

KEK 電子陽電子入射器におけるレーザーから新 RF 参照位相の導入

NEW RF REFERENCE SIGNAL GENERATION BY RF GUN LASER SOURCE AT KEK ELECTRON/POSITRON INJECTOR LINAC

周翔宇^{#, A,B)}, 熊野宏樹^{C)}, 豊富直之^{C)}, 吉田光宏^{A,B)}

Xiangyu Zhou^{#, A, B)}, Hiroki Kumano^{C)}, Naoyuki Toyotomi^{C)}, Mitsuhiro Yoshida^{A, B)}

^{A)} Accelerator Laboratory, High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

^{B)} The graduate University for Advanced Studies (SOKENDAI)

^{C)} Mitsubishi Electric System & Service Co.,Ltd.

Abstract

The stability of the RF phase in the LINAC of SuperKEKB is affected by the high voltage of the klystron and the temperature of the cooling water in the accelerating structure. To improve the stability of the RF phase, a new RF signal is generated by the RF gun's laser source, which is synchronized with a 2856 MHz signal. The laser output is transmitted through a free space area to sector B and detected by a photodetector, which is not impacted by temperature fluctuations or klystron interference.

1. はじめに

KEKB から SuperKEKB へのアップグレードに伴い、安定した加速を行うために、高精度の加速信号を長距離にわたって伝送する必要がある。現在、LINAC-MO 周波数は 571.2 MHz で、基準信号発生器により分周・通倍を行い、異なる繰り返し周波数信号が生成され、これらの信号は各機器に送られる[1]。RF 信号の位相安定度は、クライストロンモジュールの電源の安定度や冷却水及び室温の安定度に大きく依存する。ビームをリングに安定して導入するために、入射器の基準高周波信号には、移相器や位相フィードバックなどの位相制御システムが導入されていた[2]。

同時に、HER への入射を行うために、フォトカソード RF 電子銃が導入された。このため、HER 用の位相に固定された RF 信号がレーザー側に送られる。この数年間、電子銃用レーザーシステムの改良が進み、長時間安定な運転を実現してきた[3]。RF 基準信号を使用してレーザーの光信号を制御し、光信号を用いて長距離伝搬させると同時に、RF 信号との間で正確な再現を実現する

とが検討されている。このレーザーの光信号の一部は取り出され、ファイバーや自由空間を通じて伝送され、増幅が行われる。光信号は長距離伝送においても電気ノイズの影響を受けない利点がある。このため、LINAC 全域にレーザーから新 RF 参照位相の導入を行う。

LINAC の各セクターでは、レーザー光信号から変換された RF 信号とワイヤ接続を通じて送られてきた RF 信号が互いにチェックされる。そして、これら 2 つの異なる伝送方法で得られた RF 信号の位相差を評価することは、RF 信号の安定性に関する研究に非常に役立つと考えられる。この位相差の比較により、レーザー光信号を使用する光信号伝送と、ワイヤ接続を通じて行われる電気信号伝送の間での位相のずれや安定性の違いを評価することが可能である。もし位相差が大きい場合、それは信号の安定度や伝送過程での損失に関する問題を示唆するかもしれない。逆に、位相差が小さい場合、両方法の信号伝送が互いに適切に補償されていることを示す。このような比較は、LINAC システムの信号伝送の品質向上や安定性の向上に向けて、問題の特定や改善策の提案に貢献することが期待される。

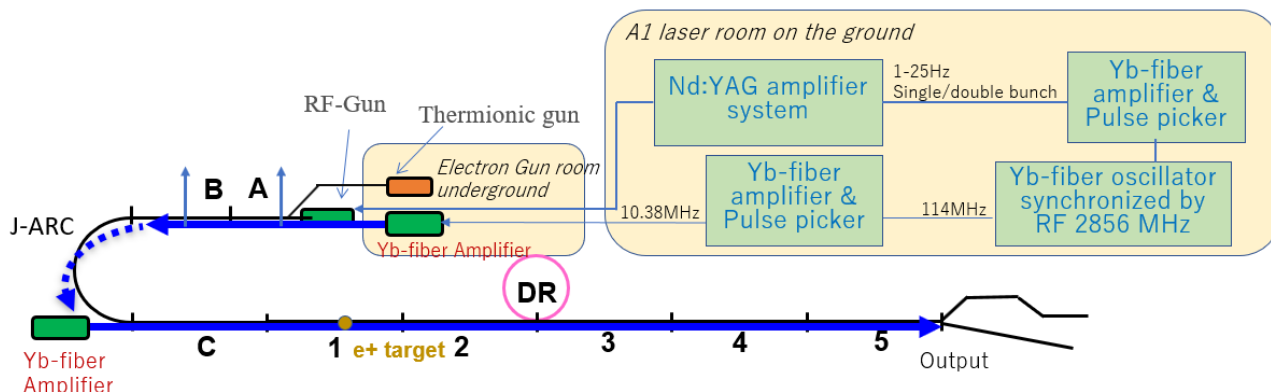


Figure 1: layout of the laser signal form RF gun laser source transmission covers the entire Linac.

[#] xiangyu.zhou@kek.jp

2. レーザーを用いた基準信号伝送

KEK 電子陽電子入射器施設 LINAC では、180 度偏向部を挟み、A-B セクター (~100 m) と C-5 セクター (~500 m) の 2 つの直線部からなる、全長 600 m の線形加速器である。電子を生成するため、レーザー信号は A1 地上ギャラリーのレーザー室から地下トンネルの A1 電子銃空洞に伝送される。そして、このレーザー信号をさらに拡張して、LINAC 全体をカバーすることを旨として開発が進められている (Fig. 1)。

2.1 発振器及びファイバー増幅

LINAC-MO の周波数は 571.2 MHz で、基準信号発生器により分周・通倍された信号が生成される。具体的には、10.385 MHz、114.24 MHz、および 2856 MHz の信号が生成され、これらは RF 電子銃用レーザーシステムへ送られる[1]。

レーザーシステムには市販の Menlo 社 Yb ファイバー発振器を導入した。Yb ファイバー発振器から 114.24 MHz のパルスが生成され、RF 信号とロックされる。また、Linac の 2856 MHz トリガーによって位相と同期を行い、安定な光パルスを供給している[4]。

出力されたシグナルパルスを波長板と偏光ビームスプリッターを通じて 2 つに分けられる。1 つを RF 電子銃用レーザー信号の種光として使用され、増幅・整形・波長変換などの操作により、1-25Hz、Single/Double bunch、1 mJ レベルの UV 光源が構築されている[4]。

もう一つのパルスは Yb-doped ファイバー増幅され、高速光スイッチ半導体光増幅 (semiconductor optical amplifier: SOA) パルスピーカーによって RF の 10.385 MHz と同期した繰り返し周波数のパルスに変換される。SOA 及びシングルモードファイバー増幅で発生した ASE (Amplified Spontaneous Emission) ノイズを取り除くために、透過型グレーティングペアとスリットの組み合わせで、中心 1030 nm、半値全幅 8 nm の光が取り出される。そこまでの、シグナルパルスの時間幅及び繰り返し周波数を調整させた。

2.2 ファイバーを用いた光信号伝送

同期された 10.385 MHz レーザーシグナルは 3 つを分割し、そのうちの 1 つを地上のレーザーハットから地下の熱電子銃室まで伝送する。この光パルスは、FC/APC コネクターを使用して行われ、1064 nm 偏波保持 (PM) パッチケーブルに集光する。伝送ケーブルの長さが 10 m を持ち、冷却水パイプに貼り付けられ、外側は断熱材

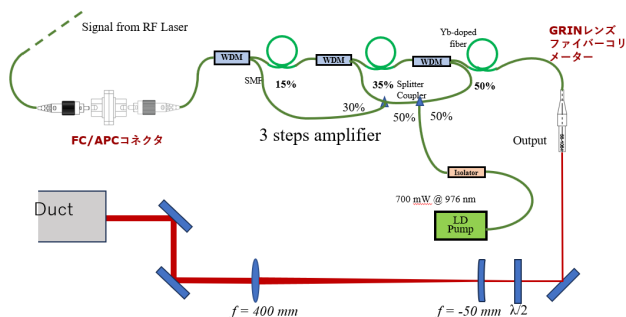


Figure 2: Input optical system.

で覆われており、1 階の光学架台から地下の熱電子銃室の光学架台まで伝わっている。

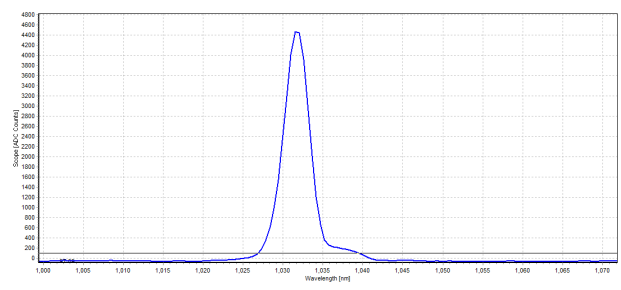
このファイバー接続方式による光信号の伝送は、自由空間への出射を避け、調整が不要であり、空気の変動や温度湿度の影響が少ないという利点がある。ファイバーコネクターによる接続は、2 つファイバーのコアを互いに接触させ、ロスや反射が発生し、エネルギーの減少があることに留意する必要がある。

2.3 光信号の増幅及び再構築

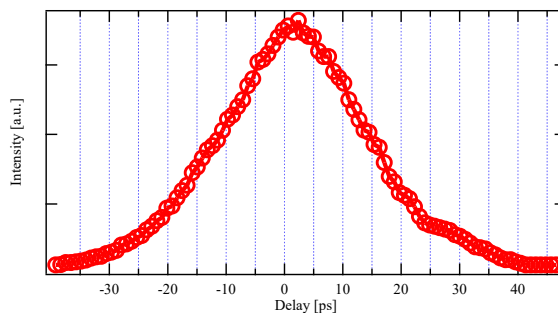
地下光学架台では、レーザーアライメントシステムのため設置した地下光学架台の一部を利用している[5]。Figure 2 のように、この架台は、A-B セクター光軸管の上流に配置されており、出射ビームを真空窓から真空ダクトに入射できるようになっている。

FC/APC コネクターを用いて PM パッチケーブルとファイバー増幅システムを接続している。ノイズを最小限に抑えるために、段階的にゆっくり増幅するシステムを構築している[6]。最大 750 mW のポンプパワーを 3 つに分け (15%、35%、50%)、コア径 5.8 μm の Yb ドップファイバーを使用して、ポンプ LD と WDM (wavelength division multiplexed coupler) を溶接させ、シグナル光を 3 段増幅する。ポンプの強度によって出力パワーを調整できるようになっており、平均パワー約 100 mW で設定している。ここまでのプロセスで、シグナルをファイバー内部に進行している。

GRIN レンズ付きコリメータを使用して、平行ビームを自由空間に出力する。出力ビーム直径が約 0.5 mm FWHM である。約 100 m の距離に平行ビームを維持するため、出力ビーム直径をテレスコープで増大させる。1 枚目及び 2 枚目のレンズは、 $f = -50 \text{ mm}$ 及び 400 mm



(a)



(b)

Figure 3: (a) Pulse spectrum. (b) Pulse time domain profile.

の焦点距離を使用し、ビーム直径は約 8 倍に増大させる。B セクターエンドのビーム径が一番小さいように、レンズ間の距離を調整した。A、B セクターにいくつかの位置にオプティクスを設置し、完全に平行ビームになることは難しいが、B セクターエンドでは光信号が完全に収集することができる。3 枚の平面ミラーでビーム光路をコンパクトに構築し、下流の 2 枚ミラーによって出射ビームの X/Y 方向を調整することができる。

長距離のファイバーを通してレーザー信号を伝送した後、パルスのパラメータは最初のレーザー信号と比べてわずかに変動することが観測された。Figure 3 により、自由空間に出射されたレーザー信号のスペクトル及びパルス幅が測定された。スペクトルの中心波長は 1032 nm で幅が約 5 nm である。また、自己相関法 (Auto-correlator) によってパルス幅を測定し、FWHM が 25 ps であることが確認された。

2.4 光軸管に光信号伝送

電子陽電子入射器のトンネル内 A,B セクターに設置されている光軸管内において、1 台の 100 l/min スクロールポンプで真空が保持される。その間に、ビーム取り出しユニットを Fig.4 のように設置した。ダクトの接続場所には、幅 20 mm のリング状アクリル窓が取り付けられており、ここから赤外信号を取り出す。光軸管内の光軸には偏光ビームスプリッターキューブを挿入させ、S 偏光成分は反射させて P 偏光成分は透過させることで、S 偏光成分を光軸管から取り出す。ビームスプリッターの上流に $\lambda/2$ 波長板を設置し、取り出す信号量を調整することができる。すべての挿入されたビームスプリッターや波長板は、光軸管内の専用ホルダーにしっかり固定されており、光軸の中心に配置されている。

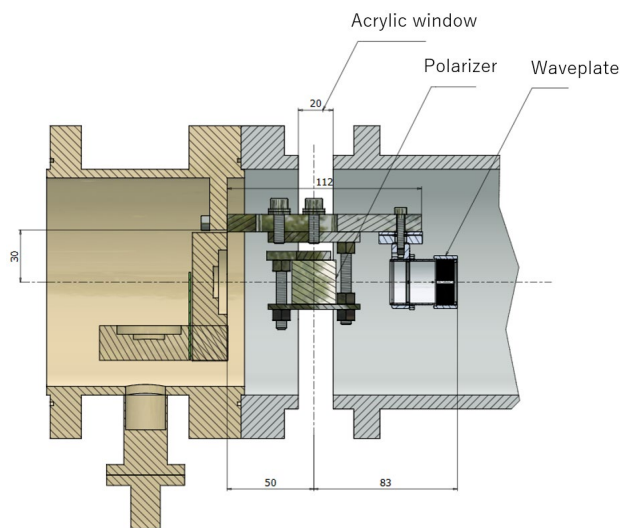


Figure 4: Beam extraction unit.

テスト実験のために、A セクターの A1M と B セクターの B3 エンドの 2 箇所計測を行う予定である。取り出す割合はそれぞれ 20%と 25%に調整される。残りの分を B エンドに到達し、真空窓からダクトに飛び出す。この光信号を伝送ファイバーに収集され、C-5 セクター用のレーザーラインに伝送されることになる。

3. 今後の予定

3.1 検出装置

出射されたシグナルはフォトダイオードによって検出され、光信号が電気信号に変換される。この電気信号は検出した光パルスの強度に比例する RF 信号を生成する。この RF 信号は 2856 MHz のバンドパスフィルターを通過し、IQ モジュレーターに導入する予定である。同様に、RF 基準信号もクライストロンを経由して加速管に到達する際にも IQ モジュレーターが導入される。

A-B セクターには長さが 100m 以上のビームラインがあり、ここに沿ってレーザー光を電子ビームとほぼ同じ速度で送ることで、A1M と B3 の位置に到達する時刻は同じと仮定されている。各測定点で位相変動を測定し、レーザー光が到達したタイミングと RF 信号のズレが発生する場合、RF タイミングを補正することが考慮されている。

提案されているタイミング補正は、正確な信号測定と同期を確保するために非常に重要である。レーザー光と RF 信号の位相整合によって、システム全体の動作を最適化し、信号の安定性と精度を向上させることが目指されている。レーザー信号の自由空間伝送は、微小な環境変動による空気の流れの乱れを真空ダクトによって抑制する。そして、光軸の安定性も、振動や温度、湿度の微小な変動による影響を受ける可能性がある。このため、フィードバック制御システムの導入が予想されている。制御システムは、変動に対してリアルタイムで補正を行う、システム全体の性能を向上させるための重要な要素となる。

3.2 全LINACに光信号の伝送

入射器は、180 度の J-arc 部によって A-B セクターと C-5 セクター 2 つの直線部から構成される。現在、A-B セクターに光信号の伝送は実現しているが、J-arc の後にある C セクターにもう一つのレーザー増幅システムを構築する必要がある。

J-arc 部における自由空間を介した光信号の伝送は複雑なので、B セクターエンドに到達した光信号を 20m の位相安定化されたファイバーを用いて C セクターに伝送する。そして、C セクターの光学ブレッドボードに光増幅システムを設置し、その出力光を光軸管ダクトを通じて自由空間に伝送する予定である。

C-5 セクターの第二直線部の全長が約 500m であるため、レーザービームの平行度を完全に維持することは難しい。そこで、レーザー管に平行度調整用のテレスコープレズを複数箇所配置する計画がある。これによって、レーザービームの平行度を適切に調整し、長距離伝送でも高い品質を維持することが目指されている。

3.3 LINAC 全域にレーザー同期光源の開発

この RF 電子銃用のレーザー光源は、遠距離での伝送後、種光として利用され、増幅、整形、波長変換などの多様な手段に展開可能である。電子ビームと同期されたレーザー光源が LINAC 全体に到達することが実現すれば、将来的には量子ビーム診断、計測技術、軌道アライメントなどさまざまな研究開発に大きな貢献が期待される。

4. まとめ

KEK 電子陽電子入射器施設 LINAC は、性能の向上と高精度な測定・制御の必要性に対応するため、RF 基準信号を同期しているレーザーから新たな RF 参照位相を導入する取り組みを行っている。このプロセスにより、LINAC 全域で光信号を用いて長距離伝搬を行いながら、RF 信号との間で正確な再現性を確保することが計画されている。現在、A-B セクター光軸管においてレーザー信号のカバーができ、高精度測定及び制御の開発を進んでいる。

参考文献

- [1] M. Miura *et al.*, “Phase shifter for RF reference signal in SuperKEKB injector linac”, Proc. 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2018), Nagaoka, Japan, Aug. 2018, pp. 1136-1139.
- [2] M. Miura *et al.*, “RF phase feedback at KEK electron/positron injector linac”, Proc. 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2021), Takasaki (Online meeting), Japan, Aug. 2021, pp. 368-370.
- [3] R. Zhang *et al.*, “Laser system for SuperKEKB RF gun and its multi-functionalized application”, Proc. 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2022), Kitakyusyu (Online meeting), Japan, Oct. 2022, pp. 668-670.
- [4] X. Zhou *et al.*, “Upgrade of electron beam generation system for Phase-III commissioning of SuperKEKB project”, Proc. 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2019), Kyoto, Japan, Jul.-Aug. 2019, pp. 487-490.
- [5] M. Satoh *et al.*, “Laser based alignment system for the KEKB injector linac”, Proc. 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2011), Tsukuba, Japan, Aug. 2011, pp. 762-767.
- [6] X. Zhou *et al.*, “25Hz and 50Hz double-bunch laser system upgrade for RF gun at SuperKEKB”, Proc. 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2015), Tsuruga, Japan, Aug. 2015, pp. 1334-1337.