



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 103995458 A

(43) 申请公布日 2014. 08. 20

(21) 申请号 201410151191. 1

(22) 申请日 2014. 02. 14

(30) 优先权数据

2013-026436 2013. 02. 14 JP

2014-006073 2014. 01. 16 JP

(71) 申请人 株式会社理光

地址 日本东京都

申请人 公立大学法人首都大学东京

(72) 发明人 矢野雄一郎 五箇繁善

(74) 专利代理机构 北京市柳沈律师事务所

11105

代理人 郭定辉

(51) Int. Cl.

G04F 5/14 (2006. 01)

H03L 7/26 (2006. 01)

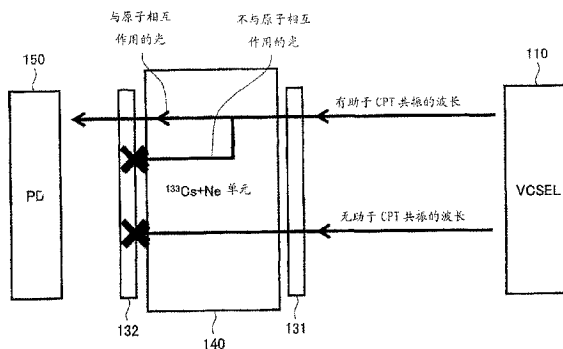
权利要求书3页 说明书18页 附图21页

(54) 发明名称

原子振荡器、检测相干布居俘获共振的方法和磁传感器

(57) 摘要

一种原子振荡器,包括封装了碱性金属原子的碱性金属单元;发出激光的光源;检测已经通过碱性金属单元的光的光检测器;和设置在碱性金属单元和光检测器之间的偏光器。通过调制光源以产生边带和将具有边带的激光注入到碱性金属单元中,根据作为两种类型共振光的量子干涉效应的光吸收特性的相干布居俘获(coherent population trapping)共振,来控制光源中的调制频率。在与激光传播方向平行的方向上,将磁场施加到碱性金属单元,而进入碱性金属单元的激光具有线性偏振,其不平行于偏光器的偏振方向。



1. 一种原子振荡器,包括:

其中封装了碱性金属原子的碱性金属单元;

发出进入到碱性金属单元的激光的光源;

检测通过碱性金属单元的光的光检测器;和

设置在碱性金属单元和光检测器之间的偏光器,其中

通过调制光源以产生边带和将具有作为边带的两种不同波长的激光注入到碱性金属单元中,根据作为两种类型共振光的量子干涉效应的光吸收特性的相干布居俘获共振,来控制光源中的调制频率,其中在与激光的传播方向平行的方向上将磁场施加到碱性金属单元,进入到碱性金属单元的激光具有线性偏振,且激光偏振方向不与偏光器的偏振方向相同。

2. 如权利要求 1 所述的原子振荡器,其中以脉冲序列形式调制进入到碱性金属单元的激光的强度。

3. 如权利要求 1 所述的原子振荡器,其中通过设置在光源和碱性金属单元之间的光强度调制器,以脉冲序列形式调制进入到碱性金属单元的激光的强度。

4. 如权利要求 1 至 3 中任一项所述的原子振荡器,其中所述偏光器是第二偏光器,将第一偏光器设置在光源和碱性金属单元之间,且第一偏光器的偏振方向不与第二偏光器的偏振方向平行。

5. 如权利要求 4 所述的原子振荡器,其中第二偏光器的偏振方向和与第一偏光器的偏振方向垂直的方向之间的角度小于 15 度。

6. 如权利要求 1 至 5 中任一项所述的原子振荡器,其中有助于相干布居俘获共振的进入到碱性金属单元的激光的偏振方向在碱性金属单元中旋转。

7. 如权利要求 1 所述的原子振荡器,其中磁场中的磁通量密度大于 $16 \mu T$ 。

8. 如权利要求 2 或 3 所述的原子振荡器,其中磁场中磁通量的密度是

$$\frac{h}{4g_I\mu_B} \cdot \frac{1}{2T} \pm 20\%$$

其中 T 是脉冲序列的周期长度, h 是普朗克常数, g_I 是核磁 g 因数和 μ_B 是波尔磁子。

9. 如权利要求 1 至 8 中任一项所述的原子振荡器,其中封装在碱性金属单元中的碱性金属是铷、铯、钠和钾中的一种。

10. 一种在原子振荡器中检测相干布居俘获共振的方法,该原子振荡器包括封装了碱性金属原子的碱性金属单元,发出进入到碱性金属单元中的激光的光源,检测已经通过碱性金属单元的光的光检测器,和被设置在碱性金属单元和光检测器之间的偏光器,其中通过调制光源以产生边带和将具有作为边带的两种不同波长的激光注入到碱性金属单元中,根据作为两种类型共振光的量子干涉效应的光吸收特性的相干布居俘获共振,来控制光源中的调制频率,其中在与激光传播方向平行的方向上,将磁场施加到碱性金属单元,该方法包括:

将具有线性偏振的激光注入到碱性金属单元中;和

通过光检测器检测已经通过碱性金属单元的激光,其中

激光偏振方向不平行于偏光器的偏振方向。

11. 如权利要求 10 所述的检测相干布居俘获共振的方法,其中以脉冲序列形式调制进

入碱性金属单元的激光强度。

12. 如权利要求 10 所述的检测相干布居俘获共振的方法,其中通过设置在光源和碱性金属单元之间的光强度调制器,以脉冲序列形式调制进入到碱性金属单元的激光强度。

13. 如权利要求 10 至 12 中任一项所述的检测相干布居俘获共振的方法,其中所述偏光器是第二偏光器,第一偏光器被设置在光源和碱性金属单元之间,且第一偏光器的偏振方向不与第二偏光器的偏振方向平行。

14. 如权利要求 13 所述的检测相干布居俘获共振的方法,其中第二偏光器的偏振方向和与第一偏光器的偏振方向垂直的方向之间的角度低于 15 度。

15. 如权利要求 10 至 14 中任一项所述的检测相干布居俘获共振的方法,其中有助于相干布居俘获共振的进入碱性金属单元的激光的偏振方向在碱性金属单元中旋转。

16. 如权利要求 10 所述的检测相干布居俘获共振的方法,其中磁场中磁通量密度大于 $16 \mu\text{T}$ 。

17. 如权利要求 11 或 12 所述的检测相干布居俘获共振的方法,其中磁场中磁通量密度是

$$\frac{h}{4g_I\mu_B} \cdot \frac{1}{2T} \pm 20\%$$

其中 T 是脉冲序列的周期长度, h 是普朗克常数, g_I 是核磁 g 因数和 μ_B 是波尔磁子。

18. 如权利要求 10 至 17 中任一项所述的相干布居俘获共振的方法,其中封装在碱性金属单元中的碱性金属是铷、铯、钠和钾中的一种。

19. 一种磁传感器,包括:

其中封装了碱性金属原子的碱性金属单元;

发出进入碱性金属单元的激光的光源;

检测已经通过碱性金属单元的光的光检测器;和

设置在碱性金属单元和光检测器之间的偏光器,其中

通过调制光源以产生边带和将具有作为边带的两种不同波长的激光注入到碱性金属单元中,根据作为两种类型共振光的量子干涉效应的光吸收特性的相干布居俘获共振,来控制光源中的调制频率,其中进入碱性金属单元的激光具有线性偏振,激光的偏振方向不与偏光器的偏振方向平行,和响应于相干布居俘获共振在与激光传播方向平行的方向上检测磁通量的密度。

20. 如权利要求 19 所述的磁传感器,其中以脉冲序列形式调制进入碱性金属单元的激光强度。

21. 如权利要求 19 所述的磁传感器,其中通过设置在光源和碱性金属单元之间的光强度调制器,以脉冲序列形式调制进入碱性金属单元的激光强度。

22. 如权利要求 19 所述的磁传感器,其中基于相干布居俘获共振的半峰全宽获得磁通量强度。

23. 如权利要求 19 至 21 中任一项所述的磁传感器,其中基于相干布居俘获共振的振幅获得磁通量密度。

24. 如权利要求 19 至 23 中任一项所述的磁传感器,其中所述偏光器是第二偏光器,第一偏光器被设置在光源和碱性金属单元之间,且第一偏光器的偏振方向不平行于第二偏光

器的偏振方向。

25. 如权利要求 24 所述的磁传感器,其中第二偏光器的偏振方向和与第一偏光器的偏振方向垂直的方向之间的角度小于 15 度。

26. 如权利要求 19 至 25 中任一项所述的磁传感器,其中有助于相干布居俘获共振的进入碱性金属单元的激光的偏振方向在碱性金属单元中旋转。

27. 如权利要求 19 至 26 中任一项所述的磁传感器,其中封装在碱性金属单元中的碱性金属是铷、铯、钠和钾中的一种。

原子振荡器、检测相干布居俘获共振的方法和磁传感器

背景技术

[0001] 1. 技术领域

[0002] 本公开一般涉及到原子振荡器,检测 CPT(相干布居俘获)共振的方法和磁传感器。

[0003] 2. 现有技术

[0004] 原子钟(原子振荡器)是非常精确的时钟。正在研究用于降低原子钟尺寸的技术。原子钟是一种基于包括在碱性金属或类似物中的电子的跃迁能的振荡器。尤其是,如果没有任何干扰影响该工艺,则发现碱性金属原子的电子跃迁能非常精确。因此,能获得与晶体振荡器相比已经改善了超过几个数量级的频率稳定性。

[0005] 存在几种类型的原子振荡器。例如,现有技术中具有微波振荡器结构的原子振荡器尺寸大且需要大量电能。另一方面,CPT(相干布居俘获)型原子振荡器提供频率稳定性,比现有技术中的晶体振荡器高三个数量级的精确性。而且,CPT型原子振荡器的尺寸和功耗都有希望能降低。在2007年制造了CPT型原子振荡器的原型,并且自2011年 Symmetricom, Inc., U. S. A 已经出售 CPT 型原子振荡器的产品。

[0006] 美国专利 6993058 披露了一种 CPT 检测器和用于检测 CPT 的方法。所述 CPT 检测器包括量子吸收器、检偏镜(polarization analyzer)和检测器。所述量子吸收器包括具有耦合到共用高能态的第一和第二低能态的材料。在第一低能态和共用高能态之间和在第二低能态和共用高能态之间的跃迁由具有预定的偏振状态的电磁辐射诱发。检偏镜阻挡预定的偏振状态的电磁辐射,同时通过具有与预定的偏振垂直的偏振状态的电磁辐射。用已经通过量子吸收器的生成的电磁辐射的一部分照射检偏镜。检测器生成与离开检偏镜的电磁辐射的强度有关的信号。

[0007] 日本公开的专利申请 No. 2010-263593 披露一种原子振荡器的光学系统,所述光学系统通过利用光和微波的双共振方法和利用由两种共振光产生的量子干涉效应的相干布居俘获(CPT)方法的一种通过使用光学吸收特性调节振荡频率。所述光学系统包括:发射共振光的光源;布置在光源发射侧的充气电池(gas cell),在其中密封了气态的金属原子并通过金属原子气体传输共振光;检测通过金属原子气体传输的光的光检测单元;和阻挡至少一部分从金属原子气体发射到光检测单元的荧光的荧光阻挡单元,其被布置在金属原子气体和光检测单元之间。

[0008] 日本专利 No. 4801044 披露了一种用于调制原子钟信号的方法和相应的原子钟。激光束(L1,L2)在振幅上被脉冲调制以照射(A)交互介质。进行电流脉冲(Sr)和在所述电流脉冲之前的脉冲(Sr-1到Sr-p)的检测(B)。脉冲通过线性组合被叠加(C)以便生成频谱带宽被最小化的补偿原子钟信号(SHC)。本发明可用于带有脉冲探寻(interrogation)的原子钟,所述脉冲探寻的交互介质由热原子或激光冷却的原子构成。

[0009] P. M. Anisimov 等人的“*Influence of transverse magnetic fields and depletion of working levels on the nonlinear resonance Faraday effect*”, *Journal of Experimental and Theoretical Physics*(实验和理论物理杂志),2003年11月,97卷,

第 5 期, 868 到 874 页披露了在 ^{87}Rb 蒸汽中在 D_1 -线 $F=2$ 到 $F'=1$ 的跃迁处在相干布居俘获条件下研究的非线性共振法拉第效应。研究了横向磁场对于非线性光学法拉第旋转的影响。对于垂直于电磁波偏振的横向磁场, 提出了一种与实验数据非常符合的理论模型。基于所获得的结果发现了提供最大灵敏性的最优强度。实验上和理论上研究了工作级耗尽 (working level depletion) 对于在开放系统中的法拉第旋转的参数的影响。在实验中通过使用附加的激光关闭该系统来增加灵敏性和扩大所测场的动态范围。

[0010] G. Kazakov 等人的“Pseudoresonance mechanism of all-optical frequency-standard operation”, Phys. Rev. A72, 063408 (2005) 基于相干布居俘获效应和在探针辐射 (probe radiation) 的最大吸收时的信号辨别的有悖常理的组合提出了对于全光频率标准设计的方式。此种标准的短期稳定性可以达到 $10^{-14}/\sqrt{\tau}$ 的级别。

[0011] 本申请所使用的数据可以在 D. A. Steck 在 2012 年 12 月 18 日的 <http://steck.us/alkalidata/> 得到。

发明内容

[0012] 本发明的至少一个实施例的总的目的是提供一种原子振荡器, 检测 CPT 共振的方法和提供频率高稳定性的磁传感器。

[0013] 在本发明的一个实施例中, 原子振荡器包括其中封装了碱性金属原子的碱性金属单元; 发出进入碱性金属单元的激光的光源; 检测通过碱性金属单元的光的光检测器; 和设置在碱性金属单元和光检测器之间的偏光器。通过调制光源以产生边带和将具有作为边带的两种不同波长的激光注入到碱性金属单元中, 根据作为两种类型共振光的量子干涉效应的光吸收特性的相干布居俘获共振, 来控制光源中的调制频率, 其中在平行于激光传播方向的方向上将磁场施加到碱性金属单元, 进入到碱性金属单元的激光具有线性偏振, 并且激光偏振方向不平行于偏光器的偏振方向。

[0014] 在本发明的另一实施例中, 一种在原子振荡器中检测相干布居俘获共振的方法, 该原子振荡器包括其中封装了碱性金属原子的碱性金属单元, 发出进入到碱性金属单元的激光的光源, 检测通过碱性金属单元的光的光检测器, 和被设置在碱性金属单元和光检测器之间的偏光器, 其中, 通过调制光源以产生边带和将具有作为边带的两种不同波长的激光注入到碱性金属单元中产生量子干涉效应, 根据作为两种类型共振光的量子干涉效应的光吸收特性的相干布居俘获共振, 来控制光源的调制频率, 并且在平行于激光传播方向的方向上将磁场施加到碱性金属单元, 其中该方法包括将具有线性偏振的激光注入到碱性金属单元中; 和通过光检测器检测通过碱性金属单元的激光。激光的偏振方向不平行于偏光器的偏振方向。

[0015] 在本发明的再一实施例中, 磁传感器包括其中封装了碱性金属原子的碱性金属单元; 发出进入碱性金属单元的激光的光源; 检测通过碱性金属单元的光的光检测器; 和被设置在碱性金属单元和光检测器之间的偏光器。通过调制光源以产生边带和将具有作为边带的两种不同波长的激光注入到碱性金属单元中, 根据作为两种类型共振光的量子干涉效应的光吸收特性的相干布居俘获共振, 来控制光源的调制频率, 其中进入到碱性金属单元的激光具有线性偏振, 激光的偏振方向不平行于偏光器的偏振方向, 和磁通量的密度响应于相干布居俘获共振在与激光传播方向平行的方向上被检测。

[0016] 根据本发明,提供了一种具有频率高稳定性的 CPT 型原子振荡器、检测 CPT 共振的方法和磁传感器。

附图说明

[0017] 当结合附图阅读时根据下文具体描述实施例的其他目的和进一步特征是显而易见的,附图中:

[0018] 图 1 是示出 CPT 共振实例的示意图;

[0019] 图 2 是示出根据第一实施例的原子振荡器实例的结构图;

[0020] 图 3 是铯 $133D_1$ 线数据实例的示意图;

[0021] 图 4 是示出激光通过碱性金属单元传输一方面的示意图;

[0022] 图 5 是示出在通过光检测器检测的光的频率和强度之间的相关性实例的相关图;

[0023] 图 6 是示出根据第一实施例的原子振荡器一方面的示意图;

[0024] 图 7 是示出根据第一实施例的原子振荡器另一方面的示意图;

[0025] 图 8 是示出通过碱性金属单元的激光传输的另一方面的示意图;

[0026] 图 9 是示出通过线性偏振激发的 CPT 共振磁场和频率之间相关性的相关图;

[0027] 图 10 是示出通过线性偏振激发的 CPT 共振磁场和频率差别之间相关性的相关图;

[0028] 图 11 是示出铯 $133D_1$ 线数据另一方面的示意图;

[0029] 图 12A 和 12B 是示出在根据第一实施例的原子振荡器中法拉第旋转特性的一方面的图;

[0030] 图 13A 和 13B 是示出在根据第一实施例的原子振荡器中法拉第旋转特性的另一方面的图;

[0031] 图 14A 和 14B 是示出在根据第一实施例的原子振荡器中法拉第旋转特性的再一方面的图;

[0032] 图 15 是示出在第一偏光器和第二偏光器之间的位置关系的示意图;

[0033] 图 16 是示出在 CPT 共振中对比度特性的一方面的图;

[0034] 图 17 是示出在旋转角度 θ 和 DC(直流)电平之间相关性实例的相关图;

[0035] 图 18 是示出在旋转角度 θ 和 CPT 共振振幅之间相关性实例的相关图;

[0036] 图 19 是示出旋转角度 θ 和 CPT 共振对比度之间相关性实例的相关图;

[0037] 图 20 是示出具有 DC 电平和共振振幅的静态磁场相关性的实例的相关图;

[0038] 图 21 是示出静态磁场和对比度之间相关性的一方面的相关图;

[0039] 图 22 是静态磁场和半峰全宽 (FWHM) 之间相关性实例的相关图;

[0040] 图 23 是示出静态磁场和品质因数 (FOM) 之间相关性实例的相关图;

[0041] 图 24 是示出根据第二实施例的磁传感器实例的结构图;

[0042] 图 25 是示出静态磁场和对比度之间相关性的另一方面的相关图;

[0043] 图 26 是示出根据第三实施例的原子振荡器一方面的示意图;

[0044] 图 27 是示出根据第三实施例的原子振荡器另一方面的示意图;

[0045] 图 28 是示出在脉冲激励和偏光器方法组合的情况下的 CPT 共振波谱的示意图;

[0046] 图 29 是示出在磁场变化和共振振幅之间变化的相关性实例的相关图;和

[0047] 图 30 是示出连续激励的磁场和法拉第旋转角度之间相关性实例的相关图。

具体实施方式

[0048] 在下文中,将参考附图描述本发明的实施例。同时,将相同数字符号指定相同部件,并省略重复说明。

[0049] [第一实施例]

[0050] 通常,对于原子振荡器需要频率的高稳定性。尤其是,在使用原子振荡器作为各种无线通讯系统中基站的参考源的情况下,短时间稳定性是非常重要的。图 1 是示出 CPT(相干布居俘获)共振实例的示意图。短时间稳定性 $\sigma_y(\tau)$ 由等式 1 表示,使用 Allan 标准偏差,其用于频率稳定性的指标。

[0051] 等式 1

$$[0052] \quad \sigma_y \propto \frac{1}{Q(S/N)\sqrt{\tau}}$$

[0053] 在等式 1 中, τ 是积分时间 (integrated time), S / N 是信噪比。而且, Q 是原子共振中的共振 Q 值,且由等式 2 表示,这里 f_{RF} 表示 RF(射频)频率并且 FWHM(半峰全宽)是最大高度一半时(即共振频率, f_{RF})共振的全宽度。

[0054] 等式 2

$$[0055] \quad Q = \frac{f_{RF}}{FWHM}$$

[0056] 尤其是, S / N 表示 f_{RF} 下的 RF 频率强度与噪音的比率。在本实施例中,下文中比率 S / N 也表示“对比度 Ct ”。

[0057] 频率的短时间稳定性 $\sigma_y(\tau)$ 还通过等式 3 表达,这里 K 是常数。

[0058] 等式 3

$$[0059] \quad \sigma_y(\tau) = K \frac{FWHM}{Ct \cdot f_{RF}} = \frac{K}{Q \cdot Ct}$$

[0060] 根据等式 3 中表达的关系,发现短时间稳定性 $\sigma_y(\tau)$ 依赖于原子共振的共振 Q 值和依赖于对比度 Ct (S / N 比率)。也就是,通过增加共振 Q 值或者对比度 Ct ,能获得较小短时间稳定性 $\sigma_y(\tau)$,即频率变得稳定。但是,在激励 CPT 共振时,通过增加用于激励的激光强度可获得大的共振振幅,但是同时,线宽度根据功率展宽效应 (power broadening effect) 展宽了。因此,通常,增加共振 Q 值和增加对比度 Ct (S / N 比率)彼此具有折衷关系 (trade-off relationship)。

[0061] 根据本实施例的原子振荡器的稳定性可通过增加对比度 Ct (S / N 比率)而非共振 Q 值来增加。

[0062] (原子振荡器)

[0063] 接下来,将参考图 2 描述根据本实施例的原子振荡器的结构。根据本实施例的原子振荡器包括激光源 110、准直透镜 120、第一偏光器 131、第二偏光器 132、碱性金属单元 140 和光检测器 150。在根据本实施例的原子振荡器中,通过调制激光源 110 中的频率产生具有两种不同边带波长的激光,和将具有所述边带波长的激光注入到碱性金属单元 140 中。

[0064] 当激光的波长对应于碱性金属原子中的激发能量时,激光激发碱性金属原子至激发态(共振光)。在具有不同波长的两种共振光能分别自第一态和自第二态激发碱性金属原子至相同激发态时,两个共振光彼此干涉且通过组合第一态和第二态形成“非耦合”状态。该“非耦合”状态自激发态退耦,即一些碱性金属原子在“非耦合”状态下被“俘获”(量子干涉效应),且这些原子不与光互相影响(相干布居俘获(CPT)状态)。当激光波长满足CPT的条件时,由碱性金属原子吸收的光减少,和在波谱中呈现共振峰。在本实施例中,通过观测波谱中的CPT共振,控制激光源110的调制频率。

[0065] 激光源110是用于激发的激光源。在本实施例中,采用垂直腔面发射激光器(VCSEL)。自激光源110发出的激光具有与铯 ^{133}Cs D_1 线波长近似相同的波长。由于小尺寸VCSEL能在低功率下发出激光,且可降低原子振荡器功耗,因此优选是VCSEL。

[0066] 例如碱性金属单元140具有直径为22.5mm且光通路长度为20.0mm的圆柱形状。在碱性金属单元140中,封装了碱性原子铯(Cs)和缓冲气体氖(Ne)。碱性金属单元140的内部压力约为4.0kPa。

[0067] 在本实施例中,经由通过准直透镜120和第一偏光器131,自激光源110发出的激光成为光束直径为约5mm的激光,并进入到碱性金属单元140中。通过碱性金属单元140的激光还通过第二偏光器132并由包括光电二极管及类似物的光检测器150检测。

[0068] 在本实施例中,锁定放大器161对于用于自激光源110发出的激光执行锁定检测,和通过电流驱动器162等控制用于驱动作为激光源110的VCSEL的电流。根据上述控制,稳定自激光源110发出的激光波长,使得由碱性金属单元140中的碱性原子实现的光吸收处于最大值。而且,VCSEL作为激光源110保持为恒定温度。为了执行上述过程,将功能产生器163连接到锁定放大器161和电流驱动器162。

[0069] 为了测量较少受磁场影响的CPT共振,亥姆霍兹线圈(未示出)将静态磁场B(例如 $32\mu\text{T}$)施加到碱性金属单元140。通过使用塞曼分裂效应抽取(extract)CPT共振。为了阻挡外部磁场诸如地球磁场,碱性金属单元140和亥姆霍兹线圈被磁屏蔽材料覆盖。碱性金属单元140和亥姆霍兹线圈被设置在恒温槽中,以便保持温度恒定。在本实施例中,将碱性金属单元140的温度保持在 30°C 和 55°C 之间。优选地,将温度保持在 42°C ,该温度下CPT共振的对比度变成最高值。在本实施例中,磁场B代表磁通量密度。用于CPT共振激发的激光具有由第一偏光器131施加的线性偏振,以避免塞曼亚能级偏差。在本实施例中,如图3中所示,观测到其中分别叠加两个CPT共振的两个共振。也就是,观测到其中叠加了共振状态 $|F=3, m=1\rangle$ 和 $|F=4, m=-1\rangle$ 、由图3中的点划线示出的CPT共振CPTa,和其中叠加了共振状态 $|F=3, m=-1\rangle$ 和 $|F=4, m=1\rangle$ 、由图3中的实线示出的CPT共振CPTb,其中F和m分别表示总角动量量子数和其投影量子数。

[0070] 而且,与被检测激光的光强度对应的源自光检测器150的输出通过DMM(数字万用表)171和示波镜172被输入到包括个人电脑(PC)等的控制单元173中。控制信号自控制单元173被发送至模拟信号产生器174。而且,作为用于检测器的参考频率源,采用铯主频标准175,其连接到模拟信号产生器174。

[0071] 在根据本实施例的原子振荡器中,将具有RF(射频)的电压施加到VCSEL作为激光源,而VCSEL执行频率调制(FM)。具有由频率调制引起(raised)的边带波长的激光用于产生CPT共振。在这种原子振荡器中,增加对比度 C_t (S/N比率)通常使得光学系统复杂

化。复杂的光学系统需要高成本的大尺寸原子振荡器,其不是优选的。

[0072] 接下来,一般为何对比度 $C_t(S/N)$ 比率) 在原子振荡器中不能增加的原因解释如下。图 4 是示出通过碱性金属单元的激光传输的示意图。在 CPT 型原子振荡器中,将自激光源 110 发出的激光注入到碱性金属单元 140 中。具有有助于 CPT 共振的波长的一部分被注入激光与碱性金属单元 140 中的碱性金属相互作用。以这种方式与碱性金属单元 140 中的碱性金属相互作用的激光作为激光检测器 150(诸如光电二极管)处的信号被检测。

[0073] 而且,具有有助于 CPT 共振但是不与碱性金属相互作用的波长的被注入激光的激光,和具有不助于 CPT 共振的波长的激光通过碱性金属单元 140。在光检测器中具有有助于 CPT 共振的波长但是不与碱性金属相互作用的激光,和具有无助于 CPT 共振的波长的激光检测为噪音(N)。当被检测为噪音的激光分量小时,对比度降低。图 5 示出了进入到光检测器 150 的激光频率和由光检测器 150 检测的光强度之间的关系。

[0074] 图 6 是示出根据本实施例原子振荡器的示意图。在原子振荡器中,第一偏光器 131 被设置在激光源 110 和碱性金属单元 140 之间,和第二偏光器 132 被提供在碱性金属单元 140 和光检测器 150 之间。图 7 是示出根据本实施例原子振荡器的另一示意图。如图 7 中所示,提供第一偏光器 131 以使具有与 X 轴平行的偏振的被注入激光的激光传输。第二偏光器 132 被设置成使具有与 Y 轴平行的偏振的被注入激光的激光传输(原文疑漏词 transmit)。。也就是,第一偏光器 131 和第二偏光器 132 被设置成使得第一偏光器 131 的偏振方向和第二偏光器 132 的偏振方向彼此相互垂直。

[0075] 一部分激光通过第一偏光器 131 并被注入到碱性金属单元 140,所述激光与碱性金属单元 140 中的碱性金属原子相互作用,根据与碱性金属原子的相互作用接收法拉第效应。由于其偏振方向根据法拉第效应旋转,因此接收法拉第效应的一部分激光通过第二偏光器 132,如图 8 中所示,并且由光检测器 150 检测。在另一方面,由于偏振方向不改变,因此具有有助于 CPT 共振的波长但是不与碱性金属相互作用的激光和具有无助于 CPT 共振的波长的激光不通过第二偏光器 132 并且不被光检测器 150 检测。以这种方式,在本实施例中,具有有助于 CPT 共振的波长但是不与碱性金属相互作用的激光和无助于 CPT 共振的波长的激光不被光检测器 150 检测。因此,能降低噪音,和能提高信噪(SN)比。

[0076] (所施加磁场带来的影响)

[0077] 如上文所解释的,图 3 是示出铯 $133D_1$ 线数据的能级图,并示出了两个通过具有线性偏振的激光激发的 CPT 共振 CPTa 和 CPTb。也就是,当将具有线性偏振的激光注入到碱性金属单元 140 中时,激发由点划线示出的 CPT 共振 CPTa 和由实线示出的 CPT 共振 CPTb。观测到其中如图 9 中所示的两个 CPT 共振 CPTa 和 CPTb 彼此交叠的信号。图 9 示出了施加到碱性金属单元 140 的磁通量密度和频率 f_{hfs} 之间的关系,所述频率 f_{hfs} 是如图 3 中所示的有助于每个 CPT 共振的两个亚能级之间的频率差(超精细分裂(hfs))。而且,将静态磁场施加到碱性金属单元 140 以使磁通量与进入到碱性金属单元 140 的激光的传播方向平行。

[0078] 而且,如图 10 中所示,磁通量的密度正比于两个 CPT 共振 CPTa 和 CPTb 频率之间的差。通过增加磁通量密度,可增大两个 CPT 共振的频率差 $f_a - f_b$ 。因此,为了精确检测频率差 $f_a - f_b$,施加到碱性金属单元 140 的磁通量密度优选大于或者等于 $10 \mu T$ 。在注入具有圆形偏振的激光的情况下,仅激发一个如图 11 中所示的 CPT 共振。

[0079] 两个 CPT 共振的频率差 $f_a - f_b$ 与磁通量 B 的密度相关,其关系由等式 4 表达。频率

f_a 是由图 3 中的点划线示出的 CPT 共振 CPTa, 和频率 f_b 是由图 3 中的实线示出的 CPT 共振 CPTb。

[0080] 等式 4

$$[0081] \quad f_a - f_b = \frac{4g_I \mu_B}{h} B$$

[0082] 在等式 4 中, μ_B 是波尔磁子 (Bohr magneton), 这里 $\mu_B = 9.2740091510^{-24}$, g_I 是铯 133 的核磁 g 因数, 这里 $g_I = -0.00039885395$, 和 h 是普朗克常数, 这里 $h = 6.6260689610^{-34}$ 。

[0083] 接下来, 将参考附图 12A 至 14B 解释法拉第旋转的特性。对于磁通量 B 负密度、无密度和磁通量 B 正密度的法拉第旋转角度分别于图 12A 和 12B、13A 和 13B 以及 14A 和 14B 中示出。在不施加磁场的情况下, 即 $B=0$, 如图 13A 和 13B 中所示, 自 CPT 共振 CPTa 和自 CPT 共振 CPTb 的作用彼此抵消。如图 13B 中所示, 不能观测到对于 CPT 共振 CPTa 和 CPTb 的法拉第旋转角度变化。

[0084] 另一方面, 如图 12A 和 12B 中所示, 这里磁通量密度值是负的, 即 $B < 0$, 在 CPT 共振 CPTa 上的法拉第效应和在 CPT 共振 CPTb 上的法拉第效应彼此交叠。图 12B 示出了对于 CPT 共振 CPTa 和 CPTb 的法拉第旋转角度变化在特定频率下变大, 这很容易观测到。相似地, 如图 14A 和 14b 中所示, 这里, 磁通量密度值是正的, 即 $B > 0$, 在 CPT 共振 CPTa 上的法拉第效应和在 CPT 共振 CPTb 上的法拉第效应彼此交叠。图 14B 示出了对于 CPT 共振 CPTa 和 CPTb 的法拉第旋转角度变化在特定频率下变大, 这很容易观测到。

[0085] 在本实施例中, 第一偏光器 131 的偏振方向和第二偏光器 132 的偏振方向彼此相互垂直。本发明不限于上述内容, 即只要第一偏光器 131 和第二偏光器 132 的偏振方向彼此不同, 就能获得与本实施例相同的效果。而且, 在自原子振荡器的激光源发出的激光具有线性偏振的情况下, 仅设置第二偏光器 132 而不设置第一偏光器 131。这种情况下, 将第二偏光器 132 设置成使得第二偏光器 132 的偏振方向不同于自激光源 110 发出的激光的偏振方向。第二偏光器 132 的偏振方向优选垂直于自激光源 110 发出的激光的偏振方向。

[0086] (实例)

[0087] 接下来, 作为本实施例的实例, 制备包括与图 2 中所示相同结构的原子振荡器的测量装置, 和测量 CPT 共振。垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 作为激光源 110 用作用于激发的激光器。激光波长是铯 133 的 D_1 线的波长, 即 895nm。进入碱性金属单元 140 的激光强度是 $1.1 \text{ mW} / \text{cm}^2$ 。碱性金属单元 140 具有直径 22.5mm 和光路径长度为 20.0mm 的圆柱形状。在碱性金属单元 140 中, 封装了碱性原子铯 (Cs) 和缓冲气体氖 (Ne)。碱性金属单元 140 的内部压力为 4kPa。注入到碱性金属单元 140 中的激光具有 5mm 的光束直径。进入到碱性金属单元 140 的激光通过碱性金属单元并由包括光电二极管等的光检测器 150 进行检测。

[0088] 作为激光源 110 的 VCSEL 的温度保持恒定。为了阻挡外部磁场诸如地球磁场, 碱性金属单元 140 和亥姆霍兹线圈 (未示出) 被磁屏蔽材料覆盖。而且, 碱性金属单元 149 和亥姆霍兹线圈被设置在恒温槽内部, 以保持温度恒定。而且, 通过将电流施加至亥姆霍兹线圈, 将预定静态磁场施加到碱性金属单元 140 上。碱性金属单元的温度在 39°C 和 55°C 之间, 且优选将其保持在 42°C , 该温度下 CPT 共振的对比度变为最高值。对于铯主频标准 175, 作为用于检测器的参考频率源, 采用 Symmetricom 公司的铯频率标准 5071A (高性能管)。对

于第一偏光器 131 和第二偏光器 132, 使用日本的 Sigma Koki 公司的偏光器 SPFN-30C-26。如图 15 中所示设置作为用于激发的偏光器的第一偏光器 131 的传输轴 (偏振方向)、作为用于检测的偏光器的第二偏光器 132 的传输轴 (偏振方向) 和激光轴。

[0089] 接下来, 图 16 示出了 CPT 共振的测量结果。图 16 中的实线 16A 是根据本实施例的 CPT 共振的测量结果, 这里如图 2 中所示设置第一偏光器 131 和第二偏光器 132。图 16 中的点划线 16B 是 CPT 共振的测量结果, 这里设置了第一偏光器 131 但是通过暗色滤波器 (dark filter) 代替第二偏光器 132。

[0090] 在用于测量以获得结果 16A 的结构中, 将磁通量密度为 $94 \mu\text{T}$ 的静态磁场施加到碱性金属单元 140。该结构中, 发现 CPT 共振的线宽 (FWHM) 和对比度分别为 1.15kHz 和 90.1% 。而且, 优化了第一偏光器 131 和第二偏光器 132 的位置。

[0091] 另一方面, 在用于测量以获得结果 16B 的结构中, 将磁通量密度为 $5 \mu\text{T}$ 的静态磁场施加到碱性金属单元 140。在该结构中, 发现 CPT 共振的线宽 (FMHW) 和对比度分别为 2.32kHz 和 3.3% 。

[0092] 接下来, 随着改变第二偏光器 132 传输轴的角度 θ , 对于对比度的测量结果于图 17 至 19 中示出。将角度 θ 如图 15 中所示限定为第二偏光器 132 的传输轴关于与第一偏光器 131 传输轴垂直的方向的角度。在测量期间, 将磁通量密度为 $30 \mu\text{T}$ 的静态磁场施加到碱性金属单元 140。

[0093] 图 17 示出了第二偏光器 132 的角度 θ 和 DC (直流) 电平之间的关系。对 CPT 共振没有帮助的波长分量出现在为 0 的旋转角度即 $\theta = 0$ 处。图 17 示出了不能检测该分量, 且发现其为零。

[0094] 而且, 图 18 示出了在第二偏光器 132 的角度 θ 和 CPT 共振振幅之间的关系。图 18 示出了发现对 CPT 共振没有帮助的波长分量为零。但是, 如图 17 中所示振幅对角度 θ 的相关性与 DC 电流的不同。这是由于偏振角度根据法拉第效应改变。

[0095] 图 19 示出了由其他结果得出的第二偏光器的角度 θ 与 CPT 共振的对比度之间的关系。在图 19 中, 发现了角度 θ 接近零时对比度增强的趋势。在本实施例中, 角度 θ 优选大于 -15 度并小于 15 度。因此, 仅需要第一偏光器 131 的方向不与第二偏光器 132 的方向平行。而且, 第一偏光器 131 和第二偏光器 132 优选被设置成使得第二偏光器的偏振方向和与第一偏光器 131 的偏振方向垂直的方向之间的角度小于 15 度。

[0096] 根据该结果, 如图 17 至 19 中所示, 在 CPT 共振中, 发现有助于 CPT 共振的波长分量的偏振方向通过法拉第效应旋转。而且, 发现接近角度 θ 为零的状态时对比度增强。

[0097] (在静态磁场和对比度之间的关系)

[0098] 接下来, 用于静态磁场和对比度之间的关系的测量结果于图 20 和 21 中示出。在该测量中, 第二偏光器 132 的角度 θ 被设置成 -3 度, 这里如图 19 中所示对比度是最大的。

[0099] 图 20 示出了静态磁场和 DC 电平之间的关系, 和静态磁场和共振振幅之间的关系。由“信号”表示的 CPT 共振的共振振幅随着静态磁场强度增加而线性增加。这是由于分别由点划线和实线示出的两个 CPT 共振, CPTa 共振和 CPTb 共振之间的频率差 $f_a - f_b$ 增加了, 且法拉第效应的交叠变大了。另一方面, DC 电平几乎与静态磁场强度无关且示出了恒定值。

[0100] 图 21 示出了在静态磁场和对比度之间的关系。该对比度由如下的等式 5 限定:

[0101] 等式 5

$$[0102] \quad \text{Contrast}[\%] = \frac{\text{Signal}}{\text{Signal} + \text{DClevel}} \times 100$$

[0103] 发现对比度随着静态磁场强度增加而变大。在磁场磁通量密度大于 $90 \mu\text{T}$ 的区域中, 由于认为 DC 电平接近常数, 因此随着静态磁场增加, 对比度将接近 100%。在本实施例中, 磁通量 B 的密度优选多于 $16 \mu\text{T}$ 。

[0104] (在静态磁场和线宽之间的关系)

[0105] 图 22 示出了用于静态磁场和 CPT 共振线宽之间关系的测量结果。在该测量中, 将第二偏光器 132 的角度 θ 设置成 -3 度, 这里如图 19 中所示对比度是最大的。如图 22 中所示, CPT 共振的线宽随着静态磁场密度增加近似线性增加。这是由于在分别由点划线和实线示出的两个 CPT 共振, CPTa 共振和 CPTb 共振之间的频率差 $f_a - f_b$ 增加了, 和线宽展宽了。

[0106] (在静态磁场和品质因数 (figure of merit) 之间的关系)

[0107] 图 23 示出了用于静态磁场和品质因数 (FOM) 之间关系的测量结果。将品质因数定义为由 FWHM 分开的对比度, 如 R. Lutwak 等人的“*The Chip-Scale Atomic Clock, Recent Development Progress*”中所示, 第 35 期 Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Systems and Applications Meeting 学报, 2003 年 12 月 2-4 日, San Diego, CA, USA, 第 467-478 页。在磁通量 B 的密度低于 $30 \mu\text{T}$ 的区域中, 品质因数急剧上升。在 B 大于 $30 \mu\text{T}$ 且小于 $60 \mu\text{T}$ 的区域中, 品质因数逐渐增加。但是, 在 B 大于 $60 \mu\text{T}$ 的区域中, 品质因数逐步降低。也是由于在 B 小于 $30 \mu\text{T}$ 的区域中, 特别是对比度上升在品质因数增加中是主要因素, 但是在 B 大于 $60 \mu\text{T}$ 的区域中, FWHM 展宽在品质因数降低中是主要因素。因此, 在本实施例中, 磁通量 B 的密度优选在 B 大于 $30 \mu\text{T}$ 并小于 $60 \mu\text{T}$ 的区域中和品质因数是最大值。

[0108] 本实施例中, 如上所述, 碱性金属单元 140 由玻璃单元形成。本实施例不限于此。碱性金属单元 140 可以是 MEMS (微型机电系统) 气体单元, 其通过在基板诸如硅 (Si) 基板中形成通孔和通过将玻璃基板贴附到基板两侧形成。通过使用上述气体单元, 可使得原子振荡器小型化且能降低成本。

[0109] 在本实施例中, 铯 (Cs) 用于封装在碱性金属单元 140 中的碱性金属。本实施例不限于此。也可使用其他碱性金属诸如铷 (Rd)、钠 (Na) 或者钾 (K) 代替铯。

[0110] 而且, 第一偏光器 131 或者第二偏光器 132 可贴附到碱性金属单元 140 的面上, 激光通过其传输。第一偏光器 131 和第二偏光器 132 可贴附到碱性金属单元 140 的面上。可通过第一偏光器 131 或第二偏光器 132 加热碱性金属单元。不通过第一偏光器 131 或第二偏光器 132 的激光被转换成热。通过加热碱性金属单元 140 的面将第一偏光器 131 或第二偏光器 132 贴附至其上, 能防止铯原子粘附到碱性金属单元 140 的面, 且由此能保持光量 (quantity)。

[0111] 【第二实施例】

[0112] 接下来, 将描述本发明的第二实施例。根据本实施例的磁传感器通过使用 CPT 共振的线宽线性依赖于静态磁场和 CPT 共振的振幅线性依赖于静态磁场的特性, 来检测磁场。

[0113] 现有技术中的 CPT 型磁传感器测量对磁场高度敏感的磁亚能级和另一对磁场不

敏感的磁亚能级之间的频率差,并评估该磁场,如 P. D. D. Schwindt 的“Chip-scale atomic magnetometer”中所示,Applied Physics Letters,85,6409(2004)。在磁亚能级之间的频率差随着磁场增加而变大。但是,在施加强磁场的情况下,需要扫描(sweeping)磁场的较宽范围,并会降低测量的准确性和精度。

[0114] 而且,在高密度磁通量(大于 50mT)的区域中,公知对磁场最敏感的磁亚能级和对磁场最不敏感的另一磁亚能级之间的频率差与磁场的相关性是非线性的。为了获得磁通量密度的精确值,需要将频率差考虑到非线性转变为磁通量密度。

[0115] 图 24 示出了示出根据本实施例的磁传感器结构实例的图。磁传感器包括激光源 110,碱性金属单元 140 和光检测器 150,与第一实施例中相同。第一偏光器 131 和第二偏光器 132 分别被设置在激光源 110 和碱性金属单元 140 之间和碱性金属单元 140 和光检测器 150 之间。根据本实施例的磁传感器检测碱性金属单元 140 中磁场值作为磁通量 B_s 密度。与根据第一实施例的原子振荡器不同,如图 2 中所示,通过亥姆霍兹线圈等产生的静态磁场不施加到根据本实施例的碱性金属单元 140。

[0116] 根据本实施例的磁传感器根据 CPT 共振的半峰全宽(full width at half maximum)检测磁通量密度值,并由此解决现有技术问题。也就是,测量半峰全宽(FWHM)或者一个 CPT 共振的振幅的根据本实施例的磁传感器不扫描(sweep)频率的较宽范围,且能简单且精确地捕获磁场。而且,由于 FWHM 和振幅大体上正比于磁场,因此在转换成磁场的过程中,不需要考虑非线性诸如现有技术中的磁亚能级。而且,能提高信噪(S/N)比。

[0117] 接下来,将具体解释根据本实施例的磁传感器。

[0118] (使用共振线宽(FWHM)和磁通量密度之间线性关系特性的磁传感器)

[0119] 图 3 是铯 $133D_1$ 线数据的能级图,并示出了由线性偏振激发的两个 CPT 共振。也就是,根据线性偏振,激发了由点划线示出的 CPT 共振 CPTa 和由实线示出的 CPT 共振 CPTb。观测到包括彼此交叠的两个 CPT 共振的信号。由于静态磁场导致的频率移位对于其它磁亚能级过大,因此在测量中通过将静态磁场施加到碱性金属单元 140 分开通过其他能级自 CPT 共振获得的益处。

[0120] 用于磁通量 B 的密度的频率 f_a 和 f_b 由等式 6 表达。

[0121] 等式 6

[0122]

$$f_{a,b} = \pm \frac{2g_I g_I \mu_B}{h} B + \frac{f_{hf_s}}{2} \cdot \left(1 \pm \frac{(g_I - g_I) \mu_B B}{2h f_{hf_s}} + \frac{(g_I - g_I)^2 \mu_B^2 B^2}{h^2 f_{hf_s}^2} \right)^{1/2} \\ + \frac{f_{hf_s}}{2} \cdot \left(1 \mp \frac{(g_I - g_I) \mu_B B}{2h f_{hf_s}} + \frac{(g_I - g_I)^2 \mu_B^2 B^2}{h^2 f_{hf_s}^2} \right)^{1/2}$$

[0123] 在等式 6 中 f_{hf_s} 是如图 3 中所示的超精细分裂频率,和 g_I 是朗德 g 因子(Landé g -factor)。

[0124] 在两个电平之间的频率差由等式 6 中的表达得出。频率差 $f_a - f_b$ 由等式 7 表达,在高达 $(g_I - g_I)^2$ 量级的近似中获得。

[0125] 等式 7

[0126]
$$f_a - f_b = \frac{4g_I \mu_B}{h} B$$

[0127] 频率差正比于磁通量 B 的密度,且不依赖于频率 f_{hfs} 。

[0128] 观测到的 CPT 共振的半峰全宽正比于磁通量 B 的密度。因此,磁通量 B 的密度可自 CPT 共振的 FWHM 简单获得。而且磁通量 B 的密度和 FWHM 具有如图 22 中所示的线性关系。因此,如果被测量磁场范围宽,则可精确测量磁通量 B 密度。

[0129] 图 25 示出了用于磁通量 B 的密度和 FWHM 之间关系的测量结果。根据图 25 中所示结果,关于磁通量密度的频率变化量是 $3.99\text{Hz} / \mu\text{T}$,和相关因数是 0.9936,其示出磁通量的密度和 FWHM 之间相当高的线性关系。根据本实施例的磁传感器以高精度度测量磁场。

[0130] (使用共振振幅和磁场之间线性关系特性的磁传感器)

[0131] 而且,共振振幅可用于一定范围磁场内的磁传感器,作为共振线宽 (FWHM)。为了将共振振幅用于磁传感器,需要考虑以下两项限制。

[0132] 本实施例中将测量的数据转换成磁场的过程使用塞曼效应的原理。共振振幅是间接改变的一项参数,即,共振振幅可受到除了磁场之外的因素影响,诸如光强度或者气体单元温度。因此,在测量磁通量密度时需要考虑源自这些因素的影响。

[0133] 而且,在强磁场的情况下,共振振幅不是线性依赖于磁通量密度。测量结果显示出在极强磁场中,共振振幅变得饱和 (saturated)。线性关系显示在磁通量密度在强磁场区域外部的位。尽管在强磁场中磁通量密度和共振振幅之间的关系非线性,但是共振振幅可用于检测弱磁场中的磁通量密度。

[0134] 考虑到上述限制,共振振幅可用于磁传感器。而且,共振振幅和 FWHM 可组合使用用于测量磁场。

[0135] [第三实施例]

[0136] 接下来,将在下文中描述本发明的第三实施例。如图 26 中所示,在原子振荡器中,可使用光强度调制器 210。图 26 示出了在准直透镜 120 和第一偏光器 131 之间提供光强度调制器 210 的结构。

[0137] 光强度调制器 210 是调制注入到碱性金属单元 140 中的激光强度的光学元件。尤其是,作为光强度调制器 210,可使用截光器 (optical chopper)、MEMS (微型机电系统) 快门、声光调制器、液晶等。

[0138] 接下来,图 27 示出了直接调制光强度且不需要光强度调制器 210 的原子振荡器。在脉冲激发中,为了调制注入到碱性金属单元 140 中的激光的光强度,由光源驱动器 220 输入到激光源 110 的功率施加至一脉冲,和将所产生的光学脉冲注入到碱性金属单元 140。

[0139] 偏光器方法使用了在 CPT 中的法拉第效应。在 CPT 中的法拉第效应源自自由线性偏振激发 ($\Delta m=2$) 激发的两个共振的交叠。因此,需要施加的磁场相对较强,以获得共振的较大交叠。但是,高密度磁通量的施加增大了二阶 (second order) 塞曼移位,且会引起频率长时间稳定性的降低。也就是,在偏振方法中,施加到气体单元的磁通量密度优选较低。

[0140] 在本实施例中,为了降低二阶塞曼效应,将脉冲激发和偏光器方法相组合。通过脉冲激发,抑制了 CPT 共振功率展宽,获得具有较窄线宽的共振,和与连续激发的情况下相比能降低待施加的磁场强度。

[0141] 在连续激发中决定 CPT 共振线宽的因素是自然展宽、所注入激光的强度、依赖于缓冲气体压力的碰撞展宽 (collision broadening),或者磁场均匀性。尤其是,在连续激发中的 CPT 共振线宽正比于所注入激光的强度。CPT 共振线宽与激光强度成正比展宽的现象

被称作功率展宽效应,其是使 CPT 共振线宽展宽的主要因素。另一方面,公知由脉冲激发获得的 CPT 共振的线宽不依赖于激光强度。所获得的线宽依赖于脉冲关闭时间(自由发展时间),通过以下等式 8 给出。

[0142] 等式 8

$$[0143] \quad FWHM = \frac{1}{2T}$$

[0144] 因此,在注入高强度激光的情况下,脉冲激发中的线宽比连续激发中的线宽窄。

[0145] 接下来,下文中将解释根据本实施例的原子振荡器的原理。可通过余弦函数近似脉冲激发中的 CPT 共振吸收光谱。此时,色散光谱(dispersion spectrum)即偏振旋转根据 Kramers-Kronig 关系成为正弦函数。当关于共振“a”和“b”的偏振旋转分别表示为 θ_a 和 θ_b 时,CPT 的偏振旋转是其交叠,通过以下等式 9 给出。

[0146] 等式 9

$$[0147] \quad \theta = \theta_a + \theta_b$$

[0148] 考虑到以下三项限制,即(1)偏振旋转是正弦函数,(2)两个偏振旋转 θ_a 和 θ_b 的标志根据共振的对称彼此不同,和(3)两个共振的频率根据塞曼移位在此不同的方向上移位,将等式 9 的偏振旋转重新撰写为等式 10。

[0149] 等式 10

$$[0150] \quad \begin{aligned} \theta &= \theta_a + \theta_b \\ &= \theta_0 \sin\left(2\pi\left(\frac{f+f_B/2}{2FWHM}\right)\right) - \theta_0 \sin\left(2\pi\left(\frac{f-f_B/2}{2FWHM}\right)\right) \\ &= 2\theta_0 \cos\left(2\pi\frac{f}{2FWHM}\right) \sin\left(\pi\frac{f_B}{2FWHM}\right) \end{aligned}$$

[0151] 在等式 10 中, θ_0 是 θ_a 和 θ_b 的最大旋转角度, f_B 是脉冲重复频率(pulse recurrence frequency),其是频率 f_a 和 f_b 之间的差,和 f 是共振频率,即 f_a 和 f_b 的平均值。根据等式 10,用于最大化旋转角度 θ 的磁通量密度的条件由等式 11 给出,如下。

[0152] 等式 11

$$[0153] \quad \sin\left(\pi\frac{f_B}{2FWHM}\right) = 1$$

[0154] 即, $\pi f_B / 2FWHM = \pi / 2$, 和最终获得 $f_B / FWHM = 1$ 。

[0155] 组合由等式 8 和 11 给出的关系,和由以下的等式 12 给出的频率 f_B 和磁通量密度之间的关系,

[0156] 等式 12

$$[0157] \quad f_a - f_b = \frac{4g_I\mu_B}{h} B$$

[0158] 磁通量密度由等式 13 获得。

[0159] 等式 13

$$[0160] \quad B = \frac{h}{4g_I\mu_B} FWHM = \frac{h}{4g_I\mu_B} \frac{1}{2T}$$

[0161] 如等式 13 中所示,线宽越窄,最大化旋转角度的磁通量密度就越低。例如,如果是

铯 Cs, 则频率差 f_B 由等式 14 给出。

[0162] 等式 14

$$[0163] \quad f_B = \frac{4g_I\mu_B}{h} B = 22.3 B \text{ [Hz/}\mu\text{T]}$$

[0164] 根据上述关系, 当脉冲重复频率 f_B 为 1000Hz 时 (即脉冲周期长度 T 是 0.5ms), 最大化旋转角度的磁通量 B 的密度评估为 44 μ T。对于 800Hz (T 是 0.625ms)、600Hz (T 是 0.833ms) 和 400Hz (T 是 1.250ms) 的脉冲重复频率, 评估磁通量密度分别为 36 μ T、27 μ T 和 18 μ T。上述评估结果于表 1 中示出。

[0165] 表 1

[0166]

脉冲重复频率 [Hz]	脉冲周期长度 (T) [μ s]	评估的磁通量密度 [μ T]
1000	500	44
800	625	36
600	833	27
400	1250	18

[0167]

[0168] 图 28 示出组合脉冲激发和偏光器方法的情况下的 CPT 共振的波谱。将脉冲重复频率设置为 400Hz, 和施加的磁通量密度为 16 μ T。尽管获得的共振振幅 (信号) 为 22.35mV, DC 电平为 3.05mV, 这非常低。对比度为 86%。而且, 对于 4.6GHz 共振频率, 线宽 (FWHM) 为 170Hz。由于由脉冲重复周期长度评估的线宽为 200Hz, 因此获得的 CPT 共振线宽小于理论值, 这里其间差别约为 20%。

[0169] 图 29 示出了对于各种磁场脉冲重复频率变化的情况下的共振振幅。发现每一个共振振幅都具有最大磁通量密度。以 7.7 μ T 间隔测量磁通量密度。

[0170] 在连续激发的情况下, 最大化共振振幅的磁通量密度为 93 μ T。另一方面, 在脉冲激发中, 根据窄化共振线宽, 当脉冲重复频率为 1000Hz 时, 磁通量密度变为 31 μ T, 和当脉冲重复频率为 400Hz 时, 磁通量密度变为 16 μ T。如上所述, 与连续激发所需的磁通量密度相比, 脉冲激发所需的磁通量密度足够低。测量结果于表 2 中示出。

[0171] 表 2

[0172]

脉冲重复频率[Hz]	脉冲周期长度 (T) [μ s]	评估的磁通量密度 (μ T) (理论值)	测量的磁通量密度 (μ T) (试验值)
1000	500	44	31
800	625	36	23
600	833	27	16
400	1250	18	16

[0173] 图 2 示出了随着脉冲重复频率变小,即脉冲周期长度变长,磁通量最大密度倾向于变低。而且,试验值小于理论值约 20%。由于获得的线宽比理论值窄约 20%,因此认为磁通量密度的试验值和理论值之间的差别很重要 (significant)。

[0174] [第四实施方式]

[0175] 接下来,将描述本发明的第四实施例。尽管本实施例涉及到磁传感器,其一部分特征结构与第三实施例的相同。

[0176] 偏光器方法利用 CPT 中的法拉第效应。CPT 中的法拉第效应源自自由线性偏振激发所激发的两个共振 ($\Delta m=2$) 的交叠。根据本实施例由偏光器方法实现的磁传感器基于两个共振之间的塞曼移位、由获得的共振的线宽或振幅评估所施加的磁通量密度。

[0177] 总之,需要磁传感器以便有高分辨率。而且,该分辨率依赖于对磁场的敏感度。因此,为了增强磁通量密度的分辨率,需要提高共振特性对磁通量密度的敏感度。

[0178] 为了提高共振特性对磁通量密度的敏感度,本实施例中将脉冲激发与偏光器方法组合。脉冲激发抑制了 CPT 共振的功率展宽,获得具有较窄线宽的共振,和能增强用于磁通量密度的共振振幅变化。

[0179] 决定连续激发中 CPT 共振线宽的因素是自然展宽、所注入激光的强度、依赖于缓冲气体压力的碰撞展宽、或者磁场的均匀性。尤其是,在连续激发中 CPT 共振的线宽与所注入激光的强度成正比。其中 CPT 共振的线宽与激光强度成正比展宽的现象称作功率展宽效应,其是 CPT 共振线宽展宽的主要因素。另一方面,公知由脉冲激发获得的 CPT 共振线宽与激光强度无关。获得的线宽依赖于脉冲关闭时间 (自由发展时间),由以下的等式 15 给出。

[0180] 等式 15

$$[0181] \quad FWHM = \frac{1}{2T}$$

[0182] 因此,在注入高强度激光的情况下,脉冲激发中的线宽比连续激发中的线宽窄。

[0183] 接下来,将计算偏振旋转 ($\partial\theta/\partial B$) 对磁场的敏感度,和对比连续激发和脉冲激发中的共振特性。尤其是,对比计算结果,并且将确定在脉冲激发中偏振旋转 ($\partial\theta/\partial B$) 对磁场的敏感度是否好于连续激发中的。

[0184] (连续激发)

[0185] 通过洛伦兹函数近似连续激发情况下 CPT 共振的吸收波谱。根据 Kramers-Kronig 关系,通过洛伦兹函数的推导获得色散波谱即偏振旋转的波谱。当关于共振“a”和“b”的偏

振旋转分别表示为 θ_a 和 θ_b 时,通过交叠获得 CPT 的偏振旋转,并且由以下等式 16 给出。

[0186] 等式 16

$$[0187] \quad \theta = \theta_a + \theta_b$$

[0188] 考虑到以下三项限制,即 (1) 偏振旋转由洛伦兹函数推导得出,(2) 两个偏振旋转 θ_a 和 θ_b 根据共振的对称性彼此不同,和 (3) 两个共振的频率根据塞曼移位在此不同的方向上移位,将等式 16 的偏振旋转重新撰写为等式 17。

[0189] 等式 17

$$[0190] \quad \theta = \theta_0 \left(\frac{\gamma(\delta - f_B/2)}{\gamma^2 + (\delta - f_B/2)^2} - \frac{\gamma(\delta + f_B/2)}{\gamma^2 + (\delta + f_B/2)^2} \right) \\ = -\theta_0 \frac{4\gamma f_B (-4\delta^2 + 4\gamma^2 + f_B^2)}{(4\gamma^2 + 4\delta^2 + f_B^2)^2 - 16\delta^2 f_B^2}$$

[0191] 在等式 17 中, θ_0 是 θ_a 和 θ_b 的最大旋转角度。而且,根据对称性,假设 $\theta_a = \theta_b$ 。为了简单化,频率失谐 δ 和塞曼移位量 f_B 通过半峰全宽 γ 标准化。将标准化的频率失谐和标准化的塞曼移位量分别表示为 $d (= \delta / \gamma)$ 和 $b (= f_B / 2\gamma)$, 和将等式 17 重新撰写为等式 18。

[0192] 等式 18

$$[0193] \quad \theta = -\theta_0 \frac{2b(1+b^2-d^2)}{(1+b^2+d^2)^2 - 4b^2d^2}$$

[0194] 而且,偏振的旋转角度在频率失谐为零,即 $d=0$ 处变成最大值。通过将“d”的值 (=0) 带入到等式 18 中,获得等式 19。

[0195] 等式 19

$$[0196] \quad \theta = -\theta_0 \frac{2b}{1+b^2}$$

[0197] 而且,变量“b”,塞曼移位量,是磁通量 B 密度的函数。如果变量“b”正比于磁通量 B 的密度,则“b”可表达为 $b = kB$, 这里“k”是正比例常数。偏振旋转 ($\partial\theta/\partial B$) 对磁场的敏感度由等式 20 表达。图 30 示出了以 b 的方式由等式 20 表达出的法拉第旋转角度。

[0198] 等式 20

$$[0199] \quad \frac{\partial\theta}{\partial B} = \frac{\partial\theta}{\partial b} \cdot \frac{\partial b}{\partial B} \\ = \theta_0 \frac{b^2 - 1}{(1+b^2)^2} \cdot k$$

[0200] 敏感度在 $B=0$ 时变为最大值,这通过等式 21 表达。

[0201] 等式 21

$$[0202] \quad \left. \frac{\partial\theta}{\partial B} \right|_{\max} = \theta_0 k$$

[0203] 根据第一实施例中的等式 4, 获得“b”的表达式,将其于等式 22 中示出。

[0204] 等式 22

$$[0205] \quad b = kB = \frac{f_B}{2\gamma} = \frac{4g_I\mu_B B}{h} \cdot \frac{1}{2\gamma}$$

[0206] 根据等式 22, 获得“k”的表达式, 如等式 23。

[0207] 等式 23

$$[0208] \quad k = \frac{2g_I\mu_B}{\gamma h}$$

[0209] 偏振旋转 ($\partial\theta/\partial B$) 对磁场的敏感度的最大值由等式 24 给出。

[0210] 等式 24

$$[0211] \quad \left| \frac{\partial\theta}{\partial B} \right|_{\max} = \theta_0 \frac{2g_I\mu_B}{\gamma h}$$

[0212] 如可从等式 24 中看出的, 共振的半峰全宽越小, 敏感度就越高。

[0213] (脉冲激发)

[0214] 脉冲激发情况下可以通过余弦函数近似 CPT 共振的吸收波谱。根据 Kramers-Kronig 关系, 色散波谱即偏振旋转的波谱是正弦函数。当关于共振“a”和“b”的偏振旋转分别表示为 θ_a 和 θ_b 时, 由二者交叠获得 CPT 的偏振共振, 并由以下的等式 25 给出。

[0215] 等式 25

$$[0216] \quad \theta = \theta_a + \theta_b$$

[0217] 考虑到以下三项限制, 即 (1) 偏振旋转是正弦函数, (2) 根据共振的对称性, 两个偏振旋转 θ_a 和 θ_b 的标记彼此不同, 和 (3) 两个共振的频率根据塞曼移位在此不同的方向上移位, 将等式 25 的偏振旋转重新撰写为等式 26。

$$[0218] \quad \begin{aligned} \theta &= \theta_a + \theta_b \\ &= \theta_0 \sin\left(2\pi\left(\frac{\delta + f_B/2}{4\gamma}\right)\right) - \theta_0 \sin\left(2\pi\left(\frac{\delta - f_B/2}{4\gamma}\right)\right) \\ &= 2\theta_0 \cos\left(2\pi\frac{\delta}{4\gamma}\right) \sin\left(\pi\frac{f_B}{4\gamma}\right) \end{aligned}$$

[0219] 在等式 26 中, θ_0 是 θ_a 和 θ_b 的的最大旋转角度。而且, 根据对称性, 假设 $\theta_a = \theta_b$ 。为了简单化, 频率失谐 δ 和塞曼移位量 f_B 通过半峰全宽 γ 标准化。将标准化的频率失谐和标准化的塞曼移位量分别表示为 $d(= \delta / \gamma)$ 和 $b(= f_B/2\gamma)$, 和将等式 26 重新撰写为等式 27。

[0220] 等式 27

$$[0221] \quad \begin{aligned} \theta &= 2\theta_0 \cos\left(2\pi\frac{\delta}{4\gamma}\right) \sin\left(\pi\frac{f_B}{4\gamma}\right) \\ &= 2\theta_0 \cos\left(\frac{\pi}{2}d\right) \sin\left(\frac{\pi}{2}b\right) \end{aligned}$$

[0222] 接下来, 将推导偏振旋转 ($\partial\theta/\partial B$) 的敏感度。根据等式 27 中的表达, 敏感度 ($\partial\theta/\partial B$) 由等式 28 表达。

[0223] 等式 28

$$[0224] \quad \frac{\partial \theta}{\partial B} = \frac{\partial}{\partial B} \left(2\theta_0 \cos\left(\frac{\pi}{2}d\right) \sin\left(\frac{\pi}{2}b\right) \right)$$

$$= \theta_0 k \pi \cos\left(\frac{\pi}{2}d\right) \cos\left(\frac{\pi}{2}b\right)$$

[0225] 通过将“d”(=0) 的值带入到等式 28 中, 获得等式 29。

[0226] 等式 29

$$[0227] \quad \frac{\partial \theta}{\partial B} = \theta_0 k \pi \cos\left(\frac{\pi}{2}b\right)$$

[0228] 等式 29 示出的表达式包括余弦函数 $\cos(\pi b/2)$, 也就是, 敏感度具有周期性。敏感度在 $B=0$ 时具有最大值。该最大值由等式 30 表达。

[0229] 等式 30

$$[0230] \quad \left| \frac{\partial \theta}{\partial B} \right|_{\max} = \theta_0 k \pi$$

[0231] 根据第一实施例中的等式 4, 获得等式 31 中“b”的表达式。

[0232] 等式 31

$$[0233] \quad b = kB = \frac{f_B}{2\gamma} = \frac{4g_I \mu_B B}{h} \cdot \frac{1}{2\gamma}$$

[0234] 根据等式 31, 获得等式 32 中“k”的表达式。

[0235] 等式 32

$$[0236] \quad k = \frac{2g_I \mu_B}{\gamma h}$$

[0237] 偏振旋转 ($\partial\theta/\partial B$) 对磁场的敏感度最大值由等式 33 给出。

[0238] 等式 33

$$[0239] \quad \left(\left| \frac{\partial \theta}{\partial B} \right|_{\max} = \theta_0 \frac{2g_I \mu_B}{\gamma h} \pi \text{ 之间对比} \right)$$

[0240] 在连续激发中, 偏振旋转 ($\partial\theta/\partial B$) 对磁场的敏感度最大值在等式 34 中表达, 其与等式 24 中相同。

[0241] 等式 34

$$[0242] \quad \left| \frac{\partial \theta}{\partial B} \right|_{\max} = \theta_0 \frac{2g_I \mu_B}{\gamma h}$$

[0243] 另一方面, 在脉冲激发中, 偏振旋转 ($\partial\theta/\partial B$) 对磁场的敏感度最大值在等式 35 中表达, 其与等式 33 中相同。

[0244] 等式 35

$$[0245] \quad \left| \frac{\partial \theta}{\partial B} \right|_{\max} = \theta_0 \frac{2g_I \mu_B}{\gamma h} \pi$$

[0246] 而且, 将连续激发和脉冲激发中的半峰全宽分别标记为 γ_{CW} 和 γ_{PL} 。对于通过高强度激光实现的激发, 连续激发中的半峰全宽大于脉冲激发中的, 即 $\gamma_{CW} > \gamma_{PL}$ 。此时, 获得

连续激发和脉冲激发中敏感度之间的关系,如等式 36。

[0247] 等式 36

$$[0248] \quad \left| \frac{\partial \theta}{\partial B} \right|_{PL,max} > \left| \frac{\partial \theta}{\partial B} \right|_{CW,max}$$

[0249] 因此,与连续激发相比,在脉冲激发中偏振旋转对磁场的敏感度很高。也就是,通过窄化根据脉冲激发的线宽,可增强磁通量密度的敏感度。

[0250] 而且,本发明不限于这些实施例,而是在不脱离本发明范围的情况下可作出各种变化和修改。

[0251] 本申请基于并要求向日本专利局于 2013 年 2 月 14 日提出的 No. 2013-026436 和于 2014 年 1 月 16 日提出的 No. 2014-006073 的日本优先权申请的优先权益,通过引用将其整体内容并入本文。

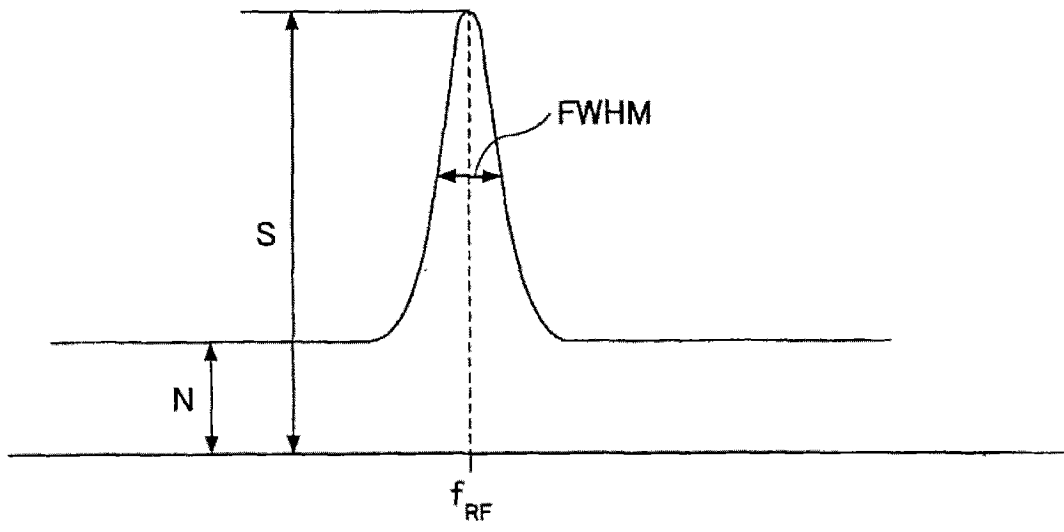


图 1

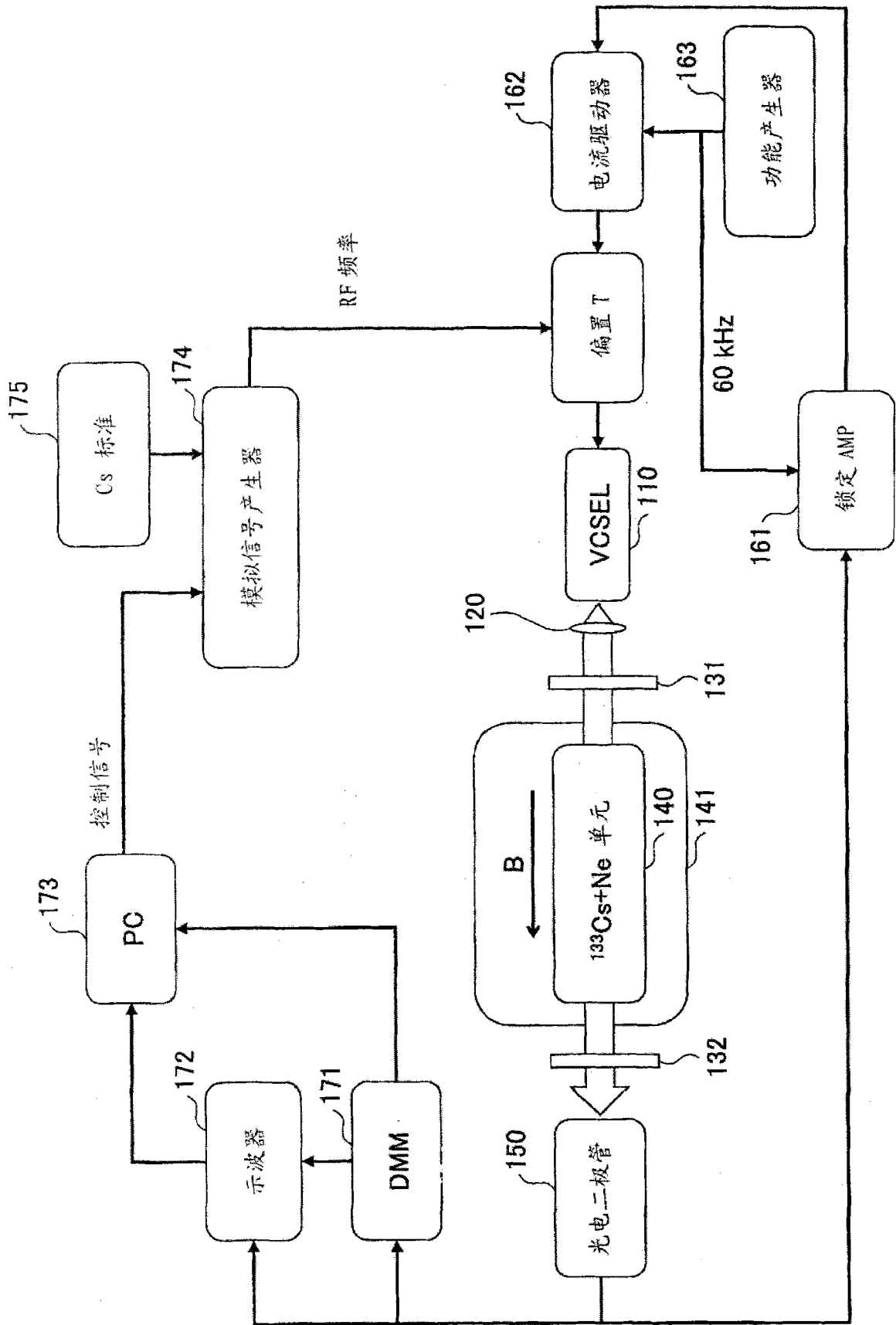


图 2

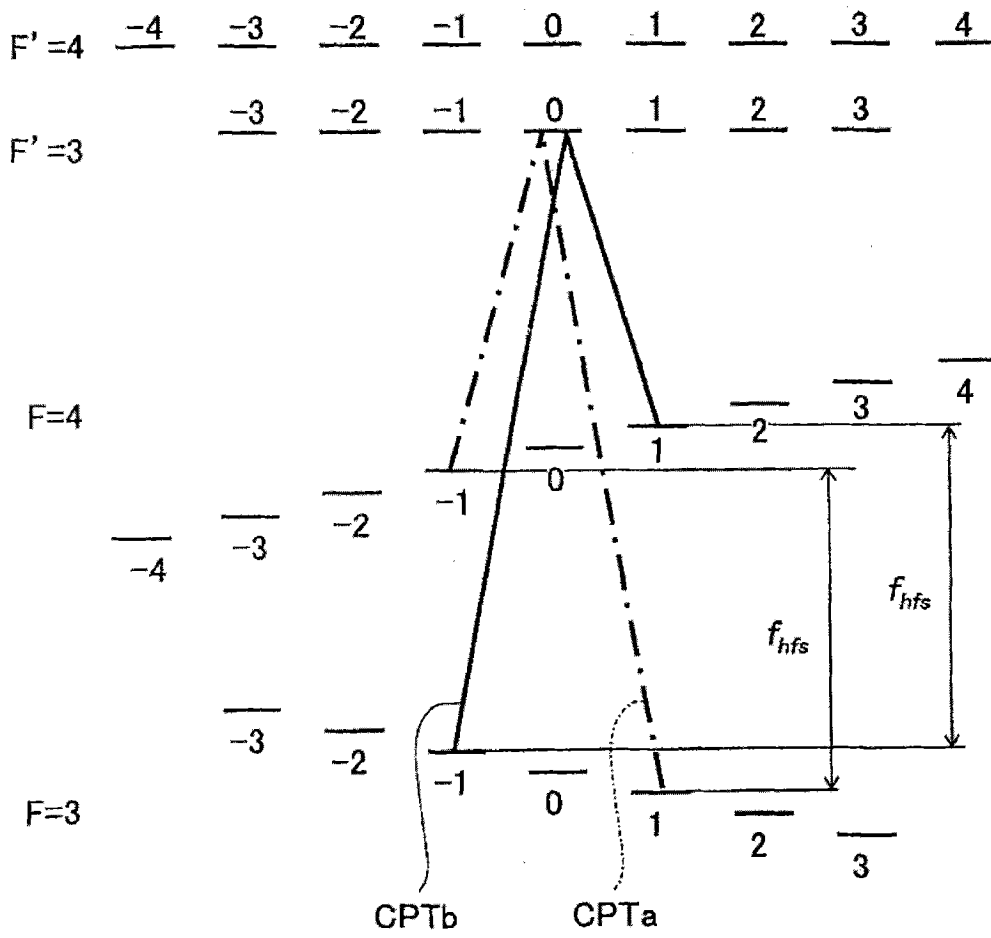


图 3

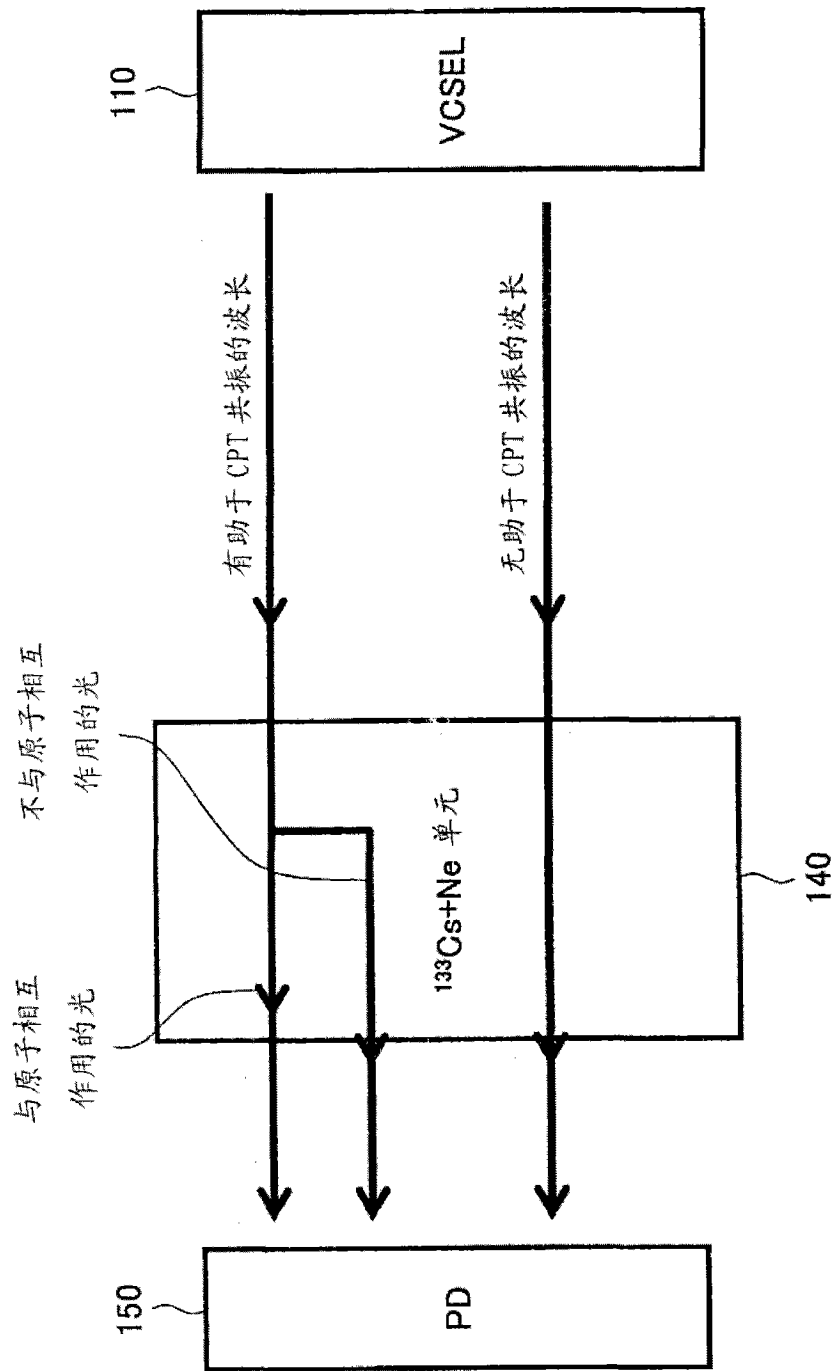


图 4

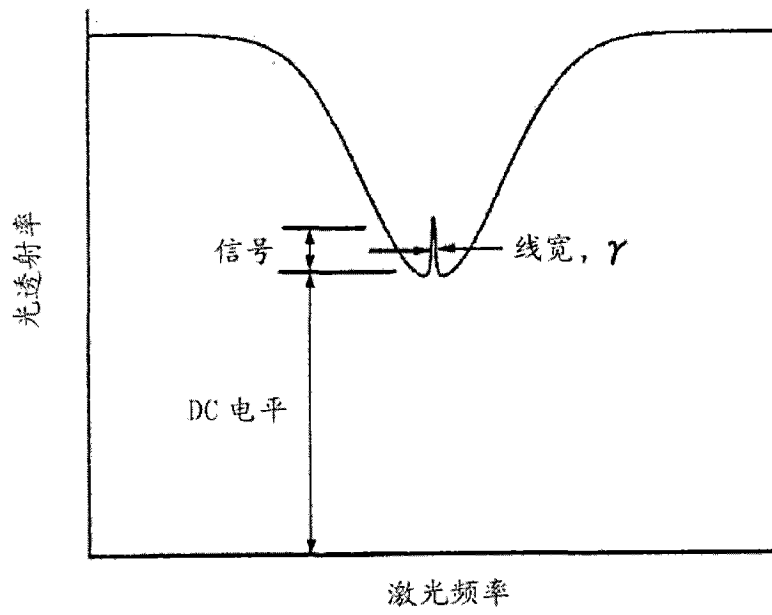


图 5

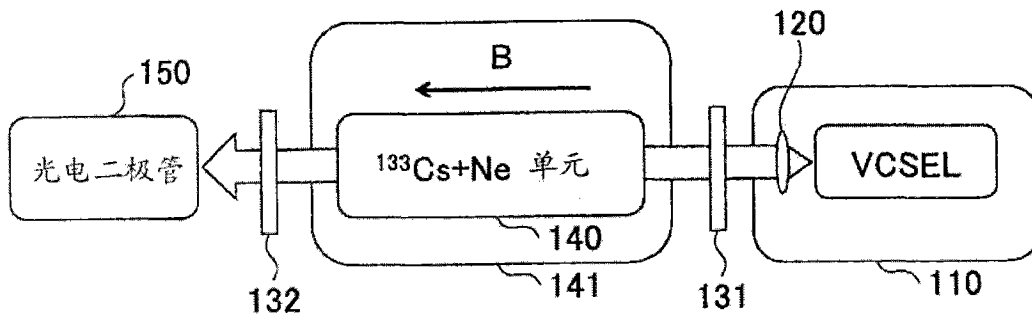


图 6

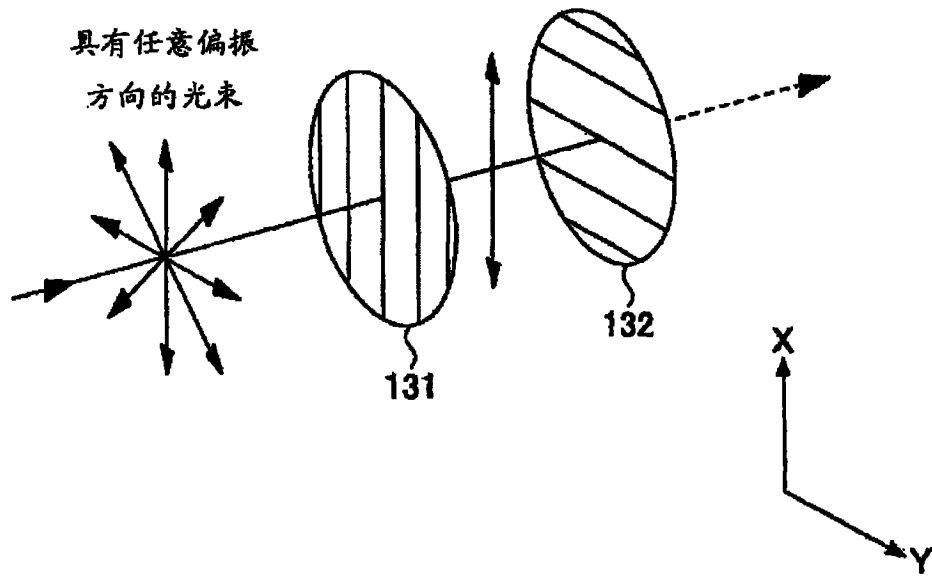


图 7

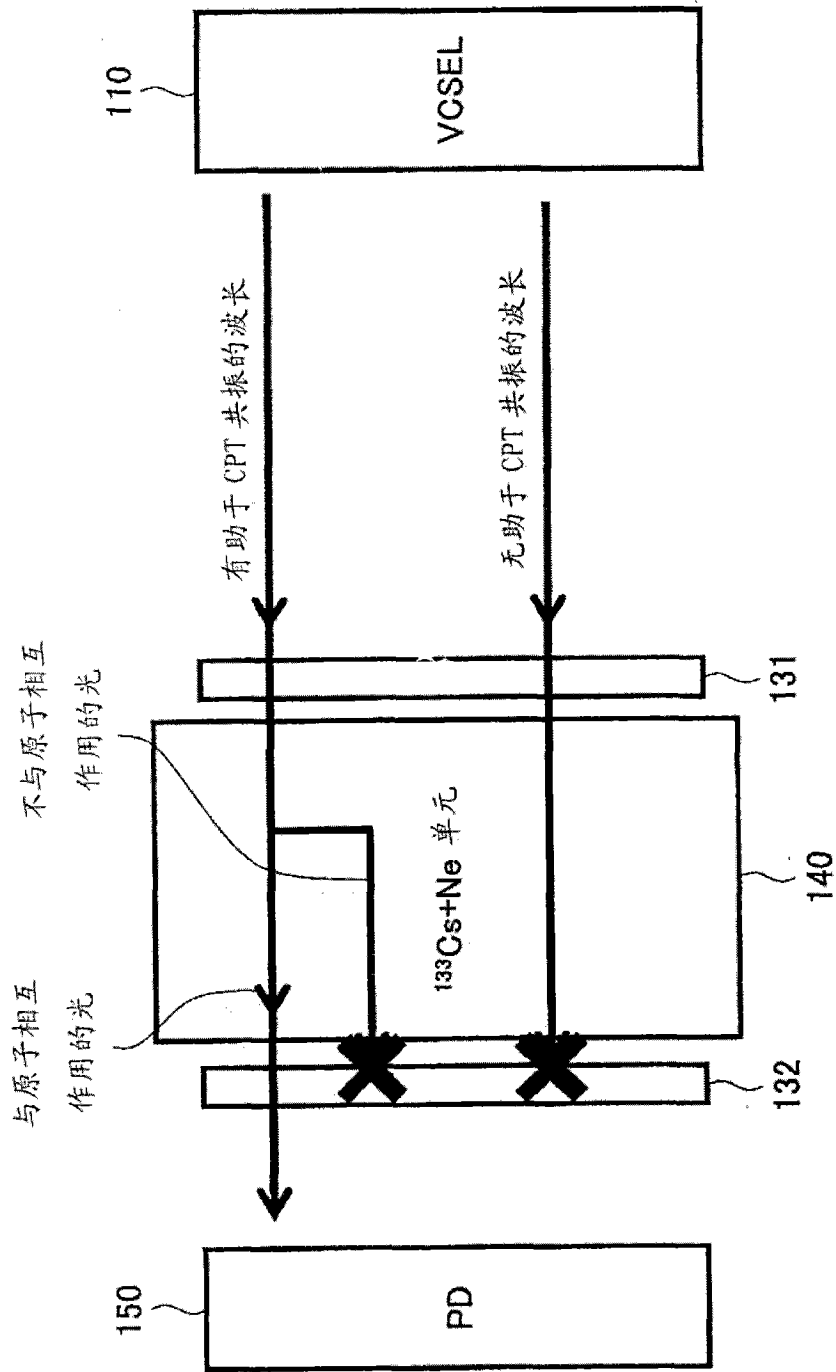


图 8

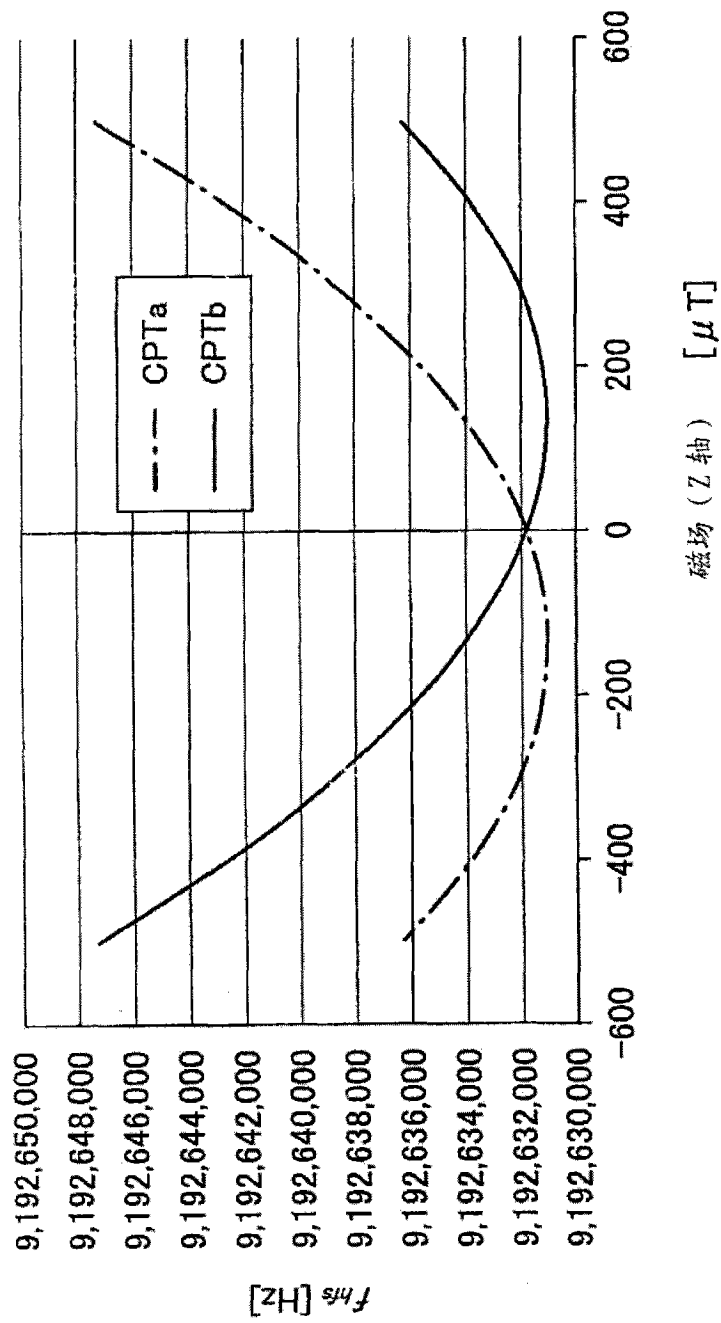


图 9

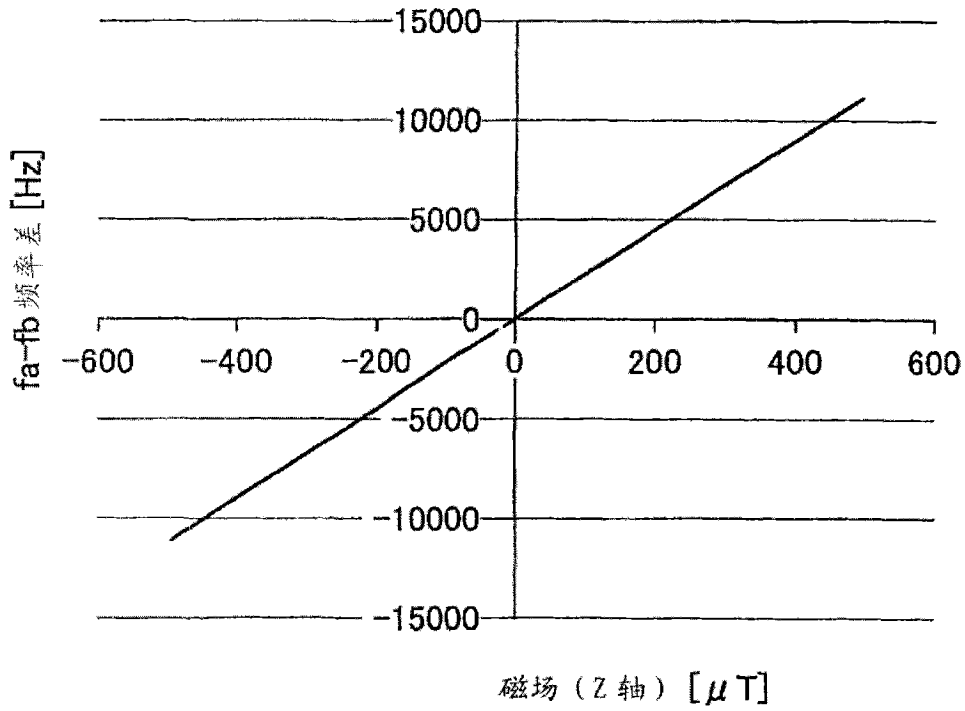


图 10

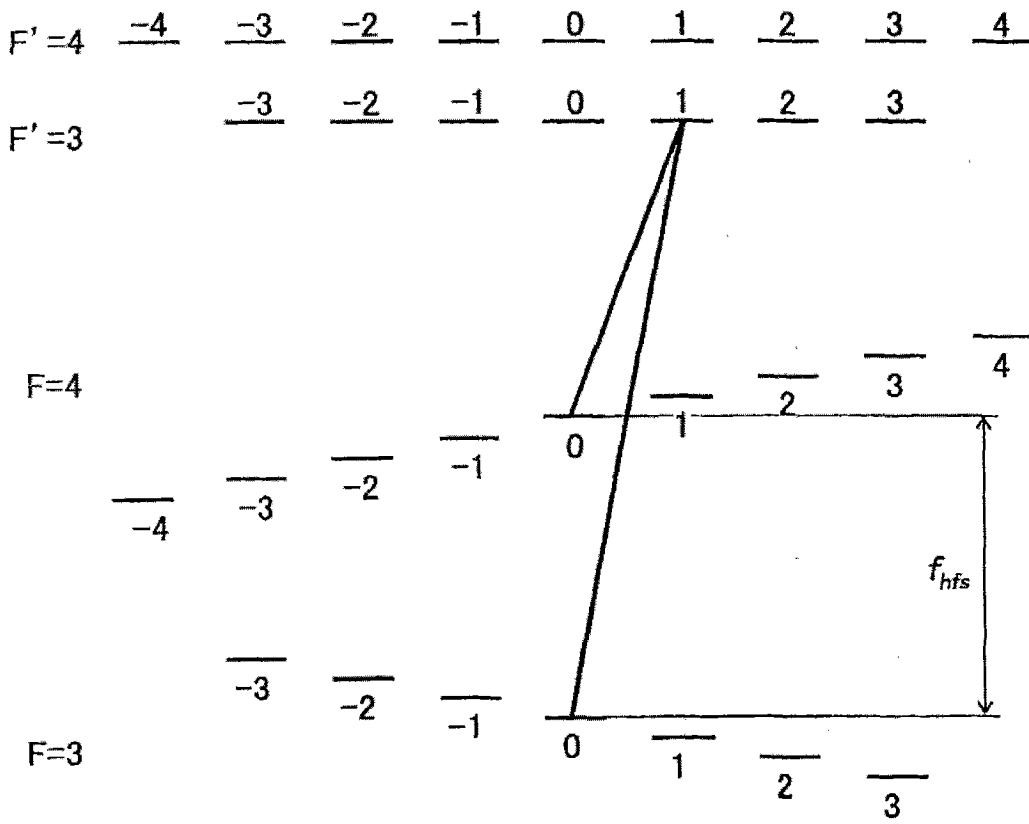


图 11

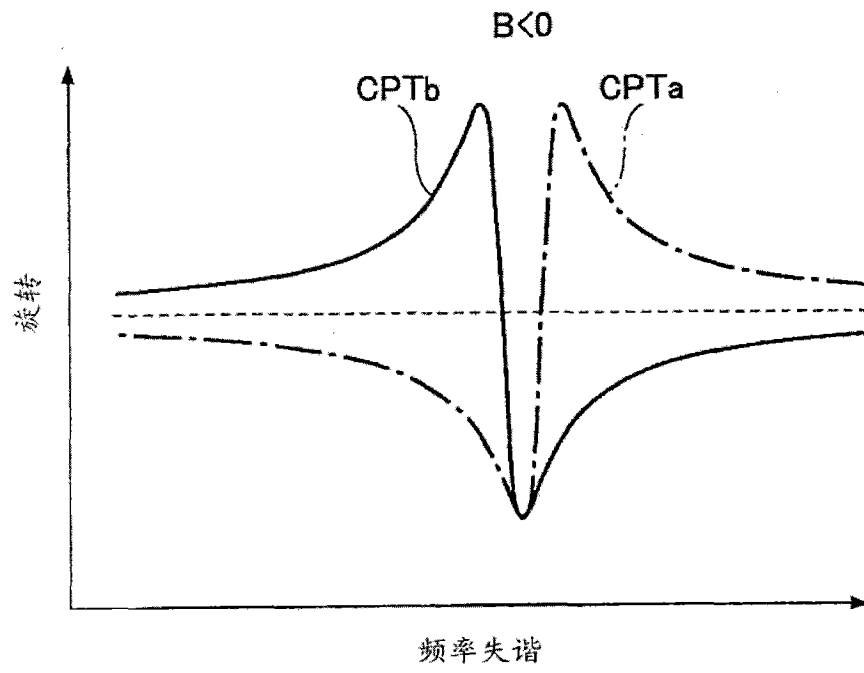


图 12A

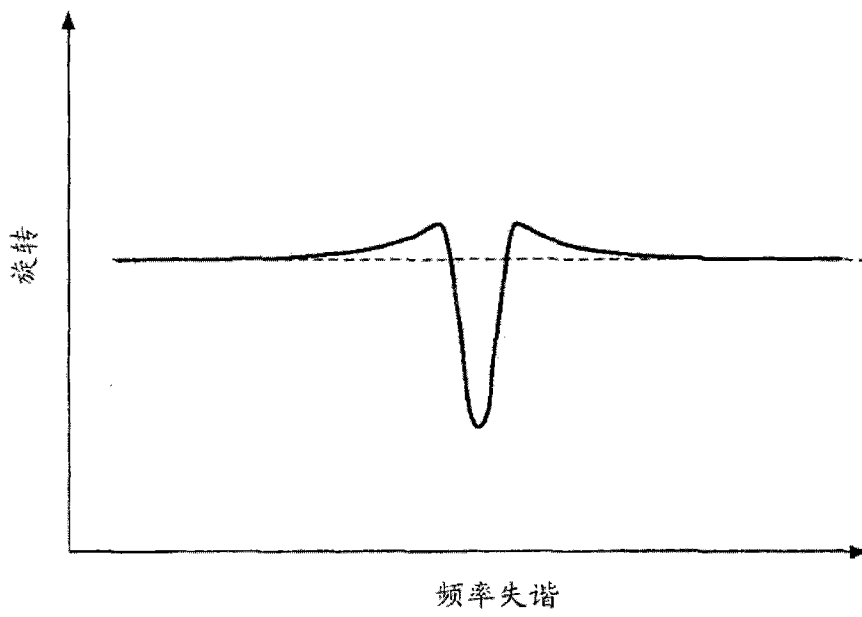


图 12B

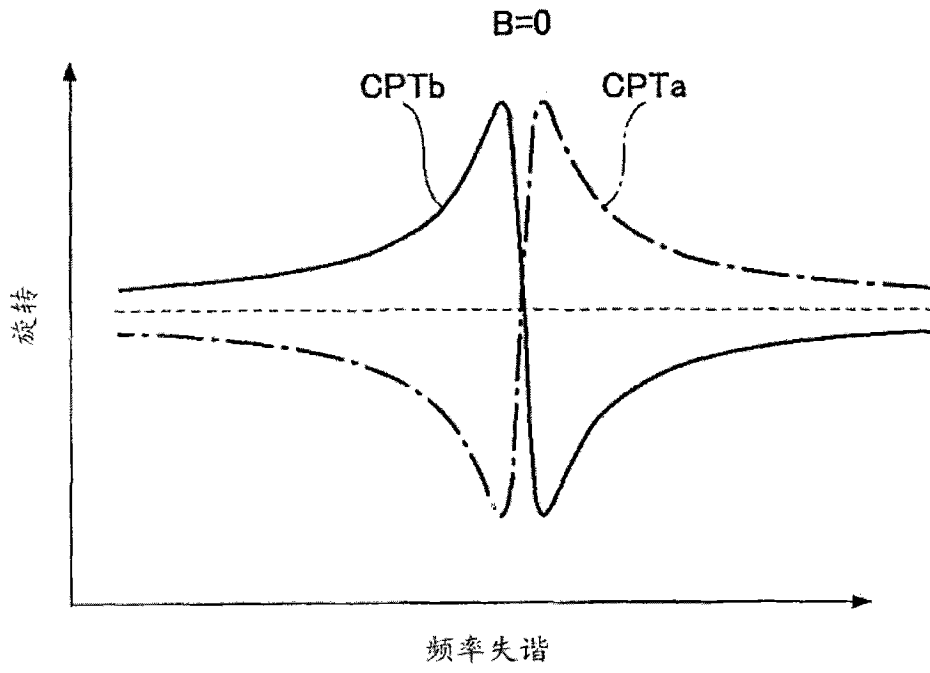


图 13A

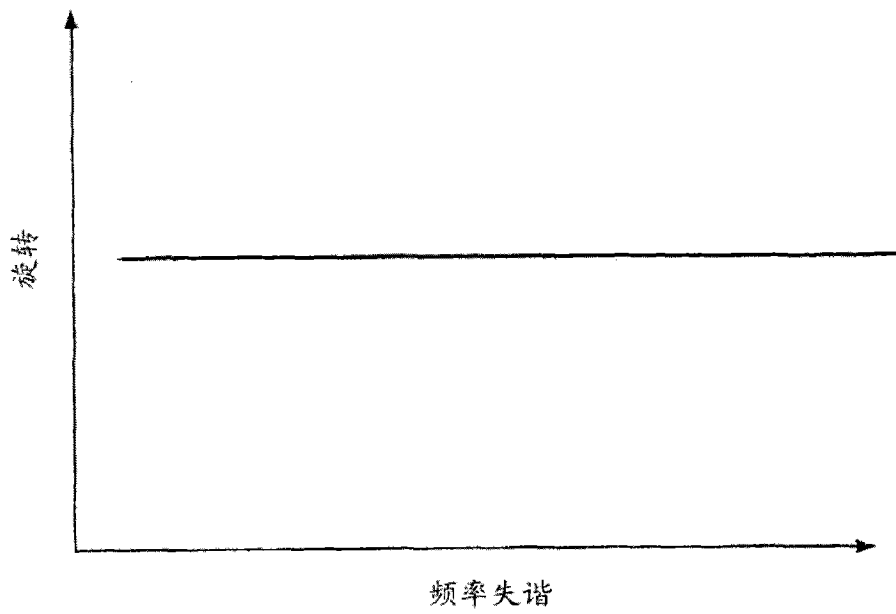


图 13B

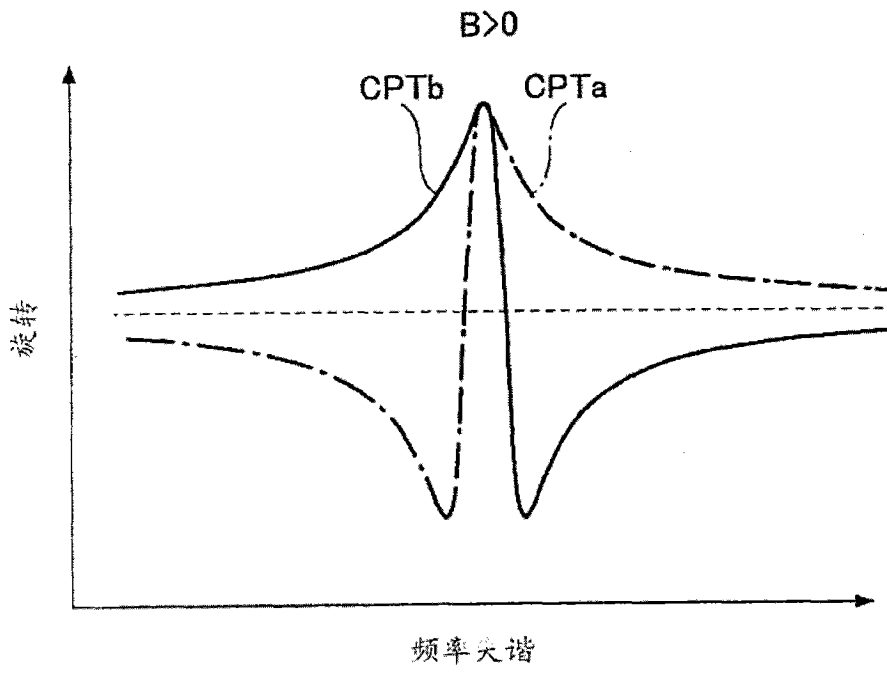


图 14A

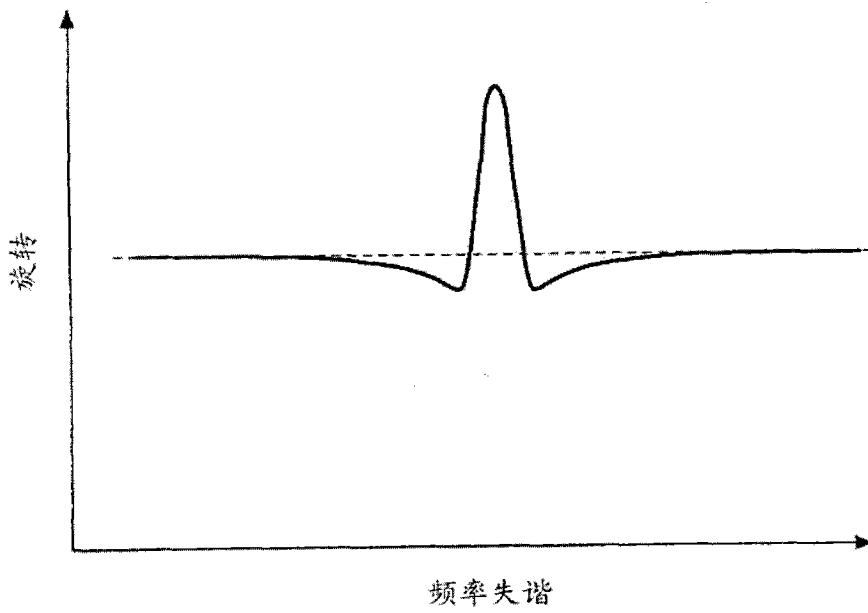


图 14B

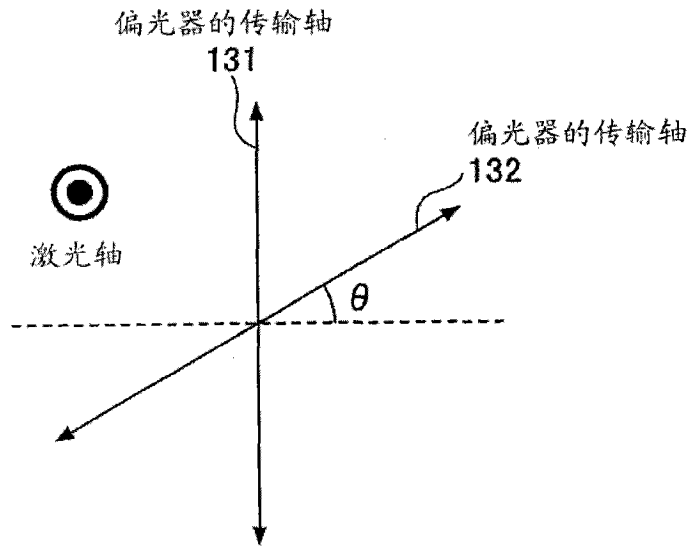


图 15

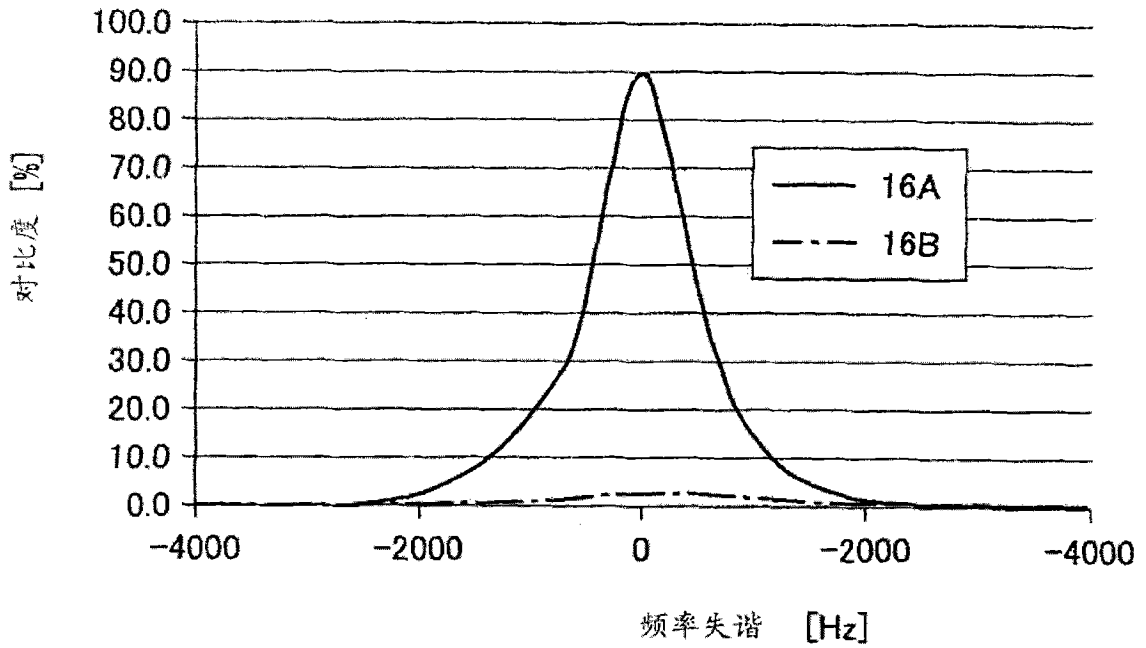


图 16

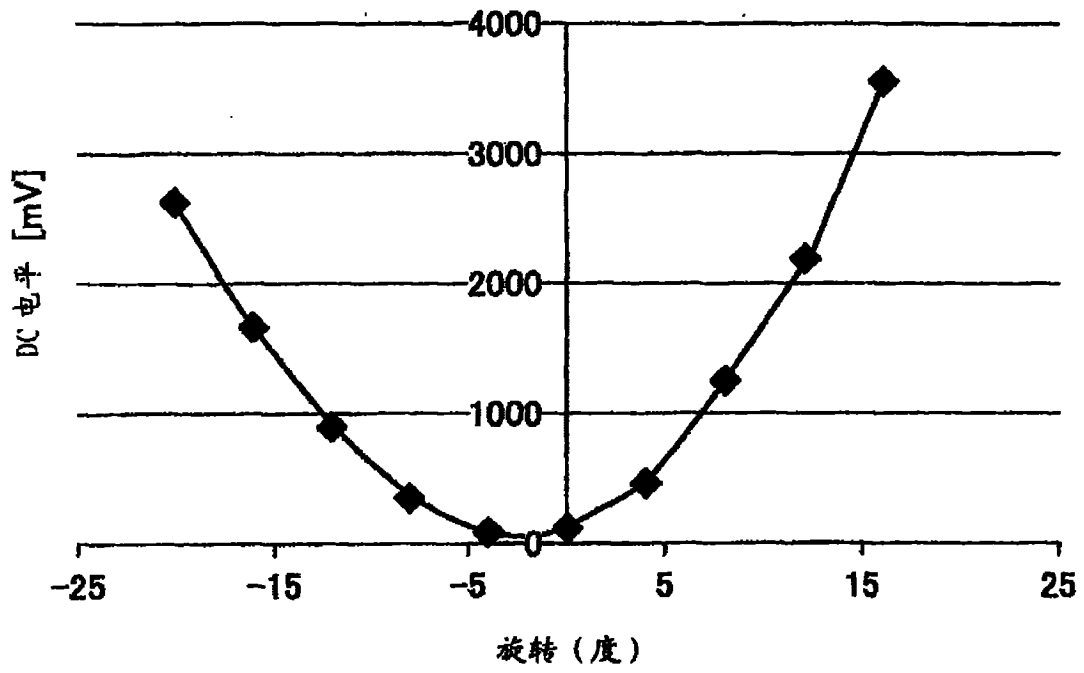


图 17

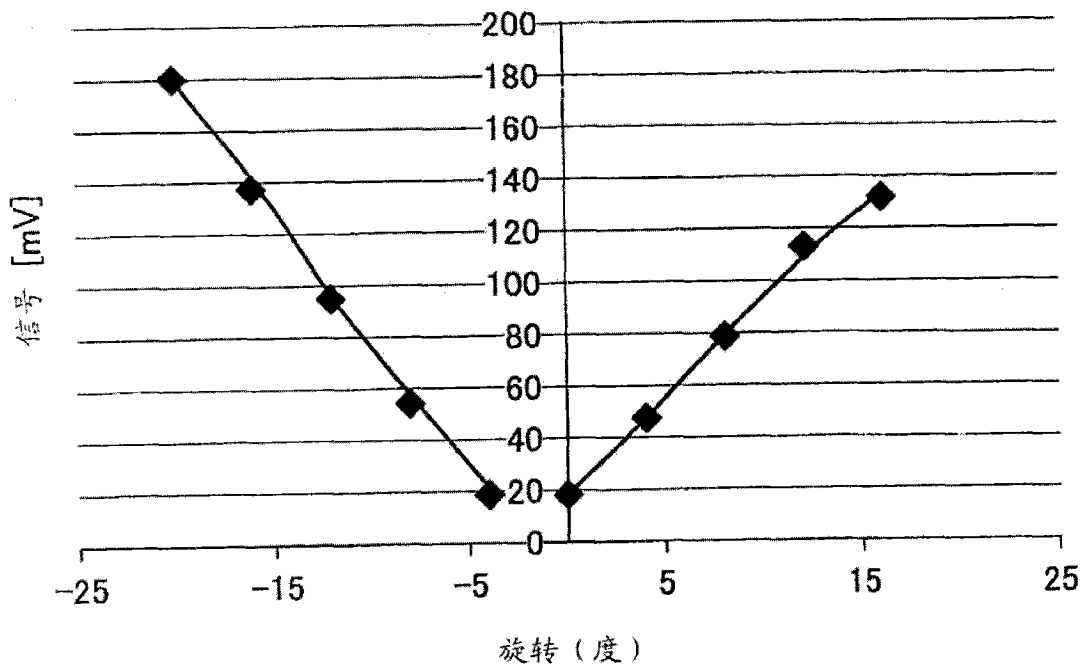


图 18

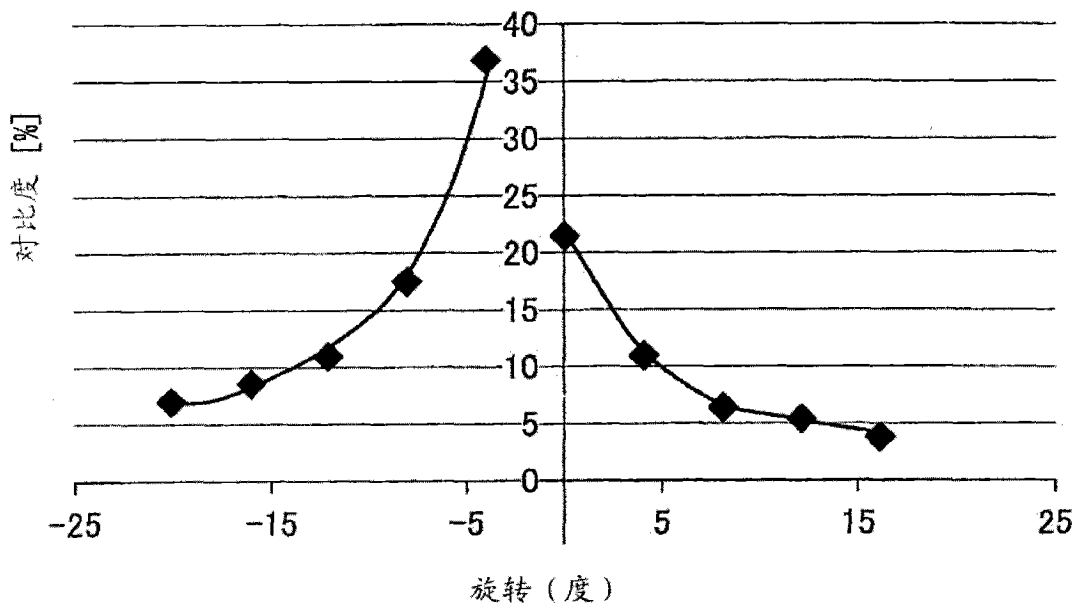


图 19

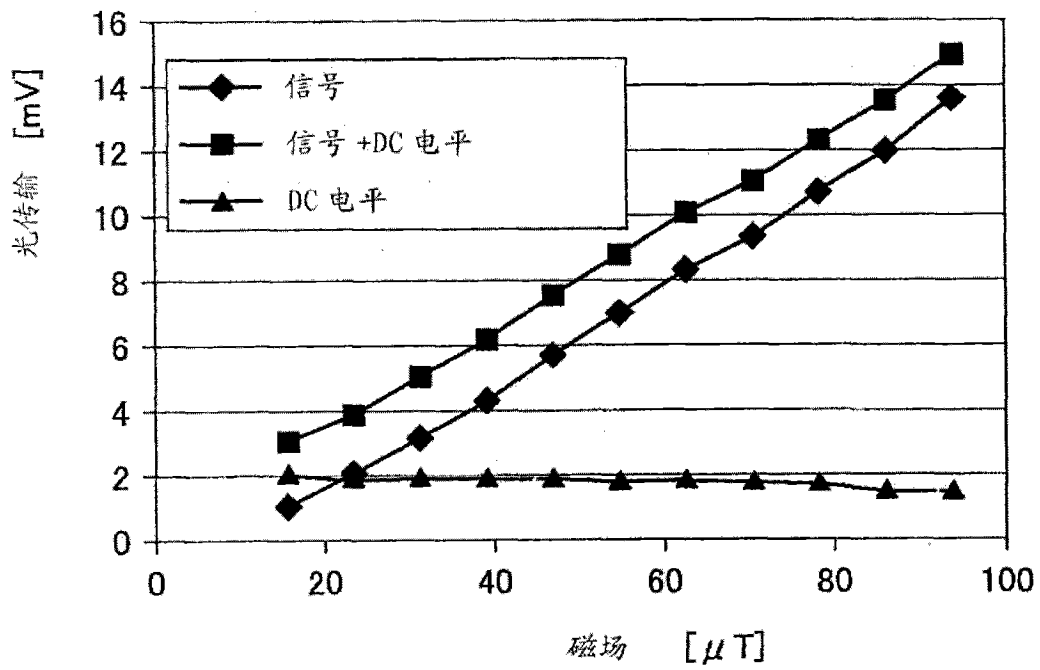


图 20

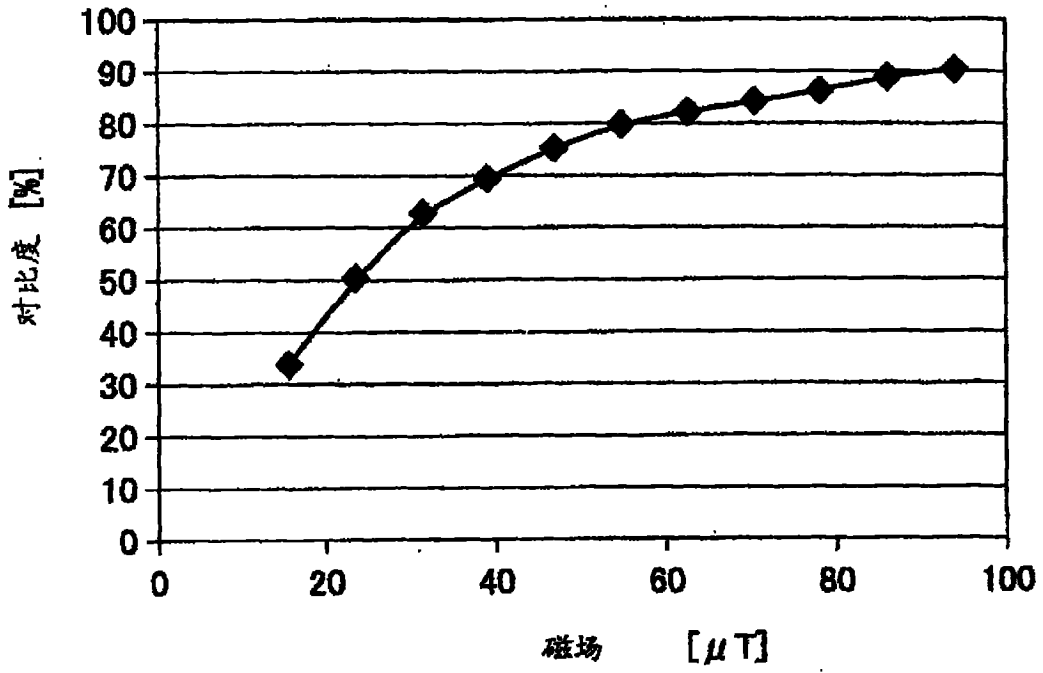


图 21

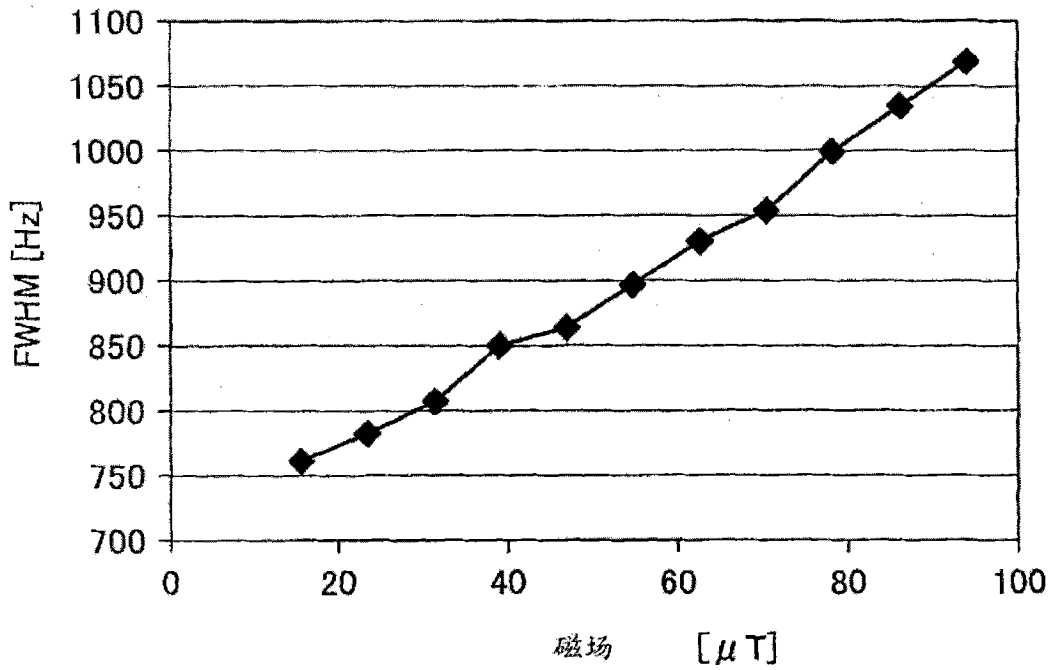


图 22

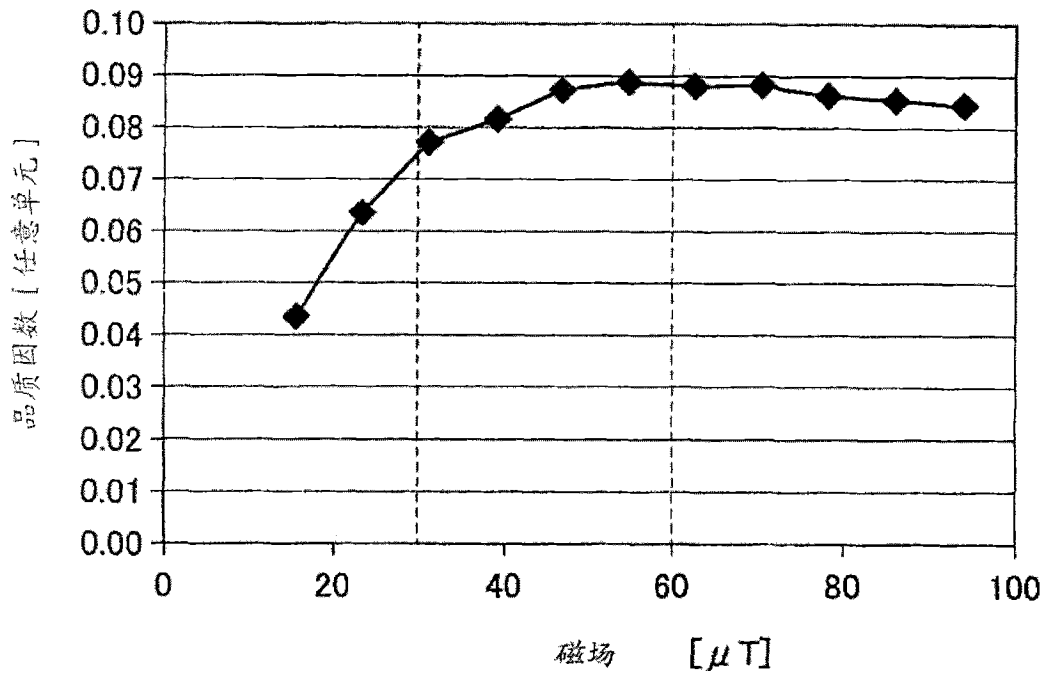


图 23

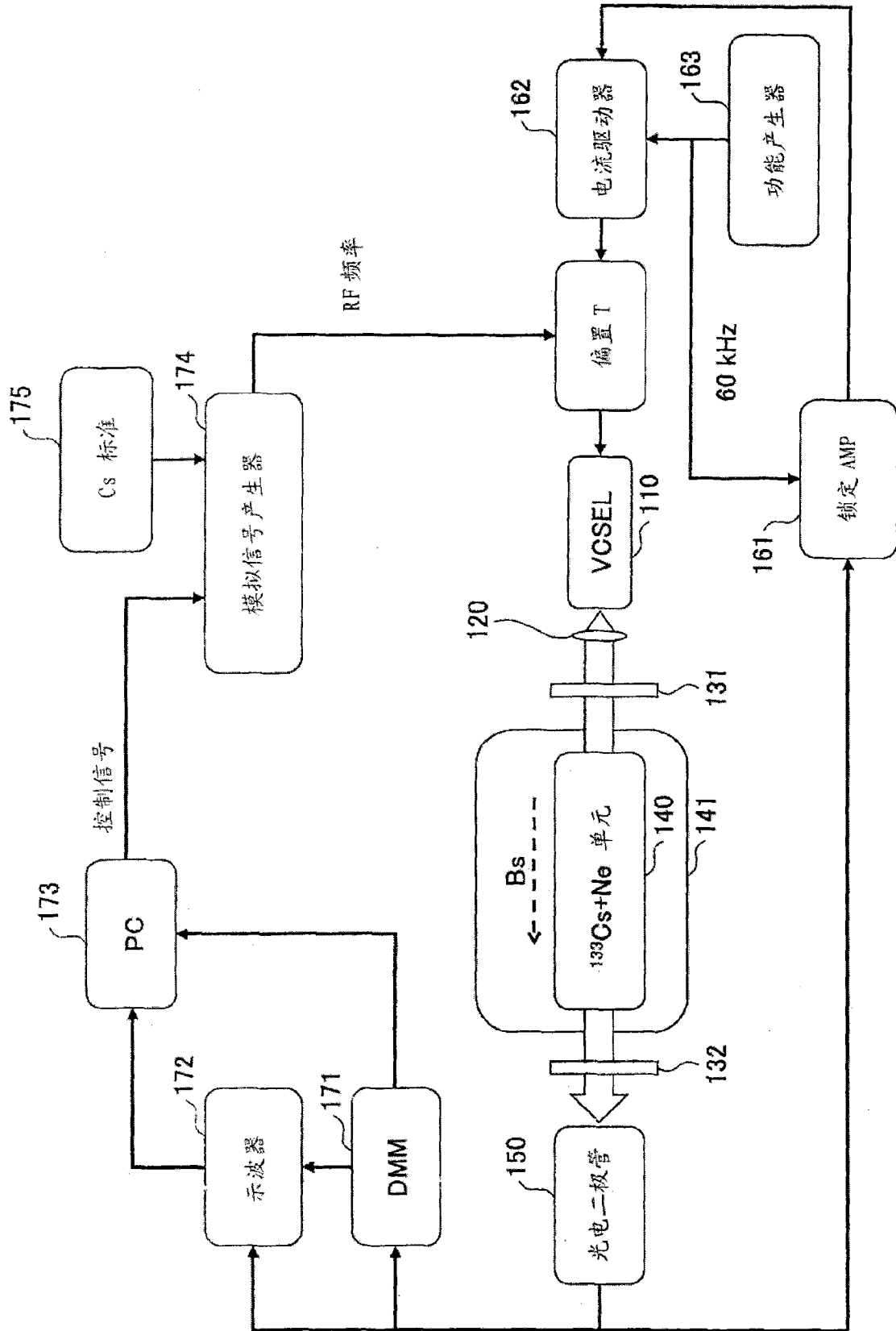


图 24

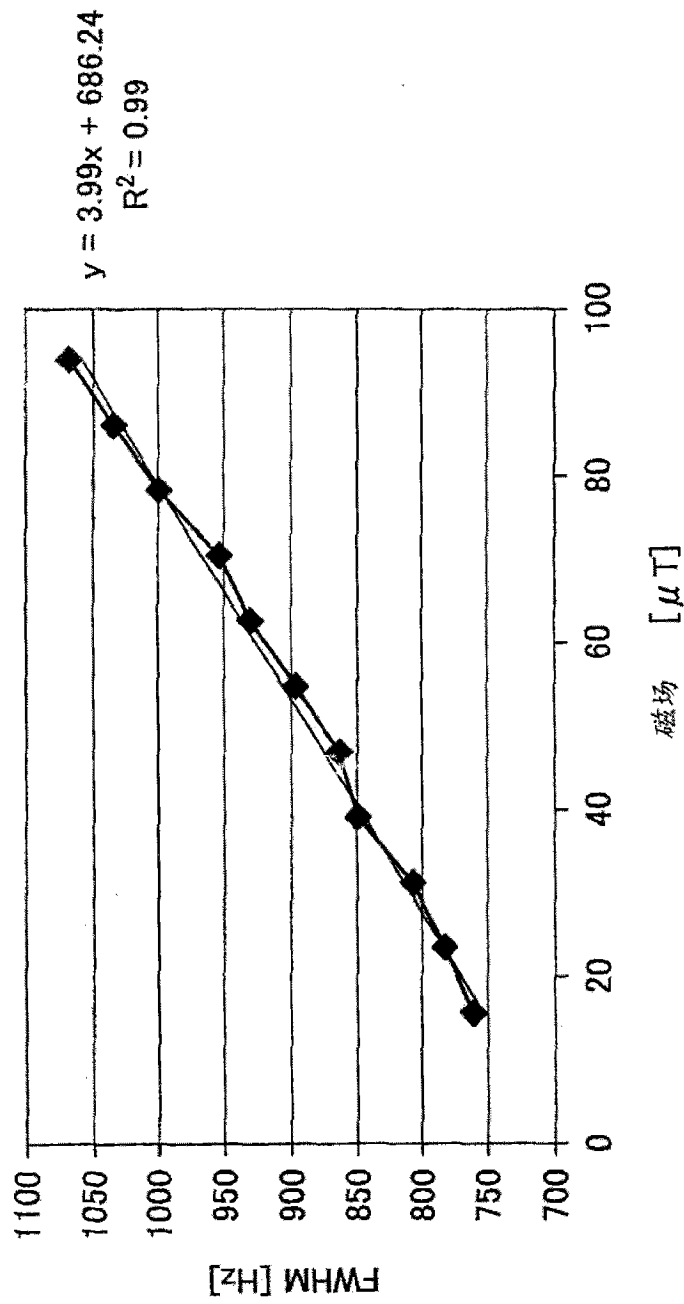


图 25

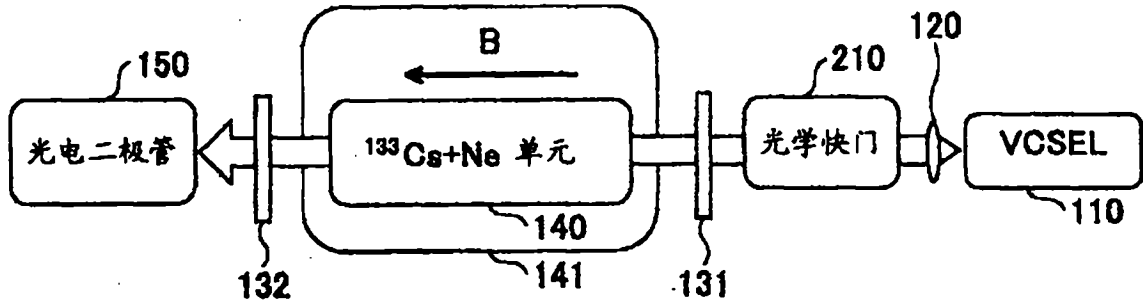


图 26

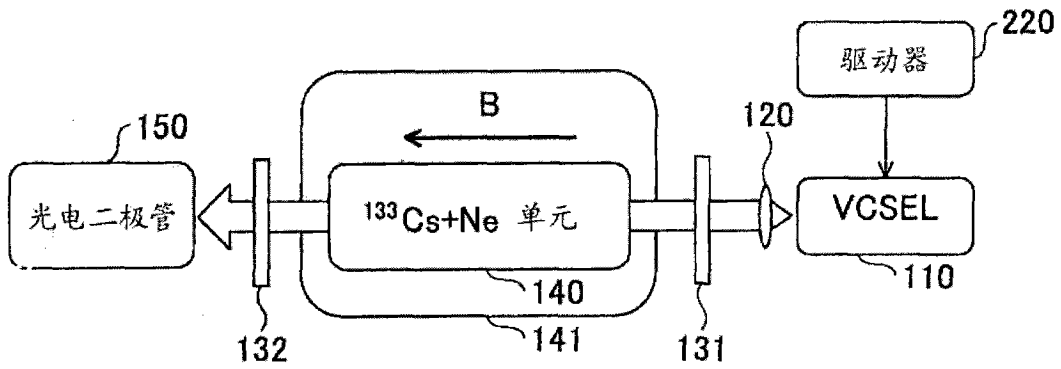


图 27

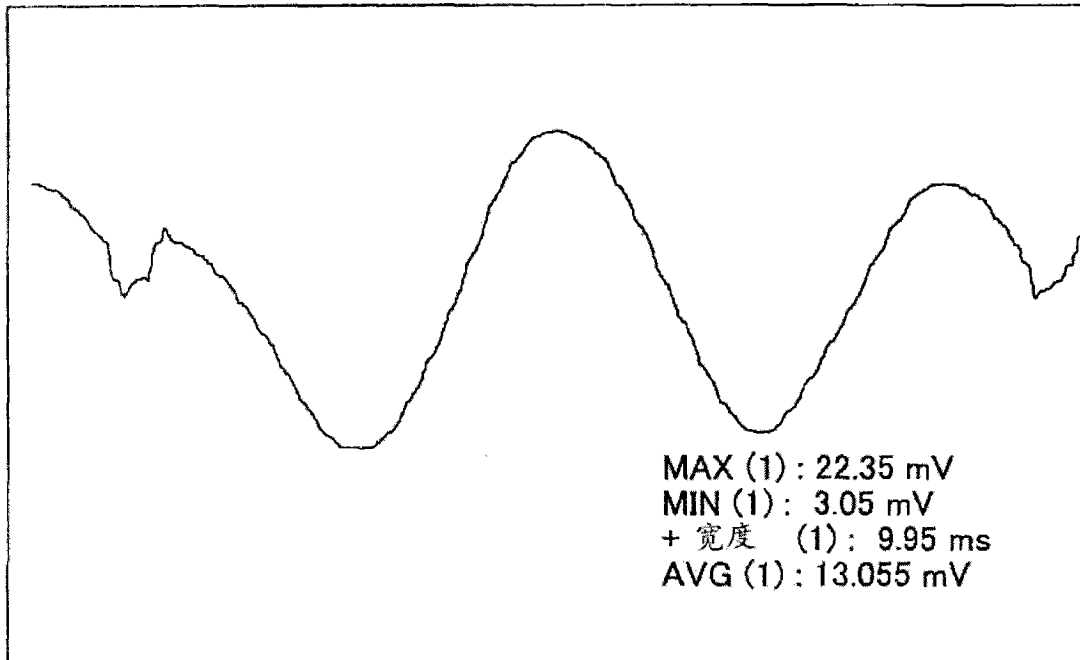


图 28

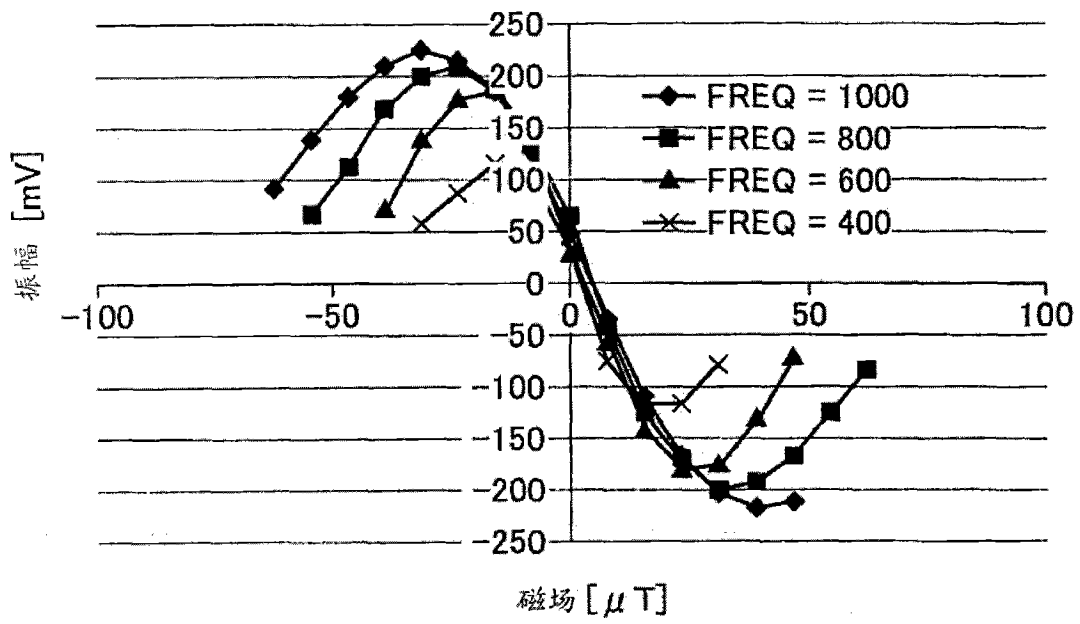


图 29

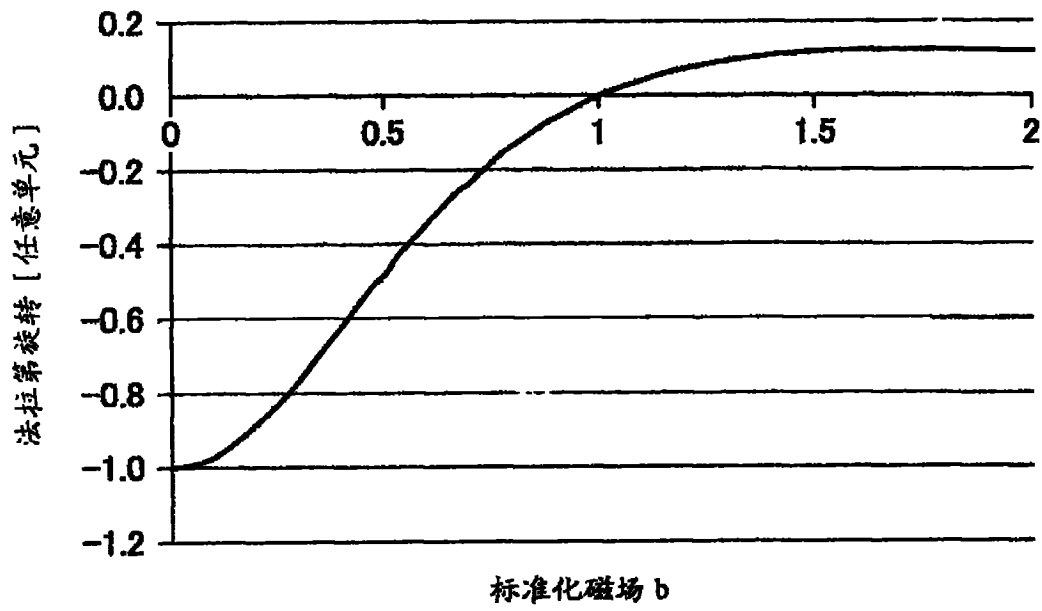


图 30