

# 変位計測・駆動機能を搭載した圧電型ダイヤモンド AFMプローブの形成に関する研究

## 学位論文内容の要旨

1950年代から現在まで続いてきたSi系のLSI(Large scale integration)の微細化は、今後、同様な速度で進み、例えば、金属配線のライン&スペースの大きさは2015年頃には80nmに到達すると予想される。そのため、プロセス技術だけではなく、現在用いられている光学顕微鏡や走査型電子顕微鏡に変わる、新規の検査・評価技術が必要となる。

次世代の検査・評価技術として、高い計測分解能をもつ原子間力顕微鏡(Atomic force microscope, AFM)を用いることが考えられる。しかし、AFMを検査・評価技術として用いる場合、探針の摩耗、広範囲の測定が技術課題となる。

そこで、本研究は、次世代の半導体検査評価ツールとして対応できるAFMプローブである「圧電型ダイヤモンドAFMプローブの開発」を目的として実施した。これは、ダイヤモンド製のカンチレバー上に圧電薄膜を形成し、カンチレバーを機能化したものである。このプローブにおいて、探針の材料は、高硬度・耐摩耗性を有するダイヤモンドであることから、AFM計測の技術課題である探針の摩耗を改善できることが期待できる。また、カンチレバー上に形成した圧電薄膜は、以下のようなセンサとしても、アクチュエータとしても機能させることができる。

- ①センサ：カンチレバーのたわみ量を電荷量として出力する寸法測定用のセンサ
- ②アクチュエータ：電圧を印加することで、ドーパント濃度の取得時の押しつけ力の制御、配線リペア時の押しつけ力の制御用のアクチュエータ

上記①のカンチレバーのたわみ量を電荷量として出力する寸法測定用センサの機能を用いれば、カンチレバーのたわみの検出に「光てこ方式」を採用する必要がなくなる。したがって、数本のプローブを形成しアレイ化することによって、上記の技術課題である広範囲の測定も期待できる。

以上の目的で実施した本論文は、以下の7章から構成されている。

第1章は緒言であり、半導体製造における検査評価技術の現状と課題を述べ、次世代の検査評価技術となりうるSPMについて論じ、その課題を提示した。さらに、これらの課題を満足する「圧電型ダイヤモンドAFMプローブの開発」が本研究の目的であることを論じた。

第2章から第3章は、ダイヤモンド薄膜からなるAFMプローブの形成について論じ、ダイヤモンド探針の有用性について論じた。

第2章では、ダイヤモンド製のAFMプローブを作製するときに必要な要素技術である

- ①ダイヤモンド探針作製のためのモールド法

## ②カンチレバー部作製のための加工技術

## ③ダイヤモンド薄膜と支持部の接合技術

について検討し、その有効性を述べた。

第3章では、第2章で確立した①～③のダイヤモンド薄膜のマイクロマシニング要素技術を統合し、ダイヤモンド製のAFMプローブを設計・作製し、実際にAFM計測をおこなうことによってその性能を評価した。さらに、探針の耐摩耗性を市販のプローブと比較し、ダイヤモンド探針が有用であるという知見を得た。

第4章から第6章は、目的の圧電型ダイヤモンドAFMプローブの開発について論じた。

第4章では、まず、薄膜の圧電定数  $d_{31}$  の測定法について検討した。圧電型ダイヤモンドAFMプローブの実現のためには、圧電定数  $d_{31}$  の高い薄膜の形成が重要となる。短時間で高精度なセンサを開発するためには、センサを作製する前に、圧電定数  $d_{31}$  の高い薄膜の形成条件を同定しなければならない。しかし、薄膜の圧電定数  $d_{31}$  の測定法については、未だに確立しておらず、実際は、センサを形成してから圧電定数  $d_{31}$  を評価するというのが実状である。そこで、本章では、片持ち梁の自由振動を用い、簡便で精度の良い薄膜の圧電定数  $d_{31}$  の測定法を開発した。このとき、測定法の精度を検討する薄膜として、構成元素数が2であり比較的簡単に圧電性を得ることのできるZnO薄膜を用いた。また、圧電定数  $d_{31}$  の高いZnO薄膜の形成法についても検討した。さらに、本章では、このZnO薄膜を用いてAFMセンサを作製した場合、センサの性能は仕様を満足するかを検討し、さらに圧電定数  $d_{31}$  の高い薄膜が必要であるという知見を得た。

第5章では、ZnO薄膜に比べてさらに高い圧電定数  $d_{31}$  を持つPZT薄膜の形成について論じた。本研究で開発する圧電型ダイヤモンドAFMプローブの実現には、ダイヤモンド薄膜上でPZT薄膜を形成する必要がある。しかし、ダイヤモンド薄膜のように表面あらさの大きい基板上にPZT薄膜を形成する技術に関する報告は、従来なされていなかった。そこで、本章では、ダイヤモンド薄膜上でのPZT薄膜の形成技術について検討し、高い圧電定数  $d_{31}$  をもつ薄膜を形成する技術を確立した。

第6章では、第2章から第5章までの知見、特に、第3章で明らかにしたダイヤモンド探針の有効性、および第5章で得たPZT薄膜の形成に関する知見を統合し、圧電型ダイヤモンドAFMプローブの形成技術を総合的に検討した。さらに、形成された圧電型ダイヤモンドAFMプローブについて、その性能は、半導体検査・評価技術に有効であるという知見を得た。

第7章は結論であり、本論文で得られた知見をまとめ、圧電型ダイヤモンドAFMプローブが、次世代の半導体検査・評価技術に有効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 山 本 眞 史  
副 査 教 授 岡 田 亜 紀 良  
副 査 教 授 武 笠 幸 一  
副 査 教 授 牧 野 英 司 (弘前大学理工学部)

学 位 論 文 題 名

## 変位計測・駆動機能を搭載した圧電型ダイヤモンド AFM プローブの形成に関する研究

1950年代から現在まで続いてきた Si 系の LSI(Large scale integration) の微細化は、今後、同様な速度で進み、例えば、金属配線のライン&スペースの大きさは 2015 年頃には 80 nm に到達すると予想される。そのため、プロセス技術だけではなく、現在用いられている光学顕微鏡や走査型電子顕微鏡に変わる、新規の検査・評価技術が必要となる。

次世代の検査・評価技術として、高い計測分解能をもつ原子間力顕微鏡(Atomic force microscope, AFM)を用いることが考えられる。しかし、AFM を検査・評価技術として用いる場合、探針の摩耗、広範囲の測定が技術課題となる。

そこで、本研究は、次世代の半導体検査評価ツールとして対応できる AFM プローブである「圧電型ダイヤモンド AFM プローブの開発」を目的として実施した。これは、ダイヤモンド製のカンチレバー上に圧電薄膜を形成し、カンチレバーを機能化したものである。このプローブにおいて、探針の材料は、高硬度・耐摩耗性を有するダイヤモンドであることから、AFM 計測の技術課題である探針の摩耗を改善できることが期待できる。また、カンチレバー上に形成した圧電薄膜は、以下のようなセンサとしても、アクチュエータとしても機能させることができる。

- ①センサ：カンチレバーのたわみ量を電荷量として出力する変位計測用のセンサ
- ②アクチュエータ：電圧を印加することで、ドーパント濃度の取得時の押しつけ力の制御、配線リペア時の押しつけ力の制御用のアクチュエータ

上記①のカンチレバーのたわみ量を電荷量として出力する変位計測用センサの機能を用いれば、カンチレバーのたわみの検出に「光てこ方式」を採用する必要がなくなる。したがって、数本のプローブを形成しアレイ化することによって、上記の技術課題である広範囲の測定も期待できる。

以上の目的で実施した本論文は、以下の 7 章から構成されている。

第 1 章は緒言であり、半導体製造における検査評価技術の現状と課題を述べ、次世代の検査評価技術となりうる SPM について論じ、その課題を提示した。さらに、これらの課題を満足する「圧電型ダイヤモンド AFM プローブの開発」が本研究の目的であることを論じた。

第 2 章から第 3 章は、ダイヤモンド薄膜からなる AFM プローブの形成について論じ、ダイヤモンド探針の有用性について論じた。

第2章では、ダイヤモンド製のAFMプローブを作製するときに必要な要素技術である

- ①ダイヤモンド探針作製のためのモールド法
- ②カンチレバー部作製のための加工技術
- ③ダイヤモンド薄膜と支持部の接合技術

について検討し、その有効性を述べた。

第3章では、第2章で確立した①～③のダイヤモンド薄膜のマイクロマシニング要素技術を統合し、ダイヤモンド製のAFMプローブを設計・作製し、実際にAFM計測をおこなうことによってその性能を評価した。さらに、探針の耐摩耗性を市販のプローブと比較し、ダイヤモンド探針が有用であるという知見を得た。

第4章から第6章は、目的の圧電型ダイヤモンドAFMプローブの開発について論じた。

第4章では、まず、薄膜の圧電定数  $d_{31}$  の測定法について検討した。圧電型ダイヤモンドAFMプローブの実現のためには、圧電定数  $d_{31}$  の高い薄膜の形成が重要となる。短時間で高精度なセンサを開発するためには、センサを作製する前に、圧電定数  $d_{31}$  の高い薄膜の形成条件を同定しなければならない。しかし、薄膜の圧電定数  $d_{31}$  の測定法については、未だに確立しておらず、実際は、センサを形成してから圧電定数  $d_{31}$  を評価するというのが実状である。そこで、本章では、片持ち梁の自由振動を用い、簡便で精度の良い薄膜の圧電定数  $d_{31}$  の測定法を開発した。このとき、測定法の精度を検討する薄膜として、構成元素数が2であり比較的簡単に圧電性を得ることのできるZnO薄膜を用いた。また、圧電定数  $d_{31}$  の高いZnO薄膜の形成法についても検討した。さらに、本章では、このZnO薄膜を用いてAFMセンサを作製した場合、センサの性能は仕様を満足するかを検討し、さらに圧電定数  $d_{31}$  の高い薄膜が必要であるという知見を得た。

第5章では、ZnO薄膜に比べてさらに高い圧電定数  $d_{31}$  を持つPZT薄膜の形成について論じた。本研究で開発する圧電型ダイヤモンドAFMプローブの実現には、ダイヤモンド薄膜上でPZT薄膜を形成する必要がある。しかし、ダイヤモンド薄膜のように表面あらさの大きい基板上にPZT薄膜を形成する技術に関する報告は、従来なされていなかった。そこで、本章では、ダイヤモンド薄膜上でのPZT薄膜の形成技術について検討し、高い圧電定数  $d_{31}$  をもつ薄膜を形成する技術を確立した。

第6章では、第2章から第5章までの知見、特に、第3章で明らかにしたダイヤモンド探針の有効性、および第5章で得たPZT薄膜の形成に関する知見を統合し、圧電型ダイヤモンドAFMプローブの形成技術を総合的に検討した。さらに、形成された圧電型ダイヤモンドAFMプローブについて、その性能は、半導体検査・評価技術に有効であるという知見を得た。

第7章は結論であり、本論文で得られた知見をまとめ、圧電型ダイヤモンドAFMプローブが、次世代の半導体検査・評価技術に有効であることを明らかにした。

これを要するに、著者は、ダイヤモンド製のAFMプローブを形成し、AFM計測の課題である探針の摩耗に対して、このプローブが有効であることを示した。さらに著者は、AFMプローブの小型化を図るため、従来の光てこ方式に代えて、圧電式の変位計測センサを導入し、ダイヤモンド製のAFMプローブに圧電薄膜を搭載した「圧電型ダイヤモンドAFMプローブ」を実現した。これによって、プローブをアレイ化して、AFMによる広範囲の計測の可能性を示した。これらの結果は、半導体検査・評価技術の分野において、新知見を与えるものであり、工学的に貢献するところ大なるものがある。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。