

卒業研究報告

題目

Ti:サファイアレーザーを利用した多重量子井戸半導
体のフォトルミネッセンス

指導教員

神戸 宏教授

報告者

塩尻 裕一

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

第 1 章 序論	1
1 . 背景	1
2 . 目的	1
3 . 論文構成	2
第 2 章 フォトルミネッセンス	3
1 . フォトルミネッセンスの原理、測定	3
2 . フォトルミネッセンス励起スペクトル PLE 測定	4
第 3 章 超高速光パルス実験装置	6
1 . 実験装置構成	6
Tsunami System の概観	6
Ti:Sa レーザー	7
Millennia	7
オートコリレーター	8
2 . 超高速光パルス発生	9
ピコ秒パルス特性	9
平均出力 1 W に固定した波長 パルス時間幅測定	12
励起光出力 パルス時間幅測定	14
3 . 本章のまとめ	16
第 4 章 量子井戸構造(QW)	17
1 . 量子井戸構造(QW)と多重量子井戸構造(MQW)	17

2 .	量子井戸構造の光学特性	17
3 .	多重量子井戸構造のフォトルミネッセンス (PL)	18
	He-Ne レーザーを利用した PL 測定	18
	波長可変レーザーを利用した PLE 測定	19
4 .	本章のまとめ	22
第 5 章 透過 吸収特性		23
1 .	多重量子井戸構造 (AlGaAs/GaAs) の透過 吸収特性	23
	試料作成 (研磨・エッチング)	23
	透過 吸収測定	24
2 .	GaAs の透過 吸収特性	25
3 .	本章のまとめ	26
第 6 章 光強度による光ファイバグレーティングカブラのフィルタ特性変化の測定		27
1 .	目的	27
2 .	理論	27
	光カー効果	27
	光ファイバグレーティングカブラ (FGC)	27
	入射光強度と FGC のフィルタ特性	28
3 .	実験方法	29
	光強度による FGC のフィルタ特性変化の測定	29
	光ファイバグレーティングカブラ (FGC)	30
4 .	実験結果	30
	光強度による FGC のフィルタ特性変化の測定	30

FGC 型全光スイッチの測定	31
FGC 型全光スイッチの測定	31
信号光波長とスイッチング特性の測定	33
5 . 考察	35
光強度による FGC のフィルタ特性変化の測定	35
FGC 型全光スイッチの測定	35
FGC 型全光スイッチの測定	35
信号光波長とスイッチング特性の測定	35
6 . まとめ	36
第 7 章 結論	37
謝辞	38
参考文献	39

第1章 序論

1. 背景

通信、計測、記録、加工、医療、エネルギー開発などの様々な分野で、光技術はかかせないものとなってきている。このような光技術の発展において重要なものは様々な光材料であり、光技術の発展とともに光材料が研究開発されている。

その光材料の一つとして、量子井戸半導体が注目されている。寸法が数ナノ程度の小さな空間に、量子力学的に電子の運動を制限する量子閉じ込め効果を持つ構造となっており、従来の半導体などでは見られない新しい性質や機能を持っている。

現在、量子井戸半導体は、半導体レーザーなどに使用されている。これは量子井戸半導体の特性を利用した低しきい値発振、高速変調能力、室温での安定動作など、様々な特性により、従来の半導体レーザーよりも高性能であることが検証されたため、実用化にいたっている。

量子井戸半導体は、半導体レーザーへの応用の他に、光非線形特性を利用したデバイスへの応用など、光技術のこれからの発展に重要な材料であると考えられている。この量子井戸半導体の非線形特性を解明すること、さらに、量子井戸半導体を拡張した、量子細線、量子箱などへの応用も今後の課題となっている。

一方、可変波長範囲の広いTi:サファイアレーザーのモードロックにより、ピコ秒以下、フェムト秒の光パルス発振技術も進展している。このような超短光パルスを用いた光スイッチングデバイスは、今後の大容量通信技術に欠かせないものになると考えられる。

2. 目的

本研究では、AlGaAs/GaAs 多重量子井戸半導体 (MQW) の非線形光学特性の解明を目指し、MQW の光吸収スペクトル及び Ti:サファイアレーザーを励起光源としてフォトルミネッセンスの励起波長スペクトル (PLE) などを測定した。これにより基礎的光学特性を明らかにし、光スイッチ等の量子閉じ込め効果を利用した非線形光学効果についての特性へ結びつけ、可能性と応用方法を明らかにしたい。

モードロック Ti:サファイアレーザーによるピコ秒光パルス発生についても基礎特性を明らかにしたが、時間領域での MQW 特性測定については今後に残された課題である。

3 . 論文構成

本論文は、第2章にフォトルミネッセンスの原理・PLE測定方法、第3章でフォトルミネッセンス測定に使用する波長可変光パルス発生装置、第4章に測定試料の多重量子井戸構造 (AlGaAs/GaAs) の説明をしたのち、実際行ったフォトルミネッセンス測定の結果を述べる。そして第5章に透過吸収特性を調べ、第6章には光非線形を利用した光デバイスとして光ファイバグレーティングカプラを用いたスイッチ特性の実験 (茨城大学と共同) について述べることにする。

第2章 フォトルミネッセンス

本研究は量子閉じ込め効果を示す量子井戸構造をフォトルミネッセンス(PL)特性を用いて検討するものである。本章ではフォトルミネッセンス(PL)および、フォトルミネッセンス励起スペクトル(PLE)の違い、そして実際の実験方法について述べる。

1. フォトルミネッセンスの原理、測定

ルミネッセンスとは物質にあるエネルギーを与えて励起した状態から、発光という形でエネルギーを放出することを言う。そして励起するエネルギーが光の場合、それをフォトルミネッセンスという。

半導体結晶におけるフォトルミネッセンスは、バンドギャップエネルギーより大きい光子エネルギーの光を照射することで励起された電子・正孔が、再結合するときに光を放出する。その放出する光はバンドギャップエネルギー近傍のエネルギーで、これを測定することで半導体の様々な情報を知ることができる。

フォトルミネッセンス(PL)スペクトル測定により、バンドギャップの大きさとともに、結晶中に存在する不純物や欠陥を検出することができる。

結晶の励起光を照射する場所を変えることにより、各場所におけるルミネッセンス発光強度分布を測定することで局所的な変化や発光線の起源が解明できる。これをマッピング測定と言う。

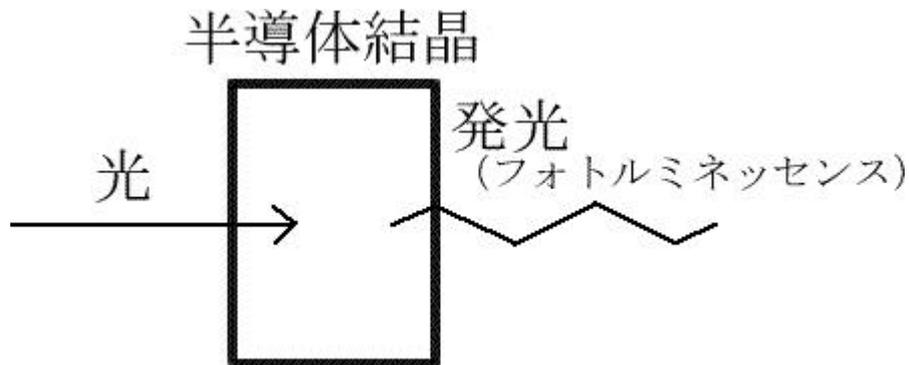


図 2-1 フォトルミネッセンスの参考例

2. フォトルミネッセンス励起スペクトル PLE 測定

PL スペクトル測定の実用として PLE 測定法がある。

PLE 測定は、励起光波長（励起エネルギー）を変化しながら PL スペクトルを測定するものである。ある特性の PL 強度に注目し、励起エネルギーの依存性を測定することにより、励起エネルギーに対する試料の光吸収特性、すなわち、バルク結晶ではバンドギャップ付近のエネルギー構造を知ることができる。また量子井戸構造の場合、光吸収を起こすサブレベルについての情報を知ることができる。

一般に光吸収特性は分光光度計によって測定できる。その装置の概略を図に示す。

ランプ光を凹面回折格子によりそれぞれの波長に分離し、試料に照射し、その波長ごとの透過光を測定し、光吸収スペクトルを検出する。半導体の吸収係数はバンド端より高エネルギー側で通常 10^4cm^{-1} 以上あり、十分な透過光を得るために、試料を薄く必要がある。これに対して、PLE 法を用いれば発光を測定すればよいので、試料の加工は必要がない。

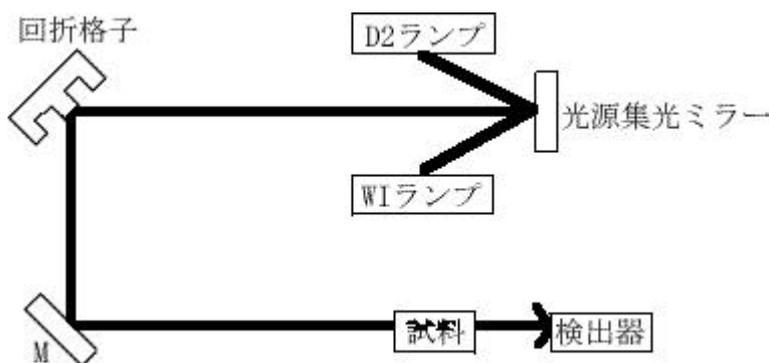


図 2-2 分光光度計構成

波長範囲	190~1100nm
分解能	2nm
光源	ランプ（重水素ランプ、ヨウ素タングステンランプ）

GaAs 基板上に成長した GaAs/AlGaAs 量子井戸構造などでは、光吸収特性を測定する場合、GaAs 基板での光吸収をなくすため、この基板を除去する必要がある。しかし PLE 測定は基板の影響を受けることなく、PL 発光から光吸収特性を知ることができるという特長がある。

実際に用いた PLE 測定方法を図に示す。

Ti:サファイアレーザー光を試料面に直接照射し、光励起させ出てくる発光を CCD 分光器によりスペクトルを観測する。

パルス光を使用する場合、第 3 章で述べるように、ハーフミラーで分けられた光でオートコリレーターに供給し、パルス時間幅などを分析する。

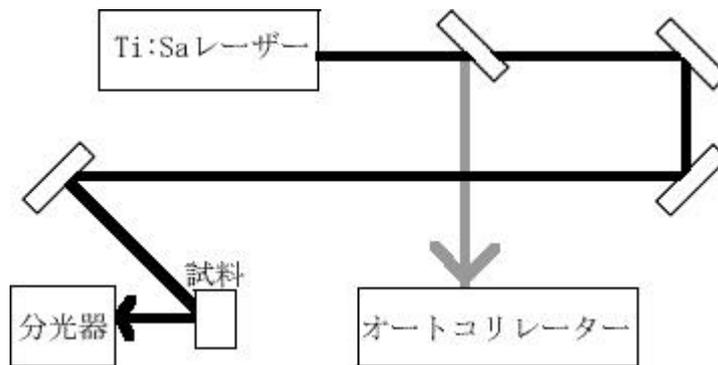


図 2-3 フォトルミネッセンス配置

波長可変範囲	CW 光 640~1160nm (要窒素) 測定では 730~900nm まで
分光器	波長域 380nm~1000nm

本実験の PLE 測定では Ti:サファイアレーザーの特性である波長可変を使用して、励起エネルギーを変化させ、試料の発光励起スペクトルを検出する。

第3章 超高速光パルス実験装置

本研究に用いたモードロック Ti:サファイアレーザーは共振器ミラー等の変換により、フェムト秒または、ピコ秒光パルスを発生させることができる。

ここではピコ秒光パルス発生について述べる。なお、フェムト秒光パルス発生については参考文献（中野雄大卒業論文）に詳しく述べられている。

1. 実験装置構成

ここでは本実験で使用した超高速光パルス実験装置の各説明を行う。この実験装置はパルス光だけでなく、モードロックをはずすことにより波長可変 CW 光源として利用できる。

Tsunami System の概観

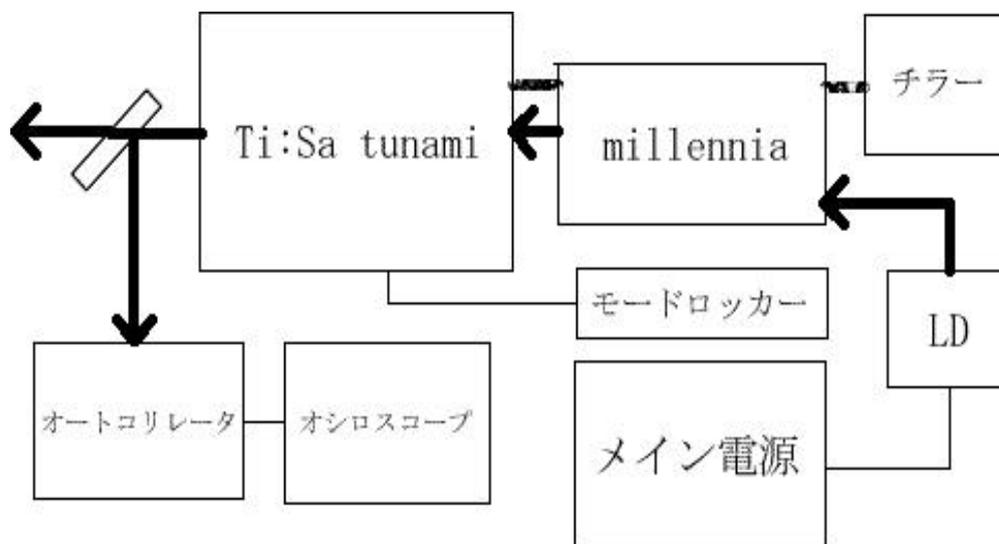


図 3-1 Tsunami System の概観

上図は本研究で使用した超高速光パルス実験装置の構成である。

- ・ この実験装置のシステムは、LD 励起 YVO レーザーの SHG 光を出力とする millennia が Ti:Sa レーザーの励起光源となっている。
- ・ レーザーの冷却システムはチラーと呼ばれる冷却装置で millennia と Ti:Sa レーザーの両方を冷却する。
- ・ モードロッカーが Ti:Sa レーザーのパルス発振を制御する。
- ・ Ti:Sa レーザーから出た光はハーフミラー（透過 8 . 5 : 反射 1 . 5）で分けられ、透過光は各種実験に、反射光はオートコリレータによりパルス時間幅測定に使用される。

- ・ その他に窒素ガス注入器があり、安定したパルス光を得るためなどに使用している。

実験装置詳細

- ・ tsunami(Ti:サファイアレーザー) Spectra-Physics 社
- ・ millennia (励起レーザー) Spectra-Physics 社
- ・ モードロッカー Spectra-Physics 社
- ・ オートコリレーター (Model409) Spectra-Physics 社
- ・ 窒素ガス注入器 (Model3910) Spectra-Physics 社
- ・ チラー NESLAB 社
- ・ オシロスコープ Tektronix 社

Ti:Sa レーザー

赤外領域パルス型の Ti:Sa (チタン添加サファイア) レーザー。Millennia(532nm)を励起光源に用い、本体中の光学系ツマミを操作することで出力パワー、波長などを調整できる。CW 光とパルス光を使い分けることができ、パルス光波長の可変範囲は 750 ~ 840nm、繰り返し周波数 82MHz、パルス時間幅(130fs,2ps)、平均出力 750mW(波長 790nm)が得られる。

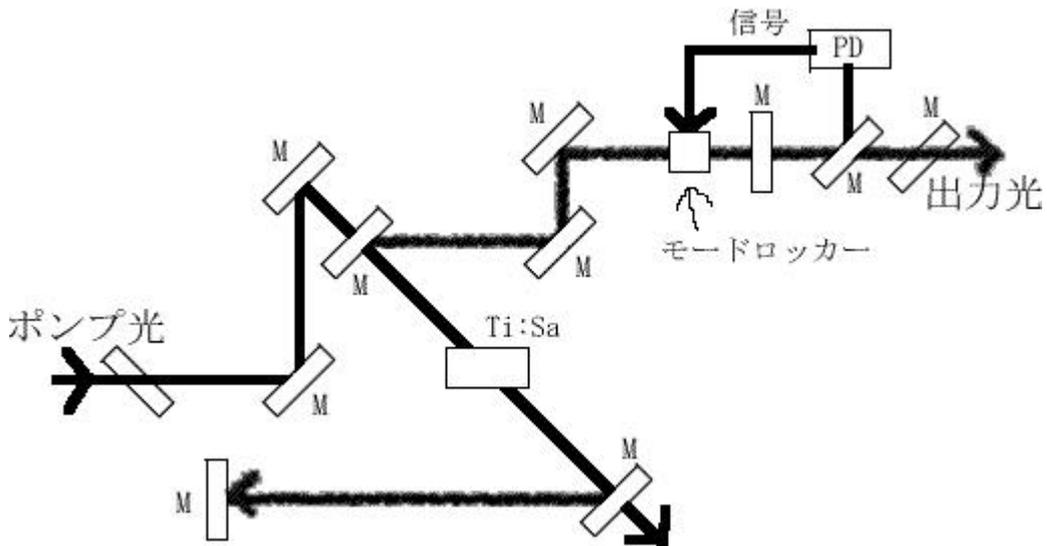


図 3-2 Ti:Sa レーザー (Tsunami)

Millennia

最大出力 5 . 5 W の CW 光を発振するレーザー。ファイバーカップルの半導体レーザー (809nm) により Nd:YVO4 (ネオジウムイオン添加イットリウム・バナダイト) 結晶を励起し、赤外レーザー (波長 1064nm) を発振させ、SHG (第二高調波) により波長 532nm を発生させる構造となっている。

このレーザーは従来の水冷アルゴンレーザーに比べ、高効率で出力安

定優れているため励起レーザーに適している。

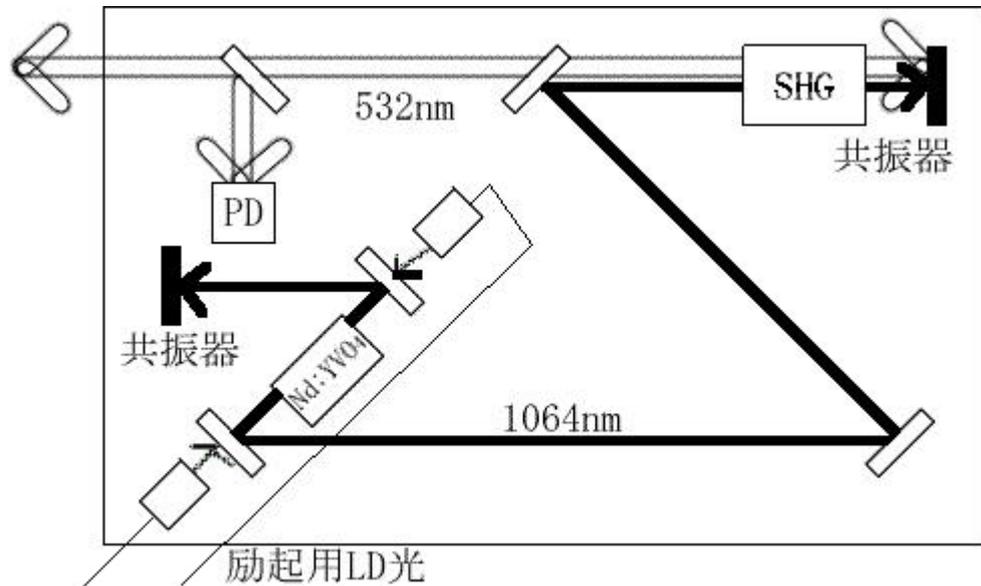


図 3-3 millennia

オートコリレーター

モードロックされたピコ秒、フェムト秒パルスレーザーのパルス時間幅を測定するための装置。

SHG 相関法により実際のパルス波形とは異なる観測パルスを得ることができる。それをオートコリレーターのデコンボリューション値で修正することにより実際のパルスデータを得られる。

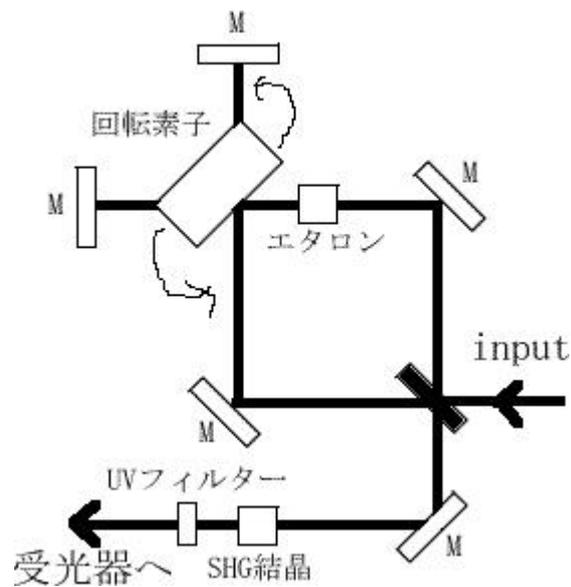


図 3-4 オートコリレーター

2. 超高速光パルス発生

ここでは実験装置をピコ秒で光パルスを発生させる設定としてピコ秒パルスにどのような特性があるのか調べた結果を述べる。

ピコ秒パルス特性

ピコ秒パルス発振させたとき、それぞれの波長での平均光出力とパルス時間幅、パルスピーク電力を測定した。波長は波長可変ツマミを調整し所定の波長とし、このとき、モードロックの条件が最適になるようにモードロッカーを調整した。モードロックが安定にかかり、かつパルス幅が最短になるようにした。また励起光の電力は 5.5W 一定とした。

励起出力 5.5W

波長 (nm)	平均出力(W)	TW(μs)	パルス幅(ps)	ピーク電力(kW)
850	0.95	184	1.73	6.86
840	0.9	160	1.5	7.5
830	1	220	2.06	6.07
820	1.09	156	1.46	9.33
810	1.11	120	1.13	12.28
800	1.15	124	1.16	12.39
790	1.11	124	1.16	11.96
780	1.15	128	1.2	11.98
770	1.11	132	1.24	11.19
760	1.1	120	1.13	12.17

表 3-1 ピコ秒パルス特性

この表で求めたパルス時間幅は、

$$\text{パルス時間幅} = \frac{\text{エタロンによる遅延時間} \times \text{オートコリレーターデコンボリューション} \times \text{TW}}{\text{エタロン挿入時のパルスと挿入しないときのパルスの時間差}}$$

この式で求められ、

- ・ TW とはオートコリレーターで得た観測パルスの半値幅のことである。
- ・ エタロンによる遅延時間はピコ秒の場合、20.5ps である。
- ・ オートコリレーターデコンボリューションは 0.65 である。
- ・ エタロン挿入時の差は 1420 μm である。

これらを代入してパルス時間幅を算出する。

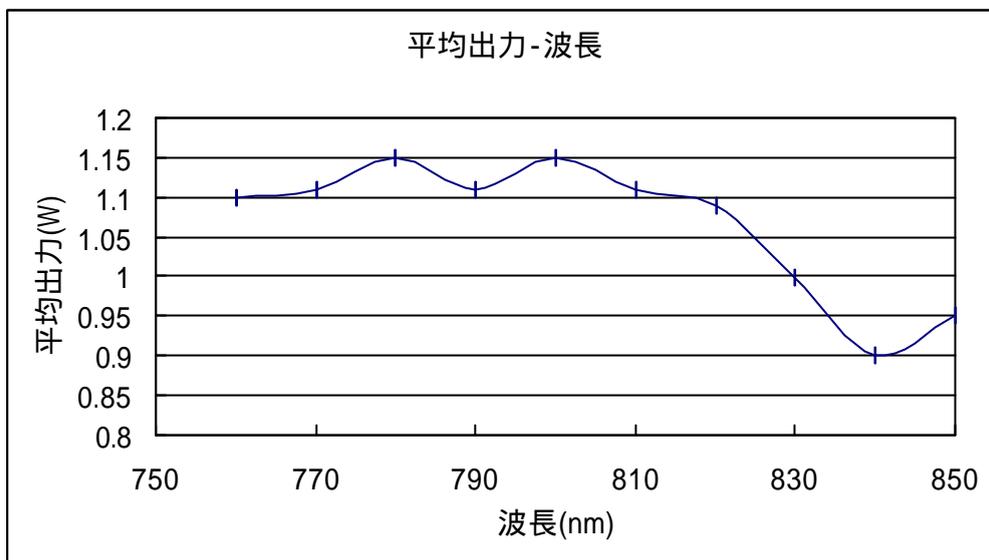
パルスピーク電力は、

$$\text{パルスピーク} = \frac{\text{平均光出力} \times \text{パルス繰り返し周期}}{\text{パルス時間幅}}$$

この式で求められる。

算出したパルス時間幅と測定した平均光出力、そして 1/80MHz の繰り返し周期を代入して算出する。
表の結果から、それぞれのグラフにしてみると

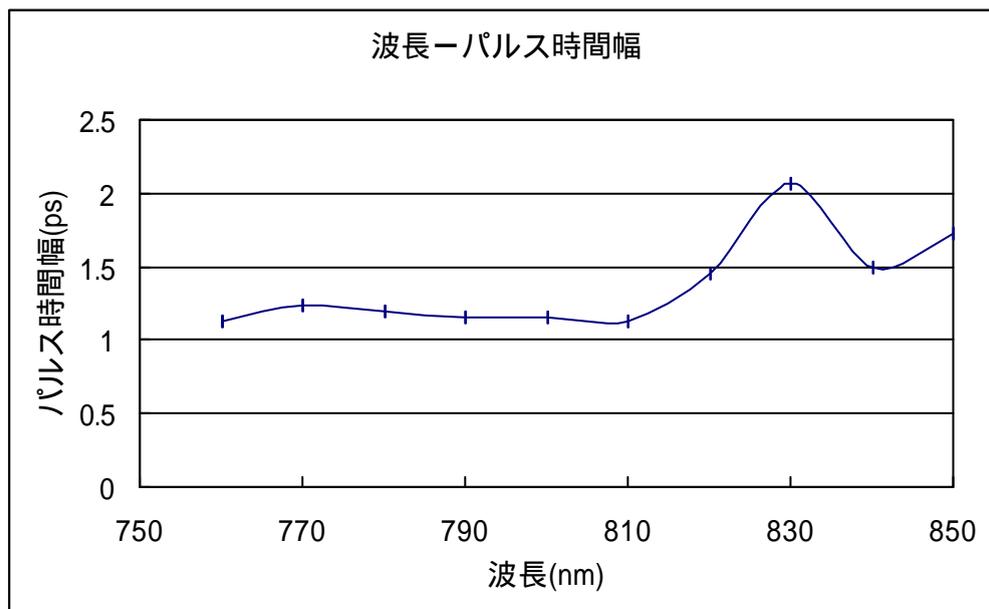
励起出力 5.5W



グラフ 3-1 平均出力 波長

平均出力は調整なしに波長を可変することにより、利得の高い 780~800nm の間では高い出力を出すことができるが、それ以上の波長では出力が低下していく。

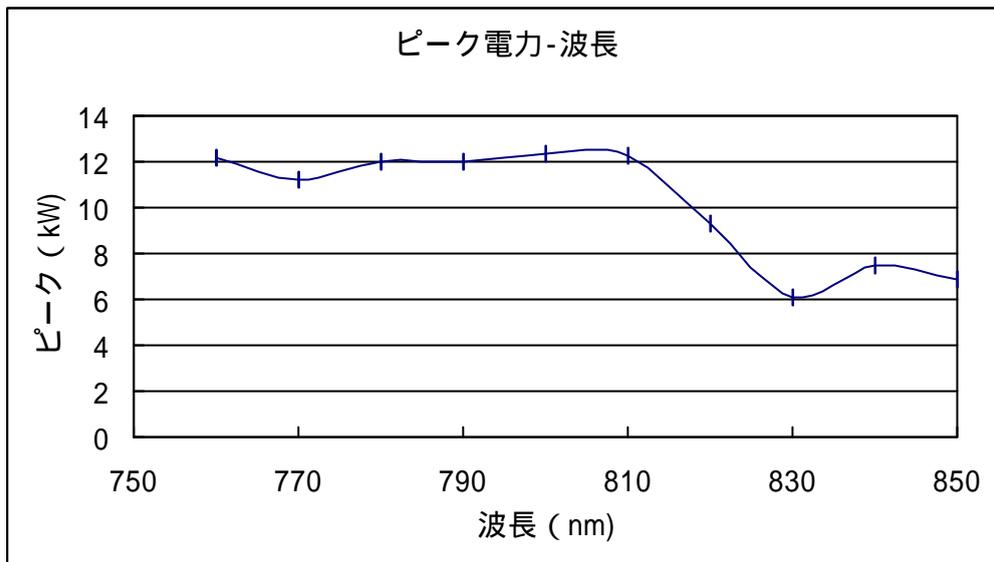
励起出力 5.5W



グラフ 3-2 波長 パルス時間幅

パルス幅は測定した 760nm~820nm の範囲ではほぼ一定値 (1.5ps 以下) であるが、平均出力が減少する 830nm 以上ではパルス幅が増加している。

励起出力 5.5W



グラフ 3-3 ピーク電力 - 波長

パルスピーク電力は 760nm~810nm では 12kW と一定であるが、平均電力の減少およびパルス幅増加のため、これ以上の波長域では、その約 1/2 程度になっている。

以上の結果から、波長を変化することによって平均出力は 760nm~810nm ではほぼ一定であるが、それより長波長側では出力の減少とパルス幅の増大が見られる。平均出力とパルスピーク電力はグラフを見ると類似し、パルスピーク電力とパルス時間幅はお互い対称な関係であることがわかる。それだけをみていると平均出力の値が時間幅、ピークに完全に影響を与えているようにも見られるが、波長 830nm、840nm 等の辺りでパルス時間幅、パルスピーク電力が平均出力の値とは違う変化を起こっている。

それで平均出力を固定したデータを測定し、それぞれの波長での特性を見る。

平均出力 1 W に固定した波長 パルス時間幅測定

今回の測定では、平均出力を一定化し、平均出力の影響を気にせずに、パルス時間幅とパルスピーク電力を比較したい。

励起光出力 5 W、平均光出力 1 W で固定した上で、それぞれの波長の効率、特性を測定してみる。

励起光出力 5 . 0 W

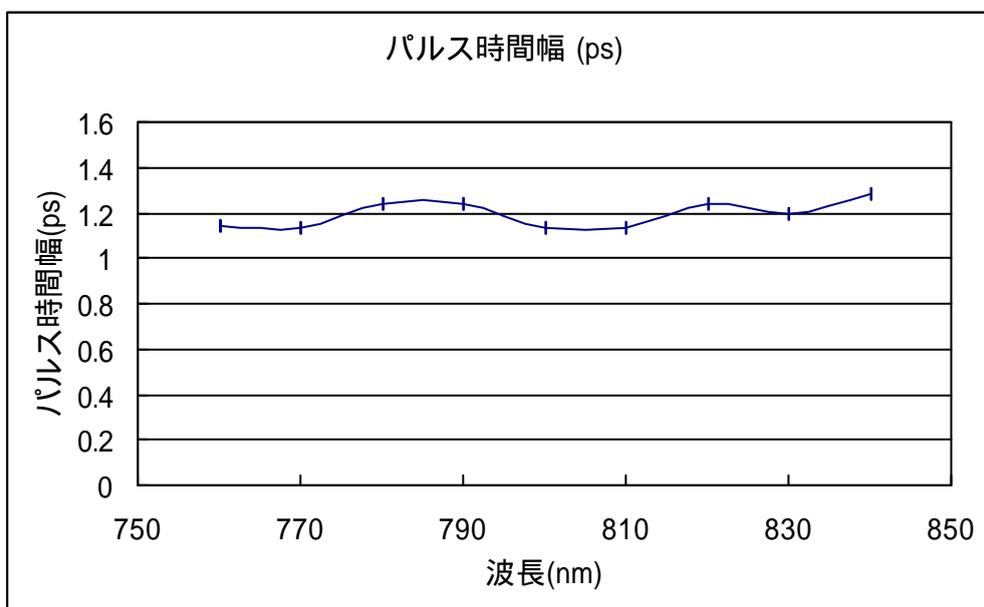
平均光出力 1 . 0 W

波長 (nm)	オシロ半値幅 (μ s)	パルス時間幅 (ps)	ピーク電力 (kw)
760	122	1.14	10.2
770	120	1.13	10.4
780	132	1.24	9.5
790	132	1.24	9.5
800	120	1.13	10.4
810	120	1.13	10.4
820	132	1.24	9.5
830	128	1.2	9.8
840	136	1.28	9.2

表 3-2 平均出力 1 W 一定

上の表から、パルス時間幅とパルスピーク電力をグラフにすると

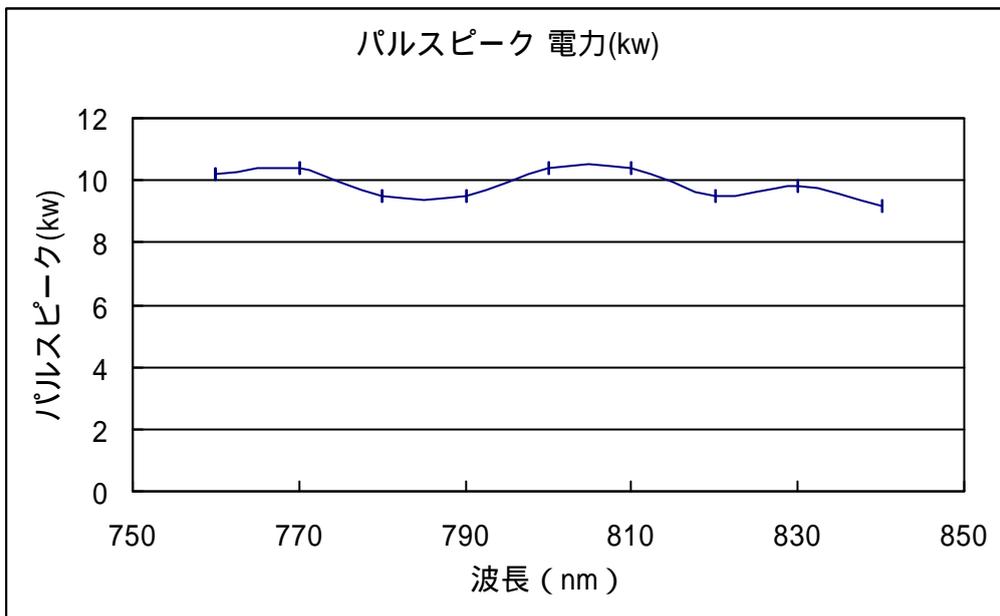
励起出力 5.0W



グラフ 3-4 波長 パルス時間幅

グラフを見てみると時間幅も大きく見れば一定だが、波を打つような変化は見られ完全には一定ではない。

励起出力 5.0W



グラフ 3-5 波長 パルスピーク電力

グラフをみると、ほぼパルスピーク電力は10kW 近傍で一定になっている。だが波のように値が変化しており、完全には平均出力と一致していない。これはパルス時間幅の影響のためである。

これらのデータ大きくみると平均出力を一定にすることによって、パルス時間幅やパルスピーク電力は変化がなく平均出力と同じく値が固定化されると思われる。それは平均出力がそのパルスの利得を表し、平均出力を決定づけることにより、その他のデータの大半が決まるものと思われる。

しかし、細かい変化に注目すると波のように一定にはなっていないことも分かる。ある程度は平均出力により時間幅、ピーク電力を制御できるが完全には制御しきれないことが分かった。

励起光出力 パルス時間幅測定

今度は波長を固定することで、励起出力の変化によるパルス時間幅とパルスピーク電力の値の変化をしてみる。これにより、励起出力による利得の変化があるか調べる。

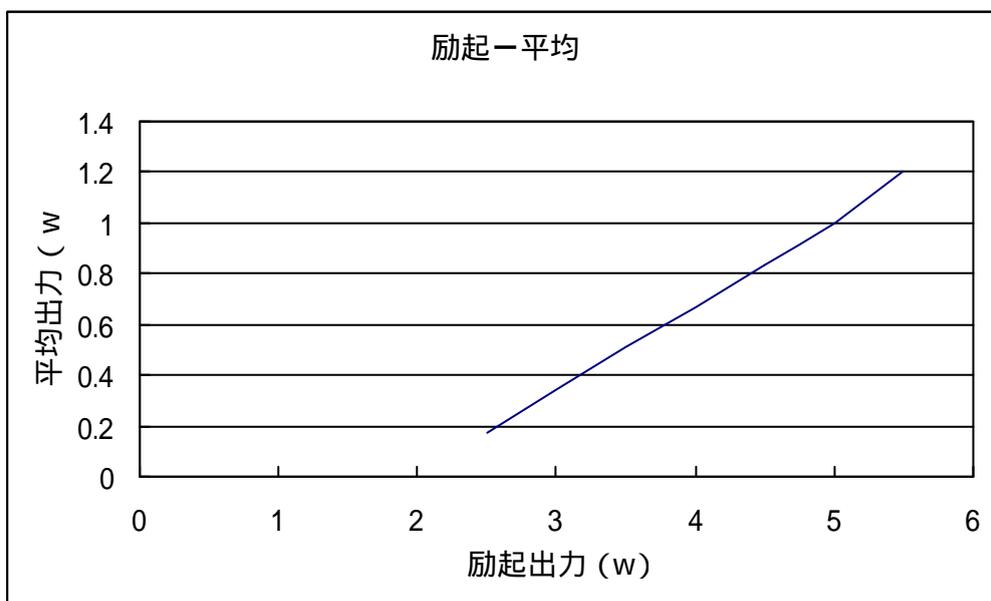
800nm

励起出力 (W)	平均出力 (W)	t w (μs)	パルス時間幅 (ps)	ピーク電力 (kw)
2.5	0.17	296	2.78	0.8
3	0.35	224	2.1	2.1
3.5	0.51	178	1.67	3.8
4	0.67	136	1.28	6.5
4.5	0.83	140	1.31	7.9
5	1	152	1.43	8.7
5.5	1.2	154	1.45	10.3

表 3-3 励起出力 パルス時間幅

上記のデータをグラフにすると

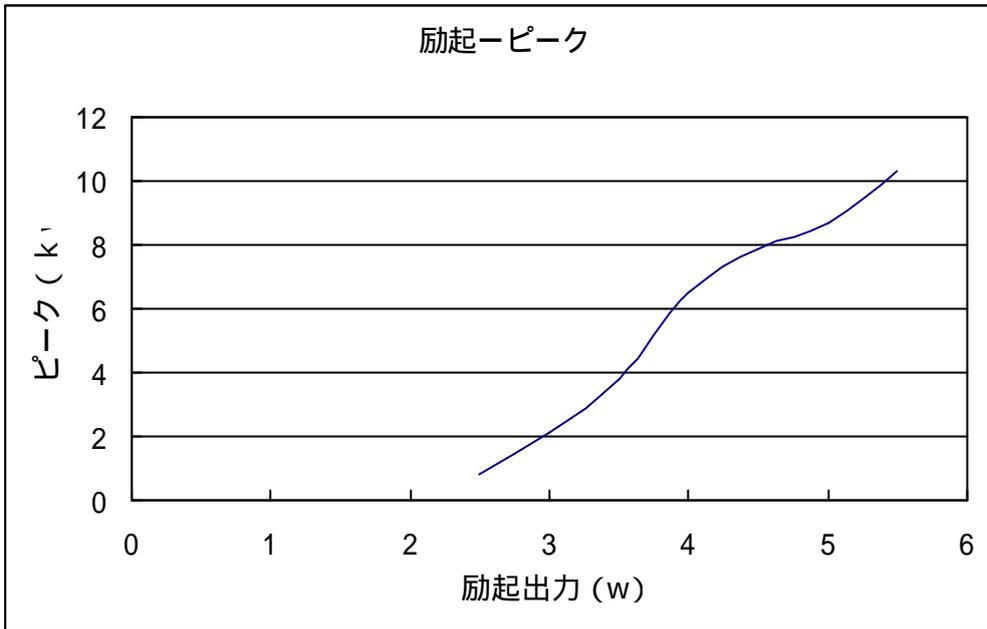
波長 800nm



グラフ 3-6 励起 平均出力

グラフを見れば励起出力と平均出力は比例関係にあることが分かる。これまでの測定から、平均出力とパルスピーク電力の関係はこれに類似するはずなのだが

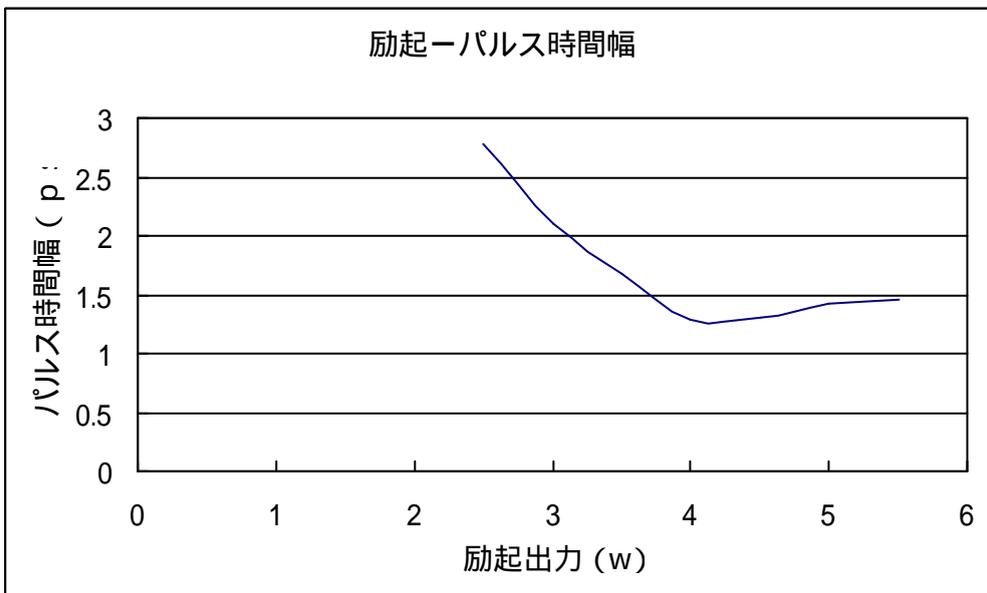
波長 800nm



グラフ 3-7 励起 ピーク

ある程度は平均出力と同じことがわかるが、ここでもパルス時間幅の影響が利得の影響により、励起出力 4~5W の部分に変化が見られる。

波長 800nm



グラフ 3-8 励起 パルス時間幅

このグラフでパルス時間幅の幅が狭い方がパルスピークなどの出力が上がり、利得が高いことが分かった。

これにより、最小のパルス幅を得るために最適な励起出力があることがわかる。

上のグラフをみると、波長 800nm のとき、励起出力が 4 ~ 4 . 5 W 部分のパルス時間幅が一番幅が狭く、効率が良いことがわかった。この結果、平均出力とパルスピークが完全な類似はしなくなりパルス時間幅と同じく 4 ~ 4 . 5 W 部分のパルスピークは少し増大しているように見える。これはパルス時間幅に影響されていて、幅が狭いとそれだけ利得が高まり、パルスピークなどの出力が高まる。

3 . 本章のまとめ

以上の結果をまとめると、

- ・ 平均出力とパルスピーク電力のグラフは類似し、パルスピークとパルス時間幅は対称であることがわかる。これにより、平均出力が与える影響が最も高いことが分かる。
- ・ 平均出力が一定のとき、パルスピーク電力、パルス時間幅ともにほぼ一定の値になるが、微妙なズレが生じ完全には一致しない。
- ・ パルス時間幅は波長だけではなく、励起出力にも効率の高い部分があり、それにより平均出力とパルスピーク電力が一致しない。

結果、ある程度平均出力の調整によりパルス時間幅、パルスピーク値の制御は可能だが、その波長、その励起出力による効率、感度が良い場所が存在しそれを踏まえた上でパルスを使用しなければならない。

パルスピークなどの出力を高めて使用した場合は、パルス時間幅の利得を考えながら調整すればよい。

他に外部気温、内部温度による乱れなど装置の使用状況により判断しなければならない部分もあることが分かる。

第4章 量子井戸構造 (QW)

本章では、Ti:サファイアレーザーを利用した多重量子井戸半導体のフォトルミネッセンス測定について述べる。まず量子井戸半導体について考え、つぎにフォトルミネッセンス測定により解明できたことを述べる。

1. 量子井戸構造 (QW) と多重量子井戸構造 (MQW)

異なる半導体を急峻な組成変化を示す境界線によって接合したのをヘテロ接合という。単一量子井戸構造とは、ダブルヘテロ構造においてバンドギャップが小さな層を電子のドブロイ波長程度まで薄くし2次元的に電子を閉じ込める層状の構造のことを言う。この単一量子井戸構造を多数重ね合わせたものが多重量子井戸構造である。

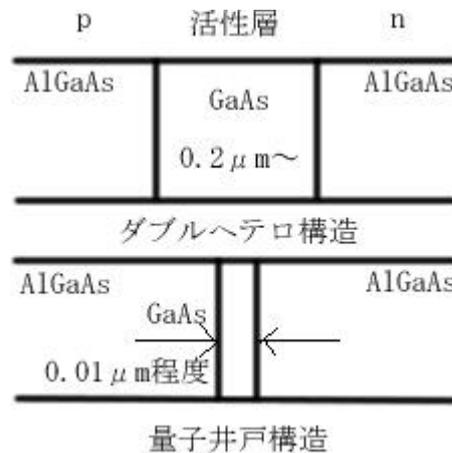


図 4-1 ダブルヘテロ構造 量子井戸構造比較

2. 量子井戸構造の光学特性

量子井戸構造での最大の特徴は量子閉じ込め効果があることである。これは層の厚さをドブロイ波長程度 (数10 ~ 数ナノ程度) にし、これを井戸層にして両側に障壁層を設け、それぞれの半導体のエネルギーギャップ差によって電子および正孔が井戸内に閉じ込められ、電子の運動を2次元的に抑制するものである。このような場合では井戸内に新たな電子準位 (サブレベル) が形成され、状態密度の集中、励起子遷移の強度の増大、励起子の結合エネルギー強化などの現象が発生し、これらは超高速光デバイスなどの実現に欠かせないものとなっている。

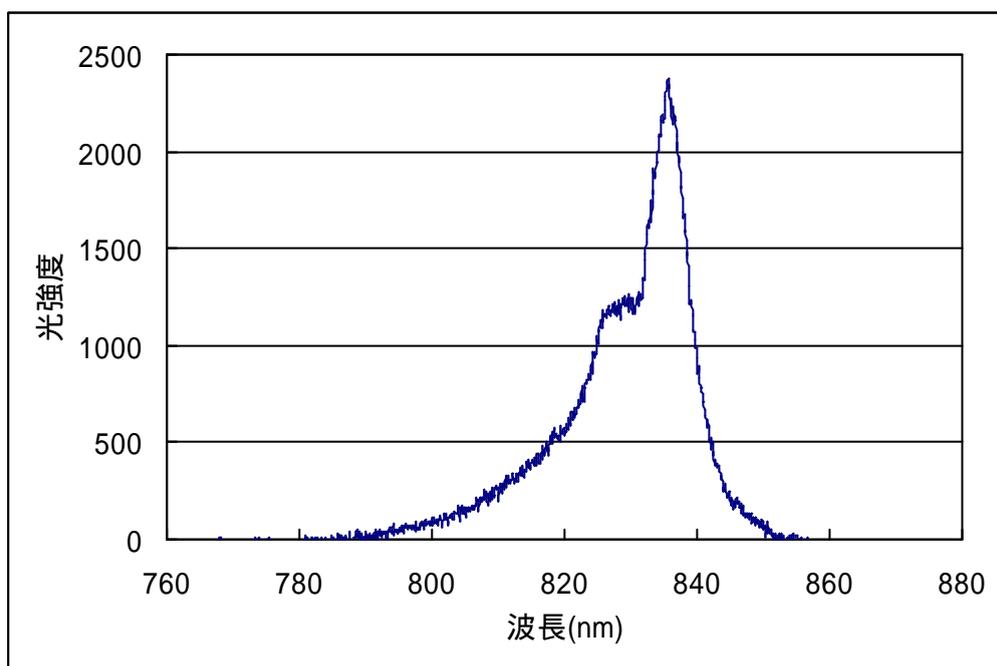
3. 多重量子井戸構造のフォトルミネッセンス (PL)

この実験は、励起エネルギーに対する多重量子井戸構造 (AlGaAs/GaAs) の光吸収特性を測定する。測定方法は、まず He-Ne レーザーにより PL 測定を行い多重量子井戸構造の基礎光学特性を明らかにしたのち、波長可変 Ti:サファイアレーザーにより、PLE 測定を行う。

実験装置の構成などは第 2 章などを参考にして行う。

He-Ne レーザーを利用した PL 測定

出力 5mW、波長 632.8nm の He-Ne レーザーを使い PL 測定を行った。



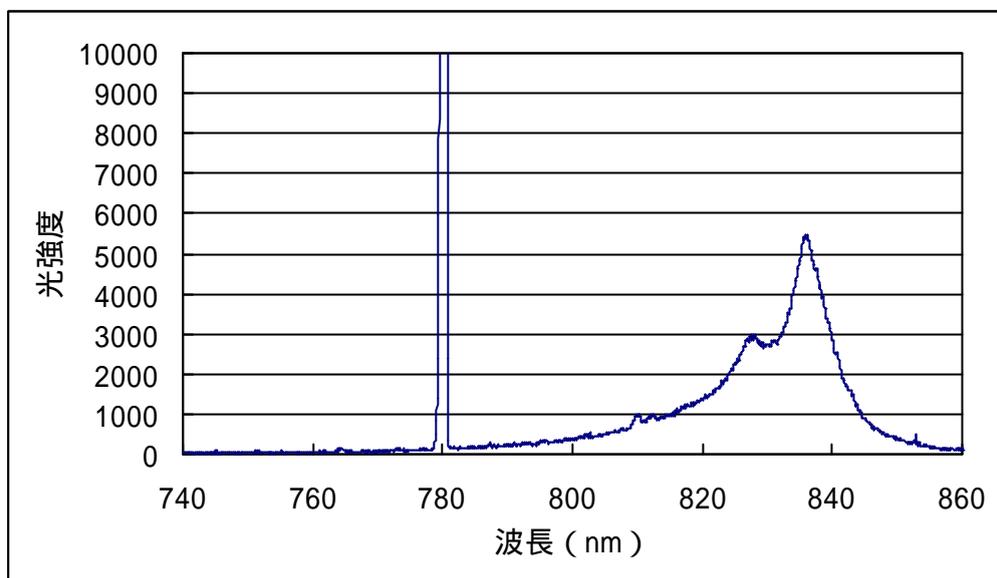
グラフ 4-1 He-Ne レーザーを使用した PL 測定

今回の測定で、使用した多重量子井戸構造 (AlGaAs/GaAs) の発光スペクトルが測定できた。

これを見てもとピーク波長は 835nm であり、これがバンドギャップ波長に相当するものとする 1.48eV となる。これにより多重量子井戸構造 (AlGaAs/GaAs) の基礎特性が明らかになり、次に PLE 測定により光吸収特性をみる。

波長可変レーザーを利用した PLE 測定

つぎに Ti:サファイアレーザーを使用した出力 5.0W、波長 780 nm の CW レーザー光を照射した PL 測定を見る。



グラフ 4-2 Ti:サファイアレーザーを使用した PL 測定

波長 780nm の CW 光で行った PL 測定である。He-Ne レーザーと同じように、MQW のバンドギャップが測定された。

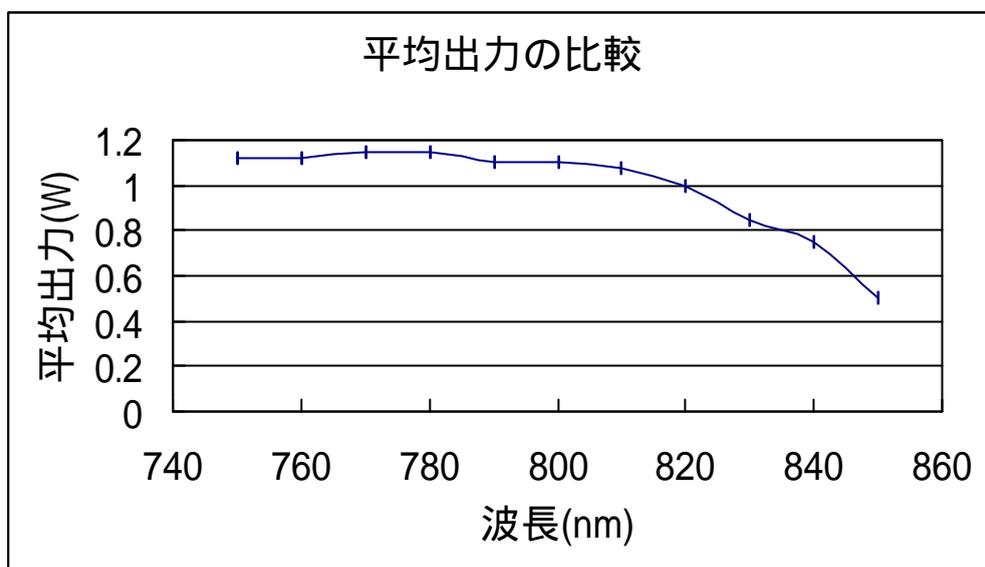
ここで、波長 835nm のピーク波長の光強度を、励起波長を変化させながら取得し、波長（光子エネルギー）とピーク光強度による光吸収特性みる。

この PLE 測定を行い表にまとめる。

励起出力 5.0W	サンプル 458	300K	100
	CW		
波長 (nm)	平均出力 (W)	pl 光強度	1W 平均化
750	1.12	4800	4285.7
760	1.12	4800	4285.7
770	1.15	3600	3130.4
780	1.15	3200	2782.6
790	1.1	2800	2545.5
800	1.1	3200	2909
810	1.08	3200	2963
820	1	3200	3200
830	0.85	2800	3294.1
840	0.75	800	1066.7
850	0.5	0	0

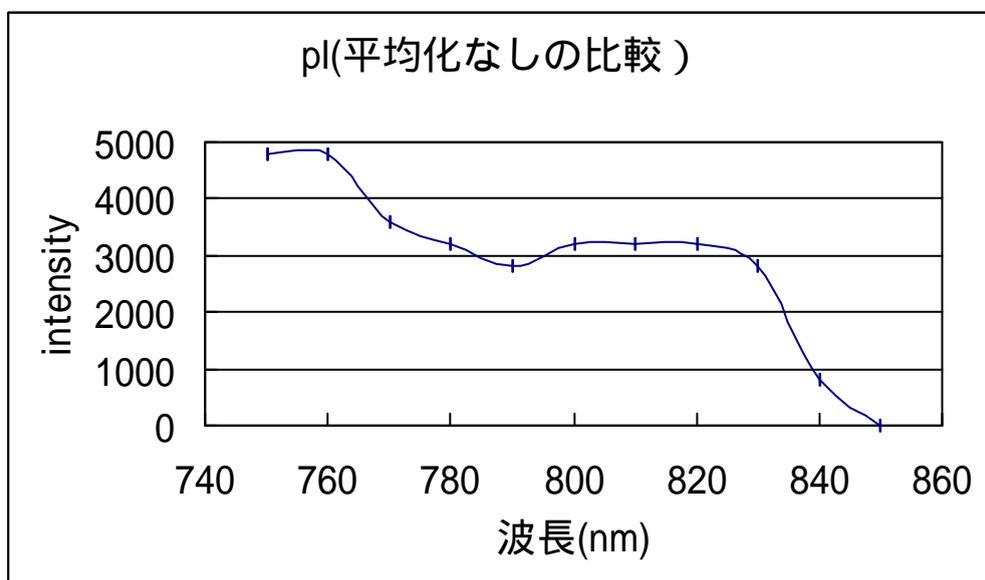
表 4-1 PLE 測定

この表をもとに、ピーク波長の光強度と波長の関係をグラフに表す。



グラフ 4-3 平均出力 波長

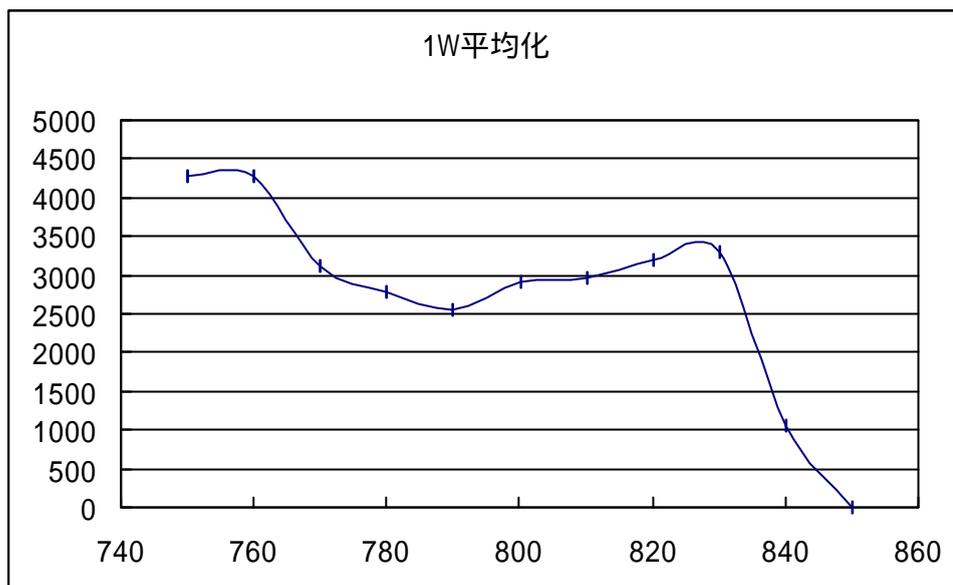
第3章の特性で見たように、平均出力は調整なしに波長を可変することにより、利得の高い780~800nmの間では高い出力を出すことができるが、それ以上の波長では出力が低下していくことが見られる。



グラフ 4-4 平均化をしていないPL 光強度 波長

このままだも特性が現れているようにも見られるが、第3章での特性のように平均出力の影響を受けている可能性があり、ピークが綺麗に見られていないので平均出力を1Wで平均化してピーク波長の光強度を算出し、グラフ化しなおす。

300K



グラフ 4-5 平均化された PL 光強度 波長

これが室温における AlGaAs/GaAs 多重量子井戸構造(井戸厚 100)の光吸収スペクトルである。

760nm(1.63eV)、830nm(1.49eV)の辺りで二つのピークがスペクトル的に見られ、その中で 830nm のピークは PL のピーク波長 835nm(1.48eV)とほぼ一致することがみられる。

これらのピーク構造は励起子に関与し、普通の半導体ならば室温においてフォノン散乱の線幅の増大により、励起子構造は観測されない(ピークが見られない)のが普通であるが、室温においてもピークを明確に見ることができるのは量子井戸構造での 2次元性に基づく励起子の束縛エネルギーの増大と、振動子強度の増大における影響である。

量子井戸では、価電子帯の重い正孔と軽い正孔に対するサブバンドエネルギーが異なるため、励起子は分離して観測され、重い正孔励起子(830nm)、軽い正孔励起子(760nm)と区別される。

4. 本章のまとめ

以上の結果をまとめると、

- ・ He-Ne レーザー、Ti:サファイアレーザーの PL 測定により AlGaAs/GaAs 多重量子井戸構造 (MQW) のバンドギャップエネルギー (波長 835nm、1.48eV) が測定できた。
- ・ PLE 測定により MQW の光吸収特性が明らかになり、励起子によるピークが検出できることによって、量子閉じ込め効果による、2 次元的光学特性である、励起子の結合強化と振動子強度の増大の特性が起こっていることがわかった。

結果、室温発振によりフォノン散乱の線幅の増大による影響を受けても、ピークが検出されたことで励起子の 3 次元から 2 次元に移行する特性は見る事ができたのだが、室温のため、2 K などの低温 PLE 測定ほどに顕著には特性が表れなかった。

温度による PLE 測定と井戸厚の違いによる特性変化を見られるのが一番望ましいと思う。

第5章 透過 吸収特性

本章では、前章に行った PLE 測定における光吸収特性と比較するために吸収特性を直接測定する試みについて述べる。

1. 多重量子井戸構造 (AlGaAs/GaAs) の透過 吸収特性

多重量子井戸構造 (MQW) に光透過特性を持たすためには、基板部分である GaAs (バンドギャップ 1.42eV、光の波長 873nm) での吸収を避けるため、これを削り落とし、1 μm の MQW だけ取り出す加工が必要となる。そこで最初に試料作製を行い、作成した試料を用いて透過 吸収特性を測定する。



図 5-1 多重量子井戸構造 (試料)

試料作製 (研磨・エッチング)

まずサンプルに光を透過できるようにするため、研磨 (粗研磨、鏡面研磨)・エッチングを行い、基盤である GaAs だけを限りなく削り落とすことを目的とする。

最初に

まず結晶をアセトン、メタノール等で綺麗に洗浄し石英ガラスを量子井戸側に接着する。(結晶に付着している不純物を取り除き、研磨・エッチングのダメージによって石英ガラスから結晶が離れることを防いだ。石英ガラスに接着するのは、量子井戸表面に傷や不純物が付着するのを防ぐためである。)

研磨

酸化アルミニウムの粉末 (研磨剤) を純水により泥状にし、円を描くように動かしながら結晶を削り落としていく。ここで注意することは、結晶は 512 μm の厚みを持っており、その中で量子井戸部分の厚みは 1 μm である。研磨では 1 μm ちょうどに削ることは無理だが、20 μ

m、10 μm 辺りまで削りたい。その時に結晶全てを削ってしまわぬように注意する。

鏡面研磨は結晶表面におこる欠陥(研磨目等)を最大限に取り除いて、文字通り鏡のように磨きあげることである。

エッチング

エッチングとは薬品やイオンの腐食作用を使い、溶かすなり削るなりして半導体を形成する工程である。

エッチングを行う利点としてはエッチング液の選択比を変えることによってエッチング速度の制御や、エッチング対象の指定が簡単に行うことができることにある。これによって、残したい部分を削ることなく結晶を削ることができる。

今回、行うエッチングとは基盤全てを削りとる作業なのでマスク処理などを行う必要はない。

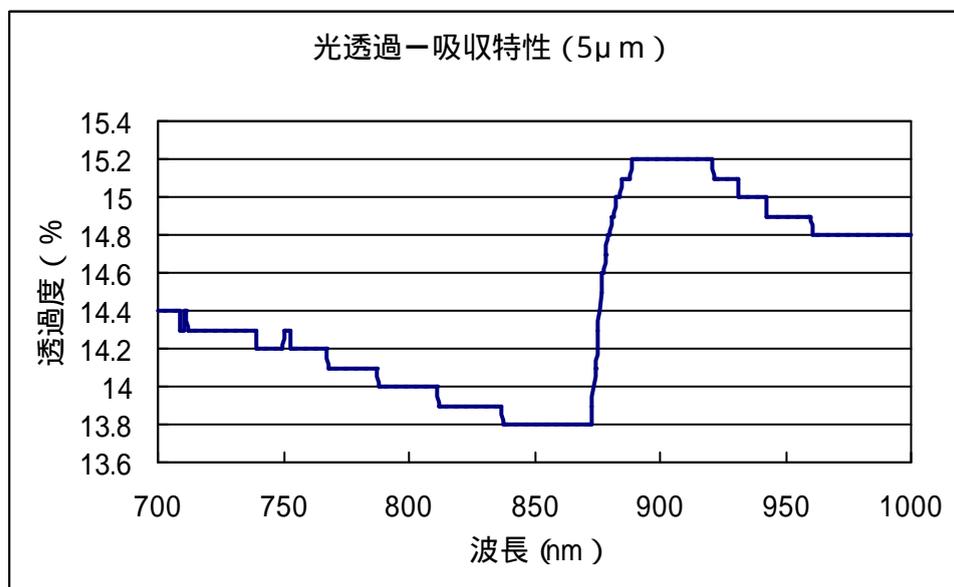
今回使用したエッチングレート (GaAs エッチング)

H₂SO₄:H₂O₂(33%):H₂O=3:1:1 ~1 μm/5min

H₂SO₄:H₂O₂(33%):H₂O=1:8:1 8 μm/min

透過 吸収測定

作製した試料を用いて、第2章で説明した分光光度計を使用した透過吸収特性により、前章で測定した光吸収特性と比較を行う。



グラフ 5-1 5 μm に研磨した試料での透過 吸収特性

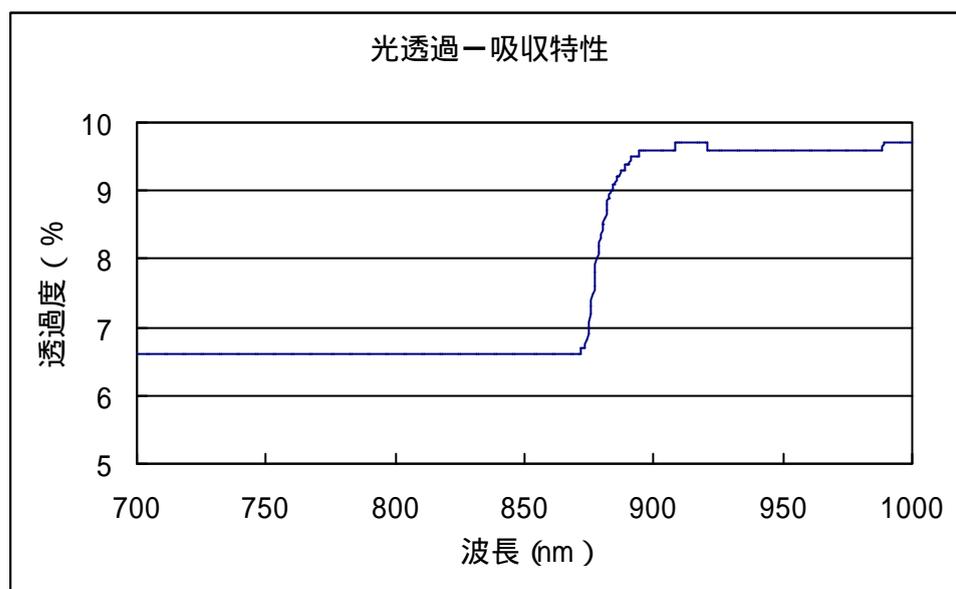
基板と合わせて 5 μm まで除去した試料での透過 吸収係数であるが、肝心の MQW 部分の吸収係数が見られずに、873nm である GaAs の特性が見られた。

これはまだ基板部分である GaAs が完全に除去されておらずに、特性が出てきたものだと考えられる。

試料自体が $5\mu\text{m}$ の辺りで劣化、損傷が激しくなりこれ以上の研磨、エッチングは MQW 層の破壊にしかならないので、試料作製は断念した。

2. GaAs の透過 吸収特性

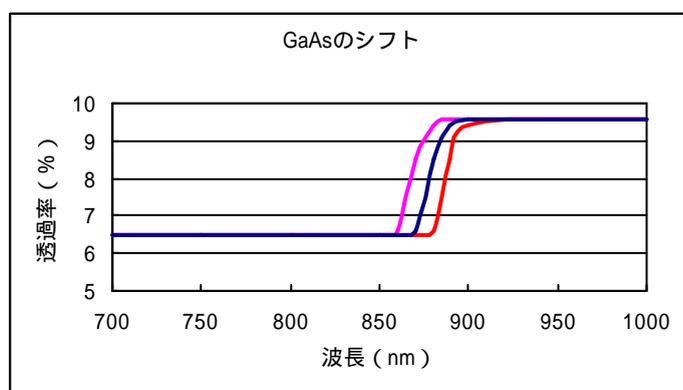
GaAs を用いて、第 2 章で説明した分光光度計を使用した透過 吸収特性により、GaAs の特性を解明する。



グラフ 5-2 GaAs の透過 吸収特性

GaAs の光学吸収端は直接遷移型であるので、価電子帯の頂と伝導帯の底の波数 k が等しいため、光学遷移の際に運動量の保存則が成り立ち強い遷移が起きる。これがこのグラフの傾斜角度の大きさで見られる。

この GaAs 特性の高エネルギー側へのシフトを観測するために、強い光強度のパルス光を照射し、観測したいが現在の段階ではまだ行っていない。



グラフ 5-3 GaAs のシフト (例)

3 . 本章のまとめ

以上の結果をまとめると、

- ・ 試料作製の工程により、現在の半導体加工技術である研磨・エッチングの作業方法を学ぶことができた。
- ・ 試料を用いての透過 吸収特性は、薄膜化の限界により MQW の特性を検出することはできなかった。
- ・ GaAs を用いた強光強度による高エネルギーシフトは次への課題として残った。

結果、今回の実験で検出できたことは GaAs の透過 吸収特性のみに終わった。薄膜化の限界を悟ったが、上手に結晶を削る方法を考え出し、MQW の試料を完成できるようにしたい。

第6章 光強度による光ファイバグレーティングカプラのフィルタ特性変化の測定

本章では、光通信の分野において、様々な光デバイスの研究が行われており、なかでも3次非線形光学効果を用いた光デバイスの研究が盛んであるため、このデバイスの研究による大容量通信技術の発展を目指し、茨城大学 工学部システム工学科の峯尾 浩之氏と佐々木 豊教授と共に、共同研究を行った。試料は茨城大学で作製され、Ti:サファイアレーザーのピコ秒パルスを用いた。その過程と共に、結果を述べる。

1. 目的

本実験では、光ファイバグレーティングカプラ (FGC) に高強度光を入射することにより FGC のフィルタ特性変化の測定と FGC 型全光スイッチの動作の確認を行うことを目的とする。

また、その結果から、FGC の非線形感受率等のパラメータを明らかにし、FGC における非線形光学効果について検討する。

2. 理論

光カー効果

光ファイバ中でおこる非線形屈折率現象のことを言う。

超高速光パルスを入射すると、ファイバ屈折率がパルスの立ち上がりで増加、立ち下り減少する現象が短時間で起こる。この光カー効果を用いてフィルタ特性などを変化させ全光スイッチを動作させる。

光ファイバグレーティングカプラ (FGC)

光ファイバグレーティングカプラとは、光ファイバカプラの結合領域にグレーティングを書き込んだ光デバイスである。

FGC はグレーティングとカプラを組み合わせているため、単体で特定波長の合波、分波が可能な波長選択デバイスである。また、ファイバ型デバイスであるために光ファイバ伝送路との親和性が良く、小型で低損失、低コストであることが主な特徴である。

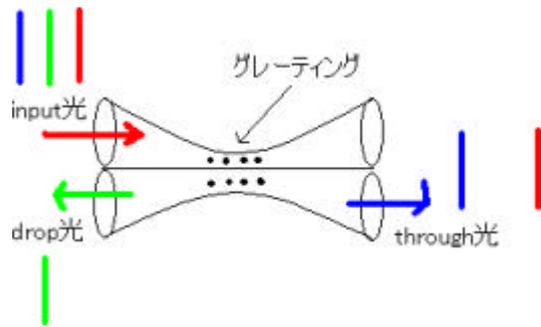


図 6-1 光ファイバグレーティングカプラ

入射光強度と FGC のフィルタ特性

グレーティングとは、光ファイバのコア部に屈折率変調をもたらすものであるから、光カー効果によりグレーティング部の屈折率を変えることで、そのフィルタ特性を変えることが可能である。また、FGC のフィルタ特性は、書き込まれたグレーティングの特性に依存する。このことから、FGC においても、光カー効果を誘起することによって、そのフィルタ特性を変化させることが可能であると考えられる。

3 . 実験方法

光強度による FGC のフィルタ特性変化の測定

モードロック Ti:サファイアレーザーのピコ秒光パルスを用いて FGC に高強度光を入射し、そのときのフィルタ特性変化の様々な基礎特性を解明し、FGC の非線形特性を観測することが目的である。

実験方法は

- ・ FGC の 2 次の Bragg 波長を観測する。
- ・ Ti:サファイアレーザーの発振波長を 2 次の Bragg 波長に合わせる。
- ・ 光ファイバに Ti:サファイアレーザー光を入射し、FGC への入射パワーを測定する。
- ・ 光ファイバと FGC を融着する。
- ・ サンプリグオシロスコープを用い、FGC の P2 の出力を測定する。
- ・ Ti:サファイアレーザーの発振波長を 2 次の Bragg 波長からわずかにずらす。
- ・ サンプリグオシロスコープを用い、FGC の P2 と P4 の出力を測定。上記の P2 出力と比較する。
- ・ Ti:サファイアレーザーの出力パワーを変えた場合についても測定を行う。また、P4 についても同様の測定を行う。

光ファイバグレーティングカプラ (FGC)

Ti:サファイアレーザーを制御光としてFGCに入射し、そのときの信号光(1.55 μm のCW光)の変化、FGCの全光型スイッチとして用いることができるか判断する。また、そのときのスイッチング特性についても検討を行う。

実験方法は

- ・ FGCの1次のBragg波長を測定する。
- ・ 光ファイバ1にTi:サファイアレーザー光を入射し、光ファイバへの入射パワーを測定する。
- ・ 光ファイバ1とWDMカプラのF2を融着する。
- ・ WDMカプラのF4とFGCのP1を融着する。
- ・ 光ファイバ2のA1とFGCのP2を融着する。
- ・ 波長可変光源の出力をFGCの1次のBragg波長に合わせる。
- ・ 波長可変光源とサンプリングオシロスコープを接続し、Ti:サファイアレーザーのパルス光と1.55 μm の波形を測定する。
- ・ 波長可変光源、Ti:サファイアレーザーの波長を変えた場合や、Ti:サファイアレーザーの出力パワーを変えた場合について測定を行う。またP2だけでなく、P4の出力も測定する。

4. 実験結果

まず、実験に使用したFGC及びFBGのBragg波長を測定する。

光スペクトラムアナライザを使用して本実験に使用したFGCのBragg波長を測定すると1553.08nmであった。また、2次のBragg波長を測定しようとしたが、波形を観測することが出来なかった。この原因は2次のBragg波長の反射波形が極めて小さいため、光スペクトラムアナライザの分解能の性能限界により、測定できなかったと考えられる。

これにより、今回の実験には茨城大学の方で取得していたBragg波長を使用する。

- ・ 1次のBragg波長 1552.9nm
- ・ 2次のBragg波長 782.98nm

である。

光強度によるFGCのフィルタ特性変化の測定

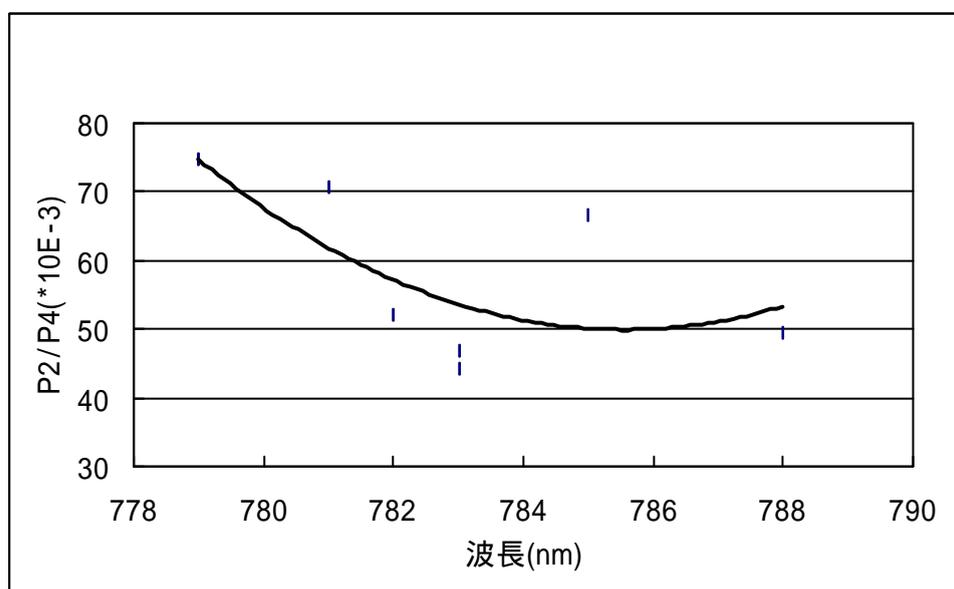
実験3.の結果を表6-1に示す。また、この表をまとめたものがグラフ6-1である。

Ti:サファイアレーザーの出力パワーを常に最高出力(5.5W)にし、Ti:サファイアレーザーの出力波長を変化させた結果が下の表である。

またこの時のファイバへのレーザー光の入射効率は28.4%(レーザーが340mW出力のとき96.4mW入射)であった。

波長 (nm)	平均出力 (W)	パルス幅 (ps)	パルスピーク (kW)	P2 変化量 (mV)	P4 変化量 (mV)	P2/P4 (*10E-3)
779	0.84	1.76	6.6	2.74	36.6	74.863
781	0.81	1.46	6.9	3.02	42.8	70.561
782	1.58	0.92	7.3	3.16	60.6	52.145
783	0.87	1.31	8.3	3.36	71.8	46.797
783	0.88	1.43	7.7	3.84	86.8	44.24
785	0.8	1.35	7.4	5	75.2	66.489
788	0.86	1.35	8	3.4	68.8	49.419

表 6-1 光強度による FGC のフィルタ特性変化の測定結果



グラフ 6-1 光強度による FGC のフィルタ特性変化の測定結果

FGC 型全光スイッチの測定

実験 3 . において、FGC の P 2 の出力をサンプリングオシロスコープで測定したが、極めて小さな波形であったため、信号がノイズに埋まってしまい測定できなかった。

そこで、アイソレータとサンプリングオシロスコープを実験系からはずし、分光器とロックインアンプの目盛りを読み取り測定を行った。

FGC 型全光スイッチの測定

ロックインアンプを使用した実験系を用いて FGC 型全光スイッチ測定を行った。

この時のファイバへのレーザー光の入射効率は 28.4%(レーザーが 340mW 出力のとき 96.4mW 入射)であった。

信号光波長は 1553.640nm(波長可変光源の表示で 1552.300nm、出力は 8dBm)を用いた。

770nm

励起光出力 (W)	平均出力 (W)	パルス時間幅 (ps)	パルスピーク (kW)	ロックインアンプ (mV)
5.5	1.2	1.18	12.7	12
5	1	1.13	11.1	10.5
4.5	0.88	1.24	8.7	9.5
4	0.7	1.43	6.1	6.7
3.5	0.53	1.43	4.6	4.9
3	0.35	1.88	2.3	3.2

表 6-2 FGC 型全光スイッチにおける信号光の変動

782nm

励起光出力 (W)	平均出力 (W)	パルス時間幅 (ps)	パルスピーク (kW)	ロックインアンプ (mV)
5.5	1.2	1.2	12.5	9.5
5	0.97	1.2	10.1	9
4.5	0.8	1.28	7.8	8.2
4	0.68	1.43	5.9	6.3
3.5	0.54	1.65	4.1	5
3	0.4	2.25	2.2	2.8

表 6-3 FGC 型全光スイッチにおける信号光の変動

800nm

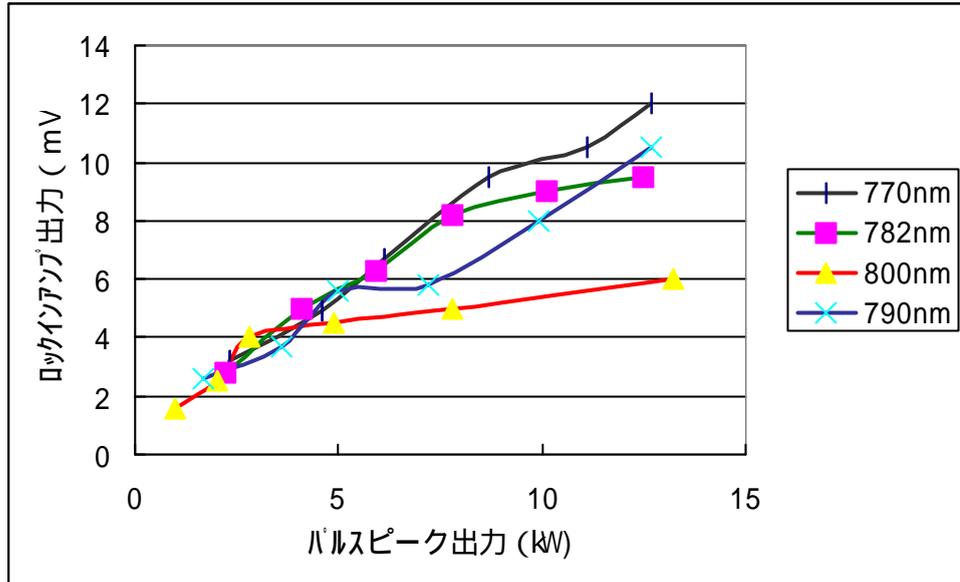
励起光出力 (W)	平均出力 (W)	パルス時間幅 (ps)	パルスピーク (kW)	ロックインアンプ (mV)
5.5	1.2	1.13	13.2	6
5	0.97	1.56	7.8	5
4.5	0.79	2.01	4.9	4.5
4	0.62	2.74	2.8	4
3.5	0.46	2.91	2	2.5
3	0.29	3.57	1	1.6

表 6-4 FGC 型全光スイッチにおける信号光の変動

790nm

励起光出力 (W)	平均出力 (W)	パルス時間幅 (ps)	パルスピーク (kW)	ロックインアンプ (mV)
5.5	1.1	1.28	12.7	10.5
5	0.98	1.24	9.9	8
4.5	0.75	1.31	7.2	5.8
4	0.6	1.5	5	5.6
3.5	0.48	1.69	3.6	3.7
3	0.32	2.35	1.7	2.6

表 6-5 FGC 型全光スイッチにおける信号光の変動



グラフ 6-2 FGC 型全光スイッチにおける信号光の変動

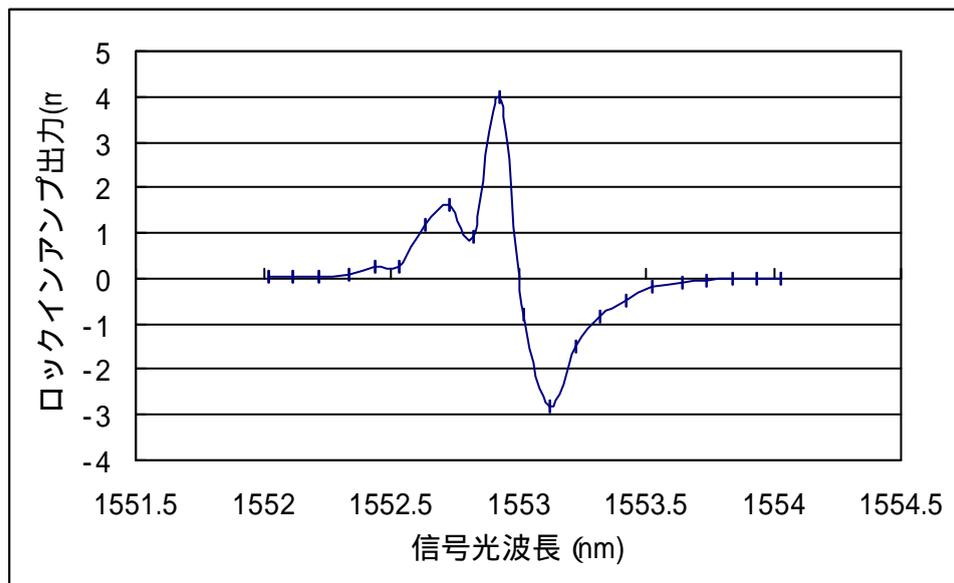
信号光波長とスイッチング特性の測定

次に、制御光の出力を固定した状態で、信号光の出力波長をシフトさせた場合のロックインアンプの出力を測定した。

Ti:サファイアレーザーの出力は波長 782nm、パルスピーク出力 11.5kW(励起光出力 5.5W、レーザー平均出力 1.1W、パルス幅 1.2ps)に固定した。また、信号光の出力は 8dBm に固定した。また、このとき Ti:サファイアレーザーの発振を安定させるためにファイバのレーザー光入射端のあおりを調整した。入射効率 13.9%であった。

信号光波長 (nm)	ロックインアンプ (mV)
1552.022	0.04
1552.116	0.04
1552.218	0.04
1552.334	0.07
1552.436	0.28
1552.53	0.25
1552.632	1.2
1552.726	1.6
1552.826	0.9
1552.927	4
1553.022	-0.8
1553.123	-2.8
1553.225	-1.5
1553.32	-0.84
1553.422	-0.5
1553.523	-0.2
1553.64	-0.1
1553.734	-0.05
1553.836	-0.02
1553.931	-0.01
1554.029	-0.01

表 6-6 信号光の波長変化によるスイッチング特性変化の測定



グラフ 6-3 信号光の波長とスイッチング特性の測定

5 . 考察

2 次の Bragg 波長は測定できなかった。これはスペクトラムアナライザの分解能が低く、微小な信号成分が捉えきれなかったことと。2 次の Bragg 波長の反射に適している FGC や FBG ならば、測定できた可能性はあったように見える。

光強度による FGC のフィルタ特性変化の測定

図のデータのばらつきは誤差であると考えられる。このことから、今回の実験では有意なデータは得られなかった。

FGC 型全光スイッチの測定

今回の実験では 1.55 μm レーザーの光パワーが小さく、サンプリングオシロスコープで測定はできなかった。今後、同様の系で測定する場合には、光増幅を用いて ASE 雑音を除去する方法が一番効果的であると思われる。

FGC 型全光スイッチの測定

図より、高強度光を FGC に入射することにより、FGC を全光スイッチとして動作することが実験的に証明された。

Ti:サファイアレーザーの波長を変化させても、得られた結果の差が無いことから 2 次の Bragg 波長の影響がないといえる。

また、レーザー光の強度に対して信号光のスイッチングの大きさが光パワーに対し線形な関係にあるのは、グレーティングの波長特性における、サイドエッジの部分に信号光波長が合っている場合である。

この検討から、グレーティングのサイドエッジ中に信号光波長を設定した場合に、スイッチングの大きさが光パワーに対し常に線形な関係であるとき、Bragg 波長はシフトしている。(シフト量はサイドエッジの幅より小さい)

信号光波長とスイッチング特性の測定

次に、制御光出力を固定し、信号光の波長をシフトさせた場合のロックインアンプの出力を測定した。

図がその結果である。理論から考えれば、光カー効果により Bragg 波長が長波長側にシフトするため、短波長側サイドエッジに合わせた信号光の P2 への出力は減少する。そして長波長側では増加する傾向にある。

この結果からロックインアンプ出力(縦軸)の値を光パワー変動とするならば正負を逆に考えた方が良い。

今回の実験では Bragg 波長が長波長側にシフトしており、光パワーにより FGC がスイッチとして機能していることがわかった。

また光強度による Bragg 波長シフトは生じても P2 への信号光出

力変化は生じていないことがいえる。

6 . まとめ

今回の実験で得た結果は

- ・ FGC の Bragg 波長をシフトさせることにより、全光スイッチとして用いることが出来ることが分かった。
- ・ FGC の Bragg 波長が長波長側にシフトすることが分かった。
- ・ FGC の 2 次 の Bragg 波長の反射率は低いため、制御光の波長を 2 次 の Bragg 波長に合わせても影響は無いことがわかった。
- ・ Bragg 波長のシフト量はサイドエッジ幅より狭いことがわかった。

第7章 結論

本研究における結果をここで述べる。

- ・可変波長 Ti:サファイアレーザーを用いたフォトルミネッセンス励起スペクトル (PLE) 測定を室温 (300 K) で行い、AlGaAs/GaAs 多重量子井戸半導体 (MQW) の光吸収特性を検出し、励起子効果によると思われるピークを見ることができた。これにより量子井戸構造の光学特性である量子閉じ込め効果が起こっていることを立証した。

- ・分光光度計を用いた透過 吸収特性によって、PLE 測定との光吸収特性の比較が行うことを試みたが、試料の加工がうまくいかず、透過特性による MQW の評価は今後の課題として残った。

- ・量子井戸構造の非線形光学効果による光スイッチの可能性は、室温測定において検出された量子閉じ込め効果で可能性は考えられるが、高強度シフトによるスイッチング特性の測定までにはいたっていない。

- ・光ファイバグレーティングカプラによる非線形光学特性を用いたスイッチング特性において、高強度光による長波長へのシフトにより、光スイッチデバイスへの可能性を見出すことができた。

本研究では以上のように、量子井戸構造の非線形光学効果について基礎的な知識が得られ、光スイッチ等の光デバイスへの可能性に触れることが出来た。今後は残された課題である高強度光シフト特性などの解明などを目指し、量子井戸を用いた応用技術に取り組んでいきたいと思っている。

謝辞

本研究にあたって、常に温かい御指導、御教授を賜りました神戸宏教授をはじめ、日頃から御指導御鞭撻をいただい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、心から厚く感謝致します。また、共同研究において、様々な助言を頂いた茨城大学の峯尾浩之氏、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レーザーの使用法についての助言頂いた中野雄大氏、共に研究に励んだ大野氏、大橋氏、田中氏には様々な助言をもらい非常に研究の励みとなり、また多くの事を学習する事ができ、大変感謝しています。本研究は私一人の力でできたわけではなく、様々な人達の力があってこそ終える事ができました。

再度心より感謝し御礼申し上げたいと思います。

参考文献

- 光エレクトロニクス基礎編 Amnon Yairiv 丸善株式会社
- 超格子ヘテロ構造デバイス 江崎玲於奈 工業調査会
- 超高速エレクトロニクス 末田正・神谷武志 培風館
- レーザー光学 中井貞雄 オーム社
- ナノスペースの不思議な世界 未踏科学技術協会 工業調査会
- Ti:サファイアレーザーによる超高速光パルスの発生と応用 中野雄大 高知工科大学卒業論文
- 光強度による光ファイバグレーティングカプラのフィルタ特性変化の測定 峯尾浩之 実験報告書