

次世代重力波検出器に向けた 非線形光学効果を用いた 信号増幅システムの開発IX

東京工業大学

原田健一，鈴木海堂，小田部荘達，宗宮健太郎

発表内容

研究目的

原理

光ばね
光パラメトリック増幅(OPA)

実験セットアップ

実験結果

まとめ

研究目的

レーザー干渉計型重力波検出器によって重力波が検出された。

重力波検出の意義

一般相対性理論の正しさに対する新しい証拠
天文学への応用

現在の検出器

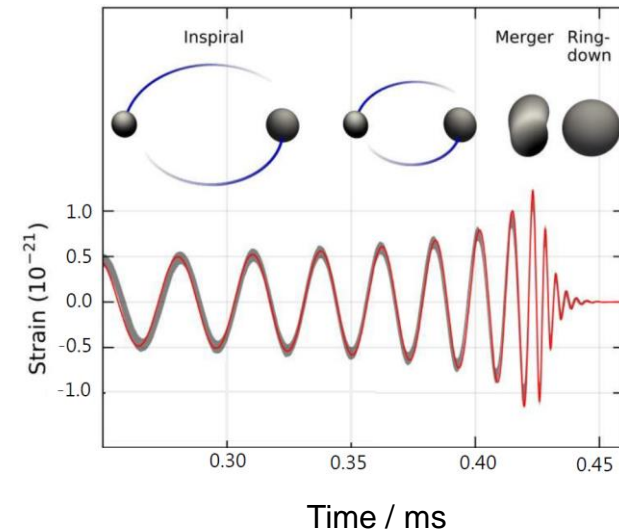
数100 Hz帯に感度のピークを持つ。
(数 kHz帯の重力波を検出することは難しい)

数 kHz帯の重力波検出感度を向上



中性子星連星合体, スーパーノバなど

宇宙における物理現象を深く理解することが可能
(重力波天文学)



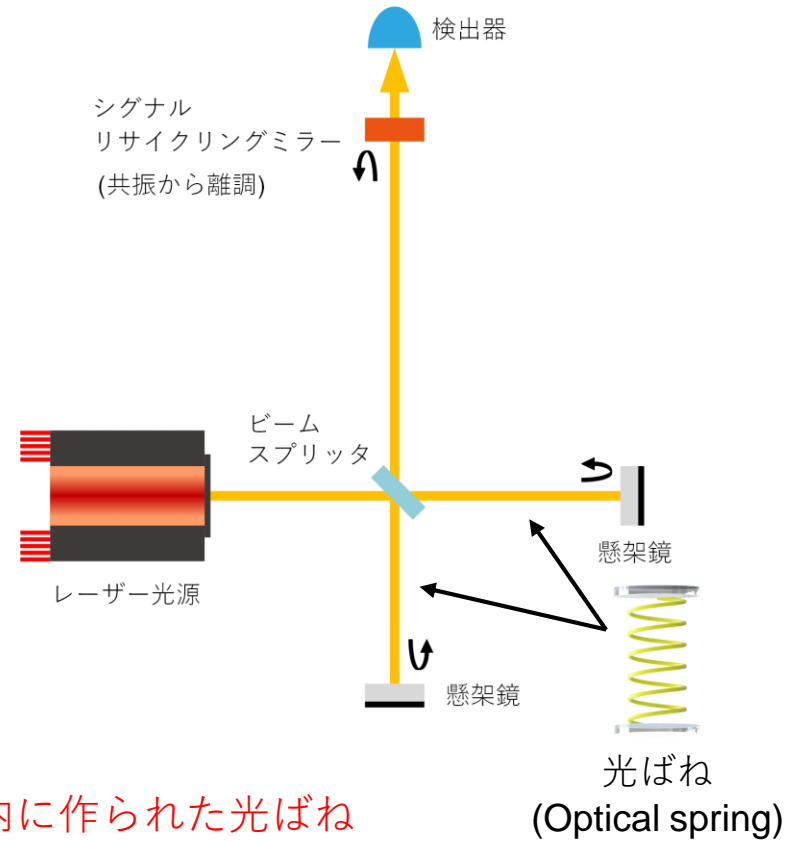
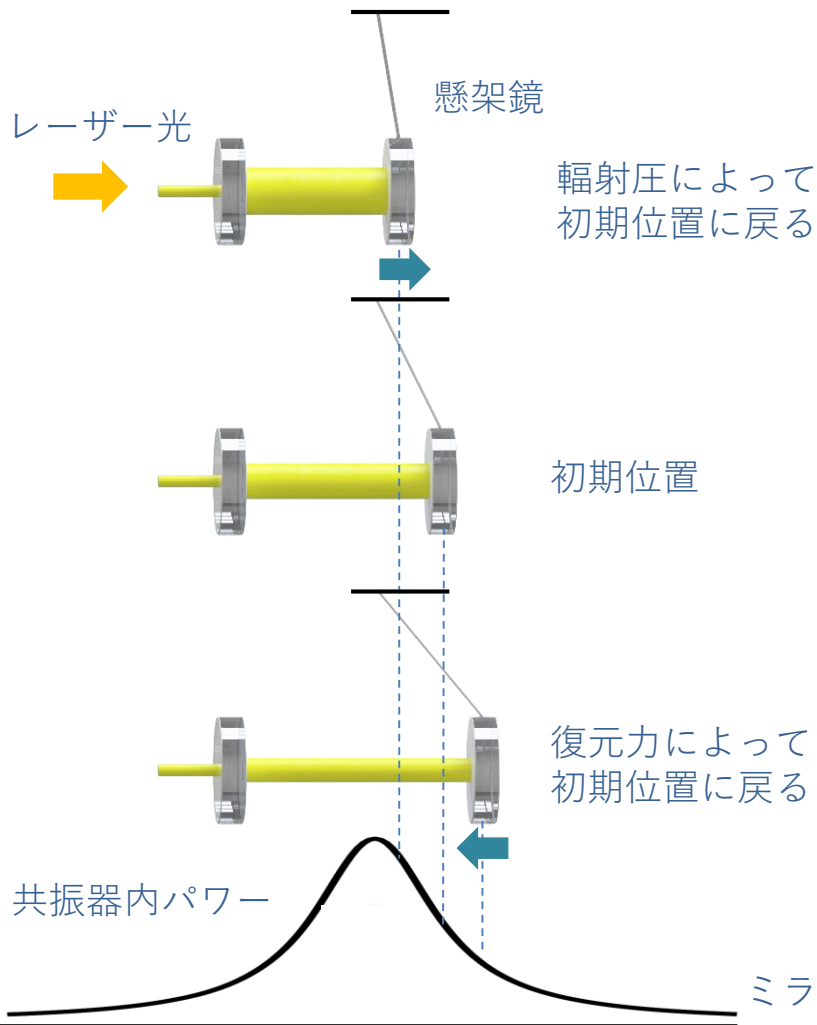
原理 -光ばね-

高周波数帯域の検出感度向上



光ばねと非線形光学効果の組合せ

光ばね(Optical spring) (オプトメカニクス効果)



干渉計内に作られた光ばね



干渉計のダイナミクスを変えられる。

輻射圧を強くすることで共振周波数を高くすることが可能

原理 -OPA-

高周波数帯域の検出感度向上 → 光ばねと非線形光学効果の組合せ

光パラメトリック増幅(OPA)

信号増幅や波長変換等に用いられる非線形光学効果

非線形結晶に強いポンプ光と微弱なシグナル光を入射

2次の非線形効果によってシグナル光が増幅



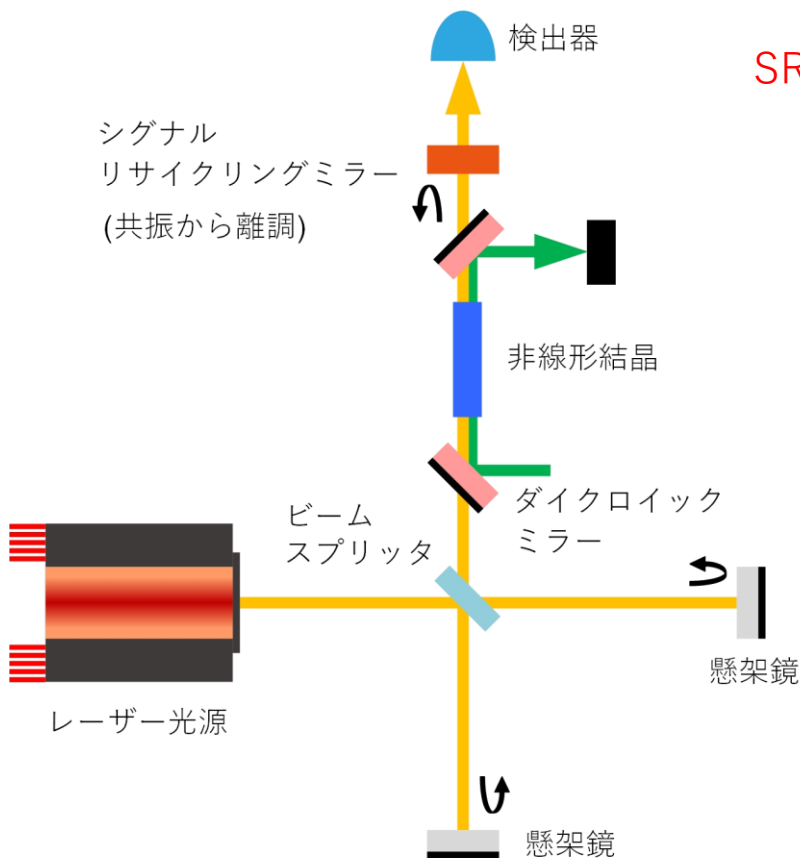
干渉計内の信号が増幅されることで

→ 光ばねが硬くなり、高い周波数での検出を可能

感度の見積り

非線形結晶が挿入されたシグナルリサイクリング干渉計(SRMI)

セットアップ図

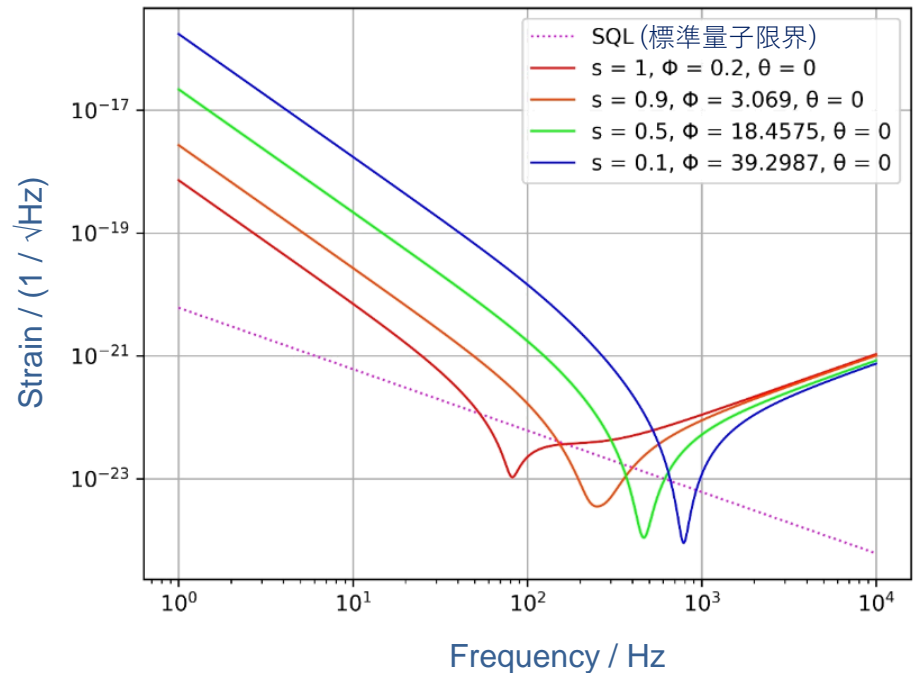


シグナルリサイクリングミラーの離調

→ 光ばねの生成

SRMIの内部に結晶を挿入

→ 信号増幅による硬い光ばね



実験の方法

伝達関数によって光バネの共振周波数の変化を測定

➡ 信号増幅の効果を確認

信号増幅効果の確認方法

2次高調波発生(SHG)共振器の製作と
高強度ポンプ光の生成



光パラメトリック増幅(OPA)の確認



シグナルリサイクリング干渉計(SRMI)とOPAの統合



伝達関数の測定

懸架鏡を用いたマイケルソン干渉計(MI)
の構築と制御



シグナルリサイクリング共振器
(SRC)の構築と制御



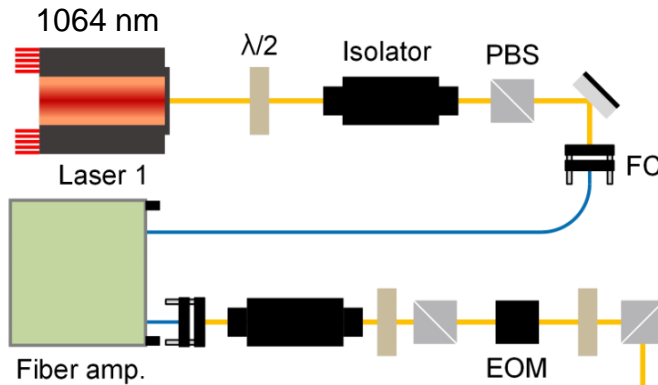
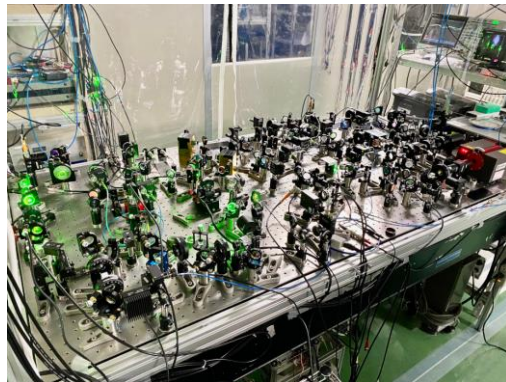
実験系

シグナルリサイクリング干渉計(SRMI)

懸架鏡で構成されたマイケルソン干渉計はPiezo1で制御

実験セットアップ図

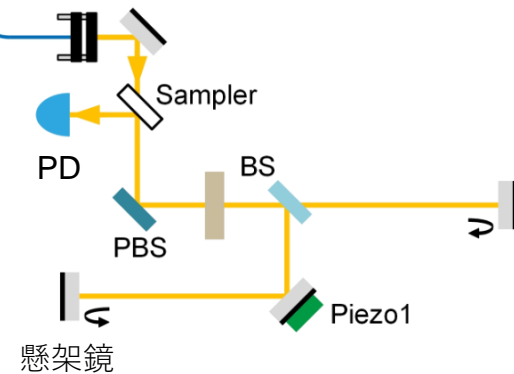
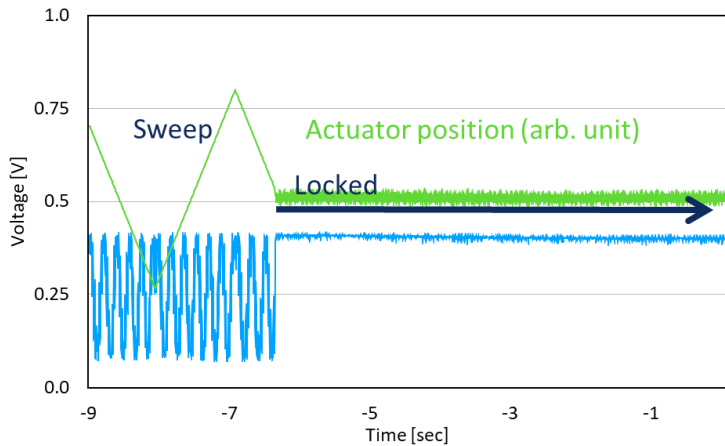
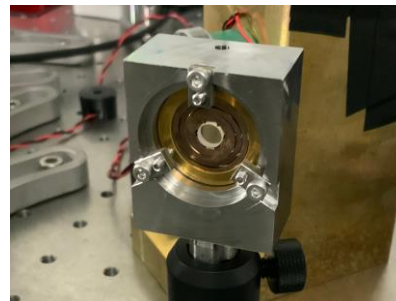
実験セットアップの写真



EOM: 電気光学変調器
FC: ファイバーカップラ
BS: ビームスプリッタ
PBS: 偏光ビームスプリッタ
PD: 光検出器

懸架鏡

ミラー直径: 6 mm
重量: 0.2 g
共振周波数: 40 Hz
懸架マウント: ベリリウム銅



実験系

シグナルリサイクリング共振器(SRC)はPiezo2で制御

実験セットアップ図

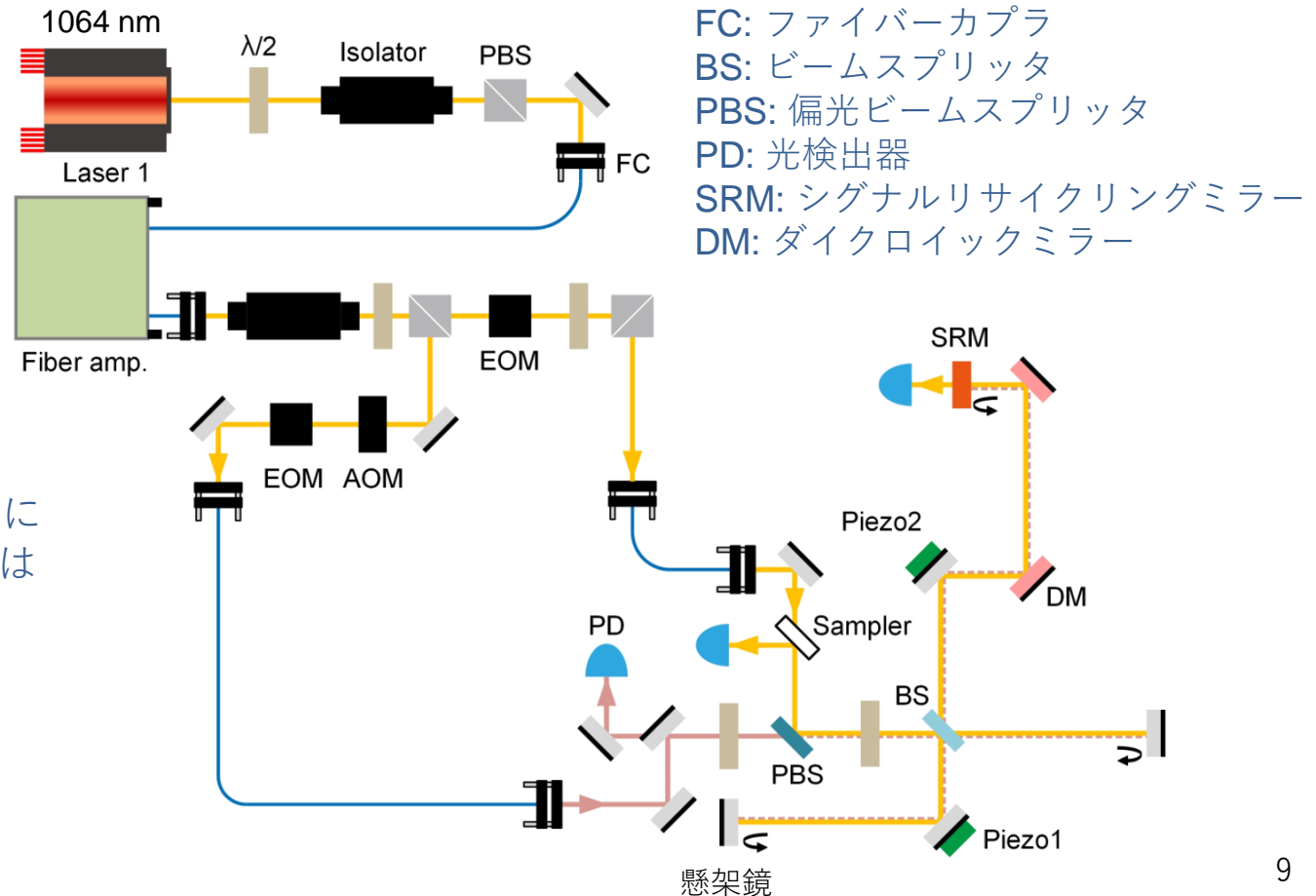
サブキャリア光

音響光学変調器(AOM)と
電気光学変調器(EOM)に
よる周波数シフト

AOM: 100 MHz

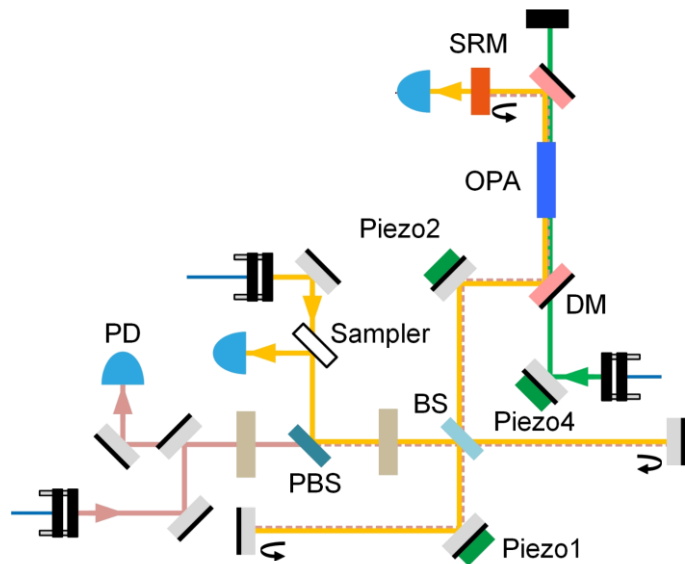
EOM: 15 MHz

MIの腕の長さの非対称性
によって、サブキャリア光は
ASポートから漏れ出る

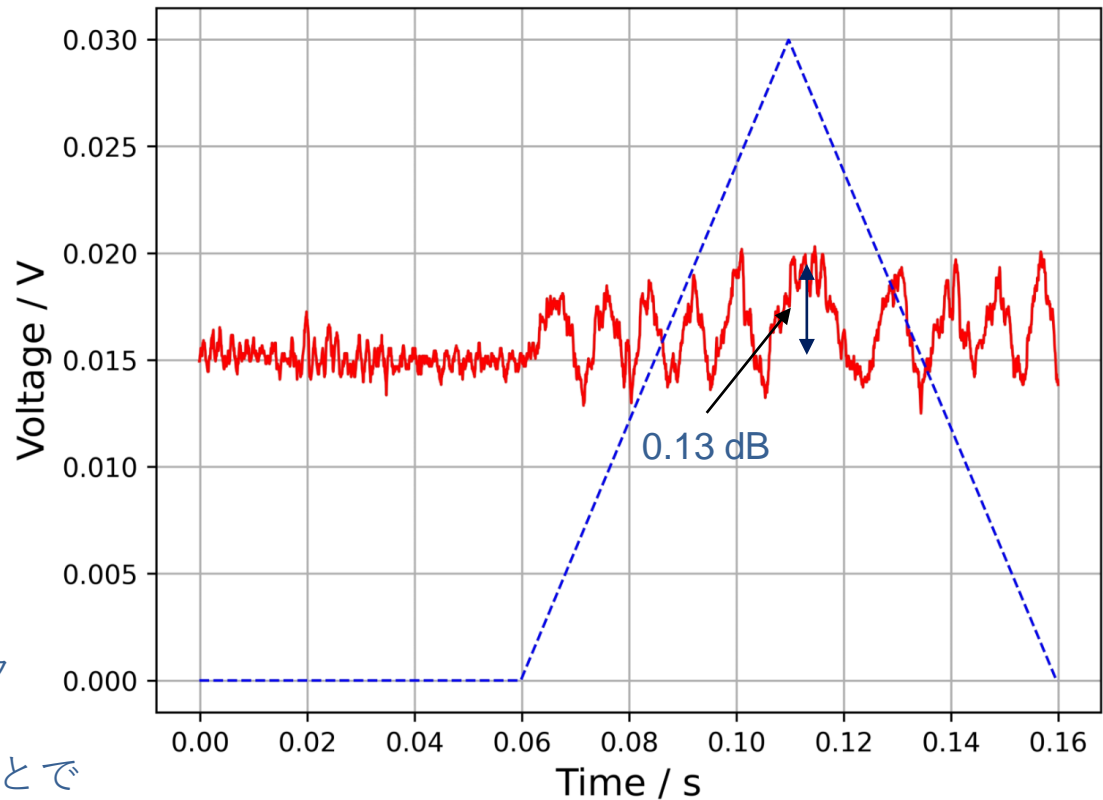


実験結果

シグナルリサイクリング共振器(SRC)中でのOPAの確認



— DC信号 - - - - - ピエゾ電圧



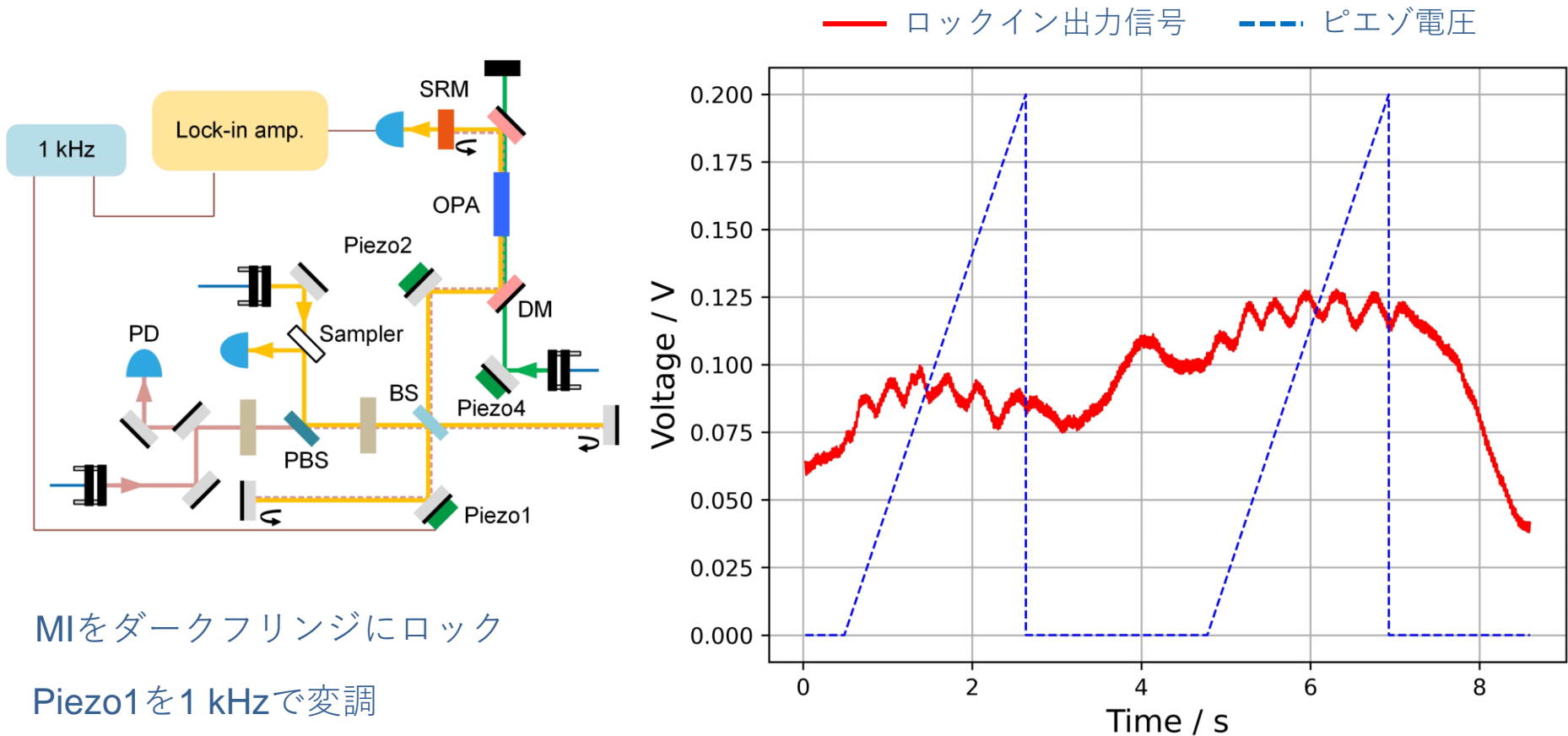
MIのASポートからキャリア光をリーク

ポンプ光との相対位相を変化させることで
増幅と減衰を確認

0.13 dBの増幅を確認

実験結果

1 kHzで変調されたキャリア光でのOPAの確認



MIをダークフリンジにロック

Piezo1を1 kHzで変調

ポンプ光との相対位相を変化させることで
OPAによる変化を観測

実験系

コヒーレントコントロール(CC)光: キャリア光とポンプ光の相対位相を安定化

CC光の周波数: $\omega + \omega_{cc}$ ($\omega_{cc} = 20$ MHz, ω : キャリア光の周波数)

CC光の偏光はキャリアと同じ

MIの腕の長さの違いによりCC光はASポートから漏れ出る

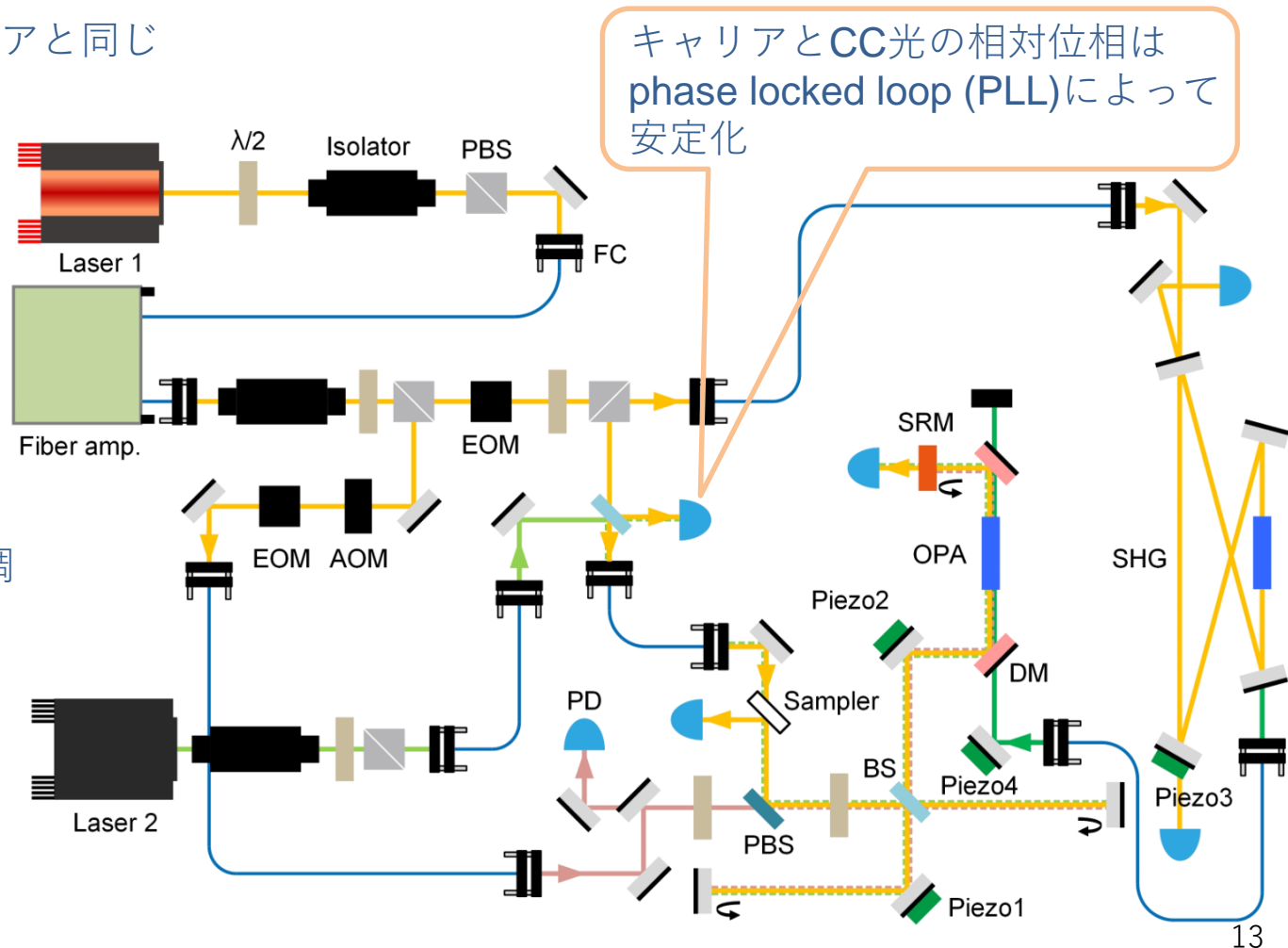
OPAによって $\omega + \omega_{cc}$ と $\omega - \omega_{cc}$ の光が発生



PDで検出後 $2 \times \omega_{cc}$ で復調

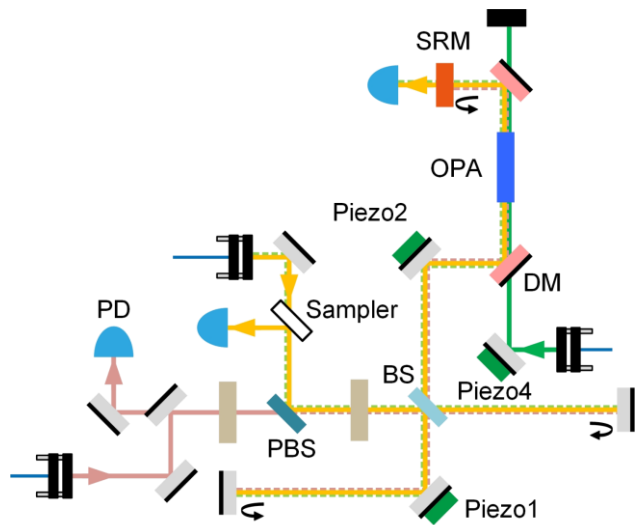
エラー信号 I_{err} を取得

$I_{err} \propto \sin \theta$ θ : 相対位相



実験結果

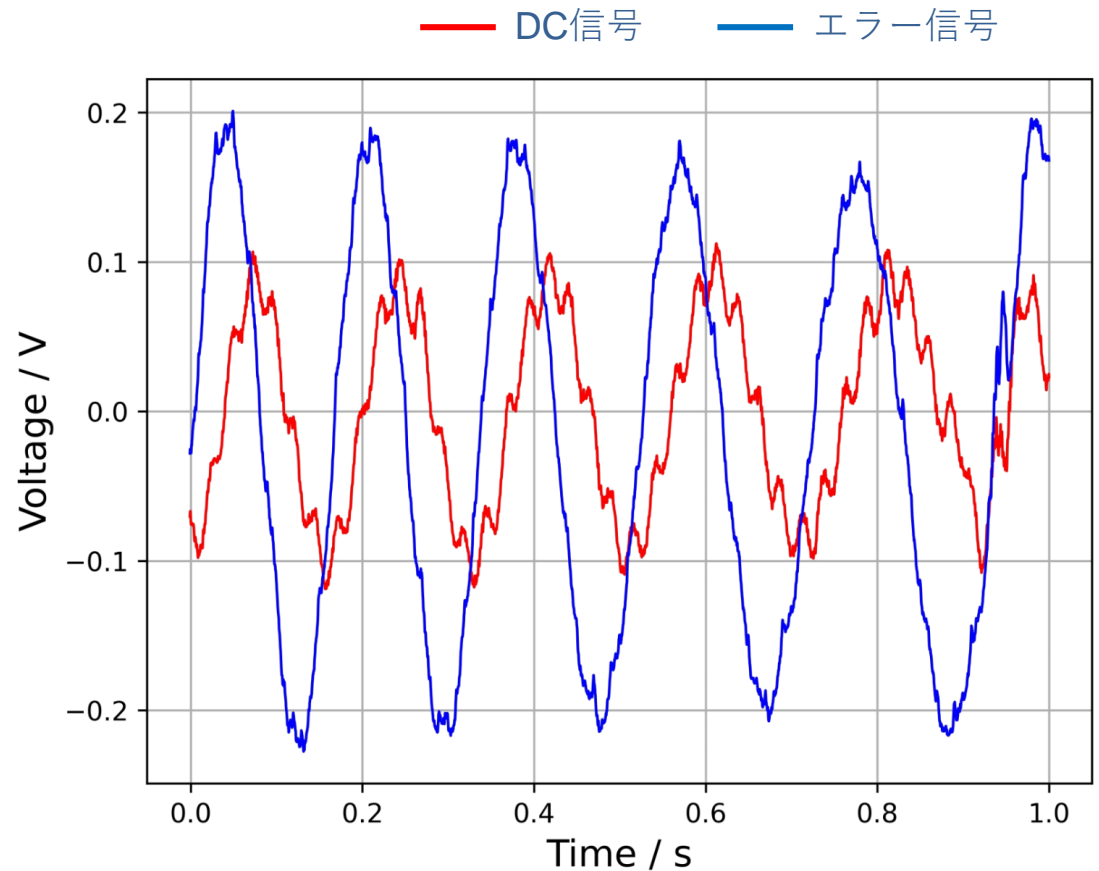
CC光によるエラー信号の取得



CC光 ($\omega + \omega_{CC}$) $\omega_{CC} = 20$ MHz

Piezo4を掃引することで信号を観測

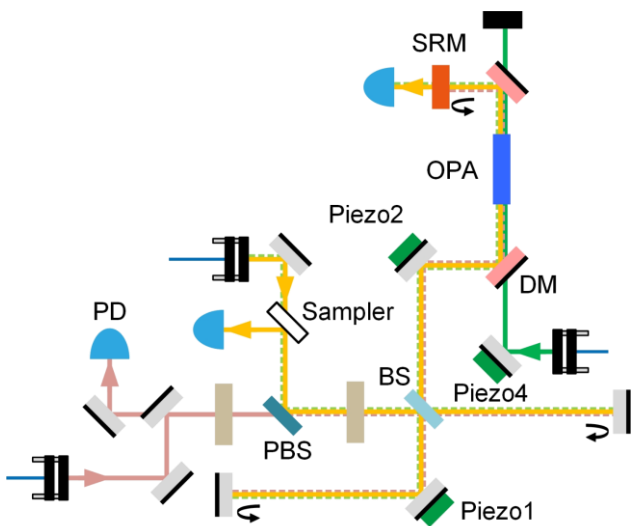
$2 \times \omega_{CC}$ (40 MHz)で復調し、
エラー信号 I_{err} を取得



DC信号のピークで線形信号の取得に成功

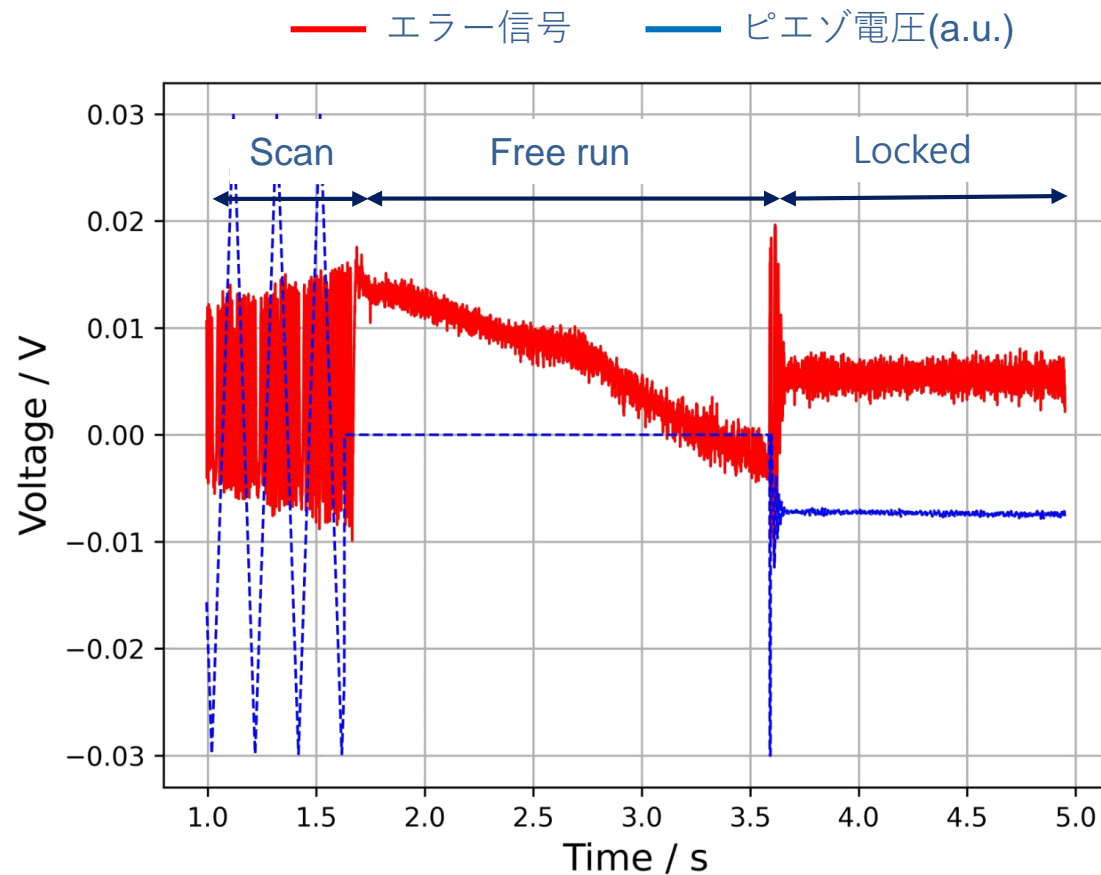
実験結果

CC光を用いてポンプ光との相対位相をロック



エラー信号によりOPAのロックを確認

キャリア光とポンプ光の相対位相の安定化に成功



まとめ

高周波数帯域の検出感度に向けた、
光ばねと非線形光学効果とを組合わせた実験系の開発

SRC中に非線形結晶を挿入して**OPA**効果の確認

CC光によるエラー信号の取得

5自由度同時制御に成功

今後の展望

光ばねの効果を伝達関数を通して観測

OPA効果によって光ばねの共振周波数の変化を確認