

周波数分解四光波混合を用いた時間反転フェムト秒パルスの発生

電子情報学専攻 市橋 祥子

1. 目的

超短光パルスは時間・空間分解能の高さから様々な発展や利用が期待される。しかし、超短光パルスはフーリエ変換の関係により非常に広いスペクトル幅を持つ為、屈折率に周波数依存を持つ分散媒質を透過するとパルス幅の広がりが著しい。これまで、回折格子やプリズムを用いて3次分散の補正が実現されているがアライメントの困難さや高次の項までの分散が残る問題がある。このように、超短パルスは上記の様に様々な利用例があるにも関わらず群遅延分散の為に意図に応じて超短光パルスを制御し実際に有効に活用できていない現状がある。群遅延分散の補償が、完全かつ簡単にできれば、さらにパルス幅を短くする可能性も広がり超短光パルスを意図に応じて制御することができるだろう。よって、本研究は新たに光を時空間でコントロールする事により群遅延分散の自動補償を目指した物である。

2. 位相共役鏡の種類

光のコヒーレンス性を示すパラメータには表 2.1 が示すように時間、空間波動、周波数の4つが存在する。

表 2.1 波動の4つのコヒーレンスとエネルギーの集束性

波のコヒーレンス	波のエネルギー集束性	
時間: t	角周波数: ω	単色性
空間: r	波動ベクトル: k	指向性
角周波数: ω	時間: t	短パルス性
波動ベクトル: k	空間: r	集束性

同様に位相共役鏡にも、それぞれに対応する位相共役鏡があり、表 2.2 は位相共役鏡の種類とそれぞれの波動の変化をまとめたものである。

表 2.1 位相共役鏡の種類と波動の変化

位相共役鏡の種類	共役となる物理量	波動の変化	実現の形態・用途
空間(r)	波面の傾き $\phi(k)$ (空間位相)	波動ベクトルの反転 (指向性の反転)	フレネル・ホログラム 波面傾斜補償
波動ベクトル(k)	球面からの位相差 $\phi(k)$ (空間周波数のフーリエ位相)	空間位置の反転 (遠近の反転)	フーリエ・ホログラム 焦点位置(収差)補償
時間(t)	瞬時位相 $\phi(t)$	スペクトルの反転 (縮退周波数に対する鏡像)	光パラメトリック増幅器 ドップラーシフトの補償
周波数(ω)	フーリエ位相: $\phi(\omega)$	波形の時間反転 (時間鏡像)	光エコー 群遅延分散の補償

一般的にいわれている波面歪みを補正する位相共役鏡は空間位相共役鏡のことである。波面が空間毎によって異なる屈折率の違いから生じた波面の歪みを空間位相共役鏡によって波動ベクトルを反転させ再び同じ媒質に透過させることによって元の波面に戻すものである。今回、目指している群遅延分散の補償をするのは、図 2.1 にあるように超短パルスが分散媒質を透過しパルス幅が広がったパルスを周波数位相共役鏡でフーリエ位相の共役を取ることにより時間波形を反転させる。そして再び同じ分散媒質に透過させることにより元の超短パルスに戻すことができる。

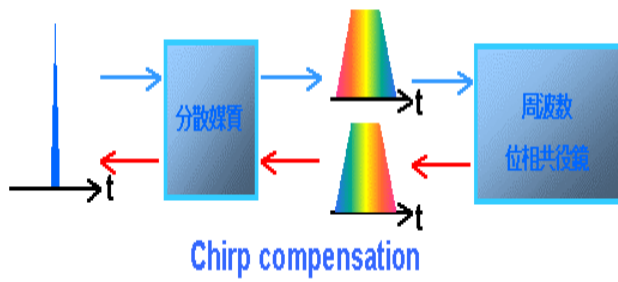


図2.1 周波数位相共役鏡による群遅延分散補償

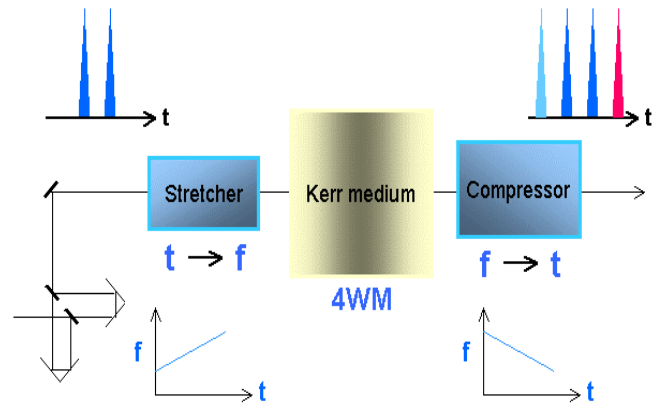


図3.1 時間・周波数変換による時間反転波の発生

3. 時間・周波数変換による時間反転波発生

時間反転波を発生する周波数位相共役鏡は光エコーで実現されているが、特別な不均一広がりを持つ材料や極低温を必要とする。また、周波数帯域は 10 GHz で時間に換算すると最短でも 100 ps のパルスしか記録できない。今回、フェムト領域における時間反転波を発生させる必要があるので別の方法で時間反転波を発生できないか検討した。

表 2.2 にあるように空間、波動ベクトル位相共役鏡は両方ともホログラムで実現されている。異なる点は波動ベクトル位相共役鏡はレンズを使用していることだけである。それは、空間と波動ベクトルにはフーリエの関係がありレンズを使うことによって位置から向きの変換、つまり空間・波動ベクトル変換ができるので同じホログラムで実現することができる。同じように時間と周波数にもフーリエの関係が存在する。もし、周波数・時間変換を行うことができれば、時間位相共役鏡である光パラメトリック増幅器を使用して時間反転波を発生させ群遅延分散の補償に使うことができる。時間・周波数変換を行う為にパルスを分散媒質に透過させ時間とともに周波数変化するチャープパルスにした。そして、光 Kerr 媒質中において周波数空間で演算を行い再び逆の分散を持つ媒質で周波数・時間変換を行うことによって時間反転波を発生させた。

実際、時間反転波の発生の過程は超短パルス発生機構である CPA(チャープパルス増幅器)システム中の時間・周波数変換の機能を利用して時間反転波を発生させた。100fs の超短パルスを回折格子により 130ps の正のチャープパルスにした後、2 つに分け時間差を与えて再生増幅器と 4 - Pass 増幅器で増幅させ後にコンプレッサーで負の分散を与えた。

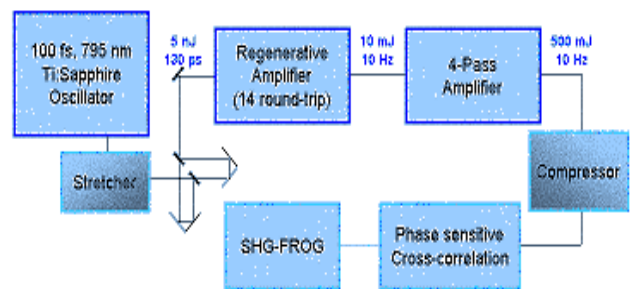


図3.2 チャープパルス増幅器システム

ちなみに光 Kerr 媒質は CPA システム中のチタン・サファイアの結晶やポッケルスセルやレンズなどの光路中にある透明媒質の光学部品がそれにあたる。

図3.3 に光 Kerr 媒質中ではどのように周波数混合が行われているかを示している。光 Kerr 媒質中に

同じ線形のチャープ変化を持つ2つのパルスに時間差を与えて入射させ、 $f_{p1}(t)$ をシグナル光とし $f_{p2}(t)$ を基準光とする。それにより、シグナル光と基準光の間には周波数差 f_{12} が生まれ、光 Kerr 媒質中でビートが生じ、周波数の電界により駆動される周波数変調器として動作する。

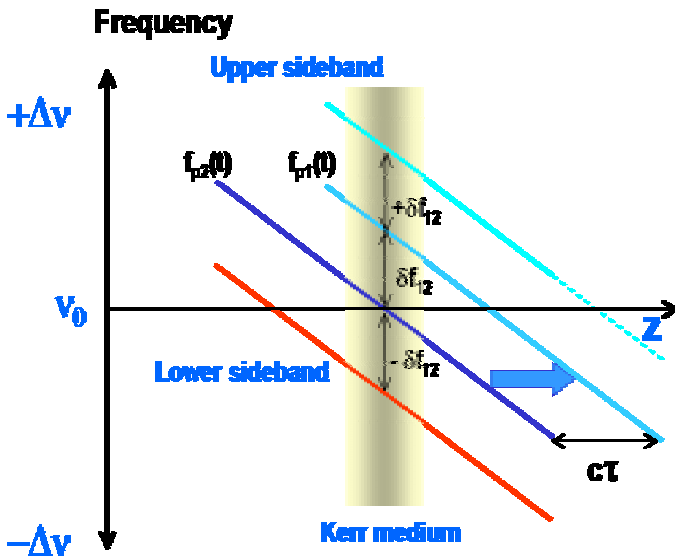


図3.3 線形なチャープパルス間における周波数混合

これにより基準光であると同時に再生光である $f_{p2}(t)$ は周波数差 f_{12} の変調を受け上下側波帯が形成される。 $f_{p2}(t)$ より発生した下側波帯は再生信号光にあたり、信号光の $f_{p1}(t)$ より周波数差が $-2f_{12}$ なのでパルス圧縮によって周波数情報から時間情報に変換されると信号光との時間差は2となる。

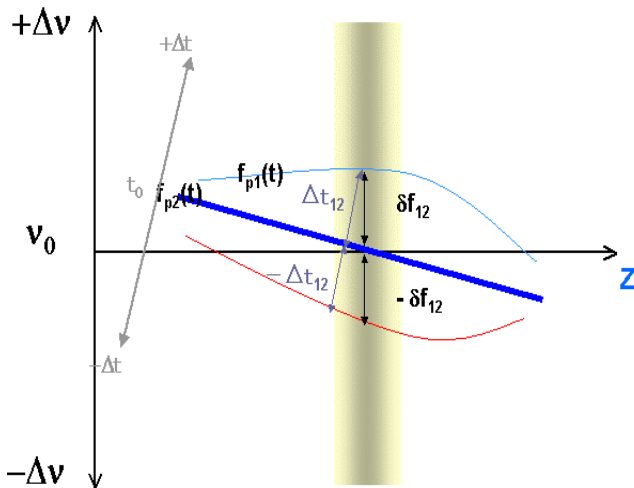


図3.4 非線形チャープパルス間における周波数混合

もし、図 3.4 がしめすようにシグナル光に高次のチャープをもつ場合、発生する光波はシグナル光に対する周波数反転像になり基準光に対して対称である時間反転波とは一致しない。しかし、シグナルパルスと基準パルスにキャリア周波数以上の大きな群遅延を与えることにより非線形な変化をもつチャープパルスでも瞬間瞬間で見れば、線形としてみることができ周波数反転を限りなく時間反転に近づけることができる。

周波数混合によって発生した4つの周波数情報もつ光波は回折格子対によってパルス圧縮され時間情報におきかえられ、同じ時間間隔において4つのパルスが出力される。2番目と3番目に発生したパルスは初めに注入した2つのパルスにあたり新たに発生した1番目と4番目のパルスのそれぞれ3番目と2番目の時間反転波にあたるはずである。この事を証明する為に、信号光と時間反転波が発生したであろうパルス間の位相関係を SHG フリンジ分解相互相関で計測した。

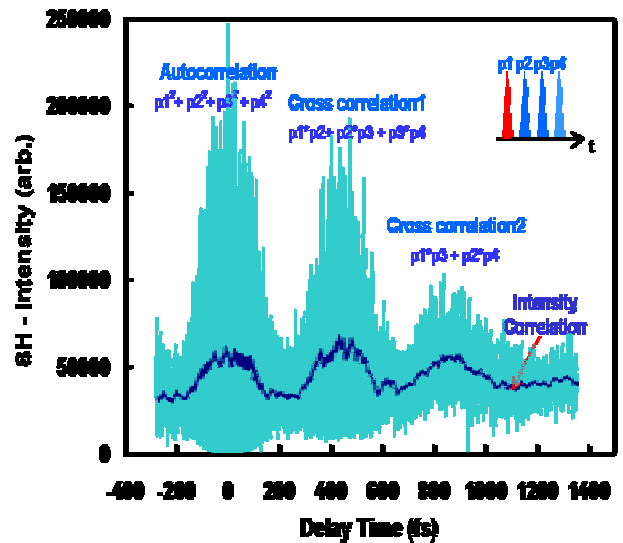


図 3.5 フリンジ分解相互相関図

図3は2つの入力パルス間の光学遅延を420fs与えた時の出力パルス列の相関関数である。時間遅延が零の所(最左側)の相関関数は発生した4つの個々のパルス間同士の自己相関の和であり、最右側は入射させた光パルスと発生したパルス間の相互相関の和である。最左側の自己相関関数は理論と等しい8対1のコントラスト比を示して干

渉しているのがみてとれる。しかし、相互相関関数には個々のフリンジをシングルショットで測定し、平均化処理をしていないにもかかわらず、自己相関と違って入射パルスと発生させた光パルスとの間には全くフリンジは見られずコヒーレントスパイクも現れていない。

また、同時に図 3.6 が示すように SHG - FROG(frequency resolved optical gating)を用いて時間領域におけるスペクトル変化も観測した。左から3つめの相関が入射したパルスと発生したパルスとの和周波であり、スペクトルの広がりはなく時間構造も滑らかであり共にフーリエ限界パルスである。よって、発生した光パルスは確実に入射パルスの時間反転波である事がいえて、周波數位相共役波を発生させることができた。

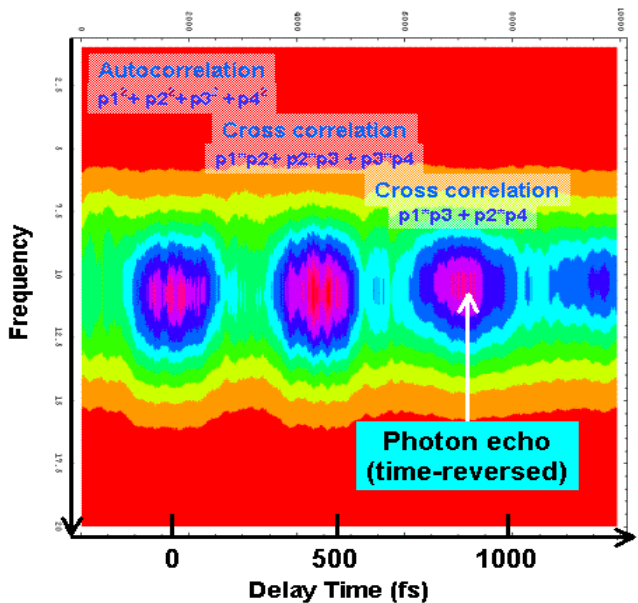


図3.6 SHG FROG

4. スペクトル反転波による群遅延分散補償

時間・周波数変換により時間反転波を発生させる事ができたが、基準パルスとして線形のチャープパルスが必要でその発生自体が困難である。次に基準光をパルスでなく周波数が一定のローカルオシレータを使って光パラメトリック増幅器による時間反転波の生成をめざした。

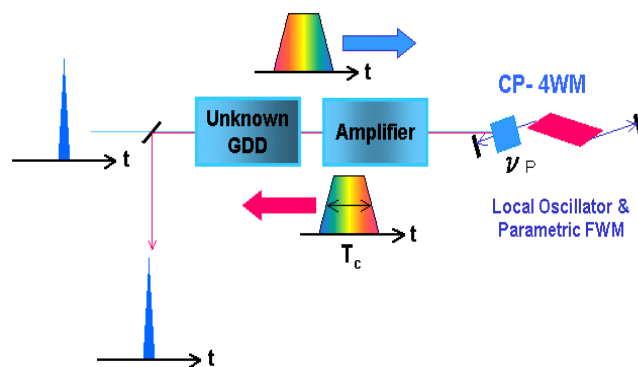


図4.1 パラメトリック増幅器

図 4.1 にあるように超短パルスが未知の分散媒質や増幅器を通過して分散したチャープパルスをシグナル光とし、周波数が一定なローカルオシレータを基準光とする。2光子励起による光パラメトリックによってアイドラ光が発生する。ちなみに、この方法はシグナル光と基準光に同じ群遅延を与えていないので時間・周波数変換を行っておらず発生するアイドラ光はシグナル光に対して時間反転ではなくただのスペクトル反転波である。

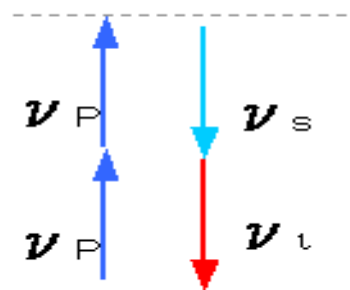


図4.2 2光子励起による光パラメトリック過程

しかし、図 4.2 のように信号パルスの周波数が時間と共に変化すれば、アイドラ光の周波数は逆の時間変化をおこしチャープを反転することができるので群遅延分散の補償ができるか考えた。また、パラメトリック過程はエネルギー蓄積効果を持たないのでパルスの強度波形は反転しない。このことからシグナル光のパルス波形は対称であることが望ましい。実際にチャープパルス光のパルス波形はスペクトル形状に近いのでスペクトル形状に構造がない

ことが理想である。

シグナル光とアイドラ光との間の周波数シフトを最小にするために基準周波数は信号波の中心周波数にとられる。このような準縮退4光波混合では前方、後方ともに位相整合は容易である。

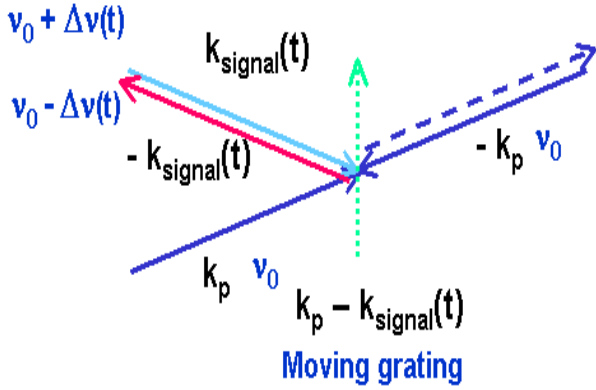


図4.3 後方散乱配置の準縮退4光波混合

図4.3は後方散乱配置を仮定した準縮退4光波混合の位相整合条件である。空間位相共役鏡ではフォトリフレクティブ媒質などが用いられるがこれを非共鳴の光 Kerr 媒質に置きかえることにより図4.3のように周波数が時間変化するシグナル光 (k_{signal}) と一定周波数である基準光 (k_p) との間に高速に移動する屈折率型回折格子を形成することができる。そこに逆方向から来た基準光 ($-k_p$) は変調を受け回折され新たにアイドラ光を発生させることができる。この配置を用いるとアイドラ光はシグナル光に対して空間・周波数と共に位相共役波を発生させることができる。よって、群遅延の補償だけでなくレーザー増幅器中における熱歪みの補正も同時に行うことができ時間反転波も独立して取り出すことが可能になる。しかし、信号光のスペクトル幅が広がると縮退条件が保てず角度分散が生じ位相整合がむずかしくなる。(図4.4)

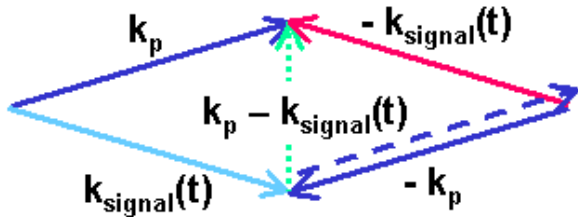


図4.4 準縮退4光波混合における位相整合

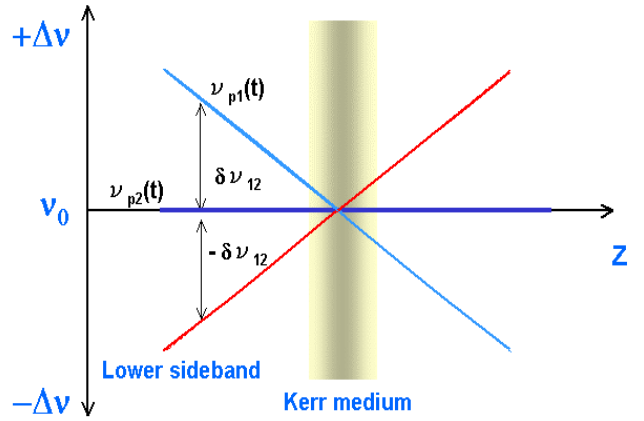


図4.5 シグナル光が線形チャープ光で一定周波数の基準光によるスペクトル反転

図3.7は光パラメトリック増幅器中のKerr媒質中の信号パルスと一定周波数の基準パルスとの間のスペクトル反転の様子を示している。

パラメトリック増幅器に線形にアップチャップする信号光を入射する時、光 Kerr 媒質中に入射した瞬間のシグナル光の周波数と常に一定基準周波数の基準光によりスペクトル反転するので線形にダウンチャップするアイドラ光を発生させることができる。よって、反対に周波数変化をするアイドラ光を発生させる事ができるのでそれを再び分散媒質に通すことにより完全に群遅延分散の補償をすることができる。

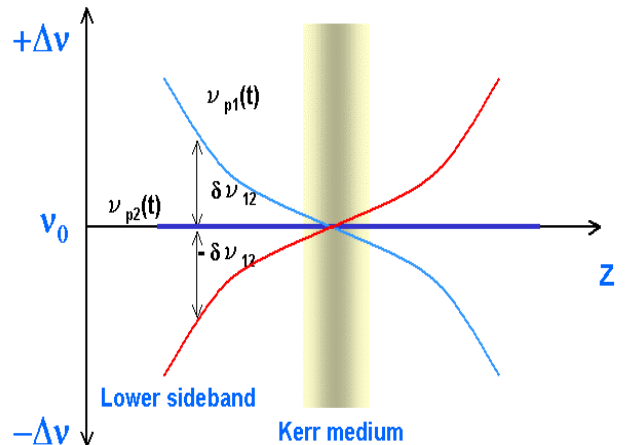


図4.6 シグナル光が非線形のチャープ光で一定周波数の基準光によるスペクトル反転

ところが、図4.6の様にシグナル光が非線形なチャープをもつ時、つまり高次の分散をもつ時、基準光がシグナル光のチャープ変化の変異点に周波数

がない時、チャープの変化が奇数次の時(偶数次の分散)はスペクトル反転も時間反転も同じ結果になるが、チャープの変化が偶数次の時(奇数次の分散)は同じ結果にならない。よって、シグナル光を周波数反転する時間位相共役鏡(光パラメトリック増幅器)では偶数次の分散補償は自動的に行えても奇数次の分散の補償を行うことができない。

光パルスは短パルスになるほど高次の分散の影響が大きくなる。よって2次分散だけでなく3次分散、つまり奇数次の分散の影響がでてくる。スペクトル反転では偶数次の分散しか補償できないのでどこまでのパルス幅まで群遅延分散の補償が可能かどうか、計算シミュレーションを行った。

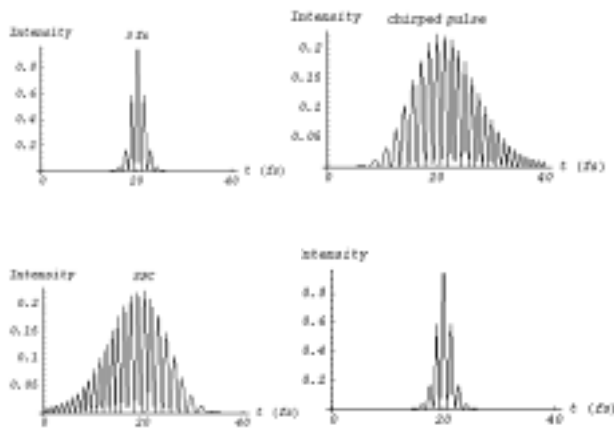
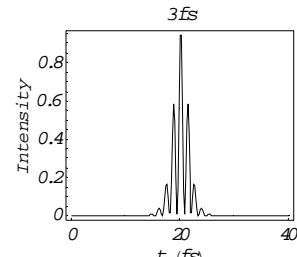


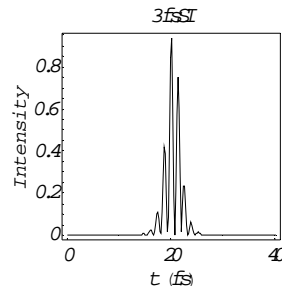
図4.7 時間反転波による分散補償の流れ

上図の波形は時間反転波のシミュレーションである。左上が入力パルスで分散媒質をBK7として設定して位相シフトを与え分散させた(右上図)のちフーリエ成分の共役をとり時間反転波を発生させ(左下図)ふたたび同じ分散の位相シフトを与えると元の波形(右下図)に完全に戻っていることがわかる。次に一定周波数の基準光を想定したスペクトル反転のシミュレーションを行ったところ、スペクトル反転は時間反転とは違って完全に波形が戻ってないことが確認できた。(図4.8)

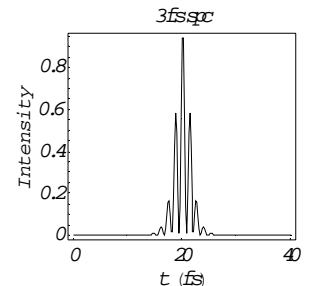
シミュレーションでは材料分散だけ想定するとほとんど2次分散だけなのでスペクトル反転でも20fsのパルス幅までだったら、群遅延補償が可能ことがわかった。



元の波形



スペクトル反転



時間反転

図4.8 スペクトル反転と時間反転

5. まとめ

今回、群遅延分散の補償を行うために、フェムト秒領域の時間反転波発生を目指し、時間・周波数変換を使うことによって周波數位相共役鏡でなく、時間位相共役鏡である光パラメトリックシステムで時間反転波の発生を試みた。実際にチャープパルス増幅システムで時間反転波を発生を確認することができた。また、時間・周波数変換をせず一定周波数の光パラメトリック増幅器の周波数反転だけの群遅延分散の補償の限界を考察した。

今後の展開として図5.1のように基準パルスとシグナルパルス間の位相情報を空間領域に体積ホログラムとして書き込む方法が考えられる。この方法の場合、奇数次の分散の補償も可能になる。

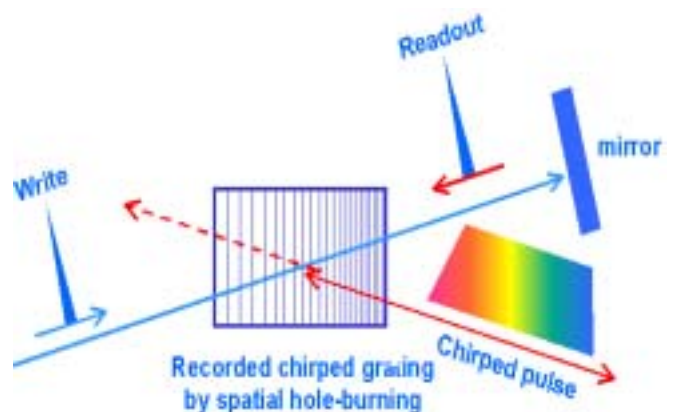


図5.1 空間領域における位相情報の書き込み