

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl⁷

G01B 9/02

G02B 26/00 H01S 5/32

H01L 21/20



[12] 发明专利说明书

[21] ZL 专利号 98813831.X

[45] 授权公告日 2004 年 12 月 8 日

[11] 授权公告号 CN 1179191C

[22] 申请日 1998. 12. 28 [21] 申请号 98813831.X

[30] 优先权

[32] 1997. 12. 29 [33] US [31] 60/068,931

[32] 1998. 6. 26 [33] US [31] 09/105,399

[86] 国际申请 PCT/US1998/027681 1998. 12. 28

[87] 国际公布 WO1999/034484 英 1999. 7. 8

[85] 进入国家阶段日期 2000. 8. 29

[71] 专利权人 核心科技公司

地址 美国麻萨诸塞州

[72] 发明人 P·塔耶巴蒂 M·阿兹米 王培栋

D·瓦克肖里

审查员 方 波

[74] 专利代理机构 中国专利代理(香港)有限公司

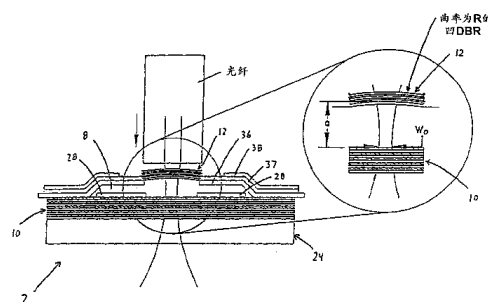
代理人 梁 永 张志醒

权利要求书 3 页 说明书 16 页 附图 9 页

[54] 发明名称 微机电调谐共焦垂直腔面发射激光器与法布里-珀罗滤光器

[57] 摘要

提供了一种方法可以精确地控制横向和纵向尺寸来制作微机电调谐垂直腔面发射激光器和微机电调谐法布里-珀罗滤光器。应变的反射介质膜堆用于多量子阱结构以对量子阱进行电子学的能带加工。也利用反射介质膜层中的适当应变而在一个反射介质膜堆中产生适当的弯曲,从而在垂直腔面发射激光器或滤光器的平面反射介质膜堆和曲面反射介质膜堆间形成共焦腔。也提供了微机电调谐垂直腔面发射激光器和滤光器结构,它包含一悬膜结构,这是由介质/金属膜或金属薄膜制成的,在其周围被金属支柱固定时,悬膜结构支持着腔调谐反射介质膜堆。空腔的精确长度和横向尺寸是使用微机械的聚酰亚胺或铝盘作牺牲层的微模铸法来实现的。而且,控制静电场使腔调谐反射介质膜堆平移来实现调谐。



1. 一种微机电调谐垂直腔面发射激光器, 其特征在于所述激光器包括:

(a) 具有上表面的衬底;

5 (b) 具有上表面的下反射镜, 所述下反射镜位于所述衬底的上表面;

(c) 具有上表面并且确定了多量子阱的增益材料层, 所述增益材料层位于所述下反射镜的上表面;

(d) 在所说的增益材料的上表面上淀积的一个电极;

10 (e) 一个具有上、下表面和圆周的膜, 所述膜的至少一部分在其下表面载有与淀积在所说的增益材料的上表面上的所说电极隔开的上调谐电极, 所说的膜确定了在所述增益材料的上表面上淀积的所说电极和所说上调谐电极之间的空腔的长度和横向尺寸;

(f) 一个厚的支撑结构, 所说的支撑结构与载有所说的上调谐电极的所说的膜的至少一部分周边的至少一部分连接, 所说的支撑结构使所说的膜得到稳定的支撑; 以及

(g) 在载有所述上调谐电极的所说的膜的所说至少一部分上中间定位的上反射镜, 所述上反射镜位于所述膜的所述上表面,

20 其中所说上反射镜响应在所述增益材料的上表面上淀积的所说的电极和所说上调谐电极之间施加的电场相对于所说的下反射镜移动。

2. 根据权利要求1的激光器, 其中所说的衬底包括半导体材料。

3. 根据权利要求1的激光器, 其中所说的多量子阱受到压应力。

4. 根据权利要求1的激光器, 其中所说的下反射镜和所说的上反射镜包括分布布拉格反射器。

25 5. 根据权利要求4的激光器, 其中所说的分布布拉格反射器包括交替淀积的四分之一波长厚的介质膜层。

6. 根据权利要求5的激光器, 其中所说的介质膜层是用 Si、Al₂O₃、SiO₂、TiO₂、MgO、Ta₂O₅、氧化锆或其任何组合组成的材料制作的。

7. 根据权利要求1的激光器, 其中所说的膜在所说的上反射镜和所说的支撑结构间有许多穿通的开孔。

30 8. 根据权利要求7的激光器, 其中所说的开孔为沿径向的狭缝。

9. 根据权利要求7的激光器, 其中所说的开孔为洞孔。

10. 根据权利要求7的激光器,其中所说的开孔为螺旋状狭缝。

11. 根据权利要求1的激光器,其中所说的支撑结构是由一环形圈构成的,它的材料选自氮化硅和钛钨这组材料。

5 12. 根据权利要求1的激光器,其中所说的膜是由 Si_3N_4 和TiW这组材料制作的。

13. 根据权利要求1的激光器,其中所说的下反射镜是平面的,而所说的上反射镜是曲面的,这样就在所说的反射镜堆间形成了稳定的共焦谐振腔。

10 14. 根据权利要求13的激光器,其中所说的稳定的共焦谐振腔具有明确限定的近高斯型结构。

15. 根据权利要求13的激光器,其中所说的上反射镜具有一定曲率半径,所说的曲率半径被优化以使得所说的腔的模式尺寸与光纤芯的尺寸相匹配。

15 16. 一种制作微机电调谐垂直腔面发射激光器的方法,其特征在于所述方法包括:

(a) 提供一个具有衬底的部件,在所说的衬底上有一个下反射镜,在所说的下反射镜上有一增益材料层;

(b) 在所说的增益材料上淀积一电极;

(c) 在所说的增益材料和电极上淀积预定厚度的牺牲材料层;

20 (d) 掩蔽腐蚀牺牲材料从而产生一中心结构,它的周边在所说的由增益材料和电极形成的结构上是向内倾斜的;

(e) 在所说的中心结构上淀积上调谐电极;

(f) 在由增益材料、中心结构和上调谐电极形成的结构上淀积一薄层第二种材料;

25 (g) 在所说的第二种材料层上淀积支撑材料的厚环圈,使得所说的环圈覆盖了所说的第二种材料层的倾斜的周边,并向所说的倾斜的周边内延伸至邻近和平行于所说中心结构的上表面,向所说的倾斜的周边外延伸至邻近和平行于所说的增益材料的上表面;

30 (h) 在邻近所说中心结构上表面的所说的第二种材料层上,在其圆心的部分与所说的环圈内边缘间掩蔽腐蚀开孔;

(i) 在所说的圆心的部分上选择淀积上反射镜;

(j) 通过所说的开孔用腐蚀技术选择除去所说的中心结构。

17. 根据权利要求 16 的方法, 其中所说的牺牲材料是在聚酰亚胺、铝和光致抗蚀剂这组材料中选择的。
18. 根据权利要求 16 的方法, 其中所说的中心结构为圆盘形。
19. 根据权利要求 16 的方法, 其中所说的中心结构为多边形。
- 5 20. 根据权利要求 16 的方法, 其中所说的第二种材料选自氮化硅和非铝金属组成的这组材料。
21. 根据权利要求 16 的方法, 其中所说的支撑材料选自氮化硅和一种金属组成的这组材料。
22. 根据权利要求 16 的方法, 其中所说的腐蚀技术包括干法腐蚀。
- 10 23. 根据权利要求 16 的方法, 其中所说的腐蚀技术包括湿法腐蚀。
24. 根据权利要求 16 的方法, 其中所说的上反射镜和下反射镜包括分布布拉格反射器。
25. 根据权利要求 16 的方法, 其中所说的上反射镜和下反射镜材料选自 Si、 Al_2O_3 、 SiO_2 、 TiO_2 、 MgO 、 Ta_2O_5 、氧化锆或其任何组合组成的这组材料。
- 15 26. 根据权利要求 16 的方法, 其中所说的厚环圈由 TiW 形成。
27. 根据权利要求 16 的方法, 其中所说的中心结构是由聚酰亚胺形成的, 所说的腐蚀是用氧等离子体来实现的。
28. 根据权利要求 16 的方法, 其中所说的中心结构包括铝, 所说的
- 20 的腐蚀是用 CF_4 等离子体来实现的。
29. 根据权利要求 16 的方法, 其中所说的下反射镜是平面的, 而在步骤 (j) 后, 所说的上反射镜是曲面的, 这样就在所说的反射镜间形成了稳定的共焦谐振腔。
30. 根据权利要求 29 的方法, 其中所说的稳定的共焦谐振腔具有
- 25 明确限定的近高斯型结构。
31. 根据权利要求 29 的方法, 其中所说的上反射镜的曲率是在上反射镜中引入应力梯度来控制的。
32. 根据权利要求 31 的方法, 其中所说的应力梯度是由控制淀积温度或淀积电压的变化来产生的。

微机电调谐共焦垂直腔面发射激光器与法布里-珀罗滤光器

本发明一般说来涉及半导体光电子器件，特别是波长可调的面发射半导体激光器和滤光器。

可调谐的垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 和滤光器近来已在技术上引起了很大的兴趣。这是由于这些器件不仅很有希望在光纤通讯中作波分复用 (WDM) 时增加带宽，而且也可用于光开关、路由器、高度密集的光谱干涉仪、光的发送-接收以及许多其他应用。

特别是 VCSEL 对于集成光电子回路是极有吸引力的。首先，它在单纵模下工作，具有圆形光斑，因而可与光纤有效地耦合。此外，它是紧凑的，可在晶片规模单片制作大的、密集阵列。

作为固定波长的光源，VCSEL 已证明了有限的应用和功能。

过去已作了一些努力来实现 VCSEL 波长的调谐，引入 (1) 折射率随温度的变化 (如参见, Berger, P.R., Dutta, N.K., Choquette, K.D., Hasnain, G., and Chand, N., "Peltier 冷却的单片 VCSEL (Monolithically Peltier-cooled vertical-cavity surface-emitting lasers)", Applied Physics letters, Vol.59, No.1, pp.117-119, 1991; 和 Chang-Hasnain, C.J., Harbison, J.P., Zah, C.E., Florez, L.T., and Andreadakis, N.C., "二电极 VCSEL 的连续波长调谐 (Continuous wavelength tuning of two-electrode vertical cavity surface emitting lasers)", Electron. Lett., Vol. 27, No.11, pp. 1002-1003, 1991); 或 (2) 折射率随载流子注入的变化 (如参见, Gmachl, C., Koch, A., Rosenberger, M., Gornik, E., Micovic, M., and Walker, J.F., "通过串联集成的内腔二极管进行双异质结 AlGaAs/GaAs VCSEL 的频率调谐 (Frequency tuning of a double-heterojunction AlGaAs/GaAs vertical-cavity surface-emitting laser by a serial integrated in-cavity modular diode)", Applied Physics letters, Vol.62, No.3, pp.219-221, 1993)。

这两种技术的调谐范围大约都为 10 nm; 然而，相对于带宽不足的 WDM 和密集的 WDM 应用所需的几十纳米调谐范围，这还是不够的。

与之成对照的是，法布里-珀罗腔长的改变已表明是一种无须改变

激光器增益区而实现 VCSEL 波长调谐的技术。在面发射器件中可这样来实现,即提供一个上反射器,它对下反射器施加一静电场。这种技术已在可调谐的法布里-珀罗器件中实现了,例如(1)滤光器(如参见, Larson, M.C., Pezeshki, B., and Harris, J.S., “GaAs 上带有可变形膜形成的上反射镜的垂直耦合腔微干涉仪 (Vertical coupled-cavity micro-interferometer on GaAs with deformable-membrane top mirror)”, IEEE Photonics Technology Letters, Vol.7, pp.382-384, 1995; 和 Tran, A.T.T.T., Lo, Y.H., Zhu, Z.H., Haronian, D., and Mozdy, E., “表面微加工的法布里-珀罗可调谐滤光器 (Surface Micromachined Fabry-Perot Tunable Filter)”, IEEE Photonics Technology Letters, Vol.8, No.3, pp.393-395, 1996); (2)发光二极管(如参见, Larson, M.C., and Harris, J.S., “调谐范围宽的谐振腔光发射 (Broadly-tunable resonant-cavity light emission)”, Applied Physics Letters, Vol.67, No.5, pp.590-592, 1996); 和 (3) VCSEL (如参见, Wu, M.S., Vail, E.E., Li, G.S., Yuen, W., and Chang-Hasnain, C.J., “可调谐微加工的 VCSEL (Tunable micromachined vertical-cavity surface emitting laser)”, Electronic Letters, Vol.31, No.4, pp. 1671-1672, 1995; 和 Larson, M.C., Massengale, A.R., and Harris, J.S., “具有 18nm 调谐波长范围的连续可调谐微加工的 VCSEL (Continuously tunable micromachined vertical-cavity surface emitting laser with 18 nm wavelength range)”, Electronic Letters, Vol.32, No.19, pp.330-332, 1996)。

在这类器件中,上反射器的偏离量取决于许多参数,如反射器支撑臂的长度、宽度、厚度和杨氏模量。虽然前述的反射器支撑臂的宽度、厚度和杨氏模量一般可十分精确地控制,但在现代制作这种器件所用的技术中对支撑臂准确长度的控制还是很有限的,这就使得器件与器件和批与批之间的性能有很大的改变。

本发明提供了实现可调谐法布里-珀罗器件所需的可重复的精确尺寸控制,这对于可调谐滤光器和 VCSEL 的商品化生产是必须的。

这项专利申请要求受益于 12/29/97 提交的序号为 60/068,931 的未决的美国预先临时专利申请:微机电调谐共焦垂直腔面发射激光器与法布里-珀罗滤光器,这里用之作为参考文献。

根据本发明的第一方面,提供了一种微机电调谐垂直腔面发射激光

器, 其特征在于所述激光器包括:

- (a) 具有上表面的衬底;
 - (b) 具有上表面的下反射镜, 所述下反射镜位于所述衬底的上表面;
 - 5 (c) 具有上表面并且确定了多量子阱的增益材料层, 所述增益材料层位于所述下反射镜的上表面;
 - (d) 在所说的增益材料的上表面上淀积的一个电极;
 - (e) 一个具有上、下表面和圆周的膜, 所述膜的至少一部分在其下表面载有与淀积在所说的增益材料的上表面上的所说电极隔开的上调谐电极, 所说的膜确定了在所述增益材料的上表面上淀积的所说电极和
 - 10 所说上调谐电极之间的空腔的长度和横向尺寸;
 - (f) 一个厚的支撑结构, 所说的支撑结构与载有所说的上调谐电极的所说的膜的至少一部分周边的至少一部分连接, 所说的支撑结构使所说的膜得到稳定的支撑; 以及
 - 15 (g) 在载有所述上调谐电极的所说的膜的所说至少一部分上中间定位的上反射镜, 所述上反射镜位于所述膜的所述上表面,
- 其中所说上反射镜响应在所述增益材料的上表面上淀积的所说的电极和所说上调谐电极之间施加的电场相对于所说的下反射镜移动。
- 根据本发明的第二方面, 提供了一种制作微机电调谐垂直腔面发射
- 20 激光器的方法, 其特征在于所述方法包括:
- (a) 提供一个具有衬底的部件, 在所说的衬底上有一个下反射镜, 在所说的下反射镜上有一增益材料层;
- (b) 在所说的增益材料上淀积一电极;
- (c) 在所说的增益材料和电极上淀积预定厚度的牺牲材料层;
- 25 (d) 掩蔽腐蚀牺牲材料从而产生一中心结构, 它的周边在所说的由增益材料和电极形成的结构上是向内倾斜的;
- (e) 在所说的中心结构上淀积上调谐电极;
- (f) 在由增益材料、中心结构和上调谐电极形成的结构上淀积一薄层第二种材料;
- 30 (g) 在所说的第二种材料层上淀积支撑材料的厚环圈, 使得所说的环圈覆盖了所说的第二种材料层的倾斜的周边, 并向所说的倾斜的周边内延伸至邻近和平行于所说中心结构的上表面, 向所说的倾斜的周边外

延伸至邻近和平行于所说的增益材料的上表面;

(h) 在邻近所说中心结构上表面的所说的第二种材料层上, 在其圆心的部分与所说的环圈内边缘间掩蔽腐蚀开孔;

(i) 在所说的圆心的部分上选择淀积上反射镜;

5 (j) 通过所说的开孔用腐蚀技术选择除去所说的中心结构。

本发明包括一种新的微机电 (MEM) 调谐共焦滤光器。

本发明也包括一种新的 MEM 调谐共焦垂直腔面发射激光器 (VCSEL)。

激光器最好利用在生长后控制量子阱中的应变的激射。

10 此外, 本发明也包括一种制作 VCSEL/滤光器的新技术, 它提供了精确的尺寸控制, 对于大量生产具有预期性能的可靠器件, 这是必须的。

特别是, 本发明提供了一种新技术, 即在晶体生长后对激光器有源区的晶格匹配薄层, 如在量子阱中, 引入适当的应变。这是通过在激光器有源区上淀积分布布拉格反射器 (DBR) 来实现的, 分布布拉格反射器是由仔细设计的应变多层介质膜构成的。小心地改变淀积的 DBR 膜中的应变, 可优化量子阱区的应变和增益性质。在 VCSEL 中, 当量子阱处于压应变下时, 激光器的微分增益增大, 阈值电流密度下降, 因而使 VCSEL 的性能得到显著改善。另一方面, 张应变对 VCSEL 的激射性能有不利的影
15 响。多层介质膜是用硅 (Si)、氧化铝 (Al_2O_3)、二氧化硅 (SiO_2)、氧化镁 (MgO)、 TiO_2 、 Ta_2O_5 、氧化锆或其任何组合组成的材料制作的。可用离子束辅助的电子束蒸发或离子束辅助的离子束溅射来淀积, 使淀积的膜中的应变可控。仔细控制离子束的电压和电流, 可使淀积的膜具有张应变或压应变, 应力的
20 大小可由几千帕 (KPa) 至几千兆帕 (GPa)。这样的多层介质膜有多种功能, 如可在量子阱中引入应变、为增益区提供光反馈、及为有源区有效地散热, 所有这些对于作出商品化的 VCSEL, 尤其是在 1300 nm 至 1500 nm 波段, 都是重要的。

本发明也包括另一种革新, 通过微机械加工来实现一种共焦腔 VCSEL, 它是由在一组平面 DBR 和一组曲面 DBR 间形成的可调谐腔来构成的。DBR 的曲率是通过在淀积的层中小心地引入适当大小的应变来实现的。由产生的共焦微腔精确地控制激光器的空间模式和模式
30

分散,从而(a)由增益区中激射畴的光限制产生空间单模,(b)控制 VCSEL 的发散角来优化产生的光与单模光纤的耦合。

本发明的制作技术对于上 DBR 结构和支撑结构都提供了极精确的实际尺寸控制,这对于实现器件与器件之间极其重复的性能是十分必要的。

本发明的另一方面是共焦微机电调谐法布里-珀罗结构。在前述的共焦 VCSEL 结构中去掉增益区,只留下光学腔,这个器件就起共焦法布里-珀罗滤光器的作用。短腔(如 0.2-10 微米)器件的共焦性质可使光有效地(1)由单模输入光纤耦合至器件,和()返回单模输出光纤。

共焦调谐滤光器和 VCSEL 器件分别在图 1 和图 2 中作了描绘。这些器件都在单纵模下工作,对于 VCSEL 结构是在增益区的整个带宽上(如 30-120 nm);对于滤光器是在 100 nm 的调谐范围中。

如图 1 所示,可调谐的法布里-珀罗滤光器是由下述部分构成的:
(i) 曲率为 R 的分布布拉格反射器(DBR),是在氮化硅(Si_3N_4)薄膜(或支撑物)或金属薄膜如钛-钨(TiW)上形成的高折射率差多层膜,薄膜支撑在其周围的金属柱上;(ii)选择腐蚀掉牺牲层形成的空腔;和(iii)淀积在衬底上与上 DBR 相对的下 DBR 介质层。

对于 VCSEL,由多量子阱构成的增益区插入图 2 所示的空腔中。VCSEL 可用光泵浦,或作成腔内电互连用于电流注入。

当然,可调谐滤光器和/或可调谐 VCSEL 使用平面结构的上 DBR 也是合适的,这也没有超出本发明的范畴。

下面列出本发明的一些技术突破。

应变优化的固定波长 VCSEL

在 VCSEL 中由于共振光学模与体积极小的增益区的相互作用,在 DBR 提供最大反馈和可能的最小热阻时,增益区必须提供最大的微分增益。

虽然使用压应变的多量子阱可能提供最大的增益,但能够生长的不产生晶格缺陷的最大应变量子阱的数目是有限的。

解决这个问题的一個方法是生长应变补偿多量子阱。然而,实际上这是困难和昂贵的。虽然 GaAs/AlGaAs 基的 VCSEL 已成熟了,但目前对于长波长(如 1300 nm 和 1500 nm)激光器优选的是

InP/InGaAsP 系材料, 对这个材料系还需作很大的改进。

由于 InP 和 InGaAsP 的最大折射率差只有 0.2, 需要大数目的 $1/4$ 波长膜堆才能提供足够的反馈。而这就在器件中引起很大的串联电阻损失和无法接受的热瓶颈。此外, 低折射率差也使反射镜的带宽变窄, 这对于面镜厚度的精度也是个制约。

此处所介绍的器件可由 InGaAsP/InGaAs 多量子阱 (MQW)、介质膜的上 DBR、和在 MQW 与衬底间的介质膜 DBR 构成。例如参见图 5, 这里示出了一个固定波长的 VCSEL。正如所希望的, 此固定波长的 VCSEL 可具有弯曲的上 DBR。两个 DBR 都是用真空淀积技术制作的。

正如下面综述的, 本发明提供了对前述的所有问题的解决办法, 同时连带着大大降低了成本和提高了产量。

1. 淀积的 DBR 可从外部改变 MQW 量子阱区的应变, 从而修改增益系数、阈值电流和斜率效率。控制淀积的 DBR 的应变和量子阱区的应变, 可优化 VCSEL 的激光性质。在晶体生长后修改量子阱中的应变就减轻了设计费用的制约和晶体外延生长 (MBE 或 MOCVD) 中使用应变补偿技术的困难。

2. 在外延生长单片 VCSEL 时, 片子各部分厚度的不同会引起激光波长的变化, 导致低产量。由于 Si 和 Al_2O_3 的折射率差较大 (约 2.8), 只要四对 DBR 就可在大的带宽 (如 500 nm) 上实现 99.9% 以上的反射率。所以用这样的 DBR 形成的法布里-珀罗腔可以产生具有足够反馈的高 Q 值腔。因为这些反射镜都是宽带的, 反射镜的补缺可以容易地跨越增益谱 100 nm 的范围。整个晶片上有源层和/或衬垫层厚度的任何变化都可在最终淀积 DBR 镜之前, 通过淀积介质膜的相位补偿层来加以补偿。这就可在晶片的大部分获得所需的发射波长。DBR 镜的高反射率也有助于降低阈值条件。

3. 由例如 Si 和 Al_2O_3 或 MgO 材料形成的介质膜反射镜具有很高的热导率, 从而为有源区提供了有效的散热。此外, 只需要几对 DBR; 因此, 在本发明中到达热沉的路程要比传统的半导体 DBR 短, 使得散热更加有效。

波长可调的 VCSEL

按照本发明制作新的波长可调的 VCSEL 的步骤示意图示于图 4。

器件是由高折射率差的介质膜对如 Si/Al₂O₃、Si/SiO₂、Si/MgO、或 TiO₂/SiO₂ 构成的下 DBR 和选择淀积的上 DBR、空腔以及嵌在由两个 DBR 形成的法布里-珀罗腔中的有源区构成的。

5 本发明也提供了混合型反射镜系统，如外延生长的下 DBR 和淀积的上 DBR。

上 DBR 座于由 Si₃N₄ 或金属 (TiW) 制成的薄支撑膜或多个支持物上，后者由其周围的厚金属层支撑着 (见图 6A-6C)。这就形成了一种蹦床型结构。对于圆形支撑膜，在 Si₃N₄ 或金属膜 (TiW) 中使用沿径向延伸的开孔，以在放开上 DBR 时选择除去下面的牺牲层，这在下面还要作进一步的讨论。

在支撑膜与下 DBR 间施加适当的电压，蹦床结构以及上 DBR 可向着 DBR 或离开下 DBR 作平移运动，从而调节激光器的发射。由于 DBR 都是宽带的，故可在激光器增益谱的整个带宽上进行调节，通常约为 60 nm。

15 本发明的一个重要特点是，新的制作工艺对蹦床结构的横向尺寸和空腔长度提供了精确的控制，这两个尺寸对于一致地制作实质上相同的器件是重要的。在本发明中这是可以作到的，使用牺牲层作为硬模以确定蹦床结构的横向尺寸和空腔的纵向尺寸。这样就保证了在选择除去牺牲层时有效地消除了因尺寸不可控而可能引起的种种不利影响。

20 此外，新器件小而紧凑 (约 500 μm × 500 μm)，因而可以制作列阵并与光纤耦合。

波长可调的滤光器

25 如图 3 所示，从上述的 VCSEL 结构省去量子阱增益区就得到了可调谐法布里-珀罗滤光器。

高折射率差 DBR 堆提供了宽的带宽 (如 500 nm)；因此对于一个波长的腔，法布里-珀罗谐振可在 DBR 的整个带宽上进行调谐。由于 DBR 的反射率很高，可得到极窄 (亚埃) 的线宽。

30 这种器件的调谐速度为微秒量级，因而成为具有极高光谱分辨率的最快的可调谐滤光器之一。这种器件也易于用标准的半导体制作技术进行批量生产，从而可努力成为消费产品。

共焦腔可调谐 VCSEL/滤光器

MEM 可调谐共焦腔法布里-珀罗滤光器是一种极其创新的谐振腔设计, 它是由第一组平面 DBR 和第二组具有一定曲率半径的 DBR 间的空腔构成的。两组 DBR 构成了共焦腔, 如图 1 所示。

5 这项设计的一个革新是, 两个反射镜有一个是弯曲的就产生了一个微谐振腔, 它可支持哈密特-高斯模式。如下面所述, 在上反射镜引入适当的曲率就可简化光在器件与标准的单模光纤之间的耦合, 免去了否则必须使用的透镜。

众所周知, Rayleigh 范围 (Rayleigh range) z_0 定义了波前最为弯曲的距离, 它与反射镜曲率 R 和腔长 d 的关系如下式: $z_0 = [(R-d)/d]^{1/2}$ (方程 1) 例如, 一谐振腔腔长为 1.5 微米, 弯曲的 DBR 曲率半径为 1.5 mm, 则得到 z_0 值为 150 微米, 按照关系式 $W_0 = (z_0 \lambda / \pi)^{1/2}$ (方程 2) 得到在波长 λ 为 1.5 微米时基模的束腰 W_0 为 8.5 微米。由于在位置 z 处的模式尺寸值由下式给出 $W(z) = W_0 [1 + (z/z_0)^2]^{1/2}$ (方程 3), 而 z_0 约一百倍于腔长, 故在腔长范围内模式尺寸实际上是相同的。因此来自输入侧 9 微米芯的单模光纤的光可激发基模, 传输的单模光束可有效地与单模光纤耦合。像这样用弯曲的反射镜, 模式束斑的尺寸可调解得与单模光纤匹配, 而无须透镜。然而折衷是在这种情况下光纤必须相对于腔的光轴定位在 0.5 微米以内 (在横向上), 以免激发不希望的高阶哈密特-高斯模式。为了改善耦合光纤的对准误差, 可与适当减小曲率的反射镜一起使用模式尺寸为 20-50 微米热胀芯纤。反射镜的曲率 R 可按上述的方程 (1) - (3) 式来调节使与热胀芯纤的模式尺寸 W_0 相匹配。由于高斯模式尺寸较大, 光纤的横向定位是不严格的。

25 这个设计显然不同于 1989 年 4 月 25 日授予 Stephen R. Mallinson 的美国专利 4,825,262 号所揭示的单晶平行反射镜谐振腔的设计。

制作本发明的新型 MEM 可调谐共焦腔滤光器的工艺步骤与用于制作本发明的新型平腔可调谐滤光器/VCSEL 的工艺相似。其主要的差别在于淀积弯曲的 DBR。控制淀积的多层 DBR 介质膜堆中的应变大小和类型, 仔细设计氮化硅薄膜的支撑以实现所希望的镜面曲率。30 巧妙地选择淀积参数, 如硅烷 (SiH_4) 与氨气 (NH_3) 的混合比、所用气体的总压强及所用射频功率的大小, 可在介质膜堆中引入不同大小和类型 (张应变或压应变) 的应变。在张应变的氮化硅薄膜与压应

变的介质膜堆间产生的应力梯度引起凹的 DBR. 逐渐改变温度和/或淀积电压在反射镜层内引入应力梯度可实现对上 DBR 曲率的进一步控制。在反射镜层内引入所希望的应力梯度的替代办法是使用二次离子源, 通过改变电流或电压来选择修改反射镜每一层中的应力。在一个例子中, 用 PECVD 法淀积具有 100 MPa 张应力的 0.5 微米厚的氮化硅层, 而上反射镜则在 100℃ 下用 700V 的离子束溅射来淀积上 DBR. 在除去牺牲层后所得的反射镜曲率约 1 mm, 而且在淀积反射镜期间衬底温度从室温改变到 120℃ 在反射镜层中进一步引起应力梯度, 而使反射镜的曲率减小到 0.75 mm.

与共焦腔可调谐滤光器 (图 1) 类似, 用共焦谐振腔方案的革新微腔设计在 MEM 可调谐 VCSEL 中也提供了稳定的空间基模。特别是对于可调谐 VCSEL 结构, 增益区处于一组平的 DBR 和一组可变曲率的 DBR 之间确定的法布里-珀罗腔内, 如图 2 所示。基模激励增益区产生圆形的空间单模受激发射。结果, 自然形成横向的光学模式限制而不必形成横向波导。这就得到了高效的 VCSEL.

共焦腔方案同样可用于固定波长的 VCSEL, 如图 5 所示。如前面所解释的, 在固定波长的 VCSEL 中空间基模提供了稳定的横向光学限制, 从而导致单模受激发射。

竞争的技术

近来已有波长小于 1.0 微米的固定波长 VCSEL 商品。

但目前可调谐 VCSEL 或 MEM 可调谐法布里-珀罗滤光器还没有商品。

唯一的可调谐滤光器商品或是依赖于带有复杂的反馈系统的压电驱动器 (Queensgate Instruments, England), 或是使用夹在两个交叉的偏振器间的双折射材料 (Cambridge Research Instruments, Massachusetts, 使用液晶)。

压电可调谐滤光器具有 0.1 nm 的分辨率, 50 nm 的调谐范围, 但也要求高工作电压。

液晶基的滤光器可有较好的分辨率, 但效率低, 如低至 99.0%。

上述两个系统的制作是劳动密集型的, 因而成本高。例如 Queensgate Instruments 的顶级型 (top-of-the-line) 价格在 10,000 美元以上。这样高的成本以及此系统的庞大, 使之对多数应用都是不现

实的。尤其是在一些应用中，例如将来的通讯网络，将为用户提供声音、图象、数据及与上游的通讯，所有这些都通过一根光缆，需用便宜的、紧凑的滤光器和激光源。相信在宽范围内光缆的可行性取决于使用紧凑、便宜的器件，例如本发明的器件。

5 已做过一些努力来实现这一目标。但只限于小规模的研究，报导了可调谐 LED、VCSEL 和 MEM 可调谐法布里-珀罗滤光器。

例如，Larson 等发表了一些结果：(1) GaAs 基可调谐滤光器（如见 Larson, M.C., Pezeshki, B., and Harris, J.S., “Vertical coupled-cavity microinterferometer on GaAs with deformable-membrane top mirror” , IEEE Photonics Technology Letters, Vol.7, pp.382-384, 10 1995）; (2) LED（如见 Larson, M.C. and Harris, J.S., “Broadly-tunable resonant-cavity light emission” , Applied Physics Letters, Vol.67, No.5, pp.590-592, 1995）; (3) VCSEL（如见 Larson, M.C., Massengale, A.R., and Harris, J.S., “Continuously tunable micromachined vertical-cavity surface emitting laser with 18 nm wavelength range” , 15 Electronic Letters, Vol.32, No.19, pp.330-332, 1996）。

这些结果表明，Larson 等用 GaAs/AlAs 作下 DBR，镀金的氮化硅膜作上反射镜。在前述的 Larson 等的所有器件中，上反射镜是在用盐酸湿法选择腐蚀掉下面的 GaAlAs 牺牲层后才被放开的。由于这种技术未对底割进行控制，上反射镜支撑结构的长度在器件与器件间是不确定的。而且，由于 Larson 等的器件的上反射镜带宽和反射率都低于 20 本发明的介质膜 DBR，所以 Larson 等的器件的调谐范围是有限的，其谱线宽度也比本发明提供的器件要宽。

类似地，Tran 等已表明：(1) 可调谐法布里-珀罗滤光器（如见 25 Tran, A.T.T.T., Lo, Y.H., Zhu, Z.H., Haronian, D., and Mozdy, E., “Surface Micromachined Fabry-Perot Tunable Filter” , IEEE Photonics Technology Letters, Vol.8, No.3, pp.393-395, 1996）; (2) LED（如见 Christenson, G.L., Tran, A.T.T., Zhu, Z.H., Lo, Y.H., Hong, M., Mannaerts, J.P., and Bhat, R., “Long-wavelength Resonant 30 Vertical-Cavity LED/Photodetector with a 75-nm Tuning Range” , IEEE Photonics Technology Letters, Vol.9, No.6, pp.725-727, 1997）; 前述的滤光器和 LED 使用聚酰亚胺作为牺牲层。这个方法同样没有精

确控制制造尺寸。此外，对于制作牢固的器件，聚酰亚胺不是稳定的材料，因为老化会使腔长的稳定性变坏。

Vail 等也报导了可调谐滤光器(如见 Vail, E.C., Wu, M.S., Li, G.S., Eng, L., and Chang-Hasnain, C.J., “GaAs micromachined widely tunable Fabry-Perot filters”, Electronic Letters, Vol.31, pp.228-229, 1995) 和 VCSEL (如见 Vail, E.C., Li, G.S., Yuen, W., and Chang-Hasnain, C.J., “High performance micromechanical tunable vertical-cavity surface-emitting lasers”, Electronic Letters, Vol.32, No.20, pp.1888-1889, 1996)。Vail 等的器件用 GaAs/AlAs 作上下 DBR，带有 GaAs 牺牲层使上 DBR 放开。虽然 Vail 等用干法腐蚀技术选择除去 GaAs 牺牲层，但还是没有作到精确控制上反射镜的长度。

本发明在以下各方面与前述器件是不同的：

1. 本发明提供了精确的方法，由淀积的支撑柱来确定上反射镜支撑的横向尺寸和腔长；
2. 本发明通过控制淀积的 DBR 中的应变来优化对 VCSEL 增益性质的控制；
3. VCSEL 结构的共焦设计可使空间单模、低阈值的光有效地耦合至单模光纤。

本发明的描述要考虑与附图结合，同样的单元都用同样的标号。

图 1 是侧视的截面图，示意和概略地说明了微机电调谐共焦腔滤光器；

图 2 是侧视的截面图，示意和概略地说明了共焦腔可调谐垂直腔面发射激光器；

图 3 (即图 3A-3F) 包括一系列侧视截面略图，示意地说明了微机电调谐滤光器的制作过程；

图 4 (即图 4A-4G) 包括一系列侧视截面略图，示意地说明了微机电调谐垂直腔面发射激光器的制作程序；

图 5 是侧视的截面图，示意和概略地说明了具有共焦腔的固定波长垂直腔面发射激光器；

图 6A-6C 表示三种不同形式的可调谐滤光器/VCSEL 器件的俯视图，图 6A 表示薄膜型结构，图 6B 表示有四个臂的器件结构，图 6C

表示有三个臂的器件结构;

图 7 为一示意图, 说明了在多量子阱结构中由应变的介质膜分布布拉格反射器引入的压应变。

- 5 MEM 可调谐滤光器 2 和 MEM 可调谐 VCSEL 4 分别示于图 3 和图 4。

现在参看图 4, 可调谐 VCSEL 4 包括增益区 6, 通常由多量子阱构成, 置于机械调谐的高 Q 值法布里-珀罗腔 8 中, 法布里-珀罗腔是由一对分隔开的 DBR 10 和 12 形成的。在本发明中可用施加静电场使
10 一个 DBR 12 向另一个 DBR 10 移动。这就改变了法布里-珀罗腔长, 并调节发射波长。VCSEL 可由光激励, 也可由内腔电互连实现电荷注入。

而且, 同一基本结构, 没有增益区, 就起着可调谐滤光器的作用 (见图 3)。

- 15 如果需要, 上 DBR 12 可作成曲面结构, 从而形成共焦滤光器 (图 1) 或共焦 VCSEL (见图 2)。

在半导体激光器受激发射时量子阱提供了必要的增益。对于 VCSEL, 微腔中谐振的光学模与体积极小的增益区相互作用。结果在相互作用区内由量子阱提供了最大增益。实现这点的最好方法是生长
20 压应变下的量子阱。量子阱中的压应变导致能带结构的各向异性, 引起简并的重空穴带和轻空穴带分裂, 使重空穴带由轻空穴带上移几十 meV (对于 1% 的压应变)。虽然各向异性导致重空穴有效质量减小, 使得接近能带中心处发生跃迁的态密度减少, 简并的分裂则导致导带与所希望的重空穴带间粒子数优先反转。由于这两个效应, 阈值电流
25 密度减小, 对温度的敏感得到改善, 微分效率增高。对于 1300 nm 和 1500 nm 的波长尤其希望使用压应变的多量子阱, 因为在这样的长波长下俄歇复合和价带内的吸收引起本征损耗。因此不能过分强调 VCSEL 中增益最大化的重要性。

应变的多量子阱不易生长, 也比无应变的量子阱昂贵。

- 30 在本发明中提供了一种方法, 可在晶体生长后对任何半导体材料的无应变量子阱引入所希望的应变。这个工艺过程要求在淀积介质膜时控制应变量。对于 VCSEL, 已发现最好淀积一个具有小心选择的应

变的 DBR 堆栈。

例如,参见图 7,为了在量子阱中引入压应变,具有张应变的 DBR 堆 10 淀积在 MQW 结构上(例如 InGaAsP/InGaAs MQW),接着将片子倒装键合到一临时衬底 20 如硅上。然后用外延剥离工艺选择除去临时衬底 20,再淀积第二组 DBR。

用前述工艺引入 MQW 的应变可由下式来近似:

$$\Delta a/a = -2Pl_2/c_{11}l_1$$

式中 P 为一个 DBR 层中的压应力; c_{11} 为 MQW 层的平均硬度系数(杨氏模量); l_2 为 MQW 层的厚度; l_1 为介质膜 DBR 的厚度。由此式,显然在 DBR 中几个兆帕的张应力将在原来晶格匹配的 MQW 中引入约 1% 的压应变。如以前所讨论的,控制淀积 DBR 的离子束能量可控制引入 DBR 的应变。典型地以这种方式可在 DBR 对 Si/Al₂O₃、Si/SiO₂、Si/MgO、TiO₂/SiO₂ 中引入几千至几千兆帕的应力(张应力或压应力)。

15 器件制作

可调谐 VCSEL 或滤光器结构的三个示例的示意俯视图如图 6A-6C 所示。

在图 3 和图 4 中分别示出了制作微机电可调谐滤光器和 VCSEL 的步骤的示意截面图。虽然这两种结构(即可调谐滤光器和 VCSEL)在形式上类似,但制作这两种器件所用的工艺步骤还是稍有不同的。下面将详细讨论这两种器件每一个的制作步骤。

MEM 可调谐 VCSEL/滤光器制作步骤

1. 在制作可调谐 VCSEL 时,DBR 10 淀积在 MQW 结构 6 的上面。淀积有 DBR 10 的 MQW 结构 6 加到一适当的临时衬底上,如硅、GaAs 或蓝宝石。这是用某种方法如倒装键合、熔焊或范德瓦尔斯焊来完成的(见图 4A)。另一方面,在制作可调谐滤光器时,DBR 10 直接淀积到所选的主衬底 24 上(图 3A)。

2. 在制作可调谐 VCSEL 时,图 4A 的结构被装到选择的主衬底 24 上(图 4B)。然后用回蚀技术选择除去 MQW 结构 6 寄生的临时衬底 20(图 4B)。在这个方法中用高选择比的腐蚀剂来腐蚀临时衬底 20,并在设置的止蚀层 26 处停止腐蚀。已发现用 1:1 混合的浓盐酸与次氯酸在 InGaAs 上择优腐蚀 InP。对于 GaAs 衬底,柠檬酸与过氧

化氢混合物可用来在 AlAs 上选择除去临时衬底 20。另一种对 GaAs 衬底有用的方法是在临时衬底 20 及其上淀积的 MQW 结构 6 间生长一薄 AlAs 层。然后 AlAs 可被选择腐蚀掉。这就可以使 MQW 结构从 GaAs 衬底上剥离。

5 3. 这时, 对于可调谐滤光器 2 (图 3B), 一个调谐电极 28 淀积在 DBR 层 10 上, 对于可调谐 VCSEL 4 (图 4C) 则淀积在 MQW 结构 6 上。如果合适, 可在电极 28 的局部或全部淀积绝缘层 29 (即, 电学隔离层)。如见图 4C (虚线部分), 图中在电极 28 上用虚线示出了绝缘层 29。

10 4. 在衬底 24 上淀积了 DBR 层 10 (对于滤光器), 或 MQW 结构 6 和 DBR 层 10 (对于 VCSEL) 以后, 预定厚度的聚酰亚胺或铝的牺牲材料 30, 或某种其他牺牲材料层被淀积在 MQW 结构 6 上 (对于可调谐 VCSEL, 图 4D) 和 DBR 层 10 上 (对于可调谐滤光器, 图 3C)。牺牲材料 30 的聚酰亚胺或铝结构在下面详述的方法中起牺牲层的作用。精确控制牺牲材料 30 的聚酰亚胺或铝结构的厚度和横向尺寸是十分重要的。这是因为这个淀积层的厚度将决定可调谐法布里-珀罗器件中最终的空腔长度, 因而也是器件未偏置时的谐振波长。另一方面, 淀积的牺牲材料 30 的聚酰亚胺或铝的横向尺寸也决定了器件的电压响应和谐振频率。

20 5. 此后, 使用腐蚀掩模在牺牲材料 30 的聚酰亚胺或铝淀积层上刻图形, 留下圆盘形的淀积层, 在其腐蚀周边形成向外倾斜的边 32 (图 3C 和 4D)。腐蚀的牺牲材料 30 的淀积层的尺寸和形状是仔细设计和控制的, 因为其外表面将决定上 DBR 支撑的长度。聚酰亚胺或铝盘的作用如同一个“微型模具”, 它精确地控制着可调谐 VCSEL 或滤光器的横向尺寸和形状。这种对可调谐 VCSEL 或滤光器横向尺寸的精确控制不是与制作现有的 MEM 可调谐 VCSEL 或滤光器所用的已有技术并行的。前面间接提到, 在后面的工艺中牺牲材料 30 的聚酰亚胺或铝层将用适当的干法腐蚀技术选择除去。

30 6. 在用 Si_3N_4 膜作上反射镜支撑时, 一金属薄层 36 (图 3D 和 4E) 先淀积在露出的聚酰亚胺或铝淀积层的上表面, 形成上调谐电极。

7. 此后, 或是氮化硅薄层, 或是非铝的另一种金属薄层, 如钛-钨 (TiW), 一般表示为 37, 被淀积在整个结构上, 即, 在牺牲材料

30 的聚酰亚胺或铝牺牲层和其余结构上 (图 3D 和 4E)。在这种情况下, 层 37 是不透明的, 其中心部分被除去 (见图 3D 和 3E, 及图 4E)。

8. 然后在器件周边, 在器件的膜或系链能与下 DBR 接触处选择淀积厚的金属 (如 Al 或 TiW) 或硬的介质层 38 (如氮化硅) 来形成边框 (膜型器件, 如图 6A 所示), 或淀积支撑片而形成支撑臂 (系链型器件, 如图 6B 或 6C)。层 38 的环面或支撑片的宽度是这样选择的, 使得厚金属框由下 DBR 10 的上面扩展到聚酰亚胺或铝牺牲层 30 的斜边 32, 直到牺牲材料 30 的牺牲层圆盘的上部, 如图 3E 和 4F 所示。这是个重要的革新, 因为在除去了下面的聚酰亚胺或铝的牺牲材料 30 的牺牲层后, 层 38 的厚金属结构为氮化硅或 TiW 膜 37 提供了坚固的支撑。

9. 使用腐蚀掩模, 通过透明的金属和氮化硅或薄 (TiW) 膜 37 一直腐蚀到下面的牺牲材料 30 的牺牲层圆盘, 从而形成了沿径向发散的开孔 40 (图 6A)。这些开孔为腐蚀剂提供了通路来选择除去下面的牺牲材料 30 的牺牲层圆盘。

10. 只在氮化硅/金属膜或 TiW 膜 37 的中心 42 选择淀积直径为几十微米的圆形上 DBR 堆 12 (图 3E, 4G 和 6A-6C)。这样的选择淀积提供了质量极佳的 DBR, 这就避免了必须腐蚀上 DBR 的困难和昂贵的工序。至此, 假定在完成的器件中上 DBR 堆 12 为弯曲的结构 (例如, 如图 1 和 2 所示), 适当大小和类型的应变在淀积上 DBR 堆时以前面所讨论的方式被引入上 DBR 堆 12 中。

11. 最后, 用氧等离子体选择除去聚酰亚胺层 30 (图 3F 和 4G)。这就使得氮化硅/金属膜 37 与上 DBR 12 一起被放开了。至此, 形成的上 DBR 堆 12 具有适当大小和类型的应变, 从而形成弯曲的 DBR 堆, 放开了氮化硅/金属膜 37 就可以假定上 DBR 堆具有所希望的弯曲结构。在选择除去铝牺牲层 30 时使用 CF_4 等离子体。因为不用湿法化学腐蚀就没有因表面张力而使放开的氮化硅/金属膜或 TiW 膜 37 崩溃的危险。

这就完成了 MEM 可调谐滤光器/VCSEL 的制作, VCSEL 的激励可用光泵浦, 可使用另一个激励激光器, 其波长在所用的 MQW 的增益谱范围内应是被高度吸收的。本发明所讨论的实现波长调谐的技术也可容易地用于电流注入 MEM 可调谐 VCSEL。在这种情况下, 在可

调谐 VCSEL 制作步骤的第一步中，淀积第一个反射膜堆之后，必须在 MQW 结构的 p-i-n 结上制作腔内电互连。

前面对本发明的优选示例已用附图作了介绍，且没有限制。对于前面详细叙述的工艺技术将会做出各种修改、变更、改变、改编和类
5 似的行为。因此，本发明应被了解为只受权利要求条款的限制。

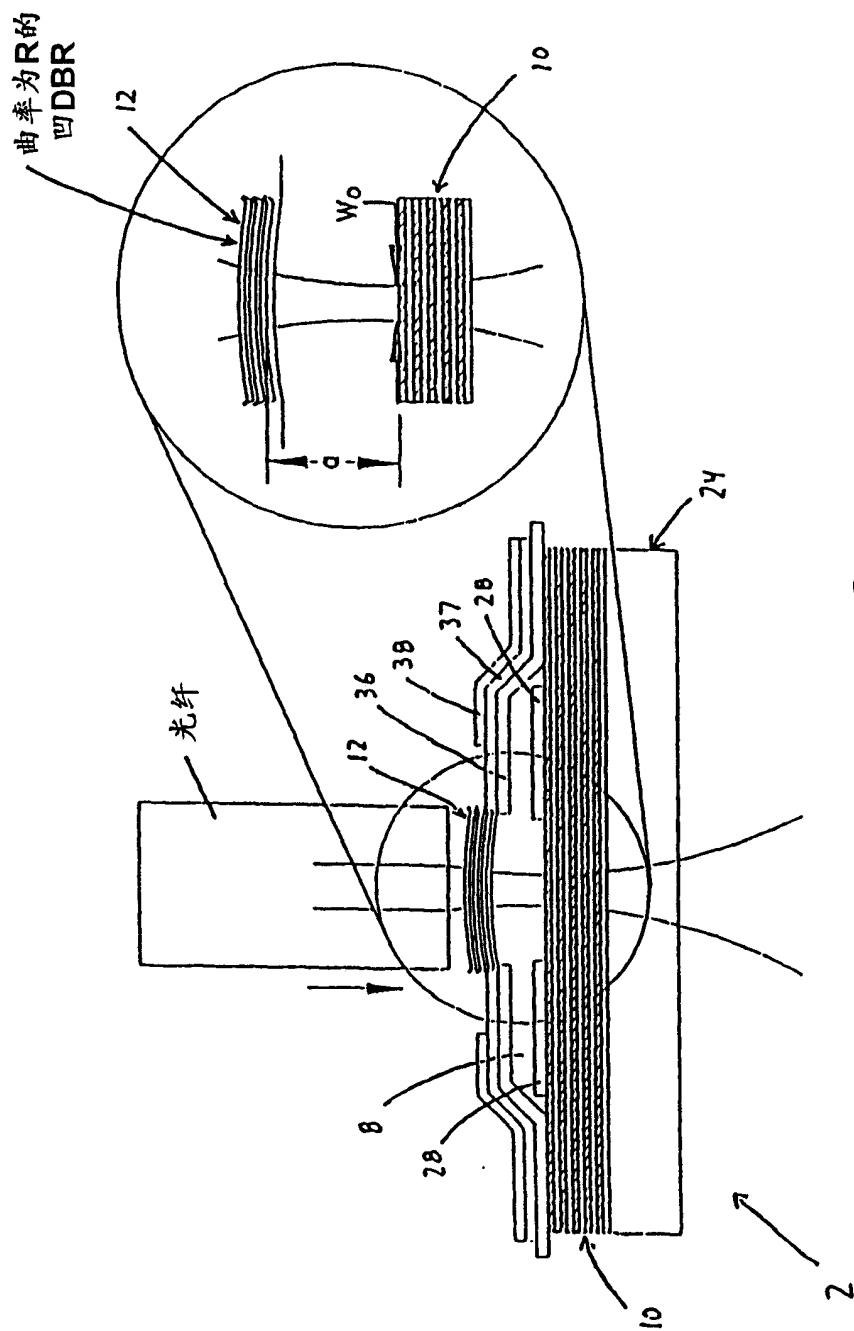


图 1 MEM 可调谐共焦腔滤光器

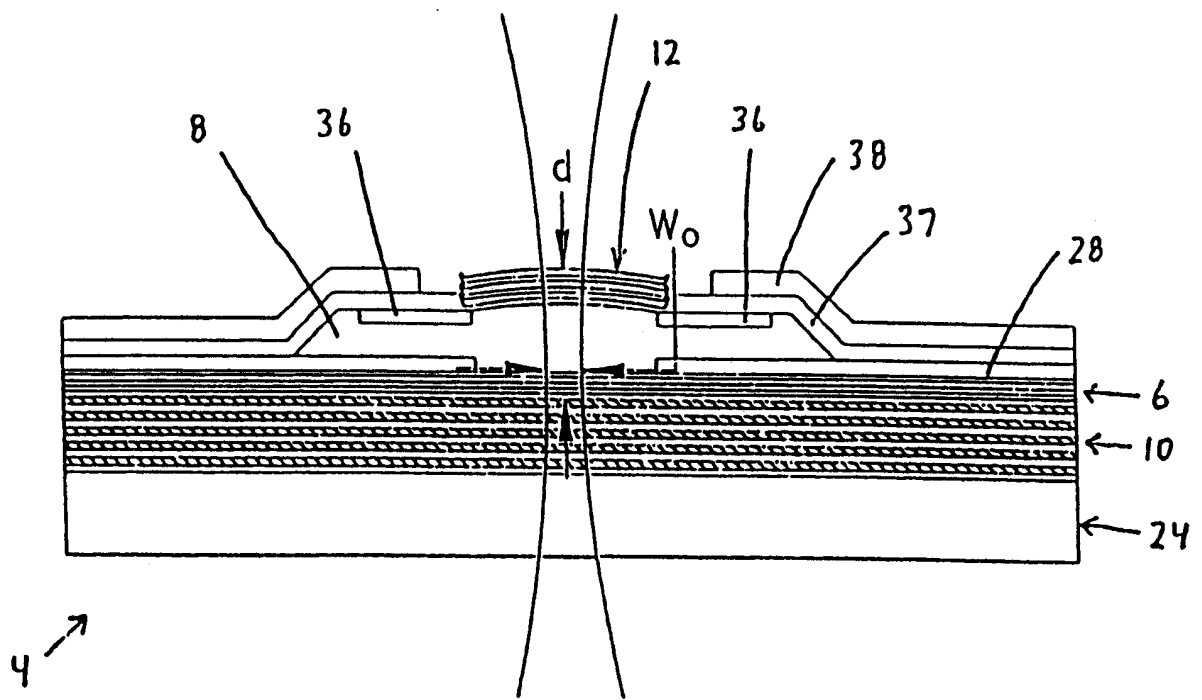


图 2

可调谐共焦腔 VCSEL

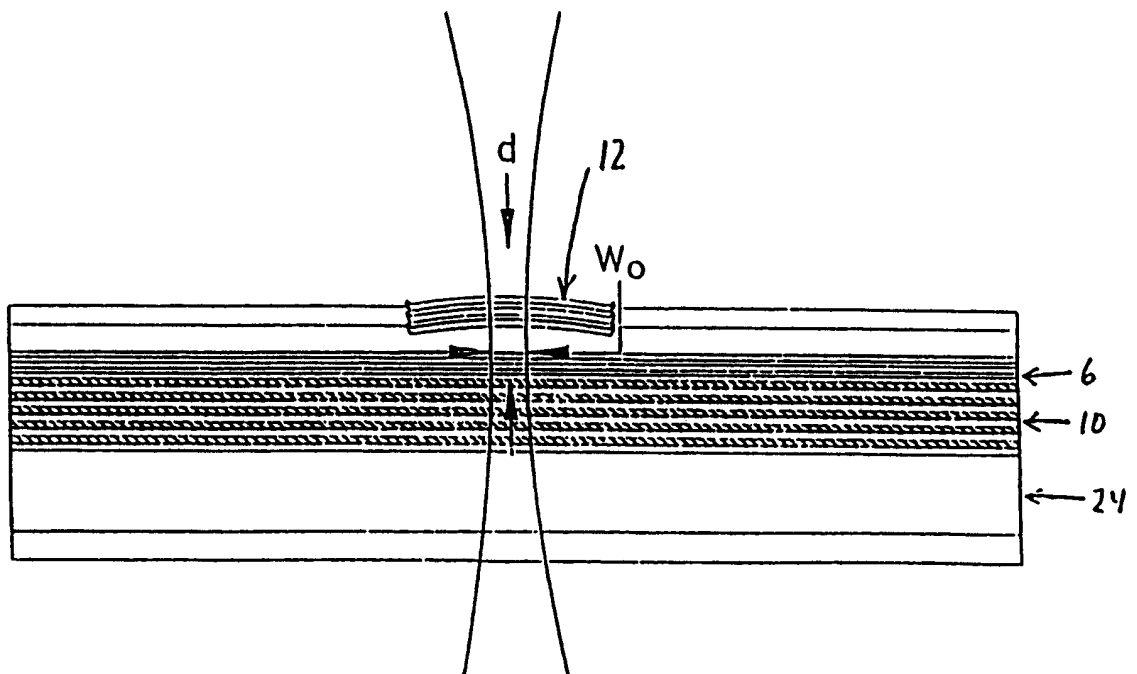


图 5

固定波长共焦腔 VCSEL

图3表示制作MEM可调谐
滤光器的步骤

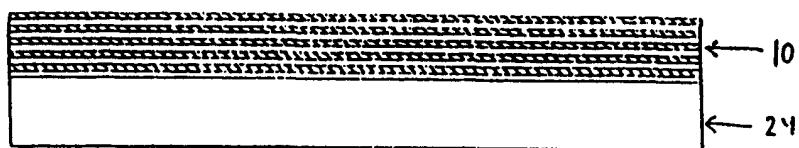


图 3A

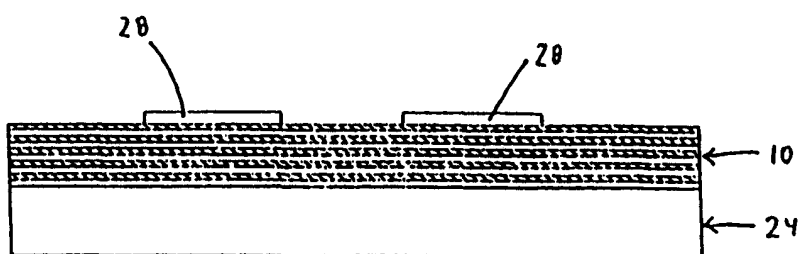


图 3B

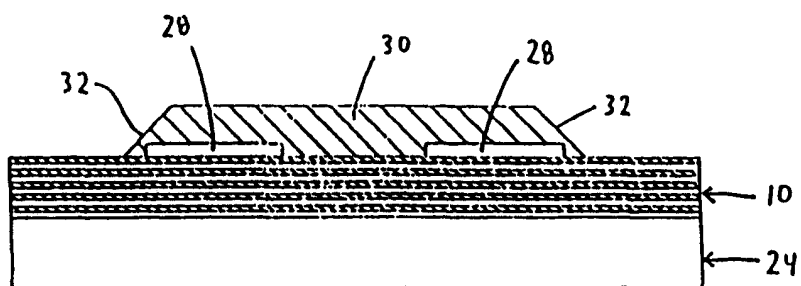


图 3C

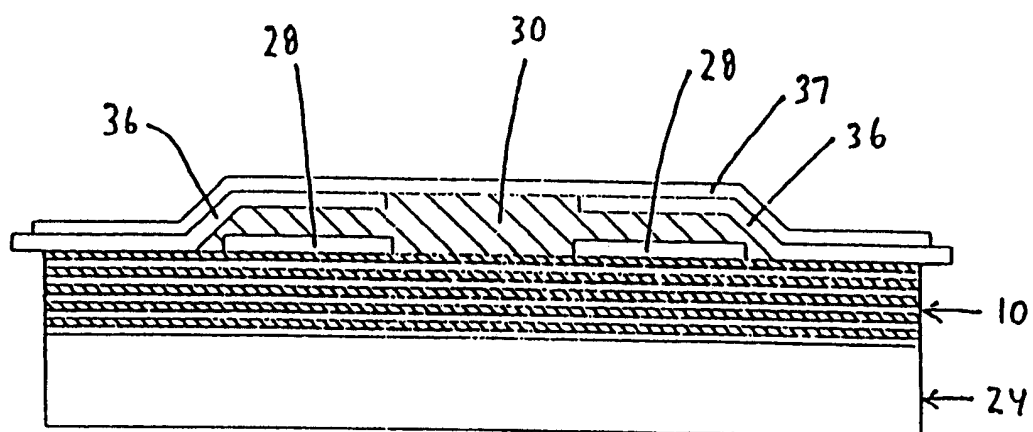


图 3D

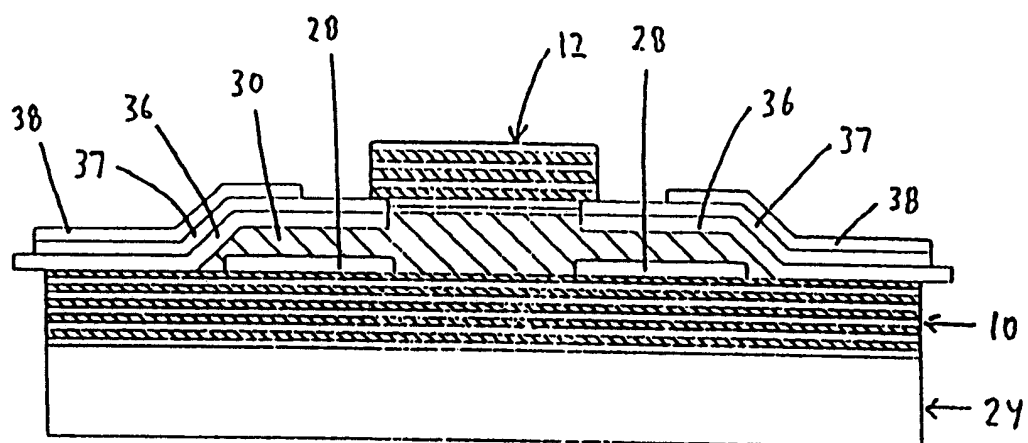


图 3E

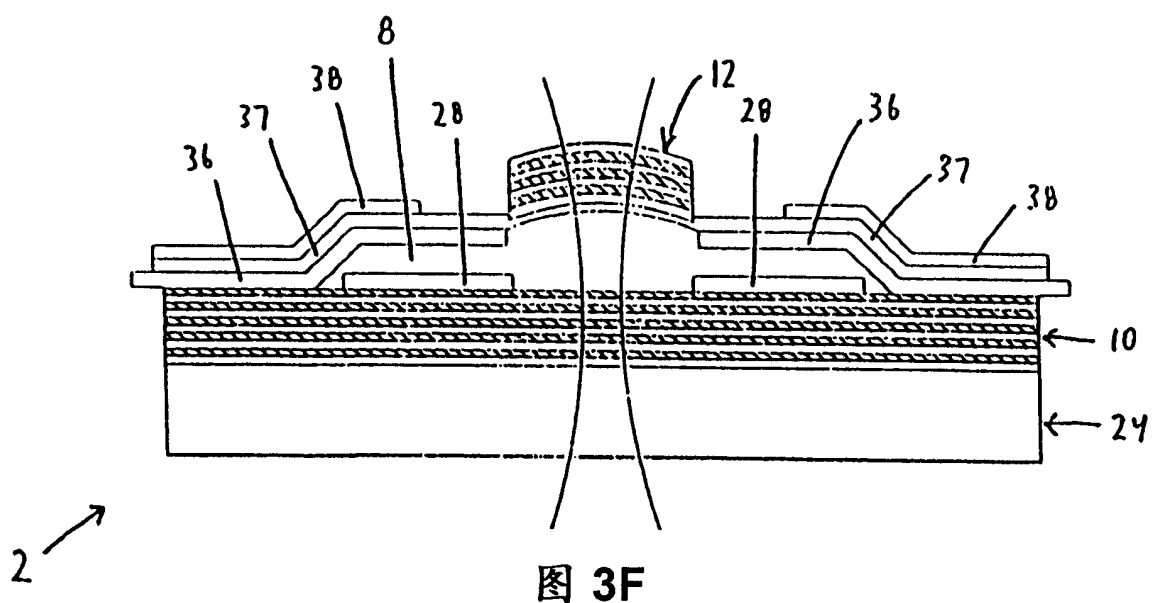


图 3F

图4表示制作MEM可调谐
VCSEL的步骤

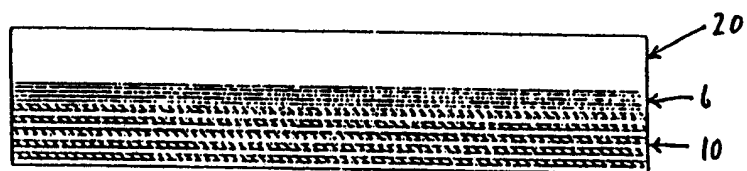


图 4A

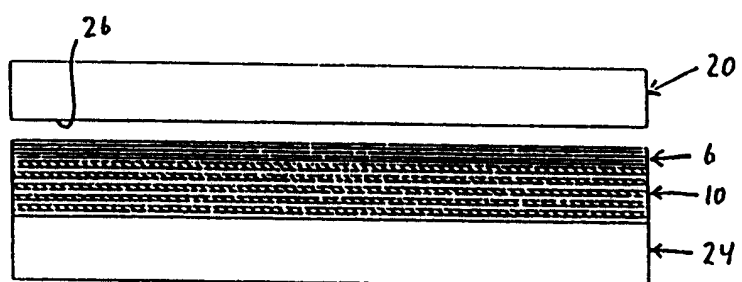


图 4B

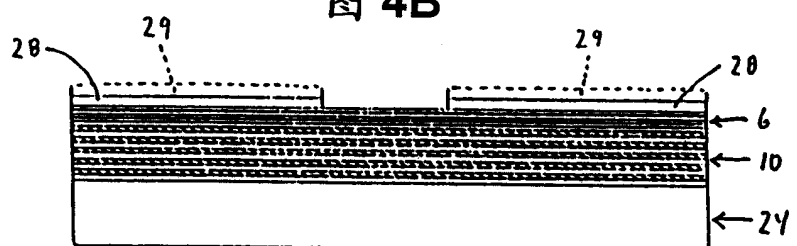


图 4C

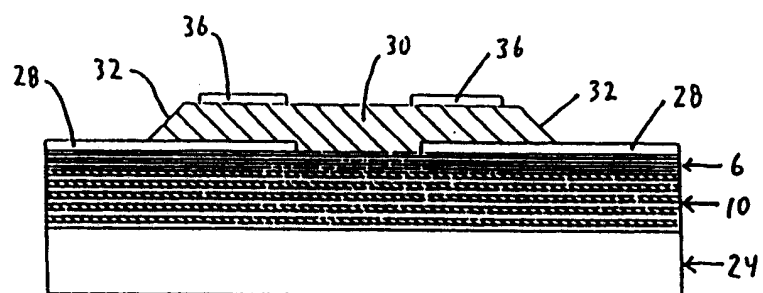


图 4D

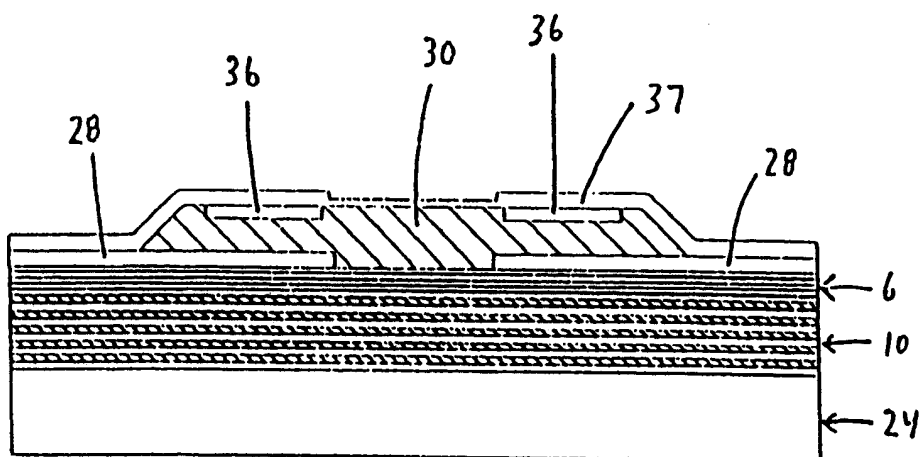


图 4E

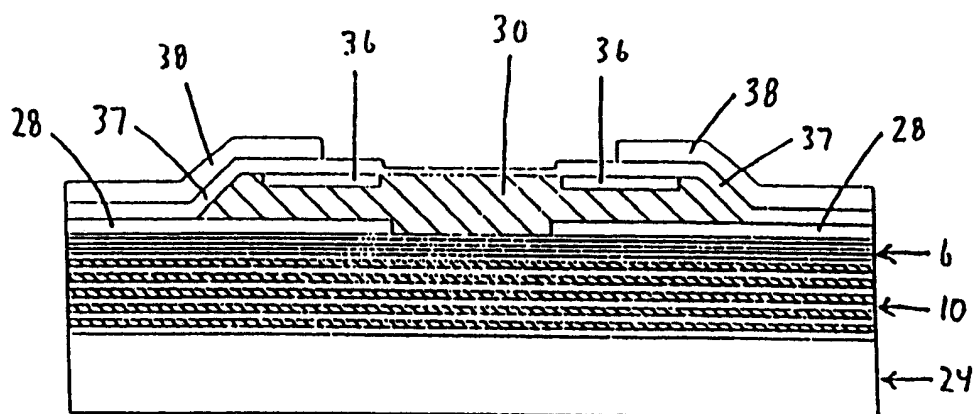


图 4F

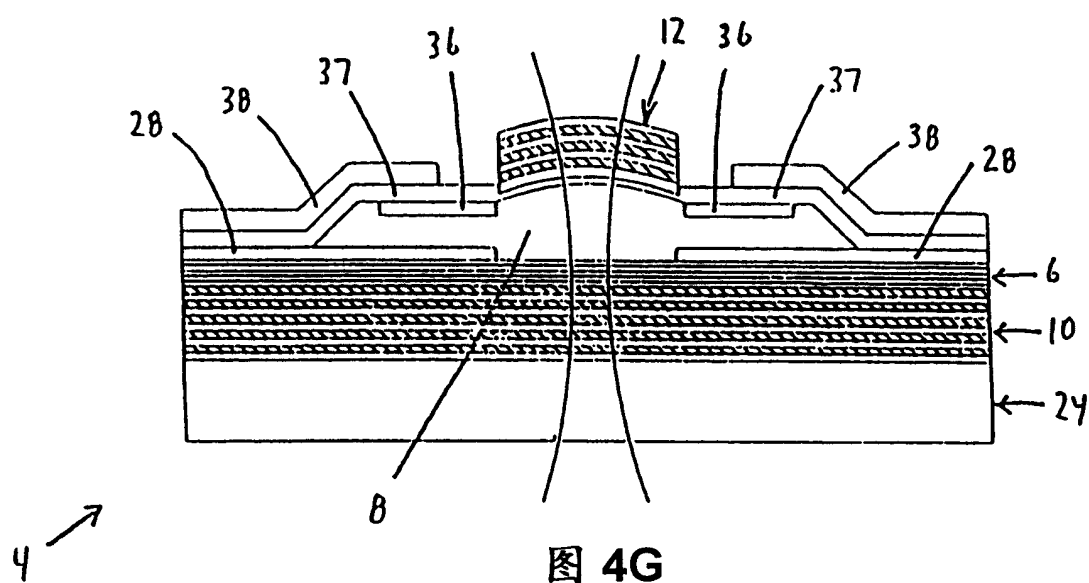


图 4G

图6表示可调谐滤光器/VCSEL器件的不同形式

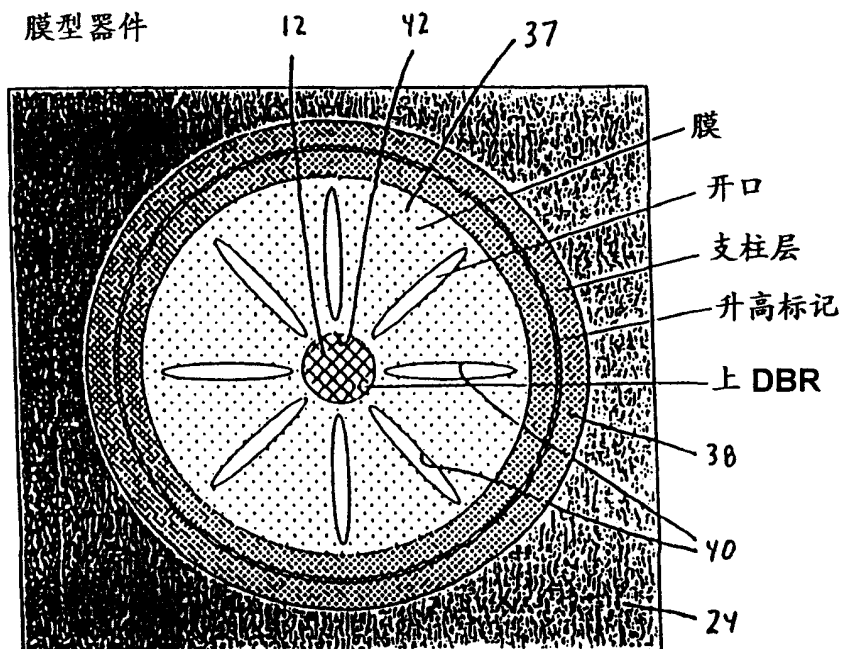


图 6A

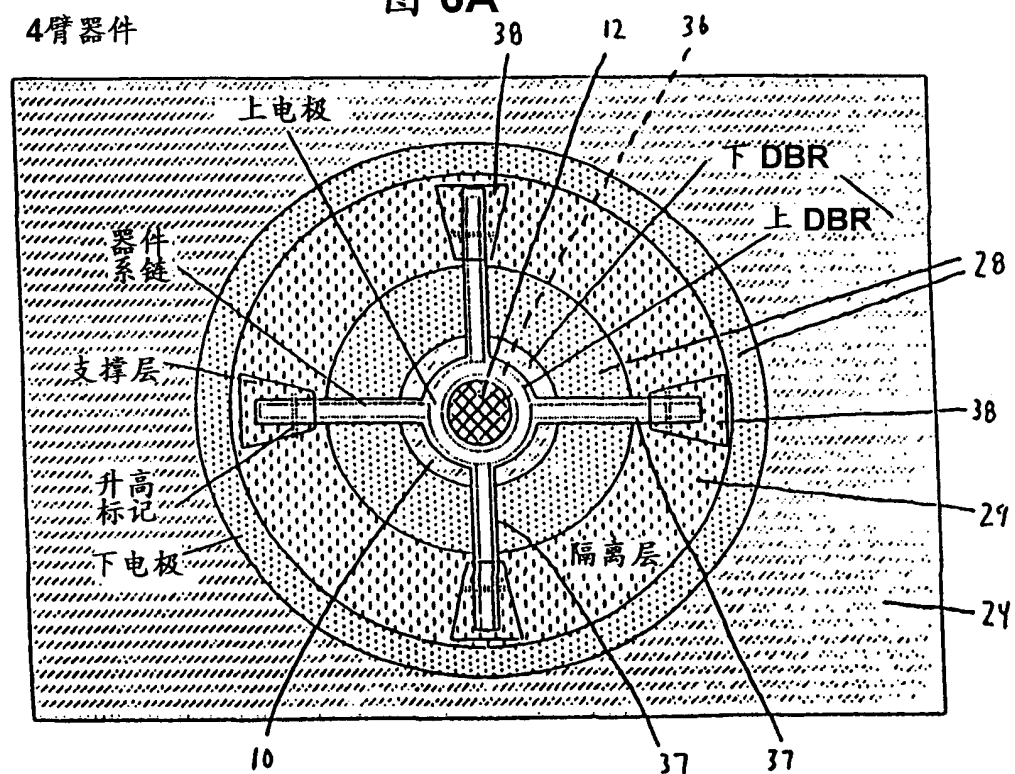


图 6B

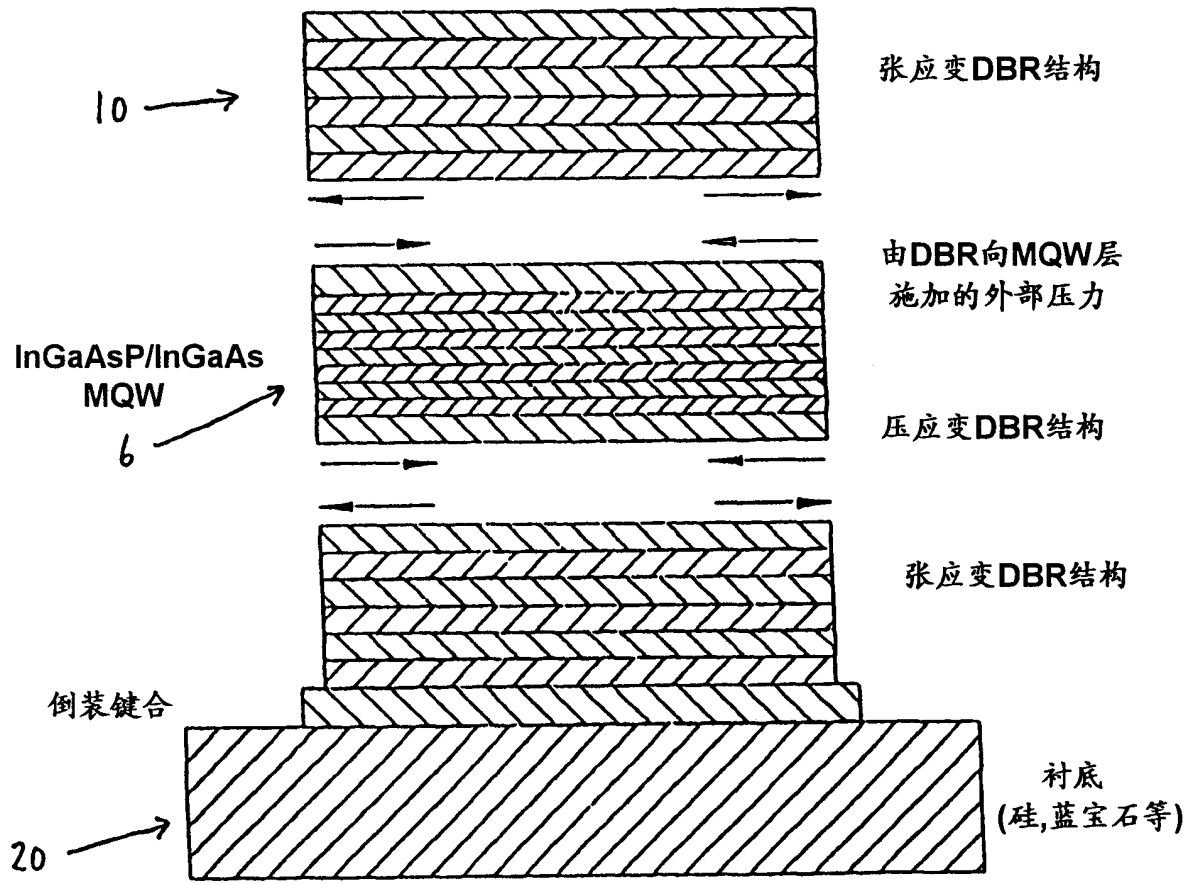


图 7