

# ファイバーレーザーの躍進を視野に入れた ERL/ILC(STF)レーザー光源開発の提案

～ 安定な高繰返し光源開発 & パルス3次元形状制御 ～

富澤 宏光 & ヴァーチャルラボLAAA

高輝度光科学研究センター 加速器部門  
(SPring-8/JASRI)

1. フォトカソード光源開発の概観
2. レーザ光源の**高品質化**（整形技術）
3. **ERL/STF用**の理想的な光源開発計画

## 1. フォトカソード光源開発の概観

高QEカソード開発に依存してレーザーの選択は異なる！

フォトカソード電子銃では、その光源レーザーの**3次元パルス形状の制御**が不可欠。同時に、**高度の長期安定度**の実現も必要である。

※ 伝播モードの選択肢に、**空間伝播モード**と**ファイバー伝播モード**がある。

レーザーパルス  
形状



**F: 環境の安定化・時/空プロファイル自動整形**

**P: 小型レーザー装置&最適整形**

**極低エミッタ  
ンスの実現**

レーザー高繰  
返し化 (CW)



**パルス: オシレータの高強度化・高効率化**

**パルス: ファイバーレーザー**

**CW: CWレーザー&ポッケルス切り出し+パルススタック**

レーザーマクロ  
パルス化

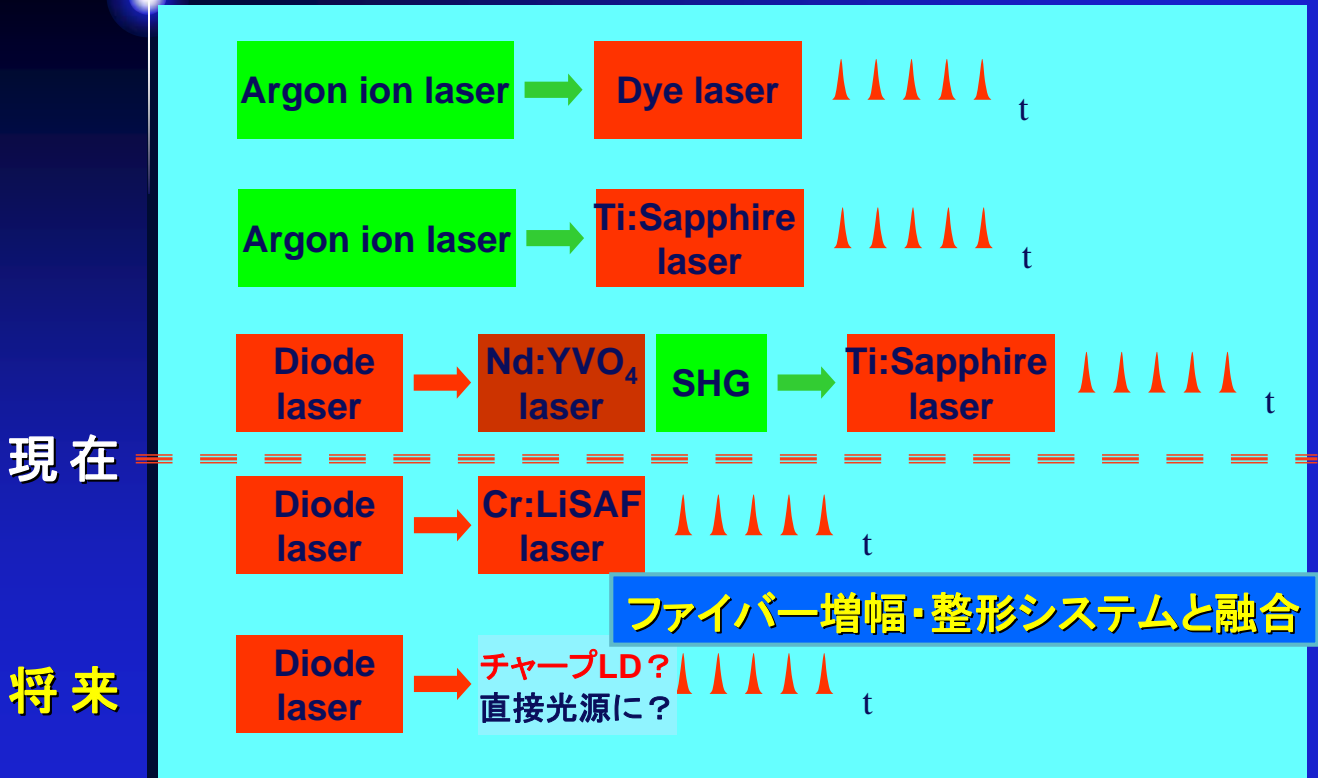


**パルス: OPCPA (Ti:Saレーザー + YLFレーザー)**

**パルス: NOPA (Ybファイバーレーザー + フォトニック結晶)**

# コンパクトなレーザー装置の検討 (高効率化と全固体化)

～ レーザ・ポンピング方式の進化 (2003年当時の提案) ～



## レーザーコンポーネント開発フローチャート (富澤案 LAAA提出)



# ファイバーレーザーの特徴

- ファイバーの熱破壊限界は**2 GW/cm<sup>2</sup>**。1mmφで20 MWに相当する。現実に100kW出力が可能。  
 (熱破壊限界が2GW/cm<sup>2</sup>というのはアンドープの石英ファイバーの場合で、実際のレーザー媒質用ファイバーはYAGなどの固体レーザー用結晶と同等。レーザーイオンがドープされていると、ダメージ限界は桁違いに下がるため、アンドープ材料を両端に融着する必要がある。)
- バンドル化やコヒーレントビーム結合による超高パワー伝送が技術的に可能。拡大して15cmφの多束ファイバーで**20 GW** パワー伝送の可能性あり。
- 高品質ビームである**単一モードで2kWの出力**(φ15μmコア)は実現。  
 (ダメージ閾値の数分の一程度なので、ファイバーのエンド部分にアンドープの材料を融着し、導波路部分を無くしてビームを広げるなどの工夫が必要。)
- 光ファイバーで5000kmの信号伝送が可能。  
 ファイバーレーザーはガラスレーザーの問題点を低損失、長大な利得長でカバー。端面がなければほとんど損失なし。  
 石英ガラスの低損失性:**0.2 dB/km**  
 単一モード伝播, 3次元閉じ込めにより回折損失なし。

# ファイバーレーザーの躍進

図1 Ybドープファイバーレーザーからの高出力単一モード出力の増大は着実に続いている。  
 (出典:ミシガン大学, A. ガルバナスカス氏)

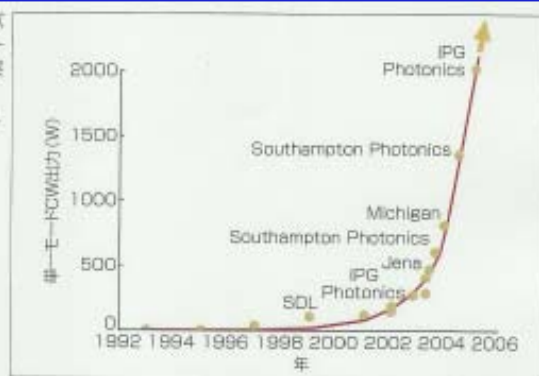
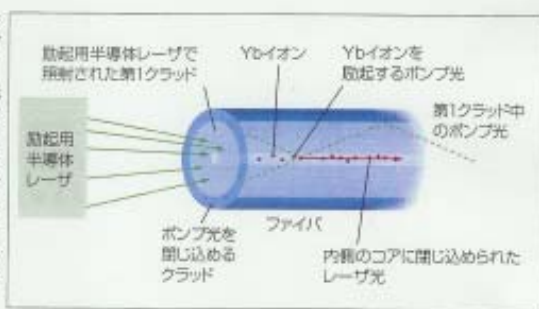


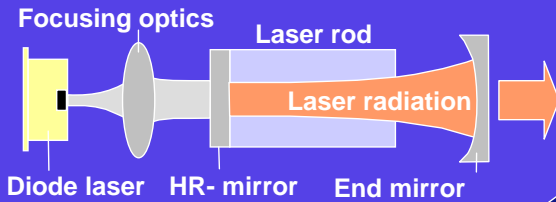
図2 半導体レーザースタックからの励起光がダブルクラッドファイバーの第1クラッドを照射する(集光光学系は省略)。クラッドは励起光を第1クラッドに閉じ込め、コアを通過ようにする。一つのポンプ光子はコア中の一つのYb原子を励起する。放射された光はコアに閉じ込められてファイバーレーザービームの一部になる。



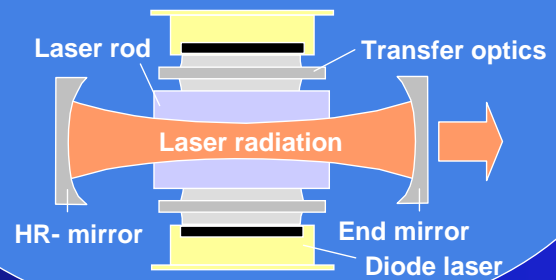
近年の高出力単一モード出力の増大。IPG社は多数のYbファイバーからの光を合わせて多モードビームを作り、**17 kW**の製品納入実績あり。

# 固体レーザーの代表的なLD励起方式

## <エンドポンプ方式>



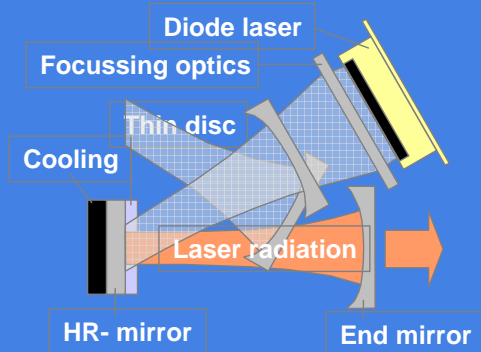
## <サイドポンプ方式>



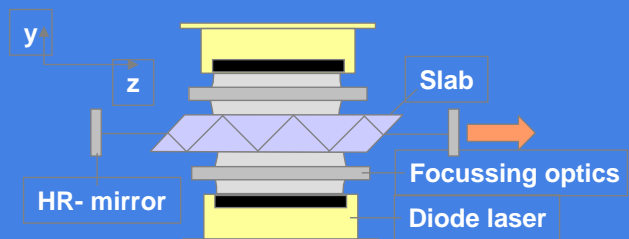
※ 他にも、ロッド型、スラブ型、ディスク型とも端面励起、側面励起、斜め励起などがあります。

# レーザー媒質形状に依存するLD励起方式 (ファイバーレーザーはその中の一つ)

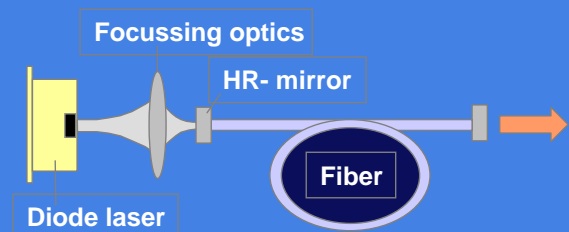
## <ディスクレーザー方式>



## <スラブレーザー方式>



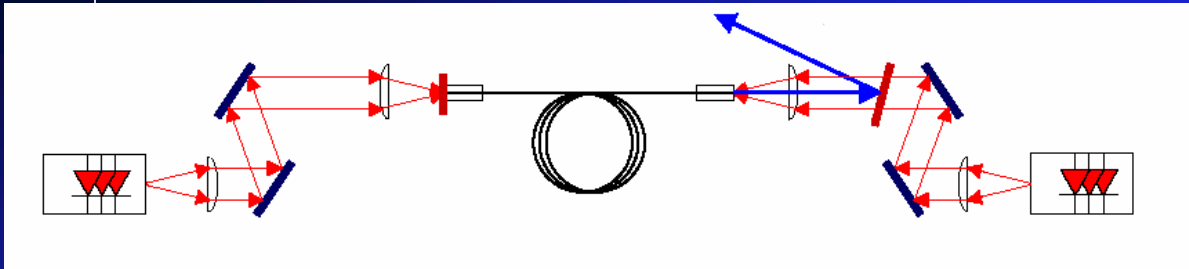
## <ファイバーレーザー方式>



# ファイバレーザ試験構成 (サザンプトン大学の実験配置と同じ)

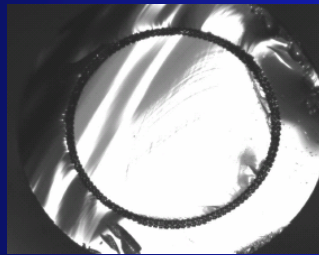
HT@975nm  
HR@1,100nm

HT@975nm  
HR@1,100nm



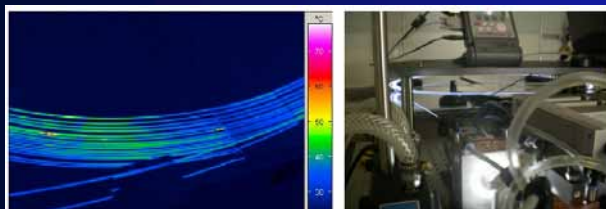
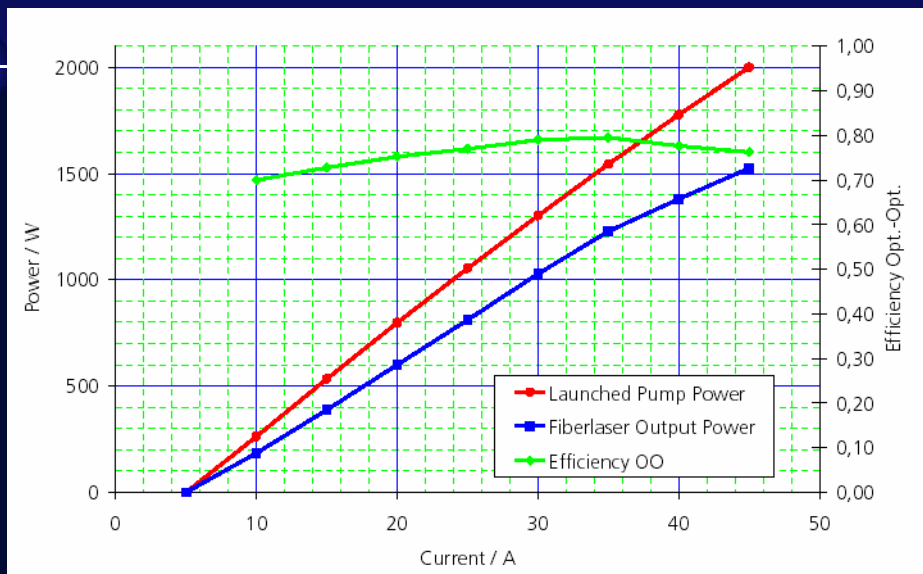
Stack LD  
1kW@975nm  
NA0.7

Stack LD  
1kW@975nm  
NA0.46



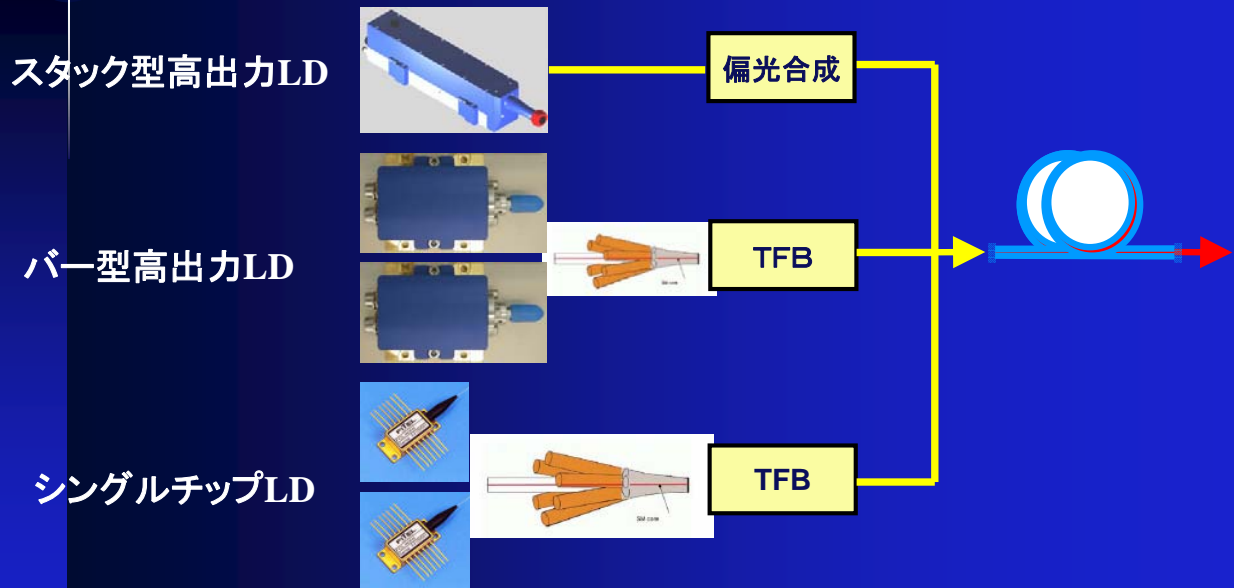
- Core diameter 31  $\mu$  m
- NA <0.07
- Length 30m

## ファイバレーザ試験結果



- 1,525W@1ファイバ
- M2<3@600W

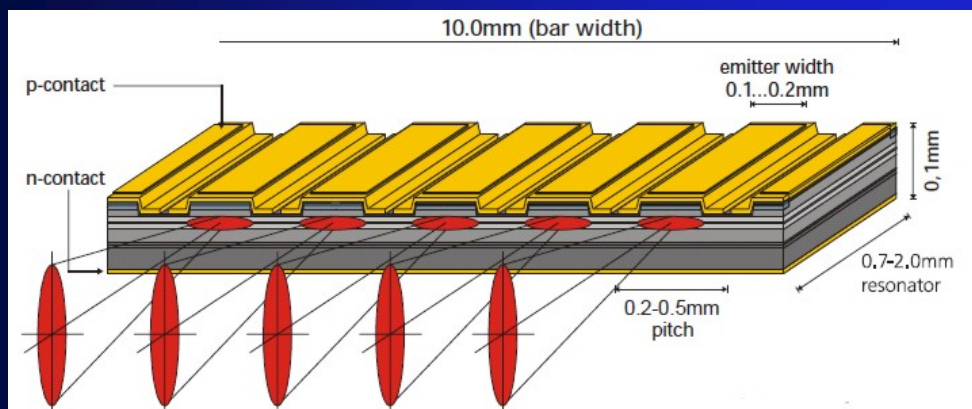
## ファイバレーザ励起光源 (イエナー社)



LDからYbファイバーへの結合効率~50%であるが、どこまで上げられるかが今後の技術開発に依る。75%位は可能か？

## 高出力半導体レーザー (イエナー社)

- InGaAs
- 808nm/915nm/940nm/980nm
- 電気→光変換効率 約40~60% (印加電圧低減で80%可能か?)

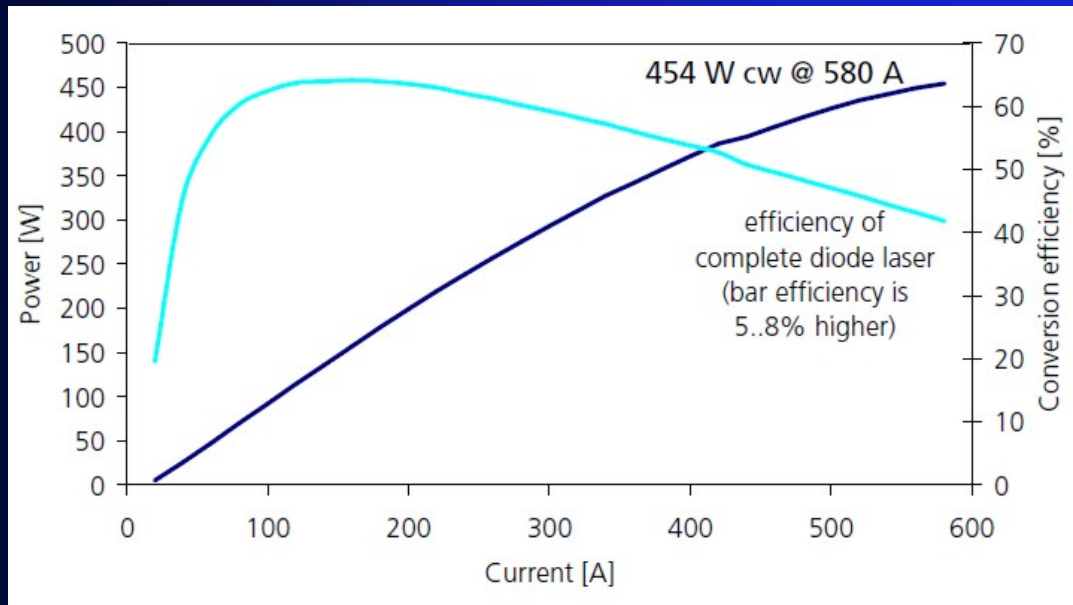


LDの高効率化に関しては、現在、アメリカの軍事予算(DARPA)で、500WクラスのLDの電力光変換効率~80%を目指すなどのプロジェクトが進行中。  
(平均出力100kWクラスの固体レーザーの励起源に利用。ASSP2006-TuA1, CLEO2006-PTuC1など参照)

# 高出力半導体レーザーのEO変換効率

## 940nm高出力半導体レーザー(並列)からの最大出力

※ シングルエミッターの高出力LDは、平均出力～数W、電圧～数V、電流～数A程度。



# 高出力半導体レーザーヒートシンク

- 10mm(幅) × 1mm(奥行き)
- 電気から光への変換効率 約50%



排熱すべき熱量

$$P_v = \frac{40 \text{ W}}{10 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}} = 4,000,000 \text{ W/m}^2$$

# 高出力半導体レーザヒートシンク

## ・ 半導体レーザの高出力化の指針:

1. シングルエミッターLDの素子そのものの高出力化
2. LDをリニアアレイ化、スタック化して全体で高出力化

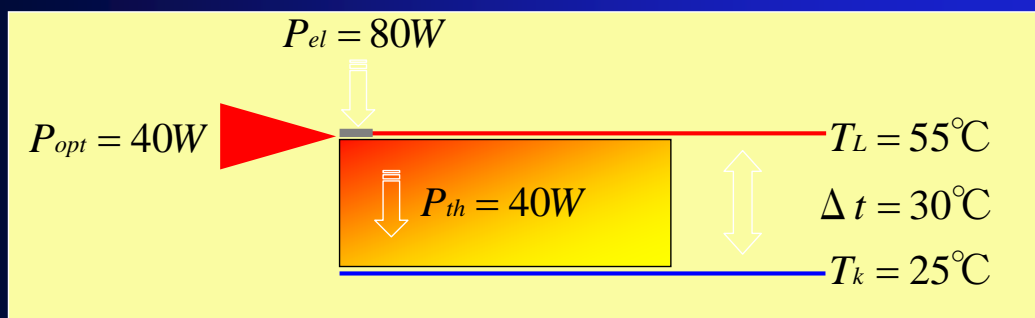
1でも2でも、結局は排熱をどうするのが問題。

材料同士の表面熱コンダクタンスが面積に比例していることを考えると、冷却面積を広げる方が有利。

## ・ シングルエミッターLDの高出力化の指針

エミッターの幅をあまり広げずにLDの共振器長をのばすなどして冷却効率を上げる工夫が行われている。

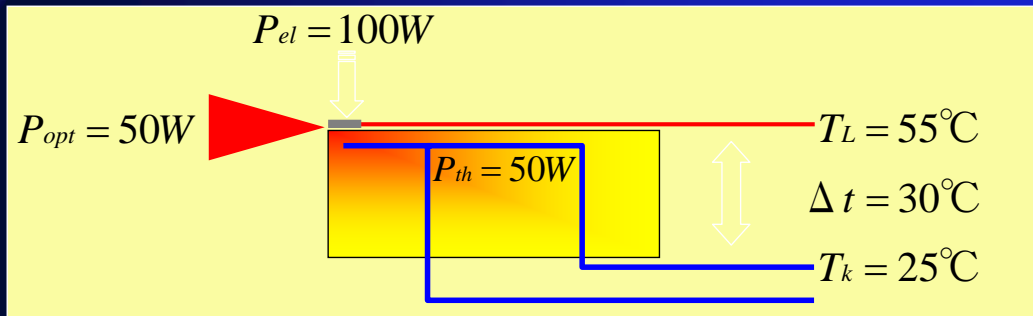
# パッシブ冷却方式 (モジュール内に冷却水を使わないという意味)



- ・ 銅製ヒートシンクによる熱伝導で排熱
- ・ モジュール内に冷却水不要
- ・ 期待寿命 20,000時間以上
- ・ 1バーあたりの最大出力~60W
- ・ ヒートシンク寸法大

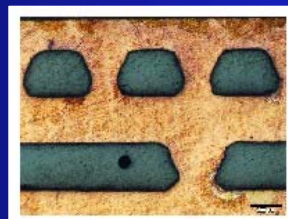
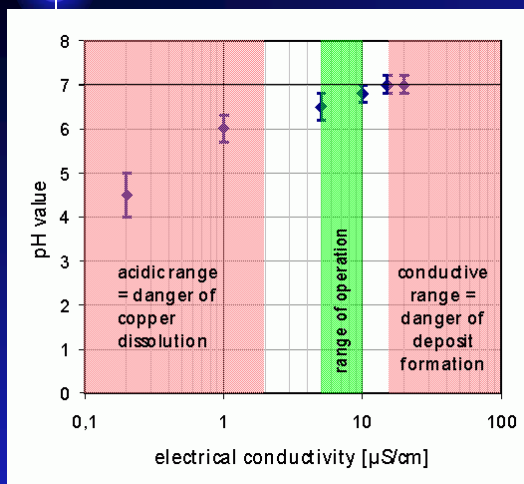


## アクティブ冷却方式

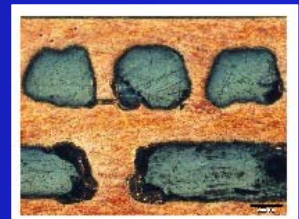


- マイクロチャネルによる積極的な排熱
- 期待寿命 10,000時間以上
- 1バーあたりの最大出力～100W
- ヒートシンク寸法小
- 水質管理が重要(フィルタ/電気伝導率)

## アクティブ冷却方式の水質管理



5 μS/cm ~ 10 μS/cm (5,000h)



0.2 μS/cm (5,000h)

水質管理は半導体励起レーザ共通の問題。他にも藻が生えることに対処する必要がある。次亜塩素酸や過酸化水素水による殺藻処理と金属防蝕は両立しない。コンダクタンスが著しく下がらないようにして適正な流量をとることが肝要！

## パッシブとアクティブ冷却方式の比較 (イエナー社の場合)

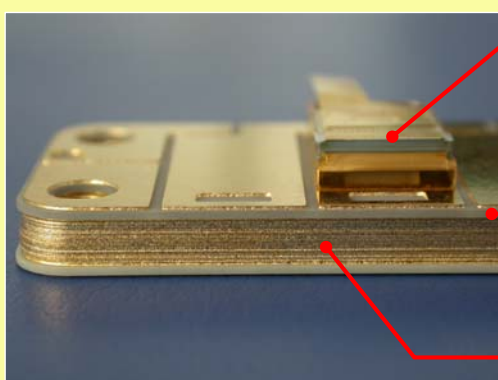
	パッシブ冷却方式	アクティブ冷却方式
1バーあたりの最大出力	60W	100W
期待寿命	$\geq 20,000h$	$\geq 10,000h$
ヒートシンクサイズ	大	小
冷却管理	易	難

IPGでもCWおよびQCWの両方で $\geq 20,000h$ を達成している。  
ダイオードレーザの寿命は本質的には $\geq 50,000h$ と言われているが、10度温度が上がれば寿命が半分になるということが知られている。

しかし、上記の寿命の値はチャンピオンデータなので、メーカーが保証している5,000hを現状では目安とすべき。

## DCB冷却方式（折衷案??）

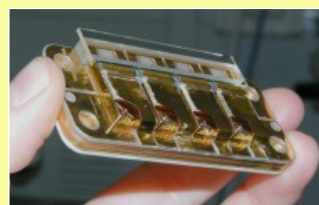
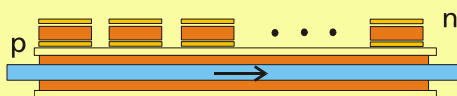
寿命が低い理由の一つは、実装密度が高すぎて発熱密度が高すぎるため、LD実装密度を減らす方法のひとつ。



パッシブ冷却方式サブマウント  
(長寿命)

絶縁用高熱伝導セラミック  
(冷却管理易)

マクロチャンネルによる冷却プレート層  
(高出力・ヒートシンクサイズ小・  
チャンネル劣化の影響無し→冷却管理易)



## 温度以外のLDの寿命短縮要因

- 戻り光雑音といい、励起用のLD自身からでた光がまたLDに戻ると寿命が短くなる。対策としては、異なるLDを低出力にして組み合わせるのが良いのでは？
- LDは本質的に電流駆動のデバイスであり、駆動電流に応じて負荷インピーダンスが変化する。LDの動作点は一般的に、低い微分インピーダンス(dV/dI)で特性化されているため、電圧の小さな変化が駆動電流の大きな変化を引き起こしてしまう。したがって、電圧電源よりも電流電源を使用した方が広いインピーダンス領域での電力制御が可能になり、LDの駆動において高い安定性を得られる。
- **QCWとCWモード**が混在するオペレーションの場合は、両方のモードで動作する電流電源を使うべきであるが、CW電源でのQCW-LDの駆動は突発事故の原因となるのでフェルセーフが働くようにすべき。
- 一般的に、LDの保護には過渡保護，出力限界制御，温度監視。

## 0. 全体に亘る検討事項（“ILCとERL用の光源案“引用）

- 方針1: リニアークライダー用とERL用をなるべく共存
  - 励起用LD
    - QCW-LD: リニアークライダー用
    - CW-LD: ERL用
  - マクロパルスの切り出しに関して(リニアークライダー用)
    - 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
- 方式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。

# いろいろなレーザー活性イオンの準位

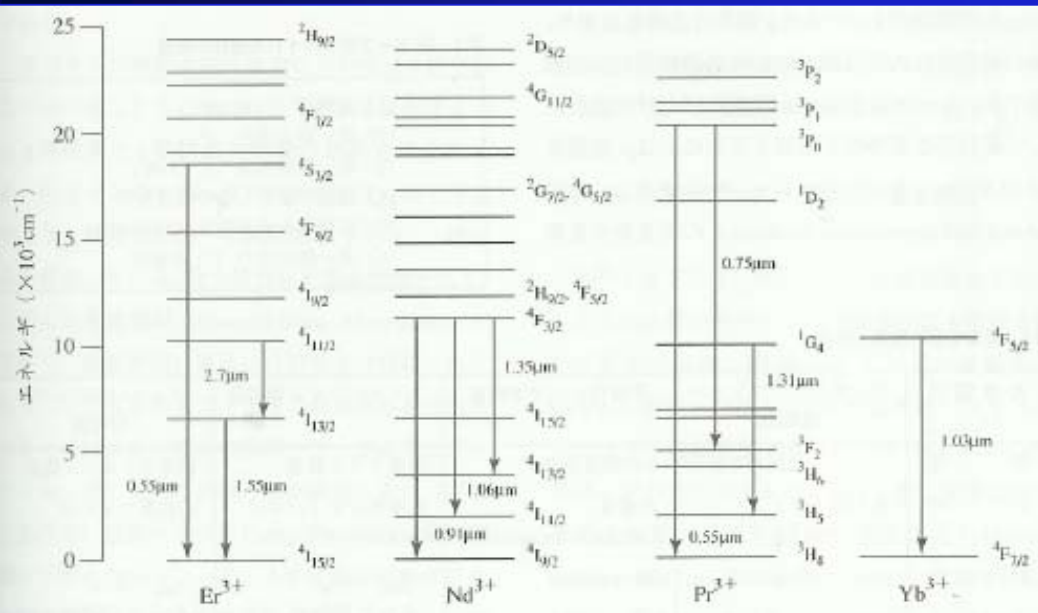


図1 Er<sup>3+</sup>イオン, Nd<sup>3+</sup>イオン, Pr<sup>3+</sup>イオン, Yb<sup>3+</sup>イオンのエネルギー準位図

例えば, Er<sup>3+</sup>イオンの場合, 0.5 μm (<sup>4</sup>I<sub>15/2</sub> - <sup>2</sup>H<sub>11/2</sub>), 0.6 μm (<sup>4</sup>I<sub>15/2</sub> - <sup>4</sup>F<sub>2/2</sub>), 0.8 μm (<sup>4</sup>I<sub>15/2</sub> - <sup>4</sup>I<sub>9/2</sub>), 0.98 μm (<sup>4</sup>I<sub>15/2</sub> - <sup>2</sup>H<sub>11/2</sub>) および 1.48 μm (<sup>4</sup>I<sub>15/2</sub> - <sup>2</sup>H<sub>13/2</sub>) 帯の様々な発光波長が存在する。1.5 μm 帯の誘導放出は <sup>4</sup>I<sub>13/2</sub> から <sup>4</sup>I<sub>15/2</sub> への遷移を用いる。

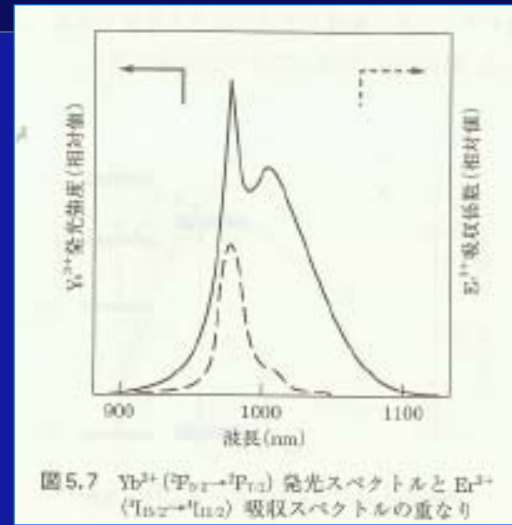
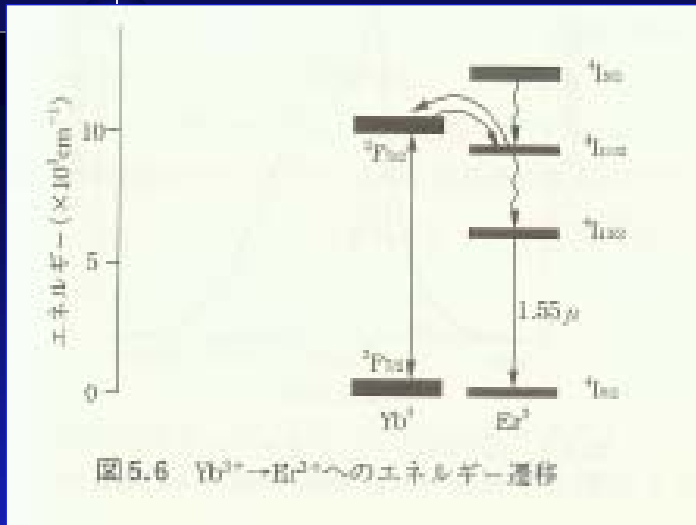
## レーザー活性イオン種に依存する ファイバーレーザー出力限界(IPG社の現状)

**Yb ファイバーレーザー: 1030 ~ 1050 nm**  
 (CW): 2 kW  
 (Pulse): 200 W 可変(2~250 ns)  
 ※ 多モード高出力化: 20 kW  
 サイズ (800 × 1460 × 1500 mm)

**Er ファイバーレーザー: 1560 nm**  
 (CW): 200 W

**Tm ファイバーレーザー: 2000 nm**  
 (CW): 200 W

## Erには高効率化にYbの援用が必要



センシタイザーであるYb 3+を僅か0.5%だけEr3+で置換したときに最高の発光強度が得られる。

このことが、レーザ発振のときにYbレーザが寄生発振する原因となり、Er3+の高ドーピングの難しさと共にErレーザの高効率化を妨げている。

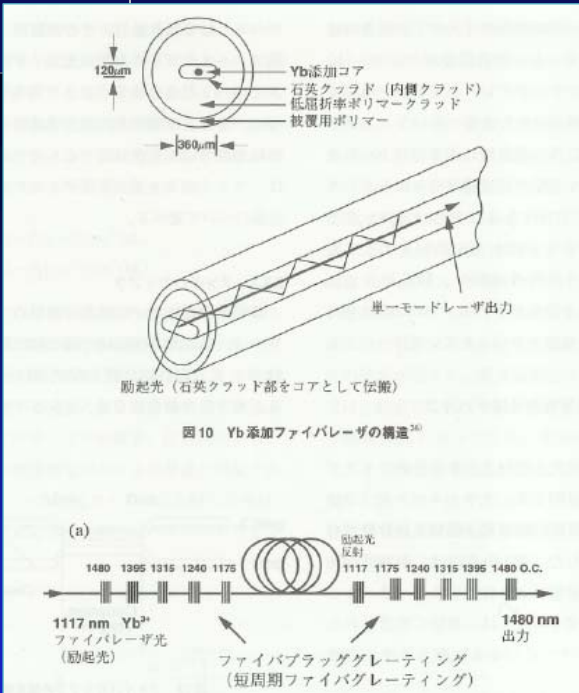
## Ybの援用なしでEr直接励起の可能性は？

可能性として、**1.48ミクロン帯**のLDを利用して**Erイオン**を直接励起することも可能。

サブワットクラスならば1.48ミクロン帯のLDもあるので、IPGと同様の分岐ファイバー形式を利用すれば、高出力ファイバー結合LDにすることも原理的には可能。

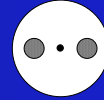
ただし、特注になるのでコストが非常に高くなる。

# ファイバーレーザー光学系の偏光に関する問題

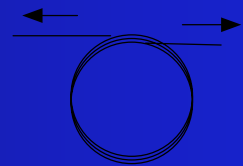


偏光保持: 高調波変換の高効率化  
 ファイバー中では応力・温度により  
 偏光状態が変わる

・クラッドに構造を作り  
 偏波保持ファイバーにする



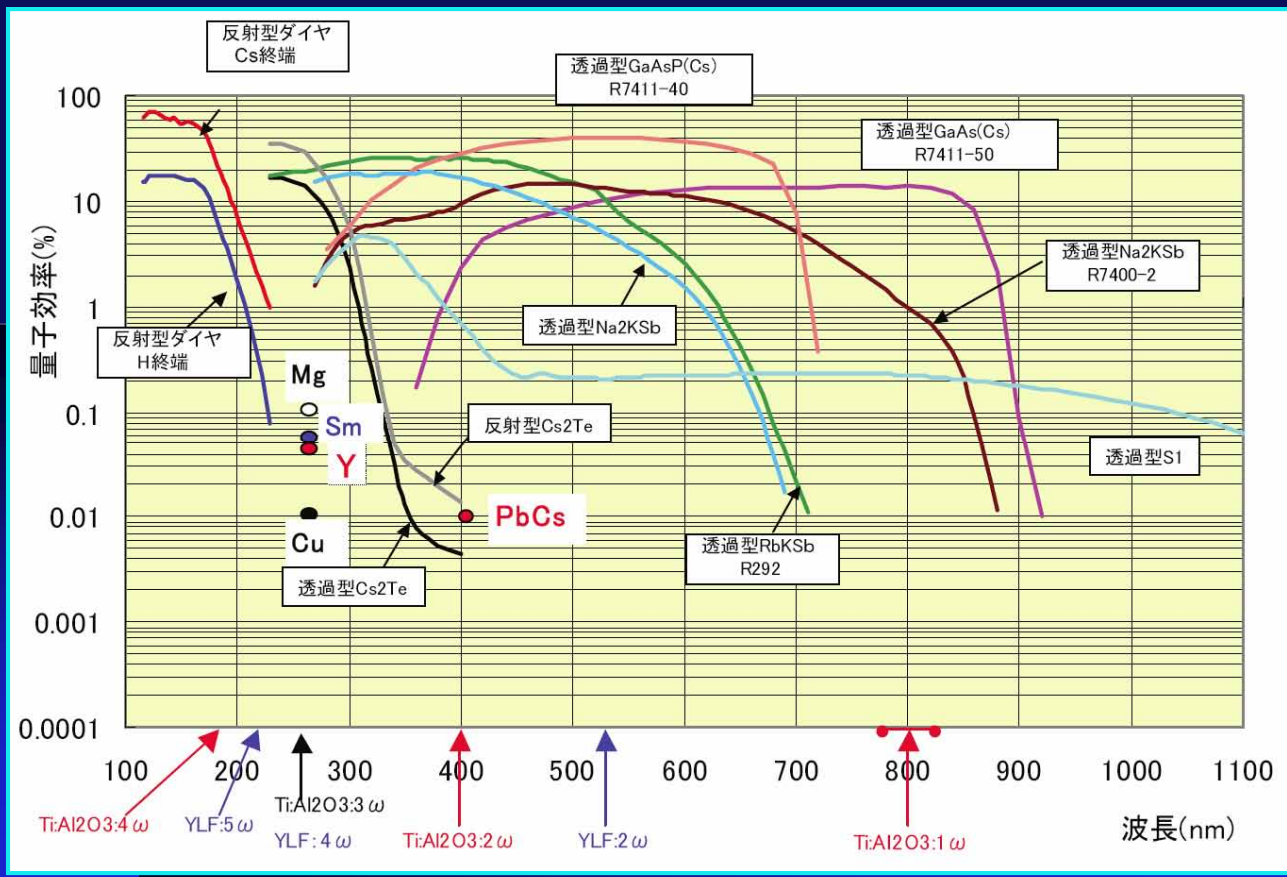
・一定応力を加えて非等方に  
 ・コイル状に巻き張力をかける



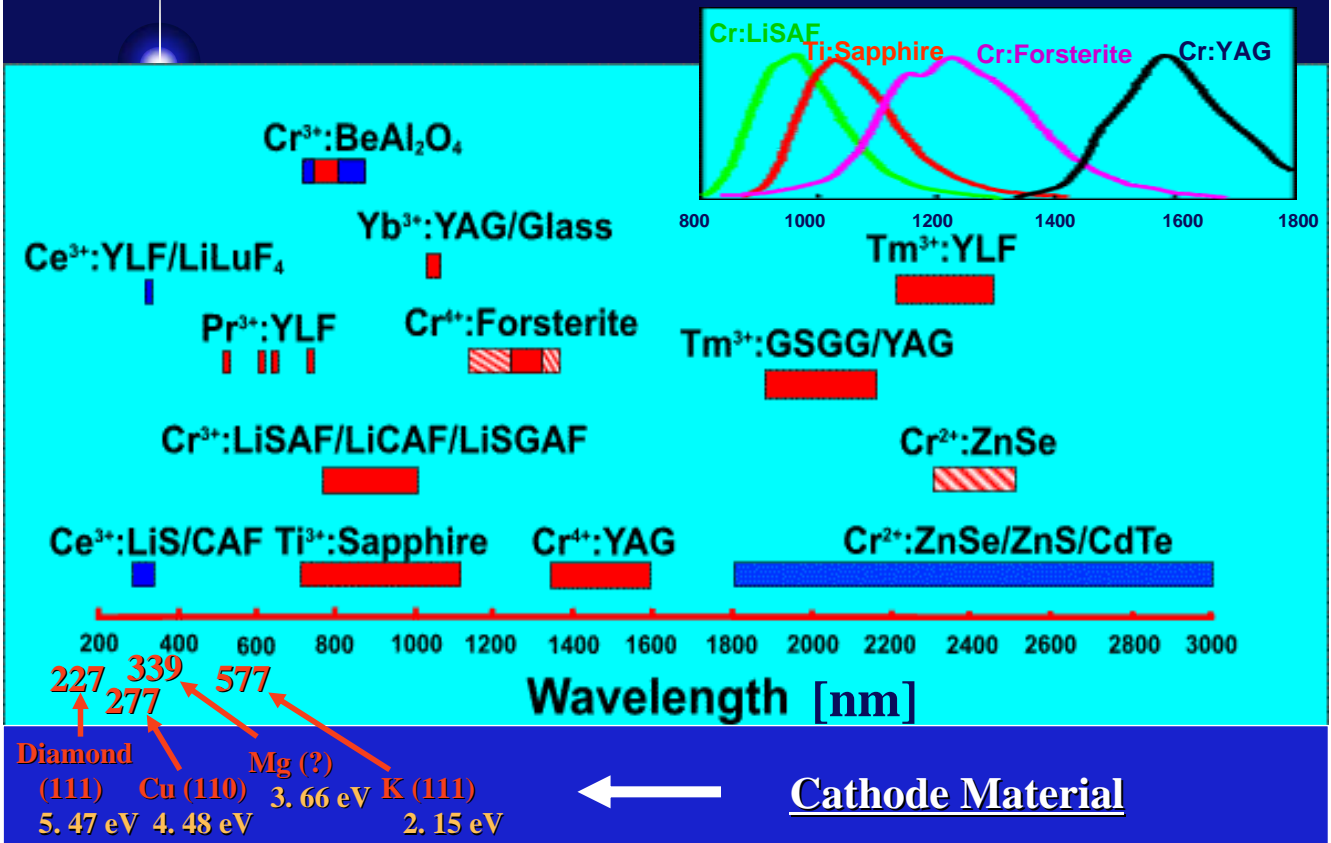
**Yb:** サザンプトン大学, 帯域10nm; 663Wの直線偏光CW出力実績あり。  
 ミシガン大学, 帯域2nm; 400Wの直線偏光CW出力実績あり。  
 二倍波変換の記録は, アクキュライト社の60W(変換効率54%)

## B-1. 加速器用半導体カソード候補のQE曲線

(LAAA提案引用 浜ホト提供)



## 各波長領域のレーザ活性媒質/結晶とカソードの候補



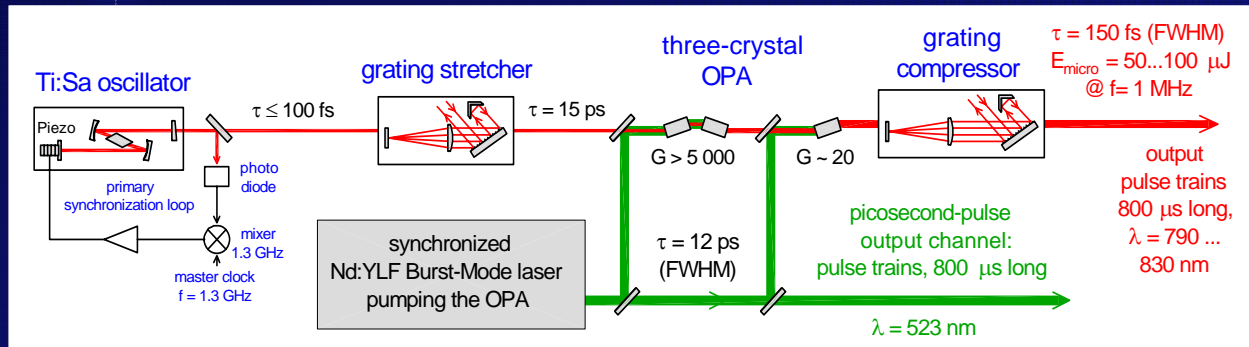
## どうやって、高繰り返し780 nm光源を得るか？ 500nm帯の高QE、偏極電子源カソードは可能か？

- ・ モードロックオシレータレーザ: 標準で  $\sim 100$  MHz。  
マイクロチップ化により、記録では  $> 50$  GHz可(U.Kellerなど)。  
  - ※ **高繰り返し化**は**高パルスエネルギー化**の障害となる。  
(同じ平均出力の場合、高繰り返し動作の方がパルスエネルギーが小さく、非線形効果の低減やダメージ閾値の点では有利。  
高効率レーザ媒質が必要。 $\sim$ GHz程度なら可能？
- ・ YLFレーザ・カスケード増幅: レーザ活性媒質の蛍光寿命により、マクロパルス幅の最適値は異なる。  
  - ※ **Yb:YAG**も重要な候補だが増幅器は研究段階。
- ・ Yb:ファイバーレーザ: 1030nm (CW): 2 kW  
(実際には長波長側1050~1100 nmにシフト?)  
**SHG(515 nmとして)をフォトニック結晶によるスーパーコンティニューウムでBBO結晶にてパラメトリック増幅。**  
(noncollinearで700~900nm可能(NOPA方式)。collinearでは1000~1100nm。)

# マックス・ボルン研究所+DESY

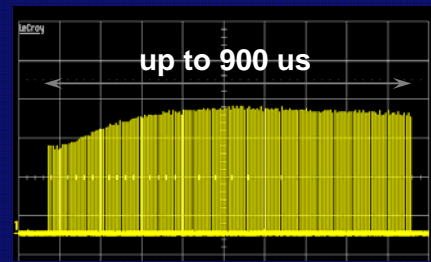
## OPCPA system for generation of trains

of femtosecond pulses with  $\sim 800$  nm wavelength



I. Will, H. Redlin, MBI Berlin

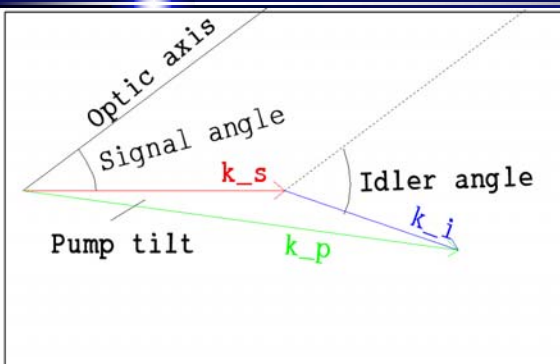
- OPCPA system generates trains of picosecond or femtosecond pulses  
 $\tau = 150 \text{ fs} \dots 20 \text{ ps}$  (FWHM)
- pulse energy:  
 $E_{\text{micro}} = 50 \dots 100 \mu\text{J}$   
 $E_{\text{train}} = \text{up to } 80 \text{ mJ}$
- Available wavelength:  
 $\lambda = 790 \dots 830 \text{ nm}$



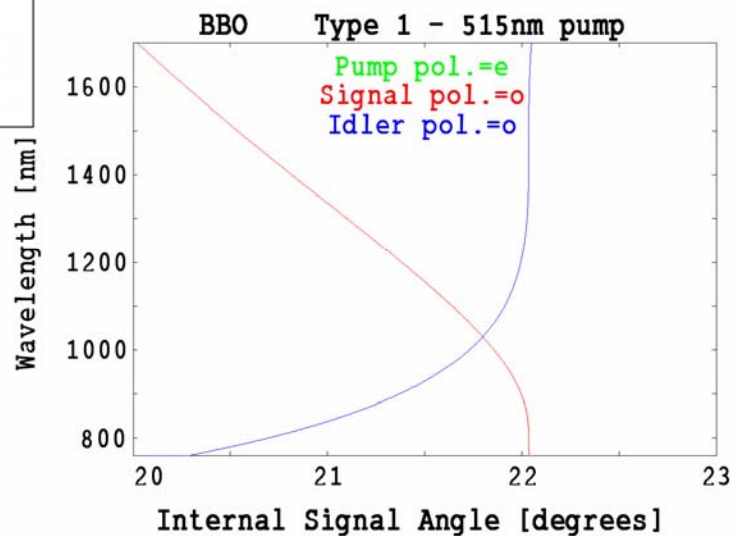
Output pulse train of the OPCPA

## どうやって、高繰り返し780 nm光源を得るか？

Yb:ファイバー-SHG(515 nm)をスーパーコンティニュームでBBO結晶にてNOPA



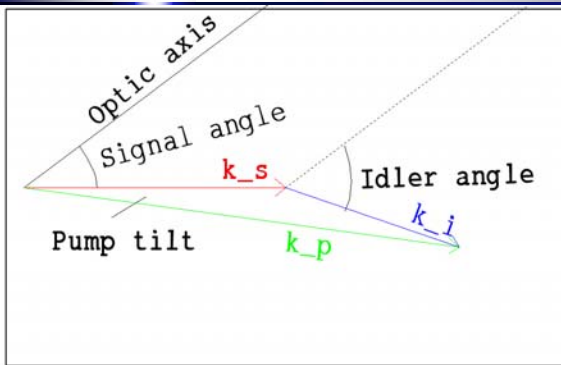
Pump tilt:  $2.65^\circ$   
 Super Continuum: 1030 ~ 1700 nm





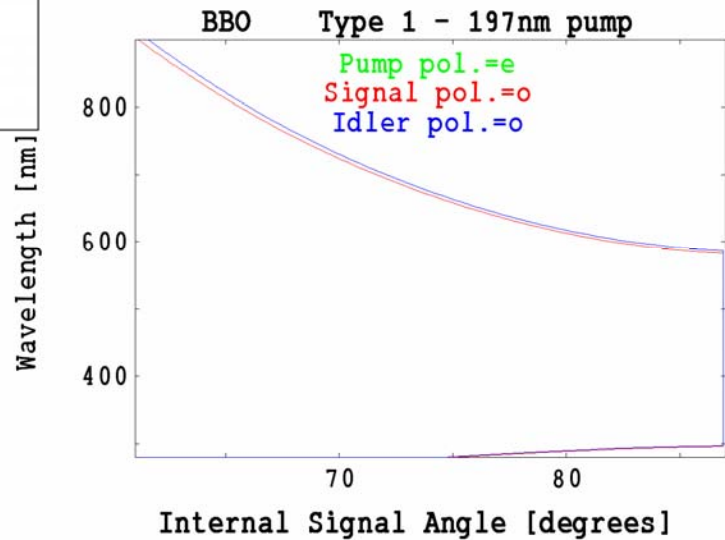
# 500nm帯の高QE、偏極電子源カソードは可能か？

Ti:SaレーザFHG(197 nm)をスーパーコンティニュームでBBO結晶にてNOPA



Pump tilt:  $1.1^\circ$

Super Continuum: 300 ~ 900 nm



500 nm帯域でもブロードな光源を得ることで、偏極電子源をこの帯域でも研究できる。

## 2. レーザ光源の高品質化

高品質なレーザ光源に必要なもの

### 1. 低エミッタンス用の、空間電荷効果を抑制する形状

⇒ 最適3次元レーザパルス形状 (Spatial & Temporal)  
3D-Ellipsoid shape (ラグビーボール型)?

### 2. 低ジッター・システム

⇒ レーザ・オシレータの長期安定化 (モードロック安定化)  
Active & Passive 安定化

### 3. レーザ出力、ポインティングの長期安定化

⇒ レーザ・システム全体の長期安定化 (温調システムの開発)  
Passive 安定化

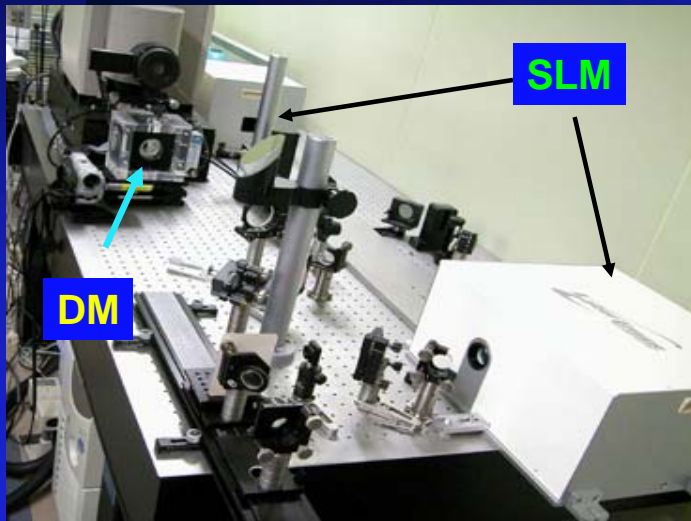
環境安定化

基本的に Passiveに安定化 することが基本！

## 2. レーザ光源の高品質化

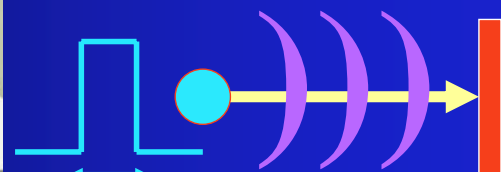
### レーザーパルス光源の3次元形状自動最適化

- ◆ Computer-aided **SLM** (Spatial Light Modulator)
  - ⇒ **Rectangular Pulse shaping** (adjustable)
- ◆ Computer-aided **DM** (Deformable mirror)
  - ⇒ **Flattop spatial profile** (adjustable)



#### Automatic Control Optics

- Spatial shaping (DM)
- Pulse shaping (SLM)
- Wave front Control (DM)

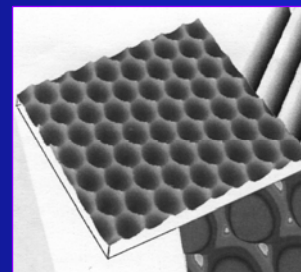
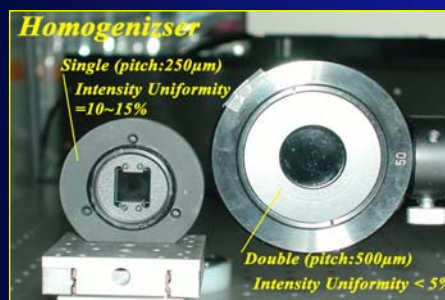


2 ~ 12 ps Fundamental  
2 ~ 8 ps THG (263 nm)

## 2-1. 空間プロファイルの自動最適化へ

~ Microlens array (MLA) and Deformable Mirror (DM) ~

### 2-1-1. Spatial profile shaping with Microlens Array



### 2-1-2. Spatial profile shaping with Deformable Mirror



+

**Genetic Algorithms**

## 2-2. 時間プロファイルの自動最適化へ

### SLM (空間位相変調器)

#### 2-2-1. DAZZLER (Acousto-optics)

simultaneously and independently performing both spectral phase & amplitude of ultrafast laser pulses. (FASTLITE)

UV-Dazzler完成! (200~500 nm使用可!)



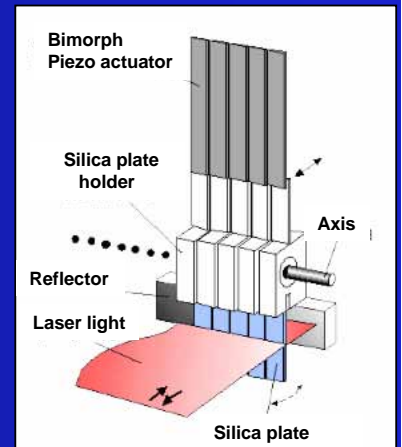
#### 2-2-2. Fused-silica based SLM

Utilizing silica plates

- ◆ Directly shaping for UV-Laser
- ◆ Higher Laser power threshold

~ Computer-controllable silica plates complex ~

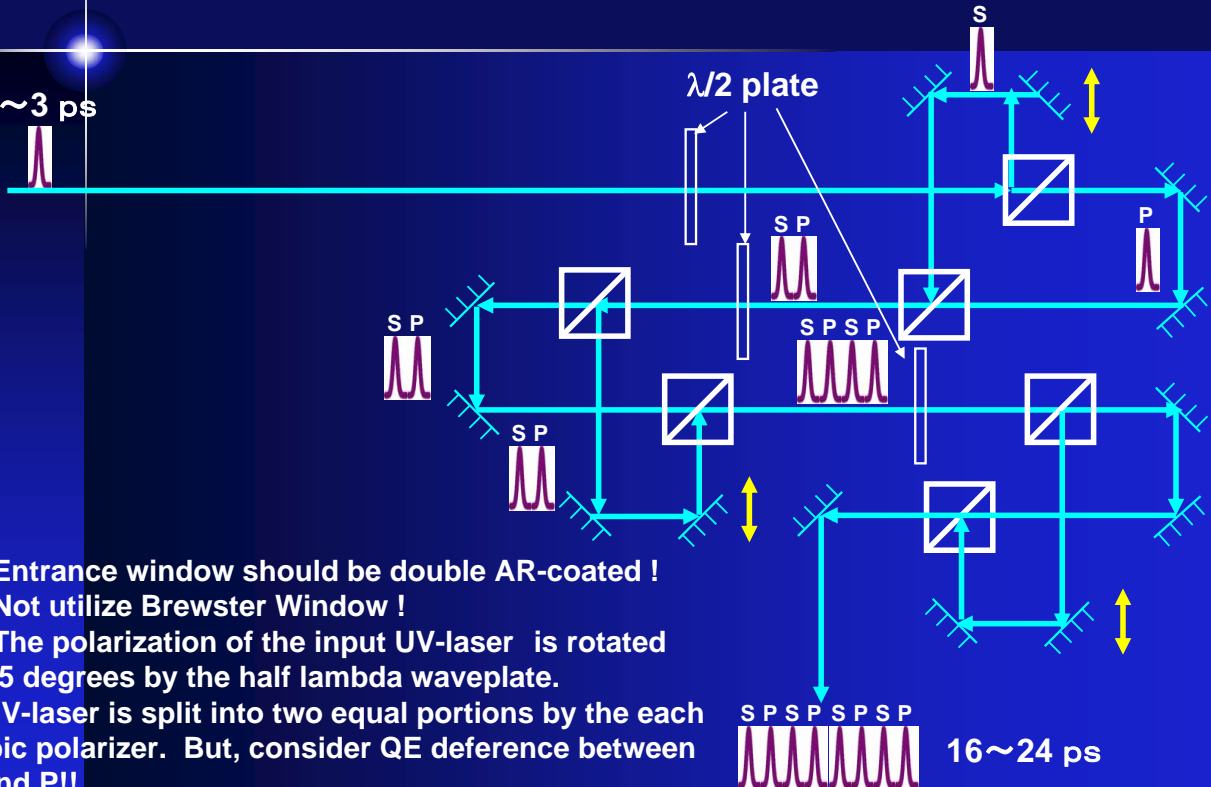
Simulated Annealing Algorithms (SA)



## 2-2. 時間プロファイルの自動最適化へ

### 2-2-3. UV-Pulse Stacker

2~3 ps



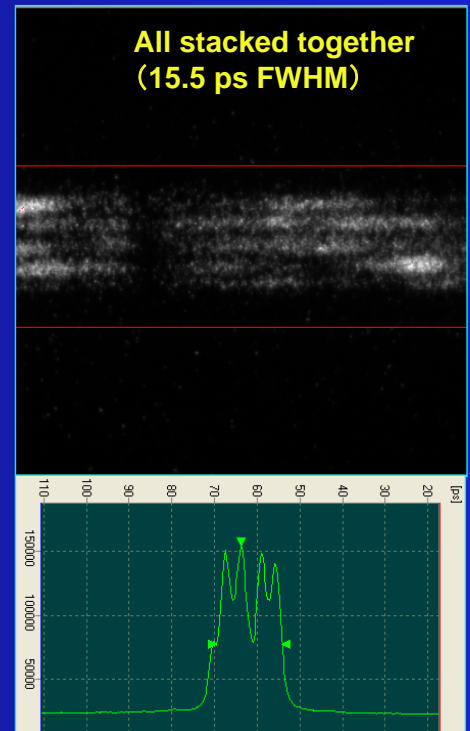
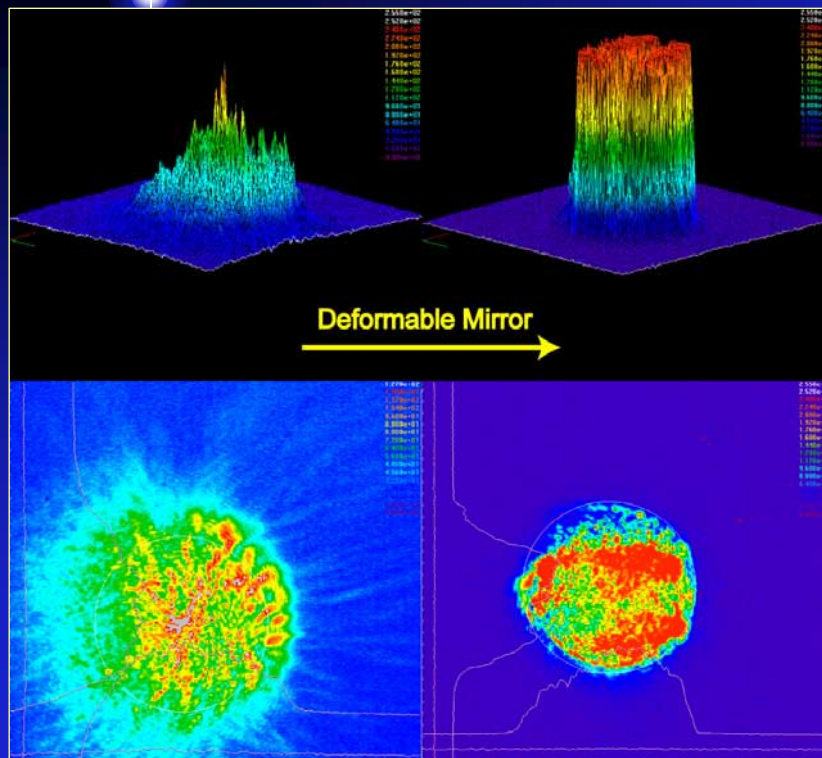
- ※ Entrance window should be double AR-coated !
- ※ Not utilize Brewster Window !
- ※ The polarization of the input UV-laser is rotated 45 degrees by the half lambda waveplate.
- ※ UV-laser is split into two equal portions by the each cubic polarizer. But, consider QE difference between S and P!!

## 2. レーザ光源の高品質化

### 2-4. レーザ3次元形状のSP8での現状

空間プロファイル:フラットトップ

パルス幅:2.5~20 ps



## 3. ERL/STF用の理想的な光源開発計画

整形技術

1500 ~  
2000万円  
(1~2年)

### 1. 高自由度・自動時間／空間プロファイル整形

- ⇒ 最終的にDMでカソードのQE分布も補償
- ⇒ SLMで最終パルス波形を最適化、途中の歪みを補償

### 2. 空間プロファイル整形: ピエゾDMの開発

1000万円/年

- ⇒ 500万円, 1年 (SP8と福井工業センター)

### 3. 時間プロファイル整形: UV-Dazzlerの導入

- ⇒ 1000万円, 1年 (SP8とタレスレーザ社)

光源開発

13000 ~  
15000万円  
(3年)

### 4. Yb:YAG高強度オシレータと増幅器同時開発

- ⇒ 4000万円, 3年 (SP8と福井大学、阪大)

### 5. Yb:ファイバーレーザの導入・改造

- ⇒ 6000万円, 2年 (IPG社と組むことができるか?)

### 6. NOPAによる波長最適化とマクロパルス増幅

5000万円/年

- ⇒ 3000万円, 2年 (誰がやる? リトアニアと組むか?)

# 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(1030 nm)ベースのILC/ERL光源の予算見積り(4倍波:258 nmで使用)

	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	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		11030		78630

※ NOPAの場合の実証が出来れば, ERL用は平均出力1kWモデルとして, 上の1/3程度になる。ILC用はさほど変わらない。両共用にすると2~3億で光源が可能という

# 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(1560 nm)ベースのILC/ERL光源の予算見積り(2倍波:780 nmで使用)

	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
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

※ センシタイザーのYbの寄生発振がどの程度抑えられるかによる。この問題が解決しないと, 増強化のためにコストがさらに上がることが予想される。

## 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(将来的に改善するか?)。
- 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、 $\phi$ 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。固体レーザーの場合はこの程度の輝度のLDで問題なく、固体レーザーならば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。空間伝播モードとファイバー伝播モードの優越を考慮する必要あり。
- 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(パラレルに)メンテナンス可能なシステム**として設計すべき。この点ではファイバーレーザもMOPAなので同様の問題がある。
- 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**主発振器**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は、**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。