

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 14 日現在

機関番号：33907

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25390085

研究課題名(和文) RHEED入射電子波動場による励起 - オージェ電子と表面プラズモン -

研究課題名(英文) Excitation by incident electron wave field of RHEED - Auger electron and surface plasmon -

研究代表者

堀尾 吉巳 (Horio, Yoshimi)

大同大学・工学部・教授

研究者番号：00238792

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：投影ポテンシャル法を用いたロッキング曲線から、Si(001)2x1表面上のシリコンダイマーは室温の非対称構造から約1000Kの高温では対称構造に変化することが解析された。BRAESプロファイルは表面波共鳴条件下においてSi(LVV)オージェ強度の増大を示した。計算によるSi原子列上の波動場強度もこの入射条件下で増大することが確認された。

二元系結晶のZnO(0001)表面においてはロッキング曲線から極性表面の識別と共に、表面の構造緩和が解析された。特に、Zn(LMM)とO(KLL)のBRAESプロファイルには異なる振る舞いが得られたが、これはオージェ電子の波動場励起を示唆するものである。

研究成果の概要(英文)：For Si(001)2x1 surface, it has been analyzed by RHEED rocking curve using projected potential approach that the asymmetric Si dimers are transferred to the symmetric ones as temperature rises from 300K to about 1000K. Beam rocking Auger electron spectroscopy (BRAES) profile, which is the dependence of Auger intensity on the glancing angle of RHEED incident beam, showed the Auger intensity enhancements of Si(LVV) under the surface wave resonance (SWR) conditions. It has been confirmed that the calculated wave field intensity on the Si atoms is enhanced under those SWR conditions.

For a binary crystal, ZnO(0001) surface, the surface relaxation has been analyzed accompanied with the distinction of the surface polarity by the RHEED rocking curves. Especially, different behaviors of BRAES profiles between Zn(LMM) and O(KLL) have been obtained, which suggests the existence of wave field excitation for Auger electrons.

研究分野：応用物理学

キーワード：RHEED 波動場 オージェ電子 ロッキング曲線

1. 研究開始当初の背景

(1)最近の発展: 反射高速電子回折 (reflection high-energy electron diffraction, RHEED) <sup>1)</sup>は、薄膜成長のモニタをはじめ結晶表面や薄膜表面の構造解析に広く用いられている。最近では振動相関熱散漫散乱法 <sup>2)</sup>やワイゼンベルグ RHEED 法 <sup>3)</sup>も開発され、エネルギーフィルタ <sup>4)</sup>された RHEED 図形のフーリエ変換により実空間の原子構造情報を取得する手法が注目されている。また、結晶表面上にクラスタが存在する場合には、透過回折図形が観察され、その回折斑点形状により形態評価も可能となる <sup>5)</sup>。

(2)RHEED 励起による副産物: このような RHEED 図形内の回折斑点の幾何学や斑点形状そして斑点強度に注目する従来の RHEED 法の他に、RHEED 観察中にその入射電子により励起され、試料表面から放出されるオージェ電子や特性 X 線の強度に注目する研究手法も開発されている。前者はビームロッキングオージェ電子分光 (beam-rocking Auger electron spectroscopy, BRAES) 法 <sup>6)</sup>、後者は全反射角 X 線分光法 (total reflection angle X-ray spectroscopy, TRAXS) 法 <sup>7)</sup>と命名されており、両手法とも構造解析のみならず同一分析箇所での組成や元素の深さ分析が可能である。

(3)BRAES 法の現状: これまで BRAES 法に関しては幾つかの表面構造に対して実験測定されており <sup>6, 8-12)</sup>、表面波共鳴 (surface wave resonance, SWR) 条件とオージェ強度との間の密接な関係が指摘されてきた。しかしながら、まだ十分な理解に至っていないのが現状である。

2. 研究の目的

本研究では Si(001)表面及び ZnO(0001)表面を試料として、RHEED 入射電子が表面近傍に形成する入射電子波動場 (入射電子密度分布) とオージェ電子強度との相関性について研究を行い、オージェ強度異常が波動場励起によることを検証する。

(1)Si(001)表面構造は BRARS 測定が初めての試料である。Si(001)表面は 200K 以下の低温で c(4x2)構造を取ることが知られているが <sup>13, 14)</sup>、室温では非対称ダイマーの高速フリップフロップ運動により、構造解析の報告は多くない。RHEED 法は試料表面すれすれに入射電子線を照射するため、近似的には入射方位に投影した結晶ポテンシャルを感じて反射回折すると考えられる。この投影ポテンシャルで考えれば、非対称ダイマーの双安定構造である up と down の 2 状態の重なりとして構造モデルの議論が可能となり、それらの配列の位相は無視できるメリットが生まれる。本研究では、上記の考えに基づき、予め室温での Si(001)2x1 構造の解析を行う。その構造モデルに基づいて計算した波動場分布とオージェ強度異常との相関性を調べる。

(2)これまでは単元素からなる結晶表面に注

目した研究を行ってきたが、二元素結晶である ZnO(0001)単結晶表面を対象に BRAES プロファイル測定する。表面に生じる入射電子波動場が Zn の原子列あるいは O の原子列に乗れば、オージェ強度の振舞いは明らかに異なることが予想されるため、本研究において注目すべき対象と言える。まず、ZnO(0001)極性表面の識別も含め、RHEED による表面構造解析を行う。Zn と O のそれぞれの元素からのオージェ強度の BRAES プロファイルと波動場の分布との関わりについて調べる。

3. 研究の方法

実験は図 1 に示す超高真空 RHEED 装置を用いて行われた。基本真空度は  $1 \times 10^{-7}$  Pa であり、試料表面から約 10mm 真上に円筒鏡面型エネルギー分析器が設置されており、RHEED の入射電子により励起されて試料表面から放出されるオージェ電子強度を測定できる。本装置はステッピングモータを用いて電子銃を機械的に傾斜できるため、入射電子の視斜角変化に対する回折電子強度変化 (ロッキング曲線) およびオージェ電子強度変化 (BRAES プロファイル) の自動測定が可能である。入射電子の視斜角変化の速度は約  $2.7^\circ/\text{min}$  である。電子線の加速電圧は 10kV とし、ロッキング曲線の測定では CCD カメラを用いて約  $0.05^\circ$  毎に回折斑点強度の測定を行った。

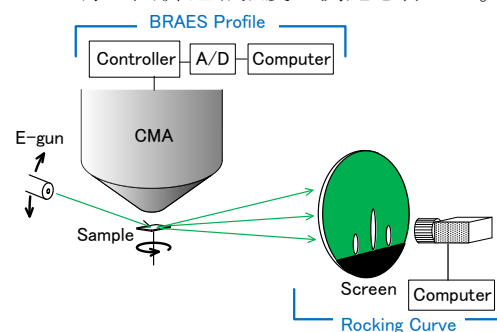


図 1 実験装置の概念図

(1)試料の一つは n 型 (P-dope) で抵抗率  $1 \sim 10 \Omega \text{ cm}$  の Si (001) 単結晶 ( $3 \times 15 \times 0.5 \text{ mm}^3$ ) が用いられ、入射方位を [1-10] とした。Si (001) 表面の清浄化は超高真空中で約  $1200^\circ\text{C}$  の通電加熱を繰り返し施すことにより遂行した。(2)他の試料は ZnO(0001) 結晶 ( $5 \times 10 \times 0.5 \text{ mm}^3$ ) の Zn 終端表面であり、入射方位を [2-1-10] とした。ZnO 表面の清浄化は超高真空中あるいは  $1 \times 10^{-4}$  Pa の酸素雰囲気中で試料下面に敷いた Ta シートを通電加熱することにより汚染ガスの脱離を促した。その際、表面組成比の変化を抑えるため  $450^\circ\text{C}$  までの加熱処理に留めたが、汚染炭素原子は 1 原子層以下で不規則に残存した。完全な清浄化には至らなかったものの、その RHEED 図形は比較的明瞭であるため、回折現象に重大な影響はないと考え、本実験研究を遂行した。

4. 研究成果

(1)Si (001)2x1 表面について

① ロッキング曲線を用いた表面構造解析

Si(001)表面構造は古くから研究されており、室温で走査トンネル顕微鏡 (STM)<sup>15)</sup>により観察される対称ダイマーは非対称ダイマーがSTM探針の走査速度より高速でフリップフロップ運動しているため、その平均構造が観察されたものとして理解されている。200K以下の低温では非対称ダイマーのフリップフロップ運動は熱エネルギーを失い、室温の2x1構造から図2に示すc(4x2)構造に相変態する<sup>14)</sup>。この構造はエネルギー的に最も安定であることが理論計算からわかっており<sup>16)</sup>、各種分析法によりその構造解析が行われた。その結果を表Iに示す<sup>16-19)</sup>。ここで、非対称ダイマーの構造パラメータは、図3を参照されたい。

表Iから Felici らの表面X線回折 (SXRD)による結果<sup>19)</sup>を除いて、ほぼ収束した構造パラメータの値が得られていることがわかる。そこで本研究では、低温のSi(001)c(4x2)表面構造に対して理論計算から導かれたRamstadらの構造パラメータ<sup>16)</sup>を非対称ダイマー構造モデルとして採用し、室温のSi(001)2x1表面構造の解析を行った。

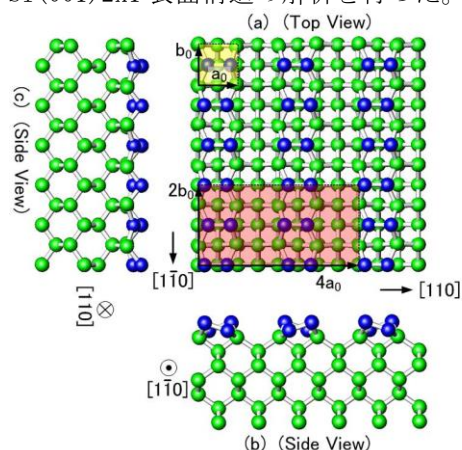
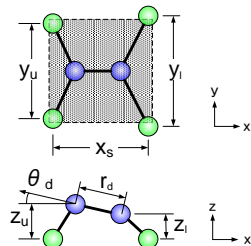


図2 Si(001)c(4x2)表面構造 : (a)は上面図、(b)及び(c)はそれぞれ[1-10]及び[110]に垂直な側面図

表I 異なる手法により導出された非対称ダイマーSiの構造パラメータ

	$\theta_d$ (deg)	$r_d$ (Å)	$z_u$ (Å)	$z_l$ (Å)	$x_s$ (Å)	$y_u$ (Å)	$y_l$ (Å)
CTDS <sup>17)</sup>	18±1	2.28	1.37	0.75	3.55	3.63	4.03
Theory <sup>16)</sup>	18.8	2.29	1.39	0.65	3.60	3.60	4.08
PED <sup>18)</sup>	18.6±1	2.26	1.36	0.64	3.64	3.74	3.94
SXRD <sup>19)</sup>	20±3	2.67	1.67	0.75	3.7	3.84	3.84

図3 非対称ダイマーSiの構造パラメータ



室温において、[1-10]入射方位で測定した00、1/20、10、3/20、20の5つの回折斑点のロッキング曲線を太線で、動力学的計算<sup>20)</sup>で求めたロッキング曲線を細線で図4に重ねて示す。ここでは、二重分域表面を考慮

すべく、図2(c)に示す[110]入射方位のロッキング曲線の計算も行い、[1-10]入射方位の結果と加え合わせた。

[1-10]入射において、0次ラウエ帯上の各逆格子ロッドは、入射方位に投影した結晶ポテンシャルのフーリエ係数に相当する。すなわち、それは図2(b)に示す[1-10]入射方位から眺めた結晶断面の投影構造を反映し、この断面構造が主にRHEEDの回折強度を決定する。この場合、非対称ダイマーの双安定構造は互いに重なり合い、配列位相は無視できる。同様に、室温においてフリップフロップ運動する非対称ダイマーも重なり合うため配列位相は無視でき、図3に示すダイマーそのものの構造パラメータが議論の対象として抽出できる。このようにフリップフロップ運動する動的表面構造もRHEED法で解析可能であることを見出した。

これらの5つのロッキング曲線はいずれも実験結果と計算結果がよく対応することがわかる。実験のピーク強度と共に細かいピーク位置まで計算でよく再現されている。

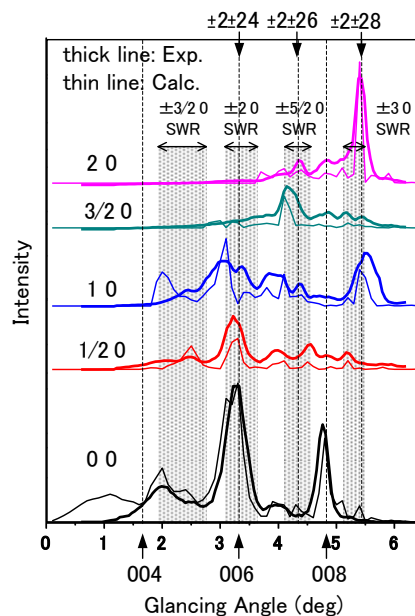


図4 [1-10]入射方位での実験と計算のロッキング曲線をそれぞれ太線と細線で示す

図4の中の影を付けた4つの帯はSWR領域を示し、低視射角側から順に±3/20ロッド、±20ロッド、±5/20ロッド、そして±30ロッドに関するSWR領域である。各SWR条件の領域幅は、平均内部ポテンシャル0eVの真空の電子から平均内部ポテンシャル12eVの結晶内の電子までを考慮している。SWR条件下で入射電子は表面に局在することが知られているが、真空と接する表面の内部ポテンシャルの値は単純でなく、上記SWRの領域内に束縛状態が存在するものと考えられる。超格子斑点1/20あるいは3/20のロッキング曲線に現れるそれぞれ約3.2°あるいは約4.1°の主ピークは、結晶内電子のSWR条件とほぼ対応しており、表面に局在した電子に

より表面構造由来の超格子斑点強度が増大したものと考えられる。

0 0、1 0そして2 0の整数次の回折斑点のロッキング曲線の幾つかは0 0 6、0 0 8、 $\pm 2 \pm 2 6$ 、 $\pm 2 \pm 2 8$ の各 Bragg 反射条件でピークが見られる。特に0 0回折斑点において、0 0 6 Bragg 反射は $\pm 2 \pm 2 4$  Bragg 反射とも重なるためか、強いピークを生んでいる。しかしながら、視射角  $1.7^\circ$  の0 0 4 Bragg 反射位置には強度ピークが現れていない。このような低視射角は表面に敏感なため、バルク構造と異なる非対称ダイマーの存在が0 0 4ピークを消失させた主たる原因と考えられる。

このように室温の Si (001)  $2 \times 1$  表面構造のロッキング曲線が、低温の c (4x2) 構造の非対称ダイマー構造を用いた計算結果でよく再現できることから、室温においても低温での非対称ダイマーを双安定構造としてフリップフロップ運動していることがわかった。

一方、1000K 程度の高温状態になると非対称ダイマー構造は対称ダイマー構造に変化することも本研究で見出された投影ポテンシャル法により確認された。その詳細は文献 21 に記載した。

#### ②BRAES プロファイルと入射電子波動場

RHEED 入射電子の視斜角変化に対する Si (LVV) オージェ電子の強度変化、すなわち BRAES プロファイルを図 5(a) に示す。全体的傾向として、視射角増大とともにオージェ強度も増大し、約  $5^\circ$  付近から減少に転じる。このようなバックグランドプロファイルは試料幅や入射電子線のビーム径、そしてその光軸のずれなどにより大きく影響を受ける。バックグランドプロファイルの詳細については文献 22 に記載した。ここでは、BRAES プロファイルに現れる強度異常に注目する。

図 5(a) には図 4 と同様に SWR 領域が帯状の影で示されている。オージェ強度は $\pm 3/2 0$  ロッドの SWR 領域では明瞭でないが、 $\pm 2 0$  ロッド、 $\pm 5/2 0$  ロッド、 $\pm 3 0$  ロッドの各 SWR 領域でオージェ強度が増大していることが認められる。特に整数次ロッドの SWR 位置でオージェ強度増大は顕著である。

図 5(b) は表面から第 4 層までの Si 原子上に乗る波動場強度 (入射電子密度) の視射角依存性を示す。オージェ電子強度はこのような原子上の入射電子強度に比例するものと考えられる。実際の Si (001)  $2 \times 1$  表面は二重分域表面であるため、 $[1-10]$  入射方位と  $[110]$  入射方位の入射電子強度の和を Total と記すグラフで示し、これと図 5(a) の実験 BRAES プロファイルを比較する。計算プロファイルには視射角  $\theta = 3.4^\circ$  に顕著なピークが、 $\theta = 5.3^\circ$  にも強度増大が認められる。これらのピークは $\pm 2 0$  および $\pm 3 0$  の整数次の逆格子ロッドの SWR 領域内に存在し、実験 BRAES の強度増大とよく対応している。また、実験 BRAES プロファイルには分数次の $\pm 5/2 0$  ロッドの SWR 領域内の  $\theta = 4.1^\circ$  付近に弱いながらも強

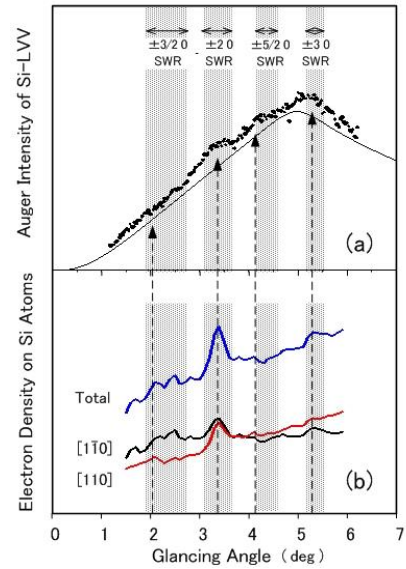


図 5 (a) Si-LVV の実験 BRAES プロファイル、(b)  $[1-10]$ 、 $[110]$  方位の Si 原子上の波動場強度とそれらの合計を Total で示す

度増大が認められるが、計算においても強度ショルダーが存在しているように思われる。 $\pm 3/2 0$  ロッドの SWR 領域内の強度増大は本実験プロファイルでは認め難いが、何度か実験測定した結果、弱いながらも強度の増大が確認されている。計算プロファイルには振動しながらも僅かなふくらみが認められる。分数次の SWR におけるオージェ強度増大がそれほど顕著でない理由として、二重分域表面のため、 $[1-10]$  入射方位から眺めて 2 倍周期のテラス表面の面積が全体の半分であることが考えられる。以上の実験と計算の比較から Si 原子上の入射電子波動場と BRAES プロファイルの強度異常が比較的良好に対応していることが明らかにされた。

#### (2) ZnO (0001) 亜鉛終端表面について

##### ①ロッキング曲線を用いた表面構造解析

ZnO 結晶は図 6 に示すウルツァイト型構造であり、その (0001) 表面には Zn 終端面を用いた、 $[2-1-10]$  の入射電子方位は非対称入射方位であるため、観察される RHEED 図形の左右の斑点強度は異なるはずである。しかしながら、ロッキング曲線の測定を行うと、図 7 に示されるように両サイドの 0 1 と 0-1 斑点のロッキング曲線はほぼ同様な強度プロファイルを示す。これは表面に存在する多くのステップテラスによるものと考えられ、ステ

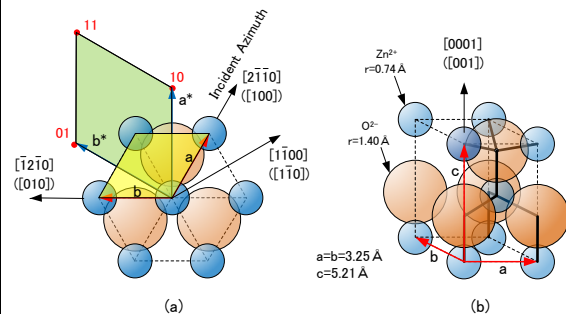


図 6 ウルツァイト構造の ZnO 結晶: Zn を終端表面とする (a) 上面図、(b) 鳥瞰図

ップを境に上段 A と下段 B のテラス表面の原子配列が  $180^\circ$  回転するため、実験測定ではほぼ等しい面積比の A と B の結晶分域からの回折強度が加算されるためと考えられる。

図 7(a) と 7(b) にはそれぞれ亜鉛終端と酸素終端の各表面に対して動力学的に計算されたロッキング曲線 (実線) と実験結果 (破線) との比較を示す。非対称入射にも関わらず実験結果は両サイドの 0 1 と 0-1 斑点のプロファイルはほとんど同じであることがわかる。これは既に述べたように互いに反対称なテラス表面からの反射強度が重なって生じたものと考えられる。そこで計算では 0 1 と 0-1 斑点のロッキング曲線を平均して 0 1 と表記して示している。

鏡面反射である 0 0 斑点のロッキング曲線に注目すれば、明らかに酸素終端表面では実験を再現出来ず、Zn 終端表面が比較的良好に実験結果と対応することがわかる。これは、試料のスペックと合致する結果である。実験では特に低視斜角で強度が弱い傾向が見られるが、これは主に表面に残留する炭素原子の影響ではないかと考えられる。

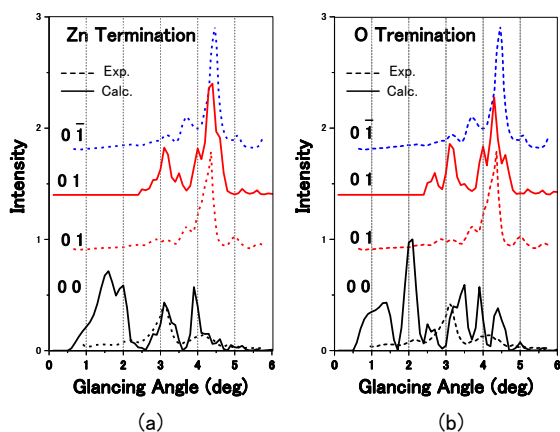


図 7 計算 (実線) と実験 (破線) のロッキング曲線の比較。計算は (a) Zn 終端表面、(b) O 終端表面に対して遂行された。

図 7 の計算では理想表面を想定したが、第一原理計算を用いて表面から第 6 二重層までの構造緩和を求めた。これは未発表であるが最表面の二重層内の間隔は狭くなり、二重層間の間隔は広がる結果が得られており、実験ロッキング曲線を図 7(a) よりよく再現することがわかった。また、酸素終端表面に対しても同様に第一原理計算から表面緩和構造が導かれ、その構造に基づいてロッキング曲線を計算したところ、実験ロッキング曲線をよりよく再現することがわかった。これらの結果は学術雑誌に投稿予定である。

#### ②BRAES プロファイルと入射電子波動場

BRAES 測定を行ったオージェ電子は Zn の LMM (992eV) と O の KLL (512eV) であり、それぞれプロファイルを図 8 にドットで示す。両者の BRAES プロファイルを比較すると明らかに異なる。全体的には両者とも視斜角の増大に対し、強度も増大する。しかしながら、

0 の BRAES プロファイルは、視斜角  $5^\circ$  付近で飽和し始めているが、Zn のそれは増大し続けている。これは Zn と O のオージェ電子のエネルギーが異なり、0 のオージェ電子の脱出深さが Zn のそれより浅いことによるものと思われる。特に顕著な違いとして、矢印で示す視斜角  $4.3^\circ$  付近で 0 のオージェ電子強度の異常増大が見られるのに対し、Zn にはそのような増大が見られない。これは入射電子波動場が Zn ではなく 0 の原子列に乗っていることを意味し、波動場によるオージェ励起の存在を示唆するものである。同時に、その時、両サイドの 0 1 と 0-1 のビーム強度はピークを迎えている。この視斜角は 0 2 及び 0-2 ロッドに関する SWR 条件に対応しており、0 2 及び 0-2 のエヴァネッセントビームによる波動場が上記の BRAES プロファイルの強度異常と両サイドの 0 1 と 0-1 ビーム強度にピークを生んだものと考えられる。

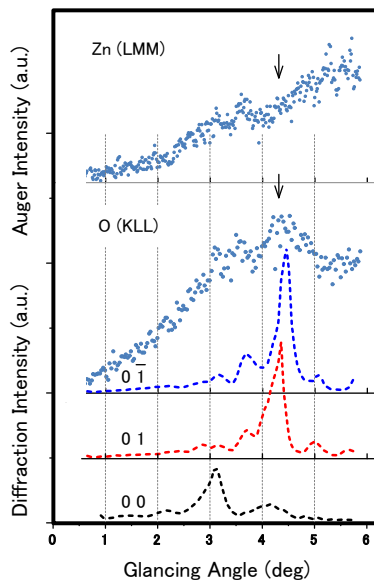


図 8 0 0 斑点、0 1 斑点そして 0-1 斑点の実験ロッキング曲線計算 (破線) と Zn(LMM)、O(KLL) の BRAES プロファイル

これを検証するため、波動場計算を行った。しかしながらエヴァネッセントビームが発生するとき、波動関数の発散が大きいため残念ながら正確な検証はできていない。この発散を克服するためのアイデアは有しているため、今後プログラムの改良により検証する予定である。

#### (3) RHEED による表面プラズモン励起

Si (111)  $7 \times 7$  表面からの鏡面反射電子のエネルギー損失スペクトルを解析した。数多くの入射条件に対して、特に SWR 条件下で表面プラズモンの励起回数が増大することを見出した。これは波動場の表面局在と関連すると考えられるが、今後詳細な実験と解析を行う予定である。

#### <引用文献>

- 1) A. Ichimiya and P. I. Cohen: "Reflection High Energy Electron Diffraction" (Cambridge, UK, 2004).
- 2) T. Abukawa, K. Yoshimura and S. Kono: Surf. Rev.

- Lett. **7**, 547 (2000).
- 3) T. Abukawa, D. Fujisaki, N. Takahashi, and S. Sato: e-J. Surf. Sci. Nanotech. **7**, 866 (2009).
  - 4) Y. Horio: Jpn. J. Appl. Phys. **35**, 3559 (1996).
  - 5) Y. Horio: e-J. Surf. Sci. Nanotech. **10**, 18 (2012).
  - 6) Y. Horio and A. Ichimiya: Physica **117B & 118B**, 792 (1983).
  - 7) S. Hasegawa, S. Ino, Y. Yamamoto and H. Daimon: Jpn. J. Appl. Phys. **24**, L387 (1985).
  - 8) A. Ichimiya and Y. Takeuchi: Surf. Sci. **128**, 343 (1983).
  - 9) H. Marten and G. Meyer-Ehmsen: Surf. Sci. **151**, 570 (1985).
  - 10) Y. Horio and A. Ichimiya: Surf. Sci. **164**, 589 (1985).
  - 11) Y. Horio: Jpn. J. Appl. Phys. **37**, L164 (1998).
  - 12) Y. Horio and D. Sakai: e-J. Surf. Sci. Nanotech. **7**, 97 (2009).
  - 13) T. Tabata, T. Aruga, and Y. Murata: Surf. Sci. **179**, L63 (1987).
  - 14) M. Kubota and Y. Murata: Phys. Rev. B **49**, 4810 (1994).
  - 15) R. J. Hamers, R. M. Tromp and J. E. Demuth: Phys. Rev. B **34**, 5343 (1986).
  - 16) A. Ramstad, G. Brocks and P. J. Kelly: Phys. Rev. B **51** 14504 (1995).
  - 17) T. Abukawa, C. M. Wei, K. Yoshimura and S. Kono: Phys. Rev. B **62** 16069 (2000).
  - 18) R. Gunnella E. L. Bullock, L. Patthey, C. R. Natoli, T. Abukawa, S. Kono and L. S. O. Johansson, Phys. Rev. B **57**, 14739 (1998).
  - 19) F. Felici, I. K. Robinson, C. Ottaviani, P. Imperatori, P. Eng and P. Perfetti: Surf. Sci. **375**, 55 (1997).
  - 20) A. Ichimiya: Jpn. J. Appl. Phys. **22**, 176 (1983).
  - 21) Y. Horio, Y. Takakuwa and S. Ogawa : Dimer Configuration of Si(001)2 × 1 Surface by Projected Potential Approach of Reflection High-Energy Electron Diffraction, e-J. Surf. Sci. Nanotech., **12**, 2014, pp. 380-386.
  - 22) Y. Horio, Y. Takakuwa and S. Ogawa : Auger intensity anomalies from the Si(001)2x1 surface excited by the wave field of RHEED, Surf. Interface Anal., **46**, 2014, pp. 1165-1169. .

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

### [雑誌論文] (計 5 件)

- ①Y. Horio, Y. Takakuwa, S. Ogawa and K. Abe: Auger Intensity Anomalies from ZnO(0001) Surface Excited by RHEED Incident Beam, e-J. Surf. Sci. Nanotech., **14**, 2016, pp. 92-96.  
査読あり (10.1380/ejssnt.2016.92)
- ②Y. Horio, Y. Watanabe, Y. Takakuwa and S. Ogawa : RHEED Patterns Calculated for Pt Nano Clusters on TiO<sub>2</sub>(110) Substrate, e-J. Surf. Sci. Nanotech., **13**, 2015, pp. 125-128.  
査読あり (10.1380/ejssnt.2015.125)
- ③Y. Horio, Y. Takakuwa and S. Ogawa : Auger intensity anomalies from the Si(001)2x1 surface excited by the wave field of RHEED, Surf. Interface Anal., **46**, 2014, pp. 1165-1169.  
査読あり (10.1002/sia.5572)
- ④ Y. Horio, Y. Takakuwa and S. Ogawa : Dimer Configuration of Si(001)2 × 1 Surface by Projected Potential Approach of Reflection High-Energy Electron Diffraction, e-J. Surf. Sci. Nanotech., **12**, 2014, pp. 380-386.  
査読あり (10.1380/ejssnt.2014.380)
- ⑤堀尾吉巳、高桑雄二、小川修一: Si(001)表面に対する RHEED 入射電子波動場, 表面科学, 第 **34** 巻, 2013 年, 第 7 号, pp. 334-339.  
査読あり (10.1380/jsssj.34.334)

### [学会発表] (計 17 件)

- ①堀尾吉巳, 柚原 淳司, 安部 功二, 高桑 雄二, 小川修一: RHEED による ZnO(0001)表面緩和の構造解析, 応用物理学会, 第 63 回応用物理学会春季学術講演会, 2016 年 3 月 19 日, 東工大 大岡山キャンパス.

- ②堀尾吉巳, 高桑雄二, 小川修一, 安部功二: RHEED による ZnO(0001)表面構造解析, 日本表面科学会, 2015 年真空・表面科学合同講演会, 2015 年 12 月 3 日, つくば国際会議場.

- ③Y. Horio, Y. Takakuwa, S. Ogawa and K. Abe : Auger Intensity Anomalies from ZnO(0001) Surface Excited by RHEED Incident Beam, 10th International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices '15 (ALC '15), October 27, 2015, Kunibiki Messe, Matsue.

- ④堀尾吉巳, 高桑雄二, 小川修一, 安部功二: RHEED 励起による ZnO(0001)表面からの BRAES プロファイル, 日本物理学会, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 2015 年 9 月 16 日, 関西大学.

- ⑤堀尾吉巳, 高桑雄二, 小川修一: 中速電子回折と表面波共鳴との相関性, 応用物理学会, 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会, 2015 年 9 月 13 日, 名古屋国際会議場.

- ⑥Y. Horio, Y. Watanabe, Y. Takakuwa, S. Ogawa : RHEED Patterns Calculated for Pt Nano Clusters on TiO<sub>2</sub>(110) Substrate, The 7th International Symposium on Surface Science (ISSS-7), November 3, 2014, Kunibiki Messe, Matsue.

- ⑦堀尾吉巳, 原 朋尚, 高桑雄二, 小川修一: RHEED 鏡面反射電子に対する表面プラズモンの異常励起, 応用物理学会, 第 75 回応用物理学会秋季学術講演会, 2014 年 9 月 17 日, 北海道大学.

- ⑧Y. Horio, Y. Takakuwa and S. Ogawa : Auger Intensity Anomalies from Si(001)2x1 Surface Excited by Wave-Field of RHEED, 9th International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices '13 (ALC13), December 3, 2013, Sheraton Kona, The Big Island, Hawaii.

- ⑨Y. Horio, Y. Takakuwa, S. Ogawa and M. Tashiro : Relaxation of Dimer Structure on Si(001)2x1 Surface at High Temperature, 12th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures in conjunction with 21st International Colloquium on Scanning Probe Microscopy (ACSIN-12 & ICSPM21), November 8, 2013, Tsukuba International Congress Center.

- ⑩堀尾吉巳, 高桑雄二, 小川修一, 田代将人: 高温 Si(001)2 × 1 表面の多波 RHEED 法による構造解析, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 2013 年 9 月, 徳島大学.

- ⑪堀尾吉巳, 高桑雄二, 小川修一, 田代将人: RHEED による高温での Si(001)表面構造解析, 第 74 回応用物理学会秋季学術講演会, 2013 年 9 月, 同志社大学

### [図書] (計 2 件)

- ①堀尾吉巳/日本学術振興会マイクロビームアナリシス第 141 委員会編: マイクロビームアナリシス・ハンドブック, 2.4.4 反射高速電子回折 (RHEED) 担当, pp. 233-237, オーム社, 2014 年.
- ②堀尾吉巳/日本表面科学会編: 現代表面科学シリーズ表面科学の基礎, 5.9 低速電子回折 (LEED) および反射高速電子回折 (RHEED) 担当, pp. 162-168, 共立出版, 2013 年.

### [その他]

ホームページ

<http://www.daido-it.ac.jp/~horio/index.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

堀尾 吉巳 (HORIO, Yoshimi)

大同大学・工学部・教授

研究者番号: 00238792

### (3) 連携研究者

高桑 雄二 (TAKAKUWA, Yuji)

東北大学・多元物質科学研究所・教授

研究者番号: 20154768