

## INTENSIFY THE GREEN LASER FOR KEK-ATF DAMPING RING LASER WIRE

Hiroataka Shimizu<sup>#,A)</sup>, Sakae Araki<sup>A)</sup>, Yosuke Honda<sup>A)</sup>, Kazuyuki Sakaue<sup>B)</sup>

Nobuhiro Terunuma<sup>Taro</sup><sup>A)</sup>, Junji Urakawa<sup>A)</sup>

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

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

<sup>B)</sup> Waseda University

17, Kikuicho, Shinjuku-ku, Tokyo, 162-0044

### Abstract

We have continued to develop high intensity green laser with self-start optical circuit for KEK-ATF damping ring laser wire. To control the wavelength and polarization direction of the circulating IR laser, we succeeded to produce 30mW green laser quite stably. Furthermore, improving the injection scheme of the pumping light from LD, the green laser intensity could become more than 3W. In this proceeding, we'd report our experimental progress and future plan to intensify the produced green laser.

## KEK-ATF Damping Ring Laser Wire 用 Green Laser の高強度化

### 1. はじめに

KEK-ATF では、高品質の低エミッタンス電子ビームとレーザーとを用いた、さまざまな衝突実験を行っている。その目的は、電子ビームサイズ計測から医療用の小型 X 線源の開発まで多岐にわたっているが、何れの研究開発実験においても、外部光蓄積装置を用いたレーザー強度の増大が基幹技術として用いられている。衝突実験に用いるレーザーが CW のかパルスレーザーかによる違いはあるが、基本的には光共振器の共振器長さを、用いるレーザーの半波長の整数倍の長さに精密に制御し、光の共振状態を保ち続ける事が重要となる。

外部光共振器の性能は、*finesse* と呼ばれる値で評価する事が出来、その値は、共振器を構成している鏡の反射率にのみ拠っている。鏡の反射率は、誘電多層膜のコートによって特徴付けられ、比較的高精度で任意の反射率を得る事が出来る。鏡の反射率が上がれば共振器内に蓄えられる光の量が増し、結果として光の増幅率が上昇する。従って素朴に考えれば、高い反射率であればある程、衝突実験の目的には有利な共振器が出来ると考えられる。

しかし共振器を構成する鏡の反射率の“量的”な上昇は、共振器長さを制御する *feed-back* 制御の手法に対して“質的”な変化を要請する。つまり、共振器の *finesse* が高くなるに連れ、共鳴の鋭さを示す共振きからの透過光強度の半値幅が非常に狭くなり、*feed-back* に必要な *error signal* の生成が極めて難しくなる事を意味している。比較的低 *finesse* での実験では、PID 回路を使った素朴な肩 *feed-back* の方法で対処が出来たが、より高い *finesse* の共振器に移るにつれ、共振器内部の基本 *mode* と高次の *mode* の位相差を利用した *tiltlock* の方法<sup>[1]</sup>や、外部共振器の *error signal* をレーザー発振器側に *feed-back* し、発信器からの *error signal* を使って外部共振器に

*feed-back* をかける様な相補的な *feed-back* の手法も実際に用いられている<sup>[2]</sup>。しかしこれらの *feed-back* の手法は、非常に複雑であり、かつ必ずしも充分安定とは言い難い。鏡の反射率の上昇に対して *feed-back* 制御の安定性が追従出来ない理由としては、板ばね構造を使った長さ制御機構が、 $\sim$ kH 以下の周波数で共振周波数を持つ事があげられる。この機械的な制約により、実際の加速器環境で生じる様々なノイズに充分対応出来ない状況にある。

多くの実験の場合、衝突に用いるレーザー強度は高い方が得られる信号強度も高まる。しかし一般に使用出来るレーザーの強度には上限があるため、これを補う目的で外部光共振器を導入している訳であるが、鏡の反射率を上げる事に頼り光の増幅率を稼ごうとすると、逆に *feed-back* 制御が不安定になりレーザーを蓄積出来なくなってしまう。この衝突点におけるレーザー強度の増強と、繊細な *feed-back* 制御からの脱却と言う、相反する要求を満たすため、技術的な *breakthrough* が強く求められていた。次章以下では、この要求を満たすべく我々が開発を進めている、自己発振方式を取り入れた光回路技術を用いたレーザー開発実験について報告する。

### 2. 自己発振型光回路実験について

近年レーザー媒質を光ファイバ内に溶かし込んだ添加型ファイバを用いた高出力レーザーの開発及びその利用が盛んに行われている。従来のレーザー媒質結晶を用いた増幅とは異なり、一度ファイバ中を通過させるだけで、容易に数十倍にも及ぶ増幅率が得られる事が最大の特徴で、水冷等による温度制御も特に必要としない点においても使い易さの面で固体結晶に勝っていると言える。この添加型ファイバの持つ高い増幅率を活かし、従来の外部光共振器の方法と組み合わせる事により、図 1 に示す様な光回路の作成を行った。光の流れとしては、励起用 LD によって添加型ファイバ中に作られた反転分布によ

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

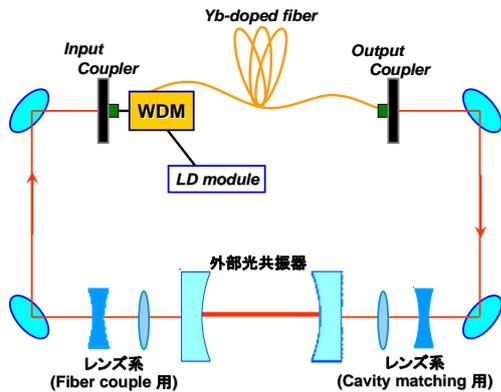


図 1. 添加型ファイバと外部光共振器を用いた系

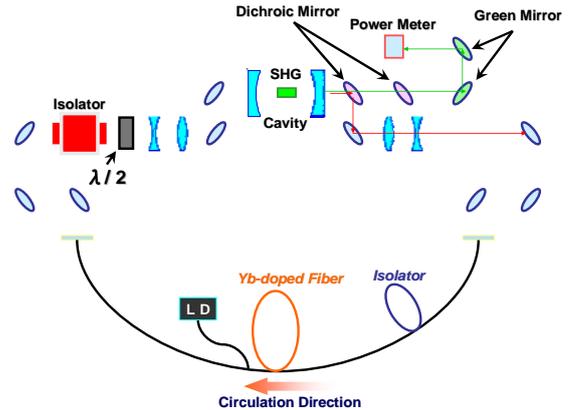


図 2. Green laser 生成実験の set-up

り、自然放出光が Yb-doped fiber から放出される。この一次的なレーザーが自由空間に置かれた外部光共振器に入射され、内部に蓄積される。共振器を透過してきた光は、再びファイバ中へと取り込まれ、添加型ファイバ部分へと送られる。自由空間中での減衰やファイバ中へ取り込む際のカップリングによる光のロス全体が、添加型ファイバを通過する際に得られる増幅率よりも小さい場合、この系を循環する光は正帰還を達成する事で発振状態に至る。つまり外部共振器を抜けた位相情報を持った光が再び増幅され送り出されるため、外部共振器に関しては長さを制御する必要なく内部に高強度のレーザーを蓄積する事が可能となる。系全体が発振状態にあるため、外乱等の蓄積を阻害するノイズに対して非常に耐性が強く、外部共振器を用いたレーザー蓄積方式としては理想的な回路を構成している。これにより、煩雑な feed-back 制御を行う事なしに、高強度のレーザー蓄積を達成する手法が得られた事になる。

我々はこの手法を用いて、実際の加速器実験への応用を図るべく、KEK-ATF Damping Ring Laser Wire システムで用いている市販の green laser と置き換える為の、高強度 green laser の開発を開始した。

### 3. Green Laser 生成実験

#### 3.1 実験 set-up

上で述べた自己発振方式の光回路では、用いる添加型ファイバに含まれるレーザー媒質によって循環するレーザーの波長が決まる。我々の最終的な目標は  $\lambda = 532\text{nm}$  の green laser の発振であるため、Yb-doped fiber を使った  $\lambda = 1064\text{nm}$  の IR 光の循環発振をまず行う。光回路内に置かれた外部光共振器内では鏡の反射率に応じて特に局所的に IR 光の強度が増強されているため、SHG 結晶を用いた二倍高調波生成に非常に適した環境が整っていると言える。我々は擬似位相整合の手法を用いた倍波生成を行うため、MgSLT 結晶を外部共振器中央に設置し、green laser の生成実験を行った。図 2 に実験の set-up を表す図を示す。

SHG 結晶によって変換された二倍高調波は共振器と IR 光のみに反射作用を持つ二色性鏡を通り抜け、green 用の鏡で反射される事により power meter へと導かれ測定される。

図 2 の set-up を用いて発振実験を行い、生成される green laser の観測を行ったが、結果としては、  
 - 生成された二倍高調波の強度の揺れが大きい。  
 - 高調波の beam profile が halo を纏っている。  
 という二つの大きな問題がある事が判明した。原因としては、予め  $1064\text{nm}$  の市販の single mode laser で外部共振器の調整を行ったにも拘らず、生成された green laser が高次 mode の様な halo を纏っている点から、意図した  $1064\text{nm}$  付近の波長から外れた IR 光が光回路内を循環していたと考えられる。つまり縦 mode 間での競合が起こり、広がった分布の縦 mode が doped-fiber 部分の gain を奪い合いながら循環する事で、SHG 結晶が変換出来ない波長の IR 光が大きな gain を得て循環した時は生成 green laser 強度は低く、変換可能な帯域の光が循環してきた場合には green laser 強度が高くなるという現象が起こっていたと考えられる。

#### 3.2 実験 set-up の改良

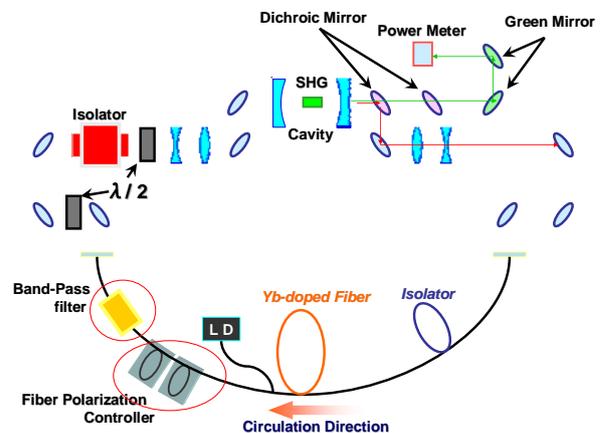


図 3. 循環する IR 光の帯域及び偏光面の制御

最初の green laser 生成実験の結果から、set-up を図 3 に示すものに変更した。最も重要と思われる、循環する IR 光の帯域の制御を目的として、半値幅  $\delta \lambda = 1\text{nm}$  の band-pass filter をファイバ中に組み込み、1064nm を中心値として通過できる IR 光の波長帯を制限した。この band-pass filter は入力する光の偏光面に対して制限を与えるため、filter 直前においてファイバ中の IR 光の偏光を制御する必要に迫られた。この問題を解決するために、fiber polarization controller(FPC)と呼ばれる阻止を filter 直前に組み込んだ。FPC は、使用するファイバの core 径及び伝送するレーザーの波長の組み合わせに従い、ファイバを一定半径で芯に最適な巻き数を巻き付ける事により生じる径の内側・外側の光路差を利用した偏光面の制御素子で、調整の仕方次第では消光比で 20dB 程度を達成出来るものである。以下に改良された set-up での発振実験の結果を述べる。

### 3.3 実験結果



図 4. 系の改良前後の green laser beam profile

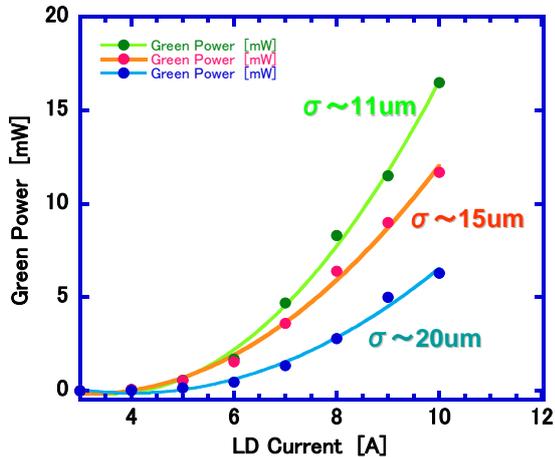


図 5. Laser waist size の変化と変換効率の相関

上図 4, 5 に改良された set-up を用いた発振実験の結果を載せる。まず図 4 からわかる様に、band-pass filter 挿入後の発振実験では、生成された green laser がきれいな profile を示しており、外部光共振器内に蓄えられた基本 mode(TEM-00mode)に由来する二倍高調波が生成されている事が期待出来る。この場合 green laser の強度分布も Gaussian 型である事が予想され、実用上好ましい結果が得られている。図 5 には生成された green laser の測定強度の plot を

示してある。Boyd et.al の論文[3]に拠れば、SHG 結晶の変換効率は、結晶内部を通過する laser waist size によって変化し、Rayleigh length  $z_0$  と結晶の長手方向の長さ  $L$  とによって定義される focusing parameter  $\xi = L/2z_0$  の値が 2.84 となる時に、最も効率良く変換する事が知られている。今の我々の set-up (IR 光) を使って  $\sigma = 4.6\mu\text{m}$  の蓄積を行うのは非常に困難であるので、20um から始めて半分の 10um を目標に waist size を絞り、その都度生成される green laser の強度を測定した。光回路系としては、外部光共振器内のレーザー waist size 以外は何も変化させていないので、この測定が文献[3]の示す waist size の変化と変換効率の相関に対する検証実験になっている事がわかる。

表 1 : Beam waist size と focusing parameter

Beam Size (um)	Focusing Parameter $\xi$
4.6 um	2.84
11 um	0.49
15 um	0.27
20 um	0.15

表 2 : 理論値と測定値との比較

比較する組	文献による変換効率	測定値の比
11um / 15um	~ 1.8	~ 1.4
15um / 20um	~ 1.8	~ 1.9
11um / 20um	~ 3.3	~ 2.6

表 2 に、文献により指摘される変換効率の変化の割合と実測した green laser 強度から求めた実際の変換効率の変化の比較を示す。表の値から、waist size が  $\sigma = 11\mu\text{m}$  の時の生成強度が若干低い様に思われる結果が得られたが、IR 光を用いて小さい beam size を達成する場合、共振器直前で急激にレーザーサイズを絞る必要があり、この結果共振器を通り抜けて来る透過光も急激に拡散する。現在使っている 20mm のレンズサイズでは光を全て捌き切れておらず、waist を絞れば絞るほど fiber への coupling 効率が悪くなる傾向にある。 $\sigma = 11\mu\text{m}$  の際の生成強度の低下はこの影響が見えているのではないかとと思われるが、全体としては概ね文献値が示す通りの結果を得ていると考えられる。尚、ここまでの結果は反射率  $R=99\%$  の鏡を用いた実験で得られたもので、 $R=99.5\%$  の鏡を使った実験により、これまでに green laser 生成強度としては約 30mW 程度の発振に成功している。今後  $R=99.5\%$  の鏡を使った set-up で、laser waist size 等の詳細な測定を行い、また励起に用いる LD の枚数を出来るだけ増やす事で、生成される green laser 強度を一層増強していく予定である。

#### 4. 今後の実験計画

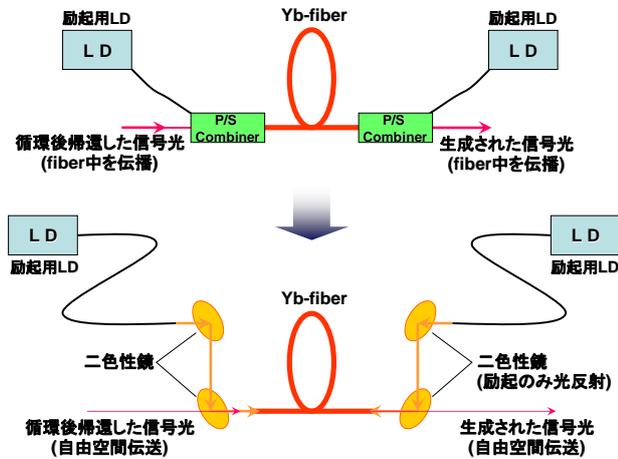


図 6. 励起光入射系の改良

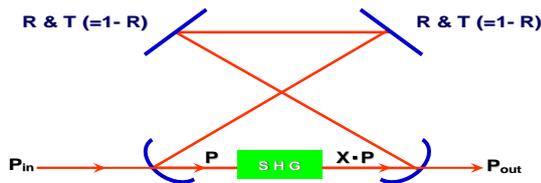


図 7. Bow-Tie Cavity への置き換え

図 6, 7 に今後の光回路系の改良案を示す図を載せる。現在我々は励起用 LD からの励起光を multi-mode fiber を通じて添加型ファイバへと送っている。この時 Pump/Signal Combiner と呼ばれる、励起光と信号光とを接続するための素子を経由するのであるが、今後 LD からの励起光強度を上げる事を考えた場合、Combiner への熱的負荷が一層増す事が考えられ、故障に繋がる危険性が高まる。加速器環境での安定な発振を目指す場合、系を出来るだけ単純化し、壊れる危険性のある素子を介入させない工夫が必要と思われる。この考えの下、ここでも二色性鏡を使う事により、LD からの励起光の直接入射を計画している。これにより光回路中におけるファイバの占める部分は正に添加型ファイバのみとなり、残りは自由空間中での伝送となるため、系全体の安定度は格段に増す事が期待出来る。図 7 に現行の 2 枚鏡の定在波型共振器からの置き換えを予定している 4 枚の鏡を使った進行波型共振器のモデルを載せる。この Bow-Tie 型共振器を使い、従来目標としていた green laser 生成強度 3 W を達成する為に必要な設定を求める計算結果を最後に示す。簡単のため 4 枚の鏡は全て同じ反射率  $R$ ・透過率  $T(=1-R)$  を持つとし、

凹面鏡背後からの入力を  $P_{in}$ 、SHG 結晶直前での蓄積強度を  $P$ 、SHG 結晶を通過する際の IR 強度の減衰率を  $X$  としてある。透過光  $P_{out}$  が光回路を循環して増幅されて戻って来る値が再び  $P_{in}$  となる。この時生成される green laser 強度は鏡の反射率  $R$  と光回路の gain の値で表す事が出来る。鏡の反射率を変えながら、 $P_{in}$  が 10W になった時の green laser power を plot したものが図 8 である。 $R=98.6\%$  鏡を使った場合最も生成強度が高い事がわかる。

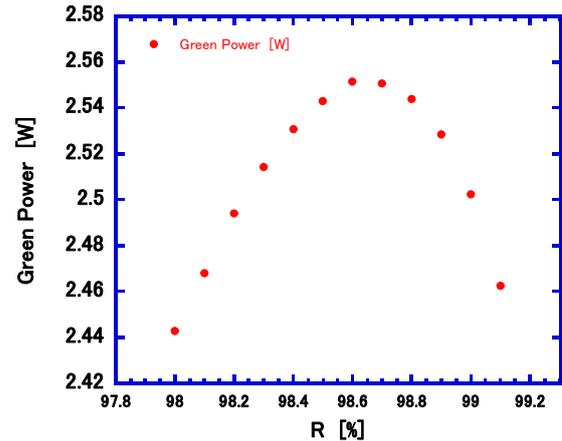


図 8. 反射率の変化と green laser power の比較

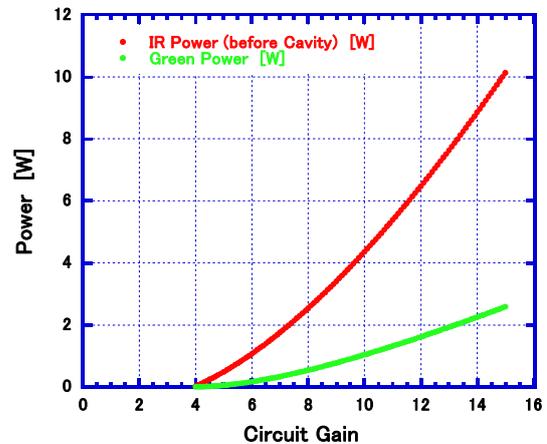


図 9.  $R=98.6\%$  鏡を使った時の各 laser 強度変化

図 9 では実際に IR 光と green 光が光回路の gain に伴って増幅していく様子を plot してある。モデルとして系の巡回 IR 光強度を 10W としたが、励起光強度を上げる事でより大きな強度の循環が可能と考えられ、生成 green laser の強度が 3W に到達する事は可能と考えられる。これらの試算に基づき、現在光回路の置き換えを含め実験を継続中である。

## 参考文献

- [1]D.A.Shaddock, et al.,Opt.Lett.**24**(2000)1499
- [2]例えば S.Miyoshi, et al.,Nucl.Instr.and Meth A(2010)
- [3]G.D.Boyd, et al., Journal of Applied Physics  
**39**(1968)3597