

軟X線蛍光顕微鏡の開発

課題番号 10555012

平成10年度～平成11年度科学研究費補助金（基盤研究(B)(2)）

研究成果報告書

平成12年3月

研究代表者 柳原美広

(東北大学科学計測研究所助教授)

はしがき

本研究は、平成 10 年度～平成 11 年度科学研究費補助金（基盤研究(B)(2)）「軟X線蛍光顕微鏡の開発（課題番号 10555012）」によって行われたものである。軟X線蛍光顕微鏡は軟X線または電子線を試料に照射し、それに含まれる原子から放出される軟X線蛍光を多層膜を蒸着したシュワルツシルト対物鏡で結像することによって、原子の種類の情報も含んだ試料局所の拡大像を得る新しい方式の顕微鏡である。本研究は 2 年の期限を設けて空間分解能 $0.5\mu\text{m}$ の軟X線蛍光顕微鏡を開発し、同方法が原理的に優れていることを実証するのが目的とした。

拡大率 50 倍のシュワルツシルト対物鏡に Mo/Si 多層膜を蒸着して搭載した軟X線蛍光顕微鏡で、Si を含んだ試料を電子線励起で観察したところ、Si の分布を示す顕微像を得ることができた。Mo/Si 多層膜の狭帯域反射によって Si 原子からの Si L 蛍光（中心エネルギー 92eV ）だけを感度よく分別して結像するという本顕微鏡の基本的な特徴が実証されたものである。

多層膜対物鏡は軟X線と同じように可視光も反射する。この性質を利用して、テスト試料を可視光で照射して可視用の CCD カメラで撮影した結果、 $0.7\mu\text{m}$ の分解能が確認できた。これはほぼ可視光の回折限界に達しており、本顕微鏡が高精度で調整されていることを示した。

軟X線の回折限界は可視光より小さいため、空間分解能の目標値 $0.5\mu\text{m}$ の達成が期待されたが、最終的には $1.5\mu\text{m}$ から $2.0\mu\text{m}$ が確認されるに留まった。しかし、波長の短い軟X線で $0.7\mu\text{m}$ を越えられなかったのは軟X線検出器自身の分解能不足が原因であった。この点については、拡大率のもっと高いシュワルツシルト対物鏡を採用するか、高分解能撮影が期待できるX線フィルムの採用による対応が考えられる。なお、軟X線検出器の高性能化の研究も進められており、長期的にはその面でも期待したい。今後は実際の生物試料や鉱物試料の観察を通して本顕微法の有用性が実証されることが期待される。

本顕微鏡は、拡大率 50 倍、開口数 0.25、物点と像点間の距離が 1m 以内という条件で設計を行った。シュワルツシルト光学系は二つの球面の曲率中心を一致させるよりも、僅かにずらせる方が高次の球面収差を消せることが知られている。そこで、光線追跡によるシミュレーションを行ったところ、曲率中心間の距離が 0.69mm のときに 30nm の空間分解能が得られることが分かった。この分解能を実現するには光学素子の仕上げ精度と合わせ精度の一層の高精度化が要求されるが、関連分野の研究も進んでおり、これに近い値の実現は十分可能と思われる。

このように、本研究は検出器の分解能という副次的な要因で制約を受けたが、目標とした基本性能を概ね確認して終了することができた。本研究結果はまだ完全とは言えないが、関連分野の発展の一助となれば幸いである。

東北大学図書



00010172992

附属図書館

平成 10 年度～平成 11 年度科学研究費補助金 (基盤研究(B)(2))

「軟 X 線蛍光顕微鏡の開発」

課題番号 10555012

研究組織

研究代表者：柳原美広 (東北大学科学計測研究所助教授)

研究分担者：江島丈雄 (東北大学科学計測研究所助手)

研究経費

平成 10 年度 11,900 千円

平成 11 年度 1,100 千円

計 13,000 千円

研究発表

(1) 学会誌等

1. M. Toyoda, Y. Shitani, M. Yanagihara, T. Ejima, M. Yamamoto, and M. Watanabe, "A Soft-X-Ray Imaging Microscope with a Multilayer-Coated Schwarzschild Objective: Imaging Tests," *Jpn. J. Appl. Phys.* **39** (2000) (in press).
2. 豊田光紀, 志谷能崇, 柳原美広, 江島丈雄, 山本正樹, 渡辺 誠: 「多層膜対物鏡を用いた結像型軟 X 線蛍光顕微鏡の開発と性能評価」東北大学科学計測研究所報告 第 48 巻 第 1 号 (1999) 39-61 (印刷中).
3. M. Toyoda, Y. Shitani, M. Yanagihara, T. Ejima, M. Yamamoto and M. Watanabe, "A Soft-X-Ray Imaging Microscope with Multilayer-coated Schwarzschild Optics," *Proceedings of VIth International Conference on X-Ray Microscopy* (2000) (in press).
4. M. Toyoda, Y. Shitani, M. Yanagihara, T. Ejima, M. Yamamoto and M. Watanabe, "A Soft-X-Ray Imaging Microscope Based on a Multilayer-Coated Schwarzschild Objective," *Abstracts of the 5th International Conference on the Physics of X-Ray Multilayer Structures* (2000) p. 11.1.
5. M. Yanagihara, "Polarimetric Characterization for Synchrotron Soft X-rays Using Multilayer Elements," *Abstracts of the 4th Hiroshima International Symposium on Synchrotron Radiation* (2000) p. 3.
6. 柳原美広: 「軟 X 線発光による界面の研究」第五回 X 線結像光学シンポジウム予稿集 (1999) 22-23.

7. 江島丈雄, 近藤祐治, 渡辺誠: 「He-I, He-II 用 2 色多層膜を用いた極紫外顕微光電子分光装置の開発」 第五回 X 線結像光学シンポジウム予稿集 (1999) 99-100.
8. 小池雅人, 山寄孝, 宮田登, 柳原美広, E. Gullikson, 原田善寿, 佐野一雄: 「軟 X 線フラットフィールドホログラフィックラミナー回折格子」 第五回 X 線結像光学シンポジウム予稿集 (1999) 105-106.
9. 志谷能崇, 豊田光紀, 柳原美広, 江島丈雄, 山本正樹, 渡辺誠: 「結像型軟 X 線発光顕微鏡の製作と性能評価」 応用物理学会東北支部第 54 回学術講演会講演予稿集 (1999) 137-138.
10. 宮田登, 石川禎之, 柳原美広, 渡辺誠: 「軟 X 線発光分光法による Mo/Si 多層膜の界面の評価」 応用物理学会東北支部第 54 回学術講演会講演予稿集 (1999) 139-140.
11. N. Miyata, S. Ishikawa, M. Yanagihara, and M. Watanabe, "Buried Interfaces in Mo/Si Multilayers Studied by Soft-X-Ray Emission Spectroscopy," *Jpn. J. Appl. Phys.* 38 (1999) 6476-6478.
12. 志谷能崇, 柳原美広, 江島丈雄, 山本正樹, 渡辺誠: 「結像型軟 X 線発光顕微鏡の開発 II」 第 60 回応用物理学会学術講演会講演予稿集 No.2 (1999) p.564.
13. 宮田登, 石川禎之, 志谷能崇, 柳原美広, 渡辺誠: 「軟 X 線発光分光法による Mo/Si 多層膜の界面層の評価」 第 60 回応用物理学会学術講演会講演予稿集 No.2 (1999) p.569.
14. M. Toyoda, Y. Shitani, M. Yanagihara, T. Ejima, M. Yamamoto and M. Watanabe, "A Soft-X-Ray Imaging Microscope with Multilayer-coated Schwarzschild Optics," *Abstracts of VIth International Conference on X-Ray Microscopy* (1999) 93-94.
15. T. Yamazaki, E. Gullikson, N. Miyata, M. Koike, Y. Harada, S. Mrowka, U. Kleineberg, J. Underwood, M. Yanagihara, and K. Sano, "Comparison of mechanically ruled versus holographically varied line-spacing gratings for a soft-x-ray flat-field spectrograph," *Appl. Opt.* 38 (1999) 4001-4003.
16. 荒井彰, 柳原美広, 渡辺誠: 「軟 X 線反射鏡用ガラス基板に対するイオンミリングの効果」 東北大学科学計測研究所技術室報告書 第 2 号 (1999) 11-16.
17. 豊田光紀, 柳原美広, 江島丈雄, 山本正樹, 渡辺誠: 「結像型軟 X 線発光顕微鏡の開発」 第 46 回応用物理学関係連合講演会講演予稿集 No.2 (1999) p.727.
18. 柳原美広: 「多層膜軟 X 線光学とその応用」 第 34 回 X 線分析討論会講演要旨集 (1998) 7-12.
19. 江島丈雄, 相川直志, 石野雅彦, 木村直樹, 近藤祐治, 渡辺誠: 「Schwarzschild 光学系を用いた顕微分光装置の開発」 第 34 回 X 線分析討論会講演要旨集 (1998) 27-28.
20. Dong-Eon Kim, Soo-Mi Lee, In-Joon Jeon, and M. Yanagihara, "Characterization of a multilayer soft X-ray reflector fabricated by pulsed laser deposition," *Appl. Surface Sci.*

127-129 (1998) 531-535.

21. M. Toyoda, N. Miyata, M. Yanagihara, and M. Watanabe, "Zero-Order Free, Multilayer-Coated Laminar Grating in the 31-nm Region," *Jpn. J. Appl. Phys.* 37 (1998) 2066-2067.

(2) 口頭発表

1. I.M. Toyoda, Y. Shitani, M. Yanagihara, T. Ejima, M. Yamamoto and M. Watanabe, "A Soft-X-Ray Imaging Microscope Based on a Multilayer-Coated Schwarzschild Objective," The 5th International Conference on the Physics of X-Ray Multilayer Structures, March 8, 2000.
2. M. Yanagihara, "Polarimetric Characterization for Synchrotron Soft X-rays Using Multilayer Elements," The 4th Hiroshima International Symposium on Synchrotron Radiation, March 16, 2000.
3. 宮田登, 石川禎之, 柳原美広, 渡辺誠: 「軟X線発光分光法による Mo/Si 多層膜界面の非破壊評価」第13回日本放射光学会年会 2000年1月19日.
4. 柳原美広: 「軟X線発光による界面の研究」第五回X線結像光学シンポジウム 1999年12月15日.
5. 江島丈雄, 近藤祐治, 渡辺誠: 「He-I, He-II 用2色多層膜を用いた極紫外顕微光電子分光装置の開発」第五回X線結像光学シンポジウム 1999年12月16日.
6. 小池雅人, 山崎孝, 宮田登, 柳原美広, E. Gullikson, 原田善寿, 佐野一雄: 「軟X線フラットフィールドホログラフィックラミナー一回折格子」第五回X線結像光学シンポジウム 1999年12月16日.
7. 志谷能崇, 豊田光紀, 柳原美広, 江島丈雄, 山本正樹, 渡辺誠: 「結像型軟X線発光顕微鏡の製作と性能評価」応用物理学会東北支部第54回学術講演会 1999年12月9日.
8. 宮田登, 石川禎之, 柳原美広, 渡辺誠: 「軟X線発光分光法による Mo/Si 多層膜の界面の評価」応用物理学会東北支部第54回学術講演会 1999年12月9日.
9. 宮田登, 柳原美広, 渡辺誠, 渡辺正満, 原田滋久, 辛埴: 「h-BN のN1s 共鳴励起発光スペクトルII」日本物理学会 1999年秋の分科会 1999年9月25日.
10. 志谷能崇, 柳原美広, 江島丈雄, 山本正樹, 渡辺誠: 「結像型軟X線発光顕微鏡の開発II」第60回応用物理学会学術講演会 1999年9月1日.
11. 宮田登, 石川禎之, 志谷能崇, 柳原美広, 渡辺誠: 「軟X線発光分光法による Mo/Si 多層膜の界面層の評価」第60回応用物理学会学術講演会 1999年9月1日.
12. 近藤祐治, 江島丈雄, 渡辺誠: 「極紫外顕微光電子分光用 He I, He II 共鳴線「二色多層膜」」第60回応用物理学会学術講演会 1999年9月1日.

13. M. Toyoda, Y. Shitani, M. Yanagihara, T. Ejima, M. Yamamoto and M. Watanabe, "A Soft-X-Ray Imaging Microscope with Multilayer-coated Schwarzschild Optics," The VIth International Conference on X-Ray Microscopy, August 4, 1999.
14. T. Ejima, Y. Kondo and M. Watanabe, "Two-color" reflection multilayers for He-I and He-II resonance lines for micro-UPS using Schwarzschild objective," The VIth International Conference on X-Ray Microscopy, August 6, 1999.
15. 豊田光紀, 柳原美広, 江島丈雄, 山本正樹, 渡辺誠: 「結像型軟X線発光顕微鏡の開発」第46回応用物理学関係連合講演会 1999年3月29日.
16. 山寄孝, 宮田登, 原田善寿, 柳原美広, 石野雅彦, 小池雅人: 「軟線平面結像ラミナー型ホログラフィック回折格子の製作と評価」第12回日本放射光学会年会 1999年1月9日.
17. 羽多野忠, 坂野究, 柳原美広, 山本正樹: 「Sc/Cr 多層膜偏光子を用いた偏向部ビームラインの直線偏光度測定」第12回日本放射光学会年会 1999年1月9日.
18. 宮田登, 柳原美広, 渡辺誠, 渡辺正満, 原田滋久, 辛埴: 「h-BN のN1s 吸収端励起発光スペクトル」第12回日本放射光学会年会 1999年1月8日.
19. 柳原美広: 「多層膜軟X線光学とその応用」第34回X線分析討論会 1998年11月9日.
20. 江島丈雄, 相川直志, 石野雅彦, 木村直樹, 近藤祐治, 渡辺誠: 「Schwarzschild 光学系を用いた顕微分光装置の開発」第34回X線分析討論会 1998年11月9日.

(3) 出版物

1. 波岡武・山下広順共編: 「X線結像光学」 培風館 pp. 1-309 1999年7月.
 柳原美広: §4.2.2. 表面粗さの効果 pp. 73-74.
 §8.3. レーザープラズマX線による評価 pp. 261-265.
 付録1. 軟X線領域における薄膜の光学定数の決定法 pp. 296-299.

平成 10 年度・11 年度

発 表 論 文 等
別 刷 集

目 次

“A Soft-X-Ray Imaging Microscope with a Multilayer-Coated Schwarzschild Objective: Imaging Tests,” M. Toyoda, Y. Shitani, M. Yanagihara, T. Ejima, M. Yamamoto, and M. Watanabe, <i>Jpn. J. Appl. Phys.</i> 39 (2000) (in press)	1
「多層膜対物鏡を用いた結像型軟X線蛍光顕微鏡の開発と性能評価」, 豊田光紀, 志谷能崇, 柳原美広, 江島丈雄, 山本正樹, 渡辺 誠, 東北大学科学計測研究所報告 第 48 巻 第 1 号 (1999) 39-61	12
“A Soft-X-Ray Imaging Microscope with Multilayer-coated Schwarzschild Optics,” M. Toyoda, Y. Shitani, M. Yanagihara, T. Ejima, M. Yamamoto and M. Watanabe, <i>Proceedings of VIth International Conference on X-Ray Microscopy</i> (2000) (in press)	35
“A Soft-X-Ray Imaging Microscope Based on a Multilayer-Coated Schwarzschild Objective,” M. Toyoda, Y. Shitani, M. Yanagihara, T. Ejima, M. Yamamoto and M. Watanabe, <i>Abstracts of the 5th International Conference on the Physics of X-Ray Multilayer Structures</i> (2000) p. 11.1	39
“Polarimetric Characterization for Synchrotron Soft X-rays Using Multilayer Elements,” M. Yanagihara, <i>Abstracts of the 4th Hiroshima International Symposium on Synchrotron Radiation</i> (2000) p. 3	40
「軟X線発光による界面の研究」, 柳原美広, 第五回X線結像光学シンポジウム予稿集 (1999) 22-23	41
「He-I, He-II 用 2 色多層膜を用いた極紫外顕微光電子分光装置の開発」, 江島丈雄, 近藤祐治, 渡辺誠, 第五回X線結像光学シンポジウム予稿集 (1999) 99-100	43
「結像型軟X線発光顕微鏡の製作と性能評価」, 志谷能崇, 豊田光紀, 柳原美広, 江島丈雄, 山本正樹, 渡辺誠, 応用物理学会東北支部第 54 回学術講演会講演予稿集 (1999) 137-138	45
「軟X線発光分光法による Mo/Si 多層膜の界面の評価」, 宮田登, 石川禎之, 柳原美広, 渡辺誠, 応用物理学会東北支部第 54 回学術講演会講演予稿集 (1999) 139-140	47
“Buried Interfaces in Mo/Si Multilayers Studied by Soft-X-Ray Emission Spectroscopy,” N. Miyata, S. Ishikawa, M. Yanagihara, and M. Watanabe, <i>Jpn. J. Appl. Phys.</i> 38 (1999) 6476-6478	49
「結像型軟X線発光顕微鏡の開発Ⅱ」, 志谷能崇, 柳原美広, 江島丈雄, 山本正樹, 渡辺誠, 第 60 回応用物理学会学術講演会講演予稿集 No.2 (1999) p.564	52
「軟X線発光分光法による Mo/Si 多層膜の界面層の評価」, 宮田登, 石川禎之, 志谷能崇, 柳原美広, 渡辺誠, 第 60 回応用物理学会学術講演会講演予稿集 No.2 (1999) p.569	53
“A Soft-X-Ray Imaging Microscope with Multilayer-coated Schwarzschild Optics,” M. Toyoda, Y. Shitani, M. Yanagihara, T. Ejima, M. Yamamoto and M. Watanabe, <i>Abstracts of VIth International Conference on X-Ray Microscopy</i> (1999) 93-94	54
「結像型軟X線発光顕微鏡の開発」, 豊田光紀, 柳原美広, 江島丈雄, 山本正樹, 渡辺誠, 第 46 回応用物理学関係連合講演会講演予稿集 No.2 (1999) p.727	56
「多層膜軟X線光学とその応用」, 柳原美広, 第 34 回X線分析討論会講演要旨集 (1998) 7-12	57
「Schwarzschild 光学系を用いた顕微分光装置の開発」, 江島丈雄, 相川直志, 石野雅彦, 木村直樹, 近藤祐治, 渡辺誠, 第 34 回X線分析討論会講演要旨集 (1998) 27-28	63
“Zero-Order Free, Multilayer-Coated Lamellar Grating in the 31-nm Region,” M. Toyoda, N. Miyata, M. Yanagihara, and M. Watanabe, <i>Jpn. J. Appl. Phys.</i> 37 (1998) 2066-2067	65

本報告書収録の学術雑誌等発表論文は本ファイルに登録していません。なお、このうち東北大学在籍の研究者の論文で、かつ、出版社等から著作権の許諾が得られた論文は、個別に **TOUR** に登録しております。