

LASER DEVELOPMENT OF HIGH CHARGE AND LOW EMITTANCE DAW RF GUN FOR SUPERKEKB

Mitsuhiro Yoshida^{#, A)}, Yujiro Ogawa^{A)}, Xiangyu Zhou^{A)}, Takuya Natsui^{A)}

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

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801, Japan

Abstract

The DAW-type RF Gun is under development for the low emittance injection of SuperKEKB ring. The charge of 5 nC and the emittance of 10 mm mrad are required. Thus the longer bunch as 30 ps is necessary to avoid the space charge effect. We developed the laser system for the RF-Gun using the solid state laser to obtain the high power UV laser.

SuperKEKB 用高電荷低エミッタンス DAW 型高周波電子銃用レーザーの開発

1. 背景

SuperKEKB では非常に高いリノシティを得るため、低エミッタンス化によるダイナミックアパーチャーの減少とビーム寿命の減少はやむを得ない。これに対応して電子陽電子入射器も高電荷・低エミッタンスの電子源として、DAW 型の RF 電子銃の導入を計画している。電子銃の要求性能としては、5nC、10mm・mrad 程度であり、これを安定に運転可能な低電界で達成するには、理論的に数十 ps 以上の長い初期バンチ長が必須である。これに合わせレーザーシステムも比較的長いパルス長が必要であり、ハイパワー化が容易で、かつ分散補正が不要な固体レーザーの開発を行った。

2. DAW 型 RF 電子銃とカソード

DAW 型 RF 電子銃は、電場によるビーム収束と、短いトランジットタイムファクターによる速度変調が可能で、大電荷のビームを小さいビームサイズを保ちつつ加速するのに非常に有効な RF 電子銃である。

電子銃の要求性能としては、5nC、10mm・mrad 程度であり、このような電荷ではエミッタンスを決めるのは、ほとんど空間電荷によるビームの発散である。図 1 は Kwang-Je KIM^[1] の式に従って、90MV/m の電界で計算したレーザーのパルス長に対するエミッタンスであり、これから理論的に数十 ps 以上の長い初期バンチ長が必須である事が分かる。

実際には GPT や CST Particle-Studio を用いて計算を行い、現在のパラメーターで、30ps 初期バンチ長で、3MeV、6 mm・mrad、14ps というビームが得られるという計算結果を得ている。またフォトカソードとしては長期間の営業運転に対応するため、高融点・低仕事関数という特殊な性質を合わせ持つ LaB6 カソードを第一候補として選択した。これらを 2011 年秋からの運転で震災後早期に PF への入射

のため復旧した 3-2 ユニットに斜め入射系を構築し、RF 電子銃の試験を行う予定である。

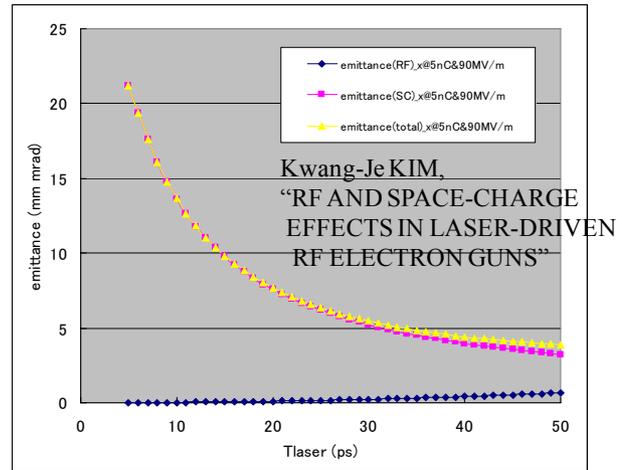


図 1 : レーザーのパルス長に対するエミッタンス

3. レーザーの要求性能

DAW 型 RF 電子銃に合わせてレーザーシステムも比較的長いパルス長が必要であり、また Cs2Te 等の高量子効率のカソードとは異なり、それなりのレーザーパワーが必要である。

レーザーの波長については 266nm と 213nm の双方について開発を進めている。266nm ではカソードの周りの銅からは電子が放出されないという利点があるが、波長を短くすると一般的にカソードの寿命が延びる事が知られており、213nm を必要に応じて混ぜて使う準備をしている。

電子の SuperKEKB の HER リングへの入射に必要な電荷は 5nC であるが、陽電子の生成にも RF 電子銃が使用できると、運転が簡易にできる。その際は 10nC の電荷が必要であるので、10nC をターゲットとして検討を行っている。10nC に必要な、量子効率が 10^{-4} の際に要求されるレーザーの出力は 500 μ J

[#] mitsuhiro.yoshida@kek.jp

であり、途中の透過率等を考慮して最低限 1mJ の出力が要求される。

4. 固体レーザー

DAW 型 RF 電子銃用レーザーシステムとして、固体レーザーとファイバーレーザーの組み合わせで開発を進めている。固体レーザーとファイバーレーザーはそれぞれ利点がある。固体レーザーは低繰り返しでのハイパワー化に有利であり、また分散補償もいらぬ。ファイバーレーザーは高繰り返しでの平均電力に有利であり、またファイバーの非線形性が利用できる。

RF 電子銃の試験用のレーザーは発振器は固体、プリアンプは固体またはファイバー、メインアンプは固体という組み合わせが、開発が簡単でありハイパワー化にも圧倒的に有利である。

RF 電子銃の運転用レーザーは発振器及びプリアンプまでファイバー、メインアンプは Yb:KGW の固体アンプという組み合わせがモジュール化や、励起 LD の交換、パルス内の時間構造の制御という点において有利でありこちらも並行して進めている^[2]。

本稿では、RF 電子銃の試験用のレーザーとして、最も簡単に大出力が得られる Nd:YVO4 と Nd:YAG の組み合わせ及び Nd:GdVO4 による固体レーザーの開発について述べる。Nd:YVO4 の発振波長は Nd:YAG の発振波長と重なっており、Nd:YAG は Nd:YVO4 の倍の蛍光寿命を持つ上、様々な Diode Pumped Solid State (DPSS)モジュールや、フラッシュ励起等が利用できる。

5. モードロック発振器

モードロック発振の方式としては受動モードロックとして、SESAM や SHG、カーレンズ、ファイバー等の非線形性を利用する方法や、AO を使った能動モードロック、またそれを組み合わせた再生増幅モードロック等がある。

今回はパルス幅が重要な要素であり、決まったパルス幅を得るには SESAM で数十 ps 程度の設計通りのパルス幅を得るか、ファイバーレーザーによるフェムト秒のレーザーをストレッチャーで伸ばすという方法が確実だと思われるので、これらの双方の開発を行っている。

本稿では SESAM を用いたモードロック発振器の開発について焦点を絞り、それらの安定性や運用を考慮して、以下の様々な条件を変えた発振器の開発を行った。

- 励起位置：エンド励起、サイド励起、中間励起等
- モードロック発振の周波数：10.38MHz の整数倍

電子陽電子入射器は 10.38MHz のリングとの同期による繰り返しで 2 バンチ、50Hz 運転を行っており、従来サブハーモニックバンチャーで使用していた基本周波数の 11 倍に当たる 114.2MHz での同期がレーザー共振器長などから簡単であるが、114.2MHz から 90ns 離れた 2 バンチを高い S/N 比で

切り出す事や、モードロックの安定性から 10.38MHz 同期や次数の少ない同期周波数の共振器の試作を行った。

SESAM でのモードロックの条件^[3]は式(1)のようになっており、

$$E_{pulse} = \frac{P_{intra}}{f_{rep}} = \frac{2LP_{out}}{cT} \geq \pi \sqrt{F_{sat,a} r_a^2 F_{sat,g} r_g^2 \Delta R} \quad (1)$$

ここで T は出力カプラーの透過率、L は共振器長である。この式から 1.3m の共振器で、 $\Delta R=0.6\%$ の SESAM を使用した場合、出力 500mW、透過率 4% で安定条件を満たす事が分かる。

共振器長が長くなると小さいエネルギーでも安定条件を満たす事ができる。しかし 114.2MHz では 1.3m、10.38MHz では 14.4m になり、安定共振器の調整が難しくなってくる。

図 2 は 114.2MHz で 1.3m の共振器長で開発した、モードロック発振器である。産業総合研究機構で開発されていたレーザー^[4]を元に台形の Nd:YVO4 結晶を端面から励起している。

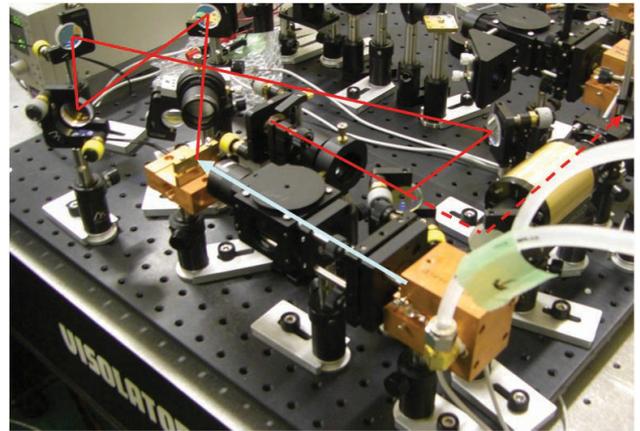
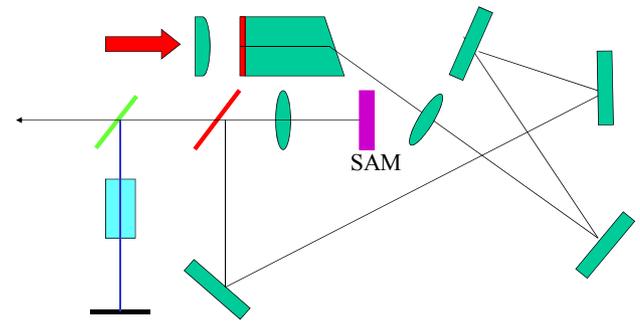


図 2 : 114.2MHz モードロック発振器

図 3 は 10.38MHz の低い次数の発振する目的で、共振器長を偏光により半分にしたモードロック発振器である。これにより 10.38MHz でも 7m の共振器であり、凹ミラーを用いて多重反射させて 1m 程度の長さになる。30MHz までは発振を確認したが、今後さらに調整を行い、10.38MHz の発振を試みる予定である。

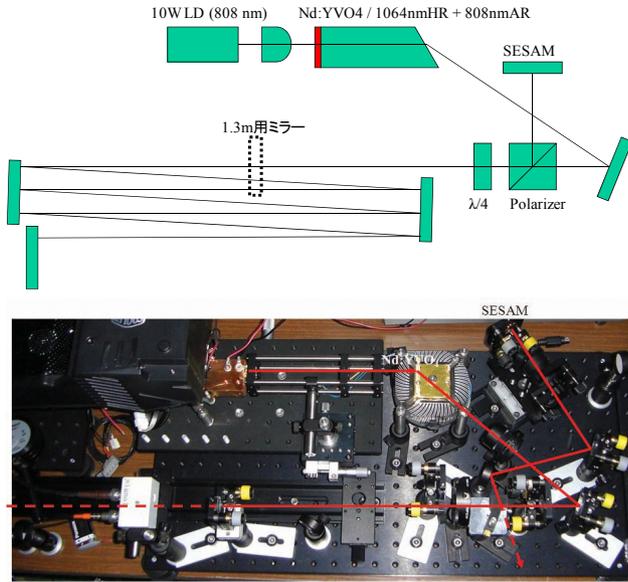


図 3 : 10.38MHz の低い次数の発振器

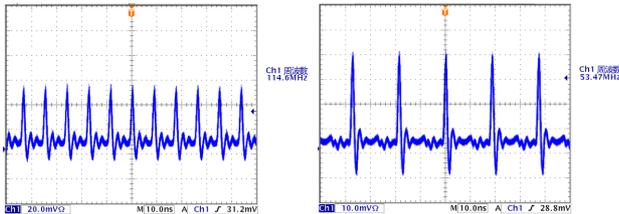


図 4 : 114MHz (10.38MHz × 11 倍)での発振と 52MHz (10.38MHz × 5 倍)での発振

また共振器長の微調整については、ピエゾモーター(50nm 精度、20mm ストローク)+ピエゾの組み合わせで、ソフトウェア的にある程度フィードフォワードしつつ、PLL で位相をロックする機構とした。

6. プリアンプ

プリアンプの方式としてはマルチパス、再生増幅器、Ytterbium Doped Fiber Amplifier (YDFA)等の方法があるが、それぞれ一長一短である。マルチパスでは非常に高いゲインになるため出力エネルギーが安定しない。再生増幅器では2バンチにするには2台必要になり、またタイミング系が難しくなる。また YDFA では分散補償が必要になる。今回それぞれ並行に開発を行っているが、マルチパスは特に開発要素は無いが、再生増幅器や YDFA は現在性能を調査している所である。図5は開発した再生増幅器である。

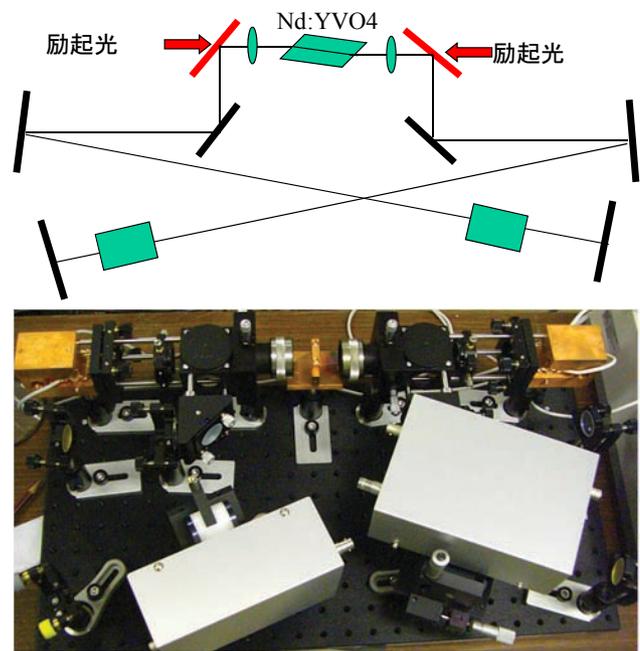


図 5 : 再生増幅器

7. メインアンプ

メインアンプとしては、以下の3つのタイプについて並行に準備を行った。

- Nd:YVO4 または Nd:GdVO4 + QCW LD
- YAG DPSS モジュール
- フラッシュ励起 YAG

1064nm で、DPSS では 100mJ は容易であり、フラッシュ励起ではジュールクラスが得られる。

8. 高調波発生

- SHG としては LBO-NCPM、KTP、DKDP、BBO
- FHG としては KDP、BBO
- 5HG としては BBO

のそれぞれについて変換効率の測定を行っている。

1064nm からの BBO での 266nm への変換効率は 10%程度であり、213nm への変換効率は 2.5%程度である。KDP でも 266nm への変換効率は 7%程度ある。従って高繰り返しかつ安定な DPSS モジュールでも 266nm で 10mJ、213nm で 2.5mJ 程度は可能となる。またフラッシュ励起では通常のフラッシュモジュールでは 10Hz が限界であるが、266nm で 50mJ、213nm で 10mJ 以上は可能である。

現時点では SHG に LBO-NCPM、FHG に BBO を使った測定で SHG は 40%程度、FHG は 10%程度の変換効率が得られておりさらに調整中であるが現時点でも十分な出力である。

また他の研究機関でフォトカソード用ではないが CLBO を使った 213nm の 100mJ 以上の出力の開発がある。それに合わせて CLBO 結晶が入手できれば、将来的には FHG 及び 5HG には CLBO の使用を検討している。CLBO は強い潮解性があるが、ワーク

ホフが小さく、長い結晶が使用できるのが特徴である。

9. まとめ

SuperKEKB の低エミッタンス入射に対応した DAW 型 RF 電子銃用のレーザーの開発を行った。発振器・アンプ・高調波変換等の結晶はいくつかのパターンで用意できている。今後は RF 電子銃の評価を行いつつ、レーザーの最適な組み合わせを決定し、また並行して行っているファイバーレーザーの開発と合わせて、最終的なレーザーシステムを構築する。

参考文献

- [1] Kwang-Je Kim, “RF and space-charge effects in laser-driven rf electron guns”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, Volume 275, Issue 2, p. 201-218 (1989)
- [2] X. Zhou, M. Yoshida, Y. Ogawa, “Fiber laser development of DAW RF gun for SuperKEKB”, Proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsukuba, Aug. 1-3, 2011
- [3] U. Keller, K. J. Weingarten, et al., “Semiconductor Saturable Absorber Mirrors (SESAM’s) for Femtosecond to Nanosecond Pulse Generation in Solid-State Lasers”, IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, Volume 2, Issue 3, p. 435-453 (1996)
- [4] R. Kuroda, H. Toyokawa, M. Koike, K. Yamada, et al., “Development of Laser System for Compact Laser Compton Scattering X-ray Source”, Proceedings of the 11th European Particle Accelerator Conference (EPAC08), Genoa, Italy, Jun 23 – 27, 2008, p. 1878-1880