



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 102064828 B

(45) 授权公告日 2013. 07. 17

(21) 申请号 201010546843. 3

(22) 申请日 2010. 11. 11

(30) 优先权数据

2009-258872 2009. 11. 12 JP

(73) 专利权人 精工爱普生株式会社

地址 日本东京都

(72) 发明人 弥道幸治

(74) 专利代理机构 北京三友知识产权代理有限公司 11127

代理人 李辉 黄纶伟

(51) Int. Cl.

H01S 5/0687(2006. 01)

H03L 7/26(2006. 01)

(56) 对比文件

CN 102013891 A, 2011. 04. 13, 权利要求
1-7、说明书第 [0041]-[0119] 段、图 1-14.CN 101800545 A, 2010. 02. 05, 权利要求
1-18、说明书第 [0079]-[0117] 段、图 2-23.US 6320472 B1, 2001. 11. 20, 说明书第 2 栏
第 48 行至第 3 栏第 26 行, 第 4 栏第 15-31 行,
第 5 栏第 9 行至第 6 栏第 9 行, 第 7 栏第 6 行至
第 8 栏第 30 行、图 2-8.

US 7378913 B2, 2008. 05. 27, 全文.

US 6888780 B2, 2005. 05. 03, 全文.

审查员 魏晶瑶

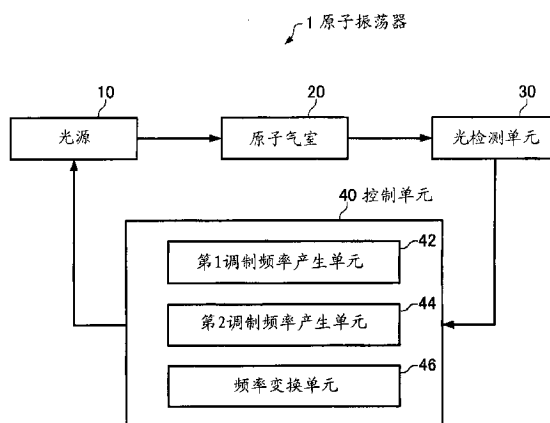
权利要求书1页 说明书12页 附图14页

(54) 发明名称

原子振荡器

(57) 摘要

本发明通过提高设计自由度而提供结构比较简单的原子振荡器。原子振荡器 (1) 包含光源 (10)、光检测单元 (30) 和控制单元 (40)。光源 (10) 产生中心频率为 f_1 且具有频率依次相差 Δf 的多个频率成分的第 1 光和中心频率为 f_2 且具有频率依次相差 Δf 的多个频率成分的第 2 光。光检测单元 (30) 检测透射过碱金属原子的包含第 1 光以及第 2 光的光的强度。控制单元 (40) 根据光检测单元 (30) 的检测结果进行控制, 使得第 1 光的规定频率成分与第 2 光的规定频率成分的频率差与相当于碱金属原子的 2 个基态能级的能量差的频率相等。第 1 光的中心频率 f_1 与第 2 光的中心频率 f_2 的频率差与相当于碱金属原子的 2 个基态能级的能量差的频率不同。



1. 一种原子振荡器,其利用通过向碱金属原子照射共振光对而产生的电磁诱导透明现象,该原子振荡器具有:

光源,其产生中心频率为 f_1 的第 1 光和中心频率为 f_2 的第 2 光,该第 1 光具有频率依次相差 Δf 的多个频率成分,该第 2 光具有频率依次相差 Δf 的多个频率成分;

光检测单元,其检测透射过所述碱金属原子的包含所述第 1 光和所述第 2 光的光的强度;以及

控制单元,其根据所述光检测单元的检测结果来进行控制,使得所述第 1 光的规定频率成分与所述第 2 光的规定频率成分之间的频率差与相当于所述碱金属原子的 2 个基态能级的能量差的频率相等,

其中,所述第 1 光的中心频率 f_1 与所述第 2 光的中心频率 f_2 之间的频率差与相当于所述碱金属原子的 2 个基态能级的能量差的频率不同,

所述第 1 光的除中心频率 f_1 以外的规定频率成分与所述第 2 光的除中心频率 f_2 以外的规定频率成分的对、或者所述第 1 光的中心频率 f_1 与所述第 2 光的除中心频率 f_2 以外的规定频率成分的对、或者所述第 1 光的除中心频率 f_1 以外的规定频率成分与所述第 2 光的中心频率 f_2 的对中的任意一对成为共振光对。

2. 根据权利要求 1 所述的原子振荡器,其中,

所述控制单元具有:

第 1 调制频率产生单元,其根据所述光检测单元的检测结果,产生具有第 1 调制频率 f_{m1} 的第 1 信号;以及

第 2 调制频率产生单元,其产生具有第 2 调制频率 f_{m2} 的第 2 信号,

所述光源根据所述第 1 信号以及所述第 2 信号来调制规定频率 f_0 的信号,产生满足 $f_1=f_0+f_{m1}$ 以及 $f_2=f_0-f_{m1}$ 、且 $\Delta f=f_{m2}$ 的所述第 1 光以及所述第 2 光。

3. 根据权利要求 2 所述的原子振荡器,其中,

所述第 2 调制频率产生单元对所述第 1 信号进行频率变换,产生所述第 2 信号。

4. 根据权利要求 2 所述的原子振荡器,其中,

所述第 2 调制频率产生单元与所述第 1 信号独立地在所述第 2 调制频率 f_{m2} 下进行振荡。

5. 根据权利要求 4 所述的原子振荡器,其中,

该原子振荡器具有对所述第 1 信号进行频率变换来产生规定频率的信号的频率变换单元。

6. 根据权利要求 1 所述的原子振荡器,其中,

所述控制单元具有:

第 2 调制频率产生单元,其根据所述光检测单元的检测结果来产生具有第 2 调制频率 f_{m2} 的第 2 信号;

第 1 调制频率产生单元,其对所述第 2 信号进行频率变换,产生具有第 1 调制频率 f_{m1} 的第 1 信号,

所述光源根据所述第 1 信号以及所述第 2 信号来调制规定频率 f_0 的信号,产生满足 $f_1=f_0+f_{m1}$ 以及 $f_2=f_0-f_{m1}$ 、且 $\Delta f=f_{m2}$ 的所述第 1 光以及所述第 2 光。

原子振荡器

技术领域

[0001] 本发明涉及原子振荡器。

背景技术

[0002] 基于电磁诱导透明 (EIT:Electromagnetically Induced Transparency) 方式 (有时也称为 CPT(Coherent Population Trapping, 相干布局囚禁) 方式) 的原子振荡器是利用以下现象的振荡器, 即: 当向碱金属原子同时照射波长 (频率) 不同的 2 种共振光时, 2 种共振光的吸收停止。

[0003] 众所周知, 如图 13(A) 所示, 可使用 Λ 型 3 能级系统模型来说明碱金属原子与 2 种共振光的相互作用机构。碱金属原子具有 2 个基态能级, 当将以下的共振光 1、或共振光 2 分别单独照射到碱金属原子时, 众所周知会产生光吸收, 其中, 共振光 1 具有相当于基态能级 1 与激发能级之间的能量差的波长 (频率 f_1), 共振光 2 具有相当于基态能级 2 与激发能级之间的能量差的波长 (频率 f_2)。然而, 如图 13(B) 所示, 当向该碱金属原子同时照射频率差 $f_1 - f_2$ 与相当于基态能级 1 与基态能级 2 的能量差的频率精确地一致的共振光 1 和共振光 2 时, 会成为 2 个基态能级的重合状态, 即量子干涉状态, 从而产生透明化 (EIT) 现象, 即: 向激发能级的激发停止, 共振光 1 和共振光 2 透射过碱金属原子。利用该 EIT 现象, 通过检测并控制共振光 1 与共振光 2 之间的频率差 $f_1 - f_2$ 偏离了相当于基态能级 1 与基态能级 2 的能量差的频率时的光吸收动作的急剧变化, 能够制造高精度的振荡器。

[0004] 图 14 是现有的基于 CPT 方式的原子振荡器的一般结构的概略图。如图 14 所示, 在现有的基于 CPT 方式的原子振荡器中, 利用相当于基态能级 1 与基态能级 2 的能量差 ΔE_{12} 的频率的 1/2 即调制频率 f_{m1} 来对由电流驱动电路产生的频率 f_0 ($= v/\lambda_0$; v 为光的速度, λ_0 为激光的中心波长) 的驱动电流进行调制, 由此使半导体激光器产生频率为 $f_1 = f_0 + f_{m1}$ 的共振光 1 和频率为 $f_2 = f_0 - f_{m1}$ 的共振光 2 (图 13(B)), 使原子气室 (cell) 中含有的气体状的碱金属原子产生 EIT 现象。该原子振荡器控制压控石英振荡器 (VCXO: Voltage Controlled Crystal Oscillator) 的振荡频率, 使得透射过原子气室的光的检测量达到最大, 并利用 PLL (Phase Locked Loop: 锁相环) 以倍增率 N/R (N, R 均为正整数) 对该振荡频率进行倍增, 生成相当于 ΔE_{12} 的频率的 1/2 即调制频率 f_{m1} 的信号。根据这样的结构, 压控石英振荡器 (VCXO) 极其稳定地持续进行振荡动作, 所以能够产生频率稳定度极高的振荡信号。此外, 这里所说的原子气室由气体状的碱金属原子和封入该碱金属原子的容器构成, 随后将对其进行说明。

[0005] 【专利文献 1】美国专利第 6320472 号说明书

[0006] 但是, 在现有的原子振荡器中, 必须特意准备直接或利用谐波来产生调制频率 f_{m1} 的 PLL 等振荡器, 因此, 设计自由度受到限制, 其中, 该调制频率 f_{m1} 与相当于 ΔE_{12} 的频率 (例如, 如果是铯原子, 则为 9.19263...GHz) 的 1/2 的频率精确地一致。

[0007] 另外, 在调制频率 f_{m1} 与相当于 ΔE_{12} 的频率的 1/2 的频率精确地一致的状态下是稳定的, 所以在现有的原子振荡器中, 根据 PLL 的倍增率 N/R 精度的不同, 有时不能使压控

石英振荡器 (VCXO) 精确地在期望的频率 (公称频率) 下进行振荡。因此还存在如下这样的情况:例如在压控石英振荡器 (VCXO) 的振荡频率为 9.999MHz 时,仅仅为了获得 10MHz 的公称频率,就需要高精度的频率变换电路,从而无法利用简单的结构来实现 (参照图 14)。

发明内容

[0008] 本发明是鉴于上述问题点而完成的,根据本发明的几个方式,可通过提高设计自由度来提供结构比较简单的原子振荡器。

[0009] (1) 本发明是利用通过向碱金属原子照射共振光对而产生的电磁诱导透明现象的原子振荡器,该原子振荡器具有:光源,其产生中心频率为 f_1 的第 1 光和中心频率为 f_2 的第 2 光,该第 1 光具有频率依次相差 Δf 的多个频率成分,该第 2 光具有频率依次相差 Δf 的多个频率成分;光检测单元,其检测透射过所述碱金属原子的包含所述第 1 光和所述第 2 光的光的强度;以及控制单元,其根据所述光检测单元的检测结果来进行控制,使得所述第 1 光的规定频率成分与所述第 2 光的规定频率成分的频率差与相当于所述碱金属原子的 2 个基态能级的能量差的频率相等,其中,所述第 1 光的中心频率 f_1 与所述第 2 光的中心频率 f_2 的频率差不同于相当于所述碱金属原子的 2 个基态能级的能量差的频率。

[0010] 在现有的 CPT 方式的原子振荡器中,控制为使得 2 种共振光的频率差与相当于碱金属原子的 2 个基态能级的能量差的频率一致,与此相对,在本发明的原子振荡器中,控制为使得第 1 光的规定频率成分与第 2 光的规定频率成分之间的频率差与相当于碱金属原子的 2 个基态能级的能量差的频率相等。即,控制为使得第 1 光的规定频率成分和第 2 光的规定频率成分成为 2 种共振光 (但是,不会出现第 1 光的中心频率 f_1 与第 2 光的中心频率 f_2 都为共振光的情况)。

[0011] 总之,在本发明的原子振荡器中,以如下方式进行设计即可:使得第 1 光的除中心频率 f_1 以外的规定频率成分与第 2 光的除中心频率 f_2 以外的规定频率成分的对、或者第 1 光的中心频率 f_1 与第 2 光的除中心频率 f_2 以外的规定频率成分的对、或者第 1 光的除中心频率 f_1 以外的规定频率成分与第 2 光的中心频率 f_2 的对中的任意一对成为共振光对。

[0012] 因此,根据本发明,与现有的原子振荡器相比,设计自由度得到提高,所以能够提供结构比较简单的原子振荡器。

[0013] (2) 在该原子振荡器中,也可以是,所述控制单元具有:第 1 调制频率产生单元,其根据所述光检测单元的检测结果,产生具有第 1 调制频率 f_{m1} 的第 1 信号;以及第 2 调制频率产生单元,其产生具有第 2 调制频率 f_{m2} 的第 2 信号,所述光源根据所述第 1 信号以及所述第 2 信号来调制规定频率 f_0 的信号,产生满足 $f_1 = f_0 + f_{m1}$ 以及 $f_2 = f_0 - f_{m1}$ 、且 $\Delta f = f_{m2}$ 的所述第 1 光以及所述第 2 光。

[0014] 在本发明的原子振荡器中,只要第 1 光的规定频率成分 ($f_1 + j \times \Delta f$) 与第 2 光的规定频率成分 ($f_2 + k \times \Delta f$) 之间的频率差、即 $(2 \times f_{m1} + (j - k) \times f_{m2})$ (j, k 为整数,且 $j \neq k$) 与相当于碱金属原子的 2 个基态能级的能量差的频率一致即可。

[0015] 因此,根据本发明,只要选择满足上述条件的第 1 调制频率 f_{m1} 和第 2 调制频率 f_{m2} 以便直接或采用简单的分频器等来获得期望的频率,就能够实现结构比较简单的原子振荡器。

[0016] (3) 在该原子振荡器中,也可以是,所述第 2 调制频率产生单元对所述第 1 信号进

行频率变换,产生所述第 2 信号。

[0017] (4) 在该原子振荡器中,也可以是,所述第 2 调制频率产生单元与所述第 1 信号独立地在所述第 2 调制频率 f_{m2} 下进行振荡。

[0018] (5) 该原子振荡器还可以包含对所述第 1 信号进行频率变换来产生规定频率的信号的频率变换单元。

[0019] (6) 在该原子振荡器中,也可以是,所述控制单元具有:第 2 调制频率产生单元,其根据所述光检测单元的检测结果来产生具有第 2 调制频率 f_{m2} 的第 2 信号;第 1 调制频率产生单元,其对所述第 2 信号进行频率变换,产生具有第 1 调制频率 f_{m1} 的第 1 信号,所述光源根据所述第 1 信号以及所述第 2 信号来调制规定频率 f_0 的信号,产生满足 $f_1 = f_0 + f_{m1}$ 以及 $f_2 = f_0 - f_{m1}$ 、且 $\Delta f = f_{m2}$ 的所述第 1 光以及所述第 2 光。

[0020] 在本发明的原子振荡器中,只要第 1 光的规定频率成分 $(f_1 + j \times \Delta f)$ 与第 2 光的规定频率成分 $(f_2 + k \times \Delta f)$ 之间的频率差、即 $(2 \times f_{m1} + (j - k) \times f_{m2})$ (j, k 为整数,且 $j \neq k$) 与相当于碱金属原子的 2 个基态能级的能量差的频率一致即可。

[0021] 因此,根据本发明,只要选择满足上述条件的第 1 调制频率 f_{m1} 和第 2 调制频率 f_{m2} 以便直接或采用简单的分频器等来获得期望的频率,就能够实现结构比较简单的原子振荡器。

附图说明

[0022] 图 1 是本实施方式的原子振荡器的功能框图。

[0023] 图 2(A) 是示出碱金属原子的 A 型 3 能级模型与照射光 1 以及照射光 2 之间的关系的第 1 例的图,图 2(B) 是示出照射光 1 以及照射光 2 的频谱的第 1 例的图。

[0024] 图 3(A) 是示出碱金属原子的 Λ 型 3 能级模型与照射光 1 以及照射光 2 之间的关系的第 2 例的图,图 3(B) 是示出照射光 1 以及照射光 2 的频谱的第 2 例的图。

[0025] 图 4(A) 是示出碱金属原子的 Λ 型 3 能级模型与照射光 1 以及照射光 2 之间的关系的第 3 例的图,图 4(B) 是示出照射光 1 以及照射光 2 的频谱的第 3 例的图。

[0026] 图 5 是示出第 1 实施方式的原子振荡器的结构的图。

[0027] 图 6 是用于对第 1 实施方式的原子振荡器中的照射光 1 以及照射光 2 的一例进行说明的图。

[0028] 图 7 是示出第 1 实施方式的原子振荡器中的第 2 调制频率产生电路的结构例的图。

[0029] 图 8 是示出第 1 实施方式的原子振荡器的变形例的结构的图。

[0030] 图 9 是示出第 2 实施方式的原子振荡器的结构的图。

[0031] 图 10 是用于对第 2 实施方式的原子振荡器中的照射光 1 以及照射光 2 的一例进行说明的图。

[0032] 图 11 是示出第 2 实施方式的原子振荡器中的第 1 调制频率产生电路的结构例的图。

[0033] 图 12 是示出第 3 实施方式的原子振荡器的结构的图。

[0034] 图 13(A) 是示意性地示出碱金属原子的能级的图,图 13(B) 是示出 2 种共振光的频谱的图。

[0035] 图 14 是现有的基于 CPT 方式的原子振荡器的一般结构的概略图。

[0036] 标号说明

[0037] 1 原子振荡器 ;10 光源 ;20 原子气室 ;30 光检测单元 ;40 控制单元 ;42 第 1 调制频率产生单元 ;44 第 2 调制频率产生单元 ;46 频率变换单元 ;100A ~ 100D 原子振荡器 ;110 半导体激光器 ;120 原子气室 ;130 光检测器 ;140 检波电路 ;150 低频振荡器 ;160 电流驱动电路 ;170 检波电路 ;180 低频振荡器 ;190 检波用调制电路 ;200 第 1 调制频率产生电路 ;210 第 2 调制频率产生电路 ;211 频率设定部 ;212 地址运算部 ;213 波形存储器 ;214D/A 转换器 ;215 低通滤波器 ;220 电子光学调制器 (EOM) ;230 频率变换电路 ;300 第 1 调制频率产生电路 ;301 分频器 ;302 相位比较器 ;303 环路滤波器 ;304 压控振荡器 (VCO) ;305 分频器 ;310 第 2 调制频率产生电路 ;410 第 2 调制频率产生电路。

具体实施方式

[0038] 下面,利用附图来详细说明本发明的优选实施方式。另外,以下说明的实施方式并不是要对权利要求中记载的本发明的内容进行不恰当的限定。并且,以下说明的所有结构不一定是本发明的必要技术特征。

[0039] 图 1 是本实施方式的原子振荡器的功能框图。

[0040] 本实施方式的原子振荡器 1 构成为包括:光源 10、原子气室 20、光检测单元 30 以及控制单元 40。

[0041] 光源 10 产生中心频率为 f_1 的第 1 光和中心频率为 f_2 的第 2 光,该第 1 光具有频率依次相差 Δf 的多个频率成分,该第 2 光具有频率依次相差 Δf 的多个频率成分。

[0042] 在原子气室 20 中含有气体状的碱金属原子,由光源 10 照射第 1 光和第 2 光。以下,分别将第 1 光和第 2 光称为“照射光 1”以及“照射光 2”。

[0043] 光检测单元 30 检测透射过碱金属原子的包含照射光 1 和照射光 2 的光的强度。

[0044] 控制单元 40 根据光检测单元 30 的检测结果来进行控制,使得照射光 1 的规定频率成分与照射光 2 的规定频率成分之间的频率差与相当于碱金属原子的 2 个基态能级的能量差的频率相等。其中,在本实施方式中,照射光 1 的中心频率 f_1 与照射光 2 的中心频率 f_2 之间的频率差与相当于碱金属原子的 2 个基态能级的能量差的频率不同。

[0045] 即,控制单元 40 控制为,使得照射光 1 的除中心频率 f_1 以外的规定频率成分与照射光 2 的除中心频率 f_2 以外的规定频率成分的对、或者照射光 1 的中心频率 f_1 与照射光 2 的除中心频率 f_2 以外的规定频率成分的对、或者照射光 1 的除中心频率 f_1 以外的规定频率成分与照射光 2 的中心频率 f_2 的对中的任意一对成为共振光对,且它们之间的频率差与相当于碱金属原子的 2 个基态能级的能量差的频率一致。

[0046] 如图 1 所示,这样的控制单元 40 可构成为包括:第 1 调制频率产生单元 42 和第 2 调制频率产生单元 44。

[0047] 例如,可以构成为,第 1 调制频率产生单元 42 根据光检测单元 30 的检测结果,产生具有第 1 调制频率 f_{m1} 的第 1 信号,第 2 调制频率产生单元 44 产生具有第 2 调制频率 f_{m2} 的第 2 信号。这里,第 2 调制频率产生单元 44 也可以对由第 1 调制频率产生单元 42 产生的第 1 信号进行频率变换来产生第 2 信号,还可以构成为与第 1 信号独立地在第 2 调制频率 f_{m2} 下进行振荡。在后者的情况下,控制单元 40 还可以包括对第 1 信号进行频率变换来

产生规定频率的信号的频率变换单元 46。

[0048] 另外,例如也可以构成为,第 2 调制频率产生单元 44 根据光检测单元 30 的检测结果来产生具有第 2 调制频率 f_{m2} 的第 2 信号,第 1 调制频率产生单元 42 对由第 2 调制频率产生单元 44 产生的第 2 信号进行频率变换,来产生具有第 1 调制频率 f_{m1} 的第 1 信号。

[0049] 并且,无论在何种情况下,光源 10 均只要根据由第 1 调制频率产生单元 42 产生的第 1 信号以及由第 2 调制频率产生单元 44 产生的第 2 信号,调制规定频率 f_0 的信号,产生满足 $f_1 = f_0 + f_{m1}$ 、 $f_2 = f_0 - f_{m1}$ 且 $\Delta f = f_{m2}$ 的照射光 1 和照射光 2 即可。

[0050] 图 2(A) 和图 2(B)、图 3(A) 和图 3(B)、图 4(A) 和图 4(B) 分别是用于说明在本实施方式的原子振荡器中产生的照射光 1 以及照射光 2 的第 1 例、第 2 例、第 3 例的图。图 2(A)、图 3(A) 以及图 4(A) 是示出碱金属原子的 Λ 型 3 能级模型与照射光 1 以及照射光 2 之间的关系的图,图 2(B)、图 3(B)、图 4(B) 是示出照射光 1 以及照射光 2 的频谱的图。

[0051] 如图 2(B)、图 3(B) 以及图 4(B) 所示,在第 1 例、第 2 例、第 3 例中,均是相对于频率 $f_0 (= v/\lambda_0)$,在上侧边带存在照射光 1、在下侧边带存在照射光 2,该照射光 1 具有频率依次相差 f_{m2} 的多个频率成分,该照射光 2 具有频率依次相差 f_{m2} 的多个频率成分。照射光 1 的中心频率 $f_1 = f_0 + f_{m1}$,照射光 2 的中心频率 $f_2 = f_0 - f_{m1}$ 。

[0052] 如图 2(A) 以及图 2(B) 所示,在第 1 例中,照射光 1 的频率成分 $f_1 - f_{m2}$ 与照射光 2 的频率成分 $f_2 + f_{m2}$ 之间的频率差与相当于碱金属原子的基态能级 1 与基态能级 2 之间的能量差 ΔE_{12} 的频率相等。因此,碱金属原子将照射光 1 的频率成分 $f_1 - f_{m2}$ 和照射光 2 的频率成分 $f_2 + f_{m2}$ 作为共振光对,产生 EIT 现象。

[0053] 如图 3(A) 以及图 3(B) 所示,在第 2 例中,照射光 1 的频率成分 $f_1 + f_{m2}$ 与照射光 2 的频率成分 $f_2 - f_{m2}$ 之间的频率差与相当于碱金属原子的基态能级 1 与基态能级 2 之间的能量差 ΔE_{12} 的频率一致。因此,碱金属原子将照射光 1 的频率成分 $f_1 + f_{m2}$ 和照射光 2 的频率成分 $f_2 - f_{m2}$ 作为共振光对,产生 EIT 现象。

[0054] 如图 4(A) 以及图 4(B) 所示,在第 3 例中,照射光 1 的中心频率 f_1 与照射光 2 的频率成分 $f_2 + f_{m2}$ 之间的频率差与相当于碱金属原子的基态能级 1 与基态能级 2 之间的能量差 ΔE_{12} 的频率一致。因此,碱金属原子将照射光 1 的中心频率 f_1 和照射光 2 的频率成分 $f_2 + f_{m2}$ 作为共振光对,产生 EIT 现象。

[0055] 下面,对本实施方式的原子振荡器的更具体的结构进行说明。

[0056] (1) 第 1 实施方式

[0057] 图 5 是示出第 1 实施方式的原子振荡器的结构的图。

[0058] 如图 5 所示,第 1 实施方式的原子振荡器 100A 构成为包括:半导体激光器 110、原子气室 120、光检测器 130、检波电路 140、低频振荡器 150、电流驱动电路 160、检波电路 170、低频振荡器 180、检波用调制电路 190、第 1 调制频率产生电路 200 以及第 2 调制频率产生电路 210。

[0059] 原子气室 120 是在容器中封入了气体状的碱金属原子(钠(Na)原子、铷(Rb)原子、铯(Cs)原子等)而成的。

[0060] 当向该原子气室 120 同时照射具有与相当于碱金属原子的 2 个基态能级的能量差的频率一致的频率差的共振光对时,碱金属原子会产生 EIT 现象。例如,如果碱金属原子是铯原子,则相当于 D1 线中的基态能级 1 与基态能级 2 的能量差的频率是 9.19263...GHz,因

此,当同时照射频率差为 9.19263...GHz 的共振光对时,会产生 EIT 现象。

[0061] 半导体激光器 110 向原子气室 120 中含有的碱金属原子照射包含照射光 1 和照射光 2 的激光。具体而言,由电流驱动电路 160 输出的驱动电流来控制半导体激光器 110 射出的激光的中心频率 f_0 (中心波长 λ_0),并且,由第 1 调制频率产生电路 200 的输出信号(以下称为“第 1 调制信号”)以及第 2 调制频率产生电路 210 的输出信号(以下称为“第 2 调制信号”)来对半导体激光器 110 射出的激光实施调制。即,可通过将具有第 1 调制信号频率成分和第 2 调制信号频率成分的交流电流叠加在电流驱动电路 160 的驱动电流中,来对半导体激光器 110 射出的激光实施调制。

[0062] 另外,半导体激光器 110 可以是端面发光激光器 (Edge Emitting Laser),也可以是垂直谐振腔面发光激光器 (VCSEL: Vertical Cavity Surface Emitting Laser) 等面发光激光器。

[0063] 光检测器 130 检测透射过原子气室 120 的光,输出与检测到的光量对应的信号强度的信号。光检测器 130 的输出信号被输入至检波电路 140 以及检波电路 170。

[0064] 检波电路 140 使用在几 Hz ~ 几百 Hz 左右的低频率下进行振荡的低频振荡器 150 的振荡信号,对光检测器 130 的输出信号进行同步检波。

[0065] 电流驱动电路 160 产生与检波电路 140 的输出信号对应的大小的驱动电流,提供给半导体激光器 110,控制激光的中心频率 f_0 (中心波长 λ_0)。另外,为了能够进行检波电路 140 的同步检波,要将低频振荡器 150 的振荡信号(与提供给检波电路 140 的振荡信号相同)叠加在电流驱动电路 160 产生的驱动电流中。

[0066] 由经过半导体激光器 110、原子气室 120、光检测器 130、检波电路 140、电流驱动电路 160 的反馈环路来对激光的中心频率 f_0 (中心波长 λ_0) 进行微调,使其稳定。

[0067] 检波电路 170 使用在几 Hz ~ 几百 Hz 左右的低频率下进行振荡的低频振荡器 180 的振荡信号,对光检测器 130 的输出信号进行同步检波。

[0068] 第 1 调制频率产生电路 200 产生具有与检波电路 170 的输出信号的电压对应的第 1 调制频率 f_{m1} 的第 1 调制信号。

[0069] 该第 1 调制信号由低频振荡器 180 的振荡信号(与提供给检波电路 170 的振荡信号相同)实施调制,并被提供给半导体激光器 110。由此,在使第 1 调制频率 f_{m1} 微微地扫频的同时,进行检波电路 170 的同步检波,对第 1 调制频率 f_{m1} 进行微调,使得光检测器 130 的输出信号最大。

[0070] 第 1 调制信号还被提供给第 2 调制频率产生电路 210,第 2 调制频率产生电路 210 对第 1 调制信号进行频率变换,使其成为具有第 2 调制频率 f_{m2} 的第 2 调制信号。

[0071] 然后,利用第 1 调制信号和第 2 调制信号对半导体激光器 110 射出的激光施加调制,产生照射光 1 和照射光 2。

[0072] 另外,半导体激光器 110、原子气室 120、光检测器 130 分别对应于图 1 的光源 10、原子气室 20、光检测单元 30。并且,由检波电路 140、低频振荡器 150、电流驱动电路 160、检波电路 170、低频振荡器 180、检波用调制电路 190、第 1 调制频率产生电路 200 以及第 2 调制频率产生电路 210 构成的电路对应于图 1 的控制单元 40。另外,第 1 调制频率产生电路 200 和第 2 调制频率产生电路 210 分别对应于图 1 的第 1 调制频率产生单元 42 和第 2 调制频率产生单元 44。

[0073] 在这种结构的原子振荡器 100A 中,如果半导体激光器 110 射出的照射光 1 的规定频率成分与照射光 2 的规定频率成分之间的频率差与相当于原子气室 120 中含有的碱金属原子的 2 个基态能级的能量差的频率精确地一致,则碱金属原子不会产生 EIT 现象,所以,光检测器 130 的检测量是随照射光 1 与照射光 2 的频率而极敏感地变化的。因此,利用经过半导体激光器 110、原子气室 120、光检测器 130、检波电路 170 以及第 1 调制频率产生电路 200 和检波用调制电路 190 或第 2 调制频率产生电路 210 的 2 个反馈环路,实施反馈控制,使得照射光 1 的规定频率成分与照射光 2 的规定频率成分之间的频率差与相当于碱金属原子的 2 个基态能级的能量差的频率极精确地一致。其结果是,第 1 调制频率和第 2 调制频率成为极其稳定的频率,因此第 1 调制信号或第 2 调制信号可作为原子振荡器 100A 的输出信号(时钟输出)。

[0074] 图 6 是用于说明第 1 实施方式的原子振荡器中的照射光 1 以及照射光 2 的一例的图。

[0075] 图 6 所示的照射光 1 和照射光 2 之间的关系与图 2(B) 所示的照射光 1 和照射光 2 之间的关系相同,但也可以是图 3(B) 或图 4(B) 所示的关系等,即,只要满足以下关系即可:照射光 1 的规定频率成分与照射光 2 的规定频率成分之间的频率差与相当于碱金属原子的 2 个基态能级的能量差 ΔE_{12} 的频率一致(其中,照射光 1 的中心频率 f_1 与照射光 2 的中心频率 f_2 的频率差与相当于 ΔE_{12} 的频率不一致)。

[0076] 根据原子振荡器 100A,如图 6 所示,使中心频率为 $f_1 = f_0 + f_{m1}$ 且频率依次相差 f_{m2} 的照射光 1 整体和中心频率为 $f_2 = f_0 - f_{m1}$ 且频率依次相差 f_{m2} 的照射光 2 整体以相对于激光的中心频率 $f_0 (= v/\lambda_0)$ 呈线对称的方式进行扫频,同时进行同步检波,稳定在 $2 \times (f_{m1} - f_{m2})$ 与相当于 ΔE_{12} 的频率一致的状态。

[0077] 如果碱金属原子是铯原子,则相当于 ΔE_{12} 的频率是 9.19263...GHz,所以,例如可设计为,使得稳定在 $f_{m1} = 4.606315...$ GHz、 $f_{m2} = 10$ MHz 的状态。

[0078] 在此情况下,第 1 调制频率产生电路 200 例如可由 LC 谐振器来实现,该 LC 谐振器可通过根据检波电路 170 的输出信号大小调节电感(L)或电容(C),由此在 4.6GHz 附近改变谐振频率。另外,第 2 调制频率产生电路 210 例如可由直接数字式频率综合器(DDS: Direct Digital Synthesizer)来实现,该直接数字式频率综合器对输入信号(第 1 调制信号)频率进行 $(10\text{MHz}/4.606315...\text{GHz})$ 倍的下变频而将其输出。

[0079] 图 7 是示出原子振荡器 100A 中的第 2 调制频率产生电路 210 的结构例的图。

[0080] 如图 7 所示,第 2 调制频率产生电路 210 构成为直接数字式频率综合器(DDS),其包括频率设定部 211、地址运算部 212、波形存储器 213、D/A 转换器 214 以及低通滤波器 215。

[0081] 频率设定部 211 根据预先设定的频率数据(用于决定频率变换率的数据)来生成加法值数据。在上述例子的情况下,频率变换率是 $(10\text{MHz}/4.606315...\text{GHz})$ 。

[0082] 地址运算部 212 与第 1 调制信号同步地将频率设定部 211 生成的加法值数据依次相加,由此计算相位角数据。具体而言,地址运算部 212 将上次的相位角数据与加法值数据相加来计算本次的相位角数据,生成相当于相位角数据的地址。地址运算部 212 可通过反复进行加法值数据的相加处理的 p 位累加器来实现,累加器的输出为地址。

[0083] 在波形存储器 213 中存储有波形图案(例如正弦波)的相位角与振幅值之间的对

应关系。具体而言,在波形存储器 213 中按地址顺序存储有以一定时间间隔 (1 周期 / 2^p) 对 1 个周期的波形图案进行采样而得到的 2^p 个点的振幅值数据 (数字数据),从波形存储器 213 输出存储在由地址运算部生成的地址所指定的区域内的振幅值数据。

[0084] D/A 转换器 214 对波形存储器 213 输出的振幅值数据进行 D/A 转换。D/A 转换器 214 的输出信号是按照第 1 调制信号的每个周期而阶段性地变化的波形,因此,要由低通滤波器 215 对其进行平滑化而生成第 2 调制信号。

[0085] 根据以上结构,第 2 调制频率产生电路 210 (DDS) 针对频率设定部 211 生成的加法值数据 M,输出具有第 1 调制频率的 $M/2^p$ 倍的频率的第 2 调制信号。因此,如果 p 足够大,则能够使第 1 调制频率近似精确地变为 (10MHz/4.606315...GHz) 倍,所以能够生成具有频率精度极高的 10MHz 的第 2 调制信号。

[0086] 如上所述,在第 1 实施方式的原子振荡器中控制为,使得照射光 1 的规定频率成分 ($f_1 + j \times f_{m1}$) 与照射光 2 的规定频率成分 ($f_2 + k \times f_{m2}$) 的频率差、即 $(2 \times f_{m1} + (j-k) \times f_{m2})$ (j、k 为整数、且 $j \neq k$) 与相当于碱金属原子的 2 个基态能级的能量差的频率一致。

[0087] 因此,根据第 1 实施方式,为了使第 1 调制频率 f_{m1} 或第 2 调制频率 f_{m2} 成为期望的频率,只要选择满足上述条件的第 1 调制频率 f_{m1} 和第 2 调制频率 f_{m2} 即可,所以与现有的原子振荡器相比,设计自由度得到提高,因此能够提供结构比较简单的原子振荡器。

[0088] [变形例]

[0089] 图 8 是示出第 1 实施方式的原子振荡器的变形例的结构的图。如图 8 所示,相对于图 5 所示的原子振荡器 100A,在变形例的原子振荡器 100B 中追加了电子光学调制器 (EOM: Electro-Optic Modulator) 220。

[0090] 如图 8 所示,在原子振荡器 100B 中,半导体激光器 110 未被施加基于具有第 1 调制频率 f_{m1} 的第 1 调制信号的调制和基于具有第 2 调制频率 f_{m2} 的第 2 调制信号的调制,向电子光学调制器 (EOM) 220 射出频率 f_0 的激光。

[0091] 并且,由检波用调制电路 190 实施调制后的第 1 调制信号与第 2 调制信号共同被输入电子光学调制器 (EOM) 220。

[0092] 电子光学调制器 (EOM) 220 利用第 1 调制信号和第 2 调制信号对频率 f_0 的激光进行调制。其结果是,透射过电子光学调制器 (EOM) 220 而照射到原子气室 120 的光与图 5 所示的原子振荡器 100A 相同,在以 f_0 为中心的上侧边带和下侧边带中分别产生中心频率为 $f_1 = f_0 + f_{m1}$ 的照射光 1 和中心频率为 $f_2 = f_0 - f_{m1}$ 的照射光 2,该照射光 1 具有频率依次相差 f_{m2} 的多个频率成分,该照射光 2 具有频率依次相差 f_{m2} 的多个频率成分。

[0093] 图 8 所示的原子振荡器 100B 的其他结构与图 5 所示的原子振荡器 100A 相同,所以标注相同的编号而省略其说明。

[0094] 另外,半导体激光器 110 和电子光学调制器 (EOM) 220 的结构对应于图 1 的光源 10。其他的对应关系与图 5 所示的原子振荡器 100A 相同。

[0095] 根据这样的结构,也能实现具有与图 5 所示的原子振荡器 A 相同的功能和效果的原子振荡器。

[0096] (2) 第 2 实施方式

[0097] 图 9 是示出第 2 实施方式的原子振荡器的结构的图。如图 9 所示,在第 2 实施方式的原子振荡器 100C 中,第 1 调制频率产生电路 300 和第 2 调制频率产生电路 310 之间的

连接关系与图 5 所示的第 1 实施方式的原子振荡器 100A 中的第 1 调制频率产生电路 200 和第 2 调制频率产生电路 210 之间的连接关系相反。

[0098] 在原子振荡器 100C 中,第 2 调制频率产生电路 310 产生第 2 调制信号,该第 2 调制信号具有与检波电路 170 的输出信号的电压对应的第 2 调制频率 f_{m2} 。

[0099] 该第 2 调制信号由低频振荡器 180 的振荡信号(与提供给检波电路 170 的振荡信号相同)实施调制,被提供给半导体激光器 110。由此,在使第 2 调制频率 f_{m2} 微微地扫频的同时,进行检波电路 170 的同步检波,对第 2 调制频率 f_{m2} 进行微调,使得光检测器 130 的输出信号最大。

[0100] 第 2 调制信号还被提供给第 1 调制频率产生电路 300,第 1 调制频率产生电路 300 对第 2 调制信号进行频率变换,使其成为具有第 1 调制频率 f_{m1} 的第 1 调制信号。

[0101] 并且,半导体激光器 110 射出的激光由第 1 调制信号和第 2 调制信号实施调制,产生照射光 1 和照射光 2。

[0102] 图 9 所示的原子振荡器 100C 的其他结构与图 5 所示的原子振荡器 100A 相同,所以标注相同的编号而省略其说明。

[0103] 另外,半导体激光器 110、原子气室 120、光检测器 130 分别对应于图 1 的光源 10、原子气室 20、光检测单元 30。另外,由检波电路 140、低频振荡器 150、电流驱动电路 160、检波电路 170、低频振荡器 180、检波用调制电路 190、第 1 调制频率产生电路 300 以及第 2 调制频率产生电路 310 构成的电路对应于图 1 的控制单元 40。另外,第 1 调制频率产生电路 300 和第 2 调制频率产生电路 310 分别对应于图 1 的第 1 调制频率产生单元 42 和第 2 调制频率产生单元 44。

[0104] 在这种结构的原子振荡器 100C 中,如果半导体激光器 110 射出的照射光 1 的规定频率成分与照射光 2 的规定频率成分之间的频率差不与相当于原子气室 120 中含有的碱金属原子的 2 个基态能级的能量差的频率精确地一致,则碱金属原子不会引起 EIT 现象,因此,光检测器 130 的检测量是随照射光 1 与照射光 2 的频率而极敏感地变化的。因此,利用经过半导体激光器 110、原子气室 120、光检测器 130、检波电路 170 以及第 2 调制频率产生电路 310 和检波用调制电路 190 或第 1 调制频率产生电路 300 的 2 个反馈环路,施加反馈控制,使得照射光 1 的规定频率成分与照射光 2 的规定频率成分之间的频率差与相当于碱金属原子的 2 个基态能级的能量差的频率极精确地一致。其结果是,第 1 调制频率和第 2 调制频率成为极其稳定的频率,因此能够将第 1 调制信号及第 2 调制信号作为原子振荡器 100C 的输出信号(时钟输出)。

[0105] 图 10 是用于说明第 2 实施方式的原子振荡器中的照射光 1 以及照射光 2 的一例的图。

[0106] 图 10 所示的照射光 1 和照射光 2 之间的关系与图 2(B) 所示的照射光 1 与照射光 2 之间的关系相同,但也可以是图 3(B) 或图 4(B) 所示的关系等,即,只要满足以下关系即可:照射光 1 的规定频率成分与照射光 2 的规定频率成分之间的频率差与相当于碱金属原子的 2 个基态能级的能量差 ΔE_{12} 的频率一致(其中,照射光 1 的中心频率 f_1 和与照射光 2 的中心频率 f_2 的频率差与相当于 ΔE_{12} 的频率不一致)。

[0107] 根据原子振荡器 100C,如图 10 所示,使频率依次相差 f_{m2} 的照射光 1 的各频率成分以相对于中心频率 $f_1 = f_0 + f_{m1}$ 呈线对称的方式进行扫频,并且使频率依次相差 f_{m2} 的照射

光 2 的各频率成分以相对于中心频率 $f_2 = f_0 - f_{m1}$ 呈线对称的方式进行扫频, 同时进行同步检波, 稳定在 $2 \times (f_{m1} - f_{m2})$ 与相当于 ΔE_{12} 的频率一致的状态。

[0108] 如果碱金属原子是铯原子, 则相当于 ΔE_{12} 的频率是 9.19263...GHz, 因此, 例如可设计为, 使得稳定在 $f_{m1} = 4.606315...$ GHz、 $f_{m2} = 10$ MHz 的状态。

[0109] 在此情况下, 第 2 调制频率产生电路 310 例如可由压控石英振荡器 (VCXO: Voltage Controlled Crystal Oscillator) 来实现, 该压控石英振荡器可根据检波电路 170 的输出信号的大小来调节石英振子的负载电容, 由此改变振荡频率。另外, 第 1 调制频率产生电路 300 例如可由 PLL 实现, 该 PLL 可使输入信号 (第 2 调制信号) 的频率倍增为 (4.606315...GHz/10MHz) 倍。

[0110] 图 11 是示出原子振荡器 100C 中的第 1 调制频率产生电路 300 的结构例的图。

[0111] 如图 11 所示, 第 1 调制频率产生电路 300 可构成为 PLL, 该 PLL 包括: 分频器 301、相位比较器 302、环路滤波器 303、压控振荡器 (VCO: Voltage Controlled Oscillator) 304、分频器 305。

[0112] 分频器 301 使第 2 调制信号的频率 (第 2 调制频率 f_{m2}) 成为 $1/R$ (R 是预定的整数) 而将其输出。

[0113] 相位比较器 302 将分频器 301 的输出信号与分频器 305 的输出信号之间的相位差变换为电压而将其输出。

[0114] 环路滤波器 303 去除相位比较器 302 的输出电压中包含的高频成分 (准确地说是使其衰减至一定电平以下)。

[0115] 压控振荡器 (VCO) 304 输出与环路滤波器 303 的输出电压对应的频率信号。

[0116] 分频器 305 使压控振荡器 (VCO) 304 的输出频率成为 $1/N$ (N 是预定的整数值) 而将其输出。

[0117] 并且, 压控振荡器 (VCO) 304 的输出信号成为第 1 调制信号 (具有第 1 调制频率 f_{m1})。

[0118] 根据这样的结构, 通过进行反馈控制而使得输入相位比较器 302 的 2 个信号的频率一致、即 $f_{m2}/R = f_{m1}/N$, 因此, 能够获得满足 $f_{m1} = (N/R) \times f_{m2}$ 的第 1 调制信号。

[0119] 在要产生图 2(A) 以及图 2(B) 所示的照射光 1 和照射光 2 的情况下, 如果碱金属原子是铯原子, 则例如满足 $f_{m1} = 4.606315...$ GHz、 $f_{m2} = 10$ MHz 即可, 因此, 只要以倍增率 N/R 为 (4.606315...GHz/10MHz) 的方式来确定 N 以及 R 即可。

[0120] 另外, 在要产生图 3(A) 以及图 3(B) 所示的照射光 1 和照射光 2 的情况下, 如果碱金属原子是铯原子, 则例如满足 $f_{m1} = 4.586315...$ GHz、 $f_{m2} = 10$ MHz 即可, 因此, 只要以倍增率 N/R 为 (4.586315...GHz/10MHz) 的方式来确定 N 以及 R 即可。

[0121] 另外, 在要产生图 4(A) 以及图 4(B) 所示的照射光 1 和照射光 2 的情况下, 如果碱金属原子是铯原子, 则例如满足 $f_{m1} = 4.601315...$ GHz、 $f_{m2} = 10$ MHz 即可, 因此, 只要以倍增率 N/R 为 (4.601315...GHz/10MHz) 的方式来确定 N 以及 R 即可。

[0122] 如上所述, 在第 2 实施方式的原子振荡器中, 与第 1 实施方式相同地施加控制, 使得照射光 1 的规定频率成分 ($f_1 + j \times f_{m2}$) 与照射光 2 的规定频率成分 ($f_2 + k \times f_{m2}$) 之间的频率差、即 $(2 \times f_{m1} + (j - k) \times f_{m2})$ (j, k 是整数, 且 $j \neq k$) 与相当于碱金属原子的 2 个基态能级的能量差的频率一致。

[0123] 因此,根据第2实施方式,为了使第1调制频率 f_{m1} 或第2调制频率 f_{m2} 成为期望的频率,只要选择满足上述条件的第1调制频率 f_{m1} 和第2调制频率 f_{m2} 即可,所以与现有的原子振荡器相比,设计自由度得到提高,因此能够提供结构比较简单的原子振荡器。

[0124] 另外,在第2实施方式中,如果将第2调制频率 f_{m2} 确定为 MHz 频带的频率,则可利用 MHz 频带的电路来实现第2调制频率产生电路 310 及检波用调制电路 190,因此能够大幅度地省略要求高度设计技术的微波电路设计。

[0125] (3) 第3实施方式

[0126] 图12是示出第3实施方式的原子振荡器的结构的图。如图12所示,第3实施方式的原子振荡器 100D 与图5所示的第1实施方式的原子振荡器 100A 的不同之处在于,第1调制频率产生电路 200 的第1调制信号未被输入至第2调制频率产生电路 410。另外,在第3实施方式的原子振荡器 100D 中追加了频率变换电路 230。

[0127] 在原子振荡器 100D 中,第2调制频率产生电路 410 与由第1调制频率产生电路 200 产生的第1调制信号独立地产生第2调制信号,该第2调制信号具有第2调制频率 f_{m2} 。第2调制频率产生电路 410 例如可由石英振荡器 (XO:Crystal Oscillator) 来实现,该石英振荡器的负载电容被调节成使得石英振子在频率 f_{m2} 下进行振荡。

[0128] 并且,半导体激光器 110 射出的激光由第1调制信号和第2调制信号进行调制,产生照射光 1 和照射光 2。

[0129] 频率变换电路 230 对第1调制信号进行频率变换,使其成为期望的频率信号。频率变换电路 230 例如可由直接数字式频率综合器 (DDS) 来实现。

[0130] 图12所示的原子振荡器 100D 中的其他结构与图5所示的原子振荡器 100A 相同,所以标注相同的编号而省略其说明。

[0131] 另外,半导体激光器 110、原子气室 120、光检测器 130 分别对应于图1的光源 10、原子气室 20、光检测单元 30。并且,由检波电路 140、低频振荡器 150、电流驱动电路 160、检波电路 170、低频振荡器 180、检波用调制电路 190、第1调制频率产生电路 200 以及第2调制频率产生电路 410 构成的电路对应于图1的控制单元 40。并且,第1调制频率产生电路 200、第2调制频率产生电路 410、频率变换电路 230 分别对应于图1的第1调制频率产生单元 42、第2调制频率产生单元 44、频率变换单元 46。

[0132] 根据这种结构的原子振荡器 100D,由于第2调制频率 f_{m2} 被固定,所以是对第1调制频率 f_{m1} 进行微调而将第1调制频率 f_{m1} 变换为期望的频率后将其输出,由此使碱金属原子产生 EIT 现象。因此,根据第3实施方式,为了获得期望的频率,可以在某种程度上自由地选择第1调制频率 f_{m1} 、第2调制频率 f_{m2} 、与频率变换电路 230 的频率变换率的组合,所以能够提高设计自由度。

[0133] 另外,例如在照射光 1 和照射光 2 处于图2(A)以及图2(B)所示的关系、且碱金属原子是铯原子的情况下,如果第2调制信号的频率(第2调制频率 f_{m2})相对于 10MHz 在 $\pm 1\text{kHz}$ ($\pm 100\text{ppm}$) 的范围内变动,则第1调制信号的频率(第1调制频率 f_{m1})相对于 4.606315...GHz 在 $\pm 1\text{kHz}$ (小于 $\pm 1\text{ppm}$) 的范围内变动。因此,如果将频率变换电路 230 的频率变换率设定为 $(10\text{MHz}/4.606315\cdots\text{GHz})$,则相对于 10MHz 可获得小于 $\pm 1\text{ppm}$ 的频率精度的输出信号。即,相对于第2调制信号的频率精度 ($\pm 100\text{ppm}$),可获得其 100 倍以上的频率精度的输出信号。

[0134] 这样,根据第3实施方式的原子振荡器,可利用碱金属原子的EIT现象来显著提高输出信号的频率精度。

[0135] 另外,在第3实施方式的原子振荡器中,如果例如由压控石英振荡器(VCXO)来实现第2调制频率产生电路410,则能够变更第2调制频率,频率变换电路230的输出信号成为与第2调制频率对应的频率。即,能够实现输出频率可变的原子振荡器。

[0136] 另外,本发明不限于本实施方式,在本发明的主旨范围内可实施各种变形。

[0137] 例如,在第1实施方式及其变形例的原子振荡器中,第2调制频率产生电路210是由直接数字式频率综合器(DDS)来实现的,但也可以由PLL来实现。

[0138] 此外,例如,在第2实施方式的原子振荡器中,第1调制频率产生电路300是由PLL来实现的,但也可以由附带倍增功能的直接数字式频率综合器(DDS)来实现。

[0139] 本发明包含与实施方式中说明的结构实质上相同的结构(例如,功能、方法及结果相同的结构、或者目的及效果相同的结构)。并且,本发明包含对实施方式中说明的结构中的非本质部分进行置换后的结构。并且,本发明包含可起到与实施方式中说明的结构相同的作用效果的结构、或可实现相同目的的结构。另外,本发明包含对实施方式中说明的结构添加了公知技术后的结构。

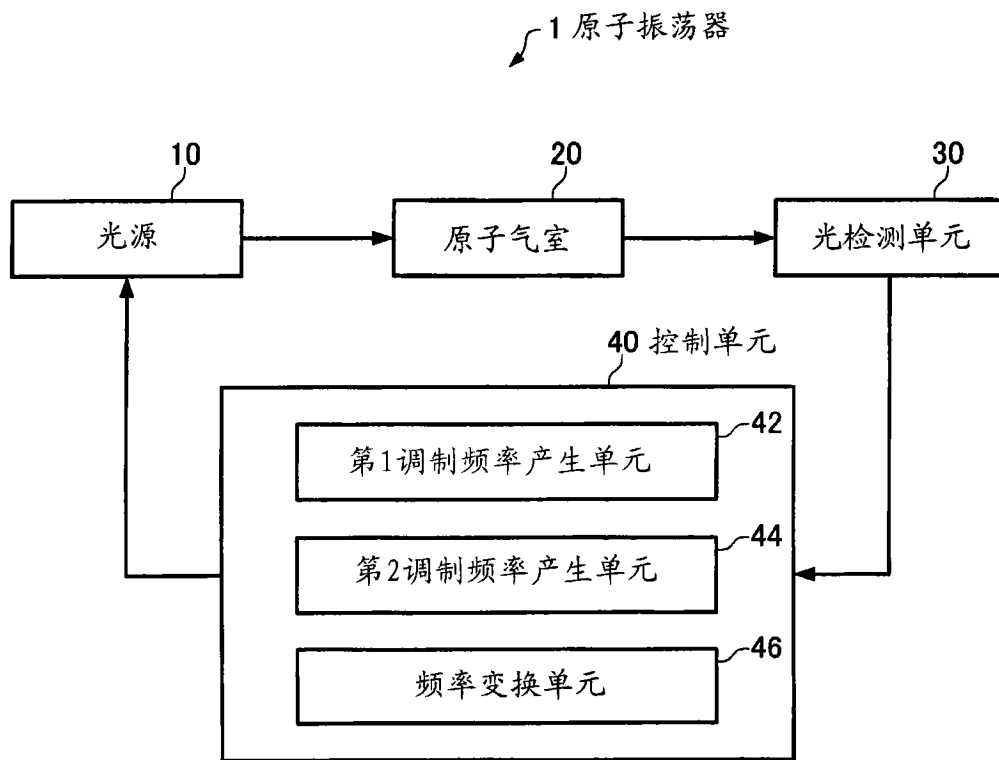
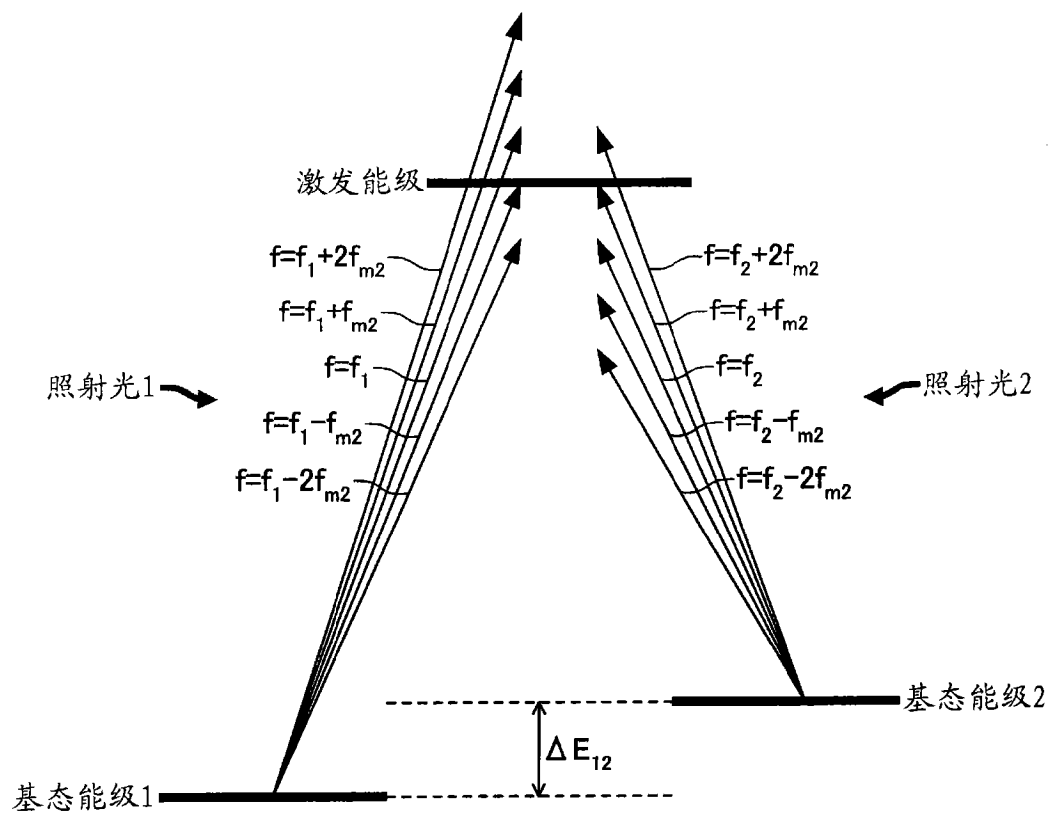


图 1

(A)



(B)

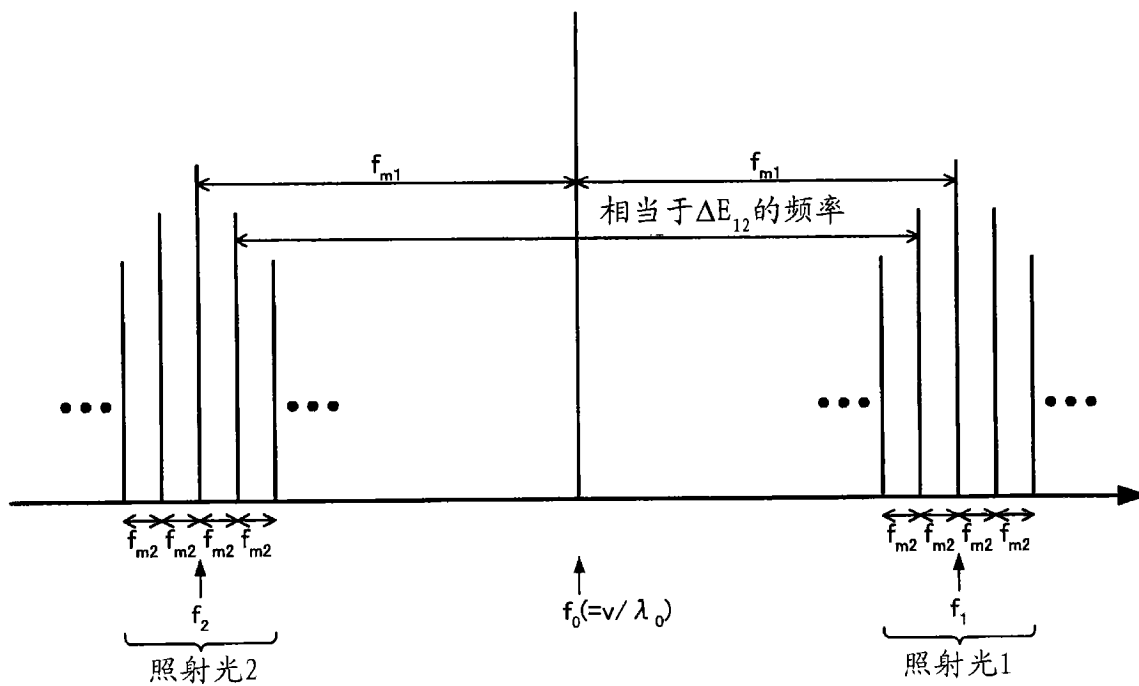
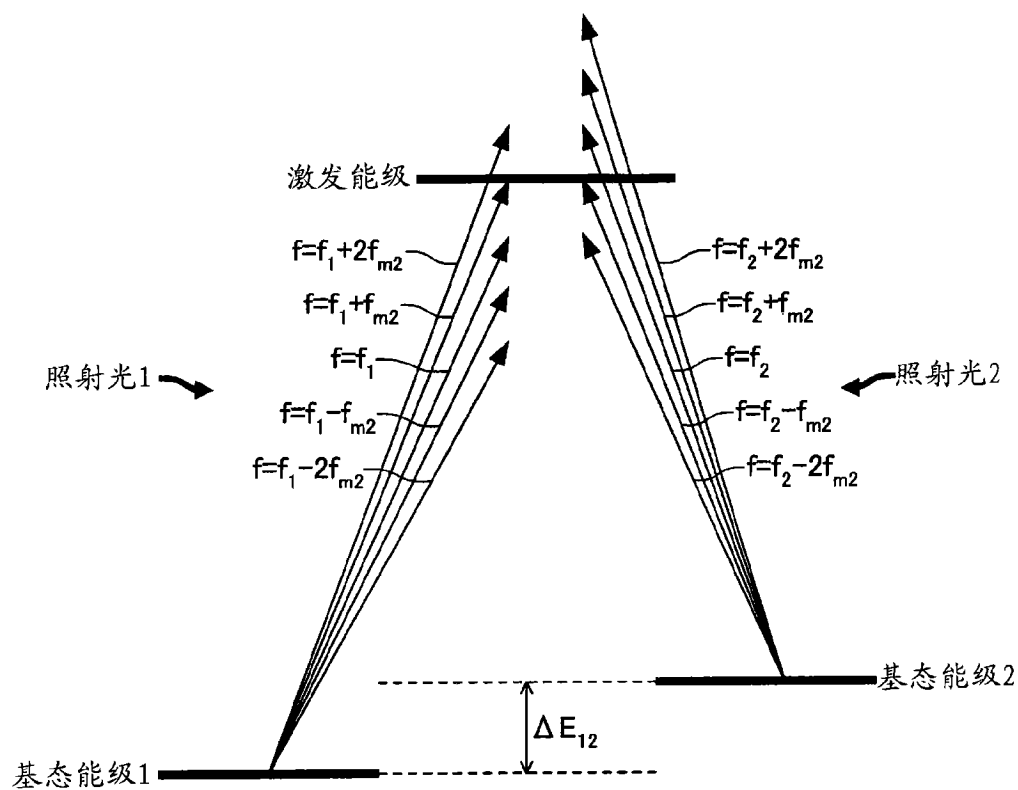


图 2

(A)



(B)

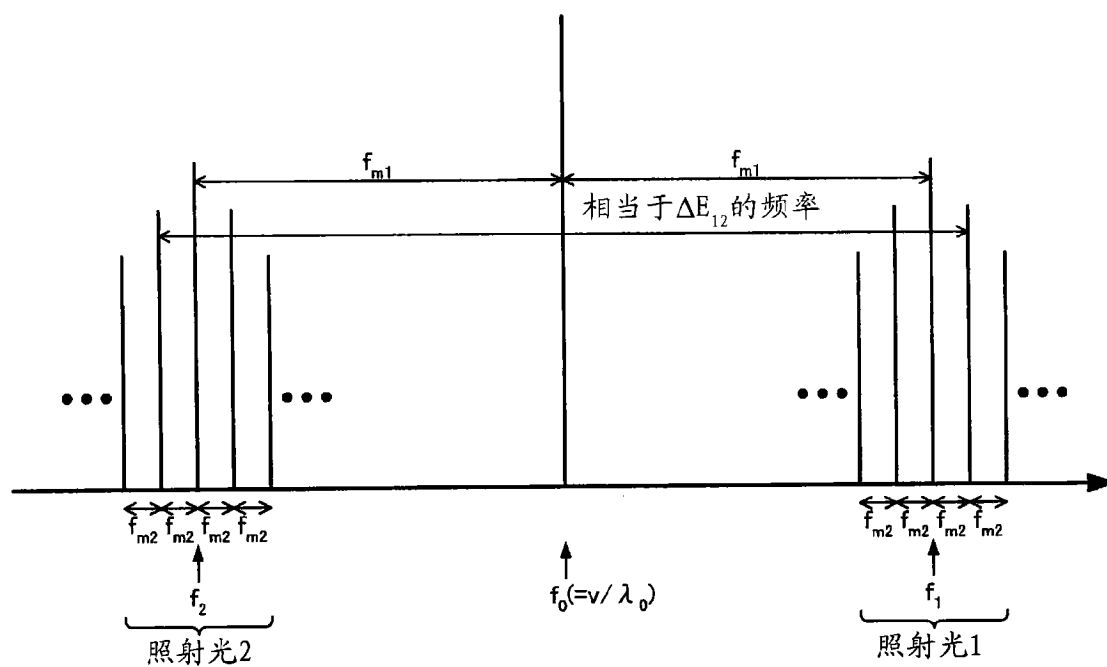
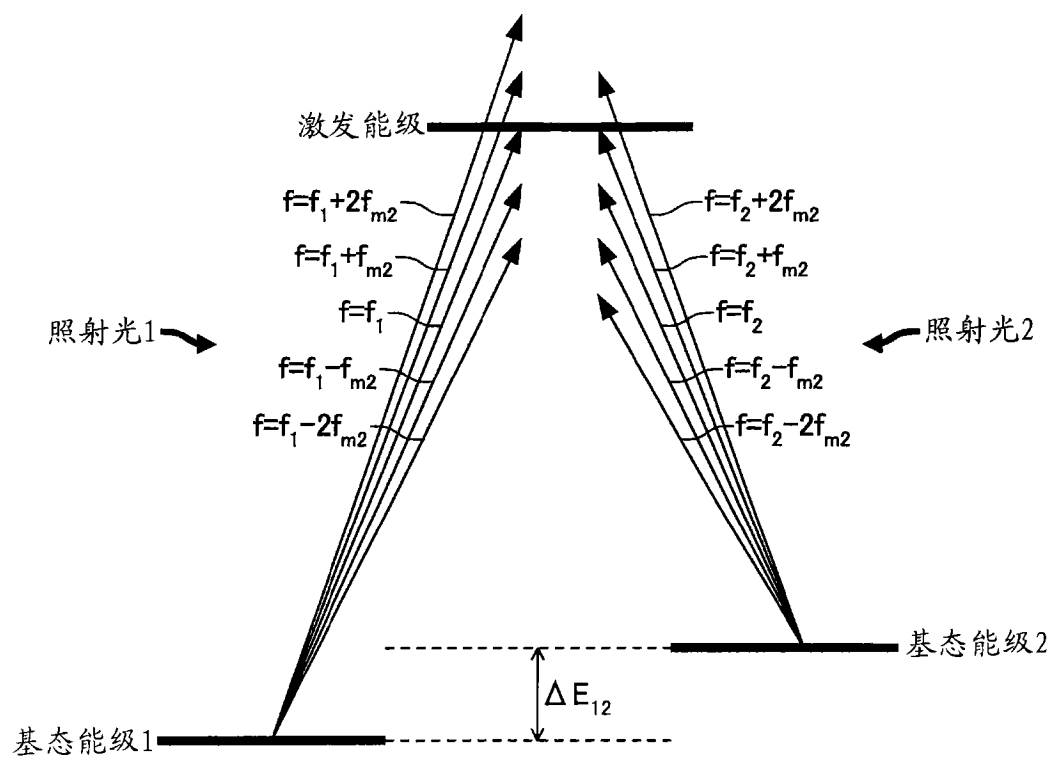


图 3

(A)



(B)

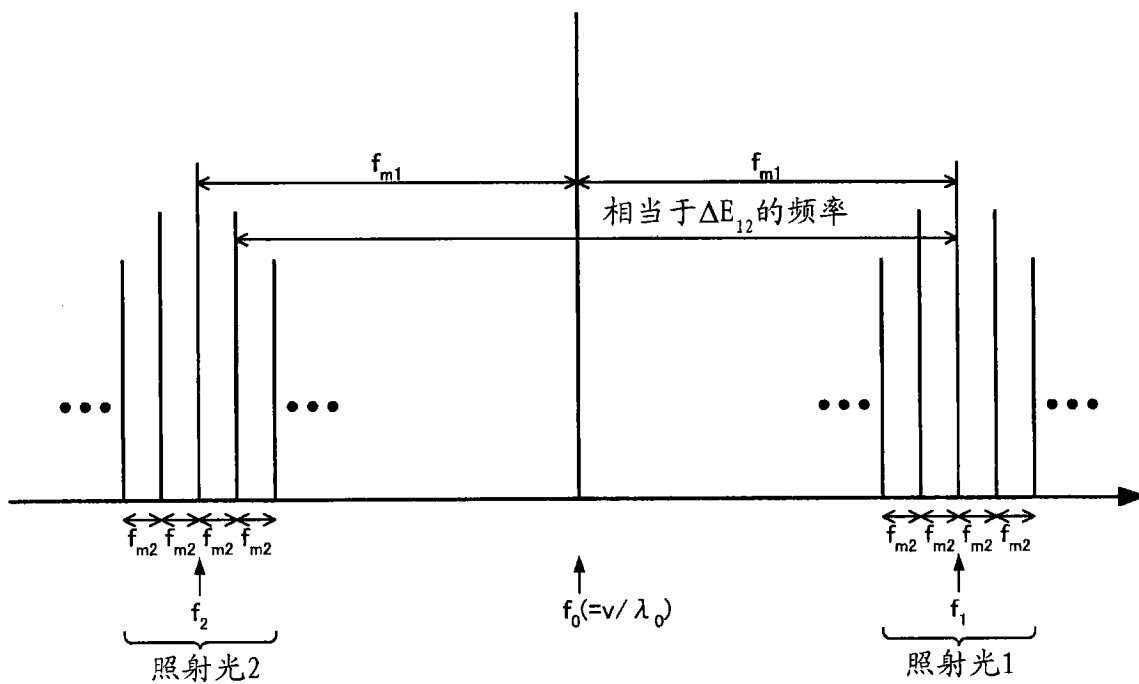


图 4

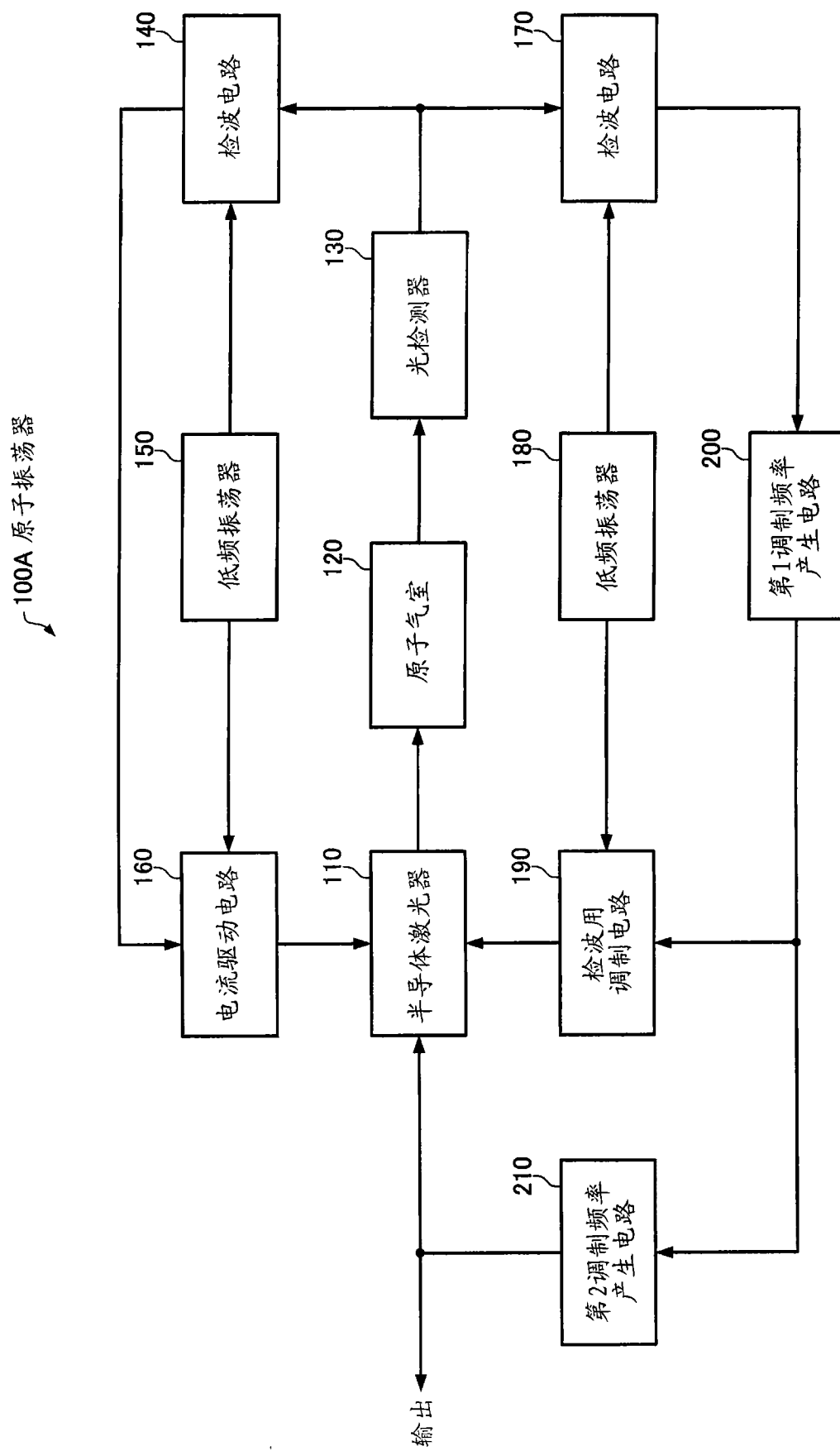


图 5

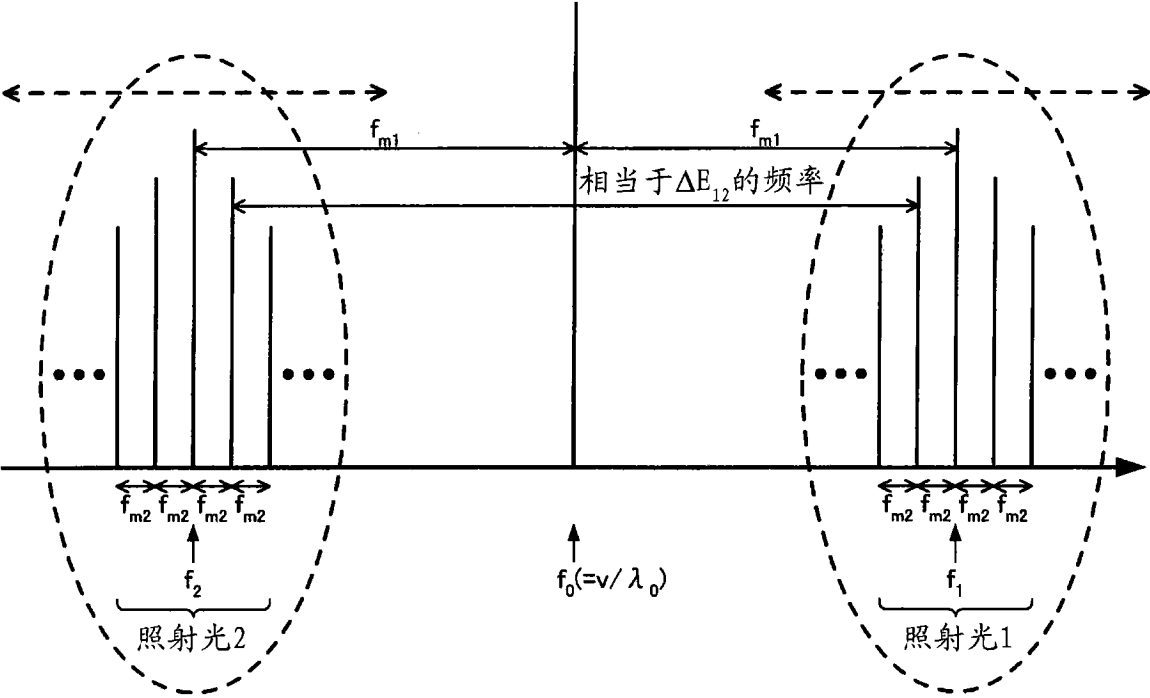


图 6

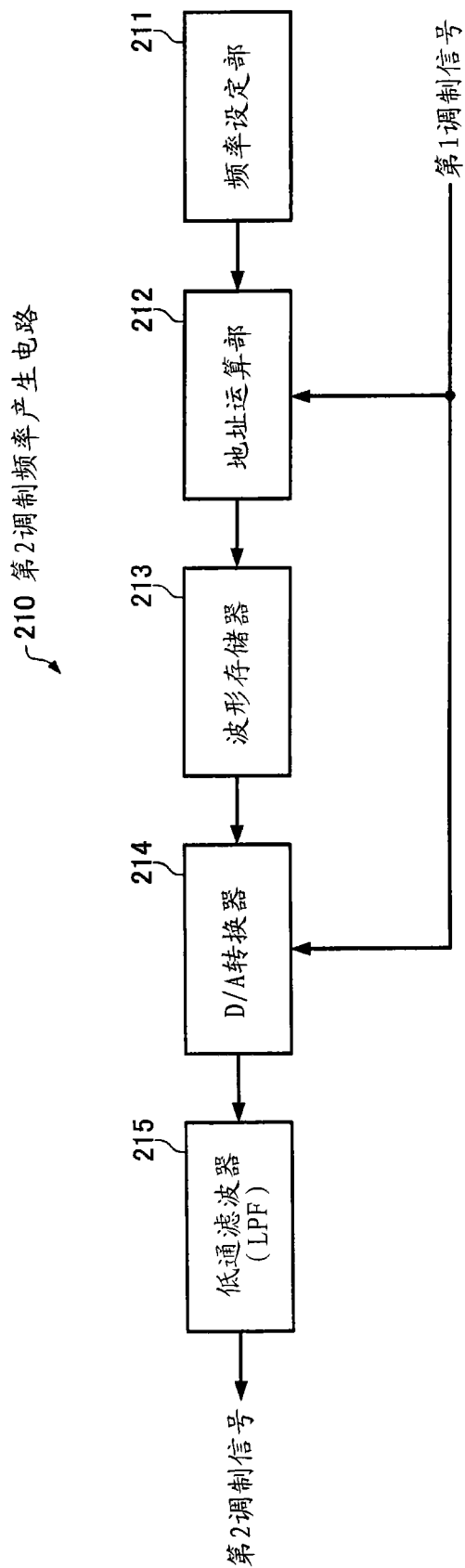


图 7

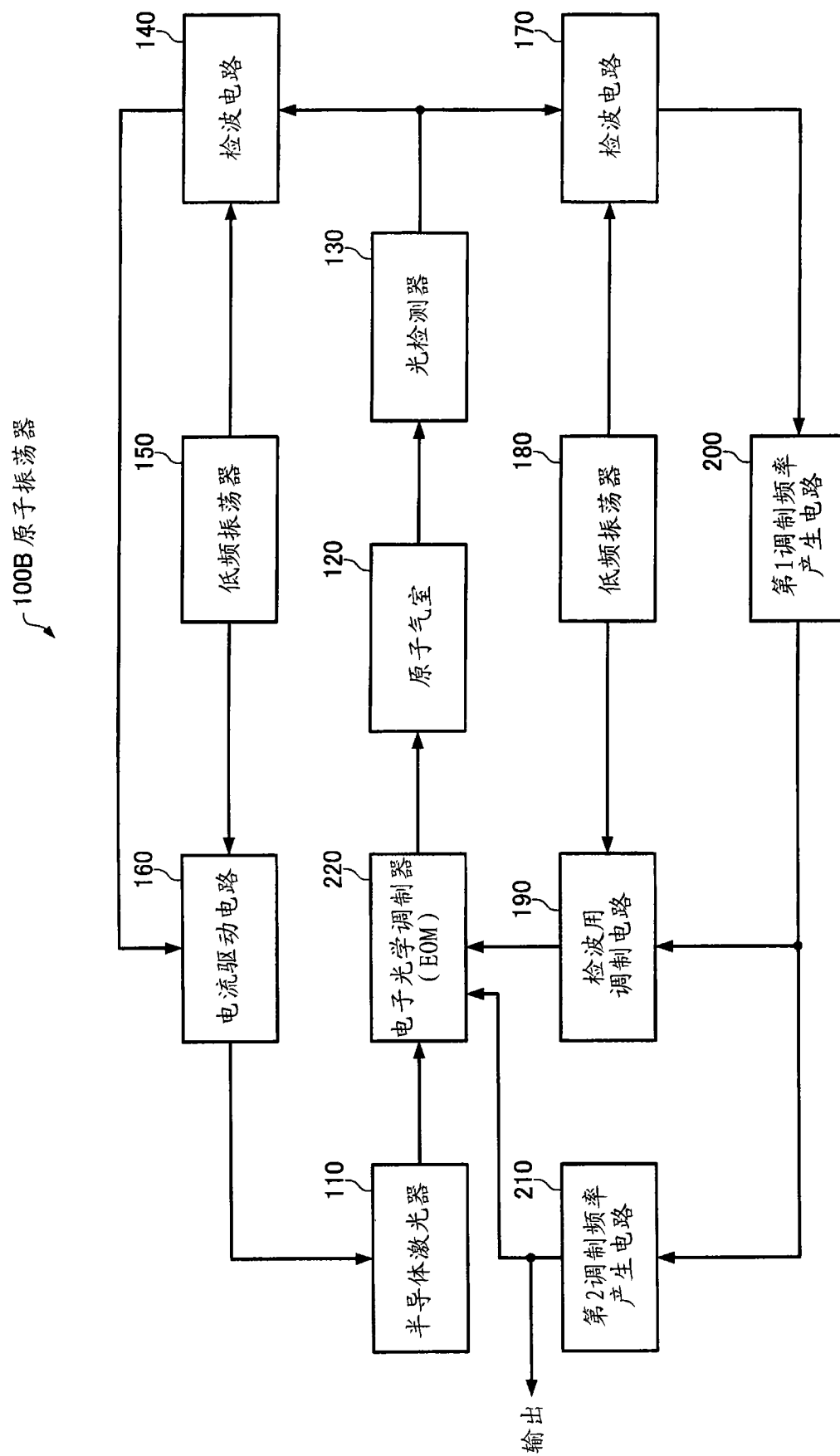


图 8

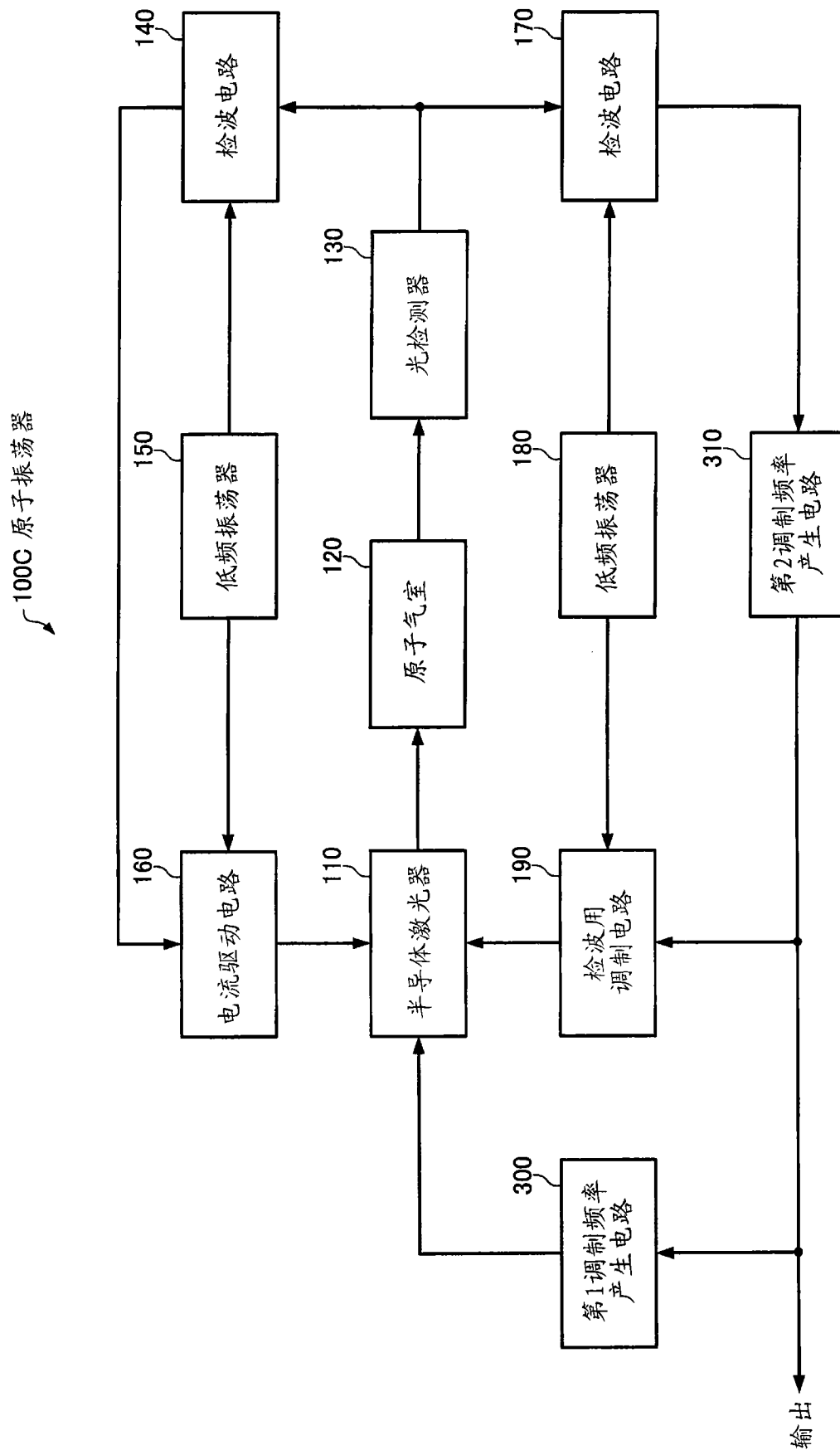


图 9

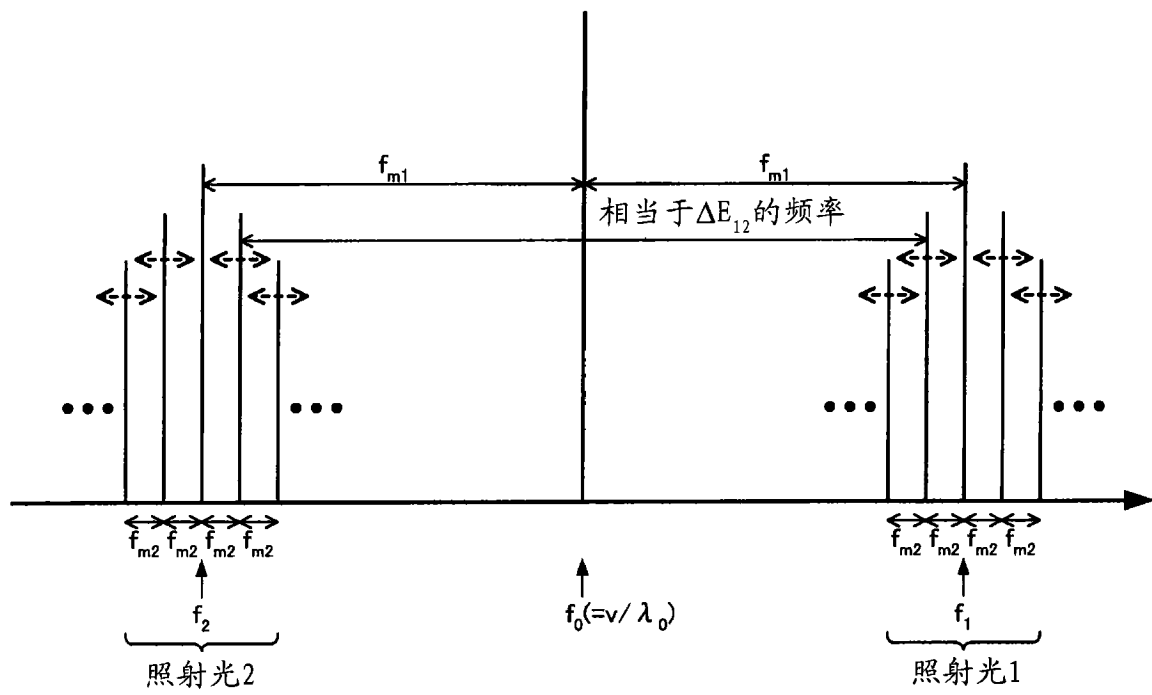


图 10

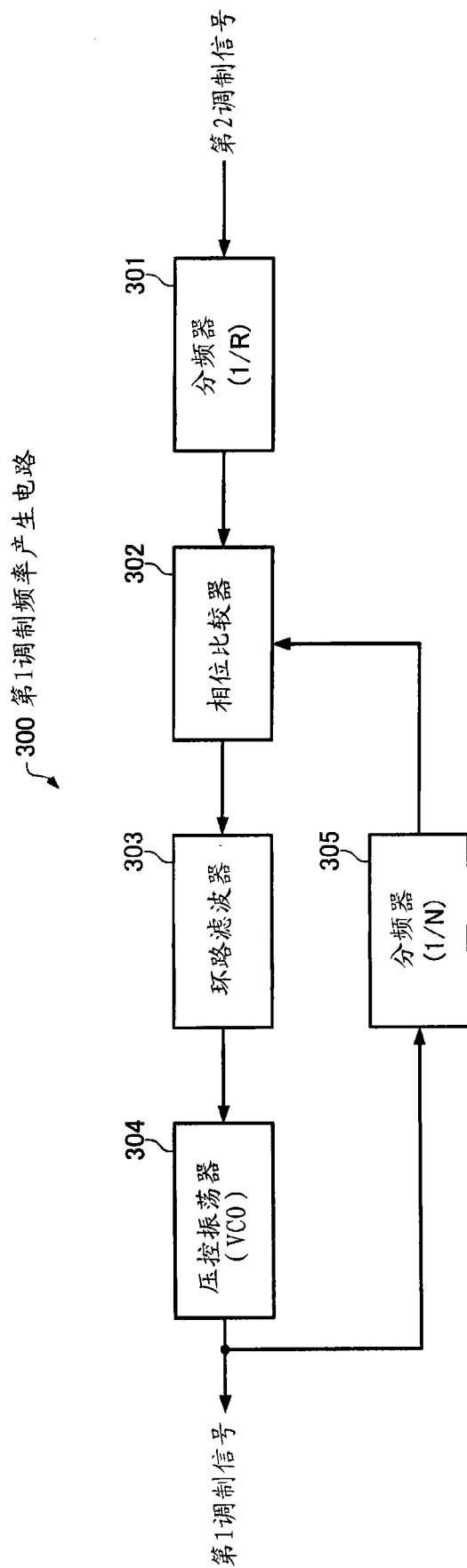


图 11

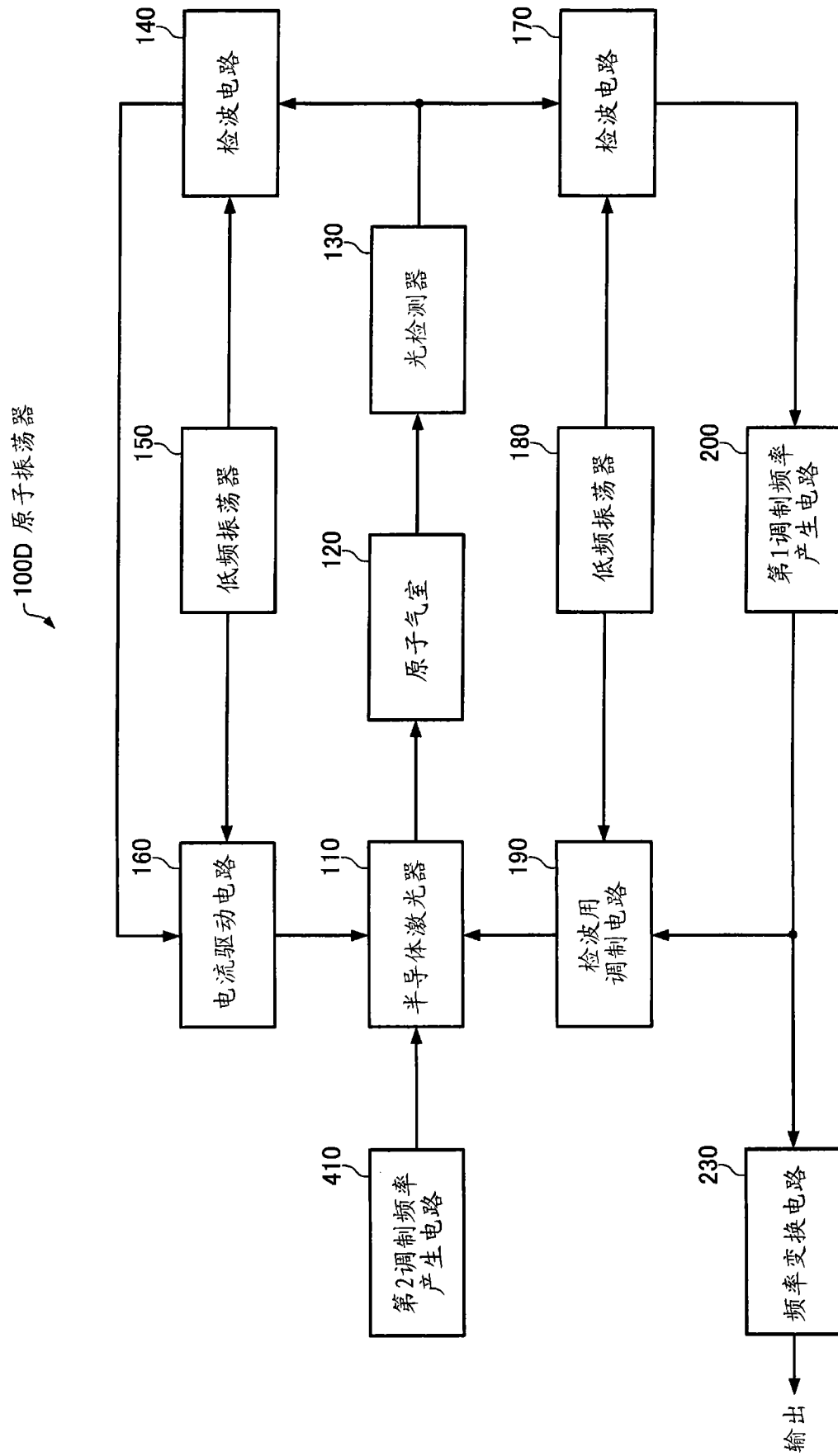
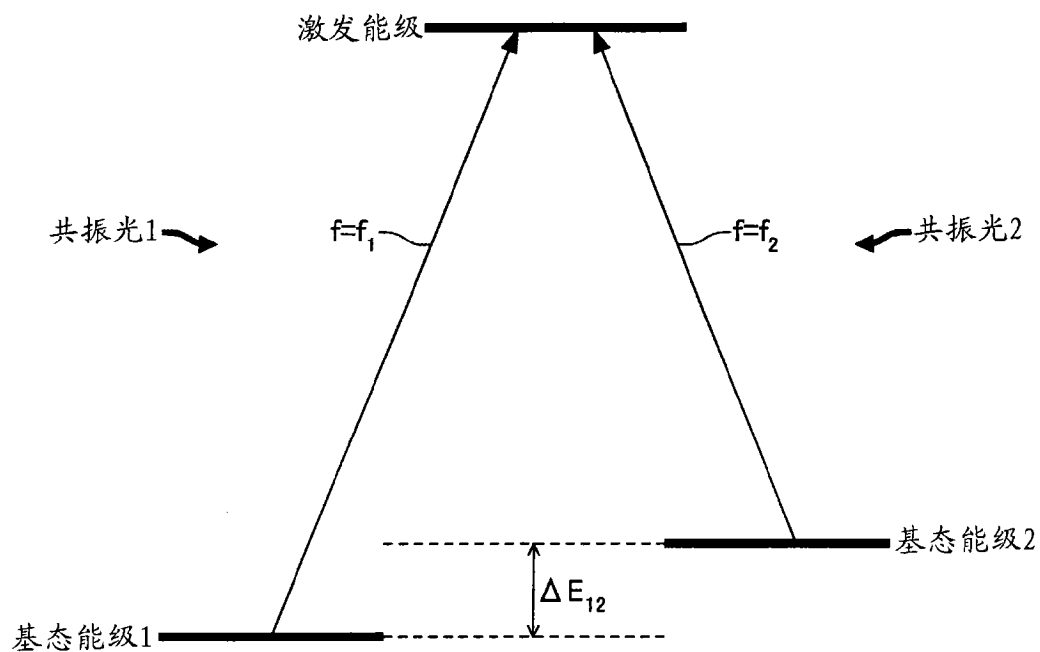


图 12

(A)



(B)

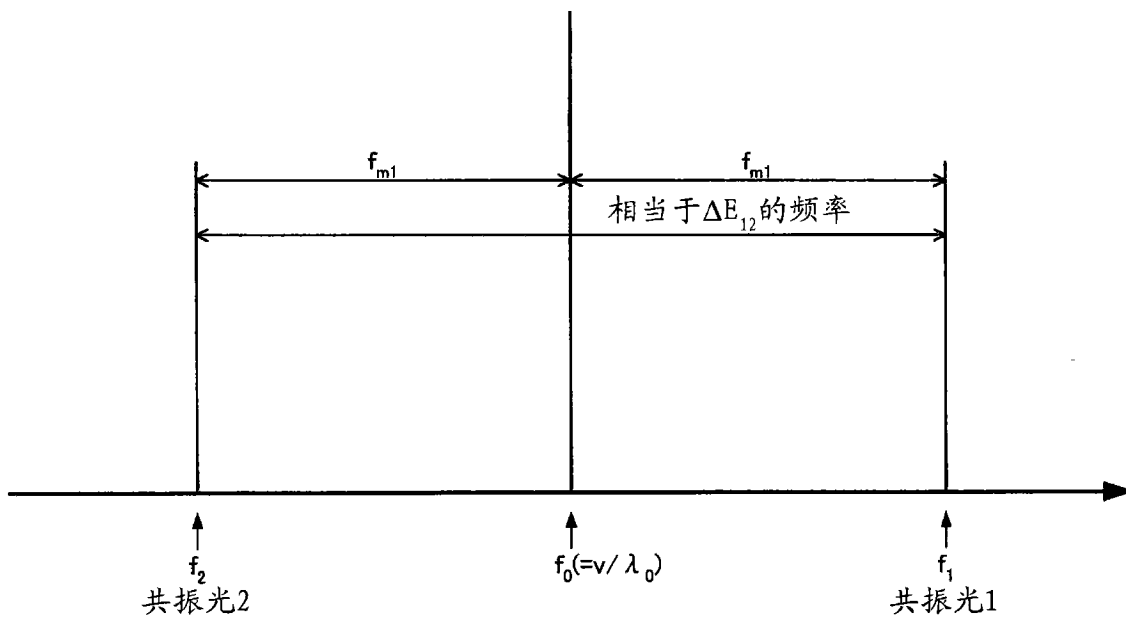


图 13

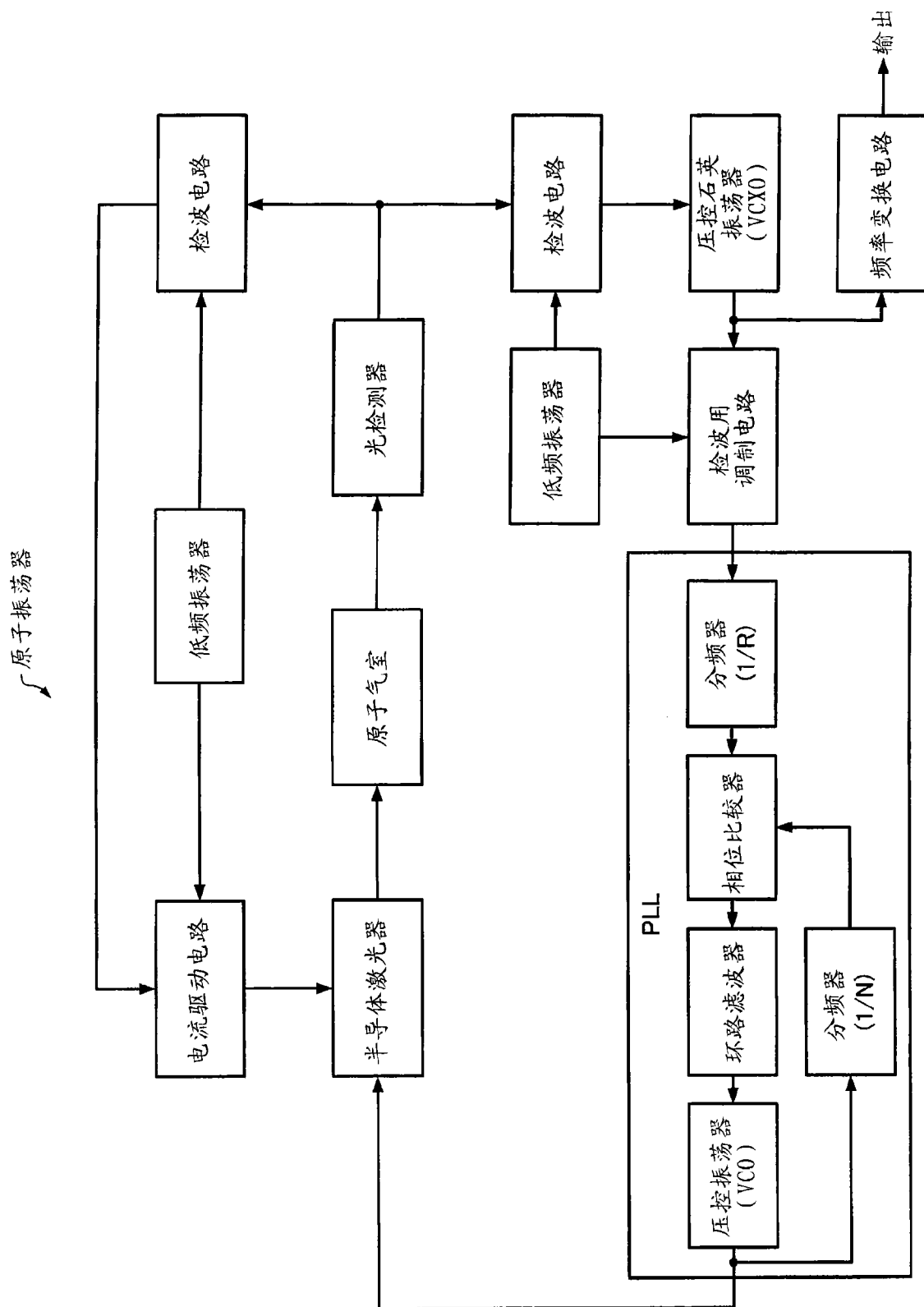


图 14