

【研究項目③三次元加工システム応用デバイス技術】

1) 三次元光学デバイス技術

(a) モアレ除去フィルタの設計

a) デジタルカメラとモアレ

デジタルカメラではしばしばモアレが発生し画質を低下させるので問題となる。モアレとは、被写体にはない偽の周期的模様を言う。モアレは、細かな周期模様を持った被写体をデジタルカメラで撮影した際に発生しうる。モアレの例を図3. 1. 2 (3) 1) (a) a) ①に示す。

b) モアレと光学ローパスフィルタ

モアレを低減する光学部品が存在し一般に光学ローパスフィルタと呼ばれている。入射光がデジタルカメラのイメージセンサ受光面上で受光素子間隔と等しい幅の2本の光に等しい光量に分離されれば、その方向へのモアレが低減することが知られている。

c) 通常の光学ローパスフィルタ — 水晶光学ローパスフィルタ — 特徴

通常の光学ローパスフィルタは水晶を素材とした板状の部品である。水晶の光学軸に対して傾いた面に沿って平行平板として切り出し、デジタルカメラの光軸に垂直に置く。このとき入射光線は、水晶のもつ複屈折性により、光軸を含む平面内で図3. 1. 2 (3) 1) (a) c) ①のように常光線と異常光線とに分離する。この分離幅をイメージセンサの受光素子間隔に一致させることで、モアレを除去している。

水晶光学ローパスフィルタは広く用いられているが、一枚の水晶板だけでは一方向にしか光線分離しないため、水平垂直の両方向のモアレを低減するためには複数枚の水晶の貼り合わせが必要となり、フィルタのコストアップの要因となっている。また、分離角は最大で 0.236° であり、常光線と異常光線の分離幅は事実上水晶板の厚みのみで調整するため、場合によってはレンズ系の製品デザイン上あるいは組み立て上の問題が生じる場合があるという課題があった。

d) 本PJで試作した光学ローパスフィルタ

— ガラス光学ローパスフィルタ — 設計と数値計算による検証

通常の水晶光学ローパスフィルタには、先に述べた課題がある。そこで我々は、当PJのフェムト秒レーザー照射によるガラス内部への異質相形成の高効率形成技術の応用の一例として、ガラスで光学ローパスフィルタを試作・検証することを目標とした。

i) ガラス光学ローパスフィルタの検証のために用いたデジタルカメラ

一般に、モアレを低減させるためには、デジタルカメラに搭載されているイメージセンサの受光面サイズおよび受光素子間隔に光学ローパスフィルタをマッチングさせる必要がある。通常は先にカメラが決まっていて、そのカメラの撮像性能をあげるために光学ローパスフィルタを設計あるいは選定するが、今回は逆に、ガラス光学ローパスフィルタの試作・検証のしやすいイメージセンサを搭載したカメラを選定する必要がある。

今回のガラス光学ローパスフィルタの試作・検証用として望ましいと思われるイメージセンサの条件としていくつかがあげられる。

1. イメージセンサの受光面サイズが大きすぎないこと。

通常の水晶光学ローパスフィルタと同じようにイメージセンサのカバーガラスに密着させてガラス光学ローパスフィルタをデジタルカメラのレンズ系に組み込むとするならば、イメージセンサの受光面サイズとガラス光学ローパスフィルタの有効サイズを等しくする必要がある。機能検証という今回試作の目的を考えると受光面サイズの大きすぎるイメージセンサを搭載したデジタルカメラを選定すると、ガラスに異質相を形成するためのフェムト秒レーザー加工に時間がかかり望ましくない。

2. できれば白黒デジタルカメラ用イメージセンサであること。

通常、カラーデジタルカメラ用イメージセンサでは、受光素子ごとにRGBの3色の色フィルタのいずれかを配置させている。従って、まず、隣り合う受光素子に装着される色フィルタが異なるというこの構造が、ガラス光学ローパスフィルタのモアレ低減性能に影響を及ぼす可能性がある。また、カラーデジタルカメラ用イメージセンサでは、一種の画像処理（画素補完）をしてカラー画像出力を構成しているため、同じく、ガラス光学ローパスフィルタのモアレ低減性能に影響を及ぼす可能性がある。

3. 受光素子数が大きすぎないこと。

光学ローパスフィルタとして機能するためには、すなわち、モアレを低減させるためには、先に触れたように像を形成する光線をイメージセンサの受光素子間隔で分割する必要がある。仮にイメージセンサの受光素子と1対1に対応するような異質相構造を採用した場合には、ガラスに形成する構造の数が多くなるほど加工時間が長くなることが予想されるので望ましくない。また、一般に出力画像のデータ容量も大きくなり、開発段階としては、後の検証の面からも望ましくない。

以上の技術的条件を考慮しつつも、入手性や取り扱いの容易さもあわせ考え、今回のガラス光学ローパスフィルタの試作・検証用デジタルカメラとして、ビデオ出力のある25万画素の監視用途CCDカメラを選んだ。以下にその仕様を記す。

ECN230/N（台湾製、メーカー不明）

1/3インチカラーインターライントランスファーCCDカメラ

画素数25万画素（水平510画素×垂直492画素）

CCD受光面サイズ 4.8mm×3.6mm

受光素子サイズ（水平9.4μm×垂直7.3μm 測定による推定）

出力 NTSC（水平解像度380TV本）

最低照度 0.95Lux/F=1.2 AGCon

SN比 48dB以上

F1.4バリフォーカルレンズf3~8mm・CSマウント

このビデオカメラはNTSCビデオ出力であるためモニターに接続すれば容易に像を目視することができ、また、TVライン方向に関してはNTSC出力信号の空間変化をオシロスコープで直接観察できるため、検証が容易である。また、レンズが取り外し式であり、レンズを取り外すとイメージセンサが露出するため、ガラス光学ローパスフィルタを装着しての撮影実験を確実に行うことができる。また、イメージセンサの実装された回路基板も簡単に外すことができるので、イメージセンサへのガラス光学ローパスフィルタの付けはずしを精度よくかつ効率的に行うことができる。

ii) 異質相の回折格子構造によるガラス光学ローパスフィルタ

既に述べたように、一般に、入射光がイメージセンサの受光面上で受光素子間隔の2本の光に分離されればその分離方向に対して光学ローパスフィルタとなることが知られている。そこで我々は、異質相の周期配置によりガラス内部に市松状の回折格子を形成し、これにより入射光を分離することとした。回折格子をXY方向に市松状の構造とし回折格子間隔を適切に設定すればXY方向それぞれにイメージセンサ受光素子間隔の光に分離することができるので、このとき、貼り合わせなく異質相の回折格子が形成されたガラス1枚で、XY両方向へのモアレ低減性能を持つ光学ローパスフィルタとなることが期待できる。

まずはフェムト秒レーザー加工中に被加工対象のガラスの移動を伴う逐次加工法による試作にて光学ローパスフィルタとしての機能確認を行い、次に、一括加工法の適用を検討することとした。

なお、異質相による回折格子をスリット状にすれば、スリットと直交する方向にしか光線は分離できないが、同様にして回折格子間隔を適切に選んで光線を分割することで1方向へのモアレの低減が確認できれば、回折格子構造を市松状にしたときXY両方向へのモアレの低減を実現できることは明らかである。このため、装置のシェアの関係上など実際の加工のやりやすさから、場合によっては異質相のスリット状回折格子を形成したガラスにて、試作・検証を行った。

iii) 異質相の回折格子構造によるガラス光学ローパスフィルタの基本設計

異質相の回折格子構造の基本設計について図③(1)–3を用いて具体的に説明する。受光素子間隔を p 、カバーガラス厚みを L_1 、イメージセンサのカバーガラス下面から受光面までの距離を L_2 とする。また、光学ローパスフィルタとなるガラス回折格子中の異質相の間隔を d としたときの1次光の分離角 θ_1 、カバーガラスに入射角 θ_1 で入射した1次光がカバーガラスを出射するときの出射角を θ_2 とする。さらに、カバーガラスと画素であるフォトダイオードの間は通常の水素が満たされていると仮定してこの空気の屈折率を n_0 とおき、カバーガラスの屈折率は回折格子を形成するガラス材料と同一であると仮定して両者のガラスの屈折率を n_1 とおく。

このとき、以下の式が成り立つ。

分離した光が受光面で受光素子間隔 p で分割されることより

$$L_1 \tan \theta_1 + L_2 \tan \theta_2 = p \quad \dots \text{式①}$$

カバーガラスの出射境界にスネルの法則を適用して

$$n_1 \sin \theta_1 = n_0 \sin \theta_2 \quad \dots \text{式②}$$

回折格子の入射光波長 λ と回折格子間隔 d と分離角 θ_1 の関係から

$$n_1 \sin \theta_1 = \lambda / d \quad \dots \text{式③}$$

以上①②③式を連立して回折格子間隔 d について解けば、

$$d \doteq (n_0 L_1 + n_1 L_2) \lambda / n_0 n_1 p = (L_1 / n_1 + L_2 / n_0) \lambda / p$$

となる。

以下、実際の数値を用いて計算する。用いたカメラのCCD (1/3インチカラーインターライントランスファースタCCD、画素数25万画素(水平510画素×垂直492画素) CCDエリアサイズ4.8mm×3.6mm) ではCCD画素サイズ水平9.4 μm ×垂直7.3 μm であったので、 $\lambda = 0.633[\mu\text{m}]$ 、 $n_0 = 1$ 、 $n_1 = 1.5$ 、 $L_1 = 1200[\mu\text{m}]$ 、 $L_2 = 600[\mu\text{m}]$ を代入して計算すると、

$$p = 9.4[\mu\text{m}] \text{ に対しては } d \doteq 94[\mu\text{m}]$$

$$p = 7.3[\mu\text{m}] \text{ に対しては } d \doteq 120[\mu\text{m}]$$

となる。

回折格子の間隔が決まったので、次に格子の深さの最適値を検討する。

RWCA (Rigorous Coupled Wave Analysis : 厳密結合波解析法) 理論の結論によると、格子の単位構造が長方体の場合の透過型体積回折格子の1次回折光の効率 η は、判別パラメータ $Q = 2\pi\lambda H / (n \cdot d^2) \cong 0.045 \sim 0.09 < 1$ であるから、通常のRaman-Nach回折またはDamman回折と思われるので、Damman回折に近いとすると、 f をfilling factorとして、

$$\eta = 2 \left(1 - \cos \left(2\pi H \Delta n / \lambda \cos \theta_0 \right) \right) \cdot \left(f \cdot \text{sinc} (mf) \right)^2$$

で与えられる。よって、垂直入射光に対し1次回折効率が最大となる格子の深さ H は

$$\Delta n = 0.001 \sim 0.002, \lambda = 0.633 [\mu\text{m}] \text{ として}$$

$$H = \lambda / (2 \Delta n) \cong 150 \sim 300 [\mu\text{m}]$$

であるので、0次回折光を利用する今回の場合では、格子の深さ H' は、 $H' = 0.755 \cdot H \cong 110 \sim 220$ とすればよいことがわかる。

(b) ガラス光学ローパスフィルタの作製と評価

a) 加工方法と装置、試作したガラス光学ローパスフィルタ

図3. 1. 2 (3) 1) (b) a) に加工方法の概略と加工装置の写真を示す。使用したフェムト秒レーザー加工装置の説明をする。使用した装置は、大まかには、フェムト秒レーザー光源部とステージ部からなる。

フェムト秒レーザー光源部は、チタン・サファイア結晶を用いたモードロックレーザーで800nmのフェムト秒レーザーを作り出し、それを再生増幅器で増幅を行なう構成となっている。それぞれの励起光源として連続発振のLD励起固体レーザーを用いている。以下にフェムト秒レーザー光源部の主要仕様を記す。

モードロックチタン・サファイアレーザー：
Mira Optima 900-F (コヒレント社製)
繰り返し周波数 76 MHz
中心波長 800 nm
パルス幅 200 fs 以内
平均出力 650 mW 以上
ビーム品質 $M^2 < 1.3$

再生増幅器：
Reg A 9000 (コヒレント社製)
繰り返し周波数 10 KHz ~ 300 KHz
中心波長 800 nm
パルス幅 160 fs 以内 (100 KHz 時)
パルスエネルギー 4 μ J 以上 (100 KHz 時)
平均出力 400 mW 以上
ビーム品質 $M^2 < 2.0$

モードロックチタン・サファイアレーザー励起用固体レーザー：
Verdi-V5 LD 励起固体レーザー (コヒレント社製)
出力波長 532 nm
出力 5 W

再生増幅器励起用固体レーザー：
Verdi-V10 LD 励起固体レーザー (コヒレント社製)

出力波長 532nm
出力 10W

ステージ部はサンプルを載せるエアベアリング式のXYステージと対物レンズが連結されたZステージからなり、更にZステージは粗動ステージと微動ステージからなっている。以下にステージ部の主要仕様を記す。

XYステージ：
ストローク 各50mm
再現性 各±20nm

Zステージ：
ストローク 10mm（粗動ステージ）、100μm（微動ステージ）
再現性 ±10μm（粗動ステージ）、±5μm（微動ステージ）

ガラス光学ローパスフィルタを作りこむためのガラス基板は、デジタルカメライメージセンサカバーガラス用途のガラス材料とした。将来的にイメージセンサカバーガラスの中に光学ローパスフィルタを作りこむことができれば、デジタルカメラ光学系の薄型化、低コスト化に大きく寄与できると考えた。イメージセンサカバーガラス用ガラスは、イメージセンサの受光素子を破壊するα線を発生する放射線同位元素を内部に極力含まないことを特長としている。

今回、具体的には、光学ローパスフィルタを形成するガラス基板として、旭硝子株式会社のFP-1を用いた。以下にFP-1の特性を記す。

組成系 硼珪酸カリ
屈折率(nd) 1.490
密度 2.26 g/cm³
熱膨張係数 52×10⁻⁷/°C
転移点(Tg) 490°C
屈伏点(T) 600°C
α線量(カウント/cm・h) 0.005以下

次に、実際に試作したガラス光学ローパスフィルタの写真を、図3. 1. 2 (3) 1) (b) a) ①と図3. 1. 2 (3) 1) (b) a) ②に示す。異質相回折格子の1ブロックは、格子の水平ピッチ方向に2μm間隔、光軸方向に表面より100μmの深さを基準に25μm間隔で12本並べられた多数の異質相から構成されている。回折格子の形成範囲は3mm×4mmである。なお、入手しやすい0.5mm厚のガラス基板を用いたが、光学ローパスフィルタとしての正味の厚みは0.3mmである。

加工条件は、繰り返し周波数250kHz・パルス幅320fs・平均出力325mWのfsレーザー光を倍率10倍(NA0.3)の対物レンズで集光、走査速度5mm/sとした。

b) 評価方法と装置、評価結果

i) 評価方法と装置

図3. 1. 2 (3) 1) (b) b) i) に評価方法の概略と装置の写真をしめす。全体の構成はチャートとデジタルカメラ、モニター（キャプチャー回路含む）、オシロスコープとパソコンとからなる。チャートはサーキュラーゾーンチャート、あるいは、ラインチャートである。デジタルカメラの内部には、CCDカバーガラスに密着して、ガラスローパスフィルタを貼り付けてある。

デジタルカメラからは NTSC ビデオ信号が出力される。このビデオ信号を分岐し、一方はビデオキャプチャーを介してモニターへ、もう一方は、オシロスコープへ入力している。オシロスコープでは、NTSC ビデオ信号の任意のラインのデジタルデータをテキストとしてファイルに取り出すことができる。必要に応じ、このデジタルデータをパソコンで分析する。

ii) 試作したガラス光学ローパスフィルタのモアレ除去機能の確認

試作したガラス光学ローパスフィルタを実装したカメラによりサーキュラーゾーンチャートを撮影した画像を図3. 1. 2 (3) 1) (b) b) ii)①に示す。サーキュラーゾーンチャートとは、中心から離れるにつれてそのピッチが小さくなっていく、白と黒の同心円からなるテストチャートである。多くの空間周波数成分を含んでいるため、カメラなどの結像性能の効率的な評価に伝統的に用いられている。図③(1)-12において、画面上半分にのみ回折格子が形成されており、画面下半分は素通しのガラスのままである。図③(1)-12において、画面下半分で発生しているモアレが画面上半分では低減されている。よって、試作したガラス回折格子が光学ローパスフィルタとして機能していることが確認できた。

iii) 試作したガラス光学ローパスフィルタの方向無依存性の確認

試作したガラス光学ローパスフィルタのモアレ低減効果の方向無依存性を確認した写真を図3. 1. 2 (3) 1) (b) b) iii)①および図3. 1. 2 (3) 1) (b) b) iii)②に示す。ここで、モアレ低減効果の方向無依存性とは、同一の光学ローパスフィルタが水平方向のモアレも垂直方向のモアレも低減することを言う。

図3. 1. 2 (3) 1) (b) b) iii)①②において太い黒線で囲われた右上 1/4 のみガラス光学ローパスフィルタが形成されており、太線の外側の残りの画面 3/4 に相当する部分は素通しのガラスとなっている。図3. 1. 2 (3) 1) (b) b) iii)①②いずれでも、太線の外側の部分ではモアレが生じているが太線の内側の部分ではモアレが低減している。すなわち、試作したガラス光学ローパスフィルタについて、モアレ低減効果の方向無依存性が確認できた。

なお、図3. 1. 2 (3) 1) (b) b) iii)①の水平方向ラインチャートのピッチは内側が 0.24mm で外側 1.0mm、図3. 1. 2 (3) 1) (b) b) iii)②の垂直方向ラインチャートのピッチは内側が 0.40mm で外側 1.0mm である。

iv) 試作したガラス光学ローパスフィルタのモアレ低減効果のビデオ信号による確認

試作したガラス光学ローパスフィルタがモアレを低減していることをビデオ信号上で確認した結果を示す。

モアレを生じるチャートを垂直縞チャート(ピッチ 0.25mm)を撮影したときの、カメラからの画像を図3. 1. 2 (3) 1) (b) b) iv)①に示し、このときのモアレ低減が確認できるラインでのビデオ信号のオシロスコープの観察画面を図3. 1. 2 (3) 1) (b) b) iv)②に示す。

図3. 1. 2 (3) 1) (b) b) iv)②よりわかるように、素通しガラス部分からのビデオ信号では画像の明るさに対応する信号振幅に周期的な変化が見られるが、フィルタ形成部分からのビデオ信号では信号振幅の周期変化の振幅が小さい。これは、光学ローパスフィルタのモアレ低減効果を示している。

さらに、これらのビデオ信号をそれぞれ周波数分析した結果を図3. 1. 2 (3) 1) (b) b)

iv) ③に示す。ビデオ信号中のモアレ成分が20%程度まで低減していることがわかる。

v) 試作したガラス光学ローパスフィルタと水晶光学ローパスフィルタとの特性比較

空間周波数の異なるラインチャートを複数用意し、ビデオ信号出力の振幅をオシロスコープにて測定する方法で、試作したガラス光学ローパスフィルタの特性を水晶光学ローパスフィルタの特性とあわせて測定した結果を図3. 1. 2 (3) 1) (b) b) v) ①に示す。試作したガラス光学ローパスフィルタでは、低空間周波数側からモアレが発生するナイキスト周波数までは水晶光学ローパスフィルタとほぼ同様の特性を示し、一方、ナイキスト周波数より少し高空間周波数では水晶光学ローパスフィルタよりむしろよい特性を示していることが確認された。

vi) ガラス光学ローパスフィルタへの一括加工法の適用の検討

以上、異質相により回折格子を形成することによって、ガラス光学ローパスフィルタが作製できることを確認した。また、回折格子を千鳥状にすれば、貼り合わせなく垂直水平両方向のモアレを低減できることも確認した。

ここでは、本PJの異質相の一括加工法の光学ローパスフィルタへの適用した結果を示す。図3. 1. 2 (3) 1) (b) b) vi) ①に示すホログラムによる一括加工法にて形成した直線異質相からなる1次元回折格子を図3. 1. 2 (3) 1) (b) b) vi) ②に示す。

加工条件は、繰り返し周波数1kHz・パルス幅60fs・平均出力6.2W・中心波長800nm

のfsレーザー光を内製の直線異質相形成用ガラス・ホログラム（焦点距離75mm）で集光した。60s照射して直線異質相1本（長さ約2.5mm幅約0.002mm）を形成し、これを並べて2.5mm×4mmの回折格子とした。

ターゲットガラスは厚み0.26mmのシリカガラスである。

波長633nmのレーザー光に対する回折光量比（＝（1次光量）／（0次光量））は18%であり、逐次加工での1次元回折格子試作品の光量比25%より3割程度低いだけであった。従って、逐次加工の場合とほぼ同程度のモアレの低減性能が期待できる。

写真では茶色の着色が見られ、実用のためには加工時間の短縮が必要であるが、本PJで開発の新ガラスと新設計ホログラムを更に改善することにより、着色はほぼ無色透明に、加工時間は10m×10mmの光学ローパスフィルタに対し数秒以下まで、大幅に改善できる見込みである。

参考文献

- [1] 岸川, ユーザーエンジニアのための光学入門, (1990), オプトロニクス社
- [2] K. M. Davis, K. Miura, N. Sugimoto, and K. Hirao, Opt. Lett. 21, 1729 (1996)
- [3] K. Kawamura, T. Ogawa, N. Sarukura, M. Hirano, and H. Hosono, Appl. Phys. B 71, 119 (2000)
- [4] J. W. Chan, T. R. Huser, S. Risbun, D. M. Krol, Opt. Lett. 26, 1726 (2001)
- [5] J. W. Chan, T. R. Huser, S. Risbun, D. M. Krol, Appl. Phys. A 76, 367 (2003)
- [6] 市川 他, 最新 回折光学素子技術全集, (2004), 技術情報協会
- [7] 渋谷・大木, 回折と結像の光学, (2005), 朝倉書店
- [8] NEDO, ナノテクノロジープログラム—三次元光デバイス高効率製造技術パンフレット, (2010)
- [9] 政岡・田中, NEW GLASS, 26(1), (2011)

(d) 図表



図3. 1. 2 (3) 1) (a) a) ① モアレの例
左：モアレを生じうる被写体の例。右：モアレが生じた画像。

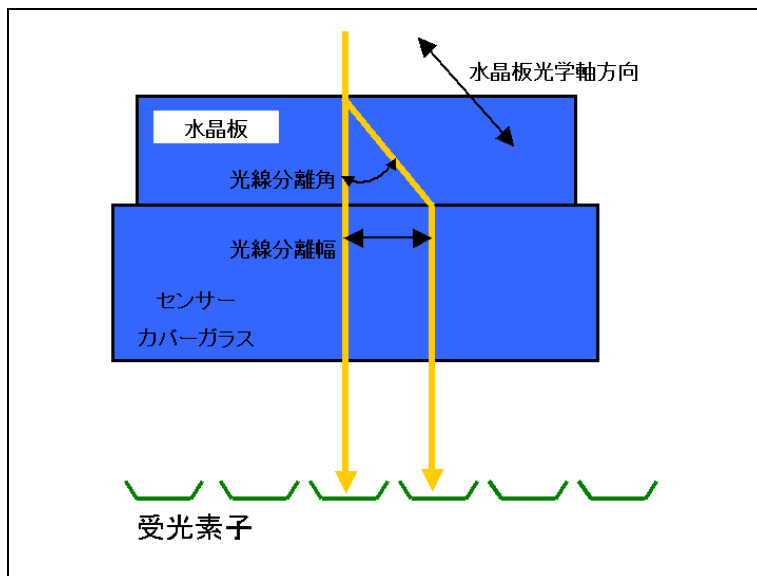


図3. 1. 2 (3) 1) (a) c) ① 水晶製光学ローパスフィルタの光線分離

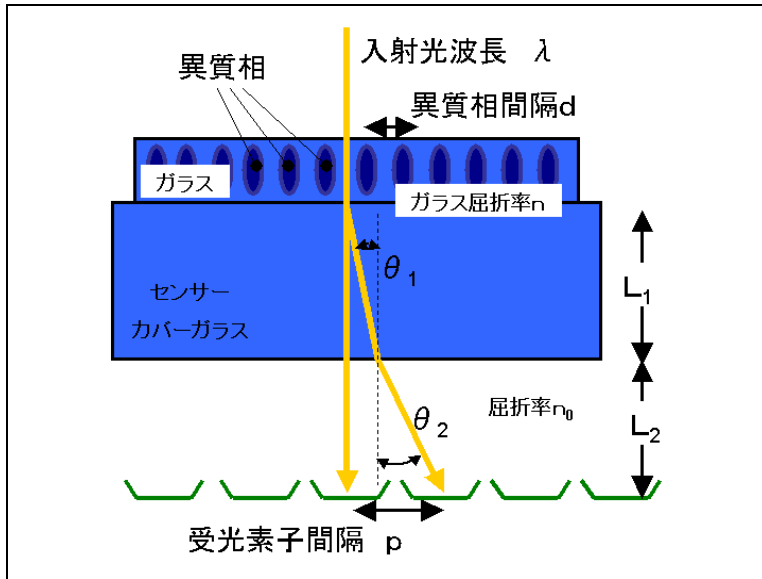


図3. 1. 2 (3) 1) (a) d) i) ①
 ガラス光学ローパスフィルタのための回折格子間隔の設計

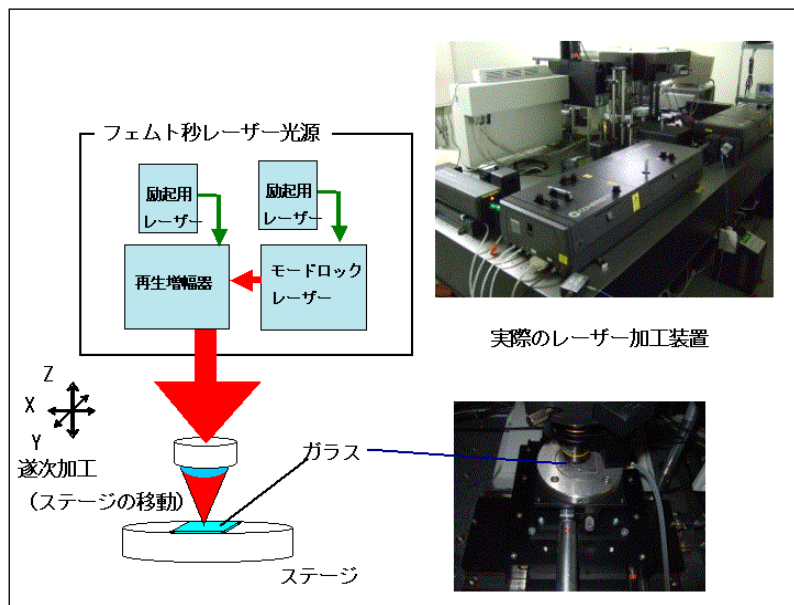


図3. 1. 2 (3) 1) (b) a) 加工方法と加工装置

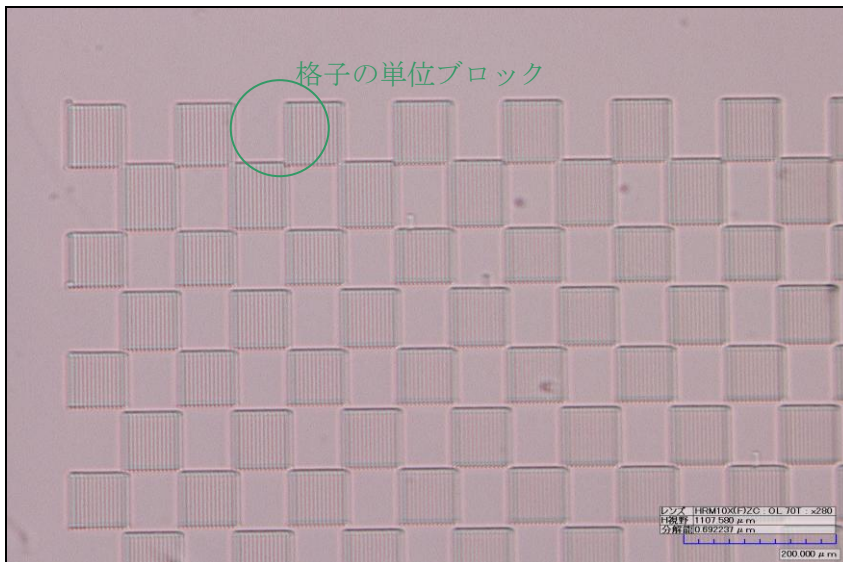


図3. 1. 2 (3) 1) (b) a) ①
 ガラス光学ローパスフィルタの光軸方向からの写真

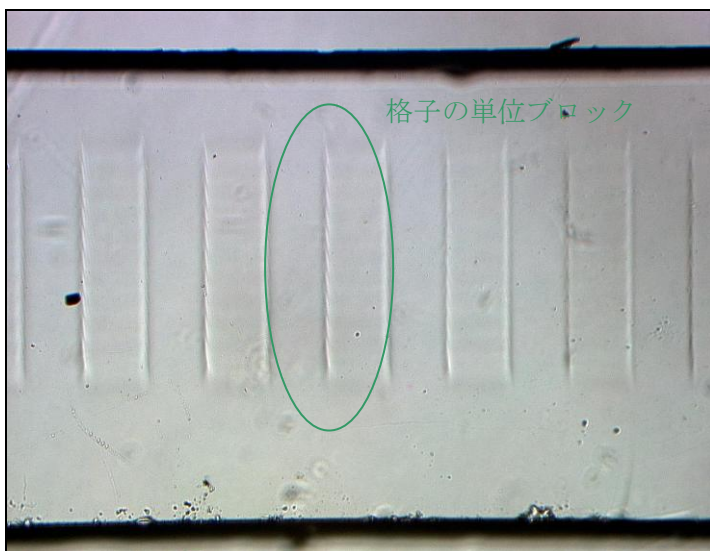


図3. 1. 2 (3) 1) (b) a) ②
 ガラス光学ローパスフィルタの断面の写真

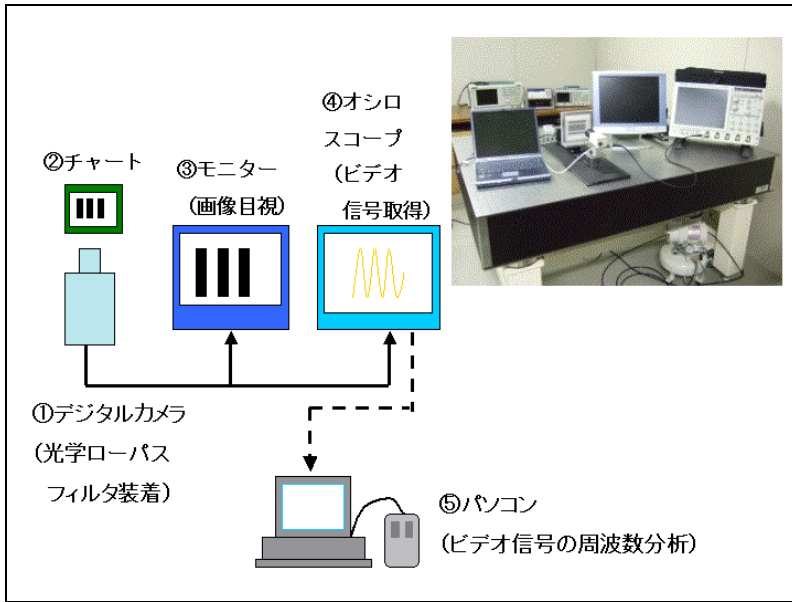


図3. 1. 2 (3) 1) (b) b) i) 評価方法と評価装置

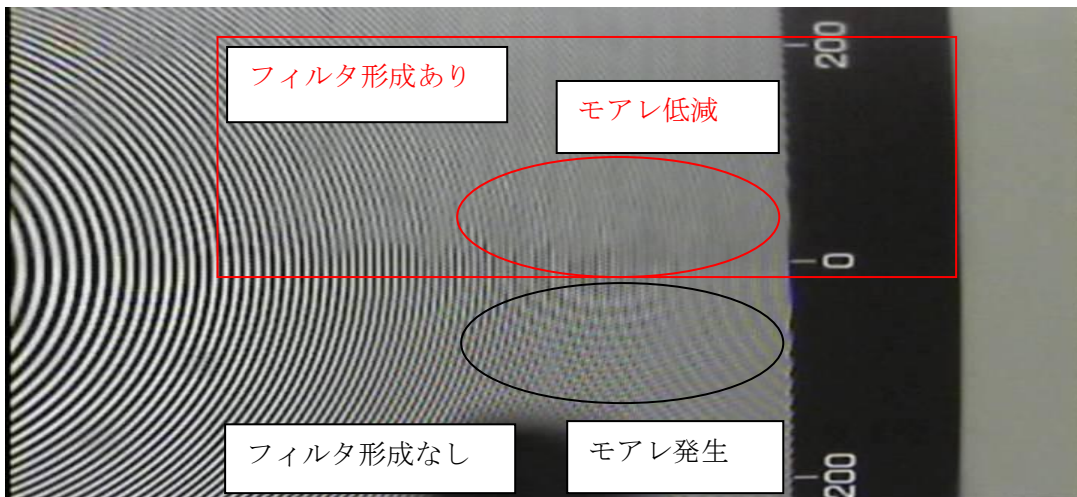


図3. 1. 2 (3) 1) (b) b) ii) ①
試作したガラス光学ローパスフィルタを実装したカメラでの、
サーキュラーゾーンチャートの画像

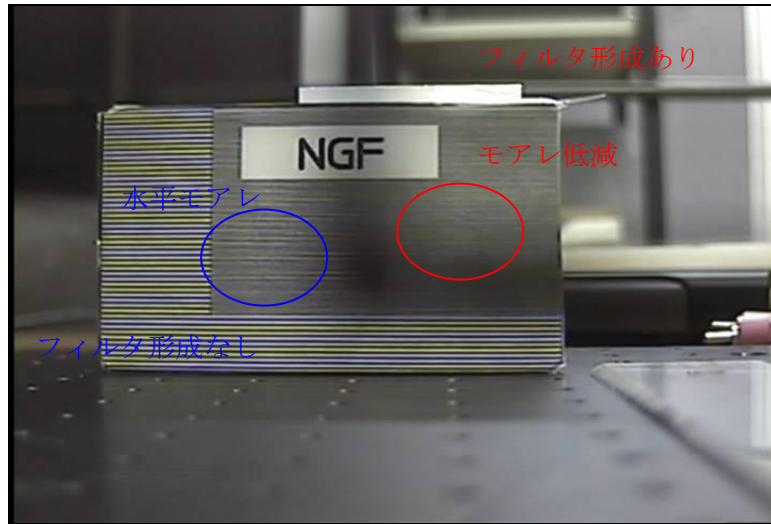


図3. 1. 2 (3) 1) (b) b) iii)①

試作したガラス光学ローパスフィルタを実装したカメラでの水平方向ラインチャートの画像

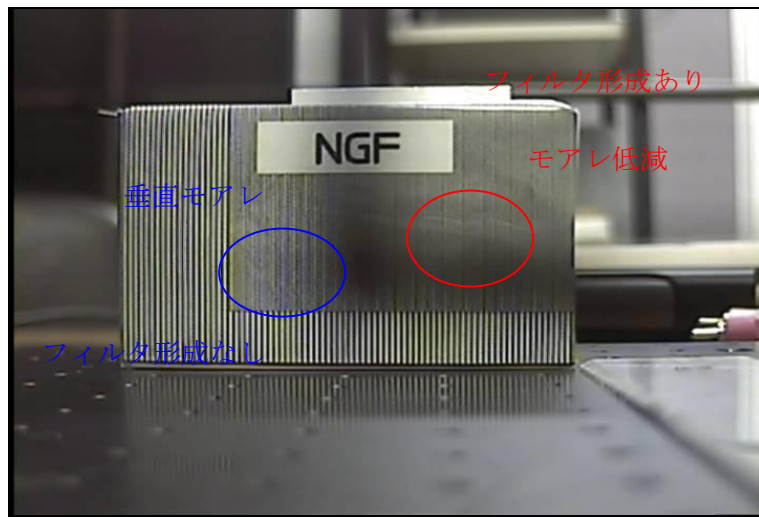


図3. 1. 2 (3) 1) (b) b) iii)②

試作したガラス光学ローパスフィルタを実装したカメラでの垂直方向ラインチャートの画像

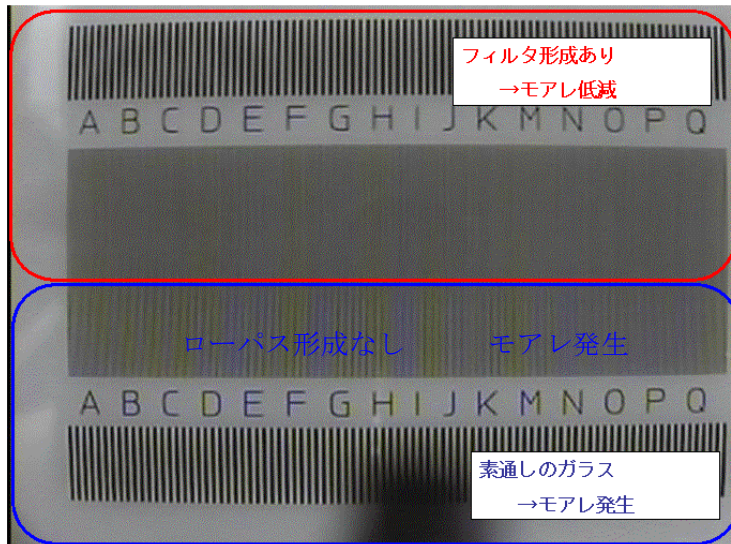


図3. 1. 2 (3) 1) (b) b) iv)①
 試作したガラス光学ローパスフィルタを実装したカメラでの
 垂直方向ラインチャートの画像

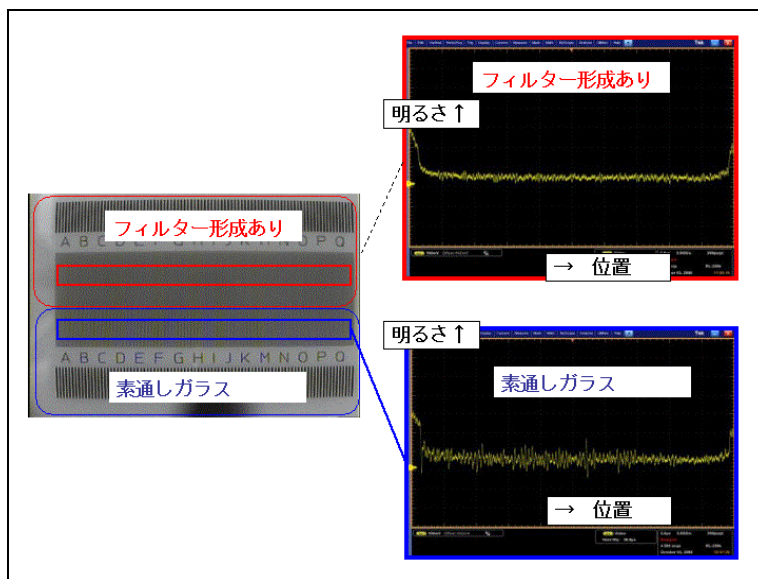


図3. 1. 2 (3) 1) (b) b) iv)②
 モアレのビデオ信号およびモアレが低減されたビデオ信号。

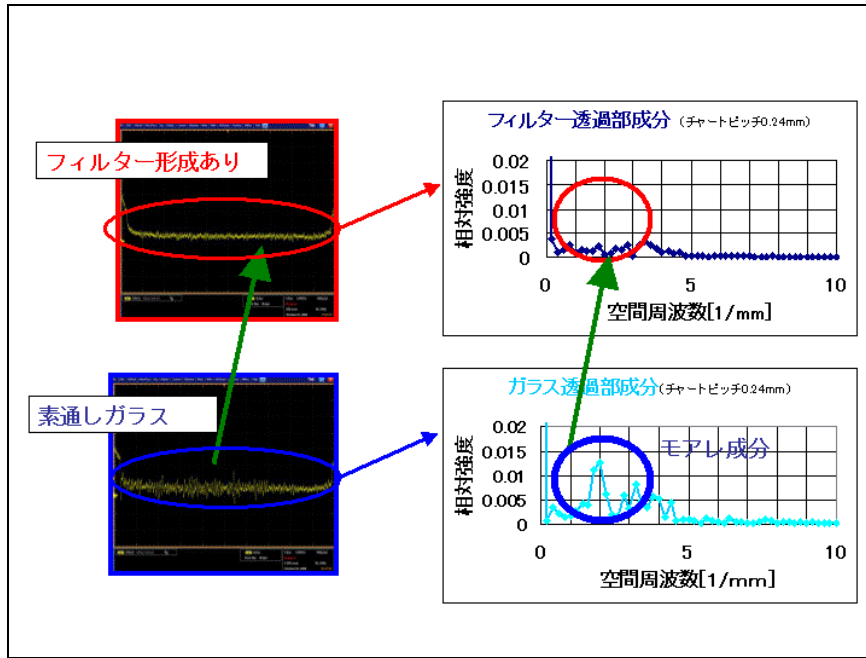


図 3. 1. 2 (3) 1) (b) b) iv)②
モアレのビデオ信号およびモアレが低減されたビデオ信号の
周波数成分分析。

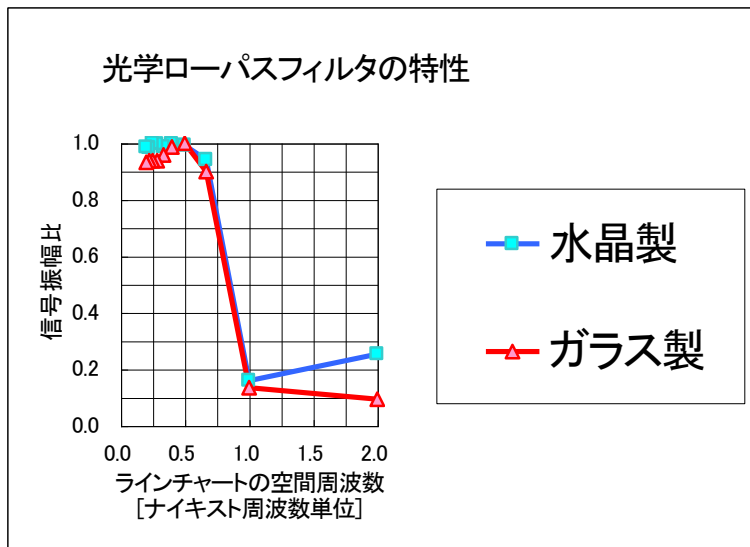


図 3. 1. 2 (3) 1) (b) b) v)①
試作したガラス光学ローパスフィルタと水晶光学ローパスフィルタとの特性比較

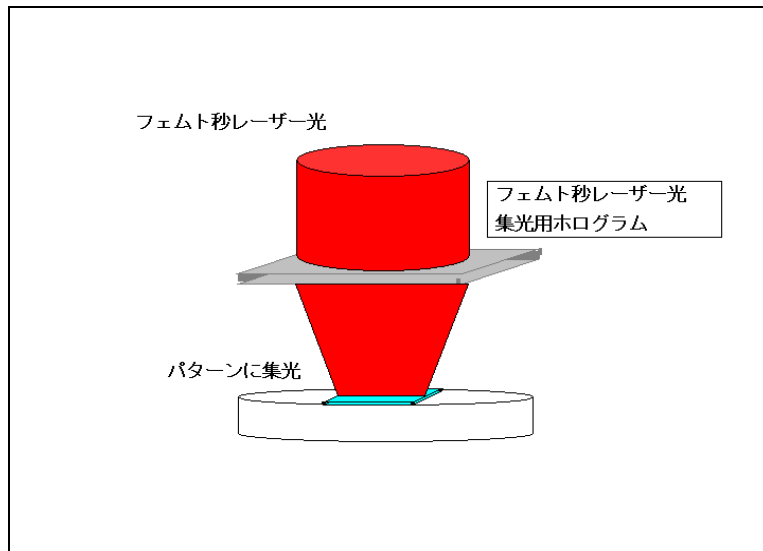


図3. 1. 2 (3) 1) (b) b) vi) ①
ホログラムによる一括加工方法

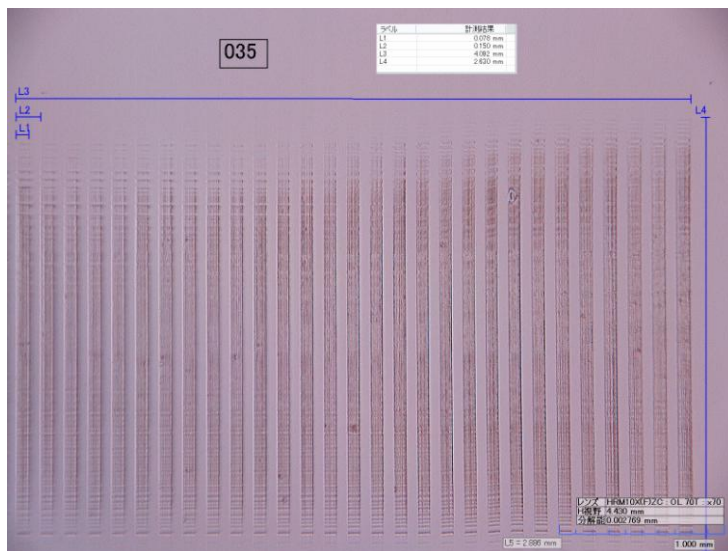
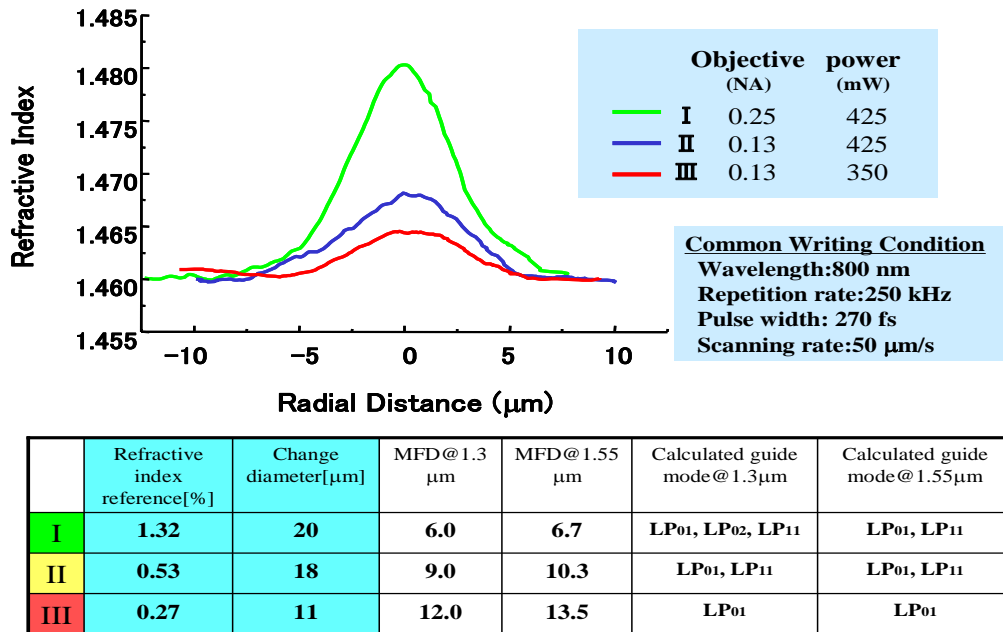


図3. 1. 2 (3) 1) (b) b) vi) ②
ホログラムにて一括に形成した直線異質相からなる1次元回折格子

2) 三次元光回路導波路デバイス技術

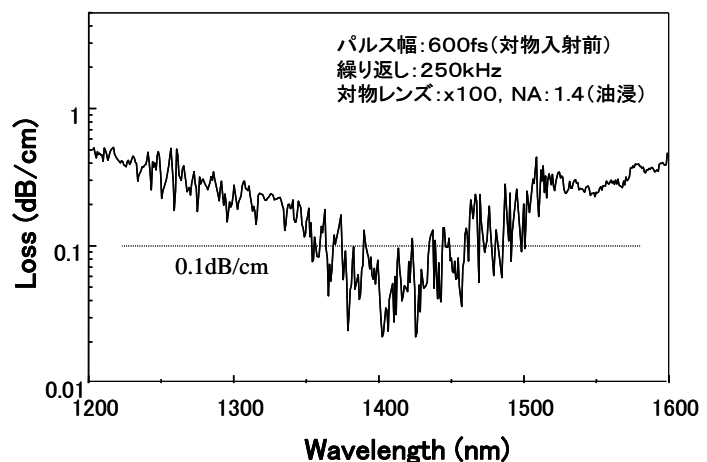
逐次描画による直線導波路形成において、描画対物レンズ、平均出力、パルス幅、繰り返し周波数や走査速度等のレーザー照射条件を変化させることで、コア径や比屈折率差を変化させることができた。図Ⅲ③(2)-1はレーザー照射条件を調整することで屈折率差および異質相形成サイズを変化させて得られた光導波路の屈折率分布より計算したモードフィールド径（MFD）を示す。描画する対物レ



図Ⅲ③(2)-1 異なるレーザー照射条件下で得られた導波路の屈折率分布（実測値）および屈折率分布より計算したMFDと伝搬モード

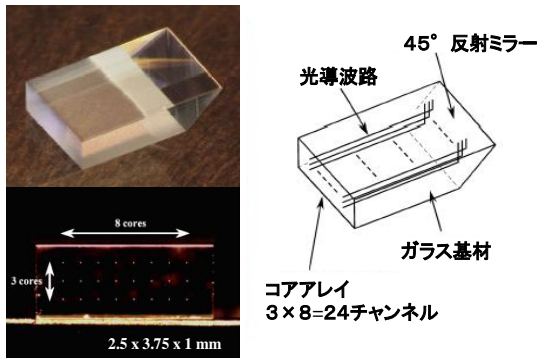
レンズの開口数や平均出力により、得られる導波路の比屈折率差やコア径が変化し、それに伴い伝搬モードも変化していることがわかる。図中Ⅲに示すように、通信帯域においてシングルモードの光導波路を描画することも可能である。

図Ⅲ③(2)-1は、カットバック法により測定した長さ5cmの光導波路の損失スペクトルを示す。レーザー照射条件制御により、目標であるコア径9μmの直線導波路を描画し、±1μmの加工精度で伝送損失0.1dB/cmの導波路を描画することができた。



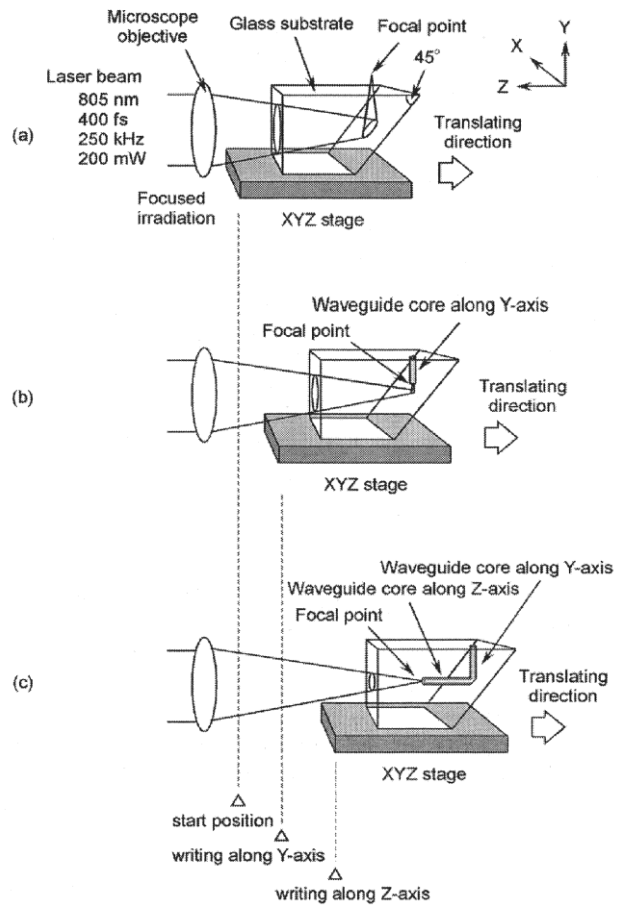
図Ⅲ③(2)-2 光導波路の損失スペクトル

また、光導波路を三次元的に配置させることも可能で、図Ⅲ③(2)-3 に示すような直角光路変換光導波路を作製することができた^{1,2)}。この三次元導波路の作製は、図Ⅲ③(2)-4 に示すように、45° 反射面を利用することで、基盤ガラスを回転させることなく一軸方向にレーザーをスキャンさせるだけで、垂直および水平導波路を描画することができ、多点同時照射を利用することで、一度に複数本

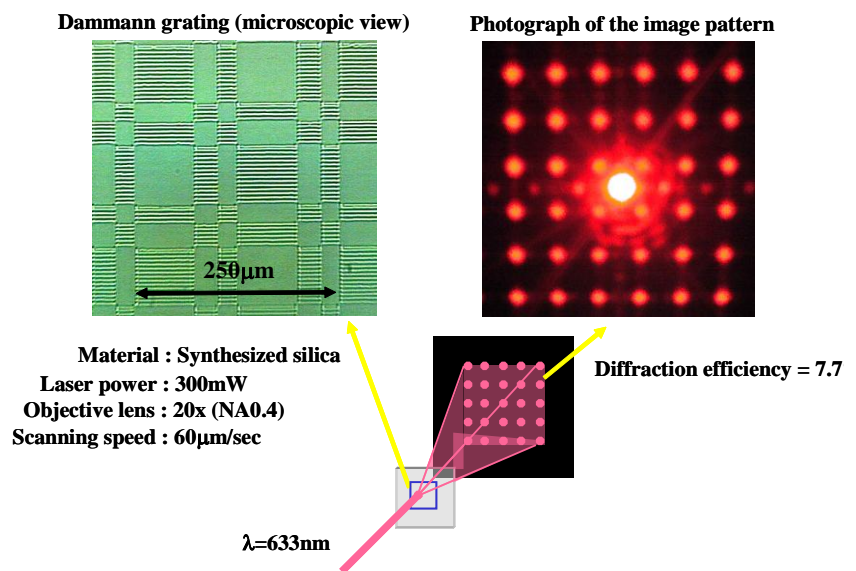


図Ⅲ③(2)-3 直角光路変換コネクタ

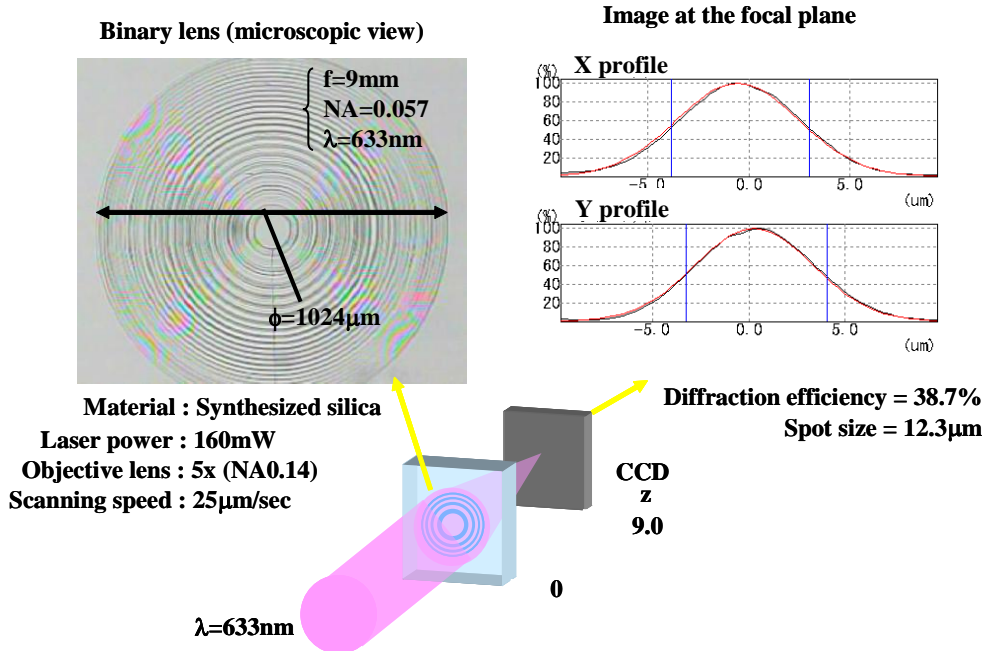
の直角導波路を描画できる可能性がある²⁾。この導波路は 250 μm 間隔で 24 本 (3 列×8 本) の導波路が、垂直及び水平方向に描画されており、45° 反射面を設けることで、複数の光路を低損失にて直角に変換することが可能である。このような光路変換光導波路は、光インターコネクションに利用できる可能性がある。



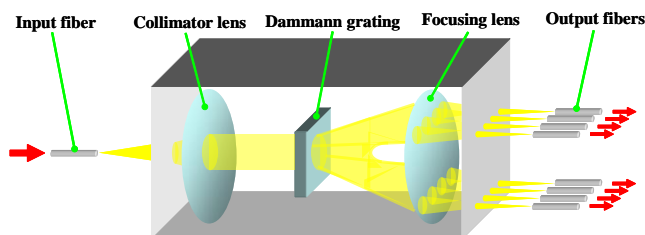
図Ⅲ③(2)-4 直角光路変換光導波路の作製法



図Ⅲ③(2)-5 ダーマングレーティング (6x6)

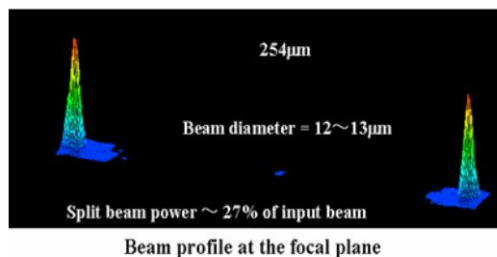
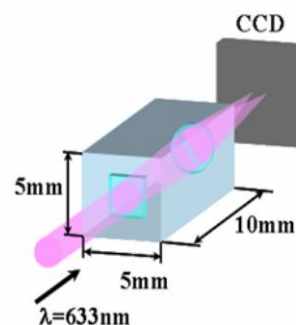
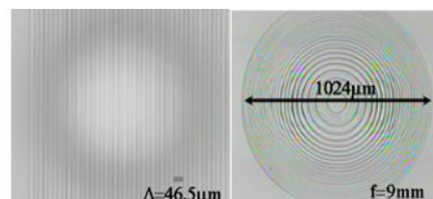


図Ⅲ③(2)-6 バイナリーレンズ



図Ⅲ③(2)-8 グレーティングとレンズを同一ガラス内に形成した分岐素子 (モデル)

さらに、光誘起屈折率変化を利用した、ガラス内部へのダーマングレーティング (図Ⅲ③(2)-5 参照) やバイナリーレンズ (図Ⅲ③(2)-6 参照) の描画も試みた。図Ⅲ③(2)-7 はグレーティングとバイナリーレンズとを同一ガラス内に描画することで作製した集積回折光学素子の 1 例で、ビームスプリッターとして機能する。これらの検討は一括描画での三次元光分岐素子の作製に活用する目的にて実施したものである。光導波路、グレーティングおよびバイナリーレンズを一括描画により同一ガラス内部に形成することで分岐素子として機能させられる可能性がある (図Ⅲ③(2)-8 参照)。このような素子や



図Ⅲ③(2)-7 グレーティングとレンズを同一ガラス内に形成したビームスプリッター

直角光路変換光導波路はその構造上、火炎加水分解法やイオン交換法等、既存の方法での作製は容易ではなく、局所領域のみを三次元的に高屈折率化することが可能なレーザー描画技術を有効活用した例と言える。

また、液晶空間光変調器 (LCOS-SLM) を利用した三次元一括レーザー加工システムも構築した。図 III ③ (2)-9 に光学系を模式的に示す。フェムト秒レーザーを SLM (HAMAMATSU; LCOS-SLM X10468) に入射し、反射ビームをリレーレンズ (L1、L2) で縮小した後、対物レンズに通して、試料 (石英ガラスなど) 内部に集光し、加工の様子は、L3 を用いて集光領域の像を CCD 面上に結像させることによって観察することができる。SLM に入力するホログラムは、形成したいビームドットパターンを表すビットマップファイルを用いて、フーリエ反復法による数値計算により得る。

この一括レーザー加工システムを用いることで、多数の光スポットを形成することができ、同時に複数の光導波路をガラス内部に形成することが可能になる。その概念図を図 III ③ (2)-10 に示す。SLM のフーリエ面に多数の光スポットを一行に形成するような空間位相分布 (位相ホログラム) をレーザー光に与えるような屈折率分布を SLM に与えて、ガラス内部

に集光した光スポット列に垂直な方向にガラスをスキャンすることによって複数の光導波路を同時に描画することができる。互いに平行な光導波路を描画する場合は、1つのホログラムのみしか SLM に入力しないが、描画する導波路の間隔を徐々に変えて曲げ導波路を作製したい場合、ビームスポットの位置を変えるためにホログラムを描画中に切り替える必要がある。ホログラムを切り替えること自体は非常に簡単であるが、ホログラムがコンピューターによって計算される Computer Generated Hologram (CGH) であるために、光スポット位置が離散的であるという問題を考慮しなければならない。それを示したのが、図 III ③ (2)-10 (b) である。CGH1 を用いて二つの集光スポットで2本の光導波路を同時に描画している途中で、CGH2 に切り替えて2つの光導波路の距離を短くすることができる。ここで、CGH を切り替えた時の集光スポットの変化の最小値 ΔX_{step} は、CGH の計算条件によって決定される。 ΔX_{step} をできるだけ小さくすることが滑らかな曲げ導波路を形成するために重要である。ここで

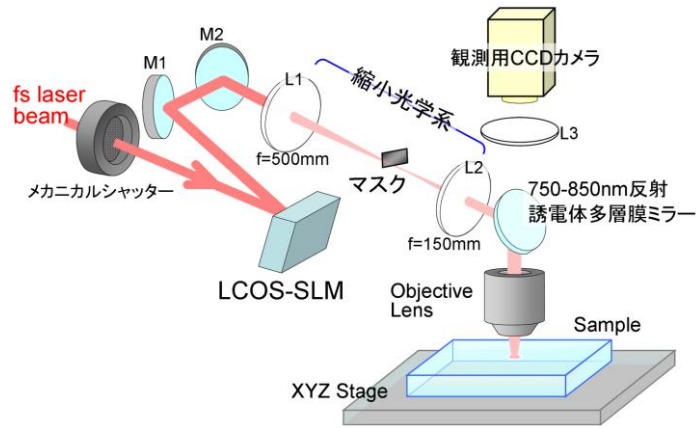


図 III ③ (2)-9 構築したホログラフィックフェムト秒レーザー加工光学系

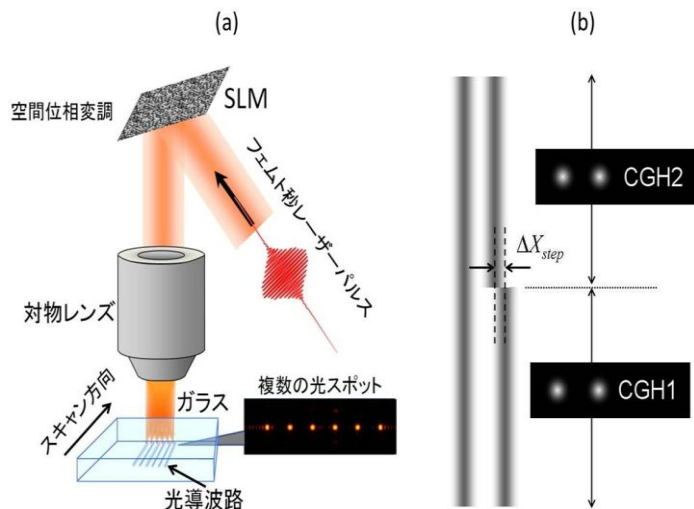


図 III ③ (2)-10 (a) SLM を用いた光導波路同時描画 (b) 位相ホログラム切り替えによる導波路の位置制御の問題

挙げる本プロジェクトの成果は、 ΔX_{step} をできるだけ小さくする単純な計算方法の提案と曲げ導波路作製の実現である。また、 ΔX_{step} の大きさと光導波路の損失について調べて、 ΔX_{step} を小さくすることと CGH の切り替え回数とのトレードオフを考慮する必要性も見出した。以下にその過程を詳しく述べる。まず、SLM を用いた一括レーザー加工システムでの CGH の計算について説明する。簡単のために、1次元で話を進める。一括レーザー加工システムで、SLM 直後の電場分布 $[F(x)]$ と集光スポットが形成される面(以下、「加工面」と呼ぶ)での電場分布 $[E(X)]$ はフーリエ変換によって関係付けられる。したがって、CGH の計算では次の離散フーリエ変換を利用して、所望の電界振幅分布 $|E(X_k)|$ が加工面に生じる位相分布 $\Delta\phi(x_n)$ を得る³⁾。

$$E(X_k) \propto \sum_n |F(x_n)|^* \exp[i\Delta\phi(x_n)] \exp[i2\pi \frac{x_n X_k}{\lambda f}] \quad (k, n=0, \dots, N-1) \quad (式 1)$$

ここで X_k, x_n はそれぞれ加工面と LSM 面での座標、 M, N は整数、 λ はレーザーの波長で、 f は SLM から加工面までの光学系によって決まる値である。ここで得られる $\Delta\phi(x_n)$ が CGH である。計算機では、位置情報 X_k, x_n は離散的であり、SLM で等間隔に素子が並んでいることを考えると、素子間隔を Δx とし $x_n = n\Delta x$ とするのがよい。離散フーリエ変換では、周波数範囲の関係から、 Δx と ΔX は次の関係によって制限される⁴⁾。

$$\Delta x \Delta X = \lambda f / N \quad (式 2)$$

この関係から、 $X_k = k\lambda f / [\Delta x N]$ であるため、加工面での集光スポットの間隔は限られた値しか取ることができないことになる。この式から、大きい N を用いれば、集光スポットの位置の微調整ができるということが分かる。曲げ導波路を描画する時に CGH を切り替える必要があることは冒頭で述べたが、十分に大きな N を用いないと、CGH の切り替え前後で導波路がなくなってしまう。例えば、 $N=512$ 、 $\Delta x=20 \mu\text{m}$ 、 $\lambda=800 \text{nm}$ 、 $f=30 \text{mm}$ の場合、 $X=2.34 \mu\text{m}$ となり、光導波路の幅が $2 \mu\text{m}$ であれば、CGH の切り替えによって導波路が完全に分離してしまうことになる。できるだけ N を大きくするためには、SLM 面での計算領域を SLM 面の外側にも広げるようにすればよい。すなわち、SLM 面での電場分布 $F(x)$ を

$$F(x_n) = \exp[i\Delta\phi(x_n)] \quad (-N_{SLMX}/2 \leq n \leq N_{SLMX}/2 - 1)$$

$$F(x_n) = 0.0 \quad (n \leq -N_{SLMX}/2 - 1, N_{SLMX}/2 \leq n) \quad (式 3)$$

と表すことによって、 N の値を大きくし、 ΔX を小さくすることができる。CGH を計算する時には、式(3)の拘束条件をフーリエ反復法に入れて、SLM の範囲のみを実験で用いる CGH とする。式(3)の表現によって、 ΔX を小さくすることができるが、 N が大きくなると CGH の計算に必要な時間も長くなる。CGH を計算する時に用いたフーリエ反復法では、離散フーリエ変換が律速過程になっており、その計算時間は 2次元フーリエ変換の場合、 $(N \log_2 N)^2$ に比例する。この計算時間を短くするために、「光導波路同時描画では単純な集光スポット分布しか使わない」ということを利用した。光導波路同時描画では、集光スポットを一行に並べればよいために、例えば図Ⅲ③(2)-11 のような単純な光強度分布になる。それを利用すると、二次元の光強度分布を次のように一次元の強度分布の積で表現することができる。

$$I(X, Y) = I_X(X) * I_Y(Y) \quad (式 4)$$

これにより、一次元の強度分布 $I_x(X)$ と $I_y(Y)$ を独立して計算すればよいために、計算時間は $2M \log_2 N$ に比例することになる。この計算では一次元の CGH が 2 つ [$\Delta\phi(x)$ と $\Delta\phi(y)$] 得られることになるが、

$$\begin{aligned}
 I(X_k, Y_l) &= I_x(X_k) * I_y(Y_l) \\
 &\propto \left| \sum_{m=-N/2}^{N/2-1} |F_x(x_m)| \exp\left(i\Delta\phi(x_m) + i2\pi \frac{x_m X_k}{\lambda f}\right) \right| \left| \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} |F_y(y_n)| \exp\left(i\Delta\phi(y_n) + i2\pi \frac{y_n Y_l}{\lambda f}\right) \right| \quad (\text{式 5}) \\
 &= \left| \sum_{m,n=-N/2}^{N/2-1} |F_x(x_m)| |F_y(y_n)| \exp i\{\Delta\phi(x_m) + \Delta\phi(y_n)\} \exp\left(i2\pi \frac{x_m X_k + y_n Y_l}{\lambda f}\right) \right|
 \end{aligned}$$

より、光導波路描画で用いる CGH は単純に両者の和である式 6 を使えばよいということになる。

$$\Delta\Phi(x, y) = \Delta\phi(x) + \Delta\phi(y) \quad (\text{式 6})$$

この手法を用い、波長 $\lambda = 800 \text{ nm}$ 、パルス幅 100 fs 、繰り返し周波数 1 kHz のフェムト秒レーザーパルスを LCOS-SLM によって位相変調し、0.3 倍の縮小光学系を通した後、焦点距離 10 mm の対物レンズによって石英ガラス内部に集光照射することで曲げ導波路の描画を試みた。石英ガラスを $20 \mu\text{m/s}$ で動かすことによって、光導波路を描画した。CGH を計算する時には、 $N=16,384$ (2^{14}) を用いたので、集光スポット位置の分解能は、計算機上では $\Delta X_{\text{min}} = 0.08138 \mu\text{m}$ である。

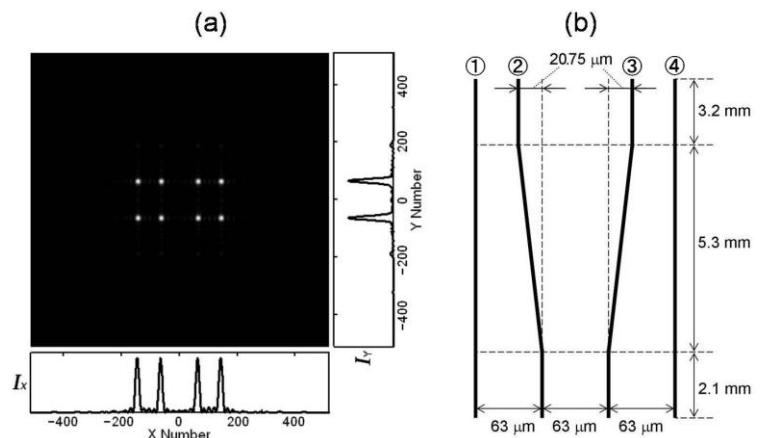
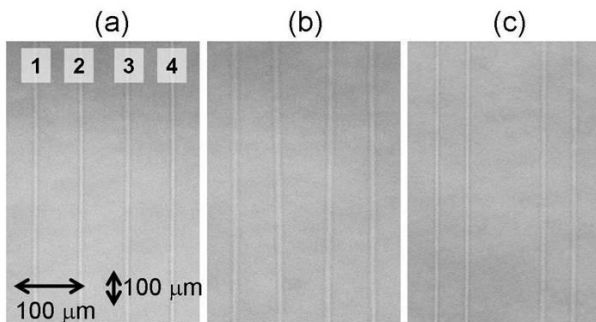


図 III ③ (2)-11 (a) 光導波路同時描画に用いる集光スポット分布の例 (b) 描画した曲げ導波路の構造

描画した曲げ導波路の構造を図 III ③ (2)-11 (b) に示した。描画を始める時の光導波路の間隔は均等であるが、途中で導波路 ② と ③ の距離が離れていき、最終的に導波路 ① と ②、③ と ④ の間隔が短くなる。描画した曲げ導波路の透過光学顕微鏡画像を図 III ③ (2)-12 (a)-(c) に示す。図 III ③ (2)-12 (a) は導波路の描画し始めであり、間隔が均等である。



III ③ (2)-12 (a) - (c) 描画した曲げ導波路の透過光波パターン結果

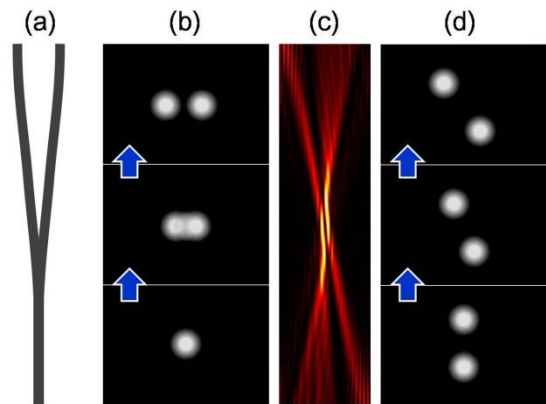
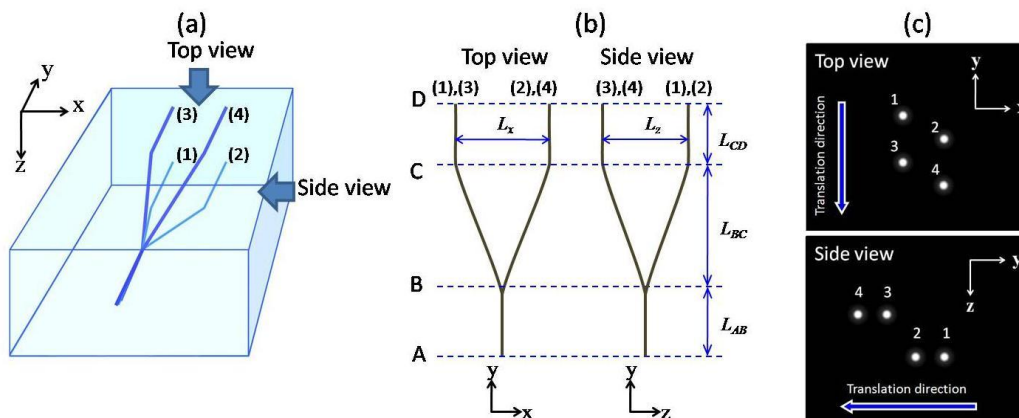


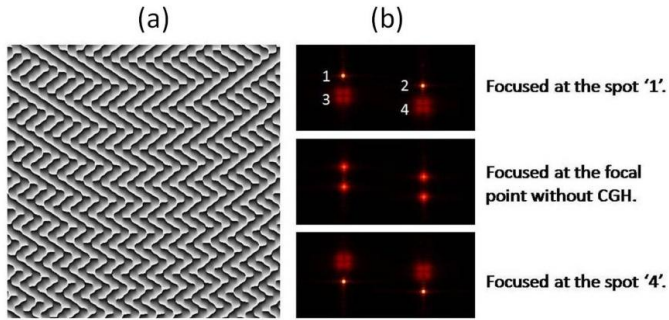
図 III ③ (2)-13 (a) Y 分岐導波路構造 (b) 直感的な Y 分岐導波路描画のための集光スポットの変化 (c) (b) の方法での 2 つの集光スポットを光軸に垂直な方向から見た光強度分布 (d) 光の干渉を受けずに Y 分岐導波路構造を描画する集光スポットの位置変化

図Ⅲ③(2)-12(b)が導波路の間隔を徐々に変えている領域であるが、光学顕微鏡で観察する限りでは、CGHの切り替えによる光導波路の途切れは見られなかった。図Ⅲ③(2)-12(c)は光導波路描画の最終段階の領域であるが、導波路①と②、③と④の間隔が短くなっている。この光導波路にHe-Neレーザーを図Ⅲ③(2)-11(b)の下方から入射して導波確認を行うと、図Ⅲ③(2)-12(b)の通りに導波することが確認された。導波の横方向の位置が異なるのは、導波路が曲がって、入射位置と出射位置が異なることに由来する。この場合、導波路①と④が直線で、②と③が曲がっているが、曲げたことによる導波光の光量は直線のものにくらべて84%程度であった。

さらに、三次元一括レーザー加工システムによる三次元分岐光導波路描画を実施した。描画方法の基本は、図Ⅲ③(2)-10に示すような複数本の光導波路を同時に描画する方法と同じである。図Ⅲ③(2)-13(a)のようなY分岐導波路を描画する場合、直感的に考えると、図Ⅲ③(2)-13(b)に示すように「1つの集光スポットを徐々に2つに分離していけばよい」となるが、実際は、集光スポット同士の干渉によって打ち消し合いが起こり、集光スポットを光軸に垂直な方向から見ると、歪んだ形に集光されてしまうことになる。このような光強度分布が形成されると、その領域で光導波路が形成されなくなる。そこで、ガラスのスキャン方向にずらした複数の集光点を横方向に動かすことによって分岐構造を作った。その方法を図Ⅲ③(2)-13(d)に示す。ガラスのスキャン中に二つの集光点が横方向に離れることによって分岐構造を作ることができる。この方法では、二つの集光点が干渉することがないために、導波路構造を確実に作製することができる。この方法により作製した分岐導波路の構造を図Ⅲ③(2)-13(a), (b)に示す。描画し始めは1本の光導波路であるが、図Ⅲ③(2)-13(b)のBからCにかけてx方向とz方向に分岐していく構造である。4つに分岐する構造を作るためには、4点の集光スポットが必要であり、その集光スポットの配置は図Ⅲ③(2)-13(c)のようになる。集光スポット#1と#3が-x方向に移動し、#2と#4が+x方向に移動する。一方、z方向では、集光スポット#3と#4が-z方向に、#1と#2が+z方向に移動する。このような集光スポット分布を形成するCGHの一例が図Ⅲ③(2)-14(a)で、シミュレーションした光強度分布が図Ⅲ③(2)-14(b)である。この場合、z方向にも光強度分布を制御する必要があるため、CGHの計算はフーリエ反復法ではなく、Optimal Rotation Angle法を用いて行った。

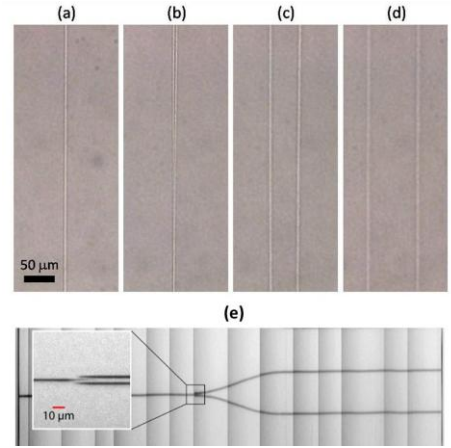


図Ⅲ③(2)-13 (a), (b)作製した1x4分岐導波路の構造 (c)1x4分岐導波路を描画する時の集光スポットの位置

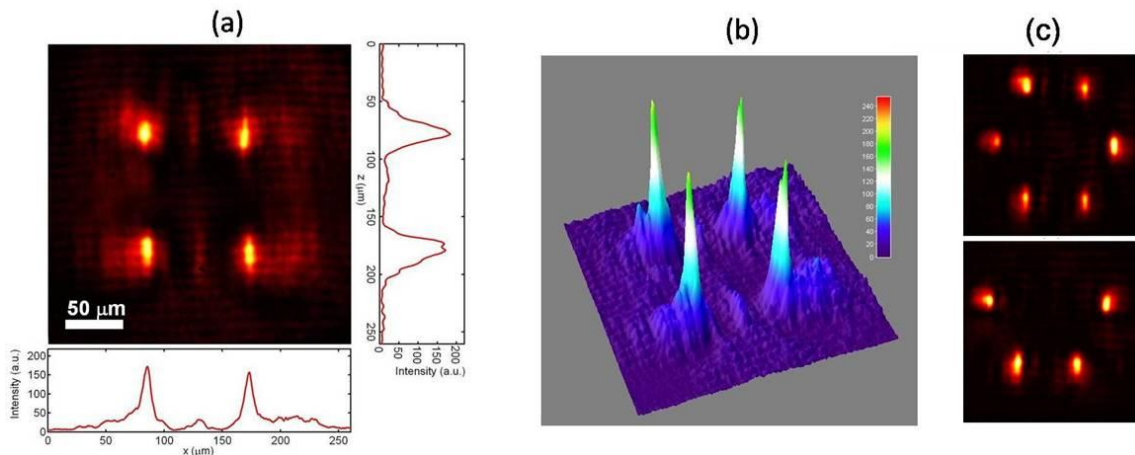


図III③(2)-14 (a)使用したホログラムの一例, (b) (a)のホログラムのシミュレーション結果

作製した導波路の透過光学顕微鏡写真を図III③(2)-15に示す。全く途中でとぎれることなく分岐していることが分かる。比較として、Pospiechら⁵⁾によるSLMを用いて描画したY分岐導波路⁶⁾の顕微鏡画像を図III③(2)-14(e)に示すが、分岐の最初の領域で光導波路が途切れていることがわかる。彼らは、1つの集光スポットを2つに分離する方法を用いているが、その方法では滑らかにつながった分岐導波路を作製できないことが分かる。作製した光導波路への光伝播を図III③(2)-16(a), (b)に示した。はっきりと伝播した光が立体的に分岐していることがわかる。この光導波路描画方法を用いると、他の三次元分岐導波路も容易に作製することができ、例えば、図III③(2)-16(c)に示すような1x6分岐導波路や、分岐幅が高さによって異なる1x4分岐導波路を作製することも可能である^{7,8)}。



図III③(2)-15 1x4分岐導波路の透過光学顕微鏡画像(a)直線領域(b)分岐領域(c)分離領域(d)4本の直線導波路の領域。(e) PospiechらによるY分岐導波路



図III③(2)-16 (a) (b) 1x4分岐導波路の光伝播。(c) 様々な分岐導波路への光伝播

参考文献

- 1) S.Hiramatsu, T. Mikawa, Q. Ibaragi, K. Miura, and K. Hirao, *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **16**, No.9 (2004) 207
- 2) S.Hiramatsu, K.Miura, K.Hirao, *Journal of Lightwave Technology*, Vol.25, No.9(2007), pp.2776–2782
- 3) W. H. Press et al., 「C 言語による数値計算のレシピ」第 12 章, Cambridge University Press (1997).
- 4) Gerchberg and Saxton, *Optik*, **35**, 237 (1972); J. R. Fienup, *Appl. Opt.* **21**, 2758 (1982)
- 5) M. Pospiech, M. Emons, A. Steinmann, G. Palmer, R. Osellame, N. Belini, G. Cerullo, and U. Morgner, *Opt. Express* **17**, 3555–3563 (2009).
- 6) M. Sakakura, T. Sawano, Y. Shimotsuma , K. Miura , K. Hirao , *Jpn. J. Appl. Phys.* (2009) **48**, 126507.
- 7) M. Sakakura, T. Sawano, Y. Shimotsuma , K. Miura , K. Hirao, *Opt. Express* (2010) **18**, 12136–12143.
- 8) M. Sakakura, T. Sawano, Y. Shimotsuma , K. Miura , K. Hirao, *Photonic West 2011*, SPIE Paper Number 7920–38.

IV. 実用化の見通しについて

1. 実用化の見通しについて

(1) 三次元光学デバイス（光学ローパスフィルタ）

モアレの低減が確認できた。更に改善した一括加工化を進めると同時に、モアレ以外の光学特性をも含めて実用化の観点から問題点の抽出を継続研究で行い、問題が無ければ実用化の検討を行なっていく。

(2) 光インターコネクション

研究項目「②三次元加工システム技術の②-1&2」で開発された直線異質相及び曲線異質相を光インターコネクション用として発展させ、オール光通信処理技術のデバイスとしての実用化への検討を進めていきたい。具体的な技術の問い合わせが来ている。

(3) 光結合器

研究項目「②三次元加工システム技術の②-1&2」で開発された直線異質相及び曲線異質相を光結合器などとして発展させて、オール光通信処理技術のデバイスとしての実用化への検討を進めていきたい。具体的な技術の問い合わせが来ている。

(4) LCOS-SLM

開発してきた LCOS-SLM で適応できる分野での実用化を検討する。

(5) プロジェクトで開発してきた下記についても早期に市場に出るように努力したい。

- ・ホログラムシミュレータ・ホログラム加工プロセス
- ・三次元屈折率差測定機能付き形状測定器

具体的な、技術の問い合わせが来ている。

(6) ホログラムを使用した特殊材料の高速、微細加工の問い合わせがきており、新規分野が開拓できる可能性が高い。

(7) ホログラムとフェムト秒レーザーを使用した加工に興味を持ち、その市場開拓に協力を申し出られている企業が複数でてきている。

2. 波及効果

プロジェクトで得られた成果は、①三次元ホログラムの設計法、②ガラス・ホログラムを使用した高耐光・高速一括加工法、③光軸方向に伸展しないホログラム加工法、④レーザー加工の容易なガラス材料、⑤高速加工が可能な光学デバイス設計法、⑥低光エネルギー加工が可能な加工法などが挙げられる。これ等は汎用性があり、今後いろいろな分野での応用展開が期待できるものである。

その対象として、1. 実用化の見通しについてに記載した(1)から(5)は勿論のこと、(6)、(7)への適用が挙げられ、従来不可能と言われていた加工が低コストで可能となる。

更に、上述の得られた成果①から⑥の内、半数以上はホログラム加工とは独立に利用できるものであり、より汎用性の高い技術であり、様々な分野に波及するであろう。

V. 成果資料

1. 論文リスト：査読付き

No	共著者	発表先	巻・号・ページ	論文題名
1	S. Kanehira, K. Miura, K. Fujita, K. Hirao	Proceedings. of SPIE	Vol.6413 (2006) 64130M-1-9	Nano-sized modification of transparent materials using femtosecond laser irradiation
2	K. Miura, Y. Shimotsuma, M. Sakakura, S. Kanehira, Hamabe and K. Hirao	Proceedings. of SPIE (Invited Paper)	Vol.6413 (2006) 64130K-1-13	Three-dimensional deposition of silicon from silicate glass with dispersed metallic aluminum by a femtosecond laser
3	Y. Shimotsuma, K. Hirao, J. Qiu, K. Miura	Journal of Non-crystalline Solids	Vol.352 (2006) pp.646-656	Nanofabrication in transparent materials with a femtosecond pulse laser
4	Y. Shimotsuma, M. Sakakura, K. Miura, J. Qiu, P. G Kazansky, K. Fujita	Journal of Nanoscience and Nanotechnology	Vol.7 (2007) pp.94-104	Application of femtosecond-laser induced nanostructures in optical memory
5	M. Sakakura, M. Terashima, K. Miura, K. Hirao	The Leview of Laser Engineering	Vol.35, No.2 (2007) pp.109-115	Methods for observation of material deformations and energy dissipation processes during a femtosecond laser machining inside transparent materials
6	M. Sakakura M. Terazima, Y. Shimotsuma, K. Miura, K. Hirao	Optics Express	Vol.15, No.9 (2007) pp.5674-5686	"Observation of pressure wave generated by focusing a femtosecond laser pulse inside a glass"
7	M. Sakakura M. Terazima, Y. Shimotsuma, K. Miura, K. Hirao	Optics Express	Vol.15, No.25 (2007) pp.16800-16807	"Heating and rapid cooling of bulk glass after photoexcitation by a focused femtosecond laser pulse"
8	Y. Shimotsuma	Proc. of SPIE	Vol. 6458, 64580L-1-16 (2007)	Formation of silicon structures in silicate glass by femtosecond laser
9	S. Hiramatsu, K. Miura, K. Hirao	Journal of Lightwave Technology	Vol.25, No.9(2007), pp.2776-2782	Optical Backplane Connectors Using Three-Dimensional Waveguide Arrays
10	M. Hamabe, K. Miura, Y. Shimotsuma, M. Sakakura, S. Kanehira, M. Nishi, K. Hirao	Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.	Vol.22(2007), pp.5-8	Three-dimensional Deposition of Silicon Structure from Silicate Glass with Dispersed Metallic Aluminum by Femtosecond Laser Irradiation
11	S. Kanehira, K. Miura, K. Hirao	Applied Physics Letters	Vol.93,(2008), pp.023112-1-3	Ion exchange in glass using femtosecond laser irradiation
12	M. Sakakura, M. Shimizu, Y. Shimotsuma, K. Miura, K. Hirao	Applied Physics Letters	Vol.93 (2008) pp.231112-231114	Temperature distribution and modification mechanism inside glass with heat accumulation during 250kHz irradiation of femtosecond laser pulses
13	K. Miura, K. Hirao, Y. Shimotsuma, M. Sakakura, S. Kanehira	Applied Physics A	Vol.93 (2008) pp.183-188	Formation of Si structure in glass with a femtosecond laser
14	M. Yamaji, H. Kawashima, J. Suzuki, S. Tanaka	Applied Physics Letters	Vol.93,(2008), pp.041116-1-3	Three dimensional micromachining inside a transparent material by single pulse femtosecond laser through a hologram
15	S. Kanehira, K. Miura, K. Hirao, N. Shibata, Y. Ikuhara	Smart Processing Technology	Vol.2 (2008) pp.163-166	Writing of nano-micro structure using femtosecond laser irradiation
16	M. Sakakura, M. Terazima, K. Miura, Y. Shimotsuma, K. Hirao	Proceedings of SPIE	Vol.6985 (2008) 698509	Dynamics of bulk modification inside glass by femtosecond laser

17	Y. Shimotsuma, M. Sakakura, M. Shimizu, K. Miura, P. G. Kazansky, K. Hirao	Proceedings of SPIE	Vol.6985 (2008) 698503	Three-dimensional nanomodification with ultrafast pulse laser
18	M. Shimizu, Y. Shimotsuma, M. Sakakura, T. Yuasa, H. Honma, Y. Minowa, K. Tanaka, K. Miura, K. Hirao	Optics Express	Vol. 17 (2009) pp. 46-54	Periodic metallo-dielectric structure in diamond
19	H. Itoh, N. Matsumoto, T. Inoue	Optics Express	Vol.17, (2009), pp.14367-14373	Spherical aberration correction suitable for a wavefront controller
20	K. Hirao, M. Sakakura, T. Sawano, Y. Shimotsuma, K. Miura, B. Hua, T. Nakaya	Proceedings of LAMP2009	pp.1-6	Three-dimensional nano- architecture in glasses using the combination of fs laser pulses and the new LCOS modulator/parallel drawing of bended optical waveguides
21	M. Sakakura, T. Sawano, Y. Shimotsuma, K. Miura, K. Hirao	Japanese Journal of Applied Physics	Vol.48 (2009) p.126507	Parallel Drawing of Bent Optical Waveguides Using a Spatial Light Modulator
22	A. Stone, M. Sakakura, Y. Shimotsuma, G. Stone, P. Gupta, K. Miura, K. Hirao, V. Dierolf, H. Jain	Optics Express	Vol.17, No.25 (2009) 23284-23289	Directionally controlled 3D ferroelectric single crystal growth in LaBGeO ₅ glass by femtosecond laser irradiation
23	M. Yamaji, H. Kawashima, J. Suzuki, S. Tanaka	Proceedings of SPIE	Vol.7358 (2009) 735816	Holographic 3D micro- fabrication by femtosecond pulse laser
24	M. Yamaji, H. Kawashima, J. Suzuki, S. Tanaka	Journal of Optoelectronics and Advanced Materials	to be published	Three dimensional holographic microfabrication by single femtosecond laser pulse
25	H. Kawashima, M. Yamaji, J. Suzuki, S. Tanaka	Proceedings of ICALEO2009	pp.1495-1499	Microfabrication of Gratings inside a Transparent Material Using Femtosecond Laser Processing with Computer Generated Hologram
26	川島勇人、山地正洋、鈴木潤 一、田中修平	日本光学会第 34 回光学シン ポジウム講演予 稿集	pp.57-58	計算機ホログラムに基づくフェムト秒 レーザー加工技術を用いた光学素 子の製作実験
27	J. Suzuki, M. Yamaji, S. Tanaka	Proceedings of SPIE	Vol.7201, 72011C (2009)	Waveguide fabrication with femtosecond laser pulse shaped by computer-generated hologram
28	J. Suzuki, Y. Arima, M. Yamaji, H. Kawashima, S. Tanaka	Proceedings of SPIE	Vol.7589, 75890T (2010)	Curved-waveguide fabrication using femtosecond laser processing with glass-hologram
29	T. Hashimoto, S. Tanaka	Proceedings of SPIE	Vol.7920 (2011) pp.792018	Evaluation of a refractive index profile for a modification induced by focused femtosecond laser irradiation in the optical glasses
30	J. Suzuki, Y. Arima H. Kawashima, M. Yamaji, S. Tanaka	Proceedings of SPIE	Vol.7925 (2010) pp.79251D	Optical device fabrication using Femtosecond Laser processing with glass-hologram
31	H. Kawashima, M. Yamaji, J. Suzuki, Y. Arima, S. Tanaka	Proceedings of SPIE	Vol.7925 (2010) pp. 79251C	Invisible Two-dimensional Barcode Fabrication inside a Synthetic Fused Silica by Femtosecond Laser Processing Using a Computer-generated Hologram

32	M. Ohnishi, H. Shikata, M. Sakakura, Y. Shimotsuma, K. Miura, K. Hirao	Applied Physics A	Vol.98 (2010) pp.123-127	Micro-hole processing of polyimide film by ultra-short laser pulses and its applications
33	N. Wu, Y. Shimotsuma, M. Nishi, M. Sakakura, K. Miura, K. Hirao	Journal of the Ceramic Society of Japan	Vol.118, No.2 (2010)pp.147-151	Photo-initiation of ZnO nanorod formation by femtosecond laser irradiation
34	M. Kumatoriya, T. Fujii, M. Nakabayashi, Y. Shimotsuma, K. Miura, K. Hirao, H. Murata, Y. Okamura	Report on the 397th Topical Meeting of the Laser Society of Japan	No. RYM-10-11, pp.27-31	Fabrication and propagation properties of waveguides in LiTaO3 by using femtosecond laser pulses
35	T. Matsuoka, M. Nishi, Y. Shimotsuma, K. Miura, K. Hirao	Journal of the Ceramic Society of Japan	Vol.118, No.7 (2010)pp.575-578	Selective growth of gold nanoparticles on FIB-induced amorphous phase of Si substrate
36	M. Shimizu, K. Miura, M. Sakakura, M. Nishi, Y. Shimotsuma, S. Kanehira, T. Nakaya, K. Hirao	Applied Physics A	Vol.100 (2010) pp.1001-1005	Space-selective phase separation inside a glass by controlling compositional distribution with femtosecond laser irradiation
37	Y. Shimotsuma, M. Sakakura, P. G. Kazansky, M. Beresna, J. Qiu, K. Miura, K. Hirao	Advanced Materials	Vol.108, No.7(2010) pp.073533 1-10	Ultrafast Manipulation of Self- Assembled Form Birefringence in Glass
38	S. Zhou, N. Jiang, K. Miura, S. Tanabe, M. Shimizu, M. Sakakura, Y. Shimotsuma, M. Nishi, J.g Qiu, K. Hirao	Journal of American Ceramics Society	Vol.132 (2010) pp.17945-73952	Simultaneous Tailoring of Phase Evolution and Dopant Distribution in the Glassy Phase for Controllable Luminescence
39	M. Shimizu, M. Sakakura, M. Ohnishi, Y. Shimotsuma, T. Nakaya, K. Miura, K. Hirao	Journal of Applied Physics	Vol.108 (2010) p.073533	Mechanism of heatmodification inside a glass after irradiation with high-repetition rate femtosecond laser pulses
40	M. Sakakura, M. Terazima, Y. Shimotsuma, K. Miura, K. Hirao	Laser C hemistry	(2010) pp.128268-1-15	Elastic and thermal dynamics in femtosecond laser-induced structural change inside glasses studied by the transient lens method
41	S. Kanehira, M. Sakakura, Y. Shimotsuma, M. Eida, K. Miura, K. Hirao	Applied Physics A	Vol.101 (2010) pp.81-85	Phase control on iron silicieds using femtosecond laser irradiation
42	S. Koyama, Y. Miyamoto, A. Fujiwara, H. Kobayashi, K. Ajisawa, H. Komori, Y. Takei, H. Nanto, T. Kurobori, H. Kakimoto, M. Sakakura, Y. Shimotsuma, K. Miura, K. Hirao, T. Yamamoto	Sensors and Materials	Vol.22, No.7 (2010)pp.377-385	Environmental radiation monitoring utilizing solid state dosimeters
43	Y. Miyamoto, K. Kinoshita, H. Kobayashi, A. Fujiwara, S. Koyama, Y. Takei, H. Nanto, T. Yamamoto, T. Kurobori, T. Yanagida, A. Yoshikawa, M. Sakakura, Y. Shimotsuma, K. Miura, K. Hirao	Sensors and Materials	Vol.22, No.5 (2010)pp.235-245	Ionizing radiation sensor utilizing Radiophotoluminescence in Ag+-activated phosphate glass and its application to environmental radiation monitoring
44	Y. Miyamoto, K. Kinoshita, S. Koyama, Y. Takei, H. Nanto, T. Yamamoto, M. Sakakura, Y. Shimotsuma, K. Miura, K. Hirao	Nuclear Instruments & Methods in Physics Research	Vol.619 (2010) pp.71-74	Emission and excitation mechanism of radiophoto- luminescence in Ag+-activated phosphate glass

		Section A		
45	Y. Miyamoto, T. Yamamoto, K. Kinoshita, S. Koyama, Y. Takei, H. Nanto, Y. Shimotsuma, M. Sakakura, K. Miura, K. Hirao	Radiation Measurements	Vol.45 (2010) pp.546-549	Emission mechanism of radiophotoluminescence in Ag-doped phosphate glass
46	C. Moon, S. Kanehira, K. Miura, E. Tochigi, N. Shibata, Y. Ikuhara, K. Hirao	Journal of Applied Physics	Vol.109 (2011) p.013517	Morphology change from nanocrack into periodic pore array formed by femtosecond laser pulses
47	M. Sakakura, M. Terazima, Y. Shimotsuma, K. Miura, K. Hirao	Journal of Applied Physics	Vol.109 (2011) p.023503	Thermal and shock induced modification inside a silica glass by focused femtosecond laser pulse
48	M. Kumatoriya, M. Nakabayashi, M. Sakakura, Y. Shimotsuma, K. Miura, T. Fujii, K. Hirao	Optical Review	Vol.18, No.1 (2011) pp.166-170	Optical properties of a waveguide written inside a LiTaO3 crystal by irradiation with focused femtosecond laser pulses
49	A. Stone, Y. Shimotsuma, M. Sakakura, G. Stone, P. Gupta, K. Miura, K. Hirao, V. Dierolf, and H. Jain	Journal of Non- Crystalline Solids	Vol. 356 (2010) pp. 3059-3065	Formation of ferroelectric single crystal architectures in LaBGeO5 Glass by Femtosecond vs. continuous-wave lasers
50	M. Sakakura, T. Sawano, Y. Shimotsuma, K. Miura, and K. Hirao	Optics Express	Vol.18, No.12 (2010) pp.12136-12143	Fabrication of threedimensional 1 × 4 splitter waveguides inside a glass substrate with spatially phase modulated laser beam

2. 講演・口頭発表リスト

No	発表者	発表先	発表年月日	発表題名
1	田中修平	京都国際融合創造センター NEDO 光集積ラボラトリー (スタートアップセミナー)	2006/09/27	「ナノガラス技術」から「三次元光デバイス 高効率製造技術」へ
2	田中修平	日本光学会(応用物理学会) 光学 設計研究グループ 第 37 回研究 会	2007/04/20	「ナノガラス技術」の光デバイスへの実 用化展開
3	兼平真悟	LAMP 2006	2006/5/16-19	Fabrication of periodic nano-void structure in glass via femtosecond laser irradiation
4	下間靖彦	セラ協関西支部第1回 学術講演会	2006/7/20	フェムト秒レーザーによる偏光依存ナノ 構造の形成
5	下間靖彦	8th International Otto Schott Colloquium	2006/7/23-27	Three-dimensional nanostructuring of glass by using ultrashort pulse laser
6	三浦清貴	8th International Otto Schott Colloquium	2006/7/23-27	Silicon deposition from silicate glass with dispersed metallic aluminum by femtosecond laser irradiation
7	下間靖彦	応用物理学会 第67回秋季 学術講演会	2006/8/29-9/1	フェムト秒レーザーによる金属ナノワイ ヤの形成
8	兼平真悟	応用物理学会 第67回秋季 学術講演会	2006/8/29-9/1	フェムト秒レーザーを利用した異方性 ナノ構造の形成
9	下間靖彦	京都大学化学系 COE 合同シンポジウム	2006/9/5	フェムト秒レーザーによる無機材料へ の機能性付与
10	兼平真悟	セラ協第19回秋季シンポ	2006/9/19-21	フェムト秒レーザーを利用した局所転

				位構造の形成
11	三浦清貴	多元技術融合光プロセス研究会	2006/11/29	フェムト秒レーザーによる誘起構造形成とナノ加工
12	兼平真悟	Smart Materials, Nano-, and Micro-Smart Systems 2006	2006/12/10-13	Nano-sized modification of transparent materials using femtosecond laser irradiation
13	三浦清貴	Smart Materials, Nano-, and Micro-Smart Systems 2006	2006/12/13	Formation of silicon structures in silicate glass by femtosecond laser
14	兼平真悟	レーザー学会 第27回 年次大会	2007/1/17-18	ファイラメント現象を利用した透明材料の微細加工
15	兼平真悟	the 17th Meeting on Glasses for Photonics	2007/1/29	Local ion exchange in glass using femtosecond laser irradiation
16	兼平真悟	日本化学会第87 春季年会	2007/3/25-28	フェムト秒レーザーを用いたナノ構造作製
17	平尾 一之	国際セラミックス総合展 2007	2007/4/5	ナノガラスの研究の現状と展望
18	三浦 清貴	IMI Glass Workshop in Washington DC 招待講演	2007/4/15-17	Modification of Glass by FS Laser for Optical Memory Applications
19	平尾 一之	Primavera Italiana Workshop "From Misro to Nanotechnology"	2007/5/17	Micro and nano-optical technologies for glasses
20	平尾 一之	レーザ加工学会 第68回 講演会	2007/5/21	ガラス材料へのフェムト秒レーザー加工の展開
21	坂倉 政明	FLAMN2007	2007/6/25-28	Dynamics of bulk modification inside glass by femtosecond laser
22	下間 靖彦	FLAMN2007	2007/6/25-28	Three-dimensional nanomodification with ultrafast pulse laser
23	平尾 一之	ICG 2007 International Congress on Glass	2007/7/5	Recent development of nano-glass technology applied to glass products
24	三浦 清貴	COLA2007	2007/9/23-29	Formation of Si structure in the glass with a femtosecond laser
25	坂倉 政明	光化学討論会	2007/9/26	屈折率時空間観測法によって観察したフェムト秒レーザー加工における圧力波発生と高速冷却過程
26	兼平 真悟	平成 19 年度 第 2 回ガラス科学技術研究会	2007/10/16	超短パルスレーザーを用いた透明材料のナノ加工
27	三浦 清貴	ULTRAFAST Solution Seminar	2007/10/23・11/2	透明材料における fs レーザプロセッシングの特長と可能性
28	西 正之	Pac Rim 2007	2007/11/11-14	Synthesis and shape control of noble-metal nano/micro materials using thiol molecules
29	兼平 真悟	the 2nd International Symposium on Smart Processing Technology	2007/11/27-28	Writing nano-micro structure using femtosecond laser irradiation
30	三浦 清貴	第 48 回ガラスおよびフォトニクス材料討論会	2007/11/30	fs レーザーによる材料内部プロセッシングの特徴と光デバイス応用
31	坂倉 政明	Gordon Research Conference "PHOTOACOUSTIC & PHOTOTHERMAL PHENOMENA"	2008/2/10-15	Acoustic and thermal dynamics in the structural change induced by a focused femtosecond
32	坂倉 政明	平成 19 年度 衝撃波シンポジウム	2008/3/18	ガラスの会部加工にもなうレーザー誘起圧力波の観測

33	坂倉 政明	第 55 回応用物理関係連合講演会	2008/3/29	ガラス内部のフェムト秒レーザー加工における圧力波のパルス幅依存
34	下間 靖彦	Progress In Electromagnetics Research Symposium 2008	2008/3/23-/28	Polarization-dependent memory of light via ultrashort pulse laser irradiation
35	伊藤 晴康、原 勉、井上 卓、福智 昇央、松本 直也	レーザー学会学術講演会第28回 年次大会	2008/1/30-2/1	高強度フェムトレーザー用波面制御モジュールの開発
36	福智 昇央、原 勉、向坂 直久、井上 卓、松本 直也	2008年春季第55回応用物理学関係連合講演会	2008/03/27-30	LCOS-SLM による可変焦点レンズ検証実験
37	大村 誠	2008年春季第55回応用物理学関係連合講演会	2008/03/27-30	フォトニック結晶レンズの光学設計
38	伊藤晴康、原勉、井上卓、福智昇央、松本直也	2008 年春季第 55 回応用物理学関係連合講演会	2008/3/27-30	LCOS-SLM による可変焦点レンズ検証実験
39	平尾一之	第4回国際ナノテク会議	2008/4/14	Nano-architecture with a femtosecond laser
40	平尾一之	Joint Conferences of The 2nd International Conference on the Science and Technology for Advanced Ceramics(STAC) and The 1st International Conference on Science and Technology of Solid Surface and Interface (STSI)	2008/5/31-6/1	Nano-architecture for Glass Materials
41	三浦清貴	エクストリームフォトニクスセミナー	2008/6/12	フェムト秒レーザーパルスによる材料内部加工の特徴
42	伊藤晴康、原勉、井上卓、福智昇央、松本直也	2008 年秋季第 69 回応用物理学学会学術講演会	2008/9/2-/5	空間光位相変調器を用いた球面収差補正の検討
43	三浦清貴	日本セラミックス協会 第21回秋季シンポジウム	2008/9/18	レーザーによるガラス内部への元素分布形成
44	三浦清貴	2nd International symposium on filamentation 2008, Paris, France	2008/9/23	Characteristics of femtosecond laser processing for glass materials
45	山地正洋	MOC 2008, Belgium, Brussels	2008/9/25-27	Three dimensional micromachining inside a transparent material by single pulse femtosecond laser through a hologram
46	平尾一之	Materials Science & Technology 2008(MS&T08) Conference & Exhibition	2008/10/6	Nano-architecture in Glasses with a Femtosecond Laser
47	平尾一之	日本セラミックス協会関西支部 平成 20 年度支部セミナー	2008/11/21	レーザーによるセラミックスの精密加工の最前線 - 三次元光デバイス製造技術 -
48	鈴木潤一、山地正洋、田中修平	Photonic West 2009 San Jose, California, USA	2009/1/27	Waveguide fabrication with femtosecond laser pulse shaped by computer-generated hologram
49	三浦清貴	第107回ニューガラス研究会	2009/1/28	フェムト秒レーザープロセッシングの特徴
50	山地正洋、川島 勇人、鈴木潤一、田中修平	2009 年春季第 56 回応用物理学関係連合講演会	2009/3/30-4/2	フェムト秒レーザーとホログラムを用いた三次元加工

51	平尾一之	国際セラミックス総合展2009	2009/4/8-10	光とガラスが切り開く新情報産業の創成
52	川島勇人、鈴木潤一、田中修平	SPIE Symposium on Optics and Optoelectronics 2009	2009/4/20-23	Holographic 3D Microfabrication by Femtosecond Pulse Laser
53	山地正洋、川島勇人、鈴木潤一、田中修平	E-MRS 2009	2009/6/11	Three dimensional holographic microfabrication by femtosecond laser pulse
54	平尾一之	the 3rd Science and Technology for Advanced Ceramics	2009/6/17	Three-dimensional Nanoarchitecture in Glasses using the Combination of fs laser pulses and the new LCOS modulator
55	平尾一之	the 5th International Congress on Laser Advanced Materials Processing	2009/6/29	Three-dimensional Nano-architecture in Glasses using the Combination of fs laser pulses and the new LCOS modulator
56	山地正洋、川島勇人、鈴木潤一、田中修平	Nonlinear Optics	2009/7/16	Three dimensional microfabrication by single pulse femtosecond laser through binary phase hologram
57	兼平真悟、文致原、三浦清貴、柴田直哉、幾原雄一、平尾一之	第4回日本セラミックス協会関西支部 学術講演会	2009/7/23	超短パルス光を用いた局所欠陥注入
58	清水雅弘、坂倉政明、下間靖彦、三浦清貴、平尾一之	第4回日本セラミックス協会関西支部 学術講演会	2009/7/23	フェムト秒レーザー照射による熱蓄積効果
59	保田直美、清水雅弘、坂倉政明、下間靖彦、三浦清貴、平尾一之	第4回日本セラミックス協会関西支部 学術講演会	2009/7/23	ガラス内部への元素分布を利用した光導波路形成
60	坂倉政明	先端フォトニック情報メモリーサーチセンター 第15回トピカル懇話会	2009/8/31	超短パルスレーザーによる材料プロセスとホログラムを用いた三次元光デバイス高効率製造システム
61	下間靖彦、坂倉政明、三浦清貴、平尾一之	2009 年秋季第 70 回応用物理学学会学術講演会	2009/9/8-11	偏光依存酸素欠陥構造の超高速制御
62	坂倉政明、澤野勉、下間靖彦、三浦清貴、平尾一之	2009 年秋季第 70 回応用物理学学会学術講演会	2009/9/8-11	空間位相変調したフェムト秒レーザーによるガラス内部への曲げ導波路一括描画
63	坂倉政明、栄田壮亮、兼平真悟、下間靖彦、三浦清貴、平尾一之	2009 年秋季第 70 回応用物理学学会学術講演会	2009/9/8-11	単結晶内部でのフェムト秒レーザー誘起応力波と局所転位形成
64	兼平真悟、三浦清貴、平尾一之、柴田直哉、幾原雄一	日本セラミックス協会 第22回秋季シンポジウム	2009/9/16-18	レーザー誘起転位の光学的解析
65	兼平真悟	第19回三次元ナノ・マイクロ構造研究集会	2009/10/6	フェムト秒レーザーで描くナノ・マイクロの世界
66	坂倉政明	電気学会「極限レーザーマテリアル科学・レーザ加工とその応用調査専門委員会」	2009/10/16	ダイナミクスと温度解析から見える透明固体材料内部のフェムト秒レーザー加工の特徴

66	平尾一之	セラミックス総合研究会	2009/10/22	フェムト秒レーザーと新規開発空間変調器を用いたガラス内部の三次元ナノ構造形成
67	平尾一之	株式会社 KRI クライアントカンファレンス	2009/10/28	先進フォトニクス材料の展開と評価
68	三浦清貴	第 50 回ガラスおよびフォトニクス材料討論会	2009/10/29-30	フェムト秒レーザー-ガラス材料プロセスの特徴と可能性
69	川島 勇人、山地正洋、鈴木潤一、田中修平	ICALEO 2009	2009/11/3-4	Microfabrication of Grating Inside a Transparent Material Using Femtosecond Laser Processing with Computer Generated Hologram
70	平尾一之	泉科学技術振興財団 財団創設20周年記念事業シンポジウム	2009/11/13	光機能ナノガラスが切り開くフォトニックネットワークの未来
71	平尾一之	固体・表面光化学討論会第28回 討論会	2009/11/22	フェムト秒レーザー光化学を利用した固体・表面の構造制御
72	三浦清貴	10th International Conference on Laser Ablation	2009/11/22-27	Formation of elemental distribution in glass with a femtosecond laser
73	兼平真悟、栄田壮亮、坂倉政明、下間靖彦、三浦清貴、平尾一之	10th International Conference on Laser Ablation	2009/11/22-27	Phase Control of Iron Silicides using Femtosecond Laser Irradiation
74	伊藤晴康、松本直也、井上卓	日本光学会年次学術講演会	2009/11/24-26	屈折率ミスマッチ球面収差の空間光変調器を用いた高精度補正
75	伊藤晴康、松本直也、井上卓	レーザー学会学術講演会第 30 回年次大会	2010/2/2-4	多点制御における空間光変調器を用いた球面収差の検証
76	鈴木 潤一、有馬靖智、山地 正洋、川島 勇人、田中 修平	Photonics West 2010 San Francisco, California, USA	2010/1/27	Curved-Waveguide fabrication using femtosecond laser pulse processing with glass hologram
77	坂倉政明、清水雅弘、下間靖彦、三浦清貴、平尾一之	レーザー学会学術講演会第 30 回年次大会	2010/2/2-4	フェムト秒レーザーによるガラスの内部加工での光吸収量の計測
78	清水雅弘、三浦清貴、坂倉政明、西正之、下間靖彦、兼平真悟、平尾一之	日本セラミックス協会 2010 年 年会	2010/3/22-24	元素分布制御によるガラス内部への局所的な相分離の誘起
79	橋本智弘、田中修平	E-MRS 2010(European Material Research Society) Strasbourg, France	2010/6/10	Large negative refractive index modification induced by irradiation of femtosecond laser inside optical glasses
80	川島 勇人、山地 正洋、鈴木潤一、田中 修平	ICALEO 2010 Anaheim, California, USA	2010/9/25-10/20	Microdrilling of Sheet Materials with Femtosecond Laser Pulse Shaped by Computer Generated Hologram
81	山地 正洋	Frontiers in Optics NewYork, USA	2010/10/28	Homogeneous and Elongation-free 3D Microfabrication
82	川島 勇人、山地正洋、鈴木 潤一、田中 修平	第 74 回レーザー加工学会講演会 @東京大学 生産技術研究所	2010/12/6	計算機ホログラムを用いたフェムト秒レーザー照射による合成石英ガラス基板への微細貫通穴あけ

				加工の実現
83	田中修平	JPCフォーラム 1 月定例会 (NPO 日本フォトニクス協 議会)	2011/1/19	三次元光デバイスとニューガラス フォーラム
84	橋本智弘、田中 修平	Photonics West 2011 (SPIE ; The Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers)	2011/1/24	Evaluation of a refractive index profile for a modification induced by focused femtosecond laser irradiation in the optical glasses
85	鈴木潤一、有馬 靖智、川島勇人 、山地 正洋、田 中 修平	Photonics West 2011 (SPIE;The Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers)	2011/1/24	Optical device fabrication using femtosecond Laser processing with glass-hologram
86	川島勇人、山地 正洋、鈴木 潤 一、有馬靖智、 田中 修平	Photonics West 2011 (SPIE ; The Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers)	2011/1/24	Invisible Two-dimensional Barcode Fabrication inside a Synthetic Fused Silica by Femtosecond Laser Processing Using a Computer-generated Hologram
87	熊取谷誠人、中 林 幹、三浦清 貴、藤井高志、 平尾一之	7th International Conference on Optics-Photonics Design & Fabrication	2010/4/19	Formation of Induced Structures in LiTaO3 Using Femtosecond Laser Pulses
88	清水雅弘、三浦 清 貴、坂倉政 明、西正之、下 間靖彦、兼平真 悟、平尾一之	FLAMN-10	2010/7/5	Localized phase separation inside glass by femtosecond laser- induced elemental migration
89	下間靖彦、坂倉 政明、P. G. Kazansky 三浦 清貴、平尾一之	CLEO/QELS: 2010	2010/5/18	Manipulation of form birefringence in isotropic material
90	坂倉政明、清水 雅 弘、下間靖 彦、三浦清貴、 平尾一之	FLAMN-10	2010/7/5	Fundamental studies of heat modification inside glasses by repeated irradiation with ultrashort laser
91	三浦清貴、清水 雅 弘、下間靖 彦、坂倉政明、 兼平真悟、平尾 一之	ISNOG 2010	2010/6/13	Formation Mechanism and applications of laser induced elemental distribution in glasses
92	兼平真悟、文致 原、柴田直哉、 栃木栄太、幾原 雄 一、三浦清 貴、平尾一之	iib 2010	2010/6/27	Defect in oxide single crystals formed by femtosecond laser pulses
93	濱田裕也、西正 之、下間靖彦、 三浦清貴、平尾 一之	the 3rd Internaitonal Congress on Ceramics	2010/11/14	Sol-Gel synthesis of Au-nanoparticle dispersed bicontinuous macroporous siloxane gel
94	西村、兼平真 悟、坂倉政明、 下間靖彦、三浦 清貴、平尾一之	the 3rd Internaitonal Congress on Ceramics	2010/11/14	Silicon precipitation in glass via photoinduced reaction using femtosecond laser
95	山本、下間靖 彦、坂倉政明、 西正之、三浦清 貴、平尾一之	the 3rd Internaitonal Congress on Ceramics	2010/11/14	Preparation of Nd2Fe14B nanoparticles under femtosecond laser ablation in liquid

96	保田、清水雅弘、坂倉政明、下間靖彦、三浦清貴、平尾一之	the 3rd Internaitonal Congress on Ceramics	2010/11/14	Formation of elemental distribution in glasses by femtosecond laser irradiation
97	伊藤宗太郎、西正之、金森主祥、中西和樹、下間靖彦、三浦清貴、平尾一之	the 3rd Internaitonal Congress on Ceramics	2010/11/14	(3-Mercaptopropyl)trimethoxysilane-derived porous gel monolith via thioacetal reaction-assisted sol- gel route
98	山本、下間靖彦、坂倉政明、西正之、三浦清貴、平尾一之、佐川	日本セラミックス協会関西支部 第5回学術講演会	2010/7/16	液相レーザーアブレーション法による Na ₂ Fe ₁₄ B ナノ粒子の作製
99	中林幹、熊取谷誠人、三浦清貴、坂倉政明、西正之、下間靖彦、平尾一之	the 3rd Internaitonal Congress on Ceramics	2010/11/14	Light propagation through femtosecond laser induced waveguide inside lithium tantalate single crystal
100	石川雄一郎、下間靖彦、坂倉政明、兼平真悟、西正之、三浦清貴、平尾一之	2010 年秋季 第 71 回 応用物理学会学術講演会	2010/9/14	フェムト秒レーザー照射による ZnO 結晶内部への誘起構造形成
101	朽尾孝哉、坂倉政明、兼平真悟、下間靖彦、三浦清貴、平尾一之	2010 年秋季 第 71 回 応用物理学会学術講演会	2010/9/14	MgO 結晶内部でのレーザー誘起構造変化における応力波干渉の効果
102	西村、兼平真悟、坂倉政明、下間靖彦、三浦清貴、平尾一之	2010 MRS Meeting	2010/11/29	Formation of silicon and silicon-based semiconductor materials via photoinduced reaction using femtosecond laser
103	坂倉政明、澤野、下間靖彦、三浦清貴、平尾一之	2010 年秋季 第 71 回 応用物理学会学術講演会	2010/9/14	空間位相変調による光スポット形成と光導波路レーザー描画への影響
104	兼平真悟	Visual-JW2010	2010/11/11	Phase transformation at interface using femtosecond laser irradiation
105	清水雅弘、保田直美、坂倉政明、兼平真悟、西正之、下間靖彦、三浦清貴、平尾一之	ガラスおよびフォトニクス材料討論会	2010/12/16	レーザーによるガラス内部の元素移動制御
106	西村将和、兼平真悟、坂倉政明、下間靖彦、三浦清貴、平尾一之	ガラスおよびフォトニクス材料討論会	2010/12/16	光誘起反応によるガラス/多層膜接合体への Fe-Si 結晶析出と制御
107	坂倉政明、澤野勉、下間靖彦、三浦清貴、平尾一之	ガラスおよびフォトニクス材料討論会	2010/12/16	液晶空間光変調器 LCOS-SLM と超短パルスレーザーを用いたガラス内部への高効率三次元加工
108	X.Wang、坂倉政明、三浦清貴、平尾一之	the 3rd Internaitonal Congress on Ceramics	2010/11/14	Molecular Radical Orientation Arrangement by Femtosecond Laser Irradiation inside Sodium Germanate Glass
109	松岡智代、西正之、坂倉政明、下間靖彦、三浦清貴、平尾一之	the 3rd Internaitonal Congress on Ceramics	2010/11/14	Selective grows and SERS property of gold nanoparticles on amorphized silicon surface

110	松岡智代、西正之、坂倉政明、三浦清貴、平尾一之、 D. Palima、 S. Tauro、 A. Banas、 J. Gluckstad	Photonic West 2011	2011/1/22	Manipulating functionalizes 2PP structures on the biophotonics workstation
111	松岡智代、西正之、坂倉政明、三浦清貴、平尾一之、 D. Palima、 S. Tauro、 A. Banas、 J. Gluckstad	2nd Annual Workshop on Photonic Technologies for Access and Biophotonics	2011/1/31	Functionalization of 2PP structures for optical manipulation on the biophotonics workstation
112	栢尾孝哉、坂倉政明、兼平真悟、下間靖彦、三浦清貴、平尾一之	2011 年春季 第 58 回 応用物理学会学術講演会	2011/3/24	単結晶内部のレーザー誘起過渡応力イメージング
113	伊藤宗太郎、西正之、金森主祥、中西和樹、下間靖彦、三浦清貴、平尾一之	セラ協 2011 年会	2011/3/16	チオアセタール反応アシストゾルゲル法によるモノリス多孔体の合成
114	石川雄一朗、下間靖彦、坂倉政明、兼平真悟、西正之、三浦清貴、平尾一之	セラ協 2011 年会	2011/3/16	フェムト秒レーザー照射による ZnO 結晶内部への誘起構造形成
115	三浦清貴	関西ナノテクノロジー推進会議 総括シンポジウム	2010/4/12	先端光技術を用いた光デバイス三次元一括加工の現状と展望
116	平尾一之	the 3rd Internaitonal Congress on Ceramics	2010/11/17	Photonic Materials
117	三浦清貴	(財)光産業技術振興協会・光材料・応用技術研究会	2010/11/19	超短パルスレーザーによる三次元光デバイス製作技術
118	三浦清貴	日本板硝子材料工学助成会・無機材料に関する最近の研究成果発表会	2011/1/24	ホログラフィックレーザー加工によるガラス材料への機能性付与
119	坂倉政明	第 17 回レーザー夏の学校	2010/8/28	過渡的温度分布・応力分布から見える透明固体内部のフェムト秒レーザー加工の特長
120	兼平真悟	第 17 回レーザー夏の学校	2010/8/28	レーザー光を用いた透明材料における欠陥構造制御

3. 雑誌投稿リスト

No	著者名	投稿先	巻・号・ページ等	発表題名
1	田中修平	月刊オプトロニクス 2007 年 2 月号特集 注目!! 光ナノテク最前線	No.2, pp.100-108 (2007)	「ナノガラス技術」から「三次元光デバイス高効率製造技術」へ
2	田中修平	日経ナロビジネス	平成 18 年 12 月	「ナノガラス技術」から「三次元光デバイス

			25 日号	ス高効率製造技術」へ
3	三浦 清貴、 平尾 一之	化学工業	Vol.58, No.1 (2007) pp.1-7	フェムト秒レーザー加工によるフォトニクス材料の創製
4	田中 修平	工業材料(日刊工業出版プロダクション発行)	Vol.56, No.1 (2008) pp.62-63	ワイド特集; 工業材料キーワード50 ナノガラス 「実用化に向けた高速加工」
5	三浦 清貴	オプトロニクス	Vol.26, No.12 (2007) pp.90-98	レーザーによるガラスの内部構造改質
6	三浦 清貴	光アライアンス	Vol.18, No.8 (2007) pp.54-59	フェムト秒レーザー材料プロセッシング
7	平尾 一之	NEW GLASS	Vol.23, No.1 (2008) pp.42-43	三次元光デバイス高効率製造技術・研究最前線 『プロジェクト開始にあたって』
8	三浦 清貴	NEW GLASS	Vol.23, No.1 (2008) pp.44	三次元光デバイス高効率製造技術・研究最前線 『京都大学での取り組み』
9	原 勉	NEW GLASS	Vol.23, No.1 (2008) pp.45-46	三次元光デバイス高効率製造技術・研究最前線 (浜松ホトニクスでの取り組み)
10	田中 修平	NEW GLASS	Vol.23, No.1 (2008) pp.47-49	三次元光デバイス高効率製造技術・研究最前線 (ニューガラスフォーラムでの取り組み)
11	三浦 清貴	NEW GLASS	Vol.23, No.2 (2008) pp.42-45	三次元光デバイス高効率製造技術・研究最前線『京都大学における三次元光デバイス研究の現状』
12	三浦清貴、平尾一之、下間靖彦、坂倉政明	未来材料	2008 年 8 月号 pp.14-21	三次元光デバイス製造技術「フェムト秒レーザープロセッシング」
13	原 勉	NEW GLASS	Vol.23, No.3 (2008) pp.54-60	空間光変調器と三次元光デバイス高効率製造技術
14	田中修平	NEW GLASS	Vol.23, No.4 (2008) pp.69-71	34th European Conference and Exhibition on Optical Communication & 14th Microoptics Conference 参加雑記 (MOC で Best Paper Award を受賞)
15	田中修平	用途別ガラス部材の改善と要素技術の最前線 出版;(株)情報機構	2008 年 12 月号 第 14 章	フェムト秒レーザー技術
16	田中修平	”	2008 年 12 月号 ”	ホログラムによる三次元高速加工・高精度加工
17	田中修平、鈴木潤一、山地正洋、川島勇人	NEW GLASS	Vol.23, No.4 (2008) pp.39-41	ホログラムを通過した1パルスの超短パルスレーザー光で三次元造形をガラス内部に作製する方法
18	三浦清貴	シーエムシー出版 月刊「機能材料」	Vol.29(4), 2009 pp.18-27	フェムト秒レーザープロセッシングの特長と可能性

19	伊藤晴康、大林寧、田中博、原勉	月刊「オプトロニクス」	Vol.28(4),2009 pp.218-223	空間光変調器によるレーザー光波面制御とその応用
20	伊藤晴康、原勉、大林寧	シーエムシー出版 月刊「機能材料」	Vol.29(4),2009 pp.28-36	空間光変調器によるレーザー光波面制御
21	田中修平	シーエムシー出版 月刊「機能材料」	Vol.29(4),2009 pp.6-17	～機能材料を甦らせるフェムト秒レーザー三次元加工技術～ 三次元高速・高精度加工技術とは
22	田中修平、鈴木潤一、山地正洋、川島勇人	シーエムシー出版「先端ガラスの産業応用と新しい加工」	2009,8/28 発行 pp.100-118	第2編第3章 ガラスホログラムとフェムト秒レーザーによるガラス内部の高速・高精度三次元一括加工
23	岩井実 田中修平	NEW GLASS	Vol.24, No4(2009) pp.45-47	ガラス内部に形成した異質相の三次元形状測定と屈折率の非破壊測定
24	田中修平	NEW GLASS	Vol.24, No4(2009) pp.48-50	2009 OSA Optics & Photonics Congress 四方山話
25	下間靖彦	月刊「機能材料」	Vol.24, No4(2009) pp.37-45	フェムト秒レーザーを利用したナノマテリアル形成
26	兼平真悟	月刊「機能材料」	Vol.24, No4(2009) pp.46-53	レーザー加工の現状
27	坂倉政明	月刊「機能材料」	Vol.29, No.4 (2009) pp.54-64	超高速時間分解観測装置の開発とフェムト秒レーザー加工の観測
28	三浦清貴	NEW GLASS	Vol.24, No2 (2009) pp.56-65	三次元光デバイス高効率製造技術・研究最前線『「三次元光デバイス高効率製造技術」プロジェクトにおける京都大学の研究』
29	下間靖彦	O plus E	Vol.31, No.7(2009) pp.717-718	一枚の写真「It's a small world?」
30	坂倉政明、平尾一之、三浦清貴	OPTRONICS	No.4 (2009) pp.190-196	レーザー誘起圧力波の観察から見るフェムト秒レーザー加工の特長
31	平尾一之、三浦清貴、坂倉政明、下間靖彦	GS Yuasa Technical Report	Vol.6, No.2 (2009) pp.1-6	フェムト秒レーザーと新規開発空間変調器を用いた三次元ナノ構造形成
32	三浦清貴、平尾一之、坂倉政明	マテリアルインテグレーション	2009年11月号 (Vol.22 No.12)	レーザー照射によるガラス内部からの半導体(Si)析出とその制御
33	三浦清貴	シーエムシー出版 先端ガラスの産業応用と新しい加工	2009,8/28 発行 pp.67-80	第2編 第1章 fsレーザーによる内部加工の特徴
34	坂倉政明	シーエムシー出版 先端ガラスの産業応用と新しい加工	2009,8/28 発行 pp.81-98	第2編 第2章 液晶空間光変調器とレーザーによるガラスの一括三次元加工
35	三浦清貴	シーエムシー出版 先端ガラスの産業応用と新しい加工	2009,8/28 発行 pp.180-195	第3編 第3章 光デバイス用ナノガラスアーキテクチャー
36	澤野勉、三浦清貴、坂倉政明、平尾一之	NEW GLASS	Vol.25, No1 (2010) pp.34-35	三次元光デバイス高効率製造技術・研究最前線『「三次元光デバイス高効率製造技術」を活用した回折光学素子の作製』
37	原勉	NEW GLASS	Vol.25, No2 (2010) pp.31-33	空間光変調器と三次元光デバイス高効率製造技術
38	田中修平、山地正洋、川島勇人、鈴木潤一	NEW GLASS	Vol.25, No3 (2010) pp.36-39	ガラスホログラムにより 75 フェムト秒で作製した三次元微細加工構造

39	平尾一之	Nanofiber	Vol.1, No.1 (2010) pp.7-10	機能性フレキシブルガラス
40	平尾一之	光アライアンス	Vol.21, No.9(2010) pp.49-52	ナノガラス材料の変遷と最新の展開
41	三浦清貴、下間靖彦、坂倉政明、平尾一之	NTS 出版 セラミックス機能化ハンドブック	(2010) pp.120-130	ガラス材料内部へのフェムト秒レーザー照射

4. 展示会、プレス発表等

No	発表者名	発表先	発表年月日	発表題名
1	京都大学、 浜松ホトニクス、 ニューガラスフォーラム	化学工業日報	2006/9/12	低コストでガラス中に三次元構造
2	京都大学、 浜松ホトニクス、 ニューガラスフォーラム	ガラス時報	2006/9/17・24 合併号	三次元光デバイス高効率製造技術 開発へ
3	平尾一之	日経産業新聞	2007/2/15	ナノガラス事業 技術伝承へ人材育成図る
4	京都大学、 浜松ホトニクス、 ニューガラスフォーラム	nano tech 2007 国際ナノテクノロジー総合展・技術会議(東京ビッグサイト)	2007/2/21-23	NEDOプロジェクト 「三次元光デバイス高効率製造技術」
5	平尾一之	日本経済新聞	2007/10/19	ガラス内に光通信回路
6	田中修平	日経産業新聞	2008/2/6	光素子回路 ガラス内に瞬時に作製
7	田中修平	化学工業日報	2008/2/21	ガラス内部に三次元構造 0.1秒以下で作製
8	田中修平	つくばサイエンスニュース (http://www.tsukuba-sci.com)	2008/2/4-2/10 (No.2008-7)	ガラス内部に三次元光導波路を一括形成する新技術を開発
9	京都大学、 浜松ホトニクス、 ニューガラスフォーラム	nanotech2008 (国際ナノテクノロジー総合展・技術会議)	2008/2/13-15	【NEDOプロジェクト】三次元光デバイス高効率製造技術
10	平尾一之	産経新聞	2008/4/12	特殊レーザーで光回路形成 超高速化技術を開発
11	田中修平	NTRニュース(日本板硝子テクノロジーサーチ発行)	2008/4 36号	ホログラムでガラス内部に三次元デバイスを瞬時に作製
12	田中修平	日経産業新聞	2008/8/20	ガラス内部への「24層三次元スパイラル構造の一括形成に成功」
13	田中修平	日刊工業新聞	2008/8/20	ガラス内部への「25層三次元スパイラル構造の一括形成に成功」
14	橋本智弘、田中修平 共同発表;(株)オハラ	セミコン・ジャパン2008	2008/12/3-5	フェムト秒レーザー加工によるガラスの高機能化(パネルとサンプル展示)
15	京都大学、 浜松ホトニクス、 ニューガラスフォーラム	nanotech2009 (国際ナノテクノロジー総合展・技術会議)	2009/2/18-20	【NEDOプロジェクト】三次元光デバイス高効率製造技術
16	田中修平	電気硝子工業会見学会	2009/9/11	三次元光デバイスの説明とつくば研究室の見学
17	京都大学、 浜松ホトニクス、 ニューガラスフォーラム	nanotech2010 (国際ナノテクノロジー総合展・技術会議)	2010/2/17-19	【NEDOプロジェクト】三次元光デバイス高効率製造技術

5. 受賞実績

- ① 平成 19 年 2 月 21～23 日、東京ビッグサイトにて開催された nano tech 2 0 0 7 展示会（国際ナノテクノロジー総合展・技術会議）において、**NEDO 独創技術賞**を受賞した。
- ② 2008 年 9 月、14th MICROOPTICS CONFERENCE BRUSSELS-BELGIUM にて、**BEST PAPER AWARD** を受賞
“Three dimensional holographic micropatterning inside silica glass by single pulse femtosecond laser”（ニューガラスフォーラム、つくば研究室）
- ③ 2008 年 10 月、Materials Science & Technology 2008、Conference & Exhibition、“Nano-architecture in glasses with a femtosecond laser” **海外最優秀講演賞**（京大・平尾研）

6. 特許リスト

No	出願日	受付番号	出願に係る特許等の標題	出願人
1	2007/3/30	2007-94634	反射型光変調装置	大林寧
2	2007/11/14	2007-295931	レーザ加工装置およびレーザ加工方法	松本直也、井上卓、福智昇央、伊藤晴康
3	2007/12/5	2007-315066	反射型空間光変調素子	伊藤晴康、大林寧、福智昇央
4	2008/2/8	2008-029185	光学部品用ガラス材料及びそれに用いるガラス組成物	橋本 智弘
5	2008/3/12	2008-062417	回折格子型光学ローパスフィルタ	大村 誠
6	2008/1/15	2008-006004	観察装置	松本直也、伊藤晴康、福智昇央、山内豊彦
7	2008/1/16	2008-007173	観察装置	松本直也、伊藤晴康、福智昇央、山内豊彦
8	2008/1/24	2008-014024	観察装置	松本直也、伊藤晴康、福智昇央、山内豊彦
9	2008/6/19	PCT/JP2008/061252	反射型光変調装置	大林寧
10	2008/8/26	2008-216742	レーザ加工装置およびレーザ加工方法	松本直也、井上卓、福智昇央、伊藤晴康
11	2008/8/26	PCT/JP2008/065191	レーザ加工装置およびレーザ加工方法	松本直也、井上卓、福智昇央、伊藤晴康、瀧口優
12	2008/9/1	2008-223582	収差補正方法及びこの収差補正方法を用いたレーザ加工方法	伊藤晴康、松本直也、井上卓
13	2008/9/1	2008-223975	レーザ光照射装置およびレーザ光照射方法	伊藤晴康、松本直也、井上卓
14	2008/9/16	2008-237010	組成分布を生じる光学部品用透明材料及びこれを利用する光学部品	平尾一之、三浦清貴、下間靖彦、富田礼子、田中修平、橋本智弘、山口勝彦
15	2008/10/2	2008-257408	光学部品用ガラス材料及びそれに用いるガラス組成物	橋本智弘
16	2008/11/28	2008-304748	光変調装置	伊藤晴康、井上卓、松本直也
17	2008/12/3	12/327259	反射型空間光変調素子	伊藤晴康、大林寧、福智昇央
18	2008/12/3	102008060281.7	反射型空間光変調素子	伊藤晴康、大林寧、福智昇央
19	2009/2/12	2009-029934	レーザ光照射装置及び照射方法	坂倉政明、平尾一之、三浦清貴、下間靖彦、福智昇央、伊藤晴康
20	2009/4/30	2009-110906	レーザ加工装置及びレーザ加	伊藤晴康、松本直也

			工方法	
21	2009/4/30	2009-110912	レーザー加工装置	伊藤晴康, 松本直也
22	2009/5/25	2009-125759	収差補正方法、この収差補正方法を用いたレーザー加工方法、この収差補正方法を用いたレーザー照射方法、収差補正装置、及び、収差補正プログラム	伊藤晴康, 松本直也, 井上卓
23	2009/8/24	PCT/JP2009/064725	レーザー加工装置およびレーザー加工方法	松本直也, 井上卓, 福智昇央, 伊藤晴康
24	2009/8/27	PCT/JP2009/064939	収差補正方法、この収差補正方法を用いたレーザー加工方法、この収差補正方法を用いたレーザー照射方法、収差補正装置、及び、収差補正プログラム	伊藤晴康, 松本直也, 井上卓
25	2009/9/1	098129424	収差補正方法、この収差補正方法を用いたレーザー加工方法、この収差補正方法を用いたレーザー照射方法、収差補正装置、及び、収差補正プログラム	伊藤晴康, 松本直也, 井上卓
26	2009/9/30	2009-228250	光学部品用ガラス材料、光学部品の製造方法及び光学部品用ガラス組成物	橋本智弘
27	2009/11/26	PCT/JP2009/069946	光変調装置およびレーザー加工装置	伊藤晴康, 井上卓, 松本直也

7. 学会発表特記事項

米国のレーザー学会である **Laser Institute of America** のホームページに下記の二つのカテゴリーで、2010年9月に開催された学会での発表論文が取り上げられた。

- ① ‘Laser Microprocessing’ Category . . . 9件採択の一つ。
- ② ‘Laser Drilling’ . . . 4件採択の一つ。

VI. その他資料

1. イノベーションプログラム基本計画

研究開発プログラム(イノベーションプログラムに改編)の中で実施

イノベーションプログラムについて 第23回研究開発小委員会(平成20年5月16日)資料

- 「イノベーションプログラム」の中での体系的推進 (Inside Management & Accountability)
 - 経済産業省の全ての研究開発プロジェクトは、政策目標毎に7つの「イノベーションプログラム」の下で体系的に推進。
 - 各プログラムの中で、政策目標に向けたプロジェクトの位置付けと目標の明確化、市場化に必要な関連施策(規制改革、標準化等)との一体化を図り、イノベーション実現に向け各プロジェクトを効果的に推進。
- 「技術戦略マップ」に基づく戦略的企画立案 (Outside Communication & Networking)
 - 先端産業技術動向を把握し、国が取り組むべき技術課題とイノベーションの道筋を明確化するため、産学官で協働するロードマッピング手法を導入(『技術戦略マップ2005/2006/2007/2008』)。
 - 研究開発プロジェクトの選定に当たっては、イノベーションプログラムにおける政策目標を基に技術戦略マップに位置付けられた重要技術課題を抽出し戦略的に企画立案。

<p>IT IPG</p> <p>①ITコア技術の革新 114億円 ②省エネ革新 67億円 ③情報爆発への対応 41億円 ④情報システムの安全性等 50億円</p> <p>小計 272億円</p>	<p>ナノテク・部材 IPG</p> <p>①ナノテク加速化領域 36億円 ②情報通信領域 31億円 ③ライフサイエンス領域 19億円 ④エネルギー・資源・環境領域 60億円 ⑤材料・部材領域 32億円 ⑥共通 6億円</p> <p>小計 184億円</p>	<p>ロボット・新機械 IPG</p> <p>①ロボット関連技術開発 24億円 ②MEMS・分析機器 22億円</p> <p>小計 46億円</p>	<p>健康安心 IPG</p> <p>①創薬・診断技術開発 96億円 ②診断・治療機器・再生医療等の技術開発 30億円</p> <p>小計 126億円</p>
<p>エネルギー IPG</p> <p>①総合エネルギー効率の向上 817億円 ②運輸部門の燃料多様化 358億円 ③新エネルギー等の開発・導入促進 488億円 ④原子力等利用の推進とその次前提となる安全の確保 258億円 ⑤化石燃料の安定供給確保と有効かつクリーンな利用 554億円</p> <p>小計 1,447億円※2</p>	<p>環境安心 IPG</p> <p>①地球温暖化防止新技術 42億円 ②3R 13億円 ③環境調和産業/バイオ 56億円 ④化学物質総合評価 16億円</p> <p>小計 127億円</p>	<p>航空機・宇宙産業 IPG</p> <p>①航空機産業の基盤技術力の維持・向上 163億円 ②宇宙産業の国際競争力強化 69億円</p> <p>小計 232億円※3</p>	

※1:各イノベーションプログラムにおけるプロジェクトの重複を排除した額 ※2:各サブプログラムで重複があるため小計と一致しない ※3:一部、財投出資(50億円)、関連予算(8億円)を含む

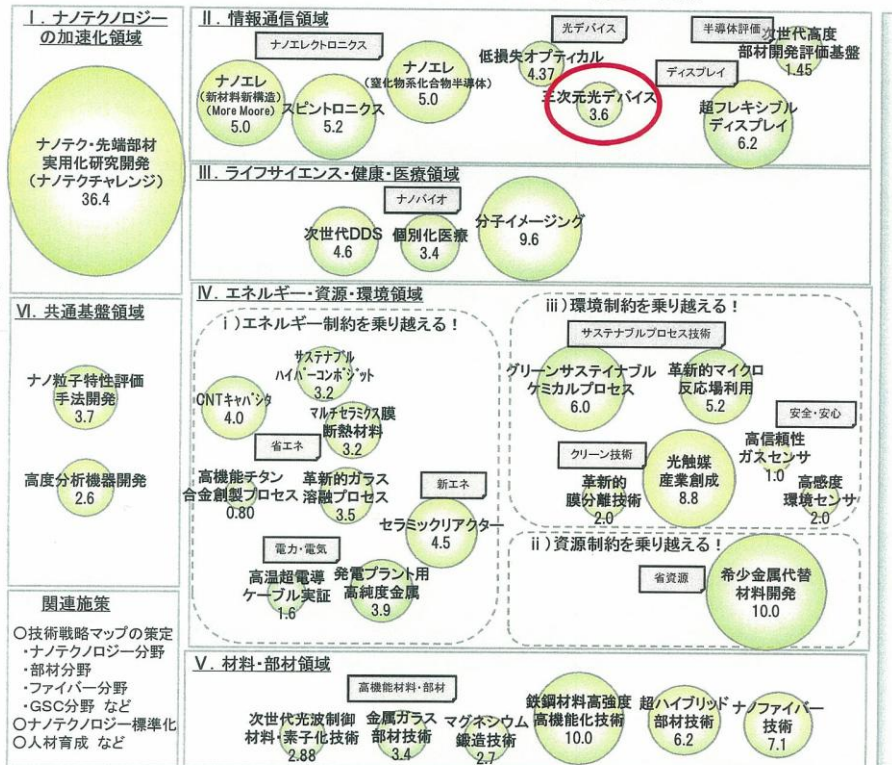
平成20年度まではナノテクノロジープログラムの位置付けで実施

ナノテク・部材イノベーションプログラム

【平成20年度予算額:184.5億円】

- あらゆる分野に対して高度化・不連続な革新をもたらすナノテクノロジー・革新的部材技術を確立！
- 我が国産業の国際競争力の維持・強化や解決困難な社会的課題の克服！

0-38



IPGの目標

世界に先駆けてナノテクノロジーを活用した非連続な技術革新を実現する！

我が国部材産業の強みを更に強化することで、他国の追随を許さない競争優位を確保するとともに、部材産業の付加価値の増大を図る！

ナノテクノロジーや高機能部材の革新を先導することで、これら部材を活用した情報通信、ライフサイエンス、環境、エネルギーなどの幅広い産業の付加価値の増大を図る！

希少金属などの資源制約の打破、圧倒的な省エネルギー社会の実現など、解決困難な社会的課題の克服を目指す！

ナノテクノロジー分野のロードマップ(02電子情報_光デバイス)

技術領域	要素技術	機能	ナノテク技術課題	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020			
光導波路	家庭内、車内ネットワーク、光インターコネクション	低損失 低結合損失 (耐熱性)	目標仕様(三次元光デバイス)			三次元加工エクスチム 露光装置・直径 9 μ m		90 μ m/シングルスロット 80 μ m加工精度<40nm			三次元分選(1x16) 挿入損失<17dB											
			三次元一階屈折(パターンニング)に適したガラス材料開発				屈折率差>0.01		屈折率差>0.015													
			フェムト秒レーザーの一階屈折を利用した三次元光導波路デバイス作製			0.15dB/cm(1.5 μ m,SM)		0.14dB/cm(1.5 μ m,SM)														
			目標仕様			0.1dB/cm(1.25 μ m) 0.08dB/cm(0.25 μ m)		0.09dB/cm(1.5 μ m) 0.02dB/cm(0.25 μ m)														
						0.3dBバック アライメント		<0.1dBバック アライメント														
							耐熱 250°C		耐熱 300°C													
						精密材料設計・精密量産(耐熱、透明材料、その他の耐環境性スペックを持つ材料の開発)																
						簡易作製法・実装法による光導波路作製技術																
			光変調	幹線系ネットワーク	高速化、広帯域化	目標仕様	光MUX/DEMUX (430Gb/s, 1 \times 2) (400Gb/s, 8Ch)					光MUX/DEMUX (160Gb/s), 光3波										
							DPSK 400Gb/s		DPSK 100Gb/s		160Gb/s											
	精密材料設計(高品質半導体量子井戸の育成、量子シミュレーション、半導体スピントロニクス)																					
	ナノ加工(数十nm)																					
家庭内ネットワーク	高速化、高効率化	目標仕様	動作電圧1V 変調周波数 100GHz						動作電圧0.8V 変調周波数 130GHz													
			精密材料設計(2D/3D-主観者格の剛直化による分子配向性の向上)																			
			電極配置、進行波型構造最適化技術(含ソルゲーション)																			
			材料の微細ナノ加工(積合、蒸着) (先実調器作製)																			

2. プロジェクト基本計画

P06029

(ナノテク・部材イノベーションプログラム・ITイノベーションプログラム)
「三次元光デバイス高効率製造技術」基本計画

ナノテクノロジー・材料技術開発部

1. 研究開発の目的、内容及び目標

(1) 研究開発の目的

21世紀の革新的技術として、情報、環境、安全・安心、エネルギー等の広範な分野の基盤技術である材料技術を根幹から変貌させることが期待されるナノテクノロジー（物質の構造をナノレベルで制御することにより、機能・特性の向上や新機能の発現を図る材料技術）の基盤技術を構築することを目的とする「ナノテク・部材イノベーションプログラム」及びITの利活用の深化・拡大を図り、より豊かな国民生活を実現するとともに、我が国の経済活力の向上を図ることを目的とする「ITイノベーションプログラム」の一環として、本プロジェクトを実施する。

ガラスは社会の広範な分野で欠かせない基幹材料となっており、情報通信の超高速大容量化や各種機器の小型・軽量化、省エネ化等のニーズに対応するためには、今後ますます高機能化が求められる。ガラスは結晶材料に比べ、組成の選択範囲が連続的で広く、かつ構造の自由度が大きい。このため組成と構造の多くの組み合わせが可能で、それに伴い種々の潜在的特性・機能があると考えられる。しかし従来技術は、組成の制御と熱処理等、マクロな構造制御に終始しており、ごく一部の特性や機能しか実現できていない。ガラスが本来有している潜在的な特性や機能を有効に引き出すためには、ガラス母材とはその物性の異なった異質相をガラス内部に作製し積極的に新たな機能をガラスに誘起する必要がある。このような基盤技術の開発は「ナノガラス技術」プロジェクトで実施されてきた。本プロジェクトでは、「ナノガラス技術」プロジェクトで得られた基盤技術を実用的な加工技術へと発展させるものであり、フェムト秒レーザー等と波面制御技術等を組み合わせ、加工の高精度化によるデバイス特性の向上と加工の高速化による製造コストの大幅な低減を目指すものである。

また本プロジェクトで開発しようとする技術は、ナノテクノロジー技術戦略マップの光デバイス分野における「光導波路／光伝送／合分波」の「簡易作成法・実装法による光導波路作製技術」に適用され得るものであり、さらに「三次元造形／光加工」の「フェムト秒レーザーによる三次元加工」としても位置付けられている。

本技術の確立により、情報通信、ライフサイエンス、環境、エネルギー等の広範な分野において、従来技術では実現できなかった新しい機能を持つ光学デバイス等の創造が期待される。また本技術はガラスのみならず有機材料や半導体材料へも適用可能であり、将来、幅広い産業分野で利用される製造技術となることが見込まれる。

(2) 研究開発の目標

平成22年度までに、フェムト秒レーザー照射等により、デバイス化加工用ガラス材料技術、三次元加工システム技術として波面制御三次元加工システム技術と空間光変調器三次元加工システム技術等を確立する。

また、具体的なデバイスへの適用を前提に、三次元加工システム応用デバイス技術として三次元光学デバイス技術と三次元光回路導波路デバイス技術に取り組み、「三次元光デバイス高効率製造技術」の有効性を実証する。

(3) 研究開発内容

上記目標を達成するために、以下の研究項目について、別紙の研究開発計画に基づき研究開発を実施する。

- ① □デバイス化加工用ガラス材料技術
- ② □三次元加工システム技術
- ③ □三次元加工システム応用デバイス技術

2. 研究開発の実施方式

(1) 研究開発の実施体制

本研究開発は、NEDO技術開発機構が、単独ないし複数の原則、本邦の企業、研究組合、公益法人等の研究機関（原則、国内に研究開発拠点を有していること。ただし、国外企業の特別な研究開発能力、研究施設等の活用あるいは国際標準獲得の観点からの国外企業との連携が必要な場合はこの限りではない。）から公募によって研究開発実施者を選定後、共同研究契約等を締結する研究体を構築し、委託して実施する。

共同研究開発に参加する各研究開発グループの有する研究開発ポテンシャルの最大限の活用により効率的な研究開発の推進を図る観点から、研究体には研究開発責任者（プロジェクトリーダー）国立大学法人京都大学 大学院工学研究科 材料化学専攻 教授 平尾一之を置き、その下に研究者を可能な限り結集して効果的な研究開発を実施する。

(2) 研究開発の運営管理

研究開発全体の管理・執行に責任を有するNEDO技術開発機構は、経済産業省および研究開発責任者と密接な関係を維持しつつ、プログラムの目的および目標、並びに、本研究開発の目的および目標に照らして適切な運営管理を実施する。具体的には、必要に応じて設置される技術検討委員会等における外部有識者の意見を運営管理に反映させる他、四半期に一回程度プロジェクトリーダー等を通じてプロジェクトの進捗について報告を受けること等を行う。

3. 研究開発の実施期間

平成18年度から平成22年度までの5年間とする。

4. 評価に関する事項

NEDO技術開発機構は、技術的及び政策的観点から、研究開発の意義、目標達成度、成果の技術的意義ならびに将来の産業への波及効果等について、外部有識者による研究開発の中間評価を平成20年度、事後評価を平成23年度に実施する。また、中間評価結果を踏まえ必要に応じプロジェクトの加速・縮小・中止等見直しを迅速に行う。なお、評価の時期については、当該研究開発に係る技術動向、政策動向や当該研究開発の進捗状況等に応じて、前倒しする等、適宜見直すものとする。

5. その他の重要事項

(1) 研究開発成果の取扱い

① 共通基盤技術の形成に資する成果の普及

得られた研究成果のうち、下記共通基盤技術に係る研究開発成果については、NEDO 技術開発機構、実施者とも普及に努めるものとする。

- a) 実現手法の確立、体系的整理
- b) 新たな特性データの取得・整備
- c) 試験・評価方法、ツールの提供
- d) 標準（デファクトスタンダードを含む）への提案、取得

② 知的基盤整備事業又は標準化等との連携

得られた研究開発の成果については、知的基盤整備または標準化等との連携を図るため、データベースへのデータの提供、標準情報（TR）制度への提案等を積極的に行う。

③ 知的財産権の帰属

委託研究開発の成果に関わる知的財産権については、「独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構新エネルギー・産業技術業務方法書」第 26 条の規定等に基づき、原則として、すべて委託先に帰属させることとする。

④ 成果の供試・開示の報告

本研究によって得られたあらゆる知的財産、また本研究の過程または成果に基づき開発したプログラム、サンプルもしくは装置などの成果物について、本プロジェクト外（国内外）への供試・開示については、事前にプロジェクトリーダーと NEDO 技術開発機構に連絡する。その際に、NEDO 技術開発機構が申請書の提出を求めた場合は、これに応じ速やかに提出する。

(2) 基本計画の変更

NEDO 技術開発機構は、研究開発内容の妥当性を確保するため、社会・経済的状況、内外の研究開発動向、政策動向、プログラム基本計画の変更、第三者の視点からの評価結果、研究開発費の確保状況、当該研究開発の進捗状況等を総合的に勘案し、達成目標、実施期間、研究開発体制等、基本計画の見直しを弾力的に行うものとする。

(3) 根拠法

本プロジェクトは、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構法第 15 条第 1 項第 2 号に基づき実施する。

(4) その他

「ナノテク・部材イノベーションプログラム」で実施される他のプロジェクトと連携を図りつつ実施することとする。

6. 基本計画の改訂履歴

- (1) 平成 18 年 3 月 制定。
- (2) 平成 18 年 6 月、研究開発責任者（プロジェクトリーダー）の決定に伴い改訂。
- (3) 平成 20 年 7 月、イノベーションプログラム基本計画の制定により、「(1) 研究開発の目的」の記載を改訂。

(別紙) 研究開発計画

研究項目①「デバイス化加工用ガラス材料技術」

1. 研究開発の必要性

ガラスの原子・分子レベルの構造を制御すれば、従来のマクロな構造制御では実現できなかった、ガラス材料の光学的、電磁氣的、機械的及び化学的等の優れた特性や機能を、有効に引き出すことが期待できる。

そのために、従来のマクロな構造制御とは異なった新たな手法、つまり、外部場（光、イオン、電子、電界、熱及び圧力等）をガラス材料に作用させることによって、母材の組成変化を起さずに、1～数百nmレベルの屈折率を変えた領域（以下において異質相と呼ぶ）の形状と配列を適正に制御することが可能となる。外部場の例としては、フェムト秒レーザーやイオンや電子ビーム等が挙げられる。従って、これらの外部場と相互作用を効率よく行えるガラス材料が必要となる。一方、このような材料で作製するデバイスに使用できることが必須の条件となる。例えば、光学デバイスにあっては、可視光での光に対して透明であることが必須である。また、光通信の光デバイスにあっては、波長が1.2から1.7 μm の通信帯域で光情報を低伝播損失で伝送できることが重要である。

従って、このようなデバイスから要求されるガラス母材と上述の各種外部場で異質相が形成できる材料とが一致する必要がある。このようなデバイスに適したガラス材料を作製する必要がある。本研究では、世の中で広範囲に使用され適用範囲の広いと考えられる光学デバイスと光導波路の作製に適した材料を開発する。

2. 具体的研究内容

研究項目③「三次元加工システム応用デバイス技術」と連携をとりながら研究を進める。具体的には、光学デバイスの代表的な光学ローパスフィルタと光回路デバイスの代表的な光回路導波路デバイスを作製するために必要なガラス材料を開発する。

(1) 三次元光学デバイス用ガラス材料技術

- ・光学ローパスフィルタを目標として、この実現に必要な光学デバイス用ガラス材料を開発する。
- ・研究項目②～③に適した「高精度で高速加工」が可能なガラス材料を開発する。

(2) 三次元光回路導波路デバイス用ガラス材料技術

- ・三次元光回路導波路デバイスの基本回路である導波路とその三次元化応用デバイスである光カップラ（スプリッタ）導波路デバイスを目標として、この実現に必要な光回路デバイス用ガラス材料を開発する。

- ・研究項目②～③に適した「高精度で高速加工」が可能なガラス材料を開発する。

3. 達成目標

三次元光学デバイスの作製は、ガラス内部に三次元的に異質相を作製することにより形成される。異質相の三次元形状は、従来フェムト秒レーザーの照射スポットを三次元的に移動させながらガラス内部に作製された。本研究開発ではレーザーの照射スポットによる点描に代えて、ホログラム等を使用した一括照射で三次元造形を一度の照射で高速に行うものである。その結果として精度のよい三次元造形を低コストで実現できる技術を開発する。以下においては、この技術を試用するデバイス用ガラスの開発に関するものである。

(1) デバイス加工用ガラス材料技術共通目標

異質相形成の閾値、速度やサイズのガラス材料依存性を系統的に調べ、データの体系化を行う。

(2) 三次元光学デバイス用ガラス材料技術

(最終達成目標)

三次元光学デバイスの機能発現のために、可視光領域（400 nm～760 nm）でガラス母材と異質相との屈折率差を0.015以上取れる透明な光学ガラス材料を開発する。

(中間達成目標)

可視光領域（400 nm～760 nm）でガラス母材と異質相との屈折率差を0.01以上取れる透明な光学ガラス材料を開発する。

(3) 三次元光回路導波路デバイス用ガラス材料技術

(最終達成目標)

三次元光回路導波路デバイスの作製において最も重要な基本回路の一つである光導波路を、ガラス内部に本プロジェクトで開発する三次元加工システムで、シングルモードでの光伝播損失として0.1 dB/cm以下（導波路サイズ：直径9 μm以下、波長：1.55 μm）を達成できるガラス材料を開発する。

(中間達成目標)

レーザー照射条件（パルスエネルギー、繰り返し周波数、波長等）の最適化により、直線導波路における主損失要因である散乱と構造不整による損失低減化を実施することで、光伝搬損失：0.1 dB/cm以下の直線導波路が作製可能なガラス材料を選定する。

(別紙) 研究開発計画

研究項目②「三次元加工システム技術」

1. 研究開発の必要性

ガラス中に、大きさが1～数百nmレベルの異質相の形状と配列を適正に制御して構造化（高次構造）することにより、高強度等の機械的特性、新しい概念の光学デバイス、低伝送損失等の光学的特性機能をガラスに付与することが可能となる。例えば、塑性変形により応力緩和しやすい異質相等をガラス中に形成すれば、透明性を損なうことなく高破壊靱性等優れた機械的特性を発現させられる。また、屈折率が母材と異なる異質相を光の波長の数倍から数十倍の大ききで形成すれば新規な光学デバイスを形成することが可能となる。更に、光の波長程度で周期的に配列すれば、光の回折効果等が発現する微小な人工的光結晶となる。

これらの高次構造制御されたガラス材料を作製するためには、ガラス表面及び内部に、光学的あるいは機械的特性の異なる相を高精度に周期的に形成する技術を開発する必要があり、これらはナノガラス技術で研究を進めてきた。異質相の作製はレーザーパルスの逐次照射で行なわれていたため、形成された異質相の形状精度が悪く、また形成に多大な時間が必要であり、生産技術としては使用できない状況であった。これらの問題を解決するために、本技術の開発が必要となった。

2. 具体的研究内容

(1) 波面制御三次元加工システム技術

フェムト秒レーザー照射によりガラス内部に各種デバイスを、高精度で高速に作製するにはホログラムを使用して一括で異質相を形成する方法が有効である。これにより、従来の逐次形成法に比べて高精度で高速に三次元的に異質相を形成することが可能となる。このための高精度三次元加工システムに必要な光学系、波面制御素子設計用シミュレータ、形状計測技術、等を開発する。

(2) 空間光変調器三次元加工システム技術

フェムト秒レーザー照射によりガラス内部に各種デバイスを作成する場合、三次元造形を重ねて順次形状を変化させながら作製する必要が生じる。この場合に有効な造形パターンを順次変更できる可変型の三次元加工システムが必要となる。これに必要な光学系、位相変調型液晶空間光変調器、空間光変調器を用いた位相変調技術、等を開発する。

3. 達成目標

(1) 三次元加工システム技術目標

(最終達成目標)

従来のフェムト秒レーザーによるガラス内部の三次元加工は、レーザー光を一点に集光させ、試料を置いたステージの三次元移動によって行っていた。本手法は、ステージの移動による三

次元加工ではなくホログラム等による波面制御により一括で三次元造形を行うもので、レーザーの照射エネルギーを有効に使用でき、従来比100倍以上の高速加工を実現する。

具体的には、1パルスのレーザーショットにより、一辺が60 μm 以上の立方体の中に、直径が10 μm 以下の球状あるいは棒状の異質相を100個以上形成する。

(中間達成目標)

加工形状寸法として、直線導波路で直径9 μm の加工を確認する。また、その加工精度として、0.9 μm を確認する。

1パルスのレーザーショットにより、一辺が60 μm の立方体の中に、直径が10 μm 以下の球状あるいは棒状の異質相を2層以上形成し、三次元基本加工機能を確認する。

(2) 波面制御三次元加工システム技術

(最終達成目標)

加工精度として40nm以下を実現する。また、波面制御素子を従来に比べて10倍以上の高速で設計ができる技術を開発する。なお、従来技術では64万画素での処理におよそ100時間が必要である。

(中間達成目標)

波面制御素子を従来に比べて3倍以上の高速で設計できる技術を開発する。

(3) 空間光変調器三次元加工システム技術

(最終達成目標)

空間光変調による波面制御をより細かく行うため、従来5万画素であった光変調器に対して45万画素以上に高精細化する。加工時間を短縮するために現状で10Hzの変調速度を50Hzに高める。光位相変調度として2 π ラジアン以上を実現すると同時に0から2 π までの中間値を制御できることとする。および、耐光性としては、ピークパワーで50 GW/cm^2 (100fs、1kHz)を達成する。

(中間達成目標)

変調速度を30Hzに高め、光位相変調度として π ラジアン以上を確認する。耐光性として、30 GW/cm^2 (100fs、1kHz)を達成する。

(別紙) 研究開発計画

研究項目③「三次元加工システム応用デバイス技術」

1. 研究開発の必要性

本プロジェクトで開発する研究項目②「三次元加工システム技術」が実際のデバイスを作製する際に、その高精細度と高速加工性能が有効であるかを調べる必要がある。本研究項目ではこれらの点を実際に以下の二種のデバイスを作製し確認する。

2. 具体的研究内容

(1) 三次元光学デバイス技術

屈折率が母材と異なる異質相を、フェムト秒レーザー照射等によって母材の表面に、並びに、母材の内部に、二次元あるいは三次元状に周期的に、微細、高精度で高速に形成する技術を開発する。これにより超薄型で、低コストで製作可能な光学ローパスフィルタを試作し、本三次元加工システムの有効性を確認する。

(2) 三次元光回路導波路デバイス技術

ガラスの中に導波路やそれらの結合した三次元光回路導波路デバイスの一例として光カップラ(スプリッタ)導波路をフェムト秒レーザー照射で作製し、本三次元加工システムが光回路デバイスの作製に有効であることを確認する。

3. 達成目標

(1) 三次元光学デバイス技術

(最終達成目標)

従来の光学ローパスフィルタは3枚の水晶と位相板から構成されており、数mmから10mmの厚さを持つ。1枚の水晶は光軸を2軸に分離し、一方向のみのフィルタリングしか行わない。上下左右のフィルタリングを行うために直行する2枚の水晶を使用し、且つ偏光特性を修正するために位相板を必要とする。

本研究開発では、一括照射で2.5mm角以上の領域に異質相を形成し、フィルタリング方向の無依存性を確認する。これにより、光学ローパスフィルタ機能を、従来の3枚から1枚に削減し、フィルタ厚0.3mm以下の光学ローパスフィルタを実現する。また、従来のローパスフィルタに使用されている水晶での2光軸同士の開き角度は、 0.236° であり、本フィルタではこれ以上の開き角度を実現する。また解像度を維持し、モアレを抑制することを確認する。

(中間達成目標)

光学シミュレーションにより、方向無依存機能を達成するための形状を検討する。また、この検討に基づき、多点描画にて光学ローパスフィルタ形状を試作し、方向無依存性を確認し、

フィルタ枚数を従来の3枚から1枚にできることを確認する。

(2) 三次元光回路導波路デバイス技術

(最終達成目標)

三次元光回路導波路デバイスの作製において最も重要な基本回路の一つは、光導波路である。光導波路は、異質相をガラス内部に作製することにより実現できる。異質相の形状は適用デバイスにより異なり種々雑多であるが基本的なものは直線導波路である。そこで、基本的な直線導波路として、シングルモードで光伝播損失： 0.1 dB/cm 以下（導波路サイズ：直径 $9 \mu\text{m}$ 以下、波長： $1.55 \mu\text{m}$ ）を開発する。また、本加工システムの加工機能・性能を確認するために分岐面が互いに直交した 1×16 の三次元光カプラ（スプリッタ）導波路について、挿入損失： 1.7 dB 以下、反射減衰量： 45 dB 以上（波長： $1.50 \sim 1.60 \mu\text{m}$ ）が作製可能であることを確かめる。

(中間達成目標)

開発したガラス材料に、波面制御法での直線導波路描画検討を行い、光伝搬損失： 0.1 dB/cm 以下のシングルモード直線導波路が作製可能であることを実証する。同時に波面描画法の留意点や問題点の抽出を行い、三次元加工システム技術の開発へフィードバックさせる。

以上

3. 技術戦略マップ(分野別技術ロードマップ)

ナノテクノロジー分野の技術戦略マップ

I. 基本的な考え方

(1) 状況認識

ナノテクノロジー分野は、経済成長戦略大綱（2006年7月財政・経済一体改革会議）における産業・基盤の強化に必要な研究開発の推進に対応するものである。また、第3期科学技術基本計画（2006年3月閣議決定）において、情報通信、環境、エネルギーなどの分野における科学技術の進歩や課題解決に貢献し、産業の振興や人間の豊かな暮らし、安全・安心で快適な社会などを実現する重要な技術シーズであると位置づけられている。

(2) 研究開発の方向性と技術戦略マップ

経済産業省では、ナノテクノロジーを確立することによって国内産業の海外に対しての競争力強化につながることを期待しており、ナノテクノロジーの基盤研究の成果を実用化に結びつけるための研究開発を進めているところである。このナノテクノロジー施策の一つの指標として、2030年頃を見据え、出口（製品）を意識しながら、ナノテクノロジー分野の技術戦略マップを策定した。

なお、策定に当たっては、まずナノテクノロジービジネス推進協議会（NBCI）との間で、彼らが策定している「ビジネス戦略ロードマップ」と技術戦略マップについての情報交換を行い、ビジネスからみたロードマップ立案と国の研究開発施策から見たロードマップ立案との関係を整理し、さらに今年度開催したナノテク分野の全てのWGにNBCIから委員として検討に加わって頂くことでビジネス戦略ロードマップ策定の過程で出た暗黙知を形式知化した。同様に、経済産業省で検討していた「繊維技術ロードマップ」策定委員についても、関係するWGに加わって頂いた。また、イノベーション創出につながる異分野融合領域への具体的取り組みとして、ナノバイオ領域の検討を行い、ロードマップを策定した。

II. 導入シナリオ

(1) 目標

2020年までに、世界最先端のものづくり国家を目指し、同時にナノテクノロジーによる新産業の創出を目標とする。

(2) 研究開発の取り組み

上記の目標を達成するために、経済産業省では、研究開発プログラム施策を実施し、ナノテクノロジーによる既存産業の高度化、ナノテクノロジーの標準化活動、川上・川下産業や産学の連携等の取り組みを一体的に推進している。

民間企業では、ナノテクノロジーによる高付加価値産業の立ち上げや、ナノテクノロジー

一による既存産業の高度化等を目指した取り組みを行っている。例えば、ナノテクノロジーによる新機能発現の材料開発、新デバイス製造技術確立のための研究開発を着実に実施している。

また、ナノテクノロジーの市場への導入・普及を促進するための取り組みとして設立された「ナノテクノロジービジネス推進協議会(NBCI)」では、新しい事業創出を目指した活動が進められている。具体的には、市場の要求(ニーズ)と技術(シーズ)のマッチングを図るため、ナノテクノロジーが資する製品や研究成果の展示、ビジネス化に向けた情報交換等のための国際展示会やセミナーの開催、ビジネスロードマップの作成などを行っている。

(3) 関連施策の取り組み

標準化戦略として、2005年にISOにナノテクノロジーを扱うTC229が設けられ、用語、計測、環境の3つのWGにおいて、国際標準の策定がなされることとなった。さらに、2006年にはIECでもナノテクノロジーに関する電気電子技術を扱うTC113が設けられた。これに呼応し、国内でも研究開発プロジェクトの成果を基にISO、IECへの提案の策定を行う際の拠り所として技術戦略マップを活用している。

さらに連携施策群においてもナノバイオ及びナノテクの社会受容の両連携施策群を通じて関係各省庁との連携がなされており、経済産業省の研究開発の方向性を説明する際に技術戦略マップを活用している。

Ⅲ. 技術マップ及びロードマップ

(1) ナノテクノロジーの市場・社会ニーズと技術課題

新産業創造戦略を踏まえ、ナノテクノロジーの重要な出口分野として、環境・エネルギー、電子・情報、バイオ・医療の3分野を設定した。これら3分野に関して製品・製造技術、機能としてナノテクノロジーに求められる領域を抽出し、その領域に求められる技術を俯瞰するマップを策定した。さらに、そのような部材を製造するための共通基盤技術について、加工技術、計測技術、シミュレーション技術の3分野に分類して俯瞰する。

(2) ロードマップの策定

本分野のロードマップでは、小項目毎に、まず「出口」、「出口に貢献するナノテクノロジー」、「技術の概要」、「技術開発課題」を示す。次いで、各重要技術の年次展開を、スペックと共に時間軸上に示す。

ナノテクノロジー分野の対象領域は極めて多岐にわたる。このため、特に施策展開から見ると重要度が高く、充実度が優先される領域から順次ロードマップを策定してきた経緯がある。2006年版までには、以下の領域について、ロードマップが策定されている。

- 電子・情報分野 (半導体、メモリ・ストレージ、光デバイス、ディスプレイ)
- ナノ計測分野
- ナノ加工分野

○ 環境・エネルギー分野（燃料電池）

○ ナノシミュレーション分野

このうち、2007年版ではナノ加工分野に於いて技術進歩の著しい「材料界面制御」、「精密ビーム加工」等の技術分野を追加検討する必要があり、併せてロードマップの充実を含めた見直しを行った。

これらに加えて、2007年版で新たに以下のロードマップの策定を行った。

○ バイオ・医療分野（再生医療）

異分野融合領域策定の理由は先に述べたとおりであるが、議論の対象とした領域については、産業化が見込まれる領域の一つと考えられる再生医療を選択した。

さらに、研究開発成果の普及、並びに、国際競争力強化の観点から、研究開発戦略と標準化戦略の一体化を図るため、技術ロードマップ策定の議論と並行して、2006年版で作成した標準化に関わるロードマップについて、ISOの動向の進展に伴い見直した。

なお、これら以外のナノテクノロジー分野が重要でないということは意味しない。2008年以降の技術戦略マップにおいても、ナノテクノロジー分野においてロードマップを策定する領域を順次拡大していく必要がある。

(3) 重要技術の考え方とその表示

ナノ加工分野に於いては、「出口への貢献／ボトルネック性」、「ナノテクノロジーの寄与」、「技術的優位性」、「産学連携／異分野連携などの必要性」、「基盤性」、「市場・社会へのインパクト」の6つを共通な評価指標として重要技術を選定した。

バイオ・医療分野（再生医療）に於いては、「医療現場における必要性」、「医療への貢献度」、「ナノテクノロジーへの寄与度」、「技術的優位性」、「基盤性・汎用性」、「市場性・経済性」、「社会適合性」の7つを評価指標として重要技術を選定した。

また、他の分野については、委員会で行われた議論を基に事務局で総合判断を行い、重要技術を選定した。

○主として市場ニーズの充足を指向する技術

・ナノ加工分野

市場のみならず社会に対してもインパクトがあるかどうかを重要との観点からWGで個別に議論し、評点の高いものを重要技術として選定した。

こうして選定された重要技術は、技術マップ上で背景に黄色の斜線を入れることで表示した。

・電子・情報分野、環境・エネルギー分野（燃料電池）、ナノシミュレーション分野

委員会で行われた議論を基に事務局で総合判断を行い、重要技術を選定した。選定された重要技術は、同じく技術マップ上で背景に黄色の斜線を入れることで表示した。

○主として政策的及び技術的ニーズの充足を指向する技術

・バイオ・医療分野（再生医療）

医療現場の必要性、医療への貢献度といった、医療との結びつきがあるかどうかを重要

との観点からWGで個別に議論し、評点の高いものを重要技術として判断した。

こうして選定された重要技術は、技術マップ上で背景に水色の縦線を入れることで表示した。

・ナノ計測分野

委員会で行われた議論を基に事務局で総合判断を行い、重要技術を選定した。選定された重要技術は、同じく技術マップ上で背景に水色の縦線を入れることで表示した。

IV. 改訂のポイント

1. 新規ロードマップ策定領域

○バイオ・医療分野（再生医療）

イノベーション創出につながる異分野融合領域への具体的取り組みとして、ナノバイオ領域の検討を行い、再生医療にかかるロードマップを策定した。策定に当たり、客観的指標に基づく重要技術の絞り込みを行った。

2. ロードマップ改訂領域

○ナノ加工分野

ナノ加工分野に於いて技術進歩の著しい「材料界面制御」、「精密ビーム加工」等の技術分野を追加検討する必要がある、併せてロードマップの充実を含めた見直しを行った。策定に当たり、客観的指標に基づく重要技術の絞り込みを行った。

3. 標準化ロードマップの見直し

研究開発成果の普及、並びに、国際競争力強化の観点から、研究開発戦略と標準化戦略の一体化を図るため、技術ロードマップ策定の議論と並行して、2006年版で作成した標準化に関わるロードマップについて、ISOの動向の進展に伴い見直した。

4. 他技術マップとの連携

ビジネスからみたナノテクノロジーロードマップである「ビジネス戦略ロードマップ」(ナノテクノロジービジネス推進協議会(NBCI)策定)や、ナノテクノロジーとの関連が深い材料について経済産業省が策定している「繊維技術ロードマップ」との緊密な連携を図った。

4. 事前評価関連資料(事前評価書、パブリックコメント募集の結果)

事前評価書

		作成日	平成18年2月10日
1. 事業名称 (コード番号)	三次元光デバイス高効率製造技術 (ナノテクノロジープログラム)		
2. 推進部署名	ナノテクノロジー・材料技術開発部		
3. 事業概要	<p>(1) 概要</p> <p>波面制御素子あるいは空間光変調器を用いた空間光変調技術を確立し、フェムト秒レーザーを用いてガラス中に三次元造形を高精度・高速に形成できるプロセス技術を開発する。これらの技術を用いて、具体的な光デバイスを作製し、当該技術の有効性の確認と市場への早期参入のための基盤技術を確立する。</p> <p>具体的な事業内容は次のとおり。</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 波面制御素子の高速設計・製造技術を確立し、ガラス中に三次元造形を高精度に一括形成できるプロセス技術を開発する。 ● 多品種・少量生産向けの製造技術として、空間光変調器を用いた光変調プログラマブル加工システムを開発する。 ● デバイス別ガラス組成の最適化検討をおこない、レーザー加工用ガラスを作製する。 ● 三次元光学デバイスおよび三次元光回路導波路デバイスに対し、「三次元光デバイス高効率製造技術」を適用し、同技術の有効性を実証する。 <p>(2) 事業規模：総事業費 20億円 (平成18年度事業費4億円)</p> <p>(3) 事業期間：平成18年度～22年度(5年間)</p>		

4. 評価の検討状況

(1) 事業の位置付け・必要性

①上位政策との関係からみた位置付け

21世紀の革新的技術として、情報、環境、安全・安心、エネルギー等の広範な分野の基盤技術である材料技術を根幹から変貌させることが期待されるナノテクノロジー（物質の構造をナノレベルで制御することにより、機能・特性の向上や新機能の発現を図る材料技術）の基盤技術を構築することを目的とするナノテクノロジープログラムの一環として、本プロジェクトを実施する。

またナノテクノロジー技術戦略マップの光デバイス分野において「三次元造形／光加工」の「フェムト秒レーザーによる三次元加工」の有用性が指摘されており、さらに「光導波路／光伝送／合分波」の「簡易作成法・実装法による光導波路作製技術」が要求されている。また出口製品は新産業創造戦略重点7分野の中の「情報家電」に分類される。

②事業自体の必要性

本技術の確立により、ガラスのみならず有機材料や半導体材料に対しても波面制御素子を利用した加工の実現など、将来、幅広い産業分野で利用される共通基盤技術の形成が見込まれる。また情報通信、ライフサイエンス、環境、エネルギー等の広範な分野に対応可能な光学デバイスの創造が期待される。

(2) 研究開発目標の妥当性

<目標>

平成22年度までに、フェムト秒レーザー照射等により、デバイス化加工用ガラス材料技術、三次元加工システム技術として波面制御三次元加工システム技術と空間光変調器三次元加工システム技術を確立する。

また、具体的なデバイスへの適用を前提に、三次元加工システム応用デバイス技術として三次元光学デバイス技術と三次元光回路導波路デバイス技術に取り組み、「三次元光デバイス高効率製造技術」の有効性を実証する。

研究項目①「デバイス化加工用ガラス材料技術」

(1) デバイス加工用ガラス材料技術共通目標

異質層形成の閾値、速度やサイズのガラス材料依存性を系統的に調べ、データの体系化を行う。

(2) 三次元光学デバイス用ガラス材料技術

(最終達成目標)

三次元光学デバイスは、光学ガラス内部に三次元的に屈折率を変えた異質相を作製することにより形成される。光学デバイスの機能発現のために、可視光領域（400nm～760nm）で光学ガラスと異質相との屈折率差を0.015以上取れる透明な光学ガラス材料を開発する。

(中間達成目標)

中間達成目標としては、光学デバイスの機能発現のために、可視光領域（400nm～7

60 nm) で光学ガラスと異質相との屈折率差を0.01以上取れる透明な光学ガラス材料を開発する。

(3) 三次元光回路導波路デバイス用ガラス材料技術

(最終達成目標)

三次元光回路導波路デバイスの作製において最も重要な基本回路の一つである光導波路を、ガラス内部に本プロジェクトで開発する三次元加工システムで、シングルモードでの光伝播損失として0.1 dB/cm以下(導波路サイズ:直径9 μm以下、波長:1.55 μm)を達成できるガラス材料を開発する。

(中間達成目標)

レーザー照射条件(パルスエネルギー、繰り返し周波数、波長等)の最適化により、直線導波路における主損失要因である散乱と構造不整による損失低減化を実施することで、光伝搬損失:0.1 dB/cm以下の直線導波路が作製可能なガラス材料を選定する。

研究項目②「三次元加工システム技術」

(1) 三次元加工システム技術目標

(最終達成目標)

従来のフェムト秒レーザーによるガラス内部の三次元加工は、レーザー光を一点に集光させ、試料を置いたステージの三次元移動によって行っていた。本手法は、ステージの移動による三次元加工ではなくホログラム等による波面制御により一括で三次元造形を行うもので、レーザーの照射エネルギーを有効に使用でき、従来比100倍以上の高速加工を実現する。

具体的には、1パルスのレーザーショットにより、一辺が60 μm以上の立方体の中に、直径が10 μm以下の球状あるいは棒状の異質相を100個以上形成する。

(中間達成目標)

加工形状寸法として、直線導波路で直径9 μmの加工を確認する。また、その加工精度として、0.9 μmを確認する。

1パルスのレーザーショットにより、一辺が60 μmの立方体の中に、直径が10 μm以下の球状あるいは棒状の異質相を2層以上形成し、三次元基本加工機能を確認する。

(2) 波面制御三次元加工システム技術

(最終達成目標)

加工精度として40 nm以下を実現する。また、波面制御素子を従来に比べて10倍以上の高速で設計ができる技術を開発する。なお、従来技術では64万画素での処理におよそ100時間が必要である。

(中間達成目標)

波面制御素子を従来に比べて3倍以上の高速で設計できる技術を開発する。

(3) 空間光変調器三次元加工システム技術

(最終達成目標)

空間光変調による波面制御をより細かく行うため、従来5万画素であった光変調器に

対して45万画素以上に高精細化する。加工時間を短縮するために現状で10Hzの変調速度を50Hzに高める。光位相変調度として 2π ラジアン以上を実現すると同時に0から 2π までの中間値を制御できることとする。および、耐光性としては、ピークパワーで $50\text{GW}/\text{cm}^2$ (100fs、1kHz)を達成する。

(中間達成目標)

変調速度を30Hzに高め、光位相変調度として π ラジアン以上を確認する。耐光性として、 $30\text{GW}/\text{cm}^2$ (100fs、1kHz)を達成する。

研究項目③「三次元加工システム応用デバイス技術」

(1) 三次元光学デバイス技術

(最終達成目標)

従来の光学ローパスフィルタは3枚の水晶と位相板から構成されており、数mmから10mmの厚さを持つ。1枚の水晶は光軸を2軸に分離し、一方向のみのフィルタリングしか行わない。上下左右のフィルタリングを行うために直行する2枚の水晶を使用し、且つ偏光特性を修正するために位相板を必要とする。

本研究開発では、一括照射で2.5mm角以上の領域に異質相を形成し、フィルタリング方向の無依存性を確認する。これにより、光学ローパスフィルタ機能を、従来の3枚から1枚に削減し、フィルタ厚0.3mm以下の光学ローパスフィルタを実現する。また、従来のローパスフィルタに使用されている水晶での2光軸同士の開き角度は、 0.236° であり、本フィルタではこれ以上の開き角度を実現する。また解像度を維持し、モアレを抑制することを確認する。

(中間達成目標)

光学シミュレーションにより、方向無依存機能を達成するための形状を検討する。また、この検討に基づき、多点描画にて光学ローパスフィルタ形状を試作し、方向無依存性を確認し、フィルタ枚数を従来の3枚から1枚にできることを確認する。

(2) 三次元光回路導波路デバイス技術

(最終達成目標)

三次元光回路導波路デバイスの作製において最も重要な基本回路の一つは、光導波路である。光導波路は、異質相をガラス内部に作製することにより実現できる。異質相の形状は適用デバイスにより異なり種々雑多であるが基本的なものは直線導波路である。そこで、基本的な直線導波路として、シングルモードで光伝播損失： $0.1\text{dB}/\text{cm}$ 以下(導波路サイズ：直径 $9\mu\text{m}$ 以下、波長： $1.55\mu\text{m}$)を開発する。また、本加工システムの加工機能・性能を確認するために分岐面が互いに直交した 1×16 の三次元光カプラ(スプリッタ)導波路について、挿入損失： 17dB 以下、反射減衰量： 45dB 以上(波長： $1.50\sim 1.60\mu\text{m}$)が作製可能であることを確かめる。

(中間達成目標)

開発したガラス材料に、波面制御法での直線導波路描画検討を行い、光伝搬損失： $0.1\text{dB}/\text{cm}$ 以下のシングルモード直線導波路が作製可能であることを実証する。

同時に波面描画法の留意点や問題点の抽出を行い、三次元加工システム技術の開発へフィードバックさせる。

<妥当性>

次世代情報通信システムにおいては、ナノレベルでの高度な基盤的技術開発が不可欠であり、本事業は技術的リスクが高く、民間企業単独では産業化までを実現することは困難であるため、産官学の参加を得て、研究開発を実施することが適切である。目標設定は有識者ヒアリングなどで意見を聴取し、妥当性について更なる検討を行う必要がある。

(3) 研究開発マネジメント

公募を行い最適な研究開発体制を構築する。基盤技術を確立し、ユーザーを垂直連携に参加させ、実用化までの加速を計る。

プロジェクト開始後3年目に中間評価を予定しており、その評価結果を踏まえ事業全体について見直しを行うことを想定している。

(4) 研究開発成果

高機能ナノガラス部材を高効率に製造できるプロセス技術を確立させ、産業化を推進することにより、ガラス部材が数多くのキーデバイスとして用いられているデジタル家電、光学機器、光通信関連の産業競争力が強化される。

(5) 実用化・事業化の見通し

本プロジェクトの成果による民間需要創出効果(2015年)はニューガラス市場(2005年6月社団法人ニューガラスフォーラム)をもとに算出すると約1千8百億円と見込まれ、本プロジェクトの事業規模を約20億円(平成18年度から平成22年度までの総予算額)としていることから、本プロジェクトは投資より大きな需要を創出するものと見込まれる。

(6) その他特記事項

5. 総合評価

NEDOの実施する事業として適切であると判断する。