

酸化物ガラスの光物性と三次元回路応用

平 尾 一 之

Optical Properties of Oxide Glasses and Their Applications for Three-Dimensional Optical Integrated Circuits

Kazuyuki HIRAO

We found for the first time that ultrashort laser pulses can induce active structures such as optical waveguide creation, non-linear single crystal precipitation, valence state change of rare-earth or transition metal ions, micro-grating and so on in transparent materials. Our recent progress in making optical integrated circuit using this technique and glass nanotechnology is shown.

Key words: nanotechnology, integrated circuit, transparent materials, micro-grating, ultrashort laser pulses

無機非晶質物質のガラスや有機非晶質物質のポリマーなどの非晶質材料は内部構造の自由度が大きいため、電場・磁場・光などの外部場によって新たな構造が誘起され、これまでにないさまざまな機能を発現させることに期待が寄せられている。筆者らはこのような誘起構造の形成技術の探索と発現機能の追及、および誘起構造の理論設計を目指して、科学技術振興事業団 ERATO プロジェクト研究 (1994~1999) およびフォトクラフト国際共同 (ICORP) プロジェクト研究 (2000~2005) を行っている。たとえば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ことを初めて示した。一方、ガラスは種々の元素を溶け込ませる溶媒としても有用な材料である。本稿では種々の元素を溶解させたガラスにフェムト秒レーザーを集光させ、さらにこれらを集積化させた三次元光集積回路の可能性について述べてみる。

1. 光誘起構造（屈折率変化、光導波路）を書き込む方法

屈折率変化および光導波路の書き込みは図1に示す光誘

起構造書き込みシステムを使用した。書き込み光源にはモードロック $\text{Ti:Al}_2\text{O}_3$ レーザーを再生増幅して得られた波長 800 nm, 繰り返し 1 kHz あるいは 200 kHz の 2 台のフェムト秒レーザーを使用した。いずれのレーザーも OPA (optical parametric amplifier) により波長可変可能であるが、照射波長は多くのガラスにおいてその固有吸収と一致しない近赤外域 (800 nm) に設定した。レーザー集光および照射の基本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。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あるいは垂直に移動させることにより行った (図2参照)。波長 800 nm, パルス幅 120 fs, 繰り返し 200 kHz, 平均出力 200 mW のレーザーパルスをガラス表面および内部へ集光 (50×) 照射した際の透過光学顕微鏡写真を図3(a), (b) にそれぞれ示す。ガラス表面へ集光照射した場合、照射スポットでは熱衝撃を伴ったアブレーションが起こっていることが確認できる。これに対しガラス内部への集光では、照射スポットがレンズ効果により周囲に比べて明るくなっており、ガラス内部が局所的に高屈折率化していることがわかる。これらの屈折率変化は室温で

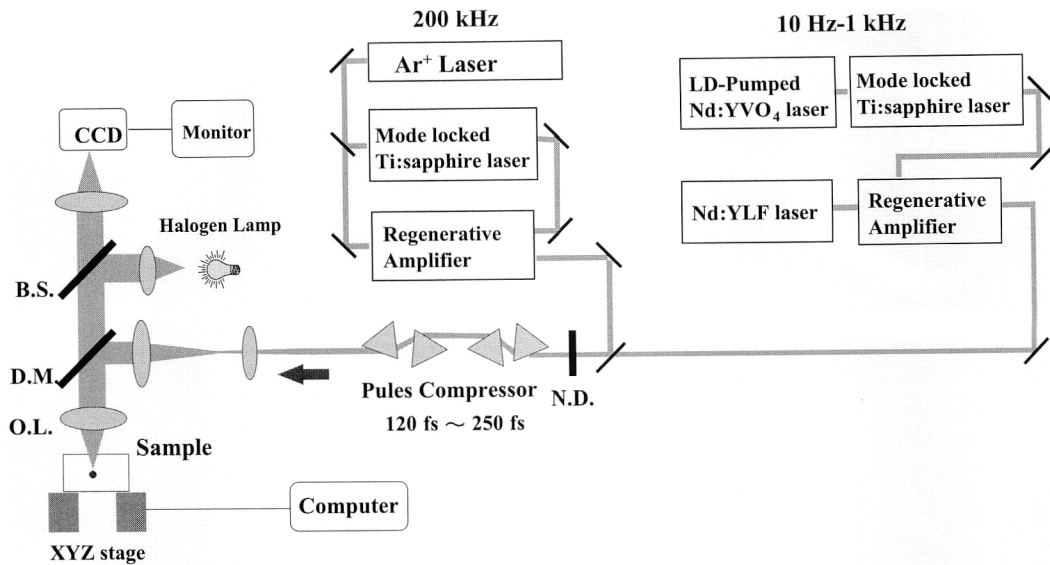


図1 光導波路書き込み用の実験装置図.

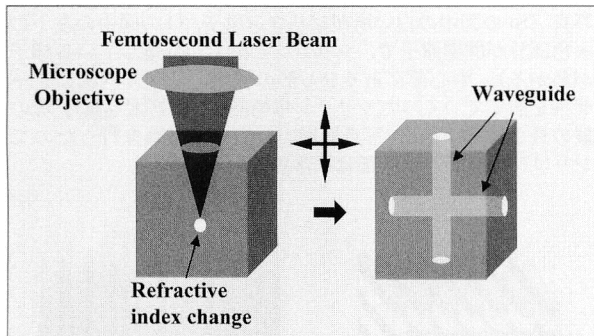


図2 高繰り返しパルスレーザーにより書かれた光導波路の模式図.

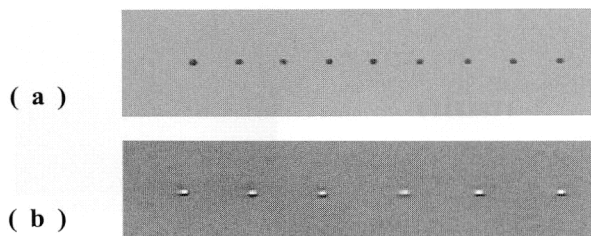


図3 フェムト秒レーザーをガラスの(a)表面と(b)内部に照射した部分の写真.

半永久的であるがガラス転移点まで加熱した場合にのみ消失されることを高温顕微鏡にて確認している. フェムト秒オーダーの超短パルスをガラス内部に照射した場合, 極短時間でエネルギーが内部に蓄積され, イオン化, プラズマ加熱, プラズマ振動の励起などによる急激な温度変化に比例した内部圧力の上昇や, これに伴う X 線発生などが起こるものと思われる^{1,2)}.

ところで, 現在, 光通信などに使用されている光ファイバーや光導波路のコアとクラッドとの屈折率差は 10^{-3} オーダーである. 筆者らが発見したフェムト秒レーザー照射

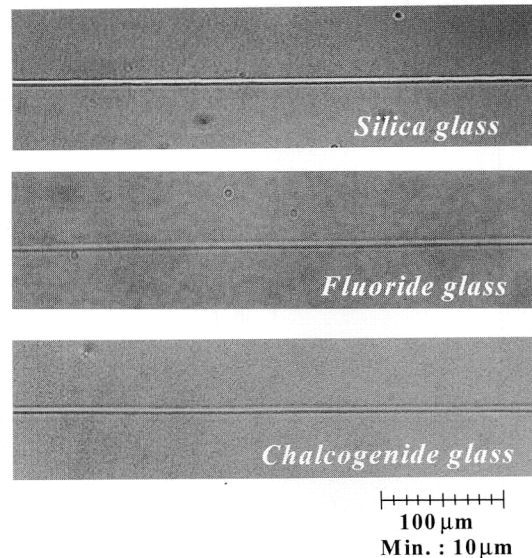


図4 さまざまなガラス中へ光導波路を書き込んだ顕微鏡写真.

による屈折率変化量は, 光通信用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. 図4には合成石英, フッ化物およびカルコゲナイドガラスなど各種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.

光軸に対してサンプルを垂直に移動させるほうが, より書き込みに自由度があり好ましい方法であることもわかった. 実際にこの方法により石英ガラス内部へ書き込んだ曲線光導波路の例を図5に示す. ピークパワーやパルス幅を変えていろいろ検討した結果, フ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, パルス幅および走査回数数のコントロールにより, 任意のコア径, およ

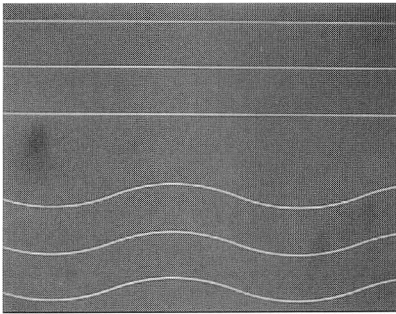
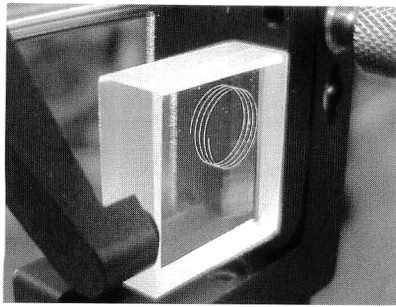


図5 フェムト秒レーザービームを内部集光させて描いた光導波路。

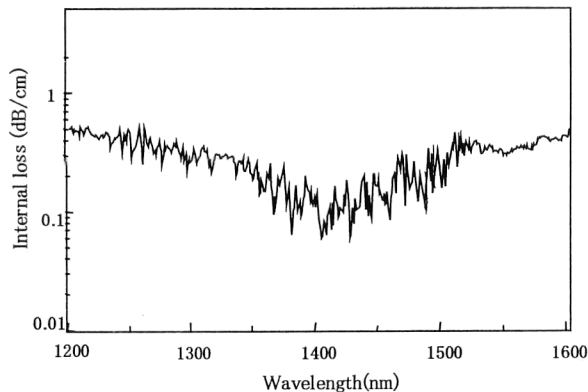


図6 フェムト秒レーザービームで書き込んだ光導波路の伝導損失の一例。

び任意の比屈折率差をもつ光導波路が書き込み可能であることがわかった。これらを用いた光の伝導損失は大変低いものであり、従来のイオン交換法を用いて作製した光導波路よりも低い値となったことを確認している。図6にその一例を示す。この光導波路の書き込みはレーザービームに対して石英ガラスを垂直に移動させて行った。また、その条件はパルス幅 600 fs, 繰り返し 250 kHz, パルスエネルギー 0.6 μ J, 走査速度 500 μ m/s で行った。

2. 光誘起構造 (フォトニック結晶) を書き込む方法

2.1 石英ガラス中に高屈折率の半導体のシリコン単結晶を析出させる³⁾

1 cm² あたり 1 兆 W 以上のエネルギーをもつレーザーを、1000 分の 1 秒間ずつ繰り返し発光させ、Na⁺ と Al³⁺

ガラス内部からのシリコン析出例1 (SEM+EDS)

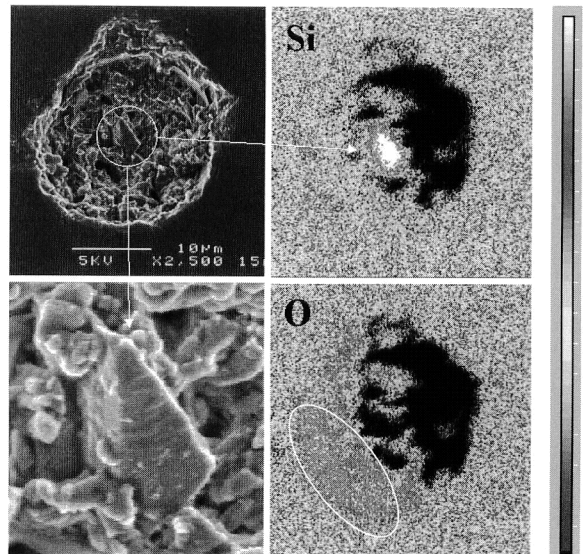
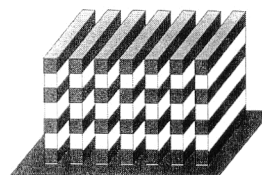
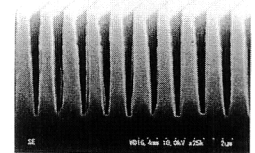
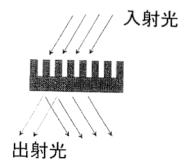


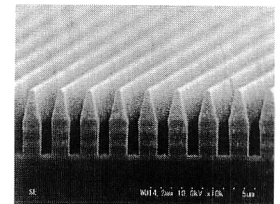
図7 シリカガラスからシリコン単結晶を析出させた SEM 写真 (Si の図中の白い所がシリコン原子, O の図中の左下の灰色部分が酸素原子で, シリコンと酸素が分離している様子がわかる)。中心部にあるひし形の小塊が, ガラス内部にレーザーを当ててつくったシリコン単結晶 (右は拡大写真)。塊の縦の長さは約 7 μ m。写真撮影のため機械研磨を行ったのでシリコンのまわりが一部はげ落ちている。



2次元周期構造体の模式図



SiO₂/Si₃N₄の2次元周期構造



SiO₂/TiO₂の2次元周期構造

図8 高分散フォトニック結晶。

イオンを含む SiO₂ ガラス内部の一点に当てる。すると、ガラス自体の構造は壊れず、分子レベルの結合だけが壊れ、ガラスの主成分の二酸化ケイ素 (SiO₂) が酸素とケイ素 (シリコン) に分かれる。

さらに発光間隔を 10 万分の 1 秒まで縮めたもう 1 つのレーザー (フェムト秒レーザー) を同時に当てると、シリコン原子が規則正しく並ぶ単結晶が図7に示すように形成できた。レーザーの条件を変えると、球状や角形で数 10 μ m 程度の単結晶も成長可能である。シリコンの単結晶は屈折率が SiO₂ ガラスに比べて高いので、三次元的に規則配列させれば、次世代の光通信素子フォトニック結晶もで

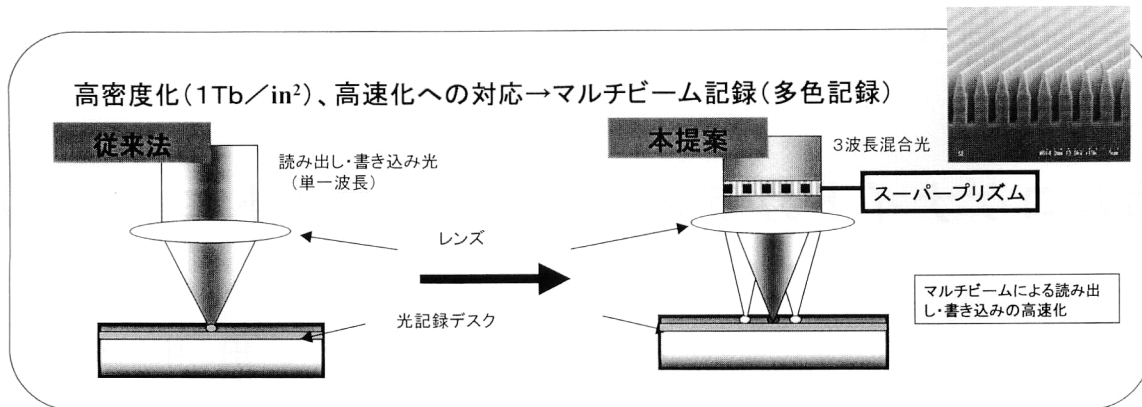


図9 高分散フォトニック結晶の大容量光メモリー用ヘッドへの応用。

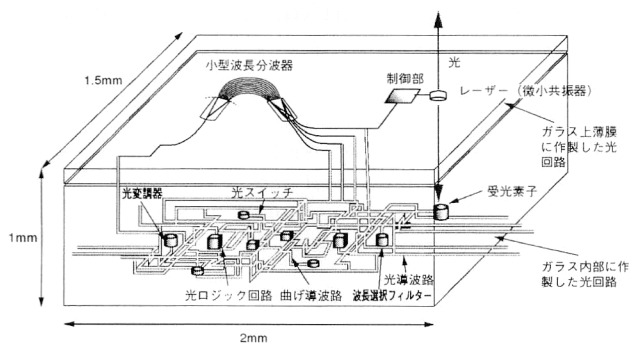


図10 三次元光集積回路の概念図。

きる。

2.2 高分散フォトニック結晶をつくる

ガラス基板上に酸化物系のガラス多層膜を形成し、これを図8の写真のように溝加工すると、いわゆる二次元のフォトニック結晶ができる。これに光を入射させると、その波長に依存して回折現象が図8に示すように起きる。とくにSiO₂とSi₃N₄(黒っぽいほう)やSiO₂とTiO₂(黒っぽいほう)を交互に積層させると、その間でも屈折が起きるので、通常のガラスプリズムや回折格子に比べて非常に大きく回折が起こり、ほんのわずかな入射光の波長差をもつ光をも分離できる。その応用先は、波長多重通信における波長分離素子や図9に示すような大容量光メモリー用ヘッドなどが考えられる⁴⁾。

3. 三次元光回路材料技術

フェムト秒レーザーによる光誘起屈折率変化、およびそれ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。さらにフェムト秒レーザーによる誘起構造変化を利用すれば、さまざまなガラス材料に新たな機能素子を形成することができる。たとえば非線形光学効果による光ス

イッチング機能をもつガラスや、いろいろな発光イオンを添加することによりガラスに光導波路レーザー、光メモリー、光増幅器などの機能構造の形成が期待できる⁵⁾。

また、屈折率変化を周期的に誘起させることで、三次元フォトニック結晶などへの展開も考えられる。さらに、これらの光機能素子とそれらをつなぐ光回路とを1つの基板に立体的に書き込むことで、図10に示すような三次元光集積回路が実現できる。現在、NEDO材料・ナノテクノロジープログラムのナノガラスプロジェクトで応用展開が図られている⁶⁾。

さらに、フェムト秒レーザーとほかの外場、たとえばX線、電圧や磁場などを併用することによって、さまざまな誘起構造の複合化あるいは誘起構造の周期制御が可能になれば、まったく新しいタイプの光機能素子が実現できる可能性も期待されている⁷⁾。

文 献

- 1) K. M. Davis, K. Miura, N. Sugimoto and K. Hirao: "Writing waveguides in glass with a femtosecond laser," *Opt. Lett.*, **21** (1996) 1729-1731.
- 2) B. C. Stuart, M. D. Feit, A. M. Rubenchik, B. W. Shore and M. D. Perry: "Laser-induced damage in dielectrics with nanosecond to subpicosecond pulses," *Phys. Rev. Lett.*, **74** (1995) 2248-2251.
- 3) 平尾一之編: ナノマテリアル最前線 (化学同人, 2002).
- 4) "光分波器を超小型化", 日本工業新聞 (2003年1月8日).
- 5) K. Hirao, T. Mitsuyu, J. Si and J. Qiu: *Active Glass for Photonic Devices* (Springer, Heidelberg, Germany, 2001).
- 6) 平尾一之: "ナノガラスプロジェクトの構想", *NEW GLASS*, **16** (2001) 7-42.
- 7) 平尾一之: "第10章 パッシブなガラス材料をアクティブに一平尾誘起構造プロジェクトの成果から一", 新しいフォトニクス時代の材料とデバイス (ティー・アイ・シー, 2000) pp. 271-277.

(2002年12月16日受理)