

「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ンクス」

1. 研究実施の概要

光は、位相をそろえることで時間的、空間的に極めて小さな領域にエネルギーを集中させることができ、どの技術より効率的により高いエネルギー密度状態を実現できる。本研究では、研究代表者等が提唱している高エネルギー密度プラズマフォトン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、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したりする。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ンクスデバイスの開発を行う。基礎データベース、物理モデルを構築しながら、結果として新機能デバイスを利用した従来技術にない小型高輝度マルチ電磁波源 (THz、可視、X 線) 実現へ向けた最適な条件を見出す。

具体的には(1) 電子ビーム制御電磁波 (X 線) 発生プラズマ、(2) 光制御・光分散プラズマ、(3) テラヘルツ波増幅プラズマを生成し、新しいプラズマフォトンクスデバイスの実現を目指している。そのために、大阪大学、電気通信大学、宇都宮大学 (プラズマフォトンクストリニティ) 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で研究を進めている。本研究の最終目標を実現するための要素技術開発は、単に戦略的要素だけではなく、光と物質との相互作用や非線形性の起源などを探究することにもつながり学術的にも大きな意義を要するものである。また、超高強度レーザーによるコヒーレント高エネルギー密度プラズマを利用したデバイス開発は、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ン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となる。

2. 研究実施内容

前節でも述べたように、本研究は、光・光量子科学技術分野の重要戦略目標の 1 つである「究極的な光の発生技術」を、研究代表者等が提唱している新しい概念の高エネルギー

密度プラズマフォトンクスにより展開していくことを目指すものである。具体的には、

- (1) 電子ビーム制御電磁波（X線）発生プラズマの開発
- (2) 光制御・光分散プラズマの開発
- (3) テラヘルツ波増幅プラズマの開発

を設定して研究を進め最終的には、高エネルギー密度プラズマデバイスを利用した電磁波源実現を目指している。以下に具体的に、H18年度の研究実績を纏める。

(1) 電子ビーム制御電磁波発生プラズマの開発

超高強度レーザーによる相対論電子ビーム発生制御とともに、固体-プラズマ中間体やプラズマの原子過程を考慮した伝導率を利用して効率的な高密度相対論電子ビーム制御を行い、高輝度のX線やテラヘルツ電磁波の発生を目指す。初年度、以下の成果を得た。

[コーンデバイスによる高密度相対論電子ビーム発生の最適化]

超高強度レーザーとコーンとの相互作用で発生する高エネルギー密度電子の最適化を図るため、コーンの開き角に対する高エネルギー密度電子のエネルギースペクトル依存性を実験的に明らかにした。また実験結果と相互作用の効果を取り入れた光線追跡計算との比較によりレーザー集光条件に対して高エネルギー密度電子を効率よく発生する最適なコーンの開き角があることがわかった。

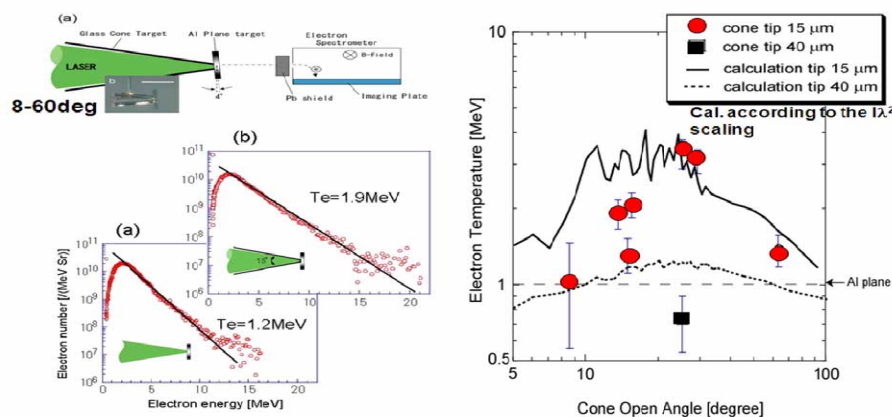


図1. コーンデバイスによる高エネルギー密度電子生成最適化

[ワイヤーデバイスにおける高密度相対論電子ビーム伝搬の直性計測]

ワイヤーデバイスにおける高密度相対論電子ビームガイドに重要な電界分布の計測を超高強度レーザー励起プロトンビームによるバックライト法により実施。ワイヤーに沿って電子がガイドされ伝搬していく様子を数 psec の時間分解で直接観測することに成功した。またワイヤーの導電率の違いにより電界の成り方が異なることがわかった。さらに銅のワイヤーにおいては電界分布が不均一であることがわかった。今後、ワイヤーの材質について固体-プラズマ中間体物性値のデータベースの構築とそれによる効率的な伝搬材質を評価する必要がある。

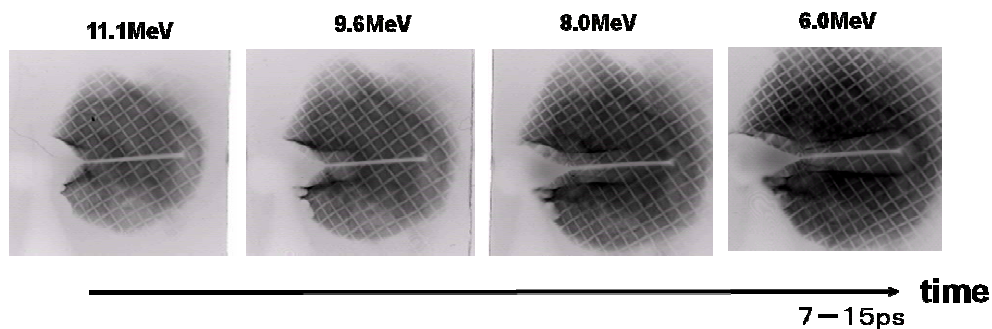


図2. ワイヤデバイスを伝搬する高密度相対論電子による静電場の光速伝搬をレーザー励起プロトンビームでバックライトした象

[マイクロパルスパワーの立ち上げ準備]

10TW 超高強度レーザーで生成する高エネルギー密度電子の効率的な伝搬を実現するため、高エネルギー密度電子流を補償する帰還電流トリガーシステムを目指したマイクロパルスパワーの立ち上げを開始した。準備試験を目的として高繰り返し長尺放電キャピラリーを試作した。

[高エネルギー密度電子ビームによる電磁波発生評価]

高エネルギー密度プラズマにより制御される高密度相対論電子ビームを利用した電磁波発生の評価を行った。

Mg から Ge の L 吸収端の複素屈折率評価をもとに単色性かつ指向性を持ったチェレンコフ X 線 (50eV-1.2keV) の発生効率を求めた。例えば 10TW 級のレーザーで励起された MeV 以上の電子ビームと Si の L 吸収端 (99.6eV) で 5GW (30fs) のピーク出力の可能性が見積もられた。今後、効率よく X 線に変換する幾何学配置を検討し実証していく。またワイヤデバイスで制御された 10TW レザー励起相対論電子ビームとマイクロパルスパワーによるパルス磁場 (20T) の組み合わせでコヒーレントな GW クラスのテラヘルツ波を発生できる可能性があることを理論的に見出した。

(2) 光制御・光分散プラズマの開発

高エネルギー密度プラズマに規則性をもたせる技術や原子過程を利用して同一の温度・密度状態にありながら異なった光学特性を持つプラズマを生成する技術、データベースを構築することで光制御・光分散デバイスの開発をおこなう。初年度以下の成果を得た。

[新機能性プラズマミラーデバイス]

水銀の warm dense matter 領域での特性を詳細に調べることで、金属-絶縁体遷移を使った超高速ネガティブ dR/dt プラズマミラーデバイスの開発に成功した。高繰り返し対応、ポストパルス制御が可能になった。

[チャーププラズマ回折格子の可能性評価]

プラズマを用いた分散素子に関する理論的検討を行った。分散発生に、チャープしたファイバブラッグ回折格子を、プラズマを利用して実現する方法を考案した。チャープしたプラズマブラッグ回折格子によりフーリエ限界 100fs のパルスをも 100ps から圧縮する場合、群遅延時間を考慮することでおおよそ 20cm 程度のプラズマが必要であると評価できた。この場合、プラズマの相互作用長が十分長くプラズマ変調による屈折率差は元の値の 10^{-4} 倍程度で十分である。

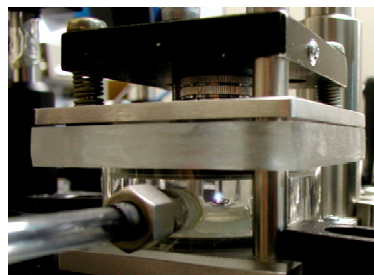


図 3. 超高速ネガティブ dR/dt プラズマミラーデバイス

(3) テラヘルツ波増幅プラズマの開発

高輝度のテラヘルツ波の発生、増幅を目的として、高エネルギー密度プラズマからのテラヘルツやプラズマを利用した増幅デバイスの開発を行う。またそのための計測手法を開発する。初年度以下の成果を得た。

[DARC(dc to ac radiation converter)デバイス]

これまで DARC (dc to ac radiation converter)を用いた電磁波発生の研究では、高出力化と高周波化が問題であった。今年度、そのうちの高周波化に焦点を絞り、半導体結晶を用いた DARC (図 4) を構築することでテラヘルツ領域の電磁波発生の確認を行った。図 5 は、EO サンプルング法で観測された電場波形であり、これをフーリエ変換することにより中心周波数 1.2 THz の電磁波であることを確認した。

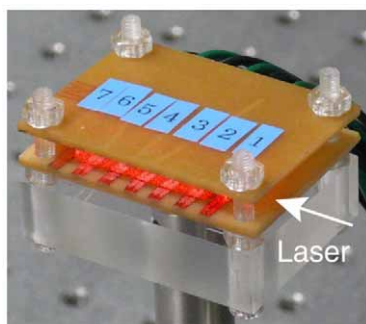


図 4. 半導体 DARC

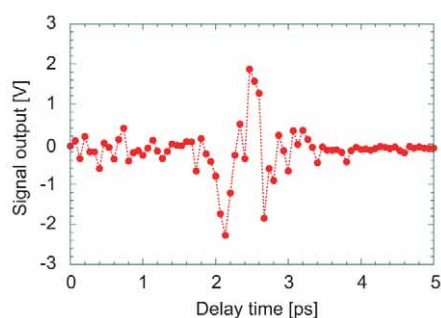


図 5. 観測電場波形

[電磁誘導透過を利用したテラヘルツ発生の評価]

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をおこない、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の発生を理論的に評価した。実験との比較を行うために、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。これをもとに、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 $10^{17}\text{W}/\text{cm}^2$ 以上でプラズマのスケール長が 1 ミクロン以下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。

[シングルショットテラヘルツ波計測器開発]

レーザーによるパルス状の高輝度テラヘルツ波やプラズマの電磁誘導透過によるテラヘルツ波発生を診断するため、テラヘルツシングルショットスペクトル計測器の開発を行った。本計測器では電磁波を計測するために電気光学効果を利用した。検出したいテラヘルツ電磁波とそのテラヘルツ電磁波のパルス幅に対し、十分パルス幅の長いチャープパルスを入射し、相関を測定することでテラヘルツ電磁波のパルス波形を測定しフーリエ変換によりスペクトルを求めるシステムを構築した。

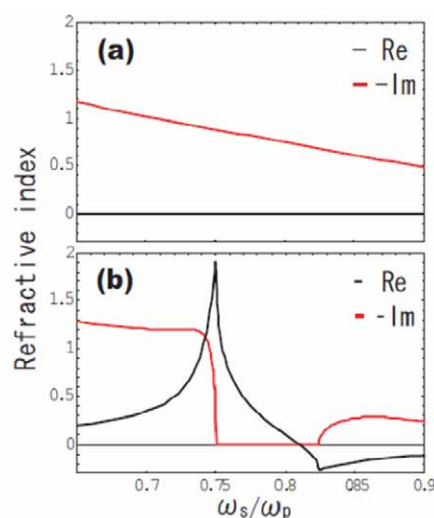


図6. 電磁誘導透過による高密度プラズマ複素屈折率変化

3. 研究実施体制

(1) 兒玉 了祐「大阪大学」グループ

研究項目

- ・ 電子ビーム制御プラズマデバイス
- ・ 高エネルギー密度パルス電子励起電磁波発生プラズマ
- ・ 光分散プラズマデバイス
- ・ 電磁誘導透過と複素屈折率制御プラズマ

(2) 米田仁紀「電気通信大学」グループ

研究項目

- ・ 新機能性プラズマミラーデバイス
- ・ 光分散プラズマ
- ・ 固体 - プラズマ中間体光物性データベース

(3) 湯上 登「宇都宮大学」グループ

研究項目

- ・ 高輝度テラヘルツ電磁波発生デバイス

- ・シングルショットテラヘルツ波計測システム開発
- ・マイクロパルスパワー技術

4. 研究成果の発表等

(1) 論文発表(原著論文)

- M. Nakatsutsumi, R. Kodama, P. A. Norreys, S. Awano, H. Nakamura, T. Norimatsu, A. Ooya, M. Tambo, K. A. Tanaka, T. Tanimoto, T. Tsutsumi, and T. Yabuuchi, "Re-entrant cone angle dependence of the energetic electron slope temperature in high-intensity laser-plasma interactions", *Physics of Plasmas* 14, (inpress) 2007
- Takeshi Higashiguchi, Nobuo Ohata, Kun Li, and Noboru Yugami, "Observation of temporal behavior of the emission frequency from an ultrashort, high-power, and compact millimeter-wave source", *Applied Physics Letters*, vol. 90 111503 (2007).
- H. Kitamura, "The role of attractive many-body interaction in the gas-liquid transition of mercury" *J. Phys.: Condens. Matter* 19, 072102 (7pp) (2007)
- K. L. Lancaster, J. S. Green, D. S. Hey, K. U. Akli, J. R. Davies, R. J. Clarke, R. R. Freeman, H. Habara, M. H. Key, R. Kodama, K. Krushelnick, C. D. Murphy, M. Nakatsutsumi, P. Simpson, R. Stephans, C. Stoeckl, T. Yabuuchi, M. Zepf, and P. A. Norreys, "Measurements of energy transport patterns in petawatt laser-plasma interactions at solid density" *Physical Review Letters* 98, pp125002 -1~4, 2007
- H. Habara, K. Azumi, T. Yabuuchi, T. Nakamura, Z. L. Chen, M. Kashihara, R. Kodama, K. Kondo, G. R. Kumar, L. A. Lei, T. Matsuoka, K. Mima, and K. A. Tanaka, "Surface acceleration of fast electrons with relativistic self-focusing in preformed plasma", *Phys. Rev. Lett.* 97, 095004 (2006).
- Y. Hama, K. Kondo, A. Zoubir, T. Honda, R. Kodama, K. A. Tanaka, and K. Mima, "Single-shot two-dimensional spectral interferometry for ultrafast laser-produced plasmas", *Opt. Lett.*, **31**, 1917 (2006).
- H. Kitamura, "Theoretical potential energy surfaces for excited mercury trimers" *Chem. Phys.* 325, pp.207-219 (2006)
- H. Kitamura, "Analysis of excited mercury clusters with diatomic potential energy curves" *Chem. Phys. Lett.* 425, pp.205-209 (2006)
- Noboru Yugami, Nobuo Ohata, Kenta Yaegashi and Hiroshi Kawanago, "Measurement of sub-mW, picosecond THz emission from a femtosecond-laser-pumped dc to ac radiation converter" *Rev. Sci. Instrum.* vol.77 pp.116102-1-116101-3 (2006).
- 中堤基彰、兒玉了祐、D. Batani, Y. Agritskiy, S. Baton, A. Benuzzi-Mounaix, J. Fuchs, M. Koenig, C. Rousseaux, P. Guillow, B. Loupias, A. Morace, and D. Piazza, 「超高強

度レーザーと固体との相互作用におけるターゲット裏面異常加熱」、レーザー研究 35, pp33-37(2007)

- 近藤公伯「光パラメトリックチャープパルス増幅における光パラメトリック蛍光の制御と高強度光パルス発生」、レーザー研究、34、117-122 (2006).
- Noboru Yugami, Kenichi Ninomiya, Kazuhiro Kobayashi, Noda Hajime “Observation of Millimeter Range Radiation with TM01 Mode by Laser Plasma Interaction Experiments” Japanese Journal of Applied Physics vol. 45 pp.L1051-L1053 (2006).

(2) 特許出願

平成 18年度特許出願:3件(CREST 研究期間累積件数:3件)