

DEVELOPMENT OF PULSED LASER SYSTEM AS A TARGET FOR QUANTUM BEAM TECHNOLOGY PROGRAM*

Hiroataka Shimizu[#], Aryshev Alexander, Yasuo Higashi, Yosuke Honda, Junji Urakawa
High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Tsukuba, Ibaraki, 305-0801 Japan

Abstract

According to the plan of “Quantum Beam Technology Program”, a new beam line using superconducting RF cavity accelerating system is now under construction. To obtain quasi-monochromatic X-ray via inverse Compton scattering, highly intensified laser beam is also needed. In this report, we describe our R&D situations about pulsed laser system that consists of laser oscillator, amplifier, and external optical cavity.

Development of Pulsed Laser System as a Target for Quantum Beam Technology Program

1. はじめに

現在 KEK-STF では、量子ビーム技術開発プログラムの計画に基く新しいビームラインの建設が行われている。これは超伝導高周波加速空洞を用いて加速された電子線と、外部光共振器に蓄積されたパルスレーザーとの逆コンプトン散乱を通じ、準単色のX線を生成する実証実験のためのセットアップで、プロジェクトとして目指すX線強度としては、 1×10^{11} photons/sec/10%bandwidth (5Hz,30MeV,10mA 運転時)以上を達成する。2012年1月の運転開始を目標として、加速器・レーザー及び測定器の各装置毎に研究開発を進めている。ここでは、コンプトン散乱によってX線を生成するために必要な衝突用のレーザーシステムの開発状況について、詳しく報告する。

衝突用レーザーシステムは、大きく分けて「発振器」・「増幅器」・「共振器」の3つの開発要素に分解する事が出来る。以下では、これら3つの開発要素に関するR&Dの状況について報告を行う。

表1: beam parameter (QB Mode Operation)^[1],

Pulse Length	1ms
Repetition Rate	5Hz
Bunch Spacing	6.15ns
# of Bunch / pulse	162500
Bunch Length	12ps
Bunch Charge	62pC
Total Charge / pulse	10000nC
Beam Current	10mA
Maximum Beam Energy	40MeV
Beam Power	2 kW

2. 発振器

STF 加速器の量子ビーム運転モードにおける bunch spacing が 6.15ns である事から、必要となる発振器の繰り返し周波数は 162.5MHz と決まる。出力強度とパルス幅として、 ~ 100 mW 及び ~ 30 ps 程度を目標の値として現在開発を行っている。これらの値は、先行して KEK-ATF のダンピングリングに機器をインストールし、衝突実験を行っている LAL(フランス線形加速器研究所)のチーム^[2]の発振器や、今夏新しい4枚鏡共振器をダンピングリングにインストールする広島大・KEK のグループ^[3]が用いている発振器のパラメータなどを参考として決めた。

実際に発振器開発に用いる技術としては、希土類添加型 fiber を使った光発振回路中に、fiber couple された Mach - Zehnder 干渉計を埋め込む事によって、系内で DC 的に発振している laser 光に対して強度変調をかけ、更に系全体の周長を調整する事によって周期境界条件を整え、mode-locked 発振状態を作り出す方法を採用した。

この方針に基づき、試作発振器として、全周長が約 8.5 m の小型の発振器を試作した。

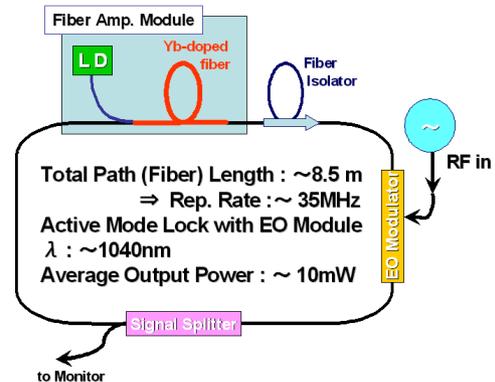


図1: 試作発振器の構成図

*Work supported by Quantum Beam Technology Project of MEXT, Japan

[#] hirotaka@post.kek.jp

系内に埋め込んだ分岐比が 50:50 の signal splitter 後の monitor port から出てくる発振光をオシロで観測する。Fiber Amp Module 内の LD への通電を始めると、光回路内に DC 的なレーザー発振が始まる。この状態で EO module に対して約 35MHz の modulation signal を与える事で、信号に同期したパルス状の波形に変わっている事が確認出来る。つまり doped fiber から放出された帯域の広い発振光のうち、光回路内で発振する為に必要な光の位相条件を満たしたものが最初の DC 的な発振状態を形成し(図 2:左側)、更に周長から加えられる周期的境界条件も満たした波長の光だけが mode-locked pulse を形成して、光回路内を循環している事がわかる(図 2:右側)。

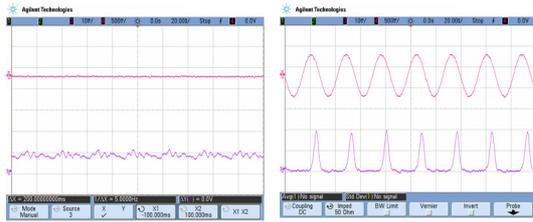


図 2 : 試作発振器での mode-locked 発振の様子

今回は簡単な為に発振器を全て偏光保持型の fiber で組んでしまい、その光発振回路の周長に合わせる様に SG の周波数を調整した。実際には加速器 RF の運転周波数に対して発振器側の繰り返しを合わせる必要があるので、fiber stretcher や自由空間中に chicane を導入するなどして、周長の調整機構を設けなければならない。これらの調整機構を組み込んだ上で、必要最小限の素子(Yb-doped fiber, EO, Isolator)を繋げて、全周を 162.5MHz の周長に抑える事はやや難しいと思われるので、より現実的な本番用発振器の構成としては、基本周波数(162.5MHz)の整数倍の周長を持つ光発振回路を用意し、その中に例えば 4 枚鏡の光共振器を埋め込む。この埋め込まれた光共振器を、feed-back 制御により加速器側から送られてくる reference 信号に正確に同期させる。これによって、光発振回路内を循環する laser pulse は加速器と同期した時間間隔を保ちながら、外部光共振器に蓄積する為に各パルスが満たすべき位相条件も満足した状態で発振する事になる。埋め込まれた光共振器の長さ制御の他に、発振回路の大部分を構成する光ファイバの長さ制御も勿論必要となるが、恒温槽を使った温度制御を行う事で、光ファイバそのものの長さ変動は十分な精度で制御出来る事が実証されている^[4]。

3. 増幅器

発振器で作られた $\sim 100\text{mW}$ 程度の laser pulse の平均強度を 1000 倍に引き上げ、 $50\text{W}\sim 100\text{W}$ 程度にまで増幅するためのアンプシステムが必要となる。基本的な構想としては、発振器自体は安定な動作を保証する事を最優先として低出力である事は問わな

い。この点は後段に用意した非常にシンプルな構成の増幅器で賄うと言う考え方である。必要とされる光強度が高くなるに伴い、集光された laser 光及び励起光による発熱の問題が顕著になってくる。この熱的問題を複雑な構成の発振器部分から切り離して増幅器部分に纏める事がシステム全体の安定性の向上に有効と考えている。

増幅部分の構成には、発振器から送られてくる seed 光をアンプする為の希土類添加型 fiber と、それを励起させるための pump 光があれば良いが、上に書いた様な発熱に伴う問題を回避しつつ doped fiber に seed 光と pump 光の両方を高い効率で couple させる必要があるため、技術開発的には難しい要素を含んだパートである。Coupling の問題は、例えば WDM (Wavelength-Division Multiplexing) 等の素子を使う事で、規格化されたコネクタの接続だけの問題に焼き直せるが、これまでの経験から、pump 光の強度が数十W近くにまで達する場合には、径の違う fiber を融着した構造を含むこれらの素子は使い方を少しでも誤ると直ぐに壊れる傾向にあるため、今回の R&D では WDM 等の使用を避け、代わりに二色性鏡を使った自由空間からの直接入射方式を採用する事とした。下に試作増幅器の構成図を載せる。

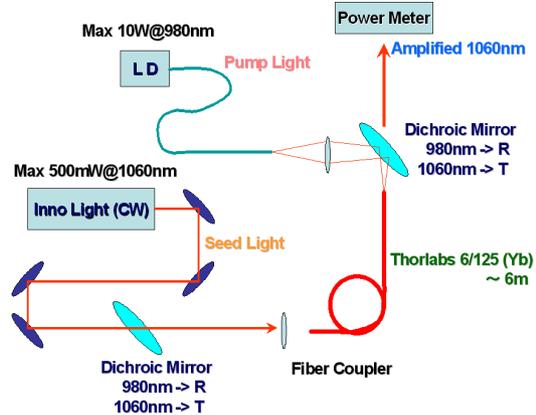


図 3 : 試作増幅器の構成

試験としては用意した二色性鏡が正しく機能するかどうかと、自由空間からの直接入射方式のアライメント技術の確立及び実際に seed 光が増幅されるかどうかを確認した。Pump 光入射側に置かれた二色性鏡の裏側に power meter を置き、doped fiber を抜けてくる seed 光の強度を測定した。Pump 用 LD への通電が 0 の時には 50mW 程度の光だけが抜けてきていたが、増幅後最終的には 1W 以上の光強度が得られた。

先にも述べた様に STF 実験では 50W 以上に増幅された laser が求められているため、今後 pump 用の LD も高出力な物を用意する必要がある。現在考えている具体的な構成としては、 1.2m の single mode photonic crystal fiber (core 径: $40\mu\text{m}$, 実効 clad 径: $200\mu\text{m}$)と 100W 以上の出力を持つ励起用 LD の使用を考えている。

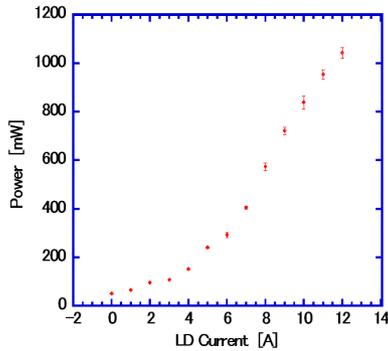


図4：試作増幅器での試験結果

試作機で使った添加型 fiber (core:6um, clad:125um) と比べて、移行を考えている PCF は各 aperture が格段に大きくなっているため、入射効率の向上が非常に期待出来る。試算として pump 光 100W 入射の内、9割以上の光が PCF 中に取り込まれ、seed 光への変換効率を7割以上と仮定すると、63W 強の増幅光を得る事が出来ると思われる。これはプロジェクトから要求されている平均強度を満たしており、充分許容可能な値である。

4. 共振器

最後に外部共振器部分に関する開発状況について述べる。これまで KEK-ATF では 2 枚鏡型の光共振器を使い、加速器中を循環する電子線の profile monitor 開発や医療用 X 線生成、ILC 計画に向けた陽電子生成実験などを行ってきた。いずれの実験の場合でも、鏡の反射率を高める事と共振器内での laser size を小さく絞る事が非常に重要な研究課題であり、その必要性から concentric cavity を用いてきた。しかし共振器構造の安定性の点から、鏡の枚数を 4 枚に増やし、凹面鏡 2 枚と平面鏡 2 枚からなる confocal cavity の有用性が認識される様になり、本格的な 4 枚鏡型共振器開発への移行期を迎えた。しかし非常に対称性の高い構造を持つ 2 枚鏡型共振器に対し、4 枚鏡型の共振器では幾何学的な鏡の配置に対応する非対称性の効果が現れる。(例えば平面状に 4 枚の鏡を配置した場合は、自然に“縦”や“横”と言う概念が生じる。この問題の克服を狙った素朴な 3 次元的な鏡の配置の場合にも、光の循環方向まで含めて考えた場合に残る非対称さの影響がある種の“歪み”として現れる。) 平面的な鏡の配置の場合、この効果は非点収差として現れ、共振器内に蓄積される laser 光の profile に影響を及ぼす。つまり円形からずれた profile への歪みの効果が生じる事となる。この非常に一般的な非点収差の影響を緩和し、4 枚鏡型共振器の長所である高安定性や並行光入射の簡便性を保ったまま、cavity waist 部分でほぼ円形の profile を達成出来る共振器の形状を独自に設計し、今回の STF 量子ビーム実験の衝突用共振器として適用する事となった。X 線の収量を上げるべく、dispersion free な chicane を beam line 上に設け、head-on collision style を取る事となったため、

chicane を構成する bending magnet を抱き込む鏡の配置が求められる。この場合どうしても共振器の一边が 1~2m 程度の大きなものになってしまう。この意味でも、各鏡の配置が一つの平面上で納まる planar type の共振器は有利であると判断した。

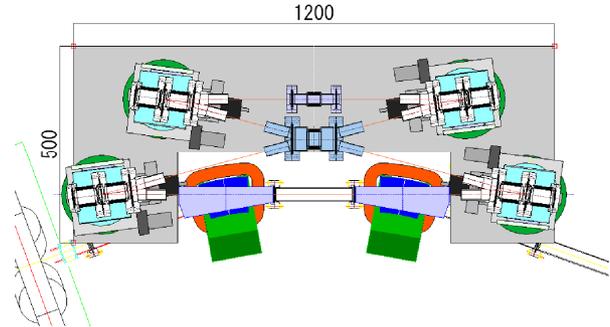


図5：STF 実験用 4 枚鏡共振器の案

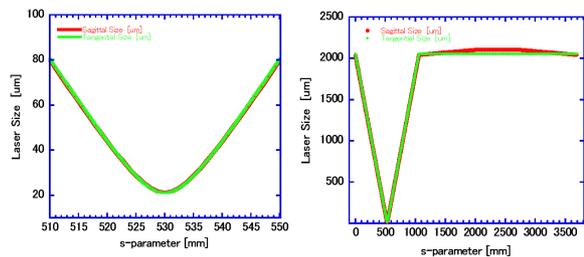


図6：4 枚鏡共振器内の laser profile 発展の様子

図6 右側が共振器を Sagittal 面と Tangential 面での profile の発展の様子を共振器一周に渡って追ったものである。両面上で大きな profile のずれが無く(至る所で円形 profile)伝播する事が見て取れる。また最も size が小さくなる凹面鏡-凹面鏡間での発展の様子を詳しく見たのが図6 左側の図である。要求される beam size $\sigma=20\mu\text{m}$ 以下を達成し、円形の profile が供給出来る事を示している。

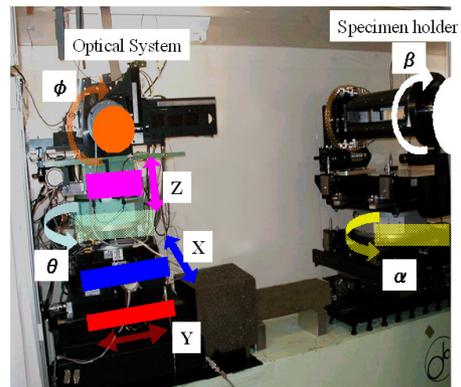


図7：鏡の曲率半径の絶対値測定試験

共振器を構成して精度良く waist size を絞るには、用いる鏡の情報を正確に知る事が非常に重要となる。我々が現在構築しようとしている平面型の 4 枚鏡共振器では、従来非常に重要と考えられていた基本的

なコンセプトから離れ、4枚の鏡が独立にそれぞれの位置を制御するための駆動式 mirror holder 上に mount する。各ステージは mm 程度の自由度を持って設計・配置されるため、初期アライメントが非常に重要となってくる。この正確なアライメントを達成する為には鏡の曲率半径の絶対値の測定が必要となり、現在 KEK 機械工作センターにある測定装置を使い、詳細な測定が行われている。この装置が使える点が、本質的に今回の平面4枚鏡共振器の設計を支えていると言える。

現在駆動式 mirror holder の試作機は2種類が出来ており、それぞれを使った試験共振器を組み、実際に mode-locked pulse laser を蓄積する実験が繰り返される。この試験実験を通じ、各 mirror holder の操作性・安定性の評価が行われ、最終的な holder 形状に至るまで、短期間で必要な技術を確認する。

の調整及び共鳴の維持が出来るかの試験に今後移行していく予定である。

参考文献

- [1] H.Hayano, “量子ビーム実験@STF の start-up”, Quantum Beam Meeting Presentation, 11th Nov. 2011
- [2] D.Nicolas, et al., “High flux polarized gamma rays production: first measurements with a four-mirror cavity at the ATF”, Proceedings of IPAC11
- [3] T. Akagi, et al., in these proceedings.
- [4] T.Naito, et al., “Development of a Stable Reference Distribution System for Future Accelerators”, Proceedings of PASJ11

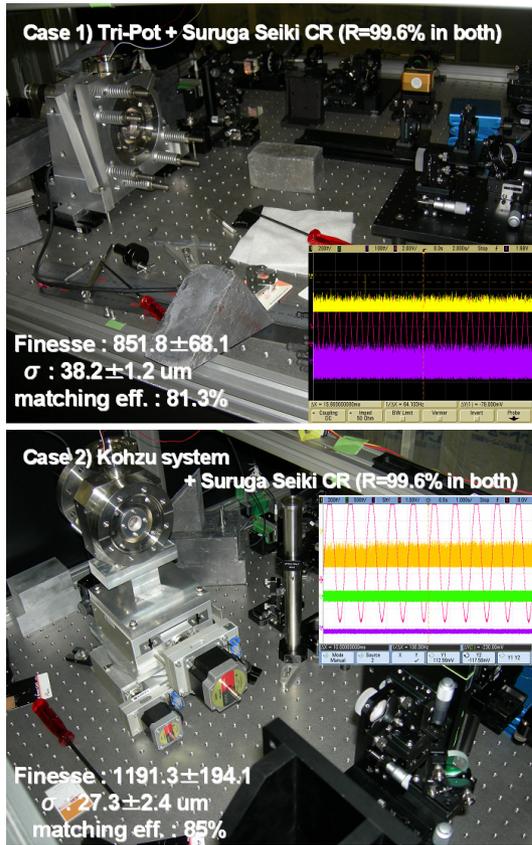


図8：試作 mirror holder での laser 蓄積実験

図8上は、3点支持により鏡がマウントされている plate の傾き(あおり)を制御するタイプの mirror holder での蓄積実験の様子を示す。反射率 99.6% の鏡2枚を使った共振器で共鳴状態が維持出来ている。図8下はゴニオステージとスイベルステージを組み合わせた、所謂ジンバル機構を持たせた mirror holder system での蓄積実験の様子である。同様の反射率の鏡を使い、やはり共鳴状態が維持出来ている。今後 mirror holder 間に本番同様の単管を繋ぎ、真空引きを行う事で大気圧との差を生じさせ、鏡やアクチュエータに本番と同様の負荷をかけた状態で、共振器