「新機能創成に向けた光・光量子科学技術」 平成18年度採択研究代表者

H22 年度 実績報告

兒玉 了祐

大阪大学大学院工学研究科・教授

高エネルギー密度プラズマフォトニクス

§1. 研究実施の概要

研究のねらい

高エネルギー密度プラズマフォトニクスという新しい概念のもとで、従来取り扱うことが困難であった 桁違いに高い強度の光や高エネルギー密度の粒子ビームを直接制御できる新しい光機能性素子 の可能性を探求している。そのために、高エネルギー密度プラズマをコヒーレントに制御したり、規 則性を維持した過渡的な状態を利用する。このようなプラズマをコヒーレント高エネルギー密度プラ ズマとして位置づけ、新概念のプラズマフォトニックデバイスの開発を行っている。超高強度レーザ ーによる高エネルギー密度プラズマデバイス開発は、単に新技術の開拓だけではなく、わが国オリ ジナルなプラズマフォトニクスというレーザー光学、ビーム光学、プラズマ物理学、固体物理学の境 界領域の学問開拓も目指している。

研究の概要

超高強度レーザーを利用したプラズマフォトニックデバイスの実現を目指し、大阪大学、電気通信 大学、宇都宮大学が、それぞれの実績と技術をもとに有機的に連携協力した体制のもとで(1)高 エネルギー密度電子ビーム制御プラズマ、(2)光制御・光分散プラズマ、(3)電磁波発生プラズマ に関する研究を進めている。

研究進捗状況、

ほぼ計画通りであり、高エネルギー密度電子ビーム制御プラズマ、光制御・光分散プラズマ、電磁波発生プラズマを実現しデバイスとしての機能性を総合評価している段階にある。また国際強化支援策による海外装置利用により、一部、機能性評価は当初予定以上に進展をした。

研究成果、

高エネルギー密度電子ビーム制御プラズマ、光制御・光分散プラズマ、電磁波発生プラズマおよ びデバイスとしての機能性評価に関して以下の成果を得た。

[光制御・光分散プラズマと機能性評価]

・新しい集光プラズマミラーによる高強度集光特性と応用における効果の総合評価

- ・自己誘導プラズマファイバー特性
- ・高繰り返し対応可能なプラズマフォトニックデバイスを目指したプラズマ生成
- ・金属液体ターゲットを用いる高繰り返し動作可能なプラズマミラーの開発

・固体-プラズマ中間状態層の状態方程式データベース構築とそのモデル化 [電子ビーム制御プラズマと機能性評価]

・超高強度レーザー生成相対論電子ビーム集光プラズマの実証 [電磁波発生プラズマと機能性評価]

- ・レーザー誘起 MeV 電子によるスミスパーセル電磁波発生評価
- ・単電極レーザースパークからのテラヘルツ電磁波放射
- ・フラッシュ電離によるテラヘルツ電磁波の周波数上昇
- ・2波長レーザー励起プラズマによる高輝度テラヘルツ波発生

今後の見通し

本研究は、ほぼ計画通りに進んでおり、デバイスとしての性能評価を行う段階にきている。一部の 項目に関しては、既に海外でもその有効性が認められ、本研究で開発したデバイスを利用した応 用研究を実施している。今後、他の成果に関してもその成果を利用した応用研究を同時に実施す ることでデバイスとしての最終評価を行うと同時にこれらを利用した新たな展開の可能性を検討す る予定である。

§2. 研究実施体制

- (1)「兒玉」グループ
 - ①研究分担グループ長:兒玉 了祐 (大阪大学、教授)
 - ②研究項目
 - ・高エネルギー密度電子ビーム制御プラズマデバイス、
 - ・光制御・光分散プラズマデバイス
 - ・電磁波発生プラズマデバイス
- (2)「米田」グループ
 - ①研究分担グループ長:米田 仁紀 (電気通信大学、教授)
 - ②研究項目
 - ・光分散プラズマデバイスの研究
 - ・繰り返し動作分散プラズマデバイスの研究

(3)「湯上」グループ

① 研究分担グループ長:湯上 登 (宇都宮大学、教授)

2研究項目

・テラヘルツ波増幅プラズマデバイスの研究

・繰り返しプラズマミラーの研究

§3. 研究実施内容

(文中に番号がある場合は(4-1)に対応する)

「兒玉」グループ

①研究のねらい

高エネルギー密度プラズマフォトニクスという新しい概念のもとで、従来取り扱うことが困難で あった桁違いに高い強度の光や高エネルギー密度の粒子ビームを直接制御できる新しい光 機能性素子の可能性を探求する。そのために、コヒーレント高エネルギー密度プラズマによる 電子ビーム制御プラズマデバイス、光制御・光分散プラズマデバイス、電磁波発生プラズマデ バイスを開発する。さらにこれらのデバイスを応用した統合的な実験研究を行い、その有効性 を総合的に評価する。

②研究実施方法

高強度レーザーを利用したプラズマフォトニックデバイスの実現を目指し、他グループと連携 取りながら総合的にこれらの研究を推進する。大阪大学既存の 10TW 高出力レーザーシステ ムを基幹装置として整備しこれを供用する。さらにマイクロパルスパワーや計測器を他グルー プと共同で開発することで効率的に研究を進める。また国際化支援事業により海外の装置も 有効に利用する。

③当初の研究計画(全体研究計画書)に対する現在の研究進捗状況(§2.と関連します)

超高強度レーザーを利用したプラズマフォトニックデバイスの実現を目指した本研究計画は、 3つのフェーズからなる。

第3フェーズにある現在の研究進捗状況は、ほぼ計画通りであり、高エネルギー密度電子ビーム制御プラズマ、光制御・光分散プラズマ、電磁波発生プラズマを実現しデバイスとしての機能性を応用を含め総合評価している。また国際化支援事業による海外装置利用により、プラズマミラーによる速い集光光学系の機能性評価は当初予定以上に進展をした。以下、各項目における進捗状況を記す。

[光制御プラズマと機能性評価]

・新しい集光プラズマミラー特性と応用における効果の評価

(主用論文: Opt. Lett. 35 2314 (2010))

ワーキングディスタンスの制約やプラズマデブリの問題から光学系のF値に制限があった超高強度 レーザーの集光光学系を、新しく考案したプラズマ集光ミラーの幾何学配置で大きく改善できるこ とを前年度、世界に先駆けて実証した。従来の集光強度の10倍以上高い集光強度を実現するができた。これにより発生する高エネルギー粒子の結果と2次元数値解析、1次元モデルなどの理論 モデルとの比較を行った。スポット径を極端に小さくすることでこれまで見られなかった2次元効果 による加速粒子エネルギーの低減や磁場効果による閉じ込め効果などが現れることが明らかになった。



図1. プラズマ集光ミラーで得られた高エネルギープロトン粒子のエネルギーのレーザー エネルギー依存性と2次元粒子シミュレーションの結果

さらに本、プラズマ集光ミラーの応用として 50keV に達する高次高調波発生や真空の非線 形効果の検証実験への適用性について評価を行った。簡単なモデル計算により本集光ミラー を用いることで従来に比べ3ケタ程度低いレーザー強度で真空の非線形効果を検証できる ことが分かった。また高次高調波に関しては、30 J/300 fs のレーザーで集光強度 7x10²⁰ W cm⁻² が期待でき、コヒーレントな 50keV 高次高調波で 1 μ J (>10¹¹ photons/str)放射でき る可能性がある。次年度の実験へ向けての実験準備を始めた。



図2. プラズマミラー集光による高次高調波発生実験配置図

・自己誘導プラズマファイバー特性

(主用論文: Nature Phys.6, 1010-1016 (2010))

高強度レーザーとプラズマの相互作用でプラズマ中の屈折率が非線形に変化することでプ

ラズマ中に導波路(ファイバー)を作ることができる。従来、単独で存在するプラズマ導波 路に関しては調べられてきたが、複数のプラズマ導波路が同じプラズマ中に存在するモード でのダイナミックスに関しては殆ど調べられていなかった。ところが後述するテラヘルツ波 発生プラズマなどのようにコヒーレンと結合を目的に複数のレーザー導波路を形成させる 場合、導波路自体のダイナミックスを理解することは必要不可欠である。我々が独自に開発 した超高速(数 10psec)のサンプリングカメラにより複数ビームによるプラズマ導波路の ダイナミックスを初めて観測することに成功した。



図3. 2ビームレーザーによるプラズマ導波路のダイナミック計測結果。2つの導波路が時間とともに 1つになるしきい値がプラズマ密度に比例する。

[電磁波発生プラズマと機能性評価]

・レーザー誘起 MeV 電子による高輝度テラヘルツ波発生

(主用論文:)

超高強度レーザーと固体との相互作用で発生する高エネルギー密度電子ビームを周期構造(グレ ーテイング)がある金属ターゲット中に伝搬させることで、高輝度の擬似スミスパーセル電磁波放射 をこれまで実験的に観測している。これは周期構造を変えることで波長を可変でき、強いテラヘル ツ波放射を可能にする方法の1つになる。今年度はさらにこのような周期構造プラズマデバイスを 伝搬する高エネルギー密度電子が自己生成電場によりガイドされつつ導体に閉じ込められること でよりエネルギー密度の高い電子量が可能になることが明らかになった。さらに電磁放射を数値シ ミュレーションで評価し10TW 級テーブルトップ超高強度レーザーでGW 級の指向性を持ったテラ ヘルツ波発生が、期待できることが分かった。



図4. レーザー誘起電子ビームによる疑似スミスパーセル放射の原理とグレーテイング構造を持っ た導体近辺での電子ビームガイドの働きを誘起する自己生成電場と磁場



図5. グレーテイング周期を変化させたた時のレーザー誘起電子ビームによる疑似スミス パーセル放射

・2波長レーザー励起プラズマによる高輝度テラヘルツ波発生

超高強度2波長レーザーによる非対称周期性電離プラズマによるテラヘルツ電磁波発生に適した 双極子列の生成を行いテラヘルツ波の発生・増幅の可能性を評価する。昨年、50fs の基本波と第 2高調波を同軸上に集光し、2波長集光収差を利用した位相変調により電子を加速することでテラ ヘルツ域の電磁波を発生させることに成功した。今年度は、これをもとに2つのコヒーレンと結合に 関する実験を行い将来のテラヘルツ波増幅デバイスの可能性を実験的に明らかにした。波長程度 もしくはそれ以下の距離で横方向に離れた場所にこのテラヘルツ発生プラズマを2つ生成し、横方 向のコヒーレンと結合を行った。その結果波長以下の距離離した場合、2つの光源からの照射強度 は、2倍ではなくほぼ4倍となり2つのプラズマ間で電磁波の結合が起こったことを示す実験結果が 得られた。もう1つは、2つの媒質を軸方向に2つ配置する縦方向のコヒーレント結合に関する実験 を行った。図6は、縦方向に結合した場合、テラヘルツ波強度が10倍に強くなったことを示す実験 結果である。これはプラズマを用いたテラヘルツ波増幅を示唆する初めての実験結果である。



図7. テラヘルツ波発生プラズマのコヒーレト結合に関する実験結果。

本研究で開発した集光プラズマミラーは当初、レーザーの集光強度を上げることだけを目的に開 発された。しかしその応用の1つとして真空の非線形光学効果に関してその有効性を評価した結 果、単にレーザー強度が上がるだけではなくローレンツ不変量が集光のコーンアングルに大きく依 存しており従来考えられていたより3ケタ以上低いレーザーパワーで真空非線形効果を実証できる 可能性が出てきた。これにより現時点で人類が実現できるレーザーパワーと本プラズ集光ミラーの 応用で真空の非線形光学に関する研究が現実的に視野に入るようになってきた。

「米田」グループ

(1)目的:

本研究機関では、コヒーレント高エネルギー密度プラズマによる光分散プラズマデバイスを開発する。さらに新たな物性を持つ固体ープラズマ中間体(warm dense matter)の基礎特性 として、その複素誘電率、状態方程式、金属の臨界点のデータベースを構築し、プラズマフォ トニックデバイス開発の基礎をおさえる。具体的には、WDM 領域の基礎データベースを構築 し、得られた詳細物理モデルなどから具体的なプラズマフォトニクスデバイスを設計、原理実証 実験を行なう。今年度は、引き続き詳細モデル、データベースの継続に加え、新しい WDM の 可能性を提案、それによる新しい光デバイスの提案と WDM 研究で最も重要とされる温度計 測の新しい手法の開拓を行った。

(2)方法

基本となるWDMの基礎特性を得る手法としては、超短パルスレーザーや重イオンビーム、高速放

電などで得られる状態を白色超短パルスプローブにより計測する手法をとっている。白色プローブ 光の計測手段として、広帯域シングルショットエリプソメトリを用い、高精度の光学定数、誘電応答 関数を決定できるシステムを用いている。

今年度は、これに加え、この WDM 研究の中で最も困難であると思われている温度測定手法について、新たな開発を行っている。具体的には、フェムト秒の時間分解能を持つパイロメータとポンプ ・プローブ計測によるエリプソメトリを組み合わせ、偏光反射率、偏光放射率を時間、波長分解で収 得するシステムを構築していく。

(3)結果

(a) 新しい温度評価システム

物質表面からの発光は、その複素誘電率によって決定される。輻射強度は温度による関数となる が、完全黒体を仮定できることは少ないので、実験上は大きなエラーを生むことになっている。また、 輻射率と呼ばれる不明なパラメータも存在するので、任意性がさらに高くなる。これらを実験的に決 定していくためには、輻射の偏光特性と物質の反射(もしくは透過)特性を同時に評価する必要が あるが、WDM の表面の変化時間が早いために、前者の計測ができなかった。また、同時刻の輻 射、反射偏光特性をとることは、計測システム的にも複雑で、行われてこなかった。ここでは、これま



でに開発してきた白色光プローブエリプソ計測に、 フェムト秒ストリークカメラで輻射の偏光分光観測 をするシステムを組み上げ、観測光学系の分解 能を10µm程度にし、100Hz程度の高繰り返し でデータが得られるシステムを構築した。その原 理図を下図に示している。分光方向の分解能と しては10チャンネル程度、時間方向には 500fs の分解能が取れることが達成できている。

一方、温度測定では、輻射、反射特性がよく分かっている物質を参照データとして用いることが 優位であるが、WDM の領域では、このような物質は規定できていないし、提案もされていなか った。そこで、この標準となる物質を決定するために、高融点金属の輻射偏光特性を加熱が実 験的に定義しやすい電流加熱法を用いて評価した。その実験装置の1例を以下にします。この 観測の中で、我々はMo-Re 合金が温度によって偏光輻射率を大きく変化させることを観測した。 (下右図)

8



輻射特性は、複素誘電率によって決定され、その複素誘電率は、可視域の場合、紫外での原子分極率の共鳴状態と、自由電子の密度で決定することが知られているが、これらは、エネルギー的に見て数eVの温度が変化には必要なはずであり、1eV以下で変化が起きる物質はこれまで報告されなかった。もし、この特性が数 eV の領域まで拡張できれば、WDM 研究にとって



参照物質が見つかったことになり、大きな進展 が期待される。そこで、現在、米国バークレー 研究所でより高温でのパルス加熱実験と重イ オン照射による加熱実験を準備している。パル ス加熱による数 eV の観測でも大きな変化が観 測されており、参照物質になる可能性が高い。 (左図で緑(p)と青(s)の差が大きいほど偏光 変化が大きいことを示している。

(b) 高繰り返し対応可能なプラズマフォトニックデバイスの開発

これまで、水銀などの金属・非金属転移を用いた反射率の高速変化を使うプラズマフォトニクス を提案、原理実証を行ってきた。この動作特性を明らかにするために、水銀の複素光学定数を 使って水銀 Warm dense matter 内での光波のシミュレーションモデルを構築した。その結果 の一例を下図に挙げている。



この図で、水銀表面のWDM層の厚みによって反射率が大きく変化していることが説明できる。 一方、この解析により、水銀WDMの反射には位相がスケール長により大きく変化することが分 かった。(上図の100nm前後)。この時の光電場の分布を見ると上右図のようになっている金属 -非金属転移にともなう光学定数の複雑な変化に対応していることが分かった。(上右図で n=k の点が金属・非金属転移点になる。)すなわちkとnの急峻な空間変化による場所での2つの反 射波が同時に存在することが可能性としてあり、強度変化だけでなく、位相を含めた複雑な反 射波を作ることができると思われる。そこで、詳細に入射強度を変化させてこのデバイスからの 反射波を周波数分解時間ゲート測定(FROG)で測定した結果、時間方向に縞が観測されるこ とがわかった。(下図)



このことは、100fs という時間内に2つの反射面をそのお互いの位相を変化させながら制御できた(強度により安定にこの縞は再現)ことになり、新たな金属・非金属転移を用いた WDM 反射 面利用の可能性を示したことになった。

「湯上」グループ

[テラヘルツ波増幅プラズマデバイスの研究] ・単電極レーザースパークからのテラヘルツ電磁波放射 (主用論文: submitted to Nature Photonics 2010) これまでレーザー生成ガスプラズマからのテラヘルツ電磁波のピーク周波数は 0.2 THz に制限 されており、レーザー強度やガス密度に依存していないことが観測されているが、モデルではプラ ズマ密度(つまりプラズマ周波数)に依存するものがほとんどであり、放射周波数について説明でき ないでいた.そこで、放射周波数が何に依存しているのかを明らかにするために、レーザーのパル ス幅の逆数に依存するであろうことをプラズマシースモデルより予測し、実験的に観測した.単電極 に最大電圧 10 kV,最大電流 10 A,繰り返し周波数 1 kHz のパルスパワー電源により高電圧を 印加し、レーザースパークによりテラヘルツ電磁波を発生させた.レーザーのパルス幅を 30 ~ 300 fs に変化させたところ、放射周波数はレーザーのパルス幅の逆数に依存する事が観測された.こ の結果は、DARC (DC to AC Radiation Converter)の最も簡単な構造に対応するものであり、 相対論的電離面の生成、プラズマ電流およびパルスパワー電源に必要な放電電流に関する知見 を与えるものである.現在、電極対を 7 対とする DARC 構造を作成し、中空ファイバーによる超短 パルスレーザーの長尺伝搬を組み合わせたテラヘルツ電磁波放射試験を行っている.この実験は 本年度末まで継続される.また、ガラス製の中空ファイバーがテラヘルツ電磁波の導波路としても 作用することが予備実験により明らかになっており、透過率および減衰係数も明らかになっている.



図1. 単電極レーザースパークの概念図と光学配置.



Pulse duration (fs)

図 2. 超短パルスレーザーのパルス幅が 30 fs のときのテラヘルツ電磁波の時間波形とスペクトル.およびスペクトルの中心周波数のレーザーパルス幅依存性.

・フラッシュ電離によるテラヘルツ電磁波の周波数上昇

(主用論文: submitted to Phys. Rev. Lett. 2010)

光伝導アンテナに限らず、レーザープラズマテラヘルツ光源などの放射スペクトルの中心周波数 は 0.2~1 THz 程度であり、周波数の利用率が制限されている. そこで、フラッシュ電離という原理 に基づくテラヘルツ電磁波の周波数上昇に関する原理実証実験を行っている. これは電磁波の周 辺の屈折率(または誘電率)が突然変化するとどうなるか、ということの実証実験でもあり、位相の時 間変化が周波数上昇を引き起こすことを意味するものでもある.数学的には初期値問題に相当する.この現象を引き起こすための概念図および実験配置を図3に示す.ボウタイ型光伝導アンテナによりピーク周波数 0.2 THz のテラヘルツ電磁波を発生させた.この種光を ZnSe 結晶内に集光照射し,テラヘルツ電磁波が ZnSe 結晶中を伝搬しているときに,超短パルスレーザー光(ポンプ光)により固体プラズマを生成した.このときのポンプ光の有無におけるテラヘルツ電磁波のスペクトルを図4に示す.



図 3. フラッシュ電離の概念図と光学配置.



図 4. フラッシュ電離による周波数上昇スペクトルとレーザー強度依存性.

・金属液体ターゲットを用いる高繰り返し動作可能なプラズマミラーの開発

超短パルス高強度レーザーを用いるプラズマフォトニクスデバイスの開発では、レーザーパルス が持つ予備パルスが呼びプラズマを生成してしまうため、主パルスとターゲットの相互作用を妨げ ることが多く、コヒーレント量子ビームの生成の妨げになっている.また、10~1000 Hz での高繰り返 し動作できるプラズマミラーは未だに開発されていない状況にある.そこで、液体金属を用いるプラ ズマミラーの開発を開始した.現在、真空容器内へのターゲット材料の設置まで進んだ.本年度末 までに、超短パルスレーザーの照射実験を行い、反射率、ビーム品質、時間波形、相対位相など を観測する予定である.

§4. 成果発表等

(4-1) 原著論文発表

●論文詳細情報

- M. Nakatsutsumi, A. Kon, S. Buffechoux, P. Audebert, J. Fuchs and R. Kodama, "Fast focusing of short-pulse lasers by innovative plasma optics toward extreme intensity", Optics Letters 35, No. 13, pp.2314-2316, (2010).
- (2) M. Nakatsutsumi, J-R. Marquès, P. Antici, N. Bourgeois, J. L. Feugeas, T. Lin, Ph. Nicolaï, L. Romagnani, R. Kodama, P. Audebert, J. Fuchs, "High-power laser delocalization in plasmas leading to long-range beam merging", Nature Physics 6, pp.1010-1016 (2010).
- (3) H. B. Zhuo, Z. L. Chen, W. Yu, Z. M. Sheng, Q. F. Hu, Z. Jin, and R. Kodama, "Quasimonoenergetic Proton Bunch Generation by Dual-Peaked Electrostatic-Field Acceleration in Foils Irradiated by an Intense Linearly Polarized Laser", Physical Review Letters 105(6), pp.065003-1-4 (2010).
- (4) M. Tampo, S. Awano, P. R. Bolton, K. Kondo, K. Mima, Y. Mori, H. Nakamura, M. Nakatsutsumi, R. B. Stephens, K. A. Tanaka, T. Tanimoto, T. Yabuuchi, and R. Kodama, "Correlation between laser accelerated MeV proton and electron beams using simple fluid model for target normal sheath acceleration", Physics of Plasmas 17, pp. 073110-07311-5 (2010).
- (5) Hideaki Habara, Guang Xu, Takahisa Jitsuno, Ryosuke Kodama, Kenji Suzuki, Kiyonobu Sawai, Kiminori Kondo, Noriaki Miyanaga, Kazuo A. Tanaka, Kunioki Mima, Michael C. Rushford, Jerald A. Britten, and Christopher P. J. Barty, "Pulse compression and beam focusing with segmented diffraction gratings in a high-power chirped-pulse amplification glass laser system", Optics Letters 35, 1783-1785 (2010).
- (6) Y. Inubushi, S. Morimoto, T. Tanaka, Z.L. Chen, Z. Jin, Y. Mizuta, H. Yoneda, J. Ishida, Y. Yamaguchi, M. Nagasono, M. Yabashi, A. Higashiya, T. Ishikawa, H. Kimura, H. Ohashi, and R. Kodama, "Plasma photonic devices with complex refractive index in EUV region", Journal of Physics 244, pp.022039-1-4 (2010).
- (7) A.Kon, M. Nakatsutsumi, S. Buffechoux, Z. L. Chen, J. Fuchs, Z.Jin, R. Kodama, "Geometrical optimization of an ellipsoidal plasma mirror toward tight focusing of ultra-intense laser pulse", Journal of Physics 244, pp. 032008-1-4 (2010).
- (8) K. Miyanishi, N. Ozaki, E. Brambrink, H. Wei, A. Benuzzi-Mounaix, A. Ravasio, A. Diziere, T. Vinci, M. Koenig, and R. Kodama, "EOS measurements of pressure

standard materials using laser-driven ramp compression technique", Journal of Physics 215, pp.012199-1-4 (2010).

- (9) Y. Inubushi, H. Yoneda, A. Higashiya, T. Ishikawa, H. Kimura, T. Kumagai, S. Morimoto, M. Nagasono, H. Ohashi, F. Sato, T. Tanaka, T. Togashi, K. Tono, M. yabashi, Y. Yamaguchi and R. Kodama ""Measurement of saturable absorption by intense vacuum ultraviolet free electron laser using fluorescent material", Review of Scientific Instruments 81, No. 3, pp. 036101 036101-3 (2010).
- (10) 犬伏 雄一,米田 仁紀,石川 哲也,大橋 治彦,木村 洋昭,熊谷 泰輔,佐藤 文哉, 田中 敏博,登野 健介,富樫 格,永園 充,東谷 篤志,森本 春助,矢橋 牧名,山口 裕 太,兒玉 了祐,"フェムト秒高強度極紫外自由電子レーザーによる金属の非線形透過現象 の観測", Rev Laser Eng. 38, 453 (2010).
- (11) 今 亮,中堤 基彰, Julien FUCHS, Sebastien BUFFECHOUX, Patrick AUDEBERT, Zheng Lin CHEN,犬伏 雄一,Jin ZHAN,兒玉 了祐,"回転楕円体プラズマミラーを用いた超高 強度レーザーの高開口数集光", Rev Laser Eng. 38, 784 (2010).
- (12) R. M. MORE, M. GOTO, F. GRAZIANI, P. NI and H. YONEDA, "Emission of Visible Light by Hot Dense Metals", Plasma and Fusion Research, Volume 5, S2007 (2010).
- (13) 米田仁紀、"EUV-FEL を用いた固体物質の非線形光学現象の研究", 放射光, vol.23, No.5, p.317 (2010)
- H. Kitamura, "Rate equation for intense core-level photoexcitation and relaxation in metals", J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 43, 115601 (2010)
- (15) Takeshi Higashiguchi, Hiromitsu Terauchi, Noboru Yugami, Toyohiko Yatagai, Wataru Sasaki, Rebekah D'Arcy, Padraig Dunne, and Gerry O'Sullivan, "Characteristics of extreme ultraviolet emission from a discharge-produced potassium plasma for surface morphology application", Applied Physics Letters, Vol. 96, pp. 131505-1-131505-3, 2010
- (16) Takeshi Higashiguchi, Masafumi Hikida, Hiromitsu Terauchi, Jin-xiang Bai, Takashi Kikuchi, Yezheng Tao, and Noboru Yugami, "Characterization of the plasma parameters of a capillary discharge-produced plasma channel waveguide to guide an intense laser pulse", Review of Scientific Instruments, Vol. 81, pp. 046109-1-046109-3, 2010
- (17) Takamitsu Otsuka, Hiromitsu Terauchi, Mami Yamaguchi, Takeshi Higashiguchi, Noboru Yugami, Toyohiko Yatagai, Padraig Dunne, and Gerry O'Sullivan, "Property of a hollow cathode discharge-produced microplasma extreme ultraviolet source with alkali metal vapor", Proceedings of European Physical Society (EPS 2010), P.2.230, 2010
- (18) Hiromitsu Terauchi, Mami Yamaguchi, Keisuke Kikuchi, Takamitsu Otsuka, Takeshi Higashiguchi, Noboru Yugami, Toyohiko Yatagai, Padraig Dunne, and Gerry O'Sullivan, "Compact extreme ultraviolet source by use of a discharge- produced potassium plasma for surface morphology application", Proceedings of SPIE, Vol. 7802, pp. 78020T-1-78020T-10,

2010

- (19) Takeshi Higashiguchi, Hiroaki Anno-Kashiwazaki, Takamitsu Otsuka, Noboru Yugami, and Ryosuke Kodama, "Terahertz radiation in an optical-field-induced ionization in air with a pulsed electrostatic field", Proceedings of The IRMMW-THz 2010, p. Th-P.40 (1-2), 2010
- (20) Takamitsu Otsuka, Fuminori Suzuki, Masahiro Nakata, Takeshi Higashiguchi, Noboru Yugami, and Ryosuke Kodama, "Experimental observation of frequency up conversion of terahertz using laser produced plasmas", Proceedings of The IRMMW-THz 2010, p. Th-P.41 (1-2), 2010
- (21) Takamitsu Otsuka, Deirdre Kilbane, John White, Takeshi Higashiguchi, Noboru Yugami, Toyohiko Yatagai, Weihua Jiang, Akira Endo, Padraig Dunn, and Gerry O'Sullivan, "Rare-earth plasma extreme ultraviolet sources at 6.5–6.7 nm", Applied Physics Letters, Vol. 97, pp. 111503-1-111503-3, 2010 [related to Nature Photonics 4, pp. 809-811 (2010) news & views]
- (22) Takamitsu Otsuka, Masashi Kudo, Shohei Sakai, Takeshi Higashiguchi, Noboru Yugami, Toyohiko Yatagai, and Ryosuke Kodama, "Propagation dynamics of an ultrashort, high energy laser pulse via self-modulation in gas medium with atmospheric pressure for laser compression", Journal of Physics: Conference Series Vol. 244 (Part 2), pp. 022055-1-022055-4, 2010
- (23) Hiromitsu Terauchi, Jin-xiang Bai, Takeshi Higashiguchi, Noboru Yugami, Toyohiko Yatagai, and Ryosuke Kodama, "Plasma parameters of a capillary discharge-produced plasma channel to guide an intense laser pulse", Journal of Physics: Conference Series Vol. 244 (Part 2), pp. 022068-1-022068-4, 2010
- Hiromitsu Terauchi, Takeshi Higashiguchi, Noboru Yugami, and Nadezhda A. Bobrova,
 "Plasma diagnostics of a capillary plasma channel for laser guiding", AIP Conference Proceedings, Vol. 1299, pp. 238-243, 2010
- (25) Takamitsu Otsuka, Deirdre Kilbane, Takeshi Higashiguchi, Noboru Yugami, Toyohiko Yatagai, Weihua Jiang, Akira Endo, Padraig Dunne, and Gerry O'Sullivan, "Systematic investigation of self-absorption and conversion efficiency of 6.7 nm extreme ultraviolet sources", Applied Physics Letters, Vol. 97, pp. 231503-1-231503-3, 2010
- (26) Takeshi Higashiguchi, Hiromitsu Terauchi, Takamitsu Otsuka, Mami Yamaguchi, Keisuke Kikuchi, Noboru Yugami, Toyohiko Yatagai, Wataru Sasaki, Rebekah D'Arcy, Padraig Dunne, and Gerry O'Sullivan, "Microdischarge extreme ultraviolet source with alkali metal vapor for surface morphology application", Journal of Applied Physics (in press)

(4-2) 知財出願

① 平成22年度特許出願件数(国内 1件)
 高出力高効率光波長変換装置、特願2010-185186

② CREST 研究期間累積件数(国内 1件)