

逆コンプトン散乱による高フラックスX線発生のためのレーザーパルス蓄積法の開発

野村 昌弘^{1,A)}、平野 耕一郎^{A)}、高野 幹男^{A)}、酒井 いずみ^{A)}、
本田 洋介^{B)}、山崎 良雄^{C)}、浦川 順治^{C)}

^{A)} 放射線医学総合研究所
〒263-8555 千葉市稲毛区穴川4-9-1

^{B)} 京都大学大学院理学研究科
〒606-8502 京都市左京区北白川

^{C)} 高エネルギー加速器研究機構
〒305-0805 つくば市大穂 1-1

概要

逆コンプトン散乱により大強度のX線を発生させる為に、パルスレーザーのパワーを外部共振器に蓄える技術（パルススタッキング[1,2]）の開発を始めた。今年3月に、反射率90%のミラーを用いて原理実証試験を行ない、レーザー波長ごとの重ね合わせによりパワーが蓄積されている事を確認した。今後より高い反射率のミラーを用いて蓄積パワーを高めていく為に、反射率95%の鏡を用いてFinesseの測定を行ない、レーザーの線幅の上限を求めた。レーザーの線幅は蓄積パワーに制限を与える重要な量である。得られた結果から、レーザーの線幅は十分に狭く、反射率95%程度のミラーにより蓄積されたパワーには全く影響をおよぼさないことが確かめられた。今後更に高い反射率のミラーを用いることにより、蓄積パワーを高めることが可能である。

1. はじめに

逆コンプトン散乱による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線の強度を高める事を考えている。

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[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、共振器内に500倍以上のパワーを蓄積している。この技術を応用する事により、パルスレーザーのパワーを外部共振器に蓄える事ができるはずである。

2. 原理

まず初めに、CWレーザーを用いた場合について述べる。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入射波と同方向の波の位相を合わせなければならない。この条件から共振器長Lは半波長の整数倍の長さでなければならない。

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

この条件を満足させると、平衡状態に達するまで共振器内にパワーは蓄積され続け、平衡状態に達すると、共振器からの反射波は0になり、透過波の強度は入射波の強度と同じになる。

次に、パルスレーザーを用いた場合について述べる。レーザーパルスは、レーザー空洞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ゲインを持った周波数モードの重ね合わせによって作られる。当然各周波数モード間の位相は一定に保たれていなければならない（モードロック）。

この事から、レーザーパルスを外部共振器で蓄えるためには、レーザー空洞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。よって条件式(1)に加えて、外部共振器長Lは、レーザーの空洞長 L_0 の整数倍でなければならないという条件が付加される。

$$L = n \cdot L_0 \quad (2)$$

もし、CWレーザーを用いた場合の条件式(1)を満たしていたとしても、条件式(2)を満たしていない場合は十分にパワーを蓄えることはできない。これは、外部共振器内ではレーザー波長ごとの重ね合わせによりパワーは蓄積されていくが、マクロパルスごと

¹ E-mail: mnomura@post.kek.jp

の重なりが徐々にずれていく為である。

3. 実験

3.1 目的

原理実証試験では、外部共振器にパルスレーザーのパワーを蓄積できる事を実証した。今回の試験の目的は、外部共振器の蓄積パワーに制限を与えるレーザーの線幅の上限を求めることである。

蓄積パワーに制限を与える要因としては、高反射率のミラー、共振器長を一定に保つ為のフィードバックシステム及びレーザーの線幅等が考えられる。高反射率のミラー及びフィードバックシステムに関しては先に述べたように既にレーザーワイヤーで開発済みである。

問題はレーザーの線幅である。レーザーワイヤーではNPRO(Non-Planar Ring Oscillator)を用いた単一周波数で線幅1kHz以下の特殊なレーザーを使用している。もし我々が使用しているモードロックレーザーの一つ一つの周波数モードの線幅が3MHz程度だとすると、そのコヒーレンス時間は約300nsecとなり、共振器長42cmの往復時間は約2.8nsecから考えると100往復程度でコヒーレンスがなくなり、パワーの蓄積ができなくなる。

3.2 モードロックレーザー

使用したレーザーの仕様を以下に示す。

波長	1064 nm
繰り返し	357MHz
パルス幅	6.86 ps (FWHM)
パワー	6.8W

モードロック方式はSESAM(Semiconductor Saturable Absorber Mirrors)による受動モードロック方式である。空洞長の制御は外部からのReference信号(357MHz)を基準にピエゾ素子とピコモーターで制御している。ピエゾは20kHzまで対応している。繰り返しは±10kHz程度の範囲で可変である。

パルス幅から計算すると、一つのパルスは約400個程度の周波数モードから構成され、各波長の違いは最大0.4nmである。

3.3 実験方法

実験装置配置図を図1に示す。Seed Laserからのレーザー光はIsolatorを通過し、Stair Mirrorにより垂直方向の位置及び角度を調整された後、Mirror1を通過し、Mirror2及びMirror3により水平方向の位置及び角度を調整されInjection部に導かれる。Injection部では、外部共振器の共振モードに合わせる為、入射角及び入射レーザー径の調整が行なわれる。

外部共振器の長さはレーザーの空洞長と同じ42cmとした。今回使用したミラーの反射率は95±1%、曲

率半径は250mmである。共振器長及びミラーの曲率から計算した共振器入り口でのレーザー径は $\omega = 0.44\text{mm}$ 、ビームウエストは $\omega_0 = 0.18\text{mm}$ である。測定系としては、反射光及び透過光を測定する為のPD1とPD2が用意されている。

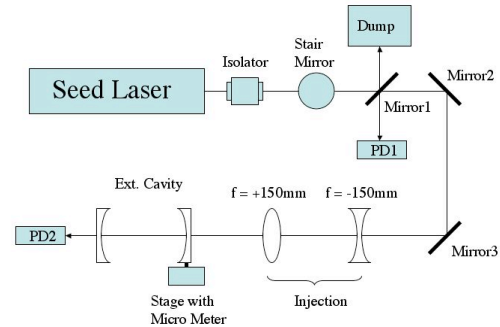


図1 実験装置配置

パルススタッキングに於いて重要な、外部共振器の長さをレーザーの空洞長と合わせなければならない点については、レーザーのパルス幅とミラーの反射率から計算するとミクロン程度の許容範囲があることから、外部共振器の入射側のミラーをマイクロメーター付きの移動ステージで調整する事により対処した。しかし、波長ごとの重ね合わせを行なう為にはナノメーターの制御が必要である。そこで、微小な共振機長の調整は、逆にレーザー側の空洞長を変化させることにより行なった。具体的にはReference信号の357MHzに三角波で1.5kHzの周波数変調をかけ、空洞長を3~4ミクロンの範囲で常に変化させた。こうする事により、レーザーの波長1064nmから考えてこの範囲内で必ず波長ごとの重ね合わせが起きる位置が存在するはずである。実際にパワーを蓄積し、そのパワーを利用する場合にはこの位置にフィードバック等により空洞長を固定すればよい。

測定は先ず初めに、反射率の測定をおこない共振器長を調整し、次に、Finesseの測定を行ないレーザーの線幅の上限を求めた。

4. 結果及び考察

4.1 反射率測定

レーザーへのReference信号に1.5kHzの周波数変調をかけた状態で、移動ステージで共振器長を変化させ反射率の共振器長依存性を求めた。反射率が最低の位置での測定結果を図2に示す。オシロの画面上の信号が反射光の信号、下の信号が周波数変化を表す。反射光が4箇所を下がっているの見える。この下がっている位置で波長ごとの重ね合わせによりパワーが蓄積されている。このギャップ間隔がFSR(Free Spectral Range)、レーザーの半波長分に相当する。

次に、反射率の共振器長依存性を図3に示す。縦軸は反射率を表し、横軸は移動ステージの位置を表す。基準は任意の位置である。●が実験点○が計算値を表す。計算ではパルス幅6.8psecのガウシアンを仮定し、レーザーの空洞長と共振器長が一致したと考えられる反射率最小の位置で規格化した。理想的には、反射率は0になるはずである。入射のマッチングが悪く外部共振器内に基本モード以外の高次モードが励起された場合は反射率は上がるが、今回の場合顕著な高次モードは観測されていない。原因に関しては現在検討中である。

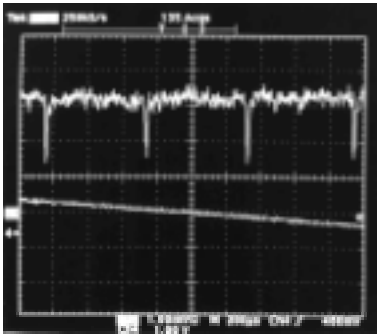


図2 オシロスコープによる反射光測定例

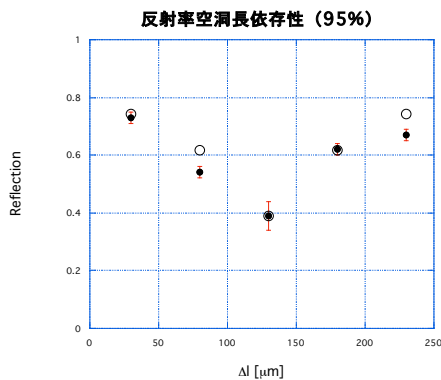


図3 反射率の空洞長依存性

4.2 Finesse測定

共振器長を合わせた後Finesseの測定を行なった。Finesseはギャップ間の距離とその半値全幅から求めた。得られたFinesseは、

$$F = 58 \pm 4.4 \quad (3)$$

であった。ミラーによる損失が無いとすると測定された反射率RとFinesseから式(4)により10倍以上のパワーが共振器内に蓄えられたことになる。

$$P = \frac{1}{3} F(1 - R) \quad (4)$$

Finesseの測定結果からレーザーの線幅の上限を以下のやり方で求めた。線幅が十分に狭い場合は測定される共鳴幅は反射率95%のミラーによる共鳴幅となるはずである。しかし、線幅がミラーによる共鳴幅と比較して広い場合は、測定される共鳴幅はミラーによるものよりも広くなるはずである。そこで、レーザーの線幅をパラメーターにして測定される共鳴幅をAiry Functionを仮定して計算した。

線幅[MHz]	共鳴幅[MHz]
0.00	5.8
0.25	6.1
0.5	6.3
1	6.7

計算結果と測定されたFinesseから求めた共鳴幅 6.2 ± 0.47 MHzとの比較により、線幅は広くとも1MHz以下と考えられる。今回程度の蓄積パワーには線幅は全く影響していない。これ以上の精度で線幅を求めるには99%程度の反射率のミラーが必要である。

5. まとめと今後

蓄積パワーに制限を与えるレーザーの線幅の上限を求めた。レーザーの線幅は十分に狭く、反射率95%程度のミラーでの蓄積パワーには、全く影響をおよぼさない事が確かめられた。また、反射率が0まで下がらなかった原因については現在検討中である。

今後は、先ず反射率98%及び99%のミラーを用いてFinesse、反射率及び透過率等の基礎データの取得を行ない、その後パワーを蓄積する為に必要なフィードバックシステムを構築し、実際に外部共振器長を制御しパワーを蓄積する予定である。

謝辞

レーザーワイヤグループの豊富な経験と技術なしではこの研究を行なう事はできませんでした。ここに感謝いたします。また、この研究開発は放医研・先進小型加速器計画として進めているもので、本推進委員会のご理解に感謝いたします。

参考文献

- [1] P.Harr et al., "Pulse stacking in the SCA/FEL external cavity" Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A358(1995)319
- [2] K.W.Berryman et al., "FEL cavity length measurement with an external laser" Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A358(1995)260
- [3] H.Sakai et al., "Measurement of an electron beam size with a laser wire beam profile monitor" Phys.Rev. special topics Vol.4,022801(2001)