

超短パルスの新しい位相測定法

蜘蛛 (SPIDER) の気持ちは
蛙 (FROG) よりわかりやすいかも??

フェムト秒レーザーがさまざまな分野で用いられるようになりました。このフェムト秒パルス波形を正確に評価するためには、パルスの強度波形（振幅波形）だけでなく、電場の位相波形も測定する必要があります。従来、この位相波形を測定する方法として周波数分解光ゲート法（frequency resolved optical gating: FROG）¹⁻³⁾が多く用いられてきました。これは2次あるいは3次のスペクトル分解強度相関波形に位相再生計算を施すことにより、パルスの位相と振幅を求めるものです。この方法では2次元のFFTを含む繰り返し計算を行う必要があります。したがって、波形が複雑な場合には時間幅の区切りが細くなり計算量が膨大になります。このため、計算の収束性が悪くなり、データの信頼性に問題が出てくる場合があります。

ここで取り上げるパルス位相計測法スパイダー（spectral phase interferometry for direct electric-field reconstruction: SPIDER）は、FROGのように力づくの繰り返し計算にたよることなく、パルスのスペクトル位相を直接測定しようという観点から考案されたパルス位相計測法です。

その原理は光学研究者である読者の皆さんにはおなじみのシアリング干渉計と似ており、SPIDERは、いわばシアリング干渉法時間バージョンといえます。これまでも、光の広場や特集記事で取り上げられてきた、空間と時間のアナロジーを直接理解できる面白い実例のひとつです。

その原理と位相計算の詳細は文献⁴⁾にゆずり、ここでは実際の測定装置例、測定例、装置に必要な校正での注意点などを記すことにします。

この測定法の実際の配置例（サブ10 fsパルス測定）を図1に示します。まず、被測定光パルスを2つに分けます。分けられた1つのパルスは分散媒質を通ることにより周波数が時間的に変化した被測定パルスに比べて十分長い時間幅（～1 ps）をもつパルスになります。すなわち周波数はパルスの中で時間的に変化しているが被測定光パルスの時間幅では周

波数が変わらないCW光とみなせるようなチャープパルスになります。ここでは、ガラスブロックを透過させることでチャープパルスを発生させています。チャープパルスの時間幅は～2 psです。

残りのパルスはビームスプリッターでさらに2つに分けて互いに時間差 τ がつくようにし、再びビームスプリッターで重ね合わせます。重ね合わせた2つのパルスの時間間隔 τ は被測定パルス幅（サブ10 fs）より十分大きくする必要があり、ここでは300 fsとしています。チャープパルスとの第二高調波発生により、この2つのパルスのアップコンバージョンを行います。2つのパルスには τ の時間差があるので、それぞれ周波数の異なる光（この周波数差を Ω とします。以下、ここでの周波数は角周波数を指します）とアップコンバージョンされることになるので、互いに Ω だけ周波数シフトした2つのパルスが作り出されることになります。このようにアップコンバージョンされた2つのパルスのスペクトルを測定します。このようにして得られたスペクトル $D(\omega)$ （図1(a)）は周波数 Ω をキャリアにもつ周波数域での干渉縞になります。縞の間隔は $2\pi/\tau$ です。スペクトル $D(\omega)$ をフーリエ変換したものが $D(t)$ （図1(b)）のようになります。このうち時間 τ 近傍の成分のみを取り出して逆フーリエ変換すると、パルスの位相を $\Phi(\omega)$ としたとき、 $\Phi(\omega) - \Phi(\omega - \Omega)$ が算出されるので、積分することによりパルスのスペクトル位相 $\Phi(\omega)$ を求めることができます。

もうおわかりいただけましたでしょうか。2つの時間差パルスを作る作業はシアリング干渉計では被

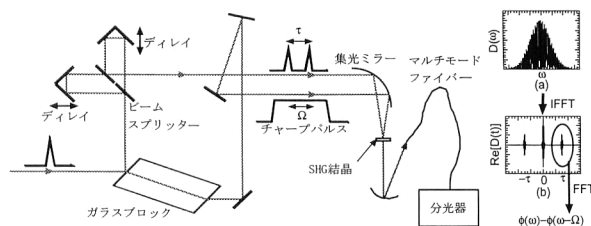


図1 スパイダーの概念図。

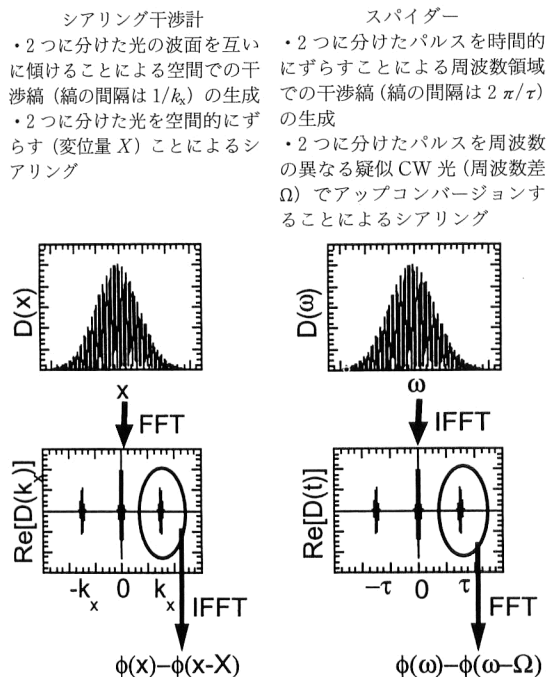


図2 シアリング干渉法とスパイダーの比較。

測定波面の横ずれに対応します。チャープパルスとのアップコンバージョン (時間的なキャリアを入れること) は, シアリング干渉計では被測定波面を互いに傾けて空間的なキャリアを入れることに対応します。そして, 最後の位相算出法は干渉計測でおなじみのフーリエ変換法そのものです。こう考えると時間と空間の違いこそあれ, 先端技術のフェムト秒パルスの位相波形測定も古典的な干渉計測と同じですよね。両者の比較を図2に示します。詳細な計算法は文献⁴⁾にゆずることにします。

実際の測定例を図3, 図4に示します。この例はタンサファイアチャープパルス増幅システムでパルス伸長・圧縮に用いられるパルス伸長器とパルス圧縮器の残留分散を評価したものです。図3の実線はこの装置で観測されたスペクトル, 点線はこのスペクトルから計算された位相です。スペクトルの横軸は, 計算された位相との比較のため, 実際の周波数からアップコンバージョン周波数を引いたものです。図より位相が大きく変化しているのがわかりま

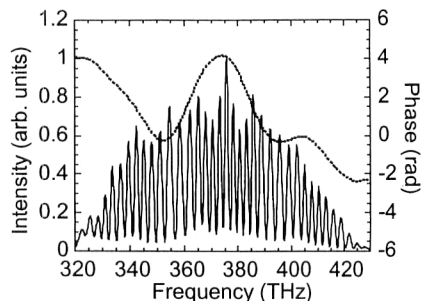


図3 観測されたチャープパルスの一例。

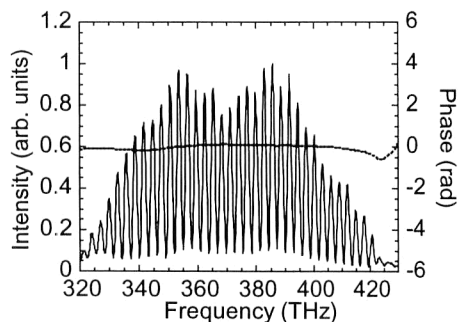


図4 観測された残留分散補償後のパルスの一例。

す。図4は先に示したパルス伸長器とパルス圧縮器の残留分散を空間位相変調器による分散補償器で打ち消した例です。図3と図4のスペクトルを比較すると, 位相変化が大きい場合にはスペクトル干渉縞の間隔が一定ではないことがわかります。一般的に, この干渉縞の間隔をみることで, 位相を計算しなくても位相の変化が顕著であるかどうかの目安になります。このあたりもシアリング干渉計と同じです。シアリング干渉計では干渉縞の間隔の変化から空間的な位相差の変化がわかるのに対し, SPIDERでは周波数差 Ω に対する位相差 $\Phi(\omega) - \Phi(\omega - \Omega)$ がわかるのです。位相の変化が顕著でなければ図4の実線のようにフリンジの間隔はほぼ一定になるはずで

SPIDERは, FROGなどと違って原理的に時間遅延を変えながらスペクトルを測定する必要がないので one-shot での測定が可能です。また, アップコンバージョンに際して SHG 結晶上にレーザーパルスを1点に集光して構わないので, モード同期発振器出力パルスのようなエネルギーの低いパルスや低線

表1 位相測定法の比較.

測定法	ワンショット測定	微弱光	時間前後同定	繰り返し計算	光学系の容易さ	検出器	分光器の分解能	チャープパルス	直感性
SHG FROG	×	○	×	必要	○	1次元	○	△	△
PG FROG	○	×	○	必要	○	2次元	○	△	○
SPIDER	○	△	○	不要	△	1次元	△	△	△

り返しレーザーのパルスでも測定可能です。また、前に述べましたように測定データからの位相の算出に繰り返し収束計算の必要がありません。しかし、2つのパルスのスペクトル干渉縞を観測するため、FROGに比べると高い分解能をもつ分光器が必要になります。また、位相を計算する際にチャープパルスは被検パルスの時間幅では周波数が変わらないという仮定をしているため、入射パルス幅が残留分散によるチャープが大きいと、この仮定からはずれて正確な位相測定は困難となる場合があります。

このSPIDERを含めて、SHG FROG(ここでいうSHG FROGは微弱光のためのディレイを変えながらスペクトルを測定するタイプ)¹⁾とPG FROG²⁾の比較を表1に示します。

実際のSPIDER装置設計における注意すべきパラメーターは、チャープパルスのチャープ量、2つの被測定パルスの間隔 τ 、2つのアップコンバージョン光の周波数間隔 Ω です。これらは互いに密接な関係にあり、 Ω が同じなら、 τ とチャープ量は比例の関係にあります。残留分散の大きなパルスを正確に測定するにはチャープパルス幅を大きくし、被測定パルス間隔 τ を大きくする必要があります。しかし、その場合にはチャープパルスのピークパワーが小さくなるので感度が落ちてしまいます。また測定パルスの間隔を大きくすると、観測スペクトルのフリッジ間隔が狭くなるので分光器の分解能の問題があります。また、CW光の周波数間隔 Ω が広がるので位相を計算する際のサンプリング間隔が粗くなってしまいます。これらの現実的なパラメーターの設定には、まず被測定パルス幅により被測定パルス間隔 τ を決め(最低でも被測定パルス幅の10倍

以上、可能ならば100倍以上)、次に用意する分光器の分解能を決め、後にチャープパルス幅を被測定パルス間隔 τ より十分広くなるように決めます。

装置校正のために、位相計算時に必要となる被測定パルス間隔 τ 、CW光の周波数間隔 Ω 、アップコンバージョン周波数を測定する場合、可能な限りフーリエ限界に近いパルス光を用いて行うことが望ましく、残留チャープが無視できないパルスでは正しい校正を行うことは困難です。また、アップコンバージョン周波数を測定する場合にSHG結晶に厚いものを用いると位相整合波長幅が狭くなり、正確なアップコンバージョン周波数がわかりにくいです。そのため、パルスのもつ波長幅に比べて位相整合波長幅がなるべく広い結晶を用いてアップコンバージョン周波数を測定したほうがよいと思います。ちなみにSHG結晶としてよく用いられるBBOのtype I位相整合波長幅(発生効率の半値全幅、基本波中心波長は800 nm)は結晶厚30 μm 、100 μm 、300 μm でそれぞれ約190 nm、50 nm、16 nmです。

この記事に対するご意見は、omatsu@image.cp.chiba-u.ca.jpあるいはoptics@kobe-u.ac.jpまで。

(高田 英行)

文 献

- 1) K. W. DeLong, R. Trebino, J. Hunter and W. E. White: J. Opt. Soc. Am. B, **11** (1994), 2206.
- 2) D. J. Kane and R. Trebino: Opt. Lett., **18** (1993) 823.
- 3) R. Trebino, K. W. DeLong, D. N. Fittinghoff, J. N. Sweetser, M. A. Krumbugel, B. A. Richman: Rev. Sci. Instrum., **68** (1997) 3277.
- 4) C. Iaconis and I. A. Walmsley: IEEE J. Quantum Electron., **35** (1999) 501.