

ガラス内部のフェムト秒レーザー誘起光導波路

*科学技術振興事業団 平尾誘起構造プロジェクト

**京都大学大学院工学研究科

三浦 清貴*・平尾 一之**,**

Femtosecond Laser-induced Optical Waveguides in Glasses

Kiyotaka MIURA* and Kazuyuki HIRAO**,**

*Hirao Active Glass Project, ERATO, JST-C

**Division of Material Chemistry, Faculty of Engineering

1. はじめに

光とガラスとの相互作用の応用例として、光ファイバー中へのブラッググレーティング書き込みが良く知られている^{1)~3)}。これらはガラスの固有吸収もしくは酸素欠陥に起因する吸収を、一光子あるいは二光子過程により励起し、屈折率変化を誘起させることにより実現される。これらの励起に使用される光源の波長は紫外或いは可視域であり、CW光もしくはナノ秒オーダーのパルス光が使用される。一方、近赤外域のフェムト秒レーザーによってもガラス内部における屈折率変化が誘起可能であることが知られている^{4)~6)}。フェムト秒レーザーとガラスの相互作用としては、多光子電離や電子なだれ、高温・高密度プラズマの生成やこれに伴うX線発生などが報告されている^{7),8)}。フェムト秒レーザーによる屈折率変化のメカニズムについては十分な解明がなされていないが、このようなレーザー光強度に依存した極めて多様な物理現象が関与していることが予想される。

我々は、フェムト秒レーザーを集光照射する

ことで、様々なガラス中に 10^{-2} ~ 10^{-3} のオーダーで屈折率変化が誘起可能であること、及びレーザーの集光スポットをガラス試料に対して連続的に走査することで、ガラス内部に自由自在にライン状の高屈折率化領域が形成できることを確認した^{4),5)}。一般的な光通信に使用されている光ファイバーのコアとクラッドとの屈折率差は 10^{-3} オーダーであることから、超短パルスレーザー照射によるこの屈折率の変化量は光通信の各種デバイスに用いる光導波構造を形成するのに十分な値である。また、フェムト秒レーザーによる光導波路書き込みでは、集光スポットを三次元的に走査することで、複雑な光回路をガラス内部へ書き込める可能性がある。そこで、我々は三次元光回路等への応用を目的として、フェムト秒レーザーによるガラス内部への光導波路書き込みに関する研究をしている^{9),10)}。ここでは、実際にガラス内部へ書き込んだ光誘起屈折率変化及び光導波路の例について紹介する。

2. 光導波路の書き込み方法

図1に屈折率変化及び光導波路の書き込みシステムを示す。光源には、モードロック Ti:

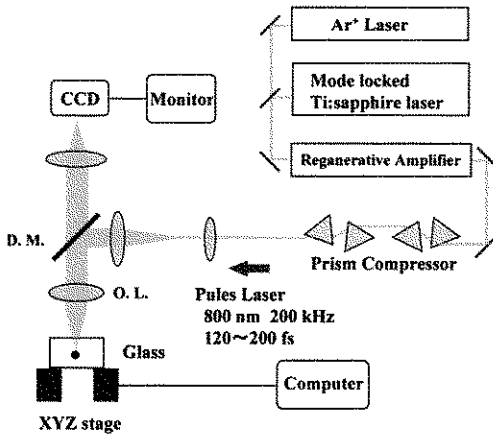


Fig. 1 Experimental setup of creating photo-written optical waveguide.

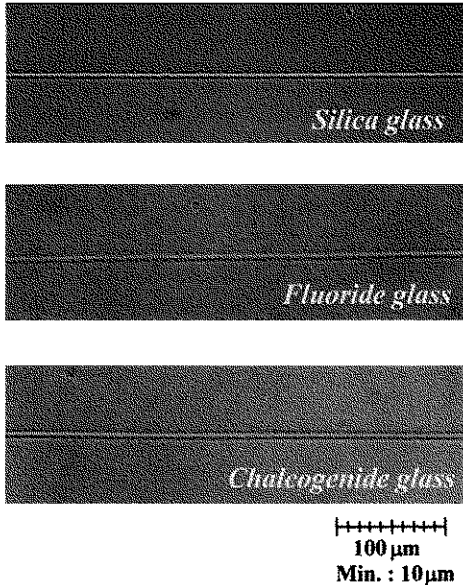


Fig. 2 Microscope photograph of photo-written optical waveguides in various types of glass.

Al_2O_3 レーザーを再生増幅して得られた波長：800 nm，パルス幅：120~250 fs，繰返し周波数 200 kHz のフェムト秒レーザーを使用した。レーザー集光及び照射ユニットは光学顕微鏡から成り，レーザーパルスの集光には対物レンズを使用した。このシステムにおいて，パルス幅はプリズム対を使用し，角度分散によって生ず

るプリズム間の群遅延分散とプリズム内の群遅延分散の組み合わせにより調節した。また，レーザーの平均出力は ND フィルターにより制御した。光導波路は 200 kHz の高繰返しパルスレーザーを使用し，コンピューター制御の XYZ ステージ上のガラスサンプルをレーザーの光軸に対して平行或いは垂直に移動させることにより書き込んだ。

3. 超短パルスレーザー誘起光導波路

図 3 に合成石英，フッ化物及びカルコゲナイドガラスの内部に連続的に光誘起屈折率変化を書き込んだレーザー誘起光導波路の例を示す。

また，レーザーの光軸に対してガラスサンプルを平行及び垂直に移動させることにより得られた各光導波路のコア断面を図 4(a), (b) にそれぞれ示す。いずれの方法においても断面が真円に近い光誘起屈折率ラインを書き込むことは可能であるが，対物レンズの焦点距離による物理的制限や全てのガラスに存在する非線形性による自己位相変調や群速度分散によるパルス幅の変動を考慮した場合，ガラス表面からの焦点位置が大きく変化する平行移動による書き込みは好ましい方法とは言えない。従って，複雑なパターンの三次元書き込みにおいては，光軸に対してサンプルを垂直に移動させる方がより書き込みに自由度があり，適した方法と言える。現在，我々は垂直移動による光導波路書き込みを中心に研究を進めているが，ここでは既にコア径及び屈折率制御において，ある程度の知見が得られている平行移動による光導波路書き込みについて紹介する。

図 4 に平均出力一定にし，パルス幅を変化させて得られた各光導波路の透過光強度分布を示す。この結果から，パルス幅が狭い，つまりピークパワーが高くなるに従い透過光強度が強くなっていることがわかる。これはコアの屈折率変化が大きくなっていることを意味する。ま

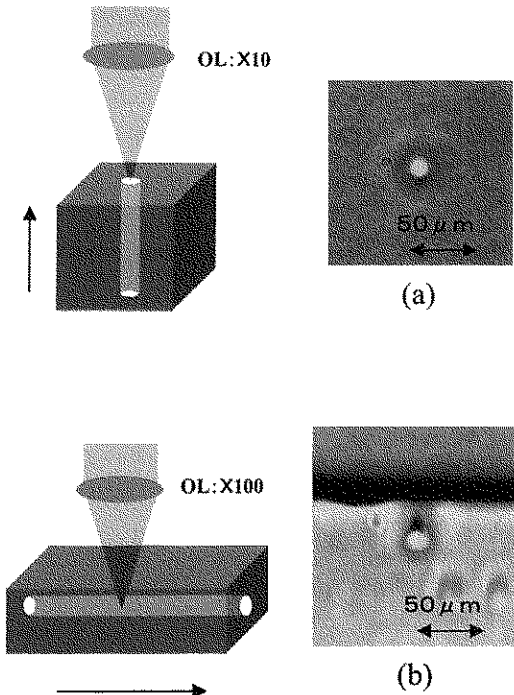


Fig. 3 Cross sections of waveguides by (a) translation of the glass parallel to the laser beam and (b) translation of the glass perpendicular to the laser beam.

た、コア径はパルス幅を狭くすることで小さくなる傾向にあることがわかる。この際コアの形状は真円を保っていることも確認している。一方、パルス幅を固定した状態で、平均出力を変化させて石英ガラス中に書き込んだ光導波路は、平均出力の増加に従いコア径が大きくなることを同様にして確認している。これらの結果は、平均出力増大とパルス幅短縮は、ピークパワーを高くする点では同じであるが、前者は時間軸のみが変化するのに対し、後者は強度分布の空間的な広がりを伴うことを考えれば理解できる。

また、一定の平均出力 (170 mW) 及びパルス幅 (120 fs) で、同じ領域におけるレーザー走査回数を変化させた場合は、走査回数を増やすことで、コア径は一定のまま屈折率差のみを大きくすることができる。これらの結果は、フ

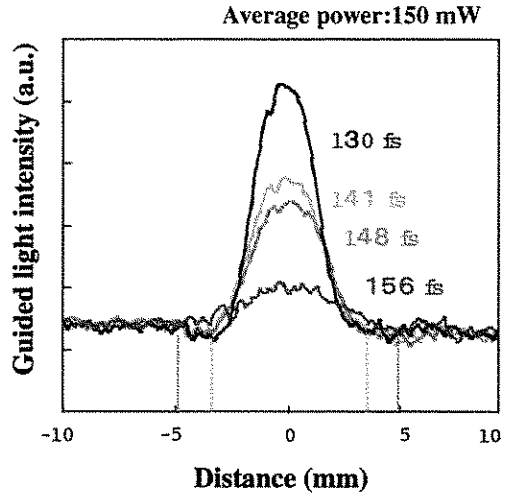


Fig. 4 Intensity profiles of the guided light for waveguides written at different pulse widths.

ェムト秒レーザーによる誘起光導波路の書き込みにおいて、平均出力、パルス幅及び走査回数のコントロールにより、任意のコア径及び比屈折率差を有する光導波路が書き込み可能であることを意味する。実際に条件を変えてフッ化物ガラス中に書き込んだ、異なるコア径の光導波路から得られたNFP(near field pattern)を図5に示す。この図において、コア径が8 μmの場合は基本モードのLP₀₁モード (linearly polarized mode) のみが伝搬されるが、コア径が太くなるに従い、より高次モードのLP₁₁, LP₂₂モードの伝搬が認められる。更に、図7のシングルモード光導波路 (コア径: 8 μm) において、波長を変化させながらFFPを観察した結果、シングルモードのカットオフ波長は800 nm付近であることがわかった。また、NFPのモードプロファイルをエルミート・ガウス関数でフィッティングした結果から、この光導波路はコア中心部の屈折率が1.502 (ベース: 1.499) で、屈折率が二乗分布の分布屈折率型であることを確認した。

以上、フェムト秒レーザーにより誘起される構造変化として、屈折率変化に焦点を絞りガラス内部への光導波路書き込みについて幾つかの

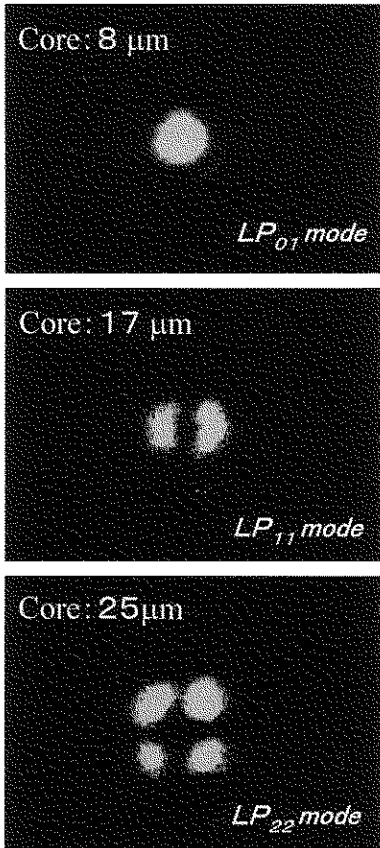


Fig. 5 Near-field patterns at 800 nm on fluoride glass waveguides where the core diameters are (a) 8 μm , (b) 17 μm and (c) 25 μm , respectively.

結果を示した。しかし、超短パルスレーザーの高いピークパワーを利用することで、複数の誘起構造を複合化することも可能である。その一例として、最後に光誘起屈折率変化と希土類イオンの価数変化とを組み合わせた例について紹介する。

図6は Eu^{2+} を含有したガラスにおいてフェムト秒レーザー照射により、コア領域のみ Eu^{2+} を Eu^{3+} に変化させた光導波路例である。図中(b)はアルゴンレーザーを光導波路に入射させた場合で、(a)はそれ以外の場所への照射例を示す。図中(b)において光が伝搬されるコア領域のみにおいて可視発光が認められる。図6(a), (b)の発光スペクトルを図7に示す。 Eu^{2+} は可視領域に殆ど発光が無く、 Eu^{3+} は ${}^5\text{D}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_1$ 及び ${}^5\text{D}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_2$ 遷移による発光が 590 nm 及び 620 nm 付近に存在する。このことから、光導波路のみにおいて希土類イオンの価数が変化していることが確認できる。このような屈折率変化とイオンの価数変化或いは他の誘起構造とを組み合わせることで、新しい光機能性ガラスの誕生、或いはガラスの新しい分野への応用の可能性が拡がることを期待したい。

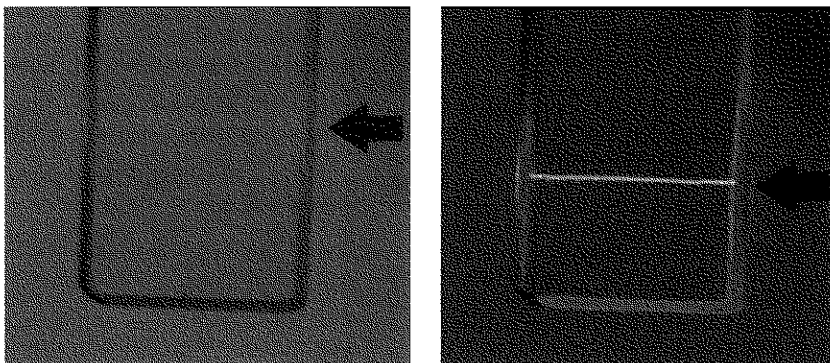


Fig. 6 An example of valence conversion ($\text{Eu}^{2+} \rightarrow \text{Eu}^{3+}$) in glass by 800 nm femtosecond laser. The excitation source is an Ar^+ laser (514.5 nm).
 (a) 800 nm femtosecond laser unirradiated part.
 (b) 800 nm femtosecond laser irradiated part.

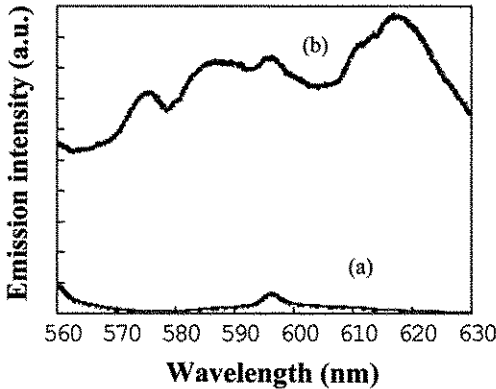


Fig. 7 Emission spectra of femtosecond laser unirradiated part (a) and irradiated part (b) of an Eu^{2+} doped glass.

The excitation wavelength is 514.5 nm (Ar^+ laser).

4. おわりに

フェムト秒レーザーによる光誘起屈折率変化を利用したレーザー誘起光導波路の書き込みについて紹介した。フェムト秒レーザーによる誘起屈折率変化のメカニズムについては残念ながら十分な知見が得られていないが、超短パルスレーザーによる屈折率変化の誘起はガラスの種類を限定しないことから、例えば非線形光学効果を有するガラスや種々の発光イオンを添加したガラスへの光導波路書き込みによる、高効率な非線形光学素子、光導波路レーザー、光増幅器等への展開も興味深い。更に、フェムト秒レーザーと他の外場、例えばX線、電圧や磁場等とを併用することにより、様々な誘起構造の複合化或いは誘起構造の周期制御が可能になれば、ガラス材料において全く新しいタイプの光機能素子が実現できるかもしれない。

5. 謝 辞

本研究を進める上でご協力いただいた科学技術振興事業団、平尾誘起構造プロジェクトの三露常男技術参事、鈴木智雄グループリーダー、邱建栄研究員、近藤裕己研究員、井上英幸研究員ならびに藤原誠司研究員に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) K. O. Hill, Y. Fujii, D. C. Johnson, and B. S. Kawasaki: *Appl. Phys. Lett.*, **32**, 647 (1978).
- 2) P. Cordier, J. C. Doukhan, E. Fertein, P. Bernage, P. Niay, J. F. Bayon, and T. Georges: *Opt. Commun.*, **111**, 269 (1994).
- 3) D. P. Hand and P. St. J. Russell: *Opt. Lett.*, **14**, 823 (1989).
- 4) 三浦清貴, 井上英幸, 田中耕一郎, 平尾一之: 第37回ガラスおよびフォトニクス討論会要旨集 p. 95 (1996, 秋) .
- 5) K. M. Daivis, K. Miura, N. Sugimoto, and K. Hirao: *Opt. Lett.* **21** 1729 (1996).
- 6) E. N. Glezer, M. Milosavljevic, L. Huang, R. J. Finlay, T.-H. Her, J. P. Callan, and E. Mazur: *Opt. Lett.* **24** 2023 (1996).
- 7) B. C. Stuart, M. D. Feit, A. M. Rubenchik, B. W. Shore, and M. D. Perry: *Phys. Rev. Lett.*, **74** 2248 (1995).
- 8) H. Nakano, T. Nishikawa, and N. Uesugi: *Appl. Phys. Lett.* **70** 16 (1997).
- 9) K. Miura, J. Qiu, H. Inouye, T. Mitsuyui, and K. Hirao: to be published in *Appl. Phys. Lett.*
- 10) K. Miura, H. Inouye, J. Qiu, and K. Hirao: submitted to *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*.