

「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

H24 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)「島根大学」グループ

- ① 主たる共同研究者: 荒河一渡 (島根大学 総合理工学部 物質科学科、准教授)
- ② 研究項目
 - ・電子輸送／光同期オプティクス研究開発

§2. 研究実施内容

2-1 研究項目:1. レーザーバーチャルカソード(LVC)研究開発(阪大グループ)

①研究のねらい

物質中の超高速過渡現象を超高分解能(フェムト秒オーダー、原子～サブナノスケール)でイメージングすることを目的として、レーザー航跡場加速(LWFA)を用いて極短性・大電荷量性・低エミッタンス性・高い単色性を同時に併せ持つ電子ビーム源を開発し、超高時間空間分解能電子イメージングに取り組む。

②研究概要

レーザー航跡場加速(LWFA)スキームによる LVC 電子源を構築するために、レーザー装置、レーザーパルス真空伝送線路と電子入射器用真空容器、パルス駆動超音速ガス標的を整備した。再現性の高い極短(自己入射)入射電子をプラズマから得る為に、レーザーパルス波形制御、外部磁場印等によるプラズマ制御技術を開発する。入射極短電子ビームのエネルギーの増幅と単色化を追求するため、追加速レーザー航跡場(光キャビティ)による段階加速機構の詳細を解明しその制御技術を確立する。

③研究進捗状況/研究成果

③-1 電子入射器

超音速ガス標的に外部磁場を印加しプラズマを制御技術することにより、極めて高い位置安定性の高電荷かつ指向性の高い極短電子パルスビームを発生させることに成功した。この電子ビームをプラズマオプティクスを用いて任意の方向に振り分けるビームステアリングの方法も確立した(図1)。これらにより追加速航跡場への正確な電子入射技術が確立された。

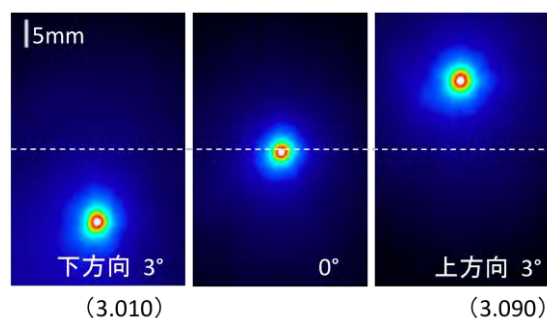


図1 出射方向を制御された電子ビーム

③-2 プラズママイクロオプティクス

プラズマオプティクスは電子入射器および段階加速において安定な電子ビーム生成の鍵となるプラズマ制御技術である。サブピコ～ピコ秒レーザーパルスの動重力による電子排除機構と加熱機構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深いチャンネルを形成することに成功した([Y.Mizuta, *et.,al*, Phys. Rev. ST – AB, 15, 121301 (2012)])。加えて、イオン化を考慮したプラズマ粒子法(PIC)シミュレーションで、チャンネル中のレーザー航跡場励起過程におけるイオン化の影響を検討した。高 Z の標的ガスの実験結果を高い確度で説明することに成功し、これにより電子ビームの大電荷量化について定量的な検討を進めることが可能になった。[K. Makito, *et.,al*, Phys. Plasmas 19, 103104, (2012)]

2-2 研究項目:2. 電子輸送/光同期オプティクス研究開発

(阪大グループ・島根大グループ)

①研究のねらい

プラズマ入射器から発生する電子ビームは、極短性、大電荷性、低エミッタンスビーム性を持つが、エネルギースペクトルにおいては比較的広い分散をもつ。このビームをイメージング標的までにパルスの極短性を維持したまま輸送し、輸送途中にエネルギースペクトルの準単色化も行うビーム補償輸送技術の開発を行う。また、極短電子パルスを用いたイメージングの条件についても電子輸送の設計とあわせて検討を行う。

②研究概要/研究進捗状況/研究成果

②-1 光キャビティーによる電子ビームの単色化

追加速レーザー航跡場(光キャビティー)による電子ビームの単色化の検討を数値計算にて進めてきた。レーザー航跡場の長さ、入射位相、電場強度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大幅な狭帯化が可能であ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最小値 $\Delta E/E \sim 10^{-3}$ 程度が得られ、この検討結果に基づき、2 段航跡場加速の実験セットアップを構築した。

②-2 チャープパルス電子ビーム輸送(CeBT)

電子パルスの極短性を維持しながらイメージング標的まで電子バンチを輸送するチャープパルス電子輸送(CeBT)(23年度特許出願済)ビームラインの製作を開始した。このビーム輸送手法を用いるとイメージング標的位置で~フェムト秒オーダーの電子バンチが得られると期待される。ビームオプティクス(四重極マグネット、電子バンチストレッチャー用永久磁石、圧縮機)の設計制作を開始した。

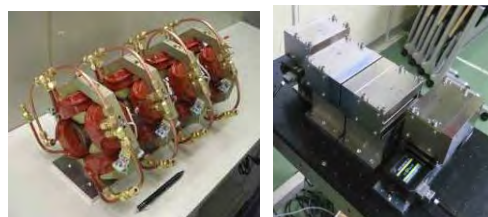


図2 準備中の四重極マグネットと電子バンチストレッチャー用永久磁石アレイ

②-3 イメージングのための条件の検証

LVC を用いたイメージングに最適な応用研究対象の一つは、結晶材料における欠陥および析出物等の第二相のダイナミックな挙動である。逆空間イメージングにおいては、これらは母相からの電子回折スポットに対するエクストラ・スポットとなる。図3に、

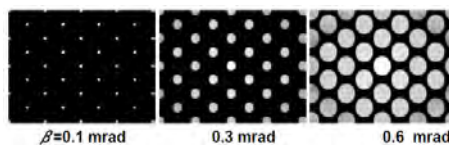


図3 Au(011)に対する逆空間イメージのシミュレーションの例

面方位 (011) の金単結晶に対する逆空間イメージのシミュレーション結果の一例を示す。ここで、結晶の厚みは 23 nm、電子のエネルギーは 3 MeV、結像系レンズの球面収差係数および色収差係数はそれぞれ 10 mm である。 β は、電子の収束角である。エクストラ・スポットを捉えるためのもっとも重要なパラメーターは、 β であり、この値を 0.3 mrad 程度にまで抑える必要があることを明らかにした。

2-3 研究項目:物質ダイナミクス研究(阪大グループ)

①研究のねらい

フェムト秒・原子スケール動的イメージングが可能になれば、物質の種々の相転移の機構が解明される。本研究では、電子源であるレーザーバーチャルカソードと光制御スイッチング技術を一つのプラットフォームに融合し、ポンプ・プローブ法によるフェムト秒・原子スケール動的イメージングシステムを構築する。観測対象として、固体中での衝撃誘起構造相転移とする。金属や半導体といった固体材料をターゲットとし、比較的高強度のレーザーパルスでポンプし衝撃波を駆動し固体中を伝播させ、衝撃高圧負荷過程および圧力解放過程で誘起される構造相転移を光制御極短シングル電子パルスでイメージングする。

②研究概要／研究進捗状況／研究成果

波長 800 nm、パルス幅 130 fs、コントラスト比 10^{-3} のフェムト秒レーザーをポンプレザーとして用い、焦点距離 70 mm の平凸レンズを用いて空气中でターゲット(鉄、アルミニウム、シリコン)に照射した。パルスエネルギーとパルスの重ね合わせ数を変化させた。透過電子顕微鏡を用いてレーザー照射部分を観察し、転位密度を見積もった。透過電子顕微鏡観察用ターゲットとして、厚みおよそ 200 nm とおよそ 500 nm の 2 種類の試料を作製した。2 種類の厚みを用いたのは、正確な転位密度の見積には厚みが大きい方が適して

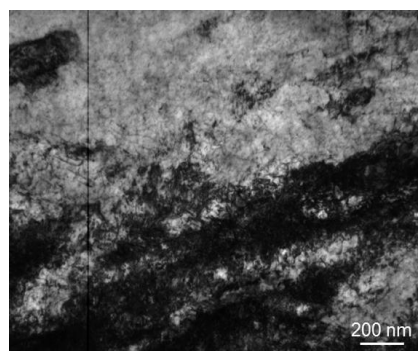


図4 高密度格子欠陥導入された鉄の透過電子顕微鏡像

いるが、フェムト秒レーザー駆動衝撃波によって高密度の転位導入が予想され、この場合厚みが大きいと転位の観察が困難になるからである。透過電子顕微鏡としては、加速電圧 200 kV の汎用透過電子顕微鏡(日立ハイテク社製 H-800、電子銃:LaB6)、加速電圧 200 kV の電界放出型透過電子顕微鏡(日立ハイテク社製 HF-2000、電子銃:電界放出型)、加速電圧 2 MV の超高压透過電子顕微鏡(日立ハイテク社製 H-3000)の 3 種類を用いた。本 CREST 研究で目指す電子の加速電圧は 10 MV 以下であるため、静的電子顕微鏡として世界最大加速電圧である大阪大学超高压電子顕微鏡センターの超高压透過電子顕微鏡を用い、CREST 研究の模擬実験とした。結果として、転位の観察には厚さ 200 nm のターゲットが適していることがわかった。また、鉄、アルミニウム、シリコンのいずれにも、最適なポンプレザー条件で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。代表的な鉄中の格子欠陥の観察結果を図4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。

§3. 成果発表等

(3-1) 原著論文発表

- 論文詳細情報

1. K. Makito, A. Zhidkov, T. Hosokai, J.-H. Shin, S. Masuda, and R. Kodama, "Tonization effects in the generation of wake-fields by ultra-high contrast femtosecond laser pulses in argon gas", *Physics of Plasmas* 19, 103104, 2012 (DOI: 10.1163/1.4757976)
2. Y. Mizuta, T. Hosokai, S. Masuda, A. Zhidkov, K. Makito, N. Nakanii, S. Kajino, A. Nishida, M. Kando, M. Mori, H. Kotaki, Y. Hayashi, S. V. Bulanov, and R. Kodama, "Splash plasma channels produced by picosecond laser pulses in argon gas for laser wakefield acceleration", *Physical Review Special Topics – Accelerators and Beams*, vol. 15, issue 12, pp. 121301 1-10, 2012 (DOI: 10.1103/PhysRevSTAB.15.121301)
3. Yu Shiratsuchi, Hayato Noutomi, Hiroto Oikawa, Tetsuya Nakamura, Motohiro Suzuki, Toshiaki Fujita, Kazuto Arakawa, Yuichiro Takechi, Hirotaro Mori, Toyohiko Kinoshita, Masahiko Yamamoto, and Ryoichi Nakatani, "Detection and In Situ Switching of Unreversed Interfacial Antiferromagnetic Spins in a Perpendicular-Exchange-Biased System", *Physical Review Letters*, vol. 109, No. 7, pp. 77202_1-77202_5, 2012 (DOI: 10.1103/PhysRevLett.109.077202).
4. 辻野雅之, 佐野智一, 尾崎典雅, 坂田修身, 荒河一渡, 大越昌幸, 井上成美, 森博太郎, 兒玉了祐, 小林紘二郎, 廣瀬明夫, "フェムト秒レーザー駆動衝撃波によるシリコン高圧構造の常圧下における残存," *レーザー加工学会誌*, Vol. 19, No. 1, 54 (2012).
5. T. Sano, S. Iwasaki, Y. Ozeki, K. Itoh, and A. Hirose, "Femtosecond Laser Direct Joining of Copper with Polyethylene Terephthalate," *Mater. Trans.* 54 (2013). (accepted)