

# 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

# 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
- ✓ 光励起実験による研究の結果、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

電流注入型の1  $\mu\text{m}$ 波長帯InGaAs系半導体レーザーにおける  
利得スイッチングパルスの高速化を目指す

アンプ技術が確立

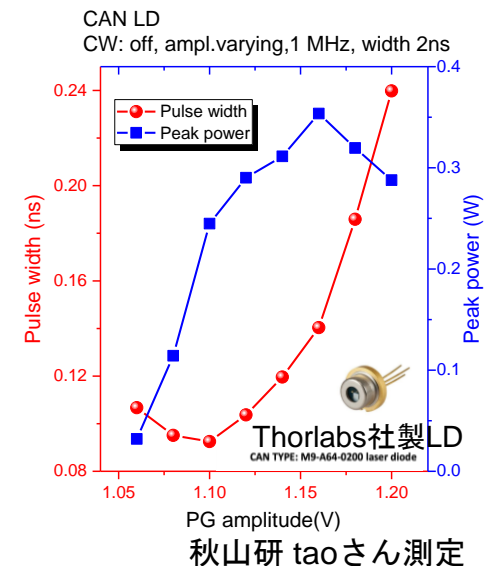
利得スイッチングの基礎物理に立ち戻ってLDの  
デザイン・開発・評価測定を行う

# 背景：利得スイッチング

## ◆ 利得スイッチングの研究例 電流注入利得スイッチング例

	パルス幅
InGaAsP MQW DFB 1.55μm	4.7 ps[1]
商用デバイス(Thorlabs CAN type LD)	80~200 ps

[1] S.Chen *et al.* OPT. EXPRESS (2012)



## ◆ 利得スイッチングの基本メカニズム

### 2準位系シングルモードレート方程式

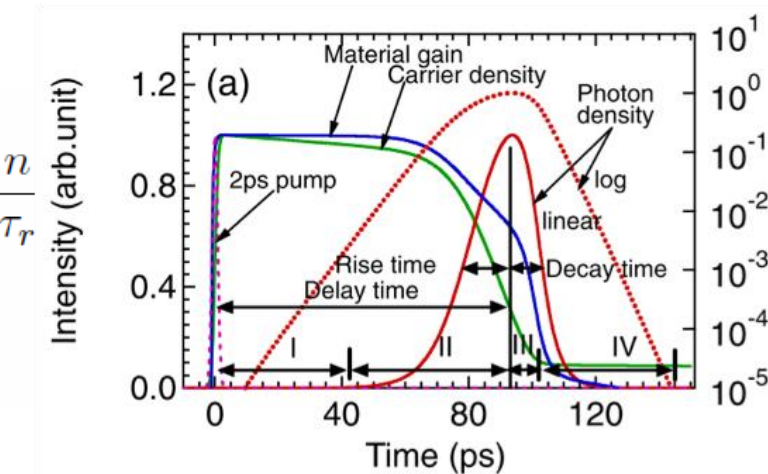
$$\begin{cases}
 \text{キャリア密度} & \frac{dn}{dt} = \boxed{n_{\text{pump}}\zeta(t)} - \boxed{\frac{\Gamma}{m}\nu_g g(n)\frac{s}{1+\epsilon s}} - \frac{n}{\tau_r} \\
 \text{光子密度} & \frac{ds}{dt} = \boxed{\frac{\Gamma\nu_g g(n)s}{1+\epsilon s}} - \boxed{\frac{s}{\tau_p}} + m\beta\frac{n}{\tau_r}
 \end{cases}$$

キャリア注入      誘導放出      共振器寿命

パルス幅を決める要因

✓ モード利得 $\Gamma g$ の大きさ  
→大きくしたい → 次のページ

✓ 共振器寿命 $\tau_p$   
✓ 短くしたい →  $\tau_p = \frac{n_{\text{eq}}}{c(\alpha + \ln(1/R)/L)}$



[2] S.Chen *et al.* JJAP (2012)

共振器長を小さく

# 背景：光パルス的高速化

## ◆ モード利得増大のための多重量子井戸

パルス幅を決める要因

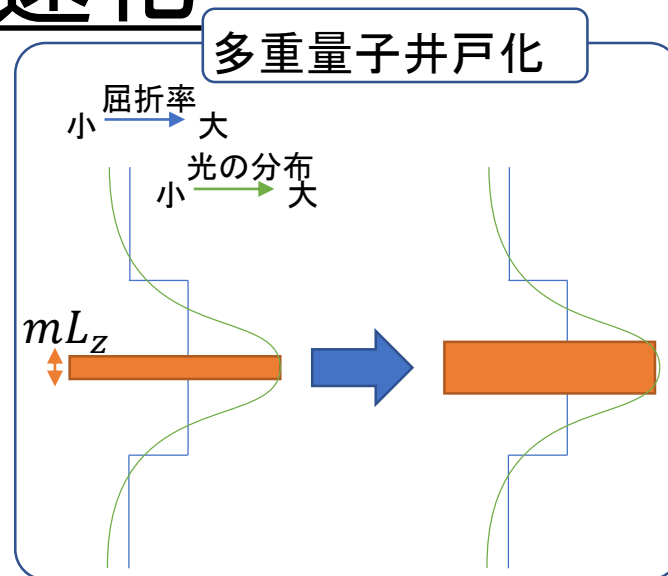
- ✓ モード利得 $\Gamma g$ の大きさ  
→大きくしたい



多重量子井戸化

光閉じ込め係数

$$\Gamma = mL_z/L_0$$



## ◆ しかし...1 μm波長帯発光材料InGaAsはGaAs基板上に厚く積めない

- GaAsとの格子不整合

→対策案：GaAsPをバリア層として歪補償を行う

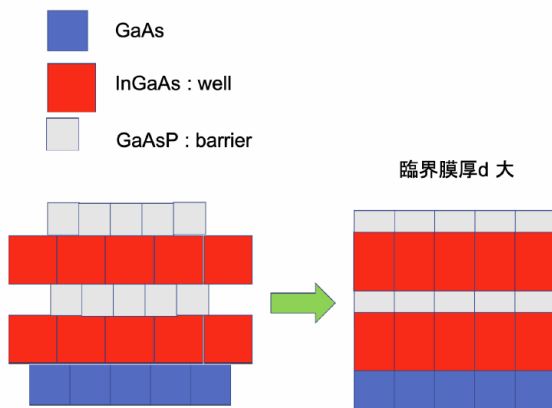
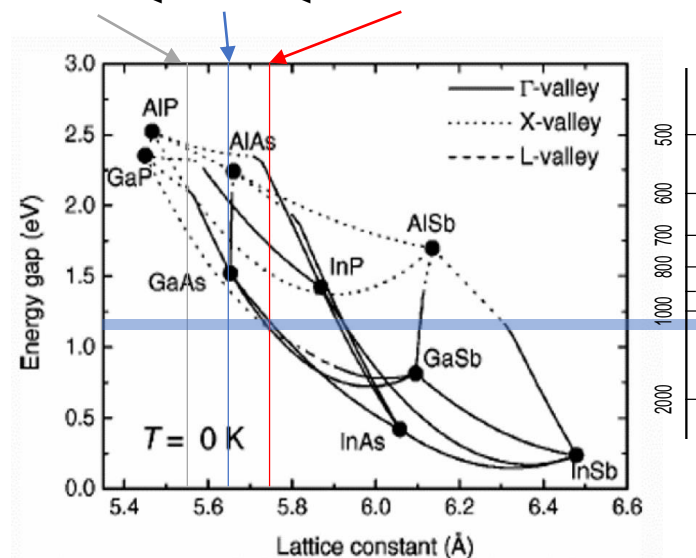


図 1.8: 格子整合の模式図

格子定数  
GaAsP < GaAs < InGaAs



I.Vurgaftman et al. J. Appl. Phys. (2001)

# 目的

## 大きな目的

☆ 利得スイッチ用電流注入型の1  $\mu\text{m}$ 波長帯InGaAs系LDの高速化

## 本研究の目的

☆ InGaAs /GaAsP 歪補償多重量子井戸レーザーの作製及び電流注入測定

### 方針

レーザー開発の工程

設計



試作



評価測定・解析

比較

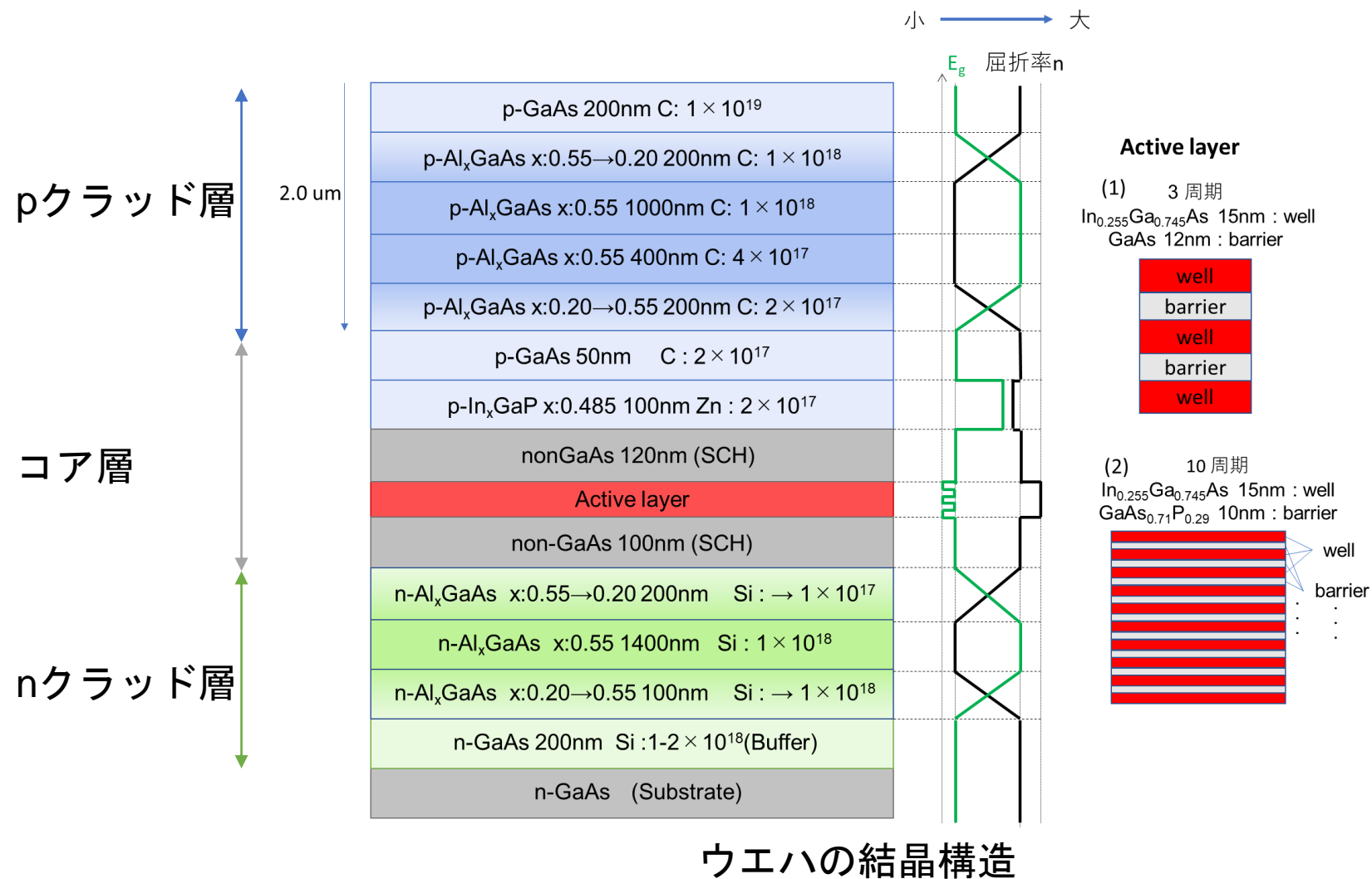
- 10周期InGaAs/GaAsP歪補償
- 3周期InGaAs/GaAs歪

エピ、フォトリソグラフィは外注  
マウント、デバイス化を行う

電流注入による評価測定

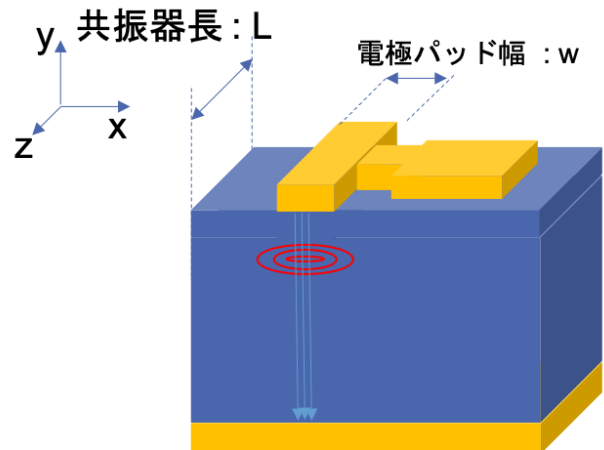
- 定常電流注入：  
多重化によるモード利得増大への有利性
- ナノ秒パルス電流注入：  
利得スイッチング動作

# 試料構造



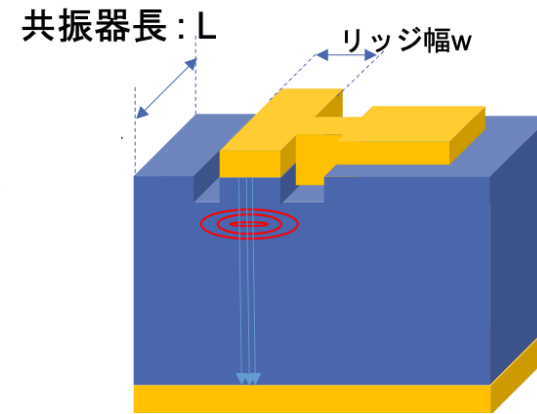
# 試料構造

ブロードコンタクトレーザー  
・・・エピウエハの評価



$L=500, 1000, 2000 \mu\text{m}$   
 $w=3, 5, 10, 30, 50, 100, 300 \mu\text{m}$

リッジ導波路型レーザー  
・・・シングルモード化



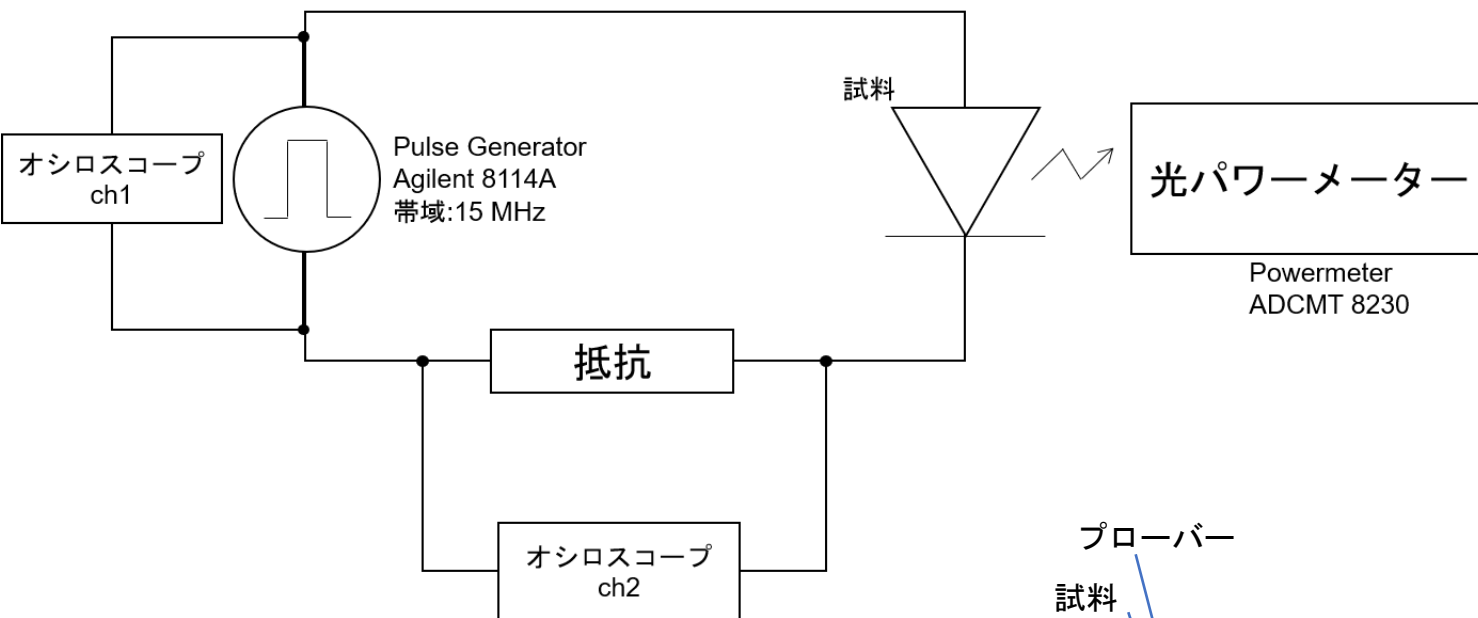
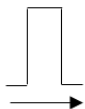
$L=300, 400, 500, 1000 \mu\text{m}$   
 $w=1.5, 2.5 \mu\text{m}$



# 測定方法

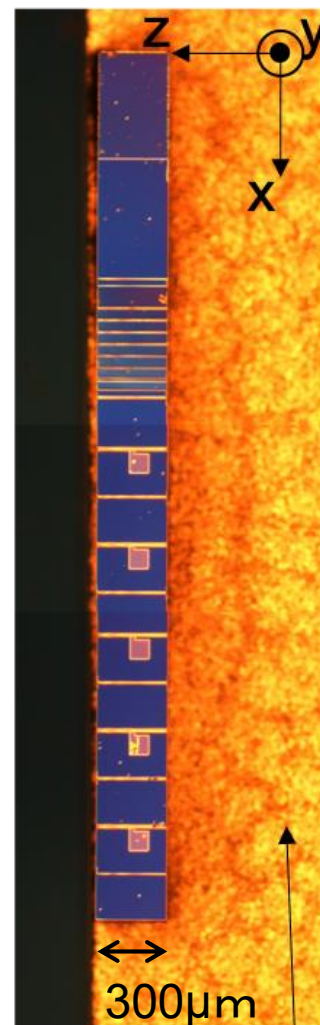
## 定常電流注入

パルス幅：数  $\mu\text{s}$   
繰り返し周期：数  $\text{ms}$

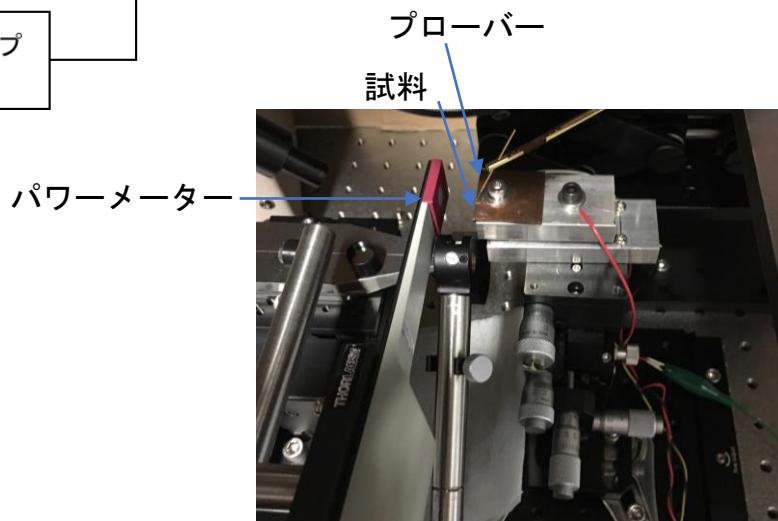


サンプル

(a)



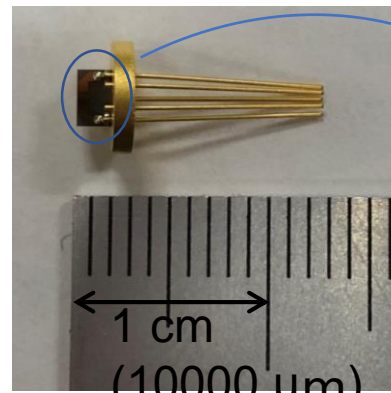
AuSn on AlN  
サブマウント



試料の電極をプローバーでさわって測定を行う様子

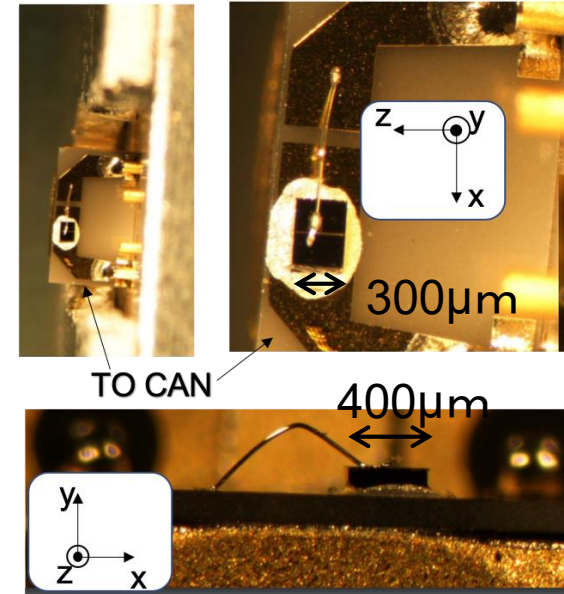
# 測定方法

## 短パルス電流注入

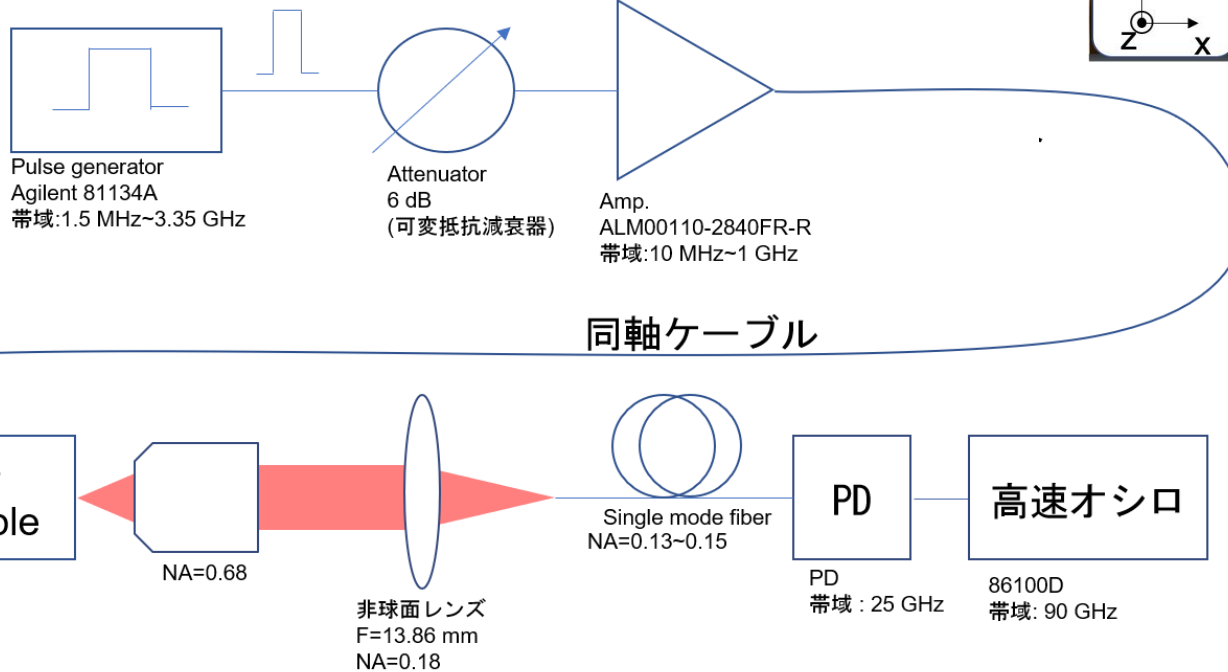


TO Canの全体像

(b)

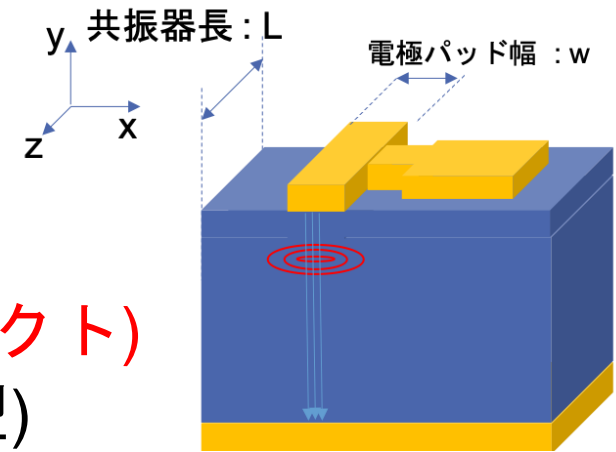


パルス幅 : 1 ns  
繰り返し周波数 : 1 MHz



# 目次

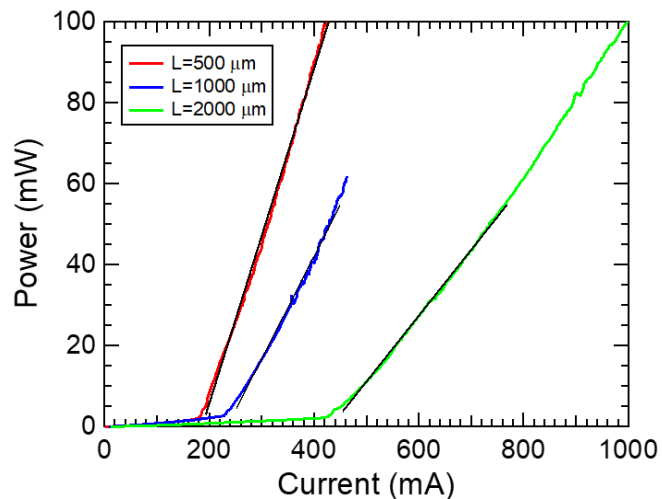
- 背景
- 実験方法
- 実験結果
  - ✓ 定常電流注入 (ブロードコンタクト)
  - ✓ 定常電流注入 (リッジ導波路型)
  - ✓ 短パルス注入 (リッジ導波路型)
- まとめ



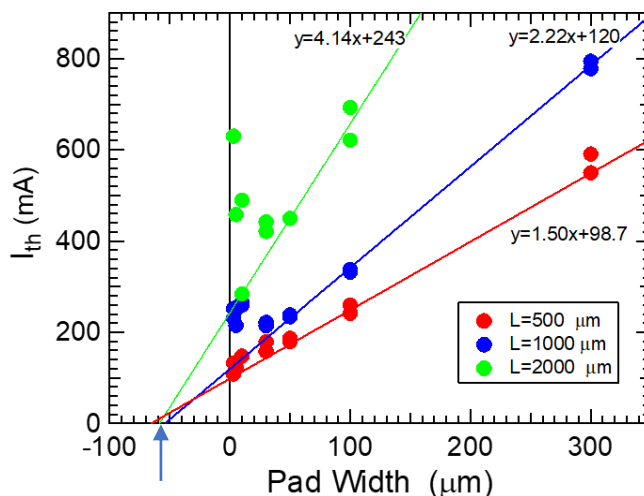
# 測定結果：定常電流注入 ブロードコンタクト

## 3周期

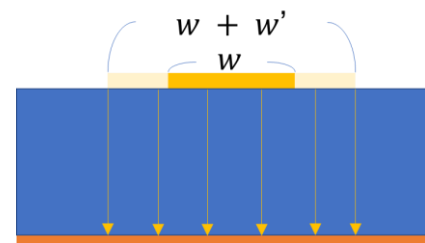
ILカーブ(注入電流 vs 発光量)



閾値電流



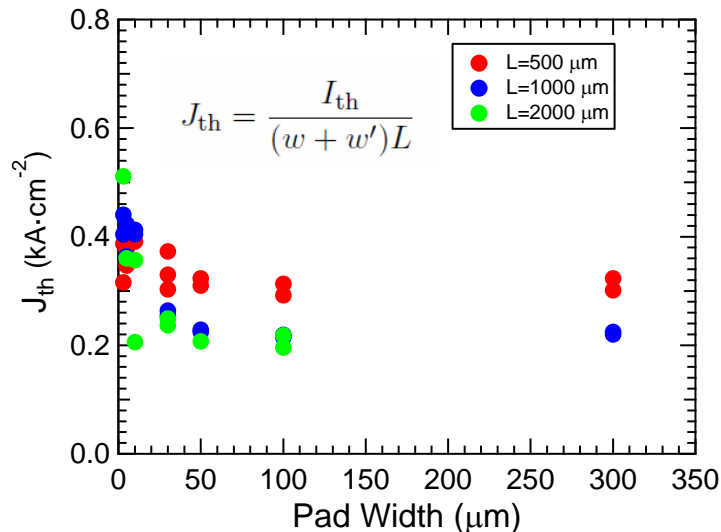
電流広がり



典型的な閾値電流、スロープ効率と見積もられた電流広がり幅

$L(\mu\text{m})$	$I_{th}$ (mA)	$2 \frac{\Delta P}{\Delta I}$ (W/A)	$w'(\mu\text{m})$
500	187	0.83	65.8
1000	234	0.51	54.1
2000	450	0.37	58.7

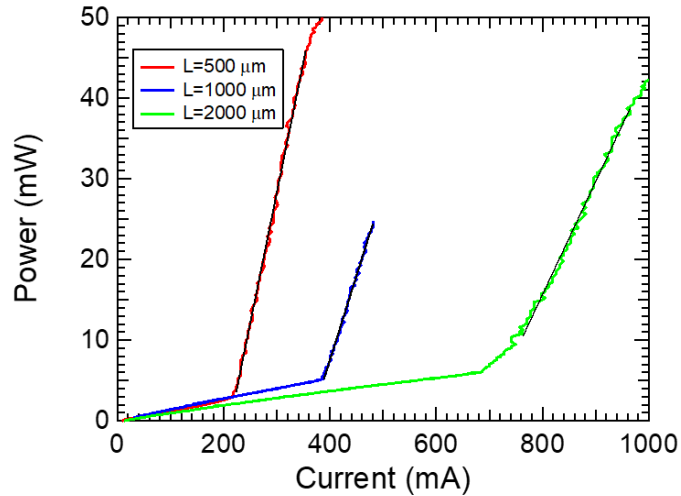
閾値電流密度



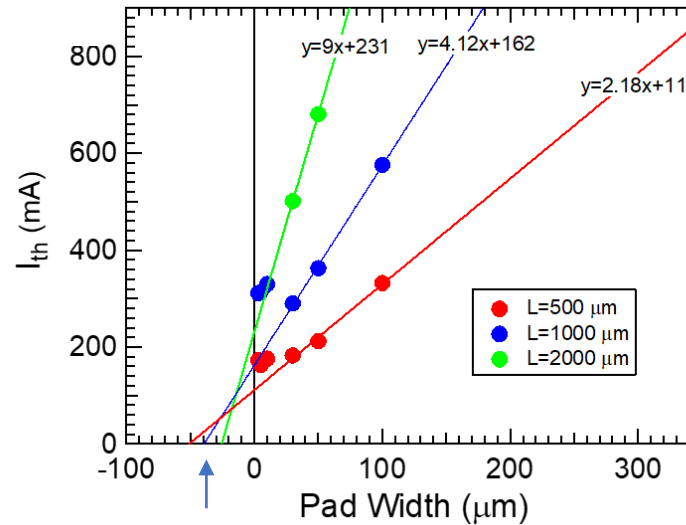
# 測定結果：定常電流注入 ブロードコンタクト

## 10周期

ILカーブ(注入電流 vs 発光量)



閾値電流

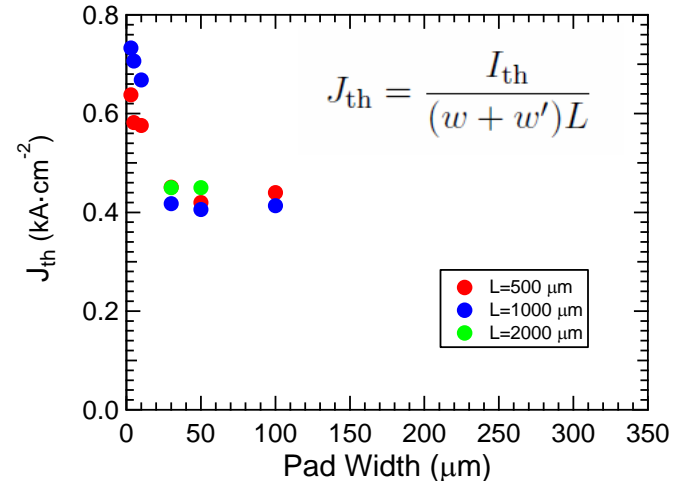


電流広がり

典型的な閾値電流、スロープ効率と見積もられた電流広がり幅

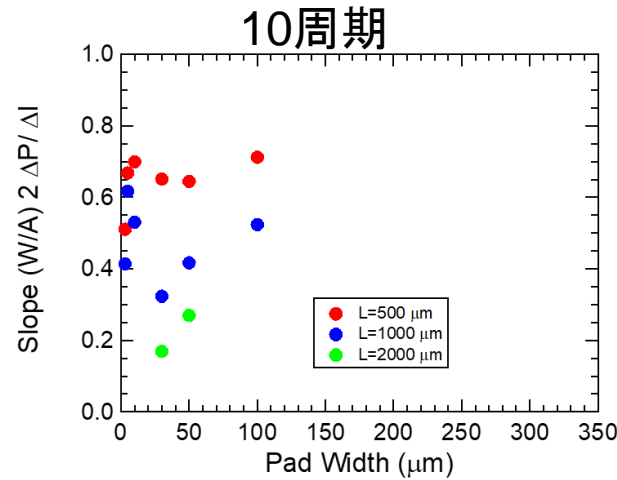
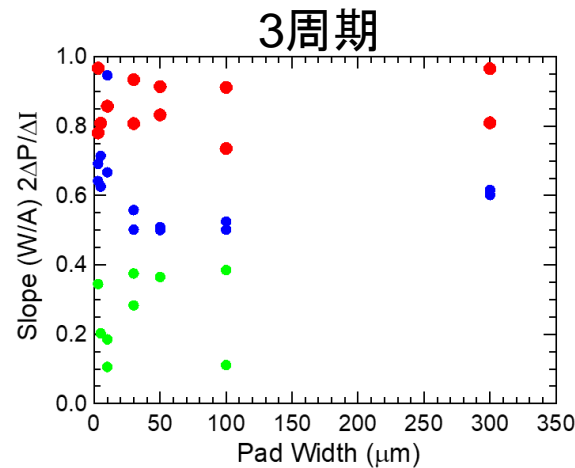
$L(\mu\text{m})$	$I_{th} \text{ (mA)}$	$2 \frac{\Delta P}{\Delta I} \text{ (W/A)}$	$w'(\mu\text{m})$
500	212	0.64	51.1
1000	363	0.42	39.5
2000	501	0.27	25.7

閾値電流密度



# 測定結果：定常電流注入 ブロードコンタクト

スロープ効率  $\Delta P / \Delta I$



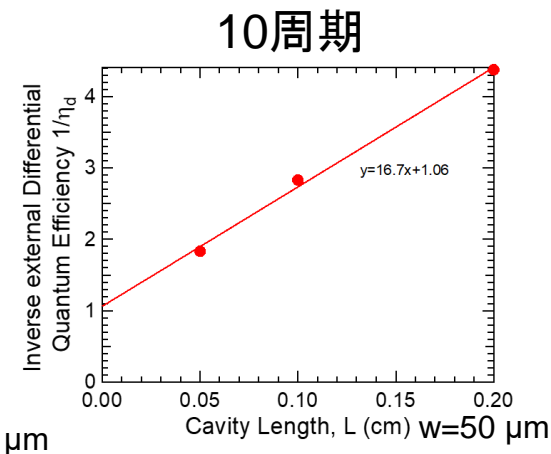
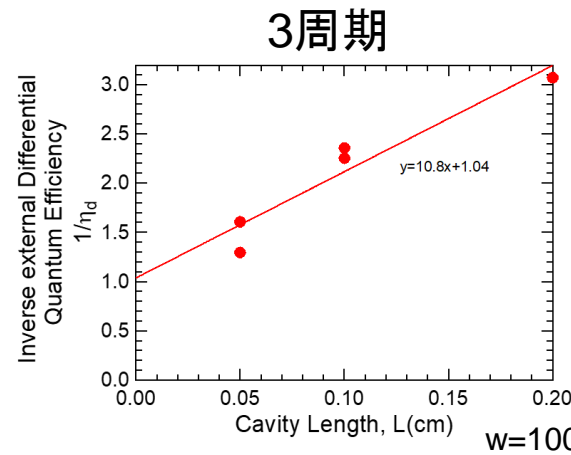
内部量子効率の見積もり

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

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

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

傾き      切片



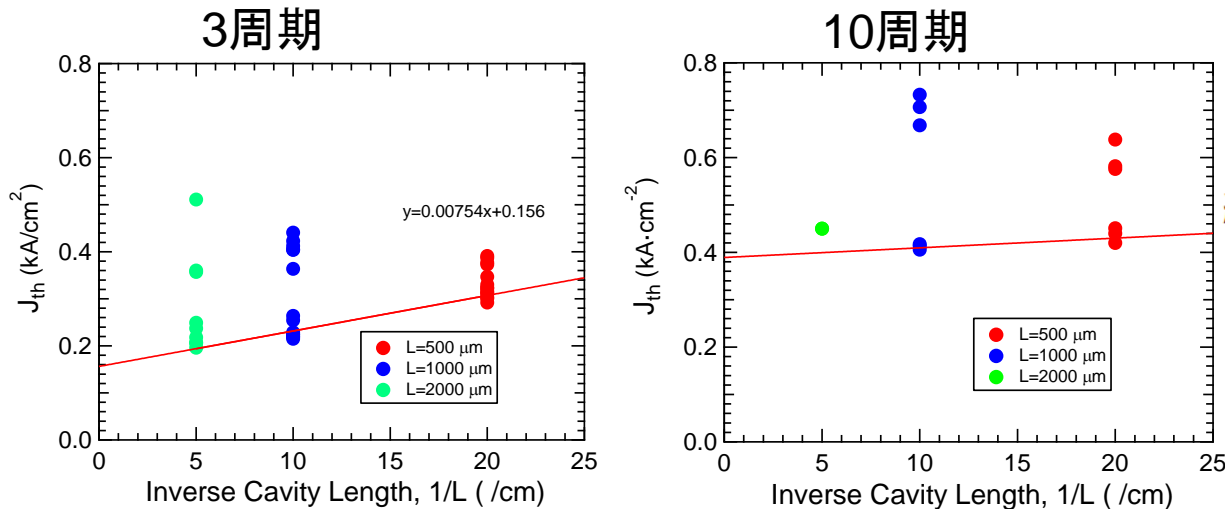
## フィッティング結果

試料	内部損失 $\alpha_{int}/\text{cm}$	内部量子効率 $\eta_{int}$
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：定常電流注入 ブロードコンタクト

## 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

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

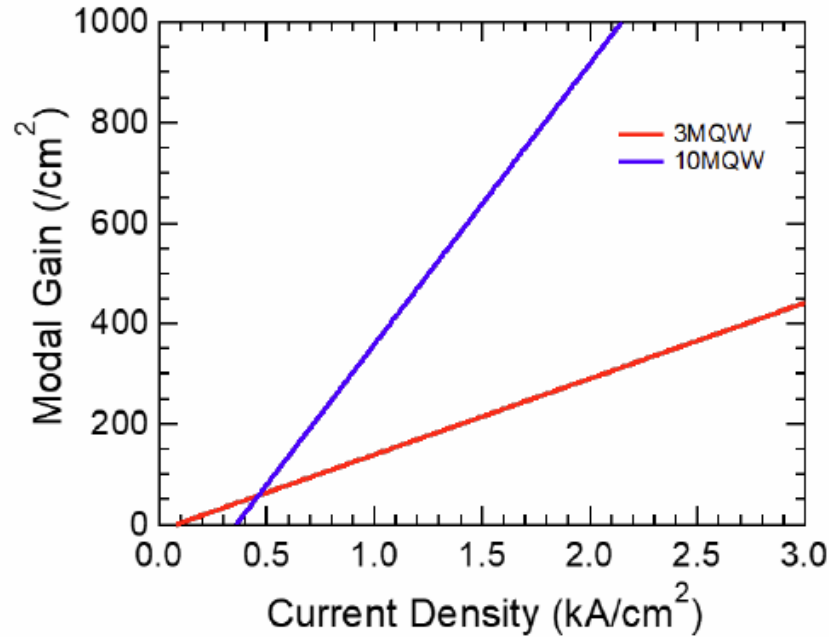
## フィッティング結果

試料	透明電流密度 $J_0$ kA/cm <sup>2</sup>	$\Gamma g_0$ /kA
3 周期	0.0782	151
10 周期	0.357	558

量子井戸層を増やしたことによる微分モード利得 $\Gamma g_0$ の増大を示す結果を得た。

# 測定結果：定常電流注入 ブロードコンタクトレーザーまとめ

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方がモード利得を稼ぐのに有利。

表 3.5: ブロードコンタクトレーザーの結果まとめ

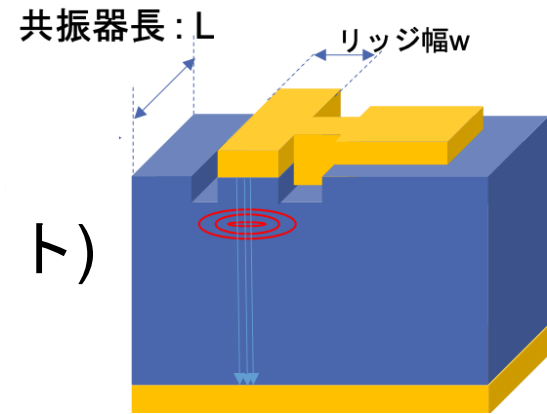
試料	内部損失 $\alpha_{int}/\text{cm}$	内部量子効率 $\eta_{int}$	透明電流密度 $J_0/\text{kA/cm}^2$	$\Gamma g_0 / \text{kA}$
3 周期	11.8	0.96	0.0782	151
10 周期	18.0	0.94	0.357	558

- 電流広がり数十 $\mu\text{m}$ 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

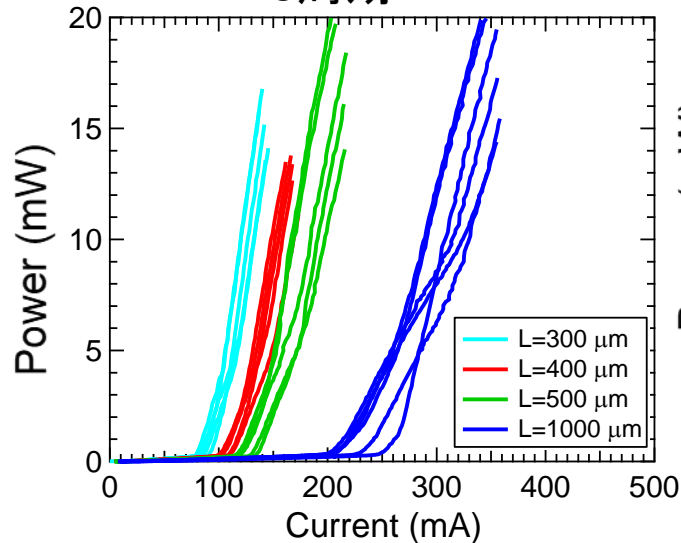
- 背景
- 実験方法
- 実験結果
  - ✓定常電流注入(ブロードコンタクト)
  - ✓定常電流注入 (リッジ導波路型)
  - ✓短パルス注入 (リッジ導波路型)
- まとめ



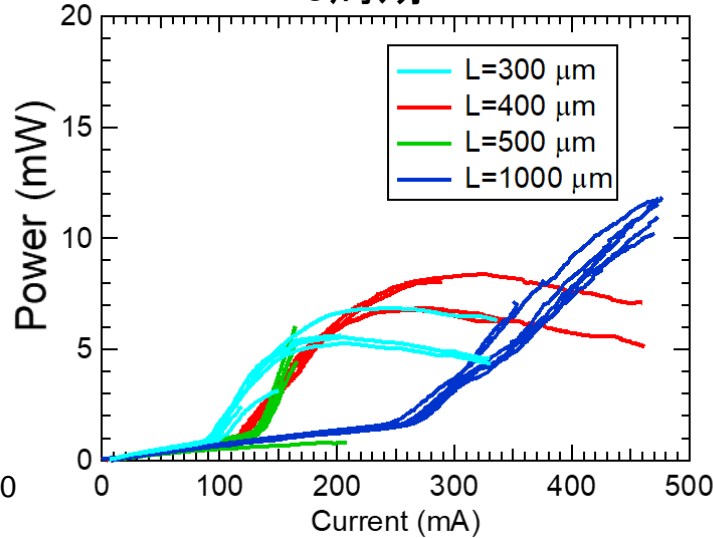
# 測定結果：定常電流注入 リッジ導波路型レーザー

ILカーブ(注入電流 vs 発光量)

3周期



10周期



リッジ幅1.5  $\mu\text{m}$ , 2.5  $\mu\text{m}$   
の差異が見られない  
(同じ色でプロットした)

$L(\mu\text{m})$	$I_{th} \text{ (mA)}$	$2 \frac{\Delta P}{\Delta I} \text{ (W/A)}$
300	85.1	0.63
400	105	0.55
500	120	0.62
1000	205	0.42

$L(\mu\text{m})$	$I_{th} \text{ (mA)}$	$2 \frac{\Delta P}{\Delta I} \text{ (W/A)}$
300	88.1	0.10
400	114	0.13
500	138	0.24
1000	265	0.08

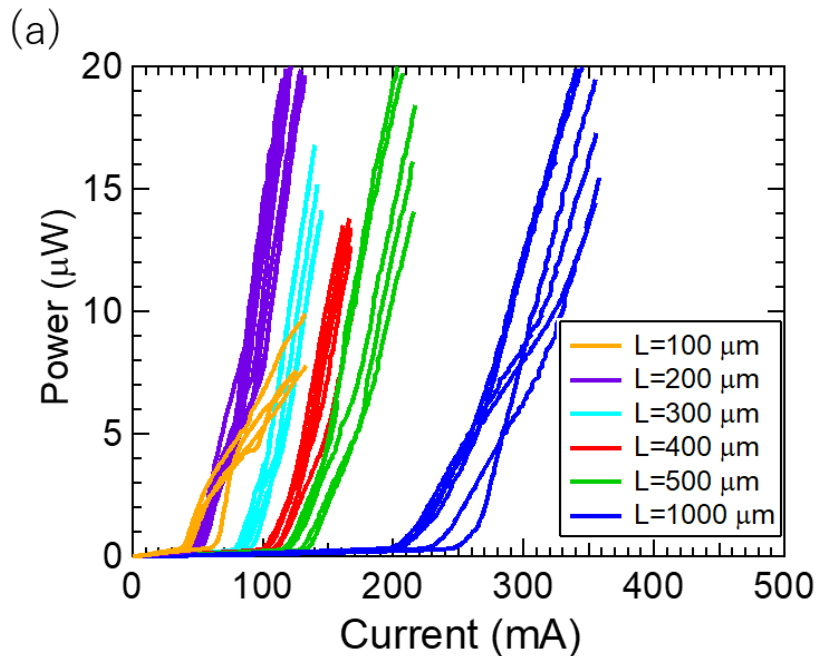
課題

- ① 閾値電流が最短でも80 mA程度と高い(商用デバイスの例:50mA)
- ② ILカーブが湾曲して発光強度が低下している(ドループ)  
→ 温度上昇
- ③ 閾値電流のリッジ幅による差異が見られない  
→ 電流の広がり

# 測定結果：定常電流注入 リッジ導波路型レーザー

## 課題① 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  $L=100\text{ }\mu\text{m}$ ,  $200\text{ }\mu\text{m}$ を追加



$L(\mu\text{m})$	$I_{th}$ (mA)	$2 \frac{\Delta P}{\Delta I}$ (W/A)
100	39.6	0.32
200	50.8	0.80
300	85.1	0.63
400	105	0.55
500	120	0.62
1000	205	0.42

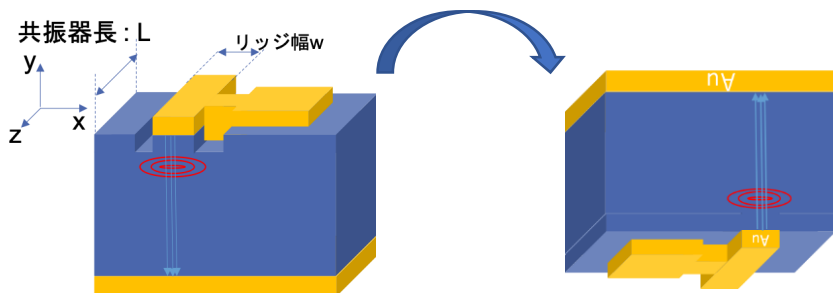
✓ 短共振器レーザー作製により閾値電流の低減達成 最短約40 mA

# 測定結果：定常電流注入 リッジ導波路型レーザー

## 課題②発光強度の低下(ドループ)

3周期  $L=300, 400, 1000 \mu\text{m}$  エピダウンによる温度上昇の抑制を期待

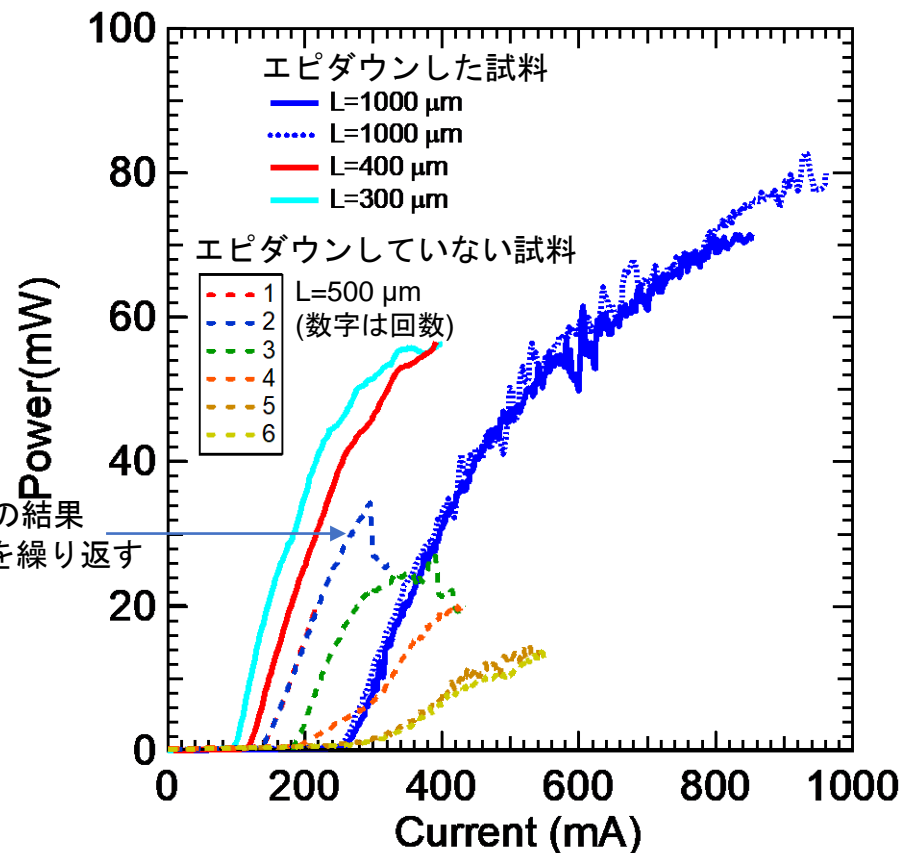
上下ひっくり返してマウント



bar 02  
( $L=300$ )素子01



エピダウンしていない試料( $L=500 \mu\text{m}$ )の結果  
・・・ドループが観測された後、測定を繰り返すとさらに発光量が落ちる

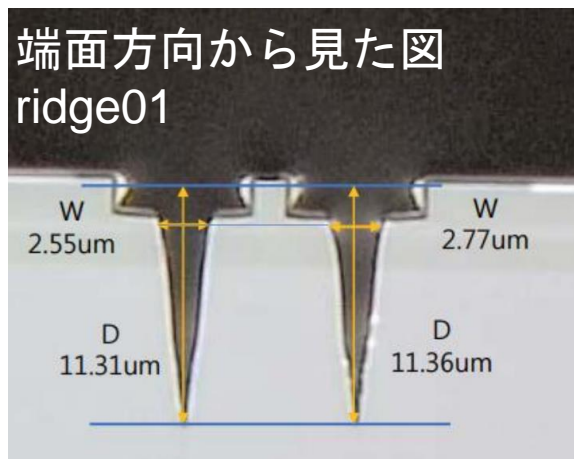
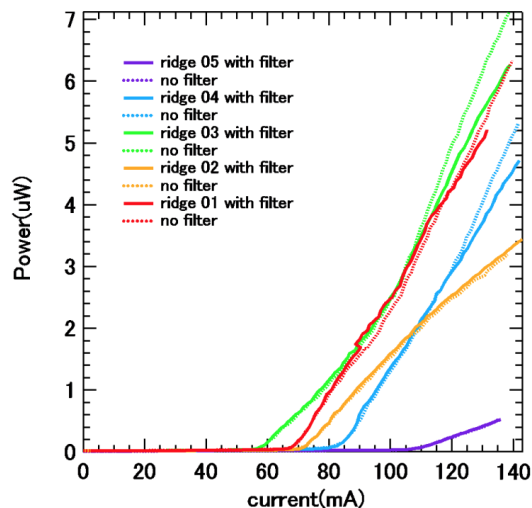


エピダウンしたことにより発光量の増加を確認した。

# 測定結果：定常電流注入 リッジ導波路型レーザー

## 課題③ リッジ幅依存性がない。

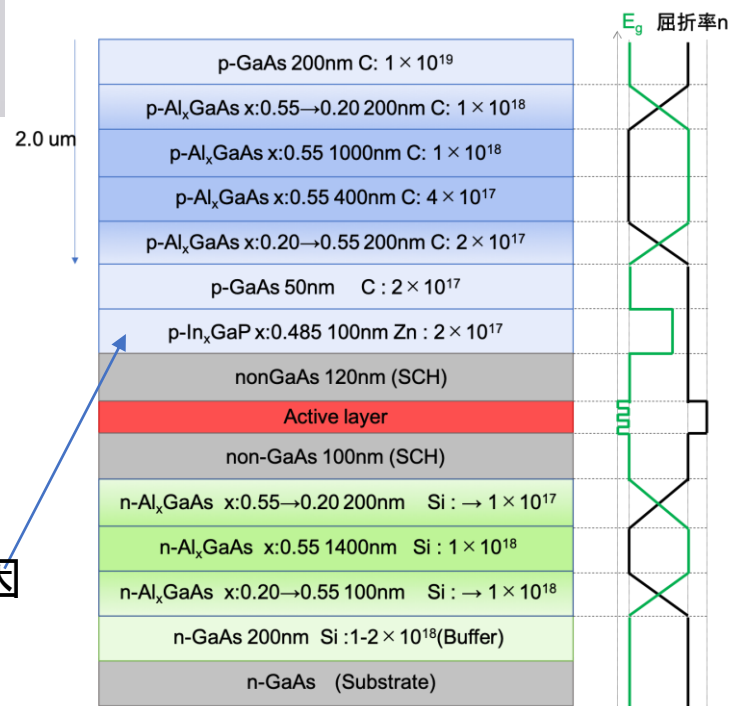
FIB加工 3周期 L=300  $\mu\text{m}$ , 2  $\mu\text{s}$ パルス, 2 ms繰り返し, Duty比1:1000



閾値電流が下がった(FIB前は最小でも80mA)  
→電流が横方向に広がっていると推察

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



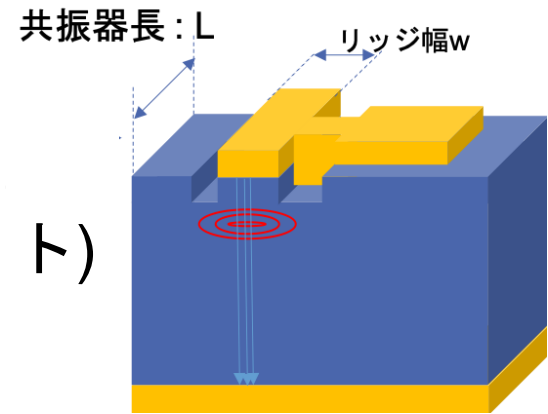
## まとめ

### リッジ導波路型レーザーのIL測定で判明した課題

- ① 閾値電流が高い。
  - 短共振器化による閾値電流の低減。
- ② 大電流を流すと発光強度が落ちる。(ドループ)
  - エピダウンによる温度上昇の抑制。光出力の向上。
- ③ 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層が原因と考えられる。薄くすることで解消しうる。

# 目次

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

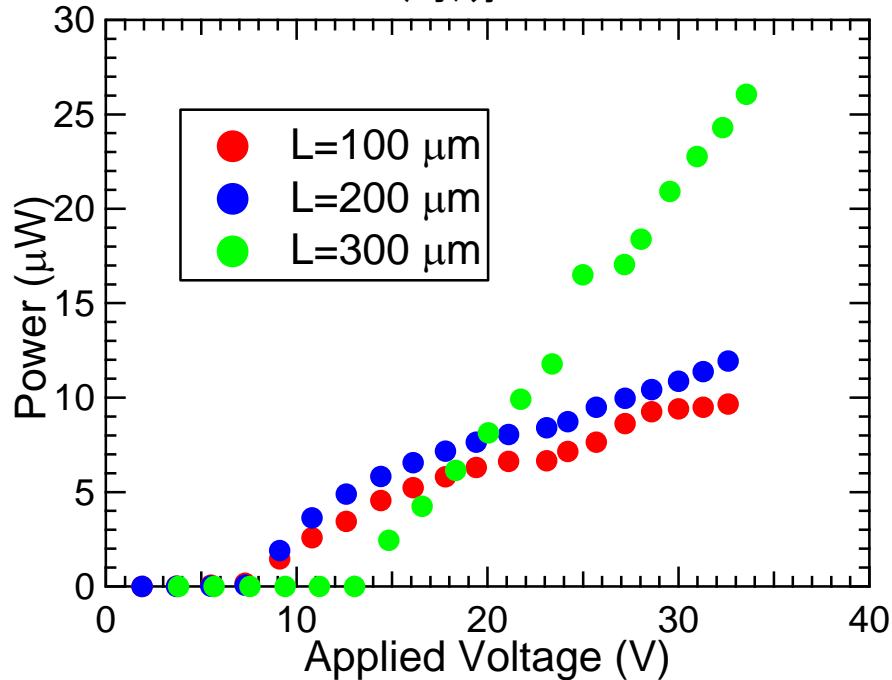


# 測定結果：リッジ導波路型レーザー 短パルス電流注入

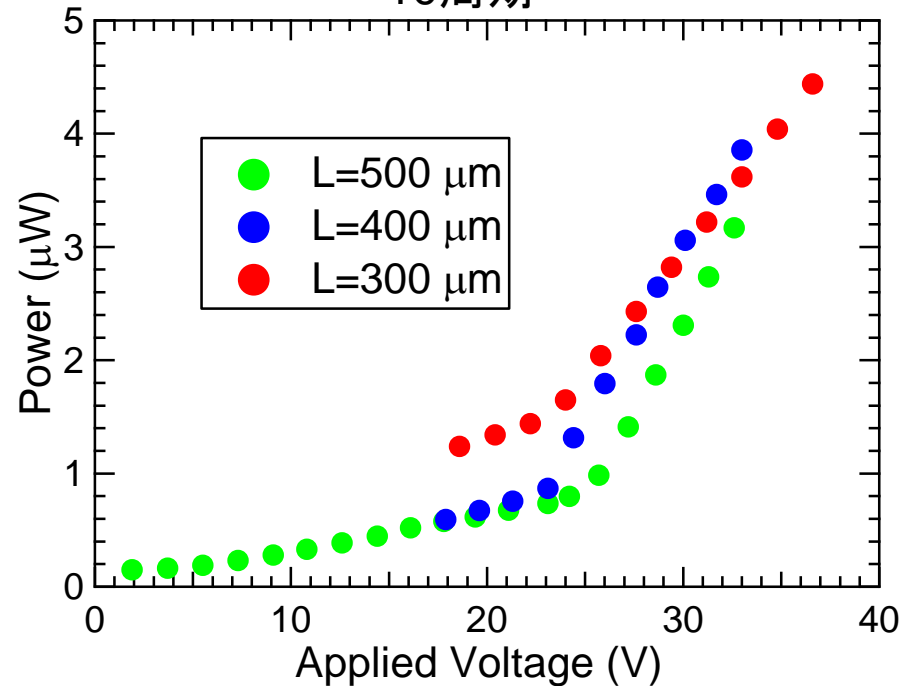
## ILカーブの結果

駆動条件：1 nsパルス, 1  $\mu$ s周期 Duty比1:1000

3周期



10周期

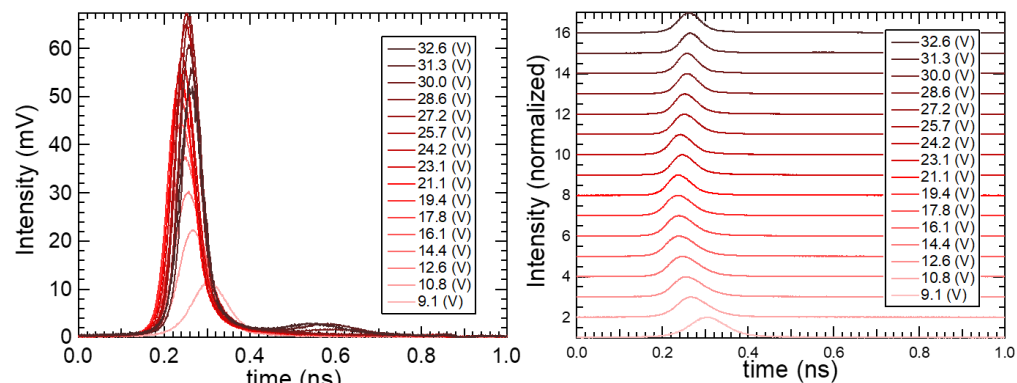




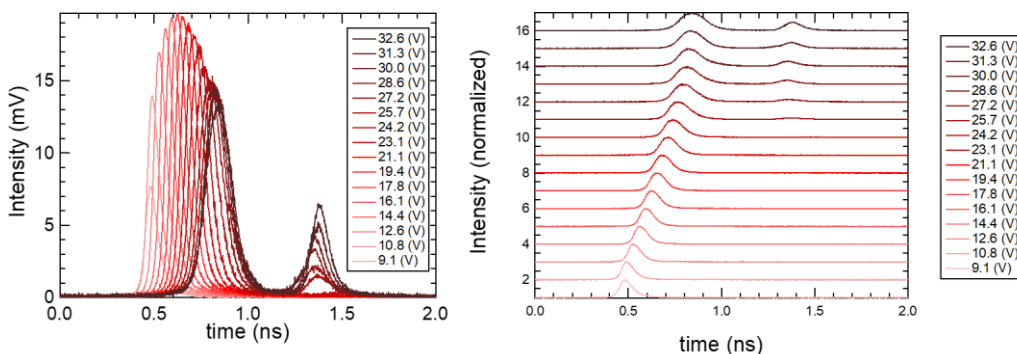
# 測定結果：リッジ導波路型レーザー 短パルス電流注入

時間波形 3周期試料の結果

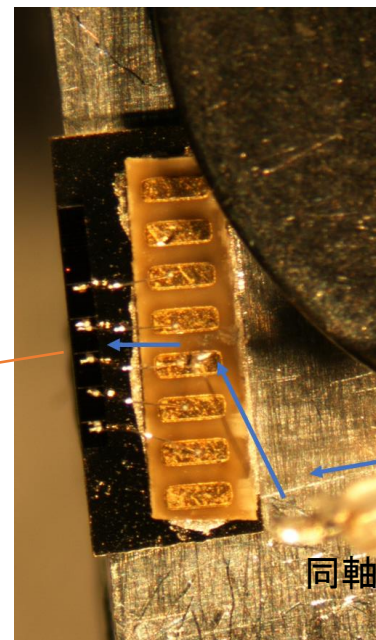
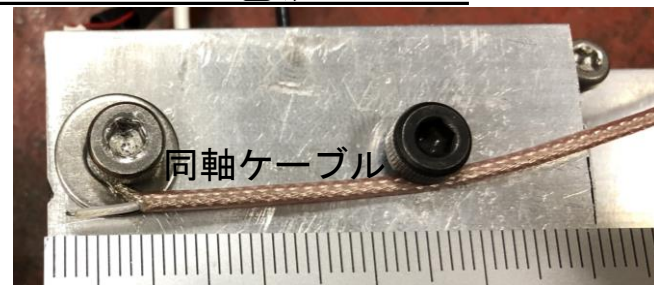
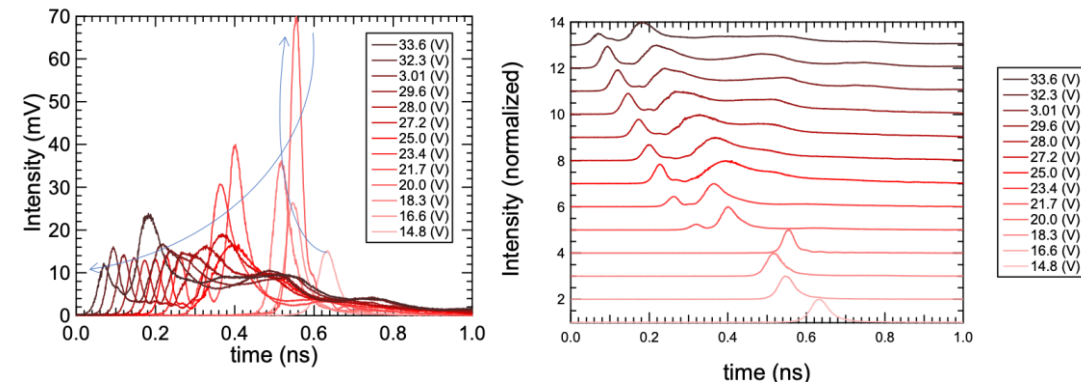
L=100  $\mu\text{m}$



L=200  $\mu\text{m}$



L=300  $\mu\text{m}$



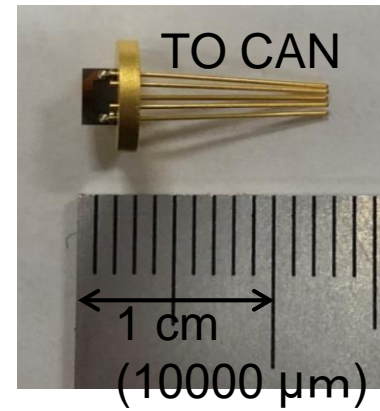
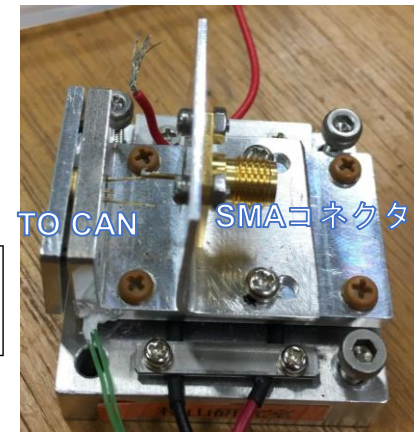
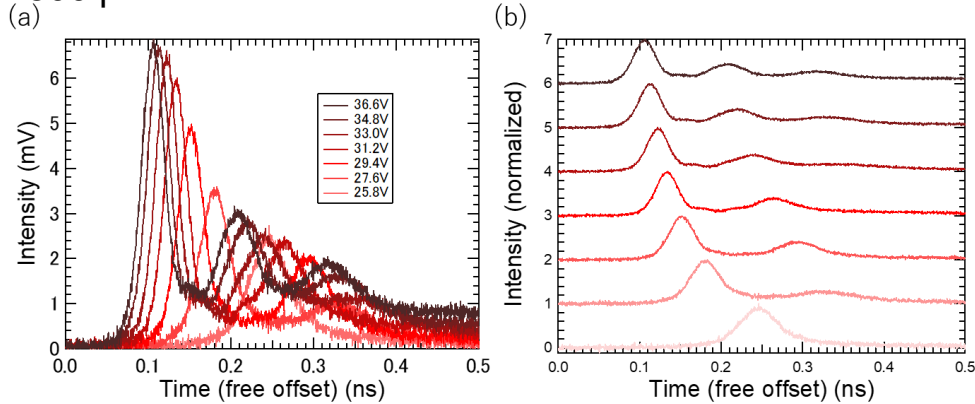
3周期試料の短パルス電流注入のマウント (L=300  $\mu\text{m}$ )

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。

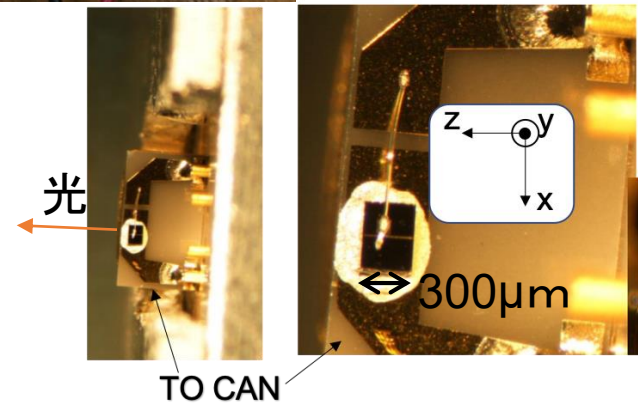
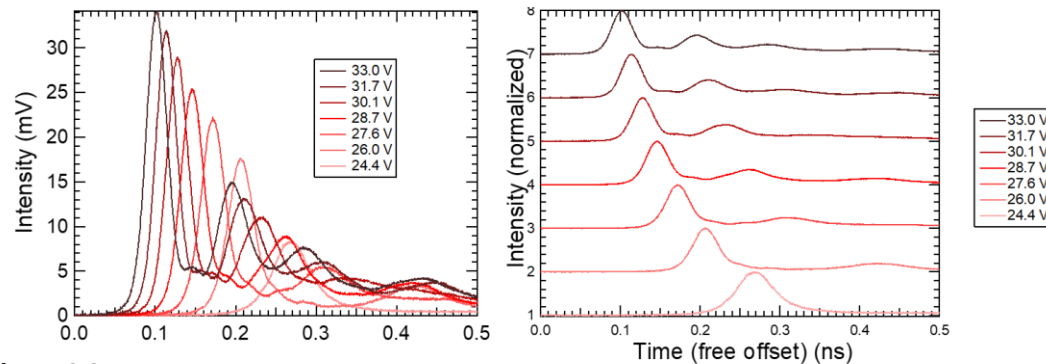
# 測定結果：リッジ導波路型レーザー 短パルス電流注入

時間波形 10周期試料の結果

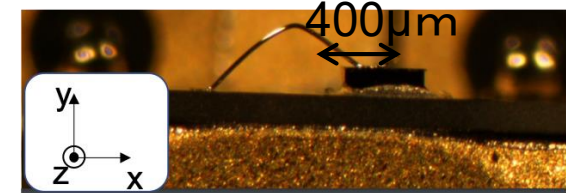
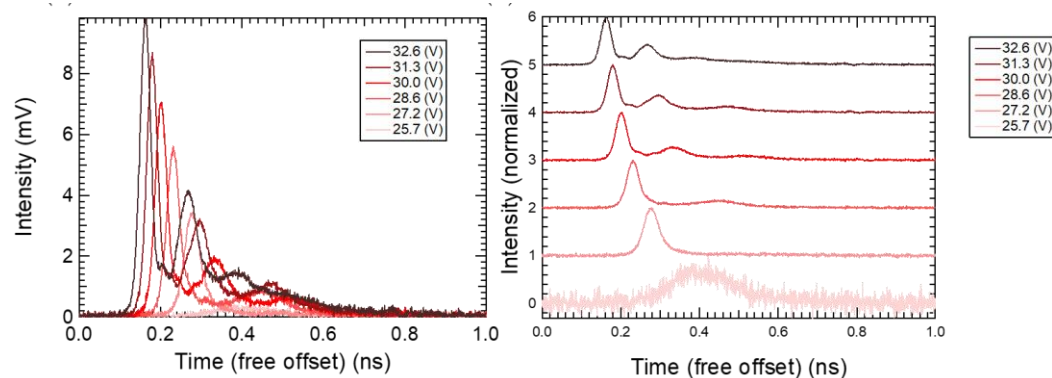
L=300  $\mu\text{m}$



L=400  $\mu\text{m}$



L=500  $\mu\text{m}$



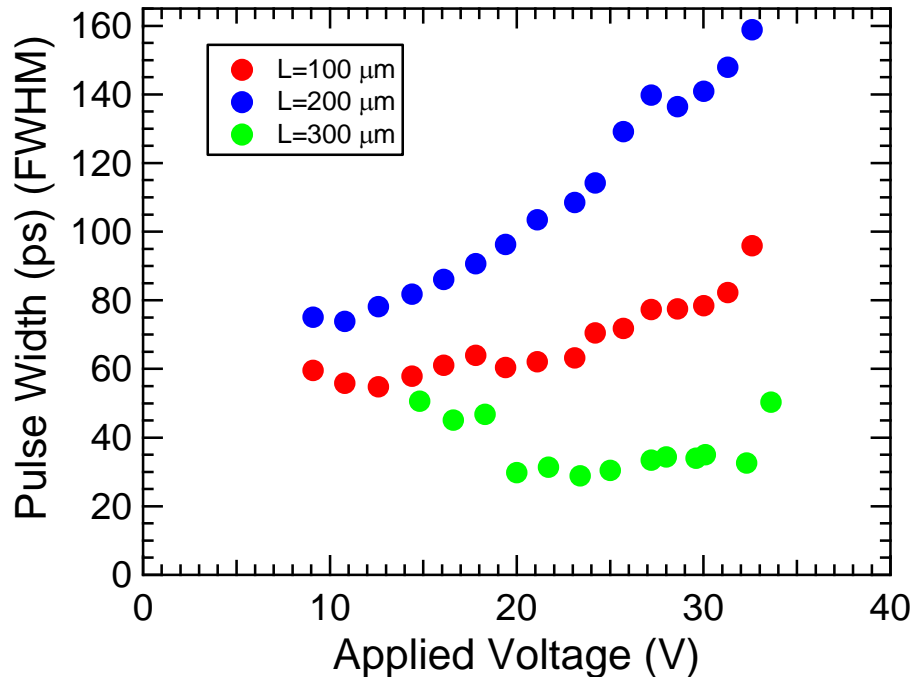
10周期試料の短パルス電流注入マウント

典型的な利得スイッチングパルス

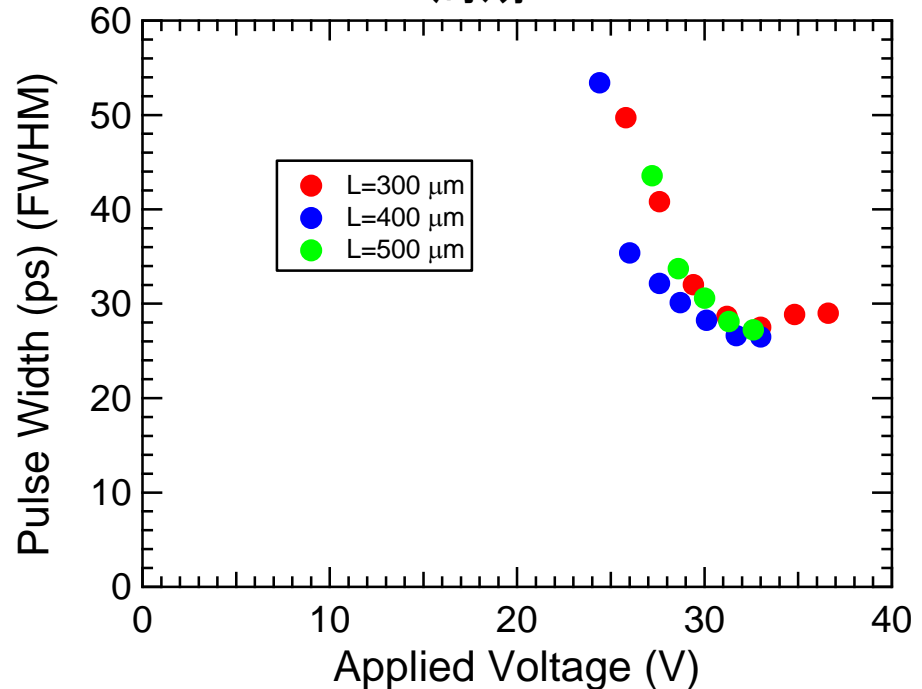
# 測定結果：リッジ導波路型レーザー 短パルス電流注入

## パルス幅

3周期



10周期



3周期・・・電圧を上げるにつれパルス幅が増加

10周期・・・共振器長によらず30 ps程度で飽和。最短で26.5 ps

→共振器寿命以外の要因でパルス幅の制限

→InGaP層での電流広がりやインピーダンス不整合による励起密度不足。

## まとめ

- 3周期試料の測定結果において光パルス形状が崩れた。  
→マウント方法に問題がある。駆動系とのインピーダンス不整合。

- 10周期試料の測定結果において典型的な利得スイッチングパルスを得た。パルス幅は最短で26.5 ps。

	パルス幅
InGaAsP MQW DFB 1.55 $\mu$ m	4.7 ps[1]
商用デバイス(Thorlabs CAN type LD)	80~200 ps

[1]S.Chen *et al.* OPT. EXPRESS (2012)

- パルス幅が30 ps程度で飽和。  
→励起密度が不十分。パッケージングの不具合により制限。InGaP層によるキャリア拡散。

## まとめ

- ✓ 1  $\mu\text{m}$  波長帯 InGaAs/GaAsP10周期歪補償量子井戸レーザーを試作
- ✓ 定常電流注入(ブロードコンタクトレーザー)
  - ✓ 閾値電流や発光効率から良質な結晶成長を達成できたと結論
  - ✓ 多重化による微分モード利得の増大を確認
    - ✓ 電流注入において井戸数を増やすことによる短パルス化の有利性
- ✓ 定常電流注入(リッジ導波路型レーザー)
  - ✓ ドループがみられたがエピダウンによる改善
  - ✓ 短共振器試料作製による閾値低減
  - ✓ FIB加工による電流広がりの抑制
- ✓ ナノ秒電気パルス注入(リッジ導波路型レーザー)
  - ✓ 10周期試料に関しては典型的な利得スイッチ動作を観測
    - ✓ 最短で26.5 ps
  - ✓ パルス幅が飽和
    - ✓ パッケージングの不具合やInGaP層によるキャリア注入の妨げによる励起密度不足

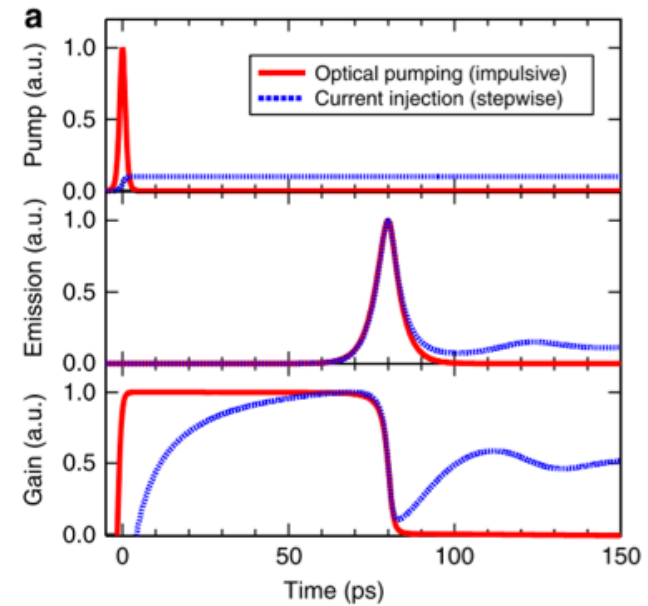
## 展望

- ✓ 10周期を超える多重量子井戸レーザーを開発(InGaP層を薄くデザイン)
- ✓ 試料の高周波実装と駆動系の改善

以上  
ありがとうございました

## 2準位系シングルモードレート方程式

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





# 背景：InGaAs系材料の多重量子井戸化

格子定数

GaAsP < GaAs < InGaAs

- 1  $\mu\text{m}$ 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

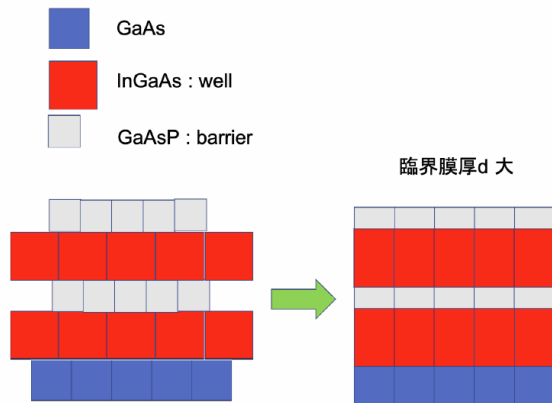
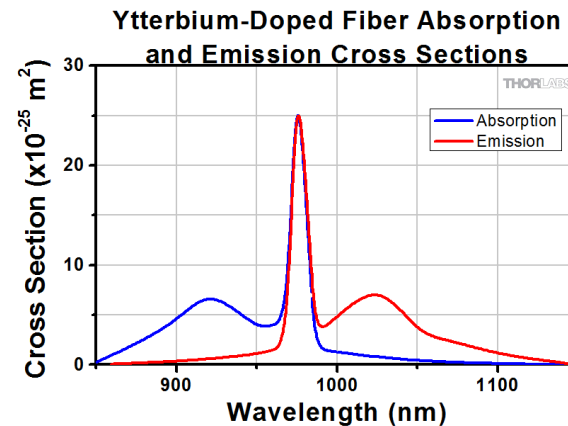
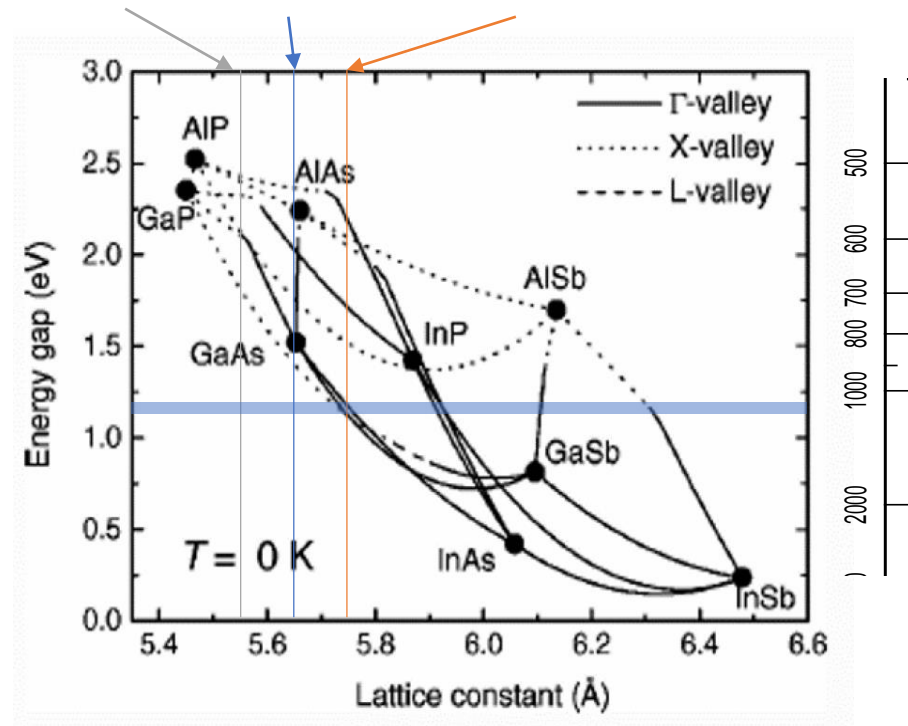


図 1.8: 格子整合の模式図





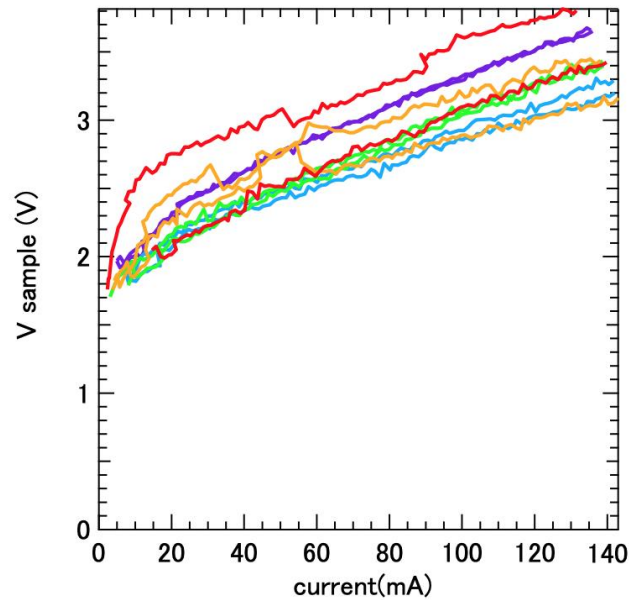
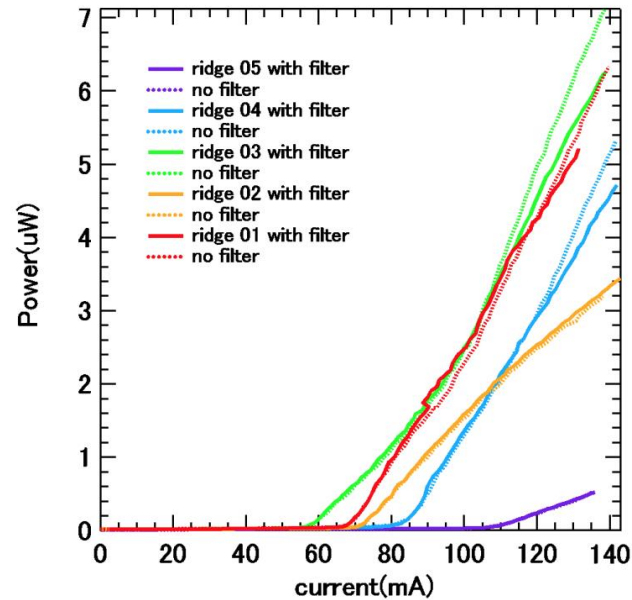
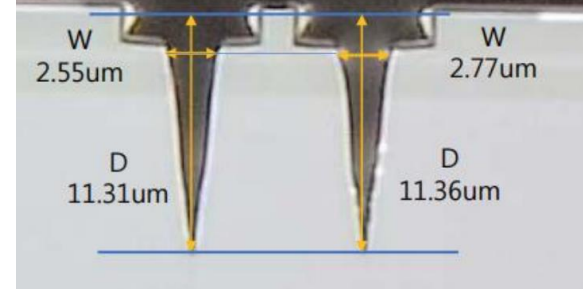
# 測定結果：DC注入 リッジ導波路型レーザー

## 課題③ リッジ幅依存性がない。

FIB加工

3周期 L=300  $\mu$ m, 2  $\mu$ sパルス, 2 ms繰り返し, Duty比1:1000

端面方向から見た図  
ridge01

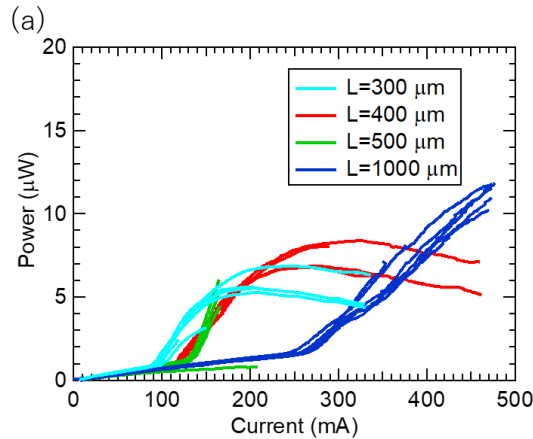


閾値電流が下がった

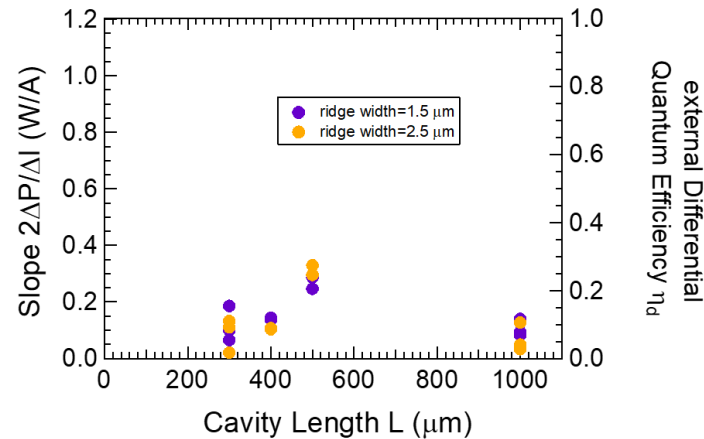
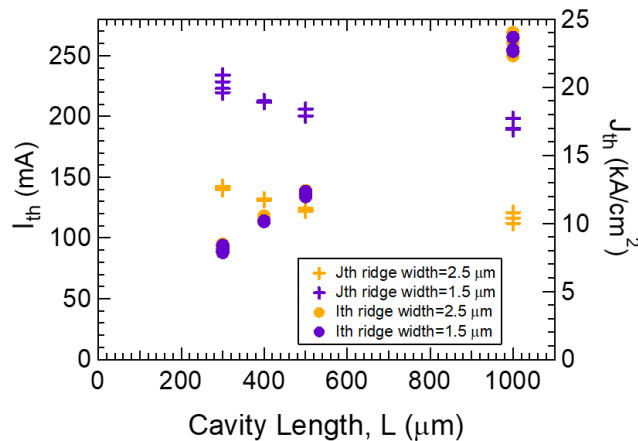
→電流が横方向に広がっていると推察

# 測定結果：DC注入 リッジ導波路型レーザー

10周期



リッジ幅 $1.5\ \mu\text{m}$ ,  $2.5\ \mu\text{m}$ の差異が見られない(同じ色でプロットした)

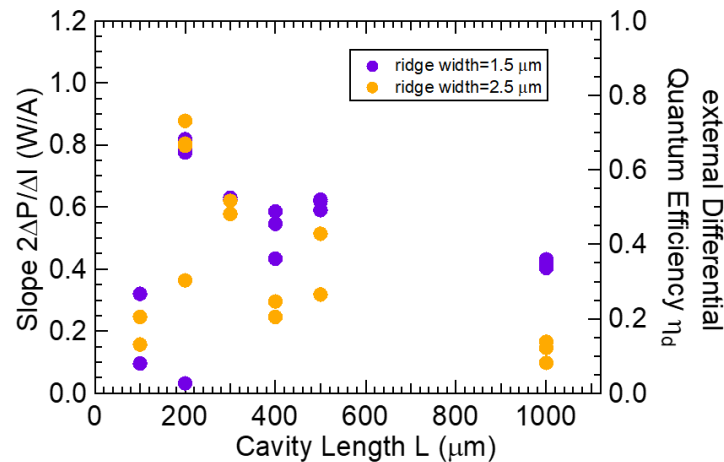
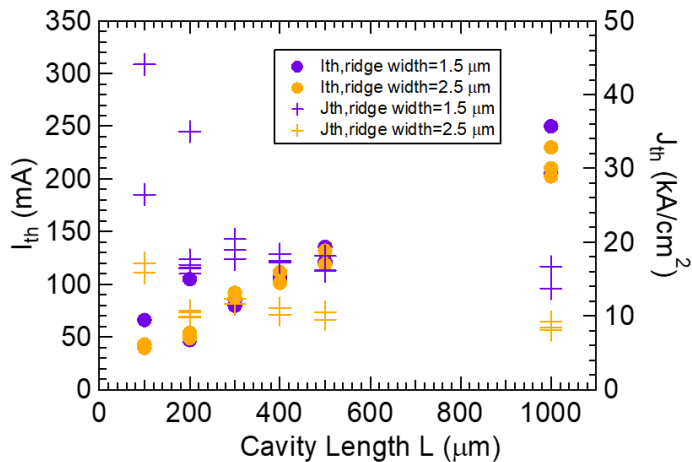
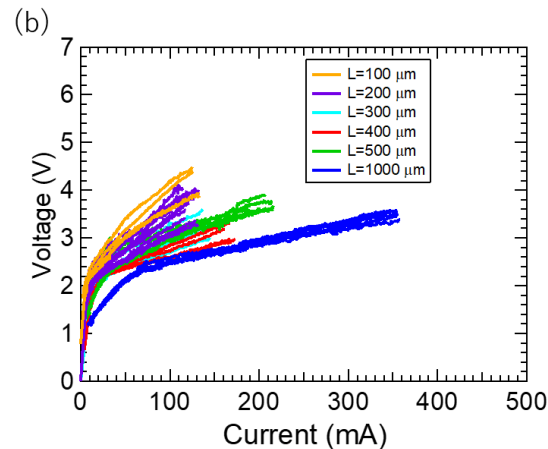
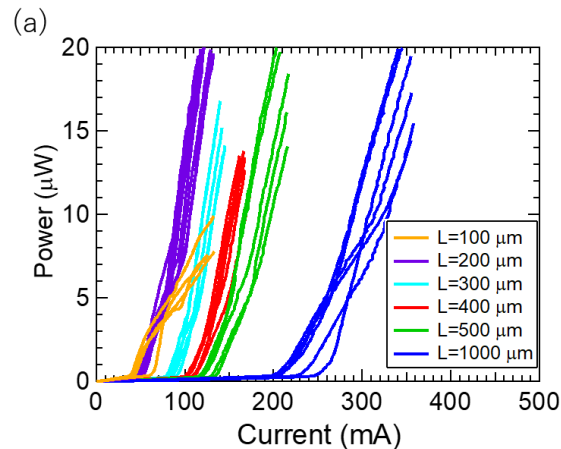


- ✓ ILカーブのが湾曲して発光強度が低下している(ドループ)  
→温度上昇による品質の低下
- ✓ リッジ幅による差異が見られない  
→電流の広がり

# 測定結果：DC注入 リッジ導波路型レーザー

## 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 $\mu$ m,200 $\mu$ 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?

## 1064 nm Fabry-Perot Laser Diode, 200 mW

M9-A64-0200



### Description

Thorlabs' Ø9 mm, TO-can package, discrete laser diodes are compact light sources suited to many applications. Our lasers are fully compatible with our entire line of Laser Diode and TEC Controllers as well as our selection of Laser Diode Mounts and Collimation Solutions.

### Specifications

Absolute Maximum Ratings	
Operating Temperature	-20 to 50 °C
Storage Temperature	-40 to 80 °C
Lead Soldering Temperature (5 sec)	250 °C
Pin Code	A

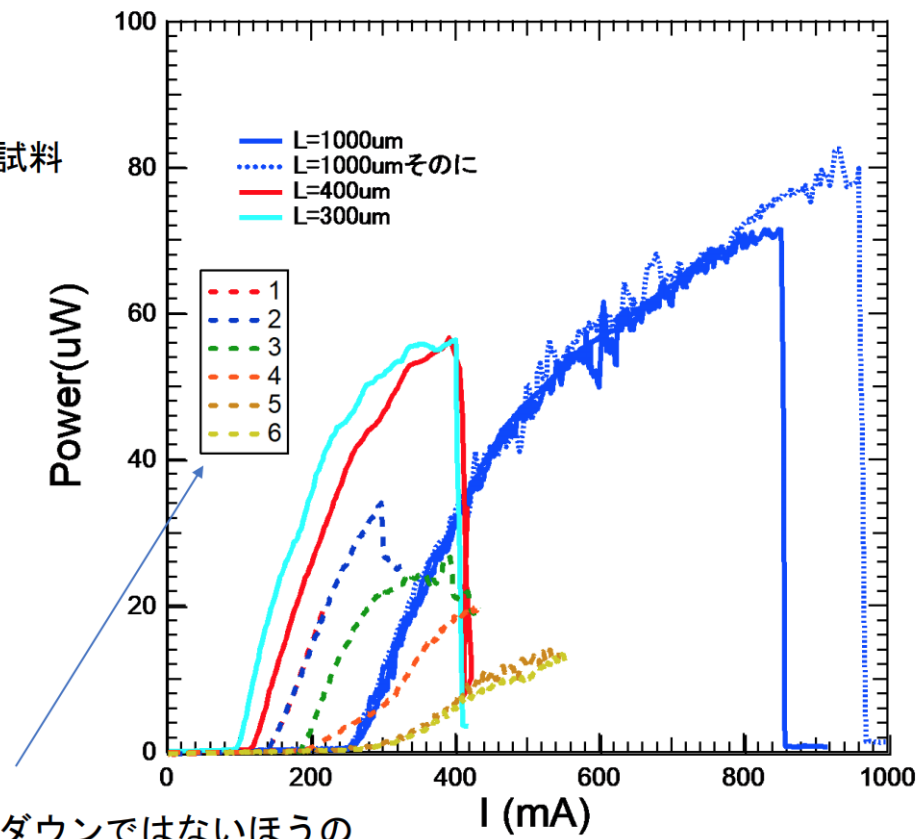


M9-A64-0200				
	Symbol	Min	Typical	Max
Center Wavelength	$\lambda_c$	1054 nm	1064 nm	1074 nm
Spectral Bandwidth (RMS)	$\Delta\lambda$	-	0.5 nm	2 nm
Output Power CW @ $I_{CW}$	$P_{CW}$	-	200 mW	-
Operating Current CW	$I_{CW}$	-	280 mA	350 mA
Threshold Current	$I_{TH}$	-	50 mA	100 mA
Forward Voltage	$V_F$	-	1.7 V	2.0 V
Slope Efficiency	$\Delta P / \Delta I$	0.8 W/A	0.9 W/A	-
Beam Divergence (FWHM) Parallel	$\theta_{\perp}$	-	8°	10°
Beam Divergence (FWHM) Perpendicular	$\theta_{\parallel}$	-	28°	30°

$T_{CASE} = 25\text{ °C}$

、

ない試料



エピソードではないほうの  
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

