

非接触走査型非線形誘電率ポテンシオメトリによる Si(111)-(7×7) 表面における分極電荷密度の原子スケール観察

Atomic scale observation of polarization charge density on a Si(111)-(7×7) surface by noncontact scanning nonlinear dielectric potentiometry

東北大通研 ○山末 耕平, 長 康雄

Tohoku Univ. ○Kohei YAMASUE and Yasuo CHO

E-mail: yamasue@riec.tohoku.ac.jp

走査型非線形誘電率ポテンシオメトリ (SNDP) [1] は, 走査型非線形誘電率顕微鏡法 (SNDM) [2] に基づくナノスケール電位測定法であり, 物質表面や界面の自発分極が誘起する電位の定量的な測定を可能とする. 電位の測定は, 自発分極に起因して生じる試料表面の電気的な極性を逆極性の誘起分極で打ち消し, 実効的に表面を無極性とするために必要な試料電圧を得ることで達せられる. 極性の有無は, 探針下の最低次非線形誘電率 ϵ_3 を測定することで判定され, ϵ_3 をゼロにする試料電圧のフィードバック制御の操作量から電位が得られる. これまでに著者らは SNDP を非接触モードで動作させる NC-SNDP を用いて Si(111)-(7×7) 表面の表面双極子が誘起する電位について原子像を得ている [1]. SNDP で測定される電位 (V_0) には探針-試料表面間距離 (z) に対する依存性が存在する. 著者らは, 最近, NC-SNDP で $\partial V_0/\partial z$ を測定することで, 自発分極の誘起する電位に加えて分極電荷密度がナノスケールで定量的に得られる可能性を指摘した [3]. 既に報告したように [3], 探針-試料表面間容量を平行平板容量とみなすとき, 測定される電位は $V_0(z) = \frac{\epsilon_r}{\epsilon_r - 1} \frac{P_s}{\epsilon_0} (z + d)$ と記述される. ただし, P_s は自発分極, ϵ_0 は真空の誘電率, ϵ_r は比誘電率, d は自発分極のつくる電気二重層の幅である. 特に試料の誘電率が真空の誘電率より十分大きいとみなせる場合 $V_0 \approx \frac{P_s}{\epsilon_0} (z + d)$ であり, $\partial V_0/\partial z$ が P_s/ϵ_0 に近似的に等しいことから分極電荷密度を得ることができる. $\partial V_0/\partial z$ は, 探針-試料表面間距離を変調する場合に生じる V_0 の変化の振幅を同期検波で測定することで実験的に得ることが可能である. 以下では, Si(111)-(7×7) 表面において表面分極電荷密度像を原子スケールで得た結果を報告する.

観察は超高真空, 室温下で行った. 試料は低抵抗の n 型 Si(111) 基板とし, 1200 °C 以上の温度で数回フラッシングすることで Si(111)-(7×7) 再構成表面を得た. プローブには約 1.7 GHz で発振する LC 発振器に Pt-Ir 探針を取り付けたものを用いた. SNDM に基づく ϵ_3 の測定および距離制御を行うため, 振幅 1.4 V_{pk}, 周波数 7 kHz の交流電圧を探針-試料間に印加した. $\partial V_0/\partial z$ を得るため, 探針-試料表面間距離を変調させ, その振幅を 200 pm, 周波数を 125 Hz とした. 変調周波数は ϵ_3 のフィードバック制御の帯域幅より十分低く設定すると同時に, 距離制御の帯域幅より十分高く設定する必要がある. 走査レートは 10 s/line とした. 図に同時に得られた (a) 形状像, (b) 電位像, (c) 分極電荷密度像を示す. 形状像と電位像の比較から, 電位は各 Si アドアトム上で高く, コーナーホール上では低いことがわかる. 電位像の原子コントラストは表面原子の持つ永久双極子に由来すると考えられている [1, 4]. 分極電荷密度像においても, 原子コントラストが得られ, アドアトム上の存在する領域とコーナーホール上で異なる電荷密度を観察することに今回初めて成功した. 以上の結果は, NC-SNDP を用いて表面の分極密度を原子スケールで測定できる可能性を示している.

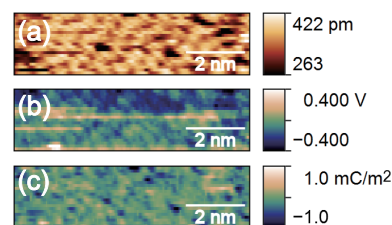


Figure: NC-SNDP images of a Si(111)-(7×7) surface. (a) topography, (b) potential, (c) surface polarization charge density.

謝辞 本研究の一部は科学研究費補助金 (23226008, 16H06360, 15K04673) の補助を受けています. 参考文献 [1] K. Yamasue and Y. Cho, Rev. Sci. Instrum. 86(9), 093704 (2015). [2] Y. Cho, A. Kirihara, and T. Saeki, Rev. Sci. Instrum. 67(6), 2297 (1996). [3] 山末, 長, 2016 年 第 62 回応用物理学会春季学術講演会 22a-H113-5, 東京工業大学 大岡山キャンパス, March 19-22 (2016). [4] Y. Cho and R. Hirose, Phys. Rev. Lett. 99 (18), 186101 (2007).