

博士（工 学） 石 田 暢 之

学 位 論 文 題 名

STM/STS study of structural and electronic properties of
GaAs (110) surface with adsorbed alkali atoms

(STM/STS による GaAs (110) 表面のアルカリ原子吸着構造と
電子状態に関する研究)

学 位 論 文 内 容 の 要 旨

物質表面や界面はバルク状態が終端する境界面であるため、バルクとは異なる多彩な性質を示す。これらの性質を積極的に利用したデバイスが考えられている一方で、表面・界面の状態によっては従来のデバイス動作の妨げになることも多くある。デバイス応用・性能向上、どちらの観点からも表面・界面で起こる現象を詳細に調べその起源を解明することは重要であるが、一般的にこれらの現象は複雑であり、様々な要因が絡み合って生じる。そのため、未解決の問題が多く存在し、これらを解明することは主要な研究課題となっている。表面物性の強力な評価手法の一つとして、走査型トンネル顕微鏡 (Scanning Tunneling Microscopy: STM) がある。STM は「原子分解能での表面形状の画像化が可能である」、「局所的なトンネル分光 (Scanning Tunneling Spectroscopy: STS) が可能である」ことから、表面構造と電子状態の相関を調べる手段として有用である。特に表面吸着原子や欠陥等の局所的な表面物性評価に多く利用されてきた。また STM にスピンドル分解能を持たせたスピンドル STM は、ナノメートルオーダーの磁性評価手法として注目されている。

表面物性の研究対象の一つとして、アルカリ金属原子が吸着した GaAs(110) 表面がある。この表面のもつ特徴には「アルカリ金属原子は GaAs(110) 表面で多彩な低次元ナノ構造を形成すること」、「GaAs(110) 表面は表面準位を持たず、金属の誘起する表面準位の研究に適していること」などがある。これらの特徴を用いて「表面ナノ構造の形成メカニズムの解明」「金属-半導体界面におけるショットキー障壁の形成やフェルミレベルピニングのメカニズムの解明」の研究に利用されている。また、円偏光照射した (アルカリ金属)/GaAs はスピンドル電子源として実用化されており、それをスピンドル STM の探針として利用する手法が提案されている。円偏光励起半導体探針は電子スピンドルを高速変調することが可能であり、高時間分解能をもったスピンドル状態の測定が期待できる。円偏光励起半導体を用いたスピンドル STM 測定において、再現性良くかつ定量的データ解析を実現するためには、半導体表面の構造や吸着状態に敏感であると予想される励起電子のトンネル電流への寄与率およびスピンドル状態を詳細に評価する必要がある。

本研究では、アルカリ金属原子の吸着した GaAs(110) 表面を原子構造、表面準位、バンド構造、光応答の観点から STM/STS により詳細に評価し、その後、良く定義された表面において、表面状態がスピンドルトンネリングへ与える影響を調べることを目的とした。本研究により (アルカリ金属)/GaAs(110) 表面物性の理解が深まり、円偏光励起半導体探針を用いたスピンドル STM の実現への途が拓けることを目指した。

本研究の成果は、大きく分けると以下4つである。

1. これまで系統的な研究報告がなかった、K原子の吸着したGaAs(110)表面において、被覆率の違いによる吸着構造の変化を調べた。K原子が3つの異なる構造を形成することを実験的に明らかにし、STM測定の結果を理論研究と比較することで、構造の決定を行った。また構造の違いを吸着エネルギーの差から説明した。K原子が誘起する表面準位をSTSによって評価し、K原子がGaAsの価電子帯上部に表面準位を形成することを明らかにした。
2. 二種類のK原子の表面拡散現象をSTM測定により観察した。この拡散をK原子のダイポールモーメントと電界の相互作用の効果により説明した。結果の分析からK原子からGaAsへの電荷移動の割合に関する知見が得られることを示した。
3. 光照射したK/GaAs(110)上でSTS測定を行い、アルカリ金属吸着サイトとGaAsサイトでの局所的な表面光起電力(Surface Photovoltage: SPV)の違いを調べた。得られた結果からアルカリ金属吸着サイトで、局所的にバンド曲がりが大きくなることを明らかにした。
4. 偏光変調した光をGaAs(110)表面に照射し、トンネル電流の変調周波数成分を位相同期検出することによって、スピン偏極トンネル電流の検出を行った。不純物濃度の低いp-GaAs(110)表面での測定結果から、偏光変調に伴う強度変調によってSPVの効果が負バイアス領域で現れ、スピン偏極トンネル電流測定を妨げることを示した。また、SPVの効果が現れない正バイアス領域でスピン偏極電流の検出に成功した。

本論文ではこれらの成果について以下のように論述した。

Introductionでは研究背景を述べ、表面評価装置として使用したSTMおよびスピン偏極STMの動作原理、測定手法について述べる。

第一部ではアルカリ金属原子の吸着構造、および電子状態について論述した。まず、これまでの(アルカリ金属)/III-V(110)表面の研究状況を総括し、その後、本研究に使用した装置の構成、試料の特徴ならびに作製方法について述べた。STM測定から得られたGaAs(110)表面のK原子の吸着構造を理論研究と比較し議論した。STS測定から得られたトンネル微分コンダクタンスよりK原子の誘起する表面準位について考察した。

第二部ではK/GaAs(110)表面の光応答について論述した。まず、これまでの半導体表面における光STMの研究状況について総括した。光STM測定において、光の強度・照射方法が重要であるため、本研究で用いた光学系の調整方法について述べた。光STM/STS測定によって局所的なSPVを測定する方法を述べ、得られた実験結果をバンド構造、電子緩和時間の観点から考察した。

第三部では円偏光を照射したGaAs(110)表面でのスピン偏極STM測定の結果について論述した。これまでのスピン偏極STMの研究状況を分析し、スピン偏極STMにとって重要な要素であるスピン偏極探針の作製方法を述べた。スピン偏極電流検出のための二つのアプローチを紹介した。測定結果が偏光変調実験を行う際問題となる強度変調によるものでないことを、第二部で得られた結果および偏光変調成分と強度変調成分の比較から明らかにし、得られた結果がスピン依存成分であることを論述した。

結語では以上の結果についてまとめ、本研究から得られた知見をもとに、今後の展望について述べる。

学位論文審査の要旨

主査教授 末岡和久
副査教授 三島瑛人
副査教授 山本真史
副査教授 高橋庸夫

学位論文題名

STM/STS study of structural and electronic properties of
GaAs(110) surface with adsorbed alkali atoms

(STM/STSによるGaAs(110)表面のアルカリ原子吸着構造と
電子状態に関する研究)

本論文は、走査型トンネル顕微鏡、走査型トンネル分光を用いたGaAs(110)清浄表面およびアルカリ原子が吸着したGaAs(110)表面の構造と電子状態に関する研究成果をまとめたものである。

アルカリ金属原子が吸着したGaAs(110)表面は「アルカリ金属原子はGaAs(110)表面で多彩な低次元ナノ構造を形成すること」、「GaAs(110)表面は表面準位を持たず、金属の誘起する表面準位の研究に適していること」などの特徴を有する。これらの特徴を用いて「表面ナノ構造の形成メカニズムの解明」「金属-半導体界面におけるショットキー障壁の形成やフェルミレベルピニングのメカニズムの解明」の研究に利用されている。また、円偏光照射した(アルカリ金属)/GaAsはスピン偏極電子源として実用化されており、それをスピン偏極STMの探針として利用する手法が提案されているが、半導体表面の構造や吸着状態に敏感であると予想される励起電子のトンネル電流への寄与率およびスピン偏極状態を詳細に評価する必要があるとされている。

本研究の成果は、大きく分けると以下4つである。

- これまで系統的な研究報告がなかったK原子の吸着したGaAs(110)表面において被覆率の違いによる吸着構造の変化を調べた。K原子が3つの異なる構造を形成することを実験的に明らかにしSTM測定の結果を理論研究と比較することで構造の決定を行った。また構造の違いを吸着エネルギーの差から説明した。K原子が誘起する表面準位をSTSによって評価し、K原子がGaAsの価電子帯上部に表面準位を形成することを明らかにした。
- 二種類のK原子の表面拡散現象をSTM測定により観察した。この拡散をK原子のダイポールモーメントと電界の相互作用の効果により説明した。結果の分析からK原子からGaAsへの電荷移動の割合に関する知見が得られることを示した。
- 光照射したK/GaAs(110)上でSTS測定を行い、アルカリ金属吸着サイトとGaAsサイトでの局所的な表面光起電力(Surface Photovoltage: SPV)の違いを調べた。得られた結果からアルカリ金属吸着サイトで、局所的にバンド曲がりが大きくなることを明らかにした。

4. 偏光変調した光を GaAs(110) 表面に照射し、トンネル電流の変調周波数成分を位相同期検出することによって、スピニ偏極トンネル電流の検出を行った。不純物濃度の低い p-GaAs(110) 表面での測定結果から、偏光変調に伴う強度変調によって SPV の効果が負バイアス領域で現れ、スピニ偏極トンネル電流測定を妨げることを示した。また、SPV の効果が現れない正バイアス領域でスピニ偏極電流の検出に成功した。

本論文では、これらの成果について下記のようにまとめられている。

Introduction として研究背景を述べ、表面評価装置として使用した STM およびスピニ偏極 STM の動作原理、測定手法について論述されている。

第一部ではアルカリ金属原子の吸着構造、および電子状態について論述し、これまでの (アルカリ金属)/III-V(110) 表面の研究状況を総括するとともに、その後、本研究に使用した装置の構成、試料の特徴ならびに作製方法について述べている。STM 測定から得られた GaAs(110) 表面の K 原子の吸着構造を理論研究と比較し、STS 測定から得られたトンネル微分コンダクタンスより K 原子の誘起する表面準位について考察されている。

第二部では K/GaAs(110) 表面の光応答について論述されている。光 STM/STS 測定によって局所的な SPV を測定する方法を述べ、得られた実験結果がバンド構造、電子緩和時間の観点から考察されている。

第三部では円偏光を照射した GaAs(110) 表面でのスピニ偏極 STM 測定の結果について論述されている。測定結果が偏光変調実験を行う際問題となる強度変調によるものでないことを、第二部で得られた結果および偏光変調成分と強度変調成分の比較から明らかにし、得られた結果がスピニ依存成分であることが論述されている。

結語では以上の結果についてまとめ、本研究から得られた知見をもとに、今後の展望について述べられている。

以上を要約すると、本論文は STM/STS を用いて、K 原子が吸着した GaAs(110) 表面の吸着構造ならびに電子状態を明らかにするとともに、この表面のスピニ STM への応用可能性を示したものであり、これらの知見は表面物性工学の基礎に寄与するところが大である。

よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格ある者と認める。