

## 超短パルス光源を用いた光学系の設計方法

光学読者の皆様も、研究を進める上で光学系の設計やアライメント作業を経験されていることと思う。高信頼性な実験結果を得るには、光学部品の適切な選定や高精度なアライメント技術は不可欠である。特に、高強度な超短パルス光源を使用する際は、取り扱い方に注意を要する。しかし、アライメント技術は一般の専門書や Web 検索には詳しく書かれておらず、個人の経験やノウハウに依存するところが大きい。本稿では、筆者が実際に経験してきた事例をもとに、フェムト秒レーザー光源を用いた光学系の設計やアライメント方法について、具体例や注意点を挙げながら紹介する。

## 1. フェムト秒レーザーを光源とした応用

フェムト秒レーザーの最大の特徴は、高強度性・広帯域性・超短パルス性にある。フェムト秒レーザーを光源とした光学系は、透明材料の三次元微細加工<sup>1)</sup>、三次元光造形<sup>2)</sup>、化学反応のコヒーレント分子制御<sup>3)</sup>、非線形光学顕微鏡<sup>4)</sup>、光周波数コムを用いた精密周波数計測<sup>5)</sup>、および超高速ダイナミクスの時間分解計測<sup>6)</sup>を含む幅広い分野で用いられている。これらのアプリケーションでは、フェムト秒レーザーの高強度性・広帯域性・超短パルス性を維持するための光学系の設計が最も重要となる。

## 2. 光学系の設計やアライメントのポイント

フェムト秒レーザーの高強度性や広帯域性を維持するには、光学系におけるエネルギーの伝送ロスを極力抑えることが重要であり、フェムト秒レーザーが有する広帯域な波長に対して、高い透過率や反射率を有し、かつ高い損傷閾値をもつ光学部品を選定することが望ましい。対物レンズを用いる場合には、光利用効率や対物レンズの開口数の有効利用の観点から、レンズの瞳径に対してレーザーのビーム径が等しくなるように光学系を設計する必要がある。ま

た、加工光学系のような高いパルス強度 (1 mJ 以上) を有するフェムト秒レーザーの使用においては、自己位相変調によるスペクトル形状の変化を抑制するために、厚みのある光学素子の使用は避けるか、反射型の素子のみで光学系を設計することが好ましい。加えて、光カー効果による自己集束によって、対物レンズの集光位置がパルスエネルギーに依存して z 方向にシフトするので、アライメントに注意が必要である。

フェムト秒レーザーの超短パルス性、つまりパルス形状を維持するには、フェムト秒レーザーの有する波長帯域全体にわたって一定の位相関係を保持しつつパルス伝送可能な光学系を設計することが重要である。通常、光学部品として用いるレンズやミラーは、可視から近赤外域にかけて低周波数 (長波長) の光の位相が速く伝搬する正常分散を示すため、光学系伝送時にはフェムト秒パルスの形状変化やパルス伸長が生じる。特に 100 フェムト以下のパルス幅を有する光源を使用する場合、広い帯域幅を有するため、分散による影響は顕著になる。フェムト秒レーザーのスペクトル位相  $\phi(\omega)$  を中心周波数  $\omega_0$  近傍でテイラー展開すると、次式が得られる。

$$\phi(\omega) = \phi(\omega_0) + \phi'(\omega_0)(\omega - \omega_0) + \phi''(\omega_0)(\omega - \omega_0)^2/2 + \dots \quad (1)$$

ここで、 $\phi' = d\phi(\omega)/d\omega$ 、 $\phi'' = d^2\phi(\omega)/d\omega^2$  である。 $\phi''$  は群遅延分散 (GDD: group delay dispersion) とよばれ、その単位長さ当たりの値が群速度分散 (GVD: group velocity dispersion) として定義される。GVD はチャープとよばれるパルスの瞬時周波数の時間変化を誘起し、パルス形状に影響を与える。式 (1) より、所望のスペクトル位相を保つには、GVD の値が極力小さい光学部品を選ぶか、負の分散をスペクトル位相に意図的に与えて、光学系伝送時に生じる正の分散を補償する必要がある。補

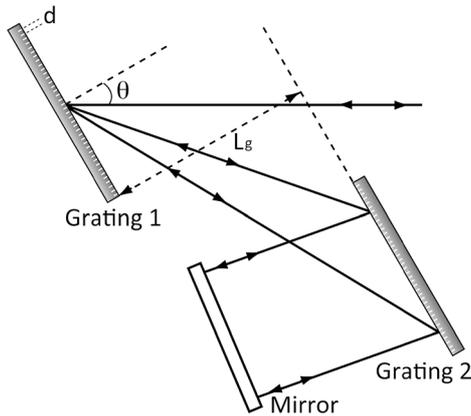


図1 グレーティング対を用いた分散補償光学系.

償方法には、グレーティング対やプリズム対、および負分散ミラーを用いる方法がある。図1は、グレーティング対を用いた補償光学系を示す。光学系によって与えられるGDDは、以下の式で与えられる。

$$\text{GDD} = -\frac{\lambda^3 L_g}{\pi c^2 d^2} \left[ 1 - \left( \frac{\lambda}{d} \sin \theta \right)^2 \right]^{-3/2} \quad (2)$$

ここで、 $\lambda$ ,  $c$ ,  $d$ ,  $L_g$  および  $\theta$  はそれぞれ、中心波長、光速、グレーティングピッチ、グレーティング間距離、およびグレーティング1への入射角である。実際には、 $L_g$  に比例して負のGDDが与えられる。プリズム対や負分散ミラーに比べると、グレーティング対を用いた方法は、グレーティングの回折効率に依存して光の利用効率は落ちるが、大きな負分散量を付与できる特徴がある。

実際の光学系では、パルス伝送の終着点であるサンプル面で群速度分散を補償する必要がある。分散補償されたフェムト秒パルスは一定のスペクトル位相を保持し、帯域幅で決定される最小パルス幅(フーリエ限界パルス幅)を有する原理を利用して、サンプル面での分散補償を行う。それは、非線形光学結晶や二光子吸収信号を取得可能な光検出器をサ

ンプル面に配置し、二倍波強度や二光子吸収信号を計測することで達成される。これらの非線形信号  $S_{\text{NL}}$  は、パルスのピーク強度  $I_{\text{peak}}$  の2乗に比例する。

$$S_{\text{NL}} \propto I_{\text{peak}}^2 = \left( \frac{I_{\text{avg}}}{s\tau} \right)^2 \quad (3)$$

ここで、 $I_{\text{avg}}$ ,  $s$ ,  $\tau$  はそれぞれ、平均光強度、サンプル面での集光ビーム径、およびサンプル面でのパルス幅である。式(3)より、 $S_{\text{NL}}$  が大きくなるように、つまりパルス幅が最小になるように、分散補償光学系を調節する。

本稿では、サブ100フェムト秒超短パルスレーザーを用いた光学系設計におけるいくつかの重要なポイントを紹介した。本稿のような表に出ない知識の共有や認識は、研究をより効率的に進める上で大変有用であると考えられる。特に、これから超短パルスレーザーを用いた光学系を組もうと考えておられる初心者の皆様には、必ずお役に立てると思う。

(宇都宮大学 長谷川智士)

## 文 献

- 1) E. N. Glezer, M. Milosavljevic, L. Huang, R. J. Finlay, T.-H. Her, J. P. Callan and E. Mazur: "Three-dimensional optical storage inside transparent materials," Opt. Lett., **21** (1996) 2023-2025.
- 2) S. Kawata, H. Sun, T. Tanaka and K. Takada: "Finer features for functional microdevices," Nature, **412** (2001) 697-698.
- 3) R. J. Levis and H. A. Rabitz: "Closing the loop on bond selective chemistry using tailored strong field laser pulses," J. Phys. Chem., **106** (2002) 6427-6444.
- 4) W. Denk, J. H. Strickler and W. W. Webb: "Two-photon laser scanning fluorescence microscopy," Science, **248** (1990) 73-76.
- 5) Th. Udem, R. Holzwarth and T. W. Hänsch: "Optical frequency metrology," Nature, **416** (2002) 233-237.
- 6) T. S. Rose, M. J. Rosker and A. H. Zewail: "Femtosecond real-time probing of reactions. IV. The reactions of alkali halides," J. Chem. Phys., **91** (1989) 7415-7436.