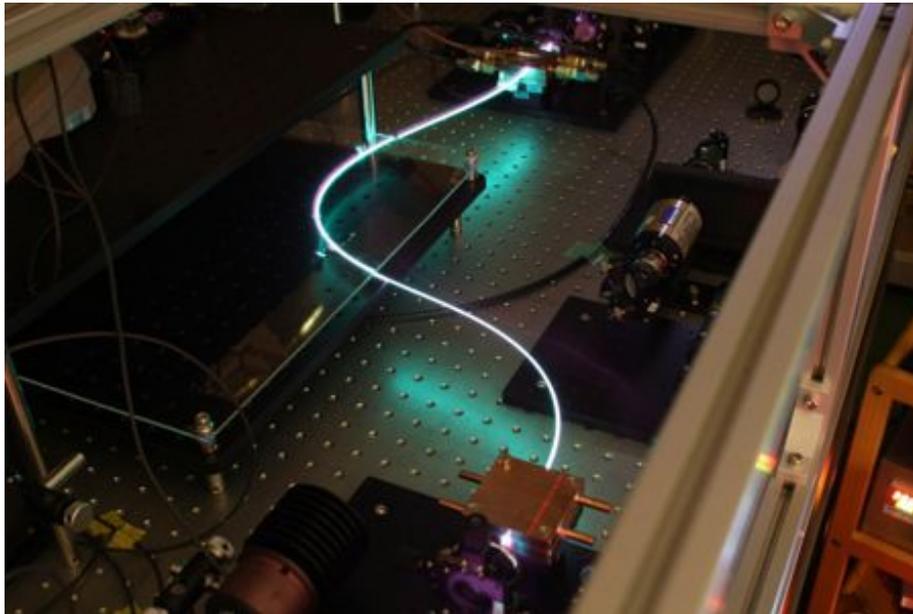


# cERL用ファイバレーザー増幅器の開発



2012.1.24

共同レーザー開発打ち合わせ

本田洋介

- cERL電子銃用のレーザーシステムの開発
- DCモード高平均出力Ybファイバ増幅器の開発状況について

# 導入と全体の設計

- cERLでのレーザー開発の目標
- システム全体

# cERL電子銃用レーザーの仕様

- cERLにおける電子ビームの仕様
  - 繰り返し1.3GHzで連続
  - 平均電流10mA(7pC/bunch)
  - 規格化エミッタンス $1\mu\text{m}$ (周回部で)
  - バンチ長(30ps)(電子銃直後)
- レーザーの仕様
  - 波長532nmで直径2mmでも、初期エミッタンス $0.2\mu\text{m}$
  - カソードQE=1%と仮定し(波長532nmならQE=10%くらいは望める)
  - 平均パワー2.3W(2nJ/pulse)(カソード上)、
    - レーザー室で、532nmで5W以上、1064nmで25W
  - バンチ長8psを8スタックで32ps
- 将来的な発展性に向けて
  - DC電子銃でビーム電流100mA
    - 532nmで23W(カソード)、1064nmで200W
  - 超伝導RF電子銃の可能性を見越して波長266nm
    - ビーム電流10mAなら、UVで4.6W(カソード)なら、532nmで50W、1064nmで200W
- 基本波の増幅器の開発としては、
  - まず25W程度のものを確実に用意する。
  - 200W級が開発の上でひとつの目標になる。
- 特徴
  - 高平均パワー、の割には、低ピークパワー
  - 効率が最も重要。特に波長変換での効率が課題。

# 発振器

SERIES | GE-100

Versatile Picosecond Laser



**Applications**

- Sewing amplifier
- Two-photon microscopy
- Opto-electronic testing
- Pump-probe experiments
- Time-resolved Raman-scatter spectroscopy

**Features**

- Passively mode-locked DPSSL
- Customizable design
- Low maintenance
- Air-cooled
- Low cost



**Options**

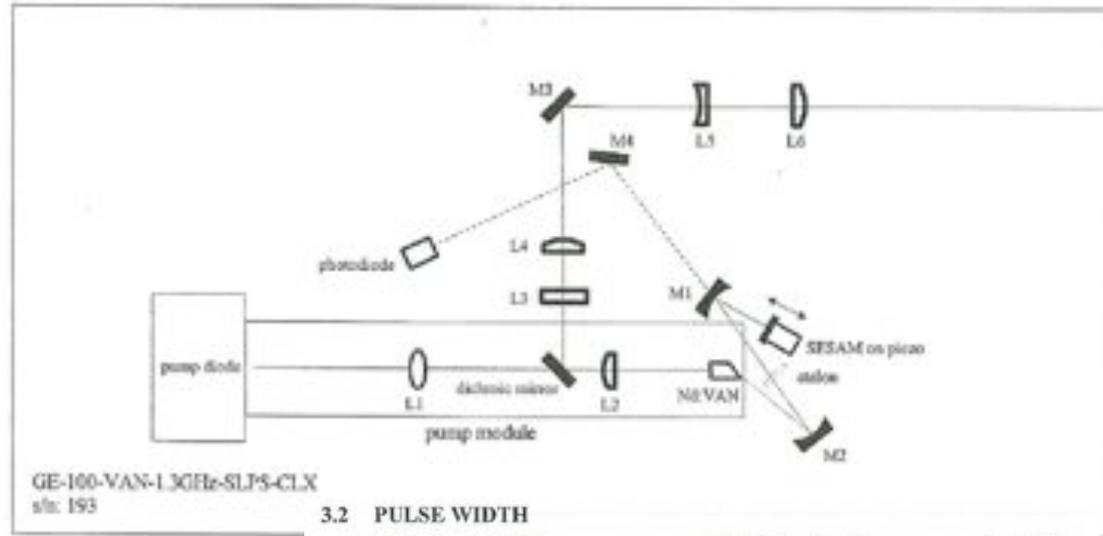
- High power
- Second harmonic generation
- Extended pulse widths
- Clock synchronization
- Pulse picker
- 1340nm output wavelength
- Switchable / tunable repetition rates
- Multiple output beams
- RS-232

1064 nm, 1053 nm, 1047 nm pulse width  
 20 MHz – 2.5 GHz wavelength  
 600 mW, 1W @ 1064 nm repetition rate  
 1%/°C output power  
 TEM<sub>00</sub> power stability  
 1.1 M<sup>2</sup> spatial mode

Made in Switzerland

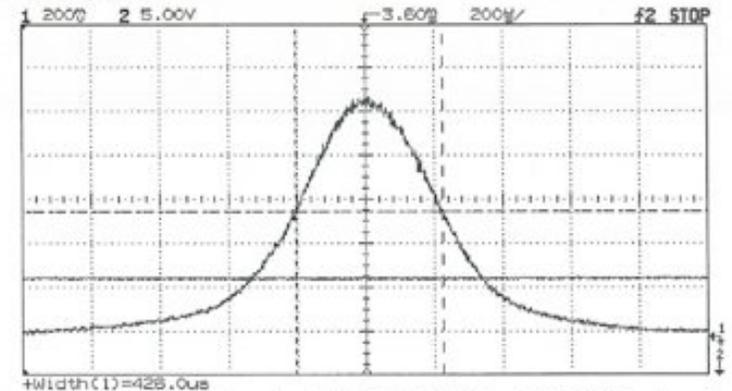


- 市販のNd:YVO受動モードロックレーザー
- 1.3GHz, 1064nm, 300mW, 9ps
- SHG結晶の長さで波長変換効率を上げると、狭線幅が望ましい。(YbよりNdが有利)
- 1064nmはファイバ増幅にはやや不利



GE-100-VAN-1.3GHz-SLPS-CLX  
 s/n: 193

3.2 PULSE WIDTH

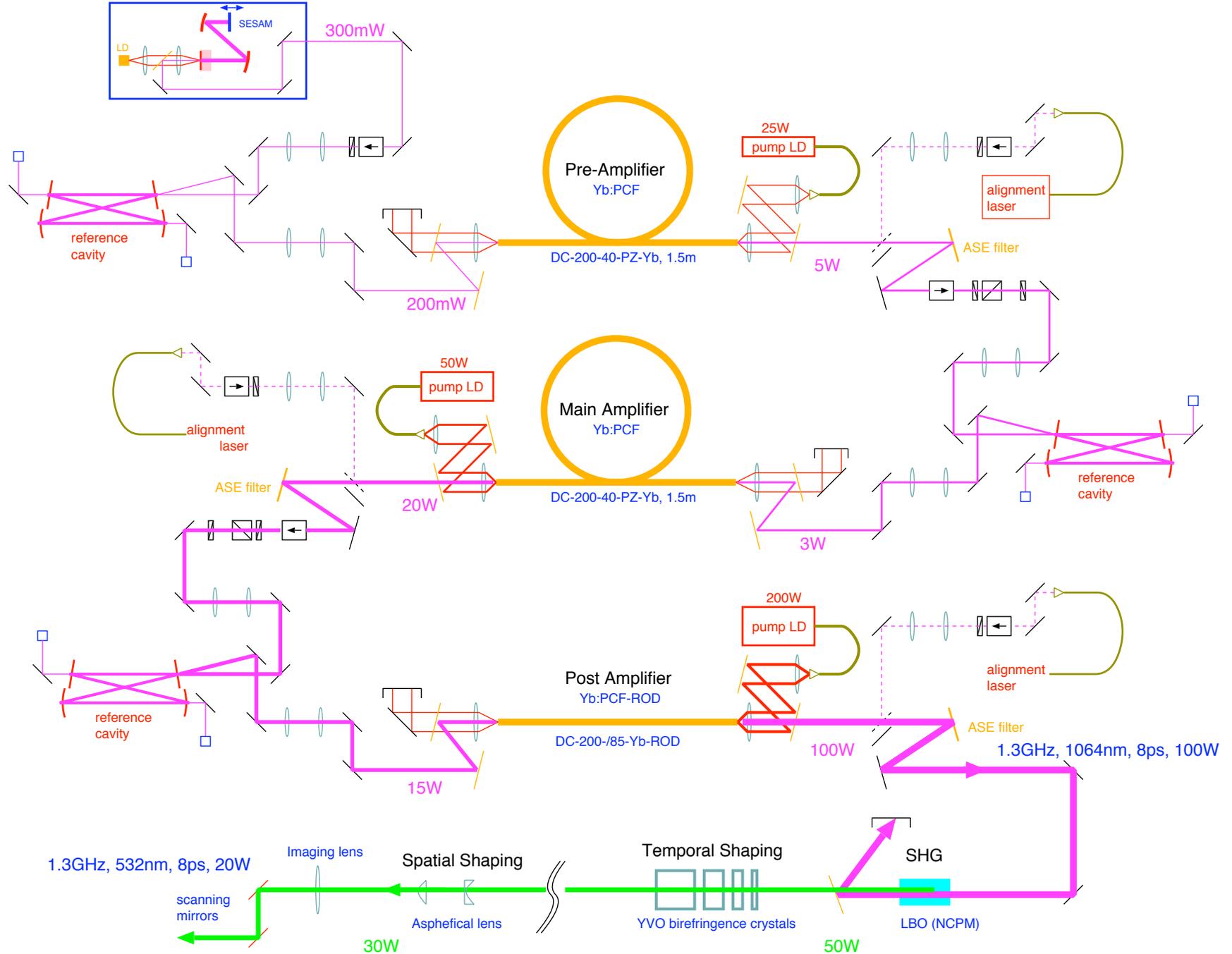


Autocorrelation:  $I_{LD} = 1.60$  A, pulse width (FWHM):  $426 \mu s \cdot 0.707 \cdot 29.6 \text{ ps/ms} = 9 \text{ ps}$   
 (29.6 ps/ms is the autocorrelator calibration factor, 0.707 the correction for a Gaussian pulse)

# 概念設計(完全版)

Nd:YVO passive mode-lock laser

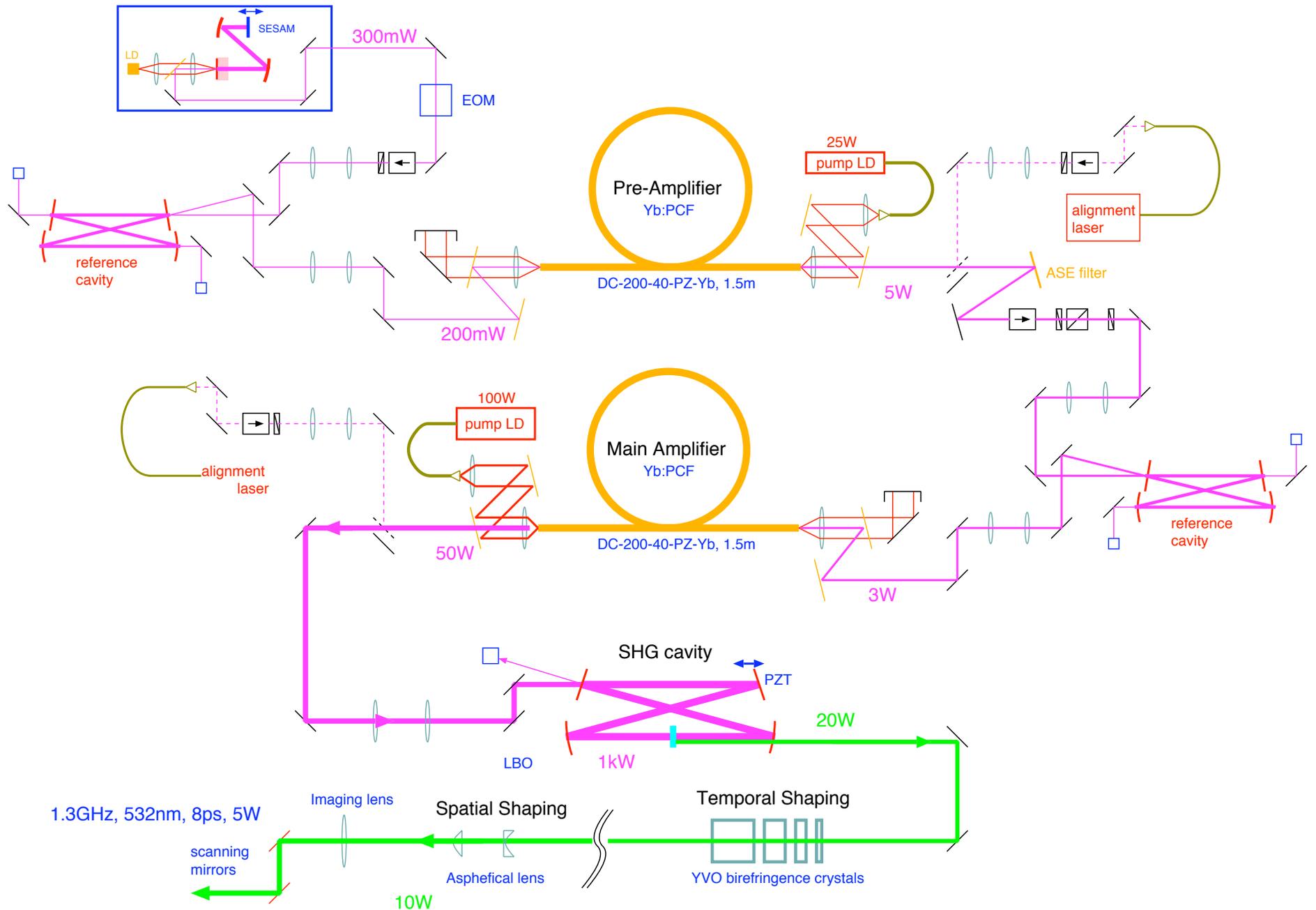
1.3GHz, 1064nm, 8ps, 300mW



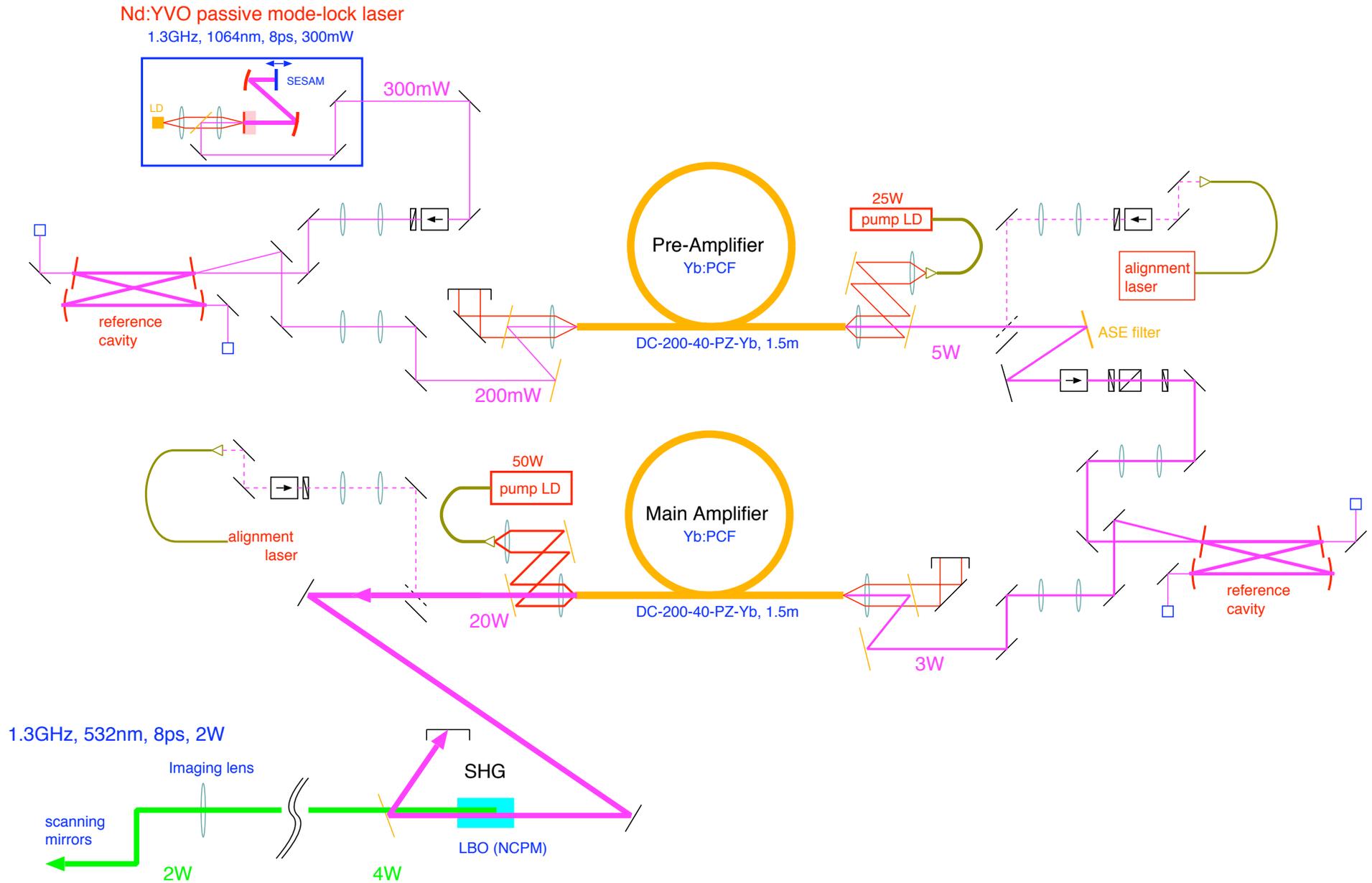
# 概念設計(共振器型で高効率化)

Nd:YVO passive mode-lock laser

1.3GHz, 1064nm, 8ps, 300mW



# 概念設計(最小)



# 準備

- ファイバ増幅器の試験を始める前の準備
- PCFについて
- 励起光について
- 信号光導入のテクニック

# ファイバ増幅器

- ファイバ増幅器の特徴

- 利点

- 小信号利得/損失比が大きい(最大引き出し効率)
    - 飽和強度で長い距離を伝搬させるので、効率が良い
    - 量子欠損が小さい(Yb)
    - 放熱面積が大きい
    - シングルモード

- 不利な点

- 端面の強度限界
    - 光密度が高いので非線形性

- 高出力用のファイバ増幅器

- 高強度の励起光を投入できるように、ダブルクラッド構造
  - 非線形性を緩和するために大口径コア
  - 大口径でもシングルモードさせるためにフォトニック結晶
  - Ybを高添加し励起光吸収率を上げる、このとき屈折率の精密な制御が必要
  - 端面のパワー密度を下げる処理

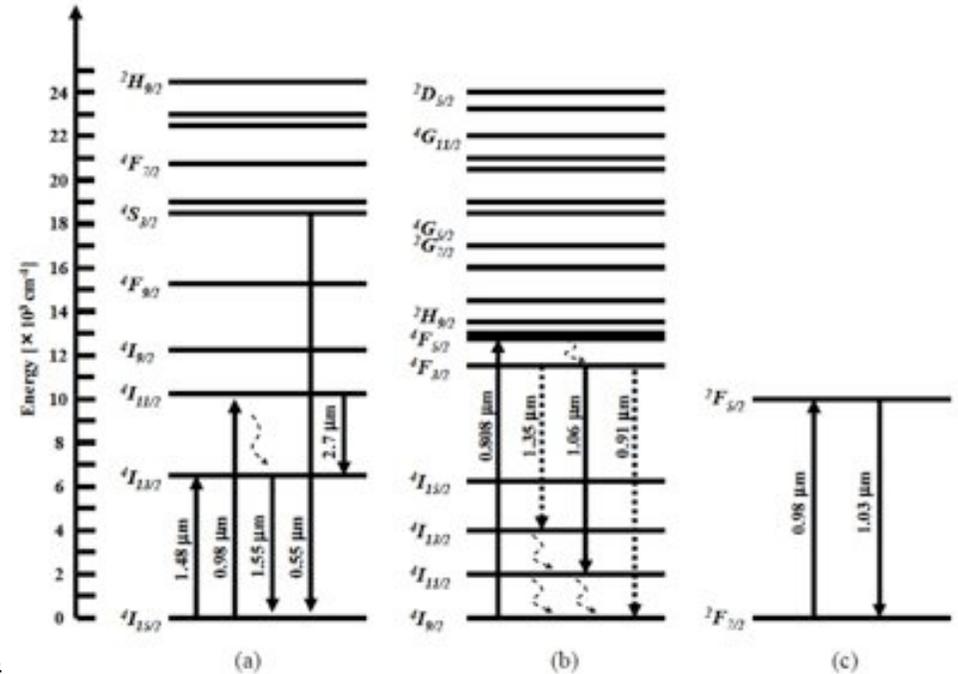
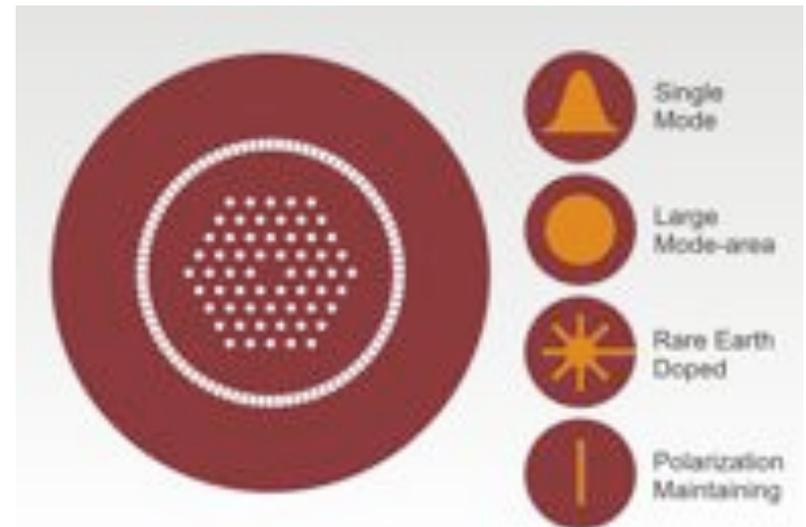
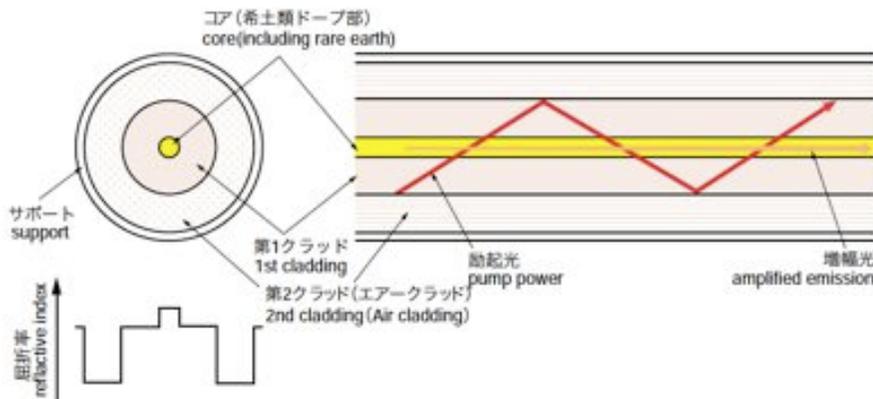


図 1.1 種々イオンのエネルギー準位構造

(a)  $\text{Er}^{3+}$ イオンの場合、(b)  $\text{Nd}^{3+}$ イオンの場合、(c)  $\text{Yb}^{3+}$ イオンの場合



# フォトニック結晶ファイバ(PCF)増幅器

- 最もメジャーと思われるPCFメーカーでYb添加PCFを選ぶ
- 今回使用しているものは、Flexibleタイプの中で最大のもの
  - もっとも売れ筋のもの。(両端にハイパワー用コネクタを付けて90万円)
- 非線形性が問題になりはじめたら、RODタイプに行く必要がある
- 高効率には励起光吸収率が大きいほうが有利

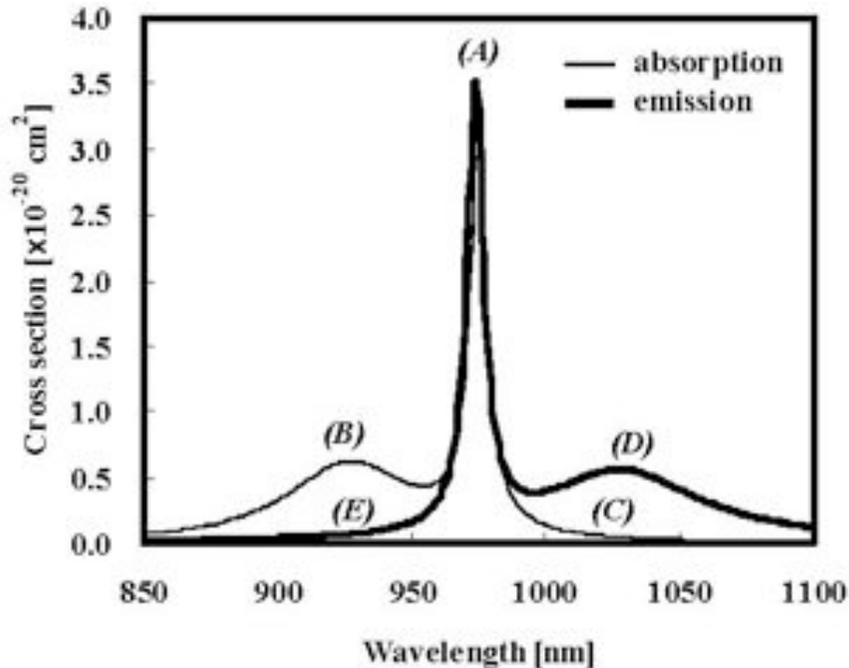
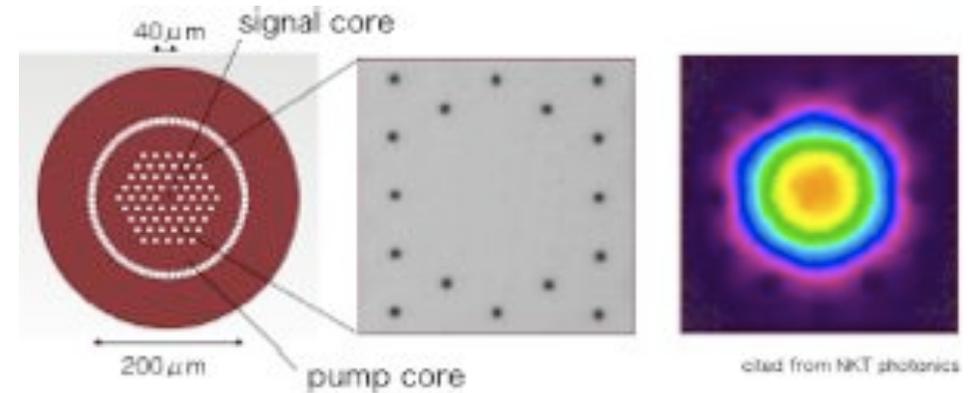


## Crystal Fibre Ytterbium Double Clad Fiber Range

	DC-70/11-PM-Yb	DC-135/15-PM-Yb	DC-150/30-PM-Yb	DC-200/40-F2-Yb	DC-200/70-PM-Yb-ROD	DC-200/85-Yb-ROD	DC-285/100-PM-Yb-ROD
Core size	11 ± 1 μm	15 ± 1 μm	30 ± 2 μm	40 ± 2 μm	70 ± 5 μm	85 ± 5 μm	100 ± 5 μm
Pump clad. diameter	70 ± 3 μm	135 ± 5 μm	150 ± 5 μm	200 ± 5 μm	300 ± 5 μm	200 ± 5 μm	285 ± 10 μm
Pump clad. geometry	Circular	Circular	Circular	Circular	Circular	Circular	Circular
Cladding diameter	170 ± 5 μm	180 ± 10 μm	330 ± 10 μm	450 ± 10 μm	1700 ± 100 μm	1700 ± 100 μm	1700 ± 100 μm
Coating diameter	300 ± 20 μm	345 ± 20 μm	440 ± 30 μm	630 ± 30 μm	NA	NA	NA
Coating material	HT acrylate	HT acrylate	HT acrylate	HT acrylate	None	None	None
Mode properties	Single mode	Single mode	Single mode	Single mode	Single mode	Single mode	Single mode
MFD	12 ± 1 μm	16 ± 1 μm	22 ± 1.5 μm	29 ± 2 μm	55 ± 5 μm	65 ± 5 μm	76 ± 5 μm
Core NA @ 1 μm	0.08 ± 0.005	0.055 ± 0.01	~0.04	~0.03	~0.02	~0.02	~0.02
Fiber format	Flexible	Flexible	Flexible	Flexible	ROD	ROD	ROD
Min bending diameter	20 cm	15 cm	20 cm	30 cm	NA	NA	NA
Pump abs. @ 976 nm	~ 12 dB/m	~ 8 dB/m	~ 10 dB/m	~ 10 dB/m	~ 10 dB/m	~ 10 dB/m	~ 10 dB/m
Pump abs. @ 915 nm	~ 4 dB/m	2.8 dB/m	~ 3 dB/m	~ 3 dB/m	~ 10 dB/m	~ 10 dB/m	~ 10 dB/m
Pump NA @ 960 nm	0.63 ± 0.03	0.6 ± 0.05	0.6 ± 0.05	0.55 ± 0.05	0.6 ± 0.05	0.54 ± 0.05	0.6 ± 0.05
PER db	> 17 dB	> 18 dB	> 15 dB	> 15 dB	> 15-15 dB	Non-PM	> 15-15 dB
Birefringence	> 1.0 · 10 <sup>-4</sup>	1.3 · 10 <sup>-4</sup>	> 1.0 · 10 <sup>-4</sup>	> 1 · 10 <sup>-4</sup>	> 1 · 10 <sup>-4</sup>	Non-PM	> 1 · 10 <sup>-4</sup>

# フォトニック結晶ファイバ(PCF)増幅器

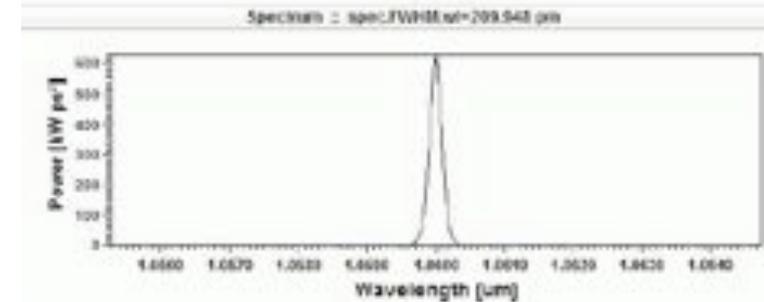
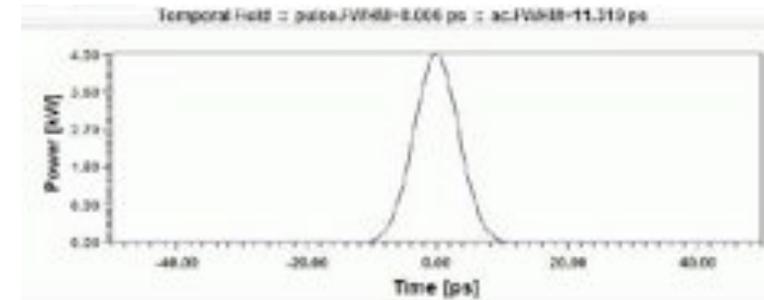
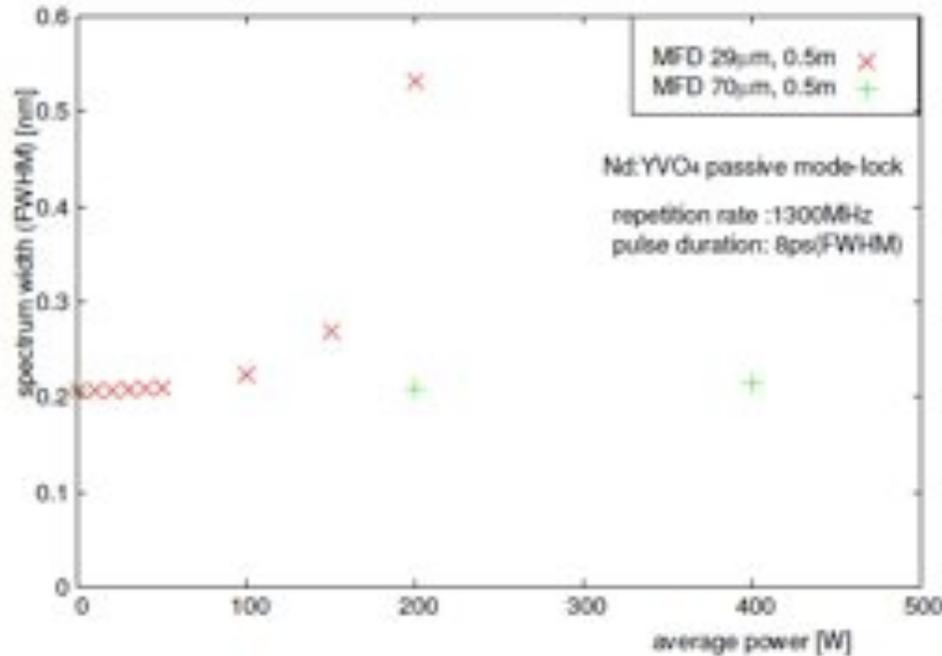
- DC-200-40-PZ-Yb
  - 信号モードフィールド径(MFD):  $29\mu\text{m}$
  - 励起光コア:  $200\mu\text{m}$
  - 976nmで励起し、1020nm-1060nmを増幅
- テスト項目
  - 中心波長は1035nm付近。波長1035nmを30Wまで増幅した経験はあるが、波長1064nmでどうなるか。
  - ファイバ長について最適化が必要だが
    - 使用済の切れ端の0.95mでまずテスト
    - それを踏まえて適当な長さを決める



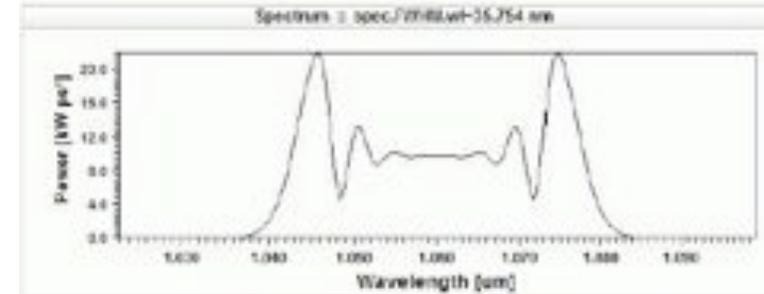
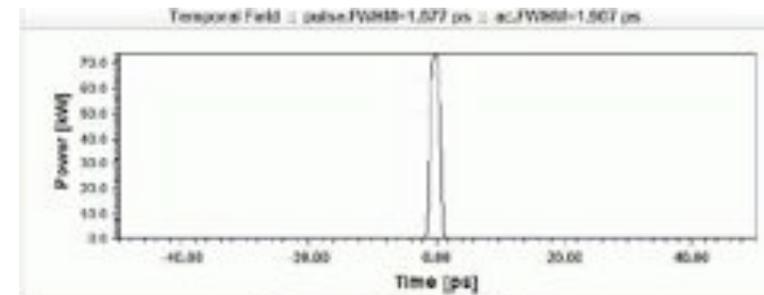
型番	DC-200-40-PZ-Yb-03
Signal Core	
Mode properties	Single mode
$M^2$	$<1.3$
Mode Field Diameter	$29 \pm 2 \mu\text{m}$
Mode Field Area	$650 \pm 100 \mu\text{m}^2$
NA @1060 nm	$\sim 0.03$
Multimode Pump Core	
NA @950 nm	$0.55 \pm 0.05$
Pump absorption @920nm	$\sim 3 \text{ dB/m}$
Pump absorption @976nm	$\sim 10 \text{ dB/m}$
Polarization Parameters	
Birefringence $\Delta n$	$1 \cdot 10^4$
Polarization Extinction Ratio	$>15 \text{ dB}$
Physical Properties	
Signal core diameter	$40 \pm 2 \mu\text{m}$
Inner cladding diameter	$200 \pm 5 \mu\text{m}$
Outer cladding diameter	$450 \pm 20 \mu\text{m}$
Coating diameter	$620 \pm 30 \mu\text{m}$
Outer and inner cladding material	Pure silica
Coating material	HT acrylate

# 非線形性の評価

- 基本的には(非線形性が十分低ければ)、定常状態の増幅器の平均パワーは、パルス構造に依存しないはず。
- 非線形性の効果の見積り
  - 自己位相変調(SPM)の影響を計算で評価した。ファイバ長0.5mを規定のパワー、パルス幅が伝搬するとして、パルス幅およびスペクトルの変化を計算。
  - cERLの発振器のパラメータ(1.3GHz, 8ps)では100Wまでは、スペクトルに顕著に現れるほどの非線形性は効かない。
  - これに対してどの程度余裕をとるべきか。
- ひとまずCWで試験を進めていく。平均出力に関する試験は、CWでできる。



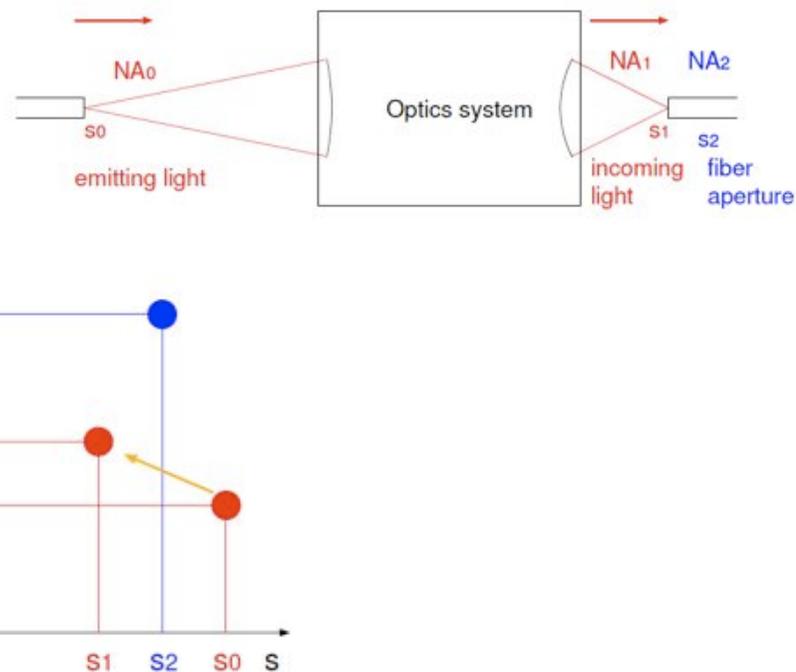
position: 0.500 m energy: 38.462 nJ average power: 58.000 W



position: 0.500 m energy: 117.652 nJ average power: 13.000 W

# 励起光

- 励起光は、 $200\mu\text{m}$ の励起コアに入れなければならない。ファイバ出力のLDで、自由空間から入射する。
- 100WクラスのLDは、 $200\mu\text{m}\sim 400\mu\text{m}$ のマルチモードファイバ出力。(10Wクラスなら $100\mu\text{m}$ のファイバがある。)
- 適当な結像光学系で、導入する必要がある。これがずれると、励起光の損失でファイバが損傷することになる。
- コア径 $\times$ NAが保存量。 $200\mu\text{m}$ ファイバのLDが望ましい。(100 $\mu\text{m}$ ファイバなら余裕で入る。)



**200W, 200 $\mu\text{m}$  Conduction Cooled Fiber-Coupled Multi Bar Module**

**Features**

- Single wavelength
- High coupling efficiency
- Conduction cooled base-plate
- Scalable output power
- High power QBH, mode strip fiber connector

**Optional Accessories**

- Integrated pointer laser
- Integrated power meter
- Integrated NTC temperature sensor
- Fiber detected sensor

**Device Specification**

Optical <sup>1</sup>	Units	
Center Wavelength Range <sup>3</sup>	nm	976
Center Wavelength Tolerance <sup>3</sup>	nm	$\pm 3$
Output Power <sup>2</sup>	W	200
Spectral Width (FWHM)	nm	$< 4$
Slope Efficiency	W/A	$> 4.2$
Wavelength Temp. Coefficient	nm/ $^{\circ}\text{C}$	$\sim 0.31$

**Fiber Parameters**

Numerical Aperture	NA	0.22
Fiber Core		200
Fiber Connector	$\mu\text{m}$	QBH



**LIMO AV5 Series (pump)**

Version July 20, 2010  
HIGH-POWER DIODE LASER



- High brightness laser for pump applications
- Hermetically sealed laser head in potential-free housing
- SMA905 / LD80 Plug & Play connector for optical fibres
- Compact dimensions
- Dual temperature sensor (NTC/PT100)

**Optical data<sup>1</sup>**

	120(CMP)	100	120	180
nominal output power (W)	100	100	120	180
centre wavelength $\lambda$ (nm)	895-910, 915, 940, 975-981 <sup>2</sup>			
tolerance of $\lambda$ (nm)	$\pm 3$ (s-2) <sup>2</sup>			
spectral width (FWHM) (nm)	$< 5$			
temperature drift of $\lambda$ <sup>3</sup> (nm/K)	0.3 - 0.4			
<b> fibre data</b>				
fibre core diameter ( $\mu\text{m}$ )	200		400	
numerical aperture	0.22			
fibre-optic connector	SMA905		LD80	
<b>Electrical data</b>				
typical operation current (start of lifetime) (A)	66	53	57	57
max. Operation current (start of lifetime) (A)	70	58	60	60
max. Operation current (end of lifetime) (A)	84	70	72	72
typical threshold current (A)	5 - 10			
typical efficiency (%)	34	35	39	35
typical slope efficiency (W/A)	2 - 4			
operation voltage (V)	$< 6$	$< 6$	$< 6$	$< 10$

JOLD-75-CPXF-2P W

JENOPTIK

**Features:**

- High optical output power of 75 W cw
- Fiber core diameter:  $400\mu\text{m}$  (NA 0.22)

# 励起光導入の光学系の設計

- ファイバの $200\mu\text{m}$ の励起コアに入れなければならないが、余裕が少ない。
- LD出口で $400\mu\text{m}$ なので、 $0.46$ 倍の縮小光学系とした。
- 入射点でのビームプロファイルを確認。NAで $3\text{-}\sigma$ 、サイズで $2\text{-}\sigma$

LD 型番	JOLD-75-CPXF-2P
ファイバコア直径	$400\mu\text{m}$
ファイバ NA	0.22
ファイバコネクタ	F-SMA 905
PCF 型番	DC-200-40-PZ-Yb-01
励起光コア直径	$200\mu\text{m}$
励起光 NA	0.55

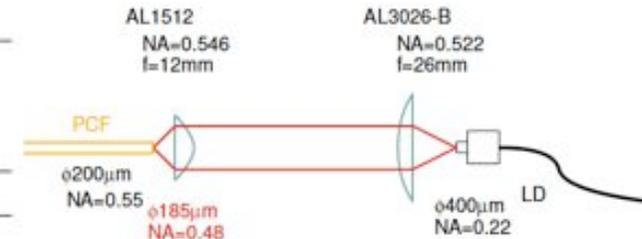


図 1: 設計した光学系

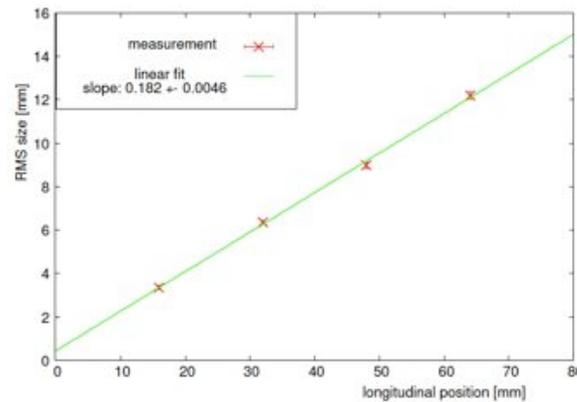


図 4: 発散角の測定結果

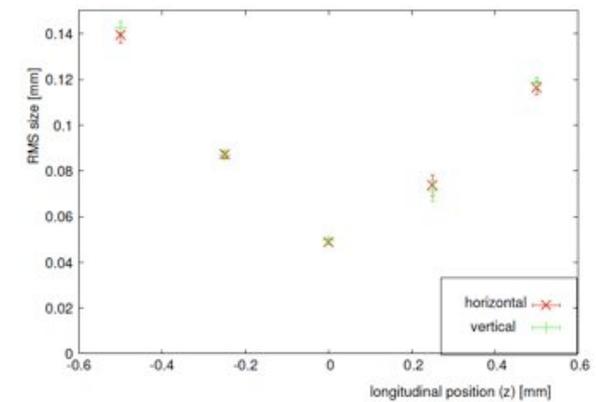


図 8: ビーム径の伝搬

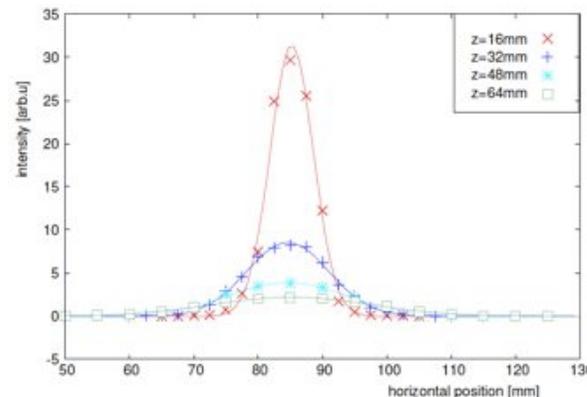


図 3: プロファイルの測定結果 (発散角測定)

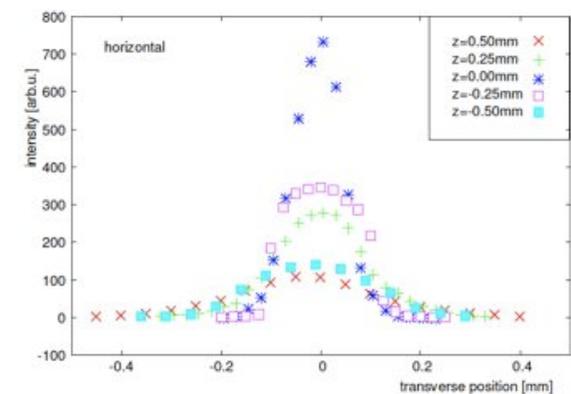


図 6: ビーム径測定の結果 (水平方向)

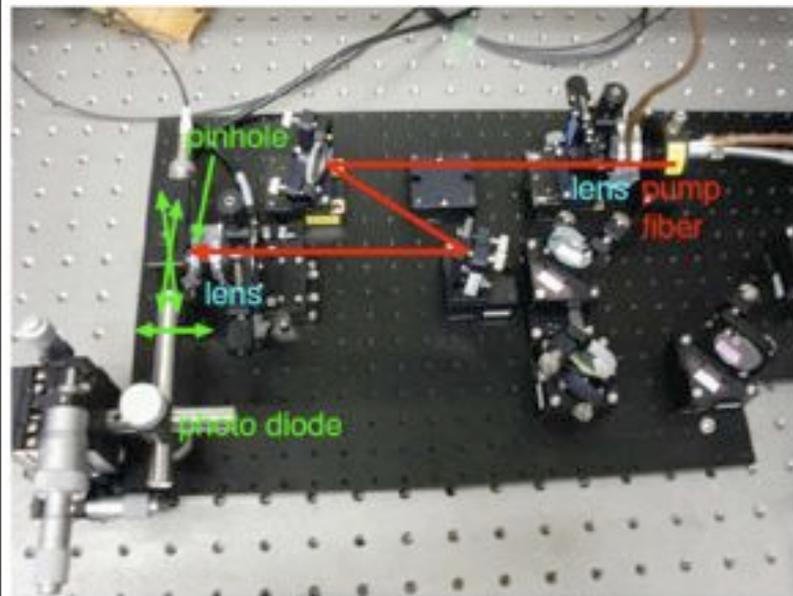


図 5: ビーム径測定の設定アップ

# 励起光波長の最適化

- 低出力のLD(100 $\mu$ mファイバのもの)で、条件だし。
- LD温度を変えて(波長が変わる)、PCFで吸収されずに透過した励起光の強度を測定
  - 入力強度依存性から、ファイバの吸収特性(吸収長、飽和強度)が分かる。
  - 976nm $\pm$ 3nmの範囲が良いことが分かる。
- これを踏まえて、LDを制御する最適な温度を決める。

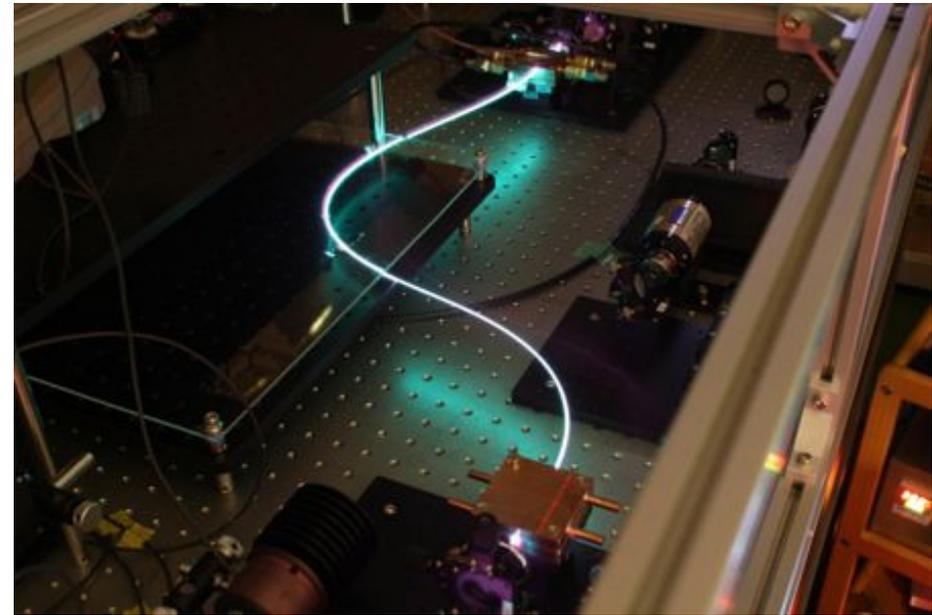
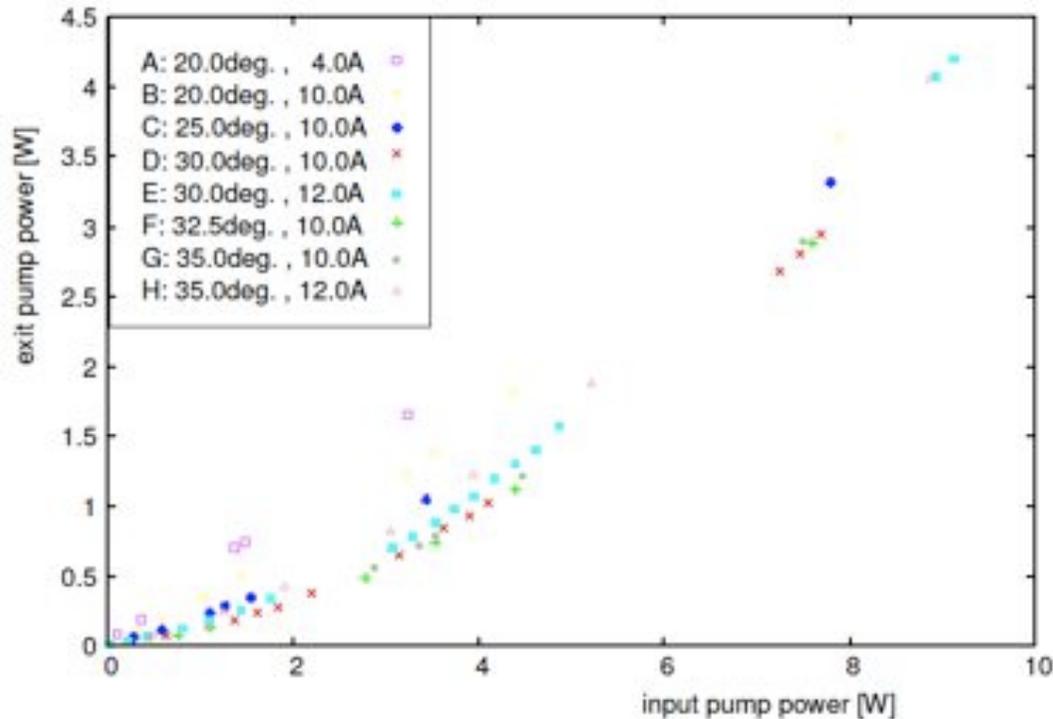
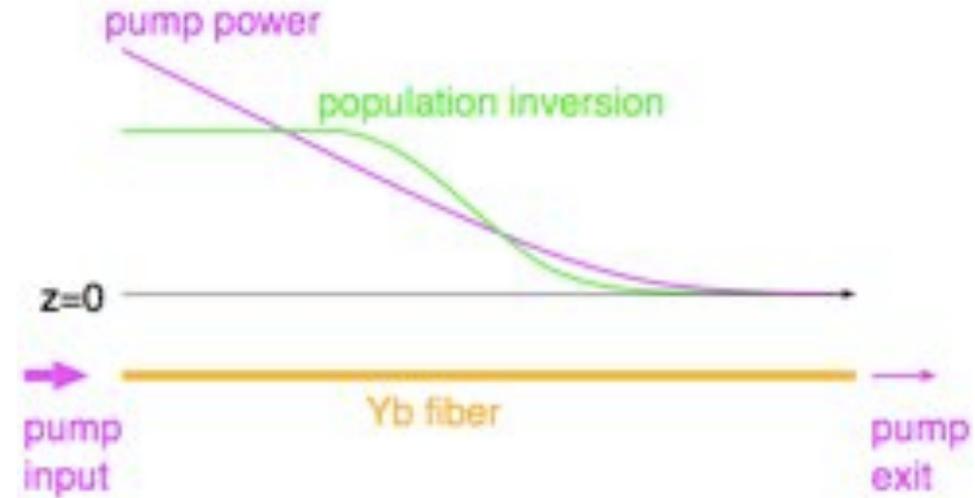
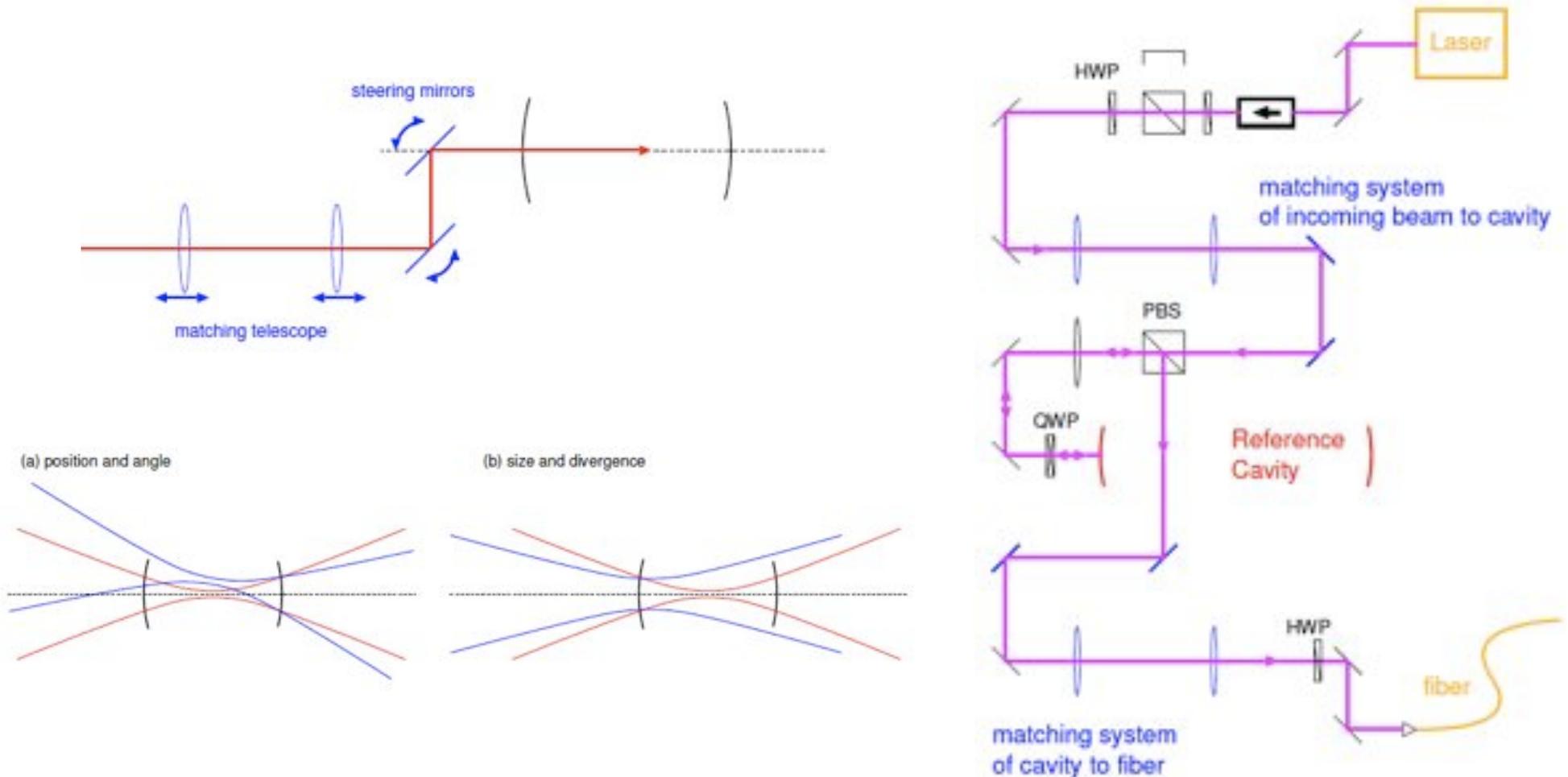


図 2: 入力強度にたいする透過強度

# 信号光の入射調整法

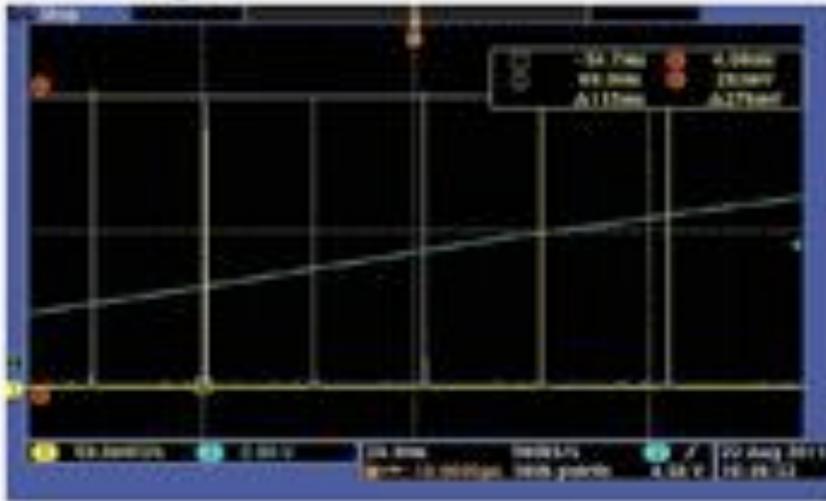
- PCFはシングルモードなので、モードマッチしないと入力されない。共振器の入射と同じ。
- 通常は、出力が増えるように手探りで入射調整をする。これだと、うまく行かないとき、永遠に調整を続ける事になってどこで調整を終えれば良いか分からないし、実際に入力した光量を把握出来ないと、まともな特性試験にならない。
- 共振器の技術を使ってモードを合わせるシステムを考案した。
  - Reference cavityに対して、入射光およびファイバモードをそれぞれ合わせることで全体が繋がる。



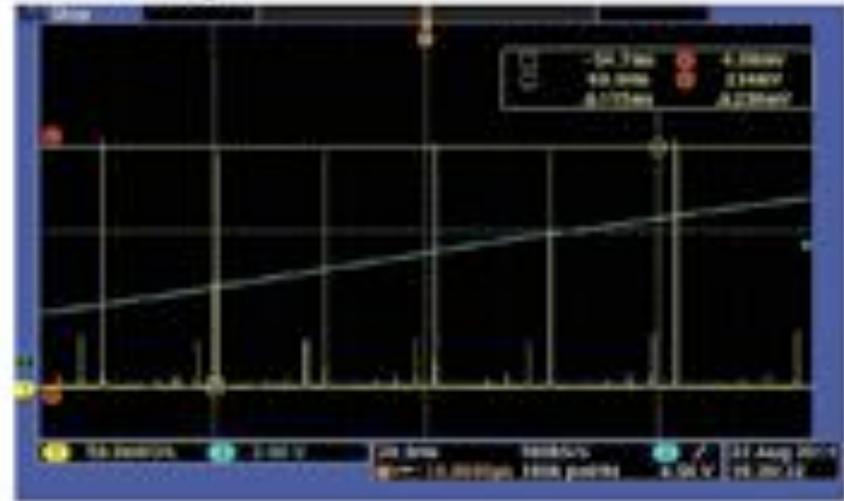
# ファイバへの入射調整法

- 調整の様子。
- Reference cavity の横モードの立ち方を見て、0次モードだけに結合するように調整する。

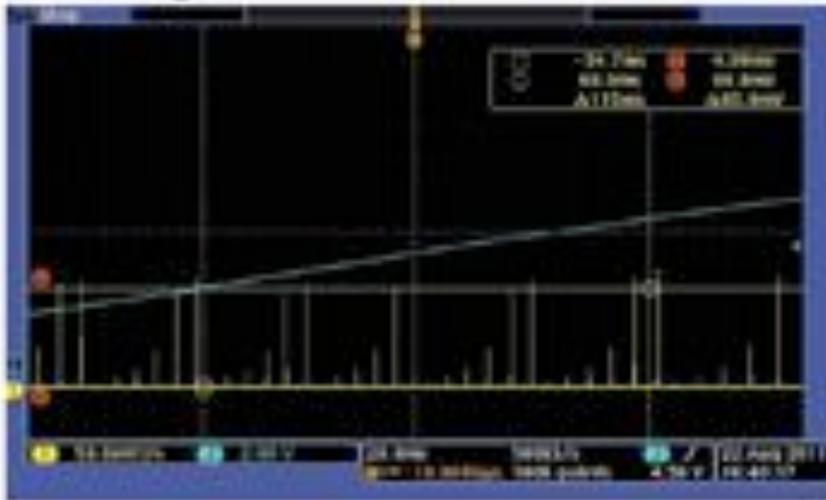
detuning 0



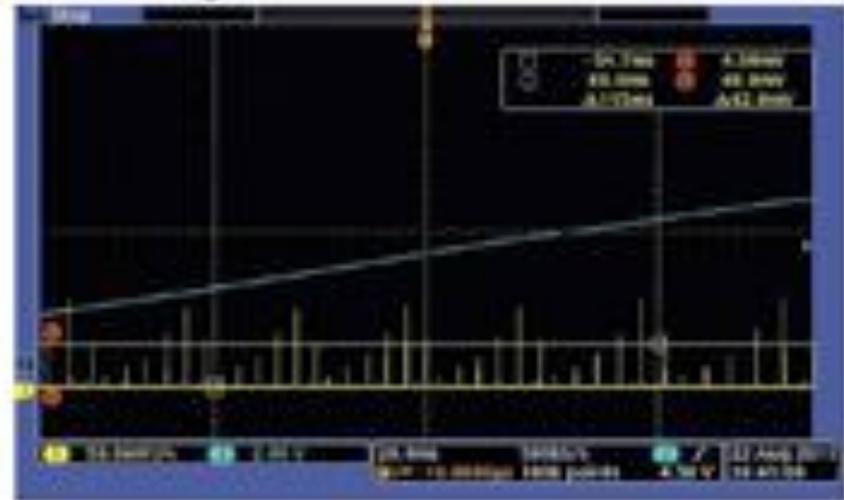
detuning 1



detuning 2

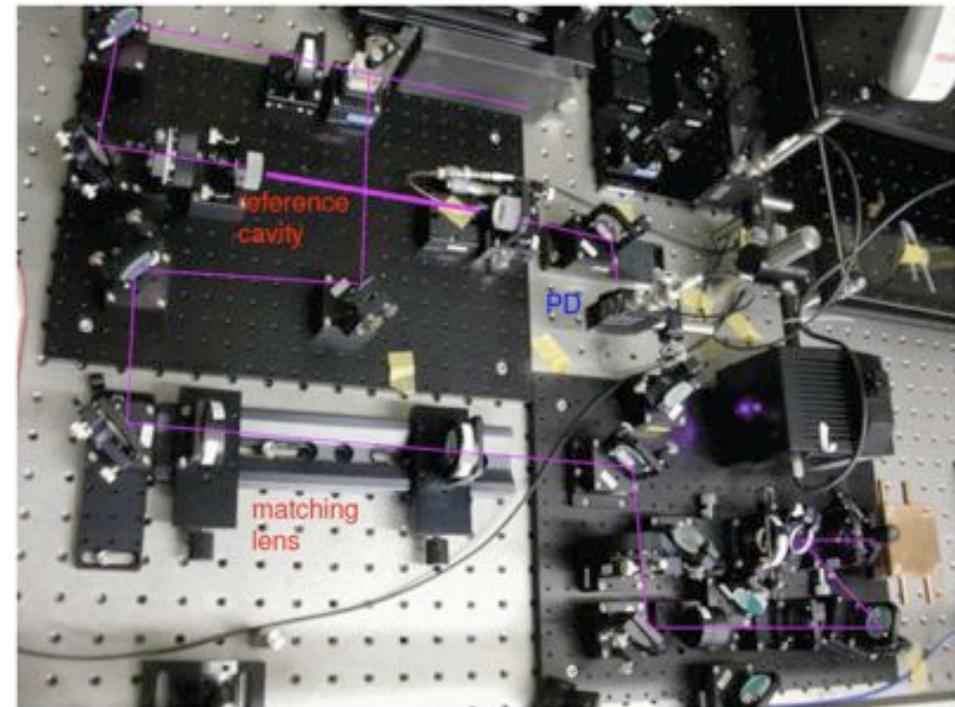
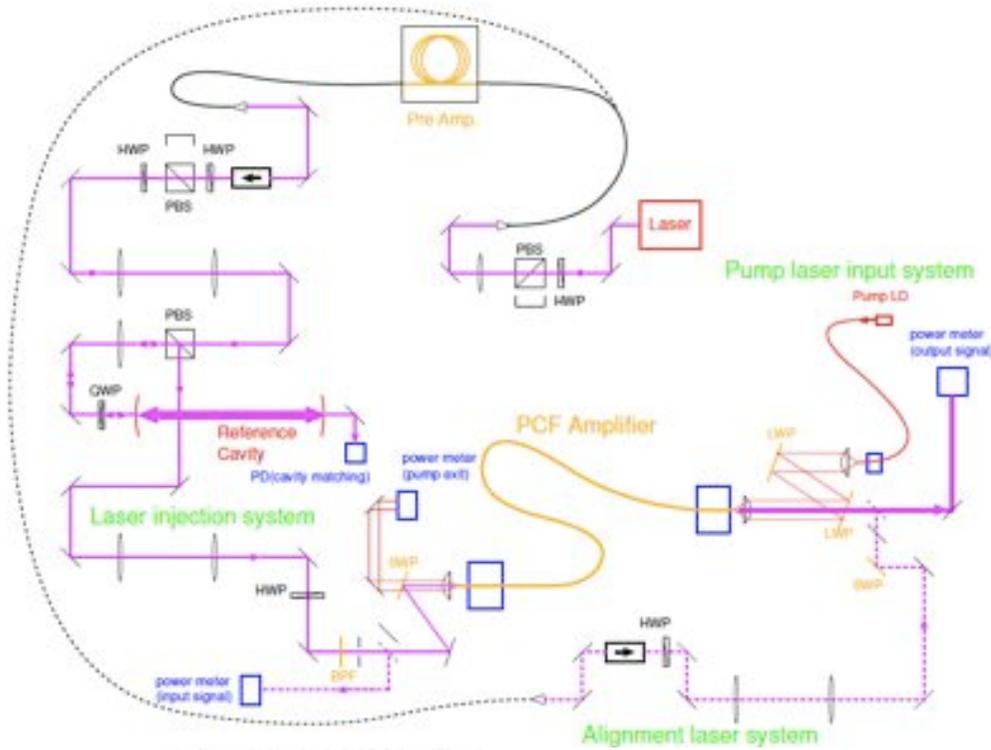


detuning 3

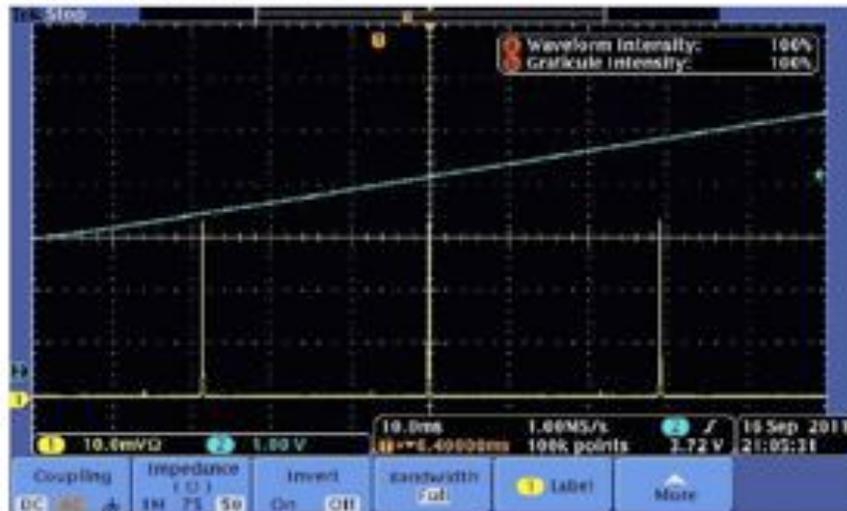


# ファイバへの入射調整法

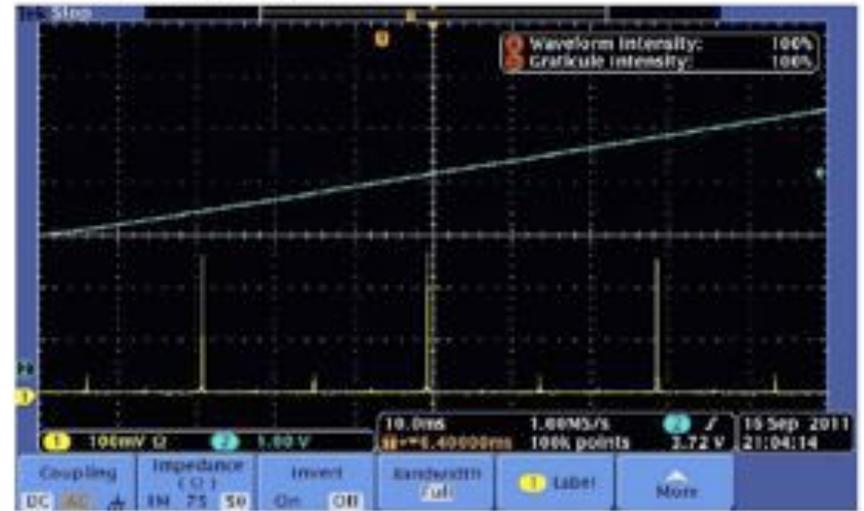
- 実際のセットアップ



(a) forward matching



(b) backward matching

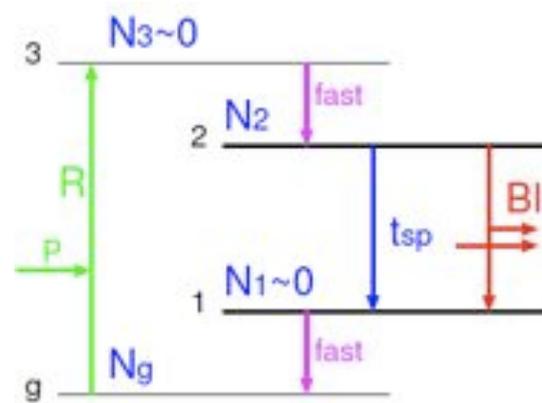
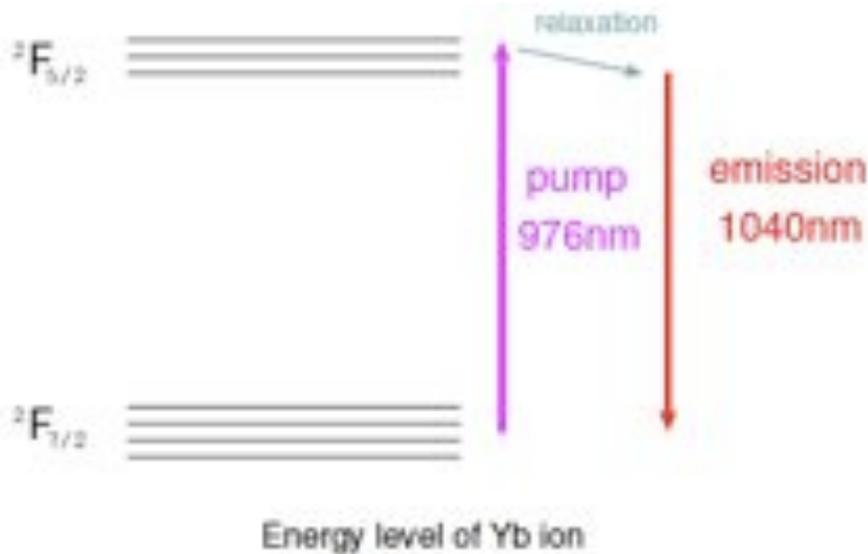
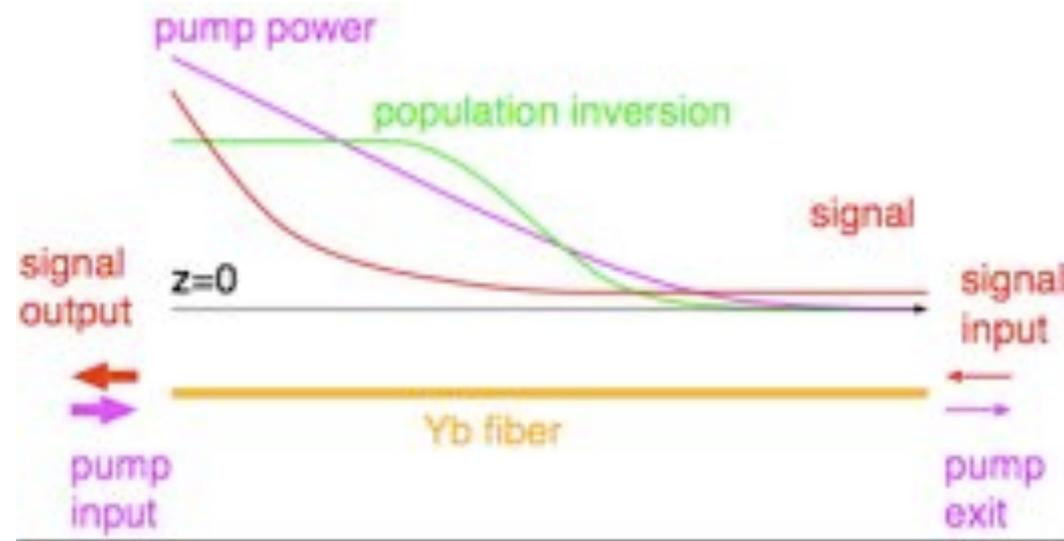


# ファイバ増幅器の特性試験

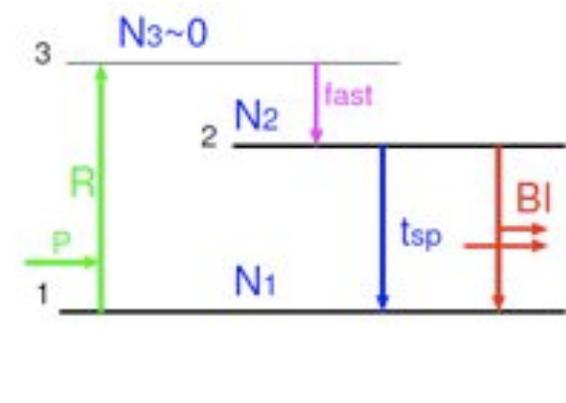
- ファイバ増幅器をモデル化して理解する
- 基礎試験でパラメータを決める
- 高出力試験の結果を予想。

# ファイバ増幅器の動作の考察

- ファイバ増幅器の特徴
  - 通常、レーザー増幅器は小信号ゲインと飽和強度で特徴づけられる。ファイバの場合は媒質が長いので、その長手方向分布も考える必要がある。
  - 信号や励起光の強度分布によって、反転分布の分布は影響を受け、また、それによって信号の発展が変わる、、、。定常的な状況が実現される。
- Ybの特徴
  - 縮退した2順位的な分布。
  - 実際的には4順位動作なのか3順位動作なのか



4-level system



3-level system

# レーザー増幅器のモデル

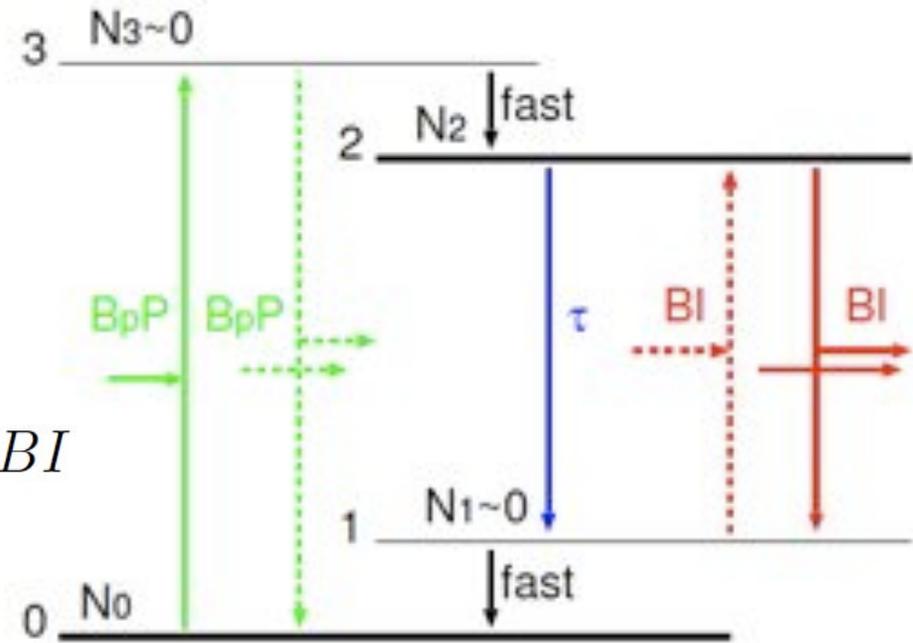
- 理想的な4準位モデルを仮定
- 定常状態のレート方程式から、励起光と信号光のファイバに沿った方程式が得られる。
- この系は4つのパラメータ、 $A$ ,  $G$ ,  $P_s$ ,  $I_s$  で表される。特性試験でこれらを決める。

原子数の保存  $N_0(z) + N_2(z) = N$

レート方程式  $\frac{dN_2}{dt} = N_0 B_p P - \frac{N_2}{\tau} - N_2 B I$

励起光の吸収  $\frac{dP(z)}{dz} = -\alpha N_0(z) B_p P(z)$

信号光の増幅  $\frac{dI(z)}{dz} = \gamma N_2(z) B I(z)$



結果として、

励起光の伝搬方程式

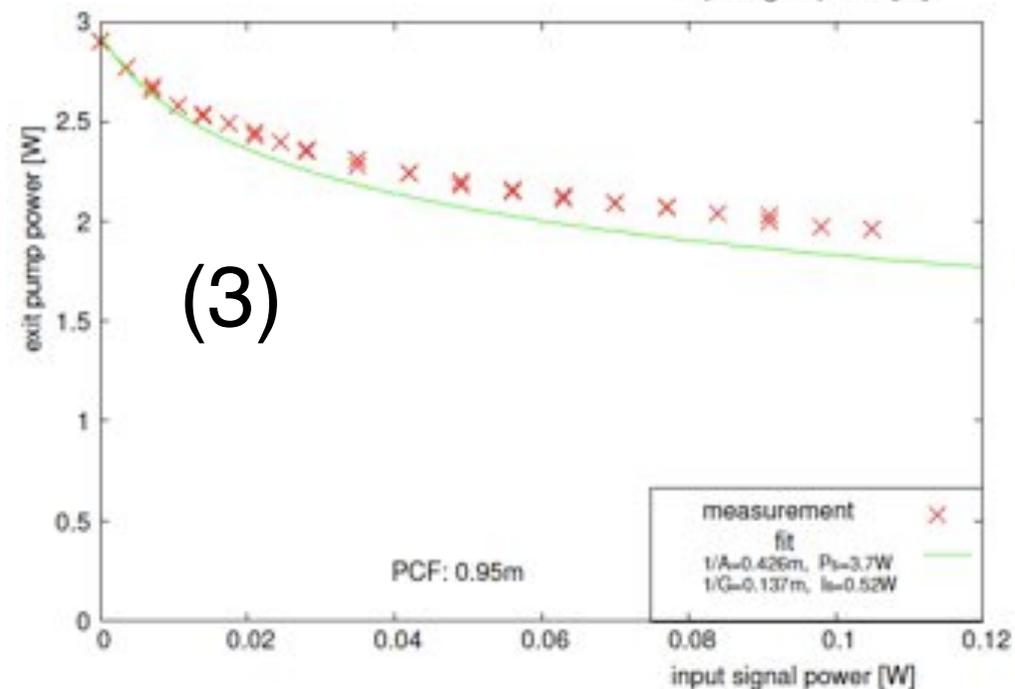
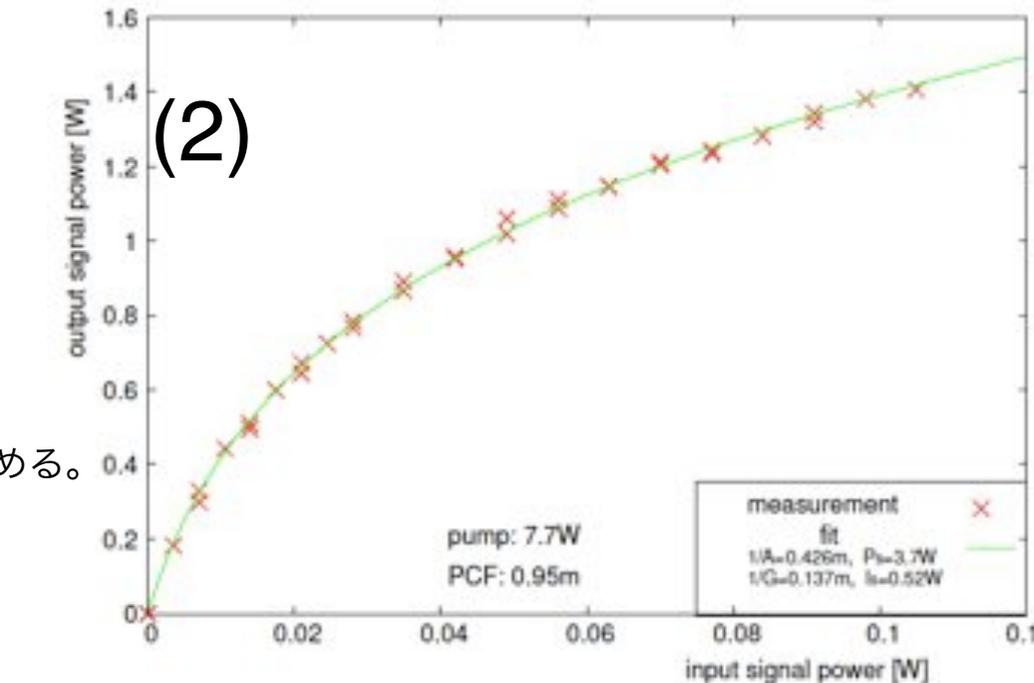
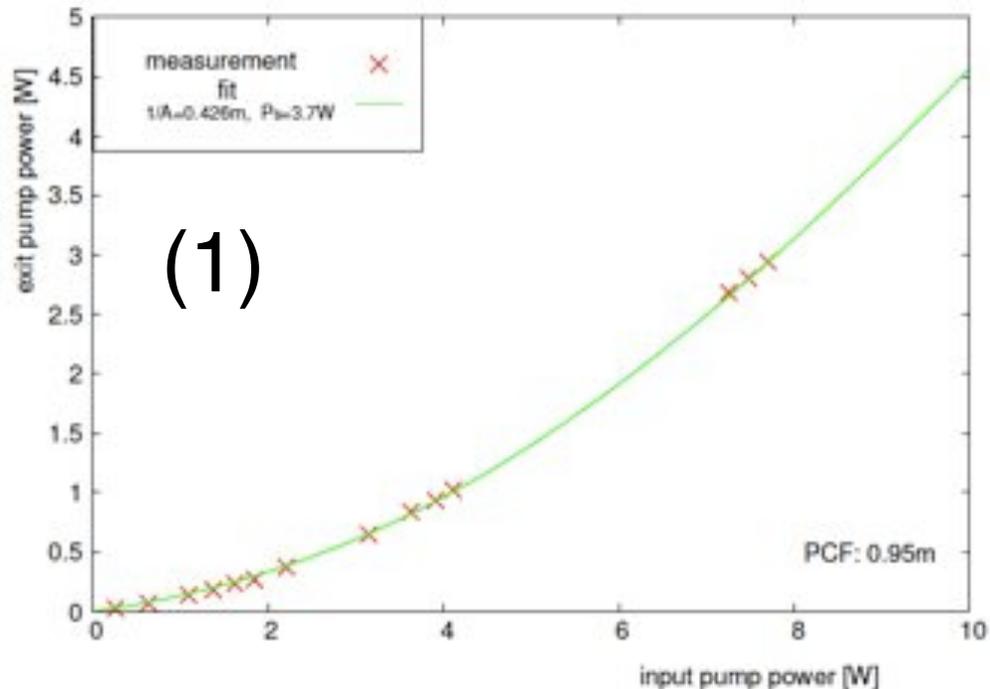
$$\frac{dP(z)}{dz} = -A \frac{1 + I(z)/I_s}{1 + P(z)/P_s + I(z)/I_s} P(z)$$

信号光の伝搬方程式

$$\frac{dI(z)}{dz} = G \frac{P(z)/P_0}{1 + P(z)/P_s + I(z)/I_s} I(z)$$

# 基礎実験からパラメータを決める

- 低出力試験で特性を決める
  - 励起光は余裕をもって入射。条件も良く分かっている。
  - PCFは0.95m
- 3組の依存性測定結果
  - 信号光無しで、励起光の吸収の強度依存性(1)
  - 励起一定(7.7W)で、信号光強度依存性
    - 信号出力(2)
    - 透過励起強度(3)
- これらを4準位モデルでフィットし、4つのパラメータを決める。
- まあまあ合っているので、モデルは良さそう。
  - 5自由度を4パラメータで合わせている。
  - 3準位モデルでは合わない。



# 高出力での動作の予想

- 低出力での基礎実験からきめたモデルのパラメータで、励起光が大きいときの動作を予想した。
- $1/A=0.43\text{m}$ ,  $P_s=3.7\text{W}$ ,  $1/G=0.14\text{m}$ ,  $I_s=0.52\text{W}$ 。
- 励起25Wなら、入力が小さくても信号出力5Wは行ける(プリアンプ2段目)
- 励起80Wなら、30Wくらいまでは行けそう。(メインアンプ)
- モデルのパラメータは信号光の波長に依存する。(ここでのモデルは1064nm。当然、1030nmではよりゲインが高い。)

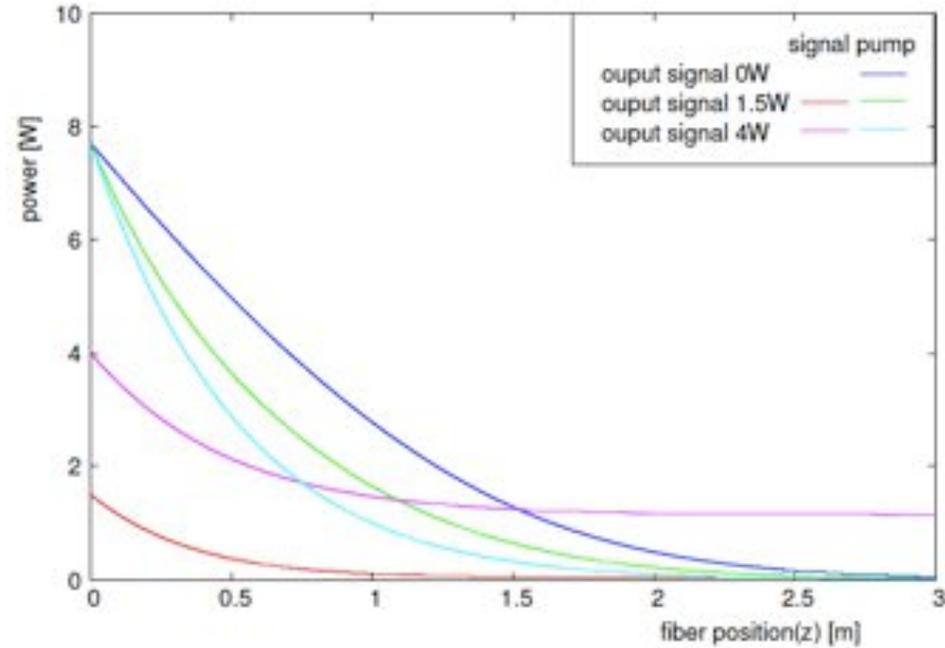
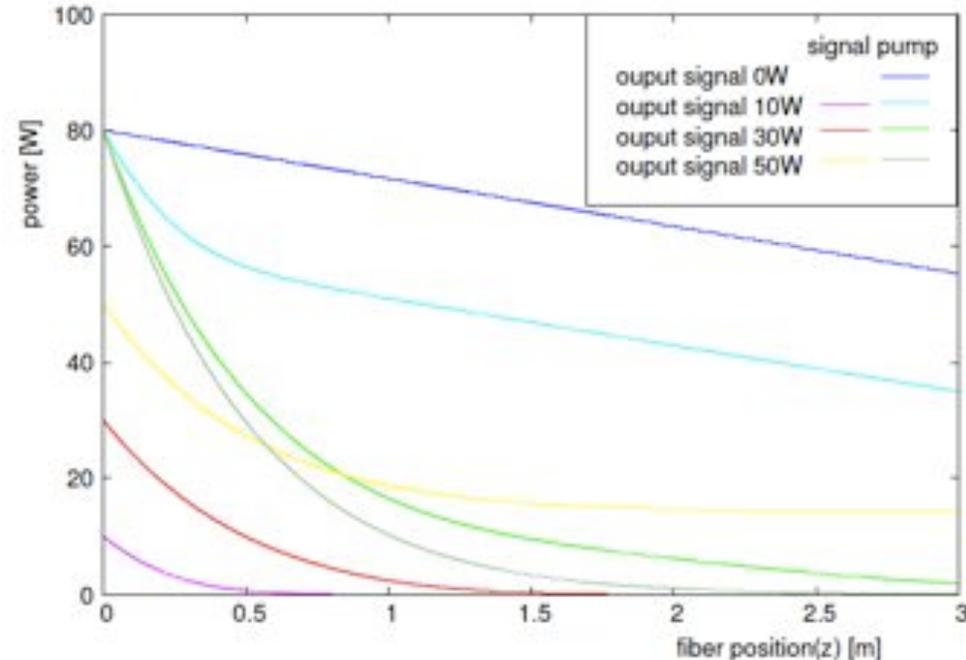
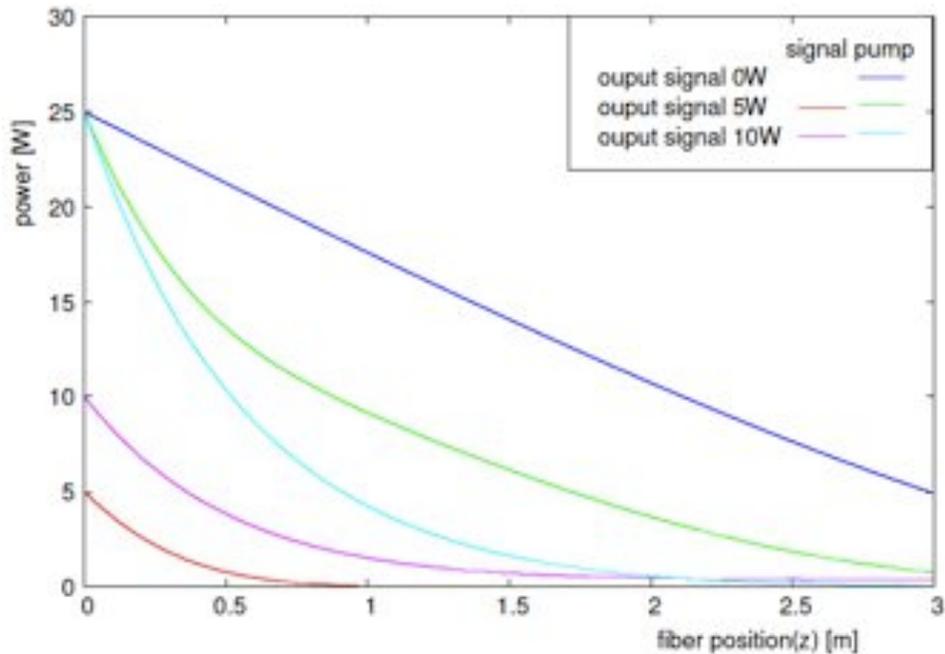
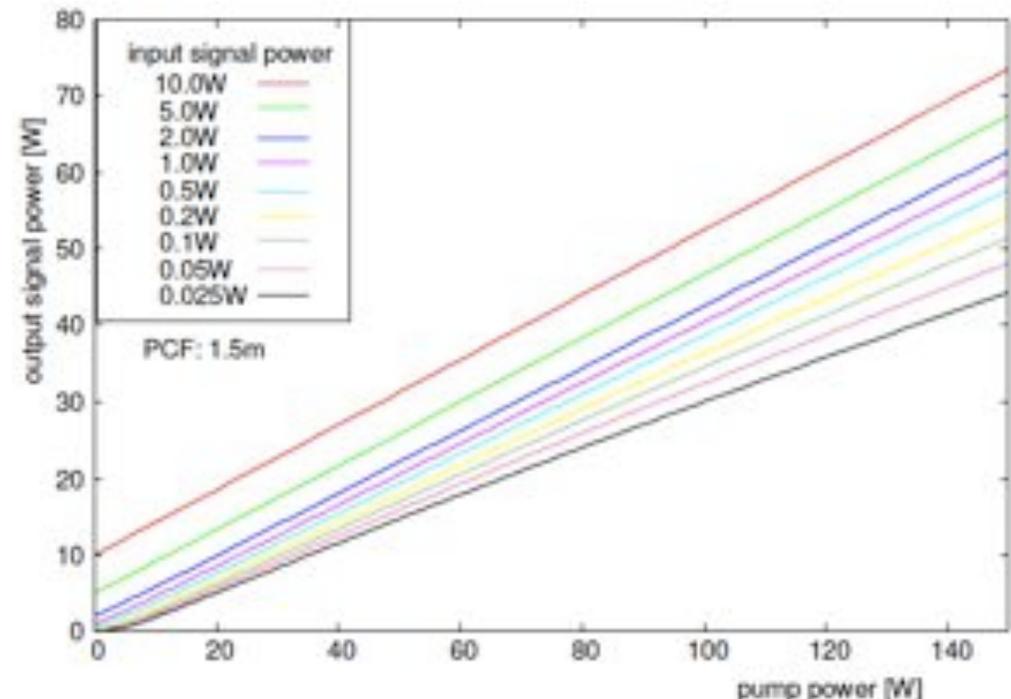
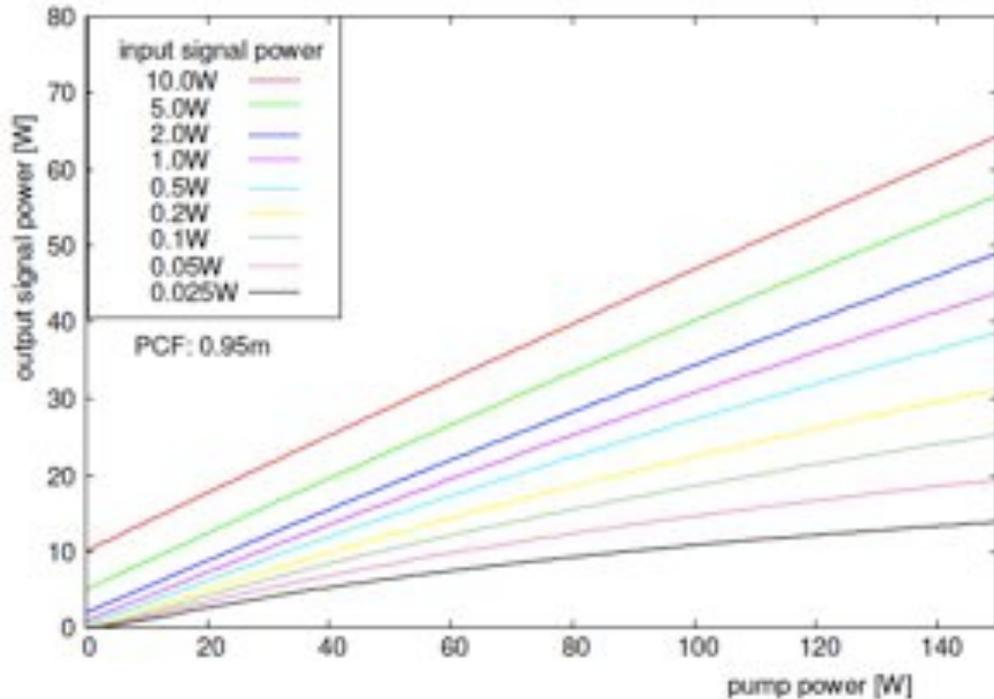
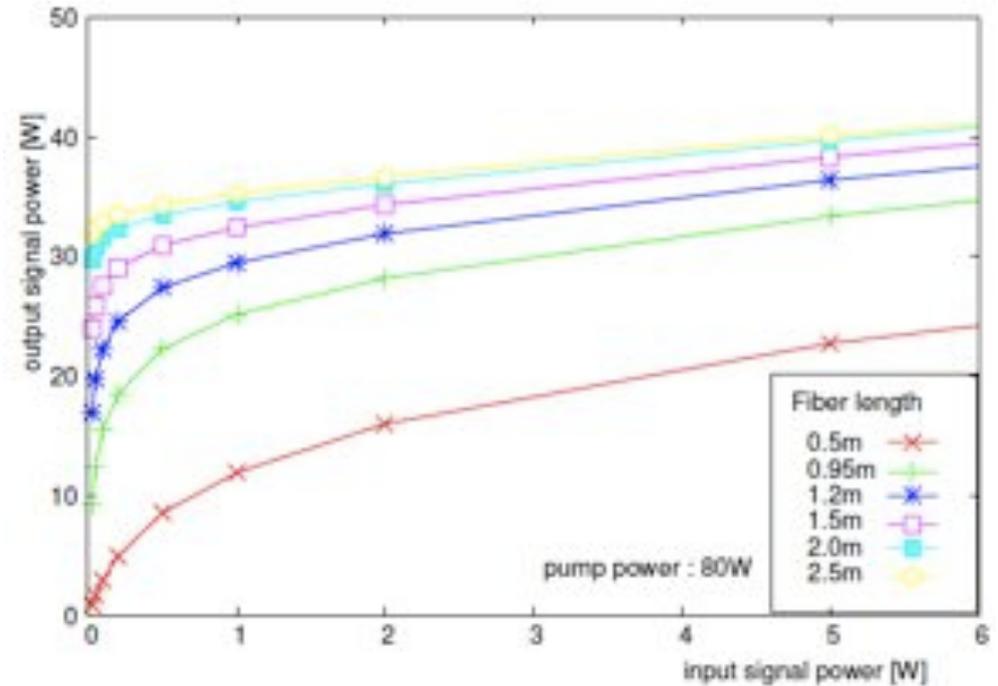


図 5: 励起光と信号光の分布 (励起 7.7W の場合)



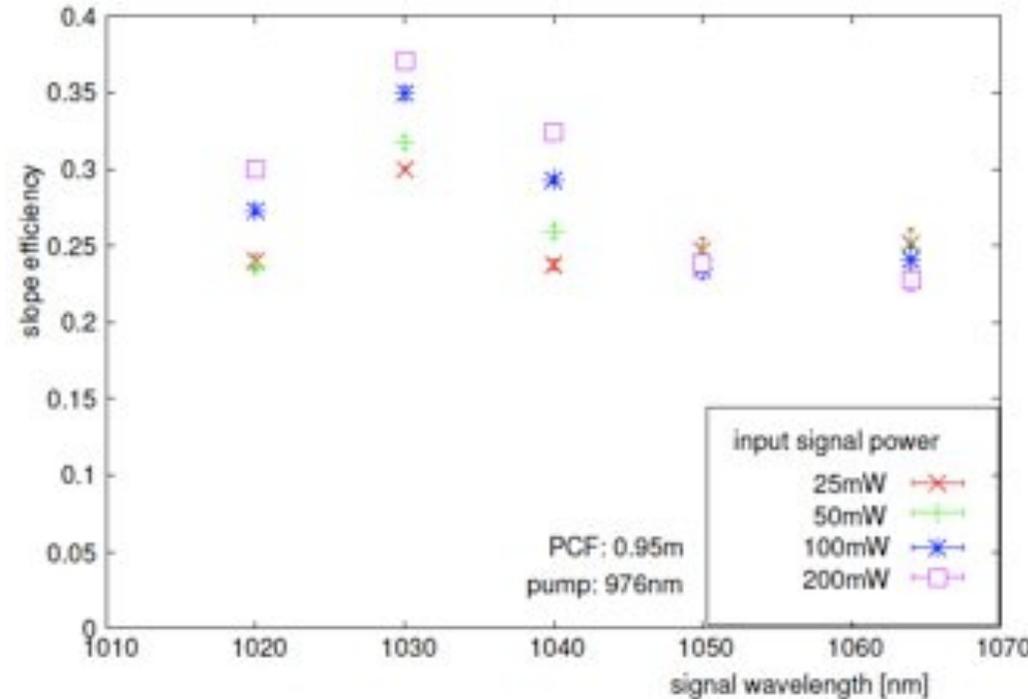
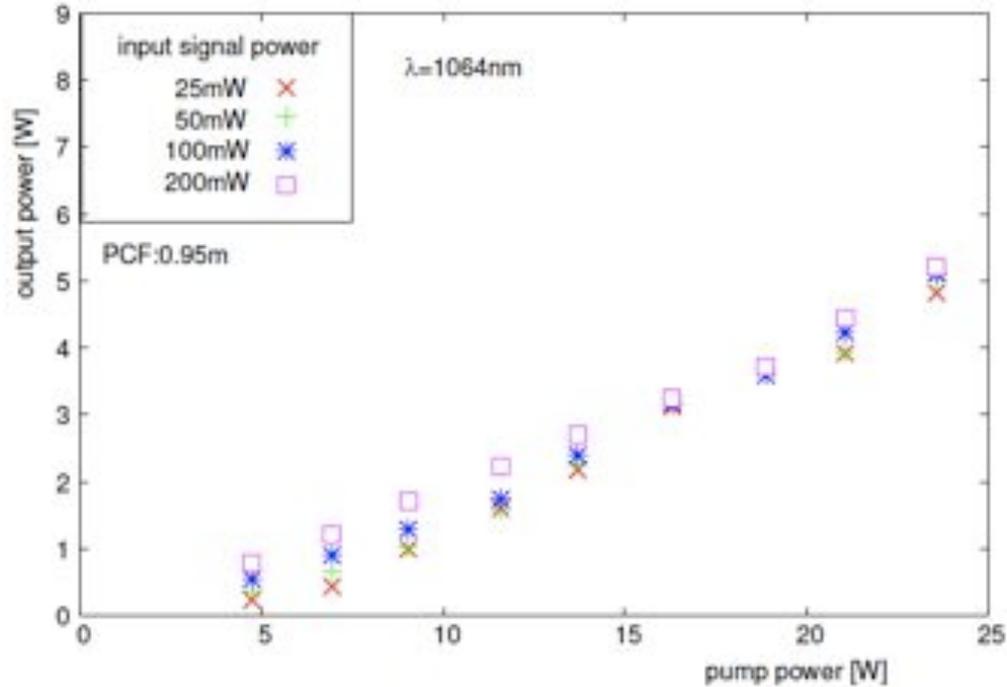
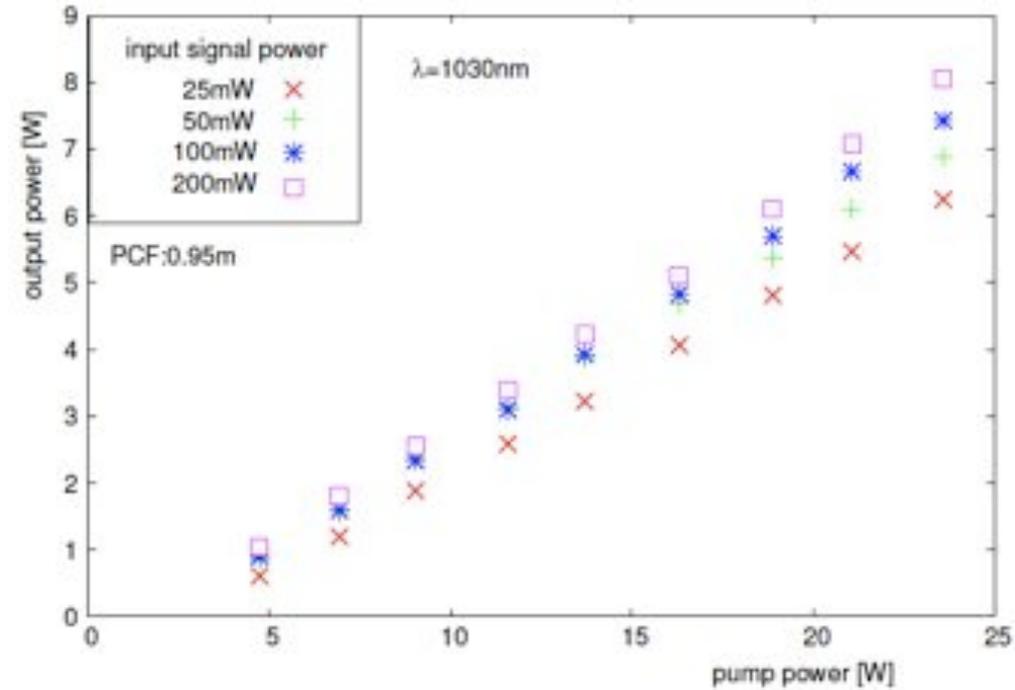
# 高出力での動作の予想

- ファイバ長が異なるときの、励起光vs出力の計算。
- ファイバ長0.95mだと励起光が十分吸収されないため、入力パワーが低いと飽和に達しない。
- 最適化
  - ファイバ1.5m(無駄に長くしても非線形性が問題)
  - 入力信号1W以上(プリアンプが必要)
  - で、30W, スロープ効率40%が得られる。
- より高出力を高効率で得るには、励起光吸収率の高いファイバが必要。



# 波長依存性

- 産総研では1035nmで試験してきた。cERLでは1064nmなので少し損。波長による違いを測定した。
- 励起24Wのとき、
  - 波長1030nmで8W(スロープ効率37%)
  - 波長1064nmで5W(スロープ効率24%)
  - 1.5倍くらい不利ではある。
- Ybの自然放出増幅光(ASE)が1030nmを中心に発生し、より高いゲインで成長するので、それとの競争に勝つ為にも、1064nmの信号光は高い入力強度が必要。

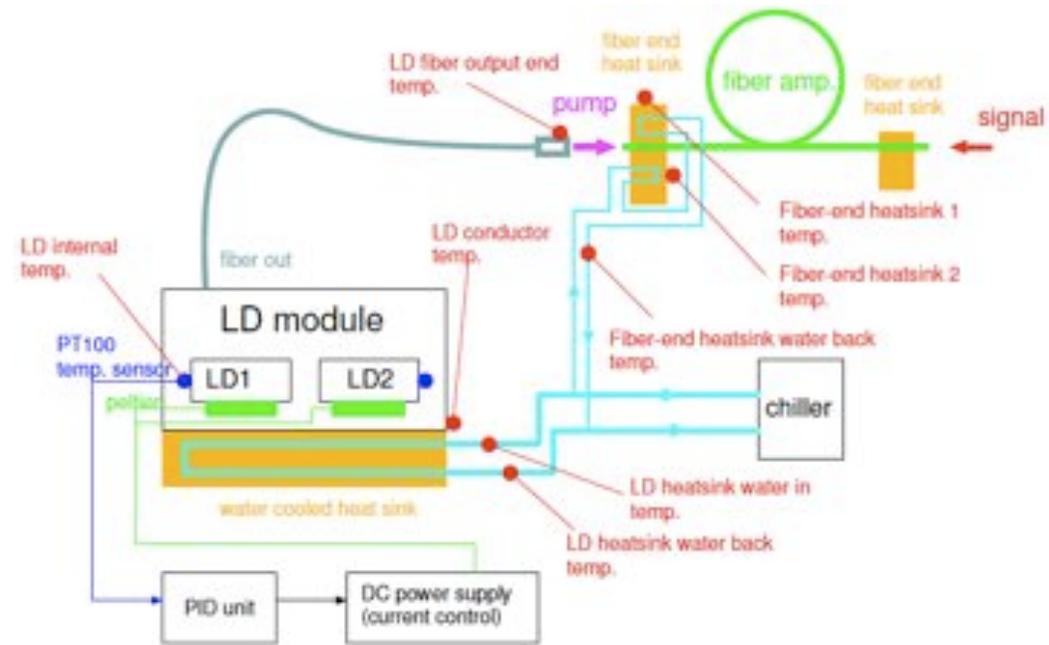


# 高出力試験

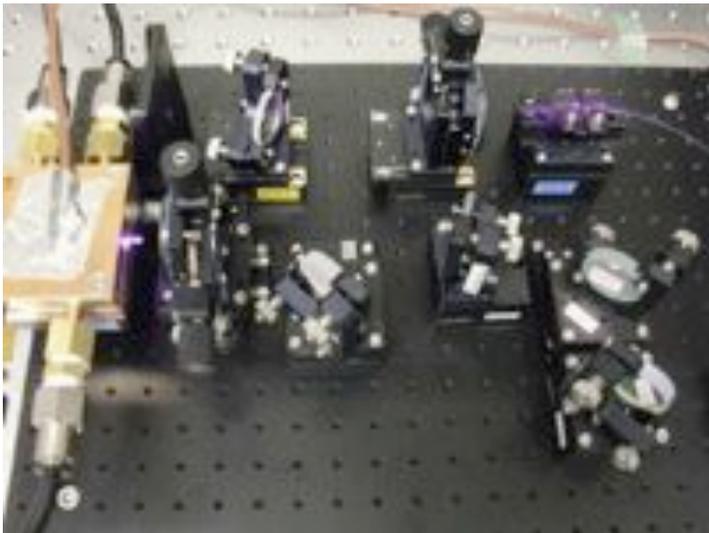
- 実際に高出力のテスト
- 熱的な対策、安定性など
- ビーム品質のチェック

# 高出力試験のセットアップ

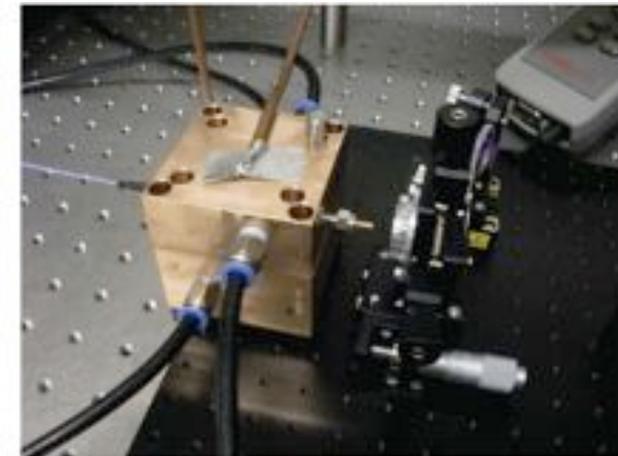
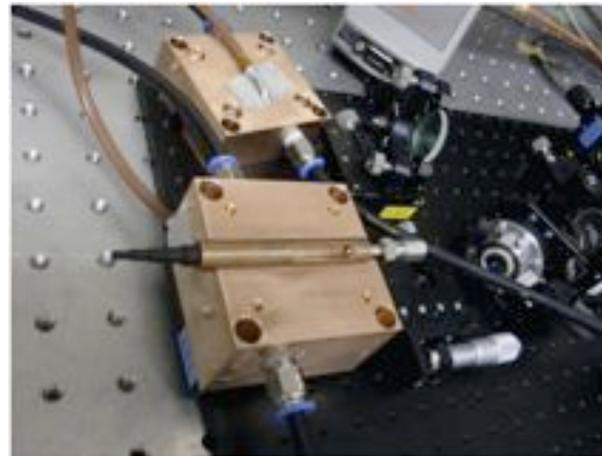
- PCFは1.5mのものに交換
- 高出力の際は、励起光導入のファイバ端部を除熱する。
  - 高出力用SMA905コネクタ(モードストリッパ)
  - ファイバ両端は、水冷ヒートシンクでサンドイッチ
- 励起LDも80Wまでのものに交換
  - 内蔵ペルチェ温調と水冷ヒートシンク



低出力のとき

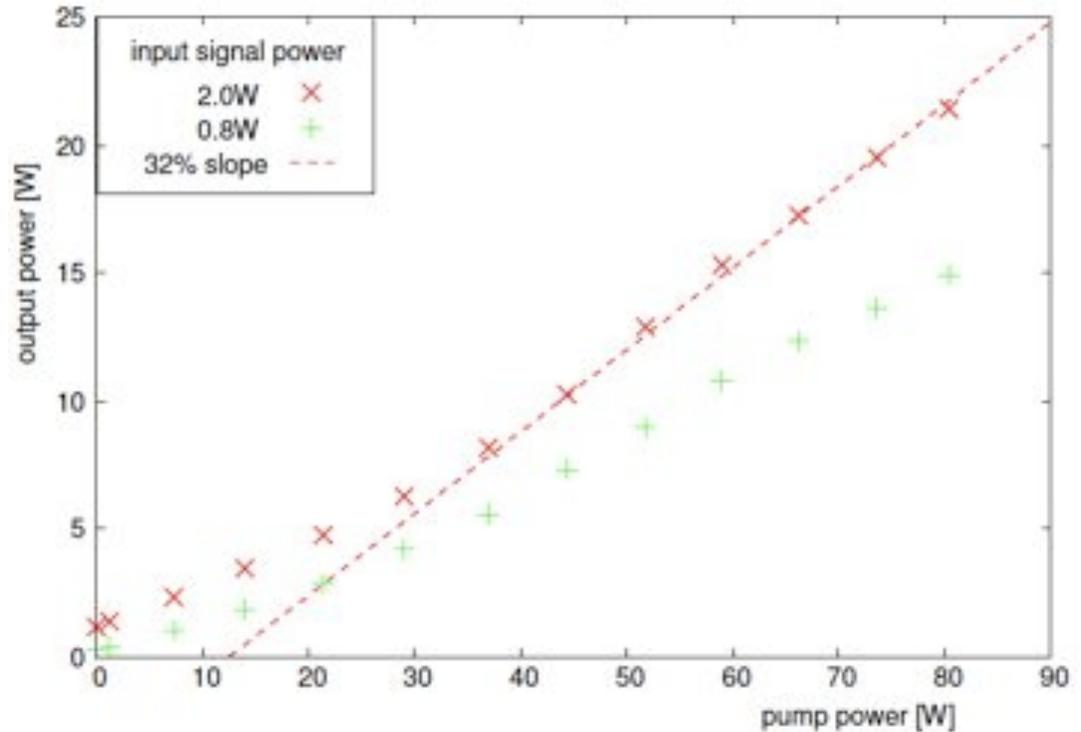


高出力のとき



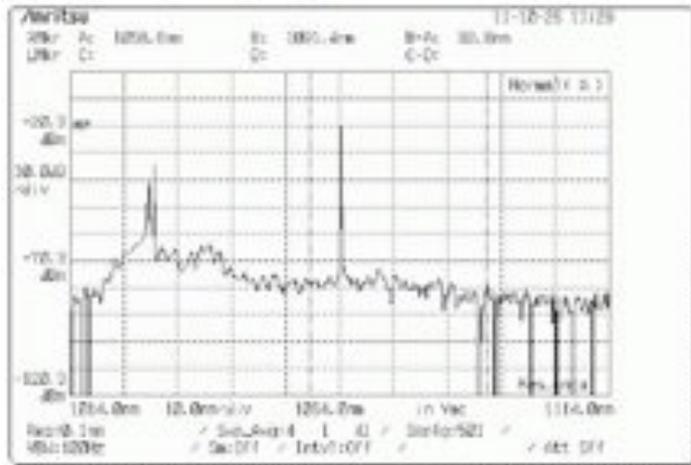
# 高出力試験

- PCF0.95mのとき
- 80Wの励起で、21.4Wが得られた。ほぼ計算どおり。
- 入力信号強度依存性が高い。
- 入力が弱いとASEに負ける。効率も落ちる。



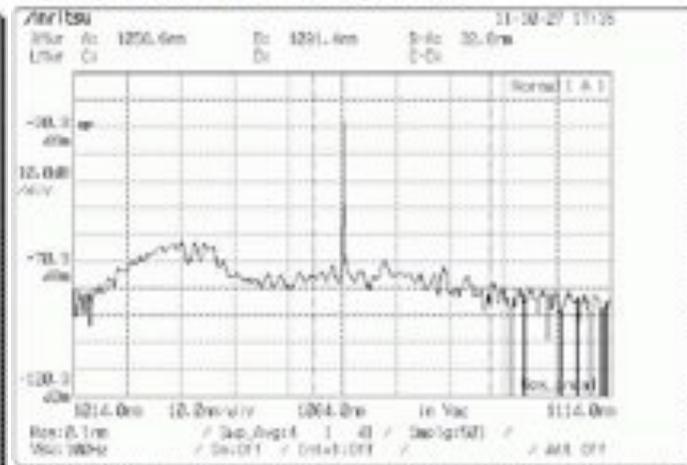
0.2W input

pump 30A (35.3W), output 6.4W



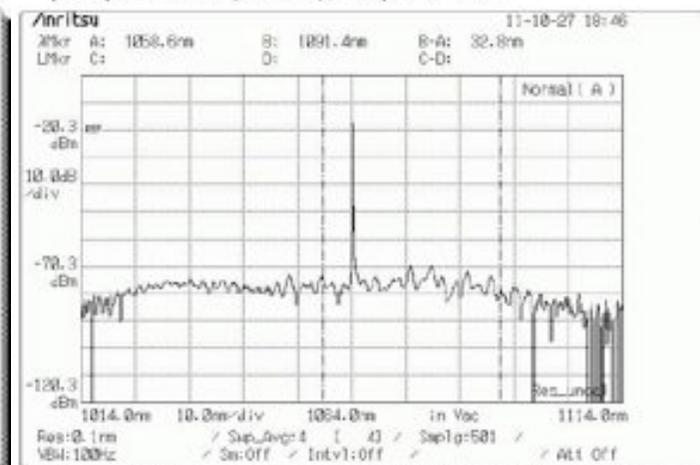
0.8W input

pump LD 60A (80.4W), output 14.9W



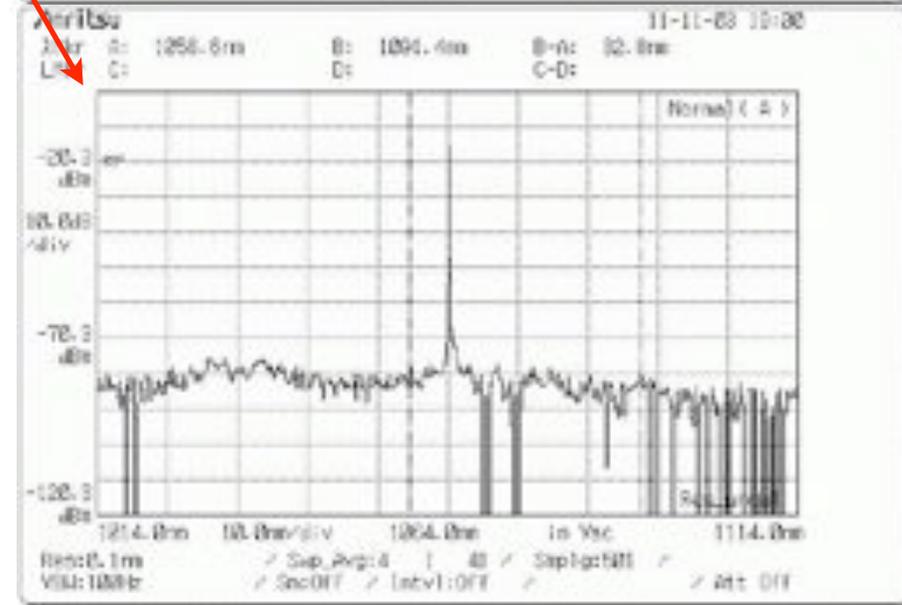
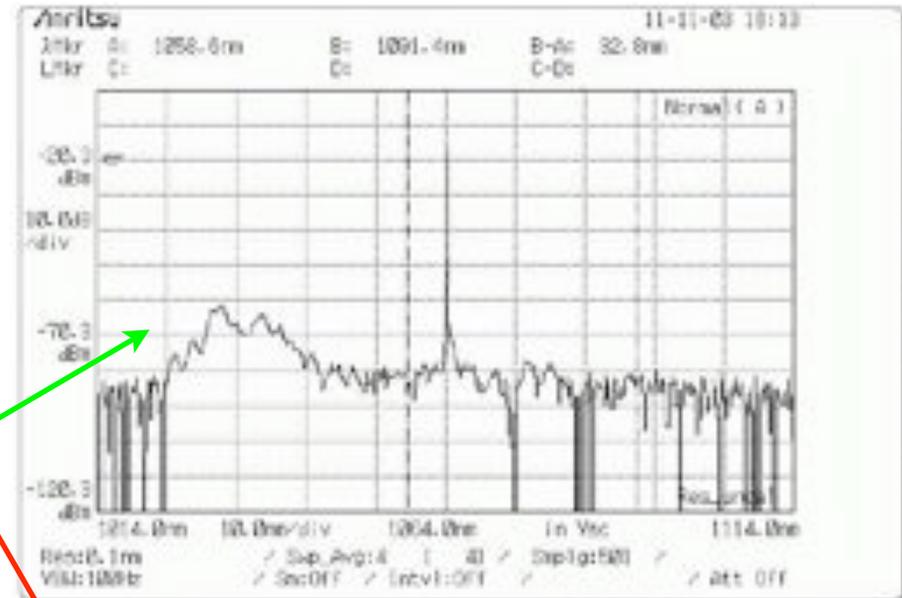
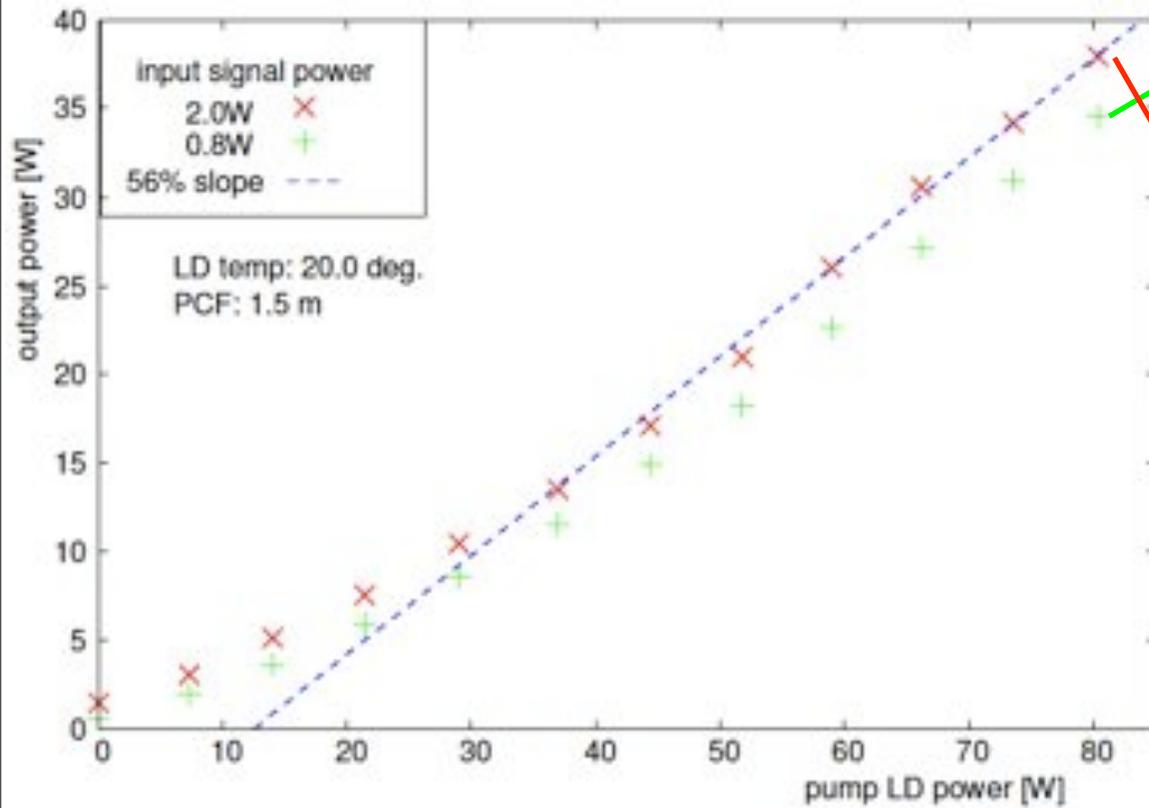
2W input

pump LD 60A (80.4W), output 21.4W



# 高出力試験

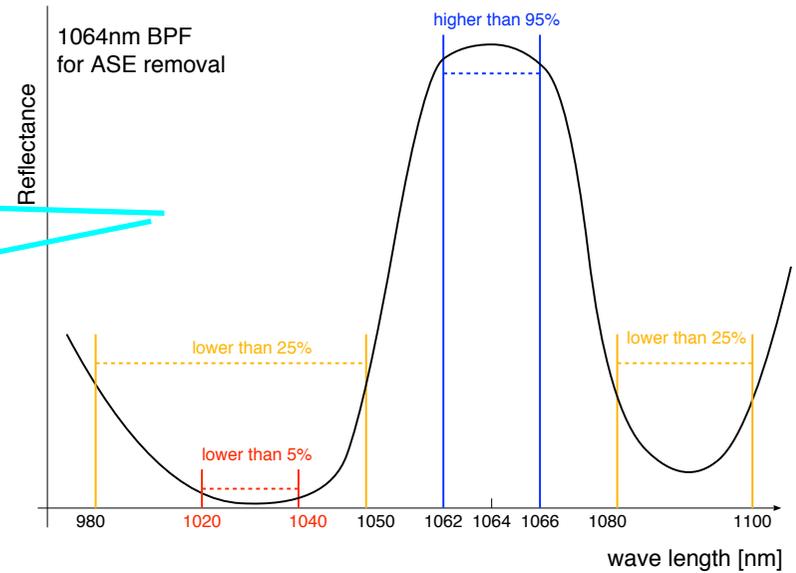
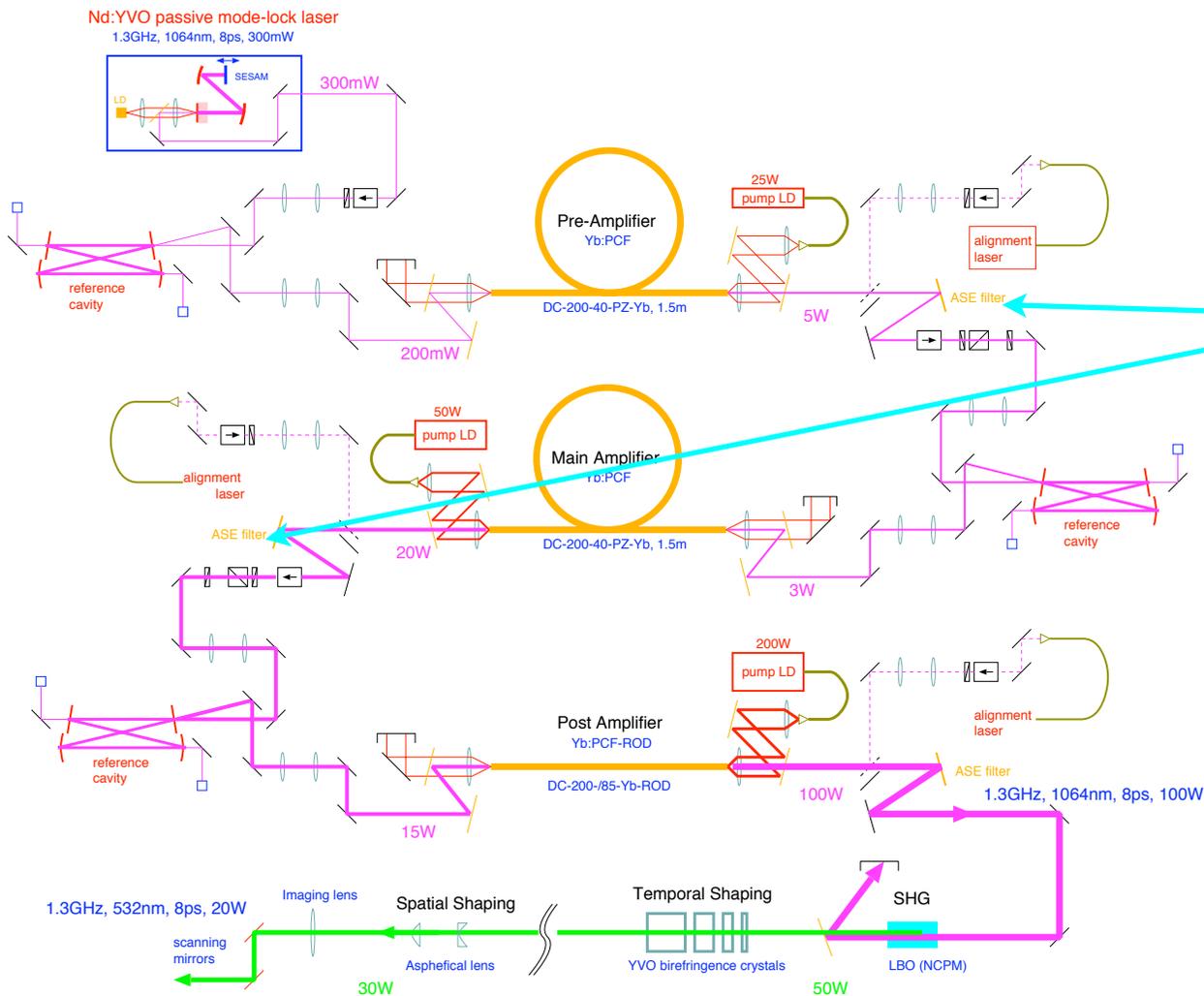
- PCF1.5mの場合
- 80Wの励起光で37Wを出力できた。
- 入力信号強度が~W以上ないと、ASEノイズが発振してしまう。
- WクラスのプリアンプとASE除去フィルタが必須。





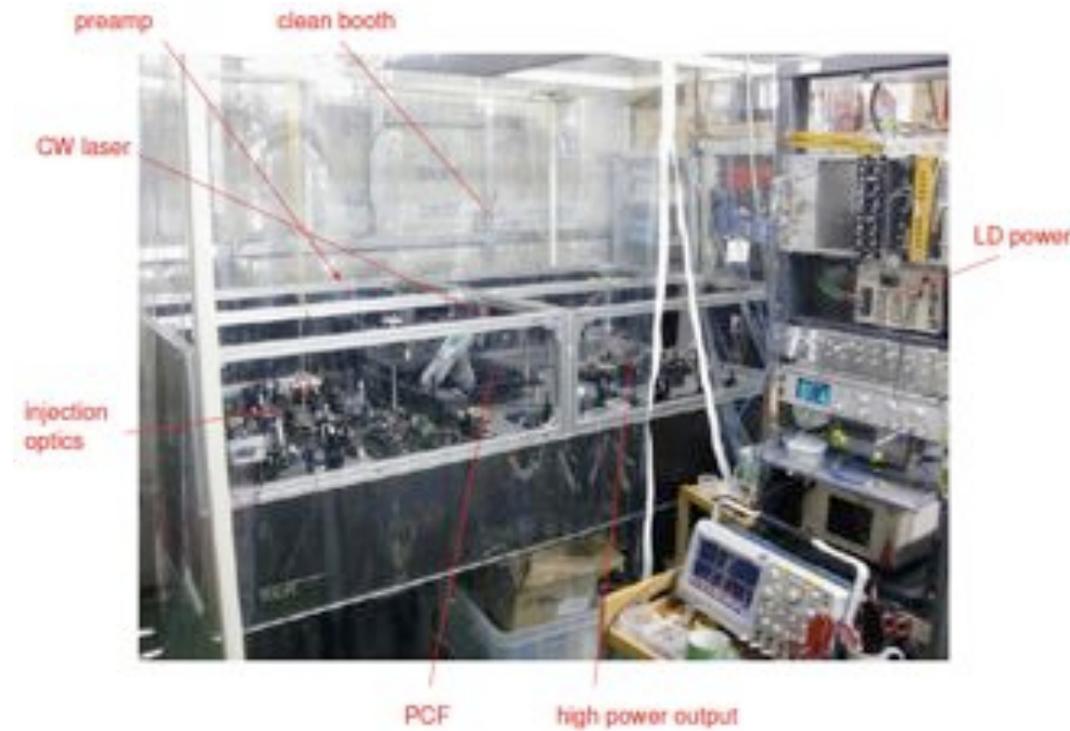
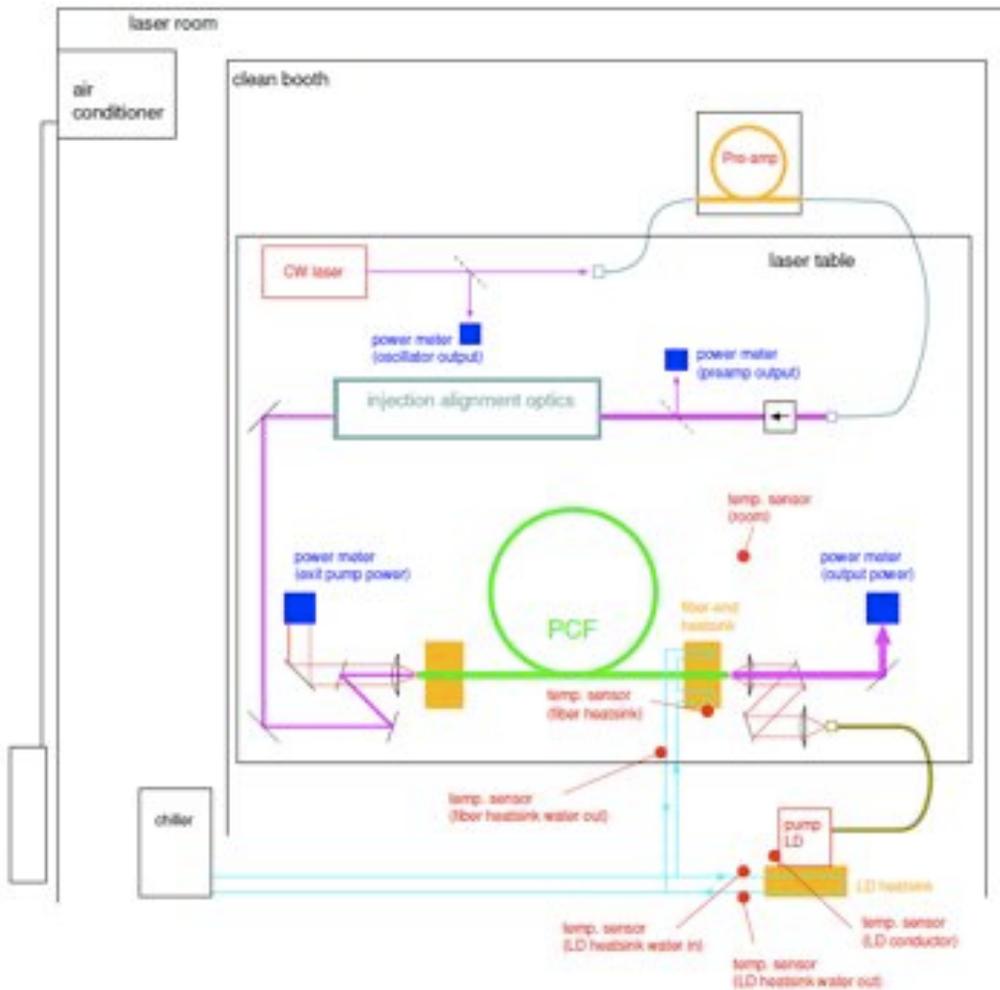
# 1064nmで必要な対策

- メインアンプでは~W以上の入力が必要なので、プリアンプ必須。
- 増幅を多段化し、ASEを除去するフィルタを導入



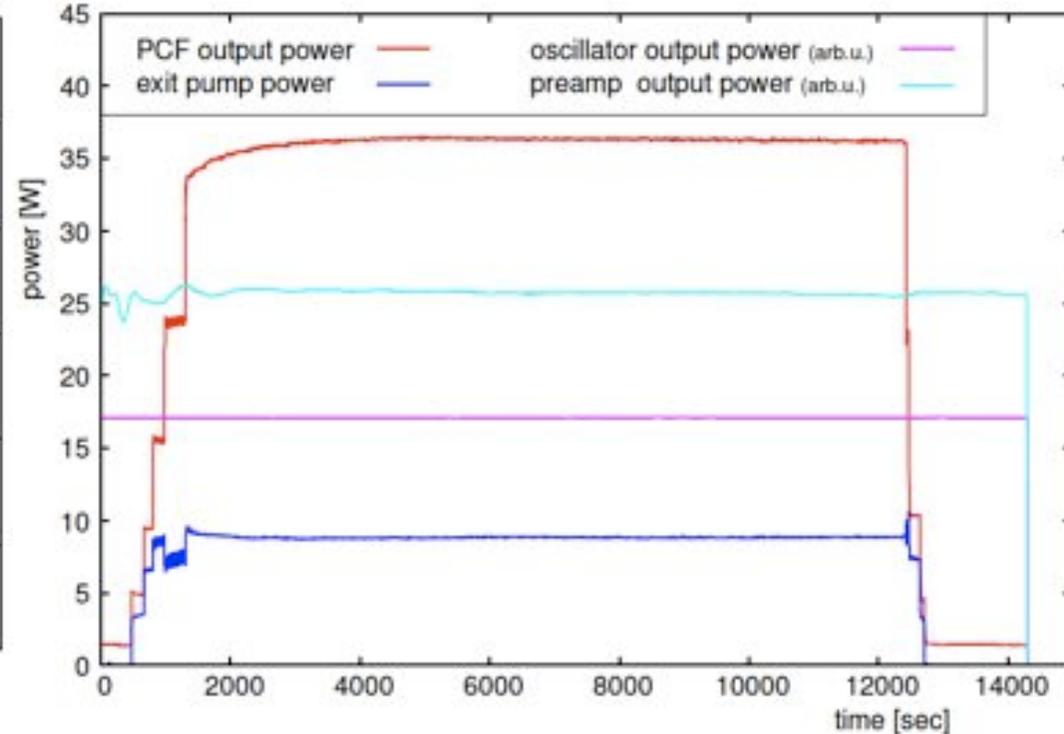
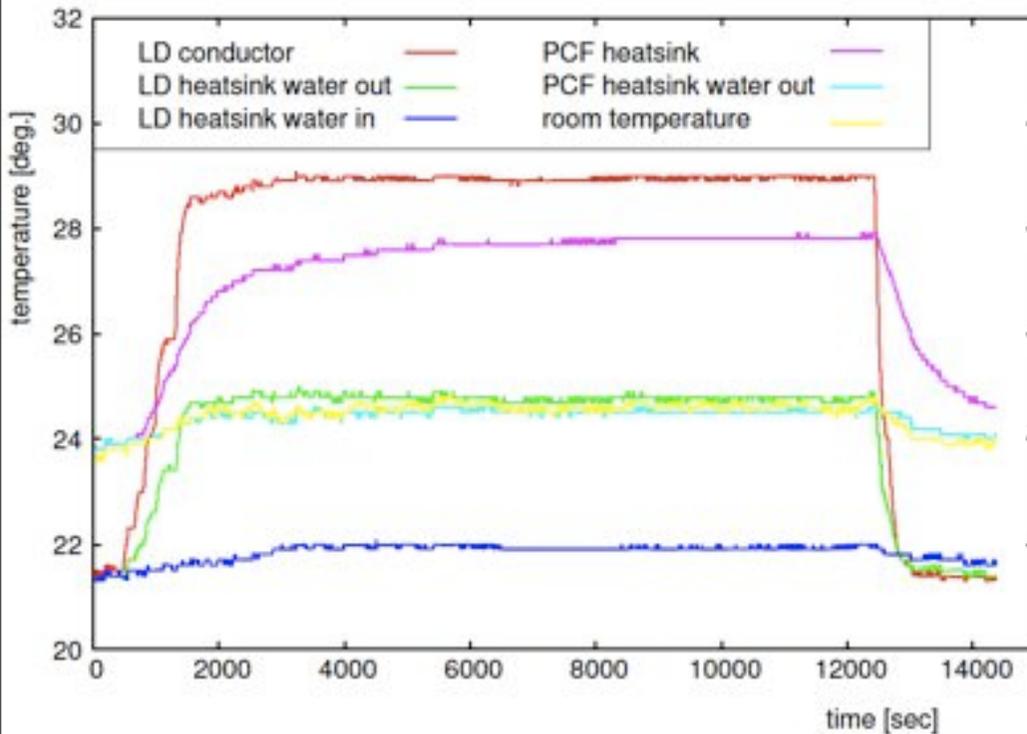
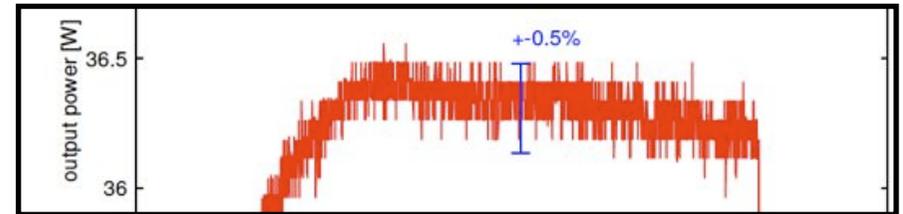
# 安定性試験

- 環境
  - 家庭用エアコンの部屋に、クリーンブースで囲ってある状態
  - LDとファイバ端はチラーで水冷
  - 数時間放置している状態では0.1度程度で温度は安定。



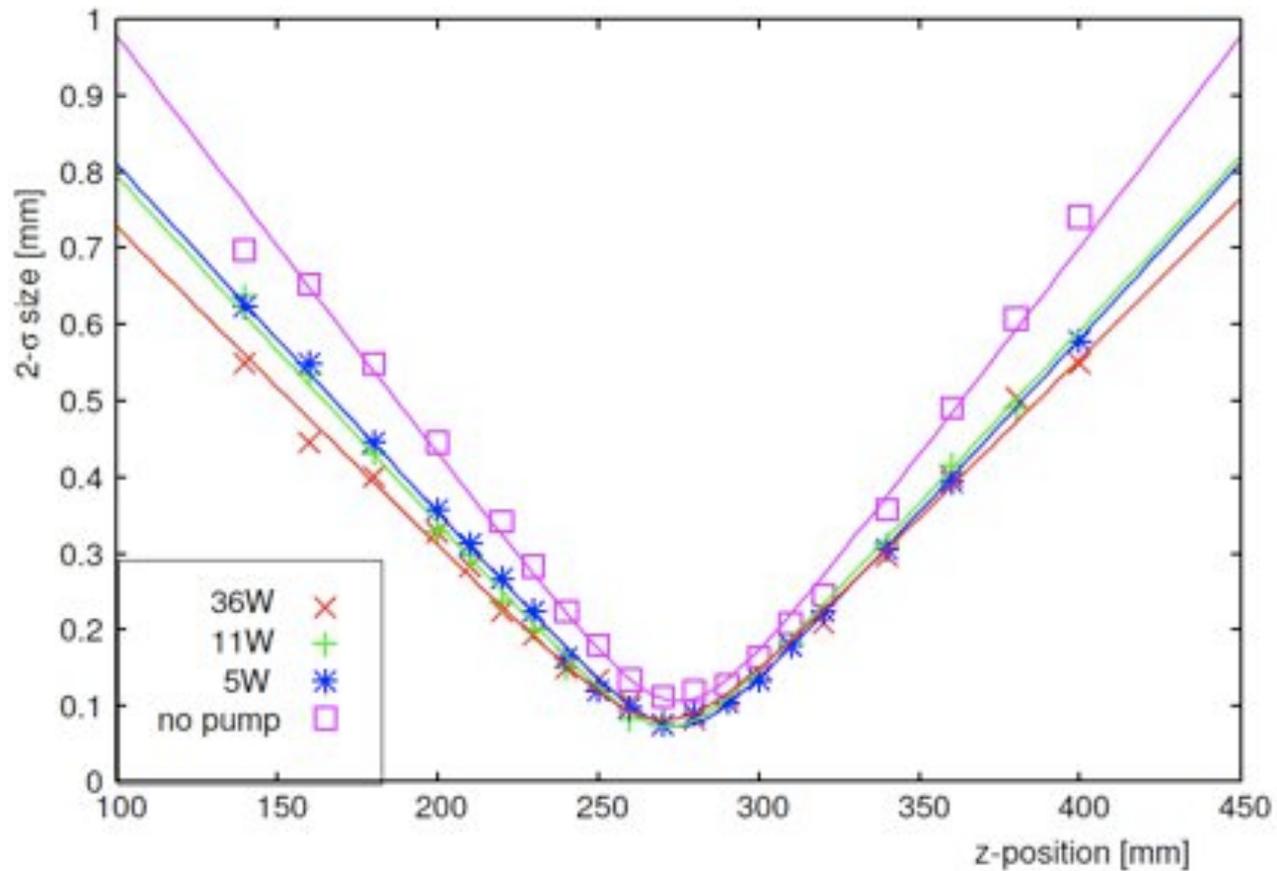
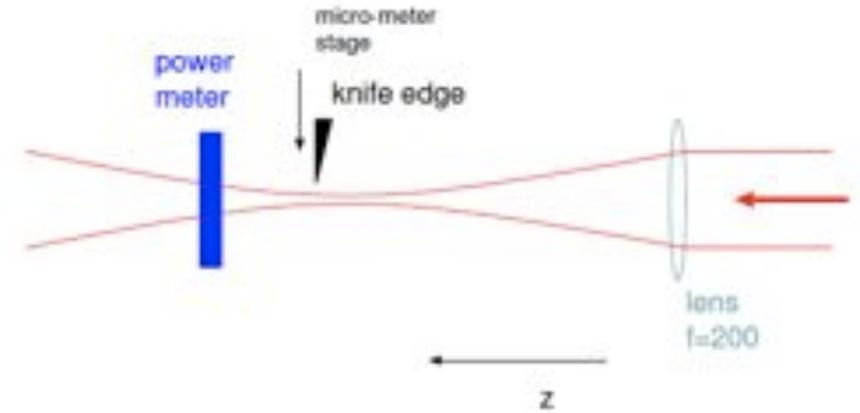
# 安定性試験

- 35W以上を出して3時間の連続試験。
- 熱負荷で損傷していくようなことは無い。
- 定常状態になってからは、 $\pm 0.5\%$ の安定度 (室温の安定性に依存)。



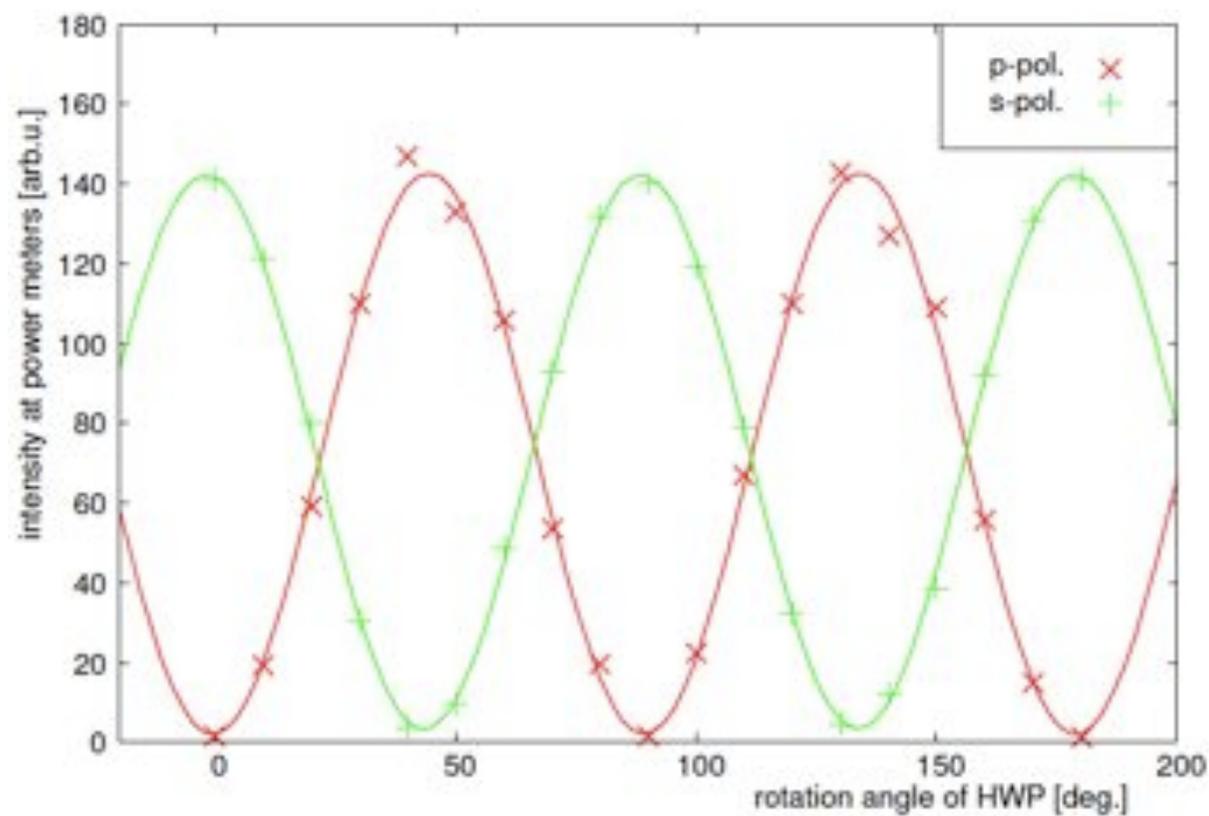
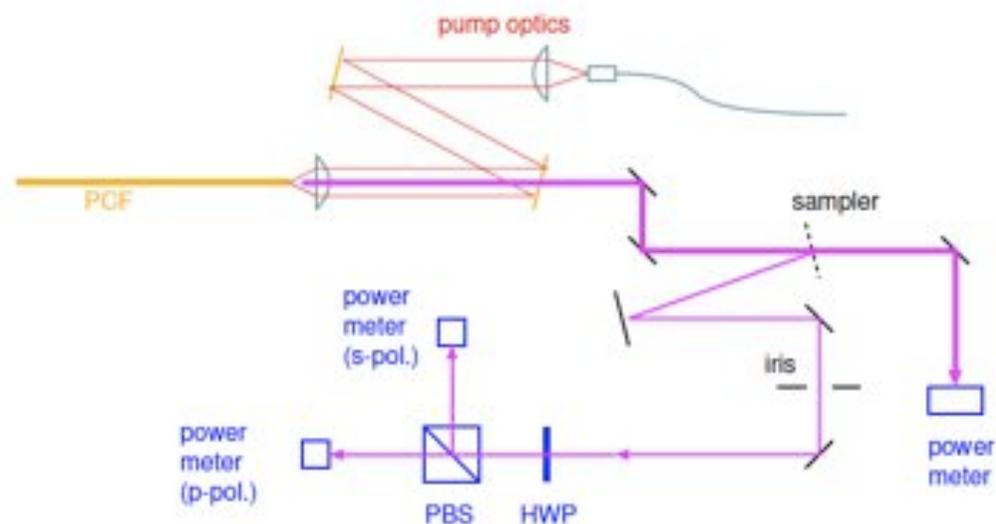
# 増幅光の横モード品質

- 36W増幅時でも、 $M^2=1.0\pm 0.1$
- ほぼ理想的なシングル横モードビームであることを確認



# 増幅光の偏光度

- 95%以上の直線偏光
- 偏光方向はパワーに依らず安定



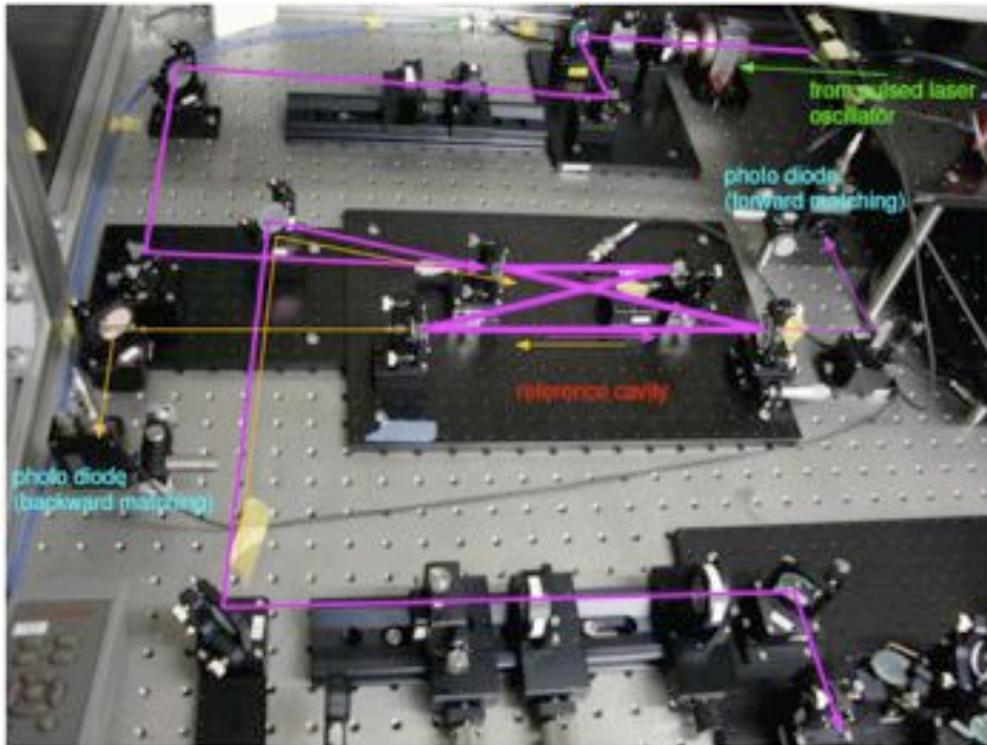
# パルスレーザーでの試験

- ピーク強度による影響
- 非線形性の効果の確認

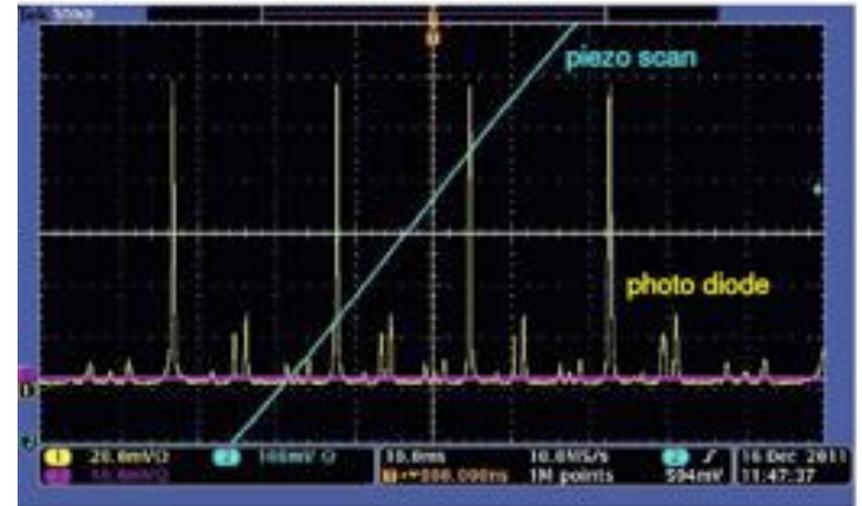


# 4枚ミラーの基準共振器

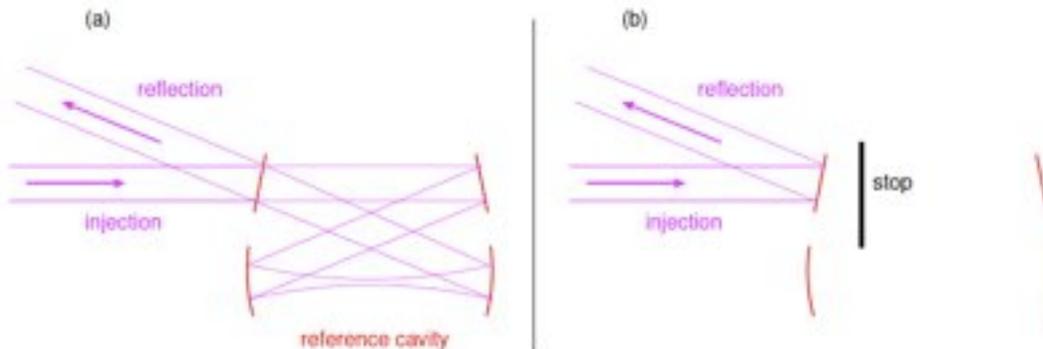
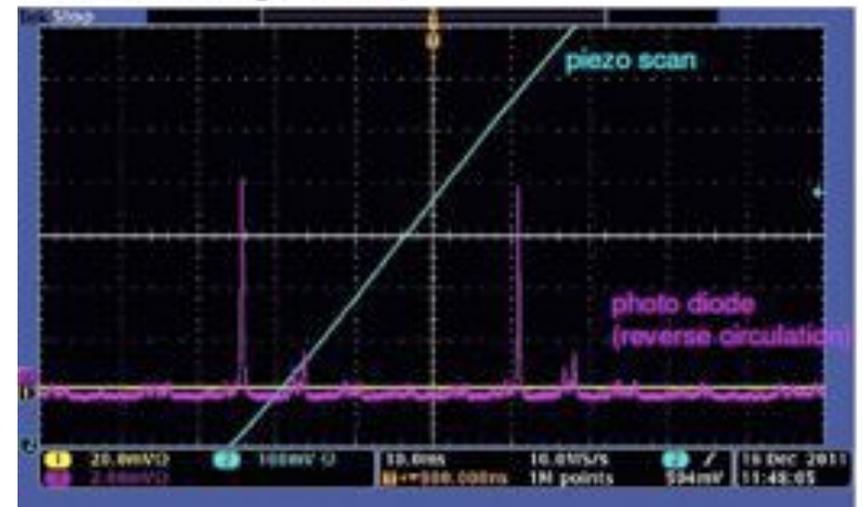
- パルス周期に周長を合わせるには、4枚ミラーが良い
- 反射が戻らないのもやりやすい



forward matching (178.5MHz pulsed laser)

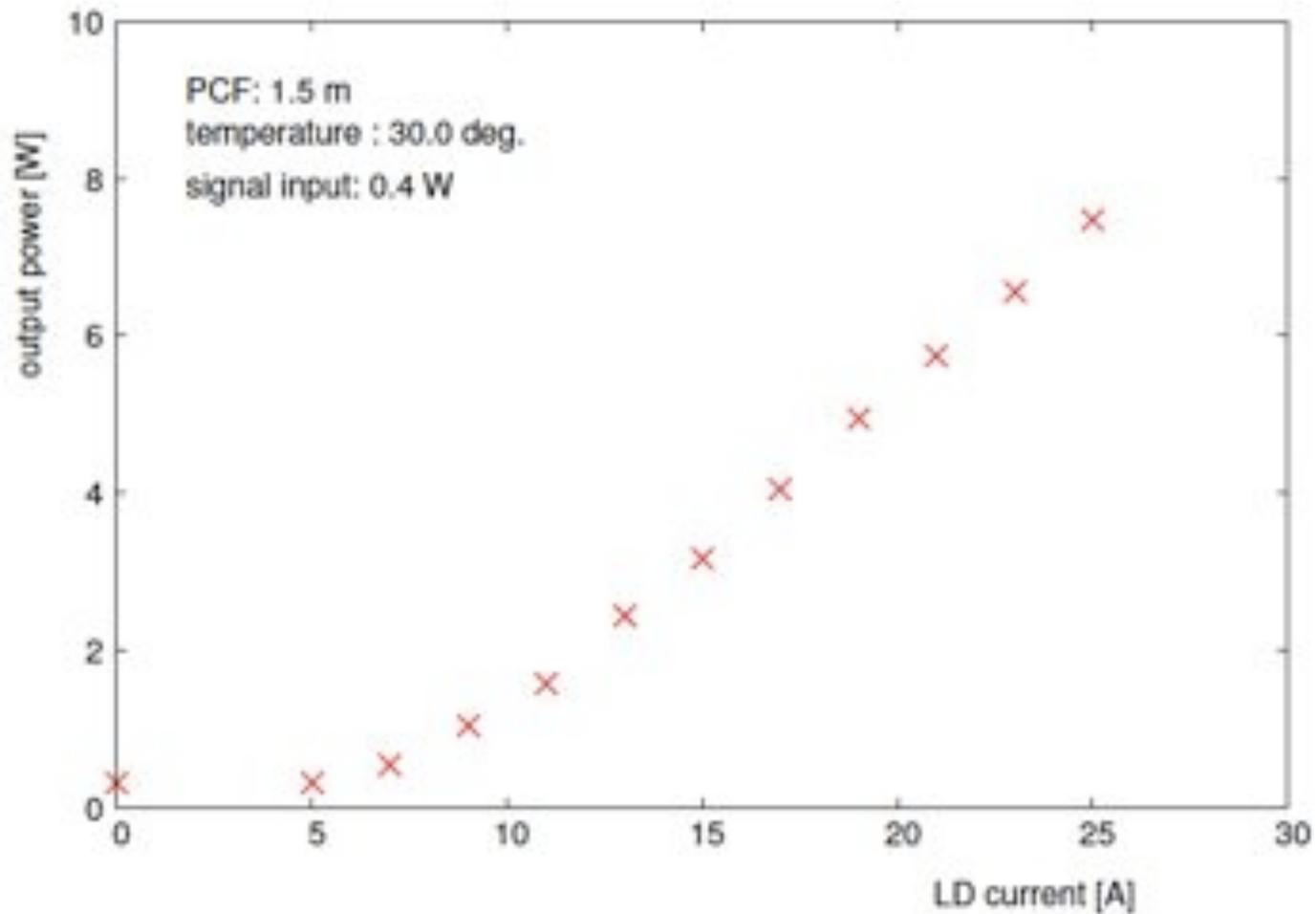


backward matching (CW laser)



# 増幅試験

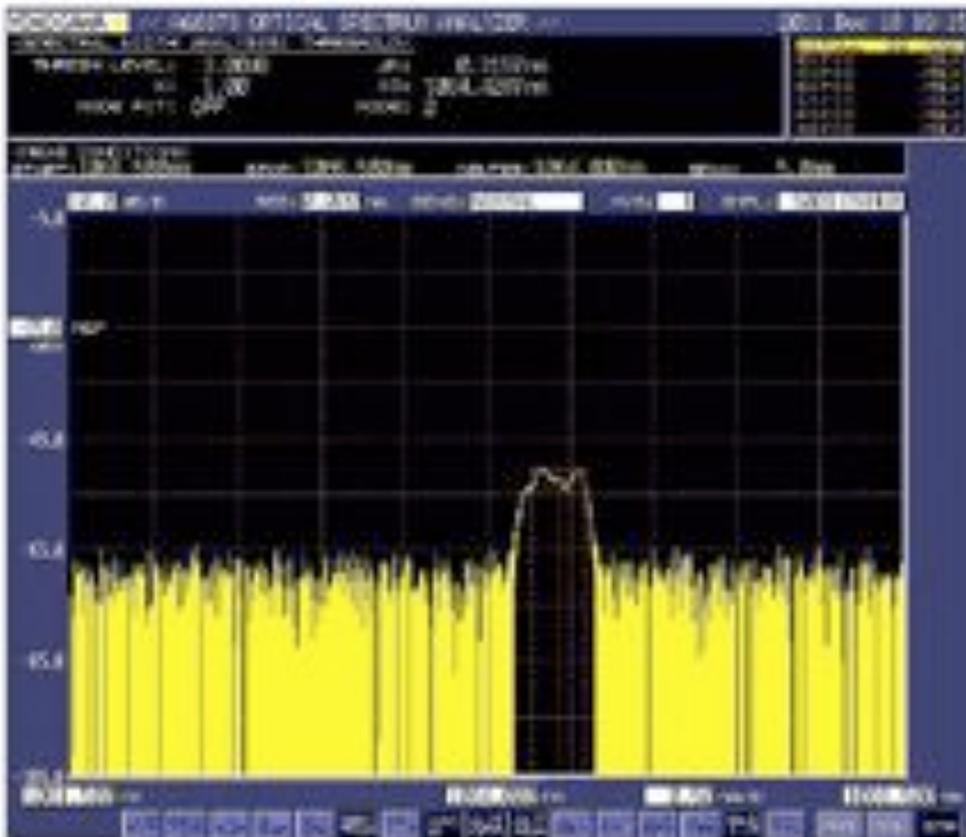
- CWのときと同様に増幅できることを確認。7Wのときで、1300MHzなら50Wに相当。
- 今は、(パルス用の)プリアンプが無いので、これ以上は上げられない。



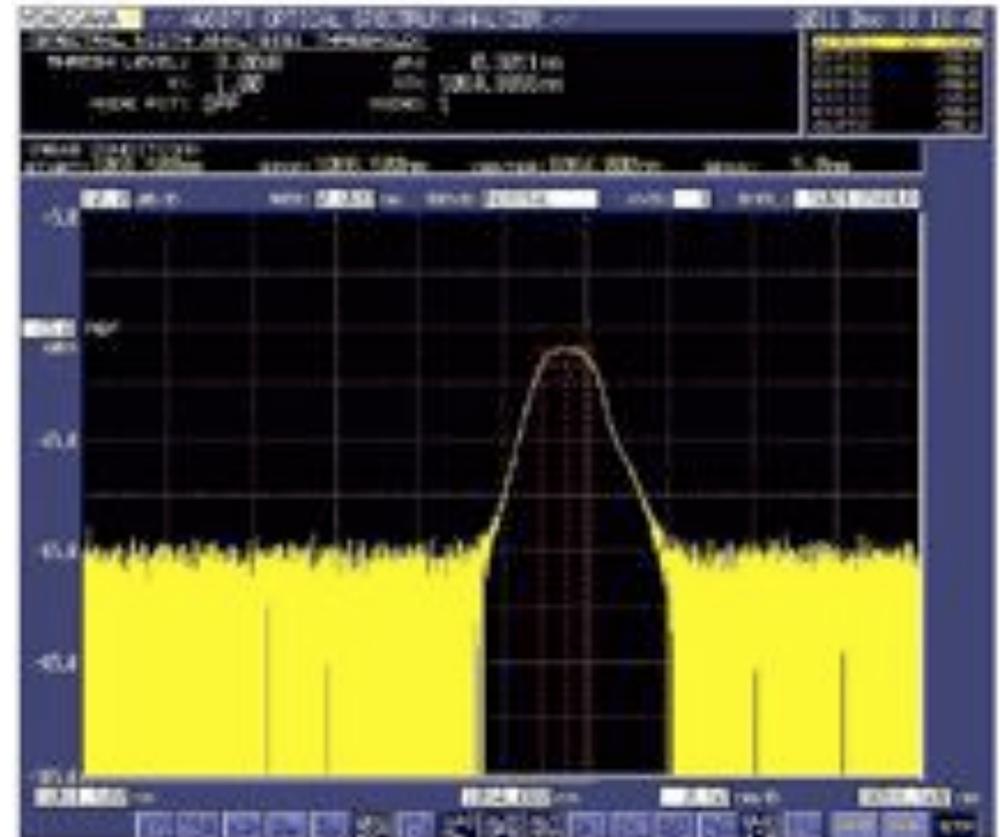
# スペクトル

- スペクトル幅、0.3nm (3dB幅)は、増幅しても顕著な変化は無いことを確認。
  - (多少丸くなっているか。)
- 自己位相変調などの非線形効果は、まだ酷くはないと期待できる。

LD current 0A (0.3W)



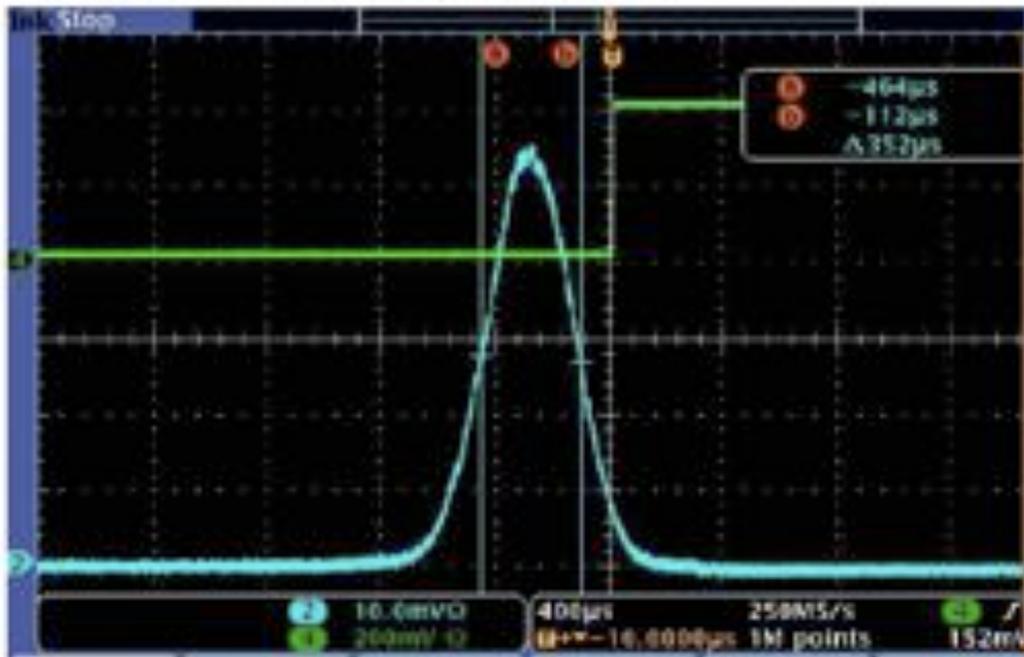
LD current 25A (7.5W)



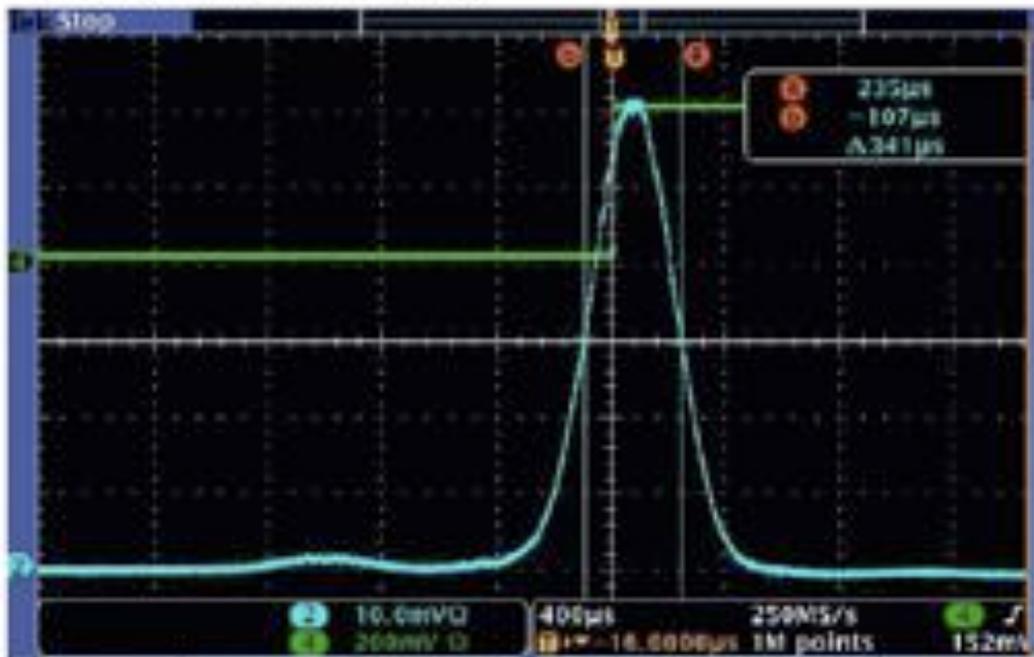
# パルス幅

- オートコリレータによる測定。
- 7.5ps(FWHM)。増幅の前後で有意な違いは無い。

Measurement at Oscillator output



LD current 25A (7.5W)



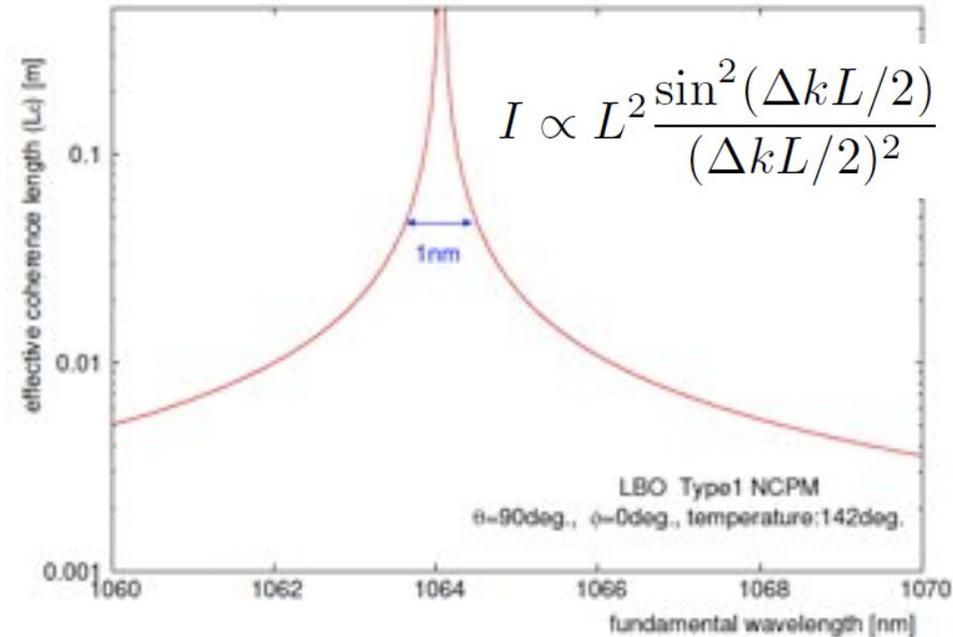
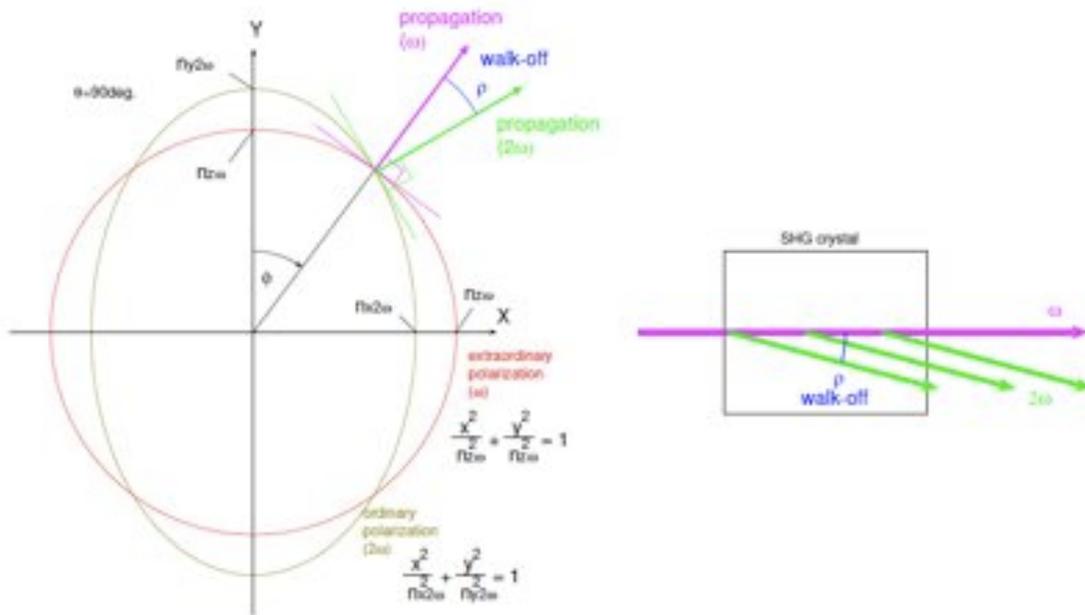
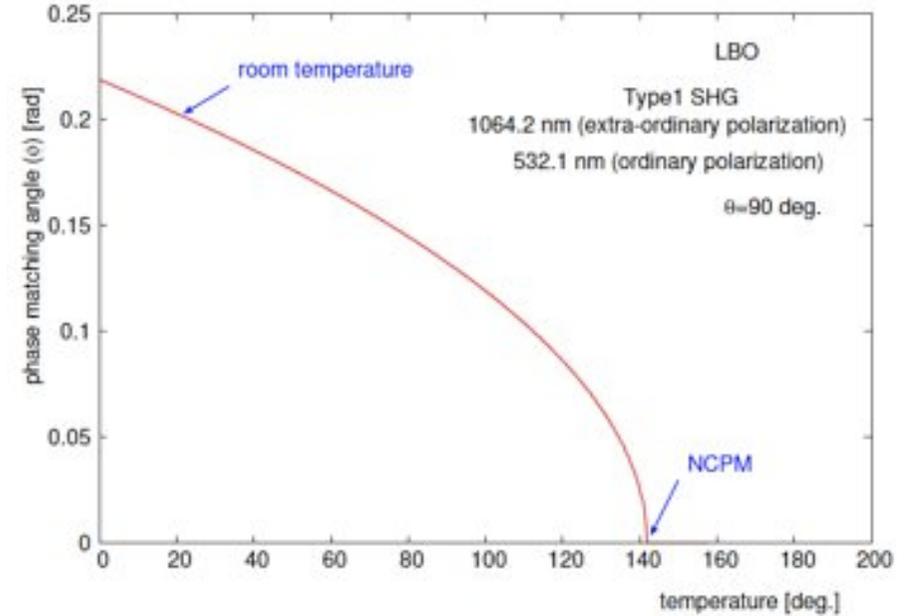
# 波長変換の試験

- 2倍波に波長変換
- cERLの要求に届きそうか確認



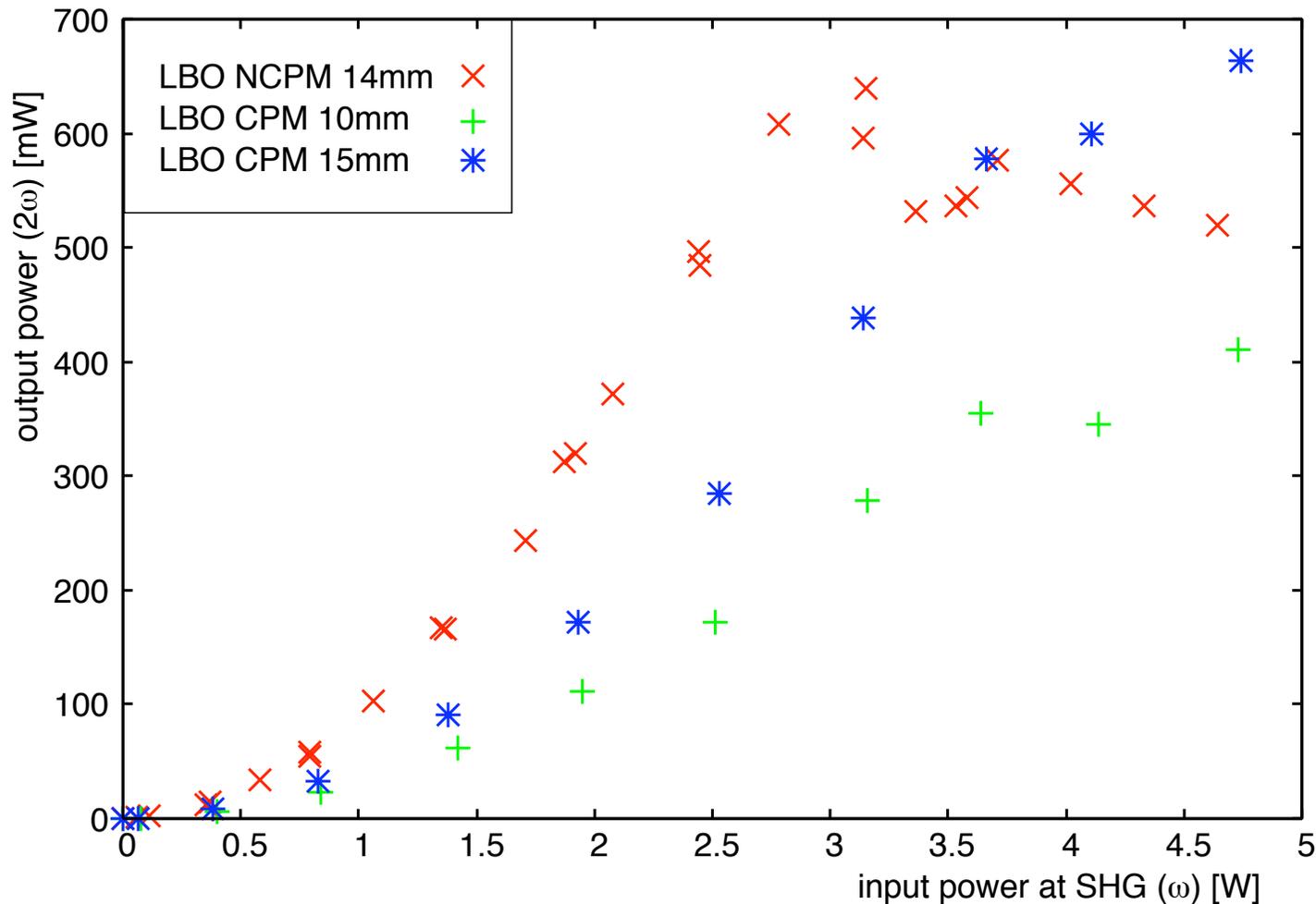
# LBO結晶

- LBOの特徴
  - Type1 CPM ( $\theta=90$ 度、 $\phi=11.6$ 度)
  - Type1 NCPM ( $\theta=90$ 度、 $\phi=0$ 度)
    - NCPMはヒーターが必要。
  - NCPMはウォークオフが無いので、実効的な結晶長を稼げる。
  - スペクトル幅は0.3nm(FWHM)なので、1nm程度あれば良い。数cmの長い結晶を使える。
  - 群速度分散は1ps以下なので、まだ無視できる。



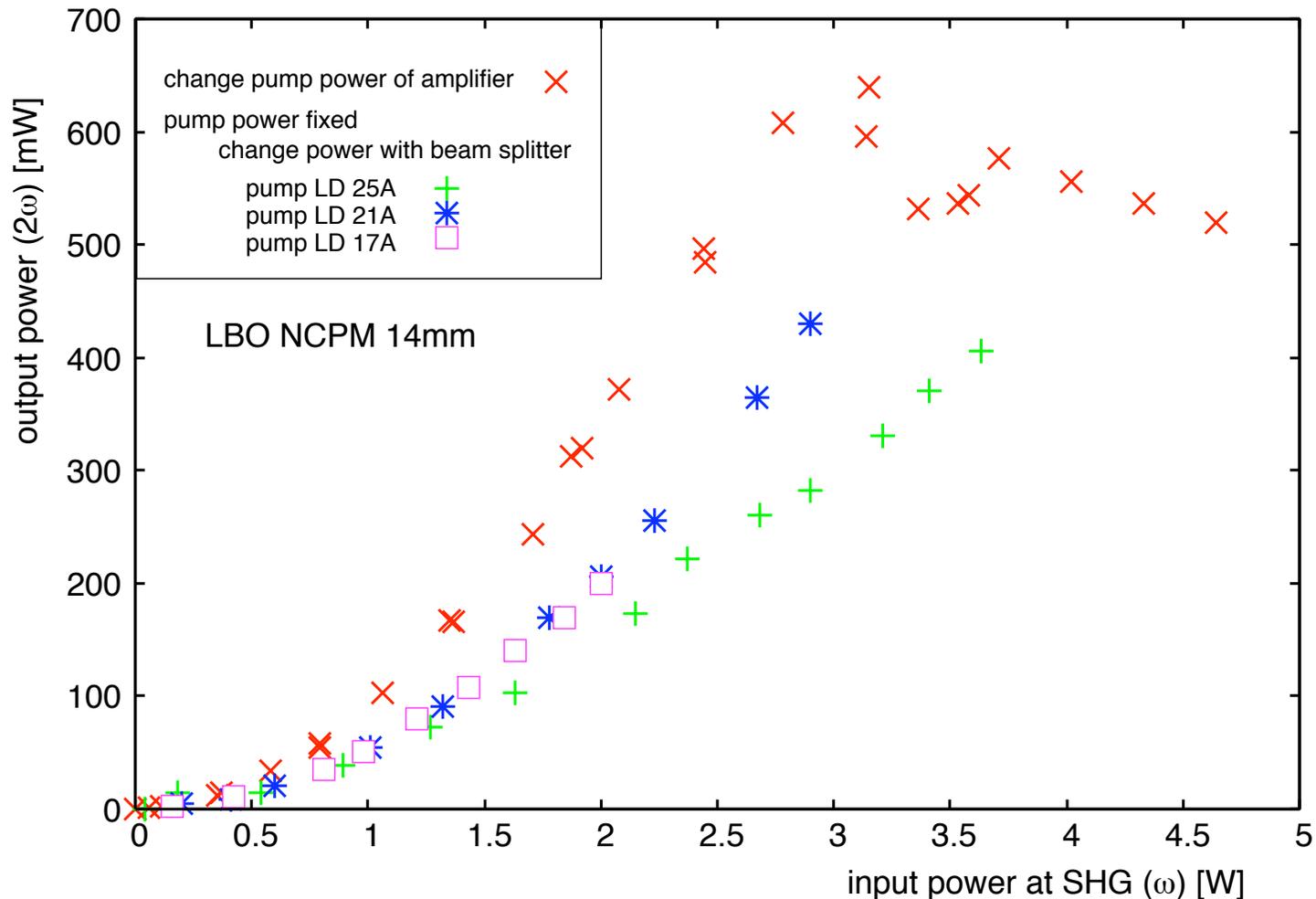
# 変換効率

- 1064nm、178.5MHz、3Wの基本波から、0.6Wの2倍波が生成。
- パルス強度でスケールすると、1064nm、1300MHz、21Wの基本波から、4.3Wの2倍波が生成できることになる。
- CPMだと、結晶長に比例。
- NCPMにすることで、CPMの2倍程度まで稼げる。
- 途中まで2次関数で上がっていくが、飽和する現象が見られる。



# 変換効率の励起強度依存

- 飽和現象の原因調査
- PCF増幅器の励起強度を変えて(増幅率を変えて)データをとる場合と、増幅器部は一定の条件で、波長変換部に送る量を変えてデータをとる場合を比較。
- 増幅器の段階で何らかのビームの質が低下しているらしい。
- 励起LD21A(PCF出力で5.5W、1.3GHzなら36W相当)までは低下は見られない。
- ファイバの非線形性の効果か。(スペクトル測定とパルス幅測定だけでは顕著では無かったが、影響しているのか。)



# まとめ

- Nd:YVO受動モードロック発振器を仮定して、PCF-Yb増幅器によるシステムを設計
- 光路調整手法の工夫
- ファイバ増幅器のモデル化。パラメータ決定。
- CWで波長1064nmで36Wを出せることを確認。安定性も確認。
- 繰り返しを落としたパルスで、同等のピーク強度で確認。
- パルスで波長変換についても確認。
- 少なくとも、cERL最小限のシステムについては、各部分でテスト完了した。あとは並べれば良い。

