

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 小野 雅紀

本論文は、「Low temperature scanning tunneling microscopy on semiconductor surface structures and their electronic states (低温走査トンネル顕微鏡による半導体表面構造とその電子状態に関する研究)」と題し、液体ヘリウム温度下で動作する超高真空走査トンネル顕微鏡 (STM) を用いた Si(001) 表面上のダイマー構造の低温相での原子構造や、Si(111) 3×3 -Ag 表面での電子状態やポテンシャル分布など、シリコン基板表面の原子構造と電子状態に関する実験結果と考察をまとめたものである。本論文は全 5 章から構成されており、第 1 章は「Introduction (序章)」、第 2 章は「Scanning tunneling microscopy and spectroscopy (走査トンネル顕微鏡および分光)」、第 3 章は「Dimer buckling of the Si(001) 2×1 surface below 10 K observed by low-temperature scanning tunneling microscopy (低温 STM により観察された Si(001) 表面のダイマーバッキングに関する研究)」、第 4 章は「Electrostatic Potential Screened by a Two-Dimensional Electron System: A Real-Space Observation by Scanning Tunneling Spectroscopy (二次元電子系により遮蔽されたポテンシャルの STS による実空間観察)」、第 5 章は「Conclusions (結論)」について述べている。

第 1 章は序論であり、研究背景や本研究の特長・内容等について言及している。

第 2 章には装置に関する記述があり、主に用いた手法である走査トンネル顕微鏡 (STM) およびその分光手法である走査トンネル分光 (STS) について説明した後、本研究で用いた液体ヘリウム温度冷却の低温 STM 装置に関する説明、及び、本研究で加えた幾つかの改良点について述べている。これらの改良の結果、外部からの機械的振動による影響が低減されたことにより探針位置の制御性が格段に向上し、また長時間の STM/STS 測定が可能となったことを説明した上で、その性能を示すために同装置による Cu(111) 表面上の銅原子を用いた原子マニピュレーションの研究について紹介し、さらに表面上各点でのトンネル分光測定手法である 2DTS (two-dimensional tunneling spectroscopy) による Si(111)- 7×7 表面の局所電子状態測定結果について述べている。

第 3 章では Si(001) 2×1 表面上での低温におけるダイマー構造の STM 観察について述べている。この表面は、最表面原子が二量体 (ダイマー) を形成し、さらに非対称に傾いて安定することが知られている。これまでの研究ではこの非対称ダイマーの傾きが交互に配列した $c(4 \times 2)$ 構造が安定構造とされていたが、最近行われた液体ヘリウム温度での STM 観察において対称ダイマーが観察されこれまでの定説に異論が唱えられていた。そこで本装置を用いて低温での高分解能 STM 観察を行ったところ、占有準位像ではこれまでの報告と同様、一見対称と思われるダイマー構造が観察された。しかしながら、詳細に見るとダイ

マー列間に非対称化ダイマーに起因した $c(4 \times 2)$ 構造が若干観察されたことから、低温でも非対称ダイマーであると結論付けている。STM 像の温度変化から、基板のキャリアが凍結する 40 K を境にそれ以下の温度で見かけ上対称ダイマーに見える現象が観察されたことから、この現象が、STM 観察時の探針直下における局所的な帯電によりポテンシャル低下し、それまで非占有準位側にあった表面準位がフェルミ準位より下がりトンネル電流に寄与するようになることに起因すると推論している。

第 4 章は $\text{Si}(111) \ 3 \times \ 3\text{-Ag}$ 表面での低温 STS による研究であり、独自の方法によって表面ポテンシャル分布を原子スケールの空間分解能で精密に測定する方法を編み出し、それにより遮蔽されたポテンシャルやフリーデル振動を観察したことについて述べている。同表面上で 2 DTS によるトンネル分光測定を行ったところ、トンネルスペクトルから観察された幾つかの表面準位のエネルギー準位がステップ近傍や吸着物など電荷が誘起されていると考えられる箇所ですら徐々に変化している様子が観察された。一方、この表面には表面準位に起因した二次元電子系が存在することが定在波観察から明らかとなっており、この二次元電子系により遮蔽されたポテンシャルを Lindhard 近似に基づき計算したところ、観察されたエネルギー準位の変化と良い一致を示すことから、エネルギー準位の変化が表面での静電ポテンシャル変化によるものであり、かつ変化を測定することにより二次元電子系で遮蔽されたポテンシャルが実空間で観測されたと結論づけている。また、フリーデル振動と呼ばれるポテンシャルの振動構造に関しても実空間観察を行っており、その振る舞いについて報告している。

第 5 章は総括であり、これまで述べてきた研究結果についてまとめている。

以上をまとめると、本論文では低温超高真空 STM の改良による高性能化を通じて、第 3 章に述べたように $\text{Si}(001)\text{-}2 \times \ 1$ 表面での低温でのダイマー構造の振る舞いを明らかにし、さらに第 4 章では、二次元電子系を有する表面である $\text{Si}(111) \ 3 \times \ 3\text{-Ag}$ 表面において表面の静電ポテンシャル分布を精密に測定する手法を見出し、それを用いて遮蔽されたポテンシャルやフリーデル振動の実空間観察に成功している。低温 STM を用いた半導体表面でのナノスケールでの構造・物性の評価及び評価法の確立という点で、物理工学への寄与は非常に大きい。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。