

氏名(本籍)	よし だ しょう じ 吉 田 昭 二 (茨 城 県)
学位の種類	博 士 (工 学)
学位記番号	博 甲 第 3915 号
学位授与年月日	平成 18 年 3 月 24 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
審査研究科	数理物質科学研究科
学位論文題目	光 STM 融合技術の開拓とナノスケールでの物性研究への展開

主 査	筑波大学教授	工学博士	重 川 秀 実
副 査	筑波大学教授	理学博士	秋 本 克 洋
副 査	筑波大学助教授	博士(工学)	佐々木 正 洋
副 査	筑波大学助教授	工学博士	岡 田 至 崇

論 文 の 内 容 の 要 旨

近年、あらゆる研究分野でナノテクノロジーとの融合が進められている。ムーアの法則に従い微細化することによって発展を続けてきた半導体デバイスにとっても、ナノテクノロジーは、まさに、避けては通れない対象である。実際、CMOS デバイスは現在、数 10 nm スケールにまで微細化が進んでおり、また、量子ドットや量子細線など様々な半導体ナノ構造の作製方法の確立により、これら新規材料を応用した次世代ナノデバイスの開発も盛んに行われている。微小な半導体デバイスにおいてはナノスケールの電気物性がデバイス全体の特性を支配するため、現在様々な顕微鏡を応用した高分解能の半導体物性評価手法の開発が急速に進められているのが実情である。

こうした中、走査トンネル顕微鏡 (Scanning Tunneling Microscopy: STM) 及び、走査トンネル分光法 (Scanning Tunneling Spectroscopy: STS) は、その高い空間分解能からナノスケールの様々な電気物性を評価する手法として応用されており、半導体デバイス分野への更なる応用が強く期待できる。しかし、従来の測定ではドーパント濃度やキャリア分布などの基本的な半導体物性を定量的に評価することは難しいとされてきた。その主な原因は、STM 探針と試料の間に印加するトンネル電圧により半導体表面近傍のバンドが湾曲されてしまう (バンドベンディング) ことにある。この探針バンドベンディングのために STM 探針-試料間に掛かる実効的なトンネル電圧が分からなくなり、エネルギー方向のデータの信頼性が失われてしまう。

しかし、このように大きな阻害要因として考えられている探針バンドベンディングは、トンネル電圧だけでなく、探針直下のドーパント特性や、多数・少数キャリア密度を反映して変化するため、逆に、これらの物性を引き出すための有益な情報源として利用することが可能である。探針バンドベンディングは、探針-試料間に光を照射することによって誘起される表面光起電力 (Surface Photovoltage: SPV) を測定することによって直接計測可能であることは以前より知られていたが、これまでは有用な SPV 測定手法が無く、SPV 測定を応用して半導体デバイスの電気物性や局所バンド構造を評価しようとする研究例はなされてこなかった。

本研究は、上記状況を背景として、レーザー光と STM を融合させた光 STM 装置を用いて SPV を計測す

る新たな手法「光変調トンネル分光法」を開発し、手法の基礎的な評価を行うとともに半導体デバイスへの応用可能性を検討したものである。

研究の前半では、Si (100), Si (111) 表面を測定対象として、SPVのトンネル電圧、STM探針-試料間距離依存性を詳細に解析した。その結果、光によって励起したキャリアがトンネル電流として半導体表面から探針へトンネルしてしまうことが、光照射効果を弱めてしまい、SPVが本来の値より小さく観測されてしまうことが明らかになった。この効果の他にも、正確な測定を阻害する探針熱膨張などの影響を取り除き、正しい測定を行うための方法を確立した。

研究の後半では、本手法を用いて半導体デバイスの基本、且つ最も重要な構成要素であるp-n接合を有するGaAs試料を対象に実験を行った。SPVの空間分布測定によるp-n接合界面でのドーパント特性の解析を通して、SPVのドーパ量依存性が明らかになるとともに、その特性を利用して定量的なドーパント分布計測が可能であることが示された。

続いて、p-n接合に順方向電圧を印加することによってp-n接合界面からp型、n型それぞれの中性領域へと注入される少数キャリアの空間分布を計測することに成功した。ここでは、少数キャリアが多数キャリアと結合して消失する様子や、少数キャリアの拡散長が電界ドリフトの影響を受けて変化する様子が観測され、本手法がデバイスの動作特性を実空間で解析する手法として非常に有効であることを明らかにした。さらに、p-n接合界面に光照射することにより誘起される界面での内蔵電位の減少を観測することに成功した。また、ここで得られた値は、従来のマクロなSPV測定により計測される量と同等であることが確認された。従って、本手法を用いて従来の手法に空間分解能を付与することができるため、量子ドットや量子井戸などのナノ構造を有する半導体デバイスへの応用が可能になると考えられる。以上のように、本研究において開発した光変調トンネル分光法は半導体デバイスの様々な特性をナノスケールの空間分解能で評価することが可能であり、半導体デバイスのナノ計測手法として非常に有力であることが明らかになった。

審 査 の 結 果 の 要 旨

論文の要旨で述べられているように、半導体の電子構造をナノスケールで解析する技術の確立は急務であり、多くの研究者が力を注いでいる課題である。しかし、局所バンド構造や、少数キャリアのダイナミクスをナノスケールで直接観察し、定量的な評価を可能にする技術の開発には、多くの困難もあり、なかなか達成することがかなわなかった。著者は、走査トンネル顕微鏡 (STM) に量子光学の技術を組み合わせることによって、これまで計測を妨げる問題点とされてきた、探針誘起のバンド湾曲を逆に利用することで、これら目的を達成している。

低温STMは、その使用に多くの基礎的な技術を必要とする先端解析装置であるが、著者は、独自のプログラムを組むなど装置を自在に扱い、ナノスケールでのバンド構造の可視化など、非常に興味深い結果を得ている。また、それら結果を用い、これまで、マクロな実験結果を基に構築されてきた少数キャリアのダイナミクスをナノスケールで直接基礎づける解析を行うなど、実験、解析、両面に渡って優れた成果を出している。

論文は、幅広い基礎学力を感じさせるものであり、全体を通じた構成能力も高い。そして、得られた結果は、今後の半導体技術開発において、重要な役割を担うものと考えられる。

よって、著者は博士 (工学) の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。