

学位論文題名

化合物半導体表面超格子における
電子波干渉に関する研究

学位論文内容の要旨

半導体の微細加工技術の進歩による微細チャネル素子作製と、結晶作製技術の発展による高移動度半導体結晶作製により、伝導電子の可干渉距離が素子寸法を上回った。このため素子中を走行する電子の干渉現象が観測可能になり、極微細チャネル中を走行する電子の電子波干渉現象の詳細な解明と、電子波干渉現象を利用した電子波干渉デバイスの実現は重要な問題となっている。また電子波干渉電子デバイスは高速動作が期待されるとともに、最近注目を集めている量子計算用素子として利用される可能性もでてきており、電子波干渉の研究は今後が大いに発展が期待される。

本研究は、電子波干渉現象を電子デバイスへ応用するために微細構造中伝導電子の干渉現象の解明を目的とする。そして干渉現象解明の手段として、次の特徴を持つ。

- (1) 高移動度変調ドープ構造の電子ガスの電子濃度をゲートによりして制御して電子波の波長を変える。
- (2) 電子波を散乱させるポテンシャルとして 2 種類の表面超格子を用いる。一つはレーザー干渉露光法により作製したグレーティングゲート構造(周期 500 nm)であり、もう一つは分数原子層超格子変調ドープ構造(基板傾斜角 1.0, 1.5, 2.0 度)である。
- (3) 表面超格子の電子波干渉効果のより深い解明のために、Mach-Zehnder 干渉計における干渉現象にも着目する。Mach-Zehnder 干渉計とは、二分割された入射波間の位相差により透過波振幅が変化する干渉現象を引き起こす素子のことをいう。

本研究では、まずグレーティングゲート構造(周期 500 nm)表面超格子素子を試作し、電子波を制御して電流が変調される効果を見出した。さらにその表面超格子形状と電子波干渉現象により引き起こされる電流振動に新たな関係を見出した。

- (1) ゲート電圧に対するドレイン電流振動を観測した。振動の谷位置は、素子寸法・温度に依らず常に計算値と一致する。故にこの電流振動は電子波干渉効果に起因する。
- (2) 電子波の波数が $n\pi/L$ ($L =$ 周期, $n =$ 整数)の時、電流は極小になる。これより表面超格子の Bragg 反射が起きていることが分かる。

つぎに分数原子層超格子変調ドープ構造表面超格子素子を試作した。分数原子層超格子変調ドープ構造の電子状態に関して以下のことが明確になった。

- (1) 変調ドーブ構造のため高移動度である。
- (2) シングルステップ短周期表面超格子(周期 8 ~ 16 nm)とマルチステップ超構造表面超格子(周期 20 ~ 60 nm)が存在する。
- (3) Weiss 振動と励起・基底サブバンド間磁気トンネリングを観測した。
- (4) 分数原子層超格子 GaAs 部を通路とする場合、電子が分数原子層超格子層 GaAs 部から GaAs 層に移動することによる大きな移動度変調を観測した。

試作した表面超格子を横切るように電流を流す電子波干渉素子において、電流が電子波長に対して振動することを観測し、以下のことを発見した。

- (1) 電流振動の表面超格子周期依存性を観測した。電流振動は電子波干渉に起因する。
- (2) 電流振動は大電流領域で起こる。表面超格子周期が短いため、干渉に関与する電子波長が短くなったためである。
- (3) 構造関数ピーク位置はシングルステップ短周期表面超格子周期の整数倍である。このためこのピークはマルチステップ超構造表面超格子の Bragg 反射が原因である。
- (4) サブミクロン幅の一次元電子波干渉素子を作製し、電流振動振幅増大を観測した。振動振幅増大はチャンネル幅狭窄により擬一次元構造が出来たことに起因する。

電流振動増大化の別の指針を探るため行路差型、狭窄型、幅広型の Mach-Zehnder 電子波干渉計の試作した。Mach-Zehnder 電子波干渉計で電流が電子波長に対して振動することを観測し、以下のことを発見した。

- (1) 電流振動振幅増大には、位相差を行路差型よりチャンネル幅差で獲得する狭窄型、幅広型が有利である。
- (2) 余分な反射を減らすためには、チャンネル幅が狭い部分を設けるより、広い部分を設ける幅広型が望ましい。
- (3) 角がない緩やかな曲がりを持つチャンネルは、反射が少なくなるので大電流振動振幅獲得に有利である。
- (4) チャンネル幅が狭いため電流に上限がある。
- (5) ドレイン電流振動で、電流が零になる状態(単一モード状態)を達成した。

最後にグレーティングゲート構造表面超格子、分数原子層超格子変調ドーブ構造面超格子、Mach-Zehnder 干渉計で電子波干渉による電流振動が観測できたことと、その電流振動の大きさ比較より、大電流変調かつ電流振動振幅増大に短周期表面超格子かつ狭チャンネル構造が有効であることを明らかにした。

学位論文審査の要旨

主査	教授	長谷川	英機
副査	教授	雨宮	好仁
副査	教授	福井	孝志
副査	教授	武藤	俊一
副査	助教授	橋詰	保

学位論文題名

化合物半導体表面超格子における 電子波干渉に関する研究

半導体集積回路の高機能化を目指し、電子の量子力学的挙動を基本動作原理とする量子効果デバイスの実現が検討されている。ことに、近年進歩した超微細加工技術と、近年達成された結晶成長の精密制御技術を用いた化合物半導体高電子移動度結晶を組み合わせることにより、電子の可干渉距離が素子寸法を上回り、電子の干渉現象の観測を可能とするに至った。この電子の干渉現象を巧みに利用した電子波干渉デバイスは、原理的に高速動作が期待され、また、全く新しい概念の量子コンピューティング素子として利用できる可能性を有している。このため、極微細チャンネル中を運動する電子の干渉現象の詳細な解明とデバイス応用に関する研究は、次世代エレクトロニクスの構築に向けて重要な位置を占めつつある。

本論文は、このような背景のもとで、化合物半導体高電子移動度結晶を利用した、グレーティングゲート形表面超格子素子、分数原子層超格子変調ドープ構造を持つ表面超格子素子およびマッハツエンダー干渉素子を作製し、超微細構造中の電子波の干渉現象を解明し、その電子デバイス応用の基礎を確立する一連の研究結果をまとめたものである。本論文は7章から構成されている。以下に各章の概要を示す。

第1章では、本研究の背景と目的を述べると共に、各章の概要が示されている。

第2章では、電子波干渉デバイス作製に用いた変調ドープ構造と分数原子層超格子構造、および、微細加工プロセスとしてのレーザー干渉露光法と電子ビーム露光法が説明されている。

第3章では、グレーティングゲート構造表面超格子素子の試作と特性評価が述べられている。AlGaAs/GaAs変調ドープ構造ウエハー表面に、レーザー干渉法により周期500nmのグレーティング構造を作製し、電子波を制御して電流が変調される効果を見出した。さらに、ゲート電圧に対するドレイン電流振動を観測し、振動の谷位置は、素子寸法や温度に依らず常に計算

値と一致することを見出し、この電流振動は電子波干渉効果に起因することを明らかにした。また、電子波の波数が $n\pi/L$ (L = 周期, n = 整数) の時に電流は極小となることを示し、表面超格子によるブラッグ反射が起きていることを明らかにした。

第4章では、グレーティングゲート構造表面超格子構造よりもさらに短周期の超格子構造が形成できる、分数原子層超格子変調ドープ構造を作製し、その電子状態を評価した結果が述べられている。まず、GaAs/AlAs分数原子層超格子構造では、シングルステップ短周期表面超格子(周期8 ~ 16 nm)とマルチステップ超構造表面超格子(周期20 ~ 60 nm)が存在することを明らかにした。また、磁気抵抗測定より、Weiss振動と励起・基底サブバンド間の磁気トンネリング現象を観測し、実際に作製した構造が、表面超格子を反映した電子状態を実現していることを確認した。

第5章では、GaAs/AlAs分数原子層超格子に変調ドープを施した表面超格子素子を作製し、その特性を評価した結果が述べられている。表面超格子を横切るように電流を流す電子波干渉素子において、電流振動の形態と表面超格子周期との関係を測定し、電流振動が電子波干渉に起因することを示した。さらに、構造関数スペクトルの解析を行い、電流振動はマルチステップ超構造表面超格子のブラッグ反射に起因していることを明らかにした。また、チャンネル幅 $0.25\mu\text{m}$ の電子波干渉素子において、振動電流振幅の増大が観測され、チャンネル幅狭窄によって、擬1次元表面超格子構造が形成されていることを確認した。

第6章では、2つに分岐された電子波路を有するMach-Zehnder電子波干渉素子を作製し、その特性を評価すると共に、電流振動増大化の指針を探るために、行路差型、狭窄型、幅広型の各種素子の特性比較を行った結果が述べられている。いずれの素子においても、位相差に起因する電流振動を観測し、電子波干渉素子として機能していることを確認した。3種の素子の特性比較より、電流振動の振幅を増大するためには、位相差をチャンネル幅差で獲得する狭窄型、幅広型が有利であること、チャンネル幅が広い部分を設ける幅広型が反射を減らすために有利であること、緩やかな曲がりを持つチャンネルは反射が少なくなるので電流振動の振幅を獲得するために有利であることを明らかにした。さらに、幅広型素子のドレイン電流振動において、電流振動の最小値が零になる状態(単一モード状態)を初めて達成した。

第7章では、本研究の成果を総括している。

これを要するに、著者は、化合物半導体高電子移動度結晶成長技術と極微細加工技術により、表面超格子構造やMach-Zehnder干渉構造を有する電子波干渉素子を作製し、素子内部の電子波干渉現象を詳細に解明し、電子波干渉現象の電子デバイス応用に関して、いくつかの新しい知見と有益な方向性を見出したものであり、半導体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。