

令和 6 年 6 月 17 日現在

機関番号：82502

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H03750

研究課題名（和文）プラズマ軟X線レーザーの高出力化と先進微細造形技術の確立

研究課題名（英文）Development of advanced plasma soft x-ray laser and next generation nano-processing technology

研究代表者

ドン タンフン（DINH, THANH HUNG）

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・関西光量子科学研究所 量子応用光学研究部・主任研究員

研究者番号：20744808

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,700,000円

研究成果の概要（和文）：超短パルスX線レーザーを物質に集光すると、極微小な時間・空間スケールで電子系が非平衡状態に励起される。この特徴を生かし、従来の可視域レーザーでは加工が難しい半導体や誘電体などのワイドバンドギャップ材料の高品質加工を実証することに成功した。次世代ナノ加工技術を見据えた基盤研究を推進するため、高繰り返し・高強度レーザーを用いてプラズマX線レーザーや高次高調波発生などの小型・高機能X線光源を開発した。さらに、数値解析により、このようなX線レーザーと高出力可視レーザーを組み合わせることで、効率的で生産性の高い加工が可能になることが予測された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

極短パルスX線と物質との相互作用によって引き起こす超高速相転移現象は非常にダイナミックであり、固体物理、放射線化学、材料科学の分野において興味深いトピックである。この現象を解明することにより、材料の極微細加工の実現や新機能の創出につながることを期待されている。本研究課題は、従来、大型装置、出力の点で実用化に大きな障害となったX線レーザー開発を飛躍的に進歩させる技術である。大学の研究室レベルで汎用性の高い極短パルスX線レーザーが実現できれば、軟X線顕微鏡を用いた生体細胞観測や機能性材料の物性研究に寄与できる。

研究成果の概要（英文）：When ultrashort pulsed X-ray lasers are focused on a material, they excite the electronic system into a non-equilibrium state on extremely small time and space scales. Taking advantage of this characteristic, we have successfully demonstrated high-quality processing of wide band gap materials, such as semiconductors and dielectrics, which are difficult to process with conventional visible lasers. To promote fundamental research with a view to next-generation nano-fabrication technology, we have developed compact high-performance X-ray light sources, including plasma X-ray lasers and high-order harmonics generations, using high-repetition-rate, high-intensity lasers. Furthermore, our numerical analysis predicts that more efficient and high-throughput processing will be possible by combining such x-ray lasers with high power visible lasers.

研究分野：量子ビーム科学関連

キーワード：プラズマ軟X線レーザー レーザー加工 高強度レーザー

## 1. 研究開始当初の背景：

情報化社会の発展を支える半導体製造産業は微細なパターンを転写するリソグラフィ技術を量産製造の基盤としている。ウィズコロナの時代において Society5.0 に向けた取り組みが一気に加速し、人工知能 (AI) や情報技術 (IoT) の急速な進歩に不可欠な情報通信・処理機器の高性能化、すなわち、半導体集積回路の密度の向上がより求められている。光の波長を短くすればその集光サイズをより小さくすることができるという回折原理から、短波長利用によるさらなる高空間分解能化が期待される。そのため、産業界は可視、紫外光から波長 10 nm 程度、軟 X 線とも呼ばれる極端紫外線 (EUV) を用いたリソグラフィ (EUVL) へとシフトが始まっている。2019 年以降はスズのレーザー生成プラズマ (LPP) が発光する波長 13.5nm EUV 光源により量産製造を開始している。一方で、2030 年以降を見据えた次世代露光技術に用いる短波長光源・レジスト・光学素子などの検討は世界中で始まっている。

近年、レーザー光源の短波長化は著しく X 線領域まで短波長化が進展している。特に加速器技術を用いた X 線自由電子レーザー (XFEL) は、極短パルス (フェムト秒レベル) の短波長光 (数 10nm ~ 0.1nm) を放出しており、この光と物質との相互作用は固体物理学、放射線化学、材料科学の分野で興味深いテーマとなっている。超短パルス X 線レーザーを物質に集光すると、従来の可視域レーザーや LPP 光源などと根本的に違う点は、内核電子も含めて、極微小な時間・空間に電子が励起される非平衡状態が生じる点である。この特徴を生かして、EUVL 技術の低温・低密度プロセスと異なる、現像・エッチングなどの複雑な工程を大幅に簡略化可能な直接ナノ造形法が期待されている。この状況下で、次世代ナノ加工技術を実現するために、下記の重要な課題を解決しなければならない。

**【汎用性の高い短波長レーザー光源の必要性】** 超短パルス X 線と物質の相互作用への理解を深めるためには、継続的に研究を集中できる実験環境の整備が不可欠である。大学の研究室をはじめとした身近な施設に超短パルス X 線が利用できる環境が望まれており、超短パルス X 線光源のさらなる小型化・高度化研究が重要である。

**【超短パルス X 線を用いた次世代ナノ加工技術の学術的体系の構築】** 次世代のナノ加工技術には、原子・分子レベルで材料を加工できる量産技術が必要であり、この究極の技術につながる超短パルス X 線と物質の相互作用に関する学術的枠組みの確立が急務となっている。

本研究では、高強度レーザーと用いて EUV 高次高調波やプラズマ X 線レーザーなど超短パルス短波長光源の小型化・高出力化を図り、次世代ナノ加工技術の確立を目指す。

## 2. 研究の目的：

### **【高強度レーザー駆動による小型・高出力 X 線レーザーの開発】**

超短パルスレーザーと原子の非線形光学効果で発生する高次高調波は、原子内の電子運動も計測できるアト秒パルスを発生させることが可能である。一方、プラズマ X 線レーザーはパルス幅がフェムト秒領域にあるが、単色性と高出力を容易に得ることができる。高次高調波を種光 (シード) とし、プラズマ X 線レーザー媒質に入射すれば、高調波の時間空間コヒーレンスを維持したまま X 線レーザーを増幅させることができる。プラズマ X 線レーザーを小型・高度化するために、従来の平板ターゲットではなく構造付きターゲットを採用する。これにより、プラズマ衝突による膨張ロス効果を抑制し、エネルギー変換効率の向上が期待できる。さらに、10Hz 以上で長時間動作可能なテーブターゲット供給装置を用いることにより、レーザーの高平均出力化を実現する。これらの X 線光源の特性を活かすことができればユニークな微細加工が実現できると期待される。

### **【超短パルス X 線レーザーを用いたナノ加工の物理機構の解明】**

研究代表者らが超短パルス軟 X 線レーザーを用いて実施した表面加工試験では、シリコンやサファイヤなどのワイドバンドギャップ材料の加工閾値に近い照射フルエンスにおいて、光電離と衝突緩和により電子が一気に励起され、伝導電子の密度が固体密度に達することがわかった [T.-H. Dinh *et al.*, Communications Physics 2, 150 (2019)]。これらの電子の照射領域での集団運動が加工プロセスにどのような影響を与えるかを明らかにする。

### 3. 研究方法：

#### 【高効率プラズマ X 線レーザー発生】

斜入射励起法と構造付きターゲットにより高効率プラズマ X 線レーザーを発振させる。まず Nd:YAG レーザーを銀(Ag)やモリブデンターゲット(Mo)に直入射で線集光する。(プリパルス：波長 520 nm, パルス幅 10 ns, エネルギー~100 mJ)。これで、プリプラズマを発生させる(低温低密度プラズマ: Ni-like イオン基底状態を生成)。次にプリプラズマ発生領域に TiS メインパルス (0.7~2J, 2ps) をターゲットに対し 20°~45° 方向から線集光する。これにより Ni-like イオンの基底状態電子を一気に励起し(過渡的電子衝突励起法), プラズマ媒質に反転分布を発生させる(図1)。

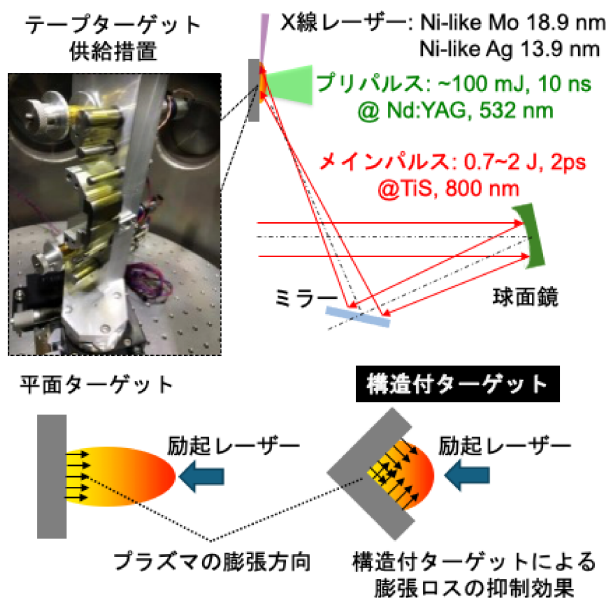


図1 高効率プラズマ X 線レーザー発生の概要と構造付きターゲットによる膨張ロスの抑制効果

#### 【EUV 高次高調波の高指向性・高出力化】

高次高調波は超短パルス高強度レーザーと希ガスとの非線形相互作用により発生する。本研究では、TiS レーザーと He ガスジェットを用いて EUV 高次高調波の発生を行う。長いガスジェット中で位相整合により、高調波を高指向性・高出力化する(図2)。

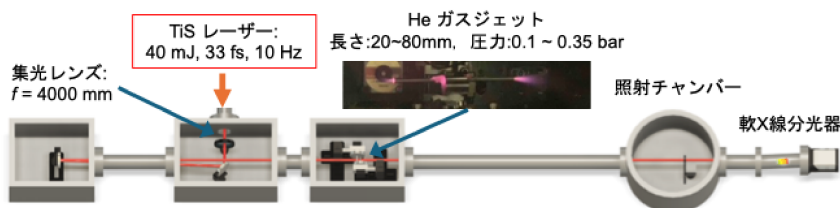


図2 EUV 高次高調波発生実験の概略

#### 【駆動レーザーの高安定化・高出力化】

プラズマ X 線レーザーや EUV 高次高調波発生に用いる TiS レーザーシステムを高安定化・高出力化する。TiS レーザーの出力を増大させるために、主増幅器の励起光源として波長 532nm, 繰返し周波数 10Hz, パルス幅~10ns, エネルギー1.6J 級の Q スイッチ YAG レーザーを 2 ビーム増設した。既存 4 ビームと合わせて、励起エネルギーは最大 7.5J まで増強可能である。また、レーザー出力やビームポインティングなどの安定性を向上させるため、レーザー装置専用空調システムを導入し、周辺環境の温度安定化を行う。

#### 【加工物理モデルの構築】

プラズマ X 線レーザーや SACLA XFEL 等を用いて、半導体や誘電体材料の表面加工試験を実施する。レーザー光路上にマスクを導入し、加工ビームの空間プロファイルを形成し、これを変更した際の加工痕の変化を表面計測により解析する。数値計算解析では、非線形方程式の数値解法を行い、波動関数の時間発展を求め、得られた各時刻の波動関数を実験データと比較する。

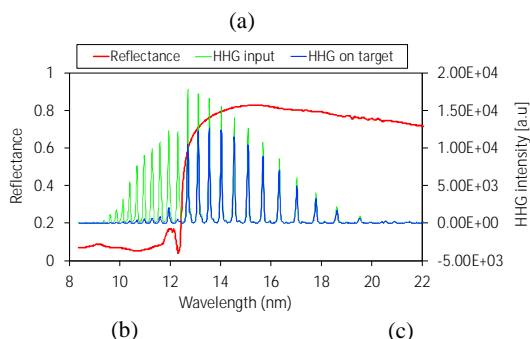
### 4. 研究成果：

#### 【高機能光源開発】

TiS レーザーの主増幅器は前置増幅の出力にあわせて5パス構成を採用した。励起レーザーの増設により、10Hzで増幅されたレーザー光は、出力3.2J, エネルギー取り出し効率43%以上達成している。パルス圧縮後、自己相関法を用いて評価したパルス幅は約40 fs(FWHM)であり、パルスエネルギーは2J以上に引き上げることができた。また、レーザー装置の専用

の空調システムを導入することによって、周辺の温度が安定化され、運転中の温度変化がRMS 0.04~0.07°Cまで制御でき、レーザーの長期安定性が格段に向上した。

高効率・高出力プラズマX線レーザーの開発においては、波長18.9nm MoプラズマX線レーザーを繰り返し周波数10Hzで発振させることに成功した。メインパルス (Ti:S: 1.2J, 2ps) とプリパルス (Nd:YAG: 300mJ, 10ns) の遅延を調整することにより、X線レーザーの出力が3倍以上増加し、パルスエネルギーがμJ級に達した。PICシミュレーションを用いて、ターゲット形状によるレーザー生成プラズマの加熱効率の解析を実施した。



EUV高次高調波発生においては、高圧圧力制御装置を導入し、圧力とガスジェット長さに対する発生効率の依存性を調べた。長さ80 mmガスジェット (圧力0.25bar) によるEUV高調波の出力が長さ20 mmガスジェット (圧力0.25 bar) の結果よりも大幅に向上し(57次では約11倍)、パルスエネルギーが3 nJ、ビームの発散角が0.4 mrad 以下まで達した。さらに、球面鏡(R=500mm)を用いてEUV高調波を線集光し、露光試験によりレジスト材料の感度評価や高分子材料の微細加工に成功した (図3)。

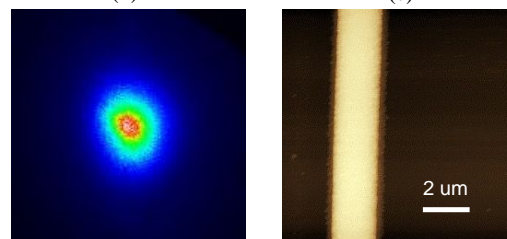


図3 EUV 高次高調波のスペクトル(a)と空間プロファイル(b)と線集光による高分子材料の微細加工試験 (c)

【非線形波動方程式による加工表面形状の再現】

パターンニング加工試験では、SACLAの軟X線自由電子レーザーを用いて実施した (図4)。照射強度と照射ショット数の調整により、窒化シリコン (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) 表面に直径400nm穴を直接加工し、加工精度が12nmに上げることに成功した (図5)。また形成された穴のサイズはX線照射領域の1/4のサイズであった。この結果から加工プロセスは照射領域内の電子の集団運動によって支配されていると予測される。

波動光学計算による SXFELの照射空間パターン intensity

Si表面に形成された照射痕

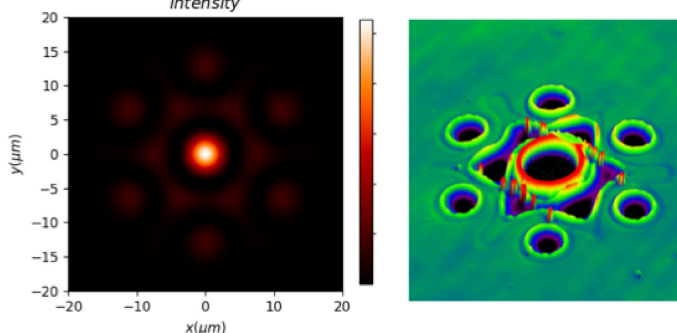
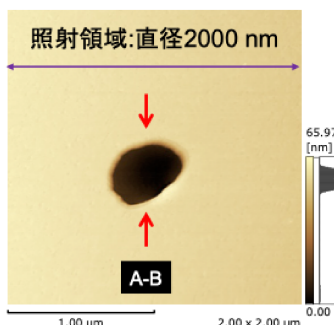


図4 SACLA 軟 X 線自由電子レーザーを用いたパターンニング加工の実施例

シリコン表面に波長10.3nm、パルス幅~70fs SXFELを照射すると、シングルショット加工閾値より少し高い照射強度領域 (1.5~3倍) では、スパイク状やリング状

(a) 極微細穴掘り加工例



(b) 穴のA-B断面プロファイル

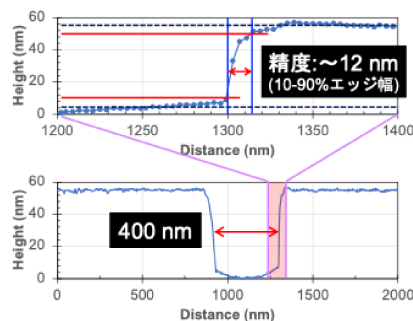


図5 パターンニング加工による極微細穴掘り加工の実施例

の構造が現れることを発見した。フーリエスペクトルを用いた非線形シュレーディンガー方程式の解法により、実験で見られたスパイク状、リング状の構造が生成される条件を見出した(図6)。理論計算によるアブレーション表面の解析については、これまでも国内外で行われてきた。しかし、前述したスパイク状やリング状の特異な形状は、流体方程式といった従来の理論計算では説明できていない[Tsibidis et al. Phys. Rev. B 86, 115316 (2012)]。本研究課題をさらに進めることにより、信頼性の高い理論モデルを構築できれば、レーザー加工における表面形状の理論予測が可能になる。

#### 【X線・IRレーザーを用いた2色照射加工の計算モデルの構築】

2色レーザー照射による相乗効果を調べるために、シリコン表面のレーザー加工効率の電子温度依存性に関する第一原理計算を実施した。超短パルスX線レーザーで励起すると電子系温度が上昇し、さらにその領域にIRレーザーを入射すると単一光子吸収量が増加し加工が容易になることが明らかになった。

本研究では、次世代ナノ加工技術を見据えた基盤研究を推進するため、高繰り返し・高強度レーザーを用いてプラズマ X 線レーザーや高次高調波発生などの小型・高機能 X 線光源を開発した。SACLA SXFEL を用いて、ワイドバンドギャップの高品質な加工を実証し、超短パルス軟 X 線レーザー加工の可能性を示した。さらに、X 線レーザーと高出力可視レーザーを組み合わせることで、より効率的で生産性の高い加工が可能となり、産業応用につながることを期待できる。

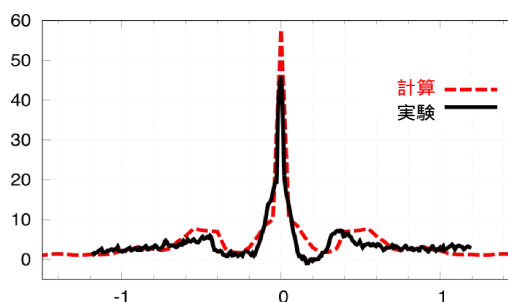


図6 非線形シュレーディンガー方程式による加工表面形状の再現(実験:シリコンの断面、計算:非線型方程式の爆発解)

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 9件 / うち国際共著 3件 / うちオープンアクセス 9件）

1. 著者名 Makarov Sergey, Grigoryev Sergey, Inogamov Nail, Filippov Evgeny, Pikuz Tatiana, Ozaki Norimasa, Ishino Masahiko, Nishikino Masaharu, Dinh Thanh-Hung, Kawachi Tetsuya, . . . , Pikuz Sergey	4. 巻 31
2. 論文標題 Damage threshold of LiF crystal irradiated by femtosecond hard XFEL pulse sequence	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 26383 ~ 26397
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.486868	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Seres Jozsef, Seres Enikoe, Serrat Carles, Dinh Thanh-Hung, Hasegawa Noboru, Ishino Masahiko, Nishikino Masaharu, Namba Shinichi	4. 巻 11
2. 論文標題 Spectral Shift and Split of Harmonic Lines in Propagation Affected High Harmonic Generation in a Long-Interaction Gas Tube	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Atoms	6. 最初と最後の頁 150 - 1 ~ 10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/atoms11120150	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Mikami Katsuhiro, Ishino Masahiko, Motoyama Hiroto, Dinh Thanh-Hung, Yokomae Shunya, Yamaguchi Gota, Egawa Satoru, Sakaue Kazuyuki, Mimura Hidekazu, Higashiguchi Takeshi, Kubota Yuya, Owada Shigeki, Iwasaki Atsushi, Inubushi Yuichi, Nishikino Masaharu	4. 巻 48
2. 論文標題 Sub-nanometer scale depth patterning on sapphire crystal by femtosecond soft x-ray laser pulse irradiation	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Optics Letters	6. 最初と最後の頁 5041 ~ 5044
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/ol.501589	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kojima Sadaoki, Miyatake Tatsuhiko, Sakaki Hironao, Kuroki Hiroyoshi, Shimizu Yusuke, Harada Hisanori, Inoue Norihiro, Dinh Thanh-Hung, Hata Masayasu, Hasegawa Noboru, Mori Michiaki, Ishino Masahiko, Nishiuchi Mamiko, Kondo Kotaro, Nishikino Masaharu, Kando Masaki, Shirai Toshiyuki, Kondo Kiminori	4. 巻 8
2. 論文標題 Induction heating for desorption of surface contamination for high-repetition laser-driven carbon-ion acceleration	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Matter and Radiation at Extremes	6. 最初と最後の頁 054002-1 ~ 7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0153578	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Masahiko Ishino, Katsuhiro Mikami, Thanh-Hung Dinh, Masaharu Nishikino	4. 巻 2024
2. 論文標題 Ablation study using soft x-ray laser	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Photonics Review	6. 最初と最後の頁 240202-1 ~ 4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11470/photo.240202	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Namba Shinichi, Wang Jiahao, Ohiro Hikari, Zhang Jiawei, Kishimoto Maki, Yamasaki Kotaro, Hasegawa Noboru, Dinh Thanhung, Ishino Masahiko, Higashiguchi Takeshi, Nishikino Masaharu	4. 巻 10
2. 論文標題 Enhancement of Gain Coefficient of Li-Like Ion 3d-4f Soft X-ray Laser Oscillation by a Single Resonator	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Atoms	6. 最初と最後の頁 128 ~ 128
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/atoms10040128	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 石野 雅彦, 三上 勝大, タンフン ゼン, 錦野 将元	4. 巻 8
2. 論文標題 軟X線レーザーによるアブレーション研究	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 フォトニクスニュース	6. 最初と最後の頁 83-87
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Seres J., Seres E., Serrat C., Dinh T. H., Hasegawa N., Ishino M., Nishikino M., Nakano K., Namba S.	4. 巻 39
2. 論文標題 Nonlinear propagation effect in x-ray parametric amplification during high harmonic generation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of the Optical Society of America B	6. 最初と最後の頁 1263 ~ 1271
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/JOSAB.454902	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Shibuya Tatsunori, Sakae Kazuyuki, Ogawa Hiroshi, Satoh Daisuke, Dinh Thanh-Hung, Ishino Masahiko, Tanaka Masahito, Washio Masakazu, Higashiguchi Takeshi, Nishikino Masaharu, Kon Akira, Kubota Yuya, Inubushi Yuichi, Owada Shigeki, Kobayashi Yohei, Kuroda Ryunosuke	4. 巻 29
2. 論文標題 Independent contribution of optical attenuation length in ultrafast laser-induced structural change	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 33121 ~ 33133
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.432130	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Okamoto Kazumasa, Kawai Shunpei, Ikari Yuta, Hori Shigeo, Konda Akihiro, Ueno Koki, Arai Yohei, Ishino Masahiko, Dinh Thanh-Hung, Nishikino Masaharu, Kon Akira, Owada Shigeki, Inubushi Yuichi, Kinoshita Hiroo, Kozawa Takahiro	4. 巻 14
2. 論文標題 Dependence of dose rate on the sensitivity of the resist under ultra-high flux extreme ultraviolet (EUV) pulse irradiation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 066502 ~ 066502
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/abfca3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hosaka Yuji, Yamamoto Hiroki, Ishino Masahiko, Dinh Thanh-Hung, Nishikino Masaharu, Kon Akira, Owada Shigeki, Inubushi Yuichi, Kubota Yuya, Maekawa Yasunari	4. 巻 34
2. 論文標題 Study on Irradiation Effects by Femtosecond-pulsed Extreme Ultraviolet in Resist Materials	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Photopolymer Science and Technology	6. 最初と最後の頁 95 ~ 98
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2494/photopolymer.34.95	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ishino Masahiko, Dinh Thanh-Hung, Mikami Katsuhiro, Hasegawa Noboru, Nishikino Masaharu	4. 巻 11886
2. 論文標題 Short pulse soft x-ray laser ablation research	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of SPIE	6. 最初と最後の頁 118860R-1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2591909	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -



1. 著者名 Ishino Masahiko, Thanhhung Dinh, Hasegawa Noboru, Nishikino Masaharu, Sakaue Kazuyuki, Higashiguchi Takeshi, Hatano Tasashi	4. 巻 #38
2. 論文標題 Calibration of Mo/Si Multilayer Beam-splitter for Soft X-Ray Laser Beamline	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Photon Factory Activity Report 2020	6. 最初と最後の頁 106-1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計15件 (うち招待講演 12件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 Thanh-Hung Dinh
2. 発表標題 Development of a compact 100-TW-class laser for energetic quantum beam generation toward practical applications
3. 学会等名 The 18th International Conference on X-Ray Lasers (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Ishino Masahiko, Thanh-Hung Dinh
2. 発表標題 Soft x-ray laser ablation study and development of coherent x-ray sources for surface processing
3. 学会等名 The 18th International Conference on X-Ray Lasers (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Thanh-Hung Dinh, Masahiko Ishino, Noboru Hasegawa, Yoshiteru Yonetani, Masayasu Hata, Masaharu Nishikino
2. 発表標題 Study on initial process of femtosecond soft x-ray laser ablation
3. 学会等名 The 12th Asia-Pacific Laser Symposium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hata Masayasu, Kojima Sadaoki, Miyatake Tatsuhiko, Dinh Thanh-Hung, Kondo Kotaro, Hasegawa Noboru, Ishino Masahiko, Mori Michiaki, Sakaki Hironao, Nishiuchi Mamiko, Kon Akira, Nishikino Masaharu, Kando Masaki, Shirai Toshiyuki, Kondo Kiminori
2. 発表標題 Estimation of laser parameters for generating enough number of energetic heavy ions for applying as the injector of the next generation heavy ion synchrotron accelerator
3. 学会等名 7th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Thanh-Hung Dinh, Shinichi Namba, Hiroki Yamamoto, Noboru Hasegawa, Masahiko Ishino, Masaharu Nishikino
2. 発表標題 Ultrafast laser-driven extreme-ultraviolet sources for applications to advanced nanolithography
3. 学会等名 The 13th Advanced Lasers and Photon Sources (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Ishino Masahiko
2. 発表標題 Soft X-Ray Laser Ablation Toward to Nanometer-Scale Depth Surface Patterning
3. 学会等名 The 13th Advanced Lasers and Photon Sources (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Thanh-Hung Dinh
2. 発表標題 Challenge of Using Ultrafast Short-wavelength Lasers in Advanced Nano-processing
3. 学会等名 SACLA Users' Meeting 2024
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 タンフン ズン
2. 発表標題 超短パルス軟X線レーザーによる加工メカニズム
3. 学会等名 日本光学会 X線・EUV結像光学研究グループ 第2回研究会「2光子リソグラフィーの最前線」(招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Thanh-Hung Dinh
2. 発表標題 Research on micromachining using ultrashort pulses of ionizing radiation
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第43回年次大会(招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 石野 雅彦, 保坂 勇志, タンフン ズン, 山本 洋揮
2. 発表標題 超短パルス軟X線レーザーによるアブレーション研究 感光性樹脂材料の感度評価研究への応用
3. 学会等名 第71回高分子討論会(招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yamamoto Hiroki, Hosaka Yuji, Yoshimura Kimio, Ishino Masahiko, Thanh-Hung Dinh, Nishikino Masaharu, Maekawa Yasunari
2. 発表標題 Recent Research activity for EUV Lithography at QST
3. 学会等名 The 39th International Conference of Photopolymer Science and Technology 2022(招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shinichi Namba, J. Seres, E. Seres, C. Serrat, Thanhhung Dinh, Hasegawa Noboru, Ishino Masahiko, Yamamoto Hiroki, Nishikino Masaharu, Kawachi Tetsuya
2. 発表標題 Enhancement of high-order harmonics radiations around 13.5 nm by a long-interaction gas tube and its application to development of photoresist materials
3. 学会等名 6th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics, Division of Plasma Physics, Association of Asia Pacific Physical Societies (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 石野雅彦
2. 発表標題 軟X線レーザーによるアブレーション研究
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yamamoto Hiroki, Hosaka Yuji, Yoshimura Kimio, Ishino Masahiko, Thanhhung Dinh, Nishikino Masaharu, Maekawa Yasunari
2. 発表標題 Recent Research Activity for EUV lithography at QST
3. 学会等名 RadTech Asia 2022 Japan (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Thanhhung Dinh
2. 発表標題 Material Processing by Ultrashort EUV Pulses: Fundamentals and Prospects
3. 学会等名 第96回レーザー加工学会講演会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計2件

産業財産権の名称 レジスト材料、レジストパターンの製造方法、及び、レジストパターン	発明者 吉村公男, タンフン ヂン, 石野雅彦, 錦 野将元...	権利者 量研
産業財産権の種類、番号 特許、特願2022-67860	出願年 2022年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 表面造形方法及び表面造形装置	発明者 石野雅彦, チンタン フン, 錦野将元, 三 上勝大	権利者 量研
産業財産権の種類、番号 特許、特願2023- 41379	出願年 2023年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

KPSI ANNUAL REPORT 2020 <a href="https://www.qst.go.jp/uploaded/attachment/30475.pdf">https://www.qst.go.jp/uploaded/attachment/30475.pdf</a>
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	長谷川 登  (Hasegawa Noboru)  (50360409)	国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・関西量子科学研究所 量子応用光学研究部・主幹研究員   (82502)	
研究分担者	錦野 将元  (Nishikino Masaharu)  (70370450)	国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・本部 経営企画部・上席研究員   (82502)	
研究分担者	石野 雅彦  (Ishino Masahiko)  (80360410)	国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・関西量子科学研究所 量子応用光学研究部・上席研究員   (82502)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	米谷 佳晃 (Yonetani Yoshiteru)  (80399419)	国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・関西光子科学研究所 量子応用光学研究部・主幹研究員  (82502)	
研究分担者	畑 昌育 (Hata Masayasu)  (60712429)	国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・関西光子科学研究所 量子応用光学研究部・主任研究員  (82502)	

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	山田 俊介 (Yamada Shunsuke)  (40940028)	国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・関西光子科学研究所・主任研究員  (82502)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
オーストリア	Vienna University of Technology			
スペイン	Polytechnic University of Catalonia			