

Theoretical Studies of Higher Order Effect and Coherent Synchrotron Radiation in Magnetic Femtosecond Electron Bunch Compressor

K. KAN¹, J. YANG, T. KONDOH, A. YOSHIDA, Y. YOSHIDA
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 bunch compressor, was developed in Osaka University for the study of radiation-induced ultrafast physical and chemical reactions on femtosecond time scale. In last year, an electron bunch with bunch length of 98 fs in rms were generated. For the realization of the pulse radiolysis with higher time resolution, a more short electron bunch is required. However, the higher order effect and coherent synchrotron radiation in magnetic electron bunch compressor should be considered and reduced for the generation of the such electron bunch. In this paper these effects in the compressor by TRANSPORT code and PARMELA code.

フェムト秒磁気パルス圧縮における高次モードとCSRの影響

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]。

2002年から、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電子銃を用いた新しいS-バンドライナックを導入し、低エミッタンス、100fs以下のフェムト秒電子線の発生を開発している。

現在、98fs(rms)の電子線の発生に成功している。しかし、さらに短いパルス幅の電子線を得るためには、高次モードやCSRによるパルス幅への影響を理論的に解析し、その影響を補正する必要がある。そこで、100fs以下の超短パルス電子線の発生を目的として、TRANSPORT計算コードを用いて、高次モードによるパルス幅の増大を見積もり、圧縮に要求される時間方向の位相空間分布を求めた。また、PARMELA計算コードを用いて空間電荷効果を考慮し、四極電磁石の磁場勾配の最適化を行った。磁気パルス圧縮機における高次モードを補正、RF電子銃に照射するレーザーの波形整形による空間電荷効果の低減を図った。

2. レーザーフォトカソードRF電子銃ライナック

レーザーフォトカソードRF電子銃ライナックは、図1に示すように、レーザーフォトカソードRF電子銃、Nd:YLFピコ秒レーザー、2m進行波型ライナック、40MWクライストロン、偏向電磁石2つと四極電磁石4つからなる磁気パルス圧縮器より構成されている。

レーザーUV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]。生成されたピコ秒電子パルスは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によって、先頭の電子は高いエネルギーを持ち、後ろの電子は低いエネルギーを持つように、電子エネルギーの変調を行う。ライナックから加速された電子ビームのエネルギーは32MeVである。また、ライナック出口でのパルス幅は、約5ps(FWHM)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

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

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来る。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を調整できる。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、磁場中高次モードによるパルス幅の増大を抑える必要がある。そこで、ライナックの位相によるエネルギー変調を最適化し、四極電磁石を用いて高次モード効果の補正を行った。

4. 電子パルスの位相とエネルギー変調

まず、ライナックの位相と加速エネルギー変調を考える。加速管出口での電子エネルギーは

$$E_0 \approx E_i + eV_l \cos(k_s z + \phi_l) \quad (1)$$

により与えられる。ここで、 E_0 は加速管出口でのエネルギー、 E_i は電子銃出口でのエネルギー(4MeV)、 V_l は加速管の電圧(31MV)、 k_s はSバンドRF波数($2\pi/\lambda$)、 ϕ_l は加速管の位相とする。

この式から、電子銃における電子パルスのエネルギー変調は無視し、パルスの中心からzだけ離れた電子のもらうエネルギーはzにより表すことができ、

$$\frac{\Delta E}{E_0}(z) \approx \frac{-eV_l k_s \sin \phi_l}{E_0} z + \frac{-eV_l k_s^2 \sin \phi_l}{2E_0} z^2$$

$$\frac{\Delta E}{E_0}(z) \approx az + bz^2 \quad (2)$$

となり、位相空間の分布を表すことができる。

ところで、ビームを構成する電子の運動は、輸送行列(transfer matrix)によって近似できる。また、輸送行列は磁気パルス圧縮器の偏向電磁石や四極電磁石の有効長、磁場勾配によって計算され、磁気パルス圧縮器出口でのパルス幅は、偏向電磁石や四極電磁石の磁場勾配の関数となる。圧縮器出口における、時間軸の位相空間分布は、圧縮器入り口における時間軸の位相空間分布の写像となり、

$$z_f \approx z_0 + R_{56} \left(\frac{\Delta E}{E} \right) + T_{566} \left(\frac{\Delta E}{E} \right)^2 \quad (3)$$

と得られ、圧縮前の電子の時間軸の位置に対する、圧縮後の位置を計算することができる。つまり、エネルギー変調から圧縮後のパルス幅を計算することができる。そこで、磁気パルス圧縮器における R_{56} 、 T_{566} をTRANSPORT計算コードにより求めた。

ここで、圧縮器の輸送行列はachromaticを満たす必要がある。つまり、 $R_{16}=R_{26}=0$ となる必要がある。また、対称性から $Q_3=Q_6$ 、 $Q_4=Q_5$ 、ビームのエネルギーは35MeV、とした。そのときに得られる、 Q_3 と、 Q_4 の磁場強度の関係と R_{56} と T_{566} を図2に示す。

図2より、achromaticを満たすとき、 R_{56} は-63mm(一定)となり、 Q_3 、 Q_4 に依存しない。また、 T_{566} は、 $Q_3(Q_4)$ とともに変化し、-550mm以下となり、さらに $Q_3=180\text{G/cm}$ 、 $Q_4=60\text{G/cm}$ のとき、 $T_{566}=-550\text{mm}$ となり、最大値を持つ。つまり、ライナック出口でのパルス幅 $\sigma_z=1.3\text{ps} \div 0.40\text{mm (rms)}$ としたとき、必要なエネルギー分散は、 $dE/E \div \sigma_z/R_{56}=0.60\%$ と見積もることができる。

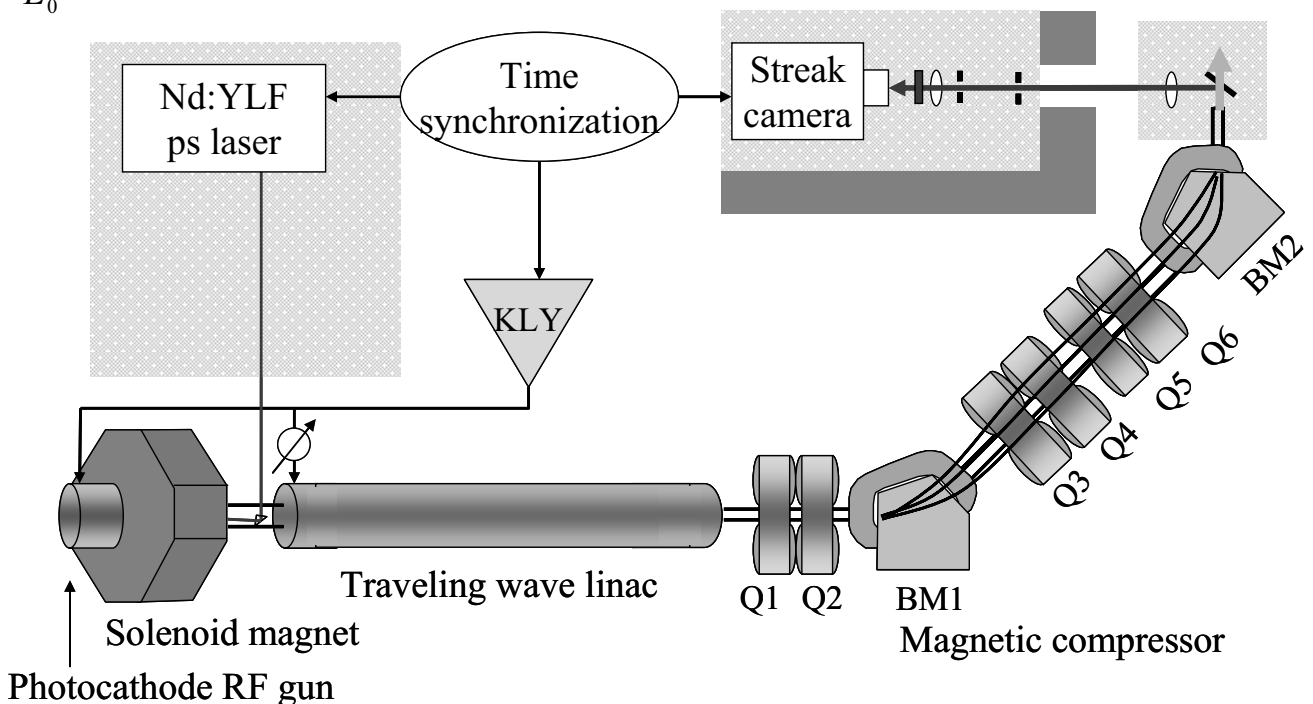


図1 フォトカソードRF電子銃ライナック

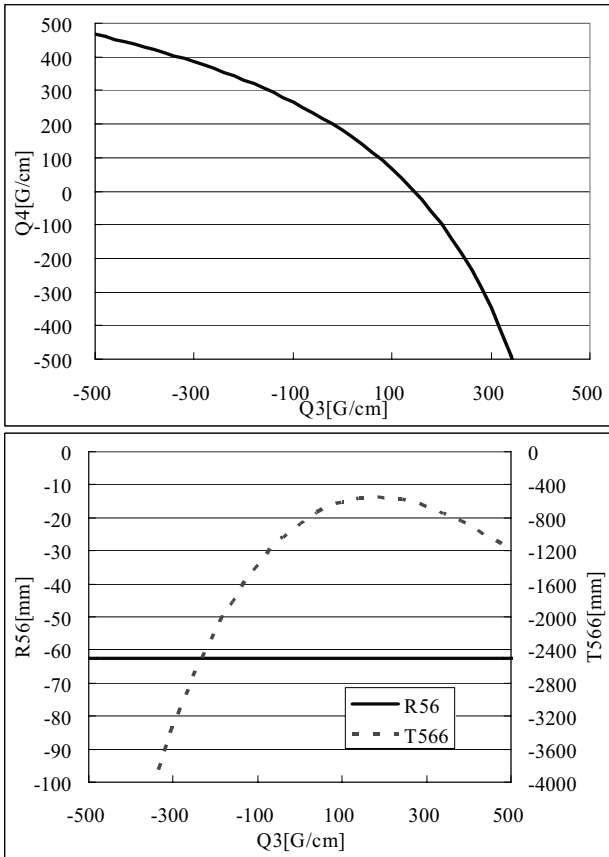


図2 achromaticを満たすときの
Q3とQ4の磁場強度とR₅₆とT₅₆₆

さらに、(2)式により得られる位相空間分布から、2次効果(T₅₆₆)によるパルス幅の増大を見積もった。まず、圧縮前のパルス幅は $\sigma_z=1.3\text{ps(rms)}$ 、 $R_{56}=-63\text{mm}$ と固定した。そこで、加速管の位相 ϕ_1 (位相空間分布)、T₅₆₆(ただしT₅₆₆<-550mm)を変化させた。さらに、(2)式を(3)式へ代入することにより圧縮器出口におけるパルス幅の計算を行った。その結果、パルス幅が最小になるとき、 $\phi_1=17^\circ$ 、 $dE/E=0.60\%$ 、 $R_{56}=-63\text{mm}$ 、 $T_{566}=-750\text{mm}$ と得られた。これらの値を用いて、圧縮前の位相空間分布が非線形であるためT₅₆₆項の補正(点線)、圧縮前の位相空間分布が線形のためにT₅₆₆によるパルス幅が増大(点線)する様子を図3に示す。つまり、加速管における非線形位相空間分布を利用することにより((2)式の $b \neq 0$)、輸送行列における2次効果(T₅₆₆)を補正することができる。しかし、さらには3次効果によるパルス幅の増大を考慮する必要がある。

5. 空間電荷効果によるパルス幅の増大

さらに、PARMELA計算コードにより、高次モード効果、空間電荷効果を考慮したパルス幅の増大を見積もった。(2)式により得られる位相空間分布を用いて、achromaticとなるように、Q3、Q4を調整することにより、パルス幅を計算した。

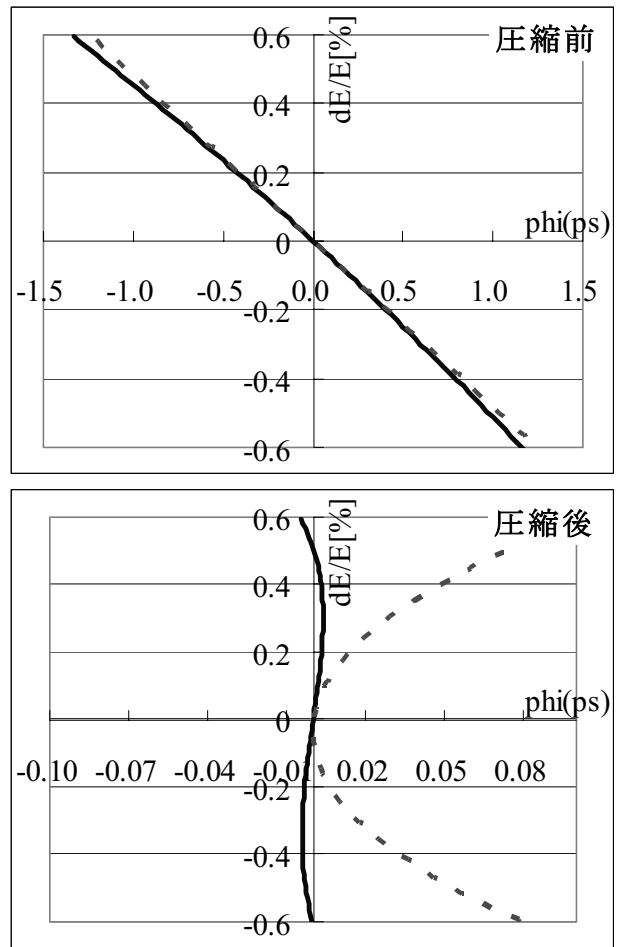


図3 磁気パルス圧縮器でのT₅₆₆によるパルス幅の増大(点線)、加速管における非線形位相空間分布を利用してT₅₆₆項の補正(実線)

6. まとめ

フェムト秒磁気パルス圧縮における高次モードによる、パルス幅の増大を見積もった。T₅₆₆によるパルス幅の増大は、加速管における非線形位相空間分布を利用することにより補正できることがわかった。今後は、RF電子銃に照射するレーザーの波形整形による空間電荷効果の低減、3次効果を考慮および補正、CSRによるパルス幅の増大の計算を行う。

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.