

学 位 論 文 題 名

容量－電圧特性の非接触測定に基づく半導体表面の評価法とその応用

学位論文内容の要旨

超LSIに象徴される半導体技術の発展には目覚ましいものがあり、更なる進歩をめざした多岐にわたる研究開発が精力的に進められている。これらの半導体技術の根幹を成す技術として半導体の表面や界面を制御する技術が果たしてきた役割には大きなものがある。近年の半導体デバイスは集積度の向上や高速化のため微細化や多層化が進み、表面・界面制御の重要性は更に増している。評価技術はこれらの研究開発を支える重要な要素の一つであり多くの測定技術が表面・界面を調べるために利用されてきた。特に機器分析技術の進歩には著しいものがあり数々の新しい知見を与えてきた。しかし近年の半導体表面や界面制御の研究の進展はこれまでも増して多様な評価を求めるようになってきた。特に表面や界面を非破壊で調べることが可能な評価法に対する要求には大きなものがある。従来電気的評価技術や機器分析技術は測定のため電極形成や電子、イオン、X線の照射を行うため本質的に破壊検査であり、これらの要求に十分答えているとは言えない。従って今後の半導体表面・界面の検討を進めて行く上で完全な非破壊・非接触で測定する測定技術の可能性を追求することは不可欠である。処理直後の極表面の状態は計測そのものによって容易に変化することが予想されたため、機器分析技術を始めとする従来測定技術の延長線では考えにくく大きな発想の転換が必要となる。

本研究はこのような現状に立脚し、測定対象物への電極形成が不可欠なため従来破壊検査と位置づけられてきた電気的評価法を見直し、新しい非接触容量－電圧(C-V)法を提案し検討することに主眼を置いている。この非接触C-V法は従来C-V法では不可欠な測定電極形成を必要せず、空間的にサブミクロンまで近付けた測定電極により非接触でC-V測定を行う概念に基づくものである。得られるC-V特性は従来C-V法と等価であり、測定されたC-V曲線は標準MOS理論で解析される。測定が非接触でかつ高周波電界の印加のみで行われたため、半導体の処理直後の表面状態を全く変化させることなく測定できる。この非

接触 C-V法による完全な非破壊・非接触測定能力は今後の半導体表面・界面の検討を進めて行く上で有力な手段となる。

この非接触 C-V法を具現化するために高精度でサンプル表面まで電極を近づけかつその近接距離を同時に高精度で検出できる測定装置を検討し、併せて電極とサンプル表面の距離を検出するため新しい測定原理に基づいた光学的測距法を確立した。第1章で研究の背景と経緯について述べる。第2章では非接触 C-V測定の原理と測定データの解析手順を示しそれを支える測定装置の概要と精度について述べる。第3章では特性が良く把握されているシリコン熱酸化膜を利用した実測定から測定されたC-V曲線が理想C-V曲線と非常に良く一致し従来 C-V(容量-電圧測定)や C-t(容量-時間測定)法とも良い相関を示すことを明らかにし、その過程で非接触 C-V測定の物理モデルが従来 M I S構造の絶縁体と測定電極間に第2の絶縁層(エアギャップ)を挟み込んだモデルで解釈できることを実証する。また測定精度の点では逆に優れた利点があることを示す。第4章では各種の表面処理を加えたシリコンウェハを測定することで非接触 C-V測定が完全な非破壊・非接触測定を実現していることを実証するとともに応用範囲を明らかにする。第5章ではベアな半導体表面や不安定な半導体表面への非接触 C-V測定法の応用を行う上で必要となるセンサーの改良及び C-V測定時の新しい電圧掃引法の付加について述べその達成された性能を示す。第6章では最も興味あるエッチング処理直後のベアなシリコン、GaAsウェハ表面の測定を行い初めてその電気的特性を明らかにする。測定されたC-VやC-t曲線は界面準位に起因する注入型ヒステリシスに特長付けられており、これらのC-VやC-t曲線の振る舞いを既に提案されている界面準位モデルに従い解析する。これらの検討の中から非接触 C-V法が半導体のベア表面も含め極表面からバルクまでの幅広い情報を完全な非破壊・非接触で測定でき、p-タイプシリコンにおいてはライフタイムの実用的な測定がベア表面でも可能であることを明らかにした。

学位論文審査の要旨

主 査	教 授	長谷川 英 機
副 査	教 授	池 田 正 幸
副 査	教 授	雨 宮 好 仁
副 査	教 授	福 井 孝 志
副 査	助教授	橋 詰 保

学 位 論 文 題 名

容量－電圧特性の非接触測定に基づく半導体表面の評価法とその応用

21世紀に本格化すると予想される高度情報化社会においては、半導体集積回路に対する社会的要求は、量的にも質的にもこれまで以上に増大し、しかも多様化することは確実である。これまでに、半導体デバイスでは、種々の接合を巧みに利用して、さまざまな機能が達成されてきたが、半導体集積回路のさらなる大容量化、高速化、多機能化のために、デバイス構造の超微細化や多層膜化が進展してきており、これに呼応してデバイスの基幹要素である表面・界面の原子スケール制御が強く望まれている。近年の表面分析手法の著しい進展によって、表面・界面構造の理解は深まりつつあるが、集積回路プロセス上最も重要である、種々の処理を施された「自由表面」あるいは極薄絶縁膜を形成した「表面」の電子的状態・電気的特性を表面状態を乱すことなく直接的に評価する方法は未だに確立されておらず、このため、本質的な表面・界面の原子スケール制御は達成されていないのが現状である。

本論文は、このような背景のもとで、エアギャップを絶縁体として金属－絶縁体－半導体構造を構成し、その容量を測定する新しい非接触容量－電圧 (C-V) 測定法を提案すると共に、その測定を可能とする新しい測定装置を研究開発し、理論解析および詳細な実験結果より、その妥当性と有効性を実証したものである。以下に各章の概要を示す。

第1章では、研究の背景、半導体表面の評価法の現状と問題点、本研究の目的と構成について述べている。

第2章では、非接触C-V法の原理と測定システムを述べている。基本構造として、半導体表面に測定電極をサブミクロンの距離まで近づけ、このサブミクロン空隙（エアギャップ）を絶縁体とする、金属（測定電極）－絶縁体（エアギャップ）－半導体構造を構成し、半導体表面の電子状態・電気的特性の非接触評価を実現した。サブミクロンエアギャップの測長は、Goos-Haenchen効果と呼ばれる現象を利用している。すなわち、測定電極表面に取りつけられたプリズムに対してレーザー光を全反射状態で照射し、試料表面の接近に起因した電界のしみだし（エバネセント波）による反射率の変化を検出して、エアギャップの高精度な絶対測長を可能としている。さらに、高精度の容量センサーとピエゾアクチュエーターよりエアギャップ長と平行度を制御し、ギャップ長変動1 nm以下、試料表面に対する測定電極面の平行度0.5秒以下を実現した。

第3章では、熱酸化法によって形成したSiO₂/Si構造を標準試料として用い、測定結果および理論解析によって、非接触C-V法の妥当性、定量性を議論している。その結果、非接触C-V測定より求めたフラットバンド電圧シフト量、界面電荷密度、表面再結合速度、キャリア寿命等の物性パラメータが、従来法

の結果と良い相関を示すことを明らかにしている。

第4章では、種々の処理を施した熱酸化シリコンウエハー表面に、非接触C-V法を適用した結果を述べている。まず、半導体プロセスに不可欠な超純水洗浄によって、フラットバンド電圧が正バイアス方向に大きくシフトし、シリコン酸化膜表面に負電荷が吸着することを明らかにした。次に、プラズマ処理した熱酸化シリコンウエハーでは、フラットバンド電圧のシフトとともに容量変化の減少が観測され、プラズマ損傷によって、 $10^{12}\text{cm}^{-2}\text{eV}^{-1}$ 台の高密度の界面準位が発生することを示した。また、窒素雰囲気中1000℃でのポストアニールによって、フラットバンド電圧シフトが大幅に減少し、界面準位濃度も1桁以上改善されることを明らかにした。これらの結果は、非接触C-V法によるプロセス直後の「その場測定」によって、プロセス管理が可能となり、半導体集積回路の高信頼化に大きく寄与できることを示唆しているものである。

第5章では、「半導体自由表面」の評価を可能とするための、非接触C-V法の特徴的な機能について説明している。まず、測定電極表面に0.3 nmのシリコン酸化膜を堆積し、測定電極と「自由表面」間に発生しやすい異常放電を抑止する方法を採用している。また、測定電極周辺にガードリングを設けることによって、測定精度が大きく向上することを明らかにした。さらに、少数キャリア発生の影響を受けずに半導体表面の多数キャリア濃度を評価できるパルス測定法を提案している。

第6章では、シリコンおよびガリウムヒソウエハーの「自由表面」の評価結果について述べている。まず希釈HF溶液で処理されたシリコン(100)表面では、熱酸化シリコンウエハー表面と全く異なるC-VおよびC-t特性を示すことが明らかにされ、詳細な解析より、この表面には、価電子帯下端から約0.46eVの位置に表面準位が局在し、特異なC-V特性を引き起こしている可能性が指摘されている。また、この表面準位が、窒素雰囲気中850~1000℃の熱処理によって減少することも示されている。さらに、化学エッチング処理および陽極酸化処理したガリウムヒソ表面に非接触C-V法を適用し、いずれの表面においても、表面フェルミ準位は強くピンニングされていることを明らかにした。

第7章では、本研究の成果を総括している。

これを要するに、著者は、半導体表面の電子的状態・電気的特性を非接触・非破壊に評価できる、「非接触C-V測定法」を提案すると共に、その測定装置を研究開発し、理論解析と詳細な実験により、新測定法および測定装置の妥当性と有効性を実証したものであり、半導体工学の進歩に寄与するところ大である。

よって、著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。