

SIMULATION STUDY ON ULTRASHORT PULSE ELECTRON GENERATION IN LASER PHOTOCATHODE RF GUN LINAC

K.KAN^{1,A)}, J.YANG, Y.HONDA and Y.YOSHIDA

^{A)} The Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University,
8-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka 567-0047, Japan

Abstract

A new S-band femtosecond electron linear accelerator, which was constructed with a laser driven photocathode RF gun, a linear accelerator (linac) and a magnetic pulse compressor, was developed in Osaka University for the study of radiation-induced ultrafast physical and chemical reactions in femtosecond time regions. In order to generate the ultrashort pulse electrons, we simulated the electron generation in the RF gun with a picosecond Nd:YLF laser light by PARMELA code with space-charge effects. The energy modulation of the electron pulse in the linac was also calculated with the optimum of the RF phase. The pulse compression in the magnetic pulse compressor was simulated by Trace-3D code. A few tens femtosecond electron pulse was obtained by optimizing the magnetic fields in the magnetic pulse compressor.

レーザーフォトカソードRF電子銃ライナックにおける 超短パルス電子線発生シミュレーション

1. はじめに

パルスラジオリシスとは電子線と分析光用のレーザーを同時に物質に入射し、吸光度を測定する事により、放射線化学初期過程を解明することが出来る非常に有効な手段である。これまで阪大産研では、励起源としてLバンドライナックからの電子線を磁気パルス圧縮法によって圧縮したフェムト秒電子線パルスを用い、分析光源としてフェムト秒チタンサファイアレーザー光パルスを用いてサブピコ秒の時間分解能を持つパルスラジオリシスの開発に成功している[1]。現在、パルスラジオリシスの時間分解能の向上と利用実験の拡大を目指してレーザーフォトカソードRF電子銃と新しいS-バンドライナックを導入し、レーザーフォトカソードRF電子銃を用いた低エミッタンスフェムト秒電子線を開発を開始した。

レーザーフォトカソードRF電子銃[2,3,4]から発生した低エミッタンス電子線パルスをRF電子銃下流に設置されたライナックのRF位相を調整することによってエネルギー変調させ、最後に磁気パルス圧縮法を用いてフェムト秒までパルス圧縮する。そのフェムト秒電子パルスを発生するためには、RF電子銃のパラメーター（レーザーの入射位相、空間電荷効果によるエミッタンス増大の補正など）、ライナックにおけるパルスエネルギー変調、パルス圧縮のための磁石の配置や磁場強度などの最適化が必要である。

そこで、フェムト秒短パルス電子線の発生を目的として、PARMELA計算コードを用いてRF電子

銃による電子パルス発生、ライナックにおける電子パルスの加速とエネルギー変調のシミュレーションを行い、レーザーの入射位相、ライナックのRF位相、ソレノイドによるエミッタンス増大の補正などの最適化を行った。また、TRACE-3Dを用いてパルス圧縮のシミュレーションを行い、電磁石の配置や磁場強度の最適化を行った。

2. レーザーフォトカソードRF電子銃ライナック

阪大産研の新規に導入したレーザーフォトカソードRF電子銃ライナックは、低エミッタンス電子線パルス発生用のレーザーフォトカソードRF電子銃、ピコ秒UVレーザー、電子線加速やエネルギー変調用のライナック、電子パルス圧縮用の磁気パルス圧縮器より構成されている。

レーザー光を無酸素銅で作られたカソード表面に照射すると、光電効果による電子が発生する。発生した電子線はRF電子銃加速空洞内の高電場による加速され、電子ビームが生成される。RF電子銃では、100 MV/m以上の高電場を持つため、電子パルス内の空間電荷効果によるエミッタンスの増大とパルス幅の増大を抑えることができる[2,3]。したがって、熱電子銃に比べて、低エミッタンスの電子パルスを生成することができる。ピコ秒の短パルスレーザー光を使えば、ピコ秒の電子パルスを生成することができる。生成された電子パルスはRF電子銃下流に設置されたライナックを用いて加速され、ライナックのRF位相を調整すること

¹ E-mail:koichi81@sanken.osaka-u.ac.jp

によって電子エネルギーの変調を行う。ライナックから発生した電子ビームのエネルギーは35MeVであり、パルス幅はNd:YLFレーザーを照射する場合、約5psである。

3. 磁気パルス圧縮器

ライナックによって加速された電子パルスの圧縮は、2台の45°偏向磁石と4台の四極電磁石から構成された磁気パルス圧縮器を用いて行われる。図1に磁気パルス圧縮器の構成とパルス圧縮原理を示す。すなわち、ライナックでエネルギー変調された電子パルスが磁気パルス圧縮器を通過するとき、個々の電子はエネルギーによって圧縮器を通過する軌道が違ってくる。図1に示すように、エネルギーの高い電子は外側を通り、エネルギーの低い電子は内側を通過する。4台の四極電磁石の磁場強度を調整するによって、エネルギーの高い電子とエネルギーの低い電子の通る軌道長が調整できる。その軌道長の差を調整することによって磁気パルス圧縮装置の出口に電子が同じタイミングで到達でき、パルス圧縮を行う事が出来る。

フェムト秒電子パルスを生成するためには、電磁石の磁場分布を考慮して設置する必要がある。そこで、POISSON[5]コードを用いて磁場分布を計算し、TRACE-3Dコード[6]を用いて四極電磁石の配置や磁場強度の最適化を行った。

4. パルス圧縮のシミュレーション

磁気パルス圧縮法によって圧縮されたパルスの幅は、入力ビームのエミッタンスとエネルギー分散に依存している。本研究では、TRACE-3Dによ

り、磁気パルス圧縮器によるパルス圧縮のシミュレーションを行った。

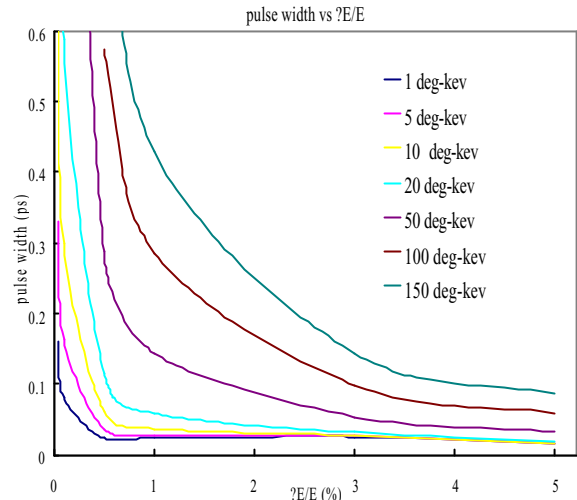


図2: パルス圧縮幅とエミッタンスとエネルギー分散との依存性

図2に、電子パルスの幅と入力ビームの縦方向エミッタンスとエネルギー分散との依存性を示す。そこで、入力ビームの横方向の規格化エミッタンスが2 mm-mradと固定され、電荷量が0 nC/pulse、パルス幅が5psであった。図に示すように、ビームのエネルギー分散が小さい場合、縦方向のエミッタンスがパルス圧縮に支配され、極短パルスを得るためには低エミッタンスのビームが必要であり、ビームのエネルギー分散が数%程度に変調させる必要があることがわかった。

電子ビーム発生とエネルギー変調のシミュレーションについては、PARMELA 計算コード[5]を用

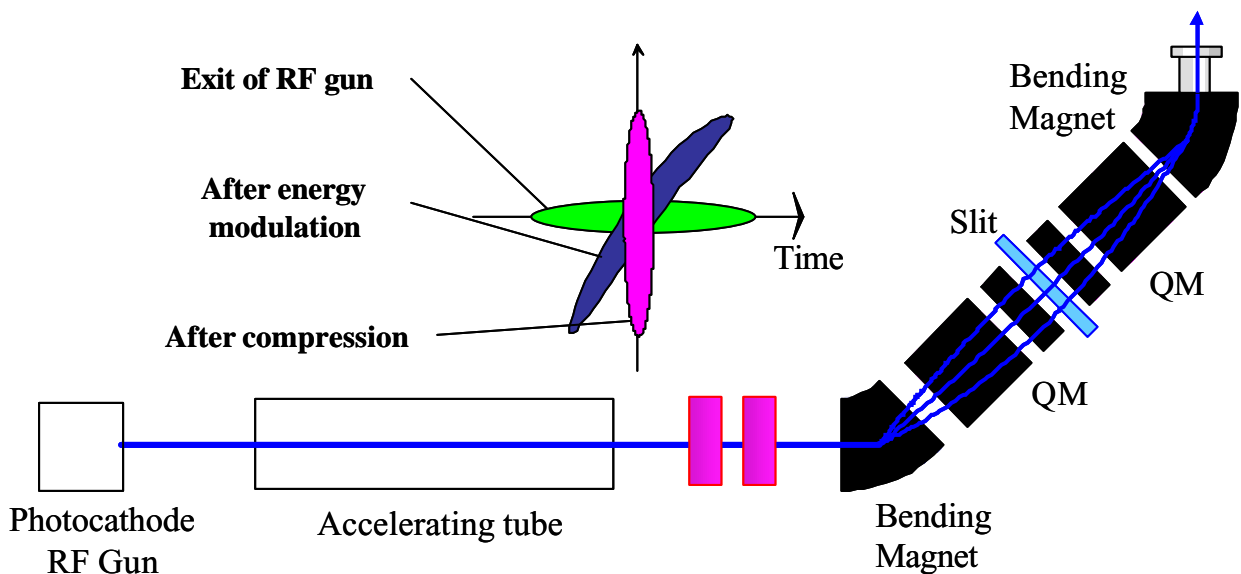


図1: 磁気パルス圧縮装置とパルス圧縮原理

いておこなった。RF電子銃とライナックの空洞内の電場分布をSUPERFISHコードにより計算し、空間電荷効果によるエミッタンスの増大やパルス幅への影響は3次的に個々の粒子間の相互作用を考慮して計算されている。図3に、電荷量が1nC/pulse時のカソードから磁気パルス圧縮器入り口までの縦と横方向エミッタンスの変化の計算結果を示す。そこで、RF電子銃のRF位相は10°に固定され、加速管のRF位相が50°に設定された。また、空間電荷効果による横方向エミッタンスの増大が最小になるように、電子銃出口のソレノイドの磁場強度を変化させた。図3に示すように、磁気パルス圧縮器入り口での横方向の規格化エミッタンスは2.3 mm-mradと得られ、縦方向のエミッタンスは121 deg-keVとなることシミュレーションでわかった。このとき、エネルギーの分散は3.63%であり、ビームエネルギーは35MeVであった。これに対して、磁気パルス圧縮器による圧縮するパルスの幅は200fsであった。

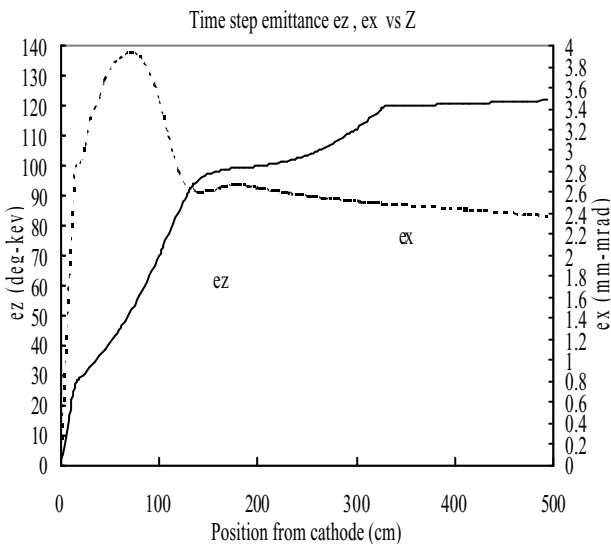


図3：PARMELAによるエミッタンスのシミュレーション結果

また、電荷量を0.1nC/pulseに設定し、PARMELAによるエミッタンスの計算を行い、エネルギー変調のシミュレーションを行った。磁気パルス圧縮器入り口での横方向の規格化エミッタンスは1mm-mrad以下になり、縦方向のエミッタンスは20deg-keV以下になった。エネルギーの分散は約3%になるようにエネルギーを変調すると、磁気パルス圧縮器による20~30fsのパルス圧縮が可能である。

5. まとめ

レーザーフォトカソードRF電子銃ライナックにおける電子パルスの発生とエネルギー変調、磁気パルス法によるパルス圧縮に関するシミュレーションを行った。シミュレーションにより、磁気パルス法によるパルス圧縮率を高めるためには、低エミッタンスビームの発生（エネルギー分散が数%）が重要であることがわかった。また、PARMELAのシミュレーションにより、電荷量が1nCのとき、縦方向エミッタンスが121deg-keV、横方向エミッタンスが2.3mm-mradのビームが得られ、電荷量が0.1nCに減らすと、20deg-keVと1mm-mrad以下の低エミッタンスのビーム発生が可能であった。

今後の課題としては、空間電荷効果を考慮した磁気パルス圧縮器のシミュレーションを行い、磁気パルス圧縮器におけるコーヒレント放射や高次磁場の分布を配慮した計算を行う予定である。

参考文献

- [1] Y. Yoshida, et al., Radit. Phys. Chem., 60 (2001), 313-318.
- [2] J. Yang, et al., J. Appl. Phys., 92 (2002), 1608-1612.
- [3] J. Yang, et al., Nucl. Instrum. Meth. A 491 (2002), 15-22.
- [4] T. NAKAJYO, et al., Appl. Phys. Vol.42 (2003), 1470-1474
- [5] H. Billen, PARMELA User's Manual, Los Alamos Accelerator Code Group, LA-UR-96-1835.
- [6] K.R. Crandall, et al., TRACE-3D User's Manual, Los Alamos National Laboratory, LA-UR-90-4146