



|              |                                                                                                                                                       |
|--------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Title        | Development of High-Low Kelvin Probe Force Microscopy for Semiconductor Surface                                                                       |
| Author(s)    | Izumi, Ryo                                                                                                                                            |
| Citation     | 大阪大学, 2022, 博士論文                                                                                                                                      |
| Version Type |                                                                                                                                                       |
| URL          | <a href="https://hdl.handle.net/11094/89606">https://hdl.handle.net/11094/89606</a>                                                                   |
| rights       |                                                                                                                                                       |
| Note         | やむを得ない事由があると学位審査研究科が承認したため、全文に代えてその内容の要約を公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、<a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed">大阪大学の博士論文について</a>をご参照ください。 |

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

## 論文内容の要旨

氏 名 ( 和 泉 遼 )

## 論文題名

Development of High-Low Kelvin Probe Force Microscopy for Semiconductor Surface  
(半導体表面を対象とするHigh-Lowケルビンプローブ力顕微鏡法の開発)

## 論文内容の要旨

本論文は、周波数変調方式ケルビンプローブ力顕微鏡 (FM-KPFM) とヘテロダインFM-KPFMを組み合わせたプローブ顕微鏡技術であるHigh-Low KPFMおよびHigh-Low KPFSの開発に関する研究成果をまとめたものである。

第1章では、本研究の背景について述べた。半導体表面の計測技術の中でKPFMが半導体の表面ポテンシャル測定に有用であることを述べ、KPFMによる半導体表面/界面準位の評価法の開発が今後求められるということを説明した。このような問題の解決策として、本研究では半導体表面/界面準位の評価が可能なHigh-Low KPFMを提案し、本手法の開発の目的や意義を説明した。

第2章では、原子間力顕微鏡 (AFM) の測定原理について述べた。まず、探針-試料間に働く相互作用力について述べ、その後、探針-試料間相互作用力の検出方式、特に周波数変調 (FM) 方式を説明し、FM-AFMによる探針-試料間相互作用力の測定原理について述べた。最後にFM-AFMの最小検出感度について述べた。

第3章では、KPFMの測定原理について述べた。まずKPFMの測定原理について説明し、探針と試料との間の接触電位差 (CPD) がKPFMによってどのように検出されるかについて示した。最後に、KPFMの検出感度およびKPFMを実現するためのフィードバック制御法について述べた。

第4章では、本研究の理解に必要な半導体の物理学について説明した。半導体のバンド構造やフェルミ準位について説明し、不純物ドーピングによってフェルミ準位がどのように変化するかを述べた。最後に、半導体の表面/界面準位について説明し、Shockley-Read模型による表面/界面準位を考慮した半導体の等価回路モデルを述べた。

第5章では、本研究で用いるAFM/KPFM測定系の説明を行った。AFM本体、カンチレバーの励振機構、カンチレバーの変位検出系、フィードバック制御系、最後にHigh-Low KPFMを実現するためのロックイン検出系の説明を行った。

第6章では、High-Low KPFMを用いてpnパターン半導体表面を観察した結果について述べた。High-Low KPFMによりpnパターン半導体表面のCPD像を取得したところ、低周波 ( $f=100$  Hz) の場合と高周波 ( $f=515$  kHz) の場合で測定されるCPDが異なる事が明らかになった。このCPDの違いは、表面準位とバルク準位との間のキャリア移動が、交流バイアス電圧の周波数が高周波になると追従できなくなる事が反映されていると本章の最後で結論づけた。

第7章では、High-Low KPFMを用いて交流バイアス電圧振幅依存性を測定した結果について述べた。まず、交流バイアス電圧の振幅の大きさ $V_{ac}$ によって測定されるCPDに違いが現れる可能性について物理的に述べ、 $V_{ac}$ 依存性測定の重要性を明らかにした。実験の結果、 $V_{ac}$ が小さい場合に、CPDの周波数依存性が大きく現れるということが明らかになりこのような $V_{ac}$ 依存性が測定される理由について、バンドモデルを用いながら考察を行った。

第8章では、High-Low KPFMを用いた散逸力測定について述べた。最初に、静電氣的散逸力の物理的な起源について述べ、High-Low KPFMによって散逸力を評価する意義について説明を行った。次に、カンチレバーの周波数シフト検出に基づく散逸力信号測定の理論を提案し、High-Low KPFMにより静電氣的散逸力を測定できる可能性について言及した。続いて散逸力測定の実験方法について述べ、得られた実験結果を示した。実験結果によると、FM-KPFMでは散逸信号は検出されず、ヘテロダインFM-KPFMでは散逸信号が現れるということが明らかになった。最後に、得られた散逸力信号に関して、半導体中の静電氣的散逸過程と関連づけながら考察を行った。

第9章では、High-Low KPFMに静電気力分光法を応用したHigh-Low KPFSについて述べた。まず、High-Low KPFMでは界面準位密度のエネルギースペクトルが取得できないという課題を述べた。その課題の解決策としてHigh-Low KPFSを提案し、その測定原理および理論を述べた。続いてHigh-Low KPFSの有用性を示すため、pnパターン半導体表面を測定した結果について述べた。得られたHigh-Low KPFSデータからあるエネルギー界面準位密度を見積もると、その値は  $D_{it} \approx 1.82 \times 10^{14} / \text{cm}^2 \text{ eV}$  とリーズナブルな値であり、本手法の有効性を示す結果となった。

第10章では、本論文のまとめおよび今後の展望について述べた。

## 論文審査の結果の要旨及び担当者

| 氏 名 (和 泉 遼) |     |     |                         |
|-------------|-----|-----|-------------------------|
|             | (職) | 氏 名 |                         |
| 論文審査担当者     | 主 査 | 教授  | 菅原 康弘                   |
|             | 副 査 | 教授  | 桑原 裕司                   |
|             | 副 査 | 准教授 | 李 艶君                    |
|             | 副 査 | 准教授 | Dino Wilson Agerico Tan |
|             | 副 査 | 教授  | 長 康雄 (東北大学電気通信研究所)      |

## 論文審査の結果の要旨

試料の表面電位は、多くの物理化学過程を左右する極めて重要な物性である。表面電位の空間分布を高感度・高分解能に測定するため、探針・表面間に働く静電氣的相互作用を検出するケルビンプローブ力顕微鏡法が用いられてきた。しかし、従来のケルビンプローブ力顕微鏡法では、低周波の交流バイアス電圧が用いられ、特に半導体表面においては、表面の電荷に関する情報だけでなく表面のバンド曲がりに関する情報も混じった画像が得られており、それらの情報を分離する方法の開発が求められていた。

本学位申請論文は、ケルビンプローブ力顕微鏡法における表面電位測定に関する研究をまとめたものである。本論文における主な成果を要約すると以下の通りである。

- (1) 高周波と低周波の交流バイアスを用いるケルビンプローブ力顕微鏡法 (High-Low KPFM) を提案し、半導体の表面電位測定における交流バイアス電圧の周波数依存性を検討した。その結果、測定される表面電位は、低周波の交流バイアス電圧の場合には表面バンド曲がりの影響を強く受けるが、高周波の交流バイアス電圧の場合には表面バンドの曲がりの影響を受けないことを見出した。また、この違いは、表面準位とバルク準位間の電荷移動が、交流バイアス電圧に応答するかしないかに起因することを解明した。
- (2) High-Low KPFM における交流バイアス電圧の振幅依存性について検討した。その結果、測定される表面電位は、交流バイアス電圧の振幅によっても影響を受けることを明らかにした。また、表面電位の周波数依存性が、交流バイアス電圧の振幅が小さい時の方が大きく影響されることを明らかにし、それを説明するバンドモデルを提案した。
- (3) 表面・界面の準位密度のエネルギースペクトルに関する情報を取得できる高周波と低周波の交流バイアス電圧を用いるケルビンプローブ力分光法 (High-Low KPFS) を提案した。具体的には、高周波と低周波の交流バイアス電圧に対する静電気力バイアス分光曲線の傾きが、それぞれ、探針と試料間の静電容量に依存し、それらの傾きの差を解析することにより、半導体の界面準位密度に関する情報を取得できることを理論的に示した。また、実際に pn パターン半導体表面を取り上げ、界面準位密度を測定できることを実証した。High-Low KPFS は、今後、様々な半導体材料・デバイスの表面・界面における不純物濃度や欠陥準位分布のナノスケール高感度・高分解能測定に広く利用されることが期待される。

以上のように、本学位申請論文は、ケルビンプローブ力顕微鏡法における表面電位測定に関して新たな手法を提案し、その有効性を実証したものであり、基礎的な面のみならず、応用の面でも有益な知見を得ており、応用物理学、特にナノ計測学に寄与するところが大きい。よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。