

レーザー物理工学研究室

Laser Technology Laboratory

主任研究員 緑川 克美
MIDORIKAWA, Katsumi

レーザー性能の向上とその周辺技術の発展は、常に新しい物理領域や工学応用を開拓してきた。特に、近年の超短パルスレーザーの発生および増幅技術の進歩は目覚ましく、高強度光電場と物質の相互作用に関する研究が注目されている。

当研究室では、この超短パルス高強度レーザーに関する技術の開発を行うとともに、それを用いた高次高調波の発生や光電界電離による新しい軟 X 線レーザーなどのコヒーレント短波長光源に関する研究を中心に、サブフェムト秒パルスの発生や新しい非線形光学現象の探索と解明に関する研究等を行っている。

一方、超短パルスレーザーや極短波長レーザーなどの新レーザー光源を利用した難加工材料や光学材料の新しいプロセッシング技術やレーザー冷却による原子操作技術も開発している。

1. 超短パルス高強度レーザーと物質の相互作用に関する研究

(1) 超短パルス高強度レーザーの伝搬に関する研究(緑川, 須田, 長坂^{*1}, 王^{*1}, Nurhuda^{*1}, 畑山^{*2})

高強度フェムト秒レーザーが媒質中を伝搬するとき、通常は非線形効果によって波形歪みやパワーの変化が起こるが、ある特定の条件が満たされるとき、レーザーパルスは時間的にも空間的にも安定に伝搬することができる。我々は、高強度フェムト秒レーザーをアルゴン、クリプトン、メタンなどのガス媒質に集光したとき、自己ビーム捕捉や自己パルス圧縮が生じることを見いだした。この現象を説明するには、三次の非線形感受率に基づく自己ビーム集束ならびに自己位相変調とつり合う別の非線形効果の存在が必要となる。時間依存シュレディンガー方程式を用いて計算した結果、五次の非線形感受率は三次の非線形感受率と異符号を持ち、ある光強度において両者に基づく非線形効果がつり合うことが明らかとなった。

(2) インパルス励起による誘導ラマン散乱に関する研究(緑川, 須田, 河野^{*3})

誘導ラマン散乱では、励起光からストークス光へのエネルギー変換効率が50%以上と極めて高く、また、全ての周波数成分で位相の同期がとれている。したがって、分散補償が極めて容易であり超短パルスを発生させる方法として非常に有用である。従来、フェムト秒領域では励起レーザーの自己位相変調などが影響して、高い効率でストークス光を発生させることが困難であった。我々はインパルス励起法を用いることにより、100 フェムト秒以下の超短時間領域において、水素の誘導回転ラマン散乱により多数のラマンサイドバンドを効率良く発生させることに成功した。これにより、5 フェムト秒以下の超短パルスの発生に必要な広帯域スペクトルを確保することが可能となった。

2. コヒーレント軟 X 線の開発と応用に関する研究

(1) 軟 X 線レーザーの開発に関する研究(緑川, 永田, 内川^{*2})

軟 X 線レーザー励起専用のピコ秒パルスガラスレーザー

システムを開発し、未だ研究途上に有る軟 X 線レーザーを高度に発展させ、高品質の軟 X 線レーザービームを安定に供給することにより、その先端利用を推進することを目的として研究を進めている。本年度は、軟 X 線レーザー励起用のピコ秒パルスガラスレーザーシステムの高出力化を計り、パルス圧縮前で2ライン、15 J の出力エネルギーを得た。パルス圧縮後でパルス幅で2 ps 以下、出力エネルギーで9 J 以上が得られる予定である。また、我々の提案した光電界電離と電子衝突励起を組み合わせた新しい励起方式でガスジェットおよび差動排気セル中のガスを媒質として用い励起レーザーパルス、ガスの圧力をパラメータとして観測されたスペクトルから生成されたプラズマの状態の解析を行った。また、本方式で Ar, Mo などを媒質として用いたときの軟 X 線レーザーとしての可能性を数値計算によって検討した。

(2) 高次高調波の発生に関する研究(緑川, 板谷^{*3}, 玉木^{*4}, 名倉^{*2}, 小原^{*1})

フェムト秒の高強度レーザーを希ガス媒質中に集光照射して得られる高次高調波は、軟 X 線領域のコヒーレント光源として注目されている。しかし、パルスジェットを用いた通常の発生方法で得られる高調波の空間コヒーレンスは、必ずしも良いものではない。我々は、励起レーザービームの伝搬を制御し長い相互作用長にわたって位相整合を満たすことにより、高次高調波の発生効率を二桁以上改善できることを実証してきたが、今回、この方法により空間コヒーレンスに関しても著しく改善されることを明らかにした。実験では、2 つに分割された励起レーザービームを空間的にわずかにずらして集光することにより、発生した2つの高調波パルスを分光器のスリット上で重ねることによって生じる干渉縞を観測した。この結果、観測された干渉縞の明度が、通常の0.31から0.73へと明らかな改善が確認された。

また、紫外から真空紫外域のフェムト秒分光光源として用いるための白色光の発生を行い、その発生機構に関していくつかの新しい知見が得られた。

3. サブフェムト秒パルスの発生と計測に関する研究

(1) サブフェムト秒パルスの計測に関する研究(緑川, 須田, 王^{*1}, 増子^{*2})

サブフェムト秒からアト秒領域の超短パルスは、必然的に極端紫外から軟 X 線領域の短波長光となる。このような短波長領域においては十分な性能の光学素子が乏しく、通常の自己相関法によるパルス幅の測定は非常に難しくなる。自己相関計を構成する光学素子の反射率、透過率、分散等により制限されるため、被測定光を二分することやそれらに遅延時間を与えること自体に大きな困難を伴う。我々は、両機能を一組の反射鏡のみで行う全反射型プリング分解自己相関計を新たに開発し、可視域においてその動作を確認した。また、アト秒領域の時間分解能を有することを確かめた。反射損失の低い斜入射反射鏡で自己相関計を構成することにより、極端紫外から軟 X 線領域の自己相関法によるパルス幅の測定が可能となる。

(2) アト秒パルス発生に関する理論的研究(緑川, 須田, Shon^{*1}, 和家^{*2})

高強度フェムト秒レーザーを原子・分子気体に集光して得られる高次高調波を用いてアト秒パルスを発生させるための理論解析を行っている。シミュレーションコードは、時間を含むシュレディンガー方程式と三次元波動伝搬方程式から成り、伝搬効果を取り入れたものである。ガスジェット中の相互作用を想定して解析した結果、次数毎に分離した高調波スペクトルとなり、時間的にはアト秒パルスから成るパルス列として発生することが分かった。一方、中空ファイバー内での相互作用を想定すると、限られたパルス成分しか位相整合条件を満足して成長することができず、単一アト秒パルスが発生しやすいという結果が得られた。これらをもとに、媒質の密度、相互作用長、入射レーザー強度などの条件の最適化を行った。

4. 短波長・短パルスレーザープロセッシング

(1) ガラス材料マイクロプロセッシング(杉岡, 緑川, 小幡^{*4})

石英ガラスに代表されるシリカ系ガラスは、オプトエレクトロニックデバイスやマイクロシステム(MEMS)で広く用いられているが、一般的に加工が困難である。そこでシリカ系ガラスを高効率に精密微細加工を行う新しい技術として、ここ数年真空紫外-紫外多重波長励起プロセスを開発してきた。

本年度は当技術をより実用化に近づけるために、F₂ レーザー(157 nm)と KrF エキシマレーザー光(248 nm)を、同軸上から試料に照射する装置を開発した。本措置を用いて石英ガラスをアブレーション加工することによって、F₂ レーザーのみで加工した場合とほぼ同程度の加工特性を実現することができた。またエッチング速度に対する、2つのレーザー光照射の遅延時間、F₂ レーザーフルエンス、KrF エキシマレーザーフルエンスの各依存性を詳細に検討した。その結果、F₂ レーザー照射によって形成された緩和時間数 ns の励起準位に、KrF エキシマレーザーが 1 光子吸収されることによって良好な加工が行われることを明らかにした。本手法の開発によって、F₂ レーザーのみで加工した場合に比べて、加工コストの低減およびスループットの向上を実現することが可能になった。

さらに上記装置を用いて、石英ガラスの屈折率制御を試みた。この場合は、KrF エキシマレーザーのフルエンスを上記アブレーション加工の場合に比べて 1 桁程度小さく設定し照射している。その結果、表面の形態変化を生じることなく、2つのレーザーを同時照射した箇所の屈折率を増加することに成功した。マスクを用いて照射領域を空間的に限定すると屈折率を周期的に変化させることができ、回折グレーティング作成に応用した。

一方、Ag イオン交換ガラスに対して、F₂ レーザー光を照射することによって屈折率制御を行い、光導波路の作成を試みた。レーザー光照射領域の最大屈折率増加量は 2×10^{-3} 以上であり、屈折率の深さ方向変化が深さ 10 μm 程度のガウシアン分布を持っていることを確認した。

(2) 六方晶 GaN の高性能・高効率加工(杉岡, 緑川, 茜^{*3})

GaN は短波長発光デバイス材料として応用が期待されているが、高効率で高性能な加工が上記ガラス材料同様きわめて困難な材料である。前年までに、KrF エキシマレーザーあるいは F₂ レーザーを単独で GaN に照射すると、アブレーションによってエッチングが生じるとともに、平面が平坦化することを見いだした。しかし照射パルス数を増加させるとエッチング表面は逆に粗れてしまい、平坦な表面を維持したまま深いエッチングを行うことは不可能であった。そこで、上記ガラス材料の精密微細加工のために開発した真空紫外-紫外多重波長励起プロセスを、GaN の高効率・高性能エッチングに応用した。その結果、F₂ レーザーフルエンス 0.2 J/cm²、KrF エキシマレーザーフルエンス 1.0 J/cm² で 5 パルス照射した場合、深さ 200 nm のエッチングが行え、かつ比較的平坦な加工面も得られた。さらにパルス数を増加し 10 パルス照射した場合は、サファイア基板上にエピ成長している GaN 薄膜は完全に除去され、その下のサファイア基板も若干エッチングされたが、その加工表面もきわめて平坦であった。このとき形成された GaN の側壁は急峻かつ平坦であり、レーザーを作成する場合の共振器面への利用を検討している。

(3) SiC の高速パターン加工(杉岡, 緑川, 熊谷, 青木^{*2}, 趙^{*3})

SiC は、高硬度、高融点、耐腐食性に優れているため、耐環境性デバイスへの応用が期待されているワンドバンドギャップ半導体である。しかしこれらの優れた特性が災いして、高速エッチングを行うことが非常に困難となっている。本研究では、まず KrF エキシマレーザー光のパターン転写によるアブレーション加工によって高速パターン加工を試みた。レーザーフルエンス 1.8 J/cm²、繰り返し周波数 10 Hz、1 時間の照射で $2 \times 2 \text{ mm}^2$ の正方形のパターン領域に約 150 μm のエッチング深さを達成することができた。しかし加工部底面には激しい凹凸が生じており、優れた加工特性を得ることはできなかった。

次にパルス幅 150 fs、波長 785 nm の Ti:サファイアレーザーを用いて加工を行った。SiC は波長 785 nm に対して透明であるが、用いたレーザー光が高強度であるため、多光子吸収によってアブレーションが生じた。レーザー光を繰り返し周波数 1 kHz、走査速度 0.56 mm/s で 20 回走査した結果、幅 130 μm (FWHM), 深さ 60 μm の線状パターンを形成することができた。また加工面も比較的滑らかであっ

た。これは Ti:サファイアレーザーのパルス幅が KrF エキシマレーザー (23 ns) に比べてきわめて短いために、熱的影響を排除できた結果であると考えられる。

(4) フェムト秒レーザープロセッシング (趙^{*3}, 熊谷, 緑川, 小糸^{*5}, 吉田^{*5})

高強度超短パルスレーザーの飛躍的な進歩につれて、フェムト秒加工分野が急速に発展している。本研究は其中でも透明誘電体材料の内部改質や金属表面のアブレーションに焦点をあてた。フェムト秒レーザーによる固体内部改質は、光 Kerr 効果による自己収束化、自己位相変調、群速度分散、さらにはイオン化、自由電子の発生による自己発散化など、複雑に関連した種々の非線形効果を考慮すべき、新しいプロセッシング領域にある。本年度は合成石英ガラス内部、表面から 1 mm の距離に、0.7–1 μm 幅で 1×10^{-2} の屈折率変化を与えるグレーティング構造を作製した。回折効率から屈折率変化を評価したが、端面でのフレネル反射からの屈折率変化値と良い一致を示した。

(5) フェムト秒レーザープロセッシング画像化計測 (熊谷, 趙^{*3}, 緑川)

我々は透明誘電体材料中の光 Kerr 効果による自己集束効果と自由電子の発生による自己発散効果がつり合う自己チャネリングの発生とそれを利用した材料プロセッシング研究を行ってきた。このような新しいプロセッシング領域では、フェムト秒レーザー光が透明誘電体材料中の焦点位置付近でいったいどのような時間的、空間的なプロファイルを持ち、時間的、空間的に変形し、材料プロセッシングに繋がっていくのか、全く不明であった。本研究では、共同研究により、フェムト秒時間分解画像化技術を利用して、透明固体材料中でのフェムト秒レーザー光の時間的、空間的なプロファイルを直接観察することに成功した。固体内部の伝播に伴ってパルス幅が大幅に延びていく様子を初めて直接的に観測できた。

5. 原子・イオンのレーザー冷却とその応用

(1) 半導体原子のレーザー冷却に関する研究 (熊谷, 緑川, 小原^{*1}, 浅川^{*2})

シリコン原子レーザー冷却に必要な実用的なコヒーレント深紫外光源の開発に世界で初めて成功した。従来の全固体光源は固体レーザーの第三高調波を発生させる方式のもので、その出力はたかだか 10 nW 程度であったが、本方式では紫外単一縦モード光の共振を保ちつつ共振器長を固定し、別の赤色の単一縦モードレーザーの周波数を微調し安定化することにより両波長で二重に共振させ、効率よく和周波を発生させることを特徴にしており、従来方式の 500 万倍の 50 mW の出力を取り出せることができた。

本装置の開発により、シリコンの原子波を制御・利用する新しい研究の幕が開かれることになる。シリコン原子の原子波制御・利用により、シリコン原子の原子リソグラフィや原子ホログラフィーによる微細加工、微細構造体作製技術へ応用されるばかりでなく、シリコン原子のアイソトープデザイン (核スピン制御技術) や高純度な結晶成長技術のブレークスルーに繋がる。

(2) アルカリ金属原子のレーザー冷却に関する研究 (熊谷, 緑川, 小原^{*1}, 朝日^{*2}, 上田^{*2})

水平型二重磁気光学トラップを用いた気体原子のボース

アインシュタイン凝縮、原子波レーザーの実現を目指してルビジウム原子冷却実験を開始した。本研究では、小型で、拡張性に富み、頑強な BEC 生成装置を開発するための準備段階として、磁気光学トラップを行い、二段目の磁気光学トラップへ Rb 原子を輸送することを試みた。一段目の磁気光学トラップでは、およそ 10^9 個の原子をトラップすることができ、二段目のトラップに原子を供給する供給源としての十分な性能を得た。

(3) レーザー冷却原子の多価イオン化の研究 (熊谷, 目黒, 松尾, 緑川)

従来の多価イオン源である電子ビームイオン源 (EBIS: Electron Beam Ion Source) や電子サイクロトロン共鳴イオン源 (ECRIS: Electron Cyclotron Resonance Ion Source) では、価数選択の前後で電界による加速・減速を必要とするため、低速であっても数 100 eV の運動エネルギーを持つことになり、結果として多価イオンの内部ポテンシャル効果が、必ずしも低価数域では顕著ではなかった。このような点に鑑み、新たな低速多価イオンビーム装置の開発を目指して研究に着手した。

本年度は、冷却用レーザー部、再励起レーザー部、飽和吸収分光部、光音響素子高速スイッチ部、第一磁気光学トラップ部、ターゲット原子蒸気圧制御部、原子輸送部、第二磁気光学/RF 二重トラップ部、イオン検出部、フェムト秒レーザー部からなる、低速多価イオン生成装置を開発した。特に RF イオントラップ部分では高周波電圧の周波数、電圧を変化させることにより、トラップポテンシャルの質量、価数フィルターとしての性能を実証できた。さらに RF トラップのキャップ電極に直流電圧パルスを引き加することで、RF トラップから多価イオンビームを引き出し、固体表面への照射実験を行った。

^{*1} 共同研究員, ^{*2} 研修生, ^{*3} 基礎科学特別研究員, ^{*4} ジュニア・リサーチ・アソシエイト, ^{*5} 研究生

誌上発表 Publications

(原著論文) *印は査読制度がある論文誌

Furusawa K., Takahashi K., Kumagai H., Midorikawa K., and Obara M.: "Ablation characteristics of Au, Ag, and Cu metals using a femtosecond Ti: sapphire laser", *Appl. Phys. A* **69**, S359–S366 (1999). *

Ilev I. K., Waynant R. W., Kumagai H., and Midorikawa K.: "Double-pass fiber Raman laser: A powerful and widely tunable in the ultraviolet, visible, and near-infrared fiber Raman laser for biomedical investigations", *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics* **5**, 1013–1018 (1999). *

Cho S. H., Kumagai H., Midorikawa K., and Obara M.: "Fabrication of double cladding structure in optical multimode fibers using plasma channeling excited by a high-intensity femtosecond laser", *Opt. Commun.* **168**, 287–295 (1999). *

Cho S. H., Kumagai H., Midorikawa K., and Obara M.: "Fabrication study of double cladding structure in optical fibers using plasma channeling induced by a femtosecond laser", *Proc. SPIE-Int. Soc. Opt. Eng.* **3885**,

- 293–302 (1999). *
- Zhang J., Sugioka K., Takahashi T., Toyoda K., and Midorikawa K.: “Dual-beam ablation of fused silica by multiwavelength excitation process using KrF excimer and F₂ lasers”, *Appl. Phys. A* **71**, 23–26 (2000). *
- Ruschin S., Sugioka K., Yarom G., Akane T., and Midorikawa K.: “Modification of refractive index in Ag/Na ion-exchanged glasses by vacuum-ultraviolet pulse laser irradiation”, *Appl. Phys. Lett.* **78**, 1844–1846 (2001). *
- Furusawa K., Takahashi K., Cho S. H., Kumagai H., Midorikawa K., and Obara M.: “Femtosecond laser micromachining of TiO₂ crystal surface for robust optical catalyst”, *J. Appl. Phys.* **87**, 1604–1609 (2000). *
- Akane T., Sugioka K., and Midorikawa K.: “Nonalloy Ohmic contact fabrication in a hydrothermally grown *n*-ZnO(0001) substrate by KrF excimer laser irradiation”, *J. Vac. Sci. Technol. B* **18**, 1406–1408 (2000). *
- Obata K., Sugioka K., Toyoda K., Takai H., and Midorikawa K.: “Si barrier metal growth by hybrid radical beam-pulsed laser deposition of TiN”, *Jpn. J. Appl. Phys.* **39**, 7031–7034 (2000). *
- Maya O., Nagata Y., Obara M., Aoyagi Y., and Midorikawa K.: “Design of an ultrahigh-gain Ni-like Kr soft-X-ray laser by use of an optical-field-induced ionization-initiated transient collisional excitation scheme”, *Jpn. J. Appl. Phys.* **40**, 153–158 (2001). *
- Fukaya S., Adachi K., Obara M., and Kumagai H.: “The growth of Cr⁴⁺:YAG and Cr⁴⁺:GGG thin films by pulsed laser deposition”, *Opt. Commun.* **187**, 373–377 (2001). *
- Fujii T., Kumagai H., Midorikawa K., and Obara M.: “Development of a high-power deep-ultraviolet continuous-wave coherent light source for laser cooling of silicon atoms”, *Opt. Lett.* **25**, 1457–1459 (2000). *
- Nguyen Hong S., Suda A., and Midorikawa K.: “Generation and propagation of high-order harmonics in high-pressure gases”, *Phys. Rev. A* **62**, 023801-1–023801-6 (2000). *
- Ishikawa K. and Blenski T.: “Explosion dynamics of rare-gas clusters in an intense laser field”, *Phys. Rev. A* **62**, 063204-1–063204-11 (2000). *
- Tamaki Y., Itatani J., Obara M., and Midorikawa K.: “Optimization of conversion efficiency and spatial quality of high-order harmonic generation”, *Phys. Rev. A* **62**, 063802-1–063802-5 (2000). *
- Koprnikov I. G., Suda A., Wang P., and Midorikawa K.: “Self-compression of high-intensity femtosecond optical pulses and spatiotemporal soliton generation”, *Phys. Rev. Lett.* **84**, 3847–3850 (2000). *
- Kumagai H., Midorikawa K., Obara M., and Cho S. H.: “Time-resolved dynamics of plasma self-channeling and bulk modification in silica glasses induced by a high-intensity femtosecond laser”, *Proc. SPIE-Int. Soc. Opt. Eng.* **4088**, 40–43 (2000). *
- Aoki N., Akane T., Sugioka K., Toyoda K., Dubowski J. J., and Midorikawa K.: “Pulsed laser nitridation of InP”, *Proc. SPIE-Int. Soc. Opt. Eng.* **4088**, 80–83 (2000). *
- Sugioka K. and Midorikawa K.: “Novel technology for laser precision microfabrication of hard materials”, *Proc. SPIE-Int. Soc. Opt. Eng.* **4088**, 110–117 (2000). *
- Sugioka K.: “Overview of novel approaches for laser microfabrication of advanced materials”, *Proc. SPIE-Int. Soc. Opt. Eng.* **4157**, 149–157 (2000). *
- Nurhuda M., Suda A., and Midorikawa K.: “Numerical simulation of femto- and subfemtosecond pulse generation by spectral control of high-order harmonic waves”, *Rev. Laser Eng.* **28**, 500–505 (2000). *
- (総 説)
- 趙聖学, 熊谷寛, 緑川克美, 小原實: “高強度フェムト秒レーザーによる 2 重クラッドファイバーの作製: プラズマチャネリング及び内部屈折率改質”, *信学技報*, No. LQE99-25, pp. 53–58 (1999).
- 杉岡幸次: “真空紫外およびフェムト秒レーザーの精密微細加工への応用”, *レーザー熱加工研究会誌* **7**, 97–102 (2000).
- 須田亮, 鳥塚健二, 緑川克美: “アト秒光パルスの発生: 展望と課題”, *応用物理* **70**, 156–160 (2001).
- 杉岡幸次: “極短パルス vs. 極短波長レーザープロセッシング”, 第 51 回レーザー熱加工研究会論文集, pp. 28–37 (2000).
- 杉岡幸次, 緑川克美: “レーザーアブレーションによる難加工材料の精密微細加工”, *放電研究*, No. 164, pp. 13–22 (2000).
- (その他)
- Midorikawa K.: “Phase-matched high-order harmonic generation with self-guided intense femtosecond laser pulses”, *RIKEN Rev.*, No. 31, pp. 38–41 (2000).
- Sugioka K. and Midorikawa K.: “Novel technology for laser precision microfabrication of hard materials”, *RIKEN Rev.*, No. 32, pp. 36–42 (2001).
- Kumagai H., Asakawa Y., Fujii T., Midorikawa K., and Obara M.: “High-power deep-UV cw coherent light source for laser cooling of silicon atoms”, *RIKEN Rev.*, No. 33, pp. 3–5 (2001).
- Midorikawa K., Tamaki Y., and Itatani J.: “Generation of high-brightness high-order harmonics”, *RIKEN Rev.*, No. 33, pp. 10–13 (2001).
- 熊谷寛: “フェムト秒レーザー誘起自己チャネリングと透明材料内部改質”, 第 47 回東京工業大学総合研究館講演会資料, 2001-03, pp. 19–27 (2001).
- 熊谷寛: “冷却シリコン原子の微細プロセッシング応用に向かっ”, *Laser Expo 2000 講演予稿集*, pp. J-6–J-9 (2000).
- 熊谷寛: “レーザー冷却シリコン原子の微細プロセッシング応用に向かっ”, *レーザー学会第 279 回研究会報告*, pp. 28–32 (2000).
- 伊藤弘昌, 小林洋平, 小関俊政, 猿倉信彦, 小山二三夫, 和田智之, 平等拓範, 今井一宏, 南出泰亜, 松本正行, 佐藤尚, 熊谷寛, 向井剛輝, 吉田正裕: “CLEO/QELS 2000 の報告”, *レーザー研究* **28**, 526–547 (2000).
- 小幡孝太郎, 杉岡幸次, 茜俊光, 青木尚子, 豊田浩一, 緑川

- 克美: “石英ガラスの F_2 -KrF エキシマレーザー多重波長励起プロセス”, 光・量子デバイス研究会資料, 電気学会(編), OQD-01-6, 25-30 (2001).
- 須田亮: “1999 年光学界の進展: レーザー(半導体レーザー以外)”, 光学 29, 206-207 (2000).
- 茜俊光, 杉岡幸次, 青木尚子, 豊田浩一, 半村清孝, 野村晋太郎, 青柳克信, 緑川克美: “パルスレーザーアブレーションによる GaN のエッチング加工”, 信学技報, No. LQE2000-25, pp. 67-71 (2000).
- 茜俊光, 杉岡幸次, 緑川克美: “パルスレーザー照射による GaN の平坦化エッチング”, 電気学会研究会資料, No. OQD-00-21, pp. 59-63 (2000).

口頭発表 Oral Presentations

(国際会議等)

- Kumagai H., Midorikawa K., Obara M., and Cho S. H.: “Double cladding structure in optical multimode fibers fabricated by a high-intensity femtosecond laser”, CLEO/Pacific Rim '99, Seoul, Korea, Aug.-Sept. (1999).
- Cho S. H., Kumagai H., Midorikawa K., and Obara M.: “Double cladding structure in optical multimode fibers fabricated by a high-intensity femtosecond laser”, CLEO/Pacific Rim '99, Seoul, Korea, Aug.-Sept. (1999).
- Cho S. H., Kumagai H., Midorikawa K., and Obara M.: “Fabrication study of double cladding structure in optical fibers using plasma channeling induced by a femtosecond laser”, Int. Forum on Advanced High-Power Lasers and Applications (AHPLA '99), (SPIE), Osaka, Nov. (1999).
- Kumagai H., Midorikawa K., and Obara M.: “Pulse duration dependence of metal ablation using femtosecond titanium sapphire laser”, Int. Forum on Advanced High-Power Lasers and Applications (AHPLA '99), (SPIE), Osaka, Nov. (1999).
- Furusawa K., Takahashi K., Cho S. H., Kumagai H., Midorikawa K., and Obara M.: “Pulse duration dependence of metal ablation using femtosecond titanium sapphire laser”, Int. Forum on Advanced High-Power Lasers and Applications (AHPLA '99), (SPIE), Osaka, Nov. (1999).
- Midorikawa K., Itatani J., Tamaki Y., Obara M., and Nagata Y.: “Coherent soft X-ray generation with high-intensity ultrashort pulsed lasers”, 7th Int. Conf. on X-ray Lasers (RL 2000), (LSAI, CNRS-Universite Paris-SUD, CEA/DAM France), Saint-Malo, France, June (2000).
- Nagata Y., Maya O., Obara M., Aoyagi Y., and Midorikawa K.: “Ultra-high-gain Ni-like Kr soft X-ray laser by optical-field-induced-ionization initiated transient excitation scheme”, 7th Int. Conf. on X-ray Lasers (RL 2000), (LSAI, CNRS-Universite Paris-SUD, CEA/DAM France), Saint-Malo, France, June (2000).
- Akane T., Sugioka K., and Midorikawa K.: “ F_2 laser ablation of GaN”, 1st Int. Symp. on Laser Precision Microfabrication (LPM 2000), (Japan Laser Processing Society, RIKEN, SPIE), Omiya, June (2000).
- Sugioka K. and Midorikawa K.: “Novel technology for laser precision microfabrication of hard materials”, 1st Int. Symp. on Laser Precision Microfabrication (LPM 2000), (Japan Laser Processing Society, RIKEN, SPIE), Omiya, June (2000).
- Aoki N., Akane T., Sugioka K., Toyoda K., Dubowski J. J., and Midorikawa K.: “Pulsed laser nitridation of InP surface”, 1st Int. Symp. on Laser Precision Microfabrication (LPM 2000), (Japan Laser Processing Society, RIKEN, SPIE), Omiya, June (2000).
- Cho S. H., Kumagai H., Midorikawa K., and Obara M.: “Time-resolved dynamics of plasma self-channeling and bulk modification in silica glasses induced by high-intensity femtosecond laser”, 1st Int. Symp. on Laser Precision Microfabrication (LPM 2000), (Japan Laser Processing Society, RIKEN, SPIE), Omiya, June (2000).
- Akane T., Sugioka K., Midorikawa K., Aoki N., and Toyoda K.: “ F_2 laser etching of GaN”, Int. Conf. on Electronic Materials & European Materials Research Soc. Spring Meet. (ICEM2000), Strasbourg, France, June-July (2000).
- Asakawa Y., Kumagai H., Midorikawa K., and Obara M.: “Proposal of atom lithography for silicon quantum dots”, 2000 Int. Microprocesses and Nanotechnology Conf., (The Japan Society of Applied Physics), Tokyo, July (2000).
- Obata K., Sugioka K., Toyoda K., Takai H., and Midorikawa K.: “Si barrier metal growth by hybrid radical beam pulsed laser deposition of TiN”, 2000 Int. Microprocesses and Nanotechnology Conf., (The Japan Society of Applied Physics), Tokyo, July (2000).
- Sugioka K.: “Overview of novel approaches for laser microfabrication of advanced materials”, Int. Symp. on Intensive Laser Action and its Applications (ILAA-2000), (St. Petersburg Institute of Fine Mechanics and Optics), St. Petersburg, Russia, Aug. (2000).
- Suda A., Oishi Y., Wang P., Nagasaka K., and Midorikawa K.: “Feedback control of intense femtosecond laser pulses using a novel spatial light modulator”, 2000 Conf. on Lasers and Electro-Optics Europe, Nice, France, Sept. (2000).
- Kumagai H., Midorikawa K., Fujii T., and Obara M.: “Tunable, cw, single-frequency, and deep ultraviolet coherent light source for laser cooling of silicon atoms”, OSA Ann. Meet. and Exhibit 2000 and ILS-XVI: 16th Interdisciplinary Laser Science Conf., (Optical Society of America), Providence, USA, Oct. (2000).
- Sugioka K., Akane T., Obata K., and Midorikawa K.: “Multiwavelength excitation ablation by combination of F_2 and KrF excimer lasers”, 3rd Int. UV Laser Symp. for 157 nm Applications, (Lambda Physik), Fort Lauderdale, USA, Nov. (2000).
- Midorikawa K., Tamaki Y., Itatani J., and Obara M.: “Generation of high-brightness high-order harmonics”,

- IEEE Lasers and Electro-Optics Soc. 2000 Ann. Meet., Puerto Rico, USA, Nov. (2000).
- Obata K., Sugioka K., Aoki N., Akane T., Toyoda K., and Midorikawa K.: "Multiwavelength excitation process of fused silica by combination of F₂ and KrF excimer lasers", Photonics West LASE2001, (SPIE), San Jose, USA, Jan. (2001).
- Asakawa Y., Kumagai H., Midorikawa K., and Obara M.: "Sum-frequency generation of a CW single frequency mode coherent light at 252 nm for laser cooling of silicon", Photonics West LASE2001, (SPIE), San Jose, USA, Jan. (2001).
- Cho S. H., Kumagai H., and Midorikawa K.: "Micro-machining on transparent materials using a femtosecond laser", Ann. Meet. of the Applied Physics Soc. of Korea, Taejon, Korea, Mar. (2001).
- (国内会議)
- 杉岡幸次: "短波長レーザによる表面改質と加工", 新技術セミナー「レーザ応用技術」, (東京都立産業技術研究所), 東京, 9月(1999).
- 永田豊, 真家大樹, 小原實, 青柳克信, 緑川克美: "高強度光電離を用いた過渡的電子衝突法による高利得 Ni-様 Kr 軟 X 線レーザー", X 線レーザー・レーザープラズマ X 線源研究会, (大阪大学レーザー核融合研究センター), 吹田, 12月(1999).
- 趙聖学, 熊谷寛, 緑川克美, 小原實: "Fabrication study of double cladding structure in optical fibers using plasma channeling induced by a femtosecond laser", 第48回レーザ熱加工研究会; 理研シンポジウム「第4回レーザーによる精密微細加工」, 和光, 12月(1999).
- 藤井剛, 熊谷寛, 緑川克美, 小原實: "シリコン原子レーザー冷却用 CW 紫外コヒーレント光源の開発", レーザー学会学術講演会第20回年次大会, 福岡, 1月(2000).
- 趙聖学, 熊谷寛, 緑川克美, 小原實: "高強度フェムト秒レーザー誘起プラズマチャネリングを利用した二重クラッドファイバの作製", レーザー学会学術講演会第20回年次大会, 福岡, 1月(2000).
- 趙聖学, 熊谷寛, 緑川克美, 小原實: "高強度フェムト秒レーザー誘起プラズマチャネリング及び内部改質の時間分解的観察", レーザー学会学術講演会第20回年次大会, 福岡, 1月(2000).
- 小幡孝太郎, 杉岡幸次, 茜俊光, 青木尚子, 豊田浩一, 緑川克美: "F₂-KrF エキシマレーザー同時照射による石英ガラスの加工", レーザー学会学術講演会第21回年次大会, 東京, 1月(2000).
- 青木尚子, 杉岡幸次, 小幡孝太郎, 茜俊光, 高橋勉, 趙聖学, 熊谷寛, 豊田浩一, 緑川克美: "レーザーアブレーションによる SiC の加工", レーザー学会学術講演会第21回年次大会, 東京, 1月(2000).
- 藤井剛, 熊谷寛, 緑川克美, 小原實: "2段階波長変換による CW 紫外コヒーレント光源の発生", 理研シンポジウム「第3回コヒーレント科学: 光から物質系へ」, 和光, 1月(2000).
- 熊谷寛, 松尾由賀利, 小林徹, 倉田(西村)美月, 門叶冬樹, 森本幸司, 趙聖学, 緑川克美: "フェムト秒レーザーを用いた低速多価イオンビーム源の研究", 理研シンポジウム「第3回コヒーレント科学: 光から物質系へ」, 和光, 1月(2000).
- 浅川雄一, 熊谷寛, 藤井剛, 緑川克美, 小原實: "原子リソグラフィに向けたシリコン原子の運動制御計算", 理研シンポジウム「第3回コヒーレント科学: 光から物質系へ」, 和光, 1月(2000).
- 趙聖学, 熊谷寛, 緑川克美, 小原實: "高強度フェムト秒レーザー誘起プラズマチャネリングと固体内部改質のダイナミクス", 理研シンポジウム「第3回コヒーレント科学: 光から物質系へ」, 和光, 1月(2000).
- 板谷治郎, 小原實, 緑川克美: "高次高調波の変換効率・空間波形の最適化", 理研シンポジウム「第3回コヒーレント科学: 光から物質系へ」, 和光, 1月(2000).
- 浅川雄一, 熊谷寛, 藤井剛, 緑川克美, 小原實: "シリコン原子リソグラフィに向けた原子の運動制御計算", 第47回応用物理学関係連合講演会, 東京, 3月(2000).
- 熊谷寛, 藤井剛, 浅川雄一, 緑川克美, 小原實: "シリコン原子レーザー冷却用単一波数 CW コヒーレント紫外光源の開発", 第47回応用物理学関係連合講演会, 東京, 3月(2000).
- 趙聖学, 熊谷寛, 緑川克美, 小原實: "高強度フェムト秒レーザー誘起プラズマチャネリングと固体内部改質のその観察", 第47回応用物理学関係連合講演会, 東京, 3月(2000).
- 板谷治郎, 小原實, 緑川克美: "高次高調波の変換効率・空間波形の最適化", 第47回応用物理学関係連合講演会, 東京, 3月(2000).
- 趙聖学, 小糸繁之, 熊谷寛, 緑川克美: "フェムト秒レーザーによる透明材料中の屈折率周期構造の作製", 第48回応用物理学関係連合講演会, 東京, 3月(2000).
- 熊谷寛: "冷却シリコン原子の微細プロセッシング応用に向かって", LaserExpo 2000 特別技術セミナー, (レーザー学会), 横浜, 4月(2000).
- 緑川克美: "高輝度高次高調波の発生", 東大物性研短期研究会「強光子場中の原子分子ダイナミクス」, 柏, 6月(2000).
- 杉岡幸次, 緑川克美: "レーザーアブレーションによる難加工材料の精密微細加工", 放電研究グループ春のシンポジウム, 東京, 6月(2000).
- 緑川克美: "高次高調波発生の最適化", 光量子研究会「X線レーザーの利用と応用」, (原研関西研究所), 京都, 7月(2000).
- 趙聖学, 熊谷寛, 緑川克美: "フェムト秒レーザー加工と内部改質プロセッシング", レーザ熱加工研究会, 大阪, 9月(2000).
- 玉木裕介, 板谷治郎, 小原實, 緑川克美: "高次高調波の空間コヒーレンス測定", 第49回応用物理学関係連合講演会, 札幌, 9月(2000).
- Nguyen Hong S., 須田亮, 緑川克美: "3D self-consistent model for generation and propagation of high-order harmonics in gases", 第61回応用物理学学会学術講演会, 札幌, 9月(2000).
- 緑川克美: "フェムト秒レーザー加工の基礎過程", 第61回応用物理学学会学術講演会, 札幌, 9月(2000).

- 小糸繁之, 熊谷寛, 緑川克美: “高強度フェムト秒レーザーによる透明材料のアブレーションしきい値の考察”, 第 61 回応用物理学学会学術講演会, 札幌, 9 月 (2000).
- 小幡孝太郎, 杉岡幸次, 茜俊光, 青木尚子, 豊田浩一, 緑川克美: “石英ガラスの F_2 -KrF エキシマレーザー多重波長励起プロセス”, 第 61 回応用物理学学会学術講演会, 札幌, 9 月 (2000).
- 杉岡幸次, 茜俊光, 小幡孝太郎, 緑川克美: “真空紫外 紫外多重波長励起プロセス”, 分子科学研究所シンポジウム「真空紫外光源と材料科学への応用」, 岡崎, 9 月 (2000).
- 緑川克美: “高次高調波による高輝度コヒーレント軟 X 線の発生”, プラズマ・核融合学会第 17 回年会, 札幌, 11 月 (2000).
- 緑川克美: “コヒーレント X 線の発生”, 平成 12 年度茅コンファレンス「光科学の新しい展開とその応用」, (日本学術振興会), 裏磐梯, 11 月 (2000).
- 緑川克美: “高次高調波発生の最適化: 高輝度コヒーレント軟 X 線の発生”, 平成 12 年度理化学研究所・日本分光学会装置部会合同シンポジウム, 和光, 11 月 (2000).
- 杉岡幸次: “極短パルス vs. 極短波長レーザープロセス”, 第 51 回レーザー熱加工研究会; 第 5 回理研シンポジウム「レーザーによる精密微細加工」, 和光, 12 月 (2000).
- 河野弘幸, 須田亮, 緑川克美: “ガス充填中空ファイバー内でのフェムト秒高次誘導ラマン散乱”, レーザー学会学術講演会第 21 回年次大会, 東京, 1 月 (2001).
- 浅川雄一, 熊谷寛, 緑川克美, 小原實: “シリコン原子レーザー冷却用連続発振紫外コヒーレント光源の高効率化”, レーザー学会学術講演会第 21 回年次大会, 東京, 1 月 (2001).
- 緑川克美: “テーブルトップコヒーレント軟 X 線の開発”, レーザー学会学術講演会第 21 回年次大会, 東京, 1 月 (2001).
- 趙聖学, 小糸繁之, 熊谷寛, 緑川克美: “フェムト秒レーザーによる透明材料中の回折格子構造の作製”, レーザー学会学術講演会第 21 回年次大会, 1 月 (2001).
- 小糸繁之, 趙聖学, 熊谷寛, 緑川克美, 四方山和彦: “フェムト秒レーザーによる難加工透明材料の切断特性”, レーザー学会学術講演会第 21 回年次大会, 東京, 1 月 (2001).
- 名倉千裕, 河野弘幸, 須田亮, 小原實, 緑川克美, 河野弘幸: “フェムト秒時間分解分光のための白色光発生”, レーザー学会学術講演会第 21 回年次大会, 東京, 1 月 (2001).
- 畑山雅俊, 須田亮, 長坂啓吾, 緑川克美: “マルチパスセル内の自己位相変調によるフェムト秒レーザーパルスのスペクトル広帯域化とパルス圧縮”, レーザー学会学術講演会第 21 回年次大会, 東京, 1 月 (2001).
- 朝日英彦, 上田徳宣, 熊谷寛, 緑川克美, 小原實: “ルビジウム原子の水平型二重磁気光学トラップの特性”, レーザー学会学術講演会第 21 回年次大会, 東京, 1 月 (2001).
- 清水庸介, 板谷治郎, 豊田浩一, 緑川克美: “再生増幅器内スペクトル整形によるフェムト秒パルスの増幅”, レーザー学会学術講演会第 21 回年次大会, 東京, 1 月 (2001).
- 四方山和彦, 河内雅子, 趙聖学, 熊谷寛, 緑川克美, 小糸繁之: “紫外フェムト秒レーザーを用いたガラス材料のアブレーション加工”, レーザー学会学術講演会第 21 回年次大会, 東京, 1 月 (2001).
- 大石裕, 須田亮, 高樋克利, 王鵬謙, 長坂啓吾, 緑川克美: “単一ショット・トランジェント・グレーティング自己相関計による紫外フェムト秒パルスの測定”, レーザー学会学術講演会第 21 回年次大会, 東京, 1 月 (2001).
- 熊谷寛, 浅川雄一, 緑川克美, 小原實: “偏光制御によるシリコン原子のレーザー冷却 (I)”, レーザー学会学術講演会第 21 回年次大会, 東京, 1 月 (2001).
- 須田亮, 緑川克美: “超短パルス光開発の現状”, 第 32 回表面科学研究会, (日本表面科学会), 横浜, 1 月 (2001).
- 小幡孝太郎, 杉岡幸次, 茜俊光, 青木尚子, 豊田浩一, 緑川克美: “石英ガラスの F_2 -KrF エキシマレーザー多重波長励起プロセス”, 電気学会研究会 (光・量子デバイス研究会), 福岡, 2 月 (2001).
- 浅川雄一, 熊谷寛, 緑川克美, 小原實: “シリコンのレーザー冷却用コヒーレント光源の開発”, 第 1 回レーザー学会東京支部研究会, 石和, 3 月 (2001).
- 熊谷寛: “フェムト秒レーザー誘起自己チャネリングと透明材料内部改質”, 第 47 回東京工業大学総合研究館講演会「透明材料のレーザー加工最前線」, 長津田, 3 月 (2001).
- 杉岡幸次: “新しい加工技術: 極短波長, 極短パルス, 複合レーザー加工”, 第 48 回応用物理学学会関係連合講演会シンポジウム「次世代レーザープロセス: 基礎から産業応用まで」, 東京, 3 月 (2001).
- 小幡孝太郎, 杉岡幸次, 茜俊光, 青木尚子, 豊田浩一, 緑川克美: “ F_2 -KrF エキシマレーザー多重波長励起プロセスによる石英ガラスの屈折率制御”, 第 48 回応用物理学関係連合講演会, 東京, 3 月 (2001).
- 倉田(西村)美月, 門叶冬樹, 松尾由賀利, 小林徹, 河合純, 緑川克美, 谷畑勇夫, 林崎良英: “フェムト秒レーザーアブレーションを用いた高分子同時元素化イオン化法の研究”, 第 48 回応用物理学関係連合講演会, 東京, 3 月 (2001).
- 畑山雅俊, 須田亮, Nurhuda M., 長坂啓吾, 緑川克美: “高強度場における希ガス原子の非線形感受率の飽和”, 第 48 回応用物理学関係連合講演会, 東京, 3 月 (2001).
- 須田亮, 緑川克美: “高次高調波発生の制御と短パルス化”, 第 48 回応用物理学関係連合講演会, 東京, 3 月 (2001).
- 名倉千裕, 河野弘幸, 須田亮, 小原實, 緑川克美: “紫外フェムト秒分光のための広帯域コヒーレント光発生”, 第 48 回応用物理学関係連合講演会, 東京, 3 月 (2001).
- 河野弘幸, 須田亮, 緑川克美: “水素ガス充填中空ファイバー内でのインパルス誘導ラマン散乱”, 第 48 回応用物理学関係連合講演会, 東京, 3 月 (2001).
- 大石裕, 須田亮, 長坂啓吾, 緑川克美: “石英空間位相変調器を用いたチャープパルス増幅後の位相制御”, 第 48 回応用物理学関係連合講演会, 東京, 3 月 (2001).
- 増子拓紀, 須田亮, 緑川克美: “全反射型フリンジ分解自己相関計”, 第 48 回応用物理学関係連合講演会, 東京, 3 月 (2001).
- 緑川克美: “フェムト秒レーザー加工の現状と将来”, 第 5 回「光工学研究会」講演会, (福井県産業振興財団), 福井, 3 月 (2001).
- 小林徹, 倉田(西村)美月, 門叶冬樹, 松尾由賀利, 河合純, 緑川克美, 谷畑勇夫, 林崎良英: “フェムト秒レーザーを

用いた生体高分子の原子イオン化と質量分析”, 日本化学会第 79 春季年会, 神戸, 3 月 (2001).

熊谷寛, 浅川雄一, 緑川克美, 小原實: “シリコン原子レーザー冷却用全固体単一縦モード CW コヒーレント深紫外光源の開発”, 日本物理学会第 56 回年次大会, 八王子, 3 月 (2001).

石川顕一, Blenski T.: “高強度レーザー場中での分子の電離・解離の Particle-in-Cell シミュレーション”, 日本物理学会第 56 回年次大会, 八王子, 3 月 (2001).

Research Subjects and Members of Laser Technology Laboratory

1. Femtosecond High-Intensity Laser Technology
2. Generation of Coherent Soft-X-Ray
3. Generation and Measurement of Subfemtosecond Pulses
4. Novel Laser Material Processing

Head

Dr. Katsumi MIDORIKAWA

Members

Dr. Akira SUDA
Dr. Koji SUGIOKA
Dr. Hiroshi KUMAGAI
Dr. Yutaka NAGATA
Dr. Toshimitu AKANE*
Dr. Sung Hak CHO*
Dr. Jiro ITATANI*

Dr. Hiroyuki KAWANO*

* Special Postdoctoral Researcher

Visiting Members

Dr. J. J. DUBOWSKI (NRC, Canada)
Prof. Mitunobu MIYAGI (Tohoku Univ.)
Prof. Keigo NAGASAKA (Fac. Sci., Sci. Univ. Tokyo)
Dr. Muhammad NURHUDA (Brawijaya Univ., Indonesia)
Prof. Minoru OBARA (Fac. Sci. Technol., Keio Univ.)
Mr. Kotaro OBATA (Fac. Eng., Tokyo Denki Univ.)
Dr. Schlomo RUSCHIN (Tel-Aviv Univ., Israel)
Dr. Shon NGUYAN HONG (Inst. Nucl. Sci. Technol., Vietnam)
Mr. Yuusuke TAMAKI (Fac. Sci. Technol., Keio Univ.)
Prof. Koichi TOYODA (Fac. Sci., Sci. Univ. Tokyo)
Dr. Pengqian WANG

Trainees

Mr. Hidehiko ASAHI (Fac. Sci. Technol., Keio Univ.)
Mr. Chihiro NAGURA (Fac. Sci. Technol., Keio Univ.)
Mr. Yuichi ASAKAWA (Fac. Sci. Technol., Keio Univ.)
Ms. Tatsuya OTSUKA (Fac. Sci. Technol., Keio Univ.)
Mr. Kosuke SHIMIZU
Ms. Naoko AOKI
Mr. Soichiro UCHIKAWA
Ms. Satoko MATSUMOTO
Mr. Yu OISHI
Mr. Masatoshi HATAYAMA
Mr. Hiroyuki MASHIKO
Mr. Koichi WAKE