

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

Three-dimensional Nano-architecture Using the Combination of fs Laser Pulses and the New LCOS Modulator

平尾 一之* 三浦 清貴* 坂倉 政明** 下間 靖彦**

Kazuyuki Hirao Kiyotaka Miura Masaaki Sakakura Yasuhiko Shimotsuma

* Department of Material Chemistry, Graduate School of Engineering, Kyoto University

** Kyoto University Office of Society-Academia Collaboration for Innovation

Abstract

The nonlinear interaction between single crystals, glasses or polymers of transparent materials and femtosecond laser called non-linear multiphoton effect was studied. The various nano or microstructure changes caused by this effect have guided the internal modification inside materials, such as densification, valence reduction of active ions, new crystal precipitation and so on. Such an ultrashort pulse laser effect of transparent materials was useful for fabrication of photonic devices. In view of our findings, the advantage of femtosecond laser combined with liquid crystal modulator developed by us was also introduced to make three-dimensional nano-architecture in materials.

Key words: Femtosecond laser; Parallel laser processing; Three-dimensional device; Spatial light modulator

1 はじめに

ガラス材料にナノテクノロジーを施したナノガラスは、薄くて、強く、軽量なガラス基板として太陽電池や磁気ディスク基板、光ディスク基板に応用したり、自動車・新幹線の窓ガラスや再利用できる飲料ボトルにも利用でき、省エネ、環境、情報など広い分野に展

開できる。ナノガラスの中でも、フォトニクスガラスは光情報分野での利用が大いに期待される。特に、加工用フェムト秒レーザーとホログラムによる波面制御技術とを組み合わせることで、ナノガラスのもつ光機能性を实用レベルにまで引き上げることを目的とした我々のNEDOプロジェクト「3次元光デバイス高効率製造技術プロジェクト」は大変注目されている。

そこで、本稿では、現在ナノ加工において重要な役割を占め始めているフェムト秒レーザーを用いた微小領域の革新的構造改質の現状を述べるとともにそれら

* 京都大学 大学院 工学研究科 材料化学専攻

** 京都大学 産学官連携センター

を利用したフォトニクス材料デバイスの創製への取り組みについて紹介する。

2 フェムト秒レーザーによるガラスの内部構造改質

ガラスの加工技術としては、機械的な研磨や切断、成形性の良さを生かした加熱延伸やモールド成形、電子、イオン、レーザーによるビーム加工等、目的に合わせて多種多様である。しかし、機械加工はもとより電子やイオンによるビーム加工やエキシマ等のUVレーザー、あるいは炭酸ガスレーザー等の赤外レーザー加工では、そのエネルギーのほとんどがガラス表面近傍で吸収されるため、ガラス内部の局所選択的な加工には不向きである。内部の特定領域のみの加工には、レーザーエネルギーがガラスを透過し、焦点位置での加工領域のみにおいてエネルギーが吸収される必要がある。この条件を満たす加工法がフェムト秒レーザーの集光照射を利用した超短パルスレーザー加工である。フェムト秒レーザーはそのパルス幅が100フェムト秒程度であり原子振動の一周期よりも短い時間で照射できるので、そのエネルギーが熱振動に使われない非熱過程となり、レーザー集光領域のみにおいて非常に高い電場強度を得ることができる。レーザーの波長に対して透明なガラス材料において、集光点近傍で非線形な光相互作用を起こさせることが可能である。従来のナノ秒レーザー光と比べるとその違いがよくわかる。つまり、フェムト秒レーザーではFig.1に示すよ

うに鉄板上に焦点を合わせて作った穴は溶融でなく、昇華していることがわかる。さらに、内部に焦点を合わせた場合は、その構成元素(組成)とレーザー照射条件との組み合わせにより、通常の光との線形の相互作用では起こりえない構造変化を誘起させることもできる。我々は、早くよりフェムト秒レーザーにより得られる高い光電場に着目し、不規則構造を有するガラス材料と超短パルス光との相互作用について研究をおこない、ガラス内部での局所選択的な屈折率変化、イオンの価数変化、金属、半導体や非線形結晶の析出、あるいはナノグレーティングやナノボイドの自己形成等々、様々な現象を発見してきた¹⁻¹⁸⁾。また、ガラス内部へのフェムト秒レーザー集光照射における構造変化の動的過程を観測することで、構造変化のメカニズム解明も試みてきた。

Fig. 2には、レーザー照射条件やガラス組成に依存するいくつかの特徴的な現象を例に、ガラス内部の局


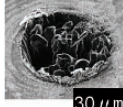
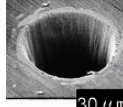
Stainless steel (100 mm thick)			
Pulsewidth	3.3 ns	80 ps	200 fs
Wavelength	780 nm	78 nm	780 nm
Energy	4.2 J/cm ²	3.7 J/cm ²	0.5 J/cm ²
SEM picture			

Fig. 1 Micro via holes drilled on stainless steel by nanosecond, picosecond, and femtosecond laser pulses.

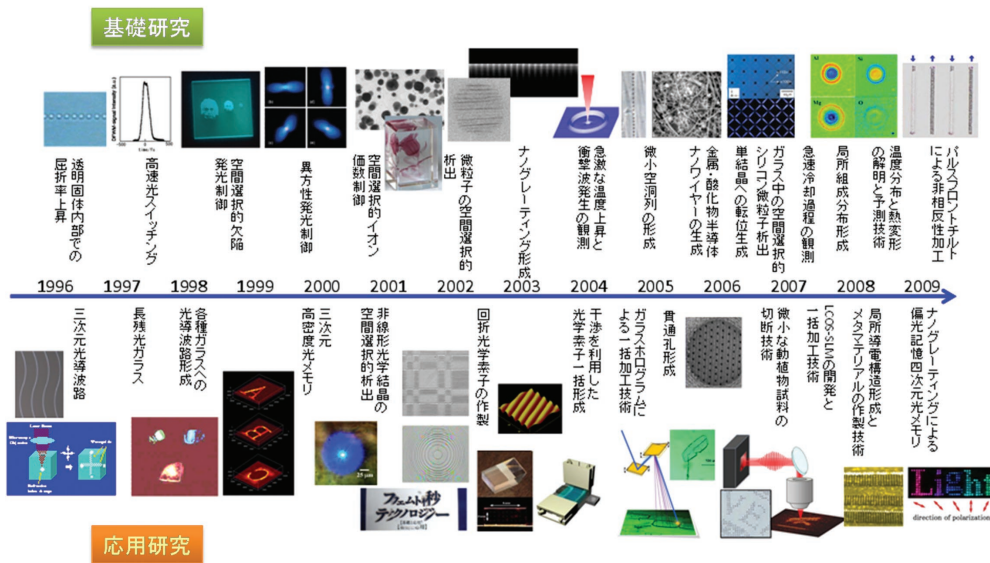


Fig. 2 Research and development chronology by authors.

所加工(構造改質)法として唯一とも言えるフェムト秒レーザー加工例を我々が発明してきた年代順に示す。

ところで、ナノオプティクス部材は、急速に市場拡大しているデジタル家電や光通信機器の超小型化に寄与するキーデバイスであり、その中でも情報処理デバイスは、急速に普及しているインターネットによる情報交換において、大容量の静止画像や動画情報等の伝送に重要な役割を果たす。また、今後、高速大容量通信社会に向け、ますます、増加する情報量の増大に対応するには、処理速度の向上のために光回路の三次元化が必須とされており、これらの部材の高効率製造技術が求められる。

その方法についてつぎに述べる。

3 フェムト秒レーザーによる三次元一括加工システム

加工を高効率におこなう場合、三次元一括加工が有効である。フェムト秒レーザー照射によりガラス内

部にさまざまなデバイスを一括で短時間で作製するには、三次元的に成形された加工用ビームを順次形状を変化させながら作製照射する必要がある。この場合にレーザーパターンを順次時間とともに変更できる可変形の三次元加工システムが必要である。そこでフェムト秒レーザーの高エネルギーパルスに適合し、かつ高精細・高変調速度を有する位相変調型液晶空間光変調器(LCOS-SLM)と最適な光学系を融合した光波面制御モジュールを用いた加工法を開発することになった。

フェムト秒レーザー光波面制御モジュールは、フェムト秒レーザー光の空間位相分布を動的に制御するための光学モジュールであり、Fig. 3のように、LCOS-SLM、レンズ、ミラーを組み合わせる構成される。この動的位相制御技術によって、加工面におけるビームパターン生成・ビームの品質向上・焦点位置制御などをおこない、加工の速度・精度・機能を向上させようとするものである。本モジュールの開発に当たっては、これらの構成要素すべてがフェムト秒レーザー加工に

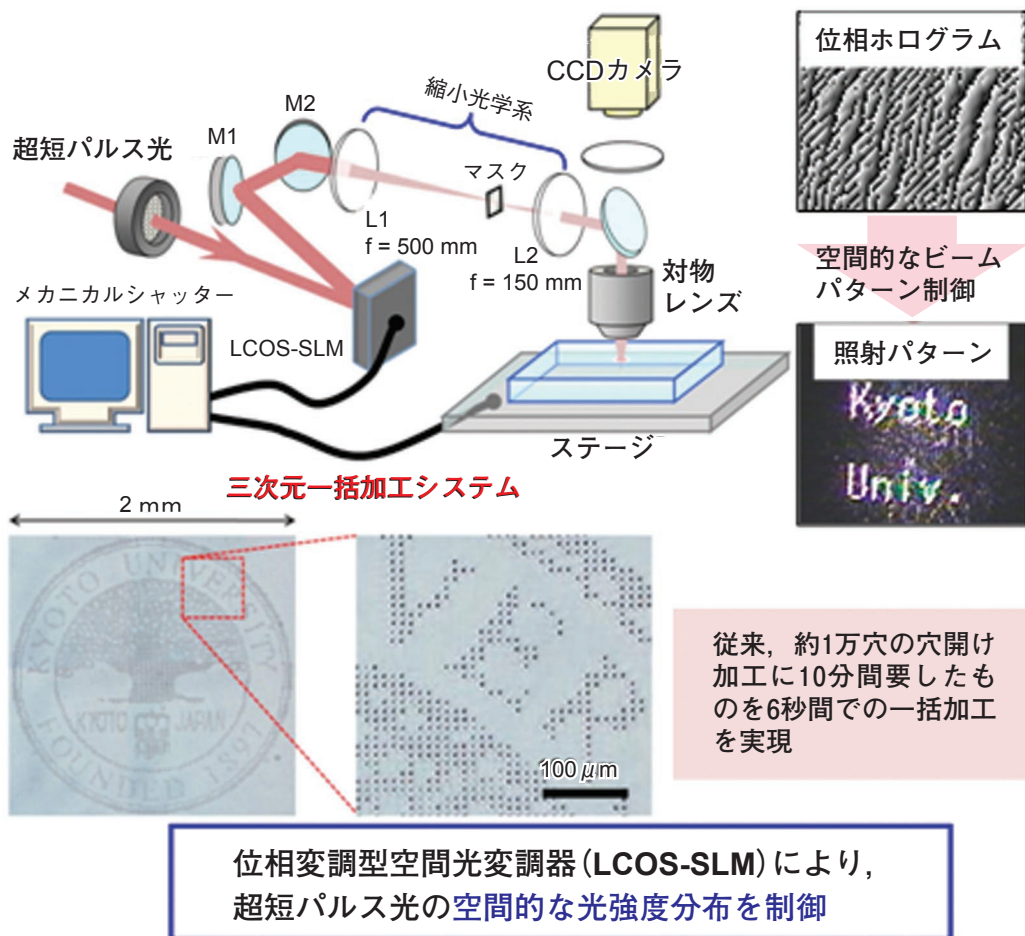


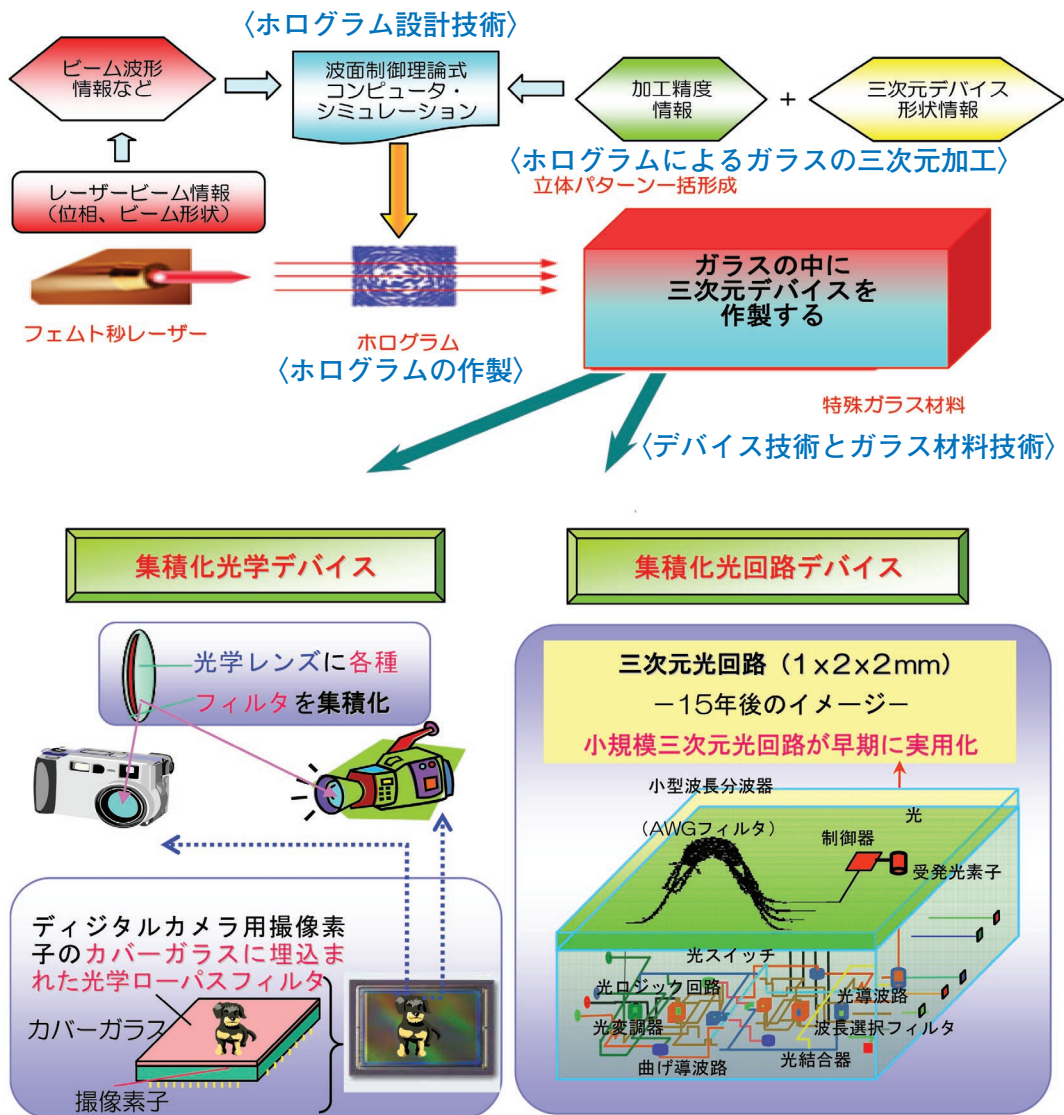
Fig. 3 Schematic of wave front control system.

適した性能(耐光性, 応答速度, 解像度)をもつ必要があった。

すなわち, 従来の LCOS-SLM では, フェムト秒レーザー加工において, 反射面が光吸収のあるアルミ電極をミラーとして用いるため, レーザー耐光性が低いという問題がある。アルミ電極上に誘電体多層膜ミラーを用いることでこの問題を解決できると考えた。また, 加工に用いるフェムト秒レーザーは波長帯域が通常のレーザーよりも広いため, 誘電体多層膜ミラー

はその全域をカバーする広帯域性と高反射率が必要であった。NEDO プロジェクトではこのような条件を満足する誘電体多層膜ミラーを製造する技術を開発し, LCOS-SLM のレーザー光耐力を高める改良をおこなうことができた。Fig. 4 に具体的なプロジェクトの研究開発内容を示す。

Fig. 4 において示すように, 超短パルスレーザーであるフェムト秒レーザーを波面制御素子であるホログラムに照射し, これによってできた三次元形状の実像



【一括形成加工法の特長】

- ・高速加工 従来比10,000倍以上 (例, 3時間→1秒)
- ・高精度 波長の1/10以下, 従来比で数10倍以上
- ・エネルギー利用効率が高い 従来比10,000倍以上

Fig. 4 Three dimensional parallel laser processing with a femtosecond laser promoted by NEDO project.

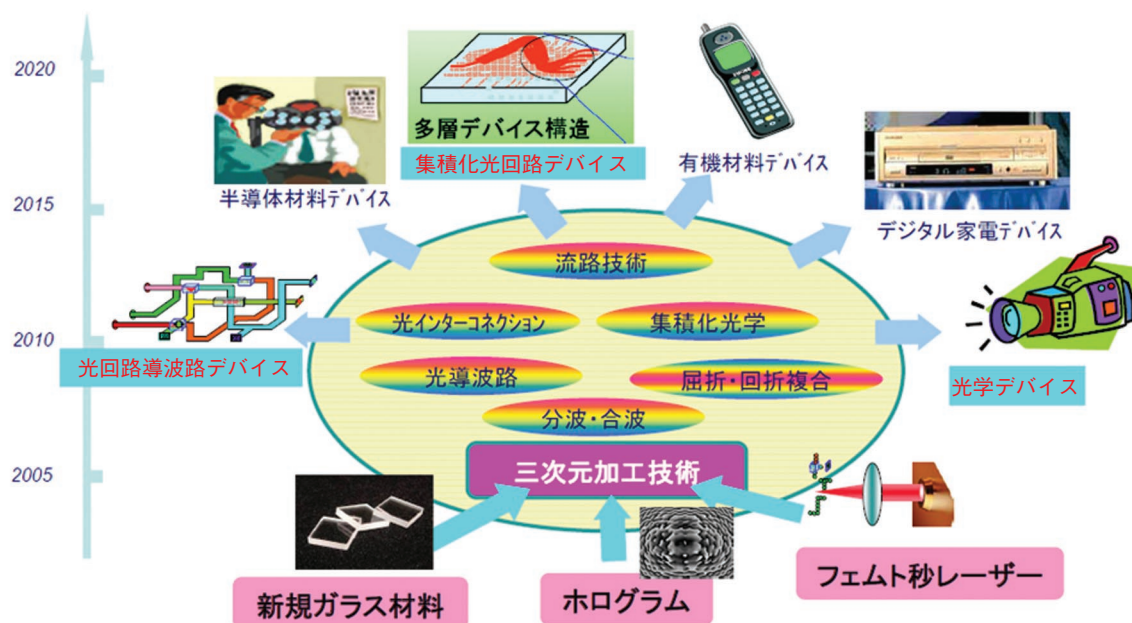


Fig. 5 Product image achieved by parallel laser processing.

をガラスの中に作製する。結像した部分のガラスの屈折率が変化し、ガラスの内部に三次元形状を作ることができる。フェムト秒レーザーを用いると原子・分子が振動する一瞬の時間で加工できるために熱の影響を受けにくく高精度な加工ができる。またホログラムを用いることにより一度に大きなエリアを加工することができ、三次元光デバイスを高精度に低コストで効率よく作ることができる。

このような革新的加工法であるフェムト秒レーザーとホログラムによる三次元加工手法は種々の分野で活用が可能だと考えられる。応用分野のデバイス候補例を Fig. 5 にまとめる。デバイスの一例として光学部品の一つに光学ローパスフィルタがあり、モアレを除去するために現状では、水晶板が使用されている。この厚みが数 mm で軽薄短小が要求される携帯電話用デジタルカメラには使用できない。本技術で作製したフィルタは厚さ数 $10 \mu\text{m}$ と薄く、モアレ除去も確認されており適用が可能である。また光情報処理用デバイスの小型化と個別部品の集積化が実現し、大容量の光情報処理が可能となる。

4 おわりに

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した手

法について紹介した。その技術は、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を見込まれる。

文献

- 1) K. M. Davis, K. Miura, N. Sugimoto, and K. Hirao, *Opt. Lett.*, **21**, 1729 (1996).
- 2) K. Miura, J. Qiu, H. Inouye, T. Mitsuyu, and K. Hirao, *Appl. Phys. Lett.*, **71**, 3329 (1997).
- 3) J. Qiu, K. Miura, and K. Hirao, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **37**, 2263 (1998).
- 4) K. Hirao and K. Miura, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **37**, 49 (1998).
- 5) K. Miura, H. Inouye, J. Qiu, and K. Hirao, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, **B141**, 726 (1998).

- 6) K. Miura, J. Qiu, T. Mitsuyu, and K. Hirao, *Proc. SPIE*, **3618**, 141 (1999).
- 7) K. Hirao, J. Qiu, K. Miura, T. Nakaya, and J. Si, *United Approaches to Materials Science*, **29** (1), 3 (2004).
- 8) J. Qiu, K. Miura, and K. Hirao, *Proc. SPIE-The International Society for Optical Engineering*, **5061**, 82 (2003).
- 9) K. Miura, J. Qiu, T. Mitsuyu, and K. Hirao, *Opt. Lett.*, **25**, 408 (2000).
- 10) K. Miura, J. Qiu, S. Fujiwara, S. Sakaguchi, and K. Hirao, *Appl. Phys. Lett.*, **80**, 2263 (2002).
- 11) Y. Shimotsuma, P.G. Kazansky, J. Qiu, and K. Hirao, *Phys. Rev. Lett.*, **91**, 247405 (2003).
- 12) Y. Yonesaki, R. Araki, K. Miura, K. Fujita, and K. Hirao, *J. Non-Cryst. Solids*, **351**, 885 (2005).
- 13) M. Sakakura, and M. Terazima, *Phys. Rev. B*, **71**, 024113 (2005).
- 14) M. Sakakura, M. Terazima, K. Miura, and K. Hirao, *The Review of Laser Engineering*, **35** (2), 109 (2007).
- 15) J. Qiu, Y. Shimotsuma, K. Miura, P. G. Kazansky, and K. Hirao, *SPIE*, **5713**, 137 (2005).
- 16) Y. Shimotsuma, K. Hirao, J. Qiu, and K. Miura, *J. Non-Cryst. Solids*, **352**, 646-656 (2006).
- 17) K. Miura, Y. Shimotsuma, M. Sakakura, S. Kanehira, M. Hamabe, and K. Hirao, *Proc. SPIE-The International Society for Optical Engineering*, **6413**, 64130K-1-13 (2006).
- 18) K. Miura, Y. Shimotsuma, M. Sakakura, S. Kanehira, and K. Hirao, *Appl. Phys. A*, **93**, 183 (2008).