

学 位 論 文 題 名

Electrical Characterization of Semiconductor–Semiconductor
Interfaces of Gallium Arsenide and Related Compounds

（ガリウム砒素および関連化合物の半導体–半導体界面の電気的評価）

学位論文内容の要旨

ガリウム砒素（GaAs）に代表されるⅢ–Ⅴ族化合物半導体は、シリコン（Si）に比べいくつもの優れた特徴を有する。その結果、1）デバイスの高速化、2）高集積化、3）光電子集積回路の実現、4）宇宙での使用に耐える、などの点でSi集積回路では実現できないものを可能とし、さらに将来の発展が期待されている。

多くの半導体デバイスは、本質的に界面構造を有し、かつ、界面の物性がデバイスの電気的特性を支配している場合が多い。従って、半導体デバイスの設計にとって、界面における物理量が既知であることが望まれる。近年のデバイス構造の微細化に伴い、デバイス構造に占める界面、表面の割合が増大している。このことから、界面の物性の本質を理解することは一層重要となると考えられる。しかしながら、半導体界面の性質に重大な影響を与える界面準位については、その成因すら十分に理解されておらず、界面準位の発生を工学的に抑制することや、その性質を制御することは、多くの新デバイス製作のうえで、最大の技術的課題のひとつとなっている。

このような背景のもとに、本論文は、分子線エピタキシ（MBE）法により半導体–半導体異種間（ヘテロ）接合および同種間（ホモ）接合を形成し、その界面物性について実験的および理論的立場から検討を行ったものである。具体的には、AlGaAs/GaAsヘテロ接合およびAlGaAs/InGaAs擬似格子整合接合のエネルギーバンドのくい違いの大きさ（バンド不連続量）を初めて定量的に評価するとともに、容量–電圧（C–V）法により、これらのヘテロ界面およびMBE成長中断が行われたGaAs/GaAsホモ接合界面における界面準位の大きさとその分布形状を初めて明らかにした。全体は8章からなる。以下に各章の要旨を述べる。

第1章では、本研究の歴史的背景と目的を述べるとともに、各章の概要を記した。

第2章では、本研究で用いたMBE装置の制御性について述べている。本研究では、試料の各層の厚さ、混晶組成比、不純物濃度を正確に制御することが必要である。最初に、このために必

要な MBE 装置の構成と成長手順を記した。本装置で得られる GaAs の膜厚は、1～2 分子層レベルで制御する事が可能であり、そのばらつきも非常に小さいことが、反射型高エネルギー電子線回折 (RHEED) の輝度振動周期から解った。AlGaAs および InGaAs の混晶組成比は、RHEED 輝度振動測定とフォトルミネセンス (PL) 測定から、誤差が ± 0.01 であることが明らかになった。Si とベリリウム (Be) のドーピング特性を C-V 測定で調べた結果、両者とも不純物密度が予定値と非常によく一致していたとともに、その深さ方向および面内方向のばらつきが小さいことが解った。以上のことから、本装置は、GaAs および関連化合物のあらゆる構成要素に対する制御性に優れ、高品質の結晶が得られることが明らかにされている。

第 3 章では、本研究で用いるヘテロ構造の電気的特性について述べている。本論文の目的を達成するために確認しておく必要がある要素として、AlGaAs/GaAs および AlGaAs/InGaAs ヘテロ界面とその周辺部の結晶性がある。本章では、ヘテロ界面に形成された 2 次元電子ガス (2 DEG) の移動度および濃度の温度依存性から、この評価を行っている。その結果、これらの部分は、高品質、高純度の結晶性を有していることが明らかになった。また、InGaAs の厚さがある臨界値を越えると、界面に多数の転位が発生し、結晶性が劣化する。この臨界値を、電気的評価法であるホール効果測定により評価した結果、InAs 組成が 0.13 のときの厚さの臨界値は 200 から 300 Å の間であり、膜厚が 200 Å のときの InAs 組成のそれは 0.15 と 0.16 の間であった。これらの結果は、Matthews と Blakeslee の理論値と非常によく一致していることが理解された。

第 4 章では、半導体-半導体界面の評価手法について説明している。第 5 章で行うバンド不連続量の評価手法として、光学的測定法では PL 測定法と光電子分光法 (XPS) があり、電気的測定法では C-V 測定法、C-V キャリアプロフィール法、および、本研究で開発された電荷釣合の関係により評価する手法 (電荷釣合法) がある。これらのうち、測定精度および測定確度の立場から、電荷釣合法がいちばん優れた手法であることが解った。また、第 6 章および第 7 章で行なう界面単位の評価手法として、光学的測定法では PL 界面単位分光法 (PLS³) があり、電気的測定法では C-V 測定法と C-V キャリアプロフィール法がある。これらのうち、バンド不連続量を最も正確に求めることができる手法は、電荷釣合法であり、ヘテロ界面およびホモ界面の界面単位の評価に最も適した評価手法は、C-V 測定法であることが理解された。

第 5 章では、ヘテロ接合のバンド不連続量を定量的に評価した結果についてまとめている。この値を実験的に正確に求めるために、すべての構造要素を正確に制御し、かつ、すべての電荷寄与を考慮できるように工夫を施した試料構造を MBE 法により形成し、電荷釣合法により評価し

た。このような試料における未知量は、求めるべきバンド不連続量と 2 DEG 濃度だけである。2 DEG 濃度を正確に決定するための測定法として、極低温においては、シュブニコフ・ドハース振動測定を、室温においては、AlGaAs を徐々にエッチングしながら行なうホール効果測定を用いた。その結果、AlAs と InAs 組成がそれぞれ 0.18 と 0.15 のとき、伝導帯不連続量は 290 meV であることが解った。この値は、理論的には、両半導体の構成軌道エネルギーを揃えるようにして形成されるバンドの並びに歪による補正を加えることにより与えられ、実験値とよく一致していた。この結果、任意組成における AlGaAs/InGaAs ヘテロ接合のバンド不連続量を与える理論式を、初めて確立した。

第 6 章では、ヘテロ界面の界面準位を C-V 法により評価した結果について述べている。測定に用いた試料は、第 5 章で述べた手法と同様に形成され、構造確認された。計算機シミュレーションにより、C-V 曲線の伝導帯不連続量、膜厚、不純物濃度、界面固定電荷、界面準位の大きさと分布形状の依存性を求め、測定で得られた C-V 曲線とフィッティングを行った。その結果、界面準位の存在を仮定したときのみ、実験結果を説明することが可能であり、このとき求められた伝導帯不連続量は、前章の結果とよく一致していた。ここで決定されたすべての AlGaAs/InGaAs ヘテロ界面での界面準位は、混成軌道エネルギーにおいて電荷中性点を持ち、かつ準位密度の最小値を持つ、連続的な U 字形分布を形成しており、統一 DIGS モデルで説明可能であることが、初めて明らかになった。

第 7 章では、MBE 成長中断界面をもつ GaAs/GaAs ホモ接合界面の界面準位を C-V キャリアプロフィール法により評価した結果をまとめてある。この成長中断界面およびその周辺部における構造変化に対して、様々なモデルを立て、前章と同じ厳密な計算機シミュレーションにより、C-V キャリアプロフィールのシミュレーションを行った。その結果、前章と同じく、統一 DIGS モデルで説明可能な界面準位の存在を仮定したときのみ、すべての実験結果を再現できることが理解された。この結果は、PLS³ 法による評価結果とよく一致していることが解った。

第 8 章では、本論文の結論を述べている。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 澤 田 孝 幸
副 査 教 授 長 谷 川 英 機
副 査 教 授 田 頭 博 昭
副 査 教 授 福 井 孝 志

半導体デバイスは、界面を構成要素として構成され、界面近傍の物理現象をその動作原理としている。したがって、界面の物性がデバイスの電気的特性を支配する。しかも、近年、デバイス寸法の超微細化が進行しつつあり、デバイス構造に占める界面、表面の重要性が増大しつつある。しかしながら、半導体界面の物性、ことに化合物半導体の界面の物性を学問的に理解することや、界面物性を工学的に制御することは十分な段階に達していない。

本論文は、このような背景のもとに、化合物半導体の半導体-半導体界面について、その界面物性を評価する新しい電気的手法を開発し、それを分子線エピタキシ (MBE) 法で作製された試料に適用し、いくつかの新しい知見を得たものである。全体は8章からなり、各章の要旨は以下の通りである。

第1章は、本研究の歴史的背景と目的と意義および構成を述べている。

第2章は、本研究で半導体-半導体界面の形成に使用された MBE 装置の構成、成長条件、成長層の基本性質およびその制御性について述べている。詳細な検討の結果、反射型高エネルギー電子線回折 (RHEED) の輝度振動周期から、GaAs の膜厚は、1~2 分子層レベルで制御することが可能であること、AlGaAs および InGaAs の混晶組成比は、RHEED 輝度振動測定とフォトルミネセンス (PL) 測定から誤差が ± 0.01 であること、Si と Be のドーピング特性が C-V 測定から非常によく制御でき、その深さ方向および面内方向の一様性が高いことが明らかにされている。そしてこれらは、本研究で必要とされる実験試料の製作に十分であることが結論されている。

第3章は、本研究で用いられる半導体-半導体界面試料の結晶学的完全性をヘテロ界面に形成された2次元電子ガス (2DEG) の移動度および濃度の温度依存性の測定と解析により検討している。その結果、AlGaAs/GaAs 界面および InGaAs 膜厚の薄い AlGaAs/InGaAs/GaAs 界面構造は、高純度・高品質の結晶性を有していること、および、InGaAs の厚さが Matthew と Blakeslee の理論値とよく一致する臨界値を越えると、界面に多数の転位が発生し、

結晶性が劣化することを明らかにしている。

第4章は、本研究で開発された半導体-半導体界面の電気的評価手法を述べ、それらを従来の手法と比較している。界面の基本特性量であるバンド不連続量の評価手法として、本研究では電荷釣合法を開発している。そして、それをPL法、光電子分光法、C-V測定法、C-Vキャリアプロフィール法と比較し、測定精度の点で電荷釣合法が最も優れていることを示している。また、界面準位の評価手法として、本研究では厳密なシミュレーションに基づくC-V法を開発し、これを従来のC-Vキャリアプロフィール法と比較し、C-V法が最も正確であることを示している。

第5章は、AlGaAs/GaAs および AlGaAs/InGaAs 界面のバンド不連続量を電荷釣合法で評価した結果を述べている。このため試料構造をすべての電荷寄与を考慮できるように工夫している。2次元電子濃度の測定は、極低温ではシュブニコフ・ドハース振動測定、室温ではホール効果測定を用いている。この結果、AlGaAs/GaAs 界面では Miller 則が成り立つことを示し、かつ、AlGaAs/InGaAs 界面のバンド不連続量の組成依存性を初めて確立している。

第6章は、AlGaAs/InGaAs の界面準位をC-V法により評価している。測定されたC-V曲線を、厳密な計算機シミュレーションにより、伝導帯不連続量、膜厚、不純物濃度、界面固定電荷、界面準位の分布形状と密度を変えつつ得られる理論C-V曲線にフィッティングした。その結果、従来無視されてきた界面準位が存在し、その分布が混成軌道エネルギーにおいて電荷中性点を持ち、かつ準位密度の最小値を持つ、統一DIGSモデルに従う連続U字形分布であることを、初めて示している。

第7章は、MBE成長中断界面を持つGaAs/GaAsホモ接合界面の界面準位をC-Vキャリアプロフィール法により評価している。種々のモデルを立て、C-Vキャリアプロフィールの厳密な計算機シミュレーションを行い、実験と比較した。その結果、統一DIGSモデルに従う界面準位の存在を仮定したときのみ、すべての実験報告を再現できることが結論されている。

第8章は、本論文の結論を述べている。

これを要するに、本論文は化合物半導体界面の半導体-半導体界面を評価する新しい電気的手法を開発するとともに、それを用いて界面物性に関して有益な新知見を得ており、半導体工学の進歩に寄与するところが大きい。

よって著者は、博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。