

5. 異常透過像拡大による高空間分解能 X 線トポグラフィー

(株)富士電機総合研究所 材料技術研究所 田沼 良平

tanuma-ryohei@fujielectric.co.jp

最近の半導体デバイス構造の微細化に伴い、サブミクロン領域での X 線回折/トポグラフィー に対する要求が高まってきた。今回、高空間分解能を達成するために、異常透過像を拡大する方法を試みたので報告する。

非対称反射拡大：実験は BL16B2 で実施した ($E = 8.76\text{KeV}$)。試料は、Si(100)ウエハ ($t=0.63\text{mm}$) にトレンチのテストパターン (幅 0.5, 1, 1.5, ...; $10\ \mu\text{m}$, 深さ $10\ \mu\text{m}$, 間隔 $4\ \mu\text{m}$) を加工したものである。実験では 2 重ゴニオの一方に試料ウエハを、他方に非対称反射アナライザ (Si(100)ウエハ) をセットした。Rh コートミラー (視射角 0.29°) で高次光を除去した X 線ビームをウエハ裏面から入射し、(022) 反射による異常透過光をアナライザの (311) 反射で拡大した。試料-アナライザ間距離 90mm , 視射角 0.3° , 拡大倍率 140 倍である。拡大像はイメージングプレート (BAS-SR127) に記録した。露光時間は 5 分である。図 1 にトレンチパターンの写真とトポ像を示す。トポグラフには幅 $1\ \mu\text{m}$ までのトレンチによる像が明確に記録され、幅 $0.5\ \mu\text{m}$ のトレンチによる濃淡が僅かに観測された。

フレネルゾーンプレート (FZP) 拡大：実験は BL16XU で実施した ($E = 8\text{KeV}$)。FZP (NTT-AT 製、位相変調タイプ) は、 $64\ \mu\text{m}$ 、最外周線幅 $0.1\ \mu\text{m}$ (~ 理論空間分解能)、焦点距離 41.3mm (@ 8KeV) である。試料は上記と同様 (トレンチ間隔のみ $1\ \mu\text{m}$) で、(022) 反射による異常透過光を FZP で 21 倍に拡大結像した。その結果、空間分解能 $1\ \mu\text{m}$ が確認できた。

以上によりサブミクロン領域の空間分解能の目処を得た。

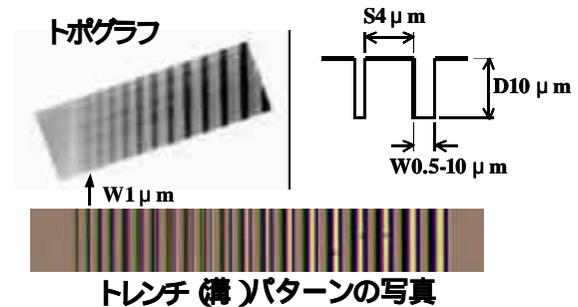


図1. 実験結果

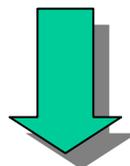
異常透過像拡大による高空間分解能 X線トポグラフィ

2002年9月12日

(株)富士電機総合研究所

田沼良平，大沢通夫

半導体デバイス構造の 微細化



X線回折 / トポグラフィーへの要求

高感度 ($d/d \sim 10^{-7}$)

深部測定 ($\sim 10 \mu\text{m}$)

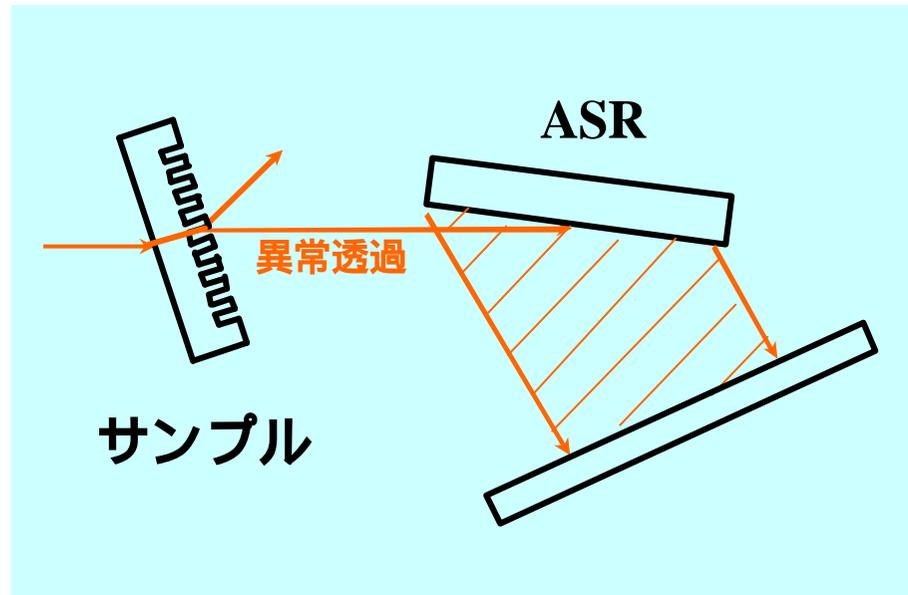
非破壊

+

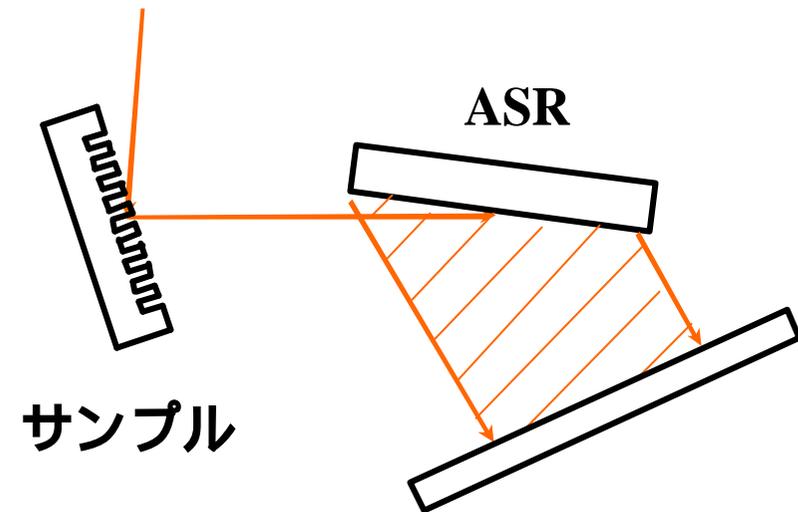
高空間分解能 ($< 1 \mu\text{m}$)

非対称反射 (ASR) 拡大法

透過光拡大



回折光拡大

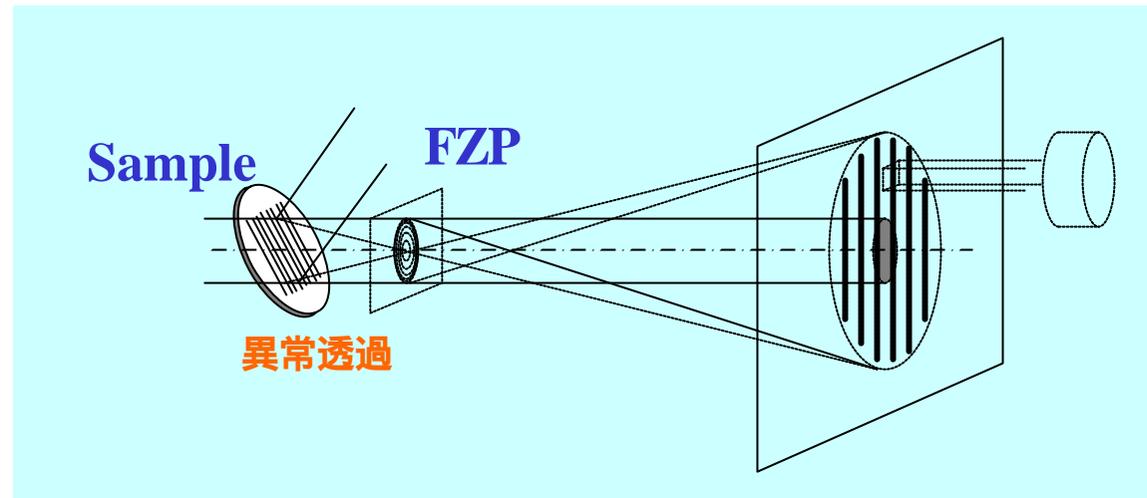


< 参考文献 >

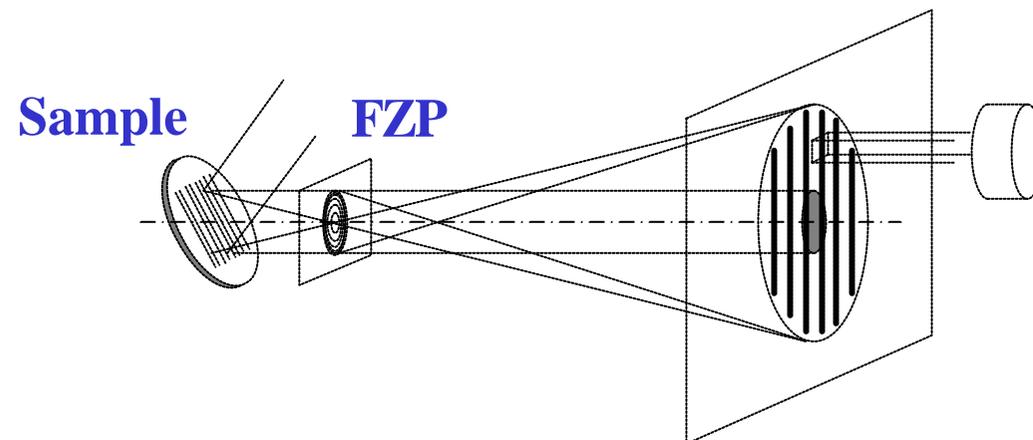
- 1) W. J. Boettinger *et al.*: Rev. Sci. Instrum. **50** (1979) 26-30
- 2) S. Kawado *et al.*: Jpn. J. Appl. Phys. **34** (1995) L89-L92
- 3) K. Kobayashi *et al.*: Appl. Phys. Lett. **78** (2001) 132-134

FZP* 拡大結像法

透過光拡大



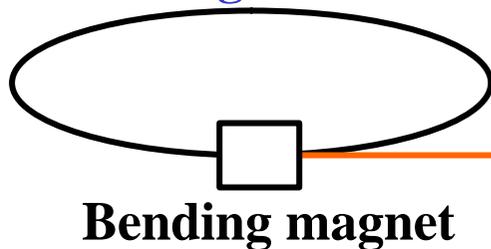
回折光拡大



* Fresnel Zone Plate

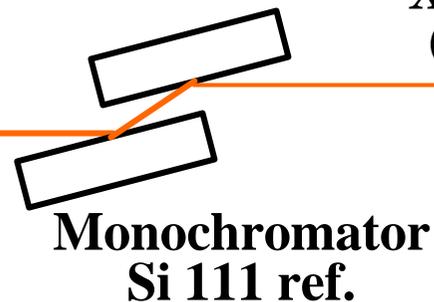
Experimental Setup

BL16B2 / SPring-8



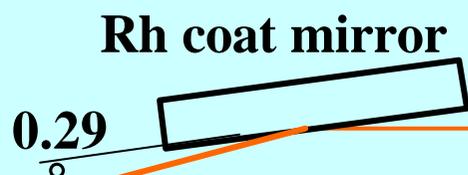
Slit $1.5 \times 10\text{mm}^2$
(H \times W)

X-ray beam
(8.74KeV)



$\sim 10^{10}$ photons/s

Experimental hatch



90mm

Si 022 ref.

Si(100)

0.3

Slit $2 \times 5\text{mm}^2$
(H \times W)

Sample
Si(100) wafer

Pb shield
Si 311 ref.
($\times 140$)

Imaging plate

拡大トポグラフィーの 実験装置

回折光

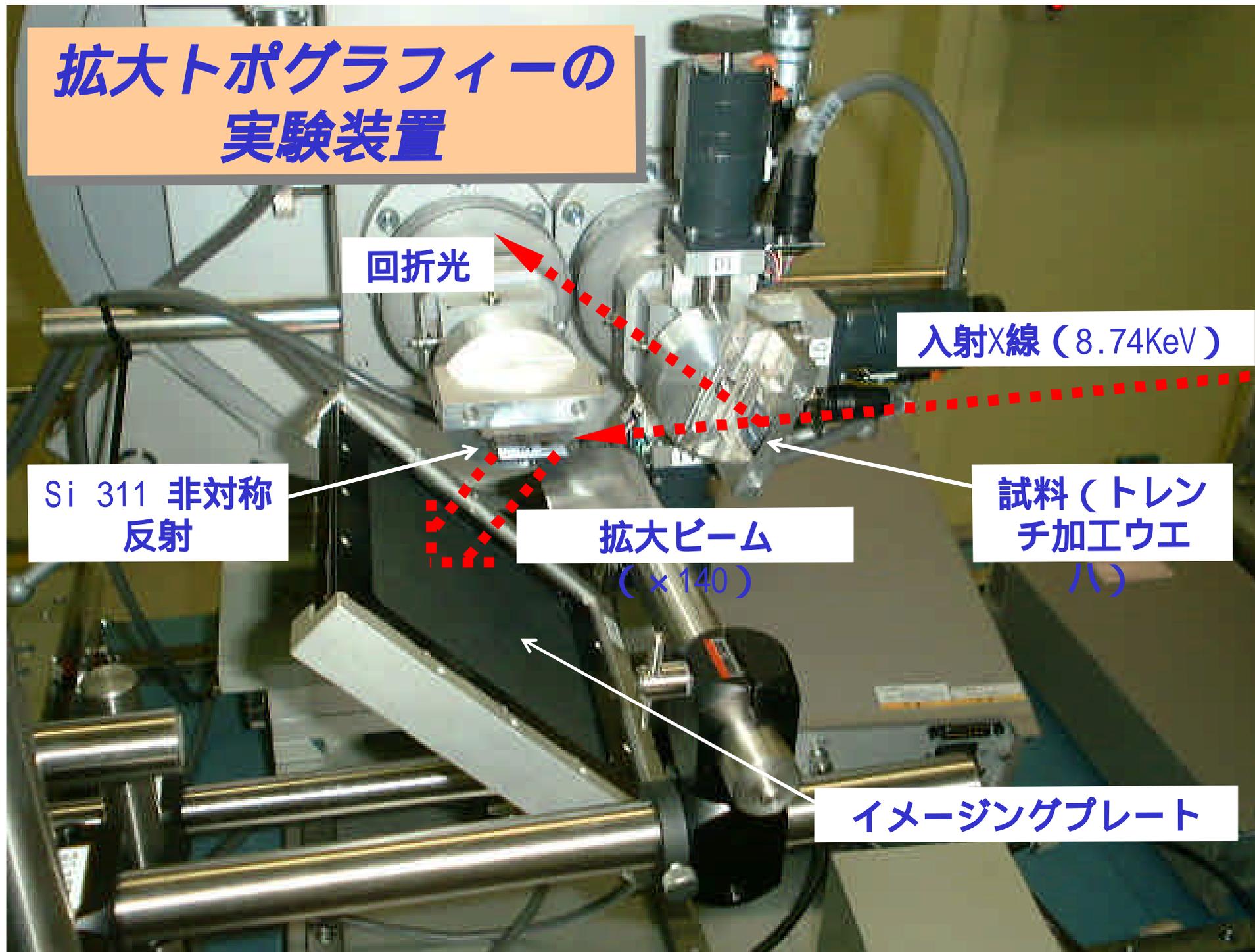
入射X線 (8.74KeV)

Si 311 非対称
反射

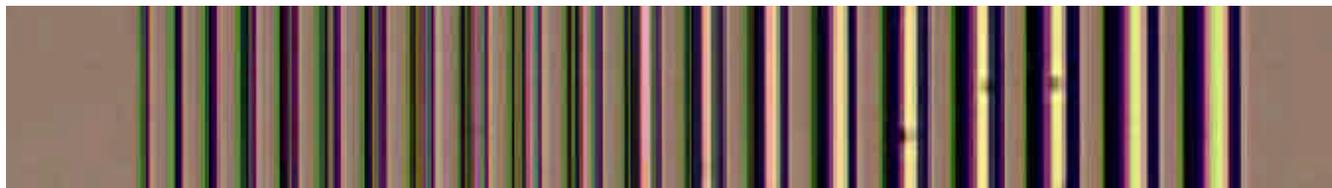
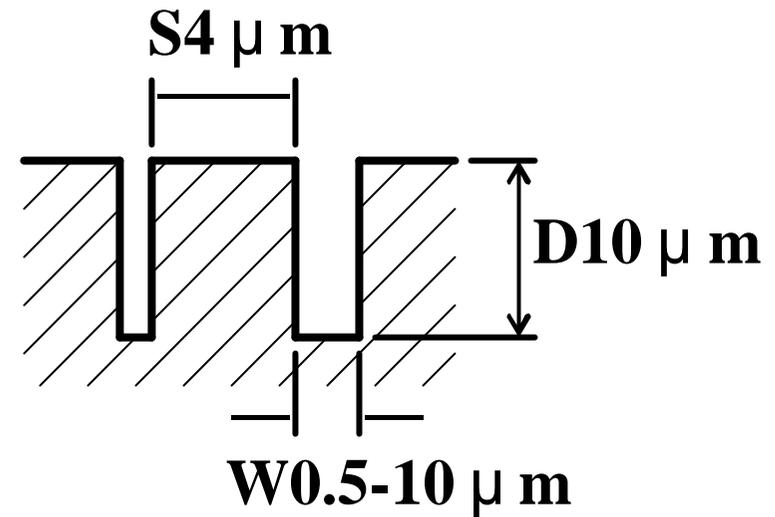
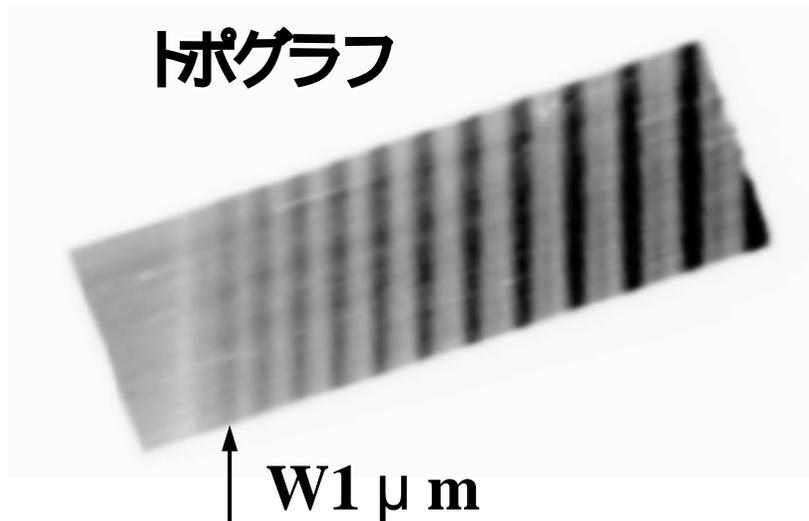
拡大ビーム
($\times 140$)

試料 (トレン
チ加工ウエ
ハ)

イメージングプレート

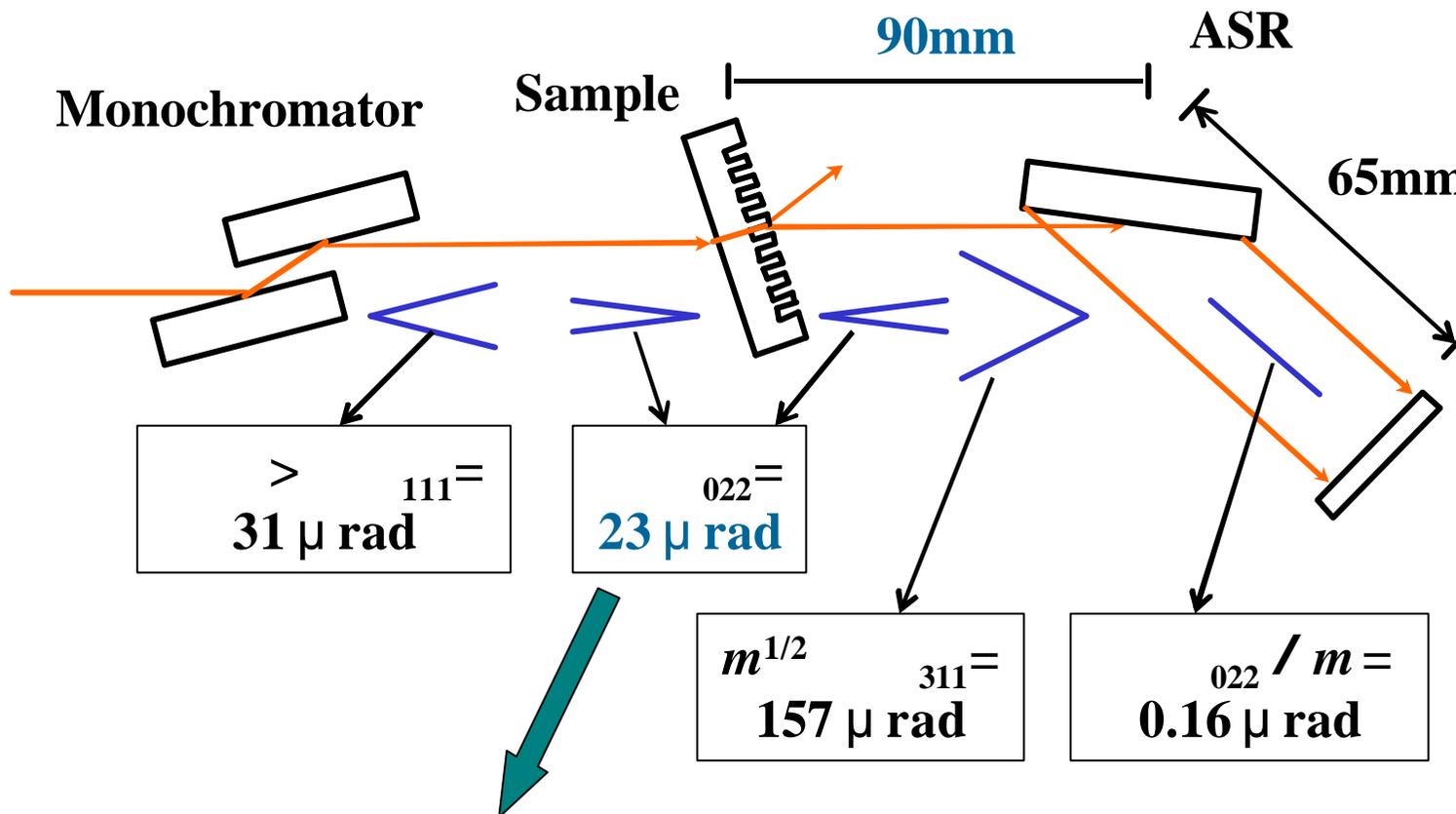


ASR拡大トポグラフィー測定結果



トレンチパターンの写真

(ビーム発散角 × 距離) による像の劣化

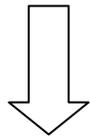


$$\text{DIV} \sim 23 \mu\text{ rad} \times 90\text{mm} = 2.1 \mu\text{m}$$

ASR拡大法の理論分解能

$$I(x) \propto \frac{|J_1(ax)|^2}{x^2} \quad J_1: \text{ベッセル関数}$$

$$J_1(ad_{\text{ASR}}) = J_1(3.83) = 0$$

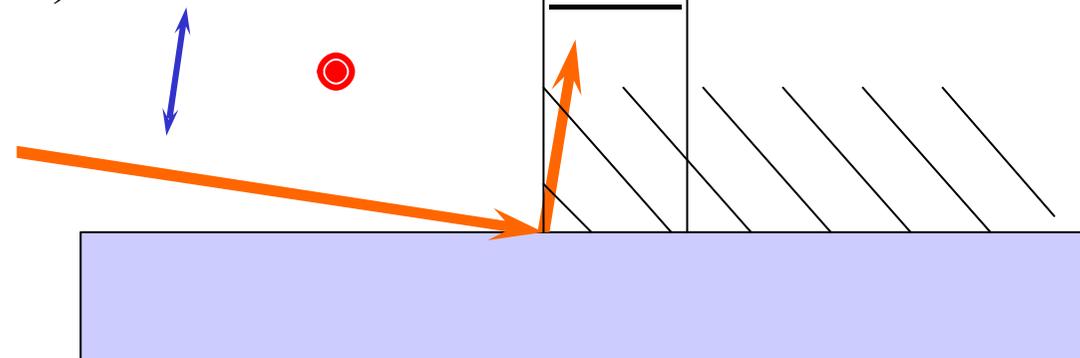
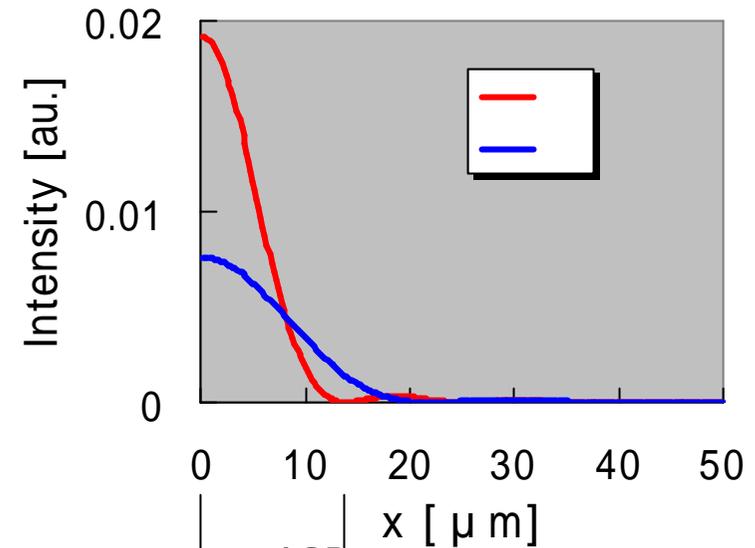


$$d_{\text{ASR}} = 3.83 \times \left(\frac{\sin \mathbf{q}_B}{Cr_e I} \right) / \left(\frac{|F_h|}{V} \right)$$

$$R_s = \frac{d_{\text{ASR}}}{m}$$

R_s : 理論分解能

m : 拡大倍率



理論分解能の計算結果

Si(hkl)	Si(311)	Si(511)	Si(333)
E [KeV]	8.78	21.5	7.23
m	142	134	131
ASR [μ m]	13.9	27.1	27.1
R_s [μ m]	0.1	0.2	0.21

位相変調型

設計波長 = 0.14nm (9KeV)

焦点距離 $f = 50\text{mm}$

ゾーン数 $N = 166$

最外周ゾーン寸法 $r_N = 0.1 \mu\text{m}$

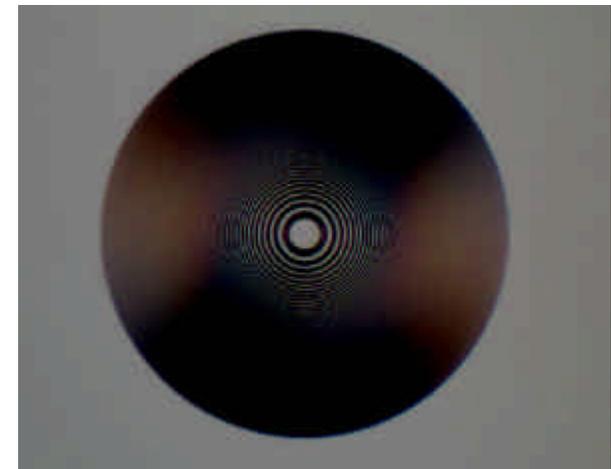
直径 $d = 64 \mu\text{m}$

Ta膜厚 = 1 μm

SiN膜厚 = 1 μm

空間分解能 $\sim r_N = 0.1 \mu\text{m}$

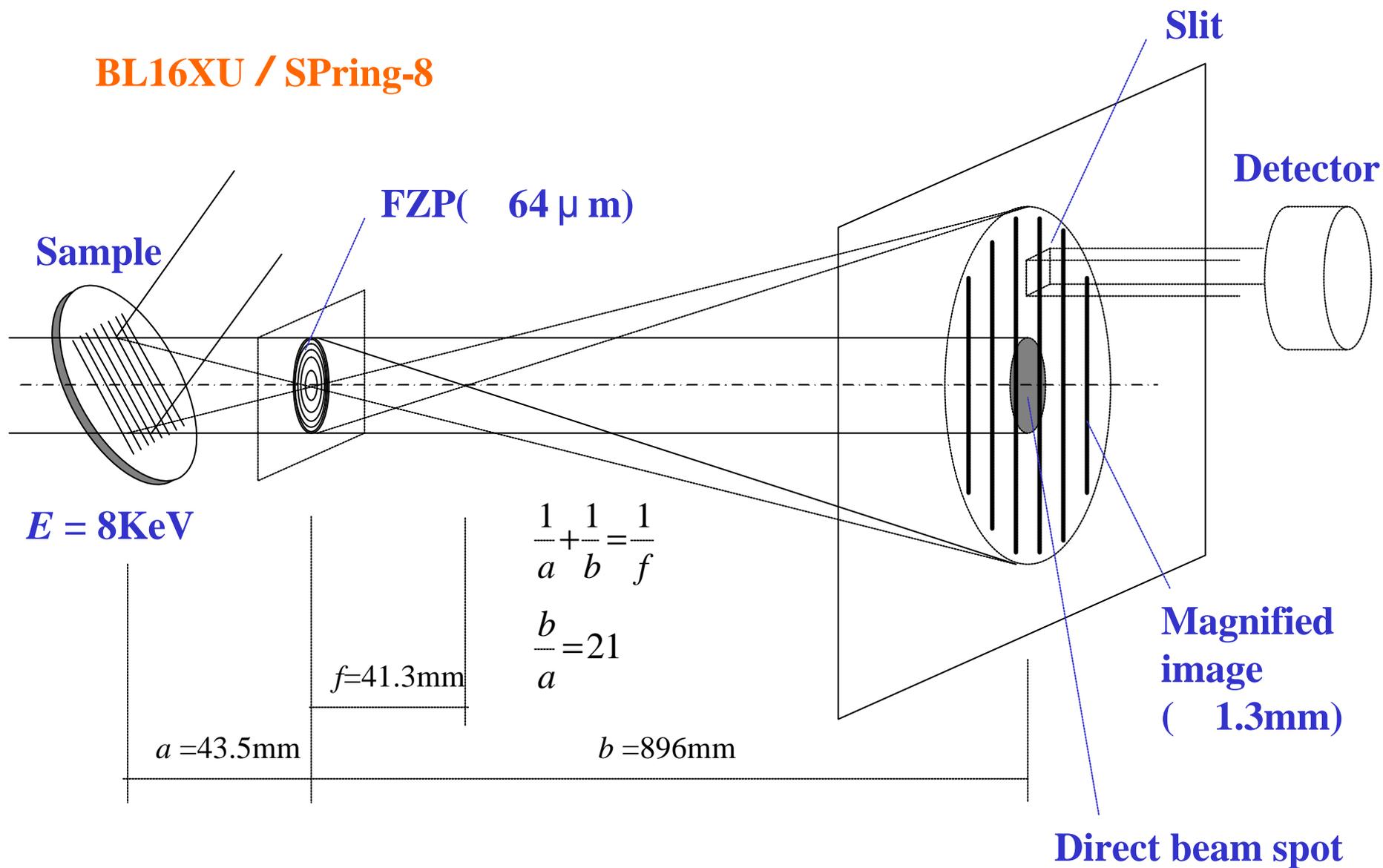
単色性条件 $E / \Delta E \sim 10^4 < 1/N$



FZPの光学顕微鏡写真

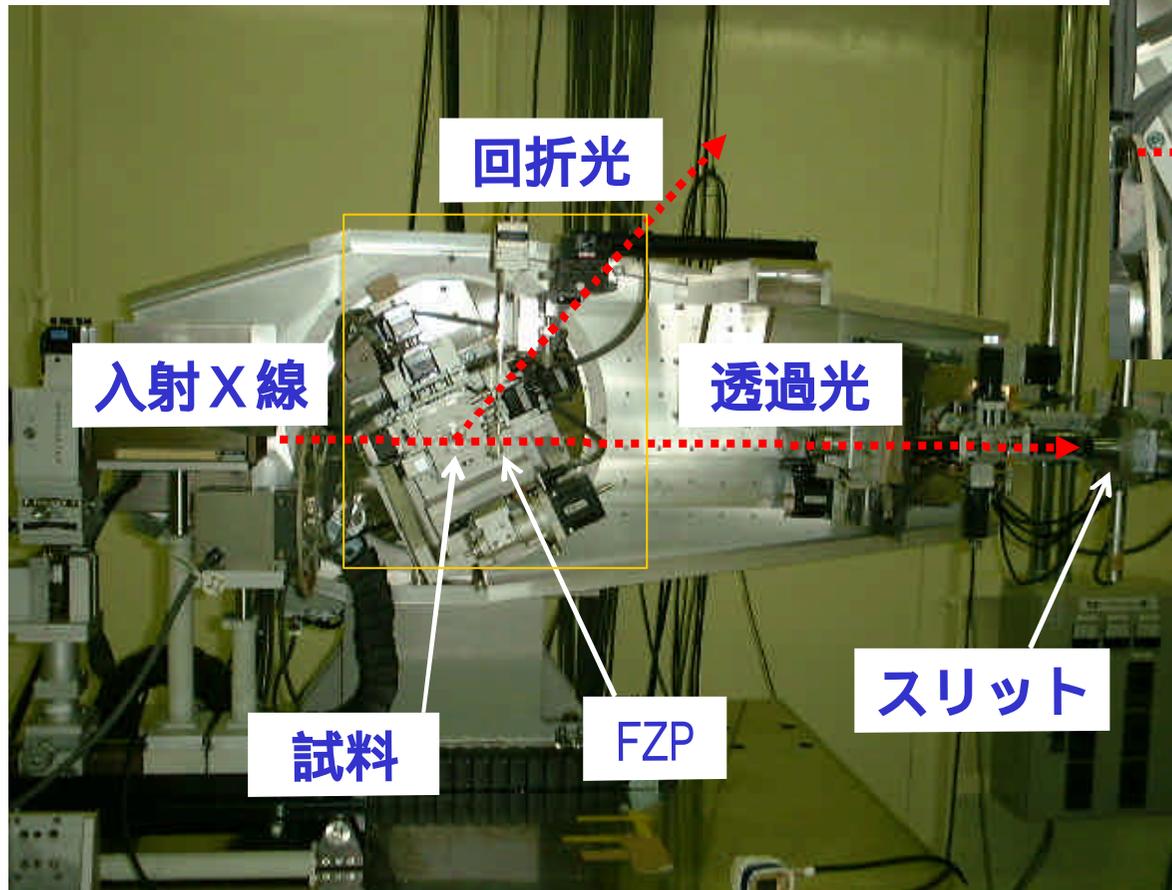
FZP結像光学系の構成

BL16XU / SPring-8

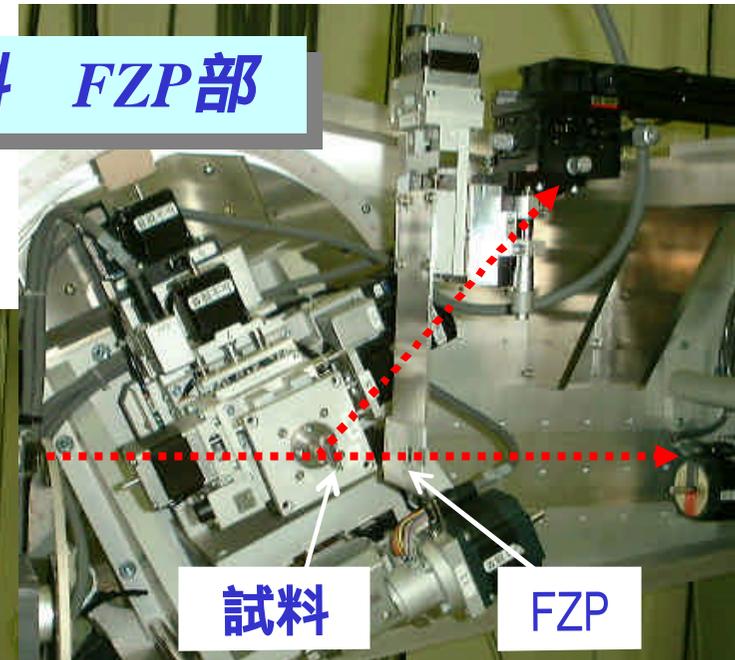


FZP拡大結像法の実験装置

装置全体



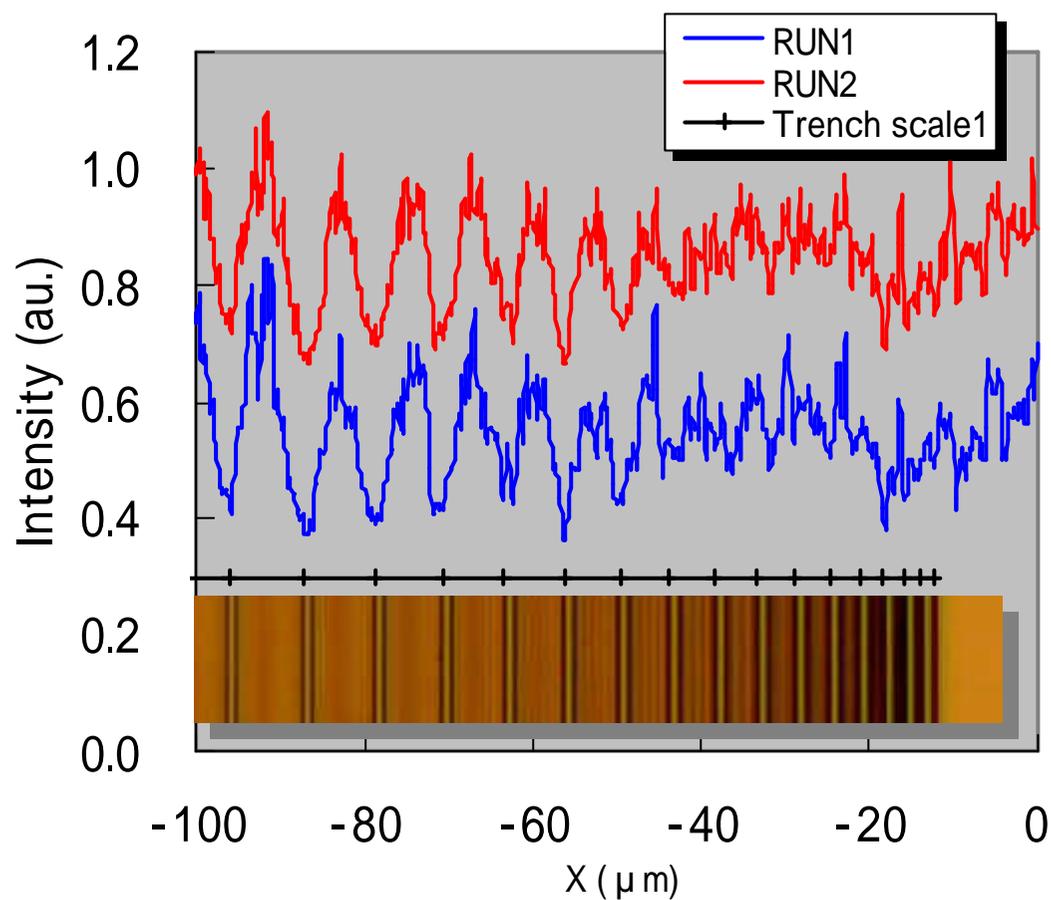
試料 FZP部



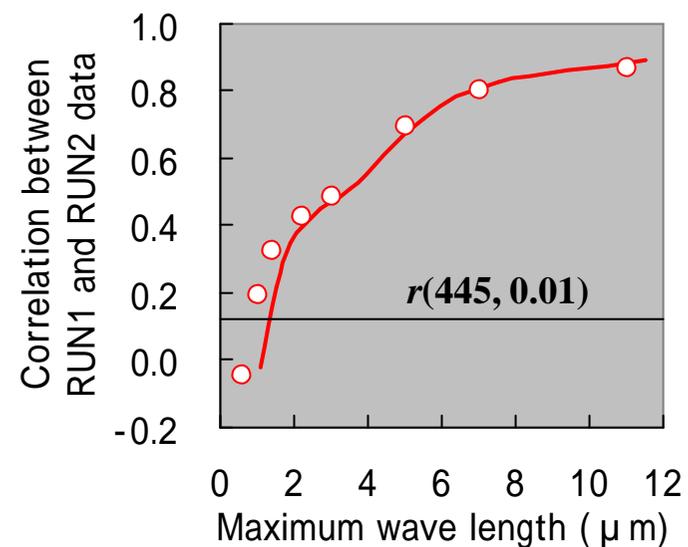
Energy = 8KeV

$2\theta = 47.6\text{deg. (022)}$

トレンチ構造による異常透過光強度の変化



長周期成分除去後のRUN1,
RUN2 dataの相関



1. ASR拡大法

- ・空間分解能 $< 1 \mu\text{m}$ の見通しを得た。
- ・最小空間分解能を $0.1 \sim 0.2 \mu\text{m}$ と推定した。

< 課題 >

- ・回折光拡大法
- ・2次元拡大方式

2 FZP 拡大結像法

- ・空間分解能 $< 1 \mu\text{m}$ の見通しを得た。

< 課題 >

- ・装置改良による現状の性能把握がまず必要である。
(ピント合わせ機構 , 精密スリット/ ピンホール)
- ・回折光拡大法