

氏 名	こ ばやし けん ごと 小 林 賢 吾
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学位記番号	工 博 第 2922 号
学位授与の日付	平 成 20 年 3 月 24 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研究科・専攻	工 学 研 究 科 材 料 工 学 専 攻
学位論文題目	走査プローブ顕微鏡を用いた半導体中の不純物のポテンシャル計測

論文調査委員 (主査) 教授 酒井 明 教授 田中 功 教授 中村 裕之

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、走査トンネル顕微鏡 (STM) を利用した局所トンネル障壁 (LBH) 測定法、いわゆる STM-LBH, を半導体中のドーパント原子のポテンシャル計測に応用するための基礎研究をまとめたものであり、11章からなっている。

第1章は緒言であり、研究の背景と目的が述べられており、特に原子レベルでのドーパント評価の重要性が指摘されている。

第2章では最初にSTMの基本原理が紹介され、次いでLBHとその物理的な意味が述べられている。最後にSTM以外のプローブ顕微鏡によるポテンシャル計測法が要約されている。

第3章では、GaAsおよび他のⅢ-V族半導体の(110)面におけるドーパント原子のSTM観察例が詳述されている。最初にこれらの半導体の(110)面の性質が導入され、次いで清浄表面およびドーパント原子のSTM像のコントラストが、探針誘起のバンドの湾曲(TIBB)を考慮に入れて論じられている。

第4章は実験装置に関する章である。本研究に用いられた室温および低温の超高真空STM、並びに超高真空ケルビン力顕微鏡(KFM)、の構成と機能が紹介され、最終節ではLBHの測定エレクトロニクスが取り上げられている。

第5章では試料劈開による(110)表面の調整方法がまとめられている。原材料である各ウェハのドーピング濃度等の特性が示され、超高真空中でウェハの劈開を行うための試料ホルダーと劈開法が述べられている。

以下の第6章～第10章が実験結果の提示と考察に充てられている。

第6章は室温におけるGaAs(110)表面のSTM-LBH観察結果である。ドーパント原子はその特徴的なSTM像により容易に識別され、起伏の相違から、表面から6層程度の深さにあるドーパントまでSTM観察可能であることが示されている。一方、室温で観測されるドーパントサイトのSTM像およびLBHは余り系統的なバイアス依存性を示していない。これは室温ではSTM探針の状態が変化しやすく、安定な走査が困難であることが原因であると推定されている。

第7章は液体窒素温度におけるGaAs(110)表面のSTM-LBH観察結果であり、本論文の主要な成果が3節にわたって論述されている。

7.1節では一定バイアスにおけるドーパントサイトのSTM像およびLBHが示され、表面から8層程度までのドーパント原子がイメージできること、またドーパントサイトの起伏がLBHと負の相関を示すこと、が明らかにされている。

7.2節ではドーパントサイトから離れた清浄表面におけるLBHのバイアス依存性が詳細に解析されている。清浄表面のLBHは正・負のバイアス域においてピークを示すことが見出され、正バイアス域のLBHピークは価電子帯から伝導帯へのトンネリング径路の切り替わりに対応したピークであることがSTM像のバイアス依存性を援用して論証されている。さらにTIBBを考慮に入れたLBHのモデル計算を行い、そのバイアス依存性が実験結果を良く再現することを明らかにしている。この理論計算に基づくバンドの湾曲を取り入れたSTM接合のバンド図を考慮し、さらに接合の距離変化等を織り込んで考察することにより、測定されたLBHのバイアス依存性は定性的に説明することが可能である。

7.3節ではアクセプタサイトにおけるLBHのバイアス依存性の実験結果とその解析が紹介されている。重要な発見は負バイアス域におけるLBHピークが清浄表面のそれに比してシフトしていることである。イオン化したアクセプタのポテンシャルによるバンドの湾曲を考慮すると、このLBHのシフトはアクセプタのポテンシャルを表していると考えられ、実際測定から得られるシフトの向きと大きさはドーパントポテンシャルとして妥当なものとなっている。従ってLBHのバイアス依存性を測定することによりドーパントポテンシャルを原子1個のレベルで評価することが可能であり、この結果はドーパント計測への重要な貢献となる成果である。

第8章は前章の内容をInPおよびGaSbに拡張したもので、清浄表面のLBHについては各半導体のバンド構造を反映した差異が見出されている。またアクセプタサイトのLBH解析からは妥当なポテンシャル値が得られており、LBHによるポテンシャル計測の汎用性を示す結果となっている。

第9章ではSTM-LBH測定をGaAs (110) 表面に現れるX字型および星型欠陥のサイトに適用した結果が報告されている。LBHのバイアス依存性から評価される欠陥サイトの荷電状態は理論予想と定性的に一致しており、この結果はLBH測定が欠陥評価にも有効であることを示している。

第10章では超高真空KFMを利用したGaAs (110) 表面の観察結果が紹介されている。KFM像においてもドーパント原子がイメージされているが、観測例はまだ少なく確定した結論を得るには至っていない。

第11章はまとめであり、本論文の成果の総括と結論が述べられている。

論文審査の結果の要旨

本研究は走査トンネル顕微鏡 (STM) を用いて半導体清浄表面直下に存在するドーパント原子を個々に観察するとともに、局所トンネル障壁 (LBH) の測定を通じてドーパントサイトにおけるポテンシャルを解明する研究を論述したものであり、得られた主な研究成果は以下のとおりである。

1. *p* 型 GaAs (110) 清浄表面の LBH が正・負のバイアス域においてピークを示すことを見出し、正バイアス域の LBH ピークが価電子帯から伝導帯へのトンネリング径路の切り替わりに対応したピークであることを明らかにした。また実験結果がバンドの湾曲を取り入れた LBH の計算結果と良く一致することを示し、GaAs (110) 等の半導体表面においては、バンドの湾曲が LBH のバイアス依存性に支配的な影響を与えていることを指摘した。

2. *p* 型 GaAs (110) 表面下に存在するアクセプタサイトの LBH と清浄表面の LBH との比較・解析を行ない、負バイアス域における両者のピーク位置がシフトしていることを明らかにした。LBH のシフト量はアクセプタのポテンシャルを表していると考えられ、この結果は、LBH 計測により個々のドーパント原子のポテンシャルを評価できることを初めて示した成果である。

3. GaSb (110) および InP (110) 各表面のアクセプタサイト、および GaAs (110) 表面の欠陥サイトについても上記と同様に LBH の観測・解析を行い、各サイトのポテンシャルおよび荷電状態について有用な情報を得ることに成功している。

以上要するに、本論文は LBH のバイアス依存性を調べることによって個々のドーパントや表面欠陥サイトのポテンシャルや荷電状態を原子レベルで計測できることを実証したものであり、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士 (工学) の学位論文として価値あるものと認める。また平成20年2月27日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行なった結果、合格と認めた。