

# STF におけるロングトレイン電子ビーム生成のための

## RF 電子銃用レーザーの改修

### IMPROVEMENT OF THE RF-GUN LASER SYSTEM FOR LONG-TRAIN ELECTRON BEAM GENERATION IN STF

福田 将史<sup>#, A)</sup>, 早野 仁司<sup>A)</sup>, 坂上 和之<sup>B)</sup>, 高野 幹男<sup>C)</sup>

Masafumi Fukuda<sup>#, A)</sup>, Hitoshi Hayano<sup>A)</sup>, Kazuyuki Sakaue<sup>B)</sup>, Mikio Takano<sup>C)</sup>

<sup>A)</sup> High Energy Accelerator Research Organization: KEK

<sup>B)</sup> Photon Science Center of the University of Tokyo: UT-PSC

<sup>C)</sup> Saubi Ltd.

#### Abstract

The 1.3 GHz superconducting cavities for the International Linear Collider (ILC) are being developed in the Superconducting RF Test Facility (STF) at KEK. In the STF Phase-2 project (STF-2), electron beam acceleration tests are being carried out in a beamline with twelve cavities. In December 2022, an electron beam of 5.8 mA was successfully accelerated with the same pulse width as the ILC at 726  $\mu\text{s}$ . To perform this test, the laser system had to be modified to be able to produce a long pulse of 726  $\mu\text{s}$ . In the laser system for the RF gun, an infrared laser pulse train generated by a 162.5 MHz mode-locked laser is cut out for up to 726  $\mu\text{s}$  with a Pockels cell. However, the extinction ratio was insufficient, so Pockels cells were added. Furthermore, to obtain a flat long-pulse waveform, the amplification gain and amplification timing of the two laser amplifiers were tuned in good combination. The profile of the laser was also improved to improve emittance of an electron beam. This paper reports on the results of these modifications and adjustments.

#### 1. はじめに

KEK の超伝導リニアック試験施設棟(STF)では、国際リニアコライダー(ILC)[1]のための超伝導加速空洞の開発を行っている。現在の STF Phase-2 (STF-2) では、ILC 仕様の 1.3 GHz 超伝導加速空洞 12 台を設置したビームラインにおいて、電子ビーム加速試験を行っている。2022 年 12 月の運転では、ILC と同じビーム電流である 5.8 mA、726  $\mu\text{s}$  の電子ビーム加速試験を行った[2]。

この加速器の電子源は photocathode RF 電子銃であり、紫外レーザー光にて電子を生成する。このための RF 電子銃用レーザーシステム(Fig. 1)がビームトンネル内に設けてある。このシステムでは、種光レーザーである 162.5 MHz のモードロックレーザーで生成した赤外レーザーのパルス列(6.15 ns 間隔)を、レーザーダイオード励起の増幅器である AMP1 で一度増幅した後、ポッケルスセルにより電子生成に必要なバンチ数(最大 726  $\mu\text{s}$ , 118000 バンチ)だけ切り出す。さらに AMP2 でもう一度増幅後、波長変換結晶である LBO および BBO にて紫外レーザーに変換し、RF 電子銃へと輸送している。

マクロパルス幅 726  $\mu\text{s}$  のロングパルスのビーム試験を行うにあたり、レーザーパルスのロングパルス化やプロファイル改善のため、システムの改修、調整を行った。

ロングパルス化の目標は、電子銃カソードの紫外光を電子に変換する量子効率を考慮して、726  $\mu\text{s}/\text{pulse}$ 、10 mJ/pulse 以上で、パルス内のパワーの変化が少ないレーザーパルスを出せるようにすることである。このため、ポッケルスセルを 1 台追加し、パルス切り出しの際に不十

分だった消光比を改善した。また、2 台のレーザーアンプにおいて、それぞれの増幅率および増幅タイミングをうまく組み合わせることで、フラットなロングパルス波形を作ることを試みた。さらに、電子ビームのエミッタンス改善のため、コンポーネント毎に光軸合わせを行い、レーザープロファイルの改善も行った。

本稿では、これらの改修や調整の結果、ビーム運転中のレーザーの安定度などについて報告する。

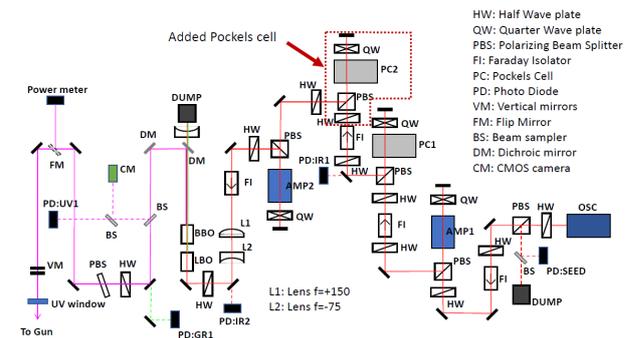


Figure 1: STF gun laser system.

#### 2. ロングパルス化のレーザー調整

##### 2.1 ポッケルスセルの追加

ポッケルスセルはパルスを切り出すタイミングのみ偏光面を回しレーザー光を通すが、1 台(PC1)だけではその消光比が悪く、切り出した部分以外でも弱いレーザー光が漏れていた。Figure 2 はその様子を示している。増幅器はパルス切り出しのタイミングの前 200  $\mu\text{s}$  から 300  $\mu\text{s}$

<sup>#</sup> mfukuda@post.kek.jp

の幅で励起されている。漏れ光があると 100 バンチ (0.6  $\mu\text{s}$ ) のパルスを切り出しても、その前後の増幅器が励起されている範囲で、徐々に漏れ光が増幅されてしまう。

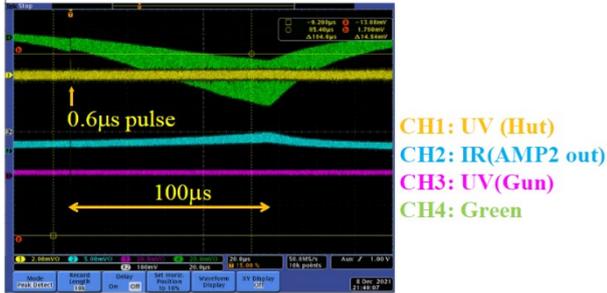


Figure 2: Laser pulses by leak laser light.

そこで、ポッケルスセルをもう1台追加(Fig. 1 の PC2)して消光比の改善を図り、漏れ光の透過を 2 % から 0.006 % に減らすことができた。Figure 3 が、このポッケルスセルの透過率を測定するために測定した PC2 下流でのレーザーパルス波形になる。この波形はフォトダイオードで測定した。ポッケルスセルに高電圧をかける(HV ON)と偏光面が回り、光が透過する。左のグラフは、PC1、PC2 を両方 HV ON にして光を通すようにした時で、右のグラフの青線は PC1 HV OFF、PC2 HV ON で PC1 の漏れ光を見たもの、赤線は逆にして PC2 の漏れ光を見たものである。左のグラフの波高との比から、PC1 の漏れ光は 2% となり、PC2 では 0.3 % となっており、2 つ合わせて 0.006 % の漏れ光となり、消光比は 1/16700 となる。

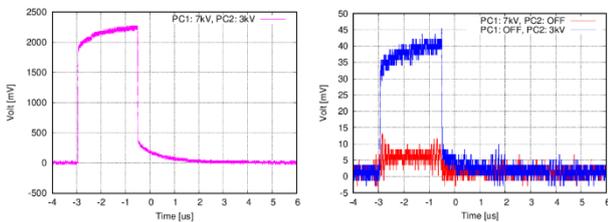


Figure 3: Shapes of laser pulses downstream of PC2 in the extinction ratio measurement.

2 台のポッケルスセル PC1、PC2 の透過が最大となる電圧はそれぞれ 7 kV、4 kV となっている。どちらも同じ BBO 結晶(BBO-6-40-AR1064)を使用しており電源も同じであるが、ポッケルスセルの透過が最大となる電圧は PC1 と PC2 で異なっており、その原因は分かっていない。今後、ポッケルスセル単体で試験を行う予定である。

## 2.2 光増幅器による発振

消光比が改善したので、2 台の光増幅器 AMP1、AMP2 の励起光のハルス幅を最大 920  $\mu\text{s}$  まで上げてテストしたが、レーザー光を AMP に通していない状態では発振が起こるのが確認された。ここでビームのパルス幅 726  $\mu\text{s}$  より長いのは、励起光が入って反転分布ができ、十分ゲインが上がるまで 200  $\mu\text{s}$  程度かかるためである。

この発振は何らかの光が、ポーライザや波長板などの表面で反射し、光が何度も AMP を往復するような状態になると起こる。発振すると非常に強い光量のパルスが発生し、ミラーなどの光学素子を破壊することもある。板などを挿しこみ反射面の前で光を遮ると発振が止まる

ので、そのようにして反射面を特定し、それを少しだけ光軸から傾けることで発振を抑えることはできる。また、戻り光を防止するファラデーアイソレーターを追加することも有効である。ただし、こういった透過デバイスでは、入射面で光が少し反射して発振の原因になることもあるので、少し光軸に対して傾けて設置している。

今回は 920  $\mu\text{s}$  と長いので、これらの対処をしても発振を完全に消すことはできなかった。ビームパルス幅は調整のため短い 0.6  $\mu\text{s}$  で使用することもあるので、それ以降の残りの部分で発振してしまうことになる。そこで、今回の運転では、AMP の励起光のパルス幅を電子ビームに合わせて変更するようにした。ただし、300  $\mu\text{s}$  以下にはならないようにした。ただ、この方法では、パルス幅を変える時に熱レンズ効果が変わり、プロファイルなどが少し変わってしまうため、これは今後の改善事項となる。

## 2.3 726 $\mu\text{s}$ のロングパルス生成

AMP では強い光ほど増幅されるため、矩形のレーザーパルスを AMP に入射し増幅すると、先頭ほどパワーが高く、逆に後ろはパワーが下がった状態になる。

そこで、AMP のゲインが上がっていく過渡期のタイミングにレーザーパルスを通すことで、先頭のゲインを下げ、後ろを上げるようにした。また、AMP は 2 台あるので、それら間のタイミングをずらして増幅後のパルス波形がなるべくフラットになるように調整した。このような調整方法を使うため、AMP のゲインは通常よりも大きく下がる。そのため波形をフラットにすることを優先するとゲインが下がりすぎてしまうため、必要なパワーを確保しつつ、パルス幅を目標まで伸ばせるように、AMP1、AMP2 のゲインやタイミングを調整しつつ、最適なパラメータを探した。

さらに、LBO および BBO 結晶での波長変換の効率を上げるため、レンズ交換により倍率を変え、結晶でのレーザー光の密度を上げ、必要なパワーを確保した。

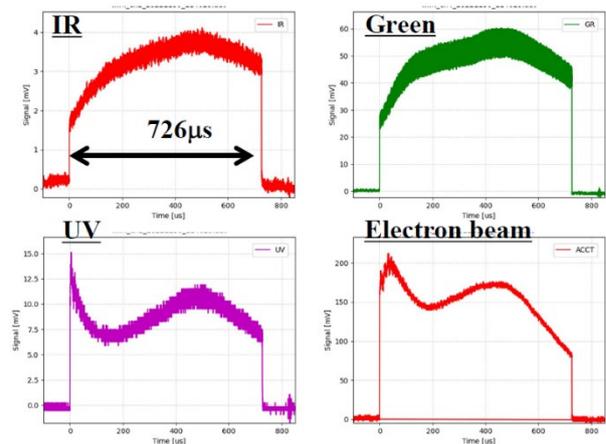


Figure 4: Laser pulse shape in 726  $\mu\text{s}$ .

調整後の波形が Fig. 4 となり、726  $\mu\text{s}$  のパルスを作り出すことができた。ただし、パルス形状は完全にフラットにはできず、紫外レーザーパルスにおいては 30% 程度の強度変化が残っている。このとき励起光を照射するタイミングは、AMP1 に比べて AMP2 は 56  $\mu\text{s}$  遅くなるところに合わせている。

また、赤外( $\lambda$ : 1064 nm)や、LBO 結晶で2倍高調波の

緑( $\lambda$ : 532 nm)に変換したレーザー光では、先頭側が低く後ろが高い形でほぼ同じ形状となっているが、さらに BBO 結晶で変換した紫外レーザーパルス( $\lambda$ : 266 nm)は、先頭側にピークができています。この理由は不明である。Figure 4 の右下のグラフは、この時に生成した電子ビームの波形であるが、こちらは、紫外レーザー光と同じ形をしており、この先頭のピークは測定の問題ではない。後ろの形は似ていることから、先頭のタイミングでは変換効率が非常に高く、その後レーザーによる温度上昇で変換効率が下がっているのかもしれない。まだ調査が必要である。

パルス幅 726  $\mu$ s のレーザーパルス全体のパルスエネルギーは 15 mJ となり、目標の 10 mJ 以上を達成できた。このパルスエネルギーだと RF 電子銃のカソードの量子効率が 0.6% であるので、1 バンチ当たり、160 pC の電子を生成できることになる。これは、ILC スペックの電流を出すときに必要なバンチ電荷である 37 pC を上回っており、十分余裕のあるパワーを確保できた。

Figure 5 は、パルス幅 726  $\mu$ s の時の紫外レーザーのプロファイルである。これは、電子銃カソードまでと同じ距離だけ飛ばした位置に置いた CMOS カメラで撮影しており、電子銃のカソード上と同じプロファイルとなる。

これを見ると、3 つのクラスタに分かれており、一か所は他に比べて強くなっている。後述するようにポッケルスセルを透過後にレーザープロファイルは同心円状のプロファイルになってしまっており、これが影響しているものと思われる。レーザーサイズはガウシアンフィットをかけると 700  $\mu$ m ( $1\sigma$ ) 程度となっている。

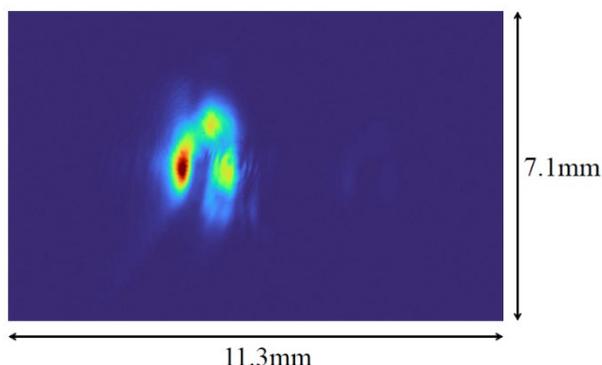


Figure 5: UV laser profile in 726  $\mu$ s.

### 3. レーザープロファイルの改善

これまでの運転で電子ビームのエミッタンスが想定より 10 倍程度悪く[3]、その理由の一つにレーザーのプロファイルの悪さがあると考えられた。そこで、主なコンポーネントの前後でレーザープロファイルを確認し、どこでプロファイルが悪化しているのかを調べた。

Figure 6 が、各所でのレーザープロファイルとなる。これを見ると、種光レーザーでは問題なく、主にポッケルスセルを通るときにプロファイルが悪化していることが分かる。また、レーザー光の強い、明るい位置が中心からずれている。さらに、AMP1 でも同心円が見えている。これは、レーザー光が透過するデバイスに点のような汚れがあると、そこで干渉し同心円模様ができるためである。

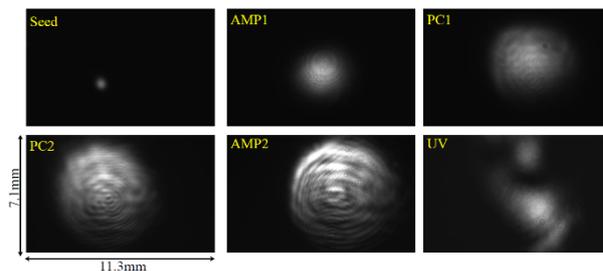


Figure 6: Laser profiles at each position before laser path alignment.

プロファイルを改善するため、AMP1 以降レーザーが透過するデバイスを全てチェックし、汚れている場合にはクリーニングを行った。

また、PC1、PC2 については一旦それらを取り外し、ポッケルスセル結晶の高さと径を合わせたアイリスを設置して光軸を正確に出してから、ポッケルスセルを再び設置し、ポッケルスセル結晶のみ動かして光軸を合わせた。

この調整後のプロファイルが Fig. 7 となる。AMP1 のプロファイルはきれいになった。ただ、PC1、PC2 でプロファイルに同心円模様ができてしまっている。AMP2 では PC2 と同じプロファイルをしているので、ここでは悪化はしていないと思われる。ただ、中心で一番光量が高くなるように調整したので、レンズで光を集束している BBO 下流の紫外レーザー光の形は、少し楕円だが中心に一つのコアができるようになった(Fig. 7 UV)。ただ、うすく周りにリングのようなハローは残っている。

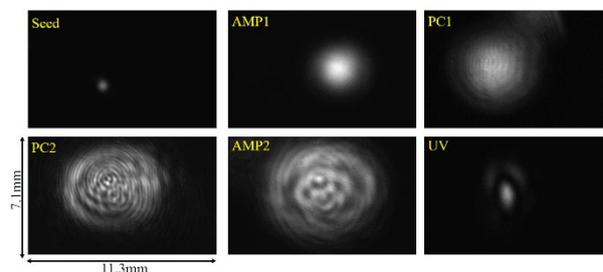


Figure 7: Laser profiles at each position after laser path alignment.

ポッケルスセルでは、口径が 6 mm $\phi$  と小さいため、ビューワーカードでは見えないくらいの弱い光量ハローが当たっている。Figure 8 は IR ビューワーで見た PC2 の BBO 結晶入口の部分で、穴の周りが光っているのが分かる。これが干渉縞を作り出している可能性があるが、レンズを入れるスペースがなく、今回はこのままとした。

最後に、紫外レーザー光の光路上にアイリス絞りを設け、穴のサイズを調整しコアの部分のみを切り出すことでプロファイルを改善した。そのプロファイルが Fig. 9 となる。左のアイリスが Open の時はハローが見られるが、右のアイリス径を最小にした場合ではハローがカットされコアのみのきれいなプロファイルになっている。この時のガウシアンフィットで出したレーザーサイズは 250  $\mu$ m ( $1\sigma$ ) 程度となっている。ただし、エミッタンス測定時の運転で使用される 0.6  $\mu$ s のパルス幅で測定したものであり、726  $\mu$ s 運転の時は、熱レンズ効果によりレーザーの位置もずれ

るため、アイリスが入れられず、Fig. 5 のようなレーザープロファイルのまま使用した。ここも今後の改善項目となる。

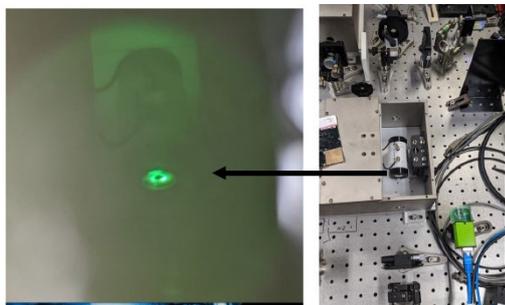


Figure 8: Laser halo at the entrance of PC2.

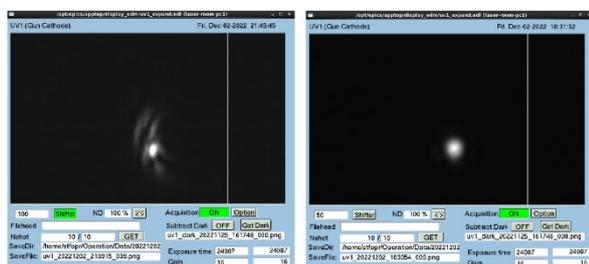


Figure 9: UV laser profile before and after cutting the halo by an iris.

#### 4. レーザーの安定度

電子銃カソード上のレーザーの位置やサイズは、カソードの位置に対応する場所に置いたカメラでモニタしており、そのジッターや時間変化は小さく安定している。Figure 10 が、短パルス(0.6  $\mu\text{s}$ )運転時の位置やサイズの時間変化である。1日の運転を通して位置ジッターは 50  $\mu\text{m}$  程度、サイズジッターも 30  $\mu\text{m}$  程度と小さく、位置のドリフトは 100  $\mu\text{m}$  程度であり、サイズのドリフトも 30  $\mu\text{m}$  程度と非常に安定している。

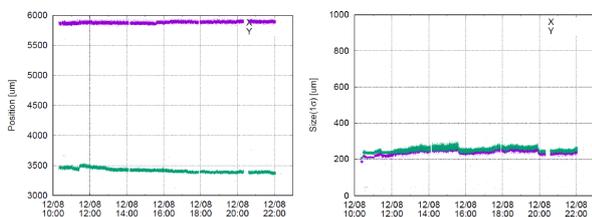


Figure 10: Trend of laser positions and sizes in the short pulse of 0.6  $\mu\text{s}$ .

Figure 11 はロングパルス(726  $\mu\text{s}$ )運転時の位置とサイズの時間変化である。ロングパルスの際はビームのパルス幅に合わせて AMP の励起光のパルス幅を変更するので、ロングパルスに切り替えた後、熱平衡状態になるまで、しばらく位置やサイズはドリフトし、位置は 200  $\mu\text{m}$  程度、サイズは 100  $\mu\text{m}$  程度である。ただ、位置やサイズのジッターは短パルス時と同程度で小さく安定である。

ロングパルス時のレーザーパワー時間変化は Fig. 12 のようになっており、若干下がる傾向にあるが概ね安定している。ただし、電子ビームカレントを見るとより安定して

いる。レーザー位置のドリフトが見られたため、レーザー光がパワーをモニタしているフォトダイオードに入らなくなってパワーが少し落ちたように見えていると思われる。

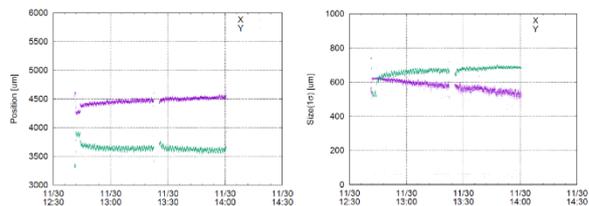


Figure 11: Trend of laser positions and sizes in the long pulse of 726  $\mu\text{s}$ .

これとは別に、約1分周期の細かいパワードリフトが見られる。これはビームカレントの方にも表れており、実際に起きていていると思われるが、今のところ1分周期で変化するものが見つかっておらず、原因は調査中である。種光レーザーのパワーにこの短周期のドリフトは見られず、レーザー位置やサイズにも、この短周期のドリフトが見られる(Fig. 11)ことから、波長変換結晶のところで、位置やサイズが変わって変換効率が変化し、パワーの変化につながっている可能性がある。

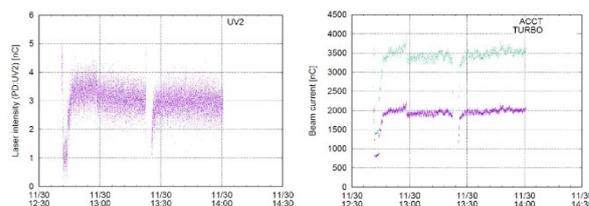


Figure 12: Trend of laser power and beam current in the long pulse of 726  $\mu\text{s}$ .

#### 5. まとめと今後

レーザーシステムの改修により、目標の 726  $\mu\text{s}$  のロングパルスのレーザーパルスを生産できた。パルスエネルギーも 15 mJ となり、電子生成に必要なパワーを十分に回ったパワーが得られた。また、位置、サイズ、レーザーパワーのジッターやドリフトは小さく、安定した運転ができた。また、レーザープロファイルも光軸調整やアイリス絞りの導入で改善でき、きれいなプロファイルを得られるようになった。ただ、パルス内のパワー変化、ポッケルセルでの同心円模様、1分周期のドリフトなど、いくつか課題が残っており、今後も調査、調整を行っていく予定である。

#### 参考文献

- [1] ILC Technical Design Report, <https://linearcollider.org/technical-design-report/>
- [2] M. Kurata, "Report of same pulse length and current electron beam acceleration as ILC specification with STF-2 cryomodels", Proc. 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2023), Funabashi, Japan, Aug. 2023, WEOA8, this meeting.
- [3] I. Suzuki *et al.*, "Report of electron beam acceleration with STF-2 cryomodels for the ILC", Proc. 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2022), Kitakyusyu (Online meeting), Japan, Oct. 2022, pp. 46-50.