

ファイバーレーザーや固体レーザー発振器 のフェムト秒タイミング同期とその応用

産業技術総合研究所
小林洋平

レーザーの種類と特徴

●ガスレーザー

- 高出力、狭帯域 × 大きい、制御性
- エキシマ、He-Ne、CO₂、アルゴンなど

●半導体レーザー

- 小型、波長可変、高出力 × デザインできない、 $> 500\text{fs}$
- GaAs、InGaAs、など

●固体レーザー

- 高出力、広帯域、超短パルス $< 10\text{fs}$ 、制御性 × 複雑、長時間
- チタンサファイア、YAG、YVO₄、など

●ファイバーレーザー

- 小型、安定、通信波長帯 $\sim 100\text{fs}$ × 出力 $\sim\text{mW}$
- エルビウム、イッテルビウム

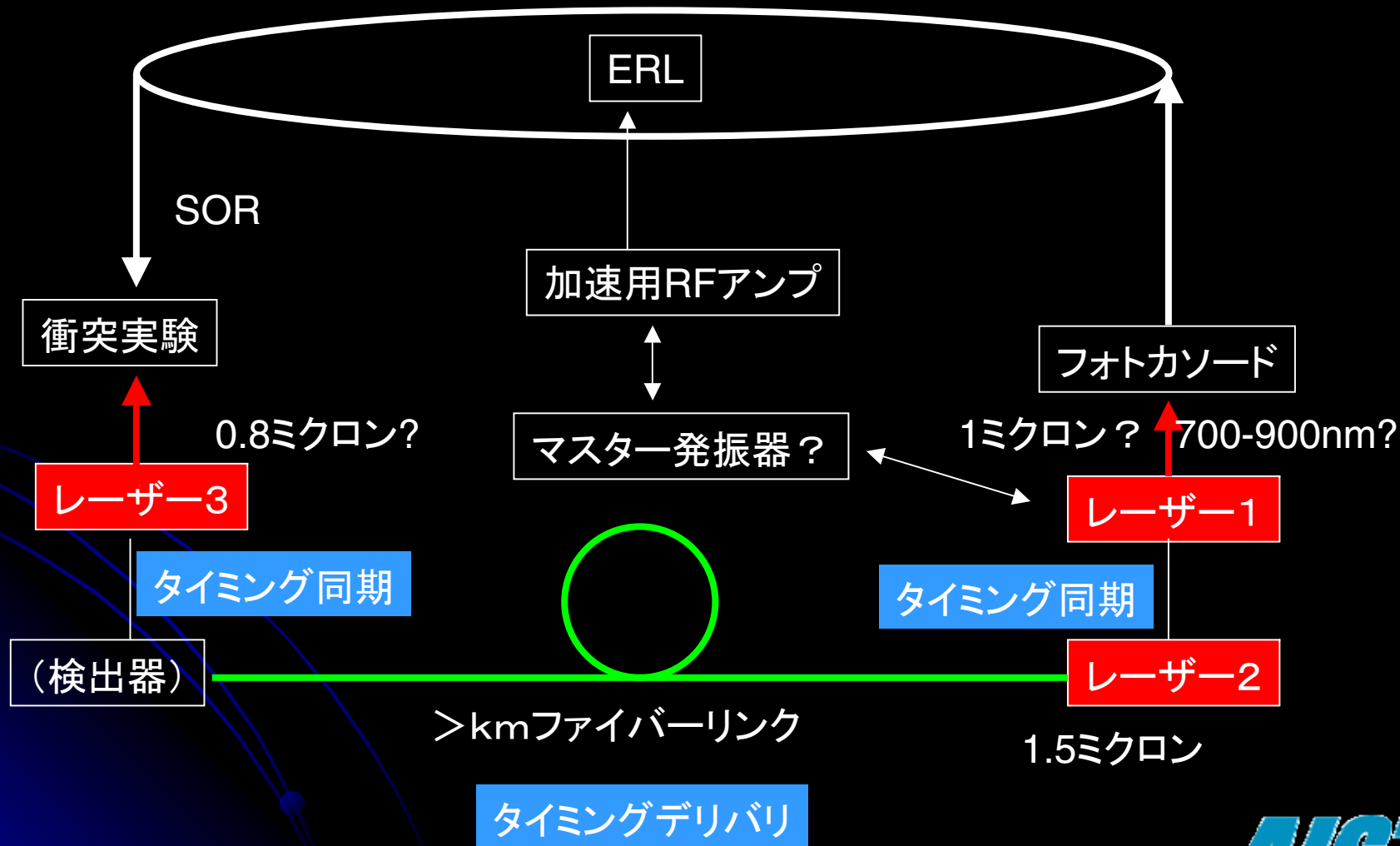
●色素レーザー

- 波長可変、超短パルス、狭帯域 × 複雑、不安定
- 各種 ローダミンなど

レーザーのパラメータ

- 平均出力
 - ガスレーザー、固体レーザー
- パルス幅
 - 固体レーザー
- 繰り返し周波数
 - 半導体レーザー、ファイバーレーザー
- 波長
 - 固体レーザー、色素レーザー
- 安定性
 - 半導体レーザー、ファイバーレーザー

加速器のシステムに必要なと思われるレーザー



加速器のシステムに必要なと思われるレーザーの特性

- フォトカソード

- f_s 、1GHz、10nJ? \rightarrow 10W!
- 波長 700–900nm?
 - もし紫外なら上記パワーの2~3倍必要!

固体レーザー又はファイバーレーザー + 増幅器

- タイミング伝送用

- f_s 、通信波長帯

Erファイバーレーザー

fs、1GHz、10nJ? → >10Wレーザーの候補

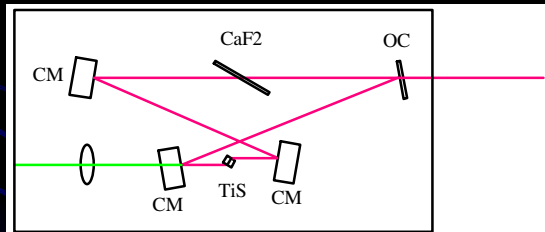
- フェムト秒
 - 固体レーザー
 - チタンサファイアレーザー、クロムフォルステライトレーザー、Yb:YAG、Yb:KGWなど
 - ファイバーレーザー
 - エルビウム、イッテルビウム
 - 色素レーザー
 - OPA
- 1GHz
 - チタンサファイアレーザー、ファイバーレーザー?、Yb固体レーザー?
- 10nJ
 - 発振器GHzでは無理 (Ybディスクレーザーであるか?)
- >10W
 - ファイバーアンプ (YbだとkW、Er-Ybだと100W)

Evidence of thermal effects in a high-power Er³⁺-Yb³⁺ fiber laser
Guillaume Canat, Jean-Claude Mollier, Yves Jaouën, and Bernard Dussardier
Optics Letters, Vol. 30, Issue 22, pp. 3030-3032

fs、1GHz、10nJ? → 10Wレーザー 1ミクロン又は500nmの場合

- 発振器 チタンサファイアレーザー 200–500mW
- 1ミクロン成分(mW)をYbファイバー増幅器で10Wにする

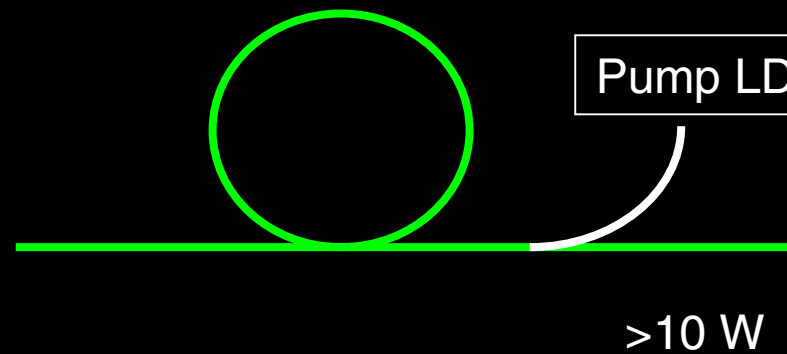
GHzチタンサファイアレーザー



Yb:ファイバーレーザー発振器



YDF



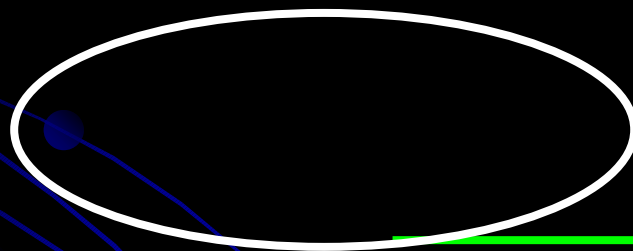
SHG

10 W@500

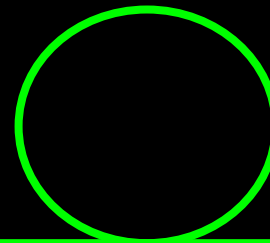
fs、1GHz、10nJ? \rightarrow 10W 700-900nm

- 発振器 Erファイバーレーザー mW
- Yb-Er co-doped ファイバー増幅器で20Wにする
- SHGで775nm 10W

DC Er-Yb co-doped fiber



Er:ファイバーレーザー
発振器又は
Ti:sapphire



Pump LD

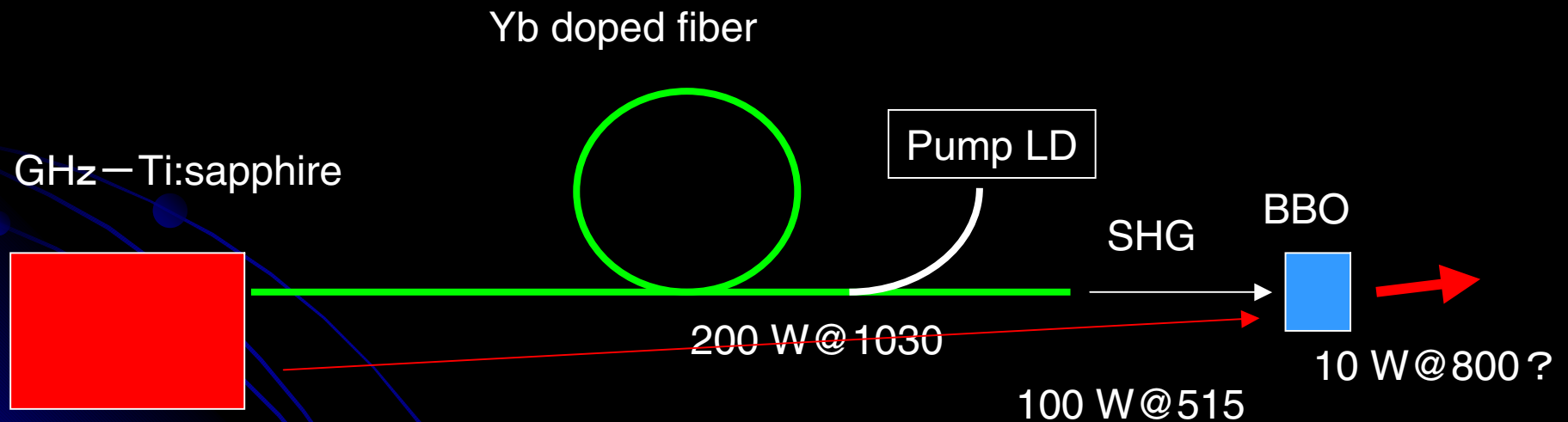
20 W@1550

SHG

10 W@775

fs、1GHz、10nJ? \rightarrow 10W 700-900nm OPAだと

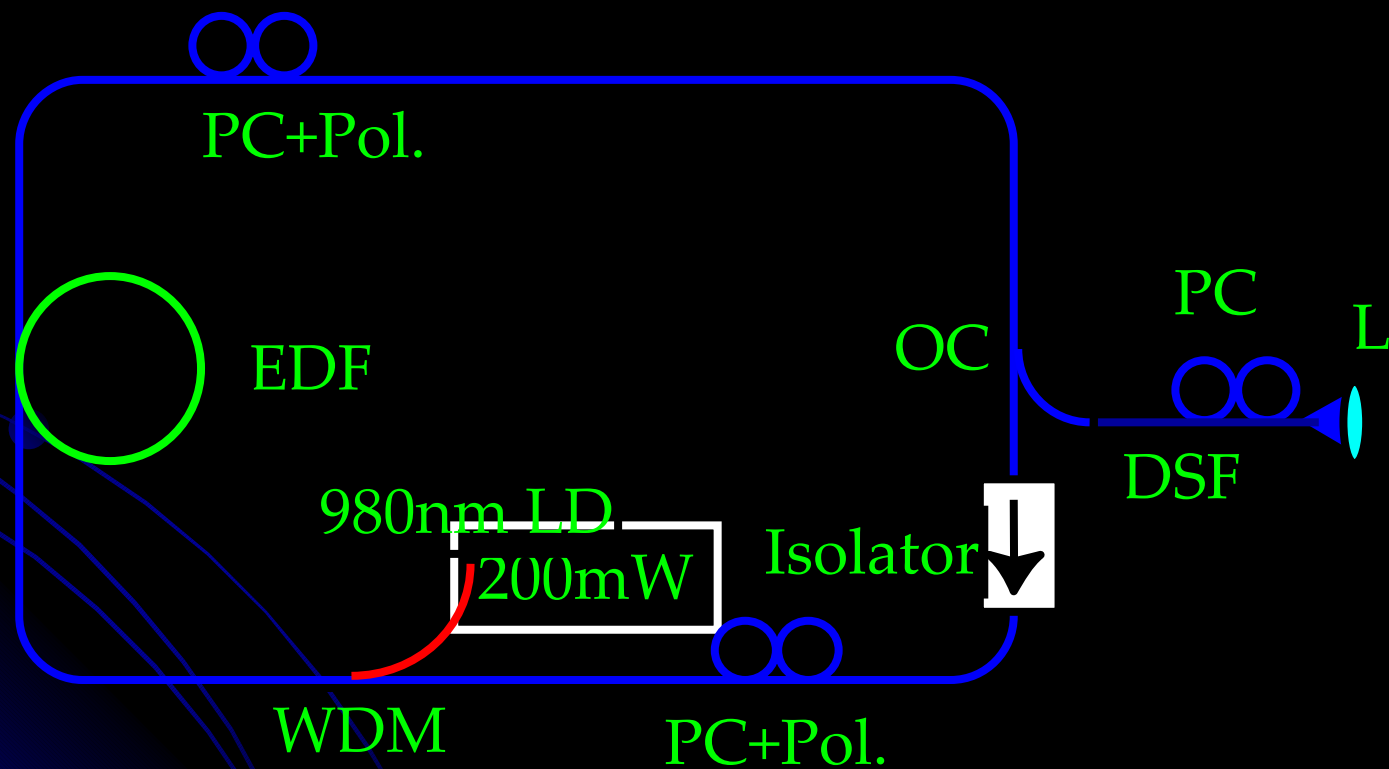
- 発振器 Ybファイバーレーザー
- 増幅器 Ybファイバー
- OPA BBO



ファイバーレーザー発振器

エルビウム非線形偏波回転モード同期レーザー

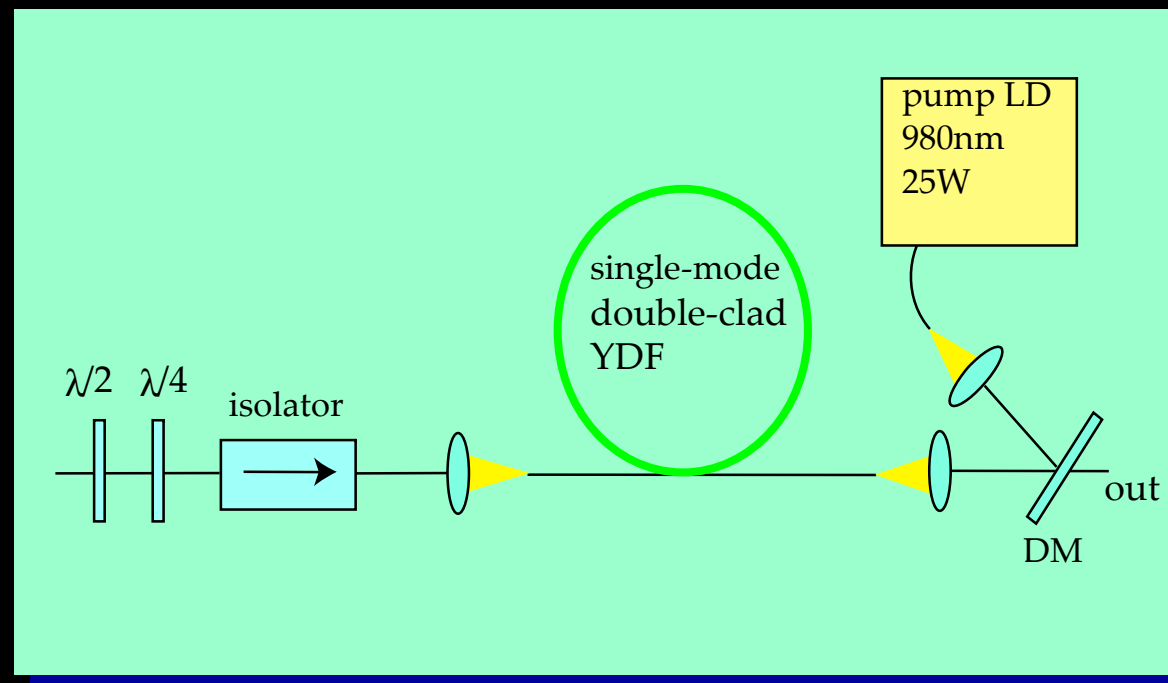
1550nm, 1mW, 40MHz



Ybは作成中

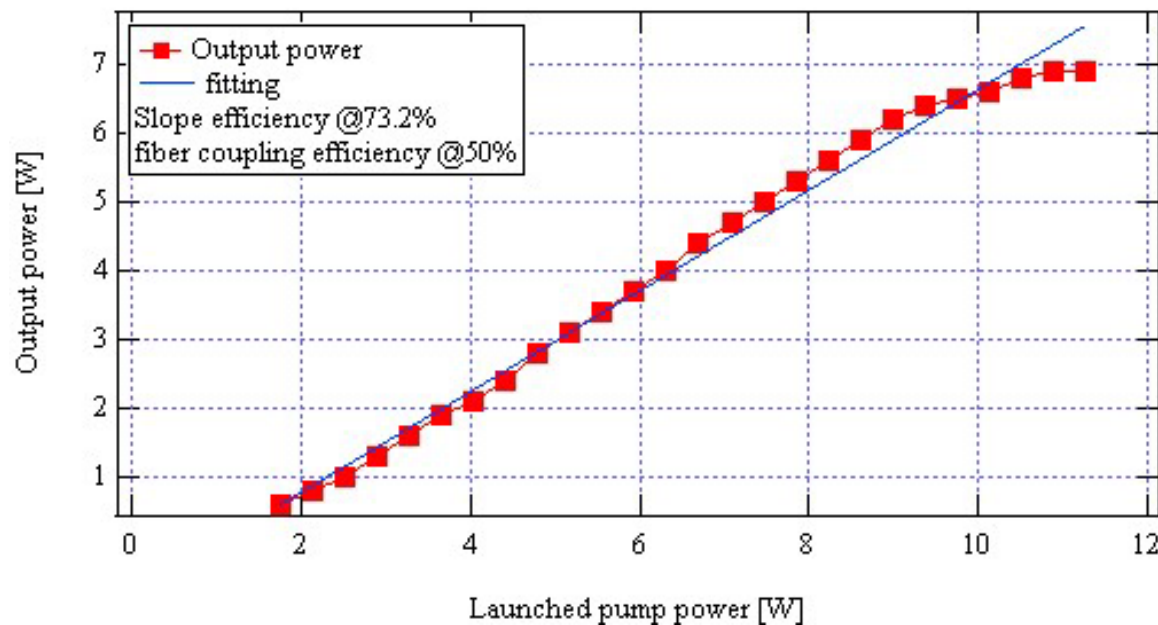
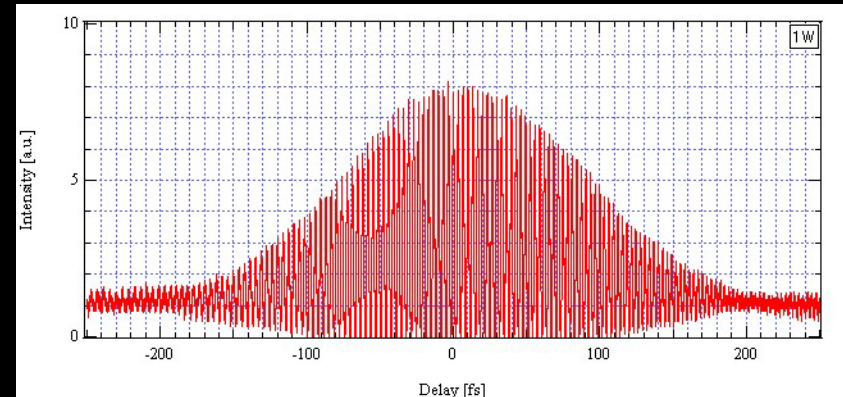
Ybファイバー増幅器

100MHz Ybガラス
レーザー発振器



Ybファイバー増幅器

チタンサファイアレーザーシード
100MHz繰り返しYbファイバアンプ
平均出力 7 W
パルスエネルギー 70 nJ
パルス幅(圧縮後) 114 fs



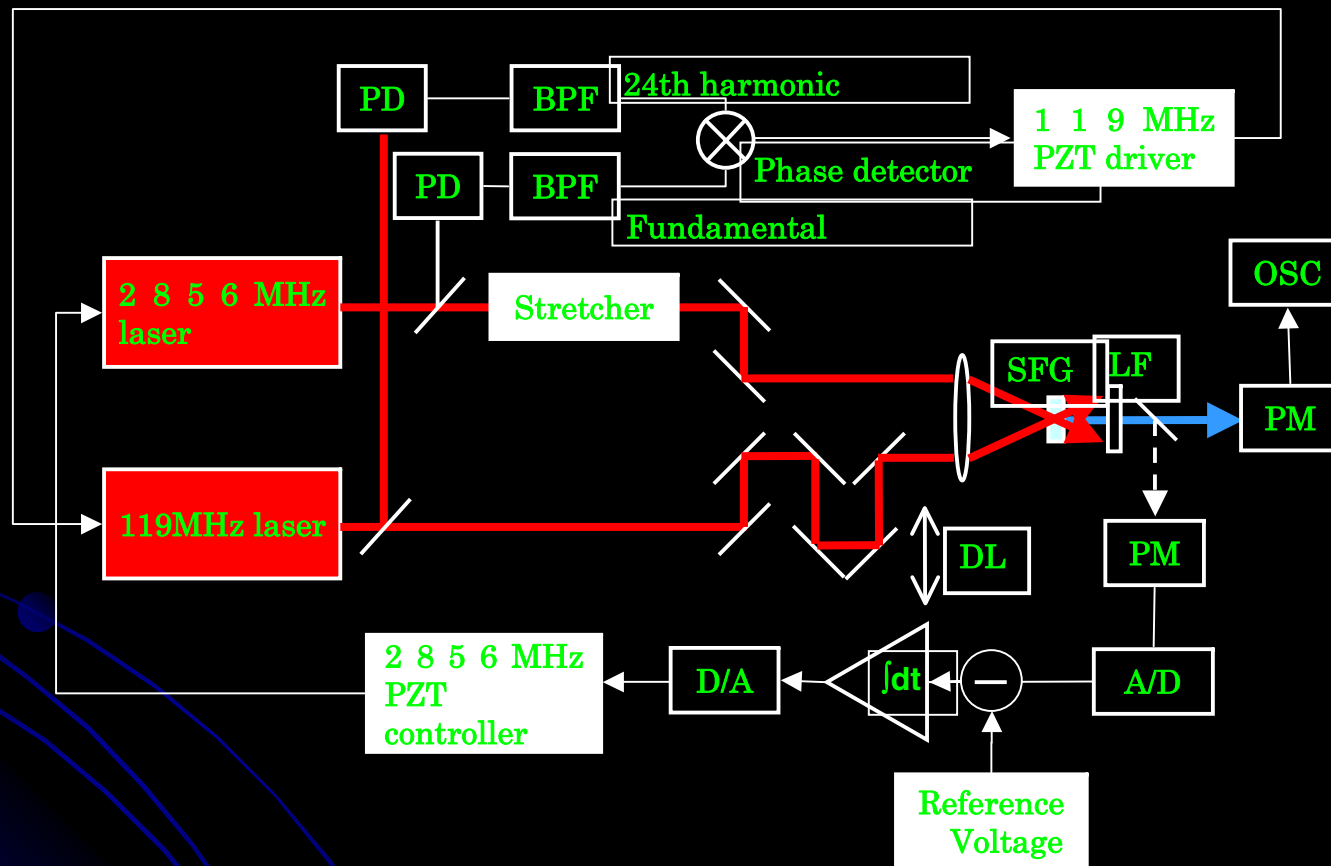
タイミング同期

- フォトカソード用レーザーと応用実験用レーザーとのタイミング同期
 - 要望は何fs?
- 異なる繰り返し周波数のレーザー間の同期
- 遠方のレーザー間の同期

これらを解決する必要がある。

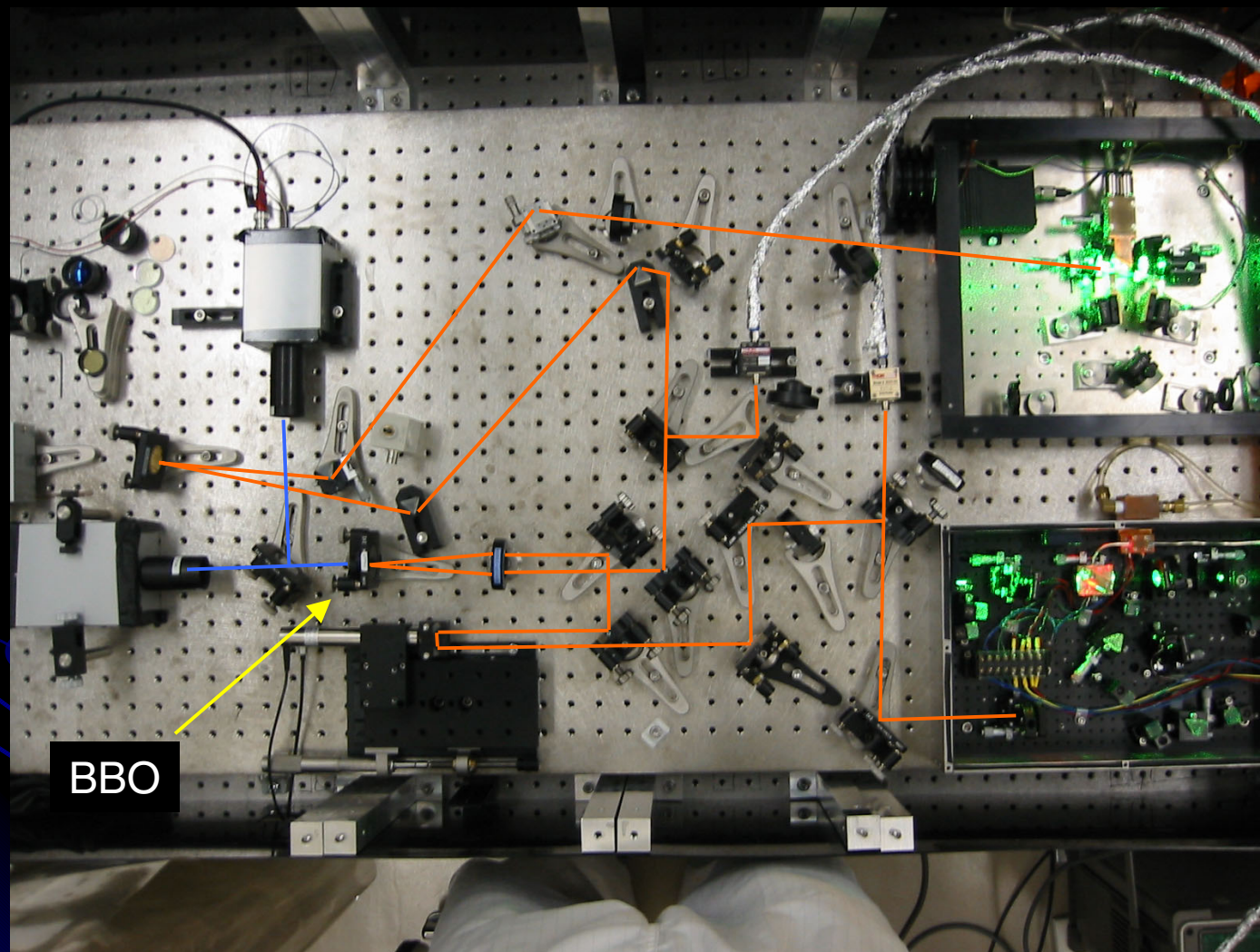
以前FESTAと共同で行ったまさに、この用途のタイミング同期実験を紹介する

2.856 GHz、119MHz レーザーのタイミング同期



PD: photodiode, BPF : Bandpass filter, SFG: sum-frequency generation, LF: 400nm line filter, PM: photomultiplier, OSC: oscilloscope, DL: delay line.

実験装置外観



BBO

2856M
laser

119M
laser

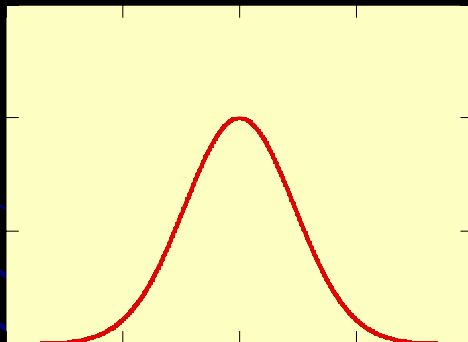
電気のPLL制御だけの場合

相関光を用いた時間ジッター計測結果

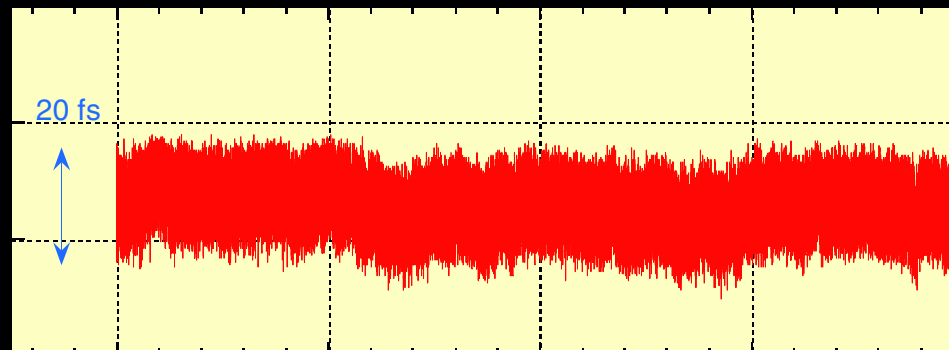
フォトダイオードによる光検出

測定帯域 最大300 kHz

測定帯域	時間ジッター
300 kHz - 2.5 Hz	5.7 fs
30 kHz - 0.25 Hz	6.3 fs
3 kHz - 25 mHz	4.9 fs

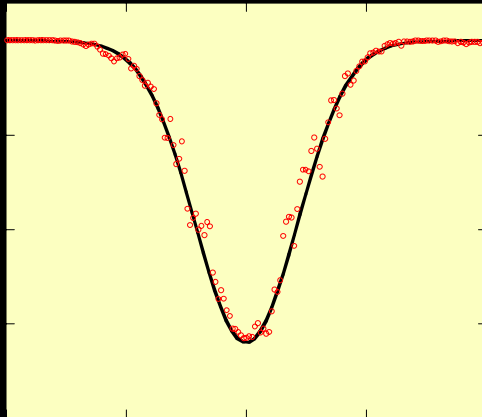


相互相関光のプロファイル

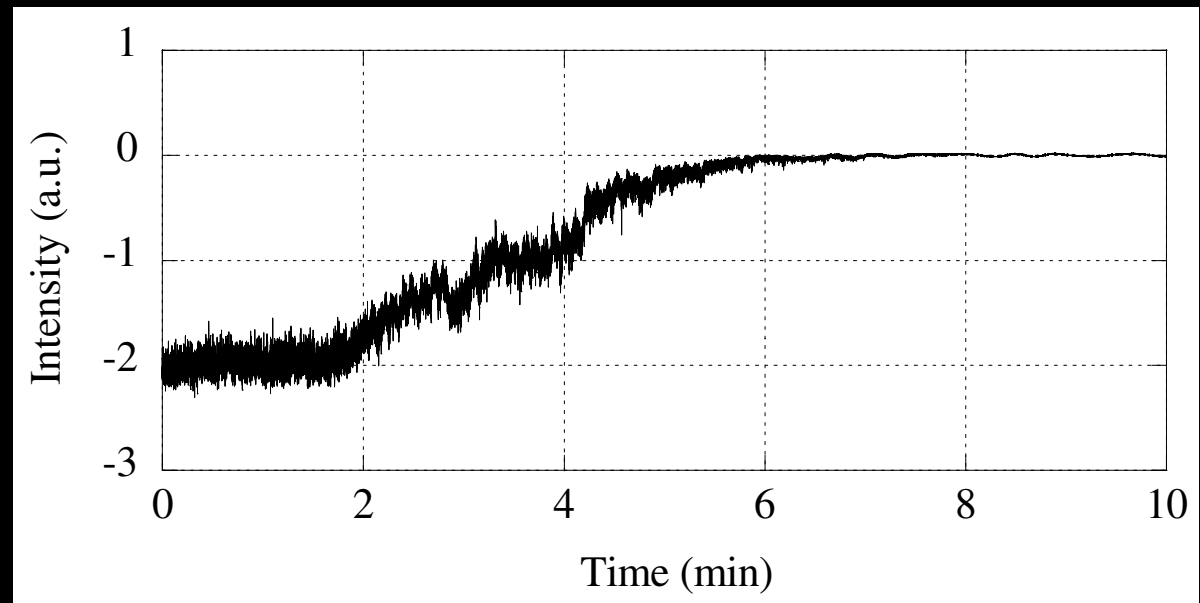


帯域 3 kHzでの測定結果

発生したドリフトのようす



掃引相互相関波形

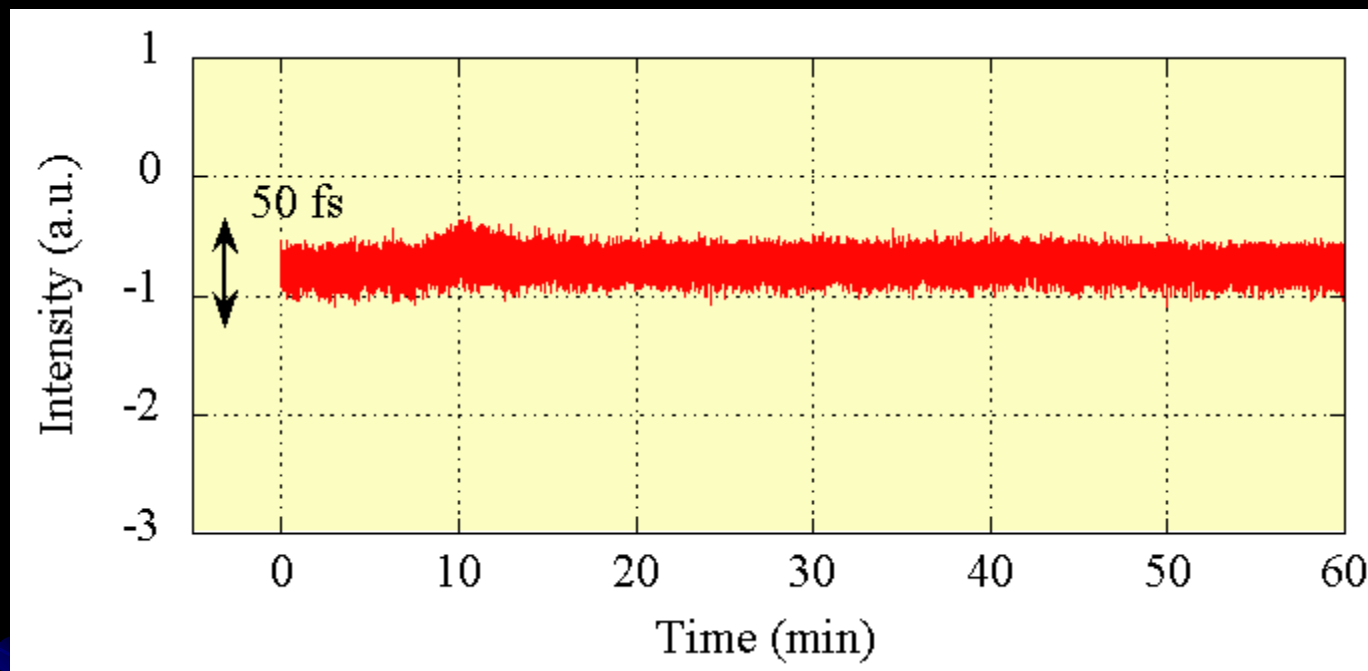


ドリフトの観測 5 – 15 min / 100 fs

原因として考えられるもの

- ・温度変化による光学定盤やRFケーブルの伸縮
- ・位相比較器の基準参照電圧の変動

長時間同期(+相関光フィードバック)

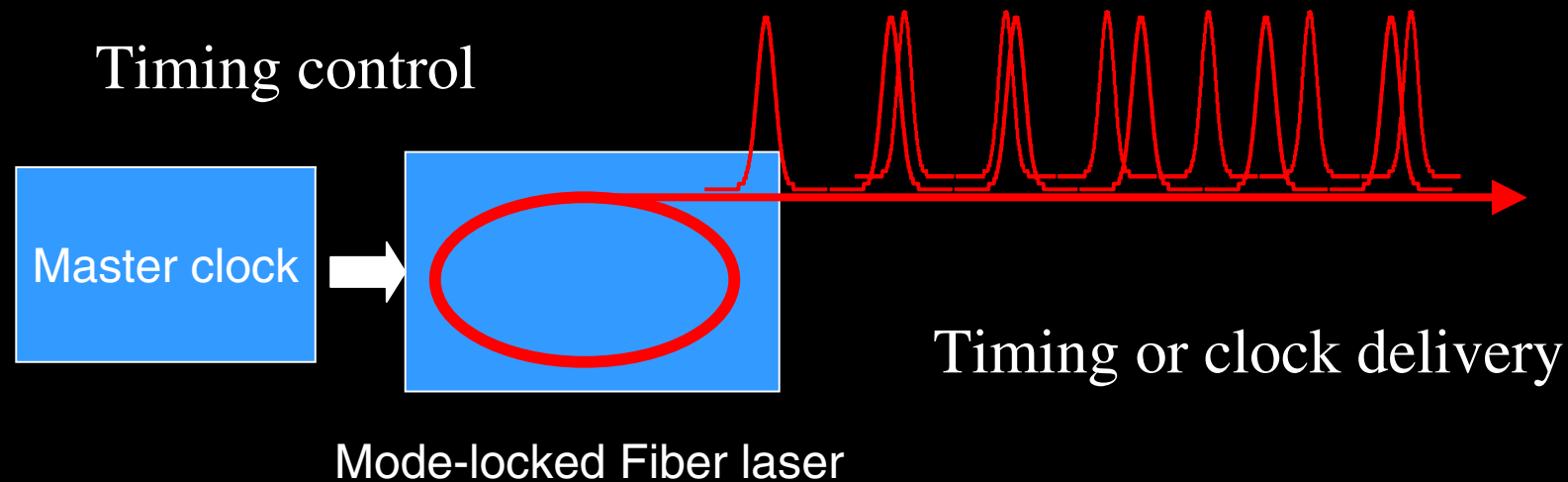


RMS jitter < 4 fs (50 Hzサンプリング)

同期精度を維持したまま、1時間以上の運転が可能になった

2台のチタンサファイアレーザーはタイミング同期できる

ファイバーレーザーのタイミング同期



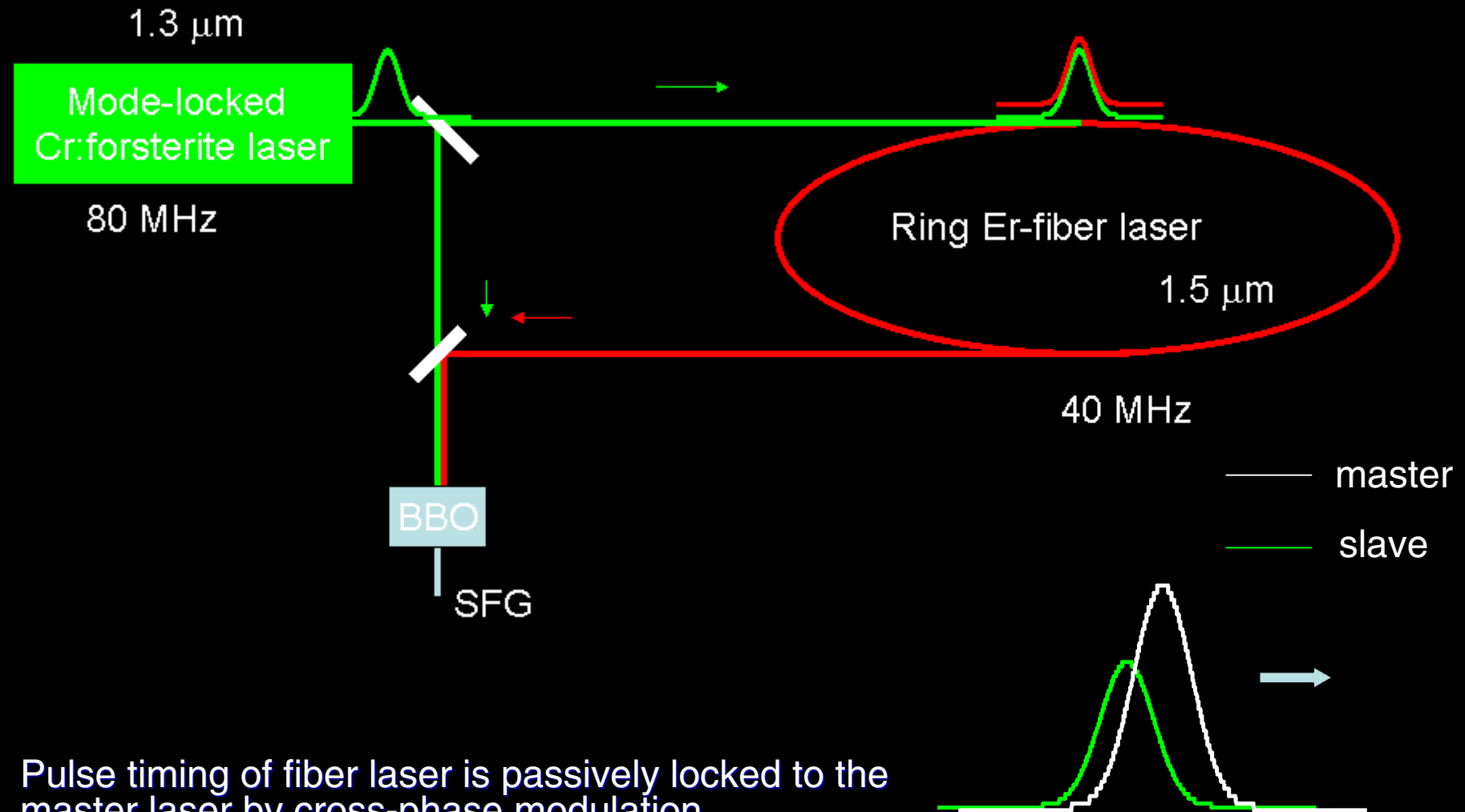
Precise timing control of the fiber laser is required for clock delivery in a short range application (10-km region).

10-fs timing jitter with active control was demonstrated [*]

- How precise can we control the timing jitter?

[*] D. D. Hudson, et. al., Opt. Lett. 31, 1951 (2006).

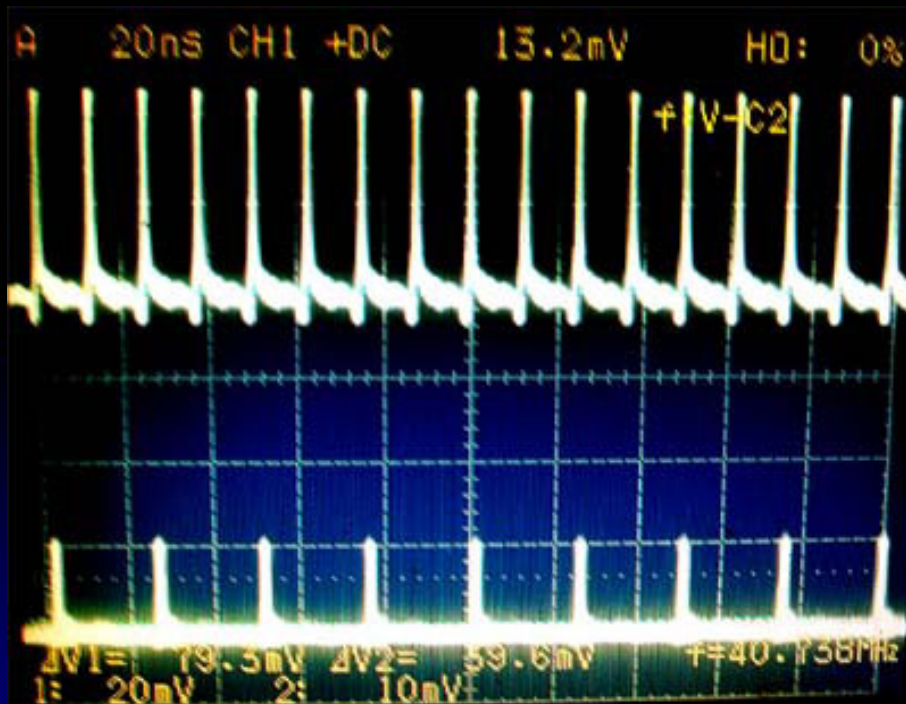
我々独自の技術 — 受動タイミング同期



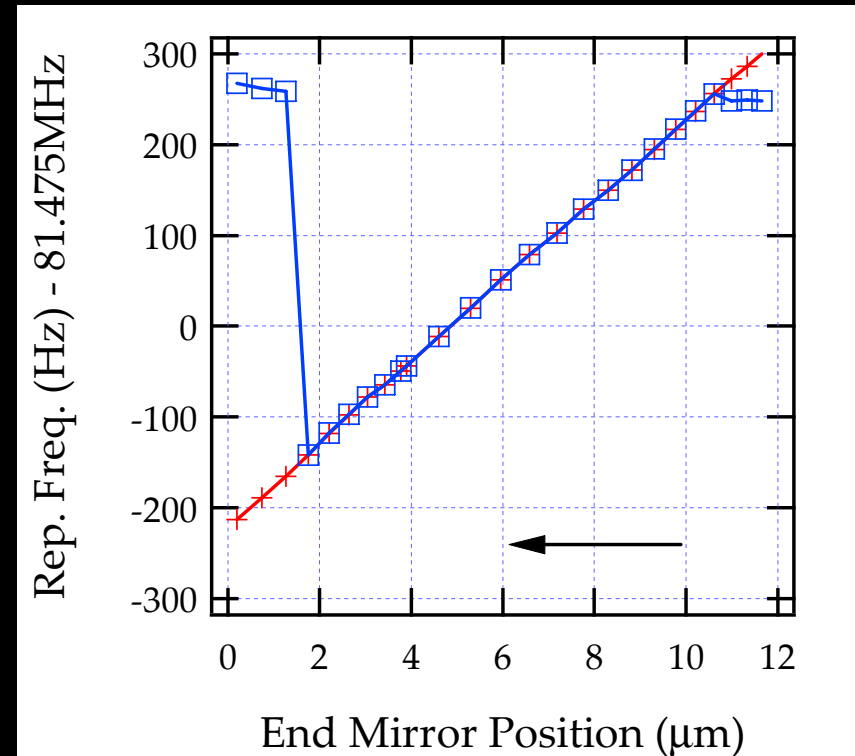
- Pulse timing of fiber laser is passively locked to the master laser by cross-phase modulation.
- Intensity fluctuation of the sum frequency corresponds to the timing fluctuation.

Results -Timing synchronization

Picture of master (upper) and slave (lower) pulses

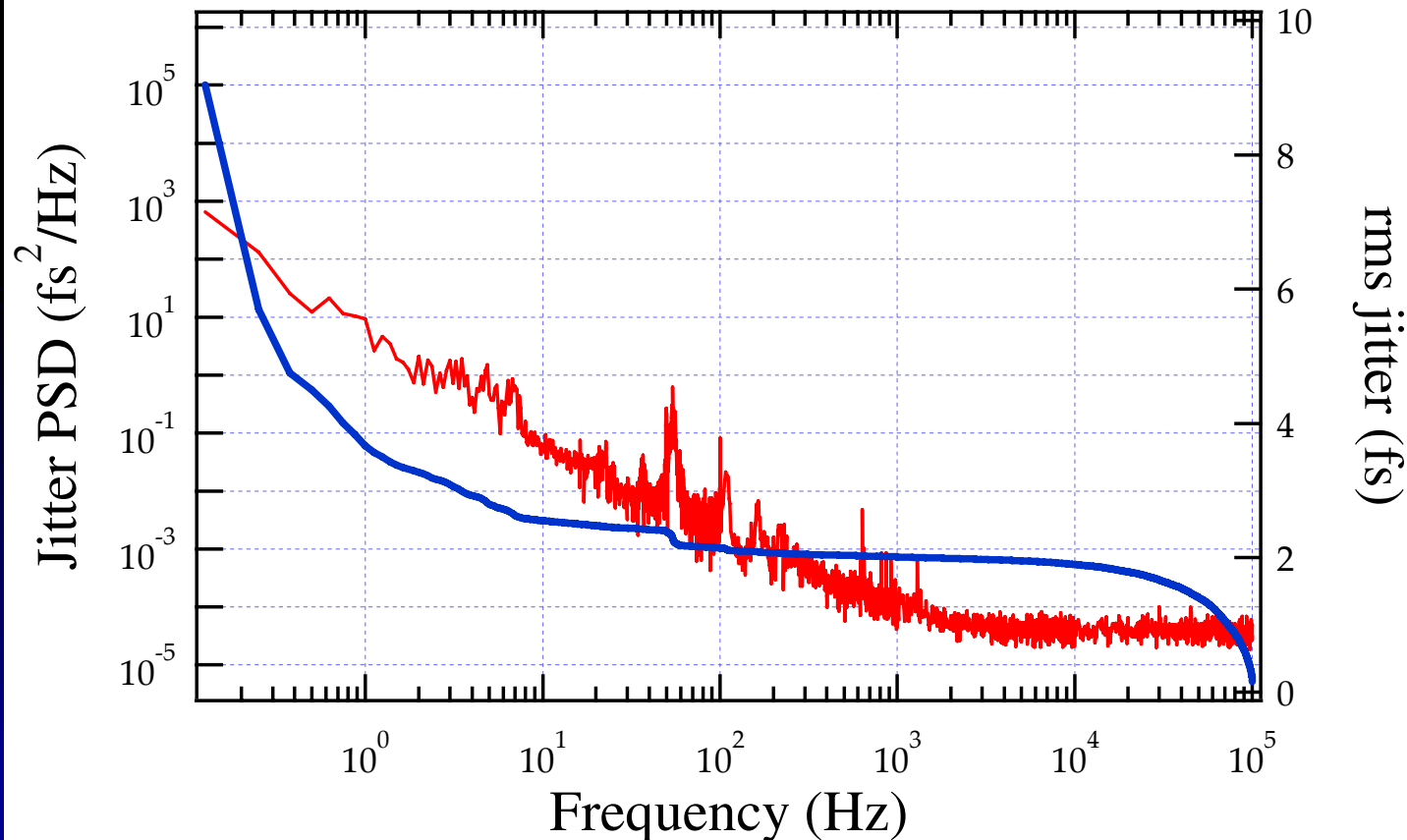
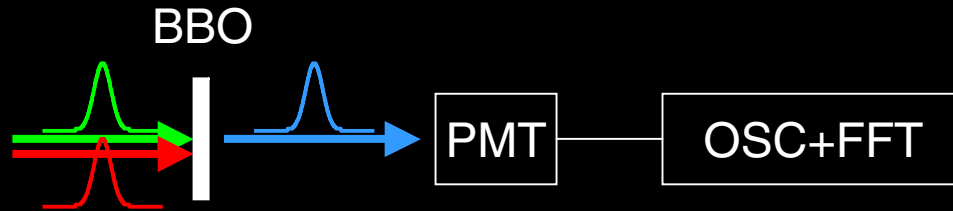


Tolerance of cavity mismatch



- Repetition rate of fiber laser is synchronized to that of master laser.
- Tolerance is ~ 400 Hz.

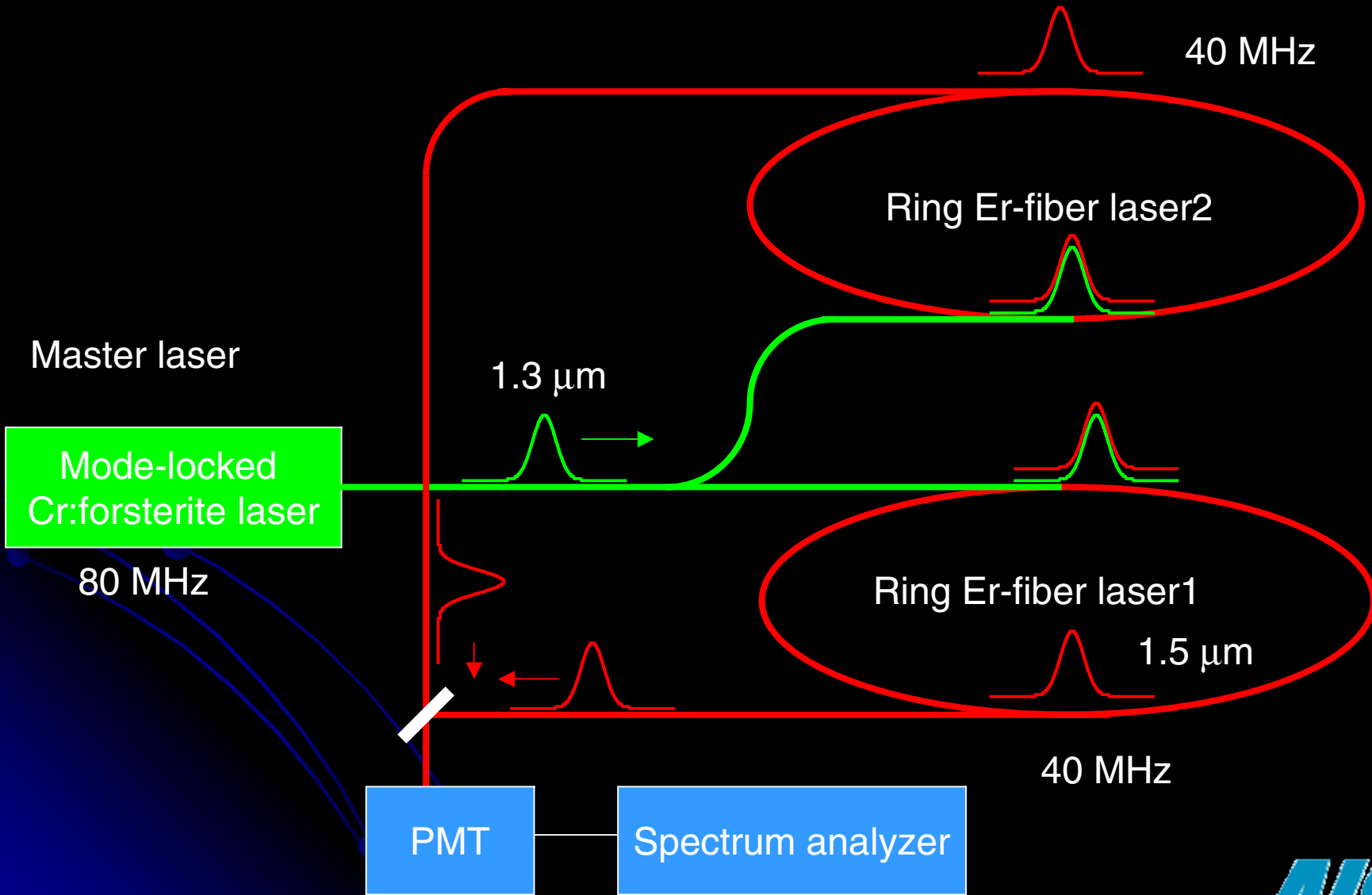
Result - Timing jitter



2 fs @ 100 Hz-
100 kHz
3.7 fs @ 1 Hz –
100 kHz

D. Yoshitomi et. al.
To be appeared in
Opt. Lett.

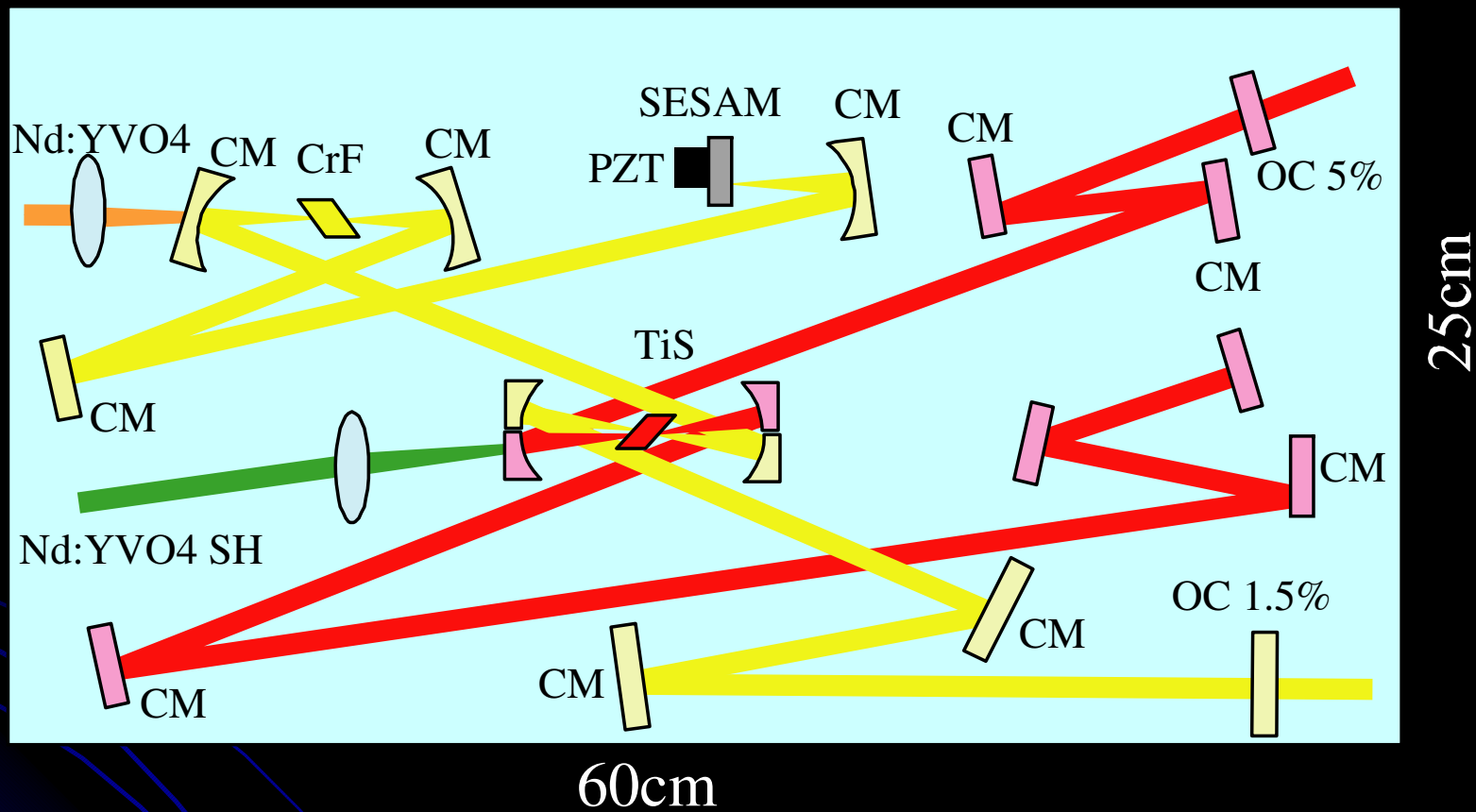
Two-fiber lasers



Stability of passive timing locking

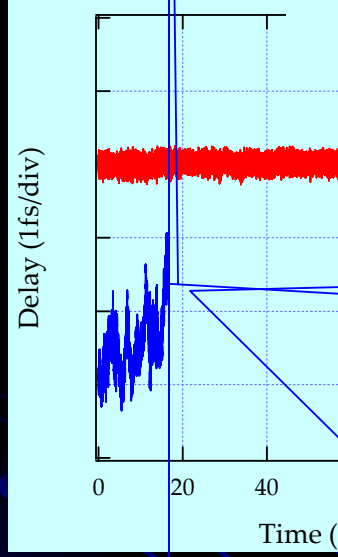


800nm-1300nm fsパルスの受動タイミング同期



TiS, Ti:sapphire; CrF, Cr:forsterite; CM, Chirped Mirror; OC, Output Coupler; PZT, Piezoelectric Transducer; SESAM, Semiconductor Saturable Absorber Mirror

Top
ok
1kHz



100kHz

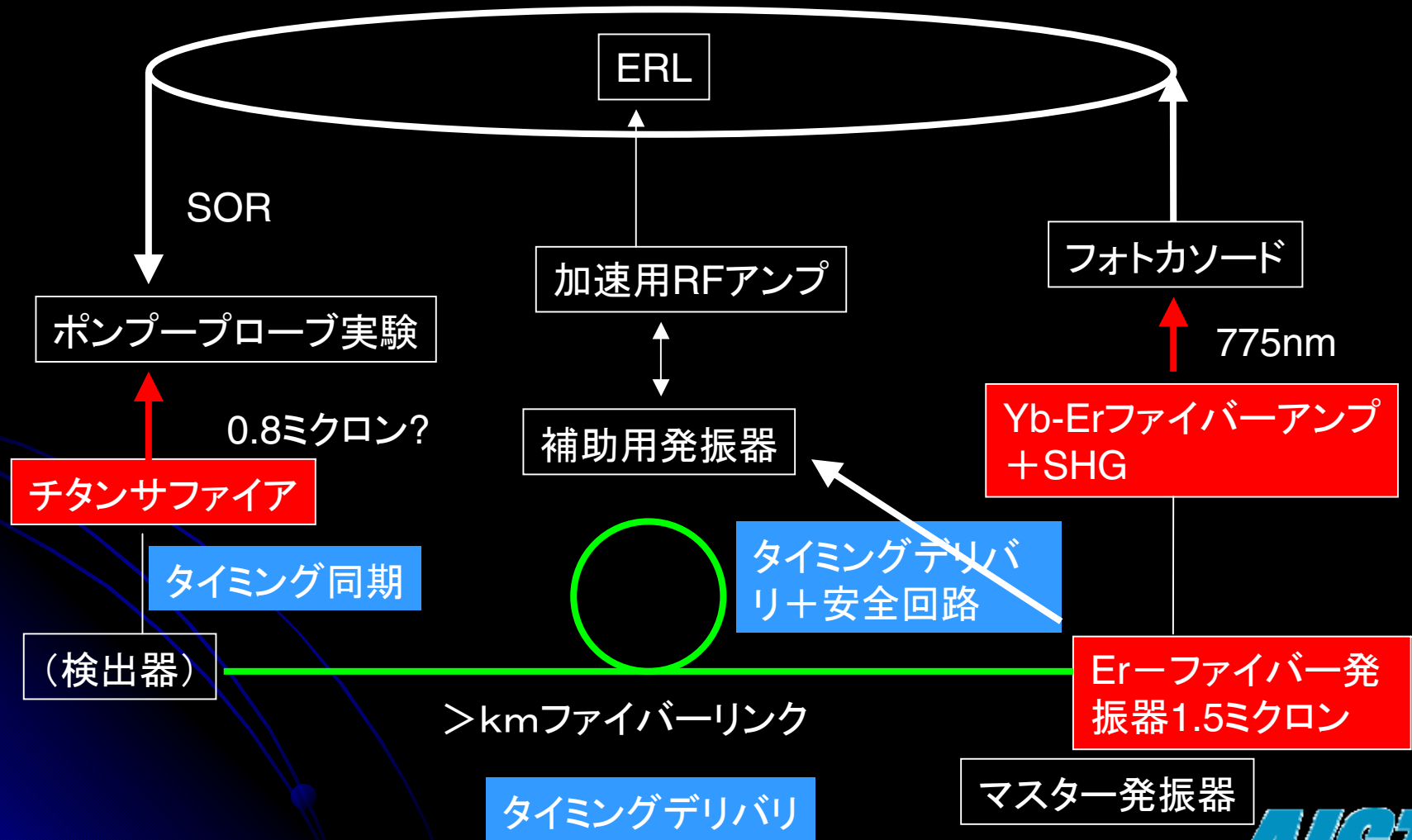
Slow jitter (1kHz BW) was significantly reduced by active control!

98 ± 18 as (10mHz - 100kHz)
 126 ± 20 as (10mHz - 1MHz)

その他の技術

- タイミング同期 + 光位相同期
- 高強度チタンサファイアレーザーシステム (> TW)
- 高強度物理 (高次高調波発生など)
- 光原子時計の発振器技術 (光周波数コム)

例えば



まとめ

- “チタンサファイアレーザー＋Ybファイバーアンプ”又は、“Ybファイバーレーザー＋Ybファイバーアンプ”がフォトカソード用に適當？
- 電氣的なフィードバックでサブ100fsレベルのタイミング同期は可能。
- ファイバーリンクで遠方のタイミング同期をするには今後の研究が必要。
- YbファイバーレーザーとErファイバーレーザーとの受動タイミング同期が有効