

# 埋もれた界面の可視化 —画像再構成を用いる X 線反射率イメージング—

桜井健次

物質・材料研究機構 〒305-0047 つくば市千現 1 丁目 2-1

蔣 金星

物質・材料研究機構 〒305-0047 つくば市千現 1 丁目 2-1

平野馨一

高エネルギー加速器研究機構 〒305-0801 つくば市大穂 1 丁目 1

## 要旨

薄膜・多層膜の埋もれた界面を非破壊的に可視化する有望な新技術を開発した。従来から薄膜の積層構造の解析に有効であることが知られていた X 線反射率法を拡張し、画像再構成法を組み合わせることにより、イメージング機能を付与することができる。この方法では微小ビームを使用することなく、微小領域の X 線反射率のプロファイルを抽出することもできる。これまでに得られているデータを紹介し、今後の展開について述べる。

## 1. はじめに

表面、界面の測定技術は多く存在する<sup>1)</sup>。ただ、最表面のみならず、露出していない埋もれた層や界面の情報が得られる技術は限られている。また、well-defined な清浄表面のみならず、超高真空ではない、大気あるいはさまざまな雰囲気下の実表面を計測できる手法となると、やはり難しくなり、対応できる方法は必ずしも多くない。薄膜を積層させてさまざまなデバイスを構成する場合、その機能は膜構造、界面構造に左右されることが多く、その品質も含めて評価、検証する技術が不可欠であるが、それもなかなか思うままにならないのが現状である。電子顕微鏡等による断面観察などがよく用いられるが、断面方向の構造が試料内の位置により異なることが多くあり、不均一さの解析もきわめて重要である。特に非破壊的な測定ができること、データを定量的に扱えること、多数の試料の分析値を用いてスクリーニング検査を行ったりできることなども長く渴望されていた。

X 線・中性子反射率法は、ある程度そのような期待に応えうる能力を備えた技術である<sup>2-9)</sup>。試料環境をさまざまに制御した条件下で、表面の詳細な深さ方向の構造を検討し、あるいは薄膜・多層膜のそれぞれの層や界面についてのサブナノメートル～数100ナノメートルレベルの深さ方向の構造情報（ちょうど断面試料の透過電子顕微鏡写真から読み取られるものと等価な情報、例えば、各層の密度、厚さ、表面および各界面のラフネス等）を非破壊的に与えることができる。特に、X 線反射率法は、基礎研究のツールとしても、半導体や磁気記録デバイスの生産工程におけ

る分析・検査技術としても、高い信頼性の得られる技術として活用され、ISO による国際規格も定められている<sup>10,11)</sup>。その X 線・中性子反射率法の欠点の 1 つは空間分解能がなく、広い面積で情報を代表するほかないことであつたが、最近、薄膜・多層膜の埋もれた層や界面のイメージングができるようになってきた<sup>12-18)</sup>。

本稿では、その原理、実験方法、現状で得られている結果と将来展望を解説する。

## 2. X 線反射率と X 線反射投影について

### 2.1 X 線の全反射と反射率

物質の表面に入射したあらゆる電磁波は Snell の法則<sup>19)</sup>に従い、反射、屈折する。X 線は、物質を構成する電子の結合に関与する種々の共鳴周波数よりも高周波の電磁波であることから、ほとんどの物質に対する屈折率は 1 より小さく、しかし非常に 1 に近い値を持つ。そのため、平坦かつ平滑な物質表面に全反射臨界角よりも浅い角度で入射した X 線は物質の表面で光学的な全反射を生じる<sup>2-6)</sup>。

X 線反射率とは、全反射条件近傍での反射 X 線強度と入射 X 線強度の比のことであり、5~8 桁またはそれ以上に及ぶログスケールで散乱ベクトルの深さ方向成分  $Q_z = \frac{4\pi \sin \theta}{\lambda}$ （視射角、出射角ともに  $\theta$ 、X 線の波長を  $\lambda$  とし）の関数として表現される。X 線反射率は、ほとんどの場合、単色 X 線を用い、微小角度域での  $\theta/2\theta$  角度走査を行って、位置分解能を持たないポイント・ディテクターで測定された X 線反射強度によって取得されている。

データのプロフィール解析によって、深さ方向の電子密度の分布（多層膜であれば各層の密度、膜厚、各界面のラフネスなど）が求められる。X線反射率法の実験、データ解析法等についてのさらに詳しい内容は、教科書<sup>7)</sup>や解説<sup>8,9)</sup>を参考にして頂きたい。

## 2.2 不均一試料のX線反射投影

X線反射率法による薄膜の解析では、他のX線技術を用いる場合と同様、暗黙のうちに試料の均一性を前提としてデータを取り扱い、議論している。しかし、現実に構造に関心を持ち、解析を必要とする薄膜は、必ずしも均一ではない。さまざまな機能や物性の差異は、そのような不均一さと関連していることも少なくない。さらには、積極的にある種の微細構造パターンを作りこんだ薄膜・多層膜について、解析を行いたい場合も多くある。このような試料について、これまでは不均一さを無視してX線反射率の測定を行うこともよく行われていた。微小ビームを用いて、ピンポイントでその地点のX線反射率を測定する方法<sup>20,21)</sup>も有力であるが、ここではX線反射投影の強度分布に注目する。

**Fig. 1**に示すように、X線検出器として1次元または2次元の位置敏感型検出器を使用すると、均一ではない試料からのX線の反射像は一様ではなく、一次元のX線強度プロファイル $P_{Q_2}(r)$ が得られる（ $r$ はX線進行方向に直交する方向に固定された座標で、検出器に記録される反射投影像内の位置をあらわす）。ここで、 $Q_2$ は先述の通り視射角 $\theta$ 、X線波長 $\lambda$ で決まる散乱ベクトルの深さ方向成分、 $\varphi$ は面内回転角である。X線進行方向（投影方向）に固定

された座標を $\omega$ とすれば、面内回転させた際の試料上の位置は $(r \cos \varphi - \omega \sin \varphi, r \sin \varphi + \omega \cos \varphi)$ のように表せる。従って、その座標の地点のX線反射強度がある $Q_2$ の時に $R$ であるとすれば、その投影は

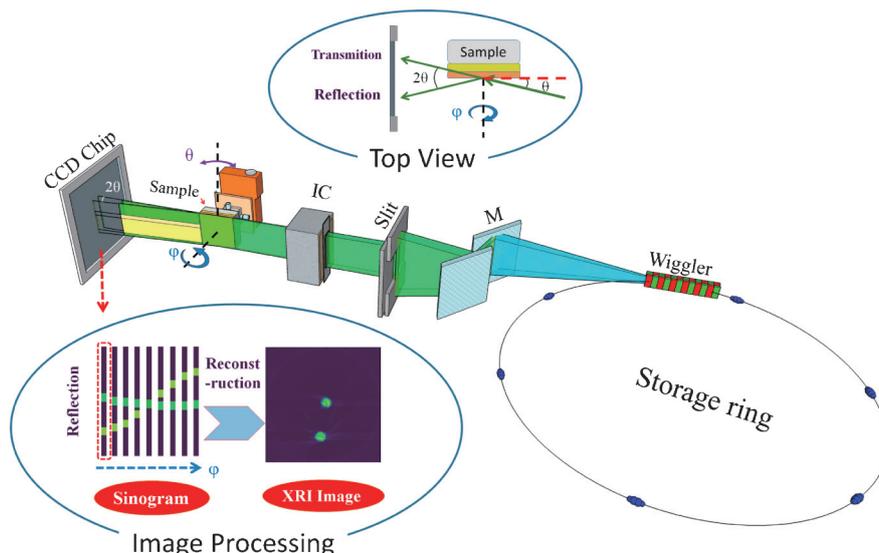
$$P_{Q_2}(r) = \int_{-\infty}^{\infty} R(Q_2, r \cos \varphi - \omega \sin \varphi, r \sin \varphi + \omega \cos \varphi) d\omega$$

のように表現できる。 $p_\varphi(Q_2, r)$ として表示した画像、 $p_{Q_2}(\varphi, r)$ として表示した画像をそれぞれ、reflectogram, sinogramと呼ぶ。

Sinogramを取得して、コンピュータ・トモグラフィと類似する画像再構成計算を行うと、特定の $\theta/2\theta$ （特定の $Q_2$ ）におけるX線反射率の試料内部の分布を画像化することができる<sup>12-15)</sup>。すなわち、試料上の任意の地点 $(x, y)$ でのX線反射率は

$$R(Q_2, x, y) = \int_0^\pi P_{Q_2}(\varphi, x \cos \varphi + y \sin \varphi) d\varphi$$

のようになる。ここで右辺の $P_{Q_2}(\varphi, x \cos \varphi + y \sin \varphi)$ は、実験データであるsinogramにフィルター関数をコンボリューションしたものである。この方法により、膜厚や密度の場所による差異によって生じるコントラストを画像化したものが得られる。着目しているX線反射率のプロファイルがわかっている時は、その特徴がよく表れている $Q_2$ を選び、その条件下で画像を取得すると、埋もれた層、界面の不均一さを明瞭に可視化することができる。



**Fig. 1** (Color online) Sketch of the X-ray reflectivity imaging instrument. Storage ring: orbit of Photon Factory; Wiggler: vertical wiggler X-ray source; M: fixed-exit monochrometer; Slit: 2D slit [1 (H) × 8 mm (V)]; IC: ionization chamber, with a horizontal slit [0.05 mm (H)];  $\theta$  is the grazing incident angle and the exit angle between X-rays and sample surface. The CCD chip is used to collect an X-ray reflectivity sinogram at a series of in-plane rotational angles  $\varphi$ s. The sinogram is inputted into the computer to reconstruct an X-ray reflectivity image.

上式から明らかなように、 $Q_z$  を 1 点ではなく、通常の X 線反射率測定と同等の点数を取って収集し、3 次元的な sinogram を構築すれば、特定地点の X 線反射率のプロファイルを抽出することもできる<sup>17)</sup>。つまり、微小ビームを用いることなく、試料上の観察視野に相当する大きさのビームを用いながら、微小領域の X 線反射率データの取得、解析ができるようになった。本研究では、高エネルギー加速器研究機構放射光研究施設 BL-14B で 16.0 keV の単色 X 線を用い、CCD カメラによって X 線反射投影を撮像して実験を行った。これまでのところ、6~10 mm 径程度の視野で、CCD のピクセルサイズの 2 または 3 ピクセルに相当する 10~20  $\mu\text{m}$  程度の空間分解能が得られている。入射 X 線の広がりやを極限的に抑制し、高解像度の検出器を採用することにより、空間分解能を更に向上させる余地はある。深さ方向には、ほとんどの場合 1~500 nm、高々 1  $\mu\text{m}$  程度までの厚さの積層構造を取扱い、後述する事例のように 0.1~1 nm 程度の差を敏感に検出している。通常の X 線反射率の実験とは異なり、面内回転角をも走査するため、その際に視射角が変化しないことは必須の要件になる。このためには試料表面が面内回転軸と直交するように調整すればよい。他の類似した施設、ビームラインでも同等の実験を行うことは十分可能であり、X 線の波長をもっと別のものにし、あるいは異なるタイプの検出器を用いて同様の測定を行うことも別段難しくない。

### 3. X 線反射率イメージングの実例

#### 3.1 保護層に埋もれた金属超薄膜パターン<sup>15)</sup>

X 線反射率イメージングによる可視化の非常にわかりやすい事例をまず示そう。Fig. 2(a) に示す試料は、10 mm  $\times$  10 mm  $\times$  0.5 mm (厚さ) のシリコン基板上に 200  $\text{\AA}$  の膜厚の金をスパッタ法で成膜し、ラインパターンを作ったうえで、その上から 150  $\text{\AA}$  の銅薄膜で覆ったものである。銅薄膜で覆った後ではパターンは埋もれており、観察できない。このような試料のある面内角における反射投影の  $Q_z$  依存性 (視射角依存性)、すなわち reflectogram の取得例を Fig. 2(b) に示す。均一な積層膜ではモノトーンであるが、埋もれた超薄膜の存在によってコントラストが生まれる。このようなデータを多数の面内角で測定して、特定の  $Q_z$  ごとの sinogram を取得し、画像再構成演算を行うと実空間での X 線反射率イメージが得られる。その結果を Fig. 3 に示す。この画像も含め、本稿で紹介するほぼ全部の再構成画像に、円周状のアーティファクトがどの画像にも乗っている。主に検出器の応答性のわずかな不均一さに由来するものである<sup>22,23)</sup>、本研究ではあえて除去処理などは行っていない。小さな  $Q_z$  (小さな視射角) では、試料上のどの地点でも全反射が生じるため、まったく一様であるが、 $Q_z$  を変化させると、下層の薄膜の有無による X 線反射率のプロファイルの差異に対応したコントラストが浮か

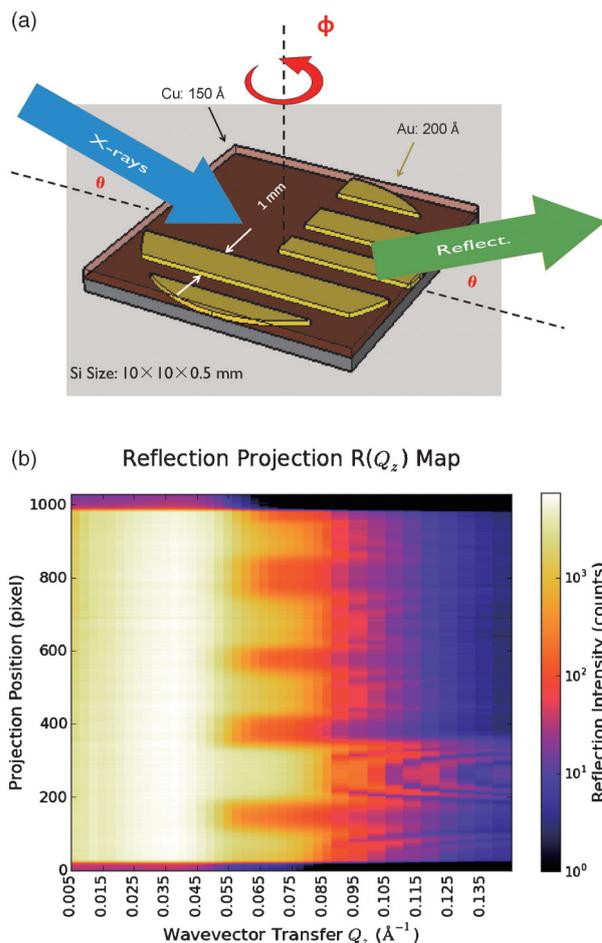


Fig. 2 (Color online) (a) The sketch of the copper/gold (pattern)/silicon sample, prepared by sputtering gold on silicon with patterned mask, followed by sputtering uniform copper layer. The geometry to measure the X-ray reflectivity sinogram is also shown on the sketch.

(b) X-ray reflectogram of the sample show in (a). X-ray energy, 16 keV. The glancing angle is scanned so that the step of  $Q_z$  becomes 0.003  $\text{\AA}^{-1}$ . The data are plotted in logarithmic color scale.

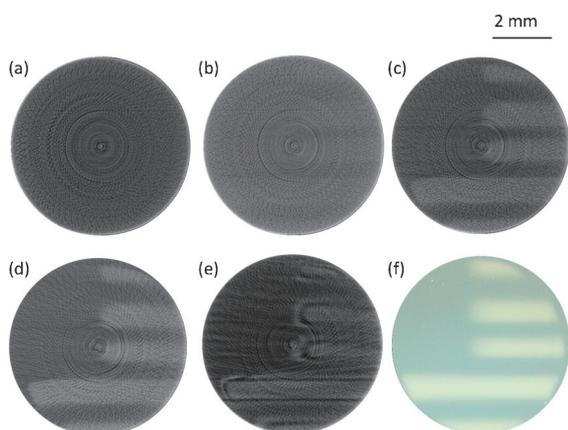
(Fig. 2(b) is partly taken from Fig. 2 in the Reference<sup>15)</sup> with permission.)

び上がってくる。膜厚がパターンごとに異なる場合や、薄膜のなかで厚さにむらや傾斜がある場合も、それぞれに X 線反射率の  $Q_z$  依存性には異なる周期の振動構造が現れるので、 $Q_z$  を注意深く選ぶことにより相互の差が明瞭な X 線画像を得ることができる。1 つの反射投影データを取得するのに典型的な測定時間は 1 秒以下、1 つの sinogram を得る時間は、面内角をいくつとるかによって変わるとしても、ほとんどの場合 1~数分もしくはそれ以内程度でおさまる。

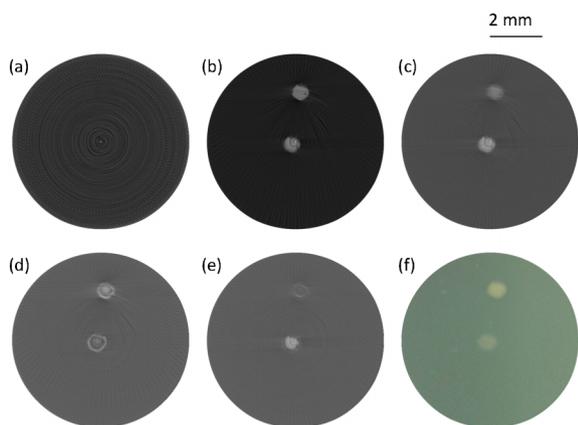
#### 3.2 厚さの異なるドット状パターン<sup>15)</sup>

同じ視野の中に厚さの異なる超薄膜のパターンがあったときに、どのように識別できるかを見てみよう。10 mm

×10 mm×0.5 mm (厚さ) のシリコン基板におよそ0.5 mmφのドット状の金薄膜を2か所に成膜した試料について、いくつかの $Q_z$ についてX線反射投影を測定し、得られたsinogramから画像再構成を行った結果をFig. 4に示す。2つのドットの膜厚は、それぞれ82 Å, 170 Åである。実際に別途膜厚が82 Å, 170 Åである均一試料を準備



**Fig. 3** (Color online) Reconstructed X-ray reflectivity images of the copper/gold (pattern)/Si sample at different wavevector transfers. Parameters for image reconstruction: 36 views, cutoff frequency for Ram-Lak filter: 0.2. (a)  $Q_z=0.024 \text{ \AA}^{-1}$ ; (b)  $Q_z=0.049 \text{ \AA}^{-1}$ ; (c)  $Q_z=0.057 \text{ \AA}^{-1}$ ; (d)  $Q_z=0.073 \text{ \AA}^{-1}$ ; (e)  $Q_z=0.098 \text{ \AA}^{-1}$ ; (f) Optical image of the pattern sample before coating with copper uniform layer. The image was trimmed to have the same scale as the reconstructed images. Scale bar on the top right shows 2 mm. (Fig. 3 is taken from Fig. 3 in the Reference<sup>15</sup>) with permission.)



**Fig. 4** (Color online) Reconstructed X-ray reflectivity images of the gold (two islands with different thicknesses)/Si sample at different wavevector transfers. Parameters for image reconstruction: 72 views, cutoff frequency for Ram-Lak filter: 0.5. (a)  $Q_z=0.030 \text{ \AA}^{-1}$ ; (b)  $Q_z=0.068 \text{ \AA}^{-1}$ ; (c)  $Q_z=0.089 \text{ \AA}^{-1}$ ; (d)  $Q_z=0.110 \text{ \AA}^{-1}$ ; (e)  $Q_z=0.132 \text{ \AA}^{-1}$ ; (f) Optical image of the two island pattern. The image was trimmed to have the same scale as the reconstructed images. Scale bar on the top right shows 2 mm. (Fig. 4 is taken from Fig. 5 in the Reference<sup>15</sup>) with permission.)

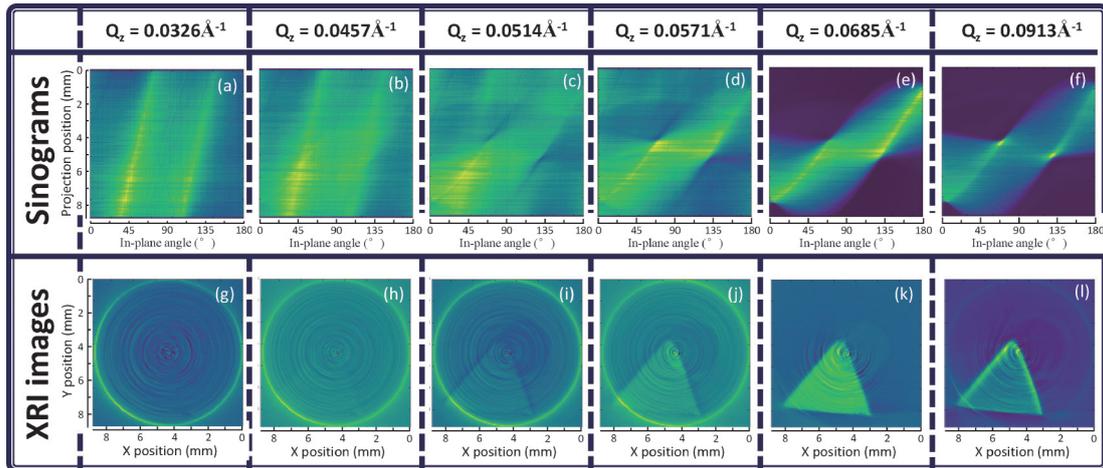
し、それぞれのX線反射率を測定すると、もちろん、膜厚によって異なる周期の振動構造を持つプロファイルを生じる。従って、特定の $Q_z$ に着眼して、データを比較すれば、同じ強度になるのではなく、一方が強く、他方が弱く、別の $Q_z$ では、それが逆転するといったことは容易に起きる。Fig. 4には2つのドットが画像として得られているが、そのそれぞれの明るさは $Q_z$ によって変化し、一方のみを強調するような画像も得られることがわかる。同じドットでも中央部と周辺部に差異が見られる。これは試料作成時に準備したマスクの影によって周辺部の膜厚が若干薄く仕上がることや、ドット端は形状が直角にならず密度傾斜が生じることなどに対応すると考えられる。

### 3.3 複雑な重なりのある金属薄膜パターン<sup>17,18)</sup>

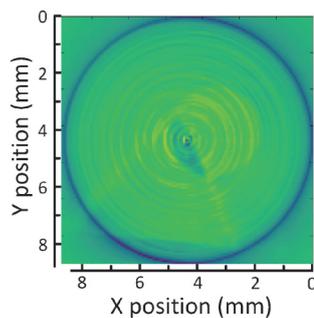
すでに示した2例よりもやや難易度の高い応用例も示そう。シリコン基板 (20 mm×15 mm×2 mm (t)) 上に、まず平均厚さ約150 Åの三角形パターンの金薄膜を堆積させ、次に平均厚さ約160 Åの均一な銅薄膜で全面を被覆し、さらに平均厚さ約240 Åの円形パターンのジルコニウム薄膜を堆積させた。この試料では、第1層のジルコニウムと第3層の金のパターンが重なっている部分がある。すなわち、同じ試料のなかで、場所によって積層数が異なっている。Fig. 5の上段に示した(a)~(f)は、取得したsinogramの典型的なものである。それぞれ異なる $Q_z$ で試料を面内回転して、反射投影1次元プロファイルの面内角度依存性を取得した。この5つの画像が相互に異なる画像であること自体、試料の膜構造が場所によって異なることを如実に示しており、そこに構造情報がある。Fig. 5の下段に示した(g)~(l)は、上段のsinogramを画像再構成して得られるX線反射率イメージングの画像群である。 $Q_z$ を変化させることによって、ジルコニウム層(円形)、金層(三角形)あるいは両者の重なる部分のX線反射率が強調されたり、弱められたりして、コントラストが変化していることがわかる。相対的に小さな変化を一層わかりやすく強調するために、例えば(j)と(k)について、簡単な演算処理を行うと、Fig. 6の画像が得られる。このようにしてZr/Cu/Auの3層構造の部位を明瞭に可視化することができた<sup>18)</sup>。通常のX線反射率法の解析の場合と同様、モデルによる検討を行うことを前提とすれば、画像から得られたX線反射率のプロファイルから、こうした層構造の膜厚等を議論することもできる。

### 3.4 接着界面<sup>18)</sup>

埋もれた超薄膜のさまざまなパターンだけではなく、例えば、接着剤を塗布した界面の一様性や接着条件の変化を可視化することもX線反射率イメージングに適した興味深い応用である。紫外線硬化型接着剤をスピコート法でシリコン基板に薄膜化し、マスクをかけて紫外線照射を行った試料を用いて実験を行ったところ、紫外線照射部



**Fig. 5** (Color online) X-ray reflectivity sinograms (the upper panel) and corresponding reconstructed images (the lower panel) of the zirconium (pattern)/copper/gold (pattern)/silicon sample at different wavevector transfers  $Q_z$ : (a) and (g)  $Q_z = 0.0326 \text{ \AA}^{-1}$ ; (b) and (h)  $Q_z = 0.0457 \text{ \AA}^{-1}$ ; (c) and (i)  $Q_z = 0.0514 \text{ \AA}^{-1}$ ; (d) and (j)  $Q_z = 0.0571 \text{ \AA}^{-1}$ ; (e) and (k)  $Q_z = 0.0685 \text{ \AA}^{-1}$ ; (f) and (l)  $Q_z = 0.0913 \text{ \AA}^{-1}$ . Any image corrections were not attempted to remove ring artifacts caused by inhomogeneity of the detector response. (Fig. 5 is taken from Fig. 4 in the Reference<sup>18)</sup> with permission.)



**Fig. 6** (Color online) A calculated X-ray reflectivity image to enhance the weak contrast pattern (zirconium/copper/gold/silicon structure) by subtracting the Fig. 5(k) by Fig. 5(j). Any image corrections were not attempted to remove ring artifacts caused by inhomogeneity of the detector response.

(硬化部)と非照射部(非硬化部)の境界部分を可視化することができた<sup>18)</sup>。実験で使用した試料では、紫外線照射により、基板と膜の間に残存していた低密度の空孔などが消滅して低密度層の密度が6~10%回復し、その一方で全膜厚はおよそ2%収縮するため、その結果としてX線反射率の $Q_z$ 依存性に差異が生まれた。そのようなコントラストに注目して画像化すると、接着界面の変化の場所による違いを可視化できる。今後は、接着界面のkissing bonds<sup>24)</sup>の検出、可視化など、接着不良部の出現にかかわる現象の解析等への応用につなげてゆきたいと考えている。

### 3.5 異種物質のパターン<sup>15)</sup>

薄膜の膜構造の差異だけでなく、もっと単純に化学組成、密度に注目した可視化も可能である。X線反射率のプロファイルで観測される全反射臨界角の位置は、密度に

よって決まっている。従って、試料の同じ視野の中にくつもの薄膜の積層パターンが作られていて、そのそれぞれが異なる金属であるとすれば、 $Q_z$ をそれぞれの臨界角に着目して選び、面内角を走査して、反射投影のsinogramを作れば、特定の金属のパターンのみを選んで画像化することも可能である<sup>15)</sup>。

## 4. まとめ

従来から知られているX線反射率法を拡張し、イメージング機能を付加することにより、パターン構造や不均一性を持つ薄膜・多層膜の埋もれた界面の非破壊的な可視化が可能になった。X線反射率は膜厚、密度、ラフネス(もしくは密度傾斜等の界面形状)の情報を解析するツールであり、従って、試料上の場所による積層構造や、特定層の膜厚・密度の違い、表面・界面形状の違いをコントラストとして与えるイメージングが可能である。本稿で紹介したデータは放射光を用いた実験により取得されたが、1~15 W程度の出力の微焦点X線源を発散光学系の配置で用い、材料研究や産業応用での活用をめざした検討<sup>16)</sup>や同じアイデアの技術を中性子反射率に適用する試み<sup>25)</sup>も行われている。これまでのところは、試料内のX線反射強度もしくはX線反射率の分布を画像として表示するイメージングを中心に検討を行っている。各点でのX線反射率プロファイルを信頼できるモデルに基づいて解析すれば、全ての地点での構造パラメータを得ることができるので、今後はそのような画像の議論に移ってゆくことを期待している。

当研究室はおよそ10年の歳月をかけて本テーマに継続的に取り組んできた。2010年~2011年頃の研究では

Vallerie Samson 君（当時筑波大大学院 D2～D3，現 Swiss Light Source）が貢献してくれた。本稿で紹介した最近のデータは，蔣金星君の博士論文（筑波大学，2017年2月）の一部である。本研究の実験は，高エネルギー加速器研究機構，放射光研究施設で行われた（課題番号 2015G053）。

### 参考文献

- 1) 西 敏夫監修「表面・界面技術ハンドブック」(エス・ティー・エス2016)。
- 2) K. Stoev and K. Sakurai: Spectrochim. Acta B **54**, 41 (1999).
- 3) M. Tolan: X-ray Scattering from Soft-Matter Thin Films (Springer, 1999).
- 4) U. Pietsch, V. Holy and T. Baumbach: “High-Resolution X-ray Scattering From Thin Films to Lateral Nanostructures”, (Springer, 2004).
- 5) J. Daillant and A. Gibaud Eds: “X-ray and Neutron Reflectivity: Principles and Applications”, (Springer, 2009).
- 6) J. Als-Nielsen and D. McMorrow: “Elements of Modern X-ray Physics”, (John Wiley & Sons, 2011).
- 7) 桜井健次編：“X線反射率法入門”（講談社サイエンティフィック，2009）。
- 8) 桜井健次：応用物理 **78**, 224 (2009)。
- 9) 桜井健次：ぶんせき **8**, 320 (2015)。
- 10) P. Colombi, D. K. Agnihotri, V. E. Asadchikov, E. Bontempi, D. K. Bowen, C. H. Chang, L. E. Depero, M. Farnworth, T. Fujimoto, A. Gibaud, M. Jergel, M. Krumrey, T. A. Lafford, A. Lamperti, T. Ma, R. J. Matyi, M. Meduna, S. Milita, K. Sakurai, L. Shabelnikov, A. Ulyanenko, A. Van der Lee and C. Wiemer: J. Appl. Cryst. **41**, 143 (2008).
- 11) ISO 16413:2013 <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:56703:en>
- 12) 桜井，水沢，日本国特許第5825602号，第5935231号。
- 13) V. A. Innis-Samson, M. Mizusawa and K. Sakurai: Anal. Chem. **83**, 7600 (2011).
- 14) V. A. Innis-Samson, M. Mizusawa and K. Sakurai: X線分析の進歩 **43**, 391 (2012).
- 15) J. Jiang, K. Hirano and K. Sakurai: J. Appl. Phys. **120**, 115301 (2016).
- 16) J. Jiang and K. Sakurai: Rev. Sci. Instrum. **87**, 093709 (2016).
- 17) J. Jiang, K. Hirano and K. Sakurai: J. Appl. Cryst. **50**, 712 (2017).
- 18) 桜井健次，蔣金星：表面科学，(2017)。印刷中
- 19) M. Born and E. Wolf: “Principles of Optics 7<sup>th</sup> edition”, (Cambridge University Press, 2000).
- 20) 上田和浩，私信。
- 21) K. Sakurai, M. Mizusawa, M. Ishii, S. Kobayashi and Y. Imai: J. Phys. Conf. Ser. **83**, 012001 (2007).
- 22) C. Raven: Rev. Sci. Instrum. **69**, 2978 (1998).
- 23) J. Sijbers and A. Postnov: Phys. Med. Biol. **49**, 247 (2004).
- 24) C. J. Brotherhood, B. W. Drinkwater and S. Dixon: Ultrasonics **41**, 521 (2003).
- 25) 桜井健次，Jinxing Jiang，水沢まり，伊藤崇芳，Dan Li，阿久津和宏，笠井聡，宮田登「中性子反射率イメージング技術開発の最新状況」（日本中性子科学会，名古屋市，2016年12月）。

### 著者紹介



#### 桜井健次

物質・材料研究機構 上席研究員  
E-mail: sakurai@yuhgiri.nims.go.jp  
専門：X線分光イメージング，分析化学  
【略歴】  
1988年3月東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。工学博士。1988年4月科学技術庁金属材料技術研究所入所，2001年4月組織改正により，物質・材料研究機構，現在に至る。2004年4月より筑波大学大学院数理物質科学研究科物質・材料工学専攻教授を兼任。



#### 平野馨一

高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所 放射光科学研究施設 准教授  
E-mail: keiichi.hirano@kek.jp  
専門：X線光学，放射光科学  
【略歴】  
1989年3月東京大学大学院工学系研究科修士課程修了。博士（工学）。1989年4月東京大学工学部助手，1993年4月高エネルギー加速器研究機構，現在に至る。



#### 蔣金星

物質・材料研究機構 ポスドク研究員  
E-mail: jasonchiangmtl@gmail.com  
専門：薄膜界面イメージング，材料工学  
【略歴】  
2017年3月筑波大学大学院数理物質科学研究科物質・材料工学専攻博士課程修了。博士（工学）。2017年4月物質・材料研究機構ポスドク研究員，現在に至る。

## Visualization of buried interfaces: X-ray reflectivity imaging using image reconstruction

---

**Kenji SAKURAI** National Institute for Materials Science, 1-2-1, Sengen, Tsukuba, Ibaraki 305-0047 Japan

**Jinxing JIANG** National Institute for Materials Science, 1-2-1, Sengen, Tsukuba, Ibaraki 305-0047 Japan

**Keiichi HIRANO** Photon Factory, High Energy Accelerator Research Organization, 1-1, Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801 Japan

---

**Abstract** A promising novel technique has been developed to visualize buried interfaces in layered thin films non-destructively. The present technique gives real-space X-ray image corresponding to positions in the sample, by combining the image reconstruction method and X-ray reflectivity, which is extremely sensitive to the layered structures. It has become possible to obtain X-ray reflectivity profile at each local point in the sample, without the use of micro beam. This article introduces the latest achievement as well as further research plan for the future.