

研究課題別評価

1 研究課題名： Si ナノ結晶を増感材とした光導波路増幅器の創製

2 研究者氏名： 森脇 和幸

3 研究のねらい：

SiO₂膜中にSiナノ結晶とErイオンをドーピングした膜を光増幅器コア膜として用い、従来のSiナノ結晶が含まれていない膜ではできなかった、大きな実用的ゲインを持つ光通信用の平面型光増幅器を実現する事を目的とする。SiO₂中にErイオンをドーピングした材料を用いて光ファイバーアンプは既に実用化されているが、この平面導波路型増幅器が作製できれば、増幅やレーザ等の能動機能を組み込んだ石英系光集積回路を、実用的なレベルで初めて実現でき、非常に大きな分野に発展すると期待される。

4 研究成果：

4-1 当初計画

当初の計画は、作製しやすい小面積(1cm 角程度)の試料で、まず最適な作製条件を得た後、実際の素子形状にできるだけ近い形状(プロトタイプ素子)で、アンプ特性が得られるように更に最適化を行うこととした。そのプロトタイプ素子作製のための要素技術をできるだけ平行して行うという計画であった。ただし、当初計画にあった埋め込み方式のプロトタイプ素子作製については、最終的には望ましい形態と思われるが、作製の容易なリッジ型・ハイメサ型に変更して検討した。他の点は概ね計画通りに進めた。以下、具体的に計画項目毎に得られた結果を述べる。

4-2 小面積(1cm角程度)で薄い膜作製と、発光強度評価

ここでは、1cm角程度の小面積で、1μm厚程度の導波路用としては薄い膜で、加工していないSiO₂/Si/Er膜を用い、導波構造でなく膜の厚み方向から出射する光で、基礎的な発光や光増幅特性の予備的な評価を行った。

まず、スパッタ成膜時のターゲット数を変えて Si と Er 濃度を変えた試料を多数作製し、PL(フォトルミネッセンス)強度の強い条件を調べた。この結果、一時期再現性不良もあったが、そのような際にも短期に修正できるような、以後の導波路形状での評価の基礎データとした。

また、励起光を照射した増幅効果の予備実験において、本来 1.55 μm 信号光波長では Si の吸収はないが、励起光照射によって Si ナノ結晶中に形成されるエキシトンが、1.5 μm 帯の信号光を吸収することが確認された。これは増幅器を構成したとき、本来増感剤として導入されていた Si ナノ結晶が損失を生じる原因となることを意味する。また Si ナノ結晶のサイズによりエキシトンの寿命が変わることから、損失も大きく変化することもわかった。膜厚方向の観測なので短い距離であり、増幅かどうかは目安ではあるが、Si ナノ結晶の平均粒径が大きいと損失となるが、平均粒径が 3nm より小さい時増幅が示唆された。このことより、PL の強い試料のアニール条件としては、以前から Si ナノ結晶作製に適した条件である 1100°C を用いているが、アンプ素子としてはこれより

低い温度が最適となることが予想された。

また、励起光を照射しない状態でのSiナノ結晶の光導波損失への影響も調べた。スラブ導波路で、Siナノ結晶の濃度により光導波損失が増加する結果を得た。それに比べErの添加による光導波損失増はあまり大きくなかった。エキシトンのない励起光非照射時でも、SiO₂中のSiナノ結晶による屈折率揺らぎがあり、散乱損失等が増えるためと考えられる。またその損失増加分がSi濃度の大きい試料では5dB/cm程度になることもわかり、これを上回る増幅が必要とわかった。

ここまでの結果をまとめると、PLを調べた結果は最初の目安としては意味があるが、その最適値が必ずしも光導波路アンプの最適値ではないということで、導波路としての評価により修正が必要である。また、これらのスラブ導波路(加工前の膜状態の導波路)での光導波損失は、8dB/cm程度で、SiやErの添加されていない導波路に比べ、2桁程度高い。これらの結果を踏まえて、以下の4-3、4-4の検討を行った。

4-3 導波路アンプ素子のプロトタイプ実現へ向けた要素検討

4-3-1 4インチ基板上の大面积・厚膜により、長尺導波路作製

また実際のデバイス作製時に近い長尺且つ厚膜の導波路で問題点が検討できるよう、4インチ基板上で、4μm厚以上のSiO₂/Si/Er膜を作製できるようにした。作製した膜について膜厚分布や発光スペクトル特性を測定した。その結果、少なくとも4インチの基板上の半分程度で、均一(発光強度分布10%以内)な導波路膜を作製することができた。この面積内で30cm長程度の導波路を作製可能であり、当面十分と考えている。ただし、4-2の検討結果により、現状の光導波損失が大きい場合、当面のデバイス実験には2cm程度の長さで、試料数を多くして評価を行った。

4-3-2 導波路加工技術の構築

SiO₂/Si/Er膜の加工について検討を行った。加工プロセスとして、フォトリソをマスクとしたRIE(Reactive Ion Etching)を用いた。単純なSiO₂膜については、6μm程度の深さを加工できていたが、SiO₂/Si/Er膜の場合エッチングレートも低下し、表面や側面の荒れも大きかった。その後RIE条件を検討し、酸素プラズマ処理が原因でSiの過剰酸化による屈折率低下等のトラブルもあったが、最終的に4μm深さのSiO₂/Si/Er膜アンプコアパターンを作製することができた。当面デバイス評価に必要な加工技術は確立し、以下の4-4の素子形状での評価を行った。

4-3-3 励起方式の検討

励起光の光源選択や波長選択、励起方式(上面から全面照射や、導波路へのカップリング)といった検討が考えられたが、ここでは当面PLで用いていたArレーザの488nm波長の励起光を導波路上面から照射した。

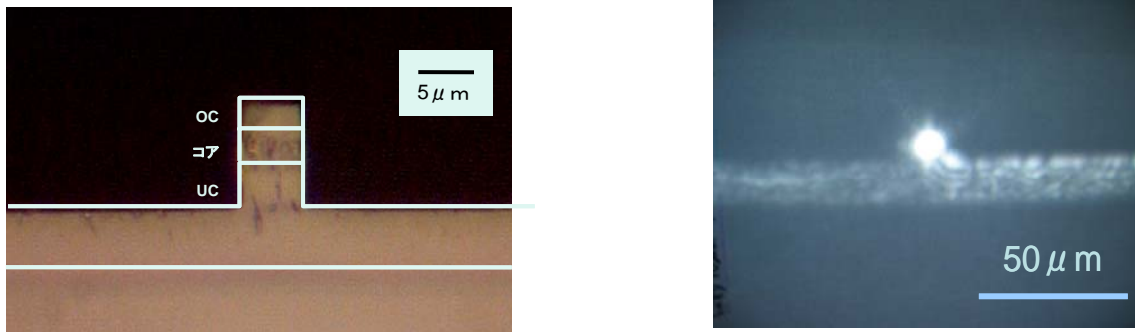
4-4 プロトタイプ素子作製により、実用性を評価(光導波損失とゲインの評価)

ここではできるだけ最終素子形態に近いデバイス形状で特性評価をし、その結果を作製条件へフィードバックするサイクルを確立し、アンプ素子としての正確な評価と特性向上を行うことを目指した。まず、リッジ型またはハイメサ型の導波路により評価を行った。

加工後の導波路を切断して長さを変え、その都度出射光の強度を測定するカットバック法により、ハイメサ型導波路の導波損失が6.7dB/cmと測定できた。その際の光導波路両端の結合損失の合計は27dBと高いが、これは構造の最適化がまだなされていないことによる。4-2でスラブ膜

での予備的な損失測定結果が8dB/cmであったが、それに比べて正確に損失が評価できて、少し低い損失値が得られた。実際の導波路断面の顕微鏡写真と、光導波させて出射端面から赤外カメラで光の閉じ込めを観測した結果を図1に示す。

ここまでの結果を踏まえ、アンプ素子特性と膜作製条件との対応を詳細に調べた。アンプコア



(a)導波路断面の光学顕微鏡写真

(b)導波路出射部断面の赤外カメラ像

図1 ハイメサ型導波路の断面顕微鏡写真と1.55 μm 信号光の出射光写真.

膜材料であるSiO₂/Si/Er膜を作製する条件は、主にSi添加量、Er添加量と、成膜後のアニール温度である。ここで、これら作製条件を網羅的に変えて、励起光非照射時と照射時の光導波損失を測定した。主にスラブ導波路で測定したが、加工後のリッジやハイメサ型導波路でも測定して、同様な結果を得ている。SiとErの濃度については、4-2の結果を踏まえ、比較的発光強度の強い濃度範囲の中で、損失を抑えるためSi濃度の低い条件を重点化した。

まずアニール温度を固定して光導波損失を測定したが、図2と3は、それぞれ励起光を照射しない場合と、照射した場合の光導波路の損失(導波路入射光強度と出射光強度比を dB 表示)を示している。どちらの図も、SiとEr濃度(スパッタ成膜時のターゲット個数)を横軸にとっている。アニール温度については、エキシトンの吸収を考慮して、PL強度の最適な1100°Cより低めで、900°Cで行った。また、縦軸の損失については、図2は導波路の挿入損失を示し、図3は励起光照射時の損失から励起光非照射時の損失を引いた損失差となっている。図2より、励起光効果のない時の、過剰SiやErによる導波損失の増加が評価でき、Si、Er共に濃度が増えたと導波損失が増える傾向がわかる。従って、励起光照射時に、この損失を上回るゲインを得られないとアンプ特性は得られない。図3では励起光としては波長488nm、パワー200mWのArレーザを照射し、図2と同じ試料を用いて導波損失・ゲインを調べた結果を示す。図3の縦軸は損失時に正で、もしゲインが得られれば負になるが、残念ながら全て損失となった。図2と比べると、SiとErの量がある一定以上で励起光の効果が見られる。すなわち、励起時のゲインにより、損失を少し補って損失が減っていることが推察される。しかし、損失を上回るゲインまでは至らず、総合的には励起光を照射すると損失が全て増える結果となっている。

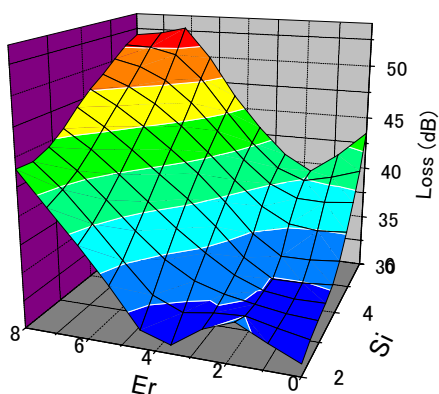


図2 励起光非照射時の光導波路損失. Si と Er 濃度を, 作製時のスパッタターゲット数で示している. スラブ膜で, それぞれの損失を測定した.

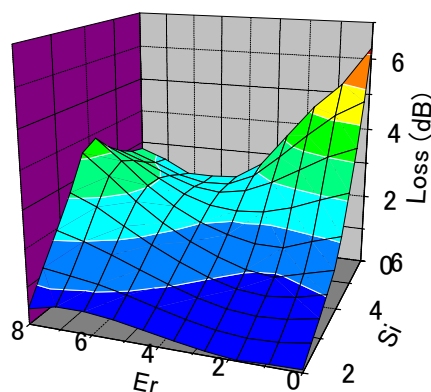


図3 励起光照射時の光導波路損失. 試料は図1と同じものを用い, スラブ膜で損失を測定した. 縦軸損失は, 励起光非照射時の損失を引いた差を示す.

図2, 3の試料のアニール温度 900°C は, 通常用いていた 1100°Cより少し下げ, 導波路損失を下げる事を意識した設定であった. しかしそれでも増幅に至っていないので, 更に低い温度も含めてアニール温度の効果を調べてみた. その結果が図4である. 各組成で, アニール温度を変えて損失を測定したが, 損失が最小になる温度はあって, 最適値を示唆しているが, 総合的にゲインを得ることには至っていない. この最適と思われるアニール温度でも, 増幅には至っていないので, 成膜の条件のかなり(場合により実用的でないくらい)狭い範囲でないと増幅に至らない可能性がある.

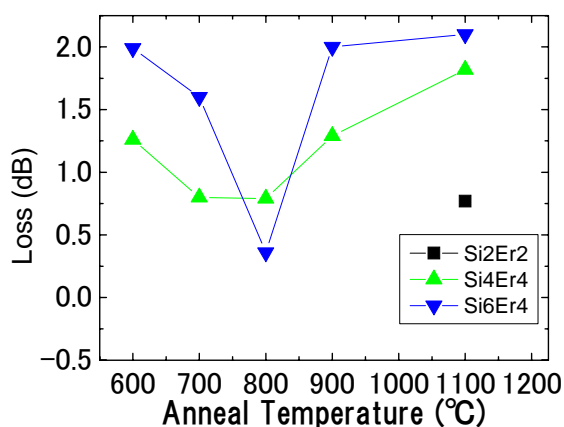


図4 Si, Er 濃度を変えた試料について, アニール温度を変えたときの光導波路損失測定結果. 縦軸の損失は励起光非照射時の損失との差.

5 自己評価:

研究成果の位置づけとして, 残念ながら当初目指した増幅を得ることができていない. 得られた結果は, 物性的に優れた特徴を示していたこの材料を, 光導波路アンプとして十分機能させるためには, 新たな特別な工夫をしない限り困難と示唆しているように思える. 基礎特性を得て, 基盤技術も最低限は構築したと思うが, 目指した目標に届かなかった点は反省材料となる. 仮に実用的な素子応用は無理であったとしても, もう一步の特性向上は可能だったかもしれない.

6 研究総括の見解:

当初の目標であったリッジ、スラブ構造導波路での光増幅が確認できなかったことは残念である。膜の作製や評価を行った結果として得られた成果を将来活かせるように整理するとともに、網羅的な実験に加えて理論的な裏づけを行うことを期待する。シミュレーションなどを行って、目標を達成できなかった要因を定量的に明らかにし、その改善策を提示してほしい。粒子と母胎材料との屈折率差を無くすなどの構造的な工夫ができるはずである。基礎的な研究なのか応用開発なのか、目標があいまいであり、論理的に研究・開発が進められなかったと判断される。

7 主な論文等:

論文 (1 件準備中)

学会・研究会報告 (2 件)