

レーザーの現状
KAGRAチーフ会議
2017年2月20日

三尾典克

KAGRAの光源への要求

- 高出力（180W）
- 直線偏光
- 単一波長、狭線幅（1064nm、 $\sim 1\text{kHz}$ ）
- 単一横モード（ TEM_{00} モード）
- 低強度雑音
- 低周波数雑音

高出力かつ高品質なレーザー光源が求められる

1つのレーザーで出力と品質を両立するのは難しい

→ MOPA + コヒーレント加算

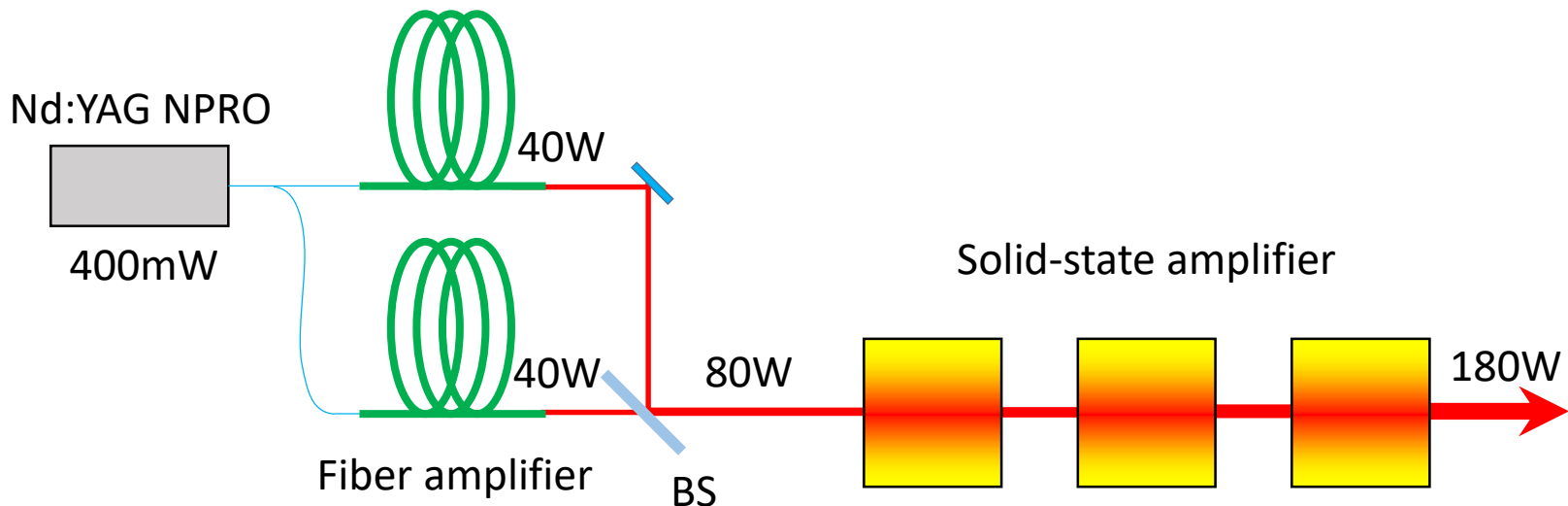
光源装置全体の構成

- MOPA (Master Oscillator Power Amplifier)

発振器と増幅器を分け、高品質を保って高出力化

- コヒーレント加算

BSでビームを重ねて位相を制御し、コヒーレントに足し合わせる

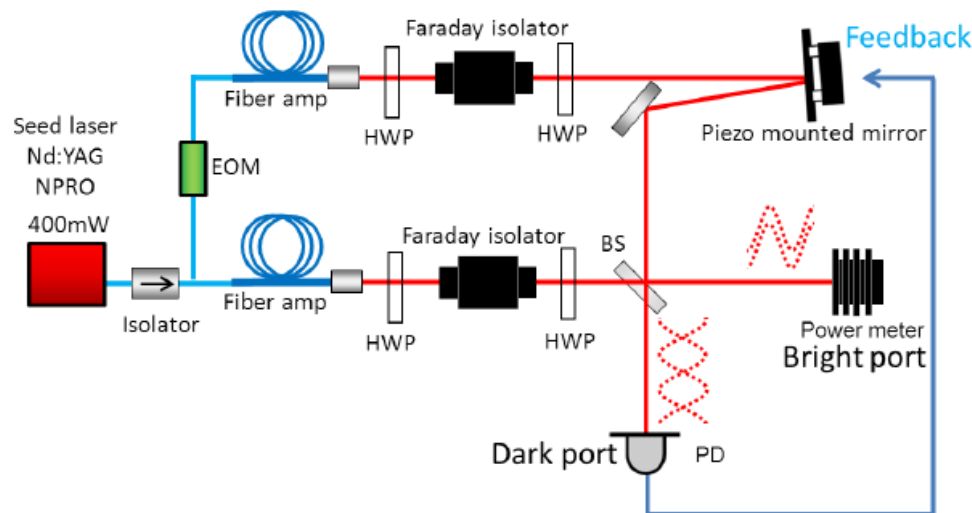


経緯 I

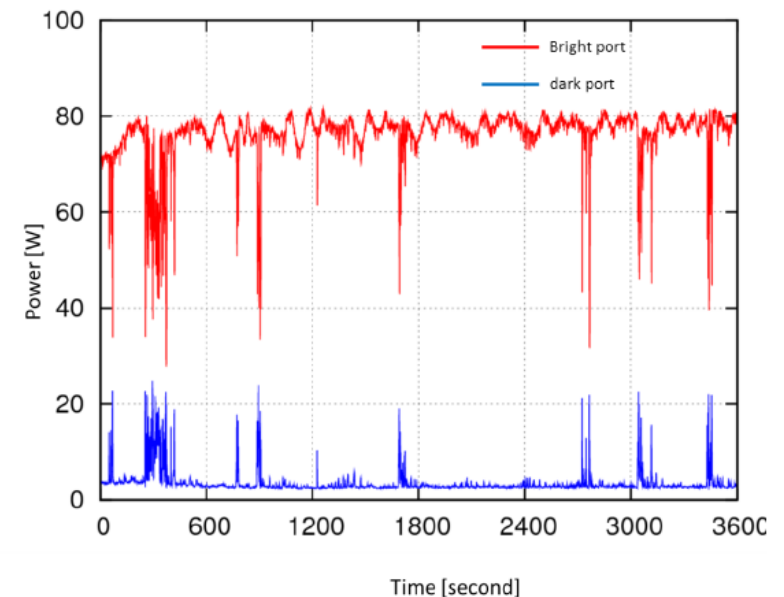
ピエゾアクチュエータによるコヒーレント加算（出力78W）

- 最大ストローク16 μm のピエゾを1つ使用
- ダイナミックレンジが小さく、**ロックが長時間持続しない**

当時の光学系



パワーの時間変化



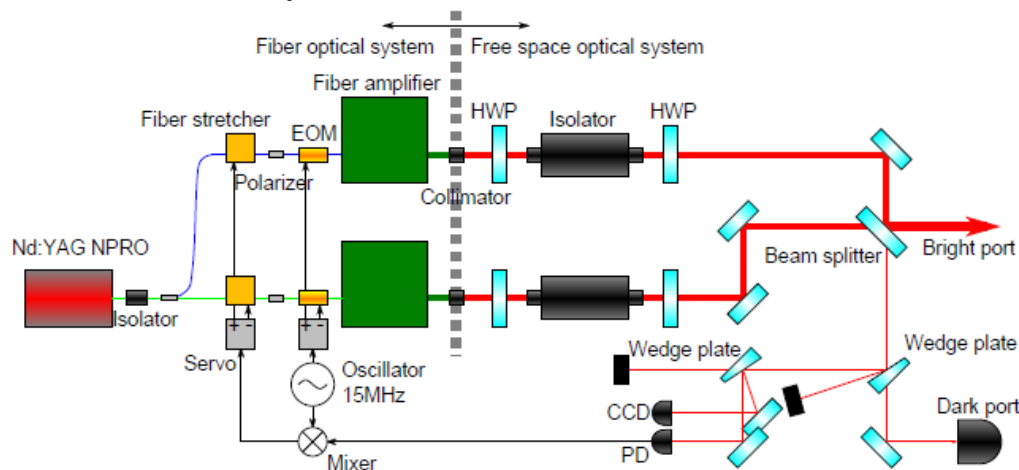
及川溪, 「重力波検出器のための高出力ファイバーアンプのコヒーレント加算」 (2013)

経緯Ⅱ

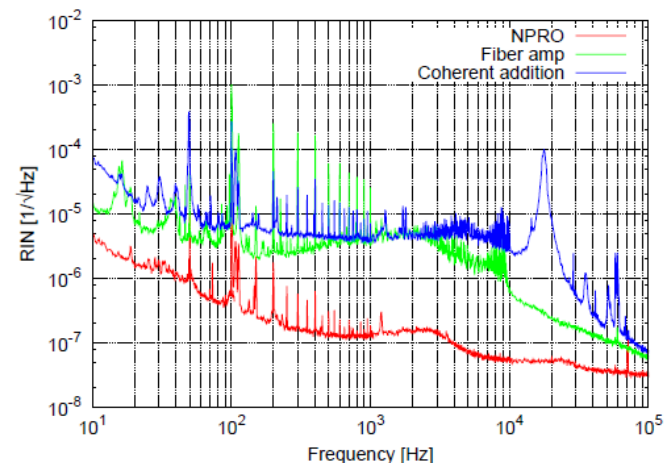
ファイバーストレッチャーによるコヒーレント加算（出力70W）

- 最大入力 $\pm 400\text{V}$ 、電圧係数 $8.1\mu\text{m/V}$ のストレッチャーを差動で使用
- 18kHzに共振があり、強度雑音にピークがある
- ストレッチャーにより偏光が回転し、低周波の強度雑音が増加

当時の光学系



出力光の強度雑音



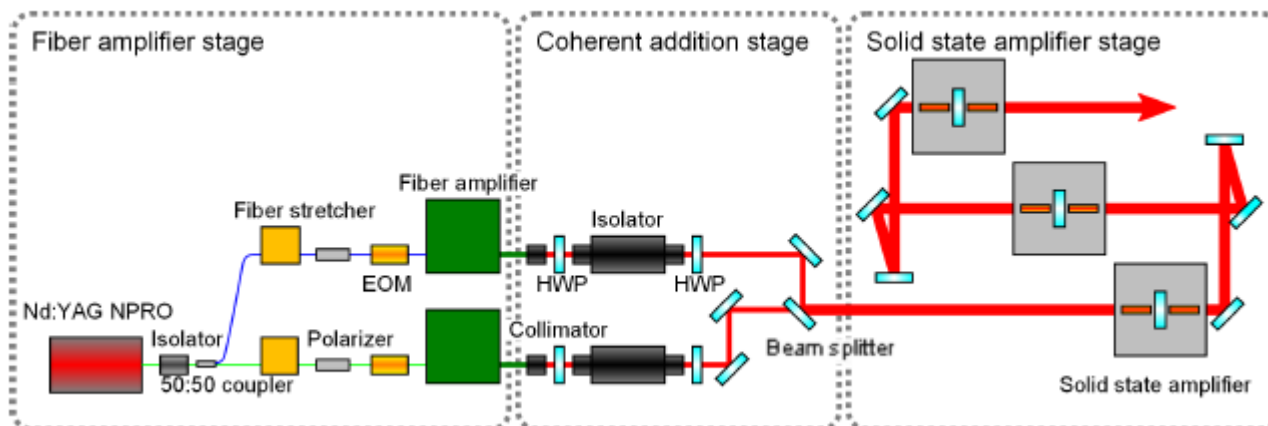
鈴木健一郎, 「レーザー増幅とコヒーレント加算を用いた重力波検出器KAGRAのためのレーザー光源開発」(2015)

経緯Ⅱ

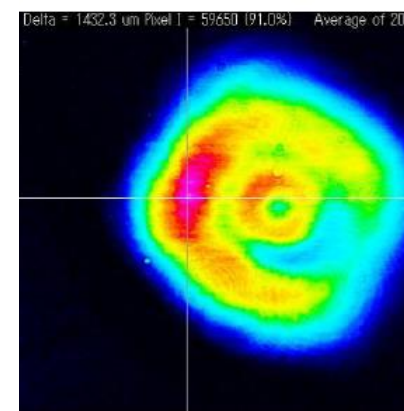
固体増幅器によるMOPA（出力70W→200W）

- ・ コヒーレント加算の出力光を固体増幅器3台で増幅
- ・ 200Wを達成したが、**プロファイルが汚い**

当時の光学系



出力光プロファイル



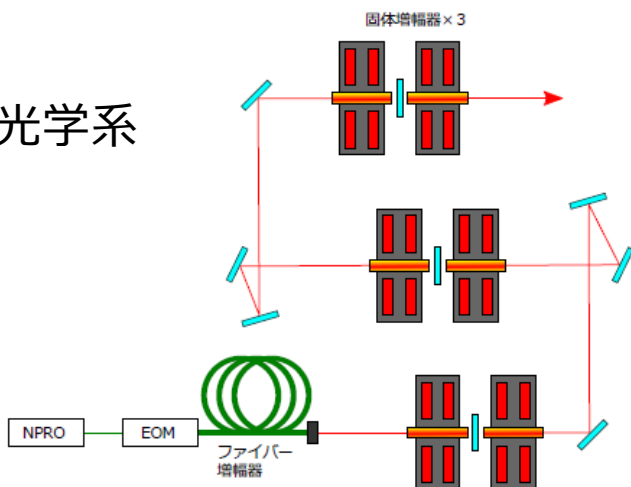
鈴木健一郎, 「レーザー増幅とコヒーレント加算を用いた重力波検出器KAGRAのためのレーザー光源開発」(2015)

経緯Ⅲ

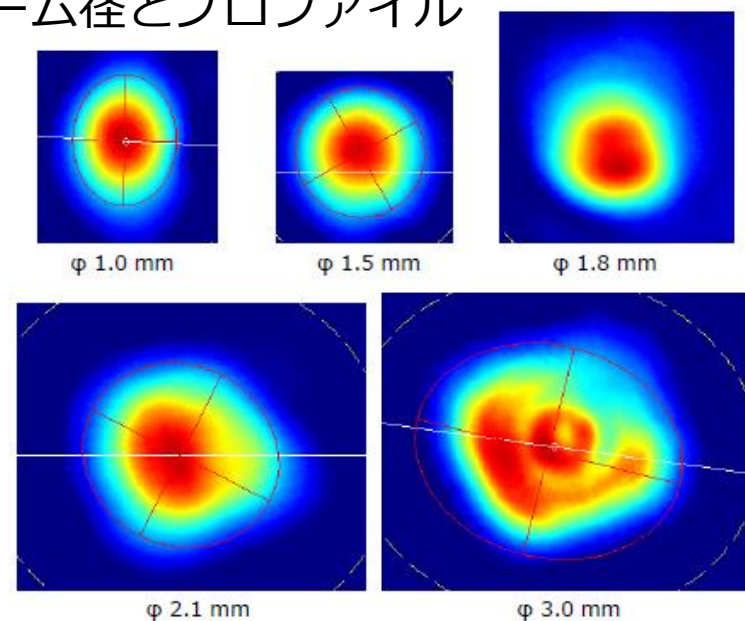
固体増幅器によるMOPA（出力40W→110W）

- 固体増幅器の入射光束径を調整し、プロファイルを改善
- 出力とプロファイルがトレードオフ → 出力低下

当時の光学系



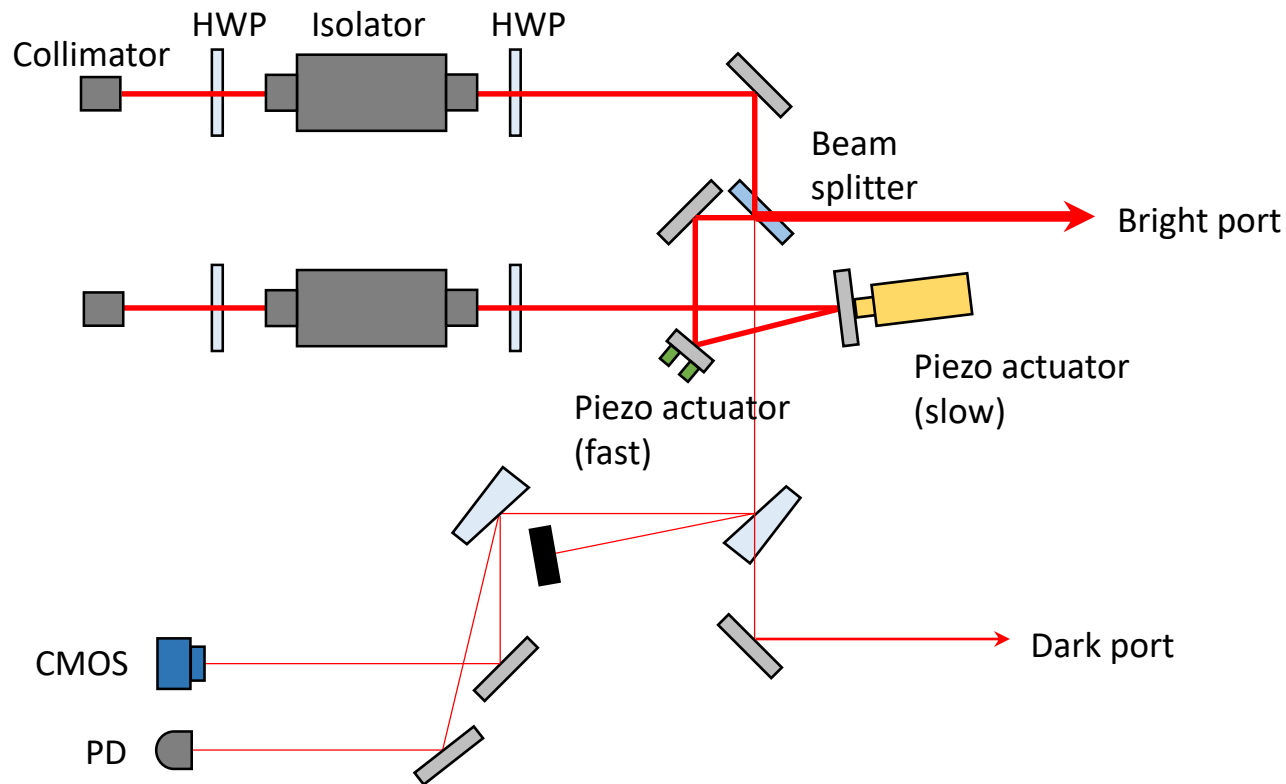
入射光束径とプロファイル



西内良太, 「重力波検出器KAGRA用高出力レーザー光源の安定化システムの開発」 (2016)

コヒーレント加算の改良

- 最大ストローク120 μm 、4.6 μm の大小のピエゾを使用
- 大型のピエゾでDC $\sim$ 30Hz、小型のピエゾで30Hz $\sim$ 数kHzを制御

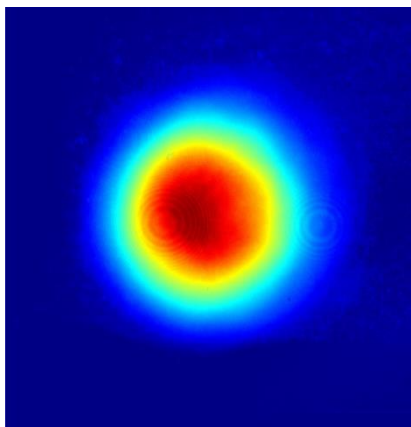


出力光の様子

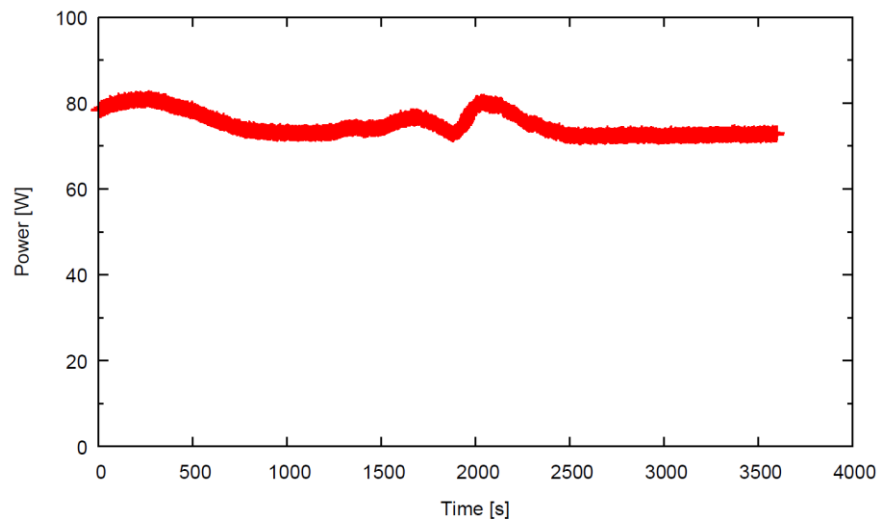
- 出力72W以上
- 強度プロファイルはTEM₀₀モードに近い
- ロックは1時間以上続いた

ピエゾを用いた先行研究と比較すると大きく改善

出力光プロファイル

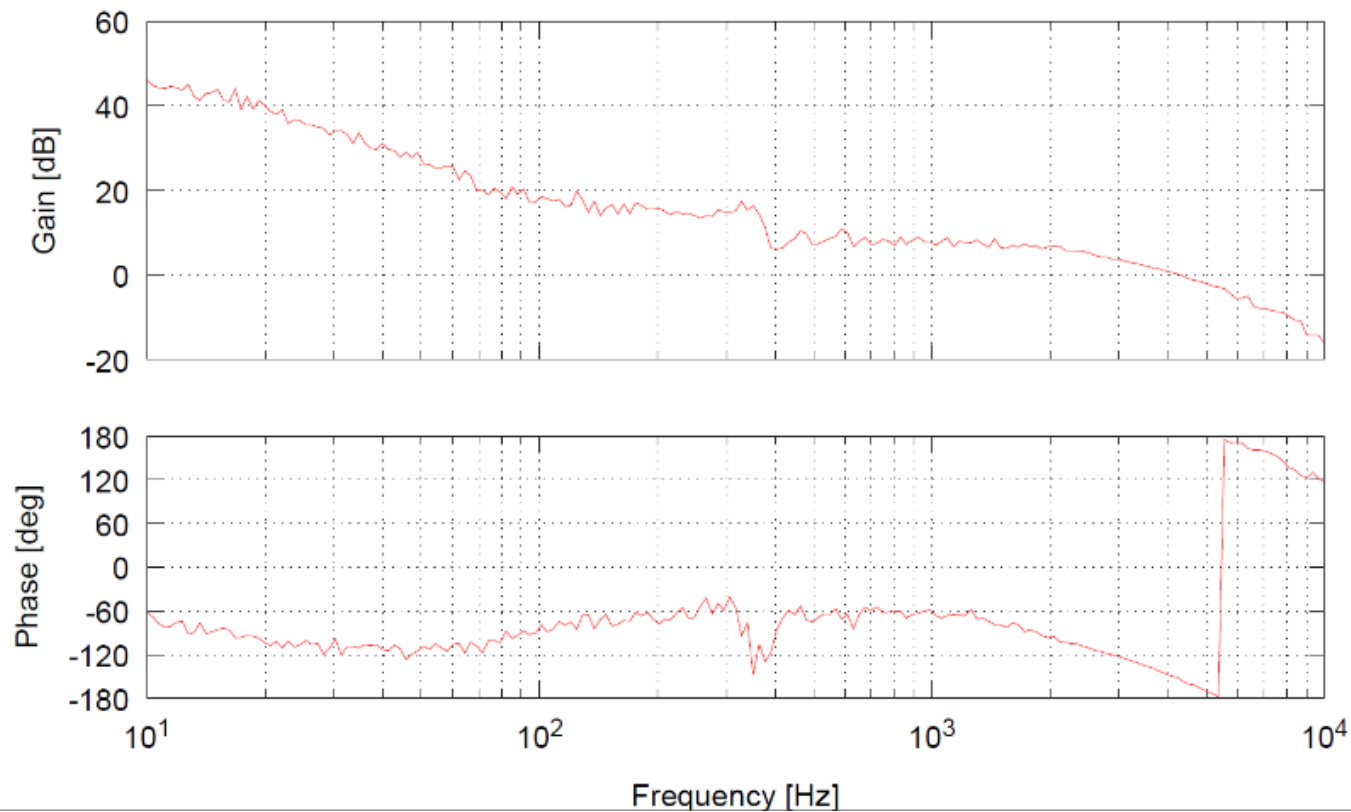


出力パワーの時間変化



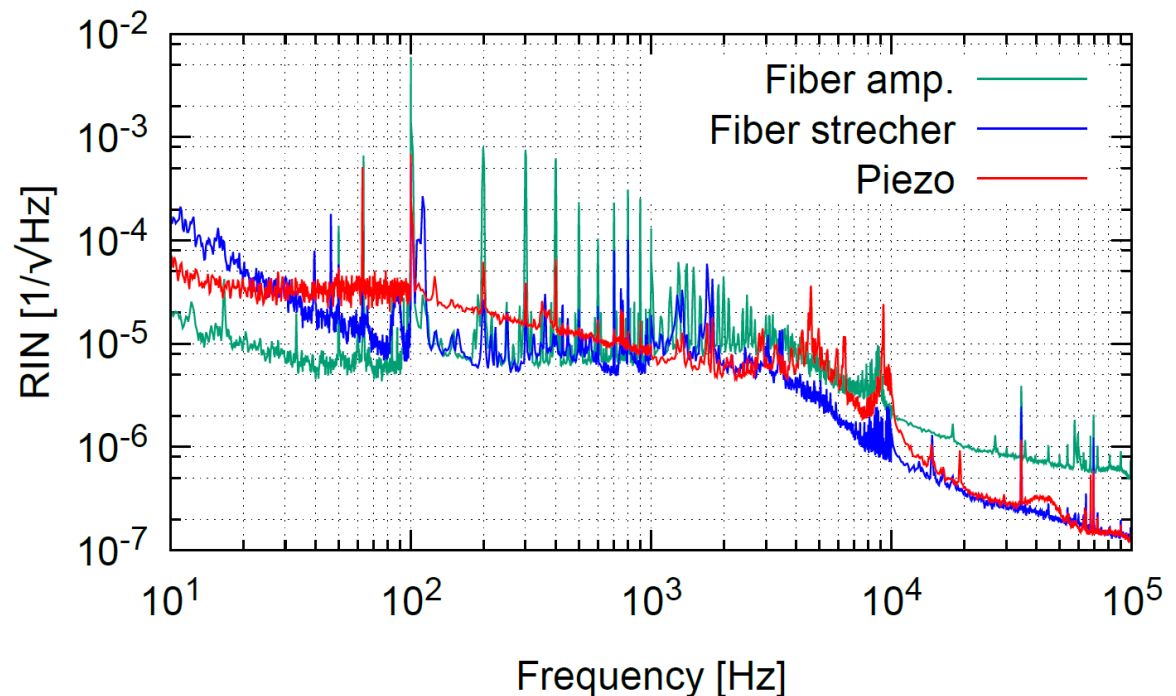
制御系の伝達関数

- ユニティゲイン周波数：4kHz、位相余裕： 30°
- 300～400Hzに、ピエゾ由来の共振



強度雑音

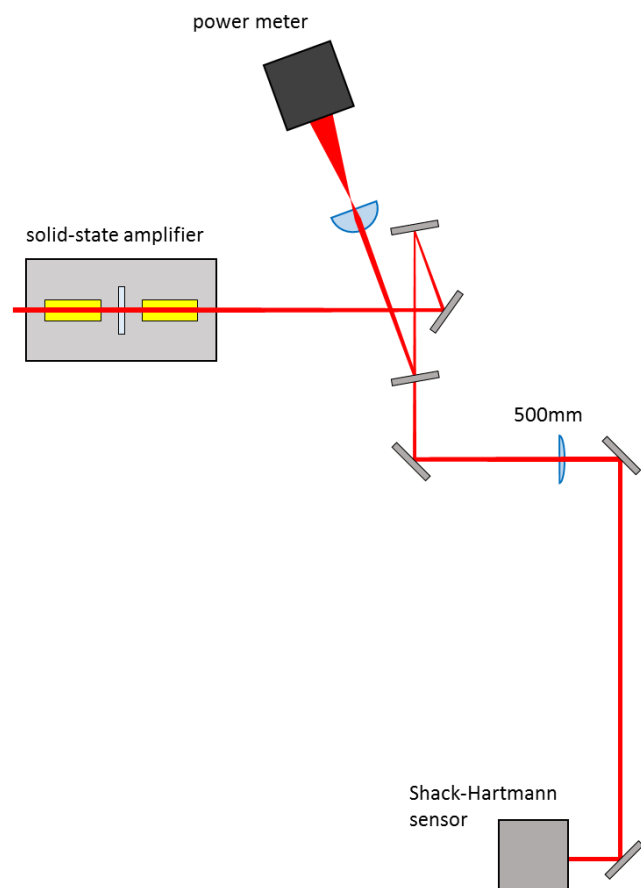
- 相対強度雑音（RIN）として測定
- 加算前と比べると全体的に増加
- ストレッチャーの場合と比べると、10Hz:雑音小 100Hz:雑音大
- 大きなピークはない



波面測定によるビーム品質評価

固体増幅ではよく波面の乱れが問題となる

→波面測定による横モード品質の評価を行った



- 固体増幅前後のビームの波面を、Shack-Hartmann センサーで測定
- 波面収差は、ストレーल比 S によって評価
 $S > 0.95$ でほぼ無収差であるとみなせる

$$S = 1 - \left(2\pi \frac{W_{\text{rms}}}{\lambda} \right)^2$$

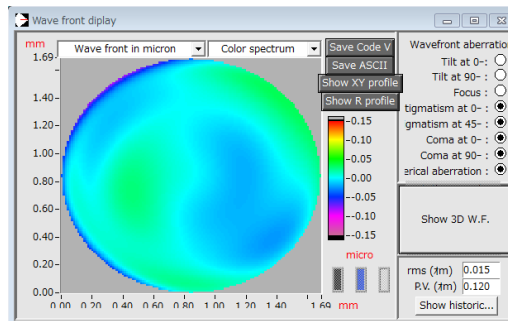
W_{rms} : 波面収差の二乗平均平方根

- ビームプロファイル、 M^2 の測定も行い、波面収差との関係を調べた

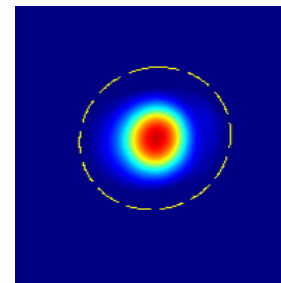
波面の測定結果

(A) コヒーレント加算前

波面収差のRMS 0.015 μ m
ストレール比 0.992

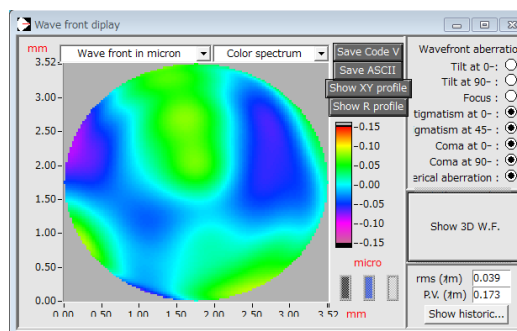


$$M^2_x=1.03, M^2_y=1.02$$

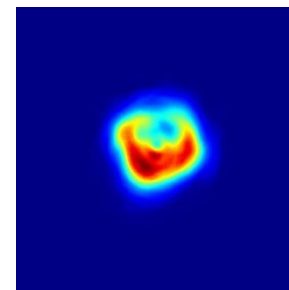


(B) コヒーレント加算後、 固体増幅器1台で増幅 (ビーム径2.2mm)

波面収差のRMS 0.039 μ m
ストレール比 0.947



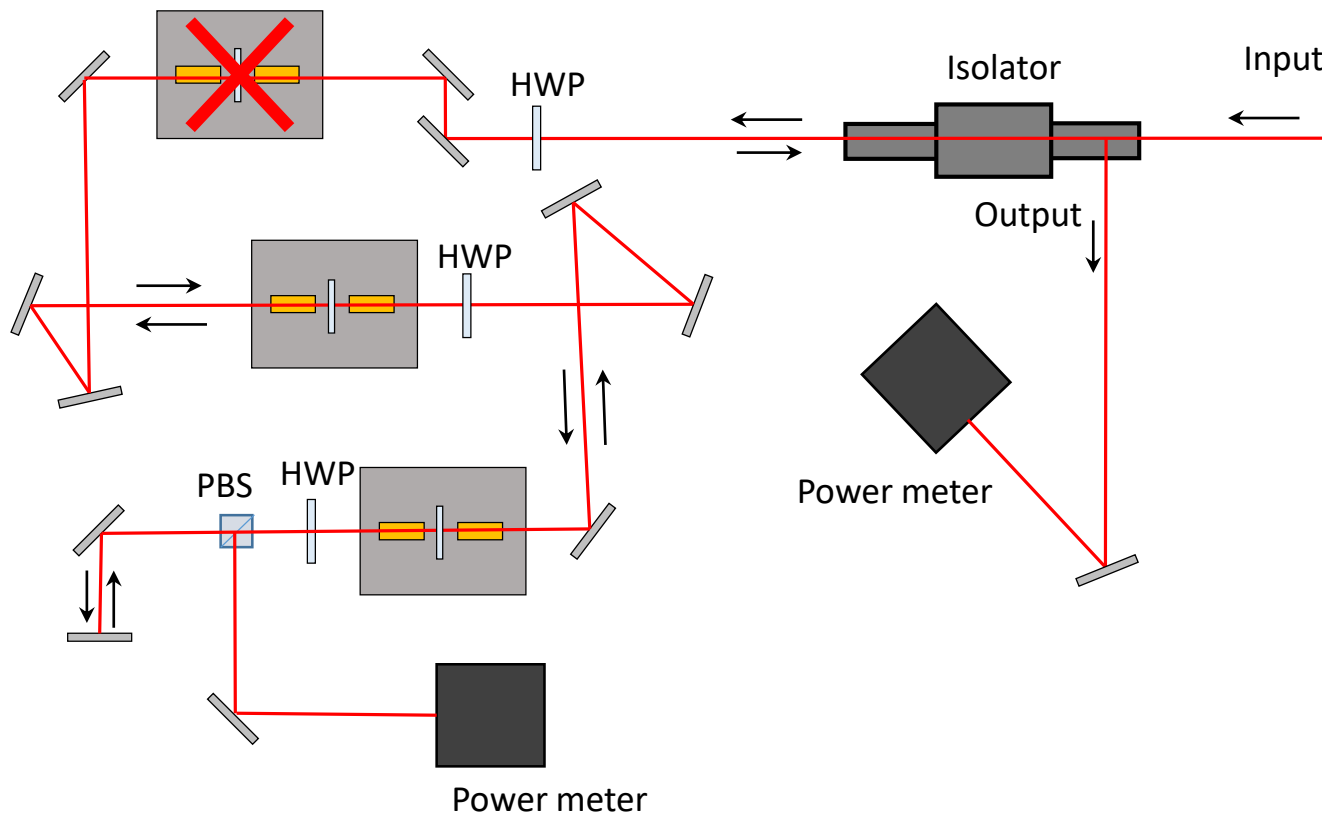
$$M^2_x=1.84, M^2_y=1.54$$



- 固体増幅によってプロファイル・ M^2 は悪化
- ストレール比も多少悪化したが、無収差とみなせる0.95に近い
- 横モードの悪化は、波面の乱れというより強度分布の乱れ

ダブルパス増幅

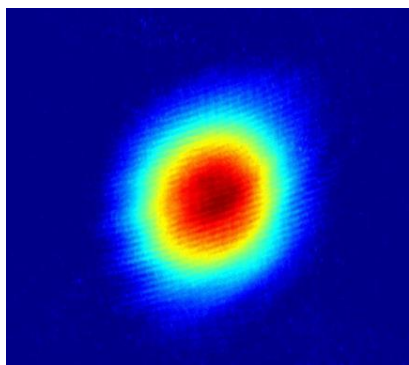
- コヒーレント加算後のビームに対し、固体増幅器を往復で使って増幅
- 入射ビーム径は1.5mm
- シングルパスとダブルパスで、出力パワー・横モード・強度雑音を比較



ダブルパス増幅の出力光

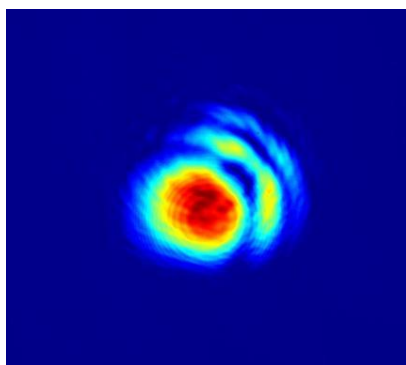
シングルパス (72W→120W)

$$M^2_X=1.15, M^2_Y=1.18$$



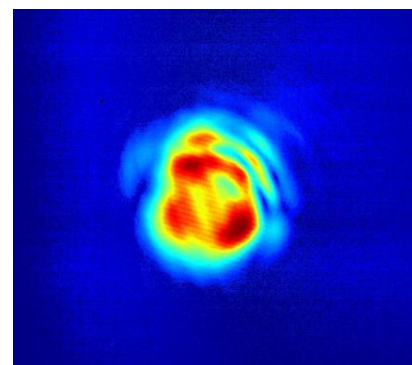
ダブルパス (20W→85W)

$$M^2_X=2.5, M^2_Y=3.4$$

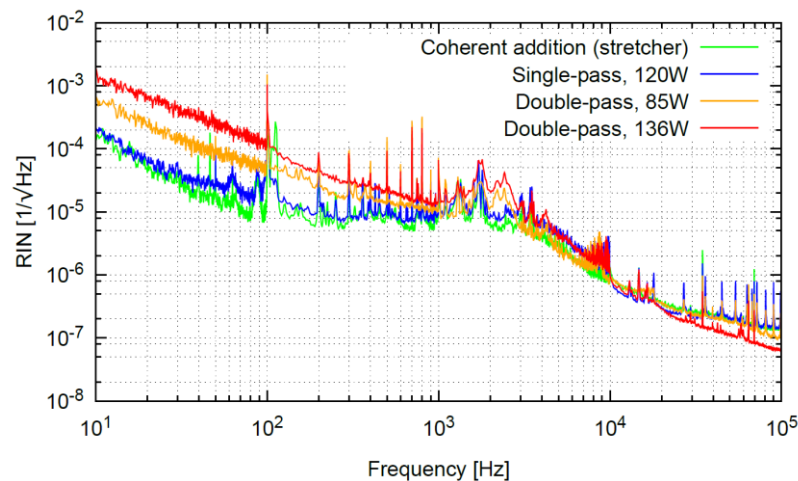


ダブルパス (72W→136W)

$$M^2_X=3.5, M^2_Y=3.0$$



強度雑音



- ダブルパス構成で16W増加
- 横モードと強度雑音は悪化
- 原因としてはモードマッチングやアライメントのずれ、利得飽和の影響が考えられる

現状のまとめ

- 故障したモジュールの修理に関しては、三菱電機に問い合わせ中
- 現在の構成では、モジュールの修理ができてても高品質の180Wの出力を取り出すことはできない。150Wが精いっぱい。
- また、三菱はモジュールの保守をしないので、長い目で見るとかなり厳しい。
- 一応、新しい増幅器を開発する科研費は出した。

今後

KAGRAの進展に合わせて、順次、出力を上げるような方針で、レーザーを納品したい。

- 第1段階 NPRO+ファイバー増幅器：40W

この場合には、ほとんど、トレーニングなしで使える。

準備はできているので、いつでも納品可。

- 第2段階 NPRO+ファイバー増幅器2台：約80W

ここまでは、確実に納品できる。ただし、運用には多少熟練が必要で、専任の研究者が必要。

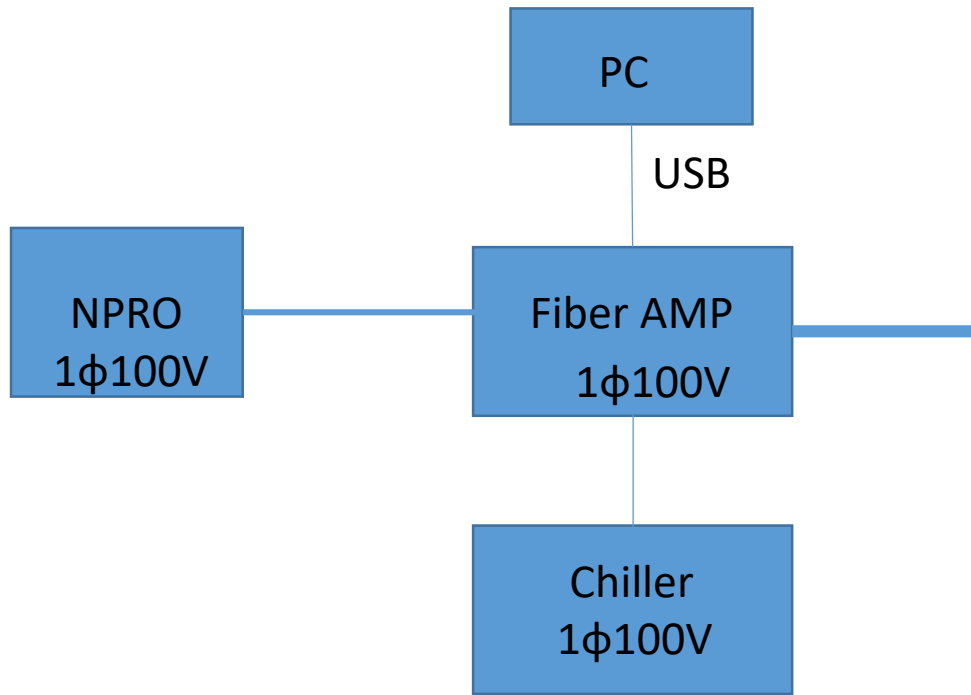
おおむね、準備が終了しているので、平成30年度なら、納品可能。しかし、平成29年度中に、整備費用を数（2から3）百万円ほしい。

- 第3段階 NPRO+ファイバー増幅器2台+固体増幅器：約150W

これも何とかかなると思うが、たぶん、保守できない。運転はかなりむづかしい。結局、注入同期とあまり変わらない。

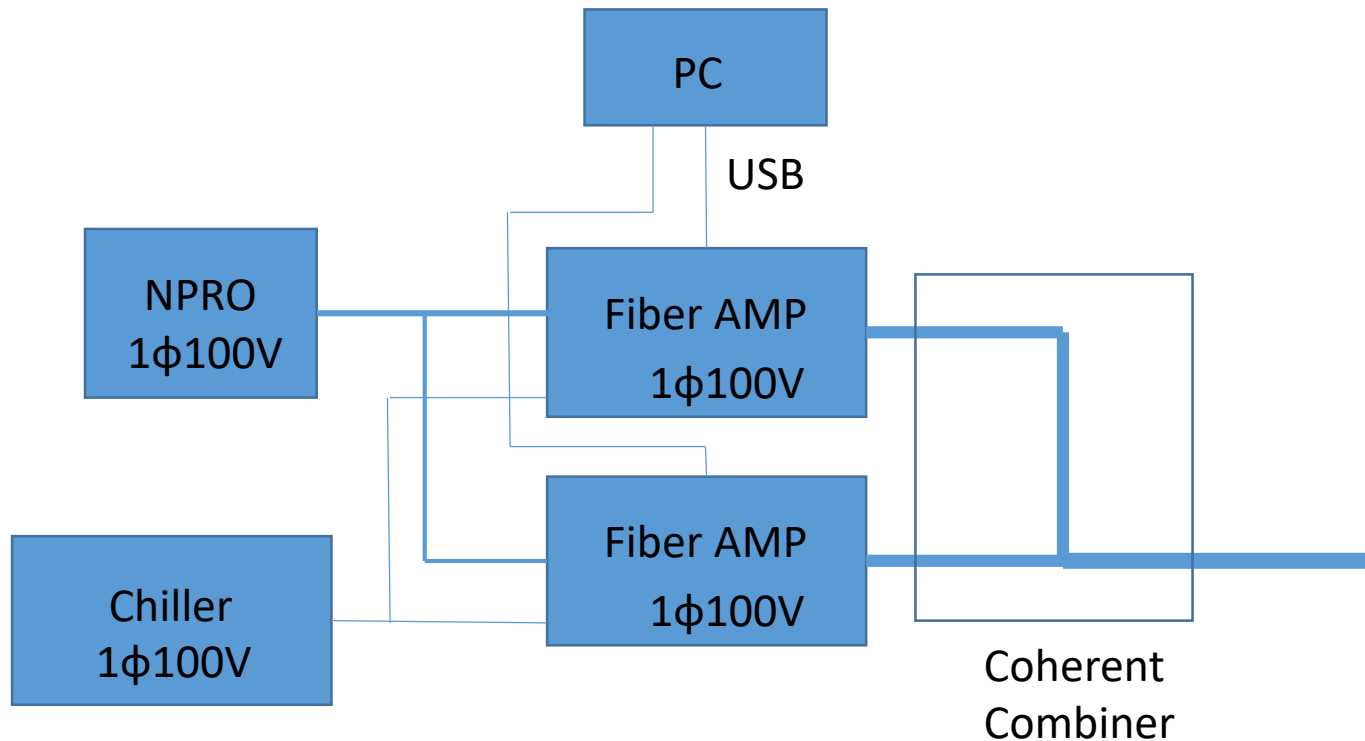
三菱の回答待ち。修理不可能という回答の場合、納品ができない。110Wレベルの装置にグレードダウンして納品。時期的には、平成32年度くらいをめどにしたい。

第1段階 NPRO+ファイバー増幅器



強度雑音はNPROより大きいが、それ以外はほとんどNPROと同等

第2段階 NPRO+ファイバー増幅器2台



強度雑音はNPROより大きいが、それ以外
はほとんどNPROと同等
Coherent Combinerを整備する必要がある。