

## I X線顕微鏡の開発と物質・生命科学への応用研究

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

高野秀和・籠島 靖・津坂佳幸

Takano, H., Kagoshima, Y., Tsusaka, Y.

物質・生体・プラズマあるいは天体における構造や生起する現象を原子レベルで解明するには、軟 X 線から硬 X 線領域での、空間的・エネルギー的・時間的に高い分解能による計測が不可欠である。それには高性能の X 線光学素子や光学系の開発が重要である。最近の X 線光学素子や光学系に関する研究の進捗は著しく、10 keV 近傍の X 線領域でサブ-100 nm の空間分解能が容易に得られるようになっている。

我々のグループも SPring-8 の兵庫県 ID ビームライン(BL24XU)において、タンタル製位相ゾーンプレートを集光素子に用いてサブ-100 nm のマイクロビームの形成に成功しており、このマイクロビームを用いた X 線顕微鏡システムを開発しその高度化と応用研究を進めている。産業応用を主な目的として、生体試料中の極微量元素の定量分析とその空間分布マッピング測定、微小領域の回折実験による半導体素子の歪み解析や高分子材料の結晶構造解析等への応用を展開している。さらに将来 10 nm 以下の空間分解能を実現するために、多層膜ゾーンプレートや全反射ゾーンプレートなどの新しいタイプの X 線光学素子の開発も進めている。

一方、マイクロイメージング研究についての研究も行っている。従来より進めている結像型 X 線顕微鏡の開発のみならず、時間分解能向上へのアプローチも行っている。高速 CMOS センサーを利用したミリ秒オーダーでの X 線画像システムを開発し、これを応用したサブ秒オーダーでの X 線マイクロ CT や、物体内部のダイナミクスをリアルタイムで捉える 4 次元 CT を実現している。

## 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・高野秀和・籠島 靖

Tsusaka, Y., Takano, H., Kagoshima, 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(BL24XU9)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 mm、横 1.1 mm、水平面内発散角 40 mrad 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クン グカーブ測定、逆格子空間マップ測定にも成功している。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。

### Ⅲ 兵庫県放射光研究施設の管理・運営

#### Management of the Hyogo Prefectural Beamline in SPring-8

籠島 靖・津坂佳幸・高野秀和  
Kagoshima, Y., Tsusaka, Y. Takano, H.

兵庫県は、第 3 世代大型放射光源 SPring-8 に硬 X 線アンジュレータ型挿入光源のビームライン（兵庫県 ID ビームライン；BL24XU）を設置した。これは、SPring-8 で得られる高輝度 X 線を用いて初めて達成できる高輝度マイクロビームに関する装置技術の開発研究を中心に据え、放射光関連の新産業の創造や革新的な医療技術の開発と、高輝度放射光利用研究の産業界への普及を図ることを目的としている。また、SPring-8 の特色を生かした研究課題を材料とバイオ・メディカル分野から選択して、産学官の研究者・技術者の参画を得たプロジェクト研究を実施し、放射光研究者・技術者層の拡大も目指している。本講座は、兵庫県ビームラインの管理運営を兵庫県ナノテク研究所と協力して行っている。

#### 発表論文 List of Publications

- I-1 Y. Kagoshima, H. Takano and S. Takeda, Inclined-incidence quasi-Fresnel lens for prefocusing of synchrotron radiation x-ray beams, *Appl. Phys. Lett.* **101**, 163102 (2012) (4 pages).
- I-2 D. Yamauchi, D. Tamaoki, M. Hayami, M. Takeuchi, I.K arahara, M. Sato, K. Toyooka, H. Nishioka, Y. Terada, K. Uesugi, H. Takano, Y. Kagoshima and Y. Mineyuki, Micro-CT observations of the 3D distribution of calcium oxalate crystals in cotyledons during maturation and germination in Lotus miyakojimae seeds, *Journal of Electron Microscopy* (2012) doi: 10.1093/jmicro/dfs079.
- I-3 H. Takano, S. Shimomura, S. Konishi, H. Azuma, Y. Tsusaka and Y. Kagoshima, Simple

- scanning phase-contrast X-ray tomography using intensity detectors, *Jpn. J. Appl. Phys.* **52** (2013) 040204 (3 pages).
- I-4 Y. Kagoshima, H. Takano, S. Konishi, T. Koyama, H. Takenaka, S. Ichimaru and T. Ohchi, Circular multilayer zone plate for two-dimensional hard X-ray focusing, in XRM2012, 11th International Conference on X-ray Microscopy, August 05-10, Shanghai, China
- I-5 H. Takano, M. Morikawa, S. Konishi, H. Azuma, S. Shimomura, Y. Tsusaka, S. Nakano, N. Kosaka, K. Yamamoto and Y. Kagoshima, Development of real-time X-ray micro-CT system, in XRM2012, 11th International Conference on X-ray Microscopy, August 05-10, Shanghai, China.
- I-6 T. Tsuji, H. Takano, Y. Tsusaka and Y. Kagoshima, Design of point focusing total-reflection zone plate, in XRM2012, 11th International Conference on X-ray Microscopy, August 05-10, Shanghai, China.
- I-7 高野秀和・東 宏昭・下村 翔・作花賢治・廣友稔樹・津坂佳幸・小坂尚史・中野真也・山本一成・籠島 靖：「リアルタイム 4 次元マイクロトモグラフィ法の開発」、第 26 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム、2013 年 1 月、名古屋大学
- I-8 澤田沙希・荒井美智子・下田麻由・小西繁輝・尾上貴洋・碓 和輝・津坂佳幸・高野秀和・籠島 靖・尾身博雄・川村朋晃・竹中久貴：「ラウエゾーン型 X 線導波路」、第 26 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム、2013 年 1 月、名古屋大学
- I-9 東 宏昭・下村 翔・作花賢治・廣友稔樹・高野秀和・津坂佳幸・籠島 靖：「高感度硬 X 線結像顕微鏡光学系の開発」、第 26 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム、2013 年 1 月、名古屋大学
- I-10 下村 翔・東 宏昭・作花賢治・廣友稔樹・高野秀和・津坂佳幸・籠島 靖：「軽元素試料観察のための走査型硬 X 線顕微鏡の開発」、第 26 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム、2013 年 1 月、名古屋大学
- I-11 廣友稔樹・小山貴久・辻 卓也・東 宏昭・下村 翔・作花賢治・高野秀和・津坂佳幸・籠島 靖・市丸 智・大知渉之・竹中久貴：「高エネルギー用高アスペクト比多層膜ゾーンプレートの設計」、第 26 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム、2013 年 1 月、名古屋大学
- I-12 作花賢治・廣友稔樹・東 宏昭・下村 翔・高野秀和・津坂佳幸・籠島 靖：「硬 X 線集光ビームを用いたリソグラフィ法の研究」、第 26 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム、2013 年 1 月、名古屋大学
- II-1 下田麻由・澤田沙希・尾上貴洋・碓 和輝・津坂佳幸・高野秀和・籠島 靖・野瀬惣市・竹田晋吾・今出 完・横山和司・松井純爾・丸山美帆子・吉村政志・森 勇介：「放射光 X 線による Na フラックス法 GaN 単結晶基板の結晶性評価」、2013 年春季 第 60 回 応用物理学関係連合講演会、2013 年 3 月、神奈川工科大学

## 大学院物質理学研究科

### 博士後期課程

平岩美央里：放射光 X 線による GaN 系結晶の高精度評価に関する研究

### 博士前期課程

東 宏昭：高感度硬 X 線結像顕微鏡光学系の開発  
澤田沙希：ラウエゾーン型 X 線導波路の開発  
下田麻由：GaN 基板の結晶性評価  
下村 翔：軽元素試料観察のための走査型硬 X 線顕微鏡の開発  
尾上貴洋：梁構造 Si の結晶性評価  
作花賢治：硬 X 線集光ビームを用いたリソグラフィ法の研究  
碓 和輝：高エネルギー分解能マイクロ XAFS 用光学系の形成  
廣友稔樹：硬 X 線円形多層膜ラウエレンズの研究

## 科学研究費補助金等

- 1 科学研究費補助金（平成 24～26 年度） 基盤研究(C) 課題番号 24510125  
研究課題 X 線円形多層膜ゾーンプレートによる高フラックス p i n k ナノビームの生成  
研究代表者 籠島 靖
- 2 科学研究費補助金（平成 23～25 年度） 基盤研究(C) 課題番号 23510121  
研究課題 X 線ナノ集光用全反射型ゾーンプレートの開発  
研究代表者 高野秀和
- 3 独立行政法人科学技術振興機構（JST）戦略的創造研究推進事業 ALCA（先端的低炭素化技術開発）  
（平成 24 年度～30 年度）  
研究課題 省エネデバイス用 8 インチ超大口径 GaN ウエハ  
研究代表者 津坂佳幸（分担者）