

波長 515nm 光源の高安定高出力化

学籍番号: 1733095 氏名: 中森 真輝

1. はじめに

2015年9月にアメリカの重力波検出器 adv.LIGO が世界で初めて重力波を検出して以来[1]、合わせて5度の検出が報告され、重力波天文学が注目を浴びている。重力波とは時空の歪みが波動として伝搬する現象であり、ブラックホールや中性子連星の合体など、巨大な質量の非対称運動に伴って発生する。その特徴として、電磁波などとは異なりあらゆる物質に対して相互作用が小さいことが挙げられる。そのため、電磁波では観測不可能な宇宙誕生初期の情報を知ることができると期待される一方、その直接検出は困難を極める。検出には重力波による空間の相対変位 $dL/L < 10^{-23}$ よりも高い感度を持つ検出器が必要である。日本では現在地上型の重力波検出器 (KAGRA) と宇宙型の重力波検出器 (DECIGO/B-DECIGO) の2種類の検出計画が進められている。我々はこのうち、宇宙型重力波検出器 (DECIGO/B-DECIGO) の光源開発を行っている。宇宙型の重力波検出計画では地上では観測困難な低周波数帯の背景重力波等の検出が期待される。検出に必要な光源には高い周波数安定度 ($1 \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}} @ 1 \text{ Hz}$) と強度安定度 ($10^{-8} \text{ } \sqrt{\text{Hz}} @ 1 \text{ Hz}$) が求められ、この要求値を達成すべくヨウ素の飽和吸収線 (515 nm) を周波数基準とした周波数安定化を行ってきた[2]。さらに、干渉計感度のショット雑音限界を低減させるため、高い安定度のみならず高出力であること (DECIGO: 10 W/B-DECIGO: 1 W) も求められる。宇宙での使用や衛星搭載も考慮に入れると、光源は小型で高効率かつ堅牢性に優れている必要がある。そこで Yb 添加ファイバーを用いた MOFPA (Master Oscillator Fiber Power Amplifier) システムを開発し、第2高調波発生の高出力化を行った。

2. Fiber MOPA システムの開発

一般に MOPA システムはシード光源の周波数特性を維持したまま増幅することが可能である。利得媒体として光ファイバーを用いている MOFPA はそれらの特徴に加え、小型高効率かつ高ビーム品質、単一偏光で増幅を行うことができる。また近年では宇宙線被曝に耐性を兼ね備えた希土類添加ファイバーも開発されており、宇宙での使用も考慮に入れると非常に有用な方法である。

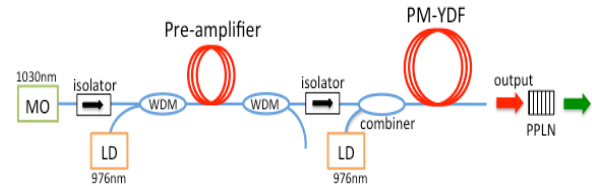


図 1. MOFPA システム

図 1 に開発した光源の系を示す。波長 1030 nm の主レーザーを 2 段の Yb 添加ファイバー増幅器で 10 W の出力を目指し、非線形光学結晶 (PP:MgOLN) によって第2高調波である 515 nm の光を 2 W 得ることを目指した。また、偏波保持ファイバーを用いれば偏光特性も安定に保つことができるため、第2高調波の出力を安定して得ることができる。本研究では全ファイバー系を偏波保持ファイバーで作成している。

2.1 MO (Master Oscillator) の開発

増幅器の作成に際して主レーザーを作成した。主レーザーは、周波数強度安定化を行えるよう単一周波数かつ狭線幅、そして強度安定度の高い光源としてフィルタ型の外部共振器型半導体レーザー (ECLD) を 2 台作成した。図 2 は作成した ECLD と fiber DFB レーザーとのビート信号のスペクトルである。2 台とも 1030 nm で単一モード発振かつビート線幅が 100 kHz 以下を達成している。また、図 3 には作成した ECLD の相対強度雑音を示している。周波数安定化の際の変調周波数帯域 200 kHz における強度雑音についても従来使用していた fiber DFB レーザーに比べて 1 桁近く低減できていることがわかった。この周波数帯域での強度雑音の低減は周波数安定化の際の周波数弁別信号の SN 比向上につながり、さらなる周波数安定度向上が期待される。現在は周波数安定化光源として ECLD を使用しており、高出力化の系では Yb fiber DFB レーザーを主レーザーとして使用している。

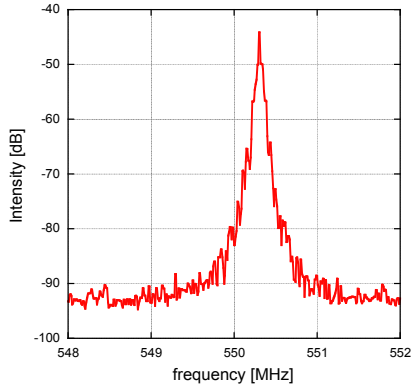


図 2. ECDL と fiber DFB のビート信号のスペクトル

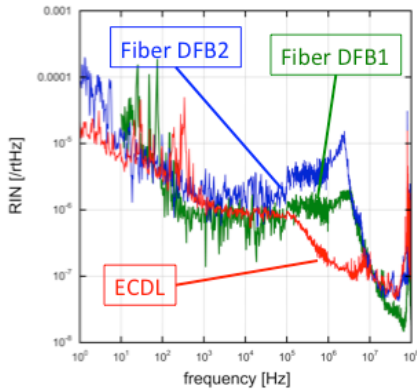


図 3. ECDL と fiber DFB の相対強度雑音

2.2 前段増幅器 (Pre-amplifier) の開発

信号の SN 比を向上させるため、2 段増幅という方法を採用している。また高い SN 比の達成を狙い、増幅手法としては前方励起の系を作成した。主レーザーからの光はアイソレータを通り WDM カプラーによって励起光と混合する。利得ファイバーはコア径 $6 \mu\text{m}$ のシングルクラッドファイバー (LIEKKI Yb300-6/125: peak core absorption 300 dB/m) でファイバー長は約 1.5 m で、励起は 976 nm の LD で行った。図 4 に前段増幅器での出力特性とスペクトルを示した。主レーザーの出力 10 mW を前段増幅器では 400 mW 程度まで増幅しており、効率は約 60% であった。増幅後のスペクトルに関しては SN 比で 50 dB を達成している。

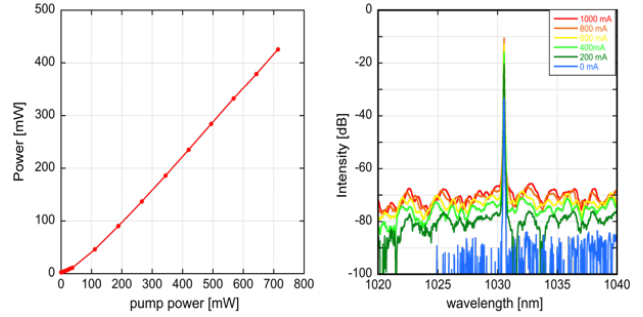


図 4. 前段増幅器の出力特性とスペクトル

2.3 後段増幅器 (Booster-amplifier) の開発

前段増幅器での 400 mW の出力を 10 W まで増幅する 2 段目の増幅器を製作した。高出力動作のため Yb 添加ダブルクラッドファイバーを用いてクラッド励起を行っている。狭線幅なレーザーの高出力化に伴い、非線形効果である誘導ブリルアン散乱 (Stimulated Brillouin Scattering) により出力が制限される可能性があった。利得ファイバーのコア径は $10 \mu\text{m}$ にし、実効ファイバー長を短くすることで SBS の発生を防ぐことを考えた[2]。以下に増幅の出力とスペクトルを以下に示す。

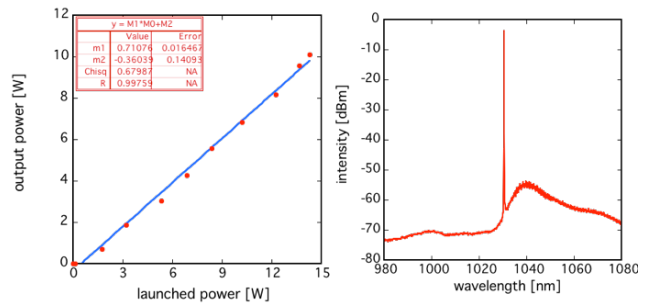


図 5. 後段増幅器の出力特性とスペクトル

出力は約 14 W で励起した際に最大 10.1 W が得られ、スロープ効率も 71.1% となった。出力の線形性から SBS の影響を受けることなく増幅できていることがわかった。また、出力の時間的安定性に関しては約 20 分の測定に関して出力変動 2% 以内と比較的安定した動作特性を得ることができた。スペクトルを見ても SN 比で 40 dB を達成できている。ここで、SBS の閾値上昇のためコア径を大きくした結果、空間モードが多モード化する現象が見られたが、ファイバーを曲げることで高次モードに損失を与え単一横モード化を図った[3]。

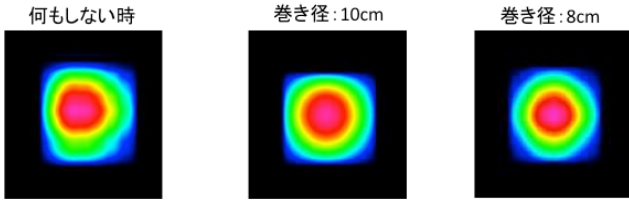


図 6. ファイバーの曲げによるモード整形

利得ファイバーの曲げ径を変化させた時の出射モードの様子を上図 6 に示した。ファイバーの巻径を小さくしていくにつれて、ビームのプロファイルが綺麗になっていることがわかる。

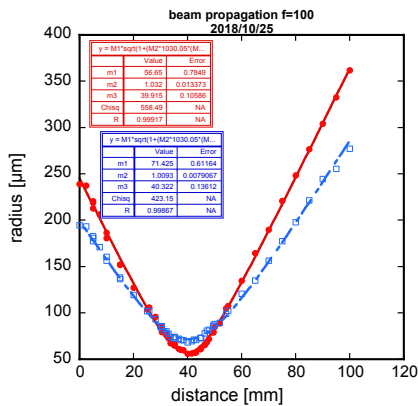


図 7. モード整形後のビーム品質

巻き半径 8 cm の時のビームプロファイルを図 7 に示す。ビーム品質を表す M^2 の値は x 軸と y 軸で 1.01 と 1.03 となり、非常に高いビーム品質を得ることができた。また、ファイバーを曲げたことによる増幅特性の劣化は見られず、損失なく高次の伝搬モードが抑圧できていることが確認できた。増幅後の相対強度雑音を図 8 に示す。強度雑音は低周波帯域では励起光源の強度雑音によって支配的になり劣化が見られた。

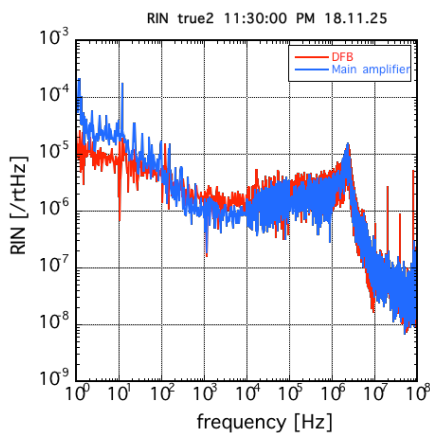


図 8. 増幅後の相対強度雑音スペクトル

しかしながら、シード光として使用している fiber DFB レーザー自体の強度雑音はかなり大きく、増幅に

よる顕著な雑音増加は見られない。増幅による雑音の寄与を調べるためにはより低い雑音レベルのシード光源が必要である。

3. 515 nm の高出力化

3.1 第 2 高調波発生

ファイバー-MOPA を用いて高出力化した 1030 nm の光を基本光に PP:MgOLN 結晶を用いて 515 nm の高出力化を行った。実験系をシンプルにするため第 2 高調波発生はシングルパス構造で行っている。結晶は結晶長 20 mm のものを使用している。

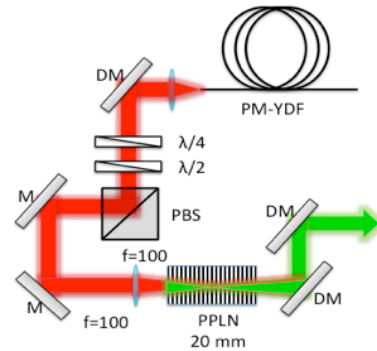


図 9 第 2 高調波発生の実験系

ビーム直径 $50 \mu\text{m}$ で集光した時の結果を図 5 に示した。図中の橙線が実測の出力であり、濃い青線で描かれているのが実測の変換効率である。図中の赤線と青線はそれぞれ、変換効率を $3\%/W$ とした際の出力と効率の理論線である。理論的にはこれらのスペックに近づくはずである。

現在基本光出力 8 W に対して第 2 高調波出力 1.2 W が得られており、この時の効率は 15% であった。また、パワーで規格化した効率は $1.9\%/W$ であった。

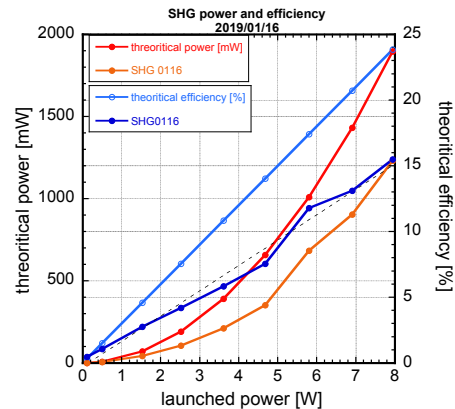


図 5. 515 nm の出力と変換効率

目標値である 2 W には及んでいないが、B-DECIGO の出力要求値は達成している。効率としては先行研究での報告[4]ほどの効率は得られていないものの、ビーム

径の縮小により、さらなる高効率化の余地がある。第2高調波発生後の強度雑音は若干の劣化はあるものの、基本波の強度雑音と概ね変わらないことがわかった。

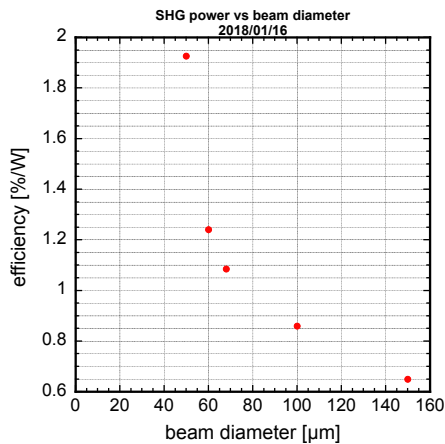


図 10. 最小ビーム径と変換効率の関係

図 10 に PPLN 結晶に入射させる際の最小ビーム径とパワーで規格化した変換効率の関係を示した。最小ビーム径を小さくするに従って、変換効率が2次関数的に増えていることがわかる。これは一般的な変換効率の関係を非常によく表しており、この関係が飽和していないことから、ビーム径の縮小によりさらなる高効率化が可能であると考えられる。第2高調波発生において雑音の増加が懸念される。非線形光学結晶の偏光依存性や温度依存性によって強度が変化してしまうためである。第2高調波発生による雑音増加を調べるために強度雑音を測定した。

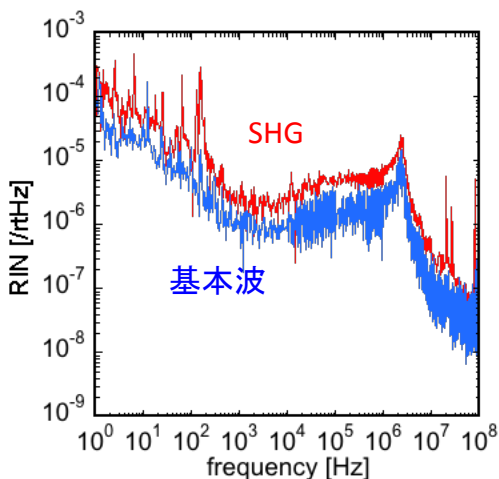


図 11. 第2高調波の相対強度雑音スペクトル

上図より第2高調波発生により、強度雑音が10 dB程度劣化していることがわかった。この原因としては、第2高調波強度が基本波強度の2乗に比例すること等が考えられるが、詳細な原因に関してはわかっていない。一部の論文によると、第2高調波発生によって同

程度強度雑音が劣化することが確認されたという報告もあるが[5]、詳しい原因に関しては言及されていない。理論的考察からは第2高調波発生により強度雑音が2倍(パワー比で考えると6 dB)劣化することが示せる。基本波のパワーを

$$P_{\omega} + \Delta P_{\omega}$$

とすると基本波の相対強度雑音(RIN: Relative Intensity Noise)は以下のように表せる。

$$\text{RIN} = \frac{\Delta P_{\omega}}{P_{\omega}}$$

第2高調波は基本波の出力の2乗に比例するため、そのパワーは

$$P_{2\omega} \propto (P_{\omega} + \Delta P_{\omega})^2 \\ = P_{\omega}^2 + \Delta P_{\omega}^2 + 2P_{\omega}\Delta P_{\omega}$$

となる。前の2項は第2高調波のDC成分であり、第3項がAC成分である。微小項を無視すると相対強度雑音は

$$\text{RIN} = \frac{\Delta P_{2\omega}}{P_{2\omega}} \\ = \frac{2P_{\omega}\Delta P_{\omega}}{P_{\omega}^2} \\ = \frac{2\Delta P_{\omega}}{P_{\omega}}$$

となり、基本波の相対強度雑音の2倍になることがわかる。重力波用の光源としての強度安定度は $10^{-8}/\sqrt{\text{Hz}}$ が必要であり、強度安定化は必須である。実際の測定と理論から第2高調波の発生過程での強度雑音増加があるため、基本波ではなく第2高調波自体の強度を安定化する必要があることが考えられる。

3.2 第2高調波の強度安定化

相対強度雑音の測定より、第2高調波自体の安定化の必要性が出てきたため、その強度安定化を行った。制御回路作製のために系の伝達関数を測定した。

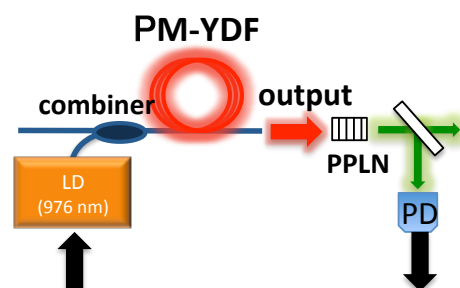


図 12 第2高調波の伝達関数測定系

図 12 に伝達関数の測定系を示す。実際はメインアンプの励起用 LD の電流源から PD までの伝達関数である。信号取得時には PD において受光されるパワーが一定になるようにアッテネートしている。以下にメインアンプの電流源の電流値を変えて取得した伝達関数を示した。

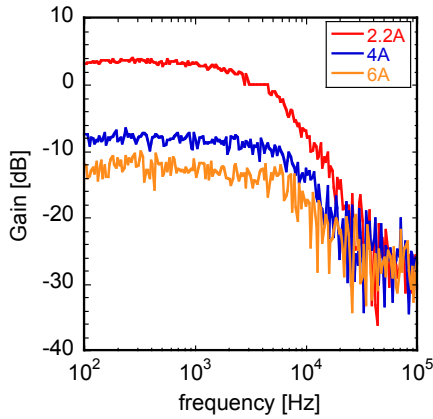


図 13 第 2 高調波の伝達関数 (利得)

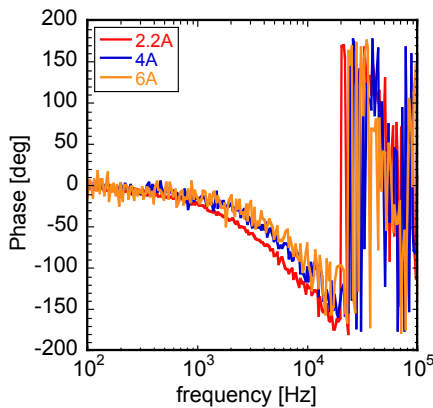


図 14 第 2 高調波の伝達関数 (位相)

この結果からメインアンプの出力に応じて伝達特性が変化していることがわかる。これに関しては以下のように考察することができる。前述の通り第 2 高調波出力は基本波出力の 2 乗に比例するため図 15 に示す 2 次関数モデルを考える。伝達関数の利得はこの関数における傾きに相当する。一般的に伝達関数は線形シフト不変システムにおいて適応されるため伝達関数は不変であるが、非線形過程における伝達関数は様相が異なる。

$$y = x^2$$

なるモデルを考えると図中の x_0, x_1 における利得は各点での微分係数になるため $2x_0, 2x_1$ となる。これは 2 次の非線形過程を含むシステムにおける伝達関数は一定でないことがわかる。今回の測定では受光パワーを規格化しているため、それぞれの伝達関数は

$$\frac{x_0}{y_0} = \frac{2x_0}{x_0^2} = \frac{2}{x_0}, \quad \frac{x_1}{y_1} = \frac{2x_1}{x_1^2} = \frac{2}{x_1}$$

と表すことができる。このようにパワーが高くなるに従って伝達関数の利得が低くなることが示された。

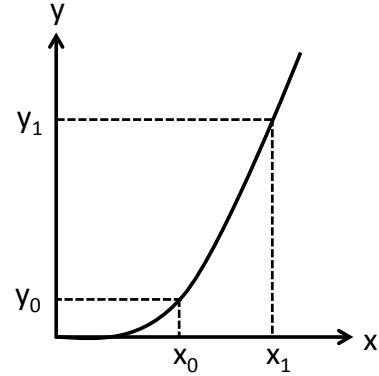


図 15 第 2 高調波出力の 2 次関数モデル

また、強度安定化する際は特定の出力を維持するように制御を行うため、伝達関数の違いはさほど問題にならない。このうち 4A で動作させた時の出力に関して強度安定化を行った。以下に安定化に用いた制御回路を示す。

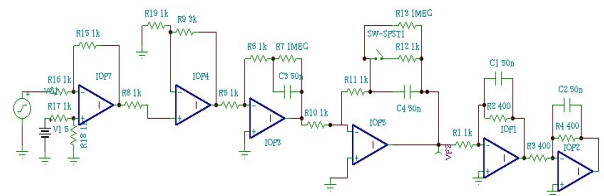


図 16 強度安定化の制御回路

安定化した時の相対強度雑音スペクトルを以下に示す。

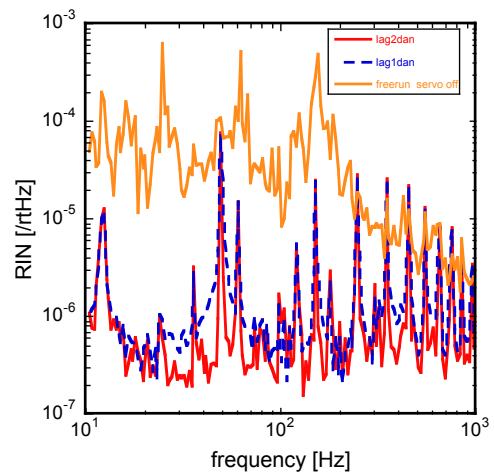


図 17 強度安定化後の相対強度雑音スペクトル

図中のオレンジ線は無制御時、青線と赤線は制御時の in-loop の雑音スペクトルを表す。100 Hz では $10^{-7} / \sqrt{\text{Hz}}$ のオーダーまで安定化できているが、10 Hz では $10^{-6} / \sqrt{\text{Hz}}$ 程度に制限されてしまっている。目標の安定度には及んでいないが混入雑音の低減と制御回路の最適化によりさらなる安定度向上が見込まれる。

4. まとめと今後の展望

強度が安定で且つ高出力な 515nm の光源の開発を行った。目標出力は B-DECIGO の要求値を上回る 2W とした。515 nm の光源を高出力に得るためには波長変換が必要であるため、基本光である 1030nm の増幅系を開発した。周波数安定度を維持した増幅をするためファイバーを用いた MOPA (Master Oscillator Power Amplifier) システムを採択している。MOPA は一般的に周波数特性の劣化なく増幅が可能である。さらに光ファイバーを利得媒質として用いることで、高効率且つビーム品質の良い光源が得られる。開発した増幅系によって 1030nm で 10.1W の出力を達成した。効率は約 70% であり、ビーム品質を表す M^2 の値は 1.1 未満となった。全てのファイバーを偏波保持ファイバーにしたことによって、偏波消光比は 20dB 以上を達成している。出力も約 20 分の測定に対して 2% 以内の変動しか見られなかった。第 2 高調波発生によって 515 nm を発生させた。現在出力は基本光 8W に対して 1.2 W が得られており、目標値である 2W には

及んでいないが、B-DECIGO の出力要求値は達成している。効率は 1.9%/W であり今後さらなる高効率化の余地が残っている。第 2 高調波発生による雑音の寄与を調べるために相対強度雑音スペクトルの測定を行ったところ、10 dB 程度雑音が増加することがわかった。また、高調波の発生過程において雑音が増加することを理論的に示すことができた。強度安定化に関しては伝達関数の測定を通して非線形過程の伝達関数が一定でないことを理論と測定によって明らかにした。強度安定化を行った際には 2 桁程度の雑音抑制に成功しているが、10 Hz で $10^{-6} / \sqrt{\text{Hz}}$ までしか達成できていないので、さらなる制御回路の最適化が必要である。

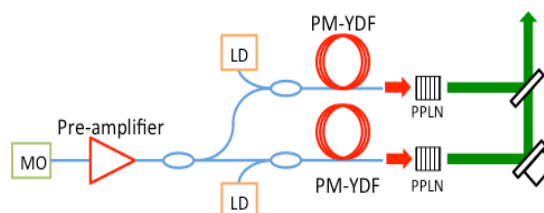


図 6. SHG コヒーレント加算

参考文献

- [1] B.P.Abbot et al. , PRL 116, 241103, 2016
- [2] A.Suemasa et.al. , CEAS Space J 9 (2017) 485-491
- [3] JP. Koplrow et.al. , Opt. Lett. 25 7 (2000)
- [4] 三浦純一 平成 1 8 年度電気通信大学修士論文
- [5] J. Qian, et al. Appl. Phys. 57. 29 (2018):8733-