

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.
G02B 5/28 (2006.01)



[12] 发明专利说明书

专利号 ZL 200480039585.2

[45] 授权公告日 2009年1月21日

[11] 授权公告号 CN 100454051C

[22] 申请日 2004.12.9

[21] 申请号 200480039585.2

[30] 优先权

[32] 2003.12.30 [33] US [31] 10/748,396

[86] 国际申请 PCT/US2004/041214 2004.12.9

[87] 国际公布 WO2005/066668 英 2005.7.21

[85] 进入国家阶段日期 2006.6.30

[73] 专利权人 3M 创新有限公司

地址 美国明尼苏达州

[72] 发明人 迈克尔·F·韦伯

[56] 参考文献

WO02/061469A2 2002.8.8

JP2003302521A 2003.10.24

JP7244204A 1995.9.19

JP7244205A 1995.9.19

审查员 姚文杰

[74] 专利代理机构 北京天昊联合知识产权代理有限公司

代理人 顾红霞 张天舒

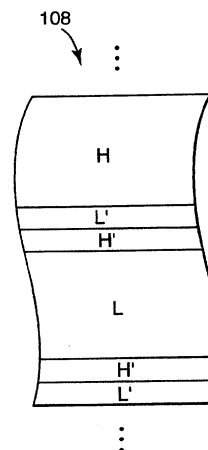
权利要求书 2 页 说明书 14 页 附图 4 页

[54] 发明名称

抑制高阶反射的多层反射器

[57] 摘要

本发明公开一种多层干涉反射膜。该多层干涉反射膜具有设置为形成整个反射膜中的光学重复单元的单独光学层。多个光学重复单元中每个具有六个单独层，其中至少三个单独层在设计波长 λ_0 处具有不同的折射率。所述单独层具有名义上相同的折射率和物理厚度并且随意标记为“A”、“B”、“C”和“D”，所述单独层按照 CACDBD 的循环排列顺序布置在六层式光学重复单元中，其中层 A 和层 B 每个都厚于层 C 和层 D。可以选择所述单独层的厚度和折射率，以便在反射设计波长的光的同时抑制二阶、三阶和四阶反射。



1. 一种多层反射膜，所述多层反射膜包括多个光学重复单元，所述光学重复单元中至少一些包括按照六层顺序 CACDBD 或者其循环排列的顺序布置的单独层 A、B、C、D，所述层 A 和所述层 B 光学上厚于所述层 C 和所述层 D，并且所述单独层具有满足下述关系的折射率： $n_A \geq n_D > n_C > n_B$ 或 $n_A > n_D > n_C \geq n_B$ 。

2. 如权利要求 1 所述的多层反射膜，其中，所述单独层每个具有各向同性折射率。

3. 如权利要求 1 所述的多层反射膜，其中，所述单独层中至少一个为双折射层，并且所述折射率 n_A 、 n_B 、 n_C 、 n_D 在设计波长处沿着所述多层反射膜的面内轴线进行测量。

4. 如权利要求 3 所述的多层反射膜，其中，所述多个单独层具有彼此相等的折射率，所述折射率是沿着与所述多层反射膜的平面垂直的轴线进行测量的。

5. 如权利要求 1 所述的多层反射膜，其中，所述光学重复单元中的至少一个具有为设计波长一半的光学厚度，即 $\lambda_0/2$ ，从而反射设计波长 λ_0 的光。

6. 如权利要求 5 所述的多层反射膜，其中， λ_0 介于 700nm 至 2000nm 之间。

7. 如权利要求 5 所述的多层反射膜，其中，选择所述单独层的厚度和折射率，以便至少抑制波长 $\lambda_0/2$ 、 $\lambda_0/3$ 和 $\lambda_0/4$ 的光反射。

8. 如权利要求 5 所述的多层反射膜, 其中,
所述单独层具有满足下述关系的折射率: $n_A > n_D > n_C > n_B$ 。

9. 如权利要求 8 所述的多层反射膜, 其中,
所述单独层的折射率还满足关系 $n_A + n_B = n_C + n_D$, 所述层 A 具有光学厚度 t_A , 所述层 B 具有光学厚度 t_B , 并且 $t_A = t_B$; 所述每个层 C 具有光学厚度 t_C , 所述每个层 D 具有光学厚度 t_D , 并且 $t_C = t_D$; 并且满足关系:

$$\frac{3\pi X_3}{2} = \pi - \arcsin\left(\frac{-\Delta n_{DC}}{2\Delta n_{AB} + \Delta n_{DC}}\right)$$

式中 $X_3 = t_A / (t_A + 2t_C)$, $\Delta n_{AB} = n_A - n_B$, $\Delta n_{DC} = n_D - n_C$ 。

10. 如权利要求 5 所述的多层反射膜, 其中,
所述单独层具有满足下述关系的折射率: $n_A = n_D > n_C > n_B$ 或 $n_A > n_D > n_C = n_B$ 。

11. 如权利要求 1 所述的多层反射膜, 其中,
所述单独层由聚合物材料构成。

12. 如权利要求 1 所述的多层反射膜, 其中,
所述单独层由无机材料构成。

13. 如权利要求 1 所述的多层反射膜, 其中,
所述光学重复单元被布置为具有沿着所述多层反射膜的厚度轴线变化的厚度分布。

抑制高阶反射的多层反射器

技术领域

本发明涉及具有布置在光学重复单元中的多个单独层从而至少反射第一波长 λ_0 的光的多层干涉膜。可以将光学重复单元中的层布置为抑制高阶反射，具体地说，至少抑制二阶($\lambda_0/2$)、三阶($\lambda_0/3$)和四阶($\lambda_0/4$)反射。这种膜特别但并非唯一地适用于红外应用场合，在红外应用场合中期望红外区域中的高反射，但是还期望整个可见光区域中的低反射/高透射。

背景技术

多层干涉膜为人公知。在这种膜中，多个单独层以重复的顺序布置，其中最小重复布置层称为光学重复单元，有时候也称为单胞(unit cell)。相邻的各个层对于至少一个偏振状态的光具有不同的折射率。各个层还具有小于设计波长 λ_0 的光学厚度(定义为各个层的物理厚度乘折射率)，使得各个层之间界面处反射的光分量的结构干涉或相消干涉可以出现，以便产生期望的波长 λ_0 处的全反射。

(因为通过材料传播的光束经历可以随着偏振状态、传播方向以及光束波长而变化的折射率，因此考虑了这些因素的材料“有效折射率”可以用于本文计算中。)在称为四分之一波长叠层(quarter-wave stack)的最简单的情况下，现有技术的膜包括相对高折射率材料(“H”)和相对低折射率材料(“L”)的交替层，每一层具有 $\lambda_0/4$ 的光学厚度。这种叠层的每个光学重复单元实质上只由两个相邻的单独层构成，一层为H，一层为L，并且每个光学重复单元的总光学厚度为设计波长的一半。

然而，这种叠层不仅反射设计波长的光，而且反射波长为设计波长的整分数的光，如图1中一般地显示，这种波长在本文中称为高阶反射波长。在图1中以简化方式按照线性比例显示了广义光学叠层

的垂直入射反射与波长的关系，在设计波长 λ_0 处可见一阶反射带 100，在波长 $\lambda_0/2$ 处可见二阶反射峰，在波长 $\lambda_0/3$ 处可见三阶反射峰，并且在波长 $\lambda_0/4$ 处可见四阶反射峰。当然，还存在更高阶的波长，但是图中没有显示。通常，从二阶开始的高阶反射由参考标记 110 地表示。真正的四分之一波长叠层因为对称性而没有偶数阶反射带（ $\lambda_0/2$ 、 $\lambda_0/4$ 、 $\lambda_0/6$ 等），但是具有奇数阶反射带。如果两层式光学重复单元中的 H 层和 L 层具有不同的光学厚度，那么偶数阶反射带将为非零。

一阶反射带 100 的峰值反射率和光谱宽度分别取决于设计波长处 H 层和 L 层的折射率 n_H 、 n_L （因此也取决于折射率差 $\Delta n = n_H - n_L$ ），并且取决于叠层中光学重复单元的总数量。此外，公知的是，引入厚度梯度，使得光学重复单元的光学厚度沿着叠层的厚度轴线变化，以便于增大一阶反射带 100 的光谱宽度。高阶反射带的反射功率（由峰值反射率和带宽决定）通常随着阶数的增大而减小。

在一些应用场合中可能不期望存在高阶反射带。例如，如果为了应用车窗或建筑窗中的太阳能控制而期望视觉上透明的红外反射膜，使得 λ_0 大于大约 800nm，那么一个或多个高阶反射带可能出现在可见光区域中并且呈现随着观察方向而变化的不期望的颜色。

很多用于至少抑制一些高阶反射带的技术已经为人公知。

在一种公知的方法中，通过在整个叠层上使光学重复单元组分层中的一层（H 层或 L 层）光学上厚于另一个层（对应为 L 层或 H 层）将四分之一波长叠层的所谓“f 率（f-ratio）”控制为不同于 50% 的值。尽管该方法可以抑制一些高阶反射带，但是该方法不能同时抑制二阶、三阶和四阶反射并因而使得实用性受到限制。

二阶、三阶和四阶总体上影响很大，这因为经常期望反射在从刚刚超出可见光区域（即，从大约 700nm 与 800nm 之间开始）延伸到大约 2000nm 的一阶宽带中的光的缘故。四阶以上的反射带通常位于光谱的 UV 区域中，因此不会存在人眼可见光谱（大约 400 至 700nm）中的颜色问题。尽管对于 2000nm 处的一阶反射带的五阶反射将出现在 400nm 处，但是这种反射通常非常微弱，并且位于人眼敏感性很差

的可见光区域边缘处，因此通常不会被注意到。

在另一种公知的方法中，修改各层的光学厚度顺序，使得每个光学重复单元中单独层的数量从两个增加到六个。参见美国专利 No. 5,360,659 (Arends 等人)。这六个层在 H 和 L 组分材料之间交替，但是以 7:1:1:7:1:1 的相对光学厚度布置。这种结构抑制二阶、三阶和四阶反射。

在另一种公知的方法中，引入第三光学材料(本文中称为“M”)，该材料具有位于 H 与 L 中间的特定折射率。参见美国专利 No. 5,103,337 (Schrenk 等人)。另外参见美国专利 No. 3,247,392 (Thelen)。此外，各个层在每个光学重复单元中以 HMLM 的顺序以及分别对应的 1/3:1/6:1/3:1/6 的相对光学厚度布置，并且将折射率选择为满足如下关系：

$$n_M = \sqrt{n_H n_L} \quad \text{等式 (1)}$$

该方法也抑制二阶、三阶和四阶反射。

然而，仍然需要更多的多层膜结构供光学膜设计者选择使用，其中包括可以抑制高阶反射的结构。

发明内容

本发明公开一种多层膜，所述多层膜具有在多层叠层的光学重复单元中各个层的独特布置。多个光学重复单元中每个包括六个单独的层，其中至少三个层在设计波长 λ_0 处具有不同的折射率。具有名义上相同的折射率和物理厚度(因此，也称为相同光学厚度)的各个层可以赋予任意的唯一字母标记，诸如“A”、“B”、“C”或“D”等。这些层按照 CACDBD 或者其循环排列的顺序布置在六层式光学重复单元中，其中层 A 和层 B 每个都厚于层 C 和层 D。

有利的是，可以选择这种多层叠层中所述层的厚度和折射率，以便抑制二阶、三阶和四阶反射。用于确定这种选择的一种方法包括：定义光学重复单元的折射率函数 $f(X)$ ，其中 X 是沿着所述光学重复单元的光学厚度中的位移，并且函数值 f 是该位移处的折射率。然后对函数 f 进行傅里叶分析，调节或者以其它方式选择所述各个层的厚

度和折射率，使得三个连续的傅里叶系数变为零。如果二阶、三阶和四阶傅里叶系数为零，并且假设整个光学重复单元的光学厚度保持在 $\lambda_0/2$ ，那么由如此确定的光学重复单元构成的多层膜将反射设计波长 λ_0 的光，但是将至少抑制二阶、三阶和四阶谐波（ $\lambda_0/2$ 、 $\lambda_0/3$ 和 $\lambda_0/4$ ）处的反射。

在一些实施例中，层 A 和层 D 可以具有相同的折射率（并且可以由相同材料构成）。作为选择，层 B 和层 C 可以具有相同的折射率（并且可以由相同材料构成）。在前述任一情况下，光学重复单元可以只由三种而非四种光学上不同的材料构成，虽然所述光学重复单元仍然可以由六个单独的层 CACDBD（或者其循环排列）构成。

在其它实施例中，六层式光学重复单元可以由对应于四类层 A、B、C、D 的四种光学上不同的材料构成。在这些实施例的一个子集中，如果选择光学材料使得厚层 A 和 B 的平均折射率等于薄层 C 和 D 的平均折射率，或者等价地，使得 $n_A + n_B = n_C + n_D$ ，其中 $n_A > n_B > n_C > n_D$ ，那么就可以获得各个层的光学厚度的封闭解。光学重复单元中的每个层 C 具有光学厚度 t_C ，每个层 D 具有光学厚度 t_D ，并且 $t_C = t_D$ ，从而满足对称条件。光学重复单元中的每个层 A 具有光学厚度 t_A ，每个层 B 具有光学厚度 t_B ，并且 $t_A = t_B$ ，从而也满足对称条件。因此，使二阶、三阶和四阶傅里叶系数为零并且抑制多层膜中的二阶、三阶和四阶反射的封闭关系为：

$$\frac{3\pi X_3}{2} = \pi - \arcsin\left(\frac{-\Delta n_{DC}}{2\Delta n_{AB} + \Delta n_{DC}}\right) \quad \text{等式 (2)}$$

式中 $X_3 = t_A / (t_A + 2t_C) = t_B / (t_B + 2t_D)$ ，其中， $\Delta n_{DC} = n_D - n_C$ 并且 $\Delta n_{AB} = n_A - n_B$ 。

附图说明

在整个说明书中请参考如下附图，其中：

图 1 是反射率与波长的简化的理想化关系图，显示由广义多层叠层产生的反射带，并且显示伴随的高阶反射带；

图 2a 至图 2c 是多层光学膜中使用的几种现有技术的光学重复单元的局部剖视图；

图 2d 是如本文中所述的光学重复单元的局部剖视图；

图 3a 至图 3c 显示折射率与沿着光学重复单元的厚度轴线的位置的关系图；以及

图 4a 至图 4b 显示另外的折射率函数关系图，这些函数为图 3c 所示更一般的折射率函数的特殊情况。

具体实施方式

现在参考图 2a 至图 2d，这些图用于更好地理解本文公开的多层膜及其与现有技术的关系，这些图包括三种公知的多层结构的光学重复单元的局部横截面图以及本文中所公开的结构图示。在这些图中，层厚无疑被放大很多，并且层厚按比例绘制以表示光学厚度而非物理厚度。在每副图中显示了单个光学重复单元。在图 2a 中，单个两组分四分之一波长叠层 102 具有一个 H 层和一个 L 层。如上所述，这种结构可以抑制偶数阶反射，但是不能抑制奇数阶反射。在图 2b 中，显示了与 Arends 等人的美国专利 No. 5, 360, 659 有关的上述六层两组分叠层 104。该叠层只需要两种组分材料，H 和 L，但是如果抑制二阶至四阶反射，它们必须以 $7/18$ 、 $1/18$ 、 $1/18$ 、 $7/18$ 、 $1/18$ 、 $1/18$ 重复顺序（光学重复单元的分数的）相对光学厚度布置。在图 2c 中，显示了与 Schrenk 等人的美国专利 No. 5, 103, 337 有关的上述四层三组分叠层 106。在该实施例中，如果要抑制高阶反射，需要满足上面等式 (1) 中所述折射率关系的第三组分材料“M”，并且这些层必须以如图所示 $1/3$ 、 $1/6$ 、 $1/3$ 、 $1/6$ 顺序（光学重复单元的分数的）相对光学厚度布置。

图 2d 显示具有可选光学重复单元结构的多层叠层 108，如下所述，该结构同样能够至少抑制二阶、三阶和四阶反射。该结构使用布置在六层式光学重复单元中的三个或四个不同的光学组分，所述光学组分在设计波长 λ_0 处具有不同的折射率。在图 2d 中添加的组分标记为 L' 和 H' ，其中 $n_H > n_{H'} > n_{L'} > n_L$ 。然而要注意到，在一些实施例中， n_H 可以等于 $n_{H'}$ ；在其它一些实施例中， n_L 可以等于 $n_{L'}$ 。（当然也可以使用其它可选的标记方法，例如标记为材料 ABCD，其中 $n_A >$

$n_b > n_c > n_b$ 。在这种情况下, $A=H$, $D=H'$, $C=L'$, $B=L$ 。)与图 2b 至图 2c 中所示结构相比, 抑制高阶反射带所需的层的光学厚度不是单一固定的顺序, 而是三种或四种光学材料的折射率的函数。此外, 由第三(如果存在, 以及第四)光学组分材料提供的额外的自由度(多个)允许比上述等式(1)提供材料之间折射率关系的更高灵活性。

叠层 108 的多层结构(图 2d)为光学膜设计者提供能够抑制高阶反射的无穷集, 该无穷集跨越图 2b 结构极限与图 2c 结构极限之间的设计空间。在一个极限处, 组分 L' 变成 L , 并且组分 H' 变成 H , 于是 $n_{L'} = n_L$ 并且 $n_{H'} = n_H$, 结构简化成图 2b 所示两组分六层式设计。在另一个极限处, L' 和 H' 变得彼此不可区分, 使得 $n_{L'} = n_{H'}$, 结构简化为图 2c 所示三组分四层式结构。然而, 重要的是, 可以获得这些极限之间的有用叠层设计的无穷集, 这一点还没有为人公知或者被认识到。

现在将结合图 3a 至图 3c 讨论至少抑制二阶、三阶和四阶反射所需满足的光学厚度与折射率的关系。在这些图中, 在垂直轴上绘制折射率, 在水平轴上绘制光学重复单元中的位移或位置 X 。参数 X 以光学厚度给出, 即物理厚度乘以叠层中各个层的相应折射率的总和, 并且显示在极限 0 和 $2T$ 之间, 其中 $2T$ 是光学重复单元的总光学厚度。三个折射率函数 114、116、118 分别对应于多层叠层 104、106、108。在每种情况下只显示一个完整周期(对应于一个光学重复单元), 应该理解为, 该完整周期可以在典型的多层膜中重复成百上千次, 可以具有或者可以不具有加宽反射带的厚度梯度。为了方便起见, 已经沿着 X 轴移动函数 114 和 116, 使得它们关于单胞的中点, 即位置 $X=T$ 处呈现逆对称性。而且, 为了方便下面进行说明, 在图 3a 至图 3c 中已经在每个函数附近添加标记 A、B、C(在函数 114 和 118 的情况下包括 D)而非图 2 中的标记 H、L、M、 H' 和 L' , 以标识单胞中的各个层。随意地, 相对较高折射率的相对较厚层标记为“A”, 相对较低折射率的相对较厚层标记为“B”, 其它层标记为 C 和 D, 这如图 3 所示。注意到, 在用于不同折射率函数的相同标记之间没有特定的关系。例如, 函数 116 的 n_c 显示为 n_a 与 n_b 的平均值, 但是函数 118

的 n_c 显示为小于函数 118 的 n_A 与 n_B 的平均值。

函数 114 (图 3a) 由两个不同的折射率 n_A 、 n_B 和光学重复单元中的六个不同层形成, 其中两个厚层设置为共同的光学厚度 $t_A=t_B=X_1$, 剩余的四个薄层设置为共同的光学厚度 $(T-X_1)/2$ 。虚线 114a 表示 n_A 和 n_B 的平均值。

函数 116 (图 3b) 由三个不同的折射率 n_A 、 n_B 、 n_C 和四个不同层 (其中一个层显示为在光学重复单元的起始与末端之间被分割) 形成, 其中层 A 和层 B 设置为共同的光学厚度 $t_A=t_B=X_2$, 并且两个层 C 设置为共同的光学厚度 $(T-X_2)$ 。虚线 116a 表示 n_A 和 n_B 的平均值。

函数 118 (图 3c) 在其最一般化的形式中由四个不同的折射率 n_A 、 n_D 、 n_C 、 n_B 和六个不同层形成, 尽管两个折射率相对较低的相对较薄层 C 可以名义上相同, 并且两个折射率相对较高的相对较薄层 D 可以名义上相同。与前面一样, 虚线 118a 表示 n_A 和 n_B 的平均值。尽管图中按照 CACDBD 的顺序显示, 但是各个层也可以以其它的循环排列布置, 诸如 ACDBDC、CDBDCA、DBDCAC 等。

对于该函数, 一般地说, 层 A 的光学厚度可以不同于层 B 的光学厚度, 并且层 C 可以具有不同于层 D 的光学厚度。然而, 层 A 和层 B 每个都在光学上厚于层 C 和层 D, 并且 $n_A > n_B$, $n_D > n_C$ 。在特殊情况下, 层 A 和层 B 可以设置为共同的光学厚度 X_3 , 并且剩余的层 C 和层 D 可以设置为共同的光学厚度 $(T-X_3)/2$ 。另外, 在特殊情况下, n_A 可以等于 n_D , 或者 n_D 可以等于 n_B 。在其它特殊情况下, n_A 和 n_B 的平均值可以等于 n_C 和 n_D 的平均值。

函数 114 和 116 的傅里叶分析将证实已经为膜设计者所公知的关系。这种分析假定图示函数的无限重复, 但是对于有限但是大量的重复近似有效。该分析将每个函数 $f(X)$ 当作折射率波形, 并且计算波形的傅里叶系数 a_n 、 b_n :

$$f(X) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n \cos\left(\frac{2\pi nX}{\Lambda}\right) + \sum_{n=0}^{\infty} b_n \sin\left(\frac{2\pi nX}{\Lambda}\right) \quad \text{等式 (3)}$$

式中

$$a_n = \frac{\int_0^{\Lambda} f(X) \cos\left(\frac{2\pi n X}{\Lambda}\right) dX}{\int_0^{\Lambda} dX} \quad \text{等式 (4)}$$

并且

$$b_n = \frac{\int_0^{\Lambda} f(X) \sin\left(\frac{2\pi n X}{\Lambda}\right) dX}{\int_0^{\Lambda} dX} \quad \text{等式 (5)}$$

符号 Λ 表示光学重复长度，该长度如图 3 所示设置为 $2T$ 。一般地说，折射率函数的傅里叶级数由正弦和余弦函数构成。

对于这里的分析，认识到在大约 1% 或更低的精度内给定阶数的傅里叶系数是否为零，然后认识到该阶数的反射功率是否也为零就足够了。通过使用由下面等式定义的单个傅里叶系数 c_n ：

$$c_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad \text{等式 (6)}$$

抑制二阶反射的条件简化成 $c_2=0$ ，抑制三阶反射的条件简化成 $c_3=0$ ，依此类推。

为了使傅里叶系数的计算更简单并且为了进行比较，可以将每个情况下的最高折射率 n_H 设置为等于 1，并且将最低折射率 n_L 设置为等于 -1。以这种方式，可以相对于单位振幅的折射率方波波形，即标准四分之一波长叠层判断所有反射功率。而且，可以通过任意地设置 $T=1$ 而将周期 $2T$ 设置为等于 2。使用该分析，函数 114（图 3a）对于所有偶数阶傅里叶系数具有零值（ $c_2=c_4=c_6=\dots=0$ ）。然而，函数 114 对于其三阶傅里叶系数具有如下值，式中 $X_i=t_A=t_B$ ：

$$c_3 = -\frac{4\left(1 + 2\sin\left(\frac{3X_1\pi}{2}\right)\right)}{3\pi} \quad \text{等式 (7)}$$

只有在如下情况下该值等于零：

$$\sin\left(\frac{3X_1\pi}{2}\right) = -0.5 \quad \text{等式 (8)}$$

上面等式存在无穷多个解，除非我们根据图 3a 添加附加的约束： $0 < X_1 < 1$ 。该约束产生单个解：

$$\frac{3\pi X_1}{2} = \pi - \arcsin(-1/2) \quad \text{等式 (9)}$$

或者

$$X_1 = \frac{7}{9} \quad \text{等式 (10)}$$

这确定了现有技术的 711711 重复结构的层厚，并且剩余的薄层具有 1/9 的相对光学厚度。上述分析证实现有技术的 711711 多层结构将不会出现二阶、三阶或四阶反射带（以及更高阶的反射带）。

对于函数 116，在傅里叶分析有效的一阶近似中，将折射率 n_c 设置为 n_A 和 n_B 的数值平均（即， $n_c = (n_A + n_B) / 2$ ）。这不同于美国专利 No. 5, 103, 337 (Schrenk 等人) 中所述的几何平均（即， $n_c = \sqrt{n_A \cdot n_B}$ ）关系。然而，对于聚合物材料的非常典型的情况，其中 $n_A = 1.75$ 并且 $n_B = 1.50$ ，该近似很准确，达到 0.3%，或者 n_c 的误差为 0.0048。由通过傅里叶分析预测的各个高阶反射峰的相对反射功率具有大致相同程度的准确性。

因为函数 116 的对称性，与函数 114 类似进行的函数 116 的傅里叶分析对于所有偶数阶傅里叶系数也产生零值（ $c_2 = c_4 = c_6 = \dots = 0$ ）。如果还需要三阶傅里叶系数 c_3 也为零，那么光学厚度 X_2 （ $=t_A = t_B$ ）必须满足如下关系：

$$\frac{3\pi X_2}{2} = \pi \quad \text{等式 (11)}$$

或

$$X_2 = \frac{2}{3} \quad \text{等式 (12)}$$

于是产生现有技术的熟悉的 1/3、1/6、1/3、1/6 重复结构。因此，傅里叶分析证实了现有技术的 HMLM 多层结构将不会出现二阶、三阶或四阶反射带（以及更高偶数阶的反射带）。

现在参考图 3c 中的函数 118，现在已经发现，可以使对应于该函数的广义六层叠层在反射 λ_0 处一阶光的同时抑制三个连续的高阶反射诸如二阶、三阶和四阶反射等，如果需要，可以如此设计。通常可以选择或者以其它方式调节定义函数 118 的各个参数，诸如不同类型的层 A、B、C、D 的物理厚度和/或折射率等。在上述通常关于函数 118 的约束下以及光学重复单元的光学厚度为待反射设计波长 λ_0 的

一半的条件下,由该可调节性提供的自由度可以用于抑制三个连续的高阶反射。这可以通过如下方式实现:从定义函数 118 的参数的一组初始条件开始,计算光学波长 λ_0 以及三个连续高阶诸如 $\lambda_0/2$ 、 $\lambda_0/3$ 和 $\lambda_0/4$ 等处相应光学重复单元的反射率,并且系统地调节这些参数以获得一组参数值,其中这些高阶处的反射率对于期望的应用足够小(即,因为该应用而等于零)。也可以通过获得函数 118 的一组参数值使三个连续傅里叶系数 c_n (参见上面等式(6)以及等式(3)至(5))为零来实现对三个连续高阶反射的抑制。

广义折射率函数 118 的特殊情况在图 4a 中显示为折射率函数 120。这里,各个层同样以 CACDBD 的循环排列布置,并且层 A 和层 B 每个具有大于层 C 和层 D 的光学厚度,并且 $n_A > n_B$, $n_D > n_C$ 。在函数 120 中,还满足如下附加条件:

$$n_A + n_B = n_C + n_D \quad \text{等式 (13)}$$

$$t_A = t_B = X_3 \quad \text{等式 (14)}$$

$$t_C = t_D = (T - X_3)/2 \quad \text{等式 (15)}$$

换句话说,层 A 和层 B 的平均折射率(如图 4a 中线 120a 所示)等于层 C 和层 D 的平均折射率,层 A 的光学厚度等于层 B 的光学厚度,并且层 C 和层 D 的光学厚度彼此相等。为了方便起见,我们将光学厚度标准化,使得 $T=1$,并且我们定义标准化参数 δ (图 4a 中所示)作为折射率 n_C 和 n_D 偏离平均折射率的程度的度量:

$$\delta = \frac{2n_D - (n_A + n_B)}{n_A - n_B} = \frac{(n_A + n_B) - 2n_C}{n_A - n_B} \quad \text{等式 (16)}$$

于是,当 n_D 接近 n_A 时(并且当 n_C 接近 n_B 时), δ 接近 1。另一方面,当 n_D 和 n_C 彼此接近时(并且当它们接近平均折射率 120a 时), δ 接近 0。

上述条件赋予函数 120 关于光学厚度位置 $X=T$ 并且关于平均折射率的对称性。因为该对称性,根据上面等式(3),函数 120 的所有偶数阶傅里叶系数都等于零($c_2=c_4=c_6=\dots=0$)。如果我们还需要函数 120 的三阶系数 c_3 也等于零,我们可以获得如下关系:

$$\frac{3\pi X_3}{2} = \pi - \arcsin\left(\frac{-\delta}{1+\delta}\right) \quad \text{等式 (17)}$$

注意到，在 $\delta = 1$ 的极限中，四组分系统简化成 $n_b = n_A$ 并且 $n_c = n_B$ 的两组分系统，并且等式 (17) 简化为等式 (9)，于是产生熟悉的 711711 多层结构。在 $\delta = 0$ 的相反极限处，四组分系统简化成 $n_b = n_c = n_D$ 的三组分系统，并且等式 (17) 简化为等式 (11)，于是产生熟悉的 HMLM 多层结构。

但是，在这些极限之间，即对于 $0 < \delta < 1$ ，可以获得不出现二阶、三阶或四阶反射带以及更高阶反射带的四组分多层叠层的全集。

现在参考图 4b，我们看到另一个折射率函数 122，该函数代表图 3 中更一般波形 118 的另一个特殊情况。虚线 122a 代表折射率 n_A 和 n_B 的平均值。与前面一样，与函数 122 相关的各个层以 CACDBD 的循环排列布置，层 A 和层 B 每个具有大于层 C 和层 D 的光学厚度，并且 $n_A > n_B$ ， $n_D > n_C$ 。在函数 122 中，还满足如下附加条件：

$$n_B = n_C \quad \text{等式 (18)}$$

$$n_A \neq n_D \quad \text{等式 (19)}$$

换句话说，低折射率薄层具有与低折射率厚层相同的折射率。这可以通过在层 B 和层 C 的形成中使用相同的光学材料而实现，在该情况下，光学重复单元可以实质上由三种不同的光学材料构成：一种用于层 A，另一种用于层 B 和层 C，另一种用于层 D。（可以产生 $n_A = n_D$ 并且 $n_B \neq n_C$ 的类似情况，其中一种光学材料用于层 A 和层 D，另一种光学材料用于层 B，另一种光学材料用于层 C）关于这一点，如果这些成分的厚层与薄层之间的形态差异导致设计波长处的不同折射率，那么两种相同化学成分的光学材料就有可能不同。这种形态差异可以在无机材料的汽相沉积过程中或者多层聚合物膜的拉伸中产生。

如此定义的折射率函数 122 缺乏上面关于折射率函数 120 所述的那类对称性。然而，对于折射率函数 122，傅里叶系数 c_n （上面等式 (6)）的一般等式可以显示为：

$$c_n = -\frac{2[\sin(n\pi) - 2\sin(n\pi_A/2) + (1+h)\{\sin(n\pi(t_C + 0.5*t_A)) - \sin(n\pi(t_D + t_C + 0.5*t_A))\}]}{n\pi} \quad \text{等式 (20)}$$

式中，参数 h 为

$$h = \frac{2n_D - (n_A + n_B)}{n_A - n_B} \quad \text{等式 (21)}$$

式中，低折射率厚层 B 的光学厚度 t_B 根据其它光学厚度计算为：

$$t_B = 2T - t_A - 2t_C - 2t_D \quad \text{等式 (22)}$$

式中，光学厚度 t_A 、 t_B 、 t_C 、 t_D 按比例变化或者标准化使得 $T=1$ 。尽管缺乏对称性，对于 h 的给定值，可以将三个独立的参数 t_A 、 t_C 和 t_D 调节为同时使三个高阶反射，诸如二阶、三阶和四阶等为零，即使非对称性通常不允许抑制无穷数量的高阶反射。

作为函数 122 所说明的非对称型函数的特殊实例，将 h 选择为 0.5。选择一组初始参数 t_A 、 t_B 、 t_C 、 t_D ，然后系统调节这些参数中的三个以获得使计算的二阶、三阶和四阶傅里叶系数都为零的值。所产生的标准化光学厚度值为：

$$t_A = 0.7684$$

$$t_B = 0.7436$$

$$t_C = 0.0895$$

$$t_D = 0.1545$$

这些值产生二阶、三阶和四阶处的计算反射率也为零的叠层。

作为函数 122 说明的非对称型函数的另一个特殊实例，将 h 选择为 0.3。选择一组初始参数 t_A 、 t_B 、 t_C 、 t_D ，并且系统调节这些参数中的三个以获得使计算的二阶、三阶和四阶傅里叶系数都为零的值。所产生的标准化光学厚度值为：

$$t_A = 0.7594$$

$$t_B = 0.7214$$

$$t_C = 0.0739$$

$$t_D = 0.1857$$

这些值产生二阶、三阶和四阶处的计算反射率也为零的叠层。当然，通过对上述四个标准化计算厚度值应用比例因子，以获得光学重复单元中各个层的实际光学厚度值，很容易将该实例和上述 $h=0.5$ 的实例应用于任何期望的感兴趣波长 λ_0 。

如上所示，可以将图 2d 中一般显示的六层重复结构的厚度和折射率值选择为同时抑制三个连续的高阶谐波。然而，因为散射，每个

高阶波长处的折射率可能不同于设计波长 λ_0 处的值，从而使得很难同时完全抑制全部三阶反射。然而，可以调节重复结构中的六个层以适当抑制全部三阶反射。三阶反射的相对抑制可能取决于产品的技术规范。

本文中所述多层叠层可以由传统无机材料构成，诸如在真空环境中在玻璃或其它基材上顺序沉积的无机材料。这种无机材料的例子包括但是不意味着只限于 TiO_2 、 SiO_2 及其混合物。也可以使用为无机物真空沉积领域的技术人员所公知的其它材料。作为选择，本文中所述多层叠层可以由有机材料诸如聚合物等构成。常见的例子包括聚萘二甲酸乙二醇酯 (PEN)、co-PEN、聚对苯二甲酸乙二醇酯 (PET)、co-PET、聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 以及间规聚苯乙烯 (sPS)。用于这种聚合物多层叠层的公知的制造技术包括多层分流器 (feedblock) 中的聚合物共挤，诸如美国专利 No. 6, 783, 349 (Neavin 等人) 中所述的方法。共挤膜可以被单轴或者双轴拉伸，以便改变一个或多个聚合物层在一个或多个正交方向上的厚度和/或折射率。请参考美国专利 No. 5, 882, 774 (Jonza 等人)，该文献包括如下内容：选择面外 (z 向) 折射率关系以实现倾斜入射角处期望的 p 偏振光反射率。这包括如下技术：选择相邻光学层的 z 轴折射率使得基本上匹配或者相差一定数量，诸如这些光学层之间面内折射率差的 0.5 倍或 0.25 倍或者更低等，或者选择 z 轴折射率差相对于沿着面内轴线的折射率差为相反符号。本文中公开的多层设计考虑适用于仅仅一个面内方向上的薄膜，就像反射式多层偏振器一样，或者适用于两个正交的面内方向上的薄膜。此外，多层设计考虑还适用于如下多层薄膜：其光学层完全由具有各向同性折射率的光学材料构成，而不管是否为聚合物。

并不总是能够获得或者并非一定期望如图 2、图 3 和图 4 中所示的层间清晰边界。并不认为保持清晰边界非常关键。圆角矩形波形也可以产生期望的一阶反射和高阶反射带抑制。关于这一点，可能出现两种不同材料之间的相互扩散，这将产生不同的第三光学层。在光学上，如果混合层的组分具有不同的折射率，那么混合层的行为就如同

不同于其任一组分的材料。于是，公开实施例中所示的一个或多个不同光学层可以包括相邻光学层材料的混合或相互扩散。

可以制造如下多层膜，其中全部或基本上全部光学重复单元为一个类型，诸如图 2d、图 3c、图 4a 或图 4b 中所示的某一类型。作为选择，多层膜可以包括两个或多个上述光学重复单元类型。另外，可以制造混合膜，其包括图 2d、图 3c、图 4a 或图 4b 中所示的光学重复单元类型中的一个或多个类型，以及一个或多个诸如图 2a、图 2b 或图 2c 中所示的传统光学重复单元类型。相同类型的光学重复单元可以聚合成封包，并且不同的封包可以由保护性边界层或者其它透明的光学厚材料分隔。

在本发明中，提供了一些数学等式。这些等式也旨在包括如下关系：等号左边的量并不精确地等于等号右边的量，但是足够接近，从而实现根据本发明内容的期望的最终结果。

尽管已经结合优选实施例说明了本发明，但是本领域的技术人员将可以认识到，可以在形式和细节上进行各种变化，并且本发明的范围只由所附权利要求书的完整范围限定，包括在等同范围内提供的保护范围。

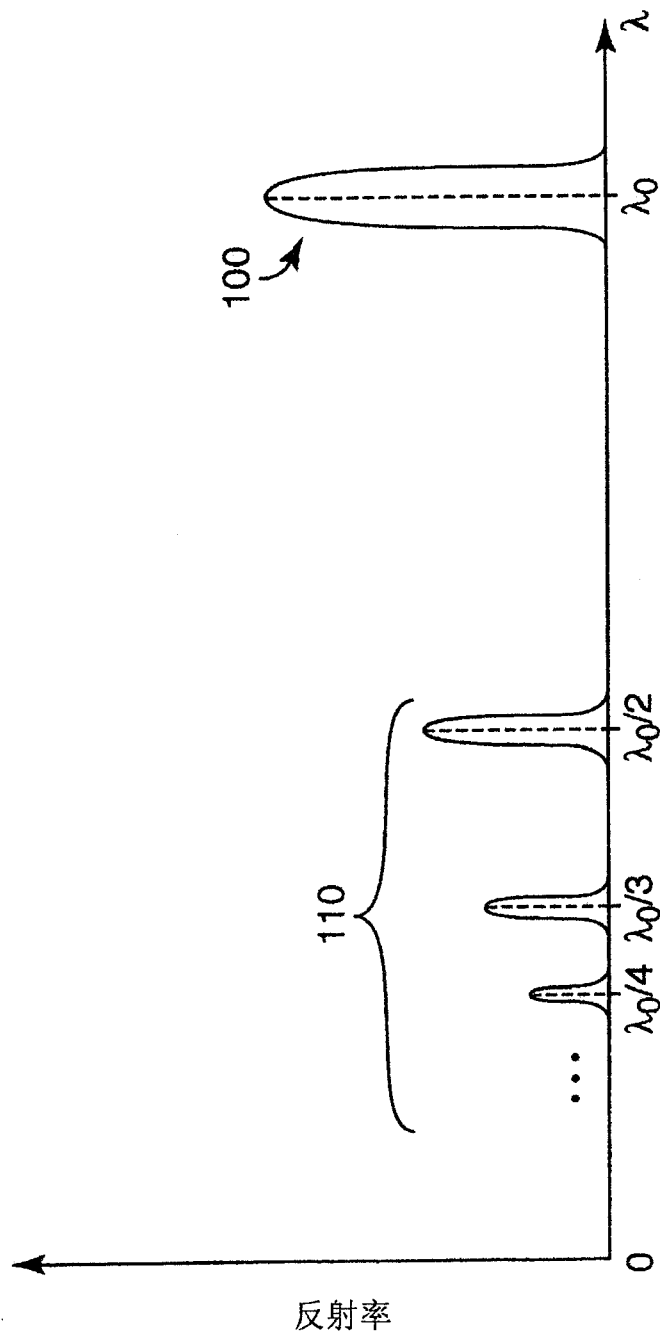


图1

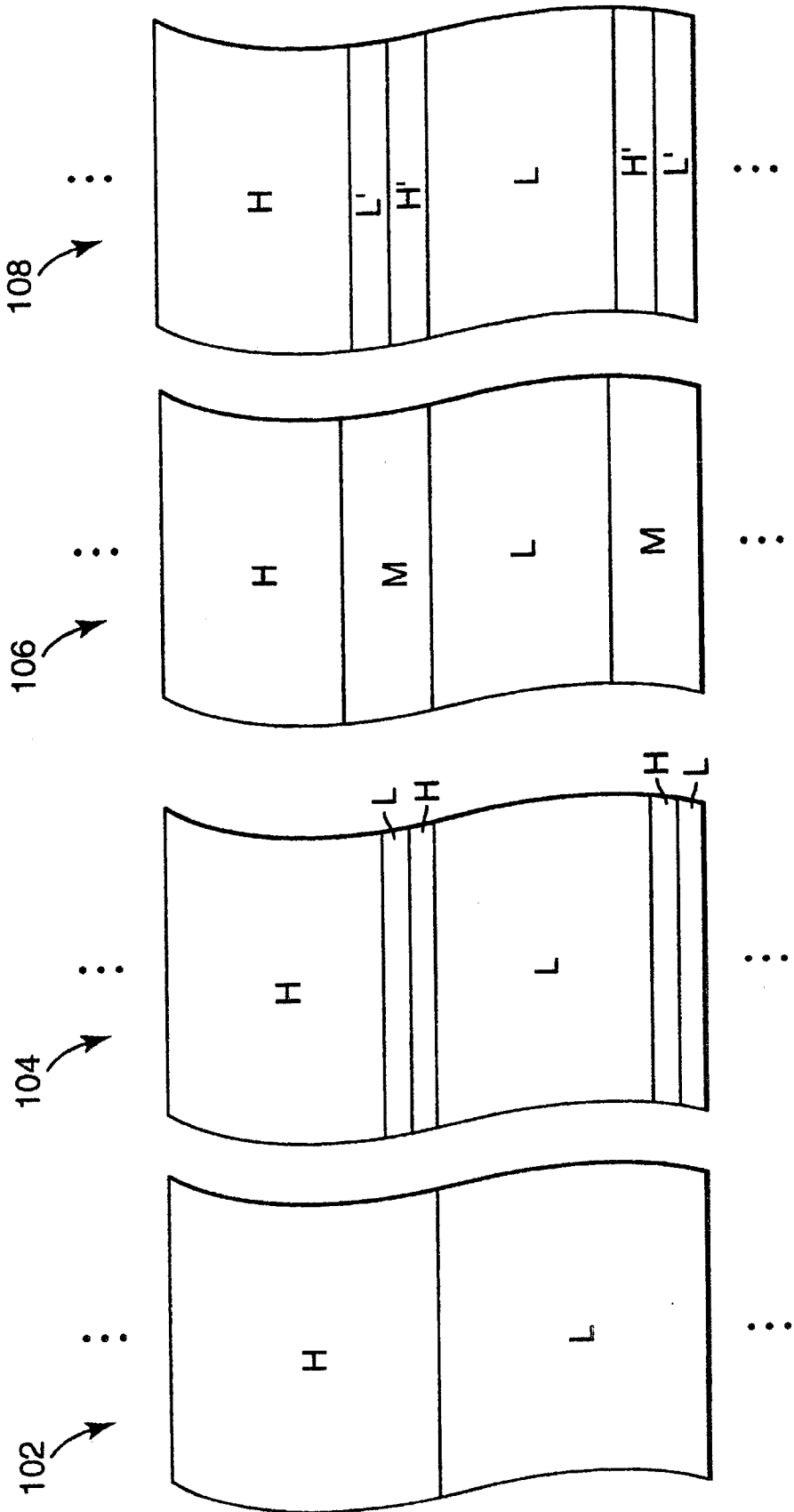


图 2a

图 2b
(现有技术)

图 2c
(现有技术)

图 2d
(现有技术)

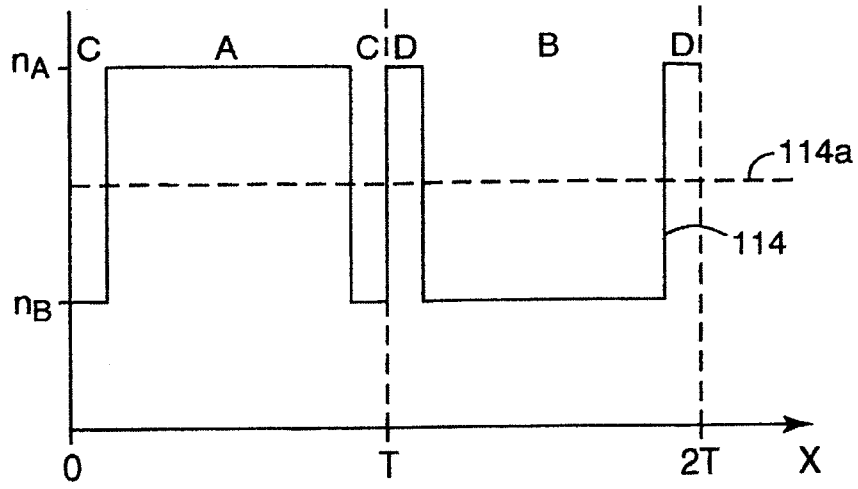


图 3a

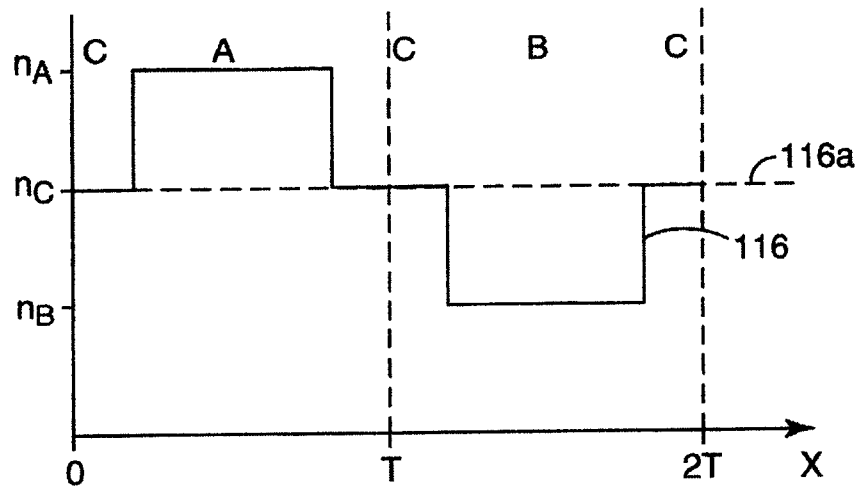


图 3b

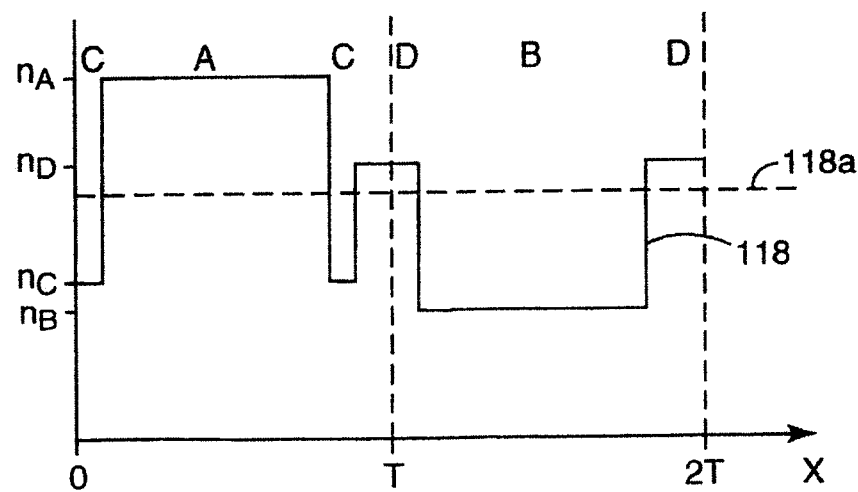


图 3c

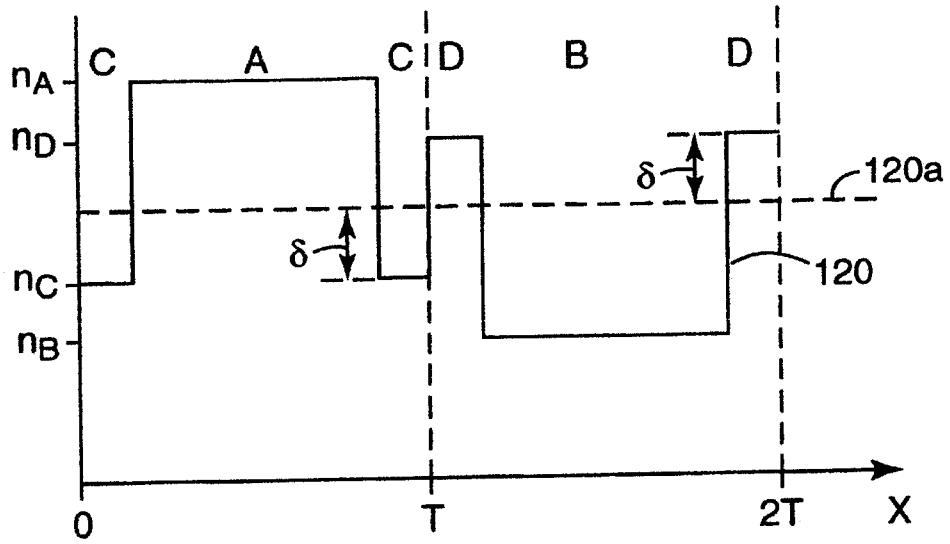


图 4a

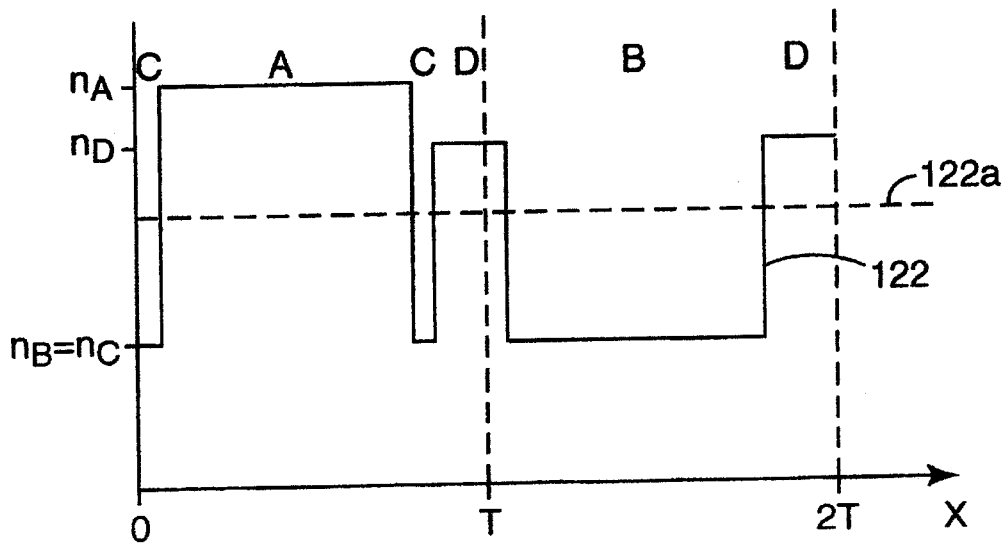


图 4b