

InGaAs系高利得量子井戸半導体レーザーの開発及び評価測定

小松原 望

平成 31 年 1 月 4 日

概 要

論文の要旨を記入

目次

第1章 序論	5
1.1 研究背景	5
1.1.1 半導体レーザーからの超短光パルス発生	5
1.1.2 InGaAs 高利得材料	6
1.2 本研究の目的	6
第2章 試料構造と測定方法	7
2.1 はじめに	7
2.2 試料作製	7
2.2.1 試料構造	7
2.2.2 ブロードコンタクトレーザー	8
2.2.3 リッジ導波路型レーザー	8
2.2.4 マウント (ダイボンディング??)	11
2.3 測定方法	12
2.3.1 定常電流注入による測定実験	12
2.3.2 電流注入利得スイッチング実験	14
第3章 実験結果	15
3.1 ブロードコンタクトレーザー試料に関する測定結果	15
3.1.1 3周期	15
3.1.2 10QW	18
3.1.3 電流広がりに関する考察	18
3.1.4 外部量子効率、内部量子効率と吸収係数の計算	21
3.2 リッジ導波路型レーザーに関する実験結果	24
3.2.1 定常電流の結果	24
3.2.2 短パルス電流注入の結果	28
3.2.3 IL	28
3.2.4 3QW 試料の利得スイッチング動作	30
3.2.5 10QW 試料の利得スイッチング動作	32
3.2.6 結果の比較	34
3.2.7 付録かな??コンボリュージョンの説明, 電気パルスの確認	35
第4章 考察	36
4.1 はじめに	36
4.2 パルス幅と共振器長の関係 (10QW)	36
4.3 3QW と 10QW の比較	36

第 5 章	まとめと展望	37
5.1	本研究のまとめ	37
5.2	今後の展望	37
第 6 章	付録	39
6.1	deconvolution の計算?	39
6.2	駆動系の電気信号	39

目 次

1.1	格子定数	6
2.1	エピウエハ構造	8
2.2	ブロードコンタクレザー	9
2.3	ブロードコンタクレザーめも	9
2.4	リッジ導波路型レーザー	10
2.5	測定デバイス外観	11
2.6	IL 実験系回路図	12
2.7	GS 実験系	14
3.1	3MQW の IL カーブと IV カーブ	16
3.2	3MQW の閾値電流と発光効率	17
3.3	10MQW の IL 結果	18
3.4	10MQW の IL 結果	18
3.5	3MQW の閾値電流密度	19
3.6	10MQW の閾値電流密度	20
3.7	3QW 外部量子効率	21
3.8	3QW 外部量子効率の逆数	22
3.9	10QW 外部量子効率	23
3.10	10QW 外部量子効率の逆数	23
3.11	3 周期 リッジ導波路型レーザーの IL カーブおよび IV カーブ	24
3.12	3 周期 リッジ導波路型レーザーの閾値電流	25
3.13	3 周期 リッジ導波路型レーザーのスロープ効率	25
3.14	10 周期 リッジ導波路型レーザーの IL カーブおよび IV カーブ	26
3.15	10 周期 リッジ導波路型レーザーの閾値電流と閾値電流密度	27
3.16	10 周期 リッジ導波路型レーザーのスロープ効率	27
3.17	3MQW 短パルス駆動時の IL カーブ	28
3.18	10MQW 短パルス駆動時の IL カーブ	29
3.19	3MQW L=100um の利得スイッチング光パルスの時間波形	30
3.20	3MQW L=200um の利得スイッチング光パルスの時間波形	30
3.21	3MQW L=300um の利得スイッチング光パルスの時間波形	31
3.22	10MQW L=300um の利得スイッチング光パルスの時間波形	32
3.23	10MQW L=400um の利得スイッチング光パルスの時間波形	32
3.24	10MQW L=500um の利得スイッチング光パルスの時間波形	33
3.25	10MQW 利得スイッチングパルスのパルス幅	34
3.26	3MQW 利得スイッチングパルスのパルス幅	34

表 目 次

2.1	定常電流印加実験に用いた機材	13
2.2	利得スイッチング実験に用いた機材	14
3.1	3QW ブロードコンタクトレーザの電流広がり	19
3.2	10QW ブロードコンタクトレーザの電流広がり	19

第1章 序論

1.1 研究背景

1.1.1 半導体レーザーからの超短光パルス発生

様々な短パルス発生法

半導体レーザーは産業的に広く普及している発光素子である。小型化可能、大量生産可能、熱や振動(安定性)に強いことなどが主な理由である。さらに半導体から直接ピコ秒程度の超短光パルスを発生させる技術も研究が盛んに行われており、産業への応用が期待されている。

半導体から短パルスを発生させる方法として従来行われてきた方法が主に3つある。モード同期法、Qスイッチ法、利得スイッチ法である。モード同期法は個体レーザーでも用いられておりフーリエ限界に近いパルス幅を生成できる反面パルスの繰り返し周期が固定されてしまうという特徴を持つ。一方Qスイッチング法は過飽和吸収帯を用いるなどしてQ値を瞬間的に増大させることで高エネルギーの光パルスを得ることができる。利得スイッチングは複雑な構造を必要とせず、全ての半導体レーザーで実現が可能な技術であり実用性に秀でている。レーザー加工などの技術的応用においては繰り返し可変であることや様々な種類の光源を試すことができるという利点があるため、??本研究では利得スイッチング法に着目した。

利得スイッチング法

利得スイッチングはこの右下の図は過去40年間に行われてきた利得スイッチングのパルス幅をプロットしたものです。赤が光励起、青が電流注入を表しています。今回意図しているのは電流注入であるため、青を見てみると最短でも5psであることがわかります。この限界に挑戦したいというのがモチベーションです。[伊藤さん論文]

利得スイッチング光パルスの短パルス化

まずは利得スイッチングのメカニズムについて説明いたします。利得スイッチングとは半導体にns以下の時間内に強く励起することで半導体内にできたキャリアが一気に放出される現象です。右の図は上から順に励起パルス、発光パルスおよび利得の時間発展の計算結果を表したものです。電流注入に関する青いプロットを見ていただくと長い励起パルスを引火すると、利得が上がっていき、発振閾値を超えたところでキャリアを使って20ps程度の短いパルスが出てきます。

ではどのような半導体ならば短いパルスが出てくるのかという疑問に達しますがこのような先行研究がなされています。この2つの連立方程式はそれぞれキャリアとフォトンの変位を記述するレート方程式です。先ほどのシミュレーションも同等の式に従って計算されたものです。この研究の中ではキャリアのフォトンへの変換効率に寄与する g というファクターが高いほど発生パルスが短くなるということが示唆され、実験的に示されました。

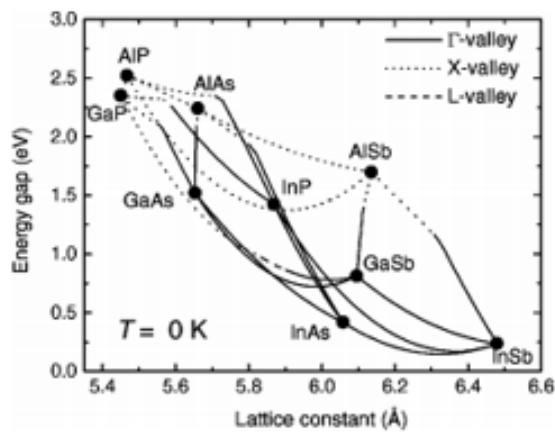


FIG. 3. Lowest forbidden gap as a function of lattice constant for non-nitride III-V compound semiconductors (points) and their random ternary alloys (lines) at zero temperature. The materials with Γ -, X -, and L -valley gaps are indicated by solid, dotted, and dashed lines, respectively.

Band parameters for III-V compound semiconductors and their alloys

図 1.1: 格子定数

1.1.2 InGaAs 高利得材料

@歪み補償 InGaAs を用いる理由 InGaAs

1.2 本研究の目的

電流注入により短いパルスを達成すること？新しい構造を作ったからそれを図ること？

第2章 試料構造と測定方法

アイウエオ

2.1 はじめに

本研究では InGaAs/GaAs 多重量子井戸・ファブリーペロー型の半導体レーザーをデザインした。本章では 2.2 節でそのエピ構造とデバイス化のためのプロセスについて、2.3 節で測定手法について述べる。

2.2 試料作製

本研究では活性層に InGaAs/GaAs 多重量子井戸を持つウエハをデザインした。本 2.2 節ではデザインと測定するためのデバイス化について述べる。ウエハの結晶成長は NTT-AT および台湾の会社？に依頼した。結晶成長また後述のリッジ加工プロセスやコンタクトメタル蒸着は NTT-AT に依頼した。

2.2.1 試料構造

まずはエピウエハ構造について述べる。量子井戸の周期は 3 周期と 10 周期の 2 種類である。それぞれのエピ構造を図??に示す。n タイプ GaAs 基板の上にバッファ層が丸々 nm, その後 n-AlGaS がどうたらこうたら SCH 層がどうたらこうたら。バンドギャップの図があると良い屈折率とかも

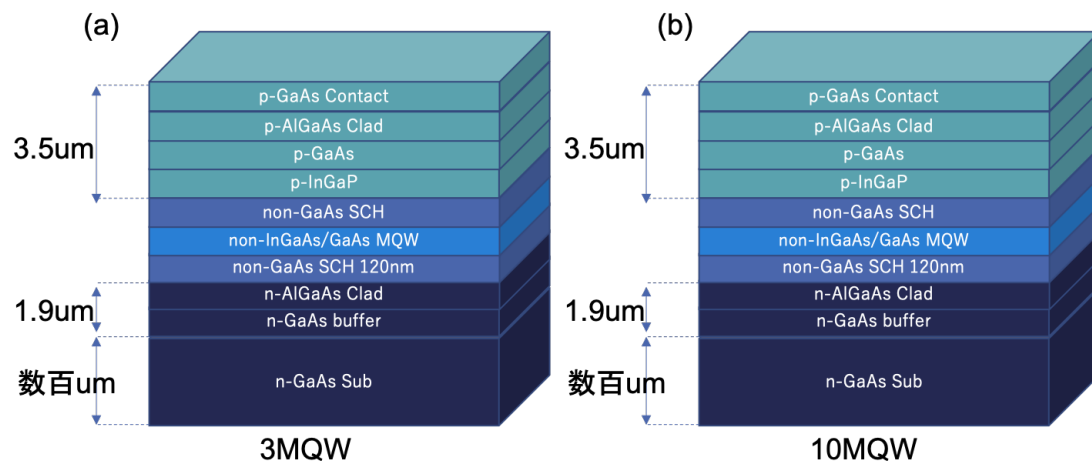


図 2.1: エピウエハ構造

2.2.2 ブロードコンタクトレーザ

結晶成長の後 n 側と p 側にコンタクト金属の蒸着を行った。p 側の原子はなにに、n 側はなににである。劈開面は 001? とかなんとかブロードコンタクトレーザとは光導波路を形成せずバー(棒)のままのレーザである。プロセスを簡略化することで早く測定を行うことを目的とした。ウエハの評価測定のために用いた。図 2.2 に模式図を示す。図 2.2 の上から下に向かって電流が流れ、活性層でキャリアの再結合が起き発光が起こる。また図の手前と奥の劈開面でファブリーペロー共振器を形成しており、反転分布となっているときに光がそこを往復することで誘導放出が起き発振し、紙面の手前と奥方向に(軸を用意した方がいいか?) この文章だと絵をバーっぽくした方がいいか? 共振器長は 500, 1000, 2000um の 3 種類を作製した。また電極パッド幅は 3, 5, 10, 30, 50, 100, 300um の 6 種類を作製した。

2.2.3 リッジ導波路型レーザ

次にリッジ導波路型レーザについて述べる。その模式図を図 2.4 に示す。エピウエハ作製後 p 側クラッド層を活性層直上までエッチングすることで光導波路を形成している。横方向の光閉じ込めが大きくなるため、キャリアと光の重なりが大きくなるため利得を大きく? することができる。参考文献欲しい。最終的に利得スイッチング動作を試みるデバイスである。共振器長は 100, 200, 300, 400, 500, 1000um, リッジ幅は 1.5um, 2.5um のものを作製した。

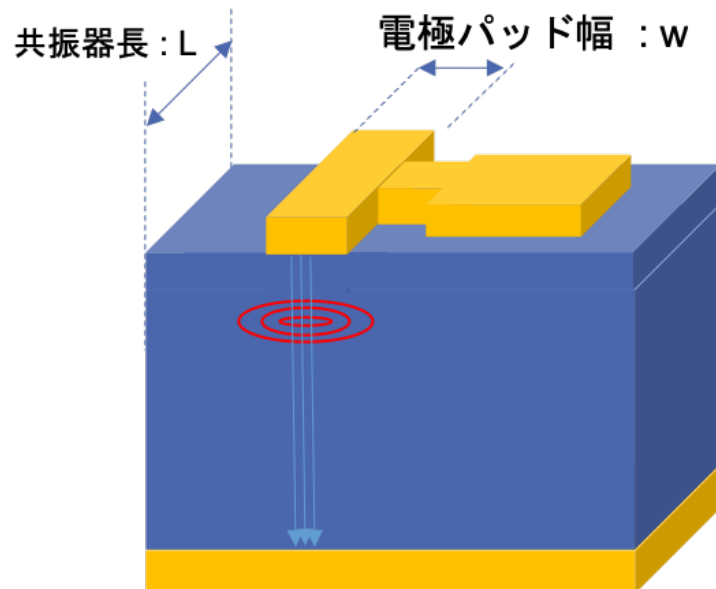


図 2.2: ブロードコンタクトレーザー

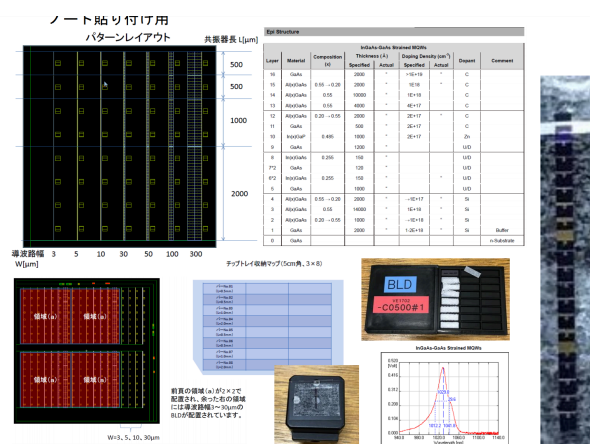


図 2.3: ブロードコンタクトレーザめも

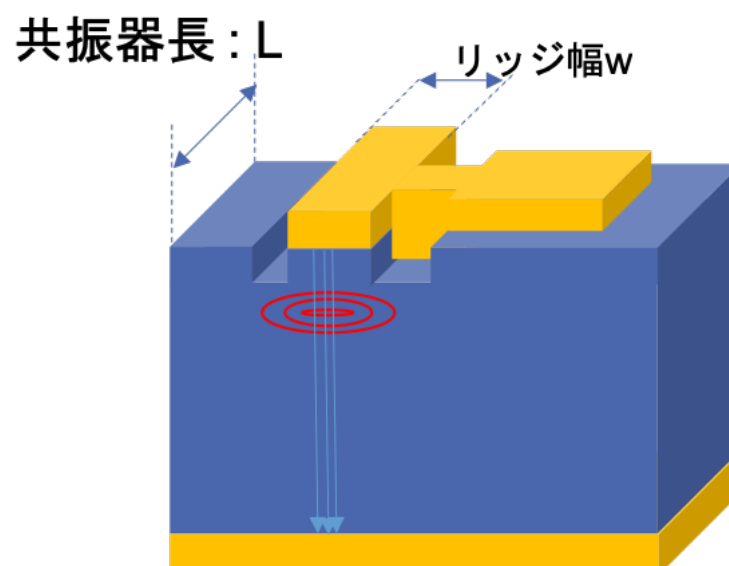


図 2.4: リッジ導波路型レーザー

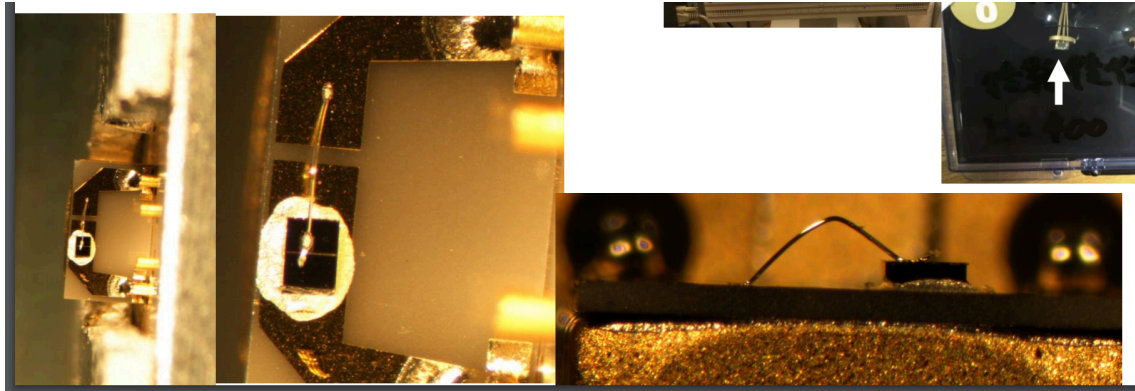


図 2.5: 測定デバイス外観

2.2.4 マウント (ダイボンディング??)

作製したブロードコンタクトレーザーバーおよびリッジ導波路型レーザーを電流注入実験を行うためにマウントを行なった。それぞれ図に示す。

レーザーバーは AlN 基板に AnSn メッキを施してあるサブマウント (.... 社製) にダイボンディングした。ブロードコンタクトレーザーはダイボンディングしてなかったっけ? そういえばこの状態で試料上面の電極をプローバー (先端の径... 程度の金属の針) でさわり、電流を流した。一本のバーに 5 個程度の素子があるので測定が終わったら次々とプローバーの触る箇所をかえていけば速やかに測定を続けることができる。

一方リッジ導波路型レーザーの一部は利得スイッチング動作実験を行うために高速応答が期待できるようにマウントした。Transistor Outline パッケージと呼ばれる缶状の金属にマウントを行った。.... 社製の CAN を用いた。その際レーザーバーをさらに分割し 1 つ 1 つの素子に分離した。分離した素子を AnSn 共晶材あるいはエポキシを用いて CAN にダイボンディングし、金線をワイヤーボンディングマシンで配線した。

2.3 測定方法

本研究では主に2つの実験を行った。1つはエピウエハの品質を評価するための定常電流を印加する実験である。もう一つは利得スイッチング動作を起こすための短い電気パルスを印加する実験である。それぞれについて節ごとに述べる。

2.3.1 定常電流注入による測定実験

まずエピウエハの品質を調べるために定常電流を注入する実験である。発振閾値電流や発振時の発光効率すなわち外部量子効率などの基本的な物性パラメータを見積もることができる。実験系を図2.6に示す。パルスジェネレータから数 μs パルスを数 ms 繰り返し周期で発生させ試料に注入する。ここでマイクロ秒程度のパルスは試料の中での発光過程やその他の物理現象の時間オーダーに対して十分長く、定常電流とみなすことができる。DC電流では熱の影響が大きくなってしまい試料が壊れてしまう恐れがあるため。Duty比(パルス幅と繰り返し周期の比)を1:1000程度に設定して実験を行った。試料からの発光強度を光パワーメータで測定した。また、回路に試料と直列に抵抗(22.4Ω)を入れ、そこにかかる電圧をモニタすることで流れる電流をそくていした。また回路全体の電圧と抵抗にかかる電圧の差をとることで試料にかかる電圧を算出した。

本来であればDC電流を印可することで定常発振させることが望ましい。しかし試料への熱の影響が無視できないほど大きくなってしまうため、本研究ではDC電流の代わりにマイクロ秒程度パルス電圧を印可した。マイクロ秒は半導体素子の中が定常状態になるには十分長い本研究ではD電流は... ms 秒周期、... μs のパルス電流を流した。 μs 程度の電流は試料にとっては定常と見なされる。

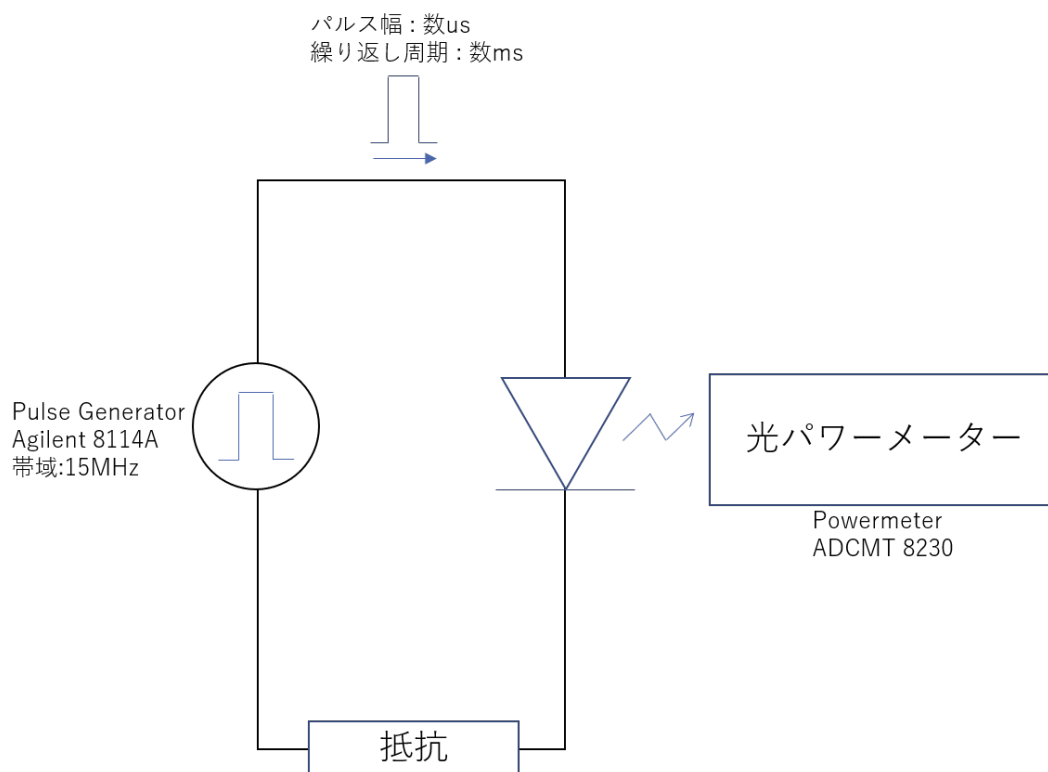


図 2.6: IL 実験系回路図

ここで用いた機材を 2.1 に示す。

表 2.1: 定常電流印加実験に用いた機材

機材	型番
Pulse Generator	Agilent 8114A
Power Meter	ADCMT 8230
Oscilloscope	-

2.3.2 電流注入利得スイッチング実験

ナノ秒程度の短いパルス電圧を印加することで利得スイッチング動作を起こした。その実験系の回路図を図??に示す。電気パルスがパルスジェネレータから同軸ケーブルを介して試料へ印加される。パルスジェネレータで生成された電圧パルスは可変抵抗、RF アンプで増幅されデバイスへと印可される。試料からの発光は対物レンズでコリメートされ、非球面レンズで光ファイバーに集光される。その後フォトダイオードで検出しその電圧を高速サンプリングオシロスコープでモニタすることで光の時間波形を測定した。この実験で用いた機材を表 2.2 にまとめた。

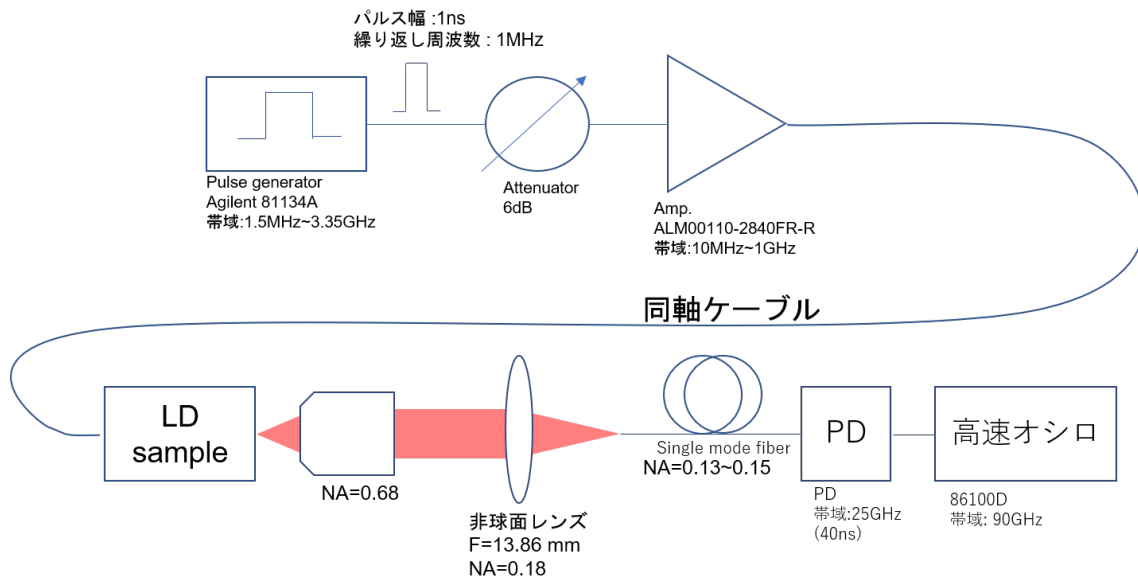


図 2.7: GS 実験系

表 2.2: 利得スイッチング実験に用いた機材

機材	型番	帯域
Pulse Generator	Agilent 81143A	1.5MHz~ 3.35GHz
Atteuator	埋める	埋める
RF Amp	ALM00110-2840FR-R	10MHz ~ 1GHz
PD	埋める	25GHz
Oscilloscope	86100D	90GHz

第3章 実験結果

本章では 3.1 節ではブロードコンタクトレーザ、3.2 節ではリッジ導波路型レーザへの電流注入実験についての実験結果を報告する。

3.1 ブロードコンタクトレーザ試料に関する測定結果

ブロードコンタクトレーザへ定常電流を流して IL カーブを得る実験を行った。様々な共振器長、電極パッド幅の試料に対して実験を行うことでウエハの基本的な物性パラメータを見積もることが目的である。

発振閾値電流を測定することに加えて、発振時の印可電流の増分に対する光出力の増大から発光量子効率 (微分外部量子効率) を見積もることが目的である。また発振閾値電流密度を算出するためにデバイス内の電流の広がりを見積もった。3 周期ウエハと 10 周期ウエハごとに節を分けている。

3.1.1 3 周期

3 周期量子井戸ブロードコンタクトレーザの結果を示す。図 3.1(a) 縦軸に発光強度 (片方の端面)、横軸に電流をとった IL カーブの結果である。また 3.1(b) は縦軸に試料にかかっている電圧、横軸に電流をとった IV カーブの結果である。共振器長 L が $L=500, 1000, 2000\mu\text{m}$ の結果をプロットした。代表としてパッド幅 $w=50\mu\text{m}$ の結果をプロットした。測定条件は $1\mu\text{s}$ パルスで 2ms 繰り返し周期である。デューティ比は 1:2000 である。

(a) を見ると各デバイスにおいて光出力強度が電流値を上げてくと増加していき、ある電流値を超えると発振が始まり発光強度が急激に増加することがわかる。その電流値を発振している時の IL カーブを直線フィッティングすることで求めた。フィッティング直線の x 切片を発振閾値電流 I_{th} とした。またフィッティング直線の傾きを発振時のスロープ効率 $\Delta P/\Delta I$ とした。ここで表とか作った方がわかりやすいか？

(b) を見ると各デバイスにおいて電流が流れ始めるのが 1V 付近からであることが見て取れる。また共振器長 L が長いほど同じ電流に対する電圧が低い。これは電流が流れる面積が共振器長 L に比例して大きくなるためデバイスの抵抗値が小さくなっているためである。

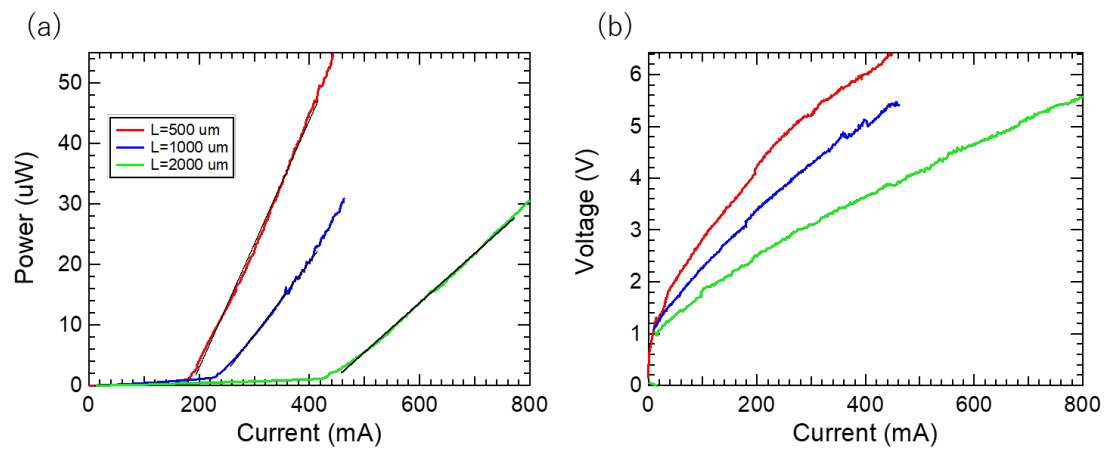


図 3.1: 3MQW の IL カーブと IV カーブ

次に様々なパッド幅に対して見積もった発振閾値電流 I_{th} の結果を図 3.5(a) に示す。発振閾値電流 I_{th} 、横軸が電極パッド幅 w である。(b) は発振時の発光効率である。先のフィッティング直線の傾きにデューティー比をかけ、さらに両端面からの発光の分で 2 倍したものをプロットした。

図 3.5(a) を見ると、パッド幅 w が 50 μm より大きい領域では閾値電流 I_{th} はパッド幅 w に対して線形に増加していることがわかる。一方パッド幅 w が小さい領域では線形に変化していない。

この原因は電流がパッド幅 w に対して無視できないほど広がってしまっているためだと考えられる。このことについて 3.1.3 節で述べる。

図 3.5(b) を見るとそれぞれの共振器長で概ね横ばいの値を持っている。

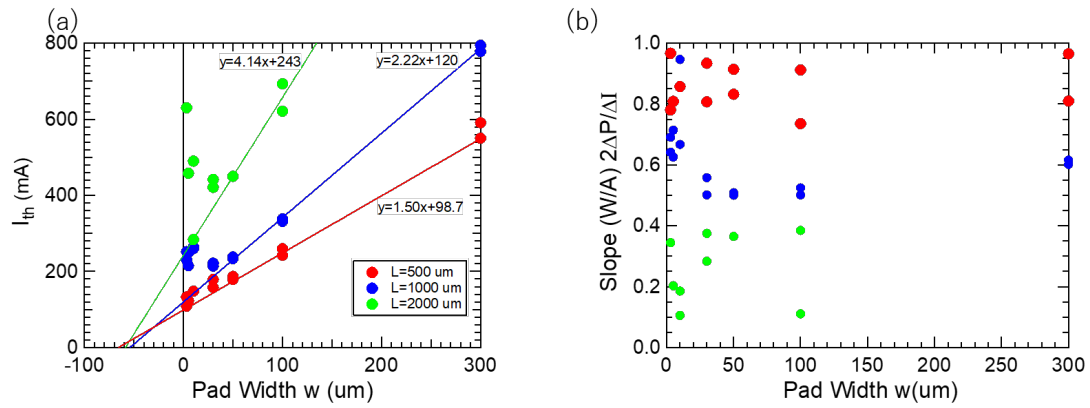


図 3.2: 3MQW の閾値電流と発光効率

3.1.2 10QW

次に10周期量子井戸ブロードコンタクトレーザーについての結果を示す。図3.3に(a)ILカーブおよび(b)IVカーブを示す。 $w=50\mu\text{m}$ を代表としてプロットした。色分けは共振器長を表す。駆動条件は2 μs パルスを2ms繰り返し周期で印可した。デューティー比は1:1000である。次に3.5

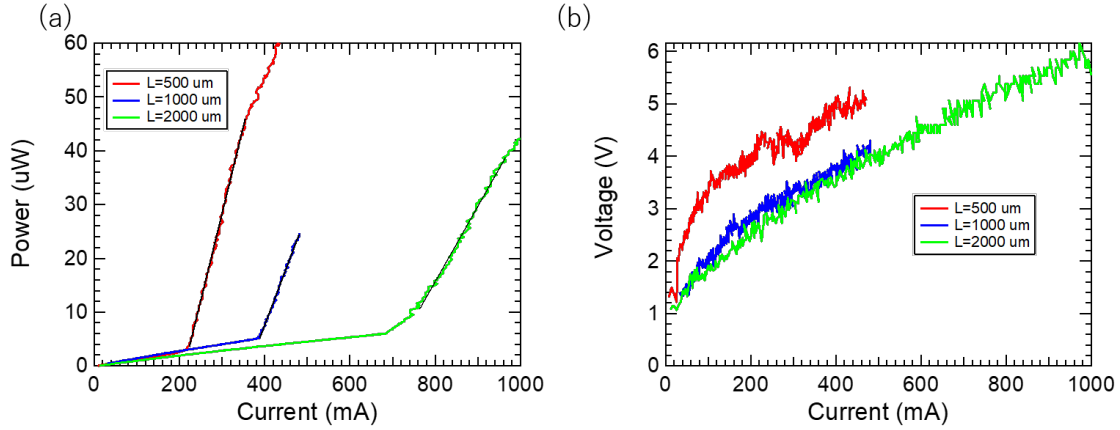


図 3.3: 10MQW の IL 結果

(a) に 3.3 (a) の IL カーブの発振時の直線フィッティング結果から閾値電流 I_{th} および (b) スロープ効率 $\Delta P/\Delta I$ をプロットした。傾きはデューティー比 1:1000 と両端面からの発光を換算していることに注意されたい。

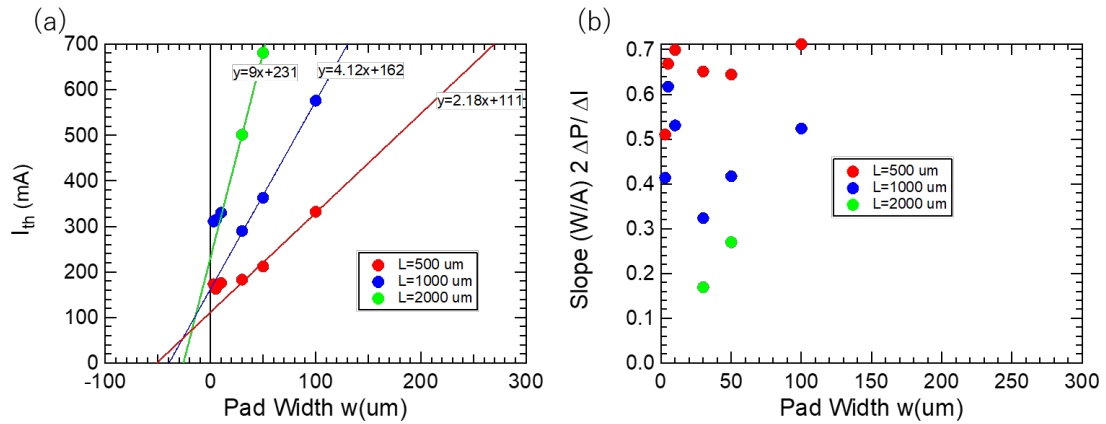


図 3.4: 10MQW の IL 結果

3.1.3 電流広がりに関する考察

3.1.1 節と 3.1.2 節で IL カーブから閾値電流を見積もった。この値から閾値電流密度 J_{th} を求めることが大切である。レーザーの基本的な特性を知る上で閾値電流密度が大切なパラメータであるからである。発振閾値電流 I_{th} を電流が流れた面積で割れることで閾値電流密度 J_{th} が求まる。本体閾値電流電流は電流を流す面積に比例して大きくなる。面積とは電極パッド幅 w と共振器長 L の積で表される。しかし図 3.1 (a) や 3.3(a) を見るとそうになっていない。そこで発振閾値電流 I_{th}

が線形に増加する領域をフィッティングした直線の x 切片を含めたパッド幅を有効的なパッド幅と
 考えて閾値電流密度を算出した。まずは有効パッド幅を見積もった。フィッティング関数の x 切片
 の絶対値が実質的なパッド幅の増分 w' である。その値を表に示した。

表 3.1: 3QW ブロードコンタクトレーザの電流広がり	
共振器長 L (um)	パッド幅の増分 (電流の広がり) w' (um)
500	65.8
1000	54.1
2000	58.7

表 3.2: 10QW ブロードコンタクトレーザの電流広がり	
共振器長 L (um)	パッド幅の増分 (電流の広がり) w' (um)
500	51.1
1000	39.5
2000	25.7

この表の値 w' と閾値電流 I_{th} (mA) から式 (3.1) の関係を用いて閾値電流密度 J_{th} (kA/cm²) を算
 出した。

$$J_{th} = \frac{I_{th}}{(w + w')L} \quad (3.1)$$

その結果を示す。図 3.5 に 3 周期の結果、3.6 に 10 周期の結果をプロットした。

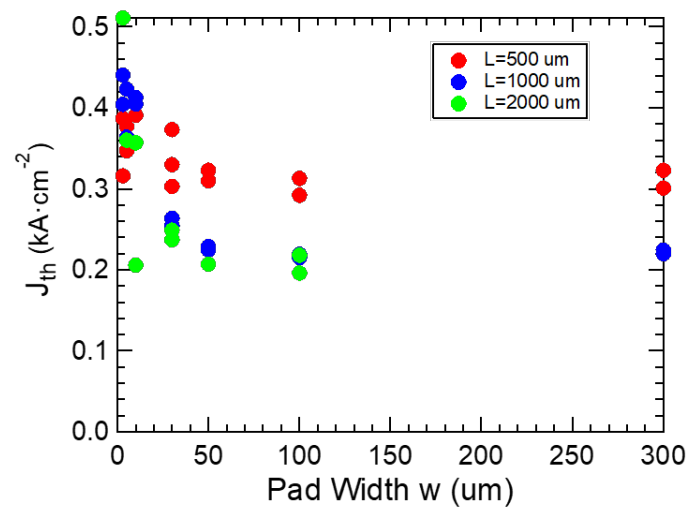


図 3.5: 3MQW の閾値電流密度

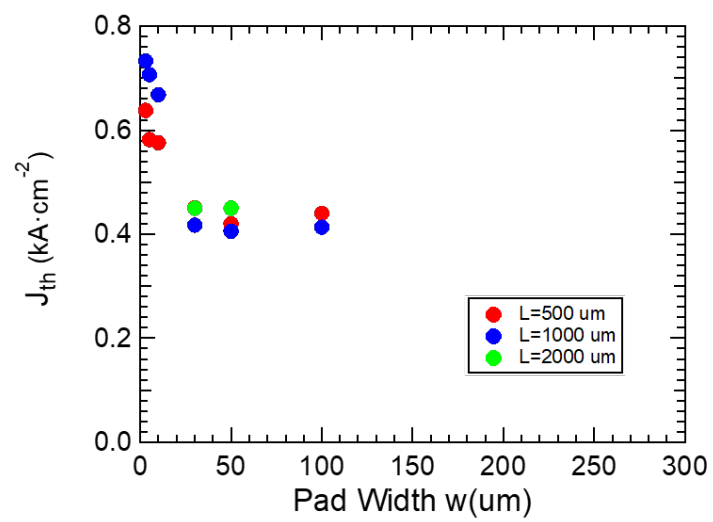


図 3.6: 10MQW の閾値電流密度

3.1.4 外部量子効率、内部量子効率と吸収係数の計算

次に IL カーブの発振時の傾きに相当するスロープ効率 $\Delta P/\Delta I$ から試料の内部量子効率および吸収係数を算出した。まずはスロープ効率 $\Delta P/\Delta I$ (W/A) から外部微分量子効率 η_d を算出した。式 (3.2) の関係を用いた。

$$\eta_d = \frac{e}{h\nu} 2 \frac{\Delta P}{\Delta I} \quad (3.2)$$

e は電気素量、 h はプランク定数、 ν は発振周波数であり、1050nm とした。 η_d はキャリアの注入数に対する取り出せる光子の数の割合である。結果を図 3.7 に示す。縦軸を η_d 横軸をパッド幅 w としてプロットした。色分けが共振器長の違いを表している。 $L=500\mu\text{m}$ では 0.7 程度、 $L=1000\mu\text{m}$ では 0.4 程度、 $L=400\mu\text{m}$ では 0.3 程度の値を持っている。 η_d は共振器長 L を用いて式 (3.3) と書

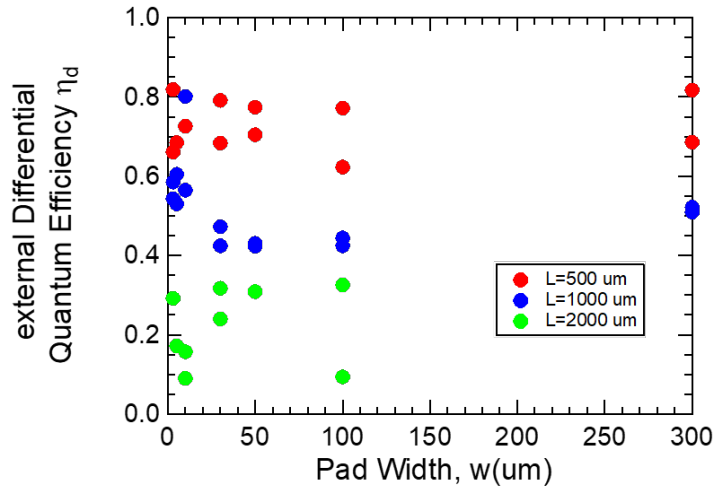


図 3.7: 3QW 外部量子効率

き表される。

$$\frac{1}{\eta_d} = \frac{\alpha_{\text{int}}}{\ln(1/R)\eta_{\text{int}}} + \frac{1}{\eta_{\text{int}}} \quad (3.3)$$

α は共振器内の内部損失、 R は共振器のミラーロス、 η_{int} は内部微分量子効率である。 R は半導体デバイスの屈折率と空気の屈折率の差から 0.32 と仮定できる。見積もった η_d の逆数を共振器長に対してプロットし直線フィッティングを行なった。これを図 3.8 に示す。例としてパッド幅 $w=100\mu\text{m}$ の結果を示す。式 3.3 よりこのフィッティング直線の y 切片から内部量子効率 η_{int} を見積もると $\eta_{\text{int}}=0.96$ と計算できる。また、直線の傾きから内部ロス α_{int} を見積もると $\alpha_{\text{int}}=11.8$ (/cm) と計算できる。

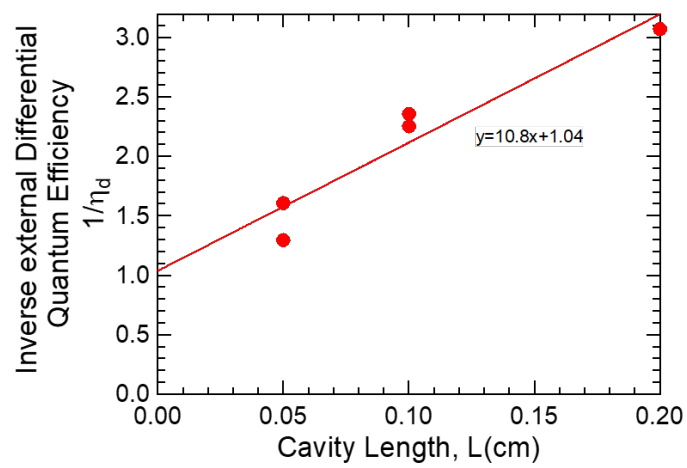


図 3.8: 3QW 外部量子効率の逆数

同様の解析を 10QW についても行った。こちらは $w=50\mu\text{m}$ の結果を示している。10 周期に関しては $\eta_{\text{int}}=0.94, \alpha_{\text{int}}=18.0$ (/cm) となった。

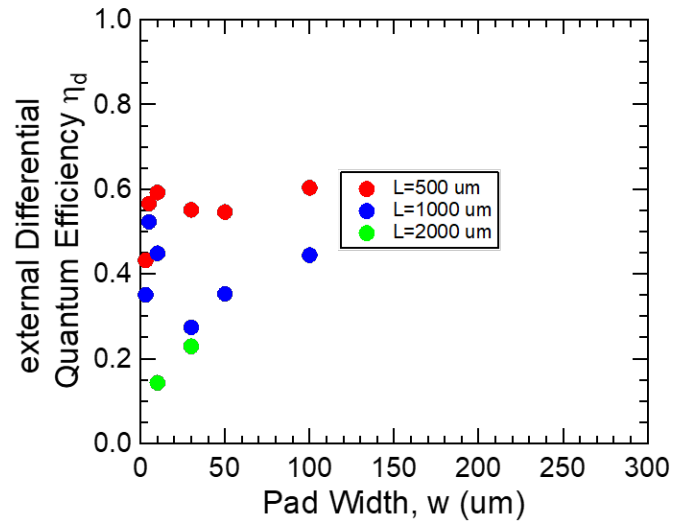


図 3.9: 10QW 外部量子効率

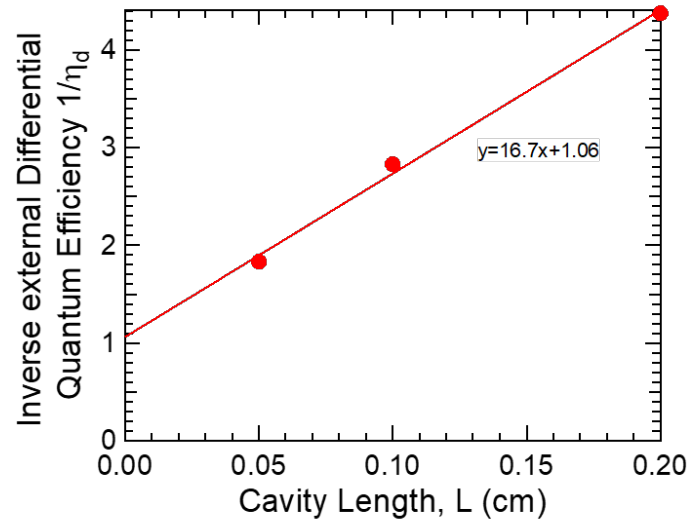


図 3.10: 10QW 外部量子効率の逆数

3.2 リッジ導波路型レーザーに関する実験結果

3.2.1 定常電流の結果

作製したリッジ導波路型レーザーのついて定常電流を流し、発光測定を行った。その結果を示す。2マイクロ秒パルスで2ミリ秒周期で注入した。デューティー比は1:1000である。まずは3周期の結果

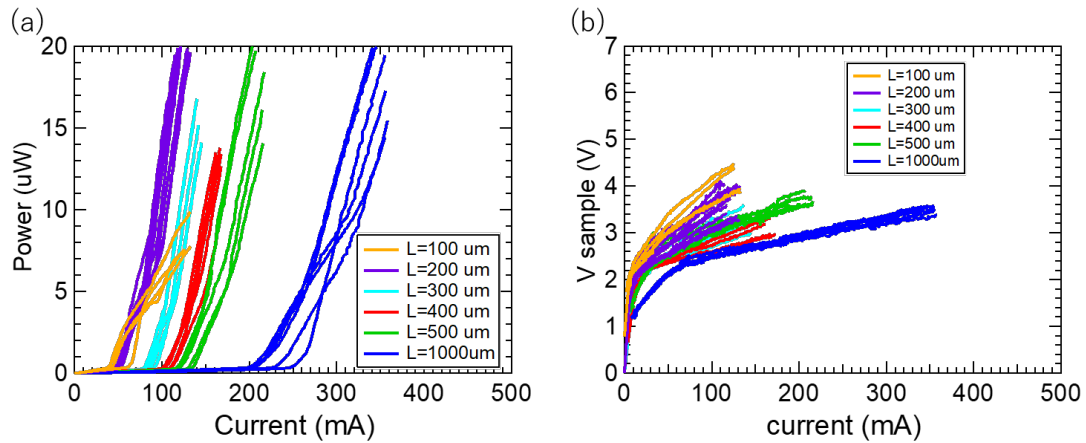


図 3.11: 3 周期 リッジ導波路型レーザーの IL カーブおよび IV カーブ

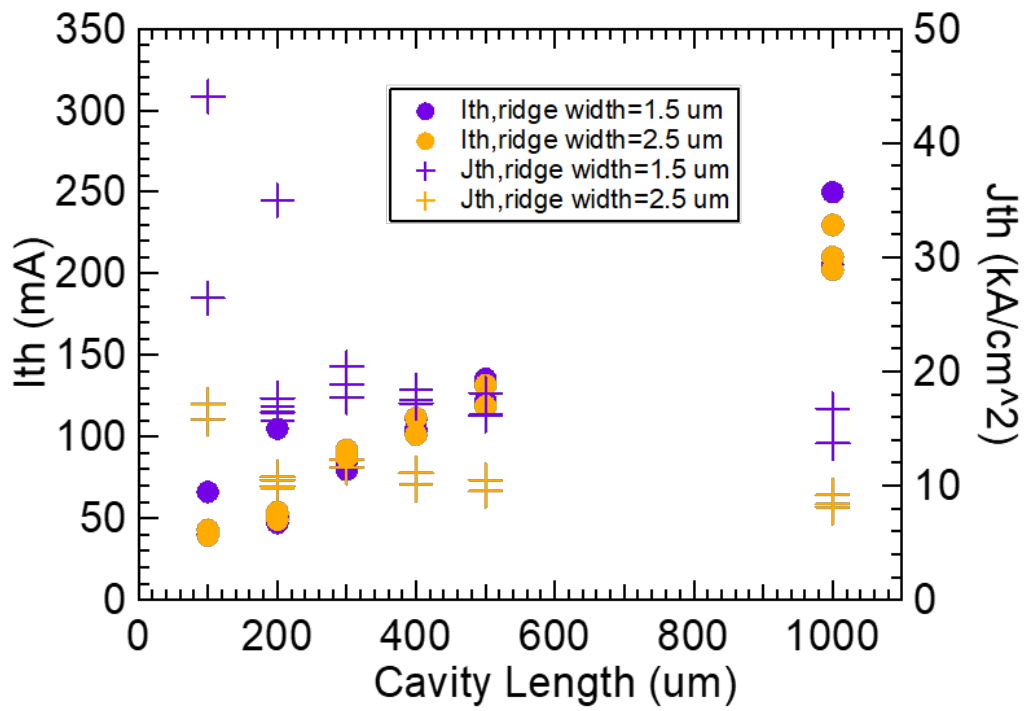


図 3.12: 3 周期 リッジ導波路型レーザーの閾値電流

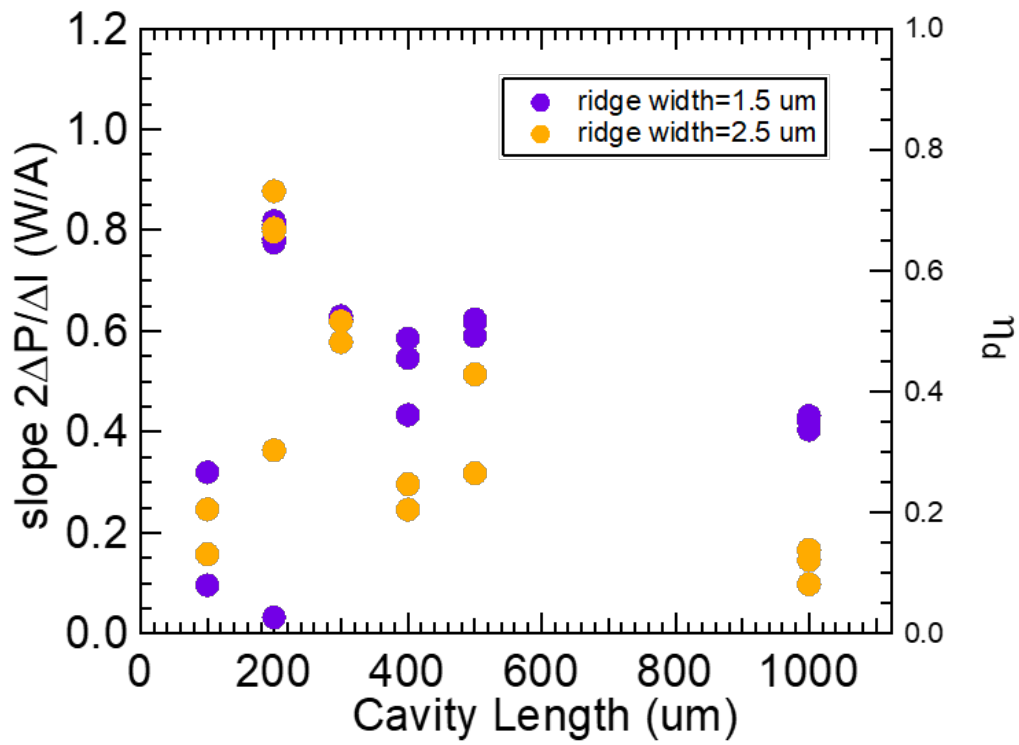


図 3.13: 3 周期 リッジ導波路型レーザーのスロープ効率

次に 10 周期の結果を示す。IL カーブから閾値電流と発進時の傾きを出した。それを示す。

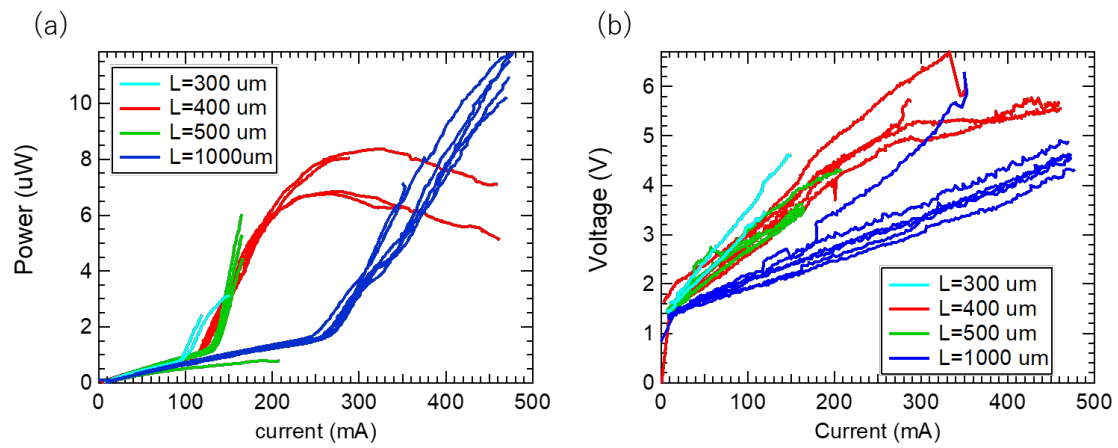


図 3.14: 10 周期 リッジ導波路型レーザーの IL カーブおよび IV カーブ

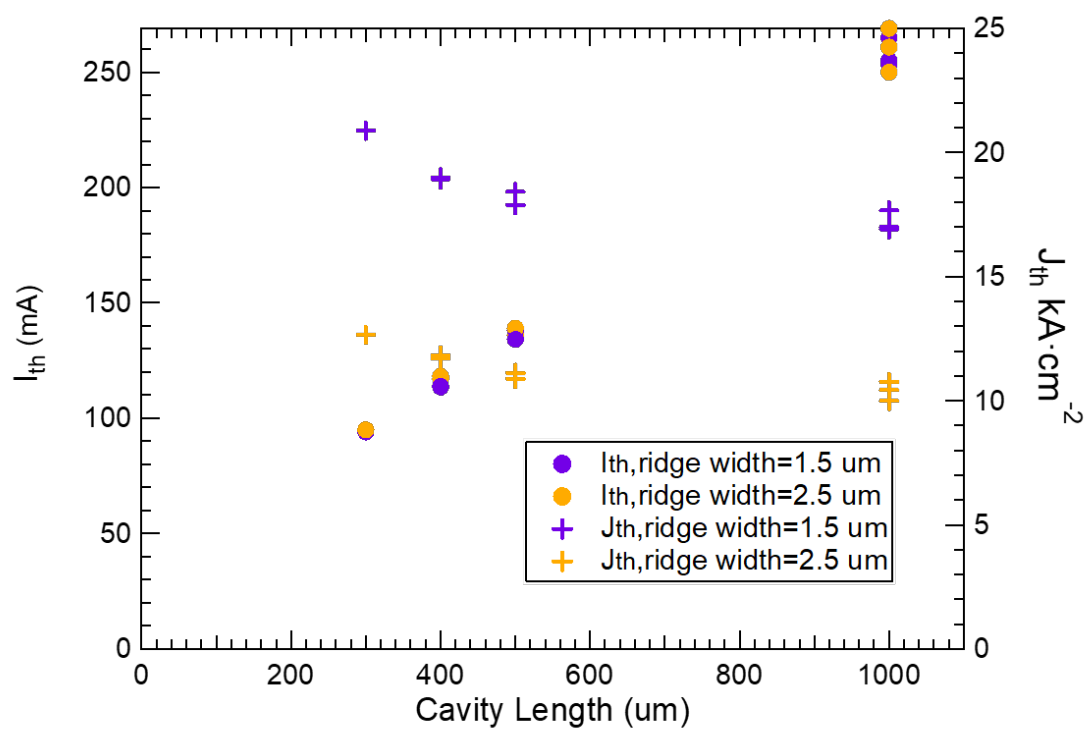


図 3.15: 10 周期 リッジ導波路型レーザーの閾値電流と閾値電流密度

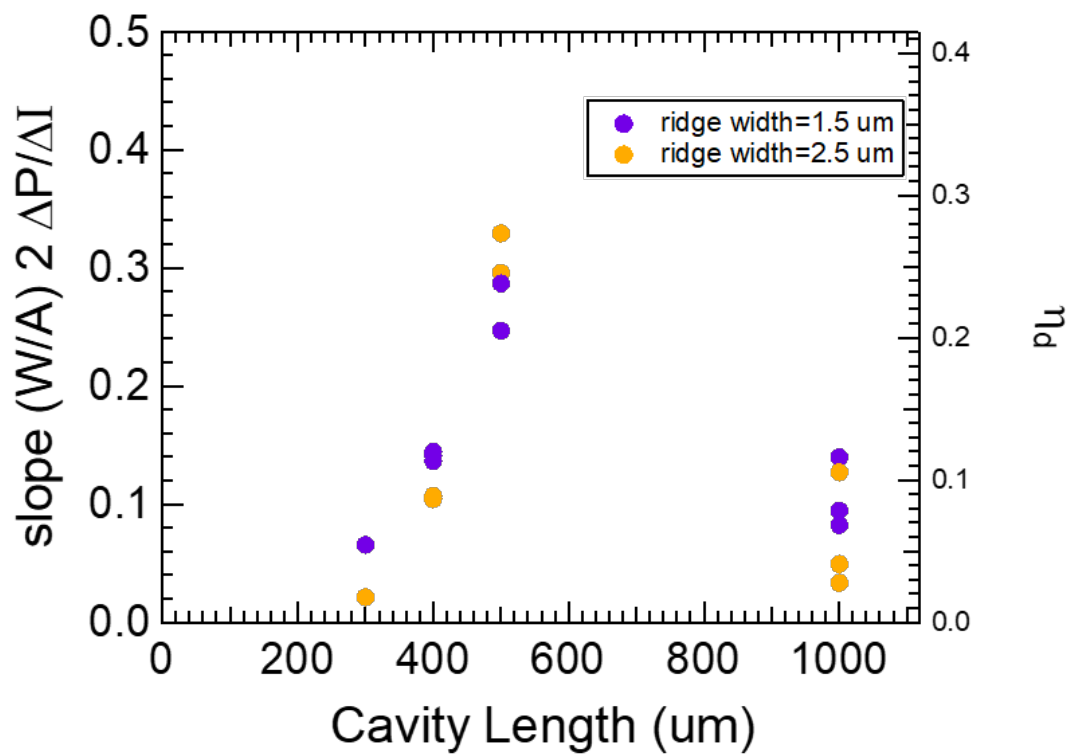


図 3.16: 10 周期 リッジ導波路型レーザーのスロープ効率

3.2.2 短パルス電流注入の結果

リッジ導波路型レーザーに関して電流注入利得スイッチング実験を行った。その IL と時間波形を示す。

3.2.3 IL

10 周期と 3 周期一個ずつ

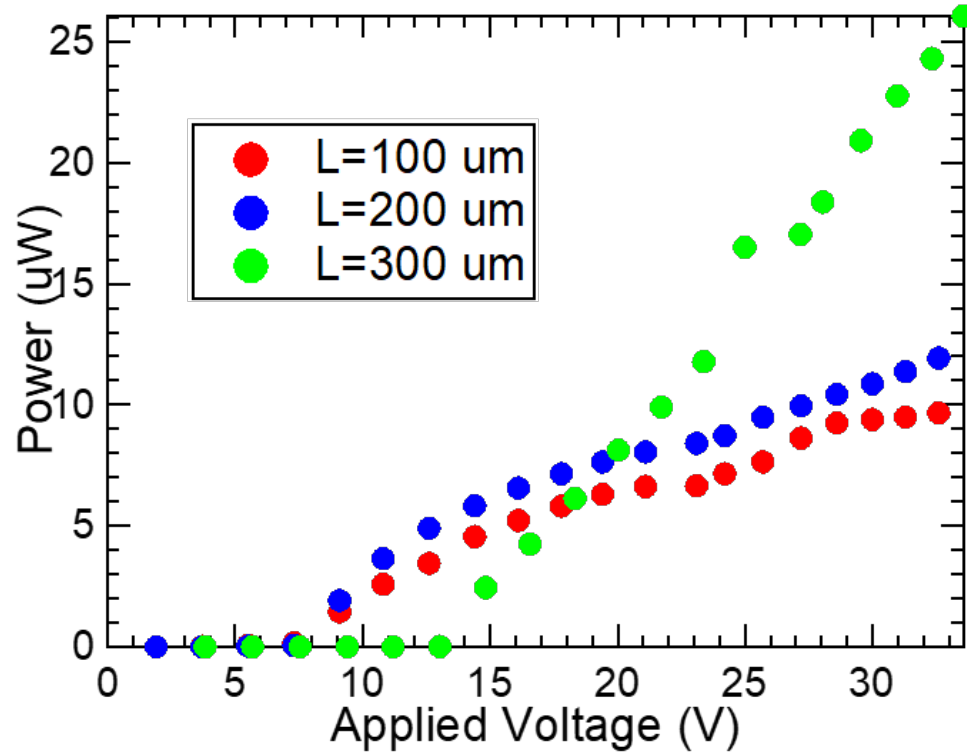


図 3.17: 3MQW 短パルス駆動時の IL カーブ

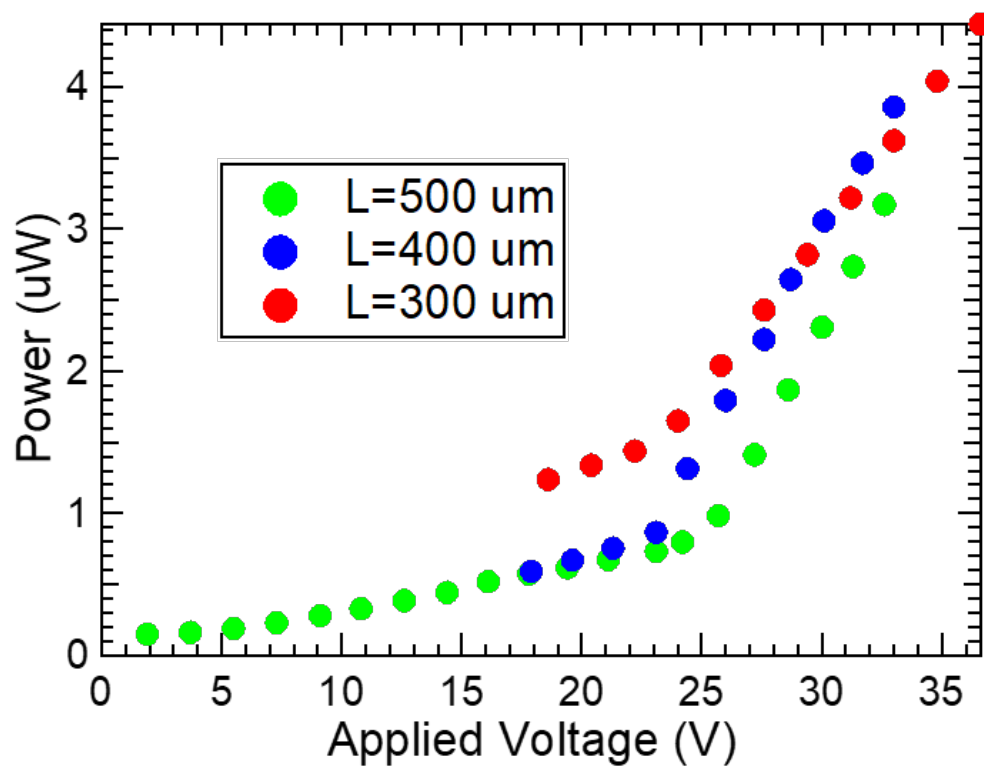


図 3.18: 10MQW 短パルス駆動時の IL カーブ

3.2.4 3QW 試料の利得スイッチング動作

時間波形を示す。図 3.19(a) に 3 周期量子井戸レーザーの励起強度を変えたときの時間波形を示す。図 3.19(b) には強度を規格化したプロットをしめす。これらを見ると励起強度を大きくするに従ってピーク強度が高くなっていき、また立ち上がりが早くなっていることがわかる。

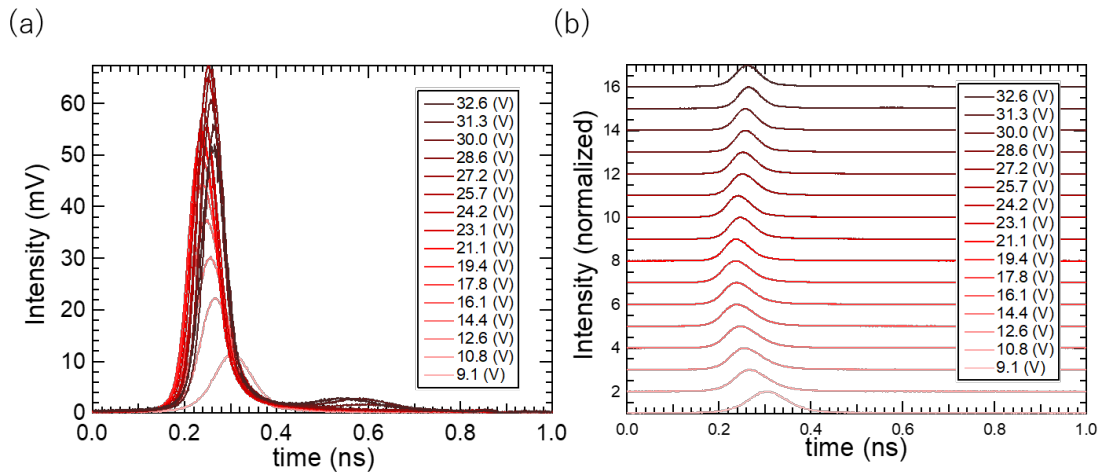


図 3.19: 3MQW L=100um の利得スイッチング光パルスの時間波形

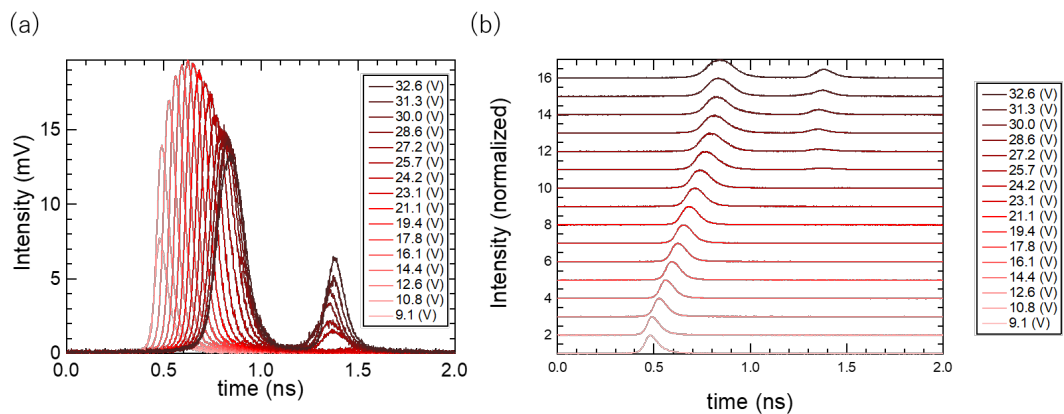


図 3.20: 3MQW L=200um の利得スイッチング光パルスの時間波形

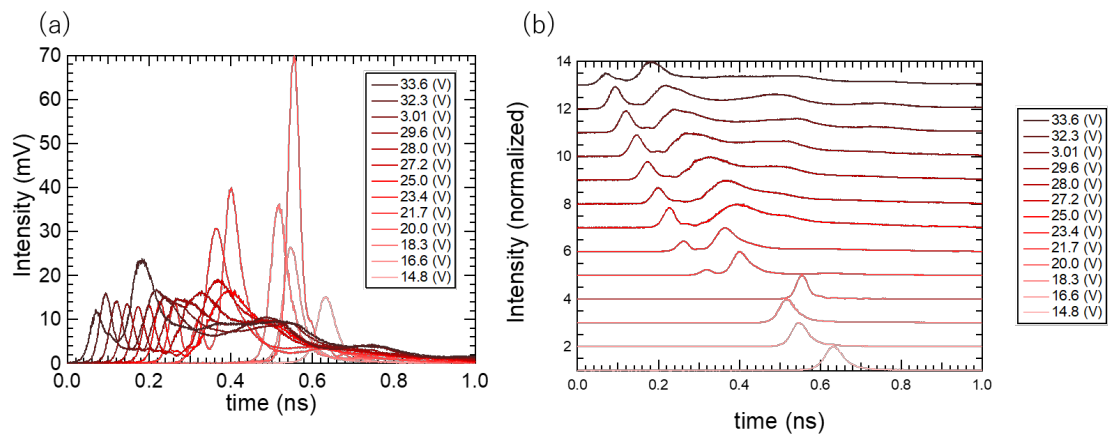


図 3.21: 3MQW $L=300\mu\text{m}$ の利得スイッチング光パルスの時間波形

3.2.5 10QW 試料の利得スイッチング動作

L=300,400,500

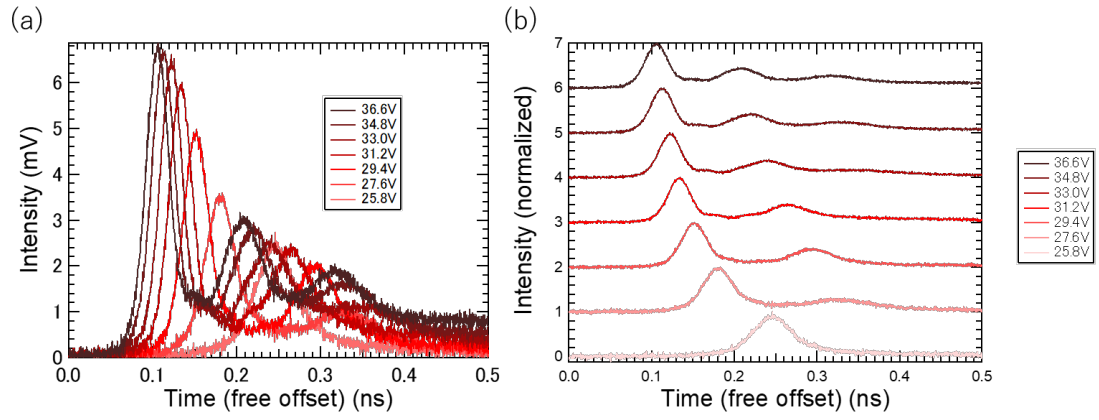


図 3.22: 10MQW L=300um の利得スイッチング光パルスの時間波形

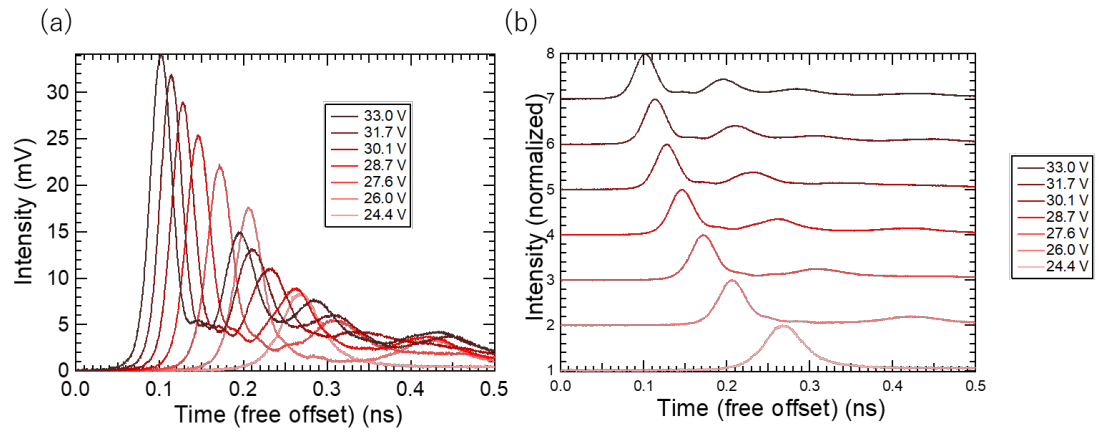


図 3.23: 10MQW L=400um の利得スイッチング光パルスの時間波形

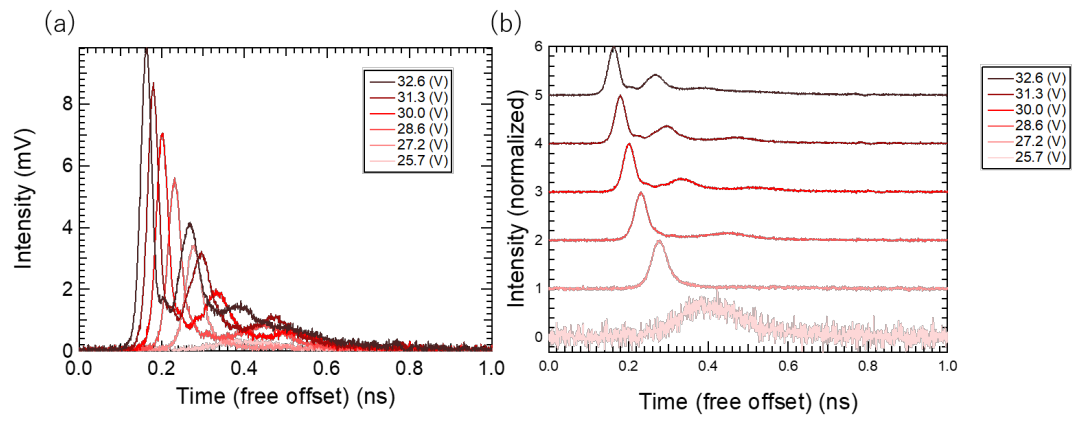


図 3.24: 10MQW L=500um の利得スイッチング光パルスの時間波形

3.2.6 結果の比較

FWHM をまとめた。でコンボリューション後の値を示した。

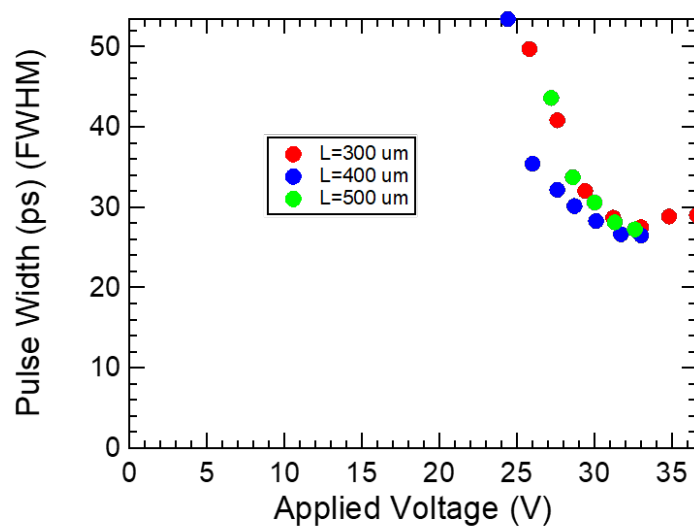


図 3.25: 10MQW 利得スイッチングパルスのパルス幅

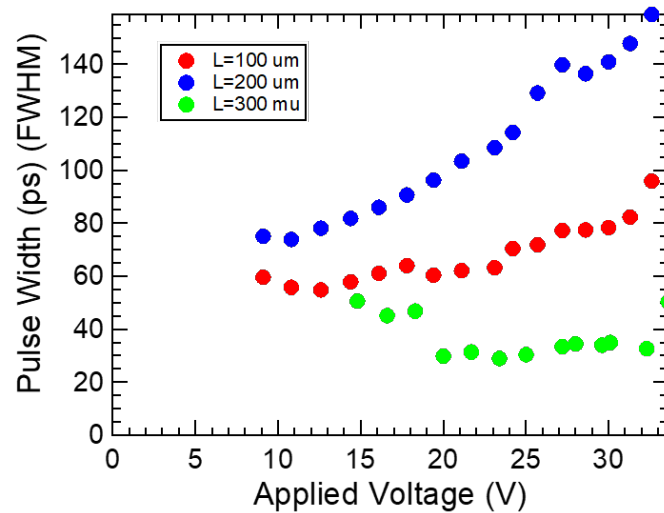


図 3.26: 3MQW 利得スイッチングパルスのパルス幅

3.2.7 付録かな??コンボリεύジョンの説明, 電氣パルスの確認

第4章 考察

4.1 はじめに

4.2 パルス幅と共振器長の関係 (10QW)

4.3 3QW と 10QW の比較

閾値の何倍で飽和しているため利得スイッチングの速さの限界が異なる？

実験での電圧から単位体積あたりの励起強度つまり励起キャリア密度を見積もった？

第5章 まとめと展望

5.1 本研究のまとめ

5.2 今後の展望

あいう r を

関連図書

[1] reference

[2] reference

[3] reference

第6章 付録

6.1 deconvolution の計算?

6.2 駆動系の電気信号

謝辭