

石英薄板の3次非線形効果を用いた広帯域光発生

Supercontinuum pulse generation using third-order nonlinearity of thin fused silica plates.

植田隆太(B4), 伊佐文宏(M2), 肥田遼平(B4), 鈴木敬和(M1)

Ryuta Ueda, Fumihiko Isa, Ryohei Hida, Takakazu Szuki

Abstract

We try to generate supercontinuum pulses using thin fused silica plates. In spite of its relatively simple optical setup, the beam spot size at each plate must be carefully selected to avoid damage and filamentation. Using four thin quartz plates, some preliminary experiments are performed.

1. はじめに

フェムト秒レーザを非線形媒質に入射することで非線形光学効果を起こし広帯域光を発生させることはよく知られている。そして、その広帯域光は、光パラメトリック増幅器のシード光や、高次高調波発生やアト秒パルス発生に必要な数サイクル領域パルス発生も可能とする。白色光発生の方法の一つに固体非線形媒質を用いる方法がある。固体非線形薄板を用いることで[1,2], 効率よく白色光発生を行えるが、固体媒質に高強度のパルスが入射した時、固体媒質はその固体の持つ損傷閾値を超えてしまい損傷してしまう恐れがあり、取り扱いに注意が必要である。また、固体非線形媒質の作用長を伸ばすと、ホットスポットが出来て、ビーム品質を低下させてしまうという欠点もある。

我々は、従来用いてきた希ガス封入中空ファイバーに代わる簡便でスループットの高い方法として石英薄板を用いた白色光発生について調査を行った。

2. 石英薄板を用いた白色光発生

CPA からの中心波長 810 nm, 平均強度 400 mW,

繰り返し周波数 1 kHz, 時間幅 50 fs (FWHM) のパルスレーザを光源として用いた。Fig.1 に今回用いたセットアップを示す。CPA 後のパルスを $f = 1500$ mm のレンズで、ブリュースタ角で配置した 50 μ m の薄板に集光した。この時の集光点のビーム径は 0.314×0.498 mm であった。そして4枚の薄板に透過後、分散補償鏡で2次分散補償を行い、再び薄板に集光し、透過させた。

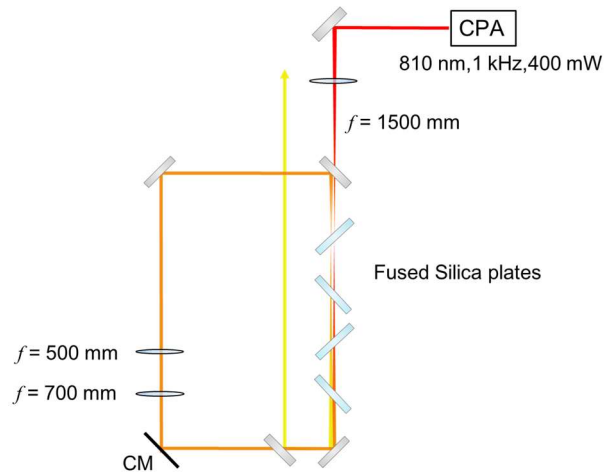


Fig.1 Experimental setup of SC generation using fused silica plates.

まず、石英薄板の詳細な配置を決める為に、Fig.2 のように ABCD 行列を解いて、ビーム径の変化を計算した。この時、石英薄板内で発生するカー効果は、薄レンズが石英薄板内にあると近似を行った。この時の焦点距離を f_{NL} とすると、(1)式のように書ける。

$$f_{NL} = \frac{4n_2 z P_{peak}}{\pi w^4} \quad (1)$$

ここで、 n_2 非線形屈折率、 z は石英薄板の厚さ、

P_{peak} は入射パルスのピークパワー、 w はビーム径である。

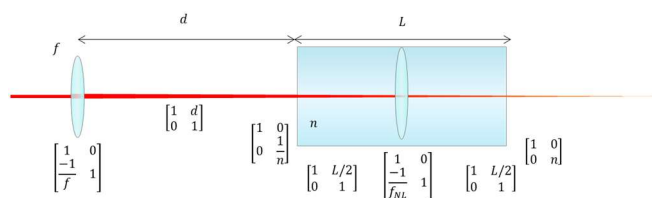


Fig.2 Schematic of numerical calculation of beam diameter change considering optical Kerr effect.

この ABCD 行列の計算により、薄板の配置を決めた。2 種類の計算結果について示す。まず、Fig.3(a)のように焦点を中心として、レイリー長内に薄板を 4 枚配置した時の計算結果を(b)に示す。これにより、石英薄板のカー効果の影響で、薄板 1 枚が $f_{NL} = 100$ mm のレンズとして働いており、4 枚が 3 次非線形光学効果を効率良く起こすようなビーム径で伝搬できない事がわかった。そこで、(c)のような、集光点後に薄板を配置することで、カー効果の影響を和らげるのではないかと考え計算した。その計算結果を(d)に示す。これにより、ビーム径を最適な大きさに維持しつつ伝搬させることが出来た。

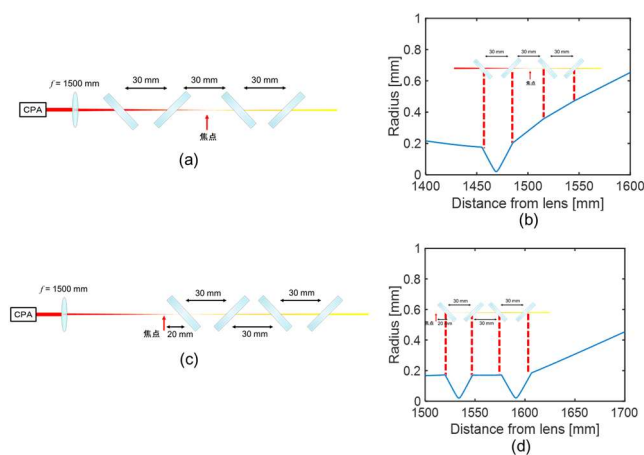


Fig.3 Changes of the beam radius during propagation of two different optical layouts (a) and (c).

このようにして、集光点後に石英薄板を 30 mm 間隔で配置して実験を行った。この時の、薄板の透過枚数とスペクトルの関係を示す。

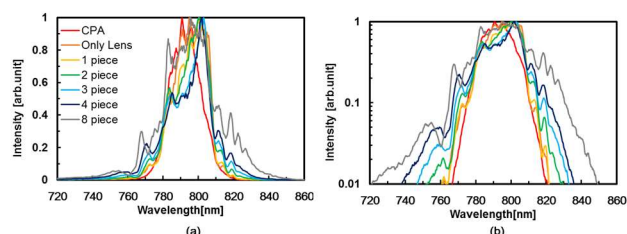


Fig.4 Dependence of SC spectrum on the number of 50 μm fused silica plate after precise adjustments. (a) linear scale (b) log scale.

この結果から、720~850 nm の広帯域化が観測された。ただし、希ガス封入中空ファイバーで得られている広帯域化に比べると断然に弱いことがわかる。

また、同様の手順での実験を厚さ 100 μm の薄板でも実験を行った。その結果を Fig.5 に示す。

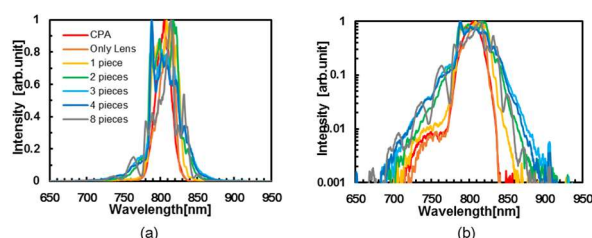


Fig.5 Dependence of SC spectrum on the number of 100 μm fused silica plate after precise adjustments. (a) linear scale (b) log scale

この結果から、650~920 nm の広帯域化を確認出来た。しかし、1 枚目から 2 枚目の間の広帯域化幅が最も大きく、2 枚目以降の広帯域化が不十分な結果となってしまった。原因として、分散が乗り、ピークパワーが低下してしまったことがあげられる。

3. 希ガス封入中空ファイバと石英薄板の組み合わせによる白色光発生

50 μm の石英薄板を 8 枚透過したパルスを, Fig.6 のセットアップのように, エクスパンダでビーム径を調整し分散補償した後に, 中空ファイバへ入射してみた.

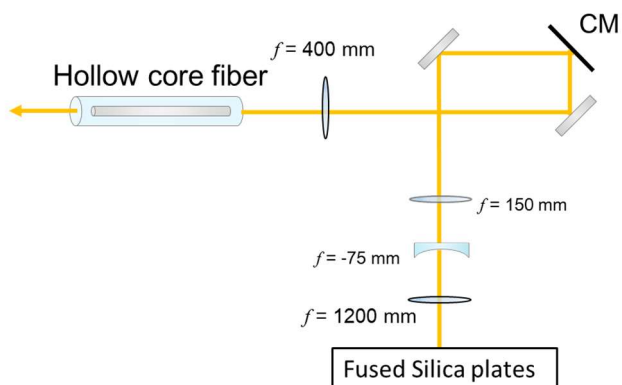


Fig.6 Experimental setup of SC generation by HCF using a broadband pulse generated by fused silica plates.

この時の中空ファイバ後のスペクトルを Fig.7(a), (b)に示す. また, この時入射強度が 174 mW と小さい為, 封入ガスは Kr を用いた. そして, (c), (d) に, 比較として, CPA 後の FTL パルスを 174 mW の強度で直接入射させた時の結果を示す. Kr 300 kPa の時, 透過効率は 28.7%で, 出射強度は 50 mW であった.

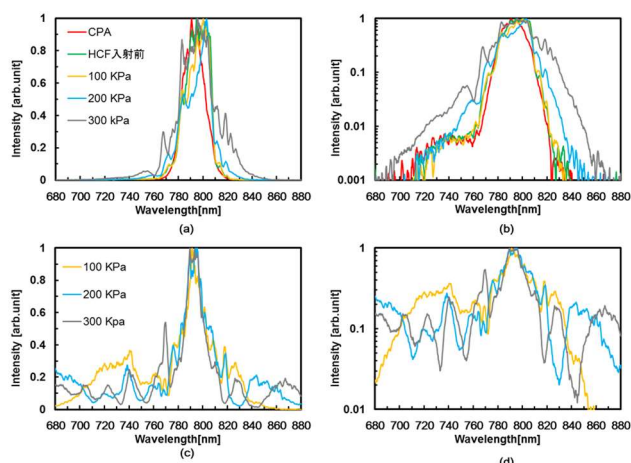


Fig. 7 (a) and (b) are SC spectra after the HCF filled by Kr gas using the broadband pulse generated by the fused silica plates. Input power is 174 mW. (a) in linear scale, and (b) in log scale. (c) and (d) are SC spectra after the HCF filled by Kr gas using the FTL 50-fs laser pulse. (c) in linear scale, and (d) in log scale.

この結果より, 680~880 μm の広帯域化が観測出来たが, FTL パルスを直接入射した時に比べ広帯域化幅の低い結果となった. 入射強度を揃えたので, パルス圧縮された広帯域入射パルスの方が非線形効果を起こしやすいはずであるが, 4波混合的な広帯域化が起きていないので, 分散補償が十分でなかった可能性がある.

4. まとめ

今回, 高効率で白色光発生を行えるとの観点から, 固体非線形薄板を用いた広帯域光発生を行った. 固体非線形薄板のみで白色光発生を行った時, 厚さが 50 μm で 720~850 nm, 100 μm で 650~920 nm の広帯域化が観測された. そして, 50 μm の石英薄板後に中空ファイバを利用した白色光発生では 680~880 nm までの広帯域光発生が観測され, 透過効率は下がらずイオン化は発生しなかった.

しかし, 両実験においても, FTL を維持しながら石英薄板や中空ファイバへ入射させることに課題

があり、分散補償量の見直しが必要である。

今後、波形計測を行い FTL になるように位相を制御して実験を行う必要がある。また、固体媒質の損傷閾値も考慮して実験を行っている為、十分な強度で入射させられていない点も課題として残っており、損傷閾値の高い媒質で同様の実験を行えば、より広帯域化させられるのではないかと考えられる。

References

- [1] C.-H. Lu, Y.-J. Tsou, and H.-Y. Chen, "Generation of intense supercontinuum in condensed media," *Optica* **1**, 400–406 (2014).
- [2] P. Wang, J. Liu, F. Li, X. Shen, and R. Li, "Multicolored sideband generation based on cascaded four-wave mixing with the assistance of spectral broadening in multiple thin plates," *3*, 210–213 (2015).