

学位論文題名

A Study on Analysis Methods for Electron Waveguide Structures

(導波構造を有する電子波デバイスの解析法に関する研究)

学位論文内容の要旨

ALE (Atomic Layer Epitaxy/Etching) に代表される半導体超薄膜作製技術の進展に伴い、量子井戸構造の作製が単原子層のレベルで制御可能となっている。これらの技術と X 線リソグラフィや電子ビームリソグラフィを組み合わせたり、自己組織的結晶成長、STM によるアトミックマニピュレーションなどの新しい半導体極微構造作製技術によって、高次元量子構造、すなわち量子細線、量子箱構造の作製もまた可能になりつつある。界面ラフネスのない高品質な半導体量子構造における電子の挙動は、有効質量近似したシュレーディンガーの方程式によって記述されるため、電子の波動性を考慮した解析・設計理論の開発が必要になっている。実際、スタブ構造を有する電子波導波路や方向性結合器における電子波の干渉効果が観測、再現可能になっている。このような状況下で、電子波と電磁波との類推関係から、これまで培われてきた電磁波あるいは光デバイスの動作原理、概念を電子波デバイスに応用しようという機運が高まっている。

現在、種々検討されている光集積回路との類推から、新世代の電子集積回路、すなわち電子波集積回路は、電子波導波路や導波形の電子波デバイスなど、導波構造を有する回路素子から構成されると考えられる。このような回路素子の特徴として、以下のことがあげられる。

- (1) 回路素子中における電子の移動が、拡散によるものではなく、伝搬によるものであること。
- (2) 電子が情報媒体として機能するための個数が数百～数十程度であり、従来の半導体デバイス中での百万個程度に比べて非常に少ないこと (超省電力化の可能性)。
- (3) サイズがナノオーダーのスケールであること (デバイスの超小型化、超高密度化の可能性)。

現在のところ、電子波デバイスに関する研究は、新しい動作原理の考案、それらに基づく素子設計が個々に行われているにとどまっており、個々の素子を組み合わせて機能デバイスを構成するアーキテクチャーや従来までの電子デバイスに対するメリットを主張するにはほど遠い段階にある。こうした新しい電子波デバイスを開発していくためには、量子効果現象を体系的に把握するとともに、デバイス設計を支援するための解析・設計理論を確立することが必要である。導波形の電子波回路素子の形態は、前述の半導体極微構造作製技術に大きく左右されるが、多くの場合、カップラやキャビティなど、ヘテロ構造を利用した電子波導波路を多段接続させたものとみなすことができる。このとき、導波される電子波は、量子井戸内に完全には閉じ込められてはおらず、障壁部にしみだしている。すなわち、開放形導波路の不連続を取扱うことになるので、数学的には連続スペクトルの評価が必要になるなど、誘電体光導波路と同様の解析上の困難が存在する。純粋に解析的な方法論では、数学的取扱いが複雑化し、結論に到

達するまでに多大な時間を要したり、場合によっては、結論が得られない場合もある。一方、計算機による数値的解法は、現象の物理的理解、その工学的応用を目的とする場合には、必ずしも見通しが良いとは言えない。このため最近、量子力学の分野に回路理論を導入しようという機運が高まっている。しかしながら、これまでは化合物半導体の境界面、いわゆるヘテロ界面に垂直入射する電子波のみを対象とした定式化が行われてきたために、その適用範囲は量子井戸やポテンシャル障壁など、1次元デバイスに限られており、ヘテロ界面に斜入射する電子波が本質的役割を果たす導波形デバイスには適用できない。

本論文は、こうした状況のもとで、導波形電子波デバイスの工学的に見通しのよい解析・設計法を開発することを目的として、電子波伝搬の回路論的取扱いの定式化を行い、プレーナ形電子波導波路の導波問題、および導波形電子波デバイスの散乱問題に対する解析法を提案している。以下に本論文の概要を示す。

第1章では、本論文の背景、目的、および構成について述べている。

第2章では、最も基本的な非対称3層スラブ構造電子波導波路における正規モードを厳密解を用いて初めて系統的に明らかにし、電磁波導波管やプレーナ形光導波路における正規モードとの比較、検討を行い、開放形構造であるにもかかわらず、電子波導波路には、エバネッセントな導波モードやエバネッセントな片側放射モードが存在可能であることを見出している。

第3章では、まず、量子論的諸量を電磁波論的諸量に変換し、電子波の伝搬問題に対しても電磁波と同様な取扱いが可能であることを述べ、ヘテロ界面に垂直な方向を線路の方向とする伝送方程式を導出するとともに、均一プレーナ形電子波導波路に対する等価回路を与えている。また、その等価回路を利用して、プレーナ形電子波導波路の導波モードの固有値方程式が、回路理論においてよく知られた横共振法を適用することによって容易に導出されることを示している。具体的に、本手法を非対称電子波方向性結合器を伝搬する電子波に適用し、光方向性結合器で見られるようなスイッチングやフィルタリングが可能であることを示した。

第4章では、プレーナ形電子波導波路階段状不連続に垂直入射する電子波に対し、電磁波導波管解析でよく知られたビルディング・ブロック法を適用し、系全体に対する等価回路を初めて与えている。また、その等価回路を利用して、導波モードが入射したときの反射、透過係数を導出している。具体的に、本手法を開放形半導体狭窄構造に垂直入射する電子波に適用し、放射損が皆無な動作エネルギー範囲が存在することやエバネッセントな導波モードを利用した共振現象を見出している。

第5章では、4章の方法論を、斜入射する電子波に対して拡張し、等価回路から入力アドミタンス行列を導出することにより、斜入射する導波モードの反射、透過係数、さらには、系全体をチャンネル導波路とみたときの導波モードの固有値方程式が一般化された横共振法により容易に導出されることを示している。具体的に、本手法をスタブ付きの開放形電子波導波路に斜入射する電子波に適用し、この構造が角度フィルタ特性を有すること、また、スタブ部付近をコアとしたチャンネル形電子波導波路として動作することを見出している。

第6章では、本研究で得られた成果の総括を行っている。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 小 柴 正 則
副 査 教 授 伊 藤 精 彦
副 査 教 授 小 川 恭 孝
副 査 教 授 永 井 信 夫

学位論文題名

A Study on Analysis Methods for Electron Waveguide Structures

(導波構造を有する電子波デバイスの解析法に関する研究)

半導体極微構造作製技術の進展に伴い、量子井戸、量子細線、量子箱など、様々な量子効果構造デバイスの作製が可能になりつつある。半導体量子構造における電子の挙動は、有効質量近似したシュレーディンガーの方程式によって記述されるため、こうした量子効果デバイスの実現にあたっては、電子の波動性を考慮した解析・設計理論の開発が必要になる。実際、スタブ構造を有する電子波導波路や方向性結合器における電子波の干渉効果が観測、再現可能になっており、これまで培われてきた電磁波あるいは光デバイスの動作原理、概念を電子波デバイスに応用しようという機運も高まっている。

現在、種々検討されている光集積回路との類推から、新世代の電子集積回路、すなわち電子波集積回路は、電子波導波路や導波形の電子波デバイスなど、導波構造を有する回路素子から構成されると考えられる。このような回路素子の特徴として、以下のことがあげられる。

- (1) 回路素子中における電子の移動が、拡散によるものではなく、伝搬によるものであること。
- (2) 電子が情報媒体として機能するための個数が数百～数十個程度であり、従来の半導体デバイス中での百万個程度に比べて格段に少ないこと(超省電力化の可能性)。
- (3) サイズがナノオーダーのスケールであること(デバイスの超小型化、超高密度化の可能性)。

現在のところ、電子波デバイスに関する研究は、新しい動作原理の考案、それらに基づく素子設計が個々に行われているにとどまっており、個々の素子を組み合わせて機能デバイスを構成するアーキテクチャーや従来までの電子デバイスに対するメリットを主張するにはほど遠い段階にある。こうした新しい電子波デバイスを開発していくためには、量子効果現象を体系的に把握するとともに、デバイス設計を支援するための解析・設計理論を確立することが必要である。このため最近、量子力学の分野に回路理論を導入しようという機運が高まっている。

本論文は、こうした状況のもとで、導波形電子波デバイスの工学的に見通しのよい解析・設計法を開発することを目的として、電子波伝搬の問題に回路理論を導入し、これを応用して電子波導波路の導波原理ならびに導波形電子波デバイスに特有の量子効果現象について研究した結果をまとめたものである。以下に本論文の研究成果を各章ごとにとりまとめる。

第1章では、本論文の背景、目的、および構成について述べている。

第2章では、最も基本的な非対称3層スラブ構造電子波導波路における正規モードを厳密解を用いて初めて系統的に明らかにし、電磁波導波管やプレーナ形光導波路における正規モードとの比較、検討を行い、開放形構造であるにもかかわらず、電子波導波路には、エバネッセントな導波モードやエバネッセントな片側放射モードが存在可能であることを見出している。

第3章では、まず、量子論的諸量を電磁波論的諸量に変換し、電子波の伝搬問題に対しても電磁波と同様な取扱いが可能であることを述べ、ヘテロ界面に垂直な方向を線路の方向とする伝送方程式を導出するとともに、均一プレーナ形電子波導波路に対する等価回路を与えている。また、その等価回路を利用して、プレーナ形電子波導波路の導波モードの固有値方程式が、回路理論においてよく知られた横共振法を適用することによって容易に導出されることを示している。具体的に、本手法を非対称電子波方向性結合器を伝搬する電子波に適用し、光方向性結合器で見られるようなスイッチングやフィルタリングが可能であることを示している。

第4章では、プレーナ形電子波導波路階段状不連続に垂直入射する電子波に対して、電磁波回路解析でよく知られたビルディング・ブロック法を適用し、系全体に対する等価回路を初めて与えている。また、その等価回路を利用して、導波モードが入射したときの反射、透過係数を導出している。具体的に、本手法を開放形半導体狭窄構造に垂直入射する電子波に適用し、放射損が皆無な動作エネルギー範囲が存在することやエバネッセントな導波モードを利用した共振現象を見出している。

第5章では、4章の方法論を、斜入射する電子波に対して拡張し、等価回路から入力アドミタンス行列を導出することにより、斜入射する導波モードの反射、透過係数、さらには、系全体をチャンネル導波路とみたときの導波モードの固有値方程式が一般化された横共振法により容易に導出されることを示している。具体的に、本手法をスタブ付きの開放形電子波導波路に斜入射する電子波に適用し、この構造が角度フィルタ特性を有すること、また、スタブ部付近をコアとしたチャンネル形電子波導波路として動作することを見出している。

第6章では、本研究で得られた成果の総括を行っている。

これを要するに、著者は、導波形電子波デバイスの工学的に見通しのよい回路理論に立脚した新しい解析・設計法を開発するとともに、こうした導波形電子波デバイスに特有の量子効果現象に関する工学的に有益な新知見を得たものであり、電子波エレクトロニクスに対して貢献するところ大なものがある。

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。