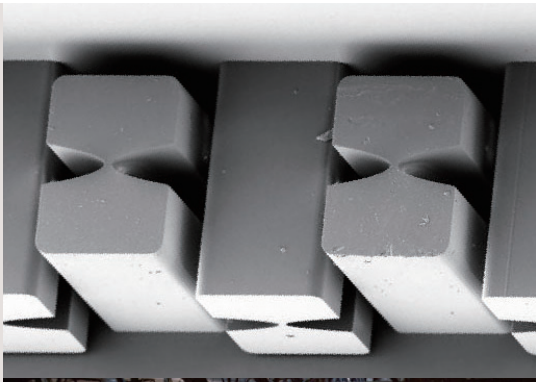
X-ray optic components and LIGA micro structures

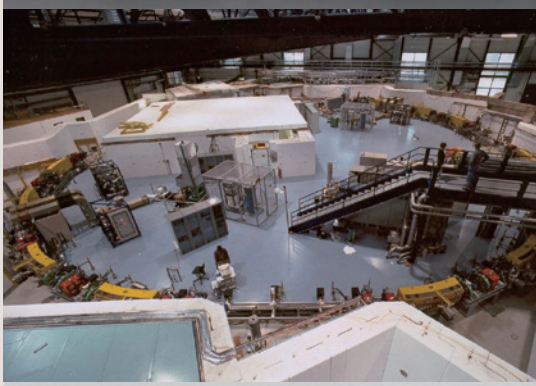
Karlsruhe Institute of Technology (KIT)
Institute of Microstructure Technology (IMT)

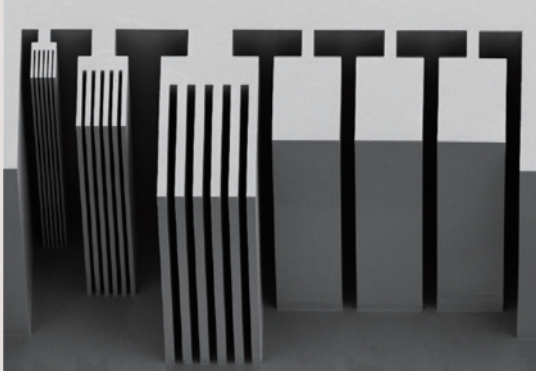
microworks GmbH

- Compound Refractive X-ray Lens (CRL)
- X-ray Gratings for Talbot Interferometer
- Micro Structuring Process by Deep X-ray Lithography: LIGA

- X線集光 複合屈折レンズ
- タルボ干渉計用 X線回折格子
- X線リソグラフィによる微細加工技術：LIGA







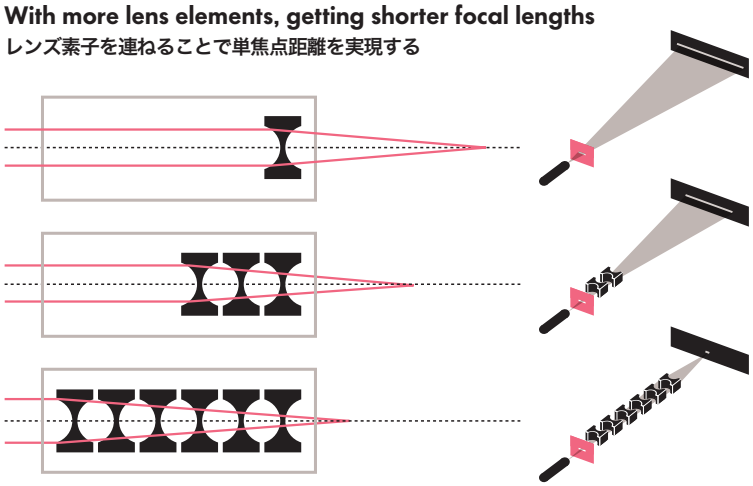
Your Local Contact: ASICON Tokyo Ltd.
代理店：株式会社 ASICON

Version 201709

Compound Refractive X-ray Lens (CRL)
X線集光 複合屈折レンズ

Focusing concept and standard specifications
集光コンセプトと標準品の仕様

With more lens elements, getting shorter focal lengths
レンズ素子を連ねることで単焦点距離を実現する



Two Dimensional Focusing CRL (Standard design)

Along the optical axis many small lens elements are positioned to focus the incident X-ray beam gradually down to a micro focal point. Both vertical and horizontal directions can be focused by using a lens array with 90° tilted elements.

Strengths
- Optical axis does not change
- Focusing quality does not change over a long exposure
- Easily installed because only one plate is required
- Fresnel lens is also available

Specifications
- Wide energy range applicable (> 8 keV)
- Entrance aperture size: up to 1,500 µm
- Focal point size: min. 0.5 µm x 0.5 µm
- Focal length: > several tens mm
- Lens material: SU-8 (epoxy resist)

複合屈折レンズ標準品(2次元集光)

～数百 µm のアパーチャを持つレンズ素子が，多数直線的に配列されており，入射光を段階的に集光していきます。 点焦点は，レンズ素子列を90度直交配列させることで実現します。

特長
- 光軸が変わらない
- 長時間の照射でも品質への影響些少
- 1枚で集光可能なので設置が非常に容易
- フレネルレンズタイプあり

仕様
- エネルギー範囲 > 8 keV
- 受光アパーチャサイズ: 最大1,500 µm
- 集光サイズ: 最小0.5 µm x 0.5 µm
- 焦点距離 > 数十 mm
- レンズ材質: SU-8 (エポキシ樹脂)

Material

Lens elements are made of SU-8 like polymers on a Si-wafer. The epoxy resist SU-8 used in the lithographic process is characterised by a high sensitivity, high X-ray transparency, and good chemical and mechanical stability.

レンズの材質

レンズの集光素子は，エポキシ樹脂のSU-8からなり，X 線リソグラフィを用いた LIGA プロセスにて，Si ウェハ上に配列されます。SU-8は高耐薬品性，高 X 線透過性，化学・機械的な安定性といった特長を兼ね備えています。

Radiation stability

The stability of the lenses against X-rays has been tested up to a dose of ≈2 MJ/cm³ until now. The longest exposure time (total) is several hundred hours at BL10XU, SPring-8. During the initial use of the lenses SU-8 polymer usually darkens. This has no impact on the transmission properties of the lenses but the focal length might decrease by about 1%.

X 線耐久性

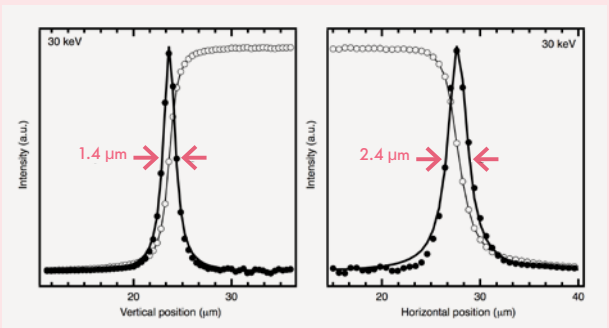
これまで照射量は2 MJ/cm³程度を記録しています。また，日本国内では SPring-8の BL10XU にて推定数百時間の累積照射実績があります。X 線照射後，初期には可視光の範囲で外見上の変化が生じ(色が濃くなり)，1% 程度の焦点距離の減衰が生じますが，以後は安定します。

Required precision of the motorised tables to adjust the lens plate
ステージの要求精度

Direction of positioning of lens plate	Minimum required range for the motion of this direction	Minimum required precision
X-translation (vertical)	15 mm	± 3 µm
Y-translation (horizontal)	15 mm	± 3 µm
Z-translation (along beam axis)	10 mm (manual pre-adjustment: 100 mm)	± 1 µm
Turning around the x-axis	3°	± 0.002°
Turning around the y-axis	3°	± 0.002°
Turning around the z-axis	1°	± 0.1°

Focusing example at BL10XU SPring-8, Japan
SPring-8 BL10XUにおける集光実例

Focusing condition:
E = 30 keV (monochromatic)
CRL1 focuses X-ray from the undulator to a pin-hole and CRL2 focuses the beam from this virtual source to the sample.
CRL 1: SD = 49.4 m, WD = 2.3 m
CRL 2: SD = 5.0 m, WD = 0.5 m
Pinhole: 10 µm diameter
BL10XU SPring-8, Japan, May 2016



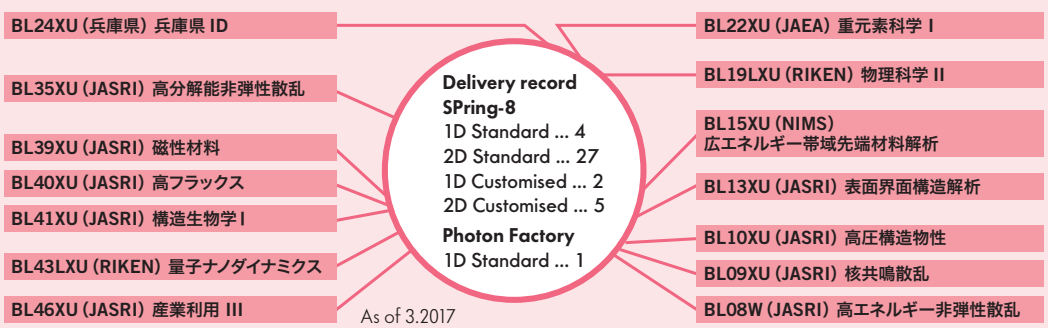
Lens design #1405 ©1

Courtesy of Dr Yasuo Ohishi (JASRI) and Dr Naohisa Hirao (JASRI)
情報提供：大石泰生様(JASRI)，平尾直久様(JASRI)

Delivery record in Japan
国内納品実績

国内実績
納品開始: 2005年12月
SPring-8 ビームライン納品実績多数
共同研究開発プロジェクト進行中

製造者
カールスルーエ技術研究所(KIT)・IMT
(ドイツ・国立研究所)

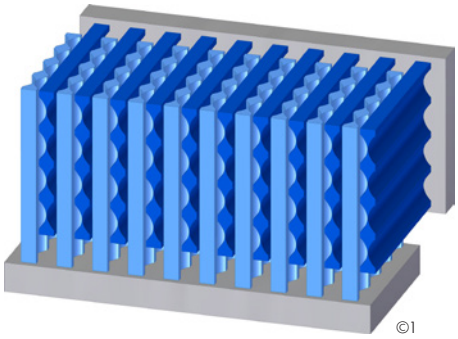


As of 3.2017

Cited references
H. Fukui et al. J. Synchrotron Rad. (2013) **20**, 591-595 DOI:10.1107/S0909049513011722
O. Sakata et al. AIP Conf. Proc. **1234**, 151 (2010) DOI: 10.1063/1.3463162
Publication examples
F. Marschall et al., Simulation of aperture-optimised refractive lenses for hard X-ray full field microscopy, Opt. Express, **24**(10), 10880 (2016), DOI: 10.1364/OE.24.010880
F. J. Koch et al., Quantitative characterization of X-ray lenses from two fabrication techniques with grating interferometry, Opt. Express, **24**(9), 9168 (2016), DOI: 10.1364/OE.24.009168
A. Last, Refractive X-Ray Lenses Produced by X-Ray Lithography, in LIGA and Its Applications (eds V. Saile et al.), Wiley-VCH (2009), DOI: 10.1002/9783527622573.ch9

Multi-focus lens
with multiple focusing conditions on a single layout

マルチフォーカスレンズ
複数の集光条件をブロック状に搭載可能

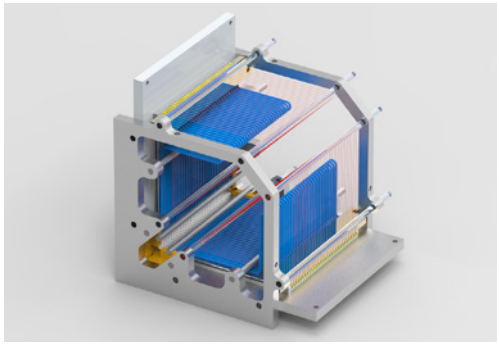

©1

Focusing lenses arranged in a matrix
At most 10 x 10 lens cells available (150 µm aperture)
Function examples:
- Multiple set-ups on a single product
- Multiple focuses realised by illuminating the whole lens aperture

格子状に配列した集光レンズ
・最大で10 x 10のレンズマトリクスを構成(アパーチャ150 µm 時の試算)
例: 複数のセットアップ向けの集光条件を一つの製品上に搭載
例: アパーチャ全体に X 線を照射することで複数の焦点を構成

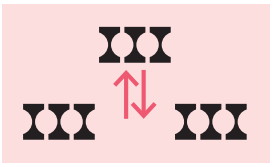
Zoom lens
with adjustable working distances

ズームレンズ
焦点距離が可変なレンズシステム


©1

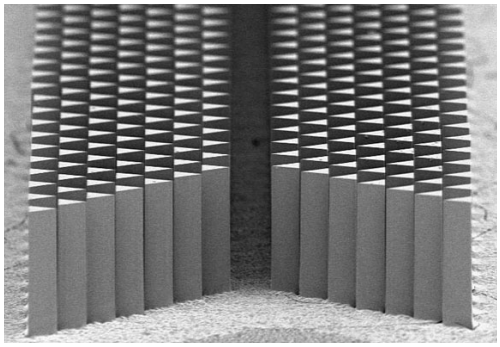
User-adjustable lens system
depending on Working distance and energy
- By putting in/out lens elements, you can ajust the WD in your hutch.
- Controlled manually or electronically (upon request)
- Outer dimension: about 100 mm x 120 mm x 100 mm

ワーキングディスタンスとエネルギーを
現場で設定できるレンズシステム
・集光素子を着脱することで ユーザにて WD を現場調整可能
・手動または電子制御(応相談)
・外形 100 mm x 120 mm x 100 mm 程度



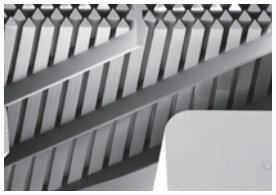
X-ray prism lens (XPL)
with a large aperture and low absorption

プリズムレンズ
大アパーチャかつ低吸収


©1

X-ray lens with focusing elements
arranged along the refracted X-ray light path
Focusing example (12.4 keV, F = 1.6 m, BL13XU SPring-8)
Incident beam: 1,500 µm x 1,500 µm
focus size: 52 µm x 46 µm
Delivery examples (SPring-8): BL13XU, BL43LXU

屈折する光線に沿って集光素子を配列したレンズ
集光例(12.4 keV , F = 1.6 m, BL13XU SPring-8)
入射光: 1,500 µm x 1,500 µm 焦点: 52 µm x 46 µm
納品例(SPring-8) BL13XU , BL43LXU

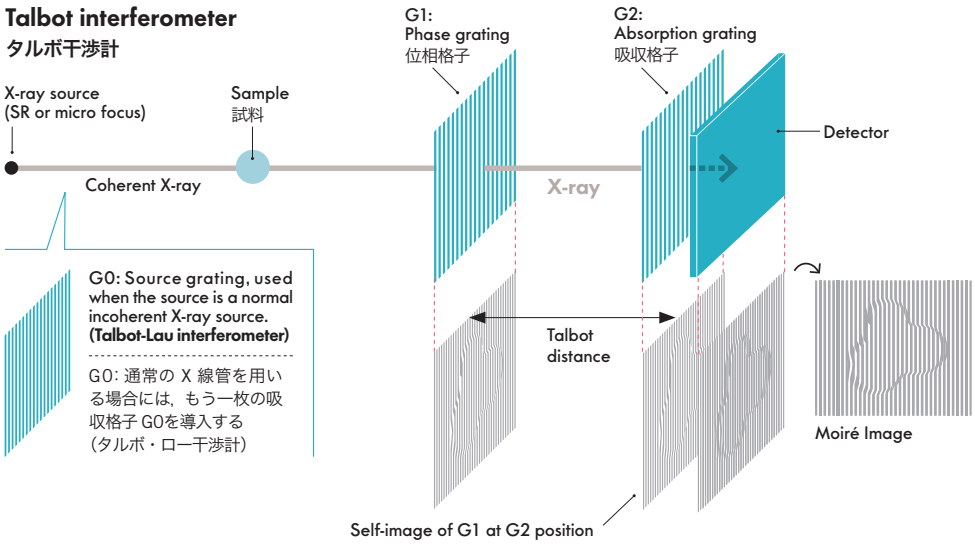

With supporting structures
支持構造付きのデザイン ©1

When you want a lens, let us know:
1. *Photon energy [keV] (monochromatic)
2. *Source size (V [µm]× H [µm], FWHM)
3. *SD: Distance between the source and lens centre position [m]
4. *WD: Working distance,
   distance between the lens cetre and the focal position [mm]
5. *Positions of optical elements between the source and the lens
   (virtual source, focusing elements) and beam size at these elements' positions.
6. Requested focused beam size (V [µm]× H [µm], FWHM)
7. Distance between the lens centre and the detector plane (* Required)

レンズ仕様の検討開始時に必要な情報(* 必須)
1. * エネルギー [keV] (単色)
2. * 光源サイズ (V [µm] × H [µm], FWHM)
3. * 光源からレンズ中心までの距離 SD [m]
4. * レンズ中心から集光点までの距離
   (ワーキングディスタンス) WD [mm]
5. * 光源からレンズまでにある光学素子
   (仮想光源や集光素子等)の位置とビームサイズ
6. 希望焦点サイズ(V [µm] × H [µm], FWHM)
7. レンズ中心位置から検出面までの距離 [mm]

X-ray Gratings for Talbot Interferometer
タルボ干渉計用 X線回折格子

A multi modal radiography method using X-ray gratings
回折格子を用いたマルチモーダルX線イメージング



A self-image of G1 is generated at a Talbot distance when G1 is exposed to coherent X-ray. Positioning a G2 where the self-image appears, the refraction from the G1 is enhanced and one can observe moiré fringes. From this refraction, phase contrast images can be retrieved. And from these moiré images, absorption, differential phase and small angle scattering images can be obtained (Talbot interferometer).

コヒーレント光を入射された位相格子は，一定距離(Talbot 距離)後に自己像 を生じさせます。自己像の位置に吸収格子を配置すると屈折が強調されモアレ縞として可視化されます。この屈折の量から位相コントラスト画像が取得できます。モアレ縞画像からは，吸収像，微分位相像，小角散乱像が得られます(Talbot 干渉計)。

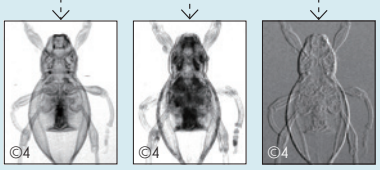
Talbot interferometer imaging with micro focus X-ray tube source
Momose Lab., Tohoku University, Japan

マイクロフォーカスX線管 撮像例
東北大学 百生研究室

X-ray source: micro focus X-ray tube,
Optimised energy: 25 keV
Acceleration voltage: 40 kV
Current: 120 µA
G1: period 4.37 µm (Ni)
G2: period 2.4 µm (Au)

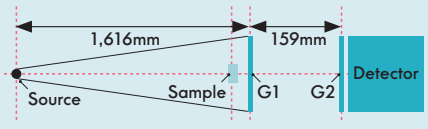
光源: マイクロフォーカス X 線管
E = 25 keV 加速電圧40 kV
電流120 µA
G1: 周期4.37 µm (Ni)
G2: 周期2.4 µm (Au)

Sample カタゾウムシ



Absorption | Dark field (Visibility contrast) | Differential phase

東北大学・百生研究室の開発した「高感度 X 線位相撮像装置」を利用する共用実験の枠組にて撮像

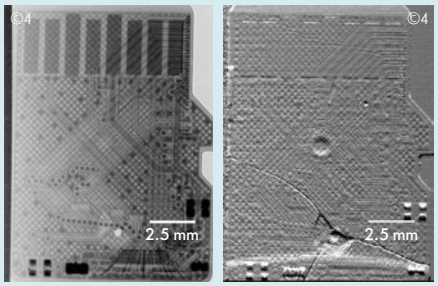


Talbot interferometer experiments at SR facility
BL-14C Photon Factory, Japan

放射光施設 撮像例 フォトンファクトリー BL-14C

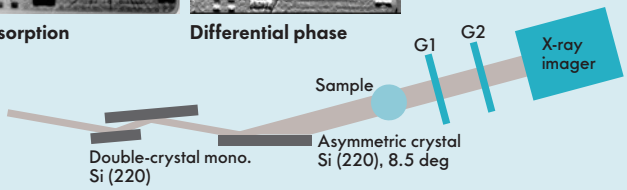
Beam line: BL-14C Photon Factory, Japan
E = 17.8 keV with Al filter (2.0 mm)
G1: period 2.4 µm (Ni), G2: period 2.4 µm (Au)

E = 17.8 keV，Al フィルタ2.0 mm
G1: 周期2.4 µm (Ni)
G2: 周期2.4 µm (Au)

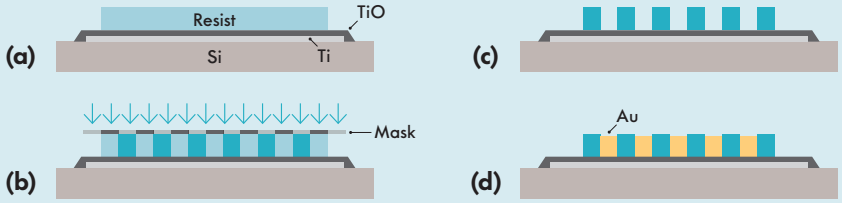


Absorption | Differential phase

「先端研究基盤共用・プラットフォーム形成事業」の「フォトンファクトリーにおける産業利用促進」にて撮像



X-ray grating fabrication process
X線回折格子製造プロセス



Absorption grating
(a) Resist layer preparation
(b) X-ray exposure through the mask to the resist layer
(c) Realisation of precise resist structure
(d) X-ray grating structured by gold electroplating

吸収格子の場合
(a) レジスト層の準備
(b) マスクを通してレジスト層に X 線を照射
(c) 微細レジスト構造の実現
(d) 電鋳により X 線回折格子の吸収体を構造化

Depending on the aspect ratio (AR), phase grating structure can be directly drawn on resist without mask and it can be electroplated afterwards.
Absorption grating requires one or two masks depending on the AR.

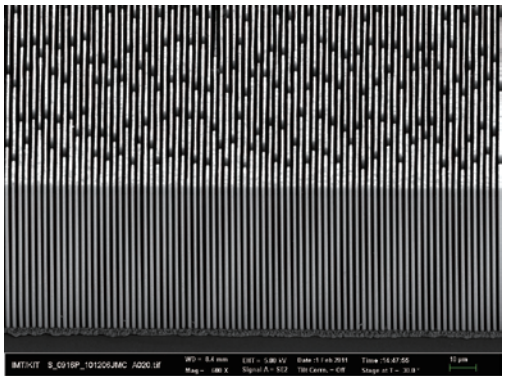
・位相格子: 低アスペクト比の場合はマスク無しでレジストに直接加工，電鋳も可能
・吸収格子: アスペクト比により X 線マスクを1つあるいは2つ使用

Referrals:
•A. Tapfer et al. Med Phys. **38** (11), 5910-5 (2011) DOI: 10.1118/1.3644844.
•M. P. Valdivia et al. J. Appl. Phys. **114**, 163302 (2013) DOI: 10.1063/1.4827186
•D. Stutman et al. Appl. Phys. Lett. **101**, 091108 (2012) DOI: 10.1063/1.4748882
•Yongshuai Ge et al. Opt Express. **22** (12) 14246-52 (2014) DOI: 10.1364/OE.22.014246
•D. Stutman et al. Phys Med Biol. **56** (17) 5697-720 (2011) DOI: 10.1088/0031-9155/56/17/015
•S. Schleede et al. PNAS **109** (44) 17880-17885 (2012) DOI:10.1073/pnas.1206684109
•E. Marco et al. Optics Letters, **39** (11) 3332-3335 (2014) DOI: 10.1364/OL.39.003332

High aspect ratio structures | 高アスペクト比構造

Karlsruhe Institute of Technology (KIT)/IMT and its spin-off company **microworks GmbH** have a long experience in the LIGA process (chain of X-ray lithography realising a high aspect ratio (AR) resist structure and precise electroplating, see next page), develop and provide high AR X-ray gratings worldwide.

カールスルーエ技術研究所(KIT)・IMT と microworks GmbH は，X 線リソグラフィを用いた高アスペクト比の樹脂構造と電鋳構造の作製(LIGA プロセス，次ページ参照)に関する第一人者です。これらの技術を用いて，狭い周期と高構造を併せ持つ回折格子を実現し，世界中に提供しています。

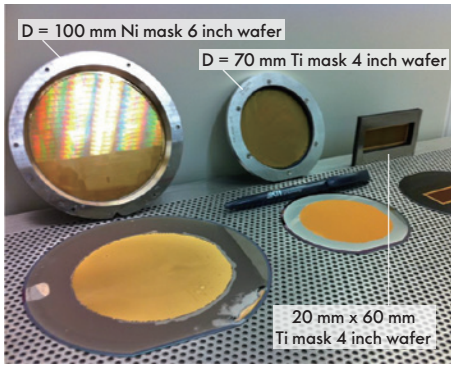


©1

Structure examples

Height [µm]	200	4
Period [µm]	4.8	3.57
Material	Au	Ni
AR	79	1.1
Type	G0/G2	G1

X-ray gratings with larger structured area | 回折格子の有効エリア拡大



©2

To realise a large FOV, many customers wish to have a large grating structured area. And so the manufacturers are continuously working on this.

Standard structured area
On 4 inch wafer: 70 to 90 mm diameter
On 6 inch wafer: up to 110 mm with some constraints

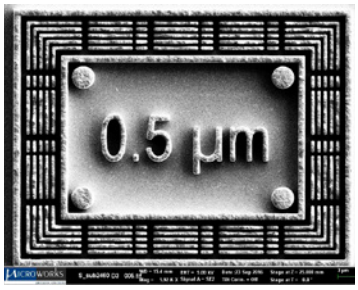
Options to further enlarge area
- Tiling multiple grating plates
- Enlarging the structured area that is made in a single fabrication process (R&D)

大きな視野を得られるように，回折格子の構造エリアの拡大に努めています。

標準サイズ
基板: 4インチウェハ
　有効エリア: 直径70-90 mm 程度
基板: 6インチウェハ
　有効エリア: 直径110 mm 程度（構造に制限がある場合あり）

さらにサイズを拡大する案
・複数の回折格子をタイル状に並べる
・単一格子の構造エリアを拡大する(開発案件)

Very small period gratings | 狭い周期の回折格子



©2

Very small period gratings are under development. Within a limited area and limited metal thickness, 1.0 µm to 2.0 µm period gratings have been realised.

非常に狭い周期の回折格子の実用化を目指しています。1.0 µm～2.0 µm の周期が，限られた面積内で実現しています。

Small period grating structure example with a lamella width of 0.5 µm
狭周期構造例。ラメラ構造の幅が0.5 µm

Structure examples

	Example 1	Example 2
Period	2.0 µm	1.0 µm
Metal	Ni	Au
Height	3.2 µm	1.5-10 µm
For	18 keV, π/2	-
Area	10 mm x 10 mm	5 mm x 5 mm
Substrate	Polyimide	Polyimide
Design	Continuous	Bridges

Substrate materials | 基板の選択肢

Depending on the customer requests for e.g. lower X-ray absorption and bending, various grating substrates are available.

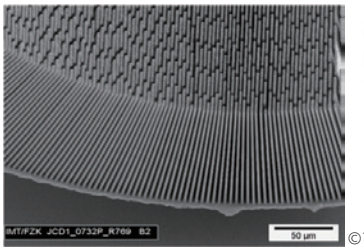
X 線の吸収，湾曲の必要性等に応じて回折格子基板を選択できます。

Material	Thickness (e.g.)	Strength
Silicon	200, 525 µm	Stable (525 µm)
Graphite	200, 500 µm	Low absorption, easy to bend
Polyimide	125, 1,000 µm	Low absorption, easy to bend

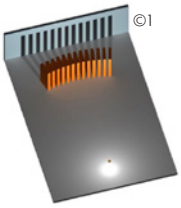
Bent gratings | 格子の湾曲

To avoid shadow effect of a high AR grating structure illuminated by a cone beam, bending can be implemented and the grating will be delivered on a special holder.

コーンビームを照射したときの影を避けるため，回折格子を湾曲することができます。特性のホルダに設置して納品します。



©1



©1

Micro Structuring Process by Deep X-ray Lithography: LIGA
X線リソグラフィによる微細加工技術: LIGA

High aspect ratio micro structures provided by Karlsruhe Institute of Technology (KIT) and microworks GmbH
ドイツ・カールスルーエ技術研究所(KIT)とmicroworks GmbH が提供する高アスペクト比の超微細構造

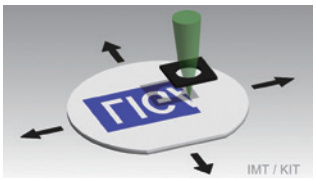
Main characteristics of LIGA structures
- High aspect ratios (> 100) in polymers and metals
- Parallel side walls with flank angle close to 90° (deviation: ~1 µm for 1 mm high structures)
- Smooth side walls (Ra in the 10 nm range) suitable e.g. for optical micro mirrors
- Lateral precision in the few µm range over distances of several cm
- Different side wall angles via double exposure possible

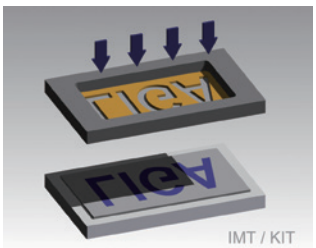
LIGA 微細構造の特長
- 樹脂，金属の高アスペクト比構造（100 可）
- 平行な側壁（フランク角ほぼ 90°，高さ 1 mm に対し誤差約 1 µm）
- 滑らかな側壁（Ra 数十 nm）例：光学マイクロミラー
- 数 cm の距離間で横方向の精度は数 µm
- 複数回の X 線照射により異なる角度の側壁を持つ構造も可能

Mask preparation

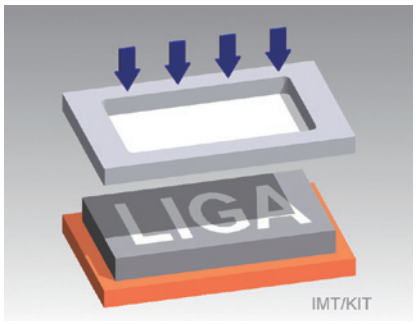
Mask is made with resist drawn by e-beam or laser, followed by gold electroplating as X-ray absorber. For high constrast structures, a high contrast mask is needed.

電子ビームやレーザーによるレジストの描画後，X 線吸収体 (金) を電鋳して作製。高コントラスト構造体向けにはさらに高コントラストマスクを作製する。





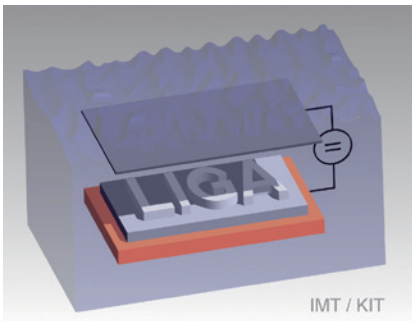
Lithographie (X-ray lithography)



Mask design is copied into reisist by X-ray from the synchrotron radition source ANKA.

マスクの構造を放射光施設ANKA の X 線にて複製。

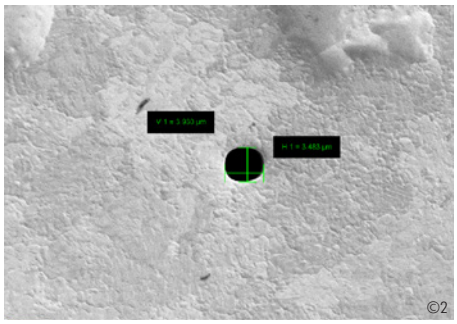
Galvanoformung (Electroplating)



To form metal structures Au, Ni or Cu electroplating is done between the resist gaps.

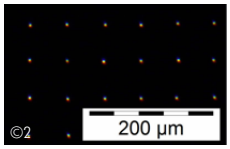
レジスト構造の間隙に電鋳を施して，微細な金属(Au, Ni 等)を構成する。

Through-holes Single/multi holes
高アスペクト比貫通孔 シングルホール/マルチホール

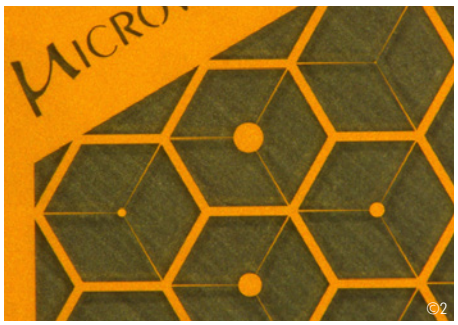


Through-hole examples
(a) Multi holes with 3.0 µm diameter and 80 µm gold thickness
(b) Single hole with 5.0-10.0 µm diameter and 200 µm gold thickness

貫通孔形成例
(a) マルチホール
直径3.0 µm
金の厚み80 µm
(b) シングルホール
直径5.0〜10 µm
金の厚み200 µm

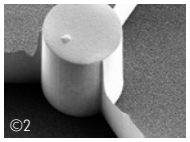


Central beam stop
センタービームストップ

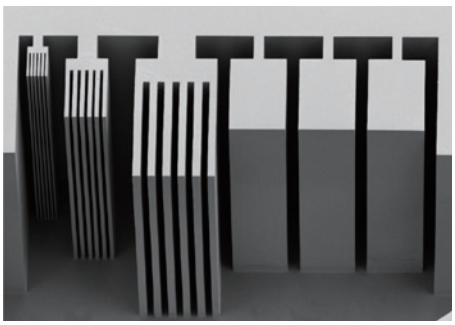


Structure example
Material: Au
Pillar diameter: 30-160 µm
Height: 80 µm
Supporting fin thickness: 2.5-10 µm (centre/outer)

高アスペクト比柱構造の例
材質： Au
中心柱の直径：30〜160 µm
高さ：80 µm
支持構造幅：2.5 µm (中心付近)〜10 µm (外縁付近)



High aspect ratio structures
高アスペクト比構造例



Example
Material: Ni
Height: 1,500 µm
Smallest structure: 12 µm
Smallest air gap: 5-8 µm (with lower height, smaller apertures feasible)
Top surface polishable

高アスペクト比構造の例
材質： Ni
高さ：1,500 µm
最小構造幅：12 µm
最小空間幅：5〜8 µm (高さを減らすことで狭周期化が可能)
上部研磨加工可

LIGA process application examples
LIGAプロセス アプリケーション例

- X-ray grating (Au, Ni)
- X-ray lens (SU-8)
- X-ray slit, pin-hole (Au)
- X-ray multi collimator (Au)
- Luxury watch parts (Au)

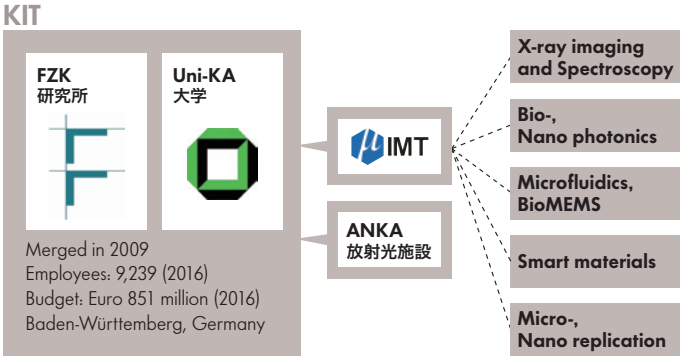
- X 線回折格子 (Au，Ni)
- X 線レンズ (SU-8)
- X 線スリット，ピンホール
- X 線マルチコリメータ (Au)
- 高級腕時計の部品 (Au)

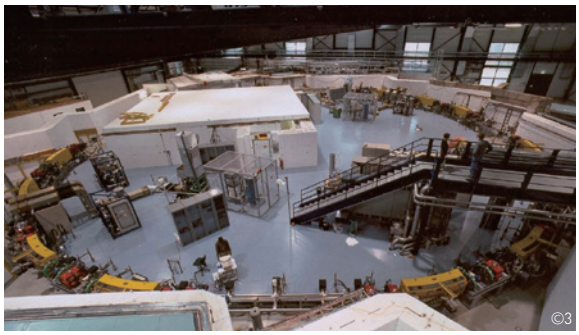
Institute of Microstructure Technology of Karlsruhe Institute of Technology (KIT/IMT)

カールスルーエ技術研究所(KIT)・IMT

Organisation: In Division III of the Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Germany
Expertise: Structuring diverse polymeric materials and selected metals (esp. Au and Ni) down to the nm range.
Major technologies: Lithographic structuring (e-beam, deep X-ray, and UV lithographies) and replication methods (hot embossing, thermoforming, and nano imprint).

研究所名: カールスルーエ技術研究所(KIT)・IMT
主要技術: リソグラフィ(電子ビーム，ディープ X 線，UV)を用いた構造化と，複製技術(ホットエンボス，熱形成，ナノインプリント)。多種のポリマーや金属(特に金とニッケル)を nm レンジまで微細に構造化可能。




©3

Synchrotron radiation source ANKA シンクロトロン放射光施設 ANKA

microworks GmbH

A spin-off company from KIT/IMT providing high precision metal structures

カールスルーエ技術研究所・IMT のスピンオフ企業

About: Founded in 2007 as a spin- off from the Institute of Microstructure Technology (IMT) of Karlsruhe Institute of Technology (KIT) in Germany.
Core competence: X-ray lithography which realises the highest aspect ratios and a precision well below 1 µm within a wafer and from wafer to wafer.
Production chain: From layout and mask making to UV and X-ray lithography up to electroplating and surface finishing.
Mission: To serve the clients as the number-one supplier of high-precision microstructures made with X-ray and laser LIGA technology.
Founder and Managing Director: Dr Joachim Schulz

ドイツ・カールスルーエ技術研究所・IMT のスピンオフ企業(2007 年設立)
コアコンピタンス: 高アスペクト比と 1 µm 未満の高精度を可能 とする X 線リソグラフィ
製造プロセス: レイアウトとマスク作製から，UV，X 線リソグラ フィ，更には電鋳と表面仕上げまで対応
ミッション: X 線リソグラフィとレーザーLIGA 技術による高精度微細構造の最良のサプライヤーとして顧客に貢献する

©2

ASICON Tokyo Ltd.

株式会社ASICON

URL: http://www.asicon-tokyo.com
Contact: microtech@asicon-tokyo.com

In the fields of X-ray optics and microfluidics, ASICON Tokyo Ltd. offers end-user specific micro structured parts fabricated in Germany to Japanese, Korean and Taiwanese customers.

株式会社 ASICON は，欧州(特にドイツ)にて開発された，微細加工を中心とした技術やサービスと，それらから派生した製品を，日本，韓国，台湾のお客様に提供しております。

Company name	ASICON Tokyo Ltd.
Founded on	25.12.2006
Managing Director	Tomoaki TSUGITA
Main businesses	Sales and facilitation services of customer specific microstructured parts in X-ray optic and microfluidic fields
Suppliers	Karlsruhe Institute of Technology (KIT) / IMT microworks GmbH microfluidic ChipShop GmbH

商号	株式会社 ASICON
設立	2006年12月25日
代表取締役	次田 友暁
主要事業	・微細加工技術によって製造された製品の販売と仕様達成のためのコンサルティング ・国外技術並びに製品の販売及び研究開発のためのコンサルティング並びに市場調査
サプライヤー	カールスルーエ技術研究所・IMT microworks GmbH microfluidic ChipShop(KIT) GmbH

X-ray optic components and LIGA micro structures

Karlsruhe Institute of Technology (KIT)
Institute of Microstructure Technology (IMT)

microworks GmbH

Your Local Contact: ASICON Tokyo Ltd.
代理店: 株式会社 ASICON

microtech@asicon-tokyo.com
www.asicon-tokyo.com

Version 201709

Copyright holders:
©1 Karlsruhe Institute of Technology IMT
©2 microworks GmbH
©3 Karlsruhe Institute of Technology
©4 ASICON Tokyo Ltd.