

「高度情報処理・通信の実現に向けたナノファクトリーとプロセス観測」
平成 14 年度採択研究代表者

大門 寛

(奈良先端科学技術大学院大学・教授)

「ナノ構造解析のための立体原子顕微鏡の開発」

1. 研究実施の概要

本研究の目的は、ナノ構造体の原子配列構造を直接解析するための新しい「立体原子顕微鏡」を開発することである。そのために、[検証実験]、[小型分析器の設計・製作]、[顕微鏡機能の開発]という 3 つの研究を進めている。[検証実験]は立体原子顕微鏡の測定例を増やし、この技術を確認するものである。[小型分析器の設計・製作]は、「立体原子顕微鏡」に使用する分析器を改良し、多くの人にとって使いやすいものにするものである。[顕微鏡機能の開発]は、ナノ構造や微小領域の拡大像を測定できるようにし、その一部からの「立体原子顕微鏡像」を測定できるようにするものである。ただし、3 番目の[顕微鏡機能の開発]が完成するには 10 年程度の時間が必要であるため、本研究期間においては基礎的な部分の開発とテストに留まる。

2. 研究実施内容

[検証実験]

立体原子写真における前方散乱ピークの回転角の入射光エネルギー依存性について詳しく解析し、立体写真の技術を検討した。Fig.1 は Si(001)からの Si2p 光電子放出角度分布の光エネルギー依存性である。中心の[001]ピークの回転角は、入射光エネルギーによらずに期待値より小さい値が得られた。この違いを解析した結果、晶帯軸における回折ピークとの重なりが原因であることがわかった。したがって、晶帯軸とピークが重なっているときには、原子位置を正確に求めるために前方散乱ピークと回折ピークを分離する必要があることが明らかになった。回折ピークは円偏光のヘリシティを変えても動かないので、分離は容易である。

昨年度に、露出時間の短縮とエネルギー分解能の向上が達成されたため、一つの画像が数分で得られるようになり、構造の変化を追うような研究が可

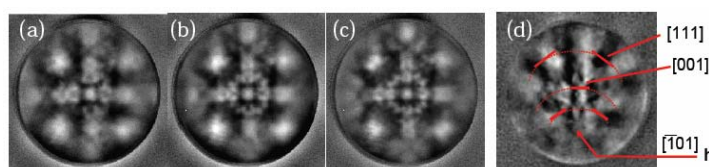


Fig.1 Si(001)からの原子立体写真のエネルギー依存性

能になった。Fig. 2 に、Cu の上に作成した Ni ナノ薄膜の立体写真の膜圧依存性を示す。Ni 膜圧が 0.4nm 程度になると、下地の Cu の構造は見えにくくなり、Ni 膜は f c c 構造をとっていることが明瞭に示されている。さらに、ここでは示さないが、各原子層ごとの磁性の情報も得られている。ナノメートルサイズの薄膜では、構造や磁性が通常物質とは異なっているため、このように原子レベルでの構造を規定した物性研究が可能になった意義は大きい。

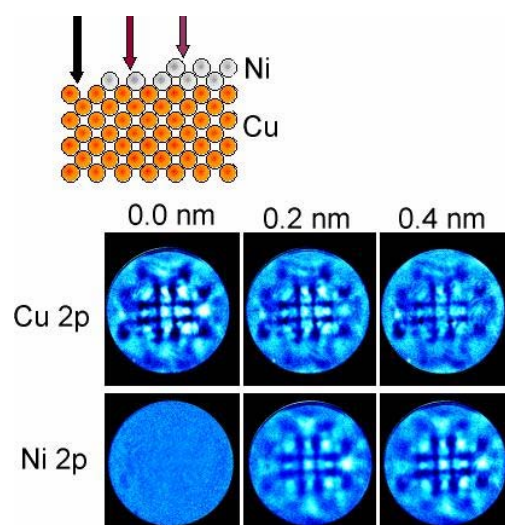


Fig.2 Cu 上の N i ナノ薄膜の原子配列

[小型分析器の設計・製作]

信頼性が高く、分解能もよく、使いやすい小型の新しい分析器を作成している。昨年度までに作成した新しい分析器を、立命館大学 SR センターに設置して性能テストを行っている。Fig. 3 に、光のエネルギー 40eV で測定した金の蒸着膜からの角度積分型光電子スペクトルを示す。放射光のエネルギー幅も入れた全エネルギー分解能として約 230 meV, $\Delta E/E$ は 0.55% という結果が得られている。従来よりも

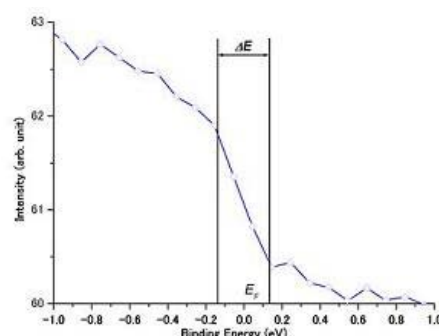


Fig.3 エネルギー分解能の評価

分解能が数倍向上しているが、調整によりさらに向上できる予定である。Fig.4 に、HOPG から得られたフェルミ面の画像を示す。励起光が水平直線偏光の放射光であるため、上下が暗くなっており、フェルミ面が p z 軌道からできていることが示されている。このような軌道解析が簡単に行える分析器として活躍が期待される。また、可変アパーチャーと、フィラメント交換が容易な小型電子銃が導入され、使いやすさが格段に向上した。

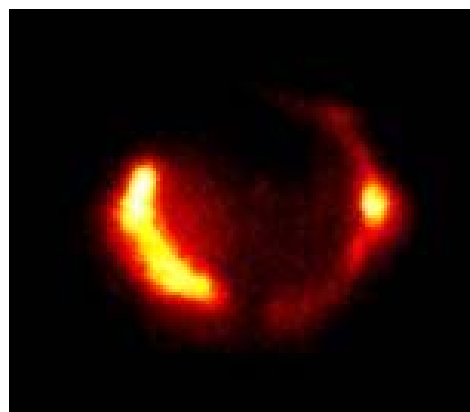


Fig.4 HOPG のフェルミ面

[顕微鏡機能の開発]

立体原子写真法をナノ構造の解析などの応用分野に適用するためには、低い倍率で像も見えるような機能を付加し、見たいところを選べるようにする必要がある。この機能の開発により、微小領域の解析ができるようになり、各種分析や基礎物性の解析に適用しやすくなる。そのためにはレンズシステム（特許申請中）を試料と分析器の間に挿入する。この

レンズシステムは、各レンズの電位のかけ方を変えることで、通常の顕微鏡像と、原子配列の立体写真の像を取りわけることができる。この方法によって、個々のナノ粒子の構造と電子状態の解析が可能になる。

17年度は、Fig.5の広角対物レンズの製作を行い、電子ビームの収束のテストを行った。試料に電子銃から500ミクロン程度の大きさの電子線を照射し、 $\pm 50^\circ$ という非常に広い角に散乱された電子を収束し、2.5mm程度の大きさに絞れることを確認した。このレンズの拡大率が5倍であるので、この大きさは妥当である。電子を集めるという性能を、従来の最高の収率を誇るCMAの立体角0.8srと比較して、今回の立体角は2.4sr程度であり、約3倍の性能が得られている。また、角度分解型の測定器に取り付けることを考えると、これまで $\pm 10^\circ$ 程度が限界であったのに対して5倍以上向上することが可能になった。表面すれすれから表面垂直まで一度に測定できるようになるため、深さ依存性が一度に解析できるようになるなど、応用範囲が広い成果である。

また、全体の顕微鏡システムとしての設計も進めており、顕微鏡としての全体の装置の設計も進めている。



Fig.5 広角対物レンズ

3. 研究実施体制

「ナノ構造解析のための立体原子顕微鏡の開発」グループ

- ①研究分担グループ長：大門 寛（奈良先端科学技術大学院大学 物質創成科学研究科、教授）
- ②研究項目：ナノ構造解析のための立体原子顕微鏡の開発

4. 主な研究成果の発表（論文発表および特許出願）

（1）論文（原著論文）発表

- Si(111)2×2-Fe surface reacted with nitric oxide,
K. Hattori, T. Nishimura, K. Kataoka, Y. Shimamoto, H. Daimon,
Thin Solid Films, 464-465,5-9(2004).
- Atomic Stereo-photographs of Cu Single Crystal,
F. Guo, F.Matsui, T.Matsushita, H.Daimon,
Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena,144-147, 1067-1070(2004).
- Magnetism-induced symmetry breaking in photoelectron diffraction patterns,
A.Chasse, W.Kuch, m.Kosugi, X.Gao, F.Offi, S.Imada, S.suga, H.Daimon, J.Kirschner,
Phys. Rev. B. 71, 01444-1-10,(2005).
- Visualization of in-plane dispersion of hole subbands by photoelectron spectroscopy,
S.Nishino Takeda, N.Higashi, H.Daimon,
Physical Review Letters,94, 037401-1-4,(2005).
- Anisotropy of surface vibration measured by temperature dependence of RHEED spot intensity,
M.Hashimoto, S.Takeda, H.Daimon,
Phys.Rev.B.71, 11314-1-4,(2005).
- Approach for simultaneous measurement of two-dimensional angular distribution of charged particles: Spherical aberration correction using an ellipsoidal mesh,
H. Matsuda, H. Daimon, M. Kato, M. Kudo,
Physical Review E.71, 066503-1-8,(2005)
Virtual Journal of Biological Physics Research, July (2005)
- Scanning Tunneling Microscopy Observation of Germapericycline on a Graphite Surface,
J.Nayeem, S.Nishino Takeda, F.Matsui, K.Hattori, H.Daimon,
Journal of the vacuum Society of Japan, 48, 304-308,(2005).
- Atomic-orbital analysis of the Cu Fermi surface by two-dimensional photoelectron spectroscopy,
F.Matsui, H.Miyata, O.Rader, Y.Hamada, Y.Nakamura, K.Nakanishi, K.Ogawa, H.Namba,
H.Daimon,
Physical Review B, 72, 195417-1-5, (2005).

（2）特許出願

H17 年度出願件数：0 件（CREST 研究期間累積件数：1 件）