

高次高調波 13 nm 単一パルス軟 X 線顕微鏡の開発

(東大院理) 沖野友哉、○寺本高啓、大神征爾、深堀信一、山内 薫

【序】

単色化した高次高調波を軟 X 線光源として用いれば、高い時間分解能 (100 fs 以下) と高い空間分解能 (100 nm 以下) を兼ね備えた軟 X 線顕微鏡の開発が可能である[1, 2]。また、高次高調波の光子数が十分多く、単一パルスで顕微画像が取得できれば、複数のレーザーパルスを照射した場合に生じる試料へのダメージや装置の振動由来のイメージコントラスト低下を回避することができる[1]。近赤外光のレーザー光から発生される高次高調波は、近赤外光と同軸に発生するため近赤外光を励起光としたポンプ・プローブ計測を行うことが容易である。さらに、水の窓領域と呼ばれる波長 2~4 nm の光は、水の層は透過するがタンパク質などは透過しない。そのため、波長 2~4 nm の高次高調波を光源とした軟 X 線顕微鏡を作ることができれば、水分を含んだままの生体試料を観測できるものと期待される。

我々は現在、波長 13 nm の高次高調波を光源として、単一パルスで顕微画像が観測可能となる軟 X 線顕微鏡の開発を行っている。目標とする空間分解能は、100 nm、倍率は 650 倍である。この顕微鏡では、照明光学系として、軸外レシユバルツシルト型 Mo/Si (凹凸面多層膜) ミラー、結像光学系として、フレネルゾーンプレート、検出器として軟 X 線 CCD カメラを用いている。今回は、高次高調波 13 nm 単一パルス軟 X 線顕微鏡の仕様と現状について報告する。

【開発装置概要】

現在開発中の、軟 X 線顕微鏡の装置概念図を図 1 に示す。装置は、(I) 高次高調波発生部、(II) 基本波・高調波分離部 (軟 X 線分光器)、(III) 軟 X 線顕微鏡部から構成される。(I) の高次高調波発生部では、高繰り返し高強度フェムト秒レーザーシステム (Coherent, Legend Elite Cryo-MPA, 800 nm, 1 kHz, 16 mJ, 30 fs, $M^2 < 1.3$) の出力 (直径: 25 mm ($1/e^2$)) を焦点距離 $f = 5000$ mm の凹面鏡を用いてネオンガスセル (セル長: 80 mm) に集光照射し (ビーム直径 ($1/e^2$): 300 μm , 集光強度: 7.5×10^{14} W/cm²)、高次高調波を発生させる[3]。高次高調波の強度としては、13 nm において 100 nJ/pulse を達成することを目標としている。

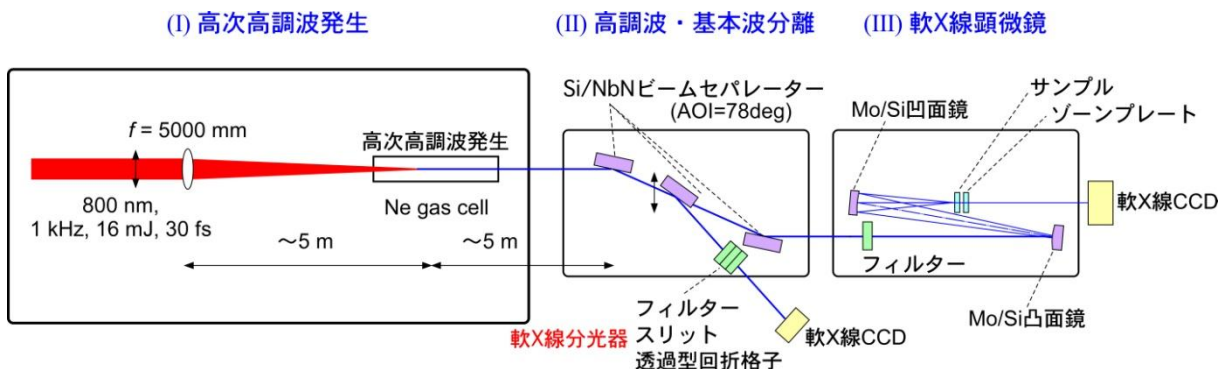


図 1: 高次高調波 13nm 単一パルス軟 X 線顕微鏡概略図

発生させた高次高調波は、5 m 下流で Si 基板に膜厚 10 nm の NbN をコーティングした 2 対の高ダメージ閾値ビームセパレーターを用いて高次高調波と基本波の分離を行う[4]。ここではさらに、Zr フィルター（厚さ 100 nm）で基本波と低次の高調波をブロックし、高次の高調波を選択した後、透過型回折格子を用いた軟 X 線分光器（観測可能範囲：10~30 nm）に高次高調波を導くことによって高次高調波のスペクトルを観測する。基本波を取り除いた高次高調波は、(III) 軟 X 線顕微鏡部に導かれる。

軟 X 線顕微鏡部は、軸外レシユバルツシルト光学系とサンプル、ゾーンプレート、軟 X 線 CCD カメラから構成される。軸外レシユバルツシルト光学系は Mo/Si の多層膜凹凸面鏡から構成される照明光学系である。サンプル上に集光する役割に加えて、13 nm の高次高調波のみを選択し、光源を単色化する役割も果たす。結像光学系として用いる、ゾーンプレートは、ゾーン数が 450、最外殻刻幅が 60 nm のものを用いる。本顕微鏡における理論上の空間分解能限界は 72 nm である。

【単一パルス計測】

単一パルスで顕微画像を取得するために、必要な光子数の見積もりを行う。現在開発中の軟 X 線顕微鏡の各光学素子、観測試料、検出器における軟 X 線の反射率または透過率は、表 1 に示す通りである。波長 13 nm の高次高調波の強度が 100 nJ/pulse である場合、軟 X 線 CCD カメラで検出される光子数は、 2×10^6 photons/pulse となる。本顕微鏡の倍率は 650 倍であり、検出器としてピクセルサイズが $13.5 \mu\text{m} \times 13.5 \mu\text{m}$ の軟 X 線 CCD カメラを用いており、1 ピクセルがサンプル上の 27 nm に対応する。従って、数ピクセルの信号が分離できれば、100 nm 以下の空間分解能を達成することができる。

【現状と今後】

高次高調波発生に用いるフェムト秒レーザーシステムの出力最適化を終え、現在、高次高調波の発生を行っている。今後は、波長 13 nm の高次高調波を光源として用いて、単一パルスで軟 X 線顕微画像の取得を目指す。さらに、高次高調波を水の窓領域にまで短波長化し、水の窓領域の軟 X 線顕微鏡を開発する予定である。

表 1: 軟 X 線顕微鏡に用いた光学素子のスループット

光学素子・試料・検出器	反射率/透過率
Si/NbNビームセパレーター (2枚)	49%
Zrフィルター (2枚)	49%
Schwartzchild光学系	36%
ゾーンプレート	10%
サンプル	10%
軟X線CCDカメラ	40%
全スループット	0.035%

【参考文献】

- [1] A. Ravasio *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **103**, 028104 (2009).
 [2] M. D. Seaberg *et al.*, CLEO2011, CTuH3.
 [3] E. Takahashi, Y. Nabekawa, and K. Midorikawa, *Opt. Lett.* **27**, 1920 (2002).
 [4] Y. Nagata, Y. Nabekawa, and K. Midorikawa, *Opt. Lett.* **31**, 1316 (2006).