

論文の要旨

氏名 上杉 祐貴

論文題目

Development of a high finesse optical cavity with self-resonating mechanism for laser Compton scattering sources

(レーザーコンプトン散乱光源のための高フィネス自発共鳴型光共振器の開発)

レーザーコンプトン散乱とは、レーザー光と加速器からの電子線とのコンプトン散乱を意味しており、エックス線からガンマ線領域の準単色な偏極光子を生成することが可能である。エックス線は、シンクロトロンからの放射光や、アンジュレーター等の挿入光源などを用いて生成することができる。しかし、これらの光源は高エネルギーの電子ビームを必要とするため、大型の加速器施設を必要とする。レーザーコンプトン散乱光源は、低い電子ビームエネルギーで同じエネルギーの光子を生成することができ、装置全体を小さくすることができる。また、レーザー光の偏光によって散乱光子の偏極を操作できるため、偏極の操作が容易である。これらのことから、レーザーコンプトン散乱方式による、物性研究や商用・医療応用のためのエックス線源や、素粒子・原子核実験のガンマ線源への応用を目指した小型偏極光源の構築が期待されている。

レーザーコンプトン散乱光源の課題は、散乱光子の生成輝度の向上である。この課題を克服するために、本研究では光共振器を電子蓄積リング中に配置し、パルスレーザー光を蓄積・増大する手法を開発している。これまでの研究によって、フィネス 4040, 増大率 1280 倍, 集光サイズ $16 \times 27 \mu\text{m}$ を有する三次元 4 枚鏡光共振器を開発し、平均蓄積強度 2.6 kW を達成した。しかし、実用的な輝度の光源を構築するためには、光共振器によるさらなるレーザー光強度の増大が必要であり、高反射率鏡を用いた高フィネス共振器により、蓄積増大率を向上することを目指している。フィネスを高くすると、共鳴を維持するのに必要な共振器長の制御精度を向上しなければならない。これまでの研究では、光共振器の共鳴線幅 260 pm に対して、圧電素子を用いたフィードバック制御により、共振器長を 16 pm の精度で安定化した。しかしフィネスのさらなる向上を目指すとは制御精度に対する要求は pm 程度となり、非常に高度なフィードバック制御システムの開発が必要である。

本研究では、この課題を克服するために、共鳴維持の問題を原理的に回避することができる新しいレーザー光蓄積システム「自発共鳴型光共振器」の開発を行った。このシステムは、レーザー媒質と励起光源からなる光増幅器と、レーザー光蓄積用の光共振器によって閉回路を構成している。閉回路内では、光共振器の共鳴条件を満たした波長の光のみが光増幅器によって増幅されるが、増幅器の利得が十分高く、利得がシステム全体の損失を上回るとレーザー発振状態となり、

光共振器内に光が蓄積される。一般に光共振器は外部からの擾乱などにより長さが変動する。自発共鳴型光共振器では、擾乱により共振器長が変化しても、レーザー光の波長がそれに追従し、共鳴条件が維持される。さらに、大きな外乱によりレーザー発振が停止した場合も、光学系が安定した後に自動的にレーザー発振と蓄積が復帰する。自発共鳴型光共振器の開発においては、発振波長が共振器の揺らぎに追従できるか、外乱に対して安定した共鳴維持が可能であるかなどは、光増幅器の特性や光共振器を含む光学素子の機械的安定性など、複雑な要素が絡む問題である。特に共鳴線幅の狭い高フィネスの光共振器を用いた場合の動作は自明ではなく、実験的研究開発による実証が必要である。

自発共鳴型光共振器の開発のため、まず高反射率鏡を用いた高フィネス光共振器を構築した。高反射率鏡の性能は、表面の汚れなどに非常に影響されやすく、製造業者からの輸送途中など装置に取り付けるまでに性能が劣化する可能性がある。そのためまず、鏡表面における乱反射を評価した。本実験では ATF:Advanced Thin Films 社の高反射率鏡を用いたが、鏡表面における乱反射を評価したところ、鏡表面の損失について同社の保証値は 10ppm 以下であるのに対して、開封直後においてすでに 25ppm であった。そのため、鏡表面における乱反射の評価と表面の洗浄による、鏡の洗浄と取り扱い手順を研究した。その結果、鏡表面の乱反射率 9.2ppm を達成した。

鏡の取り扱い手法を確立した後、ATF 社製の高反射率鏡を用いて Fabry-Pérot 型の光共振器を構築した。光共振器の筐体は、外乱や温度ドリフトによる共振器長の変化を抑えるために、スーパーインバー合金を用いて作製した。光共振器単体の性能を評価するために、光共振器内の光子寿命を測定するキャビティリングダウン法を用いて、フィネスを測定した。その結果、フィネス $646,000 \pm 3,000$ の光共振器が構築できていることを確認した。これは鏡の反射率 $99.999515 \pm 0.000002\%$ を維持して光共振器を構築できたことに相当する。光増幅器は、最大出力 330 mW の半導体レーザーで励起したイッテルビウム添加ファイバーを用いて、ファイバーレーザーを構築した。このレーザーは大きな小信号利得を有し、また利得のスペクトル幅が、約 1030nm を中心に $\pm 50\text{nm}$ 程度と広く、自発共鳴型光共振器に適した性能を持っている

高フィネス光共振器とファイバー型光増幅器を用いて、自発共鳴型光共振器を構築した。光共振器の構築に際しては、光増幅器を繋ぐシングルモードファイバーと空間モードの整合、周回するレーザー光の方向を限定するためのアイソレーターの設置など、動作を安定させるための光学素子の設置調整を行った。その一方、通常の光学機器の設置以上の高精度な防振や恒温などの対策は行っていないことは特筆に値する。

ファイバー増幅器の増幅率を増加させながら、共振器内に蓄積されたレーザー光強度を観測し、一定の閾値を超えたところでレーザー発振、即ち自発共鳴型光共振器として動作していることを確認した。光共振器から透過する光のスペクトルを測定したところ、中心波長は 1047nm で、線幅は 1.3nm (半値全幅) であった。光共振器への入射および、透過レーザー強度の測定から、蓄積増大率 $187,000 \pm 1,000$ 倍、蓄積強度 2.52 ± 0.13 kW を達成していることが分かった。また、蓄

積された強度揺らぎは 1.7 % と非常に安定して蓄積できていることを確認した。

光共振器にレーザー光を蓄積している状態でフィネスを評価するため、周波数応答法による測定を行った。光共振器はその共振周波数からの乖離に対して、ローパスフィルターとして振る舞う。そこで入射レーザー強度に振幅変調をかけることによって側波帯を生成し、その強度変化を変調周波数の関数として測定した。その結果、自己共鳴状態の揺らぎなどの性能を含んだ実効的なフィネスの値として $394,000 \pm 10,000$ を得た。このフィネスを光共振器内の光路長の制御精度に換算すると 0.16 pm に対応する。従来のフィードバック制御方式では達成困難な値であり、自発共鳴型共振器の有用性を示している。

レーザー光の蓄積および光共振器の共鳴の維持は 2 時間以上にわたって安定して動作した。共鳴状態の安定性を試験として、故意に大きな外乱を与えて共鳴条件を崩した場合もすぐにレーザー光の蓄積が復帰し、非常に安定なシステムが構築されていることが示された。またその変化を詳細に観察したところ、共鳴状態から外れた場合の光共振器内のレーザー光強度の減衰時間は光共振器内における光の寿命によって説明され、また、レーザー光蓄積が復帰する際の振る舞いは、光共振器の構造体の機械的な振動減衰と矛盾のない様子が観測された。従来のフィードバック制御系を用いる方式が、空調の変化や筐体の温度ドリフトで容易に破綻するのに比べると、際立った安定度である。

以上、本研究において、能動的な光路長制御を行わない新しい方法によって、高フィネス光共振器の構築し安定の動作させることに成功した。本研究の示す結果は、高フィネスの光共振器の課題を原理的に解決したものであり、高フィネス光共振器の応用に大きく貢献するものである。