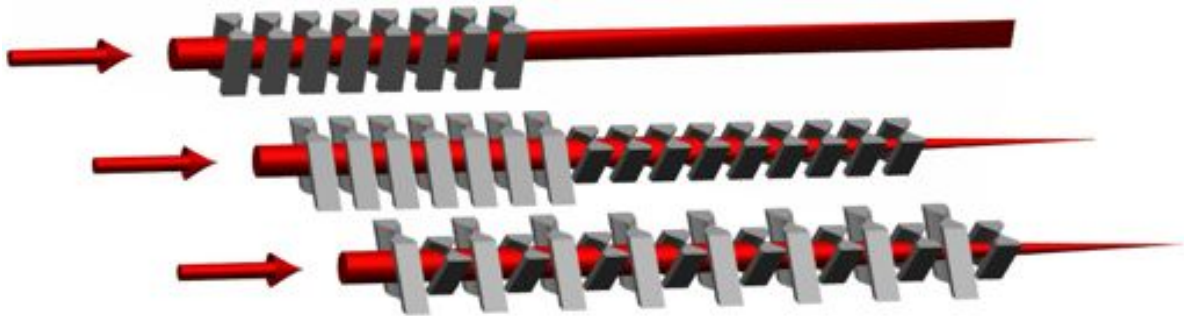


小型, 設置簡易, 長期連続使用可能な, 屈折型の樹脂レンズ
高フラックス集光, コリメータとしても応用可能

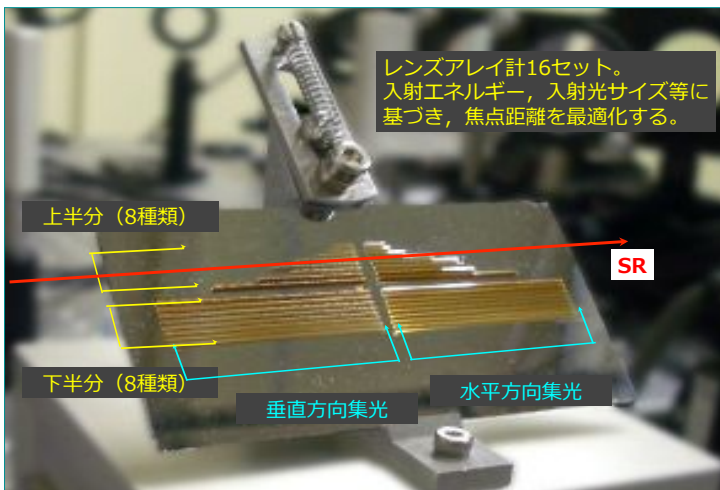
原理

- ・X線の材質内における屈折率はわずかに1未満であるため, レンズの形状は可視光用レンズとは逆の凹型となる
- ・一つのレンズパーツによる屈折は小さく焦点距離は数m程度であるが, 10個以上並べることで数mm程度まで縮められる



レンズパーツの配列と集光の様子

- (上) 1次元集光: 片側のみの集光が必要な際に有効。焦点距離は製造時に選択可能。
(中) 2次元集光: 片側を集光し, ついで90度交わった方向も集光する。
(下) 2次元集光(イメージング用): 縦横を交互に集光していく。



Si製のレンズプレート: 茶色い部分が樹脂(SU-8)のレンズアレイで, 上から下まで16本並んでいる。その内の1本を放射光が通る模式図(赤字SR)。

製品特長

- ・レンズエレメントは, X線で架橋化するエポキシ樹脂SU-8からなる。そのため経年劣化が少なく, 長時間に亘る放射光照射後も性能が安定している。最長で約4年間使用した例がある(SPring-8)。
- ・レンズアレイは, プレート上部から中央部に向かって, アパーチャ369 μm から41 μm の8種類, 中央部から下部へも対照的に8種類, 計16本が配列されている。
- ・各アレイごとに, 異なるエネルギーや焦点距離で使用できるよう調整する。したがって, レンズプレートを1枚購入すると, 最大16種類のレンズを入手できることになり, 経済的である。
- ・光軸が変わらないことから, 小型で設置や微調整が用意であることから, 作業効率を飛躍的に増大させられる。

仕様

外形	60 mm x 20 mm x 0.6 mm	エネルギー	5 - 100 keV
集光	線(1次元)または点(2次元)	Working Distance	1 - 1,000 mm
レンズ本数	アパーチャ8種類 x 2セット	アパーチャ	41 - 369 μm (8種類)
材質	SU-8 (エポキシ樹脂)	照射耐性 (28 keV)	> 8.3 GJ/cm ³

応用例

1. マイクロ集光, サブミクロン集光
 - ・(SR) 超高圧・高温環境における, 結晶構造の調査
 - ・(SR) 高フラックスを稼ぐための集光
 - ・(チューブ) X線顕微鏡としての利用
2. コリメータとして使用(1D集光レンズ2組)
 - ・1枚目でオーバーフォーカス, 2枚目で平行化

集光例(シミュレーション, FWHM)

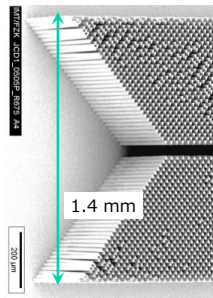
焦点サイズ: $V \times H = 0.23 \mu\text{m} \times 1.47 \mu\text{m}$
(例: 線源サイズ: $V \times H = 10 \mu\text{m} \times 300 \mu\text{m}$, 透過率88%
線源距離: 70 m, $F = 300 \text{ mm}$, $E = 10 \text{ keV}$ の場合)

焦点サイズ: $V \times H = 0.09 \mu\text{m} \times 1.90 \mu\text{m}$
(例: 線源サイズ: $V \times H = 6 \mu\text{m} \times 600 \mu\text{m}$, 透過率87%
線源距離: 65 m, $F = 200 \text{ mm}$, $E = 25 \text{ keV}$ の場合)

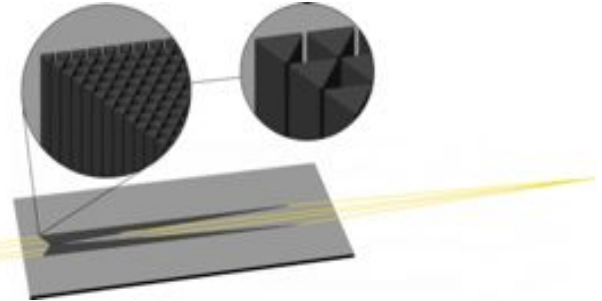
1. X線プリズムレンズ X-ray Prism Lens XPL (線集光, 点集光)

原理

フレネルレンズのパーツを三角柱に置き換えることで、屈折に寄与する面を増やし、吸収されるX線の量を減らしている。
プリズムによって屈折された光が次のプリズム構造に入射するように配列されている。そのため全てのレンズエレメントが屈折に寄与する。
光軸に対照な集光を達成するように配列されている。



Prism lens:
Height: 175 μm
Aperture: 1.4 mm



仕様例 1次元集光

Aperture [μm]	2,500	3,400	1,570
Vertical aperture [μm]	100-150	100-150	100-150
Energy [keV]	62	62	113
Intensity gain	3.50	4.08	2.36
Working distance [mm]	4,800	4,800	4,800

ビームライン環境に合わせカスタマイズ製造。

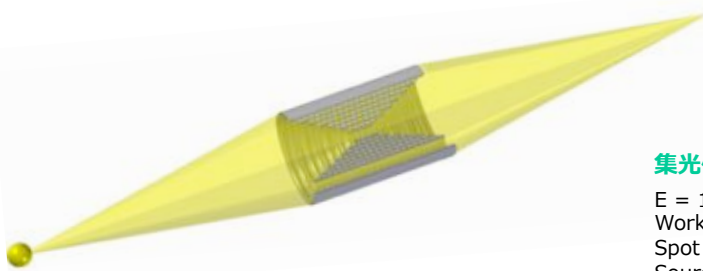
レンズ2組を直交させることで、2次元の集光製品も実現している。

SPring-8にて集光実績あり。

仕様例 2次元集光

Aperture [μm]	1,000	1,000	1,500	1,500
Vertical aperture [μm]	1,000	1,000	1,500	1,500
Energy [keV]	25	50	25	50
Intensity gain	30-60	15-35	70-140	40-82
Working distance [mm]	1,300	1,300	1,300	1,300

2. ロールドX線プリズムレンズ RXPL (点集光)



Rolled X-ray prism lens schematic

ポリイミド樹脂膜の表面に、三角柱のプリズムレンズエレメントを多数配列。その一つ一つが屈折によって集光に寄与する。
プリズムのエッジは最小で10 μm 、レンズの全長は約7 mm。

集光例(FWHM)

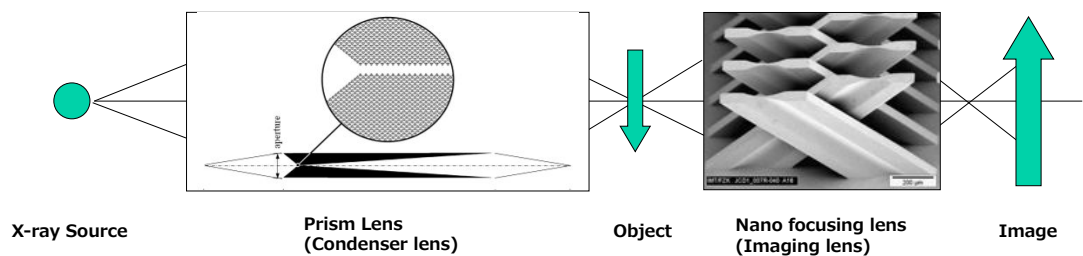
E = 16 keV
Working distance: 350 mm
Spot size: V x H = 18 μm x 31 μm
Source distance: 12 m
Gain: 30

E = 8.04 keV
Source size: 0.4 mm x 1.2 mm
Working distance: 100 mm
Spectral intensity gain: 20
Spot size: 20 μm diameter

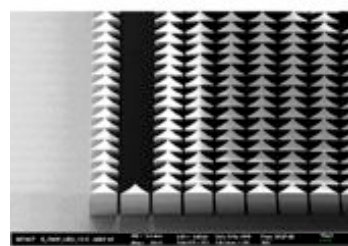
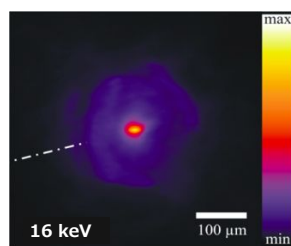
3. 応用例 X線顕微鏡

プリズムレンズの想定応用例
X線顕微鏡にイメージングレンズとして設置し、ナノフォーカスを恒常的に実現。

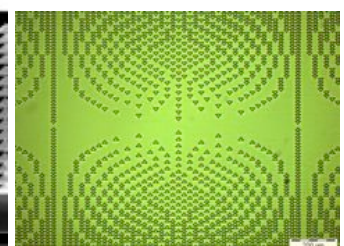
イメージングレンズは、交差型の既存のCRL(複合屈折レンズ)を想定。



Rolled X-ray prism lens



X-ray mosaic lens **NEW!**



回折格子製造と提供 (実績)

LIGAプロセスを応用して製造した、
高アスペクト比のX線用回折格子を提供いたします

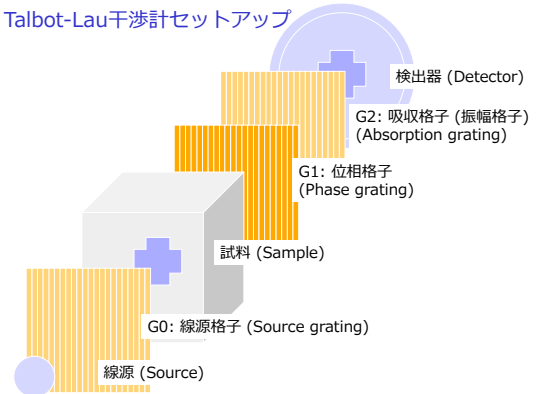
Talbot干渉計セットアップ: X線管を用いる場合、3種類の回折格子が必要となる。G0:空間コヒーレンス用(放射光を使用するTalbot-Lau型では不要)、G1:位相格子、G2:吸収格子(振幅格子)。

Talbot-Lau干渉計セットアップ: シンクロトロン放射光のようなコヒーレント光を用いる場合は、2種類の回折格子が必要となる。G1:位相格子、G2:吸収格子(振幅格子)。

カールスルーエ技術研究所・IMTでは、線源格子、位相格子、吸収格子(振幅格子)を開発・作成している。シンクロトロン放射光施設によるX線をマスクを通して樹脂に照射し、空隙に電鍍を施す。このプロセスはLIGAと呼ばれる。

ESRFやANKAでの実験の他、国内向けではX線管における使用において、実績を重ねている。

Talbot-Lau干渉計セットアップ

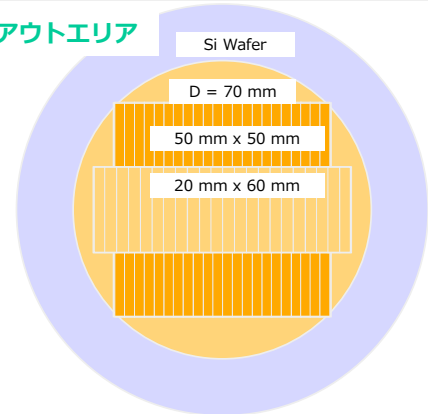


標準仕様

格子の材質	Au, Ni, または樹脂
基板材質	4インチSi厚さ550 μm, Tiメンブレン等
誤差	線幅20%, 高さ10% (基板全体)
側壁の粗さ	50 nmから80 nm
金属線の最大長	アスペクト比による。30 μm程度 (レジスト安定化のため)
面積(標準)	D = 70 mm 50 mm x 50 mm, 20 mm x 60 mm

基板の材質や厚みは応相談。格子の材質と構造高は、使用するセットアップに基づいて提案も可能。

標準レイアウトエリア

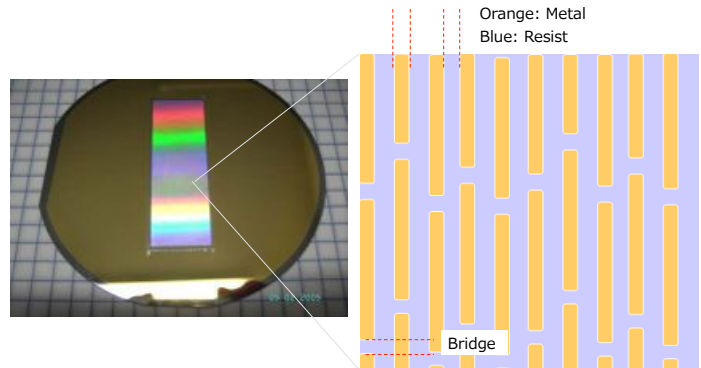


構造例

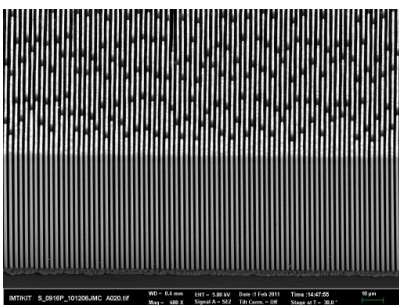
	①	②	③	④
高さ	100 μm	80 μm	100 μm	4 μm
周期	2.4 μm	4.8 μm	5.0 μm	3.24 μm
線幅(金属)	1.2 μm	2.4 μm	2.5 μm	1.62 μm
材質	Au	Au	Au	Ni

(上) ウェハ、レジスト、電鍍の構造例

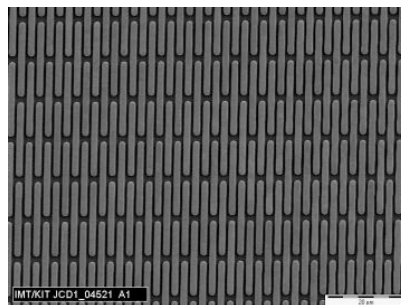
(右) 格子の拡大模式図。高アスペクト比構造の場合、製造工程で用いるレジストの安定化のため、ブリッジが必要となる(結果的に、メタル構造にレジストブリッジが入る)。30 μm長さに対して、2~3 μm程度。



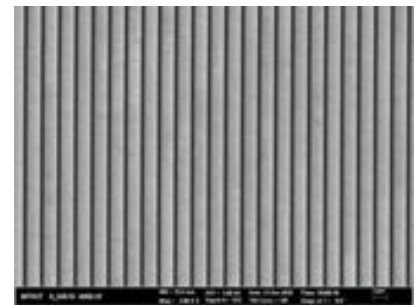
作成例 マスクを通して放射光を樹脂に照射→空隙に電鍍→樹脂の除去 ...「LIGAプロセス」



Au, 周期2.4 μm, 高さ120 μm(アスペクト比100)
周期4.0 μmで最大アスペクト100程度まで可能

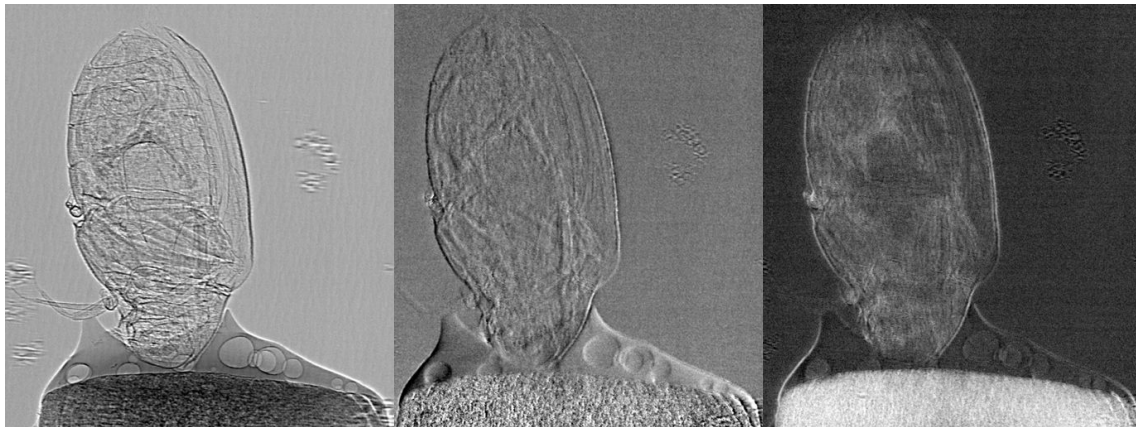


Au, 周期: 4.37 μm
ライン長さ: 30 μm, ブリッジ: 2 μm



Au, 周期: 24.39 μm
ライン長さ: 連続線, ブリッジ: なし

1. DPCI images generated with LIGA gratings



Absorption

Differential phase

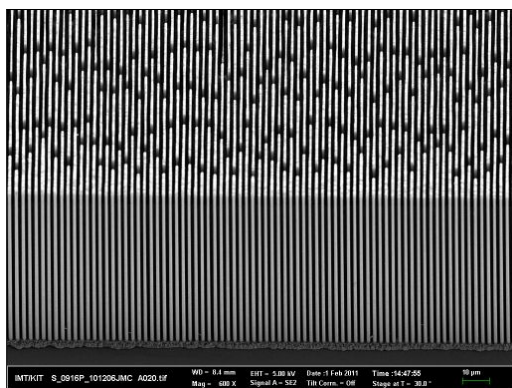
Dark-field

Images: produced at Topo-Tomo at ANKA KIT, Karlsruhe white beam, no filters
1st Talbot distance for 25 keV. Detector: PCO4000, eff. pixel size 6.6 μm
カールスルーエ技術研究所・ANKAにて作成, 実施された回折格子による像

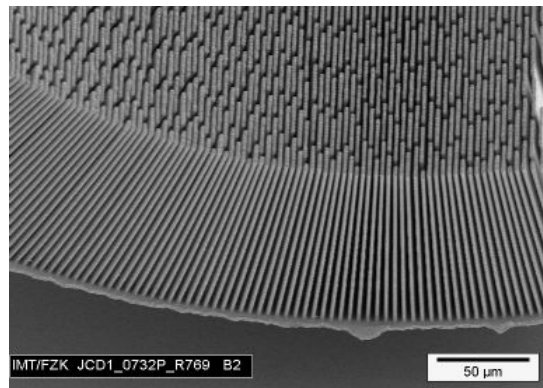
2. LIGA Gratings 研究開発品

	①作成済み	②現状実施可能	③将来展望1	④将来展望2	⑤将来展望3
最小周期	2.4 μm	1.2~1.3 μm	1.2~1.3 μm	0.8~1.0 μm	0.8 μm 未満
最大アスペクト比	100	50	100	50	50未満
構造高	120 μm	83 μm	160 μm 程度	100~125 μm	125 μm

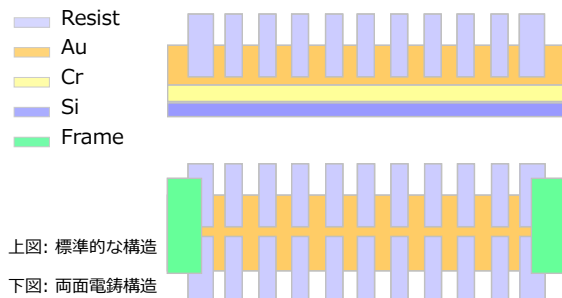
回折格子構造例:
②~⑤は追加的な
開発, 最適化を要
する。



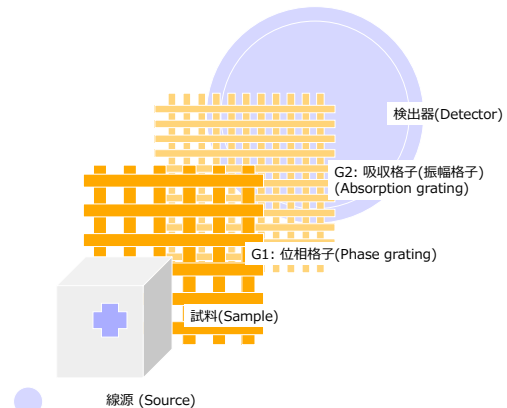
高アスペクト比構造(上記①)
Au, 周期2.4 μm , 高さ120 μm , アスペクト比100



湾曲型の回折格子
Au, 基板はTi(2 μm), Siウエハはエッチング除去



基板両面から電鍍を施す技術を開発している
最小周期は2.4 μm , 最大アスペクト比はおよそ70



2次元のTalbot干渉計用セットアップ
位相格子と吸収格子の研究開発が進められている