

第3回重力波研究交流会 2008/1/11

「注入同期レーザーの
多段式周波数安定化について」

東京大学

新領域創成科学研究科

物質系専攻

M2 大前宣昭

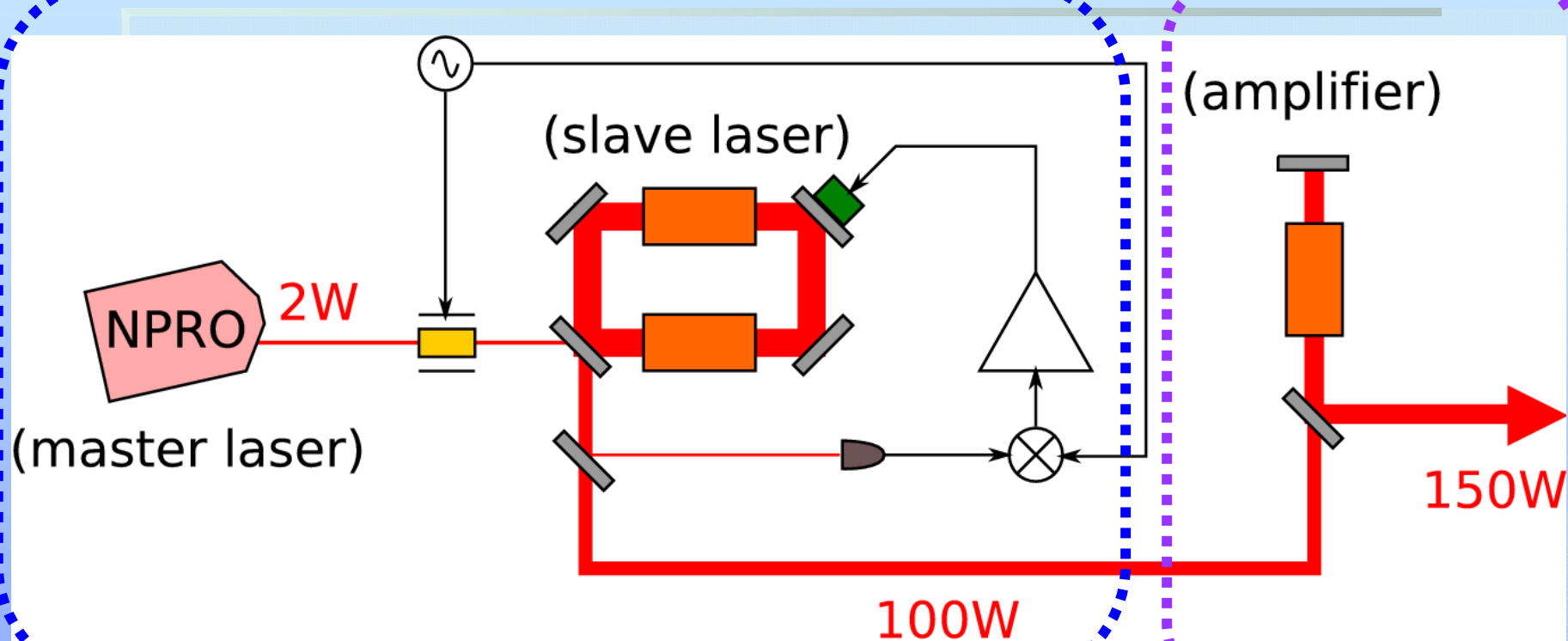
もくじ

- LCGT用光源
- LCGTでの多段式周波数安定化
- 注入同期レーザーの周波数安定化
- まとめ

LCGT用光源(高出力化)

注入同期 (Injection Locking)

増幅器 (MOPA)



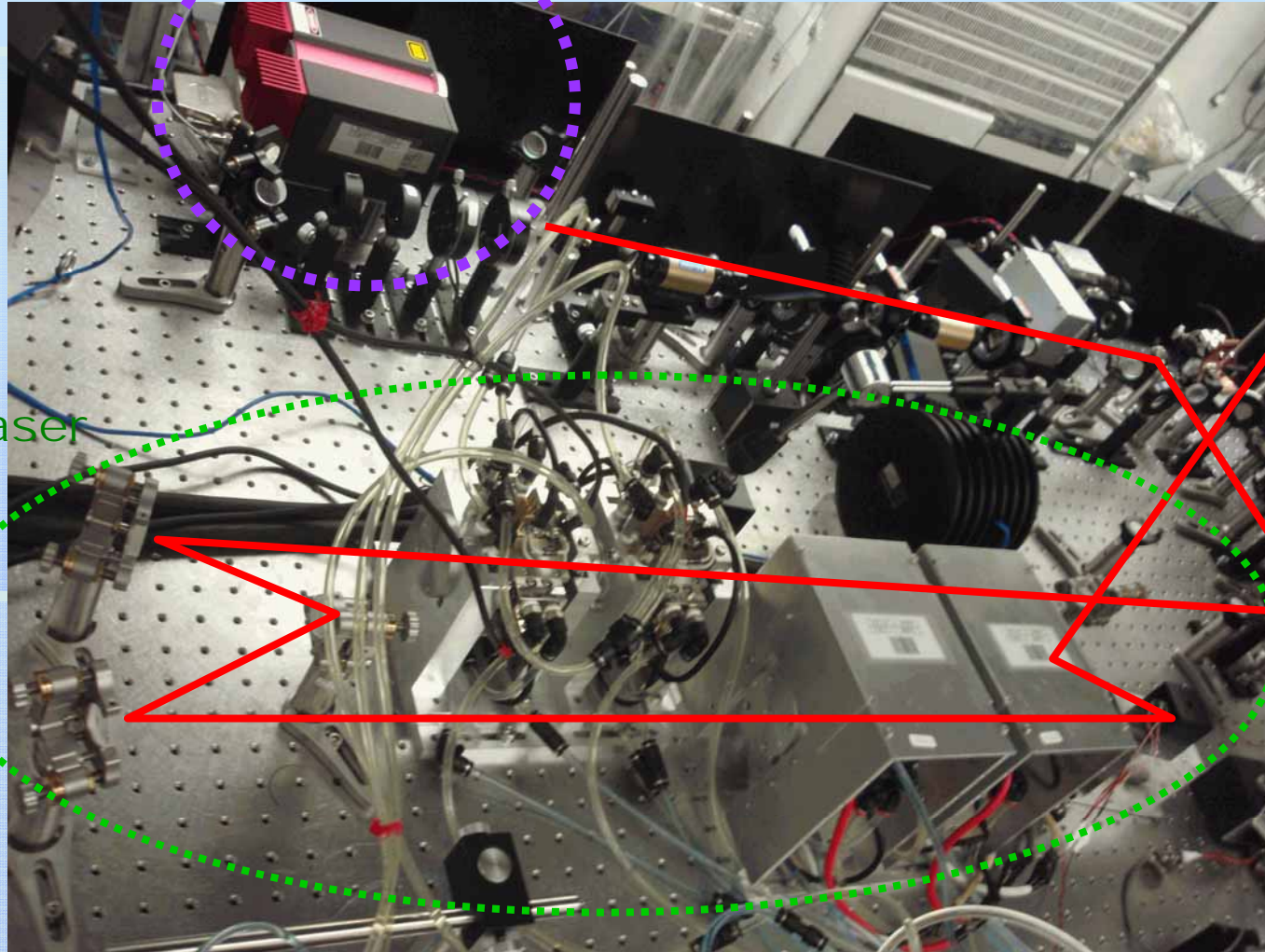
注入同期による100W出力まで達成できている。

三尾研の100Wレーザー

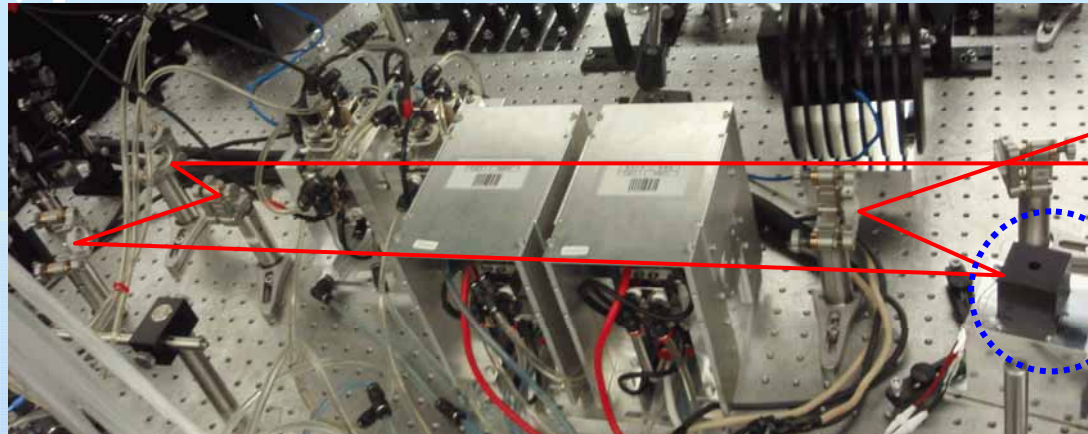
- 全体写真

Master laser : NPRO

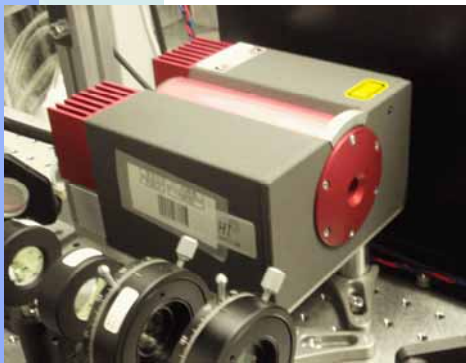
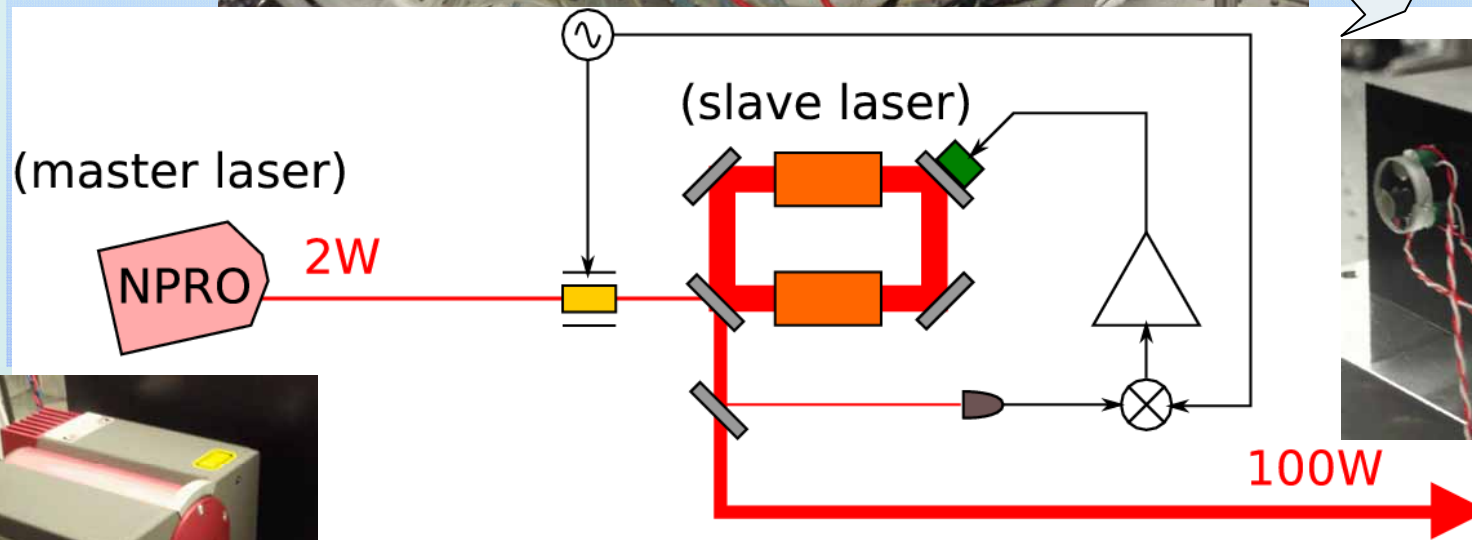
Slave laser



三尾研の100Wレーザー



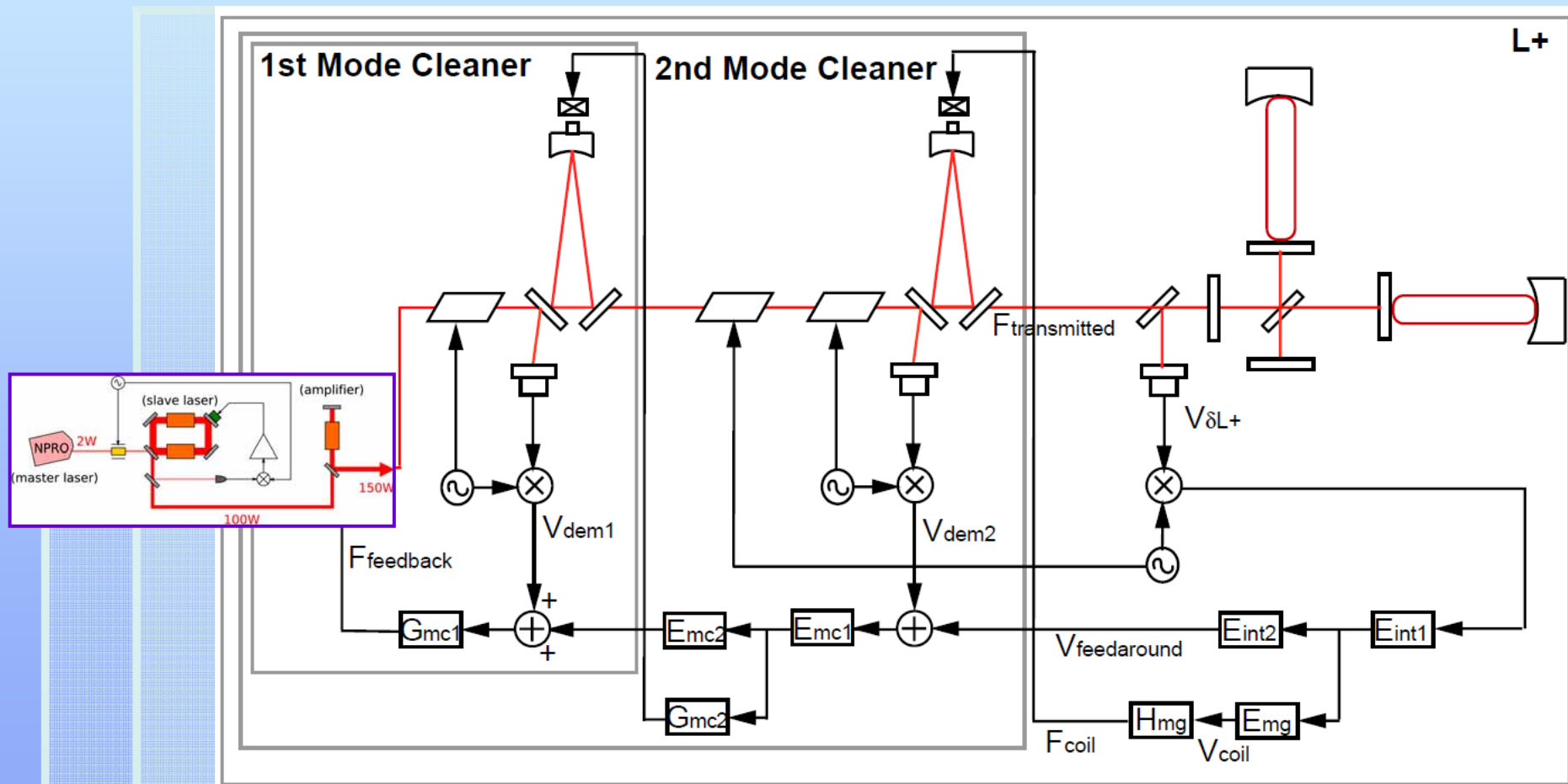
ピエゾつき鏡



今は、このレーザーの周波数安定化を行っている。

LCGT用光源(周波数安定化)

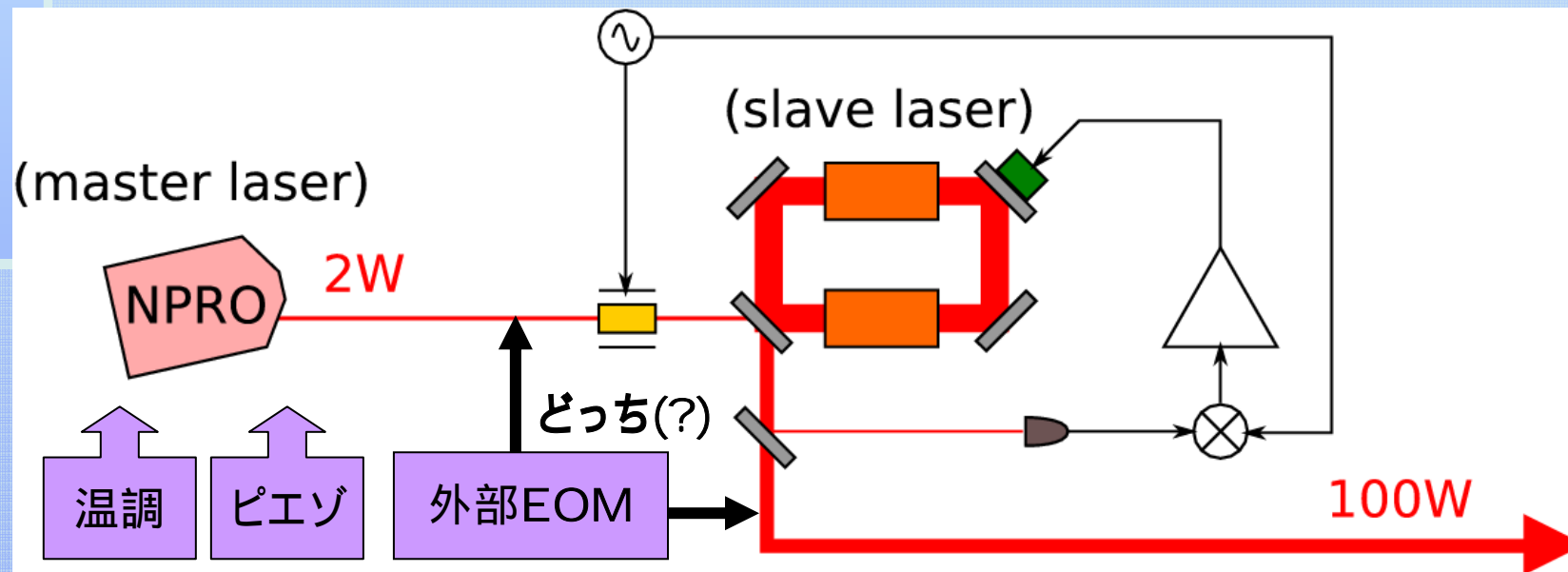
- LCGTドキュメント+



レーザー部分の周波数アクチュエータ

■ 3種類のアクチュエータ

- NPRO結晶の温調 : 3 GHz/V , $< 1 \text{ Hz}$
- NPRO結晶に付いたピエゾ : 1 MHz/V , $< 100 \text{ kHz}$
- 外部EOM(広帯域EOM) : $0.01 \times f \text{ Hz/V}$, $< 1 \text{ MHz}$

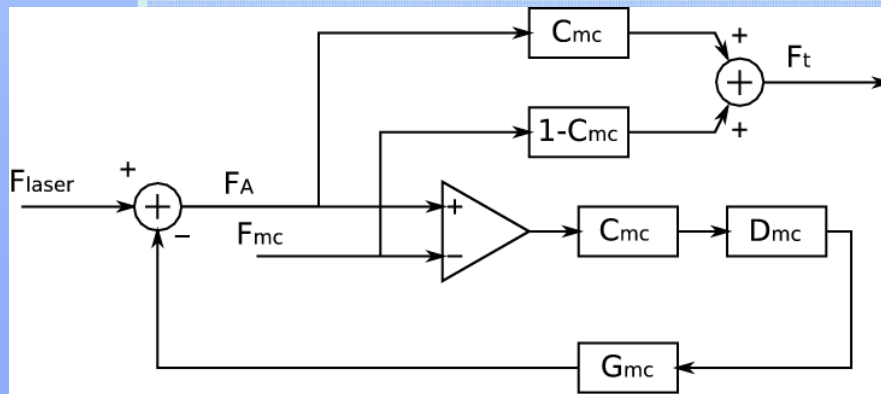
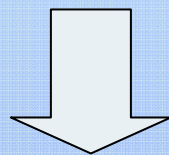
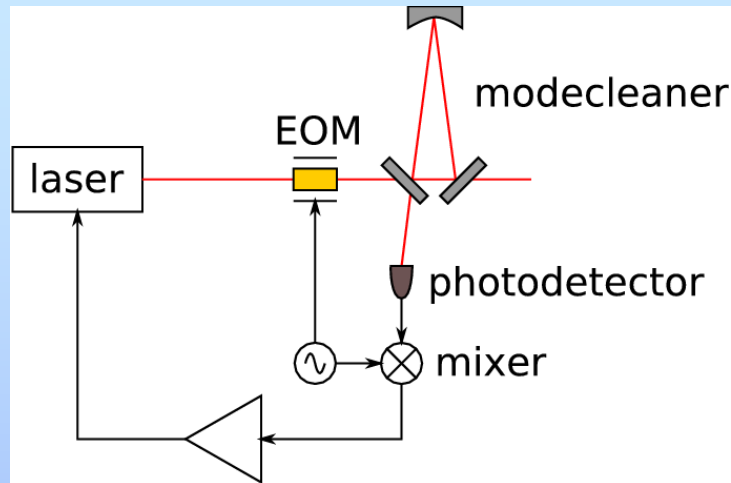


周波数安定化で考えるべきこと

- 多段式安定化システム
- 3つのアクチュエータ
- 注入同期
- (増幅器)

- シンプルなものから一つずつ順に考えていく。
 - 基本パターン：アクチュエータ1つ & MC1つ
 - LCGTの多段式システム
 - 各段に要求されるもの
 - 注入同期レーザーの周波数安定化
 - 注入同期レーザーの周波数特性
 - 3つのアクチュエータ
 - 外部EOMの場所の違いのメリット・デメリット

基本パターン



- 周波数基準 : F_{mc}
- MCの透過光の雑音 : $F_t - F_{mc}$
- フリーランの雑音 : $F_{laser} - F_{mc}$

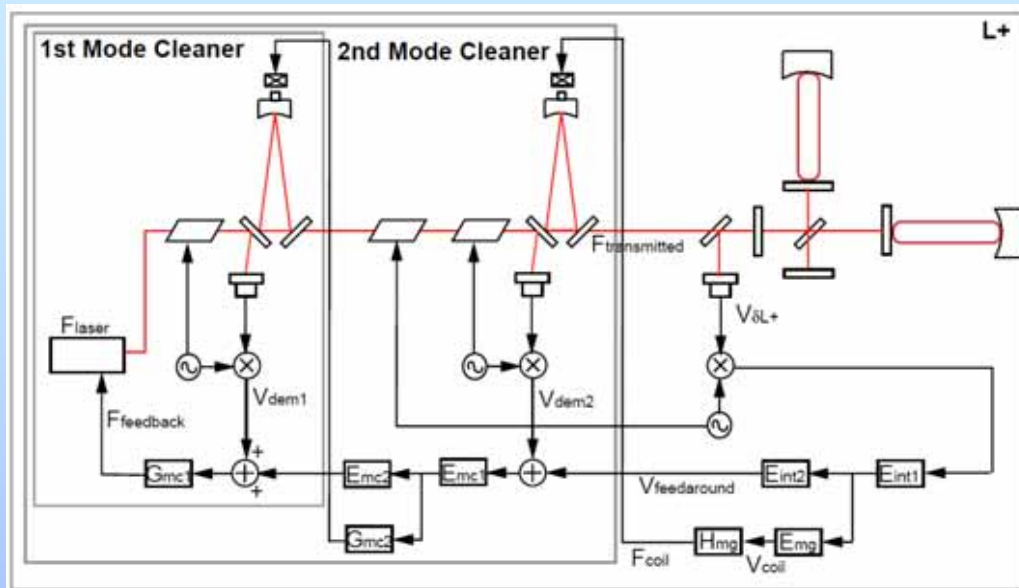
- C_i : キャピティープール

$$C_i = \frac{1}{1 + \frac{s}{\omega_i}}$$

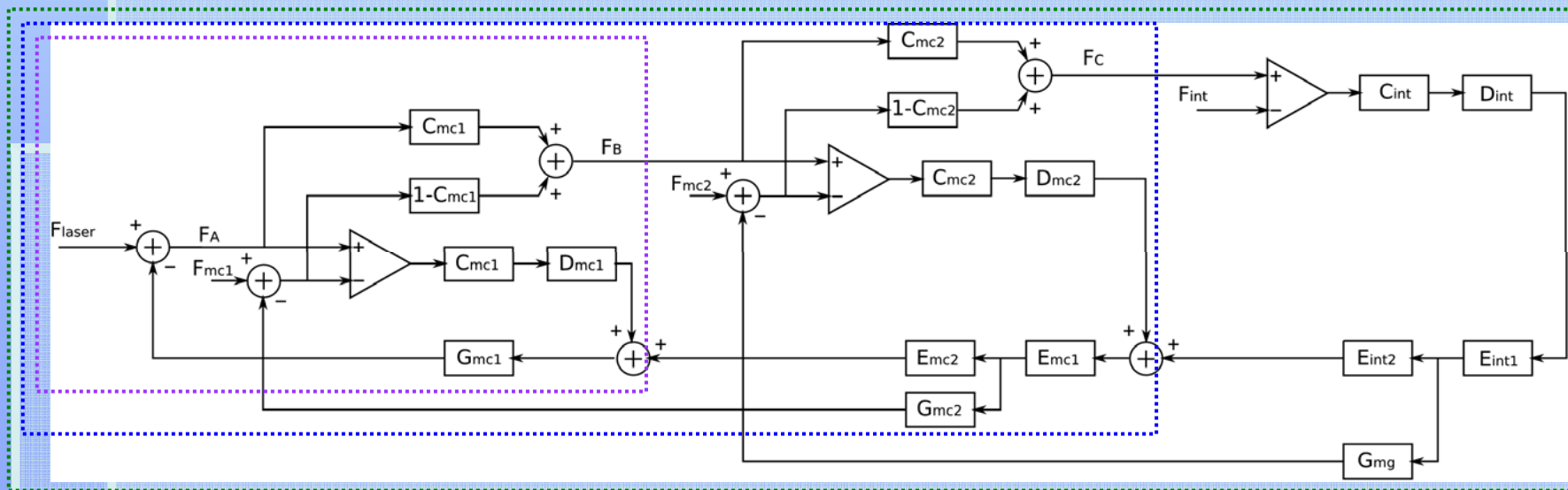
- D_i : 「周波数 電圧」係数
- $G_i = E_i H_i$
- E_i : フィルタ回路
- H_i : 「電圧 周波数」係数

$$\begin{aligned} F_t - F_{mc} &= \frac{C_{mc}}{1 + C_{mc} D_{mc} G_{mc}} (F_{laser} - F_{mc}) \\ &= \frac{C_{mc}}{1 + T_{mc}} (F_{laser} - F_{mc}) \end{aligned}$$

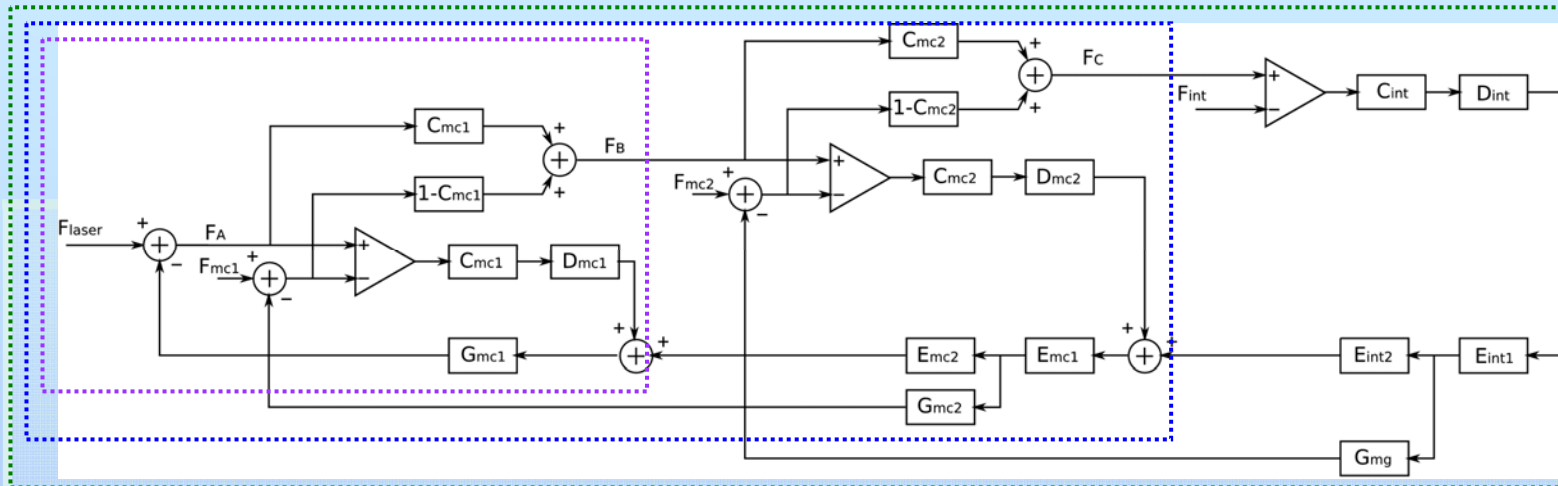
LCGTの多段式周波数安定化



- C_i : キャピティープール
- D_i : 「周波数 電圧」係数
- $G_i = E_i H_i$
- E_i : フィルタ回路
- H_i : 「電圧 周波数」係数



LCGTの多段式周波数安定化



$$\begin{aligned}
 F_c - F_{int} &= \frac{C_{mc1}C_{mc2}}{(1 + T_{mc1})(1 + T_{mc2})(1 + T_{L+})} (F_{laser} - F_{int}) \longrightarrow 1/|T_{mc1}||T_{mc2}||T_{L+}| \\
 &+ \frac{C_{mc2}}{(1 + T_{mc2})(1 + T_{L+})} \left(1 - \frac{C_{mc1}}{1 + T_{mc1}}\right) (F_{mc1} - F_{int}) \longrightarrow 1/|T_{mc2}||T_{L+}| \\
 &+ \frac{1}{1 + T_{L+}} \left(1 - \frac{C_{mc2}}{1 + T_{mc2}}\right) (F_{mc2} - F_{int}) \longrightarrow 1/|T_{L+}| \quad \text{倍になる.}
 \end{aligned}$$

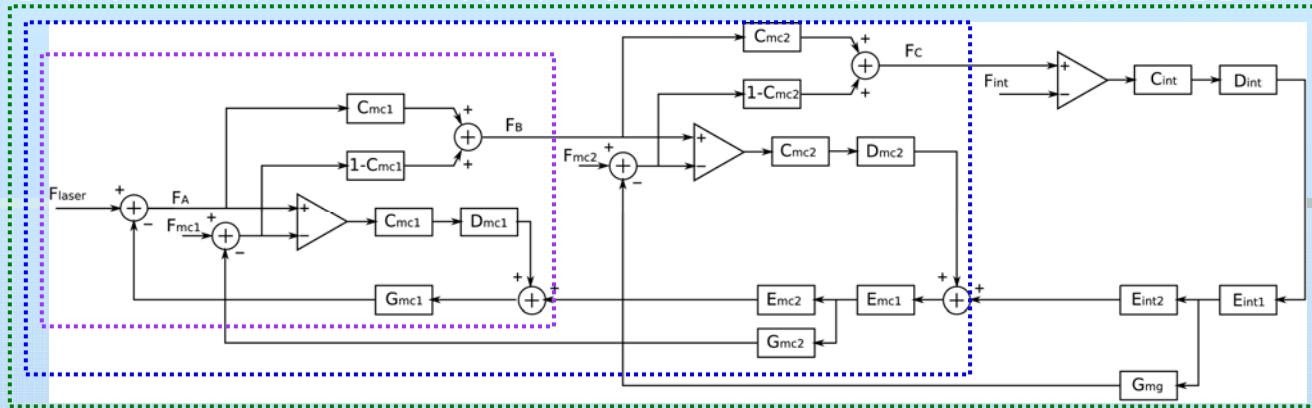
フィードアラウンドの項

$$T_{mc1} = C_{mc1}D_{mc1}G_{mc1}$$

$$T_{mc2} = C_{mc2}D_{mc2}E_{mc1} \left\{ G_{mc2} \left(\frac{C_{mc1}}{1 + T_{mc1}} - 1 \right) - E_{mc2}G_{mc1} \frac{C_{mc1}}{1 + T_{mc1}} \right\}$$

$$T_{L+} = C_{int}D_{int}E_{int1} \left\{ G_{mg} \left(\frac{C_{mc2}}{1 + T_{mc2}} - 1 \right) - E_{int2}G_{mc2} \frac{C_{mc2}}{1 + T_{mc2}} \right\}$$

多段式周波数安定化の設計指針



- 各段の安定度を埋めるように各 T_i を設計.
- フィードアラウンドは高い周波数成分.
- $|T_{L+}| \ll |T_{mc2}| \ll |T_{mc1}|$ にすることで, フィードアラウンドによる位相遅れ無視.
 - T_{L+} : UGF = 10 kHz
 - T_{mc2} : UGF = 100 kHz
 - T_{mc1} : UGF = 1MHz

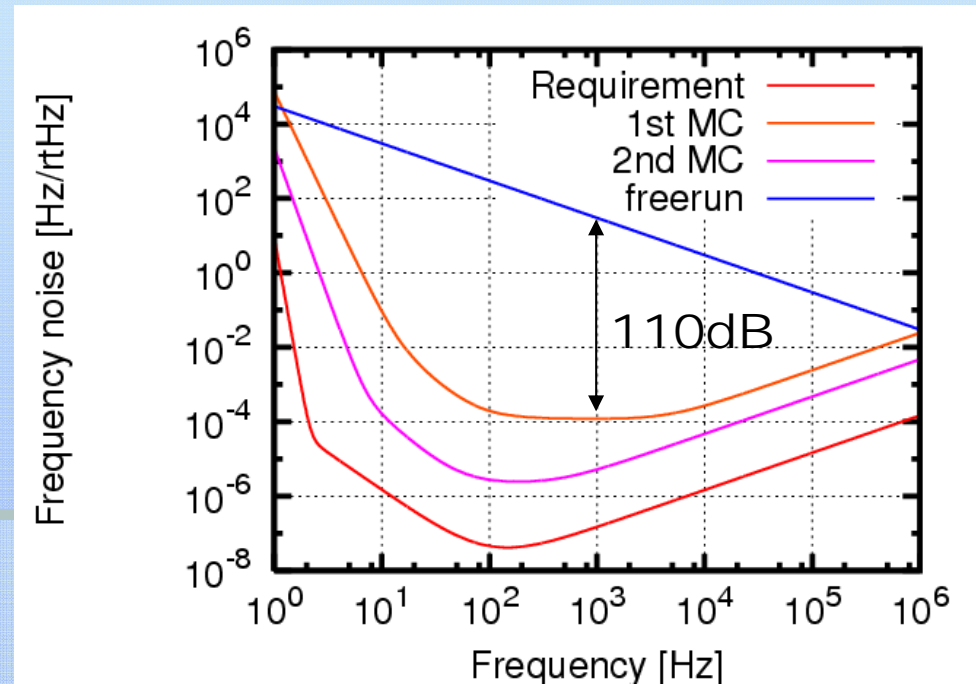
$$\begin{aligned}
 F_c - F_{int} &= \frac{C_{mc1}C_{mc2}}{(1 + T_{mc1})(1 + T_{mc2})(1 + T_{L+})} (F_{laser} - F_{int}) \\
 &+ \frac{C_{mc2}}{(1 + T_{mc2})(1 + T_{int})} \left(1 - \frac{C_{mc1}}{1 + T_{mc1}}\right) (F_{mc1} - F_{int}) \\
 &+ \frac{1}{1 + T_{int}} \left(1 - \frac{C_{mc2}}{1 + T_{mc2}}\right) (F_{mc2} - F_{int})
 \end{aligned}$$

前段の寄与はここだけ.

$$\begin{aligned}
 T_{mc1} &= C_{mc1}D_{mc1}G_{mc1} \\
 T_{mc2} &\sim -C_{mc2}D_{mc2}E_{mc1} \frac{E_{mc2}}{D_{mc1}} \\
 T_{L+} &\sim -C_{int}D_{int}E_{int1} \frac{E_{int2}}{D_{mc2}}
 \end{aligned}$$

初段の周波数安定化

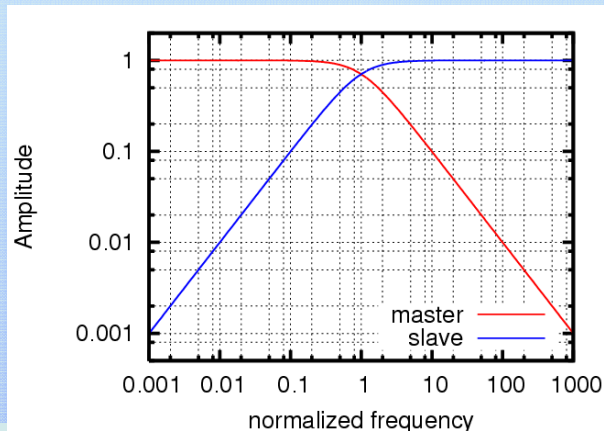
- 求められるもの
 - 広い制御帯域 : ~ 1 MHz
- 第1MCとレーザーの安定度を埋めるだけの制御利得
 - 110 dB @ 1 kHz
 - 130 dB @ 100 Hz
 - しかし, LCGT doc. では,
 - 170 dB @ 1 kHz
 - 200 dB @ 100 Hz



注入同期レーザーの周波数特性

- ロッキングレンジ内でマスターレーザーの周波数雑音程度.

$$\delta\nu_{il} = \frac{1}{1 + \frac{s}{\omega_{lock}}} \delta\nu_{master} + \frac{\frac{s}{\omega_{lock}}}{1 + \frac{s}{\omega_{lock}}} \delta\nu_{slave}$$

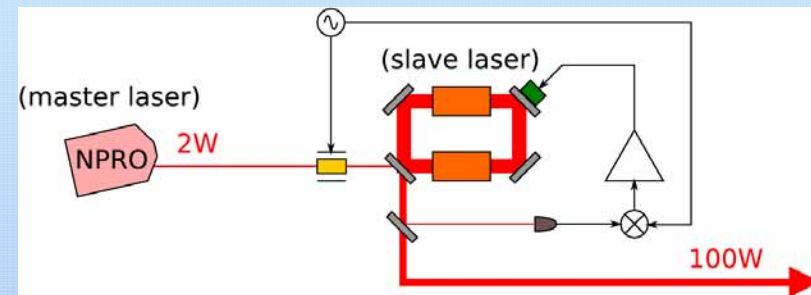


- ロッキングレンジって何？

$$\omega_{lock} \propto \frac{(\text{OCの透過率})}{(\text{スレーブレーザーの共振器長})} \sqrt{\frac{P_{master}}{P_{slave}}}$$

- TAMA10W : 1.7MHz
- 三尾研100W : 0.35MHz

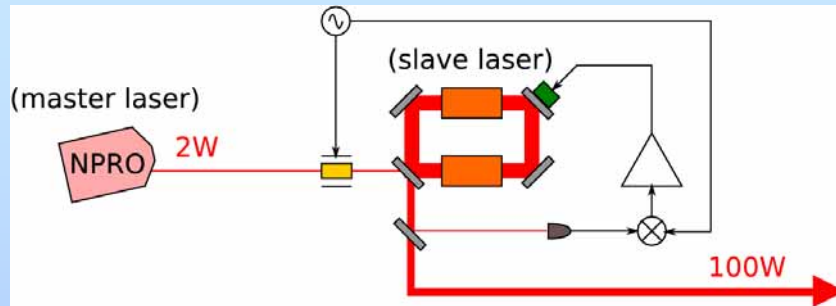
- さらに共振器長の制御を行う.
- 安定性向上のため.



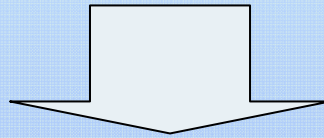
$$\delta\nu_{il} = \left(\frac{1}{1 + \frac{s}{\omega_{lock}}} + \frac{\frac{s}{\omega_{lock}}}{1 + \frac{s}{\omega_{lock}}} \frac{T_{il}}{1 + T_{il}} \right) \delta\nu_{master} + \frac{\frac{s}{\omega_{lock}}}{1 + \frac{s}{\omega_{lock}}} \frac{1}{1 + T_{il}} \delta\nu_{slave}$$

十分小さいとき, マスターレーザーと同程度の周波数雑音になる.

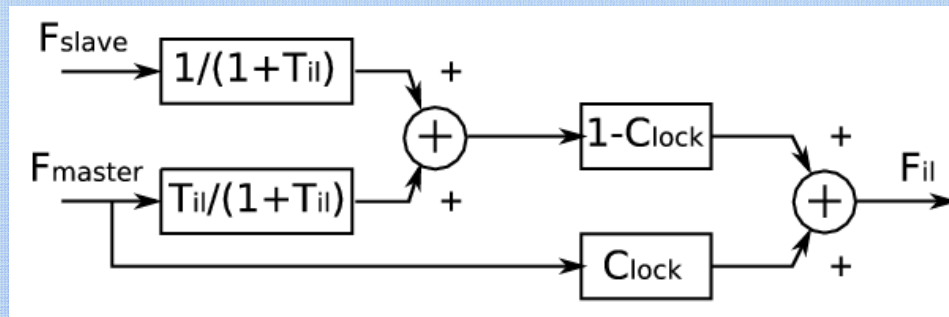
注入同期レーザーの周波数特性



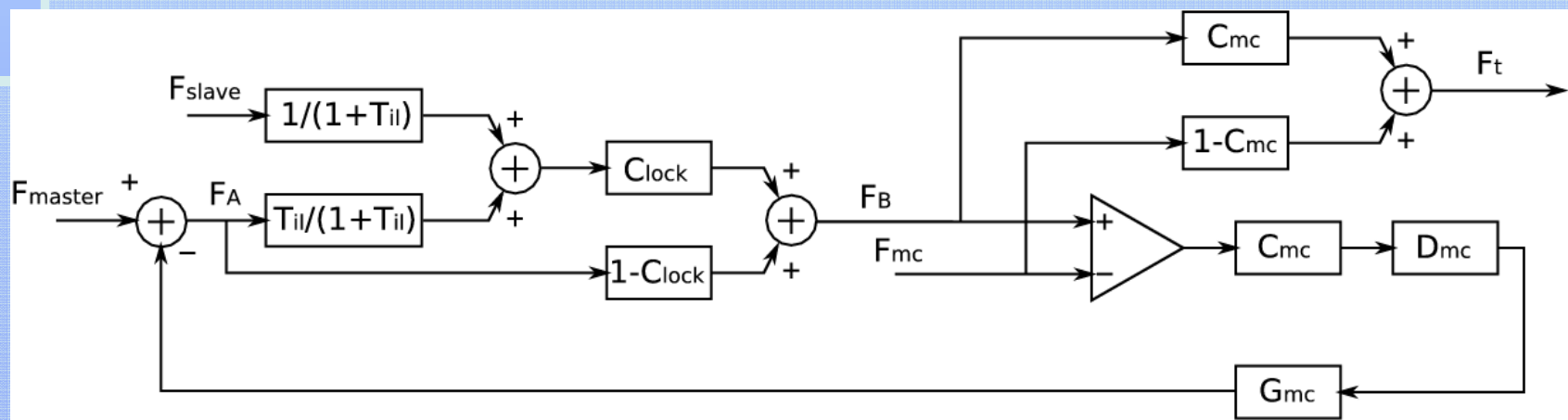
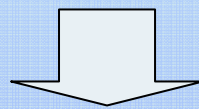
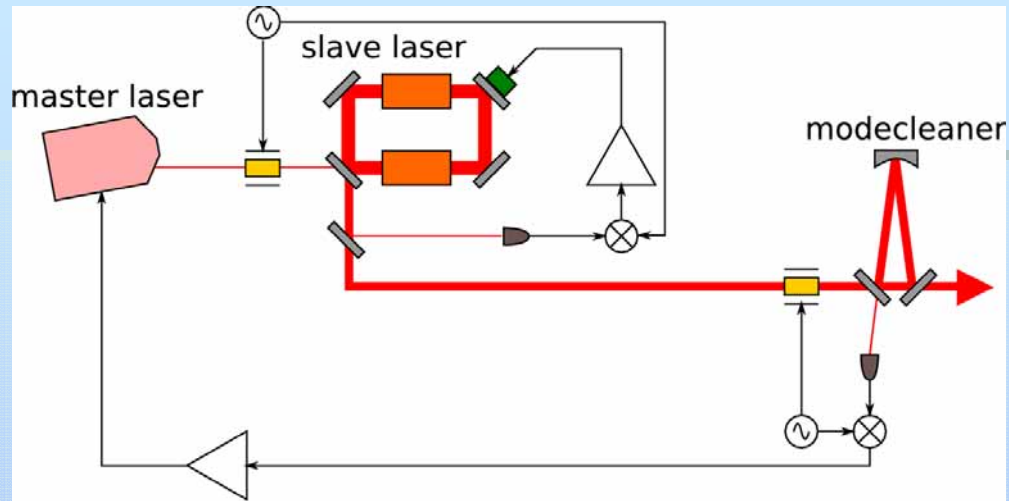
$$\delta\nu_{il} = \left(\frac{1}{1 + \frac{s}{\omega_{lock}}} + \frac{\frac{s}{\omega_{lock}}}{1 + \frac{s}{\omega_{lock}}} \frac{T_{il}}{1 + T_{il}} \right) \delta\nu_{master} + \frac{\frac{s}{\omega_{lock}}}{1 + \frac{s}{\omega_{lock}}} \frac{1}{1 + T_{il}} \delta\nu_{slave}$$



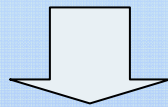
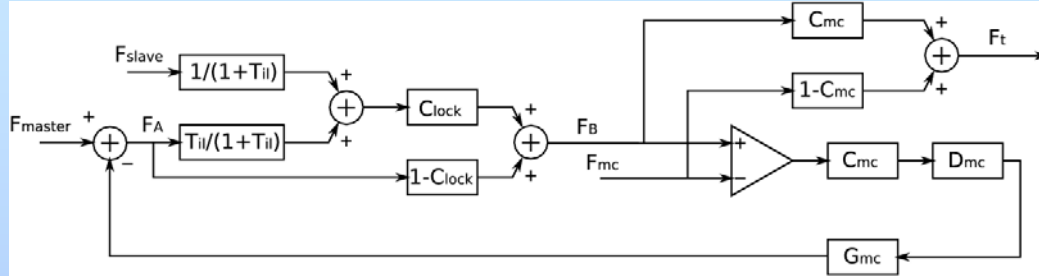
$$F_{il} = \left[C_{lock} + \frac{T_{il}}{1 + T_{il}} (1 - C_{lock}) \right] F_{master} + \frac{1 - C_{lock}}{1 + T_{il}} F_{slave}$$



注入同期レーザーの周波数安定化



注入同期レーザーの周波数安定化



$$\begin{aligned}
 F_t - F_{mc} &= \frac{\left[C_{lock} + \frac{T_{il}}{1+T_{il}}(1 - C_{lock}) \right]}{\left[1 + T_{mc} \left\{ C_{lock} + \frac{T_{il}}{1+T_{il}}(1 - C_{lock}) \right\} \right]} \frac{1}{C_{mc}} (F_{master} - F_{mc}) \\
 &+ \frac{\frac{1-C_{lock}}{1+T_{il}}}{\left[1 + T_{mc} \left\{ C_{lock} + \frac{T_{il}}{1+T_{il}}(1 - C_{lock}) \right\} \right]} \frac{1}{C_{mc}} (F_{slave} - F_{mc}) \\
 &= \frac{1}{\left[1 + T_{mc} \left\{ C_{lock} + \frac{T_{il}}{1+T_{il}}(1 - C_{lock}) \right\} \right]} \frac{1}{C_{mc}} (F_{il} - F_{mc})
 \end{aligned}$$

- マスターに信号を返すだけ
 - スレーブも同時に安定化



- スレーブへの要求:
 - 注入同期出力がマスターより悪くならない程度.

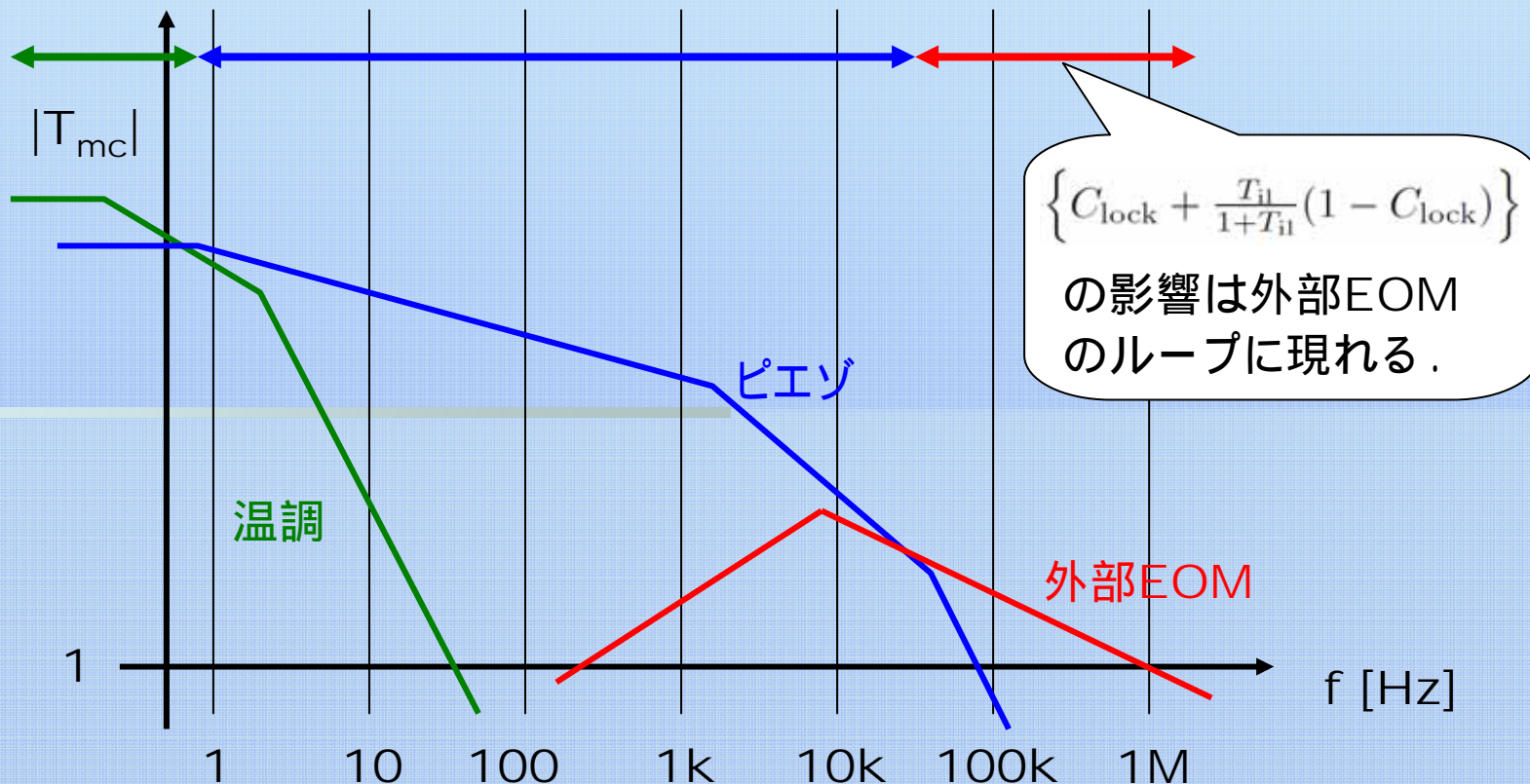
- 単純に $\frac{C_{mc}}{1 + T_{mc}}$ 倍にならない.

$$\left\{ C_{lock} + \frac{T_{il}}{1+T_{il}}(1 - C_{lock}) \right\}$$

- 1 kHz以下では, ほぼ1.
- $T_{il} : UGF = 10 \text{ kHz}$
- $C_{lock} : f_{lock} = 350 \text{ kHz}$
10 kHz以上で無視できない?

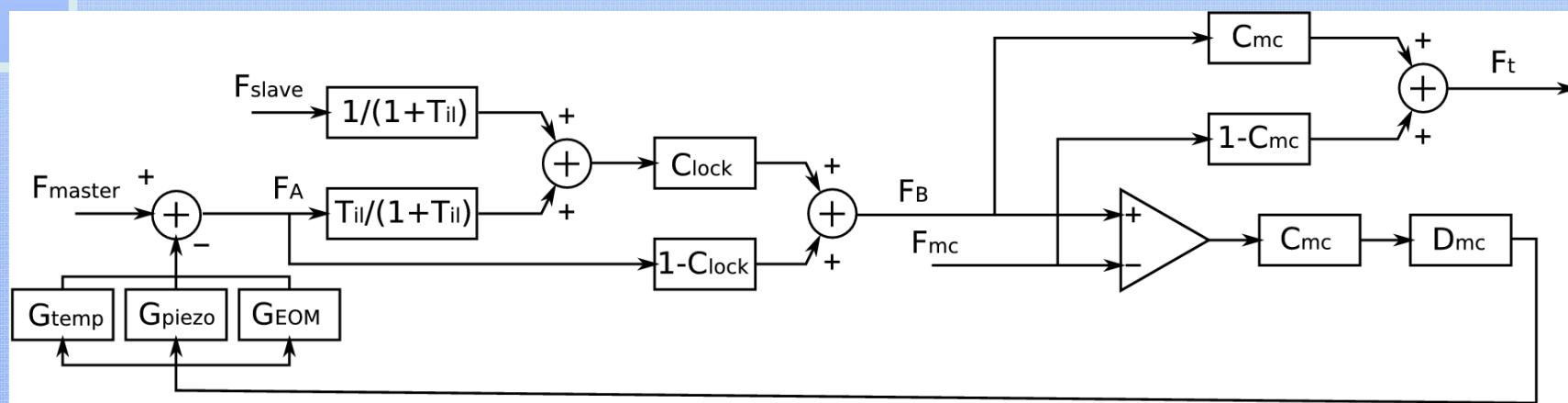
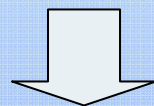
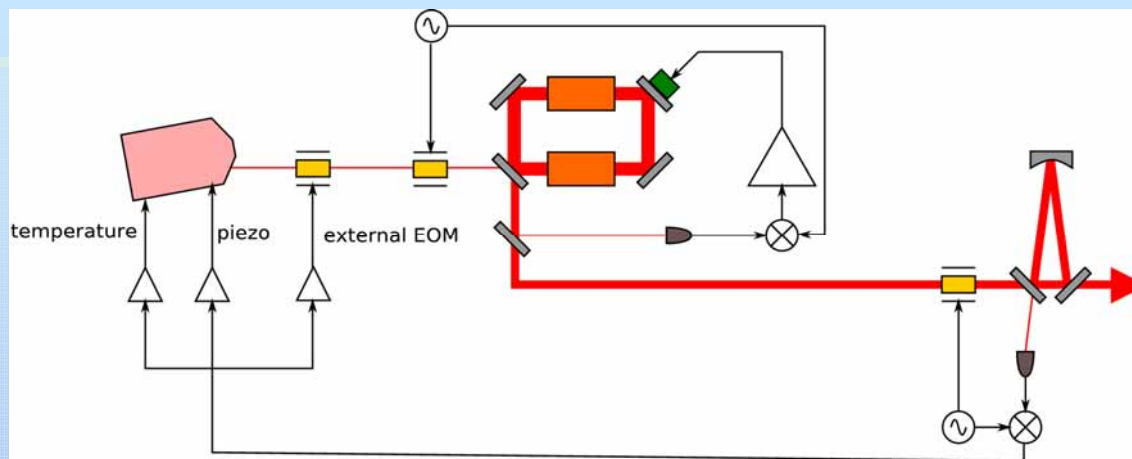
3つのアクチュエータ

- NPRO結晶の温調 : 3 GHz/V , < 1 Hz
- NPRO結晶に付いたピエゾ : 1 MHz/V , < 100 kHz
- 外部EOM : 0.01 × f Hz/V , < 1 MHz

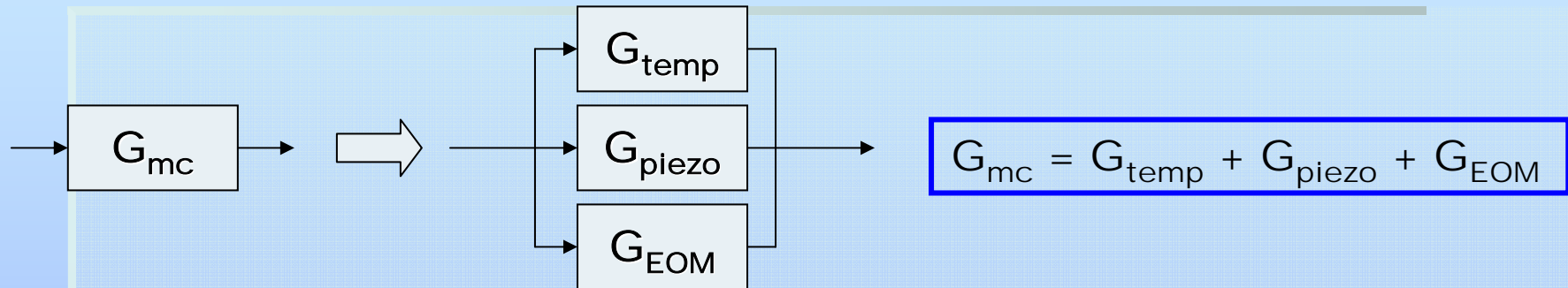


外部EOMの場所の違い

- マスターとスレーブの間に配置：



外部EOM ~ マスターとスレーブの間 ~

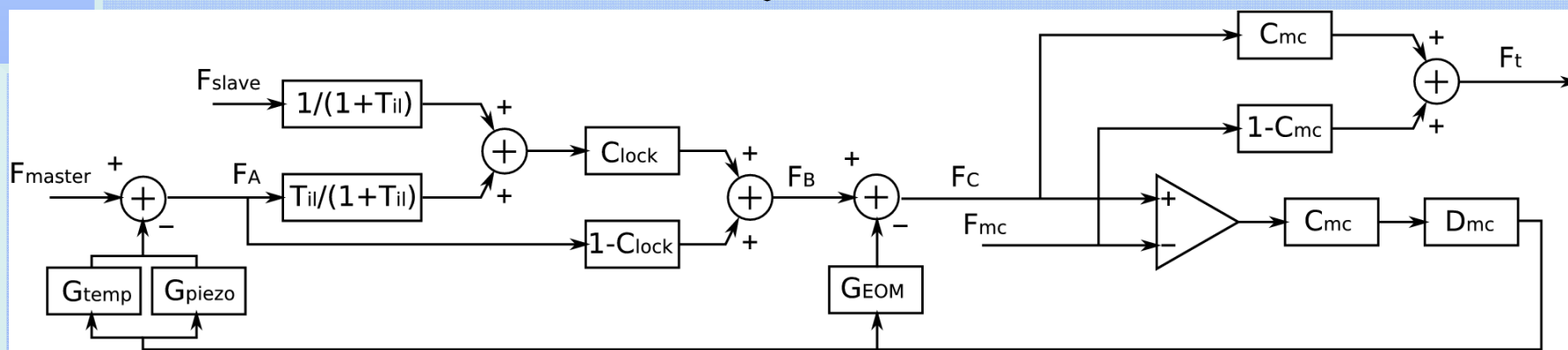
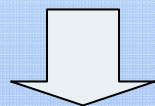
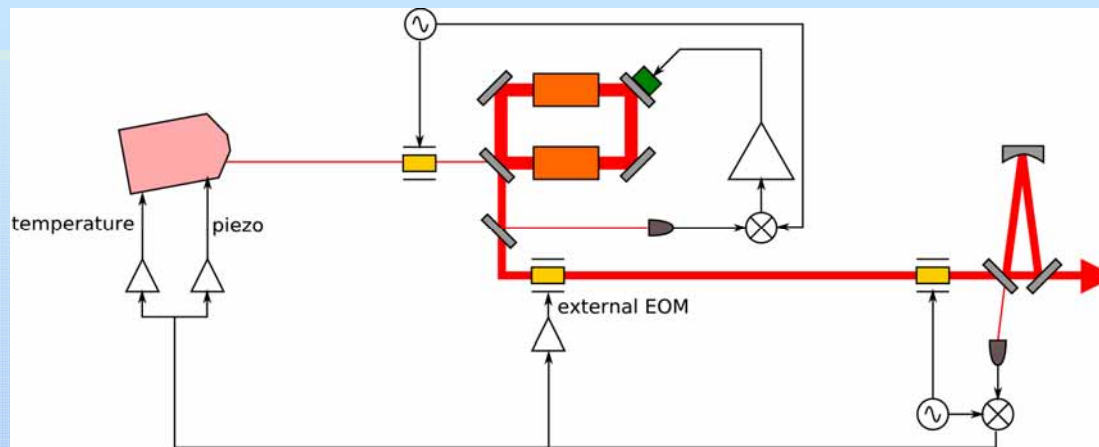


$$\begin{aligned} F_t - F_{mc} &= \frac{1}{\left[1 + T_{mc} \left\{ C_{lock} + \frac{T_{il}}{1+T_{il}} (1 - C_{lock}) \right\}\right]} \frac{1}{C_{mc}} (F_{il} - F_{mc}) \\ &= \frac{1}{\left[1 + (T_{temp} + T_{piezo} + T_{EOM}) \left\{ C_{lock} + \frac{T_{il}}{1+T_{il}} (1 - C_{lock}) \right\}\right]} \frac{1}{C_{mc}} (F_{il} - F_{mc}) \end{aligned}$$

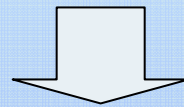
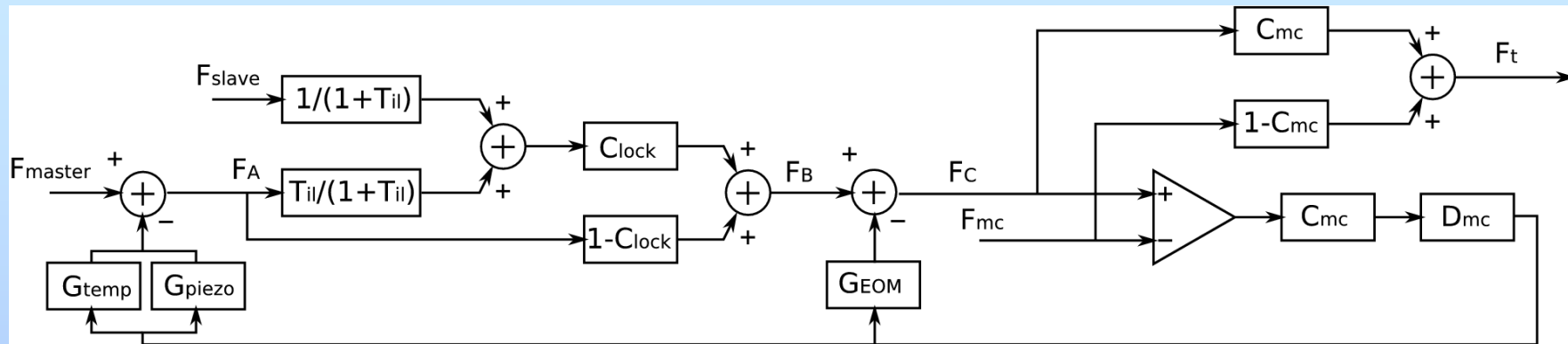
- ロッキングレンジが350kHzのレーザーでやるには不利.

外部EOMの場所の変更

- スレーブレザーの後に配置：



外部EOM～スレーブの後～



$$F_t - F_{mc} = \frac{1}{\left[1 + (T_{temp} + T_{piezo}) \left\{ C_{lock} + \frac{T_{il}}{1+T_{il}} (1 - C_{lock}) \right\} + T_{EOM} \right] \frac{1}{C_{mc}}} (F_{il} - F_{mc})$$

$\left\{ C_{lock} + \frac{T_{il}}{1+T_{il}} (1 - C_{lock}) \right\}$ を回避できる

- 外部EOMをスレーブレザーの後に配置することで、スレーブレザーによる位相遅れを回避できる。

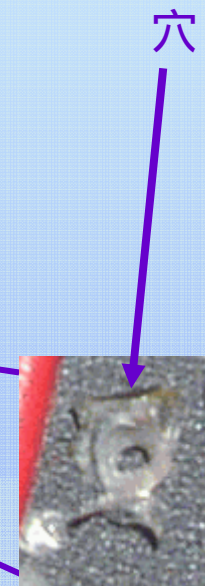
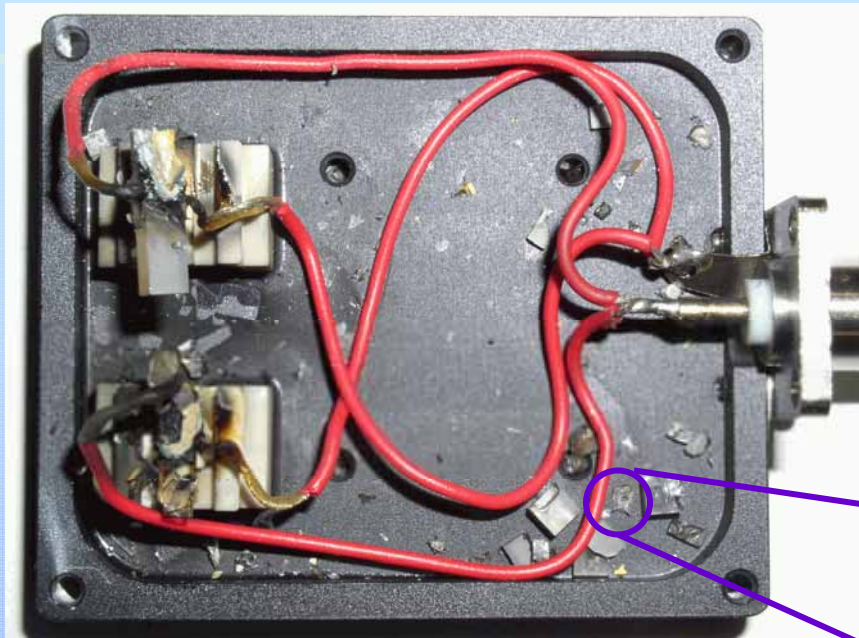
外部EOMの配置の(デ)メリット

- マスターレーザーの直後
 - メリット：高出力光にさらされない。
 - デメリット：スレーブレーザーによる位相遅れを受ける。
- スレーブレーザーの後
 - メリット：スレーブレーザーによる位相の遅れを回避できる。
 - デメリット：高出力光(100W以上)にさらされる。

高出力光にさらされて悪いかはEOMの結晶次第。

壊れたRTA結晶

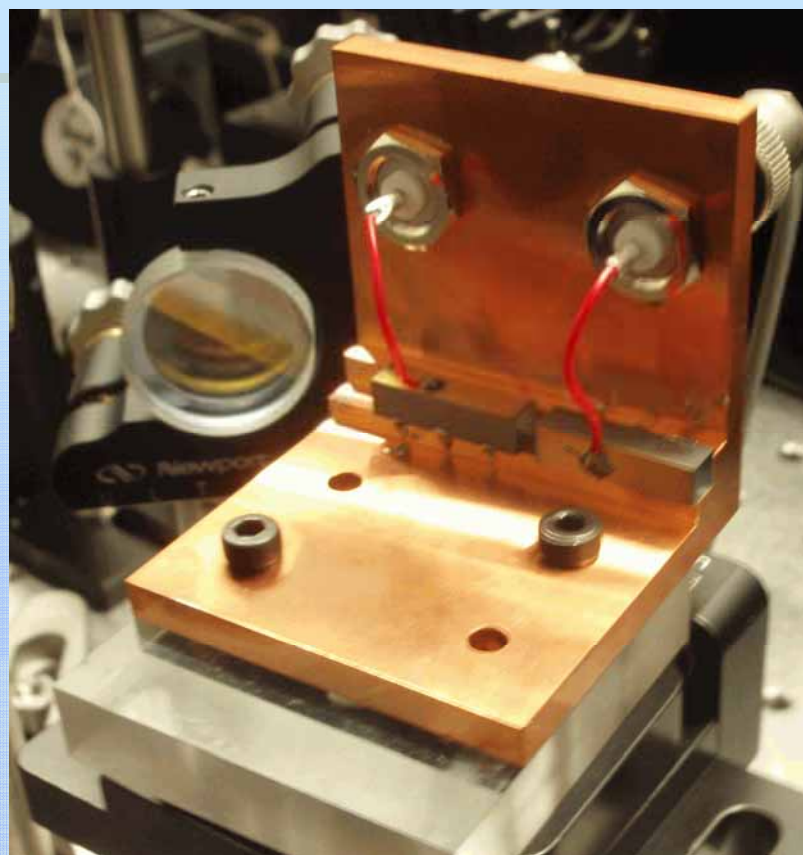
- 100Wを突っ込んだら割れたRTA製EOM.



- 古いから?
 - 劣化?
 - 時代的に今のRTAより品質悪い?
- RTAがダメ?

SLN製EOM

- 従来のCLN (Congruent LiNbO_3) より品質の良いSLN (Stoichiometric LN).
- (株)オキサイド製
- 100Wを突っ込んでも全然平気。
 - 透過後の波面の乱れの増加は観測されず。
 - フォトリフラクティブ効果による位相変調度の低下もなし。
 - 今はこれを使って広帯域制御が可能か挑戦中。100Wのレーザーに対して制御できたら、次の機会にまとめて報告します。



まとめ

- 多段式周波数安定化
 - $|低い段| \ll |高い段|$ とすることで、各段ある程度簡単に設計可能。
 - フィードアラウンドによる広帯域制御可能。
- 注入同期レーザーの周波数安定化
 - スレーブレーザーによる位相遅れが効く。
 - 外部EOMは、スレーブレーザーのあとに置いた方が得という反面、高出力光にさらされるというデメリットがある。
- SLN製EOMは高出力光を突っ込んでも大丈夫(たぶん)。
 - 波面の乱れの増加はない。
 - 高出力光に対する位相変調度は低出力の場合と同じ。
 - ただいま(ホントはこれから)、100Wレーザーの制御挑戦中。また次の機会に報告します。

おわり