

学位論文題名

Formation and mechanism of multilayer steps on vicinal(001)GaAs surfaces
grown by metalorganic vapor phase epitaxy

(有機金属気相成長法による(001)微傾斜GaAs表面の多段原子ステップの形成と機構)

学位論文内容の要旨

近年、半導体デバイスの進展に伴う微細化が急速に進み、微細構造の形成が困難な原子レベルの寸法(ナノメートル)に近づきつつある。また、電子濃度を制御する従来の原理による素子では、微細化に伴って素子からの発熱がデバイス動作上無視できない問題となっており、微細化を一層困難なものとしている。そこで従来の原理とは異なった新たな動作原理に基づくデバイスの研究が急務である。新たな動作原理として量子力学的効果を応用した様々なデバイス(量子デバイス)が提案されているが、作製すべきデバイス寸法が従来の寸法に比べて1桁以上小さく作製は難しい。

これまで量子デバイスを実現する微細構造加工技術として、様々な方法が提案されている。その中でも、結晶が原子レベルの微細な構造を自然に形成する自己組織化機構を利用する方法が近年注目されており、量子細線や量子ドットなどの低次元微細構造作製の試みが為されている。自己組織化機構を用いて微細構造を作成する利点は高密度のものが広範囲で作成されるという点である。しかし、自然現象を利用するため大きさの揺らぎの問題が本質的に存在し、均一性を向上させることを困難にしている。この問題を解決するためには成長機構を明らかにし、原理的に構造を制御していく必要がある。そこで本論文では、自己組織化現象のうち結晶学的な原子面の段差(原子ステップ)が集合して(ステップバンチング)多段ステップを形成する現象を取り上げ、その形成機構を明らかにした。この多段ステップは周期的構造を有するゆえに量子細線レーザーや電子波干渉素子などへの応用が期待されている。

第1章は序論である。材料としての化合物半導体の性質について述べ、その重要性について述べるとともに、多段原子ステップの形成及び機構を解明する重要性を述べた。

第2章は、結晶成長及び微傾斜表面上の結晶成長の概念を示した。はじめに、表面における様々な成長機構について、また微傾斜表面の概念及び成長について述べた。次に有機金属気相成長(MOVPE)法の基本概念を説明した。

第3章では、成長層及び成長層表面の各種評価方法を説明する。はじめにXPS法について説明した。また、半導体表面に対するXPS分析に関しての簡潔な説明も行った。次に表面構造分析法としてRHEED法について説明した。最後に、原子間力顕微鏡(AFM)

及び走査型トンネル顕微鏡(STM)等の走査型プローブ顕微鏡による表面構造評価について説明した。

第4章では、微傾斜表面上へのMOVPE成長後の多段原子ステップ形成の実験結果について述べた。本章では、多段原子ステップの成長パラメーターに対する依存性をAFMにより評価した。結果として、多段原子ステップ構造の大きさは成長時間に対して飽和傾向を示し、この傾向はファセットの形成機構では説明できない事を示した。その上、多段原子ステップ形成は結晶学的な微傾斜方向、成長温度、成長速度、アルシン分圧等の各種成長パラメーターに影響されることを明らかにした。

第5章では、MOVPE雰囲気下での熱処理における多段原子ステップ形成について示した。気相エッチング効果や多段原子ステップ形成に対する環境パラメーターの依存性を示した。結果として、MOVPE雰囲気下での熱処理では気相エッチング効果はほとんど存在せず、熱処理下での多段原子ステップ形成はMOVPE成長の場合とは反対に、結晶学的な微傾斜角度に非常に敏感である事、及び熱処理で多断原子ステップを形成するためには成長の場合より高温であることが必要なことを明らかにした。

第6章では超高真空(UHV)下の観察に基づく多段原子ステップの詳細な構造を示した。MOVPE成長したGaAs(001)微傾斜表面上の表面再構成構造を、表面を酸化することなしに初めて観察した。結果として、GaAs微傾斜表面上の多段原子ステップ部分の再構成構造はほぼテラス上の構造と似た構造を有しており、多段原子ステップのすぐ下のテラスの再構成構造の一部はダイマー列がかけている事を明らかにした。一方、AlAs微傾斜表面では多段原子ステップのすぐ下までダイマー列が存在し、かつ多段ステップが成長によって単原子ステップへ変移していく傾向を明らかにした。

第7章は、多段原子ステップ形成機構を明らかにするために、新しい形成モデルを提案し、多段ステップが形成されていく過程をモンテカルロ法によってシミュレートした。表面泳動原子に対するエネルギーダイアグラムをシミュレーション結果と実験結果を対比する事によって明らかにした。結果として、GaAs微傾斜表面上の多段原子ステップ形成現象は、従来言われているようなファセット機構によらず、各原子ステップの運動学的な動きで決まる事を明らかにした。

第8章では本論文で得られた結果の総括を記した。

以上により、多段原子ステップの形成機構を明らかにするとともに、構造の制御法を明らかにした。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 福 井 孝 志
副 査 教 授 長 谷 川 英 機
副 査 教 授 陽 完 治
副 査 教 授 酒 井 洋 輔

学 位 論 文 題 名

Formation and mechanism of multilayer steps on vicinal(001)GaAs surfaces grown by metalorganic vapor phase epitaxy

(有機金属気相成長法による (001) 微傾斜GaAs表面の多段原子ステップの形成と機構)

近年、半導体デバイスの進展に伴う微細化が急速に進み、微細構造の形成が困難な原子レベルの寸法（ナノメートル）に近づきつつある。また、電子濃度を制御する従来の原理による素子では、微細化に伴って素子からの発熱がデバイス動作上無視できない問題となっており、微細化を一層困難なものとしている。そこで従来の原理とは異なった新たな動作原理に基づくデバイスの研究が急務である。新たな動作原理として量子力学的効果を応用した様々なデバイス（量子デバイス）が提案されているが、作製すべきデバイス寸法が従来の寸法に比べて1桁以上小さく作製は難しい。

これまで量子デバイスを実現する微細構造加工技術として、様々な方法が提案されている。その中でも、結晶が原子レベルの微細な構造を自然に形成する自己組織化機構を利用する方法が近年注目されており、量子細線や量子ドットなどの低次元微細構造作製の試みが為されている。自己組織化機構を用いて微細構造を作成する利点は高密度のものが広範囲で作成されるという点である。しかし、自然現象を利用するため大きさの揺らぎの問題が本質的に存在し、均一性を向上させることを困難にしている。この問題を解決するためには成長機構を明らかにし、原理的に構造を制御していく必要がある。そこで本論文では、自己組織化現象のうち結晶学的な原子面の段差（原子ステップ）が集合して（ステップバンチング）多段ステップを形成する現象を取り上げ、その形成機構を明らかにしている。この多段ステップは周期的構造を有するゆえに量子細線レーザーや電子波干渉素子などへの応用が期待されている。

第1章は序論である。材料としての化合物半導体の性質について述べ、その重要性について述べるとともに、多段原子ステップの形成及び機構を解明する重要性を述べている。

第2章は、結晶成長及び微傾斜表面上の結晶成長の概念を示している。はじめに、表面における様々な成長機構について、また微傾斜表面の概念及び成長について述べている。次に有機金属気相成長(MOVPE)法の基本概念を説明している。

第3章では、成長層及び成長層表面の各種評価方法を説明している。はじめにXPS法について説明している。また、半導体表面に対するXPS分析に関しての簡潔な説明も行っている。次に表面構造分析法としてRHEED法について説明している。最後に、原子間力顕微鏡(AFM)及び走査型トンネル顕微鏡(STM)等の走査型プローブ顕微鏡による表面構造評価について説明している。

第4章では、微傾斜表面上へのMOVPE成長後の多段原子ステップ形成の実験結果について述べている。本章では、多段原子ステップの成長パラメーターに対する依存性をAFMにより評価している。結果として、多段原子ステップ構造の大きさは成長時間に対して飽和傾向を示し、この傾向はファセットの形成機構では説明できない事を示している。その上、多段原子ステップ形成は結晶学的な微傾斜方向、成長温度、成長速度、アルシン分圧等の各種成長パラメーターに影響されることを明らかにしている。

第5章では、MOVPE雰囲気下での熱処理における多段原子ステップ形成について示している。気相エッチング効果や多段原子ステップ形成に対する環境パラメーターの依存性を示している。結果として、MOVPE雰囲気下での熱処理では気相エッチング効果はほとんど存在せず、熱処理下での多段原子ステップ形成はMOVPE成長の場合とは反対に、結晶学的な微傾斜角度に非常に敏感である事、及び熱処理で多断原子ステップを形成するためには成長の場合より高温であることが必要なことを明らかにしている。

第6章では超高真空(UHV)下の観察に基づく多段原子ステップの詳細な構造を示している。MOVPE成長したGaAs(001)微傾斜表面上の表面再構成構造を、表面を酸化することなしに初めて観察している。結果として、GaAs微傾斜表面上の多段原子ステップ部分の再構成構造はほぼテラス上の構造と似た構造を有しており、多段原子ステップのすぐ下のテラスの再構成構造の一部はダイマー列がかけている事を明らかにしている。一方、AlAs微傾斜表面では多段原子ステップのすぐ下までダイマー列が存在し、かつ多段ステップが成長によって単原子ステップへ変移していく傾向を明らかにしている。

第7章は、多段原子ステップ形成機構を明らかにするために、新しい形成モデルを提案し、多段ステップが形成されていく過程をモンテカルロ法によってシミュレートしている。表面泳動原子に対するエネルギーダイアグラムをシミュレーション結果と実験結果を対比する事によって明らかにしている。結果として、GaAs微傾斜表面上の多段原子ステップ形成現象は、従来言われているようなファセット機構によらず、各原子ステップの運動学的な動きで決まる事を明らかにしている。

第8章では本論文で得られた結果の総括を記している。

これを要するに、量子効果デバイスを作製する上で最も重要な技術として化合物半導体表面、ことに多段原子ステップ形状を制御する方法、その構造及び形成機構に関し、有益な知見を得たものであり、結晶工学の進歩に寄与するところ大である。

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ものと認める。