



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 102791331 B

(45) 授权公告日 2016. 02. 17

(21) 申请号 201180013023. 0

G01J 3/10(2006. 01)

(22) 申请日 2011. 03. 01

(56) 对比文件

(30) 优先权数据

12/721, 317 2010. 03. 10 US

US 2009/0014668 A1, 2009. 01. 15,

US 2009/0127479 A1, 2009. 05. 21,

US 2008/0179548 A1, 2008. 07. 31,

(85) PCT国际申请进入国家阶段日

2012. 09. 07

审查员 张菁

(86) PCT国际申请的申请数据

PCT/US2011/000374 2011. 03. 01

(87) PCT国际申请的公布数据

W02011/112235 EN 2011. 09. 15

(73) 专利权人 ASML 荷兰有限公司

地址 荷兰维德霍温

(72) 发明人 G·O·瓦斯恩冠 A·I·叶尔绍夫

R·L·桑德斯特伦

(74) 专利代理机构 北京市金杜律师事务所

11256

代理人 王茂华 郑振

(51) Int. Cl.

G02F 1/01(2006. 01)

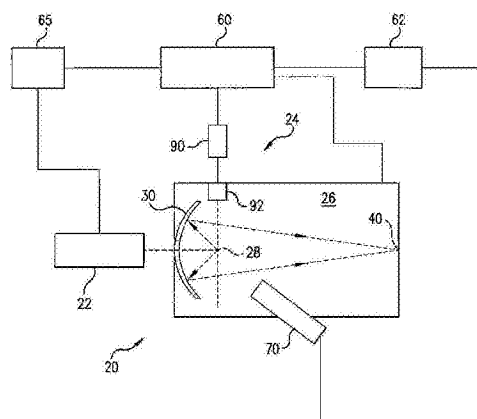
权利要求书1页 说明书13页 附图9页

(54) 发明名称

激光产生的等离子体 EUV 光源

(57) 摘要

在此公开一种可以包括等离子体产生系统的设备,该等离子体产生系统包括靶材料液滴源和产生在辐射区域辐射液滴的光束的激光器,等离子体产生 EUV 辐射,其中,液滴源包括离开小孔的流体以及在流体中产生扰动的子系统,该子系统产生具有不同初始速率的液滴,当液滴行进到辐射区域时引起在至少一些相邻液滴之间的间距减少。



1. 一种用于产生等离子体的设备,包括:等离子体产生系统,所述等离子体产生系统包括靶材料液滴源和产生在辐射区域辐射所述液滴以形成等离子体的光束的激光器,所述等离子体产生 EUV 辐射,其中,所述液滴源包括离开小孔的流体和在所述流体中产生扰动的子系统,所述子系统产生具有不同的初始速率的液滴,当所述液滴行进到所述辐射区域时引起在至少一些邻近液滴之间的间距减少,

其中,所述子系统产生液滴模式,其中,液滴双联体到达所述辐射位置,且辐射所述液滴双联体中的每一液滴以产生等离子体。

2. 如权利要求 1 所述的设备,其特征在于,所述子系统产生一系列脉冲化扰动,且每一脉冲化扰动具有充分短的上升时间和充分短的下降时间中的至少之一,以产生基频和所述基频的至少一个谐波。

3. 如权利要求 1 或权利要求 2 所述的设备,其特征在于,至少一些邻近液滴在到达所述辐射区域之前凝聚。

4. 如权利要求 1 或权利要求 2 所述的设备,其特征在于,所述扰动包括调频扰动波形。

5. 如权利要求 1 或权利要求 2 所述的设备,其特征在于,所述扰动包括调幅扰动波形。

6. 如权利要求 1 或权利要求 2 所述的设备,其特征在于,所述子系统包括在所述流体中产生扰动的电执行元件,所述电执行元件由选自由方波、矩形波和尖顶非正弦波组成的一组波形的波形驱动。

7. 如权利要求 6 所述的设备,其特征在于,尖顶非正弦波选自由快速脉冲波形、快速斜坡波形和正弦函数波形组成的一组波形。

8. 如权利要求 2 所述的设备,其特征在于,所述子系统包括在所述流体中产生扰动的电执行元件,所述电执行元件由选自由方波、矩形波和尖顶非正弦波组成的一组波形的波形驱动,且其中,所述至少一个谐波是所述基频的奇次谐波。

9. 如权利要求 2 所述的设备,其特征在于,所述子系统包括在所述流体中产生扰动的电执行元件,所述电执行元件由选自由方波、矩形波和尖顶非正弦波组成的一组波形的波形驱动,且其中,所述至少一个谐波包括所述基频的至少一个偶次谐波和所述基频的至少一个奇次谐波。

激光产生的等离子体 EUV 光源

[0001] 本申请要求于 2010 年 3 月 10 日提交的、标题为“LASER PRODUCED PLASMA EUV LIGHT SOURCE (激光产生的等离子体 EUV 光源)”、律师代理申请案第 2008-0055-01 号的美国专利申请第 12/721,317 号的优先权,该专利申请是共同待审的、于 2007 年 7 月 13 日提交的、标题为“LASER PRODUCED PLASMA EUV LIGHT SOURCE HAVING A DROPLET STREAM PRODUCED USING A MODULATED DISTURBANCE WAVE (具有使用经调制的扰动波产生的液滴流的激光产生的等离子体 EUV 光源)”、律师代理申请案第 2007-0030-01 号的美国专利申请第 11/827,803 号的部分继续申请案;该专利申请的全部内容通过引用据此合并于此。

[0002] 本申请涉及:共同待审的、于 2006 年 2 月 21 日提交的、标题为“LASER PRODUCED PLASMA EUV LIGHT SOURCE WITH PRE-PULSE (具有预脉冲的激光产生的等离子体 EUV 光源)”、律师代理申请案第 2005-0085-01 号的美国专利申请第 11/358,988 号;共同待审的、于 2005 年 2 月 25 日提交的、标题为“METHOD AND APPARATUS FOR EUV PLASMA SOURCE TARGET DELIVERY (用于 EUV 等离子体源靶输送的方法和装置)”、律师代理申请案第 2004-0008-01 号的美国专利申请第 11/067,124 号;共同待审的、于 2005 年 6 月 29 日提交的、标题为“LPP EUV PLASMA SOURCE MATERIAL TARGET DELIVERY SYSTEM (LPP EUV 等离子体源材料靶输送系统)”、律师代理申请案第 2005-0003-01 号的美国专利申请第 11/174,443 号;共同待审的、律师代理申请案第 2005-0102-01 号的美国专利申请“SOURCE MATERIAL DISPENSER FOR EUV LIGHT SOURCE (用于 EUV 光源的源材料分配器)”、共同待审的、于 2006 年 2 月 21 日提交的、标题为“LASER PRODUCED PLASMA EUV LIGHT SOURCE (激光产生的等离子体 EUV 光源)”、律师代理申请案第 2005-0081-01 号的美国专利申请第 11/358,992 号;共同待审的、于 2005 年 6 月 29 日提交的、且标题为“LPP EUV LIGHT SOURCE DRIVE LASER SYSTEM (LPP EUV 光源驱动激光器系统)”、律师代理申请案第 2005-0044-01 号的美国专利申请第 11/174,299 号;共同待审的、于 2006 年 4 月 17 日提交的、标题为“ALTERNATIVE FUELS FOR EUV LIGHT SOURCE (用于 EUV 光源的替代燃料)”、律师代理申请案第 2006-0003-01 号的美国专利申请第 11/406,216 号;共同待审的、于 2006 年 10 月 13 日提交的、标题为“DRIVE LASER DELIVERY SYSTEMS FOR EUV LIGHT SOURCE (用于 EUV 光源的驱动激光输送系统)”、律师代理申请案第 2006-0025-01 号的美国专利申请第 11/580,414 号;以及共同待审的、于 2006 年 12 月 22 日提交的、标题为“LASER PRODUCED PLASMA EUV LIGHT SOURCE (激光产生的等离子体 EUV 光源)”、律师代理申请案第 2006-006-01 号的美国专利申请第 11/644,153 号;共同待审的、于 2006 年 8 月 16 日提交的、标题为“EUV OPTICS (EUV 光学器件)”、律师代理申请案第 2006-0027-01 号的美国专利申请第 11/505,177 号;共同待审的、于 2006 年 6 月 14 日提交的、标题为“DRIVE LASER FOR EUV LIGHT SOURCE (用于 EUV 光源的驱动激光)”、律师代理申请案第 2006-0001-01 号的美国专利申请第 11/452,558 号;共同待审的、于 2005 年 8 月 9 日授予 Webb 等人的、标题为“LONG DELAY AND HIGH TIS PULSE STRETCHER (长延时和高 TIS 的脉冲展宽器)”的美国专利第 6,928,093 号;于 2006 年 3 月 31 日提交的、标题为“CONFOCAL PULSE STRETCHER (共焦脉冲展宽器)”、律师代理申请案第 2004-0144-01 号的美国申请第 11/394,512 号;于 2005 年 5 月 26 日提交的、标题

为“SYSTEMS AND METHODS FOR IMPLEMENTING AN INTERACTION BETWEEN A LASER SHAPED AS A LINE BEAM AND A FILM DEPOSITED ON A SUBSTRATE (用于在成形为线光束的激光和沉积在衬底上的膜之间实现交互的系统和方法)”的美国申请第 11/138,001 号(律师代理申请案第 2004-0128-01 号);以及于 2002 年 5 月 7 日提交的、现在是美国专利 6,693,939 的、标题为“LASER LITHOGRAPHY LIGHT SOURCE WITH BEAM DELIVERY (具有光束输送的激光光刻光源)”的美国申请第 10/141,216 号;于 2003 年 9 月 23 日授予 Knowles 等人的、标题为“VERY NARROW BAND, TWO CHAMBER, HIGH REP RATE GAS DISCHARGE LASER SYSTEM (极窄带双腔频高重复率气体放电激光系统)”的美国专利第 6,625,191 号;于 2003 年 4 月 15 日授予 Ness 等人的、标题为“INJECTION SEEDED LASER WITH PRECISE TIMING CONTROL (具有精确计时控制的注入种子激光器)”的美国申请第 10/012,002 号、律师代理申请案第 2001-0090-01 号、美国专利第 6,549,551 号、美国申请第 09/848,043 号、律师代理申请案第 2001-0020-01 号;以及于 2003 年 5 月 20 日授予 Myers 等人的、标题为“VERY NARROW BAND, TWO CHAMBER, HIGH REP RATE GAS DISCHARGE LASER SYSTEM (极窄频带双腔高重复频率气体放电激光系统)”的美国专利第 6,567,450 号、美国申请第 09/943,343 号、律师代理申请案第 2001-0084-01 号;共同待审的、于 2006 年 8 月 25 日提交的、标题为“SOURCE MATERIAL COLLECTION UNIT FOR A LASER PRODUCED PLASMA EUV LIGHT SOURCE (用于激光产生的等离子体 EUV 光源的源材料收集单元)”、律师代理申请案第 2005-0086-01 号的美国专利申请第 11/509,925 号;每一专利文件的全部内容都通过引用据此合并于此。

[0003] 领域

[0004] 本公开内容涉及从等离子体提供极紫外(“EUV”)光的极紫外光源,从靶材料产生等离子体,且将其收集和定向到中间区域,以供在 EUV 光源腔外例如由光刻扫描仪/分档器(stepper)使用。

[0005] 背景

[0006] 极紫外光,例如具有大约 50nm 或更小的波长的电磁辐射(有时也称为软 x 射线),且包括约 13.5nm 的波长的光,可以被用于光刻法工艺以便在例如硅晶片之类的衬底中产生极小的特征。

[0007] 产生 EUV 光的方法包括但不必限于将材料转换成等离子体状态,该等离子体状态具有至少一种具有在一个或多个 EUV 范围内的发射线的元素,例如氙、锂或锡。在这样的方法中,常常被称为激光产生的等离子体(“LPP”)的所要求的等离子体可以通过用激光束辐射具有所需的线发射元素的靶材料来产生。

[0008] 一种具体的 LPP 技术涉及用一个或多个预脉冲然后接着是主脉冲来辐射靶材料液滴。在这点上,作为 LPP 过程中产生“主”脉冲的驱动激光器,CO₂激光器可以呈现某些优点。对于诸如熔融的锡液滴之类的某些靶材料来说尤其如此。例如,一个优点可以包括产生相对高的转换效率(例如输出 EUV 带内功率与驱动激光输入功率的比率)的能力。

[0009] 从更为理论的观点看,LPP 光源通过将激光能量积累到诸如氙(Xe)、锡(Sn)或锂(Li)之类的源元素、产生具有数十 eV 的电子温度的高度离子化的等离子体来产生 EUV 辐射。从等离子体向各个方向发射在这些离子的去激发和重组期间产生的能量辐射。在常见配置中,接近垂直的入射镜(常常称为“集光镜”)被放置在离等离子体的一定距离上,以便将光收集并引导(且在一些配置中,聚焦)到中间位置,例如焦点。然后,可以将所收集的光从

中间位置中继到一组扫描仪光学器件且最终中继到晶片。从更为量化的观点看,当前以在中间位置产生大约 100W 为目标开发的一种配置设想使用脉冲化的经聚焦的 10–12kW CO_2 驱动激光器,该驱动激光器与液滴产生器同步,以便连续地每秒辐射约 40,000–100,000 锡液滴。出于这种目的,存在对在相对长的时间周期内以相对高的重复率(例如,40–100kHz 或更多)产生稳定的液滴流并并在计时和位置(即具有非常小的“颤抖”)方面以高的精度和良好的重复性将液滴输送到辐射位置的需要。

[0010] 对于典型的 LPP 装置,产生靶材料液滴,且然后,在真空腔内行进到其中辐射位置,在这里它们被例如经聚焦的激光束辐射。除了产生 EUV 辐射之外,这些等离子体流程也通常在等离子体腔中产生不期望的副产品(例如,碎片),这种副产品可以潜在地损害或减少各种等离子体腔光学元件的操作效率。这些碎片可以包括高能量离子和从等离子体形成散射的碎片,例如,源材料的原子和 / 或团块 / 微滴。出于这种原因,常常期望使用所谓的源材料的“质量受限的”液滴,以减少或消除碎片的形成。“质量受限的”液滴的使用也可以引起源材料消耗的减少。实现质量受限的液滴的技术可以涉及稀释源材料和 / 或使用相对小的液滴。例如,当前预期使用小至 $10\text{ }\mu\text{m}$ – $50\text{ }\mu\text{m}$ 的液滴。

[0011] 除了对真空腔中的光学元件的影响之外,等离子体副产品也可以不利地影响接近辐射位置的液滴(即,液滴流中的后续液滴)。在一些情况中,在液滴和等离子体副产品之间的相互作用可以导致这些液滴的较低的 EUV 输出。在这点上,于 2005 年 2 月 15 日授予 Shields 的且标题为“DROPLET TARGET DELIVERY METHOD FOR HIGH PULSE-RATE LASER-PLASMA EXTREME ULTRAVIOLET LIGHT SOURCE (用于高脉冲率激光等离子体极紫外线辐射光源的液滴靶输送方法)”的美国专利第 6,855,943 号(在下文中称为 943 专利)公开了其中辐射液滴流中的仅一些液滴例如每三个液滴中的一个以便产生脉冲化 EUV 光输出的技术。如 943 专利中所公开的,未参与的液滴(所谓的缓冲液滴)有利地将下一参与的液滴与在辐射位置产生的等离子体的影响屏蔽开来。然而,使用缓冲液滴可以增加源材料消耗和 / 或真空腔污染物和 / 或与不使用缓冲液滴所要求的相比可以要求以高得多的频率产生液滴(例如,两倍或更多)。另一方面,如果可以增加在液滴之间的间距,则可以减少或消除缓冲液滴的使用。因而,液滴大小、间距和计时一致性(即,颤抖)为 LPP EUV 光源设计液滴产生器时所考虑的因素之一。

[0012] 一种用于产生液滴的技术涉及熔融靶材料(例如锡),且然后,在高压下强迫它通过相对的小直径小孔,例如 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ – $30\text{ }\mu\text{m}$ 。在大多数条件下,在离开小孔的流中自然发生的不稳定性(例如噪声)可以引起流破裂成液滴。为了使得液滴与 LPP 驱动激光器的光学脉冲同步,可以将具有超过随机噪声的振幅的振幅的重复扰动施加到持续流。通过以与脉冲化激光的重复率相同的频率(或其高次谐波)施加扰动,可以使得液滴与激光脉冲同步。在过去,通常通过用诸如正弦波形或其等效物等的单频波形驱动电执行元件(例如压电材料)来将扰动施加到该流。

[0013] 在此所使用的术语“电执行元件”及其衍生物意味着当经受电压、电场、磁场或其组合时经历了尺寸改变的材料或结构,且包括但不限于压电材料、电致伸缩材料、磁致伸缩材料。

[0014] 通常,对于诸如正弦波形等的单频非调制波形扰动的应用,当扰动频率减少时(即,保持诸如压力和小孔直径等的其他因素恒定),液滴之间的间距增加。然而,

如“Drop Formation From A Vibrating Orifice Generator Driven By Modulated Electrical Signals (从由经调制的电信号驱动的振动小孔电动机形成液滴)”(G. Brenn 和 U. Lacknermeier, Phys. Fluids 9, 3658 (1997), 其内容通过引用合并于此) 中所公开的, 对于低于大约 $0.3v/\pi d$ 的扰动频率, 其中 v 是流速且 d 是持续液体流的直径, 对于每一扰动周期产生多于一个的液滴。因而, 对于以大约 50m/s 的流速的 $10\mu\text{m}$ 液体射流, 所计算的最小值频率(低于该频率, 可以每周产生多于一个的液滴) 是大约 480kHz (注意: 目前的设想是, 对于 LPP EUV 流程, 期望 40-100kHz 的液滴重复率和大约 30-100m/s 的速率)。最终结果是, 对于单频非调制波形扰动的应用, 在液滴之间的间距根本上受到限制, 且不能超过大约 $3.33\pi d$ 。如上面所指示, 可以期望在液滴流中的邻近液滴之间提供足够的距离以减少 / 消除来自等离子体的碎片对接近的液滴的影响。此外, 因为对间距的限制与流直径成正比, 且由于由此得到的液滴大小, 在诸如其中期望相对小的、质量受限的液滴的 LPP EUV 光源(参见以上讨论) 等的应用中, 这种限制尤其严重。

[0015] 鉴于以上情况, 申请人公开了激光产生的等离子体、具有使用经调制扰动波形的液滴流的 EUV 光源和相应的使用方法。

[0016] 概述

[0017] 在第一方面, 一种设备可以包括等离子体产生系统, 包括靶材料液滴源和产生在辐射区域辐射液滴的光束的激光器, 等离子体产生 EUV 辐射, 其中, 液滴源包括离开小孔的流体和在流体中产生扰动的子系统, 该子系统产生具有不同的初始速率的液滴, 当液滴行进到辐射区域时引起在至少一些邻近液滴之间的间距减少。

[0018] 在特定实现中, 至少一些邻近液滴可以在到达辐射区域之前凝聚。

[0019] 在一种实施例中, 子系统可以产生液滴模式, 其中, 液滴双联体到达辐射位置, 且辐射液滴双联体中的每一液滴以产生等离子体。

[0020] 在一个特定的实施例中, 液滴双联体中的至少一个液滴可以在接近辐射位置处具有的直径 d 和在每一双联体内的中心 - 中心液滴间距 D , 且 $d \leq D \leq 4d$ 。

[0021] 在特定的实施例中, 扰动可以包括调频扰动波形。

[0022] 在另一特定的实施例中, 扰动可以包括调幅扰动波形。

[0023] 在设备的一种配置中, 子系统可以产生一系列脉冲化扰动, 且每一脉冲化扰动具有充分短的上升时间和充分短的下降时间中的至少之一, 以产生基频和基频的至少一个谐波。

[0024] 在另一方面中, 一种设备可以包括等离子体产生系统, 该等离子体产生系统包括靶材料液滴源和产生在辐射区域辐射液滴的光束的激光器, 等离子体产生 EUV 辐射, 其中, 液滴源包括离开小孔的流体和具有在流体中产生扰动的电执行元件的子系统, 电执行元件由具有充分短的上升时间和充分短的下降时间中的至少一个波形驱动, 以产生在电执行元件的可操作响应范围内的基频和基频的至少一个谐波。

[0025] 在这一方面的一种实施例中, 波形可以选自由方波、矩形波和尖顶非正弦波组成的一组波形。

[0026] 在这一方面的一个特定实施例中, 尖顶非正弦波可以选择由快速脉冲波形、快速斜坡波形和正弦函数波形组成的一组波形。

[0027] 在这一方面的一个特定实施例中, 至少一个谐波可以是基频的奇次谐波。

[0028] 在这一方面的一种实施例中,至少一个谐波可以包括基频的至少一个偶次谐波和基频的至少一个奇次谐波。

[0029] 在这一方面的一个特定实施例中,波形可以产生具有不同的初始速率的液滴,引起当液滴行进到辐射区域时在至少一些邻近液滴之间的间距减少。

[0030] 在这一方面的一个特定实施例中,至少一些邻近液滴在到达辐射区域之前凝聚。

[0031] 在这一方面的一个特定实施例中,可以通过改变开-关切换状态来产生每一脉冲。

[0032] 在另一方面,一种方法可以包括以下动作/步骤:使得流体向小孔流动;扰动流体以产生第一液滴和第二液滴,第一液滴具有与第二液滴不同的初始速度,引起当液滴行进到辐射区域在第一液滴和第二液滴之间的间距减少;以及在辐射区域辐射液滴材料以形成等离子体。

[0033] 在这一方面的一种实现中,第一液滴和第二液滴在到达辐射区域之前凝聚。

[0034] 在这一方面的一种特定实现中,扰动可以包括选自由调频扰动波形和调幅扰动波形组成的一组调制波形的波形。

[0035] 在这一方面的一种特定实现中,扰动流体的步骤可以包括产生一系列脉冲化扰动,且每一脉冲化扰动具有充分短的上升时间和充分短的下降时间中的至少之一,以便产生基频和基频的至少一个次谐波。

[0036] 在一种特定实现中,脉冲化扰动可以选自由方波、矩形波和尖顶非正弦波组成的一组扰动波形。

[0037] 附图简述

[0038] 图 1 示出激光产生的等离子体 EUV 光源的简化的示意图;

[0039] 图 2 示出示意性的简化液滴源;

[0040] 图 2A-图 2D 阐释用于将电执行元件与流体耦合起来以便在离开小孔的流中产生扰动的若干不同技术;

[0041] 图 3 (现有技术) 阐释得自单频非调制扰动波形的液滴的模式;

[0042] 图 4 阐释得自调幅扰动波形的液滴的模式;

[0043] 图 5 阐释得自调频扰动波形的液滴的模式;

[0044] 图 6 示出对于单频非调制波形扰动和若干调频波形扰动所获得的锡液滴的照片;

[0045] 图 7 阐释可使用经调制的波形扰动实现的液滴模式,其中液滴对到达辐射区域,允许一个液滴将随后的液滴对与等离子体碎片屏蔽开来;

[0046] 图 8 阐释可使用经调制的波形扰动实现的液滴模式,其中液滴对到达辐射区域,且第一液滴将光反射到自定向激光系统,以便发起放电,该放电辐射第二液滴,以产生 EUV 发射等离子体;

[0047] 图 8A 阐释液滴模式,其中液滴双联体到达辐射位置,且辐射液滴双联体中的每一液滴以产生等离子体;

[0048] 图 9 示出将方波表示为正弦波信号的奇次谐波的叠加;

[0049] 图 10 示出在离输出小孔 ~40mm 处拍摄的以 30kHz 的方波调制获得的液滴的图像;

[0050] 图 11 示出在离输出小孔 ~120mm 处拍摄的以 30kHz 的方波调制获得的液滴的图像;

[0051] 图 12A-图 12D 示出矩形波(图 12A)调制的实验结果,包括矩形波的频谱(图 12B);离输出小孔 20mm 处拍摄的液滴的图像(图 12C)和离输出小孔 450mm 处拍摄的凝聚液滴的图像(图 12D);

[0052] 图 13A-图 13D 示出快速脉冲(图 13A)调制的实验结果,包括快速脉冲的频谱(图 13B)、离输出小孔 20mm 处拍摄的液滴的图像(图 13C)和离输出小孔 450mm 处拍摄的凝聚液滴的图像(图 13D);

[0053] 图 14A-图 14D 示出快速斜坡波(图 14A)调制的实验结果,包括快速斜坡波的频谱(图 14B)、离输出小孔 20mm 处拍摄的液滴的图像(图 14C)和离输出小孔 450mm 处拍摄的凝聚液滴的图像(图 14D);以及

[0054] 图 15A-图 15D 示出正弦波(图 15A)调制的实验结果,包括正弦波的频谱(图 15B)、离输出小孔 20mm 处拍摄的液滴的图像(图 15C)和离输出小孔 450mm 处拍摄的凝聚液滴的图像(图 15D)。

[0055] 详细描述

[0056] 最初参见图 1,示出根据一个实施例的一个方面的 EUV 光源——例如激光产生的等离子体的 EUV 光源 20——的示意图。如图 1 中所示出以及下面进一步详细描述, LPP 光源 20 可以包括用于产生一系列光脉冲并将光脉冲输送到腔 26 中的系统 22。如下面所详述的,每一光脉冲可以沿着光束路径从系统 22 行进并进入腔 26,以便在辐射区域 28 处照射相应的靶液滴。

[0057] 用作图 1 中所示出的系统 22 的合适的激光器可以包括脉冲化激光设备,例如,脉冲化气体放电 CO₂激光设备,其例如借助于 DC 或 RF 激励,以相对高的功率(例如 10kW 或更高)和高的脉冲重复率(例如 50kHz 或更高)产生 9.3 μm 或 10.6 μm 的辐射。在一种特定实现中,激光器可以是轴流式射频泵浦 CO₂激光器,其具有多级放大的 MOPA 配置,且具有由具有低能量和高重复率例如能够以 100kHz 操作的 Q 开关主振荡器(MO)发起的种子脉冲。离开 MO,然后,在进入 LPP 腔之前,激光脉冲可以被放大、被整形和 / 或被聚焦。连续泵浦 CO₂ 放大器可以用于系统 22。例如,在共同待审的、于 2005 年 6 月 29 日提交的、标题为“LPP EUV LIGHT SOURCE DRIVE LASER SYSTEM (LPP EUV 光源驱动激光系统)”、律师代理申请案第 2005-0044-01 号的美国专利申请第 11/174,299 号中公开了具有振荡器和三个放大器(O-PA1-PA2-PA3 配置)的合适的 CO₂激光设备,该专利申请的全部内容先前已经通过引用合并于此。替代地,激光器可以被配置成所谓的“自瞄准”激光系统,其中液滴充当光学腔的一个镜子。在一些“自瞄准”配置中,可以不要求主振荡器。在共同待审的、于 2006 年 10 月 13 日提交的、标题为“DRIVE LASER DELIVERY SYSTEMS FOR EUV LIGHT SOURCE (用于 EUV 光源的驱动激光输送系统)”、律师代理申请案第 2006-0025-01 号的美国专利申请第 11/580,414 号中公开并要求保护自瞄准激光系统,该专利申请的全部内容先前已经通过引用合并于此。

[0058] 取决于应用,其他类型的激光器也是合适的,例如,以高功率和高脉冲重复率操作的准分子或氟分子激光器。示例包括例如具有纤维或盘形活性介质的固态激光器、具有一个或多个腔体例如振荡器腔和一个或多个放大腔(带有并联或串联的放大腔)的准分子激光器、主振荡器 / 功率振荡器(MOPO)配置、功率振荡器 / 功率放大器(POPA)配置,或者播种一个或多个准分子或氟分子放大器或振荡器腔的固态激光器可能是适当的。其他设计是可

能的。

[0059] 如图 1 中进一步示出的, EUV 光源 20 也可以包括靶材料输送系统 24, 例如, 将靶材料的液滴输送到腔 26 的内部并进入到辐射区域 28, 液滴将在此与一个或多个光脉冲例如零个、一个或多个预脉冲以及此后的一个或多个主脉冲相互作用, 以便最终产生等离子体并产生 EUV 发射。靶材料可以包括但并不必定限于包括锡、锂、铯或其组合的材料。EUV 发射元素例如锡、锂、铯等等可以是以液体液滴和 / 或被包含在液体液滴内的固体粒子的形式。例如, 元素锡可以用作纯锡、锡化合物例如 SnBr_4 、 SnBr_2 、 SnH_4 , 锡合金例如锡 - 镓合金、锡 - 铟合金、锡 - 铟 - 镓合金或其组合。取决于所使用的材料, 可以以各种温度将靶材料呈现给辐射区域 28, 包括室温或接近室温 (例如, 锡合金、 SnBr_4)、高温 (例如, 纯锡) 或低于室温的温度 (例如, SnH_4), 且在一些情况中, 靶材料可以相对易挥发, 例如 SnBr_4 。在共同待审的、于 2006 年 4 月 17 日提交、标题为“ALTERNATIVE FUELS FOR EUV LIGHT SOURCE (用于 EUV 光源的替代燃料)”、律师代理申请案第 2006-0003-01 号的美国专利申请第 11/406, 216 号中提供了涉及这些材料在 LPP EUV 源中的使用的更多细节, 该专利申请的内容先前已经通过引用合并于此。

[0060] 继续图 1, EUV 光源 20 也可以包括光学器件 30, 例如以截断椭球形式的集光镜, 其具有例如以交替的钼层和硅层覆盖的梯度多层。图 1 示出, 光学器件 30 可以被形成带有孔径, 以允许由系统 22 产生的光脉冲穿过并到达辐射区域 28。如所示出的, 光学器件 30 可以是例如椭球面镜, 其具有在辐射区域 28 内或接近辐射区域 28 的第一焦点和在所谓的中间区域 40 处第二焦点, 中间区域 40 中, EUV 光可以从 EUV 光源 20 输出且进入到利用 EUV 光的设备, 例如集成电路光刻工具 (未示出)。应明白, 其他光学器件可以用来代替椭球面镜, 用于收集光并将光定向到中间位置, 以供随后输送到利用 EUV 光的设备, 例如, 该光学器件可以是抛物面, 或可以被配置为将具有环形横截面的光束输送到中间位置, 参见例如共同待审的、于 2006 年 8 月 16 日提交的、标题为“EUV OPTICS (EUV 光学器件)”、律师代理申请案第 2006-0027-01 号的美国专利申请第 11/505, 177 号, 该专利申请的内容通过引用据此合并。

[0061] 继续参考图 1, EUV 光源 20 也可以包括 EUV 控制器 60, EUV 控制器 60 也可以包括点火控制系统 65, 其用于触发系统 22 中的一个或多个灯和 / 或激光设备, 以便由此产生供输送到腔 26 中的光脉冲。EUV 光源 20 也可以包括液滴位置检测系统, 液滴位置检测系统可以包括一个或多个液滴成像器 70, 液滴成像器 70 提供指示一个或多个液滴例如相对于辐射区域 28 的位置的输出。成像器 70 可以将这种输出提供给液滴位置检测反馈系统 62, 液滴位置检测反馈系统 62 可以, 例如, 计算液滴位置和轨道, 从中可以例如基于逐滴或基于平均计算出液滴误差。然后, 可以将液滴误差作为输入提供给控制器 60, 控制器 60 可以将例如位置、方向和 / 或计时修正信号提供给系统 22, 以便控制源计时电路和 / 或控制光束位置和成形系统, 例如, 以改变输送到腔 26 中的辐射区域 28 的光脉冲的位置和 / 或焦距。

[0062] EUV 光源 20 可以包括用于测量由源 20 产生的 EUV 光的各种性质的一个或多个 EUV 计量仪器。这些性质可以包括, 例如, 亮度 (例如, 总亮度或在特定谱带内的亮度)、谱带宽、偏振、光束位置、指向等等。对于 EUV 光源 20, (各) 仪器可以被配置为在下游工具 (例如光刻扫描仪) 在线的同时操作, 例如通过例如使用拾取镜或采样“未被收集的” EUV 光来采样一部分 EUV 输出, 和 / 或可以在下游工具 (例如光刻法扫描仪) 离线的同时操作, 例如, 通过

测量 EUV 光源 20 的整体 EUV 输出。

[0063] 如图 1 中进一步示出的, EUV 光源 20 可以包括液滴控制系统 90, 可操作为响应于来自控制器 60 的信号(在一些实现中, 该信号可以包括以上所描述的液滴误差, 或从其导出的某种量), 从而例如修改靶材料离开液滴源 92 的释放点和 / 或修改液滴形成计时, 以便纠正到达期望的辐射区域 28 液滴的误差, 和 / 或同步借助于脉冲化激光系统 22 产生液滴。

[0064] 图 2 以示意性形式阐释简化的液滴源 92 的组件。如所示出的, 液滴源 92 可以包括将例如熔融锡之类的流体保持在压力下的储器 94。还示出储器 94 可以被形成为具有小孔 98, 允许受压的流体 96 流过小孔, 产生持续的流 100, 流 100 随后破裂成多个液滴 102a、102b。

[0065] 继续图 2, 所示出的液滴源 92 还包括在流体中产生扰动的子系统, 该子系统具有操作上与流体 96 耦合的电执行元件 104 和驱动电执行元件 104 的信号产生器 106。图 2A-图 2D 示出一个或多个电执行元件操作上与流体耦合以便形成液滴的各种方式。从图 2A 开始, 示出在压力下强迫流体从储器 108 流过管 110 (例如毛细管) 的配置, 管 110 具有在大约 0.5mm-0.8mm 之间的内径和大约 10mm 到 50mm 的长度, 产生离开管 110 的小孔 114 的持续的流 112, 流 112 随后破裂成液滴 116a、116b。如所示出的, 电执行元件 118 可以被耦合到管。例如, 电执行元件可以耦合到管 110 以便使得管 110 偏斜并扰动流 112。图 2B 示出类似的配置, 具有储器 120、管 122 和一对电执行元件 124、126, 每一电执行元件都耦合到管 122, 以便以各自的频率使得管 122 偏转。图 2C 示出另一变种, 其中将板 128 放置在可移动的储器 130 中, 以便强迫流体通过小孔 132, 以产生流 134, 流 134 破裂成液滴 136a、136b。如所示出的, 可以将力施加到板 128, 且一个或多个电执行元件 138 可以耦合到板, 以便扰动流 134。应明白, 毛细管可以用于图 2C 中所示出的实施例。图 2D 示出另一变种, 其中在压力下强迫流体从储器 140 流出, 通过管 142, 产生持续的流 144, 离开管 142 的小孔 146, 流 144 随后破裂成液滴 148a、148b。如所示出的, 例如具有环状形状的电执行元件 150, 可以被放置在管 142 周围。当被驱动时, 电执行元件 142 可以有选择地压缩和 / 或松开管 142 以便扰动流 144。应明白, 可以使用两个或更多个电执行元件来以各自的频率有选择地压缩管 142。

[0066] 关于各种液滴分配器配置和它们的相对优点的更多细节可参见共同待审的、于 2006 年 2 月 21 日提交的标题为“LASER PRODUCED PLASMA EUV LIGHT SOURCE WITH PRE-PULSE (借助于预脉冲激光产生的等离子体 EUV 光源)”、律师代理申请案第 2005-0085-01 号的美国专利申请第 11/358,988 号; 共同待审的、于 2005 年 2 月 25 日提交的、标题为“METHOD AND APPARATUS FOR EUV PLASMA SOURCE TARGET DELIVERY (用于 EUV 等离子体源靶输送的方法和装置)”、律师代理申请案第 2004-0008-01 号的美国专利申请第 11/067,124 号; 以及共同待审的、于 2005 年 6 月 29 日提交的、标题为“LPP EUV PLASMA SOURCE MATERIAL TARGET DELIVERY SYSTEM (LPP EUV 等离子体源材料靶输送系统)”、律师代理申请案第 2005-0003-01 号的美国专利申请第 11/174,443 号; 每一专利申请的内容据此通过引用合并于此。

[0067] 图 3 (现有技术) 阐释得自单频正弦波扰动波形 202 的液滴 200 的模式(对于高于大约 $0.3v/(\pi d)$ 的扰动频率)。可以看出, 扰动波形的每一周期产生一个液滴。图 3 也阐释, 液滴不凝聚在一起, 而是每一液滴被建立为具有相同的初始速度。

[0068] 图4阐释最初得自调幅扰动波形302的液滴300的模式,然而,该调幅扰动波形302与以上所描述的扰动波形202的不同之处在于,它不限于高于大约 $0.3v/(\pi d)$ 的扰动频率。可以看出,调幅波形扰动302包括两个特性频率:对应于波长 λ_c 的相对大的频率例如载波频率,以及对应于波长 λ_m 的较小的频率例如调制频率。对于图4中所示出的具体的扰动波形示例,调制频率是载波频率的次谐波,且尤其,调制频率是载波频率三分之一。借助于这种波形,图4阐释,对应于载波波长 λ_c 的扰动波形的每一周期产生一个液滴。图4也阐释,液滴凝聚在一起,得到较大的液滴的流304,且对应于调制波长 λ_m 的扰动波形的每一周期有一个较大的液滴。箭头306a、306b示出初始的相对速度分量由经调制的波形扰动302赋予液滴,且引起液滴凝聚。

[0069] 图5阐释最初从调频扰动波形402得到的液滴400的模式,该调频扰动波形402类似于以上所描述的扰动波形302,不限于高于大约 $0.3v/(\pi d)$ 扰动频率。可以看出,调频波形扰动402包括两个特性频率,对应于波长 λ_c 的相对大的频率例如载波频率,以及对应于波长 λ_m 的较小的频率例如调制频率。对于图5中所示出的具体的扰动波形示例,调制频率是载波频率谐波,且尤其,调制频率是载波频率的三分之一。借助于这一波形,图5阐释,对应于载波波长 λ_c 的扰动波形的每一周期产生一个液滴。图5也阐释,液滴凝聚在一起,得到较大的液滴404的流,且对应于调制波长 λ_m 的扰动波形的每一周期有一个较大的液滴。类似于调幅扰动(即,图4),初始的相对速度分量由调频波形扰动402赋予液滴,且引起液滴凝聚。

[0070] 尽管图4和图5示出和讨论了具有两个特性频率的实施例,图4阐释了具有两个特性频率的调幅扰动,且图5阐释具有两个频率的调频扰动,但应明白,可以采用多于两个的特性频率,且调制可以是角度调制(即,频率调制或相位调制)、振幅调制或其组合中的任一种。

[0071] 图6示出使用类似于图2D的装置获得的锡液滴的照片,且小孔直径大约 $70\mu\text{m}$ 、流速 $\sim 30\text{m/s}$,对于单频非调制波形扰动具有 100kHz 的频率(最上面的照片);调频波形扰动具有 100kHz 的载波频率以及相对强的调制深度的 10kHz 的调制频率(从上面数第二张照片);调频波形扰动具有 100kHz 的载波频率和相对弱的调制深度的 10kHz 的调制频率(从上面数第三张照片);调频波形扰动具有 100kHz 的载波频率和 15kHz 的调制频率(从上面数第四张照片),调频波形扰动具有 100kHz 的载波频率和 20kHz 的调制频率(最下面的照片)。

[0072] 这些照片指出,可以产生具有大约 $265\mu\text{m}$ 的直径的锡液滴,这些锡液滴隔开大约 3.14mm ,该间距是使用单频非调制波形扰动不能以这种液滴大小和重复率实现的间距。

[0073] 测量指示调制周期的大约 0.14% 的计时抖动,这充分少于在使用单频非调制波形扰动的类似条件下观察到的抖动。获得这种效果是因为对多个凝聚液滴平均了个体液滴不稳定性。

[0074] 图7示出使用经调制的(例如多频)扰动波形产生的液滴模式600(也参见图6,从上面数第四张照片)。也示出的是,在离小孔604的选定的距离处形成液滴对。如所示出的,这种其中液滴对到达辐射区域的液滴模式允许液滴608a在受到激光22'辐射时建立EUV发射等离子体,同时液滴608b将随后的液滴对610与等离子体碎片屏蔽开来。

[0075] 图8阐释可使用经调制的(例如多频)扰动波形实现的液滴模式700,其中液滴对到达辐射区域,且第一液滴702a将光反射到自定向激光系统704,以发起激光振荡输出的

激光束,该激光束辐射第二液滴 702b,以便产生 EUV 发射等离子体。

[0076] 在共同待审的、于提交 2006 年 10 月 13 日提交的、标题为“DRIVE LASER DELIVERY SYSTEMS FOR EUV LIGHT SOURCE (用于 EUV 光源的驱动激光输送系统)”、律师代理申请案第 2006-0025-01 号的美国专利申请第 11/580,414 号中更完整地描述了自定向激光系统 704。尤其参见其全部内容先前通过引用合并于此的美国 11/580,414 的图 5。尽管以下描述了对应于 11/580,414 专利申请的图 5 的激光系统 704,但应明白,这种描述同等适用于 11/580,414 专利申请中公开的其他自定向激光器(即,图 6-图 16)。

[0077] 继续图 8,可以看到,自定向激光系统 704 可以包括光学放大器 706a、706b、706c。例如,光学放大器 706 可以是 CW 泵浦的多腔 CO₂激光放大器,其放大 10.6 μm 波长的光,且具有相对高的双程增益(例如,约 1,000,000 的双程增益)。如进一步示出的,放大器 706 可以包括串联排列的一连串放大器腔体 706a-706c,每一腔具有其自己的活性介质和激励源,例如电极。

[0078] 在使用中,靶材料的第一液滴 702a 被放置在通过或接近延伸通过放大器 706 的光束路径 710 的轨道上。来自放大器 706 的自发辐射的光子可以被液滴散射,且一些所散射的光子可以被放置在其中它们通过放大器 706 的路径 710 上。如所示出的,光学器件 708 可以被放置为从放大器 706 接收路径 710 上的光子,将光束引导回去通过放大器 706 以供随后与第二液滴 702b 交互,以便产生 EUV 光发射等离子体。对于这种布局,光学器件 708 可以是例如平面镜、曲面镜、相位共轭镜或角反射器。光学元件 714 例如透镜可以被放置为对准从液滴进入放大器 706 的光,且聚焦从放大器 706 行进到液滴的光。可以提供可选的光学延时器 716,以便建立在第一液滴和第二液滴到达辐射区域的时间之间所要求的时间延时。

[0079] 使用不同的液滴的一个优点是可以为液滴的具体功能(即,反射与等离子体产生相比)独立优化液滴的大小。

[0080] 图 8A 阐释可使用经调制的(例如多频)扰动波形(以上所描述的)或脉冲化波形(下面所描述的)来实现的液滴模式 700',其中液滴双联体到达辐射位置,且液滴双联体中的每一液滴被辐射以产生等离子体。具体地,双联体中的两个液滴产生等离子体和 EUV 光,且两个液滴可以由用放大器 706a'-706c' 中的单次增益反转产生的激光束辐射。对于这种布局,相对于借助于单个液滴产生的 EUV 输出,对于每一增益反转,可以获得增加的 EUV 输出功率。在一些情况中,使用液滴是有益的,使得在接近辐射位置处,液滴双联体中的至少一个液滴具有直径 d,以及在每一双联体内中心到中心的液滴间距 D,且 $d \leq D \leq 4d$ 。液滴直径可以基本上相等,或者一个液滴可以大于另一个液滴。

[0081] 继续图 8A,可以看见,自定向激光系统 704' 可以包括光学放大器 706a'、706b'、706c'。例如,光学放大器 706' 可以是 CW 泵浦的多腔 CO₂激光放大器,其放大 10.6 μm 波长的光,且具有相对高的双程增益(例如,约 1,000,000 的双程增益)。如进一步示出的,放大器 706' 可以包括串联排列的一连串放大器腔体 706a'-706c',每一腔都具有其自己的活性介质和激励源,例如电极。

[0082] 在使用中,靶材料的第一液滴 702b' 被放置在经过或接近延伸通过放大器 706' 的光束路径 710' 的轨道上。来自放大器 706' 的自发辐射的光子可以被液滴散射,且一些所散射的光子可以被放置在其中它们通过放大器 706' 的路径 710' 上。如所示出的,光学器件

708' 可以被放置为从放大器 706' 接收路径 710' 上的光子, 且将光束引导回去通过放大器 706'。然后, 激光束可以沿着辐射液滴 702b' 并产生 EUV 光辐射等离子体的光束路径 710' 而建立, 且继续在等离子体和光学器件 708' 之间建立的光学腔中循环, 直到液滴 702a' 达到光束路径 710'。然后, 辐射液滴 702a' 以产生辐射等离子体的 EUV 光。对于这种布局, 光学器件 708' 可以是例如平面镜、曲面镜、相位共轭镜或角反射器。光学元件 714' 例如透镜可以被放置为对准从液滴进入放大器 706' 的光, 且聚焦从放大器 706' 行进到液滴的光。在一些实现中, 在辐射之前或在辐射期间, 双联体中的液滴可以凝聚, 形成细长的液滴。

[0083] 现在参见图 9-12, 申请人已经确定, 除了以上所描述的经调制的(例如多种频率)扰动波形之外, 其他波形可以用来产生凝聚的液滴流, 可以控制该液滴流以便产生低于最小频率(如上所述, 大约 $0.3v/(\pi d)$) 的稳定的凝聚液滴流, 最小频率将以另外方式使用单频正弦非调制波形扰动来限制稳定液滴产生。

[0084] 具体地, 这些波形可以在流体中产生扰动, 这在流内产生具有不同的初始速率的液滴的流, 这些不同的初始速率是受控、可预测、可重复和 / 或非随机的。

[0085] 例如, 对于使用电执行元件来产生扰动的液滴产生器, 可以使用一系列脉冲波形, 且每一脉冲具有与波形周期的长度相比充分短的上升时间和 / 或下降时间, 以便产生在电执行元件的可操作响应范围内的基频以及该基频的至少一个谐波。

[0086] 在此所使用的术语基频及其衍生物和等效物意味着扰动流动到出口小孔的流体的频率和 / 或被施加到诸如喷嘴等的产生液滴的子系统的频率; 该子系统具有在流体中产生扰动的电执行元件以便产生液滴流, 使得如果允许该流中的液滴完全地凝聚成同等地隔开的液滴的模式, 则每个基频周期将存在一个完全凝聚的液滴。

[0087] 合适的脉冲波形的示例包括但并不必定限于方波(图 9)、矩形波和具有充分短的上升时间和 / 或下降时间的尖顶非正弦波例如快速脉冲(图 13A)、快速斜坡波(图 14A)和正弦函数波(图 15A)。

[0088] 图 9 示出正弦波信号的奇次谐波的叠加的方波 800 的表示。注意: 为简单起见, 仅示出该频率的前两个谐波。应明白, 借助于具有逐渐变小振幅的无限数量的奇次谐波, 将获得确切的方波形状。更详细地, 方波 800 数学上可以表示为具有该方波的基频 f (波形 802) 及其高次谐波 $3f$ (波形 804)、 $5f$ (波形 806) 等等的正弦波的组合:

$$[0089] \quad v(t) = \frac{4}{\pi} \left(\sin(\omega t) + \frac{1}{3} \sin(3\omega t) + \frac{1}{5} \sin(5\omega t) + \frac{1}{7} \sin(7\omega t) + \dots \right)$$

[0090] 其中 t 是时间, $v(t)$ 是波的瞬时振幅(即电压), 且 ω 是角度频率。因而, 将方波信号应用到电执行元件, 例如压电, 可以得到以基频 $f = \frac{\omega}{2\pi}$ 以及这一频率的高次谐波 $3f$ 、 $5f$ 等等的机械振动。这可能是由于该有限的以及在通常的情况中采用电执行元件的液滴产生器的高度非均匀的频率响应。如果方波信号的基频显著地超过 $0.3v/(\pi d)$ 的限制值, 那么, 以这一频率的单个液滴的构成有效地被禁止, 且以高次谐波产生液滴。如同以上所描述的振幅和频率调制的情况一样, 借助于方波信号产生的液滴具有相对于流体中的邻近液滴不同的速率, 这引起它们最终以一种频率 f 凝聚成较大的液滴。在一些实现中, EUV 光源被配置为使得每个周期产生多个液滴, 且每一液滴具有与随后的液滴不同的初始速度, 以使得: 1) 在到达辐射位置之前至少两个液滴凝聚; 或 2) 液滴产生期望的模式, 例如包括紧密

隔开的液滴双联体(参见下面的讨论)的模式。

[0091] 图 10 和图 11 示出用以 30kHz 方波调制获得的液滴的图像。借助于简单的正弦波调制,其中对于这一实验中所使用的液滴产生器可以每周期获得单个液滴的最低调制频率是 110kHz。图 10 中所示出的图像在离输出小孔 ~40mm 处拍摄,且图 11 中所示出的图像稍后在其中各液滴已经凝聚的离输出小孔 ~120mm 处拍摄。此示例演示使用方波调制以比特定的液滴产生器配置的自然低频界限更低的频率来获得液滴的优点。

[0092] 可以将类似的自变量应用到带有多个谐波的具有短的上升时间和 / 或下降时间的包括但不限于快速脉冲(图 13A)、快速斜坡波(图 14A)和正弦波(图 15A)的各种重复调制信号。举例来说,锯齿波形不仅包含基频的奇次谐波而且也包含基频的偶次谐波,且因此也可以有效地用于克服低频调制限制并改善液滴产生器的稳定性。在一些情况中,特定的液滴产生器配置可以比其他配置更加响应于一些频率。在这种情况下,产生大量频率的波形更可能包括匹配特定的液滴产生器的响应频率的频率。

[0093] 图 12A 示出用于驱动液滴产生器的矩形波 900,且图 12B 示出在一个周期的矩形波期间具有不同振幅的基频 902a 和谐波 902b-h 的相应频谱。图 12C 示出离由矩形波驱动的液滴产生器的输出小孔 20mm 处拍摄的液滴图像,且示出液滴开始凝聚。图 12D 示出离输出小孔 450mm 处在液滴已经完全凝聚之后拍摄的液滴的图像。

[0094] 图 13A 示出用于驱动液滴产生器的一系列快速脉冲 1000,且图 13B 示出在一个周期的矩形波期间具有不同振幅的基频 1002a 和谐波 1002b-i 的相应频谱。图 13C 示出离由一系列快速脉冲驱动的液滴产生器的输出小孔 20mm 处拍摄的液滴的图像,且示出液滴开始凝聚。图 13D 示出离输出小孔 450mm 处在液滴已经完全凝聚之后拍摄的液滴的图像。

[0095] 图 14A 示出用于驱动液滴产生器的快速斜坡波 1100,且图 14B 示出在周期的矩形波期间具有不同振幅的基频 1102a 和谐波 1102b-p 的相应频谱。图 14C 示出离由快速斜坡波驱动的液滴产生器的输出小孔 20mm 处拍摄的液滴的图像,且示出液滴开始凝聚。图 14D 示出离输出小孔 450mm 处在液滴已经完全凝聚之后拍摄的液滴的图像。

[0096] 图 15A 示出用于驱动液滴产生器的正弦函数波 1200,且图 15B 示出在一个周期的矩形波期间具有不同振幅的基频 1202a 和谐波 1202b-1 的相应频谱。图 15C 示出离由正弦函数波驱动的液滴产生器的输出小孔 20mm 处拍摄的液滴的图像,且示出液滴开始凝聚。图 15D 示出离输出小孔 450mm 处在液滴已经完全凝聚之后拍摄的液滴的图像。

[0097] 尽管在本专利申请中以满足 35U. S. C. § 112 所要求的细节描述和阐释的特定实施例完全能够实现以上所描述的目标、要解决的问题或任何其他原因或以上所描述的实施例的目的中的一个或多个,但本领域中的技术人员应理解,以上所描述的实施例仅仅是示例性、说明性的,且表示本申请宽泛地预期的主题。对下列权利要求中的元素的单数引用在解释这样的权利要求元素时既不预期意味着也不应该是意味着“一个且仅一个”(除非明确地这样说明),而是“一个或多个”。本领域中的普通技术人员已知的、或以后认识到的以上所描述的实施例的任何元素的所有结构和功能上的等效物,通过引用明确合并于此,且预期由本权利要求包含。说明书和 / 或权利要求中所使用的且在本申请说明书和 / 或权利要求中明确给予含义的任何术语应具有该含义,而不考虑这样的术语的任何字典或其他通常使用的含义。说明书中讨论的设备或方法作为解决或解释本申请中讨论的每一问题的实施例是不预期的或不必要的,这是由于它应由权利要求来包含。在本公开内容中没有元素、组

件或方法步骤预期贡献给公众,而不考虑权利要求中是否明确叙述了这些元素、组件或方法步骤。所附权利要求中没有权利要求元素是在 35U. S. C. § 112 第六段的规定下解释的,除非使用短语“用于……的装置”来明确叙述,在方法权利要求的情况中,元素被叙述为“步骤”而不是“动作”。

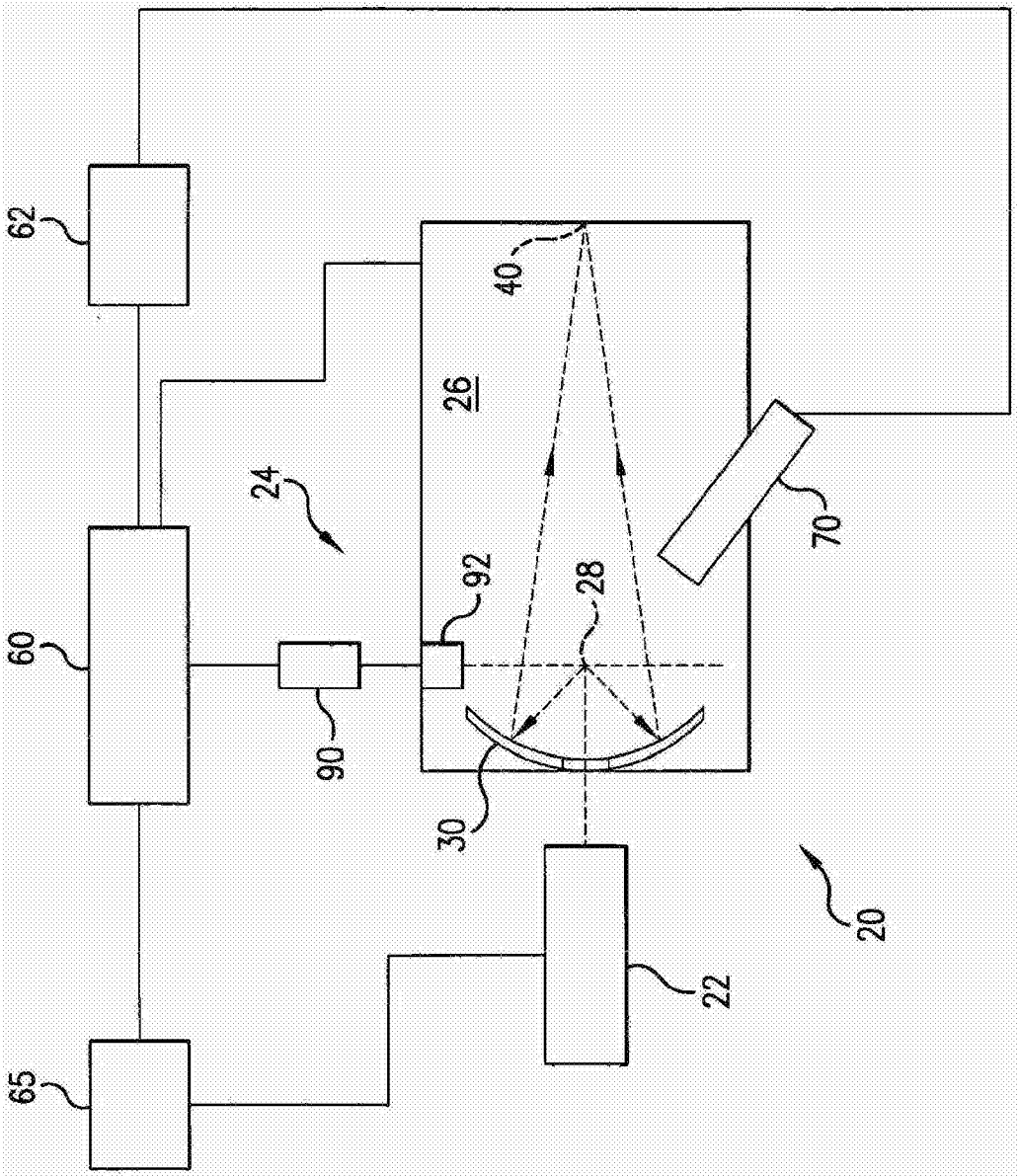


图 1

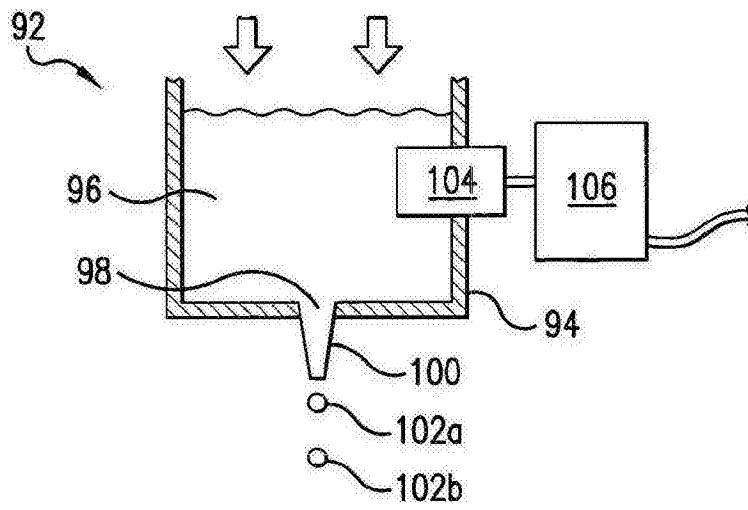


图 2

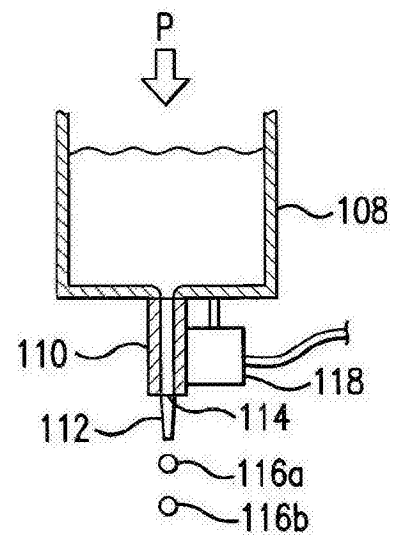


图 2A

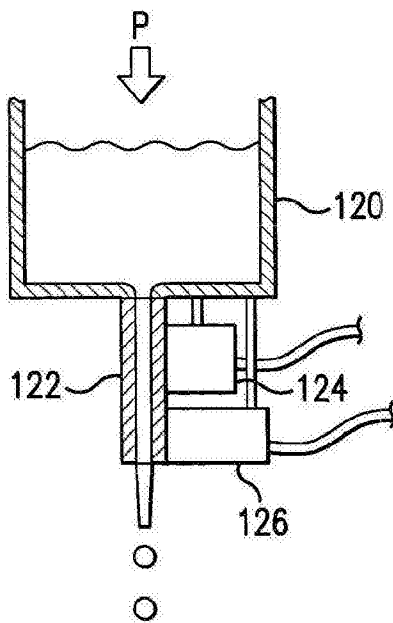


图 2B

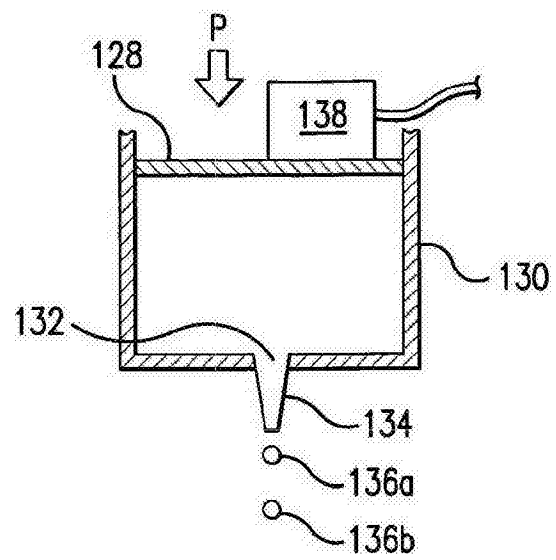


图 2C

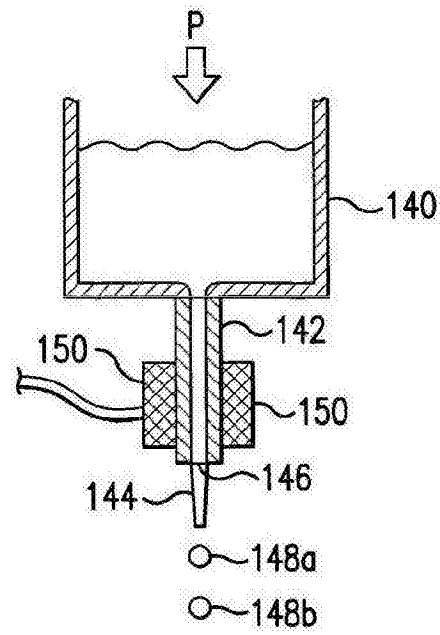


图 2D

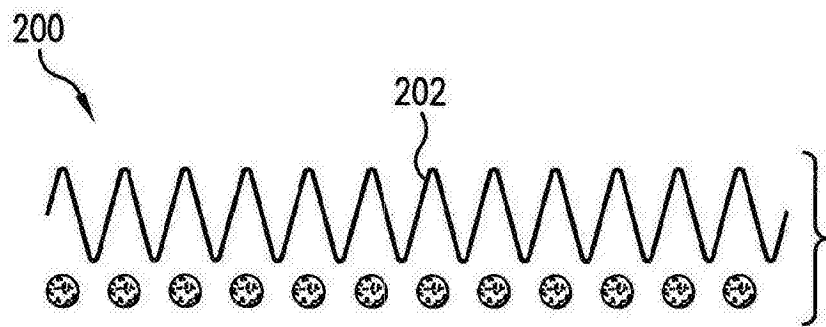


图 3(现有技术)

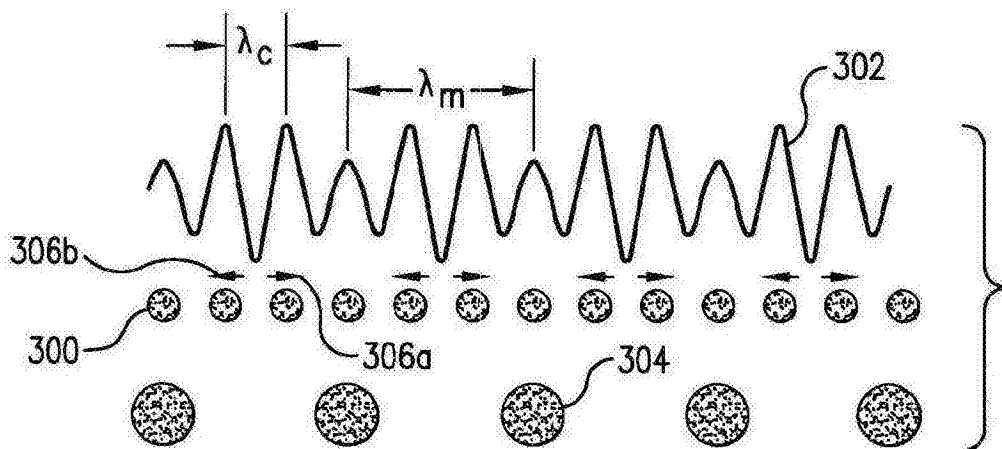


图 4

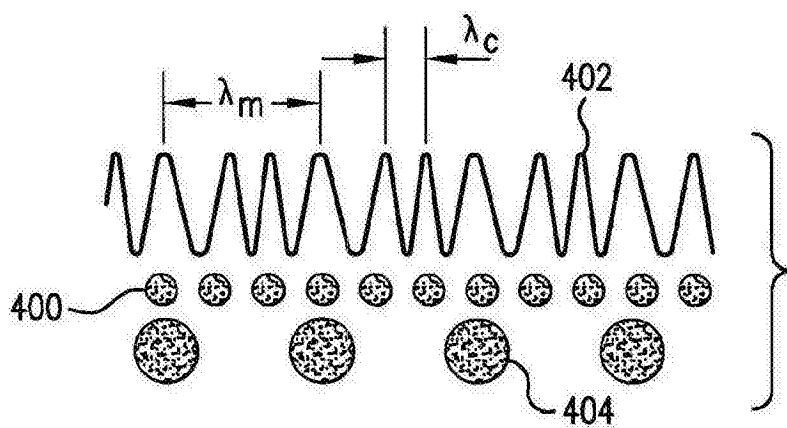


图 5

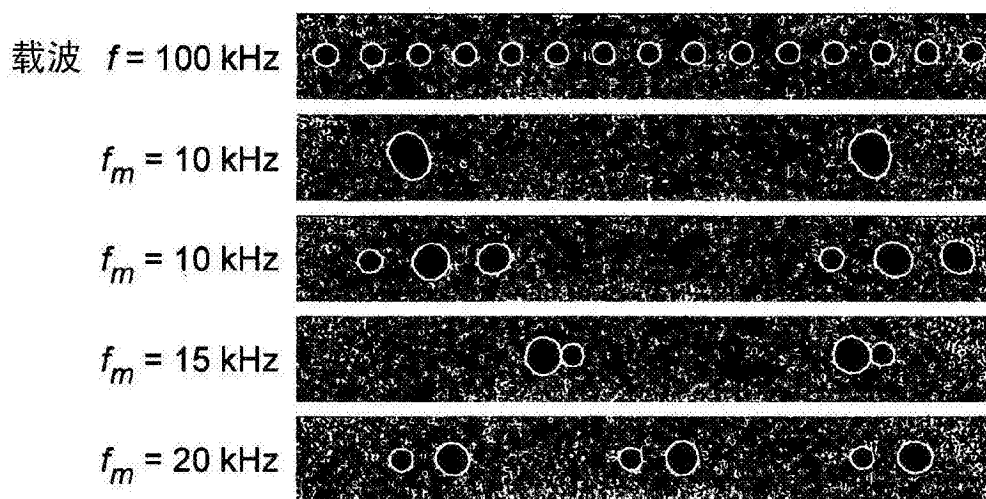


图 6

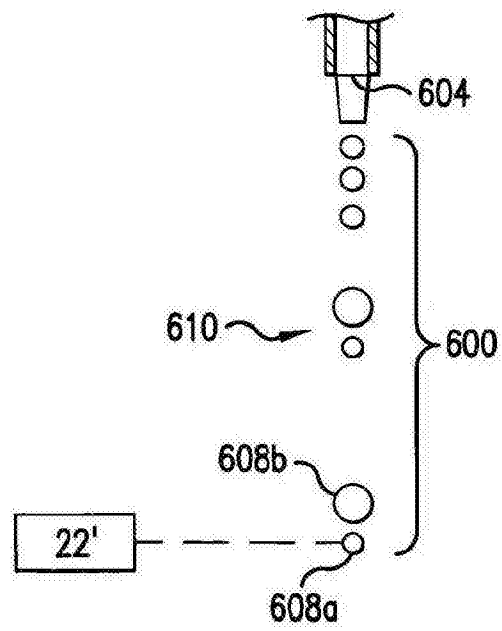


图 7

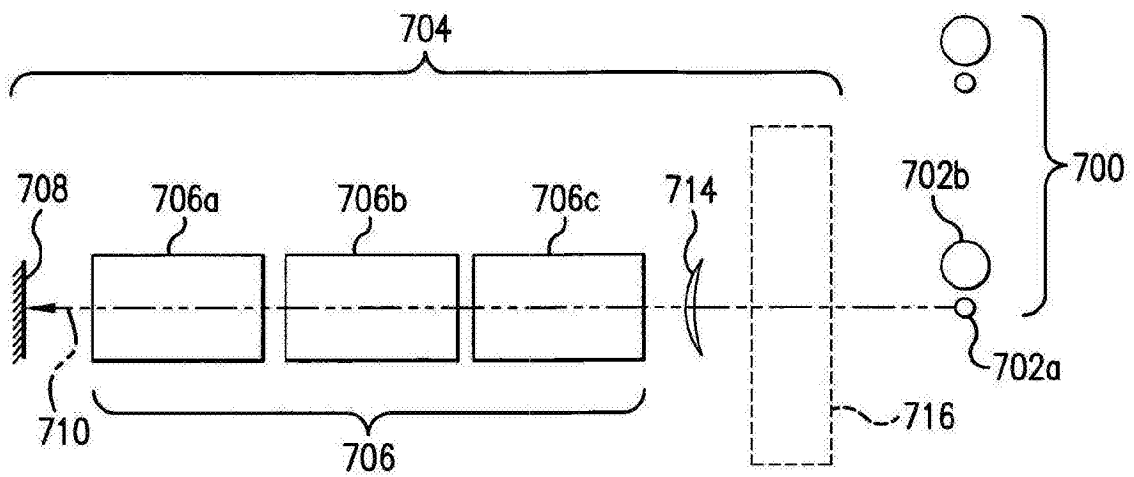


图 8

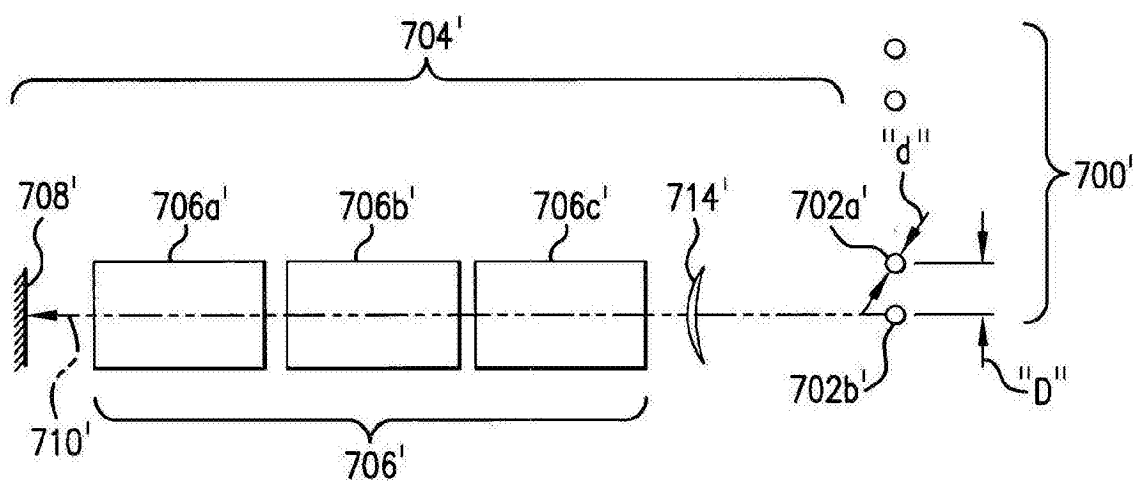


图 8A

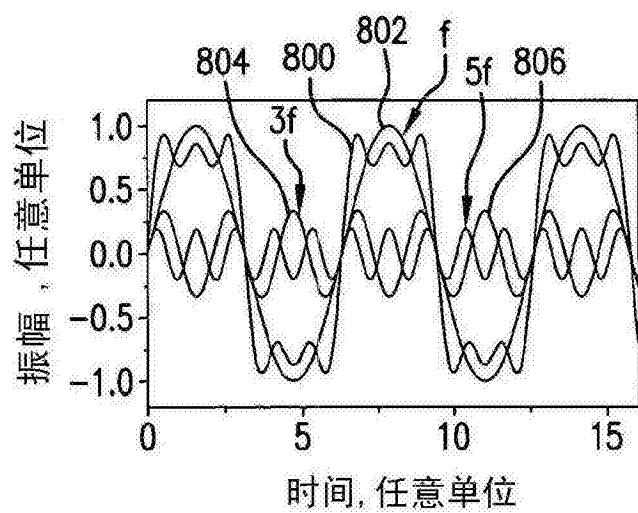


图 9

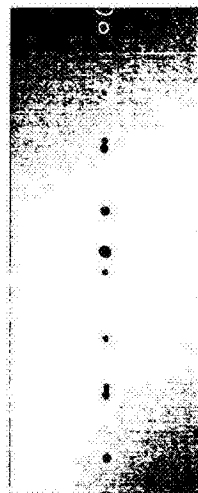


图 10

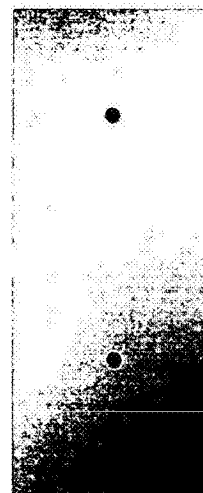


图 11

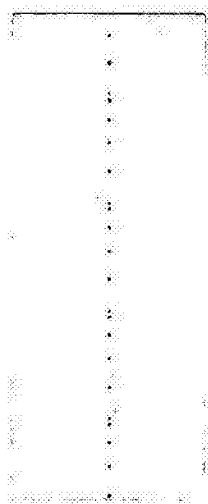


图 12C

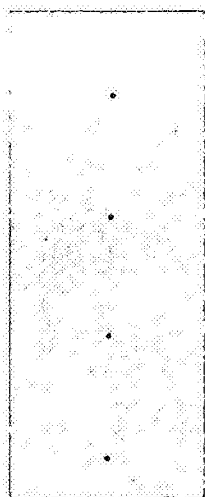


图 12D

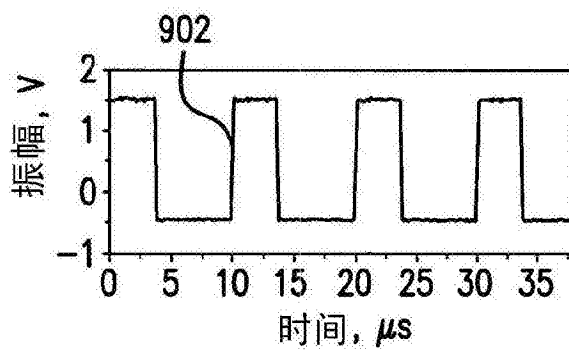


图 12A

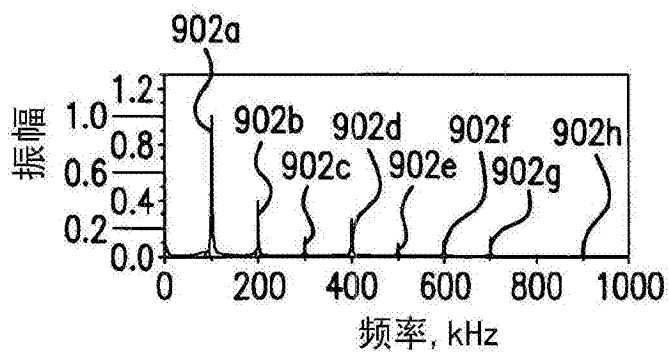


图 12B

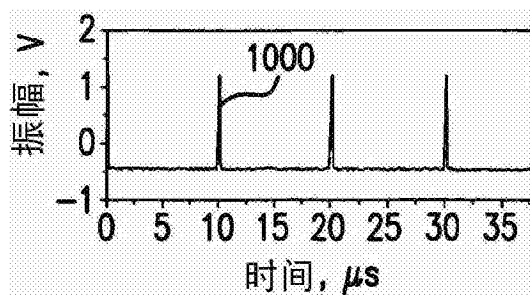


图 13A

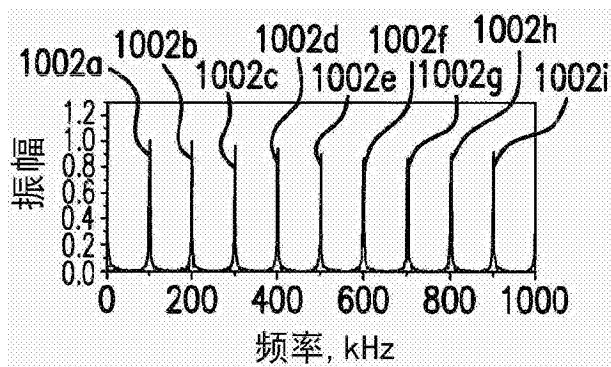


图 13B

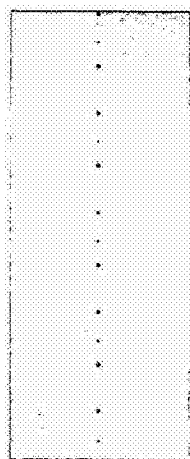


图 13C

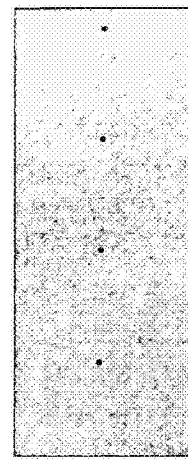


图 13D

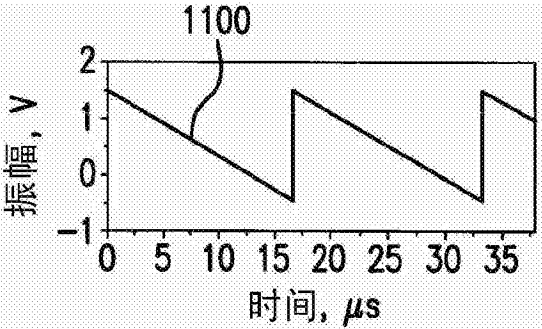


图 14A

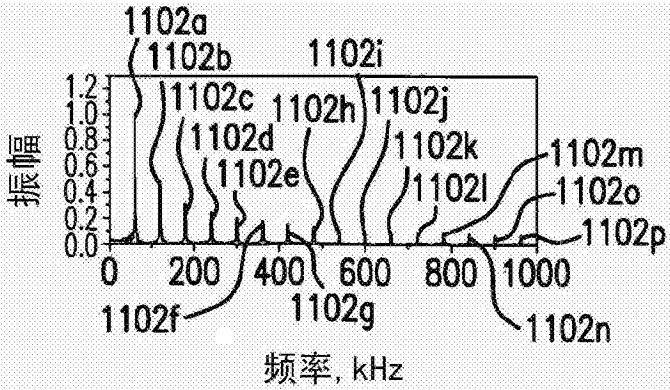


图 14B

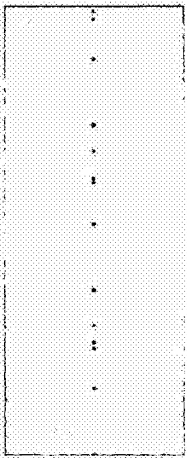


图 14C

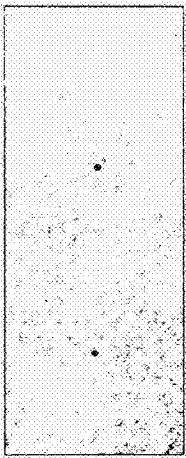


图 14D

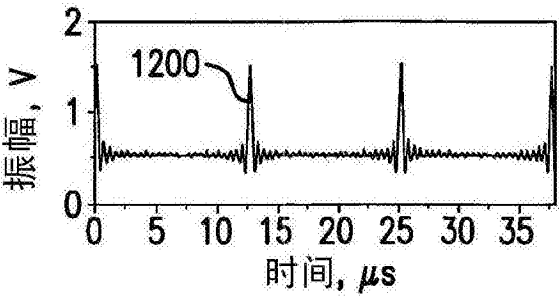


图 15A

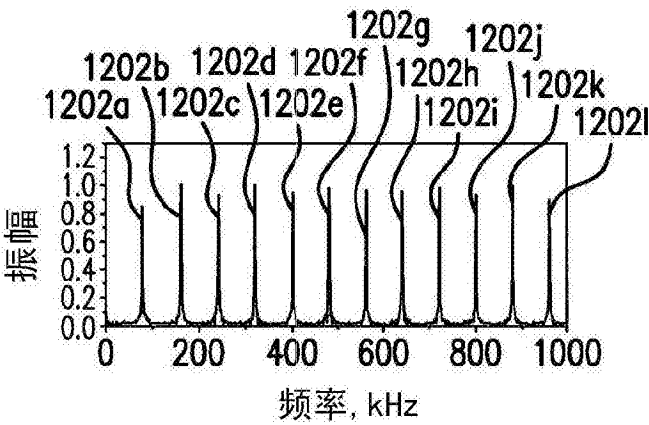


图 15B

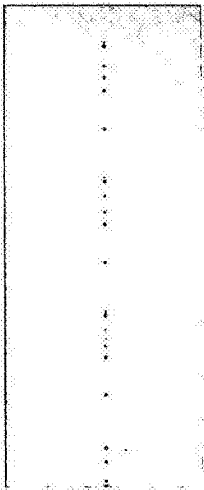


图 15C

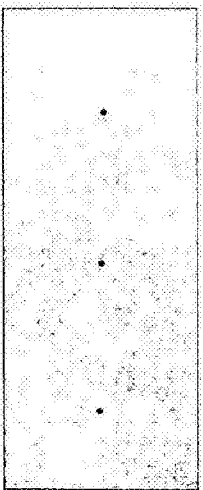


图 15D