

# X線結像光学ニュースレター

No.28 2008年9月発行

## 多層膜ラウエレンズの開発

兵庫県立大学大学院物質理学研究科 小山貴久、高野秀和、籠島 靖  
NTT-ATナノファブ리케이션株式会社 市丸 智、大知渉之、竹中久貴

X線はその高い透過能と短波長性により、物体の内部構造の非破壊観察を可能とする強力な顕微プローブである。近年の半導体デバイスの微細化・多層構造化に代表されるように、幅広い分野においてナノメートルスケールの空間分解能を有する非破壊分析技術への要求は極めて強い。X線顕微鏡はこのような要求に応え得る潜在能力を有しているために、その実用化を目指して世界各国で開発競争が繰り広げられている。

X線顕微鏡のキーデバイスであるX線レンズには、フレネルゾーンプレート(ZP)、キルクパトリック・バエズ型全反射ミラー(KB ミラー)、屈折レンズ、ウォルターミラー等が用いられている。近年の超微細・超精密加工技術の進歩は目覚しく、10keV前後のX線エネルギーにおける空間分解能は、30nm前後に達している。これらX線レンズは各々特長を有するが、薄レンズと同じ働きをするために取り扱いが極めて簡便であること、現状の製作技術で最も高い空間分解能を有していること等から、ZPが最も広く利用されている。

ZPは電子ビームリソグラフィ(EBL)法と呼ばれる方法で製作されている。集束電子ビームでレジストにZPのマスクパターンを描画し、エッチングにより所望の材質に転写する。この手法ではレジスト内での二次電子の広がりにより空間分解能は10nmが限界と言われており、ナノメートルスケールの空間分解能の達成は原理的に困難である。この問題を回避するアイデアとして、成膜技術を用いてZPと同様の周期構造を形成する多層薄膜積層法と呼ばれる製法をドイツのゲッチンゲン大学のグループが提案した[1]。薄膜を基本構造とすることでナノメートルスケールの空間分解能を実現しようとするものである。さらに、最近米国APSのグ

ループが多層膜ラウエレンズ(MLL)を提案した[2]。薄膜構造による高い空間分解能に加えて、回折過程にブラッグ反射を導入することによりZPよりも格段に高い回折効率をも得ようというものである。成膜技術を用いれば容易にナノメートルオーダーの周期構造を作製できるため、近い将来サブ10nmの空間分解能が期待される。7月にスイスで開かれた第9回X線顕微鏡国際会議において、彼らは線集光(Line Focus)で16nmのビームサイズを報告しており、10nmが十分視野に入っている。

我々のグループはAPSのグループに追随し、さらに凌駕すべく、MLLの開発を平成18年度より始めた。MLLの作製をNTT-ATN社が主に担当し、光学設計とSPring-8の高輝度アンジュレータ光を用いた性能評価を兵庫県立大学が主に担当している。MLLは、図1に示すように、シリコン基板上に膜厚がゾーンプレートの公式に従うようにDCマグネトロンスパッタリングによって多層膜を成膜し、望みの光軸方向の厚さ(t)になるように切断・研磨により薄片化することによって作製する。多層膜材としては $\text{MoSi}_2/\text{Si}$ を用いた。この組み合わせは、極めて良好な界面特性を有している[3]。最小膜厚( $\Delta r_N$ )は、10nm、全膜厚は $4.6\mu\text{m}$ 、層数は250に設計した。光軸方向の厚さ(t)が10~50 $\mu\text{m}$ の場合、アスペクト比( $t/\Delta r_N$ )は数千に達するので、光学特性の計算には従来のスカラー理論は適用できない。本研究では、Coupled Wave Theoryを用いて回折効率を計算した。その結果、多層膜の周期長がブラッグ条件を満たす所では、X線のエネルギーが20keVの時、回折効率は最大で80%に達することがわかった。回折効率が高いことはそれだけで十分価値があるが、不要な次数の回折光がその分弱くなるので、ノイズの低減など実用上極めて

有意義である。図 2 に  $\text{MoSi}_2/\text{Si}$  製の MLL の断面 SEM 像を示す。徐々に膜厚が変化している様子がわかる。この SEM 像を用いて各層の膜厚について設計値と実測値の差を調べた結果、膜厚精度は  $\pm 6.3\%$  以内(対設計値)であった。波動光学的には輪帯幅の精度は  $\pm$ 周期長/4 以内であれば良いので、十分な成膜精度が達成されていることが確認できた。

次に、SPring-8 の BL24XU (兵庫県 ID ビームライン) において、上記の MLL の空間分解能 (1次元集光ビームサイズ) を評価した。従来は空間分解能を測定する場合、ナイフエッジを集光ビームに対して垂直方向に 1次元ステップスキャンし、その際の透過光強度変化を解析することでビームサイズを測定していた。しかしながらこの方法では、ステップスキャン中に生ずるナイフエッジと集光ビーム間の微小振動やドリフトが影響し、特に透過光強度の差分を求める際に大きな誤差として測定精度を悪化させるため、50nm 以下の空間分解能を測定するには極めて再現性が悪く信頼性に欠けていた。そこで、静電変位プローブとフィードバック型ピエゾステージを導入し、集光ビームとナイフエッジ間の相対変位の測定を精密にした。さらに、透過強度ではなくナイフエッジからの散乱光を検出することで測定の S/N 比を向上させ、高精度な

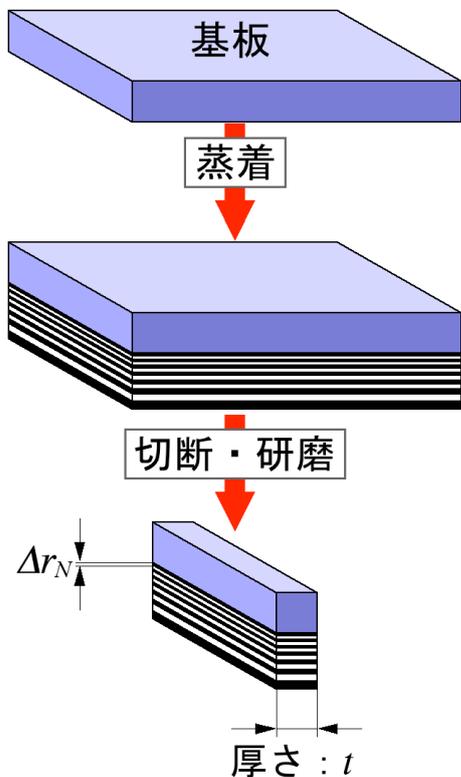


図1 MLL の作製の模式図

空間分解能測定を可能とした[4]。結果として  $\pm 3.7$  nm (100回測定) の測定精度を達成した。この空間分解能測定法を用いて MLL の集光ビームサイズを測定した結果、X線のエネルギーが 20keV において 28.2nm が得られていることを確認した。図 3 にその集光ビームプロファイルを示す。この値は幾何学的な開口数で決まる回折限界にほぼ達している。今後は最小膜厚の微小化を図り、サブ 10nm の空間分解能を目指して開発を進めていきたいと考えている。

この開発は独立行政法人科学技術振興機構の先端計測分析技術・機器開発事業による成果である。

- [1] D. Rudolph, B. Niemann and G. Schmahl, Proc. SPIE **316** (1981) 103.
- [2] J. Maser, G. B. Stephenson, S. Vogt, W. Yun, A. Macrander, H. C. Kang, C. Liu, R. Conley, Proc. SPIE **5539** (2004) 185.
- [3] H. Takenaka, T. Kawamura, Y. Ishii and S. Asagiri, J. Appl. Phys. **78** (1995) 5227.
- [4] Y. Suzuki, A. Takeuchi, H. Takano and H. Takenaka, Jpn. J. Appl. Phys. **44** (2005) 1994.

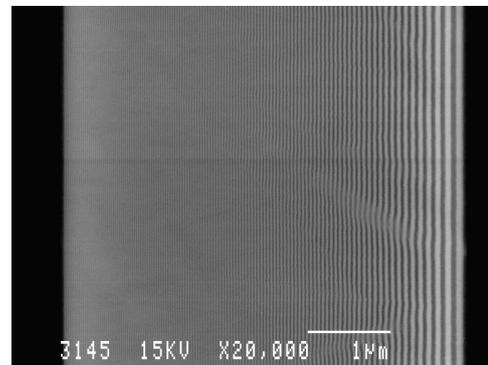


図2  $\text{MoSi}_2/\text{Si}$  製 MLL の断面 SEM 像

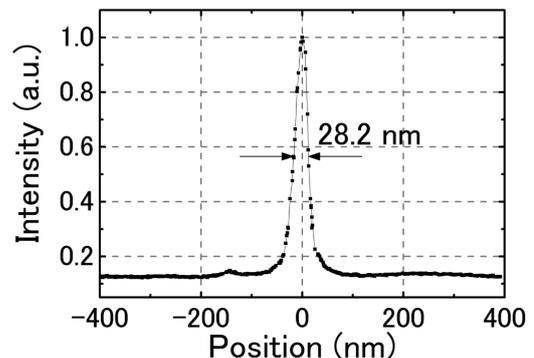


図3 MLL による集光ビームのプロファイル

## 2次元 X 線イメージングによるプラズマの揺動計測

核融合科学研究所 大館 暁

磁場閉じ込め型の核融合装置では、層状の磁気面を使ってプラズマを閉じ込めているが、磁気面を横切った熱や粒子の輸送量は単純な理論予想よりも遥かに大きいことが知られている。この「異常輸送」現象は、プラズマ中の不安定性や揺動によるものと考えられており、プラズマの揺動を測定することは核融合科学における重要な課題の一つとなっている。

プラズマからの制動放射光の強度はプラズマの電子密度・電子温度の関数であり、制動放射光の揺動はプラズマの揺動の情報を反映している。核融合プラズマの温度領域で中心部を観測するには軟 X 線領域での測定が最も適しているため、古くから、軟 X 線を使ってプラズマの断面を多数の視線で観測し、Computer Tomography(CT)の技法で局所的な放射強度を再構成する計測が行われてきた。最近では CT を使わずに軟 X 線放射強度を直接 2 次元的に測定することが行われるようになった。プラズマの揺動現象は磁場に沿って長い波長を持つことが知られており、環状の磁場閉じ込め装置の接線方向から観測すると、視線が磁場と平行に近くなるため、視線上での揺動の位相の変化が少なく、その積分値である測定値から、磁場に垂直な面内の揺動の二次元構造をトモグラフィ等の計算なしで高いコントラストで測定できるという利点がある。CT では解像が難しい細かい空間構造を持った揺動の測定に向いている。図 1 に計測器の概念図を示す。

プラズマ中では数 kHz から数百 MHz と幅広い周波数で揺動が観測されるが、この計測器が対象としているのは Magnetohydro Dynamics 不安定性と呼ばれる比較的低速(数 kHz~数十 kHz)の現象である。比較的低速とはいっても、SXCCD 等

での直接測定は不可能で、軟 X 線像を高速のシンチレータを使って可視光に変換し、増倍後、高フレミングレートの可視カメラを使って記録する。現状ではフレームレートを制約しているのは、プラズマからの光子数である。ピンホールで結像しているため、より明るい光学系を作るべく、径 100mm という大面積の FOP プレート( Fiber Optic Plate )を軟 X 線から可視光の変換用に使っている。図 2 に大型ヘリカル装置における測定例を示す[2]。

図 2(A)は接線イメージの定常成分であり、中心部でピークする放射分布が観測されている。(B)は特異値分解法を用いて動画像から分離した揺動成分で、円周方向に 6 回明暗部が変化していることがわかる。これはプラズマの中心部にトーラス小円周方向にモード数 3 を持つ揺動が成長していることを示す。時系列データを見ると、1.312s に揺動が急成長しているが、このときプラズマの中心部から周辺部にむけて急速にエネルギーが吐き出されていることが観測されている。揺動はイベント後も存続して、回転しながらその振幅を徐々に大きくし、図に示した 1.327s 付近で飽和している。

このように核融合プラズマにおける 2 次元イメージングには、複雑な揺動現象を高い分解能で直接可視化できるというメリットがあり、内外の装置で広く使われはじめている。

- [1] S. Ohdachi, K. Toi, G. Fuchs, S. Goeler and S. Yamamoto, Review of Scientific Instruments 74, 3, (2003), p.p. 2136~43
- [2] S. Ohdachi, et.al, In Proceeding of 21th Fusion Energy Conference, China, Chengdu, EX-P8-15

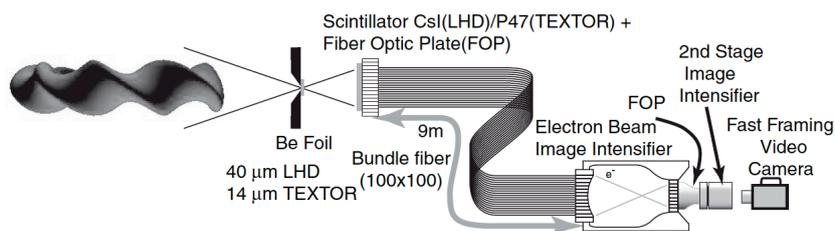


図 1 大型ヘリカル装置(LHD)の高速度接線 X 線カメラ[1]の概念図

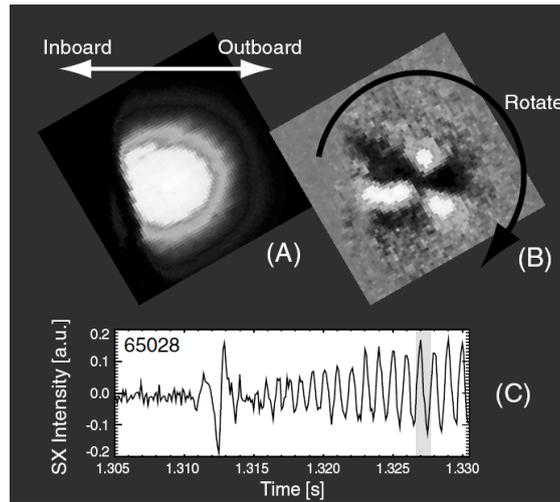


図2 大型ヘリカル装置の軟 X 線による接線像 (A) と 1.327s の揺動成分 (B) を示す

## 第 9 回 X 線顕微鏡国際会議(XRM2008)に参加して

高輝度光科学研究センター 星野真人  
筑波大学数理物質科学研究科 青木貞雄

第 9 回 X 線顕微鏡国際会議 (XRM2008) が、スイス・チューリッヒのスイス連邦工科大学メインキャンパスで、本年 7 月 21 日から 25 日までの日程で行われた。連邦工科大学メインキャンパスは、市中心部の丘陵地帯に位置し、校舎前の広場からはチューリッヒ市街を一望することができた。会期中は天候にも恵まれ、コーヒブレイクの際には遠方に雪の残るアルプスの山々を見ることもできた。参加者は 23 か国 300 名を越え、これまでの最高の参加人数になった。オーラルセッションを従来の 1 セッション形式にしたため、ポスターが 200 を越える数になってしまった。また、オーラルセッションでは招待講演に加え、Complementary トークとして STM や蛍光顕微鏡など X 線顕微鏡と相補的な顕微鏡分野の最近の成果も紹介された。以下では日記風に会議の様子を紹介する。

初日は、主に方法論 (Method) についての講演を集めたプログラムで構成され、2 つの招待講演と 1 つの Complementary トークを含む 8 つの講演が行われた。これまでの高分解能ゾーンプレートの開発に加え、最近では Multilayer Laue Lens

(MLL) と呼ばれる素子の開発が始められており、招待講演の J. Maser によってその開発状況などが報告された。また、MLL は日本でも兵庫県立大学のグループと NTT-AT との共同で開発を行っており、30nm 以下のスポットサイズが報告された。午後のポスターセッションでは、ジャンルごとではなく、発表者名のアルファベット順に掲載されたこともあってか、特定の分野のポスター掲載場所に人が集中するということではなく、適度に分散し様々なジャンルのポスター発表を多くの人が見学できたのではないと思われる。ポスター内容は多種多様で、画期的な計測方法に関するものや、CT の医学・生物応用といった、よりアプリケーションを視野にいれたものが混在し、中には、ゼルニケ型の X 線位相差顕微鏡の半定量化に成功した内容の発表など、口頭発表としては是非聞いてみたいと思うような発表も数多く見られた。また、大学メインキャンパスの 1 階部分では、企業展示が行われ、XRM2008 のゴールドスポンサーである米国企業を始め、ヨーロッパや日本企業など、数多くの出展が見られた。

2 日目は主にコヒーレントイメージングを扱っ

た講演がなされた。このコヒーレントイメージング (Holography, Diffraction microscopy) は、いわゆるレンズレスイメージングであり、近年の X 線自由電子レーザー (XFEL) に代表される X 線コヒーレント光源の発達により、その技術が確立されつつある。前回の姫路で行われた国際会議 (XRM2005) に比べると、5 日間の会期中のプログラムで半日を費やしてその講演が行われるなど、確実に発展してきている。コヒーレント X 線ビームを用いた回折顕微鏡では、20~30nm の空間分解能が得られており、結像型の X 線顕微鏡の空間分解能と同等の性能が得られている。

2 日目のプログラムは午後 3 時過ぎに終了し、その後はバンケットになった。これまでの会議では終了日前日の夕刻が通例であったが、主催者の話では参加者が予定を上回り、大きな遊覧船の都合で日程が変更になったとのことであった。バンケットでは、“Boat trip on the Lake”として、チューリッヒ湖の約 1 時間の遊覧と Rapperswil Castle へのハイキングが行われ、目的地の Rapperswil Castle の広場では歓談の場が用意され、世界各国の研究者の交流の場となった。また、チューリッヒへの帰りのボートでは、船上での夕食会が開かれ、様々なスイス料理が振舞われた。サマータイムを導入していることもあってか、午後 10 時くらいまで空は明るく、夕食を楽しみながらスイスの夕暮れを楽しむことができた。

3 日目は、午前中に Janos Kirz 教授による X 線顕微鏡の歴史と今後についてレクチャーが行われ、その後 Werner Meyer-Ilse memorial award のレクチャーと受賞者の発表が行われた。今回の会議では、Pierre Thibault 博士 (Paul Scherrer Institute) と Anne Sakdinawat 博士 (Lawrence Berkeley National Lab.) の 2 名が受賞した。Thibault 氏は、コヒーレント回折イメージングと走査型イメージングを組み合わせた新しいイメージング法を提案し、Sakdinawat 氏は従来の同心円状のゾンプレートにスパイラルなど特殊な形状にすることで、位相コントラストイメージングやより深い焦点深度を可能とする画期的な光学素子の開発を行った。各氏の発表は、それぞれ口頭発表で聞くことができた。

午後は、バイオイメージングと実験室系の X 線顕微鏡についての講演が行われた。実験室系の顕微鏡に関するオーラルは全部で 3 件あったが、近年の実用化を目指したコンパクトな顕微鏡光学系の開発が進められている中で、3 件というのは少々

物足りないようにも思われた。発表内容に関しては、実験室光学系における回折イメージングや、液体金属ジェットアノードを用いた電子線衝突型硬 X 線光源が紹介されるなど、新たな手法に関して非常に内容の濃いセッションであった。実験室顕微鏡の性能は、放射光を用いた顕微鏡に比べて、得られる空間分解能や応用面などその差は以前に比べると大幅に縮まってきているという印象を受けた。

4 日目は、会期中唯一終日オーラルセッションが行われた。まず午前中は、バイオイメージングと方法論に関する発表が行われた。バイオイメージングのセッションでは、位相差イメージング、回折イメージング、3 次元イメージングなど、それぞれ異なった方法による生体試料への応用が展開されており非常に興味深かった。特に、C. Larabell 博士の軟 X 線イメージングトモグラフィーによる微小生体試料の 3 次元イメージングでは、得られている 3 次元画像の表示もさることながら、プレゼンテーション全般にわたりアニメーションを中心とした構成になっており、生物関係など分野の異なる研究者が見ても X 線顕微鏡による 3 次元イメージングがどのようなもので、どのように行われるのかについて分かり易く表現されており、X 線顕微鏡が開発段階からそれを用いた応用・実用利用の段階にきていることを大きく印象づけられた。また、午前中のもうひとつのセッションである方法論に関するセッションでは、M. Feser 博士によって Xradia で市販されている X 線顕微鏡装置についてのプレゼンテーションが行われた。Xradia は 2000 年に設立された新しい企業であるが、近年の放射光源施設の建設ラッシュや微細加工技術の進歩により、光学素子であるゾンプレートの需要が高まり、急激な成長を遂げている。ゾンプレートは、最外輪帯幅 30nm のスペックのものまで購入することが可能なようである。また、光学素子だけではなく、実験室系の CT 装置、顕微鏡装置販売も行っており、その市場は世界中に広がってきていることが示された。午後のセッションでは、WMI 賞を受賞した Sakdinawat 博士のスパイラルゾンプレートに関する発表や、ゼルニケ型の X 線位相差顕微鏡と位相差コントラストトモグラフィー、磁性物体の動的イメージングなどに関する発表がなされた。磁性物体の動的高分解能イメージングは、磁場によって影響を受けない X 線の特性を生かしたイメージング法であるといえる。

最終日は、トモグラフィーに関するセッション

が行われた。セッションは午前中で終了し、このセッションの終了をもって、XRM2008 の全講演プログラムが終了した。午後からは Paul Scherrer Institute および Swiss Light Source の見学ツアーが開催された。

会議全体を通して、XFEL 関連のコヒーレント X 線光源を用いたイメージング技術に関する発表が前回の国際会議よりも増加し、X 線イメージング光学系については前会議の W. Chao 博士が発表したような急激な空間分解能の向上は特に見られなかったものの、顕微鏡の全体性能としては着実に底上げされてきており、3 次元イメージングや生

物・医学応用などのアプリケーションも充実してきているように思える。また、今回の国際会議の特徴として、前回の会議では見られなかった Complementary トークが招待講演として行われるなど、他の顕微鏡と相補的な役割を担う X 線顕微鏡のアプリケーション応用に対する期待などが強く感じられる会議であった。

これまででは 3 年ごとに開催されていた X 線顕微鏡国際会議であるが、応用分野の急速な広がりを考慮して、次回からは 2 年ごとの開催に変更し、2010 年夏に米国シカゴで開かれることが決まった。



X-RAY  
IMAGING OPTICS



## 編集部より

---

ようやく少ししのぎやすい季節になってきました。X線結像光学ニューズレター No. 28 をお送りします。本号の内容を含め、ニューズレターに関するご要望がございましたら当編集部までお送りください。

X 線結像光学研究会のホームページ (<http://www.u.phys.nagoya-u.ac.jp/XIO/XIO-index.html>) は、今の所まだニューズレターのバックナンバーのみの掲載にとどまっておりますが、近々体裁を整えたバージョンの公開をする予定です。お楽しみに。

---

X線結像光学ニューズレター  
No.28 (2008年9月)

発行 X線結像光学研究会  
(代表 筑波大学物理工学系 青木貞雄)  
編集部 名古屋大学エコトピア科学研究所 田原 譲  
(協力研究室: 大学院理学研究科物理学教室U研)  
〒464-8603 名古屋市千種区不老町  
TEL/FAX : 052-789-5490  
E-mail: tawara@u.phys.nagoya-u.ac.jp

---