

科学研究費補助金（特別推進研究）公表用資料
〔事後評価用〕

平成15年度採択分

平成20年 3月31日現在

研究課題名（和文）レーザープラズマ軟X線光源を用いた超高分解能多元物質顕微鏡の開発

研究課題名（英文）High-resolution, element-specific microscope using a laser-produced-plasma soft X-ray source

研究代表者

山本正樹（Yamamoto Masaki）

東北大学・多元物質科学研究所・教授



研究の概要：光学顕微鏡の解像度は光源の波長に比例する。本研究では、波長 13.5nm の軟X線を反射できる nm 周期多層膜ミラーで精密反射光学系を製作して、レーザープラズマ軟X線パルスを光源とする 50nm 解像の“明るい”透過型光学顕微鏡を開発し、世界初の1ショット撮像に成功した。軟X線は、電子に比べて桁違いに物質を通りやすく、非破壊で観察できる。電子顕微鏡では不可能な生体細胞の内部観察など、種々の未踏の領域の観測が期待される。

研究分野：工学

科研費の分科・細目：分科：応用物理学・工学基礎 細目：応用光学・量子光工学

キーワード：軟X線，多層膜，顕微鏡，レーザープラズマ，周期膜厚分布制御

1. 研究開始当初の背景

波長が 10nm 程度の軟X線では、厚さ 0.2 μ m 程度以下であれば、金属や誘電体、有機・無機といった物質の種類を問わず透過し、数 10nm の分解能で元素分布像が観察出来るナノテク技術開発に最適の光である。しかし、軟X線利用には、多岐にわたる基盤技術をベースとして、軟X線を結像に利用する軟X線光工学技術の開発が不可欠である。

2. 研究の目的

(1) 軟X線を自由に繰るために、精密多層膜結像ミラー開発を中心とする軟X線光工学技術を開発する。

(2) 技術開発目標として、波長 13 nm で、レーザープラズマ軟X線光源を用いて、分解能 50 nm の元素コントラスト画像が得られる Schwarzschild 軟X線顕微鏡を開発する。

3. 研究の方法

平面型の軟X線多層膜ミラー製作実績を精密曲面へ展開する装置群を開発統合する。

- 1) 超研磨曲面基板に特殊多層膜を形成する“軟X線特殊多層膜形成装置”の開発
- 2) “デブリ除去機構を備えたクリーンなレーザープラズマ(LPP)軟X線光源”の開発
- 3) 曲面ミラーの反射率特性を評価する LPP 光源“軟X線分光反射率計”の開発
- 4) 軟X線多層膜結像ミラーの結像特性を評価する LPP 光源“軟X線干渉計”の開発
- 5) 波面補正で回折限界結像を実現するための“多層膜リング装置”の開発

4. 研究の主な成果

本研究では、軟X線多層膜結像ミラーの製作・評価技術を高いレベルで確立し、技術実証の開発目標である「多元物質顕微鏡」を 1.8 m \times 2.0m の除振定盤上に実現した（図1）。

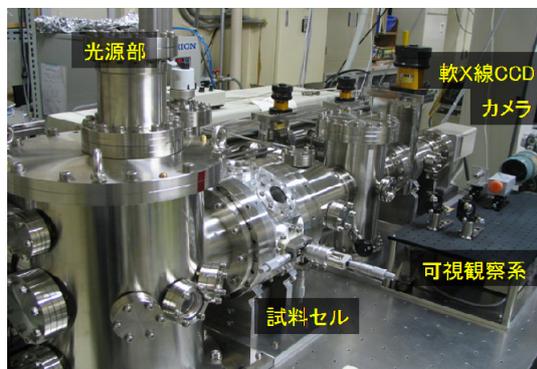


図1. 開発した TXM³ 本体写真. 光源部，試料セル部，可視観察系，軟X線 CCD カメラ部から成る。軟X線は空気にも吸収される安全なX線で、本体は真空中に保ち、生体等の試料は横から挿入する。

顕微鏡本体も多元物質科学研究所内で開発した。Transmission X-ray Multilayer Mirror Microscope (TXM³:ティーエックスエムキューブ)の名称で学会発表を行い、大きな反響を得た。心臓部には、照明2枚，対物2枚の計4枚の多層膜ミラーを内蔵する。光源のレーザープラズマは、赤外 YAG レーザーを金属面上に集光して生成する直径 0.2mm の高温プラズマで、軟X線を放射する。

[4. 研究の主な成果 (続き)]

開発した 50 倍光学系では、既に、CCD 検出器の解像限界の 400nm 解像で、励起レーザーの 1 ショットで撮像を実現した (図 2)。

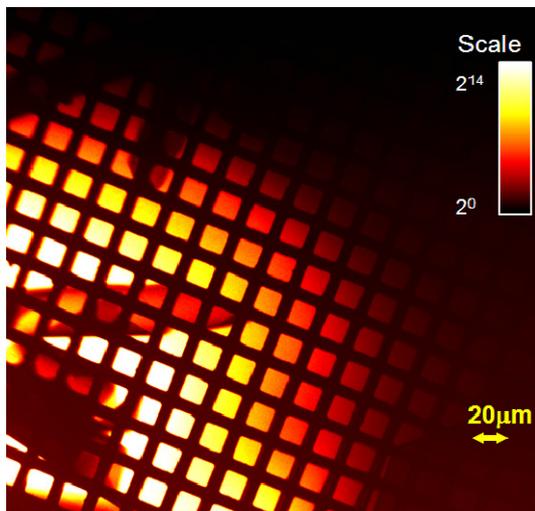


図 2. 世界初の 1 ショット超解像光学顕微鏡。波長 13.5nm, 50 倍. 厚さ 4 μ m のテスト用銅メッシュ越しに, Zr 箔の円筒状ロールが見える. 厚さ 0.2 μ m の Zr は半透明で周辺の白は, CCD 出力が飽和していることを示す.

この 1 ショット撮像では, nm 解像であっても外乱やブラウン運動等で像はボケない. バイオ細胞観察では, 照射損傷に関わりなく真の生体活動観察を実現するブレークスルーであり, 実用上の価値が非常に高い.

開発基盤の軟 X 線多層膜光工学技術では, 1) 精密多層膜結像ミラーの製作技術は, 使用波長の 13.5nm に必要な精度を十分に達成し, 3 倍の精度を要求される炭素の窓の波長 4.5nm の多層膜ミラー製作技術に要求される pm レベルを実現できた.

2) 開発した 50 倍対物用の多層膜反射ミラー製作では, 理論限界スループットの 8 割を達成できた. この明るい光学系で, 標準的な YAG レーザー (10Hz, 850mJ/パルス) の 1 ショットでの撮像に成功した. このため, 顕微鏡本体は, 次期実用機では除振対策等を大幅に簡素化できる.

さらに, 研究開始当初には全く予想していなかった従来にない高い実用化レベルの新たな光学系を発見できた.

3) 非球面を導入した実用解を新考案の解析的手法で漏れなく探索したところ, 従来型の Schwarzschild を置き換える実用特性の光学系設計解を発見できた (光設計奨励賞受賞). 特に, 従来型の 330nm のアライメント誤差許容値に対して, 20 倍の 7.6 μ m を許容する“合わせ鏡設計解”は実用性が高く, 抜本的な実用性能向上が期待できる.

5. 得られた成果の世界・日本における位置づけとインパクト

世界最高性能の光学系は, 視野 0.2mm の範囲を, ハイビジョン解像度 155 万画素を超える超高密度の 6000 \times 6000=3600 万画素で撮像できる究極光学像 (ZO-Vision) システムである. 設計解像度 30nm を達成する見通しを既に得ていることから, 生きたウィルスの観察が目前である. コマ撮りされた画像には高密度情報が記録され, 撮像後に視野内の全細胞活動を詳細にデータ解析できる. 顕微鏡の使い方を変えるインパクトがある.

6. 主な発表論文

(研究代表者は太字, 研究分担者には下線)

1. 戸坂亜希, 酒井優, 津留俊英, 山本正樹, 軟 X 線多層膜鏡の形状誤差補正のための大面積イオン銃を用いたミリング装置の開発, J. Vac. Soc. Jpn., 51, 115-117 (2008)
2. 原田哲男, 羽多野忠, 山本正樹, 軟 X 線実験室顕微鏡用の多層膜結像鏡開発, Photon Factory News 25, 28-32 (2007)
3. M. Toyoda and M. Yamamoto, Analytical designing of two-aspherical-mirror anastigmats permitting practical misalignments in a soft-X-ray optics, Opt. Rev. 13, 149-157 (2006)
4. T. Tsuru and M. Yamamoto, In-situ ellipsometric monitor with layer-by-layer analysis for precise thickness control of EUV multilayer optics, Thin Solid Films 515, 947-951 (2006)
5. T. Hatano, S. Kubota, Y. Adachi, T. Tsuru and M. Yamamoto, Normal incidence reflectometry of concave multilayer mirrors using synchrotron radiation to evaluate the period thickness distribution, AIP, Proc. 8th International Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation 705, 839-842 (2004)

ホームページ等

http://www.tagen.tohoku.ac.jp/labo/m_yamamoto/indexTok.htm