

## 平成25年度科学研究費助成事業（特別推進研究）自己評価書 〔追跡評価用〕

◆記入に当たっては、「平成25年度科学研究費助成事業（特別推進研究）自己評価書等記入要領」を参照してください。

平成25年 4月26日現在

<b>研究代表者氏名</b>	山本 正樹	<b>所属研究機関・部局・職</b>	(東北大学・多元物質科学研究所・教授)
<b>研究課題名</b>	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		
<b>課題番号</b>	15002001		
<b>研究組織 (研究期間終了時)</b>	研究代表者 山本 正樹 (東北大学・多元物質科学研究所・教授) 研究分担者 柳原 美廣 (東北大学・多元物質科学研究所・教授) 羽多野 忠 (東北大学・多元物質科学研究所・助教) 江島 丈雄 (東北大学・多元物質科学研究所・助教) 津留 俊英 (東北大学・多元物質科学研究所・助教) 豊田 光紀 (東北大学・多元物質科学研究所・助教)		

### 【補助金交付額】

年度	直接経費
平成15年度	58,500 千円
平成16年度	67,000 千円
平成17年度	34,800 千円
平成18年度	131,955 千円
平成19年度	17,000 千円
総計	309,255 千円

## 1. 特別推進研究の研究期間終了後、研究代表者自身の研究がどのように発展したか

特別推進研究によってなされた研究が、どのように発展しているか、次の(1)～(4)の項目ごとに具体的かつ明確に記述してください。

### (1) 研究の概要

(研究期間終了後における研究の実施状況及び研究の発展過程がわかるような具体的内容を記述してください。)

本特別推進研究では、軟X線を自在に操るための多層膜工学として、①軟X線多層膜鏡作製技術およびその反射率と周期膜厚評価技術を発展させるとともに、これらを基礎として軟X線光学を展開するため、②残留する反射波面誤差を計測する軟X線干渉計、③計測した残留誤差を補正する多層膜表面ミリング波面補正装置を開発した。これら要素技術によって、レーザープラズマ光源を用いた軟X線多層膜顕微鏡を完成させた。研究期間終了後は、多層膜ミリング波面補正、精密多層膜ミラー作製、および軟X線顕微鏡の応用展開について更に研究を進展させているので以下に報告する。

#### 1) 多層膜ミリング波面補正 (津留)

我々が目指す回折限界の結像の実現には上記の要素技術のさらなる高度化が要求され、これらの開発を並行して進めている。本研究推進の原動力となった研究代表者の独創による軟X線多層膜鏡の波面精度 0.1 nm を達成できる波面補正原理を実用化技術とすべく、H20年10月からH23年3月にJST先端計測分析技術・機器開発プログラムに採択された「軟X線多層膜鏡の1Å精度波面補正技術の開発(研究代表者:津留)」を行った。我々が提案した物理光学的な波面補正原理によると、多層膜の最表面1周期のミリングで生じる反射波面変化は基板形状変化0.1 nmに相当する。本特別推進研究によって、東北大多元研附属光器械工場では1 nmを切る形状精度の超研磨曲面基板を安定して製作できる技術を確立した。軟X線の強め合いの干渉を利用した多層膜鏡で満たすべき形状誤差0.1 nmの実現には1周期単位で多層膜をミリングすれば良く、最大でも10周期で済む。開発期間中に、

- 所定の強度分布を持つ大口径イオンビーム生成技術
  - ミリング膜厚の1 nm精度計測法
  - ミリング速度をφ50 mm凹面基板全面で±2%以内に均一化
- 曲面鏡ミリング技術
  - 曲面鏡上のミリング膜厚の1 nm精度計測法
  - 曲面鏡上のμm～mmミリング領域の精密アライメント技術
  - 曲面鏡上のμm～mmミリング領域の±1 nm精度ミリング技術
- ミリング波面補正原理の検証
  - 軟X線多層膜ミリングによるλ/10精度波面補正原理の検証
  - 軟X線マルチスリット干渉計による多層膜鏡の波面計測

をそれぞれ実施し、Mo/Si多層膜鏡の1 nm波面誤差を補正するため「10周期70 nmをイオンミリングし、最表面を4 nm膜厚のSi層内で完了させる」という開発目標を全て達成し、ミリング技術を実用化した。H24年度に行われた事後評価で「当初の開発目標を達成し、本事業の趣旨に相応しい成果が得られたと評価する」として[A]の評価を得た。

#### 2) 精密多層膜ミラー作製 (羽多野)

本特別推進研究の多層膜ミラー作製技術では、高精度特殊多層膜を曲面基板上に高い再現性で製作するイオンビームスパッタ特殊成膜装置を開発した。この装置を応用して、波長4.5 nmの軟X線に対して世界最高の18.4%という直入射反射率を持つ300周期Cr/C多層膜ミラーを作製した(図1)。これには、本成膜装置の9時間にわたる高度安定性が生かされている。一方、基板面内での膜厚分布制御性能を生かして、球面基板に4次の非球面成分を成膜で付加する技術を開発した。また、SPring-8の自由電子レーザーから得られる光子エネルギー20 eVの光を集光し、かつ40 eVの2次光成分を低減して、原子・分子分野の2光子イオン化過程の研究に使用するフィルタリング集光ミラーを開発した。さらに、2-(1)「学界への貢献の状況」で後述するように、膜厚勾配を持つ硬X線多層膜ミラーに応用し、X線ポリクロメーターを開発した。

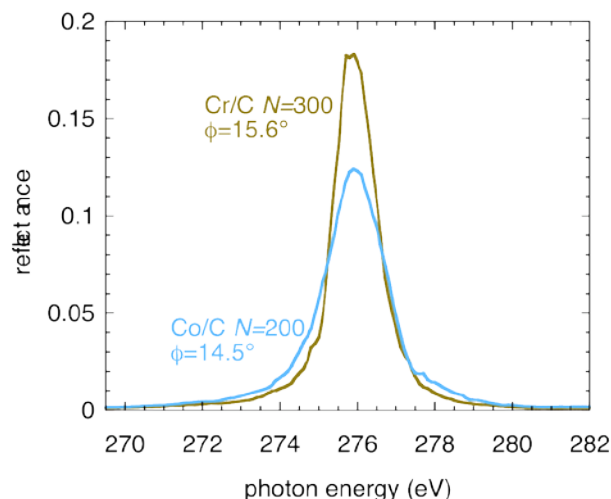


図1 300周期Cr/C多層膜ミラーの直入射反射率

## 1. 特別推進研究の研究期間終了後、研究代表者自身の研究がどのように発展したか（続き）

## 3) 軟 X 線顕微鏡の応用展開（江島）

本特別推進研究で開発した透過型軟 X 線顕微鏡の特徴の一つとして、生物試料の高コントラスト観察が挙げられる。しかし、それを実現するためには、とりわけ試料の準備と画像処理において課題を克服する必要があった。それらに関する研究を進めた結果、本顕微鏡の生物試料への応用展開が可能になった。本顕微鏡を用いた観察例として、マウス的大脑皮質の軟 X 線透過像を図 2 に示す。図の上方が皮質の外側に対応しており、軸索、細胞体、核、樹状突起などが鮮明に観察できていることが分かる。

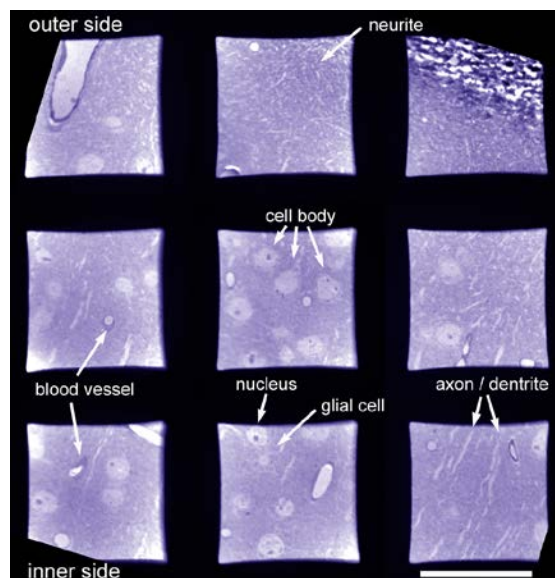


図 2 マウス大脑皮質の軟 X 線透過像。図中右下の白線の長さは 50  $\mu\text{m}$ 。

(2) 論文発表、国際会議等への招待講演における発表など（研究の発展過程でなされた研究成果の発表状況を記述してください。）

## 1. 特別推進研究の研究期間終了後、研究代表者自身の研究がどのように発展したか（続き）

## (3) 研究費の取得状況（研究代表者として取得したもののみ）

研究代表者：江島文雄

科学研究費補助金 基盤研究(A)「高効率シンチレータを用いた密着型軟X線顕微鏡による「生きた」細胞の高速動画撮影」H23-H25、総額 50,050,000 円

研究代表者：津留俊英

JST 先端計測分析技術・機器開発プログラム「軟X線多層膜鏡の1Å精度波面補正技術の開発」H20/10-H23/3

研究代表者：豊田光紀

株式会社 EUVL 基盤開発センター(NEDO 所管) 次世代半導体微細加工・評価基盤技術の開発(超低電力デバイスプロジェクト)「EUV マスクブランク欠陥検査技術開発(EUV 顕微鏡観察技術の開発)」H24/4-H26/3、総額 34,974,000 円

## (4) 特別推進研究の研究成果を背景に生み出された新たな発見・知見

本特別推進研究では、分解能 50 nm の回折限界軟X線顕微鏡実現のために、多層膜鏡作製技術や顕微鏡技術など多岐に亘る要素技術の確立を目指した。作製技術では、ナノメートル周期膜厚の多層膜成膜をモニタリングするため、多層膜成膜装置に独自開発した自動消光型エリプソメーターを導入するとともに、新アルゴリズムに基づくモニターデータ解析法を開発した。軟X線多層膜成膜のその場計測で、ピコメーターの膜厚感度を実証した。また、顕微鏡技術では、新しい光学設計法を考案し、実用的なアライメント誤差を許容する新型対物鏡を開発した。開発した非球面を利用する合わせ鏡対物鏡は、2枚の凹面鏡から成り、これらの間隔が100 mm と広く、試料周りに大きな自由領域が生まれた。本研究代表者は、エリプソメーターの超高感度およびリモートセンシング特性と波長440 nm で回折限界撮像を実証した合わせ鏡顕微鏡の試料周りの広さを積極的に利用した“傾斜エリプソメーター”を考案した。傾斜エリプソメーターは、従来の干渉法などの距離計測によらずに、表面または界面の傾斜を実時間で直読できる全く新しい精密3次元形状計測法である。

光学的性質が異なる反射面では、エリプソメーターで入射角と入射面の傾きを精密計測できる。すなわち、反射点の接平面の法線の方向余弦を精密計測できる。一方、合わせ鏡顕微鏡では、対向する非球面鏡の設置間隔100 mm の中央に物体面があって、像は右方向約1 m の遠方に結像する。試料周りが大きく空いていること、光線は十分遠方で結像することから、この構成では、照明光学系を試料周辺に自由に設置できる。従って、完全偏光照明が容易に実現できる。観測方向は顕微鏡の光軸方向に固定されているから、照明光を完全円偏光とすることで、試料表面の鏡面反射光成分をエリプソメーター計測して、微斜面の法線の方向余弦(面方位)を精密決定できる。さらに、微斜面の連続性を仮定すれば3次元形状を再構築できる。傾斜エリプソメーターの原理検証のために作製した装置(図3)で偏光計測したステンレス製立方体の3次元復元像を図4に示す。

傾斜エリプソメーターは計測環境や波長に制限が無く、任意の結像光学系が利用できる。計測法としての汎用性に加えて、従来に無い物体面の傾斜直読法で、多種多様な応用展開が期待できる。

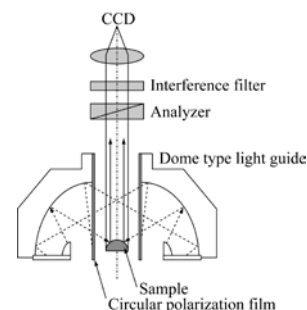


図3 試作した原理検証用傾斜エリプソメーターの模式図。

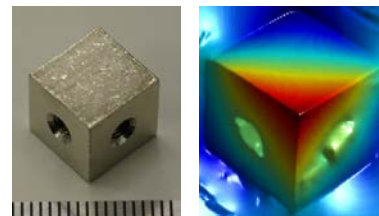


図4 (左)ステンレス製機械加工部品と、(右)エリプソメーター画像から復元した3次元形状。

2. 特別推進研究の研究成果が他の研究者により活用された状況

特別推進研究の研究成果が他の研究者に活用された状況について、次の(1)、(2)の項目ごとに具体的かつ明確に記述してください。

(1) 学界への貢献の状況 (学術研究へのインパクト及び関連領域のその後の動向、関連領域への関わり等)

1) 傾斜膜厚多層膜ポリクロメーターを用いた X 線反射率曲線計測装置 (羽多野)

本特別推進研究では高精度に膜厚分布制御した多層膜成膜技術を開発した。我々はこの技術を活用して X 線多層膜ポリクロメーターを開発し、高エネルギー加速器研究機構の松下正名誉教授らのグループに提供した。松下らは、X 線多層膜ポリクロメーターを利用してサブ秒～10 ミリ秒の時間分解能で時分割計測可能な新しい X 線反射率計を開発した。装置の模式図を図 5 に示す。面内方向に沿って周期膜厚が約 6 倍変化している多層膜をポリクロメーターとして用い、エネルギーが約 5 keV～30 keV の範囲で変化する集束 X 線ビームを実現した。多層膜は、150 mm 長のシリコン基板上で周期膜厚が 2 倍弱変化するものを 4 種類用意し、それらを予め楕円形状表面を持つように加工した銅ブロックにクランプした。焦点の位置に金薄膜 (14.3 nm 厚) を置き、PF 2.5 GeV リングで X 線反射曲線を X 線エネルギーの関数として  $10^{-4}$  の桁まで測定できることを確認した。これは、放射光科学界に貢献している顕著な例といえる。

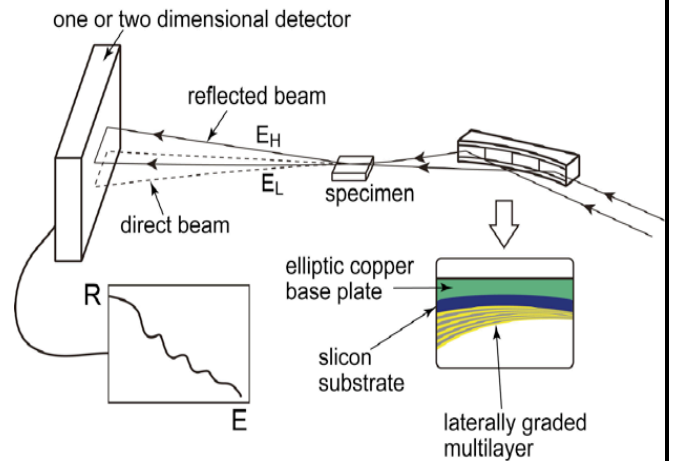


図 5 多層膜ポリクロメーターを用いた X 線反射率曲線計測装置。

2) 高次高調波集光用多層膜ミラー (豊田)

波長 800nm の Ti/S レーザーを Xe 等の希ガス上に集光することで発生する高次高調波は、波長 30 nm 近傍の軟 X 線領域での新しいレーザー光源として注目されている。我々は理研の緑川グループと協力して高次高調波用の集光用多層膜ミラーを開発している。高次高調波には多数の奇数次光が含まれ、実用的なスループットを得るには、多層膜ミラーには広い反射帯域が求められる。図 6 は 27-31 次高調波用に開発した高帯域ミラーで、非周期構造を採用することで 3 つの次数それぞれで、20% 程度の高い反射率を実現した。これは、量子ビーム科学界に貢献している顕著な例である。

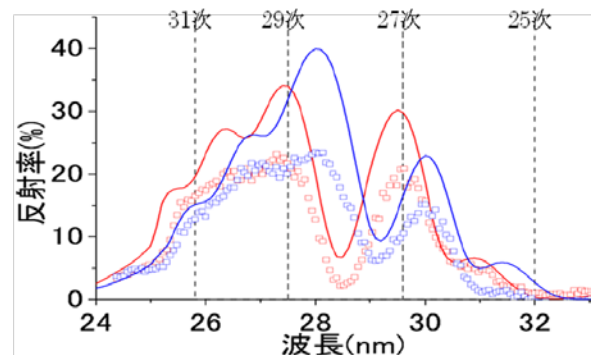


図 6 高次高調波用多層膜ミラーの反射スペクトル。

3) 密着型軟 X 線顕微鏡 (江島)

本研究期間中に開発した極紫外用 2 次元検出器を基に密着型軟 X 線顕微鏡を開発した。開発した顕微鏡は、軟 X 線領域で高い量子効率を示す Ce:LYSO シンチレータにより試料を透過してできた軟 X 線像を可視像に変換し、可視顕微鏡により拡大・結像する。平均粒径 0.52 μm の水中のポリスチレン球を用いて空間分解能を評価した結果、倍率 20 (NA=0.4) の対物レンズを用いた場合で、0.72 μm とほぼ回折限界の空間分解能を示した。また、得られた極紫外像からポリスチレン球と水の各々の透過率スペクトルを求め、それらから光学密度を得ることに成功した (図 7)。以上の結果から、水中の生物細胞試料の各オルガネラに対して、透過率スペクトルないしは吸収スペクトルを求めることが可能となった。この成果は、生物学界への貢献が期待できる。

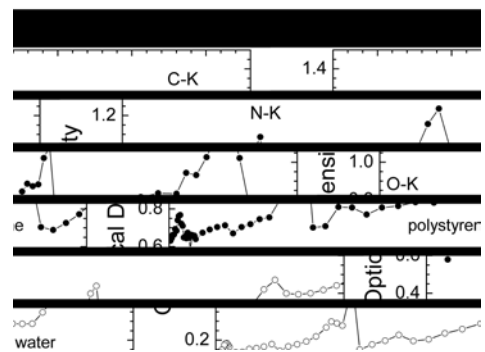


図 7 水中のポリスチレン球に対する水とポリスチレン球の光学密度。

## 2. 特別推進研究の研究結果が他の研究者により活用された状況（続き）

(2) 論文引用状況（上位10報程度を記述してください。）

## 【研究期間中に発表した論文】

No	論文名	日本語による簡潔な内容紹介	引用数
1	T. Ejima, T. Banse, H. Takatsuka, Y. Kondo, M. Ishino, N. Kimura, M. Watanabe, I. Matsubara, "Microscopic optical and photoelectron measurements of $MWO_4$ (M = Mn, Fe, and Ni)", J. LUMINESCENCE 119, 59-63 (2006)	$MWO_4$ (M = Mn, Fe, Ni)の微小結晶試料について顕微分光測定装置を用いて吸収・反射および光電子スペクトルを測定した。	20
2	T. Ejima, A. Yamazaki, T. Banse, K. Saito, Y. Kondo, S. Ichimaru, H. Takenaka, "Aging and thermal stability of Mg/SiC and Mg/Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> reflection multilayers in the 25-35 nm region", APPL. OPTICS 44, 5446-5453 (2005)	25-35 nm で高い反射率を示す Mg/SiC と Mg/Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 多層膜ミラーの経年変化に対する安定性を調べた。	16
3	M. Yamamoto, Y. Hotta, M. Sato, "A tracking ellipsometer of picometer sensitivity enabling 0.1 % sputtering-rate monitoring of EUV nanometer multilayer fabrication", THIN SOLID FILMS 433, 224-229 (2003)	極端紫外多層膜ミラーの成膜中に膜厚をピコメートル感度でモニタリングする自動消光エリプソメーターを開発した。	11
4	E. Majkova, Y. Chushkin, M. Jergel, S. Luby, V. Holy, I. Matko, B. Chenevier, L. Toth, T. Hatano, M. Yamamoto, "Nanometer-scale period Sc/Cr multilayer mirrors and their thermal stability", Thin Solid Films 497, 115-120 (2006)	軟X線直入射ミラーとして機能する Sc/Cr 多層膜について電子顕微鏡やX線散乱測定などによって総合的評価を行った。	7
5	T. Tsuru, T. Tsutou, M. Yamamoto, "Realtime layer-by-layer analysis for multilayer fabrication monitoring by an automatic null ellipsometer", THIN SOLID FILMS 455, 705-709 (2004)	極端紫外多層膜ミラー成膜をモニタリングする自動消光エリプソメーターにおいてリアルタイムで膜厚を求めるその場解析法を開発した。	6
6	T. Tsuru, 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)	軟X線 Mo/Si 多層膜のイオンビームスパッタリング成膜における膜成長過程を自動消光エリプソメーターで調べた。	4
7	T. Ejima, A. Yamazaki, T. Banse, T. Hatano, "Top layer's thickness dependence on total electron-yield X-ray standing-wave", J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom. 144-147, 897-899 (2005)	Mo/Si 多層膜ミラーを膜厚分布をつけた Mo 膜でコーティングし、分光反射率と全電子収量を同時計測して反射位相を評価した。	4
8	T. Tsuru, T. Tsutou, T. Hatano, M. Yamamoto, "Accurate measurement of EUV multilayer period thicknesses by in-situ automatic ellipsometry", J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom. 144-147, 1083-1085 (2005)	多層膜成膜中に膜厚を自動消光エリプソメーターでその場観察し、X線回折による評価と比較して0.1%の膜厚精度を確認した。	4
9	M. Toyoda, M. Yamamoto, "Analytical designing of two-aspherical-mirror anastigmats permitting practical misalignments in a soft-X-ray optics", Opt. Rev. 13, 149 (2006).	2枚鏡系である軟X線顕微鏡用非球面対物光学系のアライメント誤差を許容する設計解を解析的に探索する方法を見出した。	4
10	M. Takahashi, T. Hatano, T. Ejima, Y. Kondo, K. Saito, M. Watanabe, T. Kinugawa, J. Eland, "Polarization measurements of laboratory VUV light: a first comparison between multilayer polarizers and photoelectron angular distributions", J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom. 130, 79-84 (2003)	光電子放出角度分布による真空紫外線の直線偏光度計測法を提案し、多層膜偏光子で検出感度を較正した。	3

【研究期間終了後に発表した論文】			
No	論文名	日本語による簡潔な内容紹介	引用数
1	H. Fukuzawa, X.-J. Liu, G. Pruemper, M. Okunishi, K. Shimada, K. Ueda, <u>T. Harada</u> , <u>M. Toyoda</u> , <u>M. Yanagihara</u> , <u>M. Yamamoto</u> , et al., “Dead-time-free ion momentum spectroscopy of multiple ionization of Xe clusters irradiated by euv free-electron laser pulses”, Phys. Rev. A 49 031201 (2009).	Xe クラスタに強力な自由電子レーザーを照射し、その多重イオン化過程を調べるもので、多層膜ミラーで照射光を集光している。	26
2	H. Iwayama, K. Nagaya, M. Yao, H. Fukuzawa, -- M. Okunishi, K. Shimada, K. Ueda, <u>T. Harada</u> , <u>M. Toyoda</u> , <u>M. Yanagihara</u> , <u>M. Yamamoto</u> , et al., “Frustration of direct photoionization of Ar clusters in intense extreme ultraviolet pulses from a free electron laser”, J. Phys. B 42 134019 (2009).	Ar クラスタに強力な自由電子レーザーを照射し、その光イオン化過程を調べるもので、多層膜ミラーでレーザー光を集光している。	22
3	K. Motomura, -- K. Ueda, M. Okunishi, K. Shimada, <u>T. Harada</u> , <u>M. Toyoda</u> , <u>M. Yanagihara</u> , <u>M. Yamamoto</u> , et al., “Multi-coincidence ion detection system for EUV-FEL fragmentation experiments at SPring-8”, NUCLEAR INSTRUMENTS & METHODS IN PHYSICS RESEARCH SECTION A 606 770 (2009).	SPring-8において自由電子レーザーを用いてフラグメントイオン実験を行うため、多重コインシデンスイオン検出装置を建設し、その性能を評価した。	12
4	T. Matsushita, E. Arakawa, Y. Niwa, Y. Inada, <u>T. Hatano</u> , <u>T. Harada</u> , Y. Higashi, K. Hirano, K. Sakurai, M. Ishii, M. Nomura, “A simultaneous multiwavelength dispersive X-ray reflectometer for time-resolved reflectometry”, Eur. Phys. J., Special Topics 167, 113-119 (2009)	時分割 X 線反射率曲線計測を実現する X 線多層膜ポリクロメーターを開発した。	5
5	T. Matsushita, E. Arakawa, <u>T. Harada</u> , <u>T. Hatano</u> , Y. Higashi, Y. F. Yano, Y. Niwa, Y. Inada, S. Nagano, T. Seki, “Time-resolved X-ray reflectometry in the multiwavelength dispersive geometry”, AIP Conf. Proc. 1234, 927-930 (2010)	湾曲結晶および多層膜を分光集光素子に用いて 10 ミリ秒から分のスケールで X 線反射率曲線を時分割計測した。	5
6	P. Siffalovic, E. Majkova, L. Chitu, M. Jergel, S. Luby, J. Keckes, G. Maier, A. Timmann, S.V. Roth, <u>T. Tsuru</u> , <u>T. Harada</u> , <u>M. Yamamoto</u> , U. Heinzmann, “Characterization of Mo/Si soft X-ray multilayer mirrors by grazing-incidence small-angle X-ray scattering,” Vacuum 84, 19-25 (2009)	小角 X 線散乱法で軟 X 線 Mo/Si 多層膜ミラーの埋もれた界面の状態を非破壊で評価した。	3
7	I.A. Artyukov, R.M. Feschenko, A.V. Vinogradov, Ye.A. Bugayev, O.Y. Devizenko, V.V. Kondratenko, Yu.S. Kasyanov, <u>T. Hatano</u> , <u>M. Yamamoto</u> , S.V. Saveliev, “Soft X-ray imaging of thick carbon-based materials using the normal incidence multilayer optics,” Micron 41,722-728 (2010)	レーザー生成プラズマ軟 X 線源と多層膜集光ミラーによる照明法で炭素含有試料の炭素の窓領域軟 X 線透過像の撮像に成功した。	3
8	<u>T. Ejima</u> , F. Ishida, H. Murata, <u>M. Toyoda</u> , <u>T. Harada</u> , <u>T. Tsuru</u> , <u>T. Hatano</u> , <u>M. Yanagihara</u> , <u>M. Yamamoto</u> , H. Mizutani, “High throughput and wide field of view EUV microscope for blur-free one-shot imaging of living organisms”, Opt. Express 18, 7203-7209 (2010)	生きた生物試料を観察するために開発した EUV 多層膜反射型顕微鏡は、レーザープラズマを光源として十分な明るさと広視野であることを実証した。	2
9	<u>M. Toyoda</u> , K. Yamasoe, <u>T. Hatano</u> , <u>M. Yanagihara</u> , A. Tokimasa, <u>T. Harada</u> , T. Watanabe, H. Kinoshita, “At-Wavelength Extreme Ultraviolet Lithography Mask Observation Using a High-Magnification Objective with Three Multilayer Mirrors”, Appl. Phys. Express 5, 112501 (2012)	EUV リソグラフィ用マスクの欠陥検査を行うため、1500 倍の高倍率軟 X 線顕微鏡を用いて 13.5 nm で実波長観察をした。	1
10	<u>T. Tsuru</u> , <u>M. Yamamoto</u> , “Multi-bits coding by multi-directional valley pits permitting stamper mass-production and remote direction readout by polarization reflection”, Opt. Express 16, 9622-9627 (2008)	V 字型溝配列を記録媒体として偏光を利用して溝の方位を検出して情報読み出しする、高密度記録の新しい概念を提案し、実験的に検証した。	1

### 3. その他、効果・効用等の評価に関する情報

次の(1)、(2)の項目ごとに、該当する内容について具体的かつ明確に記述してください。

#### (1) 研究成果の社会への還元状況（社会への還元の程度、内容、実用化の有無は問いません。）

##### 1) 高倍率対物鏡による EUV リソグラフィマスクの実波長観察法（豊田）

極紫外 (EUV) リソグラフィ用のマスクの開発では、基板となる多層膜ミラーおよびミラー上に配置される吸収体パターン双方に生じる欠陥を検査するための顕微鏡システムが求められている。顕微鏡には、①動作波長 13.5 nm で、②最小線幅 40 nm の吸収体パターンを解像しつつ、③マスク全面 (対角長 210 mm) をできる限り短時間で観察することが求められる。我々は、100  $\mu\text{m}$  を超える広視野を高分解能で一括観察できる、多層膜ミラー結像系による顕微鏡システムを開発している。顕微鏡は、放射光施設 New SUBARU の偏向電磁石部で生じた白色 EUV 光を用い、波長 13.5 nm 用 Mo/Si 多層膜ミラーで構成した照明光学系、および、拡大結像系 (図 8) により、マスクの明視野反射像を CCD カメラ上に拡大投影する。拡大結像系は、Schwarzschild ミラー (開口数 0.25) の後段に凹面鏡を付加した 3 面鏡による 2 段拡大系を新たに考案した。付加鏡は、2 段拡大により倍率を約 1480 倍に向上させると同時に、フィールドフラットナーとして軸外収差の 1 つである像面湾曲を良好に補正する。このため、新型 3 面鏡では、直径 160  $\mu\text{m}$  を超える広い視野内で、約 30 nm の回折限界分解能が期待できる (図 9)。

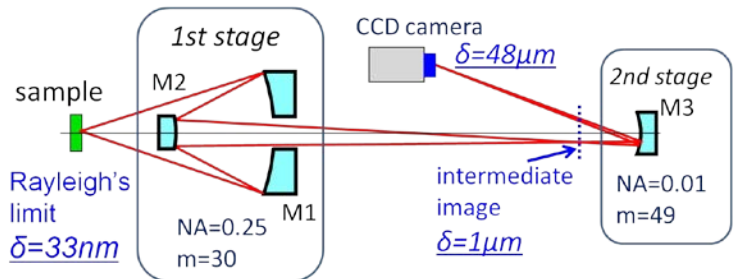


図 8 倍率 1500 倍の新型軟 X 線顕微鏡の拡大結像系。

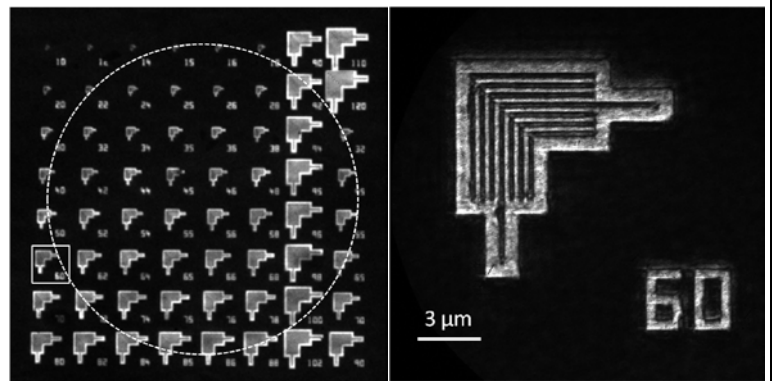


図 9 EUV リソグラフィ用マスクの 13.5 nm における実波長観察の例。(左) L 字パターンの中間像と、(右)幅 240 nm の L 字パターンの最終像。

##### 2) 傾斜エリプソメトリーによる 3 次元形状計測法（山本、津留）

1-(4) で述べたように、本特別推進研究の研究成果を背景に新規考案された傾斜エリプソメトリーは広範な研究領域と計測環境で適用できる汎用技術である。計測し得る試料の大きさは 0.1 mm から 100 m 以上に亘る。また、計測環境は、従来技術の気中・液中・固体に加えて、気相・液相・固相が形成する界面が対象となる。本技術は、「形状・傾斜検知及び／又は計測光学装置及び方法並びにその関連装置」として日本、中国、アメリカに特許出願済みである。

本技術を適用した多値情報記録再生技術の例を図 10 に示す。従来の光記録ディスクの記録ピットを V 溝形状にすれば、円偏光照明された V 溝ピットはその方位角に応じて反射楕円偏光の向きが変わるので、これをエリプソメトリーで精密計測する。V 溝方位に多値情報を載せることができるため新しい高密度光記録再生技術として提案し、様々な企業・団体から講演依頼や技術情報の提供依頼を受けた。

また、3 次元形状計測法についても、その汎用性の高さと高精度な点から、計測装置としての実用化を始め、生産管理への適用を目指す企業と連携を進めており、将来の実用化が大いに期待される。

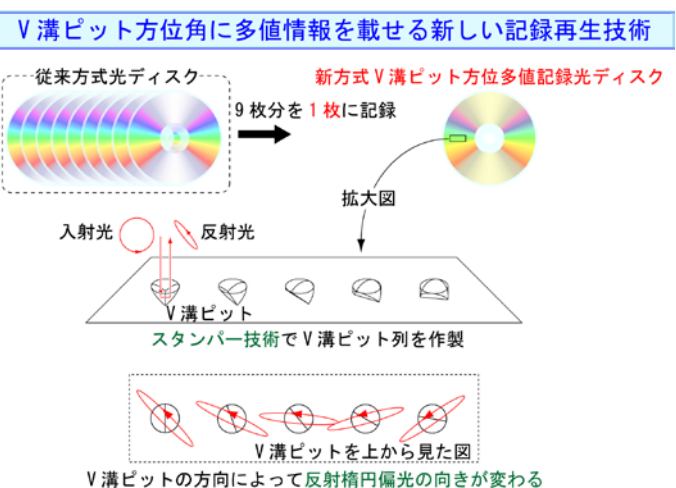


図 10 多値情報記録再生技術の例。



### 3. その他、効果・効用等の評価に関する情報（続き）

(2) 研究計画に関与した若手研究者の成長の状況（助教やポスドク等の研究終了後の動向を記述してください。）

#### 〈秋田県産業技術センター 主任研究員〉

H15 に本研究に研究支援者として参加し、軟 X 線「水の窓」領域用反射率計の光学設計に従事した。H16 から現職で、次世代高密度磁気記録媒体の研究開発と Schwarzschild 対物鏡を用いたマイクロ Kerr 磁化測定装置の開発に従事している。前者では、2  $\mu\text{m}$  の X 線ビームを用いた顕微 X 線磁気円二色性による磁気計測技術を開発し、世界で初めて 1 Tbit/in<sup>2</sup> に相当する磁性ドットアレイの作製に成功した。後者では、実験室規模で微小磁性体を評価するために、Schwarzschild 対物鏡を用いた磁化測定装置の開発を東北大と共同で行なっている。

#### 〈東北大学 多元物質科学研究所 助教〉

H15-H16 に本研究の研究支援者として、アライメント誤差を許容する軟 X 線顕微鏡用非球面对物光学系の開発に取り組んだ。H16 年 4 月に現職に着任してからも、一貫して軟 X 線顕微鏡用の光学系の開発を中心とした X 線光学の研究に従事している。これまでに、多層膜ミラーを用いた顕微対物鏡の弱点であった、ミラー設置誤差による解像度低下問題を根本的に解決できる、新規設計解を独自に見出した[光設計奨励賞 (H19: 日本光学会) 受賞研究]。近年は、さらに顕微鏡システムの高分解能化を図るために必須となる、対物鏡の高倍率化に取り組んでいる。H24 には、独自に開発した高倍率対物鏡(結像倍率 x1500)により、波長 13.5 nm の軟 X 線域において 30 nm 以下の空間分解能を達成した。

#### 〈兵庫県立大学 高度産業科学技術研究所 助教〉

本研究期間の間 (H15-H19)、東北大学大学院工学研究科修士、博士課程の学生として在籍し、軟 X 線顕微鏡の心臓部である Schwarzschild 対物鏡に Mo/Si 多層膜を高精度で成膜することに貢献した。これらによって H19 に博士の学位を取得した。H20 年 10 月に現職に着任してから現在まで、EUV リソグラフィ用マスクパターン検査に用いる全く新しいタイプの軟 X 線顕微鏡開発を中心に組み組んでおり、マスクパターンの位相評価や極微小な欠陥の 3 次元構造評価において新しい成果を出している。

#### 〈分子科学研究所 極端紫外光研究施設 助教〉

H16-H17 に本研究の研究支援者として、レーザープラズマを光源とした実験室型軟 X 線反射率計の設計、製作と改良に取り組んだ。H17 年 10 月から、高輝度光科学研究センター協力研究員、立命館大学非常勤講師などを経て、H23 年 8 月に現職に着き、現在に至っている。分子科学研究所の極端紫外光研究施設においては、H25 年 6 月から共用開始となる、日本初導入の走査型透過軟 X 線顕微鏡ビームラインの立ち上げを中心となって行っており、並行してこれを用いた軟 X 線領域での応用観察手法の開発も行っている。

#### 〈横浜市立大学 国際総合科学部 助教〉

H18-H19 に本研究の研究支援者として、イオンミリング装置の開発に従事した。H20 より現職にあり、走査型電子顕微鏡や偏光解析法を用いて表面の歪みと電子状態の関係に関する研究を行っている。

#### 〈山形大学 地域教育文化学部 准教授〉

本研究の全期間にわたって研究分担者として研究に従事。H15-H17 は軟 X 線多層膜成膜の成膜モニターとして独自に開発した 2 位相変調自動消光エリプソメーターを成膜装置に導入し、ピコメーターの膜厚感度を実証するとともに、多層膜の層毎の複素屈折率と膜厚を解析できる layer-by-layer 法を考案した。H18-H19 は多層膜結像鏡を物理光学的な手法で精密波面補正できる多層膜ミリング位相補正装置の開発に取り組んだ。H20-H23 にはミリング位相補正技術の実用化に関する「軟 X 線多層膜鏡の 1 Å 精度波面補正技術の開発」が JST 先端計測分析技術・機器開発事業に採択された。H24 年 10 月より現職。

#### 〈東北大学 多元物質科学研究所 准教授〉

本研究の全期間を通じて研究分担者として研究に従事し、透過型軟 X 線顕微鏡を設計・製作した。レーザープラズマを光源としてその性能評価を行った結果、電子顕微鏡では見えにくい軽元素試料について、パルス幅 10 nsec で明瞭に観察することに成功した。H20 年 12 月より現職。さらに、試料の準備法と画像処理において研究を進め、透過型軟 X 線顕微鏡の生物試料観察への応用展開を図った。また、密着型軟 X 線顕微鏡を開発し、生物試料の分光顕微計測を行なっている(科研費基盤研究(A))。