

X-Ray Optics

エックス線光学

I X線顕微鏡の開発と物質・生命・地球科学への応用研究

Development of X-ray Microscopes and the Applications to Material and Life Sciences

小澤 佳祐・籠島 靖
Ozawa, K., Kagoshima, Y.

物質機能の基盤となる空間階層構造を高い時空間分解能で可視化することを目指し、X線光学素子および光学系の開発とX線顕微イメージングへの応用を展開している。材料や生体の機能メカニズムの理解には、対象の構造をマクロな構造から電子状態に至るまで広い空間スケールに亘って可視化することが重要である。これまでに、SPRING-8 兵庫県 ID ビームライン BL24XU において、ゾーンプレートを用いた走査型 X 線顕微鏡や広視野結像型 X 線顕微鏡を開発し、高度化を進めている。走査型顕微鏡では、蛍光 X 線による極微量元素空間分布と広角 X 線回折による局所構造分布をサブミクロン分解能で同時マッピング可能とし、様々な機能性材料の構造解析へ応用した。結像型顕微鏡では、特に密度差の小さい試料において、デフォーカス撮像法と波動光学計算を組み合わせることで従来法より数倍高い空間分解能かつ自然なコントラストでイメージングできることを見出し、実用化を進めている。

回折限界サイズの X 線集光ビームを生成する場合やコヒーレント X 線回折イメージング法などを行う場合、入射 X 線ビームのビーム特性を評価しておくことが重要である。現在、ビーム特性として位相空間 (phase space) のマッピング測定に関する研究を行っている。これにより、入射 X 線ビームの水平・鉛直両方向のエミッタンスを実験的に求めることを目指している。さらに、焦点深度の拡大を可能とする新しいタイプの ZP として逆位相コンポジットゾーンプレートの発案・設計・性能シミュレーションを進めている。

また、ゾーンプレートを利用した研究として、地球形成初期のマグマ中での酸化還元反応に関する研究を行っている。初期地球深部に相当する高压高温条件の液体ケイ酸塩を再現し、回収試料中に含まれる鉄元素について、KEK PF の BL19A および SPRING-8 の BL23SU に備わる走査型透過 X 線顕微鏡(STXM)を利用して、酸化状態の二次元マッピングを取得することで、試料中に含まれるサブミクロンレベルの鉱物中の鉄の酸化数を明らかにすることに成功している。また、BL24XU において、高压力発生装置ダイヤモンドアンビルセル中の高压試料の X 線 CT 測定および解析手法の研究についても取り組んでおり、手法が確立されればこれまで測定が困難であった高压下における液体や非晶質の体積および密度の測定が可能になることが期待される。また、その他の X 線を使用した研究として、KEK PF の BL4A において、KB ミラーによるマイクロビーム X 線を用いた、高压下ケイ酸塩ガラス試料についての XRF マッピングおよび XAFS 測定についても行っている。

Ⅱ 電子材料等の局所構造に関する研究

Studies of Microstructure of Electronic Device Materials

津坂佳幸

Tsusaka, Y.

半導体をはじめとする最近の電子デバイスの構造は、超高集積回路や高速光通信素子に代表されるように極めて微細かつ複雑になりつつある。これらの構造を構築するには、表面酸化、エッチング等の局所加工、薄膜堆積など各種のプロセスが必須である。デバイスサイズの縮小化によって結晶構造や応力の分布もまた多様化しており、局所的な解析が不可欠となりつつある。本研究は平面波マイクロビームを形成し、数ないし $1\ \mu\text{m}$ の位置分解能をもって局所歪みなどの空間分布を測定することを目的としている。これにより将来の我が国の産業を支える電子デバイスの発展、プロセス改良に寄与するための基礎研究を行う。

現在 SPring-8 の兵庫県 ID ビームライン(BL24XU)において、高精度 X 線回折計を組み合わせた装置の開発・改良を進めており、これまでに縦 $0.4\ \mu\text{m}$ 、横 $1.1\ \mu\text{m}$ 、水平面内発散角 $40\ \mu\text{rad}$ の平面波マイクロビームの形成に成功し、シリコン基板上の酸化膜境界付近や多波長発光素子などのロッキングカーブ測定、逆格子空間マップ測定にも成功している。また、CMOS カメラを利用した多波近似条件近傍での明視野トポグラフィの開発もあわせて進めている。これらの結果は電子デバイスに関する新しい情報を提供しており、本研究の今後の進展が期待される。

発表論文 List of Publications

- I-1 籠島 靖・八坂 亘：ガウシアンビーム近似によるアンジュレータ放射光の鉛直方向のエミッタンス測定，日本光学会年次学術講演会 2024，2024 年 11 月 30 日，調布。
- I-2 籠島 靖・八坂 亘：アンジュレータ放射光のガウシアンビーム近似による鉛直方向のエミッタンス測定法の開発，第 38 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム 2025 年 1 月 11 日，つくば。
- II-1 楠本 大智・澤田 拓磨・津坂 佳幸：明視野 X 線トポグラフィによる Na-flux GAN/Ammonothermal GAN 結晶中の転位評価，第 21 回 SPring-8 産業利用報告会，2024 年 9 月，東京
- II-1 澤田 拓磨・楠本大智・津坂 佳幸：放射光 X 線による GaN 単結晶基板の格子定数評価，第 21 回 SPring-8 産業利用報告会，2024 年 9 月，東京

物質科学専攻

博士前期課程

澤田拓磨：反射トポグラフィ光学系構築と GaN 結晶の転位評価

楠本大智：明視野 X 線トポグラフィによる GaN 結晶中の転位評価

科学研究費補助金等

- 1 科学研究費補助金（令和 5 年度-令和 7 年度） 基盤研究（C） 課題番号：23K11705

研究課題 X線用深焦点ゾーンプレートの実証と深焦点内波動伝播結像シミュレーション

研究代表者 竈島 靖

2 科学研究費補助金（令和5年度-令和7年度） 特別研究員奨励費 課題番号：23KJ1668

研究課題 マグマオーシャンの結晶化が初期地球の酸化状態に与える影響の解明

研究代表者 小澤佳祐