

課題番号：1809087R

B L 番号：BL09

(様式第 5 号)

実施課題名

LIGA 微細加工による位相コントラスト X 線システムの

X 線回折格子製作の技術開発 (Ⅲ)

Technical Development of the X-ray Grating Lattices

for the phase-contrast X-ray examining devices

by the LIGA micro-machining. (Ⅲ).

日高 昌則¹、三澤 雅樹²、安本 正人³、大石明広¹、常葉信生¹、

横尾侑典¹、水上絵梨香¹、小林 和矢¹

1. 技術開発課 田口電機工業

2. 健康工学研究部門 産業技術総合研究所(つくばセンター)

3. 分析計測標準研究部門 産業技術総合研究所(つくばセンター)

Masanori HIDAKA¹, Masaki MISAWA², Masato YASUMOTO³,

Akihiro OISHI¹, Nobuo TOKIWA¹, Ryo SAKAI¹,

Yusuke YOKOO¹, Erika MIZUKAMI¹, Kazuya KOBAYASHI¹

1. Technical Development Division, TAGUCHI PLATING INDUSTRY Co. Ltd.

2. Health Research Institute, ADVANCED INDUSTRIAL SCIENCE AND TECHNOLOGY (AIST).

3. Research Institute for Measurement and Analytical Instrumentation, ADVANCED INDUSTRIAL SCIENCE AND TECHNOLOGY (AIST).

1. 概要

本研究では、シンクロtron光・高輝度 X 線および高出力紫外線を利用する微細加工技法(SL-LIGA、UV-LIGA)を使用して、位相コントラスト X 線検査システムの技術開発に使用する G0 型 X 線回折格子の試作研究と、市販の管球型 X 線源から放出される X 線の空間的な分散性を制御するための G2 型 X 線回折格子・製作技法の開発研究を行った。本実験で使用する高質な X 線フォトマスクを製作するために、UV マイクロパターンの転写には直接描画装置、フォトレジストにはドライフィルムが使用された。また、高輝度 X 線を使用して、これらの X 線フォトマスクに描画されたマイクロパターン配列は、G0 型回折格子の試作研究では通常のフォトレジストに、G2 型回折格子の技術開発研究ではドライフィルムに転写された。これらの転写マイクロパターンは、高質な G0 型 & G2 型回折格子製作の技術的な可能性を与えた。本 X 線検査システムに使用される X 線回折格子では、Au 製の周期的なライン状マイクロパターン配列が要請される。このための Au マイクロめっき技法(線幅:約 10 μ m、高さ;約 30 μ m)も確立された。

In the present investigations, the X-ray diffraction gratings of G0-type and G2-type, which are used at a Phase-contrast X-ray examining device, were made with the LIGA micro-machining by using the high-bright X-rays of synchrotron radiations (SL-LIGA), in addition to the high-power ultraviolet rays (UV-LIGA). The X-ray photomasks of high-quality were made with the direct imaging system by using the photoresist of dry film. The micro-pattern arrays drawn on the X-ray photomask were transcribed into the usual photoresists for the G0-type diffraction grating and the dry films for technical development of the G2-type one. These high-quality transcribed micro-patterns gave an effective possibility of the technical developments for the production of the G0- and G2-type X-ray diffraction gratings. And also, the Au micro-plating was estimated to make the periodic Au micro-lines having about 10 μ m in width and about 30 μ m in height.

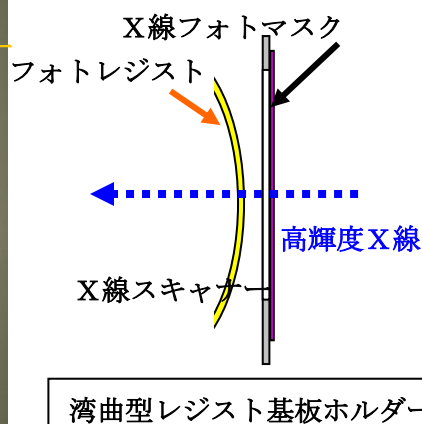
2. 背景と目的

平成28年度から、産業技術総合研究所・つくばセンター（総括研究代表者・三澤雅樹 主任研究員）と田口電機工業との共同研究によるX線画像診断に利用する位相コントラストX線検査システムの技術開発を行っている。この技術開発のためには、3種類（G0、G1、G2 型）のマイクロ構造仕様をもつ高質なX線回折格子（位相格子および振幅格子）の試作が極めて重要である。つくばセンターはG1とG2型X線回折格子の試作、田口電機工業はG0型X線回折格子の試作を担当している。これまで、田口電機工業は佐賀LS・BL09 ビームラインのシンクロtron光・高輝度X線を使用するLIGA微細加工（SL-LIGA）および高出力の紫外線（UV）を使用するLIGA微細加工（UV-LIGA）に基づくG0型X線回折格子の製作条件を調べてきた。今年度は、これまでの高質なG0型X線回折格子の試作研究に併行して、つくばセンターが担当しているG2型X線回折格子の製作条件も調査する。

3. 実験内容（試料、実験方法、解析方法の説明）

本研究課題をクリアするために、高輝度X線による露光実験に使用する高質なXフォトマスクの製作技法の確立（実験1）、G0型&G2型X線回折格子の試作研究（実験2）を実施した。実験1に使用するハニカム型マイクロパターン配列をもつX線フォトマスクは、UV露光装置には直接描画装置（福岡県立・三次元半導体研究センター）、露光用フォトレジストにはドライフィルムを使用して製作された。実験2のG0型回折格子の試作研究では、X線フォトマスクはこれまでの実験で使用した同一のG0-7 μ m型X線フォトマスクである。また、G2型回折格子の技術開発研究に使用するライン状マイクロパターン配列をもつテストG2型X線フォトマスクは、直接描画装置とドライフィルムを使用して製作された。なお、高輝度X線を利用する本実験では、X線フォトマスクに描画されたマイクロパターン配列は、G0型回折格子の試作研究では通常のフォトレジストに、G2型回折格子の技術開発研究ではドライフィルムに転写された。

BL09 ビームラインの実験ポートに専用X線チャンバーを仮設して、このチャンバー内に設置されたX線スキャナーのAl製冷却試料ホルダーに照射用フォトレジスト基板を搭載して、各種の露光実験を行った。実験1では、X線フォトマスクはガラス基板上のフォトレジストに密着固定された。実験2では、X線フォトマスクは、ガラス基板上のフォトレジストに密着固定、または、Al製の湾曲



フォトレジストホルダーの入射X線側に置かれたX線フォトマスクホルダーに固定された。後者の実験に使用した改造ホルダーが、左図に示されている。この実験では、ドライフィルムは水平方向（電子軌道面）に湾曲したAl製基板ホルダーに設置される。従って、左右方向がX線スキャナーの上下方向になる。

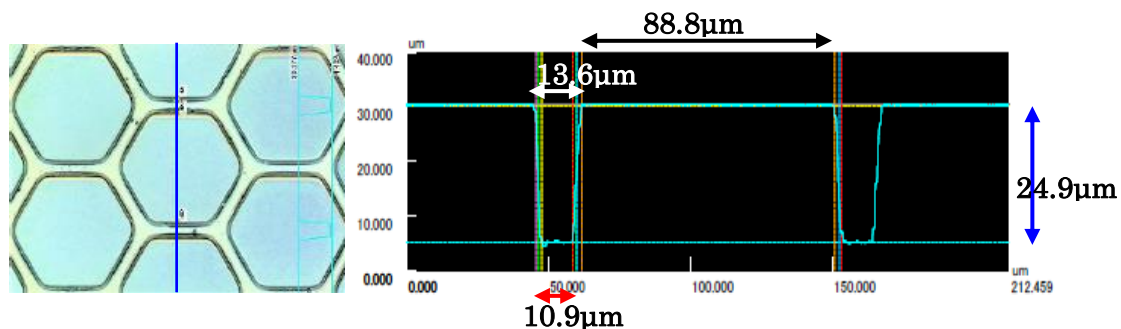
なお、X線フォトマスクに描画されたライン状マイクロパターンおよびハニカム型マイクロ細孔配列が転写した露光済フォトレジストは、田口電機工業でLIGA処理工程（現像、めっき、剥離 etc）を行った。また、これらの画像解析には、マイクロ스코プ、レーザー顕微鏡および走査電子顕微鏡（SEM）が使用された。

4. 実験結果と考察

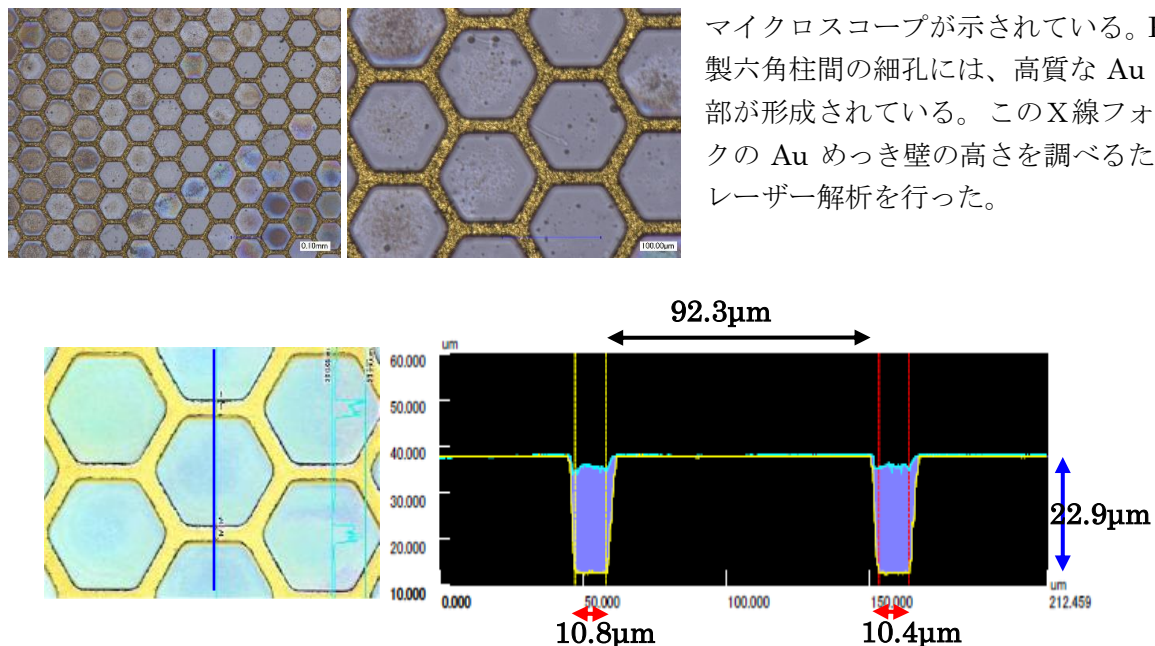
4-1. 高輝度X線による露光実験に使用する高質なXフォトマスクの製作技法の確立（実験1）

実験1では、半導体部品の試作研究に利用されている直接描画装置を使用して、UV フォトマスク上のハニカム型マイクロパターン配列 (H-D1) は、X線フォトマスク製作用のドライフィルムに転写された。このハニカム型マイクロパターンは Air-Grid マイクロメッシュ用であるが、この UV フォトマスク上のハニカム型マイクロ細孔配列の設計構造仕様は、Cr 製ライン幅；15 μm 、六角形の細孔壁間；90 μm 、ピッチ；105 μm 、細孔数；開効率；73%、マイクロ細孔数；約 11000 (1/ cm^2) である。田口電機工業がこれまで作製してきたマイクロパターン細孔の壁幅の最小値は約 25 μm であった。従って、このハニカム型マイクロパターン配列をもつ UV フォトマスクを使用して、実験1の高質な H-D1 型 X線フォトマスクの試作研究を行った。

下図は、直接描画装置により転写された現像済ドライフィルム上の H-D1 型マイクロパターンを示す。現像も福岡県立・三次元半導体研究センターで行った。左側はレーザー顕微鏡によるマイクロスコープ撮像 (レーザー・マイクロスコープ)、右側はレーザー解析である。このマイクロスコープ撮像の中央部の垂直青線は、レーザー解析でのレーザー光のスキャン方向を表示している。このスキャン方向に沿って、レーザー解析が行われる。レーザー解析により、PMMA 製レジスト六角柱は最上部で約 88.8 μm 、隣接六角柱間に形成されるマイクロ細孔は上部で約 13.6 μm 、底部で約 10.9 μm 、細孔の高さは約 24.9 μm である。なお、このドライフィルム厚さは約 25 μm である。この細孔両側壁は僅かに傾斜していて、底部の傾斜水平距離は約 1.4 μm に相应する。計測されたマイクロ細孔配列では、これらの水平距離は約 1.3~1.5 μm の領域であることが確認された。一方、これまで利用してきた自作の UV 露光装置では、同様のマイクロ細孔側壁の傾斜は水平距離で約 4~6 μm であった。従って、本実験で利用した直接描画装置およびドライフィルムによる転写法は、本研究にかなり有効である。



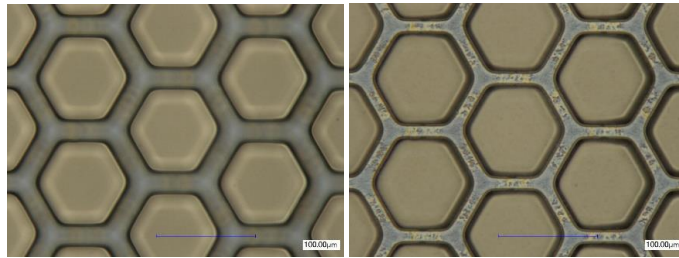
上図のドライフィルムは無電解 Ni コートをもつガラス表面に固定されているので、この H-D1 型マイクロパターン細孔配列への Au 電気めっき処理を行った。左図には、H-D1 型 X線フォトマスクのマイクロスコープが示されている。PMMA 製六角柱間の細孔には、高質な Au めっき部が形成されている。この X線フォトマスクの Au めっき壁の高さを調べるために、レーザー解析を行った。



上図の左側は H-D1 型 X線フォトマスクの Au めっき前後のレーザー・マイクロスコープ、右側はレーザー解析を示す。H-D1 型マイクロパターンの Au めっき前後のレーザー解析結果を比較するため

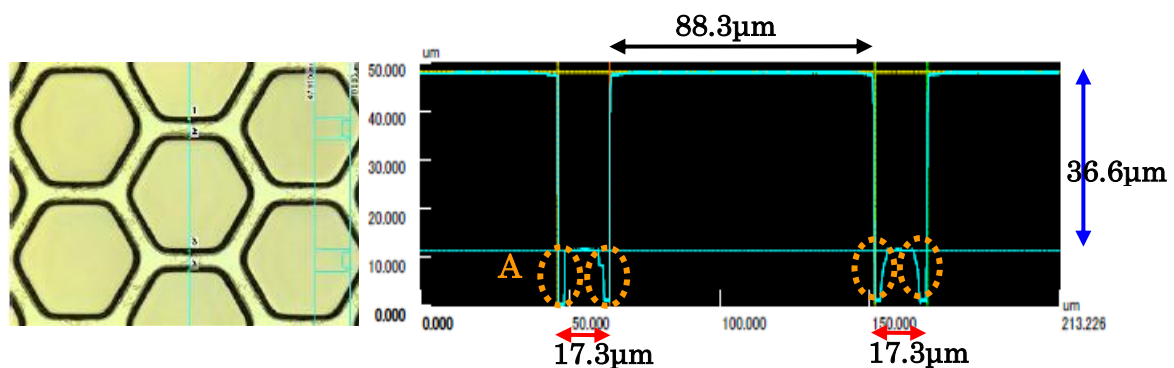
に、黄色線がめっき前、青線がめっき後の計測結果が表示されている。従って、H-D1 型マイクロ細孔内での Au めっき部は、おおよそ青色の領域と推定される。Au めっきの高さは約 $23\mu\text{m}$ である。

これまでに BL09 ビームラインで実施した SL-LIGA 実験では、使用した X 線フォトマスクの Au めっき部の最小高さは約 $15\sim 20\mu\text{m}$ であった。従って、この H-D1 型 X 線フォトマスクを使用して、露光実験を行った。下図には、BL09 ビームラインの高緯度 X 線を利用した実験結果を示す。露光・総電流量；60 mAh、現像時間；25min で得られた H-D1 型マイクロパターンのマイクロ

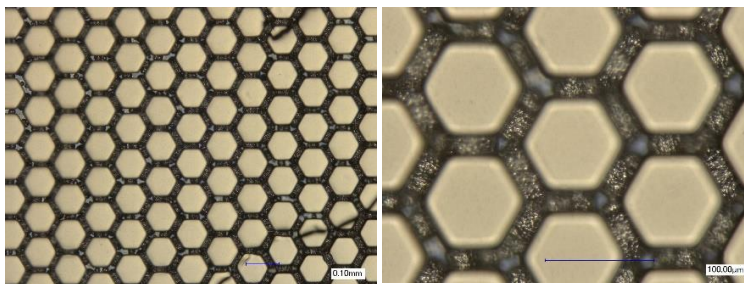


スコープが示されている。左側では PMMA 製上表面、右側ではマイクロ細孔底部に、マイクロスコープの焦点が合わされて撮影されている。

下図は、上図の露光・現像済フォトレジストの転写マイクロパターンのレーザー・マイクロスコープ（左側）とレーザー解析（右側）を示す。右側の橙色点線で表示された“A 領域”では、フォトレジスト表面からの反射レーザー光はレーザー顕微鏡に再入射していない。従って、左側の PMMA 製六角柱間の細孔側壁底部（黒色部）は僅かなステップ状の残留フォトレジストをもつ。この実験に使用した X 線フォトマスクのレーザー解析を考慮すると、これらのステップ幅で約 $2\mu\text{m}$ になる。一方、PMMA 製六角柱の側壁はかなりの部分が垂直に転写されていることが確認される。この露光・現像済フォトレジストの厚さは約 $36\mu\text{m}$ である。

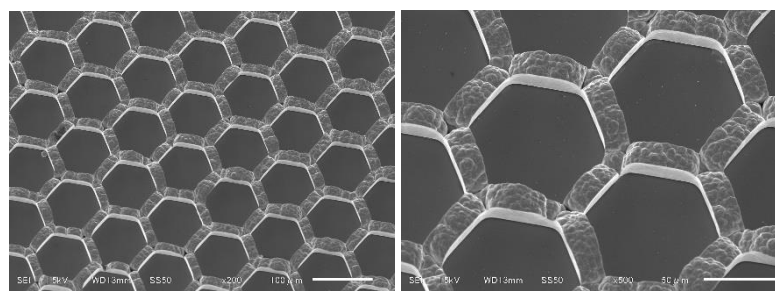


上図の転写フォトレジストが搭載されているガラス基板表面には、無電解 Ni がコートされている。

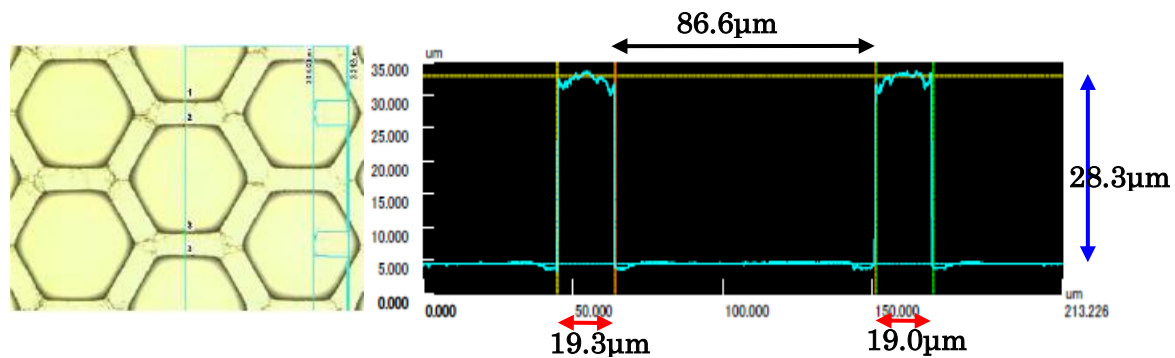


この H-D1 型マイクロ細孔配列部に Ni めっきを行った。左図には、Ni めっき後のマイクロスコープが示されている。高質なハニカム型配列のマイクロパターンが観測される。これらの配列では、六角柱はフォトレジスト PMMA で形成されている。

この露光・現像済フォトレジストに Ni めっきを行った後、LIGA の剥離工程により PMMA 製部を除去した。下図は、この剥離後に撮られた Ni 製 H-D1 型マイクロ細孔配列の走査電顕による SEM 撮像を示す。これらの Ni 製 H-D1 型マイクロ細孔は、高質な垂直な側壁をもつ。しかし、これらの細孔上部表面は僅かな起伏が観測される。この起伏はめっき処理条件で平滑化される。



下図には、剥離後の Ni 製 H-D1 型マイクロ細孔配列のレーザー・マイクロスコープとレーザー解析を示す。このレーザー解析からも、Ni 製 H-D1 型マイクロ細孔の側壁は垂直である。また、これらの細孔上部表面は僅かな起伏を示す。しかし、Ni 製マイクロパターン幅は約 $19\mu\text{m}$ である。従って、マイクロ細孔内の Ni 金属部は、あまり硬質ではない PMMA 製の側壁を僅かに押しながら積層している。



4-2. G0 型&G2 型 X 線回折格子の試作研究（実験 2）

本プロジェクトは最終年度になるので、これまで実施してきた G0 型回折格子の試作に関する技術開発研究の総括（4-2-1）および管球 X 線の分散性を制御する G2 型 X 線回折格子の構造仕様に関する技術開発（4-2-2）を行った。

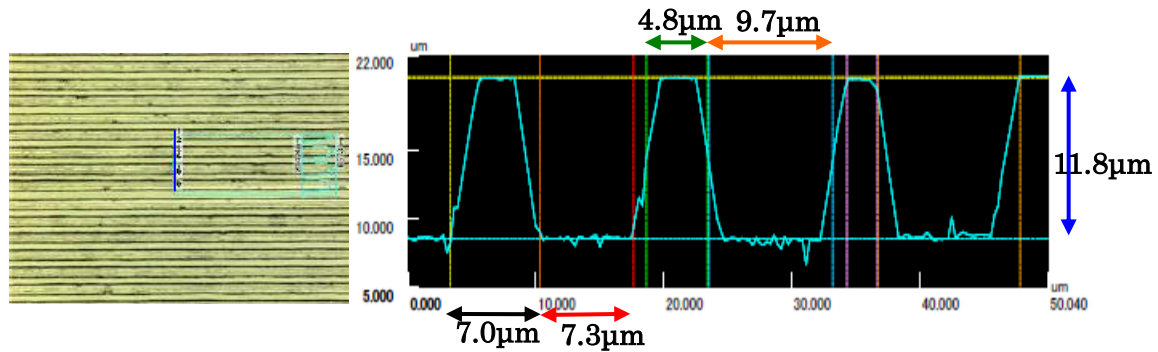
4-2-1. G0 型回折格子

G0 型回折格子の試作研究では、位相コントラスト X 線検査システムに使用する G0 型回折格子を形成する Au めっき高さは約 $30\mu\text{m}$ である。これまで実施してきた G0- $7\mu\text{m}$ 型回折格子の試作研究で使用したフォトレジストの厚さは約 $40\sim 50\mu\text{m}$ であった。しかし、本実験では、露光・現像条件を評価するために、厚さ；約 $15\mu\text{m}$ のフォトレジストを使用した。X 線フォトマスクは、これまでの実験で使用した同一の G0- $7\mu\text{m}$ 型 X 線フォトマスクである。

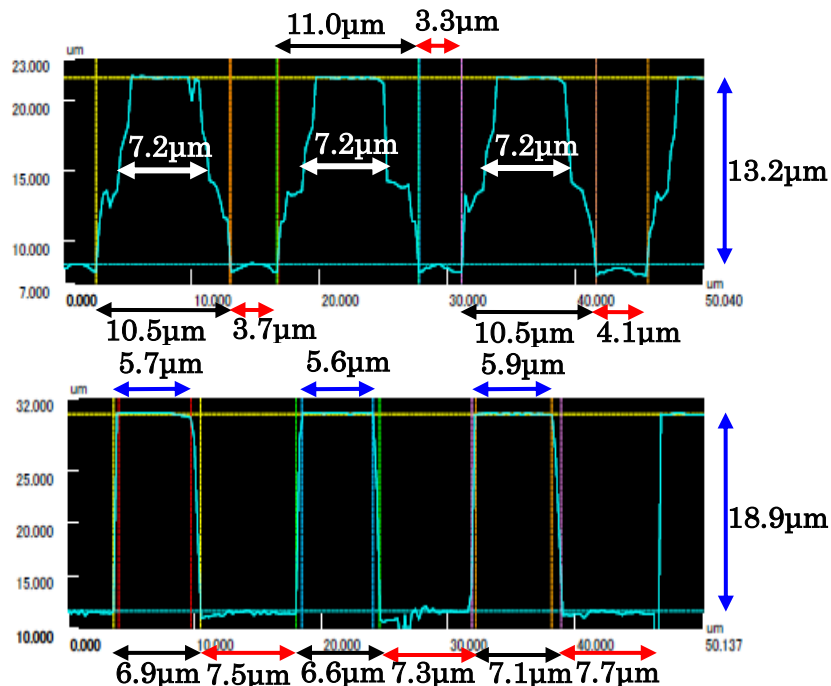
高輝度 X 線を利用して、X 線フォトマスクに描画されたマイクロパターン配列は通常のフォトレジストに転写された。左図上段には、高輝度 X 線の露光・総電流量；80 mAh、この転写フォトレジストの現像時間；15min で得られた G0- $7\mu\text{m}$ 型マイクロパターンのマイクロスコープが示されている。ただし、マイクロスコープは、左側では PMMA 製マイクロラインの上表面に、右側ではマイクロ細孔の底部に焦点が合わされて撮られている。左図下段には、G0- $7\mu\text{m}$ 型マイクロパターンを 15 度傾斜して撮られた SEM 撮像が示されている。従って、これらの撮像は、G0- $7\mu\text{m}$ 型のライン状マイクロパターン配列が形成されていることを示す。

下図は、上図のマイクロライン配列のレーザー・マイクロスコープ（左側）とレーザー解析（右側）を示す。これらの PMMA 製マイクロライン断面は、ほぼ対称的な台形である。第一マイクロラインの底部幅とそのマイクロ細孔底部幅は約 $7\mu\text{m}$ であり、G0- $7\mu\text{m}$ 型マイクロラインのピッチ； $14\mu\text{m}$ に相応する。しかし、第二マイクロライン側壁の変曲点幅は $4.8\mu\text{m}$ 、第二と第三マイクロライン側壁の変曲点間は $9.7\mu\text{m}$ である。これらの変曲点間では、このピッチは約 $14\mu\text{m}$ である。また、これらのマイクロライン配列では、上縁部幅は約 $2.5\sim 3.0\mu\text{m}$ 、底部幅は約 $6.0\sim 7.0\mu\text{m}$ である。本実験の露光・現像時間は、これまで実施してきた実験結果から決められたほぼ最適な条件である。PMMA 製マイクロラインの高さは約 $15\mu\text{m}$ である。しかし、この露光・現像済フォトレジストの厚さは約

12 μm であるので、マイクロ細孔底部では高さ；約 3 μm のフォトリソが残留している。



しかし、この残留フォトリソにより、G0 型回折格子に要請される Au 製マイクロパターンを作製するための Au めっきは行えない。これまでの試作研究で使用したフォトリソの厚さは約 40～50 μm であったが、いずれの実験でも残留フォトリソは除去されなかった。この事象は、これまで使用してきた同一 G0-7 μm 型 X 線フォトマスクの製作変更を示唆する。従って、G0-7 μm 型 X 線フォトマスクの試作に、半導体部品製造に利用されているマスクアライナーの利用を検討した。下図は、G0-7 μm 型 X 線フォトマスクの Au めっき前のレーザー解析である。上段には、これまでの実験で使用した転写フォトリソ上の G0-7 μm 型ライン状マイクロパターンが示されている。この転写フォトリソで作製された X 線フォトマスクでは、Au めっき部の断面は対称的な逆台形をもつことが推測される。下段は、半導体部品の試作研究に利用されているマスクアライナー（九州大学大学院・理学院）で作製した G0-7 μm 型マイクロラインである。ただし、下段の露光フォトリソはドライフィルムで、この露光・現像済ドライフィルムの厚さは約 20 μm であった。本プロジェクトは最終年度になるので、今後の G0 型回折格子の試作研究では、マスクアライナーおよびドライフィルムを使用して X 線フォトマスク製作を行う。



4-2-2. G2 型回折格子

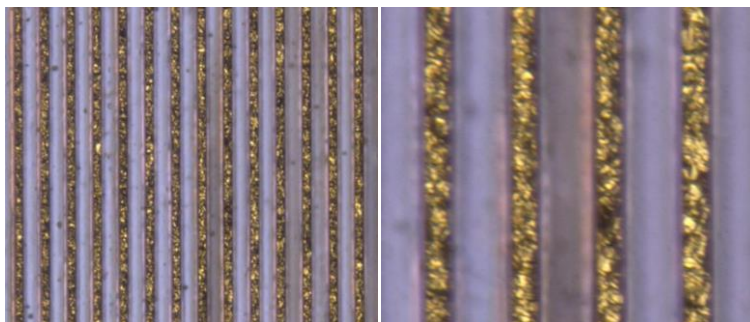
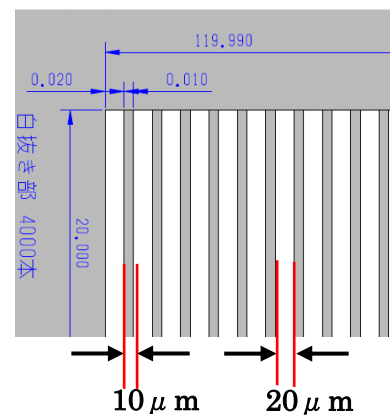
ライン状マイクロパターン配列をもつテスト G2 型 X 線フォトマスクは、半導体製造に利用される直接描画装置およびドライフィルムを使用して製作された。なお、現像も福岡県立・三次元半導体研究センターで行った。この X 線フォトマスクに描画されたマイクロパターン配列は、高輝度 X 線を利用してドライフィルムに転写された。本実験では、G0 型回折格子製作および管球 X 線の分散性を制御する G2 型 X 線回折格子に関する技術開発を行った。

下図は、2 種類（G2-10 μm 型、G2-20 μm ）のテスト G2 型 UV フォトマスクの設計図を示す。Cr

Technical drawings of two types of G0 filter elements:

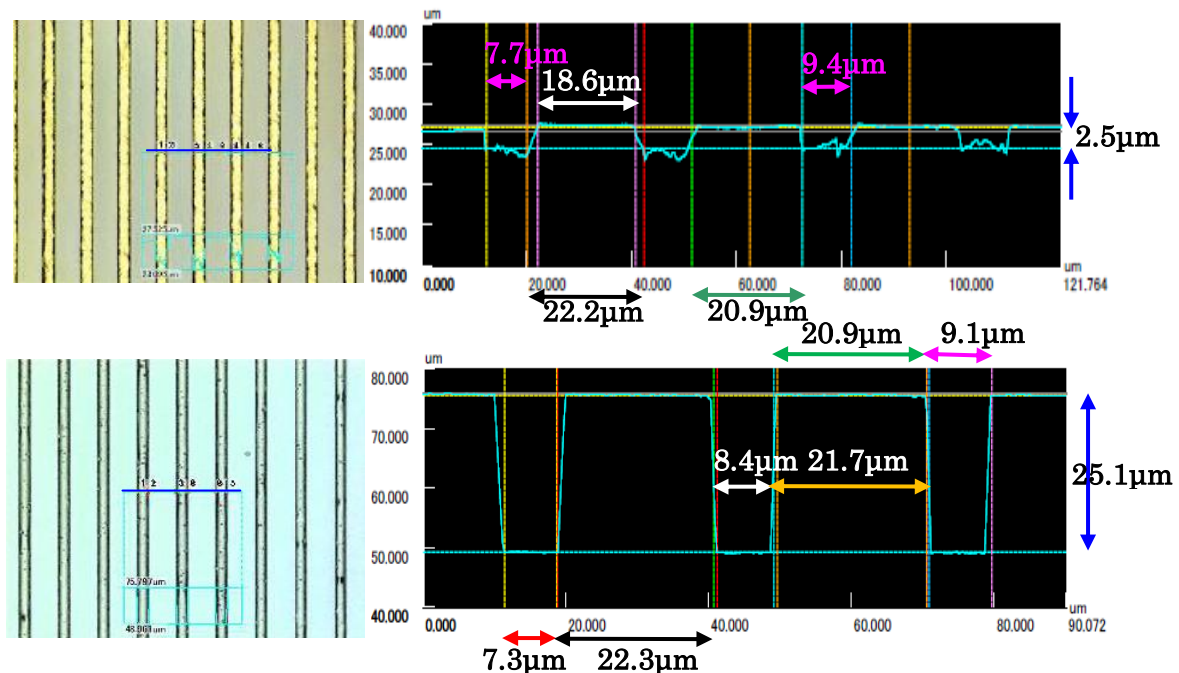
- G0-10 μ m 型**: Dimensions are 180mm (length) and 22mm (height).
- G0-20 μ m 型**: Dimensions are 180mm (length) and 22mm (height).

This image shows a blank, aged, cream-colored page, likely an endpaper or flyleaf of a book. The paper has a slightly textured appearance with some minor discoloration and faint, irregular brown spots, characteristic of old paper. The page is set against a dark, possibly black, background.

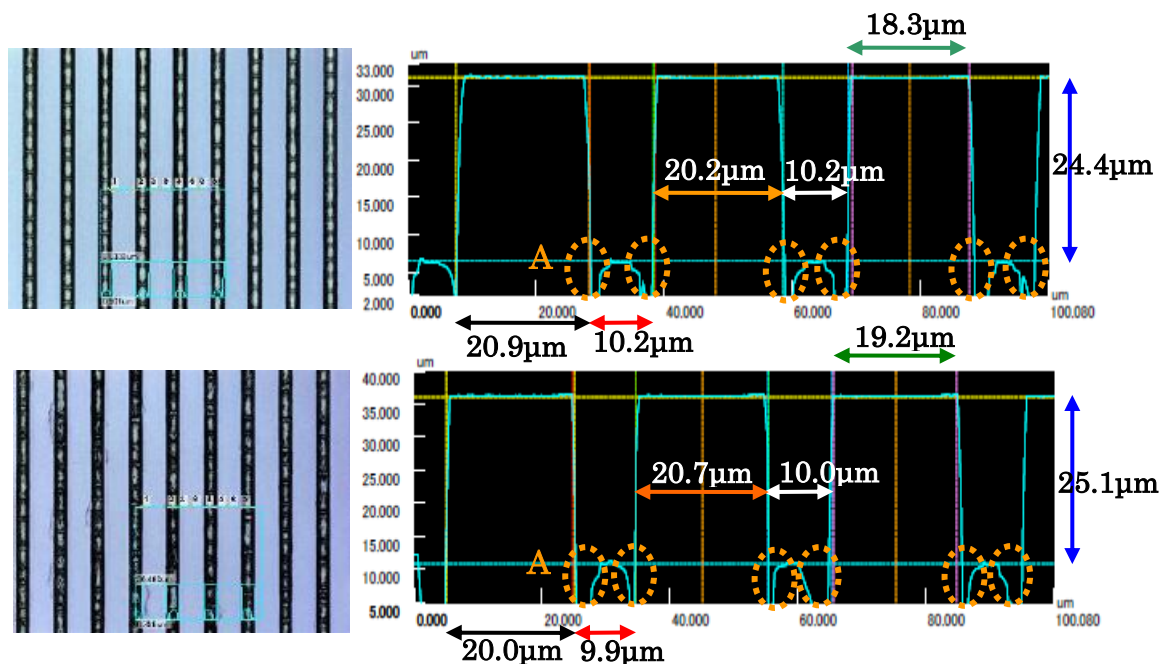


下図の上段は、上図の G2-10 μm 型 X 線フォトマスクのレーザー・マイクロスコープ（左側）とレーザー解析（右側）を示す。PMMA 製マイクロライン上表面は平面的であるが、Au 製マイクロライン上表面は僅かな凹凸が形成されている。マイクロスコープ撮像でも観察されるように、この凹凸はライン状マイクロ細孔内で形成される Au マイクログレイン群の積層による。Au 製上表面は PMMA

製上表面から約 $2.5\mu\text{m}$ 下がっている。また、Au 製上表面の幅は約 $9.0\sim 9.5\mu\text{m}$ である。下段は、Au めっき前の露光・現像済ドライフィルムのレーザー・マイクロスコープとレーザー解析を示す。直接描画装置での露光量は 13mJ である。これらのレーザー解析の比較により、この X 線フォトマスクの Au めっき部の高さは約 $23\mu\text{m}$ である。従って、この X 線フォトマスクは、BL09 ビームラインの白色高輝度 X 線を利用する LIGA プロセスに有効であることが確認される。ただし、下段のレーザー解析から、Au めっき前のマイクロライン間細孔の断面は、僅かに対称的な台形状を示す。従って、これらのマイクロライン間細孔に積層する Au めっき部の断面は、PMMA 製マイクロラインに対して僅かに逆台形状であることが推測される。



上記の G2- $10\mu\text{m}$ 型 X 線フォトマスクを使用して、BL09 ビームラインでの露光実験を行った。下図の上段には露光・総電流量； 23mAh 、現像時間； 18min 、下段には露光・総電流量； 30mAh 、現像時間； 18min で得られた転写マイクロパターンのレーザー・マイクロスコープとレーザー解析が示されている。露光・現像済ドライフィルムの厚さは約 $25\mu\text{m}$ である。



これらのレーザー解析により、G2- $10\mu\text{m}$ 型マイクロラインの線幅は約 $19\sim 21\mu\text{m}$ 、スリット幅は約 $10\mu\text{m}$ である。また、レーザー・マイクロスコープのマイクロ細孔底部の中央部は、点線状の薄青色部を示す。この部分は、無電解めっき Ni コートされたガラス基板表面である。PMMA 製マイクロ

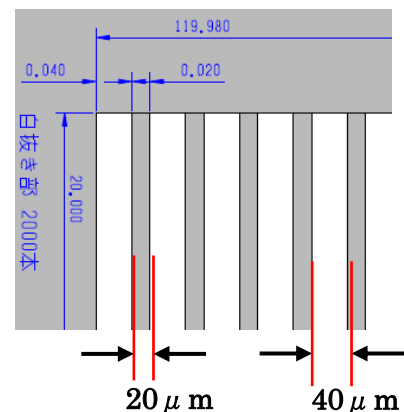
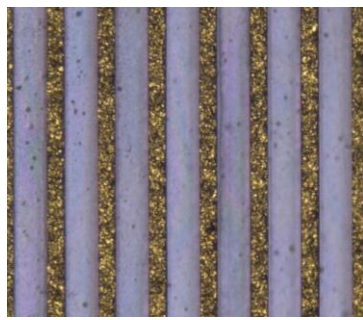
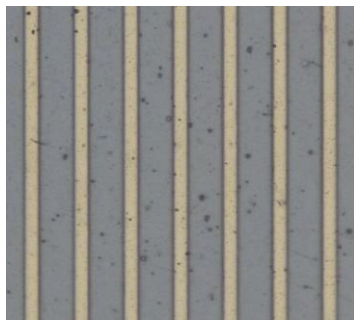
ラインの側壁はかなりの部分が垂直面である。しかし、右図の橙色点線で表示された“A領域”では、フォトレジスト表面からの反射レーザー光はレーザー顕微鏡に再入射していない。この事象は、マイクロ細孔底部の側壁付近には僅かなドライフィルムが残留していることを示唆する。上図から、露光時間と現像時間との最適条件が推定された。

(b) G2-20 μm 型湾曲回折格子

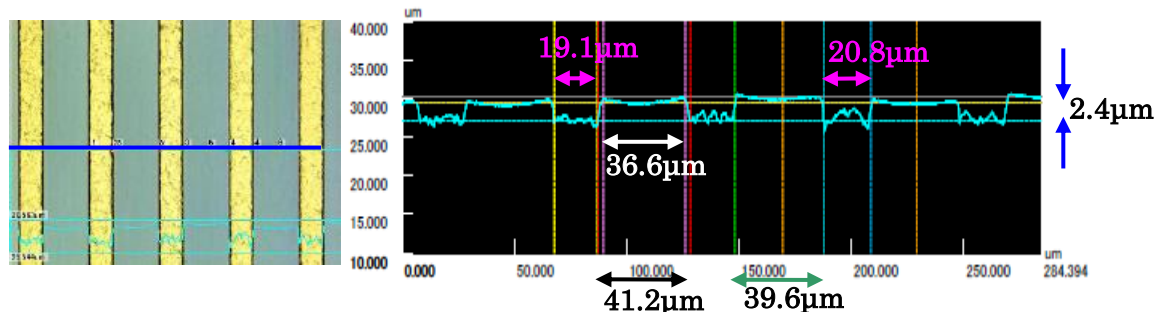
直接描画装置を使用して、UV 露光量の異なる (22 x 180mm) サイズの転写 G2-20 μm 型レジストシート (ドライフィルム) 作製した。ただし、現有 Au めっき槽のサイズ制限により、これらの一部を切断して Au めっきを行った。下図は、G2-20 μm 型回折格子の矩形状 X 線フォトマスクの写真である。湾曲回折格子の X 線フォトマスクの露光条件も調べるために、露光量は左側では 13mJ、右側では 15mJ である。これらの 2 種類の X 線フォトマスクを裏側からテープで接合している。本実験では、写真の上下方向が X 線スキャナーの駆動方向になる。



下図の左側は露光量 ; 15mJ で得られた Au めっき前の露光・現像済ドライフィルム、中央は Au めっき後の露光・現像済ドライフィルムで撮られたマイクロスコープを示す。中央撮像では、ライン状マイクロ細孔部に Au めっきが観測される。右側はこの X 線フォトマスクのライン状マイクロパターンの拡大設計図である。従って、PMMA 製マイクロラインと Au 製マイクロラインの高質な周期的配列が観測される。これらのマイクロライン配列のピッチと Au めっき部の高さを調べるために、レーザー顕微鏡による測定を行った。

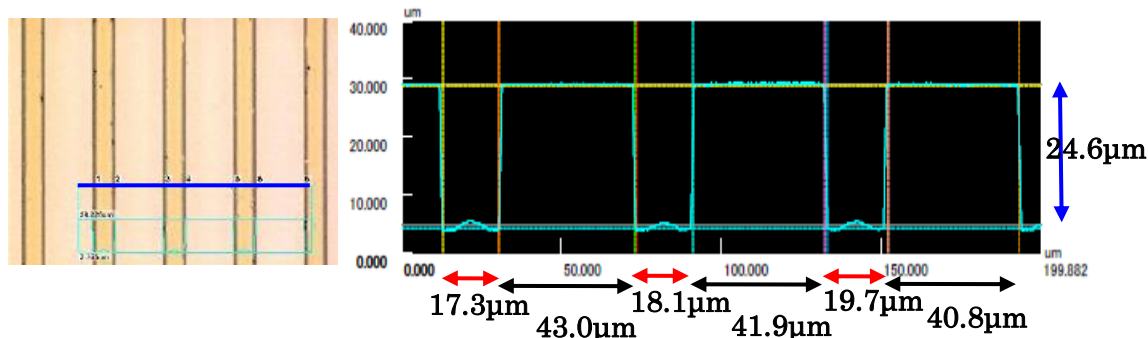


下図は、G2-20 μm 型 X 線フォトマスクのレーザー・マイクロスコープ (左側) とレーザー解析 (右側) を示す。このマイクロスコープ撮像の中央部の水平青線は、レーザー解析でのレーザー光のスキャン方向を表示している。このスキャン方向に沿って、レーザー解析が行われる。Au 製マイクロライン上表面は、PMMA 製上表面から約 2.4 μm 下がっている。また、Au 製上表面の幅は約 20~21 μm である。

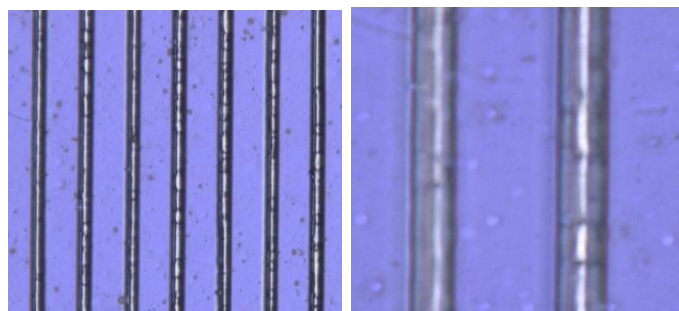


下図は、Au めっき前の露光・現像済ドライフィルムのレーザー・マイクロスコープとレーザー解析を示す。この G2-20 μm 型マイクロ細孔はほぼ垂直な側壁をもち、細孔底部の中央付近に僅かな盛り上が観測される。しかし、上図の Au 製マイクロライン配列の観測により、Au めっきは確認される。両方のレーザー解析の比較により、この X 線フォトマスクの Au めっき部の高さは約 22 μm である。従って、この G2-20 μm 型 X 線フォトマスクは、BL09 ビームラインの高輝度 X 線を利用する LIGA

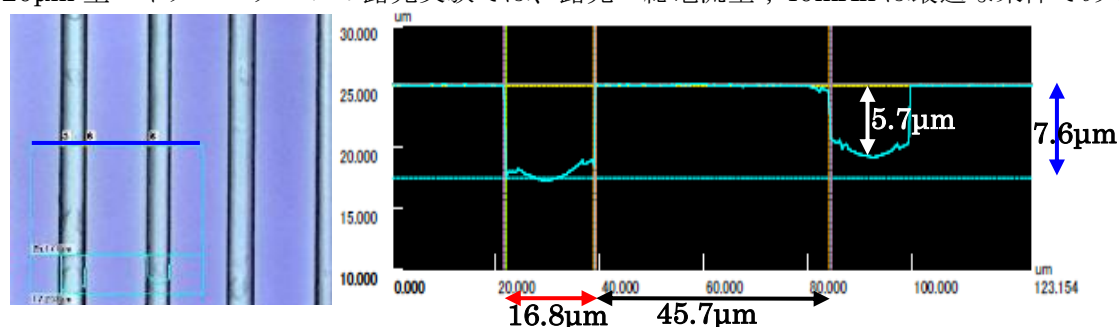
プロセス実験に有効であることが確認された。



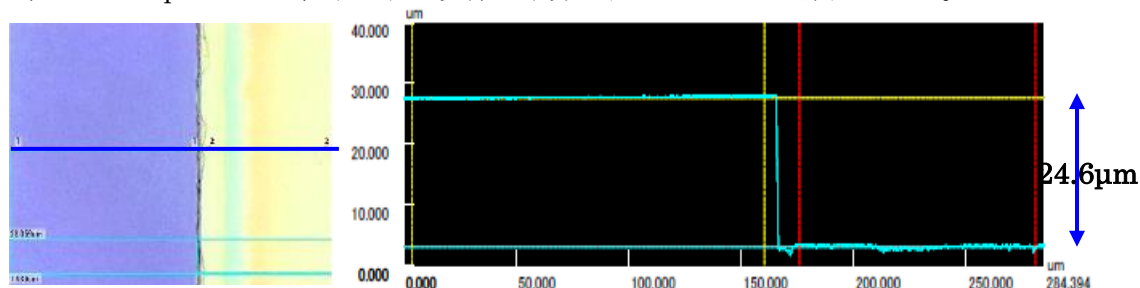
上記の G2-20μm 型 X線フォトマスクを使用して、BL09 ビームラインでの露光実験を行った。左図には、露光・総電流量；40mAh で転写された G2-20μm 型マイクロパターンのマイクロスコープが示されている。これらの撮像から、G2-20μm 型のマイクロライン配列が確認できる。ただし、前述した様に、現有現像装置のサイズ制限により、現像処理は福岡県立・三次元半導体研究センターの装置で行った。



下図は、上図の転写マイクロパターンのレーザー・マイクロスコープとレーザー解析を示す。PMMA 製マイクロラインの上表面は平面的で、約 46μm の幅をもつ。しかし、マイクロ細孔幅は約 17μm であるが、細孔は十分に現像されていない(深さ；約 6~8μm)。これまで BL09 で実施した G2-20μm 型マイクロパターンの露光実験では、露光・総電流量；40mAh は最適な条件であった。

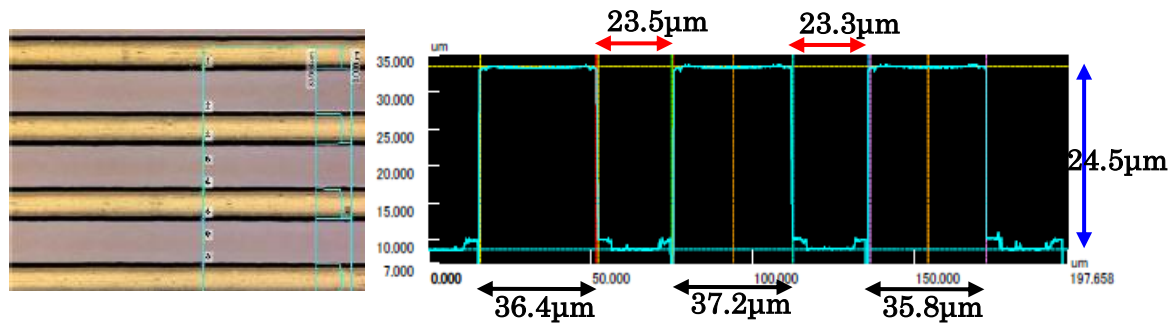


この現像処理を確認するために、同じ転写ドライフィルム端におけるレーザー・マイクロスコープとレーザー解析を行った。その計測結果が下図に示されている。使用した露光・現像済ドライフィルムの厚さは 24.6μm であり、本実験の現像は十分に行われたことが確認された。



BL09 では、平成 30 年 9 月に本実験と同様な G2-20μm 型湾曲回折格子に関するテスト実験を行っている。この実験での G2-20μm 型のテスト X線フォトマスクは、現有の UV 露光装置を用いて通常のフォトレジストから作製された。一方、転写用フォトレジストには、本実験と同じドライフィルムが使用された。下図は、このテスト X線フォトマスクのライン状マイクロパターンが転写された湾曲ドライフィルム上のレーザー・マイクロスコープ撮像（左側）とレーザー解析（右側）を示す。この転写マイクロパターンは、高輝度 X線の入射ビームライン（加速器の電子軌道面内）位置で測定さ

れた。このレーザー解析から、PMMA 製マイクロライン側壁はかなりの部分が垂直であり、高質な矩形状のマイクロライン配列が観測された。露光・総電流量は約 40mAh、現像時間は 18min である。これらのマイクロライン側壁は垂直であるが、マイクロ細孔底部の側壁付近では、約 1 μ m 高さのステップが観測された。この事象は、9 月に使用した現有 UV 露光装置の光学系から発生している。



以上の様に、本実験と 9 月に実施した G2-20 μ m 型湾曲回折格子に関するテスト実験では、転写されたマイクロ細孔の深さが大きく異なっている。いずれの実験でも露光・総電流量は 40mAh であった。従って、佐賀 LS での総電流量の計測方法が原因ではないかと推測している。これまで 10 年近く BL09 ビームラインで LIGA 実験を実施してきたが、一日 1 回電子塊バンチの入射では 18 時ごろ以降では露光不足の状況であった。この状況から、一日 2 回電子塊バンチの入射を希望してきた。9 月 5 日の露光実験は 16:30~17:50 ごろに、今回（12 月 4 日）の露光実験は 20:00~20:45 ごろに行われている。従って、LIGA 微細加工によるマイクロパーツ製造には、総電流量に加えて、特定領域（数か所）の蛍光 X 線・輝度をモニターする機器の設置が要請される。

5. 今後の課題

本研究では、SL-LIGA、UV-LIGA 技法を併用して、高輝度 X 線による露光実験に使用する高質な X フォトマスクの製作技法の確立（実験 1）、G0 型&G2 型 X 線回折格子の試作研究（実験 2）を行った。高質な X 線フォトマスクの製作には、マスクアライナーおよび直接描画装置を使用して、UV フォトマスク上に描画されたマイクロパターン配列（ハニカム型、ライン型）をドライフィルムに転写することが有効であることを確証した。また、これらの X 線フォトマスクを使用して、通常のフォトレジストやドライフィルムにマイクロパターンを転写することにより、高質な G0 型回折格子の試作が可能になった。また、大きなバンドサイズの（G2-10 μ m、G2-20 μ m）型回折格子・製作に関する技術開発は、管球 X 線の分散性を制御する G2 型の湾曲回折格子の試作を可能にした。従って、本研究で得られた技法は、近い将来における位相コントラスト X 線検査システムの実用化に向けての技術開発に継承される。

6. 参考文献 特になし

7. 論文発表・特許

8. キーワード・・・LIGA, X 線回折格子

9. 研究成果公開について

② 研究成果公報の原稿提出 （提出時期：2020 年 10 月）