

Title	チャージアンプを組み込んだ非接触原子間力顕微鏡による固体表面の電子状態解析
Author(s)	野上, 真
Citation	
Issue Date	2016-06
Type	Thesis or Dissertation
Text version	ETD
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10119/13723">http://hdl.handle.net/10119/13723</a>
Rights	
Description	Supervisor: 富取 正彦, マテリアルサイエンス研究科, 博士

氏 名	野 上 真
学 位 の 種 類	博士(マテリアルサイエンス)
学 位 記 番 号	博材第 404 号
学 位 授 与 年 月 日	平成 28 年 6 月 24 日
論 文 題 目	チャージアンプを組み込んだ非接触原子間力顕微鏡による固体表面の電子状態解析
論 文 審 査 委 員	主査 富取 正彦 北陸先端科学技術大学院大学 教授
	水谷 五郎 同 教授
	高村 由起子 同 准教授
	大島 義文 同 准教授
	藤田 大介 国立研究開発法人 物質・材料研究機構 理事

## 論文の内容の要旨

In this thesis, we demonstrate the novel measurement method using a charge amplifier installed in the non-contact atomic force microscopy (nc-AFM). A Si(111) clean surface and a silicene, a 2-dimensional material, on ZrB<sub>2</sub>(0001)/Si(111) was investigated using the charge amplifier. In Chapter 2, the basic measurement method of the scanning probe microscopy (SPM) were introduced. That is, the scanning tunneling microscopy (STM), the atomic force microscopy (AFM), the nc-AFM, and the Kelvin probe force microscopy (KPFM). These SPM techniques use a sharp tip as a probe to detect the interaction between the tip apex and the sample surface. Physical quantities obtained using sharp tip are shown using formula and the schematic diagrams of them. The basic measurement systems are also shown in detail to promote understanding of the data. The force sensor named qPlus sensor used in this study is made of a quartz tuning fork. The characteristic of the quartz tuning fork is explained.

In Chapter 3, a principle of the charge amplifier is shown. The behavior of the charge amplifier is calculated by constructing the circuit model using LTSpice software. The charge amplifier, produced by FEMT GmbH, is also modeled and formulated using the capacitance CTS and contact potential difference (VCPD) between the tip- sample with the schematic diagram of the tip and the sample in this thesis to analyze the charge amplifier output. Additionally, the equipment composition is explained in this chapter. In Chapter 4, the samples, Si(111) and ZrB<sub>2</sub>(0001)/Si(111) the preparation methods for samples are introduced. The structure of Si(111)- $7\times 7$  reconstructed surface using dimer-adatom-stacking fault model, and  $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$  structure of the epitaxial silicene on ZrB<sub>2</sub>(0001) are also shown by using schematic models.

In Chapter 5, the obtained results were shown to describe the formula of the charge amplifier output using Si(111) clean surface. A unique contrast is also obtained using the charge amplifier, that is the polarity inversion on Si adatoms during scanning with 0 V. This contrast on the charge amplifier output image is

explained by the local VCPD using the charge amplifier output model in chapter 3. Moreover, the contrast change on the charge amplifier output images during scanning are shown without no contact between the tip and the sample surface. And application of this measurement method is suggested from the charge amplifier output obtained on the Silicene.

In Chapter 6, the CTS is calculated using an atomically resolved charge amplifier output image and the charge amplifier model with considering the CPD on Si(111). It is suggested that this measurement method can be a detector for CTS and the variation  $\Delta$ CTS. The CTS is approximately calculated using the plate-plate model, and the tip shape and size are estimated. And it is proposed that the charge amplifier has a potential to detect the charge transfer phenomena between two materials.

As a summary, it is suggested that this measurement method can be applicable for fast scanning to obtain the CPD instead of the KPFM. The wide bandwidth of the charge amplifier requires fast scan to obtain the contrast on the charge amplifier output image. The evaluation of the capacitance between the tip and the sample is also possible. And the charge amplifier has a potential to detect the charge transfer phenomenon just before the collision between two materials.

Keywords; charge amplifier, CTS, CPD, nc-AFM, charge transfer

## 論文審査の結果の要旨

本論文では、走査型プローブ顕微鏡（SPM）にチャージアンプ（CA）を組み込み、探針-試料間の静電容量、接触電位差（CPD (VCPD)）、電荷移動を原子レベルで観察・計測できることを示した。

近年、電子デバイスの微細化が急速に進み、表面・界面の個々の原子・分子の挙動がデバイス特性を支配し始めた。高機能な超微細デバイスの開発には、表面・界面の電子状態を高分解能で評価し、制御する必要がある。それが可能な手法として、探針を試料表面に接近させる SPM がある。その中で、トンネル電流を利用する走査型トンネル顕微鏡（STM）と相互作用力を利用する非接触原子間力顕微鏡（nc-AFM）は原子分解能をもつ。nc-AFM の応用計測として、電子状態量である CPD を高分解能観察できるケルビンプローブ力顕微鏡（KPFM）が注目されている。その他、表面・界面の電子トンネル現象、相互作用力、電荷移動を統合的に評価する手法の開発が期待されている。

本論文では、先ず SPM を概観し、自作超高真空（UHV）nc-AFM/STM および水晶振動子力センサー（共振周波数：約 30 kHz）の特長を述べた。使用した高速応答 CA（帯域：250 Hz–15 MHz）の特性を述べ、CA を含めて、入力段の探針と試料系を静電容量（CTS）とみなすモデルを提示した。それに基づき、nc-AFM 動作での CA 出力を回路シミュレータで解析し、また実測し、CA を評価した。

Si(111)-7×7 清浄表面を観察し、シミュレータによる解析と比較した。探針-試料間電圧が 0 V

のとき、CA 出力は  $CTS \times \Delta VCPD + VCPD \times \Delta CTS$  となる。VCPD 値が不均一な、ステップバンチした Si 表面の同一領域を探針-試料間距離を変えて走査し、 $\Delta CTS$  のみの応答を確認した。力センサーの共振一周期に対する CA 出力を計測し、それを積算して探針-試料間距離に対する CTS の変化をプロットした。この曲線から、探針形状と探針-試料間距離を推定した。探針の試料面からの高さを一定にして高速走査することで、表面吸着 Si 原子の  $\Delta VCPD$  に応答した原子像を取得した。KPFM の観察結果と照合し CA 出力から CTS を推量した。成果として、高速走査で  $\Delta VCPD$  の原子像が得られることを示した。

ZrB<sub>2</sub>(0001)/Si(111)を熱処理して表面にシリセン (Si の単層膜) を形成し、nc-AFM と STM で観察した。探針-試料間距離を変えながら力センサーの共振周波数と CA 出力の変化を調べた。探針がシリセンに触れた瞬間、および、シリセンと ZrB<sub>2</sub>(0001)の界面に到達したときに探針と試料間で電荷移動が起きる様子を捉えた。CA を用いた本手法が、電荷移動の検出手法に有効であることを示した。

以上、本研究では、SPM に CA を組み込むことで表面電子状態解析に原子分解能を持つ新たな手法を導入した。よって博士 (マテリアルサイエンス) の学位論文として十分価値あるものと認めた。