

Development of High-power fiber amplifier



Institute for Laser Science, University of Electro-communications

Mitsuru Musha

Ken'ichi Nakagawa , Ken-ichi Ueda

The 3rd TAMAsymposium 2003/2/6

将来の重力波干渉計用光源

❖ 出力 100～300W

❖ 縦横単一モード、直線偏光

❖ 強度雑音 観測帯域 $10^{-8} / \sqrt{\text{Hz}}$

変調周波数領域 $10^{-5} / \sqrt{\text{Hz}}$

❖ 周波数雑音 $3 \times 10^4 / f$ [Hz/ $\sqrt{\text{Hz}}$] @ 無制御時
 1×10^{-6} [Hz/ $\sqrt{\text{Hz}}$] @ 安定化時

現行10Wレーザーと同程度の雑音と制御性

現在の形式(端面励起、注入同期)では
熱効果により20W以上は困難

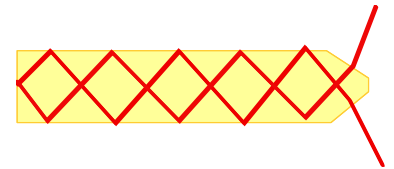
100-W 級出力への試み

- 注入同期チェーン (豪 Adelaide大)

slab型高出力レーザー

強度・モードの安定度

熱複屈折(結晶内部歪みによる)



- MOPA(主レーザー・光増幅器)

・スラブアンプ (米 Stanford大)

波面の歪み、強度雑音

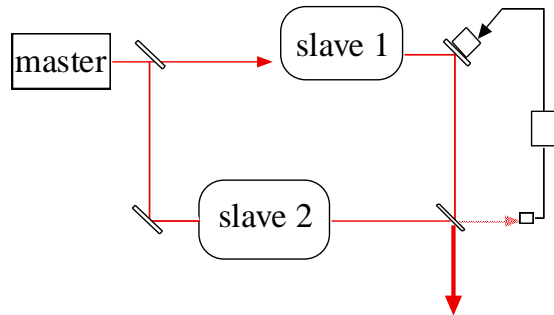
・ファイバーアンプ (独 Friedrich Schiller大)

散乱による雑音

- コヒーレント加算 (日 電通大)

空間モード

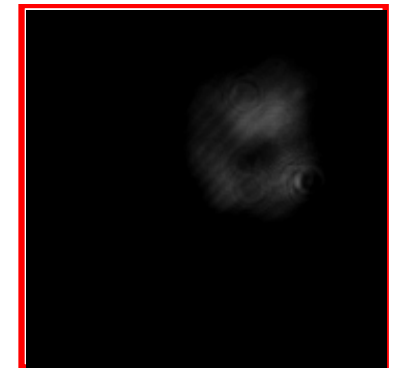
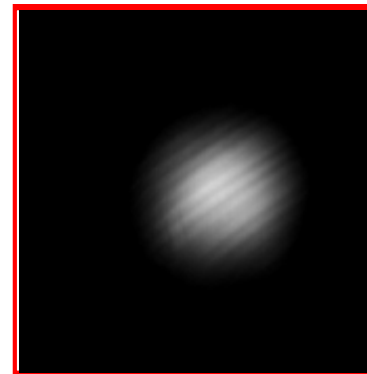
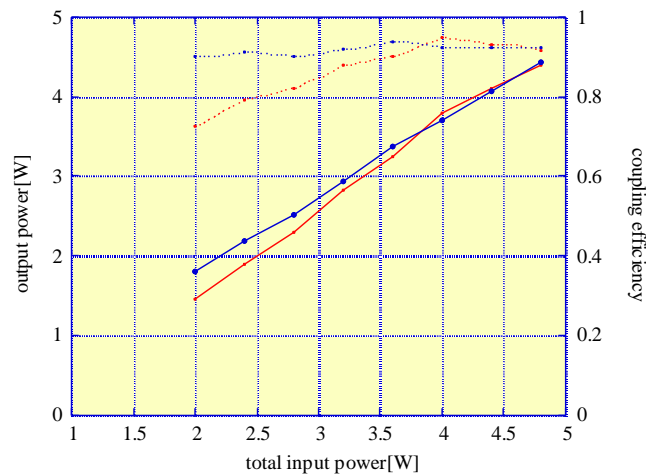
コヒーレント加算



結合効率 90%以上

強度雑音・周波数雑音

注入同期レーザーと同じ

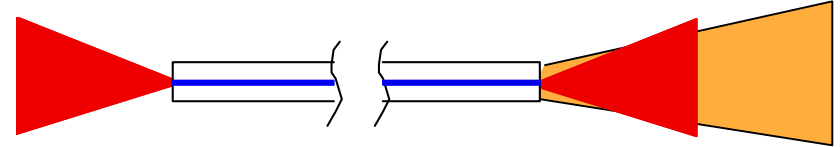


● 多数加算時には空間モードの乱れが問題となる

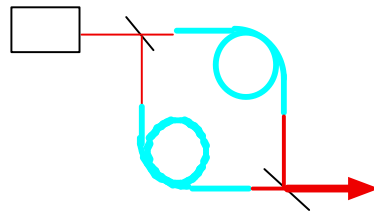
本研究

●ファイバー増幅器によるMOPA

- 高い冷却効率
- 高密度率励起
- 空間モード制御
 - NPROを主レーザー
 - Fiber-coupled LD-arrayによる端面励起
 - ダブルクラッドファイバー
 - Yb添加ファイバー



●コヒーレント加算



加算効率が高い

ファイバーアンプの問題点

- 偏光の乱れ
- 強度雑音、位相雑音の増加
- Reileigh散乱による損失
- 誘導Brillouin散乱(SBS)により利得が減少
18GHz(offset),38MHz(bandwidth)
- SBSは後方散乱
誘導phononにより励起光がゆらぐ
後方散乱photonが誘導phononにより再散乱
Thermal Brillouinによる再散乱
信号光の強度雑音に結合
線幅が細いと閾値が下がる

SBS閾値を下げる方法

SBS閾値

$$P_{th} = 21 \frac{A_{eff}}{g_b L_{eff}}$$

A_{eff} : 有効コア径

L_{eff} : 有効作用長

G_b : 利得ピーク値

- 有効コア径を大きくする
信号光密度を下げる
(シングルモード条件から外れる)
- 相互作用長を短くする
 - ・ 吸収効率を上げる Ybの高濃度添加
 - ・ 高強度励起 double-clad fiber
 - ・ 吸収効率の増加 Clad形状の工夫

マルチモードファイバーの 高次モード抑圧

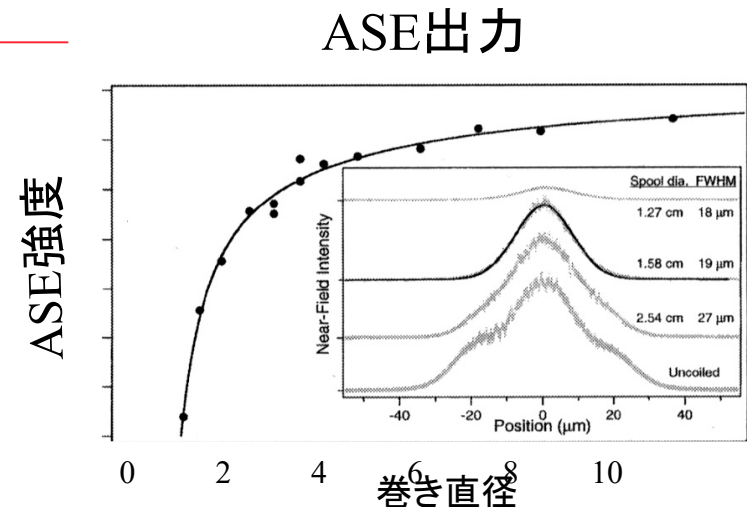
シングルモード条件を維持するため

$$V = k \cdot 0A_{eff} (n_1^2 - n_2^2) \ll 2.4$$

- コア中に損失部を作り高次モードを抑圧
- コアの屈折率分布を工夫
- Photonic fiber
- 低NAファイバ spontaneous emission も減る
- ファイバを巻いて高次モードを抑圧

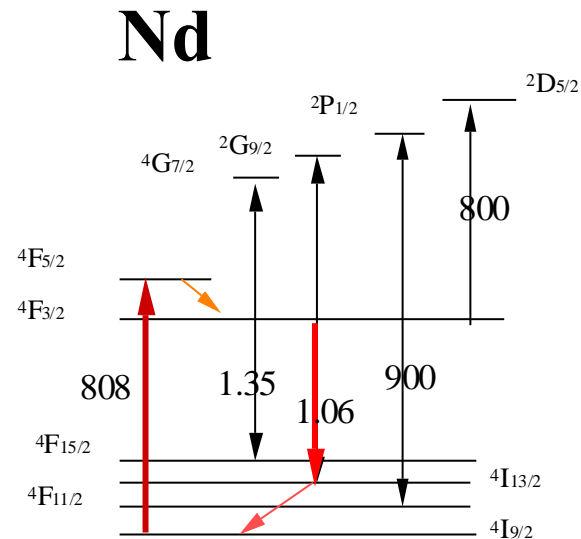
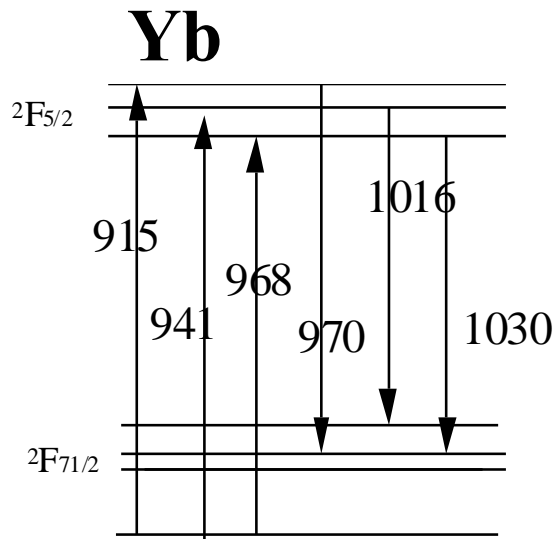
巻き損失

高次モード抑圧比が高い



15mmでASEが消える 高次モードが伝搬しない

Ybについて



準3準位構造

- 量子欠損が少ない
- ESA, upconversionが無い
- 吸収遷移と蛍光遷移が重なる
- 誘導放出断面積が小さい

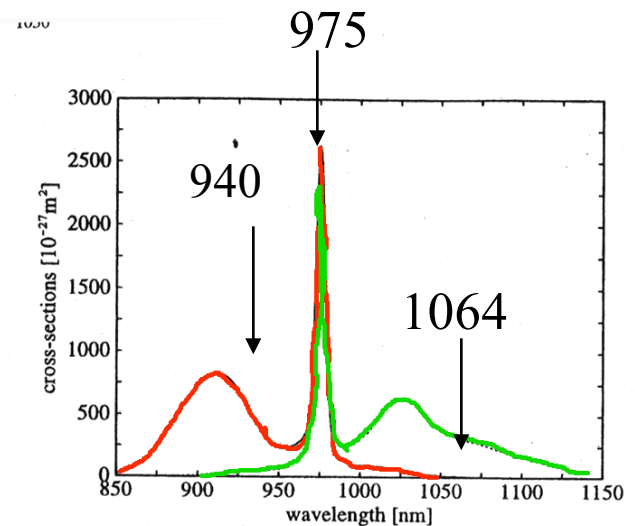


Fig. 1. Absorption (solid) and emission (dotted) cross-sections for Yb.

Yb の特徴

- 1064nmに誘導放出利得がある
- 吸収スペクトルが広い LDの制御負担緩和
- 濃度消光が少ない 高濃度添加、ファイバ長を短くできる
- 飽和吸収を起こすため強励起が必要 fiberが適する
ESA, UCが無い
- 再吸収があるのでmode-overlappingが必要
励起が弱くなると再吸収が強い
下準位の熱励起が起こる

偏光

ファイバー中では応力・温度により偏光状態が変わる

偏光保持する必要

○クラッドに構造を作り偏波保持ファイバーにする

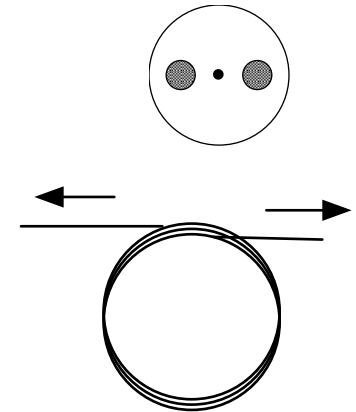
○一定応力を加えて非等方にする

コイル状に巻き張力をかける

応力有り $\beta_{tc} = -3.1 \frac{\varepsilon r}{\lambda R}$ ε : 軸応力
r : fiber外径
R : コイル半径

応力無し $\beta_{tc} = -0.86 \frac{r^2}{\lambda R^2}$

15cm巻き $P_p/P_s > 17\text{dB}$



β_{tc} : stress-induced birefringence

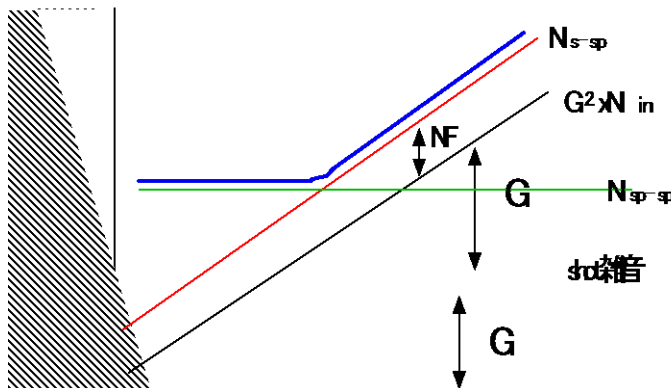
光アンプの雑音特性

- 屈折率変動による位相雑音
- 非線形雑音
- 誘導自然放出雑音(ASE) による強度雑音

$$I_{\text{out}} = E_s^2 + \underline{E_{\text{sp}}^2} + \underline{E_s E_{\text{sp}}^* + E_s^* E_{\text{sp}}}$$

E_s : 信号光

E_{sp} : 自然放出光



$$\text{出力雑音} = \text{利得} \times P_{\text{shot}} \times NF$$

$$NF = \frac{\text{入力のS/N}}{\text{出力のS/N}} = \frac{\text{出力雑音/G}}{\text{増幅shot雑音}}$$

$$NF = 2n_{\text{sp}} \frac{\text{利得}}{G} \frac{G-1}{G} + \frac{1}{G} + \boxed{\frac{n_{\text{sp}} (G-1)^2 e(2B_0 - B_e)}{G^2 I_s}} + \boxed{\frac{2(G-1)n_{\text{sp}} eB_0}{G^2 I_s}}$$

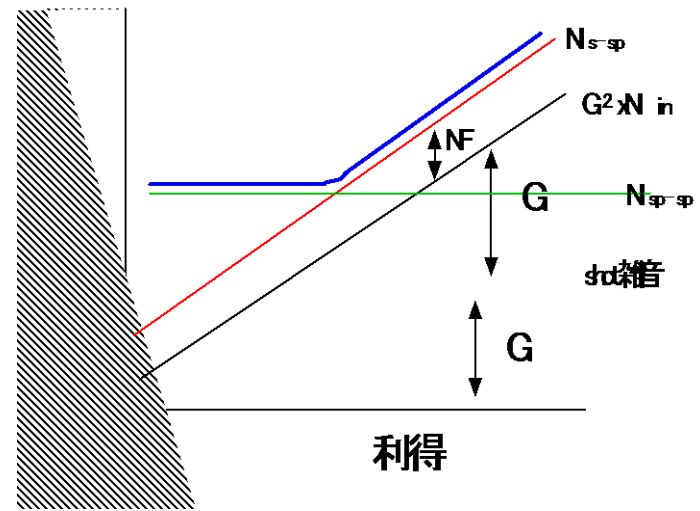
ASE-SIGのビートが支配的

強度雑音限界

- 入力信号強度を一定値以上 $\rightarrow NF$ を s-sp に支配させる

$$NF = 2n_{sp} \frac{G-1}{G}$$

- 利得を高く $\frac{G}{G-1} \rightarrow 1$



- $n_{sp} = \frac{N_2}{N_2 - \frac{\sigma_e}{\sigma_a} N_1} \rightarrow 1$

反転係数

▪ 強励起

▪ 吸収断面積(大)

(励起波長に依存)

$$\underline{NF \rightarrow 2 \text{ (3dB)}}$$

設計上のポイント

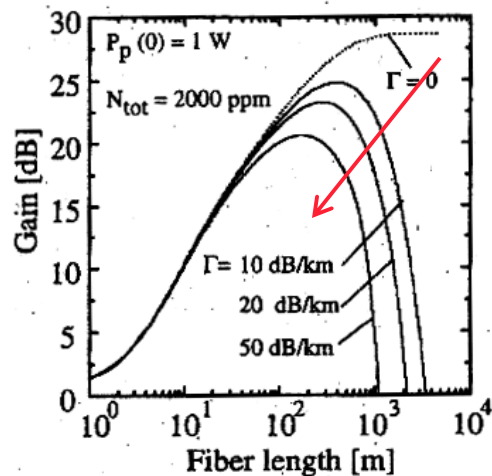
- ファイバー コア径
クラッド径
クラッド形状
添加濃度
長さ
- 励起 励起波長 効率
雑音特性
励起方向
励起方法
- モード選択 曲げによる高次光損失
偏光特性
- 付加位相雑音

ファイバ長

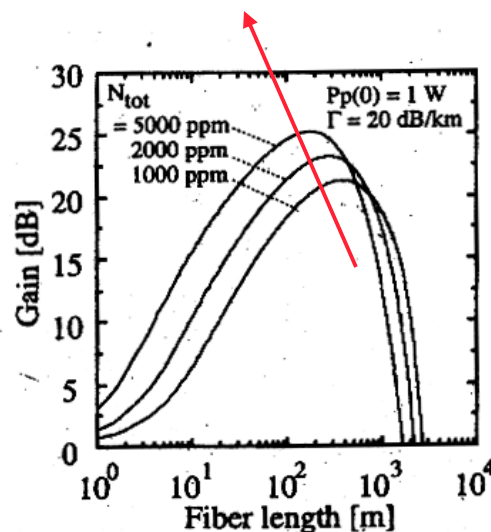
最適長は 利得、(濃度、励起強度)
損失(ファイバ固有の損失、添加による損失)
高->短

実際にはSBS閾値も考慮に入れる

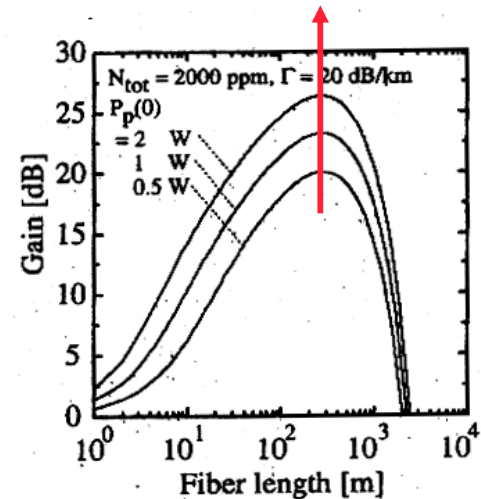
散乱損失



添加濃度



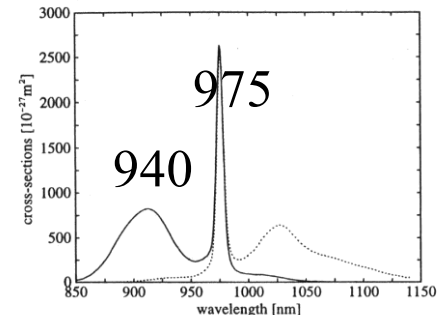
励起強度



励起波長

○940nm 反転効率 $N_2/(N_2-N_1)$ が高い ~97%
スペクトルが広い LDの温調不要
975nmでのASEが発生

○975nm 量子効率が
高い吸収効率 濃度消光
利得飽和が起きにくい
反転効率 ~50%
1064nmではクラッド励起が使える

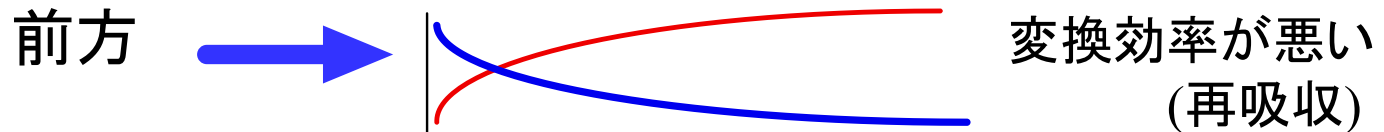


励起方法

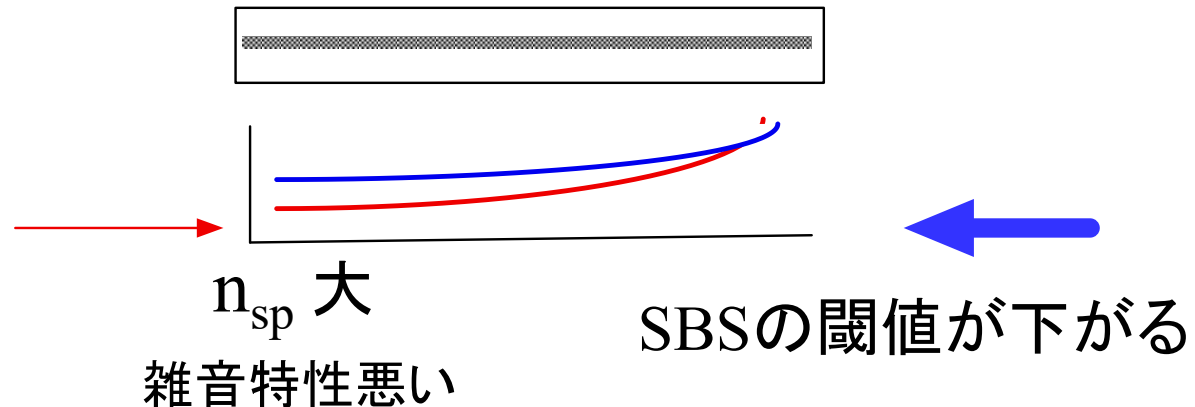
○2重クラッドファイバー端面励起

○クラッド形状 非対称形 吸収効率が低い
D-shape、矩形、六角形

励起方向

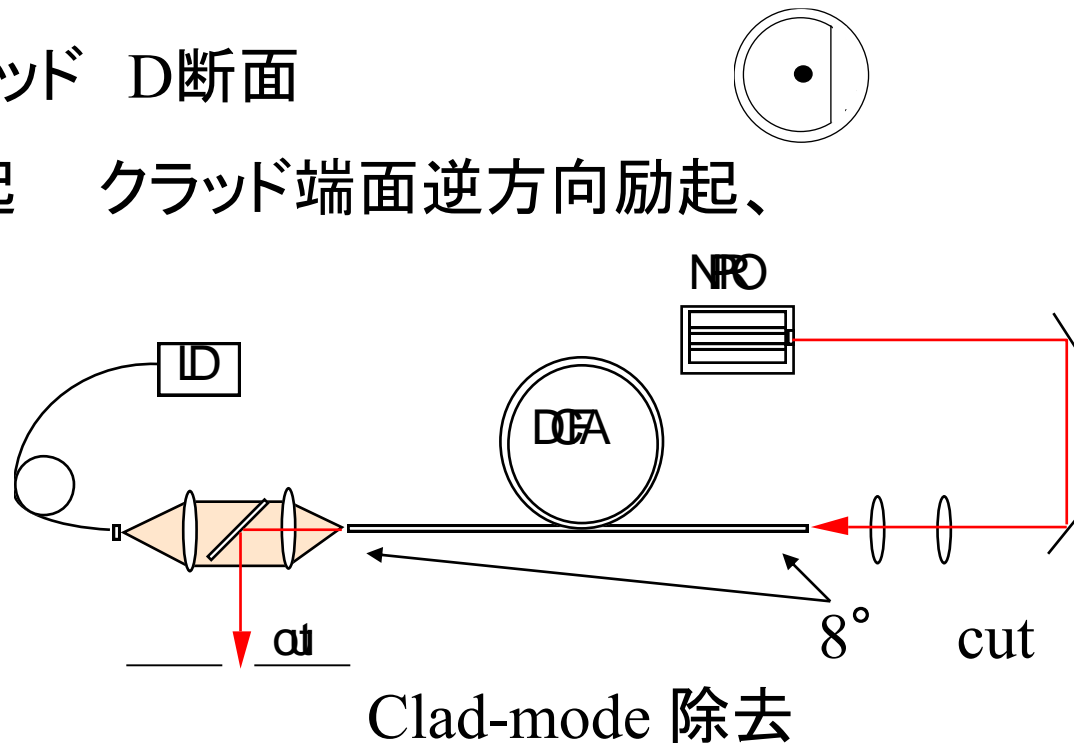


後方



実験系

- 主レーザー (NPRO or 注入同期レーザー)
- Fiber multimode Double-clad fiber $\phi_{\text{core}}=10\mu\text{m}$
低NA < 0.08
Yb濃度 0.05%以上
- クラッド D断面
- 励起 クラッド端面逆方向励起、



励起光源

○ THALES社製ファイバー結合LD (TH-C5525-F6)

中心波長 **940**±5nm FWHM 2.9nm

出力 **25W** @ 43.5A

ファイバ コア直径**600**μm NA=0.22

○ 浜松ホトニクス社製ファイバー結合LD (LA0349)

中心波長 **975**±5nm FWHM=5nm

出力 **15W** @37A

ファイバ コア直径**200**μm NA=0.2

ファイバー

- IPHT Jena社

コア 直径 $11\mu\text{m}$ 、NA=0.16

添加物 Yb 濃度 6500ppm

内クラッド 直径 $400\mu\text{m}$ 形状 D-shape

長さ 10m

モード径

- INO社 コア径 $13\mu\text{m}$ NA=0.15

クラッド径 $250\mu\text{m}$ 形状 六角形

現状と計画

940nm-25W- $\phi=600\mu\text{m}$ のLD

D-shape-clad $\phi=400$

入手

975nm LD 3月初旬

出力特性 —— 利得、線形損失の評価

最適長の計算

ASEの測定 SBS閾値

コイル巻き モード選択、偏光特性評価

位相雑音等の評価

NOISE

