

MEASUREMENT OF EMITTANCE FOR ELECTRON BUNCHES COMPRESSED BY VELOCITY BUNCHING VIA DOUBLE-SLIT-SCAN METHOD

Hokuto Iijima^{1,A)}, Ryoichi Hajima^{A)}, Mitsuru Uesaka^{B)}, Akira Sakumi^{B)}, Fumito Sakamoto^{B)}, Toru Ueda^{B)}

^{A)} Free Electron Laser Research Group, Advanced Photon Research Center, Japan Atomic Energy Research Institute
2-4 Shirakata-Shirane, Tokai, Naka, Ibaraki, 319-1195

^{B)} Nuclear Engineering Research Laboratory, University of Tokyo
2-22 Shirakata-Shirane, Tokai, Naka, Ibaraki, 319-1188

Abstract

We report the availability of velocity bunching in an energy recovery linac (ERL) by a numerical analysis, and the plan of precise measurement of bunching emittance via a double-slit-scan method. The simulation performed for eight TESLA-type cavities reveals successful bunch compression from 3.2 ps to 0.17 ps. Since the residual energy spread after velocity bunching is considerably smaller than the correlated energy spread required for magnetic compression through a recirculation loop, velocity bunching is useful to realized short-pulse and high-brightness X-rays by ERL. The emittance of velocity bunching was calculated to be $1.5 \pi \text{mm.mrad}$ for the bunch charge of 77pC without the emittance compensation by an external solenoid field. Although the emittance growth due to the space-charge effect was small in the simulation, it is necessary to evaluate the emittance-growth mechanism under velocity bunching. Therefore, the emittance measurement via double-slit-scan method is carrying out in the UTNL-18L.

Velocity Bunchingされた電子バンチのダブルスリット法による エミッタンスの測定

1. はじめに

エネルギー回収型超伝導リニアック (ERL) は、次世代放射光源として高輝度かつコヒーレントなX線発生を実現する技術として注目を浴びている。こうしたX線の利用方法は様々であるが、その1つに pump-and-probe法による超高速現象の観測が挙げられ、こうした実験では高時間分解能を必要とすることから、100fs程度の電子バンチの生成が要求される。

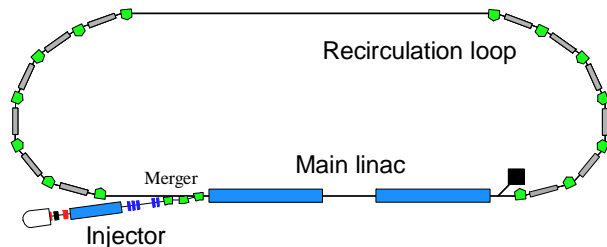


図1: ERLの概念図。

典型的なERLは図1に示すようにinjector、main linacおよび偏向電磁石で構成されるrecirculation loopからなる。これまでの、電子バンチの圧縮はこのrecirculation loopで行うことが考えられてきた^{[1]-[3]}。理由としては、mergerでのエミッタンス増大を避け

るためinjectorからの電子バンチの幅は十分長いほうが望ましいこと、main linacではhigher order mode (HOM) の誘起を防ぐため、やはりバンチ幅が長いほうが望ましいこと、main linacの途中にchicane型の圧縮器をおいた場合、加速電子と減速電子のエネルギーの違いからパスが変わってしまい、結果としてそれぞれの電子の位相差180度が保てないことが挙げられる。しかし、recirculation loopでの圧縮、つまりarc型の圧縮器を用いる場合^[1]、電子バンチにエネルギー差を与える必要がある。例えば、6GeV-3psの電子バンチを100fsに圧縮するためには0.34%のエネルギー拡がりが必要となる。これは超高速現象実験に必要なX線の輝度を達成するには不利な要因である。

そこで我々は、エネルギー拡がりの問題を解決する電子バンチ圧縮の手法として、TESLA-type (1.3GHz、定在波型、加速管1本あたり9cell)のmain linac^[4]を用いたvelocity bunching^[5]を考えた。

2. ERL main linacでのvelocity bunching

2.1 ERL固有の問題

Velocity bunchingは本来、エネルギー回収を行わない常伝導加速器を用いて電子バンチを圧縮することを前提としている^[5]。圧縮は電子バンチの加速器

¹ E-mail: hokuto@popsvr.tokai.jaeri.go.jp

への入射位相を0度付近に合わせ、バンチの前方と後方に速度差を与えることで行われる。このため通常の加速よりも得られるエネルギーは低く、バンチの電荷量が多い場合は空間電荷効果によるエミッタンスの増大が無視できない。このため、圧縮中の電子バンチに対してソレノイドコイルによる外部磁場を用いてエミッタンス補償を行う。しかし、ERLでは超伝導を用いるため外部磁場を与えることができない。また、圧縮中の電子バンチは加速位相に対してslippageを起こすため、加速と減速のバンチが圧縮区間において常に180度の位相差を保つことができない。さらにmain linacで圧縮を行うのでHOMの問題が浮上する。

しかしエネルギー拡がりに関しては、バンチのエネルギーが低い段階で圧縮を行うので、これをそのまま加速することで拡がりを抑えることが可能である。

2.2 Velocity bunchingの取出し位相と圧縮効率

加速電場中の電子の動きを表すハミルトニアンは不変量で、次式で表せる^[5]。

$$\gamma - \beta_r \sqrt{\gamma^2 - 1} - \alpha \cos \xi = \gamma_0 - \beta_r \sqrt{\gamma_0^2 - 1} - \alpha \cos \xi_0 \quad (1)$$

ここで、 γ は電子のエネルギー、 β_r は位相速度、 ξ は電子からみた加速の位相である。添字の0は始状態をあらわす。 α は無次元の加速勾配をあらわすパラメータで、8.5 MV/m の定在波に対しては $\alpha = 0.64$ となる。

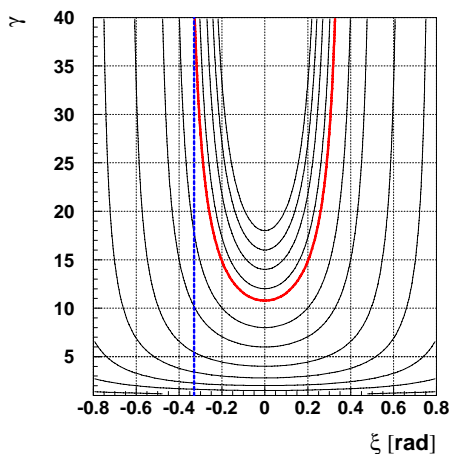


図2 : $\alpha = 0.64$ に対する phase contour plot

図2は、 $\alpha = 0.64$ に対する位相の等高線で、赤いラインは入射エネルギー5MeV、 $\xi_0 = 0$ radに相当する。これより十分圧縮されたときの取出し位相(図2中青い軸)は-0.32radとわかる。このことから圧縮効率は^[5]、 $C = 16$ となり(入射時のエネルギー拡がりを0.25%とした。)入射のバンチ幅3.2psに対して0.2psに圧縮されることとなる。

2.3 シミュレーション

2.2節の計算を元に、空間電荷効果によるエミッタンスの増大を考慮するためPARMELA^[6]によるシミュレーションを行った。シミュレーションのパラメータは2.2節の値のほか、バンチあたりの電荷量を77pC、エミッタンスを $1\text{mm} \cdot \text{mrad}$ とした。また、加速管は8本としエミッタンス補償のための外部磁場は仮定しない。図3はこのシミュレーションの結果である。上から加速管のそれぞれの位置におけるビームサイズ、エミッタンス、バンチ幅、エネルギーの変化を示している。結果はエミッタンスが $1.5\text{mm} \cdot \text{mrad}$ 、バンチ幅0.17ps、エネルギー21MeVであった。0.17psというバンチ幅は2.2節の計算とほぼ一致し、超高速現象実験からの要求をほぼ満足する。また、エネルギー拡がりは0.5MeVで、この後6GeVまで加速されるとすると、0.01%に相当する。この値はarc型圧縮器に必要な0.34%より十分小さい。

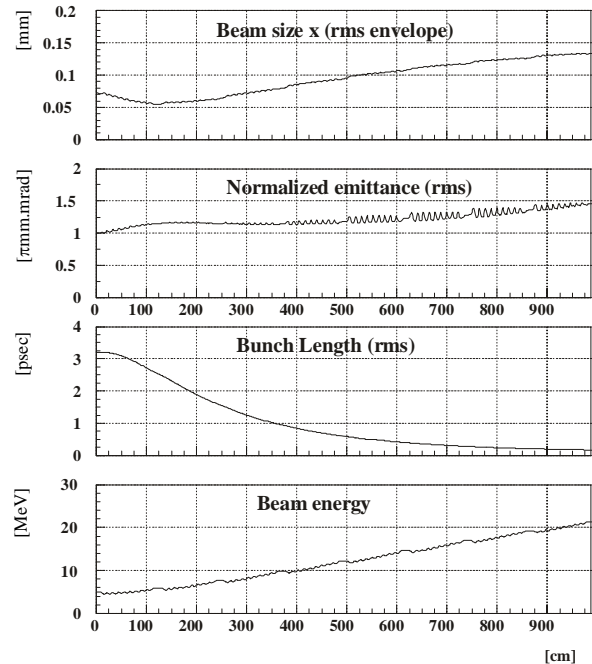


図3 : 9本のTESLA-type加速管に対する velocity bunchingのシミュレーション結果

2.4 エネルギー回収とHOM

Velocity bunchingは圧縮中に電子バンチが位相をslippageするので、加速と減速のバンチの位相差を180度に保つことができない。このことは、加速できる電流を制限することになる。そこで、平均電流5mAの加速にどの程度のRFパワーが必要かを試算した。

ここでは加速位相のcrest (zero-cross) を0 (90)度と定義する。2.3節で行ったシミュレーションから加速電子の入射と取出しの位相はそれぞれ、82度と77度であった。減速の電子が圧縮の最後のセルで

位相差が180度になるように調整すると、入射と取出しの位相はそれぞれ、248度と257度になる。このときバンチの加速に必要なRFパワー P_g は、

$$P_g = \frac{P_c}{4\beta} \left[(1 + \beta) + \frac{I_0 R_a \cos \phi_s}{V_c} \right]^2 \quad (2)$$

であらわせる。ここでそれぞれの物理量とその値はTESLA-typeを参考に、キャビティの損失 $P_c = 7.47\text{W}$ 、結合定数 $\beta = 588$ 、シャントインピーダンス $R_a/Q = 1036\Omega$ 、キャビティ電圧 $V_c = 8.8\text{MV}$ とした。また、入射時の加速・減速バンチのそれぞれの位相から $I_0 \cos \phi_s = 1.2\text{mA}$ である。これより必要なRFパワーは $P_g = 12.6\text{kW}$ となるが、これは現在考えているIOT RF源の出力25kWよりも下回っており、velocity bunchingが可能であることがわかった。

HOMに関しては、TESLA-typeを参考に、そのパワーが3ps 100mAのビームに対して170W、0.17ps 5mAに対して13Wと計算しており、ほぼ問題がないと考える。

3. ダブルスリット法によるエミッタンス測定の必要性

2章の議論で、velocity bunchingがERL放射光源に対して有用であることを示した。特にエネルギー拡がりに関してはarc型圧縮器よりも、十分小さく抑えることができる。しかしエミッタンスに関する議論はもう少し必要であると考え。Velocity bunchingの実証実験はこれまで、BNL-DUVFEL^[7]、LLNL-PLIADDES^[8]、UTNL-18L^[9]などで行われてきた。ここでは常伝導の加速器でバンチあたり200pC～1nCの電荷量で実験を行い、それぞれsub-picosecond以下の圧縮に成功している。しかしエミッタンスに関しては、もともと $10\pi\text{mm} \cdot \text{mrad}$ のオーダーで議論しており、今回我々が考える $1\pi\text{mm} \cdot \text{mrad}$ よりも大きい。そこで我々はUTNL-18Lを利用してvelocity bunching時の $1\pi\text{mm} \cdot \text{mrad}$ 程度のエミッタンスの測定を行うこととした。

これまでUTNL-18Lではエミッタンスの測定にQ-scan法を使用してきた。しかし、velocity bunchingは加速管後のエネルギーが低いこと、通常加速に比べればエネルギー拡がり大きいことから高精度の測定には向かない。そこで今回はダブルスリットスキャン法を用いて測定を行うことを考えた(図4の写真はUTNL-18に設置するスリットチャンバー)。今後、このスリットチャンバーをUTNL-18Lに設置し詳細なエミッタンス測定、特に、外部磁場の依存性を測定する。

4. まとめ

ERL放射光源における電子バンチの圧縮方式としてvelocity bunchingを数値計算から検討した。PARMELAによるシミュレーションで、3.2ps-5MeV

の電子バンチが0.17psに圧縮できることがわかった。また、エネルギー拡がりは0.01%で、これはarc型磁気圧縮器を用いたとき(0.34%)よりも十分小さい。エネルギー回収は平均電流5mAに対し、12.6kWのRFパワーを必要とする。HOMは13Wと計算しており問題はないと考える。

エミッタンスは $1.5\pi\text{mm} \cdot \text{mrad}$ で空間電荷効果によるエミッタンス増大はさほど大きくないといえるが、この点に関しては実証する必要がある。そのため今後UTNL-18Lを利用して、ダブルスリット法による詳細なエミッタンス測定を行う。

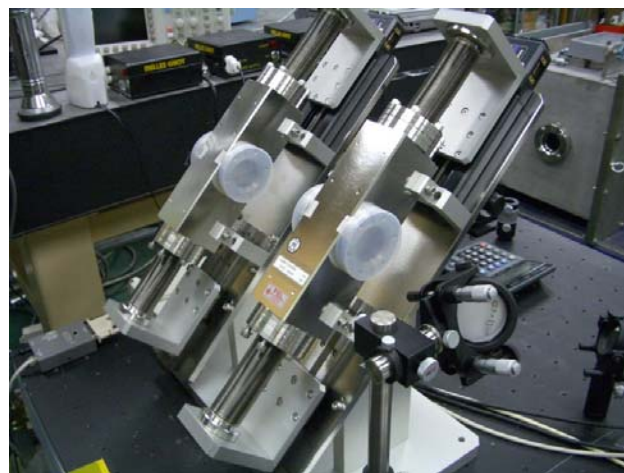


図4：ダブルスリットスキャンチャンバー

謝辞

本研究の一部は日本学術振興会・科研費基盤(B)15360507、および科研費若手(B)16740127の助成を受けている。

参考文献

- [1] S. M. Gruner and M. Tigner, CHESSTech. Memo 01-003/JLAB-ACT-01-004(2001).
- [2] V. Yakimenko et al., *Proc. of Pac*, 2001, p.3344.
- [3] M. Sawamura et al., *Proc. of PAC*, 2003, p.2117.
- [4] F. Richard et al., TESLA Technical Design Report(2001).
- [5] L. Serafini and M. Ferrario, "Physics of, and Science with, the X-ray Free-Electron Laser", ed. S. Chattopadhyay et al., (AIP, New York 2001), p.87.
- [6] J. H. Billen, "PARMELA User's Manual", (Los Alamos Accelerator Code Group, LA-UR-96-1835 2002, version 3.28)
- [7] P. Piot et al., *Phys. Rev. ST Accel. Beams* 6 (2003) 033503.
- [8] S. G. Anderson et al., *Phys. Rev. ST Accel. Beams* 8 (2005) 014401.
- [9] H. Iijima et al., *Jpn. J. Appl. Phys.* 44 (2005) No.7A (to be published)