



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 115528515 A

(43) 申请公布日 2022. 12. 27

(21) 申请号 202211280002.1

(22) 申请日 2015.10.02

(30) 优先权数据

62/059,368 2014.10.03 US

14/872,890 2015.10.01 US

(62) 分案原申请数据

201580053715.6 2015.10.02

(71) 申请人 科磊股份有限公司

地址 美国加利福尼亚州

(72) 发明人 勇·霍·亚历克斯·庄

J·约瑟夫·阿姆斯特朗

弗拉基米尔·德里宾斯基 邓宇俊

约翰·费尔登

(74) 专利代理机构 北京律盟知识产权代理有限公司 11287

专利代理师 刘丽楠

(51) Int.Cl.

H01S 3/00 (2006.01)

H01S 3/10 (2006.01)

G01N 21/95 (2006.01)

G01N 21/956 (2006.01)

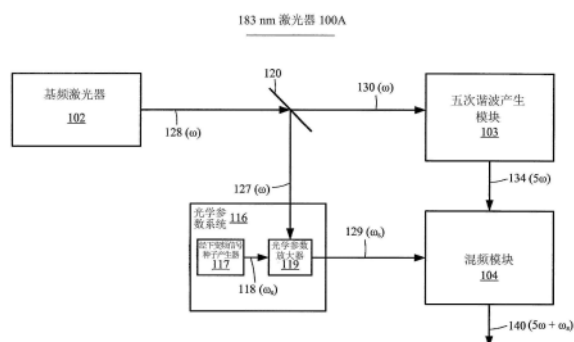
权利要求书6页 说明书24页 附图16页

(54) 发明名称

183纳米激光器及检验系统

(57) 摘要

本揭露实施例涉及一种183纳米激光器及检验系统。一种用于产生处于大约183nm的输出波长的激光器输出光的激光器组合件包含基频激光器、光学参数系统OPS、五次谐波产生器及混频模块。基频激光器产生处于基频频率的基频光。OPS产生处于经下变频频率的经下变频信号。五次谐波产生器产生基频光的五次谐波。混频模块混合经下变频信号与五次谐波以产生处于等于五次谐波频率与经下变频频率的和的频率的激光器输出光。OPS通过产生处于经下变频频率的经下变频种子信号且接着混合经下变频种子信号与基频光的一部分而产生经下变频信号。频率混合、频率转换或谐波产生中的至少一者利用经退火、经氘处理或经氢处理的CLBO晶体。



1. 一种用于产生具有在大约180nm与大约185nm之间的范围内的输出波长的激光器输出光的激光器组合件,所述激光器组合件包括:

基频激光器,其经配置以产生具有基本频率的基频光;

光学参数系统OPS,其耦合到所述基频激光器使得所述OPS接收所述基频光的第一部分,且所述OPS经配置以产生具有小于所述基本频率的经下变频频率的经下变频信号;

五次谐波产生器,其耦合到所述基频激光器使得所述五次谐波产生器接收所述基频光的第二部分,且所述五次谐波产生器经配置以产生具有等于所述基本频率的五倍的五次谐波频率的五次谐波光;及

混频模块,其经光学耦合以接收来自所述OPS的所述经下变频信号及来自所述五次谐波产生器的所述五次谐波光,且经配置以通过混合所述经下变频信号与所述五次谐波光而产生所述激光器输出光,

其中所述OPS包括:

经下变频种子信号产生器,其经配置以产生具有所述经下变频频率及第一功率级的经下变频种子信号;及

光学参数放大器OPA,其经配置使得所述经下变频种子信号与所述基频光的一部分通过穿过非线性晶体一次而混合,其中所述非线性晶体经配置使得所述混合产生处于大于所述第一功率级的十倍的所述第二功率级的所述经下变频信号,且

其中所述OPS经配置使得所述经下变频频率与所述五次谐波频率的和产生在大约180nm与大约185nm之间的所述范围内的所述激光器输出光,

其中所述五次谐波产生器及所述混频模块中的至少一者包括经退火CLBO晶体、经氘处理CLBO晶体及经氢处理CLBO晶体中的一者,所述至少一者经配置以接近非临界相位匹配以允许处于1W到20W范围内的功率级的稳定输出或大于1W到20W范围的功率级的稳定输出。

2. 根据权利要求1所述的激光器组合件,其中所述基频激光器经配置以产生处于具有等于大约1064nm、大约1053nm、大约1047nm及大约1030nm中的一者的对应波长的所述基本频率的所述基频光。

3. 根据权利要求1所述的激光器组合件,其中所述OPA包括:

光束组合器,其经配置以组合所述基频光的所述第一部分与所述经下变频种子信号;

非线性晶体,其经配置以接收所述经下变频种子信号并通过对所述基频光的所述第一部分的受激下变频而放大所述经下变频种子信号;及

光束分裂器,其经配置以分离所述经下变频信号与从所述非线性晶体接收的其它频率,且将所述经下变频信号引导到所述混频模块。

4. 根据权利要求3所述的激光器组合件,其中所述经下变频种子信号产生器经配置以产生处于在1mW到500mW的范围内的所述第一功率级的所述经下变频种子信号,且其中所述OPA经配置以产生处于在1W到20W的范围内的所述第二功率级的所述经下变频信号。

5. 根据权利要求3所述的激光器组合件,其中光束组合器进一步经配置以反射第一波长同时透射第二波长,使得所述基频光部分与所述经下变频种子信号共线地被发射穿过所述非线性晶体。

6. 根据权利要求5所述的激光器组合件,其中所述非线性晶体包括以下各项中的一者:周期性极化铌酸锂PPLN、周期性极化经氧化镁掺杂铌酸锂、周期性极化化学计量比钽酸锂

PPSLT、周期性极化经氧化镁掺杂化学计量比钽酸锂及周期性极化磷酸钛氧钾PPKTP。

7. 根据权利要求1所述的激光器组合件, 其中所述OPS的所述经下变频种子信号产生器包括二极管激光器。

8. 根据权利要求1所述的激光器组合件,

其中所述OPS进一步包括经配置以将所述基频光的所述第一部分分裂成第一子部分及第二子部分的光束分裂器, 且

其中所述经下变频种子信号产生器包括经配置以通过转换所述第一子部分而产生所述经下变频种子信号的光学参数振荡器OP0,

其中所述OPA经配置以混合所述经下变频种子信号与所述第二子部分。

9. 根据权利要求8所述的激光器组合件,

其中所述经下变频信号具有对应于所述经下变频频率的经下变频波长,

其中所述OP0包括可操作地经配置以形成腔的第一聚焦镜、非线性晶体、第二聚焦镜、波长选择器以及输出耦合器, 在所述腔中, 借助于所述第一聚焦镜及所述第二聚焦镜以及所述非线性晶体在所述波长选择器与所述输出耦合器之间反射光,

其中所述波长选择器经配置成对于具有在居中于所述经下变频波长的大约0.2nm的波长范围内的波长的光具有高反射性, 且

其中所述输出耦合器经配置以传递在所述波长选择器与所述输出耦合器之间反射的所述光的一部分作为所述经下变频种子信号。

10. 根据权利要求9所述的激光器组合件, 其中所述OPS包括:

光束组合器, 其经配置以组合所述第二子部分与所述经下变频种子信号; 及

非线性晶体, 其经配置以通过对所述第二子部分的受激下变频而放大所述经下变频种子信号,

其中从光束分裂器到所述光束组合器的光学路径长度经设定使得所述第二子部分的脉冲与所述经下变频种子信号的脉冲同时地到达所述光束组合器。

11. 根据权利要求1所述的激光器组合件, 其中所述光学参数系统经配置使得所述经下变频信号具有在大约1250nm到大约1830nm的范围内的信号波长。

12. 根据权利要求11所述的激光器组合件, 其中所述基频激光器经配置使得所述基本频率具有大约1064.4nm的对应波长, 且其中所述光学参数系统经配置使得所述经下变频信号具有在大约1250nm到大约1420nm的范围内的信号波长。

13. 根据权利要求11所述的激光器组合件, 其中所述基频激光器经配置使得所述基本频率具有大约1030nm的对应波长, 且其中所述光学参数系统经配置使得所述经下变频信号具有在大约1400nm到大约1830nm的范围内的信号波长。

14. 根据权利要求11所述的激光器组合件, 其中所述基频激光器包括模式锁定激光器、准连续波激光器、激光器二极管及光纤激光器中的一者。

15. 一种检验系统, 其包括:

激光器组合件, 其经配置以产生具有在大约180nm与大约185nm之间的范围内的输出波长的激光器输出光;

第一光学器件, 其经配置以将所述激光器输出光从所述激光器组合件引导到正受检验物件;

第二光学器件,其经配置以收集受所述正受检验物件影响的所述激光器输出光的图像部分,并将所述图像部分引导到一或多个传感器,

其中所述激光器组合件包括:

基频激光器,其经配置以产生具有基本频率的基频光;

光学参数系统OPS,其耦合到所述基频激光器使得所述OPS接收所述基频光的第一部分,且所述OPS经配置以产生具有小于所述基本频率的经下变频频率的经下变频信号;

五次谐波产生器,其耦合到所述基频激光器使得所述五次谐波产生器接收所述基频光的第二部分,且所述五次谐波产生器经配置以产生具有等于所述基本频率的五倍的五次谐波频率的五次谐波光;及

混频模块,其经光学耦合以接收来自所述OPS的所述经下变频信号及来自所述五次谐波产生器的所述五次谐波光,且经配置以通过混合所述经下变频信号与所述五次谐波光而产生所述激光器输出光,

其中所述OPS包括:

经下变频种子信号产生器,其经配置以产生具有所述经下变频频率及第一功率级的经下变频种子信号;及

光学参数放大器OPA,其经配置以混合所述经下变频种子信号与所述基频光的一部分,使得所述混合产生处于大于所述第一功率级的十倍的第二功率级的所述经下变频信号,且

其中所述OPS经配置使得所述经下变频频率与所述五次谐波频率的和产生在大约180nm与大约185nm之间的所述范围内的所述激光器输出光,

其中所述五次谐波产生器包括经退火CLBO晶体、经氘处理CLBO晶体及经氢处理CLBO晶体中的至少一者,所述至少一者经配置以接近非临界相位匹配以允许处于1W到20W范围内的功率级的稳定输出或大于1W到20W范围的功率级的稳定输出。

16. 根据权利要求15所述的检验系统,其中所述检验系统包括暗场检验系统。

17. 根据权利要求15所述的检验系统,其进一步包括经配置以减小被引导到所述正受检验物件的所述激光器输出光的相干性的声光调制器及电光调制器中的至少一者。

18. 根据权利要求15所述的检验系统,其进一步包括经配置以增加所述激光器组合件的脉冲重复率的脉冲率倍增器。

19. 根据权利要求15所述的检验系统,其中所述第二光学器件经配置以将经反射图像部分及经透射图像部分同时地引导到单个传感器。

20. 根据权利要求15所述的检验系统,其中所述第一光学器件包括一或多个组件,所述一或多个组件经配置以引导所述激光器输出光使得所述激光器输出光在所述正受检验物件上形成照明线。

21. 根据权利要求15所述的检验系统,其中所述第一光学器件包括一或多个组件,所述一或多个组件经配置以引导所述激光器输出光使得所述激光器输出光在所述正受检验物件上形成多个同时被照明的光点。

22. 根据权利要求15所述的检验系统,其中所述光学参数系统经配置使得所述经下变频信号具有在大约1250nm到大约1830nm的范围内的信号波长。

23. 一种产生波长在大约180nm与185nm之间的光的方法,所述方法包括:

产生处于具有大约1064.4nm的对应基频波长的基本频率的基频光;

对所述基频光的第一部分进行下变频,使得所述下变频产生处于具有介于大约1250nm与大约1420nm之间的对应经下变频波长的经下变频频率的经下变频信号;

转换所述基频光的第二部分,使得所述转换产生处于所述基本频率的五次谐波频率的五次谐波光;及

混合所述五次谐波光与所述经下变频信号,使得所述混合产生具有对应于所述经下变频频率与所述五次谐波频率的之和的输出波长的输出激光,

其中对所述基频光的所述第一部分进行下变频包含:

产生具有所述经下变频频率及第一功率级的经下变频种子信号;及

混合所述经下变频种子信号与所述基频光的所述第一部分,使得所述混合所述经下变频种子信号产生处于大于所述第一功率级的十倍的所述第二功率级的所述经下变频信号,且

其中所述混合所述五次谐波光与所述经下变频信号包括使所述五次谐波光及所述经下变频信号穿过经退火CBL0晶体、经氘处理CLB0晶体及经氢处理CLB0晶体中的至少一者,所述至少一者经配置以接近非临界相位匹配以允许处于1W到20W范围内的功率级的稳定输出或大于1W到20W范围的功率级的稳定输出。

24. 一种产生波长在大约180nm与185nm之间的光的方法,所述方法包括:

产生处于具有大约1030nm的对应基频波长的基本频率的基频光;

对所述基频光的第一部分进行下变频,使得所述下变频产生处于具有介于大约1400nm与1830nm之间的对应经下变频波长的经下变频频率的经下变频信号;

转换所述基频光的第二部分,使得所述转换产生处于所述基本频率的五次谐波频率的五次谐波光;及

混合所述五次谐波光与所述经下变频信号,使得所述混合产生具有对应于所述经下变频频率与所述五次谐波频率的之和的输出波长的输出激光,

其中对所述基频光的所述第一部分进行下变频包含:

产生具有所述经下变频频率及第一峰值功率级的经下变频种子信号;及

混合所述经下变频种子信号与所述基频光的所述第一部分,使得所述混合所述经下变频种子信号产生处于大于所述第一功率级的十倍的所述第二峰值功率级的所述经下变频信号,且

其中所述混合所述五次谐波光与所述经下变频信号包括使所述五次谐波光及所述经下变频信号穿过经退火CBL0晶体、经氘处理CLB0晶体及经氢处理CLB0晶体中的至少一者,所述至少一者经配置以接近非临界相位匹配以允许处于1W到20W范围内的功率级的稳定输出或大于1W到20W范围的功率级的稳定输出。

25. 一种检验样本的方法,所述方法包括:

产生处于具有大约1030nm的对应基频波长的基本频率的脉冲激光;

对所述基频光的第一部分进行下变频,使得所述下变频产生处于具有介于大约1400nm与1830nm之间的对应经下变频波长的经下变频频率的经下变频信号;

转换所述基频光的第二部分,使得所述转换产生处于所述基本频率的五次谐波频率的五次谐波光;

混合所述五次谐波光与所述经下变频信号,使得所述混合产生具有对应于所述经下变频频率与所述五次谐波频率的之和的输出波长的输出激光;

将所述输出激光引导到正受检验物件上;及

收集受所述正受检验物件影响的所述激光器输出光的图像部分,并将所述图像部分引导到一或多个传感器,

其中对所述基频光的所述第一部分进行下变频包含:

产生具有所述经下变频频率及第一功率级的经下变频种子信号;及

混合所述经下变频种子信号与所述基频光的所述第一部分,使得所述混合所述经下变频种子信号产生处于大于所述第一功率级的十倍的所述第二功率级的所述经下变频信号,且

其中所述混合所述五次谐波光与所述经下变频信号包括使所述五次谐波光及所述经下变频信号穿过经退火CBL0晶体、经氘处理CLB0晶体及经氢处理CLB0晶体中的至少一者,所述至少一者经配置以接近非临界相位匹配以允许处于1W到20W范围内的功率级的稳定输出或大于1W到20W范围的功率级的稳定输出。

26.一种用于产生具有在大约180nm至大约185nm的范围内的输出波长的激光器输出光的激光器组合件,所述激光器组合件包括:

基频激光器,其经配置以产生具有等于约1064nm基波长及相应基本频率的基频光;

二次谐波产生器,其耦合到所述基频激光器使得所述二次谐波产生器接收所述基频光的第一部分,所述二次谐波产生器经配置以产生具有等于所述基本频率的两倍的二次谐波频率的二次谐波光;

四次谐波产生模块,其经耦合以接收所述二次谐波光的第一部分且产生具有等于四倍所述基本频率的四次谐波频率的四次谐波光;

光学参数系统OPS,其耦合到所述基频激光器使得所述OPS接收所述二次谐波光的第二部分,且所述OPS经配置以产生具有小于所述基本频率的经下变频频率的经下变频信号;

五次谐波产生器,其耦合到所述基频激光器使得所述五次谐波产生器接收所述基频光的第二部分与所述四次谐波光,且所述五次谐波产生器经配置以产生具有等于所述基本频率的五倍的五次谐波频率的五次谐波光;及

混频模块,其经光学耦合以接收来自所述OPS的所述经下变频信号及来自所述五次谐波产生器的所述五次谐波光,且经配置以通过混合所述经下变频信号与所述五次谐波光而产生所述激光器输出光,

其中所述基频激光器经配置以产生所述基频光使得所述二次谐波光的所述第二部分包括可见绿色光,

其中所述OPS包括经配置以通过对所述二次谐波光的所述第二部分进行下变频而产生所述经下变频信号的绿色泵激式光学参数振荡器,且

其中所述OPS经配置使得所述经下变频频率与所述五次谐波频率的和产生在大约180nm至大约185nm的所述范围内的所述激光器输出光,

其中所述经下变频信号具有对应于所述经下变频频率的经下变频波长,

其中所述绿色泵激式OPS包括可操作地经配置以形成腔的第一聚焦镜、非线性晶体、第二聚焦镜、波长选择器及输出耦合器,在所述腔中,借助于所述第一聚焦镜及所述第二聚焦镜以及所述非线性晶体在所述波长选择器与所述输出耦合器之间反射光,

其中所述波长选择器经配置成对于具有在居中于所述经下变频波长的大约0.2nm的波长范围内的波长的光具有高反射性,

其中所述输出耦合器经配置以传递在所述波长选择器与所述输出耦合器之间反射的所述光的一部分作为所述经下变频信号,且

其中所述非线性晶体包括三硼酸锂LBO晶体。

183纳米激光器及检验系统

[0001] 本申请是申请日为2015年10月2日,申请号为“201580053715.6”,而发明名称为“183纳米激光器及检验系统”的发明专利申请的分案申请。

[0002] 优先权申请案

[0003] 本申请案主张对由庄 (Chuang) 等人于2014年10月3日提出申请的标题为“183纳米激光器及检验系统 (183NM LASER AND INSPECTION SYSTEM)”的美国临时专利申请案62/059,368的优先权。

[0004] 相关申请案

[0005] 本申请案与由庄等人于2013年3月12日提出申请且以引用方式并入本文中的标题为“使用193纳米激光器的固态激光器及检验系统 (Solid-State Laser and Inspection System Using 193nm Laser)”的美国专利申请案13/797,939相关。

技术领域

[0006] 本发明涉及一种激光器,且具体来说,涉及一种产生接近183nm的辐射且适于供在对光掩模 (photomask)、光罩 (reticle) 及/或晶片的检验中使用的固态或光纤激光器。所述激光器优选地是脉冲式激光器,例如Q开关激光器或模式锁定激光器。本发明进一步涉及一种使用在接近183nm的波长下操作的激光器的检验系统。

背景技术

[0007] 用于产生处于193nm的光的准分子激光器在此项技术中是众所周知的。令人遗憾地,此类激光器由于其低激光脉冲重复率及其在其激光介质中使用有毒且腐蚀性气体 (此导致高持有成本) 而不能很好地适于检验应用。

[0008] 用于产生接近193nm的光的固态及光纤激光器也是已知的。示范性激光器使用两个不同基频波长 (例如,雷 (Lei) 等人的US 2014/0111799) 或基频波长的八次谐波 (例如,德久 (Tokuhisa) 等人的US 7,623,557), 此两者中的任一者均需要昂贵或无法大批量生产的激光器或材料。另一方法 (米德 (Mead) 等人的US 5,742,626) 尚未产生具有如半导体检验应用所需的稳定输出及高功率 (在于服务事件之间可连续运行达三个月或多于三个月的激光器中通常需要大约1W或更大) 的商用产品。此外,这些激光器中的大部分具有极其低功率输出且限于数MHz或更小的激光脉冲重复率。

[0009] 随着半导体装置尺寸缩小,可致使装置出故障的最大颗粒或图案缺陷的大小也缩小。因此,出现对检测经图案化及未经图案化半导体晶片上的较小颗粒及缺陷的需要。由颗粒散射的光 (其中所述颗粒比所述光的波长小) 的强度通常随所述颗粒的尺寸的高次幂而比例缩放 (举例来说,来自经隔离小球体颗粒的光的总散射强度与所述球体的直径的六次幂成正比且与所述波长的四次幂成反比地缩放)。由于经散射光的经增加强度,因此较短波长通常将提供优于较长波长的对检测小颗粒及缺陷的敏感度。

[0010] 由于从小颗粒及缺陷散射的光的强度通常是极低的,因此需要高照明强度来产生可在极短时间内检测到的信号。可需要1W或更大的平均光源功率级。在这些高平均功率级

下,高脉冲重复率是所要的,这是因为重复率越高,每脉冲的能量越低,且因此损坏正受检验的系统光学器件或物品的风险越低。高重复率在高速检验中也是所要的,这是因为高重复率(例如约50MHz或更高)允许针对每一图像收集许多脉冲,从而引起对脉冲到脉冲间在强度上的变化的较低敏感度。

[0011] 因此,出现对激光器且优选地对产生短于193nm的辐射且适于供在对光掩模、光罩及/或晶片的检验中使用的固态或光纤激光器的需要。明显地,高速下的此类检验通常需要多个MHz(例如,在一些情形中大于50MHz)的最小激光脉冲重复率。

发明内容

[0012] 本发明针对于用于使用基频激光器借助于产生并混合基频激光的五次谐波与经下变频信号而产生183nm激光的激光器组合件及相关联方法,其中所述经下变频信号是借助于以下方式产生:产生具有所需经下变频频率的低功率经下变频种子信号,且接着混合所述经下变频种子信号与所述基频激光的一部分以产生处于比所述经下变频种子信号大十倍或多于十倍的峰值功率级的所述经下变频信号。除与利用五次谐波光产生所述183nm输出激光相关联的效率外,根据本发明的用于产生经下变频信号的两步式方法还提供优于常规方法的数个优点。首先,产生较低功率经下变频种子信号的初始步骤借助于最小化用以产生较高功率经下变频信号的光学组件到具有长于约4 μ m的波长的高功率闲置频率(其被大多数非线性晶体以导致变形及/或损坏的方式吸收)的暴露而促进避免对这些组件的变形及损坏。其次,产生处于相对低功率的经下变频种子信号促进对经下变频频率的较大控制,此又促进对183nm激光器输出光的微调谐。本发明的另一优点在于其促进使用各种组件的183nm激光器组合件的制造,借此借助于允许制造商在制造时选择及利用易于获得及/或相对低价的组件而提供制造灵活性。举例来说,各种所描述实施例借助于混合选定基频频率(例如,具有大约1064nm或大约1030nm的对应基频波长)与对应经下变频信号频率(例如,具有在大约1250nm到大约1420nm的范围内或在大约1400nm到大约1830nm的范围内对应经下变频波长)而产生183nm激光器输出光。处于功率与重复率的各种组合的能够产生这些基频频率中的至少一者的基频激光器通常易于以合理价格获得。由于光学参数系统(OPS)以促进控制经下变频信号频率的方式产生经下变频信号,因此本发明允许制造商针对充分相信将产生所述183nm激光器输出光的给定制造运行而选择最低价格或最易获得的基频激光器。

[0013] 根据本发明的实施例,激光器组合件包含基频激光器、光学参数系统(OPS)、五次谐波产生器及混频模块。所述基频激光器经配置以产生具有基频波长(例如,等于大约1064nm、大约1053nm、大约1047nm或大约1030nm中的一者)及对应基频频率的基频光。所述OPS光学耦合到所述基频激光器使得所述OPS接收所述基频光的第一部分,且经配置以产生具有所需经下变频频率 ω_s 的经下变频信号。在一个实施例中,所述所需经下变频频率(ω_s)低于所述基频频率(ω)且高于所述基频频率的50%(即, $0.5\omega < \omega_s < \omega$)。所述五次谐波产生器接收所述基频光的第二部分,在任选地还接收四次谐波,且经配置以产生五次谐波光(即,具有等于所述基频频率的五倍的五次谐波频率(5ω))。所述混频模块经光学耦合以接收来自所述OPS的所述经下变频信号及来自所述五次谐波产生器的所述五次谐波光,且经配置以借助于可操作地混合所述经下变频信号与所述五次谐波光而产生183nm激光器输

出光。根据本发明,所述OPS包含:经下变频种子信号产生器(例如,种子激光器或光学参数振荡器),其经配置以产生处于所需经下变频频率且处于相对低(第一)峰值功率级的经下变频种子信号;及光学参数放大器(OPA),其经配置使得所述经下变频种子信号与所述基频光的一部分通过穿过非线性晶体一次而混合,借此产生处于所述经下变频频率且处于比所述经下变频种子信号高十倍(或多于十倍)的(第二)峰值功率级的所述经下变频信号。所述OPS还经配置以产生处于适当经下变频频率及峰值功率级的所述经下变频信号,使得所述经下变频频率与所述五次谐波频率的和产生在大约180nm到大约185nm的范围内的所述激光器输出光。

[0014] 在替代实施例中,所述基频激光器经配置以产生处于具有等于大约1064nm、大约1053nm、大约1047nm及大约1030nm中的一者的对应波长的基频频率的基频光,且所述OPS经配置以产生处于经下变频信号频率及对应波长的经下变频信号,所述经下变频信号在与基频频率的五次谐波(例如,针对大约1064nm的基频波长的大约1250nm到1420nm)混合时产生处于大约183nm的激光器输出光。通过另一实例的方式,当基频波长为大约1030nm时,产生具有大约1400nm到1830nm的波长的经下变频信号,且针对大约1047nm或大约1053nm波长的基频激光,产生具有介于约1290nm与1580nm之间的波长的经下变频信号。在替代实施例中,用于产生本文中描述的大约183nm的输出波长的激光器组合件利用是Q开关式激光器、模式锁定激光器或准连续波激光器的基频激光器。由于在最终混频模块中使用接近非临界相位匹配,因此所述最终转换级是有效的且对小不对准是相对不敏感,从而允许处于约1W到20W或更大的范围内的功率级的稳定输出。

[0015] 在一个实施例中,五次谐波产生器及混频模块中的至少一者包含经退火、经氢处理或经氘处理硼酸铍锂(CLB0)晶体,其经配置以经接近非临界地相位匹配以用于通过混合介于约206nm与213nm之间的波长与红外波长而产生接近183nm的波长。由于接近非临界相位匹配,因此所述混频是极有效的(例如,非线性系数可为大约或稍大于 1pm V^{-1})且走离角度小(例如,小于约30mrad)。在优选实施例中,所述经退火CLB0晶体保持于接近50℃的恒定温度下。

[0016] 根据示范性实施例,经下变频种子信号产生器经配置以产生处于在1mW到500mW的范围内的较低(第一)平均功率级的经下变频种子信号,且所述OPA经配置以产生处于在1W到20W(或更高)的范围内的(第二)功率级的较高功率经下变频信号。在一个示范性实施例中,OPS的经下变频种子信号产生器是使用直接产生经下变频种子信号的二极管激光器实施,且在其它示范性实施例中,经下变频种子信号产生器是使用经配置以借助于转换基频光的一部分而产生经下变频种子信号的光学参数振荡器(OPO)实施。在两个示范性实施例中,光学参数系统的OPA包含:光束组合器,其经配置以组合第一基频光部分与经下变频种子信号;非线性晶体,其经配置以通过对基频光的第一部分的受激下变频而放大经下变频种子信号;及光束分裂器(波长分离器),其经配置以分离经下变频信号与不期望频率。在目前优选实施例中,在OPS中(例如,在OPA及任选OP0中)利用的非线性晶体是使用周期性极化非线性光学晶体(例如,由铌酸锂(LN)、经氧化镁掺杂铌酸锂(Mg:LN)、化学计量比钽酸锂(SLT)、经氧化镁掺杂化学计量比钽酸锂(Mg:SLT)或磷酸钛氧钾(KTP)形成的周期性极化非线性光学晶体)而实施。

[0017] 根据本发明的替代实施例,通过以类似于上文所描述的方式混合五次谐波光与经

下变频信号而产生183nm激光器输出光,但在此情形中,通过对基频激光的二次谐波进行下变频(即,代替对处于基频频率的光进行下变频)而产生经下变频信号。当使用具有1064nm的波长的基频激光时,二次谐波光包括处于可见绿色光谱中的光(即,二次谐波光具有532nm的波长),借此使用“绿色泵激式”OP0产生经下变频信号避免与从1064nm基频光产生1.3 μ m经下变频信号相关联的加热问题(即,由吸收具有大于4 μ m的波长的闲置信号导致的OPS中的非线性晶体的变形/损坏),因此消除对产生在上文所描述的实施例中利用的较低功率种子信号的需要。然而,通过对532nm光进行下变频而产生1.3 μ m经下变频信号引起限制可用于“绿色泵激式”OP0中的非线性晶体的类型(即,目前优选非线性晶体是LBO)的其它问题,且下变频过程是较低效的。

[0018] 本文中还可揭示用于检验物品(例如,半导体晶片、光掩模或光罩)的系统及方法。这些系统及方法包含在最终频率加总级中使用接近非临界相位匹配产生接近183nm的输出波长的激光器。

[0019] 除其较短波长外,本发明的183nm激光器与193nm激光器相比还具有数个优点。与产生193nm作为六次或八次谐波的激光器相比,本发明的183nm激光器具有使用处于数十W到数百W的功率级的易于获得的基频波长的优点。与通过混合五次谐波与信号频率产生193nm的激光器相比的优点在于183nm激光器的混频模块是更有效的,这是因为CLBO是经接近非临界地相位匹配以用于从在大约206nm到大约213nm的范围内的五次谐波波长产生183nm。此允许信号频率及五次谐波更有效地转换为最终输出且还使混频模块更稳定。另一优点在于对于具有介于约1.25 μ m与约1.83 μ m之间的对应波长的信号频率,与闲置频率相比的显著更多能量进入信号中,借此引起基频功率的更有效转换(与接近2.1 μ m的信号波长相比,其中几乎相等量的功率必须进入信号及闲置频率中)。

附图说明

[0020] 图1A及1B是展示根据本发明的替代示范性实施例的示范性183nm激光器组合件的简化框图。

[0021] 图2是展示根据本发明的实施例的用于图1A的183nm激光器组合件中的示范性五次谐波产生器的简化框图。

[0022] 图3展示根据本发明的替代实施例的由图1A的183nm激光器组合件产生且在图1A的183nm激光器组合件内混合以产生183nm激光器输出光的示范性波长的表。

[0023] 图4是展示根据本发明的实施例的用于图1A的183nm激光器组合件中的示范性混频模块的简化框图。

[0024] 图5是展示根据本发明的实施例的任选地用于图1A的183nm激光器组合件中以增加基频激光功率的放大器模块的简化框图。

[0025] 图6A及6B是展示根据本发明的替代特定实施例的经配置以产生用于图1A的183nm激光器组合件中的经下变频信号的示范性光学参数系统的简化框图。

[0026] 图7展示在一个传感器上同时检测两个图像或信号通道的光罩、光掩模或晶片检验系统。

[0027] 图8说明包含多个物镜及上文所描述经改进193nm激光器中的一者的示范性检验系统。

- [0028] 图9说明将法向入射激光暗场照明添加到折反射成像系统。
- [0029] 图10A说明用于检验表面的区的包含照明系统及集光系统的表面检验设备。
- [0030] 图10B说明用于表面检验设备的示范性集光系统阵列。
- [0031] 图11说明可用于检验表面上的异常的表面检验系统。
- [0032] 图12说明经配置以使用法向及倾斜照明光束两者来实施异常检测的检验系统。
- [0033] 图13说明与检验或度量系统中的上文所描述的183nm激光器一起使用的示范性脉冲倍增器。
- [0034] 图14是展示根据本发明的另一替代实施例的183nm激光器组合件的简化框图。

具体实施方式

[0035] 本发明涉及对用于半导体制作行业中的检验系统的改进,且特定来说,涉及用于此类检验系统的激光器组合件,所述激光器组合件能够以避免与现有技术方法相关联的问题的方式产生具有在大约180nm到大约185nm的范围内(例如,大约183nm)的平均输出波长且具有1W或更大的平均光源功率级的激光。呈现以下描述以使所属领域的技术人员能够制作并使用如在特定申请案及其要求的上下文中提供的本发明。在以下描述中应注意,在无限制条件地提及波长的情况下,可假定所述波长是真空中波长。

[0036] 图1A及1B是分别展示根据本发明的替代示范性实施例的183nm激光器组合件100A及100B的简化框图。尽管激光器组合件100A及100B在某些方面不同,但每一激光器组合件100A及100B利用基本上相同组的核心光学组件,即,激光器组合件100A及100B中的每一者包含基频激光器102、光学参数系统(OPS)116、五次谐波产生器(出于下文所解释的原因在图1A中使用“103”且在图1B中使用“157”识别),以及混频模块104,所述组件经布置且经配置以产生具有在大约180nm到大约185nm的范围内且最优选地大约183nm的频率的激光器输出光140。应注意,这些核心组件在图1A及1B中的每一者中由相同或类似参考编号识别,以指示这些核心组件在所述两个示范性实施例中的每一者中以相同或类似方式经配置及起作用。具体来说,在每一实施例中,基频激光器102经配置以产生具有基频波长(例如,大约1064nm)及对应基频频率 ω 的基频光128。类似地,在每一实施例中,OPS 116光学耦合到基频激光器102,使得OPS116接收基频光128的一部分127作为输入光,且OPS 116经配置以产生经下变频信号129。以类似方式,五次谐波产生器103光学耦合到基频激光器102,使得五次谐波产生器103接收基频光128的至少一部分130作为输入光,且五次谐波产生器103经配置以产生处于等于基频频率 ω 的五倍的五次谐波频率 5ω 的五次谐波光134。混频模块104经光学耦合以接收来自OPS 116的经下变频信号129及来自五次谐波产生器103的五次谐波光134两者作为输入光,且经配置以借助于混合经下变频信号129与五次谐波光134而产生激光器输出光140。

[0037] 根据本发明的一方面,OPS 116利用经下变频种子信号产生器117(例如,二极管激光器或OP0)及光学参数放大器(OPA)119来产生处于经下变频频率 ω_s 的经下变频信号129,使得当在混频模块104中与五次谐波光134混合时,产生处于所要波长(即,在大约180nm到大约185nm的范围内)的激光器输出光140。具体来说,经下变频种子信号产生器117经配置以产生具有与经下变频信号129相同的经下变频频率 ω_s 但具有基本上比经下变频信号129的峰值功率级低的较低(第一)峰值功率级的经下变频种子信号118。如本文中所使用,短语

“经下变频”打算指示经下变频信号129的经下变频频率 ω_s 是比基频激光器信号128的基频频率 ω 低的频率。在特定实施例中,经下变频频率 ω_s 还高于基频频率 ω 的50% (1/2) (即, $0.5\omega < \omega_s < \omega$)。OPA 119经配置以混合经下变频种子信号118与基频光部分127以产生处于所需(第二)峰值功率级(即,大于第一峰值功率级的十倍)的经下变频信号129。通过混合较低功率经下变频种子信号118与基频光而产生较高功率经下变频信号129的一个优点在于:控制低功率激光的稳定性及带宽要容易得多,因此产生处于较低(第一)峰值功率级的经下变频种子信号118促进对经下变频信号129的经下变频频率 ω_s 的更大程度控制。使用较低功率经下变频种子信号118产生较高功率经下变频信号129的另一优点在于:此方法促进借助于使经下变频种子信号118及基频频率部分127穿过OPA 119仅一次而产生经下变频信号129,此(如下文以额外细节所解释)最小化在使用较高功率经下变频信号来产生183nm激光器输出光140时由闲置频率导致的经下变频信号129的失真。

[0038] 下文参考激光器组合件100A(图1A)的详细描述以额外细节描述上文提及的核心组件中的每一者的功能布置及操作。除非另有规定,否则下文参考图1A提供的额外细节适用于在激光器组合件100B中使用的对应核心组件,且因此出于简洁目的从图1B的描述(下文)省略对额外细节的重复。

[0039] 参考图1A,除上文提及的核心组件以外,激光器组合件100A利用光学地耦合于基频激光器102与OPS 116及五次谐波产生器103两者之间的光束分裂器120。具体来说,基频激光器102产生被引导到光束分裂器120上的基频光128,光束分裂器120用以将基频光128划分成两个部分:沿第一(例如,朝下)方向被引导到OPS 116的第一部分127,以及沿第二(例如,水平)方向被引导到五次谐波产生器103的第二部分130。OPS 116使用OPA 119来对基频光部分127进行下变频并将具有经下变频频率 ω_s 的经下变频信号129发射到混频模块104。五次谐波产生器模块103转换基频光部分130并将五次谐波光134发射到混频模块104。混频模块104混合经下变频信号129与五次谐波光134以产生激光器输出光140。

[0040] 参考图1A的左边部分,使用已知技术配置基频激光器102以产生处于基频带宽(范围) $\Delta\omega$ 内的基频频率的基频光(fundamental light)128(在行业中简称为“基频(fundamental)”)。在一个实施例中,基频激光器102经配置使得产生处于对应于大约1064nm的红外波长的基频频率 ω 的基频光128。在示范性实施例中,基频激光器102是使用Nd:YAG(经钕掺杂钇铝石榴石)激光介质、经Nd掺杂正钽酸钕激光介质中的一者或通过经镜掺杂光纤激光器来实施。适合基频激光器可从相干公司(Coherent Inc.) (包含具有80MHz及120MHz的重复率的骑士(Paladin)系列中的模型)、理波公司(Newport Corporation) (包含探索者(Explorer)系列中的模型)及其它制造商商业购得为脉冲式(Q开关、模式锁定或准CW)。用于此类基频激光器的激光器功率级可介于从若干毫瓦到数十瓦特或更多的范围内。在替代示范性实施例中,基频激光器102是由使用产生处于接近1053nm或1047nm的基频波长的基频激光的Nd:YLF(经钕掺杂氟化钕锂)激光介质的激光器实施。在又一示范性实施例中,基频激光器102可由产生处于接近1030nm的基频波长的基频激光的经镜掺杂光纤激光器实施。

[0041] 参考图1A中的基频激光器102的右边,光束分裂器120用以将基频光128划分成分别被引导到OPS 116及五次谐波产生器模块103的基频光部分127及130。在优选实施例中,光束分裂器120包括标准量具或其它波长选择性装置,其从基频波长选择第一部分及第二

部分使得第二部分130包括比第一部分127窄的在基频波长带宽内的波长范围。使用用于光束分裂器120的波长选择性装置允许激光器的输出带宽独立于基频激光器102的带宽地受控制。波长选择性装置可如何用于控制深UV激光器(例如产生接近183nm的波长的激光器)的输出带宽的进一步细节可在由邓(Deng)等人于2014年6月9日提出申请的美国专利申请案14/300,227中发现。此专利申请案以引用方式并入本文中。在一个实施例中,183nm激光器组合件100A经配置以在高于1MHz的重复率下操作,此对于高速检验应用是重要的。为实现此高重复率操作,基频激光器102是使用在大于或约50MHz的重复率下操作的模式锁定或准CW基频激光器来实施,此对半导体晶片、光掩模及光罩的高速检验是尤其有利的,这是因为与相同功率的较低重复率激光器相比,使用此类高重复率允许高速图像采集且减小每一脉冲的峰值功率(且因此导致对光学器件及对正受检验的物品的较小损坏)。尽管本文中使用时促进产生处于所要183nm波长的激光器输出光140的各种基频波长描述本发明,但可使用不同基频波长(即,当与适当信号频率混合时)产生183nm的数纳米内的其它波长。除非在所附权利要求书中另有规定,否则利用此类激光器的此类激光器及系统被视为在本发明的范围内。

[0042] 位于图1A中的光束分裂器120下方的OPS 116经配置以接收基频光128的第一部分127并对其进行下变频,使得此下变频产生处于所需经下变频频率 ω_s 的经下变频信号129(即,使得混合经下变频信号129与五次谐波光134产生处于大约183nm的输出激光140)。在替代实施例中,OPS 116包含光学参数振荡器(OPO)、光学参数放大器(OPA),或OPO与OPA两者的组合。

[0043] 根据本发明的一方面,OPS 116还包含波长选择性装置117,例如体积布拉格(Bragg)光栅或窄带稳定种子二极管,其联合OPO或OPA操作以确定经下变频信号129的频率 ω_s 及带宽,其中基于基频光128的频率/波长及激光器输出光140的所要波长而选择用于给定特定实施例中的选择性特定波长。举例来说,当基频激光器102产生处于大约1064nm的波长(例如介于约1064nm与约1065nm之间的波长)的基频光128时,那时波长选择性装置117由特定波长选择性装置实施,所述特定波长选择性装置致使OPS 116产生处于对应于介于约1250nm与约1420nm之间的波长的频率的经下变频信号129,使得当与由五次谐波产生模块103基于1064nm基频频率产生的五次谐波光134混合时,致使激光器组合件100A产生处于介于约182nm与约185nm之间的波长的激光器输出光140。在另一实例中,当基频激光器102产生处于大约1053nm的波长(即,例如介于约1053nm与约1054nm之间的波长)的基频光128时,那时波长选择性装置117是由另一特定波长选择性装置实施,所述另一特定波长选择性装置致使OPS 116产生处于对应于介于约1290nm与约1520nm之间的波长的频率的经下变频信号129,以便产生处于介于约181nm与约185nm之间的波长的激光器输出光140。在又一实例中,当基频激光器102产生处于大约1047nm的波长(即,例如介于约1047nm与约1048nm之间的波长)的基频光128时,那时波长选择性装置117是由又一特定波长选择性装置实施,所述又一特定波长选择性装置致使OPS 116产生处于对应于介于约1290nm与约1580nm之间的波长的频率的经下变频信号129,以便产生处于介于约180nm与约185nm之间的波长的激光器输出光140。在最终实例中,当基频激光器102产生处于大约1030nm的波长(即,例如介于约1029nm与约1031nm之间的波长)的基频光128时,那时波长选择性装置117是由又一特定波长选择性装置实施,所述又一特定波长选择性装置致使OPS 116产生处于对应于介于约

1400nm与约1830nm之间的波长的频率的经下变频信号129,以便产生处于介于约179nm与约185nm之间的波长的激光器输出光140。在给出这些示范性值的情况下,所属领域的技术人员将理解如何针对给定基频频率及激光输出波长选择恰当波长选择性装置。

[0044] 再次参考图1A,将基频光128的第二部分130从光束分裂器120引导朝向五次谐波产生模块103,五次谐波产生模块103经配置且用以借助于转换基频部分130而产生具有是基频频率 ω 的五倍的频率的五次谐波光134。如果第二基频部分130的带宽比基频光128的带宽窄(即,由于光束分裂器120包括波长选择性装置),那么五次谐波光134还将具有比其在不使用波长选择性装置的情况下直接从基频光128产生的情形窄的带宽。

[0045] 图2展示根据目前优选实施例的五次谐波产生器模块103,其包含第一倍频模块(二次谐波产生)202、任选光束分裂器/棱镜212、第二倍频模块(四次谐波产生)203、任选光束分裂器/组合器213、频率加总模块(五次谐波产生)204,以及任选光束分裂器或波长分离器214。一般来说,五次谐波产生器模块103用以借助于以下方式产生五次谐波光134:利用倍频模块202及203来转换处于基频频率 ω 的输入信号的一部分(即,第二基频部分130)以产生处于基频频率的四倍(4ω)的四次谐波激光203A,且接着利用频率加总模块204来混合四次谐波激光203A与输入光的未经消耗部分。根据目前优选实施例,第一倍频模块202、第二倍频模块203及频率加总模块204中的至少一者是使用经退火CLBO晶体,经氘处理CLBO晶体或经氢处理CLBO晶体来实施。

[0046] 五次谐波产生器模块103通过以下方式产生四次谐波激光203A:借助于第一倍频模块202产生二次谐波激光202A,且接着使用第二倍频模块203使二次谐波激光202A加倍。参考图2的左侧,第一倍频模块202接收并转换处于基频频率 ω 的基频部分130以形成处于是基频频率的两倍(2ω)的二次谐波光202A。第二倍频模块203接收并转换二次谐波光202A以形成处于是基频频率的四倍(4ω)的四次谐波光203A。离开第一倍频模块202的基频光130的未经消耗部分202B可通过光束分裂器或棱镜212而从二次谐波光202A分离出去且被引导朝向频率加总模块204。在一个实施例中(未展示),未经消耗基频部分202B不与二次谐波202A分离且与二次谐波光202A共传播穿过第二倍频模块203以与四次谐波203A基本上一致地到达频率加总模块204。分离未经消耗基频部分202B与二次谐波光202A的一个优点在于:可将适当时间延迟应用到未经消耗基频部分202B或四次谐波光203A,使得两个激光脉冲基本上同时到达频率加总模块204。另一优点在于:可在用于适当波长的每一路径中单独地优化用于引导及/或聚焦光的光学元件(例如镜、透镜及棱镜(未展示))。

[0047] 在一个实施例中,未经消耗的二次谐波部分203B(即,二次谐波光的未用于第二倍频模块203内的一部分)通过任选光束分裂器/组合器213而与四次谐波203A分离。光束分裂器/组合器213可包括一或多个光束分裂器及/或一或多个棱镜。光束分裂器/组合器213可(视需要)组合未经消耗基频部分202B与四次谐波203A,使得其一起传播到频率加总模块204。

[0048] 参考图2的右侧,频率加总模块204通过加总四次谐波光203A与未经消耗基频光部分202B而产生五次谐波光134。任选光束分裂器或波长分离器214在一些实施例中用于从五次谐波光134分离出任何未经消耗基频部分及四次谐波204B。光束分裂器214可包括棱镜、偏振光束分裂器,二向色光束分裂器或光学元件的组合。

[0049] 在一个优选实施例中,二次谐波产生模块202包括用于频率转换的三硼酸锂(LBO)

晶体。在其它实施例中，二次谐波产生模块202包括用于频率转换的CLBO、BBO或其它非线性晶体。在五次谐波产生器103的一个优选实施例中，四次谐波产生模块203包括用于频率转换的CLBO晶体。在其它实施例中，四次谐波产生模块203可包括用于频率转换的BBO或其它非线性晶体。在五次谐波产生器103的一个优选实施例中，频率加总模块203包括用于频率加总的CLBO晶体。在其它实施例中，频率加总模块204可包括用于频率加总的BBO或其它非线性晶体。

[0050] 图3展示用于图1中展示的183nm激光器的示范性波长范围(以nm为单位)的表。对于每一基频激光器类型，展示示范性短波长基频部分及示范性长波长基频部分，以及所要输出波长(表中展示的实例中的183nm)所需的对应于谐波及经下变频信号的波长。基频激光器的精确波长取决于许多因素，包含激光介质的精确组合物、激光介质的操作温度及光学腔的设计。使用给定激光介质的相同激光线的两个激光器可以由于前述及其它因素而相差零点几纳米或数纳米的波长操作。适当技术领域中的技术人员将理解如何针对经下变频信号选择适当波长以便从接近于表中所列的那些波长的任何基频波长产生所要输出波长。类似地，如果所要输出波长与183nm相差数纳米，那么所述所要输出波长还可通过对用于经下变频信号的波长的适当调整而实现。

[0051] 图4展示根据优选实施例的供在激光器组合件100A(图1A)中使用的混频模块104。混频模块104包含非线性晶体402，其在优选实施例中包括包含输入表面442及相对输出表面452的经退火(经氘处理或经氢处理)硼酸铯锂(CLBO)晶体。非线性晶体402经定位以在输入表面442处接收五次谐波光134(即，来自五次谐波产生器103)及经下变频信号129(来自OPS产生器116)两者，使得信号129及光134两者大致共线地进入非线性晶体402(例如，在方向410上，由图4中的虚线箭头所指示)，且经聚焦到安置于晶体402内部或接近于晶体402的对应光束腰(未展示光束腰)。对于在处于大约50℃的温度的CLBO中与具有接近1433nm的波长的经下变频信号和具有接近206nm的波长的五次谐波的I型匹配，相位匹配角度是大约74.9°。对于在处于大约50℃的温度的CLBO中与具有接近1274nm的波长的经下变频信号和具有接近213nm的波长的五次谐波的I型匹配，相位匹配角度是大约85.7°。这些实例两者均展示可实现具有高效率及低走离的接近非临界相位匹配以用于产生接近183nm的波长。这些波长组合仅是实例且并不意在限制本发明的范围。适当技术领域中的技术人员理解如何选择波长、温度及角度的不同组合以实现相位匹配。

[0052] 在一些实施例中，晶体402的输入表面442经截切及定位以便大致处于相对于五次谐波光134(即，相对于方向410及五次谐波光134的偏振)的布儒斯特(Brewster)角。此角度最小化五次谐波波长的反射，且因此促进避免在一些实施例中对输入表面442上的抗反射涂层的需要。在其它实施例中，抗反射涂层(未展示)施加到表面442以减少处于五次谐波及/或信号波长的反射光。晶体402的输出表面452可经涂覆或未经涂覆。在一个实施例中，晶体402的输出表面452经截切且维持于相对于激光器输出光140的布儒斯特角下，且不经涂覆。应注意，如果使用I型相位匹配，那么激光器输出光140的偏振优选地垂直于输入波长的(即，五次谐波光134及经下变频信号129的)偏振，且因此布儒斯特角输出表面452必须经适当地截切。不涂覆输出表面452的优点在于涂层可在暴露于密集UV辐射时具有较短使用寿命。

[0053] 再次参考图4，在优选实施例中，混频模块104可使用一或多个光学元件(光学器

件) 405以分离所要输出波长(即,处于大约183nm的激光器输出光140)与其它不期望波长451(例如,五次谐波光134的未经消耗部分及/或经下变频信号129的未经消耗部分)。光学器件405可包含光束分裂器、棱镜、光栅或其它光学元件。在一些实施例中,走离与晶体402的输出表面452的角度的组合可实现激光输出140与其它波长的充分分离使得不需要光学器件405。

[0054] 在183nm激光器的优选实施例中,由于使用高功率经下变频信号129而在晶体402中消耗五次谐波光134的实质部分或几乎所有部分。尽管此可导致从基频光128(图1中)到激光器输出光140的较低总体转换效率,但针对给定输出功率使用处于信号波长的较大功率及处于五次谐波的较小功率的激光器可具有较长寿命且可需要较低频率维护,这是因为深UV光(例如四次及五次谐波)可容易导致对激光器内的光学器件的损坏及光污染。

[0055] 应注意,在所述实施例中的任一者中,镜、棱镜、潜望镜等可视需要用以引导基频波长或其它波长。举例来说,棱镜、光束分裂器、光束组合器及经二向色涂覆镜可视需要用以分离及组合光束。镜与光束分裂器的各种组合可用于以任何适当顺序在不同频率转换级之间分离且路由各种波长。频率转换晶体、棱镜、光束分裂器或透镜的面可以大约等于入射波长的布儒斯特角的角度经截切以便在不使用抗反射涂层的情况下最小化或控制反射。此截切可尤其有利于UV辐射入射于其中的那些表面,这是因为抗反射涂层可在暴露于UV时降级且因此可降级激光器(在用于这些表面上的情况下)的可靠性。波片(包含布儒斯特角波片或延迟器)或其它光学元件可用以视需要旋转波长中的任一者的偏振以使偏振与下一频率转换或混频级的适当晶轴对准。在阿姆斯特朗(Armstrong)的标题为“高损坏阈值频率转换系统(High Damage Threshold Frequency Conversion System)”的美国专利8,711,470中更详细地描述布儒斯特角光学器件在DUV激光器中的使用。此专利以引用方式并入本文中。

[0056] 以上描述及相关联图说明用于产生具有大约183nm的波长的光的各种激光器。描述一些特定波长及波长范围以便说明实施例。类似上文描述的那些实施例的产生比183nm短或长数纳米的不同波长的其它激光器实施例是可能的且在本发明的范围内。

[0057] 上文所描述图并不意在表示组件的实际物理布局。上文所描述图展示过程中所涉及的主要光学模块,但未展示每一光学元件。适当技术领域中的技术人员将理解如何依据上文所描述图及其相关联描述建立183nm激光器。应理解,可视需要使用更多或更少光学组件来引导光。在适当的情况下,可使用透镜及/或曲面镜来将光束腰聚焦到在非线性晶体内部或接近于非线性晶体的基本上圆形或椭圆形横截面的焦点。可在需要时使用棱镜、光束分裂器、光栅或衍射光学元件来在每一频率转换器或混频器模块的输出处导向或分离不同波长。可在适当的情况下使用棱镜、经涂覆镜或其它元件来在通到频率转换器及混频器的输入处组合不同波长。可在适当的情况下使用光束分裂器或经涂覆镜来将一个波长划分成两个光束。可使用滤光器来在任何级的输出处阻挡或分离非所要波长。可视需要使用波板来旋转偏振。可在适当的情况下使用其它光学元件。在一些情形中,允许来自一个频率转换级的未经消耗光传递到下一级(尽管在后续级中并不需要所述光)可为可接受的。如果功率密度足够低而不导致损坏且如果存在对所要频率转换过程的极少干扰(举例来说,由于晶体角处无相位匹配或由于光的偏振),那么上述情形可为可接受的。适当技术领域中的技术人员将理解在183nm激光器的实施方案中可能的各种折衷及替代方案。

[0058] 在优选实施例中,产生二次谐波的第一倍频模块202(图2)可包含三硼酸锂(LBO)晶体,其可在介于室温与约200℃之间的温度下是基本上非临界相位匹配的(针对晶体平面的适当选择)以产生在介于约515nm与约532nm之间的波长范围内的二次谐波。在其它实施例中,第一倍频模块202可包含硼酸铯锂(CLB0)晶体或B硼酸钡(BBO)晶体,其中的任一者可为临界相位匹配的以产生在介于约515nm与约532nm之间的波长范围内的二次谐波。

[0059] 产生四次谐波的第二倍频模块203(图2)及产生五次谐波的频率加总模块204可在CLB0、BBO或其它非线性晶体中使用临界相位匹配。在优选实施例中,倍频模块203及频率加总模块204两者包括CLB0晶体。

[0060] 频率转换级(包含在图1A、2及4中所展示者)中的任一者可有利地使用德宾斯基(Dribinski)等人的标题为“具有高质量、稳定输出光束及长寿命高转换效率非线性晶体的激光器(Laser With High Quality, Stable Output Beam, And Long Life High Conversion Efficiency Non-Linear Crystal)”的第8,873,596号美国专利中揭示的方法及系统中的一些或所有方法及系统。此专利以引用方式并入本文中。

[0061] 频率转换级(包含在图1A、2及4中所展示者)中的任一者可包含一或多个保护性环境,例如在阿姆斯特朗的标题为“用于控制光学晶体的环境的外壳(Enclosure for controlling the environment of optical crystals)”的美国专利8,298,335中所描述者。此专利以引用方式并入本文中。应注意,单个保护性环境可封围多个级或单个级。

[0062] 频率转换级(包含在图1A、2及4中所展示者)中的任一者可并入有:德宾斯基等人的标题为“通过抑制瞬态色彩中心形成及控制声子填充而缓解光学材料中的激光诱发的损坏(Alleviation of laser-induced damage in optical materials by suppression of transient color centers formation and control of phonon population)”的美国专利8,298,335中描述的方法或系统中的任一者;阿姆斯特朗的标题为“测量非线性光学晶体中的晶体位点使用寿命(Measuring crystal site lifetime in a non-linear optical crystal)”的美国专利8,824,514中描述的设备或方法中的任一者;由格尼斯(Genis)的标题为“激光器晶体降级补偿(Laser crystal degradation compensation)”的第8,976,343号美国专利中描述的设备或方法中的任一者;由格尼斯于2013年6月19日提出申请且标题为“延长扫描非线性光学晶体的寿命及最小化其扰动的优先移位方向(Preferential shift direction to prolong the life and minimize perturbations of a scanning nonlinear optical crystal)”的美国临时专利申请案61/837,053中描述的系统及方法中的任一者;以及由阿姆斯特朗等人分别于2012年6月29日及2013年2月7日提出申请的标题均为“对频率转换式激光器中的晶体的连续运动的扫描速率(Scan rate for continuous motion of a crystal in a frequency converted laser)”的美国临时专利申请案61/666,675及61/762,269中描述的系统及方法中的任一者。激光器可进一步并入有阿姆斯特朗的标题为“频率转换式激光器系统的动态波前控制(Dynamic wavefront control of a frequency converted laser system)”的美国专利8,686,331中描述的系统及方法中的任一者。所有这些专利、申请案及临时申请案均以引用方式并入本文中。

[0063] 应进一步注意,频率转换级(包含在图1A、2及4中所展示者)中的任一者可有利地使用经氘、氚及/或氟掺杂或处理的非线性晶体。此类晶体可通过在由德宾斯基等人于2010年9月3日提出申请的第9,023,152号美国专利中描述或在由庄等人于2012年6月1日提出申

请的美国专利申请案13/488,635以及由德宾斯基等人于2014年4月8日提出申请的美国专利申请案14/248,045(此两者同在申请中)中描述的过程或方法中的任一者形成、处置或处理。这些专利及申请案以引用方式并入本文中。所述经掺杂或处理晶体可在涉及深UV波长的那些级(包含倍频模块203、频率加总模块204,以及混频模块104)中尤其有用。

[0064] 在一些实施例中,为产生处于基频波长的充足功率,一或多个放大器可用以增加基频波长的功率。如果使用两个或多于两个放大器,那么应优选地使用一个种子激光器来对所有放大器进行播种,使得所述放大器均输出处于相同波长的同步化激光脉冲。图5说明其中种子激光器503可产生处于所要基频波长(例如,大约1064nm、大约1053nm、大约1047nm或大约1030nm)的稳定化窄带种子激光504的示范性放大器模块500。在一些实施例中,种子激光器503是经Nd掺杂YAG激光器、经Nd掺杂正钷酸钪激光器、经Nd掺杂YLF激光器、光纤激光器或稳定化二极管激光器中的一者。种子光504行进到第一放大器507,第一放大器507将光放大到较高功率级以产生基频光128。在一个实施例中,第一放大器507包括经Nd掺杂YAG或经Nd掺杂正钷酸钪。在一个实施例中,放大器泵505包含可泵激第一放大器507的激光器。在一些实施例中,此泵激可使用以大约808nm波长或以大约888nm波长操作的一或多个二极管激光器进行。在其它实施例中,第一放大器507可包括经Yb掺杂光纤放大器。

[0065] 图5还说明可用于放大器模块500的一些实施例中的示范性额外组件。由于OPA 116、第一倍频模块202及频率加总模块204(图1及2)接收基频激光波长作为输入且取决于需要接近183nm波长的输出功率,因此可需要可以所需带宽、稳定性及光束质量在单个放大器中便利地产生的更多基频激光。实际上,增加光学放大器的功率输出可导致带宽增加、由于热透镜效应或其它效应导致光束质量降级、稳定性减小及/或使用寿命缩短。

[0066] 因此,在放大器模块500的一些实施例中,第一放大器507及额外第二放大器517可用以分别产生两个基频激光输出128及528,其中如上文提及地利用基频光128,且光528可被引导到不同频率转换级(未展示)以代替(举例来说)127(在图1A中)或202B(在图2中)。第二放大器517可与第一放大器507基本上相同。在一个实施例中,放大器泵515包含可泵激第二放大器517的激光器。放大器泵515可与放大器泵505基本上相同。明显地,相同种子激光器503可用以播种两个激光器以便确保输出128及528处于相同波长且是同步的。光束分裂器或棱镜511及镜或棱镜512可划分种子光504且将其一部分引导到第二放大器517。

[0067] 图6A及6B分别展示根据两个替代示范性实施例的OPS 116D及OPS 116E。如上文参考图1A所提及,OPS 116包含产生较低功率经下变频种子信号118的经下变频信号种子产生器(DCSSG)117,接着使用光学参数放大器(OPA)119将较低功率经下变频种子信号118与基频光部分127组合以产生较高功率经下变频信号129,接着将较高功率经下变频信号129发射到混频模块104以与五次谐波光134混合。如在以下示范性实施例中所陈述,OPS 116D及OPS 116E利用类似OPA结构,但利用两个不同DCSSG布置。具体来说,在OPS 116D(图6A)利用种子激光器以直接产生经下变频种子信号的情况下,OPS 116E(图6B)利用光学参数振荡器以通过转换基频激光的一部分而产生经下变频种子信号。在以下描述中陈述这些方法中的每一者的优点。

[0068] 参考图6A,OPS 116D通常包含使用种子激光器603实施的经下变频信号种子产生器(DCSSG)117D及OPA 119D,OPA 119D包含光束组合器611、非线性晶体607及光束分裂器621。种子激光器603经配置以直接产生处于所要经下变频信号频率 ω_s 的经下变频种子光

118D,并将经下变频种子光118D引导到OPA 119D中的光束组合器611上。光束组合器611经配置及经定位以接收处于基频频率 ω 的基频光部分127(输入激光)与经下变频种子光118D两者,并组合(即,沿着共线路径引导)基频光部分127与经下变频种子光118D两者使得其进入非线性晶体607。非线性晶体607经配置以通过对基频光部分127的受激下变频而放大经下变频种子信号118,并朝向光束分裂器(波长分离器)621发射经放大信号。光束分裂器621经配置以分离经下变频信号129与从非线性晶体607接收的经放大信号中存在的其它频率,并将经下变频信号129引导到混频模块(未展示)。在以下段落中以额外细节描述这些组件中的每一者。

[0069] 在优选实施例中,种子激光器603使用二极管激光器或低功率光纤激光器实施,且经配置以产生处于经下变频信号频率 ω_s 的种子激光604,种子激光604接着用以在所述频率下为下变频过程进行播种。种子激光器603仅需具有大约1mW到数百mW的平均功率。在优选实施例中,种子激光器603通过使用(举例来说)光栅并使温度稳定化而经稳定化。种子激光频率及带宽确定经下变频信号129的频率及带宽。使用种子激光器的优点在于与高功率激光器相比,控制较低功率激光器的稳定性及带宽要容易得多。稳定窄带宽种子激光器确定经下变频信号129的带宽及稳定性。在一个实施例中,种子激光器603产生基本上垂直于基频光(即,输入激光127)的偏振而经偏振的偏振光,接着将所述偏振光引入到非线性转换器607中。

[0070] 在一个实施例中,光束组合器611(例如,棱镜)包含二向色涂层,其有效地反射第一波长同时透射第二波长,使得基频光部分127及经透射种子激光118D基本上共线地行进穿过非线性转换器607。举例来说,如在图6A中所指示,光束组合器611反射基频光部分127并透射种子激光118D,使得此两者基本上共线地被发射穿过非线性转换器607,如所展示。在替代实施例(未展示)中,光束组合器经配置且经布置以透射基频光部分并反射种子激光,使得此两者基本上共线地行进穿过非线性转换器。

[0071] 在一个实施例中,非线性晶体607使用针对输入激光频率 ω 及经下变频信号频率 ω_s 可相位匹配或准相位匹配的任何适合非线性光学晶体或周期性极化非线性光学晶体实施。在一个优选实施例中,非线性晶体607包括周期性极化铌酸锂、周期性极化经氧化镁掺杂铌酸锂、周期性极化化学计量比钽酸锂(PPSLT)、周期性极化经氧化镁掺杂化学计量比钽酸锂及周期性极化磷酸钛氧钾(PPKTP)中的一者。

[0072] 在一个实施例中,光束分裂器621(例如,棱镜)使用已知技术而经配置及经定位以分离经下变频信号129与不期望频率623(例如,未经消耗基频频率及闲置频率)。在一个实施例(未展示)中,未经消耗基频频率可以经设定以匹配基频光部分127的下一传入激光脉冲的时间延迟再循环返回到非线性转换器607的输入。

[0073] 图6B说明根据第二示范性实施例的OPS 116E,其借助于转换基频激光的一部分而产生处于所需经下变频信号频率 ω_s 的高功率经下变频信号129(例如大于约3W)。OPS116E通常包含:光束分裂器631,其经配置以将处于基频频率 ω 的基频光部分127分裂成第一子部分127A及第二子部分127B;光学参数振荡器(OPO;即,经下变频种子信号产生器)117E,其经配置以借助于转换基频光子部分127A而产生经下变频种子信号118E;及OPA 119E,其经配置以混合经下变频种子信号118E与(第二)基频光子部分127B。OP0 117E包含第一聚焦镜632、非线性晶体633、第二聚焦镜634、波长选择器637,以及输出耦合器636,其如所展示可

操作地经配置以形成光学腔,在所述光学腔中,借助于聚焦镜632及634以及非线性晶体633而在波长选择器637与输出耦合器636之间反射光。类似于OPS 116D(图6A)的OPA,OPA 119E包含光束组合器640、非线性晶体641及波长分离器642。在以下段落中以额外细节描述这些组件中的每一者。

[0074] 参考图6B的左侧,在一个实施例中,通过光束分裂器631划分处于基频频率 ω 的基频光部分(输入激光)127,使得被引导到OP0 117E的子部分127A包含输入激光127的能量的50%以下,且被引导到OPA 119E的子部分127B包含输入激光127的能量的50%以上。子部分127A借助于穿过聚焦镜632而进入OP0 117E。聚焦或模式匹配光学器件(未展示)可在OP0 117E之前放置于输入激光127的光路径中以在接近非线性晶体633的中心处聚焦子部分127A。

[0075] 非线性晶体633针对相位匹配或准相位匹配经设计以用于从处于频率 ω 的子部分127A产生处于信号频率 ω_s 的光。在一个实施例中,非线性晶体633包括周期性极化材料,例如周期性极化铌酸锂(PPLN)或周期性极化化学计量比钽酸锂(PPSLT)。未通过非线性晶体633转换为信号频率光的任何输入激光穿过聚焦镜634且可被抛弃。聚焦镜634优选地还应透射在非线性晶体633中形成的闲置频率。

[0076] 在一个实施例中,聚焦镜634经配置成对处于信号频率 ω_s 的光具有高反射性,且经布置以将处于在非线性晶体633中形成或穿过非线性晶体633的信号频率的光引导到输出耦合器636。输出耦合器636透射入射于其上的处于信号频率 ω_s 的第一部分的光(例如大约20%的一部分)且反射第二部分的光(例如大约80%)。处于信号频率 ω_s 的第二部分的光被反射回到聚焦镜634,聚焦镜634将光穿过非线性晶体633重新引导到聚焦镜632,聚焦镜632又将光重新引导到波长选择器637。

[0077] 波长选择器637使用已知技术经配置为对于以所要信号频率 ω_s 为中心的窄范围的频率是高反射性的。举例来说,波长选择器637可反射大约0.2nm FWHM的波长范围。波长选择器637对于确定激光输出140(参见(例如)图1a)的波长是重要的,这是因为激光输出140的波长是对应于基频波长的五次谐波与信号频率 ω_s 的和的波长。在一个实施例中,波长选择器637包括体积布拉格光栅。在优选实施例中,波长选择器637保持于恒定温度下以便确保其中心波长保持恒定。在一个实施例中,可通过调整波长选择器637的温度而对激光输出140的波长做出小调整以便改变信号频率 ω_s 。

[0078] 处于信号频率 ω_s 的经下变频光在从波长选择器637反射后返回到聚焦镜632,聚焦镜632将其引导回到非线性晶体633。处于信号频率 ω_s 的光从非线性晶体633到聚焦镜634到输出耦合器636、返回到聚焦镜634穿过非线性晶体633到聚焦镜632、到波长选择器637、返回到聚焦镜632以及返回到非线性晶体633所循的光学路径长度应使得处于信号频率 ω_s 的光的每一脉冲与输入激光127的脉冲基本上同时地回到非线性晶体633。此布置用以确保输入激光127及处于所述信号频率的光的脉冲基本上共传播穿过非线性晶体633以启用输入激光到处于信号频率 ω_s 的光的受激下变频。在优选实施例中,光学路径长度应使得处于信号频率 ω_s 的光的脉冲与输入激光127的脉冲的到达时间的失配小于输入激光127的脉冲的宽度的约10%。

[0079] 在一个实施例中,聚焦镜632及634经配置以包含经设定使得处于所述信号频率的光的脉冲在刚经描述的完整的往返行程之后回到非线性晶体633,在接近非线性晶体的中

心处聚焦且与输入激光127的脉冲基本上在空间上重叠的焦距。在替代实施例中,波长选择器637及/或输出耦合器636可代替聚焦镜632及634或作为聚焦镜632及634的补充而聚焦处于信号频率 ω_s 的光。在另一实施例中,一或多个透镜可用以代替聚焦镜或作为聚焦镜的补充而重新聚焦信号频率。

[0080] 还应注意,可调换输出耦合器636与波长选择器637的相对位置,只要做出适当布局改变以并入有额外镜及/或棱镜以将处于信号频率 ω_s 的光及输入激光的第二部分127B重新引导到光束组合器640即可。图6B中展示的布局打算是说明性的以解释操作的原理。

[0081] 此项技术中已知的其它OP0配置可代替OP0 117E。举例来说,可使用环形腔OP0或蝶形腔OP0。可在不背离本发明的范围的情况下对OP0 117E做出其它修改。举例来说,替代波长选择器637,可使用镜,且透射性波长选择器(未展示)可包含于信号频率 ω_s 的光学路径中。额外平面镜或棱镜可包含于OP0 117E中以(举例来说)在维持紧凑总体大小的同时实现所要光学路径长度。

[0082] 对于高功率激光输出140(例如1W或更大的功率),直接从基频激光而非从基频光的二次谐波产生信号波长 ω_s 是优选的,这是因为浪费较少功率,且因此可针对给定输出功率而使用较低功率基频激光器102(例如,图1A)。一般来说,OP0可能产生信号频率 ω_s 的高平均输出功率(例如数瓦特或更大的功率),如产生约1W或更大的激光输出140所需的高平均输出功率样。本发明针对于从接近 $1\mu\text{m}$ 的基频波长产生具有介于约180nm与185nm之间的波长的激光输出140。此需要对应于介于约 $1.2\mu\text{m}$ 与约 $1.6\mu\text{m}$ 之间的波长的信号频率 ω_s (在图3中展示一些实例性波长组合)。产生相对于基频激光器的波长的此短波长意味与所述信号频率同时形成的闲置频率必须具有长波长,例如长于约 $4\mu\text{m}$ 的波长。适用于从接近 $1\mu\text{m}$ 的波长产生介于约 $1.2\mu\text{m}$ 与约 $1.6\mu\text{m}$ 之间的信号波长的现成可用的高增益高质量非线性晶体(例如PPLN及PPSLT)在长于约 $4\mu\text{m}$ 的波长处是强吸收性的。如果OP0 117E用以产生处于所要范围内的信号频率的高功率,那么闲置频率还将含有显著功率。由于闲置频率被非线性晶体633吸收,因此在闲置功率较高时将在非线性晶体633内形成显著温度梯度。这些温度梯度局部地改变非线性晶体633的光学性质,从而导致产生处于信号频率 ω_s 的光的不规则分布曲线,且很可能导致OP0117E的不稳定操作。

[0083] 在本发明中,通过操作OP0 117E以便产生处于信号频率 ω_s 的相对低输出功率(例如数百mW的平均功率)而克服这些问题。在此输出功率下,非线性晶体633的局部加热是最小的且OP0 117E可以针对经下变频种子信号118E的良好分布曲线而稳定地操作。非线性晶体633可经选择以便(举例来说)通过使用具有高非线性系数的长长度的材料(例如PPLN或PPSLT)而在具有对损坏或热性质较少顾虑的情况下最大化转换效率。

[0084] 在本发明中,由OP0 117E产生的处于信号频率 ω_s 的光118E通过OPA 119E放大到如经下变频信号129的所需功率级。光束组合器640组合输入激光127的第二部分与来自OP0 117E的处于信号频率 ω_s 的光。从光束分裂器631到光束组合器640的光学路径长度应使得输入激光的脉冲与处于信号频率 ω_s 的光的脉冲基本上同时地到达光束组合器640。额外镜、棱镜或其它光学组件可放置于631与640之间的光学路径中及/或636与640之间的光学路径中,以确保脉冲基本上同时地到达640。透镜、曲面镜或其它光学元件(未展示)可根据需要用于任一光路径中以确保输入激光127的第二部分与处于信号频率 ω_s 的光基本上在空间上重叠且两者在接近非线性晶体641的中心处聚焦。

[0085] 光束组合器640将光脉冲引导到非线性晶体641。非线性晶体641通过对第二基频光子部分127B的受激下变频而放大处于信号频率 ω_s 的光。波长分离器642分离经下变频信号129与任何未经消耗输入激光643及任何闲置频率。波长分离器642可包括偏振光束分裂器(在经下变频信号129具有不同于输入激光的偏振的情况下)、二向色镜,佩林-勃洛卡(Pellin-Broca)棱镜或此项技术中已知的任何其它适当波长分离器。非线性晶体641可包括针对输入激光频率 ω 及经下变频信号频率 ω_s 可相位匹配或准相位匹配的任何适合非线性光学晶体或周期性极化非线性光学晶体。在一个优选实施例中,非线性晶体641包括PPSLT或周期性极化经Mg掺杂SLT。这些材料尤其适用于在较高功率级下的操作。

[0086] 由于经下变频信号129仅穿过非线性晶体641一次,因此晶体641中的热梯度导致比将在经配置以产生类似输出功率的OP0中导致的低的光分布曲线降级。即,如果OPA119E被OP0(例如,经配置为例如OP0 117E)替代,那么将需要处于信号频率 ω_s 的光多次穿过其非线性晶体(例如,OP0 117E中的非线性晶体633),从而导致因闲置频率的显著加热。因此,通过利用首先产生较低功率种子信号且接着混合种子信号与基频光的一部分以产生处于所需频率及功率级的经下变频信号129的两步式方法,本发明克服仅使用OP0来产生高功率经下变频信号129的明显限制。

[0087] 参考图1B,如上文所提及,激光器组合件100B与激光器组合件100A(图1A)类似之处在于两个激光器组合件均包含:基频激光器102,其经配置以产生具有基频波长 ω 的基频光128;OPS 116,其经光学耦合以接收基频光128的一部分127且产生经下变频信号129;五次谐波模块157;及混频模块104,其经配置以接收并混合经下变频信号129与来自五次谐波产生器157的五次谐波激光134以便产生激光器输出光140。另外,OPS 116借助于利用DCSSG 117产生处于经下变频波长 ω_s 的较低功率经下变频种子信号118且接着混合经下变频种子信号118与基频光部分127而产生经下变频信号129。

[0088] 激光器组合件100B与激光器组合件100A(图1A)之间的第一差异在于:由基频激光器102产生的全部基频光128被发射到二次谐波产生模块153,且从离开二次谐波产生模块153的未经使用基频光182获得供应到OPS 116及五次谐波模块157的部分127及130。此方法说明对其中基频激光器102输出第二基频光及未经使用基频光的情形(即,其中基频激光器实际上包含二次谐波产生模块153)的有益替代。为促进此替代,第一光束分裂器181用以分离离开二次谐波产生模块102的二次谐波光189与未经使用基频光182,使得二次谐波光189发射到个四次谐波产生模块155,且使得未经使用基频光182发射到第二光束分裂器183,第二光束分裂器183产生分别被引导到OPS 116及五次谐波模块157的部分127及130。

[0089] 除上文提及的差异以外,激光器组合件100B的操作与激光器组合件100A的操作基本上相同。二次谐波产生模块153与第一倍频模块202(图2)基本上类似地起作用且可类似地经配置。四次谐波产生模块155与第二倍频模块203(图2)基本上类似地起作用且可类似地经配置。五次谐波产生模块157与频率加总模块204(图2)基本上类似地起作用且可类似地经配置。换句话说,模块153、155及157执行与五次谐波产生模块103基本上相同的功能,但在各个模块之间具有不同基频路由。

[0090] 图7到12说明可包含上文所描述183nm激光器中的一者的系统。这些系统可用于光掩模、光罩或晶片检验及度量应用中。

[0091] 图7展示使用单个传感器770同时地检测两个图像或信号通道的光罩、光掩模或晶

片检验系统700。照明源(激光器组合件)709经配置以产生具有如本文中所描述在大约180nm到大约185nm的范围内(例如,183nm)的输出波长的激光器输出光710。照明源709可进一步包括脉冲重复率倍增器及/或相干性减少方案。两个图像/信号通道可在受检验物件(其安置于载台730上)是透明(举例来说,光罩或光掩模)时包括经反射及经透射光,或可包括两个不同照明模式,例如入射角、偏振状态、波长范围或其某一组合。

[0092] 如在图7中所展示,检验系统700包含照明中继(第一)光学器件715及720,其是使用已知技术经配置以将照明(激光器输出光)710从源709中继到安置于载台730上的正受检验物件的光学系统。受检验物件可为将受检验的光罩、光掩模、半导体晶片或其它物品。检验系统700还包含图像中继(第二)光学器件740、755及760,其是使用已知技术经配置以将被受检验物件影响(即,反射、散射及/或透射)的照明710的一部分710' 中继到传感器770的光学系统。对应于两个通道的经检测信号或图像的数据经展示为数据780且发射到计算机(未展示)以用于处理。

[0093] 可经配置以测量来自光罩或光掩模的经透射及经反射光的光罩或光掩模检验系统的其它细节描述于埃默里(Emery)等人的美国专利5,563,702、克瓦姆(Kvamme)等人的美国专利7,352,457以及布朗(Brown)等人的美国专利7,528,943中,所述专利以引用方式并入本文中。

[0094] 图8说明包含多个物镜及上文所描述183nm激光器组合件中的一者的示范性检验系统800。在系统800中,来自激光源801的照明发送到照明子系统的多个区段。照明子系统的第一区段包含元件802a到806a。透镜802a聚焦来自激光源801的光。来自透镜802a的光接着从镜803a反射。出于说明的目的将镜803a放置于此位置处,且可将其定位于别处。来自镜803a的光接着由透镜804a收集,此形成照明光瞳平面805a。可取决于检验模式的需要而将用以修改光的光圈、滤光器或其它装置放置于光瞳平面805a中。来自光瞳平面805a的光接着穿过透镜806a且形成照明场平面807。

[0095] 照明子系统的第二区段包含元件802b到806b。透镜802b聚焦来自激光源801的光。来自透镜802b的光接着从镜803b反射。来自镜803b的光接着由透镜804b收集,此形成照明光瞳平面805b。可取决于检验模式的需要而将用以修改光的光圈、滤光器或其它装置放置于光瞳平面805b中。来自光瞳平面805b的光接着穿过透镜806b且形成照明场平面807。来自第二区段的光接着被镜或反射性表面重新引导使得照明场平面807处的照明场光能由经组合的照明区段组成。

[0096] 场平面光接着在反射离开光束分裂器810之前由透镜809收集。透镜806a及809在物镜光瞳平面811处形成第一照明光瞳平面805a的图像。同样地,透镜806b及809在物镜光瞳平面811处形成第二照明光瞳平面805b的图像。物镜812(或替代地813)接着获取光瞳光且在样本814处形成照明场807的图像。物镜812或物镜813可接近于样本814而定位。样本814可在载台(未展示)上移动,所述载台使所述样本定位于所要位置中。从样本814反射及散射的光由高NA折反射物镜812或物镜813收集。在于物镜光瞳平面811处形成经反射光瞳之后,光能在于成像子系统中形成内部场816之前穿过光束分裂器810及透镜815。此内部成像场是样本814及对应地照明场807的图像。此场可在空间上分离成对应于照明场的多个场。这些场中的每一者可支持单独成像模式。举例来说,一个成像模式可为明场成像模式,而另一者可为暗场成像模式。

[0097] 可使用镜817重新引导这些场中的一者。经重新引导的光接着在形成另一成像光瞳819b之前穿过透镜818b。此成像光瞳是光瞳811及对应地照明光瞳805b的图像。可取决于检验模式的需要而将用以修改光的光圈、滤光器或其它装置放置于光瞳平面819b中。来自光瞳平面819b的光接着穿过透镜820b且在传感器821b上形成图像。以类似方式,经过镜或反射表面817的光由透镜818a收集且形成成像光瞳819a。来自成像光瞳819a的光接着在于检测器821a上形成图像之前由透镜820a收集。成像于检测器821a上的光可用于不同于成像于传感器821b上的光的成像模式。

[0098] 系统800中所采用的照明子系统是由激光源801、集光光学器件802到804、接近于光瞳平面805而放置的光束塑形组件及中继光学器件806及809组成。内部场平面807位于透镜806与809之间。在一个优选配置中,激光源801可包含上文所描述的183nm激光器中的一者。

[0099] 关于激光源801,虽然说明为具有两个透射点或透射角度的单个均匀块,但实际上此表示能够提供两个照明通道的激光源,举例来说,所述两个照明通道是例如穿过元件802a到806a的处于第一频率(例如,接近183nm的深UV波长)的激光能的光能的第一通道,以及例如穿过元件802b到806b的处于第二频率(例如,来自相同激光器的不同谐波,例如4次或5次谐波,或来自不同激光器的光)的激光能的光能的第二通道。

[0100] 虽然来自激光源801的光能经展示为90度间隔发出,且元件802a到806a及802b到806b以90度角定向,但实际上光可以各种定向发出,未必呈二维,且组件可以不同于如所展示的方式定向。图8因此简单地是所采用组件的表示且所展示的角度或距离既非按比例也非设计所具体需要。

[0101] 可在使用光圈塑形概念的当前系统中采用接近于光瞳平面805a/805b而放置的元件。使用此设计,可实现均匀照明或接近均匀照明以及个别点照明、环形照明、四极照明或其它所要图案。

[0102] 可在一般成像子系统中采用针对所述物镜的各种实施方案。可使用单个固定物镜。所述单个物镜可支持所有所要的成像及检验模式。如果成像系统支持相对大的场大小及相对高的数值孔径,那么可实现此设计。可通过使用放置于光瞳平面805a、805b、819a及819b处的内部光圈而将数值孔径减小到所要值。

[0103] 还可如图8中所展示地使用多个物镜。举例来说,尽管展示两个物镜812及813,但任何数目是可能的。可针对激光源801所产生的每一波长来优化此设计中的每一物镜。这些物镜812及813可具有固定位置或移动到接近于样本814的位置中。为将多个物镜移动以接近于所述样本,可如标准显微镜上常见地使用旋转的转台。用于将物镜移动得接近于样本的其它设计是可用的,包含但不限于在载台上横向平移所述物镜及使用测角器沿弧平移所述物镜。另外,可根据本发明系统实现固定物镜与转台上的多个物镜的任一组合。

[0104] 此配置的最大数值孔径可接近或超过0.97,但可在某些实例中更小。在此高NA折反射成像系统的情况下可能的宽范围的照明及集光角度连同其大的场大小一起允许所述系统同时支持多个检验模式。如可从先前段落了解到,可结合照明装置使用单个光学系统或机器来实施多个成像模式。针对照明及集光所揭示的高NA准许使用相同光学系统实施成像模式,借此允许针对不同类型的缺陷或样本的成像优化。

[0105] 所述成像子系统还包含中间图像形成光学器件815。图像形成光学器件815的目的

是形成样本814的内部图像816。在此内部图像816处,可放置镜817以对应于检验模式中的一者来重新引导光。在此位置重新引导光是可能的,这是因为用于成像模式的光是空间分离的。可以数个不同形式来实施图像形成光学器件818 (818a及818b) 以及820 (820a及820b), 包含变焦距缩放器件、具有聚焦光学器件的多个远焦镜筒透镜或多个图像形成变倍镜筒。2011年6月7日颁布且以引用方式并入本文中的第7,957,066号美国专利描述关于系统800的额外细节。

[0106] 图9说明经配置为具有明场及暗场检验模式的检验系统的示范性折反射成像系统900。系统900可并入有两个照明源:激光器901,以及宽带光照明模块920。在一个实施例中,激光器901可包含如本文中所描述的183nm激光器。

[0107] 在暗场模式中,将来自激光器901的光引导到调适光学器件902,调适光学器件902控制正受检验的表面上的激光照明光束大小及轮廓。机械壳体904包含孔隙及窗口903以及棱镜905以沿着光学轴以法向于样本908的表面的入射重新引导激光。棱镜905还引导来自样本908的表面特征的镜面反射离开物镜906。物镜906收集由样本908散射的光且将其聚焦于传感器909上。用于物镜906的透镜可以折反射物镜912、聚焦透镜群组913及镜筒透镜区段914的一般形式提供,所述透镜可任选地包含缩放能力。

[0108] 在明场模式中,宽带照明模块920将宽带光引导到光束分裂器910,光束分裂器910将所述光朝向聚焦透镜群组913及折反射物镜912反射。折反射物镜912用宽带光照明样本908。从样本908反射或散射的光由物镜906收集并聚焦于传感器909上。宽带照明模块920包括(举例来说)激光泵激的等离子体光源或弧光灯。宽带照明模块920还可包含自动聚焦系统以提供信号以控制样本908相对于折反射物镜912的高度。

[0109] 庄等人的标题为“折反射光学系统中用于激光暗场照明的光束递送系统 (Beam delivery system for laser dark-field illumination in a catadioptric optical system)”的美国专利7,345,825、阿姆斯特朗的标题为“折反射光学系统中用于激光暗场照明的外部光束递送系统 (External beam delivery system for laser dark-field illumination in a catadioptric optical system)”的美国专利8,665,536以及阿姆斯特朗的标题为“使用具有球面表面的折反射物镜的外部光束递送系统 (External beam delivery system using catadioptric objective with aspheric surfaces)”的美国专利8,896,917进一步详细描述系统900,所述美国专利全部以引用方式并入本文中。

[0110] 图10A说明用于检验表面1011的区域的包含照明系统1001及集光系统1010的表面检验设备1000。如图10A中所展示,激光器系统1020引导光束1002穿过透镜1003。在优选实施例中,激光器系统1020包含上文所描述的183nm激光器中的一者、经退火晶体及用以在标准操作期间通过保护晶体免受水分或其它环境污染来维持所述晶体的经退火状况的壳体。第一光束塑形光学器件可经配置以从所述激光器接收光束且将所述光束聚焦到在所述晶体中或接近所述晶体的光束腰处的椭圆横截面。

[0111] 透镜1003经定向使得其主平面基本上平行于样本表面1011且因此照明线1005形成于透镜1003的聚焦平面中的表面1011上。另外,光束1002及经聚焦光束1004以非正交入射角引导到表面1011。特定来说,光束1002及经聚焦光束1004可以与法向方向呈介于约1度与约85度之间的角度引导到表面1011。以此方式,照明线1005基本上在经聚焦光束1004的入射平面中。

[0112] 集光系统1010包含用于收集从照明线1005散射的光的透镜1012,以及用于将从透镜1012传出的光聚焦到包括光敏检测器阵列的装置(例如电荷耦合装置(CCD)1014)上的透镜1013。在一个实施例中,CCD 1014可包含线性检测器阵列。在此类情形中,CCD1014内的线性检测器阵列可经定向成平行于照明线1015。在一个实施例中,CCD 1014可为电子轰击CCD或突崩光检测器的线性阵列。在一个实施例中,可包含多个集光系统,其中所述集光系统中的每一者包含类似但在定向上不同的组件。

[0113] 举例来说,图10B说明用于表面检验设备的示范性集光系统1031、1032及1033阵列(其中为简洁起见未展示其照明系统,例如类似于照明系统1001的照明系统)。集光系统1031中的第一光学器件收集从样本1011的表面沿第一方向散射的光。集光系统1032中的第二光学器件收集从样本1011的表面沿第二方向散射的光。集光系统1033中的第三光学器件收集从样本1011的表面沿第三方向散射的光。应注意,第一、第二及第三路径是与样本1011的所述表面成不同入射角。支撑样本1011的平台1035可用以致使光学器件与样本1011之间的相对运动使得可扫描样本1011的整个表面。于2009年4月28日颁予梁(Leong)等人且以引用方式并入本文中的美国专利7,525,649进一步详细描述表面检验设备1000及其它多个集光系统。

[0114] 图11说明可用于检验表面1101上的异常的表面检验系统1100。在此实施例中,表面1101可由包括上文所描述的183nm激光器中的一者的激光器系统1130的基本上静止照明装置部分照明。激光器系统1130的输出可连续穿过偏振光学器件1121、光束扩展器与光圈1122以及光束成形光学器件1123以扩展并聚焦所述光束。

[0115] 经聚焦激光束1102接着被光束折叠组件1103及光束偏转器1104反射以引导光束1105朝向表面1101以照明所述表面。在优选实施例中,光束1105基本上法向或垂直于表面1101,但在其它实施例中光束1105可与表面1101成倾斜角度。

[0116] 在一个实施例中,光束1105基本上垂直或法向于表面1101且光束偏转器1104朝向光束转弯组件1103反射来自表面1101的光束的镜面反射,借此用作屏蔽件以防止所述镜面反射到达检测器。镜面反射的方向是沿着线SR,所述线法向于样本的表面1101。在其中光束1105法向于表面1101的一个实施例中,此线SR与照明光束1105的方向一致,其中此共同参考线或方向在本文中称作检验系统1100的轴线。在光束1105与表面1101成倾斜角度的情形下,镜面反射的方向SR将与光束1105的传入方向不一致;在此实例中,指示所述表面的方向是法向的线SR称作检验系统1100的集光部分的主轴线。

[0117] 由小颗粒散射的光由镜1106收集且被引导朝向光圈1107及检测器1108。由大颗粒散射的光由透镜1109收集且被引导朝向光圈1110及检测器1111。应注意,一些大颗粒将散射还被收集且引导到检测器1108的光,且类似地,一些小颗粒将散射还被收集且引导到检测器1111的光,但此光相比于相应检测器经设计以检测的经散射光的强度具有相对低强度。在一个实施例中,检测器1111可包含光敏元件阵列,其中所述光敏元件阵列中的每一光敏元件经配置以检测所述照明线的经放大图像的对应部分。在一个实施例中,检验系统可经配置以用于检测未经图案化晶片上的缺陷。于2001年8月7日颁予马克斯(Marx)等人且以引用方式并入本文中的美国专利6,271,916进一步详细描述检验系统1100。

[0118] 图12说明经配置以使用法向及倾斜照明光束两者来实施异常检测的检验系统1200。在此配置中,包含上文所描述的183nm激光器中的一者的激光器系统1230可提供激光

束1201。透镜1202通过空间滤光器1203聚焦光束1201且透镜1204准直所述光束并将其传送到偏振光束分裂器1205。光束分裂器1205将第一偏振分量传递到法向照明通道且将第二偏振分量传递到倾斜照明通道,其中第一分量与第二分量正交。在法向照明通道1206中,第一偏振分量是由光学器件1207聚焦且被镜1208朝向样本1209的表面反射。由样本1209散射的辐射由抛物面镜1210收集且聚焦到检测器或光电倍增管1211。

[0119] 在倾斜照明通道1212中,第二偏振分量被光束分裂器1205反射到镜1213,镜1213将此光束反射穿过半波板1214且由光学器件1215聚焦到样本1209。源自倾斜通道1212中的倾斜照明光束且被样本1209散射的辐射由抛物面镜1210收集且聚焦到检测器或光电倍增管1211。检测器或光电倍增管1211具有针孔或狭缝入口。所述针孔或狭缝及经照明光点(来自表面1209上的法向及倾斜照明通道)优选地在抛物面镜1210的焦点处。

[0120] 抛物面镜1210将来自样本1209的散射辐射准直成经准直光束1216。经准直光束1216接着由物镜1217聚焦且穿过分析器1218到光电倍增管1211。应注意,还可使用具有除抛物面形状外的形状的曲面镜表面。仪器1220可提供所述光束与样本1209之间的相对运动使得光点跨越样本1209的表面被扫描。于2001年3月13日颁予瓦兹-伊拉瓦尼(Vaez-Iravani)等人且以引用方式并入本文中的美国专利6,201,601进一步详细描述检验系统1200。

[0121] 图13说明与检验或度量系统(例如上文所描述的检验系统中的一者)中的上文所描述的183nm激光器一起使用的示范性脉冲倍增器1300。脉冲倍增器1300经配置以从来自183nm激光器(未展示)的每一输入脉冲1301产生脉冲链。输入脉冲1301照射于光束分裂器1307上。每一脉冲的部分由光束分裂器1307沿输出方向1302发射且部分进入环形腔。如在由庄等人于2012年12月11日提出申请且以引用方式并入本文中的标题为“使用激光脉冲倍增器的半导体检验及度量系统(Semiconductor inspection and metrology system using laser pulse multiplier)”的美国专利申请案13/711,593(在本文中为‘593申请案)所解释,当用作脉冲率加倍器时,如果环形腔及光束分裂器1307是无损的,那么光束分裂器1307应优选地透射每一激光脉冲的能量的约三分之一且将约三分之二反射到环形腔中。如在‘593申请案中所解释,这些透射及反射值可经修改以考虑光束分裂器及腔损失以便维持脉冲率加倍器中的基本上相等能量输出脉冲。

[0122] 在激光脉冲进入环形腔之后,其从曲面镜1305反射且被引导朝向曲面镜1306。镜1306将光重新引导往回朝向镜1305。在从所述两个镜的多次反射(图13中展示的实例中,从每一镜的两次反射)之后,脉冲穿过补偿器板1308且返回到达光束分裂器1307。补偿器板1308打算补偿激光脉冲在其发射穿过环形腔内部的光束分裂器1307时的位移。优选地,补偿器板1308具有与光束分裂器1307基本上相同的厚度及折射率。如果补偿器板1308与光束分裂器1307放置于环形腔光路径的相同部分中(如所展示),那么补偿器板1308优选地应与光束分裂器1307以相对于光路径的相等的角度但相反方向定向。替代地,补偿器板1308可以适当定向放置于环形腔的另一部分中。

[0123] 如在‘593申请案中所解释,无光束分裂器1307及补偿器板1308的环形腔类似于在赫里奥特(Herriott)等人的“离轴球面镜干涉仪(Off-axis Spherical Mirror Interferometers)”(应用光学(Applied Optics)3,#4,第523到526页(1964))以及在赫里奥特等人的“折叠光学延迟线(Folded Optical Delay Lines)”(应用光学4,#8,第883到

889页(1965))中描述的环形腔。如在这些参考中所描述,从每一镜的反射的次数仅取决于两个镜相对于所述镜的离隙的曲率半径 d ,且不取决于光进入环形腔的精确角度。举例来说,如果两个镜的曲率半径是 d (即,每一镜的焦距是 $d/2$),那么在从每一镜的两次反射之后,每一脉冲将经重新聚焦且将返回到达其起始点(图13中的光束分裂器1307)。赫里奥特等人(1964)给出镜的焦距(且因此曲率半径)的值针对离开每一镜的2、3、4、6、12及24次反射而为 d 的倍数。如由赫里奥特等人(1964)所解释,其它反射次数是可能的。如由赫里奥特等人(1964)所描述,反射不必位于一个平面中,其取决于反射次数及光从光束分裂器1307入射于镜1305上的角度。与使用从每一镜的两次反射的腔相比,从每一镜的多于两次反射使腔更加紧凑。然而,由于在每一次镜反射中丢失某些光,因此在镜反射损失并非如此小(如在(举例来说)深UV波长下)时,每镜两次反射将是优选的,但在每反射的损失是小的(举例来说,在红外、可见或接近UV波长下)时,每镜多于两次反射可为可用的。应注意,环形腔的长度且因此环形腔的聚焦可通过调整距离 d 而被调整。

[0124] 当激光脉冲在横越腔之后往回到达光束分裂器1307时,脉冲的一部分将沿方向1302被反射出环形腔且部分将往回发射到环形腔中。脉冲倍增器1300将重新聚焦激光脉冲(而不管输入激光脉冲的光束腰的位置如何),使得在方向1302上离开的输出脉冲将呈现为具有与输入脉冲大致或基本上类似的发散及光束腰位置。在脉冲倍增器1300的一些优选实施例中,来自方向1301的输入激光脉冲将基本上经准直以便最小化入射于光束分裂器1307上的功率密度。接着输出激光脉冲也将基本上被准直。

[0125] 周期性地,新输入脉冲1301由激光器提供到脉冲倍增器1300。在一个实施例中,激光器可以大约80MHz的重复率产生大约0.015纳秒(ns)激光脉冲,且腔可使所述重复率加倍。应注意,可通过针对镜1305与1306的距离 d 及曲率半径的选择而控制环形腔的光学路径长度且因此环形腔的延迟,其在确保激光脉冲的重新聚焦的同时控制反射次数。

[0126] 所述环形腔光学路径长度可稍微大于或稍微小于从脉冲间隔除以倍增因数直接计算出的标称长度。此导致并非全部脉冲恰好同时到达偏振光束分裂器且因此稍微加宽输出脉冲。举例来说,当输入脉冲重复率是80MHz时,所述腔延迟针对 $\times 2$ 的频率倍增将在标称上是6.25ns。在一个实施例中,可使用对应于6.27ns的延迟的腔长度使得经多重反射的脉冲不与传入脉冲恰好同时到达。此外,针对80MHz输入脉冲重复率的6.27ns腔长度还可有利地加宽脉冲且减小脉冲高度。具有不同输入脉冲率或不同倍增因数的其它脉冲倍增器可具有不同腔延迟。

[0127] 适于与检验及度量系统中的183nm激光器一起使用的脉冲倍增及替代脉冲倍增器的更多细节可发现于上文所述的‘593申请案中,由庄等人于2012年6月1日提出申请且标题为“使用激光脉冲倍增器的半导体检验及度量系统(Semiconductor Inspection And Metrology System Using Laser Pulse Multiplier)”的美国专利申请案13/487,075中,以及由庄等人于2015年1月14日提出申请且标题为“使用棱镜的激光脉冲倍增(Laser Pulse Multiplication Using Prisms)”的序列号为14/596,738的美国专利申请案中。所有这些申请案均以引用方式并入本文中。

[0128] 除上文陈述的借助于使用基频光产生经下变频信号而产生183nm激光器输出光的解决方案外,借助于对二次谐波光进行下变频而产生适合的经下变频信号也是可能的。举例来说,图14展示包含图1A及1B的实施例中利用的相同组件中的数者(且因此使用相同参

考编号对所述组件加以识别)的激光器组合件1400。具体来说,激光器组合件1400包含经配置以产生具有基频波长 ω 的基频光128的基频激光器102,且利用光束分裂器120将基频光128划分成部分127及130,其中将部分130引导到五次谐波产生器103C。应注意,替代地,可以类似于图1B中描绘的方式从来自二次谐波产生模块153的输出的未经消耗基频光取得经引导到五次谐波产生器的基频光的部分130。另外,类似于图1B中展示的方法,激光器组合件1400包含产生发射到五次谐波产生模块103C的二次谐波光175及四次谐波光162的二次谐波产生模块153及四次谐波产生模块155。最后,激光器组合件1400包含OPS 116C,其用以产生处于经下变频频率 ω_s 的经下变频信号129,使得在经下变频信号129随后于混频模块104中与五次谐波光134混合时,产生在大约180nm与大约185nm的范围内的激光器输出光140。

[0129] 根据本发明的实施例,激光器组合件1400不同于图1A及1B的实施例之处在于OPS116C包含接收二次谐波光部分177(其借助于光束分裂器174从二次谐波产生模块153的输出被划分)并对其进行下变频的“绿色泵激式”光学参数振荡器(OPO)117C。在上文提及的共同基频激光器的各个频率(即,具有介于从1030nm到1064nm的范围内的对应波长)下,二次谐波光部分177的二次谐波频率 2ω 具有在515nm到532nm的范围内的对应波长,其通常在与可见绿色光相关联的范围内(即,495nm到570nm)。如此,OP0 117C在其输入是在可见绿色光谱中的光的意义上来说是“绿色泵激式”。如在图14的左下部分中的虚线框中所指示,OP0 117C在其它方面以类似于OP0 117E(上文所论述)的方式经构造及配置以将二次谐波光部分177下变频为适合经下变频信号频率(例如,532nm到大约1.3 μm)。即,除了非线性晶体633C(下文论述)外,形成由OP0 117C利用的连续波单谐振OP0布置的光学组件与上文参考OP0 117E描述的那些组件基本上相同,且如此为了简便起见此处不重复对其的描述。此方法的优点在于其避免对低功率种子信号的需要(即,这是因为532nm光的下变频不产生由大多数非线性晶体吸收的频率),因此简化OPS 116C,这是因为仅使用OP0及任选光束分裂器642C(其可用以从经下变频信号129移除不期望频率(如在图14中所展示))便实现经下变频信号129的产生。

[0130] 尽管激光器组合件1400中利用的绿色泵激式OP0方法已经用以使用绿色泵激式OP0 117C成功地产生处于经下变频频率 ω_s (例如,1.3 μm)的经下变频信号129(其是产生183nm输出激光所需的),但使用二次谐波(绿色)光产生经下变频信号129限制可用于OP0 117C中的非线性晶体的类型,且绿色光的转换比较低基频频率的转换效率低。即,在高功率级下,与较高频率(例如,OP0 117E;参见图6B)一起利用的优选非线性晶体(例如,PPSLT)中的许多者受可见绿色光谱(例如,532nm)中的光的双光子吸收损坏。为解决此问题,绿色泵激式OP0 117C优选地使用三硼酸锂(LBO)晶体实施非线性晶体633C,这是因为LBO晶体具有比铌酸锂或SLT大的带隙,且因此不经受由处于绿色光频率的高功率引起的损坏。然而,甚至在LBO晶体(或另一绿色光容忍晶体)用于OP0117C中时,绿色光的下变频对于每个1.3 μm 光子产生非所要大约900nm光子,因此进行到OP0 117C中的功率的一半以上被损失,从而使激光器组合件1400比激光器组合件100A及100B(上文所描述)效率低。

[0131] 根据又一可能实施例,可产生类似于图1A中所展示的激光器组合件,其中OPS 116被替换为利用硒化锂铟(LISE)晶体的常规OP0。发明者相信此方法应起作用,这是因为LISE晶体被认为不强吸收约6 μm 的频率,且因此应不会由于加热而显著地变形或经历损坏。然

而,LISE晶体是新的,且充分高质量LISE晶体的可用性在目前是不可测定的。

[0132] 本文中所描述的183nm激光器可在检验或度量系统中联合光学器件用以塑形脉冲,减小相干性或减少斑纹。脉冲塑形、相干性及斑纹减少设备及方法的进一步细节揭示于2015年7月14日颁布的第9,080,990号美国专利以及也在2015年7月14日颁布的第9,080,991号美国专利中。这些专利两者均以引用方式并入本文中。

[0133] 本文中所描述的结构及方法的各种实施例仅说明本发明的原理且并非打算将本发明的范围限制于所描述的特定实施例。举例来说,可将除了CLB0、LB0或BB0或者周期性极化材料外的非线性晶体用于频率转换、谐波产生及混频级中的一些级。

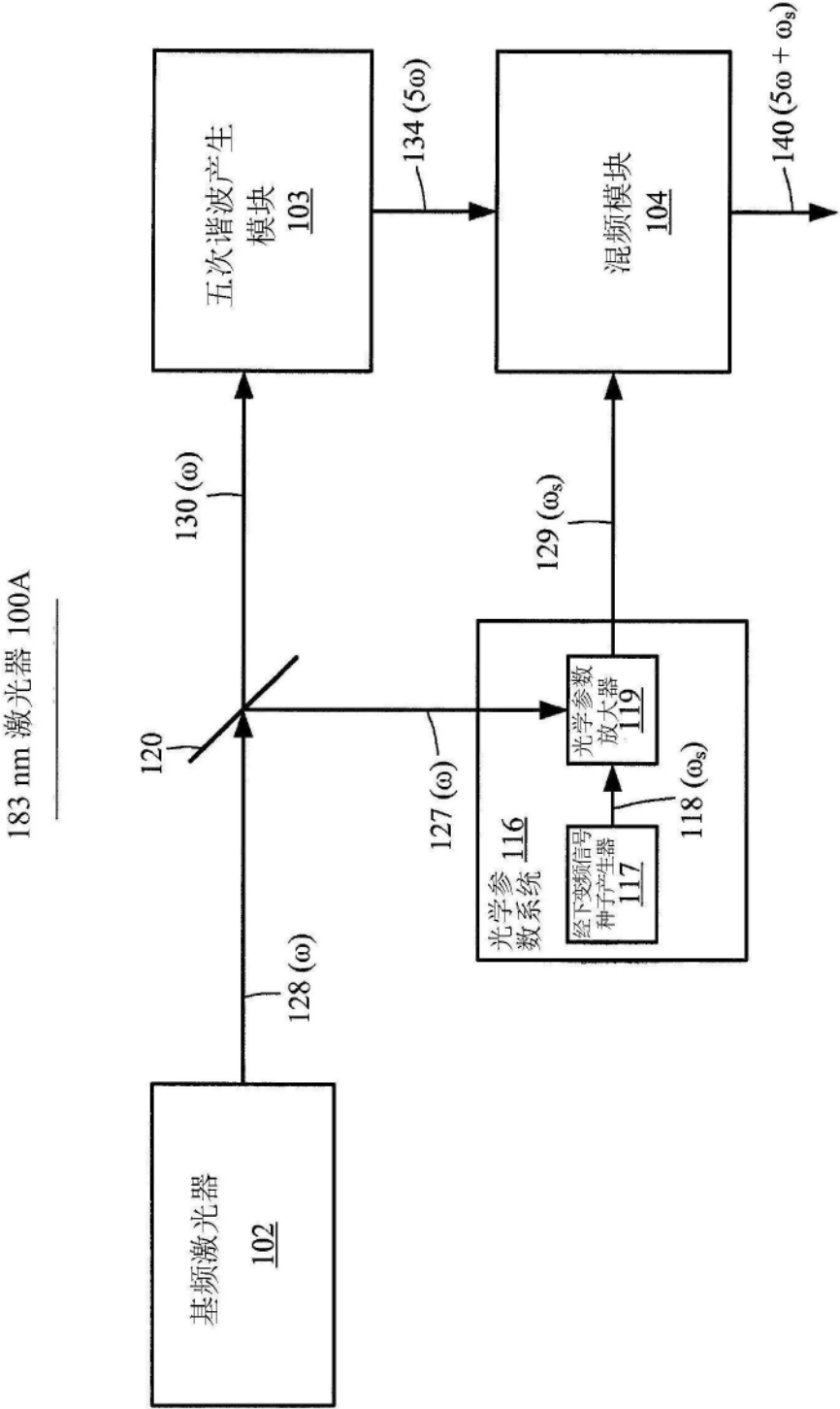


图1A

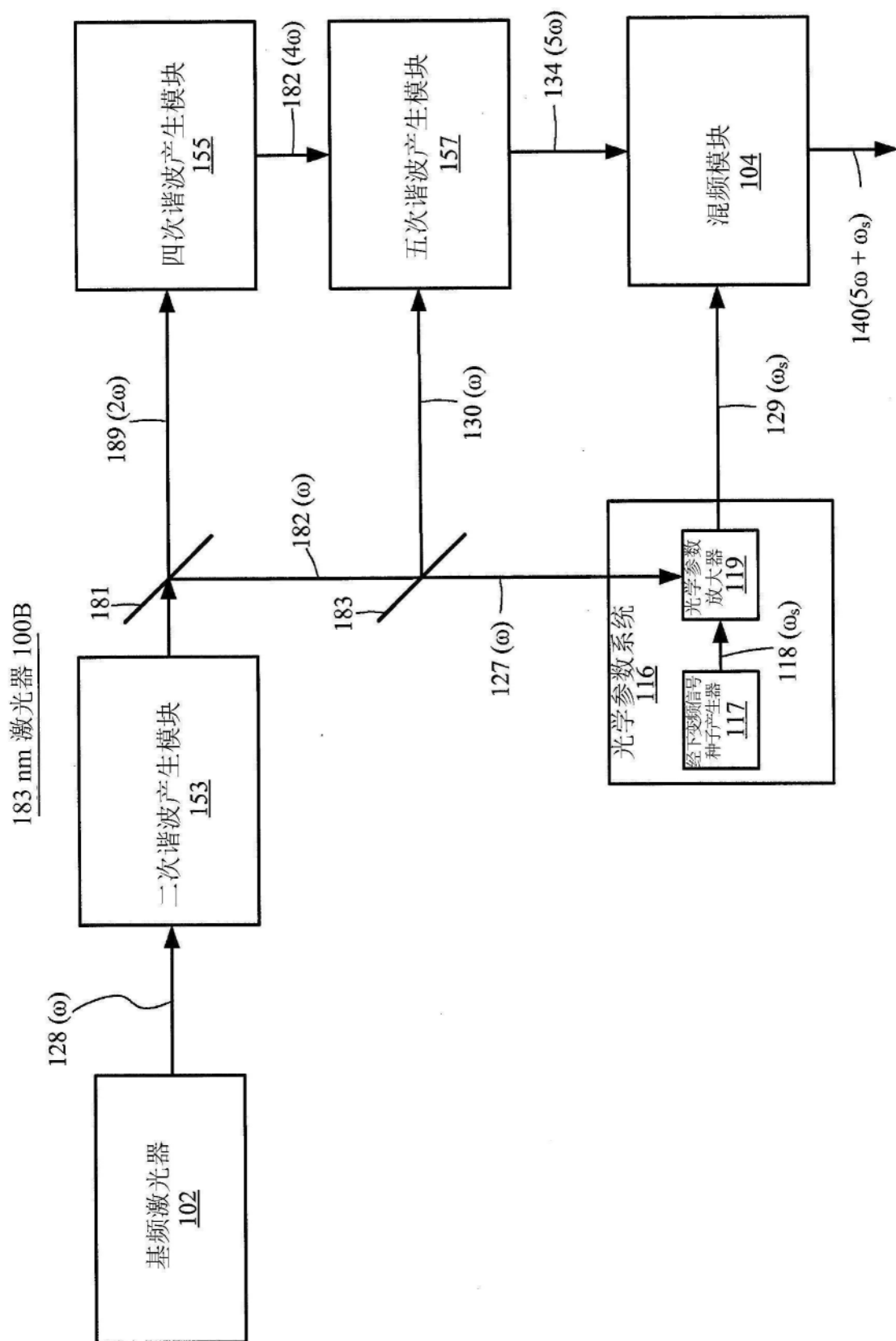


图1B

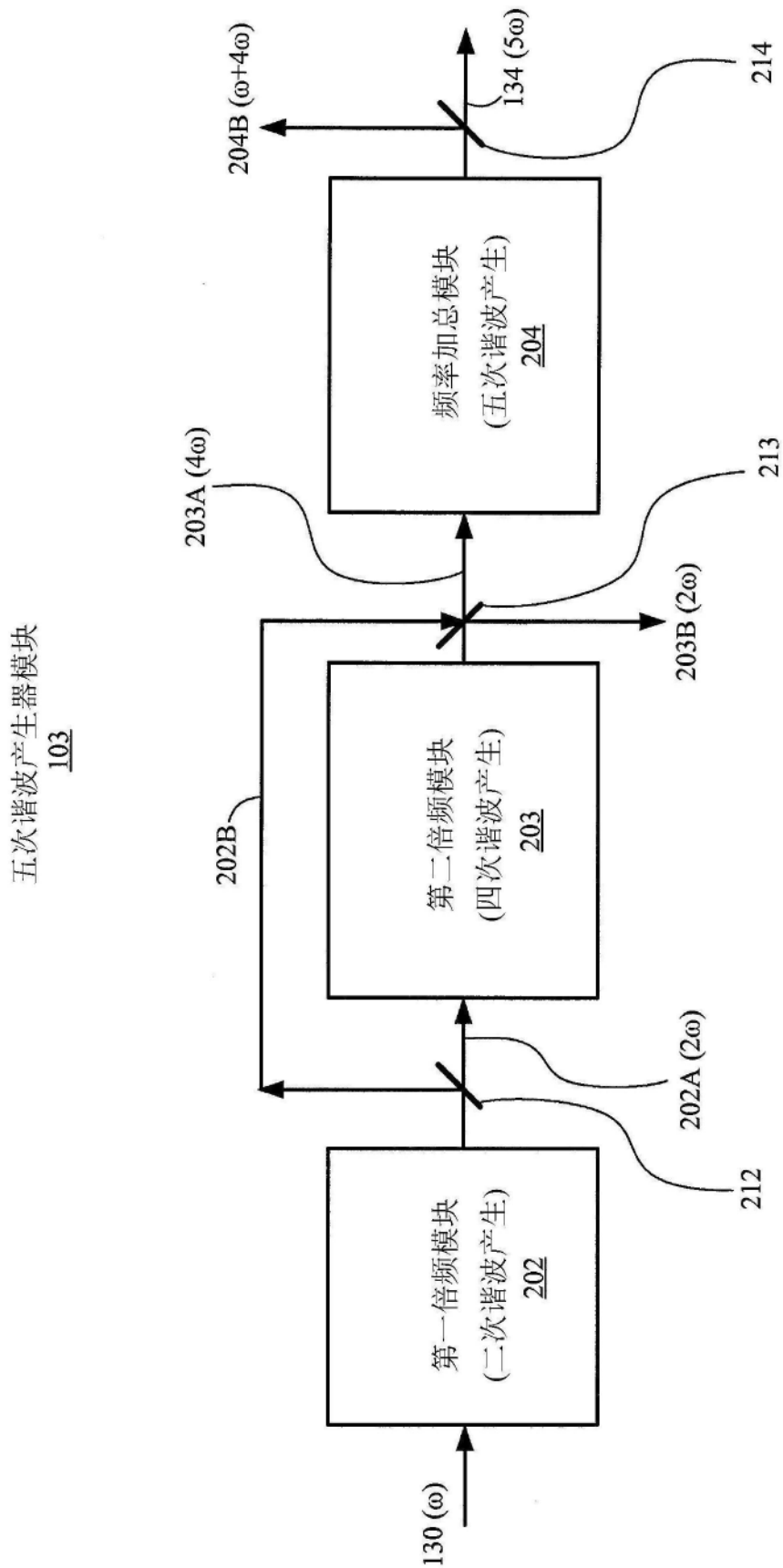


图2

基频激光器类型	经钕掺杂钒酸盐、经钕掺杂钕铝石榴石、经 Yb 掺杂光纤		经 Yb 掺杂光纤		
	基频波长(短)	基频波长(长)	基频波长(短)	基频波长(长)	基频波长(长)
谐波					
ω	1064.0	1065.0	1029.0	1031.0	
ω_s	1307	1299	1652	1626	
2ω	532.0	532.5	514.5	515.5	
4ω	266.0	226.3	257.3	257.8	
5ω	212.8	213	205.8	206.2	
$5\omega + \omega_s$	183	183	183	183	

图3

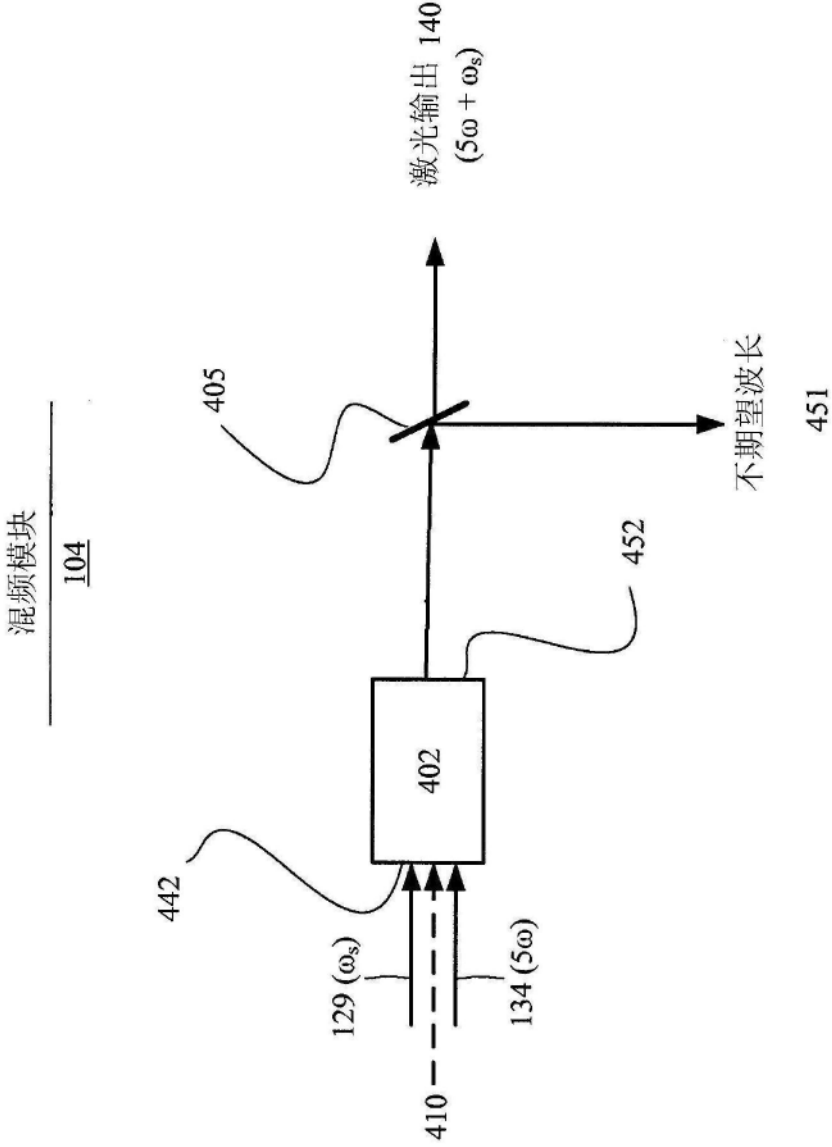


图4

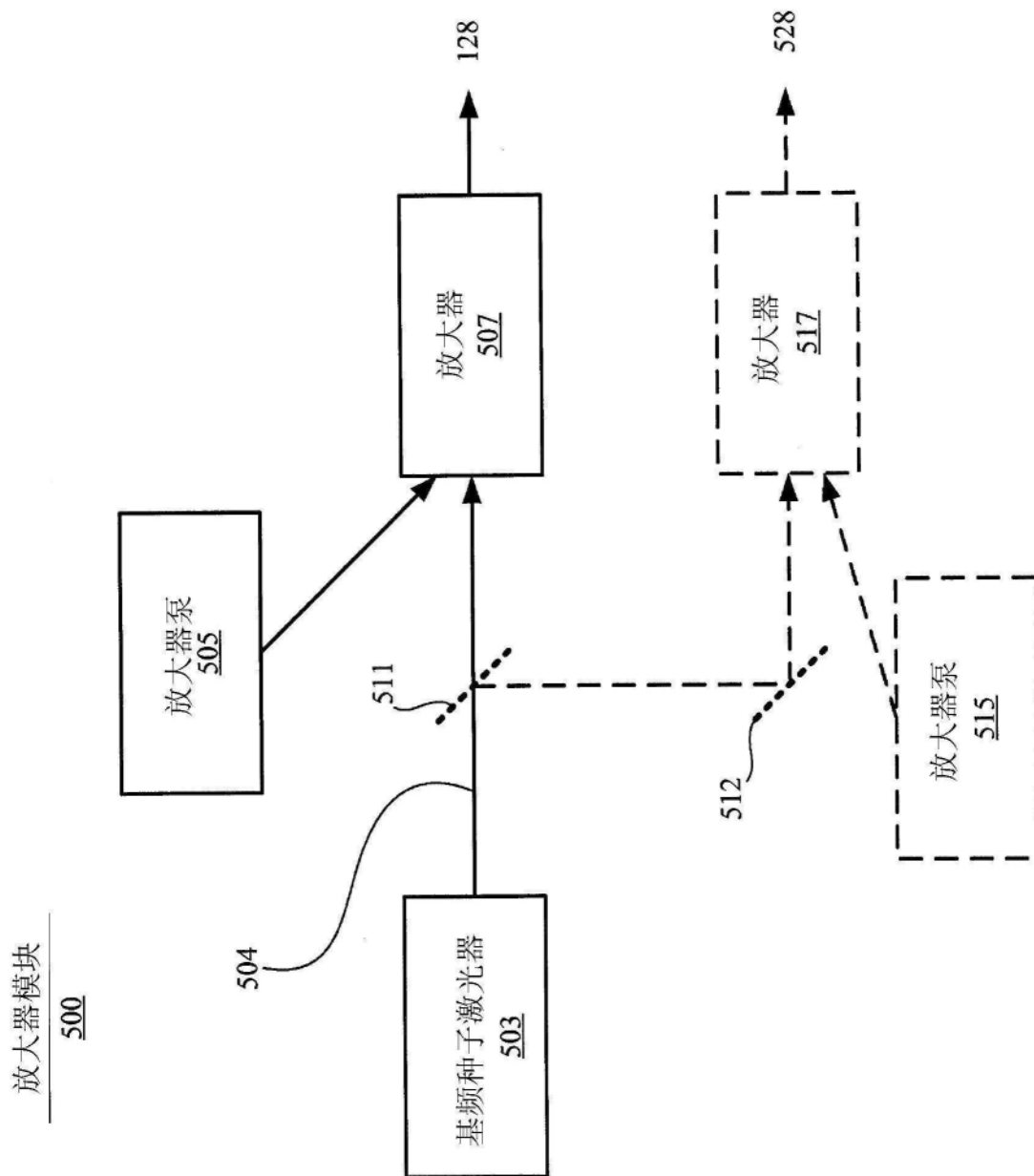


图5

光学参数系统 116D

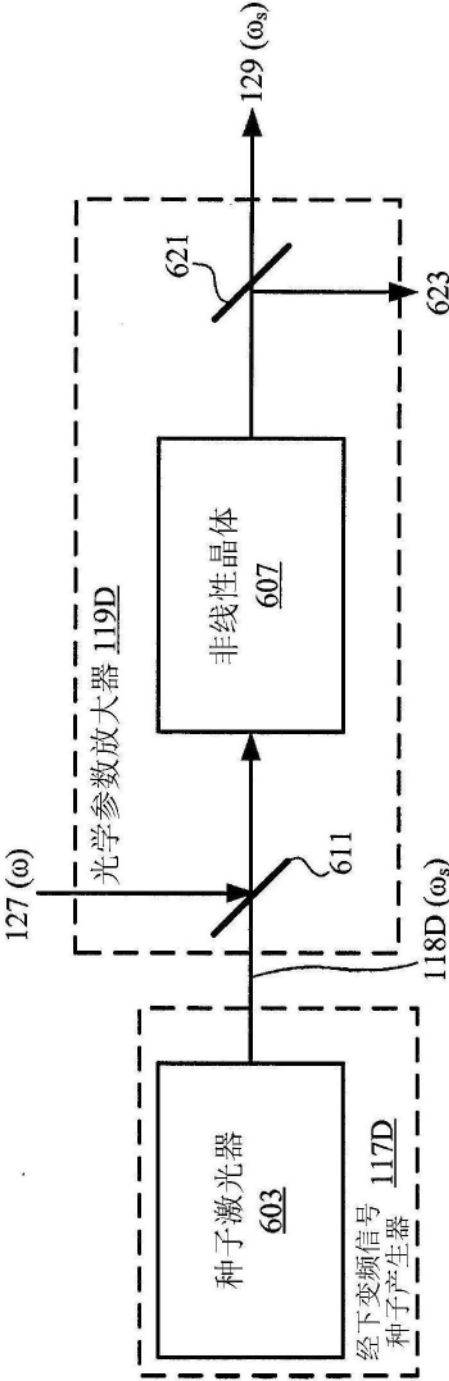


图6A

光学参数系统 116E

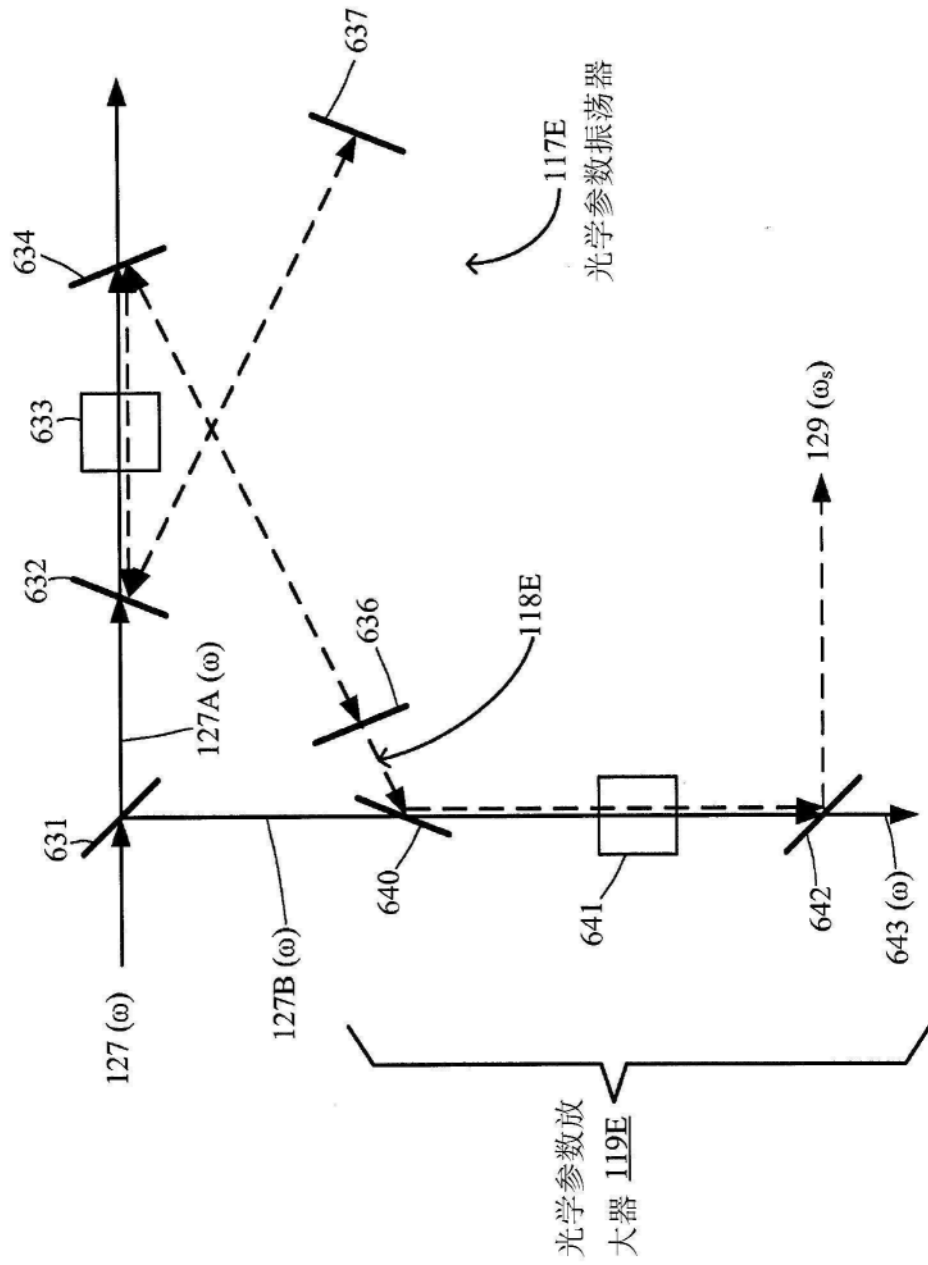


图6B

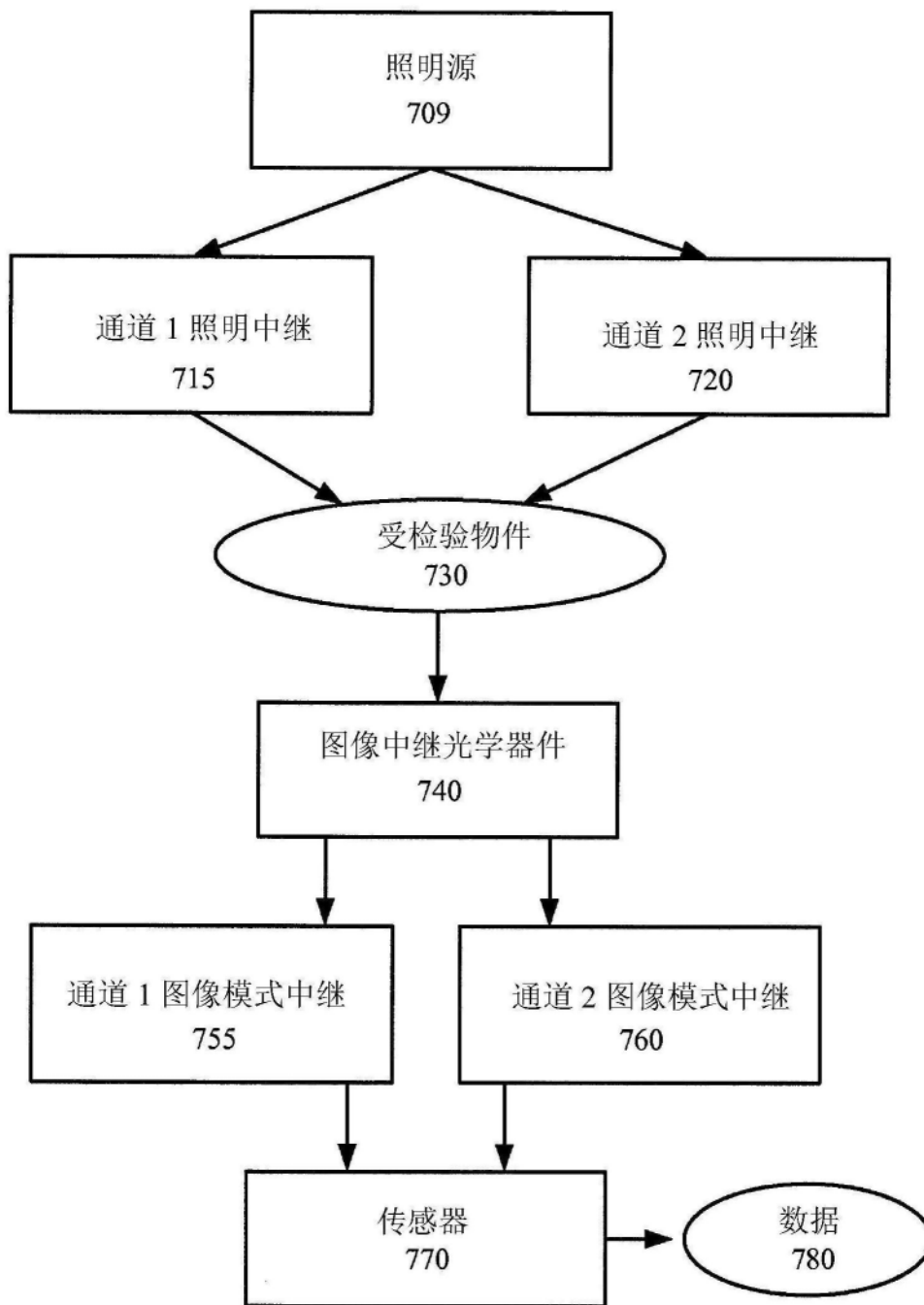


图7

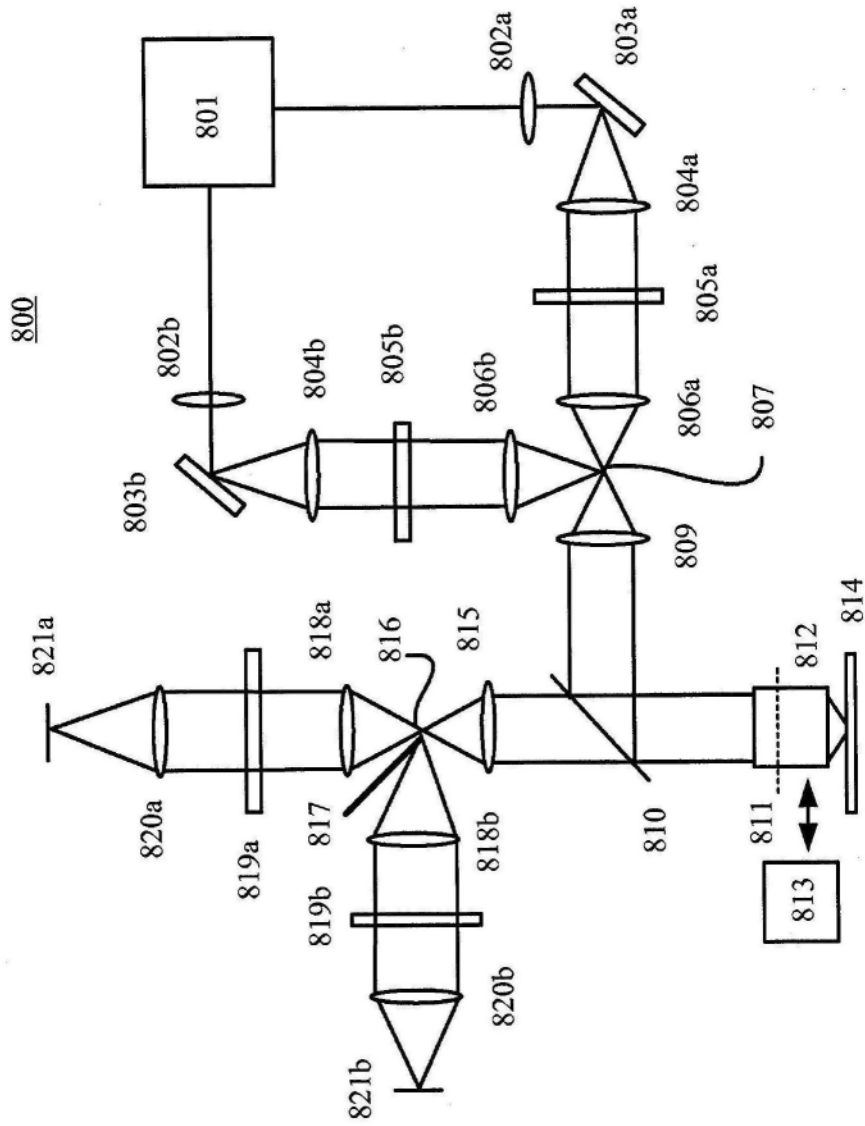


图8

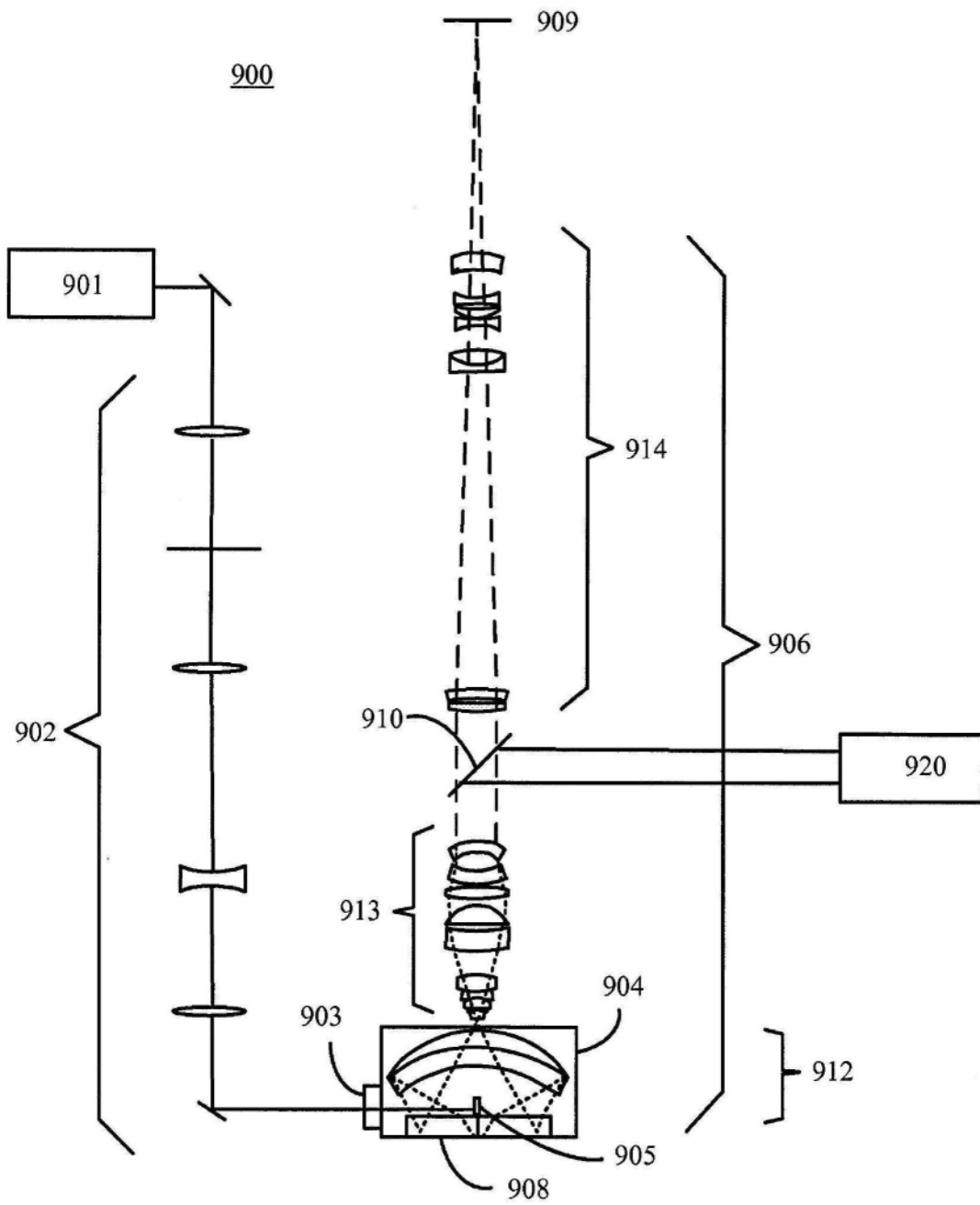


图9

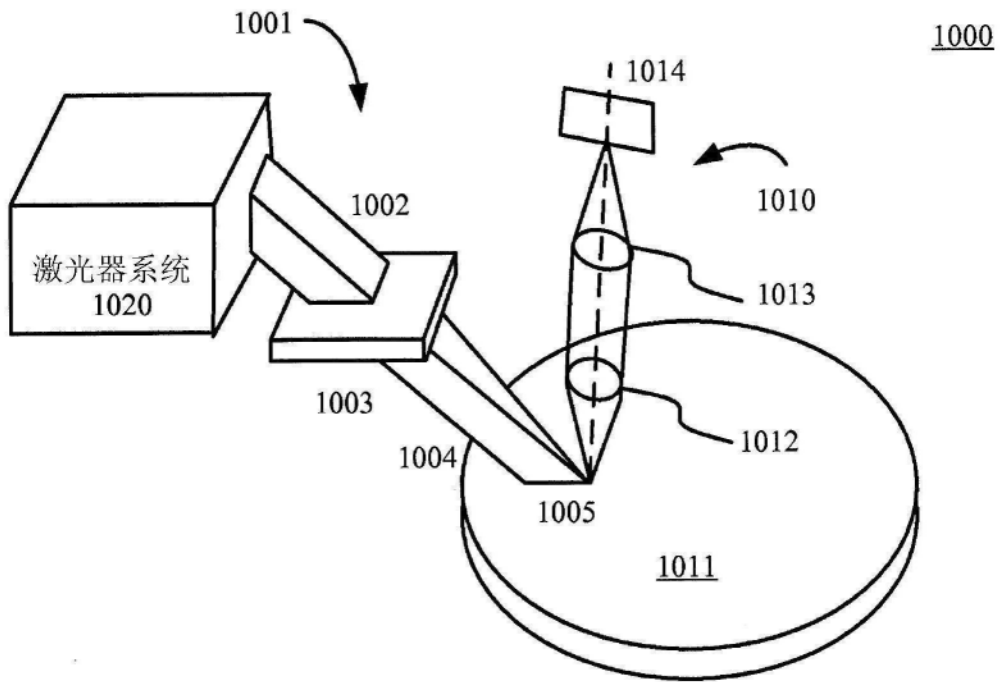


图10A

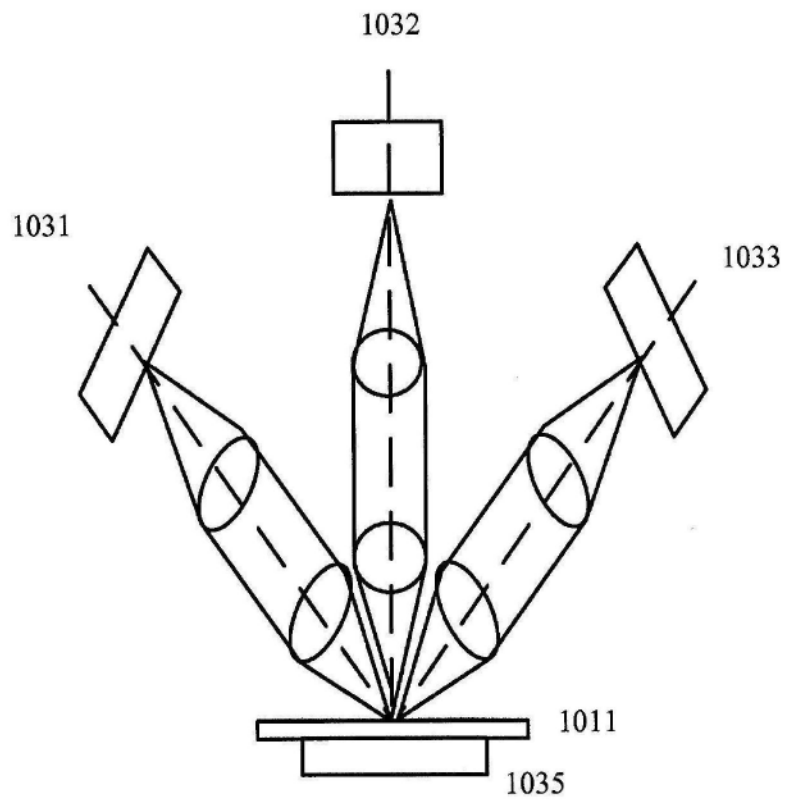


图10B

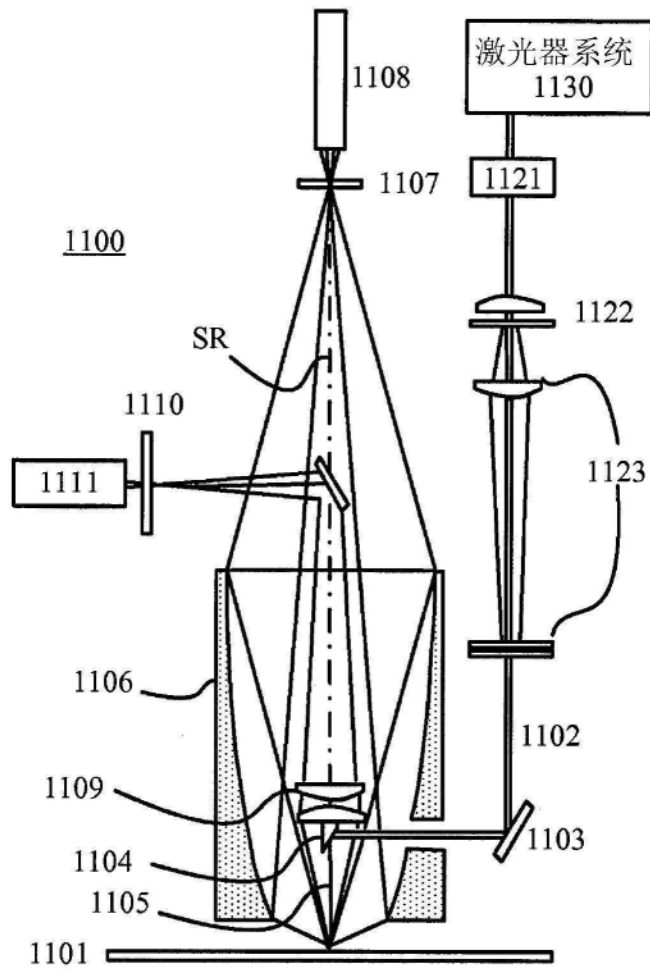


图11

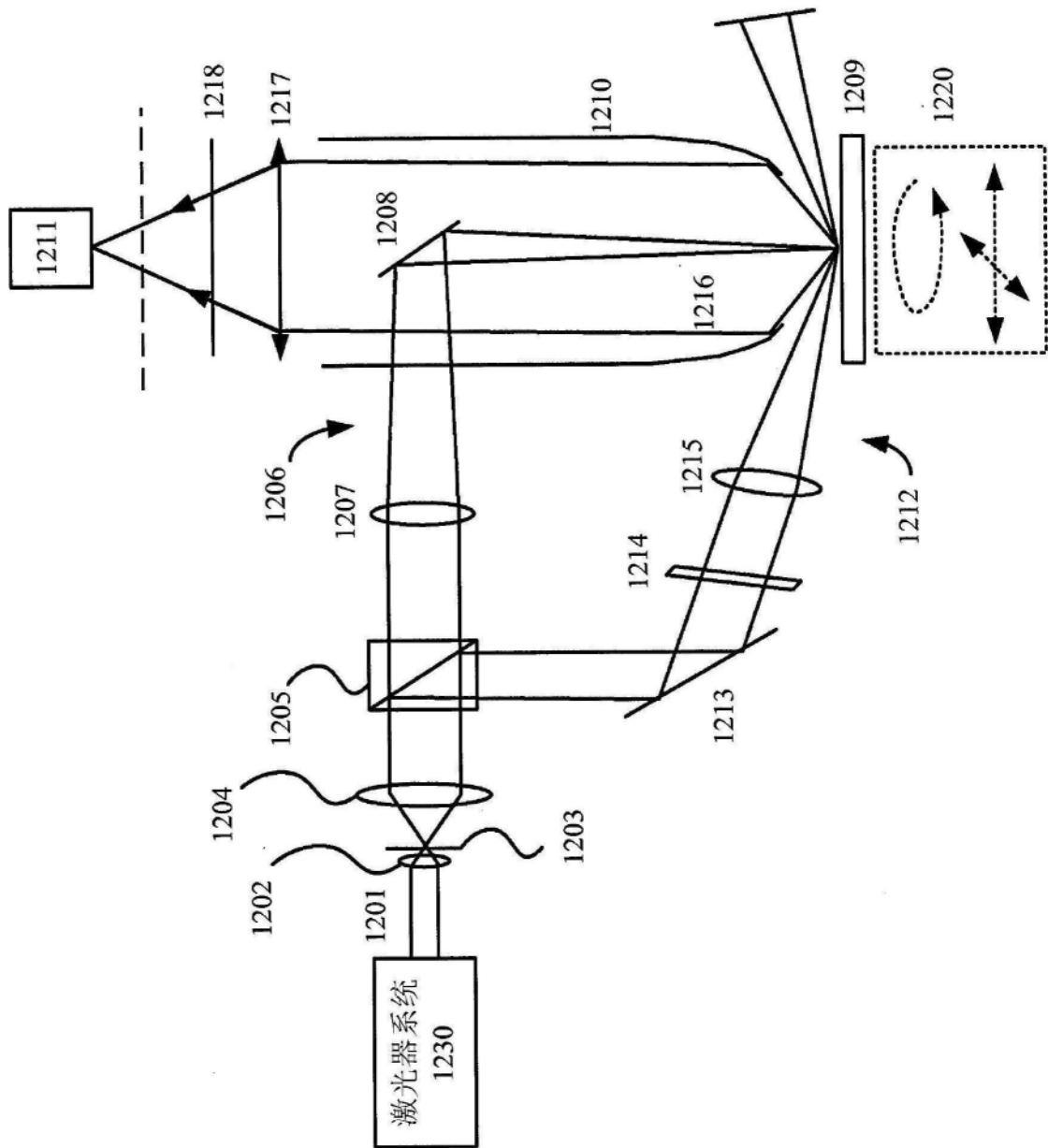
1200

图12

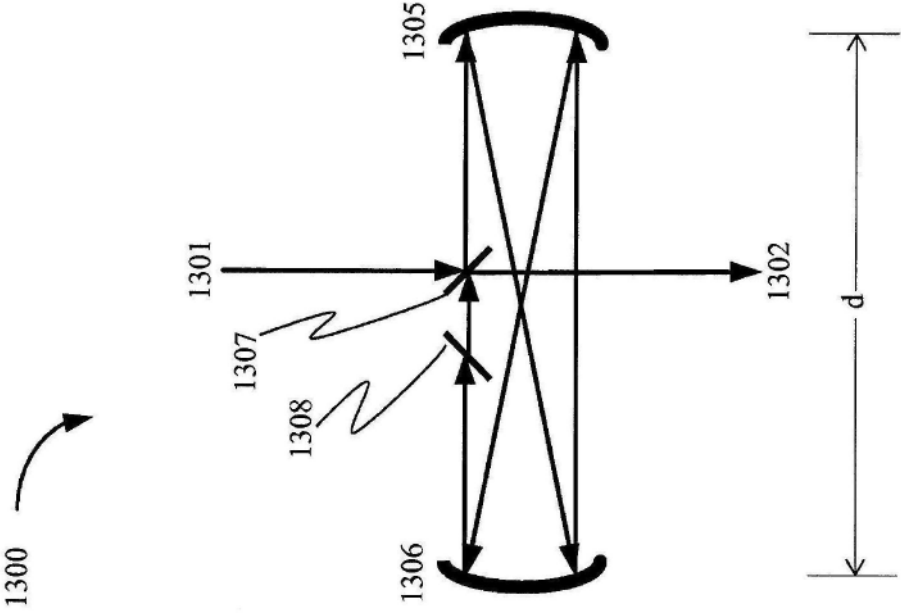


图13

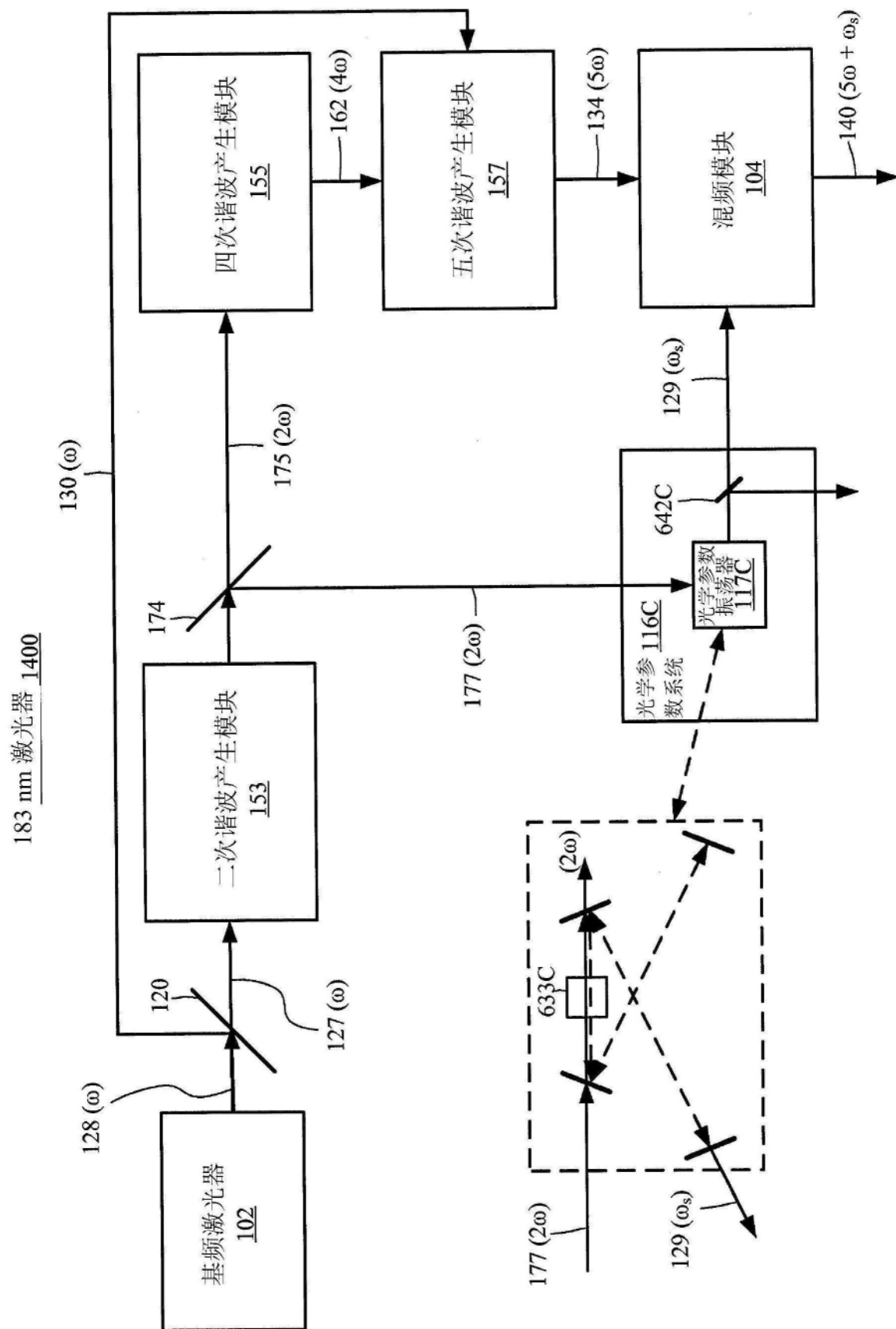


图14