

「先端光源を駆使した光科学・光技術の融合展開」
平成 21 年度採択研究代表者

H23 年度 実績報告

細貝 知直

大阪大学光科学センター 特任准教授

「光制御極短シングル電子パルスによる原子スケール動的イメージング」

§1. 研究実施体制

(1)「大阪大学」グループ

① 研究代表者: 細貝 知直 (大阪大学光科学センター、特任准教授)

② 研究項目

- ・レーザーバーチャルカソード研究開発
- ・電子輸送／光同期オプティクス研究開発
- ・物質ダイナミクス研究

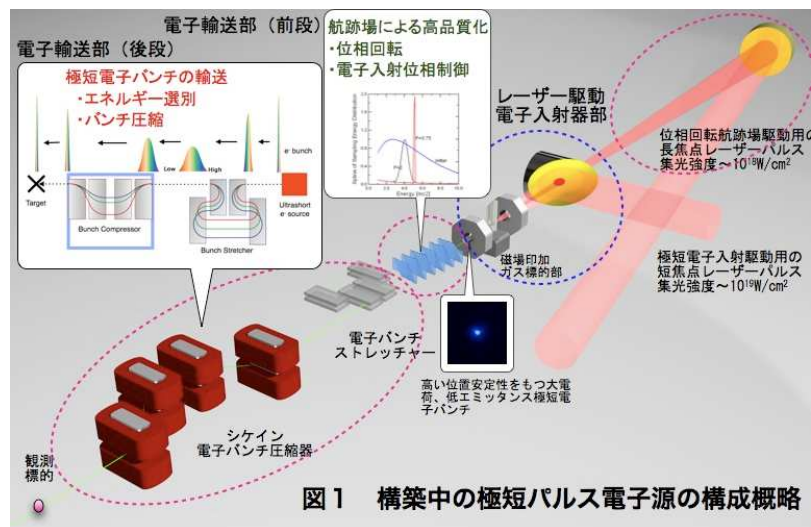
§ 2. 研究実施内容

最終目標である光制御極短シングル電子パルスによる原子スケール動的イメージングに向けて、極短パルス電子源であるレーザーバーチャルカソード(LVC)のプラットフォーム構築(40TW25fsレーザー整備と電子ビーム伝送ライン構築)を進めている。並行してイメージング対象となる標的材料/条件等の検討(物質ダイナミクス研究)を進めている。

【レーザーバーチャルカソード研究開発】

・イメージングプラットフォームの構築/電子入射器の開発

図1に構築中の極短パルス電子源 LVC の構成概略を示す。イメージングプラットフォームの構築として、LVCを駆動する40TW25fsレーザー装置の整備を行った。フロントエンド部分(発振器、ストレッチャー、再生増幅器、前段アンプ、テストコンプレッサー)の改修(H22



年度)に続き、最終段アンプとパルスコンプレッサーのアップグレードを行った。オンターゲットで最大出力1J パルス幅25fs、ASE コントラスト比 $\sim 10^{-9}$ のレーザーパルスを得た。加えて、レーザーパルス真空伝送線路と LVC 電子入射器真空容器を整備し、電子入射器(図1青丸で囲んだ部分)を構築した。新しい防振技術等も取り入れ、LVC 電子入射器真空容器内で高い位置安定性($\pm 1 \mu\text{m}$ 以下)でファイナルフォーカス径 $\sim 7 \mu\text{m}$ のレーザーパルス集光を実現した。さらに、ガス標的部にこれまでに開発を進めてきた外部磁場印可プラズマ制御技術を加えることにより、極めて高い位置安定性の高電荷、低エミッタンス極短電子パルスビーム(図1中央参照)を発生させる方法を確認した。図2に構築されたレーザーパルス真空伝送線路、LVC 電子入射器真空容器が設置された実験室の様子を示す。



図2 レーザーパルス真空伝送線路と LVC 電子入射器真空容器

・プラズママイクロ-opticsの研究開発

LVC の電子入射器や入射器後の位相回転で鍵となる技術であるプラズマopticsのダイナミクスを詳細に調べた。サブピコ〜ピコ秒のレーザーパルスによる加熱機構に注目し、低密度長尺チャンネル形成の可能性を追求した。レーザー動重力と流体運動の複雑に絡みあうチャンネル形成過程を初めて明らかにし、密度差が ~ 50 倍、長さ数ミリにもなるチャンネルを形成することに成功した(図3)。その形成機構からスプラッシュチャンネルと命名した。(結果を米国物理学会誌 *Phys Rev. E* に投稿中。)

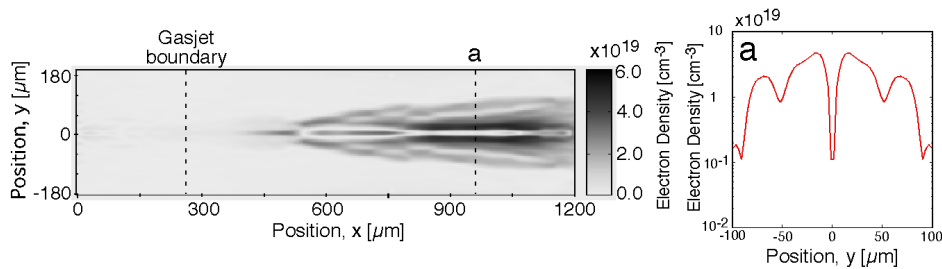


図3 形成されたスプラッシュチャンネルとその断面の密度分布

・超音速ガス標的の研究開発

これまでの階段型密度構造を持つ非対称超音速ガスジェット標的の研究開発を継続し、標的および三次元ガス密度計測法の改良をおこなった。開発した階段型標的を電子入射器真空容器内に配置し電子パルス発生に関する基礎実験を開始した。ガス密度境界での効率的な電子入射現象を観測した。(研究継続中)

・高 Z の標的ガスの検討(レーザー航跡場励起におけるイオン化の影響に関する研究)

効率的に大電荷の入射電子を供給することを目的に、高 Z の標的ガスの検討を行った。レーザー航跡場励起過程におけるイオン化の影響を、プラズマ粒子法(PIC)シミュレーションで検討した(図4)。イオン化を考慮した PIC シミュレーションを用いることで、初めてこれまでに報告されている高 Z の標的ガスの実験結果を高い確度で説明することができ、また大電荷量かについて検討を進めることができた。(結果を米国プラズマ学会誌 *Phys of Plasmas* に投稿中。)

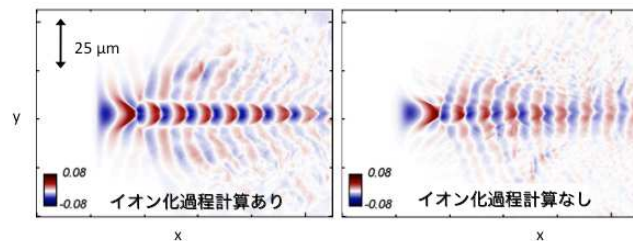


図4 イオン化を考慮したレーザー航跡場生成のシミュレーション

【電子輸送／光同期オプティクス研究開発】・チャープパルス電子ビーム輸送

イメージング標的まで電子パルスの極短性を維持しながら電子バンチを輸送するチャープパルス電子輸送(図1中電子輸送部後段参照)という手法を考案し(23年度特許出願済)検討を開始した。数値検討に基づき電子輸送部に用いるビームオプティクスの一部(Q マグネット、電子バンチストレッチャー用永久磁石)の設計制作を開始した。図5に製作途中の Q マグネットと電子バンチストレッチャー用永久磁石を示す。

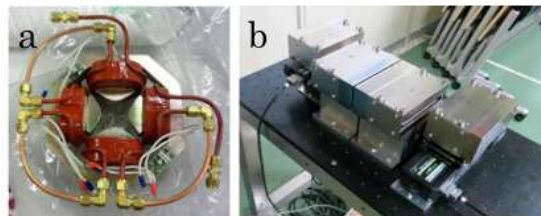


図5 Q マグネット(a)、電子バンチストレッチャー用永久磁石(b)

・レーザー航跡場による電子ビームの位相回転

電子輸送部前段(図1参照)におけるレーザー航跡場による電子ビームの位相回転の検討を数値計算をもちいて進めている。レーザー航跡場の距離、位相、電場等を適切に選択することにより入射電子ビームのエネルギースペクトルの更なる狭帯化が期待できる事を明らかにした。PIC 法による数値シミュレーションで $\Delta E/E \sim 10^{-3}$ 程度が得られた。(研究継続中)

【物質ダイナミクス研究】

レーザーバーチャルカソードから発生するプローブ電子を用いたターゲット材料観察の予備実験として、フェムト秒レーザー衝撃圧縮したアルミニウム中の格子欠陥を観察した。代表的な観察結果を図6に示す。フェムト秒レーザー衝撃圧縮した試料には、従来法と比較して極めて高密度な転位が導入されていることがわかった。導入された転位はネットワーク構造をとり、パルスを重ね合わせた試料中には数十～数百 nm の大きさの転位セルを形成していることがわかった。

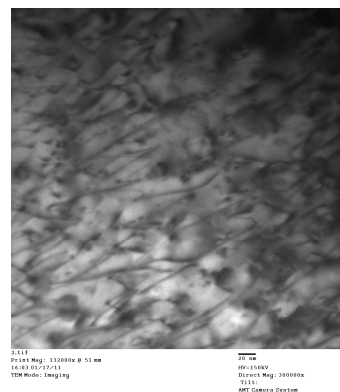


図6 高密度格子欠陥導入されたアルミニウムの透過電子顕微鏡像

【今後の予定】

LVC は電子入射の位相制御が鍵となる。これまでの要素技術開発を継続し電子入射の位相制御技術を確立し高性能電子源を実現する。できるだけ早期にチャープ電子パルス輸送を含む LVC ビームライン構築を完了しイメージング実験に着手する。

§3. 成果発表等

(3-1) 原著論文発表

- 論文詳細情報

1. Junghun Shin, Alexei Zhidkov, Zhan Jin, Tomonao Hosokai, and Ryosuke Kodama, "Non-linear plasma effects on laser-induced THz emission from the atmosphere", Phys. of Plasmas, Vol. 19, Issue 2, 023117, 2011 (DOI: 10.1063/1.3685736)
2. T. Amino, K. Arakawa, and H. Mori: "Verification of Rate Equation for Recombination between Self-interstitial Atoms and Vacancies (in Japanese)", Journal of the Japan Institute of Metals, Vol. 75, pp.460-464, 2011 (DOI:不明)
3. T. Amino, K. Arakawa, and H. Mori: "Reaction Rate between 1D migrating Self-Interstitial Atoms: An Examination by Kinetic Monte Carlo Simulation", Philosophical Magazine, Vol.91, pp.3276-3289, 2011 (corresponding author). (DOI:10.1080/14786435.2011.575411)
4. M. Tsujino, T. Sano, O. Sakata, N. Ozaki, S. Kimura, S. Takeda, M. Okoshi, N. Inoue, R. Kodama, K. F. Kobayashi, and A. Hirose, "Synthesis of submicron metastable phase of silicon using femtosecond laser-driven shock wave," J. Appl. Phys. 110, 126103 (2011). (doi:10.1063/1.3673591)
5. M. Tsujino, T. Sano, T. Ogura, M. Okoshi, N. Inoue, N. Ozaki, R. Kodama, K. F. Kobayashi, and A. Hirose, "Formation of High-Density Dislocations and Hardening in Femtosecond-Laser-Shocked Silicon," Appl. Phys. Express 5 (2012) 022703. (DOI: 10.1143/APEX.5.022703)

(3-2) 知財出願

- ① 平成 23 年度特許出願件数(国内 2件)
- ② CREST 研究期間累積件数(国内 2 件)