

平成 30 年 5 月 2 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K13929

研究課題名(和文)光誘起液相プラズマ反応場を利用したナノダイヤモンドの合成

研究課題名(英文)Synthesis of nanodiamond using photoinduced liquid phase plasma reaction field

研究代表者

下間 靖彦 (Shimotsuma, Yasuhiko)

京都大学・工学研究科・准教授

研究者番号：40378807

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：液相中で形成される超高密度・高圧なプラズマ状態を反応場として活用し、爆轟法では直接合成が困難であった数ナノメートルサイズのナノダイヤモンドの合成技術を開発することを目的に、(1)高効率ナノ粒子合成技術を開発し、(2)合成ナノダイヤモンドの光学的特性の評価、(3)形成メカニズムの解明を試みた。偏光制御したフェムト秒ダブルパルス列による液相レーザーアブレーションにより、シングルパルス列の場合に比べて生成量が約2.5倍となった。立方晶ダイヤモンド構造に加えて六方晶ダイヤモンド構造(ロンズデライト)から成る直径数nmのナノダイヤモンドの高効率合成に成功した。

研究成果の概要(英文)：By using liquid phase laser ablation technique, we have investigated direct-synthesis of nanodiamond with a diameter of several nanometers, which is difficult to synthesize by detonation method. We have developed high efficient synthesis method of nanoparticle by using femtosecond double-pulse trains. The synthesized nanodiamonds have a conventional cubic diamond structure and high dens phase of hexagonal diamond structure (Lonsdaleite). In the case of graphene oxide dispersed in cyclohexane, the surface of synthesized nanodiamond was covered with a functional group such as OH, C=O, and COOH groups. The photoluminescence of the nanodiamond synthesized in cyclohexane was broadened and red-shifted compared to that in pure water. Furthermore, in the case of the nanodiamond synthesized in aqueous ammonia, amide and ammonia groups were adsorbed on the nanodiamond surface, leading to much higher PL intensity (at least 40 times).

研究分野：無機材料化学

キーワード：液相アブレーション レーザー プラズマ ナノダイヤモンド グラフェン

## 1. 研究開始当初の背景

「光化学反応」は、時間分解能、空間分解能、エネルギーの選択・分布幅、選択性、反応温度の自由度など、いずれの条件も熱化学反応に比べて優位性を有する。このため、ポリマーの光重合過程に代表される光リソグラフィや照射による感光現象、光触媒反応等は、現在もなお国内外を問わず研究されている。一方で、材料創成を目的としたレーザーアブレーションは、通常、真空中や減圧されたガス雰囲気(気相)中でのプロセスであるが、2010年から液相レーザーアブレーションに特化した国際会議が開催されるなど、液相内でのアブレーションに関する研究が注目されている。しかし、そのメカニズムの複雑さから、革新的なナノ粒子合成技術としての達成には至っていない。申請者らは、超短パルス光の波長や電場強度だけでなく、偏光、位相等の電磁波としての性質をはじめとして、パルス間隔時間、時間的・空間的なチャープ等の超短パルス光がもつ本来の素性を最大限活用した固体材料加工技術に関する研究を世界に先駆けて開始し[*Phys. Rev. Lett.*, 91 (2003) 247405.], これまでに固体内部の局所領域における欠陥構造[*Jpn. J. Appl. Phys.*, 44 (2005) 4735.]や構成元素の分布制御[*Appl. Phys. Lett.*, 93 (2008) 231112.], 異質相の析出[*Opt. Express*, 17 (2009) 46.]等、様々な現象をいち早く発見し報告してきた。特に、超短パルスレーザー光を対物レンズに通して数  $\mu\text{m}$  程度まで集光すると、集光部近傍は、光電場強度が水素原子のイオン化に匹敵する光電場強度( $\sim 10^{16} \text{ W/cm}^2$ )に容易に達するとともに、多光子イオン化やトンネルイオン化を介したプラズマが過渡的に生成し、分子やクラスターの配向・配列、構造変形、クーロン爆発、X線発生など様々な物理現象を光誘起できる。しかし、これまでの殆どの研究は、超短パルス光のもつ強度・エネルギーのみを反応のトリガーとして利用しており、他の特性、例えば、偏光、位相、時間・空間チャープ等は殆ど着目されてこなかった。例えば、超短パルス光と物質との相互作用に関する研究では、主にパルス幅、波長、強度等に主眼が置かれ、コヒーレント X線発生をはじめとして、非線形トムソン散乱等の画期的な成果が得られているものの、時間・空間チャープ等の超短パルス光特有の性質は十分に活用されて来なかった。申請者らは、集光部近傍は局所的に超高温・高压状態(数千 K、数 GPa 以上)となっていることを理論計算により見積もった。このような局所的な高温・高密度プラズマを液体中で発生させると、①プラズマの膨張が周囲の液体により抑制され、一般的な気相中でのプラズマ状態に比べて超高密度状態のプラズマが形成、②この超高密度プラズマ領域を反応場として利用することで、溶液における化学反応と重畳できるのでは、と考え、本研究の着想に至った。

## 2. 研究の目的

超短パルスレーザー光を液体内部に集光照射すると、その集光部近傍はプラズマが形成される。このプラズマ領域は周囲の液体によって閉じ込められるため、膨張が抑制される。本研究では、

液相中で形成される超高密度・高压なプラズマ状態を反応場として活用し、これまで爆轟法では直接合成が困難であった数ナノメートルサイズのナノダイヤモンドの合成技術を開発する。特に、アモルファスカーボン、グラファイト、グラフェン、カーボンナノチューブなどの各種炭素材料を固体ターゲットとして、各種溶媒分子中で液相レーザーアブレーションさせる。液相レーザーアブレーションのメカニズム解明を行うとともに、合成されるナノダイヤモンド構造にホウ素や窒素などの不純物ドーピング技術を確立する。

## 3. 研究の方法

本研究テーマ「光誘起液相プラズマ反応場を利用したナノダイヤモンドの合成」を開発するため、以下の研究項目を実施する。

- (1) 高効率ナノ粒子合成技術の開発
- (2) ナノ粒子形成メカニズムの解明
- (3) 合成ナノダイヤモンドの光学的特性の評価

## 4. 研究成果

- (1) 高効率ナノ粒子合成技術の開発:

ビームスプリッターにより二つに分けたフェムト秒レーザーパルス(波長 800 nm、パルス幅 100 fs、繰り返し周波数 1 kHz)の一方を時間遅延させ、再びビームスプリッターに通してダブルパルス列(偏光方向: E1、E2)とし、各々の偏光方向をそれぞれスキャン方向に対して平行もしくは垂直方向にそろえた場合について液相レーザーアブレーション実験を行った。なお比較のため、照射した全パルスエネルギーを一定としたシングルパルス列による実験も実施した(図 1)。

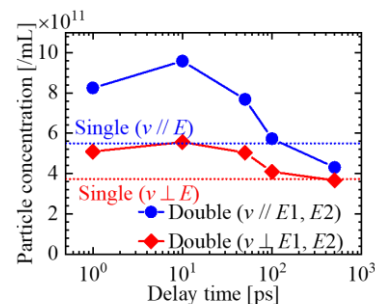


図 1. 偏光方向をそろえたフェムト秒ダブルパルス列により生成されるナノ粒子量

ダブルパルス列の偏光方向がスキャン方向に対して平行な場合、垂直なときよりもナノ粒子の生成量は約 2 倍多くなった。これは、アブレーションされた端面はレーザー光の入射方向に対して垂直ではないため、次に到達するパルス光は斜入射の状態になることと関係があると考えられる。斜入射の場合、フレネル反射を考慮すると、スキャン方向に対して平行な偏光方向である p 偏光の方が垂直な s 偏光に比べて反射率が低く、アブレーションに利用されたレーザーエネルギーが大きかったためと考えた。第 1 パルスと第 2 パルスの偏光方向を直交させたフェムト秒ダブルパルス列の照射によって生成されるナノ粒子の生成量を図 2 に示す。遅延時間が 100 ps 以内の場合、第 1 到達パルスおよび第 2 到達パルスの偏光方向に関係なく、ナノ粒子の生成量はシングルパルス列の場合に比べて増加し、条件によっては、約 2.5 倍のナノ粒子が生成された。約 100

ps 以降は、生成量は減少し、スキャン方向と平行な偏光方向でのシングルパルス列での結果に漸近した。図 1 と同様、遅延時間約 10 ps の場合に生成量が最大となった。これは、第 1 パルスにより発生したプラズマが緩和される前(プラズマ電子の寿命は数十 ps 程度と考えられる)に第 2 パルスが相互作用するため、プラズマ電子はレーザー光のポンデロモータビリティにより加速され、プラズマ電子は逆制動放射により運動エネルギーが増大し、イオン化がさらに促進され、結果としてナノ粒子の生成量が増加したと考えた。

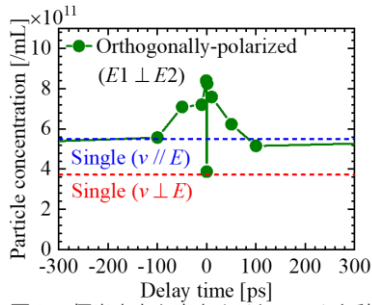


図 2. 偏光方向を直交させたフェムト秒ダブルパルス列により生成されるナノ粒子量

### (2) ナノ粒子形成メカニズムの解明

レーザーの集光照射により液相中で形成される超高密度・高圧なプラズマ状態を反応場として利用したナノダイヤモンド合成において、そのメカニズム解明の第一歩として、溶媒の影響を明らかにするため、ラジカル反応を起こしやすいシクロヘキサン、還元作用が期待されるエタノール、純水を溶媒とし、それらに酸化グラフェンを懸濁させた溶液にフェムト秒レーザーを照射して合成されるナノダイヤモンド粒子の構造を透過型電子顕微鏡による直接観察および放射光を利用した X 線回折の 2 つのアプローチで解析した。純水で合成されたナノ粒子は、通常の立方晶ダイヤモンド構造に加えて六方晶ダイヤモンド構造(ロンズデライト)から成るナノダイヤモンドであることが分かった(図 3)。

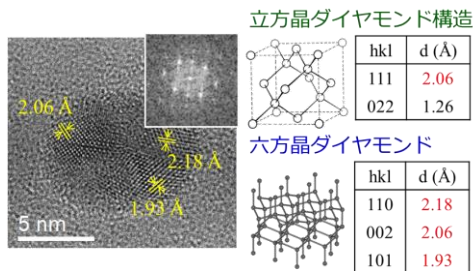


図 3. 酸化グラフェン水系で合成されたナノダイヤモンド粒子のTEM観察結果

一方、溶媒にシクロヘキサンやエタノールを使用すると、立方晶および六方晶ダイヤモンド構造のナノダイヤモンドに加え、溶媒分子の分解によるものと考えられる炭素が直鎖状に連なったカルビンまたはポリインのような分子が生成していると考えられた(図 4)。

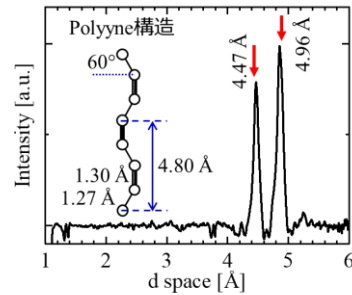


図 4. 酸化グラフェン/シクロヘキサン系で合成されたナノダイヤモンド粒子の構造解析結果

### (3) 合成したナノダイヤモンドの光学的特性の評価

酸化グラフェンを固体炭素原料として利用することによって、溶媒分子に炭素を含まない水中でナノダイヤモンドを合成することに成功した。レーザー照射により溶媒分子も変質し、ダイヤモンド構造を含む蛍光性ナノカーボン粒子の生成が示唆された。さらにシクロヘキサンやエタノール中で合成されたナノダイヤモンド粒子表面は溶媒分子の分解に起因すると考えられる OH 基、C=O 基、COOH 基等の官能基でおおわれており、このために純水中で合成されたナノダイヤモンドに比べて発光スペクトルが長波長側にシフトすることを明らかにした(図 5)。

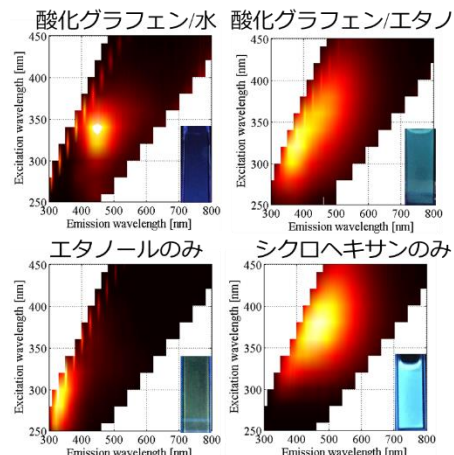


図 5. 各溶液から合成されたナノダイヤモンド粒子の発光スペクトル変化

さらに、酸化グラフェンをアンモニア水に分散させ、レーザー照射により合成したナノダイヤモンドの発光スペクトルは、アンモニアを添加しない場合に比べて蛍光の強度が 40 倍以上に増大し、蛍光波長が長波長側へシフトした。さらに、IR スペクトルから、系に窒素を添加すると、ナノダイヤモンド表面において、アミド基やアンモニア基が検出された(図 6)。また、合成したナノダイヤモンド粒子表面の酸性基により、ゼータ電位は負となることが推測され、特にアンモニア水中で合成した場合、より多くの酸性基を持つことが示唆された。このような表面官能基により欠陥準位が導入され、蛍光強度の増大や蛍光波長のシフトが生じたのではないかと考えた。



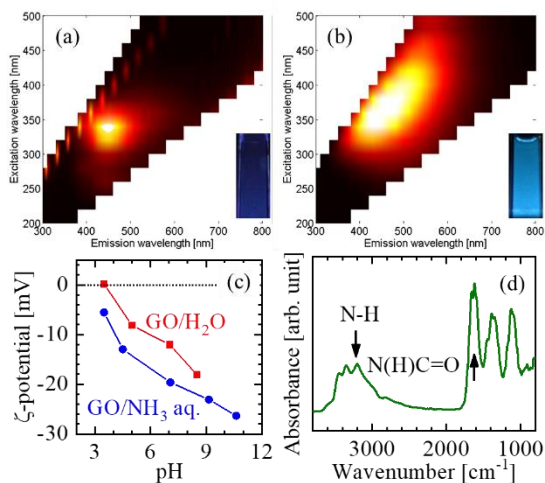


図6. (a)酸化グラフェン/水系、(b)酸化グラフェン/アンモニア水系から合成したナノダイヤモンド粒子の発光スペクトル変化。(c)合成したナノダイヤモンドのゼータ電位、(d)酸化グラフェン/アンモニア水系で合成したナノダイヤモンドのFT-IR測定結果。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計23件)

- [1] Y. Shimotsuna, T. Sei, M. Sakakura, K. Miura, H. Udono, Nanostructuring in indirect band-gap semiconductor using IR femtosecond double pulses, *J. Laser Micro/Nanoen.*, 査読有, Vol.11, 2016, 35-40  
<http://dx.doi.org/10.2961/jlmn.2016.01.0007>
- [2] T. Sei, Y. Shimotsuna, M. Sakakura, K. Miura, Self-assembled nanostructures inside indirect bandgap semiconductor by using IR femtosecond double-pulses, *J. Laser Micro/Nanoen.*, 査読有, Vol.11, 2016, 76-80  
<http://dx.doi.org/10.2961/jlmn.2016.01.0014>
- [3] S. Mori, T. Kurita, Y. Shimotsuna, M. Sakakura, K. Miura, Nanogratings embedded in Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub> glass by femtosecond laser irradiation, *J. Laser Micro/Nanoen.*, 査読有, Vol.11, 2016, 87-90  
<http://dx.doi.org/10.2961/jlmn.2016.01.0016>
- [4] A. Murata, Y. Shimotsuna, M. Sakakura, K. Miura, Control of periodic nanostructure embedded in SiO<sub>2</sub> glass under femtosecond double-pulse irradiation, *J. Laser Micro/Nanoen.*, 査読有, Vol.11, 2016, 95-99  
<http://dx.doi.org/10.2961/jlmn.2016.01.0018>
- [5] Y. Shimotsuna, T. Sei, M. Mori, M. Sakakura, K. Miura, Self-organization of polarization-dependent periodic nanostructures embedded in III-V semiconductor materials, *Appl. Phys. A*, 査読有, Vol.122, 2016, 159  
<http://dx.doi.org/10.1007/s00339-016-9686-6>
- [6] M. Shimizu, D.Hanakawa, M. Nishi, K. Nagashima, V.Heidy, M. Sakakura, Y. Shimotsuna, K. Miura, K.Hirao, Soret coefficients of alkali oxides in alkali borate glass melts, *J. Ceram. Soc. Jpn.*, 査読有, Vol.124, 2016, 774-776  
<http://dx.doi.org/10.2109/jcersj2.16053>
- [7] S. Gunji, Y. Shimotsuna, K. Miura, Synthesis

and photocatalytic properties of SiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> nanofibers using templates of TEMPO-oxidized cellulose nanofibers, *J. Sol-Gel Sci. Technol.*, 査読有, Vol.79, 2016, 151-159

<http://dx.doi.org/10.1007/s10971-016-4033-0>

[8] N. Agatsuma, Y. Fujimatsu, Y. Shimotsuna, M. Sakakura, K. Miura, Synthesis of fluorescent nanocarbons by femtosecond laser induced plasma in liquid, *Proc. SPIE*, 査読無, Vol.9983, 2016, 99831C

<http://dx.doi.org/10.1117/12.2235727>

[9] E. Kim, Y. Shimotsuna, M. Sakakura, K. Miura, Ultrashort pulse laser slicing of semiconductor crystal, *Proc. SPIE*, 査読無, Vol.9983, 2016, 99831B

<http://dx.doi.org/10.1117/12.2235146>

[10] S. Zhou, B. Zheng, Y. Shimotsuna, Y. Lu, Q. Guo, M. Nishi, M. Shimizu, K. Miura, K. Hirao, J. Qiu, Heterogeneous-surface-mediated crystallization control, *NPG Asia Mater.*, 査読有, Vol.8, 2016, e245

<http://dx.doi.org/10.1038/am.2016.15>

[11] X. Du, M. Sakakura, T. Kurita, H. Zhang, Y. Shimotsuna, K. Hirao, K. Miura, J. Qiu, Square-shape distribution of ZnO crystals in glass by using a spatial light modulator, *J. Non-Cryst. Solids*, 査読有, Vol.448, 2016, 79-82

<http://dx.doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2016.06.042>

[12] M. Sakakura, T. Okada, V. Bharadwaj, B. Sotillo, S. M. Eaton, R. Ramponi, A. Serpenguzel, U. S. Gokay, Y. Shimotsuna, K. Miura, Modification and dynamics inside diamond by femtosecond laser double-pulse irradiation, *J. Laser Micro/Nanoen.*, 査読有, Vol.11, 2016, 346-351

<http://dx.doi.org/10.2961/jlmn.2016.03.0012>

[13] B. Sotillo, V. Bharadwaj, J. P. Hadden, M. Sakakura, A. Chiappini, T. T. Fernandez, S. Longhi, O. Jedrkiewicz, Y. Shimotsuna, L. Criante, R. Osellame, G. Galzerano, M. Ferrari, K. Miura, R. Ramponi, P. E. Barclay, S. M. Eaton, Diamond photonics platform enabled by femtosecond laser writing, *Sci. Rep.*, 査読有, Vol.6, 2016, 35566

<http://dx.doi.org/10.3390/mi8020060>

[14] A. Nakamura, M. Sakakura, Y. Shimotsuna, K. Miura, Suppression of stress and crack generation in local glass melting by picosecond laser irradiation at a high repetition rates with temporal energy modulation, *J. Laser Micro/Nanoen.*, 査読有, Vol.12, 2017, 126-131

<http://dx.doi.org/10.2961/jlmn.2017.02.0014>

[15] T. Ohfuchi, M. Sakakura, Y. Yamada, N. Fukuda, T. Takiya, Y. Shimotsuna, K. Miura, Polarization imaging camera with a waveplate array fabricated with a femtosecond laser inside silica glass, *Opt. Express*, 査読有, Vol.25, 2017, 23738-23754

<http://dx.doi.org/10.1364/OE.25.023738>

[16] S. Gunji, M. Jukei, Y. Shimotsuna, K. Miura, K. Suematsu, K. Watanabe, K. Shimanoe, Unexpected gas sensing properties of SiO<sub>2</sub>/SnO<sub>2</sub> core-shell nanofibers under dry and humid conditions, *J. Mater. Chem. C*, 査読有, Vol.5, 2017, 6369-6376

<http://dx.doi.org/10.1039/C7TC01642E>

[17] Y. Shimotsuma, S. Kubota, A. Murata, T. Kurita, M. Sakakura, K. Miura, M. Lancry, B. Pommellec, Tunability of form birefringence induced by femtosecond laser irradiation in anion doped silica glass, *J. Am. Ceram. Soc.*, 査読有, Vol.100, 2017, 3912-3919

<http://dx.doi.org/10.1111/jace.14956>

[18] E. Kim, Y. Shimotsuma, M. Sakakura, K. Miura, 4H-SiC wafer slicing by using femtosecond laser double-pulses, *Opt. Mater. Express*, 査読有, Vol.7, 2017, 2450-2460

<http://dx.doi.org/10.1364/OME.7.002450>

[19] S. Gunji, Y. Shimotsuma, T. Fujimoto, K. Miura, Synthesis of SiO<sub>2</sub>-SnO<sub>2</sub> nanofibers using TEMPO-oxidized cellulose nanofibers as templates, *Front. Nanosci. Nanotech.*, 査読有, Vol.3, 2017, 1-4

<http://dx.doi.org/10.15761/FNN.1000144>

[20] M. Shimizu, H. Kato, M. Nishi, D. Hanakawa, K. Nagashima, H. Visbal, H. Itasaka, M. Sakakura, Y. Shimotsuma, K. Miura, K. Hirao, Molecular dynamics simulation of the Soret effect in a CaSiO<sub>3</sub> glass melt, *J. Ceram. Soc. Jpn.*, 査読有, Vol.125, 2017, 180-184

<http://dx.doi.org/10.2109/jcersj2.16187>

[21] Y. Nakanishi, Y. Shimotsuma, M. Sakakura, M. Shimizu, K. Miura, Formation mechanism of self-assembled polarization-dependent periodic nanostructures in  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, *Proc. of SPIE*, 査読無, Vol.10520, 2018, 105201J

<http://dx.doi.org/10.1117/12.2288276>

[22] Y. Shimotsuma, Y. Nakanishi, M. Shimizu, M. Sakakura, K. Miura, Photoinduced functional materials by femtosecond laser direct writing, *Proc. of SPIE*, 査読無, Vol.10536, 2018, 105361U

<http://dx.doi.org/10.1117/12.2286799>

[23] Y. Shimotsuma, M. Sakakura, K. Miura, Development of functional materials by using ultrafast laser pulses, *Proc. of SPIE*, 査読無, Vol.10456, 2018, 104563A

<http://dx.doi.org/10.1117/12.2282426>

〔学会発表〕（計27件）

[1] E. Kim, Y. Shimotsuma, M. Sakakura, K. Miura, Ultrashort pulse laser slicing of semiconductor crystal, *Pacific Rim Laser Damage*  
発表年月日:2016年5月18日

[2] N. Agatsuma, Y. Fujimatsu, Y. Shimotsuma, M. Sakakura, K. Miura, Synthesis of fluorescent nanocarbons by femtosecond laser induced plasma in liquid, *Pacific Rim Laser Damage*  
発表年月日:2016年5月18日

[3] T. Ohfuchi, Y. Yamada, M. Sakakura, N. Fukuda, T. Takiya, Y. Shimotsuma, K. Miura, The characteristic of birefringence and optical loss in femtosecond-laser-induced region in terms of nanogratings distribution, *International Symposium on Laser Precision Microfabrication*  
発表年月日:2016年5月25日

[4] M. Sakakura, T. Okada, Y. Shimotsuma, N. Fukuda, K. Miura, Spatially modulated beam for investigation of femtosecond laser-induced modification in transparent materials, *International Symposium on Laser Precision Microfabrication*  
発表年月日:2016年5月25日

[5] M. Sakakura, T. Okada, V. Bharadwaj, B.

Sotillo, S. M. Eaton, R. Ramponi, A. Serpenguzel, U. S. Gokay, Y. Shimotsuma, K. Miura, Modification and dynamics inside diamond induced by irradiation with femtosecond laser double pulses, *International Symposium on Laser Precision Microfabrication*

発表年月日:2016年5月25日

[6] Y. Shimotsuma, Femtosecond laser nanoprocessing and its application, *2016 Glass and Optical Materials Division Annual Meeting*

発表年月日:2016年5月23日

[7] Y. Shimotsuma, S. Mori, T. Kurita, M. Sakakura, K. Miura, Photoinduced periodic nanocrystalline structure inside Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-R<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (R = Y, La, Dy) glass, *CLEO 2016*

発表年月日:2016年6月9日

[8] S. M. Eaton, B. Sotillo, V. Bharadwaj, M. Sakakura, Y. Shimotsuma, A. Chiappini, M. Ferrari, J. P. E. Hadden, P. E. Barclay, K. Miura, R. Ramponi, Femtosecond laser written photonic circuits in diamond for quantum information, *ICTON 2016*

発表年月日:2016年6月13日

[9] Y. Shimotsuma, M. Sakakura, K. Miura, Self-assembled nanostructure inside various materials, *2nd Workshop on Progress on Ultrafast Laser Modifications of Materials*

発表年月日:2016年6月16日

[10] M. Sakakura, Y. Shimotsuma, N. Fukuda, K. Miura, Applications of parallel femtosecond laser writing inside glasses and observation of the dynamics, *BGPP 2016*

発表年月日:2016年9月8日

[11] M. Sakakura, T. Okada, V. Bharadwaj, B. Sotillo, S. Eaton, R. Ramponi, T. Fernandez, A. Serpenguzel, U. Gokay, Y. Shimotsuma, K. Miura, Observation of stress dynamics after fs laser irradiation inside diamond, *JSAP-OSA Joint Symposia*

発表年月日:2016年9月13日

[12] T. T. Fernandez, V. Bharadwaj, B. Sotillo, J. P. Hadden, M. Sakakura, A. Chiappini, S. Longhi, R. Osellame, G. Galzerano, Y. Shimotsuma, M. Ferrari, K. Miura, R. Ramponi, P. E. Barclay, S. M. Eaton, Diamond quantum photonics platform enabled by femtosecond laser processing, *JSAP-OSA Joint Symposia*

発表年月日:2016年9月13日

[13] Y. Shimotsuma, M. Sakakura, K. Miura, Photoinduced self-assembly of nanostructure, *JSAP-OSA Joint Symposia*

発表年月日:2016年9月13日

[14] E. Kim, Y. Shimotsuma, M. Sakakura, K. Miura, Ultrashort pulse laser slicing of wide bandgap 4H-SiC crystal, *JSAP-OSA Joint Symposia*

発表年月日:2016年9月13日

[15] K. Miura, Y. Shimotsuma, M. Sakakura, S. Gunji, T. Sakamoto, K. Morishita, S. Hachinohe, Deformation and improvement of IR transmission of single-crystal silicon by direct current heating, *24 International Conference on Materials and Technology*

発表年月日:2016年9月29日

[16] S. Gunji, Y. Shimotsuma, T. Fujimoto, K. Miura, Synthesis of SiO<sub>2</sub>/SnO<sub>2</sub> nanofibers using

templates of TEMPO-oxidized cellulose nanofibers, 24 International Conference on Materials and Technology

発表年月日:2016年9月29日

[17] M. Sakakura, T. Okada, Y. Shimotsuma, K. Miura, Impact of multiple stress and heat sources in parallel laser bulk processing inside transparent materials, CerSJ-GOMD Joint Symposium on Glass Science and Technologies

発表年月日:2016年11月15日

[18] A. Nakamura, M. Sakakura, Y. Shimotsuma, K. Miura, Suppression of crack and stress generation in glass welding using picosecond laser with high repetition rates by temporal modulation of laser pulse energies, International Symposium on Laser Precision Microfabrication

発表年月日:2017年6月6日

[19] Y. Shimotsuma, Y. Nakanishi, M. Sakakura, K. Miura, Polarization-dependent periodic nanostructure embedded in semiconductor, International Symposium on Laser Precision Microfabrication

発表年月日:2017年6月6日

[20] Y. Shimotsuma, S. Mori, M. Sakakura, K. Miura, Phase-separated periodic nanostructure in Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub> glass induced by femtosecond laser irradiation, CLEO/Europe-EQEC

発表年月日:2017年6月28日

[21] Y. Shimotsuma, Y. Nakanishi, M. Sakakura, K. Miura, Self-assembled periodic nanostructures embedded in wide bandgap semiconductor, CLEO-PacRim

発表年月日:2017年8月2日

[22] Y. Shimotsuma, Y. Nakanishi, E. Kim, M. Sakakura, K. Miura, Mechanisms of self-assembled periodic nanostructures induced by the femtosecond laser irradiation, International Conference on Laser Ablation

発表年月日:2017年9月7日

[23] M. Sakakura, T. Ohfuchi, Y. Yamada, N. Fukuda, T. Takiya, Y. Shimotsuma, K. Miura, Polarization imaging with a waveplate array of femtosecond laser written nanogratings inside silica glass, JSAP-OSA Joint Symposia 2017

発表年月日:2017年9月8日

[24] Y. Shimotsuma, Photoinduced polarization-dependent nanostructures in various material and their applications, International Conference on Powder and Powder Metallurgy

発表年月日:2017年11月8日

[25] Y. Shimotsuma, M. Sakakura, K. Miura, Development of functional materials by using ultrafast laser pulses, SPIE Nanophotonics Australasia

発表年月日:2017年12月12日

[26] Y. Nakanishi, Y. Shimotsuma, M. Sakakura, M. Shimizu, K. Miura, Formation mechanism of self-assembled polarization-dependent periodic nanostructures in  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Photonic West 2018

発表年月日:2018年2月1日

[27] Y. Shimotsuma, Y. Nakanishi, M. Shimizu, M. Sakakura, K. Miura, Photoinduced functional materials by femtosecond laser direct writing, Photonic West 2018

発表年月日:2018年2月1日

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計2件)

名称:ガラスの加工方法及び加工装置  
発明者:和田正紀、下間靖彦、三浦清貴、坂倉政明、清水政二  
権利者:京都大学、日本電気硝子、三ツ星ダイヤモンド  
種類:特許  
番号:特願 2016-146534  
出願年月日:2016年7月26日  
国内外の別:国内

名称:光学素子およびその製造方法  
発明者:下間靖彦、村田敦史、坂倉政明、三浦清貴、大淵隆文、池田萩  
権利者:京都大学、日立造船、大阪有機化学工業  
種類:特許  
番号:特願 2016-223679  
出願年月日:2016年11月17日  
国内外の別:国内

○取得状況(計0件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
取得年月日:  
国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

<http://func.mc.kyoto-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

下間 靖彦(SHIMOTSUMA, Yasuhiko)  
京都大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号: 40378807

(2) 研究分担者

( )  
研究者番号:

(3) 連携研究者

( )  
研究者番号:

(4) 研究協力者

( )