

本資料は「高輝度・高効率次世代レーザー技術開発プロジェクト／次世代レーザー及び加工共通基盤技術開発」知財合意書に基づく秘密情報とする

効率的紫外レーザー加工に向けた サブps～1usパルス幅1um帯 利得スイッチ半導体レーザー素子開発

東大・物性研 秋山英文

with 東北大・NICHe 横山弘之

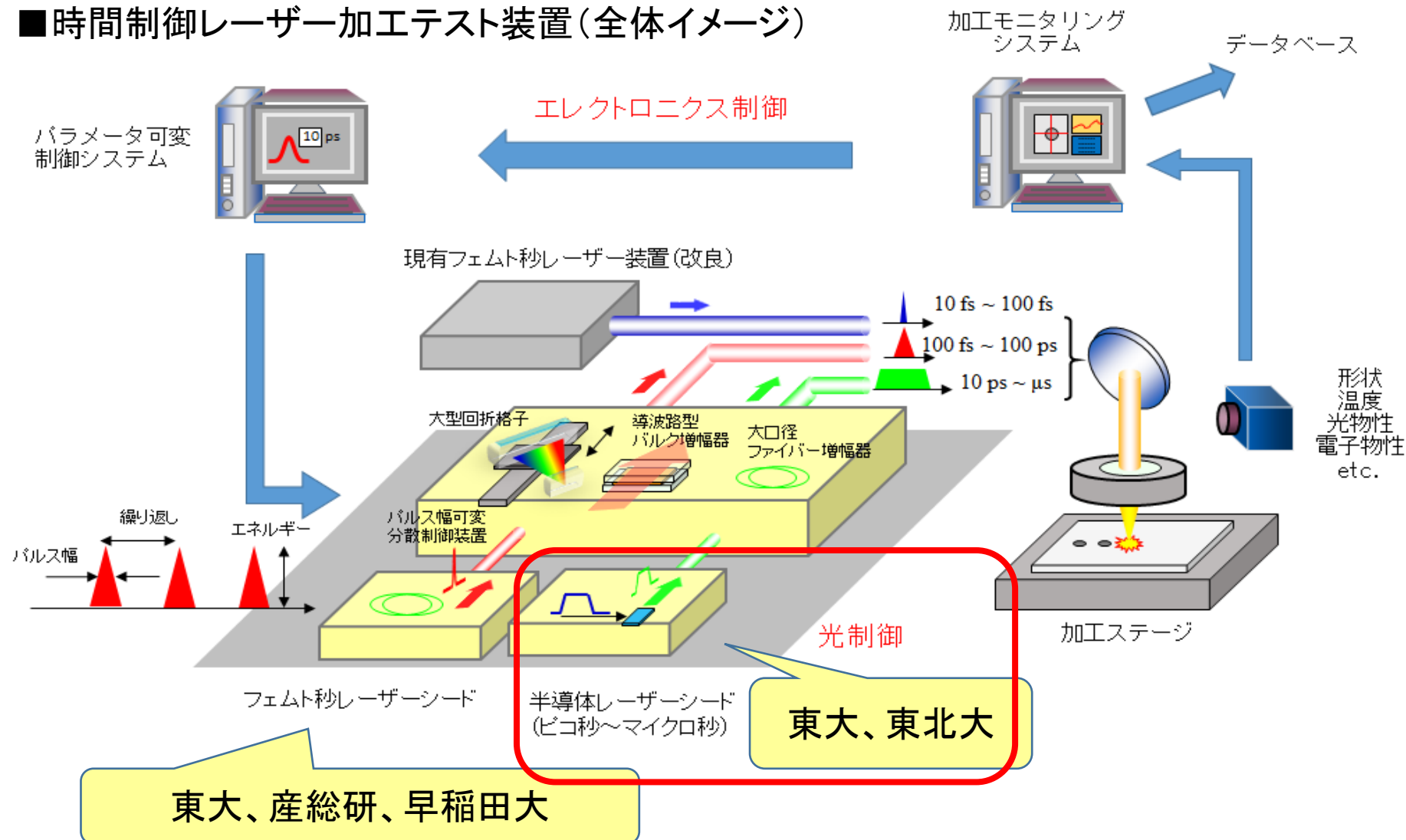
- 利得スイッチング法で、高速化・パルス幅制御や後段増幅器に負担をかけない高強度化を実現するためには、心臓部・エンジンである半導体レーザー(LD)素子開発生産が必要。
- シミュレーション、設計、生産(アウトソーシング)、中間-選別-素子評価、詳細計測解析まで、一連の研究開発生産体制を構築。
- 1umLD試作は、初回ウエハ試作が完了(2018年3月末)。素子加工・評価が進行中(2018年4月-)
- 基礎実験(光励起法・800nm帯)で、単セクションおよび多セクションレーザーから1psレベルの短パルスを発生。シミュレーションと比較を行い、その機構を調査中。

研究開発項目④ -1 レーザー加工プラットフォームの構築

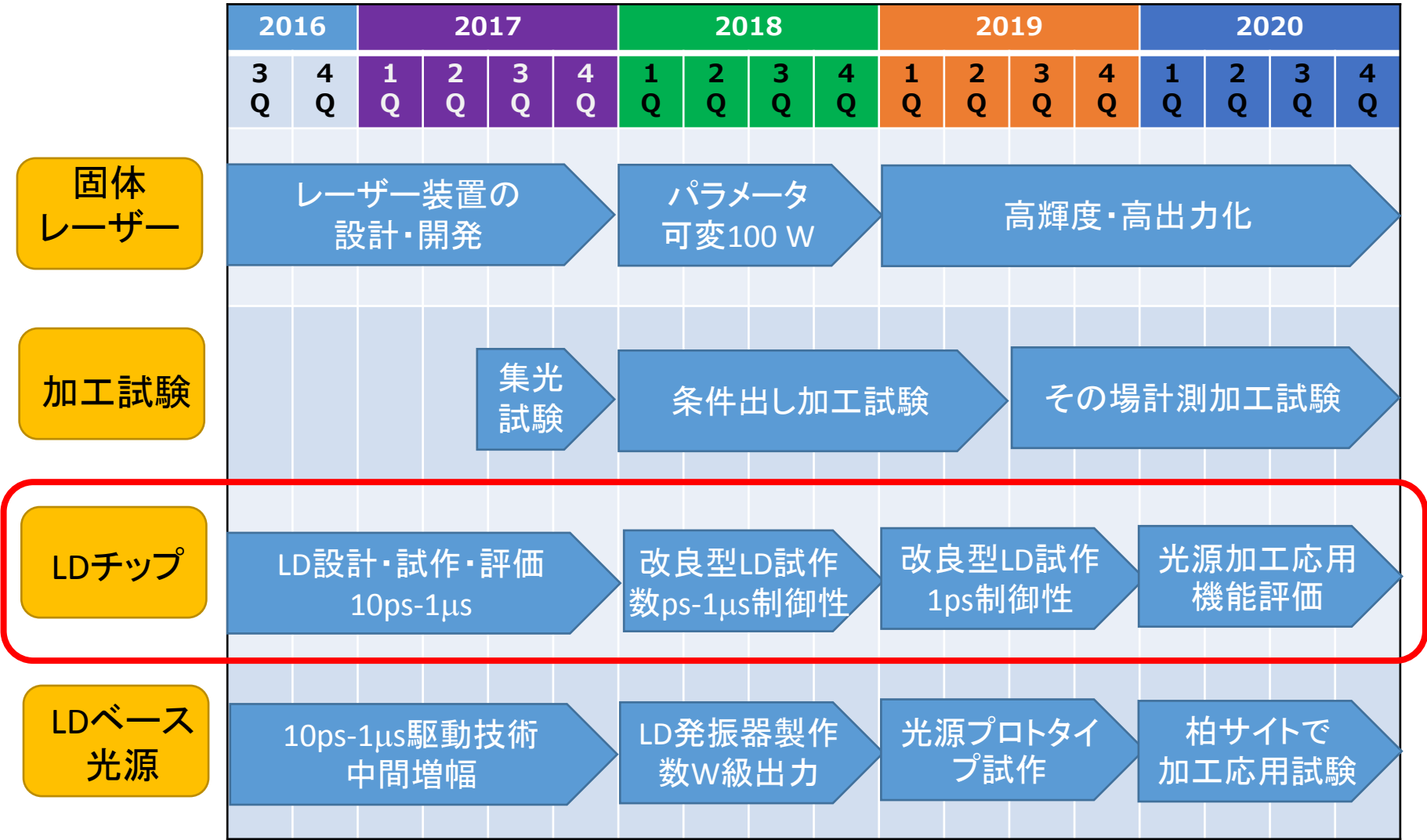
研究開発項目④ -1-(1) 時間制御型レーザー加工テスト装置

<東京大、再委託東北大学、AIST、再委託早稲田大学>

■時間制御レーザー加工テスト装置(全体イメージ)



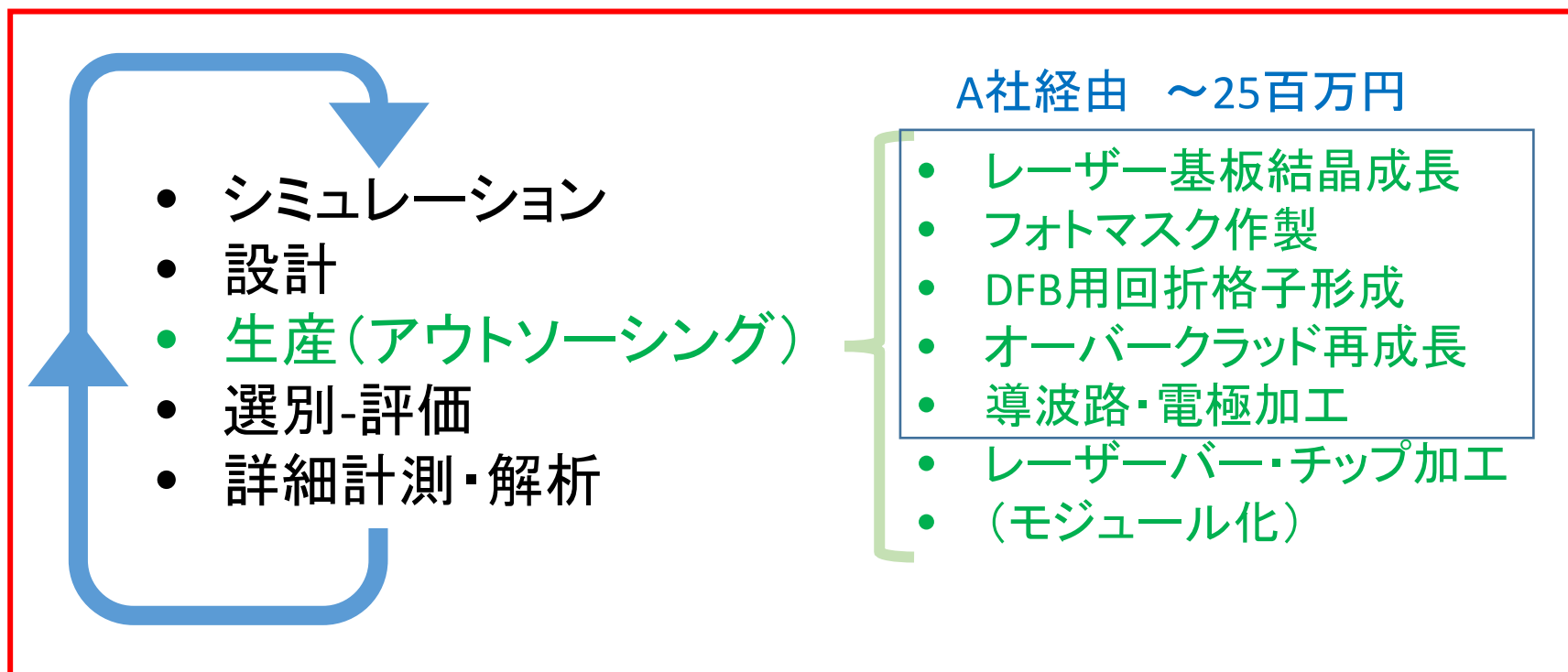
■④-1-(1) 実施計画



増幅後に非線形光学でパルス制御できるのも事実だが、
シード光レベルで直接パルス制御するのが理想

心臓部・エンジンとなるのは、半導体レーザー(LD)

大学(+企業)をファブレス拠点とする研究開発生産体制構築



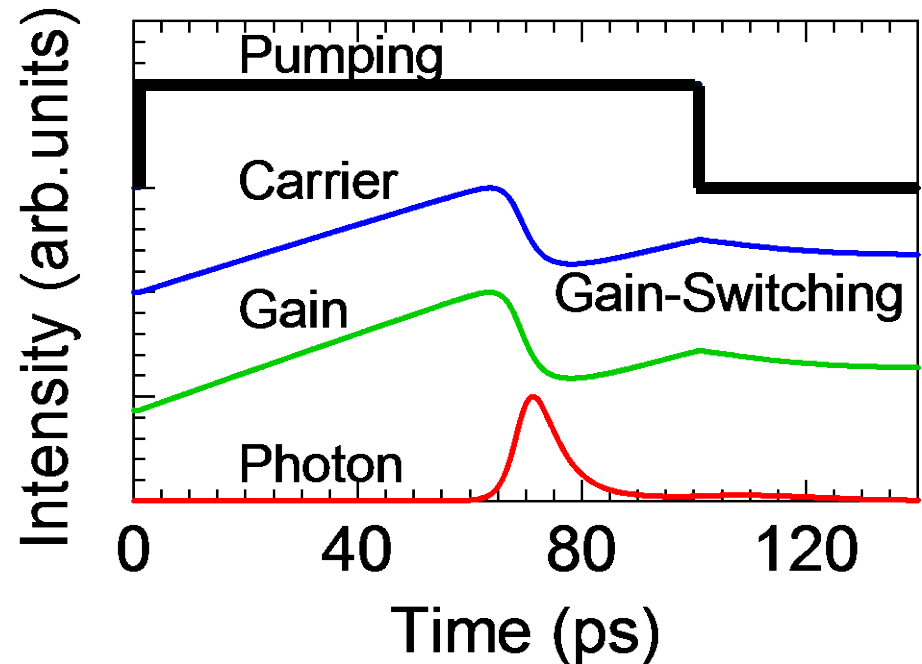
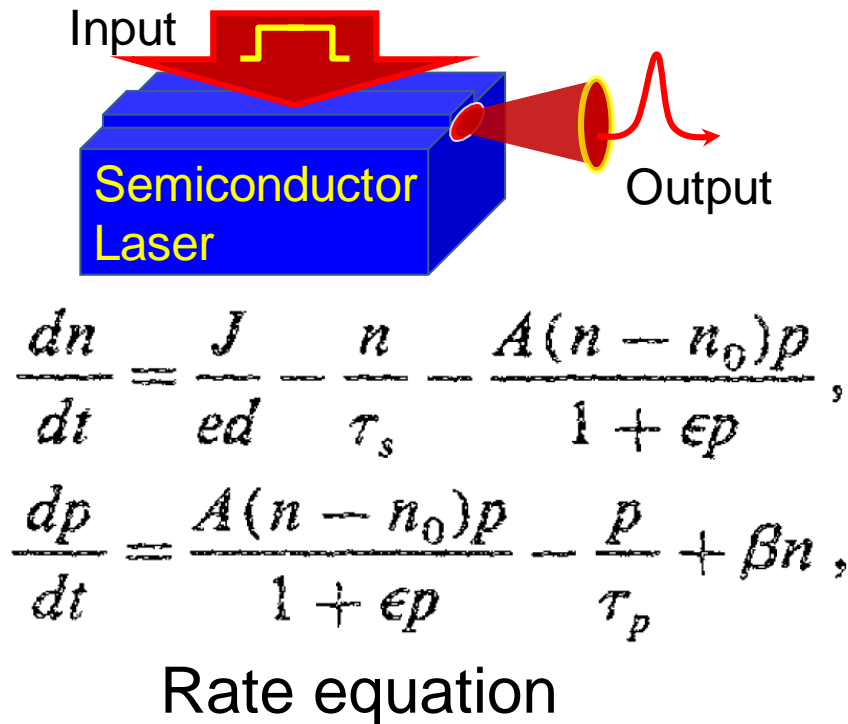
1um波長帯InGaAsMQW-LD試作(第1回2016.11-2018.7)

- 高利得化 3QW 10QW
- 短共振器 100um、200um、300um～1mm
(これらが成功したら、高速化できるはず。)

↳ 2018年度試作第2回目で再挑戦

- DFB FP
(既存技術。外注可能。ただし高価)
(エピ、加工、再成長、加工＝分離発注製作の道を拓きたい)
- 高速化・配線～モジュール化
- 多セクション、光励起など。 新機構の探索と試行。
技術探索：端面コート(光子寿命、DFB、・・・)、FIB(電流狭窄、へき開、AR)

Short-pulse generation in semiconductor lasers via gain switching



Rate equation is very useful in dynamically simulate gain switching in semiconductor lasers.

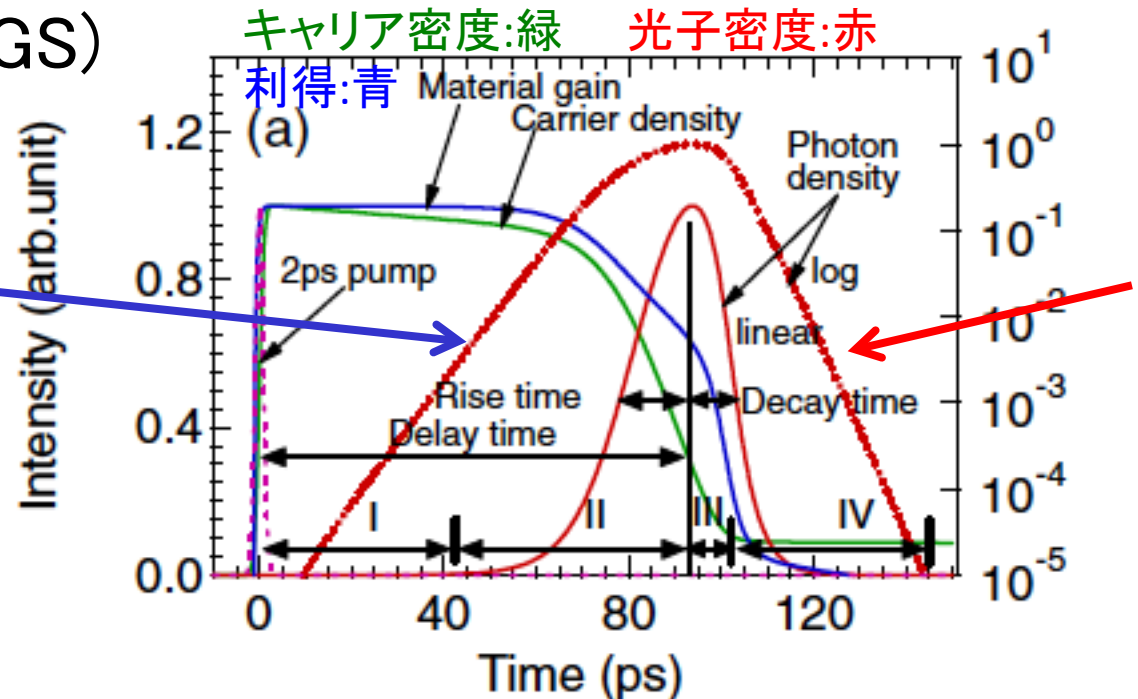
2準位系レート方程式

(分極を断熱近似)

$$\begin{aligned}
 \text{キャリア密度の時間変化} \quad \frac{dn}{dt} &= \underbrace{\eta \frac{P}{h\nu} \frac{1}{mwL}}_{\text{ポンピング}} - \underbrace{\frac{1}{m} v_g \Gamma g(n)s}_{\text{誘導放出}} - \underbrace{\frac{n}{\tau_r}}_{\text{自然放出}} \\
 \text{光子密度の時間変化} \quad \frac{ds}{dt} &= \underbrace{v_g \Gamma g(n)s}_{\text{誘導放出}} - \underbrace{\frac{s}{\tau_p}}_{\text{共振器寿命}} + m\beta_{sp} \underbrace{\frac{n}{\tau_r}}_{\text{自然放出}}
 \end{aligned}$$

利得スイッチング(GS)

光パルスの立上りは
初期利得で決まる
 立ち下がりには
共振器寿命で決まる



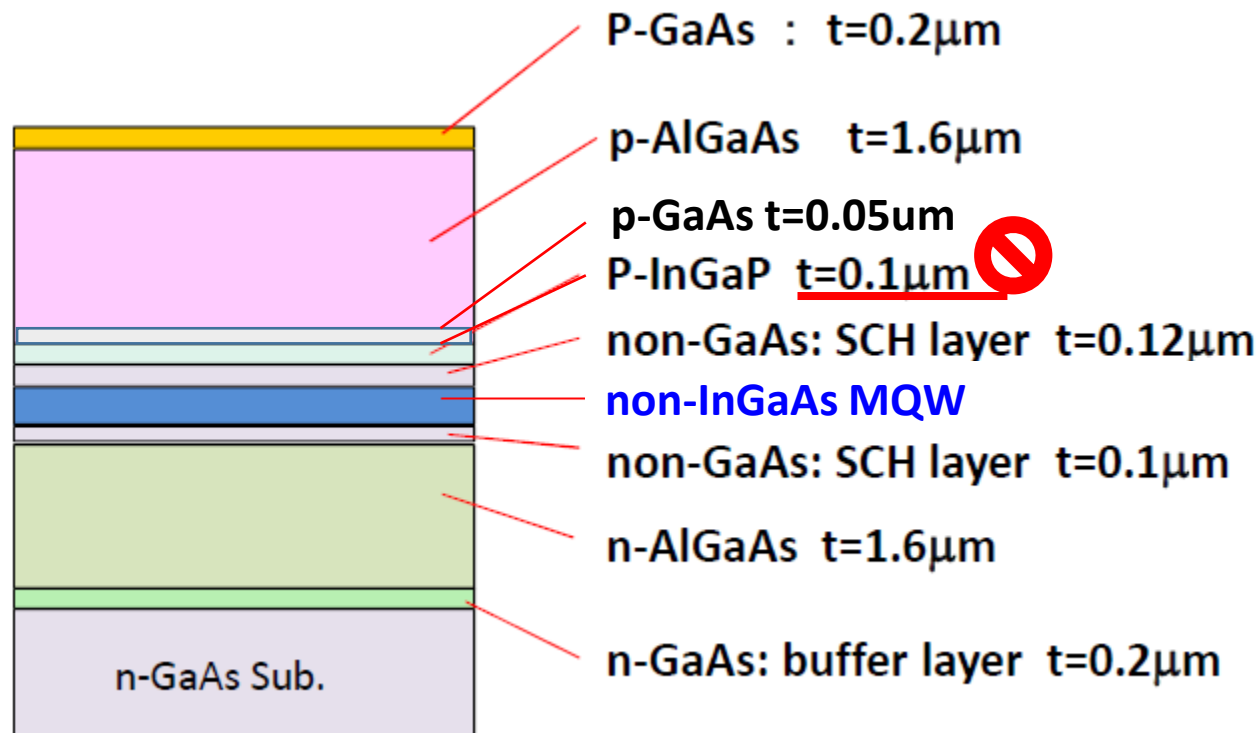
1um波長帯InGaAsMQW-LD試作(第1回2016.11-2018.7)

- 高利得化 3QW 10QW
- 短共振器 100um、200um、300um～1mm
(これらが成功したら、高速化できるはず。)

↳ 2018年度試作第2回目で再挑戦

- DFB FP
(既存技術。外注可能。ただし高価)
(エピ、加工、再成長、加工＝分離発注製作の道を拓きたい)
- 高速化・配線～モジュール化
- 多セクション、光励起など。 新機構の探索と試行。
技術探索：端面コート(光子寿命、DFB、・・・)、FIB(電流狭窄、へき開、AR)

1 μ m LD ウエハの元エピ構造

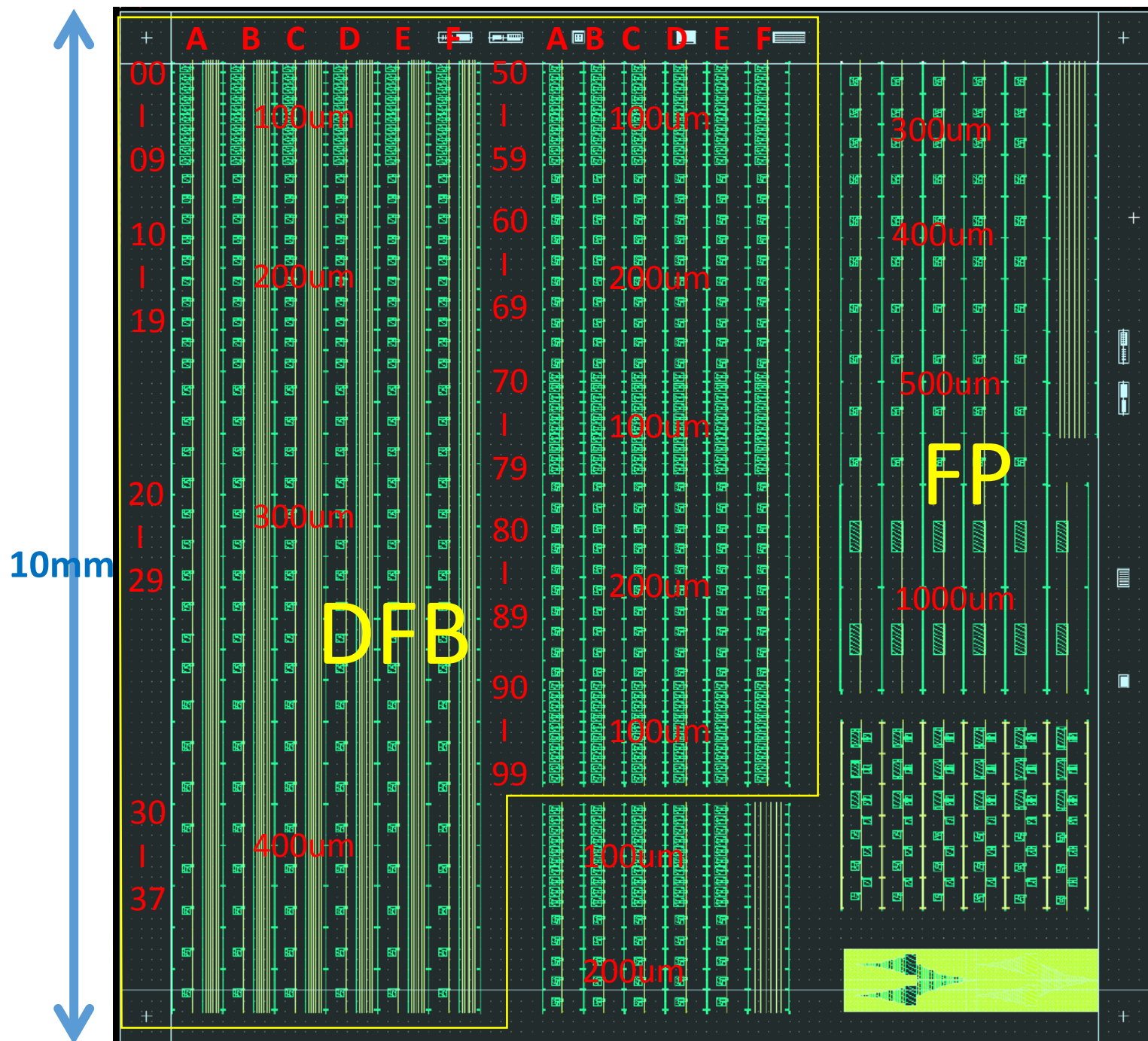


InGaAs MQW → SQW DQW 3QW 10QW DH

フォトマスク概要 2017.7 final

A・C・E
1.5um幅
リッジ

B・D・F
2.5um
幅リッジ



EBリソ・ドライ＆ウェット加工による回折格子形成

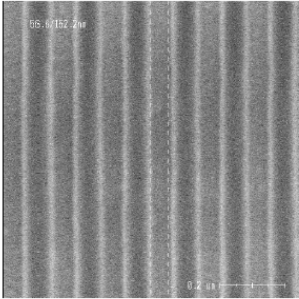
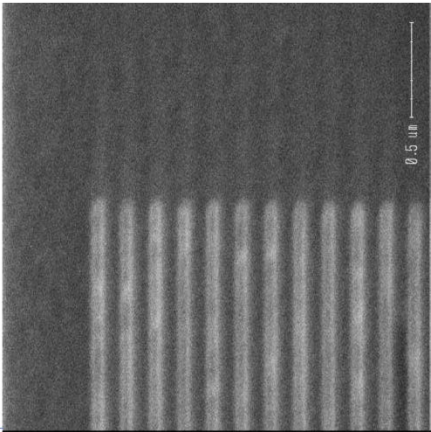
$n_{eq}=3.3$

1周期のL&S 比率 L(nm):S(nm)

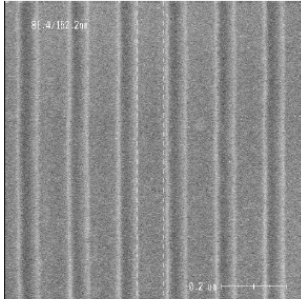
		L&Sの1周期 (nm)	λ	A B		C D	E F
Xx0	$\lambda/4$ なし	152	1003.6nm	50:102		76:76	102:50
Xx1	$\lambda/4$ あり						
Xx2	$\lambda/4$ なし	155	1023nm	52:103		77:78	52:103
Xx3	$\lambda/4$ あり						
Xx4	$\lambda/4$ なし	158	1042.8nm	53:105		79:79	105:53
Xx5	$\lambda/4$ あり						
Xx6	$\lambda/4$ なし	161	1062.6nm	54:107		81:80	107:54
Xx7	$\lambda/4$ あり						
Xx8	$\lambda/4$ なし	164	1082.4nm	55:109		82:82	109:55
Xx9	$\lambda/4$ あり						

GaAs層に転写形成した回折格子のSEM観察結果

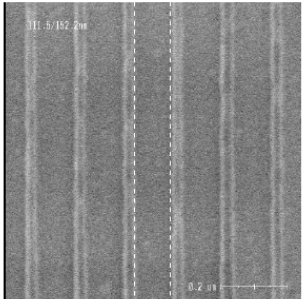
- 加工工程
- 1. EBLレジストをマスクにSiO₂層 50nm をRIE加工
 - 2. SiO₂層をマスクにInGaP層を wet etching 加工
 - 3. InGaP層をマスクにGaAs層を wet etching。 段差評価: 50nm
 - 4. 最表層のInGaP層を除去。



P1R1N

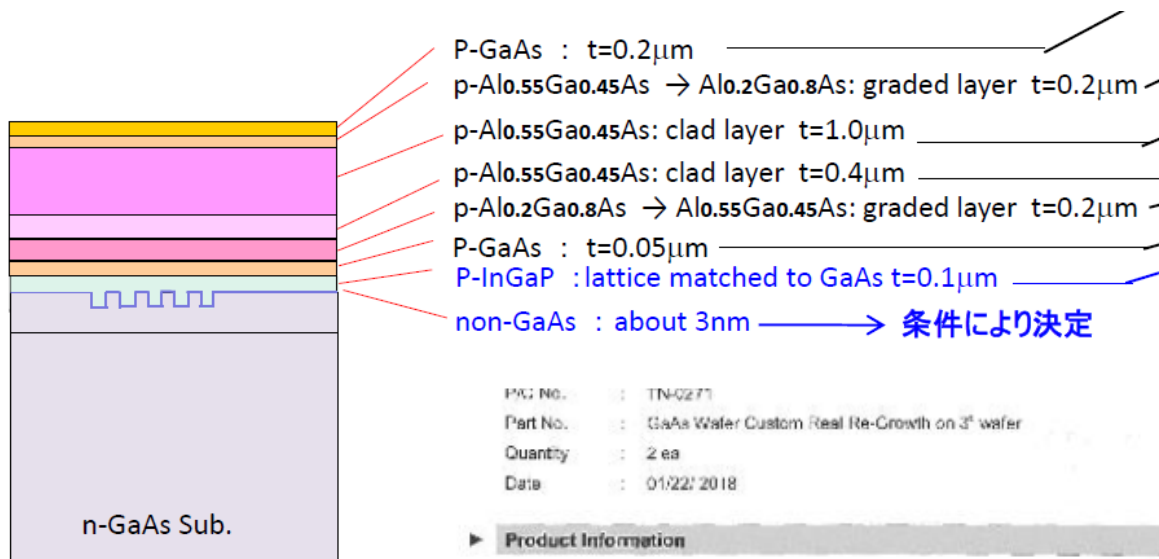


P1R2N



P1R3N

MOCVDによる上部クラッド層再成長



Cross sectional

P/C No. : TN-0277

Part No. : GaAs Wafer Custom Real Re-Growth on 3" wafer

Quantity : 2 ea

Date : 01/22/2018

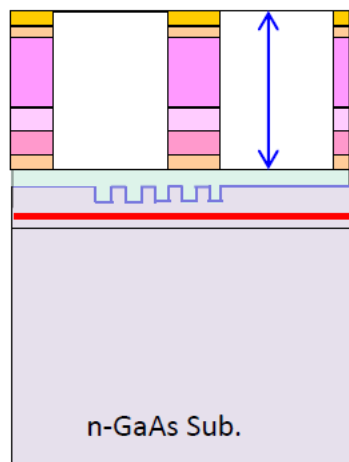
Product Information

Defect Density (cm^{-2})		
GaAs Wafer Custom Real Re-Growth on 3" wafer	VE1801-C0851 #1	<100
GaAs Wafer Custom Real Re-Growth on 3" wafer	VE1801-C0851 #2	<100

Epi Structure

Real Re-Growth								
Layer	Material	Composition (x)	Thickness (Å)		Doping Density (cm^{-3})		Dopant	Comment
			Specified	Actual	Specified	Actual		
8	GaAs		2000	*	$>1\text{E}+19$	*	C	
7	Al(x)GaAs	0.55 → 0.20	2000	*	$1\text{E}-18$	*	C	Graded layer
6	Al(x)GaAs	0.55	10000	*	$4\text{E}-17$	*	C	C ad layer
5	Al(x)GaAs	0.55	4000	*	$2\text{E}-17$	*	C	C ad layer
4	Al(x)GaAs	0.20 → 0.55	2000	*	$2\text{E}-17$	*	C	Graded layer
3	GaAs		500	*	$2\text{E}-17$	*	C	
2	In(x)GaP	0.49	1000	*	$2\text{E}-17$	*	Zn	
1	GaAs		30	*			U/C	
0	GaAs							Patterned Sub.

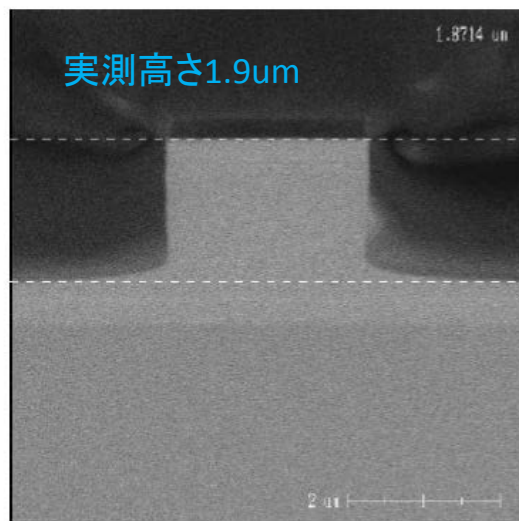
RIE加工による導波路形成とコンタクト開口



Cross sectional

★ 導波路高さ=エッチング量: $2.0\mu\text{m} \pm 0.1\mu\text{m}$

実測	1.8um	先発
	1.9-2.0um	後発



加工した導波路の断面SEM観察結果

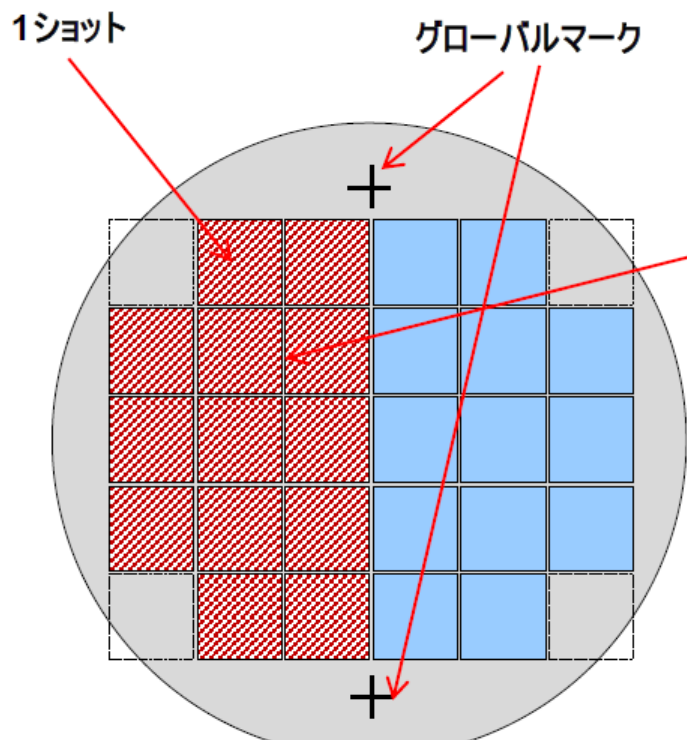
Contact開口

- 3-1. SiO₂膜のデポ: 400nm厚とする。
- 3-2. Contactパターンで開口を形成する。
 - ・パターンニング: レジスト。
 - ・SiO₂膜のRIE加工 : 開口部にSiO₂膜が残らないように。
- 3-3. レジスト除去
- 3-4. 開口部のSEM観察: 本番Waferのみ5箇所

リフトオフ加工による表面P電極形成(先発)

★ C-dope contact

・GaAs-P+ 上に Ti:10nm/Pt:15nm/Au:1000nm～ 、380℃ (360℃～420℃) , N2 gas, 5min.



★ 電極パターニングは全面に実施する。

上記(1)の電極デポは左図の斜線ハッチングショットについてのみ実施する。

★ 電極デポの直前には、Cap層GaAsを軽くエッチングして fresh なcontact面を出すこと。

★ 段切れを防止するために、斜め蒸着を行う。

第1回目：傾けなしの蒸着 Ti/Pt/Au: 400nm

第2回目：+20度の傾け蒸着 Ti/Au: 300nm

第3回目：-20度の傾け蒸着 Ti/Au: 300nm

後発は、BCB埋め込み1回蒸着。ともにOK。

★1ショットのサイズ:10000um×10000um

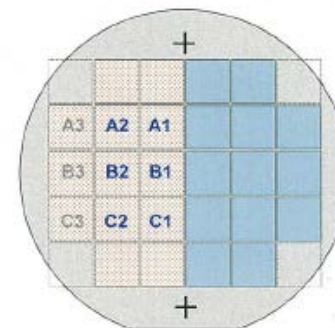
★ショット／ショットの間隔:500um

先発: 3QW (B級 Wafer)

★1ショットの!

★ショットノジ

リッジ高1.8um



・A1, A2 : 60μm厚

・B1, B2 : 120μm厚

・C1, C2 : 80μm厚

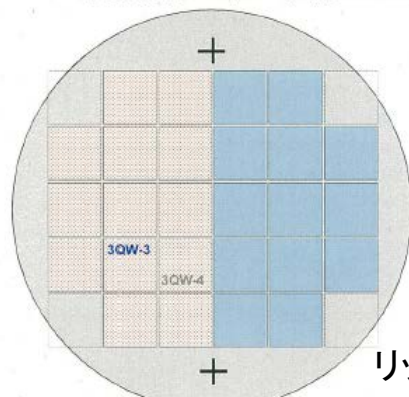
★ P電極は AuZnNi/Au depo後にalloy、padとしてTi/Au 斜蒸着3回

★ N電極は AuGeNi/Au depo後にalloy、padとしてTi/Au

オリフラ側がよい
DFB良

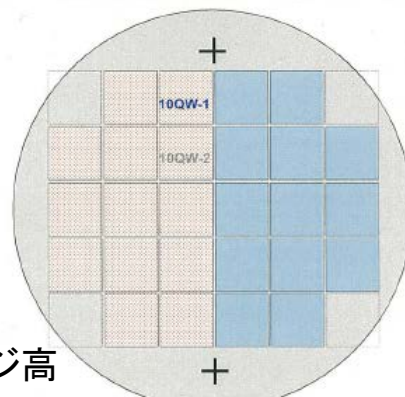
後発先行: 3QW (A級 Wafer)

後発先行: 10QW (?級 Wafer)



リッジ高
1.9-2.0um

・3QW-3: 120μm厚

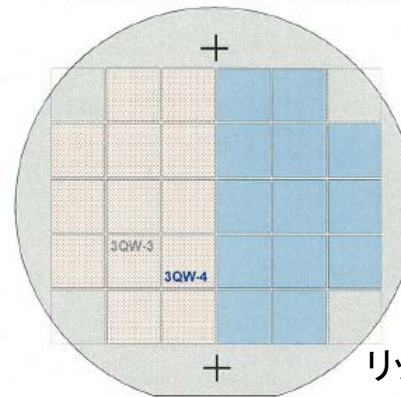


・10QW-1: 120μm厚

DFB良

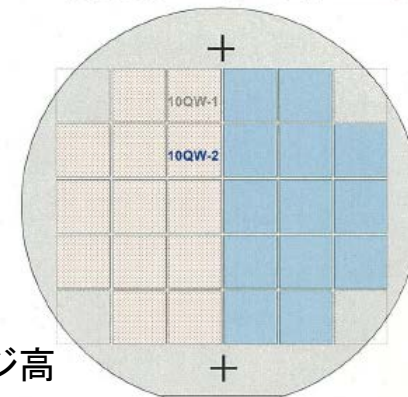
後発後行: 3QW (A級 Wafer)

後発後行: 10QW (?級 Wafer)



リッジ高
1.9-2.0um

・3QW-4: 120μm厚



・10QW-2: 120μm厚

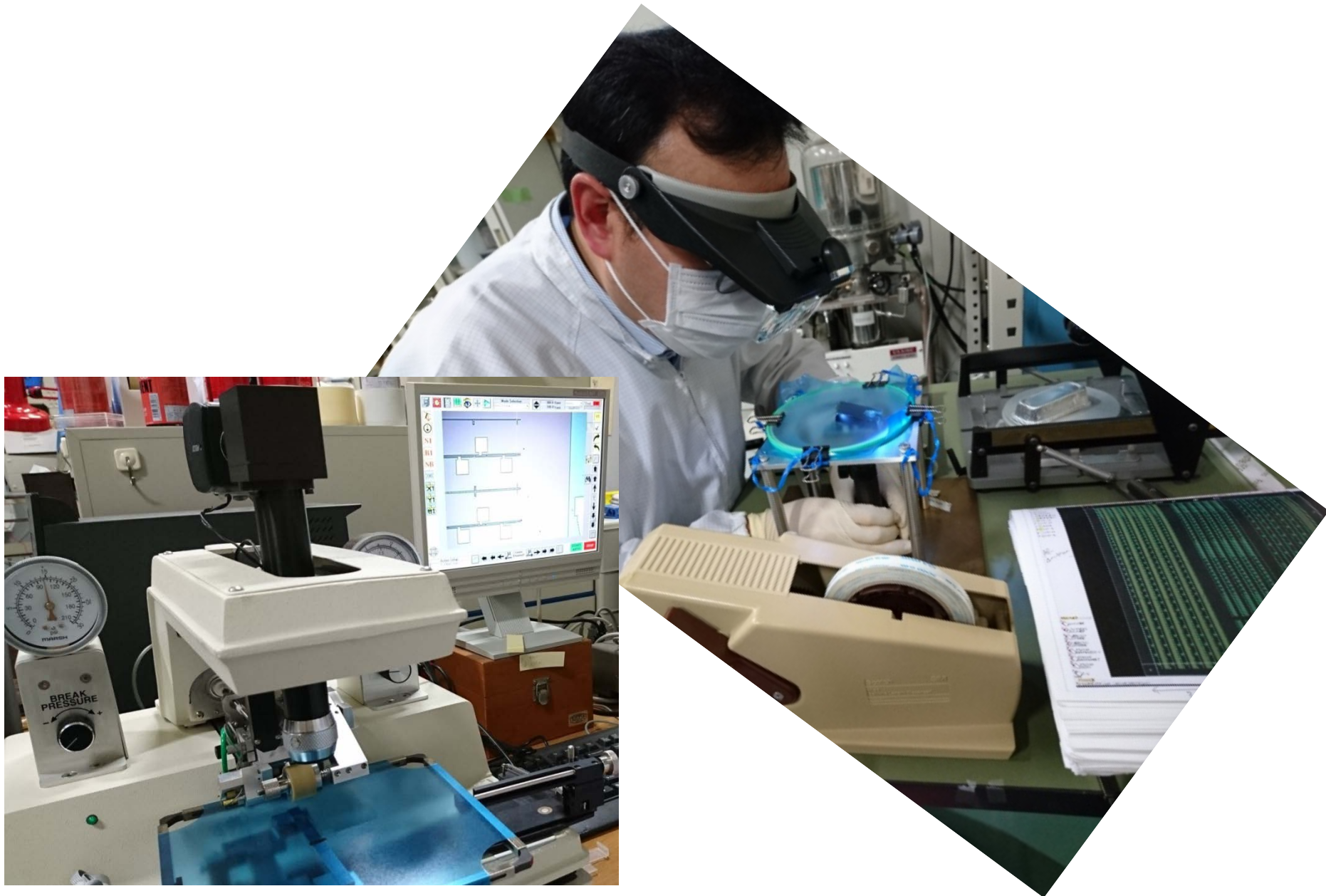
★ P電極は AuZnNi/Au depo後にalloy、padとしてTi/Au BCB埋め。斜蒸着なし。

★ N電極は Ti/Au depo後に熱処理 380°C, 20sec

★ P電極は AuZnNi/Au depo後にalloy、padとしてTi/Au BCB埋め。斜蒸着なし。

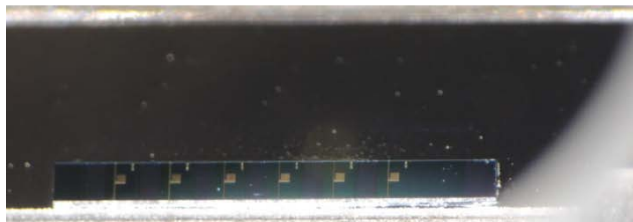
★ N電極は AuGeNi/Au depo後にalloy、PadとしてTi/Au

レーザーバーおよびチップへき開

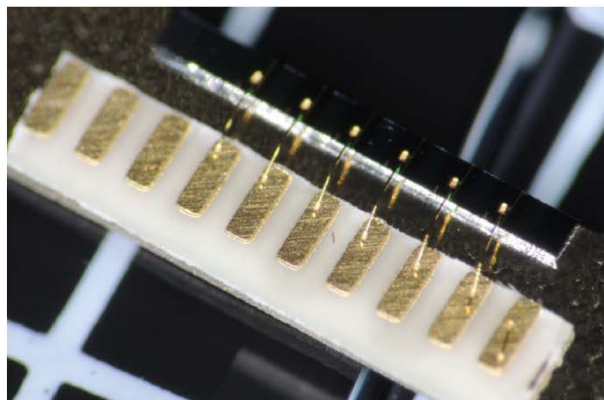


バーおよびチップの ダイボンディング・ ワイヤボンディング

ダイボンディングの様子



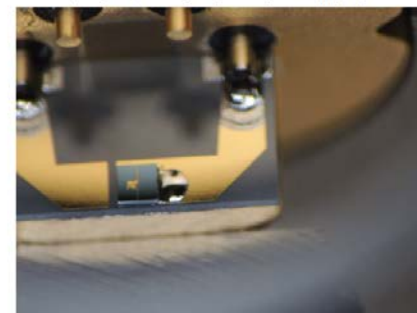
ワイヤーボンディングの様子



3QW後発後行 DFB 300um x10, 400um x8
すべてワイヤボンディングまで完了

共晶片を使った単一LD素子のTO-CANへの実装 1

ダイボンディングの様子

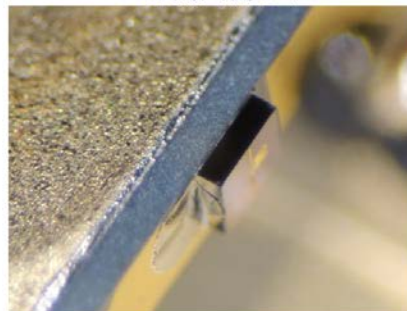


京セラTO-CANへは共晶材でOK

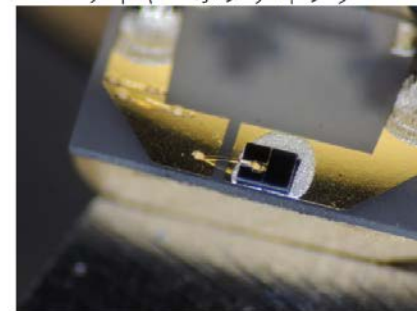
元々エポキシ材でダイボンディングする予定であったが、忘れていて共晶材でダイボンディングを行った。きれいにプロセス出来たので結果的に良かった。

3QW後発後行 300um x2, 400um x2

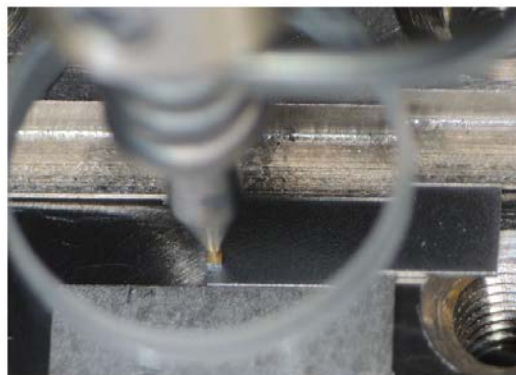
へき開面側より



ワイヤーボンディング



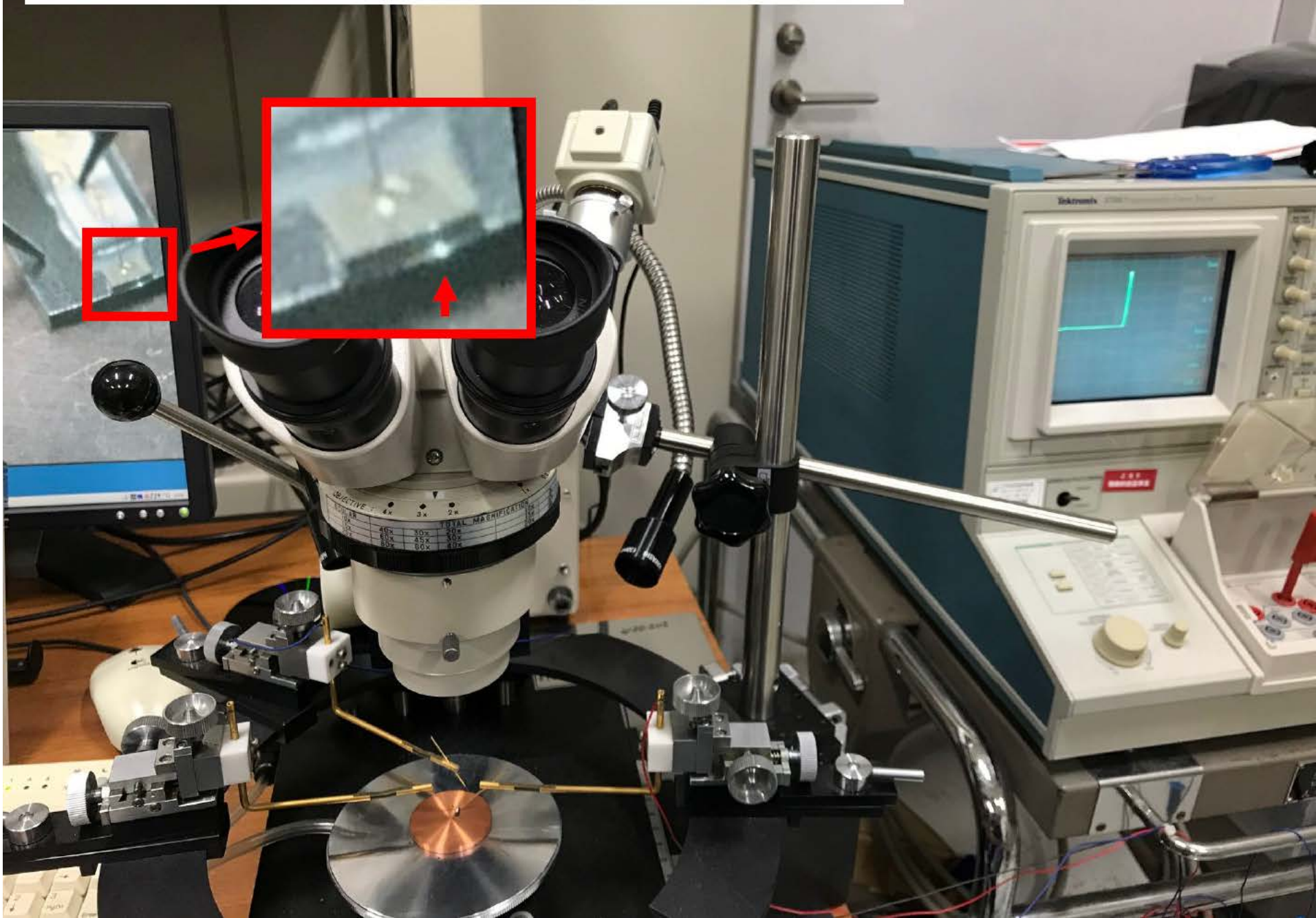
単一LD素子 ヒートシンクへのエピダウンダイボンディング



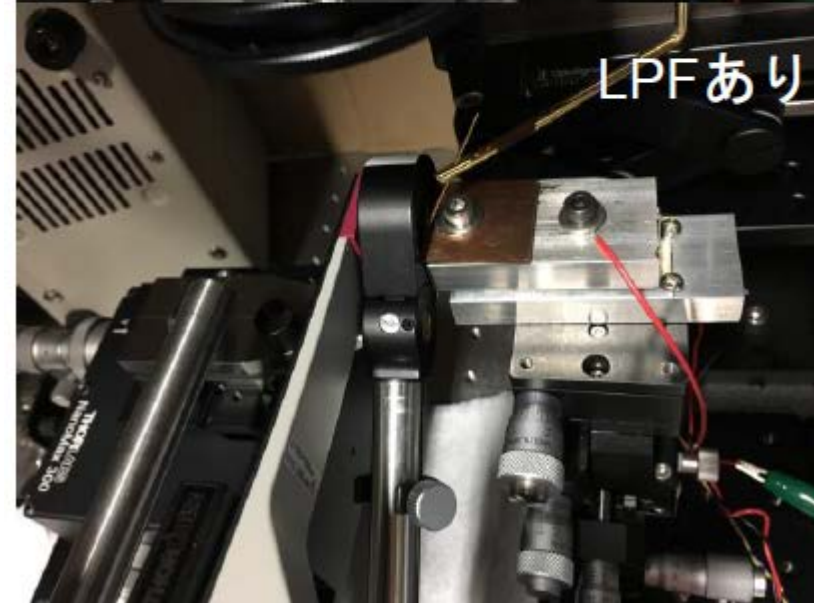
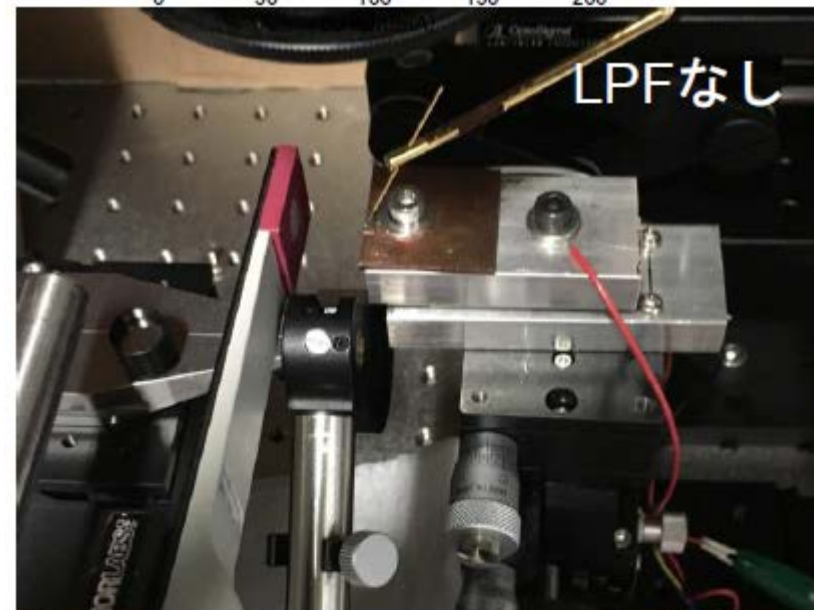
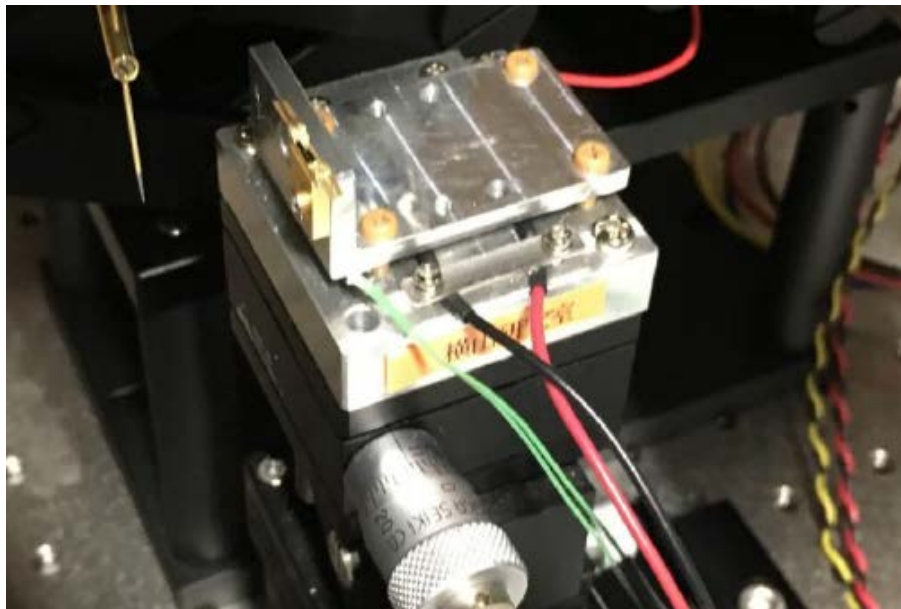
3QW 後発後行
300um x1, 400um x1, 1000um x2

180522追記 4つすべてショートしておらず光りました。

Confidential



I-L特性・I-V特性・ スペクトルなどの 評価

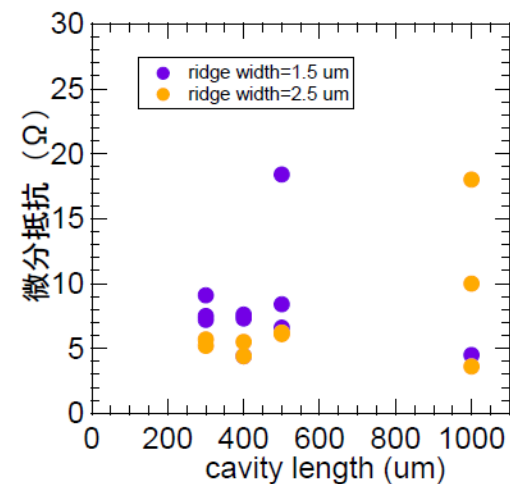
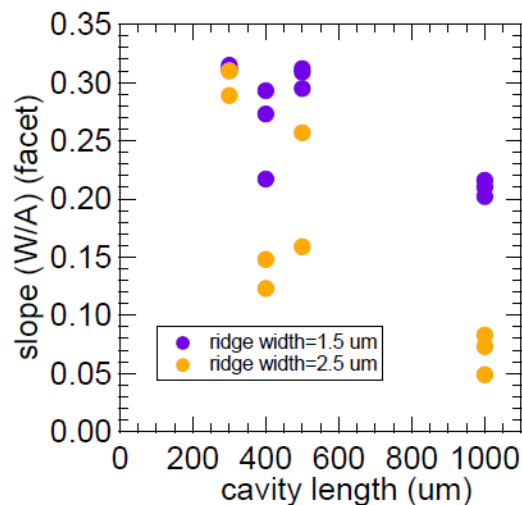
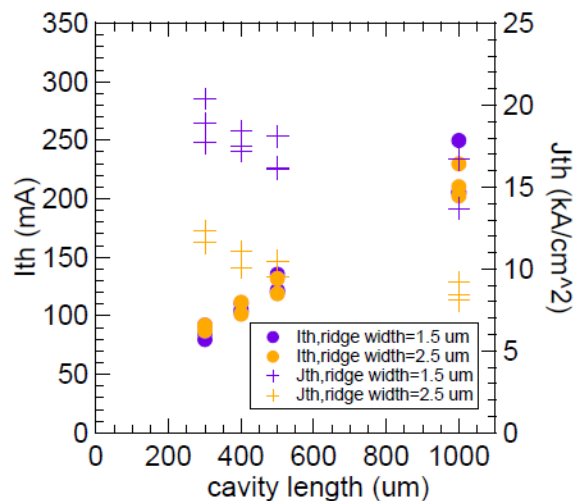
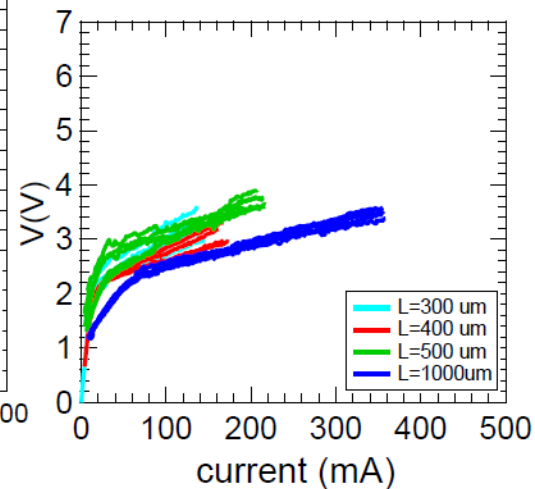
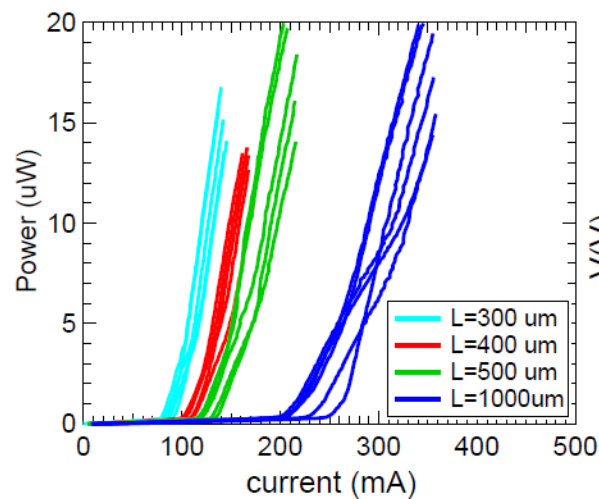


3QW-InGaAs LD

2 μ sパルス/2ms周期 駆動 duty1/1000

3QW先発

共振基長	全素子数	pad発振	ridge発振	発振せず	まだridge 触っていない
300	5	5-	-	-	-
400	5	5-	-	-	-
500	5	5-	-	-	-
1000	6	6-	-	-	-
計	21	21	0	0	0



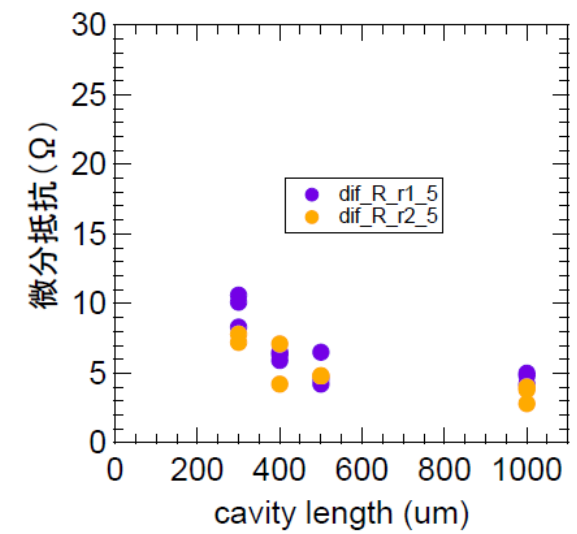
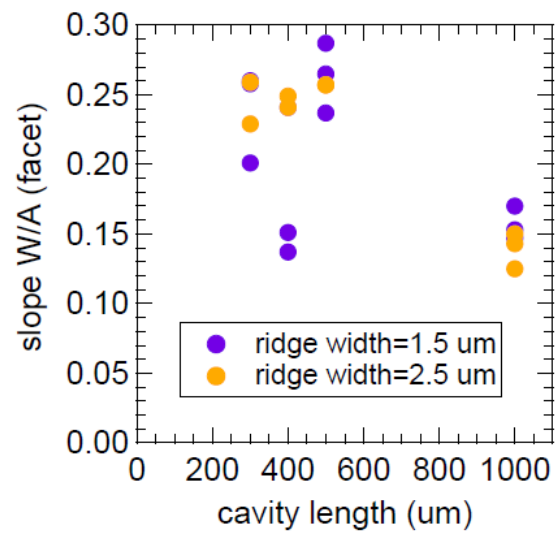
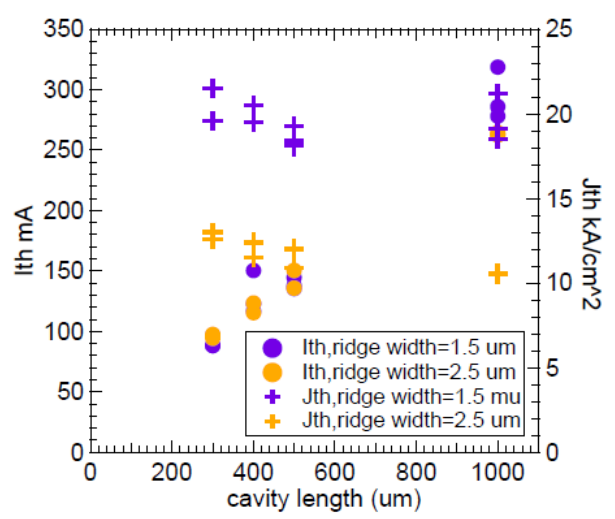
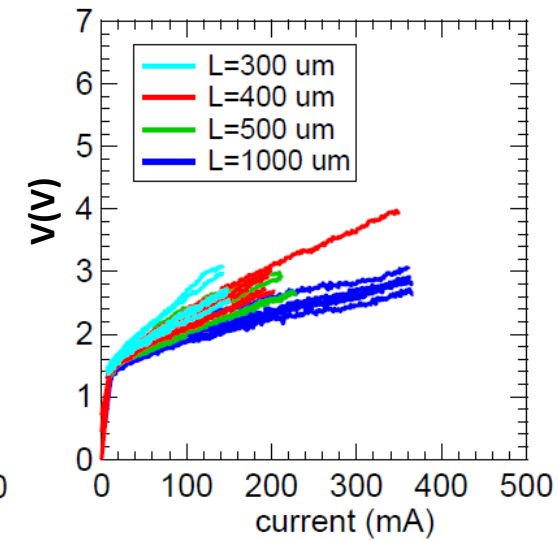
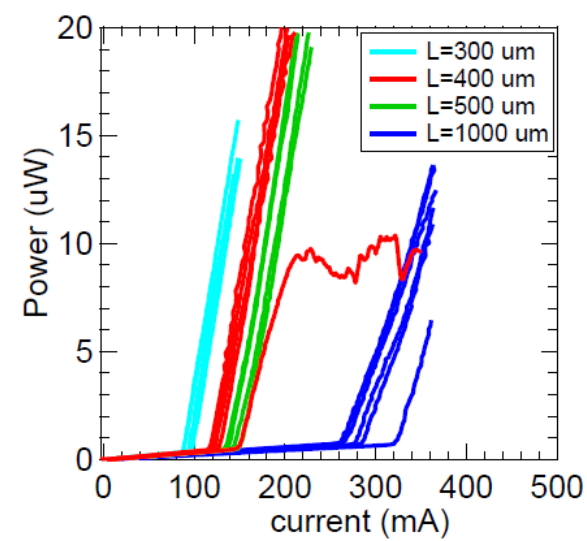
3QW-InGaAs LD

2 μ sパルス/2ms周期 駆動 duty1/1000

3QW後発後行

歩留まり

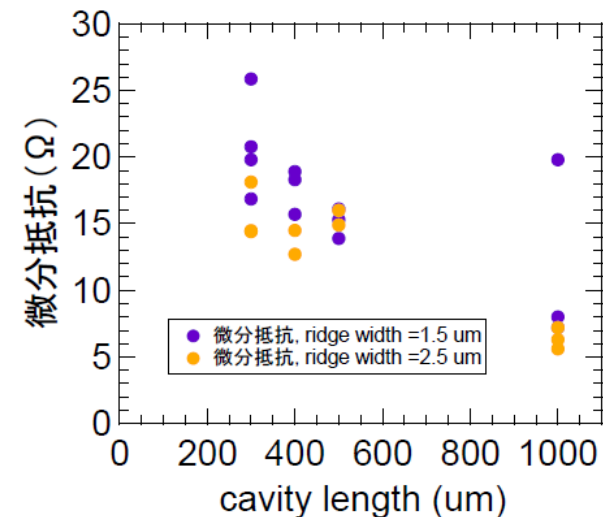
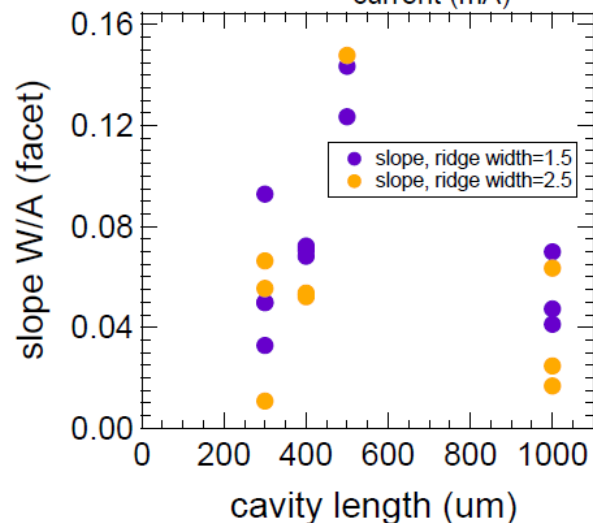
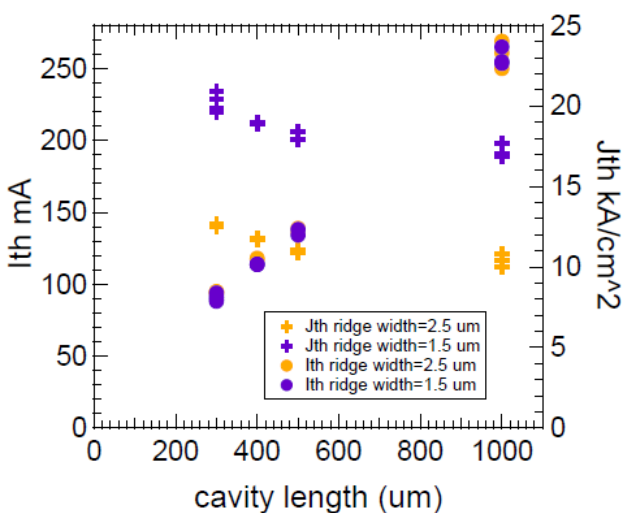
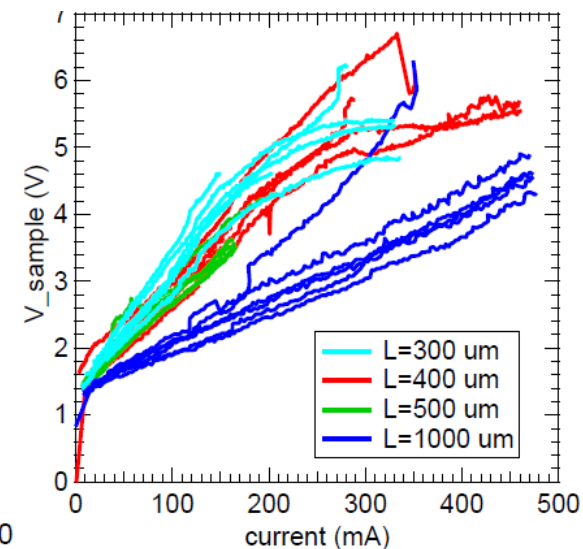
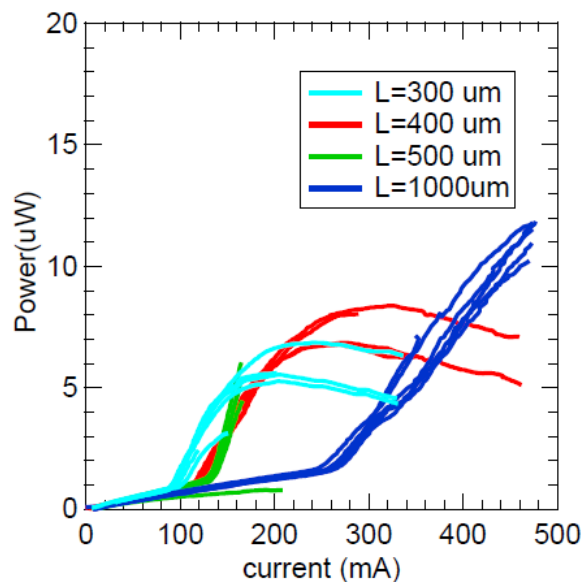
共振基長	全素子数	pad発振	ridge発振	発振せず	まだridge触っていない
300	5	5-	-	-	-
400	5	5-	-	-	-
500	5	5-	-	-	-
1000	6	6-	-	-	-
計	21	21	0	0	0



10QW-InGaAs LD 2 μ sパルス/2ms周期 駆動 duty1/1000

10QW後発後行

共振基長	全素子数	pad発振	ridge発振	発振せず	まだridge触っていない
300	10	6	1	-	3
400	5	2	3	-	-
500	5	2	2	1	-
1000	6	5	1	-	-
計	26	15	7	1	3



3QW-InGaAs LD 2 μ sパルス/2ms周期 駆動 duty1/1000

エピダウンした試料に大電流を流してみたところとてもよく光った

試料：3QW 後発後行 FP領域の以下の4つ

bar 02
(L=300)素子01



bar 05
(L=400)素子01



bar 12
(L=1000)
素子01

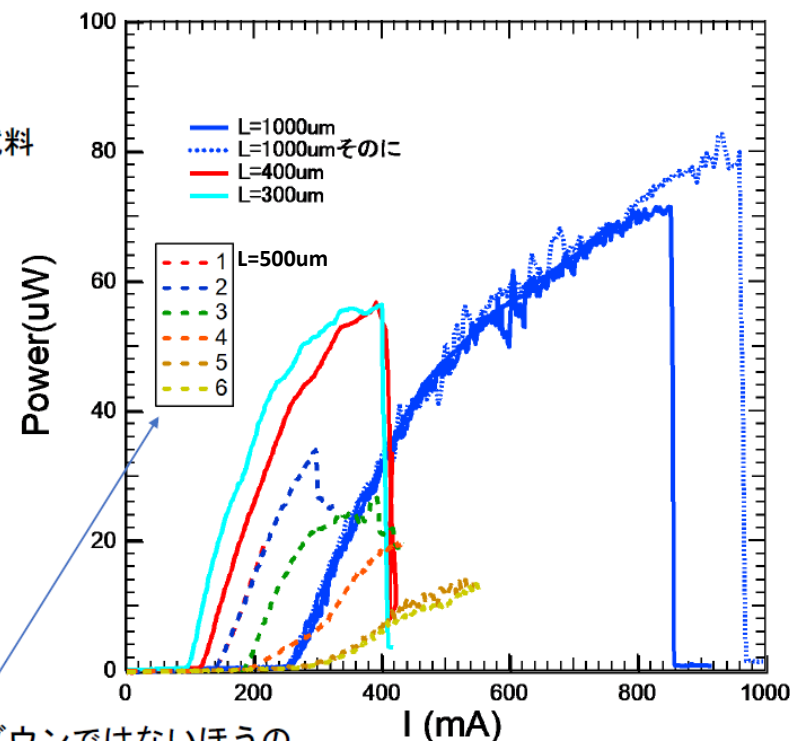


bar 12
(L=1000)
素子02



- ✓ 2 μ s, 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

ない試料

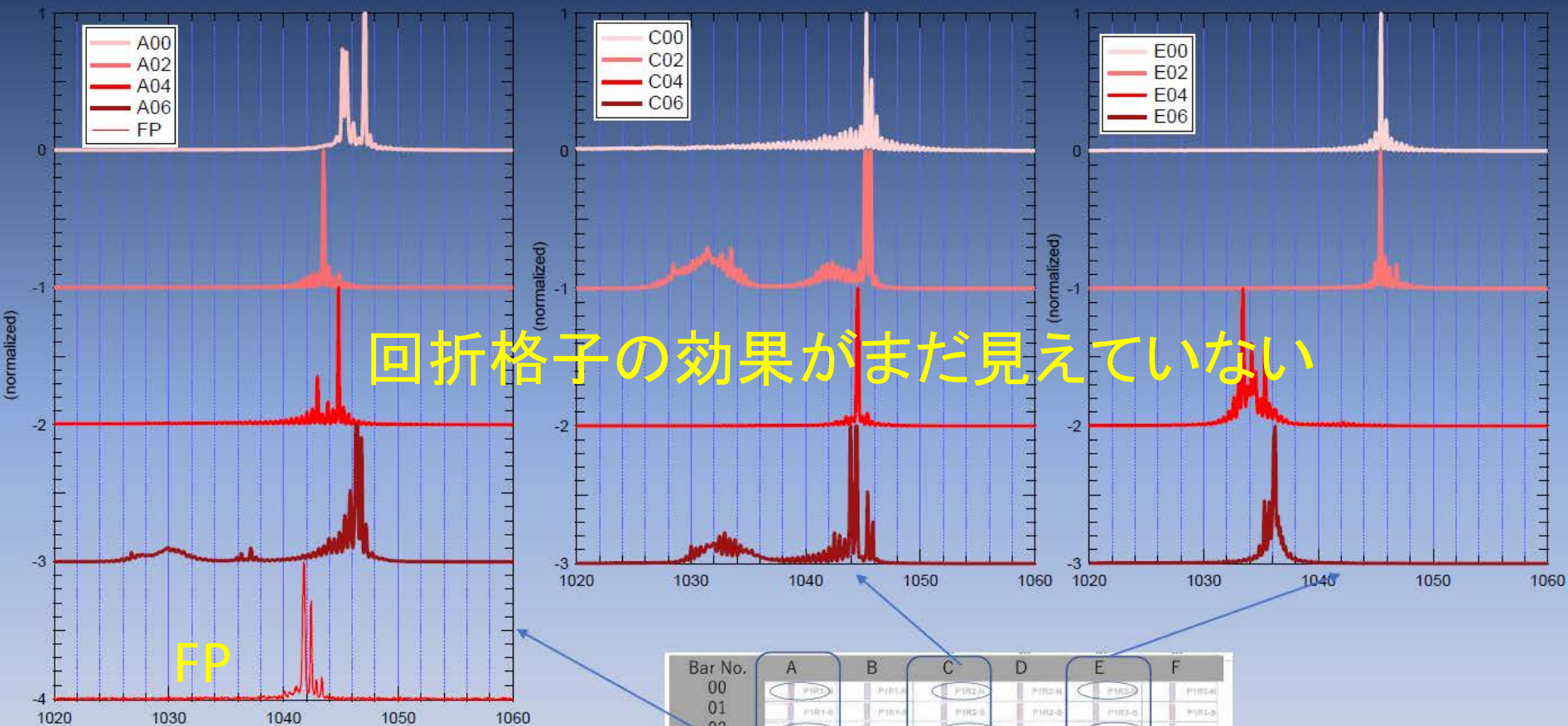


エピダウンではないほうの
プロット. 数字は測定の回数
を表し, 重ねるごとに発光量
が落ちていった

DFB構造 w/o ARコート (端面:アズ・クリーブ)

3QW-InGaAs LD 2usパルス/2ms周期 駆動 duty1/1000

180529実験 3QW後発後行 L=300um DFB及びFP



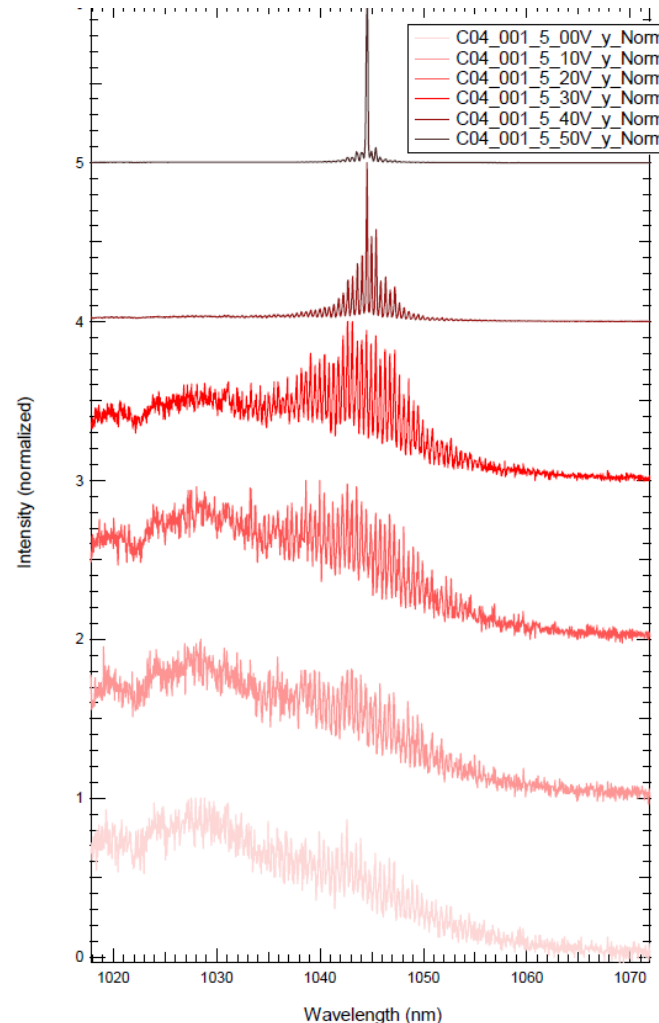
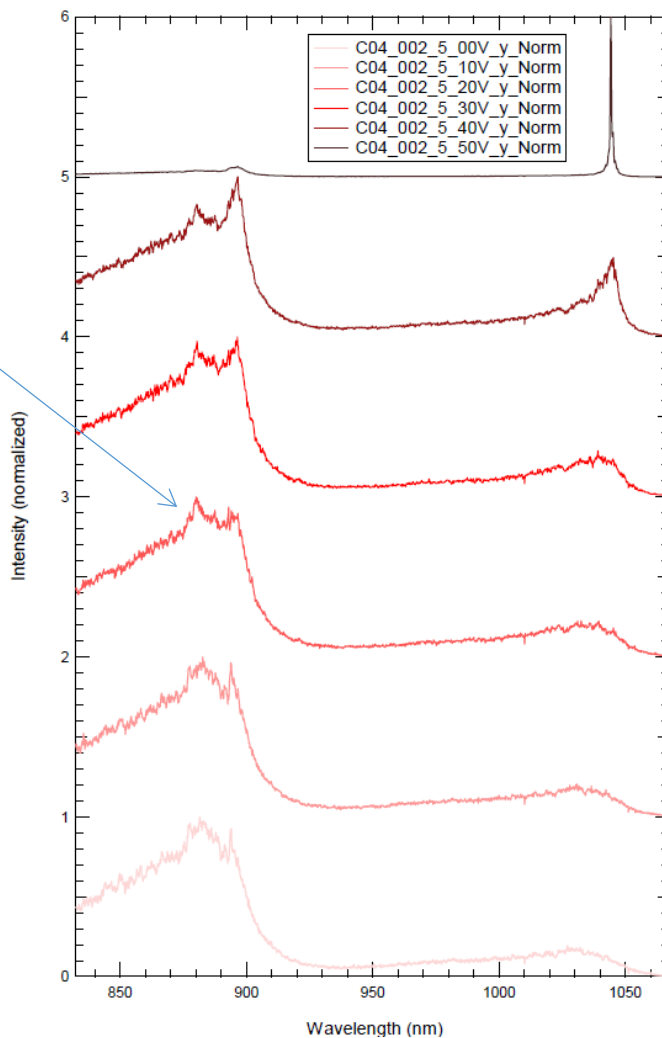
Bar No.	A	B	C	D	E	F
00	P1R1-S	P1R1-N	P1R2-S	P1R2-N	P1R3-S	P1R3-N
01	P1R1-S	P1R1-N	P1R2-S	P1R2-N	P1R3-S	P1R3-N
02	P2R1-S	P2R1-N	P2R2-S	P2R2-N	P2R3-S	P2R3-N
03	P2R1-S	P2R1-N	P2R2-S	P2R2-N	P2R3-S	P2R3-N
04	P3R1-S	P3R1-N	P3R2-S	P3R2-N	P3R3-S	P3R3-N
05	P3R1-S	P3R1-N	P3R2-S	P3R2-N	P3R3-S	P3R3-N
06	P4R1-S	P4R1-N	P4R2-S	P4R2-N	P4R3-S	P4R3-N
07	P4R1-S	P4R1-N	P4R2-S	P4R2-N	P4R3-S	P4R3-N

DFB構造 w/o ARコート 回折格子の効果がまだ見えていない

3QW-InGaAs LD 2usパルス/2ms周期 駆動 duty1/1000

GaAs層が強く
光っている。

試料によっては
GaAsで発振
することもある。

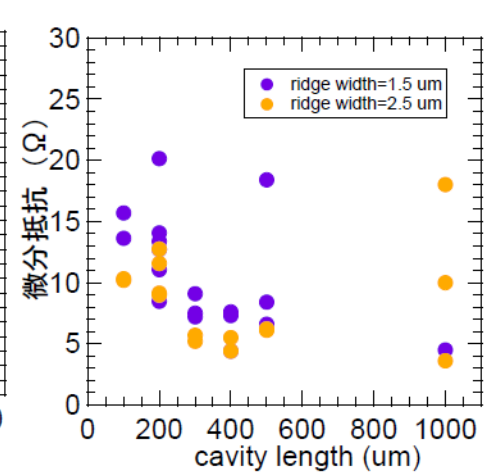
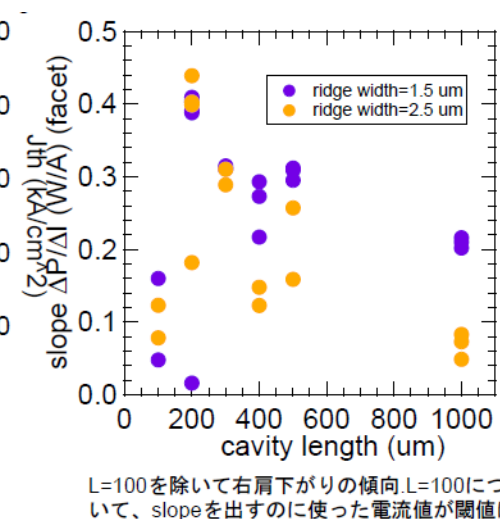
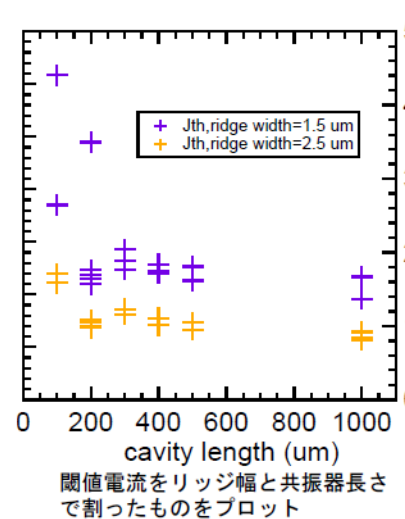
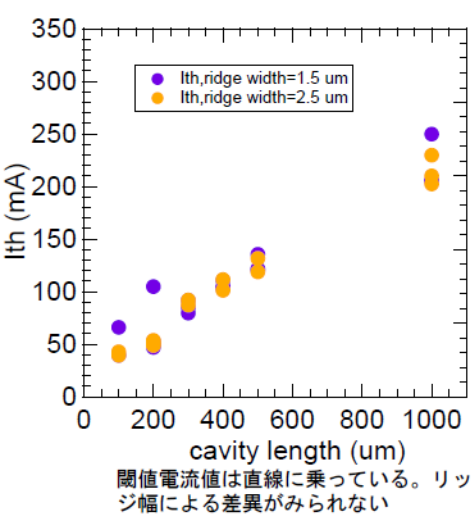
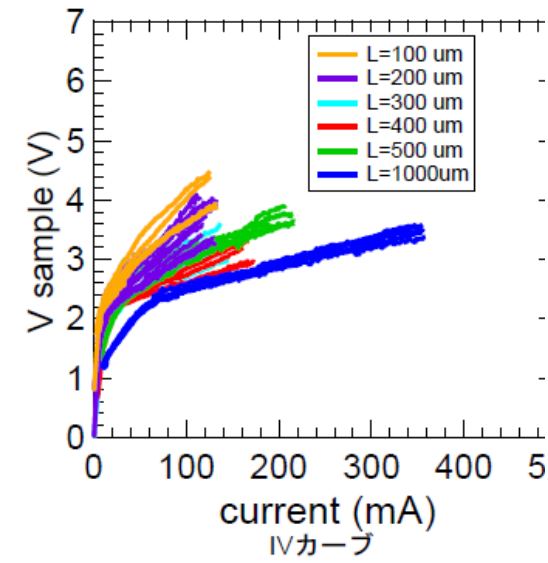
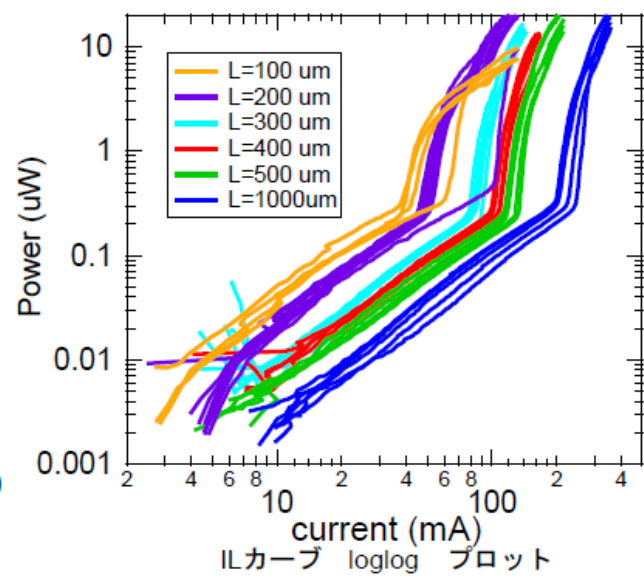
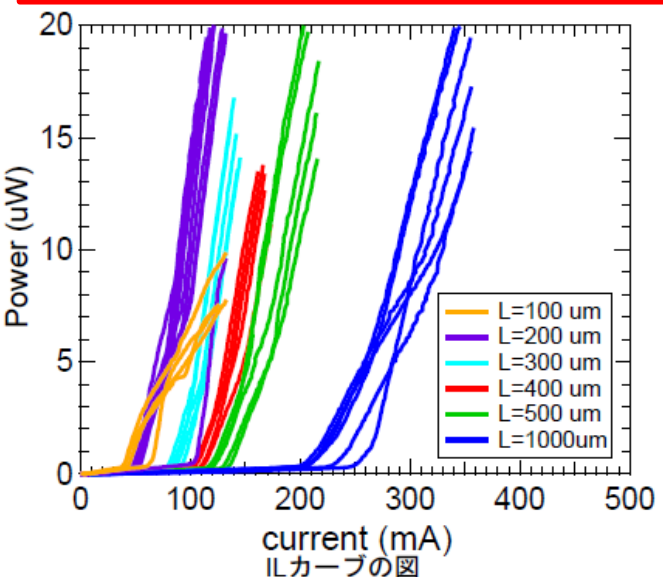


3QW-InGaAs LD

2 μ sパルス/2ms周期 駆動 duty1/1000

L=100 μ m, 200 μ mのデータ追加

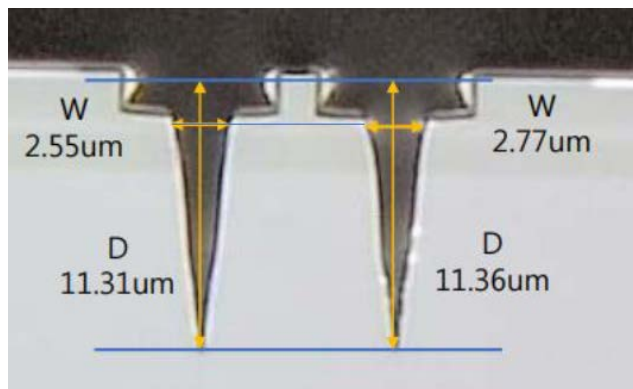
3QW先発



3QW-InGaAs LD

2usパルス/2ms周期 駆動 duty1/1000

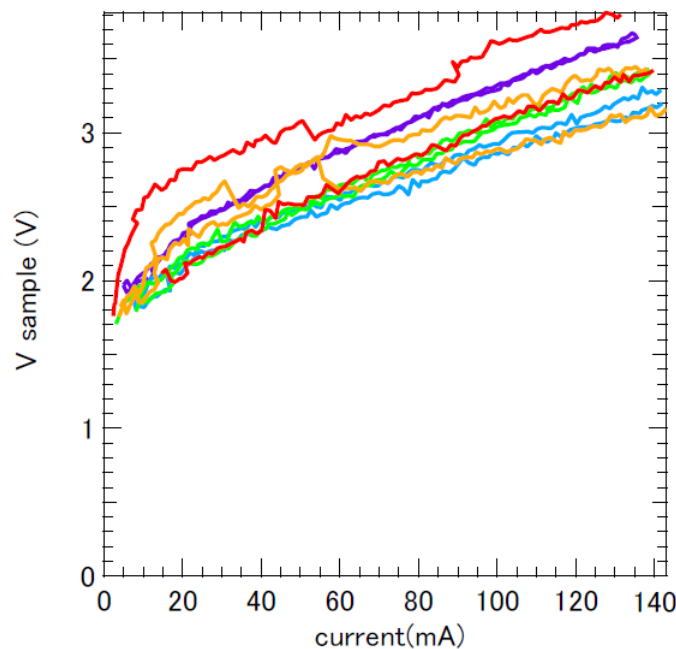
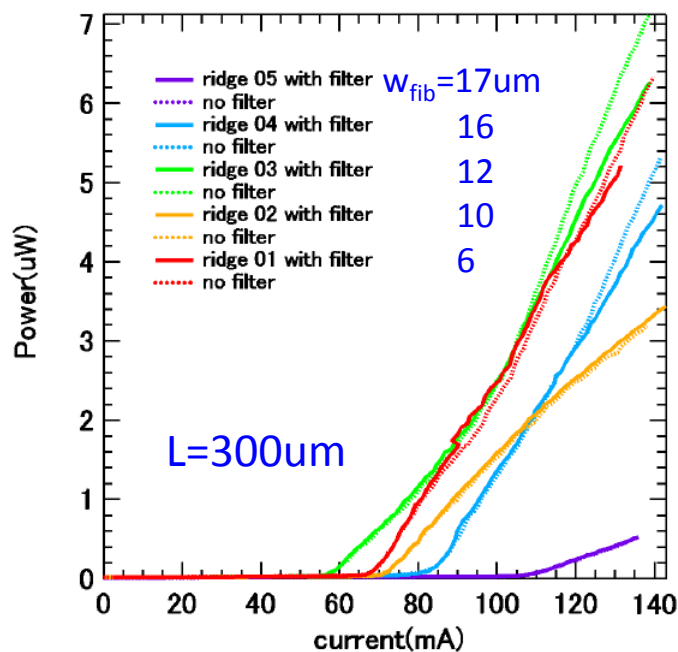
FIB加工 (ridge01)



FIB加工でしきい値電流が下がった。

→

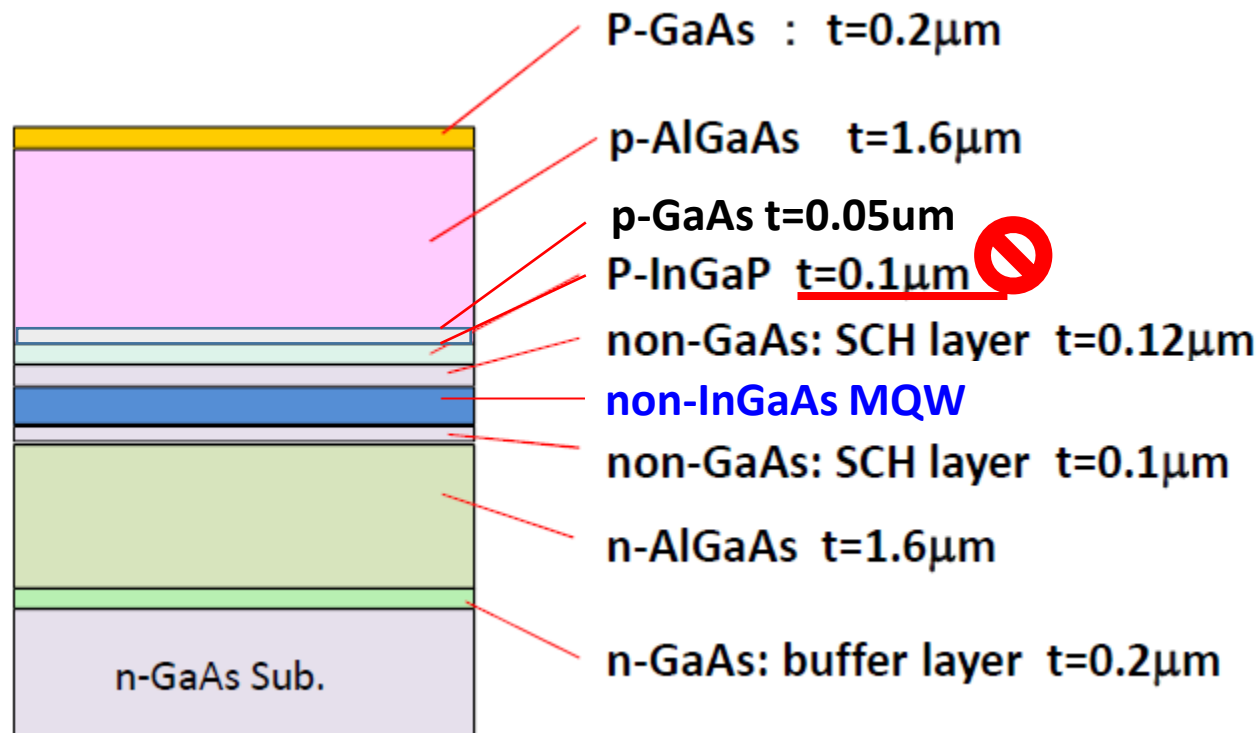
注入電流が横方向に広がってしまっているようだ



サンプル : 3QW先発先行 120μm厚 FP領域 バーNo.02 (上から数えて) L=300μm

測定条件 : Agilent8114A 1~7V設定 2us パルス 2ms周期 Duty比1:1000, ADCMT 8230 1030nm 20uWレンジ固定

1 μ m LD ウエハの元エピ構造



InGaAs MQW → SQW DQW 3QW 10QW DH

今後の進め方

2018/7/20秋山記

- △ 高しきい値の理由、エピ構造の問題点解明と対策
- 100um短共振器化成功 → 技術確立
- 多層(≥ 10)MQW化成功 → 詳細評価と次の設計

- 第2回試作
 - エピはエピファブで。加工(FP-LDにしぼる)は自前で。
 - DFB、DBRによる単一周波数化について再検討。
 - (必要な線幅、やり方、ファブの使い方)

- 第1回試作DFB-LD部分の加工と評価

- 高速駆動技術、利得スイッチ評価

- 光励起実験 多セクションLD実験など 基礎研究実験

LD試作の前に(と並行して) 既存(市販)LDを用いたパルス発生制御の実験

- 1) 利得スイッチパルス(緩和振動の一発目を取り出す)
50-200psは、市販1umLD素子でできた。
LD素子の自家開発で、制御範囲を広げたい。
- 2) LD直接変調で、1ns前後のパルスには、緩和振動が乗ってしまい、きれいなパルス発生が難しい。DCバイアスや2段階パルス駆動を試したが、成功しなかった。
- 3) LD直接変調で、10ns以上のパルスでも、緩和振動が乗った。
電気パルスの立ち上がりをあえて遅くしたら、緩和振動をほぼ消せた。
- 4) LD直接変調パルスに緩和振動が乗ると、ファイバーアンプで増幅したときに、振動成分が増長してしまった。