

	さいとう たかお
氏 名	齊藤 隆雄
授 与 学 位	博士 (工学)
学位授与年月日	平成 13 年 3 月 26 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 4 条第 1 項
研究科、専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 材料物性学専攻
学位論文題目	GaP-AlGaP 導波路型半導体ラマン増幅器に関する研究
指 導 教 官	東北大学教授 須藤 建
論文審査委員	主査 東北大学教授 須藤 建 東北大学教授 一色 実 東北大学教授 八田 有尹

論 文 内 容 要 旨

光通信の更なる需要の増加に伴い、通信容量増加の為に波長多重化が進められている。波長多重通信における重要な素子の一つとして、波長選択素子があり、本研究では、この波長選択増幅器として期待される、GaP-AlGaP 導波路型半導体ラマン増幅器の試作、ならびに諸特性の評価を行った。

試料作製においては、特に、結晶成長、再結晶成長、プラズマ微細加工の最適条件を探ることを行った。また作製された GaP 結晶導波路において、GaP 導波路の導波路内ラマン分光測定を初めて行うとともに、GaP 結晶の増幅特性を精密に測定し、光通信利用への可能性を探った。

以下は本研究で得られた結果である。

- ・ GaP 成長層の諸特性

1. GaP 結晶成長の最適化

蒸気圧制御温度差法・液相成長法により GaP 結晶の最適成長温度として、800~880℃とした。これは、イオン密度と移動度、表面モルフォロジーの総合的判断からである。イオン密度は平均して、 10^{15}cm^{-3} オーダを、移動度は $200\text{cm}^2/\text{Vs}$ 程度を得る結晶作製が可能であることを明らかにした。

2. GaP 結晶表面処理の最適化

GaP/GaP 層界面を作製し、その結晶表面処理の最適条件として、最終エッチング液は、塩酸系エッチング液、リン蒸気圧の印加時間・印加圧力は無し、本装置においては成長温度差 18℃が最適条件である結論を得た。

塩酸系エッチング液を用いて、界面ピークイオン密度 $3.8 \times 10^{16}\text{cm}^{-3}$ 、温度差 3℃において $4 \times 10^{16}\text{cm}^{-3}$ を得た。温度差実験においては、温度差低下とともにメルトバック現象が増大するため、素子作製の際の最適温度差は 18℃とした。またリン蒸気圧印加とともに、GaP 結晶表面へのシリコン元素の高濃度分布が確認された。このシリコン元素の起源は、成長系ガラス管 SiO_2 からの、 SiO ガスによると考えられ、結晶表面・メルト内部への吸着・拡散を抑制する必要があることを明らかにした。

3. GaP 結晶の導波路作製

反応性イオンエッチング装置を用いた GaP 結晶導波路作製工程において、プラズマ用マスクに SiO_2 マスクを導入し、SRI-2 装置において、cw モード放電においては、入力パワー：100W、塩素ガス：0.5sccm、アルゴンガス：0.9sccm、エッチング時間：3~4min の条件を、パルスモード放電においては、入力パワー：250W、塩素ガス 2.0sccm、アルゴンガス：0.5sccm、エッチング時間：4.0min、パルス周期：5.0KHz (duty=0.5)

の条件で、導波路作製が可能である条件を導出した。

SRI-1 装置を用いた、反応性イオンエッチング工程において、ソースガス圧力の増加とともに、表面近傍でのイオン密度減少度が減り、SIMS 測定からの塩素・リン元素の侵入が確認、その侵入量が、イオン密度変化と対応した。またスペーサの挿入により、塩素元素の侵入量低減、異方性を得ることに成功した。

SRI-2 装置を用いた、反応性イオンエッチング工程において、入力パワーに依存したイオン密度の減少を確認した。アルゴンガスのみを用いたエッチングにおいて、大きなイオン密度の減少が確認された。また、cw モード励起とパルスモード励起において、イオン密度の減少度の比較から、パルス励起モードの優位性を明らかにした。すなわち、本装置においては、低入力パワーでアルゴンガス流量を減らすことが誘起欠陥を低減させる指針であることを明らかにした。

・ GaP 導波路内のラマン散乱測定

1. ラマン散乱の導波路効果

ミクロンサイズ導波路内のラマン散乱測定を行い、ラマン散乱の導波路効果を初めて発見、その効果を明らかにした。

GaP[100]結晶方位において、ラマン選択則から期待される散乱モードは、LO フォノン散乱のみである。導波路内の後方散乱モードによる結果は、ラマン選択則から期待される LO フォノン散乱しか確認されなかったのに対し、前方散乱モードにおいては TO フォノン散乱が主である散乱が確認された。解析の結果、導波路のサイズ効果によるフォノンモーメントの各方位におけるベクトル成分変化が原因であることを明らかにした。この現象は他の[110]、[11-2]結晶方位においても同様に確認した。

・ 半導体ラマン増幅器の増幅特性

1. 増幅特性

cw 励起増幅において、ラマン増幅帯域 23.5GHz (図 1)、低波長域における非線形吸収、励起光パワーに依存した増幅率増加を確認した。

ラマン増幅帯域 23.5GHz は、初めて増幅作用により導出された値であり、他の材料と比較しても非常に狭帯域であることが明らかになった。さらに、直接増幅率を測定することにより、GaP 結晶におけるラマン増幅率 ($12.6 \times 10^{-8} \text{ Wcm}^{-1}$) を初めて得た。また、低波長域における非線形吸収を測定し、波長依存性の測定により 900nm より長波長域で吸収が確認されなくなった。この非線形吸収は、特に導波路端面の不完全性、すなわち深い準位が原因であると考えられる。また励起光に依存した増幅作用を確認し、増幅率の増加のために、導波路への励起光入射効率の増大、導波路内光損失の低減、などの指針を得た。

2. 励起モード依存性

半導体ラマン増幅器を、後方・前方散乱増幅モードで増幅実験した際、増幅は後方散乱増幅のみで起きることが明らかになった。

後方散乱増幅のみで増幅が起きる結果は、先の導波路内ラマン散乱実験を行い、その原因が明らかとなった。すなわち、導波路がミクロンサイズに微細化したことが原因である。導波路内のラマン散乱測定から、[110]、[11-2]結晶方位の前方散乱増幅においては、高強度の LO フォノン散乱が確認された。すなわち、これらの結晶方位を用いた前方散乱増幅への可能性を示唆する結果を得た。

3. 高増幅率化

導波路長 6.0mm、導波路断面積 $2.15 \mu\text{m}^2$ の導波路において、増幅率 2.74dB、単位長さ当たりの増幅率 0.46dB/mm を得た。

導波路長 9.4mm、導波路断面積 $3.4 \mu\text{m}^2$ の導波路において、増幅率 3.54dB、単位長さ当たりの増幅率 0.38dB/mm を得た。

増幅率 0.46dB/mm はこれまで得られた増幅器の中で最大の値であり、10mm 長増幅器において 4.6dB 増幅、13mm 長増幅器で 6.0dB 増幅が可能であることを示す値であり、半導体ラマン増幅器の光通信利用への可

能性を示す結果を得た。

また、増幅率 3.54dB は、cw 励起モードとしては最大の値を得て、初めて 3dB (2 倍増幅) の壁を越えることに成功した。これは、導波路長尺化効果であり、長尺化の指針を得るとともに、先の増幅率 0.46dB/mm の特性を長導波路に応用可能であることが実証された。

4. パルス増幅

パルス励起光源を用いた増幅実験において、20dB 増幅率を得ることに成功した。(図 2) また、ファブリペロー構造における増幅実験で、ブロードバンド構造で得られた増幅率の 2 倍の増幅率を得た。

パルス励起モードにおける 20dB (100 倍増幅) 増幅は、パルスを用いた光通信において半導体ラマン増幅器が、既に使用可能であることを意味する結果である。また増幅率増加にともない、増幅半値幅も減少することから、時間ゲートの通信方式に最適であるが、同時に狭帯域な半値幅をもつ励起光源が必要であることが、実験的に確かめられた。しかし、10dB の増幅率を得るには、この問題は生じないことを明らかにした。

ファブリペロー構造にすることで、ブロードバンド構造の 2 倍の増幅率を得る成功した。しかし、フィネス値が非常に高いことから熱的不安定性要素が非常に大きい。この為、増幅率増加の可能性を示す結果ではあるが、実際に利用するのは困難であると言える。

・波長多重通信への利用

上記結果をまとめると次の結論を得る。

半導体ラマン増幅器は、増幅帯域 23.5GHz の非常に狭帯域増幅幅を有し、さらに、増幅作用によるフィルター特性を兼ね備え、パルス励起モードにおいて 20dB 増幅、cw 励起モードにおいて 3.54dB の増幅率を実現した。また、他の波長選択素子において、最大の短所である熱特性変化は現在のところ確認されず、非常に微小である。また、GaP 結晶は他の材料と比較し、非常にラマン増幅率が高く、現在緑色発光ダイオードで多く使われている手軽さなどの背景を考慮すると、半導体ラマン増幅器は、波長選択増幅素子として非常に優れた特性を持つと結論付けることができる。

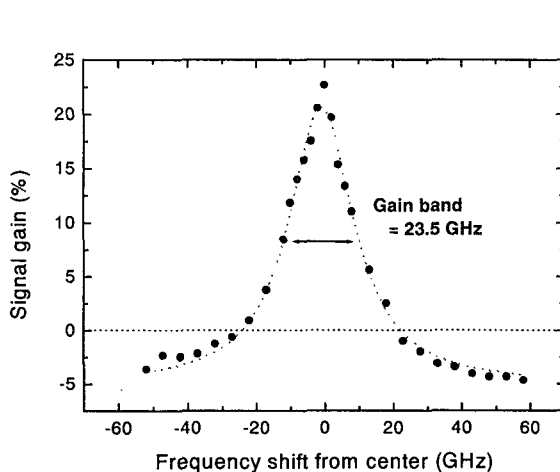


図 1 : GaP 結晶増幅帯域特性

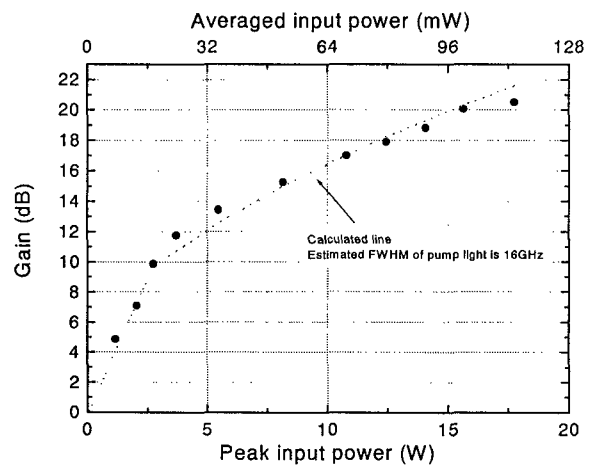


図 2 : パルス増幅による結果

審査結果の要旨

光通信の普及に伴い、単一波長通信から多重波長通信へと移行しつつあるが、非常に多くの異なる波長の光を伝送する超多重光通信においては、各受信者が1つの波長を精密に選択するためのデバイスが必要となる。著者は、半導体のラマン効果を用いた光増幅器を試作し、これが、波長選択可能なデバイスであることを明らかにした。本論文はこの研究成果をまとめたもので、全文9章よりなる。

第1章は序論であり、本研究の背景及び目的を述べている。

第2章では、GaP-AlGaP 導波路型ラマン増幅器の作製法について、主に液相エピタキシャル成長法と、反応性イオンエッチング法 (RIE) について記している。

第3章では最適な光導波路構造を論じ、また、導波路光損失の評価法として、フィネス測定法が有効であることを示した。

第4章では導波路光損失の原因を検討し、エピタキシャル再成長界面において Si 汚染が生じること、及び、塩酸によって界面 Si 濃度を低減できることを示した。

第5章では RIE を検討している。Cl₂ と Ar を用いた RIE においては、Ar によって結晶内にイオン密度の減少を引き起こす欠陥が発生するが、エッチングの異方性を高めるために、或る程度の Ar を加える必要があることを示した。

第6章は作製した半導体ラマン増幅器の特性測定法と測定結果を述べている。増幅帯域幅が 23.5GHz であることを明らかにした。この値は、超多重光通信のチャンネル幅として最適である。また、光損失の極めて小さい導波路を作製し、長さ 10mm あたり 4.6dB の光増幅度を実現した。

第7章では導波路の自然ラマン散乱を測定した結果について述べている。前方散乱においては、LO フォノンモードと TO フォノンモードが入れ替わること、この現象が導波路の寸法効果であることを初めて明らかにした。これによって、前章で後方散乱モードのみで光増幅が観測された理由が説明された。

第8章ではパルスポンプ光によるラマン増幅を行い、20dB の高増幅度を得た。パルス増幅による時間ゲート機能が光通信におけるパルスチャンネル選択に有効であることを論じている。

第9章は結論である。

以上要するに本論文は、光導波路型半導体ラマン増幅器を初めて実現し、光増幅度、帯域幅、光損失などの特性を明らかにし、超多重光通信に利用可能であることを示したものであり、光エレクトロニクス材料学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。