



[12] 发明专利申请公开说明书

[21] 申请号 02813675.6

[43] 公开日 2004年8月25日

[11] 公开号 CN 1524324A

[22] 申请日 2002.7.5 [21] 申请号 02813675.6

[30] 优先权

[32] 2001.7.6 [33] US [31] 09/900,426

[86] 国际申请 PCT/US2002/021412 2002.7.5

[87] 国际公布 WO2003/005510 英 2003.1.16

[85] 进入国家阶段日期 2004.1.6

[71] 申请人 英特尔公司

地址 美国加利福尼亚州

[72] 发明人 安德鲁·约翰·戴贝尔 华·李

威廉·B·查普曼

马克·E·麦克唐纳

[74] 专利代理机构 北京东方亿思专利代理有限责
任公司

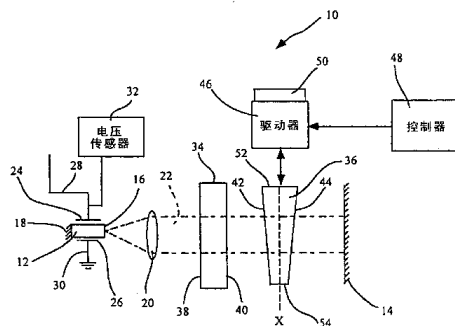
代理人 柳春雷

权利要求书4页 说明书26页 附图12页

[54] 发明名称 根据增益介质两端的电压对激光器
损耗的估计和调节

[57] 摘要

一种用于通过监测激光增益介质(12)两端的电压,探测和估计与激光器相关的光学损耗特性的系统和方法,以及一种激光器和激光器操作的方法,其中,通过监测增益介质(12)两端的电压确定内腔损耗,并根据通过增益介质(12)两端的电压调节腔损耗特性。



1. 一种用于操作具有半导体增益区的激光器的方法，包括：监测所述增益区两端的电压，以及根据所述监测到的所述增益区两端的电压确定腔
5 损耗。

2. 如权利要求 1 所述的方法，还包括根据所述监测到的所述增益介质两端的电压，调节与所述激光器相关的损耗特性。

3. 如权利要求 2 所述的方法，其中所述的调节所述损耗特性的操作包括调节与所述激光器相关的损耗元件。

10 4. 如权利要求 3 所述的方法，其中所述的调节所述损耗特性的操作包括对在所述腔中的所述损耗元件进行位置调节。

5. 一种用于控制具有在其中传播的光束的激光腔的性能的方法，包括：

(a) 监测发射所述光束的增益介质的两端的电压；以及

15 (b) 根据所述监测到的所述增益介质两端的电压，确定与所述腔相关的光学损耗。

6. 如权利要求 5 所述的方法，还包括根据所述监测到的所述增益介质两端的电压，调节与所述腔的损耗特性。

20 7. 如权利要求 6 所述的方法，其中所述的调节所述损耗特性的操作包括对在所述腔激光器中的损耗元件进行调节。

8. 如权利要求 7 所述的方法，其中所述的调节所述损耗元件的操作包括：

(a) 将频率调制引入所述的损耗元件；以及

25 (b) 从所述监测到的所述增益介质两端的电压得到误差信号，所述误差信号指明所述频率调制的传播特性。

9. 如权利要求 7 所述的方法，其中所述的调节所述损耗元件的操作包括根据所述的误差信号，对所述损耗元件进行位置调节。

10. 如权利要求 7 所述的方法，其中所述的损耗元件包括末端镜。

11. 如权利要求 7 所述的方法，其中所述的调节所述损耗元件的操作

包括：

(a) 将频率调制引入所述的损耗元件的多个位置自由度；

(b) 从所述监测到的所述增益介质两端的电压得到误差信号，所述误差信号指明对于所述的损耗元件的多个位置自由度中的每一个的所述频率调制的传播特性。

(c) 调节所述的损耗元件的多个位置自由度中的每一个。

12. 如权利要求 11 所述的方法，其中依次进行所述调节所述的损耗元件的多个位置自由度中的每一个的操作。

13. 如权利要求 12 所述的方法，其中将不同频率的调制同时引入所述的损耗元件的多个位置自由度中的每一个，并且所述调节所述的损耗元件的多个位置自由度中的每一个的操作同时进行。

14. 如权利要求 5 所述的方法，还包括根据所述监测到的所述增益介质两端的电压，调节多个与所述腔相关的多个损耗元件。

15. 如权利要求 14 所述的方法，其中所述的调节所述多个损耗元件的操作依次进行。

16. 如权利要求 14 所述的方法，其中所述的调节所述多个损耗元件的操作同时进行。

17. 如权利要求 15 所述的方法，其中所述的调节所述损耗元件的操作包括：

(a) 依次将频率调制引入所述的损耗元件中的每一个；以及

(b) 从所述监测到的电压得到误差信号，所述误差信号指明所述每一个频率调制的传播特性。

18. 如权利要求 15 所述的方法，其中所述的调节所述损耗元件的操作包括：

(a) 同时将不同的频率调制引入所述的损耗元件中的每一个；以及

(b) 从所述监测到的电压得到误差信号，所述误差信号指明所述每一个频率调制的传播特性。

19. 如权利要求 8 所述的方法，其中以周期性的突发实现所述的将所述频率调制引入至所述损耗元件的操作。

20. 如权利要求 11 所述的方法，其中以周期性的突发实现所述的将所述频率调制引入所述的损耗元件的多个位置自由度的操作。

21. 一种激光器装置，包括：

- (a) 沿光路发射相干光束的增益介质；
- 5 (b) 置于所述光路中并限定出激光腔的反射器；以及
- (c) 电压传感器，所述电压传感器被可操作耦合到所述的增益介质，并被设置来监测所述增益介质两端的电压，所述监测到的所述增益介质两端的电压指明与所述腔相关的光学损耗。

22. 如权利要求 21 所述的装置，还包括可操作耦合到所述电压传感器
10 和被置于所述的腔的光路中的损耗元件上的控制系统，所述控制系统被设置来根据所述监测到的所述增益介质两端的电压调节所述损耗元件。

23. 如权利要求 21 所述的装置，还包括高频振动元件，所述高频振动
15 元件被可操作耦合到所述损耗元件，并被设置来将频率高频振动引入至所述损耗元件，在所述监测到的所述增益介质两端的电压中可以探测所述的频率高频振动。

24. 如权利要求 21 所述的装置，其中所述的损耗元件包括所述的反射器。

25. 如权利要求 21 所述的装置，还包括多个高频振动元件，所述每一个
20 高频振动元件被可操作耦合到所述损耗元件的相应的位置自由度，所述每一个高频振动元件产生频率高频振动，在所述监测到的所述增益介质两端的电压中可以探测所述的频率高频振动。

26. 如权利要求 21 所述的装置，还包括：

- (a) 多个置于所述的腔中的光路中的损耗元件；以及
- 25 (b) 可操作耦合到所述电压探测器和所述损耗元件中的每一个上的控制系统，所述控制系统被设置来根据所述监测到的所述增益介质两端的电压调节所述每一个损耗元件。

27. 如权利要求 26 所述的装置，还包括多个高频振动元件，所述每一个
高频振动元件都被可操作耦合到所述损耗元件中的相应的一个上，并被设置来将频率高频振动引入至所述每一个损耗元件，在所述监测到的所述

增益介质两端的电压中可以探测所述损耗元件中的每一个中的频率高频振动。

28. 一种激光器装置，包括：

- 5 (a) 用于发射穿过激光腔的相干光束的激光增益介质装置；
- (b) 产生损耗特性的损耗装置，所述损耗装置被置于所述激光腔的中；
- (c) 用于监测所述增益介质装置两端的电压的装置；以及
- (d) 用于根据所述监测到的所述增益介质装置两端的电压确定所述损耗特性的装置。

10 29. 如权利要求 28 所述的装置，还包括用于根据从所述监测到的所述增益介质两端的电压得到的误差信号，调节所述损耗元件的装置。

 30. 如权利要求 26 所述的装置，还包括用于将频率调制引入所述损耗元件中的高频振动元件。

15

根据增益介质两端的电压对激光器损耗的估计和调节

5 背景技术

光通信系统对增大的带宽需求，导致了对越来越复杂的激光器的使用以在单根纤维中通过多个独立的并行的数据流进行信号传输。每个数据流被调制到相应的在特定信道波长上运行的发射激光器上的输出光束上，并且从激光器的被调制的输出被结合至单根光纤中，以其各自的信道中进行传输。国际电信联盟（International Telecommunication Union, ITU）现在要求约 0.4 纳米或约 50GHz 的信道间隔。这种信道间隔允许单根光纤在当前可用的光纤和光纤放大器的带宽范围内承载多达 128 个信道。光纤技术的提高以及对更大带宽一直在增长的需求，在将来可能会导致更小的信道间隔，并对激光发射器件提出了更高的精确度要求。

15 为了在电信传输器激光器中使光学传输功率最大化并保持波长的稳定，在发生器制造、组装和操作的过程中采取了若干措施，以使与激光器操作相关的光学损耗最小化。一般采用两种方法来表征光学损耗：测量激光器的输出功率；以及测量激光器阈值电流。例如，在外腔二极管激光器中，利用末端镜来将光导向或反馈到增益介质中。如果末端镜倾斜或没有被正确地调节，则发生反馈到腔中的光的量的损耗。一旦末端镜被调节至损耗最小值，则在制造时镜可以被固定在位。或者，在操作过程中与末端镜的倾斜相关的损耗可以被监测并被持续地进行最小化。对 Bragg 栅格的周期的调节是一个实例，其中，所述 Bragg 栅格将光反馈到 DFB（分布反馈）激光器的增益部分中。

25 当被用于确定损耗最小值时，光学功率测量和阈值测量都具有若干缺点。在测量光学功率中，损耗最小值不必与输出功率最大值相对应。假设在整个增益介质中损耗不是理想分布的，例如，当损耗发生在增益介质的外部时，则激光器将改变其内部的功率分布，以向损耗派送更多的功率。损耗的增大可以导致通过激光器的输出所测量的功率根据具体的环境，增

大、保持不变或减小。描述输出功率和腔损耗的方程甚至是数值解也很难以被解出，使得输出功率不能可靠地作为与具体的损耗元件的对准相关的内腔损耗的指示器。激励增益介质的全部功率是相关的腔损耗的相对可靠的指示器，但此数量难以测量。

- 5 测量激光器的阈值电流来确定损耗最小值也具有许多缺点。测量激光器的阈值电流的优点是激光器的阈值电流最小值对应于腔损耗的最小值。激光器阈值电流名义上通过如下的操作来确定，即通过调节注入到增益区的电流以确定第一次观察到激光阈值的电流。一个主要的缺点是不断变化注入电流改变了增益介质的光路长度或厚度，因为增益介质的温度（以及因此其尺寸）连同其它的作用发生改变。光路长度的变化改变了激光器的操作的波长，并且当损耗必须在腔内随其它的依赖于波长的损耗一起被最小化时，或当损耗必须在一个特定的操作频率被最小化时，激光器阈值难以或不可能测量。此外，激光器阈值不可能被用来最小化在高功率和高电流或恒定功率或恒定电流上的损耗，因为它是在发射激光的行为被第一次
- 10 观察到时所测量的。
- 15

因为需要复杂性日益增大的发射器激光器来满足增大的带宽需求，将需要用于损耗估计的改进的系统和方法，以及用于校正在制造后和组装后发生的损耗以及与激光器的操作相关的损耗的能力。

20 发明内容

- 本发明提供系统和方法，该系统和方法用于通过监测增益区两端的电压，探测和估计与利用半导体增益介质的激光器相关的光学损耗特性。本发明还提供：激光器操作的方法，其中，通过监测增益区两端的电压确定内腔损耗；用于在激光器操作过程中调节内腔损耗元件以最优化与各种损耗元件相关的损耗特性的方法；以及用于波长的稳定性和外腔激光器的控制的方法。本发明利用这样的事实，即在激光器的操作过程中，由增益区两端的电压可以精确地探测到自增益区的外部的损耗元件至增益区之中的光学反馈。
- 25

在本发明的一个实施是一种用于控制或操作激光腔的方法，包括：监

测沿光路发射相干光束的增益区的两端的电压，以及根据所监测到的电压确定与激光腔相关的光学损耗。所述方法还包括根据所监测到的增益介质两端的电压，调节所述激光器的损耗特性。损耗特性的调节可以包括调节置于激光腔的光路中的损耗元件的位置或其它的性能。激光器可以是外腔
5 激光器，且损耗元件可以包括例如置于半导体增益介质外部的可调谐滤波器或末端镜。可以有多个诸如栅格生成器、信道选择器、准直光学器件、偏振光学器件和其它光学器件之类的附加的损耗元件存在于光路中，或用其它方式与外腔相关，且根据所监测到的增益介质两端的电压，可以估计与这样的元件中的每一个相关的损耗，可以进行对这样的元件中的每一个
10 的调节。

在某些实施例中，可以通过将频率调制或高频振动引入至损耗元件来实现损耗特性的估计和损耗元件的调节，其中，可以在所监测的电压中探测所述的频率调制或高频振动。指示频率高频振动的传播特性的误差信号以及与损耗元件相关的损耗特性可以从所监测的电压中得到，并被用来
15 调节损耗元件以控制激光腔的损耗特性。当存在多个损耗元件时，可以将独立的频率高频振动引入每一个损耗元件，以提供指示与每一个损耗元件相关的损耗特性的相应的误差信号。可以依次进行将频率高频振动引入每一个损耗元件的操作，以及对每一个损耗元件的调节的操作。或者，可以同时
20 将不同的非干涉的频率高频振动引入损耗元件中的每一个，使得可以在所监测的增益介质两端的电压中探测每一个频率高频振动的传播特性，并使得每一个损耗元件可以被同时调节以控制外腔的损耗特性。

还可以使用高频振动器，其中，损耗元件在两个或更多的位置之间变动，并且在每个位置上测量激光器电压。然后利用较好的激光器电压可以设定名义工作点。这样，可以通过使每一个元件的高频振动依次在不同时间
25 间进行，最优化多个元件。

可以使用与损耗元件的多个位置自由度相关联的多个高频振动元件，使得每一个高频振动元件产生能够在所监测到的电压中被探测的频率高频振动。控制系统利用从频率高频振动中得到的误差信号，来对损耗元件的多个位置自由度进行位置调节。可以使用与多个损耗元件的相关联的多个

高频振动元件，以允许同时或依次估计与跟激光腔相关的每一个损耗元件相关的损耗特性，以及允许同时或依次对每一个损耗元件的相应的调节以控制激光腔的损耗特性。

5 本发明的另一个实施例是外腔激光器装置，包括：沿光路发射相干光束的增益介质；置于所述光路中的末端镜，使得末端镜和增益介质的后平面限定出外腔；以及电压传感器，所述电压传感器被可操作耦合到增益介质，并被设置来监测增益介质两端的电压。所监测到的增益介质两端的电压指示与外腔相关的光学损耗，并可以用来控制外腔损耗特性。外腔激光器还包括可操作耦合到电压传感器和外腔的光路中的一个或多个损耗元件
10 上的控制系统，所述控制系统被设置来根据所监测到的增益介质两端的电压调节损耗元件。

附图说明

15 图 1 是示出了监测增益介质两端的电压来探测与外腔中的所选定的损耗元件相关的损耗的外腔激光器装置的示意图。

图 2A-2C 是对于选定的波长栅格中的信道，对于信道选择器、栅格标准具和外腔的图 1 中的外腔激光器的通带特性的图示说明。

图 3A-3C 是对于波长栅格中的多个信道，对于图 1 中的外腔激光器的调谐的增益响应的图示说明。

20 图 4A-4C 是外腔激光器装置的示意图，其中利用监测增益介质两端的电压，以估计与末端镜定位相关的光学损耗，并且根据从所监测到的增益介质两端的电压中得到的误差信号，对此损耗进行补偿。

图 5A-5B 是用于图 4A-4C 的外腔激光器的控制系统的功能框图。

图 6 是从损耗元件的频率高频振动中得到的误差信号的图示说明。

25 图 7 是外腔激光器装置的示意图，所述外腔激光器装置利用多个高频振动元件来将频率调制引入多个损耗元件之中，而以增益介质两端的电压调制探测损耗特性。

图 8 是与损耗元件的多个位置自由度相关的多个高频振动元件的使用的示意图。

图 9 是利用通过对增益介质两端的电压的监测来估计腔损耗的分布式 Bragg 反射器 (DBR) 激光器装置的示意图。

图 10 是示出了外腔激光器的操作方法的流程图。

5 具体实施方式

更具体地参照附图, 为了说明的目的, 在图 1 至图 10 所示出的装置和方法中体现了本发明。在此所公开的是这样的系统和方法, 其中该系统和方法通过监测激光器的激光增益区或介质两端的电压, 估计与激光腔相关的损耗, 并控制激光腔的损耗特性。应该理解, 在不偏离如在此所公开的基本思想的情况下, 装置在结构和部件的细节上可以变化, 且方法在细节和事件的顺序上可以变化。本发明主要以用于外腔激光器的形式进行了公开。但是, 对于本领域的技术人员而言很显然, 本发明可以用于任何具有半导体增益介质或区的激光装置或系统是很明显的。还应该理解, 在此所使用的术语只是为了描述具体实施例的目的, 而不是想要进行限制。

15 本发明利用了这样一个事实, 即二极管激光增益区两端的电压是有源区载流子密度的函数。二极管激光器两端的电压可以由式 (1) 描述:

$$V = IR_s + V_d \quad (1)$$

20 其中, I 是驱动或泵浦电流, R_s 是串联电阻, V_d 是二极管电压。在使用恒定电流源的情况下, IR_s 的值可以看成是常数。二极管电压 V_d 等于准费米能级差 $E_{fc} - E_{fv}$, 其由二极管激光增益介质中的载流子密度决定。

对于二极管增益介质的导带, 多余电子密度 N 由式 (2) 给出

$$25 \quad N = 2 \int_{E_c}^{\infty} \rho(E - E_c) f_c(E) dE \quad (2)$$

其中, ρ 是状态密度, E_c 是有源介质的导带的最低能级, $f_c(E)$ 是准费米分布。准费米分布可以由式 (3) 表示

$$f_c(E) = \frac{1}{1 + \exp[(E - E_{fc})/K_B T]} \quad (3)$$

其中， E_{fc} 是准费米能级， K_B 是 Boltzmann 常数。

根据上述的式 (2) 和式 (3)，越高的电子浓度 N 对应于越高的准费米能级 E_{fc} 。此外，为了对二极管激光器阈值电流 I_{th} 之上的电流进行良好的近似，电子密度 N 被固定或“钳制”在其阈值 N_{th} 。类似的，在价带中，越高的空穴浓度 P （中性条件要求 $P=N$ ）对应于越低的价带中的准费米能级 E_{fv} 。

当如下所述的在激光腔中操作二极管激光增益区时，阈值电子密度值 N_{th} 将由总的腔损耗确定。因为二极管电压 V_d 服从关系式 $V_d = E_{fc} - E_{fv}$ ，所以最小腔损耗将对应于最小电子密度阈值 N_{th} 并因而对应于最小二极管电压 V_d 。因此，二极管激光增益介质两端的电压反映了与腔相关的损耗。

在考虑了上述内容的情况下，现在参考图 1，其中示出了被设计来用于监测增益区两端的电压的外腔激光器装置 10。装置 10 包括增益介质 12 和末端或外部反射元件 14。增益介质 12 可以包含传统的 Fabry-Perot 二极管发射器芯片并具有覆盖有防反射 (AR, anti-reflection) 涂层的前平面 16 和部分反射的后平面 18。输出平面 18 和末端镜 14 限定出装置 10 的激光腔。增益介质 12 从前平面 16 发射相干光束，该相干光束由透镜 20 进行准直以限定出与外腔的光轴共线的光路 22。或者，输出平面 16 可以包含“角度平面”。传统的输出耦合光学器件（没有示出）与后平面 18 相连，以便将外腔激光器 10 的输出耦合至光纤（也没有示出）之中。

由于外腔之中的末端镜 14 或其它损耗元件（如下所述），各种损耗或损耗特性将与外腔相关。通过监测增益介质 12 两端的电压可以探测或估计这些外腔损耗。根据这一点，第一和第二电极 24、26 被置于增益介质 12 附近并可操作耦合到增益介质 12。第一电极 24 通过导体 28 被可操作耦合到驱动电流源（没有示出），第二电极通过导体 30 接地。电压传感器 32 被可操作耦合到导体 28 并被设置来测量或监测在外腔激光器 10 的操作过程中增益介质 12 两端的电压。或者，可以将电压传感器 32 耦合到或者是电极 24、26，或者是导体 30 上。因为可以容易地且高精度地探测

增益介质两端的电压，所以电压传感器 32 不需要紧紧地邻近增益介质，且可以在远离增益介质 12 的某一点与导体 28 或 30 相连。

由末端镜 14 所反射的光沿着光路被反馈到增益区 12 中。由于相对于腔光轴的角度对准不良所引起的与末端镜 14 相关的损耗改变了至增益介质 12 之中的光学反馈，而这可以由于增益介质 12 两端的电压的变化而通过电压传感器探测。可以从在增益介质 12 两端所测量到的电压得到误差信号，以校正或用其它方式调节由末端镜 14 或与外腔相关的其它损耗元件所引起的与外腔相关的损耗特性。与外腔相关的其它损耗元件可以包括栅格发生器元件和信道选择器元件，所述栅格发生器元件和信道选择器元件分别在图 1 中示为置于增益介质 12 和末端镜 14 之间的光路 22 中的栅格标准具 (etalon) 34 和信道选择器 36。栅格标准具 34 一般在光路 22 中被置于楔形标准具 36 之前，且具有平行反射面 38、40。栅格标准具 34 起到干涉滤波器的作用，且栅格标准具 34 的折射率和由面 38、40 的间距限定出的栅格标准具 34 的光学厚度导致在通信波段之中与所选波长栅格的中心波长相一致的波长上的多个最小值，其中所述栅格可以包括例如 ITU 栅格。或者，可以选择其它波长的栅格。因此，栅格标准具 34 具有对应于 ITU 栅格或其它所选择栅格的栅格线之间的间距的自由频谱范围 (FSR)，且栅格标准具 34 因此起到以所述波长栅格的每一个栅格线为中心提供多个通带的作用。栅格标准具 34 具有抑制波长栅格的每个信道的之间的外腔激光器的相邻模式的精细度 (半高全宽或 FWHM 除以自由频谱范围)。

栅格标准具 34 可以是固体、液体或气体隔开的平行板标准具，并可以通过确定面 38、40 之间的光学厚度的精确尺寸进行调谐，其中通过温度控制由热膨胀和收缩来确定面 38、40 之间的光学厚度的精确尺寸。或者，可以通过倾斜来改变面 38、40 之间的光学厚度或通过对电光标准具材料施加电场来对栅格标准具 34 进行调谐。各种其它栅格生成元件对本领域技术人员是公知的，并可以用来代替栅格标准具 34。栅格标准具 34 可以是热控制的，以防止在外腔激光器 10 的操作过程由于热波动可能引起的所选栅格的偏差。或者，栅格标准具 34 可以是在激光器操作过程中

主动调谐的，就如在标题为“External Cavity Laser with Continuous Tuning of Grid Generator（可对栅格生成器进行连续调谐的外腔激光器）”，发明人为 Andrew Daiber，同此一起递交并在此作为参考文献被全文引用的美国专利申请 Ser. No. 09/900,474 中所描述的。

5 当激光器所正在发射的激光的波长偏离栅格标准具 34 的透射峰时，引起了光学损耗。这些损耗特性可以在增益介质 12 两端所监测的电压中探测出来。从电压所得到的误差信号可以因此用来调节腔的长度和所发射的激光的波长，直至波长对应于栅格标准具 34 的透射光谱的局部最大值。可以通过沿着由光束 22 所限定的光轴移动末端镜 14，通过加热和使
10 增益区 12 的光路长度热膨胀，或通过其它过程来改变腔的长度。当将末端镜 14 从被认为是正确的工作点移动或高频振动了一个小的正位移或负位移时，可以通过测量由电压传感器 32 检测的电压来产生误差信号。如果电压传感器 32 在若干偏离的位置中的一个位置检测到增益区 12 两端的一个更小的电压，则可以将末端镜 14 的名义工作点向所述对应的偏离点
15 移动。或者，可以在一个高频振动频率（dither frequency）上持续进行末端镜 14 的高频振动，利用锁定放大器（没有示出）来探测由传感器 32 所观察的与所述高频振动频率同步的电压信号。此同步的电压信号构成一个误差信号，且可以使用 PID 控制器（没有示出）来重新定位末端镜 14 并使误差信号达到零。

20 信道选择器 36 被示为具有面或表面 42、44 的楔形标准具。通过将表面 42、44 延伸到光束照射这些的表面之处的以外的区域，并通过使这些表面之间的间隔逐渐变细而形成锥度，以致所述的锥度足够的小而使表面 42、44 在激光束所穿过的范围中的厚度变化是可忽略和容忍的，并且以致所述的锥度足够的大而使穿过光束的滤波器的宏观运动引起沿着光束的表
25 面 42 和 44 之间的距离的微观变化，可以沿着激光器的轴，以小于或等于工作波长的量精细地改变表面 42 和 44 之间的间距。表面 42 和 44 之间的空间可以是气体填充的、液体填充的或用固定填充。通过热膨胀固定标准具，通过热膨胀、压电膨胀或微机械膨胀气体或液体标准具的所述间距，通过倾斜气体、固体或液体标准具，通过改变气体标准具的压强，通过使

用电光材料作为间隔材料并利用所施加的电场来改变折射率，通过在间隔层中使用非线性光学材料并利用第二光束来引起路径长度的变化，或通过任何其它的适合于波长调谐的系统或方法，可以改变表面 42 和 44 之间的间距。

5 如图 1 所示的楔形标准具信道选择器仅仅是一种可以根据本发明用于外腔激光器中的可调谐元件。各种其它类型的信道选择器可以用于本发明。在美国专利 No. 6,108,355 中描述了对用于信道选择的空气间隙楔形标准具的使用，其中，所述“楔形”是由邻近的衬底所限定的逐渐变细的空气间隙。在发明人为 Andrew Daiber，并于 2001 年 3 月 21 日递交的美国专利
10 利申请 Ser. No. 09/814,646 中描述了使用可枢轴调节栅格器件作为通过栅格角度调节来进行调谐的信道选择器，以及描述了在外腔激光器中的通过选择性地施加电压来进行调谐的电光可调谐信道选择器的使用。在美国专利申请 Ser. No. 09/814,646 和在标题为“Graded Thin Film Wedge
15 Interference Filter and Method of Use for Laser Tuning（渐变薄膜楔形干涉过滤器及其用于激光调谐的方法）”，发明人为 Hopkins 等，同此一起递交的美国专利申请 Ser. No. 09/900,412 中描述了使用平移调谐渐变薄膜干涉滤波器作为信道选择器。前面提及的公开作为参考文献在此被全文引用。在一些实例中，外腔激光器 10 的各种光学部件之间的距离、相对尺寸和形状为了清楚的目的而进行了夸张，并不必按比例示出。外腔激光器 10
20 可以包括另外的损耗元件（没有示出），诸如被设置来去除于外腔激光器 10 的各种部件相关的伪反馈的偏振光学器件以及聚焦和准直部件。栅格发生器 34 和信道选择器 36 可以不同于图 1 中所示的。

信道选择器 36 限定多个比栅格标准具 34 的通带更宽的通带，而信道选择器 36 的更宽的通带具有基本对应于和大于由栅格标准具 34 所限定的
25 最大波长信道和最小波长信道之间的间隔的周期。换句话说，信道选择器 36 的自由频谱范围超出了由栅格标准具 34 所限定的波长栅格的全波长范围。信道选择器 36 具有抑制在邻近特定的选定信道的信道进行激光发射的精细度。

信道选择器 36 被用于通过改变信道选择器 36 的面 42、44 之间的光学

厚度在多个通信信道之间进行选择。这通过沿着 x 轴移动或驱动信道选择器 36 来实现，其中所述的 x 轴平行于信道选择器 36 的锥度的方向并垂直于外腔激光器 10 的光轴和光路 22。由信道选择器 36 所限定的通带中的每一个支持一个可选的信道，并且随着所述楔形标准具在光路 22 之中前进或移动，沿光路 22 传播的光束穿过信道选择器 36 的不断增厚的部分，其支持彼此相对的面 42、44 之间在更大波长信道的相长干涉。随着信道选择器 36 被从光路 22 回撤，光束将遇到信道选择器 36 的不断变薄的部分，并使通带面临支持相应更短波长信道的光路 22。如上面所说明的，信道选择器 36 的自由频谱范围对应于栅格标准具 34 的全波长范围，使得整个波长栅格在通信波段之中可以调谐出单个损耗最小值。从栅格标准具 34 和信道选择器 36 至增益介质 12 的结合反馈支持在所选的信道的中心波长发射激光。在整个调谐范围中，信道选择器 36 的自由频谱范围比栅格标准具 34 的更宽。

通过包含驱动元件 46 的调谐组件对信道选择器 36 进行定位调谐，其中，构造和设计所述的驱动元件 46 以可调节定位或通过其它的方式调谐信道选择器 36 来选择信道。例如，驱动元件 46 可以包含用于信道选择器 36 的精确移动的步进式电动机以及适当的硬件。或者，驱动元件 46 可以包含各种类型的致动器，包括但不限于 DC 伺服电动机、螺线管、音圈致动器、压电致动器、超声驱动器、形状记忆器件以及类似的线性致动器。如果将不同于楔形标准具的其它类型的信道选择器用于本发明，则将相应地设置波长调谐器驱动器 46 以对信道选择器进行调谐。可以使用与楔形标准具 36 以及波长调谐器驱动器 46 相关联的线性译码器 50，以确保通过驱动器 46 正确定位楔形标准具 36。可以使用监测工作波长的粗分光计来确保通过驱动器 46 正确定位楔形标准具 36 或确保通过其相关的驱动器正确定位信道选择器的可选实施例。当沿着光路 22 的光束的波长与在沿着光路 22 的光束与信道选择器 36 相交的位置处的信道选择器 36 的最大透射波长不相对应时，将产生与信道选择器 36 相关的光学损耗。假设在先前已经被调节到栅格标准具 34 的透射最大值的波长是正确的，并假设信道选择器存在误差。可以通过改变反射表面 42、44 之间的间隔来改变信道

选择器 36 的最大透射的波长。可以通过使用具有表面 42 和 44 的信道选择器 36，并通过利用驱动器 46 移动信道选择器 36 改变所述间隔直至表面 42、44 之间的正确间距出现在光束穿过信道选择器 36 的位置，其中，所述的表面 42 和 44 沿其长度具有不同的间距。

- 5 可用于确定如何移动信道选择器 36 的信号可以通过如下的操作得到，即通过将信道选择器 36 的位置高频振动至名义工作点的任意一侧以将频率调制引入至信道选择器 36，并通过测量增益区两端的电压调制以生成误差信号。如果对于偏向名义工作点的任意一侧的电压低于名义工作点的，则在改进点的方向上重新设置名义工作点。或者，可以调和地高频振
- 10 动信道选择器 36，并且从在高频振动频率观察到的 AC 激光电压信号得到误差信号。可以通过使用与所述的用于信道选择器 36 的技术相类似的技术高频振动其反射表面的有效间隔，来调节信道选择器 36 的其它设计。在下面将进一步讨论使用高频振动元件来向信道选择器 36 或其它光学部件提供频率调制。在下面将进一步讨论使用高频振动元件来向腔损耗元件
- 15 引入频率调制。

- 驱动元件 46 被可操作耦合到控制器 48，所述控制器 48 通过驱动元件 46 控制信道选择器 36 的定位。可以根据如上所述从信道选择器 36 的频率调制和增益介质 12 两端所监测到的电压得到的误差信号实现信道选择器 36 的控制。或者，或另外，控制器 48 可以使用对应于可选择信道波长的
- 20 所存储的用于信道选择器 36 的位置信息查询表。控制器 48 可以在驱动元件 46 的内部或外部，并分担用于信道选择器 36 以及末端镜 14 和/或外腔激光器 10 中其它部件或损耗元件的定位和伺服功能。线性译码器 50 可以与信道选择器 36 和驱动元件 46 结合使用，以确保通过驱动器 46 正确定位信道选择器 36。

- 25 信道选择器 36 在其末端可以包括不透明区 52、54，其中，所述不透明区 52、54 是可光学探测的，并在已经将信道选择器 36 定位调谐至超出其最大或最小波长时，该不透明区 52、54 起到检验信道选择器 36 的定位的作用。不透明区 52、54 提供可以用于信道选择器 36 的定位调谐的附加译码器机构。当楔形标准具 36 被移动至这样一个位置上以致不透明区

52、54 中的一个进入到光路 22 中时，不透明区 52、54 将阻挡或衰减沿光路的光束。如下面所进一步描述的，此光的衰减是可探测的。这些不透明区可以作为“原位”和“太远”信号使用。原位信号可以用来初始化坐标系，而电动机的位置可以参照此坐标系。通过对步进式电动机已运行的

5 的步进数或微步进数进行计数并将此信息与步进采用的角度以及丝杠的间距相结合，则可以确定驱动系离开原位的位置。或者，可以将译码器固定到驱动系上。原位信号还可以用于通过提供靠近光学元件的参照物并定期地搜寻此参照物来补偿丝杠的热膨胀或驱动丝母的机械磨损。

在图 2A 至图 2C 中图示了栅格标准具 34、信道选择器 36 和由后平面

10 18 和末端镜 14 所限定出的外腔的通带的关系，其中示出了外腔通带 PB1、栅格标准具通带 PB2 和楔形标准具通带 PB3。在垂直轴上示出了相对增益，在水平轴上示出了波长。如可以观察到的，信道选择器 36 的自由频谱范围 ($FSR_{\text{信道选择器}}$) 大于栅格标准具 34 的自由频谱范围 ($FSR_{\text{栅格生成器}}$)，而栅格标准具 34 的自由频谱范围 ($FSR_{\text{栅格生成器}}$) 反过来大于外腔的自由频谱范围 ($FSR_{\text{腔}}$)。外腔的通带峰 PB1 与由栅格标准具 34 的波长栅格所限定的通带 PB2 的中心周期性地对准。存在来自信道选择器 36 的一个通带 PB3，该通带 PB3 延伸覆盖了波长栅格的全部通带 PB2。在图 2A-2C 所示出的具体实施例中，波长栅格延伸覆盖了以 0.5 纳米 (nm) 或 62GHz

15 为间隔的 64 个信道，其中，最短波长信道在 1532nm，最长波长信道在

20 1563.5nm。

栅格标准具 34 和信道选择器 36 的精细度决定相邻模式或信道的衰减。如上所说明的，精细度等于自由频谱范围比半高全宽，或精细度 = $FSR/FWHM$ 。在图 2B 中示出了栅格标准具通带 PB2 在最大值的一半处的宽度，在图 2C 中示出了楔形标准具通带 PB3 在最大值的一半处的宽度。

25 在外腔中对栅格标准具 34 和信道选择器 36 的这样的定位提高了边模式 (side mode) 的抑制。

在图 3A-3C 中图示了在以 1549.5nm 为中心的信道和在 1550nm 处的相邻信道之间的信道选择器 36 的通带 PB3 的调谐，其中，示出了栅格标准具 34 所产生的的信道的选择和相邻信道或模式的衰减。为了清晰的目的从

图 3A-3C 中省略了在图 2A-2C 中示出的外腔通带 PB1。栅格标准具 34 选择对应于栅格信道间隔的外腔的周期性纵模式而同时拒绝邻近模式。信道选择器 36 选择波长栅格中的特定的信道，并拒绝所有其它信道。对于范围在约正或负半个信道间隔的滤波偏移，所选择的信道或激光发射模式固定在一个特定的信道。对于更大的信道偏移，激光发射模式跳至下一个相邻的信道。

在图 3A 中，楔形标准具通带 PB3 以 1549.5nm 处的栅格信道为中心。在 1549.5nm 处的与通带 PB2 相关的相对增益较高，而相对于所选择的 1549.5nm 信道，与在 1549.0nm 和 1550.0nm 处的相邻通带 PB2 相关的相对增益水平被抑制。在 1550.5nm 和 1548.5nm 处的与通带 PB2 相关的增益被进一步抑制。短划线表示没有被信道选择器 36 抑制的通带 PB2 的相对增益。

图 3B 示出了如在信道切换过程中所出现的处在 1549.5nm 和 1550.0nm 处的信道之间的位置上的楔形标准具通带 PB2。在 1549.5nm 和 1550.0nm 处的与通带 PB2 相关的相对增益都较高，而两个信道都没有被抑制。相对于 1549.5nm 和 1550.0nm 信道，与在 1549.0nm 和 1550.5nm 处的通带 PB2 相关的相对增益水平被抑制。短划线表示没有被信道选择器 36 抑制的通带 PB2 的相对增益。

图 3C 示出了以 1550.0nm 处的栅格信道为中心的楔形标准具通带 PB3，在 1550.0nm 处的与通带 PB2 相关的相对增益较高，而相对于所选择的 1550.5nm 信道，与在 1549.5nm 和 1550.5nm 处的相邻通带 PB2 相关的相对增益水平被抑制，并且在 1551.0nm 和 1549.0nm 处的与通带 PB2 相关的增益被进一步抑制。同样，短划线表示没有被信道选择器 36 抑制的通带 PB2 的相对增益。

从图 2 和图 3 中可以看出，信道选择器 36、末端镜 14 和/或栅格生成器 34 的非最佳定位或调谐将导致通带 PB1、PB2 和 PB3 的对准失误，并引起外腔激光器 10 的光学输出功率的损耗和边模式抑制率的降低。通过电压传感器 32 对增益介质 12 两端的电压的监测允许此外腔损耗特性在激光器工作的过程中被探测或估计。从所监测的电压得到的误差信号则可以

被用来在工作过程中调节或伺服外腔的损耗特性，使得通过适当的重新定位或调节末端镜 14、信道选择器 36 和/或栅格标准具 34 使通带 PB1、PB2 和 PB3 实现相对彼此的最佳对准，因此提供精确的波长调谐和稳定性。

图 4A 说明了外腔激光装置 56 的另一个实施例，其中相似的参考数字 5 被用来指代相似的部件。在图 4A 的实施例中，电光激活调谐元件 58 被置于末端镜 14 之前的光路 22 中。调谐元件 58 通过通信接口 62 被可操作耦合到控制器 60。控制器 60 通过接口 64 被可操作耦合到电压传感器 32。热电控制器 66 被耦合到栅格生成器 34，控制器 60 通过通信接口 68 被可操作耦合到热电控制器 66。控制器 60 还通过导体 28 被可操作耦合到增益 10 介质，其中所述的导体 28 起到通信接口的作用。控制器 60 通过通信接口 70 被可操作耦合到驱动元件或组件 46。驱动元件 46 被可操作耦合到信道选择器 36。

如图 4A 中所示的电光调谐元件 58 以频率高频振动的形式提供信号调制，其通过在光路 22 中放置元件 58 被引入外腔激光器 56 的光路长度中。 15 调谐元件包含诸如铌酸锂或电光液晶材料之类的电光材料的标准具，并具有可电压调节的折射率。作为可选实施例中，可以将压电或微机械调谐元件固定至末端镜 14，通过末端镜 14 的物理位移起到与元件 58 中的相移相同的功能。例如，信号调制可以包括约 20KHz 的频率调制。调谐元件的电光材料两端的电压调节改变调谐元件 58 的有效光学厚度，并由此改变横 20 穿外腔激光器 56 的外腔（二极管平面 18 和末端镜 14 之间）的整个光路的长度。因此，电光调谐元件 58 既（1）向外腔提供频率调制信号或高频振动，又（2）提供通过施加在调谐元件 58 上的电压来调谐或调节外腔光路长度的机构。或者，电光调谐元件 58 可以包含声光器件、机械器件或其它能够将可探测的频率高频振动或调制信号引入外腔的输出的器件。

25 通过由元件 58 所引入的频率高频振动的的光路长度的调制在外腔激光器 56 的输出功率中产生强度变化，其中，由于从外腔至增益介质 12 之中的光学回馈，可在所监测的增益介质 12 两端的电压中探测所述的强度变化。随着使激光腔模式与由栅格生成器 34 和信道选择器 36 所限定的通带的中心波长相对准，此强度变化的幅度和相差将减小。换句话说，当如图

2A-2C 所示使通带 PB1、PB2 和 PB3 最佳地对准时，调制信号中的强度变化和相差为最小值或名义上为零。参照图 7，下面将进一步描述对于误差信号确定的调制信号中的强度变化和相差的使用。

5 在外腔激光器 56 的工作过程中，来自电压传感器 32 的电压信号通过接口被传送到控制器 60。控制器 60 从通过频率高频振动所引入的调制中得到误差信号，并通过接口 62 将补偿信号传送到电光调谐元件，其中所述的调谐元件通过改变折射率并由此改变有效光路长度，来调谐或调节穿过电光调谐元件 58 的光路长度。

10 在激光器 56 的工作过程中，控制器 60 还通过由接口 28 传送的信号来控制至增益介质 12 的驱动电流，并根据由接口 70 发送的信号通过驱动元件 46 控制信道选择器 36 的定位。控制器还可以通过热电控制器 66 和由接口 68 传送的信号控制栅格标准具 34 的温度。参照图 5A 将在下面更详细地描述在实现上述操作中的控制器 60 的操作。

15 图 4B 示出了外腔激光器 72 的另一个实施例，其中相似的参考数字被用来指代相似的部件。在外腔激光器 72 中，末端镜 14 被耦合到调谐臂 72，调谐臂 72 用于根据来自控制器 76 的指令定位调节末端镜 14。调谐臂 72 由具有高热膨胀系数的诸如铝或其它金属或金属合金之类的材料制成。控制器 76 通过通信接口 80 被可操作耦合到热电控制器 78。热电控制器 78 被耦合到调谐臂 72 并被设置来调节臂 72 的温度。在此实施例中，根据
20 来自控制器 76 的信号对调谐臂 72 的热控制（加热或冷却）被用来控制末端镜 14 的位置和由末端镜和二极管平面 18 所限定的外腔的光路长度。

25 在发明人为 Andrew Daiber，并于 2001 年 3 月 21 日递交的美国专利申请 Ser. No. 09/814,646 中，以及在标题为“Laser Apparatus with Active Tuning Thermal of External Cavity（对外腔进行主动热调谐的激光器装置）”，发明人为 Mark Rice，同此同时递交的美国专利申请 Ser. No. 09/900,443 中也描述了使用热控制的调谐元件来对外腔激光器中的末端镜和其它光学部件进行位置调节。这些公开在此作为参考文献被全文引用。或者，还可以根据从在增益介质 12 两端所测量的电压得到的误差信号，通过各种其它的调谐机构对末端镜 14 进行调谐或调节。例如，末端镜 14

可以通过相补偿器进行调谐，或通过根据来自控制器 76 的指令进行操作的步进式电动机进行机械定位。

在外腔激光器 72 的操作中，电光调谐元件 58 以上述的方式，将频率高频振动或调制引入至外腔的光路长度中。通过电压传感器 32 可在于增益介质 12 两端所监测的电压中探测频率调制，并且如上所述的，频率调制包括指示出激光腔模式与通带的中心波长相对准的相差和幅度变化，其中所述的通带的中心波长由栅格生成器 34 和信道选择器 36 所限定。控制器 76 从由频率高频振动所引入的调制中得到误差信号，并通过接口 80 将补偿信号传送至热电控制器 78，其中所述的热电控制器 78 相应地加热或冷却调谐臂 72，以定位末端镜 14 并调节外腔激光器的光路长度来使误差信号为零。控制器 76 还进行如下的控制：通过接口 28 控制至增益介质 12 的驱动电流；通过接口 70 由驱动元件 46 控制信道选择器 36 的定位；以及通过热电控制器和由接口 68 所传送的信号控制栅格标准具 34 的温度。参照图 5B 将在下面更详细地描述在实现上述操作中的控制器 76 的操作。

参照图 4C，示出了外腔激光器装置 82 的另一个实施例，其中相似的参考数字被用来指代相似的部件。在装置 82 中，将末端镜 14 形成为直接涂覆在调谐元件 58 的电光材料上的反射涂层。因此，末端镜 14 和调谐元件 58 被结合成一个部件。如上所述的，电光调谐元件 58 将频率高频振动或调制引入至外腔的光路长度中，其中所述频率高频振动或调制可在增益介质 12 两端的电压中探测，并且被用来得到误差信号。控制器 76 通过接口 80 将相应的补偿信号传送至热电控制器 78，其中所述的热电控制器 78 如上所述的根据定位末端镜 14 和调节外腔激光器的光路长度来使误差信号为零的需要，加热或冷却调谐臂 72。在其它方面，所述外腔激光器的操作基本与上述外腔激光器 72 的操作相同。在装置 82 中，调谐臂 74 和热电控制器 78 可以被省略，可以如上述的图 4A 中的外腔激光器装置 56 一样直接通过电光调谐元件的有效光学厚度的电压控制来实现光路长度的调节。

现在参照图 5A 和图 5B，在此所示出的是分别用于图 4A 和图 4B 中的控制器 60、76 的功能框图，其中类似的参考数字用于指示类似的部件。

控制器 60、76 中的每一个分别包含调谐电路 84、通过导体 28 可操作耦合至增益介质 12 上的电流/电压驱动器 86、通过接口 68 可操作耦合至热电控制器 66 的栅格控制器 88 以及通过接口 70 可操作耦合至驱动元件 46 的信道控制器 90。电流/电压驱动器 86 通过接口 28 控制传送到增益介质 12 5 的功率。栅格控制器 88 通过利用热电控制器 66 根据需要来加热或冷却栅格标准具 34 而对其进行热控制，来保持栅格标准具 34 的基准一致性 (referential integrity)。信道控制器 90 指定驱动元件 46 至一定的位置或用其它方式调节信道选择器 36，来在由栅格标准具 34 所限定的栅格中选择所要的透射波长。调谐电路 84 还包含信号处理器 94、光学低通滤波器 10 96、误差校正器 98、光路长度调节器 100 和调制信号生成或高频振动元件 102。

调制信号生成器 102 向所选择的损耗元件 (例如，调谐元件 254) 提供频率高频振动或调制信号，其产生激光器外腔的光路的相应调制。例如，调制频率和振幅可以被选择，以增大有效耦合系数。来自电压传感器 15 32 的电压信号通过通信线 28 被传送到调谐电路 84，并被传送到信号处理电路 94。信号处理电路 94 还接收来自高频振动元件 102 的参考调制信号。信号处理电路 94 确定外腔的通带 PB1 (图 2 和图 3) 与栅格标准具 34 的通带 PB2 以及信道选择器 36 的通带 PB3 的对准。

在一个实施例中，利用相同步探测以确定由高频振动元件 102 所引入的调制信号和由电压传感器 32 所探测的电压强度之间的关系，来进行信号 20 处理。由信号处理 94 产生误差信号，其指示了高频振动调制信号和所检测的电压强度之间的相对相位。误差信号通过低通滤波器 96 被传送到误差校正器 98。在此实施例中，可以用锁相环来实施信号处理 94。

在另一个实施例中，信号处理 94 可以监测来自电压传感器 32 的电压 25 信号的频率和强度变化，以确定强度变化何时最小。当通带 PB1、PB2 和 PB3 实现对准时，此强度变化最小并且强度信号的频率增大。指示频率和强度变化的误差信号从电压传感器 32 的输出中得到，并被传送到误差校正器 98。或者，信号处理 94 可以对由高频振动元件 102 提供的调制频率的所选择的谐波进行响应。

误差校正器 98 从由信号处理 94 提供的误差信号产生误差校正或补偿信号，其中所述信号用于通过光路长度调节器 100 来调节光路长度，以便最优化调制信号和强度信号之间的关系，或使调制信号和强度信号之间的关系达到所选定的偏移或值。如在下面参照图 6 将进一步所讨论的，当外腔模式或通带 PB1 被与由栅格生成器 34 和信道选择器 36 所生成的通带 PB2 和 PB3 对准，在光路 22 上传播的相干光束中在调制频率（以及其奇数倍）上的强度变化基本被最小化。同时，电压信号强度在调制频率的两倍处将发生变化。这些可探测的效应中的之一或全部可用估计与损耗特性相关的外腔损耗，并可用于生成可用于腔损耗特性的调节的误差信号以使调制信号和强度信号最优化，其中，所述的损耗特性与末端镜 14、栅格生成器 34 和信道选择器 36 的定位或相互关系相关。

图 5A 示出了用于图 4A 中的外腔激光器 56 的控制系统。在外腔激光器 56 中，通过电光元件 58 的有效光学厚度的电压控制来调节光路长度。光路长度调节器 100 提供使外腔通带 PB1 与通带 PB2 和 PB3 的中心对齐所需的“DC”偏移，以提供适当的“AC”补偿信号，其中所述“DC”偏移与来自高频振动元件 102 的调制信号相结合，所述的“AC”信号通过接口 62 被传送到电光元件 58。

图 5B 示出了用于外腔激光器 72 的控制系统，其中，如图 4B 所示并如上所述的，利用电光元件 58 实现光路长度的调制并通过由补偿臂 74 进行的末端镜 14 的热定位实现光路长度的调节。在此情况下，光路长度调节器通过接口 80 将补偿信号传送至热电控制器 78，所述热电控制器 78 相应地加热或冷却补偿臂 74 以重新定位末端镜 14，来最优化外腔的损耗特性。图 3 的外腔激光器系统 72 可以利用图 5A 和图 5B 的控制系统中的任意一种。

现在参照图 6，以相对强度随波长的变化，图示了被引入外腔的高频振动调制信号与增益介质 12 两端所探测的电压调制的关系。图 6 示出了栅格标准具通带 PB2，以及分别对应于外腔激光模式 106A、106B 和 106C 的频率或高频振动调制信号 104A、104B 和 104C。利用上述的方式，通过电光元件 58 的电压调制将频率调制信号 104A-104C 引入激光器外腔。如

图 6 所示，激光模式 106A 相对通带 PB2 的中心朝向通带 PB2 的较短波长的一侧偏离中心，而激光模式 106B 大致位于通带 PB2 的中心波长，激光模式 106C 位于通带 PB2 的较长波长的一侧。激光模式 106B 对应于波长锁定位置，并代表外腔的最优损耗特性。激光模式 106A 和 106C 相对于通带 PB2 是偏离中心的，并导致非最优的腔损耗特性，这将如上所述需要通过调节电光元件 58 的有效光学厚度或通过定位末端镜 14 来调节外腔长度。

对于高频振动信号 104A、104B 和 104C 的由电压传感器 32 所探测的增益介质 12 两端的电压被分别以电压调制信号 108A、108B 和 108C 在图 6 的右侧示出，所述的电压调制信号 108A、108B 和 108C 分别对应于激光模式波长 106A、106B 和 106C。激光模式 106A 的位置处在小于通带 PB2 的中心波长的波长处，导致了电压信号 108A，所述电压信号 108A 具有与高频振动调制信号 104A 同相的调制。激光模式 106C 的位置处在大于通带 PB2 的中心波长的波长处，导致了与高频振动信号 104C 的调制异相的电压信号 108C 的调制。

每一个激光模式相对于通带 PB2 的斜率的位置影响相对应的电压信号的振幅。因此，对应于处在通带 PB2 的相对较陡的斜率上的激光模式 106A 波长的电压信号 108A 具有相对较大的调制振幅，而对应于与通带 PB2 的具有相对较小的斜率的部分相关的激光模式 106C 的电压信号 108C 具有相应较小的调制振幅。对应于处在中心的激光模式 106B 的电压信号 108B 具有最小的调制振幅，因为高频振动调制信号 104B 的周期关于通带 PB2 的中心波长对称。在此实施例的电压信号 108B 的情况下，主强度的频率是高频振动调制信号 104B 的两倍。

从图 6 中可以看出，在增益介质 12 两端的电压中所探测到的调制的振幅指明激光器外腔所需的校正或调节的幅度，而电压信号调制的相位指明调节的方向。选择这样的高频振动调制信号 104A-104C 的振幅，使得在波长锁定过程中，电压信号调制的强度的变化被保持在对于外腔激光器的具体使用的可接受的水平。在传输的过程中，选择足够高的高频振动调制的频率以提供相干性控制，但所选择的高频振动调制的频率低得足以防止

与被调制到载波信号上信息的干涉，其中所述载波信号由外腔激光器提供。

本发明可以用于估计和调节与多个外腔激光器中的损耗元件相关的损耗特性。参考图 7，在此示出了外腔激光器装置 110，其中相似的参考数字用于指示相似的部件。在装置 110 中，将独立的频率调制或高频振动元件用于数个损耗元件中的每一个。因此，高频振动元件 112 被耦合至栅格标准具 34，高频振动元件 114 被耦合到信道选择器 36，高频振动元件 116 被耦合至末端镜 14。例如，高频振动元件 112、114、116 可以包括传统的机械、压电、电光或声光振动器或类似的振动器器件，其中所述的振动器可以分别将频率调制信号引入栅格标准具 34 的倾斜度、信道选择器 36 的横向位置和末端镜 14 的轴向位置。高频振动元件 112、114 和 116 中的每一个分别通过通信接口 117、118 和 120 被可操作地耦合到控制器 76。附加的高频振动元件可以和在外腔激光器装置 110 中存在的或用其它方式与外腔激光器装置 110 相关的附加的损耗元件（没有示出）结合使用。

用由上述在图 4A-4C 中的电光元件 58 所提供的方式相同的方式，通过高频振动元件 116 将调制信号引入至末端镜 14，直接调制由末端镜 14 和输出面 18 所限定出的外腔的光路长度。这导致在增益介质 12 两端的电压的调制，其可通过电压传感器 32 来探测并也如上所述的可以用于通过定位末端镜 14 来调节外腔的光路长度，其中，所述的定位末端镜 14 的操作通过利用热电控制器 78 加热或冷却补偿臂 74 来实现。

通过频率高频振动器 112 将调制信号引入至栅格标准具 34，导致在栅格标准具 34 的面 38、40 之间的光路长度 d_{GE} 的调制。当调制栅格标准具 34 时，不通过元件 116 调制末端镜 14，除非如下所述的情形。栅格标准具 34 之中的光路长度的调制调制了栅格标准具 34 的传输通带。因为栅格标准具 34 的 FSR 大于激光腔模式的 FSR，所以与用和给定的光路长度调制类似的腔长度的光路长度调制来产生激光模式的波长调制相比，给定的光路长度的调制产生相应更大的标准具传输模式的波长调制。

利用与图 6 中所述的相类似的方法，栅格标准具 34 的调制可以用于伺服锁定腔长度，除了在此情况下激光频率名义上是固定的且栅格标准具

通带被调制这点不同。栅格标准具通带的振动调制至增益介质 12 中的反馈，其导致了由电压传感器 32 可探测的增益介质 12 两端的电压调制。因此利用上述的方式，通过控制器 76 从增益介质 12 两端的电压调制所得到的误差信号可以用于调节腔长度。

5 栅格标准具 34 的光路长度的调制还调制激光器 110 的腔长度，并因此产生小的波长调制。在某些应用中，很小的或没有激光信号的波长调制是理想的。为了消除波长调制，可以利用高频振动元件 116 与高频振动元件 112 相关的相位相应的相反相位、适合于获得最小腔净长度调制和相应最小的激光发射波长调制的振幅来驱动末端镜 14。

10 向信道选择器 36 提供调制信号的操作导致在信道选择器 36 的面 42、44 之间的光路长度 d_{CS} 的调制。通过信道选择器 36 的传输的调制调制至增益介质 12 中的反馈，其调制由电压传感器 32 可探测的增益介质 12 两端的电压。利用与图 6 中所述的相类似的方法，从所探测的电压调制中得到误差信号，同样除了激光波长固定且传输通带一直被调制这点不同。通过控
15 制器 76，利用此误差信号来生成补偿信号，其被用于以上述的方式通过驱动元件 46 对信道选择器 36 进行位置调节。

在一个实施例中，可以依次进行调制信号与图 7 中的损耗元件 34、36 的结合使用。在此情况下，控制器 76 依次地高频振动栅格生成器 34 和信道选择器 36。当栅格标准具 34 被高频振动时，测量增益介质两端的电压
20 调制，且利用所得到的误差信号调节腔长度。当信道选择器 36 被高频振动时，利用增益介质 12 两端所监测到的电压调制，通过相对于光束传播光路 22 重新定位信道选择器 36 来调节光路长度 d_{CS} 。在激光器操作过程中可以持续反复地进行上述的操作，以确保操作过程中的每一个损耗元件的最优损耗特性和外腔激光器 110 的最优损耗特性。

25 在另一个实施例中，高频振动调制可以分别通过高频振动元件 112、114 被依次引入至栅格标准具 34 和信道选择器 36 之中，其中在不同的非干涉的频率下进行由元件 112、114、116 所提供的高频振动调制。因此，损耗元件 34、36 中的每一个的频率调制导致在不同的非干涉的频率下的增益介质 12 两端的电压的同时调制，所述的同时调制可通过电压传感器

32 同时探测。这样的设计允许根据从在增益介质 12 两端所探测到的不同的非干涉的频率调制得到的误差信号，同时原位调节光路长度 d_{GE} 、光路长度 d_{CS} 。

5 再一次应该指出的是，栅格标准具 34、信道选择器 36 和末端镜 14 代表的是可以出现在外腔激光器中的损耗元件中的仅仅一小部分，并且其中，所述的损耗元件可以具有这样的损耗特性，即可以根据增益介质 12 两端的所探测的电压调制调节所述损耗特性。与透镜 20、末端镜 14 的斜度或其它光学部件（没有示出）相关的损耗将具有可以根据本发明利用增益介质两端的电压调制进行调节的损耗特性。

10 现在参考图 8，在此示出了具有多个高频振动元件 124、126、128 的损耗元件 122，其中将所述的高频振动元件 124、126、128 以允许将高频振动调制引入至损耗元件的多个位置自由度的设置，耦合到损耗元件 122。例如，损耗元件 122 可以是在用于制造激光器的准直固定中使用的激光器末端镜，或可以是作为用于操作的末端镜。多个位置自由度中的每一个可以具有由高频振动元件 124、126、128 所引入的频率调制，其中每一个位置自由度可以根据从增益介质两端所探测的电压调制得到的误差信号进行调节。高频振动元件可以是压电元件、微机械元件或另一种位置致动器。所示出的损耗元件 122 具有位置自由度 δz （沿 z 轴的平移）， θ_x （绕 x 轴转动）， θ_y （绕 y 轴转动）。这些位置自由度中的每一个影响
15 损耗元件 122 的损耗特性，并可以通过平移和转动调节元件 124、126、128 进行调节，其中所述调节元件 124、126、128 被设置用上述的方式，根据所监测的电压调制来调节损耗元件 122 的 δz 、 θ_x 和 θ_y 。

如上所述，可以利用不同的非干涉的频率调制依次和同时进行损耗元件 122 的每一个位置自由度的高频振动和调节。当在激光腔（没有示出）
25 中存在多个损耗元件 122 时，每一个损耗元件 122 的每个位置自由度的高频振动可以同时或依次进行。

参考下面的图 9，在此示出了固态激光器装置 130，所述的激光器装置 130 根据本发明利用对增益区两端的电压的监测来估计和校正损耗。所示的激光器 130 被构造为集成单芯片的分布式 Bragg 反射器（DBR），具

有增益区 132、相控制区 134 和 Bragg 栅格或反射器区 136。激光器 130 包括限定出激光腔的平面 138、140。增益区 132 被可操作耦合到第一电流源 I_1 ，而相控制区 134 被可操作耦合到第二电流源 I_2 ，且 Bragg 反射器 136 被可操作耦合到第三电流源 I_3 。在操作中，利用来自第一电流源 I_1 的驱动电
5 流对增益区 132 进行泵浦。通过来自电流源 I_2 的电流控制相控制区 134，以调节腔的往返光路长度。Bragg 反射器 136 起到调谐元件或信道选择器的作用，并通过选择性施加来自电流源 I_3 的电流来进行调节以改变有效的栅格间距。激光器 130 被构造来从平面 140 传送光学输出。此类的 DBR 激光器的操作和制造是本领域所公知的。可以结合功率分流器（power
10 splitter）和附加的相控制区和 Bragg 反射器区（没有示出），以通过 Vernier 效应增大调谐范围。可以利用在此所描述的与用于图 9 中所示的损耗元件的相同的技术，控制这些附件或其它的附加损耗元件。

DFB 激光器 130 的 Bragg 反射器区 136 是与由平面 138、140 所限定出的激光腔相关的损耗元件。在这方面，除了具有作为固态激光器的整体部
15 分出现的内腔损耗元件，DFB 激光器 130 与上述的外腔激光器相似。分布式 Bragg 反射器向增益区 132 之中提供波长选择性反馈。附加到电流源 I_3 的 DC 电平上的小的 AC 电流调制调制波长滤波元件 136 的通带。此通带调制调制至增益区 132 之中的反馈，并在传感器 142 上产生电压调制。控制元件（没有示出）利用所述电压调制来调节电流源 I_3 的 DC 电平。

附加到 I_3 的 AC 调制还可以产生将表现为激光器输出的波长调制的小的
20 腔长度的调制，其可以通过增加补偿电流调制至电流源 I_2 以产生相等并相反的光路长度调制而被消除。利用控制元件（没有示出），基于分别来自波长锁定器（locker）和监测发光二极管（也没有示出）的信号可以设定电流源 I_1 和 I_2 的 DC 电平。控制元件还可以在附加到电流源 I_3 上的所施加的电压的频率上，监测波长锁定器上的信号，并计算出可用于设定 AC
25 信号的幅度和相位的误差信号，其中所述的 AC 信号被附加到电流源 I_3 ，补偿激光器的波长调制。

在对本发明的使用中，可能会出现损耗元件的调制产生诸如例如不需要的波长或振幅调制之类的不期望的副作用的情况，其中没有可用的方法

来持续地消除这些副作用。在此情形下，可以以短突发（short burst）来实现损耗元件的高频振动。在此突发的过程中，通过控制器生成误差信号。所述突发可以进一步与诸如不发送数据的周期之类的其它系统事件同步。

参考图 10 以及图 7 至图 9，将更加充分地理解本发明的方法。图 10 5 中的流程图示出了根据本发明在激光器的操作过程中发生的各种事件。在事件 200A，第一损耗元件 A 被高频振动或频率调制。例如，损耗元件 A 可以包括如图 7 所示的末端反射器 14、信道选择器 36、栅格标准具 34，或如图 9 所示的相控制区 134 或 Bragg 反射器 136，或任何其它内腔损耗元件。在事件 200A 中的元件 A 的高频振动可以包含损耗元件 A 的位置自由
10 度 δz （沿 z 轴的平移）， θ_x （绕 x 轴转动）和 θ_y （绕 y 轴转动）中的每一个的单独的高频振动，其可以如图 8 中所示和如上所述的同时或依次进行。

当损耗元件 A 被高频振动时，在事件 210A，通过位置与增益介质相关联的电压传感器监测增益介质或区两端的电压。如上所述的，可以以增
15 益介质两端的电压调制探测被引入至损耗元件 A 的高频振动或频率调制。如图 6 所示和如上所述的，电压调制的振幅和相位指示了损耗元件 A 的损耗特性。在事件 220A，进行信号处理以从在事件 210A 中所监测到的电压中产生或得到误差信号。如图 5A 和 5B 所示和如上所述的，可以由控制器
20 60 或 72 中的信号处理元件 94 通过傅立叶变换进行信号处理。根据在激光增益介质两端所探测到的电压调制的振幅和/或相位，误差信号可以反映损耗元件 A 的损耗特性，并且误差信号将指明损耗元件 A 的任何所需的校正调节。

在事件 230A，确定是否探测到了与损耗元件 A 相关的光学损耗。如上所述的，根据在激光增益介质两端所探测到的电压调制的振幅或相位，
25 确定损耗元件的损耗特性。如果所探测到的电压调制表现出最优的振幅和/或相位特性，则不再进行探测，并且可以重复事件 200A 至 230A。如果所探测到的电压调制表明了非最优的振幅和/或相位特性，则进行事件 240A。换句话说，事件 230A 为完成损耗元件的封闭循环控制环的事件 240A 提供误差信号。

在事件 240A, 对损耗元件 A 进行调节, 以使表明存在有与元件 A 相关的损耗的误差信号为零或将其消除。调节的特点将依据损耗特性和损耗元件的类型而变化。例如, 调节可以包括损耗元件 A 沿一个或多个位置自由度的线性或转动的运动。或者, 调节可以包括对于损耗元件的温度或电压调节。例如, 如果如图 7 所示损耗元件 A 是末端反射器 14, 则事件 240A 中的调节可以包括利用上述的方式通过加热或冷却补偿元件 74 进行的反射器 14 的热定位。在一些实施例中, 可以由同一致动器提供损耗元件的高频振动和调节, 而在其它的实施例中, 由不同的致动器提供损耗元件的高频振动和调节。

10 在事件 200B, 将高频振动或频率调制施加到第二损耗元件 B。事件 200B 可以在事件 200A 后发生, 或可以与上述的事件 200A-240A 同时发生。同样, 损耗元件 B 可以包含与激光腔相关的任何损耗元件, 并且在事件 200B 中元件 B 的高频振动可以包含位置自由度 δz 、 θ_x 和 θ_y 中的每一个的同时或依次的高频振动。

15 当损耗元件 B 被高频振动时, 在事件 210B, 如上所述的, 通过位置与增益介质相关联的电压传感器监测增益介质或区两端的电压。被引入损耗元件 B 的高频振动或频率调制表现为增益介质两端的电压调制, 并且, 调制的振幅和相位指示了损耗元件 B 的损耗特性。

20 在事件 220B, 进行信号处理以从在事件 210B 中所监测到的电压中产生或得到误差信号。如果元件 B 一直与元件 A 被同时但在不同的频率下调制, 则在不同频率下的傅立叶变换将提供不同的误差信号。误差信号可以指明损耗元件 B 的损耗特性, 并且指明损耗元件 B 的任何所需的校正调节。

25 在事件 230B, 问询或确定是否根据在激光增益介质两端所探测到的电压调制的振幅或相位, 探测到了损耗元件 B 的光学损耗。如果没有探测到损耗, 则可以重复事件 200B 至 230B, 并且如果探测到了损耗, 则进行事件 240B, 其中, 对损耗元件 B 进行调节, 以使表明存在有与元件 B 相关的损耗的误差信号为零或将其消除。事件 200B-240B 可以与事件 200A-240A 同时发生, 或跟随事件 240A 之后发生。如上所述, 使用与损耗元件

A 和 B 相关的不同的高频振动频率允许同时监测与不同频率调制相关的振幅和相位的变化，并允许同时估计多个损耗特性和对多个损耗元件的调节。

5 事件 200n 至 240n 与上面在事件 200A-240A 和事件 200B-240B 中所述的大致相同，但事件 200n 至 240n 是为与激光腔相关的第 n 个损耗元件而进行的。再次提醒的是，如上所述的，事件 200n 至 240n 可以通过对每一个损耗元件 A, B, ..., n 使用非干涉高频振动频率，与事件 200A-240A 和事件 200B-240B 同时进行，或可以以依次进行的方式进行。与高频振动
10 元件 A, B, ..., n 相关的各自事件可以以同步或依次高频振动混合的方式进行。元件的同时高频振动可以发生在有限的时间段内的“突发”中，并随后进行其它的事件。

虽然已参考其具体的实施例描述了本发明，但本领域的技术人员应该理解，在不偏离本发明的实质精神和范围的情况下，可以进行各种变化和
15 各种等价物的替换。此外，可以进行许多改变以使具体的情况、材料、物质组成、工艺、工艺步骤或多个步骤适应于本发明的目的、精神和范围。所有这样的改变都被认为是落入所附权利要求的范围。

20

25

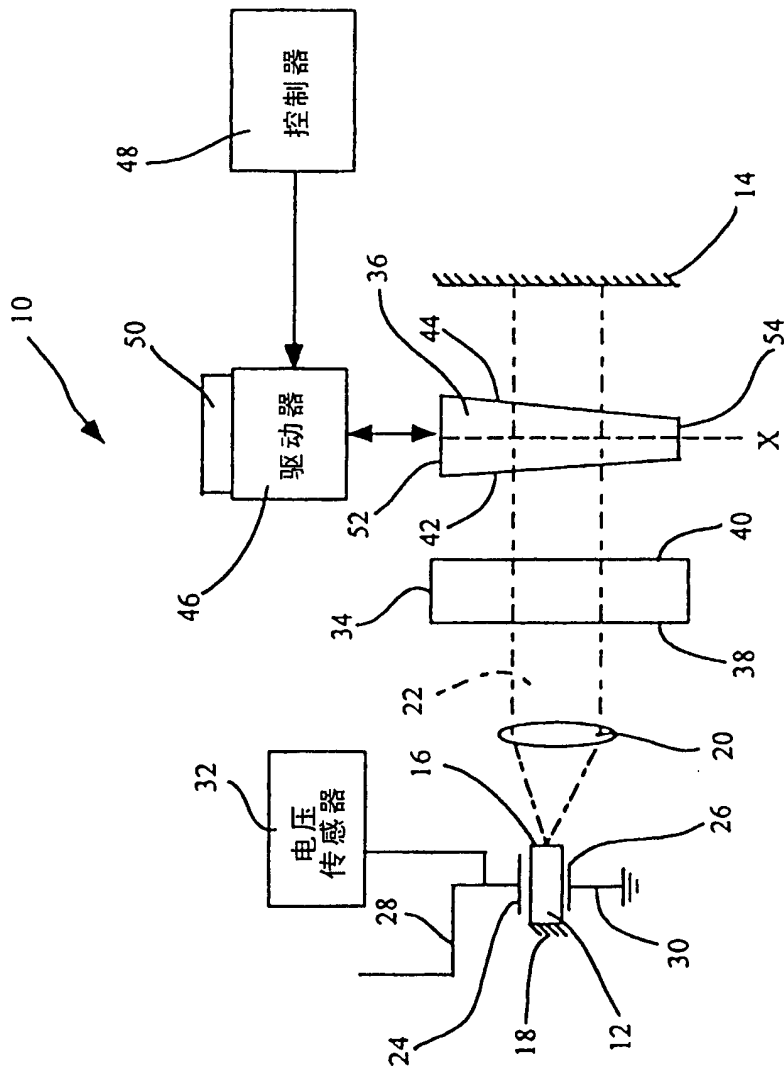


图1

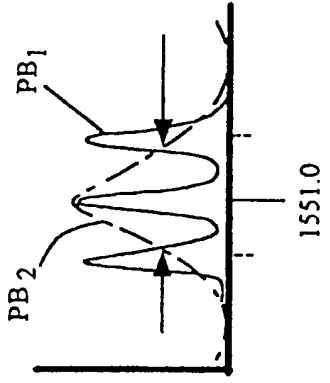
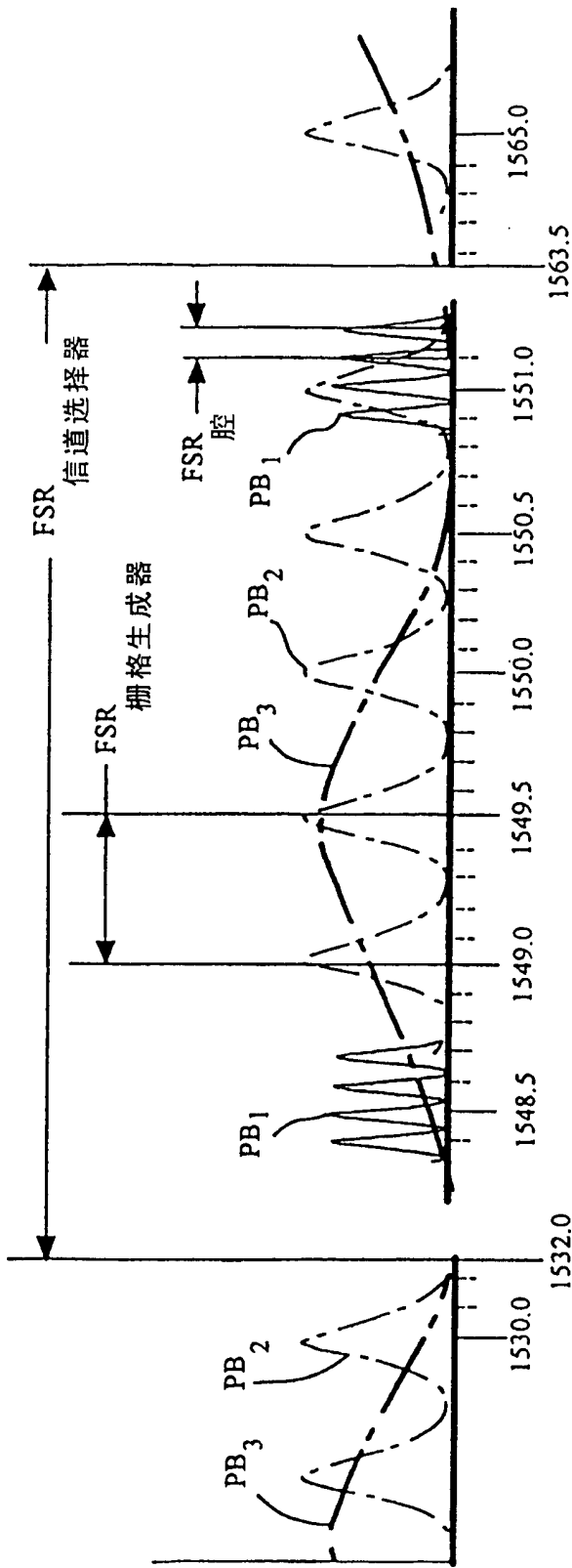


图2B

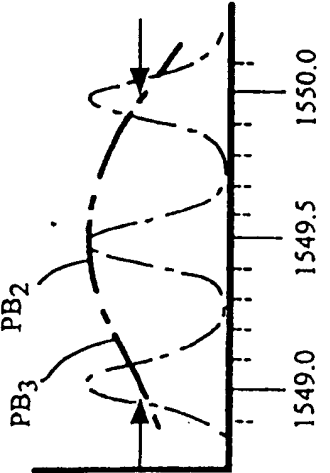
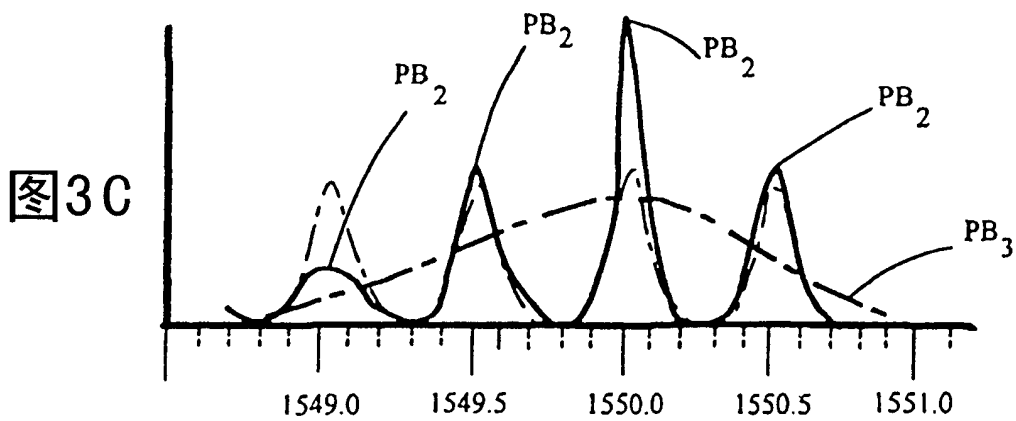
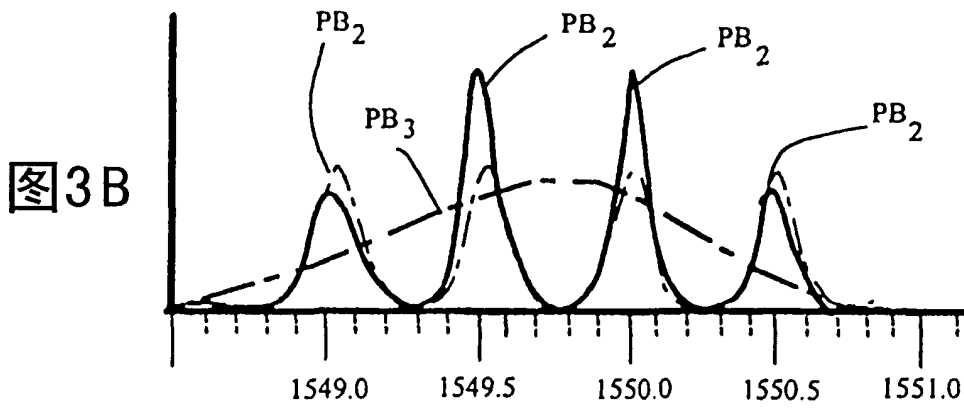
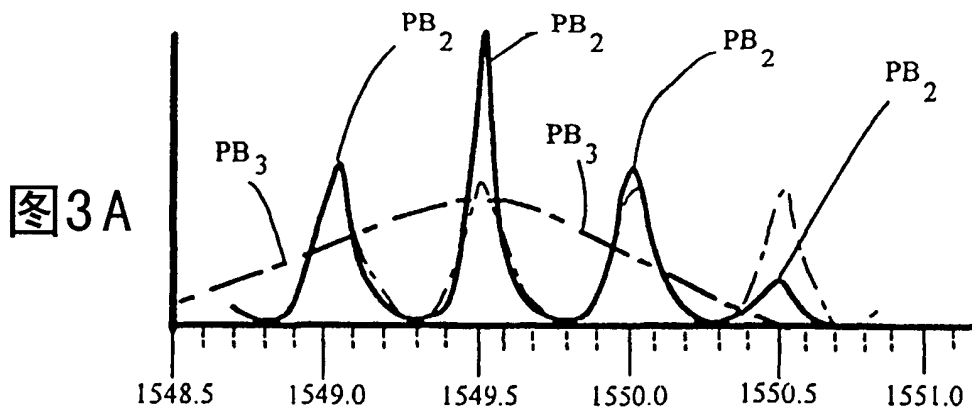


图2C

图2A



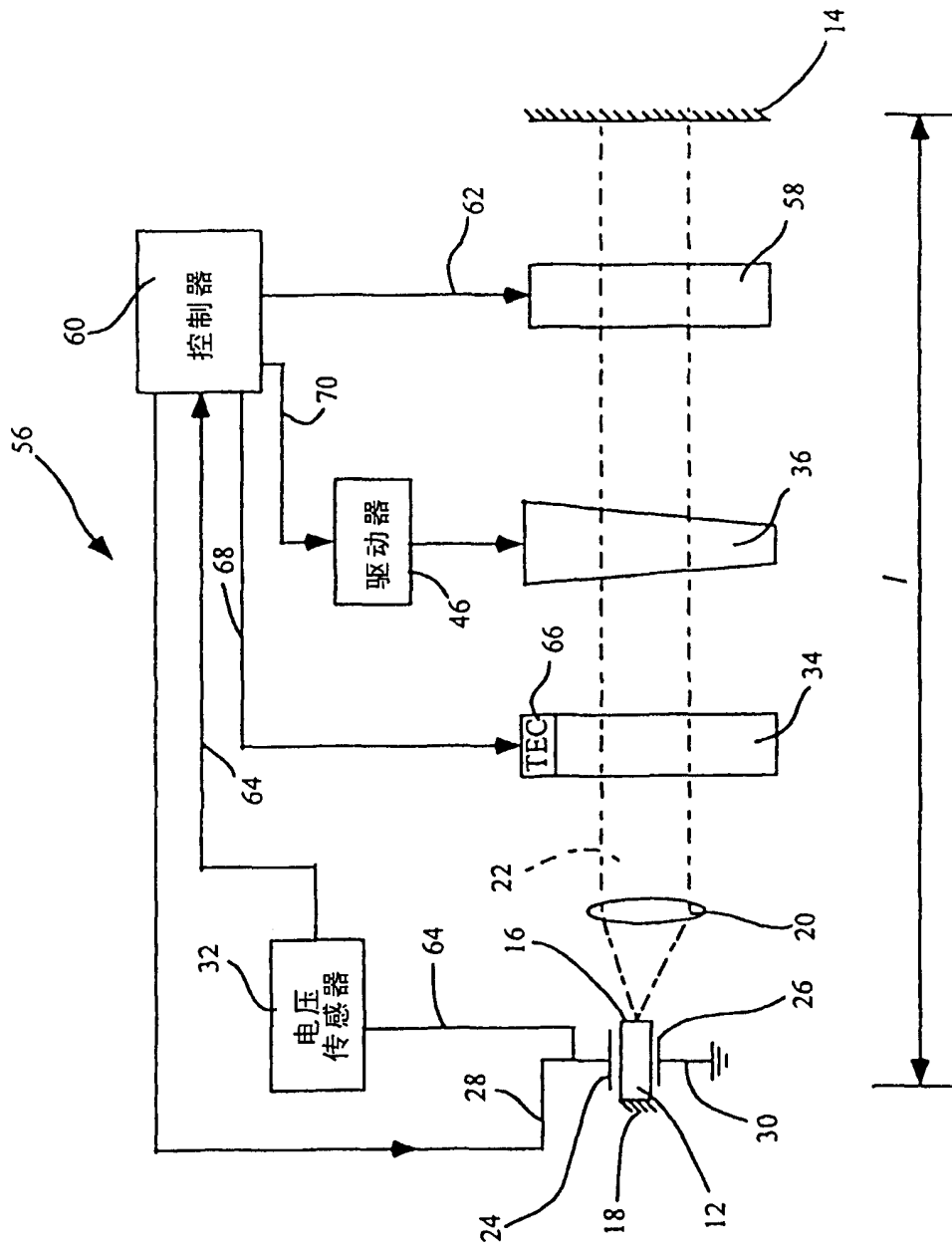


图4A

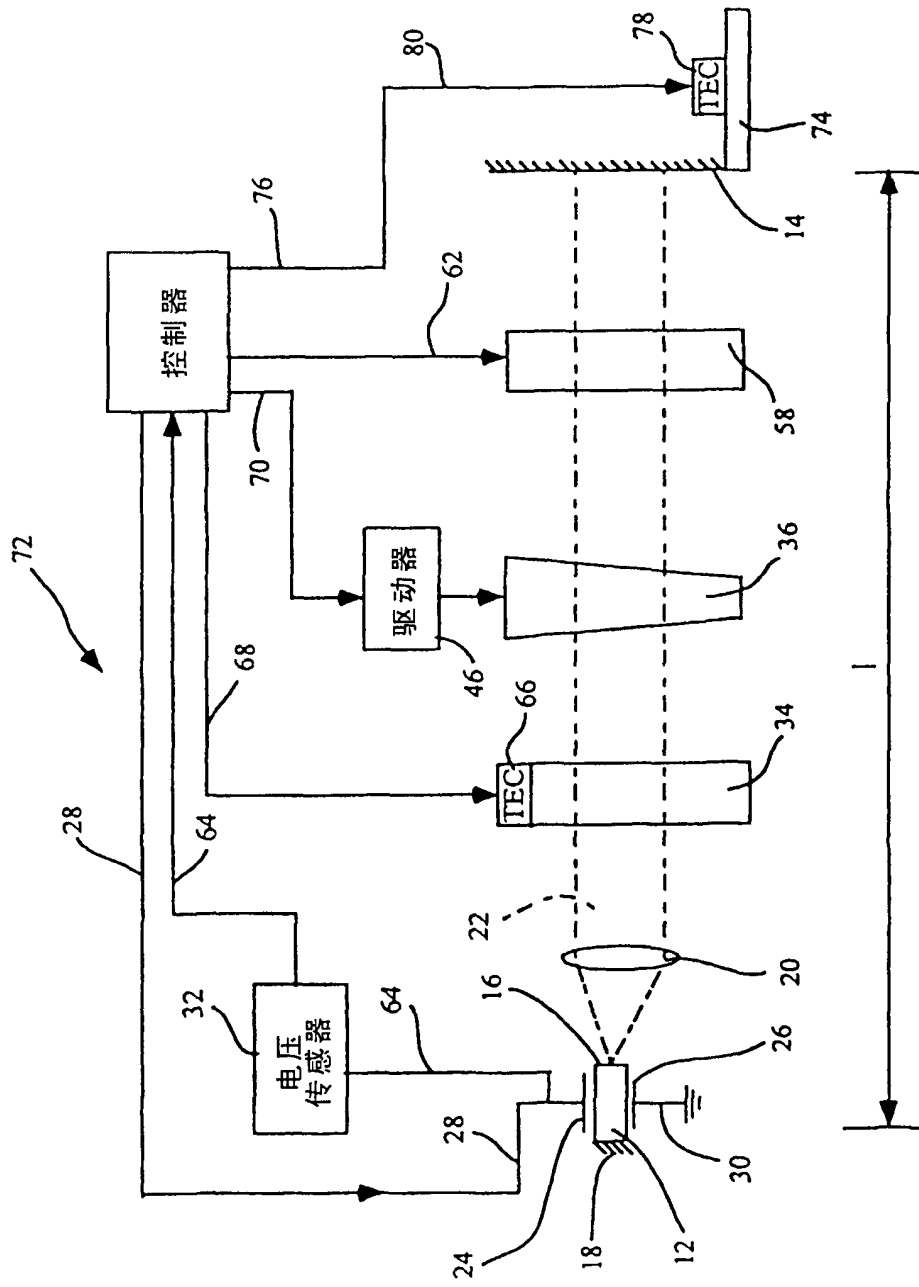


图4B

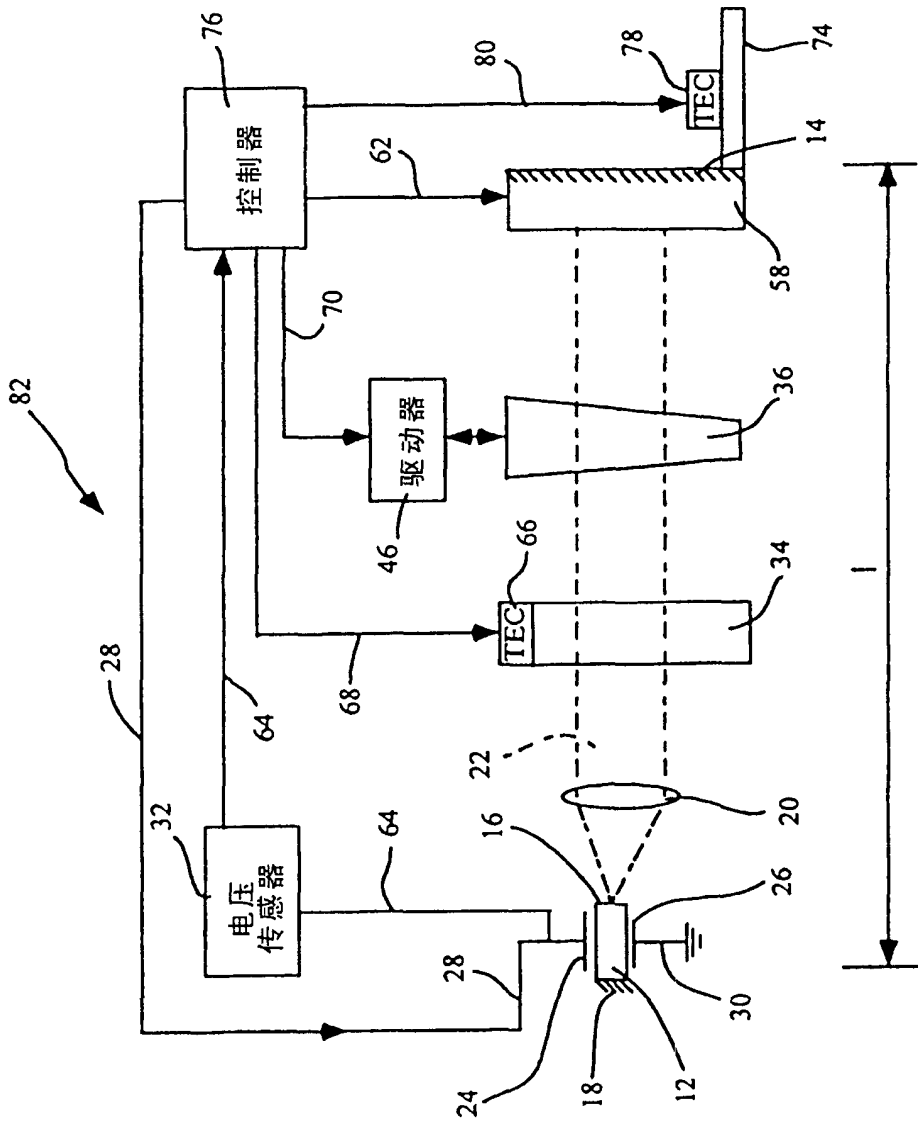


图4C

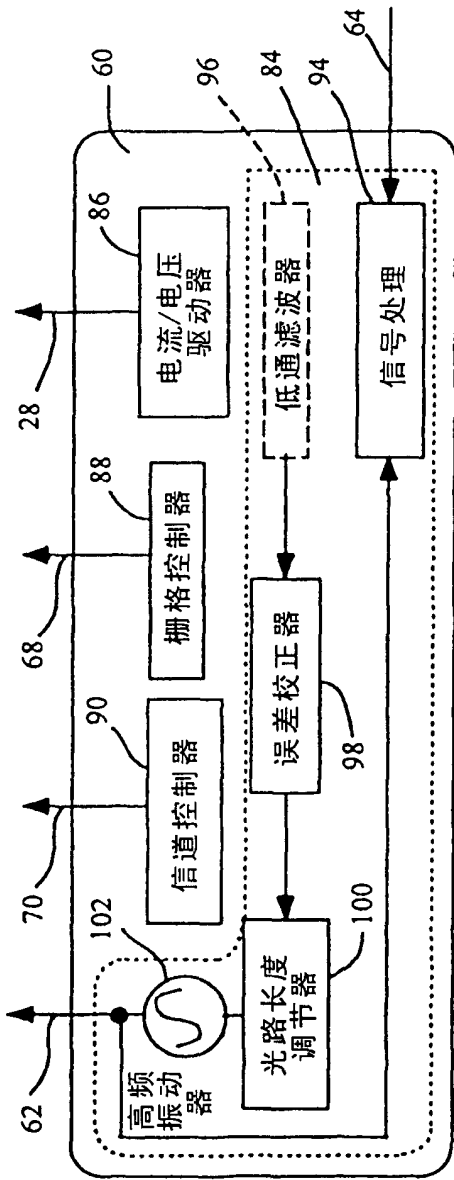


图5A

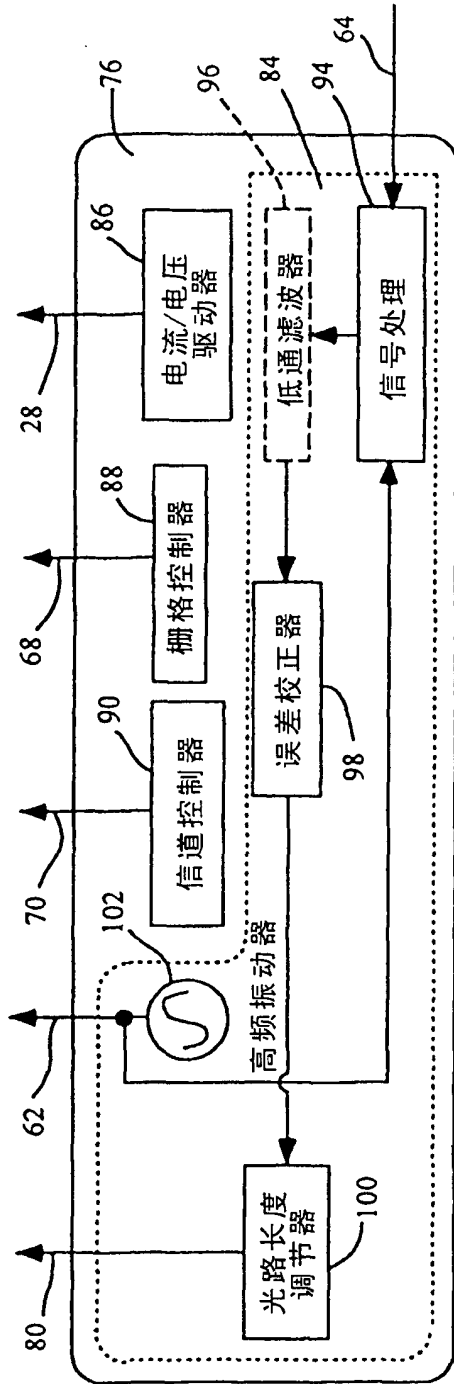


图5B

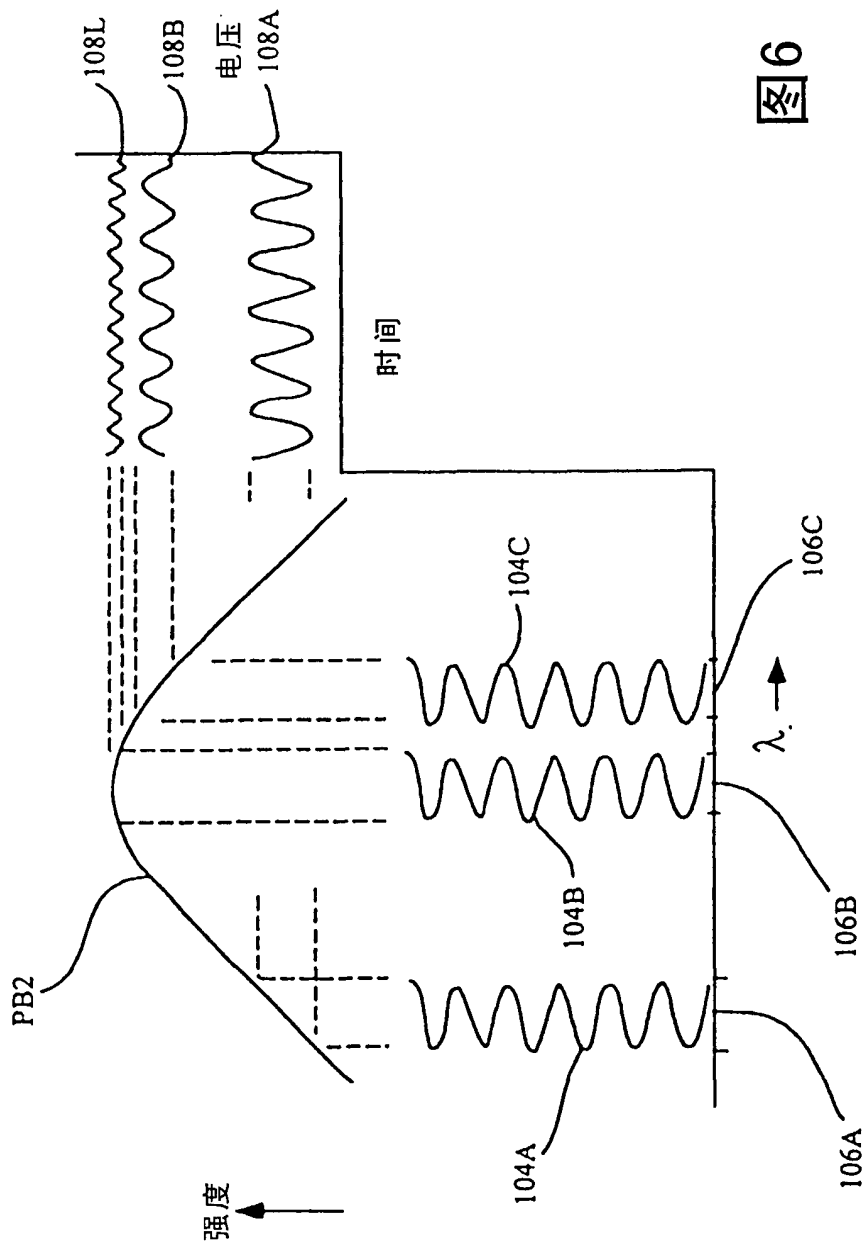


图6

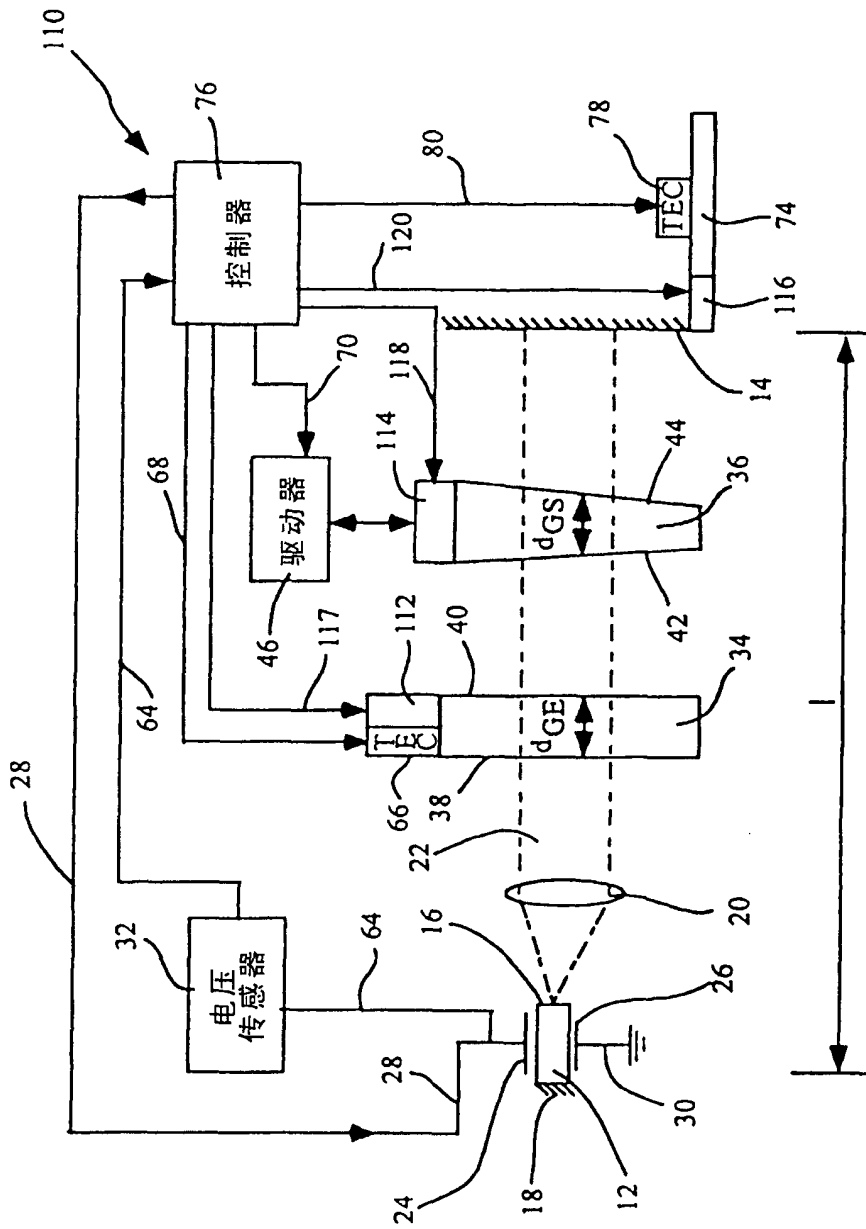


图7

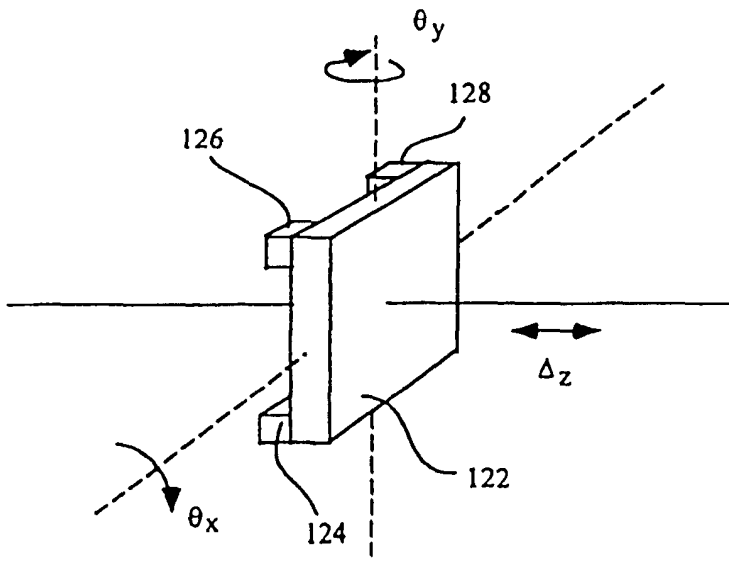


图8

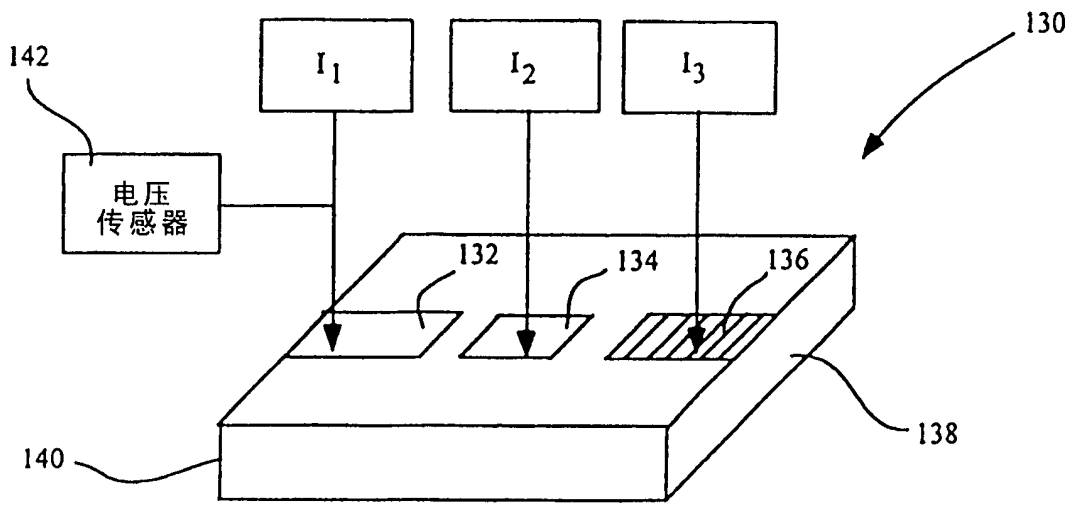


图9

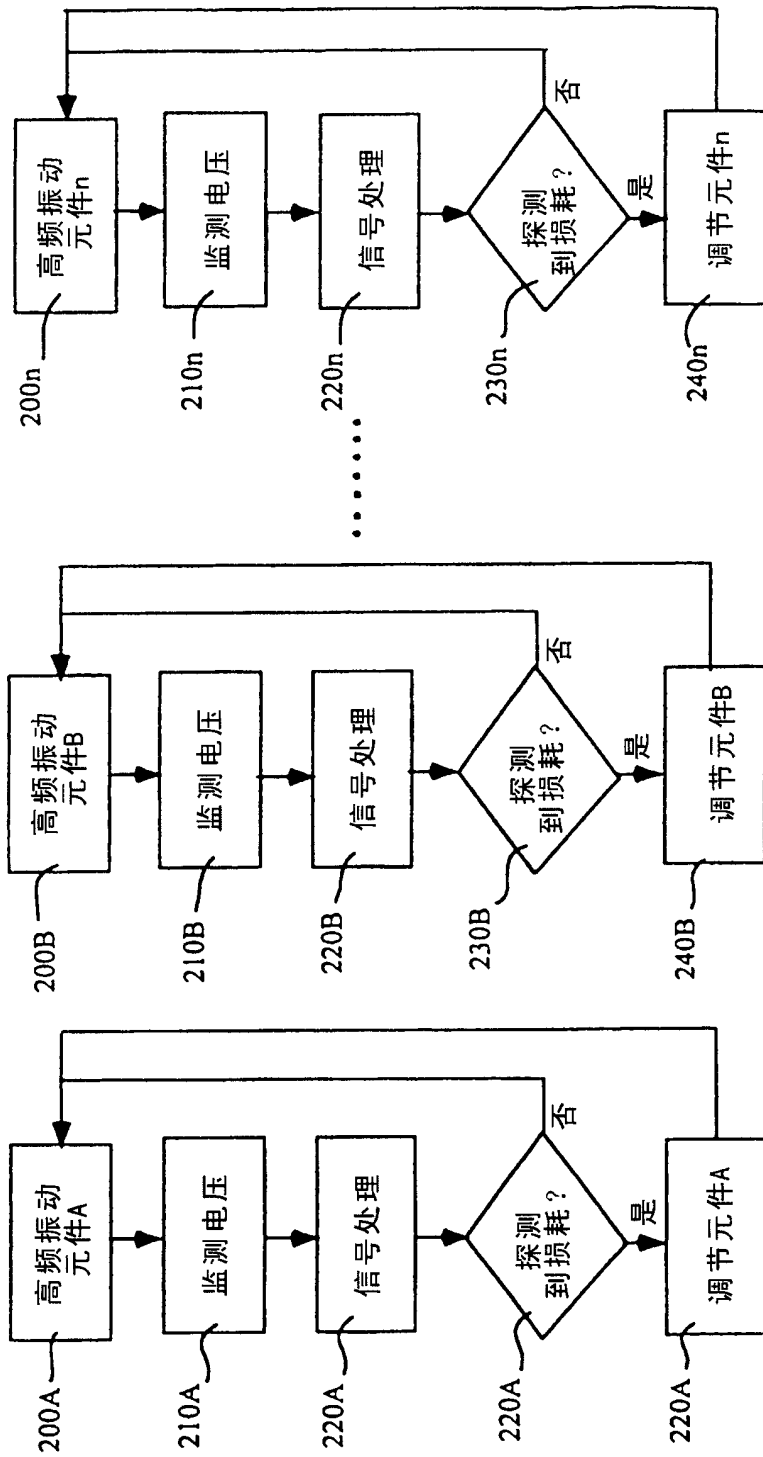


图10