

キャリアエンベロープフェイズを含めた 光瞬時電界波形の記録と再生

電子工学専攻 西岡研究室 早坂圭介

1. 序論

超短パルス光は異なる周波数を持つ光を干渉させることで発生する。分散媒質を透過すると、周波数ごとに異なる位相シフトをうけるためパルス波形は歪む。(式1)パルスが受ける位相シフトには第1項の搬送波位相、第2項の群遅延(GD: Group Delay)、第3項以降の群遅延分散(GDD: Group Delay Dispersion)があり、これまでは光瞬時電界波形を非線形吸収による時間ゲートを行って回折格子として記録することで、群遅延分散に注目して波形記録の実験を行ってきた。本研究では群遅延分散だけでなく搬送波位相に対する群遅延の記録も行うことを目的としている。

搬送波位相に対する群遅延の記録では搬送波包絡線位相(CEP: Carrier Envelope Phase)が重要である。CEPは搬送波に対するパルスの包絡線位相のことであり、群速度と位相速度の違いによって生じる。CEPも含めた波形記録実験を行なうためにCEPの観測・制御装置を作製した。

光瞬時電界波形の記録には2光子ゲート法を用いる。ゲートパルスとシグナルパルスを2光子吸収という2次の非線形効果を持つ材料中で2光子干渉させ、2次の相互相関波形を記録する。この方法では搬送波位相、群遅延、群遅延分散とパルスが持つ全ての位相情報が記録できる。

この原理を用いてフェムト秒パルスの波形記録と全光学位相補償を行った。実験にはゲートパルスとして10 fsのパルス、シグナルパルスとして10 fsのパルスを厚さ3 mmのBK7ガラスを透過させ40 fsにチャープさせたパルスを用いた。その結果80 THzの帯域で位相共役波を発生させ、全光学位相補償を行うことができた。

また本研究ではフォトリフラクティブ効果を用いたフェムト秒パルスの増幅実験を行った。実験ではゲートパルスとして10 fsのパルス、シグナルパルスとして10 fsのパルスを厚さ4 cmの石英ガラスを透過させ400 fsにチャープさせたパルスを用いた。その結果、帯域幅29 THz、パルス幅11 fsに相当する増幅器が実現できた。

$$\phi(\omega) = \phi(\omega_0) + \dot{\phi}(\omega_0) \times (\omega - \omega_0) + \frac{\ddot{\phi}(\omega_0)}{2!} \times (\omega - \omega_0)^2 + \frac{\overset{\cdot\cdot}{\phi}(\omega_0)}{3!} \times (\omega - \omega_0)^3 + \dots \quad \text{式 1}$$

2. キャリアエンベロープフェイズの制御と計測

CEP を含めた光瞬時電界波形の記録を行うためには、モード同期レーザーから出るパルスの CEP を固定する必要があるので、CEP の計測と制御を行った。CEP の計測は時間領域ではなく周波数領域で行われる。モード同期レーザーのスペクトルは図のような繰り返し周波数間隔の縦モードの集まりとなっており、これをゼロ点まで延長したときのゼロ点とのオフセットをキャリアエンベロープオフセット周波数と呼び、これが周波数領域での CEP に相当する。

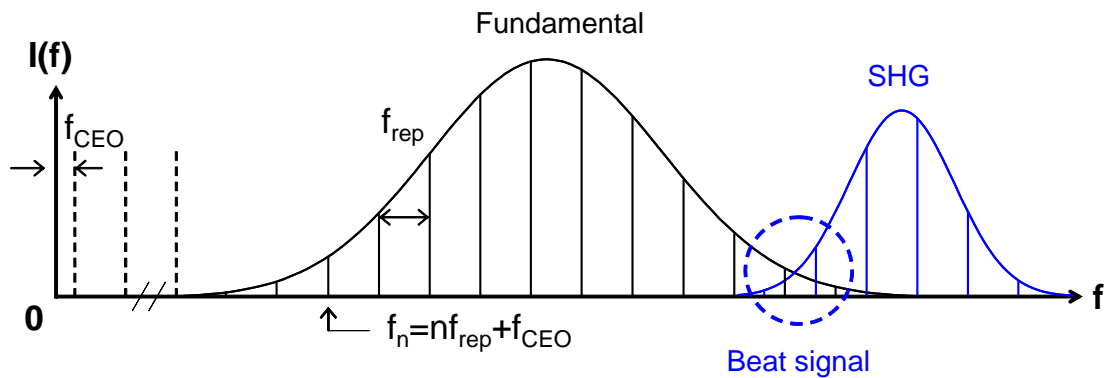


図1 モード同期レーザーの縦モードを利用した CEP の計測原理図。

オフセット周波数は f $2f$ スペクトル干渉法を用いて計測する。1 オクターブ以上のスペクトルを持つ基本波の短波長側と長波長側の第二高調波をスペクトル干渉させることで、ビート周波数としてオフセット周波数を計測することができる。

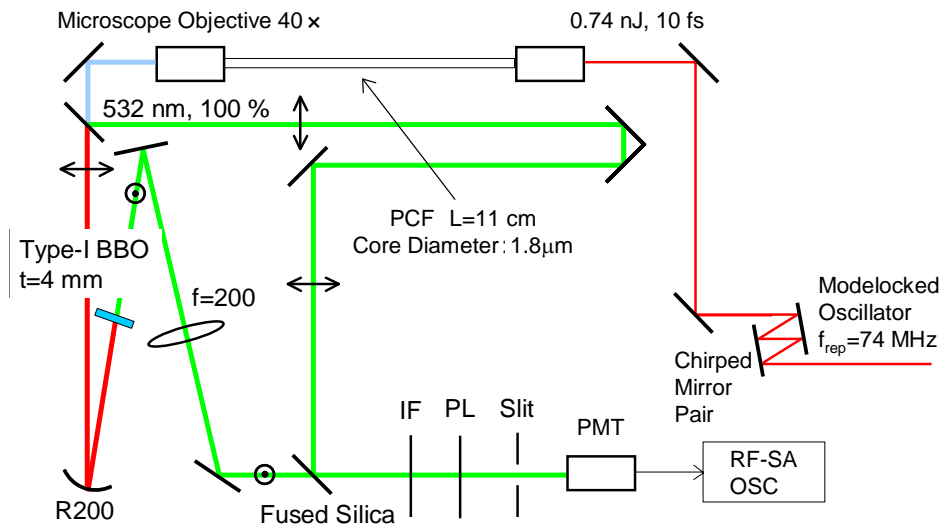


図2 CEP の計測装置図。

図は本研究で作成した CEP の計測装置である。1 オクターブ以上のモードのそろった光を得るために、繰り返し周波数 74 MHz のモード同期レーザーをフォトニック結晶ファイバーに入射し、自己位相変調を利用してスペクトル帯域を 1 オクターブ以上に広げる。その光を短波長側と長波長側にわけ、長波長側の光を BBO に入射し第二高調波を発生させる。発生した第二高調波と基本波をスペクトル干渉させ、干渉信号をスペクトルアナライザとオシロスコープで計測する。

図は励起光の出力を変えることで CEP を制御した結果である。励起光出力を 3.35 W から 4.7 W まで変えることで CEP を制御幅としては π rad. 分だけ変化させることができた。これにより sin 型や cos 型のような任意のパルス波形を得ることができる。

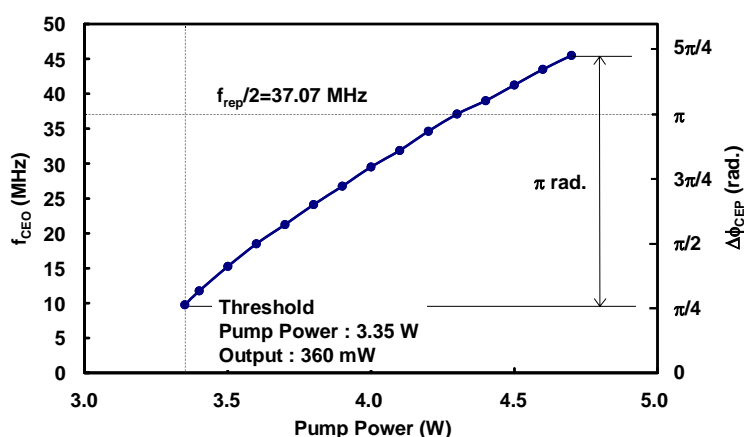


図3 励起光の出力変調による CEP の制御。

3. フェムト秒パルスの全光学位相補償

本研究では 2 光子ゲート法を用いて光瞬時電界波形を記録し、発生させた周波數位相共役波を利用して、フェムト秒パルスの位相補償を行っている。図に 2 光子ゲート法を用いた周波數位相共役波の発生とパルス圧縮の原理を示す。

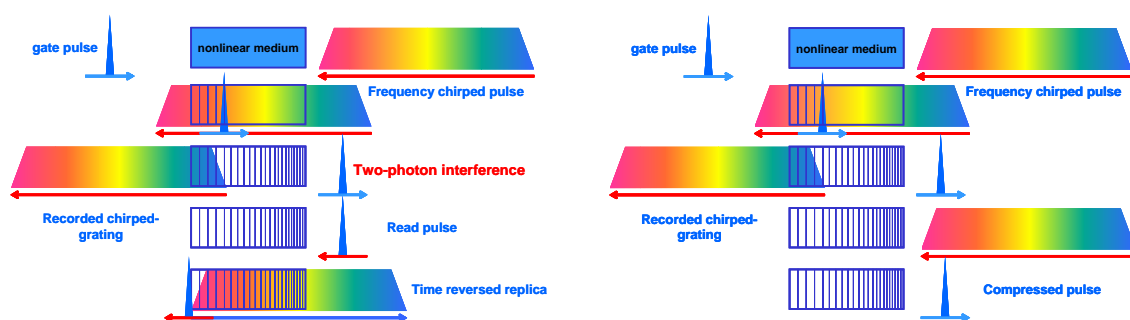


図4 2 光子ゲート法を用いた光瞬時電界波形の記録と再生
 (左) ゲートパルスを用いた周波數位相共役波の発生。
 (右) シグナルパルスを用いたパルス圧縮。

2光子ゲート法では2光子吸収という2次の非線形効果によって屈折率が変化する材料中でゲートパルスとシグナルパルスを2光子干渉させ、2つのパルスの相互相関波形を記録する。これにより2つのパルスが持つ位相情報の差を記録することができる。非線形記録回折格子にゲートパルスを入れることで、周波數位相共役波を発生させることができ、シグナルパルスを入れることでパルス圧縮を行うことができる。

図の装置で周波數位相共役波の発生と全光学位相補償の実験を行った。発振器から出たパルスを2つに分け、一方を厚さ3mmのBK7ガラスに通して40fsに周波数チャープさせる。チャープパルスとゲートパルスを厚さ72μmの色素添加薄膜中で2光子干渉させ波形記録を行う。

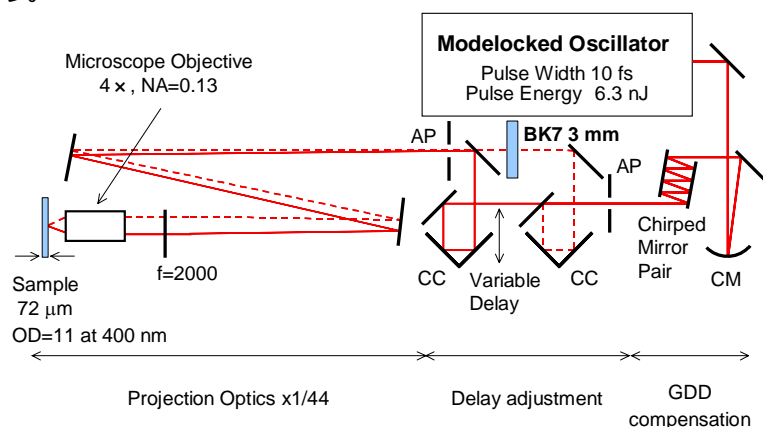


図5 フェムト秒パルスの全光学位相補償の実験装置図。

図は全光学位相補償を行った結果である。横軸が光周波数、縦軸が周波数シェアリング干渉計で計測したフーリエ位相である。図の青い線が周波数チャープさせたパルスのフーリエ位相である。下に凸になっているのでアップチャープを受けていることが分かる。オレンジの線が発生させた位相共役波のフーリエ位相で、フーリエ位相が反転していることから、周波數位相共役波が発生できていることが分かる。

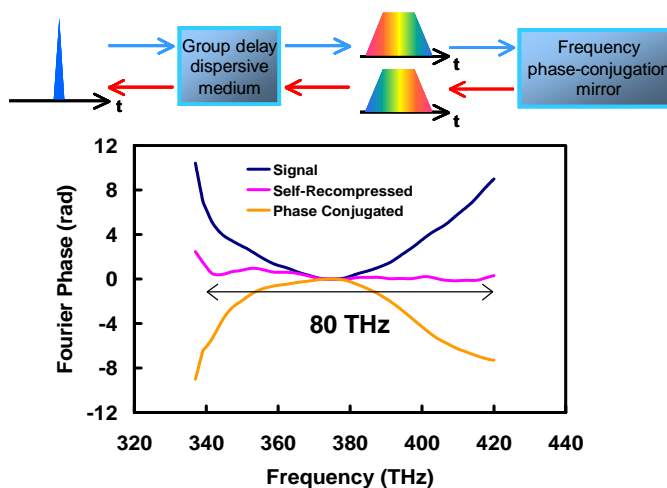


図6 フェムト秒パルスの全光学位相補償。

発生させた位相共役波を再度BK7ガラスに通した後のパルスのフーリエ位相が図のピンクの線で、フーリエ位相が0になっていることから、80 THzの帯域でフェムト秒パルスの全光学位相補償ができていることが分かる。

4. フェムト秒パルスのフォトリフラクティブ増幅

図4で示したように2光子ゲート法を用いるとシグナルパルスをゲートパルスに圧縮することができる。この特長をいかしてフォトリフラクティブ効果を用いた新たなフェムト秒パルスの増幅方法を提案する。その原理図を図7に示す。フェムト秒パルスを2つに分け、1つをゲートパルスとして利用し、もう1つはチャープパルス増幅を行いシグナルパルスとして利用する。この2つのパルスをフォトリフラクティブ結晶中で干渉させ、2光子ゲート法で光瞬時電界波形の記録を行なう。チャープパルス増幅によって、増幅されたパルスはゲートパルスと同じ波形に再圧縮されて回折され、出力されるパルスはゲートパルスが増幅されたのと同じことになる。この方法の利点は増幅されるパルスのパルス波形は、シグナルパルスの波形に関係なくゲートパルスによって決まることである。

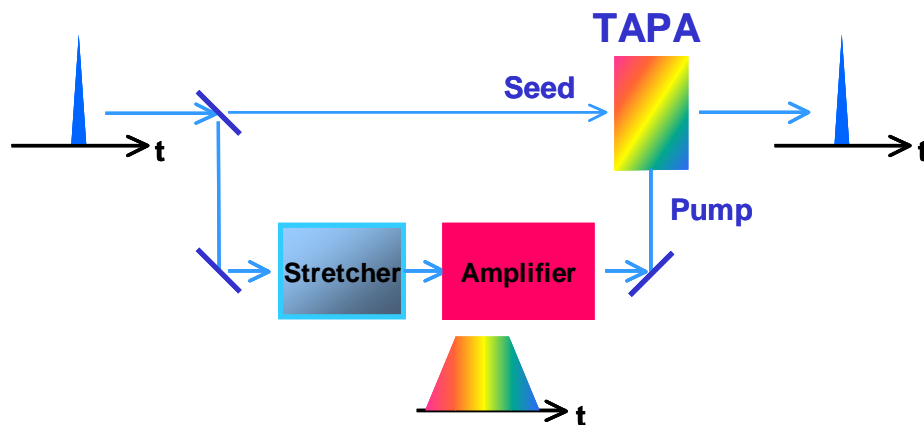


図7 フェムト秒パルスのフォトリフラクティブ増幅の原理図。

本研究ではまずフォトリフラクティブ結晶で2光子ゲート法による波形記録が行えるかどうか確認するために、Fe:LiNbO₃を用いて波形記録の実験を行った。ゲートパルスとして10 fsのパルス、シグナルパルスとして400 fsのパルスを用い、Fe:LiNbO₃中で2光子干渉させ波形記録を行った。図8は結晶内にできる非線形記録回折格子のスペクトル帯域が

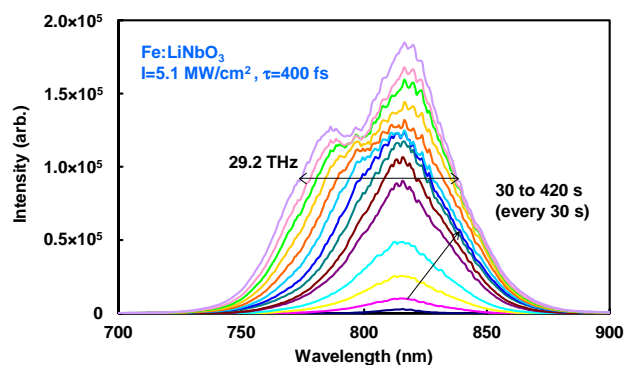


図8 露光時間の増加にともなう回折帯域の広がり。

露光時間とともにどのように変化するかを観たものである。露光時間が増加するにつれて回折格子の帯域が広がっていることが分かり、7分で29.2 THzの帯域を得ること

ができこれはパルス幅にして 11 fs に相当する。よってこの結晶を用いると 11 fs という短いパルスを増幅することができる。

次に記録された回折格子が 2 光子吸収によって記録されたものなのかを確認するために、ゲートパルスとシグナルパルス間のディレイを変えて波形記録を行い回折波のスペクトルが変化するかを調べた結果を図 9 に示す。図を見るとディレイを変えて波形記録を行うことで、回折波のスペクトルが変化していることがわかる。このことから記録された回折格子は 1 光子吸収ではなく 2 光子吸収によって記録されていることが分かった。

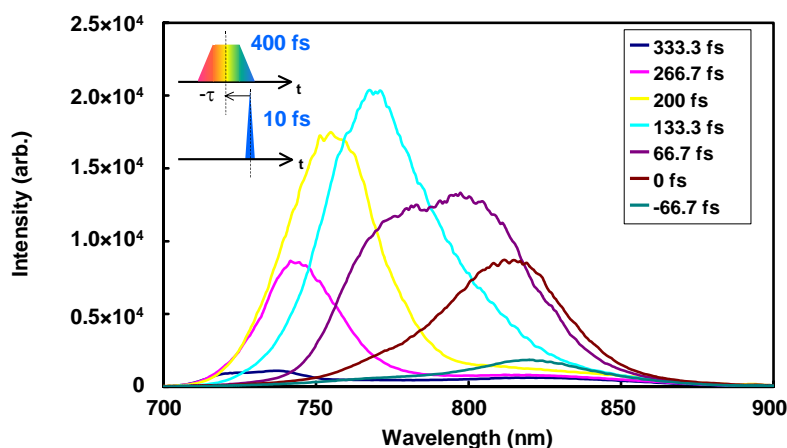


図 9 ゲートパルスによるチャープパルスの選択的記録と再生

5. まとめ

パルス間 CEP の観測装置を作製し、励起光の出力を変えることでパルス間 CEP の制御を行った。

ゲートパルスとして 10 fs のパルス、シグナルパルスとして 10 fs のパルスを厚さ 3 mm の BK7 ガラスを透過させ 40 fs にチャープさせたパルスを用いて、80 THz の帯域で周波數位相共役波を発生させ、全光学位相補償を行うことができた。

ゲートパルスとして 10 fs のパルス、シグナルパルスとして 10 fs のパルスを厚さ 4 cm の石英ガラスを透過させ 400 fs にチャープさせたパルスを用いて、帯域幅 29 THz、パルス幅 11 fs に相当するフォトリフラクティブ増幅器が実現できた。

今後の展開としては、本研究で作製した CEP の観測・制御装置にフィードバック機構を組み込むことで、パルス間 CEP 変化を固定し、CEP を含めた光瞬時電界波形の記録を行うことと、強度の異なるパルスを用いてフォトリフラクティブ増幅の実験を行うことが挙げられる。