

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl⁷

G02B 5/08

H01S 3/08



[12] 发明专利说明书

[21] ZL 专利号 00816821.0

[45] 授权公告日 2005 年 2 月 16 日

[11] 授权公告号 CN 1189766C

[22] 申请日 2000.7.5 [21] 申请号 00816821.0

[30] 优先权

[32] 1999.12.9 [33] AT [31] A2066/1999

[86] 国际申请 PCT/AT2000/000183 2000.7.5

[87] 国际公布 WO2001/042821 德 2001.6.14

[85] 进入国家阶段日期 2002.6.7

[71] 专利权人 费姆托激光产品股份有限公司

地址 奥地利科尔新堡

[72] 发明人 费伦茨·克劳斯

加布里埃尔·弗洛林·滕佩亚

审查员 马 燕

[74] 专利代理机构 中原信达知识产权代理有限责
任公司

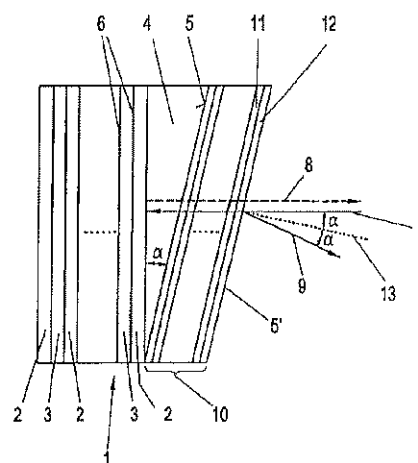
代理人 武玉琴 朱登河

权利要求书 2 页 说明书 12 页 附图 5 页

[54] 发明名称 一种多层反射镜

[57] 摘要

本发明涉及一种多层反射镜(1)，特别是多层色散反射镜，包括设置在基板(4; 14)上的数个单层(2、3)，通过相互平行的平面界面(6)彼此连接并具有不同的特性。该反射镜具有平面前表面(5; 5')，位于光束入射一侧并且与所述单层(2、3)之间的界面(6)成一定角度。



ISSN 1000-8474

5 1. 一种多层反射镜(1)，包括数个具有不同特性的单层(2、3)，施加在基板(4；14)上，并且通过相互平行的平面界面(6)彼此连接；和位于光束入射一侧的平面的前表面(5；5')，其特征在于，所述前表面(5；5')相对于所述单层(2、3)之间的界面(6)倾斜。

10 2. 如权利要求1所述的反射镜，其特征在于，所述倾斜前表面(5；5')由厚度线性变化的外层(4')的外表面提供，该外层(4')与其它单层(2、3)一起施加在背离光束入射侧的基板(14)上。

 3. 如权利要求2所述的反射镜，其特征在于，所述外层由楔形玻璃薄片(4'')形成。

15 4. 如权利要求3所述的反射镜，其特征在于，所述楔形玻璃薄片(4'')通过折射率匹配液施加在最前的单层(2或3)上。

 5. 如权利要求3所述的反射镜，其特征在于，所述楔形玻璃薄片(4'')通过光学胶水施加在最前的单层(2或3)上。

20

 6. 如权利要求3所述的反射镜，其特征在于，所述楔形玻璃薄片(4'')通过光学粘合剂施加在最前的单层(2或3)上。

25 7. 如权利要求1所述的反射镜，其特征在于，所述倾斜前表面(5；5')由楔形透明基板(4)的外表面提供，楔形透明基板(4)后侧附着有所述层(2、3)。

 8. 如权利要求1至7任一所述的反射镜，其特征在于，在所述倾斜前表面(5)上施加有具有适当倾斜前表面(5')的抗反射涂层(10)。

30

9. 如权利要求 1 至 7 任一所述的反射镜, 其特征在于, 所述单层 (2、3) 的厚度随着其离开基板 (4; 14) 的距离而变化以获得预定的反射特性和 / 或预定的组延迟色散特性。

5 10. 如权利要求 1 至 7 任一所述的反射镜, 其特征在于, 所述单层 (2、3) 的厚度随着其离开前表面 (5; 5') 的距离一致增加以提供在预定光谱范围内的负的, 可选择地是恒定的组延迟特性和高反射率。

10 11. 如权利要求 1 至 7 任一所述的反射镜, 其特征在于, 交替地设置 SiO_2 层和 TiO_2 层作为所述单层 (2、3)。

12. 如权利要求 1 至 7 任一所述的反射镜, 其特征在于, 交替地设置 SiO_2 层和 Ta_2O_5 层作为所述单层 (2、3)。

15 13. 如权利要求 1 至 7 任一所述的反射镜, 其特征在于, 交替地设置具有较低折射率的半导体层和具有较高折射率的半导体层作为所述单层 (2、3)。

20 14. 如权利要求 1 至 7 任一所述的反射镜, 其特征在于, 它是一个色散反射镜。

15. 如权利要求 1 至 7 任一所述的反射镜在激光装置中的应用。

25 16. 如权利要求 1 至 7 任一所述的反射镜在短脉冲激光装置中的应用。

一种多层反射镜

5 技术领域

本发明涉及一种多层反射镜，特别涉及一种色散多层反射镜，包括数个具有不同特性的单层，施加在一个基板上并且通过相互平行的平面界面彼此连接，以及一个位于光束入射侧的平面前表面。

10 背景技术

在激光技术中，越来越多地使用具有皮秒和飞秒范围（到 10 飞秒以下）脉冲宽度的较短激光脉冲。在其在科学领域的应用之外，这种短脉冲激光装置还越来越多地用于超高速光谱学、光学宽带通信和飞米化学（femtochemistry）领域中对材料的高精度加工。用在这种短脉冲激光装置中的激光晶体（参见 WO 98/10494 A）具有优越的热性质以及较宽的荧光带宽，从而能够产生小于 10 或者甚至小于 5 飞秒的脉冲宽度。这里特别地采用了掺杂有过渡金属的激光晶体比如特别是钛蓝宝石（Ti:S）激光晶体。

20 产生这种超短激光脉冲时的一个问题在于相应激光系统的其余的光学组件，其中特别重要的是应具有可用的宽带色散组件。

已有提出通过薄层技术在激光装置中设置色散反射镜，参见 US 5,734,503 A。在实现此点时，反射镜包括多个具有不同特性的单层，即分别具有交替的较高和较低折射率，其中当反射在频率范围具有对应较大带宽的超短激光脉冲时实现如下功能：使得激光束的不同波长成分在被反射前入射到反射镜单层的不同深度。以此方式，不同的频率成分被延迟不同的时间量，与其相应的入射深度相对应；如果必须获得一个负组延迟色散，则短波波包将在较为靠外处被反射；而长波成分在被反射之前将入射到反射镜较深处。这说明长波频率成分相对

于短波成分有时间延迟。以此方式，可以在激光装置中对短脉冲激光束获得色散补偿。然而特别短时间范围的脉冲具有较宽的频谱，激光束具有不同的频率成分，主要在光密传播介质（比如在激光晶体中）甚至也在空气中，“呈现”不同的折射率（即传播介质的光学厚度对于激光脉冲的不同频率成分差别很大）；因此激光脉冲的不同频率成分在穿过传播介质时被不同程度地延迟。通过在其中实现负组延迟色散（group delay dispersion, GDD）的已知色散薄膜激光反射镜上的上述色散补偿可以对此效应加以克服。这种已知反射镜也称作“线性调频反射镜”（CM），与先前采用的含有棱镜的延迟元件相比构成了实质性的进步。这已经首次可以从激光谐振器直接获得具有 10 飞秒以下脉冲宽度的激光脉冲，并且激光系统变得更为紧凑和可靠。CM 反射镜通过不同光谱成分在多层结构中的入射深度对上述组延迟的波长依赖性进行控制。

这种 CM 反射镜，更一般地说，类似的多层反射镜的一个问题在于在最上层与环境之间的界面即光束照射的前表面处会发生很大程度上与波长无关的反射（例如在 3% 的量级）。因此，在此前表面反射的光束与反射镜多层结构中更深处反射的光束之间会发生相互干涉，该干涉可能会导致反射的失真，并且尤其是导致反射镜相位特性的显著失真。为了至少部分地抵消该效应，已有提出在前表面及与环境（通常为空气）的界面处设置抗反射涂层或窄带阻挡滤波器（分别参见 F.X. Karntner, N. Matuscheck, T. Tschibili, U. Keller, H.A. Haus, C. Heine, R. Morf, V.scheuer, M.tilsch, T. Tschudi, “Design and fabrication of double-chirped mirrors”, 1997, Opt. Lett 22, 831 以及 G. Tempea, F. Krausz, Ch. Spielmann, K. Ferencz, “Dispersion control over 150 THz with chirped dielectric mirrors”, 1998, IEEE JSTQE 4, 193）。为了有效地抑制干涉谐振，前表面的反射率应当在仅仅为 10^{-4} 的量级。然而抗反射层和阻挡滤波器仅可以在一个非常有限的带宽范围近似地呈现该特性。相应地，在过去，对于 800 nm 的照射光束，色散反射镜仅可以在 150-160 THz 的带宽范围工作。另外，即使在该带宽上也不可能完全抑

制谐振干涉效应，其色散曲线呈现显著的波动。

发明内容

5 因此，本发明的一个目的在于弥补该情况并提供一种原创设计型的多层反射镜，其中以简单的方式避免了反射镜前侧反射造成的上述干涉效应。

10 本发明原创设计型的多层反射镜特征在于前表面相对于单层之间的界面倾斜。通过反射镜多层结构前表面，例如介电层（反射镜）和空气（环境）之间的反射镜最前界面的倾斜定位，可以实现在该前表面上反射的光束与反射镜多层结构的其余界面处反射的光束成分不共线，亦即，其轴以相对于其余光束成分之轴的一个对应角度延伸；这样，相应地不会再发生光束重叠或干涉（在离开反射镜的相应距离处，还取决于光束直径），从而可以避免前述有影响的干涉效应，例如，
15 可以实现宽带色散补偿。

前表面相对于反射镜多层结构的其余界面如此“倾斜”的角度可以选择在相当宽的界限之内，然而通常将其保持在尽可能地小，例如在 1° 或仅仅几度的范围内。一方面，这种小的角度在制作反射镜时易于实现，另一方面，在例如 2 mm 的入射光束直径时，由多层结构的内
20 界面所反射的反射后可用光束与在传播长度接近 6 cm 之后在倾斜前表面处倾斜反射的光束完全分开，也即，从该距离开始不再发生相位干扰干涉效应（此处限定了角度的下限）。另外，小角度（在 1° 或仅仅几度的范围内）的优点在于可以将反射镜的第一、最外层—其外表面
25 构成倾斜的前表面—可以保持较薄，因为这样由楔形第一外层引致的第二级正色散可以最小化（从而可以供选择地获得反射镜的负总色散）。

然而，在一定的情况下，优选对外层提供较大的“楔”角，例如，
30 为了引入附加的负色散—与含有棱镜对的结构中类似。

根据其用途，多层反射镜的结构可设有一定的基板和适宜数量的薄膜单层，并且其上淀积有相应材料。在实现此点时，如果倾斜前表面由楔形透明基板的外表面提供，其后侧施加有所述层，往往可以有利地以简单方式实现反射镜外层的楔形。因此在此实施例中，采用一个预制的薄透明楔形玻璃基板，其背离前表面的后侧以实质上传统的方式施加所需的薄膜层；例如，可以施加具有较低折射率的交替层和具有较高折射率的其它交替层。在工作时，入射光束首先到达楔形玻璃基板，其倾斜前表面处反射的光束被倾斜反射回去，另外，取决于光束成分的波长在反射镜内部会发生所需的上述反射，其中在前表面处反射光束成分不会与在外侧倾斜反射的光束发生干涉。

然而在此实施例中，已经显示较薄的楔形基板由于涂层中形成的张力会使之弯曲；由此会损害表面质量。用于实现多层反射镜的倾斜前表面或外表面的一个不同的，但特别有利的方法是由线性地改变厚度的外层来提供该倾斜前表面，这与其它的单层一起施加在背离光束入射侧的基板上。因此在该反射镜结构中，可以是平面平行且较厚的基板形成反射镜的后侧，并且在该基板上用实质上现有的方式施加有所述单层。为了实现楔形的外层，也即提供该层的线性变化的厚度，可以在制作薄膜层形式的该层时将基板在镀膜室中以一定程度倾斜定位，或者可以在施加最外层材料时采用具有适当的线性变化的渗透性的掩模。在这两种情况下，使已经在先前获得的结构经受不均匀蒸汽流以制作外层，其中最外（最上）层的厚度随着离开蒸汽源距离的增大而单调递减。

另一个易于制作的优选实施例特征在于外层由楔形玻璃薄片形成。为了避免在界面涂层 / 玻璃薄片处发生反射，可以将玻璃薄片通过折射率匹配液、光学胶水或光学粘合剂施加在所述涂层上。

如前面所指出的，在反射镜多层结构前表面处倾斜反射的光束是

具有较低强度的光束，但是仍然会导致损耗从而构成反射镜损耗。为了最大限度降低反射镜损耗，因此优选在倾斜前表面上涂覆具有相应地适合倾斜的前表面的抗反射涂层。抗反射涂层，特别是多层涂层实质上是公知的，并且已知有不引致相位失真的抗反射涂层。测试表明，
5 以此方式在倾斜前表面处的反射率在 500 至 1000 nm 的波长范围内可以降低至 0.2% 以下。为了完整应当指出该 AR（抗反射）涂层包括以相对于反射镜多层结构内部的其余界面的倾斜角延伸的层，对应于反射镜前表面本身的倾斜延长线。至于 AR 涂层的各层，可以分别采用 TiO_2 层和 SiO_2 层，或者 Ta_2O_5 和 SiO_2 层。

10

已经证明适宜使单层的厚度随着其离开基板的距离而变化，从而实现预定的反射特性和 / 或预定的组延迟色散特性。通过所述的层厚变化，可以根据反射镜的使用目的分别确定关于其反射率和色散（组延迟色散）的一定曲线簇，其中，例如，可以构想引入负组延迟色散，
15 恰如构想提供预定的正组延迟色散一样。特别地，优选使单层的厚度一般地随着其离开前表面的距离而增大，从而在预定光谱范围提供负的（可选为恒定的）组延迟色散和较高的反射率。

本发明多层色散反射镜可以具有线性调频结构（参见 US 5,734,503 A），其中层厚一般地随着其离开最前层的距离而增大，另外还可以设有一个谐振结构，例如公开于在先的 AT 申请 A1160/99 中，但其不是
20 在先公开。至于本发明反射镜的多层结构的构造，可以用公知方法交替地设置 SiO_2 层和 TiO_2 层作为单层；然而从低成本且可靠地生产的角度上，还可以考虑交替地设置 SiO_2 层和 Ta_2O_5 层作为单层。这种含有
25 Ta_2O_5 层的层结构还因为 Ta_2O_5 的吸收峰在较短波长而优选，从而材料的破裂阈值较高。

本发明反射镜的另一个优选实施例通过交替地设置具有较低折射率的半导体层和具有较高折射率的半导体层而获得。这种半导体实施
30 例的一个优点在于可以将实质上公知的可饱和吸收剂层插入在反射镜

的多层结构中，这对于其在激光装置中的应用特别有利。

根据本发明的反射镜用在激光装置中特别有利，特别是用在短脉冲激光装置中，特别是作为色散控制元件，如本文开始时所说明的。

5

附图说明

下面参照附图通过特别优选的例示性实施例对本发明进行更为详细的说明，然而这些实施例并不是限制性的。具体地说，在附图中，

图 1 简要画出了含有楔形前玻璃基板的色散多层反射镜的结构；

10

图 2 以对应示意图画出了不同的多层色散反射镜，其中设有一个要按使用目的加以选择的后向基板作为层结构的基座；

图 3 表示例如根据图 1（或者也根据图 2）的两个色散反射镜的结构，用于补偿空间色散（角色散）；

15

图 4 表示根据图 1 或图 2 的反射镜相对于图中波长 λ 变化的反射率 R ；

图 5 表示根据图 1 或图 2 的反射镜在图中波长 λ 上的组延迟色散 GDD；

20

图 6 和 7 分别在相应图中表示根据图 1 或 2 的另一反射镜在波长 λ 上的反射率 R （图 6）和组延迟色散 GDD（图 7），该反射镜由于其在泵浦波长范围内的高传输特性而可以用作激光谐振器中的耦合进入反射镜；以及

图 8 表示与图 2 具有后向基板的色散反射镜类似设计的色散反射镜的特别优选实施例。

25

具体实施方式

在图 1 中，简要画出了多层色散反射镜 1，例如由具有较低折射率的单层 2 和具有较高折射率的单层 3 组成。这些单层 2、3 交替地安排，可以设置有，例如，总计 30 个单层 2、3。这些单层 2、3 用实质上传统方法例如气相沉积方法施加在楔形薄透明基板 4 特别是玻璃基板的后侧。可以看出，基板 4 是楔形的，也即，其厚度从最小厚度一

30

端朝向另一最大厚度的相对端线性地改变，从而以此方式获得前表面 5，与单层 2、3 之间的界面 6 相比该前表面 5 以角度 α 倾斜地延伸。

到达前表面 5 的光束 7，特别是激光束，将穿过基板 4，并且视其单个频率成分的波长或多或少地在反射镜 1 的多层结构 2、3 中各界面 6 处被反射，从而获得前面所述的对反射光束 8 的色散控制。通常地，此处设有一个负的组延迟色散 GDD，其中较长波长的波比在反射镜 1 中较靠外反射的短波成分会更深地穿透进多层结构 2、3，用以获得较后者长的延迟。

已经说明，在反射镜 1 的前表面，在没有倾斜前表面时，尽管比较轻微，通常仍会发生不利的反射，此处反射的光束导致与反射镜 1 的多层结构 2、3 中反射的光束发生干涉，该干涉会导致反射镜的反射率和相位特性的显著失真。为了避免该干涉效应，将前表面 5 如前所述设置成相对于其余界面 6 倾斜，使得分别在反射镜 1 的前侧 5 或 5' 处反射的光束 9 各自以等于前表面 5 或 5' 的倾斜角 α 两倍的角度被反射。以此方式，该倾斜反射的光束 9 至少在较短距离处不再是干涉因素，因为相应地根据前表面 5 或 5' 的倾斜角以及根据入射光束 7 的直径，在几厘米范围内将其与已经处于较短传播波长的有用光束 7 和 8 完全分离，从而，从该距离开始，可以不再发生干扰相位的干涉效应。

由于线性反射光束 9 对造成反射镜 1 的损耗起作用，所以施加有抗反射（AR 抗反射）涂层 10，优选施加在楔形层 4—这里构成了层 2、3 的基板—的前表面 5 上—该抗反射层施加有交替的较低折射层 11 或较高折射层 12 的数个单层 11、12。对于该 AR 涂层，例如可以用实质上传统方式交替地采用例如 TiO_2 和 SiO_2 层或者 Ta_2O_5 和 SiO_2 层，其中通常小于 15 层就足够了，并且，由于该 AR 涂层 10 而不会引起相位失真。通过这样的 AR 涂层 10，可以在受关注的 500 nm 至 1000 nm 的波长范围内将目前外部前表面 5'（反射镜 1 与环境的界面）处的反射率降低至 0.2% 以下。

为了完整，在图 1 中还画出了表面法线 13，它垂直于前表面 5'，并且构成入射光束 7 与在前表面 5'上倾斜反射的光束 9 之间夹角的平分线。

5

为了构造根据图 1 的反射镜 1，可以例如选择如下的层结构：

	材料	层厚 (nm)
	楔形基板 4	
10	SiO ₂	259.80
	TiO ₂	15.00
	SiO ₂	61.38
	TiO ₂	59.12
	SiO ₂	18.81
	TiO ₂	79.30
	SiO ₂	72.89
	TiO ₂	21.16
	SiO ₂	118.24
	TiO ₂	56.13
	SiO ₂	30.30
	TiO ₂	75.66
	SiO ₂	96.41
	TiO ₂	33.40
	SiO ₂	76.25
	TiO ₂	76.31
	SiO ₂	80.31
	TiO ₂	35.10
	SiO ₂	108.49
	TiO ₂	73.01
	SiO ₂	72.73
	TiO ₂	48.58
	SiO ₂	102.70
	TiO ₂	76.02
	SiO ₂	95.01
	TiO ₂	42.53
	SiO ₂	100.45

TiO ₂	97.86
SiO ₂	100.47
TiO ₂	50.81
SiO ₂	93.09
TiO ₂	82.43
SiO ₂	132.75
TiO ₂	76.17
SiO ₂	84.22
TiO ₂	69.18
SiO ₂	148.68
TiO ₂	78.55
SiO ₂	117.82
TiO ₂	79.60
SiO ₂	154.27
TiO ₂	78.25
SiO ₂	116.50
TiO ₂	109.89
SiO ₂	143.51
TiO ₂	89.85
SiO ₂	158.38
TiO ₂	76.01
SiO ₂	174.52
TiO ₂	86.94
SiO ₂	186.03
TiO ₂	96.81
SiO ₂	167.78
TiO ₂	106.09
SiO ₂	191.54
TiO ₂	120.83
SiO ₂	187.05
TiO ₂	122.09
SiO ₂	307.80

对于这种反射镜，图 4 和 5 中分别画出了其在波长 λ （单位：nm）的反射率 R （单位：%）和在波长 λ （单位：nm）的组延迟色散 GDD（单位： fs^2 ）。从图 4 可以看出，反射率 R 在 500 nm 至 1000 nm 的波长范围内实际上是恒定的，而图 5 中所示的组延迟色散 GDD 呈现轻微的波动曲线。

在图 2 中，画出了不同实施例的多层色散反射镜 1，其中这里再次用传统方法将分别具有较高或较低折射率的交替单个反射镜层 2、3 施加在基板 14 的后侧。楔形外层 4' 构成最前反射镜层，其层厚对应于角度 α 线性增加，从而其前表面 5 再次相对于其余单个反射镜层 2、3 之间的界面以角度 α 倾斜延伸。此处，同样将 AR 涂层 10 施加在外层 4' 的前表面 5 上，其中 AR 涂层 10 由分别具有较低或较高折射率的交替各层 11 和 12 构成。因而再次将 AR 涂层 10 前表面 5' 处反射的不利光束 9 的强度保持在极低水平，从而可以最大限度降低反射镜的损耗。

楔形外层 4' 的制备可以例如，把其上已经施加有单层 2、3 的基板 14 在镀膜室中根据所需的倾斜位置加以倾斜，从而，考虑到基板实际上将经受不均匀蒸汽流的事实，层 4' 的厚度会随着其离开蒸汽源距离的增大而线性降低。另一个可能的方法是在从气相淀积层 4' 的材料过程中使用对应的不均匀掩模，从而也可以为层 4' 获得线性变化的层厚。

在图 6 和 7 中，画出了与根据图 2 的反射镜 1 相关并且涉及在波长 λ 上的反射率 R （图 6）和在波长 λ 上的组延迟色散 GDD（图 7）的示意图，其中可以看出从大约 580 nm 至 950 nm 的波长范围内反射率 R 恒定，在 600 nm 至 950 nm 的范围组延迟色散 GDD 有在约 -30 fs^2 和 -38 fs^2 之间轻微波动的曲线，并且在泵浦光束波长（520 nm 至 540 nm）附近具有较高的透射率。

在图 8 中，画出了针对图 2 实施例改进的多层色散反射镜 1 的实

5 施例，其中再次将用于色散补偿的多层结构 2、3 施加在较厚且平面平行的后侧光学基板 14 上。在多层结构 2、3 的前侧，施加楔形玻璃薄片 4'' 作为外层，如此再次限定了相对于入射光束 7 的倾斜前表面 5。有用反射光束再次用 8 表示，在前表面 5 处反射并且倾斜射出以避免如前所述与有用光束干涉的不需要光束 9 用 9 表示。楔形玻璃薄片 4'' 在其前表面 5 可以设有 AR 涂层 10，如前面的实施例中所述。

10 为了避免在多层结构 2、3 / 楔形玻璃薄片 4'' 的界面处发生反射，可以设置折射率匹配层 16，由之将楔形玻璃薄片 4'' 与多层结构 2、3 连接，也就是与其最前面的单层 2 或 3 连接。详细地说，可以采用折射率匹配液，或者借助于光学胶水或光学粘合剂将玻璃薄片 4'' 加以固定。这种材料的例子有：各种浓度的脂肪族或脂环族碳水化合物作为折射率匹配液，或者透明环氧树脂作为光学粘合剂或可聚合单体的光学胶水（参见 US 5,045,397 A）。

15 取决于相应的用途，多层反射镜 1 的单层 2、3 可以具有变化的厚度，相应地随其离开外层 4'（相应于图 2 或 8）或离开基板 4（图 1）的距离而变化，特别是其层厚随该距离平均一致增加，从而在一定的光谱范围分别获得负组延迟色散 GDD 和较高的反射率 R。

20 反射镜 1 可以是所谓的线性调频反射镜（CM），然而也可以是谐振层结构。另外，单层 2、3 本身也可以是传统的半导体层，从而在反射镜结构中插入可饱和的吸收剂层。

25 为了避免或者相应补偿空间（角）色散，适宜成对地采用此处所述分别具有倾斜前表面 5 或 5' 的反射镜 1，从图 3 可以看出。以此方式，可以通过图 3 中的另一反射镜例如 1a 来补偿由反射镜 1 所引致的角色散。另外，这种反射镜对 1、1a 的结构使得可以对整个色散进行精确的调谐，其中将反射镜之一例如反射镜 1a 沿横向方向移位，如图 3 中
30 箭头 15 所示。

通过本发明多层反射镜 1 相应前表面 5 或 5' 的上述倾斜定位，可以避免在最外界面（相应地前表面 5 或 5'）处的阻抗失调，并且可以实质上提高对反射镜的高反射带之下的穿透性，因为更高级的反射频带得以部分抑制。因此，具有相应倾斜前表面 5 或 5' 的本发明反射镜 1 在 600 nm 至 950 nm 的波长范围可以具有较高的反射率 R 和恒定的组延迟色散 GDD，并且在通常的泵浦光束波长（520 nm 至 540 nm）附近具有较高的穿透性，这从图 4 至 7 中可以清楚看出。通过最前界面 6 相对于层结构其余界面 6 的倾斜定位，还可以提高布拉格反射镜在泵浦光束波长的透射率。考虑到层 2、3、4、4'、4''，特别是外层 4 或 4' 或 4''，分别对其额定厚度的偏离，本发明的反射镜 1 不如传统的线性调频反射镜敏感，在传统反射镜中较小的制作误差可能会导致显著的波动，特别是在 GDD 曲线中。

通过与层结构无关地实现多层结构组件与最外楔形层 4 或 4' 或 4'' 分别之间的阻抗调整，可以获得本发明反射镜 1 的更高稳定性。统计测试已经表明，在引致 -45 fs 组延迟色散的传统线性调频反射镜中，在 300 nm 至 800 nm 的范围内，对额定层厚平均偏离 0.5 nm 会导致 GDD 特性线的波动，最大幅度为目标值的 100%（在 800 nm）。在同等的条件下，在具有相应倾斜前表面 5 或 5' 的反射镜中，在 800 nm 处 GDD 波动的最大幅度仅仅为 30%。

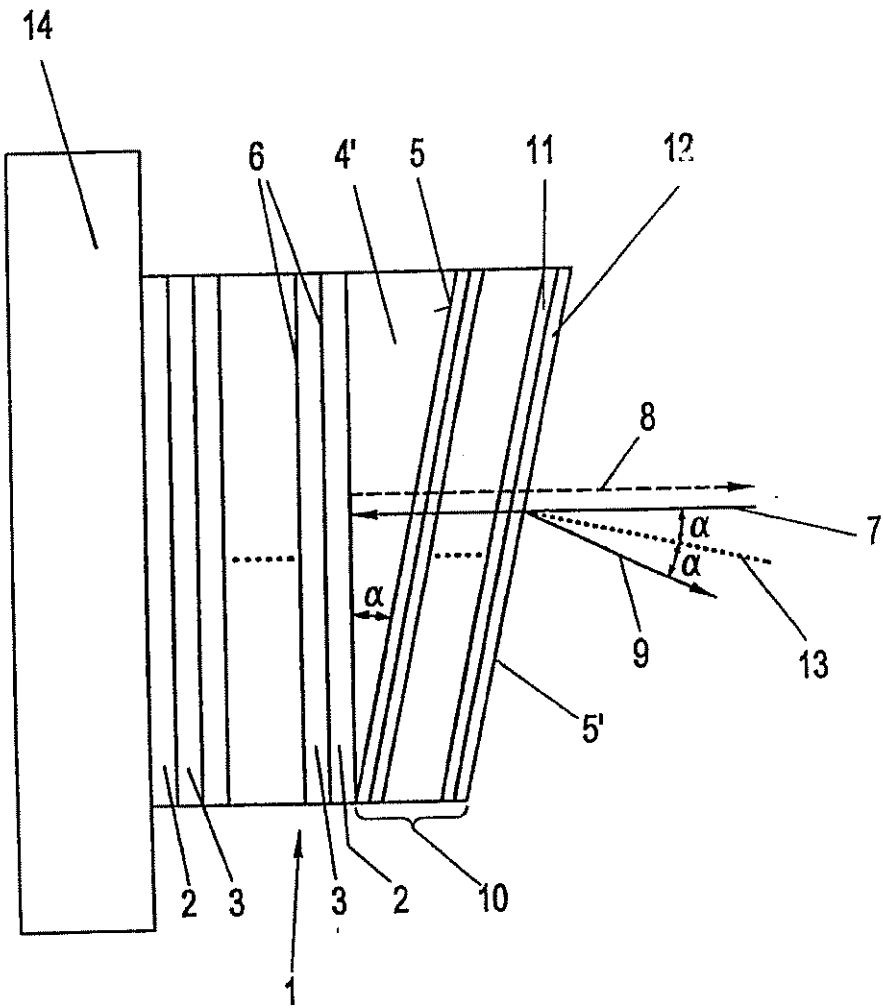


图 2

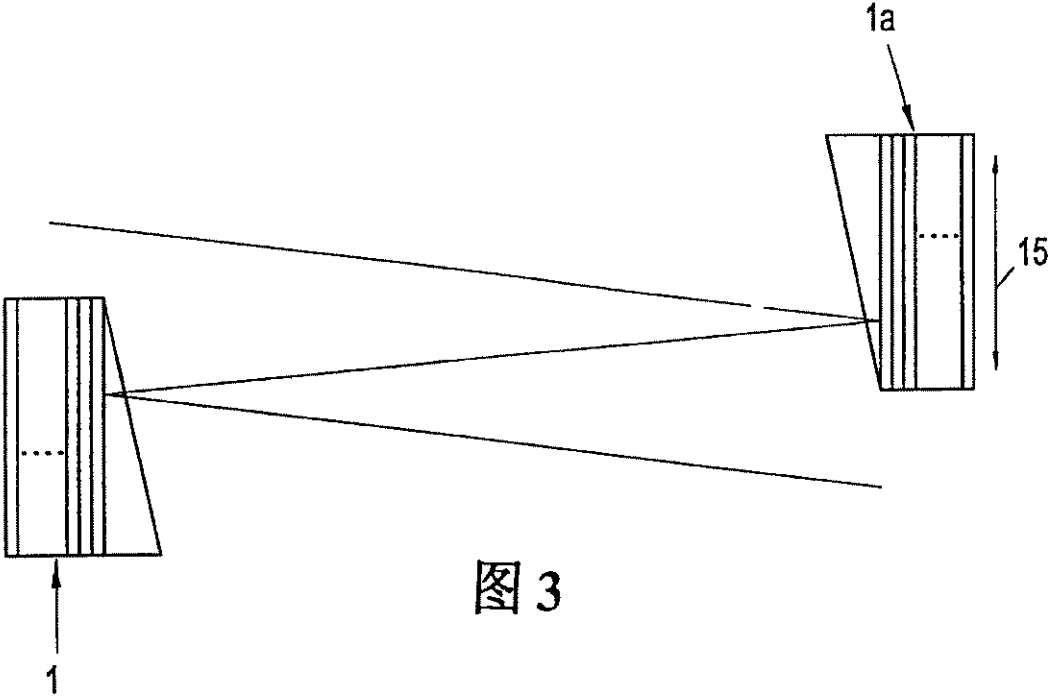


图 3

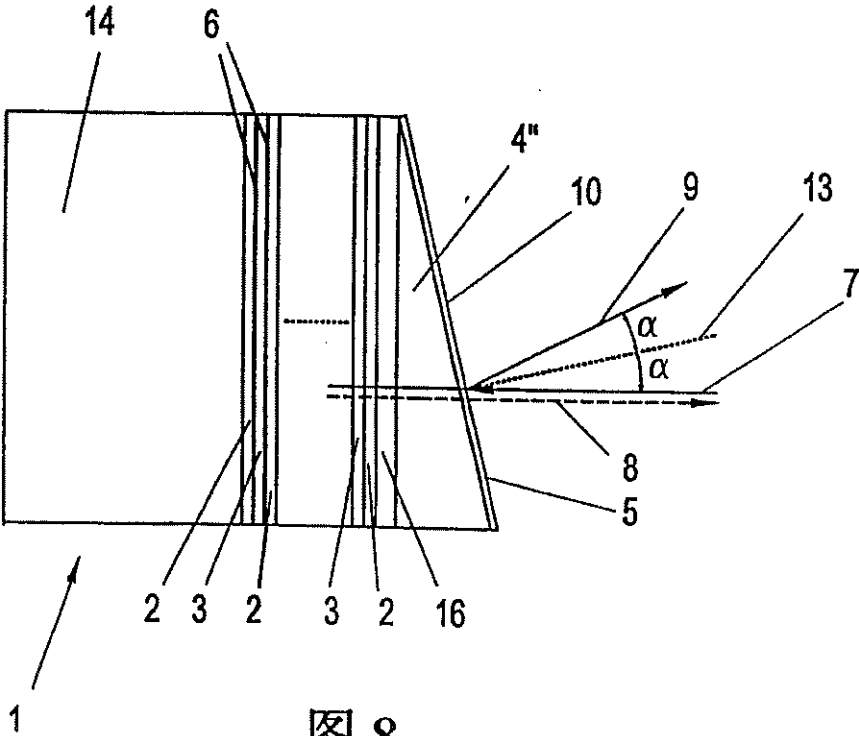


图 8

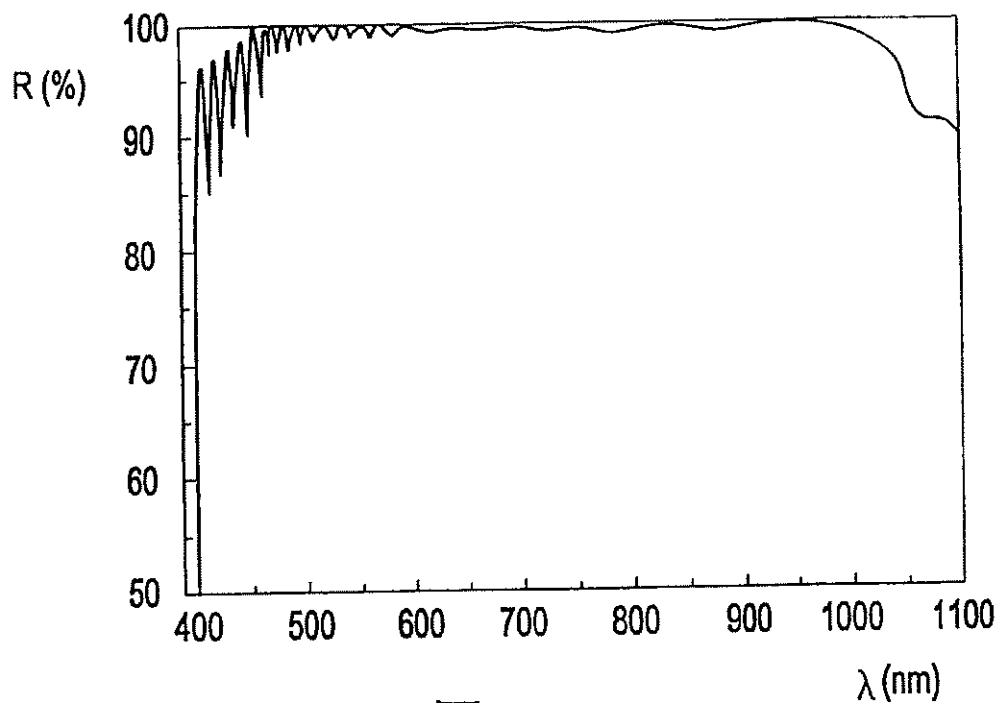


图 4

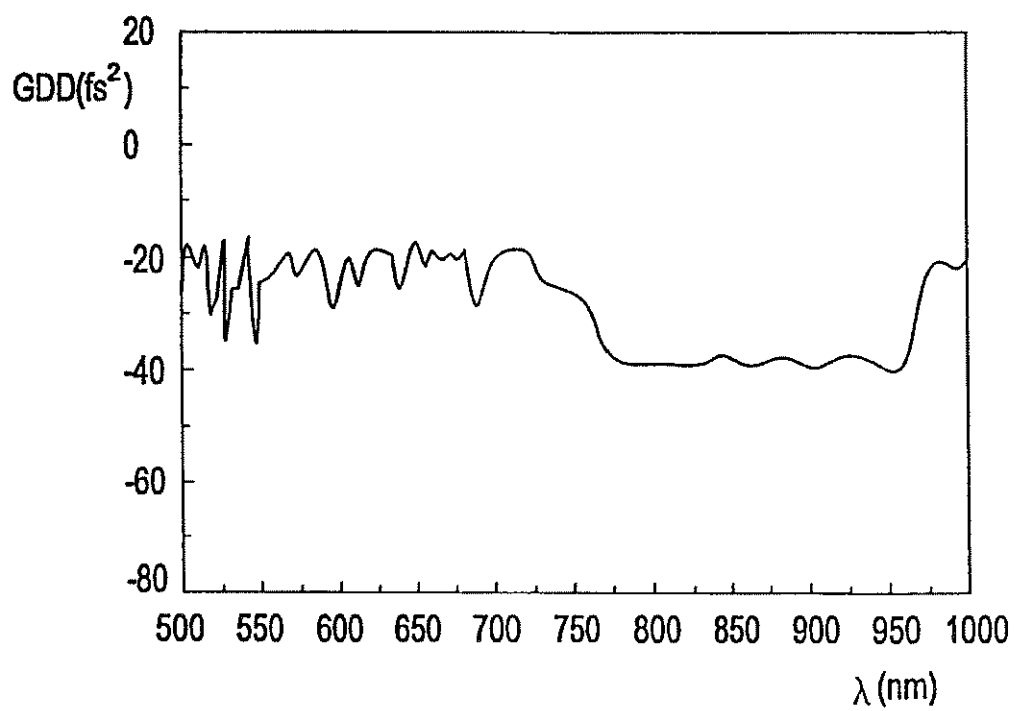


图 5

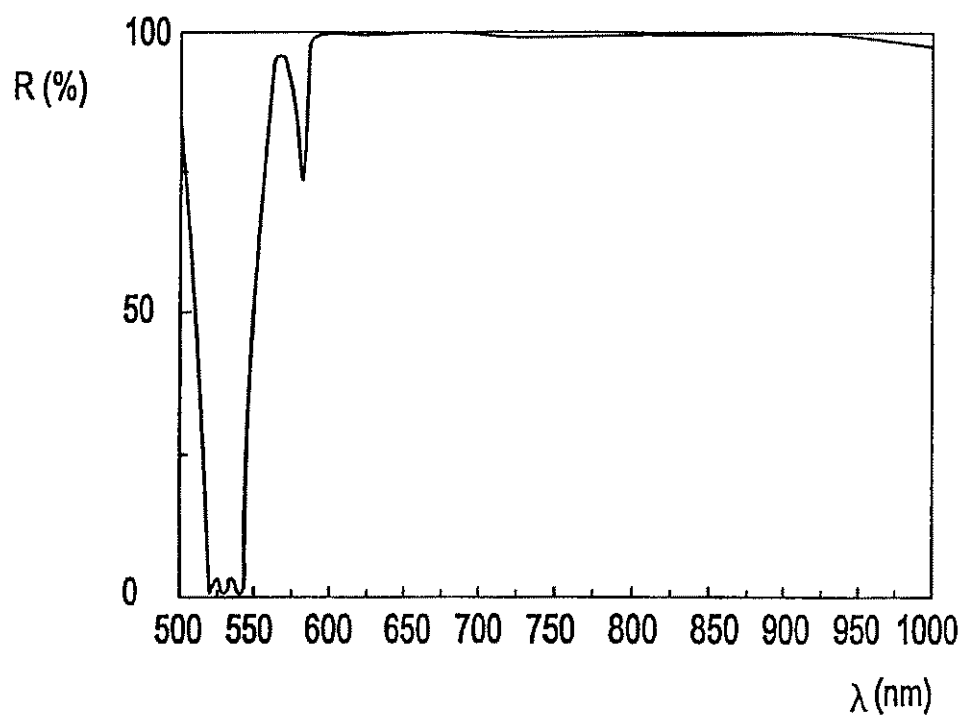


图 6

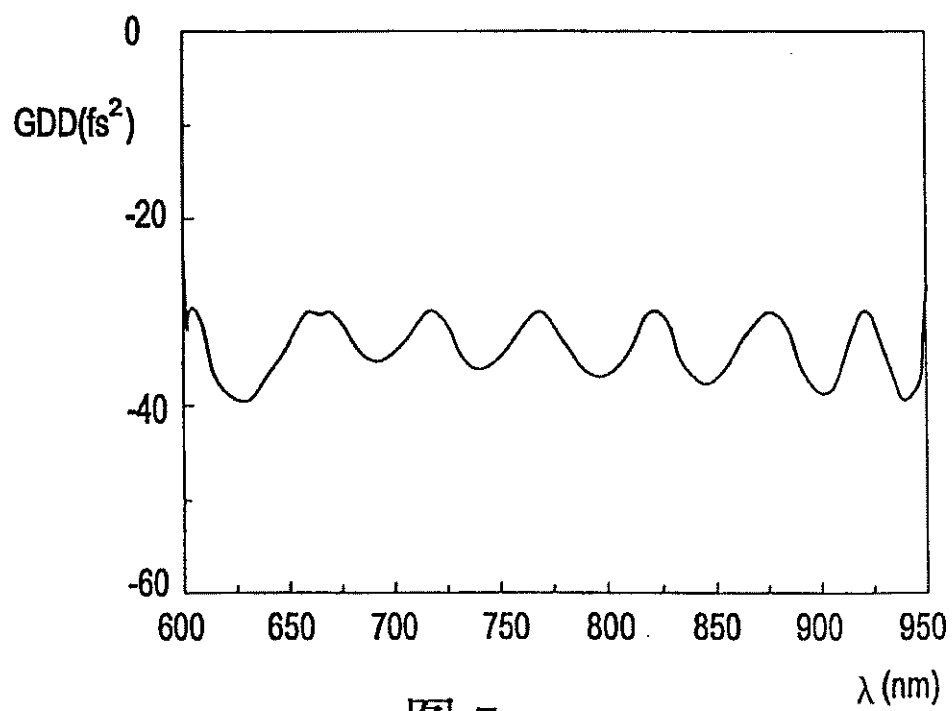


图 7