

# スペクトルシェアリング法を用いた波形合成システムの評価

電子工学科 西岡研究室 森下 宰

## 1. はじめに

光パルスを合成することによってパワーの増加だけでなく、ビーム径の増大による指向性の上昇、パルス幅の減少によるピーク強度の増加が見込める。しかし、光パルス同士を合成することは難しい。例えば超短パルス光の時間幅が 10 fs のとき空間幅は 30  $\mu\text{m}$  である。また、超短パルスのパワーは数 MW と小さいのでパルス同士を重ねても大きなパワーを得ることはできない。

そこでパルス幅の短い種パルスにパワーの大きな長いパルスを合成し、短くてパワーの大きなパルスを生み出すことを考えた。長いパルスならば簡単に大きなパワーが得られるためである。光パルスを合成するには時間、空間、周波数を一致させる必要がある。光パルスを合成するために図 1 のようにフーリエ変換し、コヒーレント長を長くして遅延をそろえることで合成を行っている。

光パルスの合成を評価するには強度分布だけではなく電界も測定できなければならない。また、合成後のパルスにノイズが出ていないことを確かめるために長時間の測定ができなければならない。そこで本研究では波形合成システムを評価するためにフーリエ位相を直接求めることのできるスペクトルシェアリング干渉計を構築し、フーリエ位相の測定を行い、測定可能時間と時間分解能を評価した。

スペクトルシェアリング干渉法とは測定する光のスペクトルにシェアリング周波数を加え、干渉をとる。スペクトルシェアリング法の利点はほかの光を必要としない自己参照法であること、フーリエ位相を干渉縞から直接得ることができることである。特に後者は超短パルスの測定法の一つである強度自己相関法や周波数分解ゲート法[1]では不可能である。

従来の測定法である SPIDER(Spectral Phase Interferometer for Direct-Electric Reconstruction)[2]では周波数差を時間差に変換しているために長いパルスを測定することが難しい。本研究では長い時間の測定を行うためにエタロンとバンドパスフィルタを用いて 2 色の単色光を発生させた。

また、短いパルスを測定するには広い帯域で同時にフーリエ位相を測定する必要がある。これは発生する和周波光の帯域幅で決まる。

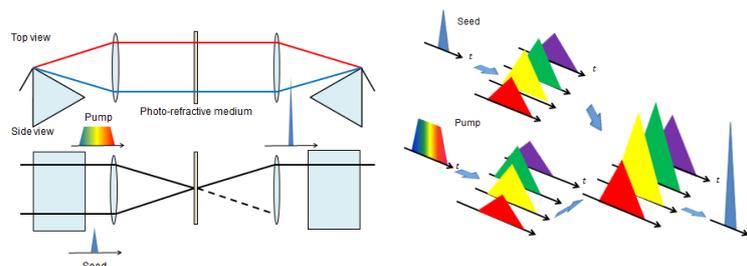


図 1 波形合成システムの原理図とイメージ図

## 2. スペクトルシェアリング法

図2のように、電界のフーリエ成分が $E(\omega)$ の光パルスに、シェアリング周波数 $\Omega$ を与えた電界 $E(\omega + \Omega)$ の光パルスを干渉させたとき、強度の周波数成分 $I(\omega, \tau)$ は

$$I(\omega, \tau) = |E(\omega)|^2 + |E(\omega + \Omega)|^2 + 2|E(\omega)||E(\omega + \Omega)| \times \cos(\varphi(\omega + \Omega) - \varphi(\omega) + \Omega\tau) \quad (1)$$

である。ただしフーリエ位相が $\varphi(\omega)$ 、2色光と被測定光間の遅延が $\tau$ である。干渉縞からフーリエ位相の差 $\varphi(\omega + \Omega) - \varphi(\omega)$ を求めることができる。このようにしてフーリエ位相を干渉縞から直接求めることができる。

フーリエ位相の差 $\varphi(\omega + \Omega) - \varphi(\omega)$ とフーリエ位相 $\varphi(\omega)$ の関係は

$$\varphi(\omega + \Omega) - \varphi(\omega) = \Omega \frac{d\varphi(\omega)}{d\omega} \quad (2)$$

である。

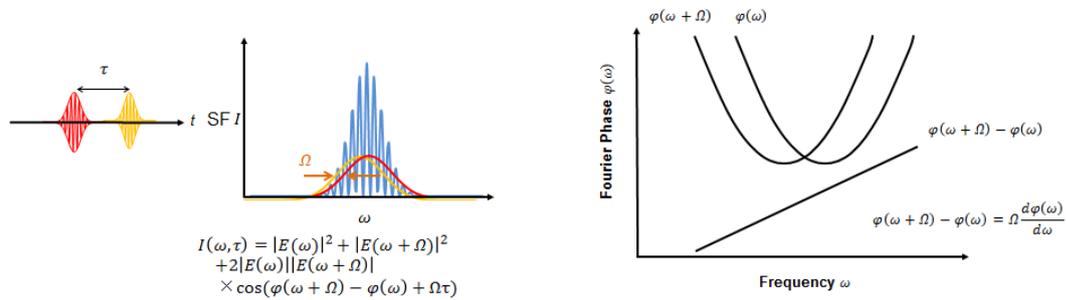


図2 スペクトルシェアリング干渉計の原理

## 3. スペクトルシェアリング干渉計の構築

図3にスペクトルシェアリング干渉計の装置図と実際に作成したスペクトルシェアリング干渉計の写真を示す。被測定光の一部をミラー間隔が $20 \mu\text{m}$ のエタロンとバンドパスフィルタを通過することにより2色光を発生させた。2色光と残りの被測定光の和周波光を焦点距離 $50 \text{ mm}$ の放物面ミラーとType-IのBBO結晶によって発生させ、スペクトルフリッジを得た。スペクトルフリッジは分光器PMA11(浜松ホトニクス社製)で測定した。2色光と被測定光との間の時間を変化させるためにリトロリフレクターを載せるステージを電動アクチュエーター(AD-100、Newport社製)で動かした。この電動アクチュエーターのねじ回転角は加える電圧に対して非線形性を持っている。加える電圧と台の移動距離の関係を測定し、補正を行った。

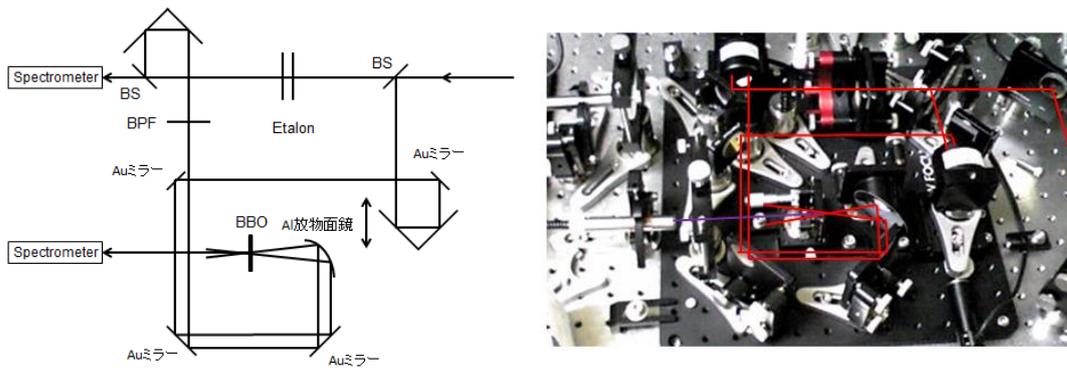


図3 スペクトルシェアリング干渉計の装置図(左図)と組み立てたスペクトルシェアリング干渉計(右図)

#### 4. フーリエ位相の測定

図4に2色光のスペクトルを示す。シェアリング周波数は7.6 THz、半値全幅は220 GHzであった。

図5の左上図にスペクトルシェアリング干渉計で測定した和周波光のスペクトルを示す。合成石英によってフーリエ位相に差が生まれ、干渉縞が発生していることがわかる。干渉縞からフーリエ位相を求めた。フーリエ位相を図6に示す。50 THzの帯域幅で同時にフーリエ位相の測定ができたことを示している。パルス光の強度分布を逆フーリエ変換することによって求めた。パルスの時間波形が図7である。パルス幅は170 fsであった。図8に2色光と被測定光との間の時間変化と和周波光の強度の関係を示す。被測定パルスより長い時間で和周波光が発生していることがわかる。これはエタロンによって時間の長い2色光が発生しているためである。和周波光の減衰時定数は600 fsであった。

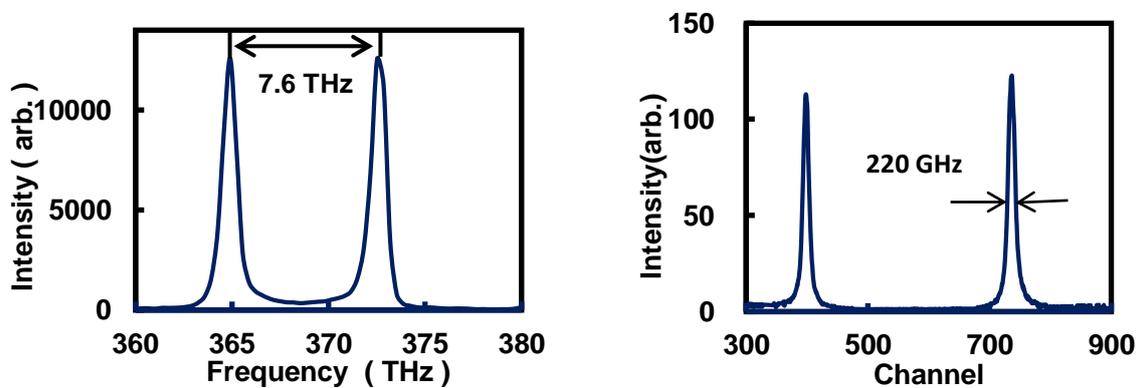


図4 2色光のスペクトル

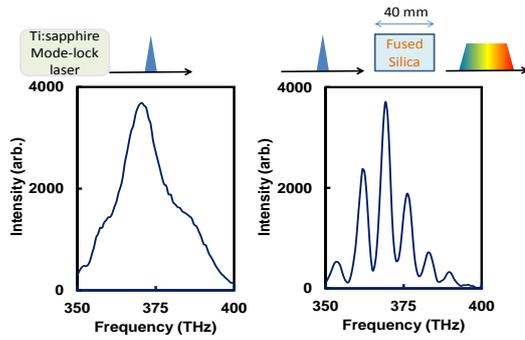


図 5 レーザースペクトルと合成石英透過パルスのスペクトルフリンジ

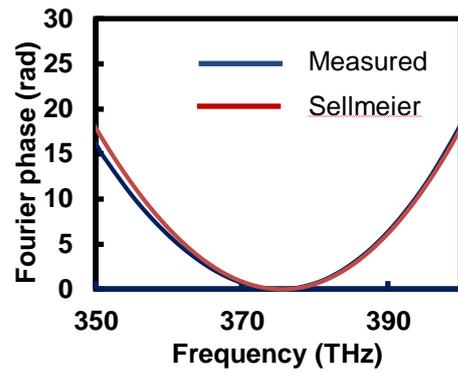


図 6 合成石英透過パルスのフーリエ位相

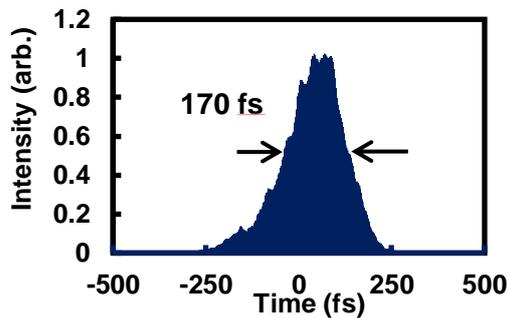


図 7 石英透過パルスの時間波形

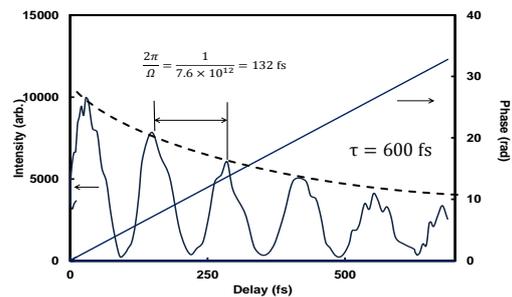


図 8 和周波光強度とパルス間時間の関係

## 5. まとめ

本実験ではフーリエ位相を直接測定することのできるスペクトルシェアリング干渉計を構築した。フーリエ位相の同時測定可能帯域幅から  $\text{sech}^2$  型パルスの場合 6.3 fs の時間分解能であった。測定可能時間を決める和周波光の減衰時定数は 600 fs であった。

今後の課題は様々な分散媒質を透過した光のフーリエ位相を測定すること、パルス合成後のフーリエ位相を測定することである。

## 参考文献

- [1] Daniel J. Kane and Rick Trebino “Characterization of arbitrary femtosecond pulses using frequency-resolved optical gating” IEEE JOURNAL OF QUANTUM ELECTRONICS, Vol. 29, 571-579(1993)
- [2] M. E. Anderson, A. Monmayrant, S. -P. Gorza, P. Wasylczyk, and I.A. Warmusley, “SPIDER: A decade of measuring ultrafast pulses” Laser Phys. Lett. Vol. 5, 259-266(2008)