

学位論文題名

高分解能電子顕微鏡法による半導体界面の
微細構造解析に関する研究

学位論文内容の要旨

材料の機械的、物理的あるいは科学的特性は、結晶粒界や異物質界面の構造と密接に関係し、その界面制御により材料の特性は著しく向上される。中でも半導体デバイスにおいては、半導体の特性向上と設計は半導体／半導体界面の制御に強く依存する。従って、半導体デバイスを構成する界面の構造の解析と界面の整合性および安定性の解析と評価は半導体プロセスにおいて極めて重要である。とくに、半導体プロセスで導入される原子レベルの乱れが界面準位密度を変化させるため、シリコン半導体に代わる次世代の化合物半導体の実現には半導体／半導体や絶縁体／半導体界面の実際構造と電気的特性の相関に関する理論の確立および界面評価が重要となる。この界面評価に電子顕微鏡法、X線回折法、XPS法、RBS法等が用いられるが、中でも高分解能の電子顕微鏡では原子レベルで結晶構造解析が可能となり、半導体界面の研究に非常に有効である。

本研究では、半導体特性に大きく影響する、半導体／絶縁膜界面及び半導体／半導体界面での乱れを高分解能電子顕微鏡法により原子レベルで観察、解析および評価、また界面構造モデルに基づき計算機シミュレーションと観察界面構造との比較から、界面における原子配列の乱れと格子不整合の緩和状態を明らかにした。

本論文は、6章で構成されており以下に各章の概要を示す。

第一章では、界面と物性に関する研究の方法や界面と半導体の電気的特性の評価法及び本論文の目的を論じている。半導体界面の研究に高分解能電子顕微鏡法の適用の理由とその特徴及び観察可能限界について記述した。高分解能電子顕微鏡の粒子点分解能は0.1nmの域に近付きつつあるが、現在の実用の電子顕微鏡の分解能は約0.2nmで、SiやGaAs半導体の構造像観察が可能な分解能であることを示した。それ故、SiおよびGaAsなどの半導体の界面を原子レベルで構造の乱れが観察評価できる。回折波と透過波の干渉像として観察される構造像は実際の原子位置像とは必ずしも対応せず、観察像から結晶構造を解析するには結晶モデルに基づく結像理論による計算機シミュレーション像との比較検証が必要があることを説明している。

第二章では、本研究で用いた高分解能電顕の結像理論と高分解能電顕像の解釈及び第一章で説明した構造像観察による界面の検証方法について論じた。高分解能電子顕微鏡像で重要な入射電子線の試料結晶内における散乱過程について検討した。高分解能電子顕微鏡像の検証法として、マルチスライス法による像の計算シミュレーション法並びに像の逆フーリエ変換した光回折法の適用についても検討した。さらに、半導体の断面観察試料の作成方法としてのクロスカット方法およびイオンミリングによる観察試料の薄膜化の条件を明らかにしている。

第三章は、半導体／絶縁膜界面の評価について論じている。熱酸化によって自己酸化膜を形成する方法(Si/SiO_2)、低温プロセスによる自己酸化膜形成($\text{GaAs}/\text{native oxide}$, $\text{InP}/\text{native oxide}$)により絶縁膜を堆積した試料($\text{GaAs}/\text{Si}_3\text{N}_4$)について高分解能電子顕微鏡により観察した界面構造を評価した。陽極酸化法により化合物半導体上への絶縁酸化膜の形成させた、化合物半導体／酸化膜および、低温プロセスであるプラズマCVD法で作製した化合物半導体／窒化膜を用いた。また、絶縁膜形成後の界面に形成する残留ひずみによる格子不整合を緩和する目的から、水素雰囲気での焼鈍前後の界面構造を観察し比較検討した。その結果、界面上の原子レベルでのステップが小さく、また界面の構造像の乱れの小さい平滑に制御されている界面ほど界面準位密度も低くなり界面構造と電気的特性を示す界面準位密度と密接な関係があることを明かにした。界面における原子の乱れは場合によっては界面から数原子層の領域まで観察され、界面に形成する格子不整合の緩和過程で原子配列の乱れが現れるものと結論した。

第四章では、前章で観察した結果についてさらに考察を加え、界面における原子配列の乱れや結合の乱れの原因となる絶縁膜と基板の格子不整合が、いかにして緩和されているかについて検討している。とくに界面の近傍での残留ひずみの少なく、界面が原子レベルで平滑に制御されている $\text{InP}/\text{陽極酸化膜}$ について考察した。とくにその界面におけるモデル構造を考え、このモデル構造に対する計算機シミュレーション像と実際に観察した構造像を検討し、そのモデルの妥当性を検証した。即ち、半導体／絶縁膜界面において、絶縁膜部分を空間と仮定した仮想超格子ユニットセルを提案し、また計算機シミュレーションにおいて必要な仮想超格子の並進したユニットからの散乱効果を避けるためのユニットセルの大きさを決定した後、シミュレーション像の検討結果、格子不整合の緩和は界面に垂直方向に基板側で界面から1—2積層原子層の領域で結晶格子が伸びることにより行われていることを実証した。

第五章は、半導体／半導体での界面について高分解能電子顕微鏡で観察した結果について述べてある。 GaAs/InAs および $(\text{GaAs})_{0.42}/(\text{InAs})_{0.58}$ 超格子について観察像、電子線回折像を解析評価した。 $(\text{GaAs})_{0.42}/(\text{InAs})_{0.58}$ をX線回折法により結晶解析した結果から超格子層の形成が確認出来なかった。しかし、高分解能電子顕微鏡による(110)断面を観察した結果、超格子層の形成が確認できた。これは GaAs 層と InAs 層の質量数の相違に起因する電子線散乱能の違いにより両積層は異なったコントラスト像を形成した結果であり、また、電子線回折像においてもサテライト反射が観察され超格子層の形成が高分解能電子顕微鏡法の適用により実証した。しかし、この試料では異層の積層界面での評価可能な格子不整合は確認できなかった。一方、 GaAs/InAs 超格子の場合には、両化合物半導体の間には約7%の格子不整合が存在する。それ故、この超格子層の臨界膜厚は2分子層以下であると考えられていたが、(110)断面について結晶構造像を観察した結果、 $(\text{GaAs})_{1.2}/(\text{InAs})_3$ の場合でも超格子層の形成が確認でき、またこの超格子層の原子配列の解析によって、各層の格子は伸縮して超格子に対応する格子定数に近い値になっていることが観察され、同じ結晶型からなる超格子の界面の格子不整合は界面全体を通じて緩和されていることを明かにした。

第六章は、総括で前章までの結果および考察をまとめている。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 高 橋 平七郎

副 査 教 授 石 井 邦 宜

副 査 教 授 長谷川 英 機

副 査 教 授 武 笠 幸 一

高分解能電子顕微鏡法による半導体界面の微細構造解析に関する研究

本研究は、各種の半導体／絶縁膜界面及び半導体／半導体界面などの半導体プロセスで導入される原子レベルの乱れを評価し、また界面準位密度との相関を明らかにする目的から、高分解能電子顕微鏡法により原子レベルで界面を観察および解析し、さらに界面構造モデルに基づく計算機シミュレーション像と観察構造像との比較から、界面における原子配列の乱れ状態を明らかにしたものである。まず、SiやGaAs半導体界面を高分解能電子顕微鏡により構造像として観察できること、また結晶モデルに基づく計算機シミュレーション像との比較から界面の状態を原子レベルで評価可能であることを示した。

次に、界面の観察用試料をクロスハット法とイオンリング法の併用により作製する条件を明らかにした後、Si／陽極酸化膜、GaAs／絶縁膜などの〔100〕面方位を基板とした各種の半導体／絶縁膜界面の観察結果を示し、半導体基板の種類およびプロセスの相違に依存した異なった構造像コントラストを確認し、界面状態が変化していることを明らかにした。

最後に、観察された各種界面構造像について、その界面における原子配列モデルに基づいた計算機シミュレーション像を考察し、InP／陽極酸化膜界面では基板側で1-2原子層の幅で緩和が生じていること、またGaAs／陽極酸化膜界面近傍ではAsの欠乏に起因する基板と異なった構造像を示す領域が存在し、水素焼鈍で正規の構造像に回復すること、およびGaAs／CVDSiO₂酸化膜界面ではGaAsの結合間隔が広がって状態で結合していることを明らかにした。

以上のように、本論文は電子顕微鏡法による直接観察から、界面評価が可能であることを示すと同時に、半導体デバイスの電気特性に及ぼす界面の原子レベルの乱れが、界面のごく近傍における組成変化あるいは基板側界面の1-2原子層における結合状態の変化に起因して、原子位置が変わることを明らかにし、半導体デバイス特性および半導体プロセス評価法に新知見を与えたものである。

これを要するに、著者は、半導体工学並びに材料工学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。