

Si 微細導波路作成における ECR エッチングと ICP エッチングの性能評価

羽柴秀臣¹, 吉本和矢²

Hideomi Hashiba¹, *Kazuya Yoshimoto²

Abstract: 本研究では, Si 微細導波路の簡便な作成手法を確立する為に, 一般的な手法である Electron Cyclotron Resonance(ECR), Inductive Coupled Plasma(ICP)エッチングを用いて作成し, その性能評価を行った. 作成した導波路は, ECR エッチングにてアスペクト比が1.42, 側面ラフネスは約±100 nm. Bosch 法による ICP エッチングにてアスペクト比が15, 側面ラフネスは約±20 nm であり ECR エッチングより優れた結果が得られた. 今後はさらにウェットエッチングなどを行うことにより側面ラフネス±10 nm 以下^[1]の低損失な Si 微細導波路の作成に期待がもてる.

1. 研究背景

Si 微細導波路は, 光路となるシリコンコア (Si Core) とそれを囲む酸化シリコンのクラッド層 (SiO₂ Clad) からなる. 導波路はシングルモードでの導波に設計され Si と SiO₂ の高い屈折率差から, 偏光を保持し無損失であるときの導波路の最小半径は数 μm^[2]と高い. 近年では, これら導波路が量子光学素子の基本素子として, 盛んに研究されている.^{[1],[3],[4],[5]}

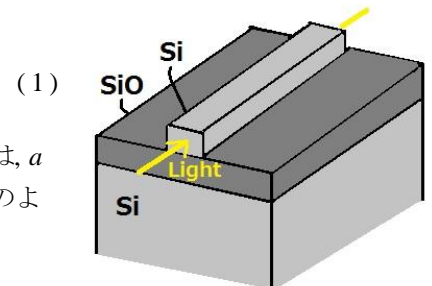
2. Si 微細導波路の光伝搬原理

Figure 1に Si 微細導波路の概略図を示す. 光路となる Si Core とそれを囲む SiO₂ Clad からなる. 導波路はシングルモードでの導波に設計することにより高い閉じ込め効果を得る. このシングルモードでの導波条件は規格化伝搬定数 b と規格化周波数 V から定義される.^[6] この規格化伝搬定数 b は, Core の屈折率を n_1 , Clad の屈折率を n_2 ($< n_1$), 光の伝搬角を θ , 真空中での光の波長を λ , $k_0 = 2\pi/\lambda$ とすると伝搬定数 $\beta = k_0 n_1 \cos\theta$ を用いて

$$b = \frac{\left(\beta/k_0\right)^2 - n_2^2}{n_1^2 - n_2^2} = \frac{n_1^2 \cos^2 \theta - n_2^2}{n_1^2 - n_2^2} = 1 - \frac{\sin^2 \theta}{2\Delta} \tag{1}$$

と表される. ここで比屈折率 $\Delta = (n_1^2 - n_2^2)/2n_1^2$ と定義する. 次に規格化周波数 V は, a を Core 半径, d_{core} を Core 径, 開口数 $NA_{core} = \sin\theta = n_1(2\Delta)^{1/2} = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2}$ とすると次のように表される.

$$V = k_0 a \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = k_0 n_1 d_{core} \sqrt{\frac{\Delta}{2}} = \frac{\pi d_{core} NA_{core}}{\lambda} \tag{2}$$



(2) Figure 1. Si 微細導波路の概略図

ここで, (1), (2)式より V を b で表すと

$$V = \frac{1}{\sqrt{1-b}} \left(\tan^{-1} \sqrt{\frac{b}{1-b}} + \frac{1}{4}\pi \right) \tag{3}$$

となる. これよりシングルモード条件は $V < 2.405$ である. したがって, Si の屈折率 $n_1 = 3.42$, SiO₂ の屈折率 $n_2 = 1.45$, λ を通信用赤外線領域に使用されている 1550 nm とし, (2)式よりシングルモード条件を満たす Core 径を計算し, 320 nm × 320 nm のデザインに決定した. この設計で Si 微細導波路の作成を行った.

3. 作成方法

Si 微細導波路の作成は以下のように行う. Silicon-on-Insulator (SOI) 基盤上に ZEP520A:ZEP-A = 1:2 をスピコートを用いて 6000 rpm で塗布, 170 °C の電気炉で 60 分間ベイクする. 電子線描画装置に東京テクノロジー社製描画制御装置を付加して加速電圧 30 kV, 電流値 100 pA, ドーズ量 150 μC/cm² の設定で

Table 1. エッチング設定

ECR	サンプル No.	真空度 (mPa)	パワー(W)	加速電圧 (V)	
	1	0.3	90	400	
	2	0.1	50	400	
ICP	サンプル No.	SF ₆ 流量 (sccm)	C ₄ F ₈ 流量 (sccm)	HFパワー (W)	RFパワー (W)
	3	35	0	20	1200
	4	150	80	100	2500

1 : 日大理工・教員・量科研 2 : 日大理工・院 (前)・量子

露光する. そのサンプルを ZED-N50 を用いて現像する. ケーサイエンス社製真空薄膜作製装置(E604)を用いて, アルミニウム(Al)を 100 nm 蒸着する. Aceton を用いて ZEP520A:ZEP - A = 1:2 をリフトオフする. エッチングを Table 1 の条件で行い Si 層を 320 nm 削る. エッチャント $\text{H}_3\text{PO}_4:\text{HNO}_3:\text{CH}_3\text{COOH}:\text{H}_2\text{O}=73:3:7:17$ を用いて Al を剥離する.

4. エッチング結果

ここでは ECR, ICP エッチング装置を使用し, Table 1 の設定で行ったエッチングについて, それぞれのアスペクト比, 側面ラフネスをまとめた.

(i) ECR エッチング

サンプル No.1 の Si エッチングレートは 7.5 n/min, Al エッチングレートは 1.5 nm/min, Al と Si の選択比は 5, アスペクト比は 1.42, 側面ラフネスは約 ± 100 nm である[Figure 2]. これは Al の保護膜が角からエッチングされてしまったためアスペクト比が低くなってしまったと考えられる. サンプル No.2 では選択比を上げるためにプラズマのパワーを低くし化学的なエッチングを行った. その結果, 選択比は 2.3 と低く, アスペクト比は 1 未満となった. これは真空度を上げたため, 1 分子あたりのエネルギーが増えてしまったためと考えられる.

(ii) ICP エッチング

サンプル No.3 は等方的なエッチングであった[Figure 3 (a)]. このときアスペクト比は 7.5 であり, 回り込みが 930 nm であった. これでは微細加工に限界があるため, サンプル No.4 にて C_4F_8 ガスを用いた Bosch 法^[7] にて異方性エッチングを行った. その結果, アスペクト比は 15 であり, 側面ラフネスは ± 20 nm であった[Figure 4 (b)].

5. まとめ

我々は Si 微細導波路の研究背景と光伝搬原理, 作成行程を述べた. エッチング行程において ECR と ICP の 2 種類のエッチングを行い性能評価を行った. ECR エッチングでは最大アスペクト比が 1.42, 最小側面ラフネスが約 ± 100 nm であった. ICP エッチングでは, SF_6 ガスのみを使用したエッチング, C_4F_8 ガスを用いた Bosch 法による ICP エッチングを行った. 前者の場合は等方的なエッチングであり, アスペクト比は 7.5 であった. Bosch 法でのエッチングではアスペクト比 15, 側面ラフネス ± 20 nm の異方性エッチングであった. 以上のことから Si 微細導波路作成においては Bosch 法を用いた ICP エッチングが最適であるといえる.

6. 参考文献

- [1]山田浩治他,「シリコン細線導波路システム—基本特性と機能デバイスへの応用」,電子情報通信学会論文誌,J88-C,6,pp374,2005
- [2]H. Yamada, et. al., “Si-nanowire optical waveguide devices for optical communications”, Proc. of SPIE, Vol. 6019, 60192X-1-11, 2005
- [3]馬場俊彦他,「Si 細線導波路」,電子情報通信学会,J88-C,6,pp363,2005
- [4]K. Harada, et. al., “Generation of high-purity entangled photon pairs using silicon wire waveguide”, Opt. Express, Vol. 16, Issue 25, pp.20368, 2008
- [5]D. Gloge, et. al., “Weakly guiding fibers”, Appl. Opt., 10, pp.2252-2258, 1971
- [6]C. J. D. Craigie, et. al., “Polymer thickness effects on Bosch etch profiles”, J. Vac. Sci. Technol. B, Vol. 20, No. 6, 2002

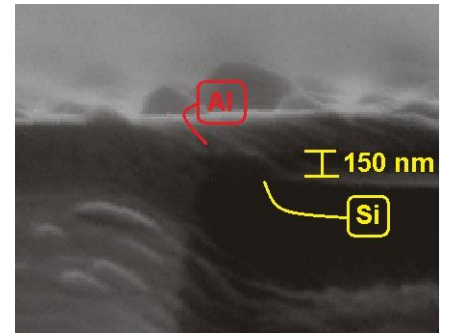


Figure 2. ECR エッチング後の断面 SEM 画像

上から Al 層 70 nm, Si 層となっている. Si 層は 150 nm 削られている.

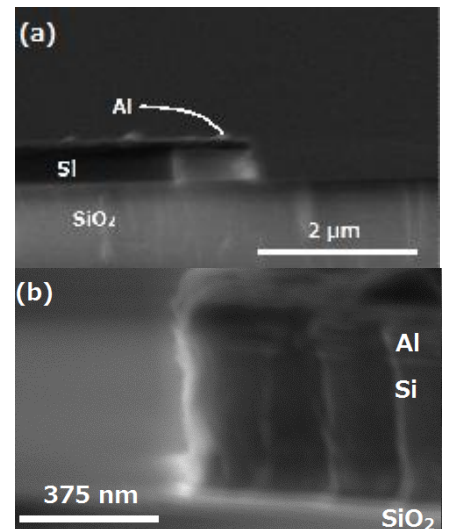


Figure 3. ICP エッチング後の断面 SEM 画像

(a)はサンプル No.3. Al 層の内側まで Si がエッチングされている. (b)はサンプル No.4. 回り込みが改善されていることがわかる.