

ILC、ERL用のレーザ光源 に求められるもの

全日本フォトカソード電子銃用光源レーザ開発共同チーム: LAAA
富澤 宏光、松原 伸一、川戸 栄

- 0. 全体に亘る検討事項
 - I. リニアコライダー用レーザ案1の概要
 - II. リニアコライダー用レーザ案2の概要
 - III. ERL用レーザ案1の概要
 - IV. ERL用レーザ案2の概要
 - V. レーザのランニングコストとLDの寿命

0. 全体に亘る検討事項

- 方針1: リニアコライダー用とERL用をなるべく共存
 - 励起用LD
 - QCW-LD: リニアコライダー用
 - CW-LD: ERL用
 - マクロパルスの切り出しに関して(リニアコライダー用)
 - 主発振器の後でEOまたはAOで切り出す
 - QCW-LDのジッター対策に、最終段でポッケルセルで切り出す
- 方針2: カソードを限定しない(偏極等の問題があるが)
 - 両方とも、案1(1030~1050nm)と案2(1560nm)を用意
 - 案1のカソードはCeTeを想定(偏極の問題が残ります)
 - 案2のカソードはGaAsを想定
- 方針3: 光学系は機能として表記
 - 現状で研究段階のものが必要なため、表記では開発済みの素子で表記
 - ストレッチャー、コンプレッサー等のグレーティングはChirped FBGに置き換わる可能性があります。

I. リニアコライダー用レーザー案1の概要(1030~1050nm)

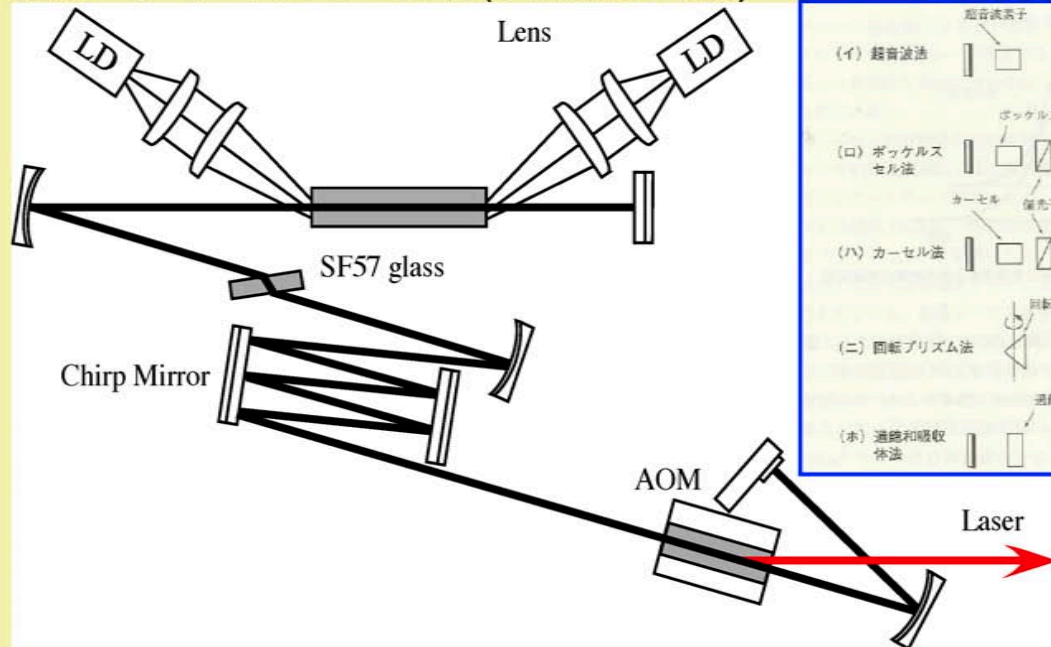
- 基本波出力 ($\lambda = 1030 \sim 1050 \text{ nm}$)
 - 最大パルスエネルギー > $32 \mu\text{J}$
 - ミクロパルス繰り返し周波数: 3 MHz (周期: 333 ns)
 - 疑似連続波出力 > 96 W (マクロパルス幅 0.933 ms 以内で > 90 mJ)
 - マクロパルス繰り返し周波数: $5 \text{ Hz} \sim 100 \text{ Hz}$ (最大)
 - 平均出力 > $0.45 \text{ W} \sim 9.0 \text{ W}$ (最大)
 - パルス幅: $10 \sim 20 \text{ ps}$
 - スペクトルバンド幅 > $2 \sim 5 \text{ nm}$
- 4倍波 ($\lambda = 258 \sim 263 \text{ nm}$), (変換効率 10% と仮定)
 - 最大パルスエネルギー > $3.2 \mu\text{J}$
 - ミクロパルス繰り返し周波数: 3 MHz
 - 疑似連続波出力 > 9.6 W (マクロパルス幅 0.933 ms 以内で > 9.0 mJ)
 - マクロパルス繰り返し周波数: $5 \text{ Hz} \sim 100 \text{ Hz}$ (最大)
 - 平均出力 > $48 \text{ mW} \sim 960 \text{ mW}$ (最大)
 - パルス幅: $10 \sim 20 \text{ ps}$
 - スペクトルバンド幅 > $2 \text{ nm} \sim 5 \text{ nm} / 16$

リニアコライダー用レーザー案1の方式

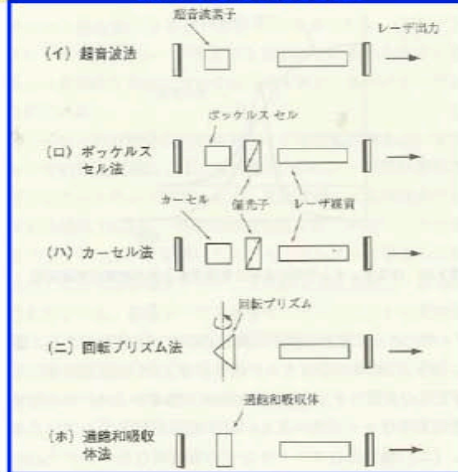
- 方式1: キャビティダンブモード同期 Yb:YAG レーザ (全て固体レーザ)
 - CWモード同期繰り返し周波数 $\sim 100 \text{ MHz}$, キャビティダンブ周波数 3 MHz
- 方式2: 主発振器 + 高出力増幅器 (MOPA) システム
 - 方式a: 高パルス出力発振器 + 高出力増幅器 (全て固体レーザ)
 - 主発振器: キャビティダンブモード同期発振器 (パルスエネルギー $\sim \text{mJ}$)
 - 増幅器: 高出力多重光路増幅器 (利得 $\sim 10 \text{ dB}$)
 - 方式b: 低出力発振器 + 高出力高利得増幅器 (1~3段, ファイバーレーザ + 固体レーザ)
 - 主発振器: CWモード同期発振器 (パルスエネルギー $\sim 1 \sim 10 \text{ nJ}$)
or CWモード同期ファイバー (パルスエネルギー \sim 数 10 pJ)
+ 前置増幅器 (利得 $\sim 20 \text{ dB}$, パルスエネルギー $\sim \text{nJ}$)
 - 増幅器: 高利得増幅器 (全利得 $40 \sim 50 \text{ dB}$)
 - 1段増幅方式: (固体レーザ)
 - » 再生増幅器 or 多重光路増幅器
 - 2段増幅方式: (ファイバーレーザ + 固体レーザ)
 - » 前置多重光路増幅器 (利得 $\sim 30 \sim 40 \text{ dB}$) + 高出力多重光路増幅器 (利得 $\sim 10 \sim 20 \text{ dB}$)
 - 方式c: チャープパルス増幅 + 高出力高利得増幅器 (1~3段, ファイバーレーザ + 固体レーザ)
 - 主発振器: CWモード同期発振器 (パルスエネルギー $\sim \text{nJ}$)
or CWモード同期ファイバー (パルスエネルギー \sim 数 10 pJ)
+ 前置増幅器 (利得 $\sim 20 \text{ dB}$, パルスエネルギー $\sim \text{nJ}$)
 - ストレッチャー: パルス幅をサブ ns へ
 - 増幅器: 高利得増幅器 (全利得 $40 \sim 50 \text{ dB}$)
 - 1段増幅方式: (固体レーザ)
 - » 再生増幅器 or 多重光路増幅器
 - 2段増幅方式: (ファイバーレーザ + 固体レーザ or ファイバーレーザ)
 - » 前置多重光路増幅器 (利得 $\sim 30 \sim 40 \text{ dB}$) + 高出力多重光路増幅器 (利得 $\sim 10 \sim 20 \text{ dB}$)
 - コンプレッサー: パルス幅を $\sim \text{ps}$ へ

方式 1: キャビティダンブモード同期Yb:YAGレーザ

- 共振器長: 1 ~ 3 m (光スイッチのON/OFF時間による)
- キャビティダンブ用スイッチ: AO or EO素子 (周波数 3 MHz, スイッチ時間 5 ns以下)
- モード同期法: 非線形ガラスによるカーレンズモード同期
- 疑似連続波励起ピークパワー: ~ 960 W (光-光変換効率10%と仮定)
- 励起平均パワー: 4.5 W ~ 90 W (QCW励起の場合)



Qスイッチの方法



方式 1: キャビティダンブモード同期Yb:YAGレーザ

- 最大パルスエネルギー > 32 mJ
- 利得媒質: マイクロスラブ型Yb:YAG
 - スラブ断面積: $(0.5 \sim 1 \text{ mm}) \times (1 \sim 5 \text{ mm}) = 0.5 \sim 5 \text{ mm}^2$
 - スラブ冷却面積: $(1 \sim 5 \text{ mm}) \times (50 \sim 100 \text{ mm}) \times 2 = 1 \sim 10 \text{ cm}^2$
 - 励起ピーク集光強度 $I_p \sim 960 \text{ W} / (1 \sim 5 \text{ mm}^2) = 20 \sim 96 \text{ kW/cm}^2$
 - 励起平均集光強度 $I_p \sim (4.5 \sim 90 \text{ W}) / (1 \sim 5 \text{ mm}^2) = 0.009 \sim 9 \text{ kW/cm}^2$
 - 励起平均パワー/冷却面積: $(4.5 \sim 90 \text{ W}) / (1 \sim 10 \text{ cm}^2) = 0.45 \sim 90 \text{ W/cm}^2$
 - レーザピーク集光フルエンス: $32 \mu\text{J} / (0.5 \sim 5 \text{ mm}^2) = 0.64 \sim 6.4 \text{ mJ/cm}^2$

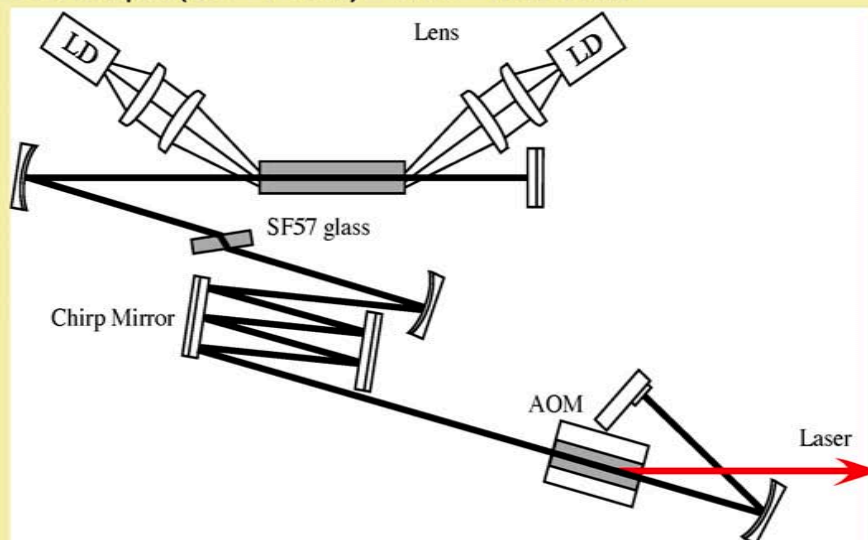
ダメージ・フルエンス:

100 J/cm² @ 1ns
10 J/cm² @ 10 ps

比較例:

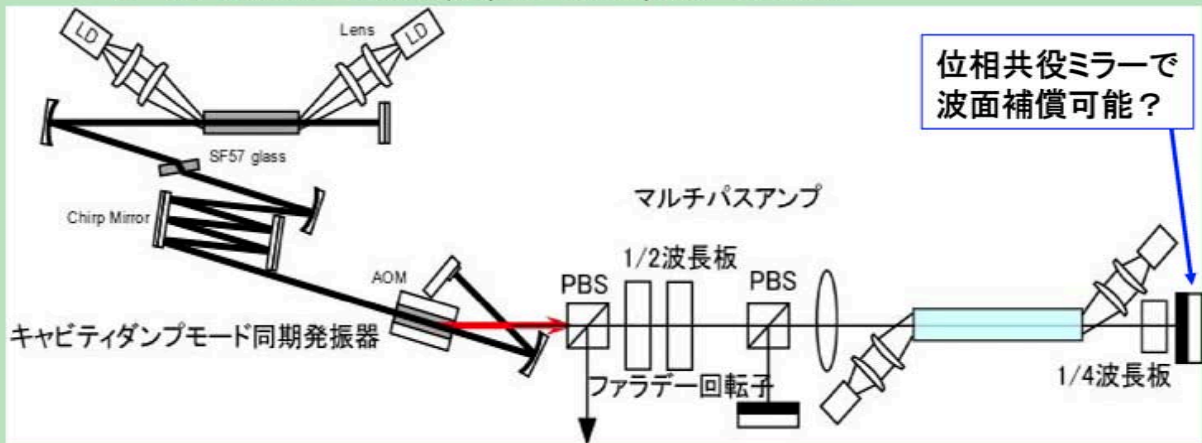
ファイバー断面積
50 μm x 50 μm

※ ほとんどはこの限界
値にいく前に壊れる!
埃の焼付けか?



方式 2a): 主発振器 + 高出力増幅器(MOPA)

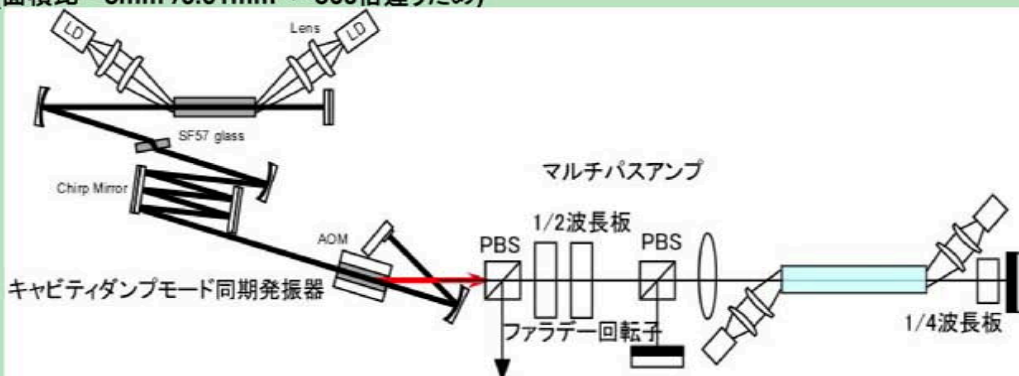
- 主発振器: キャビティダンブモード同期レーザー
 - キャビティダンブ用スイッチ: AO or EO素子(周波数3 MHz, スイッチ時間 5 ns以下)
 - モード同期法: 非線形ガラスによるカーレンズモード同期
 - パルスエネルギー > 3.2 μJ
 - パルス繰り返し周波数: 3 MHz (周期: 333 ns)
 - 平均出力 > 9.6 W
 - パルス幅: 10 ~ 20 ps
 - スペクトルバンド幅 > 2 nm ~ 5 nm
 - 連続波励起パワー: ~ 96 W (光-光変換効率10%と仮定)
 - 利得媒質: マイクロスラブ型Yb:YAG
 - スラブ断面積: $(0.5 \text{ mm}) \times (0.5 \sim 1 \text{ mm}) = 0.25 \sim 0.5 \text{ mm}^2$
 - スラブ冷却面積: $(0.5 \sim 1 \text{ mm}) \times (50 \sim 100 \text{ mm}) \times 2 = 0.5 \sim 2 \text{ cm}^2$
 - 励起集光強度 $I_p \sim 96 \text{ W} / (0.25 \sim 0.5 \text{ mm}^2) = 20 \sim 40 \text{ kW/cm}^2$
 - 励起平均パワー/冷却面積: $96 \text{ W} / (0.5 \sim 2 \text{ cm}^2) = 50 \sim 200 \text{ W/cm}^2$
 - レーザーピーク集光フルーエンス: $3.2 \mu\text{J} / (0.25 \sim 0.5 \text{ mm}^2) = 6.4 \sim 12.8 \text{ mJ/cm}^2$



方式 2a): 主発振器 + 高出力増幅器(MOPA)

- 高出力増幅器: マルチパス(4パス)増幅器(~10dB)
 - 最大パルスエネルギー > 32 μJ
 - パルス繰り返し周波数: 3 MHz (周期: 333 ns)
 - マクロパルス繰り返し周波数: 5 Hz ~ 100 Hz(最大)
 - 平均出力 > 4.5 ~ 90 W(最大)
 - 疑似連続波励起ピークパワー: ~ 960 W (光-光変換効率10%と仮定)
 - 励起平均パワー: 4.5 W ~ 90 W (QCW励起の場合)
 - 利得媒質: マイクロスラブ型Yb:YAG
 - スラブ断面積: $(0.5 \sim 1 \text{ mm}) \times (1 \sim 5 \text{ mm}) = 0.5 \sim 5 \text{ mm}^2$
 - スラブ冷却面積: $(1 \sim 5 \text{ mm}) \times (50 \sim 100 \text{ mm}) \times 2 = 1 \sim 10 \text{ cm}^2$
 - 励起ピーク集光強度 $I_p \sim 960 \text{ W} / (1 \sim 5 \text{ mm}^2) = 20 \sim 96 \text{ kW/cm}^2$
 - 励起平均集光強度 $I_p \sim (4.5 \sim 90 \text{ W}) / (1 \sim 5 \text{ mm}^2) = 0.009 \sim 9 \text{ kW/cm}^2$
 - 励起平均パワー/冷却面積: $(4.5 \sim 90 \text{ W}) / (1 \sim 10 \text{ cm}^2) = 0.45 \sim 90 \text{ W/cm}^2$
 - レーザーピーク集光フルーエンス: $32 \mu\text{J} / (0.5 \sim 5 \text{ mm}^2) = 0.64 \sim 6.4 \text{ mJ/cm}^2$

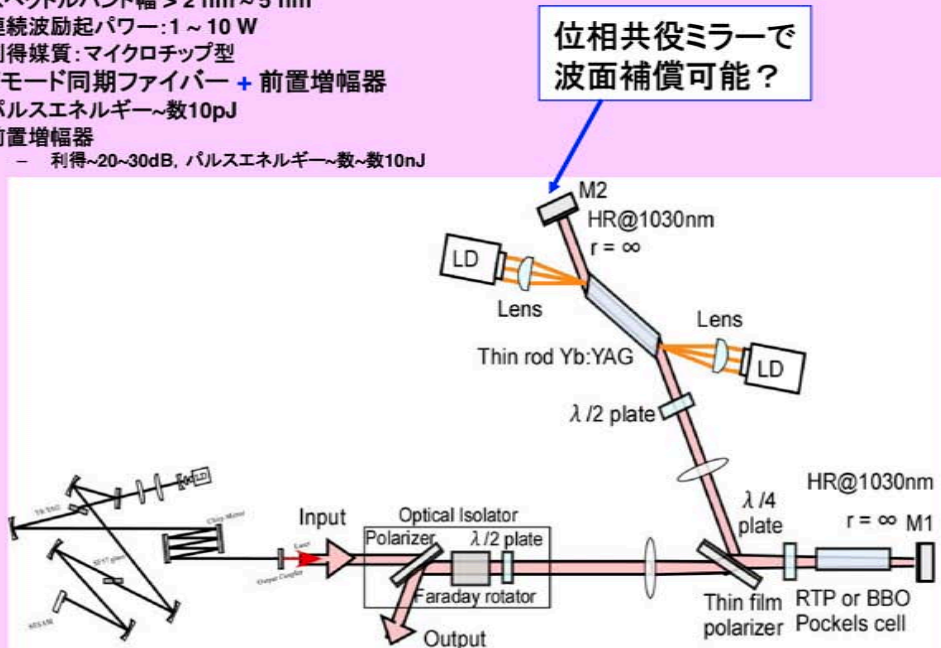
フォトニッククリスタルYbドープファイバーを利用する場合, ダメージフルーエンスに近い(~1/10~1/100)と考えられるので, パルス幅をナノ秒クラスに広げたチャープパルス増幅が望ましい。
(面積比~5mm²/0.01mm² ~ 500倍違うため)



方式 2b): 主発振器 + 高出力増幅器(MOPA)

- 主発振器: CWモード同期発振器 or CWモード同期ファイバーレーザ + 前置増幅器

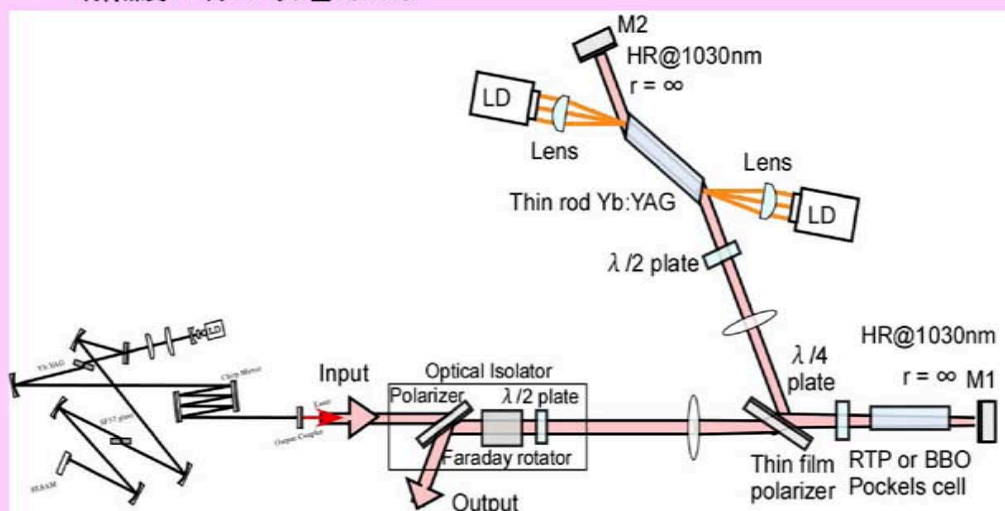
- a) CWモード同期発振器
 - モード同期法: 非線形ガラスによるカーレンズモード同期
 - パルスエネルギー 0.1 ~ 10 nJ
 - パルス繰り返し周波数: ~100~1300 MHz
 - 連続波出力 ~10 ~1000 mW
 - パルス幅: 10 ~ 20 ps
 - スペクトルバンド幅 > 2 nm ~ 5 nm
 - 連続波励起パワー: 1 ~ 10 W
 - 利得媒質: マイクロチップ型
- b) CWモード同期ファイバー + 前置増幅器
 - パルスエネルギー ~数10pJ
 - 前置増幅器
 - 利得 ~20~30dB, パルスエネルギー ~数~数10nJ



方式 2b): 主発振器 + 高出力増幅器(MOPA)

- 高出力高利得増幅器(1~2段): マルチパス増幅器 or 再生増幅器(全利得40~50dB)

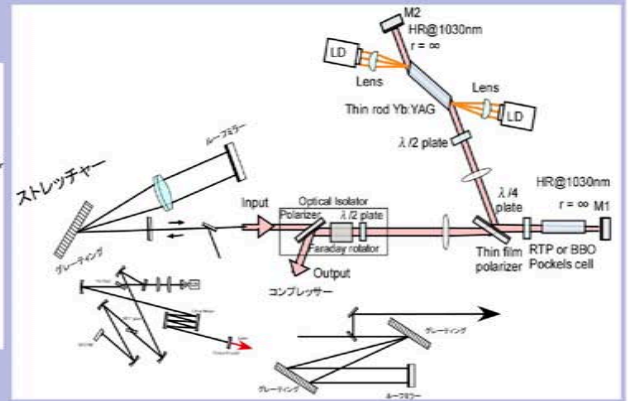
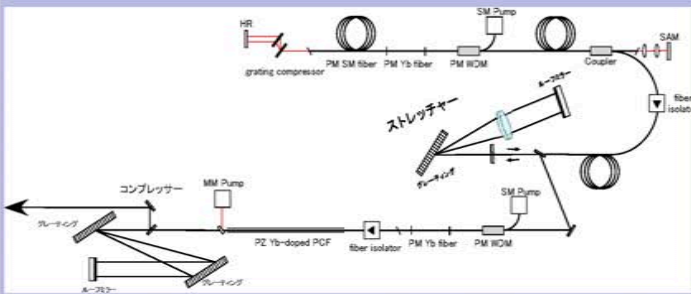
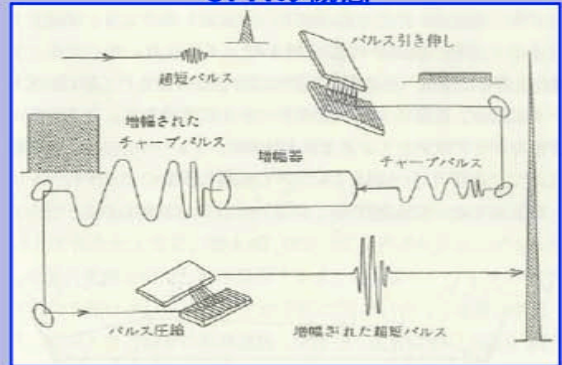
- 増幅器: 高利得増幅器(全利得40~50dB)
 - 1段増幅方式: (固体レーザ)
 - 再生増幅器 or 多重光路増幅器(利得~40~50dB)
 - 2段増幅方式: (ファイバーレーザ + 固体レーザ)
 - 前置多重光路増幅器(利得~30dB) + 高出力多重光路増幅器(利得~10~20dB)
- 最終段の増幅器の特性
 - 最大パルスエネルギー > 32 μJ
 - マクロパルス繰り返し周波数: 5 Hz ~ 100 Hz(最大)
 - 平均出力 > 4.5 ~ 90 W(最大)
 - 励起平均パワー: 45 W ~ 900 W
 - 利得媒質: マイクロスラブ型Yb:YAG



方式 2c): 主発振器 + チャープパルス高出力増幅器(CPA-MOPA)

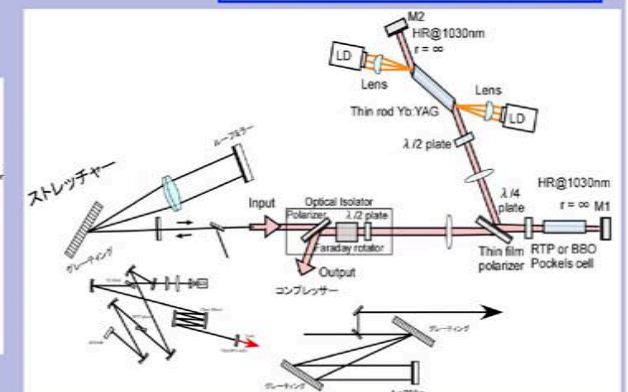
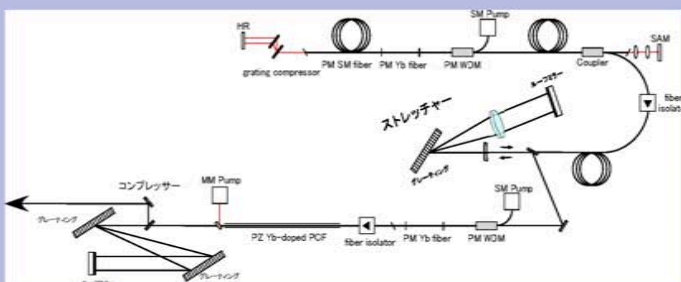
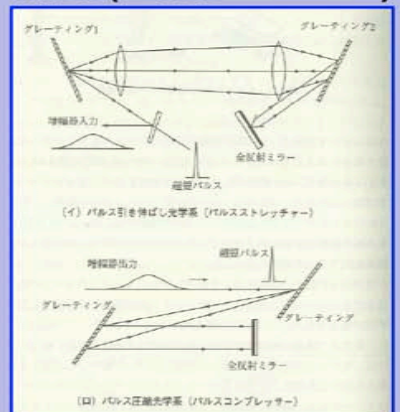
- 主発振器: CWモード同期発振器 or CWモード同期ファイバーレーザ + 前置増幅器
 - a) CWモード同期発振器
 - モード同期法: 非線形ガラスによるカーレンズモード同期
 - パルスエネルギー: 0.1 ~ 10 nJ
 - パルス繰り返し周波数: ~100~1300 MHz
 - 連続波出力 ~10 ~1000 mW
 - パルス幅: 10 ~ 20 ps
 - スペクトルバンド幅 > 2 nm ~ 5 nm
 - 連続波励起パワー: 1 ~ 10 W
 - 利得媒質: マイクロチップ型
 - b) CWモード同期ファイバー + 前置増幅器
 - パルスエネルギー: ~数10pJ
 - 前置増幅器
 - 利得 ~20~30dB, パルスエネルギー ~数~数10nJ
- パルス延伸器: パルス幅を ~ns へ

CPAの概念



方式 2c): 主発振器 + チャープパルス高出力増幅器(CPA-MOPA)

- 高出力高利得増幅器(1~2段): マルチパス増幅器 or 再生増幅器(全利得40~50dB)
 - 増幅器: 高利得増幅器(全利得40~50dB)
 - 1段増幅方式:(固体レーザ)
 - 再生増幅器 or 多重光路増幅器(利得~40~50dB)
 - 2段増幅方式:(ファイバーレーザ + 固体レーザ)
 - 前置多重光路増幅器(利得~30dB)
 - + 高出力多重光路増幅器(利得~10~20dB)
 - 最終段の増幅器の特性
 - 最大パルスエネルギー > 32 μJ
 - マクロパルス繰り返し周波数: 5 Hz ~ 100 Hz(最大)
 - 平均出力 > 4.5 ~ 90 W(最大)
 - 励起平均パワー: 45 W ~ 900 W
 - 利得媒質: マイクロスラブ型 Yb:YAG
- パルス圧縮器: パルス幅を ~ps へ

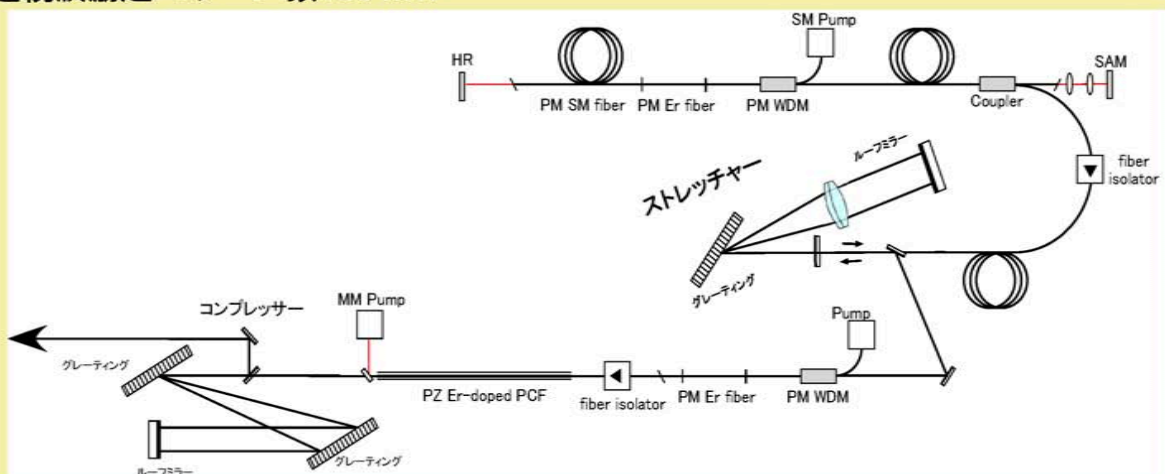


Ⅱ. リニアコライダー用レーザ案2の概要(1560nm)

- 基本波出力 ($\lambda = \sim 1560 \text{ nm}$)
 - 最大パルスエネルギー > $55 \mu\text{J}$
 - ミクロパルス繰り返し周波数: 3 MHz (周期: 333 ns)
 - 疑似連続波出力 > 170 W (マクロパルス幅 0.933 ms 以内で > 160 mJ)
 - マクロパルス繰り返し周波数: $5 \text{ Hz} \sim 100 \text{ Hz}$ (最大)
 - 平均出力 > $0.8 \text{ W} \sim 17 \text{ W}$ (最大)
 - パルス幅: $\sim 1 \text{ ns}$
 - スペクトルバンド幅 > $2 \sim 5 \text{ nm}$
- 2倍波 ($\lambda = \sim 780 \text{ nm}$), (変換効率 20% と仮定)
 - 最大パルスエネルギー > $11 \mu\text{J}$
 - ミクロパルス繰り返し周波数: 3 MHz (周期 333 ns)
 - 疑似連続波出力 > 33 W (マクロパルス幅 0.933 ms 以内で > 31 mJ)
 - マクロパルス繰り返し周波数: $5 \text{ Hz} \sim 100 \text{ Hz}$ (最大)
 - 平均出力 > $160 \text{ mW} \sim 3.3 \text{ W}$ (最大)
 - パルス幅: $\sim 1 \text{ ns}$
 - スペクトルバンド幅 > $2 \text{ nm} \sim 5 \text{ nm} / 2 \sim 4$

方式 1: 主発振器 + 高出力増幅器(MOPA)

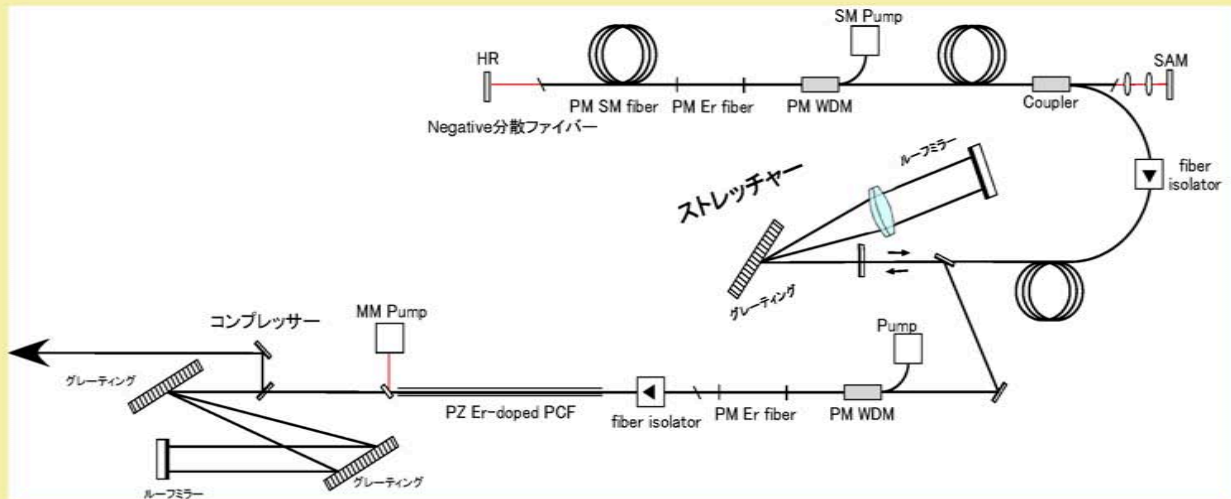
- 主発振器: CWモード同期Erファイバーレーザ
 - モード同期法: NPR (非線形偏光回転: ファイバー中の非線形性による複屈折でカーレンズが生じ, 偏光が回転する現象)
 - パルスエネルギー \sim 数 nJ
 - パルス繰り返し周波数: 3 MHz (周期: 333 ns)
 - 連続波出力 \sim 数 mW
 - パルス幅: 1 ns
 - スペクトルバンド幅 > $2 \text{ nm} \sim 5 \text{ nm}$
 - 連続波励起パワー: \sim 数 100 mW



方式 1: 主発振器 + 高出力増幅器(MOPA)

• 高出力増幅器: マルチパス増幅器

- 最大パルスエネルギー > 11 μJ
- マクロパルス繰り返し周波数: 5 Hz ~ 100 Hz(最大)
- 疑似連続波出力 > 170 W
- 平均出力 > 0.8~17 W(最大)
- 励起平均パワー: 16 W ~ 340 W (光-光変換効率5%と仮定)
- 励起ピークパワー: 3.4 kW
- 利得媒質: Er-PCF(コア径~0.1mm)



Ⅲ. ERL用レーザ案1の概要 (1030~1050nm)

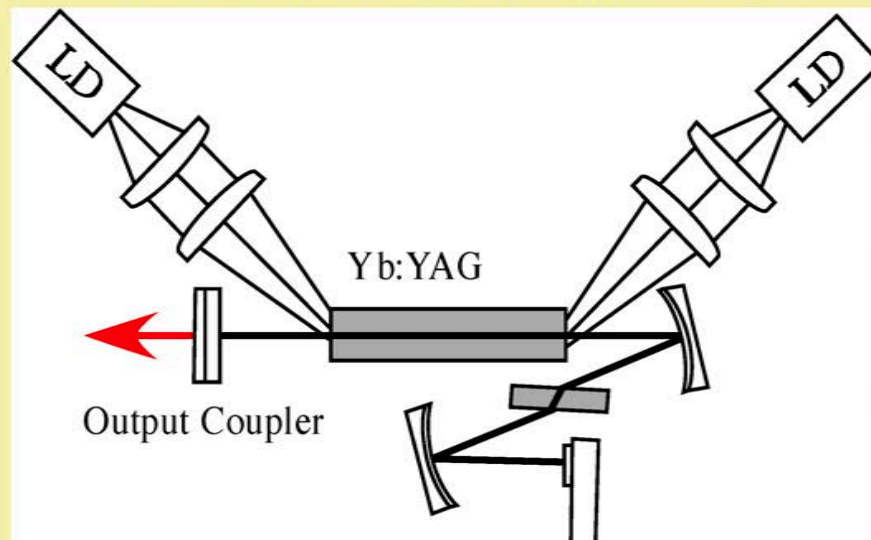
- 基本波出力 ($\lambda = 1030 \sim 1050 \text{ nm}$)
 - 最大パルスエネルギー > 23 μJ
 - 最大繰り返し周波数: 1.3 GHz (周期: 0.77 ns)
 - 平均出力 > 3 kW
 - パルス幅: 5~20 ps
 - スペクトルバンド幅: >2 nm ~ 5 nm
- 4倍波出力 ($\lambda = 258 \sim 263 \text{ nm}$), (変換効率10%と仮定)
 - 最大パルスエネルギー > 2.3 μJ
 - 最大繰り返し周波数: 1.3 GHz (周期: 0.77 ns)
 - 平均出力 > 300 W
 - パルス幅: 5~20 ps
 - スペクトルバンド幅: >2 nm ~ 5 nm / 16

ERL用レーザー案1の方式

- 基本波出力 ($\lambda = 1030 \sim 1050 \text{ nm}$)
 - 最大パルスエネルギー > $23 \mu\text{J}$
 - 繰り返し周波数: 1.3 GHz (周期: 0.77 ns)
 - 平均出力 > 3 kW
 - パルス幅: $5 \sim 20 \text{ ps}$
 - スペクトルバンド幅: > $2 \sim 5 \text{ nm}$
- 方式1: CWモード同期Yb:YAGレーザー
- 方式2: 主発振器 + 高出力増幅器(MOPA)システム
 - 方式a: (パルスを広げない通常の増幅)
 - 主発振器: CWモード同期発振器(パルスエネルギー~数 10 pJ)
 - 増幅器: 高利得増幅器(利得~ 60dB , 再生増幅器 or マルチパス増幅器)
 - 方式b: チャープパルス増幅(ファイバーの場合は必須)
 - 主発振器: CWモード同期ファイバー(パルスエネルギー~サブ pJ)
 - ストレッチャー: パルス幅をサブ ns へ, 透過率~ 50%
 - 増幅器: 高利得増幅器
 - 前置増幅器(利得~ 60dB) + パワー増幅器(利得~ 20dB)
 - 又は
 - 前置増幅器1(利得~ 30dB) + 前置増幅器2(利得~ 30dB) + パワー増幅器(利得~ 20dB)
 - コンプレッサー: パルス幅を~ ps へ, 透過率~ 50%

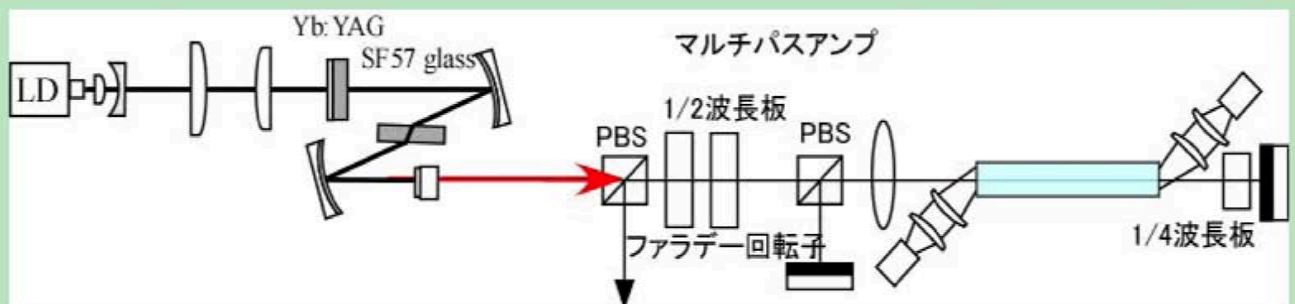
方式1: CWモード同期Yb:YAGレーザー

- 基本波出力 ($\lambda = 1030 \sim 1050 \text{ nm}$)
 - 最大パルスエネルギー > $23 \mu\text{J}$
 - 繰り返し周波数: 1.3 GHz (周期: 0.77 ns)
 - 平均出力 > 3 kW
 - パルス幅: $5 \sim 20 \text{ ps}$
 - スペクトルバンド幅: > $2 \sim 5 \text{ nm}$
 - モード同期: 非線形ガラスによるカーレンズモード同期 (SESAMの援用も検討)



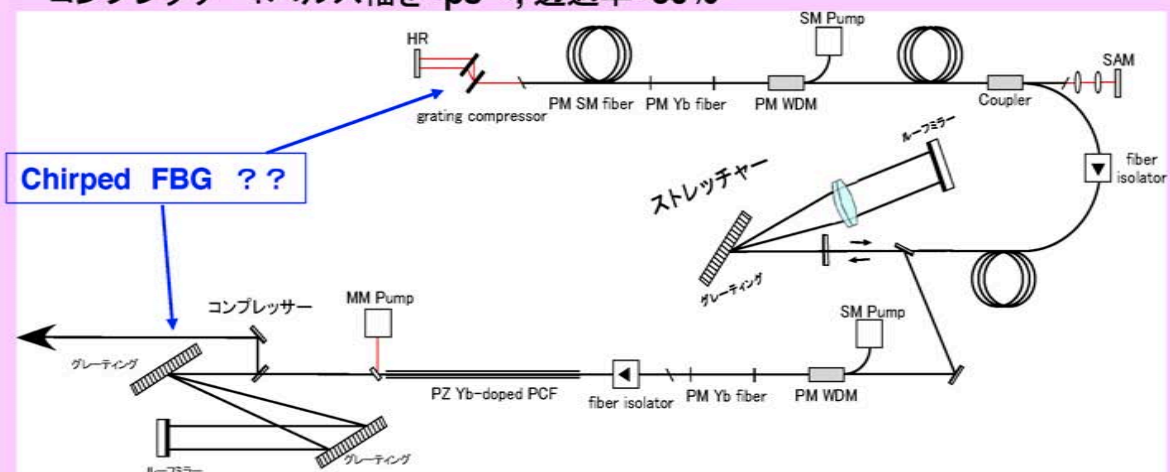
方式2: 主発振器 + 高出力増幅器(MOPA)システム

- 方式a: (パルスを広げない通常の増幅)
 - 主発振器: CWモード同期発振器(パルスエネルギー~数10 pJ)
 - 増幅器: 高利得増幅器(利得~60dB, 再生増幅器 or マルチパス増幅器)
 - 全部で4パス(2往復)



方式2: 主発振器 + 高出力増幅器(MOPA)システム

- 方式b: チャープパルス増幅(ファイバーの場合は必須)
 - 主発振器: CWモード同期ファイバー(パルスエネルギー~pJ)
 - ストレッチャー: パルス幅をサブns~nsへ, 透過率~50%
 - 増幅器: 高利得増幅器
 - 前置増幅器(利得~60dB)(固体レーザ) + パワー増幅器(利得10~20dB)(固体レーザ)
 - 又は
 - 前置増幅器1(利得~30dB) + 前置増幅器2(利得~30dB)(ファイバーレーザ)
 - + パワー増幅器(利得10~20dB)(固体レーザ or ファイバーレーザ)
 - コンプレッサー: パルス幅を~psへ, 透過率~50%



IV. ERL用レーザー案2の概要(1560nm)

- 基本波出力 ($\lambda = \sim 1560 \text{ nm}$)
 - 最大パルスエネルギー > $7.80 \mu\text{J}$
 - 最大繰り返し周波数: 1.3 GHz (周期: 0.77 ns)
 - 平均出力 > 1 kW
 - パルス幅: $5\sim 20 \text{ ps}$
 - スペクトルバンド幅: $>2 \text{ nm} \sim 5 \text{ nm}$
- 2倍波出力 ($\lambda = \sim 780 \text{ nm}$), (変換効率20%と仮定(30%?))
 - 最大パルスエネルギー > $1.6 \mu\text{J}$
 - 最大繰り返し周波数: 1.3 GHz (周期: 0.77 ns)
 - 平均出力 > 200 W
 - パルス幅: $5\sim 20 \text{ ps}$
 - スペクトルバンド幅: $>2 \text{ nm} \sim 5 \text{ nm} / 4$

ERL用レーザー案2の方式

- 基本波出力 ($\lambda = \sim 1560 \text{ nm}$)
 - 最大パルスエネルギー > $7.80 \mu\text{J}$
 - 最大繰り返し周波数: 1.3 GHz (周期: 0.77 ns)
 - 平均出力 > 1 kW
 - パルス幅: $5\sim 20 \text{ ps}$
 - スペクトルバンド幅: $>2 \text{ nm} \sim 5 \text{ nm}$

方式 1: 主発振器 + 高出力増幅器(MOPA)

方式1: 主発振器 + 高出力増幅器(MOPA)システム

– 方式a: チャープパルス増幅(ファイバーの場合は必須)

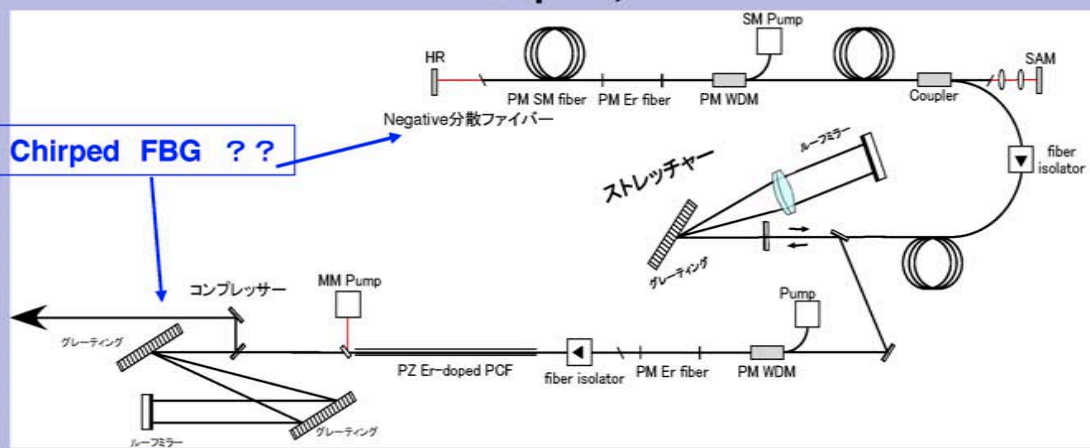
• 主発振器: CWモード同期ファイバー(パルスエネルギー~サブpJ)

• ストレッチャー: パルス幅をサブnsへ, 透過率~50%

• 増幅器: 高利得増幅器

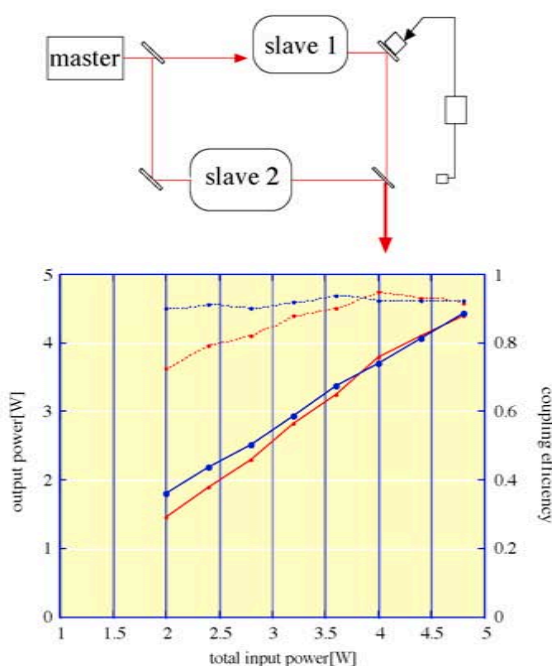
– 前置増幅器1(利得~30dB) + 前置増幅器2(利得~30dB) + パワー増幅器(利得~10dB)

• コンプレッサー: パルス幅を~psへ, 透過率~50%

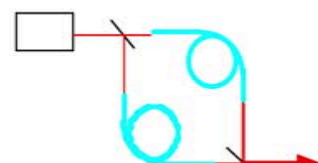


その他の高強度化

コヒーレント加算(例: 電通大の結果)



高い加算効率 90%以上



強度雑音・周波数雑音
注入同期レーザーと同じ



Bright



Dark

● 多数加算時には空間モードの乱れが問題となる

V. 各レーザー光源ベースのILC/ERL用光源コスト

1. YbレーザーベースのILC/ERL光源の予算見積り

	リニアコライダー用(Yb)	金額(万円 備考)	ERL用(Yb)	金額(万円 備考)
発振器関係中心	Ybレーザー結晶(加工,コート代含む)	300	Ybレーザー結晶(加工,コート代含む)	300
	Ybファイバー(加工, 研磨, カプラー等含む)	300 金額はよく分からない	Ybファイバー(加工, 研磨, カプラー等含む)	300 金額はよく分からない
	冷却器	10	冷却器	10
	LD	120 予備を含む	LD	120 予備を含む
	LD電源, 冷却器	100	LD電源, 冷却器	100
	再生モード同期用装置一式	500 場合によっては要らない	再生モード同期用装置一式	500 場合によっては要らない
	光スイッチ	200 場合によっては要らない	光スイッチ	200 場合によっては要らない
	チャープミラー等	1000 いろいろ組み合わせる	チャープミラー等	1000 いろいろ組み合わせる
	ホルダー等	300	ホルダー等	300
	SESAM	200 いろいろ試すため	SESAM	200 いろいろ試すため
	光学素子その他	100	光学素子その他	100
増幅器関係中心	Ybレーザー結晶	1000	Ybレーザー結晶	1000
	Ybファイバー(加工, 研磨, カプラー等含む)	1000 金額はよく分からない	Ybファイバー(加工, 研磨, カプラー等含む)	1000 金額はよく分からない
	冷却器	100	冷却器	200
	LD	2100 400 W x 3, 効率~10%と仮定	LD	52500 400 W x 75, 効率~10%と仮定
	LD電源, 冷却器	600 3台分	LD電源, 冷却器	15000 75台分
	光スイッチ	500 場合によっては要らない	光スイッチ	1000 多段増幅のスイッチ
	高反射ミラー等	500	高反射ミラー等	500
	ホルダー等	500	ホルダー等	500
	光学素子その他	500	光学素子その他	500
	アイソレーター	200	アイソレーター	500
	パルス延伸器関係中心	グレーティング	200	グレーティング
高反射ミラー等		100	高反射ミラー等	100
ホルダー等		100	ホルダー等	100
パルス圧縮器関係中心	グレーティング	200 金コート	グレーティング	2000 誘電体コートor透過型
	高反射ミラー等	200	高反射ミラー等	200
	ホルダー等	100	ホルダー等	200
合計		11030		78630

V. 各レーザー光源ベースのILC/ERL用光源コスト

1. ErレーザーベースのILC/ERL光源の予算見積り

	リニアコライダー用(Er)	金額(万円 備考)	ERL用(Er)	金額(万円 備考)	
発振器関係中心	Erファイバー(加工, 研磨, カプラー等含む)	300 金額はよく分からない	Erファイバー(加工, 研磨, カプラー等含む)	300 金額はよく分からない	
	冷却器	10	冷却器	10	
	LD	120 予備を含む	LD	120 予備を含む	
	LD電源, 冷却器	100	LD電源, 冷却器	100	
	再生モード同期用装置一式	500 場合によっては要らない	再生モード同期用装置一式	500 場合によっては要らない	
	光スイッチ	200 場合によっては要らない	光スイッチ	200 場合によっては要らない	
	チャープミラー等	1000 いろいろ組み合わせる	チャープミラー等	1000 いろいろ組み合わせる	
	ホルダー等	300	ホルダー等	300	
	SESAM	200 いろいろ試すため	SESAM	200 いろいろ試すため	
	光学素子その他	100	光学素子その他	100	
	増幅器関係中心	Erファイバー(加工, 研磨, カプラー等含む)	1000 金額はよく分からない	Erファイバー(加工, 研磨, カプラー等含む)	1000 金額はよく分からない
冷却器		100	冷却器	200	
LD		6300 400 W x 9, 効率~5%と仮定	LD	35000 400 W x 50, 効率~5%と仮定	
LD電源, 冷却器		1800 9台分	LD電源, 冷却器	10000 50台分	
光スイッチ		500 場合によっては要らない	光スイッチ	1000 多段増幅のスイッチ	
高反射ミラー等		500	高反射ミラー等	500	
ホルダー等		500	ホルダー等	500	
光学素子その他		500	光学素子その他	500	
アイソレーター		200	アイソレーター	500	
パルス延伸器関係中心		グレーティング	200	グレーティング	200
		高反射ミラー等	100	高反射ミラー等	100
	ホルダー等	100	ホルダー等	100	
パルス圧縮器関係中心	グレーティング	200 金コート	グレーティング	2000 誘電体コートor透過型	
	高反射ミラー等	200	高反射ミラー等	200	
	ホルダー等	100	ホルダー等	200	
合計		15130		54830	

VI. レーザのランニングコストとLDの寿命

- LDの寿命が5000時間(5万時間 $\div\sqrt{100}$)として
 - 連続運転および通算運転時間：1年=**3 x 2ヶ月** or 4 x 1.5ヶ月~6ヶ月=**4320時間(SPring-8のユーザタイムと同等)**
 - 現実の寿命見積もり: 1年間の運転を保証するにはLDの数は2~3倍は必要
 - 維持費：LDのコストが支配的
 - 定常的に運転すれば、CW-LDの寿命はかなり延びる。QCW-LDの寿命は相対的に短くなると思われるので、節電にしかない。
 - 基本的にはシングルエミッターLDから数ワットの出力を出すということ自体が、寿命という点で厳しい。
 - LDとヒートシンクのダイボンディングの信頼性が問題。この辺の信頼性が向上してきた結果、以前よりもLDの寿命が延びている
 - 検討したLDの価格は、全て**ファイバー結合型**の高輝度のLDのものです。例えば、 ϕ 600ミクロン、平均出力375WのLDが**600(イエナ)~700(LIMO)万円**に対して、同等の平均出力の**速軸コリメートLD**ならば、平均出力432W、広がり角0.5度で**150万円(イエナ)**程度です。固体レーザの場合はこの程度の輝度のLDで問題なく、固体レーザならばLDのランニングコストを劇的に下げられるという利点がある。

コストの見積もりについて

- LDのコストがいずれにせよ支配要因である。
 - LDの個数などは効率ぎりぎりでも考慮。最終モデルがMOPA構成の多段アンプになったり場合はプリアンプの励起用にさらに**2,3割分**、LDの個数が増える可能性あり。
 - LDの寿命を考えれば、スペクトラフィジックス社やコヒーレント社のように、最低限、最大出力の半分以下で使うのが普通とすると、LDの個数は**倍以上**と考えるのが妥当。
 - ここでの効率の内訳は、Ybファイバーの場合、
 - LDからYbファイバーへの結合効率~50%，
 - Ybファイバー増幅器の光-光変換効率~40%，
 - パルス圧縮器の透過率~50%で、全部あわせて**~10%!**，
 - 電力効率からいうと、さらに半分の5%程度になります。
 - 電力的には、例えば平均出力3kWモデル(Ybファイバー)として、電力効率で5%から、LDの必要電力が3kW/0.05~60kW程度。
 - 多段式のMOPAとして3割り増しで60kW x 1.3 ~ 80kW程度。
 - また、電源装置効率を70%、冷却器の効率を30%として、0.7 x 0.3 ~ 21%。
 - したがって、80 kW/0.2~**400kW程度**。
- ※ Erファイバーの場合は、平均出力1kWモデルとして、上の2/3程度になる。
しかし、Erファイバー増幅器の光-光変換効率がYbの場合の半分以下とすると、必要電力はさらに上がる。

メンテナンス性を考慮した設計に

- 柔軟性をとるか、メンテナンス性をとるか
 - ～ 作業従事者が安全で文化的な生活をおくれますように。。。
 - ファ이버レーザにすると柔軟性はなくなるがアライメントが固定化される。
 - 建設時にはエキスパートが必要であるが、定常運転開始後は基本的に**メンテナンス要員(運転補助員のみ)**で作業が可能なシステムであることが肝要。
 - 従来のMOPAシステムでは、主発振器から後段増幅にとシーケンシャルに調整が必要なため、同時に一人では調整できなかった。巨大システム&昼夜連続運転形態に対応するためには、**複数人数が同時に(平行に)メンテナンス可能なシステム**として設計すべき。
 - バックアップレーザ光源と主レーザ光源への切り替えの容易さ(運転停止時間は最短とする)、および主発信器の多重化による**冗長性**。
 - 主励起用LD(増幅用光源)とバックアップ励起用LD(増幅用光源)への切り替えが容易である**冗長性**の高いシステム。特に、運転を継続しながらバックアップ励起源を供給可能なシステムとする設計がファイバーレーザの方が容易である。
 - レーザのトランスポートにおける光学系調整時の事故防止、特にレーザ運転中の調整やバックアップ光源および励起源への切り替え作業での事故が防止できる構造であることが望ましい。状況により作業内容が変化するので、インターロックだけでは対応できない。したがって、**レーザ装置全体を構造的に安全性を考慮して設計**すべきである。