

4P027

2 台の超短パルスレーザーによる時間分解光サンプリングシステムの構築

(京都工芸繊維大・材料化学) ○永原 哲彦

Time resolved optical sampling utilizing ultrafast twin lasers

(Kyoto Institute of Technology) ○Tetsuhiko NAGAHARA

【序】これまで超短パルスレーザーを用いた時間分解分光法は主として光学遅延ステージを用いてきたが、その移動は時間がかかりビームの広がりや重なりに変化が生じる問題がある。高速な凝縮相時間分解イメージングの為には、電気制御を用いた光サンプリング法が適切と考え、レーザーとその位相制御システムを開発している。

以前からレーザーの位相同期では、その位相雑音特性から高次高調波を用いる方が有利であることが知られており^[1]、最近になって fs またはそれ以下のタイミングジッターが報告されている^[2]。モードロック Ti:Sapphire レーザの位相雑音の多くは、励起レーザーの雑音か機械的振動や熱変形に由来すると考えられるので、2 台のレーザー共振器を共通のベースプレート上に組み立て共通の励起レーザーでポンプすることで、既報のものより簡略なシステムで位相同期できるのでは無いかと考えた。相対揺らぎの評価と時間分解分光への適用を意識した実験結果について報告する。

【実験】レーザー： 2 台のモードロック Ti:Sapphire レーザを共通の水冷ブレッドボード (600 x 300 mm²) 上に構築した。白金抵抗温度センサと水冷ペルチェ素子により温度制御されたレーザー結晶(2 mm, OD > 7, Crystal Systems)の周りに角度非対称 (14.0, 17.5°) X 型配置で凹面鏡対(ROC = 50 mm)を設置し、共通の励起グリーンレーザー (JUNO5000, 昭和オプトロニクス) から分配された出力 (各 2 W) をそれぞれレンズ (f = 40) で結晶に集光し励起した。共振器は凹面鏡対を挟んで非対称長さ (約 1.1 m, 約 0.7 m) とし、長い側にブリュースター石英プリズム対を挿入し、短い側の部分透過鏡 (~5%) から出力 (モードロック時、各 ~400 mW) を取り出した。どちらも繰り返し周波数 $F_{rep} = 80$ MHz に調整した。モードロックはその空間モードの励起光とのオーバーラップによってのみ行い、機械的振動の可能性のあるキャビティ内のアパーチャやスリットは用いていない。ブレッドボード温度に対する F_{rep} の変化は、~2 kHz/°C @22 °C であった。共振器外部での群遅延分散の補償は行っていない。

キャビティ長の可変： 圧電素子により繰り返し周波数を可変するが、その反力に抗し共振を生じさせない様、文献^[3]を参考に構築した。Φ25 mm の銅棒を円錐形に加工し、内部に鉛を充填した。頂点を切り落とし反射鏡 (Φ6 mm) とキャビティ長制御の積層圧電素子 (PL055.31, 2.2 μm @ 100 V, PI) をエポキシ樹脂で接着した。+95 V の印加電圧に対して、 $\Delta F_{rep} = \sim 100$ Hz であった。

位相の検出と同期制御： 繰り返し周波数(F_{rep})の高次高調波 (HH) 信号は、キャビティ内プリズムの反射光を PIN フォトダイオード (ET4000, >12.5 GHz, EOT) に集光して得た。基本波信号はキャビティ内の折り返しミラーの透過光を別の PIN フォトダイオード (S5973-01, ~1GHz, Hamamatsu) に照射して得た。

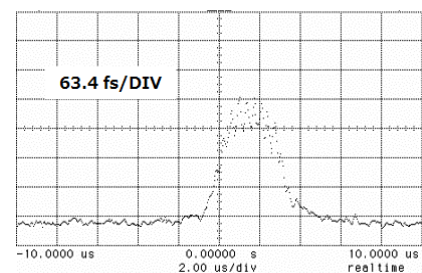
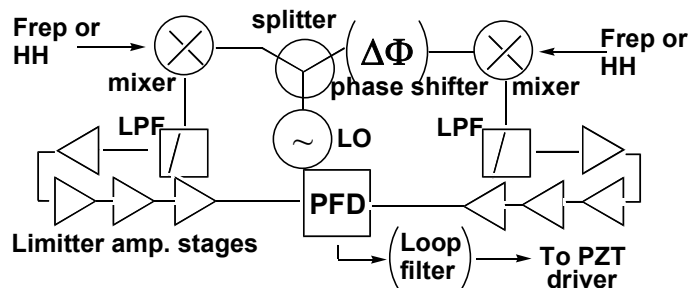
位相検出器 (PD) は、ラジオ波発振器の高感度位相雑音測定で用いられる Dual mixer

time difference multiplier⁴を参考に構築した(下左図)。この方法は低周波数にヘテロダイイン周波数変換してから位相検出を行うことで、同じ位相差に相当する時間差が増倍され検出が容易となる特徴がある。2台のレーザからの Frep またはその HH を、共通のラジオ波または X-バンドマイクロ波発振器 (Local oscillator, LO) と 1 対のダイオードミキサーを用いて低周波にヘテロダイイン周波数変換する。変換後のそれぞれの低周波信号を多段の制限増幅器とローパスフィルタを用いて整形し、デジタル位相周波数検波器 (PFD) で位相差を検出する。LO の雑音は原理的に相殺されるが、これら LO と測定機器は GPS 人工衛星受信機を参照し周波数の長期安定性 (< ppb) を確保した。

一般に Frep の N 次高調波での位相差 0 は基本波でも 0 とは限らず、N 倍周期的に起こる。従って HH での位相同期は様々な時間差(基本波では位相差)で可能なので、その位相差を補償する為に基本波 PD には周波数変換前に位相器 ($\Delta\Phi$) を挿入した。HH と基本波 Frep、2 台の PD からの信号はそれぞれローパスフィルタ(位相同期回路のループフィルタ)を通過し、その電圧を利得可変の加算回路で合成し圧電素子ドライバ (M-2629, 100 kHz, Mess-Tek) へ入力することで、全体の帰還ループが閉じる。いったん位相同期すると、位相器の調整で HH の次数で決まる時間差毎に 2 台のレーザの時間遅延が変化する。現在、Frep と HH それぞれの帰還ループ周波数を ~5 Hz, 数 kHz に設定している。また、片方のレーザのみの制御なので、他方のレーザの位相雑音も含めて位相同期している。マイクロ波周波数は 12.4 GHz (N = 155) を用いた。

パルス幅と位相差揺らぎの評価: 各レーザのパルス幅は回転ミラーラピッドスキューン型オートコリレータ (FR-103XL, 0.3 mm KDP, Femtochrome) を用いて強度自己相関で評価した。位相同期の確認はオートコリレータの干渉計の片側アームを構成するミラーを取り外し、外部からもう一方のレーザ光を導入して相互相関波形を得た。

【結果と考察】 自己相関 65, 71 fs(FWHM) に対して、~90 fs(FWHM) の相互相関幅(下右図)を得た。またこの相互相関波形は 30 分後にも変化しなかった。しかし、オシロスコープ上で相互相関波形が一瞬消える時があり、原因としてループ周波数が低いことや参照側レーザを制御していないことが考えられ、現在検討を行っている。



【引用文献】 [1] D. von der Linde, Appl. Phys. B 39, 201 (1986). [2] L.-S. Ma et al., Phys. Rev. A 64, 021802 (2001). [3] T. C. Briles et al., Opt. Exp. 10, 9739 (2010). [4] D. W. Allan, NBSIR 75-827 (1976).

【謝辞】 レーザ結晶ホルダのワイヤ放電加工は分子科学研究所装置開発室にて行った。矢野氏、水谷氏に感謝する。本研究は科研費(基盤 C 24550023)の助成で行っている。