

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 山本 洋

近年、格子不整合を有する系の結晶成長モードを用いて、ナノメートルオーダーの半導体量子ドット構造を、自己組織的に容易に形成することが可能となった。このような自己組織化量子ドットは、半導体レーザ、メモリへの応用が活発に検討されており、数万から数千で構成される集団的な量子ドットの電子的・光学的特性については従来の測定手法を用いて研究が行われている。そのような方法に加え、単一量子ドットの諸特性の解明を目的として、走査プローブ顕微鏡 (SPM) が用いられ始めている。本論文は“Scanning Probe Spectroscopy on GaAs with Near-Surface InAs Quantum Dots” (表面近傍に InAs 量子ドットを有する GaAs における走査プローブスペクトロスコピー) と題し、自己組織化 InAs 量子ドットが GaAs 表面近傍に存在することによる表面電子状態の局所的な変化及び単一 InAs 量子ドットの帯電効果を検出する手法について議論したもので、全5章と付章とで構成され、英文で記述されている。

第1章は序論であり、従来の電子的・光学的測定手法による自己組織化 InAs 量子ドットの研究について概観し、SPM を用いた単一量子ドットの研究について紹介した後、本研究の目的を述べている。

第2章では、変調光を照射した走査トンネル顕微鏡 (STM) を用いた、InAs 量子ドット被覆 GaAs 表面のトポグラフィーと光誘起電流の画像化について報告している。トポ像と比較した結果、光誘起電流は InAs 量子ドット領域において周囲の Wetting Layer (WL) 領域より小さいことを示した。また、光誘起電流の諸機構を明らかにするため、トンネル電流の時間波形測定についても報告している。その測定結果から、光の変調周波数が高い場合 (900 Hz)、光誘起電流において支配的であるのは、光照射によって試料表面近傍に生成されるフォトキャリアの分離であることを明らかにしている。これらの結果から、光誘起電流の大きさは表面空乏層の度合いに対応していると考えられ、表面空乏化は WL 領域よりも InAs 量子ドット領域の方が抑制されていると結論づけた。また光誘起電流の位相情報を取得することにより、さらに詳細な表面電子状態が得られることを付章に示している。

第3章では、原子間力顕微鏡 (AFM) とキャパシタンスブリッジとで構成される走査容量顕微鏡 (SCM) を、InAs 量子ドット被覆 GaAs 表面に適用している。負の試料バイアス条件において、空乏層に起因するキャパシタンス像が高空間分解能で得られた。第2章で得られた結果と同様に、InAs 量子ドット領域における表面空乏の低減効果が、キャパシタンス-試料電圧 (C-V) 特性およびコンダクタンス-試料電圧 (G-V) 特性でも観測さ

れている。また、InAs 量子ドットと GaAs とのバンドオフセットをショットキー障壁とみなし、 $G-V$ 特性に対して熱電子放出方程式のフィッティングを行い、量子ドットのサイズによる障壁高さの変化を見積った。これらの結果から、InAs 量子ドットのサイズが小さくなるに従って、障壁高さが大きくなることを明らかにしている。この原因として、周囲の WL 領域が GaAs のミッドギャップに強くピンニングされており、量子ドットのサイズが小さくなるにつれて、その影響をより強く受けるためであることが解析結果と共に示されている。

第 4 章では、InAs 量子ドットの帯電効果を観測することを目的として、InAs 量子ドットを GaAs 中に埋め込んだ構造を提案し、AFM と変調電流のロックイン検出系から成る SCM を用いて、トポ像と同時にキャパシタンス像・コンダクタンス像を高分解能で取得した。量子ドットが埋め込まれた領域の特定は、コンダクタンス像から行い、これとキャパシタンス像との対応から、試料バイアスを負に印加してゆくと、表面空乏は WL 領域よりドット埋め込み領域で大きくなっている可能性を示唆した。その起源としては、量子ドットの帯電効果の可能性がある。

第 5 章は結論であり、本研究で得られた主要な結果をまとめている。

以上要するに、本論文は、自己組織化 InAs 量子ドットが GaAs 表面近傍に存在することによる局所的な表面電子状態の変化、特に量子ドット近傍の表面空乏とバンドオフセットについて、走査プローブ顕微鏡を用いて明らかにしたもので、電子工学に貢献することが少なくない。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。