

「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

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リクス

## § 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リ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リ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リ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リ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の実証
- ・相対論振動プラズマミラーによる高エネルギー電子生成
- ・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
- ・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]

- ・細線ガイドレーザー誘起 MeV 電子によるX線放射と性能評価
- ・レーザー誘起 MeV 電子による単色・高指向性X線チェレンコフ発生評価
- ・DARC(dc to ac radiation converter)による高輝度テラヘルツ光源開発.
- ・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、今後、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がスタートしている。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開始することでデバイスとしての総合評価を行う予定である。

## § 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 (大阪大学大学院、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

(3)「湯上」グループ

①研究分担グループ長: 湯上 登 (宇都宮大学大学院、教授)

②研究項目

- ・DARC を用いたテラヘルツ電磁波増幅プラズマデバイスの開発
- ・電磁波とプラズマとの相互作用によるフォトニクスデバイスの開発

### § 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

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2フェーズ終盤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評価している段階にある。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・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レーザー集光の実証

(主要論文: submitted to Optics Letts 2009)

従来、超高強度レーザーの集光光学系は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。これを解決する新しいプラズマ集光ミラーの幾何学配置を考案した。回転楕円体のプラズマミラーによる像転送型の集光配置をとることにより、従来困難とされていた高精度集光を実現することができた。その結果、従来の集光強度の 10 倍以上高い集光強度を実現することができた。さらに高エネルギー密度プロトンビームの生成を行った結果、プロトンの

最大エネルギーは5倍以上増加した。これらの成果は、本 CREST によるものであるが、国際強化支援策のもと仏国装置利用により効率的に成果が得られた。

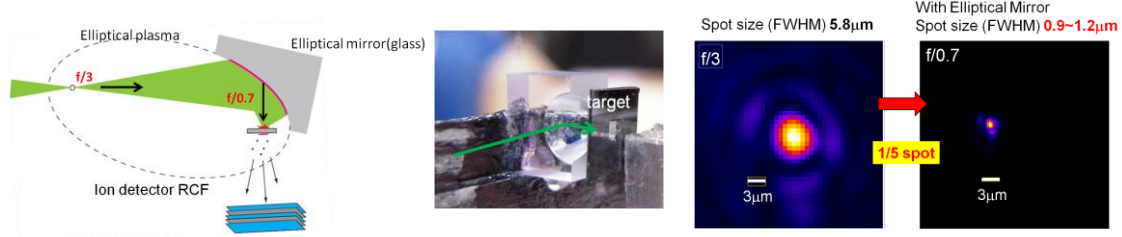


図1. 回転楕円体プラズマ集光光学系配置とプラズマミラー集光スポット

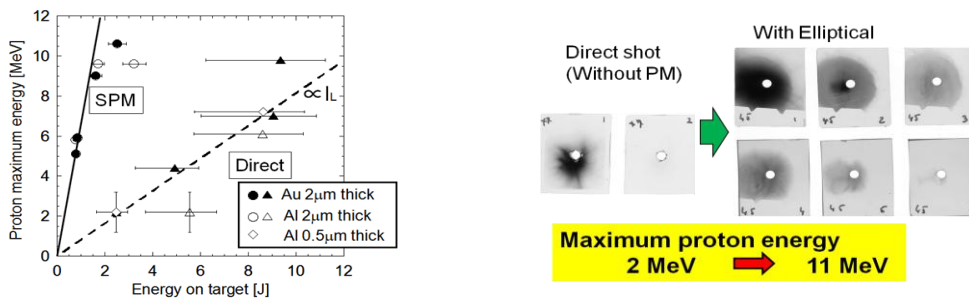


図2. プラズマミラー集光によるプロトンビーム

・電磁誘導透過現象を利用した高密度プラズマ複素屈折率制御の評価

(主要論文: Phys. Rev. E 80, 025402(R) (2009))

電子プラズマ波と電磁波の干渉効果(電磁誘導透過)を利用することで、高密度プラズマの複素屈折率制御の可能性を理論的に評価した。またこれにより従来取り出すことができなかった超臨界密度からのイオン音波による電磁波発生の可能性を理論的に評価した。超高強度レーザーとプラズマとの相互作用実験で実証するために、励起光のスペクトル波形、パルス波形、プラズマの不均一性、などを考慮した数値計算コードを作成した。これにより、励起強度、プラズマ密度とその分布などのパラメーターにより、プラズマの複素屈折率を評価し実験条件を明らかにした。その結果、レーザー強度  $10^{17} \text{W/cm}^2$  以上であればテラヘルツ波を観測できる可能性があることがわかった。またシングルショットテラヘルツ波計測器を整備し、プラズマにおける電磁誘導透過現象の実証へ向けた準備が整った。

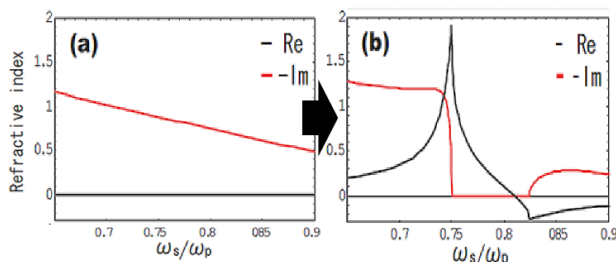


図4 電磁誘導透過による高密度プラズマ複素屈折率変化

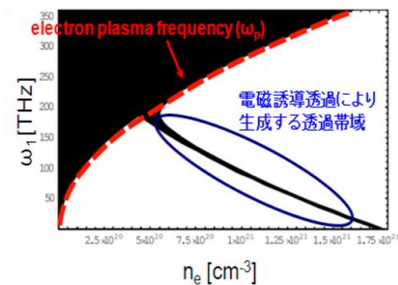


図5 電磁波透過帯域

・超高強度レーザー生成相対論電子ビームを集光するプラズマデバイス

(主要論文: submitted to Physical Rev. Lett. 2009)

超高強度レーザーと固体薄膜との相対論相互作用により、容易に高密度の MeV 電子ビームが生成する。通常、この高エネルギー密度電子ビームは、固体中を伝搬し薄膜裏面からその一部が20–30度という大きな広がり角を持って真空中に放出される。また薄膜裏面において、真空と固体の境界面に強い静電場を自身で作るため、電子ビームの放出割合は、生成電子ビームの数%以下に落ちる。そのエネルギーは薄膜裏面のイオンを加速するエネルギーに多くが変換される。これに対して、我々は薄膜裏面をプラズマ化することで薄膜裏面に生成される自己静電場を極端に抑え、従来の放出割合の10倍以上の電子ビームを真空中に取り出すことに成功した。さらに薄膜裏面の形状を球面に変化させることで、発生電子の広がり角を直接制御し集光させることに初めて成功した。この結果、従来に比べ3ケタ程度高い電子ビームのエネルギー密度を得ることができた。

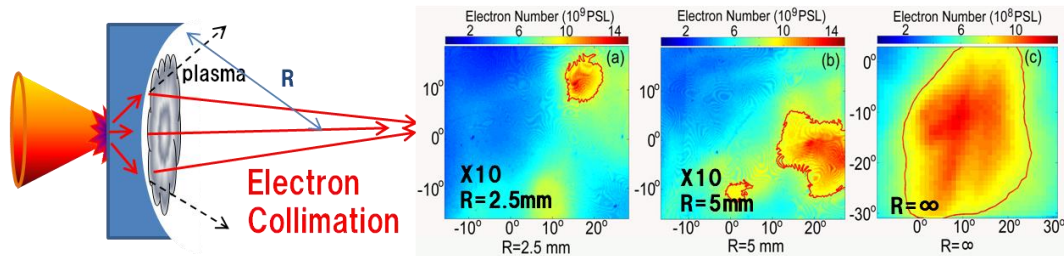


図7プラズマ電子レンズによる相対論電子ビームガイド

[電磁波発生プラズマと機能性評価]

・細線ガイドレーザー誘起 MeV 電子によるX線放射と性能評価

(主要論文: Physical Rev. E 79, 036408 (2009))

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細線プラズマでガイドし、小さな領域から X 線を効率よく発生させることは、シャドウグラフなどイメージング用の光源として重要な要素となる。この観点に立ち、細線プラズマからの X 線のイメージング用の光源として性能評価を行った。

超高強度レーザーをワイヤーデバイスに照射した際に発生する keV 領域 X 線と平板にレーザーを集光し発生する X 線によるイメージングの違いを評価した。ワイヤーデバイスでは電子がガイドされ小さな発光体となるため、単純に平板にレーザーを集光するより高い空間分解(10 ミクロンオーダー)が得られることが実験的にも明らかになった。またこの X 線を利用し、レーザー駆動衝撃波が固体中を伝搬する様子を 10ps の時間分解で撮影することに成功した。

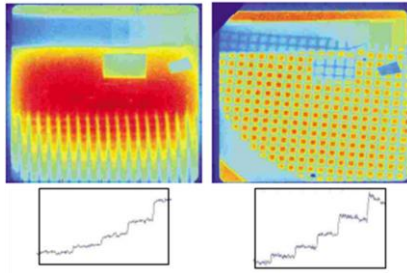


図10平板(左)とワイヤーターゲット(右)からの X 線による空間分解評価

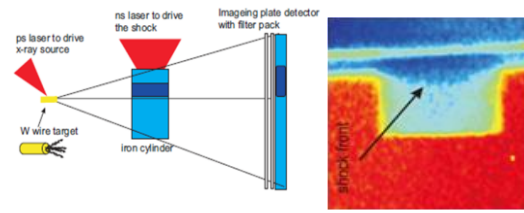
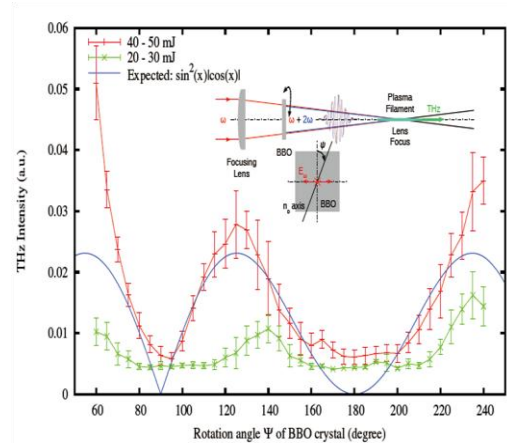


図11ワイヤーからの X 線による固体中を伝搬するレーザー駆動衝撃波像

・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・増幅の可能性を検証する。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。励起用の2波長レーザーの位相、強度などを変化させ発生効率の最適化を行った。またプラズマに磁場をかけることにより2-3倍程度の発生効率の向上を実験的に初めて実証した。今後、プラズマの空間的制御により発生するテラヘルツ電磁波の横方向および軸方向でのコヒーレント結合に関する実験を行う準備が整った。これらコヒーレント結合が成功すれば、メガワットを超える高輝度テラヘルツが可能となる。

図16 2波長レーザー励起テラヘルツ波における励起光エネルギー、偏光依存性



④当初計画では想定されていなかった新たな展開があった場合、その内容と展開状況

本研究で開発した2種類のデバイス(ワイヤーX線源、集光用プラズマミラー)の有効性が海外で評価され、海外の装置による試験、国際共同研究に発展した。国際強化支援策もあり、効率的な国際連携により当初予定以上に進展し応用研究に発展し、デバイスの総合試験を前倒しで一部できるようになった。

「米田」グループ

① 研究のねらい

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-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、前半3年間で、光分散プラズマの実現と同時に 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。後半では、詳細モデル、データベースの継続に加え、効率的かつ高出力で行える光分散プラズマデバイスの開発、最適化を行なう。

② 研究実施方法

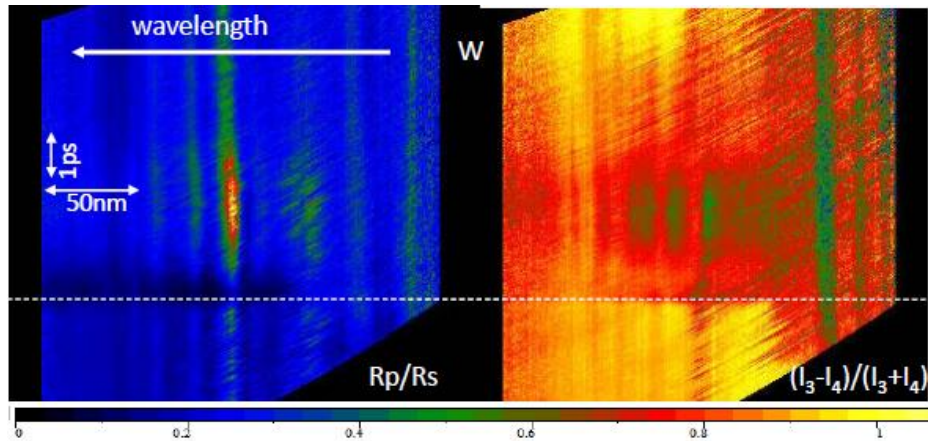
本研究では、超短パルスレーザーを利用した、固体-プラズマ中間体の基礎特性を明らかにするための白色光エリプソメトリ手法を用いている。また、実際のプラズマフォトニクスデバイスを構成する手法として、高密度放電(大気圧放電)プラズマデバイスを基礎媒質として、その放電により準備された励起状態に上げられた媒質に対して、超短パルスレーザーを照射する。

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

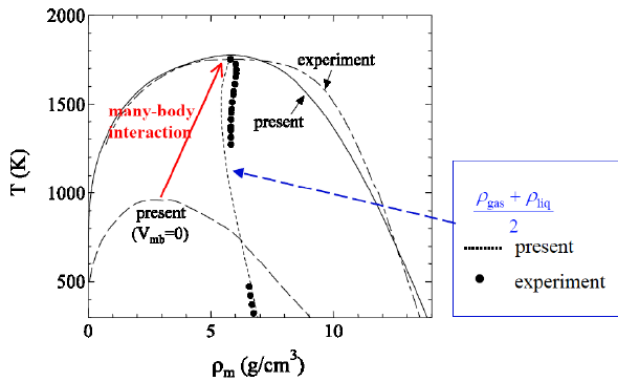
当初計画は、(1)固体-プラズマ中間状態層(Warm dense matter)の状態方程式データベース構築とそのモデル化する。(2)高繰り返し対応可能なプラズマフォトニックデバイスの開発を行う、ことを目標とした。

(1) Warm dense matter の研究

光分散デバイスをプラズマにより設計するためには、通常自由電子が支配する応答を持つプラズマとは異なる応答性を持ったプラズマを生成させる必要がある。本研究では、原子間相互作用により電子の局在化が制御できる、また、励起状態を保った状態で高密度プラズマを生成できる可能性のある Warm dense matter を対象として考えている。この状態では、わずかな温度・密度により光学複素屈折率が大きく変化することがこれまでの研究で明らかになってきたが、対象元素を変え、その波長分散光特性をまず測定し、データベース化する必要がある。そのために、白色超短パルス光を用いたエリプソメトリ測定が可能なポンプ・プローブ計測を用いている。これまでに Li, Al, Si, Ti, Fe, Ni, Cu, Zn, Mo, Ag, Sn, Ta, W, Au, Hg, Pb の純金属に対してデータ収集を 500nm~800nm の波長領域で測定を完了している。これらの中には、見掛け上の屈折率が金属から誘電体へ大きく変化するもの(Au, Ag, Cu, Sn)、ほぼ固体密度状態にあるにも関わらず、金属-絶縁体遷移を示しているもの(Zn, Hg, Mo)、また、本来  $\omega=0$  に極値のある自由電子応答から、可視域で強い共鳴状態が1ピコ秒以下で現れるもの(W)など、種々の特徴的な性質をもつものが観測されている。



タングステンの Warm dense matter 領域での光学特性。600nm 付近に強い共鳴がサブピコ秒で現れていることが初めて分かった。



これらの光学特性は、例えば金属-非金属転移をしている状態にわずかに光照射を行うことでその転移を繰り返させ、光整流作用を利用したデバイスを設計したり、フェムト秒台の高強度レーザーをオンオフできる光スイッチを構成したりする上で、重要なデータになっている。

#### 第一原理的な計算による 2 相流体領域の計算例

ここでは、ガス中にクラスタが浮遊したような状態になるために、大きな分極が生じる媒質になる可能性がある。さらに、この 2 相領域は、断熱曲線がこの領域内で平坦になることから、例えば固体表面からレーザー加熱により膨張をさせ、この 2 相流体領域に達すると、音速が 0 に近くなることで膨張速度が急激に低下し、“壁”のようなものを作る。これは、膨張面に高速で移動する平坦な鏡を自動的に生成させることになり、波長変換、動的に変調する鏡面などのデバイスを構成できることが考えられる。この 2 相流体領域は、温度-密度空間で臨界点を頂点とした上に凸の形状をしているが、純金属でも 5 つを除いて明らかになっていない。これに対し、本研究では (1) 第一原理的な計算から求める手法の開発、(2) 臨界点以下の実験データから経験則を使ったフィッティングにより求める手法を開発した。さらに、この領域を実験的に計測する方法として提案されている散乱光計測、膨張フロント位置-勾配計測などにより計算結果の実験的な確証をとる方法も行っている。

このような超短パルスレーザー照射による物質の光学定数を変化させる手法は、これまで最外殻の電子、フェルミ面にある電子のみを対象としていることがほとんどであった。これを内殻電子にまで広げ、なおかつ固体の秩序性が保たれることができれば、真空紫外～X線に対する制御デバ

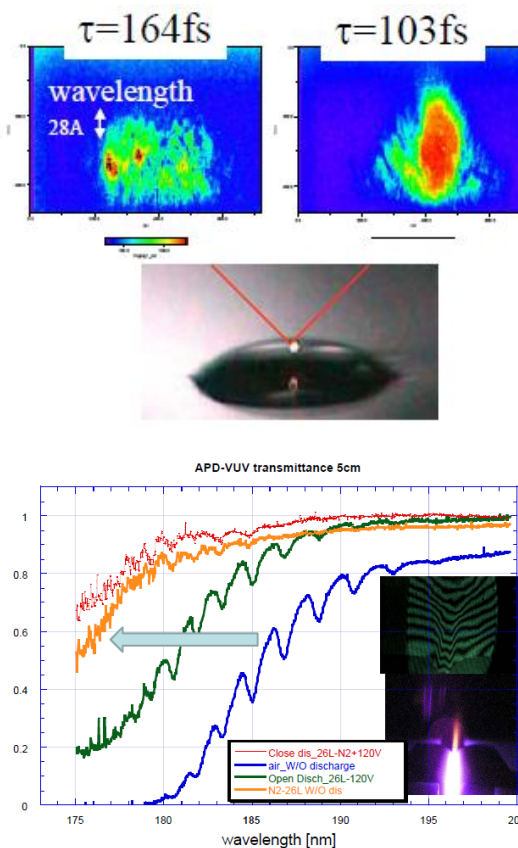


イスを構成することが可能になる。この場合、内殻イオン化された原子が固体のような秩序性を保てるかが重要な要素になる。そのため、本研究では、内殻励起された電子を伝導帯電子分布の直上に励起させた場合の、原子の結合状態をクラスタモデルを用いて検証している。その結果、Li原子9個程度のクラスタで3価程度のイオン化が起きたとしても結合状態が準安定的に存在することを明らかになってきた。このことは、バンド構造という固体特有の特性を保ちつつ光学特性を大きく変えられる可能性を意味しており、高エネルギー光子の制御用媒質候補として考えられるようになった。

## (2) 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

光分散デバイスとして(1)で述べた超短パルスレーザー生成 Warm dense matter 領域での大きく、高速な光学定数変化を利用したものを提案している。その1つとして、金属-非金属転移を用いたフェムト秒光スイッチを実現させた。このデバイスの中では、Hgを対象媒体に、反射率が急激に低下することを利用したもので、160fsの照射レーザーのパルス幅が、安定に100fs程度まで短縮されるほど高速なスイッチとなっていることが分かった。これにより、これまでの反射率が上昇するプラズマミラーと合わせ、高強度レーザー応用で重要な要素となっているプレ、ポストパルスのクリーニング手法に新しい提案を行っている。

また、プラズマ媒質をフォトニックデバイスに応用させる場合、プラズマ生成と制御・機能を付けさせる部分を分離した方が、エネルギー効率、機能の多様性などの面で利点がある場合が多い。そこで、高い変調率を期待でき、特殊な環境も必要とせず、大型化、長尺化も可能である大気圧放電を利用したデバイスを提案している。このデバイスでは、高気圧、高周波放電を行った安定なプラズマを噴出させることで、大気内に安定な屈折率変調領域を生み出すことが可能であり、プラズマが噴き出されている領域にも関わらず、CWレーザーによる干渉計で観測しても、フリンジが時間的に揺るが無く、背景ガスとの界面部分もシャープな界面を維持できることが分かった。また、その屈折率変調量は $10^{-4}$ 以上あることも分かり、窒素を作動期待として用いた場合、波長分散も近赤外～紫外まで平坦であることも確認されたため、ファイバグレーティングのような変調デバイスの設計も可能であることが分かった。さらに、前述した背景ガスとの境界が衝撃波形成されたように界面が保たれていることを利用して、このプラズマ領域を光ガイドのように使用できることが分かってきた。特に、この媒質は、励起原子



が主となる条件を作れるために、一般的に言われる紫外域での伝播する波長リミットを改善できる可能性がある。たとえば、空気中に、このプラズマ導波路をつけることで、酸素による波長限界を超えた真空紫外光の伝播ができることも実証することができている。

この媒体にレーザーによるグレーティング書き込みを行い、超高出力レーザー用圧縮光学系の開発を目指した研究を行っている。ガス中への空間屈折率変調の書き込みは、高強度レーザーにより容易にできることが分かっているが、実際のレーザー圧縮器への応用を考えた場合、エネルギー効率的な問題(グレーティングを作るエネルギーの方が大きい)、高温化してしまうために持続時間が極端に短い、などの問題がある。そこで、ここでは、これまでの自由電子による分極を利用したものでなく、励起原子を用い変調方法で、さらに、屈折率の高低の部分で圧力差が小さい状態でも構成可能な方法を提案している。現在、ミクロン程度の間隔を持ったグレーティングを製作できる書き込み条件を探索している。

#### ① 当初計画では想定されていなかった新たな展開があった場合、その内容と展開状況

上にも述べたように、提案時には、光学波長領域への応用を考えてきたが、研究の進展により、これらの手法は、より短波長の真空紫外、X線領域の光を制御する素子にも使用できることが分かってきた。これらの部分についても、研究が今後発展できるガイドラインを示せるところまでは明らかにする予定である。

#### 「湯上」グループ

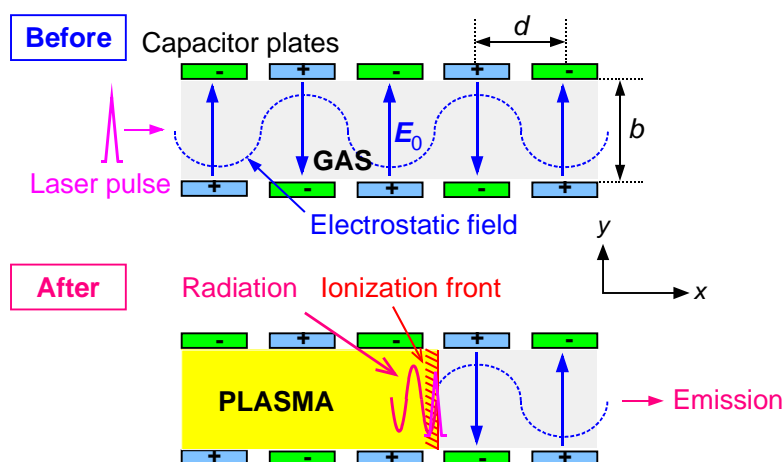
##### ① 研究のねらい(研究実施方法)

本研究機関では、主にテラヘルツ波増幅プラズマデバイスの開発と効率的なプラズマフォトニックデバイスを実現するための超小型パルスパワープラズマ生成技術を構築する。まずテラヘルツ波増幅のシードとなる短パルステラヘルツ波発生コヒーレント高密度プラズマを実現することを前半の目的とする。後半では、開発トリニティの成果を効率よく利用することで既存のテラヘルツ電磁波源の欠点を補うべく、テラヘルツ電磁波増幅プラズマフォトニックデバイスの実現を目指す。

##### ② 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

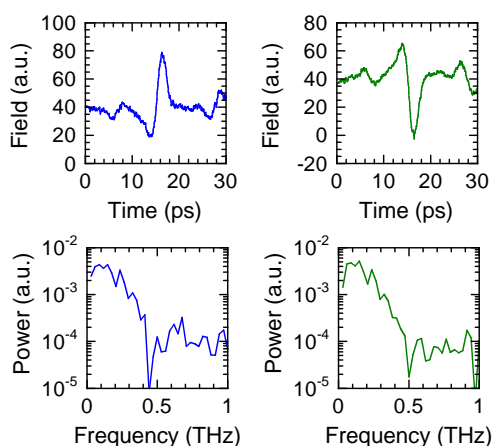
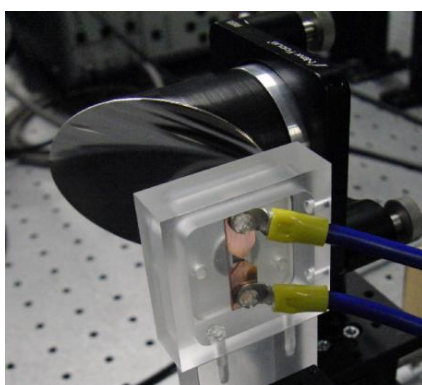
テラヘルツ電磁波源は、その発振部と増幅部に分けることが可能である。発振部で発生した小出力テラヘルツ電磁波を増幅部で増幅する。前年度に引き続き本年度も高効率な DARC (dc to ac radiation converter) によるテラヘルツ光源を実現する。DARC は、コンデンサーアレーに静電場を周期的に充電し、その間隙に高強度レーザーを通過させることにより光速で伝搬する電離面を形成する(下図参照)。その電離面にはプラズマ電流が流れることになり、それは実験室系から観測すると光速で伝搬するダイポールアンテナとして観測され、結果的に電磁波を放射する。最近、1.2 THz の放射に加えて、放射強度のバイアス依存性などが明らかになった。この計画の最終目標であるテラヘルツ増幅器に入射するシード電磁波源の候補の一つが確保できているが、現在、

シード光の高効率発生に向けた実験を開始している。加えて、シングルショットテラヘルツ計測システムの高性能化も行う。



増幅部としてのテラヘルツ波増幅プラズマデバイスの場合、ガス充填 DARC を用いることにより、外部から入射したレーザー光により電離面を形成するため、高出力テラヘルツ電磁波の発生が期待される。

DARC は、図のようにコンデンサーをアレー状に並べて形成するが、原理的には1個でも可能であるので、そのような実験を行った。写真はその実験配置である。電極に高電圧パルスを印加し、発生したテラヘルツ領域の電磁波を、写真後方の放物面鏡で集光している。実験結果を図に示す。青の線のグラフは、印加電圧パルスの極性が正極性、緑は負極性である。印加する電圧の方向により、プラズマ中を流れる電流の向きがことなるため、発生した電磁波の電場の向きもそれに応じて反転している。もちろん、その時間波形をフーリエ変換したものは一致している。この実験は、DARC 本来の形であるアレー状での実験において、テラヘルツ領域の電磁波の発生が可能であることを示唆している。



- ③ 当初計画では想定されていなかった新たな展開があった場合、その内容と展開状況  
当初、テラヘルツ電磁波の発生として DARC によるものを考えていたが、EIT(Electromagnetic

Induced Transparency: 電磁誘導透過)と呼ばれる現象によってテラヘルツ電磁波が発生することが考えられた. 阪大の兒玉先生が提案され, それを共同で論文化した. (M. Nakagawa, Phys. Rev. E, **80**, 025402(R) (2009)) プラズマ中を電磁波が伝搬するためには, 電磁波の周波数はプラズマ周波数より高くないといけない. そのため, プラズマ中に電磁波が発生していても, それを外部に取り出すことができない. そのために, プラズマ周波数に対して調整した二つのレーザー光を導入することにより, プラズマ内部に位相のあったテラヘルツ領域の周波数をもった電流を流し, 電磁波が伝播する周波数の窓を形成することが可能となる. 現在, この実験を実行するために, 計測器等の準備が進行中である.

その他, 電磁波の周辺が突然プラズマ化したとき, 電磁波の周波数がどのように変化するかという問題について議論し, その結果電磁波の周波数が上昇することが明らかとなった. また, 周辺のプラズマ密度のプロファイルをコントロールすることによって, 入射電磁波の周波数をチャープすることが可能である. このことは, パルスを圧縮することが可能であることを示唆しており, 新たなプラズマフォトニクスデバイスの可能性があると考えている.

## § 4. 成果発表等

### (4-1) 原著論文発表

- 論文詳細情報

1. 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”  
J. Phys., Accepted(2010)
2. 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”  
J. Phys., Accepted(2010)
3. T.Hosokai, A.Zhidkov, A.Yamazaki, Y.Mizuta, M.Uesaka, and R.Kodama,  
“Electron energy boosting in laser-wake-field acceleration with external magnetic field  $B \sim 1\text{T}$  and laser prepulses”  
Appl.Phys. Lett. **96**, 121501 (2010) doi:10.1063/1.3371709
4. A. Morace, A. Magunov, D. Batani, R. Redaelli, C. Fourment, J. J. Santos, G. Malka, A. Boscheron, A. Casner, W. Nazarov, T. Vinci, Y. Okano, Y. Inubushi, H. Nishimura, A. Flacco, C. Spindloe, and M. Tolley,

- “Study of plasma heating induced by fast electrons”  
 Phys. Plasmas **16**(12), 122701\_1-122701\_9(2009) doi:10.1063/1.3261807
5. Y. Mori, Y. Sentoku, K. Kondo, K. Tsuji, N. Nakanii, S. Fukumochi, M. Kashihara, K. Kimura, K. Takeda, K. A. Tanaka, T. Norimatsu, Tsuyoshi Tanimoto, H. Nakamura, M. Tambo, R. Kodama, E. Miura, K. Mima, and Y. Kitagawa,  
 “Autoinjection of electrons into a wake field using a capillary with attached cone”  
 Phys. Plasmas **16**(12), 123103\_1-123103\_6(2009) doi:10.1063/1.3271152
6. Makoto Nakagawa, Ryosuke Kodama, Takeshi Higashiguchi and Noboru Yugami,  
 “Generation of terahertz radiation via an electromagnetically induced transparency at ion acoustic frequency region in laser-produced dense plasmas”  
 Phys. Rev. E **80**, 025402(R) (2009) DOI: 10.1103/PhysRevE.80.025402
7. E. Brambrink, H. G. Wei, B. Barbrel, P. Audebert, A. Benuzzi-Mounaix, T. Boehly, T. Endo, C. Gregory, T. Kimura, R. Kodama, N. Ozaki, H.-S. Park, M. Rabec le Gloahec, and M. Koenig,  
 “X-ray source studies for radiography of dense matter”  
 Phys. Plasmas **16**, 033101\_1-7(2009) DOI: 10.1063/1.3076207
8. Stephen A. Reed, Takeshi Matsuoka, Stepan Bulanov, Motonobu Tambo, Vladimir Chvykov, Galina Kalintchenko, Pascal Rousseau, Victor Yanovsky, Ryosuke Kodama, Dale W. Litzenberg, Karl Krushelnick, and Anatoly Maksimchuk  
 “Relativistic plasma shutter for ultraintense laser pulses”  
 APPLIED PHYSICS LETTERS **94**, 201117 -1-3 (2009) doi:10.1063/1.3139860
9. T Yabuuchi, A Das, G R Kumar, H Habara, P K Kaw, R Kodama, K Mima, P A Norreys, S Sengupta and K A Tanaka  
 “Evidence of anomalous resistivity for hot electron propagation through a dense fusion core in fast ignition experiments”  
 New Journal of Physics **11**, 093031 (2009) doi:10.1088/1367-2630/11/9/093031
10. J. Rassuchine, E. d'Humières, S. D. Baton, P. Guillou, M. Koenig, M. Chahid, F. Perez, J. Fuchs, P. Audebert, R. Kodama, M. Nakatsutsumi, N. Ozaki, D. Batani, A. Morace, R. Redaelli, L. Gremillet, C. Rousseaux, F. Dorchies, C. Fourment, J. J. Santos, J. Adams, G. Korgan, S. Malekos, S. B. Hansen, R. Shepherd, K. Flippo, S. Gaillard, Y. Sentoku, and T. E. Cowan,  
 “Enhanced hot-electron localization and heating in high-contrast ultraintense

- laser irradiation of microcone targets” DOI: 10.1103/PhysRevE.79.036408  
Phys. Rev. E, **79**, 036408\_1-5(2009)
11. H. Nakamura, B. Chrisman, T. Tanimoto, M. Borghesi, Y. Sentoku, T. Matsuoka, M. Nakatsutsumi, T. Norimatsu, K. A. Tanaka, T. Yabuuchi and R. Kodama  
“Superthermal and efficient-heating modes in the interaction of a cone target with ultraintense laser light”  
Physical Review Letters **102**, 45009 1-4 (2009)  
DOI:10.1103/PhysRevLett.102.045009
  12. J. Rassuchine, E. d’Humieres, S. D. Baton, P. Guillou, M. Koenig, M. Chahid, F. Perez, J. Fuchs, P. Audebert, R. Kodama, M. Nakatsutsumi, N. Ozaki, D. Batani, A. Morace, R. Redaelli, L. Gremillet, C. Rousseaux, F. Dorchie, C. Fourment, J. J. Santos, J. Adams, G. Korgan, S. Malekos, S. B. Hansen, R. Shepherd, K. Flippo, S. Gaillard, Y. Sentoku, and T. E. Cowan,  
“Enhanced hot-electron localization and heating in high-contrast ultraintense laser irradiation of microcone targets”,  
PHYSICAL REVIEW E, **79**(3), 036408\_1-036408\_5 (2009)  
DOI: 10.1103/PhysRevE.79.036408
  13. A. L. Lei, L. H. Cao, X. Q. Yang, K. A. Tanaka, R. Kodama, X. T. He, K. Mima, T. Nakamura, T. Norimatsu, W. Yu, and W. Y. Zhang,  
“Guiding and confining fast electrons by transient electric and magnetic fields with a plasma inverse cone“,  
Phys. Plasmas, **16**(2), 020702\_1-020702\_4 (2009.02) doi:10.1063/1.3075928
  14. Takeshi Higashiguchi and Noboru Yugami,  
"Short pulse, high power microwave radiation source with a laser-induced sheet plasma mirror",  
Journal of Applied Physics, **105**, pp. 093301-1-093301-4 (2009)  
doi:10.1063/1.3117522
  15. B. L. Shivachev, T. Petrov, H. Yoneda, R. Titorenkova and B. Mihailov,  
”Synthesis and nonlinear optical properties of TeO<sub>2</sub>–Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–GeO<sub>2</sub> glasses”,  
Scripta Materialia, **61**, Issue 5, Pages 493-496(2009)  
doi:10.1016/j.scriptamat.2009.05.006
  16. N. Hasegawa, A. Sasaki, H. Yamatani, M. Kishimoto, M. Tanaka, Y. Ochi, M. Nishikino, Y. Kunieda, T. Kawachi, H. Yoneda, and A. Iwamae,  
“High-resolution Spectroscopy of the Nickel-like Molybdenum X-ray Laser Toward the Generation of Circularly Polarized X-ray Laser”,

Journal of the Optical Society of Korea Vol.13 No.1, p.60-64, (2009) DOI:  
10.3807/JOSK.2009.13.1.060

17. H. Kitamura,

"Multiple K-shell excitation of lithium clusters:Implications for hollow-atom solids",  
Chem. Phys. Lett. 475, pp.227-231 (2009) doi:10.1016/j.cplett.2009.05.050

18. H. Kitamura,

"Cluster-model study on the K-shell excited states of crystalline lithium under  
intense laser irradiation",  
Eur. Phys. J. D **52**, pp.147-150 (2009) DOI: 10.1140/epjd/e2009-00011-3