

1. 一种可调光学共振器，该可调光学共振器包含一个空腔，在一个轴中，该空腔在一端上由反射器限定，在相对的一端上由反射光栅限定；其中反射光栅由一个柔性支承所支撑，该光学共振器还包含通过弯曲该支承使光栅围绕选定点进行模拟旋转从而调整该空腔沿该轴的长度的装置；其中所述柔性支承是以半导体材料实施的。
- 5 2. 根据权利要求1所述的可调光学共振器，包含用于弯曲柔性支承以便以单个运动的方式使光栅旋转和平移的装置。
3. 根据权利要求1或2所述的可调光学共振器，其中柔性支承是通过10 通过对半导体材料进行深蚀刻而制成的。
4. 根据权利要求1或2所述的可调光学共振器，其中反射光栅是炫耀光栅。
5. 根据权利要求1或2所述的可调光学共振器，其中柔性支承是与悬臂组合的门式框架。
- 15 6. 根据权利要求5所述的可调光学共振器，其中门式框架包含一个固定端和一个自由端，其中悬臂由自由端支持。
7. 根据权利要求1或2所述的可调光学共振器，包含用于径向调整光栅位置的第一调整装置，还包含用于独立轴向调整光栅位置的第二调整装置。
- 20 8. 一种可调激光器光源，该可调激光器光源包含根据前面任意一项权利要求所述的可调光学共振器。
9. 根据权利要求8所述的可调激光器光源，包含条纹发射二极管。
10. 一种可调滤光器，该可调滤光器包含根据权利要求1-7中任一项所述的可调光学共振器。
- 25 11. 一种光通信系统，该光通信系统包含前面任意一项权利要求所述的可调光学共振器。

光学元件

技术领域

5 本发明涉及光学元件的领域，特别是涉及可调的光学元件。

背景技术

大范围可调激光器是密集波分调制 (DWDM) 光通信系统和波长路由光学系统中的重要单元。单块激光器光源当前的存在形式是多区分布的布拉格反射器 (DBR) 激光器。例如，由位于英国 Towcester 的
10 Marconi Caswell 有限公司提供了具有大于 50nm 调节范围的 4 区采样光栅注入调节 DBR 激光器 (DC9806D)。然而，可以从这种单块可调源得到的功率输出低于固定波长设备。而且，对这些设备进行调节需要基于所存储的标定数据的复杂控制算法，这可能会随着激光器的老化而变得不准确。

15 一种替换方案由外腔式激光器给出，该外腔式激光器具有以下优点：输出功率更高；控制信号与发射波长之间的关系更简单；在调节期间的模态噪声更小；对老化的敏感度更小。基于热调节外部光纤布拉格光栅的外腔允许优秀的频率选择性，但调节范围有限；机械调节的色散光栅提供较低的选择性，但调节范围较宽。现在可以得到配备了色散光栅的外腔式激光器二极管。
20

与传统光栅可调染料激光器一样，光栅可调二极管激光器的最通常的几何结构是 Littrow (见 Wyatt R. 和 Devlin W. J. 的 “10kHz linewidth 1.5 μm InGaAsP external cavity laser with 55nm tuning range (具有 55nm 调节范围的 10kHz 线宽 1.5 μm 的 InGaAsP
25 外腔)” Elect. Lett 19, 110-112 (1983) 和 Littman (见 Littman M. G. 和 Metcalf H. J. 的 “Spectrally narrow pulsed dye laser without a beam expander (不具有光束扩展器的光谱窄脉冲染料激光器)” Appl. Opt. 17, 2224-2227 (1978) 和 Liu K. C. 和 Littman M. G. 的 “Novel geometry for single mode scanning of a tunable laser (可调
30 激光器的单模扫描的新型几何结构)” Opt. Lett. 6, 117-118 (1981) 的空腔配置。

用户面临的关于这些空腔的主要问题是确保 1) 无模跳跃的调

节, 2) 热和机械的稳定性, 3) 高波长选择性, 以及 4) 大范围调节。模跳跃的产生原因是因为空腔支持离散集的纵模, 这些纵模对应于离散集的光波长。为了确保相同的模始终被光栅选择, 必须在调节期间改变空腔的长度。单独的调节方案使用了压电和发动机平移、相位片

5 和激光器中的相位调制器部分来改变外观上的空腔长度。

然而, 可以通过使用认真选择的单发动机(已知为“同步调节”)来获得相同的效果。这包含使调节单元(光栅或镜子)绕其中心之外的一点旋转, 并且已经找出了最佳旋转中心点, 用于 Littrow (Favre F. 和 Le Guen D. 的“Process of adjustment of a continuously

10 tunable light source (连续可调光源的调整处理)”美国专利 5 347 527, 9 月 (1994) 和 Littman (Radians “INTUN 1530 Continuous Tunable External Cavity Laser (INTUN 1530 连续可调外腔式激光器)”产品公告)空腔。

多数商业上可得的可调外腔式激光器二极管系统是由低膨胀系数的金属模拟板上的分立元件构成的。在最通常的情况中, 调节是通过发动机旋转或压电激励来执行的。尽管它们的光学性能很好, 但这些系统极其昂贵, 总体封装尺寸较大(很多 cm), 并且对于通信中的应用来说调节速度过慢。可用的系统因此通常被限于测试功能。所证实的最小的系统包含小型化的封装, 该封装中包含固定的或可调的

20 Littrow 空腔。

小型化和集成是具有吸引力的, 因为它们可以降低尺寸和成本, 并增加机械和温度的稳定性、纵模的间隔以及同步调节机构的速度和精确度。适当地设计的激光器可包含 DWDM 系统中的有价值的节约功能, 或作为基于波长调节的网络中的灵活源。

25 微型机电系统 (MEMS) 是指通过使用硅(或类似的)处理技术制成的小型机电设备。MEMS 设备可以用很多种材料制成, 这些材料包含半导体(硅、锗、砷化镓、磷化铟)、钻石和金属。MEMS 技术是合适的集成路径, 但至今为止, 它对可调激光器的影响还很小。混合的 MEMS 可调外腔式激光器已被证实包含小型的镀膜镜, 该镀膜镜的位置接近

30 于二极管激光器的 AR 激光器面, 而非炫耀反射光栅。因此, 该外腔是 Fabry-Perot 型的外腔。该系统显示出不佳的调节特性 (Uenishi Y.、Tsugai M. 和 Mehregany M. 的 “Hybrid-integrated laser diode

micro-external mirror fabricated by (110) silicon micromachining (通过(110)硅显微机械加工制成的混合集成的激光器二极管微型外部镜)” Elect. Lett 31, 965-966(1995), Uenishi Y.、Honma K. 和 Nagaoka S. 的 “Tunable laser diode using a nickel micromachined external mirror (使用镍显微机械加工外部镜的可调激光器二极管)” Elect. Lett 32, 1207-1208(1996)。

垂直空腔半导体激光器 (VCSEL) 是一种替换形式的激光器, 它垂直于晶片平面 (而不是像传统激光器二极管一样从切开的边缘面) 发射光线。可以通过使用多层堆积和蚀刻来在晶片表面形成可机械移动的镜子。这可以与 VCSEL 组合以形成可调激光器, 但它也具有外部 Fabry-Perot 空腔。

VCSEL 方案的主要优点是: 可以使用自对准外腔来构建体积极小的、单块集成的激光器。调节速度和稳定性因此可能较高, 而且空腔自动设置以发射激光。测试也可以在晶片上执行。主要的缺点是: 需要全新的激光器结构, 而且输出功率可能较低, 这是由于降低的有效容积所造成的。调节特性也可能被复杂化, 因为需要设计等效于前面所讨论的最佳旋转中心的调节机构。

因此, 对于混合可调激光器存在一种情况, 该混合可调激光器包含基于现有的条纹 (stripe) 发射二极管的增益块 (即光学放大器), 但使用用于可调外腔的 MEMS 技术。直到最近, 也没有可用的处理过程能制造这种激光器中所需的高质量元件。例如, 多数微型设计的设备是通过使用多晶硅表面的显微机械加工构建的。这种制造技术的确允许旋转中心轴承的建立, 但使用较薄的堆积的多晶硅层的结果是得到机械属性不佳的较弱元件, 而且对于光刻法清除的需求会造成轴承的不稳定性以及溢出 (Fan L.S.、Tai Y.-C. 和 Muller R.S. 的

“Integrated Movable micromechanical structures for sensors and actuators (用于感应器和激励器的集成的、可移动的微型机械结构)” IEEE Trans. Electron Devices 35, 724-730(1988), Mehregany M.、Gabriel K.J. 和 Trimmer W.S.N. 的 “Integrated fabrication of polysilicon mechanisms (多晶硅机构的集成制造)” IEEE Trans. Electron Devidcees 35, 719-723(1988)。

发明内容

本发明提供了一种可调光学共振器，该可调光学共振器包含一个空腔，在一个轴中，该空腔在一端上由反射器限定，在相对的一端上由反射光栅限定；其中反射光栅被固定到一个柔性支承，该光学共振器还包含这样一种装置，该装置通过弯曲该柔性支承而使光栅围绕选
5 定点的模拟旋转，从而调整该空腔沿该轴的长度。

在一个优选实施例中，本发明提供了包含可调光学共振器的一种可调激光器光源。

在另一个优选实施例中，本发明提供包含可调光学共振器的一种可调滤光器。

10 附图说明

下面参照附图通过示例的方法描述本发明，在附图中：

图 1 是现有技术的 Littrow 空腔的主要单元的示意图；

图 2 是现有技术的 Littman 空腔的主要单元的示意图；

图 3 显示了适用于本发明的示例性的 MEMS 悬挂机械部分；

15 图 4 显示了按照本发明的 MEMS Littrow 空腔的布局；

图 5 和 6 分别解释了悬臂和门式框架结构的原理；

图 7 显示了适用于本发明的梳状驱动静电微型激励器；

图 8 显示了将梳状驱动静电激励器安装到按照本发明的悬挂弯曲
上；

20 图 9 显示了按照本发明的 MEMS 可调激光器系统的一个动态模型。
具体实施方式

下面对本发明的可调光学共振器进行描述，其中参照了该可调光学共振器在可调激光器中的应用。

同步调节的 Littrow 空腔的原理

25 如图 1 所示的 Littrow 空腔使用了通过光栅的单通路，旋转该通路来对波长进行调整。该空腔包含具有一个高反射涂覆端面 (10) 和一个非反射涂覆面 (20) 的光学放大器 (OA)、一个非反射涂覆的透镜 (LE) 和一个高反射性炫耀反射光栅 (G)，但也可以使用诸如标准具、柱面透镜和棱镜 (未显示) 的其它元件来改善光学性能，如下面
30 所述的。

如图 2 所示的 Littman 空腔使用通过光栅 (G) 的双通路，并需要一个外部的镜子 (M)，旋转该外部镜子可用于调节。在这种几何结构

中可增强光谱纯度，因为在每个往返中会遇到光栅的两次过滤作用。

在 Littrow 几何结构中，在波长 λ 处满足纵向共振，对于该波长 λ ：

$$\lambda = 2Lc/m \quad (1)$$

5 其中 Lc 是有效的空腔长度（即，空腔的所有部分的光学长度，包含激光器、透镜和空气传播距离）， m 是模数。

现在，从设置为角度 θ 的、周期为 Λ 的炫耀光栅到接近的横梁的第 n 阶回射发生在这样的波长上：

$$\lambda = \{2\Lambda/n\} \sin(\theta) \quad (2)$$

10 为了使共振与光栅反射性中的峰值匹配，应该在最初将空腔长度调整为同时满足等式 (1) 和 (2)，此时：

$$Lc = \{m\Lambda/n\} \sin(\theta) \quad (3)$$

在将光栅旋转角度 $d\theta$ 以调节波长的时候，为了维持这个条件，必须将空腔长度改变相应的长度 dLc ，以使得：

$$15 \quad dLc/d\theta = \{m\Lambda/n\} \cos(\theta) = Lc/\tan(\theta) \quad (4)$$

对于第一阶，这可以通过以下方法获得：将光栅安装在沿光栅切向延伸的半径臂上，如图 1 所示，并选择半径 R 为：

$$R = Lc/\sin(\theta) \quad (5)$$

20 这种构造代表用于同步调节的最佳光栅安装。需要注意，等式 5 的结果独立于模数 m 和光栅阶数 n ，因此最佳旋转中心的半径是唯一的。

25 对准激光器空腔以便发射激光的处理过程本身是较为复杂的。一种方法包含这样一种激光器（通常还有其它元件），该激光器被安装在弯曲的悬挂物上，允许对线和角进行逐渐地、精确地调整。当实现了激光发射之后，可通过点焊将弯曲固定在一个适当的位置。

可调激光器二极管系统的小型化

30 按照本发明的设备基于一个深蚀刻（即，至少 10 微米深）的硅微型设计的模拟板，该模拟板提供用于激光器二极管和渐变折射率（GRIN）透镜的对准特征部件，并在弯曲悬挂物上携带电子调节的炫耀光栅以形成 Littrow 空腔。深蚀刻被描述于 Laermer F. 和 Schilp A. 的“Method of anisotropically etching silicon（各向异性地蚀刻硅的方法）”美国专利 5 501 893，3 月 26 日（1996）和 Gormley C.

Yallup K.、Nevin W.A.、Bhardwaj J.、Ashraf H.、Hugget P. 和 Blackstone S. 的“State of the art deep silicon anisotropic etching on SOI bonded substrates for dielectric isolation and MEMS applications (在用于电介质隔离法和 MEMS 应用的 SOI 结合基底上的技术深硅各向异性蚀刻的状态)”关于半导体晶片结合的第五届国际研讨会,电子化学学会秋季会议,夏威夷,美国,10月17-22日(1999)。使用深蚀刻和结合的硅绝缘体(BSOI)来形成该结构可得到较高的机械质量,而使用弯曲支架则可消除对旋转中心轴的需要。

10 将安装支架设计成能够最初进行被动调整,之后进行动态波长调节。光栅是深蚀刻结构,它被设置为垂直于晶片平面,并被安装在新型的弹性弯曲悬挂物上,该弹性弯曲悬挂物模仿优选的旋转中心的作用以允许大范围的、无模跳跃的调节。光栅旋转和轴向模同步化的电力控制是通过静电驱动实现的,但也可使用其它的激励方法。

15 与传统光栅调节的外腔式激光器二极管相比,本发明的优势在于:调节机构的小型化将允许更高的调节速度,并改善机械和热稳定性,大批量生产技术的使用将使成本降低。使用现有的条纹发射二极管将允许把输出功率维持在与固定波长设备相似的电平上,典型地,这些电平远远超过当前可从 VCSEL 获得的电平。

20 MEMS 可调激光器二极管的构造方案示例

一种示例性的 MEMS 可调激光器系统是基于一种激光器二极管的,该激光器二极管被混合安装在一种硅模拟板上,该硅模拟板是通过对其上结合的硅绝缘体(BSOI)进行深反应离子蚀刻而形成的。这种方法允许在单晶硅中制出厚的、不产生张力的悬挂机械部分。例如,高级硅蚀刻(ASE-Analog Devices(贝尔法斯特)的商标),处理过程可以以每分钟约 $3\mu\text{m}$ 的速率将硅蚀刻到大于 $350\mu\text{m}$ 的深度,以便使深结构是经济的。同样地, $90^\circ \pm 25^\circ$ 的侧面角、大于 0.99 的各向异性和 40:1 的特征方面在此基础上是可能的,这允许生产出高质量的部件。

30 使用这种方法,可以制造图 3 所示的普通形式的悬挂机械部分。这里,通过深反应离子蚀刻将长度为 L、宽度为 w 的横梁蚀刻到 BSOI 晶片的结合层(本身厚度为 d)中。通过使用(例如)湿酸蚀刻(诸如

缓冲的氢氟酸)来蚀刻牺牲的氧化物夹层,从而从相对窄的横梁下面去除氧化物底层。通过适当地选择尺寸和仔细地对蚀刻进行定时,就可以对横梁进行完整地底切,这样,它就可以在晶片的平面内弯曲,同时保持在左手端由相对更大的岛支持。

5 通过组合这种性质的制造技术,可以制造更复杂的微型光机电系统。图4显示了按照优选实施例的MEMS Littrow空腔的布局。其尺寸可能约为 $5\text{mm} \times 6\text{mm}$:比传统系统的线尺寸大约小10倍。该基底被各向异性地进行蚀刻,以便在形成 $a \approx 2\ \mu\text{m}$ 厚热氧化物层和附带 $a \approx 400\ \mu\text{m}$ 厚结合硅层之前,形成埋入的对准V凹槽以用于 $a \approx 1\text{mm}$ 直径1:4高跨比GRIN透镜。

10 机械部分和光栅被形成于结合层中。两个深干燥蚀刻的水平面限定了该设备:第一个从右边通过结合层,并画出所有的精密特征部件(光栅、弯曲、静电驱动)的轮廓,而第二个只通过一半,并形成一个平台以便使激光器大致安装在光轴上。使用两个掩模(抗蚀剂和氧化物)将所有的特征部件蚀刻在一起,掩膜之一被通过蚀刻剥去(即去除)一半。然后去除牺牲氧化物。得到的结构被金属化以便增加光栅反射性并允许电连接,然后为激光器模具堆积焊块。

15 激光器和透镜支架必须能够进行一次设置调整,以便补偿模具结合误差和透镜直径(OD)和中心同心度误差。该激光器因此被安装在双轴弯曲上,同时透镜对准凹槽提供自由度的第三级。系统的集合包含:将硅模拟板安装在反馈控制的热电冷却器上,以保证空腔的温度稳定性;将激光器模具焊在适当的位置以防备粗糙的、被动对准停止(alignment stop);以及引线接合。

20 空腔的对准是通过使用:外部微型操纵器,用于使GRIN透镜沿V-凹槽滑动以达到瞄准(最不关键的操作);静电激励,用于弯曲激光器的支承悬臂并更正位置上的误差(最关键)。横向调整是通过静电梳状驱动执行的,垂直调整是通过平行板驱动执行的。通过使用扫描Fabry-Perot光谱分析器来监视激光器的输出,直到实现了激光发射。然后将透镜和激光器支撑固定在适合的位置。

30 制造在 $\lambda \approx 1.5\ \mu\text{m}$ 、 $\theta \approx 45^\circ$ 处反射的第一阶光栅需要 $0.75\ \mu\text{m}$ 的特征部件。虽然使用第二阶衍射将使光栅的光谱选择性减半,但第二阶光栅的 $1.5\ \mu\text{m}$ 特征部件在直接电子束光刻法的范围之内,而且可通过

使用现有的深反应离子蚀刻技术来将得到的图案转移到结合的硅材料上。

用于对 MBMS 可调二极管进行同步调节的弯曲支架

用于光栅的弯曲支架具有下列属性，以便进行无模跳跃的调节：

- 5 1) 一个主要的端位移，该端位移模拟围绕优选的旋转中心的旋转，和
2) 一个次要的线运动，该线运动允许在不改变光栅定向的条件下调整空腔长度。如果我们考虑如图 5 所示的简单悬臂，那么由点负载 F 造成的线和角的偏移 Δ 和 θ 为：

$$\Delta = F/kL, \quad \theta = F/kA \quad (6)$$

10 其中 kL 和 kA 是线和角的刚度，由下面等式给出：

$$kL = 3EI/L^3, \quad kA = 2EI/L^2 \quad (7)$$

其中 E 是杨氏模量， I 是面积的二阶矩。对于图 3 所示类型的矩形横梁， $I = dw^3/12$ 。

根据等式 6 和 7，线和角偏移之间的关系是：

$$15 \quad \Delta = 2\theta L/3 \quad (8)$$

然而，对于模拟围绕固定点的旋转的端偏移，我们要求

$$\Delta = \theta L \quad (9)$$

在等式 8 和 9 不同的前提下，旋转中心不能被正确地固定。因此上面的要求 1) 不能被图 5 的简单悬臂满足。

20 本发明有利地提供一种复合式弯曲，它允许对线和角位移进行分别调整，以便使上面的条件 1) 和 2) 被满足。图 6 显示了包含连到长度为 L_1 的门式框架的长度为 L_2 的悬臂的复合式弯曲。这里，线和角的端位移 Δ 和 θ_2 为：

$$\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 = F\{1/k_1L + 1/k_2L\}, \quad \theta_2 = F\{1/k_2A\}$$

25 其中门式框架的线刚度 k_1L 、悬臂的线和角的刚度 k_2L 和 k_2A 由下面的等式给出：

$$k_1L = 24EI_1/L_1^3, \quad k_2L = 3EI_2/L_2^3, \quad k_2A = 2EI_2/L_2^2 \quad (11)$$

其中 I_1 和 I_2 分别是门和悬臂弯曲的二阶矩。

对于模拟旋转的端位移，我们要求

$$30 \quad \Delta = \theta_2(L_1 + L_2) \quad (12)$$

等式 12 可以通过认真选择比率 $\alpha = L_1/L_2$ 来满足。在 $I_1 = I_2$ 的特殊情况中（即，对于宽度和深度各处相等的横梁）， α 是下面三次

方程的解:

$$\alpha^3 - 12\alpha - 4 = 0 \quad (13)$$

可以找到数字上的解 $\alpha = 3.62$ 。

由于这个尺寸比可以容易地从实践中得到, 所以我们可以推出:

- 5 尺寸为 $L1 = 3.62L2$ 的复合式弯曲可以因此提供一个调节运动, 该调节运动等效于 Littrow 空腔几何结构的最佳旋转中心的调节运动。

通过使用梳状驱动静电微型激励器, 可以方便地将调节所需的点负载 F 加到悬臂, 如图 7 中所示 [103]。该设备本质上是一个可变电容器, 它的一半是固定的, 另一半是移动的, 其上携带互锁的指状电极。
10 假设有 N 个内部指状电极和 $N + 1$ 个外部电极, 它们之中每一个的深度均为 d , 并由间隙 g 分开, 当指状物重叠长度 X 时, 可以从平行板电容器近似等式得出该结构的总电容 C :

$$C = \epsilon_0 2NXd/g \quad (14)$$

其中 ϵ_0 是自由空间的介电常数。

- 15 当电容器被充电到电位 V 时, 可以简单地示出: 在该结构的两半之间存在吸引力, 该吸引力取决于电容与位置的导数, 形式为:

$$F = 1/2dC/dX V^2 \quad (15)$$

由于重叠长度 X 与 x 线性相关, 所以可得出该力为:

$$F = (\epsilon_0 Nd/g) V^2 \quad (16)$$

- 20 因此, 可通过将梳状驱动静电激励器的移动的一半安装在悬挂弯曲上 (如图 8 所示) 来执行对 MEMS 可调激光器的调节, 以便等式 16 给出的力产生作用而使悬挂偏移。该偏移将与外加的力线性相关。由于等式 16 中的平方项, 该偏移不会随外加的电压线性变化, 但是, 存在一种替换的电极几何结构, 该几何结构包含一个线性的力-电压关系。
25

更重要的是, 如图 8 所示地使用第二梳状驱动静电激励器来向门式框架外加另一个点负载允许对光栅的线位置进行独立调整, 而不影响其角定向。此第二调节单元因此允许对空腔进行轴向调节, 以补偿在将空腔轴向模与光栅反射性峰值对准时造成的初始设置误差。

- 30 示例设计参数

我们可估计一些典型的示例设计参数, 如下所示, 其中假设弹性悬挂被制成: 在携带 $100 \mu\text{m}$ 厚结合层的硅绝缘体晶片上, 恒定的横梁

宽度为 $10\ \mu\text{m}$ 。

在这种情况下，横梁宽度和深度为 $w = 10\ \mu\text{m}$, $d = 100\ \mu\text{m}$ ，面积的二阶矩为 $I = (100 \times 10^3) \times 10^{-24} / 12 = 8.333 \times 10^{-21} \text{m}^{-4}$ ，对于硅的杨氏模量为 $E = 1.08 \times 10^{11} \text{N/m}^2$ 。

- 5 我们可以假设下面任意（但是典型的）长度以用于悬挂部件，即 $L1 = 3.62\text{mm}$, $L2 = 1\text{mm}$ 。在这种情况下，光栅旋转中心臂的有效半径 R 为 $R = L1 + L2 = 4.62\text{mm}$ ，空腔长度为 $Lc = 3.27\text{mm}$ 。

使用这些参数，就可以从等式 11 中获得线刚度参数 $k1L$ 和 $k2L$ ，为：

$$10 \quad \begin{aligned} K1L &= 24 \times 1.08 \times 10^{11} \times 8.333 \times 10^{-21} / (3.62 \times 10^{-3})^3 = 0.45 \text{N/m}, \\ K2L &= 3 \times 1.08 \times 10^{11} \times 8.333 \times 10^{-21} / (1 \times 10^{-3})^3 = 2.7 \text{N/m} \end{aligned} \quad (17)$$

可以通过使用对于串联弹性弹簧的传统关系式得出复合式悬挂系统的总体线性刚度 kL ，即：

$$I/kL = 1/k1L + 1/k2L = 2.6 \text{m/N}, \text{ 使得 } kL = 0.385 \text{N/m} \quad (18)$$

- 15 调节包含光栅的很小的旋转。对等式 2 求导，我们得到：

$$d\theta = \tan(\theta) d\lambda / \lambda \quad (19)$$

对于工作于 $\lambda = 1.5\ \mu\text{m}$ 波长、光栅角被设为 $\theta \approx 45^\circ$ 的激光器， $\Delta\lambda = \pm 25\text{nm}$ 的调节范围要求光栅旋转通过 $\Delta\lambda_{\max} = \pm 0.95^\circ$ 的角度范围。

- 20 通过这个小角度的旋转要求光栅的线切向运动：

$$\Delta_{\max} = \pm R \Delta\theta_{\max} = 4.62 \times 10^{-3} \times 0.95 \times \pi / 180 \approx 80 \times 10^{-6} \text{m}, \text{ 或 } 80\ \mu\text{m} \quad (20)$$

为了通过静电激励获得这个运动，要求该力为：

$$F = kL \Delta_{\max} = 80 \times 10^{-6} / 2.6 \approx 30 \times 10^{-6} \text{N}, \text{ 或 } 30\ \mu\text{N} \quad (21)$$

- 25 然后通过比较等式 16 和 21 来获得最大驱动电压：

$$(\epsilon_0 Nd/g) V_{\max}^2 = F = kL \Delta_{\max} \quad (22)$$

使得最大电压为：

$$V_{\max} = \sqrt{\{ kL \Delta_{\max} g / \epsilon_0 Nd \}} \quad (23)$$

- 30 如果考虑静电激励器包含（假定）宽度为 $6\ \mu\text{m}$ 的指状物阵列，其中指状物由 $g = 4\ \mu\text{m}$ 的间隙分开，那么在总长度为（假定） 1mm 的激励器中可包含 $N = 50$ 个指状物对。最大电压则为：

$$V_{\max} = \sqrt{\{30 \times 10^{-6} \times 4 \times 10^{-6} / 8.85 \times 10^{-12} \times 50 \times 100 \times 10^{-6}\}} \approx 50V \quad (24)$$

在这种设计中还有对驱动电压进行改变的余地，所述的改变是通过以下方式实施的：（1）减小电极间隙，或（2）通过增加电极数量，或（3）通过降低悬挂刚度。

- 5 我们可如下估计光栅和调节激励器的质量。上面的计算建议了一种具有 1mm 跨度的梳状电极。在这个跨度上支持光栅和移动指状电极的横梁可具有 $1\text{mm} \times 50\mu\text{m}$ 的典型尺寸。如果光栅的最大平移为 $80\mu\text{m}$ 左右，那么梳状指状物的长度必须近似为 $100\mu\text{m}$ 。假设有 50 个电极，每个电极宽度为 $6\mu\text{m}$ （如上），并假设结构深度为 $100\mu\text{m}$ ，对于硅的密度为 $2330\text{kg}/\text{m}^3$ ，那么近似的总移动质量为：

$$m = \{ (10^{-3} \times 50 \times 10^{-6}) + (50 \times 100 \times 10^{-6} \times 6 \times 10^{-6}) \} \times 10^{-4} \times 2330 \\ = 1.864 \times 10^{-8} \text{kg} \quad (25)$$

对于质量弹簧共振，共振频率 ω 由下式给出：

$$\omega = \sqrt{(kL/m)} = \sqrt{(0.385 / 1.864 \times 10^{-8})} = 4544 \text{rad/s, 或 } 725 \text{Hz} \\ 15 \quad (26)$$

调节时间因此可能超过 2ms。这意味着调节的速率可能大幅超过传统的外腔式激光器。

- 20 在图 9 中显示出：该支架实际具有三级自由度，因为它有效地包含一个安装在耦合到另一个质量块 m_2 （光栅及其激励器）的线弹簧（轴向调节激励器）上的质量块 m_1 ，该质量块 m_2 还具有惯量 J_2 ，并被安装在具有线和角刚度的弹簧上。因此，可预测三个特性模。然而，可以根据最低阶模的频率来获得合适的动态行为。

本发明的可调共振器的选择性质还可应用于可调滤光器中，有利地提供无模跳跃的调节。

25

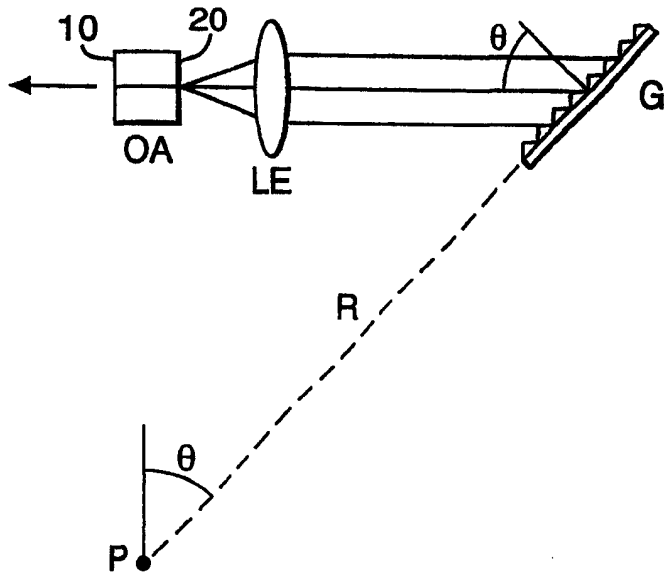


图 1

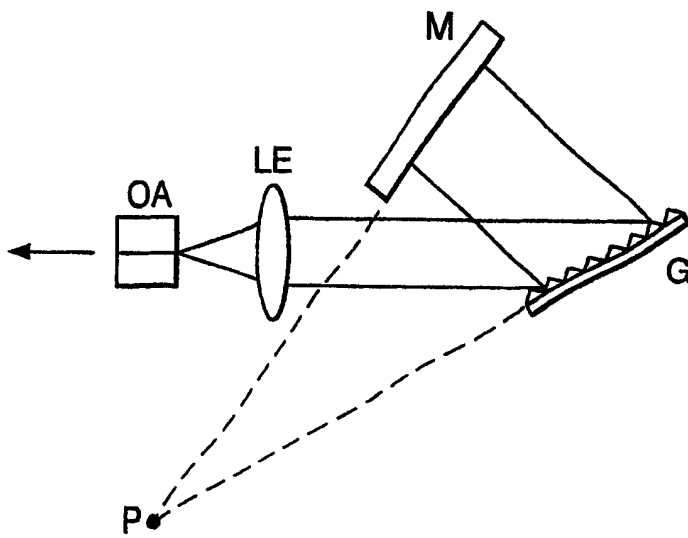


图 2

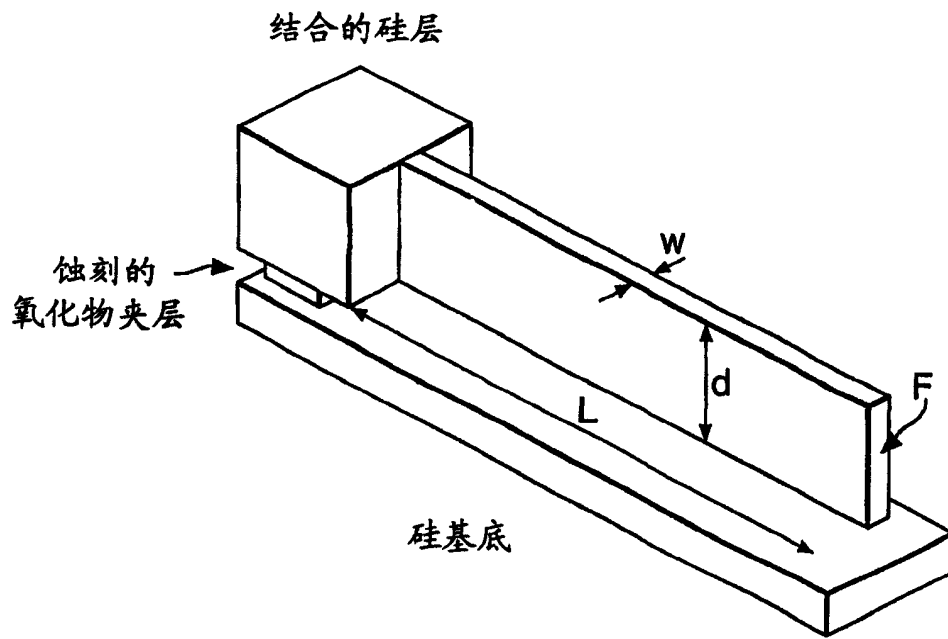


图 3

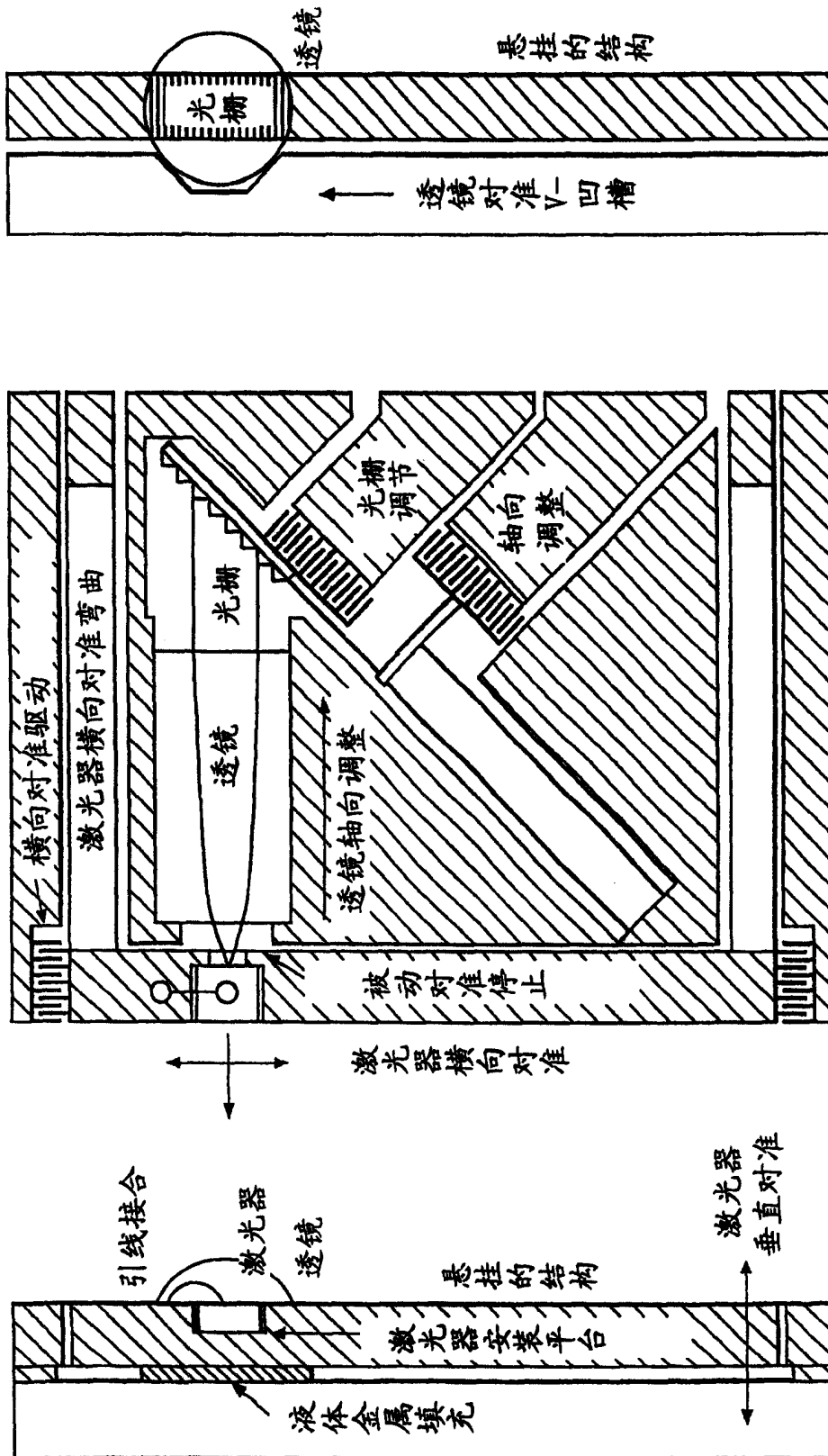


图 4

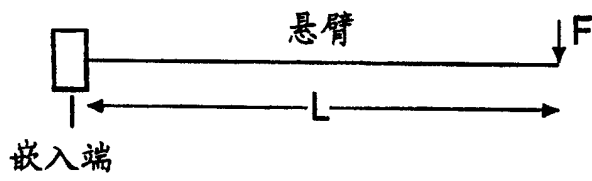


图 5 (a)

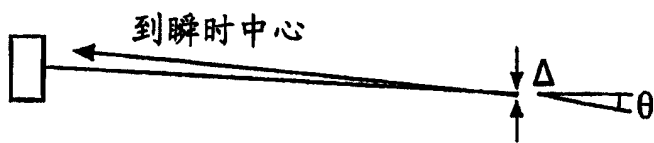


图 5 (b)

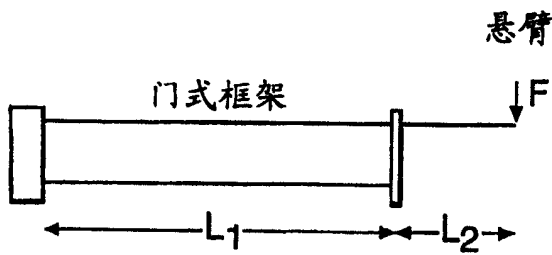


图 6 (a)

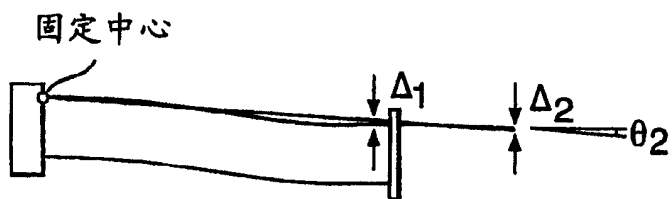


图 6 (b)

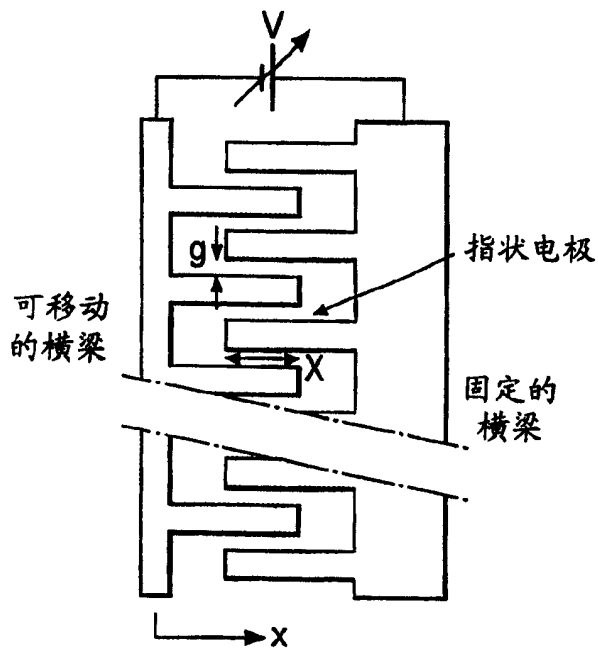


图 7

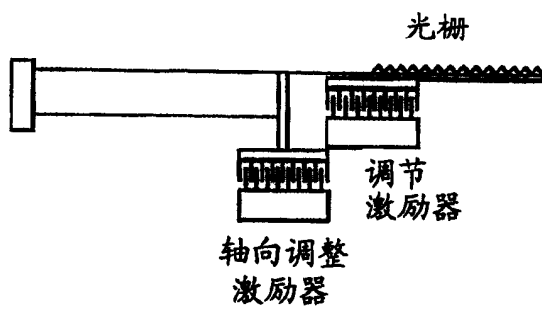


图 8

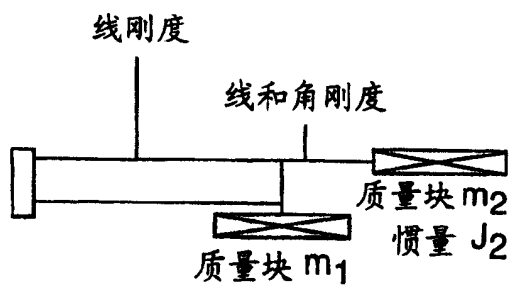


图 9