

[P-7]

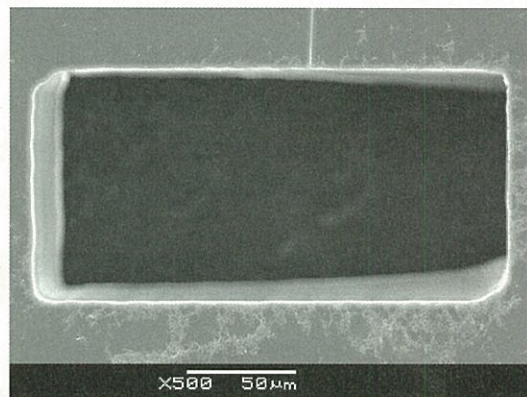
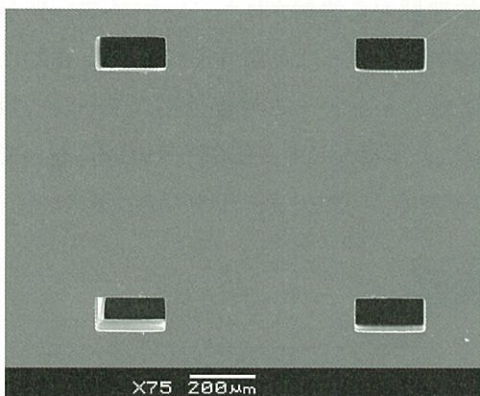
LIGA マイクロマシニングの X 線露光技術の基礎的開発研究

日高 昌則¹、常盤 信生¹、吉村 大介²、田口 英信³

1)九州大学大学院理学研究院、2)九州シンクロtron光研究センター

3)田口電機工業株式会社

九州シンクロtron光研究センターの9 Aビームライン（白色光ライン）で、深刻X線リソグラフィーによるLIGAマイクロマシニングの基礎的テスト実験を行った。この研究の主目的は、この研究センターのシンクロtron光(1.4GeV)がLIGA微細加工に適しているかの検証であった。このために、同じX線露光実験を韓国・ポハン加速器研究所のシンクロtron光施設(2.5GeV)でも行った。9 Aビームラインのテスト実験では、X線露光中はレジストへは大気中に置かれていて、使用した簡易X線スキャナーは十分な空冷装置系を装備していない。下図は、露光時間が約400mAhで得られた厚さ1.5mmのPMM AレジストのLIGAパターンの走査電顕映像を示している。本研究では、9 Aビームラインの光特性がLIGA微細加工に有効であることは確認できたが、シンクロtron光・X線の水平方向のビームサイズが企業の目指す実用化研究に適していないこと、浅刻・深刻X線リソグラフィー用の研究にはX線露光装置系が不十分であることが判明した。このような状況を改善すれば、9 Aビームラインは浅刻・深刻X線リソグラフィーの実用化研究に極めて有効である。今後も、X線リソグラフィーの開発研究を推進して行く予定である。



日高 昌則¹、常葉 信生¹、吉村 大介²、田口 英信³

1) 九州大学大学院理学研究院、2) 九州シンクロtron光研究センター

3) 田口電機工業株式会社

概要

九州シンクロtron光研究センター(佐賀SL)の9Aビームライン(白色光ライン)で、深刻X線リソグラフィーによるLIGAマイクロマシニングの基礎的テスト実験を行った。この研究の主目的は、この佐賀SLでのシンクロtron光(1.4GeV)が深刻X線リソグラフィーを応用するLIGA微細加工に適しているかの検証であった。このために、同じ露光用X線マスクを使用して、PMMAレジストフィルム(厚さ0.5mm、1.5mm)へのX線露光実験を、佐賀SLと韓国・ポハン加速器研究所(PAL)のシンクロtron光施設(2.5GeV)で行った。本研究では、9Aビームラインの光特性がLIGA微細加工に有効であることは確認できたが、シンクロtron光・X線の水平方向のビームサイズが企業の目指す実用化研究に適していないこと、浅刻・深刻X線リソグラフィー用の研究にはX線露光装置系が不十分であることが判明した。

1. 序論

シンクロtron光からの高輝度X線を利用するX線リソグラフィーは、PMMAレジスト膜への光の透過性、バンド的波長領域、空間的な指向性(垂直方向)および広がり(水平方向)等からX線マイクロマシニング(LIGA)に応用されている。図1は加速器から放射されたシンクロtron光がLIGA微細加工ビームラインの末端に設置されているX線スキャナーに入射する様子を模式的に示している。X線露光用マスク&PMMAレジストはこのX線スキャナー内の駆動用ステージに設置されていて、これらへのX線露光はステージをなめらかに上下移動して長時間行われる。従って、LIGAマイクロマシニングにおけるX線露光は極めて単純である。しかし、同一PMMAレジストへ

深刻X線リソグラフィー・LIGA微細加工

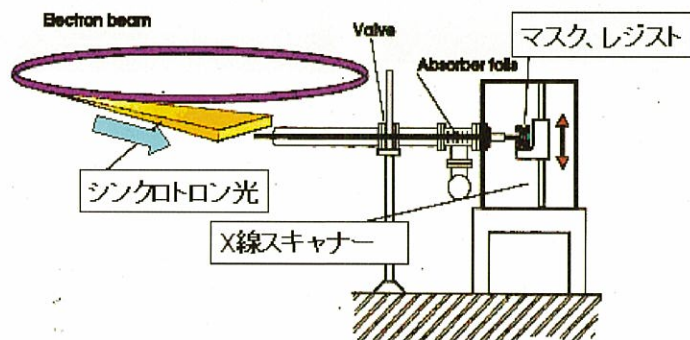


図1 X線マイクロマシニング(LIGA)

のいくつかのマスクパターンによる多重X線露光、斜方向X線入射、長時間X線露光から生じるマスクおよびレジスト内での歪み、レジスト表面層からのマスク背面での汚染等を考慮するX線スキャナーの設計が重要である。

LIGAマイクロプロセスはいくつかの処理工程に分かれているが、図2はその概容が表す。シンクロtron光の高輝度X線を利用してレジストにX線マスクパターンを転写した後、X線スキャナーステージからはずして、別室(クリンルーム等)でレジストの露光部分を化学的エッチングで除去する。この段階でも各種のマイクロパーツは作製できるが、金属的マイクロパーツやマイクロパーツの量産のための金属鋳型作製には、X線露光前にあらかじめレジスト背面にTi等の導体基盤をつける。この基盤は電気メッキ工程での電極になる。これらのマイクロ鋳型を使用して、各種のプラスチック、セラミックスのマイクロパーツが製作されている。しかし、現在では浅刻および深刻X線リソグラフィーが併用されていて、これらを総称してX線マイクロマシニングと呼ばれているようである。九州シンクロtron光研究センターの9AビームラインはMEMSもLIGAも適しているのも、まさにX線マイクロマシニングの適する施設になるでしょう。

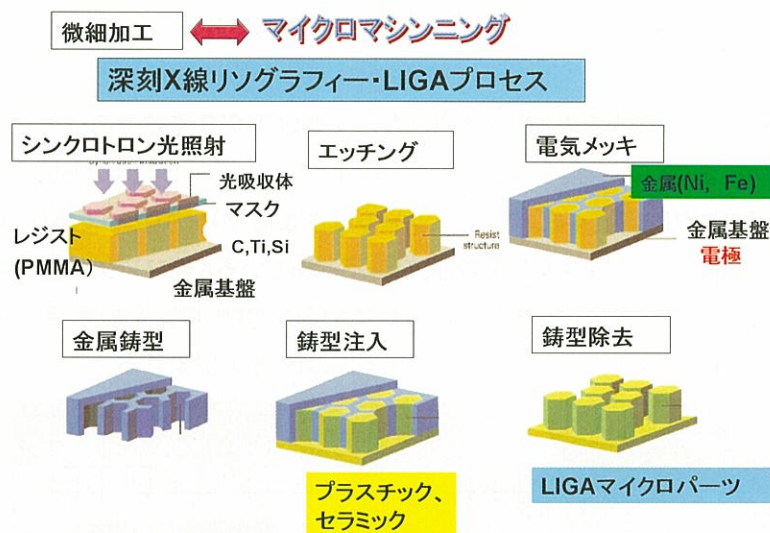


図2 LIGAマイクロプロセス

2. 実験と結果

今回の9Aビームラインのテスト実験では、X線露光は常設の多目的真空用チャンバーに簡易の簡単な駆動装置(X線スキャナー)を設置して行った。テスト実験なので、X線露光中にはPMMAレジストは大気中に置かれていて、使用したX線スキャナーは十分な空冷装置系を装備していなかった。図2には、使用した常設のX線スキャナーが示されている。この多目的真空用チャンバーは白色X線回折実験等には機能的であるが、LIGAマイクロマシニングの実験には適していない。また、9Aビームラインの光特性がLIGA微細加工に有効であることは確認できたが、シンクロtron

ン光・X線の水平方向のビームサイズが企業の目指す実用化研究に適していないことは、近い将来の実用化むけての各種の基礎的研究に障害となっている。LIGAマイクロマシンニングのテスト実験ではあるが、図2に見られるような各工程をこのセンター内で実施する環境が準備されていないので、今回はX線露光後の化学的処理等は田口電機工業で行った。



図2 9Aビームライン用の多目的真空用チャンバー

テスト実験で使用した簡易型のX線マスクパターンは以下の3種類であった；(1)Mo板(厚さ2 mm)の小径穴状マスク、(2)A型テスト用金メッキX線マスク、(3)B型テスト用金メッキX線マスク。今回使用したX線マスクは直径4インチ、金メッキの厚さは約 20～30 μm であり、その概要が図 3 に示されている。世界のシンクロtron光施設で使用されているX線マスクは直径4インチ(約100 mm)が通常のサイズであるが、9Aビームラインでのシンクロtron光の水平方向有効スパンは約 45mmなので、将来には水平方向のビームサイズの改善が望まれる。

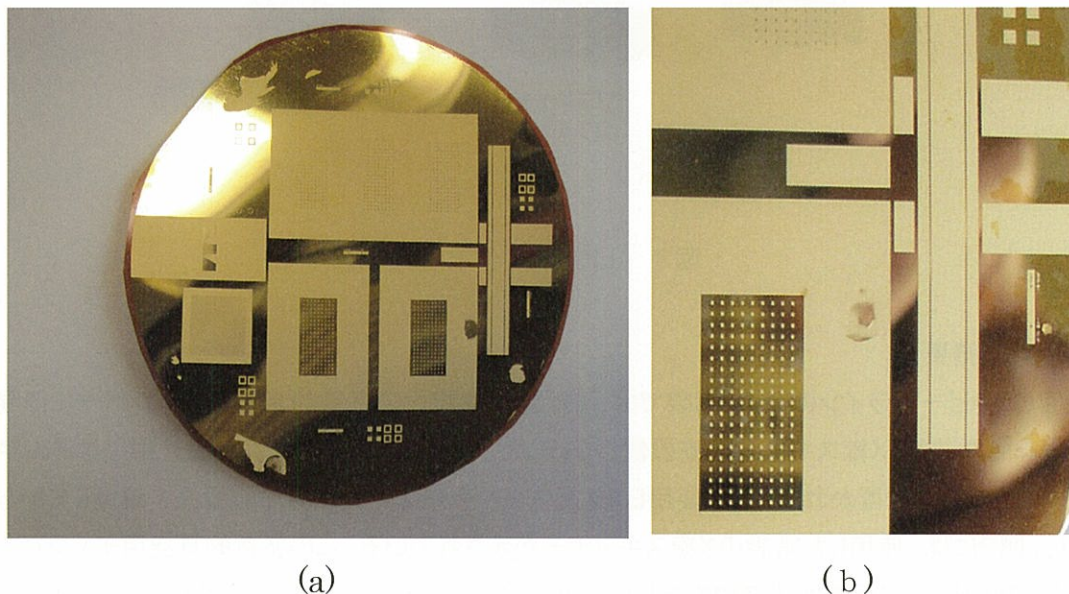


図3 A型テスト用金メッキX線マスク

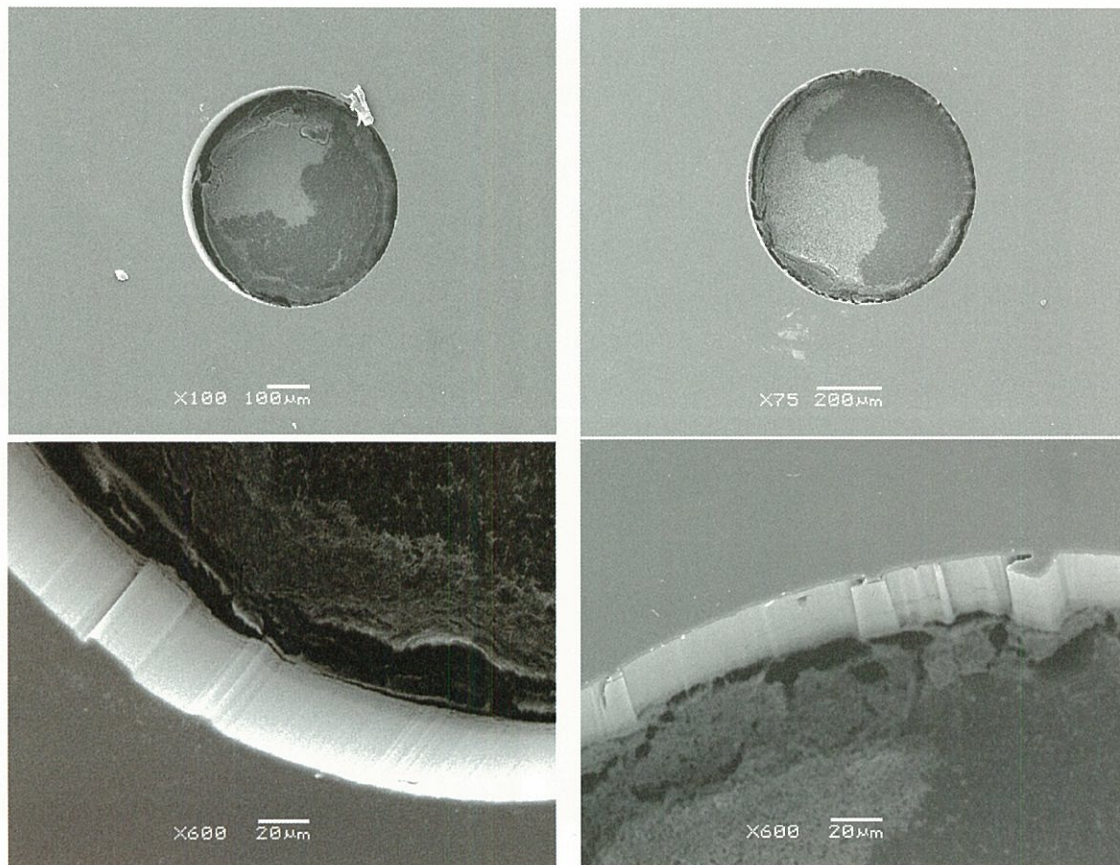


図4 Mo板(厚さ2mm)の小径穴状マスクパターンのPMMAレジストへのSEM映像

テスト実験では、PMMA レジスト板の厚さは 0.5mm と 1.5mm を使用した。図4には、小径穴状マスクパターンをもったMo板(厚さ2mm)をPMMAレジスト(厚さ1.5mm)に密着してX線露光を行った後、化学的エッチングにより得たPMMA板の投影小径穴の走査電子顕微鏡(SEM)映像を示している。9AビームラインではX線露光時間は約350mAhであった。Mo板の小径穴は機械的に作製したので、穴壁には機械加工時の切り傷の様子が鮮明に観察できる。これは9Aビームラインでのシンクロtron光の高輝度X線を利用する微細加工の有効性を示唆する。この初歩的テスト実験結果から、図3のA型テスト用金メッキX線マスクパターンを使用するX線露光実験を行った。このX線マスクには、加速器電子軌道面に対するシンクロtron光の水平方向、垂直方向の指向性を調べるための数種類のパターンが作製されている。今回のテスト実験では、レジスト面での垂直方向のビームサイズは約10mmであった。このX線マスクの直径は4インチであるので、9AビームラインでのX線露光実験ではマスクパターンの一部しかレジストに投影できなかった。しかし、近い将来におけるX線マイクロマシニング実験では、シンクロtron光加速器の稼動状況を考慮すると各種のマスクパターンを1枚のX線マスクに作製することが望まれる。また、数種類のX線マスクを用いて3次的マイクロ構造を同一レジスト内に作製するとき、X線マスクの直径は重要な用化変数になる。実用化変数になる。

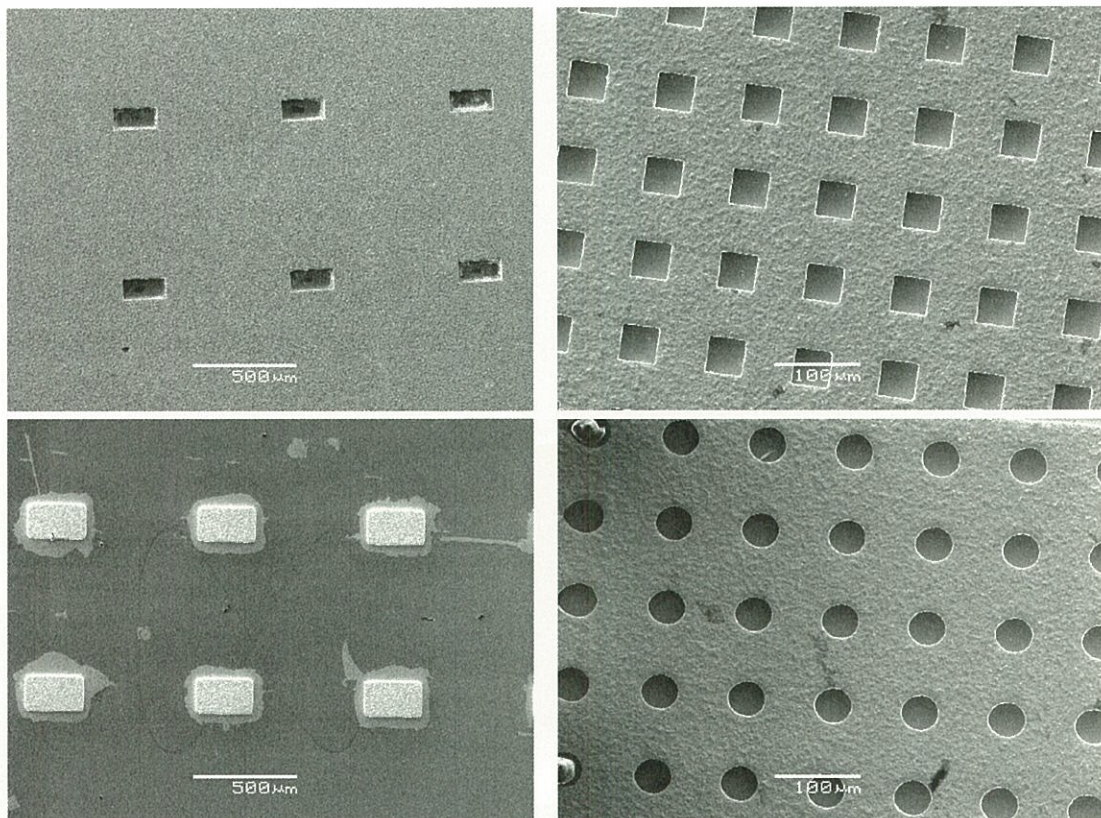


図5 A型テスト用金メッキX線マスクパターンの PMMA レジストへの SEM 映像

図5には、図3のA型テスト用金メッキX線マスクパターンを PMMA レジスト(厚さ 0.5mm)に密着してX線露光を行った後、化学的エッチングにより得た PMMA 板の SEM 映像を示している。9AビームラインではX線露光時間は約 350mAh であった。この図では、レジストホールが貫通していません、X線露光時間が十分でないことが明らかになった。この様子は図6でも確認される。

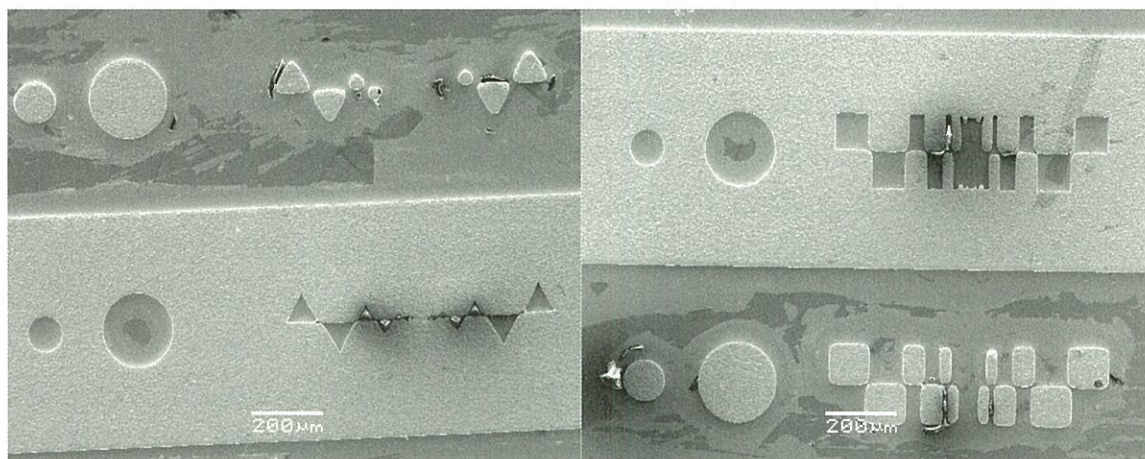


図6 A型テスト用金メッキX線マスクパターンの PMMA レジストへの SEM 映像

これらのテスト実験では、初期稼動状態での入射時の加速器電流は約 80~60mA で、5時間程度のX線露光時間であったので、近い将来はこの露光条件は大幅に改善される。

X線マイクロマシンニングのX線露光条件をさぐるために、B型テスト用金メッキX線マスクパターンを用いて長時間の露光(約 700mA)を行った。図7、8の上図が9Aビームライン、下図がポハン加速器研究所(PAL)のシンクロトロン光施設(PLS)(2.5GeV)で実施されたX線露光後、化学的エッチングによって得られたPMMAレジストのSEM映像である。PLSでのX線露光は約300mAhで、

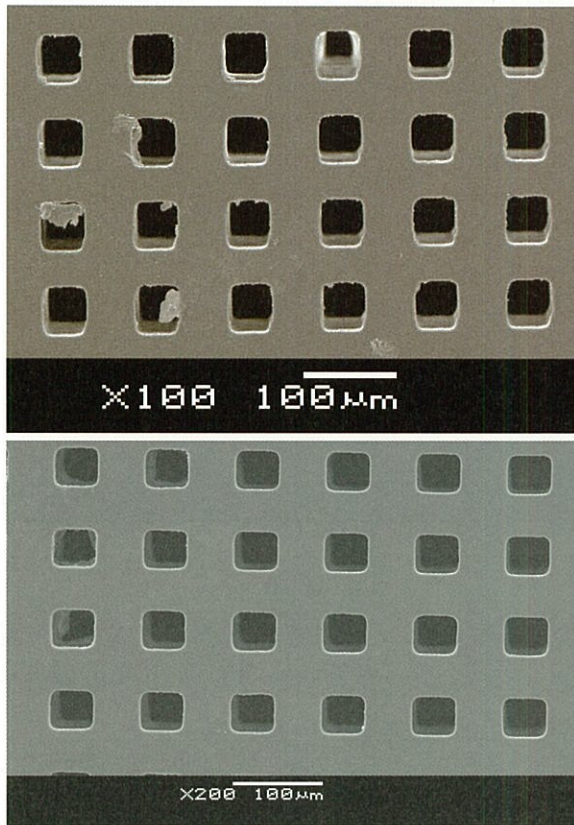


図 7

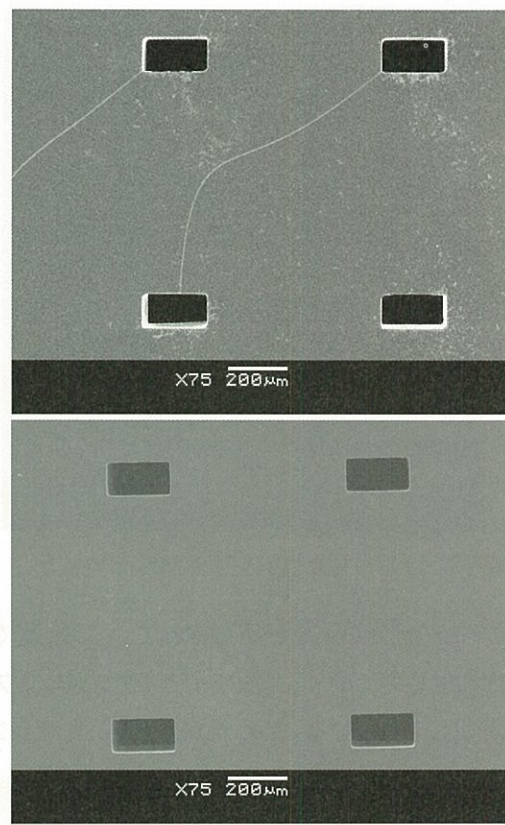


図 8

使用した PMMA レジスト厚さは 0.5mmであった。レジストパターンのエッチング状況をSEM映像から評価すると、十分にパターン溝が貫通していることが確認できる。PLSでは、高エネルギー領域の硬X線を除去するために、X線スキャナーのビームライン上流部に集光ミラーおよびエネルギーバンド領域を限定するための金属箔(バンドフィルター)を使用している。従って、X線マイクロマシンニングに関しては、九州シンクロトロン光研究センター(佐賀SL)の9Aビームラインは適していることが検証された。ただし、シンクロトロン光の水平方向のスパンがX線マスク&レジストで100mm程度あると最適である。

図9、10には、一個のレジスト細孔のSEM映像が9Aビームライン(上図)とPALビームライン(下図)とで比較されている。PALのSEM映像には少々ボケが観測されるが、細孔の内壁面の微細構造はシンクロトロン光を利用するX線マイクロ加工の特徴を反映している。即ち、X線マスク

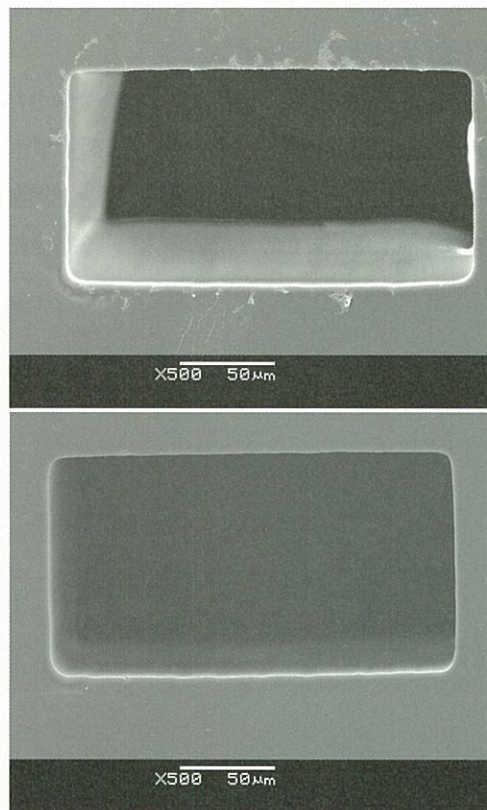


図 9

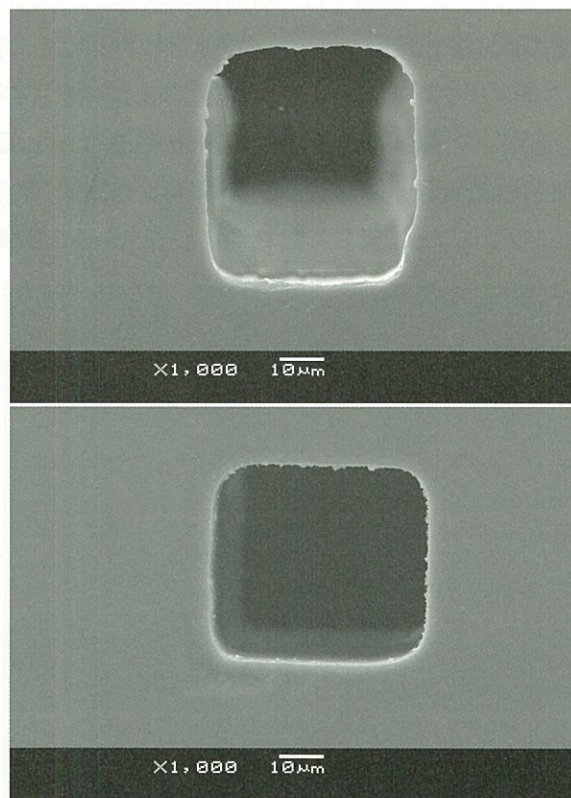


図10

パターンの形状精度が要請されてくる。最近では、シンクロtron光UVを利用するX線マスクが製作されはじめていて、X線マイクロマシニング・ビームラインにはX線(10~2 Å)とUVとの併用が現実化してきている。この観点からも、九州シンクロtron光研究センターは有効である。

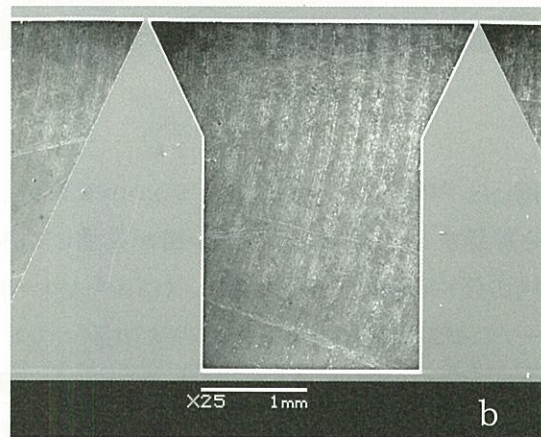
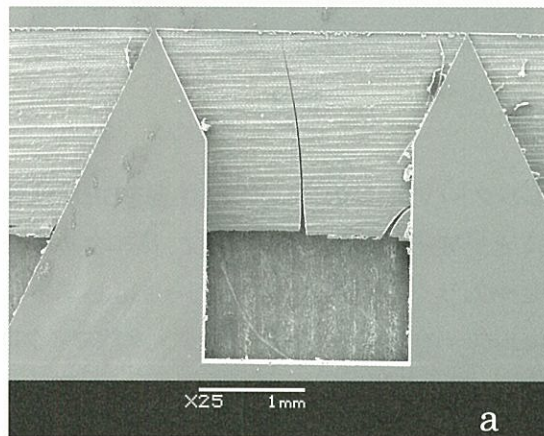


図11 金属鋳型作成のためのレジストパターンの SEM 映像

図11には、図2で表したLIGAプロセスでのPMMAレジスト背面に金属基盤を装備して、X線露光を行ったレジストパターンの SEM 映像である。(a)が9Aビームライン、(b)が PAL での実験結果

である。(b)では金属基盤まで完全に化学的エッチングにより、X線露光部分が除去されているが、(a)では部分的に除去が完了していない。これは、9Aビームラインのテスト実験では、X線露光時間の延長が望まれている。しかし、近い将来、九州シンクロtron光研究センターの稼動電流値が向上されるので(理想的には、200～300mA)、これらの問題は確実にクリアされる。

3.考察

これまで、韓国・ポハン加速器研究所(PAL)のシンクロtron光施設(PLS)での同種の比較研究から、九州シンクロtron光研究センターでのX線マイクロマシニングに関する実用化に向けた基礎的・応用的研究の可能性を調査してきた。上述したように、加速器稼動状況が初期段階で十分な光輝度ではなく、9Aビームラインのテスト実験では常設の多目的真空用チャンバーに簡易の簡単な駆動装置(X線スキャナー)を設置して行ったので、X線マイクロマシニングに適した実験環境ではなかった。しかし、一定の調査研究成果は得られた。従って、今後、九州シンクロtron光研究センターが積極的にX線マイクロマシニングの実用化研究を支援する姿勢に転じられれば、9Aビームラインの改造、X線マイクロプロセスにおける実験準備室の整備が要請される。これらの作業と並行して、試験的な各種のX線マイクロパーツ、マイクロシステムのデザインおよびそれらに基づくX線マスクの製作、実用的なX線スキャナーの製作等が関係企業を含めた各研究グループで検討される必要がある。