



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 101276125 B

(45) 授权公告日 2011.03.23

(21) 申请号 200810089808.6

(22) 申请日 2008.03.28

(30) 优先权数据

2007-085305 2007.03.28 JP

(73) 专利权人 索尼株式会社

地址 日本东京都

(72) 发明人 增田久

(74) 专利代理机构 北京东方亿思知识产权代理

有限责任公司 11258

代理人 董方源

(51) Int. Cl.

G02F 1/35 (2006.01)

H01S 3/00 (2006.01)

(56) 对比文件

US 6285691 B1, 2001.09.04, 全文.

US 2002/0171912 A1, 2002.11.21, 全文.

CN 1516911 A, 2004.07.28, 全文.

DE 102005015497 A1, 2006.10.12, 全文.

US 5621774 A, 1997.04.15, 全文.

审查员 胡婉约

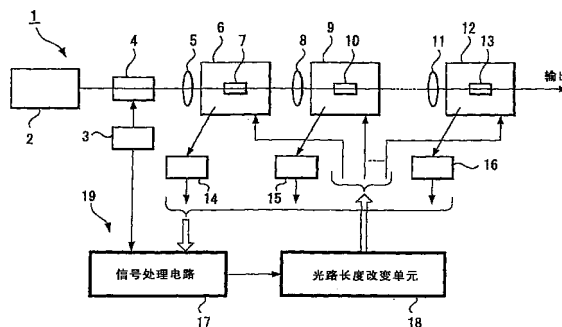
权利要求书 3 页 说明书 18 页 附图 13 页

(54) 发明名称

激光发生装置

(57) 摘要

本发明提供了激光发生装置。一种激光发生装置包括激光源、相位调制器、被配置用于生成施加给相位调制器的调制信号的信号发生单元、第一外部谐振器、布置在第一外部谐振器的后级的第二外部谐振器、各自设置在外部谐振器之中用于实施波长转换的非线性光学元件、用于改变各个外部谐振器的光路长度的光路长度改变单元、以及具有负反馈配置的控制电路，该控制电路被配置用于获取用于各个外部谐振器的误差信号，并被配置用于根据 FM 边带方法、使用误差信号来控制光路长度改变单元。在激光发生装置中，通过设置调制信号的频率并通过控制各个外部谐振器的光路长度来将各个外部谐振器同时保持在谐振状态。



1. 一种激光发生装置,包括

激光源;

第一外部谐振器和布置在所述第一外部谐振器的后级上的第二外部谐振器;

布置在所述激光源和所述第一外部谐振器之间的光路上的相位调制器,所述相位调制器被施加调制信号;

信号发生单元,被配置用于生成施加给所述相位调制器的所述调制信号;

分别布置在所述第一外部谐振器和所述第二外部谐振器之中的第一非线性光学元件和第二非线性光学元件,被配置用于对入射在所述第一外部谐振器和所述第二外部谐振器中的每一个上的激光实施波长转换;

光路长度改变装置,用于改变所述第一外部谐振器和所述第二外部谐振器中的每一个的光路长度;

至少一个光电探测器,被配置用于接收来自所述第一外部谐振器和所述第二外部谐振器中的每一个的激光;以及

具有负反馈配置的控制电路,被配置用于获取由所述至少一个光电探测器接收的至少一个检测信号和所述调制信号,从而获得用于所述第一外部谐振器和所述第二外部谐振器中的每一个的误差信号,并被配置用于根据 FM 边带方法、使用所述误差信号来控制所述光路长度改变装置,其中

通过将所述调制信号的频率设置成与下述值相等,并且通过利用所述控制电路来控制所述第一外部谐振器和所述第二外部谐振器中的每一个的光路长度,所述第一外部谐振器和所述第二外部谐振器各自同时被保持在谐振状态,所述值的获得使得用于所述第一外部谐振器和所述第二外部谐振器中的每一个的误差信号的信噪比之积维持在最大值。

2. 一种激光发生装置,包括:

激光源;

第一外部谐振器和布置在所述第一外部谐振器的后级上的第二外部谐振器;

布置在所述激光源和所述第一外部谐振器之间的光路上的相位调制器,所述相位调制器被施加调制信号;

布置在所述相位调制器和所述第一外部谐振器之间的光路上的放大器;

信号发生单元,被配置用于生成施加给所述相位调制器的所述调制信号;

分别布置在所述第一外部谐振器和所述第二外部谐振器之中的第一非线性光学元件和第二非线性光学元件,被配置用于对入射在所述第一外部谐振器和所述第二外部谐振器中的每一个上的激光实施波长转换;

光路长度改变装置,用于改变所述第一外部谐振器和所述第二外部谐振器中的每一个的光路长度;

至少一个光电探测器,被配置用于接收来自所述第一外部谐振器和所述第二外部谐振器中的每一个的激光;以及

具有负反馈配置的控制电路,被配置用于获取由所述至少一个光电探测器接收的至少一个检测信号和所述调制信号,从而获得用于所述第一外部谐振器和所述第二外部谐振器中的每一个的误差信号,并被配置用于根据 FM 边带方法、使用所述误差信号来控制所述光路长度改变装置,其中

通过将所述调制信号的频率设置成与下述值相等,并且通过利用所述控制电路来控制所述第一外部谐振器和所述第二外部谐振器中的每一个的光路长度,所述第一外部谐振器和所述第二外部谐振器各自同时被保持在谐振状态,所述值的获得使得用于所述第一外部谐振器和所述第二外部谐振器中的每一个的误差信号的信噪比之积维持在最大值。

3. 一种激光发生装置,包括:

激光源;

其中具有增益介质的第一外部谐振器;

布置在所述第一谐振器的后级上的第二外部谐振器;

布置在所述激光源和所述第一外部谐振器之间的光路上的相位调制器,所述相位调制器被施加调制信号;

信号发生单元,被配置用于生成施加给所述相位调制器的所述调制信号;

布置在除了所述第一外部谐振器之外的外部谐振器中的非线性光学元件,被配置用于对入射激光实施波长转换;

光路长度改变装置,用于改变所述第一外部谐振器和所述第二外部谐振器中的每一个的光路长度;

至少一个光电探测器,被配置用于接收来自所述第一外部谐振器和所述第二外部谐振器中的每一个的激光;以及

具有负反馈配置的控制电路,被配置用于获取由所述至少一个光电探测器接收的至少一个检测信号和所述调制信号,从而获得用于所述第一外部谐振器和所述第二外部谐振器中的每一个的误差信号,并被配置用于根据 FM 边带方法、使用所述误差信号来控制所述光路长度改变装置,其中

通过将所述调制信号的频率设置成与下述值相等,并且通过利用所述控制电路来控制所述第一外部谐振器和所述第二外部谐振器中的每一个的光路长度,所述第一外部谐振器和所述第二外部谐振器各自同时被保持在谐振状态,所述值的获得使得用于所述第一外部谐振器和所述第二外部谐振器中的每一个的误差信号的信噪比之积维持在最大值。

4. 一种激光发生装置,包括:

激光源;

其中具有增益介质的第一外部谐振器;

布置在所述第一谐振器的后级上的第二外部谐振器;

布置在所述激光源和所述第一外部谐振器之间的光路上的相位调制器,所述相位调制器被施加调制信号;

信号发生单元,被配置用于生成施加给所述相位调制器的所述调制信号;

分别布置在所述第一外部谐振器和所述第二外部谐振器之中的第一非线性光学元件和第二非线性光学元件,被配置用于对入射在所述第一外部谐振器和所述第二外部谐振器中的每一个上的激光执行波长转换;

光路长度改变装置,用于改变所述第一外部谐振器和所述第二外部谐振器中的每一个的光路长度;

至少一个光电探测器,被配置用于接收来自所述第一外部谐振器和所述第二外部谐振器中的每一个的激光;以及

具有负反馈配置的控制电路,被配置用于获取由所述至少一个光电探测器接收的至少一个检测信号和所述调制信号,从而获得用于所述第一外部谐振器和所述第二外部谐振器中的每一个的误差信号,并被配置用于根据 FM 边带方法、使用所述误差信号来控制所述光路长度改变装置,其中

通过将所述调制信号的频率设置成与下述值相等,并且通过利用所述控制电路来控制所述第一外部谐振器和所述第二外部谐振器中的每一个的光路长度,所述第一外部谐振器和所述第二外部谐振器各自同时被保持在谐振状态,所述值的获得使得用于所述第一外部谐振器和所述第二外部谐振器中的每一个的误差信号的信噪比之积维持在最大值。

5. 如权利要求 1 至 4 中任一项所述的激光发生装置,其中

分别向所述相位调制器的第一电极和第二电极施加极性相反且相位相同的第一电压信号和第二电压信号,所述第一电极和第二电极分别形成在所述相位调制器的第一表面和与所述第一表面相对的第二表面上。

6. 如权利要求 1 至 4 中任一项所述的激光发生装置,其中

通过对所述激光进行相位调制而生成的边带的频率被设置在第一范围中,并且同时在第二范围中,其中,所述第一范围是以所述第一外部谐振器的谐振频率为中心的、与所述第一外部谐振器透射宽度的半高半宽的相对应的第一频率范围的 0.5 到 2 倍,所述第二范围是以所述第一外部谐振器的谐振频率为中心的、与所述第二外部谐振器的透射宽度的半高半宽相对应的第二频率范围的至少 0.5 倍。

7. 如权利要求 1 至 4 中任一项所述的激光发生装置,还包括:

调制频率设置装置,用于获取由所述外部谐振器的透射宽度的变化导致的误差信号,并用于基于所获取的误差信号来将施加给所述相位调制器的调制信号的频率设置成下述值,所述值使得用于所述外部谐振器的误差信号的信噪比之积维持在最大值。

8. 如权利要求 1 至 4 中任一项所述的激光发生装置,其中

通过对所述激光进行相位调制而生成的边带中的一部分被所述第一外部谐振器反射,而其余边带通过所述第一外部谐振器并在随后被所述第二外部谐振器反射。

激光发生装置

技术领域

[0001] 本发明一般地涉及激光发生装置。更具体地,本发明涉及包括激光源和多个外部谐振器的激光发生装置,用于利用单个调制信号来实现装置的稳定锁定。

背景技术

[0002] FM 边带技术 (“Pound-Drever-Hall 锁定”技术)通常作为用于稳定锁定激光发生装置中的外部谐振器的技术的示例,并且被广泛地用于锁定外部谐振器。

[0003] 在 FM 边带方法中,使用置于外部谐振器的前级的用以生成误差信号的相位调制器来生成边带波。在通过调制紫外光来生成边带波的情况下,特别地,需要透光率较高且工作电压较低的高性能相位调制器。

[0004] 根据现有技术,为了避免由紫外光导致的对相位调制器的过度损坏,紫外光的锁定是通过构造这样的激光发生装置来实现的,所述激光发生装置包括多个外部谐振器、根据 FM 边带技术来同时锁定多个外部谐振器并且通过多级来实现波长转换。例如当使用两个外部谐振器时,这样来实现上述步骤:首先将第一相位调制器布置在第一外部谐振器的前级,第一外部谐振器将被根据 FM 边带技术来进行锁定;允许经过第一外部谐振器的波长转换(即,生成波长转换后的光)的光入射到第二相位调制器上;允许来自第二相位调制器的光入射到第二外部谐振器上;并且随后实现第二外部谐振器的锁定,其后是另一次波长转换。

[0005] 但是,在上述需要同时锁定多个谐振器的配置中,利用了与外部谐振器一样多的相位调制器,原因在于在每一个外部谐振器的前级布置了一个相位调制器。另外,由于在相位调制器中包括作为主要组件的光学晶体(非线性光学元件),所以相位调制器的制造相对而言比较昂贵。因此,谐振器的数目的增加已经导致了整体尺寸和装置成本的过度增加。

[0006] 此外,在经波长转换之后输出的光为紫外光的情况下,相对少量的相位调制器可对紫外光进行操作,因此具有较低的透光率和较差的品质因数(figure of merit)。这导致了几个难点,例如,用于提供高工作电压的高电压电源的提供,以及由于紫外光所引起的损坏而导致的相对较短的寿命。

[0007] 日本未审查专利申请公布 No. 2002-311467 公开了一种设备和方法,其中,通过向相位调制器输入多个调制信号(载波)来实现多级锁定。

[0008] 虽然在上述申请公布中记载的设备和方法能够补偿前述难点中的一些,但是在所述设备和方法中还是有几点尚待解决,例如,使用多个信号发生单元来提供多个调制信号,以及信号处理的增大的复杂度。

[0009] 对于使用单个调制信号来锁定多级外部谐振器的方法,需要通过下述方式来使锁定(谐振状态)稳定:通过尽可能地增大从第一级的外部谐振器反射的已调光(modulated light)的比例从而增大误差信号的 S/N 比,同时通过允许已调光尽可能多地通过第一级的外部谐振器从而增大由位于随后各级的其它外部谐振器检测到的误差信号的 S/N 比。

[0010] 因此,当没有在设置更新之后的初期对外部谐振器整体进行优化,或者由于谐振

器损耗和转换效率的变化而发生外部谐振器的透射宽度随时间的变化时,对于包括多个外部谐振器的系统而言,已经面临陷入锁定的不稳定性的若干难点。

[0011] 另外,为了增大波长转换效率或者获得大功率的波长转换后的光,大功率的激光必须照射外部谐振器,以实现激光的波长转换。虽然这种照射是通过使大功率激光入射到相位调制器上来实现的,但是由于激光照射可能导致的损坏效果,入射激光的强度仅能够被增大到对相位调制器产生一定限度的损坏。这种损坏可以通过使用设有大有效直径的组件的相位调制器来避免。但是,这使得相位调制器中的光学晶体(非线性光学元件)的尺寸增大并因而增加了其成本。因此,迫切希望能够利用低强度的激光来实现稳定信号调制。

发明内容

[0012] 考虑到上述难点,本发明的目的是使用单个调制信号来解决各个外部谐振器的稳定锁定,这是通过根据 FM 边带方法在外部谐振器中生成希望的激光来实现的。

[0013] 为了实现上述目的,根据本发明的一种形式,提供了一种激光发生装置,其包括激光光源、第一和第二外部谐振器以及其它多个谐振器、相位调制器、信号发生单元、第一和第二非线性光学元件、光路长度改变单元、至少一个光电探测器以及控制电路。

[0014] 第二外部谐振器布置在第一外部谐振器的后级;相位调制器被配置成被施加调制信号;信号发生单元被配置用于生成施加给相位调制器的调制信号;并且分别布置在第一和第二外部谐振器之中的第一和第二非线性光学元件被配置用于对入射在第一和第二外部谐振器的各个上的激光实施波长转换。另外,光路长度改变单元被配置用于改变第一和第二外部谐振器中的各个的光路长度,并且至少一个光电探测器被配置用于接收来自第一和第二外部谐振器中的各个的激光。另外,具有负反馈配置的控制电路被配置用于获取由所述至少一个光电探测器接收的至少一个检测信号和所述调制信号,从而获得用于第一和第二外部谐振器中的各个的误差信号,并被配置用于根据 FM 边带方法、使用误差信号来控制光路长度改变单元。

[0015] 通过将调制信号的频率设置成与下述值相等,该值使得用于各个外部谐振器的误差信号的 S/N 比可以被平均化,并且通过利用控制电路来控制各个外部谐振器的光路长度,各个外部谐振器被同时保持在谐振状态。作为用于平均 S/N 比的措施的一个示例,施加给相位调制器的调制信号的频率被设置成使得将用于各个外部谐振器的误差信号的 S/N 比之积 P 维持在近似等于其最大值。

[0016] 根据上述结构,由于形成了这样的激光发生装置,该激光发生装置被配置成获取各级外部谐振器的误差信号,并将施加给相位调制器的调制信号的频率设置成下述值,该值使得各级的误差信号的 S/N 比可以被平均化,所以所有外部谐振器的稳定锁定将是可行的。特别地,当调制信号的频率被设置成使得误差信号的 S/N 比之积可以近似等于其最大值时,可以总体上稳定多个外部谐振器。

[0017] 另外,激光发生装置优选地设有调制频率设置单元,用于获取由外部谐振器的透射宽度的变化导致的误差信号,并且用于将施加给相位调制器的调制信号的频率设置成下述值,该值使得用于各个外部谐振器的误差信号的 S/N 比各自被平均化。

[0018] 根据具有调制频率设置单元的上述结构,可以响应于外部谐振器的透射宽度例如随时间或者由其它因素导致的变化而设置调制信号的频率,因而可以平均化用于各个外部

选择光并将其传送到下一级的谐振器的其它组件。

[0039] 多个外部谐振器 6 到 12 被首尾相连地布置在一行中,包括第一外部谐振器和被布置成第一外部谐振器的后级的第二外部谐振器。在对所述装置的以下描述中,外部谐振器 6 被视为第一外部谐振器,并且外部谐振器 9 被视为第二外部谐振器。

[0040] 应当注意,第一外部谐振器可以不限于位于第一级的外部谐振器 6,并且任何外部谐振器都可以充当第一外部谐振器。类似地,第二外部谐振器可以不限于位于第二级的外部谐振器 9,并且任何外部谐振器都可以充当第二外部谐振器,只要该外部谐振器位于第一外部谐振器的后级。另外,对于所述装置的这种配置,需要在激光源 2 和第一外部谐振器之间的光路上设置一个相位调制器(即,此示例中的相位调制器 4),并且需要从第一外部谐振器输出的光入射到第二外部谐振器上,而不影响相位调制器 4 的相位调制。

[0041] 在外部谐振器 6 到 12 的内部分别布置了几个非线性光学元件(或者非线性光学晶体)7 到 13。作为非线性光学元件,列举了能够实现涉及二次谐振光生成、和频(sum frequency)生成等的波长转换的非线性光学元件。可替代地,可以在各个外部谐振器的内部提供具有增益放大能力的激光介质,以取代非线性光学元件。

[0042] 外部谐振器中的至少第一外部谐振器 6 和第二外部谐振器 9 设有光路长度改变单元 18,用于改变第一和第二外部谐振器中的每一个的光路长度。光路长度改变单元 18 被配置用于执行几种控制,例如:使用诸如 VCM(音圈电动机)、压电元件等的致动器来对外部谐振器中所包括的组成元件(镜子和其它光学元件)的位置和姿势进行的伺服控制;以及通过对光学晶体施加电压等来对光学特性(例如,折射指数和其它类似参数)进行的控制。

[0043] 用于模式匹配的几个光学系统 5 到 11 被布置在激光源 2 和第一外部谐振器之间,以及相邻的外部谐振器之间,以在激光源 2 和这些谐振器之间高效地耦合必要光。

[0044] 光电探测器 14 到 16 被提供用于分别接收来自外部谐振器 6 到 12 的光。这些光电探测器各自由光电二极管等构成,所述光电二极管等能够将探测器所检测到的光转换成电信号。虽然典型地列举了两种类型的光电探测器,一种检测从外部谐振器反射的光,另一种检测透过的光,但是从检测信号大小的观点来看,在本示例中前者更适合。

[0045] 信号处理电路 17 被配置用于获取由各个光电探测器 14 到 16 输出的检测信号以及由信号发生单元 3 生成的调制信号(预定频率的振荡信号),以基于该检测信号和调制信号来执行同步检测,从而获得误差信号,并将这样获得的误差信号输出到光路长度改变单元 18。也就是说,控制电路 19 当前被形成为具有负反馈的配置,包括用于获取误差信号的信号处理电路 17 和用于根据 FM 边带方法来改变外部谐振器的循环(circular)光路长度的光路长度改变单元 18。

[0046] 在这种配置中,从激光源 2 发射的激光进入被施加了由信号发生单元 3 生成的调制信号的相位调制器 4,从而被按预定频率来进行相位调制。在相位调制之后,激光通过光学系统 5 并进入第一外部谐振器 6。另外,由第一外部谐振器 6 所包括的非线性光学元件 7 生成的光入射到第二外部谐振器 9 上。

[0047] 来自第一外部谐振器 6 和第二外部谐振器 9 的光(反射光或者透射光(transmitted light))分别被光电探测器 14 和 15 检测。随后,基于利用信号处理电路 17 通过检测处理而获得的误差信号,光路长度改变单元 18 对各个外部谐振器的光路长度(即,循环光路长度)进行控制,以使其等于激光波长的整数倍。即,可变地对各个外部谐振

器的光路长度进行控制,以使得误差信号将变为零。多个外部谐振器 6 到 12 从而被同时保持在谐振状态(所谓的锁定状态)。

[0048] 图 2 是示出激光发生装置 100 的示图,激光发生装置 100 被配置成根据 FM 边带方法、使用单个相位调制器 4 来同时锁定在两级中的外部谐振器 6 和 9。激光发生装置 100 在图 2 中被示出为缩略了图 1 所示的若干组件,例如光电探测器 14 到 16、信号处理电路 17 以及光路长度改变单元 18。与图 1 所示的那些相似的组件和单元被用相同的标号来示出,并因而省略对它们的重复描述。

[0049] 根据本发明的第一实施例,激光源 2 被用于以单纵模方式输出红外光(例如,波长 $\lambda = 1064\text{nm}$)。输出光 LTO 通过单个相位调制器 4。由于向相位调制器 4 提供了具有单频 f_c 的高频信号作为调制信号,该高频信号由在图中用信号源标记来指示的信号发生单元 3 生成,所以通过相位调制器 4 的光被按频率 f_c 进行相位调制。

[0050] 从根据本发明的第一实施例的信号发生单元 3 输出的一些已调信号被用作本地振荡信号,用于对由信号处理电路 17(图 1)所生成的误差信号进行解调,其中,这些误差信号由包括第一外部谐振器 6 和第二外部谐振器 9 在内的外部谐振器获得。为了确保在最后一级的外部谐振器(例如,图 1 中的外部谐振器 12)的误差信号的足够大的 S/N 比,有效的措施是按如图 3 所示的双极驱动模式来操作相位调制器。

[0051] 图 4 是示出受双极驱动的相位调制器的示例性电路的示图。如图 4 所示,相位调制器 40 是通过彼此组合电隔离的第一和第二相位调制器来形成的。

[0052] 再次参考图 4,各自被配置用于生成指定的驱动电压 V (例如, $V = V_0 \sin(2f_c \cdot t + \phi_0)$) 的第一和第二电源单元 45 和 46 中的每一个的一端被接地。另外,第一电源单元 45 的另一端被连接到第一相位调制器的电极 42,并且第二电源单元 46 的另一端被连接到第二相位调制器的电极 44(即,布置在电极 42 的相对面上的电极)。

[0053] 此外,按彼此接触的方式来组合的有第一相位调制器的另一个电极 41 和第二相位调制器的另一个电极 43,其中,这些电极 41 和 43 各自被接地。第一和第二相位调制器的各自的电极间距离被调整成单个标准相位调制器的电极间距离的一半(即, $d/2$)。结果,在作为第一和第二相位调制器的组合而形成的相位调制器 40 中,这些电极 41 和 43 之间的电极间距离被使得等于单个标准相位调制器的距离 d 。

[0054] 假设由电源单元 45 和 46 提供电压信号 V ,并且两个电压信号 $+V$ 和 $-V$ 分别被施加给相位调制器 40 的两个电极 42 和 44,在电极 42 和 44 之间介有地电位,其中,所述两个电压信号极性彼此相反并且相位相同。因此,在相位调制器 40 的电极 42 和 44 之间总是存在电位差 $2V$,并且生成了两倍于普通电场的电场。结果,误差信号的 S/N 比增大。

[0055] 注意,关于图 4 所示的电源单元 45 和 46,可替代地,可以形成包括单个电压信号供应源(未示出)的另一个电路,该电压信号供应源被配置用于生成极性彼此相反且相位相同的电压信号,随后将其提供给相位调制器 40。

[0056] 再次参考图 2,透过相位调制器 4 的激光经由光学系统 5 而进入第一外部谐振器 6。在这种情况下,入射光被假定为与赋予第一外部谐振器 6 的独特模式合适地匹配(即,所谓的模式匹配)。

[0057] 第一外部谐振器 6 被形成为可选地包括入射镜子 21、多个镜子 22、23 和 24 以及非线性光学元件 20。也就是,如图 2 所示,入射镜子 21 和出射镜子 22 被布置在主光路上,非

线性光学元件 20 被布置在入射镜子 21 和出射镜子 22 之间。另外,镜子 23 被布置在镜子 21 的一侧,而镜子 24 被布置在镜子 22 的一侧。预先进入镜子 21 的激光通过非线性光学元件 20,顺序地经镜子 22、23 和 24 反射,随后返回到 21,从而形成外部谐振器 6。优选地,提供具有为实现阻抗匹配而进行优化的反射率的入射镜子 21。

[0058] 根据本发明的第一实施例,非线性光学元件 20 所使用的材料包括:针对二次谐波生成(SHG)而合适地相位匹配的晶体和通过周期性极化(poling)的方法或其它类似方法而被进行相位匹配的另一个晶体。在 SHG 的情况下,从激光源 2 发射的光的基波的波长(例如, $\lambda = 1064\text{nm}$)可以被转换成该波长的一半(即, $\lambda = 532\text{nm}$)。

[0059] 可以通过利用诸如 VCM(音圈电动机)、步进电动机之类的移动设备或者利用采用了 PZT 等的压电效应的驱动设备来改变第一外部谐振器 6 中的至少一个镜子的位置和姿势,来可变地控制外部谐振器 6 的循环光路的长度。作为用于可变地控制外部谐振器 6 的循环光路的长度的又一个方法,诸如棱镜、光栅等的若干光学元件可以适当地替代镜子。此外,还存在又一个方法,例如通过对非线性光学元件或电光晶体施加电压来改变循环光路的长度。

[0060] 由第一外部谐振器 6 中的镜子 24 反射的光的一部分通过镜子 21,被光电探测器 14 所接收,并且被进行信号检测。

[0061] 由于第一外部谐振器 6 也设有非线性光学元件 20,所以通过有效的波长转换而产生的光输出随后通过用于模式匹配的光学系统 8 而被导引入第二外部谐振器 9。来自第一外部谐振器 6 的光输出可以可选地被波长分离镜(未示出)与没有经过波长转换的光相分离。

[0062] 以类似于第一外部谐振器 6 的方式,第二外部谐振器 9 包括入射镜子 31、多个镜子 32、33 和 34 以及非线性光学元件 30。也就是,如图 2 所示,入射镜子 31 和出射镜子 32 被布置在主光路上,并且非线性光学元件 30 被布置在入射镜子 31 和出射镜子 32 之间。另外,镜子 33 被布置在镜子 31 的一侧,镜子 34 被布置在镜子 32 的一侧。预先经由光学系统 8 而进入镜子 31 的激光通过非线性光学元件 30,顺序地被镜子 32、33 和 34 反射,随后被返回到 31,从而形成外部谐振器 9。优选地,提供具有为实现阻抗匹配而进行优化的反射率的入射镜子 31。

[0063] 根据本发明的第一实施例,非线性光学元件 30 所使用的材料包括:针对二次谐波生成(SHG)而合适地相位匹配的晶体和通过周期性极化而被进行相位匹配的另一个晶体。在这种情况下,从第一外部谐振器 6 输出的光的基波的波长(例如, $\lambda = 532\text{nm}$)可以被转换成该波长的一半(例如, $\lambda = 266\text{nm}$)。

[0064] 同样以类似于第一外部谐振器 6 的方式,外部谐振器 9 的循环光路的长度被配置成能够通过下述方式来可变地控制:利用诸如 VCM(音圈电动机)、步进电动机等的移动设备或者利用采用了 PZT 等的压电现象的驱动设备来改变形成第二外部谐振器 9 的至少一个镜子的位置和姿势。

[0065] 由第二外部谐振器 9 中的镜子 34 反射的光的一部分通过镜子 31,被光电探测器 15 所接收,并且被进行信号检测。

[0066] 另外,在利用非线性光学元件 30 进行有效波长转换之后输出的光通过镜子 32,随后输出到外部作为光输出 LT1。

[0067] 如上所述,能够对入射在第一外部谐振器 6 上的激光的波长进行转换的非线性光学元件 20 被布置在主光路上,并且在有效波长转换之后输出的光通过光学系统而入射在第二外部谐振器 9 上。以类似于第一外部谐振器 6 的方式,根据 FM 边带方法来锁定第二外部谐振器 9,并且在由非线性光学元件 30 实施的波长转换之后获得光输出。

[0068] 图 5 是示出包括相位调制器和光电探测器在内的控制系统的基本配置的示图。由于第一和第二外部谐振器在电路布置方面相类似,所以两个外部谐振器都拥有的部分和组件在图 5 中用相应标号来并排示出。

[0069] 如上所述,频率为 f_c 的调制信号由信号发生单元 3 生成,并在随后被施加给相位调制器 4(图中示出为“EOM(电光调制器)”),从而使激光经历相位调制。

[0070] 至少一个检测信号和作为本地振荡信号的调制信号(频率为 f_c 的高频信号)两者被提供给用于实施同步检测的检测单元 47(在图 5 中指示为乘法器),所述至少一个检测信号是通过从第一外部谐振器 6 和第二外部谐振器 9 反射并由光电探测器(例如,用于第一外部谐振器 6 的光电探测器 14 和用于第二外部谐振器 9 的光电探测器 15,两者都在图 5 中示出)检测到的光生成的。如上所述通过同步检测而获得的误差信号(指示为“Err”)被提供给伺服控制单元 48。虽然在图中未示出,但是在这里注意,可以额外地提供所谓的“拉入(pull-in)”电路,以基于来自总光量监视器的信号来判断是否实施锁定。

[0071] 伺服控制单元 48 生成控制信号以使得误差信号 Err 的电平变为零,然后使用控制信号对外部谐振器的光路长度(循环光路长度)进行控制以使其等于激光波长的整数倍。也就是,在图 2 的示例中,通过控制分别在第一和第二外部谐振器 6 和 9 中的镜子 23 和 33 的位置和姿势来实现上述控制。

[0072] 由于已知机构可以用作镜子的移动机构、驱动控制电路等,所以在此省略对它们的进一步描述。另外,在此仅示出了用于所述处理的基本元件,但是注意,诸如用于在接收到光之后从检测信号中提取高频信号的滤波电路之类的一些用于信号处理的电路没有在图中示出(可替代地,这可以包括在光电探测器或其它类似设备中)。

[0073] 各个外部谐振器都同时处在模式匹配和阻抗匹配的条件下,并且显而易见,谐振器中的谐振发生在特定光路长度(即,第一光路长度)处,随后发生在另一个光路长度处,所述另一个光路长度是从第一光路长度增大一个激光波长或者其倍数而得到的。

[0074] 当光路长度改变单元 18 至少在针对各个外部谐振器而进行了很好地调整的空间环境附近被进行扫描(即,改变循环光路长度)时,周期性地出现若干区域,在这些区域中,来自外部谐振器的光反射由于谐振而降低。

[0075] 对于光反射,由下式(1)给出有效反射率 $R(\delta)$,其中, λ 表示激光的波长, L 表示外部谐振器的循环光路长度, δ 表示激光在外部谐振器中的循环光路上的相位延迟, R_1 表示激光从外部入射到其上的镜子(例如,镜子 21)的反射率, R_j 表示外部谐振器中的第 j 个镜子的反射率,而 T_j 表示除该镜子之外的第 j 个内置光学元件的透射率(包括非线性光学元件的线性和非线性损失)。

$$[0076] \quad R(\delta) = \frac{(\sqrt{R_1} - \sqrt{R_m})^2 + 4\sqrt{R_1 R_m} \sin^2(\delta/2)}{(1 - \sqrt{R_1 R_m})^2 + 4\sqrt{R_1 R_m} \sin^2(\delta/2)} \dots\dots (1)$$

[0077] 其中,

$$[0078] \quad \delta = \frac{2\pi L}{\lambda}$$

$$[0079] \quad R_m = R_2 R_3 \cdots \times T_1 T_2 \cdots$$

[0080] 由于从波长转换得到的基波分量对上述损失具有一定贡献,所以波长转换的效率也必须包括在其中以用于计算复合反射率 (compositereflectivity) R_m (William Kozlovsky 等人, IEEE Journal of QuantumElectronics, 第 24 卷之 6, 第 913 页 (1988))。如上所述,复合反射率 R_m 被定义为排除入射镜子之外的循环透射率 (即,在外部谐振器内部的激光光路上的除了入射镜子之外的各个镜子的反射因数之积乘以各个光学元件的透射因数之积)。根据本发明的第一实施例,假设入射光和谐振器模式之间的空间模式匹配 (即,模式匹配) 的系数接近于 1 (一)。当关系 $R_1 = R_m$ 为真时,阻抗匹配 (或者匹配) 的条件得以实现。

[0081] 图 6 是示出外部谐振器的有效反射特性的曲线图,表示当循环光路长度 L 经历扫描操作 (用相位延迟 δ 的量来表示) 时的有效反射率 $R(\delta)$ 的变化。由于从式 (1) 中可见,相位延迟 δ 的固有大小较大,所以为了简单起见,使用了从相位延迟 δ 中减去 2π 的整数倍而获得的参数 δ' 。因此,图 6 描绘了垂直方向上的有效反射率 $R(\delta)$ 与水平方向上的相位延迟 δ' 的关系图。顺便提及,由于在正常情况下将入射光和谐振器模式之间的空间模式匹配系数 η_m 维持在 70% 到 90% 的范围内是相对容易的,所以该系数在此近似为 $\eta_m = 1$ 。同样为了简单起见,假设针对谐振器实现了阻抗匹配,并且关系 $R_1 = R_m = 0.95$ (95%) 为真。

[0082] 从式 (1) 包括正弦函数 $\sin(\delta/2)$ 的平方项这一事实中清楚可见,外部谐振器的表见反射率 (apparent reflectivity) (有效反射率) 在 $\delta' = p \cdot \pi$ (p 是偶数) 的情况下急剧降低,并且几乎所有的入射光都进入外部谐振器,因而增大了在外部谐振器内部的循环光路上的光的强度。这被称为“谐振状态”,并且这种谐振状态的维持被称为“锁定”。

[0083] 优选的是,维持循环光路长度以满足由关系式 $\delta' = 2 \cdot \pi \cdot L / \lambda = p \cdot \pi$ 表示的条件,抵抗诸如抖动和温度变化之类的外部干扰,并且用于可变地控制循环光路长度 L 的单元可能有必要。可以或者通过改变镜子 (例如,图 2 中的镜子 23 和 33) 或非线性光学元件的位置等、或者通过使用电光元件来改变折射率或类似的其它参数,来适当地提供这个单元。

[0084] 图 7A 和 7B 是示出外部谐振器 6 的有效反射特性和调制频率之间的关系的关系的示图,其中,图 7A 是针对第一外部谐振器 6 的有效反射特性、在图 6 中的 $\delta' = 0$ 附近的部分的放大示图,图 7B 是图示出垂直方向上的入射在谐振器外部谐振器 6 上的光的光谱强度与水平方向上的频率 (根据转换成参数 δ' 的频率差 (与光频率 f_L 的频率差)) 的关系图的示图。

[0085] 边带频率与相位延迟 δ' 的对应程度一般由关系式 $f_c = c \delta' / (2\pi L)$ 给出,其中 c 是真空中光速。为了描述方便,入射光的频率 f_L 被示出在外部谐振器的透射范围的中心,并且这对应于正确锁定的情况。在这里仅示出了从入射光频率 f_L 和调制频率 f_c 得到的和频和差频 (differencefrequency)。该图指示出,通过适当地选择在同步检测中使用的、来自信号发生单元 3 (本地振荡器) 的信号频率,可以按需选择调制频率 f_c 从而在透射范围中包括已调光。

[0086] 发生相位延迟 δ' 的周期性降低,并且这种周期性降低以 2π 的整数倍为周期来重复。在降低时,反射光的强度将为最小,并且几乎所有的入射光都进入第一外部谐振器 6。例如,对于 $\pm 0.2\pi$ 的相位延迟 δ' ,反射率是 99.3% (即,透射 0.7%);而对于 $\pm 0.03\pi$,反射率降低到约为 77% (透射 23%)。在图 7A 所示的示例中,由峰值有效反射率的 50% 的强度来定义的相位延迟 δ' 的范围,即,半高全宽 $\delta'_{0.5}$ (以下称为“透射宽度”),近似为 0.033π 。顺便提及,可替代地,可以根据在有效透射曲线的半峰值高度处测得的 δ' 值来获得透射宽度 $\delta'_{0.5}$ 。

[0087] 如上所述,由于第一外部谐振器 6 的有效反射率在锁定时降低,所以大多数入射光进入到第一外部谐振器 6。假设非线性光学元件 20 例如采用用于二次谐波生成的光学晶体,并且假设生成波长为基波波长的一半的光,则相对较高比例的经过相位调制的分量也进入到第一外部谐振器 6 的内部,并在随后经历波长转换。

[0088] 在这种情况下,入射光的频率 f_L 和调制频率 f_c 发生干涉,并且其结果是生成了在频率 f_L 周围的频率为 $f_L \pm f_c$ 的边带。如果这些频率是在第二外部谐振器 9 中具有相对较高的反射率的那些频率,则可以从第二外部谐振器 9 中提取具有边带分量的反射光,并从该反射光中获得误差信号。具体而言,这样来选择调制频率 f_c 以使得光的“ $f_L \pm f_c$ ”分量差不多通过第一外部谐振器 6,并且同时使得这些分量被第二外部谐振器 9 反射。因此,这个调制频率 f_c 可以用于锁定第二外部谐振器 9。

[0089] 因此,提供了这样一种情况,其中,在“第一波长”和“第二波长”上实现上述波长转换,“第一波长”表示从激光源 2 发射的光的波长,“第二波长”表示利用在第一外部谐振器 6 中包括的非线性光学元件 20 来进行波长转换而生成的光的波长。然后,当具有“第二波长”的光被致使入射在第二外部谐振器 9 上时,具有第一波长的光可以起的作用是:利用具有第一波长的一些反射光来获得误差信号,并利用误差信号来锁定第一外部谐振器 6;而具有第二波长的光可以起的作用是:利用具有第二波长的一些反射光来获得另外的误差信号,并利用这些另外的误差信号与第一外部谐振器 6 同时地来锁定第二外部谐振器 9。

[0090] 如上所述,通过向激光源 2 提供在两级上紧接着的外部谐振器 6 和 9,并通过配置成向相位调制器 4 施加调制信号(其中,调制信号具有针对谐振而适当地选择的单频(f_c)分量),可以利用 FM 边带方法来将各个外部谐振器维持在谐振状态。

[0091] 此外,这种谐振状态是仅利用布置在单个外部谐振器 6 之前的相位调制器 4 来实现的,从而消除了布置多个相位调制器(各自位于各个外部谐振器之前的级上)的必要。另外应当注意,优选地,在已调光所包括的一些边带被第一外部谐振器 6 反射、并且其它部分通过第一外部谐振器 6 并随后在波长转换之后被第二外部谐振器 9 反射的前提之下执行上述对合适的调制频率的选择。

[0092] 在 FM 边带方法中,首先通过使用相位调制器来调制激光从而生成边带,并根据被外部谐振器反射的光中所包括的边带来获得误差信号。参考图 5,误差信号 (Err) 是通过下述方式来获得的:(a) 向检测单元 47 发送光电探测器 14 和 15 所接收的光检测信号,并同时向检测单元 47 提供频率与来自信号发生单元 3 (内部本地振荡器) 的调制信号频率 f_c 相同的信号,以及 (b) 使用检测单元 47 来执行对检测信号和从信号发生单元 3 发送而来的信号的不同步相位检测。

[0093] 图 8 是图示出从光检测信号和调制信号获得的误差信号 (Err) 的 δ 依赖性的放

大示图,描绘了水平方向的相位延迟 δ 与垂直方向的信号电平的关系图。

[0094] 误差信号 Err 是这样的信号,这些信号是在谐振器的谐振频率接近激光的频率时,基于被反射的两侧边带信号(两侧波)之间的平衡来获得的,其指示了位移离谐振位置(例如, $\delta' = 0$) 的方向和大小。也就是,在图 8 的右侧,信号电平随着沿 δ' 轴向前移动而增大直到达到正峰值,然后随着进一步向前移动而迅速下降直到渐近地接近 δ' 轴。作为对比,在图 8 的左侧,信号电平随着在 δ' 轴上向相反方向移动而降低直到达到最低值,然后迅速增大直到渐近地接近 δ' 轴。因此,这个曲线图基本上具有相对于在 $\delta' = 0$ 处的原点的旋转对称,因而可以根据误差信号来跟踪与谐振位置的偏差的方向和大小。

[0095] 关于利用调制频率来调制入射光的频率而生成的边带,由于上边带的极性与下边带相反,所以与边带的平衡相对应的误差信号 Err 是通过关于从本地振荡器(信号发生单元 3) 发送而来的本地振荡信号、对在外部谐振器反射的光中包括的边带信号(高频分量) 执行同步检测而在谐振点(最小反射率点) 附近获得的。

[0096] 在通过调整本地振荡器的相位来使谐振中心与误差信号的零点相匹配之后,通过利用伺服控制单元 48 来驱动从而适当地调整镜子或其它类似元件从而调整循环谐振器长度 L,实现对谐振点的锁定(FM 边带方法)。在锁定谐振点时,外部谐振器的表观反射率迅速降低,并且几乎所有的入射光都被导引到外部谐振器中。同时,在外部谐振器中出现了功率远大于入射光的光的循环,结果,增大了非线性光学元件 20 的转换效率。

[0097] 当第一外部谐振器 6 处于谐振状态,并且具有大功率且在第一外部谐振器 6 内循环的光被利用非线性光学元件 20 转换成另一个波长(在 SHG 的情况下转换为半波长) 时,在波长转换之后在光的中心频率 $2f_L$ 周围生成上边带和下边带。因此,上下边带具有分别与 $2f_L$ 相差 $\pm f_c$ 的频率,并在随后被致使通过光学系统 8 而入射到第二外部谐振器 9。

[0098] 这些边带可以被用于锁定作为随后的级上的谐振器的第二外部谐振器 9。此外,当这些边带被用于锁定第三外部谐振器时,只要满足下述条件就可以实现对相关频率的选择,所述条件即,边带的一部分被第一外部谐振器 6 反射、并且其余边带通过第一外部谐振器 6 并在随后被第二外部谐振器 9 反射。

[0099] 当在控制电路 19 中形成用于校正外部谐振器的组件(例如,镜子等) 的位置或其它类似参数的负反馈系统,并通过负反馈系统来控制各个谐振器的循环光路长度 L 以使得误差将变为零时,可以维持谐振状态。在这种情况下,一般而言,通过在反射光中包括尽可能多的边带(边带分量),误差信号 Err 的幅度增大并且其信噪(S/N) 比可以增大。

[0100] 在 S/N 比的几种定义中,当前所采用的是通过将(a) 图 8 所示的 S 形状的误差信号曲线的两个峰值之间的电位差($2V_1$) 的一半,即 V_1 (信号),除以(b) 在误差信号曲线的峰值之间的斜率部分中、在示波器屏幕上观测到的线的幅宽(breadth) 或宽度的六分之一($1/6$) 所对应的数值(噪声) 而得到的值。这是由于这样一个事实,即,线宽一般为变差(variation) 的标准偏差 σ 的六倍(± 3 倍) 或者变差的均方根(RMS) 的六倍。

[0101] 为了在图 2 的配置中增大误差信号 Err 的 S/N 比,优选的是,边带频率 f_c 与第二外部谐振器 9 的透射宽度所对应的频率范围相比足够大。另一方面,当边带频率大于与第一外部谐振器 6 的透射宽度相对应的频率范围时,几乎所有的边带都被第一外部谐振器 6 反射,并且几乎没有边带进入谐振器 6 中。结果,从第一外部谐振器 6 入射到第二外部谐振器 9 上的经过波长转换的光的边带频率降低,并且锁定第二外部谐振器 9 所需的误差信号 Err

的 S/N 比恶化。因此,这导致产生了关于边带频率的折衷。

[0102] 因此,在设计阶段确定调制信号的频率 f_c 的情况下,优选的是,对于针对各级外部谐振器所获得的 S/N 比,考虑采用适当的值或者平均值来作为系统稳定性的度量之一。例如,如下所述,当积 P 取最大时,该积 P 作为该适当的值可能是有效的。假设针对第 j 个外部谐振器而获得的误差信号的 S/N 比为 $(S/N)_j$ (其中, $j = 1, 2, \dots$), 则积 P 用式 (2) 来表示。

$$[0103] \quad P = (S/N)_1 \times (S/N)_2 \times \dots \quad (2)$$

[0104] 随后,通过计算各自针对 n (数目) 个外部谐振器而获得的所有 n 个误差信号的 S/N 比的积的 n 次方根,获得针对 n 个外部谐振器而获得的误差信号的 S/N 比的几何平均。因此,所获得的几何平均等于在用式 (2) 表示的积 P 为最大时的值,从而满足获得上述平均值的要求。

[0105] 因此,在激光发生装置的设计阶段,可以基于各种条件来确定最适合锁定的载波频率(调制信号的频率)。但是,在实践中可能会在设计值和商业生产的装置的值之间发生关于它们的制造容差的偏差。作为用于减少这样的偏差的单元,优选的是,提供用于初始化调制信号的频率的单元,以使得可以将针对各级外部谐振器而获得的 S/N 比被平均化。

[0106] 例如,这通过提供这样的配置来实现,所述配置是用户可以手动调整由信号发生单元 3 生成的调制信号的频率的配置。可替代地,通过将信号发生单元 3 与计算机(未示出)相连接以使得它们能够相互传送数据来提供另一个单元。然后,这个单元被这样配置,即,在用户通过输入设备向计算机输入调制信号的最佳频率值之后,可以基于所输入的调制信号的频率数据来适当地设置将从信号发生单元 3 输出的频率。

[0107] 一般而言,更有效的是,在可能的限度内将第二外部谐振器 9 的透射宽度降低到与第一外部谐振器 6 的透射宽度相当或者低于第一外部谐振器 6 的透射宽度。另外,边带的反射率优选地处在大约从 20% 到 80% 的范围内。当在考虑到涉及透射和反射的上述因素的情况下使用式 (1) 来进行计算时,优选地是,所获得的边带频率 f_c 处在以第一外部谐振器的谐振频率为中心的、第一外部谐振器的透射宽度频率的 0.5 到 2 倍的范围内,并且同时处在以第一外部谐振器 6 的谐振频率为中心的、第二外部谐振器 9 的透射宽度频率的至少 0.5 倍的范围内,其中,透射宽度频率(半高半宽)表示与上述透射宽度相对应的频率范围。

[0108] 关于根据本发明第一实施例的激光发生装置 100,具体数值列举如下。作为发射单频激光的激光源 2,使用的是单频环形谐振器 Nd:以 1064nm 进行发射的 YAG 激光器,或者配置用于对上述激光器发射或来自另一个 DFB(分布式反馈)光纤激光器的发射进行放大的光纤激光器。来自激光源 2 的输出发射被致使入射到设有电光晶体的相位调制器 4 上。在普通的单级 FM 边带锁定的情况下,施加给相位调制器 4 的电压是根据诸如晶体长度、由有效电光系数指定的所需场强以及电极间距之类的几种因素来确定的。

[0109] 对于利用 r_{33} 分量(Pockels 系数)的 KPT 晶体(具有长度为 12mm、电极间距为 3mm 的透光面),施加给晶体的电压的范围从几(伏)到近似 20(伏)就足够了。在本发明的第一实施例中,当通过适当地调整外部谐振器的循环光路的长度来使第一外部谐振器 6 的边带的反射率约为 50%,并且使第二外部谐振器 9 的边带的反射率为 70%或更大时,大小近似等于在上述范围内的电压就足够了。

[0110] 但是,在更长的谐振波长的情况下,可能需要更大的电压。在这种情况下,通过利用电放大器将信号发生单元 3 所生成的调制信号放大到从 20 到 150V 的范围来稳定锁定。可替代地,为了在不将电源电压提高那么多的情况下有效地实施信号调制,如上所述(图 4),通过对调制器 4 所包括的两个相反电极各自施加两个相反极性的电压信号,可以有效地操作相位调制器 4。

[0111] 从激光源 2 发射的激光经过相位调制,随后被使得通过光学系统 5 而入射到第一外部谐振器 6。在这个处理中,入射光和谐振器模式之间的空间匹配被称为模式匹配,其效率可能达到最大 100%。但是,在实践中,在大多数情况下模式匹配效率近似在 70%到 95% 的范围内,并且取决于激光束质量而变化,所述激光束质量用 M2 值、指示光束展开角的光束参数积(BPP)和其它类似参数来表示。

[0112] 当假设第一外部谐振器 6 的循环光路长度为 380mm 时,其自由光谱范围(FSR)近似为 800MHz。这使得图 7A 所示的值 $\delta' = 0.05\pi$ 对应于 20MHz,假设为波长的 1/40。因此,施加给作为非线性光学元件 20 的电光晶体的高频信号的频率现在例如被假设为 20MHz。当 20MHz 的高频信号被施加给相位调制器 4 时,有效反射率和调制频率的特性几乎与图 7A 和 7B 所示的情况相同(对应于正确锁定的情况)。

[0113] 在锁定的情况下,对于第一外部谐振器 6,入射在其上的边带的近似 90%被入射镜子反射从而入射在光电二极管(布置在用于锁定伺服的光电探测器中)上,并且边带的剩余 10%被使得入射到谐振器的内部。进入到第一外部谐振器 6 的边带随后在谐振器内部循环以达到谐振状态。这不仅对于中心光频率 f_L 而且对于边带频率都为真。当在处于谐振状态的谐振器中循环的光的功率被视为循环功率时,可以发现该功率等于近似放大 $[1/(1-\sqrt{R_1 R_m})]$ 倍的入射光的功率。

[0114] 在入射光功率为 20W、模式匹配效率近似为 100%、且 $R_1 = R_m = 95\%$ (即,入射镜子的反射率 R_1 和外部谐振器的复合反射率 R_m 相等,都为 95%) 的情况下,入射到第一外部谐振器 6 的光功率被放大 20 倍,至 400W。如果假设另一个情况 $R_1 = R_m = 99.5\%$,则出现更大的 200 倍的增长,这也是可行的。对于入射在厚度近似为 30mm 的 LBO 晶体上的循环功率为 400W 的光,预期二次谐波(532nm)的生成具有几瓦级别的功率。

[0115] 假设来自第一外部谐振器 6 的波长为 532nm 的光被使得通过光学系统 8 而入射到第二外部谐振器 9 上。为了简化起见,第二外部谐振器 9 的循环光路长度被假定为与第一外部谐振器 6 的上述长度相同,即 380mm。由于自由光谱范围(FSR)近似为 800MHz,所以得到的与针对 $R_1 = R_m = 99.5\%$ 的情况的透射宽度(半高全宽)相对应的频率范围 δ' 为 0.013π ,其在半高半宽的情况下对应于 16MHz 的频率。当采用频率为 20MHz 的边带时,这个边带频率与第二外部谐振器 9 的透射宽度的 0.5 倍相等,或者更大。结果,在这种情况下,入射光的近似 60%被谐振器 9 反射,并且获得 S/N 比增大了的误差信号。

[0116] 图 9A、9B 和 9C 是各自示出三级谐振器在锁定时的有效反射率和误差信号之间的相关性的曲线图,其中,图 9A 包括针对被配置用于执行从 1064nm 到 532nm 的波长转换的第一级外部谐振器的曲线图,图 9B 包括针对被配置用于执行从 532nm 到 266nm 的转换的第二级外部谐振器的曲线图,并且图 9C 包括针对被配置用于执行从 266nm 到 198nm 的转换的第三级外部谐振器的曲线图。

[0117] 应当注意,在这种情况下,图 9C 中包括的当前转换得到的波长 198nm 与 133nm(即,转换之前的波长 266nm 的一半)不同。这个 198nm 的波长是通过实际尝试用实验方法得到的,以避免否则的话将由较短波长的紫外光导致的照射损坏。从有效反射率相对于频率的曲线图中还可以发现,外部谐振器的透射宽度将随着从第一、第二到第三级谐振器的级前进而变窄。结果,谐振器的反射率在第三级增大,并且可以获得 S/N 比改善了误差信号。

[0118] 根据上面关于包括多个外部谐振器的锁定系统而描述的本发明的第一实施例,可以减少在该系统中使用的相位调制器的数目,并且这可以产生降低成本的效果。另外,由于在该锁定系统中使用的相位调制器的类型也可以更加有限,所以降低了过度的采购成本和混同的风险。

[0119] 另外,通过配置成利用红外光或者可见光、通过多级外部谐振器来实施相位调制,相位调制器可以自由地被使用,而不用考虑由紫外光束导致的任何损坏。因此,降低了修复成本,并且可以免除用于操作相位调制器的高电压电源。

[0120] 对于利用具有多个不同频率的调制信号来操作的其它锁定方法,上述配置通过仅包括一个信号发射单元而在简化系统结构方面是有效的。

[0121] 此外,在使用单个调制信号来执行对多个外部谐振器的同时锁定的情况下,通过初始化调制信号的频率,以使得通过将来自各级外部谐振器的反射光所得到的误差信号的 S/N 比之积设置为至少接近最大值,可以优化针对各级的外部谐振器所获得的误差信号的 S/N 比,从各个外部谐振器反射的调制光的比率可以被总体上优化,并且结果是,可以使锁定系统的锁定操作稳定。

[0122] 接下来,描述根据本发明的第一实施例的变体。图 10 是示出图 1 所示的第一实施例的变体的示意图。

[0123] 激光发生装置 100A 除了额外设有调制频率设置单元 49 之外,具有与激光发生装置 1(图 1)相似的系统配置。图 10 所包括的与图 1 相似的组件和单元被用相同的标号来表示,并且在此省略对它们的重复描述。

[0124] 如前所述,希望在激光发生装置的设计阶段确定最适合各种条件下的锁定的调制信号频率。但是,由于若干因素可能发生在初始化之后的随时间的几种变化。例如,谐振器损耗随时间的增加和非线性光学元件的转换效率的降低可能引起外部谐振器的透射宽度的变化。在这种情况下,透射宽度的变化又引起误差信号的 S/N 比之积 P(式 2)从其被预先设置的最大值偏移,尤其是在固定调制频率的情况下。在这样的情况下,希望将 S/N 比之积 P 至少维持在最大值附近,从而可以防止锁定系统变得不稳定。

[0125] 因此,额外地提供了调制频率设置单元 49,其被配置用于适当地改变由信号发生单元 3 生成的调制信号的频率,以使得可以利用该设置单元来稳定激光发生装置 100A。可替代地,调制频率设置单元 49 可以被配置成通过适当地调整检测相位来与透射宽度的变化相对应。

[0126] 图 11 是示出包括相位调制器和光电探测器的另一个控制系统的基本配置的示意图。由于第一和第二外部谐振器 6 和 9 具有相似的电路配置,所以应当注意,两个外部谐振器都拥有的部分和组件在图 11 中被用相应的标号并排示出。另外,与图 5 所示的那些组件和单元相似的组件和单元被用相同的标号来示出,并且在此省略对它们的重复描述。

[0127] 首先,由信号发生单元 3 生成具有初始频率 f_c 的调制信号,随后该调制信号被施加给相位调制器 4 (EOM),从而使激光经受相位调制。

[0128] 接下来,两种信号被传送至检测单元 47。即,第一种信号是由从第一外部谐振器 6 和第二外部谐振器 9 反射并且利用诸如用于第一外部谐振器 6 的光电探测器 14 和用于第二外部谐振器 9 的光电探测器 15 (图 11) 之类的光电探测器检测到的光生成的检测信号,并且第二种是作为本地振荡信号的为高频 f_c 的调制信号。随后,基于由光电探测器 14 和 15 检测到的检测信号和从本地振荡器 (信号发生单元 3) 发送的频率为 f_c 的本地振荡信号,检测单元 47 执行同步检测,从而生成误差信号 Err。误差信号 Err 被发送到伺服控制单元 48,并被发送到调制频率设置单元 49。

[0129] 伺服控制单元 48 生成用以使误差信号 Err 的电平将为零的控制信号,并且使用控制信号来对各个外部谐振器的光路长度 (即,循环光路长度) 进行控制以使其等于激光波长的整数倍。另一方面,调制频率设置单元 49 操作以监控从检测单元 47 输出的误差信号 Err,并且基于误差信号 Err 来对从信号发生单元 3 提供给相位调制器 4 的调制信号的频率和检测相位实施控制。

[0130] 根据第一实施例的这种配置,可以获得以下效果:即使当外部谐振器的透射宽度由于谐振器损耗和转换效率随时间的变化而不同时,也可以获得由这些变化所导致的误差信号,并且可以基于误差信号来将施加给相位调制器的调制信号的频率设置成这样的值,该值使得各个外部谐振器的误差信号的 S/N 比可以平均化。这例如通过下述方式来实现,即,通过将误差信号的 S/N 比之积维持在最大值来控制误差信号的 S/N 比以使其被不断优化。结果,锁定系统可以总是保持在谐振状态,而不受到不稳定性影响。

[0131] < 第二实施例 >

[0132] 图 12 是示意性地示出根据本发明第二实施例的激光发生装置的示图。图 12 中包括的与图 2 所示的那些组件和单元相似的组件和单元被用相同的标号来示出,并且在此省略对它们的重复描述。

[0133] 为了确保处在最后一级的外部谐振器 9 的误差信号的足够大的 S/N 比,有效的措施是在相位调制器 4 和第一外部谐振器 6 之间布置具有放大能力的元件。在图 12 所示的激光发生装置 200 的示例中,这种有效措施是基于根据本发明第一实施例的激光发生装置 100 (图 2) 的结构、通过在相位调制器 4 和第一外部谐振器 6 之间的光路上额外地布置放大器 50、而保持其它组件和单元与激光发生装置 100 所包括的那些组件和单元相似来实现的。

[0134] 参考图 12,由激光源 2 生成的激光 LT0 被使用单频的调制信号来进行相位调制,被导引通过光学系统 5、放大器 50 以及另一个光学系统 5a,并在随后被使得入射到第一外部谐振器 6。随后的步骤被按与以上参考图 2 来描述的那些方式相似的方式来执行,以使得通过第一外部谐振器 6 内的有效波长转换而得到的光输出入射到处于随后一级的第二外部谐振器 9 上,并且使得通过第二外部谐振器 9 内的另一次波长转换而得到的光 LT2 被输出到外部。

[0135] 在相位调制器 4 被布置在放大器 50 的后面,的情况下,经过放大器 50 放大的大功率光可能会导致相位调制器 4 的损坏。因此,为了简化锁定系统并延长其寿命,有效的是在相位调制之后再放大激光 LT0,并且将已调光导引进入第一外部谐振器 6,然后执行波长转

换。

[0136] 放大器 50 的适当示例包括光纤放大器、使用块状激光介质的固体激光放大器以及使用半导体芯片的半导体激光放大器。随着双包层 (double-clad) 光纤最近的发展, 可以相对容易地得到光纤激光放大器, 光纤激光放大器被配置成使用具有大 NA 数值孔径的双包层来实现对来自低发光度 (low-luminosity) 半导体激光器的被激励光 (excited light) 的同轴传输。这可以通过导引被激励光使其入射至纤芯 (core) 并且对入射光进行放大来执行。应当注意, 可以适当地采用上述光纤激光放大器来作为根据本实施例的激光发生装置的结构中的放大器 50。

[0137] 根据本发明的第二实施例, 激光发生装置被配置成在对低功率激光进行放大之前执行对该激光的相位调制, 并在放大之后执行波长转换。因此, 可以获得以下效果, 例如, 消除了对相位调制器的过度损坏, 并且将波长转换之后输出的功率和转换效率两者都维持在高水平上。

[0138] < 第三实施例 >

[0139] 图 13 是示意性地示出根据本发明第三实施例的激光发生装置的示图。图 13 所包括的与图 2 所示的那些组件和单元相似的组件和单元被用相同的标号来示出, 并且在此省略对它们的重复描述。

[0140] 参考图 13, 根据本发明第三实施例的激光发生装置 300 至少包括第一外部谐振器 60 和第二外部谐振器 9A。第一外部谐振器 60 包括入射镜子 61 和其它镜子 62 到 65 以及激光介质 66。激光介质 66 被布置在镜子 62 和 63 之间的光路上, 并且光学系统 67 和泵源 (pumping source) 68 被置于激光介质 66 和镜子 63 的延长线上。从泵源 68 发射的激励光 (excitation light) 被致使通过光学系统 67 而入射到镜子 63 上, 随后通过镜子 63 从而照射激光介质 66。

[0141] 另一方面, 从激光源 2 发射的光 LT0 经过相位调制器 4 使用预定频率的调制信号所进行的相位调制, 随后被致使通过光学系统 5 而入射到第一外部谐振器 60。入射到第一外部谐振器 60 的光被导引通过镜子 61、62 和激光介质 66, 进一步地顺序通过镜子 63、64、61 和 65, 并被致使入射到后一级的第二外部谐振器 9A。通过第二外部谐振器 9A 内的波长转换而得到的光 LT3 被输出到外部。

[0142] 激光发生装置 300 被配置成使用单频的调制信号来对激光源 2 所生成的激光 LT0 进行相位调制, 之后通过光学系统 5 将其引入第一外部谐振器 60, 随后对其进行放大, 这被称为注入锁定 (injection locking) 方法。在这种情况下, 在将第一外部谐振器 60 的纵模 (谐振频率) 与当前引入的光 LT0 的频率彼此匹配之后, 光进入到第一外部谐振器 60, 并被激光介质 66 放大。结果, 这个系统就好像反射率增大了一样地进行操作。

[0143] 因此, 通过利用镜子 65 来取出一部分反射光, 并且使用反射光中包括的边带、根据 FM 边带方法来执行锁定, 可以从第一外部谐振器 60 中提取出功率大于入射光 LT0 的光。如此所获得的光被致使通过光学系统 8 而入射到第二外部谐振器 9A, 随后被使用非线性光学元件 30A 来执行波长转换。由于在第一外部谐振器 60 中没有执行波长转换, 所以当前用于锁定第二外部谐振器 9A 的光和边带的频率与用于锁定第一外部谐振器 60 的光和边带的频率相同。

[0144] 根据本发明的第三实施例, 由于激光发生装置被配置成利用布置在第一外部谐振

器 60 中的激光介质来放大入射光,所以可以有效地简化系统结构(节省空间),并且由于放大之后具有增大的功率的光被导引入射到第二外部谐振器上,所以可以有效地增加第二外部谐振器中的转换效率。其它效果包括第二实施例所包括的那些效果。

[0145] < 第四实施例 >

[0146] 图 14 是示意性地示出根据本发明第四实施例的激光发生装置的示图。图 14 所包括的与图 2 和图 13 所示的那些组件和单元相似的组件和单元被用相同的标号来示出,并且在此省略对它们的重复描述。参考图 14,根据本发明第四实施例的激光发生装置 400 至少包括第一外部谐振器 70 和第二外部谐振器 9,并且在第一外部谐振器 70 中设有作为波长转换晶体的非线性光学元件 20。因此,第一外部谐振器 70 的配置是通过在上述根据本发明第三实施例的、具有注入锁定能力的第一外部谐振器 60 中额外地布置非线性光学元件 20 来形成的。

[0147] 第一外部谐振器 70 包括入射镜子 71 和其它多个镜子 72 到 74、用于波长转换的非线性光学元件 20 以及激光介质 66。激光介质 66 被布置在镜子 72 和 73 之间的光路上,并且光学系统 67 和泵源 68 位于激光介质 66 和镜子 73 的延长线上。从泵源 68 发射的激励光被致使通过光学系统 67 而入射到镜子 73,随后通过镜子 73 从而照射激光介质 66。

[0148] 从激光源 2 发射的光 LT0 经过相位调制器 4 使用单频的调制信号所进行的相位调制,随后被致使通过光学系统 5 而入射到第一外部谐振器 70。入射到第一外部谐振器 70 的光被导引通过镜子 71 和 72、激光介质 66,进一步地顺序通过镜子 73、74 和 71,随后被致使入射到后一级的第二外部谐振器 9。通过第二外部谐振器 9 内的波长转换而得到的光 LT4 被输出到外部。基于由第一外部谐振器 70 中的镜子 71 和第二外部谐振器 9 中的镜子 31 反射的光中所包括的边带,获得误差信号。随后,基于误差信号来执行各个外部谐振器 70 和 9 的锁定。

[0149] 根据本发明的第四实施例,除了本发明第三实施例所获得的效果之外,该激光发生装置可以在对入射到第一外部谐振器 70 上的光进行放大的同时以极高的效率来执行波长转换。

[0150] < 第五实施例 >

[0151] 图 15 是示意性地示出根据本发明第五实施例的激光发生装置的示图。图 15 所包括的与图 2 所示的那些组件和单元相似的组件和单元被用相同的标号来示出,并且在此省略对它们的重复描述。

[0152] 在之前的本发明的第一到第四实施例中,波长转换的步骤主要是针对输入一种频率的光然后输出不同频率的光的情况来描述的。相比之下,根据本发明第五实施例所描述的是两种频率输入和一种频率输出的情况,这种情况是使用从第一外部谐振器 6 输出的光、另一个激光输出以及彼此共用一个波长转换晶体的第二外部谐振器 80 和第三外部谐振器 90 来实现的。

[0153] 第二外部谐振器 80 至少包括四个镜子 81 到 84 以及用于差频混合的非线性光学元件 110。具体而言,形成了这样的光路,其中,被致使从第一外部谐振器 6 入射到镜子 81 上的光通过非线性光学元件 110,顺序地被镜子 82、83 和 84 反射,随后返回到镜子 81。从激光源 96 发射的单频光被致使通过用于模式匹配的光学系统 95 而入射到第三外部谐振器 90。第三外部谐振器 90 设有四个镜子 91 到 94,并设有与第二外部谐振器 80 共用的非线性

光学元件 110。形成了另一条光路,其中,从激光源 96 入射到镜子 91 上随后被镜子 92 反射的光通过非线性光学元件 110,顺序地被镜子 93 和 94 反射,并返回到镜子 91。

[0154] 第一和第二外部谐振器 6 和 80 的锁定控制类似于先前所述的锁定控制。具体而言,通过下述方式来执行控制,即,向相位调制器 4 施加频率为 f_c 的调制信号,并且同时通过配置使得频率为 f_c 的反射光的一部分调制分量(边带)可以被第一外部谐振器 6 反射,而边带的其余部分可以通过第一外部谐振器 6,并被第二外部谐振器 80 反射。随后,作为使用非线性光学元件 110、利用从激光源 96 发射的光和从第一外部谐振器 6 输出的光来生成和频的结果,由非线性光学元件 110 生成光输出 LT5。

[0155] 例如,通过在第一外部谐振器 6 中执行波长转换,使得从激光源 2 发射的波长为 532nm 的光可以被转换成 266nm,并且被用于锁定第二外部谐振器 80,同时另一个激光输出可以进行对第三外部谐振器 90 的锁定,上述两种光都可以通过利用非线性光学元件(波长转换晶体)110 所实施的和频混合与差频混合而被转换成希望的波长。

[0156] 波长转换方法的示例包括二次谐波生成、和频生成以及差频生成。另外,还可以引用另一种方法,用于使用 OPO(光学参数振荡器)来生成更长波长的光。因此,关于波长转换的方法,可以考虑各种变体。

[0157] 如上所述,可以采用被这样配置的系统配置,即,从激光源 2 发射的光通过被施加调制信号的相位调制器 4,随后经过使用布置在第一外部谐振器 6 中的非线性光学元件 20 来进行的波长转换,并且被致使顺序地入射到多个外部谐振器(例如,排列成列的外部谐振器),而不通过另一个相位调制器。还在这种情况下,可以使用调制信号和根据由光电探测器检测到的外部谐振器的反射光中的信号来生成的误差信号、根据 FM 边带方法来同时将各个外部谐振器维持在谐振状态。

[0158] 为了实现外部谐振器的稳定锁定,优选的是,通过对从激光源 2 发射的光调制而生成的边带、和分别从边带中获得的和频信号或差频信号中的每一个都保持关于调制信号频率(信号发生单元 3 的振荡频率)的稳定的位置关系。这优选地是通过配置成在同步检测期间、针对各个边带来独立地调整相位延迟量而实现的。例如,如图 5 所示,通过在光电探测器 14 和 15 与信号处理电路 47 之间插入延迟电路,可以实现用于适当地调整光电检测得到的信号的相位延迟的配置。

[0159] 根据本发明的上述实施例的非线性光学元件所使用的合适材料包括非线性光学材料,例如 KTiOPO_4 (KTP)、 $\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$ (BBO)、 LiB_3O_5 (LBO)、 $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$ 、PP-KTiOPO₄、PP-MgO:LiNbO₃、PP-MgO:S-LiNbO₃、PP-S-LiTaO₃、PP-MgO:S-LiTaO₃ 以及其它类似材料。

[0160] 在以上命名的符号中,“PP”表示周期性极化,意味着通过应用电场等、对非线性光学晶体进行周期性极化处理从而得到周期性极化结构的非线性光学晶体,并利用其来形成非线性光学元件。通过对这些材料进行整形以使其在当前使用的波长上具有满足相位匹配条件的适当的角度,并进行加工以使其具有适当的周期性极化结构,从而使这些材料满足(准)相位匹配条件。

[0161] 另外,符号“S”指示材料的化学计量组成(stoichiometric composition)。另外,优选的是,非线性光学元件的大小相对地大于基波和在外外部谐振器内经过转换得到的波的光束大小。这些光学晶体也可以用于波长转换,例如,和频生成、参数放大、三次谐波生成等。

[0162] 虽然在描述本发明的各个实施例时、在转换得到的波长相同的情况下已经使用相同的名称来陈述一种非线性光学元件（光学晶体），但是可替代地也可以使用其它合适的光学晶体。作为比较，在转换得到的波长不同的情况下，即使在相同的晶体上，晶体方向可以针对适当的相位匹配条件而变化。另外，当使用表面覆盖材料来保护光学晶体时，选择的透射范围的波长依据覆盖材料而变化。当然，对于各个转换得到的波长，可以使用不同的光学晶体。

[0163] 应当了解，本发明的配置并不限于在此公开的实施例。例如，在不脱离本发明的范围的情况下，可以针对布置在激光发生装置所包括的谐振器内部的多反射部分中的光学元件的数目、和用于该装置所包括的耦合谐振器的透镜的数目来实施各种变化和修改，也可以针对用于构造该装置的材料成分和其它必备因素来实施各种变化和修改。另外，由用于波长转换的非线性光学元件所生成的高次谐波并不限于二次谐波。因此，利用该非线性光学元件，还可以获得诸如三次或更高次之类的谐波，并且也可以执行通过和频生成来进行的高次谐波生成以及通过参数振荡来进行的波长转换。

[0164] 本领域技术人员应当了解，根据设计要求和其它因素可以对本发明进行各种修改、组合、子组合和变更，只要它们在所附权利要求或其等同物的范围内。

[0165] 本发明包含与 2007 年 3 月 28 日在日本专利局提交的日本专利申请 JP2007-85305 相关的主题，该申请的全部内容通过引用而结合于此。

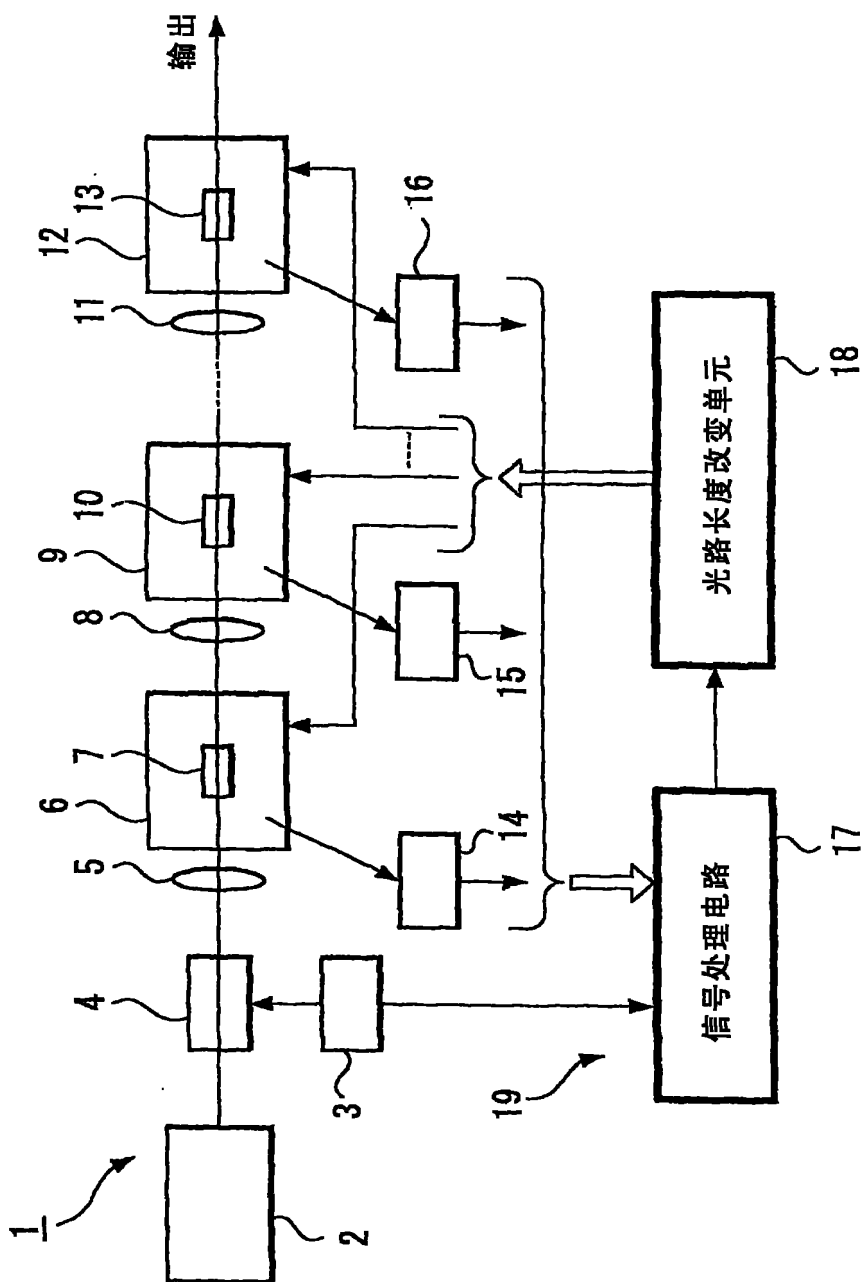


图1

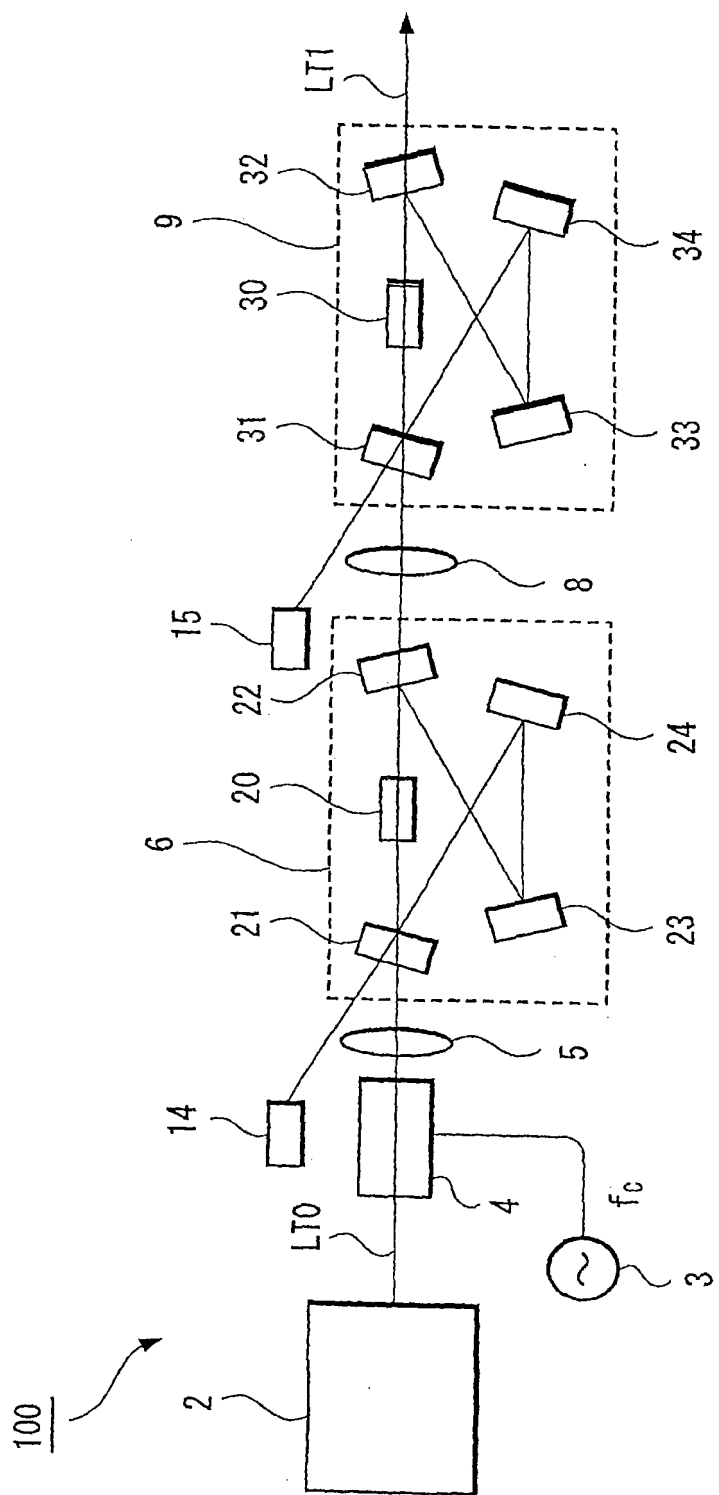


图2

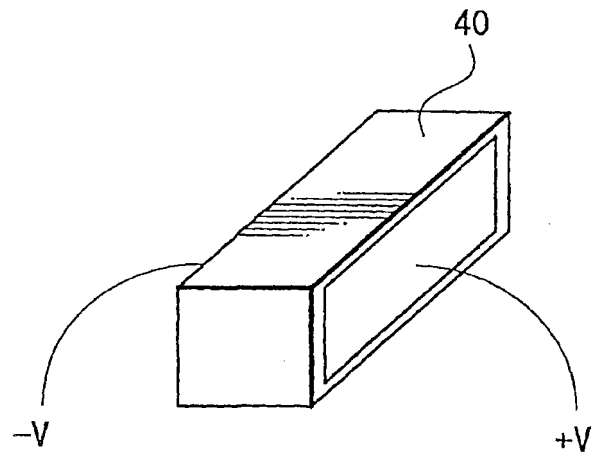


图 3

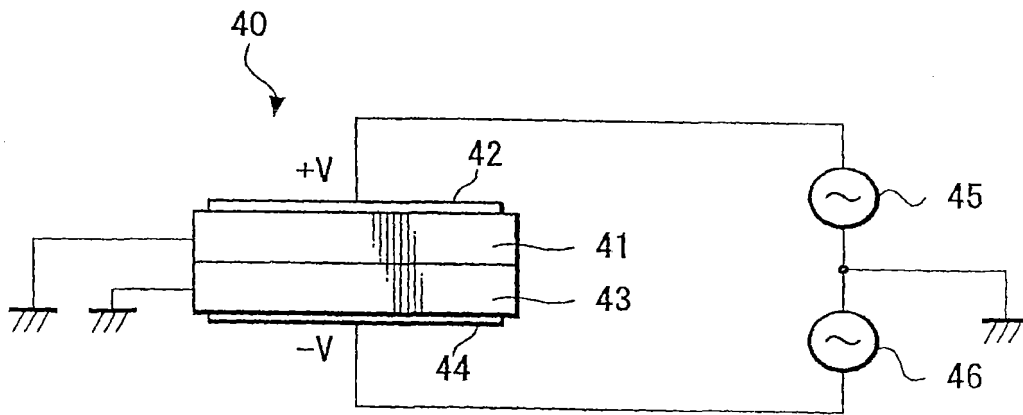


图 4

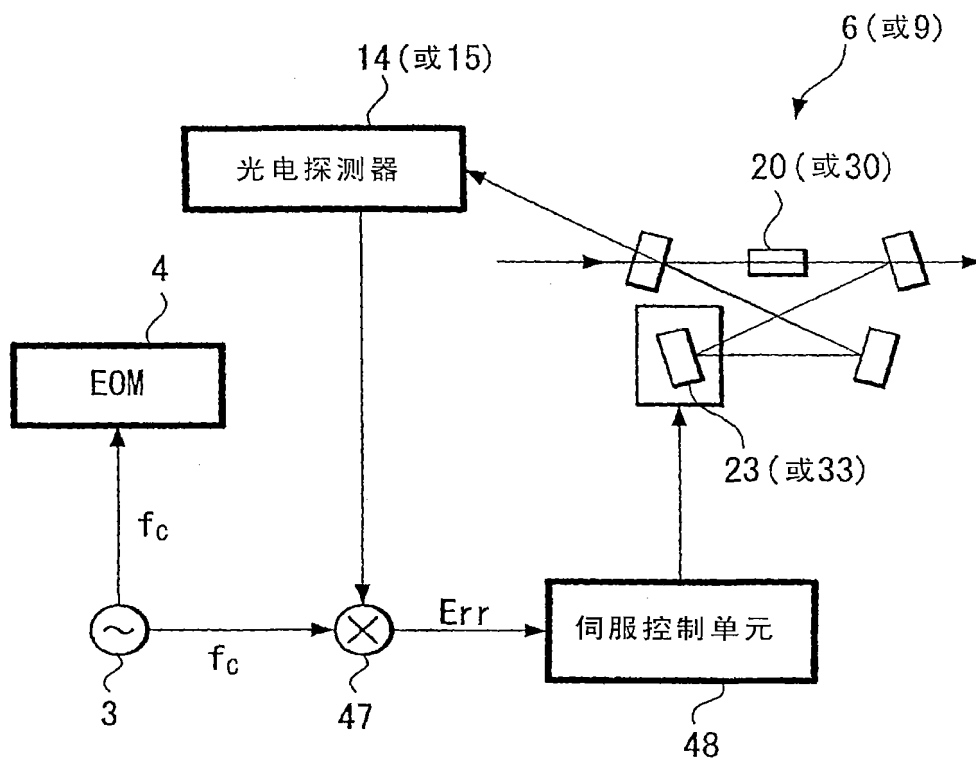


图 5

有效反射率

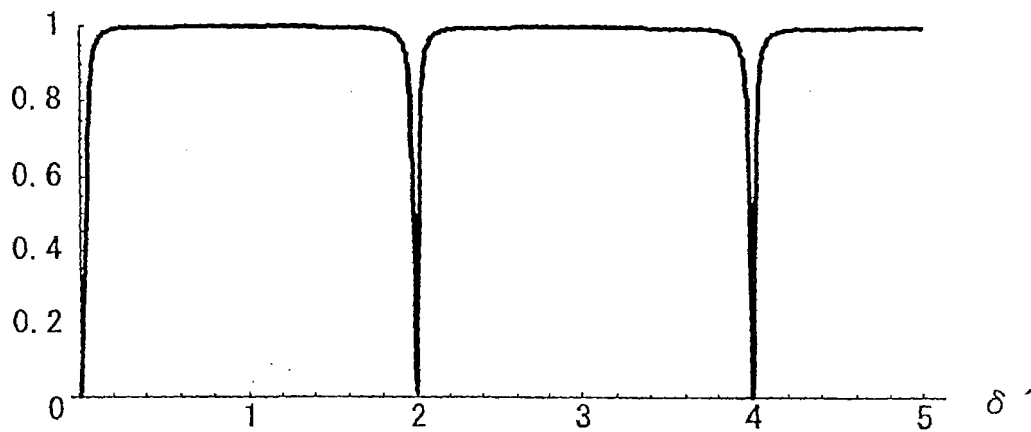


图 6

图7A

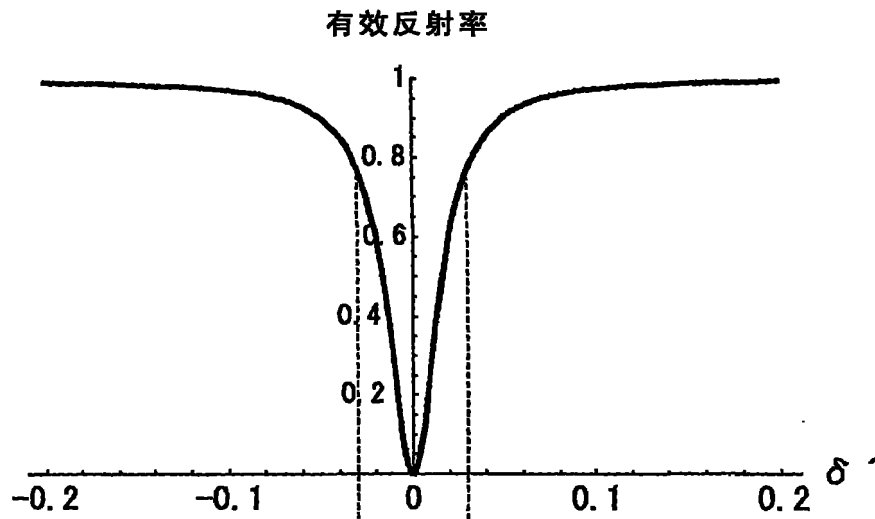
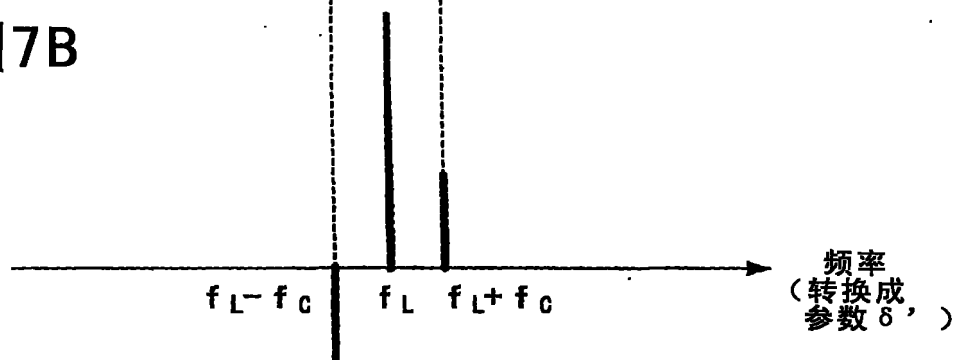


图7B



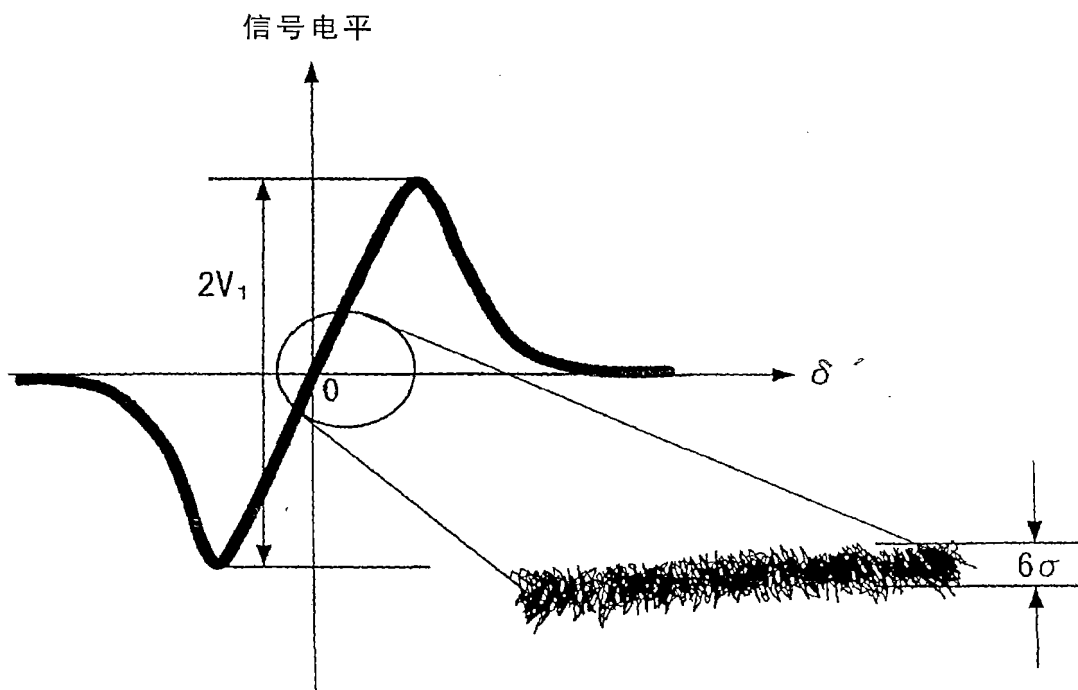


图 8

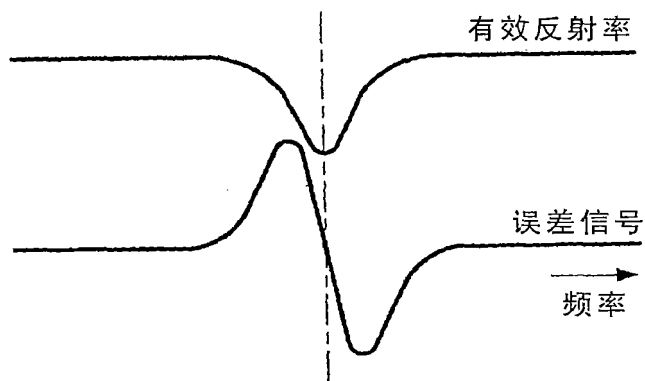


图 9A 第一级 (1064 → 532nm)

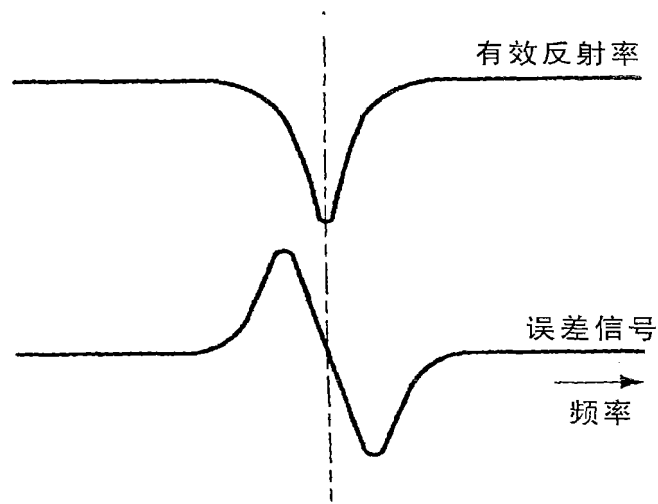


图 9B 第二级 (532 → 266nm)

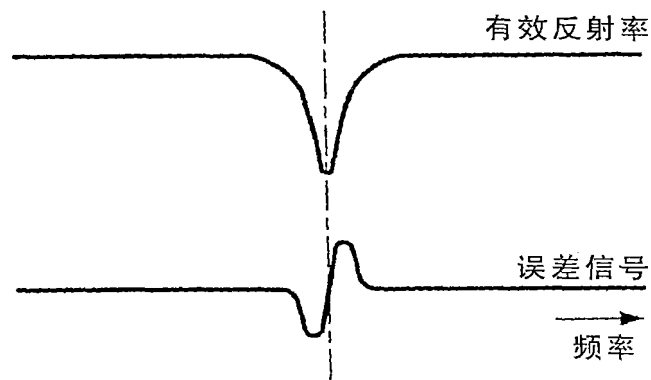


图 9C 第三级 (266 → 198nm)

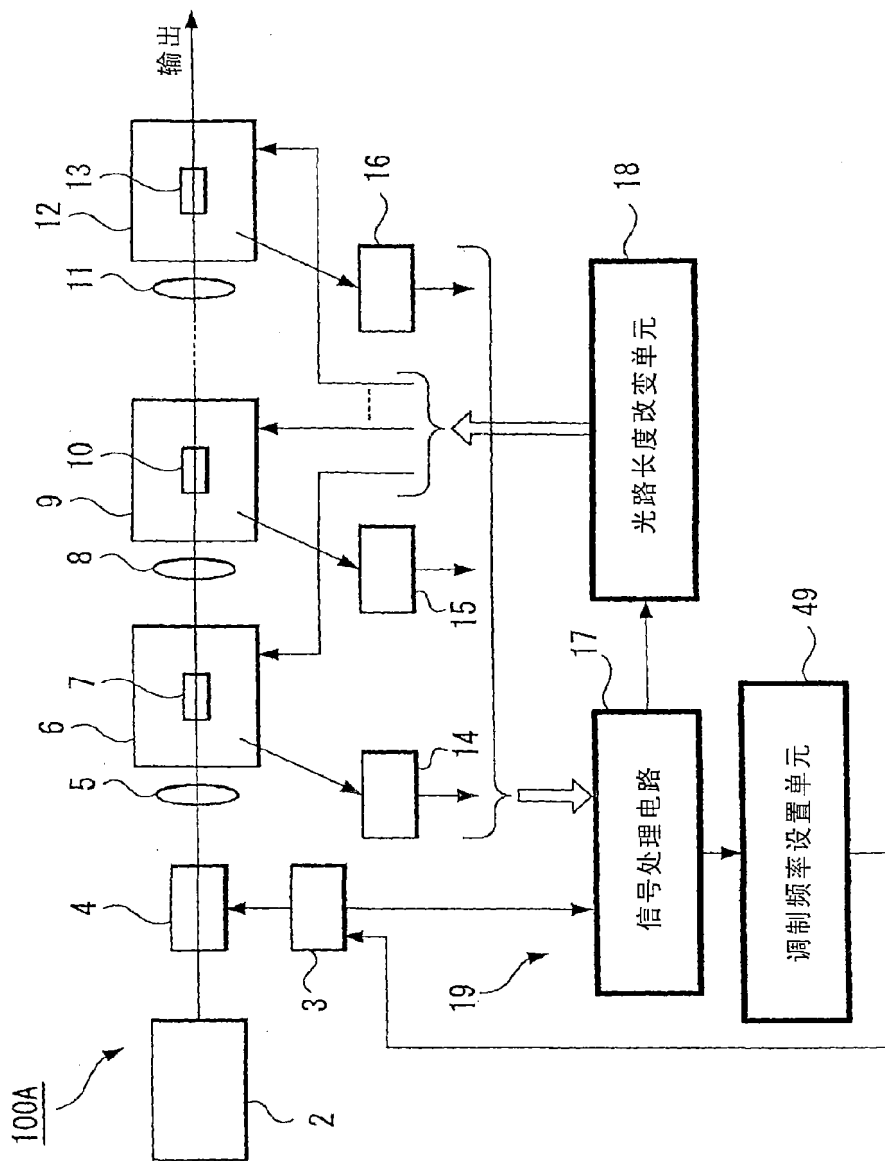


图10

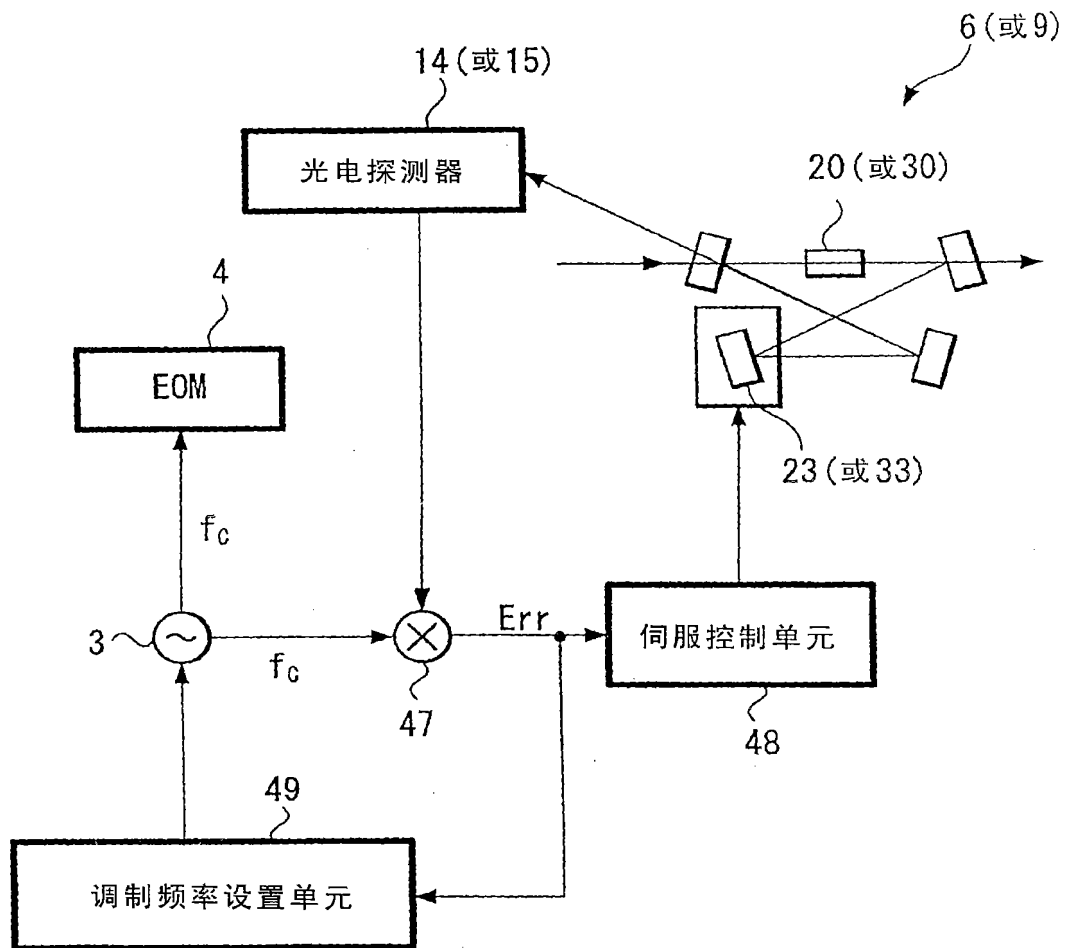


图 11

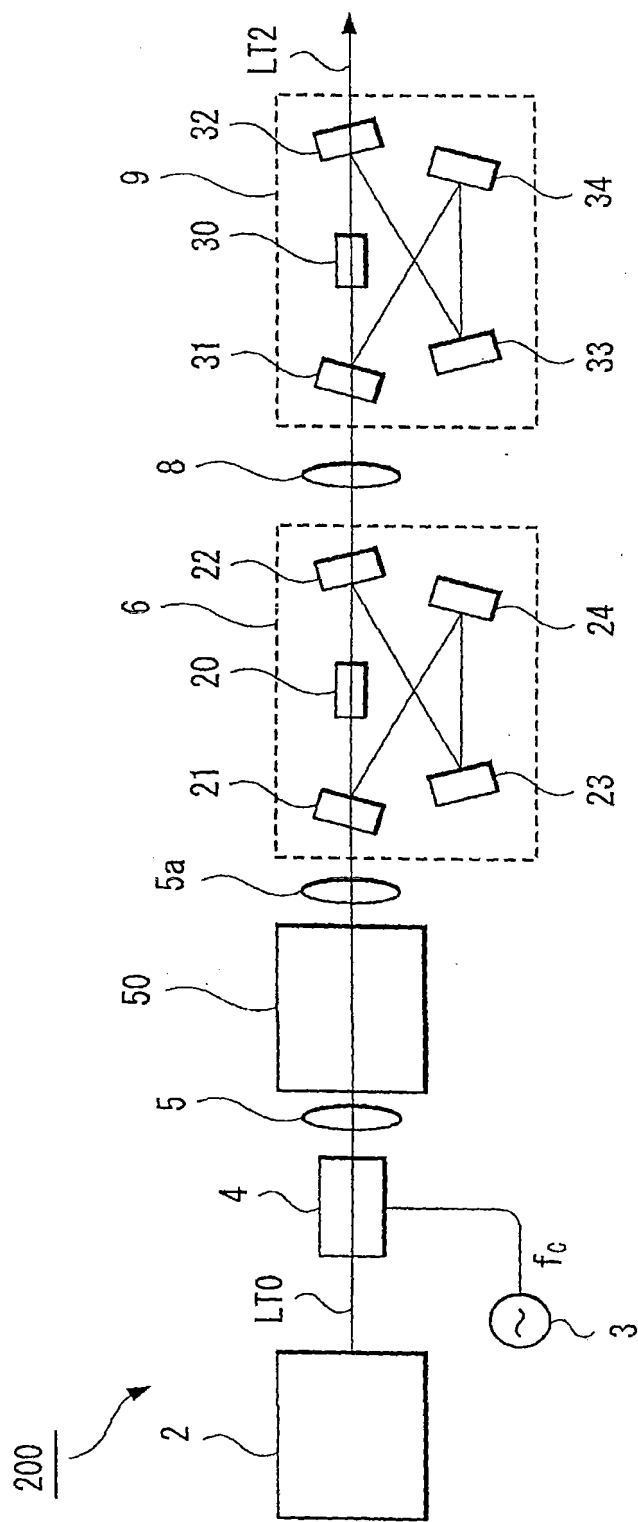


图12

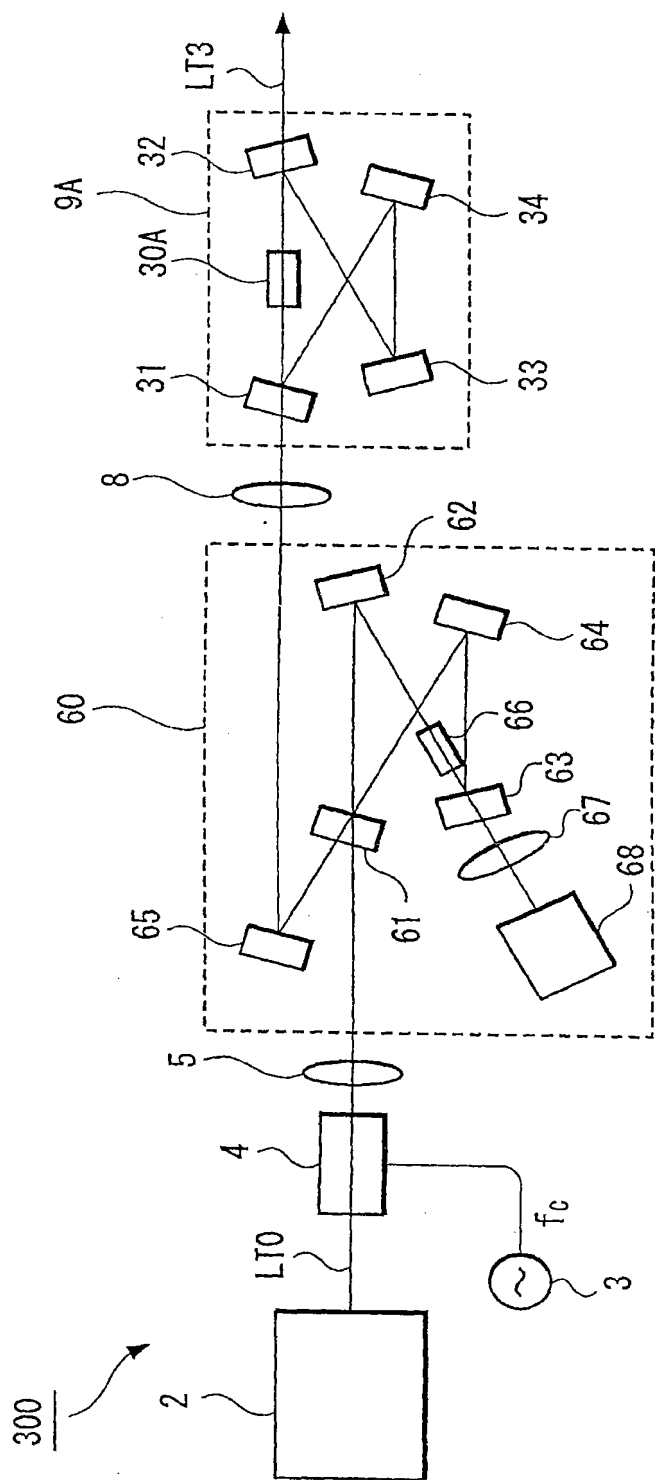


图13

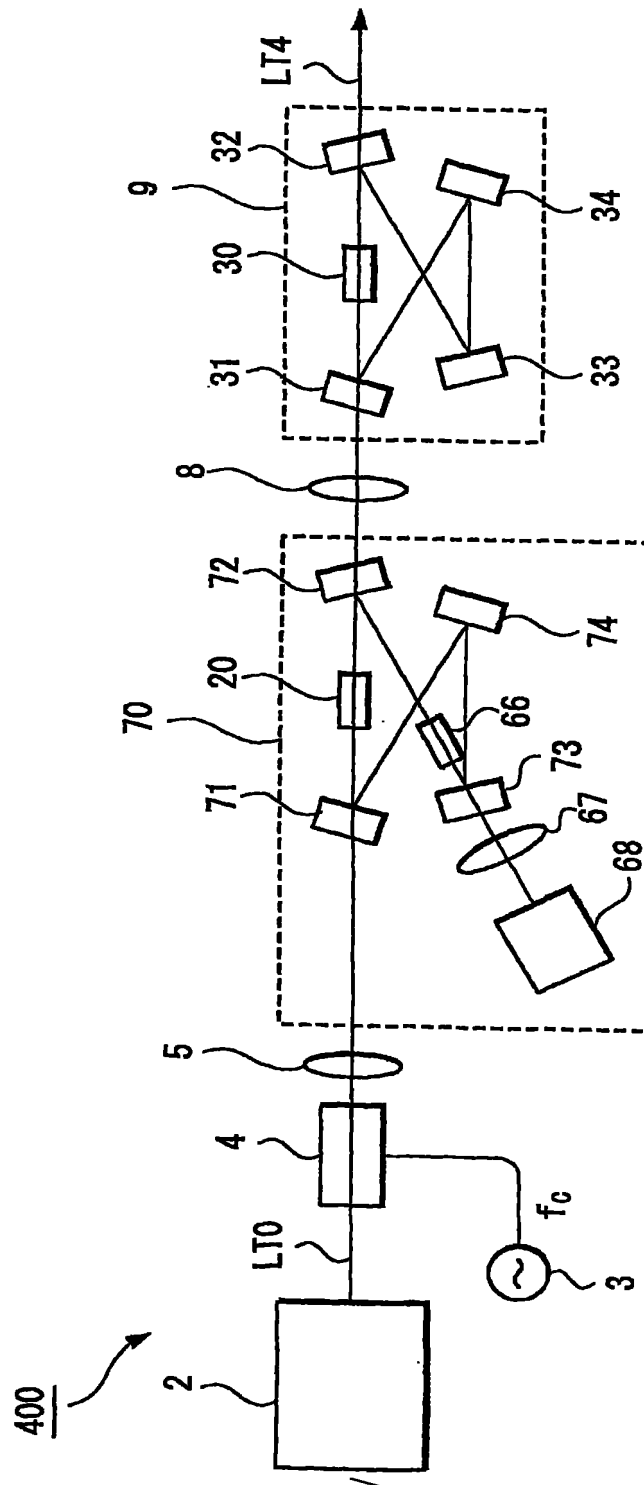


图14

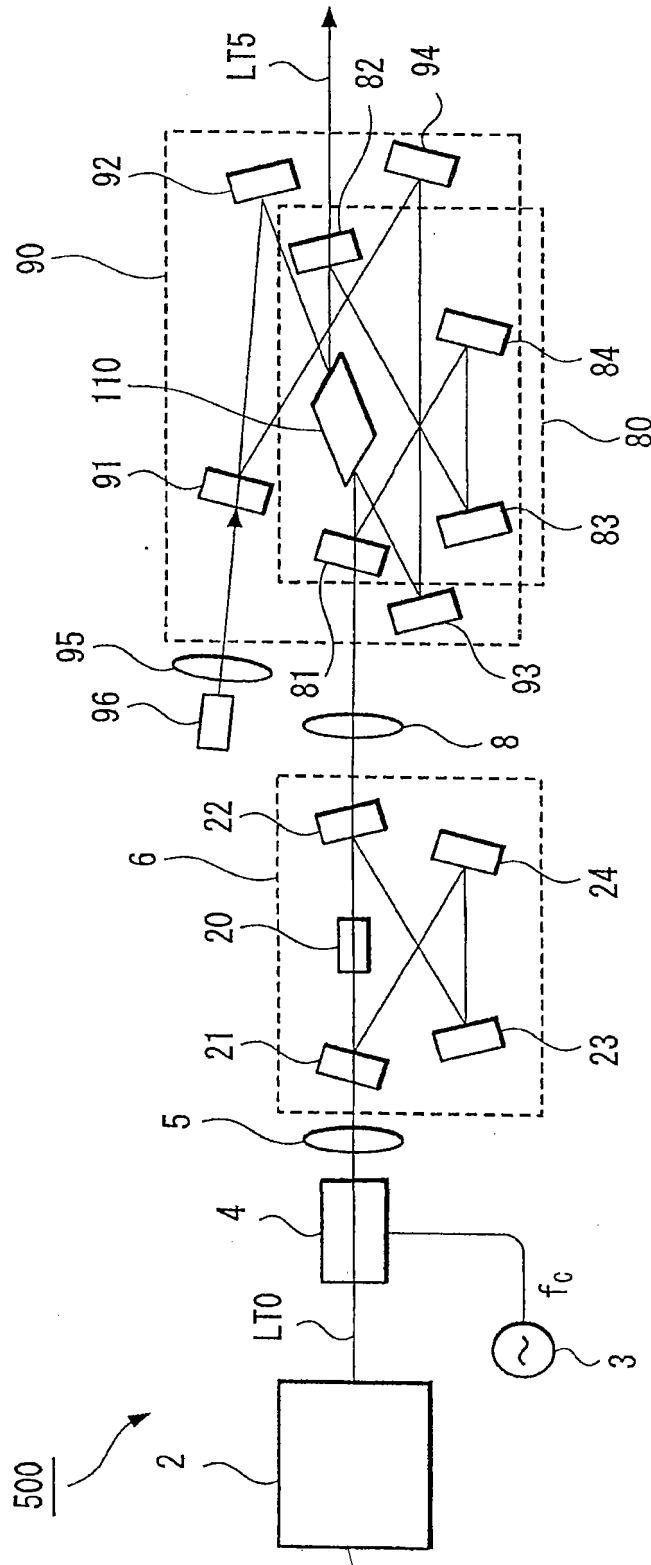


图15