

論文内容の要旨

博士論文題目

Development of the atomic and electronic structure analysis method
for the hetero interface of semiconductor devices
(半導体デバイスヘテロ接合界面の原子構造・電子状態
直接観察手法の開発)

氏名 前島 尚行

(論文内容の要旨)

近年半導体デバイスは微細化が進み、走査トンネル電子顕微鏡や透過電子顕微鏡等を用いた原子スケールでの物性評価が必要とされている。しかし、これらの手法では試料非破壊で各原子サイトの原子構造と電子状態を直接観察することはできなかった。そこで試料非破壊で元素選択的・サイト選択的な観察が可能な光電子回折分光法を用いた半導体デバイスヘテロ接合界面の観察手法の開発を行った。

3章では、近年 Shirasawa らによって報告された界面準位フリーな SiC 上酸化窒化膜について界面の原子構造の直接観察の結果から、界面の積層欠陥を確認した。また深さ分解 O K 吸収端 X 線吸収分光の解析により原子サイト毎の電子状態の分離に成功した。

さらに超高真空中で SiC 上酸化窒化膜の NO ガス中ポストアニールで作製した酸化窒化膜について、角度分解 N 1s 光電子分光の結果から酸化窒化膜中に3種類の N 原子が異なる深さに存在することが分かった。そこで深さ分解 N K 吸収端 X 線吸収分光の結果界面の N 原子はダングリングボンドをもたないが膜中や表面の N 原子は価電子帯バンド下端付近に欠陥準位となる電子状態を持つことが分かった。

4章では分子線エピタキシー法を用いて SiC 上に成長した AlN について、角度分解光電子分光の結果から電子状態の異なる N 原子が界面に存在していることを明らかにした。束縛エネルギーの違う光電子回折パターンの測定からこれら2つの原子サイト周りの原子構造を明らかにし、その構造から界面に SiN が生じていることが分かった。この情報をもとに試料界面が Si rich にならないように先行 Al 照射を行うことで界面欠陥がなくなったことを角度分解光電子分光法により確認した。これにより、ヘテロ接合界面の欠陥構造を明らかにし、デバイス開発サイドに作製試料の欠点をフィードバックすることで、ヘテロ接合界面原子構造・電子状態の改良を実現した。

以上のように、光電子回折法を用いることで、他の手法では判別しにくい原子置換サイトに関する欠陥を試料非破壊で明らかにすることができた。さらに、光電子分光や X 線吸収分光と合わせる事で欠陥準位になりうる電子状態とそれに起因する原子構造を明らかにできた。これらの知見は、欠陥準位・構造を生み出さないデバイス界面の作製条件を考えるために必要な情報であり、良質なデバイスの作製を可能にするものである。これにより、理想的な原子構造の界面を実現する半導体デバイスヘテロ接合界面原子構造・電子状態直接観察手法の開発に成功した。

(論文審査結果の要旨)

本論文は、非破壊で元素選択的・原子サイト選択的な半導体デバイスヘテロ接合界面の原子構造・電子状態の直接観察手法の開発研究である。近年半導体デバイスは微細化が進み、走査トンネル電子顕微鏡や透過電子顕微鏡等を用いた原子スケールでの物性評価が必要とされている。しかし、これらの手法では試料非破壊で各原子サイトの原子構造と電子状態を直接観察することはできなかった。そこで光電子回折分光法を用いて、試料非破壊で元素選択的・サイト選択的な観察が可能な半導体デバイスヘテロ接合界面の観察手法の開発を行った。

3章では、近年 Shirasawa らによって報告された界面準位フリーな SiC 上酸窒化膜について界面の原子構造の直接観察の結果から、界面の積層欠陥を確認した。また深さ分解 O K 吸収端 X 線吸収分光の解析により原子サイト毎の電子状態の分離に成功した。

さらに超高真空中で SiC 上酸化膜の NO ガス中ポストアニールで作製した酸窒化膜について、角度分解 N 1s 光電子分光の結果から酸窒化膜中に3種類の N 原子が異なる深さに存在することが分かった。そこで深さ分解 N K 吸収端 X 線吸収分光の結果界面の N 原子はダングリングボンドをもたないが膜中や表面の N 原子は価電子帯バンド下端付近に欠陥準位となる電子状態を持つことが分かった。

4章では分子線エピタキシー法を用いて SiC 上に成長した AlN について、角度分解光電子分光の結果から電子状態の異なる N 原子が界面に存在していることを明らかにした。束縛エネルギーの違う光電子回折パターンの測定からこれら2つの原子サイト周りの原子構造を明らかにし、その構造から界面に SiN が生じていることが分かった。この情報をもとに試料界面が Si rich にならないように先行 Al 照射を行うことで界面欠陥がなくなったことを角度分解光電子分光法により確認した。これにより、ヘテロ接合界面の欠陥構造を明らかにし、デバイス開発サイドに作製試料の欠点をフィードバックすることで、ヘテロ接合界面原子構造・電子状態の改良を実現した。

以上のように、光電子回折法を用いることで、他の手法では判別しにくい原子置換サイトに関する欠陥を試料非破壊で明らかにすることができた。さらに、光電子分光や X 線吸収分光と合わせる事で欠陥準位になりうる電子状態とそれに起因する原子構造を明らかにできた。これらの知見は、欠陥準位・構造を生み出さないデバイス界面の作製条件を考えるために必要な情報であり、良質なデバイスの作製を可能にするものである。

以上のように、本論文は、理想的な原子構造の界面を実現する半導体デバイスヘテロ接合界面の原子構造・電子状態直接観察手法の開発に成功しており、学術的に意義深い。よって審査員一同は本論文が博士(理学)の学位論文として価値あるものと認めた。