

# フェムト秒レーザーによるガラス内部への 微細な集光レンズと回折光学素子の形成

\*科学技術振興事業団 フォトンクラフトプロジェクト  
\*\*京都大学 工学研究科材料化学専攻

中谷隆幸\*・邱 建榮\*・平尾一之\*,\*\*

Fabrication of micro-lense and grating devices inside glasses  
by a femtosecond laser

Takayuki Nakaya\*, Jianrong Qiu\*, Kazuyuki Hirao\*,\*\*

\*Photon Craft Project, JST

\*\*Department of Material Chemistry, Kyoto University

## 1. はじめに

1996年に我々がフェムト秒レーザーによるガラス内部への光導波路の書き込みを初めて報告して以来<sup>1)</sup>, フェムト秒レーザーを利用した透明材料の内部改質(屈折率変化)と光デバイスへの応用の研究が各国の研究グループによって進められてきている。例えば近年ではこの光導波路の形成技術を利用してMITのNinoshimaらが光カプラの形成に成功し, その伝搬特性等を確認しているなど, 世界各所でさまざまな応用製品として開発され始めている。

フェムト秒レーザーはそのパルス幅の短さ故に非常に大きなピークパワーを有し, レンズで集光することで容易に数百TW/cm<sup>2</sup>の高い強度の光を得ることが可能である。また使用した波長がガラスなどの透明材料に吸収がない区域でも集光によってTW級の強力な電場が発生

し, 光とガラスの非線形相互作用により集光点のみ選択的に多光子過程による改質が行える。一例としてレーザーが照射されたところに10<sup>-2</sup>~10<sup>-3</sup>程度の屈折率変化を誘起でき, ガラス内部に3次元的に光導波路の形成が可能となる。この技術が確立されれば従来のリソグラフィプロセス技術による光導波路の作製に比べ, 大幅なコスト削減や光回路の集積化が望める。

今回我々は光デバイスの一つである回折光学素子を, フェムト秒レーザーによる光誘起屈折率変化を利用してガラス内部に直接形成する試みを行った。本文では2つの回折光学素子(Dammann型グレーティングとバイナリレンズ)について紹介する。

## 2. 回折光学素子の書き込み方法

一般に回折光学素子は図1(a)に示すようなプロセス技術を用いて作製される。プロセスは相互に独立し, 多くのプロセスを経なければならない。一方フェムト秒レーザーによる光誘起

〒631-0237 京都府相楽郡精華町光台1-7  
けいはんなプラザスーパーラボ棟2-5  
TEL 0774-95-5205  
FAX 0774-95-5206  
E-mail: nakayatakayuki@mail.goo.ne.jp

屈折率変化を利用すれば複雑なプロセスを経ることなく直接回折光学素子を形成することが可能である(図1(b))。またガラス内部に空間選択的に形成することができるため、他の光誘起

構造との組合せを行うことによる複合型の光機能素子への発展も興味深い。

回折光学素子の書き込みは図2に示すレーザーシステムと光学系を用いた。書き込み光源にはモードロック Ti: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> レーザーを再生増幅した波長: 800 nm, パルス幅: 150 fs, 繰返し: 200 kHz のフェムト秒レーザーを使用した。レーザーは OPA (Optical Parametric Amplifier) により波長可変が可能であるが、波長は多くのガラスにおいて固有吸収が存在しない近赤外域 (800 nm) に設定した。レーザー集光及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。レーザーの平均出力は ND フィルターにより制御した。また XYZ ステージと電磁シャッターはコンピュータで制御されており、XYZ ステージの動きと同期をとって電磁シャッターの開閉を行うことにより書き込みの ON/OFF を制御した。XYZ ステージ上にガラスサンプルを設置し、レーザーの光軸に対して垂直に移動させることにより様々な光誘起屈折率パターンから成る回折光学素子をガラス内部に書き込んだ。

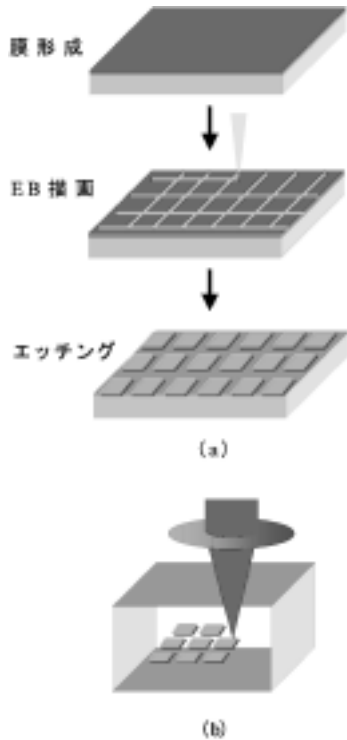


図1 回折光学素子の作製法 (a) 従来のプロセス技術 (b) フェムト秒レーザーによる直接描画

### 3. Dammann 型グレーティング

回折光学素子には波長選択, 偏向, 集光など

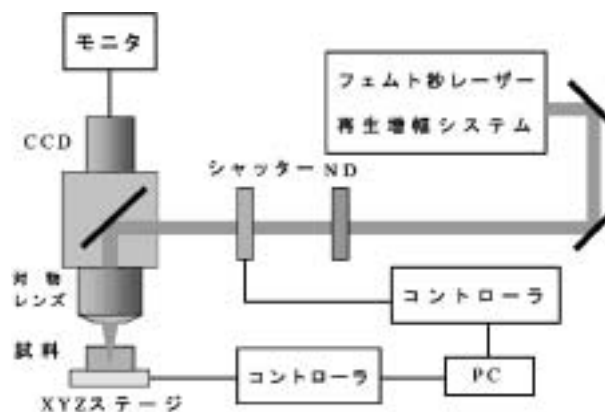


図2 光誘起構造書き込みシステム

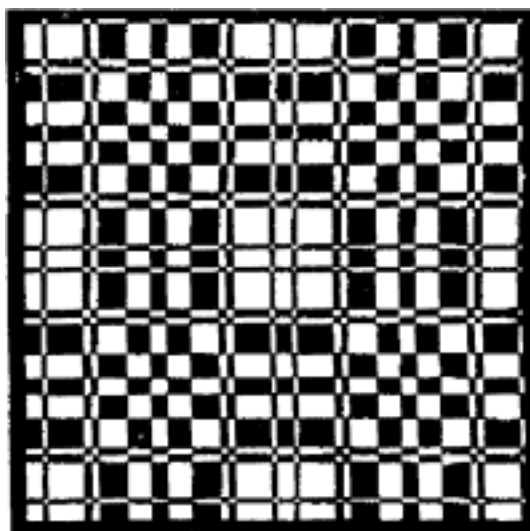


図3 Dammann型グレーティングの構造例（白と黒の部分で屈折率が異なる。）

様々な機能があるが、Dammann型グレーティングは分岐機能を有する回折光学素子である。具体的には設計により任意の $n \times m$ 個の等強度の分岐光を生成することができる。素子の構造は複雑な屈折率分布を有する。一例として $15 \times 15$ のDammann型グレーティングを図3に示す。この屈折率パターンは回折像が透過関数のフーリエ変換として与えられることを用いて分岐光が等強度になる条件と回折効率が最大になる条件から数値計算により求めることができる<sup>2)</sup>。

Dammann型グレーティングはレーザー加工の効率化やビーム成形などで実用化されている。またレンズと組み合わせることで $1 \times n$ 光ファイバーカプラへの応用<sup>3)</sup>や光コンピュータシステムのファンアウトとしても期待されている<sup>4)</sup>。

### 3.1 作製

前述のようにDammann型グレーティングは複数の大きさの異なる矩形形状の屈折率パターンから成っている。フェムト秒レーザーの光誘起屈折率変化を用いる場合、このような矩形パターンをマスクにより一括転写する方法も

考えられるが、パワー密度の低下を考慮すると一括転写は未だ容易ではない。そこで我々は細線状の屈折率変化ラインを少しずつずらしながら書き込むことにより矩形パターンを形成した(図4)。試料としては合成石英ガラス $30 \times 30 \times 2$  tmmを用い、その内部深さ約1 mmの場所に大きさ $1 \times 1$  mmの $6 \times 6$ のDammann型グレーティングを形成した。書き込み条件としてはレーザー平均出力300 mW、走査速度60 mm/s、対物レンズは $20 \times$  (NA=0.40)を用いた。

### 3.2 評価

波長633 nmのHe-Neレーザーを入射させた際の回折像を図5に示す。きれいな $6 \times 6$ のパターンが得られており、(A)と(B)ラインの強度分布も均一である。Dammann型グレーティングの評価は回折効率とビーム均一性によって行われる。回折効率の定義は(等分岐光強度の総和)/(入射光強度)、均一性の定義は(分岐光強度の最大値と最小値の差)/(分岐光強度の最大値と最小値の和)である。したがって均一性に関してはその値が小さいほど分岐ビームが均一であるといえる。

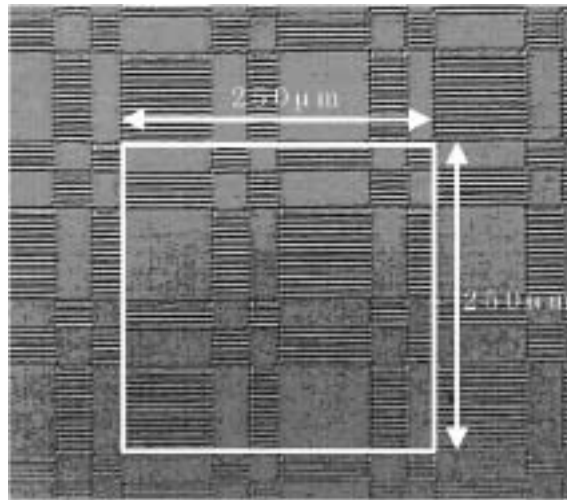


図4 6×6のDammann型グレーティングの光学顕微鏡写真 一周期が250 μm.

今回作製した6×6のDammann型グレーティングについて測定を行った結果、回折効率が7.7%、均一性が29%であった。回折効率については理論値が71%であり、均一性に関してはプロセス技術により作製されたもので約12%という報告があるので性能的にはまだ改善の余地がある。我々は回折効率の向上について検討を行い、多層に書き込む新たな手法を開発し、効率を理論値に近づけることに成功したが、今回は誌面の都合上割愛させていただく。

#### 4. バイナリーレンズ

回折光学素子の中で集光機能を有する素子にはバイナリーレンズがある<sup>5)</sup>。バイナリーレンズとはフレネルレンズを階段状に近似した屈折率分布をもつレンズで、通常の屈折型レンズと同様の機能を持つ。特徴としては小型化・薄型化が容易に行えるという利点があり、光通信分野では光ファイバーコリメート用レンズや光インターコネクションとしての応用<sup>6)</sup>などが検討されている。一方、集光に回折現象を利用して、屈折型レンズとは異なる特性を持つ。すなわち、非球面性による収差補正効果、

像面湾曲がない、焦点距離の波長依存性が大きいなどである。このようなバイナリーレンズの特性をうまく生かし、CD/DVD互換光ピックアップや2焦点コンタクトレンズなど様々な分野で応用されている<sup>7)</sup>。

##### 4.1 作製

バイナリーレンズは半径の異なる輪帯が同心円状に広がる構造をしており、この輪帯をフェムト秒レーザーの光誘起屈折率変化により形成する必要がある。やはりこの場合にも輪帯の屈折率変化領域を一括して形成することはできないので、細線状の屈折率変化リングを少しずつらしながら輪帯の屈折率変化領域を形成していった(図6)。試料としては合成石英ガラス10×10×2 tmmを用い、その内部深さ約1 mmの場所に大きさ約400 mm<sup>2</sup>のバイナリーレンズを形成した。書き込み条件としてはレーザー平均出力250 mW、走査速度25 mm/s、対物レンズは10×(NA=0.30)を用いた。

##### 4.2 評価

作製したバイナリーレンズの設計値は波長633 nmに対し、焦点距離が4.9 mmでNAが0.04である。実際の集光の様子を図7に示す。ライン上の輝度分布はきれいなガウシアン

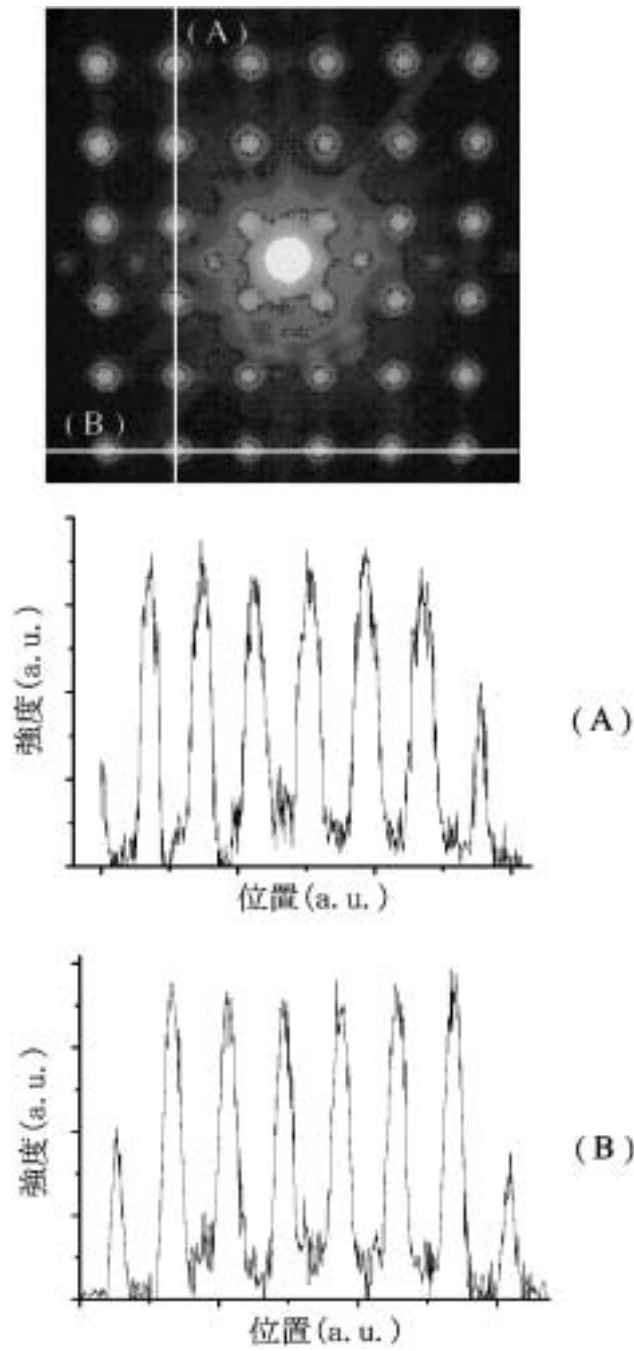


図5 6×6の回折像及び強度分布

分布になっている。集光スポット径を測定したところ 11 mm であり、理論値が 9.4 mm であることを考えると回折限界の近くまで集光が行われたことが分かる。

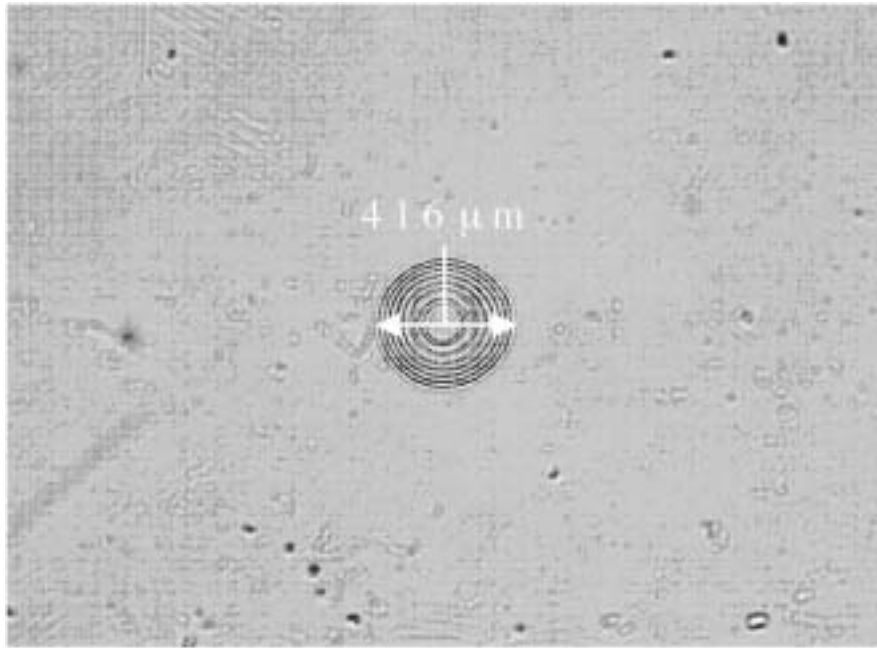


図6 バイナリーレンズの光学顕微鏡写真

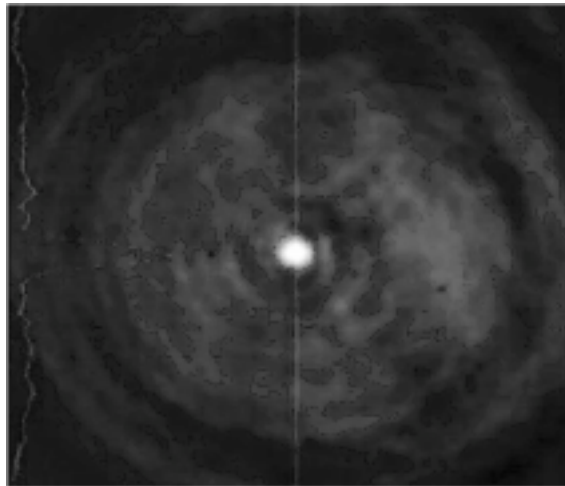


図7 バイナリーレンズによる集光スポット像

## 5. 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回折光学素子の作製について紹介した。回折光学素子は一般に半導体製造装置を用

いて非常に複雑なプロセスを経て作製される。そのため優れた機能と可能性を秘める回折光学素子の普及についてはまだサプライヤー環境が成熟していないのが現状である。今回紹介した手法は微小な回折光学素子を複雑なプロセスを

経ることなく、単一プロセスで形成することができるユニークな手法として期待される。またフェムト秒レーザーの特徴である3次元立体描画を用いれば一つのガラスの中に様々な機能性素子を書き込むことで新たな光集積デバイスや光ファイバーを形成できると期待される。NEDO ナノテクノロジー・材料プログラムのナノガラスプロジェクトでこの技術をさらに進めて実際の製品になるよう開発に向けて取り組んで頂くことを希望したい。

#### 参考文献

- 1) K. M. Davis, K. Miura, N. Sugimoto and K. Hirao: Opt. Lett., 21, 1729 (1996).
  - 2) H. Dammann and K. Gärtler: Opt. Commun., 3, 312 (1971).
  - 3) J. J. Pan and T. Zhu: Elec. Lett., 35, 324 (1999).
  - 4) F. A. P. Tooley, S. Wakelin and M. R. Taghizadeh: Appl. Opt., 33, 1398 (1994).
  - 5) 神谷武志, 小館香椎子: 応用物理, 53, 714 (1984).
  - 6) H. Sasaki, I. Fukuzaki, Y. Katsuki and T. Kamijoh: Appl. Opt., 37, 3735 (1998).
  - 7) 応用物理学会日本光学会光設計グループ監修: 回折光学素子入門, オプトロニクス社 (1997).
- 1) K. M. Davis, K. Miura, N. Sugimoto and K. Hirao: