

[13A-05]

Performance of the thermionic electron gun at JAERI FEL

N. Nishimori, R. Nagai, R. Hajima, T. Shizuma and E. Minehara

Japan Atomic Energy Research Institute

2-4 Shirane, Shirakata, Tokai, Naka, Ibaraki 319-1195, Japan

ABSTRACT

The thermionic electron gun for JAERI superconducting linac driven FEL has been developed to produce high quality electron beam. The beam energy is 230 keV, micropulse charge 0.51 nC, pulse width (FWHM) 0.81 ns, peak current 0.63 A. Especially rms time jitter was shortened to 23 ps and amplitude fluctuation in peak to peak sense became less than 1 %. The normalized rms emittance is $13 \pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$. The high performance of the electron gun is one of key technologies to realize high power FEL.

原研 FEL 用熱電子銃の性能

1. はじめに

原研自由電子レーザー (JAERI FEL) では波長 $20 \mu\text{m}$ 程度の遠赤外光を平均出力 1kW レベルで発振させることを一つの目的としてきた。CW 化可能な超伝導加速器を駆動源としており、電子銃も CW 化可能なことが大前提となる。RF 電子銃は CW 化が困難であり、米国ジェファーソン国立研究所 (TJNL) では DC 加速管とフォトカソードを組合せ質のよいビームを作り出している [1] が、半導体フォトカソードの寿命、取扱に難がある。JAERI FEL では Grid Pulser (GP) で駆動させる熱陰極カソードと DC 加速管を組み合わせた一般的な電子銃を採用している。数 $10 \mu\text{s}$ のマクロパルス数を数 10Hz で駆動するような場合はピーク電圧 150V、半値幅 0.5ns という非常に高性能な GP が市販で手に入るが [2]、数 $100 \mu\text{s}$ 以上のマクロパルスを 10Hz で動作させるパルサーは市販品がない。そこで、1ms 以上のマクロパルスを 10Hz で動作させる GP を作製することを中心に開発し [3,4]、1998 年 2 月の最初の発振に結び付いた。

ところが、[4] で報告した時点では前段加速器後のマイクロパルスのバラツキが大きく、アンジュレーターに全ビームを導けていないことがわかってきた。一つの原因は光ファイバーのトランスミッターとレシーバー部にあり、1 ns 程度のジッターを生み出していた [5]。高速な HFBR2426,1424 (Hewlett Packard) に交換することで、光-電気変換部に起因するジッターは除去された [6]。ところがここで別の問題が生じた。

JAERI FEL は 230kV の高圧をかけるために SF₆ ガスを絶対 2.5 気圧封入したタンク中に加速管を納めている。パルサーに基準信号を送る光ファイバー中の光信号が大気中とタンク内を繋ぐコネクタ中で減衰し、電気信号に戻すと 0.2V 程度になる。それを 100V 程度まで増幅する必要があり、ノイズ対策が難しい。0.2ns 程度のジッターがオシロで観測されていたが、GP の

グラウンドとアンプ用バイアス間に適度な容量のコンデンサを入れることで、GP 単体のジッターはほぼ除去された [6]。

このレポートでは、GP 単体のノイズ除去以降の改良点である、GP を電子銃にインストールする際に発生するジッターの除去、電子銃からの電子ビームのエミッタンス計測、電子ビームの電荷量やパルス幅などの諸特性について述べる。

2. GP インストール時のジッター

JAERI FEL で行なっているタイミングジッターの測定方法について述べる。最も簡単には、GP 本体に送っている TTL レベルの 10.4125MHz の基準信号を 1GHz のアナログオシロ (Tektronix 7104) のトリガー信号とし、それに対する電子銃下流 1m に設置してあるコアモニター信号のジッターを観測する。ジッターの幅が 200ps より狭く、時間的なふらつきがなければよい。おおむね間違っていないが、余りにも定性的すぎるのでコアモニター信号を 1GHz のデジタルオシロ (Tektronix TDS684) に入れてタイミングジッターを測定している。オシロに信号の間隔を自動計測する機能がついているので、GPIB を通して 0.6 秒毎にパソコンに取り込み 500 個貯める (約 5 分の測定)。信号の最初の $10 \mu\text{s}$ は信号に変動があるので、トリガを適当に (例えば $50 \mu\text{s}$) 遅延させて測定する。

次に測定データの意味を考える。 $50 \mu\text{s}$ 頃のパルスがコアモニターを通過した時間を T_1 とし、次のパルスが通過する時間を T_2 とする。その差は $T_1 - T_2$ であり、これがデータとして貯めこまれる。ところが、実際に欲しいデータは 10.4125MHz の間隔の基準信号 R との差であり、 $T_1 - T_2$ とは異なる。実際に欲しいデータ $\Delta_1 = T_1 - R$ 、 $\Delta_2 = T_2 - R$ と $T_1 - T_2$ の関係を求める。

$$\begin{aligned}\Delta_{1,2} &= T_{1,2} - R \\ R &= 96.038\text{ns} \\ \langle(T_1 - T_2)^2\rangle &= \langle\Delta_1^2\rangle - 2\langle\Delta_1\Delta_2\rangle + \langle\Delta_2^2\rangle\end{aligned}$$

ここで、以下の (1),(2) 式を仮定すると (3) が得られる。

$$\langle\Delta_1\Delta_2\rangle \simeq 0 \quad (1)$$

$$\langle\Delta_1^2\rangle \simeq \langle\Delta_2^2\rangle \quad (2)$$

$$\langle(T_1 - T_2)^2\rangle \simeq 2\langle\Delta_1^2\rangle \quad (3)$$

従って、実験で得られる標準偏差 $\sigma_T = \sqrt{\langle(T_1 - T_2)^2\rangle}$ は必要としている $\sigma_\Delta = \sqrt{\langle\Delta_1^2\rangle}$ の $\sqrt{2}$ 倍になっていることがわかる。実験的には Fig. 1 のように $\sigma_T = 32\text{ps}$ が得られた。これは、 $\sigma_\Delta = 23\text{ps}$ に相当する。JAERI FEL では FWHM 800~900ps 幅のパルスを FWHM 5ps 程度まで圧縮している。圧縮比は 150 倍程度。ジッターも同様に圧縮されれば、 $\sigma_\Delta @ \text{undulator}$ は 0.2ps 程度以下になっていると推定される。ここではオシロの持つジッター等のエラーは考慮されていない。これ以上の測定を行なうにはサンプリングオシロを使うことが必要かもしれない。

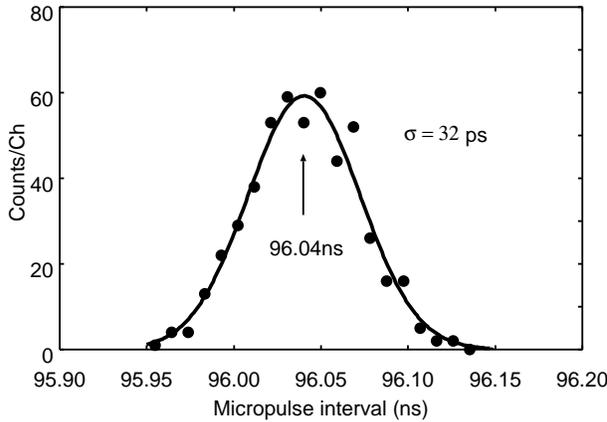


Fig. 1: 電子銃下流 1m のコアモニターで測定したタイミングジッターの分布。オシロの period 測定機能を使って得たデータを PC に取り込んだもの。マイクロパルス周期が 10.4125MHz なので、96.04ns 位が中心となるはず。

実は上の計測以前はジッターが 2 倍以上大きかった。原因不明だが GP のインストールのやり方でジッターが大きく変わった。0.2V 程度の小さな信号を 100V 程度まで増幅する上で、浮遊容量等が効いてくるものと考えているがはっきりと掴めていない。ここでは、経験的にわかったことを述べる。JAERI FEL では GP のインストール後に空气中で 70kV 高圧をかけビームテストを行なう。ジッター等を計測してビームの質が良いことを確認後、SF₆ を詰める。そのテストの際、GP インストール方法とジッターの関係として Fig. 2 の

ような関係があることがわかった。直径 20cm、長さ 68cm の筒状の先にカソード (Y646B) が取り付けられていて、そこに GP をインストールする。Fig. 2 のドーナツ状の丸い円は GP の後部フランジを表していて、一番外側の太い線は筒を表している。筒とフランジで浮遊容量を調節するようなイメージである。現在は最もジッターの少なかった 6mm 厚のゴムシートを下に敷き、上にアルミテープを貼り筒と電氣的に繋ぐ方法を採用している。

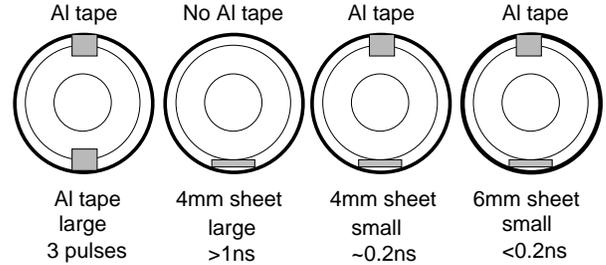


Fig. 2: GP を電子銃にインストールする際の方法与ジッターの関係。外側の太線は加速管内部の高圧側の筒を表している。筒の先端にカソードが取り付けられている。筒内に GP を入れカソードをドライブする。図のドーナツ状のものが GP の後部フランジを表す。浮遊容量等を調節してタイムジッターを少なくするため、ゴムシートを敷いて電氣的に浮かしたり、ゴムシートの厚みを変えたり、フランジ上部と筒間にアルミテープを貼って電氣的に繋いだりと、カット&トライを繰り返して最適なインストールの方法を探した。現状はアナログオシロで見て最適な結果が得られた右端の方法でインストールしている。GP の故障などで度々 GP の出し入れを繰り返した。その度に小さなジッターを再現できている。

3. ビームの幅、電荷等諸特性

電子銃からのビームの半値幅等の諸特性の測定は高圧 230kV、フィラメント電圧 6.6V で行なった。230kV でパルサーを駆動させず、バイアスを下げていくとビームが出始める電圧がある。その電圧はバイアス 62V であった。そこで、バイアス 64V までのデータを取った。パルス幅測定はコアモニターを用いているので、コアモニターの分解能が必要となる。似た形状、材質のコアモニターがビームライン上にいくつか使われていて、半値幅 0.58~0.64ns が得られている。前段加速器以降のパルス幅は 50ps 程度以下になっているはずなので、コアモニターの分解能が推定できる。ここでは 0.58ns と仮定して、生データに補正を加えた。Fig. 2 に横軸バイアス値、縦軸に半値幅とパルス当たりの電荷量をプロットしたものを示す。パンチあたりの電荷量は推定値。バイアス 85V の時にアンジュレーター後の F.C. でおおよそ 5.3 mA と測定されている。それを基準に制御室で測定されたコアモニター信号のピーク電圧値を使って換算した。制御室でのコアモニター信号はケーブルで速い成分が減衰し、電流に比例すると考えている。その証拠にコアモニターのそばで測定

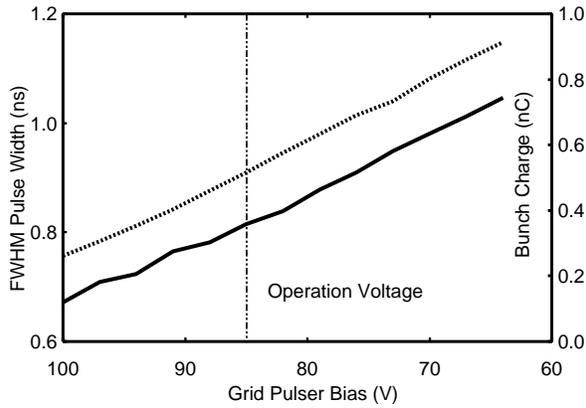


Fig. 3: 電子銃のパルス幅(実線)、電荷量(点線)とバイアス値の関係。通常はバイアス 85V で 5.3 mA 平均、FWHM 0.81ns、ピーク電流 640mA で運転していることになる。

した電圧ピークと半値幅の積と制御室でのピーク値は比例する。また、図から挿入すると電荷量の 0 になるバイアス電圧は 120V と推定される。バイアス 62V で電流が流れ始めるので、カソードに対してかかっている GP の電圧は 58V と推定できる。

今後の JAERI FEL の展開として、エネルギー回収により電流量を増やし FEL の出力を増やす計画がある [7,8]。エネルギー回収による FEL 出力増に成功した唯一の例は TJNL[9] だが、そこでは 1 パルス当たりの電荷量を変化させずに繰り返しの周波数を 2 倍、4 倍に増やしている。JAERI FEL で現状の 10.4MHz から 20.8MHz に周波数を増やすのは GP に使用している部品の関係上困難である。しかしながら、1 パルス当たりの電荷量は Fig. 3 に示すように 0.9 nC 程度まで増加可能である。パルス当たりの電荷量を現状の約 2 倍の 0.9 nC にして 5.2MHz で運転し、エネルギー回収後に 10.4MHz で運転することで、電流を増やすことが可能と考えられる。このように、特別な変更なしにエネルギー回収に対応した電子銃とすることができる。

4. エミッタンス

電子銃でのエミッタンス測定は、アノード下流 0.25m に設置されたソレノイドコイル(有効距離 186mm)で中心磁場を 0~180gauss まで変化させ、アノード下流 0.62m に設置された位置可変ワイヤモニター(材質タンゲステン、直径 0.1mm)でビームサイズを測定することにより行なった。データからのエミッタンスの逆算には、ここでは TRACE3D[10] コードを用いた。エミッタンスなどのツイスパラメータを初期値として設定し磁場を変化させ、計算値と実験値がある程度一致する値を電子銃のエミッタンスとした。(230keV の場合は規格化エミッタンス ε_n は非規格化エミッタンス ε とほぼ同じになる。ここでは両者を特に区別しない。) 計算結果は α に依存しないが、 β と ε に依存する。そこで、アノードの穴径が半径 5mm であることを条件として加え、EGUN 等の結果などから考え合わせて半径 3.5mm 程度のビームが出ると

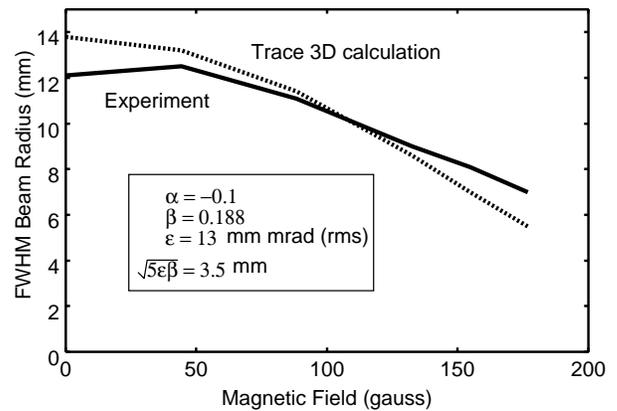


Fig. 4: ワイヤースキャナー位置での FWHM ビームサイズ。実験データと計算結果の比較。

仮定し、実験値をよく再現する ε と β を求めた。Fig. 4 に実験結果と計算結果の比較を示す。アノード位置のビーム条件は、 $\varepsilon_{rms} = 13$ mm mrad、 $\alpha = -0.1$ 、 $\beta = 0.188$ を仮定している。この場合、初期ビームサイズは $\sqrt{5\varepsilon_{rms}\beta} = 3.5$ mm となる。 β と ε_{rms} の組合せによっては ε_{rms} は 12~14 mm mrad まで変化するが、ビームの初期サイズから考えて 13 mm mrad 程度と推定した。

5. まとめ

GP を電子銃にインストールする方法によってジッターが異なることがわかった。そこで空気中で 70kV の高圧をかけ、最適なインストール方法を探した。その結果、現象論的ではあるが再現性のあるインストール方法を見付けることが出来、ジッターを標準偏差 (σ) で 23ps まで小さくすることが出来た。電子銃からのビーム量パルス幅をバイアス電圧の関数として求めた。この結果パルス当たりの電荷量が 0.9 nC の時、パルス幅 1.1 ns 程度のビームを出せることがわかった。電子銃直後のビームエミッタンスを求め、 13π mm mrad が得られた。

参考文献

- [1] G.R. Neil et al., NIM A358 (1995) 159.
- [2] T. Tomimasu et al., NIM A407 (1998) 370.
- [3] N. Nishimori et al., Proceedings of the 22th Linear Accelerator meeting in Japan (1997) 341.
- [4] N. Nishimori et al., Proceedings of the 23th Linear Accelerator meeting in Japan (1998) 130.
- [5] N. Nishimori et al., 高エネ研究会「電子ビーム源の新展開」AccLab-98-154 (1999) 27.
- [6] N. Nishimori et al., NIM A445 (2000) 432.
- [7] R. Hajima et al., NIM A445 (2000) 384.
- [8] T. Shizuma et al., "Design of an energy recovery beam line for the JAERI FEL", in this proceedings.
- [9] G.R. Neil et al., Phys. Rev. Lett. 84 (2000) 662.
- [10] K.R. Crandall, D.P. Rusthoy, LA-UR-97-886 (1997).