

Effects of space-charge and emittance in femtosecond bunch compression

Koichi Kan¹, Jinfeng Yang, Takafumi Kondoh, Yoichi Yoshida

The Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University, 8-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka, 567-0047

Abstract

Beam dynamics of femtosecond electron bunch in the magnetic bunch compressor were investigated with particle simulation. The growth of bunch length due to the space-charge and emittance effects in the bunch compression was calculated and compared with the experimental results.

パルス圧縮における空間電荷効果とエミッタンスの影響

1. はじめに

阪大産研では、レーザーフォトカソードRF電子銃、S-バンド加速管、磁気パルス圧縮器を導入し、フェムト秒電子パルスの発生とフェムト秒パルスラジオリシスの開発を行っている。現在は、フォトカソードRF電子銃を用いて低エミッタンスのピコ秒電子パルスを発生し、ライナックより加速の共にパルス圧縮時高次効果を補正するための非線形エネルギー変調を行い、98フェムト秒の短パルス電子ビームの発生に成功した。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、サブフェムト秒・アト秒電子パルスの発生方法を開発している。超短パルス電子線を発生するためには、パルス圧縮における磁場中高次効果、空間電荷効果とエミッタンスによるパルス幅への影響を理論的に解明する必要がある。そこで、本研究では、PARMELA計算コード [1] を用いてそれらのパルス幅への影響をシミュレーションにより評価を行い、実験データとの比較を行った。

2. レーザーフォトカソードRF電子銃ライナック

本ライナックは、フォトカソードRF電子銃、S-バンド進行波型ライナック、磁気パルス圧縮装置、40MWクライストロンから構成されている。RF電子銃はS-バンドの1.6セルの加速空洞をもち、カソードの材質は無酸素銅である。電子ビームの発生には、Nd:YLFレーザーの4倍高調波(266nm)を用いている。レーザーをカソードに照射すると、光電効果により発生した電子は空洞内の高電場で加速される。生成された電子ビームは電子銃下流に設置されたライナックを用いてさらに32MeVまで加速され、エネルギー変調をかけられる。加速された電子ビームは偏向電磁石2台(B1、B2)、四極電磁石4台(Q3~Q6)からなる磁気パルス圧縮装置に入り、パルス圧縮される[図1]。

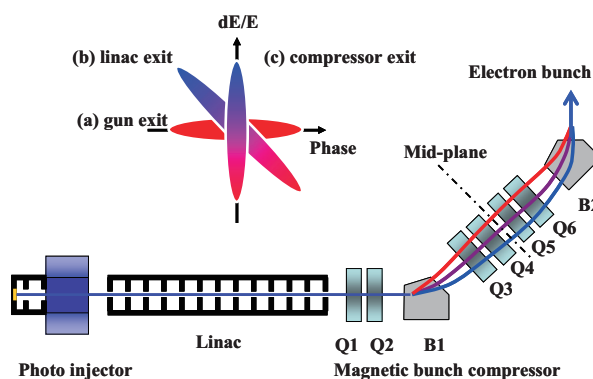


図1 フォトカソードRF電子銃ライナック

3. シミュレーション結果と考察

パルス圧縮における空間電荷効果とエミッタンスの影響を解明するために、圧縮器の1m手前から、圧縮器出口までのビームダイナミクスのシミュレーションをPARMELA計算コード [1] により行った。電磁石、初期ビームのパラメータ設定、計算手順について述べる。

まず、電磁石のパラメータ設定について述べる。径方向エミッタンスによるパルス幅の増大を抑えるためには、圧縮器出口でのエミッタンス増加を抑える必要がある。つまり、achromaticityを満たす必要があり、軌道の対称性からエネルギーによらず全ての電子が圧縮器の対称面(Mid-plane)に対して垂直に入射する必要がある。よって、四極電磁石の磁場強度を $Q3=Q6$ 、 $Q4=Q5$ とカップリングを行った。そこで、TRANSPORT計算コード [2] により、圧縮器出口における転送行列の $R_{16} = R_{26} = 0$ となるような四極電磁石の磁場を求めた。その結果、あるQ3の磁

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

場強度に対し、Q4の磁場強度は一意に定まり、 $R_{56} = -63 \text{ mm}$ (一定)、 $T_{566} \leq -550 \text{ mm}$ と得られた [3]。また、シミュレーションでは、2次効果の影響が小さい $T_{566} = -550 \text{ mm}$ となる、磁場強度をQ3 = 180 G/cm (Focus) Q4 = -60 G/cm (Defocus)とした。更に、2次効果を補正するために、2台の六極電磁石を偏向電磁石B1の下流と偏向電磁石B2の上流に対称に設置し、シミュレーションを行った。

次に、初期ビームのパラメータ設定について述べる。初期パルス幅、エネルギーを、それぞれ2.1 ps (rms)、35 MeVとした。また、径方向に関しては、径方向の空間電荷効果を一定にするために、x、y方向共に同じエミッタンスで、ビームサイズは0.5 mm (rms)とした。軸方向に関しては、 $R_{56} = -63 \text{ mm}$ であることから、圧縮後パルス幅を最小にするためのエネルギー分散を $dE/E=2.1 \text{ ps} / 63 \text{ mm} = 1.0 \%$ とした。

最後に計算過程について述べる。まず、径方向のエミッタンス増大を最小にするように、x,y方向の初期ツイスパラメータ(α_x , α_y)をスキャンし、最適化を行った。 β は、ビーム径を0.5 mmと一定にしているためエミッタンスにより一意に定まる。この最適化は、色収差によるエミッタンス増大を最小化するエンベロープマッチングに相当する。更に、パルス幅が最小になるように、六極電磁石の磁場強度とz方向のツイスパラメータ(α_z)をスキャンし最適化を行った。これは、2次効果の補正を行うためである。

3.1 径方向エミッタンスによるパルス幅の増大

空間電荷効果を考慮しない、圧縮後パルス幅の径方向エミッタンス依存性を図2に示す。径方向のエミッタンスが増加すると、圧縮後のパルス幅も増加する。特に、軸方向のエミッタンスが50deg-keV以下の場合、径方向のエミッタンスがパルス幅に支配していることが分かった。これは、径方向のエミッタンスが大きくなると、径方向の運動量分散も大きくなり、磁気パルス圧縮器での軌道へのずれが生じるためである。その結果、軸方向エミッタンスの増加となり、パルス幅の増加となる。パルス幅は、軸方向エミッタンスが低いと、径方向エミッタンスに依存しやすく、高いと、径方向エミッタンスに依存しにくくなる。

3.2 軸方向エミッタンスによるパルス幅の増大

図3に、圧縮後パルス幅の軸方向エミッタンス依存性を示す。データには、空間電荷効果を考慮しない。径方向のエミッタンスが10mm-mrad以下の場合、磁気パルス圧縮によるパルスの幅は、軸方向エミッタンスに支配されていることが分かる。つまり、 R_{56} は一定であるため、圧縮に最適なエネルギー分散は、パルス幅に応じて、一意に定まる。パルス圧縮の過程で、電子の加速減速は行われなため、圧縮後のエネルギー分散変わらない。つまり、軸方向エミッタンスがパルス圧縮前後で保存されるとすれ

ば、z方向の分散は軸方向位相空間分布の面積である軸方向エミッタンスに比例する。そのため、軸方向エミッタンスは、軸方向位相空間分布における面積であり、圧縮前後の軸方向エミッタンスが保存するとすれば、比例することになる。そのため、径方向エミッタンスが低いとき、軸方向エミッタンスが保存しやすく、パルス幅は軸方向エミッタンスに比例し、径方向エミッタンスが高いときは、軸方向エミッタンスが増大し、パルス幅も増大する。

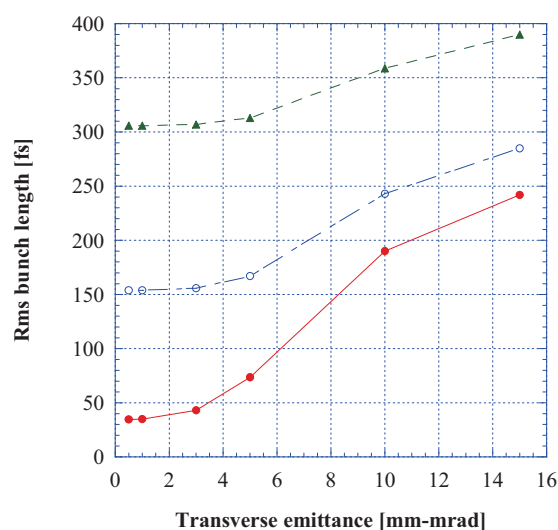


図2 圧縮後パルス幅の径方向エミッタンス依存性(軸方向エミッタンスが10 deg-keV(●)、50 deg-keV(○)、100 deg-keV(▲))

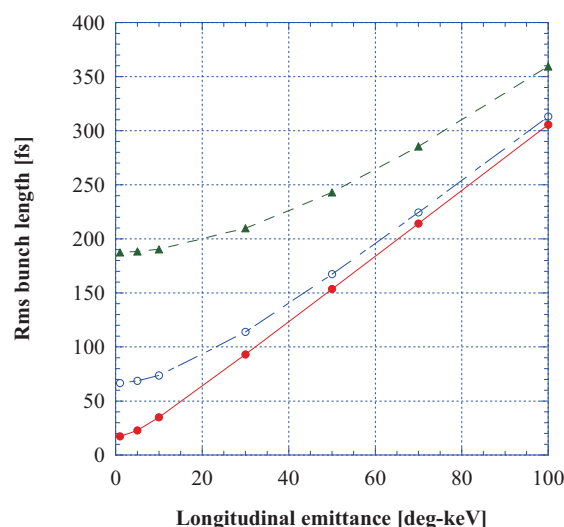


図3 圧縮後パルス幅の軸方向エミッタンス依存性(径方向エミッタンスが1 mm-mrad(●)、5 mm-mrad(○)、10 mm-mrad(▲))

3.3 空間電荷効果によるパルス幅の増大

圧縮後パルス幅の空間電荷効果依存性を図4に示す。電荷量が増加すると空間電荷効果により、圧縮後のパルス幅は増加する。これは、空間電荷効果を考慮しない計算結果からもわかるように、軸方向エミッタンスに圧縮後のパルス幅が比例することから、圧縮時の空間電荷効果が強くなるためである。軸方向エミッタンスが低いとき、空間電荷効果によるパルス幅の増大は大きくなり、軸方向エミッタンスが高いとき、パルス幅の増大は小さくなる。

3.4 実験結果とシミュレーション結果

電子銃から圧縮器出口までのシミュレーションと電子パルス圧縮実験 [4] との比較を行った。シミュレーションでは、電子銃での加速位相は 30° 、加速管での加速位相を最適なエネルギー分散を持つように加速を行った。圧縮器上流の四極電磁石Q1、Q2の磁場強度を出口での径方向エミッタンス増大が最小となるように行った。シミュレーションでのパルス幅は、軸方向エミッタンスに依存していることを確認した。実験結果では、圧縮器上流の四極電磁石Q1、Q2を最適化していないため、圧縮器出口での径方向エミッタンスが圧縮器入口のエミッタンスに比べて増大し、径方向エミッタンスの増大によりパルス幅の増大が含まれ、実験で観測されたパルス幅はシミュレーションに比べて大きくなっていることと考えられる。

4. まとめ

磁気パルス圧縮における径方向と軸方向のエミッタンス、空間電荷効果によるパルス幅の増大を理論的に検討し、フォトカソードRF電子銃ライナックと磁気パルス圧縮におけるフェムト秒電子線パルスの生成シミュレーションを行い、シミュレーションから得られたパルス幅と実験で測定した結果を比較し、エミッタンスと空間電荷効果によるパルス幅の増大を評価した。その結果、超短パルス電子線を発生するためには、径方向と軸方向共に低エミッタンス化する必要があることが分かった。

今後は、サブフェムト、アト秒電子線パルス発生のためのビームダイナミクスの計算を行う予定である。

参考文献

- [1] Lloyd Young et al., Proceedings of PAC2003, 3521 (2003)
- [2] Karl L. Brown, SLAC Report-75 June (1982)
- [3] K. Kan et al., Proc. of linear accelerator meeting in Japan, 349 (2005).
- [4] J. Yang et al., Nucl. Instr. and Meth., A 556, 52-56 (2006).

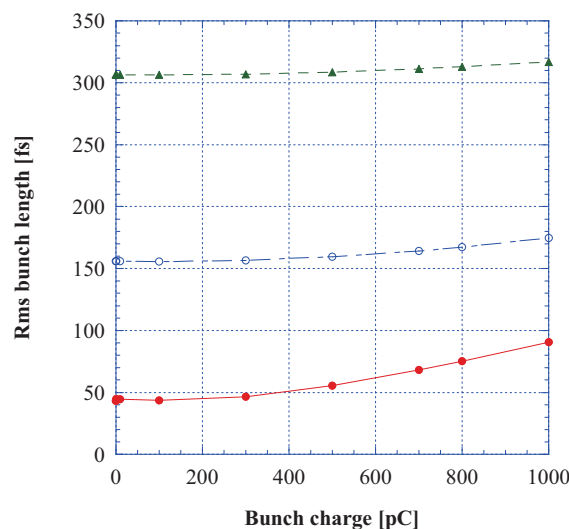


図4 圧縮後パルス幅の電荷量依存性(径方向エミッタンスが3 mm-mrad、軸方向エミッタンスが10 deg-keV(●)、50 deg-keV(○)、100 deg-keV(▲))

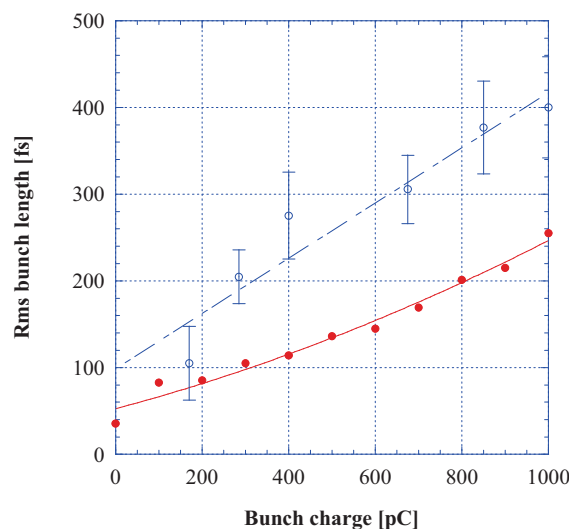


図5 圧縮後パルス幅の電荷量依存性(シミュレーション結果(●)と実験結果(○))