

超短パルスレーザーの群遅延分散入門

オリビア・ホイラー

超短パルスレーザーの非常に短いパルス幅を管理するのは、骨の折れる作業かもしれない。他とは異なるその時間的特性に精通していない場合は、特にそうである。群遅延分散(Group Delay Dispersion: GDD)を理解することで、非常に短いパルス幅を維持することの難しさや不確実性を軽減し、レーザーの性能を最大限に引き出すことができる。

超短パルスレーザーは、ピコ秒(ps)からフェムト秒(fs)のパルス幅(パルス持続時間)を特徴とし、そのような非常に短いパルスが可能なのは、レーザーのスペクトル帯域幅が広いためである。非常に短い特定のパルス幅を達成するために必要となる、レーザーの最小スペクトル帯域幅が存在し、その値は、時間帯域幅積(Time Bandwidth Product: TBP)によって決まる。

「超短パルスレーザーの基礎:パート1」⁽¹⁾で説明したこの関係は、非常に短いパルス幅を維持するには、レーザーの広いスペクトル帯域幅を維持する必要があることを意味する。

ピンク・フロイド(Pink Floyd)というロックバンドを知っている人ならば、

分散を全く知らないわけではないだろう。白色光がプリズムを通ると虹色に分かれるのと同じ効果によって、単一のレンズを通したその光の集束も複雑になる。屈折率は波長によって異なるため、異なる波長の光は、光学媒体を通過すると、異なる物理的位置に集束する。例えば、図1(a)は、紫外線(UV)溶融シリカの屈折率を波長の関数として示したものである。異なる波長の光を単一素材のレンズに通した場合の効果、図1(b)に示す。

超短パルスレーザーについて、時間的な観点からこの現象を考えてみよう。複数波長成分からなるパルスが、媒体を通過する様子を思い浮かべてほしい。この場合は、異なる波長に対して

異なる位相シフトが、媒体によって付加される。これは、群遅延分散(GDD)として知られる現象である。

溶融シリカの群速度分散(Group Velocity Dispersion: GVD)、すなわち、単位厚さあたりのGDDを、図2のグラフに示す。色分散がレンズによる各色の集束位置に影響を与えるのと同じように、GDDはパルスの波長成分が光学媒体から出射するタイミングに影響を与える。図2の下半分は、この影響を図示したものである。超短レーザーパルスは、正のGDDにより、赤色成分が青色成分よりも先に媒体から出射する。言い換えると、GDDは、所定の厚さの光学媒体を通過する際に、異なる波長成分がどれだけ遅延するかを表す、定量的な指標となる。

GDDがパルスに与える影響は、入力パルス幅に依存する。短い入力パルスほど、GDDによって大きく引き伸ばされる。式(1)はこの関係を表している。

$$\tau_{\text{output}} = \tau_{\text{input}} \sqrt{1 + \left(4 \ln(2) \frac{GDD}{\tau_{\text{input}}^2} \right)} \quad (1)$$

また、GDDが大きいほど、入力パルスは大きく引き伸ばされることになる。

システム内のGDDの概算方法

超短パルスレーザーシステムからの圧縮パルスを起点とすると、光学経路における主要なGDD源は、光学部品である。特定のシステムにおけるGDDの適切な最初の概算値を得るには、各透過部品のGDD寄与を測定する。

GDD特性評価用の白色光干渉計で

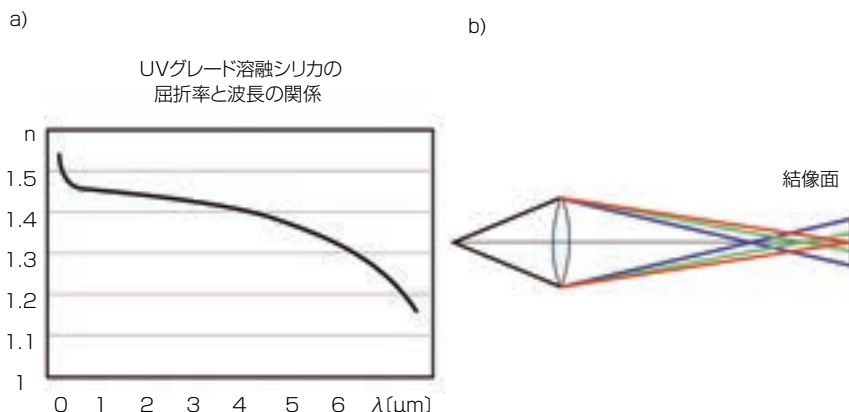


図1 (a) UVグレード溶融シリカの屈折率を、波長の関数として表したグラフ。この分散が、超短パルスレーザーパルスの時間的な歪みにつながる恐れがある。(b)単一レンズを通して白色光源を集束させようとする、色成分によって焦点面が異なる状態になる。これは、媒体を通過する超短パルスに時間的な歪みが生じる現象に似ている(画像提供: エドモンド・オブティクス社)

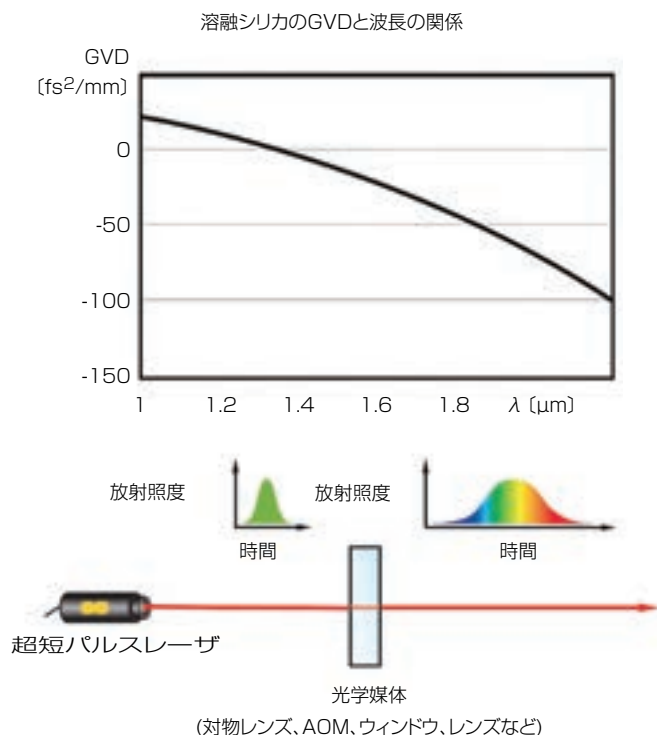


図2 上のグラフは、溶融シリカの群速度分散（GVD：単位厚さあたりのGDD）を示しており、下の図は、正のGDDが超短パルスに与える影響を表している。光学媒体を通過した後、パルスの長波長成分は短波長成分よりも先に出射する。これは、光学媒体の累積GDDが正であるためである（画像提供：エドモンド・オブティクス社）

各部品を測定するか⁽²⁾、基材や厚みに基づいて推定することにより、これを行うことができる。例えば、3mmの反射防止コーティングされた溶融シリカウィンドウが経路内にある場合は、パルスの中心波長におけるシリカのGVDを調べることによって、そのGDDを推定する。refractiveindex.infoなどの屈折率データベースに、そのような情報が記載されている。

GVDに媒体の厚み（この例では3mm）を乗じることにより、ウィンドウのGDDを推定することができる。入力パルスがどれだけ引き伸ばされるかを近似するには、システム内のすべての透過素子についてこの手順を繰り返し、個々のGDD寄与をすべて合計して、その値を式(1)に代入する。

非常に短いパルス（約50fsまたはそれ以下）を使用する場合は、この近似方法ではうまくいかない可能性がある。パルス幅がそこまで短くなると、超短

パルスアプリケーション向けに最適化されていないミラーなどの反射部品の寄与や、その他の分散効果が、パルス幅に大きな影響を与える可能性がある。

システム内のGDDを防ぐ方法

光学経路内の透過部品が、GDDに対する主要な寄与因子である。可能であれば、透過部品を避けて、代わりに反射素子を使用するのが最善策である。

しかし、多くのアプリケーションで透過部品は欠かせない要素である。そのような場合は、溶融シリカのような光学材料でできた薄い素子を、可視域と近赤外域（NIR）のパルスに対して選択することにより、GDDを最小限に抑える。例えば、薄い溶融シリカレンズのほうが、厚いBK7レンズよりもGDD寄与が小さいため、望ましい。光学性能の制約により、薄い素子を使用できない場合は、大きさが等しい逆符号のGDDを付加する部品を使用す

ることによって、GDDを補償することができる。

パルスが非常に短い場合は、反射部品であっても超短パルス用ではないコーティングが施されているものは、不要なGDDを付与し、著しい時間的歪みを引き起こす可能性がある。そのような場合は、入射パルスに最小限のGDDを付加するように最適化されたミラーを使用するとよい（図3）。

GDDの補償方法

透過部品を最小限にして低GDDのコーティングを選択しても、GDDは残ってしまう場合が多い。引き伸ばされたパルス幅が、アプリケーションに対して長すぎる場合は、光学部品のGDDの一部またはすべてを補償することにより、パルスを再圧縮する必要がある。

パルスを再圧縮する手段としては、高分散ミラー、チャープミラーペア、回折格子（透過型と反射型）、プリズム

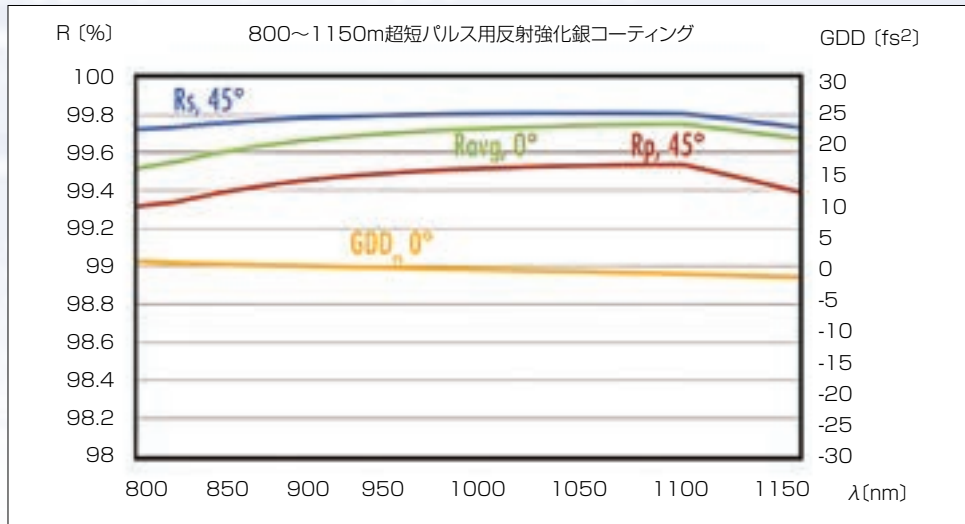


図3 GDDが低くなるように最適化されたミラーのコーティング性能の例。超短パルスレーザーアプリケーション用のミラーは、反射率と、超短パルスレーザーの損傷しきい値も高くなるように最適化されている。詳細については、「超短パルスレーザーの基礎：パート2」(www.laserfocusworld.com/14292432)⁽⁴⁾を参照のこと(画像提供:エドモンド・オブティクス社)

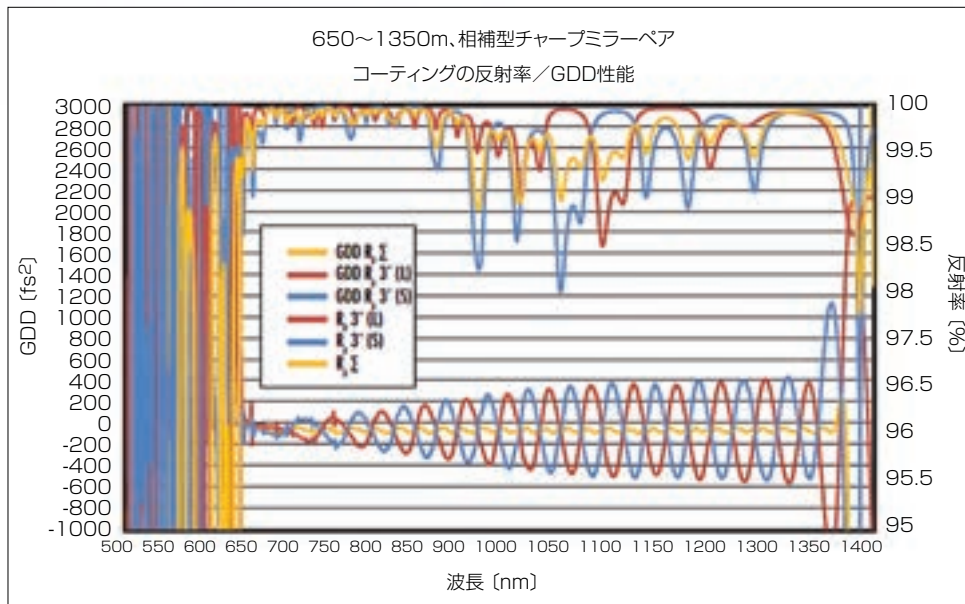


図4 相補型チャープミラーペアの性能グラフ。これらのミラーは、図5に示すようにペア(⊕)で使用することにより、個々のミラー(LとS)に存在するGDDの変動を相殺する(画像提供:エドモンド・オブティクス社)

など、さまざまな方法がある。それぞれの光学部品によって超短レーザーパルスを再圧縮する方法の詳細については、「超短パルスレーザーの基礎：パート3」⁽³⁾を参照してほしい。

付加されるGDDを補償するためにどの方法が最適であるかは、アプリケーションに大きく依存する。以下では、3つの仮説的なシナリオ(ただし、非常に現実的なものである)を示して、特定のパルス再圧縮方法を実装する際に検討すべき項目について説明する。

GDD 寄与が既知の固定の光学経路。

このシナリオでは、光学経路の素子が固定で、それぞれのGDD 寄与がはっきりとわかっている。OEM レーザインテグレーターが超短パルスレーザー微細加工装置を設計する場合は、このような状況に該当する可能性がある。

インテグレーターは、顧客がターゲット材料を効果的にアブレーションするために、515nm で100fs のパルス幅が必要であることを知っているが、光学経路内のビームエクspander、走査レンズ、さまざまなフィルタによって、元のパルスは約250fs に引き伸ば

されている。

ターゲットパルス幅に戻すためには、これらの光学部品によって付加される約8300fs²のGDDを補償しなければならない。このシステムの仕様は固定なので、高分散ミラーをこの光学経路に使用することが、このパルスを再圧縮するための適切な選択肢となる。

1回の反射で約-1000fs²のGDDを付加する高分散ミラーで、引き伸ばされたパルスを8回反射させると、このシステムで付加されたGDDの大半が補償されることになる。この方法では

300fs²のGDDが残るが、パルス幅は100fsであるため、この分散量による影響は無視できる。

スペクトルが広く、GDDが大まかに概算できている。レーザパルスのスペクトルが非常に広く、パルス幅は非常に短いという状況を考えてみよう。低GDDの反射部品が光学経路全体を通して使用されているが、試料面で非常に高い光量子束を得るには、集光対物レンズが極めて重要である。

この状況は、超短パルスレーザの非常に高いピーク出力を利用して生体試料の詳細画像を生成するために、多光子顕微鏡を使用する人にとって、珍しいものではない。

この場合は、対物レンズのGDDを補償しなければならないが、正確な仕様はわからない。また、付加される負のGDDの関数として画質を評価することが、求められている。これを、スペクトル帯域幅が広いことと合わせて考えると、相補型チャープミラーペアがこの場合の適切な選択肢である。

図4のグラフに示すような性能を備えたミラーを使用すれば、2つのミラーの間の反射回数を増加させることによってGDDを少しずつ漸進的に変化させることができる。最適な画質が得られた時点で、集光対物レンズによって付加されるGDDが適切に補償されたことになる。図5は、チャープミラーペアの光学配置例を示したものである(図中ではパルス圧縮ミラーと表記されている)。

GDDが大きく、柔軟性が高い。このシナリオは、超短パルスレーザシステムを設計している最中を想定したものである。レーザそのものに、設計に基づく一定量のGDDがあり、エンドユーザーのアプリケーションでどれだけのGDDを補償しなければならない

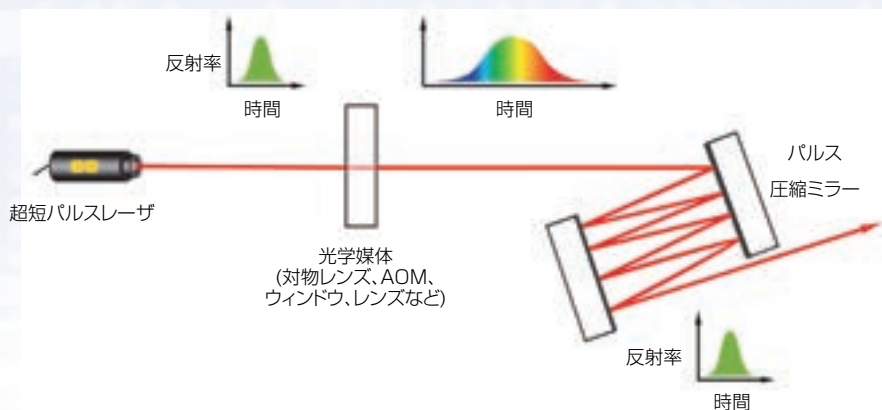


図5 パルス圧縮ミラーとしてこの図に示されている相補型チャープミラーペアは、2つのミラーの間の反射回数を増加させることによってGDDを少しずつ漸進的に変化させることができるため、顕微鏡に対する良い選択肢である(画像提供:エドモンド・オブティクス社)

かは不明である。

レーザ設計のGDDは10⁴fs²程度で、広範囲でチューニング可能とすることが求められている。この状況は、商用の超短パルスレーザシステムを設計しているレーザエンジニアにとって、容易に起こり得るものである。

この場合は、回折格子(グレーティング)コンプレッサーの柔軟性が望ましい可能性がある。特定の中心波長用に設計された2つの透過型回折格子を使用して、回折格子間の距離が可変の回折格子コンプレッサーシステムを実装することができる。この方法は、レーザそのものが持つGDDだけでなく、

エンドユーザーの光学経路内で付加されるその他のGDDも補償する柔軟性を備える。

上記の3つのシナリオは、すべてのGDD補償方法を網羅するものではなく、特定の方法を選択する際に検討しなければならないさまざまな項目を示すことを目的としている。GDD量の概算から補償方法の決定まで、アプリケーションやシステムによって検討すべき項目はそれぞれ異なる。自分の超短パルスアプリケーションに対する最善の方法を見極めるための支援が必要な場合は、光学サプライヤーにソリューションの探索を依頼してほしい。

参考文献

- (1) See www.laserfocusworld.com/14291054. / Laser Focus World Japan 2023 年9月号 P38
- (2) See www.edmundoptics.com/knowledge-center/application-notes/optics/group-delay-dispersion-and-white-light-interferometry.
- (3) See www.laserfocusworld.com/14294148.
- (4) See www.laserfocusworld.com/14292432.

著者紹介

オリビア・ホイラー博士(Olivia Wheeler, Ph.D.)は、米エドモンド・オブティクス社(Edmund Optics)の超短パルスレーザ光学エンジニア。
e-mail: owheeler@edmundoptics.com URL: www.edmundoptics.com

ILSJ