

先端追跡

[R-192] 表面力測定装置のマイクロトライボロジー分野への応用

表面力測定装置 (Surface Forces Apparatus, SFA) のトライボロジー研究への応用は Israelachvili らによって 1980 年代後半に始められた¹⁾。SFA では、表面間距離の測定に等色次数干渉法を用いる。この技術はトライボロジー解析においては、界面膜の動的膜厚変化やダイラタンシー、界面変形や摩擦など、せん断に付随する各種の動的現象の直接観察を可能にする。膜厚に比べて接触界面の面積が圧倒的に大きいことも、分子層オーダーの薄膜物性の理解には有利である。このような技術的特徴から、SFA は他の手法では得られない画期的な知見を数多くもたらし、特に界面膜のせん断下での構造変化・相転移と摩擦の関連の理解等に大きく貢献してきた。最新の報告例として、フッ素系界面活性剤 LB 膜のせん断に伴う界面構造の変化と摩擦力の不連続的な減少²⁾、滑り面と垂直方向に微小の振動を加えることにより得られる低摩擦状態³⁾などがあり、ナノレベルでの摩擦制御の新しい可能性を示すものといえる。また、技術的側面の進歩も見逃せない。Klein らは従来の SFA の摩擦力測定法よりも 3 桁程度高感度な Surface Force Balance を自作した。これにより、低分子液体の薄膜がその膜厚減少に伴って秩序構造化を始める臨界膜厚付近における、微弱なせん断応力の測定に成功している⁴⁾。

SFA によるマイクロトライボロジー研究は、近年の SFA 装置の急速な普及を背景に、新しい局面を迎えつつある。今後、応用範囲の拡大と共に一層大きな進展が期待される。

文 献

- 1) J.N. Israelachvili et al.: *Science* **240**, 189 (1988)
- 2) S. Yamada and J. Israelachvili: *J. Phys. Chem. B* **102**, 234 (1998).
- 3) M. Heuberger et al.: *J. Phys. Chem. B* **102**, 5038 (1998).
- 4) J. Klein and E. Kumacheva: *J. Chem. Phys.* **108**, 6996 (1998).

(花王(株) 構造解析センター 山田真爾)

[R-193] RHEED 強度振動の解釈に対する最近の動向

薄膜成長時に観察される RHEED 強度振動は、その振動周期が成長単位原子層の形成に対応することから、薄膜成長モニターとして特に原子レベルの制御を必要とするデバイス作成には欠くことのできない評価方法となっている。RHEED 強度振動の解釈として一般に次のような考え方がある¹⁾。ステップ密度モデルは電子線が主としてステップエッジによって散乱されるとして、ステップ密度の高い(粗い)表面ほど反射強度は弱くなるという考えである。また、運動学的回折理論による解釈は、off Bragg 条件において、成長原子層が完成する度に成長最表面からの反射電子波の反位相成分は消滅し、反射強度はピークを迎えるという考えである。しかしながら、このような解釈だけでは説明できない現象もあり、動力学的回折理論による一般的解釈が期待されている。

最近、Korte らは上述のステップ密度モデルの解釈に反する結果を出している²⁾。彼らは Si(001) 表面において 400 個の表面格子のスーパーセルを基に散乱ポテンシャルを摂動で取り扱った動力学的計算から、鏡面反射強度はステップ密度の増加と伴に系統的に増加するということである。また、Braun らは従来の運動学的解釈では理解できない電子線の視射角変化に対する振動の位相変化について、成長原子層のポテンシャルの成長を仮定した動力学的計算から GaAs や AlAs の実験結果をよく説明している³⁾。これについては、既に報告されている計算手法⁴⁾と同様と思われる。注目すべきはエネルギーフィルターを備えた RHEED 振動観察において、鏡面反射電子ビームには振動の位相に影響を及ぼすような非弾性散乱成分は含まれていないことを示したことである。

文 献

- 1) たとえば川村隆明: *表面科学* **18**, 570 (1997); 坂本純徳: *応用物理* **66**, 1298 (1997).
- 2) U. Korte and P.A. Maksym: *Phys. Rev. Lett.* **78**, 2381 (1997).
- 3) W. Braun et al.: *Phys. Rev. Lett.* **80**, 4935 (1998).
- 4) Y. Horio and A. Ichimiya: *Ultramicroscopy* **55**, 321 (1994).

(大同工大 堀尾吉巳)

[R-194] 密度汎関数法を用いた金属のエピタキシャル成長の研究

密度汎関数法を用いた金属表面上の金属膜のエピタキシャル成長の理論的研究が進んでいる。密度汎関数法はこのとき成長過程の原子の吸着や表面拡散に関するパラメーターの計算に用いられている。表面拡散は一般には吸着原子が固体表面上を振動しながら移動する hopping process による。しかし、Bassett¹⁾らによって Pt(110) 上の Pt 原子の表面拡散は下地表面の原子と入れ替わりながら移動する exchange process によることが FIM で観察された。その後 Pt(100), Ir(110), Ir(100) などでも観察されている。このことが発端になり前述の研究が進んだようである²⁾。

さて計算によれば、Al 原子の表面拡散は Al(110), Al(100) 上では exchange process となるが Al(111) 上では hopping process となる。しかし、Al(111) 上のステップの {111}-facet や {100}-facet を直角に拡散する原子はエッジ上で exchange process となる。この過程から Al(111) 上では {111}-facet と {100}-facet の側面をもつ 6 角形の島がエピタキシャル成長することを予測している³⁾。Ag(100) 上の Ag 原子は hopping process で拡散するがステップを直角に拡散する原子は exchange process となる。また、Ag(100) 上では {110}-facet をもつ 4 角形の島がエピタキシャル成長、Ag(111) 上では Al と同様に 6 角形の島のエピタキシャル成長を予測している⁴⁾。面心立方結晶の (100) 上の表面拡散は定性的にはより多くの近接した原子をもつ exchange process が安定で障壁が小さいと説明されているが⁵⁾、Ag(100) では違った結果になっている。後者は吸着原子と広範囲の下地原子との相相互作用を計算しているのでこの違いは当然であろう。

以上のことより表面拡散する原子は表面の状態に合わせて変化する性質をもつと考えることができ興味深い。

文 献

- 1) D.W. Bassett and P.R. Webber: Surf. Sci. **70**, 520 (1978).
- 2) 樋口眞次: 表面科学 **17**, 230 (1996).
- 3) R. Stumpf and M. Scheffer: Phys. Rev. B **53**, 4958 (1996).
- 4) B.D. Yu and M. Scheffer: Phys. Rev. Lett. **77**, 1095 (1996).

(日大工 柳原隆司)

[R-195] 熱反応による Si の原子層エッチング

ナノメータ加工技術の1つの候補として、半導体を3次元にわたって原子一層ずつエッチングする、いわゆる原子層エッチング技術が提案されている。この場合、ナノメータスケールの微細加工を達成するためには、電子、イオン、あるいはX線などを細く収束させたビームによってエッチングを誘起することが要求される。これまでに、このようなビームによるエッチングが実際に原子層単位で進行すること、また、エッチングされた表面が原子レベルで平坦であることを実証した報告はない。この技術の実現には、ハロゲンなど反応種の均一な吸着層の形成はもとより、ビーム照射による表面励起反応の原子レベル制御など、いくつかの重要な研究課題が残されている。最近、ビーム利用ではないが、熱反応を制御することにより Si のエッチングが2次元方向に優先的に進行することが報告された。米国の Boland および Weaver らの報告¹⁻³⁾によると、臭素ガス雰囲気中で Si(111) 表面を 400°C でアニールすると、表面の 7×7 構造の Si アドアトムが選択的にエッチングされて、下のレストアトム層が現われてくる。ここでレストアトムは臭素によって終端されている。これは、臭素雰囲気中で複数の臭素原子がアドアトムに反応し、アドアトムの臭化物が形成されるが、上記のアニールによってこれらが選択的に蒸発するために、臭素で終端されたレストアトムが残されるものと解釈されている。同様な選択エッチングの可能性は塩素を利用した熱反応でも報告されている⁴⁾。また、臭素中でさらに高温にすると、これらのレストアトム層が特定の結晶方向に沿ってエッチングされやすいことも見い出されている。いずれの例も Si の熱反応の異方性を示すものであるが、このような異方性発現の機構解明のなから、今後、ビーム励起による3次元原子層エッチングの手掛かりが見い出されることを期待する。

文 献

- 1) R.J. Pechman et al.: Phys. Rev. B **52**, 11412 (1995).
- 2) B.S. Itchkawawitz et al.: Surf. Sci. **385**, 281 (1997).
- 3) J.J. Boland and J.H. Weaver: Physics Today **51**, 34 (1998).
- 4) J.J. Boland and J.S. Villarrubia: Phys. Rev. B **41**, 9865 (1990).

(アトムテクノロジー研究体 持地広造)