



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 102565932 B

(45) 授权公告日 2014. 10. 08

(21) 申请号 201210022127. 4

JP 特开平 11-248949 A, 1999. 09. 17,

(22) 申请日 2012. 01. 14

JP 特开 2000-131541 A, 2000. 05. 12,

(30) 优先权数据

审查员 陈嘉佳

61/432916 2011. 01. 14 US

(73) 专利权人 李冰

地址 200433 上海市杨浦区国定路 335 号 2 号楼 1611 室

(72) 发明人 李冰

(51) Int. Cl.

G02B 6/12(2006. 01)

G02B 6/293(2006. 01)

(56) 对比文件

CN 1512207 A, 2004. 07. 14,

CN 1512207 A, 2004. 07. 14,

JP 特开 2009-198594 A, 2009. 09. 03,

CN 101320111 A, 2008. 12. 10,

CN 1411197 A, 2003. 04. 16,

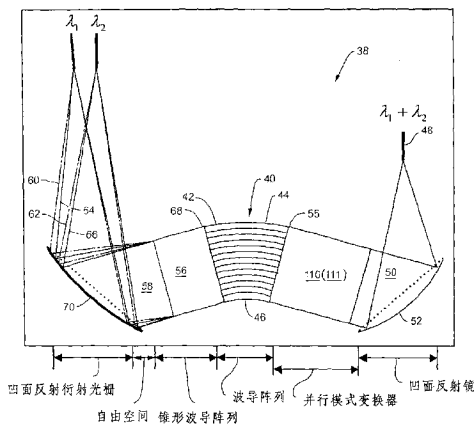
权利要求书3页 说明书10页 附图8页

(54) 发明名称

色散校正的阵列波导光栅

(57) 摘要

本发明公开了一种阵列波导光栅。在一个实施例中,阵列波导光栅包括一个与一并行模式变换器的输出端耦合的波导阵列,以及一个与所述波导阵列的输出端耦合的凹面反射衍射光栅,其中所述波导阵列包括第一波导和第二波导,其中所述波导阵列的第一波导与其第二波导长度不同。所述波导阵列引发了有第一色散符号和第一幅度的第一色散,所述凹面反射衍射光栅引发了有第二色散符号和第二幅度的第二色散,其中第一色散符号与第二色散符号相反。



1. 一种阵列波导光栅,包括:
  - 至少一个输入波导;
  - 一个由第一平板波导构成的第一自由空间,所述第一自由空间与所述输入波导的输出端耦合;
  - 一个与所述第一自由空间耦合的凹面反射镜;
  - 一个通过所述第一自由空间与所述凹面反射镜耦合的并行模式变换器;
  - 一个与所述并行模式变换器的输出端耦合的波导阵列,
  - 其中所述波导阵列包括第一波导和第二波导,
  - 其中所述波导阵列的第一波导沿着由第一圆的一段圆弧定义的第一轨迹延伸,所述第一圆的半径为第一半径,
  - 其中所述波导阵列的第二波导沿着由第二圆的一段圆弧定义的第二轨迹延伸,所述第二圆的半径为第二半径,
  - 其中第一半径不同于第二半径,以及
  - 其中第一圆和第二圆同心地排列;
  - 一个由第二平板波导构成的第二自由空间,所述第二自由空间与所述波导阵列的输出端耦合;
  - 一个与所述第二自由空间的输出端耦合的凹面反射衍射光栅;以及
  - 多个通过所述第二自由空间与所述凹面反射衍射光栅耦合的输出波导。
2. 根据权利要求1所述的阵列波导光栅,其中并行模式变换器包括多个波导脊,且所述波导脊并行排列。
3. 根据权利要求1所述的阵列波导光栅,还包括:
  - 一个位于所述波导阵列的输出端和所述第二自由空间之间的锥形波导阵列,其中所述锥形波导阵列使脊波导的导模的光场能量多数分布在平板层中。
4. 根据权利要求3所述的阵列波导光栅,其中,所述锥形波导阵列包括多个锥形阵列波导脊,且所述锥形阵列波导脊并行排列。
5. 根据权利要求1所述的阵列波导光栅,其中,所述阵列波导光栅是在绝缘体上硅的波导薄膜上形成的。
6. 根据权利要求5所述的阵列波导光栅,其中,所述并行模式变换器和所述波导阵列都包括多个通过在绝缘体上硅的波导薄膜上部分刻蚀得到的脊波导。
7. 根据权利要求5所述的阵列波导光栅,其中,所述凹面反射镜和所述凹面反射衍射光栅都是通过在绝缘体上硅的波导薄膜上全刻蚀得到的,其中所述全刻蚀在所述硅薄膜上刻蚀出一个垂直侧壁从而使得在所述硅薄膜内传播的光束可以在所述垂直侧壁上发生全反射。
8. 一种阵列波导光栅,包括:
  - 一个波导阵列,
  - 其中所述波导阵列包括第一波导和第二波导,
  - 其中所述波导阵列的第一波导沿着由第一圆的一段圆弧定义的第一轨迹延伸,所述第一圆的半径为第一半径,
  - 其中所述波导阵列的第二波导沿着由第二圆的一段圆弧定义的第二轨迹延伸,所述第

二圆的半径为第二半径，

其中第一半径不同于第二半径，以及

其中第一圆和第二圆同心地排列；

一个由第二平板波导构成的第二自由空间，所述第二自由空间与所述波导阵列的输出端耦合；以及

一个与所述第二自由空间的输出端耦合的凹面反射衍射光栅，

其中所述波导阵列具有第一色散，所述第一色散包括第一色散符号，第一幅度和第一自由频谱范围，

其中所述凹面反射衍射光栅具有第二色散，所述第二色散包括第二色散符号，第二幅度和第二自由频谱范围，

其中所述第一自由频谱范围至少大于所述第二自由频谱范围的两倍，而且所述第二色散符号与所述第一色散符号相反，所述第二幅度与所述第一幅度相同，故而在所述凹面反射衍射光栅和所述波导阵列的共同作用下，在所述第二自由频谱范围内实现了平坦色散曲线，同时在所述第一自由频谱范围内实现了步进式色散曲线。

9. 一种阵列波导光栅，包括：

至少一个输入波导；

一个由第一平板波导构成的第一自由空间，所述第一自由空间与所述输入波导的输出端耦合；

一个与所述第一自由空间耦合的并行模式变换器，其中所述并行模式变换器包括多个波导脊，其中所述波导脊扇出排列；

一个与所述并行模式变换器的输出端耦合的波导阵列，

其中所述波导阵列包括第一波导和第二波导，

其中所述波导阵列的第一波导沿着由第一弯曲段和第一弯曲角度定义的第一轨迹延伸，

其中所述波导阵列的第二波导沿着由第二弯曲段和第二弯曲角度定义的第二轨迹延伸，以及

其中所述第一弯曲段不同于所述第二弯曲段，其中所述第一弯曲角度也不同于所述第二弯曲角度；

一个由第二平板波导构成的第二自由空间，所述第二自由空间与所述波导阵列的输出端耦合；

一个与所述第二自由空间的输出端耦合的凹面反射衍射光栅；以及

多个与所述凹面反射衍射光栅耦合的输出波导。

10. 根据权利要求 9 所述的阵列波导光栅，其中所述波导阵列具有第一色散，所述第一色散包括第一色散符号，第一幅度和第一自由频谱范围，

其中所述凹面反射衍射光栅具有第二色散，所述第二色散包括第二色散符号，第二幅度和第二自由频谱范围，

其中所述第一自由频谱范围至少大于所述第二自由频谱范围的两倍，而且所述第二色散符号与所述第一色散符号相反，所述第二幅度与所述第一幅度相同，故而在所述凹面反射衍射光栅和所述波导阵列的共同作用下，在所述第二自由频谱范围内实现了平坦色散曲

---

线,同时在所述第一自由频谱范围内实现了步进式色散曲线。

## 色散校正的阵列波导光栅

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种平面光波回路,尤其是一种阵列波导光栅。

### 背景技术

[0002] 阵列波导光栅(简称 AWG)通常应用在光波分复用(WDM)系统中,它是一种通过色散效应来复用或解复用不同波长的光波的器件。在理想状态下,我们希望 AWG 能提供平坦的传输通带,也就是说,为一个滤波通带内的光波提供一致的衍射角。然而,传统 AWG 中的波导阵列引起的色散使得滤波通带内部无法具有完全一致的传递性,而 AWG 复用、解复用不同波长的光的工作原理正是基于色散效应本身。

### 发明内容

[0003] 本发明的目的在于克服现有技术的不足,对波导阵列光栅 AWG 的色散进行,从而提供平坦传输滤波通带,提高器件性能和效率。

[0004] 本发明通过下述技术方案予以实现:

[0005] 一种阵列波导光栅,包括:至少一个输入波导;一个由第一平板波导构成的第一自由空间,所述第一自由空间与所述输入波导的输出端耦合;一个与所述第一自由空间耦合的凹面反射镜;一个通过所述第一自由空间与所述凹面反射镜耦合的并行模式变换器;一个与所述并行模式变换器的输出端耦合的波导阵列,其中所述波导阵列包括第一波导和第二波导,其中所述波导阵列的第一波导沿着由第一圆的一段圆弧定义的第一轨迹延伸,所述第一圆的半径为第一半径,其中所述波导阵列的第二波导沿着由第二圆的一段圆弧定义的第二轨迹延伸,所述第二圆的半径为第二半径,其中第一半径不同于第二半径,以及其中第一圆和第二圆同心地排列;一个由第二平板波导构成的第二自由空间,所述第二自由空间与所述波导阵列的输出端耦合;一个与所述第二自由空间的输出端耦合的凹面反射衍射光栅;以及多个通过所述第二自由空间与所述凹面反射衍射光栅耦合的输出波导。

[0006] 如上所述的阵列波导光栅,其中并行模式变换器包括多个波导脊,且所述波导脊并行排列。

[0007] 如上所述的阵列波导光栅,还可以包括一个位于所述波导阵列的输出端和所述第二自由空间之间的锥形波导阵列,其中所述锥形波导阵列使脊波导的导模的光场能量多数分布在平板层中。所述锥形波导阵列包括多个锥形阵列波导脊,且所述锥形阵列波导脊并行排列。

[0008] 如上所述的阵列波导光栅,其中,所述阵列波导光栅是在绝缘体上硅的波导薄膜上形成的。所述并行模式变换器和所述波导阵列都包括多个通过在绝缘体上硅的波导薄膜上部分刻蚀得到的脊波导。所述凹面反射镜和所述凹面反射衍射光栅都是通过在绝缘体上硅的波导薄膜上全刻蚀得到的,其中所述全刻蚀在所述硅的波导薄膜上刻蚀出一个垂直侧壁从而使得在所述硅的波导薄膜内传播的光束可以在所述垂直侧壁上发生全反射。

[0009] 一种阵列波导光栅,包括:一个波导阵列,其中所述波导阵列包括第一波导和第二

波导,其中所述波导阵列的第一波导沿着由第一圆的一段圆弧定义的第一轨迹延伸,所述第一圆的半径为第一半径,其中所述波导阵列的第二波导沿着由第二圆的一段圆弧定义的第二轨迹延伸,所述第二圆的半径为第二半径,其中第一半径不同于第二半径,以及其中第一圆和第二圆同心地排列。

[0010] 如前一段所述的阵列波导光栅,还包括:一个由第二平板波导构成的第二自由空间,所述第二自由空间与所述波导阵列的输出端耦合;以及一个与所述第二自由空间的输出端耦合的凹面反射衍射光栅,其中所述波导阵列具有第一色散,所述第一色散包括第一色散符号,第一幅度和第一自由频谱范围,其中所述凹面反射衍射光栅具有第二色散,所述第二色散包括第二色散符号,第二幅度和第二自由频谱范围,其中所述第一自由频谱范围至少大于所述第二自由频谱范围的两倍,而且所述第二色散符号与所述第一色散符号相反,所述第二幅度与所述第一幅度相同,故而在所述凹面反射衍射光栅和所述波导阵列的共同作用下,在所述第二自由频谱范围内实现了平坦色散曲线,同时在所述第一自由频谱范围内实现了步进式色散曲线。

[0011] 另一种阵列波导光栅,包括至少一个输入波导;一个由第一平板波导构成的第一自由空间,所述第一自由空间与所述输入波导的输出端耦合;一个与所述第一自由空间耦合的并行模式变换器,其中所述并行模式变换器包括多个波导脊,其中所述波导脊扇出排列;一个与所述并行模式变换器的输出端耦合的波导阵列,其中所述波导阵列包括第一波导和第二波导,其中所述波导阵列的第一波导沿着由第一弯曲段和第一弯曲角度定义的第一轨迹延伸,其中所述波导阵列的第二波导沿着由第二弯曲段和第二弯曲角度定义的第二轨迹延伸,以及其中所述第一弯曲段不同于所述第二弯曲段,其中所述第一弯曲角度也不同于所述第二弯曲角度;一个由第二平板波导构成的第二自由空间,所述第二自由空间与所述波导阵列的输出端耦合;一个与所述第二自由空间的输出端耦合的凹面反射衍射光栅;以及多个与所述凹面反射衍射光栅耦合的输出波导。

[0012] 由于采用上述技术方案,本发明提供的色散校正的阵列波导光栅具有这样的有益效果:在波导阵列和凹面衍射光栅的共同作用下,波导阵列光栅能够提供平坦传输滤波通带,从而提高了器件的整体性能和效率。另外,相对于传统波导阵列光栅的波导阵列,本发明公开的波导阵列光栅的波导阵列中,波导的光程长度差异可为任意值,无需受入射角和其他设计参数的限制。

#### 附图说明

[0013] 图 1 是传统阵列波导光栅的结构示意图。

[0014] 图 2 是传统波导阵列光栅的色散示意图。

[0015] 图 3 是本发明公开的色散校正的阵列波导光栅的一个实施例的结构示意图。

[0016] 图 4 是凹面反射衍射光栅引起的色散示意图。

[0017] 图 5 是本发明公开的阵列波导光栅的色散校正示意图。

[0018] 图 6A 和图 6B 是可用于本发明各实施例的凹面反射衍射光栅的部分结构示意图。

[0019] 图 7 是可用于本发明各实施例的一种并行模式变换器的结构示意图。

[0020] 图 8A 是可用于本发明各实施例的另一种并行模式变换器的结构示意图。

[0021] 图 8B 是可用于本发明各实施例的一种锥形波导阵列的结构示意图。

[0022] 图 9 是可用于本发明各实施例的一种同心圆系列的示意图。

### 具体实施方式

[0023] 下面通过具体实施例并结合附图对本发明进行详细地说明：

[0024] 阵列波导光栅（简称 AWG）通常应用在光波分复用（WDM）系统中，它是一种通过色散效应来分解（分用）或复合（复用）不同波长的光波的器件。光束进入 AWG 的波导阵列部分后，被分到多个波导通道中，由于每个波导通道的长度不同，所以波导阵列末端的各波导输出的光之间存在相位差。这种相位差将会和输入端处初始相位差叠加。例如，如果入射端处的光是同相的，而且波导阵列的各波导间长度是线性变化的，那么在波导阵列的输出端，各波导通道中的光场将沿横跨波导阵列的方向呈现线性的相位分布。请注意，本发明中提到的色散，指的是单位波长变化内的衍射角度变化。

[0025] 在传统的波导阵列中，由于色散的存在，平坦的传输滤波通带难以实现。这是因为，衍射角在滤波通带内随波长的变化而变化，使得滤波通带内的不同波长的光被接收波导接收的效率也不同。一般而言，一个接收波导（即输出波导）对应一个滤波通带，然而，前述接收波导的位置和滤波通带的中心波长对应。因此，滤波通带内的衍射角不同导致波长不同于中心波长的光进入接收波导的位置和入射角产生偏移。因此，波长不同于滤波通带的中心波长的光与接收波导的耦合效率并不是最佳的。离滤波通带的中心波长相差越大，耦合效率越低，直至耦合效率为零。采用本发明公开的技术方案，使得传统波导阵列中在通带内的固有色散得到校正，从而实现平坦的传输滤波通带，这一点在绝大多数应用中都是希望被实现的。另外，相对于现有技术，本发明将提升整个回路的整体性能和效率，例如降低插入损耗。

[0026] 图 1 是传统阵列波导光栅的结构示意图。图 1 所示的传统阵列波导 10 中从右到左，包括两个或两个以上波长的光沿一个或多个输入波导 12 传播至波导阵列 14 中。输入波导 12 输出的光波进入第一自由空间 16（一个平板波导）时开始发散，如箭头 18A 和 18B 所示。第一自由空间 16 在波导阵列输入端 20 处与波导阵列 14 进行耦合。每个波长的光都沿着波导阵列 14 中的每条波导传播，同时能量也分布在波导阵列 14 的各波导 22（或通道）中。

[0027] 如图 1 所示，从波导阵列 14 的最内侧波导 24 至其最外侧波导 26，各波导的长度逐渐增加。波导阵列 14 的各波导 22 间的长度差异，使得沿波导阵列 14 的各波导传播的光波之间出现相位偏移。光从波导阵列 14 的输出端 28 射出的角度取决于波导阵列 14 的各波导之间的相位差，而该相位差由光波长和波导长度差异决定。

[0028] 如图 1 所示，在波导阵列 14 的中间部位 30，每个波导的弯曲角度不同，即最内侧波导 24 弯曲角度最小，最外侧波导 26 的弯曲角度最大。在波导阵列 14 的输入端 20 处，各波导排列紧凑，然后再自输入端 20 至中间部位 30 方向呈扇形发散开来。自中间部位 30 至输出端 28 方向，波导阵列 14 的各波导又开始逐渐收拢，在输出端 28 处再次紧凑排列，从而形成聚焦效应。通常情况下，在输出端 28 处，各波导末端沿一个圆弧排列来加强聚焦效应，这种排列方式形成的结构通常被称为孔径。因此，图 1 中的波导阵列 14 中各波导的间距在波导阵列 14 的长度方向上不相等。当然，波导阵列 14 的各波导 22 的间距在中间部位 30 处最大，在输入端 20 和输出端 28 两处最小。

[0029] 波导阵列 14 与第二自由空间 32(一个平板波导)耦合。从输出端 28(即出射孔径)输出的光进入第二自由空间 32,并在其内传播。在第二自由空间 32 的成像平面上,光波之间互相干涉,包括相长干涉和相消干涉。为接收特定波长的光,在第二自由空间 32 的输出端耦合有多个输出波导 34,且输出波导 34 的摆放位置由波导阵列 14 输出的光波的成像点决定。通过这种方式,经输入波导 12 进入阵列波导光栅 10 的光波中不同波长的光被分离,并沿输出波导 34 输出。在图 1 所示的结构基础上,传统阵列波导光栅 10 实现了波分解复用的功能。请注意,阵列波导光栅的结构通常是对称的,这样阵列波导光栅也能实现波分解复用的功能。本技术领域内的一般技术人员熟知传统的阵列波导光栅技术,本发明不再赘述。

[0030] 如上文所述,传统波导阵列的色散使得滤波通带内部无法具有完全一致的传递性,而 AWG 复用、解复用不同波长的光的工作原理正是基于色散本身。衍射角在滤波通带内随波长变化而变化,使得接收波导接收不同波长光波的效率也不同。

[0031] 图 2 是传统波导阵列光栅的色散示意图。在图 2 中,竖直轴代表衍射角,水平轴代表波长。图 2 中给出了两个滤波通带,即滤波通带  $\lambda_1$  和滤波通带  $\lambda_2$ 。每个滤波通带都包括多个波长。滤波通带  $\lambda_1$  内的波长范围为  $\lambda_{1\min}$  至  $\lambda_{1\max}$ (自小到大),滤波通带  $\lambda_2$  内的波长范围为  $\lambda_{2\min}$  至  $\lambda_{2\max}$ (自小到大)。波导阵列光栅的自由频谱范围由 36 表示。为方便说明,图 2 中做了一个近似处理:光波的衍射角随波长近似线性增加(色散符号为正号)。

[0032] 在滤波通带  $\lambda_1$  内, $\lambda_{1\min}$ (代表具有该波长的光)具有第一衍射角, $\lambda_{1\max}$ (代表具有该波长的光)具有更大的第二衍射角。色散,或者  $\lambda_{1\min}$  和  $\lambda_{1\max}$  之间衍射角的线性变化,具有第一幅度。在滤波通带  $\lambda_2$  内, $\lambda_{2\min}$ (代表具有该波长的光)具有第三衍射角, $\lambda_{2\max}$ (代表具有该波长的光)具有更大的第四衍射角。色散,或者  $\lambda_{2\min}$  和  $\lambda_{2\max}$  之间的衍射角的线性变化,具有第二幅度。

[0033] 一个滤波通带内所有波长的光都应传播到同一波导内。但是,如图 2 所示,由于在一个滤波通带内具有不同的衍射角,该滤波通带内不同波长的光被输出波导接收的效率不同。这里以无源光网(PON)为例,说明滤波通带内衍射角变化或通带内色散的影响。在一种无源光网(PON)中,为使两个下游光通道和一个上游光通道通过三线器来共享同一光纤链接,系统采用一种粗糙的波分复用系统(WDM)。1310nm 波长的上游通道的带宽为 100nm(从 1260nm 到 1360nm)。1490nm 波长的第一下游通道(用于电话或网络)的带宽为 20nm(从 1480nm 到 1500nm),而 1550nm 波长的第二下游通道(用于覆盖视频)的带宽为 10nm(从 1550nm 到 1560nm)。

[0034] 上游通道的带宽较大(100nm),为了覆盖光网用户(ONU)使用的激光波长变化范围。而正因为带宽大,传统的 AWG 不能满足 PON 中三线器的要求。这是因为在 PON 中,上游通道的 100nm 带宽内衍射角变化很大,所以 100nm 带宽内的光具有多个不同的传播角度。因此,传统的 AWG(无色散校正功能)无法应用在 PON 中。

[0035] 请注意,随着滤波通带的宽度增加,衍射角变化范围也加大。可以通过一个非常宽的波导来接收所有衍射角的光波,但是即使对这样一个波导,以不同角度入射的光的被接收效率仍是不一致的。

[0036] 目前已有一种技术试图克服上述色散问题。在 Bidnyk 等人发明的美国专利



No. 7068885 中,两个凹面反射衍射光栅被面对面摆放,第一个反射光栅用来产生主体色散用以分光,第二个发射光栅用来产生附加色散来校正通带内的主体色散。然而,因为平面光波回路中反射光栅的效率是有限的,所以整体插入损耗性能不理想。

[0037] 采用本发明公开的技术,传统 AWG 中固有的滤波通带中的色散得到校正,从而在滤波通带内实现平坦传输,同时相对于现有技术,回路的整体性能和效率都得到了提高,包括降低插入损耗在内。下文中将会详细描述,本发明公开的波导阵列,与一单凹面反射衍射光栅相结合,在校正滤波通带(例如滤波通带  $\lambda 1$  和  $\lambda 2$ ) 内的色散的同时,保持波导阵列对不同通道( $\lambda 1$  和  $\lambda 2$ ) 间的衍射角度的差异。

[0038] 图 3 是本发明公开的色散校正的阵列波导光栅的一个实施例的结构示意图。如图 3 所示,色散校正的 AWG 38 包括一个有多个波导 42 的波导阵列 40。与图 1 中所示的波导阵列相反,图 3 中波导阵列 40 的每个波导沿着同心圆系列中圆的一段圆弧(即圆的一部分)定义的轨迹延伸,下文 中将结合图 9 对此进行详细描述。也就是说,在本发明中,波导阵列 40 的每条波导都沿着由圆的一段圆弧定义的轨迹延伸,这里波导阵列 40 的每个波导 42 遵循的圆弧轨迹所在的圆的半径都不同于其他波导 42 延伸的圆弧轨迹所在的圆的半径,而且这些圆是同心圆,或者是同心地排列。在图 3 中,波导阵列 40 的最外侧波导 44 沿着同心圆系列中半径最大的圆的一段圆弧定义的轨迹延伸,而波导阵列 40 的最内侧波导 46 则沿着同心圆系列中半径最小的圆的一段圆弧定义的轨迹延伸。与图 1 所示的传统波导阵列 14 相比,图 1 所示的传统波导阵列 14 能达到的最小长度差异有限,而图 3 所示的波导阵列 40 能达到的最小长度差异接近于零。因此,波导阵列 40 的自由频谱范围可以为任意值。

[0039] 图 3 中的整个 AWG 器件 38 是在一个平面波导上形成的。如图 3 所示的实施例中,沿输入波导 48 传播的光包括两个波长,即  $\lambda 1$  和  $\lambda 2$ 。输入波导 48 的输出端与没有横向限制的第一自由空间 50(或者称为第一平板波导 50)耦合。随着光传播进第一自由空间 50,光开始发散。与第一平板波导 50 耦合的凹面反射镜 52 将发散的光波转换成一横向准直光束,即被凹面反射镜 52 反射的光束中的光线是平行的。

[0040] 然后,前述准直光束进入与第一平板波导 50 耦合的并行模式变换器 110 中。并行模式变换器 110 将单束入射准直光束分解到多个波导通道内。图 7 和图 8A 中将详细描述并行模式变换器的一个例子。关于并行模式变换器 110 的更多信息可以在 Bing Li 发明的美国专利 No. 7668416 中得到,本发明将美国专利 No. 7668416 的全部内容作为参考资料。

[0041] 当图 3 中的器件被用作波分解复用器时(从右到左),被耦合进波导阵列 40 的准直光束在每个波导通道中激发出同相位的光束,并行模式变换器是用于降低整个器件的插入损耗的可选单元。当这个器件被用作波分复用器(从右到左)的时候,就不应该再使用并行模式变换器,或者用一个波导通道间不发生耦合的锥形波导阵列(例如图 8B 所示的结构)替代并行模式变换器。

[0042] 将在下文中结合图 9 详细描述波导阵列 40 的输入端 55 与并行模式变换器 110 的输出端耦合。波导阵列 40 通过其长度差,对不同波长的光波引入不同的相位偏移,这使得不同波长的光波(如  $\lambda 1$  和  $\lambda 2$ ) 在不同方向上发生衍射。

[0043] 图 3 中的 AWG 38 可以选择性地包括一个与波导阵列 40 的输出端耦合的锥形波导阵列 56。锥形波导阵列 56 的存在,帮助降低波导阵列 40 在其出射端口的散射损耗。请注意,与并行模式变换器 110 相比,锥形波导阵列 56 的各波导通道之间应该尽可能地没有模

式耦合。

[0044] 在一个实施例中,锥形波导阵列 56 与图 8B 中所示的结构类似。如图 8B 所示,锥形波导阵列 56 包括一个输入端 54,输出端 53,和一个或多个并行排列的锥形阵列波导脊 51。锥形阵列波导脊 51 在输入端 54 处的宽度大于其在输出端 53 处的宽度。在理想情况下,锥形波导阵列 56 的长度应足够短以确保波导之间几乎没有或者完全没有模式耦合,因为这种情况下的模式耦合需要长度积累。无模式耦合这一点是本发明期望实现的,因为锥形波导阵列 56 中波导通道间的耦合会破坏波导通道中在波导阵列 40 内部和之后都必须保持的光波的相位独立性。

[0045] 作为一个可选择的单元,锥形波导阵列 56 耦合到第二自由空间 58 上。请注意,如果没有选用锥形波导阵列 56,那么波导阵列 40 可以直接耦合到第二自由空间 58 上。

[0046] 如前文所述,锥形波导阵列 56 或波导阵列 40 输出的平行光束根据光波波长不同而出射角度不同。在图 3 中描述了分别命名为  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  的两道光束。然而,请注意,在图 2 中, $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  分别代表一个滤波通带。在图 3 中,虚光束线(如线条 60 和 62)对应滤波通带的短波长光波(如  $\lambda_{1\min}$  和  $\lambda_{2\min}$ ),实光束线(如线条 64 和 66)对应滤波通带的长波长光波(如  $\lambda_{1\max}$  和  $\lambda_{2\max}$ )。在波导阵列 40 的输出端 68 处,对应于虚光束线 60,62 的光束的衍射角不同于对应于实光束线 64,66 的光束的衍射角。

[0047] 本发明公开的各种技术方案中,为校正色散,阵列波导光栅在第二自由空间 58 之后采用了凹面反射衍射光栅 70。凹面反射衍射光栅 70 将平行光束聚焦到一点,更重要的是,凹面反射衍射光栅 70 同时还校正了同一通带内的衍射角差异。

[0048] 凹面反射衍射光栅 70 具有与所要求的滤波通带等宽的自由频谱范围(FSR),这使得凹面反射衍射光栅 70 在滤波通带  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  内引入了相同的色散。在滤波通带  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  内引入相同的色散校正了滤波通带  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  内之前由波导阵列 40 引入的色散,但是不会消除滤波通带  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  之间的色散。波导阵列 40 的色散在前文中结合图 2 进行了描述。利用凹面反射衍射光栅 70 校正波导阵列 40 的色散的过程将在下文中结合图 4 和图 5 进行描述。

[0049] 图 4 是凹面反射衍射光栅引起的色散示意图。图 4 中描述了图 3 所示的凹面反射衍射光栅 70 引起的色散。在图 4 中,竖直轴代表衍射角,水平轴代表波长。图中,凹面反射光栅 70 的自由频谱范围由 72 表示。采用本发明公开的技术,凹面反射衍射光栅 70 与波导阵列 40 引起的色散符号相反,但是两者幅度大小相等,这样,与凹面反射衍射光栅 70 相结合的波导阵列 40 就实现了一个平坦传输滤波通带,图 5 中将会详细描述。

[0050] 如图 4 所示,衍射角随波长近似线性地减小(色散符号为负号)。而且,衍射角的变化具有反复性和周期性。由凹面反射衍射光栅 70 引起的衍射角线性变化(即图 4 中的斜坡)的幅度和图 3 中波导阵列 40 引起的衍射角线性变化的幅度相等。请注意,图 3 中波导阵列 40 的色散同样可以由图 2 来表示,其自由频谱范围(FSR)由 36 表示。另外,凹面反射衍射光栅 70 引起的衍射角线性变化与图 3 中波导阵列 40 引起的衍射角线性变化符号相反;即图 3 中波导阵列 40 引起的衍射角线性变化的第一色散符号(即正号)与凹面反射衍射光栅 70 引起的衍射角线性变化的第二色散符号相反(即负号)。换句话说,图 4 中凹面反射衍射光栅 70 的自由频谱范围内的斜坡 74 与图 2 中滤波通带(如图 2 中的  $\lambda_1$ )内的斜坡 76 大小相等,但是方向相反。

[0051] 在一个实施例中,凹面反射衍射光栅 70 的自由频谱范围 72 与系统中要求的滤波通带相同。在这种实施例中,凹面反射衍射光栅 70 仅校正滤波通带内的色散,没有改变波导阵列对不同通道 ( $\lambda_1$  和  $\lambda_2$ ) 的色散,即对不同通道 ( $\lambda_1$  和  $\lambda_2$ ) 的衍射角度差异。

[0052] 图 5 是本发明公开的色散校正阵列波导光栅的色散示意图。准确地说,图 5 是将图 2 所示的波导阵列光栅的色散和图 4 所示的凹面反射光栅的色散结合在一起的示意图。经色散校正后的波导阵列光栅的自由频谱范围由 78 表示。请注意,自由频谱范围 78 和图 2 中原来波导阵列 40 的自由频谱范围 36 是相同的。在图 5 中,垂直轴代表衍射角,水平轴代表波长。波导阵列 40 的色散与凹面反射光栅 70 的色散幅度大小相等,符号相反,因此波导阵列 40 和凹面反射光栅 70 两者色散的结合使得滤波通带  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  成为平坦传输滤波通带。换句话说,将波导阵列 40 与凹面反射衍射光栅 70 的结合形成了具有平坦传输滤波通带特性的色散校正的阵列波导光栅。

[0053] 图 6A 和图 6B 是可用于本发明各实施例的凹面反射衍射光栅的部分结构示意图。图 6A 描述了引发正衍射级的凹面反射衍射光栅的一部分,图 6B 描述了引发负衍射级的凹面反射光栅的一部分。根据公式 (1),即光栅衍射公式,

$$[0054] \quad m\lambda = \Lambda (\sin \alpha + \sin \beta) \quad (1)$$

[0055] 其中  $m$  是衍射级,  $\lambda$  是入射光的波长,  $\Lambda$  是光栅晶格常数,  $\alpha$  是相对于光栅表面的法向的入射角,  $\beta$  是相对于光栅表面的法向的衍射角。

[0056] 假设两条法线,即光栅法线  $N_g$  和局部表面法线  $N_r$ , 之间具有一夹角  $\varphi$ 。为得到高衍射效率,偏角  $\varphi$  与  $\beta$  之间的角度差应为  $\theta$  (即  $\varphi - \beta = \theta$ ), 这样选定的衍射级  $m$  才会在局部表面反射的方向上,这里  $\theta$  是入射光与局部表面的法线  $N_r$  之间的夹角。

[0057] 举例说明,为得到一个 50nm 的自由频谱范围(自由空间的波长范围  $\lambda_{1\min}$  至  $\lambda_{2\max}$ ), 那么  $\lambda_{2\max} * (m+2) = \lambda_{1\min} * m$ , 因此  $m = 30$ , 光栅晶格常数  $\Lambda$  应该近似等于  $m \cdot 1550 / 3.45 \cong 13 \mu\text{m}$ 。当  $\beta = 45^\circ$  时, 衍射角  $\beta$  相对于波长  $\lambda$  的变化率, 即角色散, 由公式 (2) 决定,

$$\frac{d\beta}{d\lambda} = \frac{-m}{\Lambda \cos \beta} \cong (-) 3.26 \mu\text{m}^{-1} \quad (2)$$

[0058] 根据公式 (2), 角色散, 即单位波长变化内的角度变化, 与光栅晶格常数  $\Lambda$  成反比。请注意, 角色散的符号 ( $-3.26 \mu\text{m}^{-1}$ ) 取决于衍射级  $m$ 。由于图 3 中的波导阵列 40 的色散符号为正, 用于色散校正的反射光栅的衍射级应为负的, 例如图 6B 中所示。

[0059] 在一些实施例中, 整个 AWG 器件是在绝缘体上硅平面波导膜上形成的。在一个实施例中, 图 6A 和图 6B 所示的凹面反射衍射光栅可以通过在绝缘体上硅 (SOI) 的平面波导膜上实施全刻蚀形成。

[0060] 另外, 图 3 中的凹面反射镜 52 的形成方法可以是: 对 SOI 平面导膜进行全刻蚀 (深刻蚀) 直到埋入氧化层以得到一个相对于硅导波层的垂直的平滑侧壁, 从而使得光在传播过程中在这个平滑侧壁上发生全反射。因为硅和二氧化硅 (本发明中也称为氧化物) 或其他涂层材料如氮化硅 (SiN) 之间的折射系数差异很大, 所以全反射角很小, 这样前述侧壁可以为很大范围内的入射角提供 100% 的反射。

[0061] 全反射入射角临界值 (临界角)  $\theta_T$  由以下公式 (3) 决定。假设硅折射系数为 3.45, 氧化物折射系数为 1.44, 那么

[0062]

$$\theta_T = \arcsin\left(\frac{n_{\text{oxide}}}{n_{\text{silicon}}}\right) \cong 25^\circ \quad (3)$$

[0063] 因此,只要入射角大于  $25^\circ$ , 前述侧壁(凹面反射镜 52)就可以对入射光很好地进行全反射。

[0064] 并行模式变换器 110, 111 或锥形波导阵列 56 可以由在起始 SOI 波导薄膜上部分刻蚀得到的一个多脊波导形成。图 7 是可用于本发明各实施例的一种扇出并行模式变换器的结构示意图。如图 7 所示, 并行模式变换器 111 包括一个输入端 80, 一个输出端 82 和一个或多个波导脊 84。波导脊 84 的宽度和间距沿多脊波导长度方向变化, 从而引发了超模式转换。

[0065] 图 8A 是可用于本发明各实施例的另一种并行模式变换器的结构示意图。当采用凹面反射镜 52 准直输入波导 48(图 3 中)的输出光时, 图 8A 所述的并行模式变换器 110 可用于图 3 中 AWG38。并行模式变换器 110 包括一个输入端 112, 一个输出端 114 和一个或多个波导脊 116。如图 8A 所示的一种并行模式变换器 110, 其波导脊并行排列, 这与图 7 中所述的扇出排列不同。

[0066] 然而, 应该注意到, 如果没有采用凹面反射镜 52, 那么并行模式变换器 110 需要按如图 7 所示的扇出方式排列。即在这种结构下, 图 3 中的并行模式变换器 110 需要由图 7 所示的并行模式变换器 111 替代。然而, 这样做的结果是, 波导阵列 40 的各波导的排列方式就无法如图 9 中所示的那样沿同心圆系列排列, 而是更加类似于图 1 所示的传统 AWG 中的排列方式, 即波导阵列包括一个第一波导和第二波导, 这里波导阵列的第一波导沿第一弯曲线段定义的第一轨迹延伸, 第二波导沿第二弯曲线段定义的第二轨迹延伸, 且第一弯曲线段不同于第二弯曲线段。例如, 如图 1 所示, 波导阵列 14 的各波导的起点沿着一圆弧轨迹排列, 因此, 波导阵列 14 的每个波导的起始延伸角度不同, 且各波导逐渐发散开来。由于波导阵列 14 的所有波导末端必须收拢, 因此波导阵列 14 的各波导的弯曲角度不同, 即最内侧波导 24 的弯曲角度最小(即其弯曲程度小于其他波导), 而最外侧波导 26 的弯曲角度最大(即其弯曲程度大于其他波导)。

[0067] 并行模式变换器 110 对经过准直的光束的分光缓解了波导阵列 40 在沿其长度方向上在各波导间产生长度差异的局限。在传统波导阵列中波导长度差异的局限可以结合图 1 解释: 由于在传统波导阵列中的分光过程是通过各波导间扇出分光实现的, 外侧波导的整体弯曲角度肯定会大于内侧波导的整体弯曲角度。而相邻波导间的弯曲角度差异限制了波导阵列所能达到的最小长度差异, 而这又减小了波导阵列能实现的自由频谱范围。

[0068] 相对于传统波导阵列, 本发明公开的波导阵列能达到的最小波导长度差异值没有任何限制。而更小的波导长度差异有助于形成更大自由频谱范围。另外, 更小的波导长度差异扩大了设计空间, 有助于得到尺寸更小、性能更佳的器件。

[0069] 图 9 是可用于本发明各实施例的一种同心圆系列的示意图, 用于设计波导阵列 40 的布局。因为并行模式变换器 110(图 3)将准直光束分光, 所以本发明公开的色散校正的 AWG(例如图 3 中的 AWG 38)可以包括一个如图 3 所示的波导阵列 40, 该波导阵列 40 沿如图 9 所示的同心圆系列 86(其上的圆弧)定义的轨迹排列。

[0070] 图 9 中描述了凹面反射镜 52, 它将输入端 88 处的发散光波转换成横向准直光束, 并将光束传输到并行模式变换器 110。并行模式变换器 110 将单入射准直光束分解到多个

波导通道内。在图 9 中,位于凹面反射衍射光栅 70 之前的自由空间直接耦合到波导阵列 40 上。需要指出的是,如前文所述,一个锥形波导阵列,例如锥形波导阵列 56,也可以用于本发明公开的 AWG,并与波导阵列 40 的输出端耦合。

[0071] 在本发明中,波导阵列 40 的每个波导 22 分别沿着一个同心圆系列的圆上的一段圆弧轨迹延伸;即波导阵列 40 的每个波导 22 都是沿着圆上一段圆弧定义的轨迹延伸,这里波导阵列 40 的每个波导(或通道)所遵循的圆弧轨迹所在的圆的半径都不同于其他波导所遵循的圆弧轨迹所在的圆的半径,而且这里每个圆都是同心的,或者被同心地排列(共享圆心 89)。波导阵列 40 的每个波导的长度不同,这使得波导阵列的输出孔径处存在线性相位分布。

[0072] 图 9 中的波导阵列 40 包括第一波导(如外侧波导 44)和第二波导(如内侧波导 46)。波导阵列 40 的第一波导沿着由第一圆(如圆 92)上的圆弧段 90 定义的第一轨迹延伸,第一圆的半径为第一半径 94。波导阵列 40 的第二波导沿着由第二圆(如圆 98)上的圆弧段 96 定义的第二轨迹延伸,第二圆的半径为第二半径 100。第一半径 94 不同于第二半径 100。为清楚起见,图 9 中只显示出同心圆系列 86 包括两个圆,即圆 92 和圆 98。然而,实际上,同心圆系列 86 还可以包括多个圆,比如 10 个圆,50 个圆,100 个圆或者更多,其数量取决于阵列波导 40 中的波导通道数量。

[0073] 波导阵列中相邻波导的长度差异是由公式(4)决定的:

$$[0074] \quad dL = dR \cdot \alpha = dR \cdot L/R \quad (4)$$

[0075] 其中,dL 是波导阵列中相邻波导间的长度差异,dR 是波导间距,L 是波导阵列的平均长度。R 是同心圆系列的平均半径, $\alpha$  是波导阵列 40 的输入端 55 和输出端 68 之间的夹角。

[0076] 如图 9 所示,根据公式(4),给定平均长度 L 和间距 dR,在不增加器件尺寸的前提下,波导阵列 40 的相邻波导间的长度差异 dL 可以为任意值。在一个实施例中,波导阵列 40 的输入端 55 和输出端 68 之间的夹角  $\alpha$  为 18 度,平均半径 R 为 2500 微米,间距 dR 为 10 微米。如果  $\alpha$  为 18 度(0.314159 弧度),间距 dR 为 10 微米,那么根据公式(4),阵列中相邻波导的长度差异  $dL = dR \cdot \alpha = 0.314159 \text{ 弧度} * 10 \text{ 微米} = 3.14159 \text{ 微米}$ 。请注意,波导阵列 40 可以是一个在起始 SOI 波导薄膜上部分刻蚀形成的多条并行排列的脊波导。

[0077] AWG 38 的色散校正是在第二自由空间 58 之后采用一个凹面反射衍射光栅 70 来实现的。凹面反射衍射光栅 70 补偿了由波导阵列 40 引起的滤波通道内的衍射角偏移,并将平行光束聚焦到一点上。

[0078] 总而言之,上文提到的 Bidnyk 等人发明的美国专利 No. 7068885 采用了一个双凹面反射衍射光栅结构(两个面对面排列的凹面反射衍射光栅),与该美国专利相比,本发明公开的色散校正的 AWG(如图 3 中的 AWG 38),通过将阵列波导光栅与一个单凹面反射衍射光栅相结合以实现色散校正的阵列波导光栅结构。本发明公开的色散校正的 AWG 还引入了由一个自由空间和一个在平面导膜上形成的凹面镜共同构成的平面光准直系统,用以取代扇出波导阵列,这样,波导阵列的每个波导都沿着圆上的一段圆弧轨迹延伸,每个波导遵循的圆弧轨迹所在的圆的半径都不同于波导阵列上其他波导所遵循的圆弧轨迹所在的圆的半径,而且这里每个圆都可以是同心的,或者被同心地排列。与现有技术(如双凹面反射衍射光栅结构)相比,本发明公开的色散校正的 AWG 整体效率更高。另外,本发明公开的 AWG

消除了常规 AWG 结构中的可实现的波导长度差异限制。而且,与美国专利 No. 7068885 公开的双凹面反射衍射光栅结构不同,本发明公开的 AWG 的波导阵列的波导光程长度差异可为任意值,且无需受入射角和其他设计参数的限制。

[0079] 以上实施方式对本发明进行了详细说明,本领域中普通技术人员可根据上述说明对本发明做出种种变化例。因而,实施方式中的某些细节不应构成对本发明的限定,本发明将以所附权利要求书界定的范围作为本发明的保护范围。

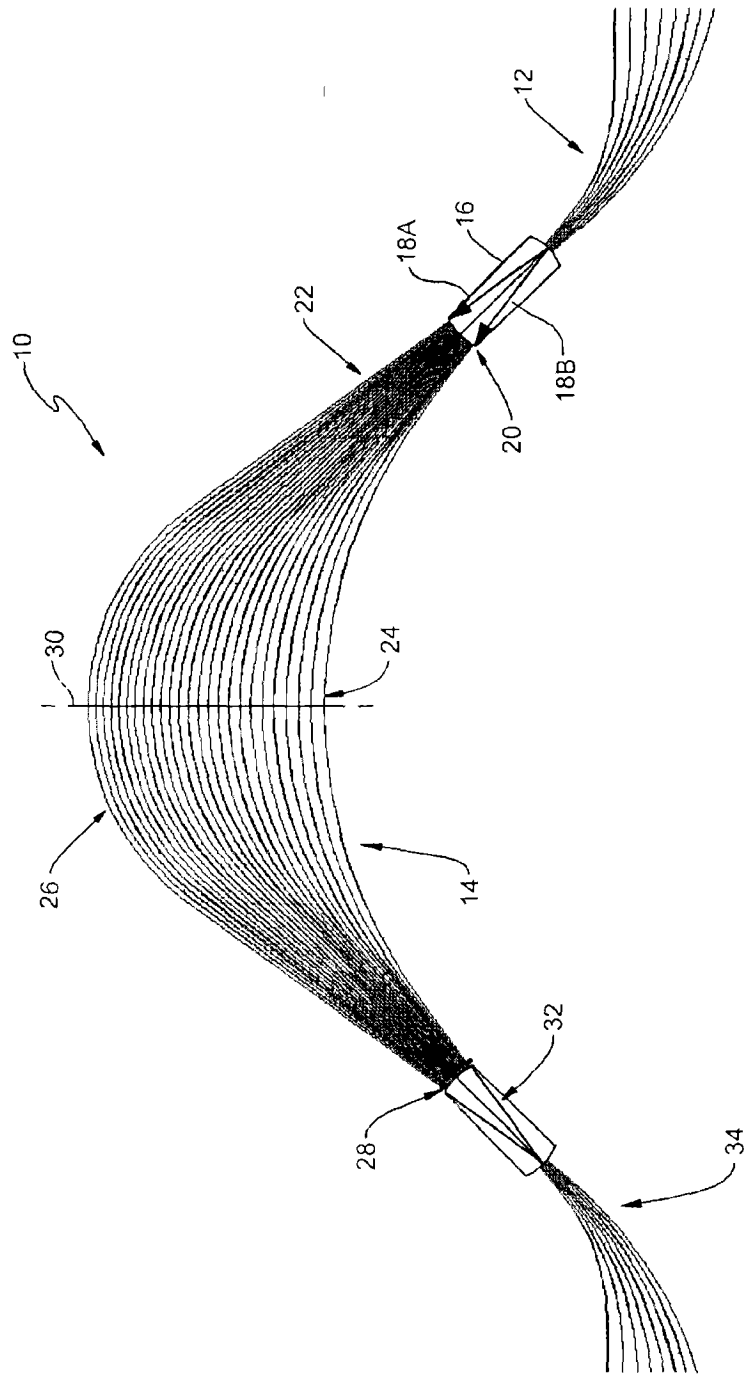


图 1

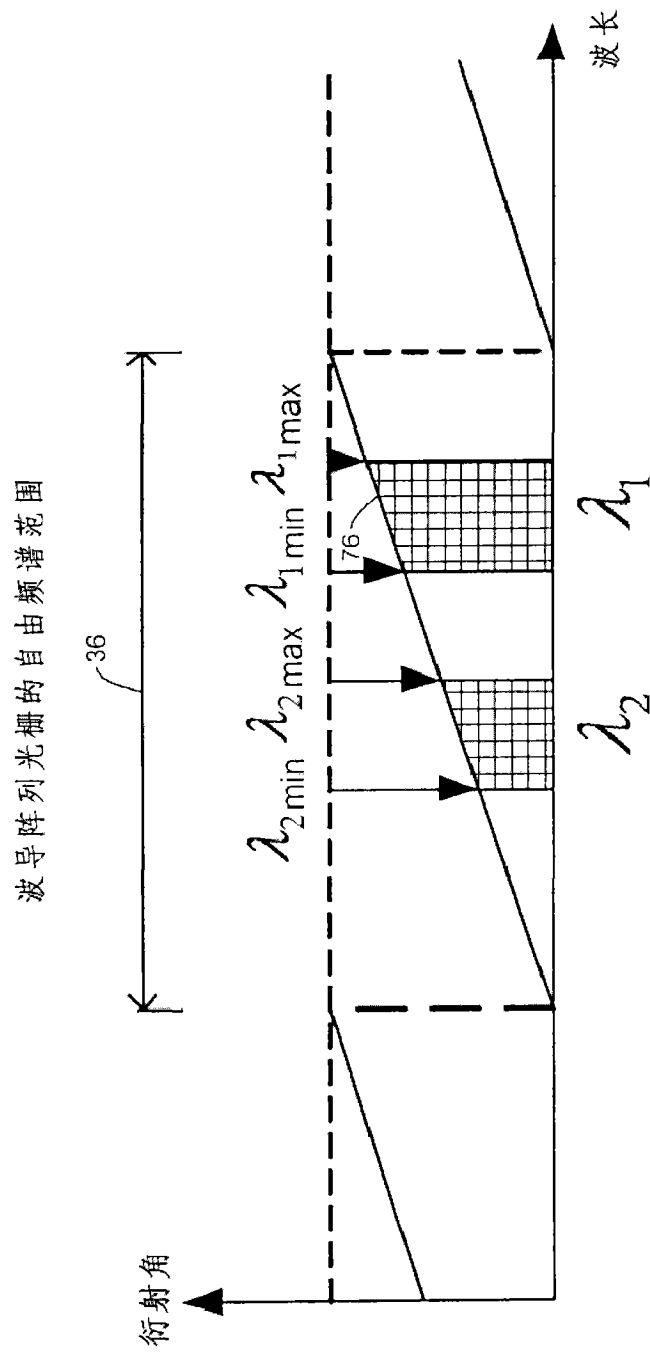


图 2



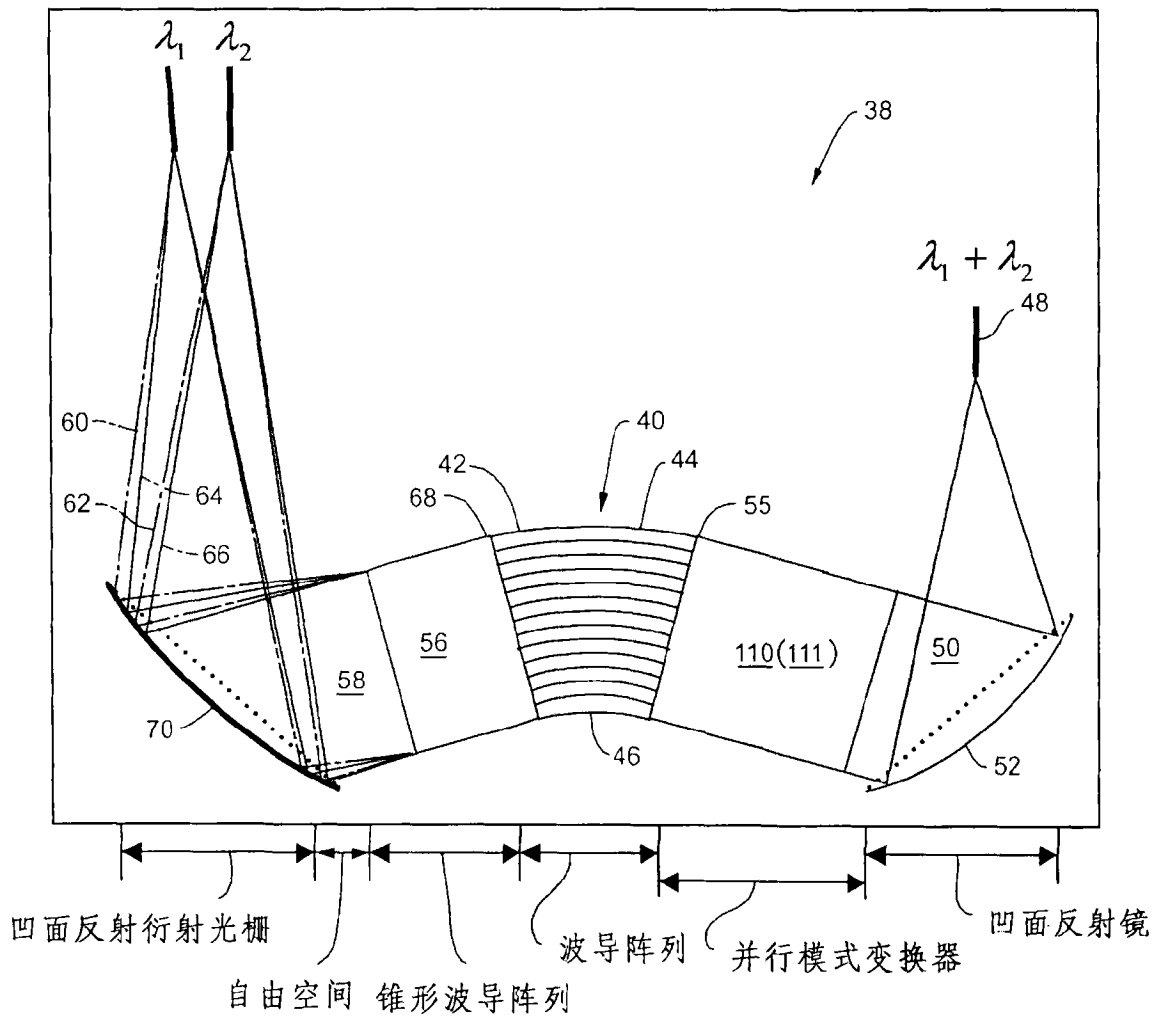


图 3

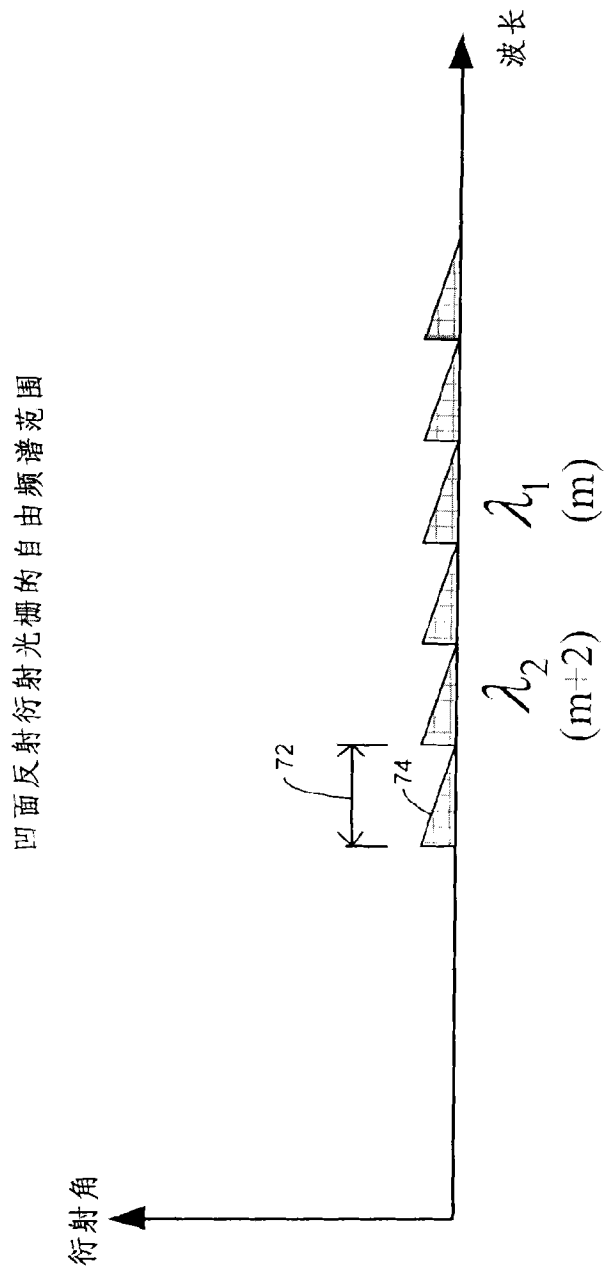


图 4

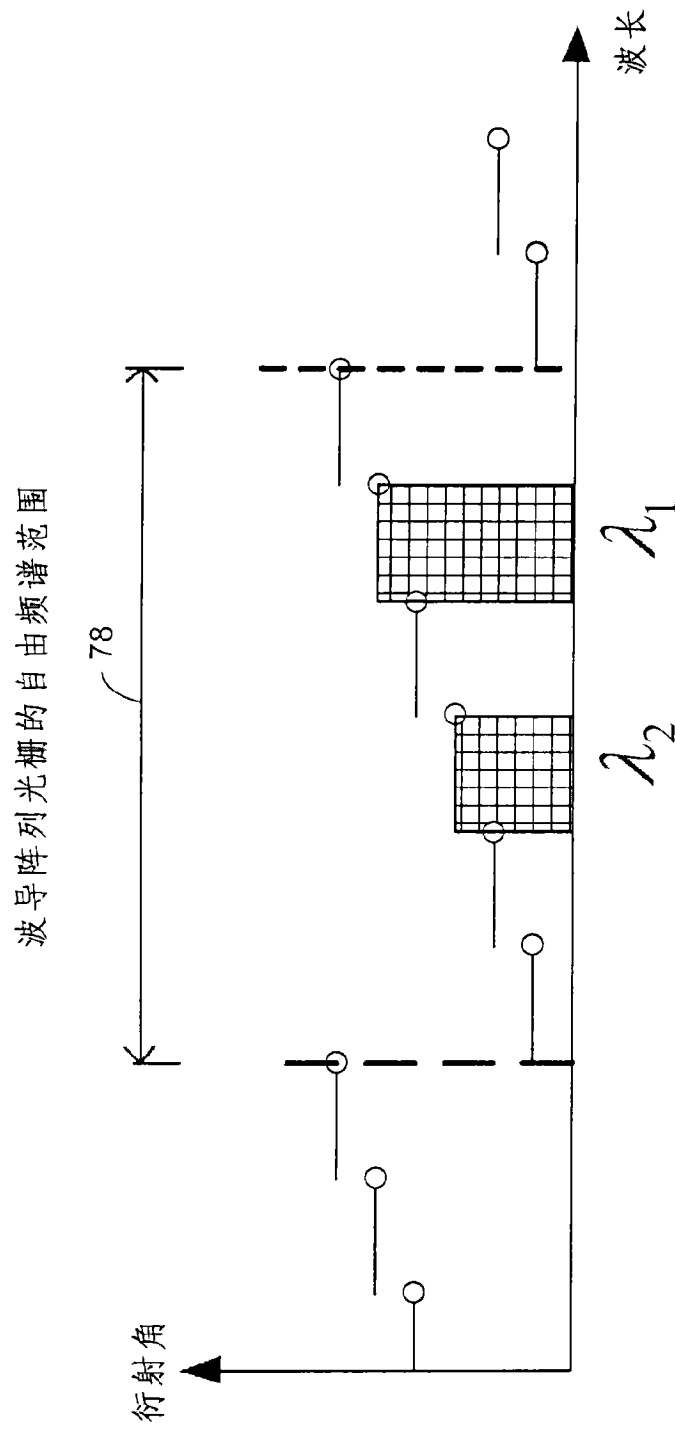


图 5

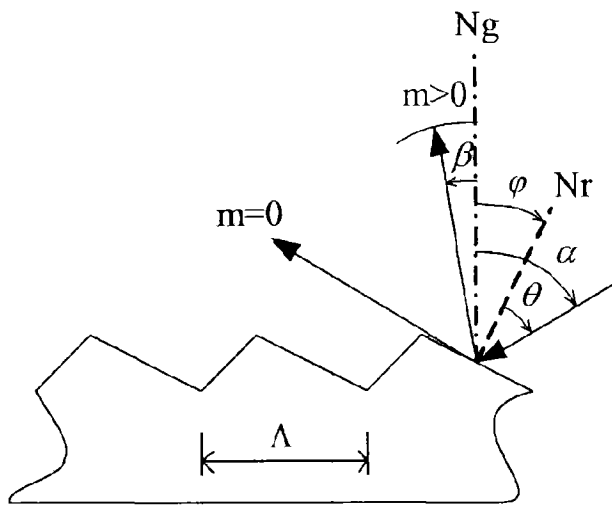


图 6A

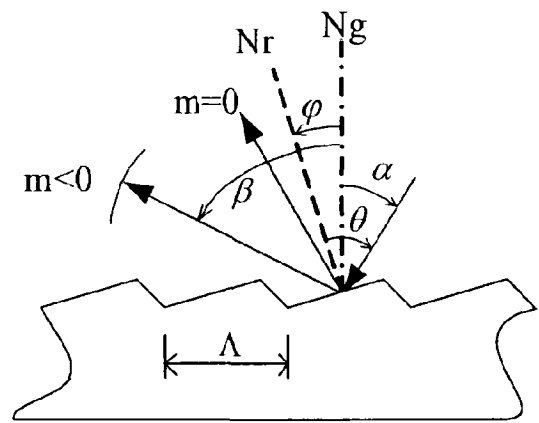


图 6B

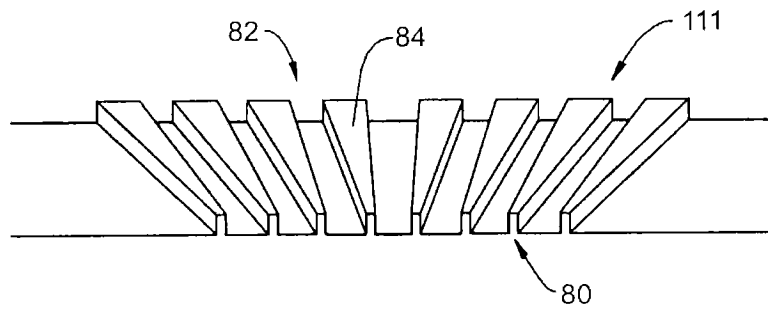


图 7

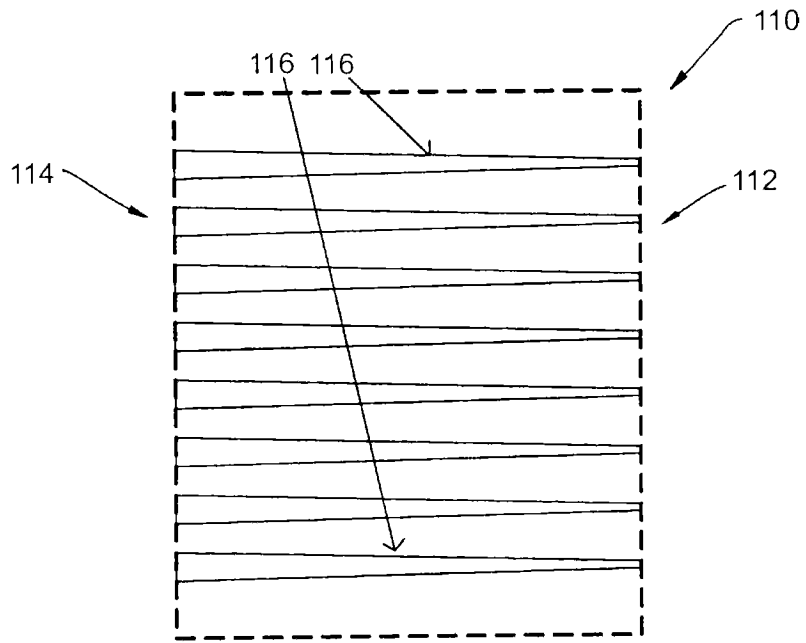


图 8A

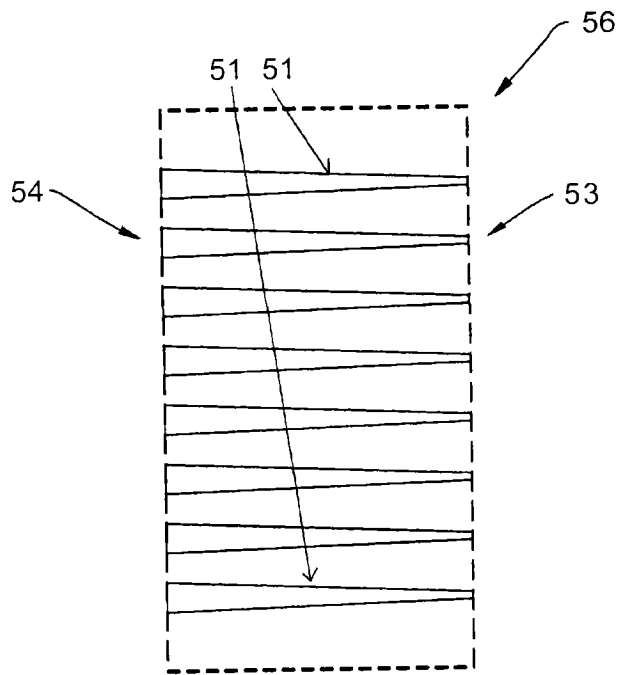


图 8B

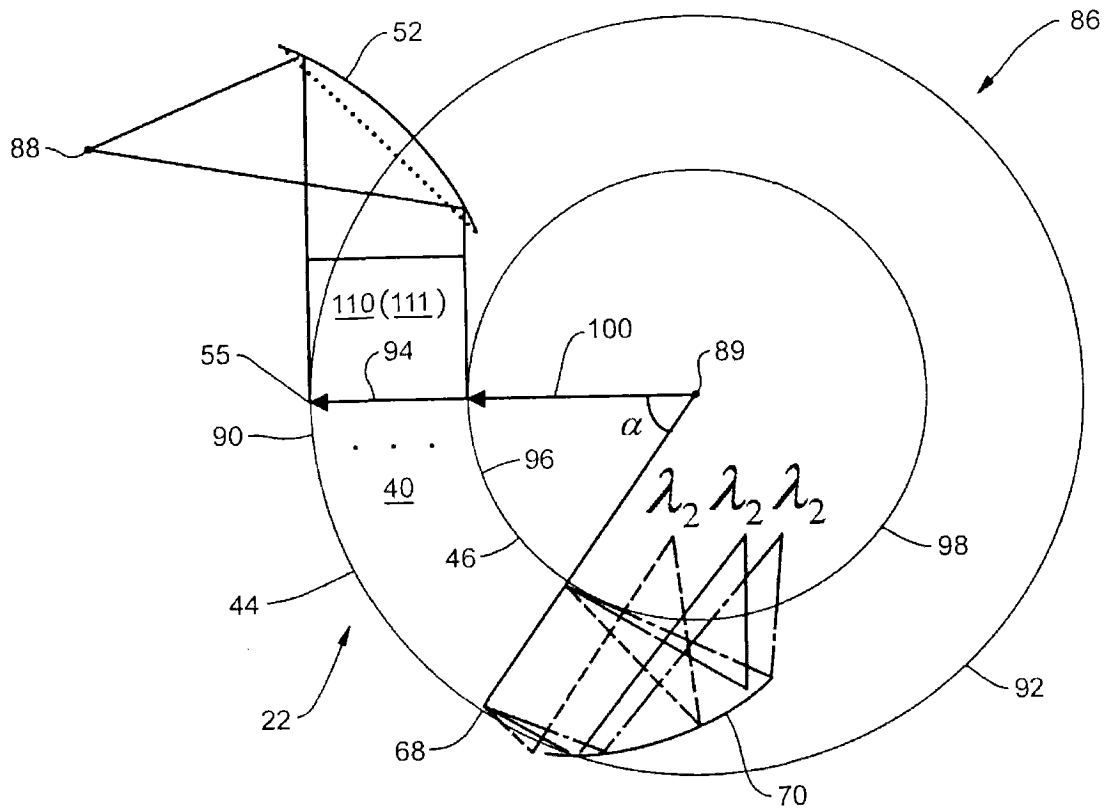


图 9