(19)中华人民共和国国家知识产权局

(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 101258783 B
(45)授权公告日 2012.12.05

(21)申请号 200680028066.5

(22)申请日 2006.06.01

(30)优先权数据
60/687,014 2005.06.02 US
11/421,351 2006.05.31 US

(85)PCT申请进入国家阶段日
2008.01.31

(86)PCT申请的申请数据
PCT/US2006/021562 2006.06.01

(87)PCT申请的公布数据
WO2006/130856 EN 2006.12.07

(73)专利权人 约翰·M.J.·麦迪
地址 美国夏威夷州

(72)发明人 E·B·斯扎莫斯

(74)专利代理机构 上海专利商标事务所有限公司 31100
代理人 李玲

(51)Int.Cl.
H01S 4/00(2006.01)

(56)对比文件
US 4598415 ,1986.07.01, 全文.
US 5247562 A,1993.09.21, 全文.
CN 1318970 A,2001.10.24, 全文.
US 5495515 A,1996.02.27, 全文.

审查员 赵延瑞

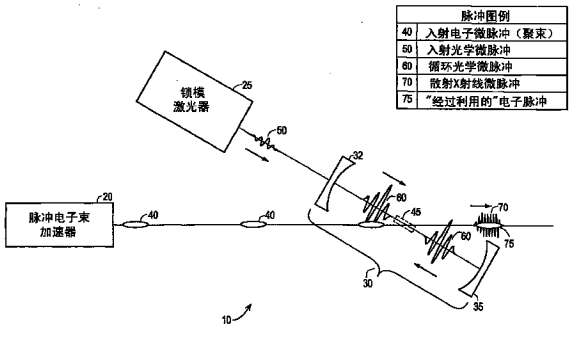
权利要求书 10 页 说明书 25 页 附图 12 页

(54)发明名称

使用光学波动器的高效单色X射线源

(57)摘要

一种生成高能电磁辐射的方法包括:在多个独立辐射间隔的每一个期间,向由给定波长辐射的往返传播时间(RTTT)表征的光学腔中注入该给定波长的激光辐射。至少一些辐射间隔由一个或多个光学宏脉冲定义,至少一个光学宏脉冲引起被该光学宏脉冲中的后续光学微脉冲相干增强的关联循环光学微脉冲,且腔中任何给定位置处的循环光学微脉冲的电场振幅在辐射间隔期间达到最大值。



CN 101258783 B

1. 一种生成高能电磁辐射的方法，所述方法包括，在多个独立辐射间隔的每一个期间：

向由给定波长辐射的往返传播时间表征的光学腔中注入所述给定波长的激光辐射，其中

至少一些辐射间隔由一个或多个光学宏脉冲定义，

至少一个光学宏脉冲引起被所述光学宏脉冲中的后续光学微脉冲相干增强的关联的循环光学微脉冲，并且所述腔中任何给定位置处的所述循环光学微脉冲的电场振幅在所述辐射间隔期间达到最大值，

引起循环光学微脉冲的至少一个光学宏脉冲由一光学微脉冲系列构成，所述光学微脉冲系列具有以下特征：

一个光学微脉冲的起始与下一个的起始之间的间距足够接近所述给定波长辐射的往返传播时间或所述往返传播时间的精确整数倍，以在所注入的光学微脉冲与由所述光学宏脉冲引起的所述循环光学微脉冲之间提供至少 50％的空间交迭，以及

所述光学宏脉冲中的所注入的光学微脉冲与由所述光学宏脉冲引起的所述循环光学微脉冲在 ±45° 的光学相位内；

将所述循环光学微脉冲聚焦在所述腔的相互作用区中，从而在所述循环光学微脉冲的电场振幅处于或接近其最大值时，所述循环光学微脉冲在所述相互作用区中提供由大于 0.1 的归一化矢势表征的光学波动器场；

将包括一电子微脉冲系列的电子束导向所述腔中的所述相互作用区；

使所述电子微脉冲的至少一部分与所述腔中的所述循环光学微脉冲同步；以及

将所述电子束聚焦在所述腔中的所述相互作用区，使得至少一个所述电子微脉冲与所述相互作用区中的所述光学波动器场相互作用，并生成光学频率比所述激光辐射的光学频率更高的电磁辐射。

2. 一种生成高能电磁辐射的方法，所述方法包括：

在共振光学腔中生成光学波动器场，其中：

所述光学波动器场由在所述腔中循环并聚焦在相互作用区中的光学微脉冲在所述相互作用区中提供；以及

所述光学波动器场由在所述腔的所述相互作用区中大于 0.1 的归一化矢势表征；

在其一个分量沿与所述光学微脉冲传输通过所述相互作用区的方向相反之方向的方向上，将电子微脉冲的电子束导向所述腔的所述相互作用区；以及

将所述电子束聚焦在所述腔的所述相互作用区，其中所述电子微脉冲与所述光学波动器场相互作用、并生成光学频率比提供所述波动器场的循环光学微脉冲的光学频率更高的电磁辐射。

3. 一种生成高能电磁辐射的方法，所述方法包括，在多个独立辐射间隔的每一个期间：

向光学腔注入激光辐射，其中：

所述激光辐射包括间隔开的光学微脉冲，

所述间隔开的光学微脉冲的至少一部分引起在所述腔中循环的一个或多个光学微脉冲，

所述间隔开的光学微脉冲被间隔和定相，使得至少一部分所注入的光学微脉冲相干增强所述腔中的循环光学微脉冲，以及

所述腔中任何给定位置处的每个循环光学微脉冲的电场振幅在所述辐射间隔期间达到最大值；

将每个循环光学微脉冲聚焦在所述腔的相互作用区，从而对于至少一个循环光学微脉冲，当该循环光学微脉冲的所述电场振幅处于或接近其最大值时，该循环光学微脉冲在所述相互作用区中提供由大于 0.1 的归一化矢势表征的光学波动器场；

将电子束导向所述腔的所述相互作用区，其中所述电子束包括相间隔的电子微脉冲；

使所述电子微脉冲与一个或多个所述循环光学微脉冲同步；以及

将所述电子束聚焦在所述腔中的所述相互作用区，以与所述相互作用区中的所述光学波动器场相互作用、并生成光学频率比提供所述波动器场的所述循环光学微脉冲的光学频率更高的电磁辐射。

4. 一种生成高能电磁辐射的方法，所述方法包括，在有限辐射间隔期间：

向其中有一个或多个光学微脉冲循环的光学腔中注入激光辐射，其中：

所注入激光辐射的至少一部分具有由至少一个相间隔光学微脉冲系列表征的时间依赖性，所述光学微脉冲由光学微脉冲持续时间、光学微脉冲相位、光学微脉冲光学频率和光学微脉冲周期来表征，

所述光学微脉冲周期实质上等于光学微脉冲在所述光学腔中完成单次往返传播的时间间隔或者是所述时间间隔的精确整数倍，

所述光学微脉冲光学频率实质上是所述光学微脉冲周期的倒数的精确整数倍，以及

在所述辐射间隔期间，至少一个循环光学微脉冲的电场振幅被所注入的光学微脉冲的至少一部分相干增强、并且对于所述腔中的任何给定位置在该辐射间隔期间达到最大值，

将每个循环光学微脉冲聚焦在所述腔的相互作用区，从而对于至少一个循环光学微脉冲，当该循环光学微脉冲的电场振幅处于或接近其最大值时，该循环光学微脉冲在所述相互作用区中提供由大于 0.1 的归一化矢势表征的光学波动器场；

将电子束导向所述腔的所述相互作用区，其中：

所述电子束的至少一部分具有由相间隔电子微脉冲表征的时间依赖性，

所述电子微脉冲由电子微脉冲持续时间和电子微脉冲重复频率来表征，以及

所述电子微脉冲的至少一部分与所述循环光学微脉冲同步；以及

将所述电子束聚焦在所述腔的所述相互作用区，使得至少一个电子微脉冲与所述相互作用区中的所述光学波动器场相互作用、并生成光学频率比激光辐射的光学频率更高的电磁辐射。

5. 如权利要求 1 所述的方法，其特征在于，给定光学宏脉冲中的所注入的光学微脉冲与由所述给定光学宏脉冲引起的所述循环光学微脉冲在 ±20° 的光学相位内。

6. 如权利要求 1 所述的方法，其特征在于，一个光学微脉冲的起始与下一个光学微脉冲的起始之间的间距相当充分地接近于所述给定波长辐射的往返传播时间或所述往返传播时间的精确整数倍，以提供注入的光学微脉冲与由所述光学宏脉冲引起的所述循环光学微脉冲之间至少 90％的空间交迭。

7. 如权利要求 1 或 2 或 3 或 4 所述的方法，其特征在于，所述光学波动器场的所述归一

化矢势在 0.1-0.5 的范围内，使得所生成的电磁辐射高度单色。

8. 如权利要求 1 或 2 或 3 或 4 所述的方法，其特征在于，所述相互作用区中的所述光学波动器场由 1.0-2.5 范围内的归一化矢势表征，使得所生成的电磁辐射是相对宽带的。

9. 如权利要求 1 或 2 或 3 或 4 所述的方法，其特征在于，对于至少大部分所述辐射间隔，所述辐射由具有等间隔光学微脉冲的单个光学宏脉冲构成。

10. 如权利要求 1 所述的方法，其特征在于，所述光学宏脉冲中的所有所述光学微脉冲都间隔开相同整数倍的往返传播时间。

11. 如权利要求 1 所述的方法，其特征在于，所述光学宏脉冲中的所述光学微脉冲的至少一部分间隔开不同整数倍的往返传播时间。

12. 如权利要求 3 或 4 的方法，其特征在于，在一个或多个辐射间隔期间，基本上所有的所述光学微脉冲都被等距离间隔开。

13. 如权利要求 1 所述的方法，其特征在于，

所述激光辐射包括一附加的光学宏脉冲系列；

每个附加宏脉冲引起一附加的循环光学微脉冲；

所述附加系列中的每个光学宏脉冲包括特征是一个光学微脉冲的起始与下一个的起始之间的间距充分接近所述给定波长辐射的往返传播时间或所述往返传播时间的精确整数倍的光学微脉冲系列，以提供注入光学微脉冲与由所述光学宏脉冲引起的所述循环光学微脉冲之间至少 50％的空间交迭，以及

所述附加光学宏脉冲的光学微脉冲与所述第一次提到的光学宏脉冲系列的所述光学微脉冲交错。

14. 如权利要求 13 所述的方法，其特征在于，

所述第一次提到的光学宏脉冲的所述光学微脉冲被等距离间隔开；

所述附加光学宏脉冲中的所述光学微脉冲具有与所述第一次提到的光学宏脉冲中的所述光学微脉冲相等的间距；以及

所述宏脉冲被交错，使得所述光学宏脉冲之一中在所述光学宏脉冲的另一个的两个连续光学微脉冲之间的每个光学微脉冲在所述两个连续光学微脉冲之间被等距离间隔开。

15. 如权利要求 13 所述的方法，其特征在于，

所述第一次提到的光学宏脉冲的所述光学微脉冲被等距离间隔开；

所述附加光学宏脉冲中的所述光学微脉冲具有与所述第一次提到的光学宏脉冲中的所述光学微脉冲相等的间距；以及

所述宏脉冲被交错，使得所述光学宏脉冲之一中在所述光学宏脉冲的另一个的两个连续光学微脉冲之间的每个光学微脉冲在所述两个连续光学微脉冲之间被非等距离地间隔开。

16. 如权利要求 13 所述的方法，其特征在于，所述第一次提到的光学宏脉冲和所述附加光学宏脉冲由不同波长来表征。

17. 如权利要求 13 所述的方法，其特征在于，

所述激光辐射由第一和第二独立激光器生成；以及

所述第一次提到的光学宏脉冲和所述附加光学宏脉冲分别由所述第一和第二独立激光器生成。

18. 如权利要求 3 或 4 所述的方法，其特征在于，每个辐射间隔由单个等距离间隔开的光学微脉冲系列表征。

19. 如权利要求 2 或 3 或 4 所述的方法，其特征在于，

存在多个循环光学微脉冲；以及

每个循环光学微脉冲由入射到所述腔上的独立的等距离间隔开的光学微脉冲系列生成。

20. 如权利要求 19 所述的方法，其特征在于，来自所述不同独立系列的所述光学微脉冲以入射到所述腔上的所述光学微脉冲被等距离间隔开的方式交错。

21. 如权利要求 19 所述的方法，其特征在于，来自所述不同独立系列的所述光学微脉冲以入射到所述腔上的所述光学微脉冲被非等距离间隔开的方式交错。

22. 如权利要求 1 或 2 或 3 或 4 的方法，其特征在于，

所述激光辐射包括多个光学宏脉冲，每个所述光学宏脉冲包括相应的由基本上等于所述腔的往返传播时间或是所述往返传播时间的精确整数倍的相应光学微脉冲周期表征的等距离间隔开的光学微脉冲系列；以及

所述光学宏脉冲的光学微脉冲交错，使得每个宏脉冲引起相应的循环光学微脉冲。

23. 如权利要求 22 所述的方法，其特征在于，所述多个光学宏脉冲的光学微脉冲以所述光学微脉冲被等距离间隔开的方式交错。

24. 如权利要求 22 所述的方法，其特征在于，所述多个光学宏脉冲的光学微脉冲以所述光学微脉冲被非等距离间隔开的方式交错。

25. 如权利要求 1 或 2 或 3 或 4 所述的方法，其特征在于，每个光学宏脉冲包括单个等距离间隔开的光学微脉冲系列。

26. 如权利要求 1 所述的方法，其特征在于，

所述光学微脉冲峰值功率、积分通量和占空比使得所述循环光学微脉冲不通过快速非线性现象损伤所述腔的部件；

在给定辐射间隔上平均的功率和积分通量足够低，从而不对腔部件产生局部热损伤；以及

在跨越至少 100 个辐射间隔的时间间隔上平均的功率和积分通量足够低，从而不对腔部件产生总体热损伤。

27. 如权利要求 1 或 2 或 3 或 4 所述的方法，其特征在于，所述电子束微脉冲和所述循环光学微脉冲在所述相互作用区中具有基本上相等的横向尺寸。

28. 如权利要求 1 或 2 或 3 或 4 所述的方法，其特征在于，给定电子微脉冲与给定循环光学微脉冲相互作用，同时所述循环光学微脉冲基本上包含在所述相互作用区中。

29. 如权利要求 1 或 2 或 3 或 4 所述的方法，其特征在于，所述电子束具有 1-10％的微脉冲占空比。

30. 如权利要求 1 或 2 或 3 或 4 所述的方法，其特征在于，

所述电子束是由微波加速器提供的经聚束的束；

所述电子束具有进一步的由间隔开的电子宏脉冲表征的时间依赖性，其中所述电子宏脉冲由电子宏脉冲持续时间和电子宏脉冲重复频率来表征；以及

每个电子宏脉冲具有由一间隔开的电子微脉冲系列表征的时间依赖性。

31. 如权利要求 30 所述的方法，其特征在于，所述电子聚束对向不超过 10° 的 RF 相位。

32. 如权利要求 1 或 2 或 3 或 4 所述的方法，其特征在于，所述电子束由存储环提供。

33. 如权利要求 1 或 2 或 3 或 4 所述的方法，其特征在于，所述腔包括一个或多个反射镜，并且还包括用于控制以下至少一个的一个或多个元件：

至少一个腔反射镜的同心度；和 / 或

至少一个腔反射镜的横向对准；和 / 或

所述循环光学微脉冲的往返传播时间；和 / 或

所述激光器与所述光学腔的频率匹配。

34. 如权利要求 33 所述的方法，其特征在于，还包括通过所述腔反射镜的平移和 / 或激光反向加热来控制至少一个腔反射镜的同心度。

35. 如权利要求 33 所述的方法，其特征在于，还包括通过在所述光学微脉冲包络的尺度和灵敏度上的反射镜平移来控制所述循环光学微脉冲的往返传播时间。

36. 如权利要求 33 所述的方法，其特征在于，还包括通过所述光波长的分数倍的尺度和灵敏度上的反射镜平移来控制所述激光器与所述光学腔的频率匹配。

37. 如权利要求 1 或 2 或 3 或 4 所述的方法，其特征在于，还包括控制以下的至少一个：

所述激光器的调制频率；和 / 或

所述电子束发生器的调制频率；和 / 或

所述激光辐射的横向对准和时序；和 / 或

所述激光辐射的纵向对准和模式匹配；和 / 或

所述入射电子微脉冲的横向对准和时序；和 / 或

来自所述激光器的所述光学微脉冲与来自所述电子束发生器的所述入射电子微脉冲的同步。

38. 一种控制光学腔使得入射到所述腔上的至少一部分光脉冲相干增强在所述腔中循环的一个或多个光脉冲的方法，所述腔具有至少第一和第二曲面反射镜，所述曲面反射镜的每一个由焦点表征，其中从所述焦点发散并入射到该反射镜上的辐射被反射并聚焦到所述焦点上，所述方法包括：

控制光脉冲重复周期和腔光学长度的至少之一，以规定入射到所述腔上的至少某些给定波长光脉冲具有基本上等于对于所述给定波长辐射的腔的往返传播时间或是所述往返传播时间的整数倍的脉冲重复周期；以及

控制所述曲面反射镜中至少之一的焦点，使得所述第一和第二曲面反射镜的焦点基本上重合，对所述焦点的所述控制独立于对光脉冲重复周期和腔光学长度的所述控制；

由此至少一部分入射光脉冲相干增强一个或多个循环光脉冲，且所述一个或多个循环光脉冲被聚焦到所述共同焦点。

39. 如权利要求 38 所述的方法，其特征在于，对所述焦点的所述控制包括：

在所述光学腔中所述曲面反射镜之一与该曲面反射镜的焦点之间设置一透光板；以及

控制所述透光板的倾斜角以允许该曲面反射镜焦点的位置根据所述倾斜角移置。

40. 如权利要求 38 所述的方法，其特征在于，对所述焦点的所述控制包括：

提供使所述曲面反射镜之一变形以改变其曲率的机构；以及

控制所述机构以允许所述曲面反射镜焦点的位置根据变形程度移置。

41. 一种生成高能电磁辐射的方法，所述方法包括：

在一间隔开的辐射间隔系列期间发生激光辐射的情况下向光学腔中注入给定波长的辐射，其中每个辐射间隔包括引起一个或多个相应循环光学微脉冲的一个或多个间隔开的光学微脉冲序列；

将每个循环光学微脉冲聚焦到所述腔的相互作用区，同时允许所述循环光学微脉冲在遇到腔部件之前从所述相互作用区发散；

其中：

所述辐射间隔由辐射间隔持续时间和辐射间隔重复频率来表征，

在多个所述辐射间隔上所述辐射间隔的平均功率足够低以不造成所述腔部件的不可校正的热变形，

每个辐射间隔期间的积分通量足够低以不对所述腔部件造成局部热损伤；

每个光学微脉冲序列由光学微脉冲持续时间和光学微脉冲周期来表征，每个循环光学微脉冲被所述光学微脉冲序列中的后续光学微脉冲相干增强，并且在所述腔中任何给定位置处所述循环光学微脉冲的电场振幅在所述辐射间隔期间达到最大值，

当所述循环光学微脉冲的所述电场振幅处于或接近其最大值时，所述循环光学微脉冲在所述相互作用区中提供具有由 0.1 以上的归一化矢势表征的所需振幅的光学波动器场，以及

所述循环光学微脉冲的发散角以及所述相互作用区与最近腔部件的距离足够大，使得任何给定腔部件处的微脉冲强度和积分通量并不由于热或快速非线性现象造成不可接受程度的可逆或不可逆的降级；

将包括一电子微脉冲系列的电子束导向所述腔的所述相互作用区；

使所述电子微脉冲与所述腔中的至少一个循环光学微脉冲同步；以及

将所述电子束聚焦到所述腔的所述相互作用区，以与所述相互作用区中的所述光学波动器场相互作用、并生成光学频率高于激光辐射光学频率的电磁辐射。

42. 如权利要求 41 所述的方法，其特征在于，所述波动器场由在 0.1-0.5 范围内的归一化矢势表征，使得所生成的电磁辐射高度单色。

43. 如权利要求 41 所述的方法，其特征在于，所述波动器场由在 1.0-2.5 范围内的归一化矢势表征，使得所生成的电磁辐射是相对宽带的。

44. 如权利要求 41 所述的方法，其特征在于，注入到所述腔中的所述光学微脉冲序列使其光学相位保持在所述循环光学微脉冲的相位的 20 度之内，以增强所述光学微脉冲序列对所述循环光学微脉冲的相干增强。

45. 如权利要求 41 所述的方法，其特征在于，注入到所述腔中的所述光学微脉冲序列具有保持在与对于所述给定波长辐射的腔的往返传播时间或所述腔的往返传播时间的整数倍相距所述循环光学微脉冲持续时间的 10％之内的光学微脉冲重复周期，以增强所述光学微脉冲序列对所述循环光学微脉冲的相干增强。

46. 一种用于生成高能电磁辐射的设备，所述设备包括：

光学腔，具有间隔开使注入到所述腔中的辐射在其间循环并被聚焦到相互作用区的至少两个凹面反射器，所述腔由给定波长的辐射的往返传播时间表征；

激光器系统，将由给定波长表征的激光辐射引导到所述腔中，在多个间隔开的辐射间隔的每一个期间，对于至少一个辐射间隔：

所述激光辐射包括一个或多个光学宏脉冲，

至少一个光学宏脉冲包括一光学微脉冲系列，所述光学微脉冲系列的特征是一个光学微脉冲的起始与下一个的起始之间的间距足够接近给定波长的辐射的往返传播时间或所述往返传播时间的精确整数倍，使得至少一个光学宏脉冲引起被所述光学宏脉冲中的后续光学微脉冲相干增强的循环光学微脉冲，从而在所述腔的任何给定位置处的所述循环光学微脉冲的振幅在所述辐射间隔期间达到最大值，其中相干增强由所述循环光学微脉冲与所述光学宏脉冲中的后续光学微脉冲之间至少 50％的空间交迭来表征，以及

将每个循环光学微脉冲聚焦到所述腔的所述相互作用区，从而在该循环光学微脉冲的电场振幅处于或接近其最大值时，该循环光学微脉冲在所述相互作用区中提供由大于 0.1 的归一化矢势表征的光学波动器场；以及电子束发生器，提供导向所述腔中所述相互作用区的电子束，其中：

所述电子束具有由间隔开的电子微脉冲表征的时间依赖性，

所述电子微脉冲与至少一个循环光学微脉冲同步，以及

所述电子束发生器将所述电子束聚焦到所述腔的所述相互作用区，以与所述相互作用区中的所述光学波动器场相互作用、并生成光学频率高于激光辐射光学频率的电磁辐射。

47. 一种生成高能电磁辐射的设备，所述设备包括：

共振光学腔，具有相互作用区；

用于在间隔开的辐射间隔系列期间，通过建立在所述腔中循环并聚焦到所述相互作用区的一个或多个光学微脉冲来在所述相互作用区中生成光学波动器场的装置，其中所述光学波动器场由所述腔的所述相互作用区中的大于 0.1 的归一化矢势来表征；

用于提供电子微脉冲的电子束，并在其分量沿与所述一个或多个光学微脉冲传输通过所述相互作用区的方向相反之方向的方向上，将所述电子微脉冲导向所述腔的所述相互作用区的装置；以及

用于将所述电子束聚焦在所述腔的所述相互作用区的装置，其中所述电子微脉冲与所述光学波动器场相互作用、并生成光学频率比提供所述波动器场的循环的光学微脉冲的光学频率更高的电磁辐射。

48. 一种用于生成高能电磁辐射的设备，所述设备包括：

提供激光辐射的激光器系统，其中：

所述激光辐射包括由辐射间隔持续时间和辐射间隔重复频率表征的间隔开的辐射间隔系列，以及

每个辐射间隔包括一个或多个间隔开的光学微脉冲系列；

光学腔，设置在所述激光辐射的光路上从而在每个辐射间隔期间微脉冲被注入到所述腔中并在其中循环，其中：

所述腔具有使每个注入光学微脉冲相干增强所述腔中的循环光学微脉冲的光学长度，从而在每个辐射间隔期间每个循环光学微脉冲的电场振幅在腔内达到最大功率，以及

所述腔将每个循环微脉冲聚焦到所述腔的相互作用区，从而在该光学微脉冲的电场振幅处于或接近其最大功率时，该循环光学微脉冲在所述相互作用区中提供由大于 0.1 的归

一化矢势表征的光学波动器场；

电子束发生器，提供导向所述腔中的所述相互作用区的电子束，其中：

所述电子束具有由间隔开的电子微脉冲表征的时间依赖性，

所述电子微脉冲的至少一部分与循环光学微脉冲同步，以及

所述电子束发生器将所述电子束聚焦到所述腔的所述相互作用区，使得所述电子微脉冲的至少一部分与所述相互作用区中的所述光学波动器场相互作用、并生成光学频率高于激光辐射光学频率的电磁辐射。

49. 如权利要求 46 所述的设备，其特征在于，

所述一个或多个光学宏脉冲包括被称为第一次提到的光学宏脉冲的所述至少一个光学宏脉冲以及附加光学宏脉冲；

所述附加光学宏脉冲引起一附加循环光学微脉冲；

所述附加光学宏脉冲包括特征是一个附加光学微脉冲周期的起始与下一个的起始之间的间距充分接近所述给定波长辐射的往返传播时间或所述往返传播时间的精确整数倍的间隔开的附加光学微脉冲系列，以提供注入光学微脉冲与由所述附加光学宏脉冲引起的所述循环光学微脉冲之间至少 50％的空间交迭，以及

所述附加光学宏脉冲的光学微脉冲与所述第一次提到的光学宏脉冲系列的所述光学微脉冲交错。

50. 如权利要求 49 所述的设备，其特征在于，

所述第一次提到的光学宏脉冲的所述光学微脉冲被等距离间隔开；

所述附加光学微脉冲被等距离间隔开；以及

所述第一次提到的光学宏脉冲和所述附加光学宏脉冲被交错，使得这些光学宏脉冲之一中在这些光学宏脉冲的另一个的两个连续光学微脉冲之间的每个光学微脉冲在所述两个连续光学微脉冲之间被等距离间隔。

51. 如权利要求 49 所述的设备，其特征在于，

所述第一次提到的光学宏脉冲的所述光学微脉冲被等距离间隔开；

所述附加光学微脉冲被等距离间隔开；以及

所述第一次提到的光学宏脉冲和所述附加光学宏脉冲被交错，使得这些光学宏脉冲之一中在这些光学宏脉冲的另一个的两个连续光学微脉冲之间的每个光学微脉冲在所述两个连续光学微脉冲之间被非等距离地间隔开。

52. 如权利要求 49 所述的设备，其特征在于，所述第一次提到的光学宏脉冲和所述附加光学宏脉冲由不同波长来表征。

53. 如权利要求 49 所述的设备，其特征在于，

所述激光器系统包括第一和第二独立激光器；以及

所述第一次提到的光学宏脉冲和所述附加光学宏脉冲分别由所述第一和第二独立激光器生成。

54. 如权利要求 46 所述的设备，其特征在于，所述激光辐射包括多个光学宏脉冲，每个光学宏脉冲包括由基本上等于所述腔的往返传播时间或所述往返传播时间的精确整数倍的相应光学微脉冲周期表征的一等距离间隔开的光学微脉冲系列，所述光学宏脉冲的光学微脉冲被交错使得每个宏脉冲引起相应的循环光学微脉冲。

55. 如权利要求 54 所述的设备，其特征在于，所述多个光学宏脉冲的所述光学微脉冲以所述光学微脉冲被等距离间隔开的方式交错。

56. 如权利要求 54 所述的设备，其特征在于，所述多个光学宏脉冲的所述光学微脉冲以所述光学微脉冲被非等距离间隔开的方式交错。

57. 如权利要求 46 或 47 或 48 所述的设备，其特征在于，所述腔包括一个或多个反射镜，并且还包括用于控制以下的至少一个的一个或多个元件：

至少一个腔反射镜的同心度；和 / 或

至少一个腔反射镜的横向对准；和 / 或

所述循环光学微脉冲的往返传播时间；和 / 或

所述激光与所述光学腔的频率匹配。

58. 如权利要求 57 所述的设备，其特征在于，所述腔包括用于通过所述腔反射镜的平移和 / 或激光反向加热来控制至少一个腔反射镜的同心度的一个或多个元件。

59. 如权利要求 57 所述的设备，其特征在于，所述腔包括用于通过在所述光学微脉冲包络的尺度和灵敏度上的反射镜平移来控制所述循环光学微脉冲的往返传播时间的一个或多个元件。

60. 如权利要求 57 所述的设备，其特征在于，所述腔包括用于通过在所述光波长的分数倍的尺度和灵敏度上的反射镜平移来控制所述激光与所述光学腔的频率匹配的一个或多个元件。

61. 如权利要求 46 或 47 或 48 所述的设备，其特征在于，还包括控制以下的至少一个：

所述激光器的光学微脉冲重复频率；和 / 或

所述电子束发生器的电子微脉冲频率；和 / 或

所述激光辐射的横向对准和时序；和 / 或

所述激光辐射的纵向对准和模式匹配；和 / 或

所述入射电子微脉冲的横向对准和时序；和 / 或

来自所述激光器系统的所述光学微脉冲与来自所述电子束发生器的所述入射电子微脉冲的同步。

62. 如权利要求 47 或 48 所述的设备，其特征在于，每个辐射间隔由单个等距离间隔开的光学微脉冲系列构成，由此在该辐射间隔期间引起单个循环光学微脉冲。

63. 如权利要求 47 或 48 所述的设备，其特征在于，

每个辐射间隔包括多个等距离间隔开的光学微脉冲系列；

每个光学微脉冲系列由基本上等于所述腔的往返传播时间或是所述往返传播时间的精确整数倍的光学微脉冲周期来表征；以及

每个光学微脉冲系列引起相应的单个循环光学微脉冲。

64. 如权利要求 46 或 47 或 48 所述的设备，其特征在于，

所述光学微脉冲峰值功率、积分通量和占空比使得所述循环光学微脉冲不通过快速非线性现象损伤所述腔的部件；

在给定辐射间隔上平均的功率和积分通量足够低以不对腔部件产生局部热损伤；以及

在跨越至少 100 个辐射间隔的时间间隔上平均的功率和积分通量足够低以不对腔部件产生总体热损伤。

65. 如权利要求 46 或 47 或 48 所述的设备，其特征在于，所述电子束微脉冲和所述循环光学微脉冲在所述相互作用区中具有基本上相等的横向尺寸。

66. 如权利要求 46 或 47 或 48 所述的设备，其特征在于，给定电子微脉冲与给定循环光学微脉冲相互作用，同时所述循环光学微脉冲基本上包含在所述相互作用区中。

67. 如权利要求 46 或 47 或 48 所述的设备，其特征在于，所述电子束具有 1-10％的微脉冲占空比。

68. 如权利要求 46 或 47 或 48 所述的设备，其特征在于，

所述电子束是由微波加速器提供的经聚束的束；

所述电子束具有由间隔开的电子宏脉冲表征的进一步时间依赖性，其中所述电子宏脉冲由电子宏脉冲持续时间和电子宏脉冲重复频率来表征；以及

每个电子宏脉冲具有由间隔开的电子微脉冲系列表征的时间依赖性。

69. 如权利要求 30 所述的设备，其特征在于，所述电子聚束对向不超过 10° 的 RF 相位。

70. 如权利要求 46 或 47 或 48 所述的设备，其特征在于，所述电子束由存储环提供。

使用光学波动器的高效单色 X 射线源

[0001] 相关申请的交叉引用

[0002] 本申请要求 2005 年 6 月 2 日提交的美国专利申请 No.60/678,014 的 35U.S.C. §119(e) 的权益，该申请通过引用整体结合于此。

[0003] 发明背景

[0004] 本发明一般涉及 x 射线以及其它高能电磁辐射（短波长）的产生，尤其涉及用于将相对论电子与具有相对较长波长的电磁辐射相互作用以生成短波长电磁辐射。

[0005] 基于电子束的电磁辐射源采用波动器来生成强烈、近单色、前向峰值 (forwardpeaked) 辐射束的独特能力已经使波动器成为诸如第二代和第三代同步加速器辐射源和自由电子激光器的先进光源的关键部件。因此，在文献中有很多对波动器技术和波动器使用的引用，从 Motz 对其概念、以及在 Stanford（斯坦福）的第一次演示的开拓性描述 (Motz 1951)，到对其概念及其与自由电子激光器 (Madey 1971) 的开发和在 Brookhaven（布鲁克海文）国家实验室 (Decker 1996)、劳伦斯伯克利实验室 (Robinson 1991)、斯坦福线性加速器中心 (Hettel 2002) 和阿汞国家实验室 (Galayda 1995) 开发的第二代同步加速器辐射源相关的实现的许多出版物描述。

[0006] 迄今为止构建的几乎所有这种系统都使用构建成二极磁体线性阵列的波动器，该二极磁体线性阵列被设计成创建一静态、横向、空间周期性磁场，其中洛伦茨力的磁场分量 ev x B 对电子穿过磁场的运动施加周期性的横向加速度和周期性的横向速度。典型的磁体周期从略小于 1cm 到 10cm 的量级，这取决于所需辐射的波长和在该系统中可用的电子束的能量。为了最大化所辐射的功率同时将发射限制成谐波，这些系统通常在 0.1-1.0 之间的量级上的归一化矢势 a_n 下操作。典型的波动器长度按实现光谱带宽所需为从 1 至 10 米。作为示例，被设计成在 3.0GeV 的电子能量和具有最小角发散的电子束的情况下产生光谱带宽为 1％、波长为 10 埃 x 射线的、在 $a_n^2 = 0.2$ 下操作的波动器具有 5.7cm 的周期和 3 米的长度。

[0007] 用于这种系统的波动器的延长长度以及需要产生操作所需的高能、高功率电子束的加速器系统的尺寸、成本和复杂性使这种光源在物理上庞大且昂贵。作为示例，布鲁克海文、劳伦斯伯克利实验室、斯坦福和阿汞的 X 射线光源分别具有 54、63、75 和 350 米的直径，构建成本为从 1.60 亿美元到 5.00 亿美元。

[0008] 相关物理现象 - 逆康普顿散射也已作了研究，作为在同步加速器辐射源 (Ruth1998,Ruth 2000 和 Harteman 2004) 和自由电子激光器 (Elias 1979) 中产生短波电磁辐射的手段。该逆康普顿机制将两个基本物理效应相组合，即入射电磁波被单个电子散射的康普顿散射、以及由运动电荷发射的辐射沿运动方向频率上移的多普勒频移。

[0009] 然而，文献中 (Heitler 1960) 中描述的康普顿散射的概念只能在该机制可被描述为单光子散射的情况下应用，并且在入射电磁波的电场和磁场强得足以引入接近光速的横向速度的情况下（例如在其归一化矢势接近 1 的情况下）不再有效。将此限制加于给定的低场振幅以及所辐射的功率对场振幅平方的依赖性，基于电子束的逆康普顿光源尚未被证明与迄今为止的基于波动器的光源有竞争力。

[0010] 发明概述

[0011] 在本发明的一个方面，生成高能电磁辐射的方法包括：在多个分离辐射间隔的每一个期间向光学腔中注入给定波长的激光辐射，该光学腔由给定波长辐射的往返传播时间(RTTT)表征。至少某些辐射间隔由一个或多个光学宏脉冲来定义，至少一个光学宏脉冲引起由该光学宏脉冲中的后续光学微脉冲相干增强的关联循环光学微脉冲，并且腔中任何给定位置处的循环光学微脉冲的电场振幅在辐射间隔期间达到最大值。

[0012] 使用术语“激光器”是因为激光器代表当前唯一的实用（就功率而言）相干辐射源。如果有新发现的相干光源证明可用，则术语“激光器”应该旨在涵盖这种源。

[0013] 在本方法中，引起循环光学微脉冲的至少一个光学宏脉冲由光学微脉冲系列构成，该光学微脉冲系列的特征在于一个光学微脉冲的起始与下一个的起始之间的间距足够接近给定波长辐射的 RTTT 的精确整数倍（包括 1 倍），从而在所注入光学微脉冲与由光学宏脉冲引起的循环光学微脉冲之间提供至少 50％的空间交迭，并且所注入的光学微脉冲的特征在于光学宏脉冲与由该光学宏脉冲引起的光学微脉冲在 ±45° 的光学相位内。

[0014] 该方法还包括将循环微脉冲聚焦在腔的相互作用区中，从而当循环光脉冲的电场振幅处于或接近其最大值时循环光学微脉冲在相互作用区中提供由大于 0.1 的归一化矢势表征的光学波动器场，并且将包括电子微脉冲系列的电子束导向腔中的相互作用区。将电子微脉冲中的至少一部分与腔中的循环光学微脉冲同步，并且将电子束聚焦在腔中的相互作用区，从而至少一个电子微脉冲与相互作用区中的光学波动器场相互作用，并生成光学频率比激光辐射的光学频率更高的电磁辐射。

[0015] 根据本发明的一个方面，与基于波动器的同步加速器辐射源的流生成时所能达到的性能可比的性能水平下的操作可使用一光学波动器来获得，该光学波动器即归一化矢势升高到 0.1 或更高量级的强烈光脉冲系列，在该 0.1 或更高量级的值的范围中由相对论电子运动通过该脉冲系列而引起的紫外线、x 射线和伽吗射线辐射得到优化。但是与在该归一化矢势下操作的永磁体波动器不同，在这种光学波动器中每单位长度辐射的 x 射线功率大 10,000 量级倍。

[0016] 同样重要的是，这种源的操作所需的电子能量减小同一倍数的平方根，从而使尺寸、成本和操作花费的极为显著减小成为可能。最终，与基于使用磁学波动器的短波辐射源不同，更改包括连续辐射间隔上光学波动器的光脉冲序列的波长和格式的能力使得在生成使用所需的单色和多色 x 射线脉冲时实现通过使用常规磁性波动器所无法达到的一定程度的灵活性成为可能。

[0017] 近同心光学腔的光学属性使得通过集合从一个或多个低功率泵浦激光器注入腔中的光功率、并且将所累积的能量在腔内真空中聚焦成小光斑来生成操作本发明所需的强烈光脉冲成为可能。通过适当的设计，在腔内表面处的峰值光功率密度和积分通量被衍射降低到与那些表面的峰值功率损伤阈值一致的水平上。通过对泵浦激光器向腔中注入光功率的时间间隔进行限制，可将入射到这些表面上的积分通量和平均光功率进一步保持在积分脉冲和平均功率损伤阈值之下。

[0018] 就术语而言，为方便起见，将注入到或存储在光学腔中的各个光脉冲称为光学微脉冲，而将向光学腔中注入这种光学微脉冲所占用的间隔称为辐射间隔。因此，入射到腔上的激光辐射具有由两个不同时间尺度－即辐射间隔时间尺度和微脉冲时间尺度－表征的分

层脉冲结构。如下所述，该系统和方法被配置成使向腔中注入的光学微脉冲相干增强在腔中循环的光学微脉冲，进而使给定循环光脉冲的振幅增大。

[0019] 在本申请中，在相干增强循环光学微脉冲的注入光学微脉冲的上下文中的术语“相干增强”将被用于表示注入光学微脉冲和循环光学微脉冲的振幅累加。这在两者彼此处于精确光学相位中的情况下发生，但是该术语还考虑了从零相位差的可能程度的偏离。类似地，该术语考虑了从注入光学微脉冲和循环光学微脉冲的包络（宽度和到达时间）之间100％交迭的可能偏离。

[0020] 例如，在一代表性实施方式中，注入光学微脉冲的相位与循环光学微脉冲的相位之间 ±20 度的相位差仍然会提供相对有效的增强。类似地，注入微脉冲的包络与循环微脉冲包络之间的 10％循环微脉冲宽度的非交迭仍然会提供相对有效的增强。

[0021] 因此，通过将注入微脉冲的相位保持在循环存储微脉冲相位的 ±20％以内，以及将注入微脉冲包络的时间宽度和到达时间保持在循环光学微脉冲宽度的 10％以内，实现有效的增强。然而，“相干增强”的定义是宽得足以包括接近 ±45° 量级上极限的相位差、以及在光学微脉冲持续时间的 ±50％量级上的非交迭，即使这会对同一 a_n 值导致较低的注入效率和较高的注入光学微脉冲功率。

[0022] 每当循环光学微脉冲被注入光学微脉冲相干增强时，循环光学微脉冲的振幅增大。然而，在一次往返之后，循环光学微脉冲的振幅会因腔损耗而减小。只要一个往返的腔损耗小于因相干增强的增大，循环光学微脉冲的振幅就会继续增长。由于镜面损耗按百分比与入射光功率成正比，所以振幅越大，损耗越大。在某一点上，腔损耗将会等于相干增强的量，并且循环光学微脉冲的振幅会停止增长。当然，一旦光学宏脉冲结束，循环光学微脉冲的振幅会开始衰减。

[0023] 在本申请中，术语“光学宏脉冲”用于表示辐射间隔内的一系列微脉冲，该辐射间隔的特征在于在一个光学微脉冲的起始与下一脉冲的起始之间的间距基本上等于光学微脉冲在光学腔中作单次往返传播的时间间隔的精确整数倍（包括 1 倍）。该往返传播时间间隔称为“RTTT”。通过该定义，单个给定光学宏脉冲由相干增强（受限于其它可能约束）单个循环光学微脉冲的一系列光学微脉冲构成。光学微脉冲通常具有基本上相等的持续时间。

[0024] 应该注意，该定义不要求光学宏脉冲中的所有光学微脉冲是等距间隔的。相反，光学宏脉冲中的一个光学微脉冲可与其前一光学微脉冲隔开 RTTT 的第一整数倍，而光学宏脉冲中的另一光学微脉冲可与其前一光学微脉冲隔开 RTTT 的第二整数倍，其中第二整数倍不同于 RTTT 的第一整数倍。大多数实施方式将由具有等距间隔的光学微脉冲的光学宏脉冲来表征，但这对循环光学微脉冲的相干增强并非是必要的。

[0025] 其推论是：如果两个光学微脉冲被非 RTTT 的整数倍隔开，则它们属于不同的光学宏脉冲（或者其一或两者不是一光学宏脉冲的一部分）。例如，如果正向腔中注入的光学微脉冲被 1/2 往返传播时间隔开，则这被视为包括两个交迭光学宏脉冲，其相应光学微脉冲交错。受限于其它可能的约束，向腔中注入这两个光学宏脉冲会导致两个不同循环光学微脉冲的相干增强。换言之，光学宏脉冲的定义导致光学宏脉冲中的光学微脉冲会相干增强同一循环光学微脉冲的结果。可以描述其它示例，其中两个交迭的光学宏脉冲以任意相关延时交错。

[0026] 可能存在诸如特定诊断应用的实例，其中需要注入不满足任何特定时序限制并且不相干增强任何循环光学微脉冲的一个或多个光学微脉冲。这些可被视为孤立光学微脉冲，因为它们不属于一个光学宏脉冲。注意，光学宏脉冲的持续时间可与辐射间隔的持续时间基本上相同，或者比辐射间隔短。在光学宏脉冲的持续时间比辐射间隔短的情况下，暗示了可能存在不是该光学宏脉冲一部分的其它光学微脉冲。这种其它光学微脉冲可属于一个或多个其它光学宏脉冲，或者可以是这种单独的孤立光学微脉冲。

[0027] 本发明的各个实施方式利用入射到光学腔上的泵浦激光器光学微脉冲相干增强光学腔中循环光学微脉冲的能力。相干增强可通过确保注入光学微脉冲的时间模式包括一个或多个光学宏脉冲来实现，其中每个光学宏脉冲由一个或多个光学微脉冲间隔表征，且每个光学微脉冲间隔基本上是 RTTT 的精确整数倍 m（包括 1x，即包括 m ＝ 1）。光学频率基本上是 RTTT 倒数（由 c 来标度）的精确整数倍 n，所以光学频率是 n 除以 (m 乘以 RTTT)。如上所述，具有不同周期或相同周期的多个系列可以交错。

[0028] 一旦注入到腔中，每个光学微脉冲在腔中循环，并且注入到腔中的同一光学宏脉冲的每个后续光学微脉冲相干增强给定光学宏脉冲中先前光学微脉冲所引起的循环微脉冲。可以看到，本发明的操作一方面要求注入功率足以用 0.1 或更高量级的归一化矢势来实现存储光学微脉冲的多个微脉冲，同时将宏脉冲的持续时间以及因此注入微脉冲的数量限制于与腔的内表面的积分脉冲和平均功率损伤阈值相一致的值。

[0029] 作为示例，光学微脉冲的持续时间可以在 1-10ps（皮秒）的量级上，而光学微脉冲的重复率通常在 GHz 范围内 (1GHz[L 波段] 至 10GHz[X 波段]；在具体示例中为 2.86GHz)。辐射间隔持续时间可以在 1-10μs（微秒）的量级上，并且辐射间隔重复率在 10-100Hz 或者更低或更高的量级上。这对应于 0.1-0.001 范围内的微脉冲占空比，以及 0.00001-0.001 范围内的辐射间隔占空比。因此，术语“辐射间隔”、“宏脉冲”和“微脉冲”是在相对意义上使用的。在具体示例中，辐射间隔持续时间和典型光学宏脉冲宽度为微秒量级，而光学微脉冲宽度为皮秒量级。

[0030] 假设使用可被预编程为逐次发射 (shot) 地改变其激射波长和 / 或光学宏脉冲时序的单个泵浦激光器，或者可被触发以产生交迭或交错光学宏脉冲的多个泵浦激光器，本发明还提供在同一辐射间隔期间或独立辐射间隔期间，逐次发射地随意改变 x 射线波长、更改不同的任意可调波长的 x 射线束、或者同时生成多个波长的 x 射线束的装置。

[0031] 这些能力在分析系统和结构时的重要性是明确的，其中这些系统和结构的属性随时间动态变化，从而需要以毫秒、微秒或皮秒时间尺度曝露在许多波长下，以捕捉其保持时间不会长到使用诸如当今在大多数同步加速器辐射实验室中使用的永磁体波动器源的更常规 x 射线源可以成像的瞬时特征。

[0032] 通过结合具有 $a_n \sim 0.1$ 或更高量级上的归一化矢势、但具有微米量级的空间周期的光学波动器，本文所述的本发明可用大小和成本大大减小的波动器和电子束加速器一起操作，从而允许以迄今为止可能成本的一少部分来构建和操作高性能的紫外线和 x 射线光源。

[0033] 虽然许多实施方式将使每个电子微脉冲与循环光学微脉冲之一相互作用，但是并不要求循环光学微脉冲在其每一趟中都与电子微脉冲相互作用。类似地，并不要求每个电子微脉冲都与腔中的循环光学微脉冲相互作用。这实际上可以是这种情况：单个电子束由

多个光学腔共享。而且，注意，不可能对孤立光学微脉冲定时以与电子微脉冲相互作用。

[0034] 虽然本文所述的本发明的具体实施方式涉及生成 x 射线，但是其它实施方式可以生成诸如 EUV 和伽吗射线的在其它波长范围内的电磁辐射。术语高能电磁辐射用于表示波长短于 100nm 的电磁辐射，包括远 UV、极端 UV(EUV)、x 射线和伽吗射线。描述中的大部分是就 x 射线而言的，但是应该理解，除非上下文说明，否则可以包括其它形式的高能电磁辐射。

[0035] 通过参考说明书的剩余部分和附图，可以实现对本发明的本质和优点的进一步理解。

[0036] 附图简要描述

[0037] 图 1A 是根据本发明一实施方式的系统的高级示意图，它示意性地示出在腔的相互作用区中入射电子微脉冲（束）与循环光学微脉冲的相互作用；

[0038] 图 1B 是图 1A 所示系统的更详尽的示意图；

[0039] 图 2A 是时序图，示出 (a) 包含一光学微脉冲系列的一代表性光学宏脉冲，(b) 当入射光学微脉冲相干增强光学腔中的循环光学微脉冲时循环光学微脉冲的振幅的增长方式，以及 (c) 一代表性电子宏脉冲，其中注入电子微脉冲被定时成在腔中存储光功率最大值或接近最大值处进入光学腔；

[0040] 图 2B 示出代表性电子束和激光束宏脉冲时序，其中辐射间隔的占空比被选择成限制时间平均损伤和外形变形；

[0041] 图 3A 和 3B 示意性地示出光学相位相干的概念，其中图 3A 示出入射光学微脉冲从左侧接近腔反射镜而循环光学微脉冲从右侧接近腔反射镜，且图 3B 示出由腔反射镜反射以及透射的入射和循环光学微脉冲的部分；

[0042] 图 4 示意性地示出来自用于建立两个循环光学微脉冲的两个独立激光器的光学微脉冲；

[0043] 图 5 是适于实践本发明实施方式的光学腔的第一配置的示意图；

[0044] 图 6 是适于实践本发明实施方式的光学腔的第二配置的示意图；

[0045] 图 7A 和 7B 是分别使用第一和第二腔配置的实施方式的示意图，示出用于保持入射光学微脉冲、循环光学微脉冲和入射电子微脉冲之间的所需时序关系的代表性控制元件；

[0046] 图 8 是使用辅助光学腔的控制系统的实施方式的示意图；

[0047] 图 9A 和 9B 是在多个光学波动器之间共享单个电子束的可选方法的示意图。

[0048] 具体实施方式的描述

[0049] 基本配置和操作

[0050] 简言之，本发明的实施方式能够生成 x 射线和其它高能电磁辐射（包括紫外线和伽吗射线的短波长）。这些实施方式可提供用于 x 射线结晶学、医学射线照相术和放射疗法、以及其它 x 射线和伽吗射线成像系统，以及用于核物理和高能物理研究中所需的明亮、近单色、高平均功率和峰值功率的 x 射线束。

[0051] 图 1A 是根据本发明一实施方式的代表性系统 10 的主要元件的高级示意图。该系统的主要元件包括诸如脉冲电子束加速器 20 的电子源、诸如锁模泵浦激光器（或多个泵浦激光器）25 的脉冲光源、以及用作光学共振腔的光学腔 30。腔 30 被示意地示为包括相对的

凹面反射镜 32 和 35。简言之，来自加速器 20 的一聚焦电子微脉冲系列 40 被驱使与光学波动器场在腔 30 中的相互作用区 45 处相互作用以生成高能电磁辐射。

[0052] 波动器场较佳地通过从激光器 25 向腔 30 中注入辐射 50 以在该腔中建立一个或多个循环光学微脉冲 50 来建立。激光辐射有时称为激光束。该腔被配置成将循环光学微脉冲聚焦在相互作用区 45。如以下更详细描述地，入射辐射中的光学微脉冲被间隔开并同步，使得循环光学微脉冲被入射辐射中的后续光学微脉冲相干增强。这种相互作用的产物是散射的 x 射线（或其它高能电磁辐射）微脉冲 70 和能量减小的电子微脉冲 75。

[0053] 图 1B 是图 1A 所示系统的更详尽示意图。如上所述，该系统用于通过将来自电子加速器 20 的电子微脉冲 40 与存储在光学腔 30 中（示例性地示为凹面反射镜 32 和 35）的一个或多个强烈的相干光学微脉冲 60 碰撞来生成明亮、相干、单色的 x 射线（或者其它电磁辐射）。X 射线生成被局限在相互作用区 45 中，其中光学微脉冲的矢势被控制为保持大于～ 0.1 的 a_n 值。

[0054] 该系统包括连接到控制计算机 80 的多个控制和反馈元件。电子束控件包括电子束传输光学元件和诊断元件 85a、85b 和 85c 以及束位置监视器 87。来自电子加速器 20 的电子束被引导通过电子束传输光学元件和诊断元件 85a 到达在束位置监视器 87 控制下的相互作用区 45，然后由电子束传输光学元件和诊断元件 85b 从输出束移出，并由电子束传输元件和诊断元件 85c 引导进入减速束泵浦 90。

[0055] 所生成的 x 射线微脉冲被引导通过其间设有准直器 100 的 x 射线束诊断元件 95a 和 95b，到达使用该 x 射线的 x 射线试验或其它实体。

[0056] 光束控件包括传输和模式匹配光学元件 105、球度补偿器 110（对于本特定腔实施方式示为倾斜板）、一个或多个光学诊断元件 115 以及一对辐射热源 117 和 120。由泵浦激光器 25（或多个泵浦激光器）生成的光学微脉冲被引导通过传输和模式匹配光学元件 105 进入光学腔 30。球度补偿器 110 被结合到腔光学元件中以确保相互作用区 45 中的紧密聚焦可与光学腔中的相干脉冲堆叠同时实现。在光学腔 30 中循环的光学微脉冲的模式质量和强度由光学诊断元件 115 来监视。辐射热源 117 和 120 经由相应的分束器 122 和 125 被引导到腔反射镜 32 和 37 以补偿存储束的热效应。这种对光学腔 30 的附加水平的几何控制有助于在相互作用区 45 中保持所需的光学矢势 a_n。

[0057] 将来自电子束传输光学元件和诊断元件 85a、85b 和 85c、束位置监视器 87、x 射线束诊断元件 95a 和 95b 以及光学诊断元件 115 的信号发送到控制计算机 80，该计算机使用这些信号来控制电子束传输光学元件和诊断元件 85a、85b 和 85c、传输和模式匹配光学元件 105、球度补偿器 110 以及辐射热源 117 和 120。

[0058] 图 2A 是时序图，它示意性地示出对于图 1A 和 1B 的系统操作过程中给定循环光学微脉冲的一部分时序关系。以下将描述微脉冲时序的细节，但是在这一点上注意，入射辐射的总体时间轮廓包括一间隔光学宏脉冲系列，每个宏脉冲包括一系列光学微脉冲。当在本申请中使用术语“光学宏脉冲”时，构成光学宏脉冲的光学微脉冲引起一个循环光学微脉冲。在某些实施方式中，可叠加多个光学宏脉冲以引起多个对应循环光学微脉冲。

[0059] 图 2A 的顶部示出包含一光学微脉冲系列的一代表性光学宏脉冲。在图 2A 的中间部分示出循环光学微脉冲的振幅随着入射（注入）光学微脉冲相干增强光学腔中的循环光学微脉冲而增长的方式。这可称为在该腔中“堆叠”的入射光学微脉冲。图 2A 的底部示出

一代表性电子宏脉冲，其中注入电子微脉冲被定时成在该腔中存储光功率的最大值或接近最大值处进入光学腔。

[0060] 图 2B 示出代表性光学和电子时序。注入电子微脉冲被定时成在腔中存储光功率的最大值或接近最大值处进入光学腔。宏脉冲中注入光学微脉冲的数量被选择成限制对腔的瞬时热诱导损伤。占空比被选择成限制时间平均损伤和未补偿的外形变形。

[0061] 图 3A 和 3B 示意性地示出光学相位相干的概念。图 3A 示出从左侧接近腔反射镜的入射光学微脉冲和从右侧接近腔反射镜的循环光学微脉冲。图 3B 示出一般情况，其中：

[0062] (a) 入射光学微脉冲的一部分传输通过腔反射镜进入该腔中，而循环光学微脉冲的一部分被腔反射镜反射（具有反相）；以及

[0063] (b) 入射光学微脉冲的一部分被腔反射镜反射（具有反相）而循环光学微脉冲的一部分传输通过腔反射镜；

[0064] 如果注入光学微脉冲的微观（光学）相位和包络与如图所示的循环光学微脉冲的微观（光学）相位和包络基本上匹配，这会造成：

[0065] (a) 入射光学微脉冲中由腔反射镜传输部分的振幅会相干叠加到循环光学微脉冲中由腔反射镜反射的部分；以及

[0066] (b) 入射光学微脉冲中由腔反射镜反射的部分和循环光学微脉冲中由腔反射镜传输的部分的振幅会在腔外抵销（即相消叠加）。

[0067] 本发明的物理基础操作

[0068] 被空间周期性横向磁场或电磁场偏转的相对论电子以与乘积 $\gamma^2 k^2 A^2$ 成正比的速率辐射电磁能量，其中

[0069] γ 是洛伦茨因子 E/mc^2，

[0070] k 是波数 $2\pi/\lambda$，指定场的空间振荡周期 λ，以及

[0071] A 是 rms 矢势。

[0072] 定义归一化矢势 a_n 也是有益的，其中在 cgs 单位下 $a_n = eA/mc^2$。

[0073] 如果横向磁场是周期性的，则在该场为静态的情况下所发射的辐射在前进方向上（即平行于电子运动方向的轴）在波长 $(1+a_n^2)\lambda/(1+\beta\cos\theta)\gamma^2$ 处达到峰值。如果该场是平面行波，则所发射的辐射在前进方向上在波长 $(1+a_n^2)\lambda/2(1+\beta\cos\theta)\gamma^2$ 处达到峰值，其中 θ 是光学腔的轴从电子束的前进方向偏移的角度。该过程在静态场的情形中帮助为诸如 x 射线结晶的应用产生强烈、高度准直的近单色 x 辐射束，并且促成构建大量巨型、昂贵的基于加速器的 x 射线源以用于这些应用。

[0074] 对于静态场和时间变化场的两种情况，这些源中电子辐射的能量随着场强按矢势的平方增大。虽然在较大场 ($a_n >> 1$) 会辐射更多能量，但是该辐射是在较长波长下发射的。在较高场 ($a_n >> 1$) 下发射的辐射也不再是单色的，但是包括数量增多的谐波，并最终退化为近似白光光谱 (Elleaume 2003 以及 Lau 2003)。

[0075] 因此基于这些原理，波动器辐射谱随着归一化矢势值增大的质量进步向系统设计者和用户提供优化设计以与应用相匹配的机会 (Kim 1989)。对于注重单色性和低谐波成分的应用，该系统可被设计成在 $0.1 < a_n < 0.5$ 范围内的较低 a_n 值下操作，而对于诸如 x 射线光刻的应用，在较高的矢势值下操作的特性可有益地用于生成包括较宽的谐振相关波长范围的较高功率和光子通量的束，其中该束可对 $a_n >> 1$（诸如 3 或更高）收敛到近连续

白光辐射。

[0076] 在固定发射波长下所辐射的能量对波数、矢势和电子能量的依赖表明所辐射的能量只能通过减小磁场或电磁场的周期 λ 来增大。该结果确立如下一般结论：所辐射功率的最大化需要波动器周期的最小化。本发明的技术允许波动器周期 λ 从当前在基于电子束的 x 射线源中使用的 1-10cm 范围减小到光学区域，例如小四个量级的微米量级的 λ 值。

[0077] 因此，有可能由本发明实现的波动器周期减小将每单位波动器长度的辐射能量增大至少四个量级，同时减小操作所需的电子加速器的大小和成本，从而有可能构建不昂贵的紧凑型、高性能 x 射线和伽吗射线源，用于 x 射线结晶、医学射线照相术和放射疗法、高级 x 射线和伽吗射线成像系统、以及核物理和高能物理中的科学研究。

[0078] 这种紧密聚焦、高能光脉冲的产生和保持需要入射到腔的光学表面上的积分通量和峰值功率密度与用于构建该腔的衬底和涂层的损伤级别一致，腔反射镜的外形和间隔被控制成维持操作所需的聚焦，以及由脉冲泵浦激光器生成的光脉冲的间距和光学相位与腔中的累积光脉冲保持精确同步。

[0079] 光学微脉冲的特征

[0080] 为了满足这些苛刻约束，本文所述的本发明使用通过累积来自一个或多个低平均功率的脉冲激光器的、处于高精细的近似球状光学腔的匹配模式的皮秒、同步、相位相干光脉冲而创建的光学波动器，以使用这些腔的能力来将循环光脉冲聚焦到光波长量级上的焦点同时在反射镜上维护 cm 尺度的光斑尺寸。通过这种方式，可以构建其中焦点处的矢势接近 1、同时保持腔的部件的表面处的峰值功率密度和积分通量与稳定和可靠操作一致的光学腔。

[0081] 但是即使允许降低这些腔的光学表面处的峰值光功率，在光学表面处的平均光功率密度仍然可能因涂层和 / 或衬底材料的熔化、扩散和分解、以及因在腔部件的涂敷层和衬底中消耗的宏脉冲平均功率和 / 或时间平均功率引起的外形变形而造成损伤或降级。因此，功能光学波动器不能只依赖腔的几何形状，而是也要结合一个或多个技术来抑制这些光学损伤机制同时保留光源操作所需的条件。

[0082] 因此，本发明的实施方式结合了在腔中循环的光学微脉冲的时间结构，该结构提供了所需的高矢势同时保护腔部件免于损伤。在光学微脉冲层面，循环光学微脉冲在遇到腔部件时具有足够受限的持续时间和峰值功率，以便限制皮秒时间尺度上雪崩击穿的发生。在辐射间隔层面，辐射间隔中的光学微脉冲数量被限制，以限制腔的光学元件部件的涂层和表面的峰值温度上升。

[0083] 此外，连续辐射间隔的重复率被限制，以将在腔的构建中使用的光学元件的热应力和热变形保持在易控值上。在这种上下文中，“易控值”表示可通过调节衬底温度梯度，或通过调整反射镜间距、泵浦激光器频率和皮秒脉冲来补偿以维持该源操作所需的条件。

[0084] 假设创建能在归一化矢势的值 $a_n \sim 0.1\text{-}1.0$ 下操作的光场，在本发明中通过引导紧密聚焦、聚束的脉冲电子束在腔内所存储光脉冲的焦点处通过该光脉冲来产生强烈、准直、近单色的 x 射线束。当耦合到适当电子束源时，如此构建和操作的光学波动器有可能在指定 x 射线功率输出值所需的最低可能平均电子流和功率下以可能比使用现有波动器技术低 100 倍的电子能量下生成该辐射。

[0085] 由该系统生成的 x 射线束的即时峰值功率通过由 a_n^2 和 γ 确定的辐射 x 射线 / 电

子的数量、由峰值电子流和聚束长度确定的每聚束的平均电子数量、以及聚束间距来确定。由本发明生成的平均 x 射线功率仅受在光学腔中使用的表面和衬底的平均功率级别、以及对用来提供操作所需电子束的加速器的重复率的限制（如果有的话）限制。

[0086] 对当前可达到的光学损伤阈值以及加速器峰值和平均电流的代表性值的假设提供了与使用 cm 周期的波动器的现有技术源的当前状态可比拟的 x 射线束亮度，但是由于操作所需的加速器和波动器系统的尺寸减小而尺寸更小和成本更低。可以进一步看出，使用皮秒脉冲光束来创建循环光学微脉冲使得实现通过使用受对反射镜表面的光功率密度和平均光功率的相同约束所限制的连续光束所可能实现的大得多的归一化矢势和辐射 x 射线功率的值成为可能。

[0087] 泵浦激光器的特征

[0088] 本发明操作所需的光辐射由一个或多个重复脉冲的相位相干激光器源生成，这些激光器源的光学微脉冲的相位和振幅不同，且周期等于光脉冲在腔中循环的往返传播时间的整数倍。虽然这些激光器通常不能直接达到用作光学波动器所需的峰值功率，但是可将从更低功率相位相干激光器源获得的重复脉冲集成到适当设计的低损耗光存储中，以在腔内实现超过激光器输出功率至少 3 个量级的峰值功率。

[0089] 原则上，每个注入微脉冲序列的相位周期性的条件允许使用不等于光存储腔的本征频率的激射频率（电场的零相交之间周期的倒数），而在每个光学微脉冲中有有限数目的光学循环的情况下不显著影响操作。然而，放松对通常可应用于用 CW 激光器驱动的光存储腔的频率同步的标准不改变本发明中的要求，即：注入脉冲的光学相位必须具有与其时间间距的周期相同、并等于腔的往返传播时间的整数倍的周期性。

[0090] 给定这些约束，要注入到存储腔中的脉冲的光学频率必须被设置为等于频率 $v_{nm} = n/(m\tau)$ 的单个或组合，其中 τ 是该腔的往返传播时间（有时称为 RTTT），m 是以 τ 定义注入微脉冲之间的时间间隔的整数，且 n 是定义光学频率与 1/(mτ) 的比值的整数。

[0091] 给定注入到腔中的微脉冲的相位和振幅的周期性所要满足的条件，显然有可能同时用具有不同激射和微脉冲重复率以及相对于彼此的任意时序的多个光脉冲序列来泵浦该腔，只要每个光脉冲序列满足对其振幅和相位变化的周期性的上述条件。

[0092] 与这种光存储腔一起使用的可能激光器源包括用于光通信的宽带脉冲二极管激光器、脉冲光纤激光器以及锁相自由电子激光器。通过将活性激射介质置于光存储腔外，有可能使用更宽范围的激射介质、并在比存储腔内所必要的那些更接近最佳的条件下操作这些激射介质，由此用更接近最佳的归一化矢势生成存储的光学微脉冲。

[0093] 如果作为本发明的一部分一个或多个自由电子激光器 (FEL) 结合来泵浦光学腔，则这些 FEL 可被配置成使用通用的直线加速器注入器 (linac injector)，或者对 FEL 操作和本发明的优化波动器 x 射线源的操作使用通用的直线加速器注入器。

[0094] 虽然用于根据本发明实施方式的光学波动器操作的皮秒脉冲结构通常与脉冲相位相干泵浦激光器和微波或射频电子加速器的能力兼容，但是激光器的激光器频率和脉冲间距与由用于该系统的加速器产生的电子聚束的相位和脉冲间距的同步条件要求加速器和激光器的工作频率与光存储腔的尺寸精确匹配。

[0095] 由脉冲泵浦激光器提供的光脉冲序列的周期性与腔的往返传播时间的同步通过调节反射镜的纵向位置以将常播时间保持在适当值，或者通过调制泵浦激光器的光波长和

脉冲周期以跟踪腔尺寸和聚焦参数的变化来设置和维护。如果在操作期间改变泵浦激光器的激射频率和微脉冲重复率，则相应地改变加速器的工作频率来保持同步。如果在操作期间光学腔的往返传播时间保持为恒定值，则不要求激光器和加速器频率有变化。

[0096] 考虑注入微脉冲的相位及其包络中的时序的跳动对其向光学腔中循环微脉冲的耦合和增强的影响表明：为了确保有效注入，较佳地将注入微脉冲的相位保持在循环存储微脉冲的相位的 ±20° 内，同时较佳地将注入微脉冲的包络的时间宽度和到达时间调节到循环光学微脉冲的宽度的 10％内。

[0097] 如果不能将注入光学微脉冲的相位和时序保持在这些限制内，则有必要增大注入微脉冲的功率以将循环微脉冲的矢势升高到系统操作所需的水平。因此可容耐超出 ±45° 量级限制的更大相位跳动和 / 或 ±50° 的光学微脉冲持续时间量级上的更大时序跳动，但代价是对相同 a_n 值注入效率较低且注入光学微脉冲功率更高。具有在这些扩展范围内的相位跳动和 / 或时间跳动的实施方式仍被视为通过入射光学微脉冲提供相干增强。

[0098] 考虑到该系统对激射光学微脉冲、加速器和腔的时域周期性的较小失配以及对影响这些周期性的尺寸的极度敏感，在大多数实际系统中，确保有效和稳定操作所需的频率和 / 或周期性的同步会要求包括测量和比较这些周期性、以及按照闭环反馈控制下所需来调节要调节的操作频率和 / 或元件尺寸所需的传感器和诊断元件。

[0099] 多激光器实施方式

[0100] 图 4 是示出其中来自两个独立激光器 25a 和 25b 的光学微脉冲用于建立相应的单个循环光学微脉冲 60a 和 60b 的实施方式的示意图。如图所示，激光器提供由腔的往返传播时间分隔的相应入射光学微脉冲序列 50a 和 50b，这与每个激光器生成单个光学宏脉冲一致（与提供交错宏脉冲相反）。这些束在引入到腔中之前在束组合器 122 进行组合，但是原则上可将两个激光束引入该腔的相对两端。

[0101] 该附图还示出一个激光器光学宏脉冲的光学微脉冲，它们处于其它激光器光学宏脉冲的光学微脉冲之间的中心位置。为了适应脉冲堆叠，一个激光器光学微脉冲的时序不必相对于其它激光器光学微脉冲存在所要求的关系。因此，光学宏脉冲的交错对的间距可以是非周期性的，其中一对光学微脉冲紧密间隔，之后是间隙，之后是另一对紧密间隔的光学微脉冲，只要所有间距对应于经加速的电子微脉冲间距的整数倍即可。

[0102] 然而，如果腔与产生单个周期性电子微脉冲序列的电子加速器一起使用，则交错光学宏脉冲也必需彼此间隔开往返时间 τ 的整数分之一（τ /n），否则循环光学微脉冲将不与电子微脉冲碰撞。由于大多数或全部电子加速器使用某种 RF 共振来生成加速电子微脉冲（聚束）所需的高电场，本发明的大多数实用实施方式受到以某种限定频率周期性地放出电子微脉冲的事实的约束。

[0103] 电子束的特征

[0104] 本发明中使用的电子束由一个或多个 RF 或微波加速器提供，这些加速器中的每一个生成一扩展的电子聚束系列（每个较佳地对向不大于 10 度的 RF 相位、并间隔开加速器工作频率的周期或其整数倍）。这种束的可能源包括 RF 或微波线性加速器、电子回旋加速器或存储环。一代表性实施方式使用一个或多个 10-30MeV 的电子线性加速器，每个加速器使用以 3GHz 操作的热电子微波枪来产生高平均电流的聚束电子束。

[0105] 由每个加速器生成的电子束在电子束与光学辐射碰撞的区域中在水平和垂直平

面中被聚焦成束腰。焦斑的尺寸被选择成使电子束的空间横截面最小、同时将电子的角展度约束为提供可接受的 x 射线光谱带宽的值。系统的操作通常要求电子束的发射率尽可能地低，以实现与 x 射线光谱亮度对角展度施加的约束相一致的最小束焦点。

[0106] 在电子穿过光学波动器之后，出射电子束可重新聚焦以用于与第一个相互作用区类似的一个或多个后续的独立相互作用区、在存储环中重新循环、传输到束流收集器以备丢弃、或者传输到被定相成提取所利用电子的能量作为 RF 或微波功率来代替热和电离辐射的第二组一个或多个 RF 或微波加速器。在一代表性实施方式中，长度与生成传输到光学波动器的束的加速器类似的第二加速器部分 180 度失相，以将减速电子的能量减小到 10MeV 以下以供常规束流收集器丢弃。

[0107] 腔的特征

[0108] 简单的双反射镜光学存储腔的设计和操作已在科学文献 (Siegman 1996a) 中多方面地回顾，并且该类腔已与 CW 激光器一起用来提供极精细的“光学线”(Sakai2001) 以测量用于高能物理研究的单次通过线性对撞机 (single-pass linear collider) 中使用的高能量、低发射率电子束的横截面。现有技术还已经解决了在将锁模泵浦用于脉冲堆叠时调节锁模频率以匹配本征模式间距从而优化注入效率和存储脉冲的振幅的需要 (Jones 2001)。

[0109] 然而，虽然在现有技术中无论出于脉冲堆叠（使用脉冲泵浦源）目的、还是生成强烈的窄焦斑（使用 CW 泵浦源）的目的都已经开发并验证了这种光学存储腔，但是在单个存储腔中同时实现有效的脉冲堆叠和指定的窄焦斑需要在现有技术中没有描述的特定腔设计。例如，现有技术中用于构建单模、CW“光学线”的腔不提供对往返传播时间的约束，并且异常不适合用于其微脉冲重复率精确匹配于该间距以实现有效多模操作的脉冲激光源。

[0110] 现有技术也没有提供关于可用于实际制作结合为本发明一部分的构建和操作光学腔所需的光学元件的装置的指导。虽然为 CW 和相位相干的脉冲激光束的注入和累积所设计的腔的设计和构建已在文献 (Sakai 2001 和 Jones 2001) 中作了详细描述，但是现有技术没有提供关于可用于构建能够同时满足对有效累积和存储以及对实现有用光学波动器所需的窄焦点的创建和维护的极苛刻标准的腔的指导。

[0111] 本发明所依赖的腔实现以下同时能力：通过规避弯曲反射表面制作中的固有限制，将循环光脉冲聚焦到衍射所允许的最小光斑、同时维持腔本征模式的光谱以及操作所需的腔往返传播时间和腔损耗。要解决的中心问题是：打磨或塑造反射镜表面使其曲率中心具有小于其曲率半径的 0.1％左右的误差实质上是不可能的，这对应于本发明中存储腔的实用实施方式所需的反射镜曲率中心位置的几百微米的绝对不确定度。

[0112] 该不确定度对于本发明是不够的，对于本发明而言，几微米量级的不确定度必须在反射镜间隔（以提供充分的脉冲堆叠）和反射镜曲率中心的空间位置（以在束腰处独立实现紧密焦点）上同时实现。在现有技术中，只有这两个条件之一而非两个被实现。然而，本发明的诸方面提供用于累积由泵浦激光器注入的光脉冲的光学腔的构建和能力，即现有技术中所没有的能力。

[0113] 腔的设计

[0114] 在双反射镜的腔中，最小焦斑尺寸和指定往返传播时间的实现需要比反射镜制作中实际实现的精度更高、或者使反射镜变形以使其表面符合所需外形的机制，即还可以引

起不可接受的内部应力水平的工序。因此，通常较佳的是向腔添加第三元件，该元件被制作并设置成补偿腔的两个主要反射镜的制作中不可避免的误差。因此，在本发明中使用光学存储腔的可能设计通过提供将所需精度传递给其相应精度可在制作中达到的另一光学元件或者适当调节腔的操作参数的技术来规避反射镜制作中的以上限制。可以实现至少两个这种通用的三元件腔配置。

[0115] 第一腔配置

[0116] 图 5 是适于实践本发明各实施方式的光学腔 30 的第一配置的示意图。该配置将球度补偿器 110 实现为对来自泵浦激光器的 P 偏振光在布鲁斯特 (Brewster) 角上或附近取向的有限厚度的介电布鲁斯特板。该板在腔中的出现具有两个效果 :(i) 将腔中脉冲的往返传播时间增大与板的厚度直接成正比的延时 ;以及 (ii) 在光学上将最接近反射镜的曲率中心移动与板的厚度直接成正比的空间位移。(i) 和 (ii) 中的时间和空间位移由该板的独立物理特性确定，因此它们可在存储腔的设计中独立指定。腔对循环光学微脉冲的最佳聚焦在两个反射镜 32 和 35 的曲率中心基本上在对应于束腰的指定点 125 处重合时发生。

[0117] 将该板结合到腔中的建议方法基于以下步骤序列 :

[0118] 1) 选择介电板的名义厚度、入射角和在腔中的位置 ;板的名义厚度的最佳选择在下一段中描述 ;

[0119] 2) 计算有效脉冲堆叠所需的物理反射镜间隔，包括由该板引入的延时 ;该计算给出涉及板厚度的第一等式 ;

[0120] 3) 使用 (2) 中确定的间距计算在束腰处实现所需焦斑半径的所要求的反射镜曲率半径，包括由该板引入的光学空间位移 ;该计算给出涉及板厚度的第二等式 ;

[0121] 4) 使用与 (3) 中确定的半径尽可能接近地匹配的曲率半径制作腔反射镜 ;

[0122] 5) 通过干涉测量法或其它光学技术来测量 (4) 中产生的反射镜的实际曲率半径 ;在几微米误差内执行该测量的方法可在现有技术中找到 ;以及

[0123] 6) 使用来自步骤 (2) 和 (3) 的涉及板厚度的两个独立等式并使用步骤 (5) 中测得的曲率半径作为这些等式中的固定参数，对这两个等式求解两个新的未知数 :i) 板的新厚度 ;以及 ii) 新的物理反射镜间隔。

[0124] 板的名义厚度的初始选择应该充分，从而在给定反射镜的可制作曲率半径中 [步骤 (3)] 的不确定度限制的情况下，板的新厚度足够厚以制成良好平坦度、并且足够薄以最小化诸如吸收或自聚焦的腔操作的伪光学效应 ;

[0125] 通常，倾斜平行板会将散光引入发散或会聚光束中，从而在当前设计中导致所存储的光束在“垂直”和“水平”(即正交横向) 方向上有不同的焦半径。但是这种散光可通过研磨在该板的入射平面中的表面之间的小楔角来精确补偿 ;楔角的大小可通过本领域技术人员已知的光学分析技术来确定。

[0126] 以上设计方法的益处源于以下事实 :与难以将两个反射镜的曲率中心定位在几微米的精度上不同，板的厚度很容易研磨并抛光到几微米的精度。因此，在以上设计中能够实现本发明中所需的焦斑 (经由腔的球度) 和脉冲堆叠的同时优化。

[0127] 除了补偿弯曲反射镜表面制作中的误差之外，布鲁斯特板还可被设计成补偿操作中反射镜表面的热变形，由于高功率存储光束的空间轮廓该热变形的主要效应是改变曲率

半径。这些效应原则上可用反射镜衬底已知的热机械和光学特性来计算或测量到高精度。或者，可将存储腔设计成例如通过使用功率可变的外部激光束来反面加热反射镜之一或两者，或者通过在反射镜的反面或边缘处施加可调节的机械应力以提供补偿变形，来独立地提供这种补偿。图 1B 示出作为一个具体实现的用于热补偿的两个辐射热源 117 和 120。

[0128] 存储腔的各个实用实施方式实际上可能必需通过这些或其它技术来补偿曲率半径的这种变化。例如，如果存储腔的额定配置使用所施加的外部热源来在没有存储束的情况下升高反射镜中心的温度，则在操作过程中该热源的强度可按弥补由操作中的泵浦激光器引起的加热所需地减小。类似地，可将所施加的机械应力从其初始（空腔）值起调节，以在具有高功率存储束的操作过程中保持所需的曲率半径。

[0129] 图 5 还示出用于控制球度和锁模的附加定位元件。具体而言，定位器 132 被示为与凹面反射镜 32 相关联，而定位器 135 则与凹面反射镜 35 相关联。例如，这些定位器可用机械和电气部件来实现以提供补偿可能出现的任何扰动的快速响应。例如，可将反射镜安装在将其平移运动限制于沿单个轴进行的固定机械挠曲上，该运动实际上由相应压电致动器推动挠曲而诱发。

[0130] 注意，在图 5 的基本设计中，平移反射镜也略微改变了腔长，因此影响了脉冲堆叠。补偿本设计中的共振腔球度而不平移反射镜的技术是使用激光反向加热来改变反射镜的曲率半径而不改变腔长，如图 1B 所示（辐射热源 117 和 120）。原则上，如果将腔的往返时间和共振频率的所得变化反馈回锁模锁频的激光器源和 RF 驱动器，则有可能只用平移运动补偿球度；这些变化通常足够小才允许这样，即使在 RF 直线加速器 FEL 中也是如此。

[0131] 第二腔配置

[0132] 图 6 是适于实践本发明诸实施方式的光学腔 30 的标示为 30’的第二配置的示意图。该配置能够独立地优化焦斑（经由腔球度）和脉冲堆叠。该设计使用三个反射镜（两个曲面腔反射镜 140 和 145 以及一个基本上平坦的反射镜 150）来产生以所示方式折叠的线性腔轴。腔中包围紧密聚焦束腰的区域由曲面反射镜 140 和 145 界定。

[0133] 反射镜 140 是限定腔的一个端部反射镜的基本上球状对称的反射镜，并且反射垂直入射的腔束。反射镜 145 是中间的离轴抛物面反射镜，并且将以诸如 45° 的适当斜角入射的腔束反射到限定腔的另一个端部反射镜的平面反射镜 150。反射镜的基本曲率半径被设计成使得球状端部反射镜 140 与离轴抛物面反射镜 145 之间的存储光束会聚到标示为 155 的束腰处的紧密焦点，且离轴抛物面反射镜与平面端部反射镜之间的存储束基本上与在平面反射镜位置处的束腰对准（即波前在平面反射镜处基本上是平面的）。

[0134] 焦斑的优化（经由腔的球度）通过将球状的腔端部反射镜置于可移动台 160 上使得其相对于中间抛物面反射镜的间隔可独立于平面反射镜调节来实现。通过允许对腔的球度进行这种独立的可能动态优化以实现和维持紧密焦点，不再需要施加外部的热或机械变形来保持这些反射镜的曲率。脉冲堆叠的优化通过将平面的腔端部反射镜置于可移动台 165 上使得其相对于中间抛物面反射镜的间隔可独立于球状端部反射镜调节来同时实现；由于已存储束与腔的该区域中的大横向半径基本上对准，因此可执行脉冲堆叠调节而基本上不影响腔的相互作用区中的聚焦束。

[0135] 应该注意，原则上，如果泵浦激光器的重复率可在足够宽的重复率范围上连续调节，则腔的球度和脉冲堆叠的独立优化问题不会出现。在这种情况下，存储腔可被构建成在

束腰处提供紧密聚焦的束，并且泵浦激光器的重复率可被调节以满足脉冲堆叠的要求。但是存在诸如 RF 直线加速器自由电子激光器的某些泵浦激光器，它们的重复率不具有充分可调性以补偿存储腔的制作缺陷，于是腔的构建必需同时结合所有这些技术来实现这种优化。

[0136] 在指定了诸如辐射间隔持续时间、存储腔长度和驱动激光器功率的某些系统参数的某些实施方式中，反射镜透射率可被选择成将来自驱动激光器的充足功率耦合到腔中，以最大化在辐射间隔结束处的循环光学微脉冲功率或者在辐射间隔期间穿过存储腔的相互作用区的积分光能量。然而，可能需要其它的反射镜反射率值，以在存储腔的相互作用区中实现所需的矢势。

[0137] 例如，如果在反射率对峰值循环功率或积分循环能量进行优化时驱动激光器功率高得使矢势超过所需值，则可按需减小反射率以实现所需的矢势，这还可导致存储腔中的循环光功率在辐射间隔期间的更加均匀的时间依赖性。在诸如在此考虑的某些实用实施方式中，反射镜的吸收损耗可以忽略，从而可将未从反射镜反射的能量视为传输通过该反射镜。补偿非零吸收损耗的方法是本领域技术人员已知的。

[0138] 选择不包括耦合元件的光学元件之间的反射率损耗的分布取决于所需的定义为耦合损耗与总损耗之比的耦合效率。如果耦合效率为 1，则可在腔中获得最大的功率累积，但是在这种情况下所得的反射功率水平可能需要在驱动激光器与存储腔之间有隔离光学元件来减小进入驱动激光器的反向反射。该反射功率可通过设计一损耗匹配腔（例如其反射镜的反射率相等的双反射镜腔）来最小化，但是与单位耦合效率的情况相比这会减小腔中累积的功率。可选择其它耦合效率值来选择反射和透射功率之间的适当平衡。

[0139] 系统配置因素

[0140] 通过将这种光学存储腔定位于电子束焦点附近使得电子束和存储光脉冲的焦点重合，以及控制注入光脉冲和 / 或加速电子束的时序以使两个束在其共同焦点处相交，加速束的每个重复聚束中的电子会处于由在光脉冲峰值强度之上或附近的强烈存储光脉冲生成的强烈波动器场中，从而实现在每次碰撞时有效生成波动器辐射、以及通过这些较小电子聚束与在光学存储腔中循环的高强度光脉冲的多次连续碰撞而生成高平均 X 射线积分通量和亮度所需的条件。

[0141] 优化系统操作所需的循环光脉冲的聚焦参数与电子束略有不同。虽然焦点处电子束的水平和垂直斑大小的优化通常只需要与由反向散射 x 射线波长的角度依赖性对角展度施加的限制相一致地最小化光斑的大小，但是存储光脉冲的聚焦参数较佳地被选择成优化光脉冲与电子聚束的交迭。

[0142] 在最简单的情况下 - 即电子束和光脉冲沿同一个轴但在相反方向上共线传播，与电子相互作用的光场的功率密度将随时间和位置而变化，这取决于由泵浦激光器的设计确定的光脉冲长度以及由衍射律确定的焦点附近的光束半径和面积的特性依赖性。光斑半径 w(z) 通常随与光斑位置相关的轴位置 z 变化如下：

[0143] $w(z) = w_0[1+(z/z_R)^2]^{1/2}$

[0144] 其中 w^0 是焦点处的光斑半径，以及

[0145] z_R 即瑞利 (Rayleigh) 参数，指定焦斑的“景深”。

[0146] 通过考虑对由电子发射的波动器辐射强度的光功率密度的特性依赖性，可以发现

传播通过连续聚焦光束的电子会在距焦点 +/-zr 距离中辐射从 - 无穷传播到 + 无穷所发射的能量的一半。因此，与电子和相同峰值强度的连续光束碰撞的情况相比，循环光学微脉冲的脉冲长度可减小到两倍瑞利参数 z_R 的量级上，而反向散射的 x 射线光子数的损耗不超过二分之一，只要满足以下条件即可：

[0147] 7) 聚焦区域中光脉冲的横截面保持与电子束的横截面匹配，

[0148] 8) 在光脉冲的形心 (centroid) 到达焦点之前一个瑞利参数的点的时刻与脉冲形心到达焦点的时刻之间的间隔期间的某时刻，电子与反向传播的光脉冲相遇，

[0149] 9) 光脉冲具有通常等于或小于两倍瑞利参数除以光速的持续时间，以及

[0150] 10) 光学存储腔的瑞利参数已被设置成约等于或大于由加速器驱动器提供的电子聚束长度。

[0151] 如果这些条件得到满足，则运动通过在存储腔中循环的光脉冲的电子会在焦点附近的空间区域中与光场相遇，其中光功率密度在焦点处强度的两倍以内，并产生一 x 射线束，其积分通量和亮度在由运动穿过功率等于光学存储腔中循环脉冲的峰值功率的连续光束的相同电子所生成 x 射线束的两倍以内。

[0152] 腔尺寸和反射镜反射率分析

[0153] 以下描述在相互作用区中给出所需矢势、同时将在反射镜处加载的光学强度或热功率限制在实用损伤阈值之下的激光驱动存储腔的一代表性设计分级体系。该设计过程旨在是示例性而非排它性或者限制性的。

[0154] 该代表性设计从通常都由可用激光器系统确定的泵浦激光波长 λ、激光微脉冲持续时间 τ_p 和峰值功率 P_{inc}、以及微脉冲重复率 v 开始。例如，可根据与光束相匹配的电子束的发射率特性和聚焦几何位置，指定腔的相互作用区中 TEM_{00} 模的所需腔内 $1/e^2$ 强度束半径 ω_0。

[0155] 然后，按照所考虑应用所需来指定相互作用区中的轴上所需归一化矢势 a_n。rms 矢势 a_n 与 gcs 单位的 rms 光电场 $\hat{E}$ 通过以下表达式相关：

[0156] $$a_n = \frac{e\hat{E}\lambda}{2\pi mc^2}$$

[0157] 其中 e 和 m 是电子电荷和质量，λ 是光波长，c 是光速。在由 a_n 确定轴上电场 $\hat{E}$ 之后，cgs 单位的轴上光强度 Ip 可从以下表达式计算：

[0158] $$I_p = \frac{c}{4\pi}\left|\hat{E}\right|^2$$

[0159] 向 mks 单位强度的转换是公知的，并且相应的循环微脉冲峰值功率 P_{circ} 可通过以下关系从轴上强度获得：

[0160] $$P_{circ} = I_p\left(\frac{\pi\omega_0^2}{2}\right)$$

[0161] 对于较佳地相对于腔长定相并因此相干增强循环光学微脉冲的峰值功率 P_{inc} 的注入微脉冲，腔中第 n 次通过期间的循环功率 Pcirc（从第 0 次通过的空腔开始）可由以下等式描述：

[0162] $$\frac{P_{circ}}{P_{inc}}=\frac{t_i^2}{\left(\frac{1}{4}\delta_c^2\right)}\left[1-2e^{-\delta_c n/2}+e^{-\delta_c n}\right]$$

[0163] 其中 t_i^2 是输入反射镜处的分数功率耦合系数，而 δ_c 是分数往返腔功率损耗。定义为在辐射间隔期间入射到每个腔反射镜上的总光能的积分光能 K_{cav} 通过对上式积分得到：

[0164] $$K_{cav}=\overline{P_{inc}}T_\Omega\frac{t_i^2}{\left(\frac{1}{4}\delta_c^2\right)}\left[1-\frac{4}{\delta_c N}\left(1-e^{-\delta_c N/2}\right)+\frac{1}{\delta_c N}\left(1-e^{-\delta_c N}\right)\right]$$

[0165] 其中 $\overline{P}_{inc}$ 是辐射间隔期间的时间平均入射激光功率，T_Ω 是辐射间隔的持续时间，N 是辐射间隔期间总的腔往返数。

[0166] 对于具有腔中总的 N 次往返的辐射间隔，辐射间隔（即第 N 次通过）结束处的循环峰值功率 P_{circ} 针对满足 $\delta_c N=2.52$ 的腔损耗 δ_c 得到最大化，且积分光能 K_{cav} 针对 $\delta_c N=3.78$ 得到最大化。两种情况之间的有益设计折衷可用以下标准获得：

[0167] $\delta_c N=3.056$（等式 1）

[0168] 对此

[0169] $$P_{circ}=(0.985)P_{circ}^{\max}$$

[0170] $$K_{cav}=(0.985)K_{cav}^{\max}$$

[0171] 并且在辐射间隔结束处的循环峰值功率 P_{circ} 给定（针对 t_i^2 主导腔损耗 δc 的腔设计）如下：

[0172] $$\frac{P_{circ}}{P_{inc}}=\frac{2.45}{\delta_c}$$（等式 2）

[0173] 在辐射间隔期间长度为 L_c 的对称腔中腔反射镜处的积分通量 F_Ω（即单位轴上面积的积分能量）可如下从 TEM_{00} 模式的几何位置获得：

[0174] $$F_\Omega=\frac{8\pi\omega_0^2}{\lambda^2}\left(\frac{\tau_p v_p}{c}\right)P_{circ}\frac{0.94N}{L_c}$$（等式 3）

[0175] 且辐射间隔的持续时间 T_Ω 与腔长 Lc 相关如下：

[0176] $$T_\Omega=\frac{2L_c}{c}N$$（等式 4）

[0177] 等式 2、1 和 3 形成限制热功率加载的点设计过程的基础，它们可按需更改以适应其它系统参数或要求。例如，基于自由电子激光器的系统的以下设计可直接从以上过程获得：

[0178] $\lambda=1\mu m$

[0179] $\omega_0=10\mu m$[为此 $z_R=0.31mm=c(1ps)$]

[0180] $\tau_p=1ps$

[0181] $v_p=2.86GHz$

[0182] Pcirc = 43GW[对应于 $a_n=0.1$]

[0183] Pinc = 50MW[对应于倒锥形 FEL]

[0184] F_Ω = 60J/cm2[针对 T_Ω = 1μs 的守恒积分通量损伤阈值]针对以上参数,等式 2 指定往返腔损耗 δ_c = 0.285%,等式 1 则指定腔中的总往返数 N = 1073,而等式 3 及其后续等式一起指定辐射间隔的持续时间(假设损伤阈值与 T_Ω 的平方根成正比)T_Ω = 5.4μs。

[0185] 然后,可从由以上设计过程获得的具体腔参数计算腔的尺寸。在本示例中,相应的腔长 L_c = 0.75m,它可按需增大以匹配腔中循环微脉冲的最接近整数;在本示例中 L_c = 0.786m。针对该腔长,TEM_{00} 模式在反射镜处的 $1/e^2$ 强度半径 ω_{mirr} 为 ω_{mirr} = 12.5mm,且腔反射镜的直径 φ_{mirr} 可被适当选择成 φ_{mirr} = 60mm。

[0186] 对于损伤机制取决于峰值光强(与积分光学积分通量相反)在快速时间尺度上发生的操作领域,所选设计必须与所考虑过程的实用损伤阈值相符。在长度为 L_c 的对称腔中,腔反射镜上辐射间隔结束处的峰值循环微脉冲强度(即单位轴上面积的峰值微脉冲功率)是

[0187] $$I_{mirr} = \frac{P_{circ}}{\left(\frac{\pi\omega_{mirr}^2}{2}\right)} = \frac{8\pi\omega_0^2}{\lambda^2 L_c{}^2} P_{circ}$$

[0188] 因此,对于选择成在相互作用区中提供所需矢势 a_n 的规定束半径 ω_0 和循环峰值微脉冲功率 P_{circ},对称光学存储腔的腔长 L_c 可独立于积分通量因素来确定。对于最终的系统设计,系统参数必须与光强依赖和积分通量依赖的损伤机制的损伤阈值相符。

[0189] 同步的控制和稳定

[0190] 如上所述,使电子微脉冲、来自泵浦激光器的光学微脉冲和存储腔中的循环光学微脉冲同步是很重要的。存在许多实现同步的可能方法。总之,本发明的实施方式可提供用于设置和稳定以下的一个或多个的传感器和控件:

[0191] • 光学腔的聚焦参数和往返传播时间;

[0192] • 泵浦激光器的激射和光学微脉冲周期性;

[0193] • 电子束加速器的频率;以及

[0194] • 加速器的相位和电子束操纵。

[0195] 较佳实施方式尝试稳定以上的一部分,更佳地则稳定以上的全部。

[0196] 图 7A 和 7B 是示出用于实施同步的控制和稳定的代表性控制元件的示意图。图 7A 对应于使用图 5 所示的第一(布鲁斯特补偿)腔配置的实施方式;图 7B 对应于使用图 6 所示的第二(折叠)腔配置的实施方式。诊断元件和控件被设计成适应存储腔的瞬时以及稳态操作领域,其某些实施方式可受辐射间隔的有限持续时间约束以提供最大的存储循环光功率和积分光能。这种最佳腔通常不实现稳态操作,因此必须包括监视周期性驱动激光器和电子束输入以及循环光脉冲的频率和相位的诊断元件和控件。

[0197] 对光学腔中的循环光脉冲的主要诊断元件包括能够在腔内脉冲在反复往返中累积时记录它们的空间和时间演变的一个或多个 2D 和 / 或 3D 光电二极管阵列和快速光电二极管阵列。这些检测器被配置在一个或多个的腔端口处,以测量横向模式轮廓的形状和位置、以及在比腔往返传播时间更快的时间尺度上测量循环光强的时间依赖性。

[0198] 入射电子聚束的主要诊断元件包括在相互作用区附近的一个或多个束位置监视器和 RF 拦截检测器、以及用于测量所生成的高能量光子功率和 / 或通量的 x 射线检测器。还包括针对来自驱动激光器系统的入射激光器脉冲的频率和相位的诊断元件。

[0199] 控制针对以下中的至少一个，较佳地针对以下的多个或全部提供：

[0200] • 光学存储腔反射镜的同心度。代表性控制可由光学存储腔反射镜的平移和 / 或激光反向加热构成。

[0201] • 循环光脉冲的往返传播时间。代表性控制可由反射镜在光脉冲包络的尺度和灵敏度上的平移构成。

[0202] • 驱动激光器与光学存储腔的频率匹配。代表性控制可提供光波长分数倍的尺度和空间分辨率上的激光器腔反射镜平移。

[0203] • 驱动激光器系统的微脉冲重复率。

[0204] • RF 电子加速器的微聚束重复率。

[0205] • 光学存储腔反射镜的横向对准。

[0206] • 驱动激光束的横向对准和时序。

[0207] • 驱动激光束的纵向对准和模式匹配。

[0208] • 入射电子聚束的横向对准和时序。

[0209] • 来自驱动激光器的光脉冲与入射电子聚束的同步。

[0210] 驱动激光器腔耦合系数

[0211] 保持驱动激光器和存储腔的最佳对准的所需控制灵敏度取决于用存储腔的 TEM_{00} 模式确定驱动激光的空间模式交迭的系统参数。如果驱动激光模式自身是 TEM_{00} 模式，则其与腔模式的耦合可通过以下从高斯模式理论计算的功率耦合系数 η 来解析确定（在此，假设驱动激光和腔模式的理想空间对准对应于单位功率耦合系数）：

[0212] 1) 如果入射驱动激光束与腔模式除了从腔轴的均匀横向位移 δ 外理想地对准和模式匹配，则

[0213] $$\eta = \exp\left[-\left(\frac{\delta}{\omega_0}\right)^2\right]$$

[0214] 其中 ω_0 是 TEM_{00} 模式在束腰处的 $1/e^2$ 强度束半径。

[0215] 2) 如果入射驱动激光束与腔模式除了在束腰处有从腔轴的 θ 角位移外理想地对准和模式匹配，则

[0216] $$\eta = \exp\left[-\left(\frac{\vartheta}{\vartheta_0}\right)^2\right]$$

[0217] 其中 θ_0 是 TEM_{00} 模式在远场中的 $1/e^2$ 强度半发散角。

[0218] 3) 如果入射驱动激光束与腔模式除了沿腔轴的纵向位移 Δz 外理想地对准和模式匹配，则

[0219] $$\eta = \frac{1}{1+\left(\frac{\zeta}{2}\right)^2}$$

[0220] 其中 $\zeta = \Delta z/z_R$，且 z_R 是腔模式的瑞利范围。

[0221] 4) 如果入射驱动激光束与腔模式除了在束腰处的束半径失配外理想地对准和模式匹配，则

[0222] $$\eta = \frac{4}{\left(\frac{\omega_b}{\omega_0}+\frac{\omega_0}{\omega_b}\right)^2}$$

[0223] 其中 ω_b 是驱动激光模式在束腰处的 $1/e^2$ 强度束半径。

[0224] 未耦合到 TEM_{00} 的腔模式或者被光学元件吸收的任何入射驱动激光功率从该腔反射。

[0225] 独立（即主）和依赖（即从）控制如下在一代表性实施方式中耦合（实际实施方式可包括以下的任何子集）：

[0226] 1. 光学腔的对准和聚焦：

[0227] 光学腔的对准和聚焦可由以下的一个或多个实现：

[0228] • 光学存储腔反射镜的同心度可通过来自监视所传播的 TEM_{00} 模式轮廓的横向形状和宽度的光电二极管阵列的反馈来单独控制；

[0229] • 光学存储腔反射镜的横向对准通过来自监视所传播的 TEM_{00} 模式的横向位置的光电二极管阵列的反馈来单独控制；

[0230] • 存储腔中循环光脉冲的时序和 / 或相位可通过从监视腔内 TEM_{00} 模式的循环功率的光电二极管阵列得到的相位信号来单独监视，并向入射驱动激光脉冲提供可调节的相位偏移以最大化腔内 TEM_{00} 模式的循环功率。

[0231] 2. 入射驱动激光的对准和时序：

[0232] 入射驱动激光的对准和时序可通过以下的一个或多个来实现：

[0233] • 入射驱动激光束的横向对准可通过来自监视 TEM_{00} 模式的功率的光电二极管阵列的反馈来单独控制；

[0234] • 入射驱动激光束的纵向对准和空间模式匹配 (Siegman 1986b) 可被单独调节以最佳地耦合到腔内 TEM_{00} 模式，并可通过来自使用在存储腔的两个或更多端口处记录的模式轮廓信息的光电二极管阵列的反馈来单独控制；

[0235] •入射驱动激光束与光学存储腔中的循环脉冲的频率匹配（或者峰-峰波前匹配）可通过 Pound-Drever-Hall(PDH) 激光稳定技术 (Drever 1983) 来单独控制，其中 PDH 误差信号被用于调节光学存储腔或驱动激光器系统的频率（经由反射镜平移）；

[0236] • 入射驱动激光束的时序和 / 或相位可通过取自入射驱动激光束并导入到独立光电二极管检测器的拦截信号来独立监视；

[0237] • 可按需对任意多个构成驱动激光器系统的驱动激光器复制这些控制。

[0238] 3. 入射电子束的对准和时序：

[0239] 入射电子束的对准和时序可由以下的一个或多个来实现：

[0240] • 入射电子聚束的横向对准可通过来自靠近相互作用区的接近束位置监视器的反馈来单独控制并优化，以最大化所生成 x 射线的强度；

[0241] • 入射电子聚束的时序和 / 或相位可耦合于取自靠近相互作用区的 RF 拦截检测器的相位信号并受其控制，该相位信号包括用于优化入射电子聚束与来自驱动激光器的光脉冲的同步、以及最大化所生成的高能光子功率和 / 或通量的可调节相位偏移；

[0242] • 可按需对任意多个构成电子聚束源的电子加速器复制这些控制。

[0243] 4. 驱动激光器系统和电子束加速器的微脉冲重复频率：

[0244] 驱动激光器系统和电子束加速器的微脉冲重复频率可由以下的一个或多个来控制：

[0245] • 存储腔中循环光脉冲的往返频率与驱动激光器系统和 RF 电子加速器的微脉冲重复频率可相互耦合成具有两个从频的单个主频。

[0246] • 在一代表性实施方式中，驱动激光器系统和 RF 电子加速器的微脉冲重复频率可耦合于存储腔中的循环光脉冲的往返频率并由其控制，该往返频率取自监视 TEM_{00} 模式的循环功率的光电二极管阵列和 / 或快光电二极管。

[0247] • 在一可选实施方式中，驱动激光器系统的微脉冲重复频率以及由存储腔反射镜的平移控制的循环光脉冲往返频率可耦合于 RF 电子加速器的微聚束重复频率并由其控制；

[0248] • 可按需对任意多个驱动激光器和电子加速器复制这些控制。

[0249] 使用辅助低功率腔的控制系统

[0250] 图 8 是用于匹配驱动激光器和存储腔的频率的一可选控制系统的示意图。图 8 与图 7A 和 7B 所示的控制系统之间的主要差别在于对每个高功率驱动激光器和光学波动器存储腔（无论布鲁斯特耦合还是折叠设计）都引入了机械耦合的低功率辅助腔。这些辅助腔的主要特征是其反射镜被机械地或以其他方式固定安装在与高功率腔的反射镜共同的基底上，使得每对耦合反射镜彼此统一地平移；这些耦合反射镜对在图中被标为“耦合反射镜组件”。注意，折叠存储腔的辅助腔反射镜被示意性地示为向一侧移位，但是在使用折叠腔的较佳实施方式中，可将辅助反射镜置于其相应反射镜“之上”，即折叠腔的平面之外。

[0251] 引入辅助腔的目的是与使用 Pound-Drever-Hall 或其它技术将高功率驱动激光直接稳定到存储腔中相反，这些辅助腔可被直接稳定并锁频到独立的、低功率频率稳定的激光器 170；然后，内嵌到耦合反射镜组件中的稳定机械耦合可用于将该稳定性间接地转移到高功率激光器和存储腔。用于稳定辅助腔的单模 cw 激光器可以具有不同于由驱动激光器提供的脉冲光束的波长。

[0252] 该可选技术对使用有限辐射间隔的光学波动器具有两个主要优点。第一，通过向低功率辅助腔而非高功率驱动激光器施加激光稳定技术（例如 Pound-Drever-Hall，“PDH”），对高功率驱动激光束的光学调节（例如相位调制和偏振控制）得以避免，并且进入高功率存储腔的驱动激光束的匹配能更容易和可靠地实现。第二，由于辅助腔保持连续锁定到稳定的 cw 激光器并因此向高功率腔连续提供其稳定性，因此高功率腔保持彼此“锁频”，即使在辐射间隔之间不存在高功率驱动束的那些时刻也是如此。

[0253] 对于图 9 所示的配置，用于操作的一代表性控制分级体系如下：

[0254] 1) 主时钟提供驱动激光模式锁定器 (locker) 和电子束的时序信号。

[0255] 2) 使用独立的 Pound-Drever-Hall(“PDH”) 系统将辅助腔锁频到稳定的单模激光器，其中误差信号被如图所示地反馈到相应的耦合反光镜组件。

[0256] 3) 高功率驱动激光器的操作可通过独立于低功率辅助腔调节驱动激光器调谐致动器来优化。

[0257] 4) 光学波动器存储腔的操作可通过将驱动激光束匹配到存储腔、并独立于低功率辅助腔调节存储腔脉冲堆叠致动器，来对 TEM_{00} 模式的操作优化。

[0258] 5)2D 光电二极管阵列被用于取得存储腔反射镜操纵的误差信号，使得球面反射镜保持与光轴对齐；在适当设计的系统中，球面反射镜的操纵可独立于频率匹配和脉冲堆叠来调节。

[0259] 6)2D 光电二极管阵列还被用于取得存储腔同心度的误差信号使得 TME_{00} 模式的大小保持稳定；一般而言，该补偿在总的腔长中引入变化，这会影响频率匹配。然而，由于光学波动器存储腔机械耦合到低功率辅助腔，因此 PDH 反馈系统即时和连续地补偿腔长的任何变化（预先准备或以其他方式）；总的腔长保持稳定，并且保留存储腔向驱动激光器的锁频。

[0260] 7) 在存储腔于 TEM_{00} 模式上的稳定操作下，可微高频振动存储腔脉冲堆叠致动器以产生可进而用于使该致动器保持对最大 TEM_{00} 模式功率调节的误差信号。

[0261] 8) 当实现 TEM_{00} 模式的稳定操作时，可缓慢扫描驱动激光 / 电子束同步阶段以优化已存储光脉冲与电子聚束的交迭，并因此最大化 x 射线的产生。

[0262] 用于建立和控制稳定的已存储光束的开启过程

[0263] 以下过程是用于最初开启系统以供高功率操作和 x 射线产生的典型过程。但这并不表示排它性。

[0264] 1) 初始腔准备：

[0265] 腔的初始对准在控件停用的情况下‘手动’完成。驱动激光器和电子加速器的微脉冲重复频率在操作期间必须匹配的腔往返时间可通过仔细测量所涉及的物理距离、或者通过注入其腔内的无干扰循环可用光电二极管诊断元件来测量的单个籽微脉冲来建立。包括输入激光的对准和匹配的腔的初始横向对准可通过注入低功率驱动激光器使得变形的注入束的束腰与腔的束腰在空间上对准来实现，并且反射镜的横向对准可通过观察低功率和相干的腔内束在光电二极管阵列上的对称性和位置来调节。驱动激光器和腔反射镜的这种对准可按需重复进行。通过这些和类似的过程，腔可准备成处于基本对准的状态（除了剩余在操作期间的最小调节之外），以允许注入激光的某种初始相干积累。

[0266] 2) 低功率稳定存储束的初始建立

[0267] 相干循环光束的初始建立最好在控件停用以及足够低的驱动激光功率的情况下完成，从而在腔的调节引起相干脉冲堆叠的突然开始以及相应的腔内功率增大时不对腔的光学元件施加热变形。在这些低光束功率下，驱动激光被注入到腔中，并且驱动激光器系统的微脉冲重复频率可被调节以匹配存储腔的往返频率（对于其中可独立于同心度调节往返频率的腔配置，存储腔的往返频率可被调节成与驱动激光器系统的微脉冲重复频率匹配）。如果调节足够缓慢，则会观察到所注入的驱动激光在腔中激发共振，最初可能只是偶尔的，且波动的幅度指示驱动激光与腔内束的耦合（即锁模）程度。

[0268] 此时，可仔细调节驱动激光的光频率（或在光波长分数倍的尺度上调节腔反射镜的平移）以激发存储腔的共振。该共振在光电二极管诊断元件处呈现为对光频率调节敏感的准稳定模式轮廓。所得的共振并非必然表示 TEM_{00} 模式的激发，而是其它更高阶横向模式之一，因此应该继续频率调节直到观察到 TEM_{00} 共振在腔中建立。使用这样建立的 TEM_{00} 共振作为参考，应该仔细调节横向腔对准和腔的同心度，按需对频率重复进行调节，以最大化 TEM_{00} 模式中的存储功率。

[0269] 3) 控制系统的开启

[0270] 在步骤 2 的低驱动激光功率下，应该启用腔的控件，每次一个控件。启用的一代表性次序如下：(a) 腔反射镜横向对准以将存储束置于光电二极管阵列的中央，(b) 驱动激光束的横向和纵向对准以最大化到存储 TEM_{00} 模式的耦合，(c) 启用 Pound-Drever-Hall(PDH) 激光器稳定系统以将驱动激光频率锁定到共振 TEM_{00} 模式的轴向模式，(d) 存储腔的同心度以在相互作用区中实现所需的聚焦参数和束尺寸（腔长的相应变化会由 PDH 稳定系统在该点进行补偿和跟踪），以及 (e) 将微脉冲重复频率锁定到存储腔的往返频率。

[0271] 4) 高功率的稳定存储束的最终建立：

[0272] 在步骤 3 中开启控件之后，可缓慢增大驱动激光功率以在腔的相互作用区中实现所需的归一化矢势。在理想状况下，这在没有腔内束或光学元件干扰的情况下进行。然而，如果在较高功率下引起了反射镜或光学元件的变形，则对腔的主要影响会是腔同心度的畸变以及 TEM_{00} 模式的大小的诱发变化。在控制系统完全启用的情况下，这些变化应当甚至在高功率下得到补偿。然而，如果补偿没有导致最佳的最终系统配置（例如，如果控制参数之一落在其最佳范围之外），则对准和开启过程可在低功率下重复进行以重新初始化开始配置，以给出经优化的高功率配置。

[0273] 5)X 射线的产生

[0274] 在步骤 1 至 4 中建立光学波动器之后，电子束就能在加速器微脉冲重复频率锁定到驱动激光器和存储腔频率的情况下被聚焦到相互作用区中，且相关相位可被调节成使电子聚束与存储光脉冲在相互作用区中碰撞。用于该过程的主诊断元件将在 x 射线检测器上生成高能光子。然后，可调节电子束的横向和纵向对准与时序以优化所生成的 x 射线功率。

[0275] 多波动器的实施方式

[0276] 尽管以上讨论考虑电子束在单个腔的强烈波动器场中，但是有可能在多个光学腔之间共享电子束，并因此提供多个 x 射线源。这种可能性的原因是即使在归一化矢势接近 1 的情况下 x 射线发射的几率仍然较小，从而甚至在通过多个这种相互作用区之后，束中大多数电子的动量和能量完全未受干扰。在多个 x 射线源之间共享电子束的能力是重要的，至少因为电子束设施较为昂贵。这对将这种 x 射线用于蛋白质结晶的实验室以及可得益于多个 x 射线源的其它应用而言是有用的特性。

[0277] 图 9A 和 9B 是在多个光学波动器之间共享单个电子束的可选方法的示意图。在两个实施方式中，用诸如四极磁体 200 的公知元件来聚焦电子束，然后用诸如双极磁体 210 的公知元件来偏转该电子束。在穿过第一光学腔 30a 之后，该束偏转并聚焦以穿过下游的光学腔 30b。虽然附图只示出两个这种腔，但是有可能设置附加腔。

[0278] 图 9A 示出其中将 x 射线束全部引导到初始电子束方向的一侧的配置。注意，通过使用该配置，有可能在位于第一光学存储腔中第一相互作用区的下游的光学腔的多个相互作用区中重新聚焦电子束以驱动多个独立 x 射线束。该配置不需要存储环而只需要电子束传输通道（网格），该通道可同时围绕 5-30 度弧引导电子束，并且将电子束重新聚焦在第二存储腔的相互作用区处，并按需重复该过程多次以驱动在该设施中使用的多个束线。该安排是合适的，无论经过利用的电子束在丢弃前在“能量恢复”直线加速器中减速还是在适当设计的高能束流收集器中简单丢弃。

[0279] 关于不需要存储环提供多个 x 射线束线的评论不应被解释成暗示本发明无法与电子存储环结合使用。

[0280] 图 9B 示出其中将 x 射线束引导到初始电子束方向其它侧的配置。与图 9A 所示配置相比唯一的变化是对每个附加光学腔添加另一透镜（例如四极 200）和另一对偏转元件（例如偶极 210）。

[0281] 如上所述，根据本发明原理构建的 UV、x 射线和伽吗射线源的有效操作需要最小化相互作用区中的电子束能量扩展效应以及电子束横向上的发射率的一电子束传输系统。因此，该电子束传输系统应被设计成在相互作用区中提供几乎零发散，以允许安装聚焦透镜来将电子束急剧聚焦到垂直和水平平面上的焦点而不改变发散，以及以在相互作用区使用之后重新聚焦该电子束用于减速和丢弃、或者在第二相互作用区中用来产生第二单独可调的 UV、x 射线或伽吗射线束线。

[0282] 图 9A 和 9B 所示的简单电子束传输系统是系统的示例，这些系统能够依靠其对称性满足这些要求，同时附带提供将在沿束线的连续相互作用区中生成的 UV、x 射线和伽吗射线束在空间上分离以方便其在支持不相关的科学、医学或工业应用中同时使用的能力。这种配置还允许将所有聚焦透镜置于零发散位置处或其附近，从而消除（或最小化）透镜对电子束下游发散的影响。

[0283] 还存在能够添加到这些相对简单设计的某些其它加强。例如，离轴偶极子之间的六极磁体可用于减小或消除引起由四极子引入的能量依赖聚焦项的消色差畸变。这是因为由六极子提供的聚焦相关于横向位置不对称，所以可看到离轴高能电子的聚焦效应比离轴低能电子更强。

[0284] 设计优先

[0285] 在结合本发明的系统中，入射到腔的光学表面上的峰值和平均功率密度可通过增大腔长、腔反射镜的横向半径以及反射镜处的光斑尺寸来减小，并且这种更长和更大的腔在使用诸如存储环或超导线性加速器的连续或近连续电子束源的系统操作中是有益的。

[0286] 通过与发射过程的物理现象以及可用光学材料的属性相一致地最大化由在系统中使用的每个电子产生的 x 射线数，本发明将生成操作所需的电子束以及由该电子束产生的电离辐射所需的电功率降低到可达到的最低水平，进而将设施和操作成本降至最低、同时最大化由源生成的 x 射线的强度和亮度。

[0287] 参考文献

[0288] 以下参考文献通过引用结合于此：

[0289]

Motz 1951	Application of Radiation From Fast Electron Beams(来自快电子束的辐射的应用),H.Motz,Journal of Applied Physics 22(1951),527-535 页
Madey 1971	Stimulated Emission of Bremmstrahlung in a Periodic Magnetic Field(周期磁场中韧致辐射的受激发射),J.J.J.Madey,Journal of Applied Physics 42(1871),1906 页
Decker 1996	Synchrotron Radiation Facilities in the USA(美国的同步辐射设施),Glenn Decker,第五届欧洲粒子加速器会议 (1996)90
Robinson 1991	The ALS-A high Brightness XUV Synchrotron Radiation Source(ALS-高亮度 XUV 同步辐射源),A.L.Robinson 和 A.S.Schlachter,1991 年粒子加速器会议论文集
Hettel 2002	Design of the Spear 3 Light Source(矛 3 光源的设计),R.Hettel 等,第八届欧洲粒子加速器会议论文集,2002 年法国巴黎
Galayda 1995	The Advanced Photon Source(高级光子源),John N.Galayda,1995 年粒子加速器会议论文集 1(1995),4-8 页
Ruth 1998	Compton Backscattered X-Ray Source(康普顿反向散射 X 射线源),R.D.Ruth 和 Z.Huang,美国专利 No.5,825,847(1998)
Ruth 2000	Compton Backscattered Collimated X-Ray Source(康普顿反向散射准直 X 射线源),R.D.Ruth 和 Z.Huang,美国专利 No.6,035,015(2000)
Hartemann 2004	Femtosecond Laser Electron X-Ray Source(飞秒激光电子 X 射线源),F.V.Hartemann、H.A.Baldis、C.P.J.Barty、D.J.Gibson 和 B.Rupp,美国专利 No.6,724,782(2004)
Elias 1979	High-Power,C W,Efficient,Tunable(UV through IR)Free-Electron Laser Using Low-Energy Electron Beams(使用低能电子束的高功率、CW、高效、可调谐(UV 至 IR) 自由电子激光器),L.R.Elias,Phys.Rev.Letters 42(1979)977
Heitler 1960	Quantum Theory of Radiation(辐射的量子理论),第三版 (Oxford University Press(牛津大学出版社)1960),W.Heitler,211-224 页
Lau 2003	Nonlinear Thomson Scattering:A Tutorial(非线性汤姆森散射:指南),Y.Y.Lau,F.He,D.P.Umstadter 和 R.Kowalcyzk,Physics of Plasmas 10(2003),2155-2162 页
Elleaume 2003	Lecture on Insertion Devices(插入器件讲义),P.Elleaume,CERN 加速器学校(Brunnen,2003 年 7 月 2-9 日)
Kim 1989	Characteristics of Synchrotron Radiation(同步辐射的特征),K.J.Kim,AIP 会议论文集 184:Physics of Particle Accelerators(粒子加速器物理)(1989)565
Siegman 1986a	Lasers(激光器)(University Science Books(大学自然科学图书出版社),Sausalito 1986),A.E.Siegman,558-891 页

Sakai 2001	Measurement of an Electron Beam Size with a Laser Wire Beam Profile Monitor（使用激光线束轮廓监视器测量电子束尺寸），H.Sakai 等，Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams 4（物理评论专题 - 加速器和束 4)(2001)
Jones 2001	Stabilization of Femtosecond Lasers for Optical Frequency Metrology and Direct Optical to Radio Synthesis（对无线电合成的光学频率度量和直接光学的飞秒激光器稳定），R.J.Jones 和 J.C.Diels，Phys.Rev.Letters 86(2001)，3288-3291 页
Siegman 1986b	Lasers（激光器）(University Science Books（大学自然科学图书出版社），Sausalito 1986)，A.E.Siegman，680
Drever 1983	Laser Phase and Frequency Stabilization Using an Optical Cavity（使用光学腔的激光相位和频率稳定），R.W.P.Drever，J.L.Hall 和 F.V.Kowalski，Appl.Physics 31(1983)97

[0291] 结论

[0292] 总而言之，可以看到，本发明的诸实施方式可提供紫外、x 射线和伽吗射线波长下的近单色高能电磁辐射的有效可调源。这种源能够用光学波动器 - 通过在相匹配、近球状、低损耗的光学腔中累积来自一个或多个脉冲激光器的相位相干脉冲辐射来创建 - 和相对论电子束来构建，该电子束以上述光学微脉冲的周期聚束、并且在上述光学腔的相互作用（聚焦）区中聚焦、并与所累积的（循环）光学微脉冲同步，从而使得电子聚束与循环光学微脉冲在光学微脉冲的峰值强度上相互作用。

[0293] 当泵浦激光器的峰值功率和腔的反射率被选择成生成在腔的相互作用（聚焦）区处归一化光学矢势大于 0.1 的循环光学微脉冲，并且注入光脉冲和电子聚束的辐射间隔持续时间针对反射镜处的给定束尺寸优化以确保入射到腔的反射表面上的光脉冲的积分通量和平均功率保持在其损伤阈值之内、同时最大化如此创建的脉冲序列的重复率以优化平均辐射 x 射线功率时，x 射线产生的强度和效率就得到了优化。

[0294] 本发明的诸实施方式还提供大大减小用紧密聚束的电子束有效产生 x 射线所需的平均循环光功率的优点，或者大大增大峰值光功率、同时保持与连续束相同的平均功率的优点，从而基本上限制入射到光学存储腔的高度反射镜上的光场的积分通量和平均功率密度，因此显著降低光学损伤这些反射镜、因热膨胀引起的外形变形等风险。这种低占空比脉冲激光束的使用还明显降低了由泵浦激光器提供的用于该系统操作的平均功率。

[0295] 虽然本说明书适于生成最亮和最强的可能 x 射线束，但是可在降低强度和亮度的代价下通过更改光波长或光脉宽和间距、通过改变光学存储器的瑞利参数、或者通过改变电子与反向传播的光脉冲束相遇的电子能量或角度来更改所生成 x 射线的实际脉宽和脉冲间隔。

[0296] 虽然以上是本发明特定实施方式的完整描述，但是以上描述不应作为对如权利要求书所定义的本发明范围的限制。

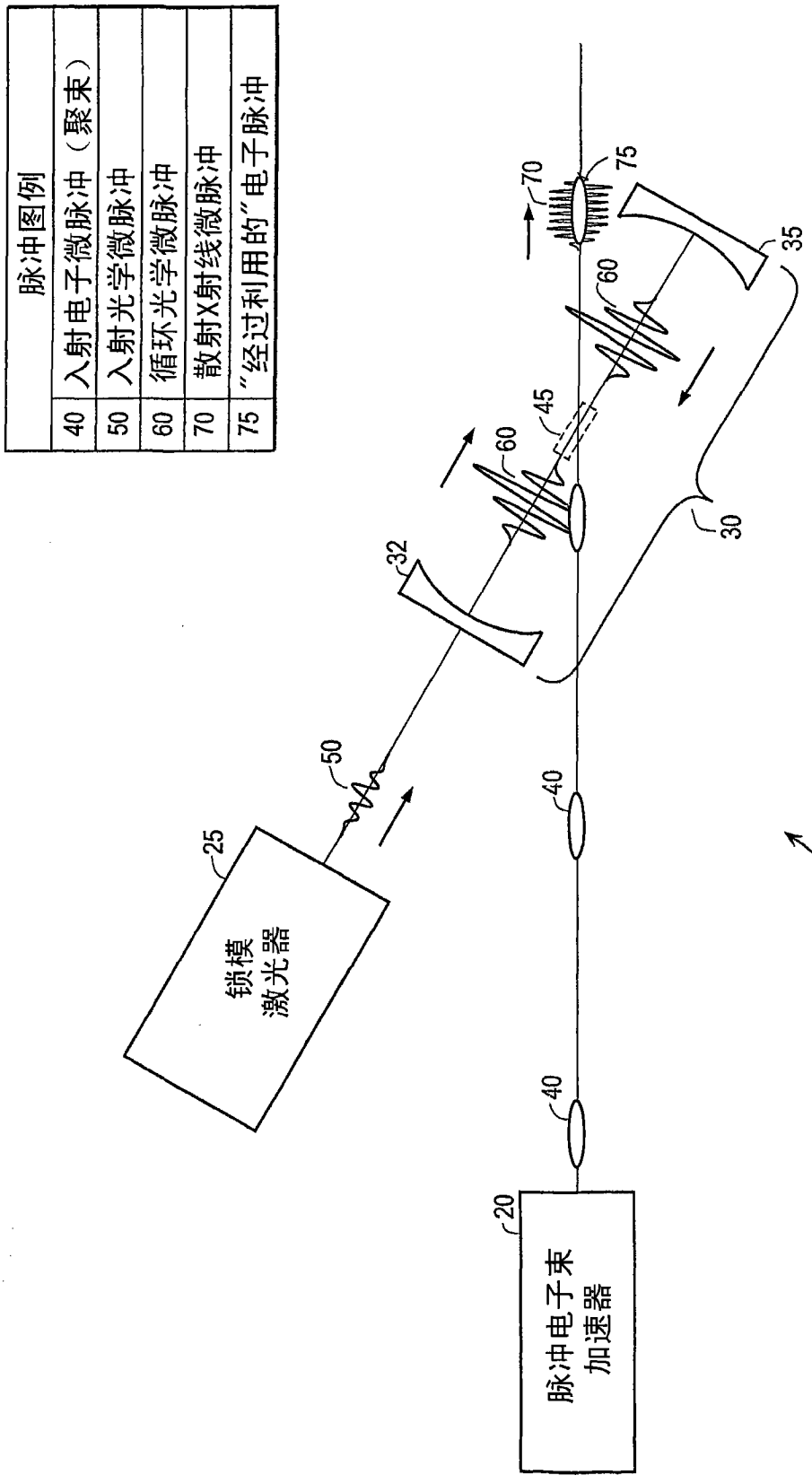
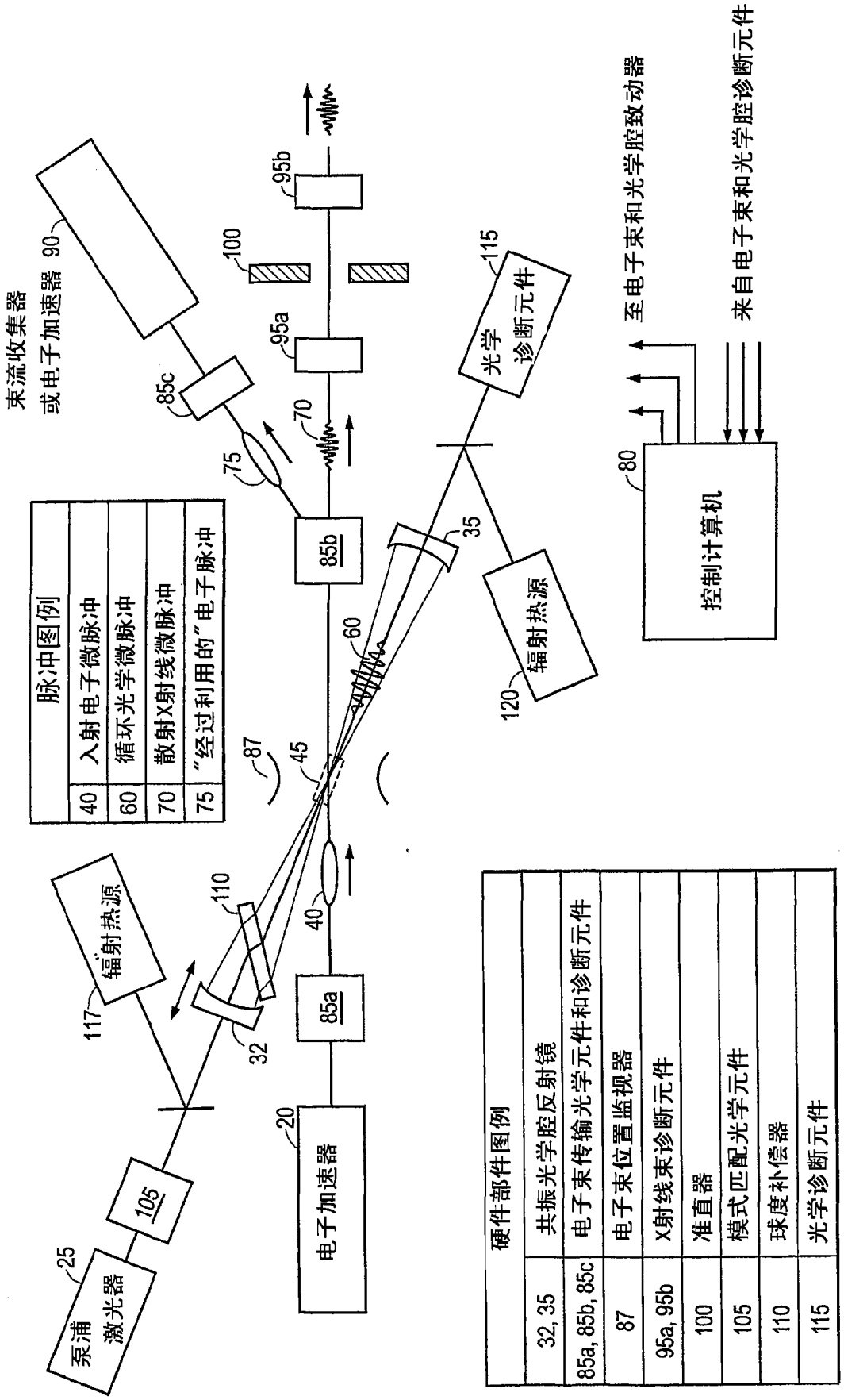

脉冲图例
40 入射电子微脉冲（聚束）
50 入射光学微脉冲
60 循环光学微脉冲
70 散射X射线微脉冲
75 "经过利用的"电子脉冲
锁模
激光器
脉冲电子束
加速器
10
20
25
30
32
35
40
45
50
60
70
75

图 1A



脉冲图例	
40	入射电子微脉冲
60	循环光学微脉冲
70	散射X射线微脉冲
75	"经过利用的"电子脉冲

硬件部件图例	
32, 35	共振光学腔反射镜
85a, 85b, 85c	电子束传输光学元件和诊断元件
87	电子束位置监视器
95a, 95b	X射线束诊断元件
100	准直器
105	模式匹配光学元件
110	球度补偿器
115	光学诊断元件

图 1B

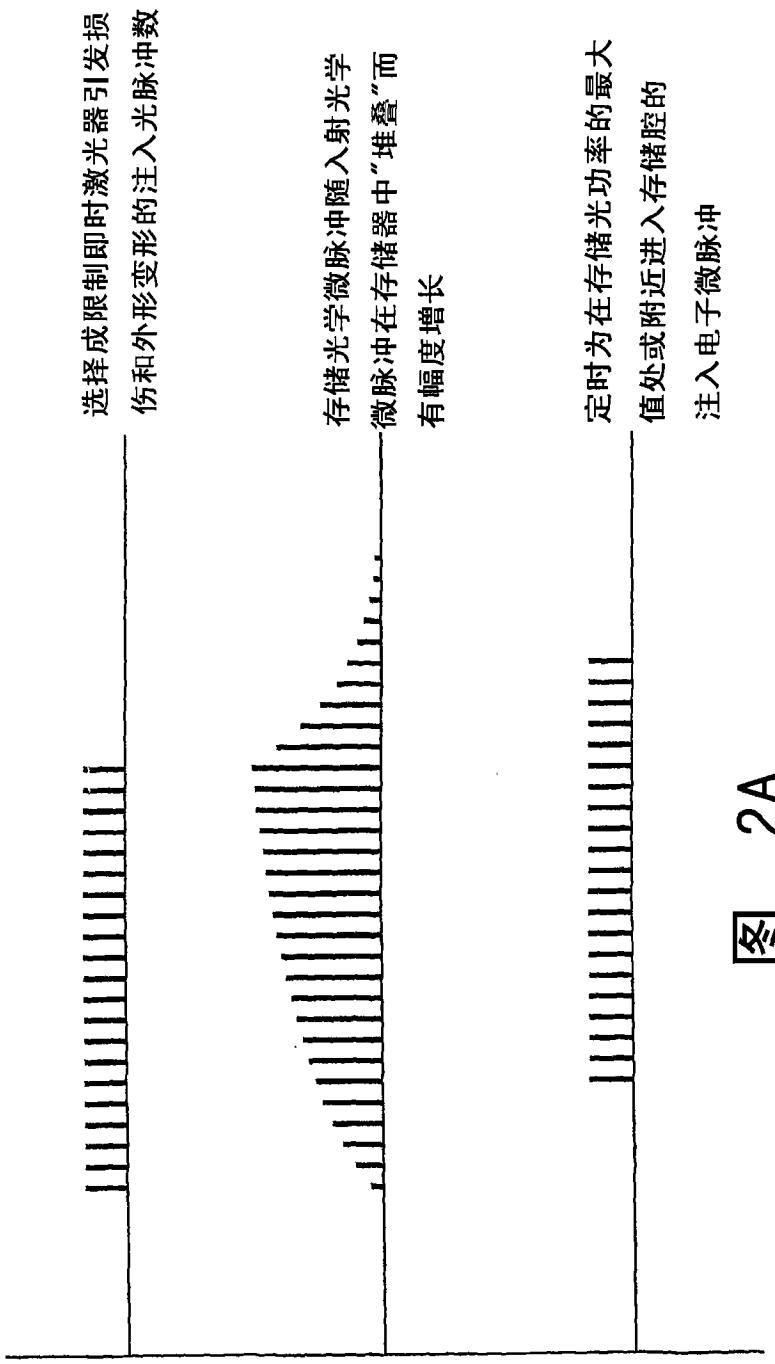

注入光学微脉冲
选择成限制即时激光器引发损伤和外形变形的注入光脉冲数
存储光学微脉冲
存储光学微脉冲随入射光学微脉冲在存储器中"堆叠"而有幅度增长
注入电子微脉冲
定时为在存储光功率的最大值处或附近进入存储腔的注入电子微脉冲

图 2A

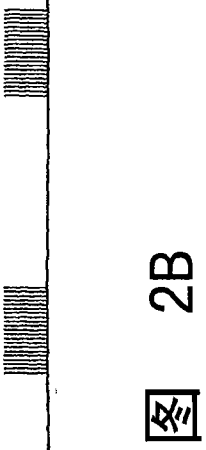

电子束，光束脉冲重复率
选择成限制时间平均光学损伤和外形变形的占空比

图 2B

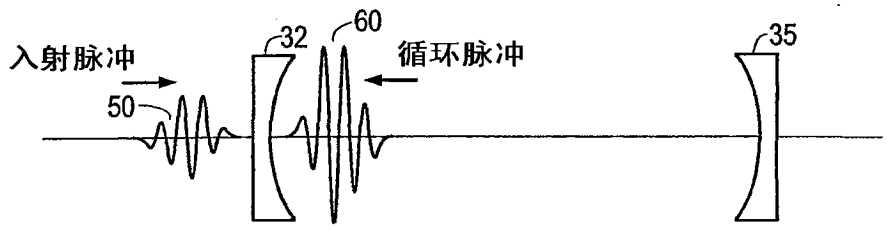

入射脉冲
50
32
60
循环脉冲
35

图 3A

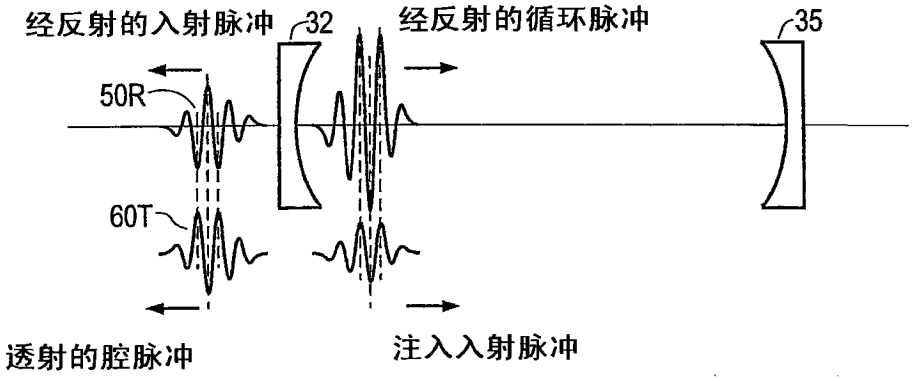

经反射的入射脉冲
32
经反射的循环脉冲
35
50R
60T
透射的腔脉冲
注入入射脉冲

图 3B

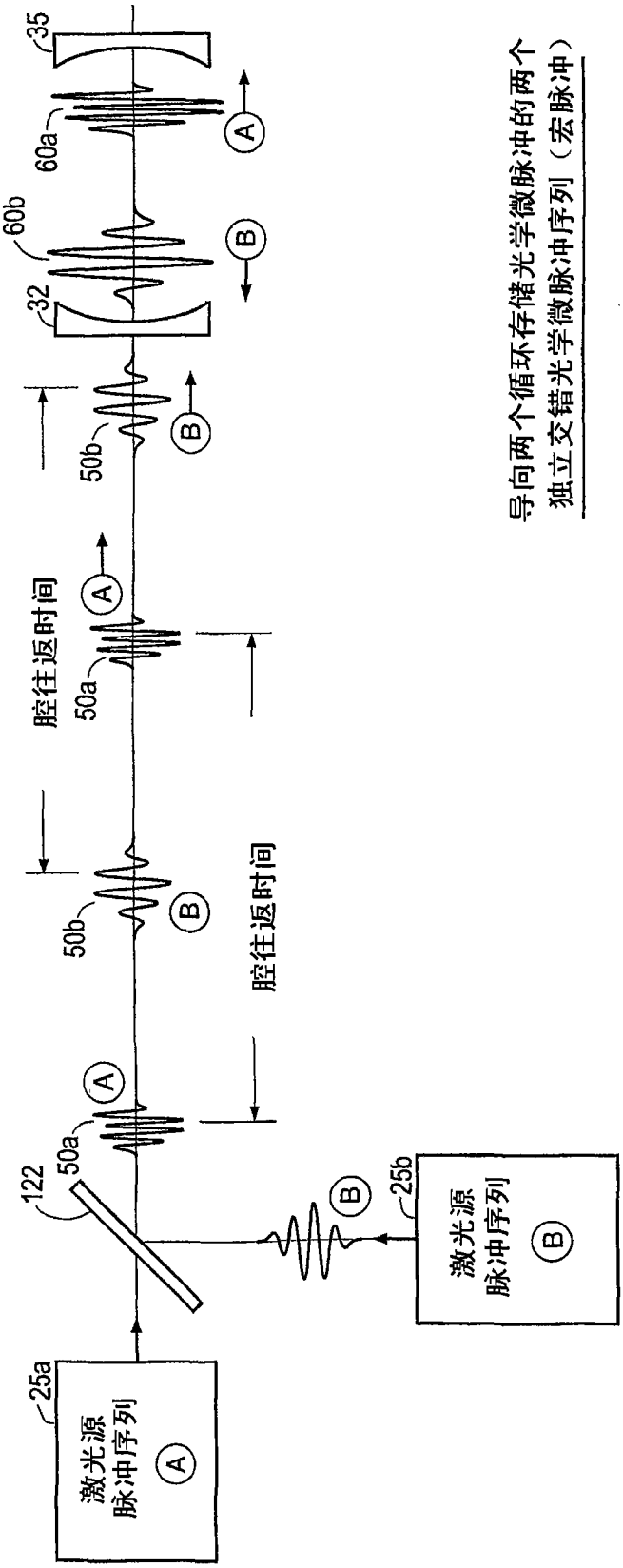

导向两个循环存储光学微脉冲的两个
独立交错光学微脉冲序列（宏脉冲）
35
60a
60b
32
50b
50a
122
25a
25b
激光源
脉冲序列
A
B
腔往返时间

图 4

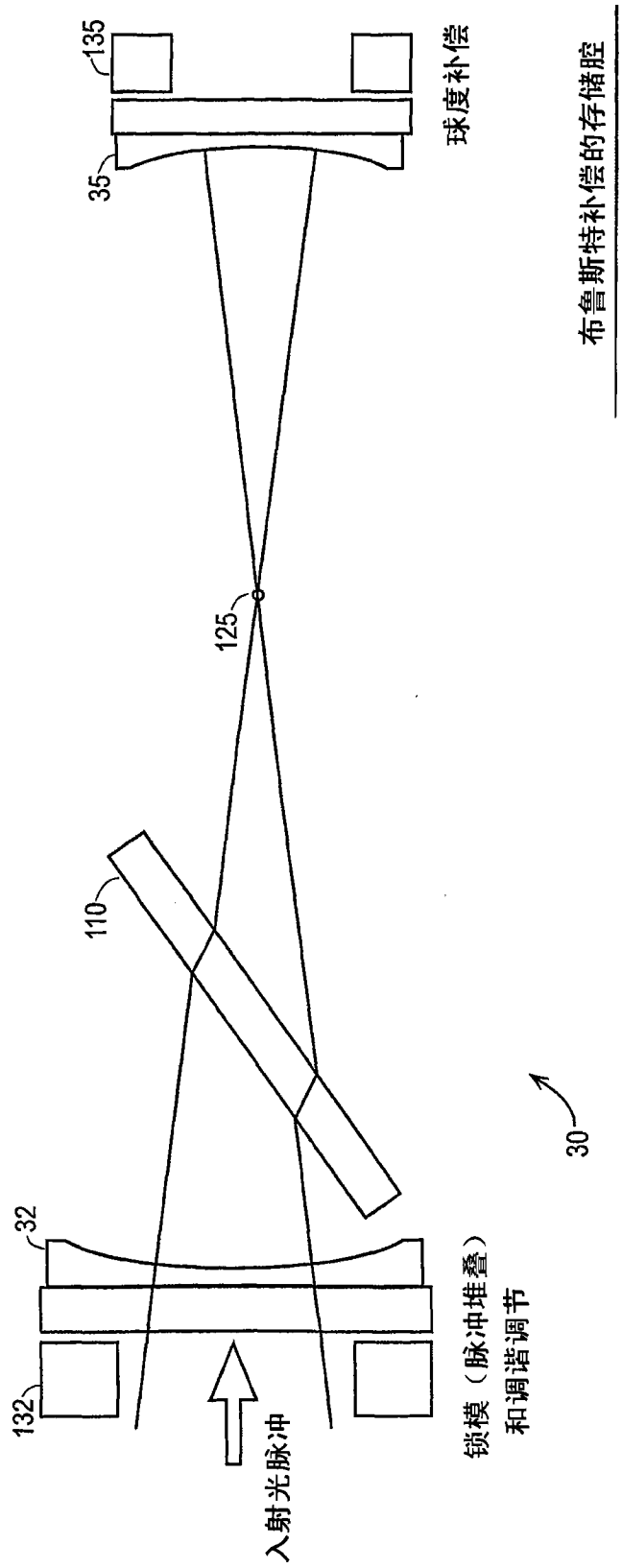


图 5

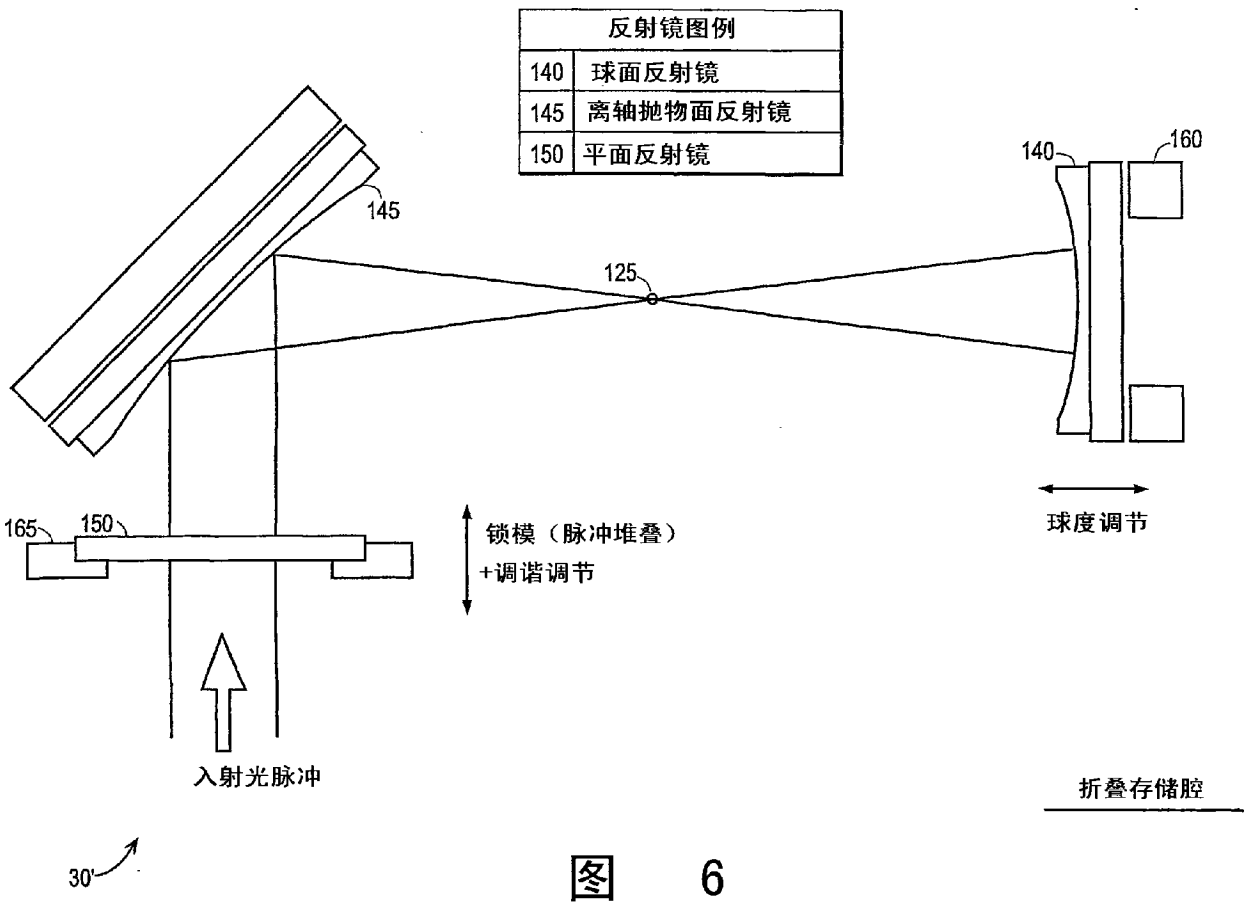

反射镜图例
140 球面反射镜
145 离轴抛物面反射镜
150 平面反射镜
145
125
140
160
165
150
锁模（脉冲堆叠）
+调谐调节
球度调节
入射光脉冲
折叠存储腔
30'

图 6

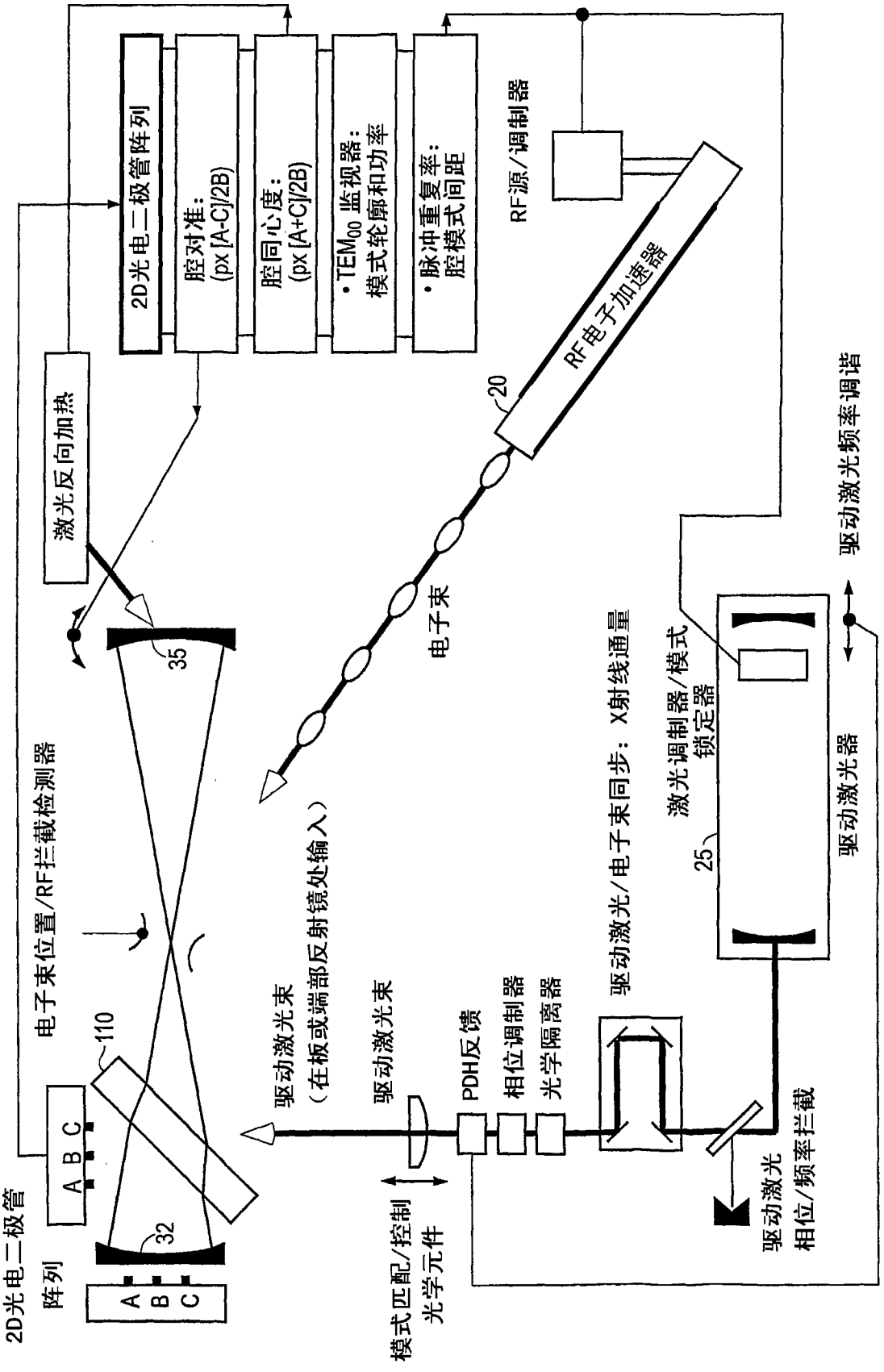

2D光电二极管阵列
A B C
电子束位置/RF拦截检测器
激光反向加热
2D光电二极管阵列
腔对准:
(px [A-C]/2B)
腔同心度:
(px [A+C]/2B)
• TEM00 监视器:
模式轮廓和功率
• 脉冲重复率:
腔模式间距
RF源/调制器
RF电子加速器
电子束
驱动激光束
(在板或端部反射镜处输入)
驱动激光束
PDH反馈
相位调制器
光学隔离器
驱动激光/电子束同步: X射线通量
激光调制器/模式
锁定器
驱动激光器
驱动激光频率调谐
驱动激光
相位/频率拦截
模式匹配/控制
光学元件
110
35
32
20
25

图 7A

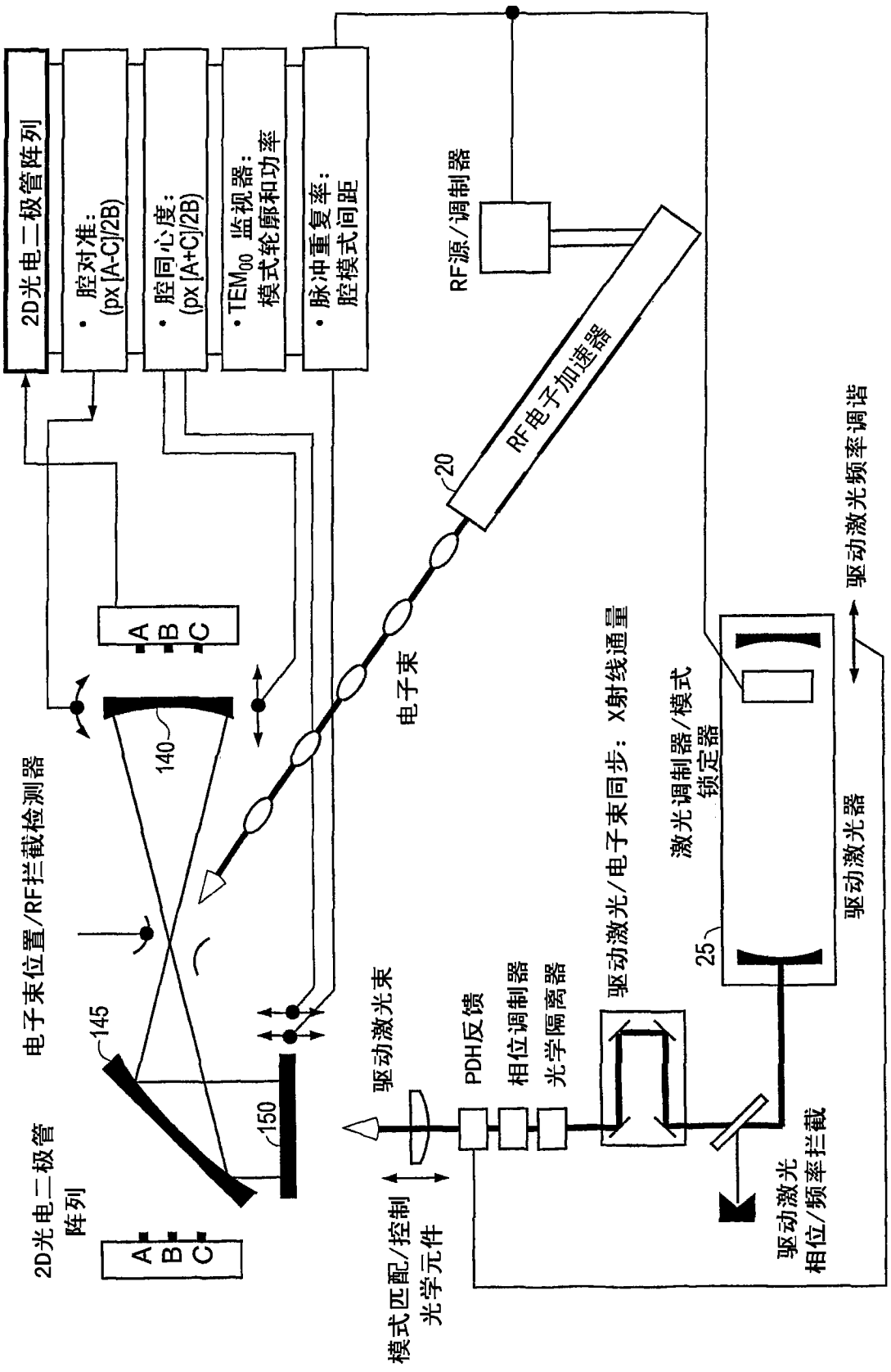

2D光电二极管阵列
• 腔对准:
(px [A-C]/2B)
• 腔同心度:
(px [A+C]/2B)
• TEM00 监视器:
模式轮廓和功率
• 脉冲重复率:
腔模式间距
RF源/调制器
RF电子加速器
20
电子束
电子束位置/RF拦截检测器
A
B
C
140
145
150
2D光电二极管
阵列
A
B
C
驱动激光束
PDH反馈
相位调制器
光学隔离器
驱动激光/电子束同步: X射线通量
激光调制器/模式
锁定器
25
驱动激光器
驱动激光频率调谐
模式匹配/控制
光学元件
驱动激光
相位/频率拦截

图 7B

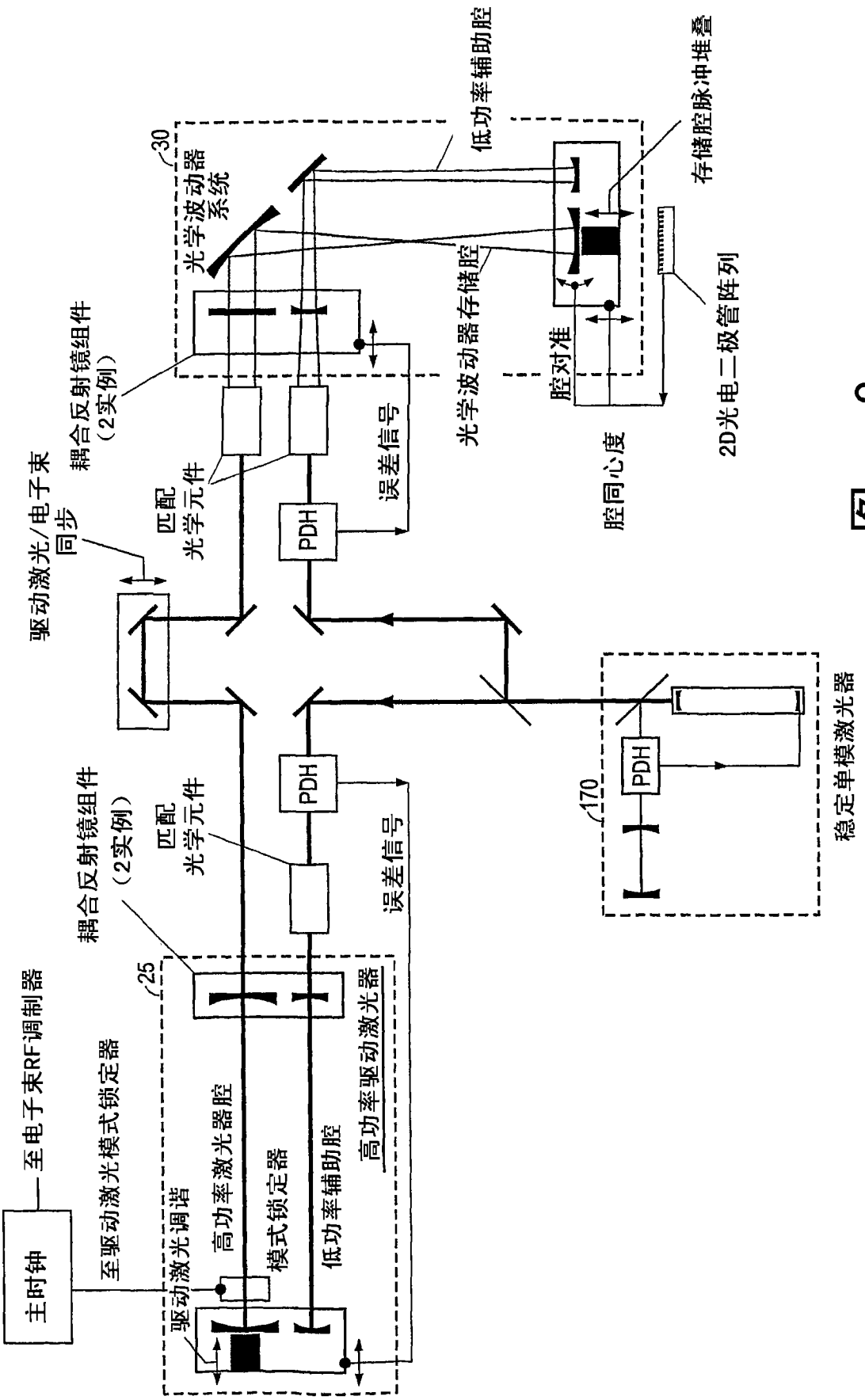

主时钟
至电子束RF调制器
至驱动激光模式锁定器
驱动激光调谐
高功率激光器腔
模式锁定器
低功率辅助腔
高功率驱动激光器
25
耦合反射镜组件
（2实例）
匹配
光学元件
PDH
误差信号
驱动激光/电子束
同步
耦合反射镜组件
（2实例）
匹配
光学元件
PDH
误差信号
30
光学波动器
系统
低功率辅助腔
光学波动器存储腔
腔对准
腔同心度
存储腔脉冲堆叠
2D光电二极管阵列
170
PDH
稳定单模激光器

图 8

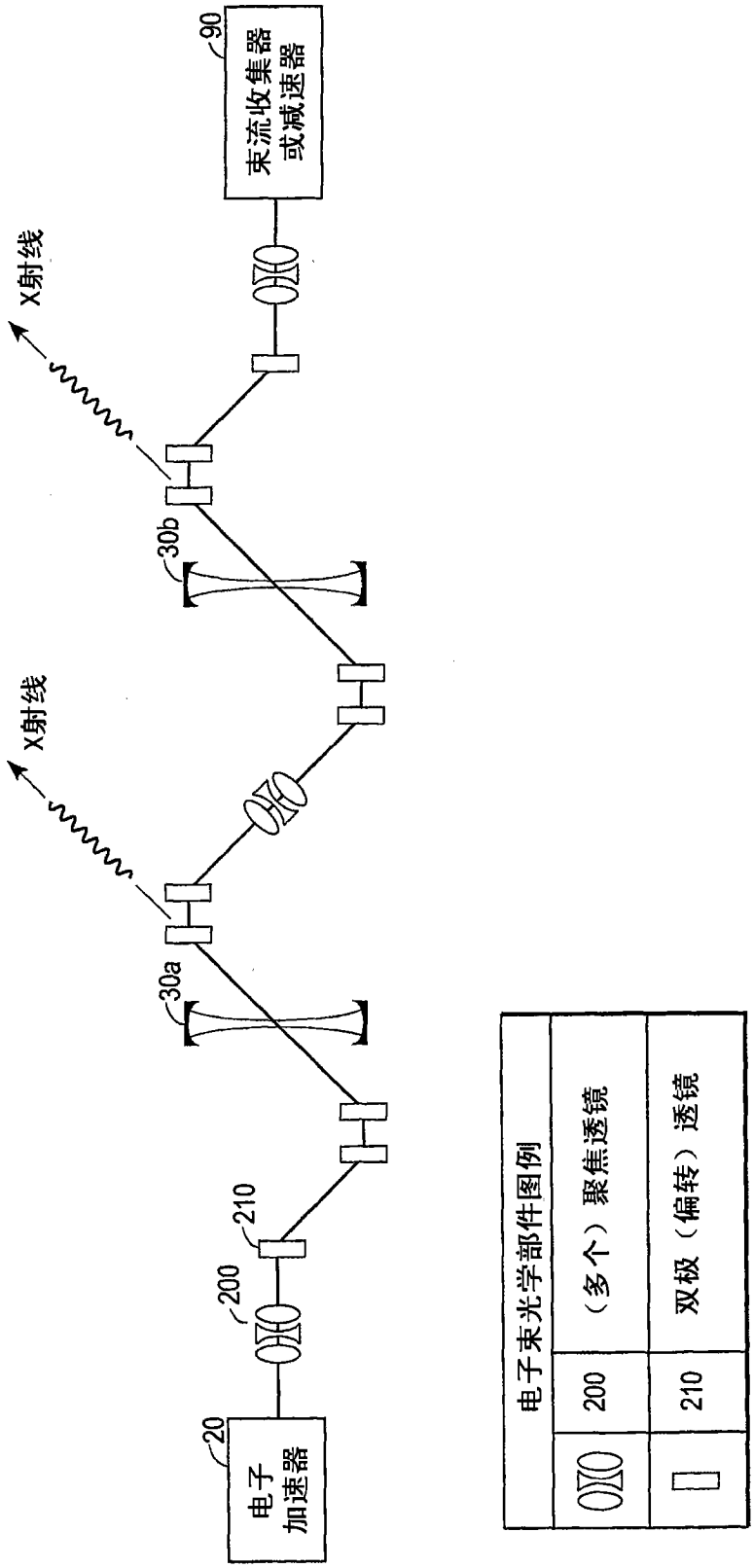
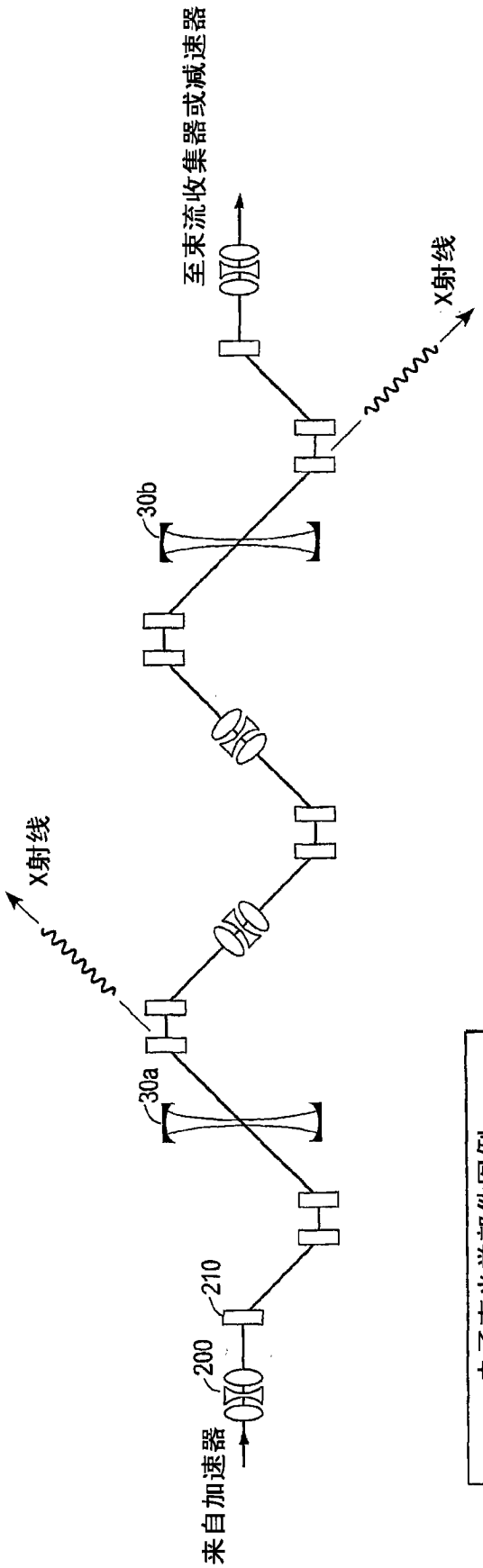

电子束光学部件图例
200
（多个）聚焦透镜
210
双极（偏转）透镜
电子加速器
20
200
210
30a
30b
X射线
X射线
束流收集器或减速器
90

图 9A



电子束光学部件图例		
	200	（多个）聚焦透镜
	210	双极（偏转）透镜

图 9B