

JAERI-FEL熱電子銃の電子バンチ繰り返し周波数の増加

西森 信行¹、永井 良治、峰原 英介、菊澤 信宏、羽島 良一、沢村 勝
日本原子力研究所 光量子科学研究センター 自由電子レーザー研究グループ
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方2-4

概要

エネルギー回収リニアックを用いたFELで出力を向上させるには、電子バンチの繰り返し周波数を増やす必要がある。原研FEL(JAERI-FEL)の電子バンチの繰り返し周波数は従来10.4MHzであった。熱電子銃のグリッドパルサーを交換し、2倍の周波数の20.8 MHz まで増加させる。10.4MHzと同等のピーク電流、パルス幅、より少ないジッターを持つ電子ビーム生成に成功している。

1. はじめに

電子線形加速器システムで、熱カソードDC電子銃からns幅の電子マイクロパルスを生ずるには、カソード・アノード間に100-300kVの高圧をかけ、RF加速器の周波数とマッチした周波数で高圧・短パルスのゲート電圧をカソード・グリッド間にかける。ゲート電圧生成に用いるGrid Pulser (GP)が電子ビームの性能を支配する。

GPの出力は、高圧・短パルスであるのはもちろんのこと、Free Electron Laser (FEL)オシレーターで用いるには、マクロパルス内に多くのマイクロパルス数を必要とする。シングルパスゲインの小さいFELオシレーターでは、発振が飽和に至るには電子とFELが数多く相互作用する必要があるからである。超伝導加速器で駆動される高出力JAERI-FELではマクロパルス幅として数100 μ s以上を必要とする。従ってGPはhigh-dutyという条件を満たす必要がある。マクロパルス幅の長いFELオシレーターの例は、米国のJLab^[1]とStanford大^[2]、ロシアのBINP^[3]、韓国のKAERI^[4]が挙げられる。このうちJLab^[1]は光カソードを使った方法を用いているが、その他は全てグリッド付の熱カソードをGPで駆動するタイプである。JAERI-FELを含めたいずれのGPでも、ステップリカバリーダイオード(SRD)を用いて短パルス化している。JAERI-FELではKoontzの文献^[5]を参考に、10.4MHz周期でマクロパルス幅1ms以上、10Hzで動作するGPを開発した^[6]。電子銃直後でピーク電流640mA、幅0.8ns FWHM、振幅変動1%以下、時間ジッター23ps rmsという高輝度高安定なビーム性能を有している^[6]。この電子ビームを効果的に圧縮してFEL発振実験を行い、6%という高効率で2kWを超える高出力FEL発振を実現した^[7]。

さらに、10kWを超える高出力発振実現のため、エネルギー回収型リニアック(ERL)に改造し実験を行っている^[8]。高効率発振では電子ビームのエネル

ギーが広がるため、エネルギー回収が困難となるが、電子ビームの繰り返し周波数を増やすことで高出力化が可能となる。JAERI-FELでは加速器の周波数が499.8MHz、SHBの周波数が83.3MHzであり、従来の83.3MHzまで電子ビームの繰り返しを高くすることが望ましい。ここでは、2倍の周波数である20.8MHzの電子銃の開発状況について報告する。

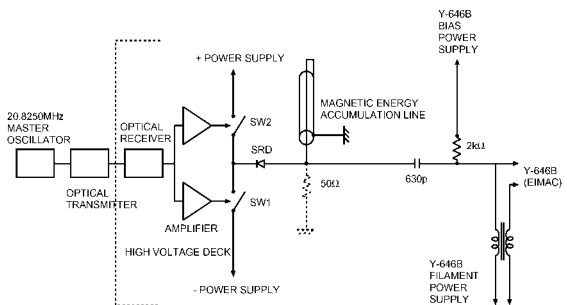


図1：グリッドパルサー回路の模式図。2つのトランジスタスイッチをON-OFFさせることにより、SRDの充放電を行ない、SRDを急速にOFFする。コイルの役割を果たすケーブルに溜め込まれたエネルギーが解放され、負荷を駆動する。

2. 20MHz GRID PULSER

従来の10.4MHzのGPにはField Effect Transistor (FET)が用いられている。このFET出力は50ns以上の幅を持つため、20MHz運転は困難である。一方、最近ロシアのBINPで開発されたGP^[9]は、20ns程度以内でSRDのON-OFF動作を終え、22.5MHzでCW動作することが実証されていた^[3,4]。そこで、このパルサー本体を入手し、既存のものとの置き換えを行った。

パルサー本体は図1に示すように、2つのスイッチ、SRD、コイルの役割を果たすケーブルで構成されている。SW1を10nsの間ONしSRDに電荷を充電する。SW1のOFFの5ns後にSW2を5nsの間ONし、SRDに溜まった電荷を放電する。この際ケーブルに電流が流れ、コイルにエネルギーが貯められる。放電が終わると同時にSRDは急速にOFFし、電流が流れなくなる。この際、コイルに溜まったエネルギーは負荷に急速に流れだす。GP単体の試験時には負荷として50 Ω の抵抗を使用する。電子銃に取り付ける時には引き出される電子ビームが負荷となる。カソードのサイズにより、負荷抵抗が変化する。カソードサイズが小さければ、引き出せる電流は減り、負荷が相対的に大

¹ E-mail: nisi@milford.tokai.jaeri.go.jp

きくなる。

3 . JAERI -FEL電子銃へのインストール

電子銃のGPとして使うには、GPに印加する+40V,-20V,+8V電源、フィラメント回路、バイアス回路、それらのコントロール回路が必要となる。SF6ガスを充填したタンク中に納めるため、できるだけコンパクトにする必要がある。市販の電源を用いたテストにより、CW運転モードに必要な電流量は0.28A(+40V)、0.31A(-20V)、0.14A(+8V)であることがわかってきた。そこで、2Aまで流せる+40V電源を文献[10]を参考に自作し、-20V、+8V電源については、一般的なレギュレーター7920、7808を用いた。フィラメント回路、バイアス回路については、従来のグリッドパルサーのスペアとして製作済みのものを流用した。コントロール回路は、電圧・周波数変換回路（VFC32:Burr-Brown製）を用いて自作し、0-10V電圧でコントロールする。CAMACを使ったリモートコントロールが可能である。

加速器のマスターオシレーターからの499.8MHzの信号を83.3MHzに分周し、SHBとGPの入力信号として用いる。83.3MHzの1/2、1/4、1/8倍の周波数を持つ信号をカウンターを使って生成する(サムウェイ製)。この回路の出力TTL信号は+3Vであり、光トランスミッターを駆動するのに充分でない。そこで、この信号をパルスジェネレーター(HP8116A)のゲート入力に入れる。パルスジェネレータの出力は+5Vであり、光トランスミッターを駆動するための増幅器として使用している。この出力信号は直接光トランスミッターを駆動できる。光トランスミッターを電子銃のタンク中に納め、20.8MHzの信号はタンク内で電気から光信号に変換される。従来は光信号に変換してからタンクに入力していたため、コネクタでの光減衰が起こり、ジッター低減に苦労した。今回は、S/Nのよいジッターの少ないGP出力信号を容易に作ることができた。

4 . 電子ビーム性能

通常の運転条件である230keVでビーム性能を測定した結果、従来のGPを用いた場合と同等のピーク電流0.6A、パルス幅0.8ns、電荷0.5nCが得られることを確認した。ところが、新たな問題として10.4MHz運転で現れなかったジッターやマクロパルス内での変動が現れた。その解決に時間を要したため、本レポートでは現時点で報告可能な70keVでのジッターや振幅変動の実験結果について述べる。

測定はカソードから1m下流のcurrent transformerの信号をオシロスコープ(Tektronix TDS684B)で測定した。図2はマクロパルス波形を示す。横軸は20 μ s/div、縦軸は200mV/divである。最初の50 μ sで変動が目立つが、後半は水平とみなせる。同じ測定を10.4MHzで行なうと、より滑らかになり振幅が大きくなる。SRDの充放電に要する20nsのタイミング調整、コイルの役割を果たすケーブルの長さの調整等を対策として考えているが、まだ実行していない。

41.6MHz運転では、条件がさらに厳しくなるため、想定外の動作の可能性も残されている。

図3にビームの先頭から30 μ s後(約600パルス目)のマクロパルスの振幅変動を時間の関数として測定したものを示す。振幅の変動は10分間の測定で0.6% rmsであった。ただし、ビームを出し始めてから10分程度、振幅が系統的に増加する。はっきりとした原因はまだ掴めていない。30 μ s後のパルス間の間隔を時間の関数として示したのが図4である。パルス間隔のジッターは16ps rmsであり、これはRFに対して12ps rmsのジッターに対応する^[6]。従来のジッターは23ps rmsであったので、かなり改善したことになる。

猶、現データは70keVでの測定結果であるが、高圧依存性はなく、230keVでも同じ性能が期待できる。

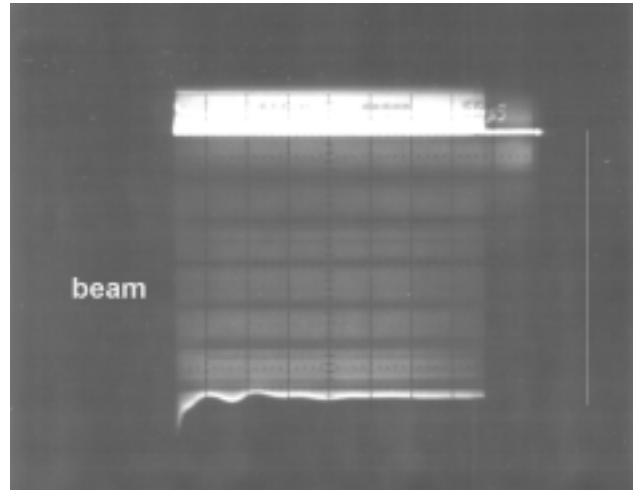


図2：電子銃直後のcurrent transformer を用いて測定したマクロパルス波形（150 μ s幅の例）。横軸は20 μ s/div、縦軸は200mV/div。電荷量は0.5nC/パルス。

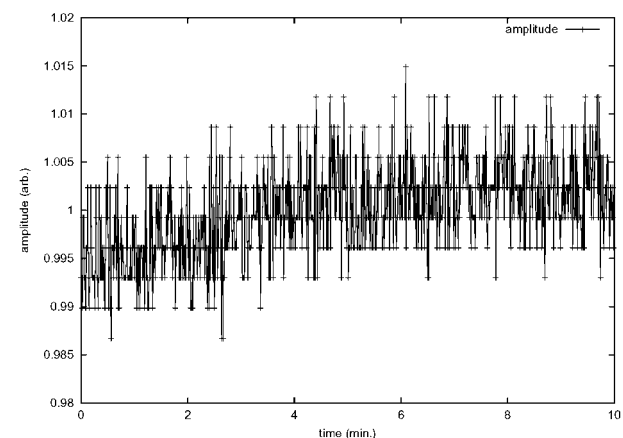


図3：振幅変動。10分間の測定で0.6% rms。横軸は時間（分）。

5 . 他のHIGH-DUTY電子銃との比較

BINPのグリッドパルサーを使った電子銃は

BINP^[3]、KAERI^[4]の例がある。そこで得られたビーム性能は2A、1ns (BINP)^[3]、1.25A、1.6ns (KAERI)^[4]である。カソードのサイズは1cm²である^[4]。JAERI-FELでは0.6A、0.8ns幅であるが、カソード・グリッド間のバイアス電圧を下げていくと、1A、1ns幅のビームを出せることがわかっている。カソードの面積が半分なので、BINPと同等である。Stanford大ではサイズが0.5cm²のY845 (EIMAC製)をカソードに使い、ピーク電流1.3A、パルス幅1nsを実現している^[2]。JAERI-FELはStanford大ともほぼ同じ性能を満たしていることがわかる。SRDを用いた短パルス化をこれ以上望むのは困難と思われる。

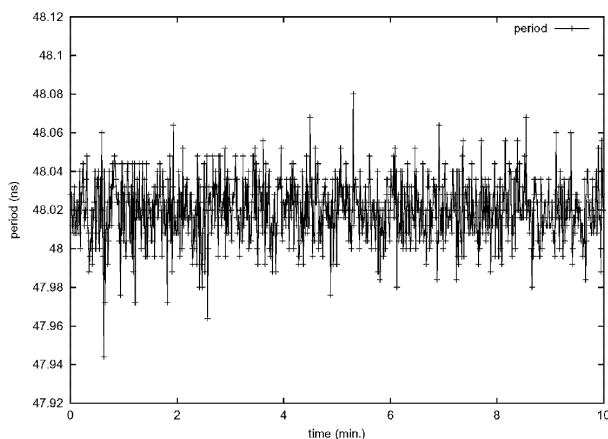


図4：パルス間隔の時間変動。ジッターは16ps rmsである。横軸は時間（分）。縦軸はパルス間隔（ns）。

6．結論

BINPのGPをJAERI-FELの電子銃に適用することにより従来10.4MHzで得られていたのと同等の性能を持つ電子ビームを2倍の20.8MHzで生成することができた。さらに、電子銃タンク内で+5VのTTL信号を光信号に変換する方式を採用したので、ジッターを23psから12psに低減することができた。41.6MHz運転についてはSRDの充電時間をコントロールすることにより、おそらく可能と考えている。GP単体での試験では40MHz動作は確認できているが、ビームを

出してみないと、どんな問題が起こるかわからないのが実情である。最終的な目標である83.3MHzのグリッドパルサーの候補は1)本報告で述べたBINPパルサーを2ヶ組み合わせる方法、2)RFアンプを用いる方法^[11]等が考えられる。これらについては今後の大きな課題である。現状の高輝度高安定ビーム性能（パルス幅0.8ns、ピーク電流0.6A、電荷量0.5nC、ジッター12ps rms、振幅変動0.6% rms）を保ちつつ、83.3MHz化するのは、かなりハードルの高い仕事と思われる。

参考文献

- [1] G.R. Neil et al., Phys. Rev. Lett. **84**, 662 (2000).
- [2] S. Talmadge et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A **285**, 333 (1989).
- [3] B.A. Baklakov et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A **470**, 60 (2001).
- [4] B.C. Lee et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A **429**, 352 (1999).
- [5] R. F. Koontz, SLAC-PUB-2261 (1979).
- [6] N. Nishimori et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A **445**, 432 (2000); “A thermionic electron gun system for the JAERI superconducting FEL”, Proc. Of the 7th EPAC, 1672 (2000).
- [7] N. Nishimori, R. Hajima, R. Nagai, and E.J. Minehara, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A **475**, 266 (2001)
- [8] 羽島良一 他, 本論文集, TP-30; R. Hajima et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A **445**, 384 (2000); R. Hajima et al., to be published in Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A (2003). DOI:10.1016/S0168-9002(03)00849-0
- [9] E.A. Kuper and V.K. Ovchar “High repetition rate grid pulser for thermionic electron gun for BINP FEL”, 第3回光量子科学研究シンポジウム論文集(JAERI-Conf 2002-008), 165 (2002).
- [10] 戸川治朗, “実用電源回路設計ハンドブック” CQ出版社 p55 (1988).
- [11] E. Minehara and K. Whitham, “83MHz electron gun system”, Proc. Of the 6th EPAC, 1474 (1998).