



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 102931987 B

(45) 授权公告日 2015. 10. 14

(21) 申请号 201210454371. 8

(22) 申请日 2010. 02. 05

(30) 优先权数据

2009-025652 2009. 02. 06 JP

2009-153402 2009. 06. 29 JP

2009-201329 2009. 09. 01 JP

(62) 分案原申请数据

201010113602. X 2010. 02. 05

(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 青山拓 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 黄纶伟

(51) Int. Cl.

H03L 7/26(2006. 01)

(56) 对比文件

US 20050068115 A1, 2005. 03. 31, 说明书第 43 段—48 段, 第 81 段, 图 2.

US 20080042761 A1, 2008. 02. 21, 全文.

US 5751193 A, 1998. 05. 12, 全文.

US 6359916 B1, 2002. 03. 19, 说明书第 14 栏第 11 行—13 行, 第 15 栏第 46 行—第 16 栏第 34 行, 图 7.

US 6710663 B1, 2004. 03. 23, 全文.

WO 2005054907 A2, 2005. 06. 16, 全文.

郭文阁等. 相干布居囚禁原子钟技术及其进展. 《时间频率学报》. 2007, 第 30 卷 (第 1 期), 第 48 页第 2 段, 图 4.

审查员 史玉梅

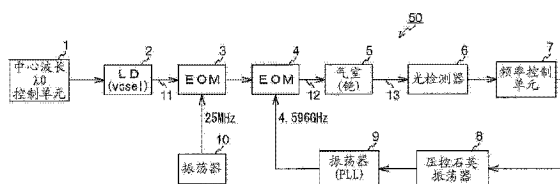
权利要求书1页 说明书14页 附图15页

(54) 发明名称

量子干涉装置、原子振荡器以及磁传感器

(57) 摘要

量子干涉装置、原子振荡器以及磁传感器。使具有多普勒扩展的光共振波长分布的原子团高效地产生 EIT 现象。具有：射出各共振光的 LD (2)；产生 LD 的中心波长的中心波长产生单元 (1)；振荡器 (9)，振荡产生相当于 2 个不同基态的能量差 (ΔE_{12}) 的频率的 1/2 频率；振荡器 (10)，振荡产生远小于多普勒扩展的频率；EOM (电子光学调制元件) (3, 4)，利用电信号对从 LD 射出的共振光 (11) 实施频率调制；气室 (5)，根据 EOM (4) 调制的光 (12) 的波长来改变光的吸收量，封入了气态碱金属 (铯) 原子；光检测器 (光检测单元) (6)，检测从气室透射的光 (13)；频率控制单元 (7)，根据光检测器的输出检测气室的 EIT 状态，控制输出电压。



1. 一种量子干涉装置,该量子干涉装置具有:
封入有金属原子的气室;
混合器,其将输入的 2 个频率信号混合而生成混合信号;以及
光源,其输入所述混合信号,将中心频率彼此不同的 2 个共振光对照射到所述气室。
2. 根据权利要求 1 所述的量子干涉装置,其特征在于,
所述混合器输入的 2 个频率信号中的至少 1 个是从包含 PLL 电路的振荡器输出的。
3. 根据权利要求 1 或 2 所述的量子干涉装置,其特征在于,
所述混合器输入的 2 个频率信号是从彼此不同的振荡器输出的。
4. 根据权利要求 1 所述的量子干涉装置,其特征在于,
所述混合器输入的 2 个频率信号都是从包含 PLL 电路的振荡器输出的。
5. 一种量子干涉装置,该量子干涉装置具有:
封入有金属原子的气室;
照射光的光源;以及
电子光学调制元件,其使得从所述光源入射的光成为中心频率彼此不同的 2 个共振光对而向所述气室进行照射。
6. 根据权利要求 5 所述的量子干涉装置,其特征在于,
所述电子光学调制元件包含生成第 1 共振光对的第 1 电子光学调制元件以及生成第 2 共振光对的第 2 电子光学调制元件。
7. 根据权利要求 6 所述的量子干涉装置,其特征在于,
所述第 1 电子光学调制元件和所述第 2 电子光学调制元件在所述光源与所述气室之间串联连接。

量子干涉装置、原子振荡器以及磁传感器

[0001] 本申请是申请日为 2010 年 2 月 5 日,申请号为 201010113602.x,发明名称为“量子干涉装置、原子振荡器以及磁传感器”的发明专利申请的分案申请。

技术领域

[0002] 本发明涉及量子干涉装置、原子振荡器以及磁传感器,更详细地讲,涉及用于高效地产生 EIT 现象的技术。

背景技术

[0003] 电磁诱导透明方式(有时也称为 EIT 方式、CPT 方式)的原子振荡器是利用了如下这样的现象的振荡器,即:当同时向碱金属原子照射波长不同的 2 种共振光时,2 种共振光的吸收停止(EIT 现象)。图 24 (a)表示 1 个碱金属原子的能量状态。众所周知,当向碱金属原子分别单独地照射具有相当于第 1 基态能级 23 与激发能级 21 之间的能量差的波长的第 1 共振光、或具有相当于第 2 基态能级 24 与激发能级 21 之间的能量差的波长的第 2 共振光时,将引起光吸收。但是,当向该碱金属原子同时照射第 1 共振光和第 2 共振光、且同时照射的第 1 共振光和第 2 共振光之间的频率差与第 1 基态能级 23 和第 2 基态能级 24 之间的能量差(ΔE_{12})准确地一致时,图 24 (a)的系统处于 2 个基态能级的重合状态,即量子干涉状态,向激发能级 21 跃变的激发停止,产生透明(EIT)现象。利用该现象来检测第 1 共振光与第 2 共振光之间的波长差偏离 ΔE_{12} 时的光吸收动作的急剧变化,并将其作为信号进行控制,由此,能够制造出高精度的振荡器。另外, ΔE_{12} 随外部磁场的强度或变动而敏感地变化,因此,能够利用 EIT 现象来制造高灵敏度的磁传感器。

[0004] 另外,为了提高 EIT 现象下的光输出信号的信噪比(S/N),只要增加与共振光相互作用的碱金属的原子数量即可。例如,在专利文献 1 中,以改善原子振荡器的输出信号的 S/N 为目的,公开了以下等方法:增大封入有气态碱金属原子的气室(cell)的厚度,或增大入射到气室的激光的光束直径。无论哪一种方法,为了增大碱金属原子与共振光接触的区域,如图 24 (b)或图 24 (c)所示,均增大了气室的厚度或高度。关于这里所使用的激光,只使用了 1 对满足 EIT 现象的产生条件(发见条件)的 2 种波长的激光。

[0005] 另外,在专利文献 2 中,(1)公开了关于提高 EIT (CPT)方式的原子振荡器的灵敏度的技术。即,特征在于将 D1 线用作光源。与以往的 D2 线的情况相比,理论上可提高 EIT (CPT)信号强度。由此,灵敏度/频率稳定度得到提高。(2)并且,使用 4 光波光源,利用双重 Λ 型跃迁使能量分裂为 2 个而成的 P 1/2 激发能级(超精细结构)同时相互作用,由此,进一步改善信号强度,但这里公开的技术涉及 4 光波混合,不属于本发明涉及的技术领域的范围。

[0006] 专利文献 1:日本特开 2004-96410 号公报

[0007] 专利文献 2:USP6359916

[0008] 关注气室内的构成气态碱金属原子团的各个原子,可知具有与各自的运动状态对应的一定的速度分布。如果入射到该原子团的激光的波长只有 2 种(一对),则在原子运动

的多普勒效应(多普勒频移)的影响下,实际上可相互作用的原子只是气室内的多个原子中的、在激光入射方向上具有特定的速度分量值的极少部分的原子,有助于产生 EIT 的原子比例极低。专利文献 1 所公开的现有技术存在下述课题,即:由于原子振荡器是在这种 EIT 产生效率低的状态下构成的,因此为了得到信噪比(S/N)较大的期望的吸收光谱,必须增大气室的厚度或高度中的一个,难以在维持信噪比的同时实现小型化。即,气室内的每单位体积内有助于 EIT 现象的原子数量保持不变。另外,专利文献 2-(1)所公开的技术也存在相同的课题。

[0009] 即,专利文献 1、2-(1)均只使用了 2 种光波。气室内的碱原子具有速度分布,存在与此相伴的能量的多普勒扩展。因此,在只有 2 种光波的 Λ 型跃迁中,只与极少部分的原子相互作用,因此,每单位体积的 EIT 产生收获率极差。因此,存在 EIT 信号强度弱的问题。

[0010] 实际的碱原子的激发能级具有超精细结构,分裂成图 20 所示的具有彼此不同的能量的能级。因此,不能用图 24 (a)所示的简单的 Λ 型 3 能态系统来说明以碱原子为对象的 EIT 现象,因此,实际上,为了高效地产生 EIT,需要考虑这样的多能级。但存在这样的问题,即:至今为止,考虑了多能级的存在与伴随于上述原子速度分布的能量多普勒扩展之间的研究尚不充分。

[0011] 尤其,从应用了 EIT 现象的量子干涉器件的驱动条件的优化等角度看,像本发明这样,在使用多对共振光对的情况下考虑激发能级的能量状态来决定光源(激光)的中心频率或决定激光的调制条件是很重要的。

发明内容

[0012] 本发明正是鉴于上述课题而完成的,其目的在于,提供通过生成波长不同的多对共振光对,来使气室内的更多的气态碱金属原子高效地产生 EIT 现象的量子干涉装置,并且通过利用该量子干涉装置而提供小型的原子振荡器、磁传感器或量子干涉传感器。

[0013] 本发明是为了解决上述课题的至少一部分而完成的,可作为以下方式或应用例来实现。

[0014] [应用例 1] 量子干涉装置至少具有:气态的碱金属原子;以及光源,其用于产生不同频率的共振光对,该共振光对保持与该碱金属原子的 2 个基态之间的能量差相应的频率差,使所述碱金属原子与所述共振光对相互作用,产生电磁诱导透明现象(EIT),其特征在于,所述共振光对的数量为多对,各个共振光对的中心频率彼此不同。

[0015] 本发明的量子干涉装置的特征在于,激发激光对的数量为 2 对以上的多对,且各个激光对的中心频率彼此不同。由此,能够在每单位体积内,使更多的气态碱金属原子产生 EIT 现象。

[0016] [应用例 2] 特征在于,与所述碱金属原子相互作用的共振光对为线偏振光。

[0017] 对于从光源射出的共振光对,在与光的传播方向垂直的面内电矢量的末端描绘出直线的情况下,该光被称为线偏振光。因此,如果不对从光源射出的共振光对实施偏振,则其为线偏振光。另外,可将光的偏振状态考虑成垂直的 2 个线偏振光的重合。由此,由于来自光源的共振光本身就是线偏振光,因此不需要进行偏振的手段,从而能够简化光源结构。

[0018] [应用例 3] 特征在于,与所述碱金属原子相互作用的所述共振光对为圆偏振光。

[0019] 对于从光源射出的共振光对,在与光的传播方向垂直的面内电矢量的末端描绘出圆的情况下,该光被称为圆偏振光。经实验确认,当把共振光对转换成圆偏振光时,波长 λ_0 的光透射强度增大到通常的 6 倍左右。由此,能够提高 EIT 现象下的光输出信号的 S/N。

[0020] [应用例 4] 特征在于,与所述碱金属原子相互作用的所述共振光对为椭圆偏振光。

[0021] 对于从光源射出的共振光对,在与光的传播方向垂直的面内电矢量的末端描绘出椭圆的情况下,该光被称为椭圆偏振光。且可知,存在这样的椭圆偏振光,即:当在共振光对的光路上,以与光路垂直的方式设置了波长板并旋转其表面时,该椭圆偏振光的偏振状态发生变化且是在垂直偏振光与圆偏振光之间连续地变化。因此,即使是椭圆偏振光,也能够提高 EIT 现象下的光输出信号的 S/N。

[0022] [应用例 5] 特征在于,在所述光源与封入了所述碱金属原子的气室之间的光路上设有波长板。

[0023] 波长板是指使垂直的偏振光分量之间产生相位差的多折射元件。将产生相位差 π (180°) 的波长板称为 $\lambda/2$ 板或半波长板,其用于改变线偏振光的偏振方向。将产生相位差 $\pi/2$ (90°) 的波长板称为 $\lambda/4$ 板或四分之一波长板,其用于将线偏振光转换成圆偏振光(椭圆偏振光),或相反地将圆偏振光(椭圆偏振光)转换成线偏振光。在发明中,由于需要将线偏振光转换成圆偏振光或椭圆偏振光,因此需要使用 $\lambda/4$ 板,利用波长板 40 将从光源射出的线偏振光的共振光对转换成圆偏振光或椭圆偏振光,入射到气室。由此,只需简单的结构即可提高 EIT 现象下的光输出信号的 S/N。

[0024] [应用例 6] 特征在于,所述多对共振光对满足电磁诱导透明现象的产生条件,各个共振光对的光强度处于 EIT 信号强度线性增大的区域中的最大值 P_0 附近。

[0025] 采用这样的多对共振光对的光强度分布,能够提高光利用效率。

[0026] [应用例 7] 特征在于,所述多对共振光对的强度分布相对于各个对的中心频率呈高斯分布,且与最大的光强度对应的共振光对满足与该光方向的速度分量为 0 附近的所述碱金属的原子团对应的电磁诱导透明现象的产生条件,其强度是线性区域中的最大值 P_0 。

[0027] 由于碱金属原子的速度分布为高斯分布,因此只要预先将共振光对的光强度分布设定成高斯分布,即可利用简单的光驱动电路来实现高的光利用效率。

[0028] [应用例 8] 特征在于,通过振幅调制与频率调制或相位调制的合成来生成所述多对共振光对。

[0029] 这种调制方式能够以较高的自由度来控制共振光对的光强度分布。

[0030] [应用例 9] 特征在于,通过具有正弦波、三角波、锯齿波、矩形波中的任意一个波形的信号的调制,来生成所述多对共振光对。

[0031] 这种调制方式能够利用简单的光驱动电路以较高的自由度来控制共振光对的光强度分布。

[0032] [应用例 10] 特征在于,具有用于对所述光源进行调制的驱动电路部,该驱动电路部与其它结构部件分离,在制造过程中或在产品化后的状态下,能够任意地控制、设定所述驱动电路部的常数。

[0033] 关于利用了 EIT 现象的“量子干涉器件”,可想到各种应用产品,例如高精度振荡器、钟表等高精度测量装置、以及以磁传感器、花粉或烟雾等微粒子检测传感器为代表的量

子干涉传感器等,通过采用这种结构,能够获得与目的相符的最佳 EIT 信号曲线。

[0034] [应用例 11] 特征在于,当设所述碱金属原子的核自旋量子数为 I 、所述碱金属原子的 $P_{1/2}$ 的激发能级或 $P_{3/2}$ 的激发能级中的超精细结构的量子数为 F' 、考虑了 $F' = I - 1/2$ 以及 $F' = I + 1/2$ 的多普勒扩展的两个能量的范围彼此重合的区域内的最小能量为 E_1 、最大能量为 E_2 时,引起所述电磁诱导透明(EIT)现象的多对共振光对中的任意一对的激发目标能量(励起先エネルギー) E_{end} 满足 $E_1 < E_{\text{end}} < E_2$ 。

[0035] 对于与满足该条件的 E_{end} 对应的共振光对,能够使具有彼此相反方向的速度分量的原子同时产生 EIT,因此不容易发生功率展宽(power broadening:光功率越强 EIT 信号的线宽越大的现象),因此,增大了 Q 值(EIT 信号的半值宽度的倒数),由此提高了性能指数(后面进行定义)。

[0036] [应用例 12] 特征在于,设所述碱金属原子的核自旋量子数为 I 、所述碱金属原子的激发能级的超精细结构的量子数为 F' ,则在考虑了 $F' = I - 1/2$ 以及 $F' = I + 1/2$ 的多普勒扩展的两个能量的范围彼此不重合的状态下,当设考虑了所述多普勒扩展的所述 $F' = I - 1/2$ 的能量的范围为从 E_{11} 到 E_{12} (其中, $E_{11} < E_{12}$)、考虑了所述多普勒扩展的所述 $F' = I + 1/2$ 的能量的范围为从 E_{21} 到 E_{22} (其中, $E_{21} < E_{22}$) 时,引起所述电磁诱导透明现象的多对共振光对中的任意一对的激发目标能量 E_{end} 只满足 $E_{11} < E_{\text{end}} < E_{12}$ 或 $E_{21} < E_{\text{end}} < E_{22}$ 中的某一方的条件。

[0037] 当满足该条件时,能够在保持纯粹的 3 能级系统 Λ 型跃迁的同时,实现基于多对共振光对的 EIT,因此,能够增大基于重叠效应的 EIT 信号的增强效果。

[0038] [应用例 13] 该量子干涉装置使多对共振光对 1 次或多次地折返通过所述碱金属原子,从所述碱金属原子检测所述电磁诱导透明现象,其特征在于,当设未考虑多普勒宽度的激发能级的能量为 E_{10} 、所述多对共振光对的激发目标能量为 $E_{\text{end } 0}$ 时,所述 $E_{\text{end } 0}$ 满足 $E_{10} < E_{\text{end } 0}$ 或 $E_{\text{end } 0} < E_{10}$ 。

[0039] 在该情况下,能够使 1 对共振光在去路和回路上,分别在气室内与具有相反方向的速度分量的碱金属原子群产生 EIT。因此,在这样的条件下由多对共振光对产生 EIT 时,与非反射型的情况相比,利用一半数量的共振光对或一半的光调制宽度,即可得到相同的效果。

[0040] [应用例 14] 该量子干涉装置使多对共振光对 1 次或多次地折返通过所述碱金属原子,从所述碱金属原子检测所述电磁诱导透明现象,其特征在于,当设引起所述电磁诱导透明现象的多对共振光对中的任意一对的激发目标能量为 E_{end} 时,所述 E_{end} 只满足 $E_{\text{end}} < E_{10}$ 或 $E_{10} < E_{\text{end}}$ 中的某一方的条件。

[0041] 在该情况下,所有的共振光对均对 EIT 有贡献,且由于是反射型,因此与非反射型的情况相比,只需一半数量的共振光对即可,效率更高。

[0042] [应用例 15] 特征在于,所述折返次数为奇数次(去与回各自的总光路长度基本相等)。

[0043] 如果光的去路与回路的光路长度基本相等,则在彼此不同的速度群中对 EIT 有贡献的原子数量基本相等,因此从 EIT 产生效率的角度来看是有利的。

[0044] [应用例 16] 特征在于,原子振荡器具有所述量子干涉装置。

[0045] 原子振荡器通过具有本发明的量子干涉装置,能够在 S/N 高的状态下产生 EIT 现

象,因此能够实现原子振荡器的小型化。

[0046] [应用例 17] 特征在于,磁传感器具有本发明的上述量子干涉装置。

[0047] 原子振荡器的振荡频率以原子的 2 个基态能级之间的能量差(ΔE_{12})为基准。 ΔE_{12} 的值随外部磁场的强度或变动而变化,因此,对原子振荡器的气室实施了磁场屏蔽,以不受外部磁场的影响。因此,可通过去除磁场屏蔽并根据振荡频率变化读取 ΔE_{12} 的变化,来制造测定外部磁场的强度和变动的磁传感器。通过具有本发明的量子干涉装置,能够在 S/N 较高的状态下产生 EIT 现象,因此能够实现磁传感器的小型化。

[0048] [应用例 18] 特征在于,量子干涉传感器具有本发明的所述量子干涉装置。

[0049] 通过具有本发明的量子干涉装置,能够实现用于检测影响 EIT 信号曲线的外部干扰的各种传感器的灵敏度和精度提高以及小型化。

附图说明

[0050] 图 1 是气态碱金属原子的速度分布的概略图。

[0051] 图 2 是示出本发明的第 1 实施方式的原子振荡器的结构的图。

[0052] 图 3 (a) 及 (b) 是示出入射到气室(gas cell)的共振光的频谱的图。

[0053] 图 4 是示出入射到气室的共振光和气态碱金属原子的移动方向的状态的图。

[0054] 图 5 是说明基于原子运动的能量多普勒扩展与本发明的共振光之间的关系的示意图。

[0055] 图 6 是示出本发明的第 2 实施方式的原子振荡器的结构的图。

[0056] 图 7 是示出本发明的第 3 实施方式的原子振荡器的结构的图。

[0057] 图 8 是示出本发明的实施方式的磁传感器的结构的图。

[0058] 图 9 (a)是由波长不同的 2 种共振光的对引起的 EIT 现象的光透射强度的图,(b)是对波长不同的 2 种共振光的对进行调制时的 EIT 现象的光透射强度的图。

[0059] 图 10 是示出本发明的第 4 实施方式的原子振荡器的结构的图。

[0060] 图 11 是示出本发明的第 5 实施方式的原子振荡器的结构的图。

[0061] 图 12 (a) 是示出原子的“速度(一维射影)”分布(麦克斯韦玻耳兹曼分布)的图,(b) 是示出原子的“速度”分布(麦克斯韦玻耳兹曼分布)的图。

[0062] 图 13 (a) 是示出正弦波调制时的高次谐波(十分量)分布的图,(b) 是示出典型的方波调制时的高次谐波(十分量)分布的图,(c) 是示出典型的三角波调制时的高次谐波(十分量)分布的图。

[0063] 图 14 (a) 是示出光强度的线性-非线性分支点的图,(b) 是示出激光频率分布的图。

[0064] 图 15 (a) 是示出 EIT 信号线宽的激光强度依赖性的图,(b) 是针对 EIT 信号强度与 EIT 信号线宽之间的关系而示出以往与本发明的比较的图。

[0065] 图 16 是示出 CsD2 线附近激光频率分布的图。

[0066] 图 17 是示出 EIT 信号强度与线宽之间的关系的图。

[0067] 图 18 是示出同一线宽下的 EIT 信号强度的比较的图。

[0068] 图 19 是示出实验系统的结构的图。

[0069] 图 20 (a) 是与 D2 线对应的能量图,(b) 是与 D1 线对应的能量图,(c) 是考虑了多

普勒扩展的激发能级附近的能量图。

[0070] 图 21 (a) 是考虑了多普勒扩展的激发能级附近的能量图, (b) 是考虑了多普勒扩展的激发能级附近的能量图。

[0071] 图 22 (a) 是激发能级附近的能量图, (b) 是激发能级附近的能量图, (c) 是示出本发明的第 6 实施方式的封入了碱金属原子的气室、光源、光路以及检测器的配置结构的图。

[0072] 图 23 (a) 是激发能级附近的能量图, (b) 是激发能级附近的能量图, (c) 是示出本发明的第 7 实施方式的封入了碱金属原子的气室、光源、光路以及检测器的配置结构的图。

[0073] 图 24 (a) 是说明以往的 EIT 方式的原理的图, (b)、(c) 是示出以往的气室与共振光之间的关系的图。

[0074] 标号说明

[0075] 1 中心波长产生单元 ; 2LD ; 3EOM ; 4EOM ; 5 气室 ; 6 光检测器 ; 7 频率控制单元单元 ; 8 压控石英振荡器 ; 9 振荡器 ; 10 振荡器 ; 11、12、13 共振光 ; 14、15、16 气态铯原子 ; 17 混合器 ; 18、19 调制信号 ; 40 波长板 ; 41 未实施调制时的被线偏振光化的波形 ; 42 未实施调制时的被圆偏振光化的波形 ; 43 实施了调制时的被线偏振光化的波形 ; 44 实施了调制时的被椭圆偏振光化的波形 ; 45 实施了调制时的被圆偏振光化的波形 ; 50、51、52、53、54 原子振荡器。

具体实施方式

[0076] 下面, 使用附图所示的实施方式来详细说明本发明。不过, 只要没有特别的记载, 本实施方式所述的结构要素、种类、组合、形状、其相对配置等均只是单纯的说明例, 其目的并不在于将本发明的范围仅局限于此。

[0077] 这里, 预先对下面将多次出现的“性能指数”进行定义。性能指数被定义为 EIT 信号的线宽的倒数(即 Q 值)与 EIT 信噪比(即 S/N)的积。例如, 由于 S/N 与 EIT 信号强度成比例, 因此如果 EIT 信号强度增大, 则性能指数提高。本发明的主要目的在于提高该性能指数。

[0078] 图 1 示出了封入在容器中的气态碱金属原子团的速度分布的概要图。

[0079] 图 1 的横轴表示气态碱金属原子的速度, 纵轴表示具有该速度的气态碱金属原子的数量的比例。如图 1 所示, 气态碱金属原子具有以速度 0 为中心的与温度对应的一定的速度分布。这里, 速度表示向气态碱金属原子团照射激光时与照射方向平行的原子速度分量, 将与光源相对静止的速度的值设为 0。这里, 本发明人注意到了气态碱金属原子的速度对 EIT 现象的影响很大。当气态碱金属原子的速度存在分布时, 由于光的多普勒效应(多普勒频移), 在共振光的视波长即从气态碱金属原子观察到的共振光的波长中, 产生分布。因此, 注意到, 在原子团中存在相当数量的如下这样的气态碱金属原子, 即: 即使同时照射 1 对共振光 1 和 2, 这些气态碱金属原子也不会产生 EIT 现象而将存留下来。在采用以往的方法即同时向碱金属原子团照射 1 对共振光 1 和 2 的情况下, 被封入在气室内的气态碱金属原子团中的对 EIT 现象有贡献的碱金属原子仅仅是一部分。因此, 本发明人进行了研究, 使得以往由于多普勒效应的影响而对 EIT 现象没有贡献的气态碱金属原子也能够有助于产生 EIT 现象。下面, 对本发明进行详细说明。

[0080] 图 2 是示出本发明的第 1 实施方式的原子振荡器的结构的图。该原子振荡器 50

利用基于入射由 2 对以上(如后文所述为 3 对)的波长不同的相干光对构成的共振光时的量子干涉效应的光吸收特性,来控制振荡频率,该原子振荡器 50 构成为具有:射出各共振光的 LD (VCSEL)(相干光源)2;产生 LD 2 的中心波长的中心波长产生单元 1;振荡器 9,其振荡产生相当于 2 个不同的基态的能量差(ΔE_{12})的频率(9.2GHz)的 1/2 (4.596GHz);振荡器 10,其振荡产生 25MHz 左右的频率;EOM (电子光学调制元件)3、4,其利用电信号对从 LD 2 射出的共振光 11 实施频率调制;气室 5,其根据经 EOM 4 调制的光 12 的波长来改变光的吸收量,封入有气态铯(Cs,碱金属)原子;光检测器(光检测单元)6,其检测从气室 5 透射过的光 13;以及频率控制单元 7,其根据光检测器 6 的输出,检测气室 5 的 EIT 状态,控制输出电压。另外,振荡器 10 的振荡频率被设定为 25MHz,该频率是远小于铯原子的典型的多普勒宽度(例如在室温下大约为 1GHz)的值。可对该频率进行适当变更。另外,关于振荡器 9 的输出频率,由于对于铯而言,相当于 ΔE_{12} 的频率大约为 9.2GHz(4.596GHz $\times 2$),因此,振荡器 9 的输出频率设为 4.596GHz,其是通过如下方式得到的频率进行倍频而生成的,所述频率是根据从频率控制单元 7 输出的控制电压对压控石英振荡器 8 进行控制而得到的。并且,利用振荡器 10 的频率(25MHz)对 EOM3 进行调制,利用振荡器 9 的频率(4.596GHz)对 EOM 4 进行调制,将 EOM 3 和 EOM 4 串联配置在 LD 2 的射出侧。并且,EOM 3 和振荡器 10 的组合与 EOM 4 和振荡器 9 的组合的排列顺序也可以颠倒过来。

[0081] 即,本实施方式的原子振荡器 50 的结构与以往的不同之处在于:针对从 LD 2 射出的共振光 11,经由作为调制单元的 EOM 3,得到 2 对以上(3 对)的波长不同的 2 种共振光的对。在以往的原子振荡器中,只准备了 1 对波长不同的 2 种共振光的对,并对频率进行控制,使得同时照射的 2 种共振光的频率差(波长差)与各个基态能级的能量差 ΔE_{12} 准确地一致。但是,由于因原子运动而产生的共振光的多普勒效应,封入在气室 5 中的铯原子团的共振光波长产生分布,对于 1 对共振光而言,只是偶尔与以满足与其波长对应的共振条件的速度运动的一部分铯原子发生相互作用,因此产生 EIT 现象的效率差。因此,在本实施方式中,将调制单元构成为,使得波长不同的至少 4 个(2 个共振光对)共振光与封入在气室 5 中的气态的铯原子相互作用。由此,能够增大气室 5 的每单位体积内的有助于产生 EIT 现象的铯原子的数量,能够高效地取得 EIT 信号。

[0082] 图 3 (a) 及(b)是示出入射到气室的共振光的频谱的图。图 4 是示出入射到气室的共振光与气态铯原子的移动方向的状态的图。

[0083] 接着,参照图 3 及图 4 对本实施方式的动作进行说明。中心波长产生单元 1 以中心波长为 λ_0 (中心频率 f_0)的方式产生 LD 2 的共振光 11。当 EOM 3 和 4 对 LD 2 的共振光 11 实施了频率调制时,具有图 3 (a) 所示的频谱 30 ~ 32 的共振光 12 被输入到气室 5 中。这里,在图 3 (a) 中,A - A' 的频率差为 9.2GHz,对于这 1 对共振光,通过将 λ_0 设定成适当的值,图 4 所示的入射光 12 的方向上的速度分量小的气态铯原子 15 产生 EIT 现象。另外,B - B' 的频率差也是 9.2GHz,对于这 1 对共振光,具有与图 4 所示的入射光 12 相反方向的速度分量的气态铯原子 14 产生 EIT 现象。另外,在图 3 (a) 中,C - C' 的频率差也是 9.2GHz,对于这 1 对共振光,具有与图 4 所示的入射光 12 相同方向的速度分量的气态铯原子 16 产生 EIT 现象。这样,气室 5 内的原子具有多种速度分布。因此,当如上所述地向气室 5 入射被赋予了边带(sideband)B、B'、C、C' 的分量的共振光 12 时,A-A'、B-B'、以及 C-C' 的频率差均为 9.2GHz,这 3 对激光均与具有对应的速度分量的气态铯原子发生相互作用。

用,其结果,增大了对 EIT 现象有贡献的铯原子的比例。由此,能够得到信噪比(S/N) 大的期望的 EIT 信号。

[0084] 另外,在本实施方式中,虽然将 EOM 4 的调制频率设定为气态铯原子的频率差的 $1/2$ (4.596GHz),但是也可以设定为频率差 9.2GHz。此时的共振光的频谱如图 3 (b)所示,产生了频谱 33 ~ 35,但例如不使用频谱 33,而是使用频谱 34 和 35 (也可以是频谱 33 和 34)。即, $A - \lambda 0$ 的频率差是 9.2GHz,对于这 1 对共振光,通过将 $\lambda 0$ 设定成适当的值,在图 4 所示的入射光 12 的方向上的速度分量小的气态铯原子 15 产生 EIT 现象。 $B - \lambda 1$ 的频率差也是 9.2GHz,对于这 1 对共振光,具有与图 4 所示的入射光 12 相反方向的速度分量的气态铯原子 14 产生 EIT 现象。另外, $C - \lambda 2$ 的频率差也是 9.2GHz,对于这 1 对共振光,具有与图 4 所示的入射光 12 相同方向的速度分量的气态铯原子 16 产生 EIT 现象。这样,气室 5 内的原子具有多种速度分布。因此,当如上述地向气室 5 入射被赋予了边带 B、 $\lambda 1$ 、C、 $\lambda 2$ 的分量的共振光 12 时, $A - \lambda 0$ 、 $B - \lambda 1$ 、以及 $C - \lambda 2$ 的频率差均为 9.2GHz,这 3 对激光均与具有对应的速度分量的气态铯原子发生相互作用,其结果,增大了对 EIT 现象有贡献的铯原子的比例。由此能够得到信噪比(S/N) 大的期望的 EIT 信号。

[0085] 即,为了产生至少 2 对共振光对(这里为 3 对)的共振光,考虑使从 LD 2 射出的共振光重叠地产生边带,并利用其频谱。另外,需要用以下 2 个频率来对用于调制共振光的频率进行调制,即:相当于 2 个不同的基态的能量差(ΔE_{12}) 的频率(9.2GHz) 的 $1/2$ 的 4.596GHz;以及远小于铯原子的典型的多普勒宽度(例如在室温下大约为 1GHz) 的值的频率(这里为 25MHz)。另外,需要利用用于对光进行调制的 EOM。因此在本实施方式中,准备了分别振荡产生 2 种频率的振荡器 9 和 10,用各个频率对串联配置在 LD 2 的射出侧的 EOM 3 和 4 进行调制。由此,能够基于从 LD 2 射出的共振光 11,产生具有 3 对频谱的共振光,这 3 对频谱保持 9.2GHz 的频率差。

[0086] 另外,在本实施方式中,EOM 3 和 EOM 4 各设有 1 个,不过,也可以在 LD 2 的射出侧串联配置 EOM 4 和至少 2 个 EOM 3。由此,可任意设定共振光对的数量,且以梳齿状的频率间隔产生。

[0087] 图 5 是说明基于原子运动的能量多普勒扩展与本发明的共振光之间的关系的示意图。封入容器中的气态碱金属原子团的能量状态图可通过如下方式来表现:用与多普勒扩展相当的能带来置换图 24 所示的针对 1 个原子的能量状态图的激发能级。图 5 中的 20、21、22 的各能级是与图 4 中的分别由 16、15、14 表示的原子对应的激发能级。由此可知,对于具有速度分布的气态碱金属原子团,利用多个共振光对增大了对 EIT 现象有贡献的原子比例。因此,例如,如果将分配给 1 对共振光的功率设定为与以往的功率基本相等,则吸收的饱和极限变高,总功率增大,因此,能够取得高对比度的 EIT 信号。另外,在总光照射功率与以往基本相等的情况下,本发明的每 1 对共振光的功率减小,因此抑制了 EIT 信号的功率展宽(光功率越强 EIT 信号的线宽越大的现象),与以往相比,能够取得半值宽度窄的良好 EIT 信号。因此,在将其应用于振荡器的情况下,与以往相比,能够提高频率稳定性。

[0088] 图 6 是示出本发明的第 2 实施方式的原子振荡器的结构的图。对相同结构要素标注与图 2 相同的参照标号来进行说明。图 6 与图 2 的不同之处在于,删除了 EOM 4,并设置了将振荡器 10 和振荡器 9 的输出信号混合的混合器 17,利用混合器 17 的输出信号 18 来驱动 EOM 3,将 EOM 3 配置在 LD 2 的射出侧。由此,从 EOM 3 射出的共振光 12 产生与图 3

(a) 相同的频谱。

[0089] 即,为了对光进行调制,使用了 EOM,但存在下述问题,即:如果增加频谱的数量,则必须相应地增加 EOM 的数量,成本增高且部件数量增加。因此,在本实施方式中,预先用混合器 17 混合对 EOM 进行调制的信号,利用其输出信号 18 对 1 个 EOM 3 进行调制。由此,可将 EOM 的数量控制为最小,能够减少部件数量。

[0090] 图 7 是示出本发明的第 3 实施方式的原子振荡器的结构的图。对相同的结构要素标注与图 6 相同的参照标号来进行说明。图 7 与图 6 的不同之处在于,删除了 EOM 3,利用混合器 17 的输出信号 19 直接对 LD 2 进行调制驱动。由此,从 LD 2 射出的共振光 11 产生与图 3 (a) 相同的频谱。

[0091] 即,中心波长产生单元 1 以中心波长为 λ_0 的方式产生从 LD 2 射出的共振光 11。并且,为了对中心波长进行调制,除了用 EOM 对从 LD 2 射出的共振光 11 进行调制的方法以外,还有对 LD 2 本身进行调制的方法。因此,在本实施方式中,混合器 17 将振荡器 10 和振荡器 9 的输出频率混合,并用混合器 17 混合后的信号 19 对 LD 2 本身进行调制驱动。由此,可以不需要 EOM。另外,还可从压控石英振荡器 8 经由 PLL 等(也可利用振荡器 9 的电路的一部分)来生成振荡器 10 的输出频率。在该情况下,也不需要振荡器 10。

[0092] 另外,省略图示,也可以将设置在以往的 EIT 方式的原子振荡器中的 LD 形成为如下结构,即:将各个不同波长的面发光激光配置成阵列状。

[0093] 图 8 是示出本发明的实施方式的磁传感器的结构的图。对相同结构要素标注与图 7 相同的参照标号来进行说明。图 8 与图 7 的不同之处在于,在气室 5 的附近配置了被测定磁场产生源 37,并具有测定频率控制单元 7 的输出信号的变动的磁场测定器 36。原子振荡器的振荡频率以原子的 2 个基态能级之间的能量差 (ΔE_{12}) 为基准。 ΔE_{12} 的值随外部磁场的强度或变动而变化,因此,对原子振荡器的气室实施了磁场屏蔽,以不受外部磁场的影响。因此,可通过去除磁场屏蔽并根据振荡频率变化读取 ΔE_{12} 的变化,来制造测定外部磁场的强度和变动的磁传感器。通过采用本发明的结构,能够在 S/N 较高的状态下产生 EIT 现象,因此能够实现磁传感器的小型化。

[0094] 图 9 (a) 是由波长不同的 2 个共振光的对引起的 EIT 现象的光透射强度的图,图 9 (b) 是对波长不同的 2 个共振光的对进行调制时的 EIT 现象的光透射强度的图。根据图 9 (a) 可知,波形 41 是来自 VCSEL 的经线偏振光化的光透射强度的波形,波形 42 表示进一步使该共振光对通过波长板而成为圆偏振光时的光透射强度。可知,波形 42 相对于波形 41 增加了大约 20% 的水平。另外,当如图 9 (b) 所示地对共振光对进行调制时,多个共振光对均与具有对应的速度分布的气态铯原子发生相互作用,显现出具有多个峰值的波形 43。在本实施方式中,例如如图 10 所示,在 LD 2 与气室 5 之间,以与光路垂直的方式配置了波长板 40,当逐渐旋转波长板面而使得共振光对 11 变成圆偏振光时,确认到在波长 λ_0 处光透射强度为最大的波形 45。因此,确认到,在共振光对从线偏振光向圆偏振光变化的过程中,光透射强度变成波形 43 (线偏振光)、波形 44 (椭圆偏振光)、波形 45 (圆偏振光)。

[0095] 即,对于从 LD 2 射出的共振光对 11,在与光的传播方向垂直面内电矢量的末端描绘出圆的情况下,该光被称为圆偏振光。经实验确认到:当将共振光对转换成圆偏振光时,波长 λ_0 的光透射强度增大到通常的 6 倍左右。由此,能够提高 EIT 现象下的光输出信号的 S/N。

[0096] 另外,对于从 LD 2 射出的共振光对 11,在与光的传播方向垂直的面内电矢量的末端描绘出椭圆的情况下,该光被称为椭圆偏振光。存在这样的椭圆偏振光,即:当在共振光对的光路上,以与光路垂直的方式设置了波长板并旋转其表面时,该椭圆偏振光的偏振状态发生变化且是在垂直偏振光与圆偏振光之间连续地变化。因此,即使是椭圆偏振光,也能够提高 EIT 现象下的光输出信号的 S/N。

[0097] 图 10 是示出本发明的第 4 实施方式的原子振荡器的结构的图。第 4 实施方式是在图 7 的结构中追加了波长板 40 而得到的结构。即,在 LD 2 与气室 5 之间,以与光路垂直的方式配置了波长板 40。从 LD 2 射出的线偏振光的共振光对 11 入射到波长板 40,被偏振 90 度相位而成为圆偏振光 11a。另外,波长板 40 可以配置在 LD 2 与气室 5 之间的任何位置,可以位于 LD 2 的出射面附近,也可以位于气室 5 的入射口附近。

[0098] 图 11 是示出本发明的第 5 实施方式的原子振荡器的结构的图。第 5 实施方式是在图 6 的结构中追加波长板 40 而得到的结构。即,在 EOM 3 与气室 5 之间,以与光路垂直的方式设置了波长板 40。从 LD 2 射出的线偏振光的共振光对 11 经 EOM 3 调制后成为共振光 12,入射到波长板 40,被偏振 90 度相位而成为圆偏振光 12a。另外,波长板 40 可以配置在 EOM 3 与气室 5 之间的任何位置处,可以配置在 EOM 3 的出射面附近,也可以配置在气室 5 的入射口附近。

[0099] 即,波长板是指使垂直的偏振光分量之间产生相位差的多折射元件。将产生相位差 π (180°) 的波长板称为 $\lambda/2$ 板或半波长板,其用于改变线偏振光的偏振方向。将产生相位差 $\pi/2$ (90°) 的波长板称为 $\lambda/4$ 板或四分之一波长板,其用于将线偏振光转换成圆偏振光(椭圆偏振光),或相反地将圆偏振光(椭圆偏振光)转换成线偏振光。在本实施方式中,由于需要将线偏振光转换成圆偏振光或椭圆偏振光,因此需要使用 $\lambda/4$ 板,利用波长板 40 将从 LD 2 射出的线偏振光的共振光对 11 转换成圆偏振光或椭圆偏振光,入射到气室 5。由此,只需简单的结构即可提高 EIT 现象下的光输出信号的 S/N。

[0100] 图 14 (a) 是示出满足产生 EIT 的条件的 2 光波共振光对的光强度(横轴)与 EIT 信号强度(纵轴)之间的关系的图。在光强度很弱的区域,EIT 信号强度与光强度保持比例关系且大致线性地变化。但是,当光强度超过某点(P_0)时,即使增大光强度,EIT 信号强度也不明显地变化(饱和区域)。考虑到这点,关注气室内的碱金属原子中的具有特定速度(如上所述,是指与入射光平行的速度分量)的原子团(ensemble),从光利用效率的角度来看,希望将入射光强度设定为 EIT 信号强度相对于入射光强度未达到饱和的最大光强度 P_0 (强度线性地增加的区域中最大的光强度)。

[0101] 作为 EIT 产生区域的气室内的碱金属原子(例如铯, Cs)团具有图 12 (b) 所示的速度分布(曲线),该曲线随压力和温度等环境因素而变化,但如果仅关注某个固定方向上的速度分量的分布,则如图 12 (a) 所示,基本呈高斯分布。当向该系统入射 2 光波的共振光对来产生 EIT 时,因该速度分布而产生能量的多普勒扩展,因此与产生 EIT 的频率区域的中心频率对应的 EIT 信号强度分布也呈高斯分布(典型情况下,经频率换算而具有 1 [GHz] 左右的扩展)。因此,关注上述光利用效率,当设定为使得多个共振光对各自的光强度处于 P_0 附近时,希望其分布为图 14 (b) 所示那样,呈接近原子的速度分布即高斯分布的形状。

[0102] 半导体激光器等当被施加直流电流时,发出与其电流值(I_{bias})对应的频率(波长)的单色光(相干光)。如果把中心波长设为大约 852 [nm] 并对 I_{bias} 施加 4.6 [GHz]

的「调制」时($I_{\text{mod}}(1) = 4.6 \text{ [GHz]}$),在中心波长的两侧形成二者间隔为($4.6 \times 2 = 9.2 \text{ [GHz]}$)的边带,当该 2 光波作为共振光对入射到气室内的 Cs 原子时,发生量子干涉而产生 EIT 现象。这里,结合前面的多普勒扩展可知,对于 2 光波的共振光对(1 对)而言,对 EIT 现象有贡献的气室内的 Cs 原子数量非常少。即,以往 EIT 产生效率差。

[0103] 下面使用附图详细地说明驱动半导体激光器的施加电流的状态和激光器的频率分布。图 16 是示出在对中心波长为大约 852 [nm]的单色半导体激光器实施频率调制时观测到的频率分布的图。为了将碱金属原子(Cs)作为对象原子来产生 EIT,将 I_{bias} (直流偏置电流)设定成使得中心波长成为与 Cs 激发能量相当的 852 [nm]左右,然后可以对 I_{bias} 实施 4.6 [GHz]的频率调制 $I_{\text{mod}}(1)$,或者经由 EOM(电子光学调制元件)产生边带,由此产生 1 对彼此的频率差为 9.2GHz 的 2 光波的共振光对。当对其进一步重叠任意频率(例如 15 [MHz])的调制 $I_{\text{mod}}(2)$ (重叠调制)时,2 光波分别由重叠频率 15 [MHz]进行调制,产生具有重叠频率 15 [MHz]的间隔的梳(Comb)齿状的频率分布。具有这种梳齿状的频率分布的各个原来的 2 光波可以被看作多对共振光对,因此,只要使其与气室内的 Cs 原子发生作用,即可与以不同速度运动的 Cs 原子团同时产生 EIT, EIT 产生效率进一步提高(本发明)。

[0104] 图 16 (a)是以往那样未进行重叠调制的 2 光波中的 1 个。(b)、(c)是用正弦波来重叠 $I_{\text{mod}}(2)$ 时的频谱。经调制的频率均等于 15 [MHz],但(b)、(c)的调制的振幅条件不同。二者均呈现梳齿状的频率分布,并且可知,与调制振幅为 0.2 [V]的(b)相比,1.0 [V]的(c)的频率扩展范围更大。

[0105] 图 17 是将 Cs 的 EIT 信号的强度(纵轴)和线宽(横轴)之间的关系与现有方法进行比较的图,上述关系是通过利用考虑了本发明的重叠调制 $I_{\text{mod}}(2)$ 的激光驱动来照射多个共振光对而得到的,通过改变照射到 Cs 的激光功率而得到数据。图 17 的(a)、(b)、(c)分别与图 16 的(a)、(b)、(c)对应。可知与以往相比,在相同线宽的情况下,本发明的 EIT 信号强度远远大于以往,先前定义的“性能指数”(= $Q \times (S/N)$)提高。在本发明方法中,还能够理解到,与(b)相比,(c)的 EIT 信号强度更大是因为:根据图 16 所示的各个激光频谱分布可知,通过捕捉气室内的速度分布更多的 Cs 原子,与共振光对之间相互作用的效率提高,这对产生 EIT 有贡献。并且确认到:在现有方法(a)中,由于无法得到 EIT 信号强度,因此很难实现 120 [kHz]以下的 EIT 线宽,很难提高 Q 值(EIT 信号线宽的倒数),但在本发明(b)、(c)中,能够进一步细化线宽,因此能够大幅提高性能指数。

[0106] 图 18 是对半值全宽(线宽)为 127 [kHz]下的各个 EIT 信号进行比较的图。确认到:与现有方法(a)相比,在本发明的(c)中, EIT 信号强度大约比其大 14 倍。

[0107] 对到此为止的结果进行总结,可明确以下结论。当要细化功率展宽的线宽时,如果降低激光功率(图 15 (a)),则 EIT 信号强度与其成比例地减弱(图 15 (b)),在现有方法中,在 A 点处 EIT 信号强度变成 0。即,无法得到比 A 点处的信号线宽更窄的信号线宽。

[0108] 但是,在本发明的方法中,对产生 EIT 信号有贡献的气室内的原子数量(密度)大幅增加,因此,在现有方法中信号强度已消失的 EIT 信号宽度下,能够得到充分的信号强度(B 点)。即,用 B 点处的 EIT 信号强度除以 A 点处的 EIT 信号强度而得到的值表示本发明的方法相对于现有方法的最大放大率,是 S/N 的改善效果的指标。如果 S/N 得到改善,则性能指数提高,因此可与其大小成比例地提高利用了 EIT 现象的各种器件的性能。很明显,例如在

利用了 EIT 现象的原子振荡器中,频率稳定度与 S/N 成比例地提高,如果将其应用于磁传感器(利用 EIT 原子振荡器的频率对外部磁场敏感地做出反应而发生变化的性质)等量子干涉传感器中,则能够产生高灵敏度等的效果。另外,在本发明中,与 S/N 得到改善相应地,即使减小引发 EIT 现象的上述气室的大小,也能够得到与以往相同的信号强度,因此,具有能够实现器件的进一步的小型化等的效果。

[0109] 另外,如图 15 (b)所示,如果在 B 点处得到了充分的 EIT 信号强度,则可通过进一步降低激光强度来进一步细化信号线宽(排除功率展宽的影响)。例如,用点划线表示作为目标的最低信号强度线,对于本发明的方法而言,能够实现 C 点处的信号线宽。与先前的关于 S/N 的讨论相同,线宽值越小, Q 值越大,因此性能指数的值变大,从而能够提高利用了 EIT 现象的各种器件的性能。例如,在利用了 EIT 现象的原子振荡器中,通过 EIT 信号的细线化,频率稳定度提高,如果将其应用于磁传感器(利用 EIT 原子振荡器的频率对外部磁场敏感地做出反应而发生变化的性质)等量子干涉传感器,则带来高精度化等效果。

[0110] 通过以上讨论可知,根据本发明,通过适当地选择激光的调制方法,能够得到现有方法所无法实现的 EIT 信号强度和 EIT 线宽,因此具有这样的优点:能够大范围地确定与应用目的相符的 EIT 信号曲线。利用该优点,例如在 EIT 器件设计、制造阶段中,如果利用激光驱动电路 IC 等一体地独立设置能够控制上述激光调制参数(调制波形、强度等,还包括调制开启/关闭)的单元,并将相当数量的其它结构要素作为通用部件,则能够容易地分开制造专用目的的 EIT 器件,具有降低成本等的效果。另外,也可以预先设置这样的单元,即:产品用户自己可利用该单元,根据使用环境等适当地控制、设定上述激光调制参数。

[0111] 图 13 示出了激光的调制方法与傅立叶分量之间的关系。(a)是用正弦波进行振幅调制(AM)时的傅立叶分量,(b)是用矩形波进行振幅调制(AM)时的傅立叶分量,(c)是用三角波进行振幅调制(AM)时的傅立叶分量。横轴是频率。矩形波调制与三角波调制相比,存在更高次的傅立叶分量。如果用频率调制(FM)或相位调制(PM)对这些合成波进一步进行重叠调制,并对激光进行作为 Imod (2)的重叠调制,则能够得到任意的调制波形,并能够高自由度地控制多个共振光对的强度分布和相邻的频率间隔。由此,能够得到如下等效果:容易实现每种用途所要求的器件性能需要的 EIT 信号制御,精度也得到提高。

[0112] 图 19 是示出本发明的实验系统的结构的图。其是这样的例子,即:不用 Imod (1)对激光进行调制,而是利用了 EOM (电子光学调制元件)。

[0113] 图 20 是碱金属的电子状态的能量图。图 20 (a)是激发能级为 P_{3/2}、即与所谓的 D₂ 线对应的能量图,图 20 (b)是激发能级为 P_{1/2}、即与所谓的 D₁ 线对应的能量图。图 20 (c)表示以往的基于 2 光波的 1 对共振光对或本发明的多对共振光对与考虑了多普勒扩展的碱金属原子之间的相互作用,是满足了产生 EIT 现象的条件时的激发能级附近的能量图。

[0114] 激发能级 P_{3/2} 由超精细结构构成,在利用了 EIT 现象的器件的通常使用温度范围内,涉及 EIT 产生的 $F' = I + 1/2$ 、 $I - 1/2$ 的能量因多普勒扩展而重合(图 20 (c))。另外,在温度高的区域中,即使是激发能级 P_{1/2} 的超精细结构,有时也会因多普勒扩展而发生能量重合。对激光中心频率(中心波长)进行设定,使得本发明的多个共振光对中的尽量多的共振光对的激发目标能量 E_{end} 进入该重合区域。即,如图 20 (c)所示,使得满足 $E_1 < E_{end} < E_2$ 。这里,所述 F' 表示超精细结构的量子数,所述 I 表示核自旋量子数。

[0115] 入射到该能量重合区域的 1 对共振光对引起与不同的 F' (超精细结构的量子数) 对应的 2 种碱金属原子的 EIT 现象。即, 针对具有彼此相反方向的速度分量的 2 种不同的速度群(ensemble: 原子团) 的碱金属原子, 同时产生 EIT。当满足这样的条件时, 共振光对的光强度(光子数) 被分散到各个原子团中, 因此 EIT 信号强度不容易达到饱和, 能够照射更强的激光, S/N 提高。尤其是, 当气室小型化而需要增强 EIT 信号强度时, 效果更好。另外, 如果所照射的总的光强度不变, 则在该重合区域中, 光子数以如上所述地使得不同的 2 种速度群的碱金属原子与光子发生相互作用的方式分散, 因此其结果是, 对于一方的速度群, 抑制了功率展宽, 细化了 EIT 信号的线宽(Q 值增大)。即, 能够提高性能指数。

[0116] 图 21 是典型的 $P1/2$ 能级的能量图。一般情况下, $D1$ 线的超精细结构能量分裂宽度比 $D2$ 线大(典型为 $0.5 \sim 1\text{GHz}$), 多普勒扩展的 2 种能带不重合。如上所述, 在 $D2$ 线(激发目标能级为 $P3/2$) 的情况下, 由于超精细结构的能量分裂宽度小, 因此, 因多普勒扩展而产生能带重合, 能够使多对共振光对与同一原子同时发生相互作用。在该情况下, 发生 4 光波混合, 纯粹的 3 能级系统 Λ 型跃迁出现问题, EIT 效率降低。但是, 一般情况下, $D1$ 线的超精细结构能量分裂宽度比 $D2$ 线大(典型为 $0.5 \sim 1\text{GHz}$), 多普勒扩展的 2 种能带不重合。因此, 如果使用 $D1$ 线, 则能够在保持纯粹的 3 能级系统 Λ 型跃迁的同时, 实现基于多对共振光对的 EIT, 因此, 能够增大基于重叠效应的 EIT 信号的增强效果。在该情况下, 存在 $E11 < E_{\text{end}} < E12$ (图 21 (a)) 和 $E21 < E_{\text{end}} < E22$ (图 21 (b)) 这 2 种方法。

[0117] 图 22(c) 是示出本发明的第 6 实施方式的封入了碱金属原子的气室、光源、光路以及检测器的配置结构的图。这里, 由激光光源发出的光入射到气室, 与碱金属原子产生 EIT 现象, 之后, 通过反射等手段而折返的光向反方向前进, 由此再次与气室内的碱金属原子产生 EIT 现象, 然后被导入到光检测器中。这是所谓的反射型。此时, 如图 22 (a)、(b) 所示, 当把未考虑多普勒宽度的激发能级的能量设为 $E10$ 时, 如果以上述光源的单色光的激发目标能量 $E_{\text{end}0}$ 与 $E10$ 不相等($E10 < E_{\text{end}0}$ 或 $E_{\text{end}0} < E10$) 的方式进行选择, 则能够使 1 对共振光在去路和回路上, 分别在气室内与具有相反方向的速度分量的碱金属原子群产生 EIT。因此, 在这样的条件下由多个共振光对产生 EIT 时, 与非反射型的情况相比, 利用一半数量的共振光对或一半的光调制宽度, 即可得到相同的本发明的效果。因此, 根据本结构, 激光驱动器等生成多对共振光对的机构的设计变得更容易, 器件驱动时的功耗减少, 有利用节能。

[0118] 图 23 (c) 是示出本发明的第 7 实施方式的封入了碱金属原子的气室、光源、光路以及检测器的配置结构的图。这里, 从激光光源发出的光入射到气室, 与碱金属原子产生 EIT 现象, 之后, 通过反射等手段, 使光多次通过气室内, 每当引起了 EIT 现象后被导入到光检测器中。这是所谓的多重反射型。此时, 如图 23 (a)、(b) 所示, 如果以能够引起 EIT 现象的多个共振光对的所有的激发目标能量 E_{end} 只满足 $E_{\text{end}} < E10$ 或 $E10 < E_{\text{end}}$ 中的任意一个条件的方式进行选择, 则能够使 1 对共振光在去路和回路上分别在气室内与具有相反方向的速度分量的碱金属原子群产生 EIT。另外, 通过采用多重反射型, 光路长度变得更长, 从而相干时间增大, EIT 信号强度更强, 线宽更细。这有利于提高性能指数。另外, 当把光的反射次数设为奇数次且光的去路与回路的光路长度大致相等时, 在彼此不同的速度群中, 对 EIT 有贡献的原子的数量几乎相等, 因此, 从 EIT 产生效率的角度来看是有利的。因此, 在该条件下由多个共振光对引起 EIT 的情况下, 与非反射型的情况相比, 利用一半数量

的共振光对或一半的光调制宽度,即可得到相同的效果。因此,根据本结构,激光驱动器等生成多对共振光对的机构的设计变得更容易,器件驱动时的功耗减少,有利于节能。

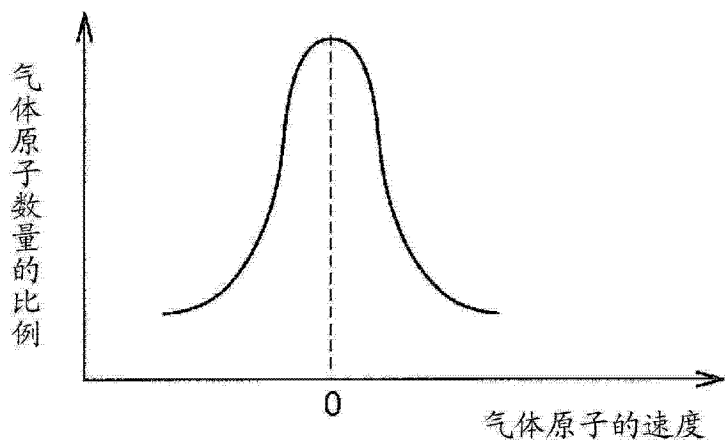


图 1

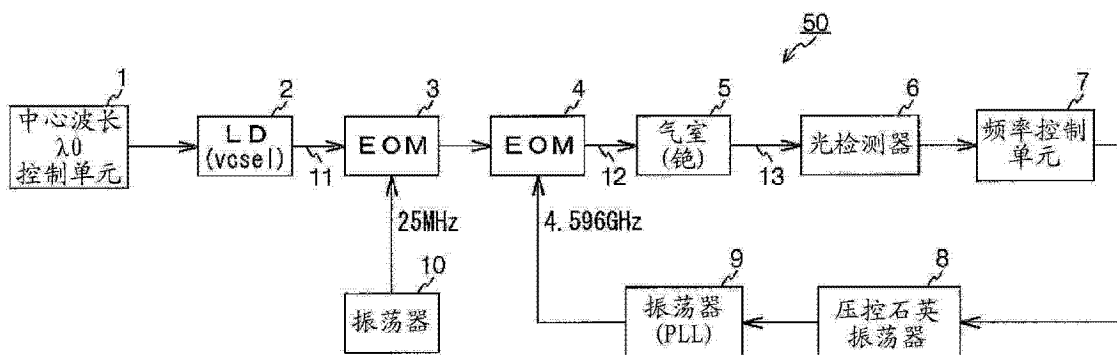


图 2

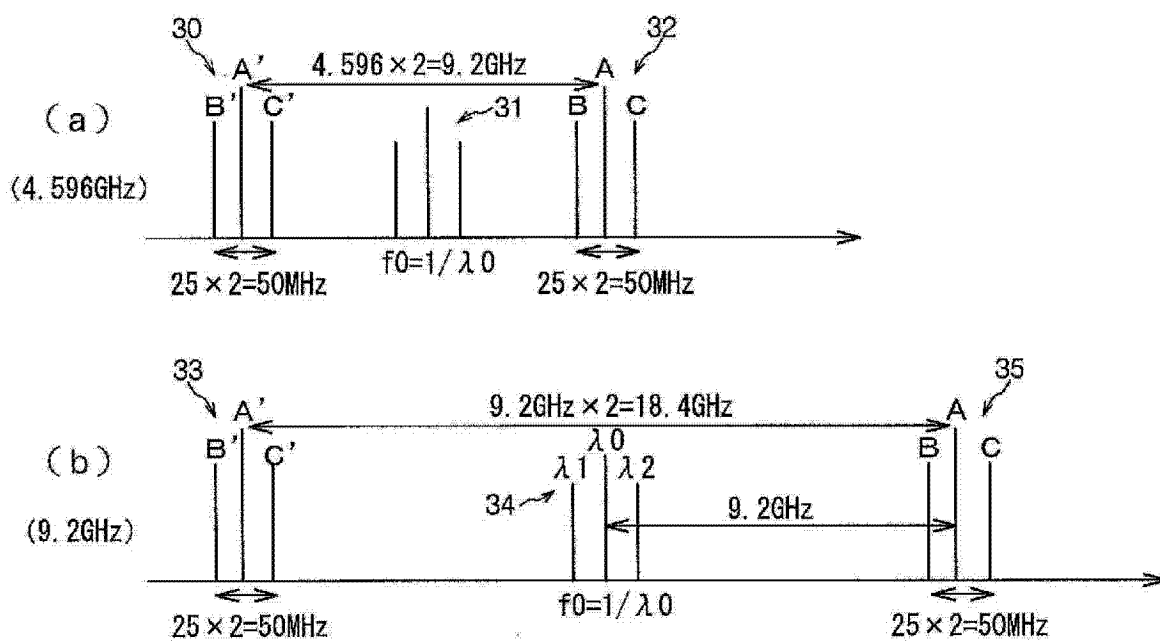


图 3

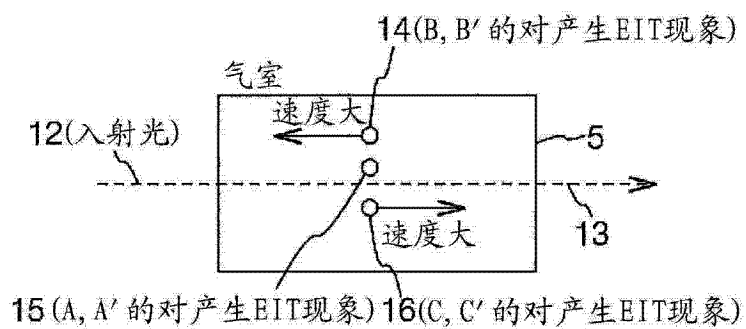


图 4

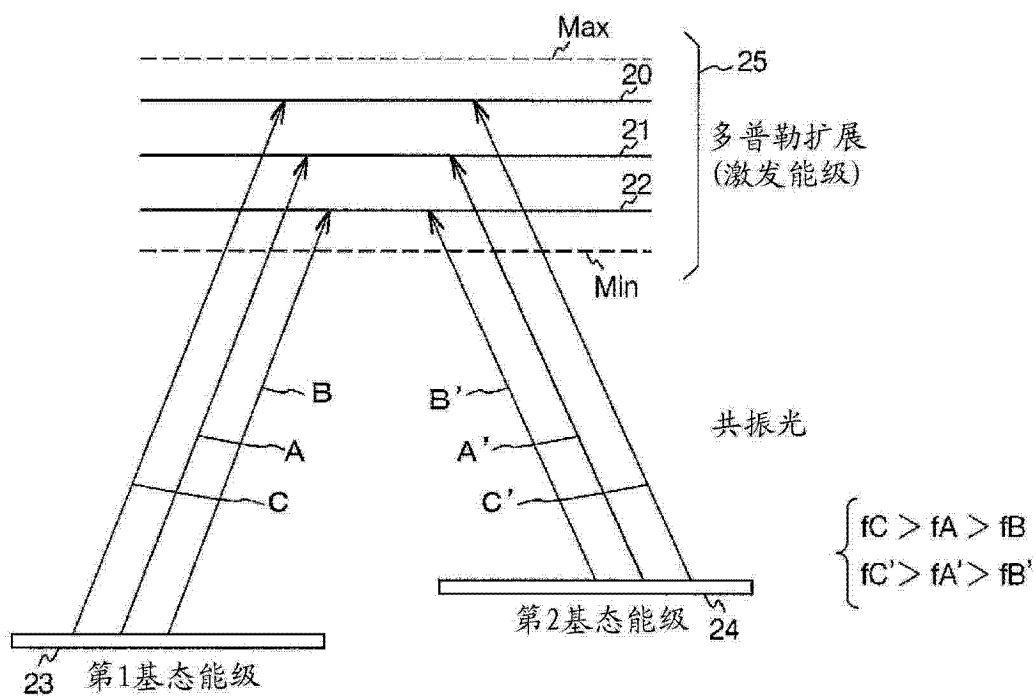


图 5

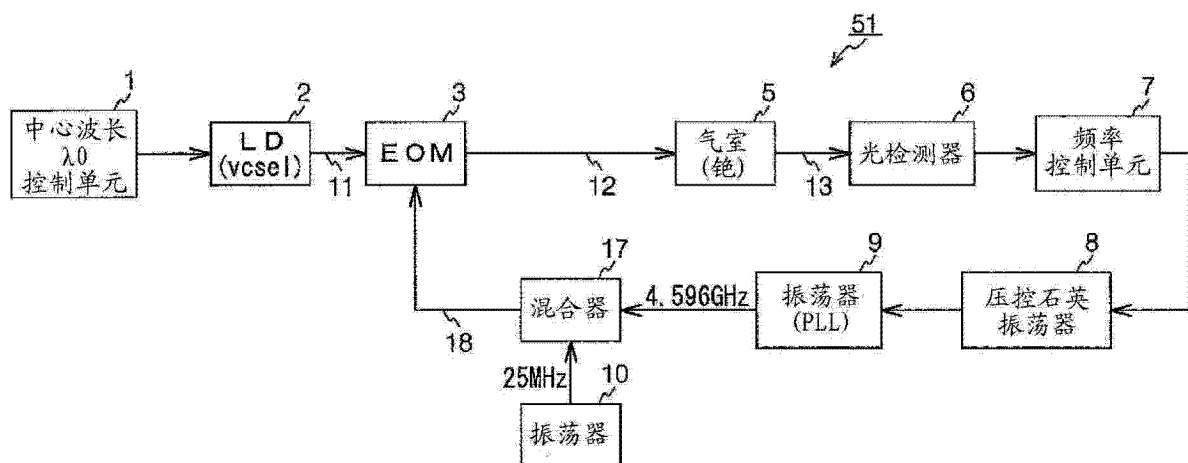


图 6

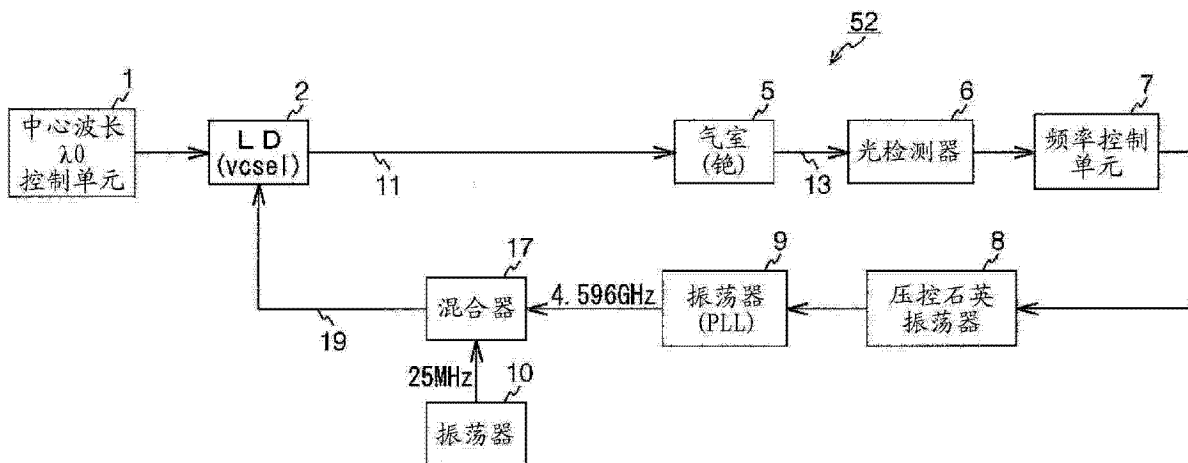


图 7

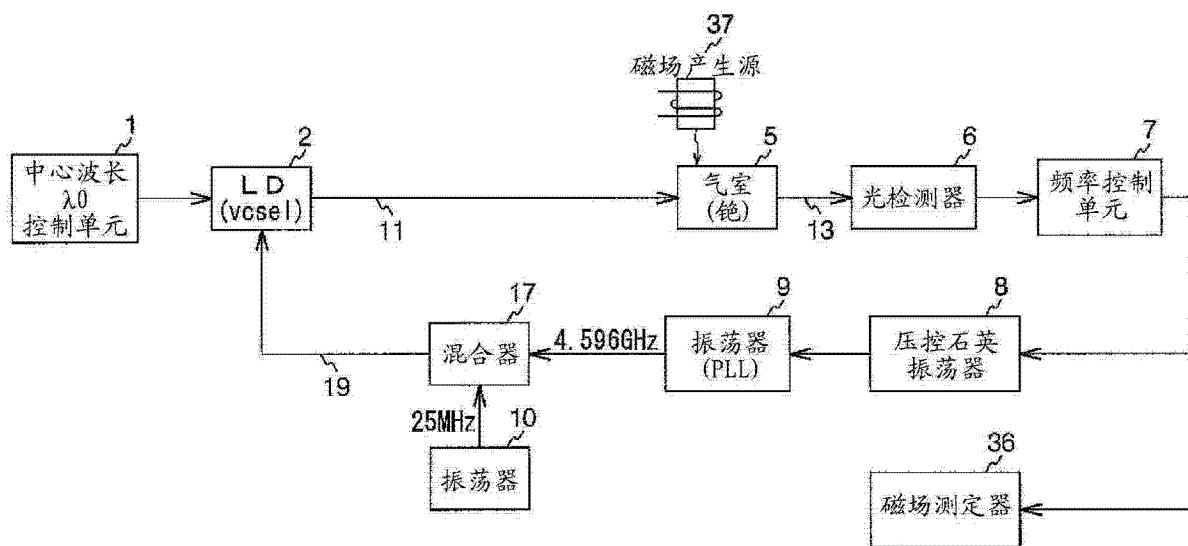


图 8

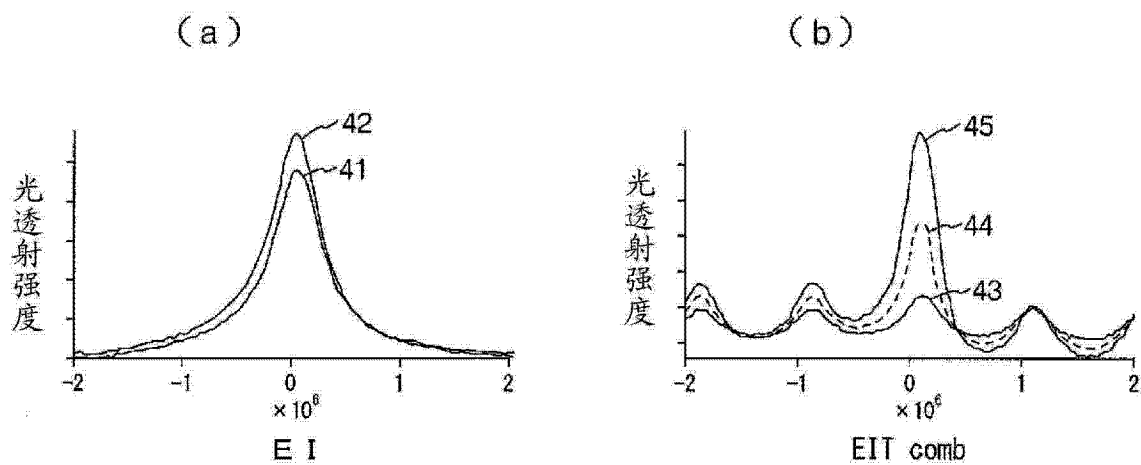


图 9

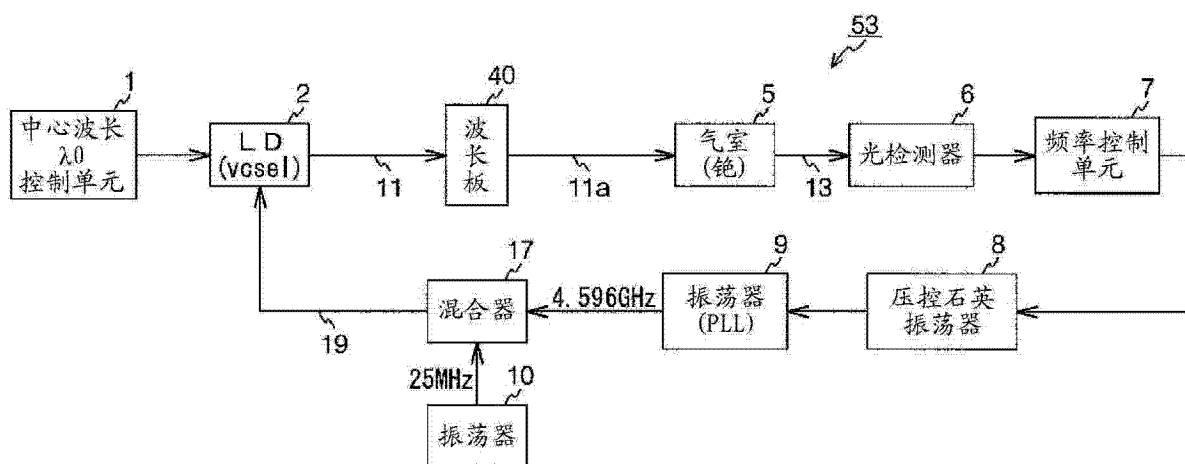


图 10

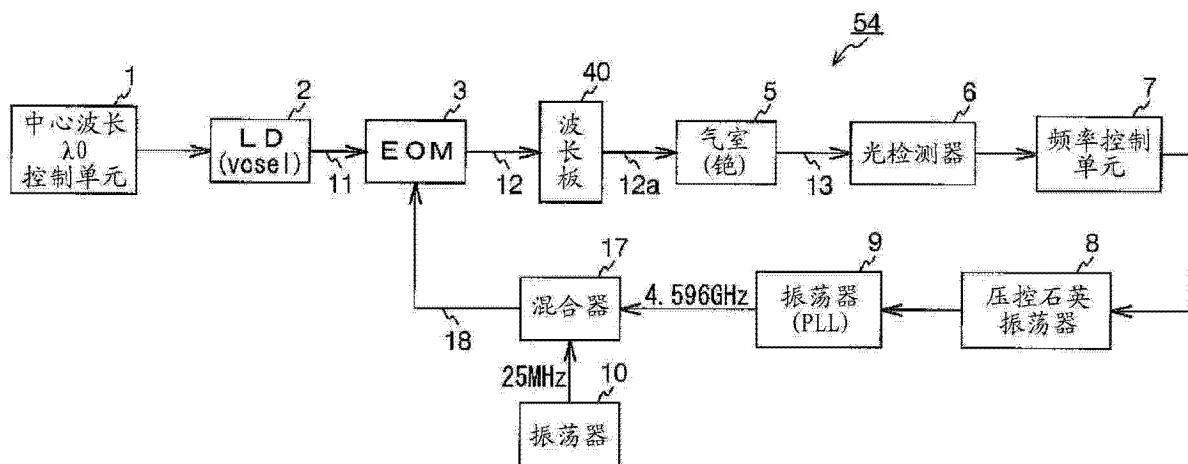


图 11

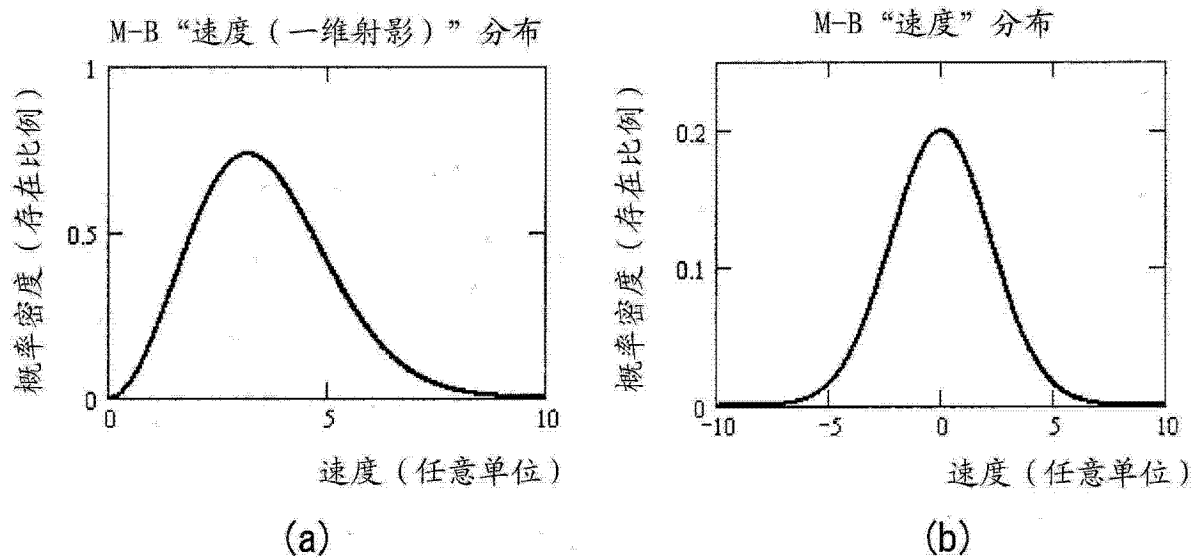


图 12



图 13

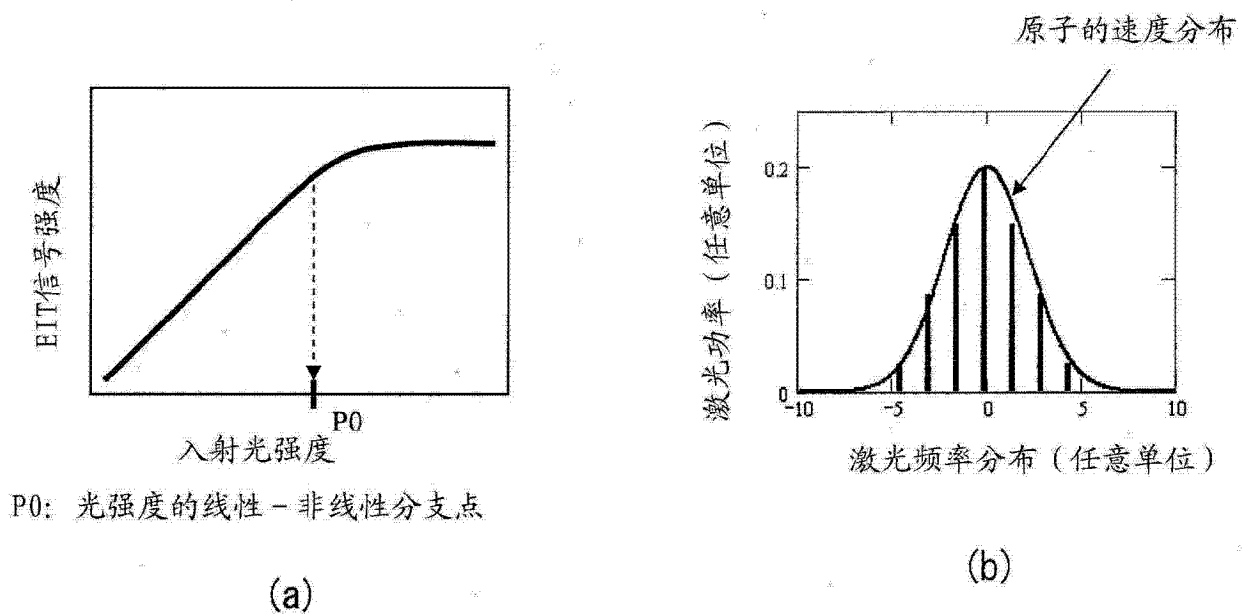


图 14

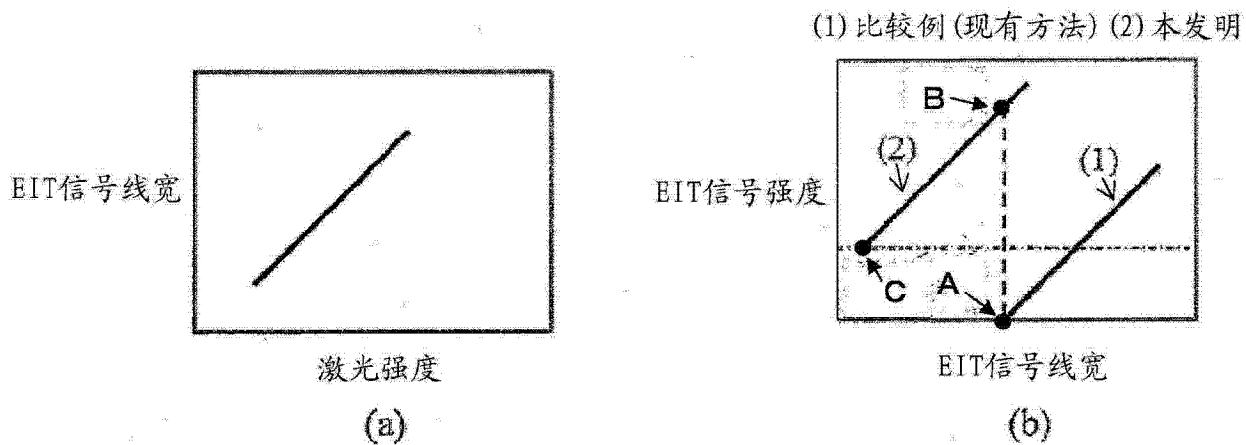
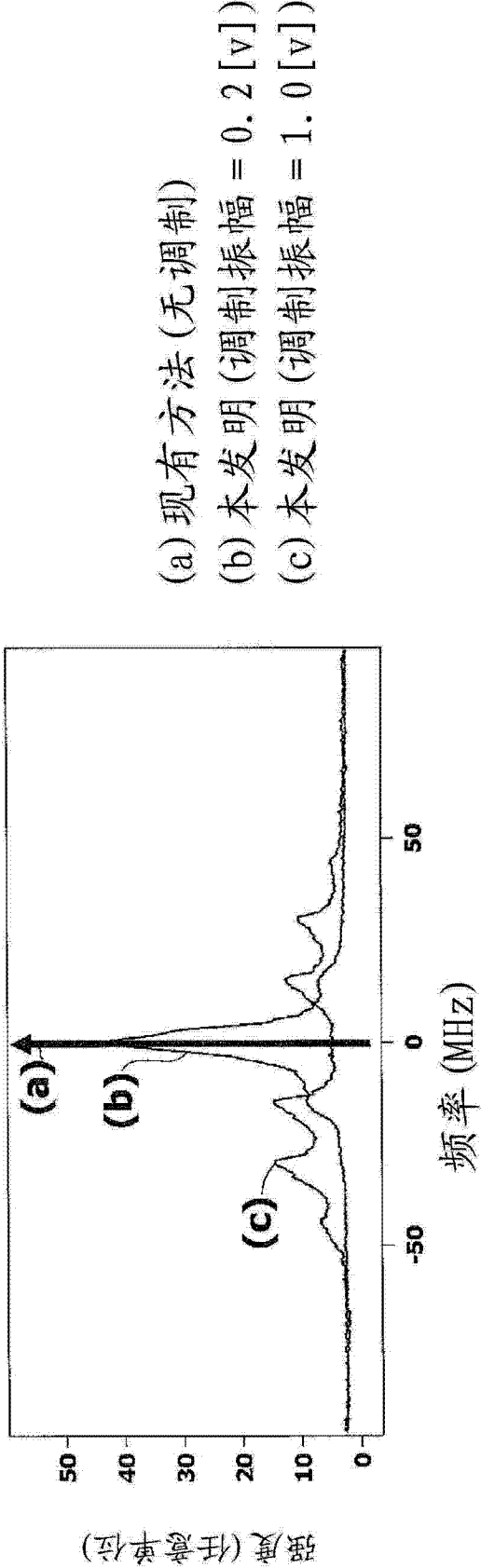
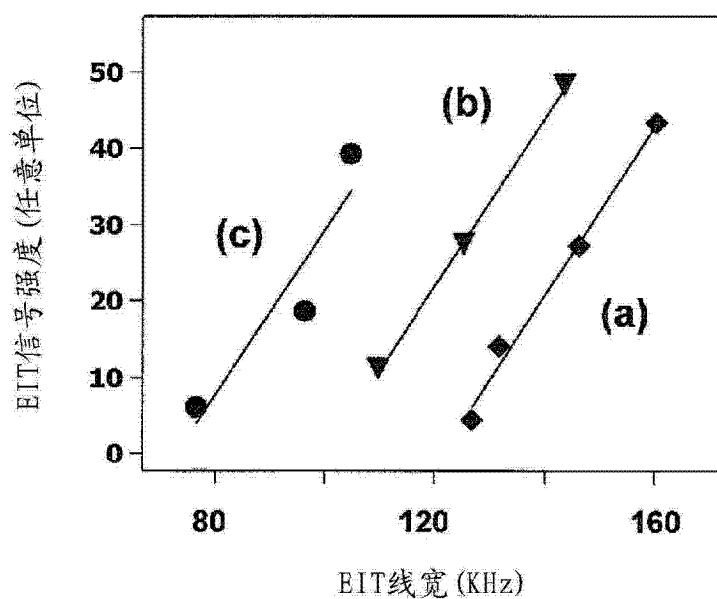


图 15



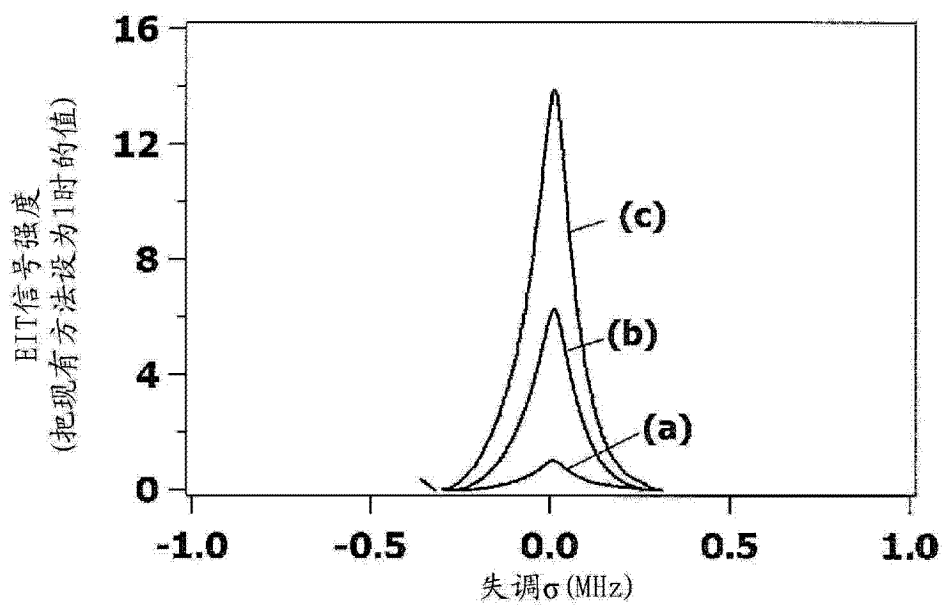
- (a) 现有方法 (无调制)
- (b) 本发明 (调制振幅 = 0.2 [v])
- (c) 本发明 (调制振幅 = 1.0 [v])

图 16



(a) 比较例 (现有方法) (b) 本发明 (调制振幅 = 0.2V)
(c) 本发明 (调制振幅 = 1.0V)

图 17



(a) 比较例 (现有方法) (b) 本发明 (调制振幅 = 0.2V)
(c) 本发明 (调制振幅 = 1.0V)

图 18

实验系统

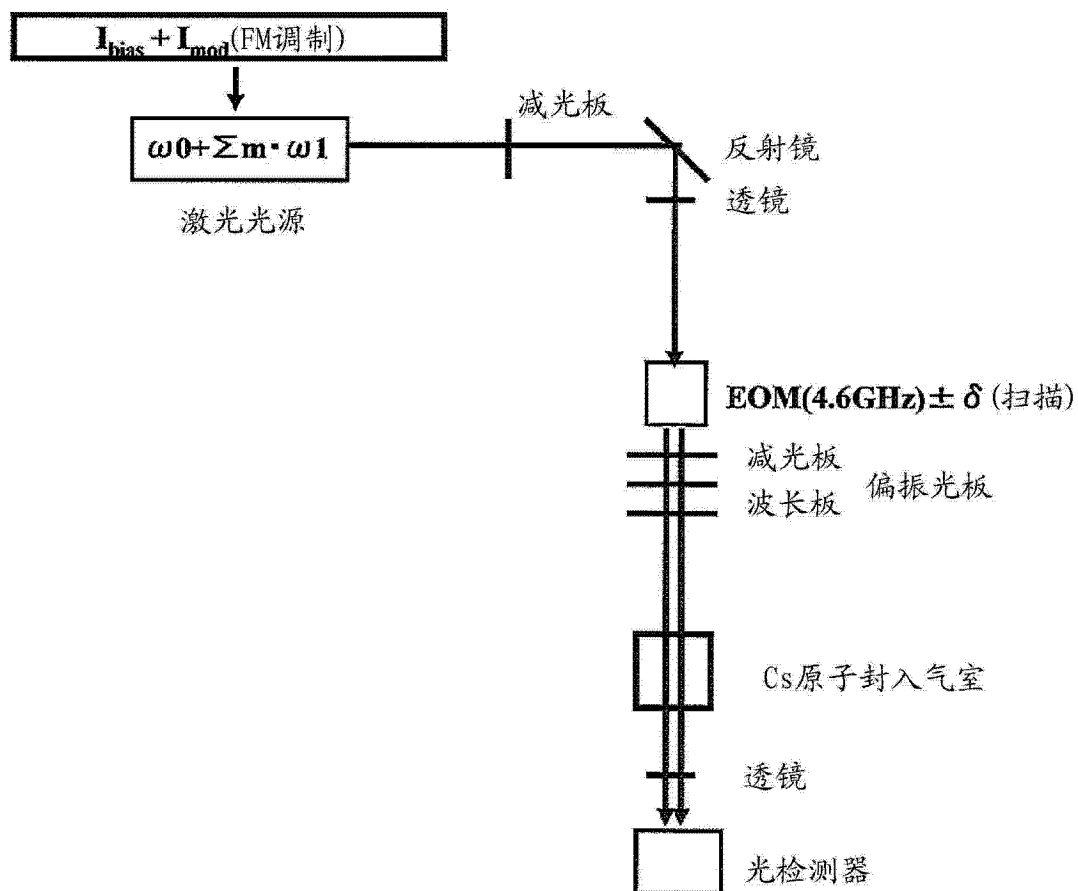


图 19

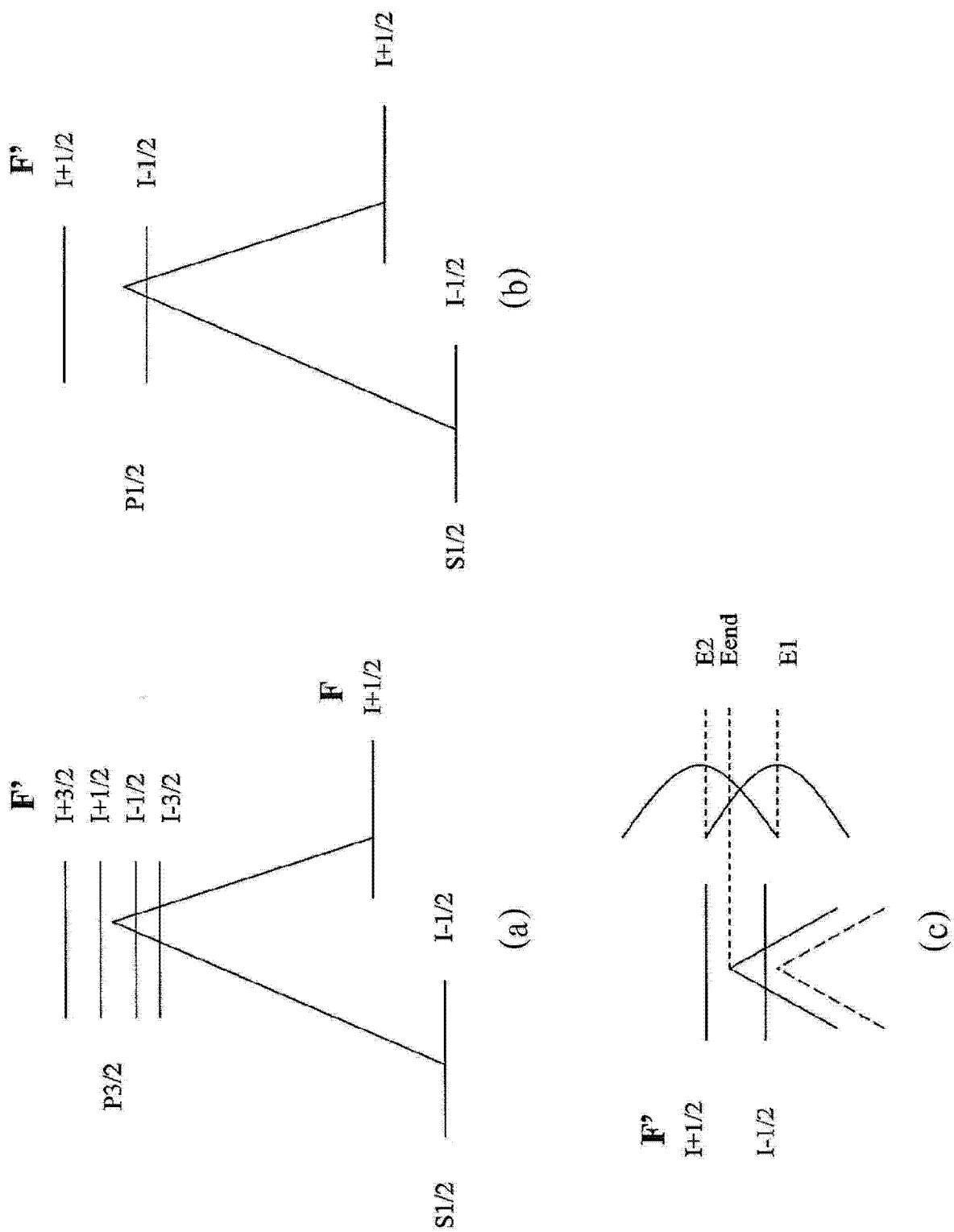


图 20

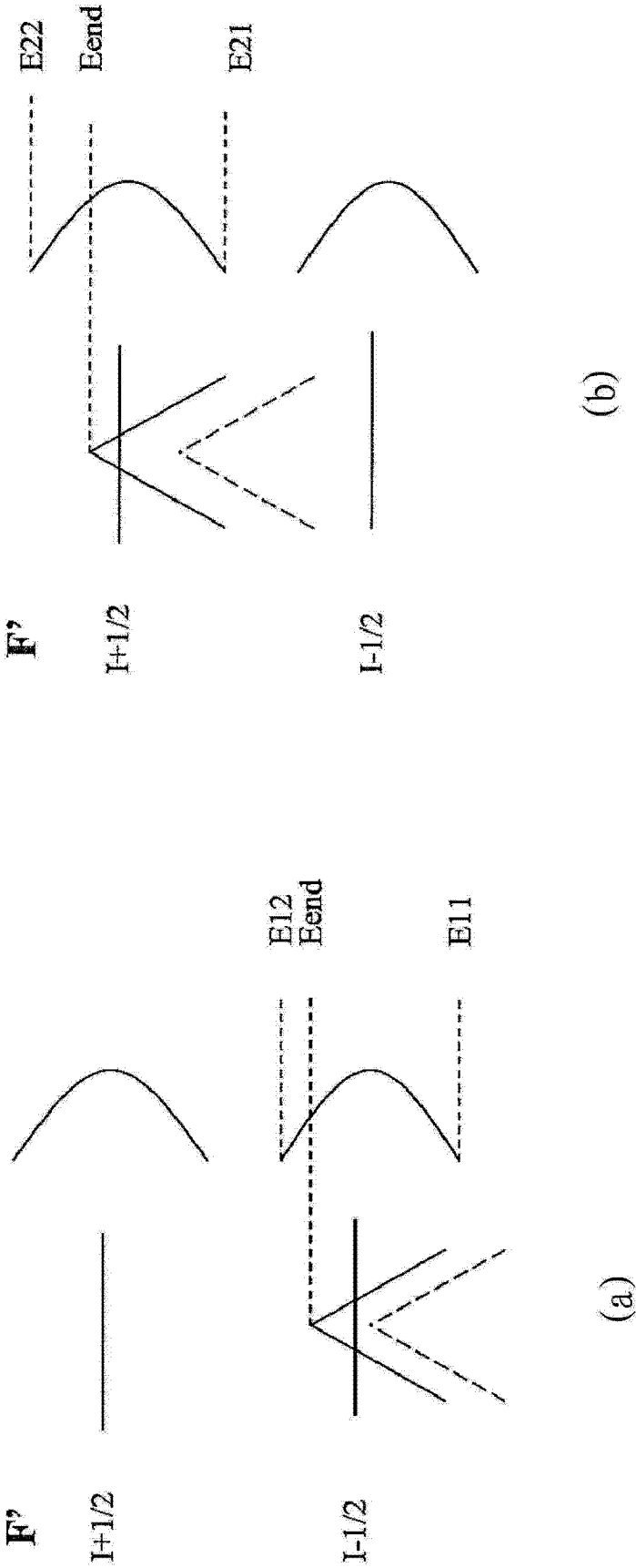


图 21

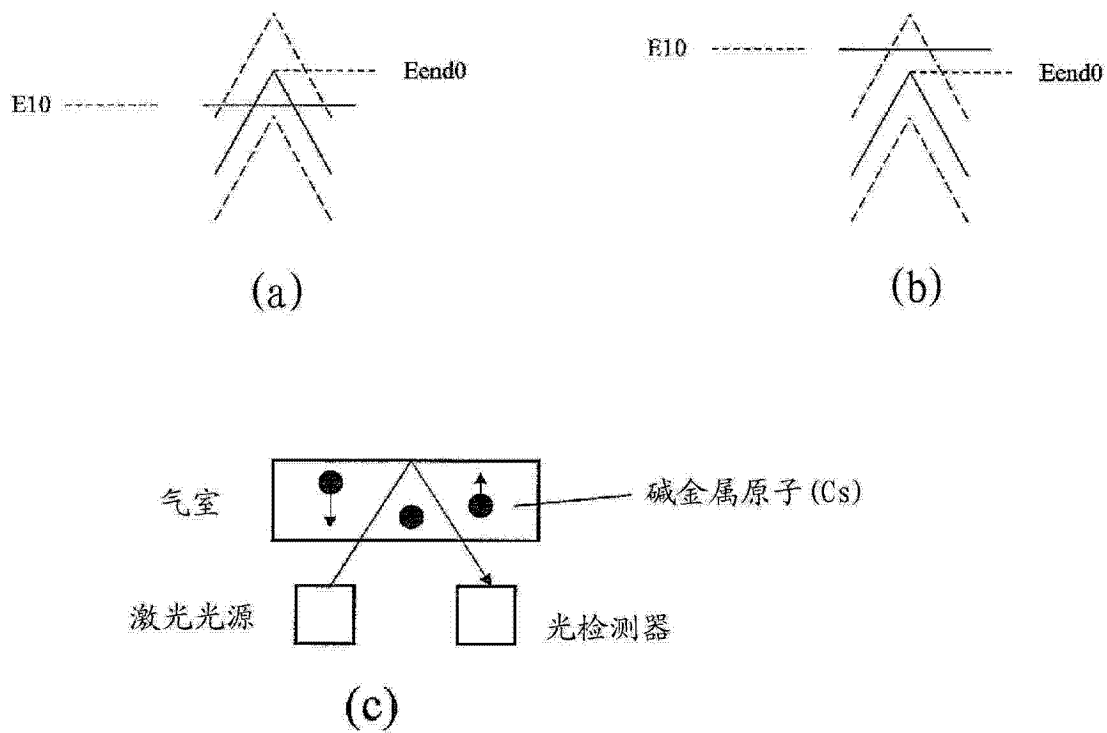


图 22

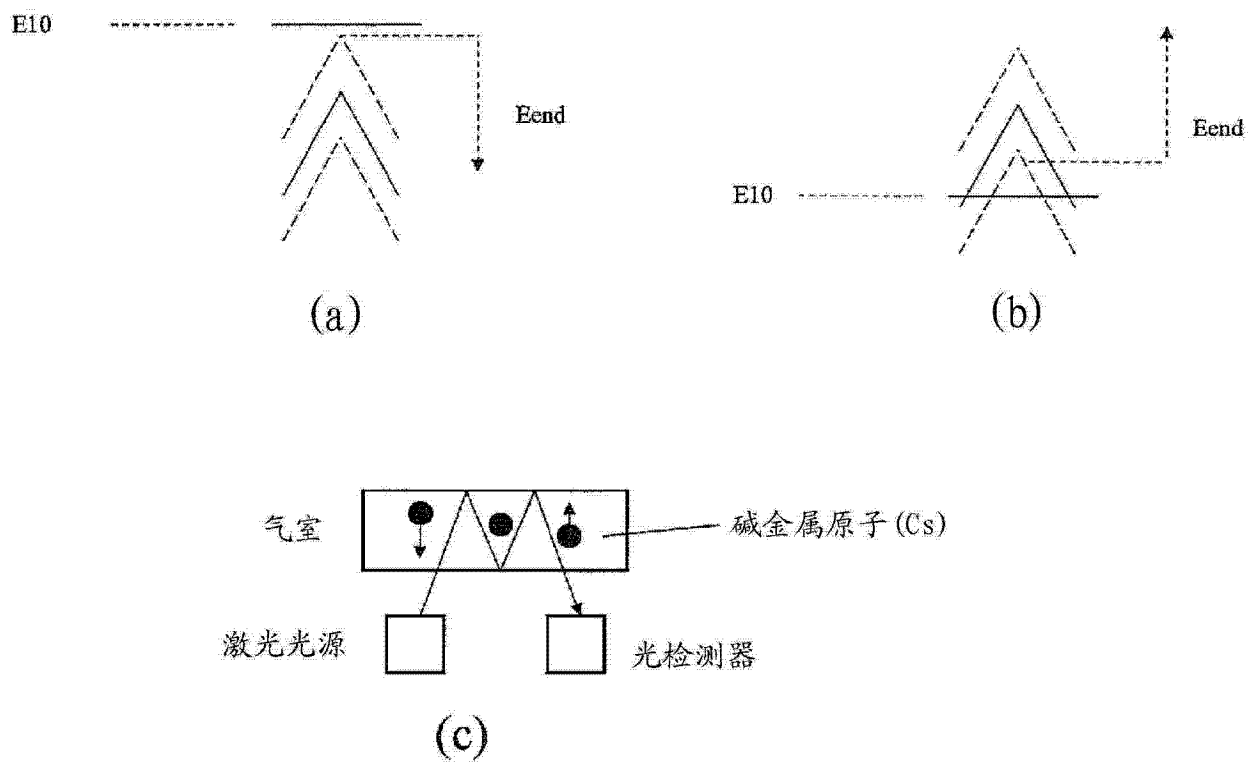


图 23

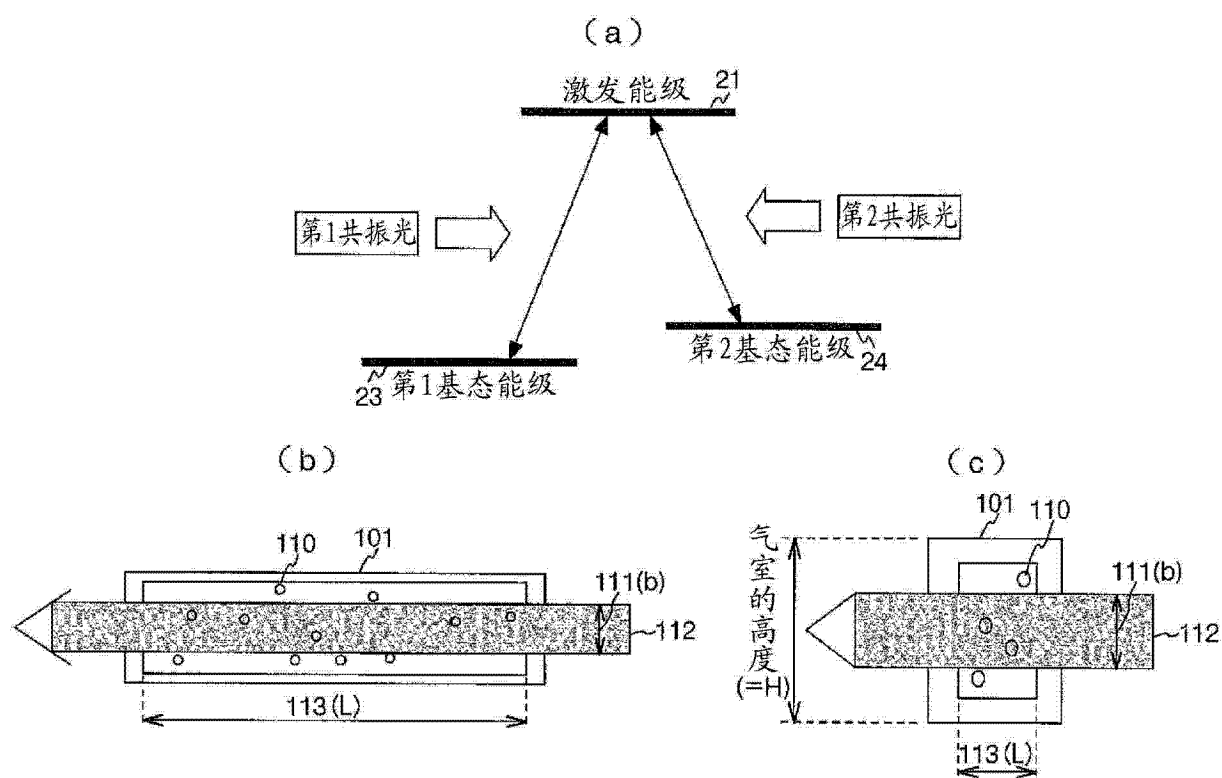


图 24