

## 変調超格子のミニバンド構造に関する研究

## 学位論文内容の要旨

近年、超格子によって構成される電子波エネルギーフィルタを、量子カスケードレーザや共鳴トンネルデバイスの高性能化のために利用することが検討されている。特に従来の周期的な超格子のポテンシャル包絡をガウス関数に従って変調した超格子(ガウス型変調超格子)は、非常に優れたエネルギー選択性を持つため、電子波エネルギーフィルタを実現するためのポテンシャル構造として有望視されている。

ガウス型変調超格子は従来の周期的な超格子と比較して、エネルギー通過域における透過確率が大幅に向上するが、構造パラメータの設定によっては、透過確率が極端に減少するエネルギー領域が現れる場合があり、周期的超格子と比較し特性が劣化することもある。ガウス型変調超格子の効率的な設計法の確立のためには、上述の問題を含め、構造パラメータと実現される特性の関係を体系的に把握しておく必要があるが、現状では十分な研究はなされていない。

本論文では、有効質量近似一次元シュレディンガー方程式によってモデル化される $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 系化合物半導体によるガウス型変調超格子について、変調方法とエネルギーフィルタ特性について詳細に調査し、基本特性を明らかにしている。特にガウス型変調超格子と従来の周期的超格子のミニバンド構造には、単純かつ規則的な関係が存在することを明らかにしており、設計のために有効な指針となりうることを示している。また、微細半導体作製に伴って生じる材料組成の乱れを考慮したモデルによる特性計算を行い、材料組成にある程度の乱れを伴う場合においても、周期的超格子と比較して優れた特性が維持されることを明らかにしている。

以下に本論文の構成を示す。

第1章では、本研究の背景と目的を述べ、本論文の構成を示している。

第2章では、有効質量近似一次元シュレディンガー方程式の等価回路表現に基づいた、有限長超格子および無限周期超格子の解析手法について述べる。そして、有限周期超格子のエネルギー通過域におけるリップル特性は、単一バリア及び二重バリア構造から概ね見積もることができること、有限周期超格子のミニバンド構造は、無限周期のものからほぼ正確に見積もることができることを述べている。またこれらを総合し、有限周期超格子のエネルギー透過特性は、その1周期分の特性から概ね見積もることができることを明らかにしている。

第3章では、優れたエネルギーフィルタ特性を示すガウス型ポテンシャル包絡をもつ変調超格子、および各種変調超格子のパラメータと特性の関係を詳細に調査し、ポテンシャル包絡が緩やかに変化し、かつ外部ポテンシャルと滑らかに接続されるように変調操作を施すことにより平坦なエネルギー通過域が形成されることを明らかにしている。

第4章では、多数のシミュレーションに基づき、ガウス型変調超格子のミニバンド構造は、透過確率がほぼ1となるエネルギー通過域、ほぼ0となるエネルギー阻止域の他に、多数の鋭い共鳴準位で構成される準通過域の3帯域に分類されることを示している。また、準通過域の形成はある単純な規則性に従っていることを明らかにし、影像パラメータの利用により、ガウス型変調超格子のミニバンド構造が容易に見積もられることを明らかにしている。準通過域の形成は電子波エネルギーフィルタにとってあまり好ましくないため、ここで示すミニバンド構造の推定法は、優れた電子波エネルギーフィルタを設計する上で有効な指標となりうることを示している。

第5章では、結晶成長過程における材料組成の乱れを加味したモデルにより、ガウス型変調超格子のエネルギーフィルタ特性への影響を検討し、材料組成に若干の乱れを伴う場合においても周期的超格子と比較して、優れた特性が維持されることを明らかにしている。

第6章では、本論文の結論を述べるとともに、今後の課題について述べている。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 宮 永 喜 一

副 査 教 授 小 川 恭 孝

副 査 教 授 小 柴 正 則

学 位 論 文 題 名

## 変調超格子のミニバンド構造に関する研究

近年、超格子によって構成される電子波エネルギーフィルタを、量子カスケードレーザや共鳴トンネルデバイスの高性能化のために利用することが検討されている。特に従来の周期的な超格子のポテンシャル包絡をガウス関数に従って変調した超格子（ガウス型変調超格子）は、非常に優れたエネルギー選択性を持つため、電子波エネルギーフィルタを実現するためのポテンシャル構造として有望視されている。

ガウス型変調超格子は従来の周期的な超格子と比較して、エネルギー通過域における透過確率が大幅に向上するが、構造パラメータの設定によっては、透過確率が極端に減少するエネルギー領域が現れる場合があり、周期的超格子と比較し特性が劣化することもある。ガウス型変調超格子の効率的な設計法の確立のためには、上述の問題を含め、構造パラメータと実現される特性の関係を体系的に把握しておく必要があるが、現状では十分な研究はなされていない。

本論文では、有効質量近似次元シュレディンガー方程式によってモデル化される  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  系化合物半導体によるガウス型変調超格子について、変調方法とエネルギーフィルタ特性について詳細に調査し、基本特性を明らかにしている。特にガウス型変調超格子と従来の周期的超格子のミニバンド構造には、単純かつ規則的な関係が存在することを明らかにしており、設計のために有効な指針となりうることを示している。また、微細半導体作製に伴って生じる材料組成の乱れを考慮したモデルによる特性計算を行い、材料組成にある程度の乱れを伴う場合においても、周期的超格子と比較して優れた特性が維持されることを明らかにしている。

以下に本論文の構成を示す。

第1章では、本研究の背景と目的を述べ、本論文の構成を示している。

第2章では、有効質量近似次元シュレディンガー方程式の等価回路表現に基づいた、有限長超格子および無限周期超格子の解析手法について述べる。そして、有限周期超格子のエネルギー通過域におけるリップル特性は、単一バリア及び二重バリア構造から概ね見積もることができること、有限周期超格子のミニバンド構造は、無限周期のものか

らほぼ正確に見積もることができることを述べている。またこれらを総合し、有限周期超格子のエネルギー透過特性は、その1周期分の特性から概ね見積もることができることを明らかにしている。

第3章では、優れたエネルギーフィルタ特性を示すガウス型ポテンシャル包絡をもつ変調超格子、および各種変調超格子のパラメータと特性の関係を詳細に調査し、ポテンシャル包絡が緩やかに変化し、かつ外部ポテンシャルと滑らかに接続されるように変調操作を施すことにより平坦なエネルギー通過域が形成されることを明らかにしている。

第4章では、多数のシミュレーションに基づき、ガウス型変調超格子のミニバンド構造は、透過確率がほぼ1となるエネルギー通過域、ほぼ0となるエネルギー阻止域の他に、多数の鋭い共鳴準位で構成される準通過域の3帯域に分類されることを示している。また、準通過域の形成はある単純な規則性に従っていることを明らかにし、影像パラメータの利用により、ガウス型変調超格子のミニバンド構造が容易に見積もられることを明らかにしている。準通過域の形成は電子波エネルギーフィルタにとってあまり好ましくないため、ここで示すミニバンド構造の推定法は、優れた電子波エネルギーフィルタを設計する上で有効な指標となりうることを示している。

第5章では、結晶成長過程における材料組成の乱れを加味したモデルにより、ガウス型変調超格子のエネルギーフィルタ特性への影響を検討し、材料組成に若干の乱れを伴う場合においても周期的超格子と比較して、優れた特性が維持されることを明らかにしている。

第6章では、本論文の結論を述べるとともに、今後の課題について述べている。

これを要するに、著者は、変調超格子に関する多くの重要な性質を明らかにし、電子波エネルギーフィルタへの応用に関する有益な新知見を得たものであり、光量子エレクトロニクス分野に貢献するところ大なるものがある。

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。