

論文の内容の要旨

二波長光照射走査トンネル顕微鏡による InAs 細線の光吸収特性の局所的評価

勝井 秀一

量子ドットや量子細線のような半導体ナノ構造の局所的な特性評価は、ナノ構造を高性能デバイスへ応用するにあたり大変重要となる。走査トンネル顕微鏡 (STM) や原子間力顕微鏡 (AFM) に代表される走査プローブ顕微鏡 (SPM) は、原子スケールの高空間分解能を有するため、局所的評価に関して重要な役割を果たす。例えば、光照射下において STM や導電性カンチレバーを用いた AFM で半導体ナノ構造材料を観測すると、ナノ構造の電気的特性と光学的特性の情報を得られる。この観測では、光吸収により誘発される光誘起電流 (PIC) 信号を検出しているが、半導体ナノ構造材料の特性の正確な評価のためには、この PIC 信号の起源を正確に理解し、信号の解釈を困難にする起源を必要に応じて抑制しなければならない。本研究では、内蔵電界が内在する基板上に成長したナノ構造を評価する際に検出される PIC 信号の起源を考慮し、信号の解釈を困難にする下地の基板の内蔵電界の影響を抑制する方法を新たに提案し、その方法を用いて実際にナノ構造の光吸収特性の評価を行う。

本測定では、内蔵電界を有する GaAs 上に InAs 細線を成長させた構造を試料として用いた。n 型 GaAs 微傾斜基板上にアンドープ GaAs のバッファ層を成長させると、その表面はマルチステップ形状を構成する。InAs 細線は、各ステップ端に沿って配列している。InAs 細線での光吸収を選択的に誘発するために、GaAs のバンドギャップ未満の光子エネルギーの on-off 変調した光 (変調光) を照射して PIC 信号を検出したところ、光吸収が生じていない GaAs 上でも信号が検出された。この結果を踏まえて PIC 信号の起源を考えると、変調光を用いた場合に検出される PIC 信号を構成する成分として、(i) フォトキャリアのトンネル、(ii) 容量性電流、(iii) 表面光起電力の 3 つが挙げられる。GaAs 上で検出された PIC 信号は成分 (ii)、(iii) の影響によるものであり、更に InAs 細線上の PIC 信号にも下地の GaAs の影響が含まれることを考慮すると、InAs 細線の光吸収特性を正確に評価するためには成分 (ii)、(iii) を取り除かなくてはならない。そこで我々は、二波長光照射 STM を提案した。この方法では、変調光に加えて連続光を合わせてナノ構造材料表面に照射している。連続光の吸収により下地の GaAs のバンド構造をフラットにすることで、成分 (ii)、(iii) の起源となる内蔵電界を抑制することができ、変調光の変調周波数に同期した PIC 信号からそれらの成分を取り除くことができる。実際に PIC 信号の位相を解析したところ、二波長光照射 STM 観測により検出される PIC 信号では成分 (i) が支配的であることが確認でき、その PIC 信号のマッピング像では GaAs 上の PIC 信号が消え、InAs 細線上の PIC 信号が強調された。

次に、二波長光照射 STM を用いて InAs 細線の光吸収特性の局所的評価を行った。ナノ細線構造での量子閉じ込め効果や形状異方性に基づく特徴的な特性を調べるため、PIC 信号の照射光光子エネルギー依存性、及び偏光依存性を観測した。偏光依存性に関しては、細線横方向の閉じ込め効果の有無で生じる PIC 信号の違いを観測することを期待して平均幅 25 nm と 50 nm の細線 (平均高さはいずれも 10 nm) に対し、細線垂直方向/平行方向偏光状態の変調光を照射して PIC 信号を観測した。

その結果、25 nm 幅の細線では垂直方向偏光状態の光の場合のみ PIC 信号が観測されず、明瞭な偏光依存性を示したのに対し、50 nm 幅の細線では PIC 信号の偏光依存性が確認されなかった。このような細線幅の違いによる PIC 信号の偏光依存性の差異から、十分に細い細線において生じる量子閉じ込め効果が細線垂直方向偏光除隊の光吸収を抑制して、PIC 信号の明瞭な偏光依存性を生じさせることを確認した。

また、平均幅 50 nm の細線における PIC 信号の光子エネルギー依存性を観測し、InAs 細線の特性を詳しく調べた。1.20 eV から 1.55 eV の光子エネルギー領域での PIC 信号スペクトルを取ったところ、室温下での GaAs のバンドギャップ (1.42 eV) 以上の領域において、GaAs 上の PIC 信号スペクトルは、バルク半導体の吸収スペクトルとよい一致を示した。このことは、二波長光照射 STM 観測により検出される PIC 信号から半導体材料の吸収スペクトルを議論できることを意味している。1.42 eV 未満の光子エネルギー領域での InAs 上の PIC 信号スペクトルはステップ状の変化を示しており、この細線幅では偏光依存性が現れなかったことも合わせて考慮すると、この InAs 細線が量子井戸として働いているものと推測できる。更に、この細線を 10 nm 幅の InAs 量子井戸として考えると、PIC 信号スペクトルの測定結果から今回の観測されなかった離散準位などの本 InAs 細線試料の特性を解析できる。