

cERL用レーザーの進捗状況

2011.11.02

ERL検討会

本田洋介

- cERL運転開始まで1年だが、まだ実体がない。そろそろ本気でやらないと間に合わない。
- レーザーの開発の拠点を産総研からKEKに移した。(8月～)
- KEKで増幅器の試験からやり直している。
 - 設計を進めるのに最低必要な段階まで理解は進んだ。

設計方針

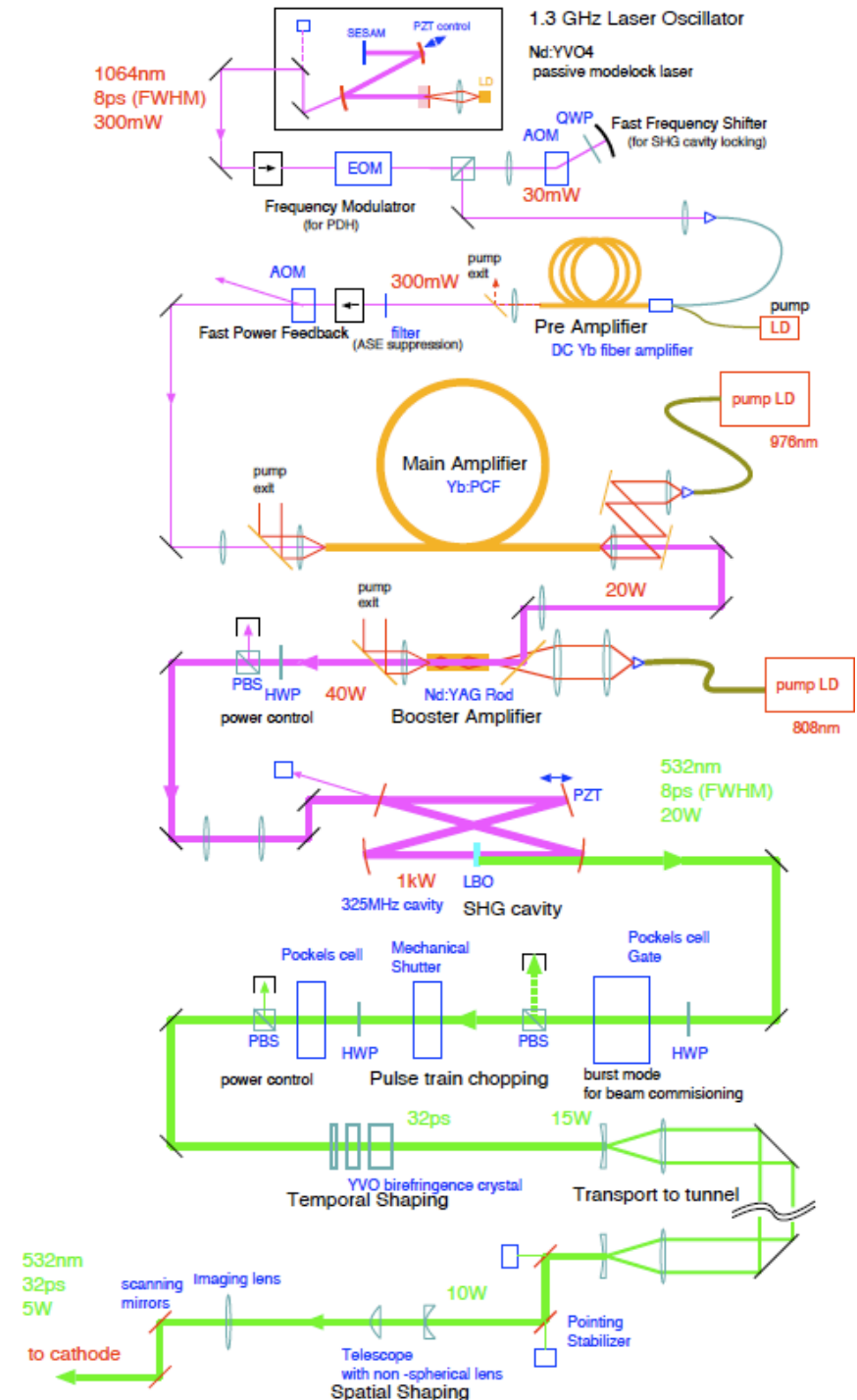
- 少なくともcERL開始時は
- 波長
 - 800nm帯の優位性は実はそんなに明らかではない。エミッタンス、QE、寿命、と共に、レーザーシステムの複雑さを考慮して、500nm帯とする。
- 発振器
 - Ybの多パルスファイバー発振器は、モードロックの原理的に不明確。能動モードロックのタイミング精度は良くはない。
 - ビームダイナミクス的に、それほど短パルスは要求されない(むしろ長い方が好まれる)。
 - 素性が良く分かるNd系受動モードロック
- 増幅器
 - 発振器の都合で波長1064nm。
 - ファイバ増幅器的には1030nm辺りが最適だが、1064nmでもカバーできる。
 - いざと言う時は、Nd系のバルク増幅器を追加できる。
- 波長変換
 - 2倍高調波で532nm。Nd系発振器だと線幅が狭いので結晶を長くすることで稼げる。

~~800nm~~

~~能動多パルス
ファイバ発振器~~

cERL電子銃レーザーのスキーム

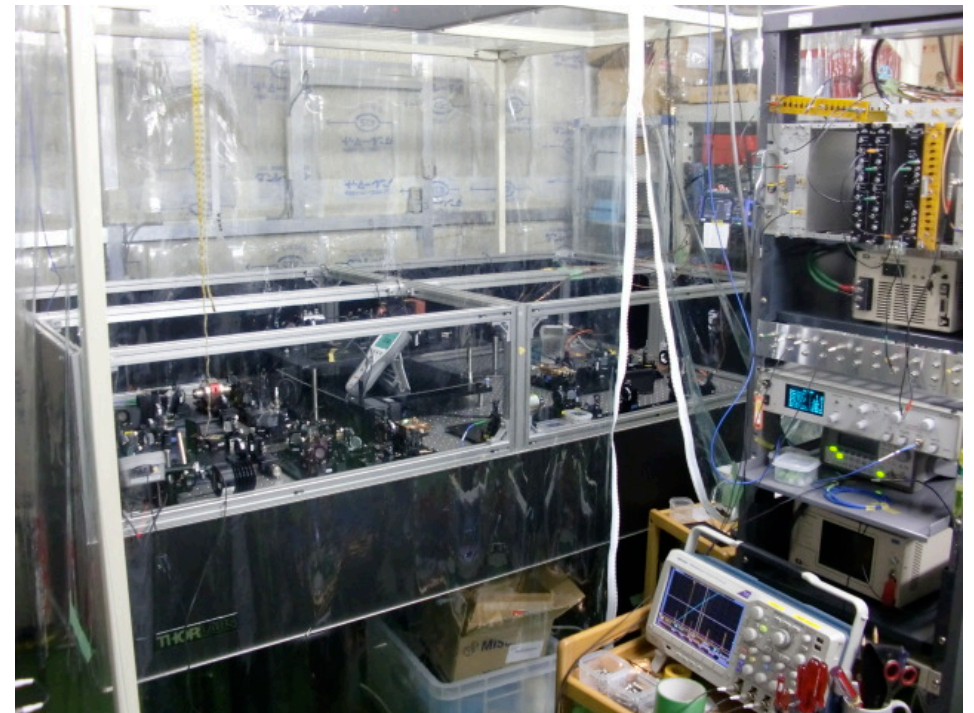
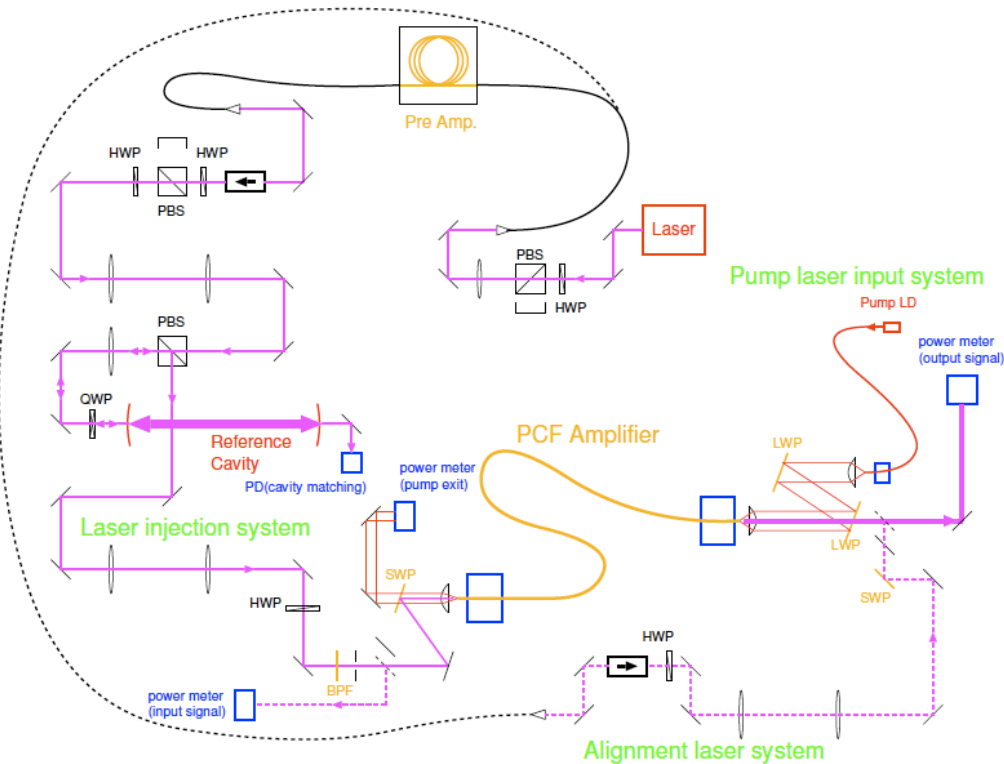
- 発振器
 - 市販Nd系受動モードロックレーザー。納品待ち(2012.1)。
- 変調関係
 - 必要に応じて
- プリアンプ
 - 初段はオールファイバ(変調関係なしなら無し)
 - (この絵には無いが)2段目が多分必要。PCF増幅器
- メインアンプ
 - PCF増幅器。試験中
 - 必要に応じてポストアンプ(NdまたはYb)
- 波長変換
 - ポストアンプ無しなら共振器型で変調関係あり
 - ポストアンプ有りなら単一パスも可
- パルスモードやインターロック関係
 - 市販のポッケルスセルで適当に
- ビームデリバリー
 - 時間整形は複屈折結晶
 - 空間整形は非線形レンズ
 - 適当な輸送光学



準備

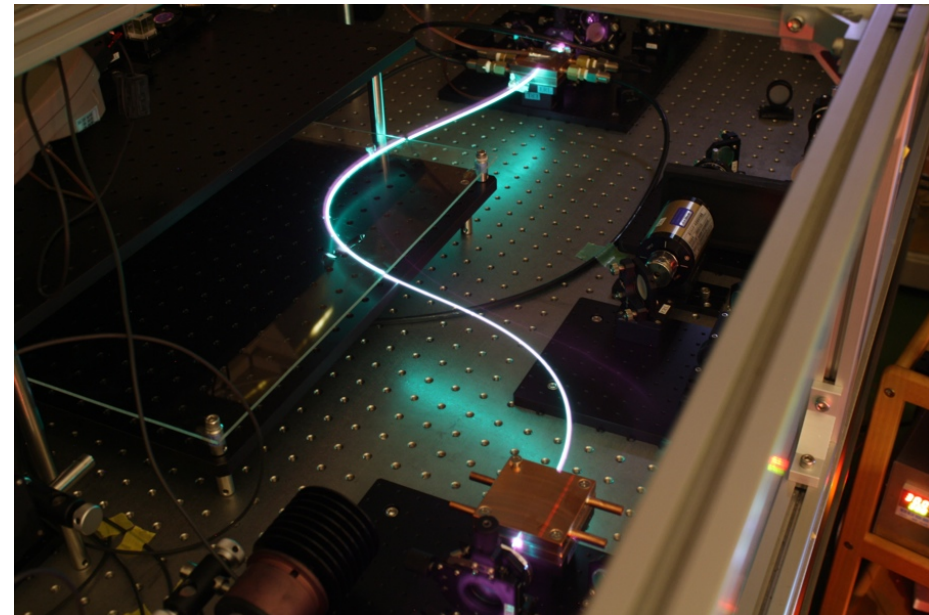
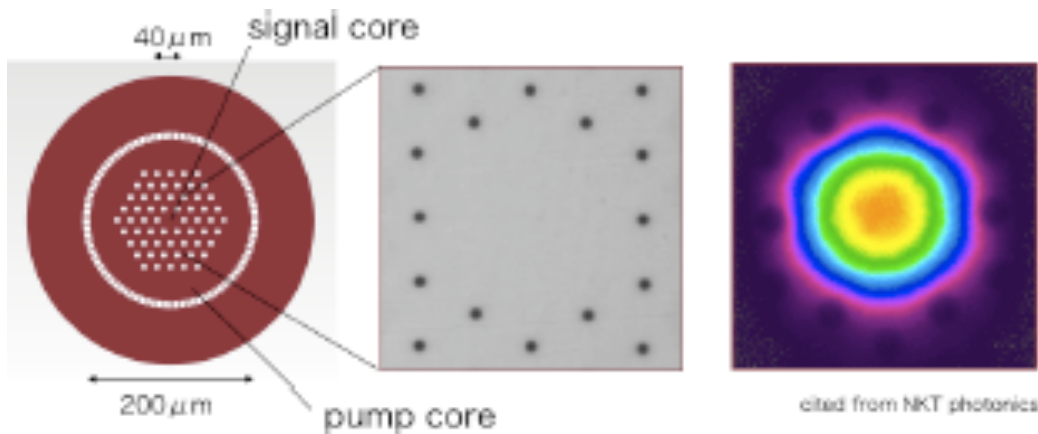
アンプ試験の開発場所

- スキームのうち、KEKで経験が少ないのはファイバ増幅器。産総研から引き上げて来た部品で試験を始めた。(8月から)
- AR南は電子銃高電圧試験中には入れない。量子ビームのグループと協力してATFで行っている。
- テーブル、クリーンブース、レーザー発振器、光学部品、計測器なども借用
- 1m x 2m のテーブルで、増幅器を1セット分のテスト。
- 本番ではこのセットのようなものが3つ。そのほかに、発振器部、SHG部、その他が必要になる。全体で1.5m x 3.5mくらいは必要になりそう。



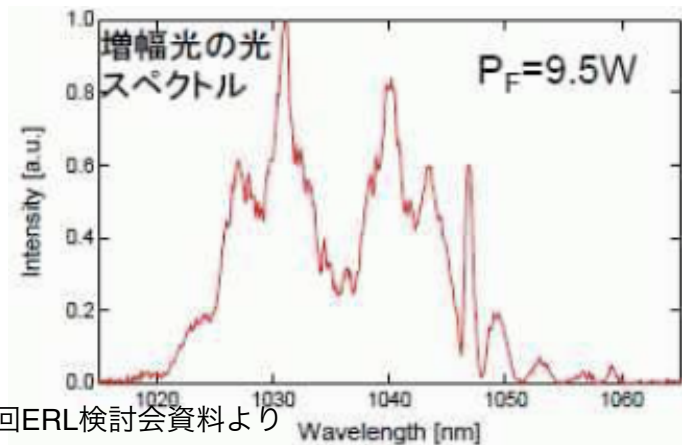
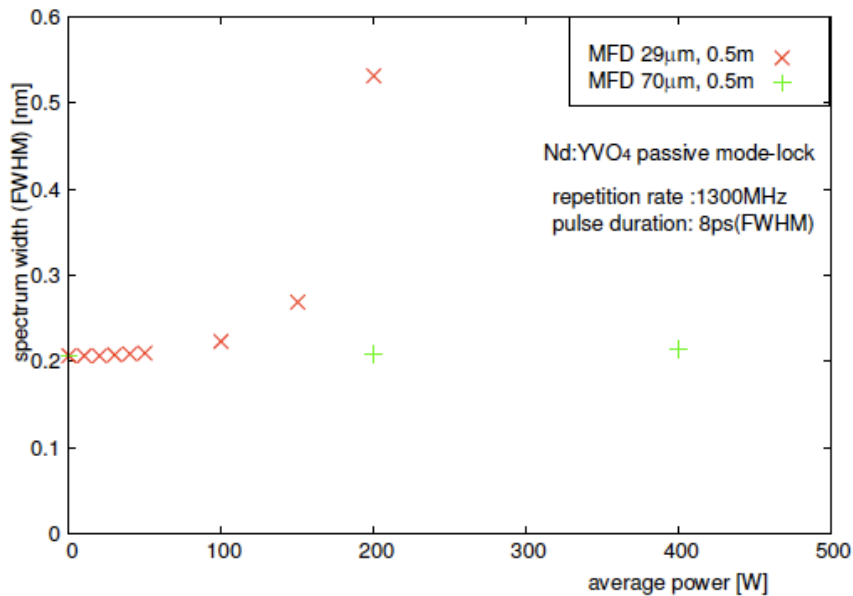
フォトニック結晶ファイバ(PCF)増幅器

- シングルモードなのでプロファイルは基本モード。大口径なので非線形性が抑えられる。
- 最も売れ筋の NKTフォトニクス製のDC-200-40-PZ-Yb (MFD $29\mu\text{m}$)を仮定する。
- 少なくとも産総研で波長1035nmで30Wが得られた経験があるので、多分大丈夫だろう。
- まずは、これで波長1064nmを20Wまで増幅できることを確認する。
- (ポストアンプには、より励起吸収の強いDC-200/85-Yb-RODが候補。)
- ファイバ長について最適化が必要だが
 - AISTでは1.2m。長さについての考察はしていない。
 - ATF/LALでは1.5m。非線形性から決めている。
 - AISTから使用済の切れ端をもらって来た0.95mでまずテスト。

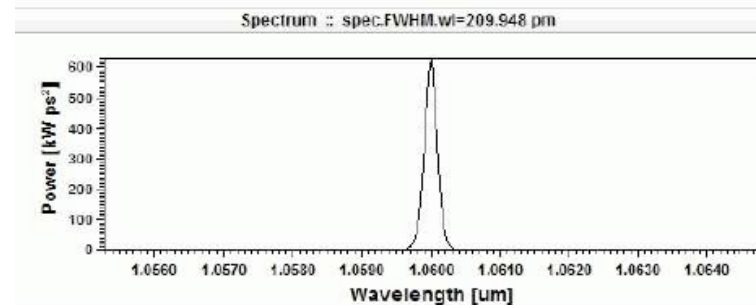
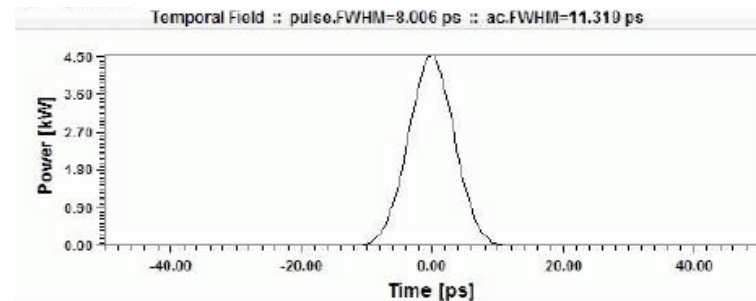


非線形性の評価

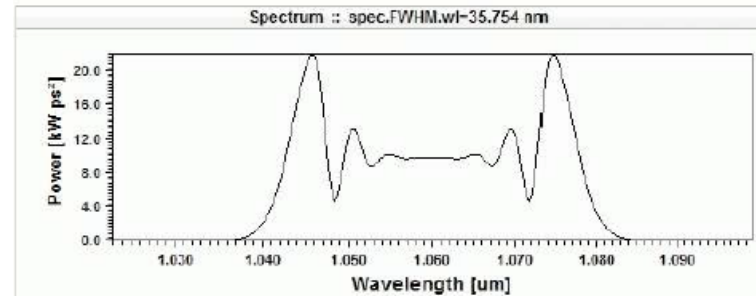
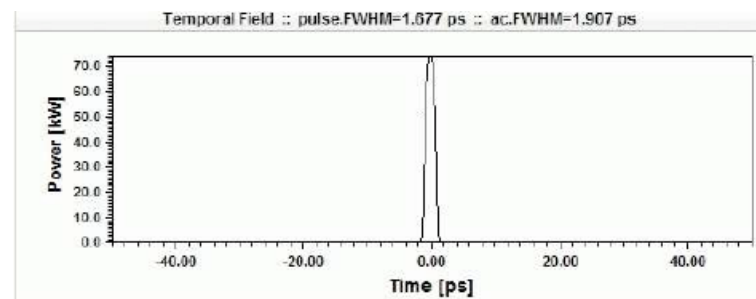
- 基本的には(非線形性が十分低ければ)、定常状態の増幅器の平均パワーは、パルス構造に依存しないはず。
- 非線形性の効果の見積り
 - AISTでは実験的に短パルスで非線形性によるSPMの影響が見られた。
 - SPMの影響を計算で評価し、AISTの結果を再現。
 - cERLの発振器のパラメータでは100Wまでは非線形性は効かない。
- CWで試験を進めても大体大丈夫という根拠。



伊藤氏第52回ERL検討会資料より



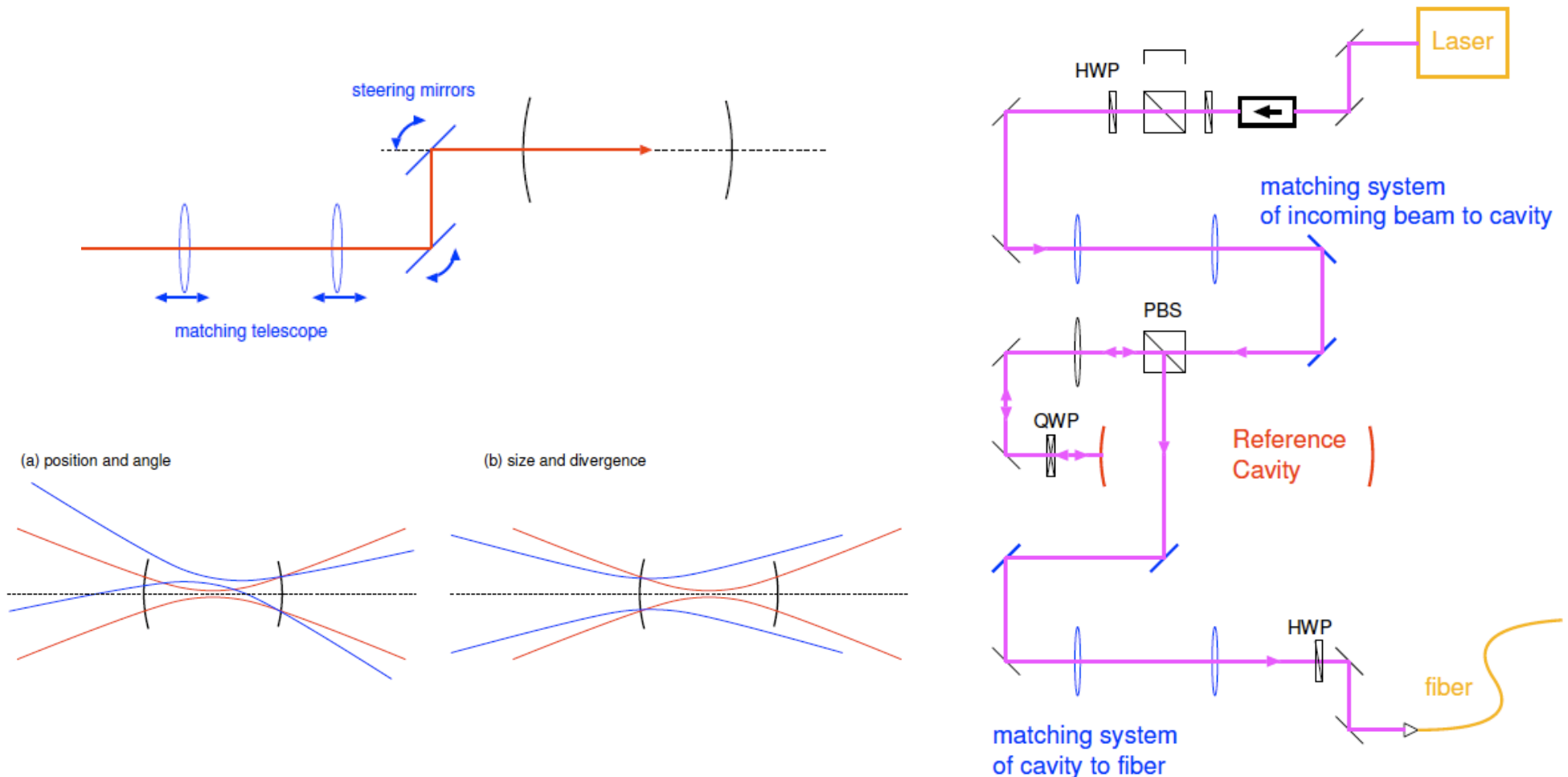
position: 0.500 m energy: 38.462 nJ average power: 50.000 W



position: 0.500 m energy: 117.652 nJ average power: 10.000 W

ファイバへの入射調整法

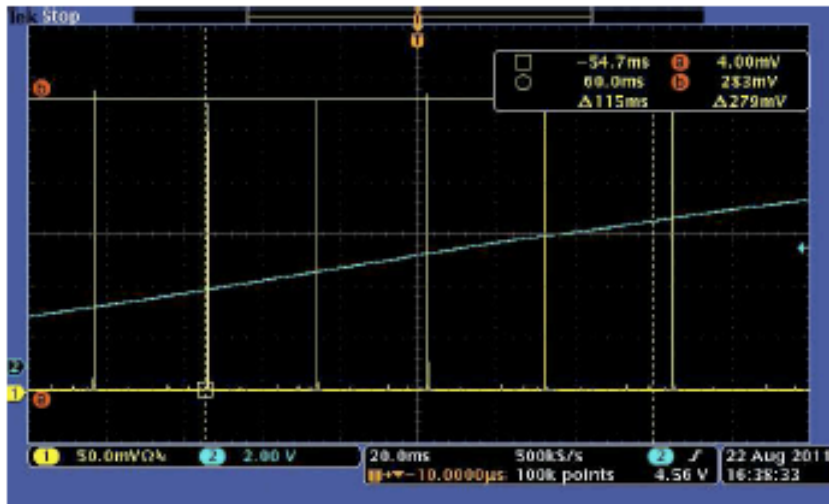
- PCFはシングルモードなので、モードマッチしないと入力されない。共振器の入射と同じ。
- 通常は、出力が増えるように手探りで入射調整をする。これだと、うまく行かないとき、永遠に調整を続ける事になってどこで調整を終えれば良いか分からないし、実際に入力した光量を把握出来ないと、まともな特性試験にならない。AISTで開発が進まなかった理由はここにある。
- 共振器の技術を使ってモードを合わせるシステムを考案した。(KEKの独自技術)
 - Reference cavityに対して、入射光およびファイバモードをそれぞれ合わせることで全体が繋がる。



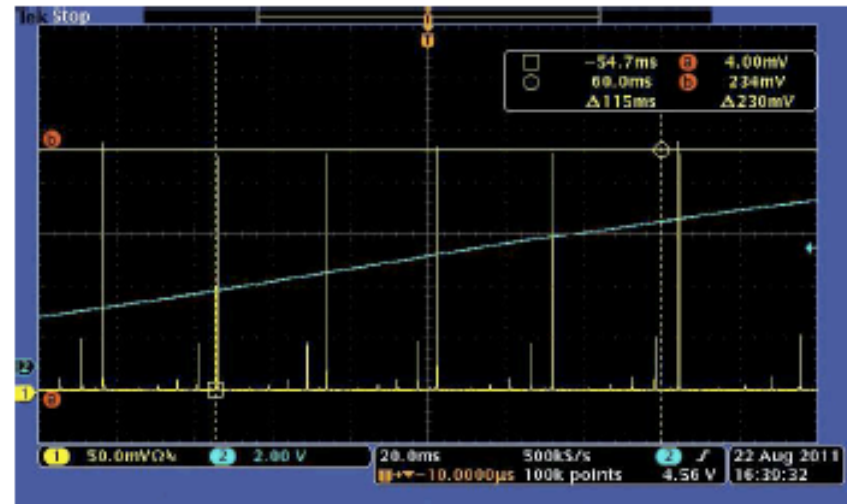
ファイバへの入射調整法

- 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。

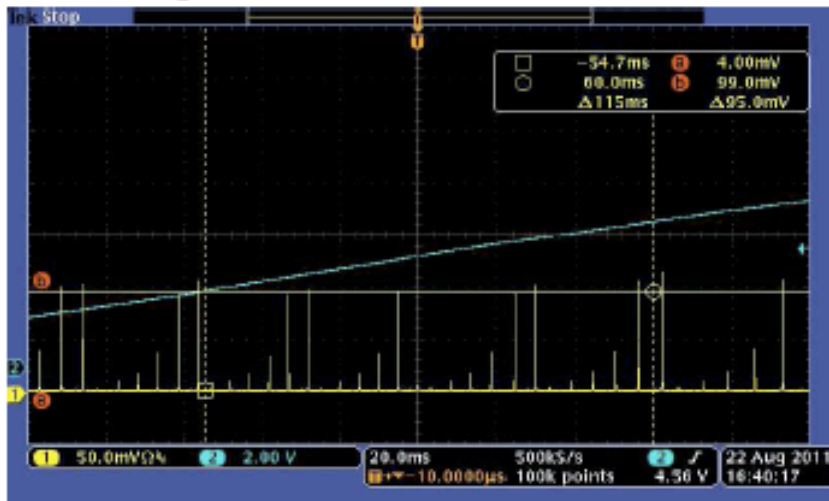
detuning 0



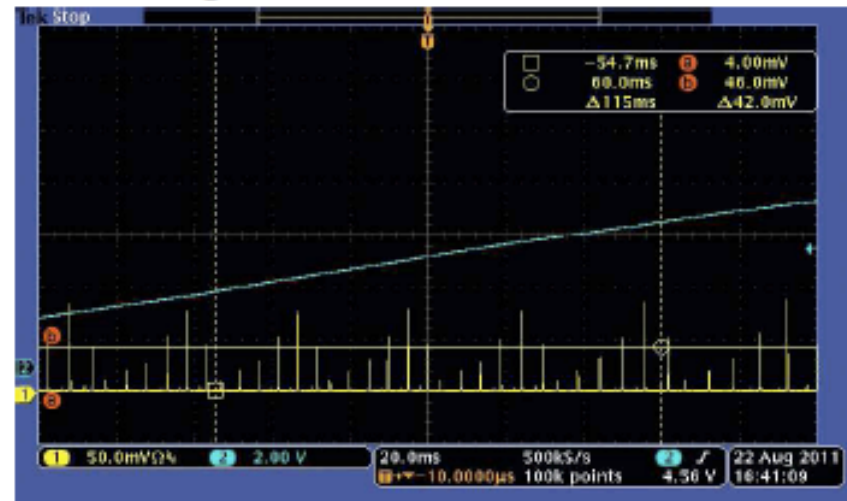
detuning 1



detuning 2

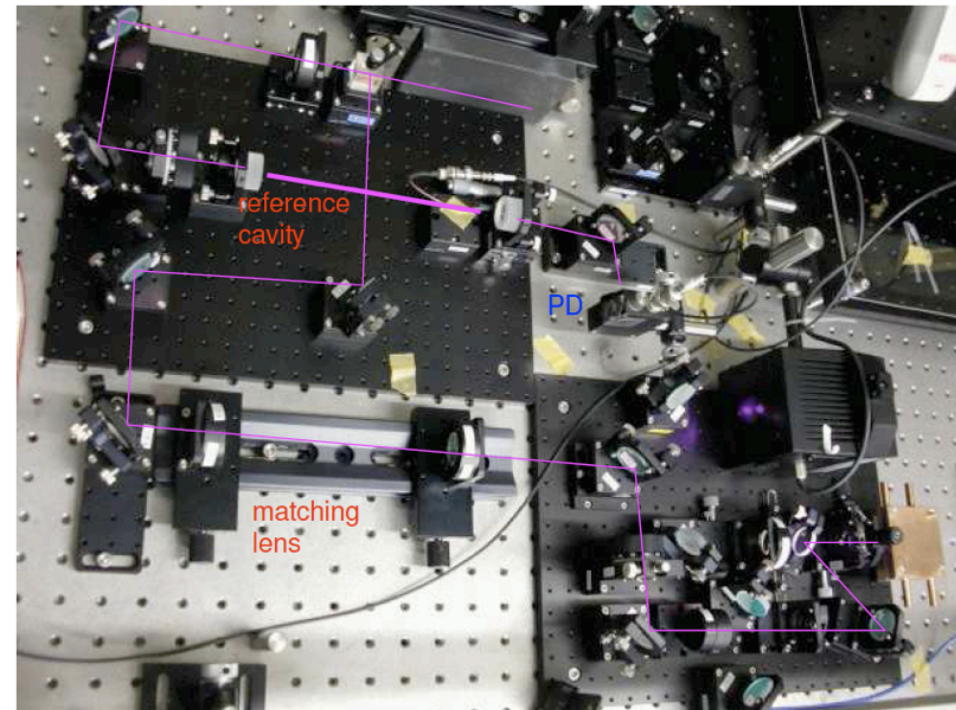
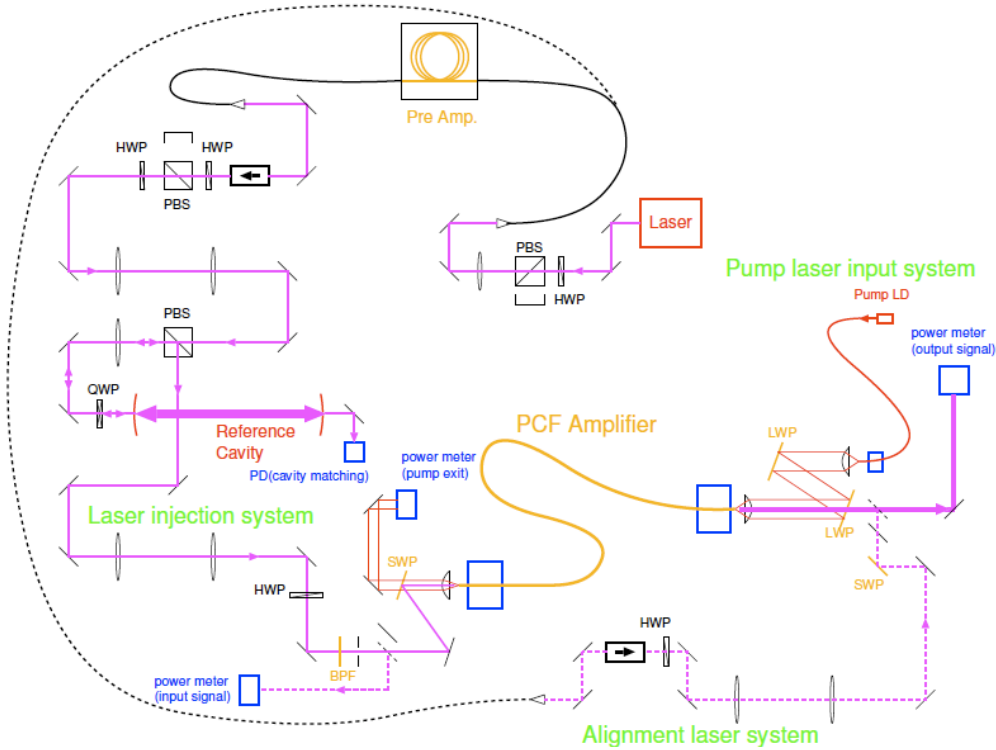


detuning 3

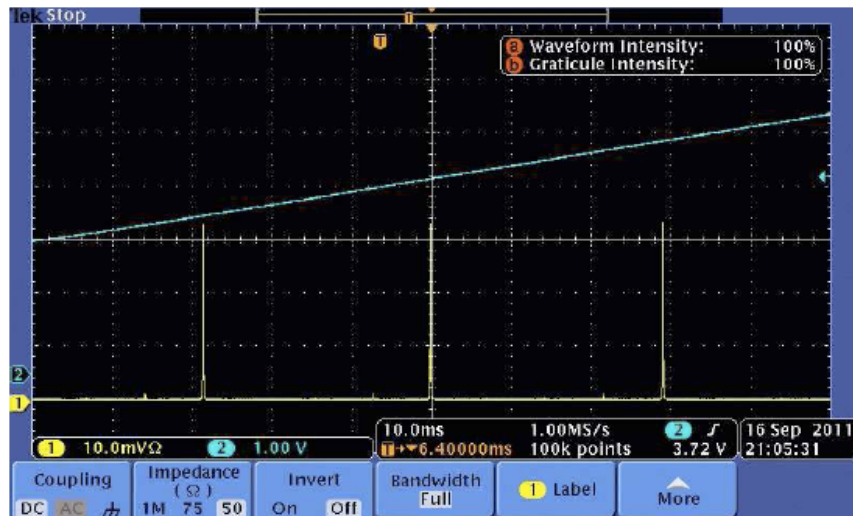


ファイバへの入射調整法

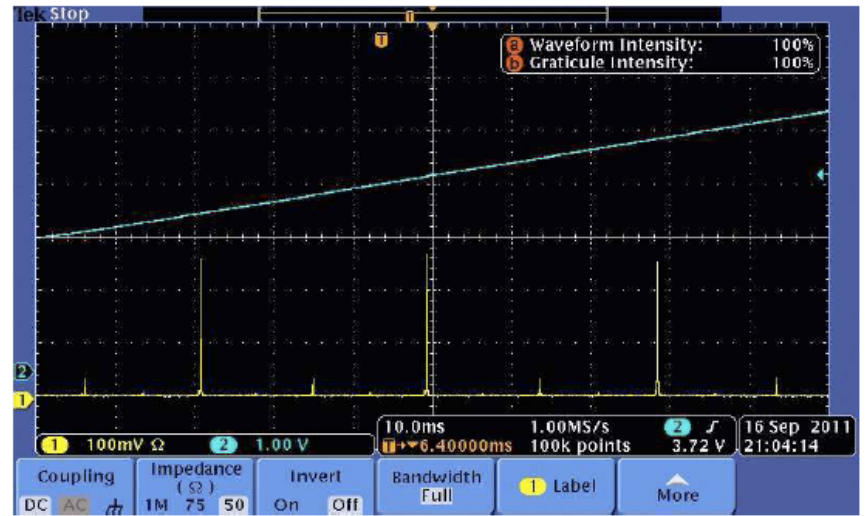
- 実際のセットアップ



(a) forward matching



(b) backward matching



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ちゃんと確認した。NAで $3\text{-}\sigma$ 、サイズで $2\text{-}\sigma$
- LDは変更する余地はある。
 - AISTでは入射ミスでファイバを損傷。
 - ATF/LALでは $200\mu\text{m}$ のもの。

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

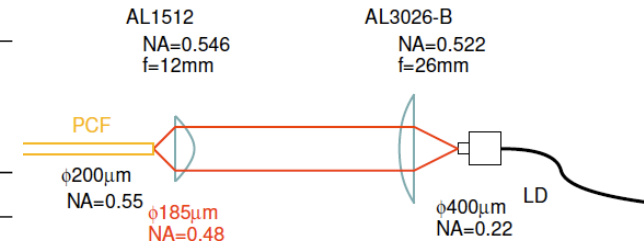


図 1: 設計した光学系

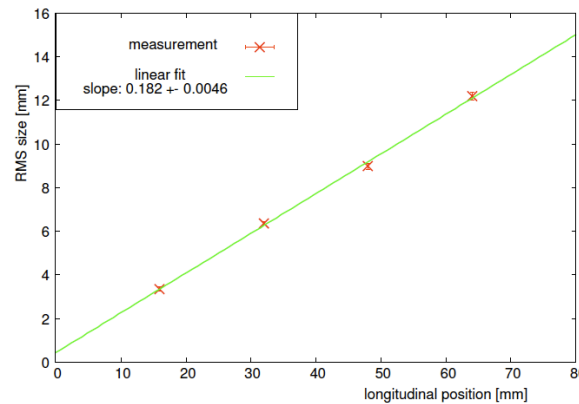


図 4: 発散角の測定結果

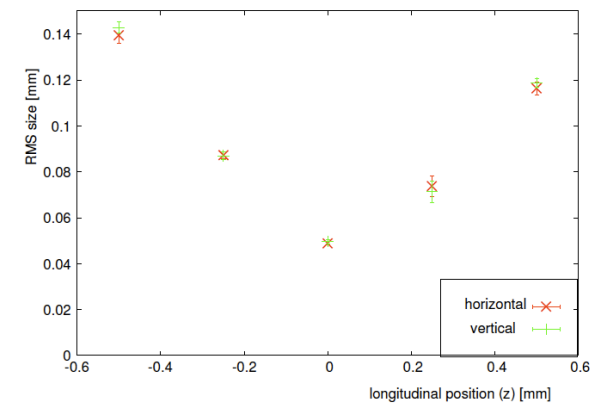


図 8: ビーム径の伝搬

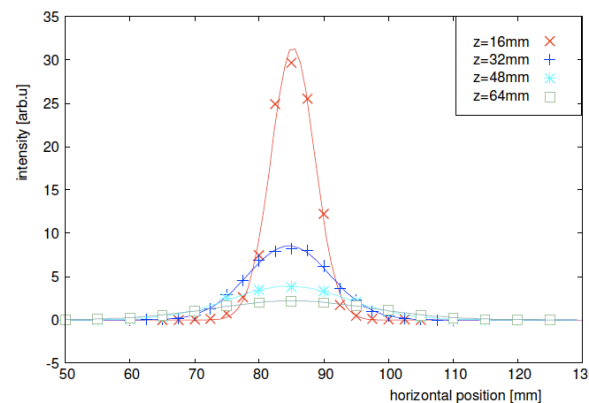


図 3: プロファイルの測定結果 (発散角測定)

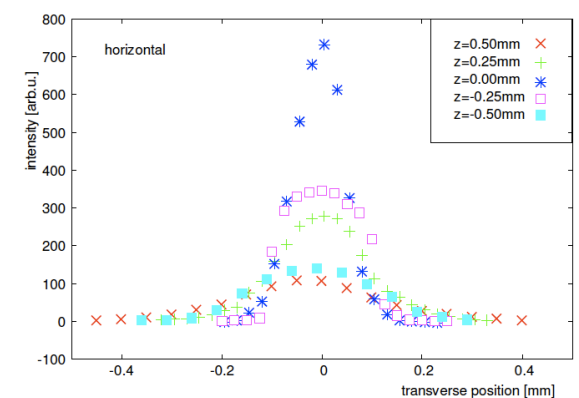


図 6: ビーム径測定の結果 (水平方向)

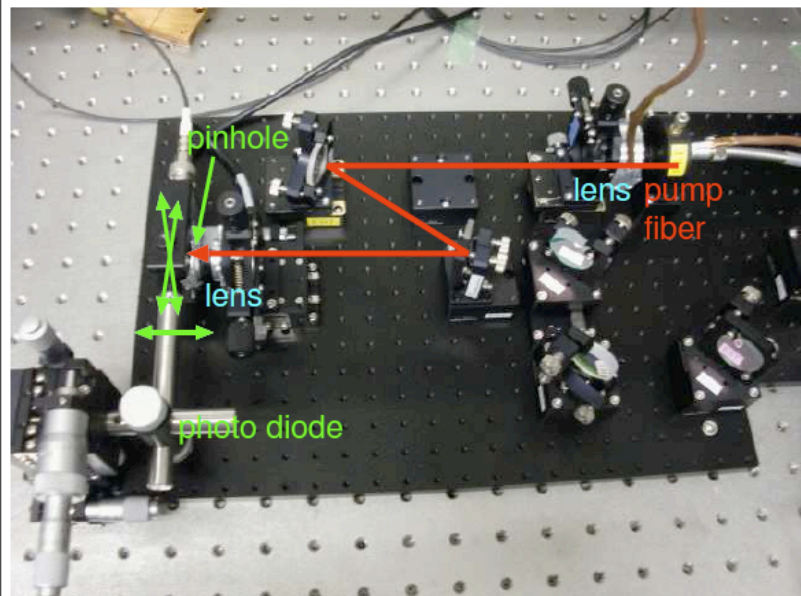


図 5: ビーム径測定の設定アップ

励起光波長の最適化

- 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±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。

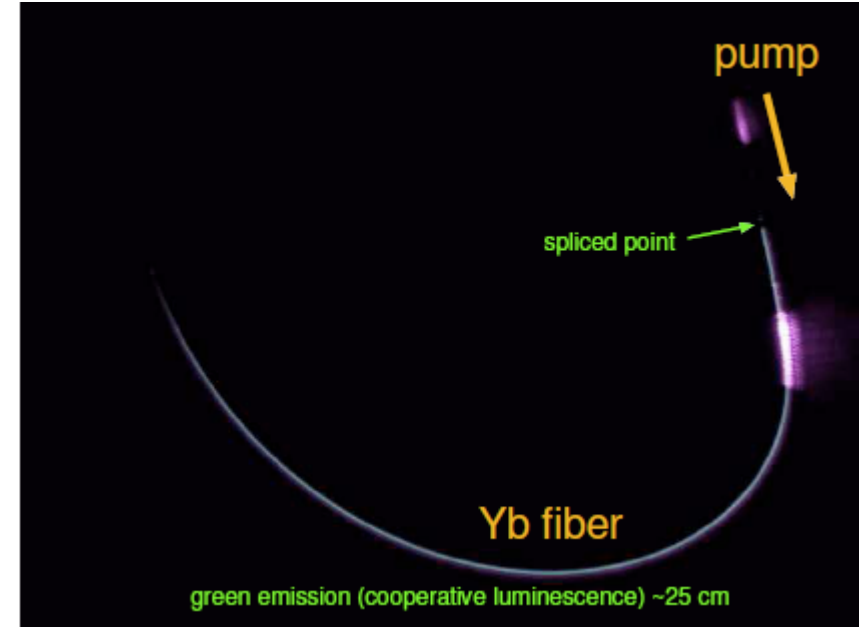
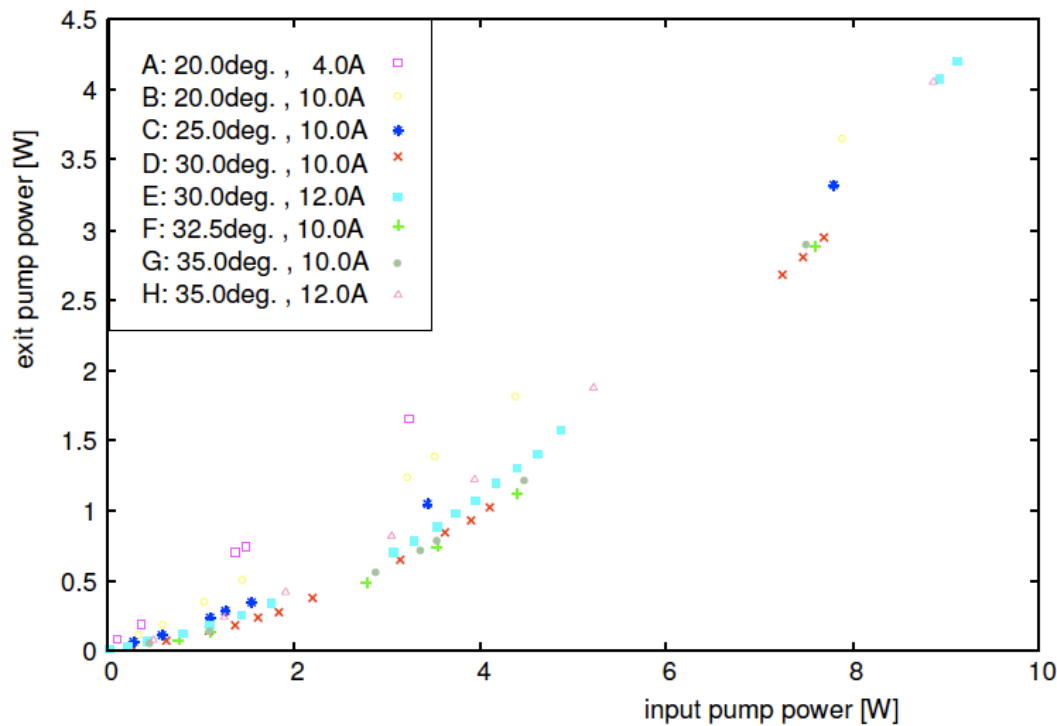
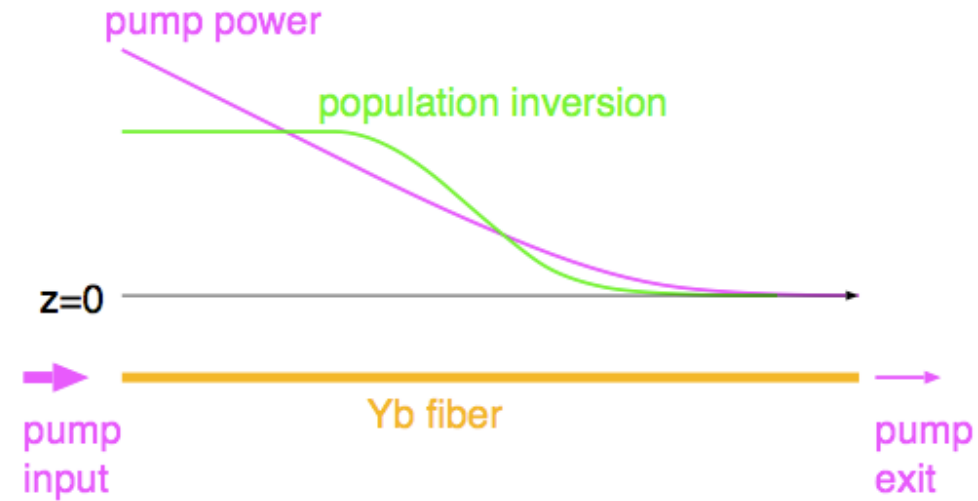
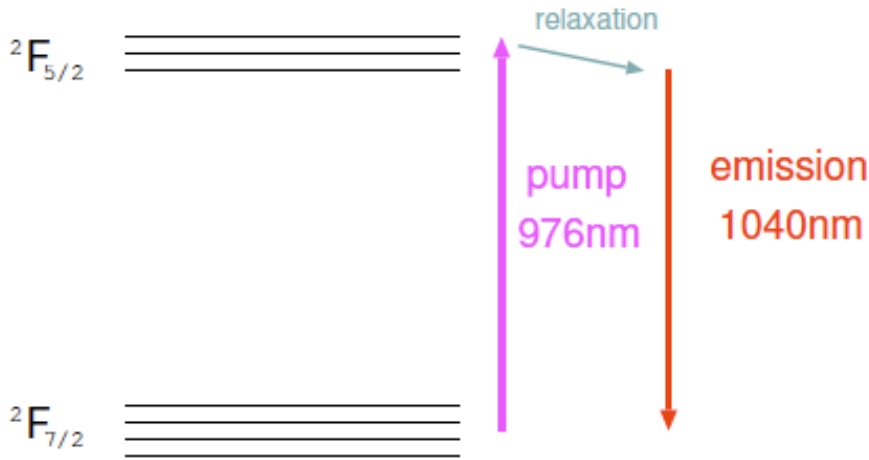
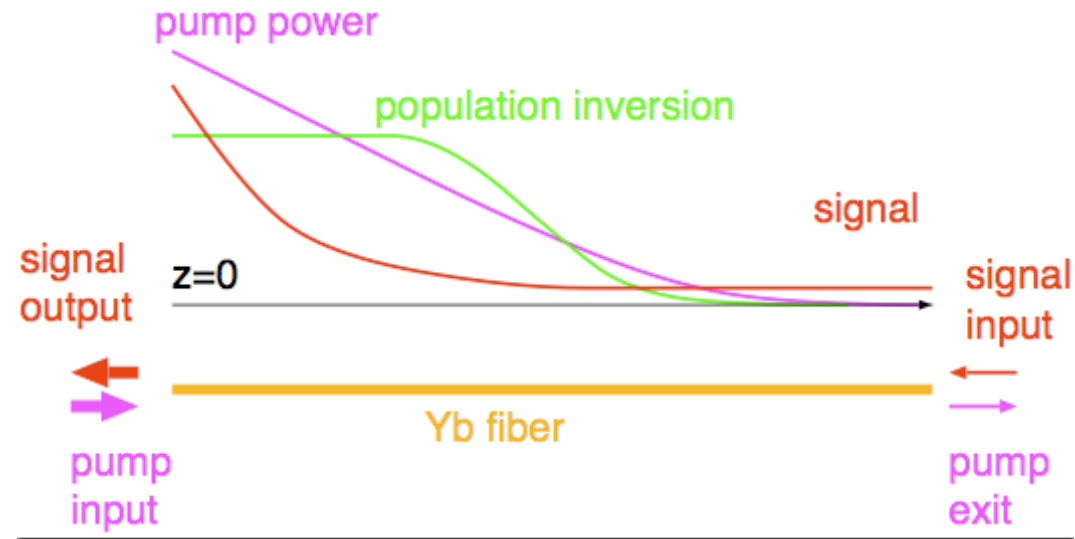


図 2: 入力強度にたいする透過強度

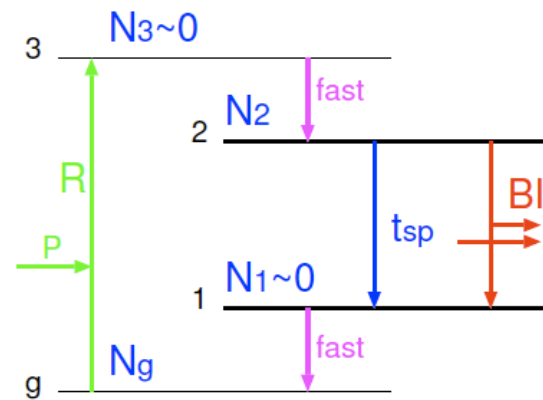
ファイバ増幅器の特性試験

ファイバ増幅器の動作の考察

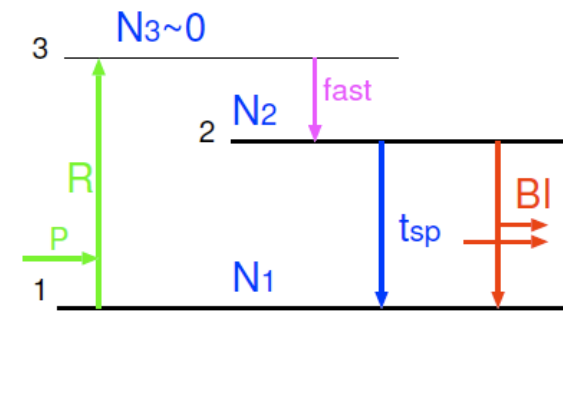
- ファイバ増幅器の特徴
 - 通常、レーザー増幅器は小信号ゲインと飽和強度で特徴づけられる。ファイバの場合は媒質が長いので、その長手方向分布も考える必要がある。
 - 信号や励起光の強度分布によって、反転分布の分布は影響を受け、また、それによって信号の発展が変わる、、、。定常的な状況が実現される。
- Ybの特徴
 - 縮退した2順位的な分布。
 - 実際的には4順位動作なのか3順位動作なのか



Energy level of Yb ion



4-level system



3-level system

レーザー増幅器のモデル

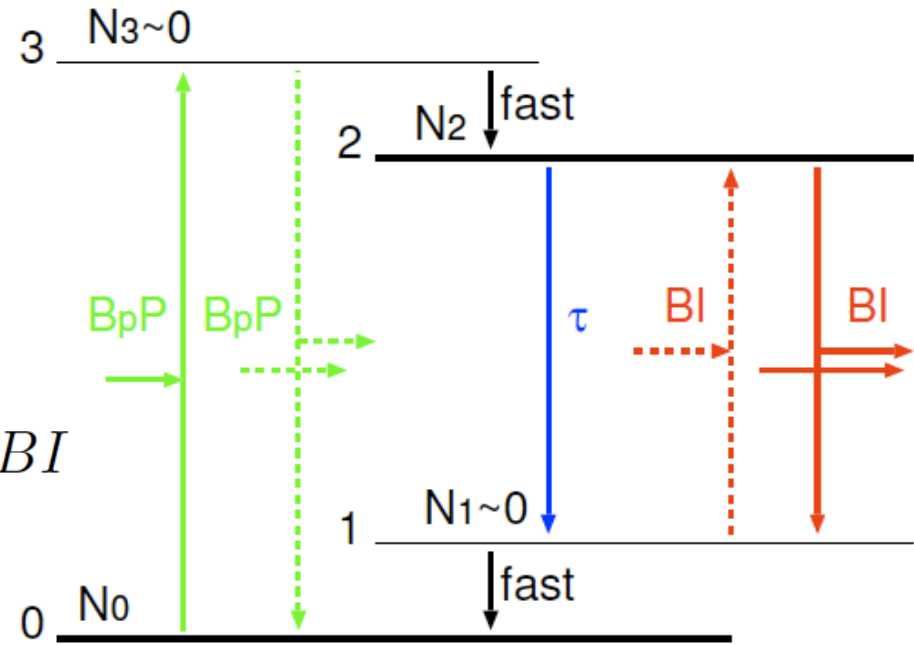
- 理想的な4準位モデルを仮定
- 定常状態のレート方程式から、励起光と信号光のファイバに沿った方程式が得られる。
- この系は4つのパラメータ、 A , G , P_s , I_s で表される。特性試験でこれらを決める。

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
$$\frac{dI(z)}{dz} = \gamma N_2(z) B I(z)$$



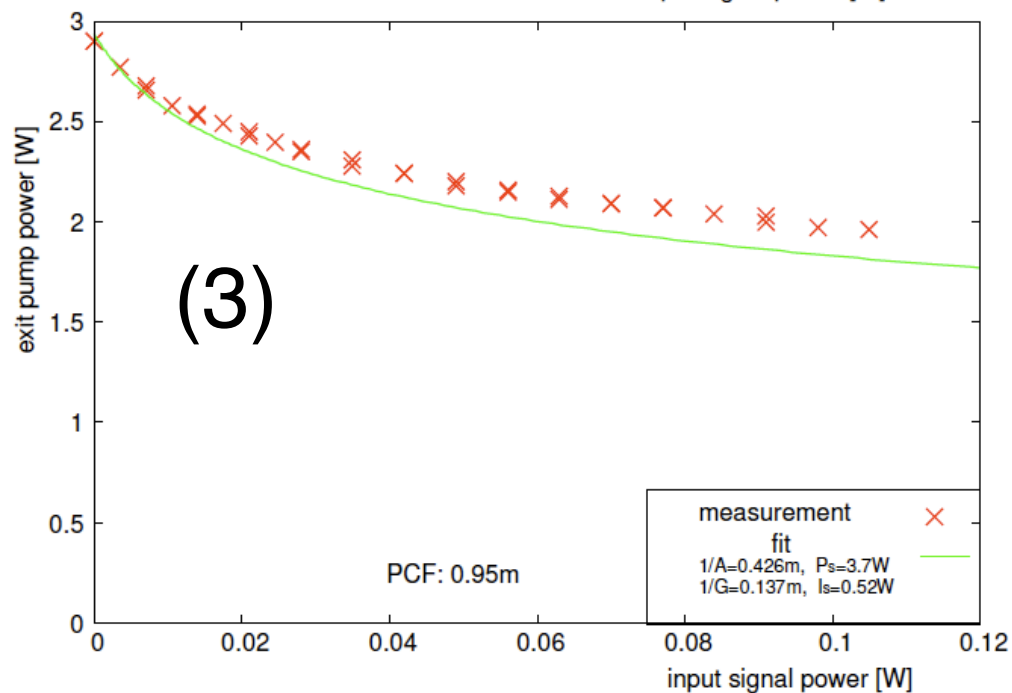
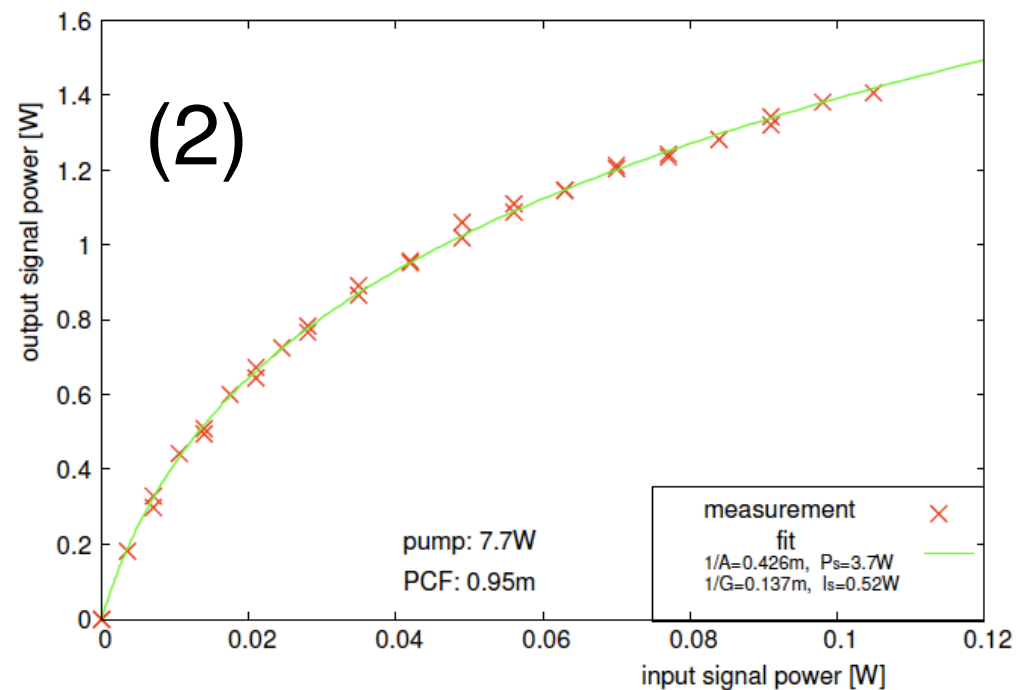
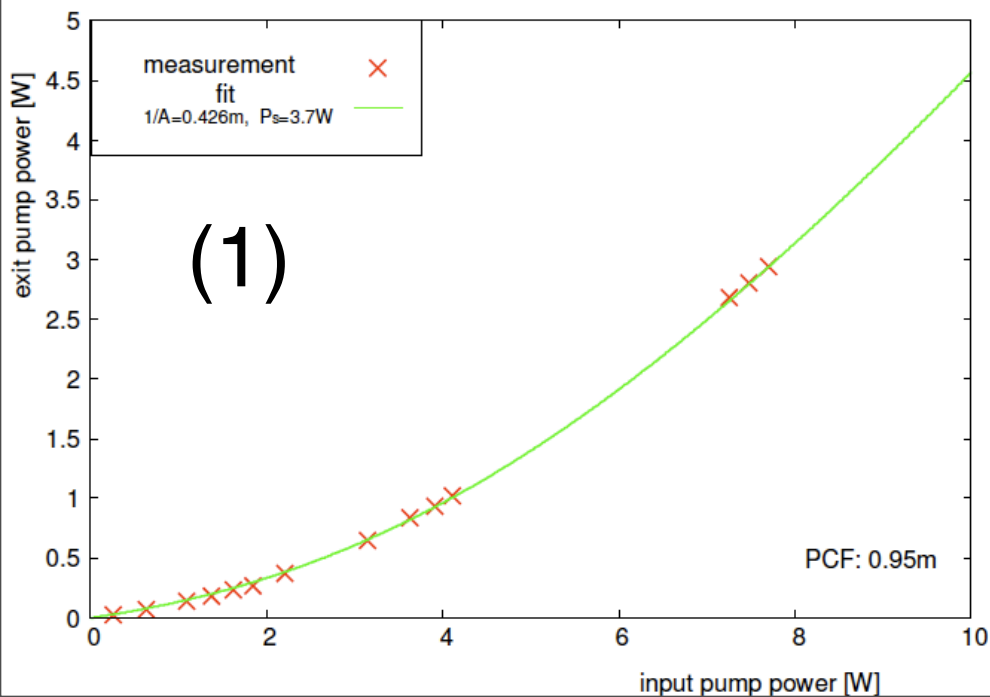
結果として、

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
- 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順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。)

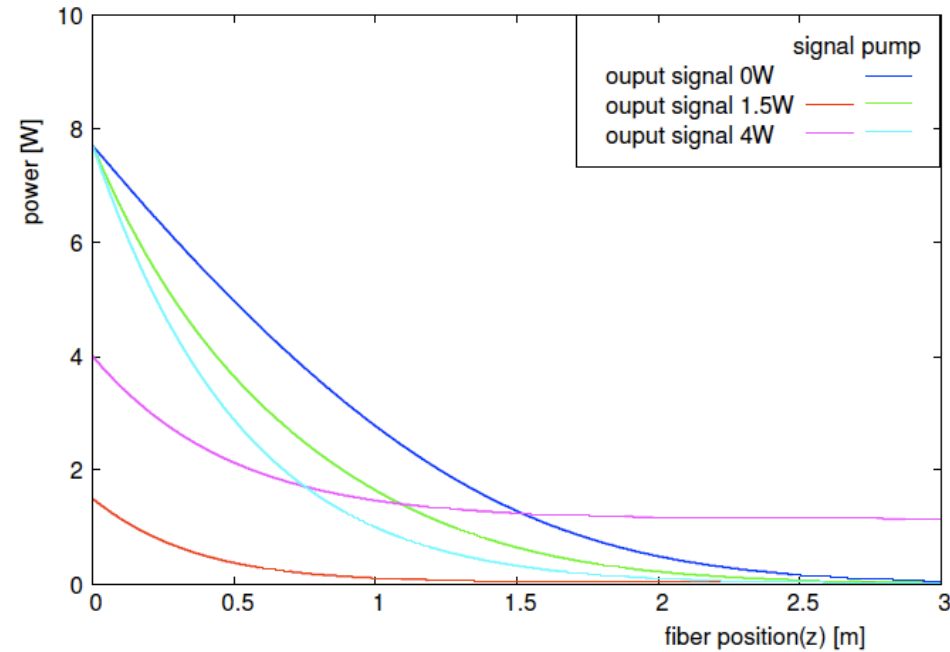
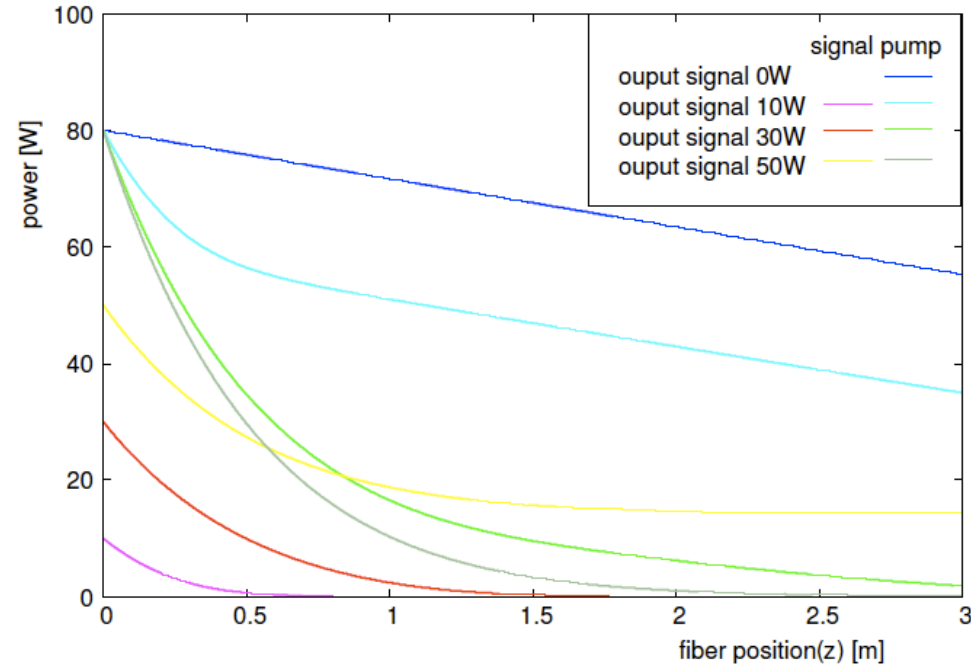
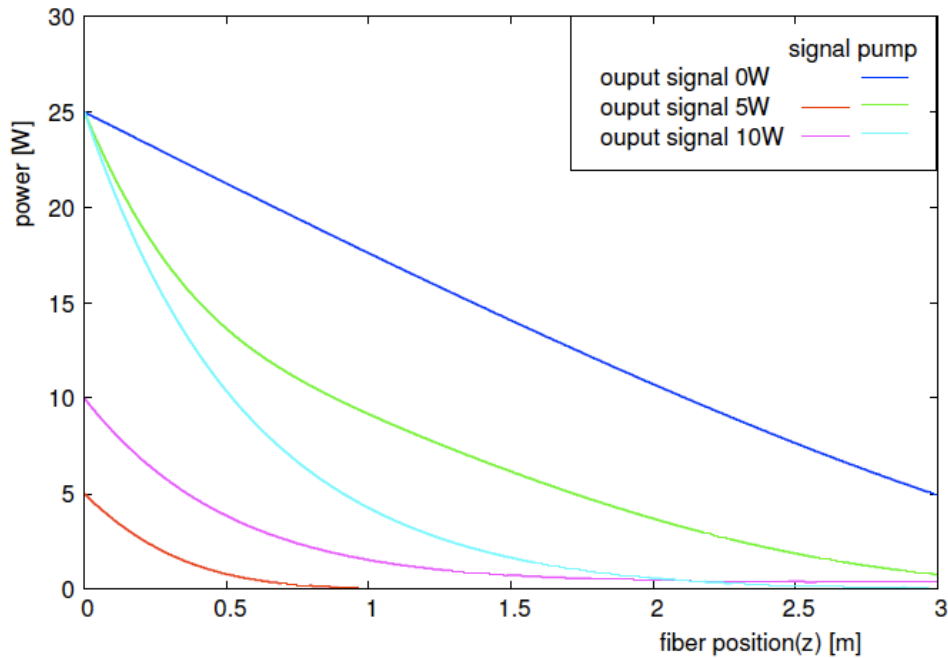
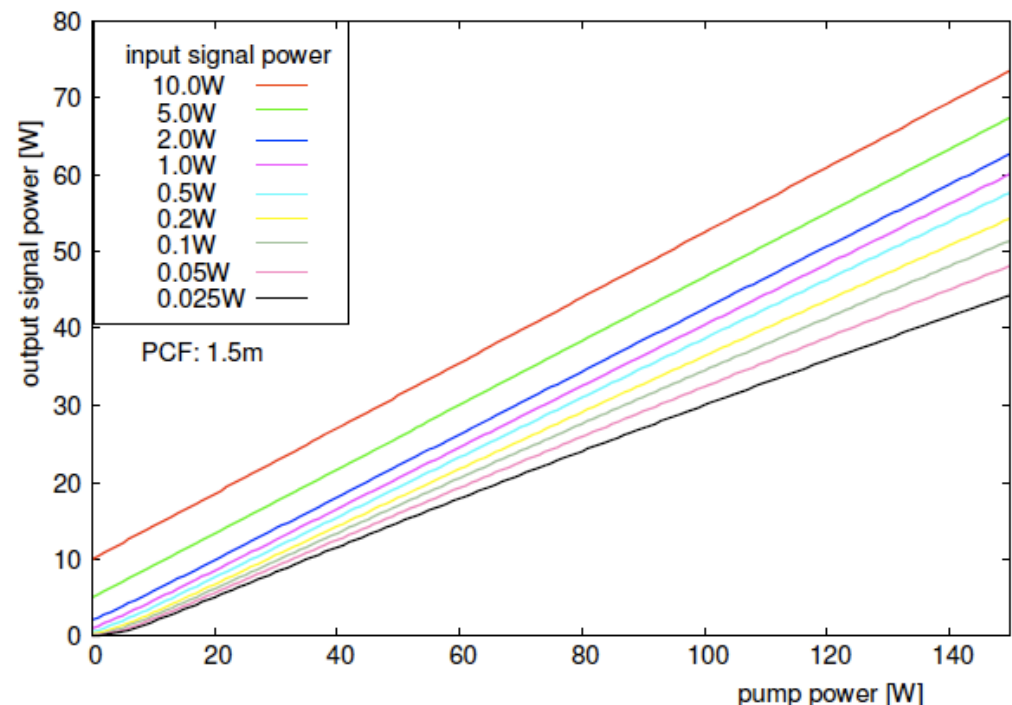
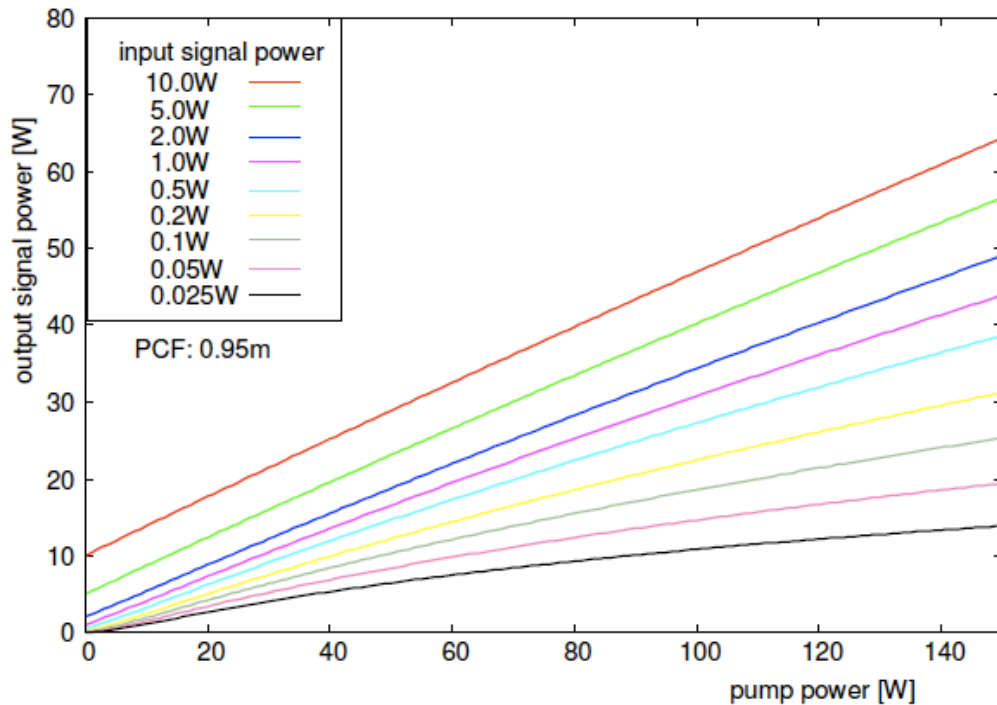
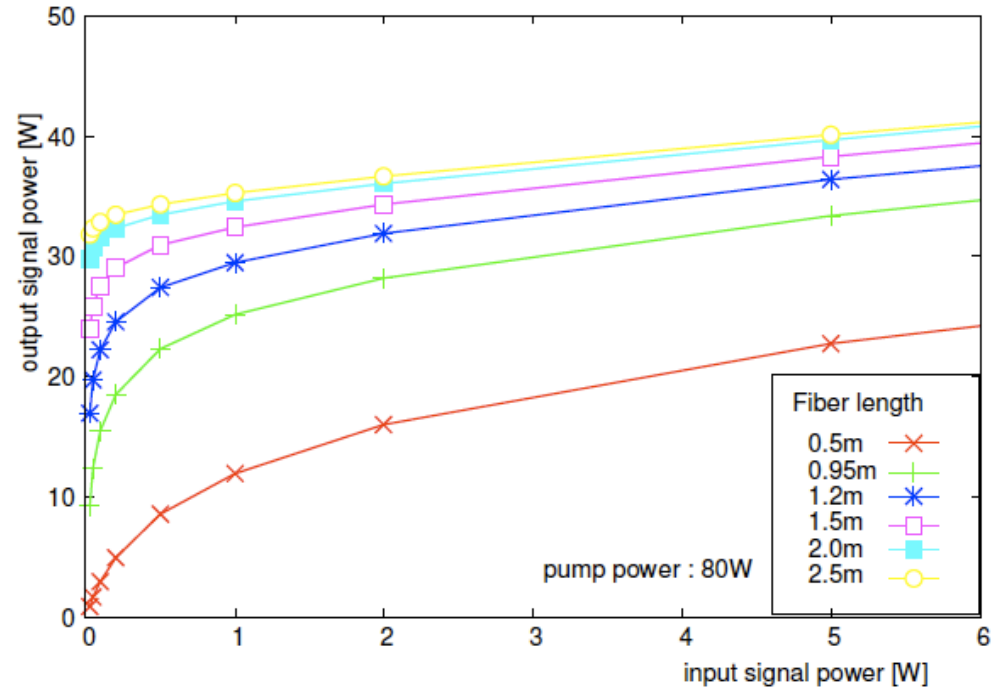


図 5: 励起光と信号光の分布 (励起 7.7W の場合)



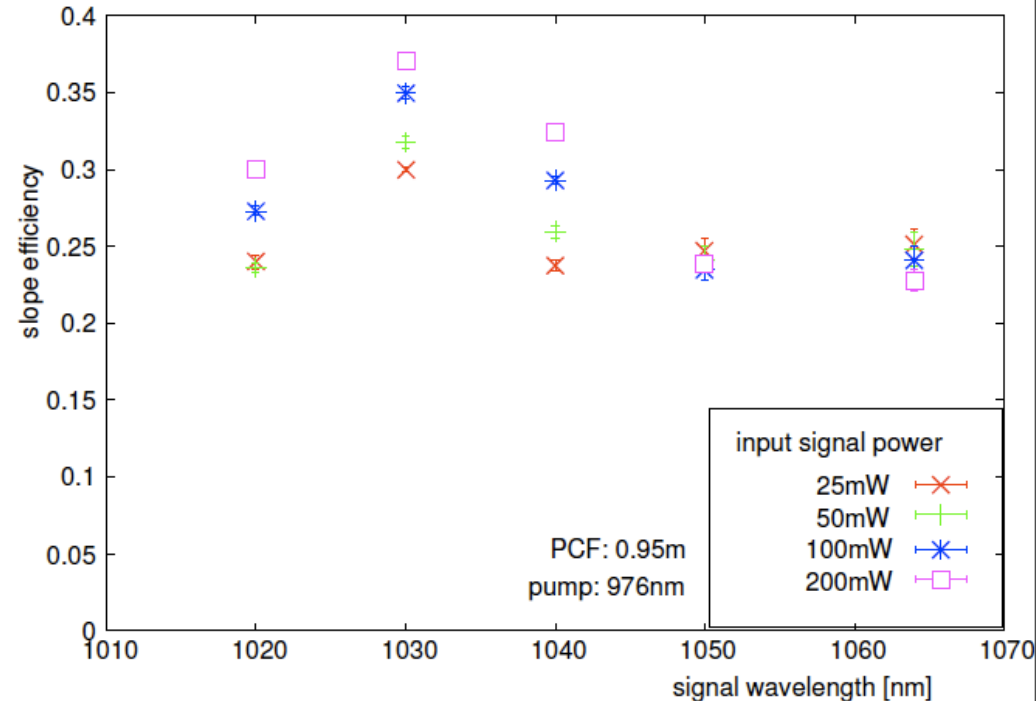
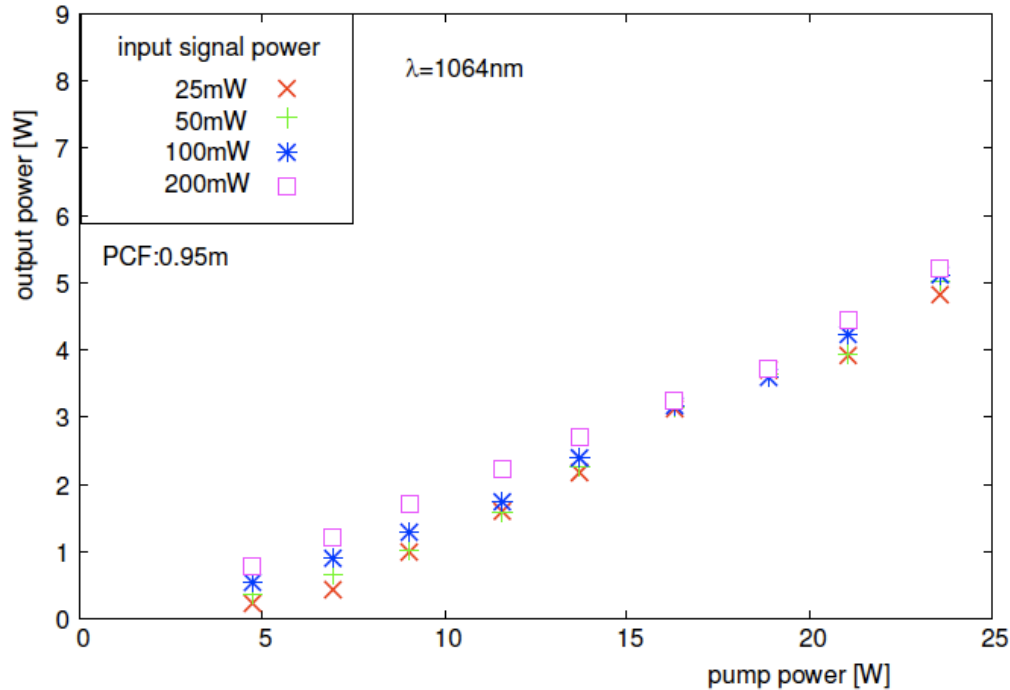
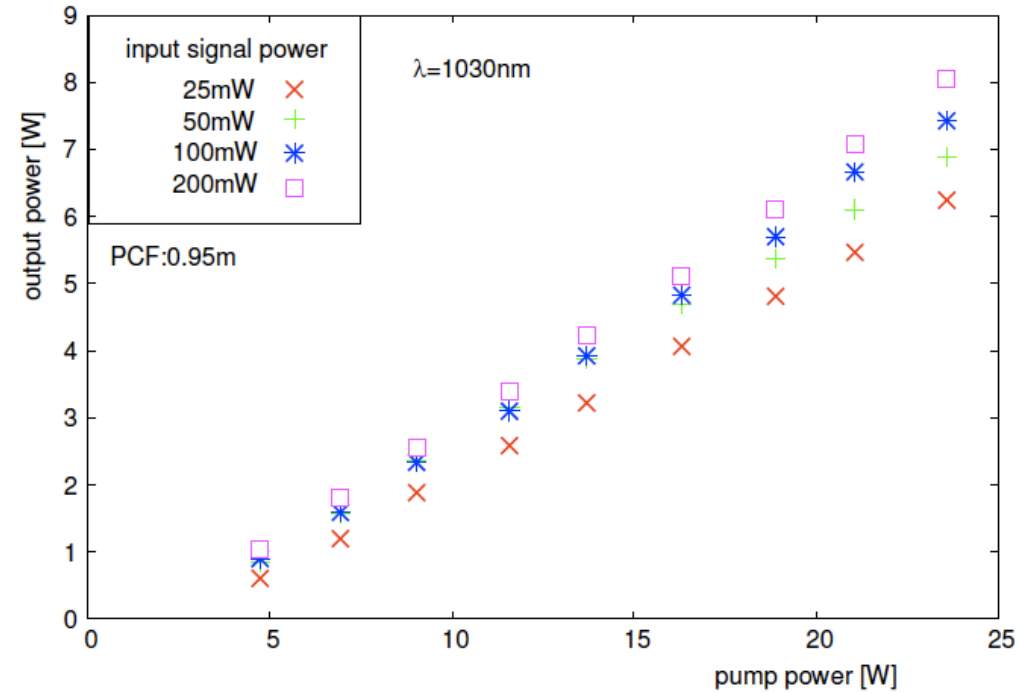
高出力での動作の予想

- ファイバ長が異なるときの、励起光vs出力の計算。
- 最適化
 - ファイバ1.5m
 - 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。
- 今は、ファイバ長0.95mでテストしているが、次は1.5mに交換して試験する予定。



波長依存性

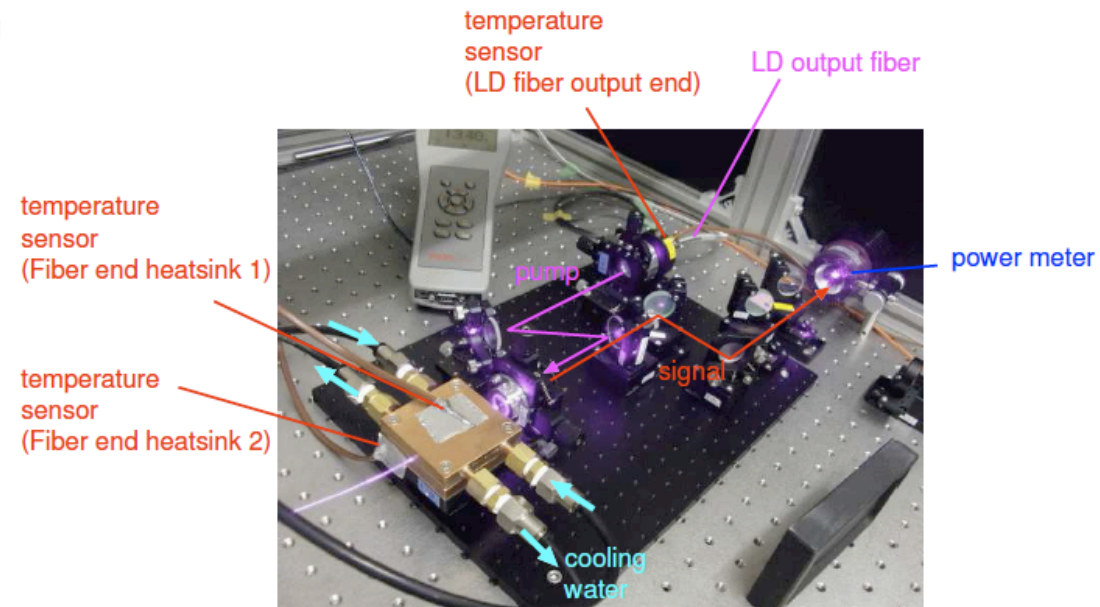
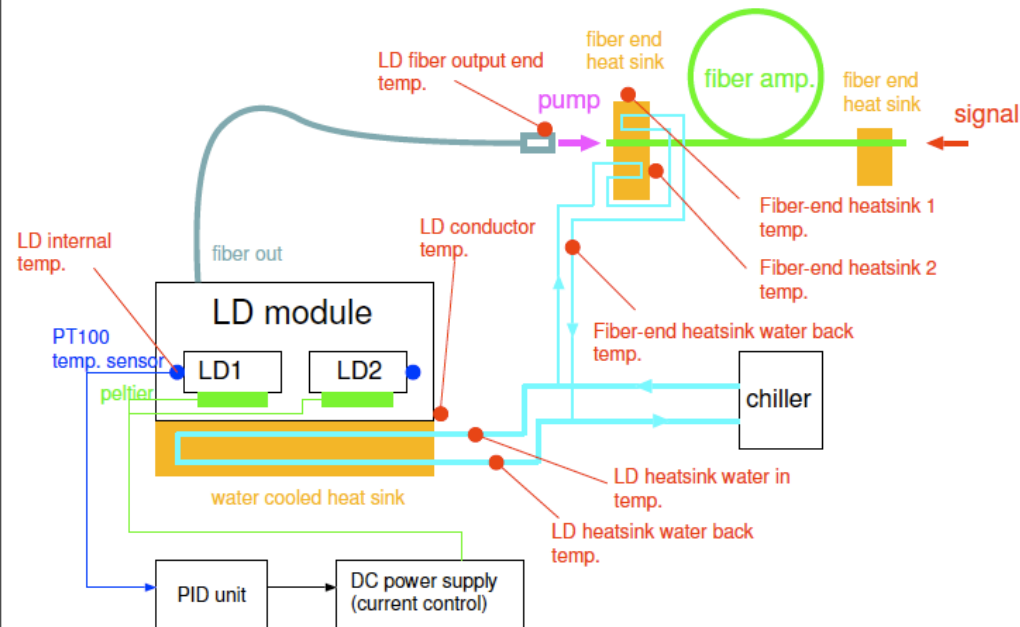
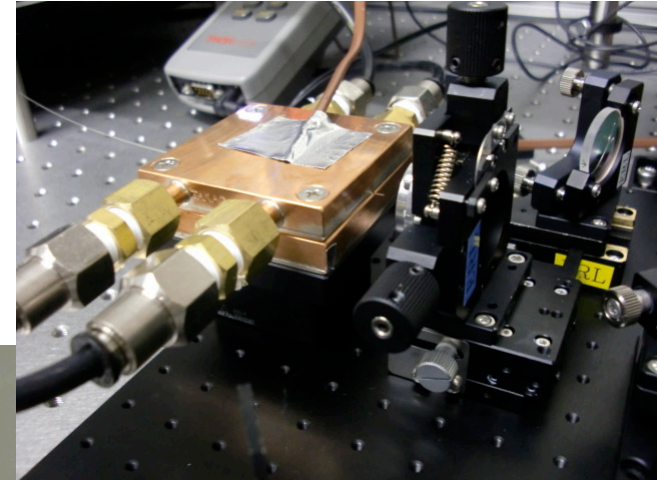
- 産総研では1035nmで試験してきた。cERLでは1064nmなので少し損。波長による違いを測定した。
- 励起24Wのとき、
 - 波長1030nmで8W(スロープ効率37%)
 - 波長1064nmで5W(スロープ効率24%)
 - 1.5倍くらい不利ではある。
- Ybの自然放出増幅光(ASE)が1030nmを中心に発生し、より高いゲインで成長するので、それとの競争に勝つ為にも、1064nmの信号光は高い入力強度が必要。



高出力試験

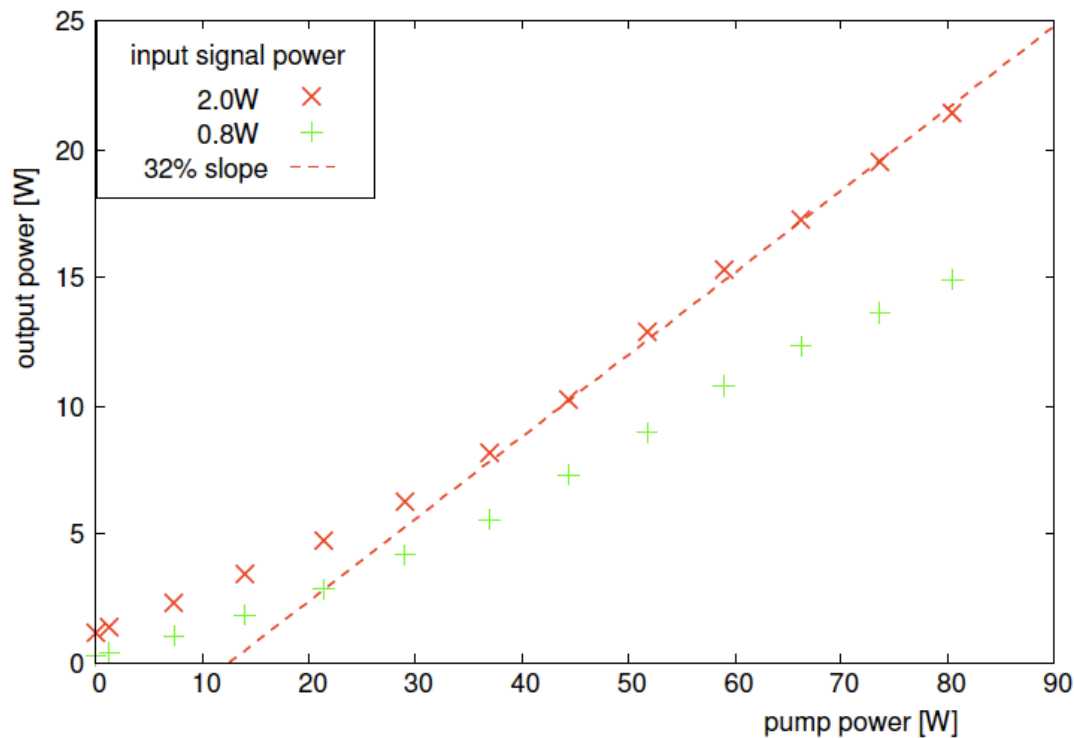
高出力試験のセットアップ

- 産総研では何度かファイバを損傷。
- 高出力の時は、励起光導入のファイバ端部を除熱するのは常識。
- ATF/LALでは水冷ヒートシンク+モードストリッパ付きコネクタにしている。(コーネルもこのタイプに変更したらしい)
- 新規に購入したファイバはSMA905コネクタ。
- 産総研では切りっぱなしファイバ。水冷はやっていない。
- せめて、水冷ヒートシンクでサンドイッチした。
- 温度計も各部に設置

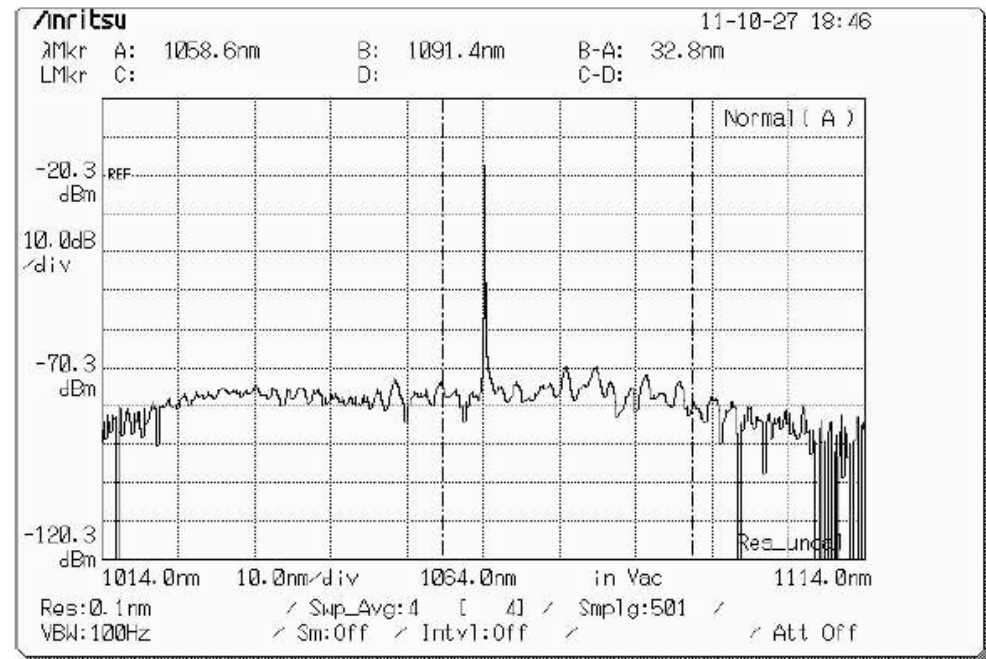


高出力試験

- 80Wの励起で、21.4Wが得られた。ほぼ計算どおり。
- ファイバ長を最適化(0.95m->1.5m)すると、30Wいけそう。
- ASEは十分抑えられている。
 - 入力に1W以上ないとASEに負ける。効率も落ちる。



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



ASE対策

- Ybは波長1030nm付近がもっともゲインが高い。ほっておくと、自然放出増幅光(ASE)が成長する。
- ASEが発振してピーク状になると、せっかくの励起エネルギーがとられる。
- ノイズからの発振なので、ピークが高くなりうる。ファイバ破壊の危険。
- ASEに負けないように、ある程度大きな入力信号が必要。プリアンプが重要。
- アンプを多段化して、余計な波長はバンドパスフィルタで取り除く。

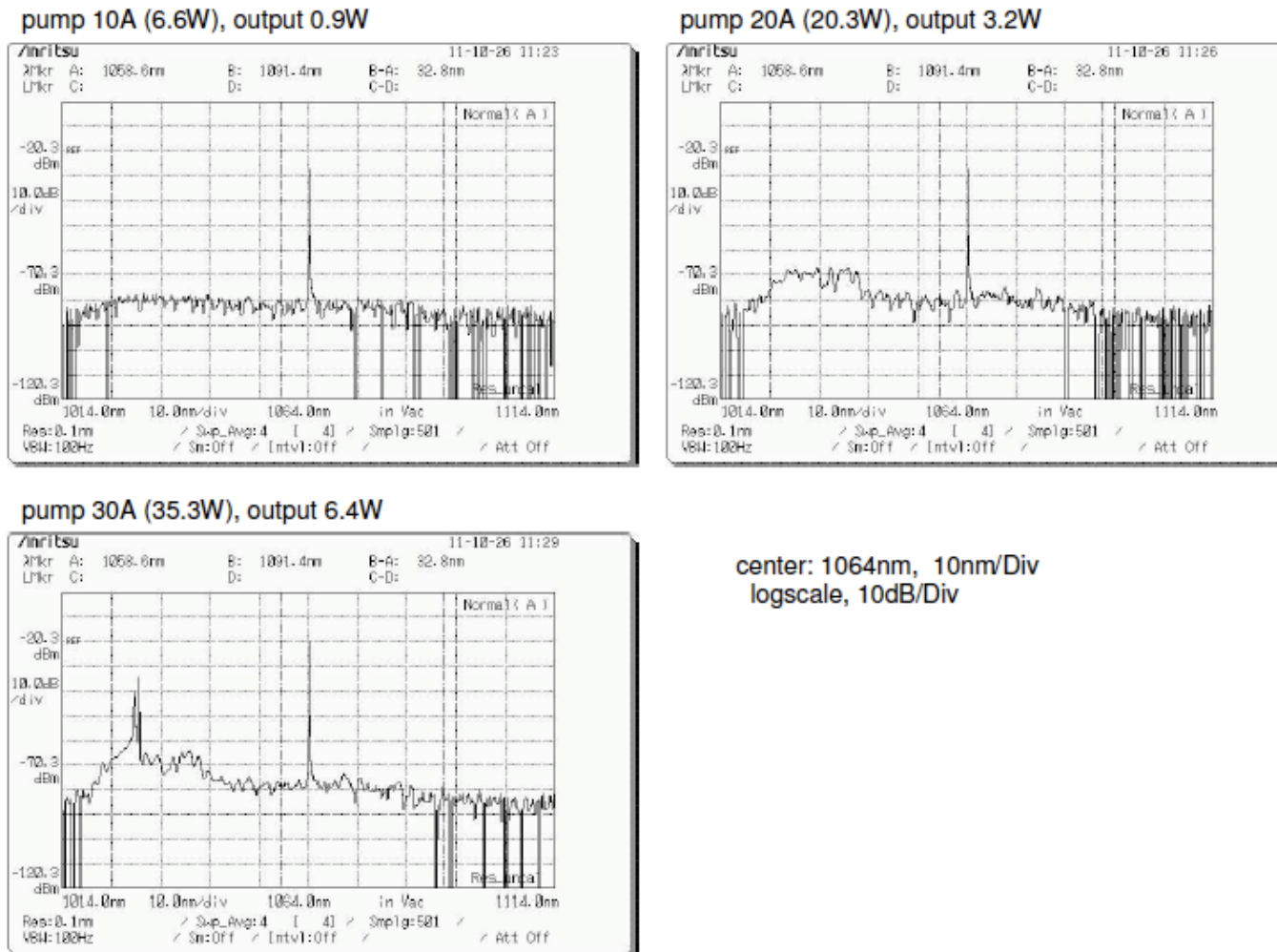


図 4: 入力信号 200mW のときの増幅出力のスペクトル

まとめ

- 増幅器についても見通しはついた。
- cERLレーザーのシステム全体について、各部について大体同じレベルには理解されている。
- パーツを選定できるだけのデータを得たので、システムを設計して、購入できる段階になった。
- 安定性とかはまだあるが、システム全体を組みながらのテストになるだろう。