

## 量子固体エレクトロニクス研究グループ

### 1. 概 要

当時 IBM におられた江崎先生が超格子の概念を提出されてから20年以上たっている。現在、原子を人工的に配置し電子の波動性を積極的に制御することにより、新たなデバイスを創成する「量子固体エレクトロニクス」の研究が広く活発に行われている。この研究分野は極微半導体構造の形成のためのきわめて精密で緻密な技術の発展と、半導体物理学の深い理解のもとで推進されてきた。その結果、電子の閉じ込め効果や干渉効果という量子力学の世界をハンドリングしながら、超高性能・高機能電子・光デバイスの実現をはかるという研究のスタイルがきわめてポピュラーになってきている。

本研究グループは、このような量子固体エレクトロニクスについてきわめて早い時期から先導的に研究をすすめてきている。これまでの先駆的業績および現在の活発な研究活動は、内外で高く評価されている。なお、このような研究はしばしば「メソスコピック現象、デバイス」や「量子効果現象、デバイス」などと呼ばれているが、ここでは「量子固体エレクトロニクス」という言葉を使うことにしたい。

本研究グループは第3部生駒俊明教授、榊裕之教授、荒川泰彦助教授、平川一彦助教授、および本年4月より新たに加わった高橋琢二講師を中心に構成されている。また、光デバイスが専門である藤井陽一教授とも緊密な関係を保っている。研究室としては、栗原由紀子助手、斉藤敏夫助手（生駒研）、松末俊夫助手（榊研）、野田武司技術官（榊研）西岡政雄助手（荒川研）および大学院生、研究員（海外も含む）など総勢数約30名のメンバーが参加している。また、学内共同研究「ヘテロ界面の構造と機能の解析評価」を推進することにより第1部岡野達雄教授、第2部木村好次教授、第4部二瓶好正教授、渡辺正教授とともに量子固体エレクトロニクスの基礎的側面についても研究をすすめている。

一方、組織的には、機能エレクトロニクスセンターの機能デバイス部門を生駒教授、平川助教授が担当しており、この部門は本グループの研究の発展に多くの貢献をした。また、榊教授、荒川助教授は昭和63年度より、先端科学技術研究センター先端デバイス大部門極小デバイス分野の教授、助教授にもなっている。現在は榊教授は生研側が併任、荒川助教授は先端研側が併任となっている。いずれにしても同センターとは密接な関係を保っている。

### 2. 大型プロジェクト

この研究グループでは、現在ふたつの大型プロジェクトが走っている。ひとつは、生駒教授が代表者となり4大学（東大、東工大、大阪大、広大）と10企業との間で民間との共同研究「メソスコピックエレクトロニクス」が1期3年、2期のプロジェクトとして昭和63年より遂行されている。東大においても5部局（生研、先端研、物性研、理学、教養）の教官が参加しており、理論、実験両方の立場から活発に研究がすすめられている。

一方、榊教授は新技術開発事業団の創造科学推進事業のひとつである「量子波プロジェクト」を統括責任者として平成元年より推進している。これは厳密には科学技術庁の管轄のもとで行われているが、当然のことながら榊教授が属している本所や先端研ともきわめて密接な関係を保ちながら遂行されてきている。

この分野においては過去にも大型予算を伴うプロジェクトが進んでいる。ひとつは昭和56年度から3年間の期間で行われた榊教授が研究代表者である文部省特別推進研究「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」である。これは本研究グループにおいて最初にきた大型予算である。また昭和61年から4年間にわたり生駒教授が代表者となり「ヘテロ電子材料」に関する概算要求研究が遂行された。これは単にわれわれのグループのみならず前述の第1部の岡野教授、第4部の二瓶教授、石田教授（現在工学部）、渡辺教授なども参加され、研究所全体で活発に研究がすすめられた。

本研究グループは、これまでの業績とその結果得られた上記大型予算をふまえ、さらに先駆的・先導的な成果をあげつつある。次章ではそれぞれの研究室の最近の研究成果について述べよう。

### 3. 最近の研究

ここでは関連研究の最近の成果について、それぞれ述べることにしよう。

#### 3.1 生駒・平川研究室

生駒教授は、本所で化合物半導体の研究を最も早くから始め、現在でもこの分野で活発に研究をすすめてきている。最近では、メソスコピックエレクトロニクスについて、現在プリンストン大学で在外研究を行っている平川助教授と殆ど一体で研究をすすめ、多くの重要な成果をあげている。特に、電子波のコヒーレンス長の測定などメソスコピック・エレクトロニクスの基礎的物理現象

を究明するとともに分子線エピタキシーによる半導体ヘテロ接合の形成と電子分光による評価等について重要な成果をあげている。

最近の成果について述べよう。まず、n 型 GaAs/AlGaAs ヘテロ接合を集束イオンビームにより加工した量子細線の磁気抵抗を調べることにより、電子波の位相緩和機構に関し重要な知見を得ている。すなわち位相緩和時間  $\tau$  は、温度の低下にしたがって増加するが、極低温においては飽和する。この飽和の原因が、外来ノイズおよび磁気不純物やスピン軌道相互作用によらない別の散乱過程が飽和の原因としてあることを示した。

また、電子ビーム露光技術による量子ポイントコンタクトの作製をすすめている。特に最近電子ビーム露光法で描画した部分を wet chemical etching で微細加工する方法を最適化することにより、細線の加工欠陥をごく小さくすることができ、低温で  $10\text{m}^2/\text{Vs}$  の移動度の細線を実現した。また、MBE 成長によって得た移動度が  $3.5\text{m}^2/\text{Vs}$  以上の高移動度 2 次元正孔ガスが存在する基板上にポイントコンタクトを作製することに初めて成功した。その結果、ある試料でゲート電圧に対しほぼ周期的に変化するコンダクタンス振動を見出した。図 1 はこのようにして作製された量子ポイントコンタクト構造である。

一方、X 線光電子分光法を用いて半導体ヘテロ接合におけるバンド不連続量の形成要因の解明とその制御を行っている。これまで多くの知見をえてきたが、特に GaAs/AlAs ヘテロ界面においては、その両側に合計 4 分子層に及ぶ静電的遷移領域が存在すること、またバンドオフセットを制御する方法としては、Si をヘテロ界面に挿入する方法の有効性を議論した。

さらに、高分解能 EELS を用いた MBE 成長直後の化合物半導体表面空乏層欠陥深さの in-situ 決定も行っている。すなわち高分解能電子線エネルギー損失分光

(HREELS) と紫外線光電子分光 (UPS) とを組み合わせることにより、表面 pinning の原因となる欠陥の深さ広がり方を決定する方法を考案した。MBE 成長した GaAs (100) 面に in-situ で Al を 0.8ML 積層した接合について、均一な密度の欠陥が表面から半導体中に侵入していると仮定することにより、その欠陥深さが 7 nm 以下と推定した。

また、不純物原子層を有する GaAs 及び GaAs/AlAs 超格子の電子構造を  $sp^3s^*$  強結合法で計算し以下の結論を得た。Ga サイトの Ge 単原子層、As サイトの Ge 単原子層、As サイトの Se 単原子層のいずれもキャップ中に不純物バンドを形成する。一方、Ga サイトに Zn 単原子層を挿入しても不純物バンドは形成されない。

### 3.2 榊研究室

榊教授は電子波の干渉効果について、早い時期にデバイス概念について先駆的な提唱を行うとともに、半導体量子効果の研究を一貫してすすめてきた。特に、MBE を用いた量子マイクロ構造の形成技術、その電子・光デバイスへの展開を中心に研究をすすめている。ここではこのグループの最近の成果について述べる。

MBE による量子構造形成と制御の研究では、成長最上面での原子の拡散過程を解明制御する新手法を考案し、原子スケールで平坦な界面を持つ量子井戸構造の実現とともに、傾斜基板上、グリッド挿入型量子井戸構造を形成することにより量子細線効果の実現をはかった。図 2 は傾斜基板上に MBE 成長により形成された GaAs と AlAs の井戸界面近傍の透過電子顕微鏡写真である。また、エッジ量子細胞の作製にも取り組んでいる。

半導体量子マイクロ構造における 2 次元・1 次元電子の伝導で超高速ヘテロ構造 FET の研究では、応答速度や移動度と濃度の支配要因を解明して、低雑音マイクロ波素子 HEMT の動作限界や最適化の方向を示した。また超高速化のためにダブルヘテロ選択ドープ構造 FET・速度変調 FET・量子細線 FET・プレーナ超格子

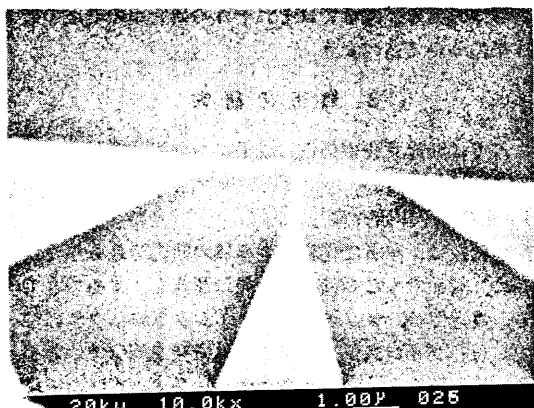


図 1 正孔電子ガスのポイントコンタクト構造 (生駒・平川研究室)

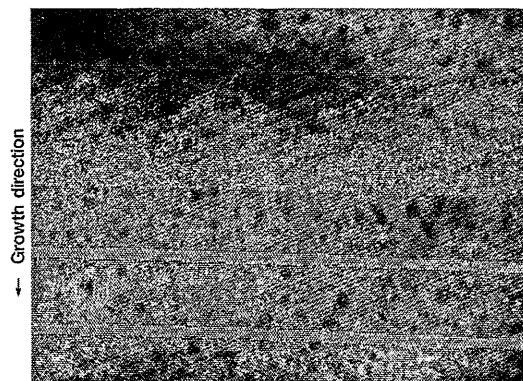


図 2 傾斜基板上への MBE 成長による GaAs と AlAs とヘテロ界面近傍の透過電子顕微鏡写真 (榊研究室)

FETなどを考案し、実現、解析を行った。さらに量子細線内の凹凸散乱やフォノン散乱の解明の理論的研究をすすめた。

さらに量子ヘテロ構造垂直伝導素子の研究では、共鳴トンネルダイオードの直流伝導特性や速度の決定要因を解明し、室温で動作可能なダイオードを初めて実現するなどの研究を進めた。一方、結合量子井戸間の電子移動におけるフォノン放出による緩和効果を明らかにした。また結合量子箱構造における光学フォノン抑制効果を理論、磁場を用いた実験により明らかにした。

半導体量子マイクロ構造の光物性と光デバイス応用については量子井戸の基底準位に電子を入れ、これを励起準位に光学遷移させたときの電気的および光学特性の変化を調べ、これを利用した10 $\mu$ m帯の検出器の新動作原理と性能改善方法の探索を行った。また、高性能レーザーや変調器への利用の期待される量子細線や量子箱の光学特性（とくに吸収の偏波面依存性と構造との関連）について特性解析を行った。更に、量子井戸内の2次元励起子の面内拡散を4波混合の手法で調べ、その温度依存性を明らかにした。その他、電界印加下の量子井戸による光非線型性を用いた波長変換や量子箱中や量子細線の2光子吸収プロセス、2次元電子のサイクロトロン共鳴吸収による電子質量の決定などの研究も進めた。

### 3.3 荒川研究室

荒川助教授は主として量子効果を伴う半導体レーザーについてこれまで先駆的な研究をすすめてきた。特に、MOCVD法による量子細線の作製、量子効果レーザーのデバイス物理、種々の量子井戸機能レーザーの実現、量子井戸レーザーからの超短光パルス発生、マイクロ共振器レーザーなどについて重要な成果が得られている。なお、高橋講師は昨年度まで荒川研究室の大学院生として研究活動に参加していた。最近の主要成果について述べよう。

まず、量子細線・量子ドットの作製であるが、MOCVD選択成長法を用いて一辺20nm以下の三角形を有するGaAs量子細線やInGaAs歪量子細線およびGaAs量子ドットを作製することに成功した。図3に作製された量子細線の断面の走査型高解像度電子顕微鏡写真を示す。さらに電子ビームによる局所的励起によるMOCVD選択成長にも世界で初めて成功し、GaAs量子細線を実現し、その成長メカニズムを検討した。

さらにこのようにして作製した量子細線・量子ドットの電子・光物性について理論的、実験的に究明した。すなわち量子細線・量子ドットのバンド構造を強結合理論、 $k \cdot p$ 法を用いて明らかにするとともに、強磁場を用いてここで作製したGaAs量子細線の磁気光学物性を測定し、フォトルミネッセンスのピークの移動の異方性から量子細線効果の存在を観測した。また、量子細線の励起子寿命や時間分解スペクトルを測定し、キャリアダイ



図3 MOCVD選択成長により作製したGaAs量子細線の断面SEM写真(荒川研究室)

ナミックスを明らかにした。さらに、量子ドットから良好なフォトルミネッセンスを観測した。

一方、次世代の半導体レーザーの基礎研究として、量子マイクロレーザーの研究をすすめている。すなわち、垂直マイクロ共振器レーザーを実現するとともに、マイクロ共振器において電子波モードと光波モードの結合効果を半導体で初めて観測した。これは真空場におけるラビ振動と解釈できる。また、量子細線、量子箱レーザーの性能限界の理論的解明とその作製の試みを行った。さらに、マイクロ共振器における光子リサイクリング効果をキャリア寿命の測定を用いて観測した。

さらに、超高速フォトニクスのための基礎研究として、フェムト秒領域におけるポンプ・プローブ分光を行っている。特に、量子井戸レーザーにおいてキャリアが障壁層から量子井戸に捕獲される現象などを明らかにした。また、量子ドットのフォトルミネッセンスをピコ秒分光を用いて測定したキャリアが量子ドットに捕獲される現象を理論的、実験的に議論をした。

### 3.4 二瓶・尾張研究室

二瓶教授は固体表面のキャラクタリゼーションの立場から、特に半導体および酸化物表面ならびに半導体-金属および半導体-半導体界面の構造と状態の解明に早くから取り組んできた。また、ユニークな固体表面解析法

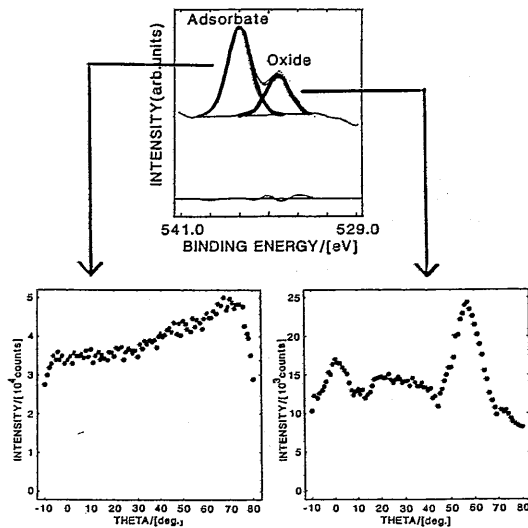


図4 化学状態識別X線光電子回折法の測定例。電子線照射後CaF<sub>2</sub>基板上的O原子には2種の化学状態が存在し(2種のO1sピーク)、それぞれの光電子回折パターンから吸着層と酸化層の構造の違いが示される。

として世界的な注目を集めているX線光電子回折法について、尾張講師と共にバイオニアとしての先導的研究を進めると共に、上記のような種々の応用研究をも精力的に推進してきた。近年では化学状態識別X線光電子回折法などさらに新しいキャラクタリゼーション手法の開発と応用に取り組んでいる。以下に最近の主な成果の概要を紹介する。

まず、Au/GaAs, Ge/GaAs, Au/Ge/GaAs, Au/GaSbなどのヘテロ界面の拡散挙動の検討から始まり、酸化しない還元雰囲気におけるPt/TiO<sub>2</sub>界面の構造・状態変化などを調べた。これらの研究はいずれもX線光電子分光法により化学状態を評価すると共にX線光電子回折法により表面構造を解析したものであり、ヘテロ界面における拡散挙動と化学状態変化ならびに原子構造変化などの関係を明解に解析した例である。

最近では、SOI (Semiconductor-on-Insulator) 構造の基礎的研究の一環として開始したGaF<sub>2</sub>基板上で生ずる電子線衝撃による構造・状態変化に関する一連の研究を行っている。特に化学状態識別X線光電子回折法により

CaF<sub>2</sub>基板上に生成したヘテロ界面の解析を進めている。この方法の原理は図に示した通りであるが、要するにXPSの化学シフトを利用して異なった化学状態を識別しつつ、個々の化学状態下の原子が示す光電子回折パターンを別々に解析して原子構造に関する知見を得ようとするものである。例えばCaF<sub>2</sub>基板上にCaO層が生成した場合、Caの2種の化学状態を識別すればおのおの層の構造を別々に検討することが可能となるわけである。

以上述べたように二瓶・尾張研究室は新しいヘテロ界面を形成しその電子物性を調べてデバイスへ応用する際にならざる必要になる、ヘテロ界面生成の初期過程を明らかにするための強力な方法体系を開発している。

### 3.5 岡野研究室

岡野教授は、固体界面における原子分子と電子系のダイナミクスを解明するための時間分解光電子分光システムの開発を進めた。電子直射型ストリークカメラを開発し、これをパルス放射光光源と組み合わせることによりGaAs, Au, 真空用ステンレスなど多岐にわたる試料について測定が可能な真空紫外領域での高速時間分解光電子分光装置を完成した。この装置は、時間分解能20 psと従来のものに比べてはるかに高速であるのみならず単一電子計測が可能にまで高感度である。パルス幅が450 psのパルス放射光により励起されたGaAs表面からの光電子飛行時間測定では、励起波長の変化による飛行時間スペクトルの変化を明瞭にとらえることに成功した。この装置をベースとして、飛行時間スペクトルからエネルギー分布を分離するための静電偏向型分散システムとの複合化、超高分解能電子分光システムを目指す時間収束システムの開発、より短波長のパルス放射光を利用した高エネルギー励起状態の時間分解分光などへの展開を現在進めている。

### む す び

量子波エレクトロニクスの研究は今後世界的にますます活発に研究がされていくものと考えられるが、本研究グループは今後も先導的役割を果たしながらこの分野の発展に貢献することになろう。さらに次の世代の量子マイクロエレクトロニクスを新たに切り開いていくこともこのグループに課せられた大きな使命と考えられる。