

卒業研究報告

題目

UV 硬化樹脂を使用した光導波路の製作

指導教員

神戸 宏 教授

報告者

田中 聡

平成 14 年 2 月 5 日

高知工科大学 電子・光システム工学科

目次

1 序論	1
1-1 背景と目的	1
1-2 実験の意義	1
1-3 本論文の構成	2
2 光導波路製作準備	3
2-1 主な材料	3
2-1-1 基板	3
2-1-2 UV 硬化樹脂	3
2-1-3 フォトマスク.....	4
2-2 光導波路パターン設計	4
2-2-1 要求項目	4
2-2-2 完成イメージ	4
2-2-3 フォトマスクパターン設計.....	5
3 UV 硬化樹脂を使用した光導波路製作	6
3-1 製作工程	6
3-1-1 製作工程概要	6
3-1-2 基板洗浄	6
3-1-3 UV 硬化樹脂の塗布	7
3-1-4 各層の厚さ調節方法	7
3-1-5 フォトマスク接着防止フィルム	8
3-1-6 第 1 クラッド層フォトリソグラフィ工程.....	8
3-1-7 コア層フォトリソグラフィ工程.....	9
3-1-8 第 2 クラッド層フォトリソグラフィ工程.....	9
3-1-9 マスクアライメントとファイバガイドについて.....	10
3-1-10 製作工程表(製作工程まとめ).....	11
3-2 各フォトリソグラフィ条件の導出過程.....	13
3-2-1 クラッド層フォトリソグラフィ条件の導出過程.....	13
3-2-2 コア層フォトリソグラフィ条件の導出過程	16
4 性能評価	19

4-1 評価方法	19
4-1-1 顕微鏡によるコアパターン観察.....	19
4-1-2 ファイバ接続実験 (632.8nm He-Ne レーザ入射).....	19
4-2 評価結果	20
4-2-1 顕微鏡観察結果	20
4-2-2 ファイバ接続実験結果 (632.8nm He-Ne レーザ入射)	20
4-3 まとめと課題点	22
4-3-1 まとめ.....	22
4-3-2 課題点	22
謝辞	23
参考文献	24

1 序論

1-1 背景と目的

近年の目覚ましい情報通信技術(IT)の発展は、今日を情報化社会へと導いた。そして今、FTTH(Fiber to the Home)や IEEE1394 車内 LAN などのさらなる発展により、個人レベルでも高速・大容量の情報空間を容易に手に入れることが可能な環境が実現しつつある。

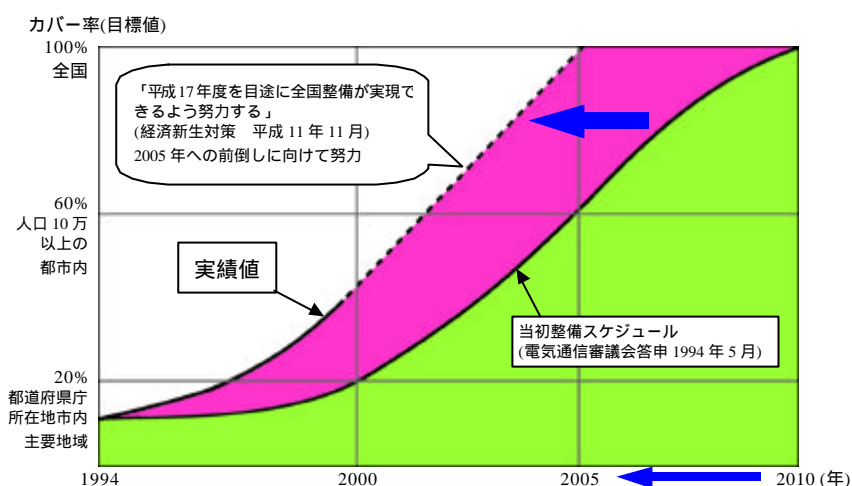


図 1 加入者系光ファイバ網の整備状況 (H13 通信白書より)

このような情報化社会の発展に大きな役割を担う通信技術の一つに、光波長分割多重(WDM)通信技術が挙げられる。そしてこの WDM通信を実現するために重要な光伝送デバイスとして、光ファイバや、分波器や合波器の機能を持つ光導波路が存在する。これらは通常、石英ガラス(SiO_2)を主原料として作られ、比較的大規模なネットワークに使用される。一方、小規模なホームネットワークやカーネットワークでは、誰でも加工できる特徴や破損時の安全性、軽量性、耐衝撃性などを生かして、プラスチックを原料としたものも開発されている。

今回の実験では、このような背景のもとに、 SiO_2 を主原料とする製作工程と比べ、屈折率の異なる 2 種の UV 硬化樹脂を原料とすることにより、フォトリソグラフィ工程のみで比較的簡単に光導波路を製作できる工程を提案し、製作を試み、実現した光導波路の伝送損失を評価し、解決すべき問題点を明らかにすることを目的とする。

1-2 実験の意義

光導波路は一般的に SiO_2 を主原料として、コア・クラッド層蒸着や導波路パターンフォトリソグラフィ、エッチングなどの工程を通して製作される。今回の実験では、材料をコア用・クラッド用に屈折率の異なる 2 種の UV 硬化樹脂に置き換えて Y 型分波器(合波器)の製作を試みる。UV 硬化樹脂で製作することにより、製作工程が単純化し、導波路パターンフォトリソグラフィのみ(パターン露光・現像の繰り返し)で製作できることになる。この工程の単純化は、光導波路の製作時間の削減につながり、生産性が向上する。また、出来上がったものは 100%樹脂であるため、軽量化や耐衝撃力、安全性の向上が期待でき、家庭用・車用光デバイスへの応用も考えることができる。

1-3 本論文の構成

以後、第2章では、光導波路を製作する準備作業としての、材料選定や光導波路パターンの設計を、第3章では、今回提案した製作工程と、その各工程の最適条件解明までの過程をそれぞれ記す。そして、第4章では、実際に製作した光導波路を評価し、その結果と解決すべき課題を記す。

本論文は、以上のような構成となっている。

2 光導波路製作準備

2-1 主な材料

2-1-1 基板

表面が平坦で、比較的安価に調達しやすい条件を満たしていたため、今回は暫定的に顕微鏡用のスライドガラスを使用した。

表 1 基板の仕様

縦×横サイズ [mm ²]	76×26
厚さ [mm]	1.2～1.5
型番等	S-1214 水縁磨
メーカー名	松浪ガラス

ただし、仕様から基板の厚さは必ずしも一定でない事がわかる。したがって、各層生成時はどの基板に対しても基板表面を基準高さ(高さ 0)として設定出来る環境が必要である。また、水切放タイプを使用するときは、基板のエッジが鋭いので扱いに注意する。

2-1-2 UV 硬化樹脂

硬化後の屈折率が決まっていることや、硬化前後の体積の歪みが小さいこと、コア層とクラッド層の密着性が優れていることが必要なことから、屈折率の異なる2種類のUV 硬化接着剤を使用した。

表 2 UV 硬化樹脂詳細 (取扱説明書より)

		クラッド層用	コア層用
屈折率(完全硬化後)		1.52	1.54
*硬化時間[s]	初期硬化	15	10
	完全硬化	300	180
25 時の粘度[cps]		1000	5000
ショア D 硬さ		50	60
メーカー名および品名		NORLAND 社 NOA65	NORLAND 社 NOA68

* 100 Watt Mercury Spot Lamp 6 インチ型を使用した場合

この接着剤は、正しくは 5～22℃ で保存し、使用時に常温に戻す必要がある。しかし、実際の実験では、秋季および冬季のイエロールーム内で使用しつづけたが、特に問題はなかった。したがって、著しく高温(低温)にならない限りは、常温で使用しても問題ないようである。

2-1-3 フォトマスク

フォトマスクは、クラッド用(MASK01)とコア用(MASK02)に各 1 種類ずつ準備した。パターンの詳細は次節に示す。

2-2 光導波路パターン設計

2-2-1 要求項目

今回製作する光導波路は、Y 型分波器または合波器として機能するものとする。また、光導波路に接続する光ファイバはシングルモード石英系ファイバとして、ファイバ直径は $125\mu\text{m}$ で、コア系は $10\mu\text{m}$ とする。ファイバの光導波路との接続に関しては、光導波路の各層生成段階で同時に形成されるファイバガイドによって、ファイバコア端面が光導波路のコア端面と容易に位置合わせ出来るものを目指す。

2-2-2 完成イメージ

要求項目を満足する光導波路として、次のような完成イメージを提案した。ファイバガイドの幅とファイバ直径、ファイバコア高さと光導波路コア層高さはともに等しく、基板上に置いたファイバをファイバガイドに挿入すればコア同士の位置合わせが可能である。

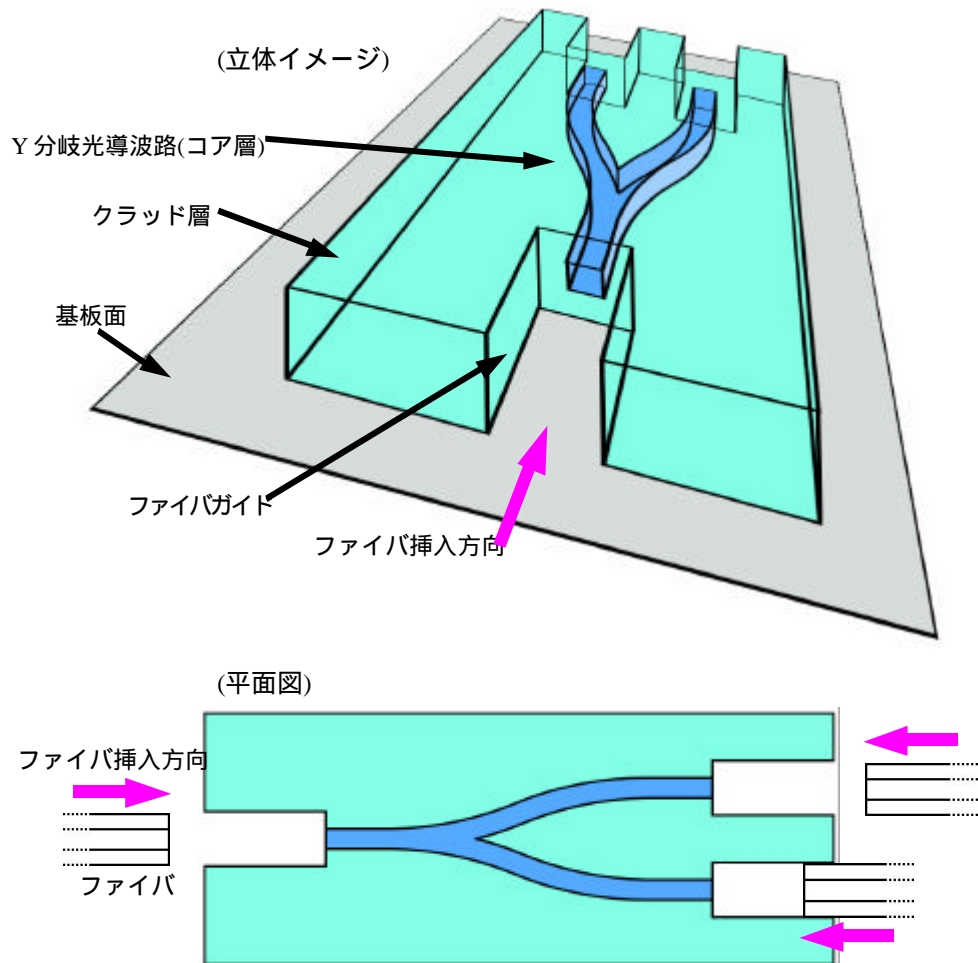


図 2 光導波路完成イメージ

2-2-3 フォトマスクパターン設計

前述の光導波路を実現するために、クラッド層用とコア層用に2種類のフォトマスクを設計した。

クラッド用フォトマスク(MASK01)と、コア用フォトマスク(MASK02)の設計図を次にそれぞれ示す。

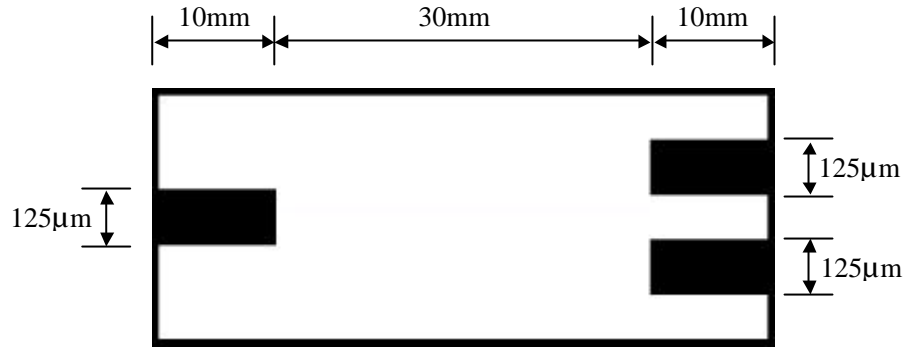


図 3 クラッド層用フォトマスク

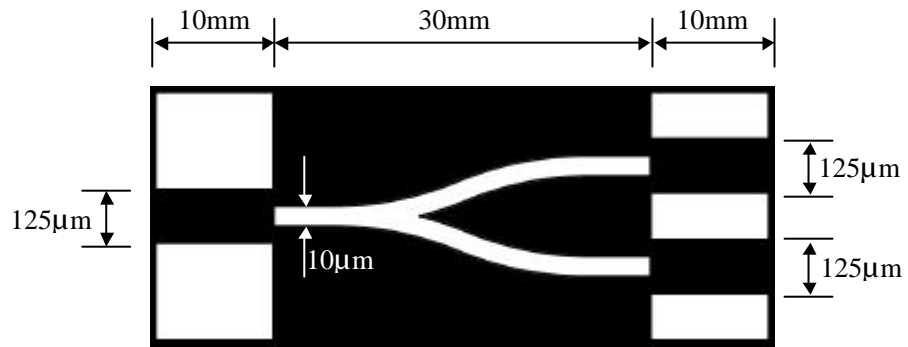


図 4 コア層用フォトマスク

なお、コアとクラッドに屈折率をそれぞれ 1.54、1.52 と割り当てていることから、コア端面に光を入射する場合の最大入射角 は、約 14.32° となっている。

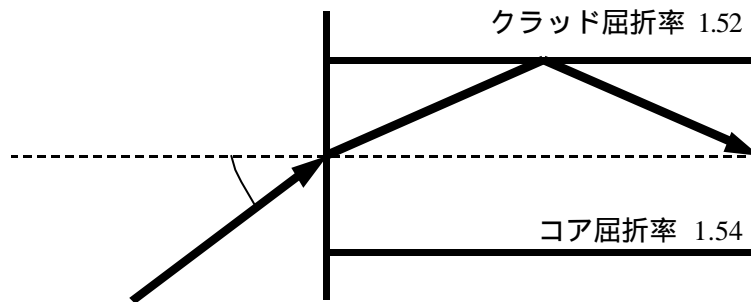


図 5 入射角

3 UV 硬化樹脂を使用した光導波路製作

3-1 製作工程

3-1-1 製作工程概要

今回の実験で提案した製作工程概要を示す。

工程

洗浄した基板を準備する。

工程

クラッド用 UV 硬化樹脂(NO A65)を塗布する。

工程

クラッド用フォトマスク(MASK01)を被せ、露光する。

工程

現像後、*第 1 クラッド層が生成される。

工程

コア用 UV 硬化樹脂(NO A68)を塗布する。

工程

コア用フォトマスク(MASK02)を被せ、露光する。

工程

現像後、コア層が生成される。

工程

クラッド用 UV 硬化樹脂(NO A65)を塗布する。

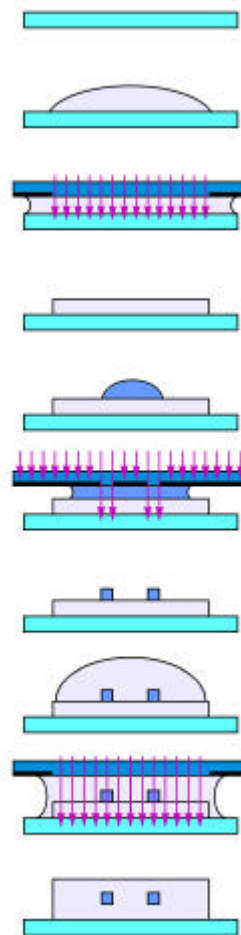
工程

クラッド用フォトマスク(MASK01)を被せ、露光する。

工程

現像後、*第 2 クラッド層が生成され、光導波路が完成する。

*クラッド層は、コア層を挟むようにして上下 2 層生成することが必要であるので、両者を区別するために、下層を第 1 クラッド層、上層を第 2 クラッド層と呼ぶことにする。



3-1-2 基板洗浄

基板は、常温の各洗浄液に順番に浸し、いずれも超音波洗浄器を使用する。洗浄工程は以下の通りである。

アセトン × 5[min]

メタノール × 5[min]

純水(リンス)×5[min]

洗浄後は窒素ブローで表面の水分を飛ばすが、実験を重ねた結果、この窒素ブローのみでは完全に乾燥しないことが分かった。そこで、オープンに入れて完全に乾燥させる工程を追加したところ、以後の薬品塗布の際、均一に塗布できるようになった。乾燥工程は以下の通りである。

窒素ブロー

乾燥ベーク 90[]×1[min]

常温冷却×2[min]程度

以上の洗浄・乾燥工程を経て、基板の洗浄は完了する。

3-1-3 UV 硬化樹脂の塗布

当初、塗布したUV硬化樹脂は、スピナーコーターを使用して目的の厚さに近づけようと試みた。しかし、基板が長方形でスピナー上でのバランスが取り難いこと(2-1-1 参照)や、通常のフォトレジストと比べて粘度が高いこと(2-1-2 参照)、そして最も重要な点として、樹脂はUV光を照射しないと硬化しないため、たとえ樹脂の厚さを調節しても液体のまま露光工程に移ることになる。これをフォトマスクに圧着させた場合、挟まれた樹脂を押し出してしまふので、厚さが変化してしまうことになる。したがって、樹脂は基板上に適量(クラッド層の場合、一層当たり 0.05ml 程度)滴下した後、各層の厚さは露光段階にて以下のようにして調節する方法を考えた。

3-1-4 各層の厚さ調節方法

前述のスピナーコーターを使用しないことから、露光時のフォトマスクと基板との間の距離を調節することで各層の目的の厚さを実現できるような方法を採用した。

距離調節は、目的の厚さに合ったゲージを、接着防止フィルム(3-1-5 参照)を貼り付けたフォトマスクと樹脂を塗布した基板との間の、パターンに影響しない面の4ヶ所に挟んだ状態で露光する。すると、ゲージの厚さよりもマスクと基板が近づくことはなく、目的の厚さを持った平坦な層が生成できる。

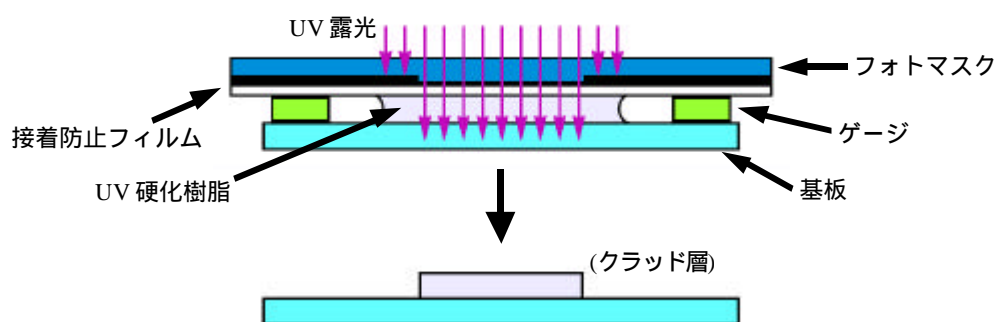


図 7 各層の厚さ調節方法

なお、基板をフォトマスクに圧着する圧力は、基板吸引台の高さを相対表示する装置を利用して、初回に圧着時の座標を 0 にリセットすれば、次回圧着時から再び 0 に合わせることで、毎回ほぼ同じ圧力で圧着することが出来る。

ゲージは、10 μ m の隙間ゲージ、12 μ m、15 μ m の厚さのアルミ箔を組み合わせて

対応した。ある一定の厚さのゲージを挟み、いくつかサンプルの試作を繰り返した結果、

設定した厚さ - 3[μm]

の厚さで層が生成されることが分かった。3 μm 分は、圧着による接着防止フィルムの厚さ変化によるものとする。しかし、ゲージに微細な塵やガラス破片が付着したり、圧着時に押し出された余分な樹脂が浸透した場合でも誤差は生じるので、ゲージの管理には注意を要した。

3-1-5 フォトマスク接着防止フィルム

フォトマスクと塗布した樹脂との接着を防ぐため、露光時は、フォトマスクと樹脂を隔てるフィルムを間に挟むことにした。ここで使用するフィルムは、露光量やパターン形成に影響を及ぼさないように、出来るだけ薄く、無色透明であり、ある程度の柔軟性がありかつ丈夫であること、そしてフォトマスクに密着させやすい材質である条件が要求される。ここでは料理用ラップフィルムを使用した。厚さは 10 μm である。

フィルムは、フォトマスクにしっかりと密着させる必要がある。フィルムとフォトマスクの間に気泡が入ったり、フィルムにしわが寄ったりしないように工夫した。

空気が入らないように何度か試みたところ、フォトマスク上にそっとフィルムを乗せ、ガーゼを使ってマスクパターン中央部分から放射状に拭くように、軽く引っ張りながら貼り付けて行くということと、フォトマスク自体を加熱することを試み、しっかりと密着させることが出来るようになった。工程にすると、次の通りである。

フォトマスク加熱 90 × 100[s]

フィルム貼り付け作業

また、フィルムを引き伸ばして張力を持たせた状態で密着させると、しわは寄りにくいが、コア層露光後、基板とフィルムを剥がす直前に、その張力でコアを破壊することがあるので、フィルムは、元の形状に戻ろうとする張力が働かない状態で密着していることが重要である。

なおこのフィルムは、各層生成毎に新規に貼り付けしなおす必要がある。

3-1-6 第 1 クラッド層フォトリソグラフィ工程

全工程内のうち、ここで初めて必要となるフォトリソグラフィに備えて、まず最適な現像液の選出が必要となった。仮のフォトリソグラフィ工程を組み、試験現像液として数種類それぞれ試した。試作の結果、現像液はエタノールと純水の 5:1 混合液に決定した。また、現像時に超音波洗浄器を使用することにより、良好な現像結果を出すことが出来るようになった。露光時間については、14 ~ 25[s]程度が最も鮮明なパターンが得られる時間帯となり、14[s]に決定した。第 1 クラッド層の露光から現像までを工程として表すと、次の通りである。

クラッド用 UV 硬化樹脂 NOA65 塗布

UV 露光 14[s]

現像(超音波) エタノール:純水=5:1 混合液 40[s]

純水リンス 20[s]

窒素ブロー

完全硬化露光 300[s]

なお、条件導出過程については、3-2-1 に記す。

3-1-7 コア層フォトリソグラフィ工程

当初コア層試作中は、ゆがみや切れなど、パターンの破壊が頻繁に見られた。この現象を低減させるために、クラッド層と比べてパターン部を強くし、それにもなっ
て現像力も強くしたところ、次のような最適条件を得ることが出来た。

コア用 UV 硬化樹脂 NOA68 塗布

UV 露光 50[s]

エタノール(原液) 現像 60[s]

アセトン(原液) 現像 30[s]

純水リンス 20[s]

窒素ブロー

完全硬化露光 180[s]

なお、条件導出過程については、3-2-2 に記す。

3-1-8 第2クラッド層フォトリソグラフィ工程

第2クラッド層に関しては、ゲージの厚さ設定を除き、第1クラッド層と同じ工程で生成できることが分かった。ただし最近では、コア層フォトリソグラフィでもあったように、パターンが十分耐える時間程度でアセトンを使用した方が、エタノール:純水 = 5:1 が現像液で超音波洗浄器を使用する場合よりも遥かに手軽だと言える。よって、ごく最近のクラッド層およびコア層生成工程における現像工程の流れとしては、まずエタノールで現像し、それでも樹脂が残るようであれば、アセトンによる短時間な現像を加えてから純水リンスするようになっている。最近の第2クラッド層の工程をまとめると以下の通りである。また、この条件は、第1クラッド層生成時にも適切である。

クラッド用 UV 硬化樹脂 NOA65 塗布

現像 14[s]

エタノール(原液) 現像 60[s]

アセトン(原液) 現像 5[s]

純水リンス 20[s]

窒素ブロー

完全硬化露光 300[s]

3-1-9 マスクアライメントとファイバガイドについて

コア層フォトリソグラフィおよび第2クラッド層フォトリソグラフィにおける露光時にはマスクアライメント作業が必要になる。実験においてこの作業は手動であり、顕微鏡からの距離が異なるフォトマスクパターンと基板上パターンとを、それぞれ交互にピンポイントを合わせながら位置合わせをし、位置決めしたところで基板とマスクを密着させた。しかし、マスクパターンと基板上パターンの中に挟まれた樹脂による基板の不規則な平面移動や、目測による位置決めが多いことなどから正確な位置合わせは難しく、結果的にファイバガイドに対するコア位置は頻繁にずれ、ほとんどの場合、ファイバガイドの効力が無くなってしまった。よって、その対策として、完成後にファイバガイドを切除する方法をとった。(例として、下図中の点線に沿って基板に垂直にカッターを入れ、その端面から光を入射する。)

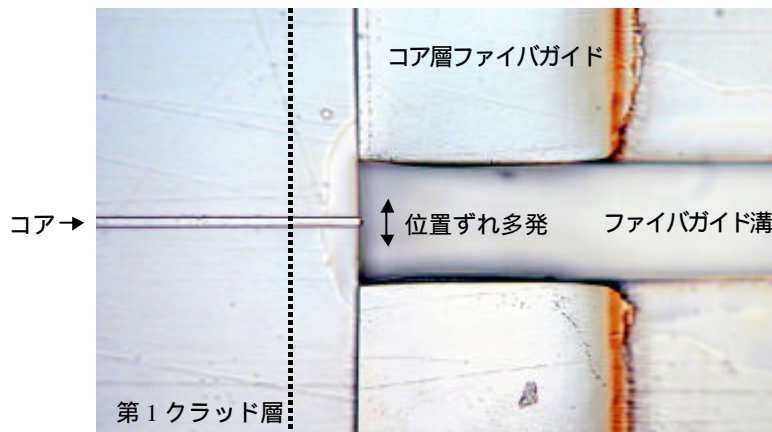


図 8 コア層アライメント

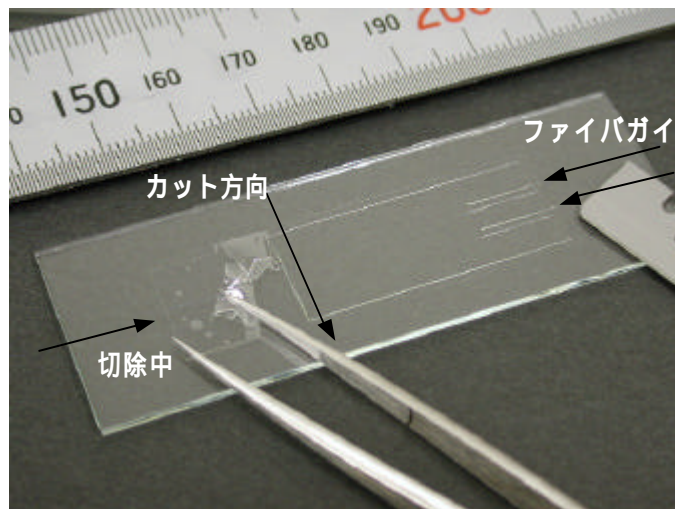
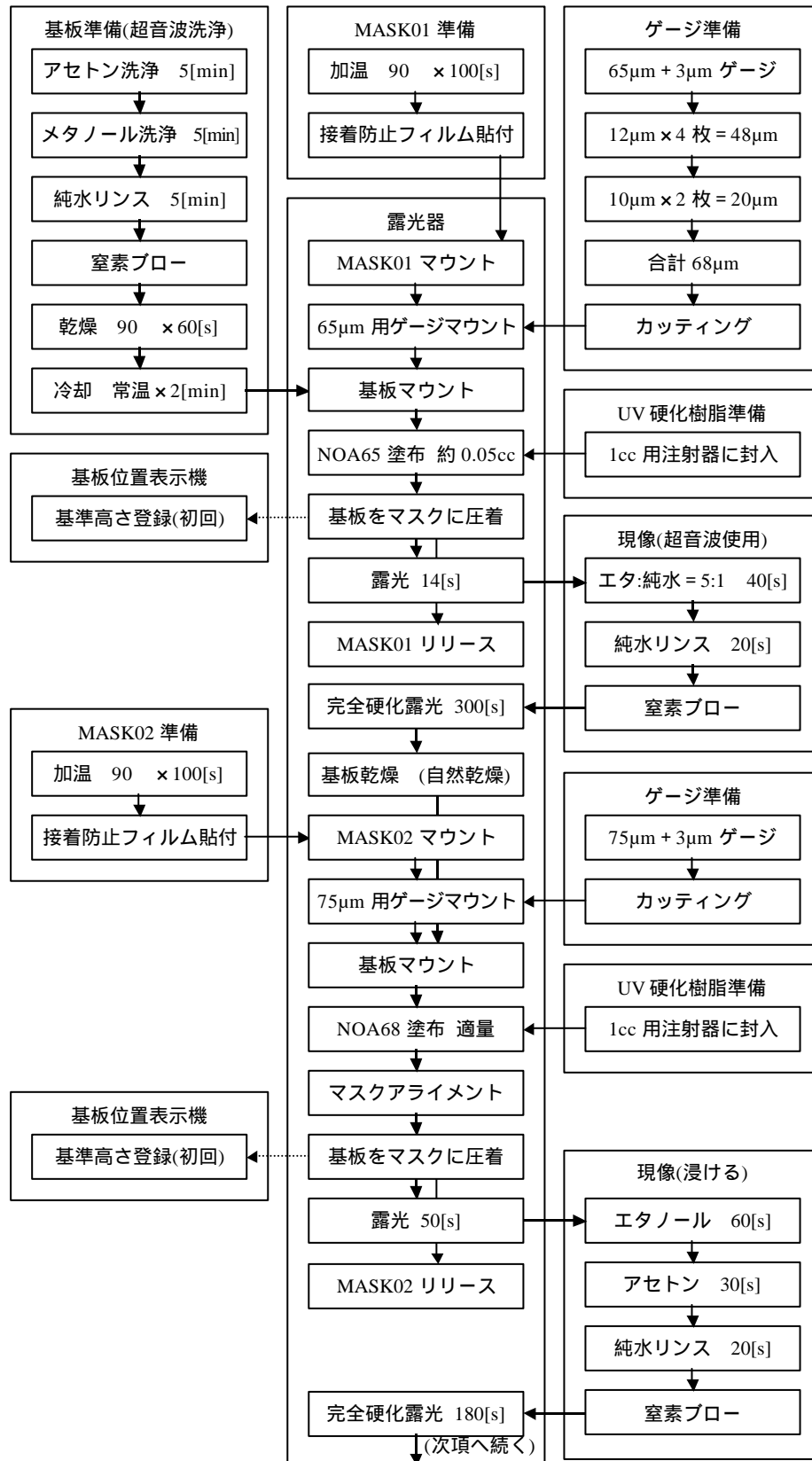


図 9 ファイバガイドの切除

3-1-10 製作工程表(製作工程まとめ)

製作工程を基板準備から完成までを表に示すと、以下の通りである。



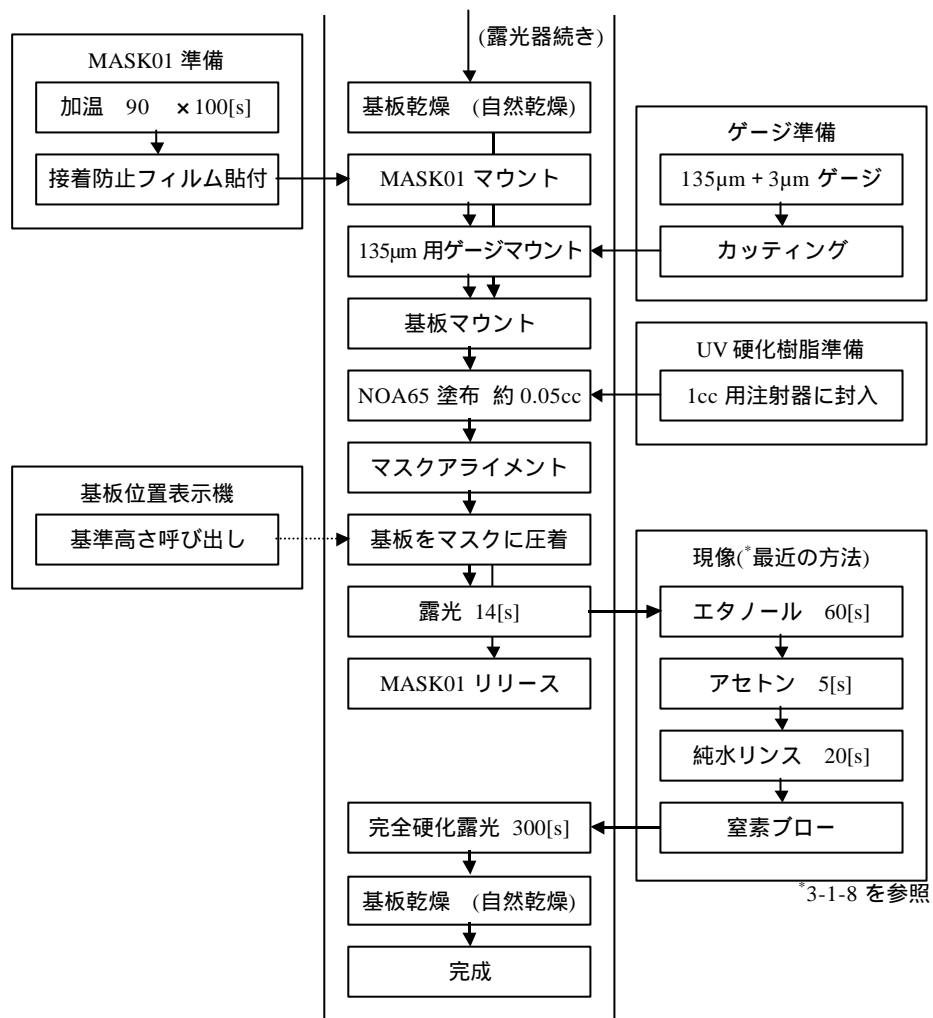


図 10 製作工程表

3-2 各フォトリソグラフィ条件の導出過程

3-2-1 クラッド層フォトリソグラフィ条件の導出過程

(全工程内のうち、ここで初めて)必要となるフォトリソグラフィに備えて、まず最適な現像液の選出が必要となった。仮のフォトリソグラフィ工程を組み、試験現像液として数種類それぞれ試した。

仮のフォトリソグラフィ工程では、樹脂を塗布した基板の半分を遮光して露光した。また、現像については手作業のため、工程間の若干の時間誤差による影響を低減することを目標に、現像時間を若干長めに(1分弱)設定し、穏やかに現像される条件を探した。その他の条件は以下の表に一例を示す。

表 3 仮のフォトリソグラフィ工程

使用基板 [mm ²]		ガラス基板 18×18
*スピンコート [rpm×sec]	初速	500×10
	本速	4000×10
	終速	7000×0.4
露光 [sec]		300
現像 [sec]		40
リンス [sec]		20

*樹脂の盛り上がりを低減する程度に使用

結果は、アセトンは急激だが鮮明な現像の後剥離し、メタノールでは急激で若干不鮮明、エタノールでは穏やかだが弱かった。使用した試験現像液の種類と、それぞれの結果を下表に示す。なお、このUV硬化樹脂の取扱説明書には、硬化前の接着剤を洗い落とすための薬品として、アセトンが挙げられている。

表 4 現像結果

現像液	現像速さ	鮮明度	剥離の有無
アセトン	急激	鮮明	有
メタノール	やや急激	やや不鮮明	有
エタノール	穏やか	不鮮明	無

これら仮のフォトリソグラフィ工程で得られた結果を踏まえ、第1クラッド層に最適なフォトリソグラフィの解明に進んだ。

第1クラッド層に求められる主な条件は、MASK01を使用するということと、もう一つは、後々に基板上に置かれるファイバの、基板からコアまでの高さを H_1 とし、第1クラッド層の高さを h_1 とした場合、 H_1 と h_1 の関係は、 $H_1 > h_1$ を満たすことである。もし $H_1 > h_1$ である場合、光導波路のコア位置が低すぎて、ファイバからの光を入射することができない。今回の実験では、ファイバ直径は125 μm 、コア径10 μm のファイバを使用することを想定しているため、 $H_1 = 57.5\mu\text{m}$ とした。 h_1 については、現在ではファイバアライメント時にゆとりを持たせるため、65 μm に設定している。

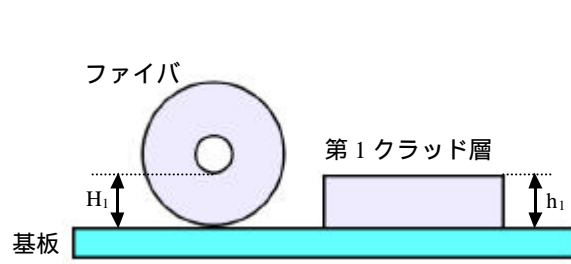


図 11 クラッド層高さとファイバの関係

厚さ 65 μm の第1クラッド層を生成するという設定の下に、最も適した条件を見つけるため、露光時間、現像液種類とその温度等を変化させた試作サンプルをそれぞれ比較した。

また、ほとんどの試作において、最適な条件を求める基本的な方法としては、まず2点の条件を仮設定し、その結果を照らし合わせ、最適条件(3点目)を予想した。

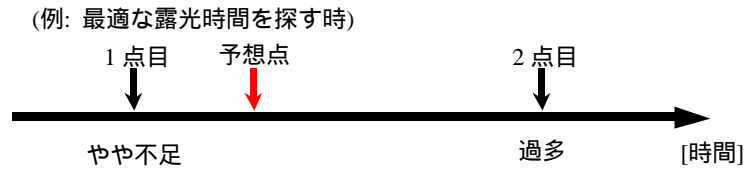


図 12 最適条件予想方法

最初は露光時間にねらいを置き、現像液はエタノールを使用し、リンスは純水で20秒に固定し、各露光時間に対して現像後の変化を観察した。

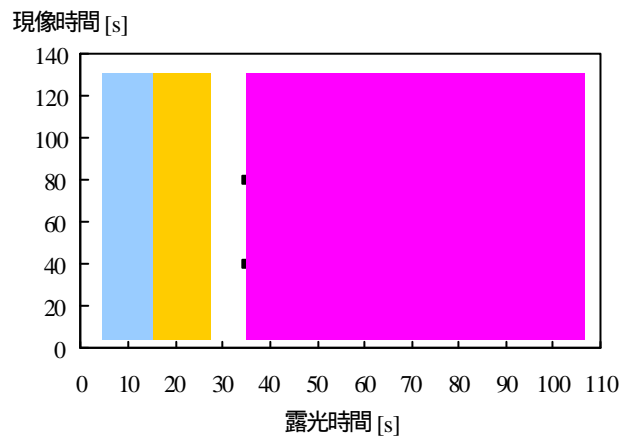


図 13 露光 現像時間条件とその最適値

露光時間と現像時間の組み合わせとその最適値

部分は露光時間過多、は最適、は不足を表す。

諸条件は、現像液 エタノール リンス 純水 20[s]

露光時間に関しては、上のグラフに示した約 35[s]以上の領域が露光時間過多となり(図 14)、漏れ出した紫外線によってパターン以外の部分まで硬化して、パター

ンを現像することが出来なかった。逆に 13[s]以下になると、パターン形成が弱すぎた。結果的に 14～25[s]程度が最も鮮明なパターンが得られる時間帯となった。そして最終的には、出来るだけ弱い現像液で出来るだけ穏やかな現像を目標としていたため、鮮明なパターンが得られる時間帯で最も現像されやすいと考えられる点、つまり 14[s]に決定した。

しかし、最も鮮明なパターンが得られる露光時間は確認したが、当初仮のフォトリソグラフィ工程で種々の現像液にて確認したように、エタノールのみでは若干現像が弱いのか、パターンのエッジ周辺に樹脂が残る程度に留まった。(図 14)なお、現像時間の不足を考えて上乘せで現像を試みたが、ある一定の露光時間に対するサンプルは、エタノールで現像する限り、現像時間 40[s]以上ではほとんど変化を見せなかった。したがって、エタノールの場合、40[s]現像して樹脂液が残っている場合は、それ以上現像しても意味が無いことが分かった。そこで、エッジに残った樹脂の状態を確認するため、針で直接突いてみたり、同じ条件で試作を繰り返した結果、その樹脂は粘りはあったが一応液体であったので、残る原因としては、現像液の樹脂液を洗い落とす力が弱いのではなく、樹脂液をブラッシングする力(掻き落とす力)が少ないと考えた。そこで次は、最適な現像液条件にねらいを置き、ブラッシングするような力を付加させる役割を期待して、純水を現像液に混合して試作サンプルを比較した。

エタノールと純水の混合比を、1:1、2:1、3:1、4:1、5:1 の順に変化させて現像を観察したところ、5:1 に来るまでにやや良い結果を確認した。なお、全体的な効果から見ても、混合比 6:1 以降の変化はあまり期待できないと考えた。

表 5 現像液混合比による現像結果の違い

露光時間 [s]	混合比		現像仕上がり
	エタノール	純水	
14	1	1	現像不足
	2	1	やや現像不足
	3	1	若干良好
	4	1	やや良好
	5	1	やや良好

この試作から、現像液はエタノールと純水の 5:1 混合液に決定した。しかし、手動で現像する場合、パターンに与えることの出来るブラッシング力には限界があり、やや改善はしたものの、完全に洗い落とすまでには至らなかった。

ここでさらにブラッシング力を増加させるために、現像液の加熱を試みた。40 程度に加熱して現像したところ、エッジ付近の樹脂液は減少し、無数の細かな粒となった。しかし、若干エッジが溶解してしまった。そして 50 程度に加熱した場合は、すべて剥離してしまった。

現像液を加熱することに関しては、温度管理が非常に困難であること、エタノールが容易に蒸発してしまうので現像液の管理も困難であること、そしてパターンのエッジに影響を与えることから、この方法を中止した。

最後に、現像液を加熱せずにブラッシング力を増大させる効果を期待して、現像時に超音波洗浄器を使用した。この方法では、樹脂液をほぼ取り除くことができ、第 1 クラッド層完成へ至ることとなった。(図 14)

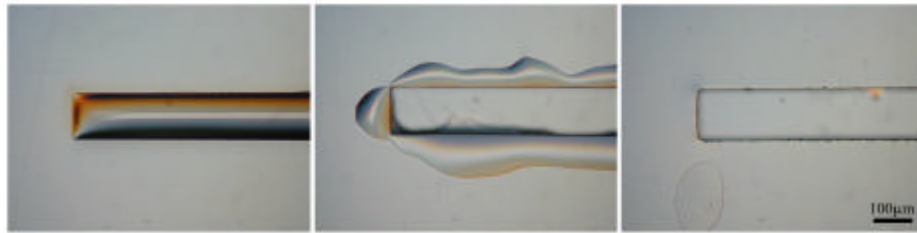


図 14 クラッド層の現像

左から、露光過多、現像不確実、良好なパターンニングを表す。

以上の試作過程を経て、第1クラッド層フォトリソグラフィ工程が完成した。

3-2-2 コア層フォトリソグラフィ条件の導出過程

コア層生成については、そのパターン規模の違いからも、クラッド層生成工程とは別の新しい工程が必要であることが分かった。そこで、試作にはガラス基板、MASK02、コア用 UV 硬化樹脂(NO A68)を使用して、コア層フォトリソグラフィ工程の最適条件の解明に進んだ。

当初、第1クラッド層生成工程を基本として試作を繰り返したところ、コアパターン部の破壊が頻繁に見られた。

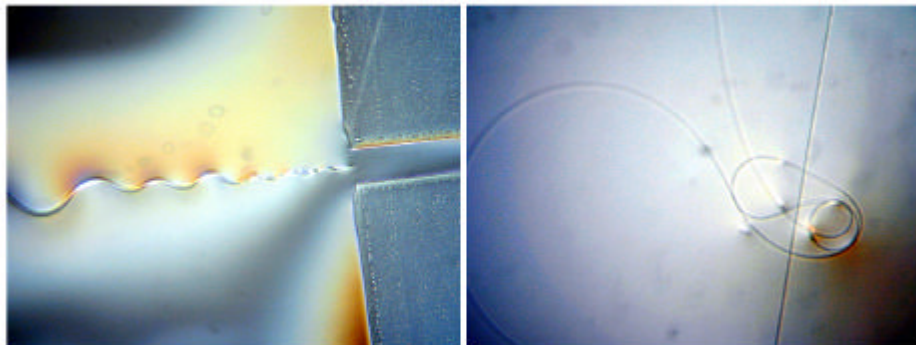


図 15 コアパターンの破壊

コアの硬化を促すためにも、まず露光時間にねらいを置いて試作したところ、問題が発生した。それは、MASK02のコアパターンとファイバガイドパターンとの規模があまりに違いすぎるため、それぞれの最適条件が全く異なってしまうということであった。このことから、同一フォトマスク上に、巨大なパターンと微細なパターンは混在させるべきではないということが分かった。応急処置としては、ファイバガイドがコアパターンの規模に出来るだけ近くなるように、遮光性のあるビニールテープで不必要な部分を覆った。

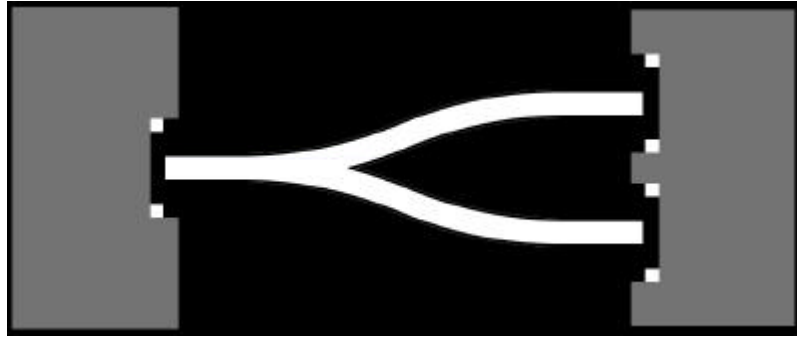


図 16 コア用フォトマスクの応急処置
部分にテープを貼り付け、露光面積を最小限に減らした。

ビニールテープによる応急処置の後、コアパターン部とファイバガイド部のフォトリソグラフィ条件がほぼ一致したところで、再び露光時間にねらいを置いて試作を観察した。試作における露光時間条件は14[s] ~ 150[s]の間の約10通り試したが、いずれの場合も不規則にコアパターン部の破壊やゆがみが確認できた。そこで、このコアパターン部の破壊等が、いつ、どのような状況で発生しているのかを確認するため、最小工程単位を終える毎に観察を行った。観察を行った時点は次の表に示す通りである。

表 6 観察時点

観察順番	観察した時点
1	露光後、密着した基板を剥がす前
2	露光後、密着した基板を剥がした後
3	超音波洗浄器を使用して現像した後
4	エタノールに浸けた後
5	純水に浸けた後

観察はすべて顕微鏡を使用し、観察順番 1 については、露光直後、フォトマスク(接着防止フィルム)に密着したままの状態を観察した。観察順番 2 と 3 についてはそれぞれの工程後、弱く窒素ブローしてから観察し、4 と 5 については、まずを顕微鏡でコア部分を見える状態にして、観察しながらエタノールや純水に浸けた。

観察の結果、まず、2 の密着した基板を剥がした後の観察で破壊等を確認し、次に 3 の超音波洗浄器の使用により、さらに破壊が進むことが分かった。1 と 4 そして 5 については破壊等の変化は起こらなかった。

これらの結果から、2 の結果については、露光後に密着した基板を剥がそうと力をかけた際、コアパターンに挟まれた内部および周辺は、残った樹脂にも由来する密着によって真空に近い状態になり、その高い圧力がパターンを破壊したり、剥がれる直前にパターンを越えるようにして勢いよく流れ込んできた空気によって破壊したのではないかと考えた。そして 3 では、2 の時点で破壊されたパターンを超音波洗浄力によってさらに傷めたと考えた。

これらの結果に対する対策として、露光後に基板を剥がす際は、パターン周辺が真空状態になりにくい方向から、出来るだけ穏やかに空気を流し込むようにして剥が

し、現像液には静かに浸けるのみとした。

この対策の結果、コアパターンの破壊は、完全ではないが、かなり減少した。しかしその一方で、浸けることしか出来ない現像によって現像不足が生じ、パターン周辺に樹脂が残るようになった。ただし、コア層パターン生成における最適な露光時間が50[s]前後であったため(図 17)、コア層およびすでに完全硬化した第1クラッド層は数十秒程度ならアセトンに耐久出来る位に硬化していることが分かった。そこで、最初にエタノール(100%)で現像して、そこで残った樹脂に関しては、短時間のアセトンを使用した現像を加えることにより、パターンに影響を与えること無く残りの樹脂を除去できることが分かった。

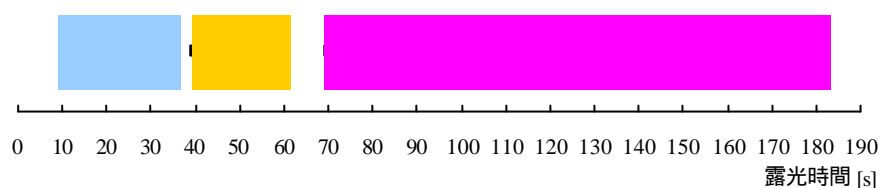


図 17 試作露光条件とその最適値

部分は露光時間過多、 は最適、 は不足を表す。

諸条件は、現像液 エタノール:純水 = 5:1 現像時間 40[s] リンス 純水 20[s]

以上の過程を経て、コア層フォトリソグラフィが完成した。

4 性能評価

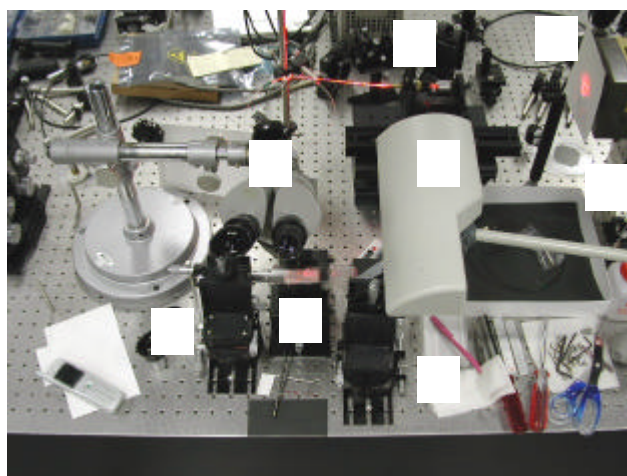
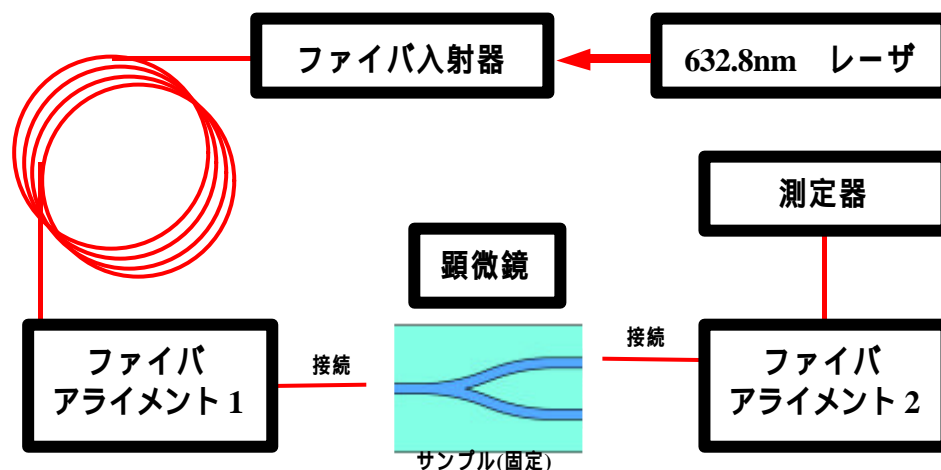
4-1 評価方法

4-1-1 顕微鏡によるコアパターン観察

完成した光導波路の光導波方向に対して垂直に切断した断面、および上面から顕微鏡で観察することにより、パターン形成状況を評価した。

4-1-2 ファイバ接続実験 (632.8nm He-Ne レーザ入射)

次の図に示すような実験系を構成し、レーザを通したファイバと光導波路を接続し、光導波路入射前の測定値を基準に、光導波路通過後の光損失を計測した。なお、ファイバアライメント 1、2 では、固定されたサンプルに対するファイバの位置を調節できるようにしている。



レーザ
ファイバ入射器
マスクアライメント 1
サンプル固定台
マスクアライメント 2
測定器
顕微鏡
照明

図 18 レーザ光入射実験系略図と実際の様子

4-2 評価結果

4-2-1 顕微鏡観察結果

コア層の断面は良好なパターンを形成していることがわかった。この結果から、導出した各フォトリソグラフィ工程が確立した。

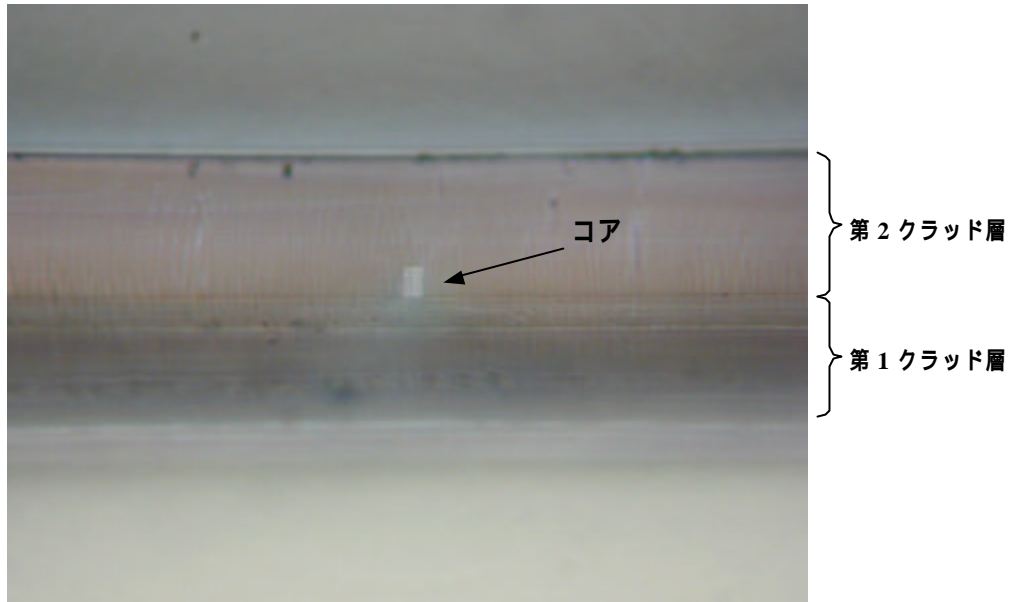


図 19 光導波路断面図

4-2-2 ファイバ接続実験結果 (632.8nm He-Ne レーザ入射)

光導波路入射前のレーザ強度は約 30mW であったが、光導波路に入射した後、分岐後に片方から測定できたのは、約 15 μ W であり、光導波路全体の損失は、約 30dB となった。この実験では、ファイバの結合損失にはじまり、多くの損失が出てしまい、実用レベルには至らなかった。(図 20、図 21)

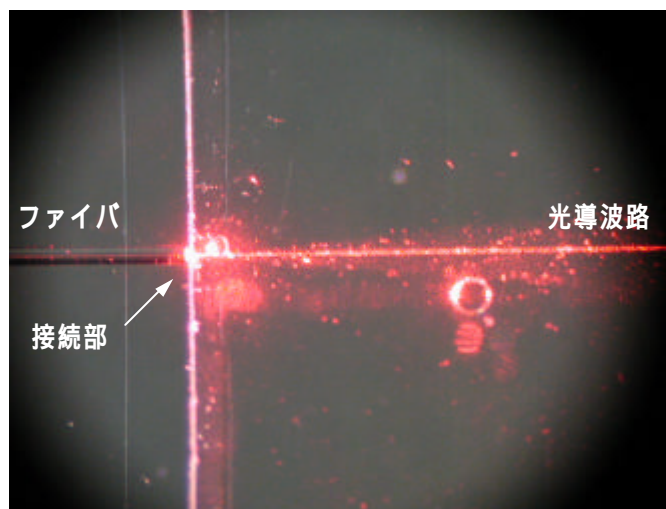


図 20 ファイバと光導波路の接続

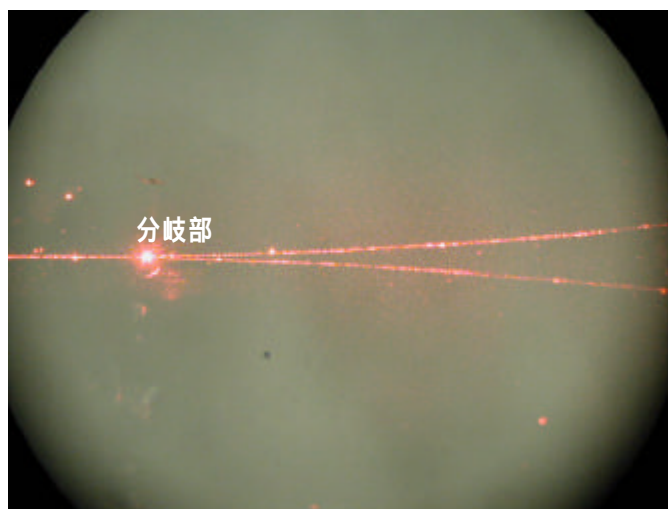


図 21 分岐部の様子

4-3 まとめと課題点

4-3-1 まとめ

- ・ 各製作工程における最適条件を導出することができた。
- ・ 良好な光導波路パターンが形成できた。
- ・ ファイバガイドについては、特に精巧なマスクアライメントを要するので、その手法を廃止した。
- ・ ファイバと光導波路の結合損失が大きく、実用レベルの光導波路完成には至らなかった。

4-3-2 課題点

課題点として、次のような項目が残された。

- ・ 使用している UV 硬化樹脂の波長特性を調べ、どの帯域に適した素材であるのかを調べる。
- ・ 製作時に使用する接着防止フィルムをより平坦なフィルムに変更し、導波路面の平坦性を向上させる。
- ・ マルチモードファイバに対応させるため、コア径を 50 μm にして設計し、その他プラスチックファイバの規格にも合わせてコア径を設計する。

謝辞

本研究にあたって、常に親身の御指導、御教授を賜りました神戸宏教授をはじめ、日頃からお世話になりました高知工科大学電子・光システム工学科の教職員の皆様には、心から厚く感謝いたします。また、本研究に必要な実験器具を提供して下さった野中弘二助教授、武田光由講師、茨城大学の佐々木豊教授に深く感謝いたします。

最後に同研究室での先輩にあたり、フォトリソグラフィの基礎について助言して下さった加瀬川亮氏、西岡伸博氏、そして日頃から共に研究に励む中、様々な助言を頂いた大野史晶氏、大橋律男氏、塩尻裕一氏、石川美津朗氏、鳥井智正氏、渡辺啓太氏には、知識だけでなく、大変な心の支えとなって頂いたことに、とても感謝しています。

本研究は多くの方々に支えられて終えることが出来ました。再度心より厚く御礼申し上げます。

参考文献

- ・ 光導波路の基礎 岡本勝就著 コロナ社
- ・ 光デバイス精密加工ハンドブック オプトロニクス社
- ・ 光学実験講座 オプトロニクス社
- ・ 平成13年度 通信白書