

高強度フェムト秒レーザープラズマ高速電子パルスによる 高速時間分解電子線回折の実証

Demonstration of ultrafast electron diffraction with fast electron pulse generated in plasma by intense femtosecond laser pulses

阪部 周二 (SAKABE SHUJI)
京都大学・化学研究所・教授



研究の概要

超高強度フェムト秒レーザーと固体との相互作用により生成・加速・放射されるプラズマ電子を電子線源に利用し、単一ショット撮像可能な超高速電子線回折を実証する。高品位電子源の開発を実施した。プリパルスフリーのレーザーパルスと金属薄膜との相互作用により、従来の10倍の電子線量、金属細線ターゲット照射により30倍程度の高指向性電子線が観測された。

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎・薄膜表面界面物性

キーワード：電子顕微鏡，超高速電子線回折，高強度レーザープラズマ

1. 研究開始当初の背景

物質科学やナノ科学の飛躍的な発展とともに、物質の状態やその変化を調べる高い空間と時間分解能を持つ観察手法が必要となる。物質の構造的な動力学を単一原子の振動周期の時間尺度で直接観察する技術として、パルスX線や電子による時間分解回折法が開発されている。電子の原子弾性散乱断面積はX線のそれに比べ約5桁大きいので、時間分解電子線回折は低強度条件下でも原子レベルの分解能で過渡的構造変化を捉えることができると考えられる。しかし、その時間分解能は数psに留まっている。フェムト秒の時間分解で電子線回折により構造変化を直接測定するには、十分な強度のフェムト秒電子パルスが絶対不可欠である。

2. 研究の目的

レーザープラズマ放射線は一般に点源・パルス・高輝度・小型などの特徴を有しており、これらを発展的に利用して本研究を提案実施している。超高速時間分解電子線回折に求められるエネルギー：数100keV、バンチ（パルス）幅：<数100fs、電子数：>100万個程度の電子線源を生成制御し、単一電子パルスによる高速時間分解電子線回折像の取得を実証することを目的とする。

3. 研究の方法

超高強度フェムト秒レーザーと固体（薄膜等）標的との相互作用により、発生・加速・

放射する高エネルギー電子の特性を詳細に調べ、高強度、短パルス電子線源を生成する。さらに、加速電子の運動量広がり特性を利用し、位相反転によるパルス自己圧縮により短パルス化を実現する。この電子源を利用し単一ショットで撮像できる超高速電子線回折を実証する。

4. これまでの成果

(1) レーザープラズマ加速電子の自己圧縮パルス幅の最短実証：

高強度フェムト秒レーザーとポリエチレン薄膜との相互作用により加速する高エネルギー電子パルスを位相反転パルス圧縮した。圧縮の最適化により250fs程度を実現した。レーザープラズマ加速電子の圧縮パルスとしては世界最短であり、自己パルス圧縮の有効性を示すとともに、元の電子パルス幅を短くできれば、代表者らが提案しているパルス圧縮装置により圧縮パルスもさらに短くできることを示した。

(2) レーザー加速プラズマ電子パルス幅がレーザーパルス幅に等しいことの検証に成功：

「フェムト秒電子偏向法」を提案し、2つのレーザー生成加速短パルス電子による自己相関法によりこの検証を行った。2分したレーザーパルスを薄膜ターゲットの異なる2点に照射し、2つの電子パルスを発生する。この発生位置を電子レンズにより観測する。2つの生成電子パルスは互いにクーロン斥力を受けるので、時間差により2点の像の間

隔が変化する．時間差を変化させることにより，この2点間の距離を測定する．他方，電子軌道計算により電子源から撮像スクリーンまでの挙動を求める．実験ではレーザーパルス幅を，計算では電子パルス幅を変化させ時間差と空間間隔の相関を調べた．その結果，ほぼ同相関が得られた，これによりレーザーパルス幅と加速電子パルス幅が同程度であることが世界で初めて検証された．

(3) 電子の高品位化（金属標的による電子線量の増加）：

電子線回折に必要な電子線量を得るために，標的材料と放射電子特性の詳細を調べた．ターゲットをアルミニウム薄膜にすることにより，線量は10倍以上に増加した．しかし，線源の拡大や面方向への放射などの欠点明らかとなり，レーザーパルスのコントラストの向上の必要性が明らかとなった．後述のプラズマミラーを用いることにより，線源の品質は改善された．

(4) プラズマミラーの開発：

プラズマミラー装置を開発しレーザーシステムに導入した．開発したプラズマミラーの性能は反射率 $\sim 70\%$ ，プリパルスコントラスト比の改善 10^4 を示し，世界で報告されているプラズマミラーと比して最高の性能が得られた．

(5) 電子の高品位化（ダブルパルス照射による電子線量の増加）：

レーザーシステムの改造による短パルス化とレーザーの高強度化の結果，ダブルパルス実験が可能となった．薄膜ターゲットのプラズマ化と電子加速をそれぞれ低強度と高強度の短パルスレーザーで行った．その結果，アルミニウム薄膜で，単一パルス照射に比べて，20倍以上の線量増加が確認できた．これらは，世界で初めての成果であり，高強度レーザー加速電子の高い潜在能力を示したものである．

(6) 電子の高品位化（新電子線源の発見）：

アルミニウム標的では面方向に電子放射のあることから，金属ワイヤーを照射すればワイヤーの方向に電子が誘導され指向性の高い電子線が得られると考え検証した．数10mmの金属ワイヤーで薄膜ターゲットに比べて30倍程度の電子線量の増大を確認し，m級の金属細線でも電子が誘導され，細線を用いることにより，極めて指向性の高い電子線が得られる事を発見した．

(7) 新たな THz 放射源の発見：

高強度レーザーと金属細線との相互作用により加速電子を誘導するワイヤー周辺の過渡電場を，(1)のUEDに用いた短パルス電子線を用いて測定した結果，ワイヤーに表面電磁波が走ることを発見した．これは高強度THz源にもなりうるもので，高強度レーザー生成放射線の新たな潜在能力を発掘した．

5. 今後の計画

今までの成果を踏まえて、

- ・電子線のパルス圧縮
- ・圧縮パルス幅の測定法の確立
- ・電子線回折装置の設計と構築
- ・ポンプ法の選定
- ・電子線回折像取得の実証

に取り組む。前期3年の成果から電子源としては

- ・アルミあるいは他の金属薄膜+プラズマミラーによるプリパルスなしパルス
- ・アルミあるいは他の金属薄膜+ダブルパルス（プリパルスなし）
- ・金属ワイヤーターゲット

を候補とし，パルス圧縮を行い，最高品位の電子線源を決定する．

6. これまでの発表論文等（受賞等も含む） (原著論文)

"Enhancing the energy of THz radiation from plasma produced by intense femtosecond laser pulses", F. Jahangiri, M. Hashida, S. Tokita, T. Nagashima, M. Hangyo, and S. Sakabe, *Applied Physics Letters* **102**(19), 191106 (2013).

"Divergence-free transport of laser-produced fast electrons along a meter-long wire target", H. Nakajima, S. Tokita, S. Inoue, M. Hashida, and S. Sakabe, *Physical Review Letters* **110**(15), 155001-(4) (2013).

"Autocorrelation measurement of fast electron pulses emitted through the interaction of femtosecond laser pulses with solid target", S. Inoue, S. Tokita, K. Otani, M. Hashida, M. Hata, H. Sakagami, T. Taguchi, and S. Sakabe, *Physical Review Letters* **109**(18), 185001-(5) (2012).

"Efficient laser-proton acceleration from an insulating foil with an attached small meta disk", K. Otani, S. Tokita, T. Nishoji, S. Inoue, M. Hashida, and S. Sakabe, *Applied Physics Letters* **99**(16), 161501-(3) (2011).

"Femtosecond electron deflectometry for measuring transient fields generated by laser-accelerated fast electrons", S. Inoue, S. Tokita, K. Otani, M. Hashida, and S. Sakabe, *Applied Physics Letters* **99**(3), 031501-(3) (2011).

"Collimated fast electron emission from long wires irradiated by intense femtosecond laser pulses", S. Tokita, K. Otani, T. Nishoji, S. Inoue, M. Hashida, and S. Sakabe, *Physical Review Letters* **106**(25), 255001-(4) (2011).

(受賞)

- ・第8回日本物理学会若手奨励賞 井上峻介
- ・2013京大化研学生研究賞 井上峻介
- ・第7回日本物理学会若手奨励賞 時田茂樹
- ・レーザー学会第32回年次大会優秀論文発表賞 井上峻介
- ・第5回大阪大学近藤賞 時田茂樹

ホームページ等

<http://laser.kuicr.kyoto-u.ac.jp/index.html>