3次元マイクロ光デバイスの光加工

渡辺 歴, 伊東 一良

大阪大学大学院 工学研究科物質・生命工学専攻(〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

Fabrication of Three-Dimensional Micro Optical Device

Wataru WATANABE and Kazuyoshi ITOH

Department of Material and Life Science, Graduate School of Engineering, Osaka University
2-1, Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871

(Received September 18, 2002)

By use of localized modification of transparent materials with femtosecond laser pulses the fabrication of three-dimensional photonic device was become possible. In this paper, we report on the fabrication technique of three-dimensional optical devices. We show that the waveguides and the couplers can be fabricated by use of the filamentation of femtosecond laser pulses. We report on the formation and the movement of submicrometer vacancies, called voids and also the formation of three-dimensional shapes of long holes with microscopic diameters. Finally we show the formation of Bragg gratings in soda-lime glass by two-beam interference.

Key Words: Femtosecond laser pulse, Silica glass, Device, Optics.

1. はじめに

インターネットをはじめとした画像、動画像を扱う情報通信技術(IT技術)の発展により、通信容量およびデータ量が増大し、光通信システムのさらなる大容量化、高速化が望まれている。大容量・高速通信を可能とするためには、信号を光で処理するフォトニックネットワークの構築などネットワークインフラストラクチャの整備が望まれている。また、大容量データを取り扱うには、微細光デバイスの開発および集積化が必要となっており、3次元空間内に微小光学素子を作製し、高密度に集積する微細加工技術の確立が不可欠である。例えば、現在は光ファイバを中心として光導波路が用いられているが、複雑な光制御の必要性により多数の導波路によって構成される光集積回路やアレイ導波路回折格子などの研究も行われている。限られた空間内で大容量の光接続をするには、1次元、2次元的な光回路から3次元的な光回路を作製し、高密度に集積する必要性が生じてくる。

こういった微細加工技術のひとつとして、超短光パルスの非線形光学現象を利用した加工法が注目されている¹⁻³⁾。超短光パルス技術の発展により、パルス幅がフェムト秒オーダーであるフェムト秒レーザーが開発され、現在では製品化されている。フェムト秒レーザーの特徴は、パルス幅が短いため、高いピークパワーが得られることである。フェムト秒レーザーパルスを、1光子では吸収を持

たない媒質内部に集光すると、集光点近傍の空間的に限定された領域でのみ、多光子吸収により媒質は改質される。また、フェムト秒レーザーでは、ナノ秒パルスなどに比べて、熱の影響が少ないため、精度のいい加工ができる。このようにフェムト秒レーザーにより、透明材料内部にナノメートルからマイクロメートルオーダーの3次元的に局在した構造変化領域を自由に誘起することができ、ガラスを中心としたさまざまな媒質内部への3次元光メモリの形成⁴⁻⁷⁾、導波路の作製⁸⁻¹⁵⁾、方向性結合器の作製^{10,16-18)}、回折格子の作製¹⁹⁻²³⁾、微細空孔(ホール)加工²⁴⁻²⁷⁾などが報告され、微小な光デバイスの作製が可能となってきた。このような3次元マイクロ光デバイスを集積化し、機能を持たせることができれば、来たるべき大容量情報通信時代のデバイス、システムとして活用できるであろう。

本稿では、3次元マイクロ光デバイスの1つの加工技術として、フェムト秒レーザーパルスを用いたガラス内部への微細光学素子の作製に関する最近の研究成果を紹介する。具体的には、①自己束縛フィラメントによる導波路の作製¹³⁾、および方向性分岐結合路の作製²⁸⁾、②フィラメント、および二光束干渉による回折格子の作製^{29,30)}、③レーザーパルスの集光照射によるボイドの移動現象^{6,7)}、④シリカガラスの後面に蒸留水を接触させることによるマイクロ3次元ホールドリリング^{27,32)}、について述べる。

2. 自己束縛フィラメントによるガラス内部での屈折率変化の誘起

超短光パルスを用いた低い開口数 (numerical aperture; NA) をもつレンズによりガラス内部へ集光照射すると、自己束縛フィラメントが形成される。自己束縛フィラメントは、非線形光学効果である自己集束効果とプラズマによる回折が釣り合う自己束縛効果による、一定の直径を保ってビームが伝播している領域を意味する。Fig. 1にフェムト秒レーザーパルスによる構造変化の誘起光学系およびその観察光学系を示す^{6,7,13}。チタンサファイアレーザー増幅器からのレーザーパルス (中心波長: 800 nm, パルス幅: 130 fs, 繰り返し周波数: 1 kHz) は、レンズにより試料内部に集光される。集光点付近の様子は、試料をハロゲンランプにより側面より照射し、光源の反対側に設置した長作動距離対物レンズを用いて実時間で観察している。Fig. 2 (a)は焦点距離100 mm (NA: 0.01)の単レンズにより、約1 $\mu\text{J}/\text{pulse}$ のレーザーパルスをシリカガラス内部に集光することにより得られるフィラメントを示す¹³。Fig. 2 (b)に2分間のレーザーパルス照射後に得られる屈折率変化の透過型顕微鏡による光学像を示す。フィラメントが生成した部分に、永続的屈折率変化が誘起されていることがわかる。誘起される屈折率変化部分の直径は約2 μm であり、最大の屈折率変化の増加は 0.8×10^{-2} である。また、その長さは集光レンズのNAに依存し、8 ~ 500 μm である。また、1150 $^{\circ}\text{C}$ のアニール処理により

Fig. 1 Schematic of experimental setup for creation by femtosecond laser pulses and *in situ* observation of voids. ND and SH denote neutral density filter, and shutter, respectively. OB1 and OB2 indicate objective lenses. L1, L2 and L3 indicate lenses.

Fig. 2 (a) Self-trapped filament by femtosecond laser pulses in silica glass (b) Permanent refractive-index change induced by the filament.

屈折率変化は消滅することがわかっている。

3. 導波路の作製

近年、ガラス内部にフェムト秒レーザーを集光することにより永続的屈折率変化を誘起し、導波路を直接描画する技術が世界的に研究されている⁸⁻¹⁵。この導波路の作製方法は、集光領域を(1)光軸に垂直に走査するside writing法と、(2)光軸と平行に走査するparallel writing法に大別できる。(1)のside writing法では、長い導波路を作製することができるが、集光点での強度分布特性から屈折率変化部分(コア)の形状が非対称になってしまう。これに対して(2)のparallel writing法では、コアの形状は対称となる。しかし、書込み可能な最大の長さは、集光レンズの作動距離により限定される。また、深さによりレンズの収差の影響が異なり、書込み条件が変化する。いずれも書込み強度と走査速度の2つのパラメータを最適化する必要がある。ここでは、自己束縛フィラメントによる導波路の作製を示そう¹³。1 $\mu\text{m}/\text{s}$ の速度で試料を走査し、長さ2 μm の導波路を作製している。作製した導波路に波長632.8 nmのHe-Neレーザーを対物レンズにより結合させることにより得られる近視野像と強度分布の断面をFig. 3に示す。シングルモードの光が導波路を伝播していることがわかる。導波路の側面から導波路のようすを観測した場合、導波路からの散乱光は見られず、side writing法に比べて、低損失な導波路を作製できることがこの手法の特長であろう。

4. 方向性結合器の作製

導波路の作製と同様に、集光領域を3次元的に任意に走査し、ガラス内部に屈折率変化を自由に描くことができる。このひとつの応用例として、方向性結合器の作製が、アメリカCornell大¹⁰、Corning社¹⁶、MIT^{17,18}により報告されている。また、我々のグループは、フィラメント領域を2次元的に走査することにより、曲がり導波路を作製することができることを示している。直線状導波路と曲がり導波路を組み合わせることにより、方向性分岐結合器が作製できる²⁸。Fig. 4 (a)にその設計の一例を示す。結合部分の長さはL mm、導波路の間隔は4 μm 、曲がり導波路は曲率半径17 mmの円弧であり、結合器の全長は2 mmとしている。作製した方向性分岐結合器の一部の光学顕微鏡像をFig. 4 (b)に示す。

作製した方向性結合器の直線導波路部分にHe-Neレーザーを入射し、導波路の射出端を対物レンズを用いて観

Fig. 3 Waveguide output profile at 633 nm. A near-field image is shown on the right-hand side.

Fig. 4 (a) Schema of fabricated directional coupler and (b) expanded optical image of directional coupler.

測した結果を示そう。結合長 $L=0.5$ mm, (b) $L=1.0$ mmの場合での、射出端の近視野像をそれぞれFig. 5 (a), (b)に示す。上部に見えるのが直線部分(直線導波路)からの射出光であり、下部が分岐部分(曲がり導波路)からの射出光である。結合長により、射出端での出力は異なり、 $L=1.0$ mmの場合、入射光強度を約1:1の比率で分岐することができている。フィラメントにより作製した方向性結合器はコア径が小さく、また屈折率差が大きいことから、小型の干渉計の作製が可能となるであろう。さらに、将来的には、光スイッチへの応用を期待したい。

5. 回折格子の作製

媒質内部に周期的な構造変化を誘起すると、回折光学素子として利用できる。周期構造の誘起にはさまざまな手法があるが、ここでは、フィラメントによる屈折率変化の誘起²⁹⁾および二光束干渉法による屈折率変化の誘起^{24,25)}による回折格子の作製について述べる。

対物レンズ(NA: 0.55)によりテルライトガラス内部にレーザーパルスを集光するとシリカガラスと同様にフィラメント状の屈折率変化を誘起することができる。テルライトガラスは高い屈折率(約2.2)および高い非線形感受率を有する。この屈折率変化領域を周期的に配置することにより、薄い回折格子を作製することができる²⁹⁾。Fig. 6 (a)は、周期が $10\text{ }\mu\text{m}$ 、大きさが $250\text{ }\mu\text{m} \times 500\text{ }\mu\text{m}$ の回折格子の光学顕微鏡像であり、Fig. 6 (b)はHe-Neレーザーを入射したときの回折パターンである。また、フィラメントを光軸に垂直に走査することにより、厚さ約 $2\text{ }\mu\text{m}$ のシート状屈折率変化領域を形成することができる。このシート状屈折率変化領域を周期的に並べることによ

Fig. 5 Near-field pattern of coupler's output at 633 nm. (a) $L=1$ mm and (b) $L=0.5$ mm.

り、厚い回折格子を作製することができる²⁹⁾。シートの間隔が $4\text{ }\mu\text{m}$ のとき、1次光の回折効率 75.4% となり、Bragg回折格子として利用できる。

フェムト秒レーザーの干渉性を利用し、その二光束干渉による干渉縞パターンを透明媒質の表面及び試料内部に転写し、回折格子が作製できることが報告されている^{17,18,23)}。この二光束干渉技術の応用として、ガラスの表面にホログラムを書き込み、物体像の再生に成功している³¹⁾。二光束干渉法では深さ方向の厚みの制御をすることが難しいのが難点ではあるが、波長オーダーの周期で屈折率変化を、1パルスで試料内部に書き込める技術は、大容量のメモリ素子、マーキングなどに利用される可能性があるだろう。

6. ボイドの移動

フェムト秒レーザーを透明媒質内に高い開口数を有する対物レンズで集光すると、集光点近傍において緻密化した媒質に囲まれたボイド(微小空泡)が形成されていることが報告されている^{5,6)}。集光点近傍のみ改質を行うことができるので、3次元空間に自由にかつ高密度にボイドを作製可能であり、ボイドをデータのビットと見立てた3次元光メモリが提案されている⁵⁾。ボイドは内部が空泡のため、周囲との屈折率差が大きいといった特徴を持つ。

フェムト秒レーザーパルスの照射により、ボイドを移動させる技術について述べよう⁶⁾。レーザーパルス入射側へのボイドの移動をFig. 7に示す。図の中央部の黒い部分がボイドに相当し、パルスは左から右に伝播している。ボイドの生成はNAが0.55の対物レンズを用いて、試料表面から約 $300\text{ }\mu\text{m}$ の位置に行っている。比較のため、深さが同じ位置(光軸と垂直方向)に3つのボイドを作製した後、集光レンズの焦点を中央のボイドに設定し、レーザーパルス入射側に $0.5\text{ }\mu\text{m}$ 焦点を移動し、 $1/125$ 秒(8パルス)の露光を行っている。この集光点の移動とレーザーパルスの露光を繰り返すことにより、ボイドを約 $5\text{ }\mu\text{m}$ 移動しているのがわかる。ボイド生成時の入射光強度は $0.95\text{ }\mu\text{J/pulse}$ 、移動時の入射光強度は $0.74\text{ }\mu\text{J/pulse}$ である。

ボイドの移動の応用として、Fig. 8に示すようにメモリの書き換え実験例を示そう⁶⁾。まず、(a) y軸方向に5つのボイドを $5\text{ }\mu\text{m}$ 間隔に生成し、(b) Fig. 8の上から4番目のボイドを移動させ、(c) 続いて上から2番目のボイドを移動させて、メモリの状態を変化させている。ボイドの位置をビットの状態とすると、メモリの状態を変化させるこ

Fig. 6 (a) Optical image of periodic structures induced by self-trapped filament and (b) diffraction pattern.

Fig. 7 (a)-(e) Side view of optical seizing and movement of a void. Central void is moved towards input plane by $5\ \mu\text{m}$.

とが可能である。

光軸に対し垂直方向にボイドを移動させることを示す⁷⁾。Fig. 9に試料としてフッ化カルシウム結晶(CaF_2)を用いた実験結果を示す。入射エネルギーは約 $300\ \text{nJ/pulse}$ としている。マーカーとしてのボイドを作製後、集光点を図中の左上に設定し、1パルス照射し、ボイドを作製している。集光点を光軸と垂直の $+y$ 軸に沿って $1\ \mu\text{m}$ 移動し、1パルス照射する。集光点の移動とパルス照射を繰り返すと、ボイドは光軸に対し垂直方向に、約 $3\ \mu\text{m}$ 移動することがわかる。

ボイドが動くメカニズムは次のように考えられる。フェムト秒レーザーパルスを集光した場合、集光領域では、多光子吸収やアバランシェイオン化によって非線形のエネルギー吸収が起こり、オプティカルブレイクダウンが生じ、高密度のプラズマ状態となる。このプラズマは周辺へ広がり、ボイドが生成される。生成されたボイドは、空泡と周辺の構造変化領域から成り立っていると考えられる。集光点を移動すると、空泡部分との境界部分が強度の高い領域となる。また、周辺部ではカラーセンターなどの欠陥が生じており、境界部分でブレイクダ

Fig. 8 Optical movement of arbitrary voids: (a) creation of voids, (b) movement of the fourth void, and (c) movement of the second void.

Fig. 9 Lateral movement of a void perpendicular to the beam propagation axis. The void moves by $2\ \mu\text{m}$ along the direction perpendicular to optical axis.

ウンが発生しやすくなると考えられる。次のレーザーパルスにより、境界部分を中心にブレイクダウンが発生し、押しやられた媒質はもとにあったボイドを埋めることにより、ボイドが移動していくように見える。レーザーパルスの照射により3次的にボイドを移動させる技術は、書き換え可能なメモリへの応用やチューナブルなフォトニックデバイスなど様々な応用が考えられる。現在のところ、一度状態を書き換えると元に戻すことはできないが、CD-Rの3次元版のような書き換えメモリを想定している。

7. フレネルレンズの作製

シリカガラス内部にボイドを配列することにより、フレネルレンズを作製することができる³¹⁾。フレネルゾーンプレートは、一点を中心とし、半径 $r, r+\lambda/2, r+3\lambda/2, \dots$ の多数の円盤(輪帯)から成り立っている(ただし、 λ は波長)。この輪帯を1つおきに塗りつぶし、逆位相の光は遮ると、同位相の光のみ集光され、レンズとして作用する。Fig. 10 (a)がボイドを用いたフレネルゾーンプレート作製法である。ゾーンプレートの暗輪帯の部分では、ボイドを $1\ \mu\text{m}$ 正方形格子状に書き込むことにより光を遮っている。使用する光を波長 $632.8\ \text{nm}$ のHe-Neレーザー光とし、焦点距離を $3\ \mu\text{m}$ 、サイズを $L_x = L_y = 400\ \mu\text{m}$ としてフレネルゾーンプレートを設計している。試料を設置した微動ステージを光軸に垂直な面内で走査し、試料表面か

Fig. 10 (a) Schematic of the fabrication of Fresnel zone plate. We constructed the zone plate that passes only the odd zones and obstructs the even zones. Even zones are fabricated by embedding the array of the voids with steps of $1\ \mu\text{m}$. (b) Optical image of the fabricated Fresnel zone plate by embedding the two-dimensional array of voids. The image was observed under illumination by halogen lamp.

ら300 μm の深さに、フレネルゾーンプレートを書き込んでいる。Fig. 10 (b)が作製されたフレネルゾーンプレートの光学顕微鏡像である。フレネルゾーンプレートにHe-Neレーザー光を入射し、集光点における強度分布を、50倍の対物レンズによりCCDカメラ上に結像したところ、集光点での分解能は7.1 μm 程度であり、理論値の6.1 μm とほぼ同程度の分解能が得られている。ガラス内部にレンズを作ることににより、アライメントフリーで導波路に光を結合することも可能となるであろう。

8. マイクロ3次元ホールドリリング

フェムト秒レーザーによる穴あけ加工(ホールドリリング)は、これまでのナノ秒レーザーに比べて、被加工材料への熱的効果を減らせることや、材料のアブレーションしきい値が下がるなどの利点があり、微細なホールドリリングや微小領域の切断加工に用いられている。近年、フェムト秒レーザーにより光感応性ガラスまたはシリカガラス内部に構造変化を誘起後、エッチング処理を行うことで3次元的に複雑な形状のホールの作製が報告されている²⁴⁻²⁶⁾。ここでは、化学的処理なしで、高いアスペクト比をもつ3次元マイクロホールの作製法を紹介する^{27,32)}。

この手法の特徴は、蒸留水をシリカガラスの後面に接触させ、レーザーパルスを集光し、ホールを作製していくことである。試料の後面を蒸留水に接触させることにより、ホール加工時に堆積するガラスの破片を水の中に分散させることによりアスペクト比の高い穴あけ加工が可能となる。エネルギー 3.7 $\mu\text{J}/\text{pulse}$ のレーザーパルス48発を、試料の後面に集光照射し、集光点を1 μm 間隔で z 方向に走査し、直線状のホールを作製した場合、直径は約5 μm で、深さは200 μm のホールを作製することができる。試料を光軸と垂直方向に走査することにより、直角に曲がるホールを作製することができる。Fig. 11(a)に作製した2次元ホールの一例を示す²⁷⁾。はじめに、入射エネルギー4 $\mu\text{J}/\text{pulse}$ で、 $+z$ 方向に試料を移動し、水平方向にホールを作製し、次に、入射エネルギーを1 $\mu\text{J}/\text{pulse}$ に減らし、同様に水平方向にホールを作製している。ホールの直径は7 μm から4 μm になっている。さらに、 $+y$ 方向に試料を移動させ、垂直部分を作製している。水と空気の屈折率が異なるため、ホールが水で満たされていると

き、像は明るく見えるが、水が乾燥後、暗くみえる。ホール中を水で満たし、水がホールから出て行く経過をFig. 11(b)に示す。このことから、ホール内部が空洞であることがわかる。また、Fig. 12にシリカガラス内に作製した3次元マイクロホールの透過顕微鏡像を示す³²⁾。このようなガラス材料内部への3次元ホールドリリングは、マイクロ-optics、マイクロ-electronicsやマイクロ-chemicalsの分野での利用が期待されている。

9. おわりに

フェムト秒レーザーパルスをガラス内部に集光照射することによる微細光学素子の作製方法について紹介した。①自己束縛フィラメントによる導波路の作製、および方向性分岐結合路の作製、②フィラメントおよび二光束干渉による回折格子の作製、③レーザーパルスの集光照射によるボイドの移動現象と書き換えメモリへの可能性、④シリカガラスの後面に水を接触させることによるマイクロ3次元ホールドリリングについて述べた。ガラスをはじめとした媒質内部の3次元空間に光導波路、回折光学素子、レンズ、ホール、メモリなどのさまざまな微小な光学素子を集積することにより、大容量の情報を取り扱う次世代光通信情報処理システムの構築に役立てることができることを期待している。ガラス内部への光回路および光学素子の作製は、従来の光ファイバ技術との相性から、既存の技術と融合することができるが、3次元マイクロデバイスと光ファイバ技術とのインターコネクション技術の開発が問題となる。今後は、光の振る舞いを制御するフィルタ、スイッチなどの機能性素子の作製、および、デバイスとして実用に耐えるかという性能評価を行う必要がある。

謝 辞

本研究は、大阪大学大学院工学研究科物質・生命工学専攻の山田 和宏氏、浅野 大志氏、石塚 智彦氏、本学卒業生の遠間 正真氏(現 松下電器)、黒田 大介氏(現 ソニー)、大阪大学ベンチャー・ビジネス・ラボラトリー Yan Li博士、産業技術総合研究所関西センターの西井 準治博士との共同研究結果であり、深く感謝いたします。

Fig. 11 A square-wave shaped hole drilled by translating the sample in different directions. (a) The finished hole with diameters are about 7 μm (with pulse energy $\sim 4 \mu\text{J}$) and 4 μm (with pulse energy $\sim 1 \mu\text{J}$), respectively. (b) The video clips of drying process of the refilled hole.

Fig. 12 Examples of micro-hole structures in a 3-D space in silica glass.

参考文献

- 1) 邱 健榮, 平尾 一之: レーザー研究 **30** (2002) 233.
- 2) 三澤 弘明: レーザー研究 **30** (2002) 239.
- 3) 河村 賢一, 平野 正浩, 細野 秀雄: レーザー研究 **30** (2002) 244.
- 4) E. N. Glezer, M. Milosavljevic, L. Huang, R. J. Finlay, T.-H. Her, J.P. Callan, and E. Mazur: Opt. Lett. **21** (1996) 2023.
- 5) N. Glezer and E. Mazur: Appl. Phys. Lett. **71** (1997) 882.
- 6) W. Watanabe, T. Toma, K. Yamada, J. Nishii, K. Hayashi, and K. Itoh: Opt. Lett. **25** (2000) 1669.
- 7) W. Watanabe and K. Itoh: Opt. Express **10** (2002) 603.
- 8) K. M. Davis, K. Miiura, N. Sugimoto, and H. Hirao: Opt. Lett. **21** (1996) 1729.
- 9) K. Miura, J. Qiu, H. Inouye, T. Mitsuyu, and K. Hirao: Appl. Phys. Lett. **71** (1997) 3329.
- 10) D. Homoelle, W. Wielandy, A. L. Gaeta, E. F. Borrelli, and C. Smith: Opt. Lett. **24** (1999) 1311.
- 11) S. H. Cho, H. Kumagai, K. Midorikawa, and M. Obara: Opt. Commun. **168** (1999) 287.
- 12) Y. Sikorski, A. A. Said, P. Bado, M. Maynard, C. Florea, and K. A. Winick: Electron. Lett. **36** (2000) 226.
- 13) K. Yamada, W. Watanabe, T. Toma, K. Itoh, and J. Nishii: Opt. Lett. **26** (2001) 19.
- 14) C. B. Schaffer, A. Brodeur, J. F. Garcia, and E. Mazur: Opt. Lett. **26** (2001) 93.
- 15) M. Will, S. Nolte, B. N. Chichkov, and A. Tunnermann: Appl. Opt. **41** (2002) 4360.
- 16) A.M. Streltsov and N.F. Borrelli: Opt. Lett. **26** (2001) 42.
- 17) K. Minoshima, A. M. Kowalevich, I. Hartl, E. P. Ippen, and J. G. Fujimoto: Opt. Lett. **26** (2001) 1516.
- 18) K. Minoshima, A. M. Kowalevich, E. P. Ippen, and J. G. Fujimoto: Opt. Express **10** (2002) 645.
- 19) T. Toma, Y. Furuya, W. Watanabe, J. Nishii, K. Hayashi, and K. Itoh: Opt. Rev. **7** (2000) 14.
- 20) L. Sudrie, M. Franco, B. Prade, and A. Mysyrowicz: Opt. Commun. **171** (1999) 279.
- 21) K. Kawamura, T. Ogawa, N. Sarukura, M. Hirano, and H. Hosono: Appl. Phys. **B71** (2000) 119.
- 22) K. Kawamura, N. Sarukura, M. Hirano, and H. Hosono: Appl. Phys. Lett. **78** (2001) 1038.
- 23) Yan Li, W. Watanabe, K. Yamada, T. Shinagawa, and K. Itoh: Appl. Phys. Lett. **80** (2002) 1508.
- 24) A. Marcinkevicius, S. Juodkazis, M. Watanabe, M. Miwa, S. Matsuo, and H. Misawa: Opt. Lett. **26** (2001) 277.
- 25) Y. Kondo, J. Qiu, T. Mitsui, K. Hirao, and T. Yoko: Jpn. J. Appl. Phys. **38** (1999) L1146.
- 26) M. Masuda, K. Sugioka, Y. Cheng, N. Aoki, M. Kawachi, K. Shihoyama, K. Toyoda, H. Helvajian, and K. Midorikawa: Appl. Phys. **A76** (2003) 857.
- 27) Y. Li, K. Itoh, W. Watanabe, K. Yamada, D. Kuroda, J. Nishii, and Y. Jiang: Opt. Lett. **26** (2001) 1912.
- 28) 浅野 大志, 山田 和宏, 渡辺 歴, 西井 準治, 伊東 一良: Optics Japan 2001講演予稿集, 101 (2001).
- 29) 山田 和宏, 渡辺 歴, 高橋 雅英, 徳田 陽明, 西井 準治, 伊東 一良: 2002年(平成14年)春季第49回応用物理学関係連合講演会, 28p-YC-/III (2002).
- 30) Y. Li, W. Watanabe, K. Itoh, and X. Sun: Appl. Phys. Lett. **81** (2002) 10 (2002) 978.
- 31) W. Watanabe, D. Kuroda, K. Itoh, and J. Nishii: Opt. Express (submitted).
- 32) 石塚 智彦, Li Yan, 渡辺 歴, 西井 準治, 伊東 一良: Optics Japan 2001講演予稿集, 103 (2001).

レーザーワード

3次元マイクロ光デバイス

(three-dimensional micro optical device)

透明媒質内部に埋め込まれたマイクロメートルサイズの光デバイス。超短光パルスを透明媒質内部に集光すると、非線形光学現象により集光点近傍のナノメートルからマイクロメートルオーダーの空間的に限定された領域でのみ、空泡(ボイド)、屈折率変化などの構造変化領域を自由に誘起することができる。この超短光パルス加工技術

により、媒質内部に3次元光メモリ、導波路、方向性結合器、回折格子、空孔(ホール)などのマイクロ光デバイスの作製が可能である。このような3次元マイクロ光デバイスを集積化することにより、大容量情報通信データを取り扱うデバイスとして活用することができる。

(渡辺 歴)