

量子遷移プロジェクト 追跡調査報告書要旨

国際共同事業プロジェクト「量子遷移プロジェクト」は、現在のシリコンの技術を凌駕または補完する次世代の技術を目指して、代表研究者榊裕之氏のグループとカリフォルニア大学サンタバーバラ校（UCSB）の Merz 氏のグループが連携して行ったもので、3層膜の中央に電子が溜まっている厚さ 10nm の半導体井戸層を含んでいる量子井戸¹、断面が 10nm 角の細長い量子細線²、一片が 10nm の立方体の形をした量子ドット³を用い、量子現象を利用したデバイスの開発を推進した。

このプロジェクトは榊が 1975 年に、量子細線、量子ドットを提案したことから始まっている。榊がこの提案を行った当時には、10nm 寸法のデバイスを実際に作る具体的な方法が存在しなかった。こうした当初の状態から、榊のグループは、ERATO の量子波動プロジェクトと本 ICORP のプロジェクトを経てこれらを実際に作製し動作することを実証するまで到達した。現在では、本プロジェクトの成果は、学会や産業界で高い評価を受けている。榊は江崎玲於奈賞を始め 19 件(ICORP 発足後 11 件)の権威ある賞を受賞している。

量子現象を室温で実現するには 10nm の加工寸法と 1 原子層の平坦化を達成する必要がある。そのために分子線エピタキシ (MBE)⁴を用いた高度の製法が開拓された。MBE 法は、超格子⁵や半導体レーザーなどの研究を行った他の多くのグループの参加によって発展した。

本プロジェクトでは、電子の量子遷移を制御するために UCSB の自由電子レーザー (FEL) が発生するテラヘルツ (THz) 光⁶を用いて、榊らは 10nm の領域の量子細線、量子ドットを実際に試作し、THz 領域の量子効果の存在を世界で初めて実証した。量子井戸に THz 光を照射すると、励起子⁷の吸収スペクトルにサイドバンドが現れるという新しい結果を得た。この現象を理解するための新理論が打ち立てられた。また THz 光によって量子井戸対⁸の間の電子移動の性質が詳しく調べられ、メモリやセンサへの応用の可能性が出てきた。また THz 光による光の周波数変調の可能性が開かれた。以上が本プロジェクトの成果である。一般に THz 光は従来の電磁波にはない透過性の性質を持つので、ガン組織の透過による識別や麻薬醒剤の発見に使われる。本プロジェクトで開発された量子素子内の量子遷移によって THz 光源が実現すれば、量子素子の利用範囲が拡大すると考えられる。

10nm の加工寸法を実現することは大量生産レベルでは現在でも難しい。本プロジェクトで、量子細線に関しては 1 次元の電界効果トランジスタの実験や、リッジ量子細線⁹における光励起レーザーが実証された。半導体レーザーに関しては均一なリッジ量子細線ができず、優れた特性の量子細線レーザーを作るのが難しかった。東大物性研の秋山助教授（研究推進委員）は、アメリカの Pheiffer 達と協力して、完全に均一なエッジ型の量子細線¹⁰の開発に成功し、鋭い線スペクトルが観測されるようになった。将来的に波長多重通信などへの実用化への道が近づいている。

1 量子ドットを用いた1電子トランジスタでは1電子と1光子を制御することができることが、本プロジェクトで実証された。この成果がプロジェクト終了後、量子コンピュータ¹¹の研究者達に利用されている。また同じ成果が量子暗号通信¹²の研究者にも利用されている。

本プロジェクトで単体の量子ドット中の励起子による蛍光の性質が測定された。また量子ドットレーザでは発光強度が強くなるしないとするフォノンボトルネック効果説が現れたが、プロジェクトの理論研究によってこの説は否定された。現在では強い発光が可能というのが定説になっている。

本プロジェクトで、量子井戸の中に量子ドットを自己形成法によって散りばめて、量子ドットに電子をトラップさせるタイプのメモリ¹³の動作が確認された。また量子井戸の中に量子ドットを散りばめたという意味で類似の構造における量子ドットの蛍光特性が測定された。プロジェクト終了後この構造のレーザの開発は東大生産技研の荒川教授（研究推進委員）らによって引き継がれた。

量子ドットレーザを光ファイバ通信の波長多重通信に用いると通信の多重度を飛躍的に増やせる可能性がある。また最近になってこのタイプのデバイスを変形して光増幅器へ応用することが検討されている。

このプロジェクトが成功したのは、日米両国の役割が明確だったこと、日米のリーダーが懇意だったこと、予算的にも米国は National Science Foundation(NSF)、日本は JST から支援され、日米双方が対等な関係を維持できたこと、日本の研究者が代表として UCSB に常駐したことなどが挙げられる。このプロジェクトで育った研究者たちも多い。日本側ではメンバー10人のうち5人が大学、5人が企業あるいは研究機関で活躍している。アメリカでは4人の学生がプロジェクトの研究で博士号を取得している。

1. 量子井戸：3層の半導体薄膜層の真中の膜中に電子を閉じこめた2次元の構造。
2. 量子細線：量子井戸の電子を細い線上の領域だけに閉じこめた1次元の構造。
3. 量子ドット：電子を点状の領域に閉じこめた0次元の構造。
4. 分子線エピタキシ（MBE = molecular beam epitaxy）：高真空中で加速した分子線を照射して結晶成長する方法。
5. 超格子：バンド構造が異なり、格子定数が等しい半導体を交互に周期的に積層して作った人工的な格子。
6. テラヘルツ（THz）光：振動数 1012Hz の光。
7. 励起子：バンドギャップ近傍の光が吸収または発光されるときに現れるピーク。
8. 量子井戸対：量子井戸が隣接した対になった構造。対の間を電子が移動して様々な性質を示す。
9. リッジ量子細線：結晶成長を利用して作った屋根の頂上の線状部分に電子を閉じこめ

た状態。

10. エッジ型量子細線：量子井戸を劈開した面上に再度量子井戸を作ってT字型の量子井戸を作り、その交差点に線状に電子を閉じ込めた細線。
11. 量子コンピュータ：波動関数の量子力学的な重ね合わせの性質を利用した超並列演算可能なコンピュータ。
12. 量子暗号通信：量子力学的な1光子の伝搬によって暗号を送る通信。
13. トラップ型メモリ：量子井戸中の量子ドットに電子をトラップさせることを利用するメモリ。