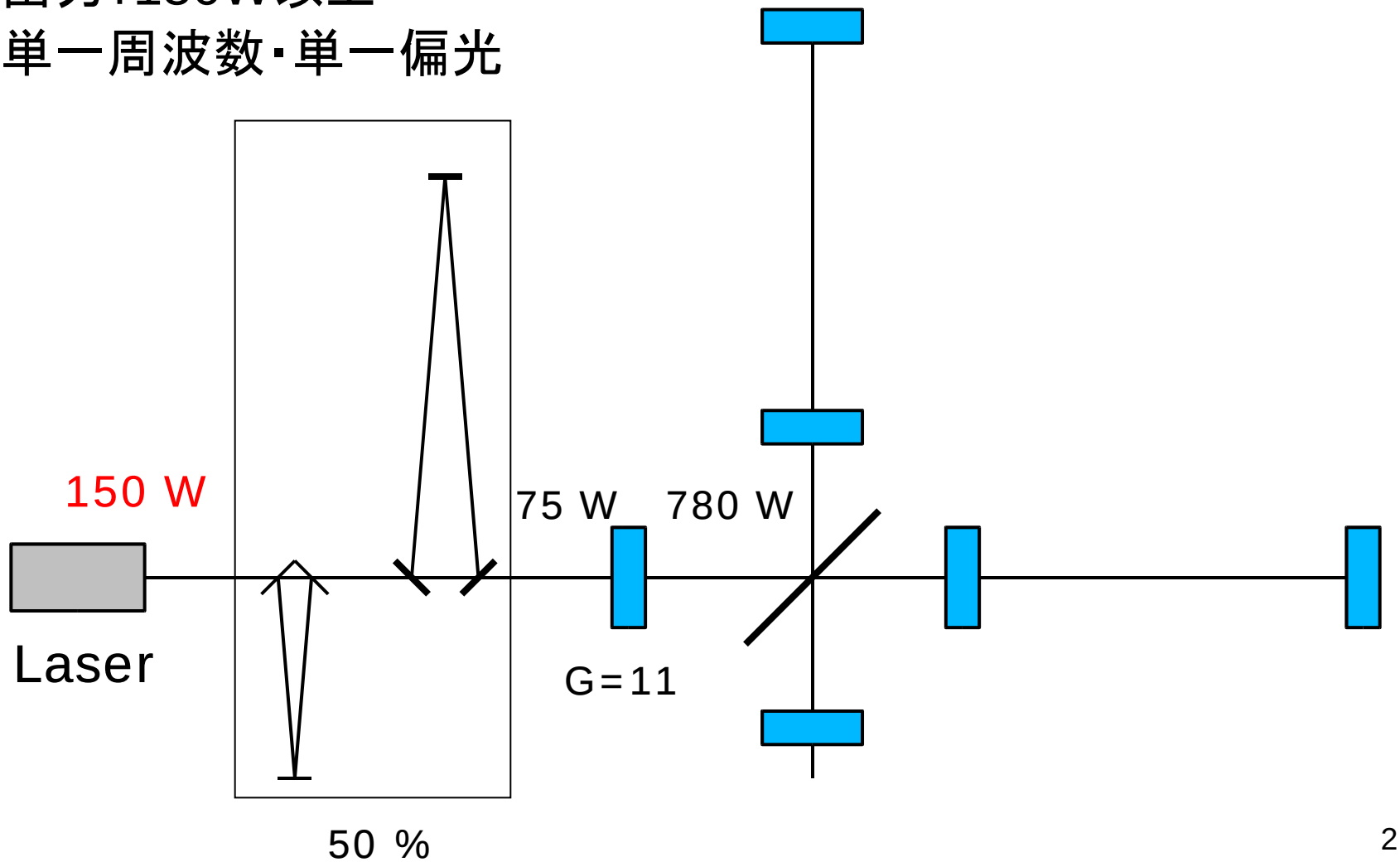
Laser system for LCGT
レーザーは自前か、コピーか、その他か？

三尾典克

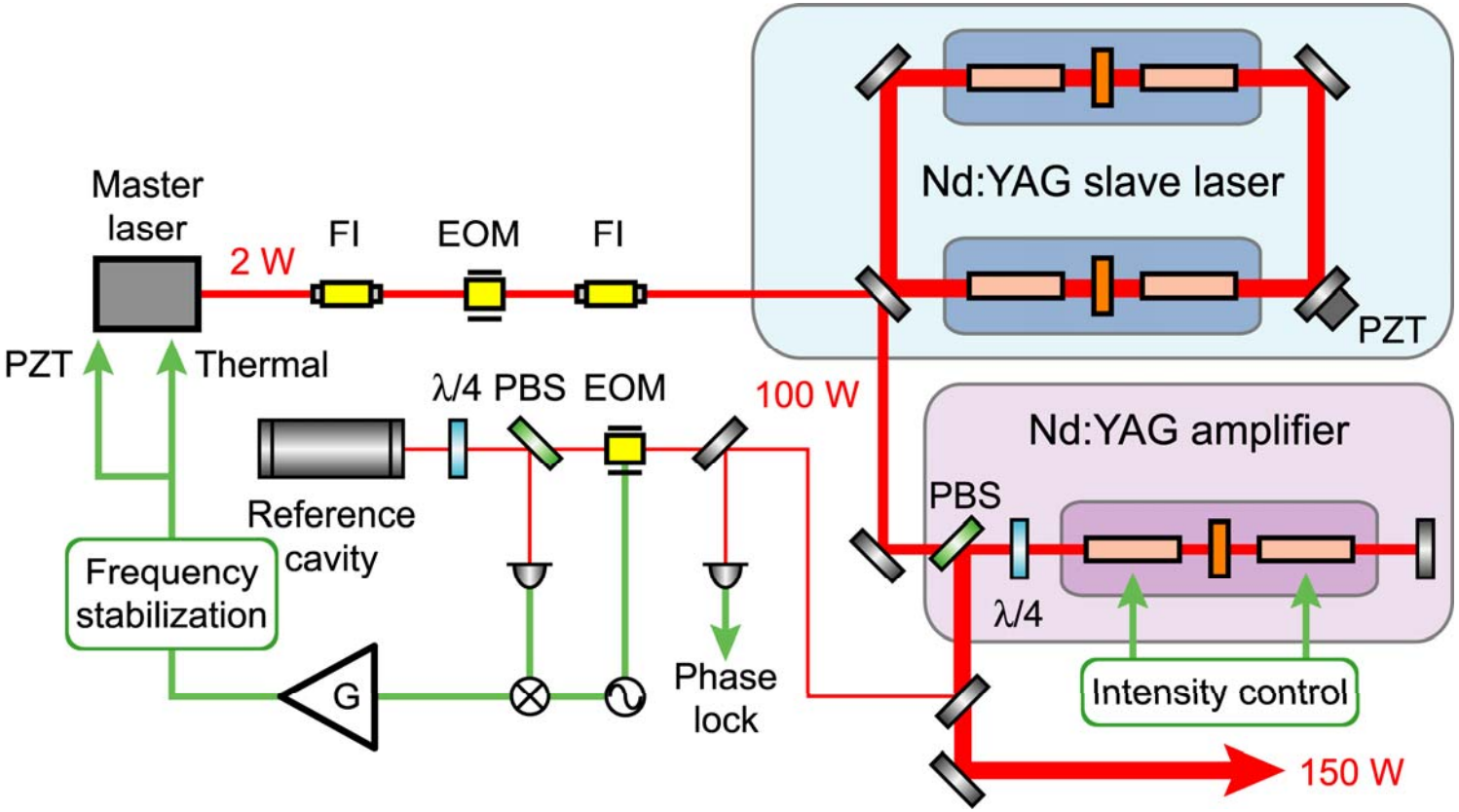
Power requirement for LGCT laser

出力:150W以上
単一周波数・単一偏光



オリジナルデザイン

- 150W Output：Injection locking + MOPA



設計思想

- Injection-locked laser: Stable optical mode

Frequency control element

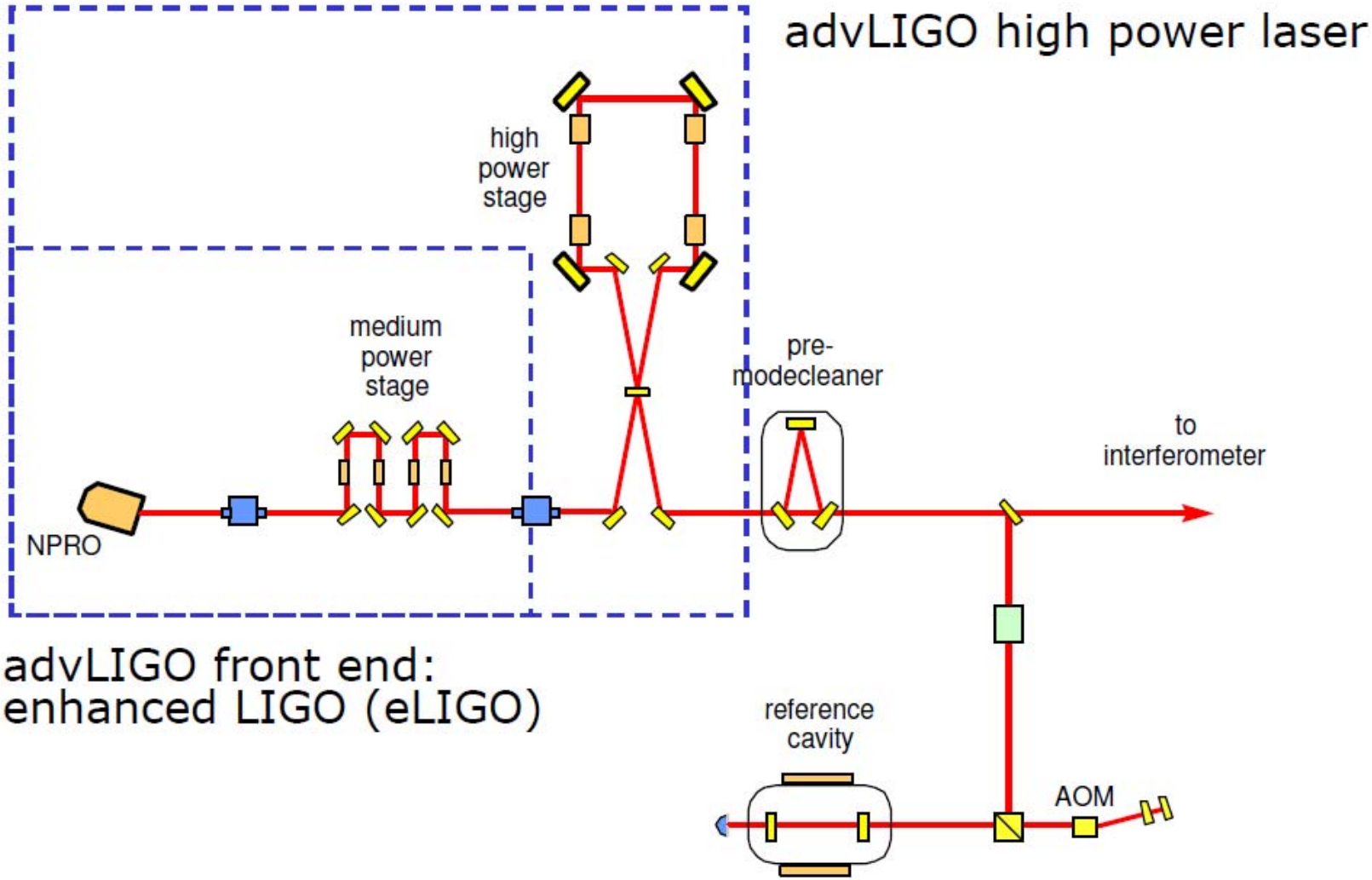
- Power amplifier: Easy operation,
  Cascadable for higher power operation

Intensity control element

Lasers for advanced GW Observatories

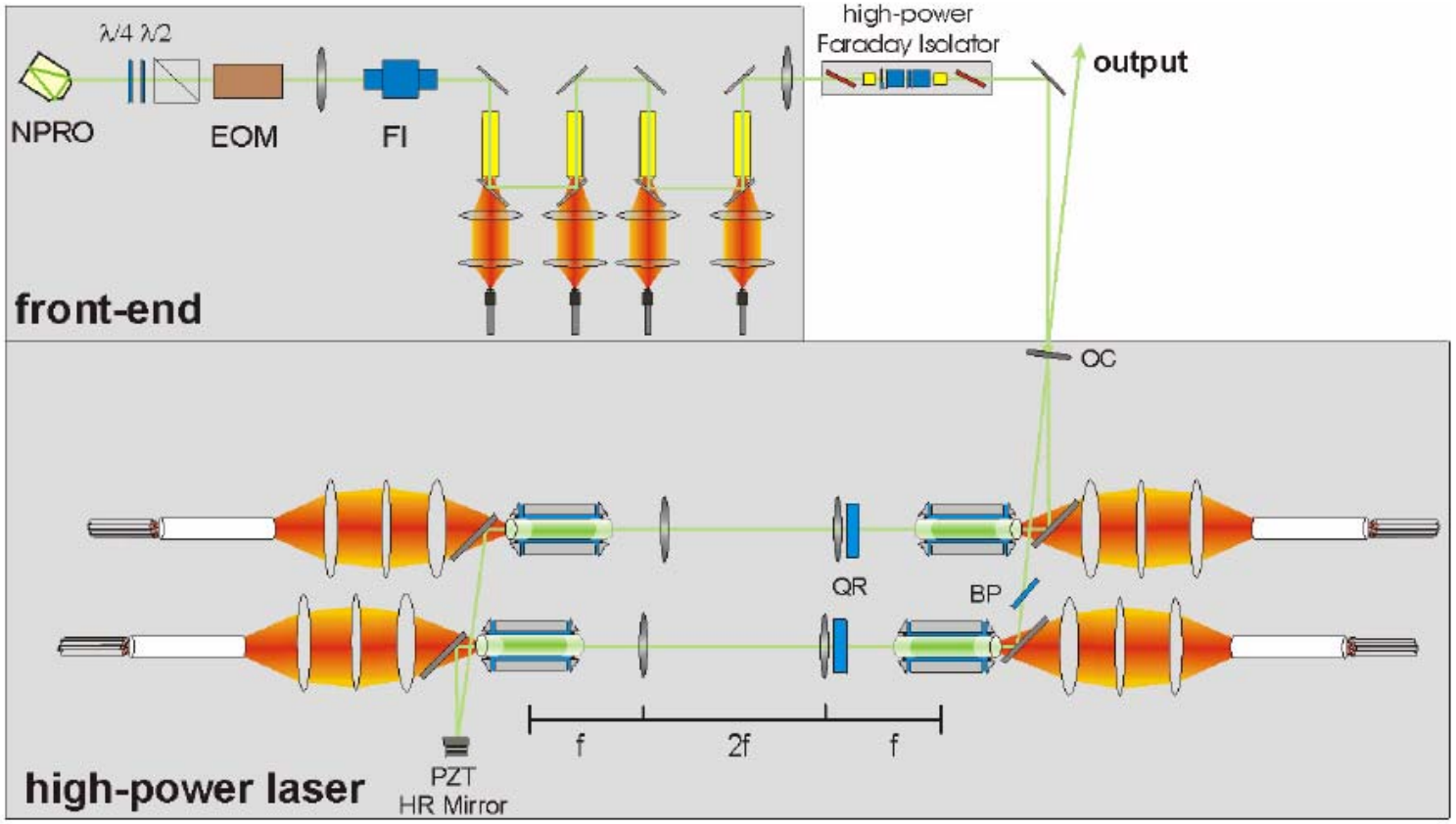
- Single frequency operation
- Single mode operation
- Linearly polarized output power: ~ 200 W
- Frequency stability: 10^{-2} Hz / $Hz^{1/2}$ @ 100 Hz
- Amplitude stability: 10^{-8} / $Hz^{1/2}$ @ 100 Hz
- High reliability
- Easy maintenance

Advanced LIGO prestabilized laser: Optical layout



Advanced LIGO Laser Design

195W出力が報告されている

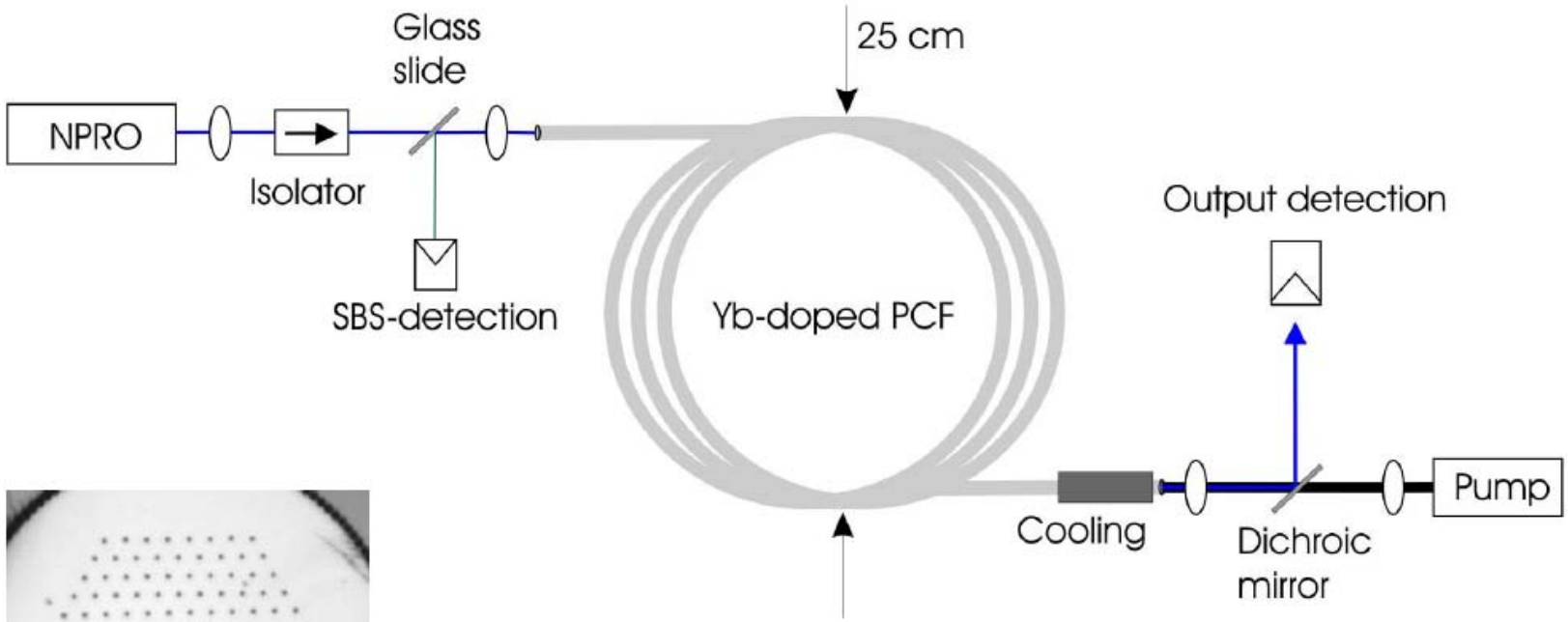


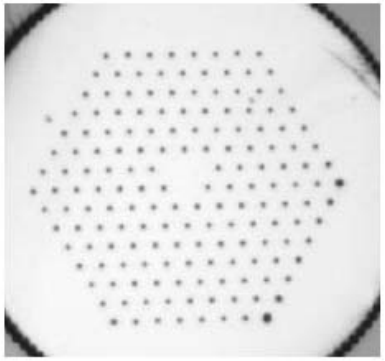
新方式

- Ybドープファイバーを利用したMOPA方式
- 特定領域研究：10W＠電通大
- LZH＋GEO：PCF型レーザー：148W
- Stanford:136W

PCF Amplifier: Setup

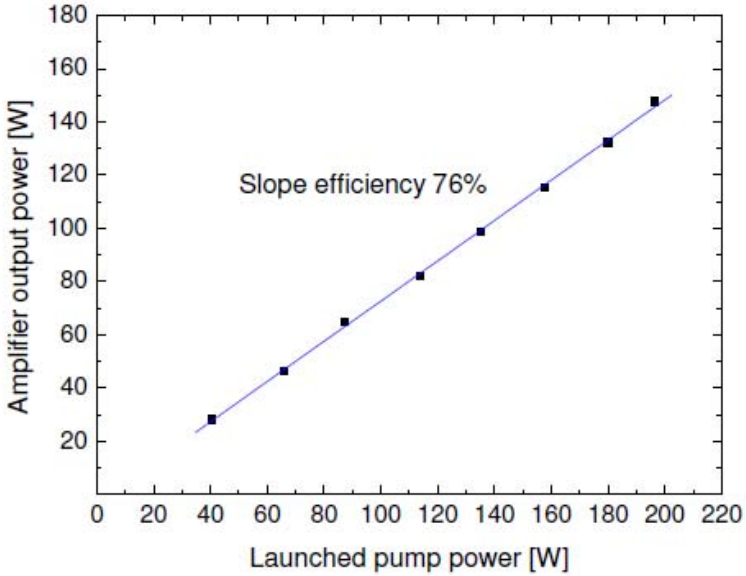
Amplifier experiments with 4 m Crystal Fiber *DC-22/225-Yb*



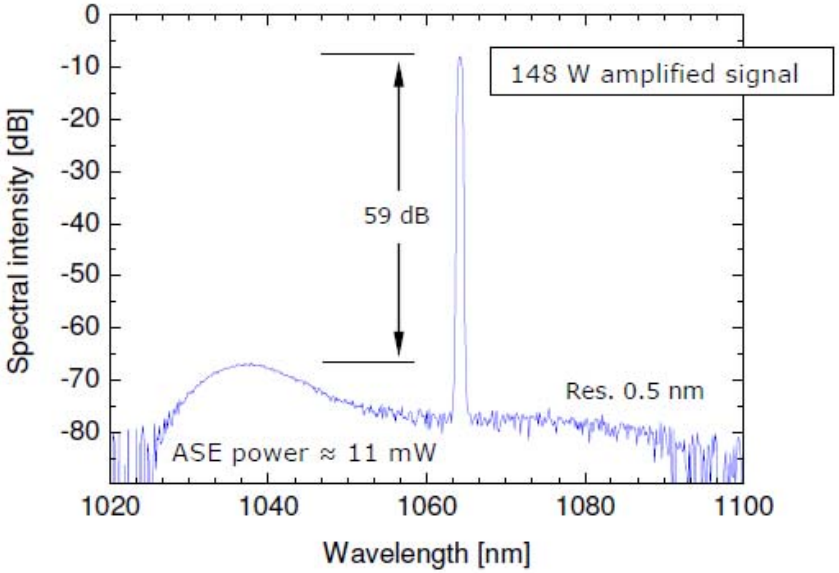


PCF Amplifier: Output

Output power characteristic



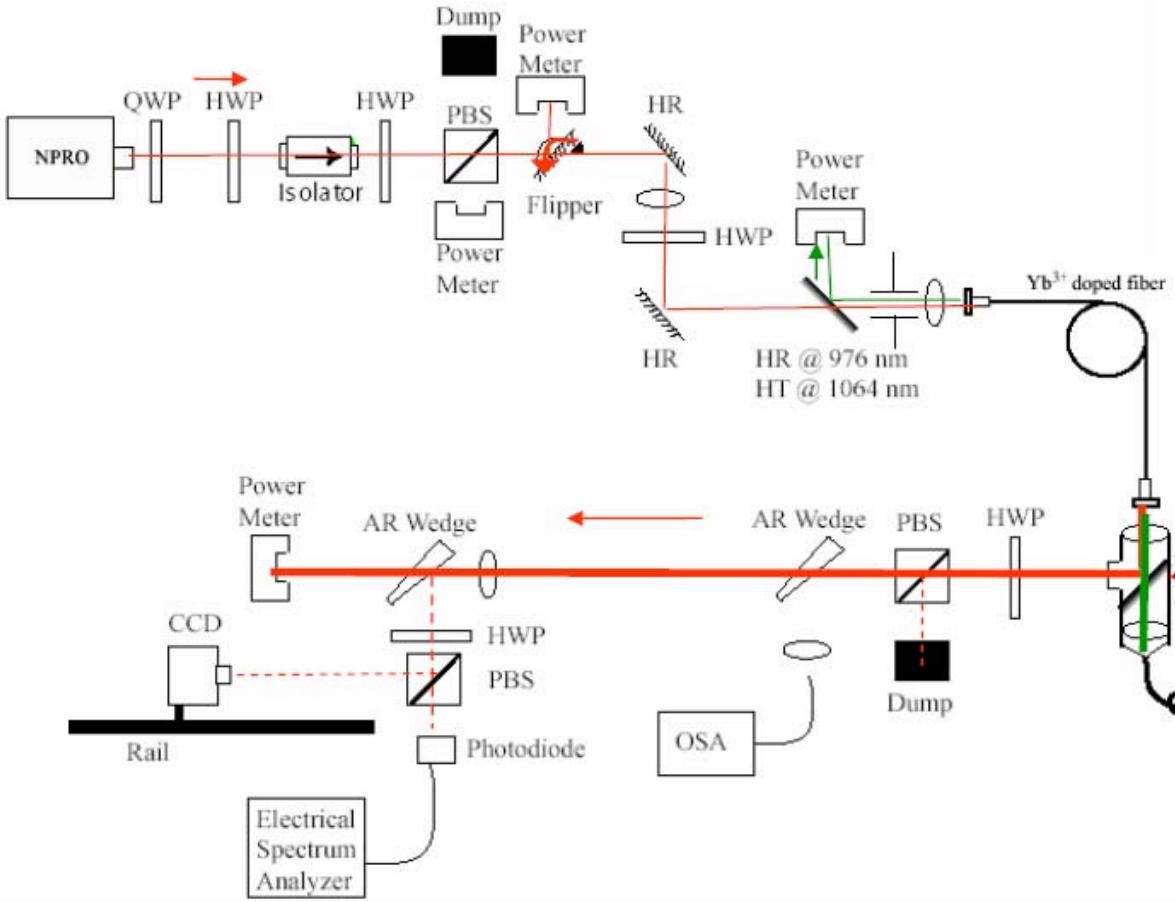
Optical emission spectrum

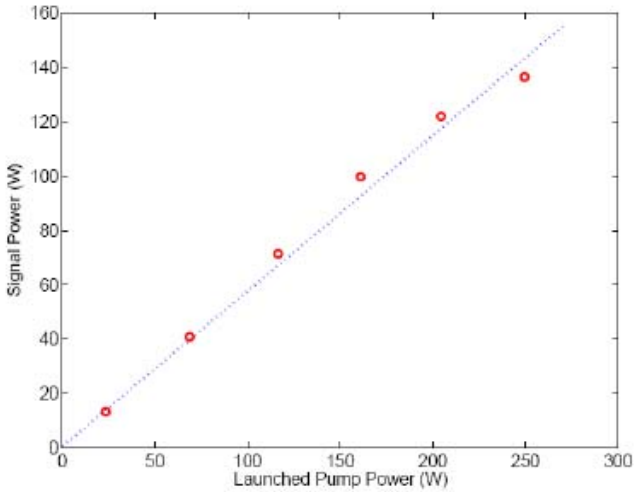


Max. output power 148 W
Slope efficiency 76%
Integrated ASE suppression > 40 dB

Optical Layout (new)

136-W single-frequency, polarized fiber amplifier operating at 1064 nm





Characterized noise properties of LMA fiber amplifier

検討すべき項目

- 性能：仕様を満たすものかどうか
- 費用：予定の予算内で完成するかどうか
- 維持：10年スケールの使用で性能の維持が可能かどうか
- 運転時の操作性など：システムの完成度
- 安全装置：高強度レーザーは極めて危険
- 研究としての意義：装置の一部として働くだけのものだけではない！

性能

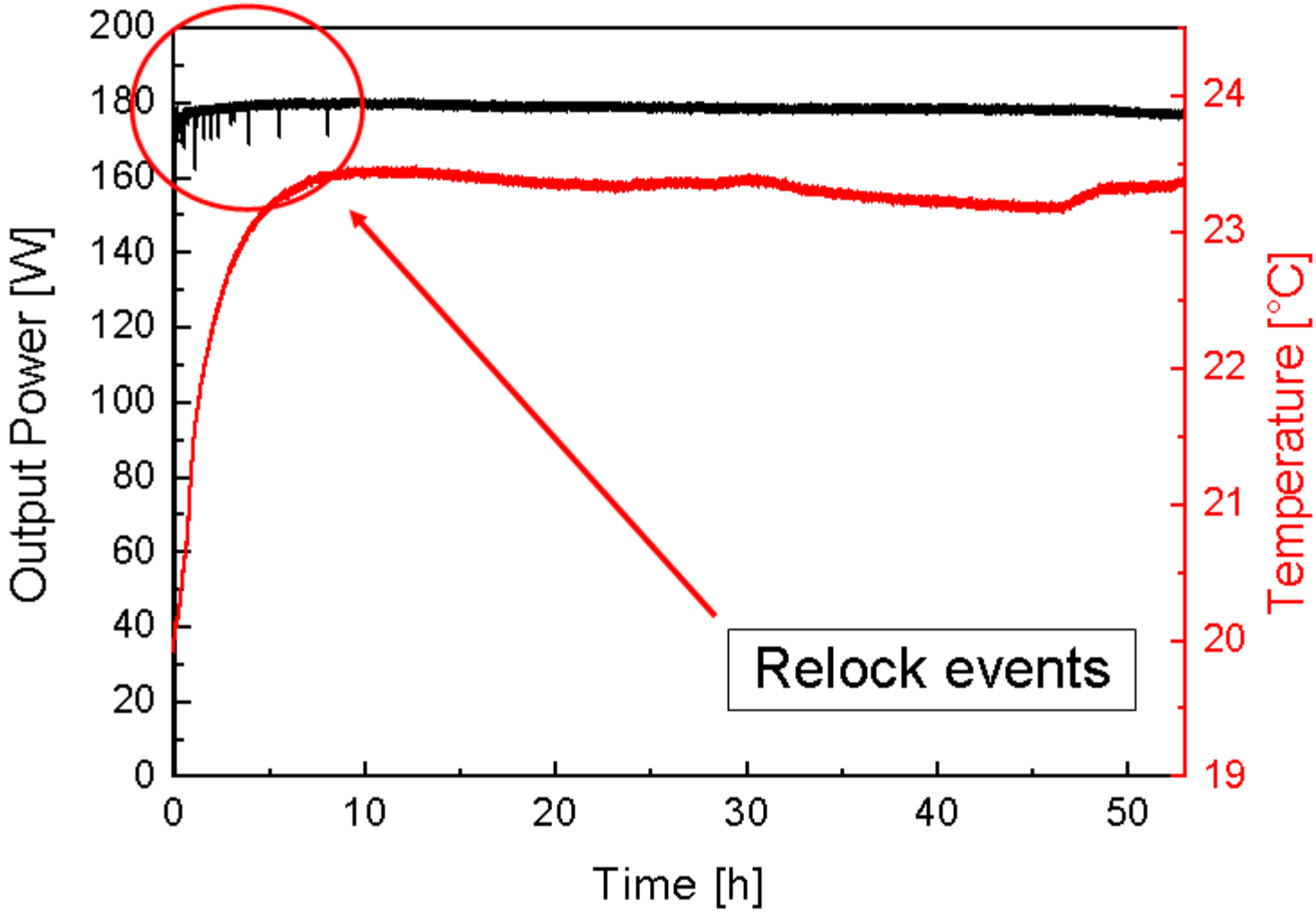
- 出力は、どの方式でもたぶん問題はない。
- 安定度は、LZHのものやファイバーレーザーでは、ほとんど評価されてないのでなんともいえない（特に周波数安定度）。
  - 注入同期の理論に従えば、NPRO単体の性能が実現されるはず。
  - ファイバー中の誘導ブリルアン散乱や自己位相変調など非線形効果

現時点では、完成品を買うというレベルではないという認識が必要である。

- 光ファイバーの提案では、光増幅に関しては実績の実績に頼っている。
- 長期安定度に関しては、今後の問題であるが、LZHのレーザーでも十分解決されているとは思えない。

LZH laser

53h test run



status 10/07

費用

- LZHからAdvanced LIGO用レーザーを購入すると、国際協力・共同研究という意味を含めて、5台で1Mユーロ（1.7億円？）という打診がある。
- これは破格の安さ。1台、3400万円くらいなので、TAMAのレーザーより安い：この中に何処まで含まれるのか不明、NPRO1台1000万円なので、かなりお買い得？
- 従来のシステムでの費用推定：1台、システム全体で約1億円＋保守費用、現在、どのくらいを三菱は受けてくれるか検討中（システムで受けるかどうかも含めて）。共同開発になる見通し
- ファイバーレーザーに関しては、現在、市販されているもので線幅の狭いものは無いが、10Wクラスでは既に400万円程度になっている。

What Now?

- The High-Power fiber laser industry continues to move very fast
  - Very soon the following will be known
    - 20-W 100-μm-fiber-coupled wavelength-stabilized pumps will be available for about $2k
      - Temperature feedback control is unnecessary --- diodes can be fan cooled
      - 1 diode per 10-W system (the pump diode industry is also making progress)
    - Suitable high-power pump / signal combiners will be available for about $300

Build Your Own!

- Cost of materials
  - Pump diode $2000
  - Signal / Pump combiner 300
  - Gain fiber 200
  - Taps, monitor PD's, polarizer 1000
  - Electronics, diode driver 1000
  - Assembly ?

All in all, a 10W amplifier for less than $5k

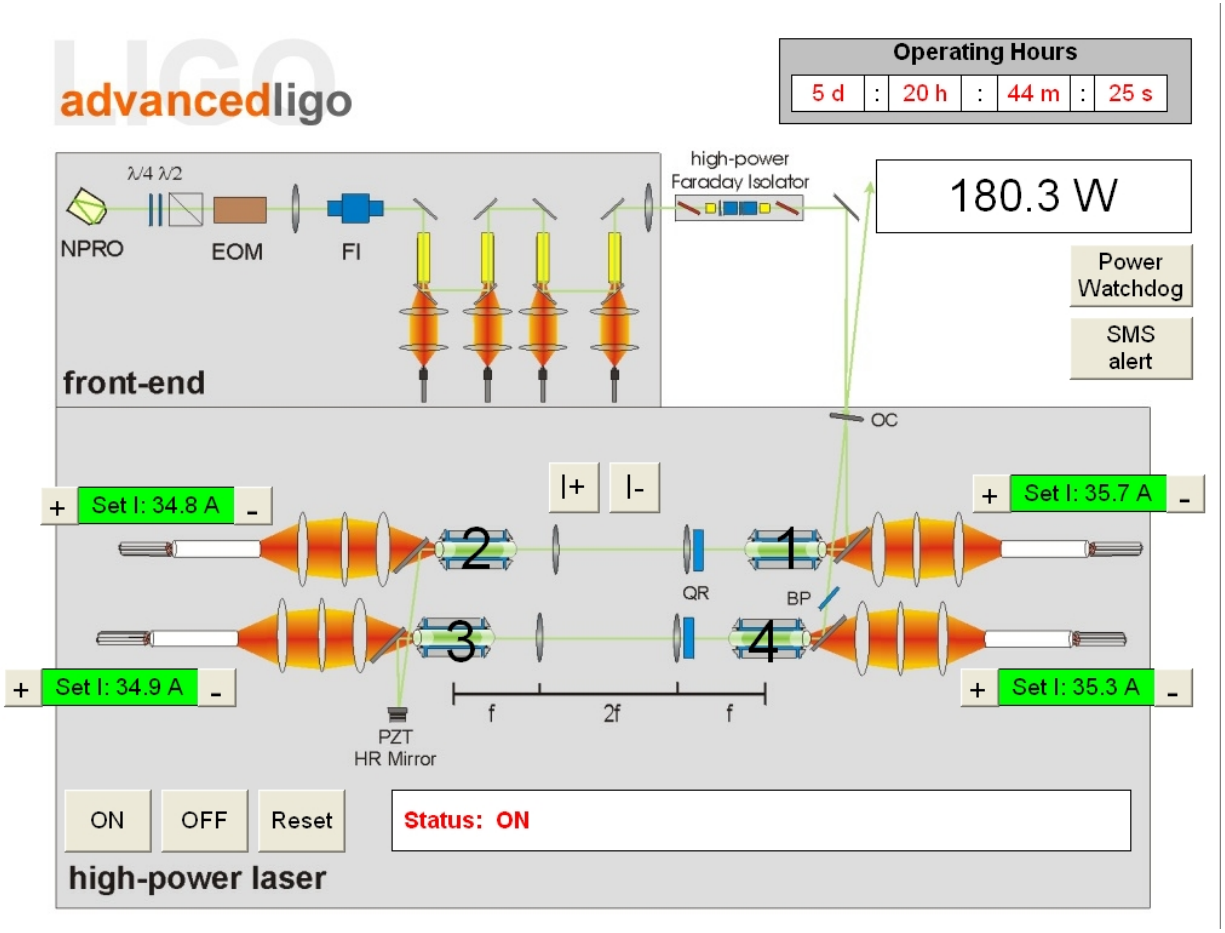
維持

- レーザーの性能維持は以下の要素に関して考慮する必要がある。
  - 励起用LD
  - 共振器の光学素子
  - その他のシステム（電源、冷却装置）
- この中で、励起用LDの確保が一番難しい（製品のサイクルが短いので、長期にわたって同じものを確保しにくい）。TAMAのSONYレーザーでもその点が非常に問題となった。
- 日本のメーカー製品では、7年間の保守が義務付けられているので、その形で、ある程度は確保できる可能性もある（三菱のモジュールは基本的に製品用に開発されたもの）。
- LZHのレーザーに関しては、保守の情報が全く無い。
- ファイバーレーザーも不明。

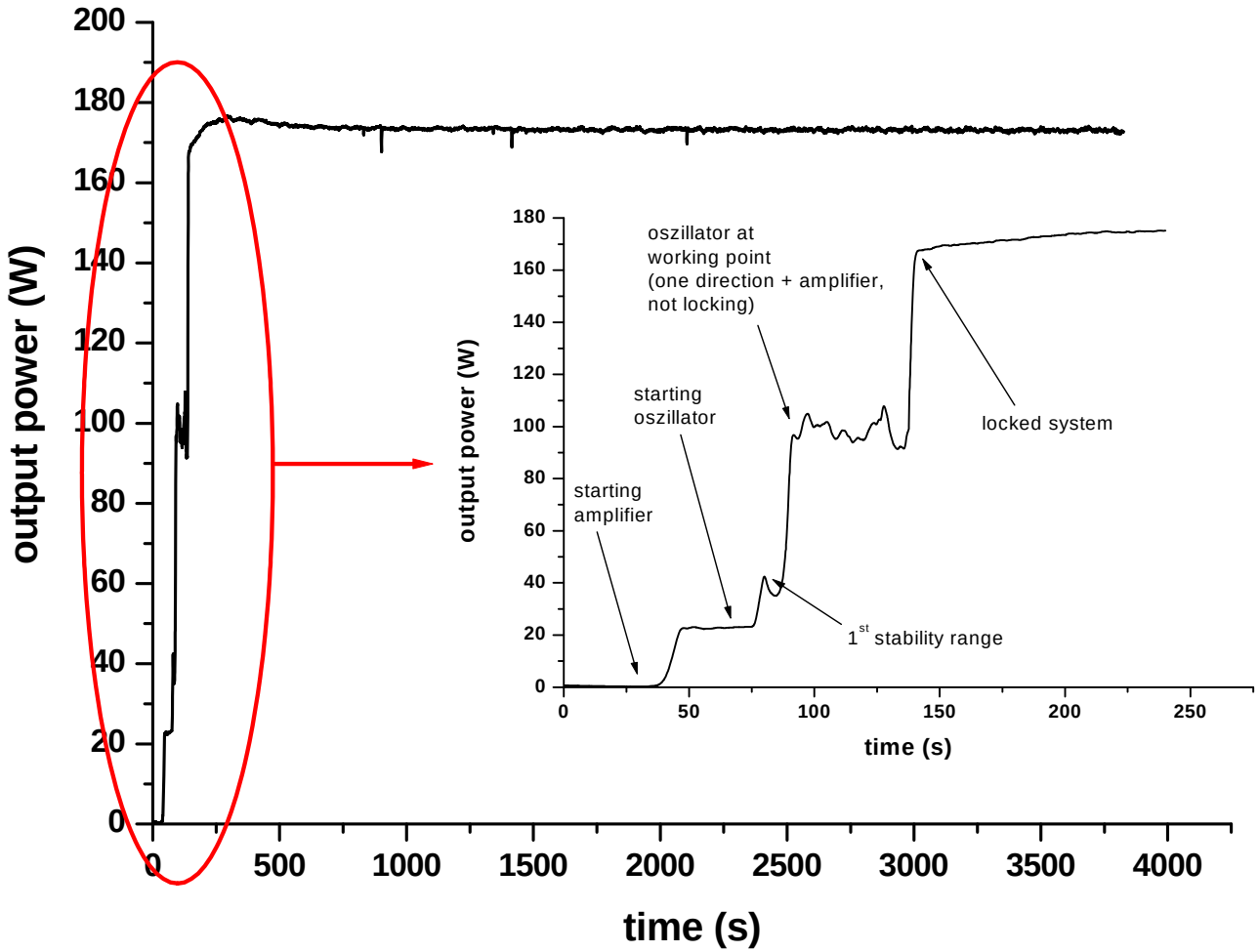
運転時の操作性

- 運転時の操作性に関しては、まだ、未知数。
- これまでの経験では、レーザー共振器のアラインメントは、長時間連続点灯すればかなり安定になる。
- システム作りは、レーザーを作る会社のノウハウでもあるので、研究室レベルではなかなか難しい部分もあり、今のところ判断できない。
- LZHでは、かなり本格的にやっている。

Adv. LIGO electronics

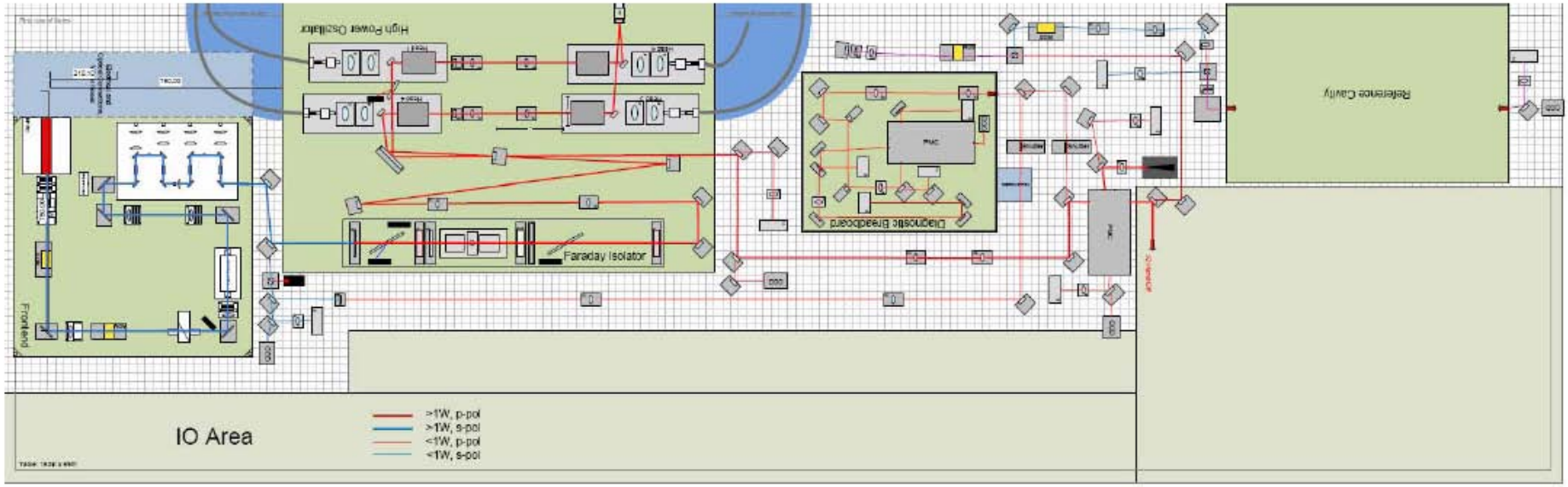


Start-up behavior



Complete system started and locked after 3 min !

PSL / IO Table layout

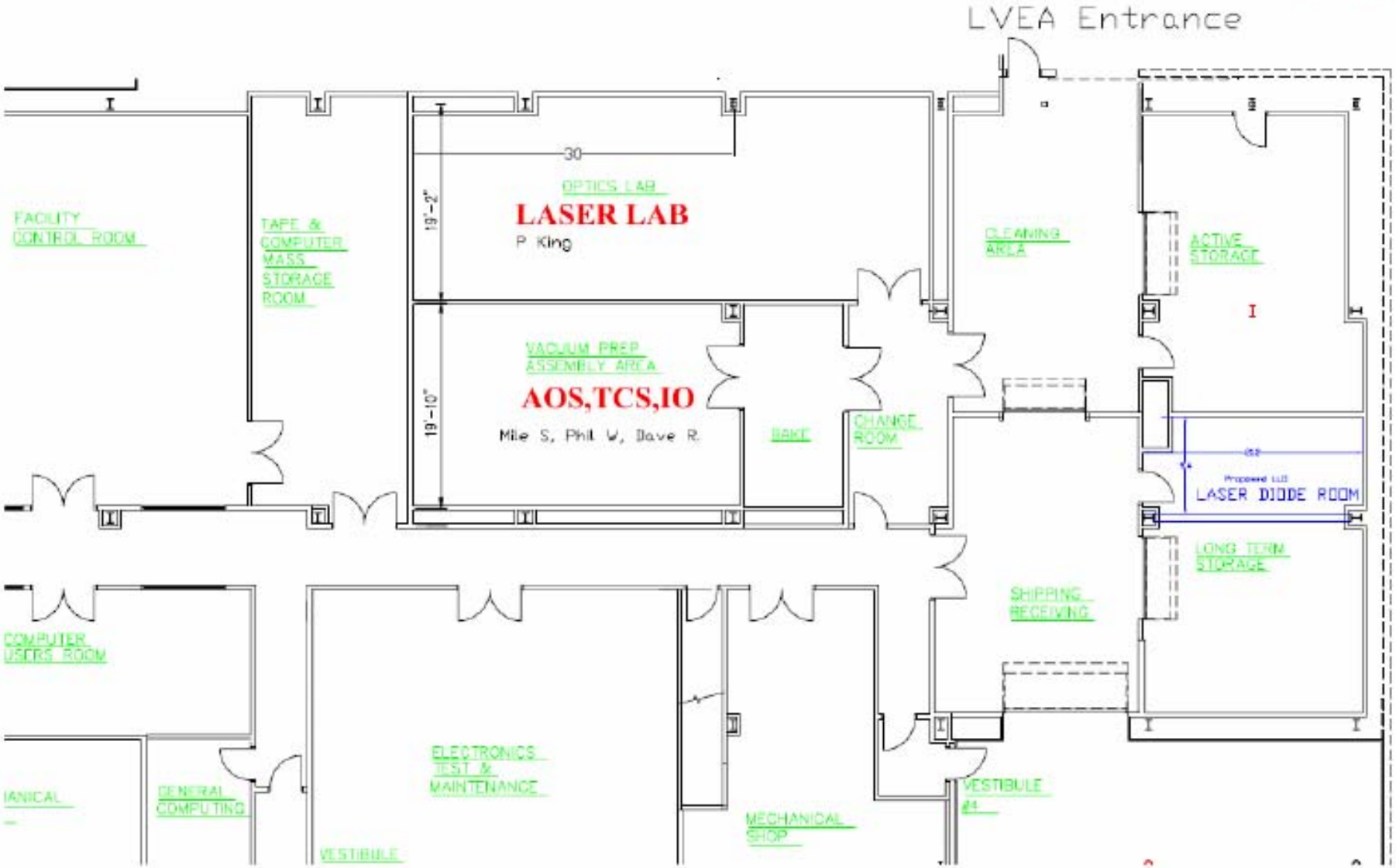


- real estate on the PSL table is currently negotiated between IO and PSL
- layout sketch above will change
- PSL table more crowded than in inital LIGO
- table size probably just big enough
- can DBB be used for IO diagnostic purposes ?
- cleanliness, easy access, small number of componets in 180W laser path

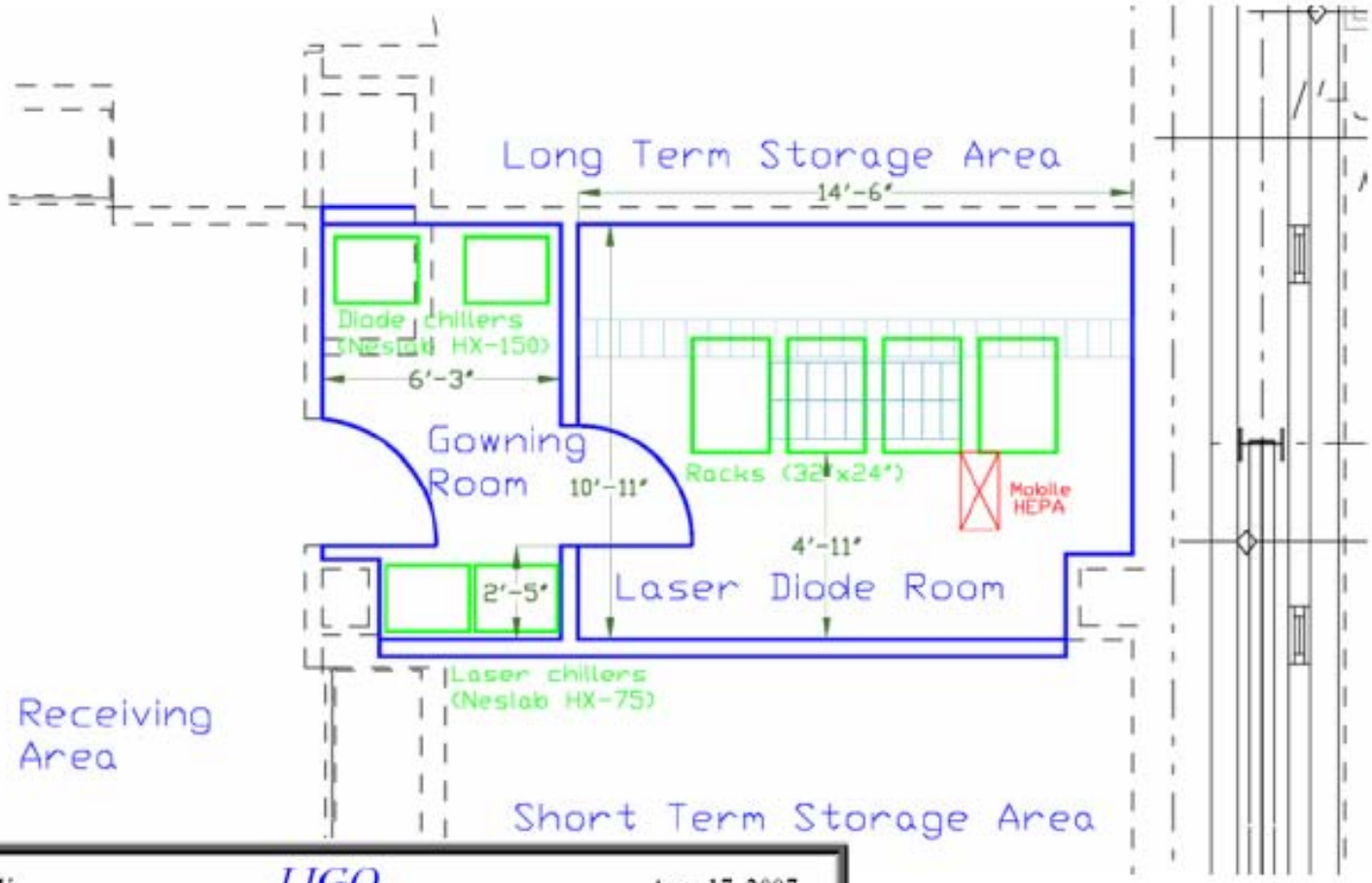
安全管理

- 強力なレーザー光を利用するので、安全管理は非常に重要。
- システムモニター、インターロック、人間とのインターフェースなどで、注意を払う必要がある。
- 三菱電機は加工用のレーザーを開発・販売しているので、そのノウハウを十分に持つという話を聞いている。
- レーザーを設置する部屋から設計しないといけない。

laser diode room location



laser diode room



LIGO-T070195-04-W

LIGO

Aug. 17, 2007

Revised Sept. 5, 2007

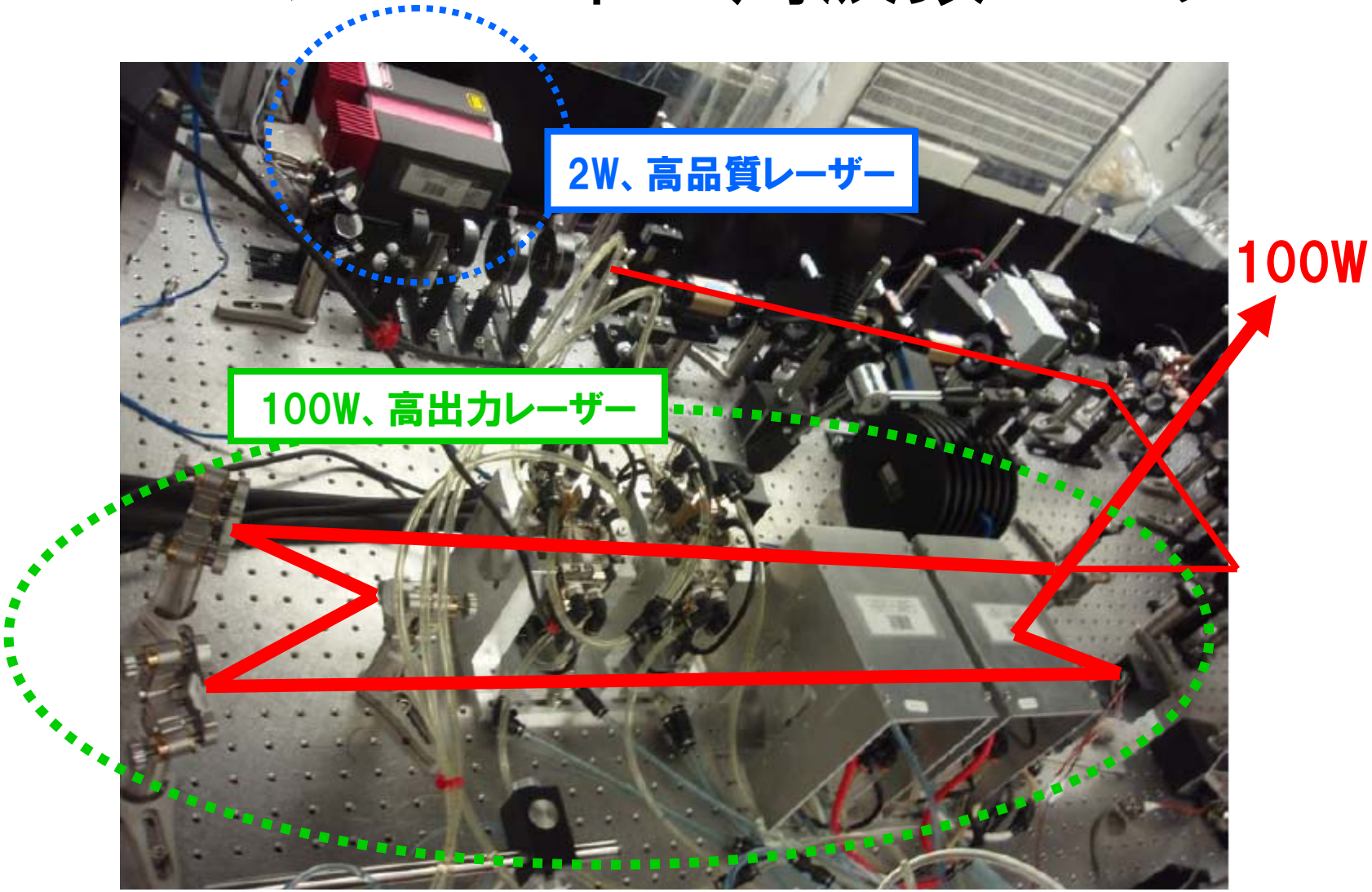
Preliminary Design – AdvLIGO PSL Laser Diode Room

A. Effler, P. King, R. Savage, R. Wooley

研究として成り立つか

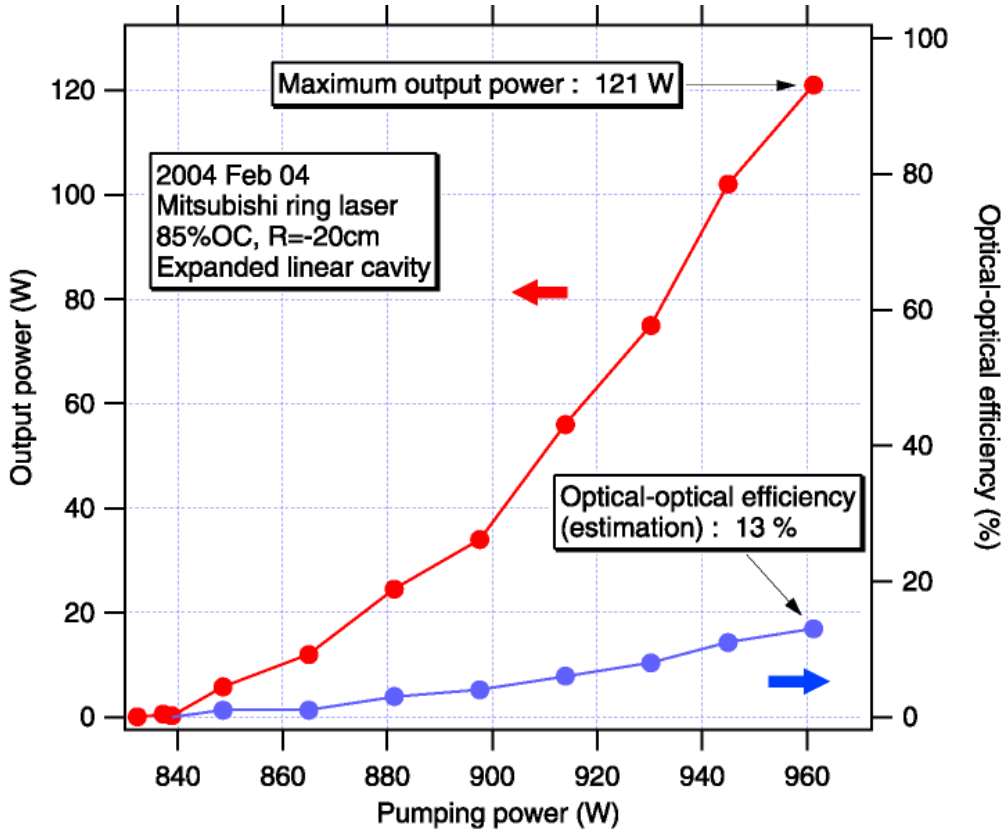
- 重力波検出器にとって、レーザーは、現在でも重要な開発要素であると考える。
- 「完成品」を買って、すぐに仕事ができるものとも思えない。
- 装置の製作と性能評価、干渉計への組み込みは、一連の研究として見るべきものと考える。でないと、結局、使えない物になってしまう（アデレードのレーザー？）。
- 自分達は以下に示すような形で研究してきた実績を捨てることはしたくない。
- 長期的に見た場合、従来型の固体レーザーからファイバーレーザーに移行することは十分にありえる。基礎開発は既に終わっていると考えると、高出力化の研究に投資すべき時期に来ていると思われる。

Miolabの100W単一周波数レーザー



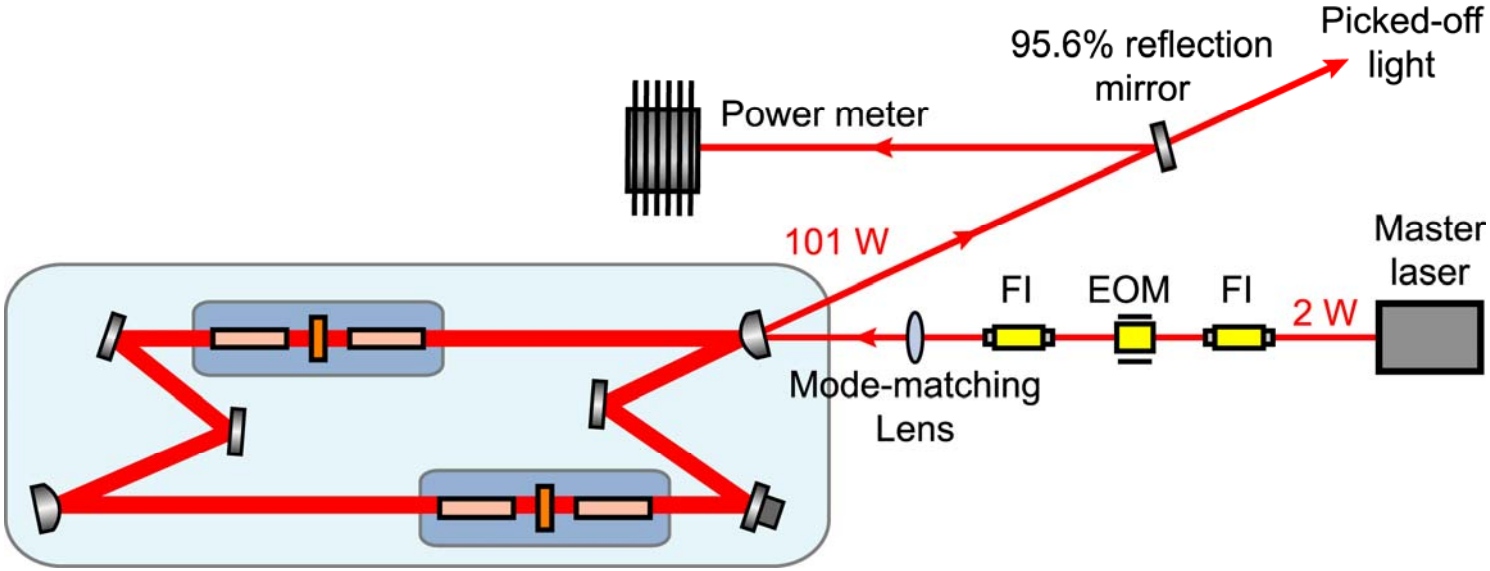
Output power of the slave laser

- 121W by bidirectional oscillation



100-W Power laser

- Injection locking with 2-W master laser (NPRO)



Realization of single frequency oscillation

- Scanning Fabry-Perot output

2110 OPTICS LETTERS / Vol. 30, No. 16 / August 15, 2005

100 W, single-frequency operation of an injection-locked Nd:YAG laser

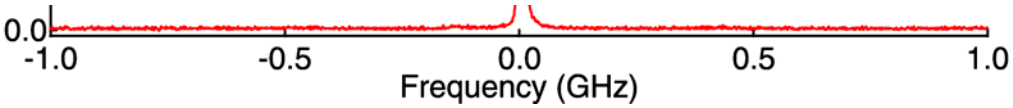
Kohei Takeno, Takafumi Ozeki, Shigenori Moriwaki, and Norikatsu Mio

Department of Advanced Materials Science, University of Tokyo, 5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba 277-8561, Japan

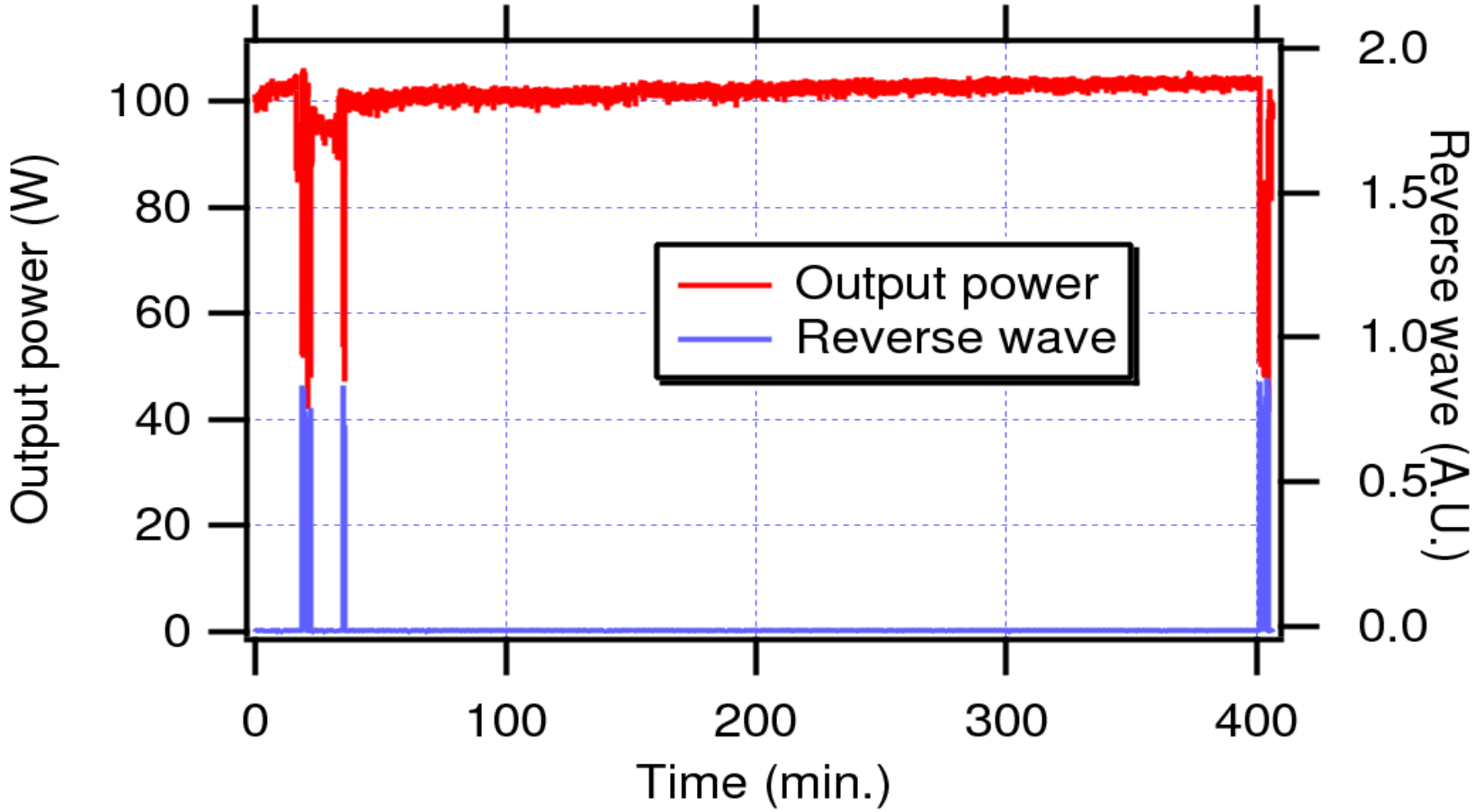
Received February 7, 2005

We have built a single-frequency Nd:YAG laser capable of producing an output power of 101 W by injection locking a slave laser that can emit an output power of 121 W in the free-running state to a 2-W master laser. We confirmed that the output mode was diffraction limited and linearly polarized. © 2005 Optical Society of America

OCIS codes: 140.3520, 140.3580.

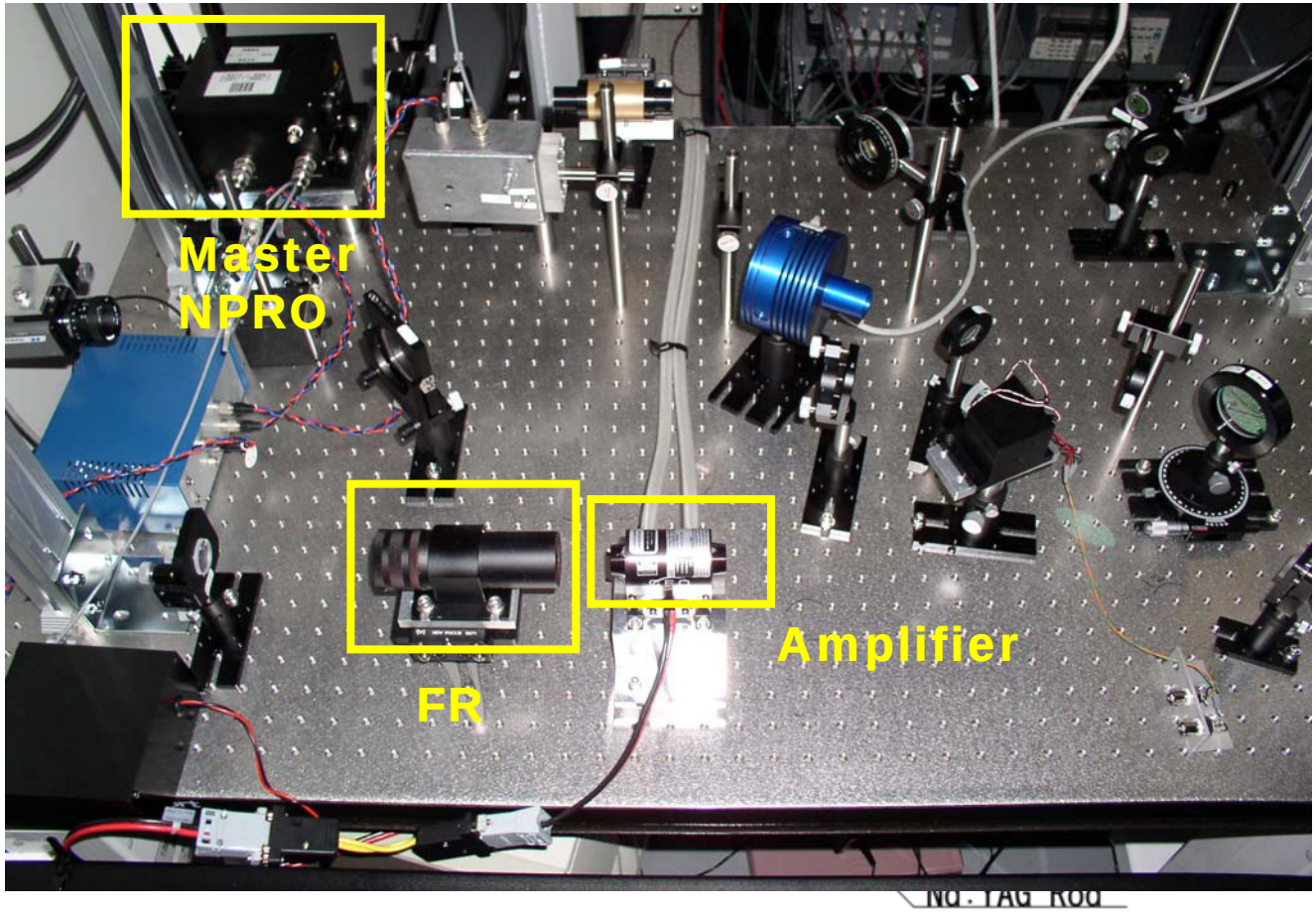


Long term stability

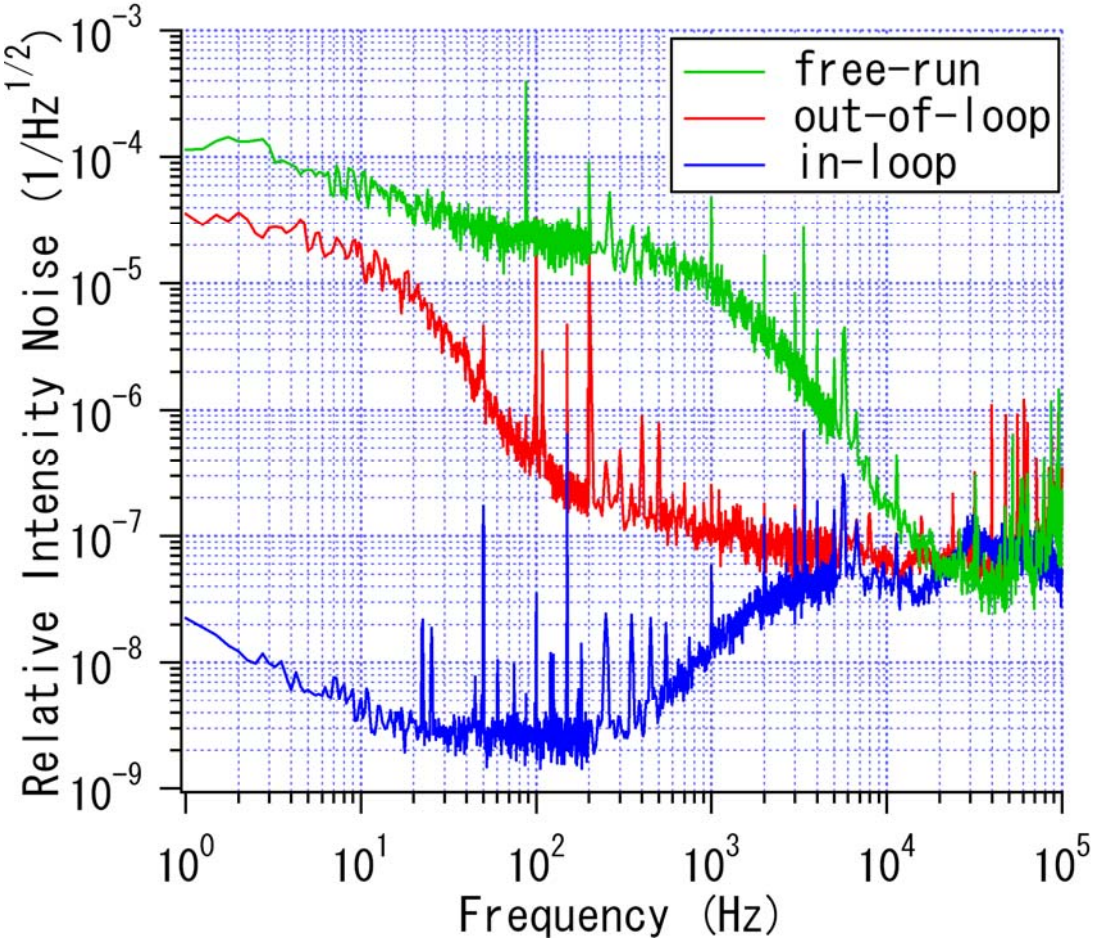


Continuous operation for more than 6 hours

MOPA and intensity stabilization (test bench)



Intensity stabilization performance

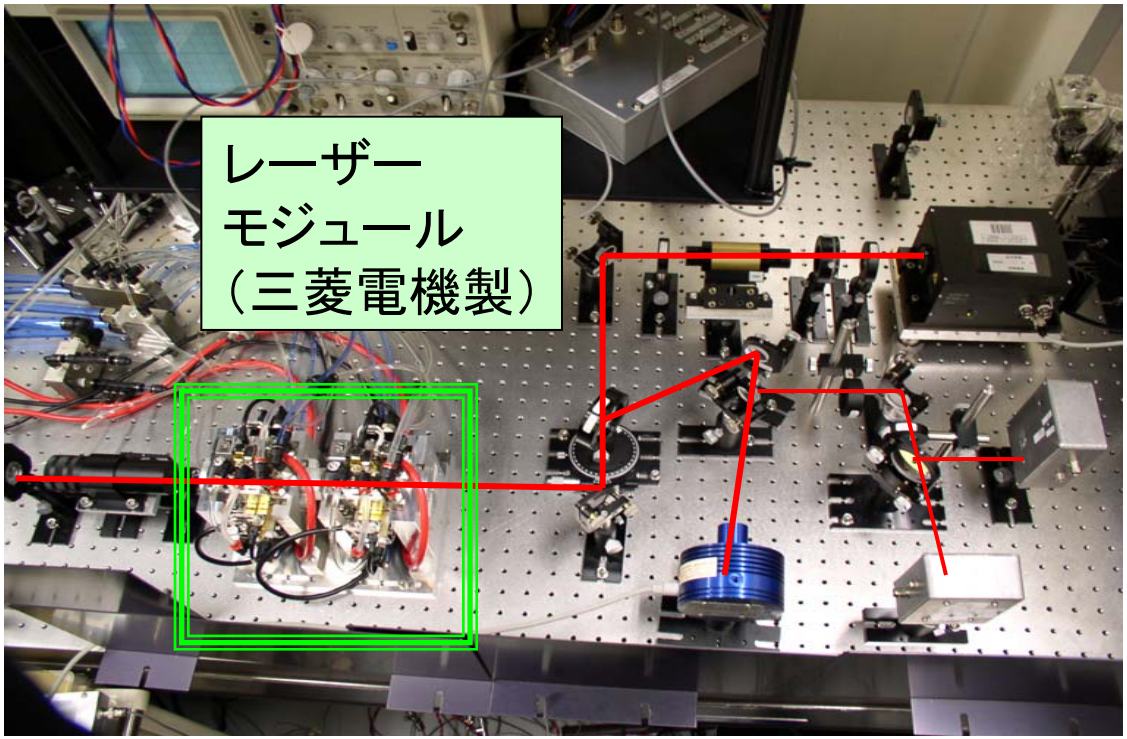


Unity Gain freq.
30kHz

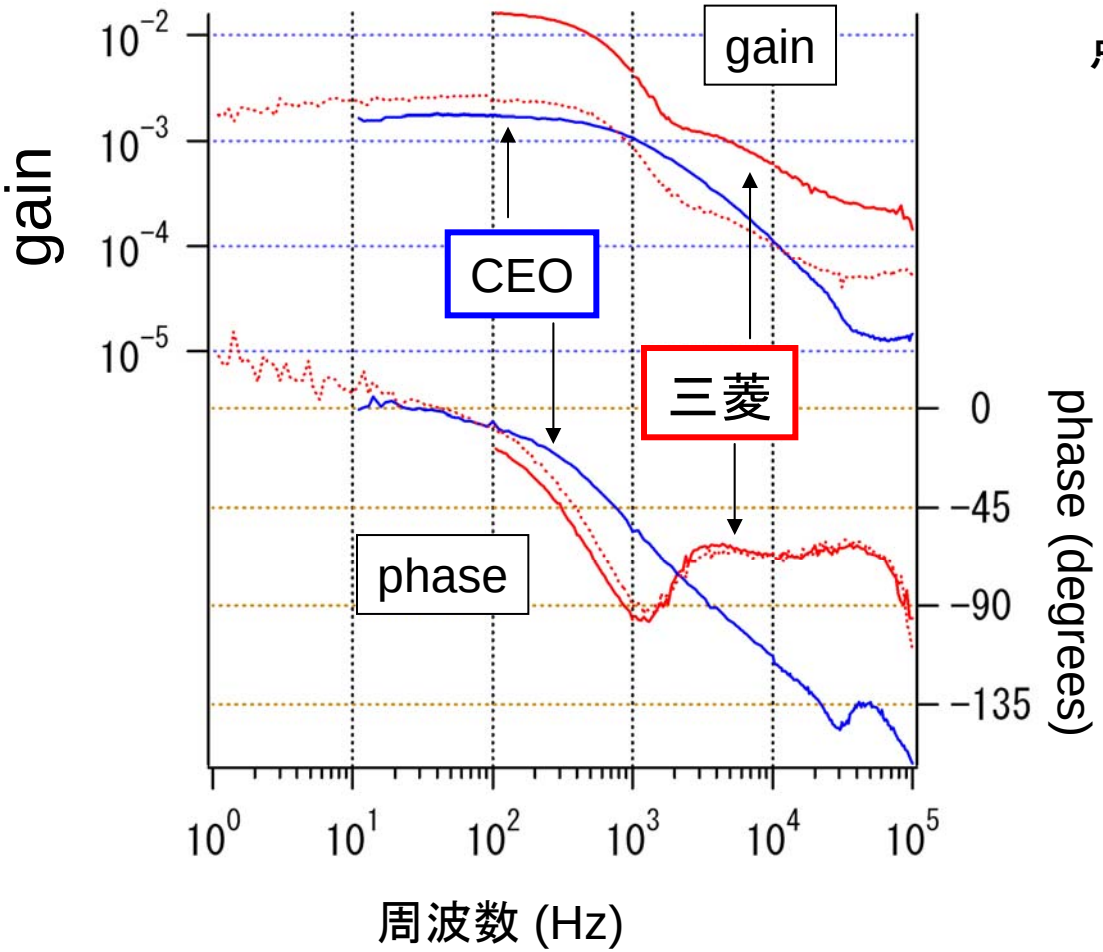
Loop Gain
at 100 Hz
100db

大型モジュールでの安定化

- 三菱電機のモジュールで安定化

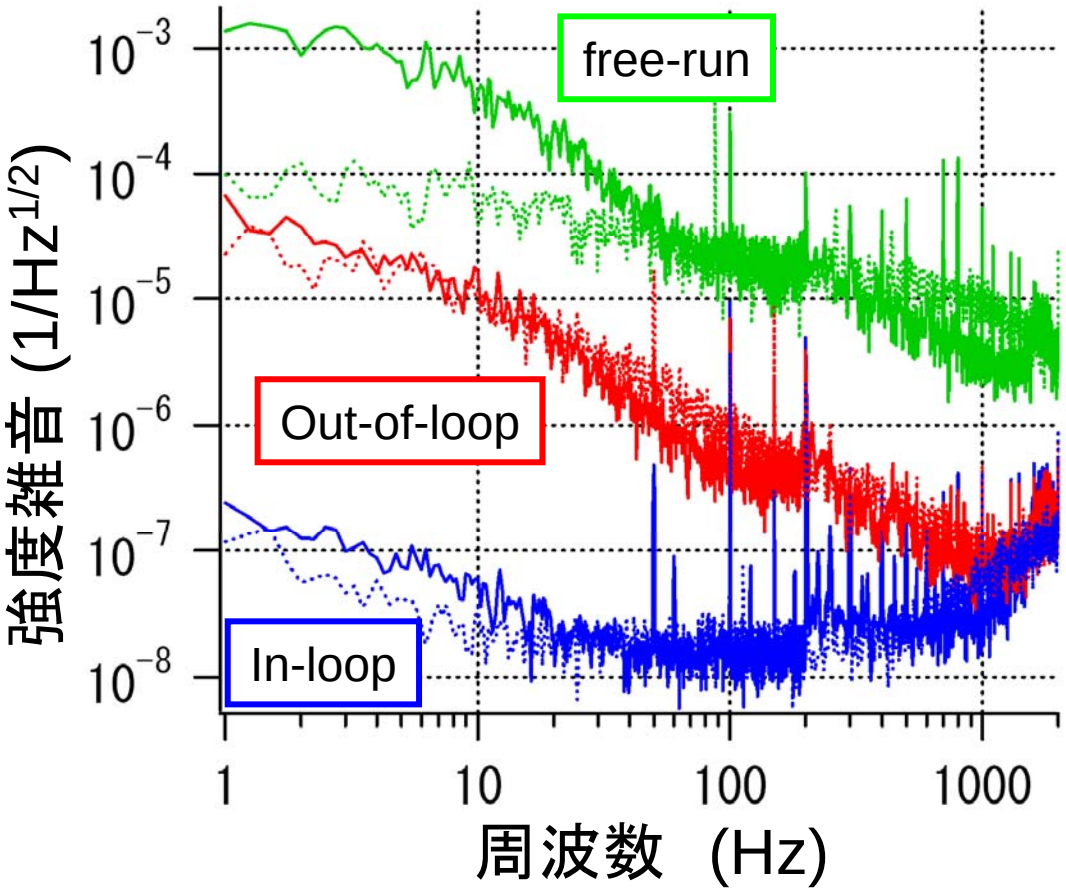


応答関数の測定



点線はトランジスタ変更前

安定化実験の結果

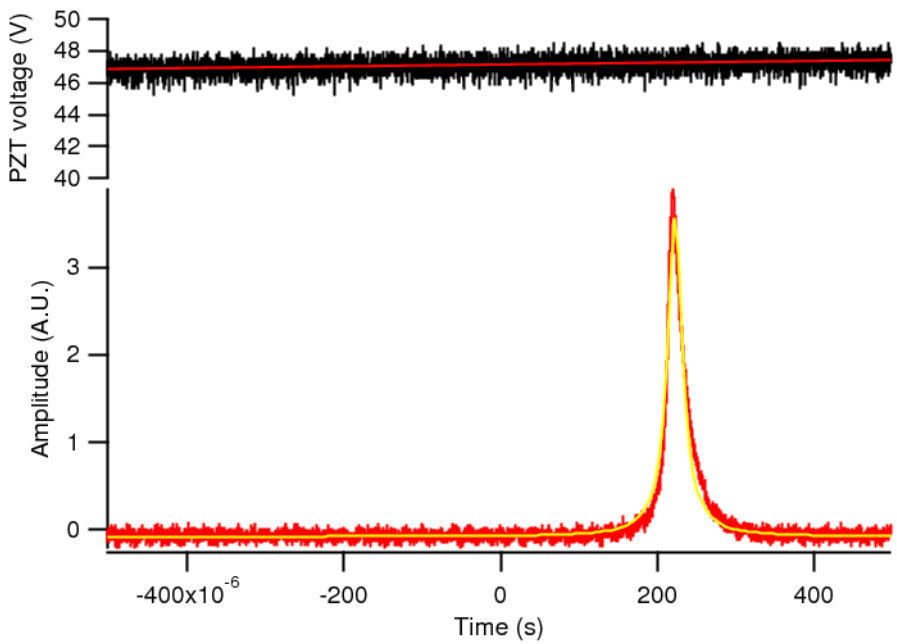


実線は三菱
点線はCEO

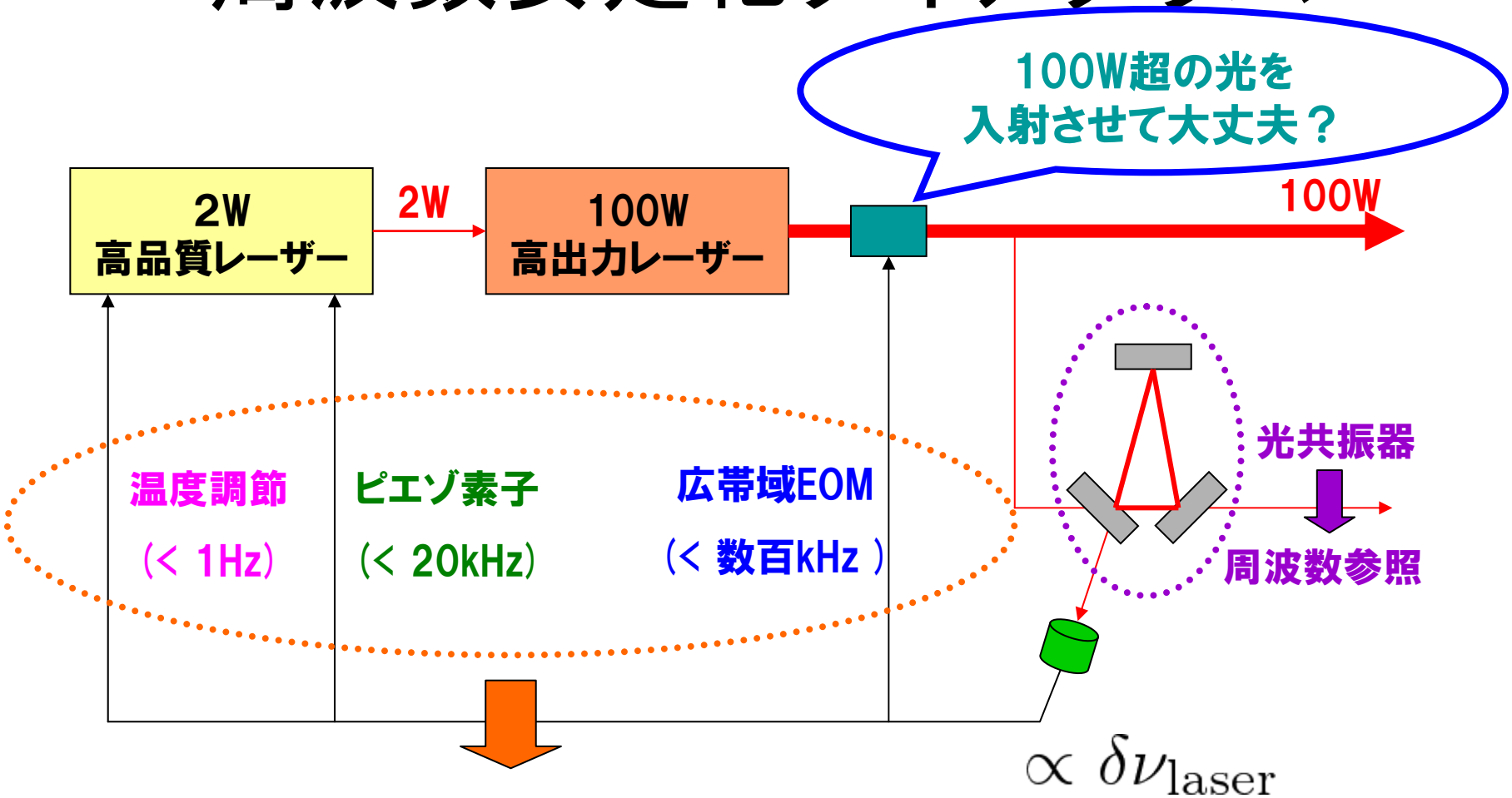
モードクリーナーは
どちらもなし

Frequency stabilization experiment

- Triangular reference cavity ($\Delta\nu$=152kHz)
- Transmission intensity curve



周波数安定化ダイアグラム



アクチュエータが制御の限界を決める

高出力光用EOMの開発

Applied Physics Express 1 (2008) 012005

Development of Electrooptic Modulator for Advanced Ground-Based Gravitational Wave Telescopes Using Stoichiometric MgO-Doped $LiNbO_3$ Crystals

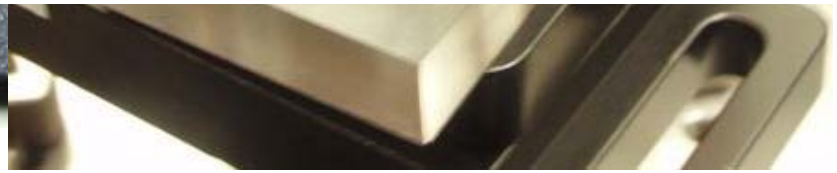
Noriaki Ohmae*, Kohei Takeno[1], Shigenori Moriwaki, and Norikatsu Mio

Department of Advanced Materials Science, University of Tokyo, 5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba 277-8561, Japan
[1] *National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 1-2-1 Namiki, Tsukuba, Ibaraki 305-8564, Japan*

Received November 2, 2007; accepted November 20, 2007; published online January 11, 2008

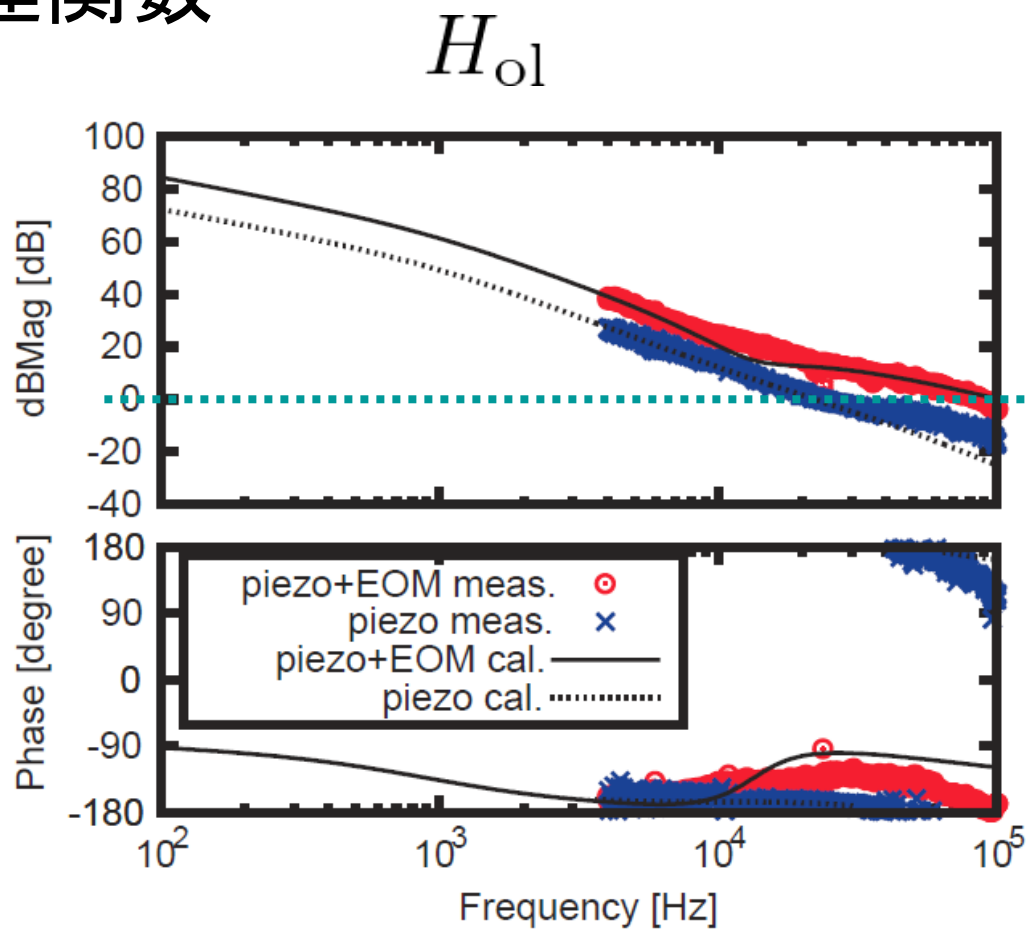
We have developed an electrooptic modulator (EOM) using stoichiometric MgO-doped $LiNbO_3$ (MgO-doped SLN) crystals, and evaluated this EOM for the phase control of a high-power laser whose power is over 100 W. We succeeded in the phase modulation of a 100 W laser without a decrease in phase modulation index, due to a nonlinear optical effect, which can occur when a high-power laser beam enters the EOM. We also estimated wavefront distortions caused by passing through the EOM with a Shack–Hartmann wavefront sensor, and found that the additional wavefront distortion was negligible. Thus, we confirmed that MgO-doped SLN crystals are a suitable material for use in a high-power laser system. © 2008 The Japan Society of Applied Physics

DOI: 10.1143/APEX.1.012005

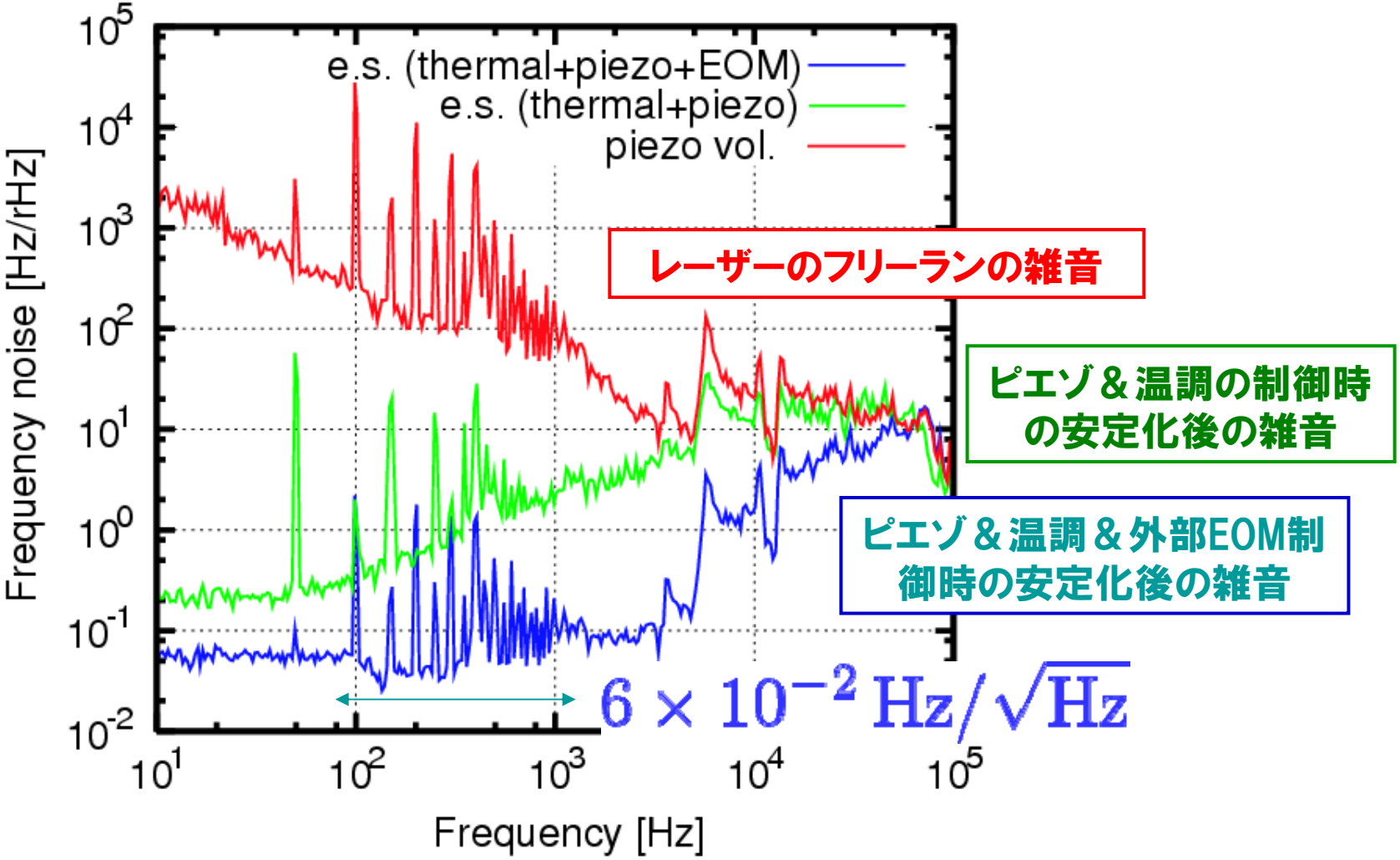


周波数安定化の結果

- オープンループ伝達関数
  - 制御帯域
    - 85kHz
  - 制御ゲイン
    - 60dB@1kHz
    - 80dB@100Hz



周波数安定度


e.s. (thermal+piezo+EOM)
e.s. (thermal+piezo)
piezo vol.
レーザーのフリーランの雑音
ピエゾ＆温調の制御時の安定化後の雑音
ピエゾ＆温調＆外部EOM制御時の安定化後の雑音
$6 \times 10^{-2}\,\mathrm{Hz}/\sqrt{\mathrm{Hz}}$
Frequency noise [Hz/rHz]
Frequency [Hz]
10^{5}
10^{4}
10^{3}
10^{2}
10^{1}
10^{0}
10^{-1}
10^{-2}
10^{1}
10^{2}
10^{3}
10^{4}
10^{5}

結論

- オリジナルデザインを採用したい。
  - 費用に関して、現在、国産のシステムは不利である。しかし、保守には一番有利である。また、干渉計が1台になったので、保守が可能な状態なら、必要なレーザー装置は2台で十分であるので、あまり大きな差にならない。
  - 研究の実績を考えると、一番、素性の知れた光源を提供できると判断する。
  - 日本の干渉計には、日本の技術を使ったものを利用していきたい。
- 10年後までの運用を考えると、ファイバーレーザー導入のための準備を進めるべきと考える。