には、新しい原子配列を持った新物質の開発が不可欠となる。図1に示すように、半導体の厚さを著しく薄くして、電子の量子力学的波長 $\lambda_e$  (約100オングストロム)と同程度の厚みにしたものを超薄膜と呼び、これが2種以上の構成要素できている場合には超薄膜ヘテロ構造と呼んでいる。これらの構造では電子の波動性が顕在化するためさまざまな新機能を実現できる可能性がある。

例えばGaAs超薄膜をAlAsで挟んだ構造では、電子がGaAsに閉じ込められるため、自由運動は膜面に沿う2次元方向に限定される。このとき膜面に垂直な方向には、水面上の油膜に閉じ込められる光波と同様に、電子は特定波長の定在波状態をとる。この効果を量子サイズ効果と呼び、そうした超薄膜を量子井戸と呼んでいる。

逆にAlAs超薄膜をGaAsで挟んだ場合、電子がAlAs層をトンネル効果で透過する可能性が生じる。したがってヘテロ構造を構成する薄膜の組成・膜厚・配列順序を選ぶことにより、多様な量子力学的現象と機能が生まれる可能性がある。

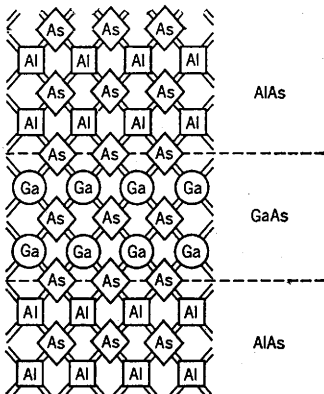


図1 半導体超薄膜ヘテロ構造の概念図

2. プロジェクトの発足経緯・組織とその後の発展

生産技術研究所における量子効果の研究は1973年着任の榊教授によって開始された。当初は、量子細線を並べたプレーナ超格子概念の提唱と解析など主として理論的研究が中心であった。1976~77年18ヶ月間留学して帰国した榊によって、分子線エピタキシー (molecular beam epitaxy : MBE) 装置が設計・試作されたため、(a)各種の超薄膜ヘテロ構造の形成と、(b)これを用いた量子効果物性の研究、ならびに(c)そのデバイス応用の実験的研究を先駆的に進めることが可能となった。

試作装置は当時としては世界的にも数少ない本格装置であり、順調に稼動して、いくつかの顕著な成果も達成された。このため、1981年には制度発足直後の文部省特別推進研究制度の助成対象プロジェクトに選ばれ、支援を受けて研究を進めることとなった。このときのグループは、代表者を榊が務め、グループ員としては、濱崎 (高周波測定担当)、安藤恒也 (物性研、理論担当)、川路紳治 (学習院、電子物性担当) が正式参加した。このほか、荒川・石田らの教官、吉野淳二 (現東工大) らの職員、ならびに大野 (現北大)、平川 (現生研)、土屋 (現カリフォルニア大)、田中 (現東大工学部) らの多くの大学院生の協力を得た。

なお、本プロジェクトは後に述べるように順調に進展し、その成果は内外で相当の評価を得ると共に、研究所内では関連研究者が増加し、強力な人材集団を形成した。この結果、概算要求「ヘテロ電子材料設備」('85~'89)、創造科学推進事業「量子波プロジェクト」('88~'93)、大型共同研究「メソスコピックエレクトロニクス—基礎と応用—」('88~'90)、など関連プロジェクトなどの発足・発展の基盤となった。

3. 研究のねらいと主要成果

3.1 超薄膜ヘテロ構造の膜厚および界面平坦性の原子スケールでの制御

量子効果の究極的な制御には、ヘテロ界面の構造を原子スケールで解明し、これを制御する必要がある。本研究では量子井戸の蛍光線の拡がりや電子移動度の測定から界面凹凸の高さや、横寸法を決定する手法を確立した。この結果、界面の凹凸は高さが一原子層程であること、その横寸法は通常GaAs面上で約200 Å, AlAs面上で50 Å程であること、横寸法は成長表面における原子の拡散過程で支配されていることが判明した。更にGaやAl分子線の供給を100秒ほど中断する新しい成長プロセス（堆積中断法）を考案し、これにより、原子の面に沿う移動が進み、原子スケールで平坦な表面・界面の得られることを初めて見いだした。図2は、この手法で作成したヘテロ構造の断面、電子顕微鏡写真であり、3原子層のAlAs層（8.4 Å）がGaAs結晶内に埋め込まれ、良好な界面を持つ様が見てとれよう。

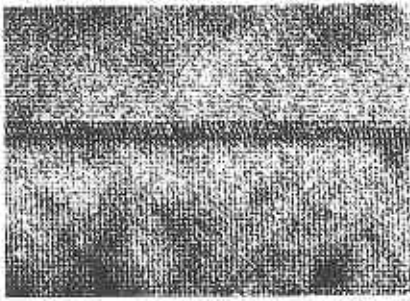


図2 GaAs中に3原子層のAlAs結晶を埋め込んだヘテロ構造のTEM写真

### 3. 2 界面に沿う2次元電子の伝導特性・超高速ヘテロ構造FETの性能限界の解明とその打破

超高速デバイスとして重要なGaAs/n-AlGaAsヘテロ構造FET (HEMT)において、(a)究極スイッチ速度が走行時間で支配されており、約1ピコ秒となること、(b)その実現には高移動度性が有用であること、(c)デジタル回路では、高い電流駆動力を要するため、通常HEMTでは不十分であること、(d)ダブルヘテロ型FETなど新構造を考案実現し、その有効性を理論・実験の両面で示した。更に走行時間の限界を破る一手法として、電子の数ではなく、その速度を変調する新しいトランジスタ (VMT) の概念を提示した。このほか電子移動度の電子密度依存性やGaAsの変型ポテンシャル定数の決定 (11.5eV) などで成果を得た。HEMTは衛星放送の受信機に広く使用されるに至っている。

### 3. 3 二重障壁型共鳴トンネルダイオードの伝導機構の解明と室温負性抵抗の実現

電子が隣接した2枚のトンネル障壁を通過する場合、特定波長の電子に対し反射波が干渉して消滅し、100%の透過率が達成できる。この共鳴トンネル効果に伴う電流の増加は、ダイオードに特定の電圧を加えたときのみ起きるので、負性抵抗特性が生じる。実際に作られたダイオードでは、この現象は極低温でのみ観測され、室温での利用は困難視されていた。本研究では、量子力学的な解析に基づき、障壁層として5~8原子層の極薄AlAs層を用いることにより、トンネル電流成分を飛躍的に高めることに成功し、室温で使用可能なダイオードを初めて実証した。この設計思想と構造はサブピコ秒領域の超高速応答にも優れており、以後の研究に広く利用されるに至っている。

### 3. 4 量子井戸の光物性とその新デバイスへの応用

量子井戸の光学的特性に関しては、電子準位間の遷移に対応するラマンスペクトルの解析を安藤が行い、自己無撞着な量子準位の計算と良好な一致を見ることなどを示した。また荒川と榊は量子細線と量子箱を活性層に用いたレーザを提案解析し、優れた発振特性の期待できることを示し、その一部を強磁場閉じ込めを利用して実証している。このほか、電子正孔の空間分離を利用した低雑音アバランシェ光検出器の考案と解析、サブバンド間の光遷移を用いた新しい赤外検出器の考案と解析、FET構造を利用した光変調器の解析と原理検証などでも成果を達成した。

### 3. 5 量子細線・量子箱・プレーナ超格子の研究

これらの高次量子閉じ込め構造の研究は、1976年榊が提唱・解析し電子干渉ブラグFETへの応用の研究に始まる。1980年量子細線FETの提案と高電子移動度効果の理論的予言 (榊)、1982年の量子細線・量子箱レーザの提唱・解析の研究 (荒川・榊) が、その後の世界的な研究活発化の源流を作った。本プロジェクトの期間内では、ホログラフィック露光を用いたプレーナ超格子の形成と検証、強磁場を用いた高次閉じ込め状態の発光特性の解明、斜め研磨基板上の結晶成長により太さ100 Å以下の細線列を作るための基礎的検討に関して成果を達成した。特に後者は、1988年に至り、GaAs/AlGaAs量子細線列の実現に結実している。