

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 大久保 猛

近年の高強度超短パルスレーザー技術の向上により、いわゆるテーブルトップサイズのテラワット級レーザーが登場し、高エネルギー物理研究分野におけるレーザー運用が比較的容易となった。最近、従来の電子加速に用いられてきた RF 線形加速等の手法とは異なるレーザー航跡場加速という新たな加速機構が注目されている。レーザー航跡場加速により生成するフェムト秒の電子バンチは、現在ピコ秒の時間分解能で行われている放射線パルスラジオリシスをフェムト秒の時間分解能で時間ジッター無しで行うことを可能にする。本論文では、レーザー航跡場加速からのフェムト秒電子バンチ生成を計算・実験両面より実証している。

第1章では、まず、レーザー航跡場加速に関する研究背景を示しており、準単色な電子エネルギー分布が得られた事例を紹介している。つぎに、これまで電子 RF 線形加速器によって行われてきた放射線パルスラジオリシスについて、その時間分解能への要求が従来のピコ秒からフェムト秒へ移ってきていることを概説している。そして、このフェムト秒時間分解測定に対して、レーザー航跡場加速からのフェムト秒電子バンチを用いれば、時間ジッターの無いフェムト秒パルスラジオリシスが可能となるであろうことを主張している。

第2章では、始めにレーザー航跡場加速におけるレーザープラズマ相互作用を線形領域について記述している。しかしながら、実際にはレーザー電場強度が相対論領域であり現象は非線形であることから、その解析のために2次元 PIC シミュレーションを行うとしている。まずは、レーザー入射時における真空・プラズマ境界面での電子密度勾配が緩やかな場合 ($150\mu\text{m}$) と急な場合 ($5\mu\text{m}$) を比較し、レーザー航跡場加速によって得られる電荷量が急な密度勾配によって数倍に増大することを示している。つぎに、単色性を示すピークを持つ電子エネルギー分布を得る機構として、プラズマ中に形成されたチャンネル中をレーザーパルスが進行する際に起こるレーザーの集光・発散に注目している。瞬時入射が起こる場合には得られる電子エネルギー分布が単色性を示すピークを持ち、常時入射が起こる場合にはそのピークが得られずマクスウェル分布になってしまうという結果を示している。これら急峻な密度勾配による電荷量増大と瞬時入射による単色化効果が計算によって示されたのは初めてであり、高品質電子バンチ生成機構の解明へ向けた重要な提案であると言える。

第3章では、コヒーレント遷移放射スペクトル測定による電子バンチ長計測実験について記述している。100 フェムト秒未満のバンチ長を計測することが可能で、かつ現状の不安定性ではショット毎に全く異なるであろう電子バンチ形状をシングルショットで測定すべく、赤外ポリクロメータを用いた遷移放射のスペクトル測定を目指している。遷移放射強度の不足からポリクロメータによるシングルショットでのスペクトル測定には至っていないものの、その代わりにポロメータを使用して電子バンチがチタン膜から空气中へ通る際に放出される遷移放射を測定している。複数種類のハイパス・ローパスフィルタによって波長範囲を限定して遷移放射強度を測定することで、粗いながらも $50\mu\text{m}$ から $300\mu\text{m}$ までのスペクトルを得ている。また、実験で得られた電子エネルギー分布とその時の電子バンチの広がりを示し、準単色エネルギー分布の場合には 70fs 程度しか広がらないのに対し、マクスウェル分布の場合には 2ps 程度に広がってしまうため、 200mm 以下の比較的短波長領域が得られるのは準単色分布であった場合のみであると考察している。シングルショット計測は成し得なかったため、20 ショットに対する平均とその誤差を、電子バンチ形状がガウス分布であると仮定した場合の遷移放射強度の理論曲線とともにプロットして比較しており、実験で得られたバンチ長はガウス分布を仮定すると 180fs から 290fs (FWHM) であると結論付けている。遷移放射のスペクトル観測による電子バンチ長測定は世界初である。この値は従来の電子 RF 線形加速器におけるトップデータに匹敵するものであり、レーザー航跡場加速のフェムト秒電子バンチ生成とそのフェムト秒時間分解応用への大いなる可能性を示している。

以上のように、本論文における研究成果は高い独創性を有しており、フェムト秒ビーム応用への足がかりとして非常に有用なものである。また、システム量子工学の発展に寄与するところが大きいと判断される。

よって本論文は博士(工学)の学位請求論文として合格と認められる。