

機関番号：34412

研究種目：学術創成研究費

研究期間：2006 年度 ～ 2010 年度

課題番号：18GS0211

研究課題名（和文） ナノ位相トモグラフィー走査型透過電子顕微鏡の開発

研究課題名（英文） Development of Nano-phase Tomographic STEM

研究代表者

生田 孝 (IKUTA TAKASHI)

大阪電気通信大学・工学部・教授

研究者番号：20103343

研究成果の概要（和文）：走査型透過電子顕微鏡によるナノ位相トモグラフィー実現を目指し、長焦点深度の振幅・位相像分離再生手法を提案している。これに必要な 4 技術要素である、磁場界浸型電界放出電子銃、小型収差補正システム、円環状対物絞りと円環状アレイ型検出器の研究・開発を行い、試作走査型透過電子顕微鏡を用いてこの新結像手法を評価した。

研究成果の概要（英文）：To realize nano-phase tomographic STEM, a novel amplitude/phase separation imaging technique with very long field of depth has been proposed. Four significant technical components, the magnetic field immersion type FE-electron gun, the compact aberration corrector, the annular objective stop and the annular detector array were studied and developed in the present study. We evaluated this new imaging technique by using a proto-type STEM newly developed in this project.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
平成 18 年度	106,900,000	32,070,000	138,970,000
平成 19 年度	102,700,000	30,810,000	133,510,000
平成 20 年度	90,900,000	27,270,000	118,170,000
平成 21 年度	26,500,000	7,950,000	34,450,000
平成 22 年度	27,400,000	8,220,000	35,620,000
総計	354,400,000	106,320,000	460,720,000

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）薄膜・表面界面物性

キーワード：走査型透過電子顕微鏡、位相コントラスト、FE 電子銃、Cs コレクター

1. 研究開始当初の背景

高分解能電子顕微鏡で長焦点深度位相像が観察出来れば、試料回転ステージと組み合わせナノ位相トモグラフィーが実現出来、格子欠陥の観察などに応用が期待される。

さらに結像の長焦点深度化は色・球面両収差の影響を排除出来る。これらはエネルギーアナライザー装備による高分解能化の流れとは全く異なる、独自のアプローチである。

2. 研究の目的

透過型電子顕微鏡(TEM)傾斜照明方位に対するローテーションシリーズを、焦点移動平均を行いつつ収集すると、各画像のフーリエスペクトルには 8 の字状の無収差サークル対

(長焦点深度で、色・球面両収差の影響を受けない画像スペクトル)が生じる。独立したフィルタリング処理を施し再積算すると、無収差長焦点深度振幅・位相像が分離再生出来る。

一方、走査型透過電子顕微鏡(STEM)と TEM の結像に対する「相反定理」(Zeitler and Thomson 1970) によれば、特定方向照明時の TEM 観察像は、STEM ではその方向の弾性散乱電子検出器による像に等しい。この定理により上記の長焦点深度振幅・位相像の分離再生が STEM でも同様に実現可能になる。

本研究は STEM での長焦点深度振幅・位相像の分離再生と対物レンズ収差の影響排除を実現した、3 次元ナノ位相差トモグラフィー電子顕微鏡法の創出を目標としている。

3. 研究の方法

上記目的を達成するために、STEM に対応する以下の要素技術の研究を展開した。

- (1) 磁場界浸型超高輝度 FE 電子銃
- (2) 対物レンズ小型収差補正システム
- (3) 円環状対物絞りによる振幅・位相像の長焦点深度化と色・球面両収差の影響排除
- (4) 円環状アレイ型検出器による実時間振幅・位相像分離処理システム

4. 研究成果

- (1) 円環状対物絞りとアレイ検出器による STEM 長焦点深度振幅・位相分離再生の提案

円環状対物絞りによるホローコーン収束ビームで試料を走査し、収束ビームに対応する位置に小検出立体角円環状配列透過電子検出器を配置する(Fig. 1)。

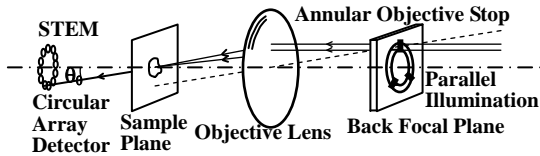


Fig. 1 STEM 内での円環状対物絞りと円環状配列透過電子検出器の配置

各検出器のビデオ信号は「相反定理」によって TEM 傾斜照明の方位に関するローテーションシリーズに相当する画像を同時に得るものである。TEM と同様に、各画像の Fourier スペクトルには、検出器の方位に対応した方向に整列する 8 の字状無収差サークル対が現れる。各画像のスペクトルを並列処理で同時に 8 の字 Fourier フィルタリングした後、再積算することで、無収差かつ長焦点深度の振幅・位相分離像が実時間再生出来る。

上記の目的には狭い幅の円環状対物絞りが望ましいが、信号利用率が低下するので、実用上内径外径比を 70-90% に選ぶ。この状況では対物レンズ球面収差の影響が残存するとともに、ある程度信号利用率の低下が生じる。この為、以下の超高輝度電子銃と対物レンズ収差補正システムが不可欠である。

- (2) 磁場界浸型超高輝度 FE 電子銃の開発

FE 電子銃は放出陰極と加速・集束レンズから構成され、超高真空内設置可能な低収差の静電レンズを用いるものはバトラー型 (Butler 1966) と呼ばれる。しかし静電レンズ収差の影響が大きく、光源輝度の改善には、より低収差の磁界レンズで集束後、静電レンズで加速する構造が望まれる (Kawasaki et al 2000)。本研究では収差低減に必要な短焦点化の為、永久磁石型磁界レンズを超高真空内に組み込み、磁界内部に放出陰極を配置し

て加速・集束作用を同時に行う、新しい磁場界浸形電子銃を開発することで、大幅な光源輝度の改善を目指した。永久磁石には超高真空内で放出ガスの少ない、TiN コーティングを施した SmCo 系磁石を採用している。

Fig. 2 内に磁場界浸型 FE 電子銃の構造を示した。バトラー型に比べて、界浸型はプローブ電流 1nA で 2 倍強、3nA で ~10 倍、10nA で ~100 倍の実効輝度を維持できる。また Fig. 2 には 200kV-STEM 搭載時のプローブ電流 I_p と最終スポット径 d の解析結果をバトラー型と比較して示した。 $I_p < 0.1nA$ では電子銃による差はないが、 $I_p > 1nA$ では磁場界浸型の方が小さなスポットが得られる。これは磁場界浸型がバトラー型に比べ集束作用強く、ビーム拡がり (開口角) が狭いので、後段コンデンサーレンズ収差の影響が小さくなる為である。

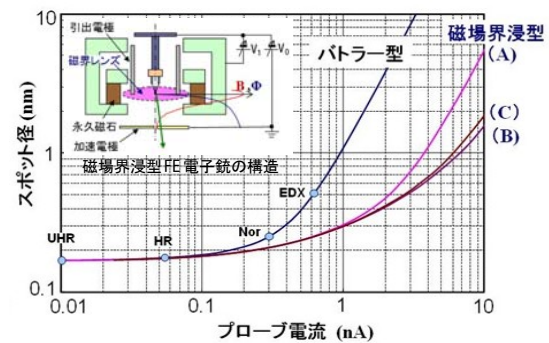


Fig. 2 磁場界浸型 FE 電子銃の構造とバトラー型とのスポット径比較

- (3) 対物レンズ小型収差補正システムの開発

無収差 (特に非回転対称収差) で、かつ高電流密度の収束プローブを得るため、収差補正システムを開発した。制御の容易さや装置全体の安定性を高めることを狙い、従来よりレンズ数を減らし小型化することを試みた。解析計算や電子軌道計算の結果、12 極子が 2 段、回転対称レンズが 3 段 (従来は 4 段) という構成で、従来と変わらない収差補正機能が実現できる事を明らかにした。この数値解析結果を基に装置設計・製作を行い、新開発の 200kV-STEM (HD2300S) に搭載した。本機は試料室下部に TEM (HF2000) の結像系を有する STEM/TEM 複合系である。収差量の測定にはロンチグラムを用い、計算機処理で自動的に 5 次までの収差量を計測できるシステムとし、得られた収差量を低減するため各所に設けられた偏向器を制御できるソフトウェアを新たに開発した。また、補正器の性能が充分発揮できるよう、制御電源ノイズや、磁場や振動などの外乱についても、フィルタ挿入やシールド装着などの対策を実施した。

開発した収差補正器を用いることで、28mrad までの位相平坦領域が得られ、Fig. 3 に示すように、1.4Å を上回る空間分解能を得

ることに成功した(収差補正なしでは 12mrad、 2.0\AA)。さらにまた条件次第では、 1\AA を上回る空間分解能が得られる可能性がある。

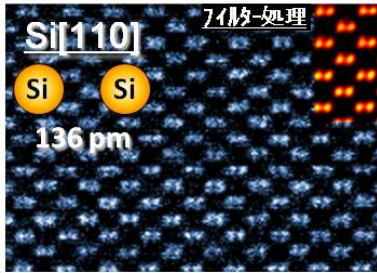


Fig. 3 Si 単結晶の収差補正高分解能 STEM 像

(4) 円環状対物絞り作製技術の開発

STEM でホローコーン収束ビームを作る円環状対物絞りは集束イオンビーム(Focused Ion Beam: FIB)により作製した。Fig. 4 に試作結果の例を示す。円環状対物絞り壁面からの高速散乱電子の生成を抑制するため、輪帯溝壁面にテーパ加工を施してある。目下円環状対物絞りのサイズとして、外径 $20\mu\text{m}$ (輪帯幅 $1\mu\text{m}$)から $120\mu\text{m}$ のものが製作可能である。

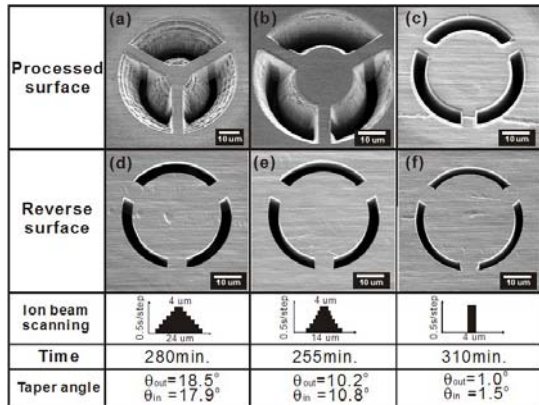


Fig. 4 FIB 作製テーパ付円環状対物絞り

(5) アレイ型検出器と並列実時間振幅・位相分離処理システムの開発

研究の初期段階では既存の STEM(Hitachi、HD2000)を使用、まず正方形配列の検出器群を製作して無収差、長焦点深度振幅・位相分離処理のアルゴリズム開発を実施した。Fig. 5 に振幅・位相分離再生処理の例を示す。

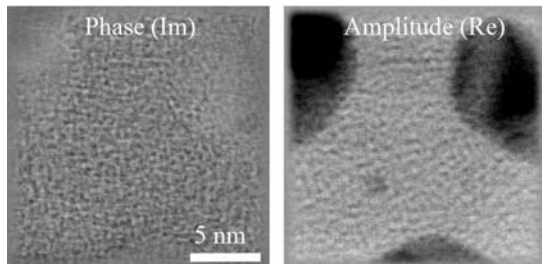


Fig. 5 振幅・位相分離再生処理の例 (アモルファス C 膜上の Au 微粒子)

試料下面の P47 シンチレーションプレートからの検出光をリレーレンズにより 8×8 正方形配列マルチアノード PMT に直接投影して 64 検出器分の電気出力を得る。これらは複数 PC により並列データ収集され、実時間表示されるとともに、長焦点深度の振幅・位相分離再生に必要な 8 の字 Fourier フィルタリング等の処理が施される(APCO 製)。

研究の後半では上記検出器の光結合効率の低さを改善する目的で、シンチレーター直接結合方式光ファイバー型円環状配列検出器の試作を試みた。検出器は、シンチレーターを光ファイバーの端面(受光面)に接着し、円環状に配置した光ファイバーアレイである。

プラスチックファイバーはSTEM真空内の検出器位置に設置し、アダプターを介してSTEM真空外のPMT各アノードと直接結合させ、効率良く信号を取得する(Fig. 6, APCO製)。

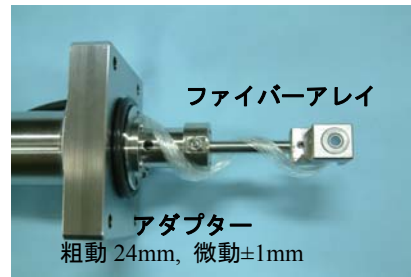


Fig. 6 シンチレーター直接結合方式光ファイバー型円環状配列検出器とアダプター

本研究で新たに開発したSTEM鏡体(Fig. 7, HD2300S)にこの光ファイバーアレイ検出器を取り付け、走査像を確認した。検出効率は100%に近く、位相像観察に充分利用出来る。



Fig. 7 新開発の STEM 鏡体(HD-2300S)

(6) 国内外における位置づけと今後の展望

独自の発想による、「日本発」の電子顕微鏡高性能化、高機能化の試みであり、世界の主流であるエネルギーアナライザー装備による電子顕微鏡高分解能化の流れとは異なった方向のアプローチと位置づけられる。

さて STEM と TEM の結像に対する「相反定理」によって、同等の観察手法が TEM についても実現可能である。これについては、共同研究者である大阪大学高井義造教授のグループで TEM 版の試みが並行進行している(科研費、平成 20-22 年度基盤研究 A、「動的ホローコーン照明による球面収差と色収差の同時補正」)。類似の手法を用いた研究は、我々と高井教授のグループ以外では国内外ともに全く行われていないと思われる。

当初予定していた STEM 位相トモグラフィは、残念ながら達成出来ていないが、本研究で理論面及び技術的基盤の確立と問題点の洗い出しが実施出来た。これにより当初の目標に向けた今後の研究展開が期待できる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者には下線)

[雑誌論文] (計 32 件)

- 1) T. Ishida, T. Kodama, K. Ogai, and T. Ikuta, “Characteristics of an optical fiber array detector for phase shift measurement in the STEM,” Proceedings of the 8th International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices '11 (ALC'11), held in Seoul, Korea, May 22-27, 2011, 無, pp. 221-222
- 2) 松谷 貴臣, 田中 武雄, 川崎 忠寛, 田屋 昌樹, 生田 孝 “走査型透過電子顕微鏡への輪帯瞳を用いた電子光学システムの開発”平成22年電気学会基礎・材料・共通部門大会論文集, 無, 2010, pp. 482-485
- 3) T. Kawasaki, T. Matsutani, T. Ikuta, M. Ichihashi and T. Tanji “Simulation Study of a Hollow Cone-Shaped Probe in Aberration-Corrected STEM for High-resolution Tomography” Ultramicroscopy, 有, Vol. 110, 2010, pp. 1332-1337
- 4) Takaomi Matsutani, Masaki Taya, Takeo Tanaka, Yoshihide Kimura, Yoshizo Takai, Tadahiro Kawasaki, Mikio Ichihashi, and Takashi Ikuta “Development of Parallel Image Detection System Using Annular Pupils for Scanning Transmission Electron Microscope” AIP Conference Proceedings, 有, Vol. 1282, 2010, pp. 111-114.
- 5) T. Matsutani, M. Taya, T. Fujimura, H. Inui, T. Tanaka, Y. Kimura, Y. Takai, Kawasaki, M. Ichihashi and T. Ikuta “Development of Parallel Detection and Processing System using Multidetector Array in Scanning Transmission Electron Microscope with Annular Pupil” Plasma Application and Hybrid Functionally Materials, 無, Vol. 19, 2010, pp. 87-88
- 6) T. Ikuta “Transmission and Scanning-transmission Microscopy using Annular Objective Pupil (Invited)” Proceedings of the 7th International Symposium on Atomic Level Characterization for New Materials and Devices '09 (ALC'09), held in Maui, Hawaii, USA, Dec. 6-11, 2009, 10AM02, (2009年12月10日発表), 無, pp. 395-399
- 7) T. Matsutani, M. Taya, T. Tanaka, Y. Kimura, Y. Takai, T. Kawasaki, M. Ichihashi, T. Ikuta, ”Development of Electron Optical System Using Annular Pupils for Scanning Transmission Electron Microscope” Proceedings of the 7th International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices '09 (ALC'09), held in Maui, Hawaii, USA, Dec. 6 - 11, 2009, 08P37, (2009年12月8日発表), 無, pp. 245-248
- 8) T. Kawasaki, T. Matsutani, M. Taya, Y. Kimura, M. Ichihashi and T. Ikuta “Focal Depth Extension by Hollow-cone Illumination with Annular Pupils for 200kV-Scanning Transmission Electron Microscope Tomography” Advances in Applied Plasma Science, 有, 2009, pp. 261-262
- 9) T. Matsutani, M. Taya, T. Fujimura, H. Inui, T. Tanaka, Y. Kimura, Y. Takai, T. Kawasaki, M. Ichihashi, T. Ikuta “Annular Pupils for Electron Optics Able to Suppress High-Energy Electron Scattering Formed by Focused Ion Beam Technique” Advances in Applied Plasma Science, 有, Vol. 7, 2009, 259-260
- 10) 生田 孝 “(講座)結像光学系の3次元結像特性 (Three-dimensional Imaging Characteristics in Imaging Optical Systems)” 顕微鏡, 有, Vol. 44, 2009, pp. 121-129
- 11) Takaomi Matsutani, Masaki Taya, Takashi Ikuta, Tetsuya Fujimura, Hirohiko Inui, Takeo Tanaka, Ippei Shimizu, Yoshihide Kimura, Yoshizo Takai, Tadahiro Kawasaki, Mikio Ichihashi “Evaluation of annular pupil for scanning transmission electron microscope formed by focused ion beam technique” Vacuum, 有, Vol. 83, 2009, pp. 201-204
- 12) Masaki Taya, Takashi Ikuta and Yoshizo Takai “Wave Field Restoration using Focal-depth Extension Techniques under dynamic hollow-cone illumination” Optik, 有, Vol. 119, 2008, pp. 153-160
- 13) T. Kawasaki, M. Ichihashi, T. Matsutani, Y. Kimura and T. Ikuta “Aberration Analysis of Cs-corrector System with Twin Hexapoles and Transfer Lens Doublet in Scanning Transmission Electron Microscope by Simple Ray Tracing Based on Geometrical Optics” Surf. Interface Analysis, 有, Vol. 40, 2008, pp. 1732-1735
- 14) 小粥 啓子, 田屋 昌樹, 松谷 貴臣, 生田 孝, 田中 武雄, 高井 義造 “走査電子顕微鏡のための新しい収差補正法” 金属, 有, Vol. 78, 2008, pp.1075-1078
- 15) Tuneo Yasue, A. Nakaguchi, M. Hashimoto, T. O. Mentis, A. Locatelli, E. Bauer and Takanori Koshikawa “Effects of Coulomb Interaction between Photoelectrons on XPEEM” Proceedings of the 6th International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices '07 (ALC'07), held in Kanazawa, Japan, Oct. 28 - Nov. 2, 2007, TuP-33 (2007年10月30日発表), 無, pp. 207-211
- 16) Takaomi Matsutani, Masaki Taya, Takashi Ikuta, Tetsuya Fujimura, Hirohiko Inui, Takeo Tanaka, Yoshihide Kimura, Yoshizo Takai, Tadahiro Kawasaki, and Mikio Ichihashi “Development of Annular Pupil for Electron Optics by Focused Ion Beam Technique” Proceedings of the 6th International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices '07 (ALC'07), held in Kanazawa, Japan, Oct. 28 - Nov. 2, 2007, TuP-13 (2007年10月30日発表), 無, pp. 147-150
- 17) Masaki Taya, Takashi Ikuta, Takaomi Matsutani, Makoto Fujiwara, Takeo Tanaka, Keiko Ogai, Yoshihito Harada, Hidekazu Saito and Yoshizo Takai “Development of an Aberration-free Phase Imaging System using a Detector Array and an Annular Pupil in Scanning Transmission Electron Microscopy” Proceedings of the 6th International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices '07 (ALC'07), held in Kanazawa, Japan, Oct. 28 - Nov. 2, 2007, TuP-7 (2007年10月30日発表), 無, pp. 132-135
- 18) Tadahiro Kawasaki, Mikio Ichihashi, Taisuke Nakamura, Takeshi Kawasaki, Takaomi Matsutani, Yoshihide Kimura

and Takashi Ikuta "Interpretation of Cs-corrector System with Twin Hexapoles and Transfer Doublet based on Geometrical Optics Theory" Proceedings of the 6th International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices '07 (ALC'07), held in Kanazawa, Japan, Oct. 28 - Nov. 2, 2007, TuP-2 (2007年10月30日発表), 無, pp. 119-122

19) Takashi Ikuta and Mikio Ichihashi "Phase Imaging Microscopy with Increased Depth of Focus by TEM and STEM (Invited)" Proceedings of the 6th International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices '07 (ALC'07), held in Kanazawa, Japan, Oct. 28 - Nov. 2, 2007, MoA-2 (2007年10月29日発表), 無, pp. 56-60

20) Masaki Taya, Takaomi Matsutani, Takashi Ikuta, Hidekazu Saito, Keiko Ogai, Yoshihito Harada, Takeo Tanaka and Yoshizo Takai "Development of a Parallel Detection and Processing System using a Multidetector Array for Wave Restoration in Scanning Transmission Electron Microscopy" Rev. Sci. Instrum., 有, Vol. 78, 2007, pp. 083705-1 - 083705-5

21) Tadahiro Kawasaki, Mikio Ichihashi, Takaomi Matsutani, Yoshihide Kimura and Takashi Ikuta "Aberration Analysis of Cs-corrector System with Twin Hexapoles and Transfer Lens Doublet in Scanning Transmission Electron Microscope by Simple Ray Tracing Based on Geometrical Optics" Proceedings of the International Symposium on EcoTopia Science, 無, Vol. 1, 2007, pp. 1245-1247

22) 藤原 誠, 田中 武雄, 志水 一平, 松谷 貴臣, 日坂 真樹, 安江 常夫, 生田 孝, 田屋 昌樹, 木村 吉秀, 高井 義造, 川崎 忠寛, 市橋 幹雄 "集束イオンビームを用いた電子光学系輪帯瞳用アパーチャの作製" 真空 (J. Vac. Soc. Jpn), 有, Vol. 50, 2007, pp. 639-643

23) Takaomi Matsutani, Masaki Taya, Takashi Ikuta, Tetsuya Fujimura, Hrihiko Inui, Takeo Tanaka, Yoshihide Kimura, Yoshizo Takai, Tadahiro Kawasaki, Mikio Ichihashi "Development of Annular Pupil for Scanning Transmission Electron Microscope by Focused Ion Beam Technique" Advances in Applied Plasma Science, 有, Vol. 6, 2007, pp. 209-212

24) Masaki Taya, Takaomi Matsutani, Takashi Ikuta, Hidekazu Saito, Keiko Ogai, Yoshihito Harada, Takeo Tanaka and Yoshizo Takai "Development of a Parallel Detection and Processing System using a Multidetector Array for Wave Restoration in Scanning Transmission Electron Microscopy," Rev. Sci. Instrum., 有, Vol. 78, 2007, pp. 083705-1 - 083705-5

25) K. Tamura, T. Ikuta, R. Shimizu and M. Ichihashi "New Computer Simulation Software of Electron Trajectories for Evaluation of Magnetic Field Immersion-Type Field Emission Gun" Japanese J. of Appl. Phys., 有, Vol. 46, 2007, pp. 834-837

26) 藤原 誠, 田中 武雄, 志水 一平, 松谷 貴臣, 日坂 真樹, 安江 常夫, 生田 孝, 田屋 昌樹, 木村 吉秀, 高井 義造, 川崎 忠寛, 市橋 幹雄 "集束イオンビームを用いた電子光学系輪帯瞳用アパーチャの作製" 真空 (J. Vac. Soc. Jpn), 有, Vol. 50, 2007, pp. 639-643

27) 笹倉 祐, 日坂 真樹, "反射型超音波変調スペックル光計測" 生体医工学, 有, Vol. 45, 2007, pp. 235-241

28) Y. Yamaguchi, R. Shimizu, T. Ikuta, T. Kikuchi and S. Takahashi "Effective Resolution of Phase-contrast Images in X-ray Microscopy" Journal of Surface Analysis, 有, Vol. 13, 2006, pp. 223-233

29) T. Yasue, R. Amakawa, H. Shimizu, A. Nakaguchi, T. Koshikawa and E. Bauer "Anomalous Step Contrast in LEEM during Growth of Pb on W(110)" Proceedings of the 5th International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices ALC'05, 無, 2006, pp. 680-683

30) M. Hisaka "Ultrasound-modulated optical parallel speckle measurement with stroboscopic illumination in a coaxial reflection system" Applied Physics Letters, 有, Vol. 88, 2006, pp. 033901-1 - 033901-3

31) Y. Takai, M. Taya, H. Chikada and Y. Kimura "Atomic Level Characterization Based on Defocus Modulation Electron Microscopy" Microchimica Acta, 有, Vol. 155, 2006, pp. 11-17

32) M. Taya, T. Kawasaki and Y. Takai "Cross-sectional image obtained from spherical aberration-free three-dimensional image intensity distribution in transmission electron microscopy" Journal of Electron Microscopy, 有, Vol. 55, 2006, pp. 27-30

[学会発表] (計 21 件)

1) 小粥 啓子, 児玉 哲司, 生田 孝 "S(T)EMアレイ検出器の試作" 真空表面科学合同講演会予稿集, 2010年11月, 4P-097, (2010年11月4日発表), 大阪大学コンベンションセンター

2) 松谷 貴臣, 田中 武雄, 川崎 忠寛, 田屋 昌樹, 生田 孝 "走査型透過電子顕微鏡への輪帯瞳を用いた電子光学システムの開発" 平成22年電気学会基礎・材料・共通部門大会, 2010年9月, 沖縄

3) Takaomi Matsutani, Tsuhika Yasumoto, Takeo Tanaka, Tadahiro Kawasaki, Mikio Ichihashi, Takashi Ikuta, "Development of Electron Optical System Using Annular Pupils for Scanning Transmission Electron Microscope by Focused Ion Beam" 17th International Conference on Ion Beam Modification of Materials 2010, Aug. 22-27, Montreal, Canada

4) 川崎 忠寛, 松谷 貴臣, 生田 孝, 市橋 幹雄, 丹司 敬義 "収差補正STEMにおける輪帯絞りをを用いたプローブ形成 -シミュレーション解析-" 日本物理学会 第65回年次大会, 2010年3月20-23日, (2010年3月21日発表), 岡山大学

5) Takaomi Matsutani, Masaki Taya, Takeo Tanaka, Yoshihide Kimura, Yoshizo Takai, Tadahiro Kawasaki, Mikio Ichihashi, and Takashi Ikuta, "Development of Parallel Detection and Processing System using Multidetector Array in Scanning Transmission Electron Microscope with Annular Pupil" The 17th Annual Meeting of IAPS International Workshop 2010 in Busan (Feb. 26, Busan, Korea)

6) 松谷 貴臣, 田中 武雄, 木村 吉秀, 高井 義造, 川崎 忠寛, 市橋 幹雄, 生田 孝 "集束イオンビームによる走査型透過電子顕微鏡用輪帯アパーチャの開発" 第50回真空に関する連合講演会, 2009年11月4-6日(2009年11月5日発表), 学習院大学, 東京

7) 田村 圭司, 大西 崇, 渡辺 俊一, 市橋 幹雄 "磁場界浸型C-FE電子銃の開発(2)理論解析" 日本顕微鏡学会 第65回学術講演会, 2009年5月26-29日, (2009年5月27日発表), 仙台国際センター

8) 大西 崇, 田村 圭司, 渡辺 俊一, 大江 俊美, 市橋 幹雄 "磁場界浸型C-FE電子銃の開発(1)機構設計" 日本顕微鏡学会 第65回学術講演会, 2009年5月26-29日, (2009年5月27日発表), 仙台国際センター

9) 松谷 貴臣, 田中 武雄, 木村 吉秀, 高井 義造, 川崎 忠寛, 市橋 幹雄, 生田 孝 "集束イオンビームによるテーパーを有した電子光学系輪帯瞳の開発" 平成21年電気学

会全国大会, 2009. 3 月 北海道

10) 生田 孝 “3次元フーリエフィルタリング法と動的ホローコーン照明法の原理と応用” 日本顕微鏡学会関西支部特別企画講演会－電子顕微鏡イメージング法の展開, 平成20年12月21日, 岡崎カンファレンスセンター

11) K. Kitade, H. Yoshimori, T. Ikuta, Y. Kimura and Y. Takai “Aberration-Free Imaging by Dynamic Hollow-cone Illumination in Transmission Electron Microscopy” Proc. of the 9th Asia-Pacific Microscopy Conference (APMC9) held in Jeju island, Korea, 2-7 Nov. 2008

12) T. Kawasaki, T. Matsutani, M. Taya and T. Ikuta “Focal Depth Extension by Hollow-cone Illumination with Annular Pupil for STEM Tomography” Proc. of the 9th Asia-Pacific Microscopy Conference (APMC9) held in Jeju island, Korea, 2-7 Nov. 2008

13) 松谷 貴臣, 田屋 昌樹, 生田 孝, 田中 武雄, 木村 吉秀, 高井 義造, 川崎 忠寛, 市橋 幹雄 “走査型透過電子顕微鏡における輪帯照明システムの開発” 日本顕微鏡学会第64回学術講演会, 2008年5月, 京都

14) Takaomi Matsutani, Masaki Taya, Takashi Ikuta, Tetsuya Fujimura, Hirohiko Inui, Takeo Tanaka, Yoshihide Kimura, Yoshizo Takai, Tadahiro Kawasaki, Mikio Ichihashi, Toshimi Ohye, “Formation of High-energy Electron Scattering Suppressible Annular Pupils for Electron Optics by Focused Ion Beam Technique” The 15th Annual Meeting of Institute of Applied Plasma Science, held in Tairen, China, Mar. 14-16, 2008

15) N. Nomaguchi, Yoshihide Kimura and Yoshizo Takai “A Process for Exit Wave Restoration Using Through-focus Series” Proceedings of the 6th International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices '07 (ALC'07), held in Kanazawa, Japan, Oct. 28 - Nov. 2, 2007, TuP-9 (2007年10月30日発表)

16) H. Yoshimori, Masaki Taya, Takashi Ikuta, and Yoshizo Takai “Restoration of Phase and Amplitude Components using Dynamic Follow-cone Illumination in Transmission Electron Microscopy” Proceedings of the 6th International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices '07 (ALC'07), held in Kanazawa, Japan, Oct. 28 - Nov. 2, 2007, TuP-8 (2007年10月30日発表)

17) Takaomi Matsutani, Masaki Taya, Takashi Ikuta, Makoto Fujiwara, Takeo Tanaka, Yoshihide Kimura, Yoshizo Takai, Tadahiro Kawasaki and Mikio Ichihashi “Development of Annular Pupil for Scanning Transmission Electron Microscope by Focused Ion Beam Technique” The 6th International Symposium on Applied Plasma Science, held in Nikko, Japan, Sep., 2007 (2007年9月27日発表),

18) Tuneo Yasue “Observation of surface dynamic processes by LEEM/PEEM” 19th Int. Cong. On X-ray Optics and Microanalysis, held in Kyoto, Japan, Sep., 2007 (2007年9月19日発表)

19) 安江 常夫 “LEEM/PEEMにおける離散的クーロン効果” 分子研究会「放射光と表面電子顕微鏡－顕微ナノ材料科学の新しい進展－」, 2007年9月10日, 岡崎カンファレンスセンター

20) 安江 常夫 “LEEM/PEEMにおけるMCPでの分解能劣化” 第68回応用物理学会学術講演会, 2007年9月4日, 北海道工業大学

21) 松谷 貴臣, 生田 孝, 田屋 昌樹, 高井 義造, 川崎 忠寛, 市橋 幹雄, 志水 一平, 藤原 誠, 田中 武雄 “集束イオンビームを用いた電子光学系輪帯照明用アパーチャの開発” 2007年度春季第54回応用物理学関係連合講演会, 2007年3月, 神奈川

[産業財産権]

○出願状況 (計2件)

(1)名称: 電子銃

発明者: 市橋幹雄, 大西崇, 渡辺俊一, 田村圭司

権利者: 株式会社日立ハイテクノロジーズ

種類、番号: 特願 2009-123684 号

出願年月日: 2009年5月22日

国内外の別: 国内

(2)名称: 磁場界浸型電子銃及び電子線装置

発明者: 市橋幹雄, 大西崇, 渡辺俊一, 田村圭司

権利者: 株式会社日立ハイテクノロジーズ

種類、番号: 特願 2010-056095 号

出願年月日: 2010年3月12日

国内外の別: 国内

[その他]

○新聞掲載 (計1件)

日経産業新聞 2007年4月6日 p.8

「微小構造3次元で観察、

大阪電通大電子顕微鏡実用化へ」

6. 研究組織

(1)研究代表者

生田 孝 (IKUTA TAKASHI)

大阪電気通信大学・工学部・教授

研究者番号: 20103343

(2)研究分担者

日坂 真樹 (HISAKA MASAKI)

大阪電気通信大学・医療福祉工学部・准教授

研究者番号: 40340640

市橋 幹雄 (ICHIHASHI MIKIO)

名古屋大学・エコトピア科学研究所・客員教授

研究者番号: 90345869

臼倉 治郎 (USUKURA JIRO)

名古屋大学・エコトピア科学研究所・教授

研究者番号: 30143415

川崎 忠寛 (KAWASAKI TADAIRO)

名古屋大学・工学研究科・助教

研究者番号: 10372533

木村 吉秀 (KIMURA YOSHIHIDE)

大阪大学・工学研究科・准教授

研究者番号: 70221215

大江 俊美 (OYE TOSHIMI)

名城大学・理工学部・教授

研究者番号: 30076632

児玉 哲司 (KODAMA TETSUJI)

名城大学・理工学部・教授

研究者番号: 50262861

松谷 貴臣 (MATSUTANI TAKAOMI)

近畿大学・理工学部・講師

研究者番号: 00411413

(下記1名は平成20年度まで研究分担者)

安江 常夫 (YASUE TUNEO)

大阪電気通信大学・情報通信工学部・教授

研究者番号: 00212275