

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

東京大学大学院理学系研究科

物理学専攻

小松原望

本発表内容は、機密事項の内容を含むため非公開扱いでの対応をお願いします。

目次

- 序論
- 実験方法
- 実験結果
- まとめ

目次

- 序論
 - 背景
 - 目的
- 実験方法
- 実験結果
- まとめ

背景

微細レーザー加工のためには扱いやすい短パルス光源が必要

利得スイッチング短パルス半導体レーザー

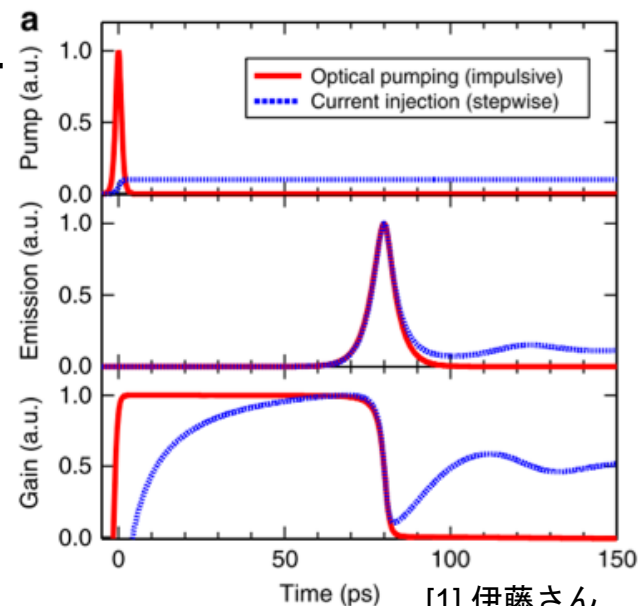
- ✓ 小型・扱いが容易
- ✓ 高安定
- ✓ 印可電流の繰り返しで光パルスの繰り返し可変
- ✓ 基礎的なキャリアダイナミクスの物理に直結

応用上重要な利得スイッチング用電流注入型の半導体レーザーの高速化に着目

背景：利得スイッチング

2準位系シングルモードレート方程式

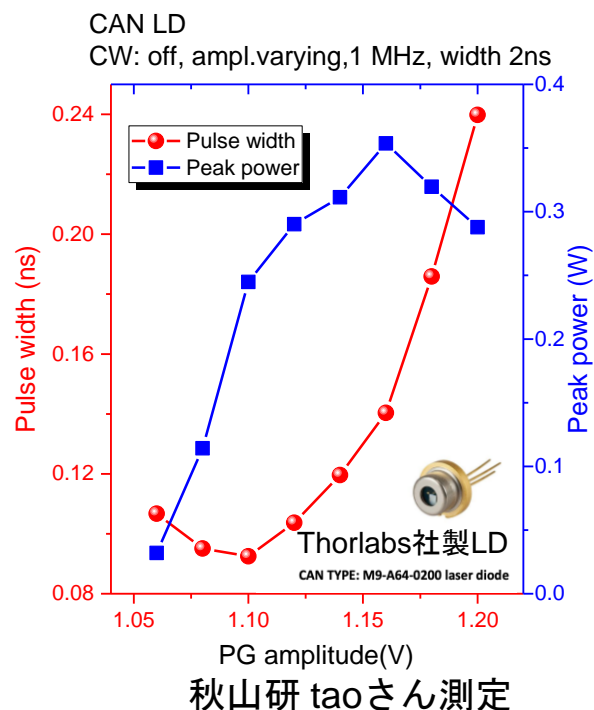
$$\left\{ \begin{array}{l} \text{キャリア密度} \\ \text{光子密度} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \frac{dn}{dt} = n_{\text{pump}}\zeta(t) - \frac{\Gamma}{m}\nu_g g(n) \frac{s}{1 + \epsilon s} - \frac{n}{\tau_r} \\ \frac{ds}{dt} = \Gamma\nu_g g(n) \frac{s}{1 + \epsilon s} - \frac{s}{\tau_p} + m\beta \frac{n}{\tau_r} \end{array}$$



電流注入利得スイッチング

	パルス幅
InGaAsP MQW DFB 1.55μm	4.7 ps[2]
商用デバイス(Thorlabs CAN type LD)	80~200 ps

[2]Chenさん横山先生



背景：利得スイッチング

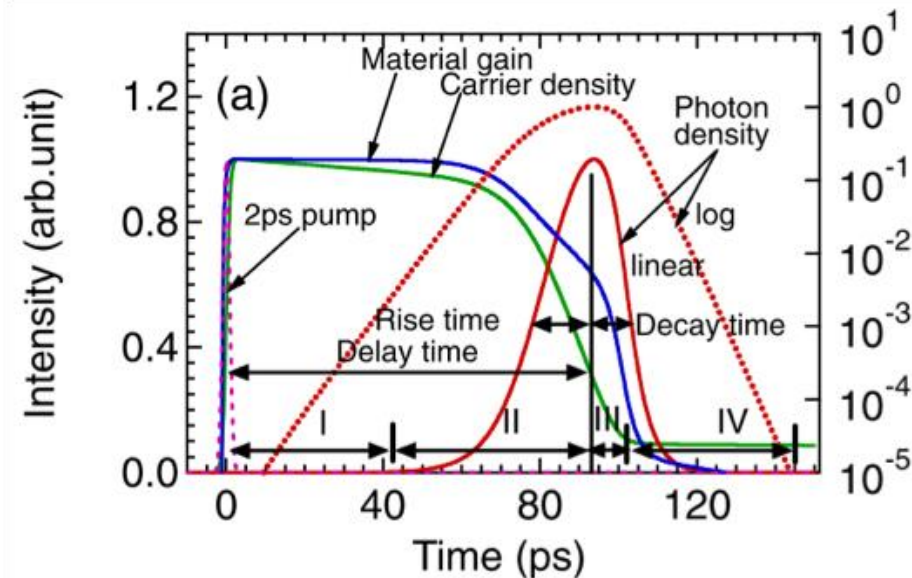
2準位系シングルモードレート方程式

キャリア注入

誘導放出

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{キャリア密度} \\ \text{光子密度} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \frac{dn}{dt} = n_{\text{pump}}\zeta(t) - \frac{\Gamma}{m}\nu_g g(n) \frac{s}{1+\epsilon s} - \frac{n}{\tau_r} \\ \frac{ds}{dt} = \frac{\Gamma\nu_g g(n)}{1+\epsilon s} \frac{s}{\tau_p} + m\beta \frac{n}{\tau_r} \end{array}$$

共振器寿命



- パルス幅を決める要因
- ✓ モード利得の大きさ
→大きくしたい
 - ✓ 共振器寿命
✓ 短くしたい

背景：光パルス的高速化

パルス幅を決める要因

✓ モード利得の大きさ

→大きくしたい

✓ 共振器寿命

→短くしたい



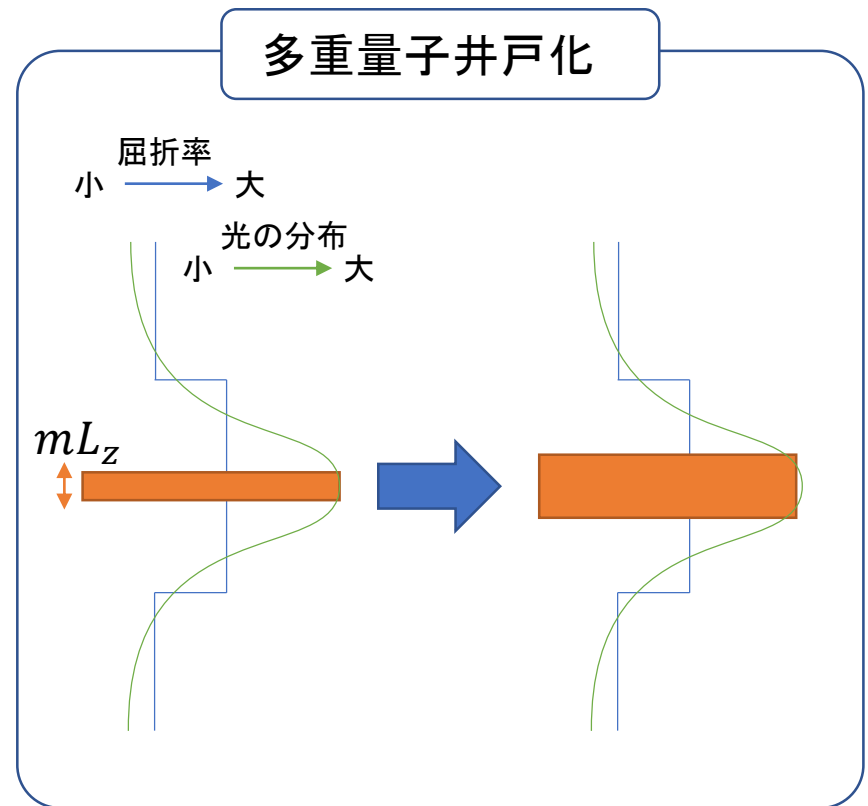
短パルス化

✓ Γg を大きくする →多重量子井戸化

$$\Gamma = mL_z/L_0$$

✓ τ_p を小さくする →短共振器化

$$\tau_p = \frac{n_{eq}}{c(\alpha + \ln(1/R)/L)}$$



背景：InGaAs系材料の多重量子井戸化

格子定数

$\text{GaAsP} < \text{GaAs} < \text{InGaAs}$

- 1 μm 波長帯発光材料・・・InGaAs

GaAs基板に格子整合させながら
厚く積むことができない

- GaAsPをバリア層として歪補償を行いながら多重化

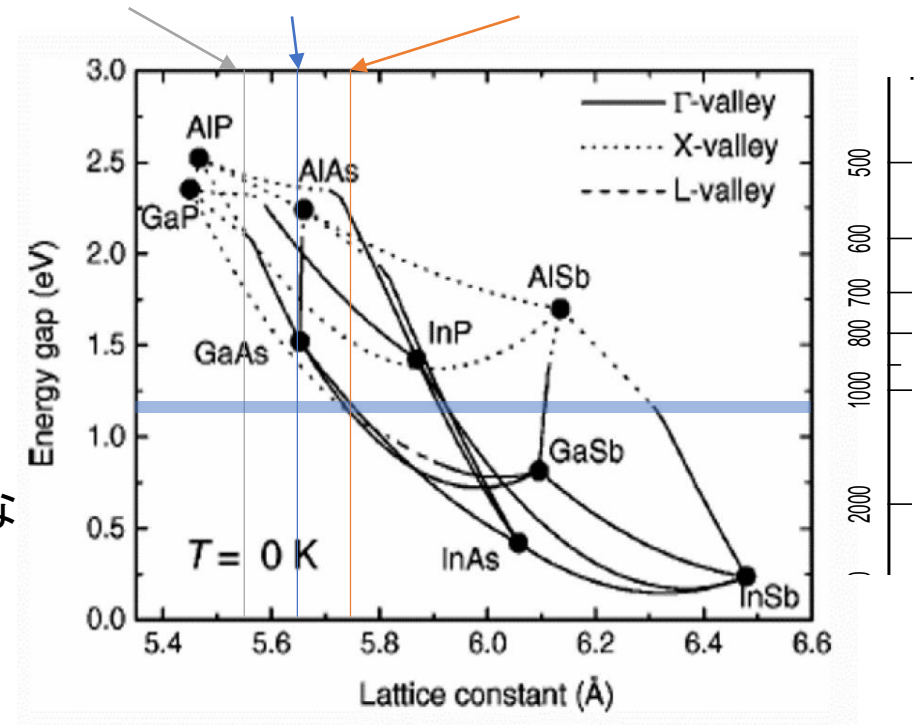
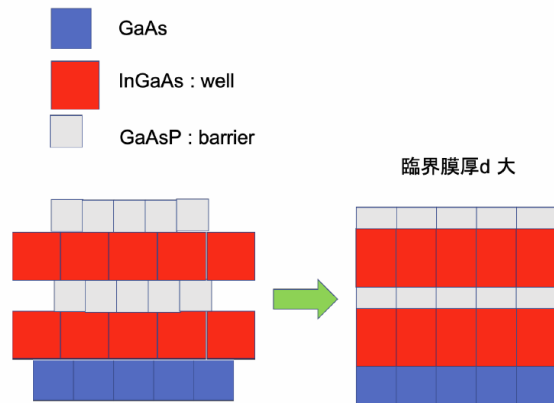
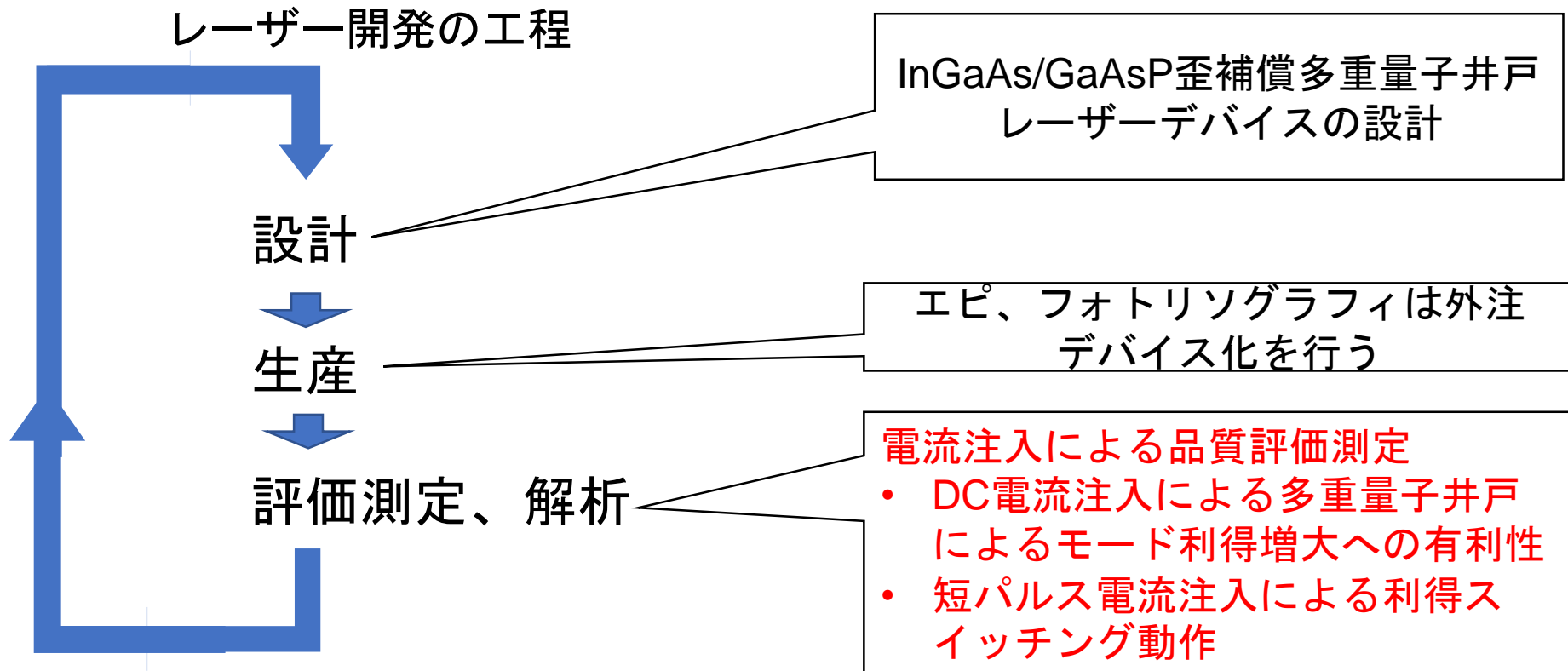


図 1.8: 格子整合の模式図

本研究の目的

☆利得スイッチングパルス的高速化



目次

- 背景
- 実験方法
 - ✓ 試料構造
 - ✓ 測定方法
- 実験結果
- まとめ

試料構造

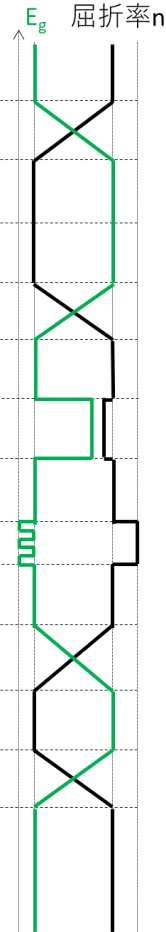
pクラッド層 2.0 μm

コア層

nクラッド層

p-GaAs 200nm C: 1×10^{19}
p-Al _x GaAs x:0.55→0.20 200nm C: 1×10^{18}
p-Al _x GaAs x:0.55 1000nm C: 1×10^{18}
p-Al _x GaAs x:0.55 400nm C: 4×10^{17}
p-Al _x GaAs x:0.20→0.55 200nm C: 2×10^{17}
p-GaAs 50nm C: 2×10^{17}
p-In _x GaP x:0.485 100nm Zn: 2×10^{17}
nonGaAs 120nm (SCH)
Active layer
non-GaAs 100nm (SCH)
n-Al _x GaAs x:0.55→0.20 200nm Si: $\rightarrow 1 \times 10^{17}$
n-Al _x GaAs x:0.55 1400nm Si: 1×10^{18}
n-Al _x GaAs x:0.20→0.55 100nm Si: $\rightarrow 1 \times 10^{18}$
n-GaAs 200nm Si: $1-2 \times 10^{18}$ (Buffer)
n-GaAs (Substrate)

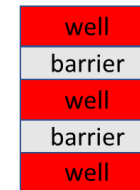
小 → 大



Active layer

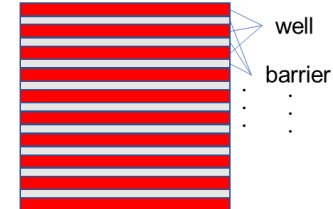
(1) 3 周期

In_{0.255}Ga_{0.745}As 15nm : well
GaAs 12nm : barrier



(2) 10 周期

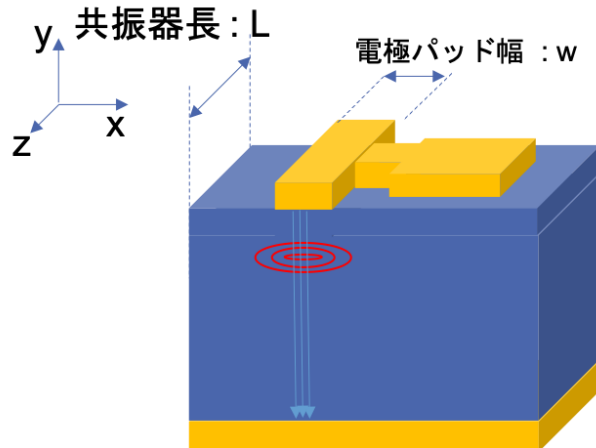
In_{0.255}Ga_{0.745}As 15nm : well
GaAs_{0.71}P_{0.29} 10nm : barrier



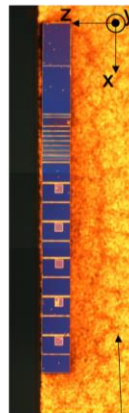
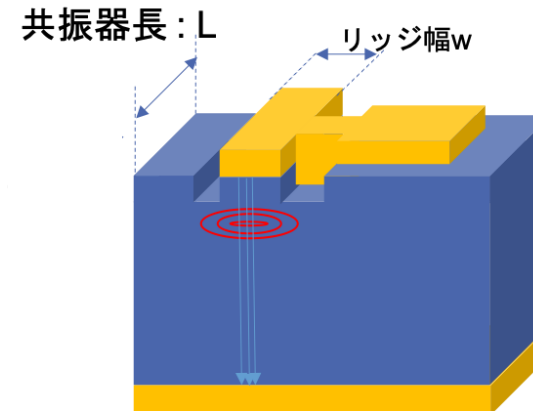
ウエハの結晶構造

試料構造

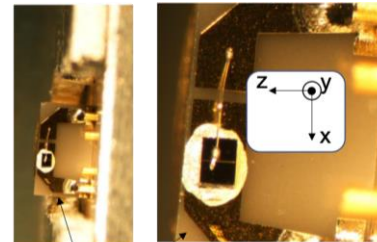
ブロードコンタクトレーザー



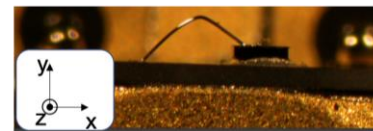
リッジ導波路型レーザー ・・・シングルモード化



AuSn on AlN
サブマウント

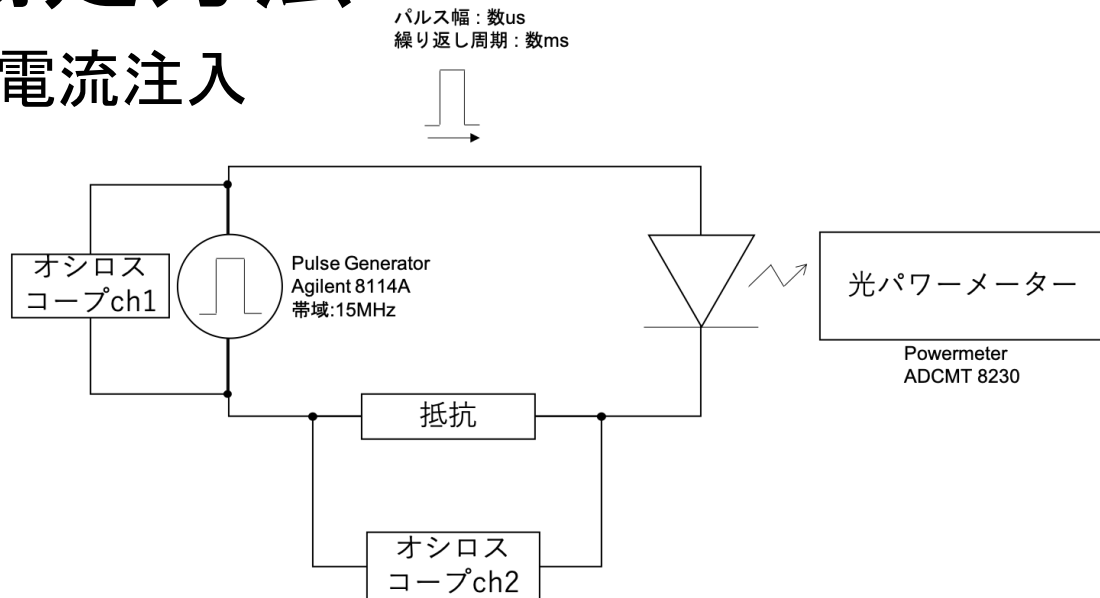


TO CAN

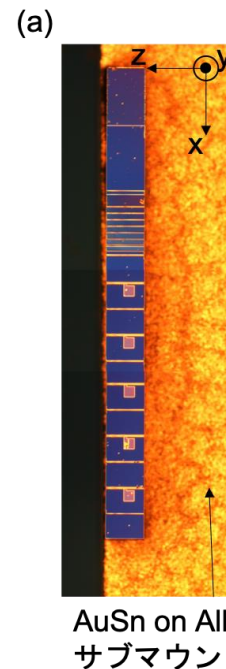


測定方法

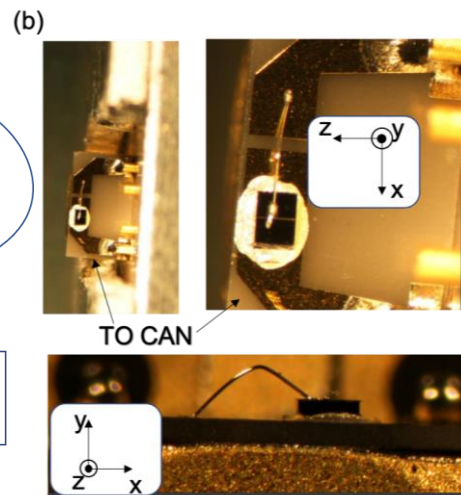
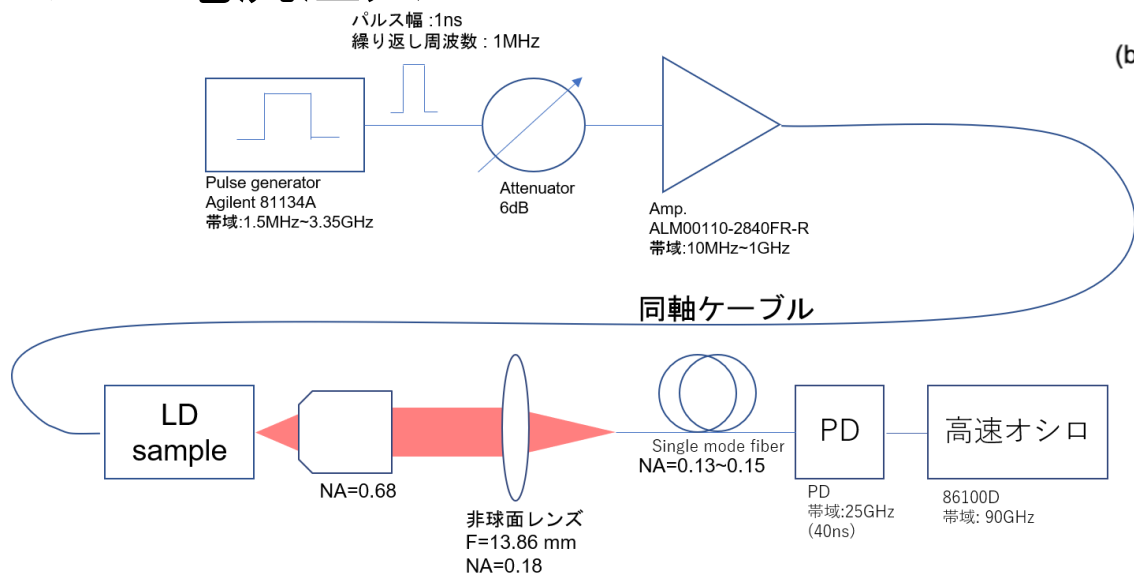
定常電流注入



サンプル



短パルス電流注入

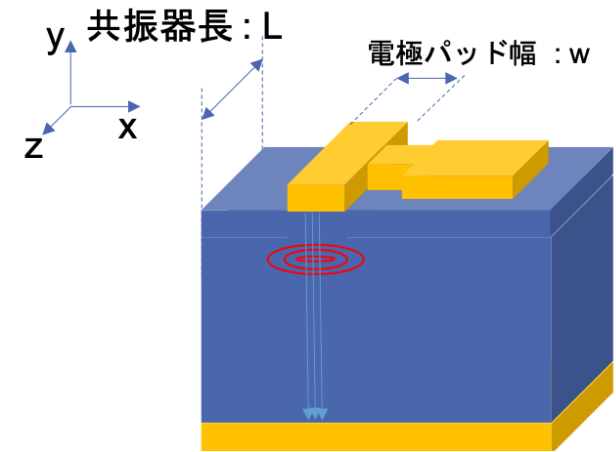


目次

- 背景
- 実験方法
- 実験結果
 - ✓ブロードコンタクトレーザー
 - ✓3周期
 - ✓10周期
 - ✓リッジ導波路型レーザー
 - ✓3周期
 - ✓10周期
- まとめ

目次

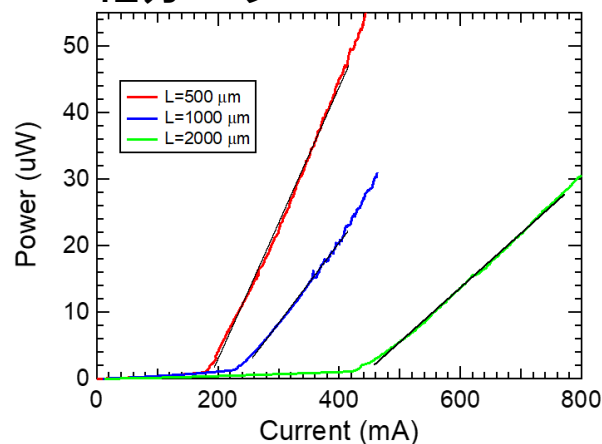
- 背景
- 実験方法
- 実験結果
 - ✓DC(ブロードコンタクト)
 - ✓DC注入 (リッジ導波路型)
 - ✓短パルス注入 (リッジ導波路型)
- まとめ



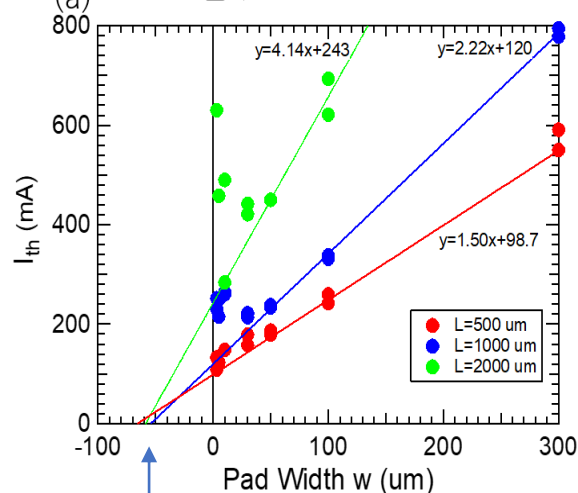
測定結果：DC ブロードコンタクト

3周期

(a) ILカーブ

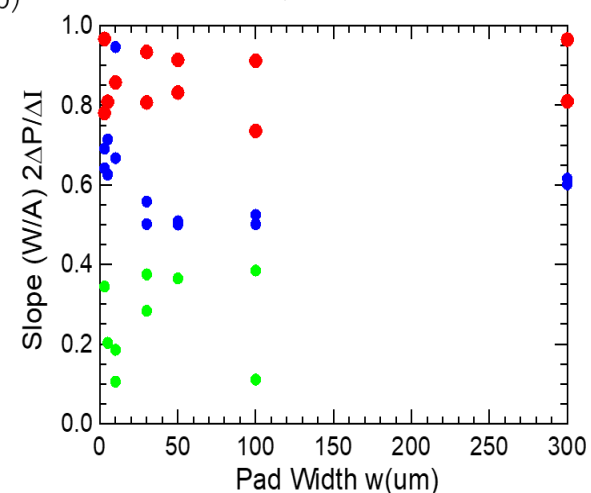


(a) 閾値電流



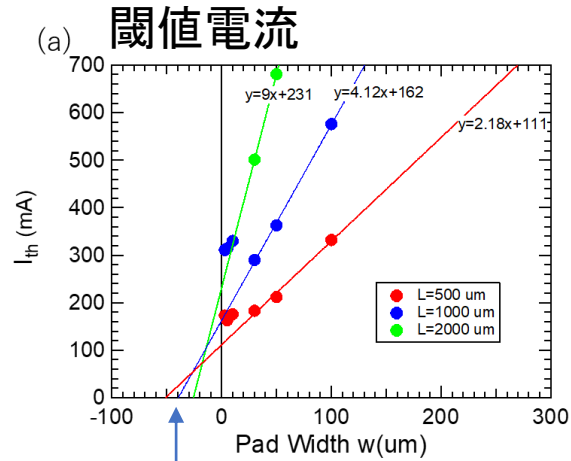
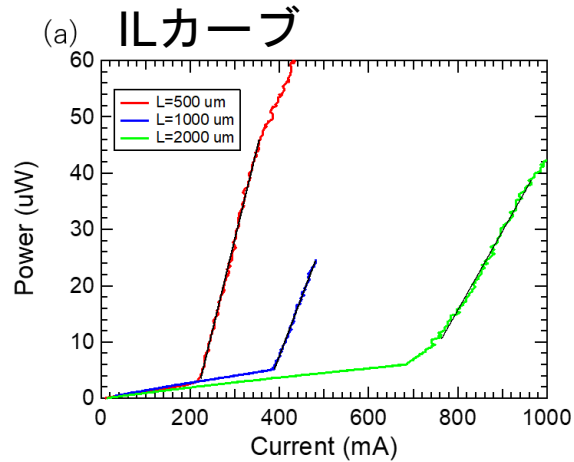
電流の広がり

(b) スロープ効率

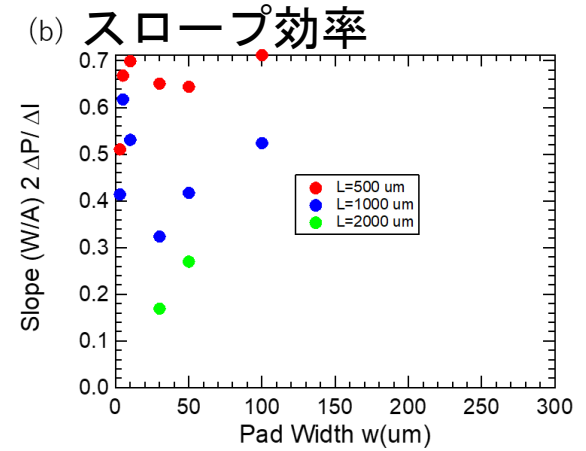


測定結果：DC ブロードコンタクト

10周期



電流の広がり



測定結果：ブロードコンタクトレーザー

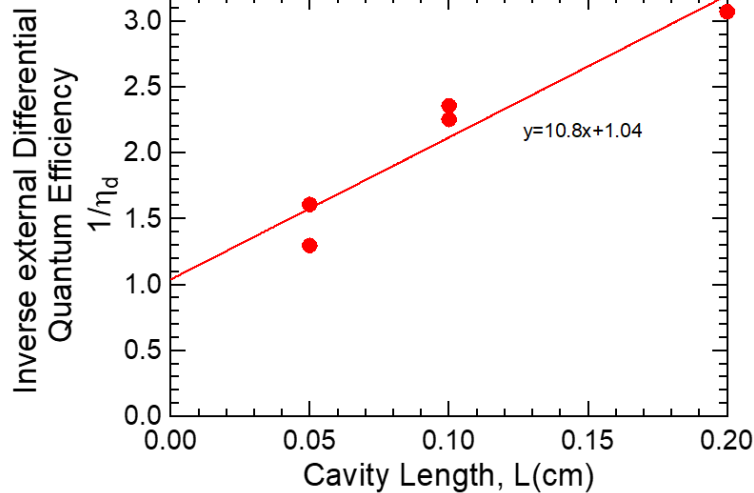
内部量子効率の見積もり

$$\eta_d = \frac{e}{h\nu} 2 \frac{\Delta P}{\Delta I}$$

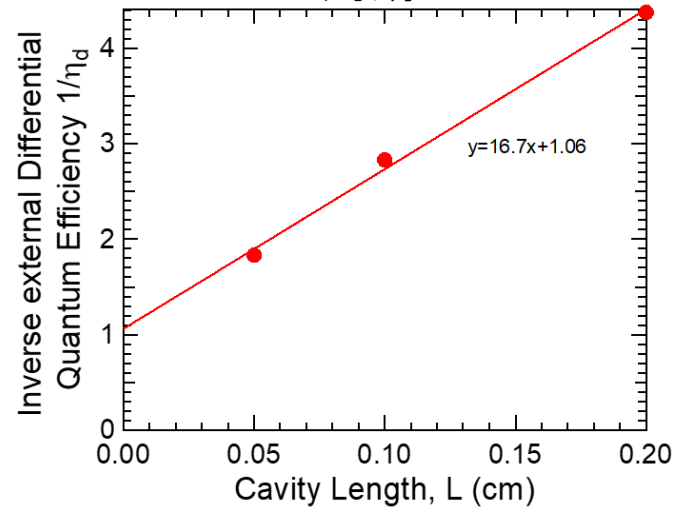
$$\eta_d = \eta_{int} \frac{\alpha_m}{\alpha_{int} + \alpha_m}$$

$$\frac{1}{\eta_d} = \underbrace{\frac{\alpha_{int}}{\ln(1/R)\eta_{int}}}_{\text{傾き}} L + \underbrace{\frac{1}{\eta_{int}}}_{\text{切片}}$$

3周期



10周期



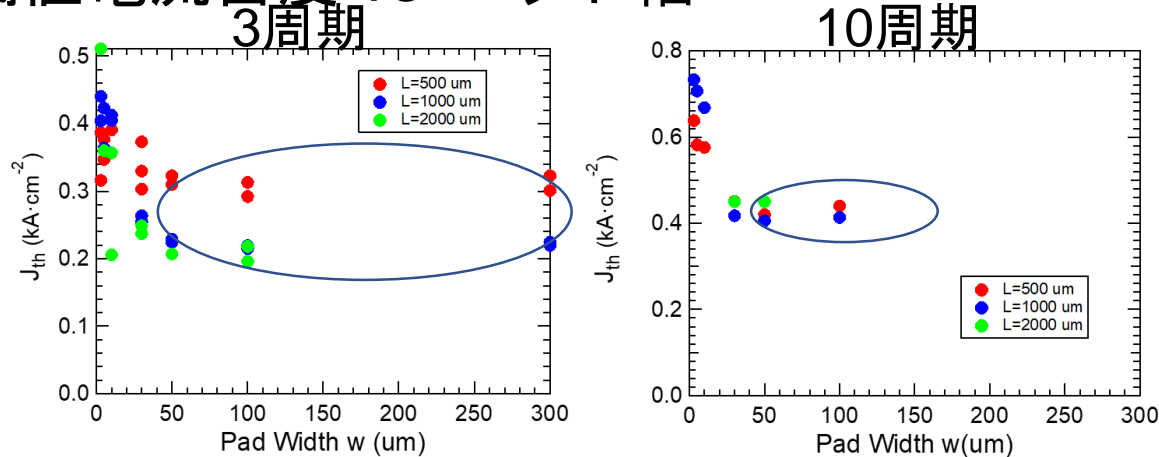
フィッティング結果

試料	内部損失 α_{int}/cm	内部量子効率 η_{int}
3 周期	11.8	0.96
10 周期	18.0	0.94

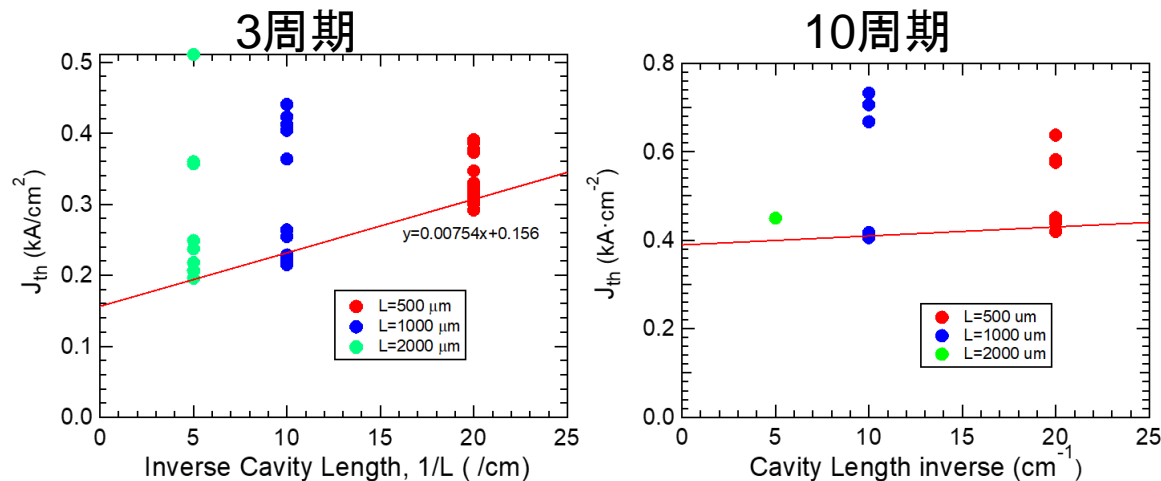
歪補償を用いて発光効率の高い
良質な結晶を作製できた

測定結果：DC ブロードコンタクト

閾値電流密度 vs パッド幅



閾値電流密度 vs 共振器長の逆数



$$g_{net} = \Gamma G - \alpha_{int} - \alpha_m$$

線形利得 $G = g_0(J - J_0)$ を仮定

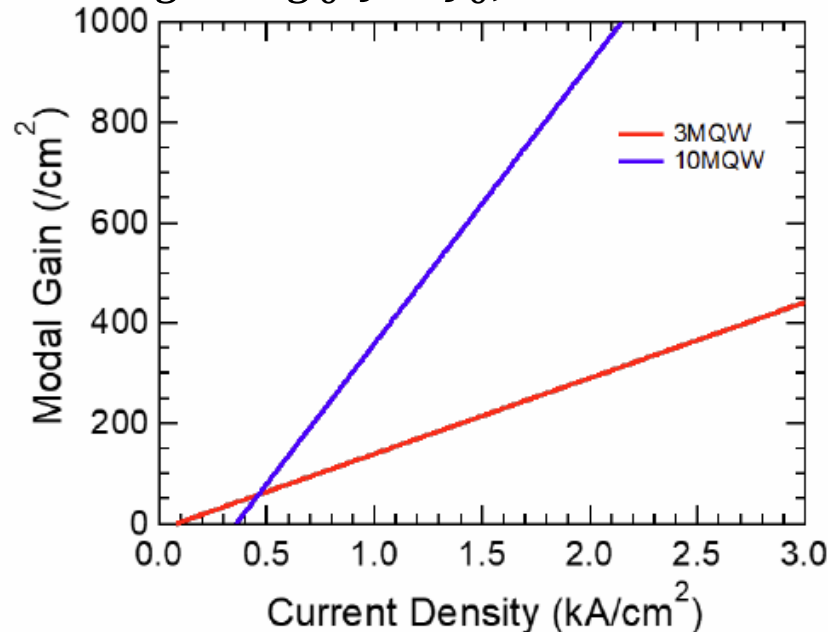
$$J_{th} = \underbrace{J_0 + \frac{\alpha_{int}}{\Gamma g_0}}_{\text{切片}} + \underbrace{\frac{1}{\Gamma g_0} \ln \left(\frac{1}{R} \right)}_{\text{傾き}} \frac{1}{L}$$

測定結果：ブロードコンタクトレーザ

フィッティング結果

試料	透明電流密度 J_0 kA/cm ²	Γg_0 /kA
3 周期	0.0782	151
10 周期	0.357	558

モード利得 $\Gamma g = \Gamma g_0 (J - J_0)$ vs 電流密度



ある電流密度以上では層数が多いほうがモード利得を稼ぐのに有利である。

測定結果：ブロードコンタクトレーザーまとめ

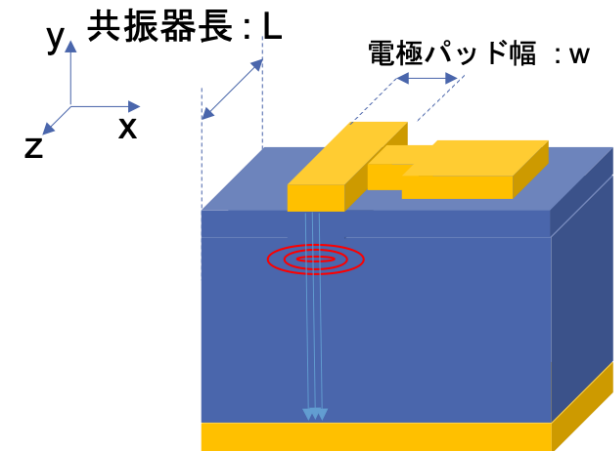
表 3.5: ブロードコンタクトレーザーの結果まとめ

試料	内部損失 α_{int}/cm	内部量子効率 η_{int}	透明電流密度 $J_0/\text{kA}/\text{cm}^2$	$\Gamma g_0 / \text{kA}$
3 周期	11.8	0.96	0.0782	151
10 周期	18.0	0.94	0.357	558

- 電流広がり数十 μm と見積もられた。
- 歪補償を用いて良質な結晶成長を行うことができた。
- 量子井戸の多重化によるモード利得増大への有利性を確認

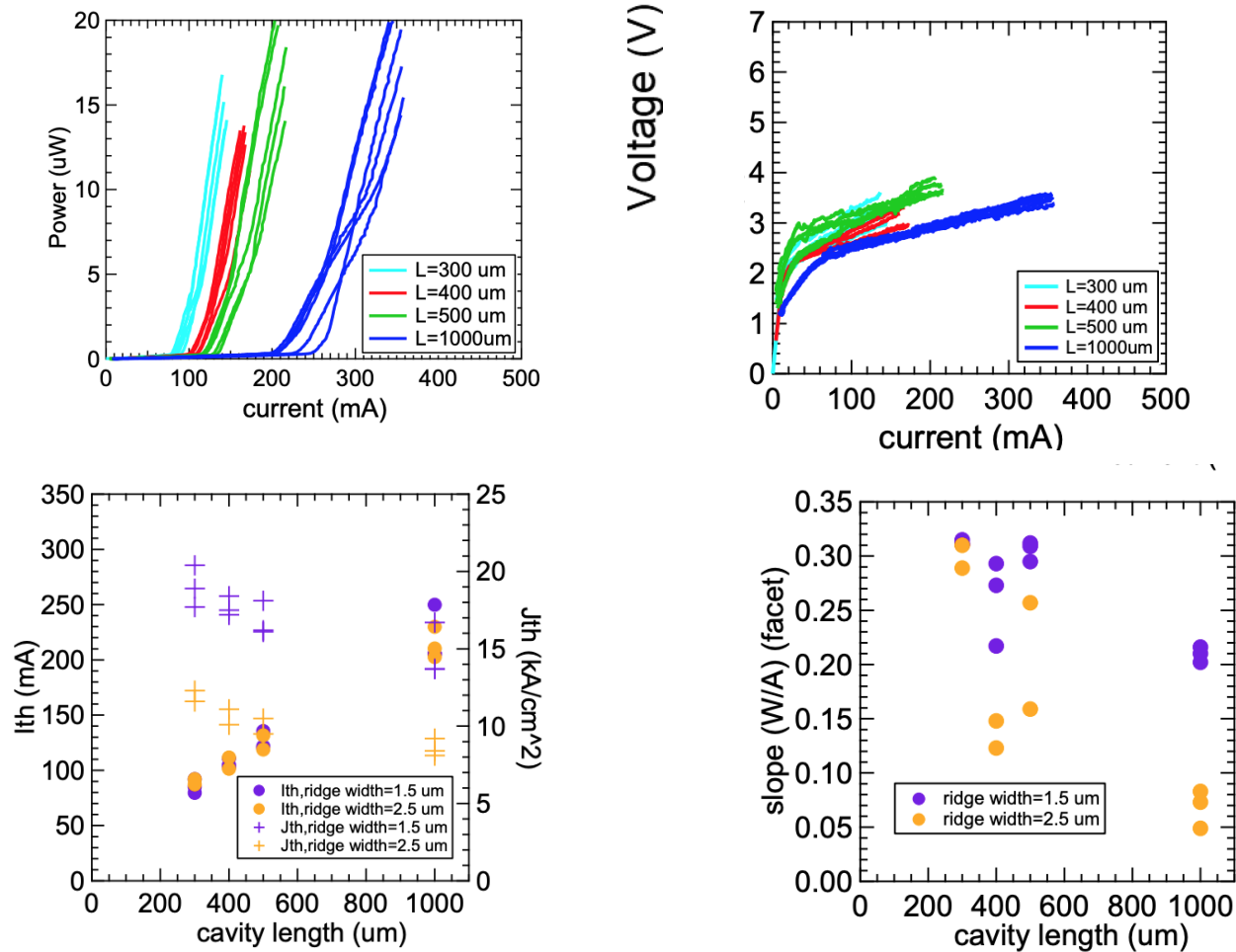
目次

- 背景
- 実験方法
- 実験結果
 - ✓DC注入(ブロードコンタクト)
 - ✓DC注入 (リッジ導波路型)
 - ✓短パルス注入 (リッジ導波路型)
- まとめ



測定結果：リッジ導波路型レーザー 定常電流注入

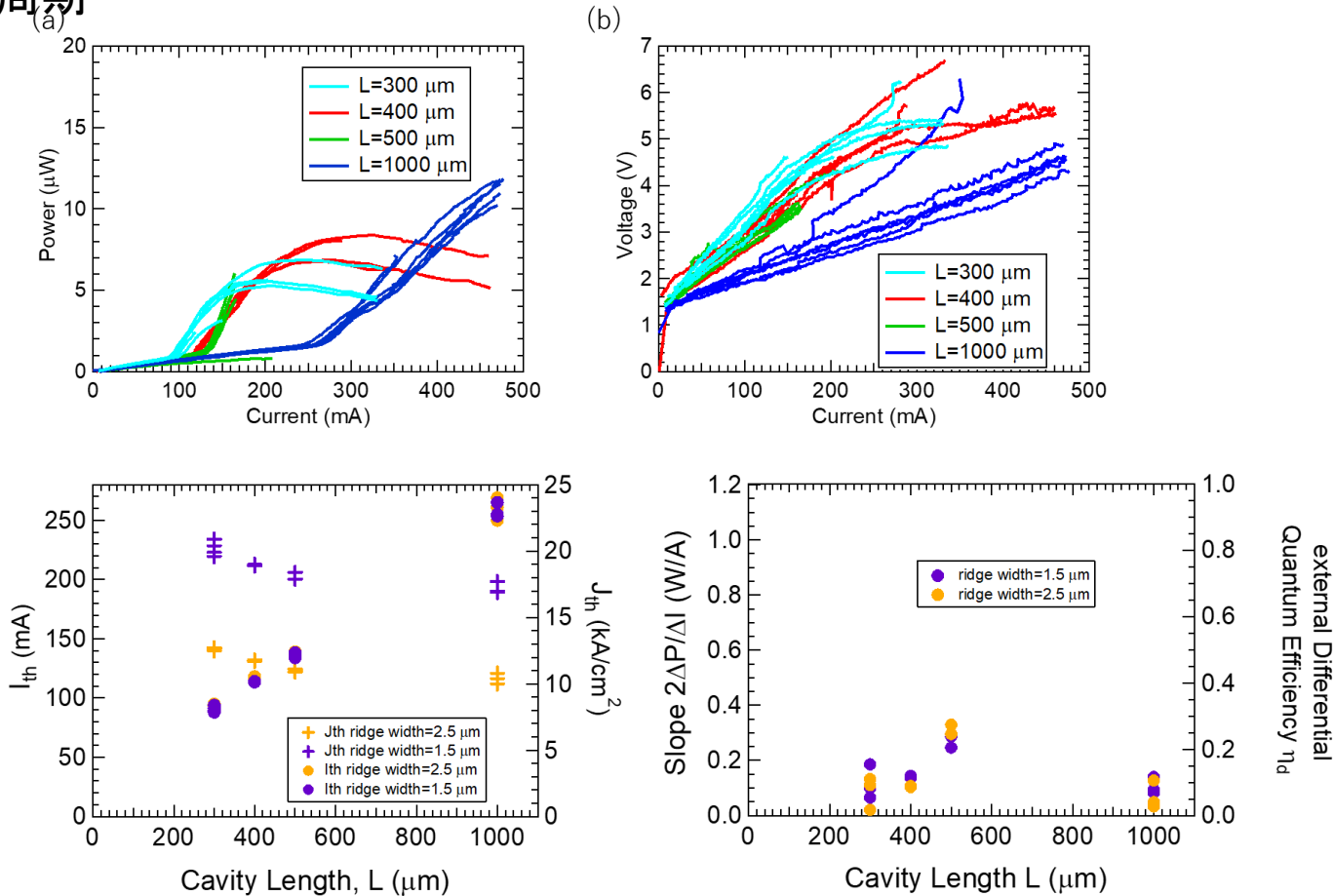
3周期



✓ 閾値電流が最短でも80 mAと高くなってしまった

測定結果：リッジ導波路型レーザー 定常電流注入

10周期



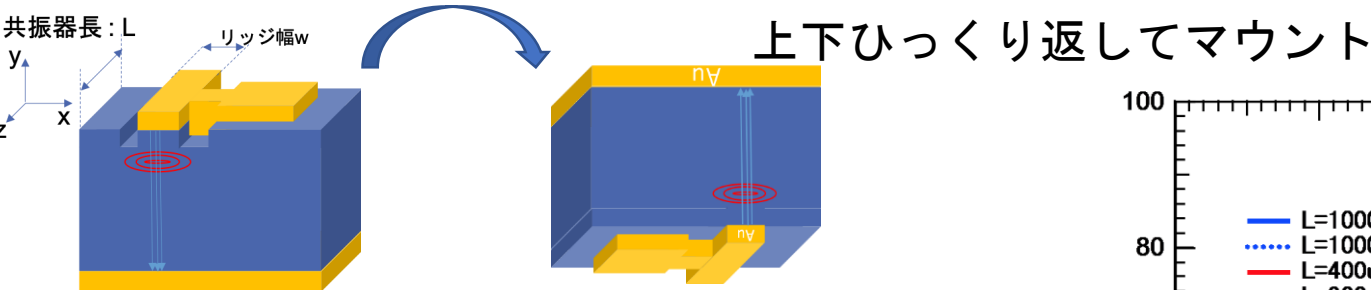
- ✓ ILカーブのが湾曲して発光強度が低下している
→ 温度上昇による品質の低下
- ✓ リッジ幅による差異が見られない

- ・リッジ導波路型レーザーのIL測定で判明した課題
 - ① 大電流を流すと発光強度が落ちる
 - ② 閾値電流が高い。
 - ③ リッジ幅依存性がない。

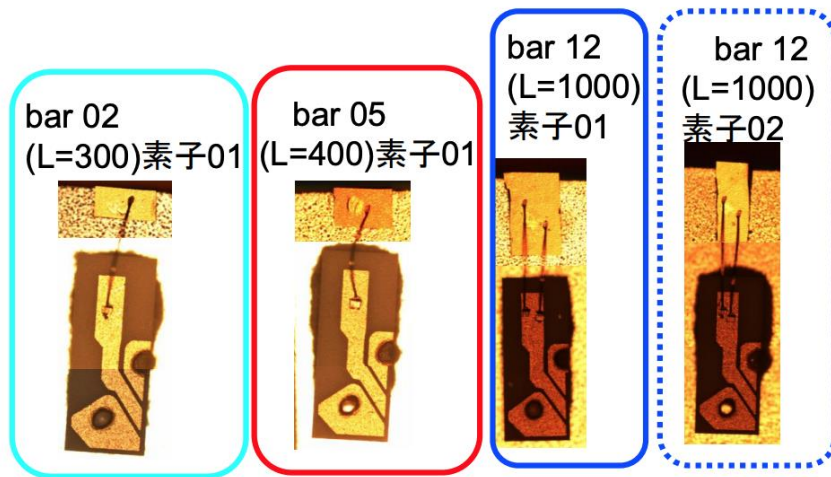
測定結果：リッジ導波路型レーザー 定常電流注入

課題①大電流を流すと発光強度が落ちる

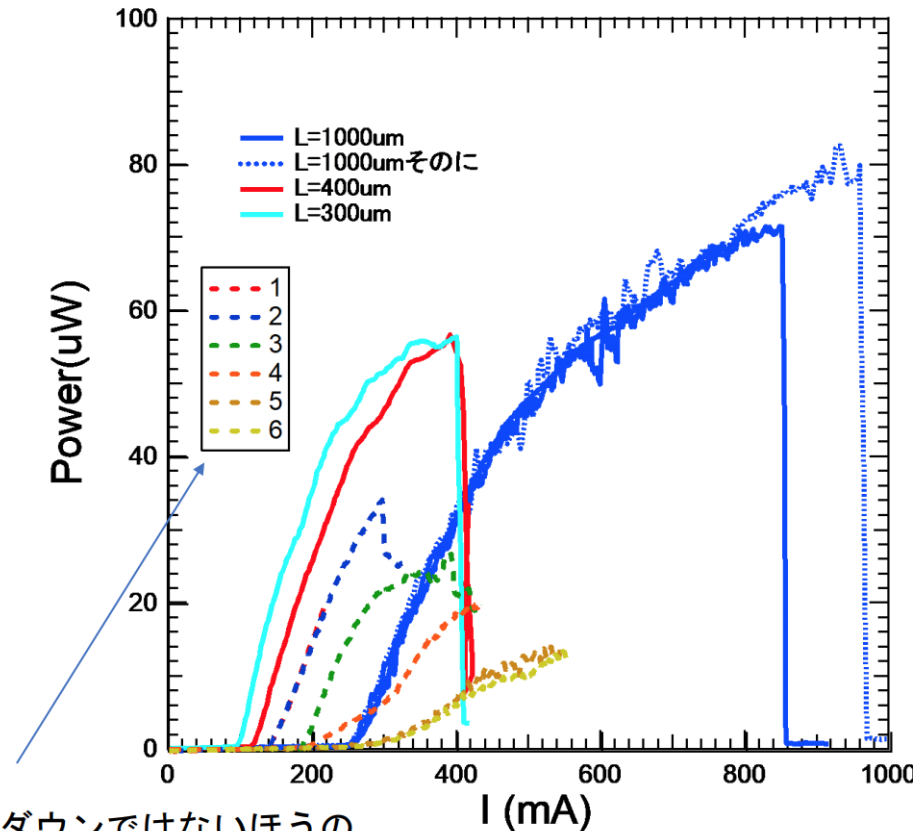
3周期 エピダウンによる温度上昇の抑制を期待



試料：3QW 後発後行 FP領域の以下の4つ



- ✓ 2us, 2ms周期, Duty比1:1000
- ✓ 温調かけ忘れた
- ✓ パワーメータの設定波長：1030nm



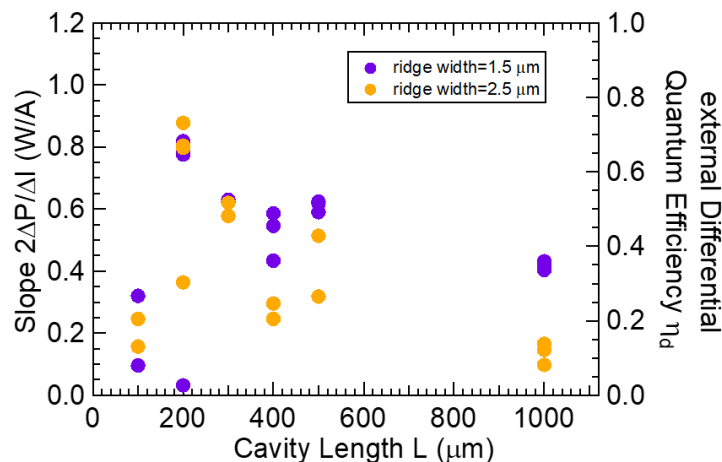
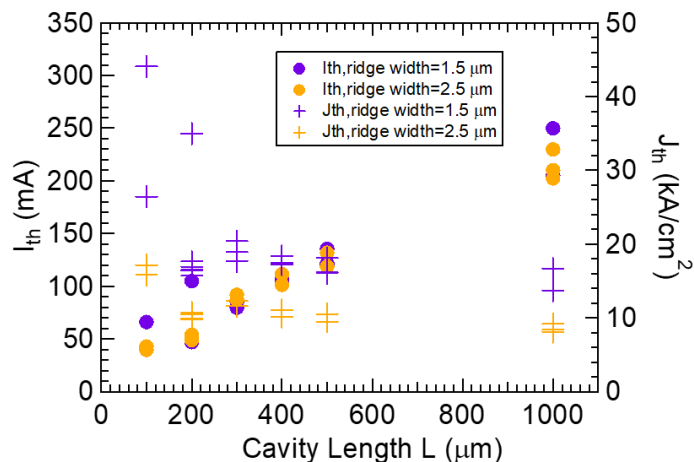
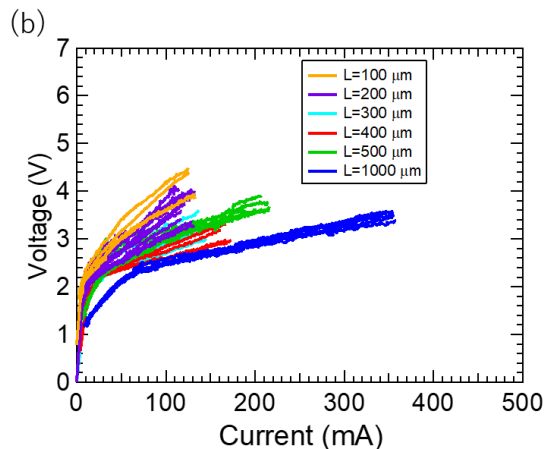
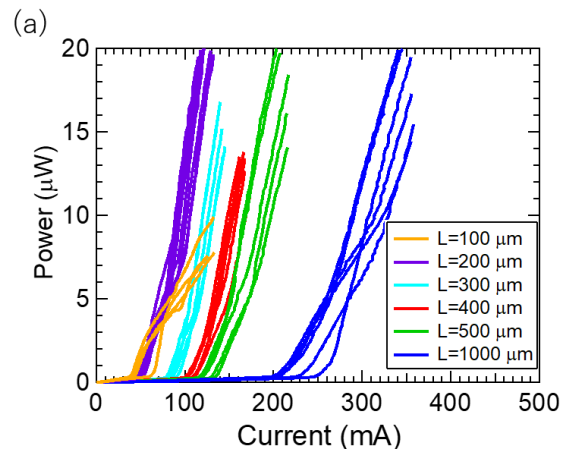
エピダウンではないほうの
プロット. 数字は測定の回数
を表し, 重ねるごとに発光量
が落ちていった

エピダウンしたことにより発光量の増加を確認した。

測定結果：リッジ導波路型レーザー 定常電流注入

課題② 閾値電流が高い。

3周期 短共振器長レーザーデバイスの作製 L=100 μ m,200 μ mを追加



✓ 短共振器レーザー作製により閾値電流の低減達成 最短40mA

✓ リッジ幅による差異が見られない

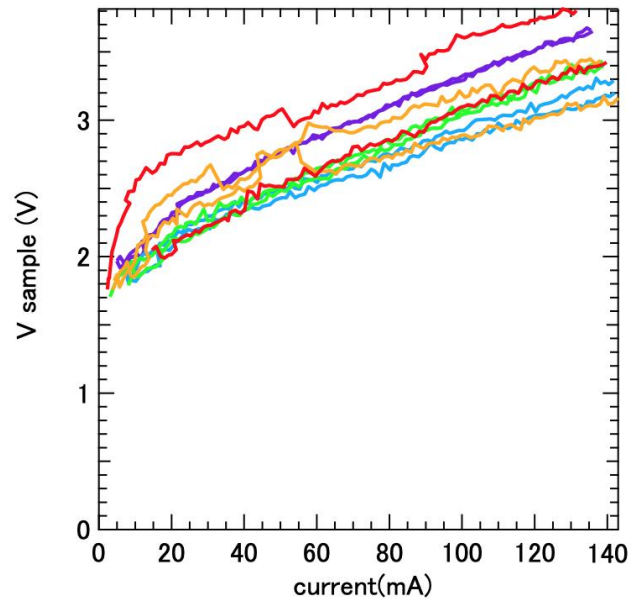
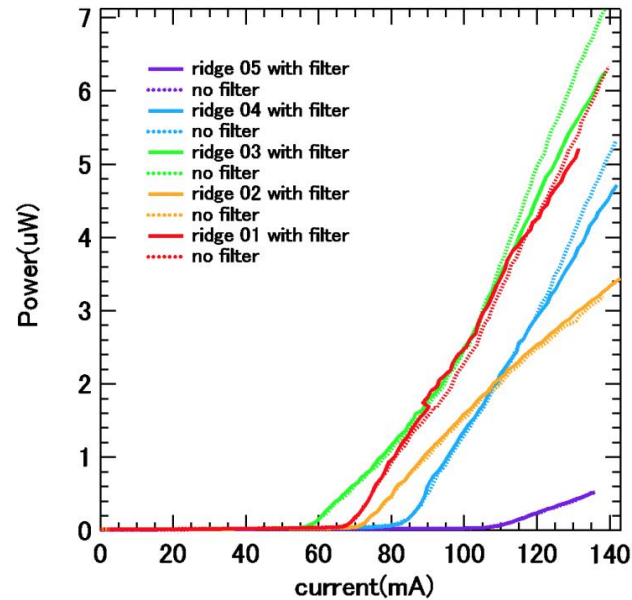
→電流が広がってる？

測定結果：リッジ導波路型レーザー 定常電流注入

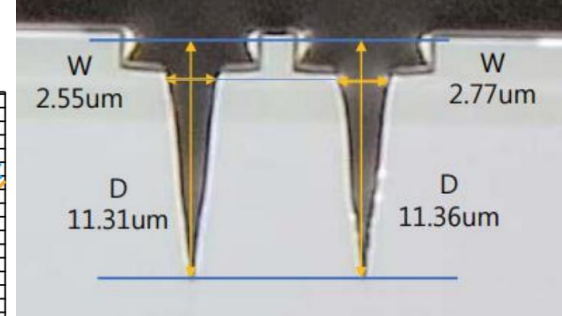
課題③ リッジ幅依存性がない。

FIB加工

3周期 L=300 μm , 2 μs パルス, 2 ms繰り返し, Duty比1:1000



端面方向から見た図
ridge01



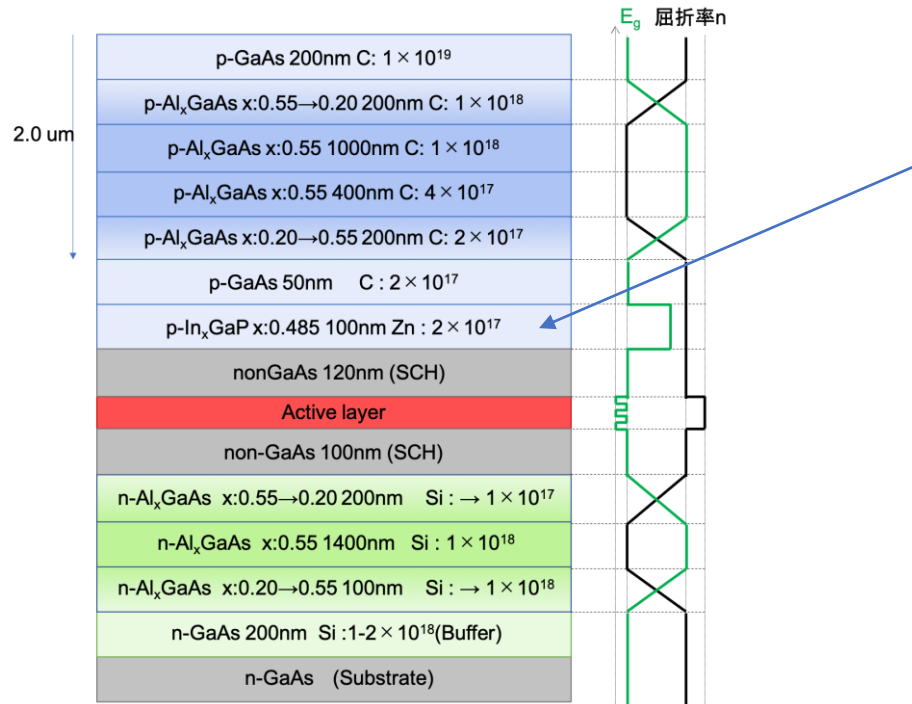
閾値電流が下がった

→電流が横方向に広がっていると推察

測定結果：リッジ導波路型レーザー 定常電流注入

課題③ リッジ幅依存性がない。

電流広がりの要因



エピ構造において
バンドギャップの大きい
p-InGaPが電流広がりの
原因

ウエハの結晶構造

まとめ

リッジ導波路型レーザーのIL測定で判明した課題

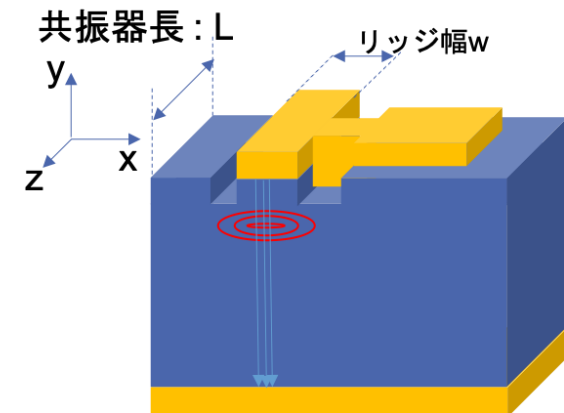
- ① 大電流を流すと発光強度が落ちる
 - エピダウンによる光出力の向上

- ① 閾値電流が高い。
 - 短共振器による閾値電流の低減

- ② リッジ幅依存性がない。
 - FIB加工試料の測定から電流が横方向に広がっていると推測
 - InGaP層を薄くすることで解消しうる。

目次

- 背景
- 実験方法
- 実験結果
 - ✓ブロードコンタクトレーザー
 - ✓リッジ導波路型レーザー
 - ✓定常電流注入
 - ✓短パルス電流注入
- まとめ

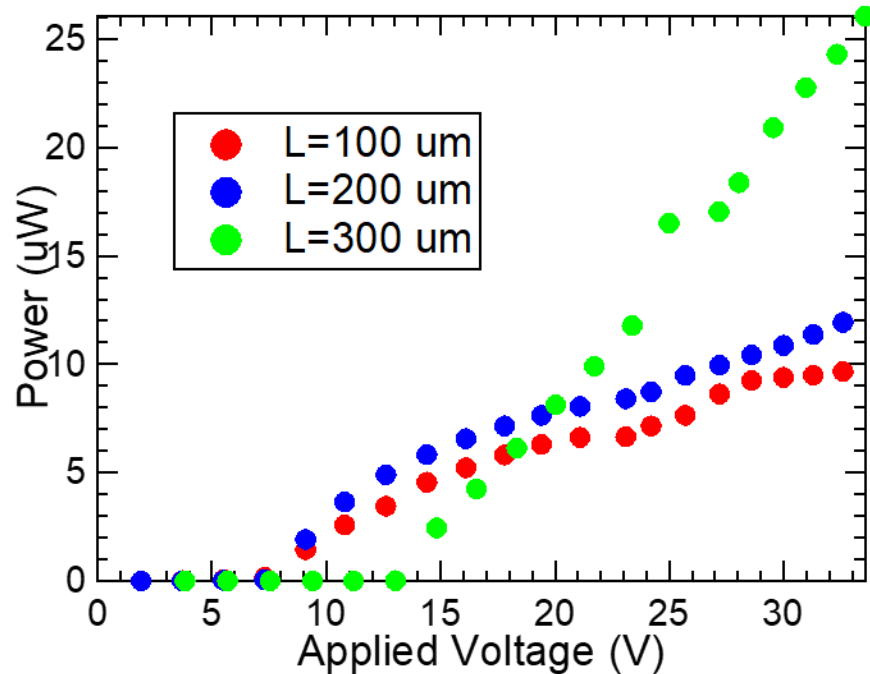


測定結果：リッジ導波路型レーザー 短パルス電流注入

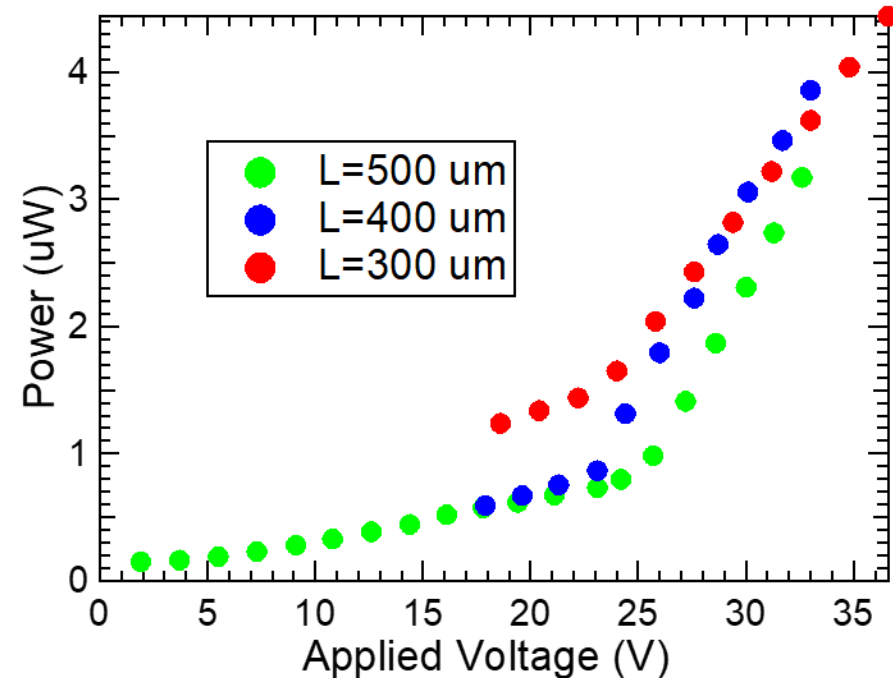
ILカーブの結果

駆動条件：1nsパルス, 1 μ s周期 Duty比1:1000

3周期



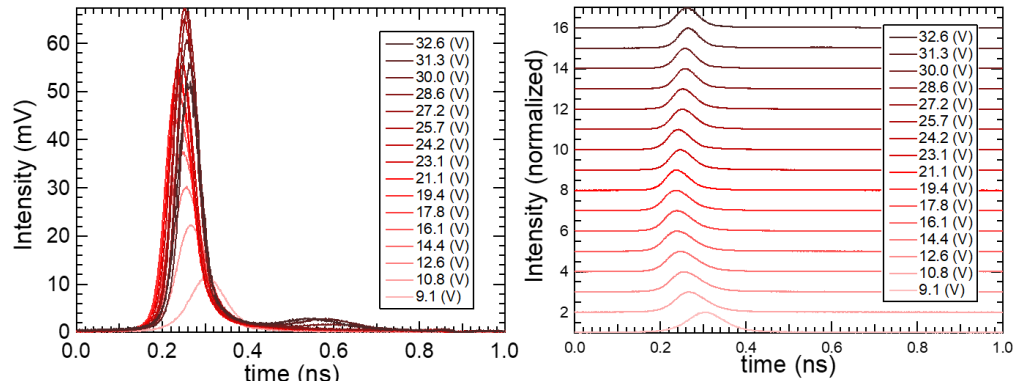
10周期



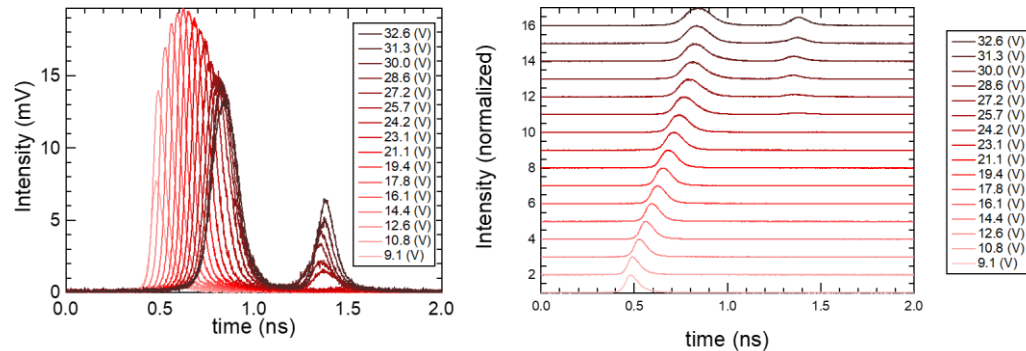
測定結果：リッジ導波路型レーザー 短パルス電流注入

時間波形 3周期試料の結果

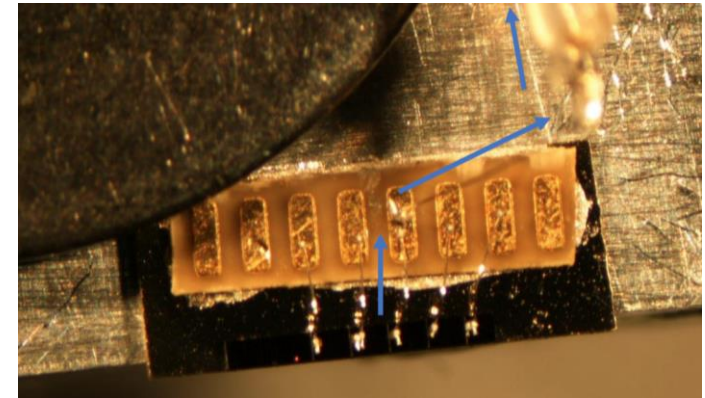
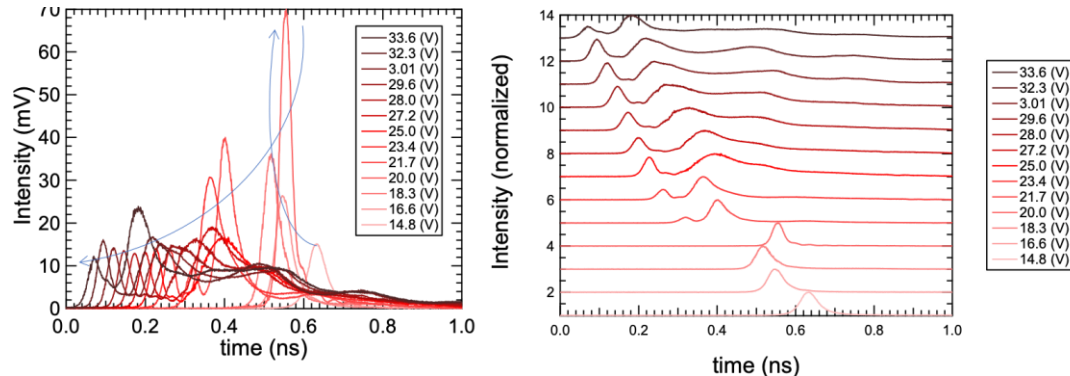
L=100 μm



L=200 μm



L=300 μm



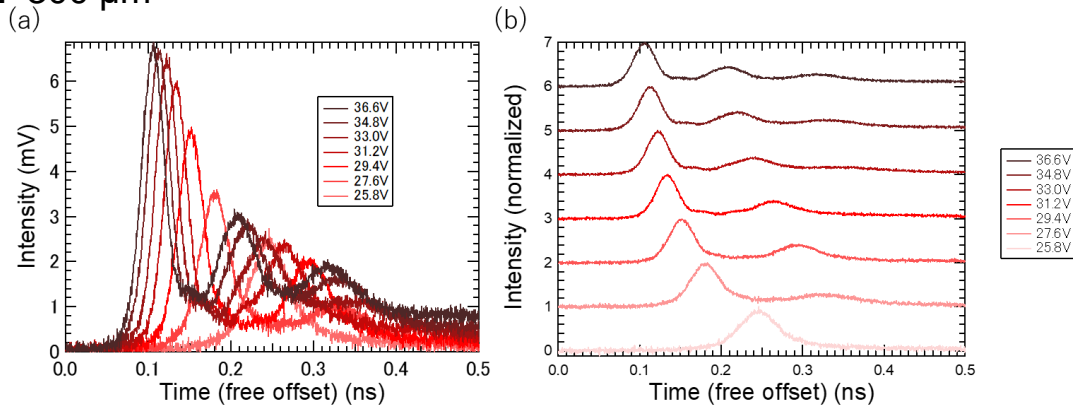
3周期試料の短パルス電流注入の様子 (L=300 μm)

励起強度を大きくしても立ち上がり
が早くならない。ピーク強度も増加
しない。
→電気パルスが正しく印加されてい
ない。インピーダンス不整合。

測定結果：リッジ導波路型レーザー 短パルス電流注入

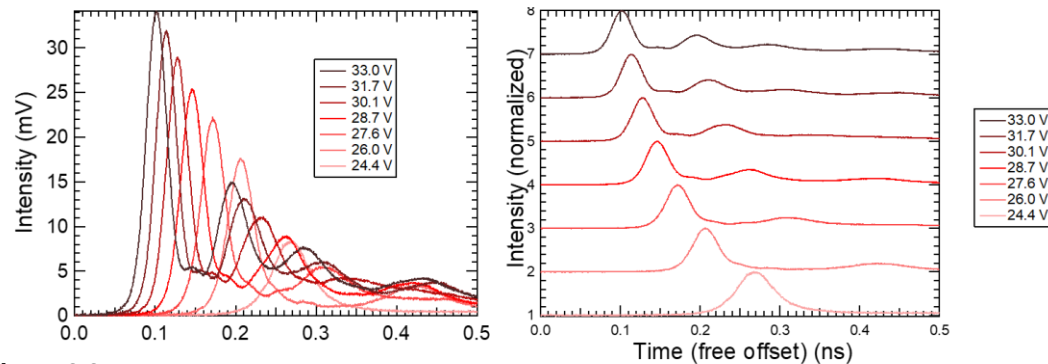
時間波形 10周期試料の結果

L=300 μm

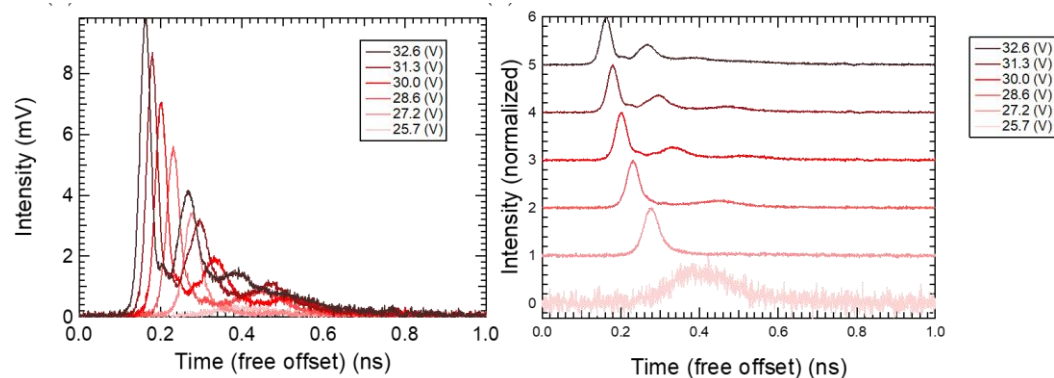


Can type

L=400 μm



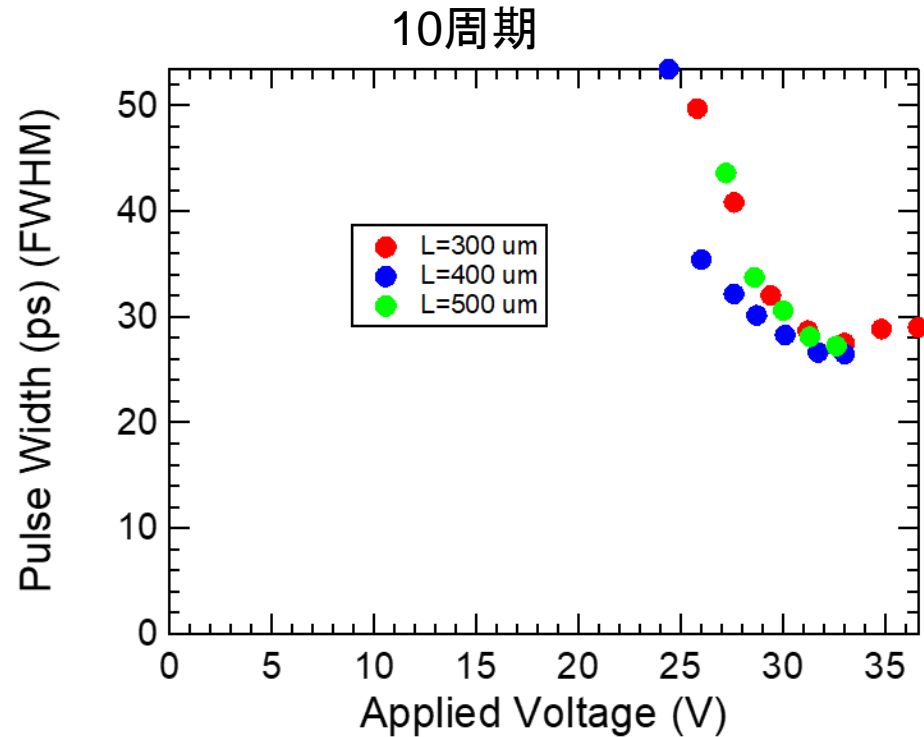
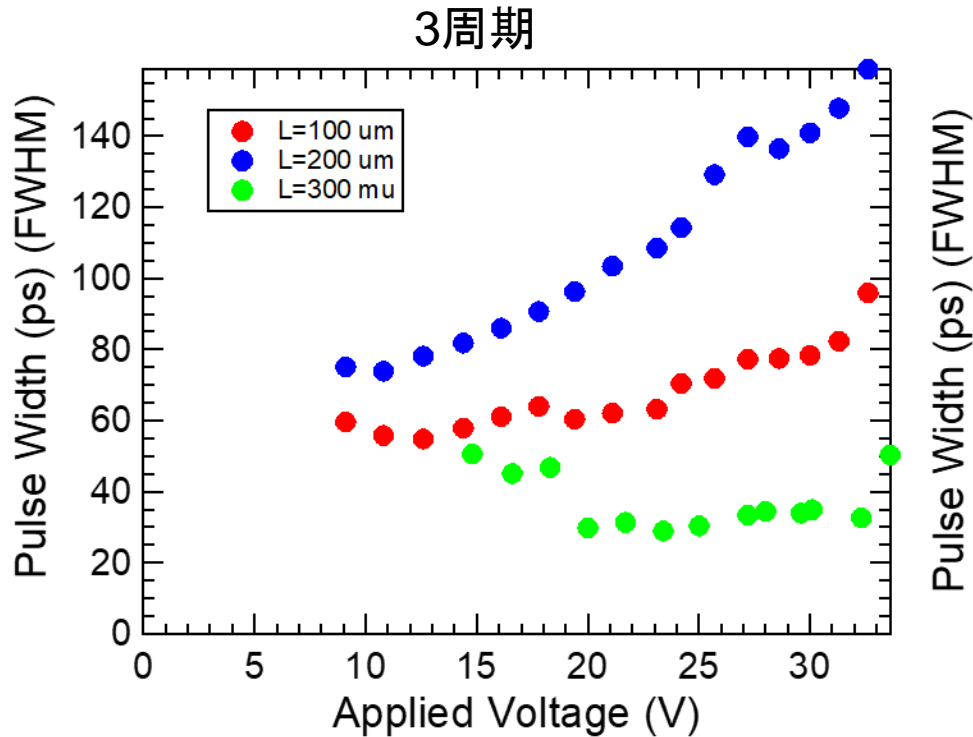
L=500 μm



典型的な利得スイッチングパルス

測定結果：リッジ導波路型レーザー 短パルス電流注入

パルス幅



共振器長依存性が見られない
飽和

まとめ

