

学位論文題名

Characterization of III-V Compound Semiconductor Interfaces by X-ray Photoelectron Spectroscopy

(光電子分光法によるIII-V族化合物半導体界面の評価)

学位論文内容の要旨

GaAs、InPに代表されるIII-V族化合物半導体は、Siに比べいくつか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。将来のデバイスの超微細化は、デバイス構造に占める界面、表面の割合を現在よりも増大させることが予想される。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。

本研究は、このような背景のもとで、化合物半導体デバイスの基本的構造要素である、代表的な、I-S(絶縁体-半導体)界面、M-S(金属-半導体)界面、およびS-S(半導体-半導体)界面を作製し、光電子分光法による界面物性の評価をおこなったものである。光電子分光法は、固体表面の電子状態および化学状態を評価する上でたいへん優れた手法であり、しかも、真空中で非破壊的に測定が行われるこ

とから、界面形成時の「その場観察」が可能であるという利点を有する。本論文では、光電子分光法による評価に基づき、それぞれの界面の物性を本質的に支配している原因について考察するとともに、また、それぞれの代表的な界面の性質を工学的に制御することを試みている。

次に、本論文の各章の概要は、以下の通りである。

第1章は、序論である。化合物半導体の界面に関する研究をデバイス応用と学問的な立場から簡潔にまとめ、そのなかにおける本研究の位置を明らかにしている。さらに、各章の構成を述べている。

第2章では、半導体界面構造の基本的な物理を述べている。ここでは、統一DIGS (Disorder Induced Gap State)モデルを含めて、これまでに主張されている界面準位の成因に関する代表的モデルについてまとめている。

第3章は、光電子分光法の手法と、本研究で用いた装置についてまとめたものである。さらに、過去に報告されている光電子分光法をもちいてなされた半導体界面の評価結果についても言及している。

第4章は、最近注目されているGaAsの化学的表面処理技法について、本研究で行った実験的検討結果をまとめたものである。まず、表面処理を施す前の表面であるMBE成長GaAs清浄面、化学エッチングされたGaAs表面、イオンエッチングされたGaAs表面について、表面の組成および表面フェルミ準位のピンニングの程度を明かにした。次にGaAsの表面ピンニングを緩和する方法として提案された光化学酸化、気相HCl処理、硫化物処理等を施し、これらの処理による表面組成、表面フェルミ準位のピンニングの程度の変化を、光電子分光法および表面電流輸送法を用いて評価した。その結果、気相HCl処理を施すことによって、表面フェルミ準位のピンニングが緩和されることが明らかにされた。また、これらの結果と、PL (フォトルミネッセンス)強度の関係を検討し、それぞれの表面の表面フェルミ準位の位置が、統一DIGSモデルの立場から矛盾なく説明できることを示した。

第5章では、代表的なI-S界面として、実用的なMISFETへの応用の可能性が高いInP陽極酸化膜について評価した結果を述べている。InP陽極酸化膜の化学的組成を検討する基礎データとして、種々のP化合物におけるP原子の化学シフトが、第二近接原子まで考慮した局所電気陰性度により定量的に説明できることを示した。その結果、InP陽極酸化膜は、 In_2O_3 を主成分とする外部層と $\text{In}(\text{PO}_3)_3$ を主成分とする内部層の2層構造となっていることがわかった。さらに、InP陽極酸化膜の外部層はMIS特性を悪化させるが、内部層の電気的特性は優れていること

を明かにした。そこで、InP陽極酸化膜の内部層を界面制御層とした 光CVD-SiO₂/陽極酸化膜/InP構造を作製した結果、低界面準位密度のMIS構造が形成できた。また、陽極酸化条件を変化させることにより、酸化膜の組成制御を行い、MIS構造の最適化を試みた。さらに、DIGSモデルにおいて界面準位の成因とされる界面乱れ(disorder)層と関係があると考えられる界面組成遷移層が検出された。

第6章では、本研究で行ったM-S界面に関する実験的検討をまとめている。代表的なM-S界面として、Al、Mg、Auなどの金属と、MBE成長GaAs清浄表面、化学エッチングされたGaAs表面、イオンエッチングされたGaAs表面、硫化物処理されたGaAs表面の間に形成される界面について、その界面の構造とGaAs表面フェルミ準位位置の変化を光電子分光法で評価した。まず、照射X線による光起電力がフェルミ準位位置測定に及ぼす影響を明らかにした。次に、光電子分光法、I-V(電流-電圧)法、C-V(容量-電圧)法による障壁高さと、界面の構造・組成との関連を調べ、そのふるまいが、界面層の存在を考慮したDIGSモデルでよく説明できることを示した。

第7章では、本研究で行ったS-S界面に関する実験的検討をまとめている。代表的なヘテロ接合界面であるGaAs/AlAsヘテロ界面の価電子帯不連続量 ΔE_v を光電子分光法によって評価した。その結果、以前より報告のあった ΔE_v の成長順序依存性が、単に半導体表面のバンドの曲がり起因する見かけ上のものであることを明らかにした。 ΔE_v の値は、それぞれ0.40 eVと測定され、これは、電荷中性準位を一致させることにより得られる理論値に近い。

第8章は、結論である。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 長谷川 英 機
副 査 教 授 田 頭 博 昭
副 査 教 授 福 井 孝 志
副 査 教 授 澤 田 孝 幸

学 位 論 文 題 名

Characterization of III-V Compound Semiconductor Interfaces by
X-ray Photoelectron Spectroscopy
(光電子分光法によるIII-V族化合物半導体界面の評価)

半導体デバイスは、半導体が形成する界面近傍で生ずる物理現象を動作原理としており、界面の物性が、デバイスの電氣的機能・性能を決定する。しかも、デバイスは超微細化の動向をたどっており、表面・界面の重要性が、ますます増大しつつある。

III-V族化合物半導体は、電子速度が大きい、半絶縁性結晶基板が得られる、混晶により物性が広範囲かつ精密に制御できる、ヘテロ構造や量子井戸構造が実現できる、直接遷移による発光・受光機能が実現できるなどの利点を持ち、これらによりSiデバイスでは得られない機能・性能を持つ電子デバイスや光デバイスが実現できる。しかし、化合物半導体の界面の物性は学問的によく理解されておらず、またそれを工学的制御することは、十分に達成されていない。

本研究は、このような背景のもとで、化合物半導体デバイスの基本的構成要素である、表面、I-S（絶縁体-半導体）界面、M-S（金属-半導体）界面、およびS-S（半導体-半導体）界面を形成し、光電子分光法により界面物性を評価すると共に、これに基づき界面の性質を工学的に制御することを試みたものである。本論文は8章からなり、各章の概要は、以下の通りである。

第1章は、序論であり、本論文の背景・目的と意義および構成を述べている。

第2章は、本論文の基礎となる「統一DIGS (Disorder Induced Gap State) モデル」を含めて、これまでに発表されている界面に関する代表的なモデルについて要約して述べている。

第3章は、本論文の主要な実験手法である光電子分光法の概要と、本研究で用いた装置についてまとめている。

第4章は、表面処理によるGaAs表面の改質に関する検討結果を述べている。まず、GaAsのMBE成長清浄面、化学エッチ表面、イオンエッチ表面について、表面の組成および表面フェルミ準位のピンニングの位置を明かにしている。次に光化学酸化、気相HCl処理、硫化物処理後の表面組成および表面フェルミ準位のピンニングの位置を、光電子分光法、表面電流輸送法、およびフォトルミネセンス法を用いて評価・検討している。その結果、気相HCl処理のみが、表面フェルミ準位のピンニングを緩和すること、および実験結果すべてが「統一DIGSモデル」の立場から矛盾なく説明できることを明らかにしている。

第5章は、I-S界面として、実用的なMISFETへの応用の可能性が高いInPと陽極酸化膜の界面について検討した結果を述べている。まず、種々のP化合物のP原子の内殻準位の化学シフトが、第二近接原子まで考慮した局所的電気陰性度により定量的に説明できることを明らかにしている。ついで、陽極酸化膜は、 In_2O_3 を主成分とする外部層と $\text{In}(\text{PO}_3)_3$ を主成分とする内部層の2層構造となること、および外部層は電気的特性を劣化させるが、内部層は優れていることを明らかにしている。さらに、光CVD-SiN/陽極酸化内部層/InP構造では、低界面準位密度が実現されることを示している。また、陽極酸化の条件を変化させることにより、酸化膜の組成制御が可能であることを示し、MIS構造の最適化を試みている。

第6章は、GaAsのM-S界面に関する結果について述べている。Al、Mg、Auなどの金属と、MBE成長清浄表面、化学エッチ表面、イオンエッチ表面、硫化物処理表面の間に形成される界面について、界面の構造・組成を明らかにしている。次に、光電子分光法、電流-電圧法、容量-電圧法によるショットキ障壁高さと、界面の構造・組成との関連を調べ、障壁高さのふるまいが、界面層の存在を考慮した「DIGSモデル」でよく説明できることを示している。

第7章は、S-S界面に関する検討結果について述べている。GaAs/AlAsヘテロ界面の価電子帯不連続量 ΔE_v を、光電子分光法によって評価し、以前より報告のあった ΔE_v の成長順序依存性が、単に半導体表面のバンドの曲がり起因する見かけ上のものであることを明らかにしている。

第8章は、結論であり、各章で得られた結果を要約して述べている。

これを要するに、本論文は、化合物半導体界面の光電子分光法による評価、および界面の工学的制御に関し、いくつかの有益な新知見を得ており、半導体工学の進歩に貢献するところ大なるものがある。

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。