

走査顕微鏡光学系を利用した位相計測

(財)高輝度光科学研究センター 高野 秀和

概要

走査型硬 線顕微鏡光学系を利用した高空間分解位相イメージングについて述べる。試料を透過した集光ビームの回折パターンをすべての走査点において画像検出器で記録し、強度重心の移動量を求めることにより基準点からの位相差を求めることができる。これを利用して位相再構成を行う。SPring-8 のアンジュレータービームライン BL20XU において、8 keV の 線を光源としたマイクロビーム光学系を用いた実験及び得られた結果について述べる。

はじめに

物質における 線の位相変化は複素屈折率 $n=1-\delta-i\beta$ を用いて記述される。線のエネルギーが高いほど、また物質の原子番号が小さいほど一般的に δ/β が大きくなるために、位相変化を利用したイメージングは従来の吸収イメージングに比べて非常に高い感度が期待できる。試料での位相変化の定量は、干渉計⁽¹⁾、ホログラフィ⁽²⁾を利用した手法などがあり、CT 再構成を利用した 3 次元イメージングにも成功している。しかしながら、これらは基本的に投影光学系であるため、回折による空間分解能の低下が問題となる。軟 線領域では、Zernike 位相差顕微鏡⁽³⁾、暗視野顕微鏡^(4,5)、微分位相顕微鏡⁽⁶⁾など、顕微鏡光学系の位相イメージングへの応用が行われてきており、高い空間分解能での観察が可能となっている。また、Wigner-distribution deconvolution 法を用いた位相回復法⁽⁷⁾、回折像からの位相回復法⁽⁸⁾などの、位相定量の試みもなされている。硬 線領域においては、例えば生物の切片試料などは透過率が高すぎるために、吸収コントラストを用いた観察は基本的に困難である。しかしながら、位相イメージングを利用することによるコントラストの向上がなされれば、大気中、溶液中など様々な雰囲気での観察が非常に容易となるほか、線による試料の照射損傷を抑える効果等も期待できる。近年の硬 線領域における結像光学系、マイクロビーム光学系等の顕微鏡光学系は急速に開発が進んでおり、サブミクロン～サブ 100 nm の高い空間分解能を達成している⁽⁹⁻¹¹⁾。位相イメージングにおいても、Zernike 位相差顕微鏡^(12,13)等で硬 線領域における高分解能観察がなされており、その高感度性が示されている。本研究では、硬 線マイクロビーム走査顕微鏡光学系を用いた高空間分解能位相定量について試みた。SPring-8 における全長 248 m のビームライン BL20XU を用いて構築されたコヒーレントマイクロ

ビーム光学系、及びそれを用いた実験結果等について述べる。

実験光学系

図1に実験光学系の概要を示す。BL20XUはHybrid型X線アンジュレータを光源として有し、液体窒素循環冷却型Si 111二結晶分光器により8~27 keVの硬線を供給する。分光器直後には仮想光源として用いるための矩形開口(100 μm 、50 μm 、20 μm)及びスリット開口(10 μm)が挿入可能であり、この光源から最下流の実験ハッチ入口まで距離が195 mあるため、高い空間コヒーレンスを有する線を用いた実験が可能である。

線集光素子として、フレネルゾーンプレート(FZP)を用いた。ゾーンは厚さ1 μm のタンタルでできており、その最外線幅は100 nmである。FZPの直径は150 μm であり、十分なコヒーレンスで照明するため、50 μm の仮想光源を用いた。直径20 μm のピンホールによってFZPの一次回折による集光ビームのみを選択する。実験では8 keVの線を用いた。生成したマイクロビームはナイフエッジスキャン法で評価を行い、縦横方向ともに強度半値幅150 nmのサイズが得られている。光学系の最下流には可視光変換型画像検出器を配置した。検出器はP43シンチレーター、光学リレーレンズ、高速読み出し型冷却CCDカメラ(浜松ホトニクス:C4742-98)から構成されており、試料を透過したマイクロビームの回折像を記録する。

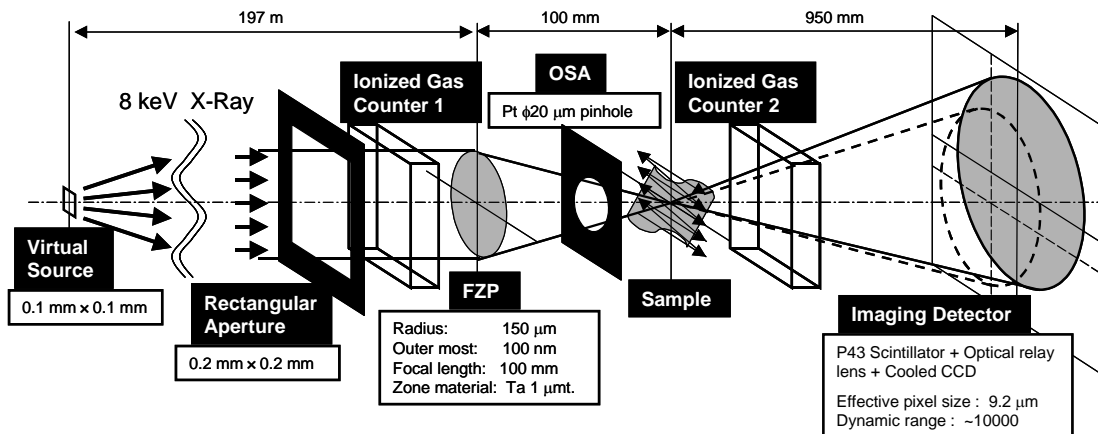


図1 SPring-8、BL20XUを用いた線マイクロビーム光学系

位相定量法

マイクロビームが試料を透過する際、試料の位相勾配に応じて線の屈折が起こる。一次元系において、ビームサイズ Δx に対して試料の位相勾配が $\Delta\phi$ であるとき、その屈折角 θ は線の波数 k を用いて、

$$\theta = \frac{1}{k} \left(\frac{d\phi}{dx} \right) \quad (1)$$

として表される。屈折角は画像検出器で検出された回折像の強度重心の移動として観測されるため、試料を走査することにより試料の微分位相マップが得られる。テストチャート（タンタル厚さ $0.5 \mu\text{m}$ ）を用いて得られた、横、縦方向の微分位相像を図 2(a)、2(b))にそれぞれ示す。これらの像から、ある基準点からの経路積分を行うことにより相対的な位相マップが得られる。再構成した位相像を図 2(c)に示す。位相 $Phase(x,y)$ は、計算の簡略化のため、横、縦方向の微分位相像を $DX(x,y)$ 、 $DY(x,y)$ (いずれも $x=0 \sim xn$ 、 $y=0 \sim yn$)とし、基準点を $(0,0)$ としたとき、

$$Phase(x,y) = \left[\sum_{y=0}^y DY(0,y) + \sum_{x=yn}^y \{-DY(0,y)\} \right] / 2 + \left[\sum_{x=0}^x \{-DX(x,y)\} + \sum_{x=xn}^x DX(x,y) \right] / 2 \quad (2)$$

として求めた。図 2(c)中に白線で示された場所における位相分布を図 2(d)に示す。厚さ $0.5 \mu\text{m}$ のタンタルに対する 8 keV の線の位相変化は $0.26\pi \text{ rad}$ であり、ほぼ理論値に近い位相定量ができていることがわかる。

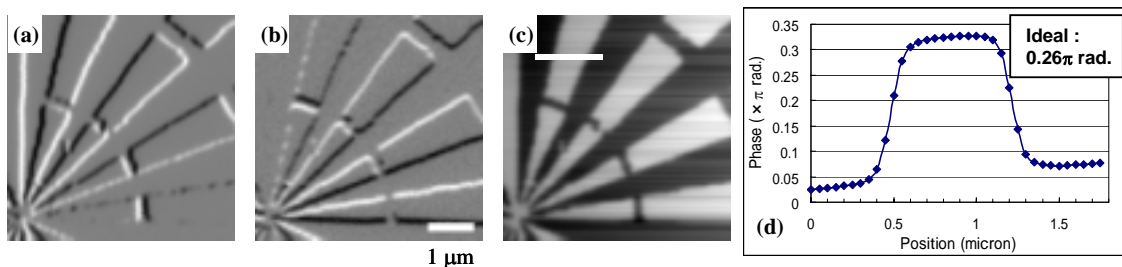


図 2 テストチャート（厚さ $0.5 \mu\text{m}$ タンタル）の微分位相像及び位相再構成像
 (a): 微分位相像(横方向) (b):微分位相像(縦方向) (c):微分位相像より再構成した位相像。
 (d):(c)において白線で表示された場所の位相分布。走査速度 6.5 Hz 、ステップ 50 nm のラスタースキャンにより得られた。画像の濃度はそれぞれ(a): 0.102π (白) \sim -0.105π (黒)、
 (b): 0.107π (白) \sim -0.110π (黒)、(c): 0.291π (白) \sim -0.175π (黒) のリニアグレースケール。

吸収像との比較

弱吸収物体として、直径 0.5 mm のガラス球を用いた測定を行った。透過率は 8 keV の X 線に対して 99.6% である。図 3 (a)に位相像、図 3(b)にイオンチャン

バー（Air:14 cm）を用いて同時に計測した吸収像を示す。吸収では見ることのできない球体の重なり具合が明瞭に観察できており、位相像の感度の高さを示している。

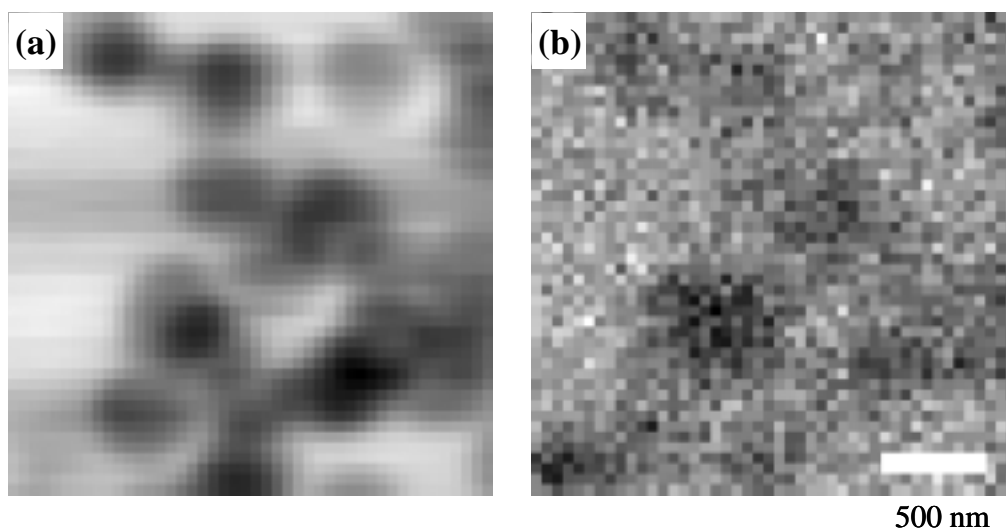


図2 直径 0.5 mm ガラス球の位相像及び吸収像

(a):位相像、(b):吸収像。走査速度 6.5 Hz、ステップ 50 nm のラスタースキャンにより得られた。画像の濃度はそれぞれ(a):1.005 (白) ~ 0.987 (黒) (b): -0.064π (白) ~ 0.037π (黒) (吸収像との比較のため正方向が黒) のリニアグレースケール。

References

- (1) A. Momose, T. Takeda, Y. Itai and K. Hirano, *Nature Medicine* **2**, (1996) 473.
- (2) P. Cloetens, W. Ludwig, J. Baruchel, D. Van Dyck, J. Van Landuyt, J. P. Guigay and M. Schlenker, *Appl. Phys. Lett.* **75**, (1999) 2912.
- (3) G. Schmahl, D. Rudolph, P. Guttman, G. Shneider, J. Thieme and B. Niemann, *Rev. Sci. Instrum.* **66**, (1995) 1282.
- (4) H. N. Chapman, C. Jacobsen and S. Williams, *Ultramicroscopy* **62**, (1996) 191.
- (5) H. Takano, K. Yokota and S. Aoki, *Jpn. J. Appl. Phys.* **38**, (1999) L1485.
- (6) H. N. Chapman, C. Jacobsen and S. Williams, *Rev. Sci. Instrum.* **66**, (1995) 1332.
- (7) H. N. Chapman, *Ultramicroscopy* **62**, (1996) 153.
- (8) J. Miao, P. Charalambous, J. Kirz and D. Sayre, *Nature* **400**, (1999) 342.
- (9) W. Yun, B. Lai, Z. Cai, J. Maser, D. Legnini, E. Gluskin, Z. Chen, A. A. Krasnoperova, Y. Vladimirovsky, F. Cherrina, E. Di. Fabrizio and M. Gentili, *Rev. Sci. Instrum.* **70** (1999) 2238.
- (10) A. Takeuchi, H. Takano, K. Uesugi and H. Takano, *Proc. SPIE* **4499** (2002) 29.
- (11) N. Kamijo, Y. Suzuki, M. Awaji, A. Takeuchi, H. Takano, T. Ninomiya, S. Tamura and M. Yasumoto: *J. Synchrotron Rad.* **9** (2002) 182.
- (12) N. Watanabe, S. Aoki, H. Takano, K. Yamamoto, A. Takeuchi, H. Tsubaki and T. Aota, "X-RAY MICROSCOPY", XRM99, Aug 2-6, 1999, Berkeley CA, USA, W. Meyer-Ilse, T. Warwick and D. Attwood eds., (American Institute of Physics, Melville, NY, 2000) pp. 84.
- (13) Y. Kagoshima, T. Ibuki, Y. Yokoyama, Y. Tsusaka, J. Matsui, K. Takai and M. Aino, *Jpn. J. Appl. Phys.* **40**, (2001) L1190