微傾斜表面からの RHEED 菊池図形[†]

堀 尾 吉 己

大同工業大学電気電子工学科 ㊚ 457-8530 愛知県名古屋市中区滝春町 10-3

(2005 年 6 月 16 日受理；2005 年 8 月 10 日掲載決定)

RHEED Kikuchi Pattern from Vicinal Surface

Yoshimi HORIO

Department of Electrical Engineering and Electronics, Daido Institute of Technology
10-3 Takiharu-cho, Minami-ku, Nagoya, Aichi 457-8530

(Received June 16, 2005 ; Accepted August 10, 2005)

RHEED patterns have been observed for vicinal surfaces of Si(001) and Si(111) polished into vicinal angle $\alpha = 2.5^\circ$ and 3.1° , respectively. It was confirmed that both the glancing angle θ and the vicinal angle α can be estimated by the geometric relation between the diffraction spots and Kikuchi lines. For the step down incidence, bulk information such as Kikuchi lines and diffraction spots arisen from the three dimensional crystal lattices is mainly obtained. For the step up incidence, on the contrary, surface properties such as fractional order spots arisen from surface super structure is mainly obtained. In this study, features of the RHEED patterns taken from the vicinal surface are summarized and compared with calculated ones. It is concluded that these features can be explained by the escape length of electrons and the shadow effect by the step edges.

1. は じ め に

反射高速電子回折 (RHEED) 法は表面科学の分野で用いられている評価・分析手法であり、薄膜の成長モニターとしての利用や表面構造解析ではかなり成熟した手法となっている^{1~3)}。さらには、RHEED 励起により発生するオージェ電子⁴⁾や特性 X 線^{5, 6)}を用いた吸着原子構造の解析や組成分析への応用、あるいは回折電子の損失エネルギー分析^{7, 8)}とその展開も期待されるところである。しかしながら表面の形態評価となると、その利用は十分であるとは言えないのが現状であろう。それは走査プローブ顕微鏡 (SPM) と異なり、RHEED では電子の可干渉領域内の平均情報であり、局所的な構造情報を探るのが困難であることによるものと考えられる。薄膜成長の“その場”評価として極めて有効な RHEED において、薄膜の結晶性および成長様式の評価とともに表面形態情報の取得の可能性を探ることは今後の発展が期待されるナノ構造体の評価に向けた応用にとっても重要な

課題であると考えらる。

今日のナノ科学技術分野では原子レベルの構造物の構築と評価が必要である。中でも表面原子ステップはエッチング過程^{9, 10)}や結晶成長過程¹¹⁾あるいは分解過程などの活性サイトとしてナノ構造体の形成に重要な役割を担っている。この表面原子ステップの局所的な構造・形態の観察には SPM が主に用いられている。一方、RHEED 法においても平均情報ではあるが 0.1° 程度の極めて小さな微傾斜角を有す表面形態情報が得られることは既に報告している^{12, 13)}。本研究では Si(001) および Si(111) 単結晶表面を意図的に数度の微傾斜角で研磨した試料表面を用い、RHEED 図形の特に菊池図形と回折斑点との幾何学的位置関係について注目して観察し、計算シミュレーションとの比較検討によりその特徴を整理した。また、回折斑点と菊池図形との幾何学的位置関係から試料の微傾斜角と入射電子の視射角を求めた。このような基礎的研究は意外と報告例が少なく、特に菊池図形を含めた議論はあまり行われていないように思われる。

回折電子の強度を解析するには、動力学的回折理論と運動学的回折理論がある。表面の原子構造解析には電子の多重散乱過程を考慮した厳密な動力学的計算が必要で

[†] 第 24 回表面科学講演大会 (2004 年 11 月 8 日~11 月 10 日) にて発表

E-mail: horio@daido-it.ac.jp

あるが、表面形態を反映する回折図形の幾何学や回折斑点の形状については運動学的計算でも説明できる場合が多い。ここでは後者の計算を用いるが、実際の RHEED 図形には動力学的効果も含まれており、運動学的計算でどこまで実験結果を再現できるかを見極めることも興味のあるところである。

2. RHEED 図形内の回折斑点と菊池図形の計算

運動学的回折理論では、表面形態が RHEED の回折斑点形状や斑点位置に影響を及ぼす要因として次の4つが考えられる。まず第1は入射電子線の可干渉距離である。すなわち入射電子の可干渉領域が RHEED の検出する平均情報となる。第2は結晶分域のサイズや形態に起因する形状因子であり、これはラウエ関数によって与えられる。一般に RHEED では入射方向に $1,000\text{\AA}$ 程度におよぶ可干渉領域を有するため、その中に存在する結晶分域のサイズや形態は形状因子によって計算され、回折斑点の形状を決定する。第3は屈折効果である。可干渉領域内に存在する3次元島のファセット面や微傾斜表面では、電子線が入射あるいは出射する際に表面で屈折を受け、本来の回折斑点位置からわずかに変移する。特に低視射角においてはその変移が大きいため、逆にそれを利用した表面の形態情報が取得できる。第4は回折現象が平坦な表面での反射による場合は2次元周期性を反映する逆格子“ロッド”を用いることができるが、3次元島の存在やラフ表面の場合は結晶内部を入射電子が貫通し、透過回折現象が生じる。そのため3次元周期性を反映する逆格子“点”に由来する回折斑点が支配的となる。

また、RHEED 図形内には回折斑点以外にも菊池図形が存在する。特に、入射電子の視射角が大きくなると、結晶内部に侵入する電子の割合も増え、それらが非弾性散乱を経て菊池図形のコントラストを増す。

ここでは数度の微傾斜表面を対象として、回折斑点および菊池図形の幾何学的位置関係に注目した計算を行ったので以下に述べる。一般に RHEED 法は高速電子線を低い視射角 ($0^\circ \sim 7^\circ$ 程度) で結晶試料表面に入射するため、主として表面数原子層からの反射回折が支配的となり、表面構造に敏感である。したがって、結晶表面近傍の2次元原子配列に由来する2次元逆格子ロッドとエwald球を用いた作図から反射電子の出射方向が決定される。その際、Fig. 1に示すように、電子線は微傾斜表面の入射面および出射面で屈折を受けるため、特に低角で入射あるいは出射する場合には、表面垂直方向に進行方向を曲げる。実際には微傾斜表面はステップとテラスから構成される面であるが、ここではそれらが規則的に配

Fig. 1. Refraction of electron beam at incident and outgoing planes. Symbols K_0 and k_0 denote wave vectors outside and inside of crystal, respectively.

列しているものと仮定し、シミュレーションではそれらを平滑化（あるいは平均化）した表面を想定して屈折効果を計算した。なお、屈折効果は Si の平均内部ポテンシャル 12 eV を用いて計算を行った。

結晶内部の3次元格子面に由来する逆格子“点”を用いた解析も逆格子“ロッド”の場合と同様に行った。この逆格子“点”には数十 $\text{\AA}$ 程度の結晶分域に相当する膨らみを与え、この逆格子“球”を用いてエwald球との交わりを判別した。この程度の結晶分域サイズは表面からの入射電子の侵入深さにほぼ相当することから採用した。電子の入射方向の可干渉距離は長いから、試料が単結晶であれば、入射方向につぶれた逆格子球を想定しなければならないが、ここではそこまでの厳密な取り扱いには行っていない。また、ステップを下る方向に電子線を入射し、結晶内部からの回折電子が低い角度で出射する場合、その回折電子の出射面はテラス面よりもステップ端面が支配的になると考えられる。テラス面からの出射とステップ端面からの出射では屈折の効き方が異なるため、この両出射面についてもそれぞれ計算を行い、実験と比較した。

一方、一部の入射電子は非弾性散乱過程を経ながら結晶内部にまで侵入する。特にフォノン散乱による非弾性散乱電子において、損失エネルギーは 1 eV 以下でほとんど無視できるが、その進行方向は広がり示すため、多くの3次元格子面によるブラッグ反射条件を満たし、菊池電子として表面から出射して菊池図形を形成する。この菊池電子は表面から数十 $\text{\AA}$ 内部で発生した後に表面から出射するため、出射面においてのみ屈折効果を考慮した。

3. 実験方法

用いた試料は Si(001) および Si(111) 単結晶で、サイズは $15 \times 5 \times 0.5 \text{ mm}^3$ である。試料の研磨には研磨装置 (ECOMET III, BUEHLER 社製) を用いた。意図した微傾斜角度に研磨するため、予め真鍮で傾斜試料台を作り、その上に試料を蝋付けした。まず粗研磨として研磨紙 #2000 を用い、その後の鏡面研磨ではポリバスとアルミナパウダー ($0.03 \mu\text{m}$) を用いた。作成した研磨表面は、注意深く肉眼で観察すると僅かではあるが極微小な傷の存在が確認できた。

試料の傾斜方向は Fig. 2 に示すように Si(001) については $[110]$ 方向に、Si(111) については $[10\bar{1}]$ 方向にいずれも微傾斜角が 3° となるように研磨した。しかしながら X 線回折 (XRD) により確認したところ、Si(001) 面の試料では 2.7° 、Si(111) 面の試料では 3.3° の微傾斜角であった。また、後節で述べる RHEED 図形の計算シミュレーションによる実験 RHEED 図形の再現性から、Si(001) は 2.5° 、Si(111) は 3.1° の微傾斜角であることがわかり、いずれも XRD の結果と比べて 0.2° 小さな値であった。これは XRD 測定における系統誤差と考えられる。

微傾斜試料は超高真空 RHEED 装置に装着し、 3×10^{-9} Torr の基本真空度のもとで約 $1,200^\circ\text{C}$ の高温アニールを数回施して表面の清浄化を行った後、RHEED 観察を行った。実験に用いた電子線の加速電圧は 10 kV である。

Fig. 2. Atomic structures of Si(001) and Si(111) vicinal surfaces.

Si(001) についてはステップダウン方向である $[110]$ 入射とステップアップ方向である $[\bar{1}\bar{1}0]$ 入射の両方位について観察を行った。また Si(111) についてもステップダウン方向である $[10\bar{1}]$ 入射とステップアップ方向である $[\bar{1}01]$ 入射の両方位について観察を行った。ただし、試料マニピュレータは 180° の回転ができないため、逆方位入射の実験観察では毎回試料を RHEED 装置から取り出し、反対向きに試料を設置した後、再度表面の清浄化を行ってから観察した。したがって、全く同じ状態の試料表面ではないが、RHEED 観察から表面の状態に特に有意な変化は認められなかった。

4. 結果および考察

微傾斜表面を観察する前に、まずジャスト面 (微傾斜角 $\alpha = 0.0^\circ$) の Si(001) と Si(111) を RHEED 観察し、計算シミュレーションとの比較を行ったので Fig. 3 (a) および Fig. 3 (b) にそれぞれ示す。Fig. 3 (a) の Si(001) 面の入射条件は、 $[110]$ 方位で視射角 $\theta = 3.1^\circ$ であり、Fig. 3 (b) の Si(111) 面では $[10\bar{1}]$ 方位で視射角 $\theta = 3.6^\circ$ である。計算 RHEED 図形では、表面からの 2 次元反射の中で、特に基本 (整数次) 反射斑点を○印で示した。Si(001) 清浄表面では Fig. 2 に示すような 2 重分域の 2 倍周期の超構造が現れるため、 2×1 超格子斑点群を×印で、 1×2 超格子斑点群を+印で区別して示した。実験 RHEED 図形では 2×1 と 1×2 の両超格子斑点がほぼ

Fig. 3. Comparison between experimental and calculated RHEED patterns for (a) Si(001) just surface and (b) Si(111) just surface. Symbols in the calculated patterns are denoted as follows, ○ : 2 dimensional (2D) integer, × : 2×1 fractional, + : 1×2 fractional, ▽ : 7×7 fractional, and ▽ : 3 D integer spots.

同程度の強度で観察されることから Fig. 2 に示すような 1 原子高さのステップで隔てられた 2×1 と 1×2 の両超構造テラス表面がほぼ同じ面積比で存在することがわかる。一方、Si(111) 清浄表面では 7 倍周期の 7×7 超構造が現れるため、それらの超格子斑点を小さなドットで示す。2 次元逆格子ロッドを用いて計算された RHEED 図形の幾何学は Si(111) および Si(001) の両試料とも実験 RHEED 図形とよく一致している。ただし、ここでは回折強度の計算は行っていない。

また、入射電子が結晶内部に侵入し、結晶内部の 3 次元格子によって反射回折して出射する回折電子の斑点を ∇ 印で示す。このような回折電子は表面から数十 Å 内部から発生すると考えられるため、その程度の深さ領域では禁制則が十分満たされない可能性があり、さらに表面構造の存在や動力学的効果なども加わることから、禁制反射斑点も含めて計算している。ジャスト面のような平坦な表面で入射視射角が浅い場合には表面の 2 次元格子による反射回折が支配的であり、結晶内部の 3 次元格子による回折斑点は RHEED 図形には現れない。しかしながら、結晶内部の回折現象が 2 次元反射強度に影響を及ぼすことは多重散乱効果として認められる。例えば Fig. 3 の矢印で示す 2 次元回折斑点 (○印) と 3 次元回折斑点 (∇ 印) が重なる場合、実験 RHEED 図形には斑点強度の増大が一般に認められる。

一方、菊池図形については 0 次ラウエ帯上の主な逆格子点に起因する菊池電子を屈折効果も考慮して計算を行

った。入射電子の加速電圧は 10 kV と高速電子としては低い値であるため、菊池電子の強度は弱くコントラストの悪い菊池図形となっているが、計算による菊池図形は実験のそれとよく対応していることがわかる。実験 RHEED 図形には弱いながらも禁制反射に起因する菊池線も認められるため、計算においても禁制反射の菊池線を含めた。これらジャスト面からの実験 RHEED 図形にはシャドーエッジ (S.E.) に平行に走る菊池線はほとんど認められず、次に示す微傾斜表面のステップダウン方向の結果と異なる点である。なお、菊池線の指数表示は以後の RHEED 図形についても同様であるため以後の図では省略した。入射方位が逆になれば当然ながら菊池図形は左右反転する。

さて、微傾斜角 $\alpha = 2.5^\circ$ の Si(001) 微傾斜表面に対して、ステップダウン方向である $[110]$ 入射方位で観察された RHEED 図形を計算結果と並べて Fig. 4 に示す。入射電子の視射角は $\theta = 1.0^\circ$ から 12.4° まで幅広く変化させた。特に低視射角の $\theta = 1.0^\circ$ と 2.7° では特徴的 RHEED 図形となっており、0 次ラウエ帯上の回折斑点は極めて長いストリーク状に伸びると同時にそのストリークの上に複数の斑点列が確認される。これは既に報告している微傾斜表面特有のステップ周期間隔を反映する斑点列と考えられるが^{12, 13)}、ここでは詳細な解析は行っていない。入射視射角を高くすると、このような特徴は弱くなり、消失する。計算 RHEED 図形内の矢印で示す 2 次元回折斑点 (○印) と結晶内部からの 3 次元回折

Fig. 4. Comparison between experimental and calculated RHEED patterns in the step down direction $[110]$ for Si(001) vicinal surface ($\alpha = 2.5^\circ$). Symbols in the calculated patterns are the same as Fig. 3. Especially in $\theta = 12.4^\circ$, symbol Δ represents 3D integer spot escaped from the step edge plane without refraction.

斑点 (▽印) が重なる場合は、一部例外もあるが、一般に実験 RHEED 図形内の矢印で示すように強度増大が観察される。また、 $\theta=2.7^\circ$ や 4.9° の実験 RHEED 図形内の矢印で示すように、菊池線と交わる 3 次元回折斑点にも強度増大が観察される。 $\theta=7.7^\circ$ や 12.4° の高視射角の RHEED 図形では 2 次元回折斑点と異なる位置に 3 次元回折斑点も観察され、結晶内部からの回折電子の寄与が大きくなっていることがわかる。特に $\theta=12.4^\circ$ のように 3 次元逆格子点を反映する菱形に配列する回折斑点も出現する。この場合、結晶内部からの回折電子がテラス面から脱出する際に屈折効果を考慮した回折斑点 (▽印) よりむしろ屈折効果を考慮しないで計算した回折斑点位置 (これを△印で示す) の方が実験結果をよりよく再現することがわかる。結晶内部からの回折電子がステップ端面から脱出すれば、ステップ端面に対してほぼ垂直方向の脱出となるため屈折効果はあまり効かないと考えられる。したがって、菱形に配列した回折斑点はステップ端面からの脱出によるものと考えられる。このような低視射角で脱出する方向と逆向きにこの微傾斜表面を眺めると、ステップ端面の見える割合がテラス面よりも大きくなることからステップ端面からの脱出が支配的であることを理解できる。また、狭いステップ端面からの脱出によりストリーク強度分布を生むものと考えられる。このように特に低角で脱出する回折電子の場合、屈折効果による有意差を確認できるが、約 4° 以上の視射角で脱出する場合は、一般に評価困難である。

菊池図形についても計算結果は実験をよく再現している。特に S.E. に平行な 004 菊池線は実験 RHEED 図形内に強く現れており、これはジャスト面の場合とは異なる特徴である。後で考察するが、結晶内部で発生した菊池電子はこのようなステップダウン方向ではあまり減衰せずに出射できるためと考えられる。また、菊池図形と回折斑点の位置関係から微傾斜角 α および視射角 θ を決定することも可能である。

一方、ステップアップ方向である $[\bar{1}\bar{1}0]$ 入射方位の入射において観察された RHEED 図形を計算結果と並べて Fig. 5 に示す。視射角 θ は比較のため Fig. 4 にできるだけ対応させた。ステップアップ方向ではステップダウン方向とかなり様相の異なる図形となっており、むしろジャスト面の RHEED 図形の S.E. 近傍が S.E. の下に潜り込んだ図形に似ている。すなわち表面の 2 次元格子を反映する回折図形が支配的となっている。この場合においても結晶内部の 3 次元格子による回折斑点位置と一致する場合や菊池線と重なったときの回折斑点強度は矢印で示すように一般に強度増大が観察される。また、 1×2 表面超構造の斑点 (+印で示す) 強度は 2×1 表面超構造の斑点 (×印で示す) 強度と比べて全般に弱いことがわかる。この特徴は Fig. 4 のステップダウン方向においても同様である。すなわち、 $\alpha=2.5^\circ$ の微傾斜表面では 1×2 テラス表面の占める割合が小さくなるような方向に SA ステップと SB ステップのステップバンチングが生じ、1 原子ステップが 2 原子ステップあるいはその整

Fig. 5. Comparison between experimental and calculated RHEED patterns in the step up direction $[110]$ for Si(001) vicinal surface ($\alpha=2.5^\circ$). Symbols in the calculated patterns are the same as Fig. 3.

数倍に移行するステップダイナミクスが働いたものと思われる。

微傾斜角 $\alpha = 3.1^\circ$ の Si(111) 清浄表面についてもステップダウン方向である $[10\bar{1}]$ 方位とステップアップ方向である $[\bar{1}01]$ 方位の実験 RHEED 図形を計算結果と並べて Fig. 6 に示す。ステップダウン方向の Fig. 6 (a) は視射角 $\theta = 3.1^\circ$ の RHEED 図形であるが、 7×7 超格子斑点はほとんど確認できず、むしろ点線の円で囲んだ位置に結晶内部からの 3 次元回折斑点が確認される。そこで、Fig. 6 (b) に示すように視射角を下げて $\theta = 1.6^\circ$ にするとわずかに 7×7 超格子斑点がストリーク状に観察されるが、依然として結晶内部からの 3 次元回折斑点と菊池線が強く観察され、ジャスト面からの RHEED 図形とはかなり様相が異なる。また、菊池図形については特に S.E. に水平な複数の菊池線が強く現れる点は Fig. 4 の微傾斜 Si(001) の場合と同様である。

一方、ステップアップ方向の視射角 $\theta = 3.4^\circ$ では数多くの 7×7 超格子斑点がストリーク状に観察され、ジャスト面からの RHEED 図形の特徴に比較的似ている。また、S.E. 近傍領域が S.E. の下に潜り込んでいる点は Fig. 5 と同様である。点線の丸で囲んだ 1 次ラウエ帯上

のいくつかの回折斑点は結晶内部からの回折斑点と重なり、強度増大が確認される。この非対称入射の菊池図形は左右非対称であるため、Fig. 6 (c) のステップアップ方向では Fig. 6 (a), (b) のステップダウン方向と左右反対になることが確認され、実験の菊池図形は計算結果と対応している。

Fig. 2 からわかるように、Si(111) では 1 原子高さ ($d_{111} = 3.14 \text{ \AA}$) のステップを仮定すると、今回用いた微傾斜角 $\alpha = 3.1^\circ$ の微傾斜表面の平均テラス幅は $L = 58 \text{ \AA}$ となる。一方、 7×7 単位網の $\langle 110 \rangle$ 方向の 1 辺の長さは約 $27 \text{ \AA}$ であるため、今回の微傾斜試料ではテラス幅あたり約 2 個分の 7×7 超格子が存在することになる。このような数少ない 7×7 超格子により、分数次の逆格子ロッド強度は弱く、ステップ方向に広がる。これがストリーク状の回折斑点を生む原因と考えられる。

また、図には載せていない別の試料であるが、微傾斜角 $\alpha = 2.3^\circ$ の Si(111) 微傾斜表面では 5×5 表面超構造を観察した。Si(111) 表面上に安定的に存在する 2 次元島は 5×5 構造であることが報告されており¹⁴⁾、微傾斜表面のテラスにも同様なステップカインエティクスが働いているものと考えられる。詳細については更なる実験データの蓄積を必要とするため、ここでは実験結果例の報告に留める。

これまでの結果を Fig. 7 を用いて以下のように考察した。ジャスト面の場合は Fig. 7 (a) に示すように入射電子は表面全体を照射できるため、表面からの 2 次元回

Fig. 6. Comparison between experimental and calculated RHEED patterns for Si(111) vicinal surface ($\alpha = 3.1^\circ$). (a) and (b) show RHEED patterns in the step down direction $[10\bar{1}]$ and (c) in the step up direction $[\bar{1}01]$. Symbols in the calculated patterns are the same as Fig. 3.

Fig. 7. Escape length l from depth d to the surface and electron irradiated area indicated by hatching for (a) just surface and (b), (c) vicinal surfaces. (b) and (c) show step down and step up directions, respectively.

折が主となる。一部の電子は表面内部に数十Åまで侵入し、結晶内部の3次元格子による回折や菊池電子を生む。

ところが Fig. 7 (b) に示すように微傾斜表面のステップダウン方向の入射では、入射電子が照射する表面は図の斜線で示すようなステップ端からある一定の距離にある表面領域となり、全表面の一部に限られる。したがって、表面からの2次元回折の割合は減少し、表面構造情報は減少する。反対に、結晶内部で生まれる3次元回折電子や菊池電子は表面に到達する距離(脱出距離) l が短くなるため、3次元回折斑点や菊池図形の強度は増大すると考えられる。

一方、Fig. 7 (c) に示すようにステップアップ方向の入射では、入射電子は表面全体を照射するため表面からの2次元回折強度はステップダウン方向より強い。ただし、テラス表面からの反射回折電子の一部はステップ端を引っかけると屈折の影響を受け、ストリーク状となる。また、一部の電子は結晶内部に侵入し、3次元回折電子や菊池電子を生むが、表面に到達する距離 l が長くなるため大きな強度減衰を受ける。もちろん、脱出視射角が大きければこれらの電子の表面到達距離 l は短くなり、RHEED 図形の高角脱出領域に結晶内部からの回折電子が出現する可能性は高くなると考えられる。

Si(001) 微傾斜表面や Si(111) 微傾斜表面で結晶内部で発生する菊池図形や3次元回折斑点がステップダウン方向の入射で比較的強く現れ、一方、ステップアップ方向の入射では逆に表面超格子斑点強度が比較的強く現れたのは上述の理由によるためと考えられる。特に Si(111) 微傾斜表面の1原子高さのステップ高さは $d_{111} = 3.14 \text{ \AA}$ であり、Si(001) 微傾斜表面の1原子高さのステップ高さ $d_{004} = 1.36 \text{ \AA}$ (ダブルステップの存在を仮定しても $2.72 \text{ \AA}$) より大きいため、この特徴が顕著に現れたものと考えられる。また、実際には研磨仕上げの程度や表面清浄化のための高温アニールにより発生するジャイアントステップやステップバンチングなどの存在も考えられるため、ステップダウン方向の入射では結晶内部からの回折電子の脱出をいっそう容易にしている可能性も考えられる。

5. ま と め

ナノ技術を用いたエレクトロニクスデバイスや新機能性材料の開発において、微傾斜結晶基板を有効に利用して、自己組織的に目的とする微細構造を構築する技術は現実的なボトムアップ形成手法として注目されている。同時に微傾斜表面形態の評価も必要とされる。局所領域を原子レベルで実空間観察できる SPM の有用性は言うまでもないが、もう少し広い領域で全体的、平均的表面

形態情報を取得することは応用面では特に重要である。この比較的広い領域の構造形態評価では電界放射型走査顕微鏡(FE-SEM)が活躍しているが、薄膜形成などのその場観察は一般に困難である。RHEED 法は薄膜形成のその場モニターとして広く利用されているため、RHEED で微傾斜表面形態の情報も同時に取得できれば大変有効である。そのためには、まず微傾斜表面から得られる RHEED 図形について理解しておく必要がある。

本研究では、実験からいくつかの知見を得るとともに、それらを計算結果と比較することにより解釈し、整理した。以下にその内容を示す。

(1) 微傾斜表面ではシャドーエッジを基準として菊池図形および回折斑点の幾何学的位置関係が変化する。菊池電子は脱出時のみ屈折を受けるが、回折電子は入射時と脱出時に2回屈折の影響を受ける。したがって、回折斑点と菊池線のそれぞれの幾何学的位置関係を計算シミュレーションで比較することにより、微傾斜角 α と入射電子の視射角 θ を決定することができる。本研究ではこの方法を採用した。

(2) ステップダウン方向の入射方位では表面構造情報よりも結晶内部情報の取得が有利となる。特に菊池図形のコントラストは増大する。逆にステップアップ方向の入射方位では結晶内部情報の取得は困難となる。ただし、脱出角度が高くなると結晶内部からの電子も大きな減衰を受けずに脱出可能となるため RHEED 図形上部には結晶内部情報も比較的多く含まれる。

(3) 一般に2次元回折斑点が結晶内部からの3次元回折斑点あるいは菊池線と重なる場合、強度増大が認められる。特にステップダウン方向において、2次元ロッドを用いた解析では得られない位置に結晶内部からの3次元回折斑点が透過回折斑点のように現れる。特に、Si(001) 微傾斜表面のステップダウン入射方位では高視射角にすると3次元回折斑点が現れるが、その斑点位置からテラス面からではなく屈折効果の効かないステップ端面から出射したものであることがわかった。

今回、Fig. 4 の低視射角側で顕著にあらわれたストリーク強度上の斑点列についてはステップ周期から解析可能と考えられるが、詳細については今後の課題としたい。また、今回の結果からわかるように、結晶内部の情報は RHEED 図形の高角の脱出方向に多く含まれるため、今後は高脱出角の回折図形に注目して、その特徴を整理したいと考えている。

謝 辞

微傾斜試料を作成するにあたり、研磨処理をしていた学部4年生の大橋路弘君と長井孝光君に感謝いた

します。

文 献

- 1) A. Ichimiya and P.I. Cohen: “Reflection High Energy Electron Diffraction” (Cambridge, UK, 2004).
- 2) L.-M. Peng, S.L. Dudarev and M.J. Whelan: “High-Energy Electron Diffraction and Microscopy” (Oxford, New York, 2004).
- 3) W. Braun: “Applied RHEED” (Springer, Berlin, 1999).
- 4) Y. Horio: Jpn. J. Appl. Phys. **37**, L 164 (1998).
- 5) S. Hasegawa, S. Ino, Y. Yamamoto and H. Daimon: Jpn. J. Appl. Phys. **24**, L 387 (1985).
- 6) T. Yamanaka: e-J. Surf. Sci. Nanotech. **1**, 91 (2003).
- 7) Y. Horio: Jpn. J. Appl. Phys. **35**, 3559 (1996).
- 8) Y. Horio and T. Hara: Jpn. J. Appl. Phys. **41**, L 736 (2002).
- 9) T. Ogino, H. Hibino and Y. Homma: Jpn. J. Appl. Phys. **34**, L 668 (1995).
- 10) Y. Homma, H. Hibino, T. Ogino and N. Aizawa: Phys. Rev. B **5**, 13146 (1998).
- 11) 箕田弘喜: 表面科学 **20**, 853 (1999).
- 12) Y. Horio and Y. Hashimoto: Jpn. J. Appl. Phys. **36**, L 808 (1997).
- 13) 堀尾吉已: 表面科学 **22**, 522 (2001).
- 14) 一宮彪彦, 林 和彦: 表面科学 **20**, 865 (1999).