

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.⁷
G02B 5/30



[12] 发明专利说明书

专利号 ZL 01125747.4

[45] 授权公告日 2005 年 11 月 30 日

[11] 授权公告号 CN 1229657C

[22] 申请日 1998.2.20 [21] 申请号 01125747.4
分案原申请号 98810262.5

[30] 优先权

[32] 1997.10.17 [33] US [31] 08/953,128

[71] 专利权人 美国 3M 公司

地址 美国明尼苏达州

[72] 发明人 H·萨霍阿尼 S·达摩达朗

G·T·博迪 R·库马

审查员 尉小霞

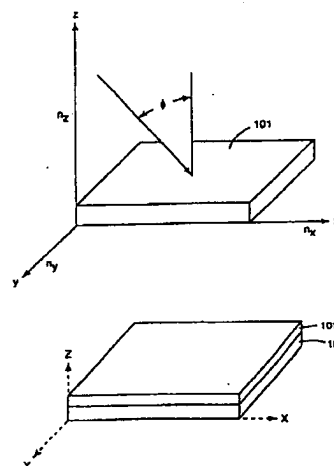
[74] 专利代理机构 上海专利商标事务所有限公司
代理人 李 玲

权利要求书 4 页 说明书 15 页 附图 13 页

[54] 发明名称 宽角度光学延迟器

[57] 摘要

在丙烯酸基延迟器中, 当入射角在较宽范围上变化时可获得相对均匀的性能。 可以将韧化材料与丙烯酸基聚合物相混合, 便于对延迟器的处理以及改善延迟器的机械性能, 不会危及光学性能。 利用一般的处理技术能够制备提供相对均匀宽角度的橡胶改进的丙烯酸基延迟器。 这种延迟器尤其适合于使用相对较宽入射角范围的许多特定应用。



1. 一种光学延迟器，它对在相对较宽入射角范围内入射在该延迟器上的可见光产生均匀延迟，所述入射角范围从垂直于延迟器平面的角度变化到至少约 30° 的最大角度 $\phi_{\max}$ ，其特征在于所述光学延迟器包括：

基板；

设置在该基板上的丙烯酸基聚合物和弹性体共聚物的薄膜，所述薄膜具有延迟幅度 δ ，它可以由以下关系式来表示：

$$\delta = d \left[\frac{n_x}{n_z} (n_z^2 - (\sin(\phi))^2)^{1/2} - (n_y^2 - (\sin(\phi))^2)^{1/2} \right]$$

式中： n_x 和 n_y 是薄膜对于沿薄膜平面内正交轴 x 和 y 偏振的有关波长的光的折射率， d 是薄膜在相互正交于平面内 x 和 y 轴的 z 轴方向上的厚度， n_z 是薄膜对于沿 z 轴偏振的有关波长的光的折射率， ϕ 是 x - z 平面内的入射角，其特征在于：当有关波长上的光的入射角 ϕ 从法向变为最大角 $\phi_{\max}$ 时，薄膜的延迟幅度 δ 的改变小于法向入射时延迟幅度的约 25%。

2. 如权利要求 1 所述的光学延迟器，其特征在于：所述基板包括反射镜。

3. 如权利要求 2 所述的光学延迟器，其特征在于：所述薄膜在法向入射角下的延迟幅度 δ 在约 115nm 至 158nm 的范围。

4. 如权利要求 1 所述的光学延迟器，其特征在于：所述基板包括玻璃。

5. 如权利要求 1 所述的光学延迟器，其特征在于：所述基板包括聚合物薄膜。

6. 如权利要求 5 所述的光学延迟器，其特征在于：所述聚合物薄膜是各向同性的。

7. 如权利要求 5 所述的光学延迟器，其特征在于：所述聚合物薄膜是双折射的。

8. 如权利要求 1 所述的光学延迟器，其特征在于：所述最大角 $\phi_{\max}$ 至少为 40 度。

9. 如权利要求 8 所述的光学延迟器，其特征在于：在入射角的范围内，所述延迟幅度 δ 的改变小于法向入射延迟幅度的约 15%。

10. 如权利要求 8 所述的光学延迟器, 其特征在于: 所述最大角 $\phi_{\max}$ 至少为 60 度。

11. 如权利要求 1 所述的光学延迟器, 其特征在于: 在入射角的范围内, 所述延迟幅度 δ 的改变小于法向入射延迟幅度的约 6%。

5 12. 如权利要求 1 所述的光学延迟器, 其特征在于: 所述丙烯腈基共聚物包括与一种(甲基)丙烯酸酯单聚物或多种单聚物相共聚的丙烯腈。

13. 如权利要求 12 所述的光学延迟器, 其特征在于: 所述的(甲基)丙烯酸酯单聚物包括选自丙烯腈甲酯、丙烯酸丙酯、丙烯酸丁酯、丙烯酸异辛酯或 2 乙基己基丙烯酸酯的单聚物。

10 14. 如权利要求 12 所述的光学延迟器, 其特征在于: 所述的(甲基)丙烯酸酯单聚物包括丙烯酸甲酯。

15. 如权利要求 14 所述的光学延迟器, 其特征在于: 所述的弹性体共聚物包括丁二烯与丙烯腈共聚。

15 16. 一种光学延迟器, 用于对在很宽入射角范围内入射在该延迟器上的可见光产生延迟, 所述入射角范围从垂直于延迟器平面的角度变化到至少约 30° 的最大角度 $\phi_{\max}$, 所述光学延迟器包括:

由丙烯腈基聚合物和弹性体共聚物的混合物组成的薄膜, 所述薄膜具有平面内延迟幅度 δ_{in} , 它可以由以下关系式来表示:

$$\delta_{in} = d(n_x - n_y)$$

20 式中: n_x 和 n_y 是薄膜对于沿薄膜平面内正交轴 x 和 y 偏振的有关波长的光的折射率, d 是薄膜在相互正交于平面内 x 和 y 轴的 z 轴方向上的厚度, 所述薄膜进一步具有平面外延迟幅度 δ_{out} , 它可以由以下关系式来表示:

$$\delta_{out} = d \left[\frac{n_z}{n_x} (n_x^2 - (\sin(\phi))^2)^{1/2} - (n_y^2 - (\sin(\phi))^2)^{1/2} \right]$$

25 式中: n_z 是薄膜对于沿 z 轴偏振的有关波长的光的折射率, ϕ 是 x - z 平面内的平面外入射角, 其特征在于: 对于以最大角 $\phi_{\max}$ 入射在薄膜上的有关波长的光, 平面内延迟 δ_{in} 与平面外延迟 δ_{out} 之间的延迟幅度差 $\Delta\delta$ 小于平面内延迟 δ_{in} 的约 25%。

17. 如权利要求 16 所述的光学延迟器, 其特征在于: 所述最大角 $\phi_{\max}$ 至少

为 40 度。

18. 一种延迟反射镜，用于以反射光基本上在垂直于初始偏振方向的方向上线偏振的方式反射在初始偏振方向上线偏振的可见光，入射在延迟器反射镜上的光的角度范围从垂直于延迟反射镜平面的角度到至少约 15° 的最大角度 ϕ_{max} ，所述延迟反射镜包括：

基本上为平面的反射基板；和

平行于所述反射基板设置的拉伸丙烯腈基聚合物延迟薄膜，所述延迟薄膜具有延迟幅度 δ ，它可以由以下关系式来表示：

$$\delta = d \left[\frac{n_x}{n_z} (n_x^2 - (\sin(\phi))^2)^{1/2} - (n_y^2 - (\sin(\phi))^2)^{1/2} \right]$$

式中： n_x 和 n_y 是延迟薄膜对于沿薄膜平面内正交轴 x 和 y 偏振的有关波长上的光的折射率， d 是延迟薄膜在相互正交于平面内 x 和 y 轴的 z 轴方向上的厚度， n_z 是延迟薄膜对于沿 z 轴偏振的有关波长的光的折射率， ϕ 代表 x - z 平面内的角度，光以该角度入射在延迟反射镜上，

- 15 其特征不在于：由延迟反射镜以最大角 ϕ_{max} 入射在延迟反射镜上的有关波长的反射光所引起的椭圆率在以垂直于延迟反射镜表面的角度入射在延迟反射镜上的有关波长的反射光的椭圆率的 25% 之内。

19. 一种设置在部分反射表面上且在相对较宽入射角范围内有效的减反射光学元件，用以大大地减少可见光从所述表面上反射，所述减反射光学元件
- 20 包括：

设置在入射光源与反射表面之间的吸收偏振器；和

位于偏振器与反射表面之间的由丙烯腈基聚合物薄膜组成的延迟器，所述延迟器接收偏振器透射的偏振光并使所述偏振光延迟一个延迟幅度 δ ，所述延迟幅度可以由以下关系式来表示：

$$\delta = d \left[\frac{n_x}{n_z} (n_x^2 - (\sin(\phi))^2)^{1/2} - (n_y^2 - (\sin(\phi))^2)^{1/2} \right]$$

25 式中： n_x 和 n_y 是薄膜对于沿薄膜平面内正交轴 x 和 y 偏振的有关波长的光的折射率， d 是薄膜在相互正交于平面内 x 和 y 轴的 z 轴方向上的厚度， n_z 是

薄膜对于沿 z 轴偏振的有关波长的光的折射率, ϕ 代表 x - z 平面内的角度, 光以该角度从偏振器透射到所述薄膜,

其特征在于: 以垂直于混合薄膜表面的角度入射在混合薄膜上的有关波长的光的延迟幅度 $\delta_{\phi=0^\circ}$ 在从法向入射测量以至少约 30° 的最大入射角入射在薄膜上的有关波长的光的延迟幅度 $\delta_{\phi_{\max}}$ 的 15% 之内。

宽角度光学延迟器

- 5 本申请是 1998 年 2 月 20 日提交的题为“宽角度光学延迟器”的第 98810262.5 号中国专利申请的分案申请。

技术领域

- 本发明一般地涉及光学延迟器，尤其涉及在宽范围入射角上可操作的光学
10 延迟器。

背景技术

- 光学延迟器通常用于以某种方式改变通过该延迟器的偏振光的相对相位。光学延迟器尤其适合应用于需要对偏振进行控制的场合。光的偏振一般指将电（或磁）场矢量振动限制在单个平面内。通常认为电磁辐射的偏振方向为电场矢
15 量来回振荡的方向。偏振矢量与光平面内的光束方向是正交的。

- 偏振光可以假设许多不同形式。在给定点上光束仅在一个方向上振荡的地方，将该光束称为线（或平面）偏振光。振荡的方向就是偏振方向。如果光束具有两个正交的相位变化相差 90° 的偏振方向，该光束称为椭圆或圆偏振光。圆偏振出现在两个振荡的幅度相等（即电场矢量尖端在圆上移动）时。椭圆偏振出
20 现在两个振荡的幅度不相等（即电场矢量尖端在椭圆上移动）时。相反，非偏振光的正交振荡是随机变化相位差的平均相等。

- 线偏振光可以通过从非偏振光束去除其电场在单个平面内振荡以外的所有波而获得。例如可以采用光学延迟器将线偏振光转变为圆或椭圆偏振光。当用于控制光的偏振时，通常将延迟器构造成导致 $1/2$ 和 $1/4$ 波延迟。通常，采
25 用这种延迟器在偏振光的两个线性分量之间产生所需的相对相位延迟。

- 光学延迟器的一种典型用途是作为补偿器，用于在入射光中引起相位差，以校正由系统中其它光学元件的机械或光学位移引起的偏振光两个分量之间的相位差。例如，在液晶显示器（LCD）中，液晶单元的双折射可能引起线偏振光变为少许椭圆偏振。采用延迟器将椭圆偏振光返回为线偏振光。将补偿延迟
30 器放置在光路中，对由液晶双折射引起的特定相位差作调谐。

典型光学延迟器是由双折射材料构成的。双折射材料沿延迟器两个正交平面内轴形成一个快光路和一个慢光路。当双折射延迟器的这两个轴以 45° 与入射光偏振方向对准时, 可以采用该延迟器来引起或者补偿两个偏振分量之间的相位差。双折射延迟器的快和慢光路是由沿延迟器平面内轴偏振的光的不同折射率产生的。通过增大两个平面内轴之间的折射率差和/或通过增大延迟器厚度可实现两个偏振轴之间较大的延迟差。因此, 通过控制延迟器中双折射材料的厚度和折射率, 便能够控制延迟器的光学性能。

除了沿延迟器平面内轴偏振的光的折射率外, 在厚度方向偏振的光的折射率也会影响延迟器在特定应用中的性能。例如, LCD 显示技术中所采用的补偿器必须对在相对较大角度范围上入射在补偿器上的光提供相对均匀的延迟。已经建议, 通过采用对厚度方向偏振的光具有受控的折射率的延迟薄膜, 可对 LCD 显示器获得展宽的宽视角范围。

目前试图生产具有均匀宽角度性能延迟器的尝试已经证明造价昂贵且难以制造, 在获得均匀宽角光学性能方面仅获得有限的成功。对获得均匀宽角度性能的尝试作了变化, 例如包括在拉伸时在垂直于拉伸方向的方向上使薄膜收缩、通过拉伸控制从熔化聚合物或聚合物溶液产生的原薄膜在施加电场下的双折射、将在电场下产生的薄膜层叠在传统相位延迟器上等等。这些处理通常是相当复杂和昂贵的, 仅获得有限的成功。由于在形成延迟器的双折射部分中所采用的工艺和材料变为更加复杂, 将这种材料组装到延迟器中的难度越来越大了。

发明内容

一般地, 本发明涉及光学延迟器。在一个实施例中, 提供一种光学延迟器, 它对在相对较宽入射角范围上入射在延迟器上的光产生均匀的延迟, 所述入射角范围从垂直于延迟器平面的角度变化到至少约 30° 的最大角度。光学延迟器可以包括一块基板和设置在该基板上的丙烯腈基聚合物和弹性体共聚物的混合薄膜。当入射角从法向入射变为以最大角度入射时, 延迟幅度的变化小于法向角度入射延迟的约 25%。在一个实施例中, 最大角度可以大于约 60 度。当最大角度较小时, 延迟的变化也较小。

在另一个实施例中, 提供一种丙烯腈基延迟器反射镜。使被延迟器反射镜

反射的线偏振光旋转成基本上正交的线性偏振。偏振方向的旋转在延迟器反射镜上相对较宽入射角范围上是相对均匀的。在另一个实施例中，抗反射光学结构包括丙烯酸基延迟器，以改善抗反射结构的离位角度性能。

本发明的上述概要并非希望描述本发明的每一个例举实施例或每一种实施方案。附图和下面给出的详细描述将更具体地例举各种实施例。

附图说明

考虑到以下结合附图所作的对本发明各个实施例的详细描述，将能更全面地理解本发明，附图中：

- 10 图 1A-1B 示出按照本发明一个实施例的延迟器。
- 图 2A-2C 示出按照本发明一个实施例的延迟器的特性。
- 图 3A-3C 示出按照本发明一个实施例的延迟器的特性。
- 图 4A-4B 示出按照本发明一个实施例的延迟器的特性。
- 图 5A-5B 示出按照本发明一个实施例的光学延迟器的一种具体应用。
- 15 图 6 示出按照本发明一个实施例的光学延迟器的另一种具体应用。
- 图 7 示出按照本发明一个实施例的光学延迟器的又一种具体应用。

具体实施方式

本发明可应用于许多光学延迟器。本发明尤其适合于在被延迟的光以相对较宽入射角范围入射在延迟器上的环境中使用的光学延迟器。这种延迟器非常

20 适合于用作光学补偿器、 $1/2$ 波和 $1/4$ 波延迟器等。为了便于说明本发明，下面将提供这种延迟器的各种不同例子。

下面将参考图 1A 描述按照本发明一个特定实施例的光学延迟器。图 1A 中的光学延迟器 101 由丙烯酸基聚合物薄膜形成。薄膜可以用三个彼此正交的轴，

25 即两个平面内的轴 x 和 y 及在薄膜厚度方向的第三轴 z 来描述。正如图 1B 所示，图 1A 中所示的丙烯酸基延迟薄膜 101 可以设置在基板 105 上。基板 105 可以用作不同用途。例如，基板可以是光学中性的，如玻璃，以及主要用作其机械特性和/或作为将延迟薄膜 101 固定到其它光学元件的基础。基板也可以起到一种或多种光学功能。例如，基板可以是反射镜、偏振器等，这里延迟薄膜的功能是作为较大光学结构中的光学延迟器。基板也可以是一种聚合物薄膜。

30 聚合物薄膜可以是各向同性的或者可以是双折射(平面内或平面外)的，与

丙烯酸基延迟器的光学性能合作获得所需的全光学性能。薄膜也可以与补偿器薄膜相组合，以改善光学性能。

通常，延迟薄膜 101 可与任何合适的基板 105 合用。可以将延迟薄膜 101 层叠在基板上，用粘合剂固定，或者以其它合适方式设置在基板上。应当注意，
5 要保证将延迟薄膜 101 设置在基板 105 上所采用的工艺和方式不会对最终延迟构造的光学性能产生不利影响。

正如下文更全面地描述的，结合本发明已经确定，丙烯酸基延迟薄膜尤其适合于要求在宽角度范围入射在延迟器上的光具有相对比较均匀延迟的这些应用中。再参考图 1A，对于在 x、y 和 z 轴的方向上分别偏振的光，延迟器 101
10 的延迟和角度性能是薄膜厚度 d 和薄膜的相对折射率 n_x 、 n_y 和 n_z 的函数。沿平面内轴的双折射为入射在薄膜上的偏振光例如产生短路径和长路径。通常，光以偏振方向与平面内折射率轴以 45° 角对准入射在薄膜上。

薄膜的延迟通常定义为沿平行入射面方向 (p) 和垂直入射面方向 (s) 对准的偏振光 E_p 和 E_s 的线性分量之间引入的相位差。例如在理想的 $1/4$ 波延迟器
15 中，沿一根轴偏振的光 (即沿该轴的偏振光) 相对于沿平面内另一根轴偏振的光被延迟其波长的四分之一。当偏振光起始是线偏振光时，两个分量或是同相或是相位相差 180° (即相位差等于 0 或 π 弧度)。当线偏振光通过 $1/4$ 波延迟器时，在两个分量之间引入 $\pi/2$ 弧度的相位差。两个分量 E_p 和 E_s 之间的总相位差现在是 $\pi/2$ 和 $3\pi/2$ 弧度。以这种方式，可以采用 $1/4$ 波延迟器在线偏振光与圆偏
20 振光之间进行转换。

当光以垂直于延迟器平面的角度入射在延迟器上时，延迟是薄膜厚度和平面内折射率 n_y 与 n_x 之差的函数。当入射角度偏离法向入射时，通过延迟器的光的延迟还受在延迟器厚度方向 z 偏振的光的折射率 n_z 的影响。

通过将法向入射的延迟幅度与偏离法向入射的入射光的延迟幅度进行比较可以研究给定延迟器的离位性能。
25

对于已知折射率的给定延迟器，利用以下关系式可以检查在不同角度下延迟的相对幅度：

$$(1) \quad \delta = d \left[\frac{n_x}{n_z} (n_z^2 - (\sin(\phi))^2)^{1/2} - (n_y^2 - (\sin(\phi))^2)^{1/2} \right]$$

式中 δ 是 s 和 p 场之间的延迟幅度，d 是薄膜厚度， n_x 、 n_y 和 n_z 是对于给定

波长的光薄膜的各个折射率, ϕ 是 x - z 平面内的入射角度(从垂直于薄膜平面的轴起测量)。因此, 方程式(1)中延迟幅度代表当入射光通过延迟器时入射光中 s 和 p 偏振光分量所经历的延迟差与 x - z 平面内入射角的函数。应当明白, 方程式(1)作为表示延迟的一种方法。可以导出类似的表示, 表示光的延迟与其它平面(例如 y - z 平面)内变化的光的函数。

在上述关系式中, 当光以垂直于薄膜的方向(即 $\phi=0$)入射在薄膜上时, 延迟幅度 δ 简化为厚度 d 和平面内折射率差的函数, 由以下关系式表示:

$$(2) \quad \delta = d(n_x - n_y)$$

因此, 所需的法向角度入射光的延迟可以通过控制薄膜厚度和平面内折射率获得。通过增大 n_x 与 n_y 之间的差和/或增大厚度可以获得更大的延迟。

所需的延迟量通常取决于将采用延迟器的特定应用和要延迟的光的波长。例如, 典型的 $1/4$ 波延迟器的延迟值在约 115nm 至 158nm 的范围。典型的 $1/2$ 波延迟器的延迟值在约 230nm 至 316nm 的范围。也可以采用全波延迟器使两个分量的相位简单延迟 2π 弧度。有许多应用特别适合于延迟值在 115nm 至 158nm 的丙烯酸基延迟器。除非另外注明, 在以下讨论中, 采用波长约为 550nm(大约为可见光的中心波长)的光表示延迟器的性能。虽然适当地采用这种光作为表示延迟器特性的一种手段, 但是应当明白, 可以采用延迟器在整个可见光范围内或者以其任何特定波长或波段进行光延迟。

可以采用法向角度入射的光的延迟与偏离法向(离位)的光的延迟之差来确定光学延迟器在光从法向到最大离位角度的宽角度范围内入射在延迟器上的应用中的合适程度。正如下面更详细描述, 丙烯酸基延迟器提供异常好的离位光学性能。

通常, 在通过拉伸或抽拉材料在聚合物材料中引起双折射。当材料被拉伸时, 分子趋向于在拉伸方向上对准。引起的分子取向对在拉伸与非拉伸方向偏振的光产生折射率差。拉伸聚合物薄膜不仅引起在拉伸方向偏振的光的折射率变化, 而且引起在非拉伸和厚度方向上的变化。例如, 在利用拉幅机的典型控制条件下, 非拉伸和厚度方向上偏振的光的折射率变化通常是很不同的。结果, 当对薄膜进行拉伸以获得所需平面内折射率失配时, 厚度方向折射率可以与平面内折射率中的任何一个不匹配。虽然这种变化可以不影响采用法向入射光的延迟器的性能, 但是当对离位入射光延迟时, 尤其是在采用相对较大角度

的地方, 这种变化明显地影响延迟器性能。

从方程式(1)可以确定, 当在厚度方向偏振的光的折射率 n_z 介于平面内折射率 n_y 与 n_x 之间时, 可获得改善的离位性能。然而, 在典型拉制条件下, 拉制的聚合物薄膜的厚度方向折射率 n_z 并不落在平面内折射率 n_y 和 n_x 之间。根据
5 本发明, 当对丙烯腈基聚合物进行拉伸时, 在平面内折射率之间能够获得所需的失配, 同时, 在非拉伸和厚度方向偏振的光的折射率基本维持相等。此外, 即使在以限制在非拉伸方向的尺寸缩小的方式拉制薄膜时(例如当利用传统拉幅机对薄膜进行拉伸时), 也获得紧密匹配的 n_y 与 n_x 折射率。

从方程式(1)将会明白, 当入射角增大时, 延迟量变化。在本发明的丙烯腈基延迟器中, 由于折射率(例如 n_y 和 n_x)基本上相等, 所以延迟的变化幅度明显减小。相反, 诸如聚丙烯的典型双折射聚合物当在传统拉幅机中拉伸时显示
10 在非拉伸方向与厚度方向的折射率失配在 0.009 的量级。这一失配的结果, 当与丙烯腈基延迟器比较时, 这种延迟器的离位性能被明显削弱。

虽然在利用法向和近法向入射光的延迟器应用中可以采用基于丙烯酸
15 延迟薄膜, 但是这种延迟器尤其适合于用在入射光从法向入射变为离位入射角至少约 30° 的应用中。在这种应用中, 利用丙烯腈基延迟器允许获得法向与离位入射光之间的延迟差, 它小于法向入射延迟的 15%, 小于 10% 则更佳, 小于约 6% 则更加好。随着离位入射角增大, 延迟差也增大。然而, 在高达 60° 的离位角度下, 丙烯腈基延迟器的延迟差小于法向入射延迟的 30%, 小于约
20 25% 则更佳, 小于约 20% 则更加好。也可以采用丙烯腈基延迟器来获得较低入射角的均匀延迟。例如, 当最大离位角至少约为 15° 或者更小时可获得这种优点。下面将提供丙烯腈基延迟器的示范实施例。

如上所述, 为生产宽角度延迟器所推荐和采用的制造技术是复杂又昂贵的。这些技术通常涉及将多种材料层叠在一起、利用高度专用设备对双折射材
25 料进行拉伸以人为地控制各个折射率的步骤。相反, 在本发明的一个实施例中, 丙烯腈基延迟器能够利用标准处理设备制备, 如用拉幅机进行拉伸, 很少或不需要作改进。因此, 能够明显地节约成本。此外, 该过程便于获得高产量, 进一步降低生产丙烯酸基延迟器的成本。

发现尤其适合于作光学延迟器的一种丙烯腈基薄膜是丙烯腈相与初化相
30 的混合物。例如, 一种弹性体(橡胶)共聚物可以用作混合物中的初化剂。增加

韧化相可以获得许多好处。例如，最终的薄膜抗碰撞能力将提高，薄膜更柔软并展现抗断裂、分裂和撕裂的能力提高。弹性体相也可以增强控制能力。

然而，在光学延迟器的形成中还必须考虑到韧化相的流加。正如下面将全面地讨论的，根据本发明一个实施例，丙烯腈基聚合物和弹性体共聚物的混合物被单轴拉伸以获得所需的双折射和延迟器厚度。由于丙烯腈聚合物和弹性体共聚物相对于所施加的应变是相反双折射，应变引起的弹性体相的折射率变化减小了拉伸薄膜的总延迟。因此，包含弹性体共聚物的丙烯腈基混合薄膜必须制成比没有弹性体共聚物的丙烯腈基薄膜更厚，以便获得相同的总延迟。然而，厚度增加也增加了总吸收和离位延迟。这些会导致透射强度降低和/或离位颜色变化，二者对于许多延迟应用可能是有害的。在改善薄膜处理和加工的特定情况中，厚度增加可能也是需要的(例如，较厚的薄膜可能更容易被层叠)。

根据特定的应用，可以给混合物增加不同量的韧化共聚物。通常，在冲突的利益之间必须找到平衡。例如，对于增加的厚度，必须对所采用的韧化剂的量称重，以获得所需的延迟。通常，在采用弹性体共聚物的地方，要求弹性体相的重量小于约 18%-20%。在需要相对较高透射的地方，要求弹性体相小于约 15%，小于约 10%则较好，小于约 5%更好。

当应用韧化剂时，还必须考虑韧化剂的其它光学特性。通常要求丙烯腈基聚合物和韧化剂的折射率相对比较接近。这对于使通过延迟器的光的漫散射和反射减至最低是重要的，因为它与不同的相相互作用。在以上的例子中，在对丙烯腈基聚合物和弹性体共聚物进行拉伸前通过使各向同性折射率相匹配能够获得比较接近的匹配。虽然在拉伸薄膜中可以不产生严格匹配，由于在拉伸期间折射率的不同变化，对于许多应用折射率是足够接近的。也可以选择材料、组分和初始折射率，以致于在定向过程中两种相的折射率彼此接近，进一步降低或消除对拉伸薄膜的危害。

为了便于理解本发明，将描述示范的延迟器，它们包括丙烯腈基聚合物/弹性体共聚物的混合物。虽然下面的例子描述一种过程，其中网纹织物是铸造的，然后利用拉幅机在横向方向上定向，但也可以采用许多其它典型薄膜处理技术中的任何一种。例如，聚合物可以挤压铸造或溶剂铸造的。网纹织物可以铸造在表面敞开的轮子上或者铸造在辊隙(nip)中。可以用不同方法影响定

向。例如，可以单轴地(机器或横向方向)或者利用典型机器方向定向器和/或拉幅机(例如机械和线性电机)双轴地拉伸薄膜。也可以利用吹制薄膜(例如单或双气泡)处理、通过在辊隙中进行研光、在冷却前通过将熔化聚合物拉伸成网纹织物对薄膜进行定向。

5 在一个特定实施例中，延迟器是利用改进橡胶、丙烯腈-甲基丙烯酸酯共聚物(72-99.5%共聚物、18-0.5%弹性体相)制造的。丙烯腈-甲基丙烯酸酯共聚物组分范围为 70-100%丙烯腈和 30-0%甲基丙烯酸酯。弹性体相含有 70-90%丁二烯与 30-10%丙烯腈。具有 10%和 18%弹性体相的改进橡胶、丙烯腈-甲基丙烯酸酯共聚物可由 BP Chemicals 公司(Barex®210 和 218)提供。

10 虽然这里提供的例子采用丙烯腈与甲基丙烯酸酯共聚，但也可以采用其它类型的丙烯腈基共聚物。例如，通过丙烯腈与各种各样的(甲基)丙烯酸酯单聚物(它们具有小于约 20℃的玻璃转变温度 T_g)共聚，能够获得含有丙烯腈的合适共聚物。这些(甲基)丙烯酸酯单聚物包括例如丙烯酸甲酯、丙烯酸丙酯、丙烯酸丁酯、丙烯酸异辛酯和 2 乙基己基丙烯酸酯或这些单聚物的混合物。

15 根据本发明的一个实施例，制造了改进橡胶丙烯腈基光学延迟器。延迟器是含有 10%或是 18%弹性体相的丙烯腈基组分。共聚物相组分为 75%丙烯腈和 25%丙烯酸甲酯。弹性体相含有 70%丁二烯和 30%丙烯腈。如上所述，含有弹性体相给组分提供韧性。选择两种相的组分(共聚物和丁二烯基弹性体相)以获得紧密匹配的折射率。这种组分可以由 BP Chemicals 公司(Barex®210 和
20 218)提供挤压和注模等级。Barex®族的丙烯腈树脂通常用于形成高的气体阻挡层填充材料等。

铸造的上述组分的网纹织物的起始厚度在 254-355 μm 的范围。对铸造的网纹织物进行处理，以获得约 100-140nm 的目标延迟值。在拉幅机中对铸造的网纹织物进行单轴拉制。这种薄膜的拉制温度通常在约 25℃至 120℃的范围。拉
25 制温度在约 90℃至 110℃之间则较好，在约 90℃至 105℃之间更好。这种处理的拉制比例在约 1.5:1 至 5.0:1 的范围。拉制比例在约 2.0:1 至 5.0:1 之间则较好，在约 2.5:1 至 4.0:1 之间则更好。合适的拉制率在每秒约 1%至 3000%的范围。拉制率在每秒约 5%与 1000%之间则较好，在每秒约 10%至 200%之间则更好。

30 当应用 10%弹性体组分时，产生厚度范围在 63 至 115 μm 的光学延迟薄膜，

它提供所需的延迟范围。薄膜还显示最小的离位显色。这种薄膜的透射强度超过 92%。

当应用 18% 的弹性体组分时，显然，只有采用厚得多的初始网纹织物增大拉制厚度(例如 254-635 μm)才能获得目标延迟值。因此，由 18% 弹性体相组成的延迟器的透射率降低，且离位性能变差。弹性体相的最佳浓度在 5—10% 之间。相信这样的浓度可以找到需要相对较高延迟值和光透射率的最佳平衡。正如下文将更详细描述，可以采用一种相对比较廉价的方式制造由含有约 10% 弹性体相的组分制成的延迟器，在宽的入射角范围内具有相对均匀的性能。

如上所述，在丙烯腈基组分中含有诸如弹性体相的初化剂会降低通过拉伸在薄膜中引起所需双折射的能力。在典型拉幅机处理中，因为在许多情况中必须将薄膜拉伸至接近其断裂点以获得所需的延迟，所以要求初始网纹织物在拉伸前在机器方向上基本上不定向。这是因为在拉伸方向上能够获得所需的定向前，在拉幅机操作期间必须克服在非拉伸方向上的初始定向。在拉幅机中控制 10% 改进橡胶的丙烯腈基网纹织物以获得高透射率的 1/4 波延迟器，例如通常需要预拉伸的网纹织物在机器方向上没有任何定向。因此，必须以这样的方式对铸造网纹织物进行初始铸造，该方法使在机器方向的无意或残留分子取向减至最小，在特定情况中则消除。

在特定情况中，在初始取向的方向上可以对薄膜进行拉伸，该初始取向将放宽对铸造过程的要求。例如，薄膜可以是铸造的，然后利用长度定向器(L0)在机器方向上拉制。这种 L0 处理可以利用初始机器方向。事实上，在这种情况下，机器方向取向可以在铸造期间有意地引导，有助于形成所需的双折射。也可以使用其它的定向处理。例如，机器方向取向可以在它退出模具后以及固化前在熔化聚合物中引导。通常，要求在拉伸前薄膜在非拉伸方向上基本上没有定向，不管对薄膜进行拉伸的方式和/或方向如何。

虽然以上描述了均匀厚度的铸造网纹织物，但是也可改变铸造网纹织物的厚度。如上所述，延迟是延迟器厚度的函数。因此，通过控制铸造工艺过程，在网纹织物的不同点处产生厚度差，可以产生在薄膜上具有变化延迟分布的延迟器薄膜。

利用一般的拉幅机在正交于铸造方向的方向上可以拉制出本发明的铸造网纹织物。选择拉制温度、速率和比率，在拉制网纹织物的平面内折射率之间

引起所需的折射率差。采用这种方式, 根据关系式 $\delta=d(n_y-n_z)$ 可获得所需的延迟 δ , 对于在非拉伸和厚度方向偏振的光, 拉制网纹织物的折射率基本上匹配。从方程式(1)可以确定离位延迟(n_y 和 n_z 基本上相等)。

图 2A-2C 示出根据本发明的丙烯腈基延迟器的各种光学性能。利用上述的一般工艺, 获得透明的丙烯腈基延迟器薄膜。采用 10% 橡胶改进的丙烯腈-丙烯酸甲酯 312 μm 厚挤压的网纹织物, 其中在其形成时基本上保持初始各向同性。在十字方向上将网纹织物单轴拉伸至 3 倍于其初始宽度。拉制温度约为 90 $^{\circ}\text{C}$ 。最终的薄膜厚度约为 88.5 μm , 对于在拉伸方向偏振的 550nm 光的折射率为 1.5128(n_z), 对于在非拉伸和厚度方向上偏振的 550nm 光的折射率(分别为 n_y 和 n_x)为 1.5142。

测量上述薄膜的延迟值并与利用方程式(1)确定的延迟值进行比较。图 2A 示出对于薄膜在法向、10 $^{\circ}$ 、30 $^{\circ}$ 和 40 $^{\circ}$ 入射角测得的延迟值 201 与利用方程式(1)由测得折射率导出的延迟值的比较。延迟的差值随入射角从法向增大到 40 $^{\circ}$ 约为法向入射延迟的 10% (13nm)。相反, 具有相似法向角度延迟的聚丙烯薄膜在 40 $^{\circ}$ 入射角下将改变约 50% (60nm)。聚苯乙烯薄膜的延迟对于在 40 $^{\circ}$ 离位入射的光下降约 80% (100nm), 而在法向角度入射下具有可以接受的延迟性能。

利用方程式(1), 确定上述薄膜当入射光从法向入射开始偏移时的延迟差。图 2B 列出了薄膜在不同入射角度下的延迟值(nm)211、当入射光偏移到离位时的延迟变化 213 以及在各个入射角度下的延迟作为法向角度入射时延迟的百分比。图 2C 示出薄膜的延迟值(nm)与入射角的函数关系曲线。

第二种丙烯腈基延迟器薄膜是通过在 95 $^{\circ}\text{C}$ 的温度下在十字方向上将 317.5 μm 厚的光学各向同性挤压薄膜单轴拉伸至 4 倍于其原始宽度而产生的。产生的薄膜约 48 μm 。对于 488nm、550nm 和 700nm 的光, 测量沿每个方向偏振的光的折射率, n_z 为在拉伸方向上偏振的光的折射率, 结果如下:

	488nm	550nm	700nm
n_z	1.51162	1.51124	1.51055
n_y	1.51175	1.51139	1.51066
n_x	1.51174	1.51139	1.51066

图 3A 示出一张对于以不同角度 301 入射在薄膜上的 550nm 光的延迟值 (nm) 303 的表。图 3A 还列出了当入射光从法向入射偏移时延迟 (nm) 的差 305。图 3A 进一步列出了在离位入射角下延迟作为在法向角度入射下延迟值的百分比 307。图 3B 示出延迟值 (nm) 311 与入射角的函数关系曲线。图 3C 示出延迟差 (nm) 与角度的函数关系。正如这些图所示, 同其它单个薄膜延迟器相比, 丙烯酸基延迟器的离位性能相对比较均匀, 这使该延迟器尤为适合于要求宽入射角范围内具有均匀延迟的许多应用。

如上所述, 丙烯酸基延迟器的离位性能的提高是由 n_y 与 n_x 折射率的匹配导致的。图 4A-4B 示出 n_y 与 n_x 之间的差值增大是如何影响延迟器的离位性能的。在图 4A 中, 示出的丙烯酸基延迟器的延迟值 401 (为入射角的函数) 是针对结合图 3A-3C 所描述的延迟器的。列 403、405 和 407 示出当折射率 n_y 与 n_x 的差分别从 0.0003 增大到 0.0009 时具有相同法向轴延迟值的延迟器的离位性能。在宽入射角度下的延迟明显变化。

正如图 4A 示出的, n_y 与 n_x 之间较大的差值引起在较大入射角度下延迟下降的增大。在特定的应用中, 可能要求法向入射与在 60° 下入射之间的总延迟差小于法向入射延迟的约 20% (例如 20-30nm)。这可以利用丙烯酸基延迟器来获得, 它具有基本上相等的 n_y 和 n_x 折射率。例如, 正如以上数据表示的, 等于至少第四个小数位的折射率提供相对均匀的宽角度性能。图 4B 绘出上述薄膜离位延迟 411 与由折射率计算的这些延迟的比较。

正如图 4A 和 4B 中数据所示的, n_y 和 n_x 即使少许偏差也会明显地影响延迟器的离位性能。这就增强了丙烯酸基光学延迟器的特定适用能力, 尤其是在需要均匀的宽角度性能的应用中所使用的这些延迟器。此外, 利用允许产生具有均匀厚度和光学特性的较大延迟器而且较简单的工艺能够制备这种延迟器。

虽然在以上的例子中, 将丁二烯弹性体钝化材料加到丙烯酸基延迟器中, 但是将会明白, 其它的丙烯酸基延迟器将具有相似的所需光学特性。通常, 可以将其它的合适材料加到延迟器中, 只要该材料并不明显地影响延迟器的光学性能。例如, 可以采用 2 甲基丁二烯基橡胶、天然橡胶等。

如上所述, 丙烯酸基延迟器尤其适合于在宽入射角度范围内需要相对均匀延迟的应用。下面将描述在这些应用中的本发明较具体的实施例。

根据本发明的一个实施例,采用丙烯腈基延迟器作为延迟器或偏振旋转反射镜的基础。通过一个例子,但并不希望局限于该示例,将描述特定的 1/4 波反射镜。采用 1/4 波反射镜使线偏振光从反射镜反射后偏振方向旋转 90°。图 5A 示出一种具体的 1/4 波反射镜配置 500。丙烯腈基延迟器 501 设置在平行于反射镜 503 反射表面的平面内。光源将线偏振光 505 以入射角 ϕ 投射在反射镜上。延迟器 501 相对于入射光取向,使垂直于其表面的角度(即 $\phi=0$)入射在延迟器上的光被延迟其波长的四分之一。在这一结构中,线偏振光 505 当它通过延迟器 501 时被转变为圆偏振光 505A,具有第一旋转方向。

圆偏振光 505A 反射离开反射镜 503 的表面。被反射镜 503 反射的光 505B 是具有相反旋转方向的圆偏振光。反射光以角度 ϕ 返回投射在延迟器 501 上。当反射的圆偏振光 505B 第二次通过延迟器 501 时,引入另一个 1/4 波相位差,将圆偏振光 505B 转变为线偏振光 507。被反射的线偏振光 507 的偏振方向与入射光 505 的初始偏振方向基本上正交。

将会明白,以上描述假设对于每一次通过延迟器 501 是法向入射以及精确的 1/4 波延迟。当入射角 ϕ 偏离法向时,由于延迟器 501 的离位延迟偏差的结果,将影响相对相位漂移。因此,当线偏振光 505 以较大的入射角通过延迟器时,被延迟器 501 引入到偏振光中的椭圆率增大。当离位入射光被反射时,它也是以入射角 ϕ 反向通过延迟器,假设反射镜是基本平坦的。由离位延迟差引入的椭圆率将加到由第一次通过所引入的椭圆率。

正如以上讨论说明的,初始的线偏振光 505 二次通过延迟器。引入到被 1/4 波反射镜 500 反射的性偏振光 507 中的椭圆率将随入射角的变化而变化。这种椭圆率会退化依赖于反射光线偏振状态的这些应用的性能。于是,在利用 1/4 波反射镜和相对较宽入射角的应用中,需要使离位延迟差减至最小,以致于反射光将基本上是线偏振光,偏振方向被旋转 90°。

正如从以上描述所明白的,采用丙烯腈基延迟器构成的 1/4 波反射镜 500 以能够以相对较低的成本和复杂性构造的形式提供比较均匀的离位性能。这种结构允许线偏振光的偏振方向旋转,而对于在相对较大入射角下旋转的线偏振光基本上不引入椭圆率。通常,要求在离位入射角下引入的偏离 0 椭圆率的任何偏差小于约 10%。偏差小于约 5%则更好。在特定入射中,对于所有的入射角,椭圆率小于 1%是必须的。正如从丙烯腈基延迟器的以上描述中将会明白

的, 鉴于延迟器特定的宽角度光学性能, 能够获得上述结果。

在图 5A 中, 示出的延迟器 501 与反射镜 503 是分开的。在图 5B 中, 示出延迟反射镜 510 的另一个实施例, 其中丙烯腈基延迟器 511 通过粘合剂 514 层叠或者以其它方式固定于反射镜 513 上。这种反射镜配置的光学性能通常与以上结合图 5A 所描述的性能相同。然而, 应当考虑到由本结构引入的任何附加元件。例如, 必须考虑叠层缺陷、粘合剂的折射率等。

图 6 示出一个光学系统, 该系统装有例如图 5A 和 5B 中所示类型的延迟器反射镜。图 6 所示的光学系统是一种具有折叠光路的投影显示系统 600。折叠光路投影显示系统的一般操作示于图 6 中。正如下面将更详细描述, 投影系统 600 装有丙烯腈基 1/4 波延迟器/反射镜配置 605, 作为必须在大入射角范围内工作的关键元件。显示系统 600 的操作还要求被 1/4 波延迟器/反射镜配置 605 反射的光是高度线偏振的(例如, 呈现最小的椭圆率)。对于这种系统的更详细的描述, 可参考题目为“背投图象显示装置用的含有反射偏振器的光学系统”的第 5,557,343 号美国专利和题目为“投影图象”的公开的欧洲申请 EP 0,783,133。

在图 6 的光学系统中, 代表待显示图象的光从图象源 601 投影到显示屏组件 603 上。来自光源 601 的光 602 以第一方向线偏振。显示屏组件 603 的背面包括一个反射偏振器。反射偏振薄膜是由 3M 公司提供的, 商品名为双亮度增强薄膜(DBEF)。其它的反射偏振薄膜在 1995 年 3 月 10 日提交的题目为“光学薄膜”的美国专利申请 08/402,041 和 1996 年 2 月 29 日提交的题目为“光学薄膜”的美国专利申请 08/610,092 中有描述, 这里将其内容引作参考。

显示屏组件的反射偏振器反射一种特定线偏振光而透射相反(正交)的线偏振光。反射偏振器的取向和开始入射在反射偏振器上的光的偏振方向是这样的, 即入射光最初被反射偏振器反射到丙烯腈基延迟反射镜组件 605 上。延迟反射镜组件 605 可以是图 5A 和 5B 所示的类型, 其作用是将线偏振光的偏振方向旋转 90°。

在操作中, 线偏振光被反射偏振器反射并入射在延迟反射镜 605 上。光被反射后, 偏振方向旋转 90°, 使得偏振方向现在与反射偏振器的通过方向相对准。因此, 光通过显示屏组件 603 供人们观看。要求所有的光都通过显示屏, 以增大观看亮度。然而, 光中的任何椭圆率将降低通过显示屏的光量, 因为仍

然与正交偏振方向对准的光的分量将被显示屏所反射。

正如从图 6 所示的光学几何关系中将能明白的,光将在很大的入射角范围(ϕ_1 、 ϕ_2 、 $\dots\phi_n$)内入射在延迟器反射镜 605 上。在这种应用中,入射的最大角度可以是相当大的。如上所述,引入到被延迟器反射镜 605 反射的光中的任何椭圆率将会使显示装置的总体性能降低。在图 6 所示的投影装置中,延迟器反射镜 605 是由丙烯酸基延迟器形成的,所以当入射角变化时,使引入到反射光中的椭圆率减至最小。通常要求在这种系统中偏离零椭圆率的偏差小于 5%。在特定的情况中,椭圆率甚至小于 1%则更好。以上的讨论假设在法向入射角下椭圆率为零,如果在法向入射角下入射在延迟器反射镜上的光还以一些椭圆率被延迟器反射镜所反射,最大椭圆率的较佳百分比是合适的。

可以将以上描述的丙烯酸基延迟器装到在上述容限内呈现椭圆率偏差的延迟反射镜中。因此,装有丙烯酸基延迟器反射镜的投影装置的性能将比许多典型延迟器有所提高,并能够相对廉价地制造。此外,按照如上所述制造的丙烯酸基延迟器非常适合于层叠在反射镜表面和其它基板上。

图 7 示出按照本发明又一个特定实施例的光学结构。在图 7 的实施例中,将丙烯酸基延迟器 701 装到防眩光学结构中。防眩光学结构包括一个吸收偏振器 703,例如二向色性偏振器。偏振器 703 使入射在偏振器上的非偏振光 705 线偏振。使丙烯酸基延迟器 701 相对于吸收偏振器定向,将线偏振光 706 转变为具有第一旋转方向的圆偏振光。如果圆偏振光反射离开光学元件 707(它被防眩结构所保护)的表面,则光作为以相反方向旋转的圆偏振光而反射。圆偏振光 708 反向通过延迟器 701。因此,正如在上述延迟反射镜的情况一样,光的偏振方向现在被旋转 90°。旋转 90°的光落在吸收偏振器上,这时在吸收方向上线偏振,由此禁止或防止从光学元件 707 表面反射的光从防眩结构出射。

光学元件 707 可以是任何类型的反射表面,这里要求降低眩目。例如,它可以是计算机监视器的显示屏。在这种应用中,可以用多种常见方法中的任何一种方法将偏振器 703 和丙烯酸基延迟器 701 固定或者定位在监视器前面。将会明白,当光学元件 707 是监视器时,从监视器出射的光 721 将通过丙烯酸基延迟器 701 并被吸收偏振器 703 偏振。

正如对延迟器反射镜的以上描述一样,丙烯酸基延迟器的离位性能对保证被光学元件 707 反射的光正确地偏振并在反射时被吸收偏振器 703 吸收是至关

重要的。此外，将会明白，抗反射光学结构可以看到相对较大的入射角 ϕ 。例如，计算机监视器经常被用在以相对于监视器倾斜的角度下对引起反射和眩目的光源定位的环境中。因此，延迟器的宽角度性能的改善进一步降低或消除来自被保护光学元件 707 的眩目或反射。

- 5 在一个实施例中，面向入射光的吸收偏振器 703 的表面可以涂覆 A/R 涂层，以降低来自偏振器的任何反射。也可以将吸收偏振器 703 层叠或固定到诸如玻璃或其它薄膜的基板上。基板也可以涂覆 A/R 涂层。1/4 波薄膜 701 也可以通过层叠或其它方式固定到基板上。在特定的场合中，它可以是固定了偏振器的同一块基板。可以将各种元件层叠在玻璃之间。一个或多个玻璃表面也可以涂覆 A/R 涂层。
- 10

如上所述，本发明可以应用于许多光学延迟器。相信在宽角度范围内将光入射在延迟器上的应用中是特别有用的。于是，不应当将本发明理解为局限于以上所述的特定例子，而是应当理解为覆盖所附权利要求书中限定的本发明的所有方面。

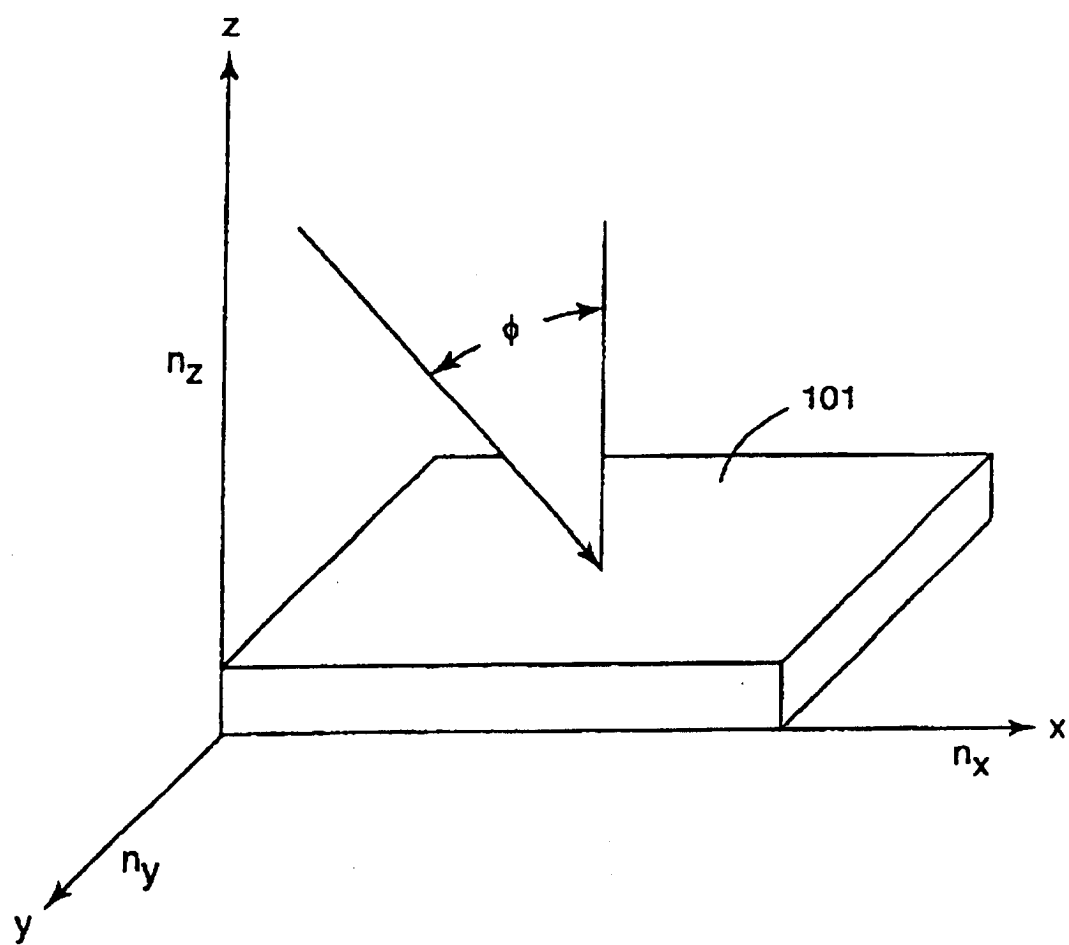


图 1A

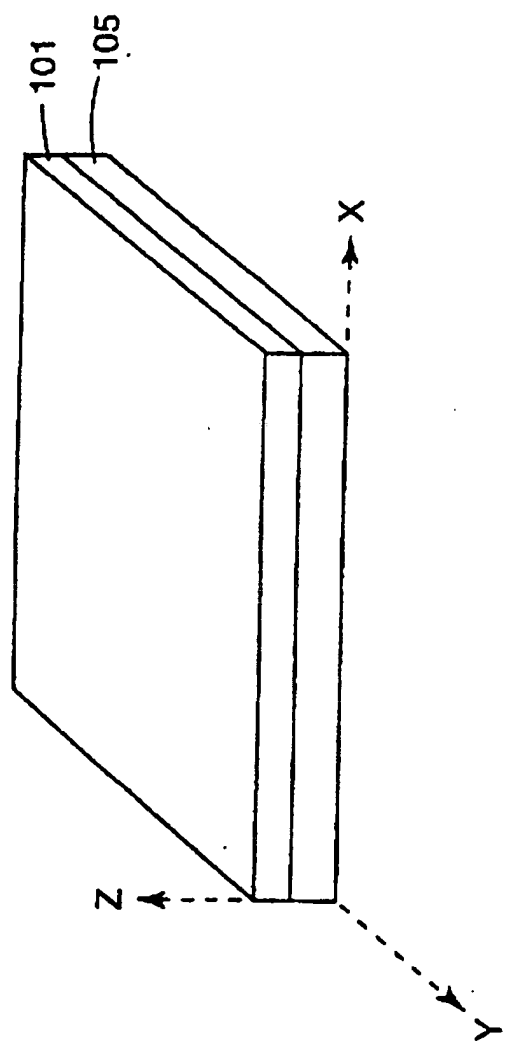


图 1B

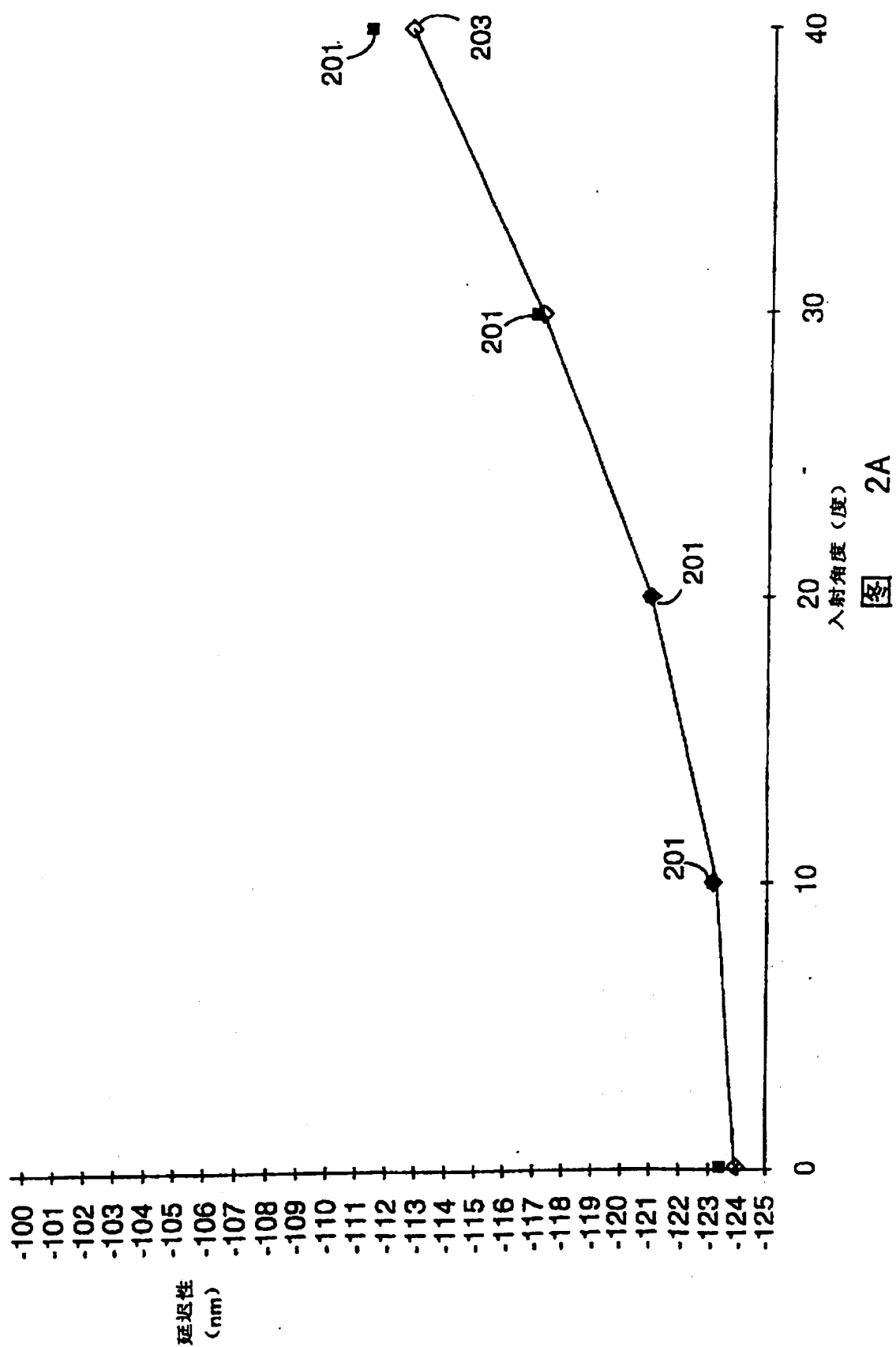


图 2A

角度 (度)	延迟性 (nm)	差.(nm)	百分比
80	-94.12	-29.78	76.0
70	-97.15	-26.75	78.4
60	-101.63	-22.27	82.0
50	-106.87	-17.03	86.3
40	-112.18	-11.72	90.5
30	-116.95	-6.95	94.4
20	-120.70	-3.20	97.4
10	-123.08	-0.82	99.3
0	-123.90	0.00	100.0
-10	-123.08	-0.82	99.3
-20	-120.70	-3.20	97.4
-30	-116.95	-6.95	94.4
-40	-112.18	-11.72	90.5
-50	-106.87	-17.03	86.3
-60	-101.63	-22.27	82.0
-70	-97.15	-26.75	78.4
-80	-94.12	-29.78	76.0

图 2B

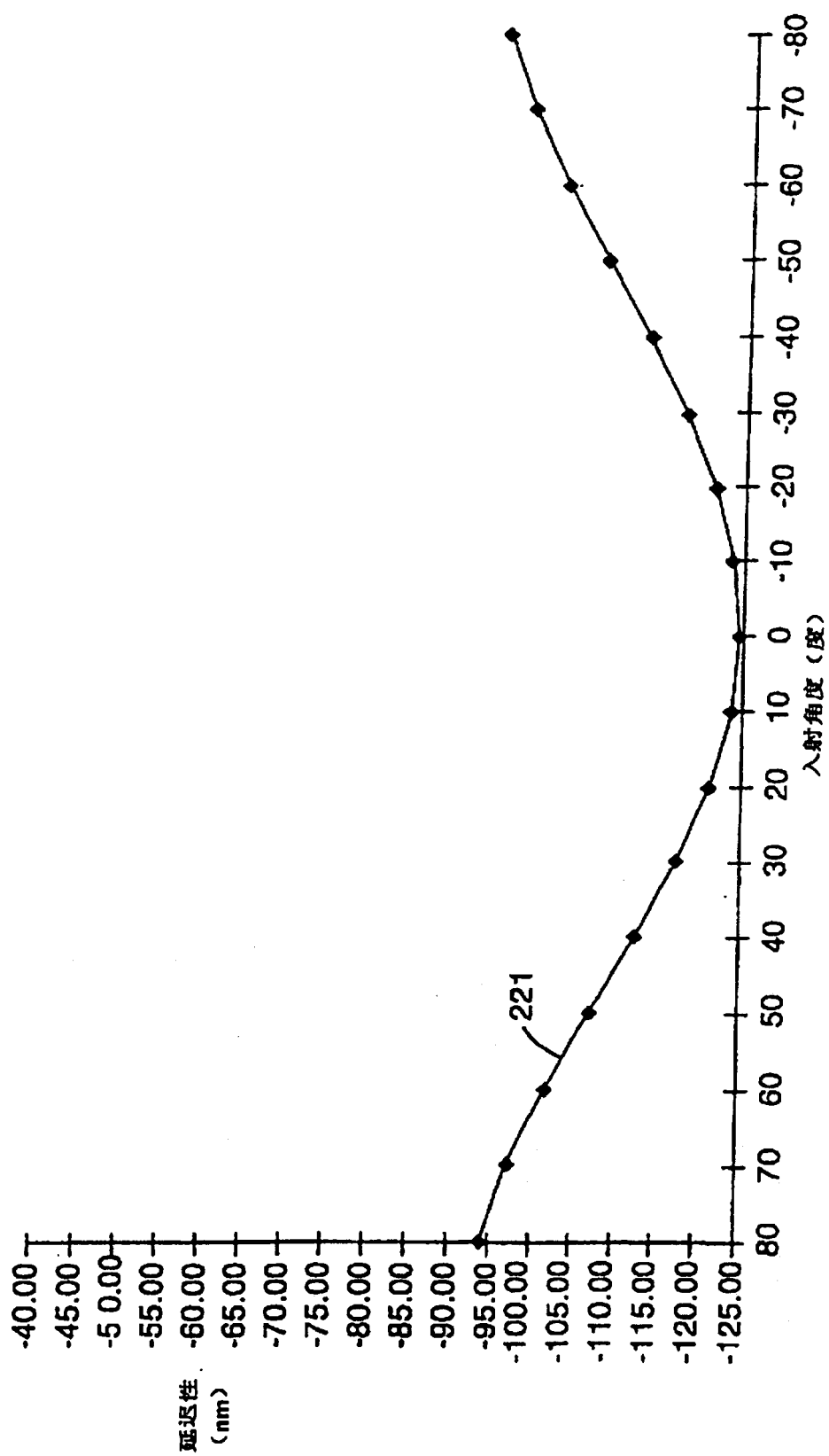


图 20

301
⚡

303
⚡

305
⚡

307
⚡

角度 (度)	延迟性 (nm)	差 (nm)	百分比
-80	-87.2	-27.60	76.0
-70	-90.02	-24.78	78.4
-60	-94.17	-20.63	82.0
-50	-99.03	-15.77	86.3
-40	-103.94	-10.86	90.5
-30	-108.36	-6.44	94.4
-20	-111.83	-2.97	97.4
-10	-114.04	-0.76	99.3
0	-114.8	0.00	100.0
10	-114.01	-0.79	99.3
20	-111.83	-2.97	97.4
30	-108.36	-6.44	94.4
40	-103.94	-10.86	90.5
50	-99.17	-15.63	86.4
60	-94.17	-20.63	82.0
70	-90.02	-24.78	78.4
80	-87.2	-27.60	76.0

图 3A

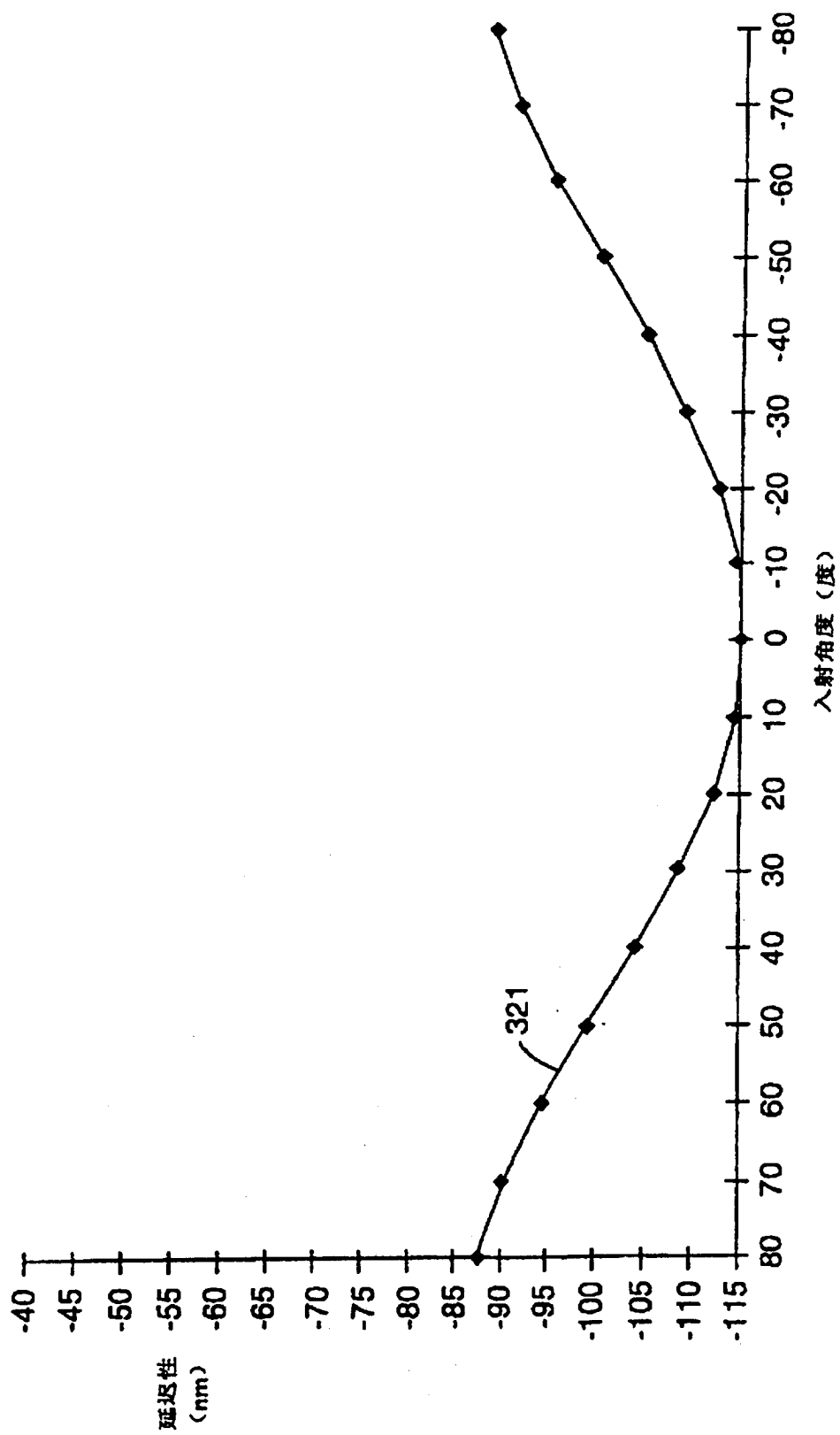


图 3B

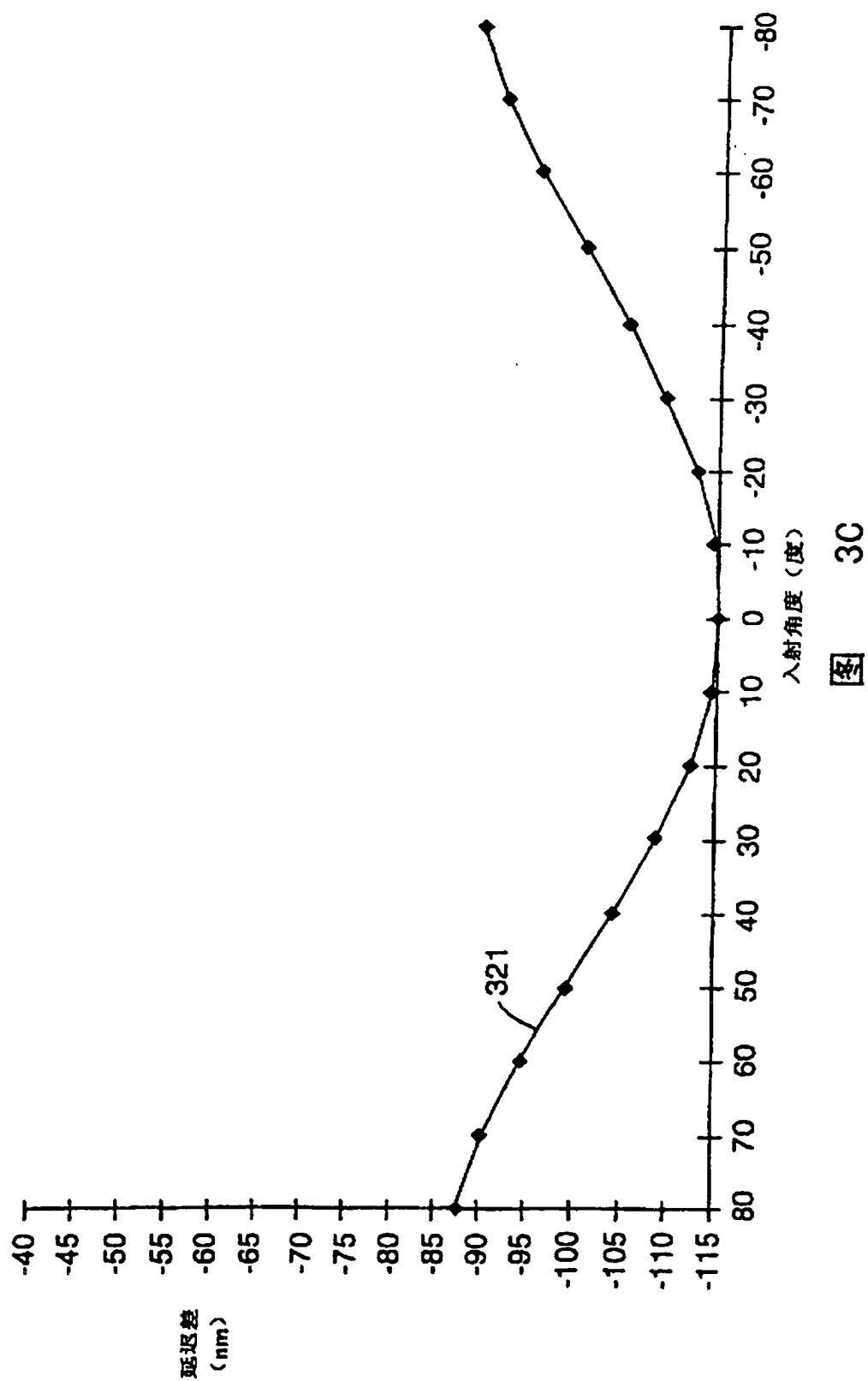


图 3C

入射角度 (度)	ny-nz=0.0000 延迟 (nm)	ny-nz=0.0003 延迟 (nm)	ny-nz=0.0007 延迟 (nm)	ny-nz=0.0009 延迟 (nm)
-80	-87.2	-73.52	-55.3	-46.19
-70	-90.02	-77.95	-61.88	-53.84
-60	-94.17	-84.37	-71.32	-64.8
-50	-99.03	-91.74	-82.02	-77.17
-40	-103.94	-99.05	-92.54	-88.28
-30	-108.36	-105.52	-101.74	-99.85
-20	-111.83	-110.55	-108.83	-107.98
-10	-114.04	-113.72	-113.28	-113.07
0	-114.8	-114.8	-114.8	-114.8
10	-114.01	-113.72	-113.28	-113.07
20	-111.83	-110.55	-108.83	-107.98
30	-108.36	-105.52	-101.74	-99.85
40	-103.94	-99.05	-92.54	-88.28
50	-99.17	-91.74	-82.02	-77.17
60	-94.17	-84.37	-71.32	-64.8
70	-90.02	-77.95	-61.88	-53.84
80	-87.2	-73.52	-55.3	-46.19

图 4A

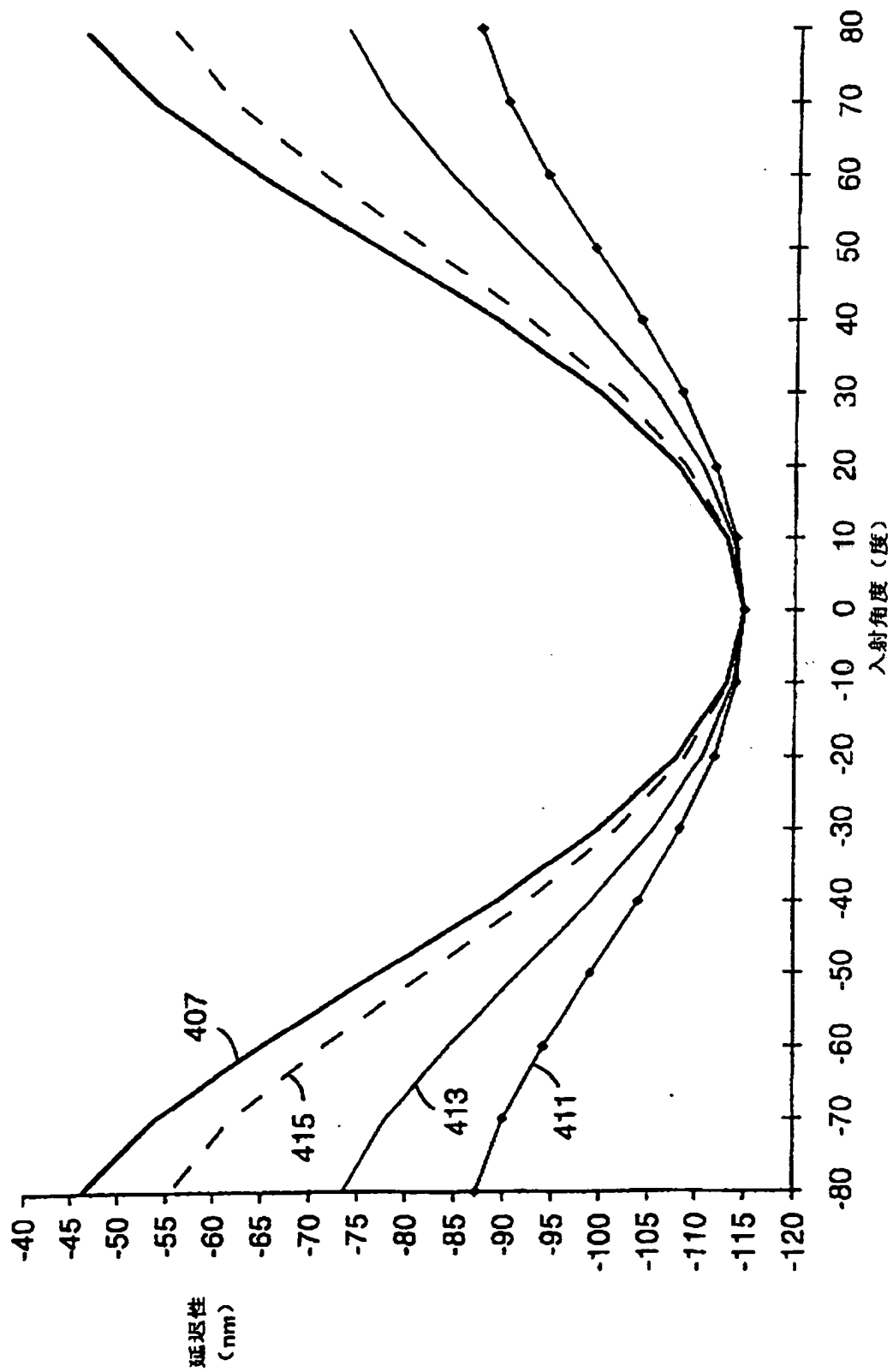


图 4B

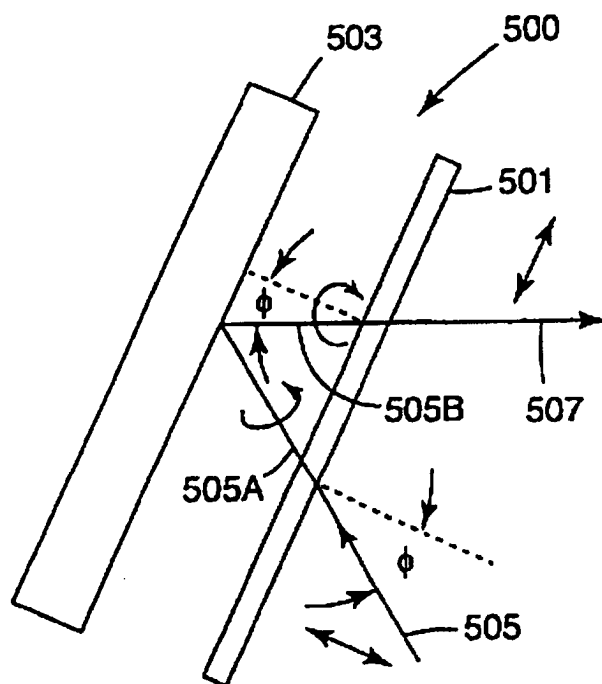


图 5A

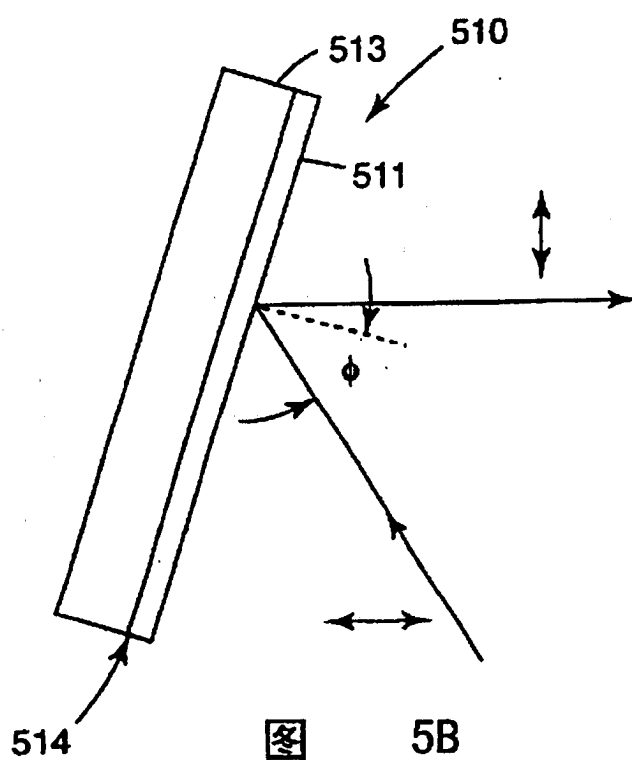


图 5B

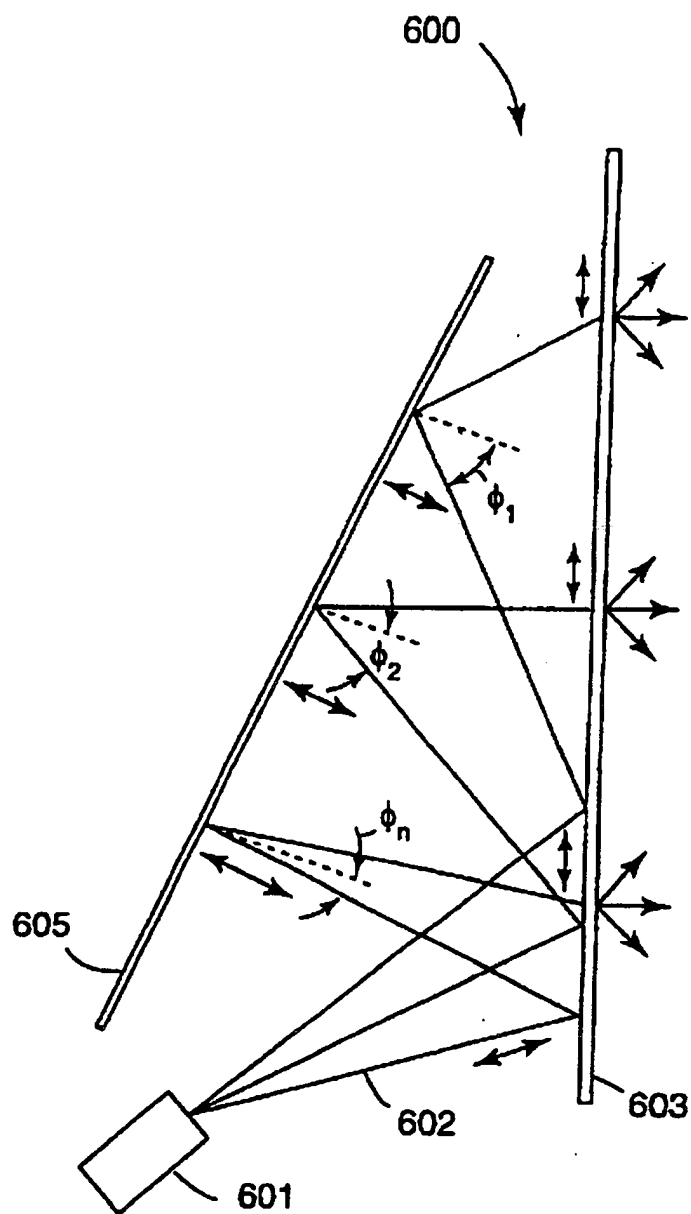


图 6

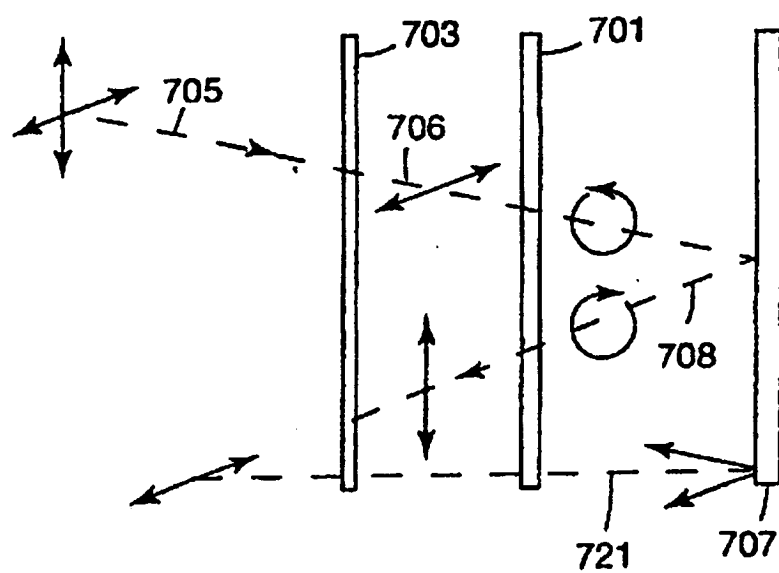


图 7