

第二高調波による分割パルス増幅の 位相検出法の検討

白川晃研究室 三宅晴之

1. 序論

光ファイバーはシリカガラスでできた光の導波路であり、 $10\mu\text{m}$ ほどのコア径のファイバーに光を閉じ込めて伝搬させることができ、ファイバー自体が増幅媒質にもなるので、長い相互作用長により高利得、高効率という特徴をもつ。しかしファイバー内を伝搬する光のパワーには限界があって、高ピークパワーの光が伝搬してしまうとファイバーが損傷するおそれがある。また、非線形光学効果である誘導ラマン散乱、誘導ブリルアン散乱などによって光信号の劣化という問題もでてしまう。

これらの問題を回避する手法の一つとしてチャープパルス増幅(CPA) [1]があげられる。チャープパルス増幅は、まずパルスをチャープさせて伸長させ、ピークパワーを抑えた上で増幅させる。そして最初のとくと反対にチャープさせてパルスを圧縮させることによって、ファイバーの非線形光学効果を抑えて高ピークパワーのパルスを得ることができるというものである。より高出力を目指すには、よりパルス幅の短いピコ秒のパルスを用いる必要がある。

そこで、別の方法として分割パルス増幅(DPA) [2]がある。分割パルス増幅は、1つのパルスを複数のパルスに分割し、それぞれを増幅した後に1つに結合するという手法である、しかし先行研究より、Hansch-Couillaud(HC)法では、2分割

では結合をロックさせることができたが4分割ではできないことがわかった [3]。

そこでPBSを通してフィードバック光を観測するのではなく、BBO結晶に通して第二高調波を観測することによってこの問題が解決するという手法を考案した。本研究では第二高調波による分割パルス増幅の位相検出を目的して行った。

2. 原理

2.1. 分割パルス増幅の基本原則

分割パルス増幅の基本原則を図1に示す。1つのパルスはまず分割器で複数のパルスに分割する。分割した後、それぞれを非線形光学効果の影響が出ない程度まで増幅し、再び結合する。こうすることによってパルスを分割しない場合よりも高出力なパルスを得ることができる。

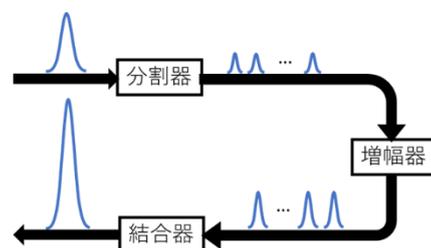


図1 分割パルス増幅の基本原則

2.2. 結合のロックのための位相検出

先行研究では Hänsch-Couillaud(HC)法で結合のロックを行ったが、この方法では4分割での結合のロックを行えないことがわかった [3].

Hänsch-Couillaud(HC)法での4分割パルス増幅の実験配置図を図2にのせる.

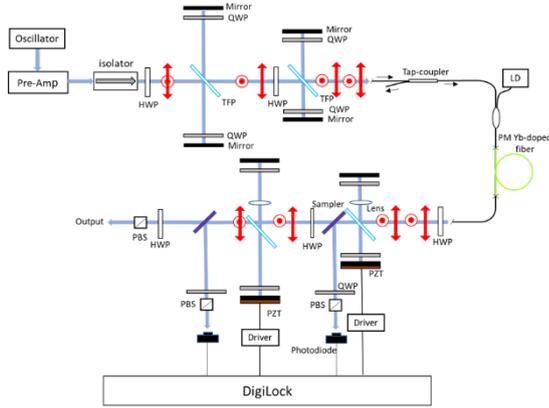


図2 Hänsch-Couillaud(HC)法での分割パルス増幅器の配置図(4分割)

piezo素子にはチタン酸ジルコン酸鉛(PZT)セラミックスを使っており、それを DigiLock につなぎ、PID 制御で結合効率が最大となるところで遅延路のロックを行う。結合後の光はビームサンプラーで出力光とフィードバック光にわけられ、フィードバック光がフォトダイオードで検知される。フォトダイオード前の QWP によって、出力光とフィードバック光との間には $\pi/2$ の位相差が生じる。遅延路のロックは、フィードバック光の信号の最大値の $1/2$ になる位置でロックを行う。しかし4分割では遅延路を動かしても信号の変化が起こらず、常に一定の強度がフォトダイオードで検知される。4分割での結合の様子を図3に示す。

その前にまず x 軸と波長板の遅軸との偏角 θ でおかれた波長板のジョーンズ行列を求める。半波長板のジョーンズ行列を $W_{HWP}(\theta)$, $1/4$ 波長板のジョーンズ行列を

$W_{QWP}(\theta)$ とすると、

$$W_{HWP}(\theta) = \begin{pmatrix} \cos 2\theta & \sin 2\theta \\ \sin 2\theta & -\cos 2\theta \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

$$W_{QWP}(\theta) = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 - i(1 - 2 \sin^2 \theta) & -i \sin 2\theta \\ -i \sin 2\theta & 1 + i(1 - 2 \sin^2 \theta) \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

と表せる。

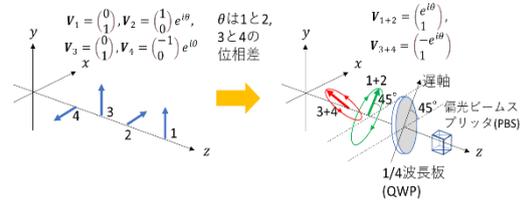


図3 4分割パルスの結合の模式図

これを偏角 45° でおかれた $1/4$ 波長板に通し、その後 PBS に通すとフィードバック光は、

$$V'_{1+2} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 - i \left(1 - 2 \sin^2 \frac{1}{4} \pi\right) & -i \sin \frac{1}{2} \pi \\ -\sin \frac{1}{2} \pi & 1 + i \left(1 - 2 \sin^2 \frac{1}{4} \pi\right) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{i\theta} \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} e^{i\theta} - i \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.3)$$

V'_{3+4}

$$= \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 - i \left(1 - 2 \sin^2 \frac{1}{4} \pi\right) & -i \sin \frac{1}{2} \pi \\ -\sin \frac{1}{2} \pi & 1 + i \left(1 - 2 \sin^2 \frac{1}{4} \pi\right) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -e^{i\theta} \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} -e^{i\theta} - i \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.4)$$

ここで強度 I を以下のように定義する。

$$I_{1+2} = |V'_{1+2}|^2 = -\sin \theta + 1 \quad (2.5)$$

$$I_{3+4} = |V'_{3+4}|^2 = \sin \theta + 1 \quad (2.6)$$

$$I = I_{1+2} + I_{3+4} \quad (2.7)$$

すると、このように一定の強度となってしまふ。

そこで第二高調波発生(SHG)を利用すると、SHG 光の強度は基本波の強度の2乗に比例するのでこの問題を回避することができる。

$$I^{2\omega} \propto I_{1+2}^2 + I_{3+4}^2 = 3 - \cos 2\theta \quad (2.8)$$

これにより、フォトダイオードが検知する強度が位相差によって変化するので適切な遅延路長でのロックが可能になる。

3. 実験と結果

3.1. HC 法による位相差検出

第二高調波による位相検出を行う前にまず従来の HC 法で位相検出を 2 分割 DPA で行った. その実験配置図を図 4 に示す.

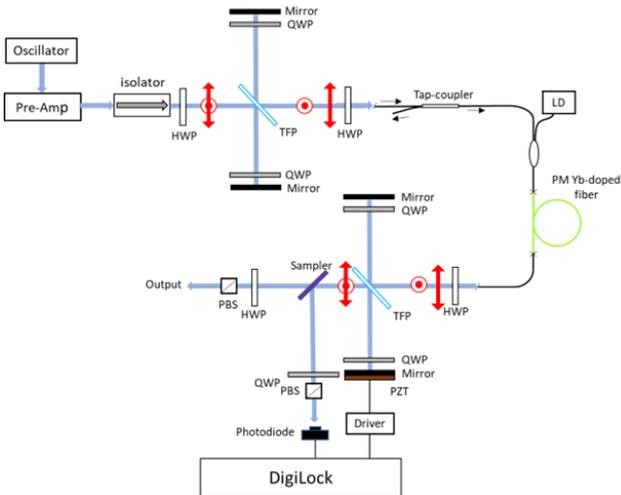


図 4 HC 法での分割パルス増幅器の配置図(2 分割)

パルス発振には, 全正常分散型モード同期発振器を用いた. 励起光は中心波長 976 nm のレーザーダイオードを用いた. Yb 添加ファイバーは 0.5 m, コア径は 6 μm のシングルモードファイバー, それ以外の部分は合計長さ 9 m のシングルモードファイバーを用いた. 発振したパルス間隔はおよそ 50 ns, 繰り返し周波数は 20 MHz であった. モード同期時にはおよそ 40 ps のパルスが生成され, 平均パワーは 40mW であった. スペクトルは中心波長が 1030 nm でスペクトル幅はおよそ 10 nm であった.

分割器の遅延路の長さは約 40.7 cm であり, 合計で約 81.4 cm の遅延が生じる. TFP (薄膜偏光子) によって P 偏光と S 偏光にわけられ, S 偏光は遅延路を通る. メインアンプ後の分割したパルス波形を図 5 に示す. メインアンプには Yb 添加 PANDA ファイバーを用い, 長さは 1m, コア径

は 10 μm のものを用いた.

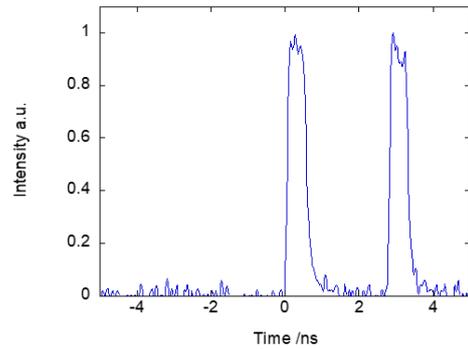


図 5 2 分割パルス波形

分割した 2 つの位相差を検出するために, ピエゾ素子に正弦波の電圧をかけ, それに応答したひずみを遅延路に生じさせて, 1st パルスと 2nd パルスの時間的干渉縞を観測した. ピエゾ素子に与えた電圧波形を図 6 に, メインアンプ 1.2 W 励起での時間的干渉縞を図 7 に示す.

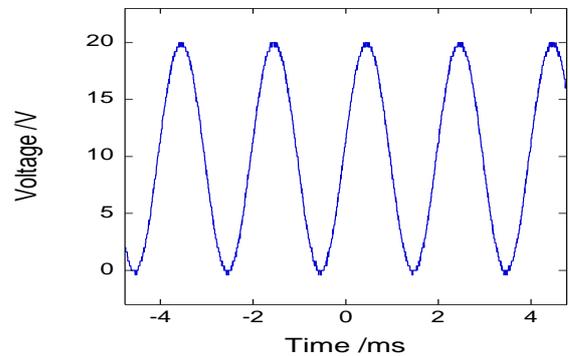


図 6 ピエゾ素子に加えた電圧波形

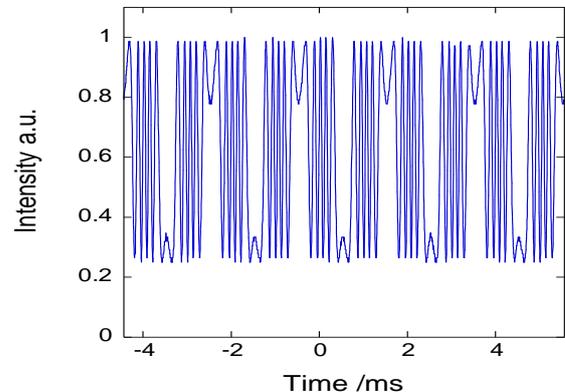


図 7 HC 法での時間的干渉縞

図6と図7をみると、 piezo素子に与えた電圧と同じ周期で干渉縞が生じていることがわかる。0.15 $\mu\text{m}/\text{V}$ で動作するpiezo素子を用いたので、図6より最大3 μm の変位量であった。ビジビリティは60%であった。

3.2. 第二高調波による位相差検出

第二高調波による位相差検出は結合器のみを変更して行った。結合器の配置図を図8に示す。

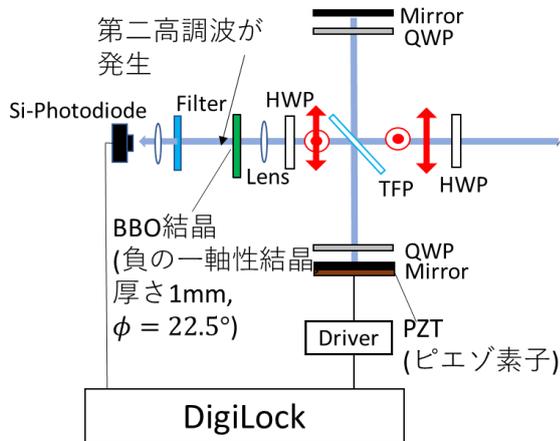


図8 結合器の配置図(第二高調波による位相差検出)

第二高調波のパワーが低いのと、本実験では第二高調波による位相差検出を目的としたので出力光を取り出さないで位相差検出を行った。位相整合角 $\phi = 22.5^\circ$ のBBO結晶でタイプIの位相整合を利用したので、PBSを取り除きフォトダイオードで検知した。

piezo素子印加電圧とメインアンプの励起パワーをHC法の場合と変えずに第二高調波の時間的干渉縞を観測した。その結果を図9に示す。

図9よりビジビリティは9%となってしまった。考えられる原因としては1stパルスと2ndパルスの伝搬経路が異なることによるビーム径の違いが考えられる。ビーム径が違くと第二高調波に変換したとき、よりその差が顕著になるので、このような干渉縞が生じてしまったと考えられる。

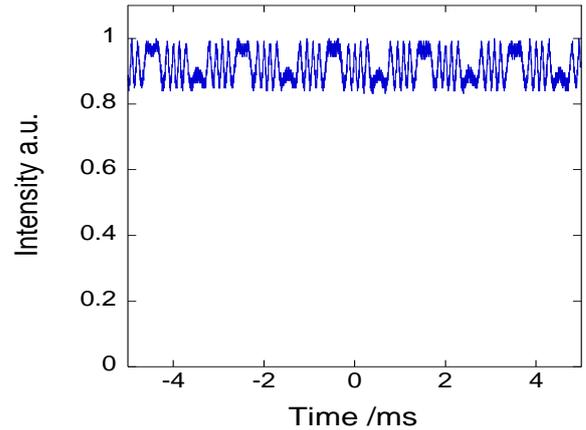


図9 第二高調波による時間的干渉縞

4. まとめと今後の展望

本研究では、先行研究[3]のHC法による4分割での位相検出が原理的に行えないという結果から新たに第二高調波による位相検出を目的として実験を行った。

その結果、第二高調波による分割パルス増幅の位相差検出に成功した。しかし、ビーム径の違いによるビジビリティの低下や、変換効率の低さから出力光を取り出せないという現状である。また、4分割での位相差検出には現在取り組んでいる途中である。

今後の展望としては、4分割での位相差検出の達成、第二高調波への変換効率の向上などがあげられる。

参考文献

- [1] D. Strickland and G. Mourou, *Optics Communications*, vol. 56, no. 3, pp. 219-221, 1985.
- [2] S. Zhou, F. W. Wise and D. G. Ouzounov, "Divided-Pulse amplification of ultrashort pulses," *Optics Letters*, vol. 32, no. 7, pp. 871-873, 2007.
- [3] 興石(杉本) 洗太, "分割パルスファイバー増幅およびチャープパルス増幅による高エネルギー超短パルス増幅特性," 電気通信大学修士論文, 2021.