

## STORAGE OF LASER PULSES IN A FABRY-PEROT OPTICAL CAVITY FOR HIGH FLUX X-RAY

K.Takezawa<sup>A)</sup>, Y.Honda<sup>A)</sup>, N.Sasao<sup>A)</sup>, K.Hirano<sup>B)</sup>, Y.Yamazaki<sup>B)</sup>, M.Takano<sup>B)</sup>  
S.Araki<sup>C)</sup>, Y.Higashi<sup>C)</sup>, T.Taniguchi<sup>C)</sup>, J.Urakawa<sup>C)</sup>, M.Nomura<sup>D)</sup>, H.Sakai<sup>E)</sup>

<sup>A)</sup> Graduate School of Science, Kyoto University  
Kitashirakawa, Sakyo-ku, Kyoto, 606-8502

<sup>B)</sup> National Institute of Radiological Science  
1-9-4 Anagawa, Inage-ku, Chiba, 263-8555

<sup>C)</sup> High Energy Accelerator Research Organization  
1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki, 305-0801

<sup>D)</sup> Japan Atomic Energy Research Institute

<sup>E)</sup> The Institute for Solid State Physics, The University of Tokyo  
5-1-5, Kashiwanoha, Kashiwa-shi, Chiba, 277-8581

### Abstract

We have a plan to produce a high flux x-ray for medical use by using a Fabry-Perot optical cavity in which the laser pulses from a mode-locked laser are stored and enhanced [1]. In this plan, the X-ray is produced from the Compton scattering of electrons in a storage ring with the laser light in the optical cavity. In order to increase X-ray flux, high power laser light is necessary. We show the enhancement of the laser power from the mode locked laser with a Fabry-Perot optical cavity.

## 高輝度 X 線生成のためのファブリ - ペロ共振器内レーザーパルス蓄積

### 1. はじめに

コンプトン散乱による準単色で指向性のある X 線の利用が実用化され始めている。しかし医学利用、動的血管造影写真測定等、までを視野に入れると X 線の強度が不十分である。そこで、我々は外部共振器を用いてパルスレーザーのパワーを蓄積し、X 線の強度を高めることを考えている。

KEK-ATF では、CW レーザーのパワーを外部共振器に蓄えることにより、ダンピングリング内の電子ビームのプロファイルを測定している (レーザーワイヤー) [2][3]。レーザーワイヤーでは、共振器長をサブナノメートル以下で制御することにより、Cavity 内に 500 倍以上のパワーを蓄積している。この技術を応用することにより、パルスレーザーのパワーを外部共振器に蓄えることができるはずである。

最終的には共振器に蓄積したレーザーパルスと ATF ダンピングリング内電子ビームとを衝突させ、大強度の X 線を得ることを目標としている。概念図を図 1 に示す。電子ビームはリング内でバンチ化されてある一定周波数で周回している。よって CW レーザーより、パルス化することでパワーを増幅させたレーザーをリング RF 周波数と同期させて電子バンチ毎に衝突させたほうが効率的でより高フラックスの X 線が得られる。

### 2. 原理

CW レーザーを用いた場合、外部共振器にパワーを蓄えるには外からの入射波の位相と共振器内での

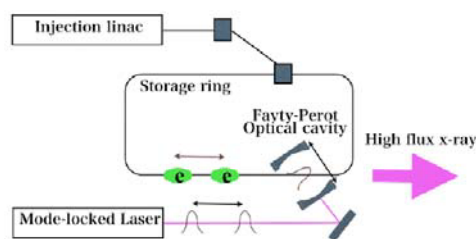


図 1: X 線源の概念図

入射波同方向の波の位相を合わせなければならない。つまり  $L_{cav}$  を外部共振器長、 $\lambda$  をレーザー波長、 $n$  を任意の整数として以下の条件式が満たされたときに共振器内にレーザー光が入射することができ、パワーが蓄積する。

$$L_{cav} = n \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (1)$$

レーザーパルスの場合になると、上記の条件式の他に  $m$  を任意の整数として更に以下の条件式を満たさねばならない。

$$L_{cav} = m \cdot L_{laser} \quad (2)$$

この条件式は次の理由による。レーザーパルスはレーザー共振器内で共鳴条件を満たしている周波数モードの中で、レーザー発振に必要な利得を持った周波数モードの重ね合わせによって作られる (図 2)。各周波数モード間の位相は一定に保たれている (モードロック)。

\* E-mail: kaop@hep.scphys.kyoto-u.ac.jp

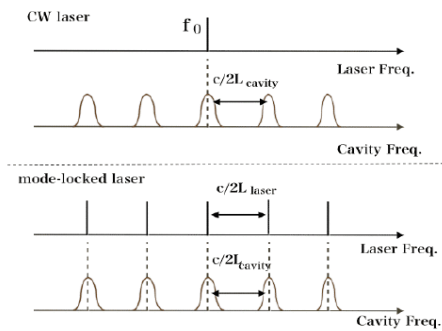


図 2: CW レーザーと modelock レーザーの周波数

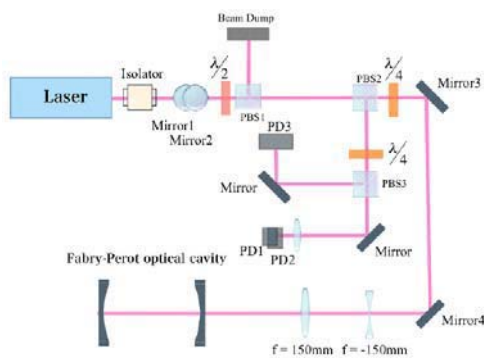


図 3: 光学系の配置

これより、レーザーパルスを蓄えるためにはレーザー共振器と同じ共鳴条件を外部共振器で作り、レーザーからの周波数の異なった多数のレーザー光を蓄えられるようにしなければならない。そのために、外部共振器長  $L_{cav}$  はレーザー空洞長  $L_{laser}$  の整数倍でなければならない [4][5]。

### 3. 実験

#### 3.1 セットアップ

セットアップは図 3 の通りである。レーザー光は 4 つの鏡で角度と位置を調整され、更に共振器を構成する凹面鏡の曲率半径と同じ波面を形作るよう配置された 2 枚のレンズを通過して共振器内に入射する。つまり 2 枚のレンズは共振器内のガウスモードとレーザー光を一致させる為の調整用である。より共鳴条件に近いところで共振器長を保つために今回

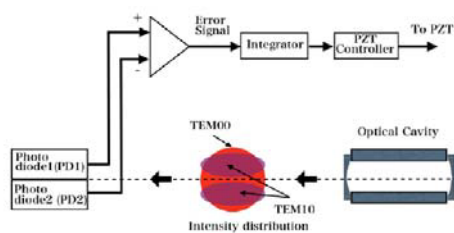


図 4: Tilt lock feedback 原理

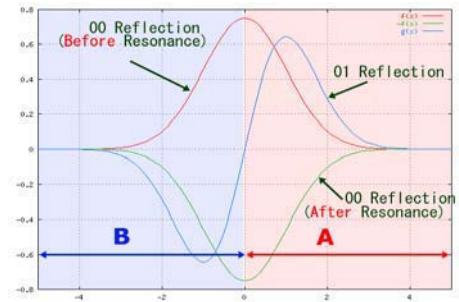


図 5: TEM<sub>00</sub> と TEM<sub>01</sub> の電場分布

新しいフィードバックシステム (Tilt locking [6]) を導入した。PD1 と 2 は Tilt locking エラーシグナルをつくるための共振器からの反射波のモニタリングを行っている。これは実際には  $y$  軸方向  $y > 0$  領域 (PD1)、 $y < 0$  領域 (PD2) で受光面が分割されたフォトダイオードであり、ここで作られたエラーシグナルは外部共振器長  $L_{cav}$  を制御している PZT に返される (図 4)。PD3 はやはり反射波の検出用である。このとき使用しているレーザーの仕様は以下の通り。パルスの繰り返し率はダンピングリングのパンチ間隔と同じにしている。

#### Mode lock laser specification

Mode Lock	Passive SESAM
Repetition	357MHz
Pulse width	7.3 psec (FWHM)
Wave length	1064 nm
Power	≒ 6W

#### 3.2 Tilt locking フィードバックシステム

共鳴条件が共振器とレーザー光の間で満たされれば検出される反射波は 0 になる。外部共振器長  $L_{cav}$  を変えていったときに、共振の前後で共振するガウスモード反射波の位相は反転する (図 5)。例えば TEM<sub>00</sub> モード共振の際には TEM<sub>00</sub> モードの位相のみが共振の前後で反転し、他のモード TEM <sub>$m$  $n$</sub>  ( $m \neq 0, n \neq 0$ ) の位相は変わらない。理想的にレーザー光が共振器軸に対して TEM<sub>00</sub> と TEM<sub>01</sub> のみしか存在しない場合、図 6 の領域 A ( $y > 0$ ; PD1) と領域 B ( $y < 0$ ; PD2) で検出する反射光強度は共振の前後で大きく変わる。

実際に (PD1-PD2) シグナルは図 6 のようになる。今回の実験では用いていないが、今後更に共振器内での強度を上げるために、より蓄積パワーがピークを示す点に近いところで共振器長を制御できる Tilt lock フィードバックシステムを導入する予定である。

#### 3.3 実験結果

まず始めに、レーザー共振器長  $L_{laser}$  を変化させて反射光強度をスキャンする (図 7)。最も反射光強度が小さくなる時、 $L_{cav} = m \cdot L_{laser}$  を満たしている。理想的にはこのとき反射光は 0 になるはずだがそうならないのは、入射レーザーと共振器軸のミスアラインメント等の原因によるものと思われる。

ここから最大でも共振器内に入射できるレーザー強度の割合は全体の 0.78 であることが推定できる。

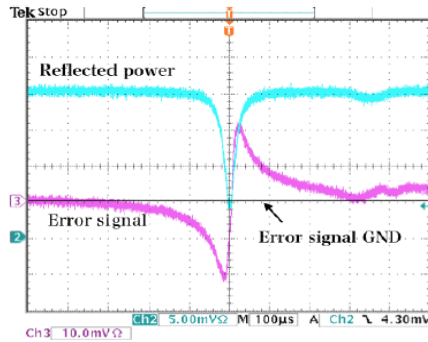


図 6: Tilt lock error signal

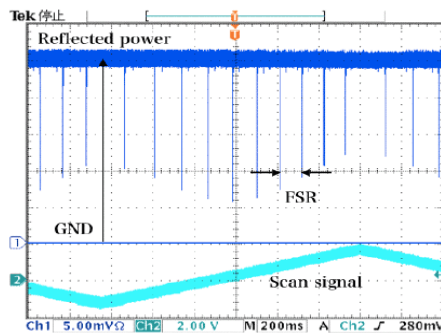


図 7: 外部共振器からの反射波

また反射波の測定から共鳴の鋭さを表す量として外部共振器の Finesse  $F$  も測定できる。測定結果は  $F = 1140 \pm 40$  であった。

そして Finesse  $F$  と外部共振器からの透過光強度比  $T_{cav}$  を用いて共振器内に溜められるパワーの蓄積率  $S_{cav}$  も計算できる。ここで FWHM とは共振し反射波強度が落ちたときの半値全幅である。Free-Spectral-Range(FSR) は外部共振器が式 1 を満たす波長間隔である。今回外部から強度 3.0W のレーザーを外部共振器内に入射させ、フィードバックシステムを用いてレーザー空洞長  $L_{laser}$  を制御しレーザーパルスを蓄積した。透過光強度の測定値は 1.9W であった。

$$F \equiv \frac{\pi\sqrt{R}}{1-R} = \frac{FSR}{FWHM} \quad (3)$$

$$S_{cav} = \frac{F}{\pi} \cdot T_{cav} \quad (4)$$

$R$  は外部共振器ミラーの実効的反射率である。これより、外部共振器内部でレーザー光は 230 倍の強度に増大され、690W のパワーが蓄積されていたことがわかる。

#### 4. 結論

現段階では Finesse  $F = 1140$  で蓄積率 230 倍、690W のパワー蓄積を達成した。ピークパワーにして約 300kW である。 $\Delta l = L_{cav} - L_{laser}$  とすると、実験では  $\Delta l = 0$  のときに反射波強度は最小値を示し

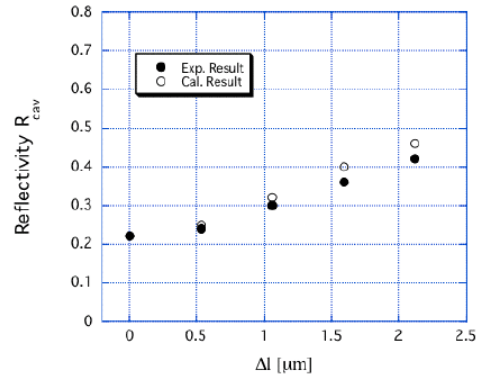


図 8: 外部共振器からの反射と  $\Delta l$  の依存性

た。反射波強度は  $\Delta l$  の関数として数値計算できる。結果を図 8 に示す。実験値と良い一致をしている。

外部共振器長  $L_{cav}$  制御のために今回 Tilt locking フィードバックシステムを導入したが、Tilt lock エラー信号は式 1 の条件を満たすためのもので  $\Delta l = 0$  の情報は持っていない。図 7 の最大ではない極大点で止まってしまう可能性がある。常に反射波が最小になるフィードバックシステムの構築が必要である。

#### 5. 今後の計画

現在、ATF ダンピングリング内にレーザーパルス蓄積システムをインストールすることを目標として新しいシステムの構成を行っている。将来的に ATF ダンピングリング内電子ビームに対して衝突させることを考慮に入れ、以下のようにパラメータを変更中である。

##### Cavity specification

Cavity length $L_{cav}$	$209.94 \pm 0.006$ mm
Beam waist	$50.6 \pm 2.4$ $\mu$ m
Finesse $F$	$\approx 3000$

外部共振器は今までの半分の長さのものを使用する。蓄積率は今までの半分になるが、インストールの際装置がコンパクトになり、また共振器中心でレーザー径をより容易に絞れ、効率良く電子ビームと衝突させることができるという利点がある。ちなみに今回用いた外部共振器の beam waist は 180  $\mu$ m である。

まずこの新しい共振器を用いてパルスレーザー蓄積のテストを行う予定である。

#### 参考文献

- [1] J.Urakawa et al, Proceedings Cool 03.
- [2] H.Sakai et al, J.J.Appl.Phys 41 (2002) 6398.
- [3] Y.Honda et al, Phys.Rev.Lett.92 (2004)
- [4] R.Jason Jones and Jun Ye, Opt Lett.27,1848(2002)
- [5] R.Jason Jones et al, Opt.Commun.175(2000) 409
- [6] D.A.Shaddock et al, Opt.Lett.24,1499(1999)