

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公表特許公報(A)

(11) 特許出願公表番号

特表2016-507156

(P2016-507156A)

(43) 公表日 平成28年3月7日(2016.3.7)

(51) Int.Cl.		F I	テーマコード (参考)		
<b>HO1S</b>	<b>3/083</b>	<b>(2006.01)</b>	HO1S	3/083	4C092
<b>HO1S</b>	<b>3/00</b>	<b>(2006.01)</b>	HO1S	3/00	A 5F172
<b>HO1S</b>	<b>3/098</b>	<b>(2006.01)</b>	HO1S	3/098	
<b>HO1S</b>	<b>3/139</b>	<b>(2006.01)</b>	HO1S	3/139	
<b>HO5G</b>	<b>2/00</b>	<b>(2006.01)</b>	HO5G	2/00	J

審査請求 未請求 予備審査請求 有 (全 22 頁)

(21) 出願番号 特願2015-537066 (P2015-537066)  
 (86) (22) 出願日 平成25年2月1日 (2013.2.1)  
 (85) 翻訳文提出日 平成27年7月28日 (2015.7.28)  
 (86) 国際出願番号 PCT/JP2013/052958  
 (87) 国際公開番号 W02014/118998  
 (87) 国際公開日 平成26年8月7日 (2014.8.7)

(71) 出願人 504151365  
 大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構  
 茨城県つくば市大穂1番地1  
 (74) 代理人 110000855  
 特許業務法人浅村特許事務所  
 (72) 発明者 浦川 順治  
 茨城県つくば市大穂1番地1 大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構内  
 (72) 発明者 清水 洋孝  
 茨城県つくば市大穂1番地1 大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構内

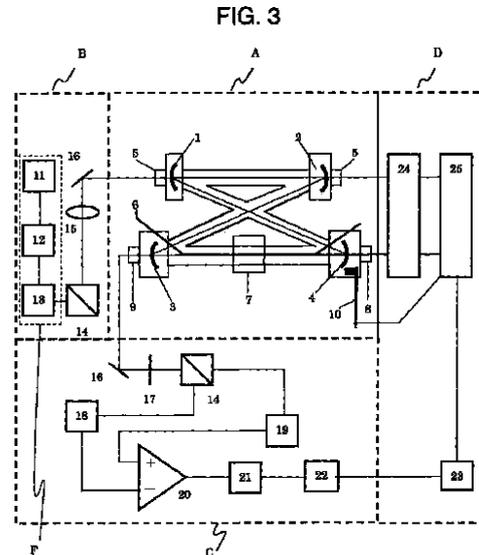
Fターム(参考) 4C092 AA02 AC01 AC08

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 2次元4鏡光共振器

(57) 【要約】

本発明は、レーザーコンプトン散乱を行うための高強度偏光レーザーを生成する光共振器を提供する。それは、2次元平面に配置された1対の円筒凹面鏡(1, 2)と1対の凹面鏡(3, 4)、共振長調整手段(10)、レーザービームと電子ビームの衝突を行うレーザーコンプトン散乱部(7)、入射レーザーを入れるレーザー導入口、電子ビームをレーザーコンプトン散乱部に入れる電子ビーム導入口、及び発生するレーザーコンプトン散乱放射線を取り出す放射線取出口を設ける2次元4鏡光共振器(A)、共振マッチングユニットFを備えるレーザー光源ユニット(B)、偏光制御ユニット(C)、及び共振制御ユニット(D)を設けるレーザーコンプトン散乱光共振器であって、レーザー光源ユニット(B)から供給されたレーザービームが、2次元4鏡光共振器(A)におけるレーザーコンプトン散乱部の中で最も強められ、偏光制御ユニット(C)及び共振制御器(D)を介して選択的に偏光に変えられる、構成を有する。



## 【特許請求の範囲】

## 【請求項 1】

2次元平面上に配置された1対の円筒凹面鏡と1対の凹面鏡と、光路の長さを調整する共振長調整手段と、レーザー光と電子ビームとの衝突を行うレーザーコンプトン散乱部とを備える2次元4鏡光学系と、レーザー光を導入するレーザー導入口と、電子ビームを導入する電子ビーム導入口と、及びレーザーコンプトン散乱放射線を取り出す放射線取出口が設けられている2次元4鏡光共振器であって、前記レーザー導入口から2次元4鏡光学系に導入されたレーザー光が、前記電子ビーム導入口から導入された電子ビームと前記レーザーコンプトン散乱部の中で衝突が行われレーザーコンプトン散乱X線を放射線取出口から取り出せるように、前記レーザーコンプトン散乱部の中で最も強められることを特徴とする2次元4鏡光共振器。

10

## 【請求項 2】

前記2次元4鏡光学系の偏光を制御する偏光制御ユニット、及び前記2次元4鏡光学系の共振を制御する共振制御ユニットをさらに設け、該偏光制御ユニット及び該共振制御ユニットを介して、レーザービームを前記光路の長さに応じて右円偏光レーザー光及び/又は左円偏光レーザー光に分離し、増幅するようにしたことを特徴とする請求項1に記載の2次元4鏡光共振器。

## 【請求項 3】

モードロックレーザーを供給するモードロックレーザー発振器及び2次元4鏡光共振器の共振状態とモードロックレーザー発振器の共振状態をマッチングさせる共振マッチングユニットを設けるレーザー光源ユニットをさらに有し、モードロックレーザー発振器から供給されたレーザービームが安定的に増幅されるようにしたことを特徴とする請求項2に記載の2次元4鏡光共振器。

20

## 【発明の詳細な説明】

## 【技術分野】

## 【0001】

本発明は、レーザーコンプトン散乱を行うための光共振器に関する。

## 【背景技術】

## 【0002】

近年、レーザーコンプトン散乱を利用した小型X線発生装置の研究開発が注目されている。レーザーコンプトン散乱とは、パルスレーザー光と電子ビームの衝突によってX線等の放射線が発生することである。レーザーコンプトン散乱を行うためには1パルス当たりのレーザー強度(パルス強度)が非常に高いレーザービームと高輝度電子ビームが必要である。しかしながら、パルス強度の高いレーザービームの製造は、下記に述べるように非常に困難であった。一方、高輝度電子ビームは、シンクロトロンやサイクロトロン等の円形加速器によって製造することが可能であった。そのため、従来は、円形加速器の電子ビーム周回路の中にレーザー発振器を置き、レーザーコンプトン散乱を行わせることが提案されていた。しかしながら、円形加速器は、周長が数キロメートルもある巨大な装置であるので、上記方法は産業利用には向かなかった。

30

## 【0003】

円形加速器は、数keV~100keVの範囲に在る高輝度のコヒーレントなX線を生じることができる。しかし、このようなサイクロトロンは、その巨大な大きさのために産業利用には決して利用されないであろう。しかし、これまで、シンクロトロンX線と同じように強いX線を生じするような小型の装置は、殆ど知られていない。

40

## 【0004】

従来、レーザー光を生じさせるための手段として光共振器が知られている。光共振器は、誘導放出物質からの誘導放出によって発生するレーザー光を向かい合う共振鏡によって反射させながら共振鏡面上のレーザー干渉によって増幅するレーザー増幅手段であり、共振鏡の反射率に依存してレーザーの蓄積を調整できる。光共振器を用いる方法は、原理的にはコンパクトな光共振器によってレーザー光の増幅と蓄積が可能である。光共振器には

50

、リング形状のファブリペロ型共振器や反射鏡を持つマイケルソン干渉計型共振器やフォックス・スミス干渉計型共振器等が知られている。

【0005】

光共振器によるレーザー増幅の原理は、共振器長がレーザー光の半波長の整数倍に合致する条件が満足されることによって行われることである。これを定在波が立つという。定在波の共鳴幅は、共振鏡の反射率で決まるので、高増幅率を得ようとして高反射率の鏡を使用する程、狭くなっていく。例えば、仮に、反射率99.9%の反射鏡を用いて増幅率1000倍の光共振器を想定した場合、共鳴幅は、24kHz、共鳴位置にして約1 (10<sup>-10</sup>m)であるので、振動等の環境の擾乱で簡単に共鳴状態が失われる。レーザー共鳴状態を維持させるためには、共振鏡をピエゾ駆動にし、高度なフィードバック制御を行うことが必要であるが、従来の光共振器は、機械的な制御の限界上、安定に共鳴を維持できる技術的限界は、増幅率1000倍程度であるとされている。

10

【0006】

これまで、光共振器を用いる多くのレーザー増幅器が提案されている(特許文献1~5、非特許文献1)。特許文献1は、光通信用の希土類をドープした光ファイバを充填するレーザー空洞を持つファブリペロ型共振器や反射鏡を持つフォックス・スミス干渉計型共振器等を用いた単純な構造の光伝送用レーザー発振器を開示している。これらのレーザー発振器の目的は、縦モード選択のきれいな光搬送波を供給するためのレーザー発振器であり、高いパルス強度を持つレーザーを生成するためのレーザー生成装置ではない。この種のレーザー発振器は、熱振動による共振幅のずれのために、発振出力を高くしたとしてもパルス強度は、高々マイクロジュールレベルが限界であった。

20

【0007】

非特許文献1は、共振鏡としての凹面鏡と共振鏡を機械的に制御するためのピエゾ調整器とを有するフォックス・スミス干渉計型の共振器を用いたSingle-Frequencyのレーザーパルスの生成を開示している。この方法で生成されるレーザー光の出力は、前記説明のように低い増幅倍率のために、精々15mWであることが報告されている。

【0008】

特許文献2は、光共振器内に個体レーザー(誘導放出媒体)を設け、レーザーダイオードに電流注入を行うことにより発生させたポンピング光(励起レーザー)を前記個体レーザーに入射してレーザー光を発生させることを開示している。この方法は、レーザーダイオードが安価で小型であるので、利便性の高いレーザー光の発生方法ではあるが、レーザーコンプトン散乱を生起させるに足るような高強度のレーザー光の生成と蓄積は、前記説明のように低い増幅倍率のために、困難である。

30

【0009】

特許文献3は、ダイオードでポンピングされるレーザー増幅器を開示している。この増幅器は、レーザー活性個体媒体を内部に有する共振器内にサーマルレンズを設けることによって、レーザービームを該媒体に合焦させる装置である。しかし、この手段を用いてもレーザーコンプトン散乱を生起させるに足るような高強度のレーザー光の生成と蓄積は、前記説明のように低い増幅倍率のために、困難である。

【0010】

特許文献4は、レーザーコンプトン散乱によるX線を発生させるために、大強度モードロックレーザー発振器と光共振器を用いてレーザー光を生成する装置を開示している。しかし、大強度モードロックレーザー発振器は、非常に高額な大型の装置であり、発振器からのレーザーを光共振器に導き、安定に増幅するには、非常に高度なフィードバック制御技術が必要であるので、精々1000倍程度の増幅が限界であることから、この方法で生成可能なレーザー光のパルス強度は、精々100μJ程度である。

40

【0011】

特許文献5は、複数の光共振器を直列に配置した多段増幅型レーザーシステムを半導体露光に用いることを開示している。この光共振器には、反射鏡が使用されているものの、レーザー蓄積が困難な光共振器であるので、後段の光共振器に伝送することで徐々にレー

50

レーザー光の増幅を高めていく装置である。レーザー光の増幅倍率は、機械的な共鳴幅の制御精度によって制限されるので、この種の光共振器を用いてレーザーコンプトン散乱に足るレーザー増幅倍率を上げようとするれば、多くの光共振器の直列配列が必要であり、それぞれの光共振器について共鳴幅の高度な制御システムが必要であるので、實際上、このような複数の光共振器を配置した多段増幅型レーザーシステムをレーザーコンプトン散乱用のレーザー光源として用いることは、ほとんど困難である。

【 0 0 1 2 】

大強度のレーザー光を生成させるためには、大出力の励起レーザー光源と大型の光共振器と大出力の高周波発振器を組み合わせることによって原理的には可能であるが、装置全体が超大型になることから、産業利用には適さない。

10

【 0 0 1 3 】

また、前記に挙げたような光共振器では、増幅倍率は小さいもののレーザー光の増幅は可能ではあるが、偏光レーザーを生成することはできない。

【 0 0 1 4 】

従来、光共振器を用いた逆コンプトン散乱によるX線の発生装置は、幾つか提案されている（特許文献 6 - 8 ）。

【 0 0 1 5 】

特許文献 6 は、円形加速器の電子ビーム周回路の中に 1 対のミラーを持つフォックス・スミス干渉計型共振器を設け、該共振器内でレーザー光と電子ビームとを衝突させて X 線を発生させる装置を開示している。該光共振器に導入されるレーザー光は、レーザー発振器のみからのレーザー光であるので、反射ミラーの反射率をいくら高くしたとしても、前記の説明のようにレーザー光の増幅倍率は精々 1 0 0 0 倍程度が限界であるので、該装置により強いレーザーコンプトン散乱 X 線を発生することは、困難である。

20

【 0 0 1 6 】

特許文献 7 は、一つの光共振器構造体の中に同列状に複数の凹面鏡が並ぶ凹面鏡群を対向配置した光共振器に電子ビームを導入し、光共振器内の反復反射レーザー光と衝突させることにより短波長光を発生する装置を開示している。該装置は、個々の対向した凹面鏡間で反復反射されたレーザー光の収束領域でレーザー光と電子ビームとを衝突させることにより衝突頻度を向上させ、その衝突が、複数の各凹面鏡間で行われる、とする装置である。しかし、該光共振器に蓄積されるレーザー光は、レーザー光源からのモード ロックレーザーを一对の対向する凹面鏡間で反復反射するだけのことであるから（一对の対向する凹面鏡を配した共振器は、構造的に、フォックス・スミス干渉計型共振器と同じであるので）、前記の説明のようにレーザー光の増幅倍率は精々 1 0 0 0 倍程度に過ぎない。したがって、該発明にも述べられているように、該装置は、フォトリソグラフィ用の短波長光を発生させるための装置であり、該装置により強いレーザーコンプトン散乱 X 線を発生することは、困難である。

30

【 0 0 1 7 】

特許文献 8 は、円形加速器の電子ビーム周回路の中に 2 枚の超高反射ミラーを持つフォックス・スミス干渉計型共振器を置き、該共振器内に蓄積されたレーザービームと、上記加速器発生電子ビームを共振器内で衝突させ、X線又はγ線を発生させる装置を開示している。また、該共振器を円形加速器の電子ビームの周回路に同列状に配置し、X線又はγ線を発生させる装置も開示されている。しかし、この装置に用いられる該共振器は、2 枚の凹面鏡が対向配置されている通常の光共振器であるので、凹面鏡として例えば反射率が 9 9 . 9 9 9 8 4 % という超高反射率の反射鏡を用いたとしても、前記説明のようにレーザー光の増幅倍率は精々 1 0 0 0 倍程度が限界であるので、該装置により強いレーザーコンプトン散乱 X 線を発生することは、困難である。

40

【 0 0 1 8 】

1 m J 程度又はそれ以上のパルス強度を有するレーザー光を生成できる光共振器の開発には、レーザー耐久性の共振鏡の課題もある。従来、耐レーザー性の共振鏡の材料には、半導体露光装置用の耐レーザー性の高い光学用合成石英ガラス（特許文献 9 ）、耐レーザ

50

ー損傷特性を有する屈折率の低い高純度シリカガラス材料（特許文献10）、耐レーザー性の高い合成石英ガラス（特許文献11）、耐レーザー性に優れたエキシマレーザー用光学石英ガラス（特許文献12）、耐レーザー性の良好なエキシマレーザー用積層金属膜（特許文献13）、高屈折率の酸化タantal薄膜と低屈折率のシリカ薄膜から成る誘電体多層膜（特許文献14）、サファイア等のセラミック材料（特許文献15）、等、が知られている。また、面発光型半導体レーザーなどの光デバイス中に熱伝導性の高いダイヤモンド層を含む多層膜構造を多層膜反射ミラーとして形成させることが提案されている（特許文献16）。

【0019】

しかし、本発明者らの実験によって、前記に挙げた材料を用いた共振鏡や反射鏡の多くが、300 $\mu$ J程度のパルス強度を有するレーザー光の繰り返し共振によって破壊されることがわかった。

【0020】

以上のような状況の中で、本発明者らは、レーザーコンプトン散乱を可能にするための高強度の偏光レーザーを発生させるために、1対の平面鏡と1対の凹面鏡とを3次元に配置させた画期的な3次元4鏡光共振器を提案した（特許文献17）。しかし、上記3次元光共振器は、ミラーの3次元配置のために、レーザー光のビームサイズを絞るのに非常に高度な共振器内の共振レーザー光と入射レーザー光との共振マッチング技術を必要とした。

【0021】

以上の説明のように、従来の光共振器を用いた種々のレーザー生成装置は、材料加工用のレーザー生成装置や光通信のレーザー発振器として知られているが、レーザーコンプトン散乱X線を発生するための大強度の偏光レーザーを生成する小型の光共振器は、殆ど知られていなかった。

【先行技術文献】

【非特許文献】

【0022】

【非特許文献1】P. W. Smith, Stabilized single-frequency output from a long laser cavity, IEEE Journal of Quantum Electronics, 1965, 11, Vol. QE-1, No. 8, pp. 343-348.

【特許文献】

【0023】

【特許文献1】特開平6-318751号公報

【特許文献2】特開2002-141589号公報

【特許文献3】特開平5-75189号公報

【特許文献4】特開2009-16488号公報

【特許文献5】特開2011-166169号公報

【特許文献6】米国特許4598415号

【特許文献7】特開平7-110400号公報

【特許文献8】特開平11-211899号公報

【特許文献9】特開2010-150097号公報

【特許文献10】特開2010-155778号公報

【特許文献11】特開2009-190958号公報

【特許文献12】特開2000-191329号公報

【特許文献13】特開平10-160915号公報

【特許文献14】特開2006-30288号公報

【特許文献15】特開2004-356479号公報

【特許文献16】特開平10-233558号公報

【特許文献17】特開2011-34006号公報

【発明の概要】

10

20

30

40

50

## 【発明が解決しようとする課題】

## 【0024】

前記に述べたように、従来のレーザーコンプトン散乱装置は、電子ビーム源として、巨大な円形加速器を用いるという発想に基づいていたので、産業利用には利用されなかった。本発明者らは、超小型の直線加速器発生電子ビームを用いて光共振器の中でレーザーコンプトン散乱を行わせるという発想の転換を行った。直線加速器が発生する電子ビームは、周回する電子ビームではないので、光共振器は、レーザーコンプトン散乱を行うための容器を兼ね備えていなければならない。本発明は、光共振器の中でレーザーコンプトン散乱を行わせるための高強度のレーザーを生成しようとする考えに基づいている。

## 【0025】

本発明の目的は、以上の考えに基づき、共振器に供給された電子ビームとレーザーコンプトン散乱を行うために、高輝度偏光レーザービームを生成することができる光共振器を提供することである。

## 【0026】

本発明者らは、レーザーコンプトン散乱によって数keV程度の準単色X線を発生させるに必要なレーザー光のパルス強度は100 $\mu$ J程度あればよいが、医療診断、治療、物質構造解析、材料分析、等の産業利用性が高い高輝度準単色X線を発生させるのに必要なレーザー光のパルス強度は、1ミリジュール程度は必要であることを見積もっている。また、診断・治療用の高輝度準単色X線を発生させるためには、レーザーコンプトン散乱によって高輝度の準単色X線を発生させるためには、規格化エミッタンスが10 $\mu$ m $\cdot$ rad以下である高輝度の電子ビームが必要であることを見積もっている。

## 【課題を解決するための手段】

## 【0027】

本発明者らは、上記の目的を達成するために鋭意研究を重ねた結果、1対の円筒凹面鏡と1対の凹面鏡を同一平面上に配置する2次元4鏡光学系によって、非常に強いレーザー光の生成が可能であることを見だし、この知見に基づいて本発明を完成するに至った。

## 【0028】

本発明者らは、2次元平面上に配置された1対の円筒凹面鏡と1対の凹面鏡を設ける2次元4鏡光学系が、パルス強度1mJ以上、ビームサイズ5 $\mu$ mの非常に強い偏光レーザーを生成することができることを見いだした。このパルス強度及びビームサイズは、従来のレーザービームのパルス強度及びビームサイズに比べて、それぞれ、10<sup>9</sup>倍高く、100倍小さい。この発見に基づいて、本発明者らは、従来のシンクロトロン放射X線と同じくらい強い高強度の準単色偏光X線を生成できる新しい小型光共振器を提供する。

## 【0029】

すなわち、本発明は、

1.

2次元平面上に配置された1対の円筒凹面鏡と1対の凹面鏡と、光路の長さを調整する共振長調整手段と、レーザー光と電子ビームとの衝突を行うレーザーコンプトン散乱部とを備える2次元4鏡光学系と、レーザー光を該2次元4鏡光学系に導入するレーザー導入口と、電子ビームを該レーザーコンプトン散乱部に導入する電子ビーム導入口と、及びレーザーコンプトン散乱X線を取り出す放射線取出口が設けられている2次元4鏡光共振器をであって、前記レーザー導入口から2次元4鏡光学系に導入されたレーザー光が、前記電子ビーム導入口から導入された電子ビームと前記レーザーコンプトン散乱部の中で衝突が行われレーザーコンプトン散乱X線を放射線取出口から取り出せるように、前記レーザーコンプトン散乱部の中で最も強められることを特徴とする2次元4鏡光共振器の構成とした。

2.

前記2次元4鏡光学系の偏光を制御する偏光制御ユニット、及び前記2次元4鏡光学系の共振を制御する共振制御ユニットをさらに設け、該偏光制御ユニット及び該共振制御ユニットを介して、レーザービームを前記光路の長さに応じて右円偏光レーザー光及び又は左

10

20

30

40

50

円偏光レーザー光に分離し、増幅するようにしたことを特徴とする前記 1 に記載の 2 次元 4 鏡光共振器の構成とした。

3 .

モードロックレーザーを供給するモードロックレーザー発振器及び 2 次元 4 鏡光共振器の共振状態とモードロックレーザー発振器の共振状態をマッチングさせる共振マッチングユニットを設けるレーザー光源ユニットをさらに有し、モードロックレーザー発振器から供給されたレーザービームが安定的に増幅されるようにしたことを特徴とする前記 2 に記載の 2 次元 4 鏡光共振器の構成とした。

【 0 0 3 0 】

前記 1 に記載の本発明は、パルス強度が 1 mJ 以上、ビームサイズが 3 0 μm 以下のレーザービームを生成できる。

10

【 0 0 3 1 】

前記 2 に記載の本発明は、パルス強度が 1 mJ 以上、ビームサイズが 3 0 μm 以下の右円偏光及び / 又は左円偏光レーザービームを選択的に生成できる。

【 0 0 3 2 】

前記 3 に記載の本発明は、2 次元 4 鏡光共振器の共振状態とモードロックレーザーの共振状態を自動的にマッチングすることができるので、これによって 1 0 万倍を超えるような驚くほどの大増幅を安定的に行うことができ、このことにより、驚くほど高強度のレーザービームを生成することができる。

【 0 0 3 3 】

また、本発明は、パルス強度が 1 mJ 以上でありビームサイズが 3 0 μm 以下の偏光レーザービームと規格化エミッタンスが 1 0 μm - r a d 以下の品質特性を有する電子ビームを衝突角度が 0 - 2 0 度の範囲で衝突させることによってシンクロトロン放射 X 線と同じくらい強い高輝度準単色 X 線を生成できる。

20

【発明の効果】

【 0 0 3 4 】

本発明は、高輝度レーザービーム及び高輝度 X 線を生成できる 2 次元 4 鏡光学系を搭載した新しい小型の光共振器、2 次元 4 鏡光共振器、である。該 2 次元 4 鏡光学系は、理想的な円形のビームプロファイルを有する高輝度レーザービーム生成することができ、選択的に右円偏光及び又は左円偏光レーザービームを生成することができ、容易に入出レーザービームの共振マッチングを可能にし、該光学系の中でレーザービームと電子ビームとの衝突（レーザーコンプトン散乱）を可能とする光学系である。これにより、本発明は、シンクロトロン放射 X 線と同じくらい強い高輝度偏光 X 線を選択的に生成できる。

30

【図面の簡単な説明】

【 0 0 3 5 】

【図 1】本発明に用いる 2 次元 4 鏡光共振器の光学パラメーターを説明する図である。

【図 2】本発明光共振器の一つを説明する概略図である。

【図 3】共振マッチングユニットを備えるレーザー光源ユニット、偏光制御ユニット、及び、共鳴制御ユニットが付帯されている 2 次元 4 鏡光共振器のブロックダイアグラムを説明する概念図である。

40

【図 4】図 3 の光共振器に電子ビーム発生ユニット E が付帯されている 2 次元 4 鏡光共振器のブロックダイアグラムを説明する概念図である。

【図 5】本発明に用いる 2 次元 4 鏡光共振器のレーザーサイズと S - パラメーターの関係を示す図である。

【図 6】本発明により生成させるレーザー光のパルス強度と励起レーザー光源の電流値の関係を示す図である。

【図 7】本発明により生成されるレーザー光の共振状態を示す図である。

【発明を実施するための形態】

【 0 0 3 6 】

本発明は、電子ビームと衝突を行うための高強度のレーザービームを生成することがで

50

きる2次元4鏡光学系を搭載した光共振器である。

【0037】

前記2次元4鏡光共振器は、基本的に、1対の円筒凹面鏡と1対の凹面鏡を2次元に配置した2次元4鏡光学系と、上記光学系に形成される光路の長さを調整する共振器長調整手段と、レーザー光を導入するレーザー導入口と、電子ビームを導入する電子ビーム導入口と、レーザー光と電子ビームの衝突を行うレーザーコンプトン散乱部と、及び該レーザーコンプトン散乱部で発生する放射線を外部に取り出す放射線取出口と、から構成される。

【0038】

前記円筒凹面鏡とは、湾曲した内側の形状が半円筒形の曲面であり、この曲面を鏡面とする鏡のことである。また、前記凹面鏡とは、湾曲した内側の曲面を鏡面とする鏡のことである。

10

【0039】

一般に、1対の平面鏡と1対の凹面鏡が同一平面上に配置されている2次元4鏡光学系では、レーザービームの入射方向と反射方向が各鏡に対して垂直にならない。この傾きのために、凹面鏡の垂直及び水平方向の焦点距離が一致しなくなり、凹面鏡間の midpoint に在るレーザー収束点でのビームプロファイルが楕円形状になる。楕円形状のレーザービームは、真円形のレーザービームに比べて、ビーム断面積が大きいので、輝度が低い。

【0040】

本発明は、前記平面鏡の代わりに円筒凹面鏡を用いることによって、ビームプロファイルを真円形状に小さく絞ることができることを初めて見いだした。これにより、本発明で用いられる2次元4鏡光共振器に生成されるレーザー光は、従来の光共振器によるレーザー光よりも桁違いに輝度を向上させることができる。

20

【0041】

また、円筒凹面鏡を用いることによって、真円形状のビームプロファイルを有する平行ビームにすることができるので、レーザー入射マッチングが非常に容易になり、レーザー透過マッチングも同様であるので、本発明の2次元4鏡光共振器は、レーザービームオプティクス調整を簡便に行うことができる。本発明で用いられる2次元4鏡光学系は、従来、殆ど知られていない。

【0042】

前記円筒凹面鏡及び前記凹面鏡の反射率は、光共振器の共鳴の鋭さ ( F i n e s s e ) を大きくするように最適化される。 F i n e s s e ( F ) は、反射率 ( R ) と式1の関係がある。

30

【0043】

【数1】

$$F = \frac{\pi \sqrt{R}}{1-R} \quad \text{式1}$$

40

【0044】

R が大きいほど F を大きくすることができる。反射率を大きくするもう一つの理由は、高輝度のレーザー衝突によって凹面鏡の表面が損傷を受けるのを抑制する ( レーザー耐久性を上げる ) ためである。

【0045】

前記光学系の中に設けられる1対の円筒凹面鏡のうちの一つ及び1対の凹面鏡のうちの一つは、それぞれ反射率が99.9%以上であるのが好ましく、反射率が99.99%以上100%未満であるのがさらに好ましい。反射率が99.9%以下であると凹面鏡の F i n e s s e の低下が大きくなり凹面鏡表面でのレーザー光の衝突による悪影響が生じやすくなるので、99.9%以上であるのが好ましく、反射率が99.99%以上であれば光共

50

振器の *F i n e s s e* を非常に大きくできるだけだけでなくレーザー光の衝突による悪影響を小さくできるので好ましい。また、反射率を100%未満とするのは、反射率を100%未満とするのは、レーザー光の入出を行うためである。通常は、反射率が99.999%程度乃至それ以上の反射率の凹面鏡を用いる。

【0046】

前記円筒凹面鏡及び前記凹面鏡は、通常、鏡の表面が誘電体多層膜でコートされた鏡を用いる。誘電体多層膜をコートした鏡は、従来の光共振器に用いられている鏡よりもレーザー耐久性が比較的に高い。好ましい鏡としては、例えば、フッ素含有誘電体多層膜がコートされた鏡、単結晶ダイヤモンド薄膜がコートされた鏡などを挙げることができるが、これらに限定するものではない。

10

【0047】

前記光共振器内に形成される光路の長さを調整する共振器長調整手段は、前記凹面鏡間の光路長を制御する手段である。該手段は、凹面鏡を支持する各ホルダーに設けられ、共振状態に依存した印加電圧に応じて該ホルダーと共に高精度で可動できる機構になっている。上記共振器長調整手段としては、 piezo素子を持つ圧電制御手段が好ましい。

【0048】

前記レーザーコンプトン散乱部は、2次元4鏡光共振器の中でレーザー光と電子ビームを衝突させてレーザーコンプトン散乱を行う所である。電子ビームとの衝突は、レーザーコンプトン散乱部の手前に設けた電磁石によって、レーザービームに向かってくる電子ビームと正面衝突に近い入射角を精密に制御することにより、達成できる。該レーザーコンプトン散乱部は、通常、2次元4鏡光学系の光路上に設けられ、共鳴レーザー光のビームサイズ(ビームウエストともいう)が最小になる共振長の中央の位置に設けられるのが最も好ましい。そうすることによって、後述のように、レーザーコンプトン散乱を行う上で、該光学系のレーザービームが、レーザーコンプトン散乱部の中で最も強められるのである。

20

【0049】

前記レーザー光を導入するためのレーザー導入口は、通常、前記光学系の中に設けられる円筒凹面鏡に適切な入射角度でレーザー光を入射できるように、前記光学系を収納する光共振器構造体の側部に設けられる。

【0050】

前記電子ビームを導入するための電子ビーム導入口は、通常、前記コンプトン散乱部に適切な入射角度で電子ビームを入射できるように前記光学系を収納する光共振器構造体の側部に設けられる。

30

【0051】

前記レーザーコンプトン散乱部で発生する放射線を取り出す放射線取出口は、通常、前記コンプトン散乱部からの放射線が適切な取り出し角度で取り出せるように、前記光学系を収納する光共振器構造体の側部に設けられる。

【0052】

前記レーザーコンプトン散乱部で高輝度X線を発生させるには、ビームサイズが小さいほど、またパルス強度が高いほど好ましい。レーザーコンプトン散乱部において衝突させるレーザー光は、パルス強度が1mJ以上でありビームサイズが30 $\mu$ m以下の偏光レーザーであるのが好ましい。また、パルス強度が1mJ以上でありビームサイズが20 $\mu$ m以下の偏光レーザーであるのが更に好ましい。ビームサイズが30 $\mu$ m以下でありパルス強度が1mJ以上であれば、高輝度放射線のマイクロビームを発生することが可能であるからである。また、本発明で用いる2次元4鏡光共振器によるビームサイズの理論的下限は、約5 $\mu$ mであることから、前記レーザーコンプトン散乱部において衝突させるレーザー光のビームサイズの下限は、5 $\mu$ mである。

40

【0053】

前記レーザーコンプトン散乱部において衝突させる電子ビームは、規格化エミッタンスが10 $\mu$ m-rad以下の品質を有する電子ビームであるのが好ましい。規格化エミッタ

50

ンスが小さい電子ビームを用いることで高輝度の放射線が発生させることができるからである。

【0054】

前記レーザーコンプトン散乱部におけるレーザーコンプトン散乱は、前記偏光レーザーと前記電子ビームとの衝突角度が0 - 20度の範囲で行われるのが好ましい。この範囲は、レーザーコンプトン散乱の衝突確率を大きくし、準単色放射線が発生するために好ましいからである。本発明では、衝突角度が0 - 20度の範囲で行われるのが好ましい。衝突角度調整は、レーザーコンプトン散乱部の手前に設ける電磁石により行うことができる。

【0055】

前記2次元4鏡光共振器は、周回光路中の微粒子によるレーザー散乱を防止するために真空下に置くのが好ましい。この真空度は、 $10^{-6}$  Pa以下であるのが好ましい。

10

【0056】

更に、本発明は、2次元4鏡光学系のレーザー光の選択的な右円偏光又は左円偏光の制御を行う偏光制御ユニットと、各偏光レーザーの共振を行わせる共振制御ユニットDを付帯することができる。

【0057】

前記偏光制御ユニットは、共鳴レーザーの偏光状態を検出するシステムである。該システムは、光共振器からのレーザー光を所定距離離れた場所に導く複数の平面鏡、最終段の平面鏡で反射されたレーザー光の偏光面を調整する $\lambda/2$ 波長板、偏光面が調整されたレーザー光をP偏光とS偏光に分離する偏光ビームスプリッター、分離されたそれぞれの偏光ビームのレーザー強度を示す偏光強度信号を生成するそれぞれのピンフォトダイオード、それぞれのピンフォトダイオードから出力されるそれぞれの偏光強度信号の差分を演算し差分信号を生成する差動増幅器、差動増幅器から出力される差分信号を判定するゼロクロス判定器、ゼロクロス判定器の判定結果からゼロクロスフィードバック信号を生成するゼロクロスフィードバック信号生成器、等を備える。そして、これを実施する各種の演算を行うマイクロプロセッサ、又は演算機能が組み込まれたLSIなどが搭載された演算基板を備える。

20

【0058】

前記共振制御ユニットは、前記偏光制御ユニットからの信号を用いて2次元4鏡光学系の位置調整手段(ピエゾ素子)を制御するシステムである。該システムは、前記ゼロクロスフィードバック信号生成器からのゼロクロスフィードバック信号を受けて、選択される右偏光又は左偏光を指定する指示信号を出力する偏光切替えスイッチと、光共振器の内部で共振しているレーザー光の強度とレーザー光源部からのレーザー光の強度を測定する共振モニターと、前記偏光切替えスイッチの出力、前記共振モニターの出力、及び、前記ゼロクロスフィードバック信号生成器の出力に基づき、前記光共振器内に設けられた圧電素子の駆動電圧を制御する共振制御器、等を備える。そして、これを実施する各種の演算を行うマイクロプロセッサ、又は演算機能が組み込まれたLSIなどが搭載された演算基板を備える。該偏光制御部は右偏光と左偏光の光路長の僅かな違いを利用するものである。

30

【0059】

更に、本発明は、レーザー光を供給するレーザー光源ユニットを付帯することができる。該レーザー光源ユニットは、レーザー光源と、共振マッチングユニットと、レーザー光源からのレーザー光を導く複数の平面鏡と、レーザーのビーム径を整える複数のコリメートレンズと、及びレーザーを直線偏光にする偏光ビームスプリッター、等を備える。該レーザー光源としては、モードロックレーザー発振器、パルスレーザー発振器、CWレーザー発振器、等を用いることができる。例えば、光共振器とファイバレーザー増幅器とで作られるループ状の光周回路で協調的な自己発振による増幅を可能とするモードロックレーザー発振器は、高強度のレーザー光を供給できるので、最も好ましい。

40

【0060】

前記共振マッチングユニットFは、2次元4鏡光共振器内のレーザー光の増幅を前記レーザー光源ユニットのレーザー光の増幅と同調させるための手段のことである。該共振マ

50

ッチング手段は、レーザー光源として光共振器とファイバレーザー増幅器とで作られるループ状の光周回路で協調的な自己発振による増幅を可能とするモードロックレーザー発振器を用いる場合に有効である。前記共振マッチングユニットを搭載した本発明は、モードロックレーザー発振器の光周回路に在る光共振器のモードロックレーザー光を2次元4鏡光共振器によって容易に増幅することを可能にする。なぜなら、この増幅レーザー光は、前記共振マッチング手段によって、モードロックレーザー発振器の光周回路に在る光共振器の共鳴条件を自然に満足しているからである。該共振マッチング手段によって0.1の共鳴幅の制御を難なく行うことができることが確認されている。

#### 【0061】

前記共振マッチングユニットは、前記レーザー光源ユニットのパルス信号を検出し2次元4鏡光共振器にフィードバックするフィードバック検出系、及び該フィードバック検出系からの信号を読み取り2次元4鏡光共振器の光学系の位置制御手段を駆動させる駆動制御信号を生成する補正ボードを備える。そして、これを実施する各種の演算を行うマイクロプロセッサ、又は演算機能が組み込まれたFPGAやASIC等のLSIなどが搭載された演算基板を備える。

10

#### 【0062】

前記フィードバック検出系としては、図3に示すような偏光制御ユニットC [ / 2ミラー17 ポラライズビームスプリッタ(PBS)14 S波検出ピンフォトダイオード18 P波検出ピンフォトダイオード 差動増幅器20 ゼロクロス判定器21 ゼロクロスフィードバックシグナル生成器22 ]に類似のシステムを用いることができる。

20

#### 【0063】

前記補正ボードとしては、図3に示すような共振制御ユニットD [ 偏光切替えスイッチ23 共振モニタ 共振制御器 ]に類似のシステムを用いることができる。

#### 【0064】

更に、本発明は、高エネルギー電子ビームを2次元4鏡光共振器に供給する電子ビーム生成ユニットを付帯することができる。

#### 【0065】

前記電子ビーム生成ユニットとしては、高周波信号発生装置と、高周波信号発生装置から出力される高周波信号と同期した高周波電圧を使用して、電子を加速させて高エネルギー電子ビームを出射する高エネルギー電子ビーム発生装置、とを備えている。該高エネルギー電子ビーム発生装置としては、高周波(RF)直線加速器が好ましい。

30

#### 【0066】

以下に図面を参照しつつ本発明の一側面を実施形態(以下、「本実施形態」とも表記する)として詳細に説明する。

#### 【実施例】

#### 【0067】

図1に示す本発明に用いる2次元4鏡光学系の光学パラメータは、円筒凹面鏡間の距離 $L_1$ 、凹面鏡間の距離(共振器長) $L_2$ 、光共振器の幅 $d$ 、及び入射角 $\theta$ である。そして、これらのパラメータは、凹面鏡間のレーザービームのビームサイズ(ビームウエストともいう) $w_0$ をできるだけ小さくするように最適化される。それは、ビームサイズが小さいほどレーザーコンプトン散乱X線のフラックスは大きいので、 $w_0$ をできるだけ小さくすることで、フラックスを大きくするためである。本発明では、 $w_0 = 1064 \text{ nm}$ のレーザービームを用いている。 $L_2$ は、モードロックレーザーの共鳴条件から、 $1075 \text{ mm}$ 程度とするのがよい。 $w_0$ の値は、ガウシアンビーム光学におけるビームエキスパンダーを使ったエンベロープ計算を行って、凹面鏡の垂直方向及び水平方向のレーザーサイズ $w_0$ とS-パラメータとの関係から求めた。ここで、S-パラメータとは、対向する1対の凹面鏡において、片方の凹面鏡からもう片方の凹面鏡に沿うレーザー方向に在るレーザーパルスの位置のことである。その結果、図5に示すように、S-パラメータが $537.6 \text{ mm}$ の所でレーザーサイズ $w_0$ は、 $5 \mu\text{m}$ の極小値に収束することがわかった。また、凹面鏡の垂直方向及び水平方向のそれぞれのレーザーサイズとS-パラメータ

40

50

の関係の重なりである共鳴安定領域が、オプティクスとして拡大されることがわかった。このレーザー光のビームサイズの極小値は、従来の大強度モードロック発振器（出力50W、発振器内のパルスの時間幅10ps/pulse、波長1064nm、150MHz繰り返し）のレーザー光のビームサイズの極小値が50μmであることに比べて、10分の1であるので、本発明光共振器で生成するレーザービームの輝度は、従来の大強度モード発振器で生成するレーザービームの輝度よりも100倍も高くすることが可能である。それゆえに、前記レーザーコンプトン散乱部は、共鳴レーザーのビームサイズが極小になるような共振長の2分の1の位置に設けられるのが最も好ましい。こうすることによって、光学系のレーザー光がレーザーコンプトン散乱部において最も強められる。

【0068】

図1に示すように、光共振器の幅dと凹面鏡に入射されるレーザー光の入射角は、凹面鏡による水平方向及び垂直方向の収束力が最大になるように最適化される。本発明では、光共振器の幅dは240mm程度、入射角は0.20radian(11.4°)程度とするのが好ましい。

【0069】

図2に示す本発明は、2次元に配置された1対の円筒凹面鏡1、2と1対の凹面鏡3、4と、光路の長さを調整する共振器長調整手段10と、レーザー光と電子ビームとの衝突を行うレーザーコンプトン散乱部7と、レーザー光源11から出射されるレーザー光を導入するレーザー導入口5と、電子ビームを導入する電子ビーム導入口6と、放射線を取り出す放射線取出口8が、設けられている2次元4鏡光共振器Aから構成されるレーザーコンプトン散乱光共振器である。そして、該光共振器内の蓄積レーザー光の一部を、凹面鏡3を透過してレーザー出射口9から後述の偏光制御ユニットCに出射することができる。

【0070】

図3に示す本発明は、2次元4鏡光共振器A、レーザー光源ユニットB、偏光制御ユニットC、及び共振制御ユニットDを備える光共振器である。

【0071】

図4に示す本発明は、2次元4鏡光共振器A、レーザー光源ユニットB、偏光制御ユニットC、共振制御ユニットD、及び電子ビーム生成ユニットEを備える光共振器である。

【0072】

次に、図2～4を参照しながら、本発明の動作を説明する。

【0073】

本発明2次元4鏡光共振器は、 $10^{-6}$ Pa以下の真空下に置かれている。起動スイッチがオンされて、レーザー光源11からレーザー光の出射が開始されると、偏光ビームスプリッター14、コリメートレンズ15、を通過する過程で、レーザー光の偏光面とビーム径が整えられて、反射鏡16を経て、2次元4鏡光共振器の円筒凹面鏡1の裏側に入り、円筒凹面鏡1を透過したレーザーが、円筒凹面鏡2 凹面鏡3 凹面鏡4 円筒凹面鏡1 円筒凹面鏡2なる経路で閉じ込められる。

【0074】

また、この動作と並行し、2次元4鏡光共振器の円筒凹面鏡2を透過したレーザー光の強度が共振モニター24によって測定されてモニター信号が生成され、共振制御器25に供給される。上記共振モニター24は、ピンフォトダイオードを備えており、レーザー光の強度を測定してモニター信号（2次元光共振器内のレーザー光が共振しているとき、大きな値となる信号）を生成するものである。

【0075】

また、これらの動作と並行し、偏光制御ユニットCによって、2次元4鏡光共振器内で共振しているレーザー光のうち、凹面鏡3を透過したレーザー光を反射させ、2次元4鏡光共振器から所定距離離れた場所に導く複数の平面鏡16と2次元4鏡光共振器から距離に応じた取り付け角度に調整され、最終段の平面鏡で反射されたレーザー光の偏光面を調整する / 2波長板17と、 / 2波長板17で偏光面が調整されたレーザー光をP偏光とS偏光に分離する偏光ビームスプリッター14と、偏光ビームスプリッター14で

10

20

30

40

50

分離されたS偏光側のレーザー光を反射する平面鏡16と平面鏡16で反射されたS偏光側のレーザーを受光し、S偏光側のレーザー強度を示すS偏光強度信号を生成するピンフォトダイオード18と、偏光ビームスプリッター14で分離されたP偏光側のレーザー光を反射する平面鏡16と、平面鏡で反射されたP偏光側のレーザー光を受光し、P偏光側のレーザー強度を示すP偏光強度の信号を生成するピンフォトダイオード19と、ピンフォトダイオード18から出力されるS偏光強度信号とピンフォトダイオード19から出力されるP偏光強度信号との差分を演算し、差分信号を生成する差動増幅器20と、差動増幅器20から出力される差分信号がゼロクロスしているかどうか、ゼロクロスしたとき、プラス側からマイナス側にゼロクロスしたか、マイナス側からプラス側にゼロクロスしたかどうかなどを判定し、これらの判定結果を示すゼロクロスフィードバック信号を生成するゼロクロス判定器21とを備えており、2次元4鏡光共振器内で共振しているレーザー光のうち、平面鏡を透過したレーザー光を取り込んで、P偏光とS偏光に分離し、その強度を測定すると共に、その差分値を求めて、差分信号がゼロクロスしているかどうか、ゼロクロスしたとき、プラス側からマイナス側にゼロクロスしたか、マイナス側からプラス側にゼロクロスしたかどうかなどを示すゼロクロスフィードバック信号をゼロクロス信号生成器22で生成し、偏光切替えスイッチ23に送り、共振制御器25に送る。

10

**【0076】**

また、この動作と並行し、共振制御器25によって、ランプ状に電圧値が高くなる駆動電圧が生成されて、2次元4鏡光共振器内のピエゾ素子10に供給され、該光共振器の光路長が調整される。

20

**【0077】**

そして、偏光切替えスイッチ23から出力されている指示信号で、右偏光、又は左偏光の何れか、例えば、右偏光が指定され、この状況で、偏光制御ユニットCによって右偏光が検出されたことを示すゼロクロスフィードバック信号がゼロクロスフィードバック信号生成器22により生成され、共振モニター24から2次元4鏡光共振器内でレーザー光が共振していることを示すモニター信号が出力されたとき、共振制御器25によって、これが検知されて、駆動電圧の電圧値が固定される。

**【0078】**

これにより、2次元4鏡光共振器内の光路長がその時点で固定され、該光共振器内で右偏光のレーザーに対する共振が、指定された時間、維持される。

30

**【0079】**

前記共振制御器25は、各種の演算を行うマイクロプロセッサ、又は演算機能が組み込まれたFPGAやASIC等のLSIなどが搭載された演算基板を備えており、偏光切替えスイッチ23から出力される指示信号、共振モニター25から出力されるモニター信号、ゼロクロス判定手段Cから出力されるゼロクロスフィードバック信号に基づき、ランプ状の電圧値、又は2次元光共振器内に右偏光、又は左偏光のレーザー光を選択させるのに必要な電圧値の駆動電圧を生成して2次元光共振器内のピエゾ素子10に供給することにより、2次元4鏡光共振器の光路長を制御し、2次元光共振器内に右偏光、又は左偏光のレーザー光を選択的に蓄積させる。

**【0080】**

この時、モードロック発振周波数とパルスレーザー光の時間幅とによって、パルスレーザー光の線幅が決まり、また2次元4鏡光共振器のレーザーコンプトン散乱部では、衝突点におけるパルスレーザー光のビームサイズが30 $\mu$ m以下であることから、パルスレーザー光の時間幅が30ps以内であれば、2次元4鏡光共振器のレーザーコンプトン散乱部でのパルス強度を1mJ以上にすることができる。この時、2次元4鏡光共振器の1対の円筒凹面鏡及び1対の凹面鏡としてレーザー耐久性の誘電体多層膜でコートされた鏡を用いると、2次元4鏡光共振器のレーザーコンプトン散乱部でのパルス強度を10mJ以上にすることができる。

40

**【0081】**

また、偏光切替えスイッチ23から右偏光、左偏光を交互に指定する指示信号が出力さ

50

れている場合でも、同様な制御が行われて、2次元4鏡光共振器内に大強度の右偏光と左偏光が交互に、共振により増幅され、該光共振器内に蓄積される。

【0082】

また、図4を用いて本発明の操作を説明する。

【0083】

高周波信号発生装置26から出力される高周波信号と同期した高周波電圧を使用して、高エネルギー電子ビーム発生装置27により電子ビームが加速され、2次元4鏡光共振器Aに供給される。高周波信号発生装置26と高エネルギー電子ビーム発生装置27は、電子ビーム生成ユニットにある。更にこれと並行して、レーザー光源ユニットBにより生成されたモードロックレーザーが、2次元4鏡光共振器Aに供給される。一方、偏光性は、偏光制御ユニットCによって調整され、共振状態は、共振制御ユニットDによって調整される。

10

【0084】

本発明によって得られる代表的な結果を、図5を用いて説明する。

【0085】

本発明者等らは、図3に示すような光共振器に用いて、2次元4鏡光共振器内のレーザービームの一部を取り出し、パルス強度、及び共振状態を観測した。レーザー光源としては、光共振器とファイバレーザー増幅器を連結したループ状の光周回路を持つモードロック発振器を用いた。該2次元4鏡光共振器の共振鏡として反射率が99.99%の凹面鏡を用いた。該モードロック発振器に入れた種レーザーのパルス強度は、 $0.1 \mu\text{J}$  ( $= 10^{-7} \text{J}$ )であった。実験結果を図5及び図6に示す。図5は、光周回路に供給した励起レーザー光源の電流と該2次元4鏡光共振器内のレーザービームのパルス強度の関係をフォトダイオードで測定した結果である。この結果から、パルス強度が約1ミリジュールに達していることがわかる。すなわち、増幅倍率は、約1万倍であった。このことは、0.1の共鳴幅の制御が達成されていることを示す。図6は、該2次元4鏡光共振器内のレーザービームの共振状態をオシロスコープで観察した結果である。この結果から明らかなように右偏光レーザーと左偏光レーザーの分離ができていくことがわかる。

20

【0086】

以上をまとめると、前記1~4の本発明は、真円形状のビームプロファイルを有する平行ビームを得ることができ、レーザー入射マッチングが非常に容易であり、レーザー透過マッチングも同様であるので、レーザービームオプティクス調整を簡便に行うことができる。その結果、レーザービームサイズを $30 \mu\text{m}$ 以下にし、産業利用性が高いパルス強度が1ミリジュール以上の偏光レーザーの生成が可能である。

30

【産業上の利用可能性】

【0087】

本発明は、偏光レーザー共振方法、偏光放射線発生方法、レーザーコンプトン散乱によるX線マイクロビームを発生させるX線源システムやデバイス等に関する産業応用が可能であり、特に、医療用機器、診断機器、材料分析装置、構造解析装置、材料加工、等の多くの産業に幅広く利用できる。

40

【符号の説明】

【0088】

- A 2次元4鏡光共振器
- B レーザー光源ユニット
- C 偏光制御ユニット
- D 共振制御ユニット
- E 電子ビーム発生ユニット
- F 共振マッチングユニット
- 1 円筒凹面鏡
- 2 円筒凹面鏡
- 3 凹面鏡

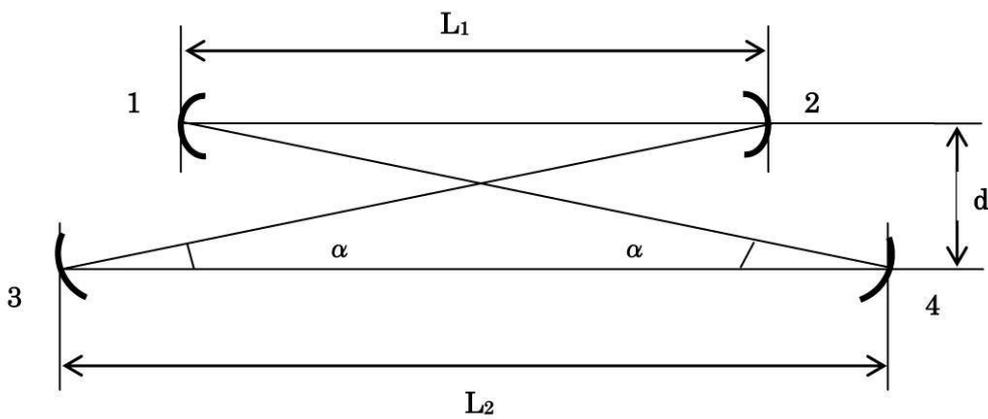
50

- 4 凹面鏡
- 5 レーザー導入口
- 6 電子ビーム導入口
- 7 レーザーコンプトン散乱部
- 8 放射線取出口
- 9 レーザー光取出口
- 10 共振長調整手段
- 11 レーザー光源
- 12 フィードバック制御系
- 13 補正ボード
- 14 偏光ビームスプリッタ
- 15 コリメートレンズ
- 16 反射鏡
- 17 / 2 波長板
- 18 ピンフォトダイオード
- 19 ピンフォトダイオード
- 20 差動増幅器
- 21 ゼロクロス判定器
- 22 ゼロクロスフィードバック信号生成器
- 23 偏光切替えスイッチ
- 24 共振制御器
- 25 共振モニター
- 26 高周波信号発生装置
- 27 高エネルギー電子ビーム発生装置

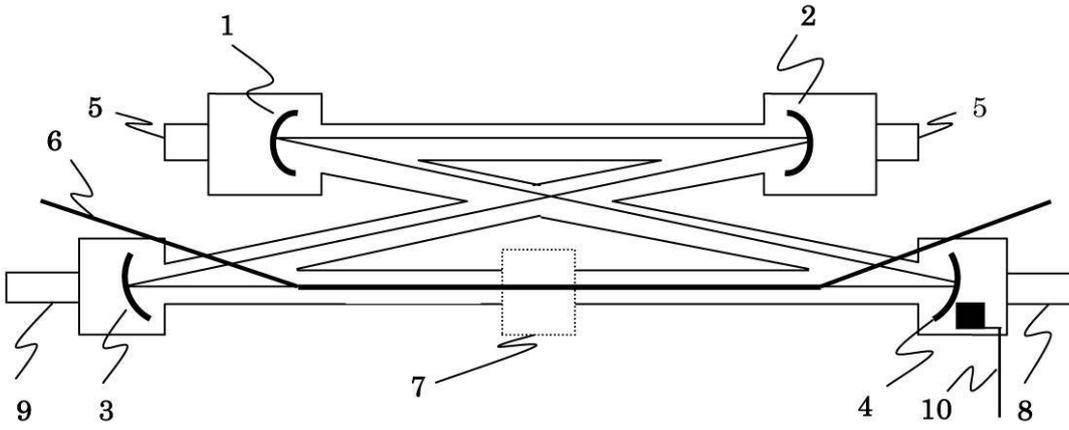
10

20

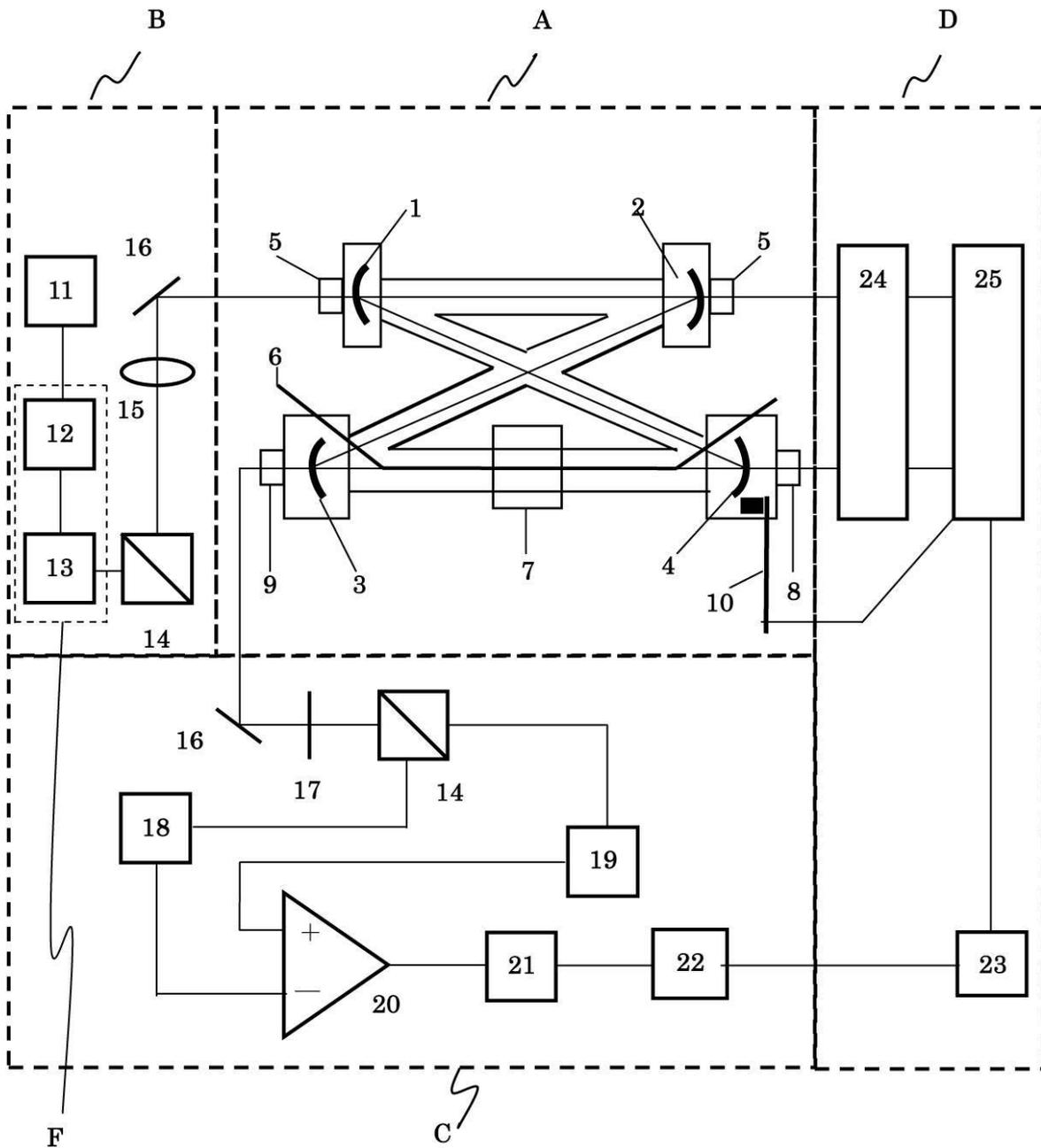
【図1】



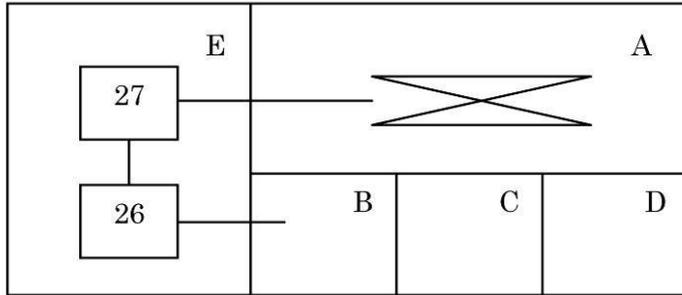
【図2】



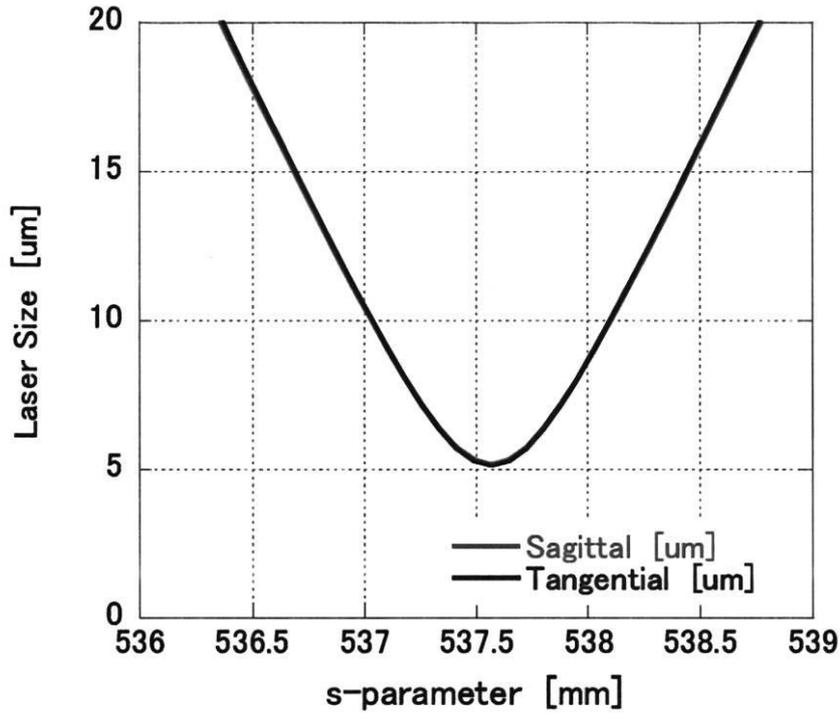
【図3】



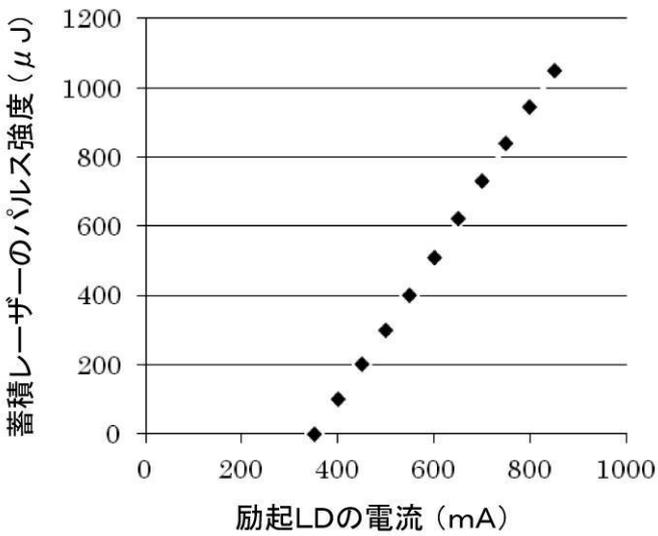
【 図 4 】



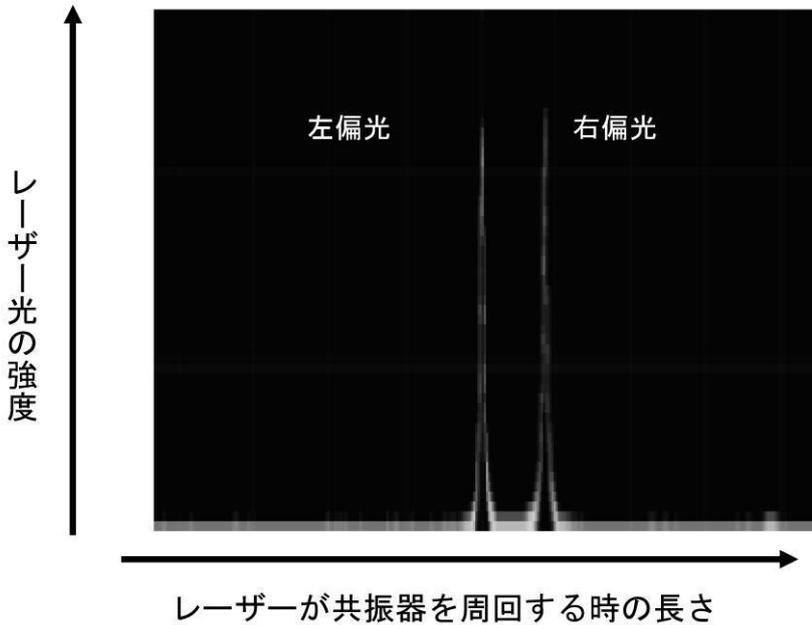
【 図 5 】



【 図 6 】



【図 7】



## 【手続補正書】

【提出日】平成27年8月4日(2015.8.4)

## 【手続補正 1】

【補正対象書類名】特許請求の範囲

【補正対象項目名】全文

【補正方法】変更

【補正の内容】

【特許請求の範囲】

【請求項 1】

1 対の円筒凹面鏡と 1 対の凹面鏡が 2 次元平面上に配置され、光路の長さを調整する共振器長調整手段と、レーザー光と電子ビームとの衝突を行うレーザーコンプトン散乱部と、レーザー光を導入するレーザー導入口と、電子ビームを導入する電子ビーム導入口と、及びレーザーコンプトン散乱放射線を取り出す放射線取出口が設けられている 2 次元 4 鏡光学系を備える 2 次元 4 鏡光共振器であって、前記レーザー導入口から前記 2 次元 4 鏡光学系にレーザー光が導入され、該導入されたレーザー光が、前記 2 次元 4 鏡光学系により真円形状のビームプロファイルを有する平行レーザービームに加工され、該真円形状の平行レーザービームを用いた入射、出射、及び反射レーザービームの光学マッチングが行われ、該真円形状の平行レーザービームが、前記電子ビーム導入口から導入された電子ビームと前記レーザーコンプトン散乱部の中で衝突が行われ、レーザーコンプトン散乱 X 線を前記放射線取出口から取り出せるようにしたことを特徴とする 2 次元 4 鏡光共振器。

【請求項 2】

前記 2 次元 4 鏡光学系の偏光を制御する偏光制御ユニット、及び前記 2 次元 4 鏡光学系の共振を制御する共振制御ユニットをさらに設け、該偏光制御ユニット及び該共振制御ユニットを介して、レーザービームを前記光路の長さに応じて右円偏光レーザー光及び/又は左円偏光レーザー光に分離し、増幅するようにしたことを特徴とする請求項 1 に記載の 2 次元 4 鏡光共振器。

【請求項 3】

モードロックレーザーを供給するモードロックレーザー発振器及び 2 次元 4 鏡光共振器の共振状態とモードロックレーザー発振器の共振状態をマッチングさせる共振マッチングユニットを設けるレーザー光源ユニットをさらに有し、モードロックレーザー発振器から供給されたレーザービームが安定的に増幅されるようにしたことを特徴とする請求項 2 に記載の 2 次元 4 鏡光共振器。

## 【手続補正 2】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0029

【補正方法】変更

【補正の内容】

【0029】

すなわち、本発明は、

1.

1 対の円筒凹面鏡と 1 対の凹面鏡が 2 次元平面上に配置され、光路の長さを調整する共振器長調整手段と、レーザー光と電子ビームとの衝突を行うレーザーコンプトン散乱部と、レーザー光を導入するレーザー導入口と、電子ビームを導入する電子ビーム導入口と、及びレーザーコンプトン散乱放射線を取り出す放射線取出口が設けられている 2 次元 4 鏡光学系を備える 2 次元 4 鏡光共振器であって、前記レーザー導入口から前記 2 次元 4 鏡光学系にレーザー光が導入され、該導入されたレーザー光が、前記 2 次元 4 鏡光学系により真円形状のビームプロファイルを有する平行レーザービームに加工され、該真円形状の平行レーザービームを用いた入射、出射、及び反射レーザービームの光学マッチングが行われ、該真円形状の平行レーザービームが、前記電子ビーム導入口から導入された電子ビームと前記レーザーコンプトン散乱部の中で衝突が行われ、レーザーコンプトン散乱 X 線を前記放射線取出口から取り出せるようにしたことを特徴とする 2 次元 4 鏡光共振器の構成とした。

【手続補正 3】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0062

【補正方法】変更

【補正の内容】

【0062】

前記フィードバック検出系としては、図 3 に示すような偏光制御ユニット C [ 2 ミラー 17 ポラライズビームスプリッタ (PBS) 14 S 波検出ピンフォトダイオード 18 P 波検出ピンフォトダイオード 差動増幅器 20 ゼロクロス判定器 21 ゼロクロスフィードバックシグナル生成器 22 ] に部分的に類似のシステム、その他同種類のものを用いることができるが、それらに限定されない。

【手続補正 4】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0063

【補正方法】変更

【補正の内容】

【0063】

前記補正ボードとしては、図 3 に示すような共振制御ユニット D [ 偏光切替えスイッチ 23 共振モニタ 共振制御器 ] に部分的に類似のシステム、その他同種類のものを用いることができるが、それらに限定されない。

## 【 国際調査報告 】

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2013/052958

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER		
Int.Cl. H01S3/30 (2006.01) i, H01S3/10 (2006.01) i, H05G2/00 (2006.01) i		
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
B. FIELDS SEARCHED		
Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)		
Int.Cl. H01S3/00-3/30, H05G2/00		
Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched Published examined utility model applications of Japan 1922-1996 Published unexamined utility model applications of Japan 1971-2013 Registered utility model specifications of Japan 1996-2013 Published registered utility model applications of Japan 1994-2013		
Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	Masafumi FUKUDA et al., Development Status and	1
Y	Future Plan of Laser Undulator Compact X-ray Source (LUCX) in KEK, Journal of Accelerator Society of Japan, 2012.10.31, Vol.9, No.3, pp.156-164	2-3
X	WO 2012/031607 A1 (Max-Planck-Gesellschaft zur	1
Y	Forderung der Wissenschaften e. V.) 2012.03.15, the whole document (Family: none)	2-3
Y	WO 2011/016378 A1 (High Energy Accelerator Research Organization) 2011.02.10, the whole document & JP 2011-35328 A & JP 2011-34006 A	2-3
<input checked="" type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input type="checkbox"/> See patent family annex.		
* Special categories of cited documents:		
"A"	document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance	"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"E"	earlier application or patent but published on or after the international filing date	"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"L"	document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)	"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"O"	document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means	"&" document member of the same patent family
"P"	document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed	
Date of the actual completion of the international search	Date of mailing of the international search report	
21.05.2013	04.06.2013	
Name and mailing address of the ISA/JP	Authorized officer	2X 3013
<b>Japan Patent Office</b>	<b>Atsuhiko Furuta</b>	
3-4-3, Kasumigaseki, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8915, Japan	Telephone No. +81-3-3581-1101 Ext. 3294	

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No. PCT/JP2013/052958
--

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	WO 2011/041493 A2 (Massachusetts Institute of Technology) 2011.04.07, abstract, all figures & US 2011/0073784 A1	1-3
A	WO 2006/104956 A2 (Massachusetts Institute of Technology) 2006.10.05, abstract, all figures & US 2006/0251217 A1	1-3
A	US 2006/0222147 A1 (Robert John Filkins et al.) 2006.10.05, abstract, all figures (Family: none)	1-3
A	WO 2005/101925 A2 (Lyncean Technologies, Inc.) 2005.10.27, abstract, all figures & JP 2007-533081 A & JP 5030772 B & US 2005/0226383 A1 & US 2005/0243966 A1 & US 2005/0254534 A1 & US 2005/0254535 A1 & US 2005/0271185 A1 & US 2008/0002813 A1 & US 2008/0031420 A1 & EP 1745682 A & WO 2005/101926 A2 & WO 2005/112525 A2	1-3
A	WO 2011/060805 A1 (Max-Planck-Gesellschaft zur Forderung der Wissenschaften e. V.) 2011.05.26, abstract, figure 1 (Family: none)	1-3
A	WO 2012/018034 A1 (High Energy Accelerator Research Organization) 2012.02.09, abstract, figure 2 & JP 2012-38866 A	1-3
A	WO 2011/016379 A1 (High Energy Accelerator Research Organization) 2011.02.10, abstract, figure 2 & JP 2011-35331 A	1-3

## フロントページの続き

(81)指定国 AP(BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), EA(AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), EP(AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OA(BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG), AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC

特許法第30条第2項適用申請有り 「KEKにおけるレーザーコンプトン散乱を用いた小型X線源の開発の現状とアップグレード計画」日本加速器学会発行「加速器」平成24年10月31日発行

(出願人による申告)平成23年度、文部科学省、科学技術試験研究委託事業による委託研究、産業技術力強化法第19条の適用を受ける特許出願

Fターム(参考) 5F172 AM08 CC04 EE01 NN14 NN28 NP02 NP18 NQ09 NQ12 NQ33  
ZZ14