

論文審査の結果の要旨および担当者

報告番号	※ 甲 第 12306 号
------	---------------

氏 名 藤村 信幸

論文題目

X線光電子分光法によるHigh-kゲートスタック構造の電子状態および界面ダイポールに関する研究
(Study of Electronic States and Interfacial Dipoles in High-k Dielectric Gate Stacks by X-ray Photoelectron Spectroscopy)

論文審査担当者

主査	名古屋大学	教授	宮崎 誠一
委員	名古屋大学	教授	曾田 一雄
委員	名古屋大学	教授	中塚 理
委員	名古屋大学	准教授	牧原 克典

論文審査の結果の要旨

藤村信幸君提出の博士論文「X線光電子分光法によるHigh-kゲートスタック構造の電子状態および界面ダイポールに関する研究」は、金属酸化物高誘電率絶縁膜 (high-k膜) /Si界面におけるエネルギーバンド構造の詳細解明とその制御技術の構築を目指した研究成果をまとめたものであり、high-k膜/Si界面の電子物性評価に高電子分光を中心とする精密分析技術を適用し、種々のhigh-k/Si界面のエネルギーバンド構造を詳細に解明している。具体的には、大規模集積回路(LSI)の基本構成素子である金属-絶縁体-半導体電界効果トランジスタ(MOSFET)の開発では、2000年頃から新材料・新構造導入による低省電力化と高性能化の両立が強く求められている。MOS構造の要である金属/高誘電率絶縁膜(high-k)ゲートスタック構造では、実効仕事関数やしきい値電圧を精密に制御するために、電位変化の主要因となる絶縁膜の荷電欠陥や異種材料界面のダイポールを高感度に定量し、その形成メカニズムに基づいた精密制御が必要である。これまでに、荷電欠陥や界面ダイポールの評価は、主にMOSダイオードの容量-電圧(C-V)特性によって議論されてきたが、C-V特性では、MOS構造内に荷電欠陥や複数のダイポールが存在する場合、それぞれの寄与を切り分けて議論するためには電極材料や絶縁膜厚をパラメータとした複数の試料と高度な解析が必要となる。

本論文では、異種材料界面のダイポール等の電位変化を高感度に計測する手法として、X線光電子分光法(XPS)に着目し、XPS測定により得られた二次光電子信号と価電子帯信号のそれぞれの立ち上がりのエネルギー位置を解析することで、半導体や絶縁膜材料の真空準位から価電子帯上端までのエネルギー差を定量でき、さらに、絶縁膜材料では、内殻光電子エネルギー損失信号よりエネルギーバンドギャップを求めることで、電子親和力を直接評価可能であることを報告している。さらに、この手法を絶縁膜/半導体や絶縁膜/絶縁膜構造のような異種材料界面に展開することで、異種材料界面での真空準位の違い、すなわち界面ダイポールを直接評価可能であることを明らかにし、界面ダイポール量と酸素密度比が線形に相関することも実験的に明らかにしている。尚、本論文は、以下の6章で形成されており、各章の詳細は下記の通りである。

第1章は序論であり、研究背景、目的および概要について述べられている。研究背景では、MOSFETの微細化に関する歴史的背景が解説されており、高誘電率絶縁膜(high-k)導入によって生じるフェルミレベルピニングや界面ダイポール等の諸問題がまとめられ、本研究の意義と目的が記載されている。

第2章では、本論文の要素技術である、X線光電子分光法および電気的特性評価の基本原則および基礎的事項が詳細に述べられている。また、X線光電子分光法に関する課題を整理し、界面ダイポール検出手法を提案している。

第3章では、XPSによって半導体(SiやSiC)や絶縁膜材料(SiO₂)の真空準位から価電子帯上端までのエネルギー差および電子親和力の定量分析を行った結果を議論している。具体的には、励起光エネルギーおよび価電子帯信号と二次光電子信号の立ち上がりのエネルギー差より価電子帯上端位置が決定できることを示すとともに、絶縁膜材料では、XPSにより測定可能な内殻光電子エネルギー損失信号より見積もったエネルギーバンドギャップを考慮することで、電子親和力が定量可能であることを示している。

第4章では、異種材料界面の内部電位分布および界面ダイポールを定量評価した結果を説明している。第3章で議論した手法を積層構造に展開することで、各層の真空準位の差を議論し、異種材料界面でダイポールが存在する場合は、二次光電子信号のしきい値エネルギーの変化から真空準位のエネルギー差が測定可能であることを明らかにしている。また、Al-MOSキャパシタのC-V測定を踏まえ、膜中の荷電欠陥や界面に形成したダイポールによる電位変化との相関を明らかにしている。

第5章では、high-k(HfO₂, Al₂O₃, Y₂O₃, TiO₂, SrO)/SiO₂積層構造において、界面の化学構造および電位変化の相関を調べた結果を解説している。さらに、内殻光電子信号より界面近傍での酸素密度比を算出し、界面反応の起こりにくい材料(HfO₂, Al₂O₃, TiO₂)において、実測したダイポールは内殻光電子信号より見積もった酸素密度比と比例することを実験的に明らかにしている。

第6章では、本論文で明らかにした研究成果を総括するとともに、残された今後の課題や展望が述べられている。

以上のように本論文では、酸化物/半導体界面の化学的構造と電子物性との相関について総合的な分析結果が示されており、その学術的意義は十分に高く、今後のSiナノエレクトロニクス分野の発展に貢献する成果がまとめられている。よって、本論文の提出者である藤村信幸君は、博士(工学)の学位を受けるに十分な資格を有するものと判断した。