

(続紙 1)

| | | | |
|---|--|----|-------|
| 京都大学 | 博士 (工学) | 氏名 | 吉岡 裕典 |
| 論文題目 | Fundamental Study on Si Nanowires for Advanced MOSFETs and Light-Emitting Devices (先端 MOSFET および発光デバイスを目指した Si ナノワイヤの基礎研究) | | |
| (論文内容の要旨) | | | |
| <p>本論文は、半導体の新しい構造として学術的に興味深いナノサイズの Si 細線(Si ナノワイヤ)の電子物性、光物性およびデバイス応用に関する研究についてまとめたものであり、7章からなっている。</p> <p>第1章は序論であり、Siの基礎的な物性と半導体ナノ構造について紹介した後、Si MOSFETのこれまでの発展から現状の問題点を説明し、これを解決する構造としての Si ナノワイヤ MOSFET の有用性、および量子閉じ込め効果などのナノワイヤ MOSFET に特有の物理現象について述べている。次に、発光材料としての Si ナノ構造の可能性と研究の現状について整理している。最後に、Si ナノワイヤに関する未解明の物性について説明し、当該分野における本研究の位置づけと目的を明らかにしている。</p> <p>第2章では、本研究で用いた Si ナノワイヤの作製方法と、作製したナノワイヤの形状に関する評価結果を述べている。まず、SOI(Silicon-on-Insulator)基板に電子線リソグラフィ、反応性イオンエッチング(RIE)と犠牲酸化を用いたトップダウン方式で微細ナノワイヤを作製する手法について説明した後、電子線の描画ドーズ量、ナノワイヤ描画長さと同幅、RIEの選択比とエッチング量を適切に選択することで、描画と RIEにより幅 12 nm のナノワイヤの形成に成功している。その後の犠牲酸化によりさらなる微細化を行い、幅 7 nm、高さ 2 nm という世界でも最小レベルの超微細ナノワイヤの作製に成功している。Si ナノワイヤのサイズや形状の制御性について議論し、従来法に対する優位性を論じている。</p> <p>第3章では、断面サイズ 4-18 nm の Si ナノワイヤを有する MOSFET を作製し、その移動度のサイズ・温度依存性を詳細に評価し、その結果から推測されるナノワイヤ中の電子状態・キャリア散乱機構について考察している。作製した Si ナノワイヤ MOSFET は良好な動作を示し、特にほぼ理想的なサブスレッショルド特性を得ることに成功している。また、作製した MOSFET のしきい値電圧は、ナノワイヤのサイズが小さくなるに従い緩やかに単調増加した。この増加量は量子閉じ込め効果による禁制帯幅の増大を考慮することにより説明できることを示している。電子と正孔の移動度比は、ナノワイヤサイズ 8 nm 以上ではほぼ一定であったが、それ以下で顕著に変化し、ナノワイヤ固有の伝導現象が現れていることを明らかにしている。つまり、ナノワイヤサイズ 8 nm 以上では、電子と正孔の移動度の比はバルク MOSFET のそれとよく一致し、キャリアはバルク MOSFET と同様に電界によって界面に閉じ込められた状態にあることを示している。一方、ナノワイヤサイズ 8 nm 以下では、移動度の比は特異な変化を示し、キャリアはナノワイヤ全体に分布した状態にあると考えられる。</p> <p>第4章では、ナノワイヤ MOSFET におけるドレイン電流の振動現象を説明するため、一次元電子状態における電気伝導の理論モデルを提案し、実験結果と比較している。ナノワイヤ MOSFET においては、ゲート電圧の変化に対しドレイン電流が振動して変化する。サイズの小さいナノワイヤにおいて低温ほど大きな振動として観測され、本研究では断面積が $3 \times 18 \text{ nm}^2$ のナノワイヤ MOS-</p> | | | |

FETで、約200Kまでドレイン電流が振動し、相互コンダクタンスではより高温の300 Kまで振動することを見出している。提案した理論モデルでは、有効質量近似を用いてキャリアの電子状態を規定し、これを基に音響フォノンによる散乱頻度を計算している。次に、求めた散乱頻度に対してフェルミ分布を用いた積分を行い、移動度をフェルミエネルギーおよびゲート電圧の関数として求めている。解析の結果、サブバンド状態密度の重ね合せである状態密度はエネルギーに対して振動し、この振動を起源として、移動度はゲート電圧に対し振動することを示している。つまり、一次元状に閉じ込められたキャリアの状態密度の振動を起源として、移動度、ひいてはドレイン電流がゲート電圧に対して振動することを明らかにし、ドレイン電流の振動の1つの山谷は1つのサブバンドに対応することを示している。

第5章では、密度汎関数法を用いてSiナノワイヤの電子状態および光学的性質について計算し、Siナノワイヤの発光デバイスとしての可能性について調べている。効率的な電流注入が可能で、異方性も評価できるSiナノワイヤに着目し、断面サイズが約1-3 nmで表面を水素終端した<100>方位Siナノワイヤと<111>方位Siナノワイヤを対象として、バンド構造およびバンド端遷移による吸収係数のサイズ・方向依存性を評価している。計算した結果、<100>ナノワイヤのバンド構造は直接遷移型である一方、<111>ナノワイヤにおいては、サイズ1.5nm以上では間接遷移、サイズ1.0 nm以下では直接遷移型となることを明らかにしている。偏光特性についても検討し、偏光がナノワイヤに平行な場合の<100>ナノワイヤの吸収係数は、バンドギャップエネルギーでピークを持ち、そのピーク値はサイズの減少に伴い増加することを示している。サイズ約2 nm以下のナノワイヤでは、バルクの吸収係数より1桁以上大きくなり、発光効率の増加が期待できることを示している。一方、<111>ナノワイヤは、ほとんどのサイズにおいて間接遷移であるため、吸収端はバンドギャップエネルギーより高エネルギー側にシフトし、さらに吸収端での吸収係数は、<100>NWより小さいことが分かった。吸収係数の偏光依存性についても計算し、その結果を群論に基づく考察から、偏光が垂直な場合、 Γ 点における1重縮退状態 \leftrightarrow 1重縮退状態の遷移が禁制遷移となることで説明している。以上のように、発光デバイス応用には<100>ナノワイヤが適していること、およびナノワイヤからの発光はナノワイヤに平行に偏光していることを示している。

第6章では、Siナノワイヤのpinダイオードを試作し、そのエレクトロルミネッセンス(EL)を評価した結果を述べている。ナノワイヤからのバンド端遷移による発光を確認するために、ナノワイヤの断面サイズをバルクとみなせるものから徐々に小さくしたナノワイヤpinダイオードを作製し、良好な整流性と順バイアス時のELを確認した。断面サイズの大きなナノワイヤpinダイオードでは波長1,130 nmにピークを有するELスペクトルが得られ、バルクの状態であることを確認している。次に、ナノワイヤサイズを減少させていくと、このバンド端発光のピーク波長が徐々に短波長側にシフトすることを見出し、これをSiナノワイヤの量子閉じ込め効果と関連付けて議論している。

第7章は結論であり、本研究において得られたSiナノワイヤの作製、電子物性、光物性に関する知見をまとめ、デバイスへ応用した結果を要約している。また、今後の研究課題を提示し、その方策について述べている。

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、半導体の新しい構造として学術的に興味深いナノサイズの Si 細線(Si ナノワイヤ)の電子物性、光物性およびデバイス応用に関する研究についてまとめたものであり、得られた主な成果は以下の通りである。

1. SOI(Si-on-Insulator)基板に電子線リソグラフィ、反応性イオンエッチングと犠牲酸化を用いたトップダウン方式の加工を施すことにより、制御性よく Si ナノワイヤを形成する基本技術を確認した。作製条件を最適化することで最小幅 7nm、高さ 2nm という当該分野で最小レベルの超微細 Si ナノワイヤの作製に成功した。
2. 断面サイズ 4-18nm の Si ナノワイヤを用いて熱酸化膜をゲート絶縁膜とする MOSFET を作製し、その特性を詳細に評価した。作製した MOSFET において、ほぼ理想的なサブスレッショルド特性を得ることに成功すると共に、ナノワイヤのサイズの減少に従って、しきい値電圧が増大し、これが量子閉じ込め効果による Si ナノワイヤの禁制帯幅の増大によることを明らかにした。さらに、7-9nm 以下の微細ナノワイヤ MOSFET で観測される電流の振動現象について、独自のモデルを提案して解析した。有効質量近似やフェルミ黄金律を元に、Si ナノワイヤ中の電子の状態密度や散乱頻度を求め、MOSFET 特性を計算した結果、ナノワイヤ特有のサブバンドの状態密度に起因して、移動度がゲート電圧に対して振動することを提示した。この移動度の振動により、実験で得られる電流の振動現象が説明できることを明らかにした。
3. Si ナノワイヤの光学的性質を理論計算と実験により調べた。まず、様々なサイズと方位を有する Si ナノワイヤのバンド構造を密度汎関数法を用いて計算し、断面サイズが数 nm の <100>方位 Si ナノワイヤでは直接遷移型のバンド構造を示し、バルクに比べてバンド端の吸収係数が顕著に増大することを明らかにした。また、理論計算および群論に基づいた考察により、バンド端遷移はナノワイヤに平行な偏光特性を有することを示した。さらに、実際に Si ナノワイヤで pin 接合を形成し、電流注入によるエレクトロルミネセンス特性を評価した。ナノワイヤのサイズ減少により、バンド端の発光ピークが短波長側にシフトすることを示し、量子閉じ込め効果と関連付けて論じている。

以上、要するに、本論文は、数 nm レベルの微細 Si ナノワイヤを再現性よく形成する基本技術を確認すると共に、Si ナノワイヤの電子デバイス応用、光デバイス応用に関する実験的および理論的研究を行い、Si ナノワイヤの基本的な電子物性、光物性を電子工学の立場から明らかにしたもので、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22年6月19日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。