

卒業研究報告

題目

平面型光導波路の作製

指導教員

神戸 宏 教授

報告者

学籍番号: 1030227

氏名: 山田 和弘

平成 15年 1月 27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 本研究の意義.....	1
1. 3 本論文の構成.....	1
2 光導波路とは.....	2
2. 1 光導波路の構造	2
2. 2 光導波路の材料	3
2. 3 光導波路の形状	4
2. 4 光導波路の作製方法.....	5
3 光導波路の製作	7
3. 1 基板材料.....	7
3. 2 製作工程の概要	8
3. 3 Si・ガラスの導波路製作工程.....	9
(a) 基盤切断.....	9
(b) 基板洗浄	9
(c) 自然酸化膜 (SiO ₂) 除去 (Si の場合のみ)	9
(d) フォトレジスト塗布	10
(e) プリベーク	10
(f) 露光.....	10
(g) 現像	10
(h) ポストベーク	10
(i) エッチング	10
3. 4 行程の導出過程	11
3. 5 工程のまとめ.....	12
3. 6 実験での注意事項.....	13
4 結果と評価.....	15
4. 1 実験結果.....	15
(a) レジスト塗布.....	15
(b) ガラスのエッチング	16
(c) Si のエッチング	16

4. 2	性能評価	17
(a)	SEMによる導波路評価	17
(b)	ガラスへの光の入射実験	18
5	おわりに	20
	謝辞	21
	参考文献	22

1 序論

1. 1 背景と目的

近年インターネットの普及によって低コストで高速・大量に情報をやりとりできる光ファイバネットワーク基盤の構築が早急に求められている。各家庭まで光ファイバを敷設したり (FTTH)、また LAN, 家庭内ネットワーク, 装置内接続を従来の金属配線から光ファイバや光導波路を用いた光配線へ移行する光化が盛んに進められている。これらの実現に欠かせない光部品は、高性能、高信頼性、低コスト性、システム管理のしやすさなどが重要視される。光導波路は、ガラス、半導体、ポリマーなどの材料を用いて作られており高性能あるいは高機能化を目指して研究が進められている。

本研究では、現在光通信で主流の波長 $1.55 \mu\text{m}$ に対して透明となる Si および可視から赤外までの波長に適応するガラスを使用し導波路の作製を試みる。すなわち、Si やガラスの導波路の作製方法を確立すること、さらに実現した導波路を評価し解決すべき問題点を明らかにすることを本研究の目的とする。

1. 2 本研究の意義

半導体やガラスを用いた光導波路の製作は、将来の光集積回路の実現になくはならない技術である。Si やガラスをエッチングして光導波路を製作することは、今後の光導波路デバイスに向けた研究につながる重要な基本技術であると考えられる。本研究ではウェットエッチングにより製作の限界があることを明らかにした。同時にプラズマによるドライエッチングの検討は必要であると考えられる。簡単な光導波路構造を実現し、光スイッチや光分岐回路への応用の見通しを得た。

1. 3 本論文の構成

以後、第2章では、光導波路とはどのようなものか、第3章では、本研究で進めた光導波路の製作および各製作工程において見出した最適条件について記す。そして第4章では、実現した光導波路について電子顕微鏡による観察や光導波路特性の測定結果について、第5章では、本研究のまとめと解決すべき課題点を記す。

2 光導波路とは

この章では、光導波路の基礎的な構造と導波特性及び、製作方法について述べる。

2. 1 光導波路の構造¹⁾

光導波路の基本的な構造は、図 2. 1 に示すように光が閉じこめられて伝搬するコアと、これを囲むクラッドからなる。コアの屈折率 n_1 は、クラッドの屈折率 n_0 よりわずかに大きくなっており、端面から入射された光は、コアとクラッドの境界で全反射され、コア内に閉じこめられて伝搬する。

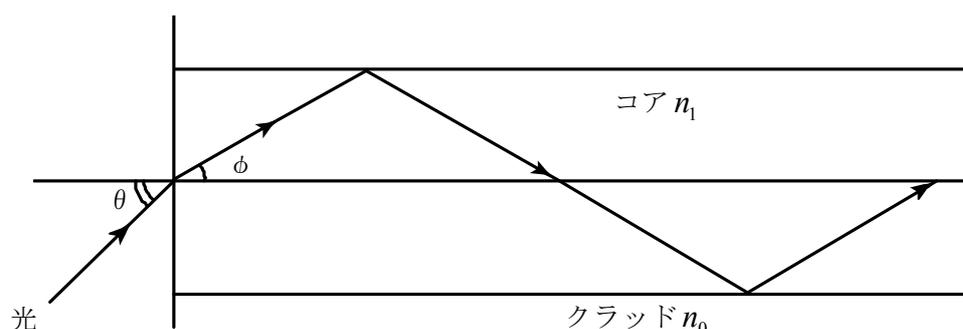


図 2. 1 光導波路の構造

光がコアとクラッドの境界で全反射するための条件は、コア内の光線の角度 ϕ を使って $n_1 \sin\left(\frac{\pi}{2} - \phi\right) \geq n_0$ となる。したがって角度 θ でコア端面に入射された光がコアとクラッドの境界で全反射されるためには、

$$\theta \leq \sin^{-1} \sqrt{n_1^2 - n_0^2} \equiv \theta_{\max} \quad (2. 1)$$

が満足されなければならない。コアとクラッドの屈折率差は例えばガラス導波路では $n_1 - n_0 = 0.01$ 程度であるから、式 (2. 1) の θ_{\max} は次のよう近似できる。

$$\theta_{\max} \doteq \sqrt{n_1^2 - n_0^2} \quad (2. 2)$$

式 (2. 2) の θ_{\max} は、光導波路が受け入れることのできる最大受光角

を表す。この角度を開口数 (Numerical Aperture : NA) という。NAは、屈折率差($n_1 - n_2$)とコア部の屈折率 n_1 との比で表すことができる。比屈折率差 Δ を

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_0^2}{2n_1^2} \doteq \frac{n_1 - n_0}{n_1} \quad (2.3)$$

とすると、NAと Δ の関係は次のように表せる。

$$NA = \theta_{\max} \doteq n_1 \sqrt{2\Delta} \quad (2.4)$$

2.2 光導波路の材料

現在実際に用いられている光導波路の材質には、ガラス、ポリマー、半導体等がある。ここでは半導体としてSiを考えてみる。

光導波路の材料ごとの特徴をまとめたものを表2.1に示す。

表2.1 光導波路の種類

材質	特徴	屈折率
ガラス	低損失 広帯域	1.6
ポリマー (フッ素化ポリイミド)	加工が容易 耐熱性	1.5程度 (材質による)
Si	安価 波長1550nmしか通らない	3.5

ガラス、特に石英ガラスは低損失であり、波長1550nmで損失が0.

01dB/cmと低い。²⁾

ポリマーの特徴は加工が容易であり、また紫外線の照射により、屈折率が変わる。

Siの特徴は、安価で現在主流の通信バンド1550nmに対して透明になる。半導体であることから、電圧印加や電流の注入により屈折率を変えることができ、光スイッチなどの機能を持たせたり、また他の半導体発光・受光素子とも一体化した集積回路実現の可能性はある。

2. 3 光導波路の形状³⁾

光導波路には、図 2. 2 に示すようにいろいろな形状が考えられている。ここでは、光導波路の形状について述べる。

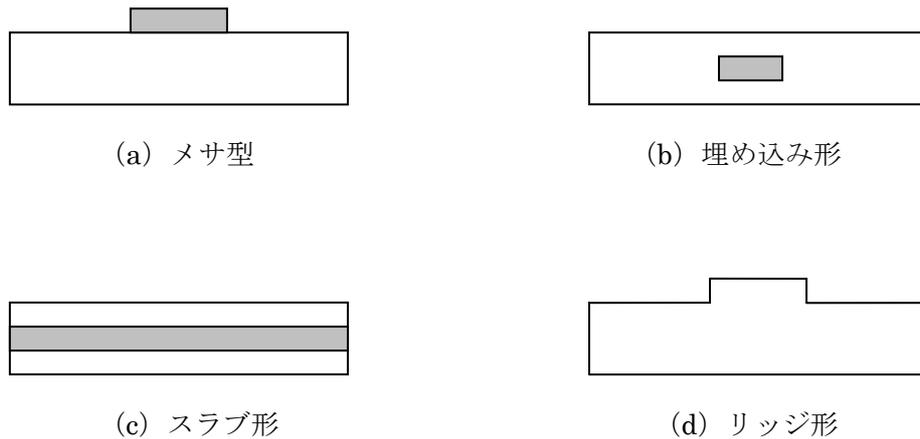


図 2. 2 平面導波路の種類

図 2. 2 (a) はメサ形と呼ばれ、クラッドとなる基板の上にコア部となる材料を平板状に形成して薄膜作製した後、フォトリソ法パターン化し、逆スパッタ法等で導波路となる部分を形成する。ガラス、有機材料、半導体等で導波路が作られている。

図 2. 2 (b) はストライプ形光導波路で、(a) のコアの周囲にそれよりも屈折率の小さな材料を埋め込みクラッド層を設けたものである。コア部の凹凸による散乱損失も少ない。

図 2. 2 (c) のスラブ光導波路は、上図のようにコアの両側をクラッドで覆ったサンドイッチ構造である。LD (レーザダイオード) はこのような構造である。

図 2. 2 (d) のリッジ形導波路は、材料の表面に凸形の部分を設けリッジ形にすると、その部分の等価屈折率が周辺に比べて大きくなることにより導波しようとするもので、最も作製が容易である。本研究ではこの形を実現することを目指す。

2. 4 光導波路の作製方法

光導波路の作製方法として、フォトリソグラフィによりマスクパターンを形成した後、反応性イオンエッチング法（**RIE**法）や、化学薬品でエッチングする方法（ウェットエッチング）及び射出成形法^{4) 5)}がある。

作製方法における概略図を図2. 3に示す。

このうち**RIE**を用いる方法は、現在光導波路として最も優れた性能を有する石英ガラス系光導波路の形成方法である。フッ酸のような化学薬品によるエッチングで形成する方法（ウェットエッチング法）は、大がかりな装置を必要としないので、本研究で検討することにした。

射出成形法とは、材料を加熱溶融し金型の空隙にシリンダーから高圧で射出注入し、冷却、固化させることによって成形する方法である。この方法は、大量生産に適し、かつファイバ実装が簡便に行えるとの期待が高い。

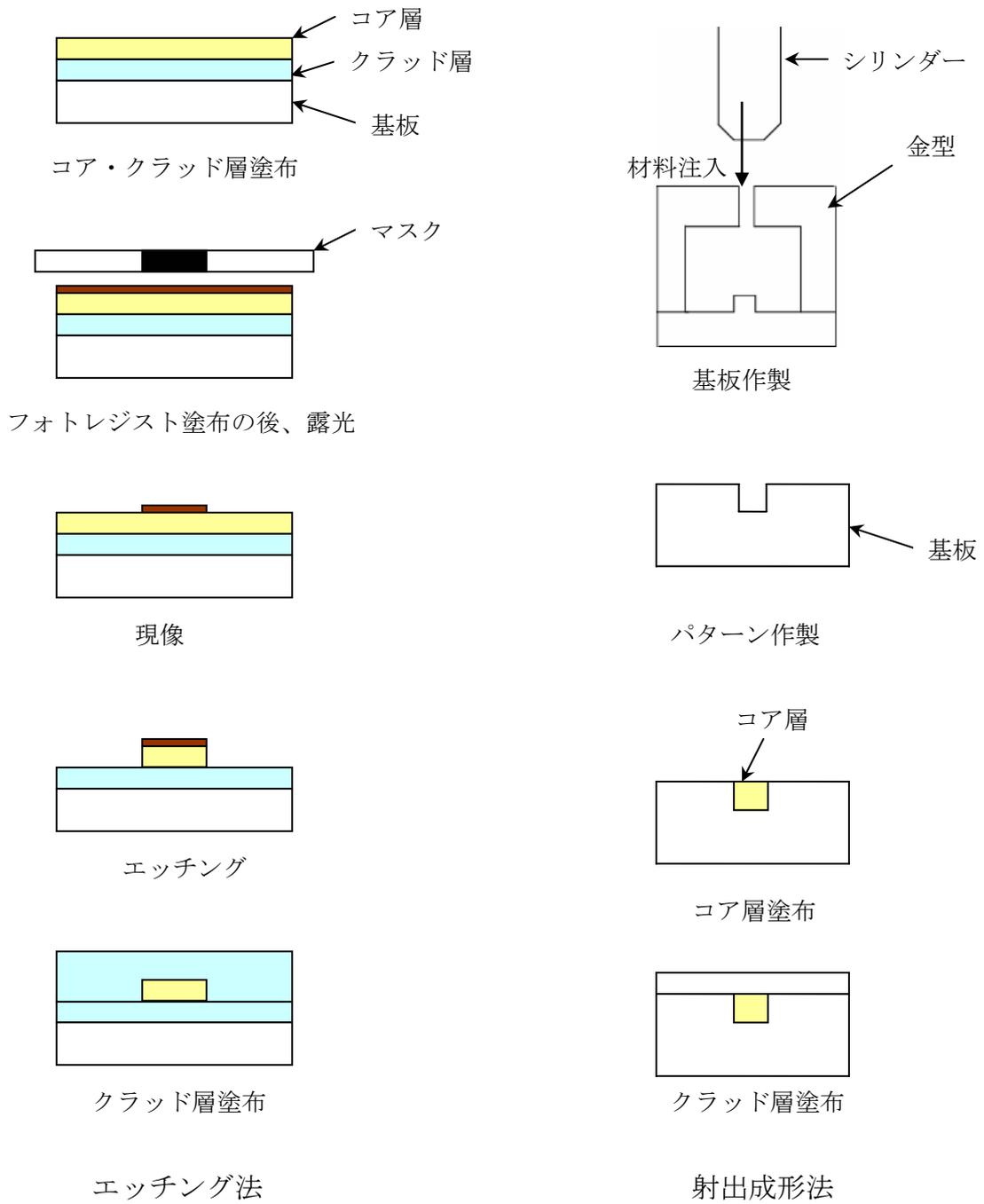


図 2. 3 光導波路の作製工程概略図

3 光導波路の製作

本章では、本研究で検討したウェットエッチング法による Si とガラスの光導波路の製作工程について述べる。

3. 1 基板材料

本研究では、現在通信分野で多く使われている波長 $1.55 \mu\text{m}$ に対して透明になる Si ウェーハと、可視から赤外までの波長に適応するガラスを用いて導波路形成を試みた。ガラスはスライドガラスを用いたが石英ガラスにも適応できる。ガラス及び Si ウェーハを 2cm 角に切断し使用した。

3. 2 製作工程の概要

導波路の製作工程の基本的な流れを図3. 1に示す。

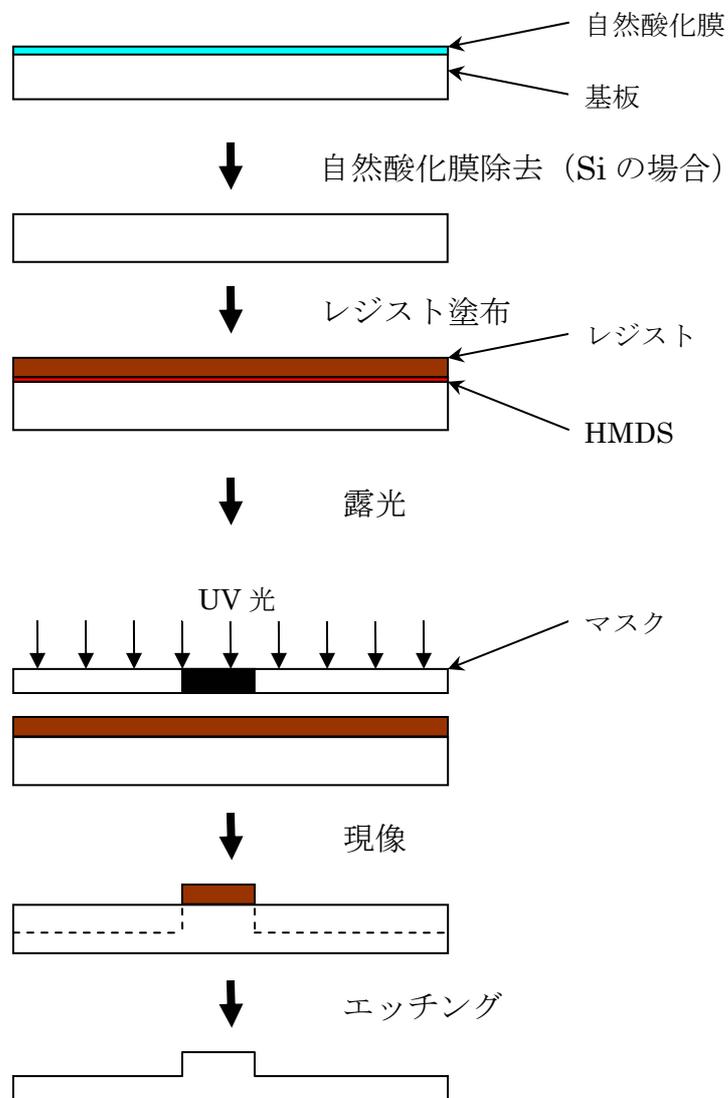


図3. 1 製作工程概略図

図に示すように、基本的な工程は次のようである。
基板洗浄後自然酸化膜を除去 (Si の場合) し、レジストを塗布する。次に露光し、UV 光があたっていないところにレジストを残す。現像した後、エッチングでレジストパターンを基板に転写することでリッジ形の導波路の完成となる。

3. 3 Si・ガラスの導波路製作工程

ここでは各工程について検討した結果を述べる。以下に述べる各工程の条件より、比較的安定に光導波路の製作が行えることができた。

(a) 基盤切断

基板は、扱いやすくするためスクライバー（図3. 2）を使用し2 cm角に切断した。

スクライバーとは、台の上に切断したいサンプルを置き顕微鏡でサンプルを見ながら切断する位置を決めダイヤモンドで傷をつける装置である。

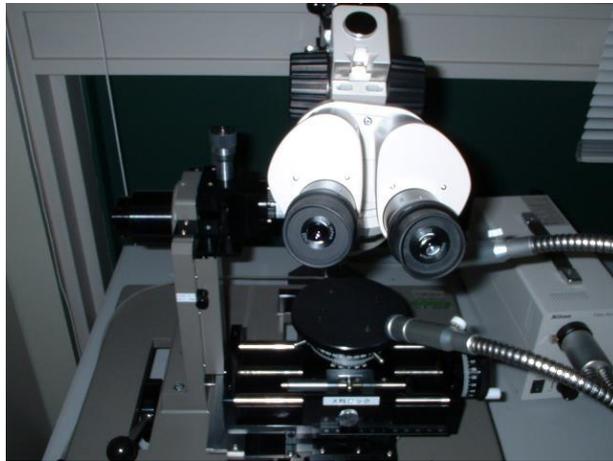


図3. 2 スクライバー

(b) 基板洗浄

Siの場合：アセトン、メタノール、純水の順で5分ずつ超音波洗浄した。

純水洗浄後、90℃、5分のベークでサンプル上の液体を取り除いた。

ガラスの場合：Siと同様に洗浄した後、窒素ブローで完全に表面上の液体を吹き飛ばす。

(c) 自然酸化膜（SiO₂）除去（Siの場合のみ）

Si上には、自然酸化膜がある。当初自然酸化膜があるとレジストが斑になり均一に塗布できなかつた。自然酸化膜を取り除くためにバッファードフッ酸（B-HF）に2分間浸した後、フッ酸（HF）：純水（H₂O）を1：1の割合で3分間かくはんした。

(d) フォトレジスト塗布

用いたフォトレジストは、OFPR-800, 20cP である。スピンコーターによりレジストを塗布するが、その条件については、次節に記す。レジストのみではレジストが後で行うエッチングで剥がれてしまう。レジストと Si の密着性を高めるためにHMD Sの蒸気によって表面処理を実施し密着性向上をはかった。HMD Sとレジストを塗布するスピンコーターの回転数は同じである。

初速	3 0 0 rpm	3 秒間
本速	4 0 0 0 rpm~6 0 0 0 rpm	2 0 秒間
終速	4 0 0 0 rpm	0. 2 秒間

初速の部分はレジストを基板にある程度広げるための回転、本速は必要な膜厚にする回転、終速の部分基板の端に残っているレジストをとばす役割である。

(e) プリベーク

レジスト塗布後、露光する前レジストを焼き固めるためにオーブンでプリベークを行う。その条件は次の通りである。

Si の場合：9 0℃、7 分

ガラスの場合：1 2 0℃、1 0 分間

(f) 露光

露光工程ではウェーハを露光装置にセットし、必要とするマスクパターンを密着させ3 秒間露光し、パターンをレジストに転写する。

(g) 現像

現像液には NMD-3 を使用した。当初現像でかくはんしていたが、サンプルによって現像時間が異なっていたことが分かった。今回の実験では、かくはんせずに現像液に浸したまま現像した。

(h) ポストベーク

エッチングにおけるレジストの耐性を高めるためホットプレートで1 6 0℃、2 時間した。この温度と時間は通常（レジスト推奨条件）よりも高く、また長い。

(i) エッチング

次のようなエッチャントを用いたエッチングにより、レジストパターン

をサンプルに転写した。

Siの場合：フッ酸（HF）：硝酸（HNO₃）：酢酸（CH₃COOH）＝ 2：1
5：5（体積比）

ガラスの場合：B-HF（市販品）

3.4 行程の導出過程

レジスト回転数・エッチング時間

レジスト回転数の導出条件としてまずすでに得られている結果⁶⁾を参考にした。スピナーの本速を4000rpm、5000rpm、6000rpm 変えエッチングにどのような影響が及ぼすかを測定した結果を以下グラフに示す。

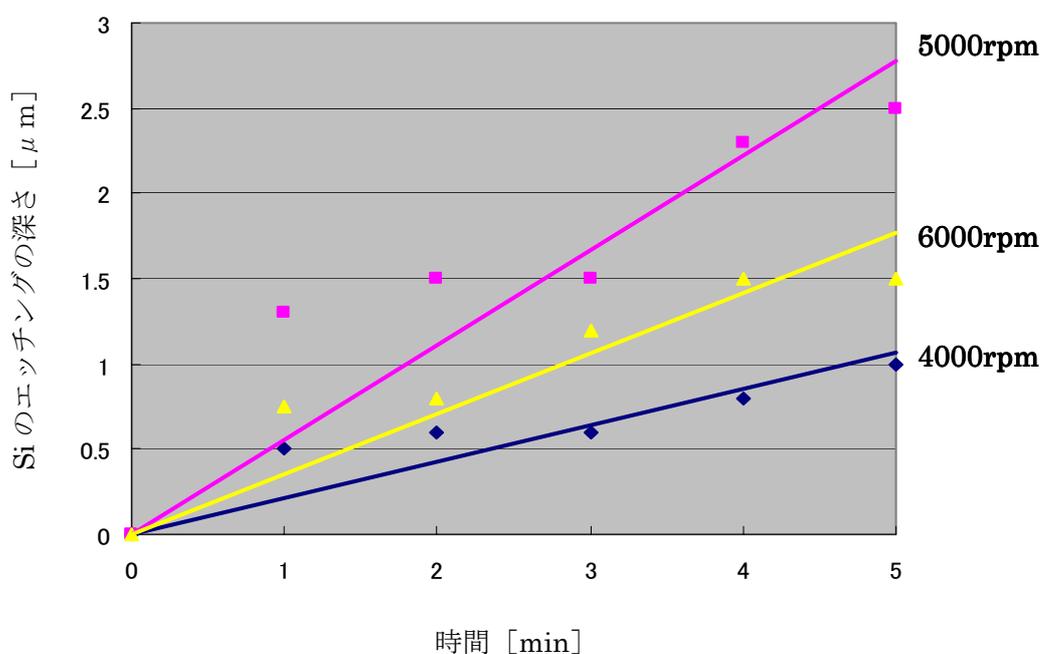


図3.3 レジストの膜厚とエッチングの関係

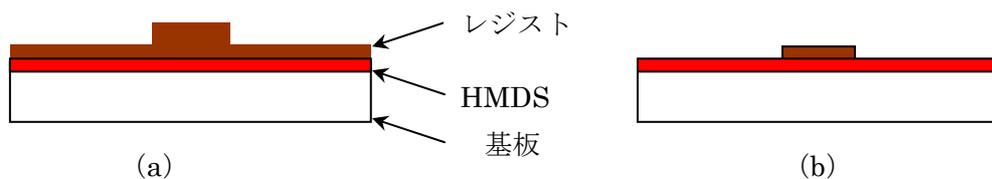


図3.4 4000rpmでのレジストの状態

図 3. 3 は、レジスト塗布時にスピナーの回転数を変えそれぞれのサンプルをエッチングして削れた深さを測定したものである。4000 rpm を見るとエッチングされた深さは浅い。これは、4000 rpm ではレジストの膜厚が厚く、図 3. 4 (a) に示すように現像をしてもエッチングすべき部分にもレジストが残ってしまうためである。また図 3. 4 (b) より現像が過剰になると周りのレジストが取り除かれても残るべきレジストが薄くなりエッチング中に剥がされてしまう。6000 rpm ではレジストの膜厚が薄くなっており現像をしても導波路の部分のレジストがエッチングでは耐えられないためと考えられる。以上より 5000 rpm がエッチングに対して最適であることを見出した。5分以降のエッチングの深さは、どの回転数も一定となった。すなわち 5000 rpm 5分が最適ではないかと考えられる。

3. 5 工程のまとめ

以上の結果から、本研究で見出した Si とガラスの製作工程の各条件をまとめると図 3. 5 になる。

Si の場合		ガラスの場合	
基板洗浄 (超音波洗浄)		基板洗浄 (超音波洗浄)	
アセトン	5 min	アセトン	5 min
↓		↓	
メタノール	5 min	純水	5 min
↓		↓	
純水	5 min	窒素ブロー	
↓		↓	
ベーク 90°C	5 min	HMDS 塗布	
↓		5 sec 900 rpm	
自然酸化膜除去 (かくはん)		20 sec 4000 rpm	
B-HF	2 min	↓	
↓		フォトレジスト塗布	
純水リンス		5 sec 900 rpm	
↓		20 sec 4000 rpm	
HF : H ₂ O = 1 : 1	3 min	↓	
↓		プリベーク (オープン)	
純水リンス		120°C 10 min	
↓		↓	

HMDS 塗布 (コーター)				露光	4.5 sec
初速	300 rpm	3 sec		↓	
本速	5000 rpm	20 sec		現像 (静止)	60 sec
終速	4000 rpm	0.2 sec		↓	
	↓			純水リンス	30 sec
フォトレジスト塗布 (コーター)				↓	
初速	300 rpm	3 sec		窒素ブロー	
本速	5000 rpm	20 sec		↓	
終速	4000 rpm	0.2 sec		ポストバーク (ホットプレート)	
	↓			160°C	2 h
プリバーク				↓	
90°C		7 min		エッチング	
	↓			B-HF	5 min
露光		3 sec			
	↓				
現像		約1 min			
	↓				
ポストバーク					
ホットプレート	160°C	2 h			
	↓				
エッチング					
HF : HNO ₃ : CH ₃ COOH = 2 : 15 : 5					
		5 min			

図 3. 5 製作工程表

3. 6 実験での注意事項

以上述べた各工程で気付いた点を注意事項として記しておく。

- (1) レジストをきれいに試料面全体に広げるためにサンプルの約90%がレジストで覆われる程度滴下した後スピナーを回転する。HMDSの塗布はごく少量でよい。
- (2) Siの場合
 - ・基板洗浄後や酸化膜除去後にサンプル上の液体を取り除くとき、窒素ブローだとほこり等のゴミが付着するおそれがあるのでフィルタの

使用などを検討する必要がある。

- オープンで温めたときは、水分が残っているとレジストに斑ができてりするので完全に除去する必要がある。
- 酸化膜除去後の純水リンスは、レジストとフッ酸系は相性が悪いので十分に純水で洗い確実にフッ酸を取り除く必要がある。

(3) ガラスの場合

- 160℃でベークした場合は、レジストが付着して剥がれない場合があるのでアセトンまたは剥離液を使って剥がす必要がある。

4 結果と評価

本章では、光導波路製作工程で検討した問題点とその解決法を述べ、さらに実現した光導波路の性能評価について行った実験の結果を述べる。

4. 1 実験結果

(a) レジスト塗布

当初レジストをスピナーで塗布したとき多くの場合、斑点ができた。この斑点は、ガラス、Si 共同様に見られた。下図は、その斑点を顕微鏡で拡大した写真である。

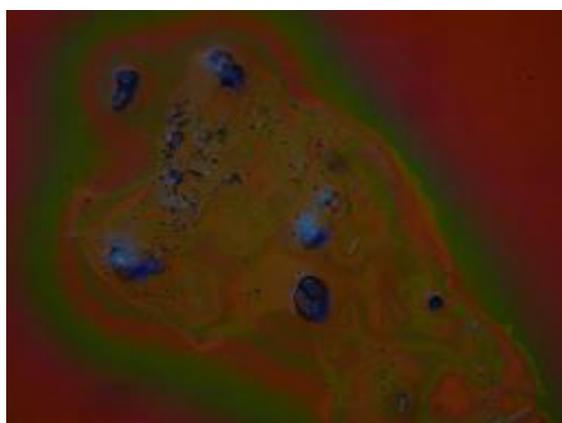


図4. 1 レジストの斑点の拡大写真

上の写真から判別すると、レジストの固まりかゴミが付着しているように見られる。そのためレジストをろ過することとし、下図のステンレスシリンジホルダーを使用した。これは、注射器の中にレジストを入れ、ろ過するものである。ステンレスシリンジホルダーを使用することにより若干斑点がなくなり以前より改善することができた。



図4. 2 ステンレスシリンジホルダー

(b) ガラスのエッチング

以上のようにしてレジストを塗布しパターニングしたガラス試料のエッチングレートを測定した。下図は、B-HF 溶液でガラスを浸食させた場合のエッチングレートを示す。

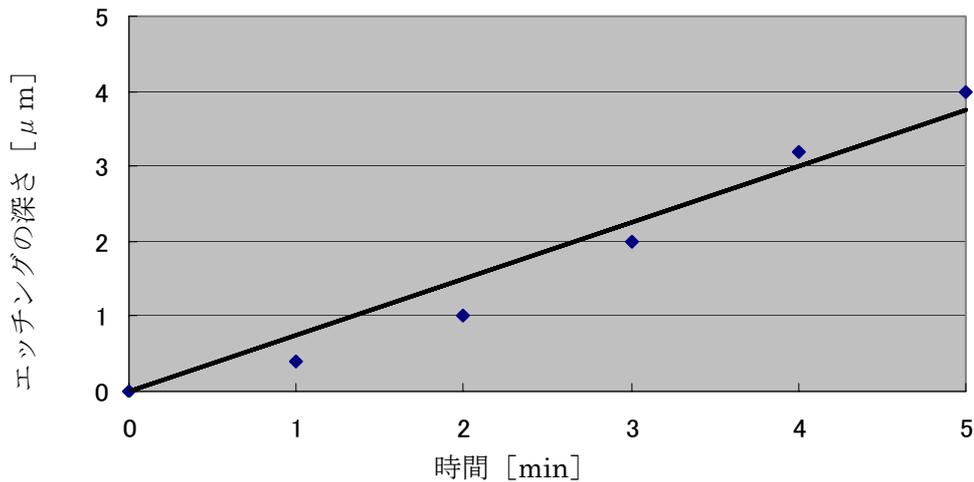


図4. 3 ガラスのエッチングレート (幅 $50 \mu\text{m}$)

図4. 3は、ガラスで5分間、時間変えサンプルが削れた深さを示したグラフである。

レジストの膜厚が薄い場合は、B-HF 溶液に対する耐性が弱く、早ければ5分でレジストが剥がれてしまう。また、ガラスの表面が白濁してしまうという現象も見られた。導波路の製作の成功は、いかに長くレジストとサンプルの密着性を良くするかに依存する。また導波路の幅が狭くなるほど、エッチングされる深さは浅くなる。これは、レジスト幅が狭くなるほど、エッチング中にレジストがはがれやすくなるためと考えられる。

実際に作製した試料では、導波路幅 $100 \mu\text{m}$ 、高さ $4 \mu\text{m}$ 、及び幅 $10 \mu\text{m}$ 、高さ $0.4 \mu\text{m}$ のメサ形光導波路を作製できることを確認した。これ以上の高さは可能だが、顕微鏡で見ると導波路の側面が荒くなり白濁してしまう現象が見られた。

(c) Si のエッチング

次に同様にして Si のエッチングレートを測定した。下図は、エッチング溶液で Si を浸食させた場合のエッチングレートを示す。

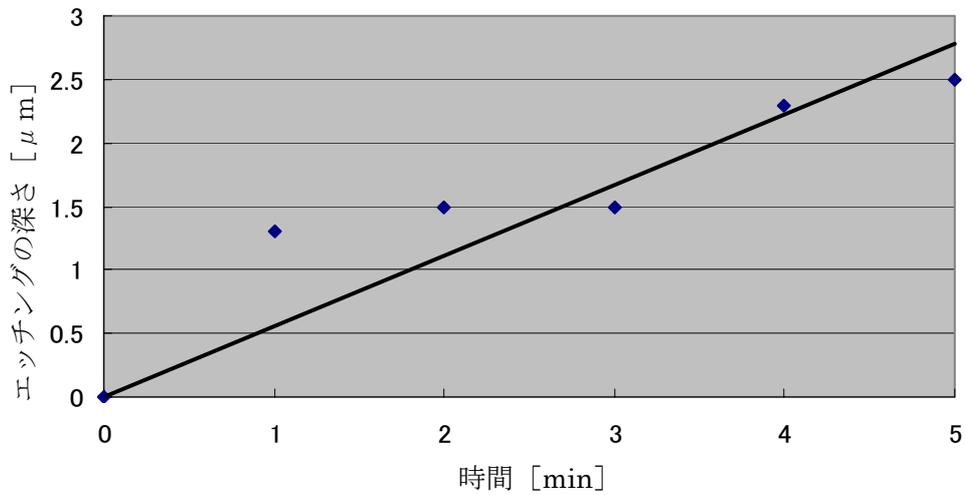


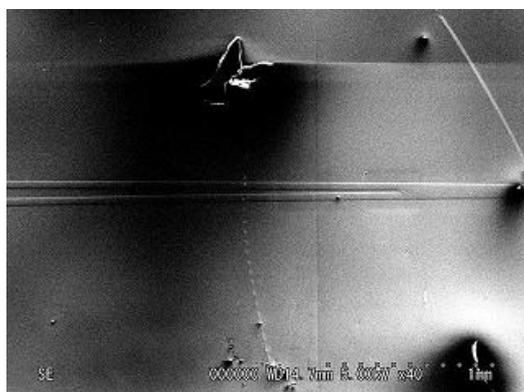
図4. 4 Siのエッチングレート (幅 $50\mu\text{m}$)

図4. 4は、Siで1分～5分ごとに時間変えサンプルが削れた深さを示したグラフである。5分以降は、レジストがなくなってしまう導波路とサンプルが同時に削れるため最大の厚さは、 $2.5\mu\text{m}$ であった。ガラスと同様にエッチング溶液に対するレジストの耐性が弱く、目視した場合レジストが約2分ではがれてしまうことが分かった。Siの場合は、導波路の幅が細いものは、所定のパターンにエッチングされず実現できた最低の幅は $50\mu\text{m}$ で高さ $2.5\mu\text{m}$ であった。

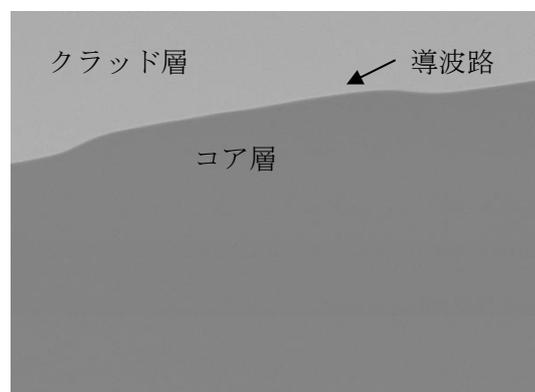
4. 2 性能評価

作製した光導波路をSEMで観察しさらに光を入射して評価した。

(a) SEMによる導波路評価



(a)



(b)

図4. 5 導波路SEM写真

図4.5は、Siの導波路の幅 $50\mu\text{m}$ の表面をSEMで観察したものである。

(a)の写真は導波路の分岐部分のSEM像であり、この導波路が合流していることが確認できた。しかし、(b)のリッジ導波路の端面を見るとエッチングされたリッジ部は丸みをおびており、短形になっていないことが分かる。光導波路としては望ましい形ではないので今後の検討が必要である。

(b) ガラスへの光の入射実験

次に図4.6のような実験系を構成し 632.8nm のHe-Neレーザを通したファイバと光導波路を接続し、光入射の実験をした。導波路の端面とファイバとを直接接続し導波路に光を入射した後、出口の端面にファイバを接続し光パワーメーターに接続する。導波路の端面は非常に状態が悪い(荒い)ため、スクライバーまたはガラスカッターで切断し平坦な端面とファイバと接続した。

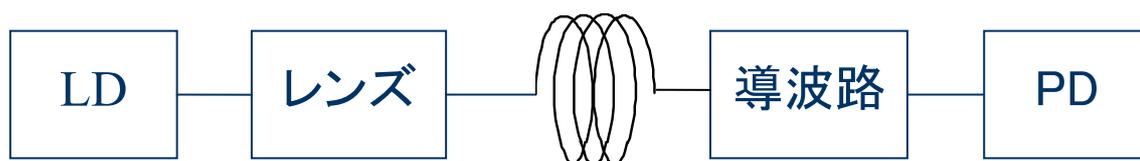


図4.6 性能評価回路概要図

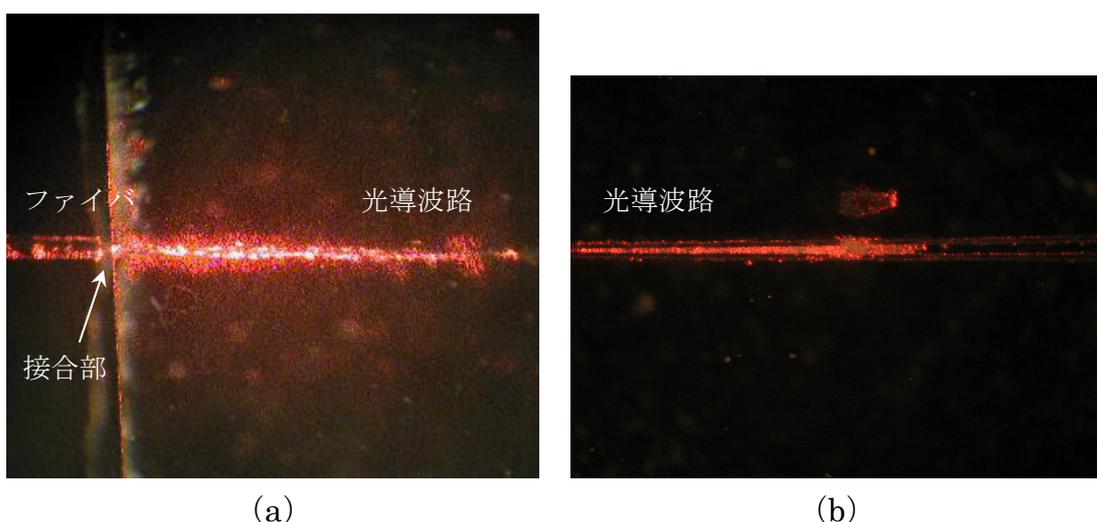


図4.7 光導波路入射実験

図4.7(a)は、LDからファイバを通して幅 $50\mu\text{m}$ の導波路に光を入射した時の、光導波路上部から観察した写真である。ガラスの端面

に乱反射して導波路の外へ光が漏れているのが分かる。

図4.7 (b)は、導波路の分岐後 ($25\ \mu\text{m} \times 2$) の写真である。光が分岐せずに直進しているのが分かる。これは、導波路の分岐点がエッチングで下図のようになり直進してしまうのではないかと考えられる。また、導波路出口付近では分岐点で直進してきた光と分派された光で乱反射が起きており、光がファイバへ入射されず伝送損失の測定までには至らなかった。

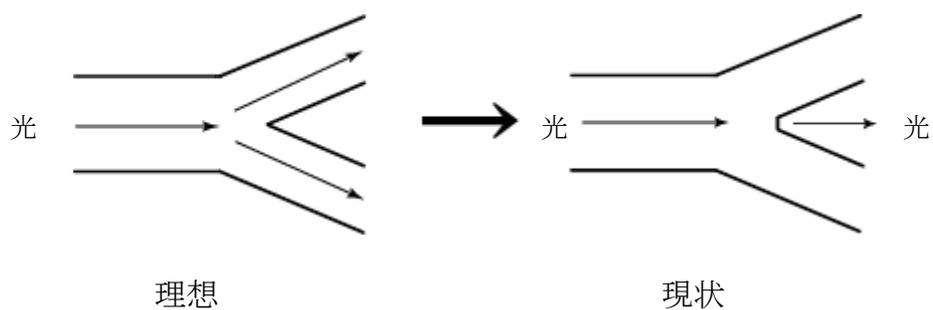


図4.8 導波路イメージ図

5 おわりに

材料に Si、ガラス、製作方法にウェットエッチング法を用いて、光導波路の製作実験を行い、ウェットエッチングによる製作方法や製作工程における注意事項を挙げた。そして製作工程の最適条件を明らかにした。しかし、エッチングでは早い時間でレジストが剥がれてしまうなどの課題が残っており、レジスト液を変えたりエッチャントの変更によりレジストの耐性を高めることが可能になり低損失の光導波路が実現できる。ガラス、Si それぞれの光導波路の形状観察を顕微鏡、SEM によって評価ができた。ガラス光導波路では光を入射したが、出力側の端面を凹凸が多く出力光が確認できなかった。この凹凸がなくなると出力光も確認できるであろう。

この光導波路の製作手法は、短時間で低損失の導波路ができる。この導波路を実現することによって光カプラやグレーティング導波路への応用が望まれる。

謝辞

本研究にあたり、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電子・光システム工学科の教職員の皆様には。心から感謝いたします。また、本研究に必要な実験器具を提供してくださった八田章光助教授、野中弘二助教授に感謝いたします。

最後に同研究室の先輩にあたり、光導波路の実験について助言してくださった前田康彦氏、大西健一氏、日頃から共に研究に励む中、様々な助言を頂いた川内悠輔氏、木本薫宏氏、坂元誠氏、小原健治氏、松久治可氏に心より感謝致します。

参考文献

- 1) 岡本 勝就 著 光導波路の基礎 コロナ社
- 2) 日本ペイント株式会社 光導波路新材料の開発に成功
<http://www.nipponpaint.co.jp/news/2002/wn0416.html>
- 3) 末松安晴 伊賀健一 共著 光ファイバ通信入門 オーム社
- 4) 丸野 透 著 ポリマー光導波路とスイッチ 信学技報 Vol.102 No.97
- 5) A. Neyer, T. Knoche, and L.Muller, Electron. Letters, Vol 29,
399-401(1993)
- 6) 西岡 伸博 フォトリソグラフィ工程における条件の最適化 高知工科大学 卒業論文