



[12] 发 明 专 利 说 明 书

[21] ZL 专利号 00813525.8

[45] 授权公告日 2004 年 9 月 1 日

[11] 授权公告号 CN 1164961C

[22] 申请日 2000.8.31 [21] 申请号 00813525.8

[30] 优先权

[32] 1999.12.20 [33] US [31] 60/172,843

[32] 2000.6.1 [33] US [31] 60/209,018

[32] 2000.7.29 [33] US [31] 09/634,619

[32] 1999.12.20 [33] US [31] 60/172,885

[32] 2000.7.29 [33] US [31] 09/628,774

[32] 1999.9.3 [33] US [31] 60/152,218

[86] 国际申请 PCT/US2000/023898 2000.8.31

[87] 国际公布 WO2001/018577 英 2001.3.15

[85] 进入国家阶段日期 2002.3.28

[71] 专利权人 佐勒技术公司

地址 美国科罗拉多

[72] 发明人 安德鲁·萨皮 格里·莫菲

审查员 李 莹

[74] 专利代理机构 中国国际贸易促进委员会专利
商标事务所

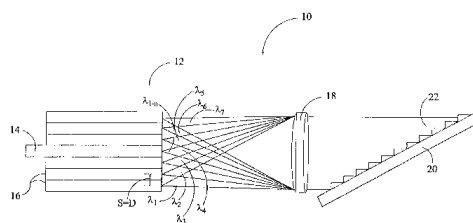
代理人 冯赓宣

权利要求书 4 页 说明书 18 页 附图 10 页

[54] 发明名称 基于中阶梯光栅的密集波分复用器/分用器 工作在利特罗配置下的复用器。

[57] 摘要

一种在光学通信系统中使用的密集波分复用器/分用器(“DWDM”)(10),包括一个传播多个具有选择信道间隔的在选择近红外波长区中复用为单个光信号的光学信道($\lambda_{iest; 1-n}$)的复用光波导(14),一个在选择焦距光学耦合到复用光波导的准直/聚焦光学部件(18),一个光学耦合到准直/聚焦光学部件(18)的反射中阶梯光栅(20),此中阶梯光栅(20)具有凹槽间隔(d)和炫耀角(θ_b)可在选择焦距对选择衍射级提供复用光学信号(λ_{1-n})的信道间隔(d)。每一个都传播近红外波长区内的单信道的单信道波导(16)的线性阵列光学耦合到准直/聚焦光学部件,每一个单信道波导(16)具有一个中心和一个传播终端,并且传播终端与准直/聚焦光学部件之间的距离等于焦距,而相邻分用波导的中心之间的距离为选择信道间隔(D)。光纤线束被用于连接



1.一种在光学通信系统中使用的设备,该设备用于对由在选择波长区内具有选择信道间隔的波长相异的光信道构成的光信号进行复用或分用,包括:

多个一般沿着同一光轴定位并分别具有一个传播终端的光波导;以及

一个具有凹槽间隔在 50 和 300 凹槽/每毫米之间,而炫耀角为 $51-53^\circ$,光学耦合到沿着光轴的多个光波导,接收光波导中至少一个发射的光信号和将光信号衍射进入至少另一个光波导的反射中阶梯光栅。

2.如权利要求 1 的设备,其中炫耀角可在离光栅 152.4 毫米或更小的距离处对选择衍射级 5-7 提供至少 40 微米的信道间隔。

3.如权利要求 1 的设备,其中多个光波导包括至少一个传播多个复用信道的光波导和其余的传播单信道的光波导,传播单信道的光波导位于线性阵列之中并具有一个纤芯中心,相邻波导的纤芯中心之间的间隔为 125 微米或以下。

4.如权利要求 1 的设备,其中选择波长区在 1520-1610 nm 之间,选择信道间隔为 0.8 nm 或以下。

5.如权利要求 1 的设备,还包括一个光学耦合到多个光波导和反射中阶梯光栅之间的准直/聚焦透镜,该准直/聚焦透镜与多个光波导的间隔为 152.4 毫米的选定焦距。

6.如权利要求 1 的设备,其中凹槽间隔为 171.4 凹槽/每毫米和炫耀角为 52.6° 。

7.如权利要求 1 的设备,还包括:

至少两个每个都传播包括多个信道的不同的复用光波导,复用光波导配置于线性阵列中;以及

其余的光波导为单信道波导,配置于二维阵列中,直线行垂直复用线性阵列,每个直线行相应于一个复用光波导。

8.如权利要求 7 的设备,其中每行中的单信道波导数至少等于复用

光信号中的多个信道数。

9.一种在光学通信系统中使用的密集波分复用器/分用器,包括:

一个传播多个具有选择信道间隔的在选择近红外波长区中复用为单个光信号的光学信道的复用光波导;

一个光学耦合到复用光波导的准直/聚焦光学部件,该准直/部件具有选定焦距,该准直/聚焦光学部件与复用光波导间隔选定焦距的距离;

一个光学耦合到准直/聚焦光学部件的反射中阶梯光栅,此中阶梯光栅具有 50-300 凹槽/每毫米的凹槽间隔和炫耀角,可在选定焦距处对选择衍射级 5-7 提供复用光学信号的相邻信道之间的信道间隔; 以及

每一个都传播近红外波长区内的单信道的光分用波导的线性阵列,每一个光学分用波导都具有一个中心和一个传播终端,它光学耦合到准直/聚焦光学部件,并且传播终端与准直/聚焦光学部件之间的距离等于焦距,而相邻分用波导的中心之间的距离对应于相应的相邻信道之间的信道间隔。

10. 如权利要求 9 的密集波分复用器/分用器,其中炫耀角为 51-53°。

11. 如权利要求 9 的密集波分复用器/分用器,其中凹槽间隔为 171.4 凹槽/每毫米和炫耀角为 52.6°。

12. 如权利要求 9 的密集波分复用器/分用器,其中近红外波长区是在 1520 和 1610 nm 之间。

13. 如权利要求 9 的密集波分复用器/分用器,其中中阶梯光栅具有至少与近红外波长区同样大小的自由频谱区。

14. 如权利要求 9 的密集波分复用器/分用器,其中选择衍射级为 5 或 6。

15. 如权利要求 9 的密集波分复用器/分用器,其中准直/聚焦光学部件是单透镜组。

16. 如权利要求 9 的密集波分复用器/分用器,其中复用光波导、单透镜组和光栅都沿着同一光轴定位。

17. 如权利要求 9 的密集波分复用器/分用器,其中反射中阶梯光栅在一凹面基底中形成,并且反射中阶梯光栅包含准直/聚焦光学部件。

18. 如权利要求 9 的密集波分复用器/分用器, 其中选择信道间隔是 0.8 nm 或更小, 信道间隔为至少 40 微米。

19. 如权利要求 9 的密集波分复用器/分用器, 还包括:

至少两个复用光波导每个都传播不同的复用光信号, 复用光波导配置于线性阵列中; 以及

对应于至少两个复用光波导的每一个的光分用波导的线性阵列, 光分用波导的线性阵列垂直于复用光波导线性阵列。

20. 如权利要求 19 的密集波分复用器/分用器, 其中每个光分用波导的线性阵列中的分用波导数至少等于复用光信号中的多个光信道数。

21. 一种在光学通信系统中使用的复用或分用的方法, 光信号包括 0.8 nm 或以下的信道间隔的光信道和在 1520 和 1610 nm 之间的波长区中的不同波长, 此方法包括:

a) 提供一般沿着同一光轴定位的多个光波导, 至少一个传播多个复用信道的光波导和其余的传播单信道的光波导;

b) 将其余的光波导定位于线性阵列中;

c) 将至少一个光波导的一个光信号指向光学耦合到沿着光轴的多个光波导的反射中阶梯光栅, 此中阶梯光栅包括 50-300 凹槽/每毫米的凹槽间隔和炫耀角, 可在 152.4 毫米或更小的选定焦距处对选择衍射级 5-7 提供等于相邻光波导的纤芯中心之间的距离的信道间隔;

d) 使光信号大致沿着光轴衍射;

e) 使光信号在 152.4 毫米或更小的选定焦距处聚焦到至少另外一个光波导。

22. 一种在工作在近红外波长区的光学通信系统中用于复用和分用光信号的体光学中阶梯光栅, 包括 50-300 凹槽/每毫米的凹槽间隔和炫耀角可对 5-7 的选择衍射级提供 0.091 和 0.11 度/nm 的角色散。

23. 如权利要求 22 的体光学光栅, 其中炫耀角在 51-53°之间。

24. 如权利要求 22 的体光学光栅, 其中其中凹槽间隔为 171.4 凹槽/每毫米和炫耀角为 52.74°。

25. 如权利要求 22 的体光学光栅, 其中凹槽是形成于平面基底之中。

26. 如权利要求 22 的体光学光栅，其中凹槽是形成于具有小于 152.4 毫米的焦距的凹面基底之中。

基于中阶梯光栅的密集波分复用器/分用器

技术领域

本发明涉及光通信，并且更具体说是涉及体光学中阶梯光栅密集波分复用器/分用器（bulk optical echelle grating multiplexer/demultiplexer）。

背景技术

在光纤通信初期，一般一根光纤只用来承载单波长的单数据信道。密集波分复用(DWDM)可使给定波长带中的不同波长的多个信道通过一根单模光纤发送，从而大大扩展每根光纤传输的数据量。选择每个信道波长使信道不能相互干扰并使光纤的传输损耗最小。典型的 DWDM 容许多达 40 个信道同时通过一根光纤传输。

通过光纤传输的数据量正在以指数方式增加，并且数据传输的容量消耗迅速。再增加铺设光纤成本效益差。增加光传输率受到系统周围的电子设备的速度和经济方面以及光纤中的色散的限制。于是，增加数据承载容量的最有希望的解决方案是通过 DWDM(密集波分复用)增加每一给定带宽的信道数目。

DWDM 要求有两个概念上对称的器件：复用器和分用器。复用器接收多个光束或光信道，每一个的波长都不同并且来自不同的来源，将这些信道合成为单一的多信道或多色光束。典型的输入为波导线性阵列，如光纤线性阵列，激光二极管线性阵列或某些其他光源。典型的输出为单波导，如一根光纤。分用器根据波长将多色光束在空间上分离为分离的信道。典型的输入为单输入光纤，而典型的输出为波导线性阵列，如光纤，或光检测器线性阵列。

为满足 DWDM 的要求，复用器和分用器要求具有某些固有的特性。首先，这些器件必须能够提供空间间隔紧密信道的高度角色散以使各信

道可经过相对短距离就得到足够的间距而可与线性阵列, 如输出光纤, 耦合。另外, 复用器/分用器必须能适应与光纤通信带宽相匹配的自由频谱区的信道。此外, 这些器件必须提供高分辨率以使串扰最小, 并且还需要效率高以减少信号损失。理想的器件还应该小、耐用、热稳定、价廉和可扩缩。

密集波分复用器件的主要注意力专注于阵列波导。阵列波导具有一组中间通路, 比如长度逐级变化以使自由频谱区内的不同波长信号的波前倾斜的波导。共焦耦合器将公共和专用通路 with 中间通路的相对端连接。一个例子公开于 Lee 的美国专利 No. 5,706,377 中。阵列波导的缺点是设计和制造费用高, 不能在密集波分复用所需要的宽广的波长区内提供高信道密度, 热敏感, 缺乏扩缩性, 具有偏振依赖性, 介入损耗高。

另外一族密集波分复用器件使用滤波器网络和/或光纤布喇格光栅来进行信道分离。Pan 的美国专利 No. 5,748,350 就是例子。然而, 这些器件的信道间隔约为 0.8 或 1.6 毫微米 (nm), 限制了光纤的耦合输入或输出的波长的数目。另外, 这些器件在光损耗、串扰、定位困难和热敏感方面问题很大。

在现有技术中曾经研究过各种体光学密集波分复用器件。Fu 等人的美国专利 No. 5,970,190 中提出一种利用布喇格衍射光栅的标准光栅波分复用器件。Fu 要求一个倾斜机构或者制造一个标准波导 (etalon wave guide), 该波导具有将布喇格光栅写入到波导中的反射露光面。此器件的信道分隔能力有限, 并且要求一个倾斜机构, 而控制该倾斜机构很困难, 并且不可靠。

Dueck 的美国专利 No. 6,011,884 提出一种具有准直光学部件和体光栅(近利特罗配置)的波分复用器件。Dueck 关心使用一种均匀短透镜(bolt lens)来创造一种单件集成器件。此器件想要做成紧凑、牢固和对环境及热稳定的器件。然而, Dueck 提出的这种器件未能照顾到为密集波分复用提供多信道的需要, 和提供紧凑器件所要求的高效和短焦距。

Lundgren 的美国专利 No. 6,018,603, 与 Dueck 类似, 提出将体衍射光栅应用于波分复用。特别是, Lundgren 提出将小阶梯光栅(红外光栅)

与类棒状分级折射率透镜或成像透镜组合起来用于校正聚焦透镜焦距的任何偏移。Lundgren 也未能提出一种能够适应高信道密度并提供高度信道角色散的密集波分复用器件以减小焦距和设备尺寸。

用于光学信号复用和分用技术的其他例子包括使用双折射元件 (birefringent element), 使用光带通滤波器, 使用干涉滤波器, 使用棱镜和使用级联光栅序列。然而, 这些系统都不能提供满足密集波分复用日益增长的需要所必需的有益属性组合。

本发明意欲克服上述问题中的某些问题并提供一种具备成本效益良好的密集波分复用所需要的许多属性的体光学中阶梯光栅密集波分复用器/分用器。

发明概述

本发明的第一个方面是在光学通信系统中使用的密集波分复用器/分用器 ("DWDM")。DWDM 包含一个传播多个信道间的间隔为 0.4 nm 或以下的在选择近红外波长区中复用为单个光学信号的光学信道的复用光波导。一准直/聚焦光学部件在选择焦距处光学耦合到复用光波导。一个反射中阶梯光栅光学耦合到准直/聚焦光学部件。此中阶梯光栅具有的四槽间隔和炫耀角可在选择焦距处对选择衍射级提供复用光学信号的选择信道间隔。每一个都传播近红外波长区内的单信道的单信道波导的线性阵列光学耦合到此准直/聚焦光学部件。每一个单信道波导具有一个中心和传播终端, 并且传播终端与准直/聚焦光学部件之间的距离等于焦距, 而相邻分用波导的中心之间的距离为选择信道间隔。最好是四槽间隔在大约 50 和 300 四槽/每毫米之间, 而炫耀角为 51-53°。近红外波长区最好是在 1520 和 1610 nm, 中阶梯光栅最好是具有至少与近红外波长区同样大小的自由频谱区。选择信道间隔最好是 0.4 nm 或更小, 优选信道间隔为至少 40 微米(μ), 而焦距最好是小于 152.4 毫米。光栅的分辨率最好是至少为 20000, 而光栅效率至少为 75%。复用和单信道波导最好是光纤。

本发明的第二个方面是一种在光学通信系统中使用的设备, 该设备

用于对由在选择波长区内具有选择信道间隔的波长相异的光信道构成的光信号进行复用或分用。此设备包括多个一般沿着同一光轴定位并具有一个传播终端的光波导。一个反射中阶梯光栅光学耦合到沿着光轴的多个光波导并接收光波导中至少一个发射的光信号。光信号衍射进入至少另一个光波导。光栅最好是具有凹槽间隔在大约 50 和 300 凹槽/每毫米之间，而炫耀角为 $51-53^\circ$ 的中阶梯光栅。中阶梯光栅可以是具有焦距小于 152.4 毫米的凹面基底。最好是波长区在 1520-1610 nm，信道间隔为 0.4 nm 或更小，而中阶梯光栅具有凹槽间隔和炫耀角可在焦距为 152.4nm 或更小时对选择衍射级提供 40 微米或以上信道间隔和至少 75% 的效率。此设备还包括一个光学耦合到多个光波导和中阶梯光栅之间的准直/聚焦光学部件。准直/聚焦透镜的焦距为 152.4 毫米，而传播单信道的光纤每一个的纤芯中心与相邻光纤的纤芯中心之间相隔一选择距离，此选择距离小于 125 微米。

本发明的第三个方面是一种在光学通信系统中使用的复用或分用的方法。光信号包括在选择波长区内的选择信道间隔和不同波长的光信道。提供多个光波导并且它们一般沿着同一光轴定位。一个光信号由至少一个光波导指向光学耦合到沿着光轴的多个光波导的反射中阶梯光栅。光信号衍射大致沿着光轴至少进入至少另一个光波导。光波导最好是光纤。最好是多个复用信道在一根光纤中传播并且单信道在其他光纤中传播，而且其他光纤在线性阵列中定位。最好是信道带宽在 1520-1610 nm，信道间隔为 0.4 nm 或更小，而光栅具有的凹槽间隔和炫耀角可在效率至少为 75% 时在选择焦距对选择衍射级提供等于线性阵列中的相邻光纤的纤芯中心之间的距离的信道间隔。

本发明的最后一个方面是一种在工作在近红外波长区和信道间隔为 0.4 nm 或更小的光学通信系统中用于复用和分用光信号的体光学光栅。此光栅包括凹槽间隔和炫耀角可对选择衍射级提供 0.091 和 0.11 度/nm 的角色散和至少为 75% 的效率。光栅最好是凹槽间隔在大约 50 和 300 凹槽/每毫米之间，而炫耀角为 $51-53^\circ$ 。近红外波长区最好是在 1520-1610 nm，并且体光学光栅最好是具有至少与近红外波长区同样大小的自由频谱

区。选择衍射级最好是在 4 与 7 之间。

根据本发明的密集波分复用器/分用器利用一个体光学中阶梯光栅使得在相对宽的带宽上实现密集信道间隔(0.4 nm 或更小)的复用/分用,从而使在给定带宽时单根光纤所能承载的信道数为最大。利用体光学中阶梯光栅的密集波分复用器件容许以高分辨率和高效率进行信道复用/分用。中阶梯光栅的高角色散容许在相对短的焦距上得到足够的信道间隔,提供较之现有的复用器/分用器更小的波形因数。使用体光学元件可提供一种易于制造、高度可靠、可扩缩和制造安装相对便宜的系统。

附图简述

图 1 为利用本发明的体中阶梯光栅的复用器/分用器的平面示意图;

图 2 为示出相关尺寸的中阶梯光栅凹槽的放大横截面图;

图 3 为在可生成工作中阶梯光栅的不同级的可能的阶梯宽度和竖板的高度的示意图;

图 4 为采用本发明的体中阶梯光栅的复用器/分用器示例的示意图;

图 5 为引出线模板的部分横截面图;

图 6 为图 1 的采用体中阶梯光栅的复用器/分用器的透视图, 示出部件的可能调节;

图 7 为采用包括一对准直/聚焦凹面镜的体光学中阶梯光栅的复用器/分用器的第一种可能实施方式的示意图;

图 8 为图 7 的复用器/分用器还包括有一个提供水平方向上的波长色散的棱镜的第二种可能实施方式的示意图;

图 9 为采用单准直/聚焦镜的复用器/分用器的第三种可能实施方式的示意图;

图 10 为采用离轴抛物面反射镜作为准直/聚焦光学部件的本发明的复用器/分用器的第四种可能实施方式的示意图;

图 11 为采用凹面中阶梯光栅本发明的复用器/分用器的第五种可能实施方式的示意图;

图 12 为用于将宽带宽分割为复用/分用用的带宽段的设备的示意图;

图 13 为采用三波带分割元件的图 12 的实施方式的示意图;

图 14 为具有一维光纤输入阵列和二维单信道光纤阵列的引出线束的示意剖视图;

图 15 为具有多层复用光纤和二维单信道光纤阵列的复用器/分用器的示意图;

图 16 为图 4 的复用器/分用器的系统响应与波长的关系图。

实施发明的具体方式

图 1 示出应用于本发明的光学通信系统 10 中的复用器/分用器的平面示意图。此复用器/分用器的构成包括一引出线束 12, 引出线束 12 的构成包括输入波导 14、邻接输入光纤排列形成线性阵列的多个输出波导 16; 准直/聚焦透镜 18 及中阶梯光栅 20, 其中每一个都是光耦合。在此讨论中, 复用器/分用器将就分用器进行讨论。该描述对复用器同样适用, 只不过输入和输出波导 14, 16 的功能对调而已。另外, 为清楚起见, 图中示出的只有七个输出波导(中心输出波导位于图 1 的输入光纤的下面, 这可以通过图 14 中的元件 142 和 148 看出)。另外, 输入波导 14, 16 最好是单模光纤。下面将详细讨论, 在优选实施方式中, 90 或更多的输出波导可与一个单输入波导相结合, 这取决于带宽信道, 间隔和许多其他因素。

此处使用的“光耦合”或“光通信”指的是使一个光学元件承载的光学信号赋予“耦合的”或“通信的”元件的任何连接、耦合、链接等等。此种“光通信”器件不一定要互相直接连接, 而可以隔着一段光信号通过的空间或是隔着中间的光学部件或器件。

如图 1 所示, 光学通信系统 10 是“近利特罗配置”, 就是说入射光束 λ_{1-n} 和由光栅的表面衍射(diffract)出去的信道($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5, \lambda_6, \lambda_7$)大致是沿着同一光轴(即经过非常靠近的通路)并且透镜既对输入光束 λ_{1-n} 准直也将衍射信道 λ_1, λ_7 聚焦到输出光纤 16。

中阶梯光栅 20, 与其他光栅如小阶梯光栅类似, 利用从其刻划表面的不同部分或阶梯 22 反射的光波前之间的干涉, 将由多个具有在选择波

长区中的选择信道间隔的信道组成的入射光 λ_{1-n} 分割为经过光栅角色散进入不远处的输出波导的波长束 λ_1 - λ_7 的分离信道。参照图 1, 器件(D)的信道间隔(是准直/聚焦光学部件的焦距, 角色散和增加的信道间隔的乘积)等于相邻输出波导的中心间的距离 S。中阶梯光栅 20 特别适用于光通信系统, 因为具有如下特性的组合: 1)它可提供清楚的信道间隔, 尽管信道间隔很小(0.4 nm 或更小); 2)它可在相对短的距离上提供信道的巨大空间间隔; 3)在光通信波长区中其效率高。

参照图 2, 为本说明书之用, 中阶梯光栅是一个特殊光栅结构, 具有凹槽密度(1/d)为 300 凹槽/每毫米以下, 而炫耀角 (blaze angle) θ_b 大于 45° , 通常工作于大于 1 的衍射级的条件下。经过组合, 这些特点可以实现一种通过相对小的焦距(比如 5 英寸)高效分离间隔很小的信道并使波形因数很小(大约长度为 10 英寸或以下)的复用器/分用器。

考虑对密集波分复用理想的中阶梯光栅某些外部因素和性能的限制。外部限制包括以下各项:

- 1) 使焦距最小, 焦距最好在 6 英寸以下。
- 2) 中心波长在近红外区, 大约在 C 波段的中心, 1550 nm。
- 3) 信道间隔最小(比如 0.4 nm 或更小)。
- 4) 自由频谱区大, 150 nm。
- 5) 系统 f 数在 4-8 范围内。
- 6) 系统结实, 成本最低。

性能限制包括:

- 1) 分辨率大于 20000(虽然分辨率>15000 对某些应用是合适的)。
- 2) 高色散。
- 3) 频谱区内响应平坦。
- 4) 高效率或低损耗(>75%)。
- 5) 偏振损耗最小。

外部限制中的结实程度和成本的降低以及性能限制中的易于定位和高效率使得必须采用利特罗配置, 它可简化系统优化分析。

图 2 示出中阶梯光栅的几何形状和下面设定的变量。

θ_b =炫耀角

α =入射角

β =衍射角

在利特罗配置中, $\theta_b = \alpha \cong \beta$

b = 阶梯 (step) (反射面)尺寸

d = 1/凹槽密度

a = 竖板(riser)尺寸

对大量上述限制因素数目的检查表明中阶梯光栅对密集波分复用有效。

1.限制因素: f 数(f)在 4-8 范围内, 分辨率(R)>20000.

结果: 对利特罗配置的光栅,

$$R > 2\left(\frac{w}{\lambda}\right),$$

其中 W 是光栅照明宽度。于是, 或是 $W = (20000/2)(1550 \text{ nm})$, 或是 $W \approx 1.55 \text{ cm}$.

$W_{xf} = fl$ (焦距), 或

$$fl \approx 1.55 \text{ cm} \times 8 \approx 124$$

2.限制因素: $fl > 124 \text{ mm}$ 和信道间隔至少为 80μ .

结果: 对利特罗配置的光栅, 色散 $\left(\frac{d\theta_b}{d\lambda}\right) = \frac{m}{b} \cdot fl$, 其中 m = 衍射级。于是, 假设信道间隔至少为 80μ , $\Delta\lambda = 4 \times 10^{-4} \mu$ 和 $fl = 1.2 \times 10^4 \mu$, $m > 1.5 b$.

3.限制因素: FSR (自由频谱区) > 150

结果: $FSR = \lambda/m$, 它表示 $m = 1550/150$, 或 $m \leq 10$.

4.限制因素: 希望提供带宽内的平坦响应。

结果: 衍射包络必须具有足够宽的最大值以使在波长区极端处损耗最小。这要求 $b < 8.5 \mu$ 。超过级 7 使得过多的光通过衍射峰, 结果效率就低得令人无法接受。于是: $b < 8.5 \mu$ 和 $m \leq 7$.

5.限制因素: 高效率(>85°).

结果: 效率是阶梯尺寸的函数。阶梯尺寸的选择要可以在选择级提供捕获 90%信号的信道宽度。

$b < 3\mu$ 可产生适宜的效率。

6.限制因素：从上面的 2.和 4.得出对 m 的限制。

结果： $1.5 < m < 7$ 。

7.限制因素：对利特罗模式中的中阶梯光栅： $a = m\lambda/2$ 。

结果： $a = 3.88\mu$ ($m = 5$ 时)

4.65μ ($m = 6$ 时)

5.43μ ($m = 6$ 时)

图 3 示出在给定的适宜的级(m)的范围内这些限制和结果会提供给 a 和 b 的值的范围。旨在使效率最大化和衍射损耗最小化的模拟可使在中阶梯光栅区内的炫耀角和凹槽频率，即 $45 < \theta_b < 78^\circ$ 和 $d < 300$ ，最优化。另外，制造的限制进一步使得只有中阶梯光栅能够在外部和性能限制下提供必需的结果。

在设计运行的复用器/分用器时，要对由上面设定的外部限制和性能限制中的很多个限制所要求的大量的设计参数进行选择。图 4 为示出一个配置示例的示意图，其中与图 1 中的类似的元件采用同样的标号。提出要求的限制及其对例示的体中阶梯光栅密集波分复用的作用如下：

1.信道特性

当前光通信使用称为“C”频带的近红外波长，波长带为 1528-1565 毫微米(nm)。这可提供 37 nm 的带宽或自由频谱区用于信道分离。现有技术的复用器/分用器要求信道间隔为 0.8 nm 或甚至 1.6 nm，结果可能的信道数目在 48 和 24 之间。因为中阶梯光栅可提供明显优越的信道色散，可选择小得多的信道间隔 0.4 nm，结果在 C 频带中可以有 93 C 信道。随着半导体激光器的调谐范围的增加和光通信扩展到“C”频带之外包含“L”频带(1566-1610 nm)和“S”频带(≈ 1490 -1527 nm)，可预见的总带宽大约为 120 nm 或更多，可能制造出能够在在一根输入光纤容纳 300 信道的复用器/分用器。

当前的光通信主要工作于称为 OC48 的 2.5 GHz 信道频率。在 OC48，信道宽度 $\lambda_{48} = 0.02$ nm。现在光通信正在开始采用称为 OC192 的 10 GHz 频率。在 OC192 信道宽度 $\lambda_{192} = 0.08$ nm。

2. 光纤尺寸

在光通信中使用的标准的单模光纤通常的外径为 125 微米(μ), 而纤芯直径为 10 μ 。现在可得到外径 80 μ 纤芯直径 8.3 μ 的光纤, 型号为 SM-1250, 由 Fibercore 制造的。在此示例中, 输入光纤 14 和输出光纤 16 都是单模光纤并且共用 80 μ 的外径。假设输出光纤 16 如图 4 所示平行邻接, 这将导致纤芯中心之间的间隔为 80 μ , 或在选择焦距处所要求的信道间距为 D 为 80 μ 。因为可以获得不同外径的光纤, 并且光纤包层可蚀刻掉, 所以 80 μ 的间隔可以减小, 可以预期纤芯间隔可做到 40 μ 或更小, 这将可以使得焦距更短或设计具有更小角色散的不同的中阶梯光栅。从光纤中发射出去的光束的分布在 e-折叠点处为 10°, 尽管后来发现在 1%点是 14°。

3. 波形因数

此设计的目标是以与现在的复用器/分用器器件中使用的波形因数一致或更小的波形因数来提供高信道密度。设计的目标是总长度在 10-12 英寸之间。为适应所有的光学部件和线束, 选择的最大焦距为 5 英寸(127 mm)。如上所述, 由于限制因素中的 f 数在 4-8 之间和分辨率(R)>20000, 最终选择的焦距为 124。

4. 色散限制

为防止数据丢失, 过去必须使中阶梯光栅的色散受到限制。在中阶梯光栅中要求初始的 0.4 nm 的信道间隔以求在输出光纤得到 80 μ 的间隔(相应于纤芯间隔)。另一方面, OC192 频率的 0.08 nm 的信道宽度在焦距上不能发生比纤芯孔径大得多的色散。于是:

$$\frac{\text{信道间隔}}{\text{光纤间隔}} < \frac{0.4nm}{80u}, \text{ 而 } \frac{\text{信道宽度(OC192)}}{\text{线芯直径}} > \frac{0.08nm}{8.3u}$$

5. 光栅设计

影响光栅设计的变量为:

- 1) 波长范围
- 2) 效率
- 3) 色散(D)

4) 要求的分辨率($\lambda / \Delta\lambda$)

图 3 为示出中阶梯光栅主要尺寸的横截面图, 这些尺寸包括炫耀角(θ_b), 波长区和凹槽密度(d)。

为了设计光栅, 选择中心在 1550 nm 的 150 个信道。这导致光谱图像的物理尺寸为(信道数目) $\times$ (最大间隔), 或 $150 \times 80 \mu = 12000 \mu$ 。这种要将 90% 的强度包含于 12000μ 中的要求限制 b 的尺寸。衍射光栅的远场图形为

$$I = I_0 \left(\frac{\sin \beta}{\beta} \right)^2 \left(\frac{\sin N\alpha}{\alpha} \right)^2$$

N = 照明的线数, $\beta = (\pi b / \lambda) \sin \theta_b$ 和 $\alpha = (\pi d / \lambda) \sin \theta_b$ 。

电子表格计算表明 $b \leq 5.5\lambda$ (或 $b \leq 8.5 \mu$) 是使其 90% 强度点频谱图像 $> 12000 \mu$ 所必需的。

为将损耗减少到最小, 即保持适当的效率, $b > 2\lambda$ 。于是, $2\lambda < b < 5.5\lambda$ 。(条件 A)。

在利特罗模式中, 角色散为:

$$\left(\frac{d\theta}{d\lambda} \right) = \frac{m}{d \cos \theta} \text{ 或 } \frac{d\theta}{d\lambda} = \frac{m}{b}$$

$$\Delta x (\text{直线间隔}) = (\Delta \theta) (f_l) (\Delta \lambda) = \left(\frac{m}{b} \right) (\Delta \lambda) \cdot (f_l)$$

$$80 \mu < \frac{m}{b} (4 \times 10^{-4} \mu) (1.2 \times 10^5 \mu)$$

$$m > \frac{1.6b\mu}{0.6\mu} > 1.6b\mu$$

然而, 对 OC192, 色散必须受到限制以便在 10μ 纤芯中包含 0.08 nm 的信道宽度, 以使 $m < 3.34b_\mu$ 。

这样, $1.67b < m < 3.34b$ (条件 B)。

所要求的分辨率(R) = $\lambda / \Delta\lambda = N \cdot m$ 。

其中 $\lambda = 1550 \text{ nm}$, 而 $\Delta\lambda = 0.08 \text{ nm}$, 可以产生所要求的分辨率 $R = 19375$ 或大致为 20000。假设在光栅处光束的大小为 2.1 cm (根据 $f_l = 124 \text{ cm}$ 和 10° 发散):

$$N = \frac{P(2.1)}{\cos \theta_b}, P = \text{线/cm} = \frac{1}{d}$$

$$\text{这样, } 20000 < \frac{2.1 \times 10^{-2} \text{ cm}}{d \cos \theta} \cdot m = \frac{2.1^{-2} \text{ cm}}{b} m \text{ 或}$$

$$b < 1.05m \text{ (条件 C).}$$

为了在利特罗模式中将级 m 与衍射峰对齐, 我们知道 $a = (m\lambda)/2$, 或 a 必须具有的值:

$$a = 3.88\mu \text{ (} m = 5 \text{ 时)}$$

$$4.65\mu \text{ (} m = 6 \text{ 时)} \quad \text{(条件 D)}$$

$$5.43\mu \text{ (} m = 6 \text{ 时)}$$

只有当 θ_b 增加到大于 45° 时条件 A 和 B 才能满足。

假设 $\theta_b = 60^\circ$, 而 $m = 5$, $a = 3.88\mu$

$$b = 2.2\mu$$

$$d = 4.48\mu$$

所有的条件 A-D 均满足。

精确的凹槽密度和炫耀角的选择还受到偏振损耗和制造限制的影响。对图 4 所示的实施方式, 使用干涉计量控制的刻线机来加工线光栅可使线密度的选择能够被 3600 等分。考虑到这些各种因素选择了凹槽密度 $d = 171.4$ 凹槽/mm 和 $m = 5$ 。这导致在此示例中 $a = 3.88\mu$, $b = 3.55\mu$ 和相应的炫耀角等于 52.6° 。然而, 这一方法表明, 对于焦距在 30-125mm 之间和级为 5-7 的场合, 可能的炫耀角范围在 51° 至 53° 之间, 并且凹槽密度承载 50 至 300 凹槽/mm 以便提供直线信道间隔 40-125 微米和中阶梯光栅的角色散在 0.091-0.11 度/nm 之间。

在图 4 的示例中, 中阶梯光栅的凹槽密度为 171.4 凹槽/mm 和炫耀角为 52.6° 。中阶梯光栅可借助数种已知方法中的一种形成。比如, 可利用淀积于玻璃基底上的环氧树脂层形成, 在其中压入确定阶梯的母模。之后在阶梯上涂覆高反射性的材料, 如金。阶梯也可以精确加工直接进入玻璃或硅基底, 然后利用反射材料涂覆。还有一种选择是利用在 McMahan 的美国专利 N0. 4,736,360 中描述的光刻法, 该专利的整个内容在本说明书中清楚地援引作为参考文献。

透镜 18 可以是一个具有球形表面的渐变折射率(GRIN)光学部件或具有一个或多个可能不是球形(非球面)表面的复合透镜。使用数个透镜或单个透镜来准直光束和聚焦色散光可限制由使用要求光线以离轴几何形状通过系统的前表面反射器造成的球面像差或彗差(coma)。第一种可能类型的透镜是使用径向渐变折射率以取得离轴光线的近衍射限制成像。第二类透镜实际上是由至少两个独立的镜片胶合在一起(双合透镜)。另一种选择是使用三个独立的透镜片(三合透镜)。这些镜片可分别独立地具有球形表面,或者是在需要校正某种像差时也可以利用非球形表面。在此场合,透镜将被称为非球面双合透镜或三合透镜。

在图 4 示出的示例中,透镜 18 是一个非球面单透镜,球面 26 直径 25.4 mm,曲率半径 373.94 mm,非球面表面 28 的曲率半径 75 mm,锥形常数 ~ 0.875 。在 1520-1580 nm 波长区平均焦距为 125.01mm。这样,从球形表面的中心到输入和输出光纤 14, 16 的发射端的距离 A 约为 125 mm。非球面表面 28 和光栅 20 的表面中心的平均距离约为 43.2 mm。

在图 1 的引出线束 12 中,输入和输出光纤中止于同一平面。图 4 的示例也一样。然而,在某些配置中,引入和引出光纤 16 是处于略微不同的轴线上而不在一个平面上终止。引出线束的光纤 14, 16 精确定位于图 5 示意示出的模板 34 之内。模板 34 具有多个平行 V 形凹槽 36。此模板和 V 形凹槽 36 是通过将凹槽 36 刻蚀到硅基底而精确形成的。在图 4 中模板凹槽之间的间隔为 80 μ 。

在图 6 中示出的是图 4 的配置示例的透视图。为便于对准定位,引出线束 12、透镜 18 和光栅 20 在多方向上具有有限的移动自由度。它们一旦移动就位,就由夹具或适当的胶合物在原位固定。透镜 18 是固定不动的。引出线束 12 可沿 x, y 和 z 轴移动。输入和输出光纤独立地沿 x 轴移动。除了沿 z 轴之外,中阶梯光栅 20 固定不能平移。它可绕 x, y 和 z 轴各轴转动。元件移动的其他的可能组合也可以产生合适的定位。

图 4 的 DWDN 器件 10 的尺寸和性能标准总结如下:

光纤: SM-1250(Fibercore)

- 外径 80 μ

- 纤芯直径 $8.3\ \mu$

- f 数 4-8

透镜: 非球面单透镜

- 平均焦距(fl)=125

光信号: $\lambda = 1528-1565\ \text{nm}$

信道间隔=0.4 nm

光栅:

- $d = 5.83\ \mu$
- $\theta_b = 52.6^\circ$
- 级=6

系统性能:

- D(直线间距)=80 μ
- 分辨率(R)=20000
- 效率=75%

图 16 为平均介入损耗为 7.5 db 在 1528-1565 nm 带宽上 100GHz(0.8 nm)信道间隔的上述光栅的系统响应(y 轴)与波长(x 轴)的关系图。此图显示出在整个带宽中介入损耗是平坦的。

作为使用利特罗配置以及使用准直透镜的一种替代方案, 可以使用凹面镜来准直和聚焦入射光。图 7 示出采用凹面镜的密集波分复用器/分用器 40 的第一种可能实施方式。单模输入光纤 42 发射出由复用信道组成的发散入射光束 44 入射到准直/聚焦凹面镜 46 的表面。之后准直光束 48 以离轴方式指向中阶梯光栅 50 的表面。中阶梯光栅以图 1 及图 4 讨论的方式根据波长对各信道实施色散, 并且色散信道 52 由准直/聚焦凹面镜 54 的前表面离轴反射。之后准直/聚焦凹面镜 54 将各信道聚焦并反射到输出光纤阵列 56 的相应的光纤中。正如上面在讨论图 1 和图 4 的实施方式时提及的, 使用像准直凹面镜 46 和聚焦凹面镜 54 这样的表面反射光学部件要求光束以离轴几何形状通过系统, 这将造成明显的像差(球面像差和彗差), 显著限制系统的性能。然而, 使用前表面反射光学部件具有提供较之使用单光学透镜的利特罗配置更为紧凑的波形因数的潜力。显

而易见，在必须平衡波形因数最小化要求和光学像差的场合在非利特罗配置中可以使用前表面反射光学部件和透镜的组合。

图 8 中示出第二种可能实施方式 60，图中概略地示出采用棱镜与前表面光学反射镜的组合的中阶梯光栅复用器/分用器。在此实施方式中，发自单模输入光纤 62 的光指向准直/聚集镜 64 并且准直光束 66 通过棱镜 68。棱镜 68 提供在水平平面上的波长色散，如光束 70 所示。这些水平色散光束 70 被导向中阶梯光栅 72，而中阶梯光栅 72 使得光束 70 以正交维数衍射并使这些衍射光束指向准直/聚集凹面镜 74 的前表面。一个二维输出光纤阵列 76 接受发自准直/聚集凹面镜 74 的聚焦光束。采用棱镜 68 和中阶梯光栅 72 的组合可提供波长色散的二维阵列并由此可以易于获得长度更短的检测器阵列，这在某些应用中可能需要。

图 9 为采用单凹面镜作为沿光轴的准直/聚焦光学部件的第三种可能实施方式 80 的示意图。在此实施方式中，输入光纤 82 将复用信道组成的光束指向凹面镜 84 的表面。准直光束 86 由中阶梯光栅 88 反射，中阶梯光栅 88 使复用信号以上面讨论过的方式衍射。之后分用信道由凹面镜 84 的表面反射并指向进入输出光纤 92 的阵列。实施方式 80 认为凹面镜 84 为球面并因而具有固定的直径，比如 25 cm，如需要，也可以使用近似抛物面或非球面的反射镜以改进成像的质量。

图 10 为采用离轴抛物面反射镜作为准直/聚焦光学部件的第四种可能实施方式 100 的示意图。在此实施方式中，发自输入光纤 102 的复用光线指向离轴抛物面镜 104 的前表面，而离轴抛物面镜 104 又将准直光束 106 指向中阶梯光栅 108 的表面。复用光由中阶梯光栅 108 的表面反射回到离轴抛物面镜 104 的表面并色散到相应的各个输出光纤 106 中。在此实施方式中，中阶梯光栅是近利特罗配置，从而可将光线反射回到输出光纤 106。

图 11 示出的第五种可能实施方式采用配置成为一种可以对进入光束准直和聚焦的光学部件的凹面中阶梯光栅 107。此实施方式不需要可能的实施方式一至四的准直/聚焦透镜或凹面镜。

对图 1-11 中示意地示出的基本中阶梯光栅分用器结构可提供多种变

形以进一步增加单模光纤的信道承载容量。如上所述,可以预期将来光学放大器技术的进展将可使带宽超过现在在光通信中使用的 60-80 nm 带宽。此种宽带宽将要求中阶梯光栅 DWDM 的性能可以对整个带宽进行高效率的复用/分用,特别是对此宽频带的边缘处的频率。因此,使用每一个器件被优化以在宽频带区的一部分对光进行复用/分用的中阶梯光栅 DWDM 器件网络将很有用和理想的。比如,假设将来的放大器技术可应用 120-180 nm 的带宽,各中阶梯光栅 DWDM 将可以优化为可利用带宽的一部分,比如 1/2, 60-90 nm, 工作。

图 12 示出将宽带宽进行分割用于复用/分用的设备 110 的示意图。设备 110 的组成包括输入光纤 112, 高通薄膜滤波器 114, 第一聚焦透镜 116, 第二聚焦透镜 118, 第一中阶梯光栅 DWDM 器件 120 和第二中阶梯光栅 DWDM 器件 122。

下面通过示例就分用器对分割宽带宽信号的设备 110 的操作予以说明。与本发明的其他实施方式一样,此设备也可以简单地通过反转光的传播方向而同样作为复用器工作。由输入光纤 112 发出的复用光束 124 指向高通薄膜滤波器 114。此高通薄膜滤波器具有一设计截止波长,可将波长区中的下半段反射到第一中阶梯光栅 DWDM 器件 120。波长区中的上半段通过滤波器 114 进入第二中阶梯光栅 DWDM 器件 122。在此示例中,输入波长是在 1460-1580 nm 区中。此高通薄膜滤波器设计成为在频带 1520 nm 截止。于是,波长区 1460-1520 nm 指向第一中阶梯光栅 DWDM,而波长区 1520-1580 nm 指向第二中阶梯光栅 DWDM 器件。指向第一中阶梯光栅 DWDM 的信号光学耦合到第一聚焦透镜 116,第一聚焦透镜 116 又将较低波长的光束输入到第一中阶梯光栅 DWDM。与此类似,较高波长的光束 128 光学耦合到第二聚焦透镜 118,第二聚焦透镜 118 又将较高波长的光束 128 输入到第二中阶梯光栅 DWDM 器件 122。

本示例考虑使用高通薄膜滤波器 114。然而,可以代之以其他的波带分割元件,包括使用光纤布喇格光栅。

本发明的第一和第二中阶梯光栅 DWDM 器件 120, 122 可具有利用图 1-11 说明的任何一种配置。使用中阶梯光栅 DWDM 器件来分用分割

的波长带可提供前面结合图 1-11 中示出的实施方式的很多优点。然而，本发明也可以使用其他的 DWDM 器件，如光纤布喇格光栅器件，集成波导阵列等等。采用允许波长间隔达 0.4 nm 的中阶梯光栅摄谱仪，一种可以提供总波长区为 120 nm 的器件将容许由单根光纤分用达到 300 信道。另外，此系统使是可扩缩的。图 13 示意地示出一个 1460-1700 nm 的输入带宽如何利用三波带分割元件将其分割为四个 60 nm 的带宽光束，每一个都可输入到一个优化中阶梯光栅 DWDM 器件中。此种器件能够适应 240 nm 的总波带，并假设波长间隔为 0.4 nm，总信道数为 600。

本发明的体光学中阶梯光栅 DWDM 能够同时分用来自多根光纤的信号。在图 1-7 和 9-11 中示出的每一个中阶梯光栅 DWDM 中，光只在一维(垂直于横过色散方向的方向)中进行空间分解。结果，输入光纤可在垂直方向上叠排形成线性阵列并可提供相应的输出光纤二维阵列用来接受来自不同的输入光纤的分用信号。这一概念示意地示于图 14 中。图 14 为从准直/聚焦光学部件的方向上观察到的引出线束 140 的示意剖视图。垂直阵列中的第一、第二和第三输入光纤 142、144、146 分别光学耦合到第一、第二和第三水平输出行 148、150、152。于是，一个一维输入阵列生成一个二维输出阵列。本示例局限于 3 根输入光纤 142、144、146 和在输出的第一、第二和第三输出行 148、150、152 中只有 9 根输出光纤，但实际的输出光纤数目将对应于输入光纤数并且是信道间隔和输入带宽的函数，可以很容易地超过每一个输出光纤行 90 根输出光纤。每一根输出光纤有一个纤芯中心，而输出光纤的纤芯中心之间的间隔等于在器件焦距处的光栅的直线间距。另外，相应的输入和输出阵列的数目可大于 3，而且在很大程度上是外部因素，如可应用于引出线束 140 的空间的函数。显然，此配置容许单个分用器分用多个输出光纤的信道，从而可将多输入光纤光学系统所要求的中阶梯光栅 DWDM 器件的数目最小化。这进一步示出根据本发明的中阶梯光栅 DWDM 器件的灵活性并可扩缩性。

图 15 为具有多层输入体光学中阶梯光栅 DWDM 器件 160 的优选实施方式的示意图。发自输入光纤 142 的输入光束 λ_{1-10}^1 指向准直/聚焦光学

部件 162, 并且之后准直光束指向反射中阶梯光栅 164 的反射面。之后衍射信道 λ^1_1, λ^1_2 通过准直/聚焦光学部件 162 返回并色散到包含第一输出行 148 的光纤中, 如 λ^1_1 所示。准直/聚焦光学部件具有光轴 166, 并且输入光纤 142 和输出光纤 148 在垂直方向上与准直/聚焦光学部件的光轴 166 的距离相等。与此类似, 复用输入光束 λ^2_{1-n} 由输入光纤 144 发出, 并且其不同信道 λ^2_1, λ^2_2 衍射到第二水平输出行 150。对输出行 148 和 150 中的每一个, 行中光纤的中心与行中邻接光纤中心的距离都等于在准直/聚焦光学部件 162 的焦距处的中阶梯光栅 164 的信道间隔。输出光纤的传播终端以及输入光纤的传播终端都位于距准直/聚焦光学部件的距离为准直/聚焦光学部件的焦距的一个平面上。

根据本发明的中阶梯光栅 DWDM 器件可在给定带宽上提供密集信道间隔(0.4 nm), 从而可以对给定带宽使单根光纤所能够承载的信道数最大化。通过仔细选择中阶梯光栅炫耀角和阶梯间隔, 信道可以以高分辨率和高效率进行复用/分用。另外, 使用中阶梯光栅可以使波形因数更小, 因为角衍射容许在聚焦透镜和输入/输出光纤之间焦距更短。使用体光学元件可提供一种易于制造、高度可靠、可扩缩的系统。本发明的另外的实施方式包含使用波带分割元件, 如薄膜高通滤波器, 这容许将极宽的信号带宽进行分割并同时平行地复用或分用。因为此器件可使单个线性维数中的光发生色散, 多个输入光纤可叠排而使每个体光学中阶梯光栅 DWDM 器件可适应多个输入光纤。

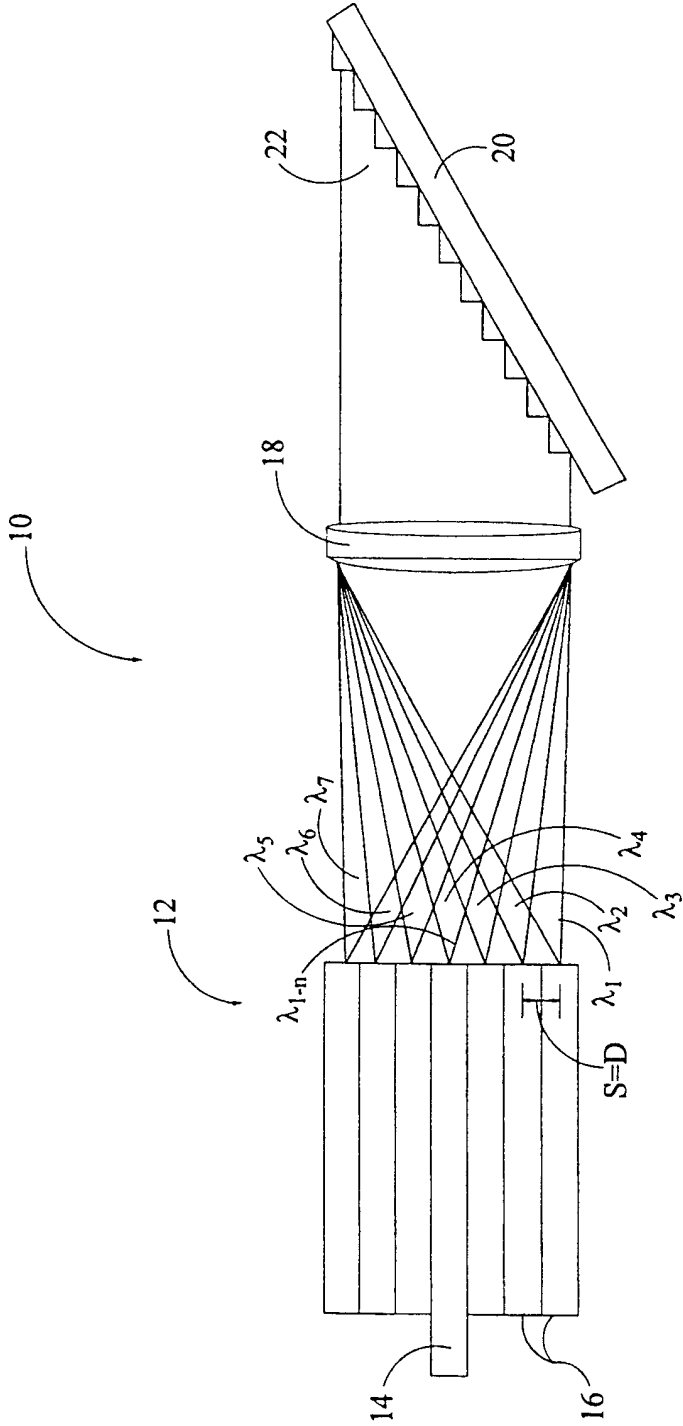


图1

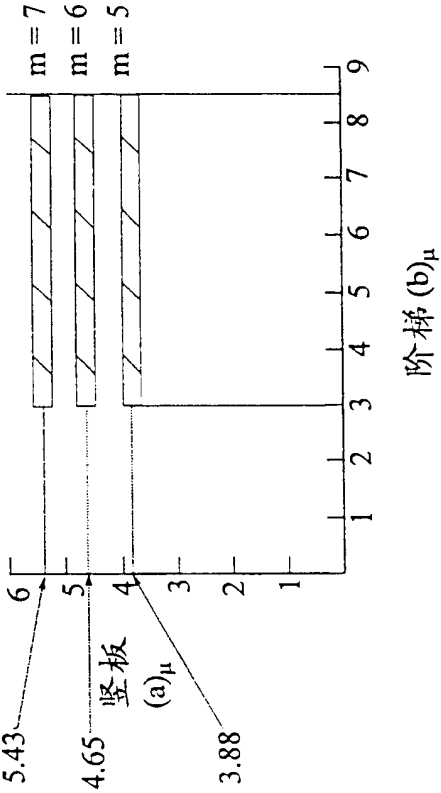


图3

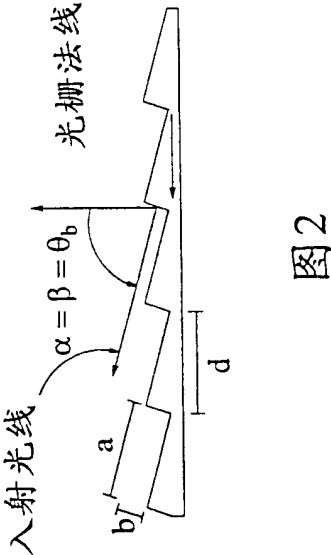


图2

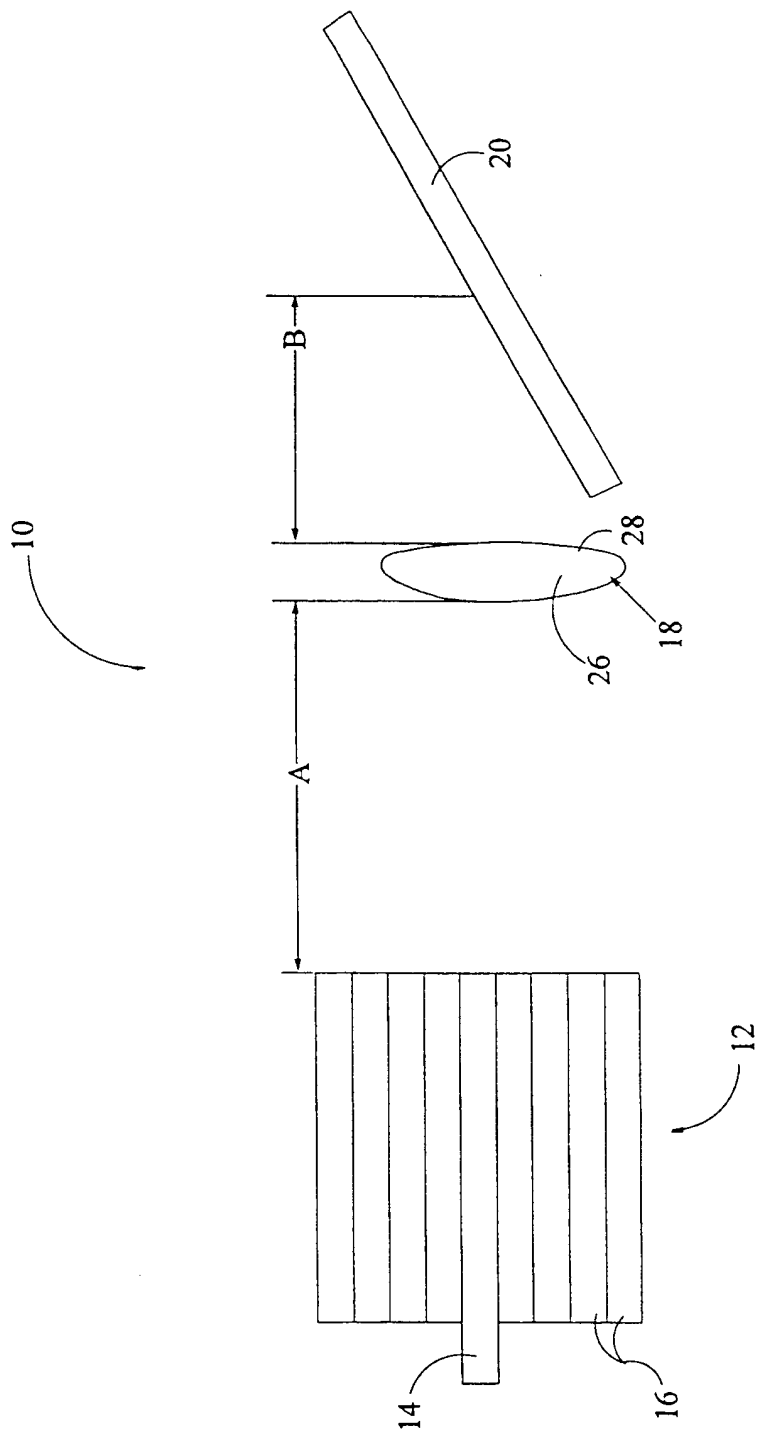


图 4

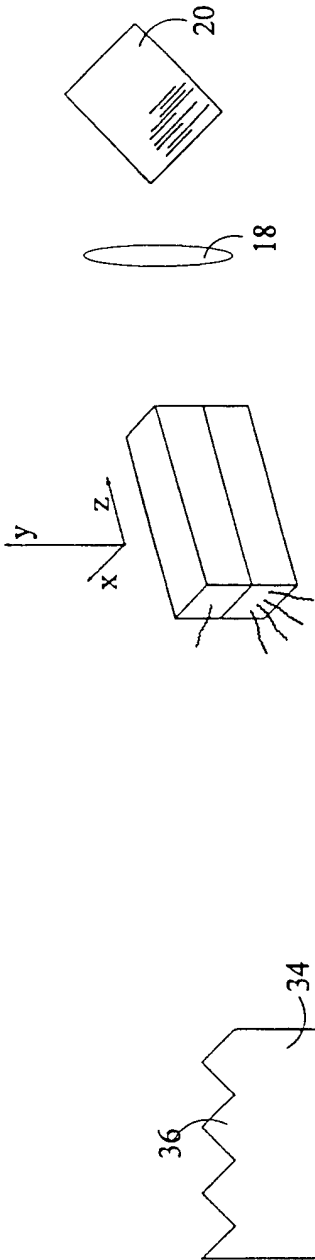


图 5

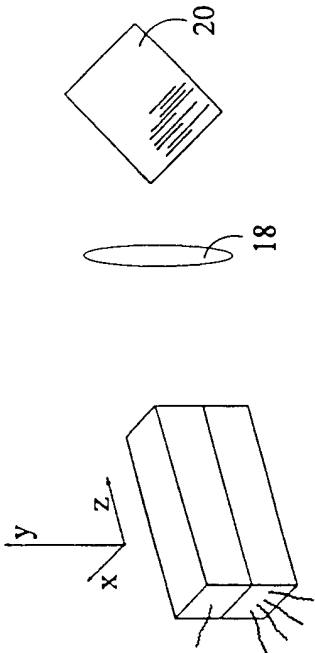


图 6

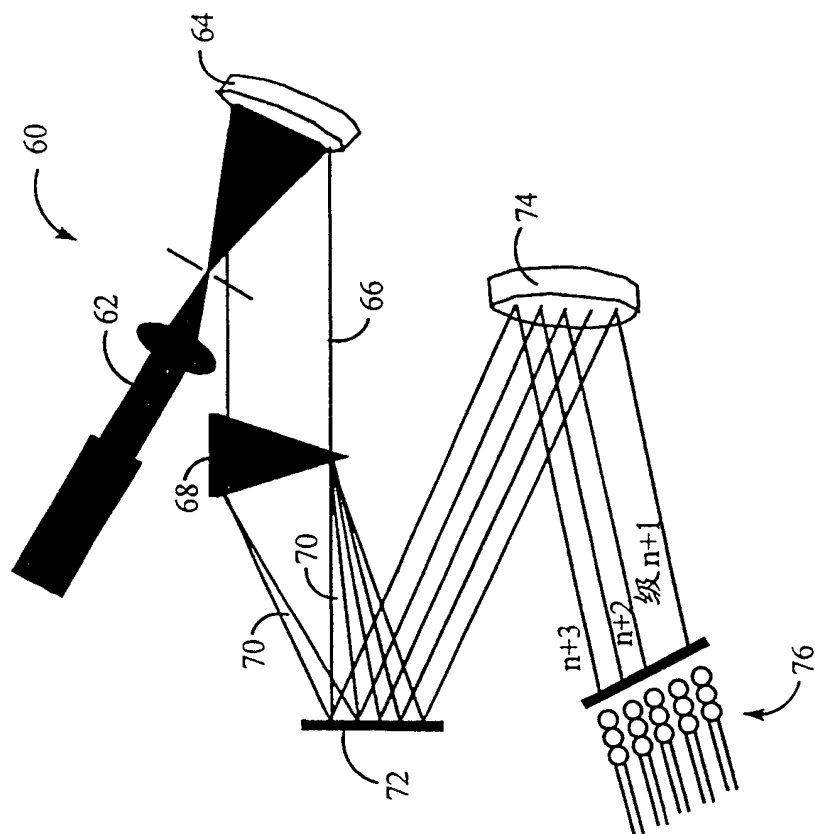


图 8

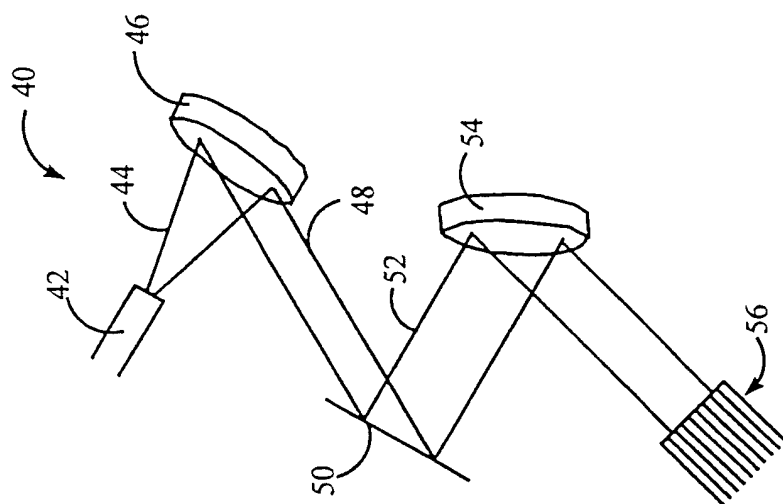


图 7

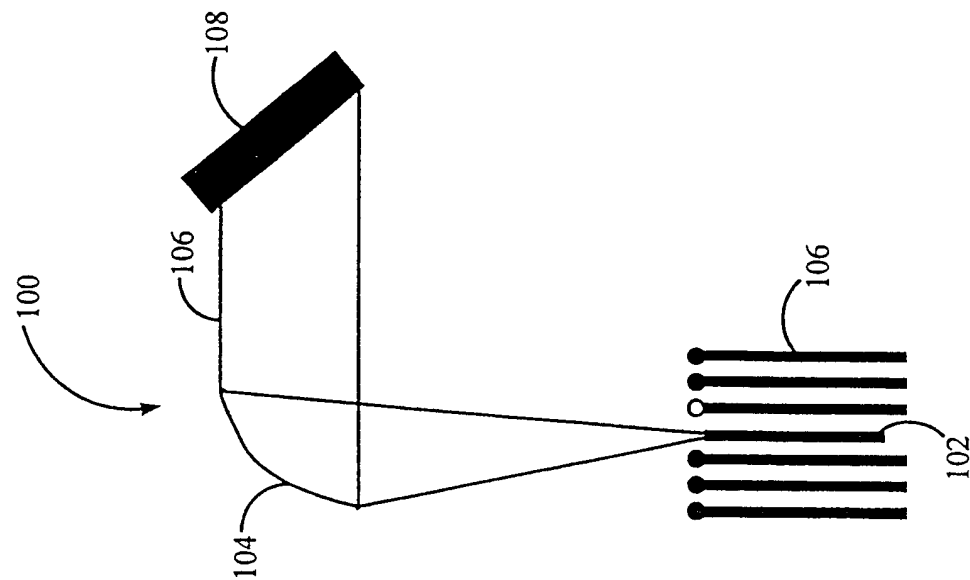


图10

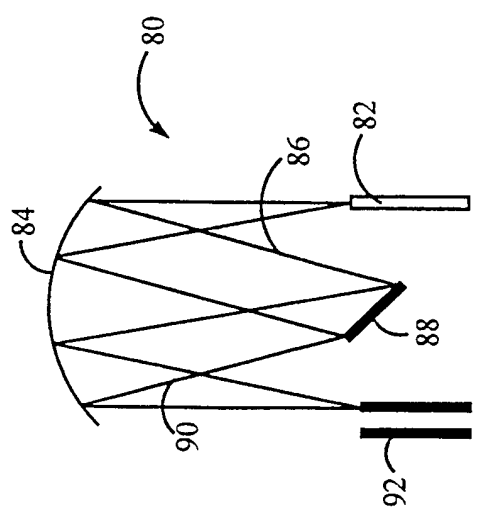


图9

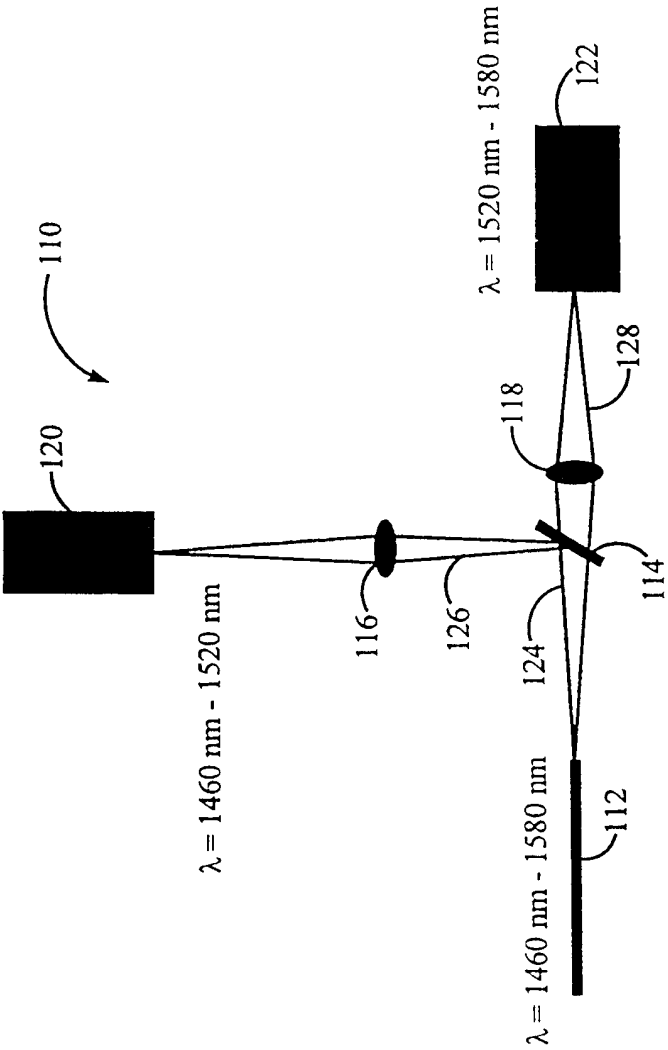


图12

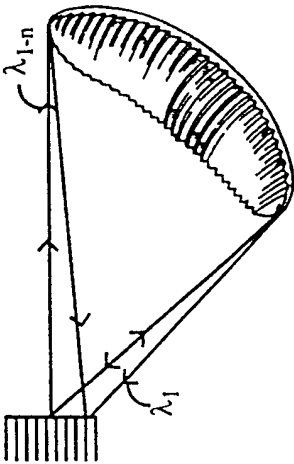


图11

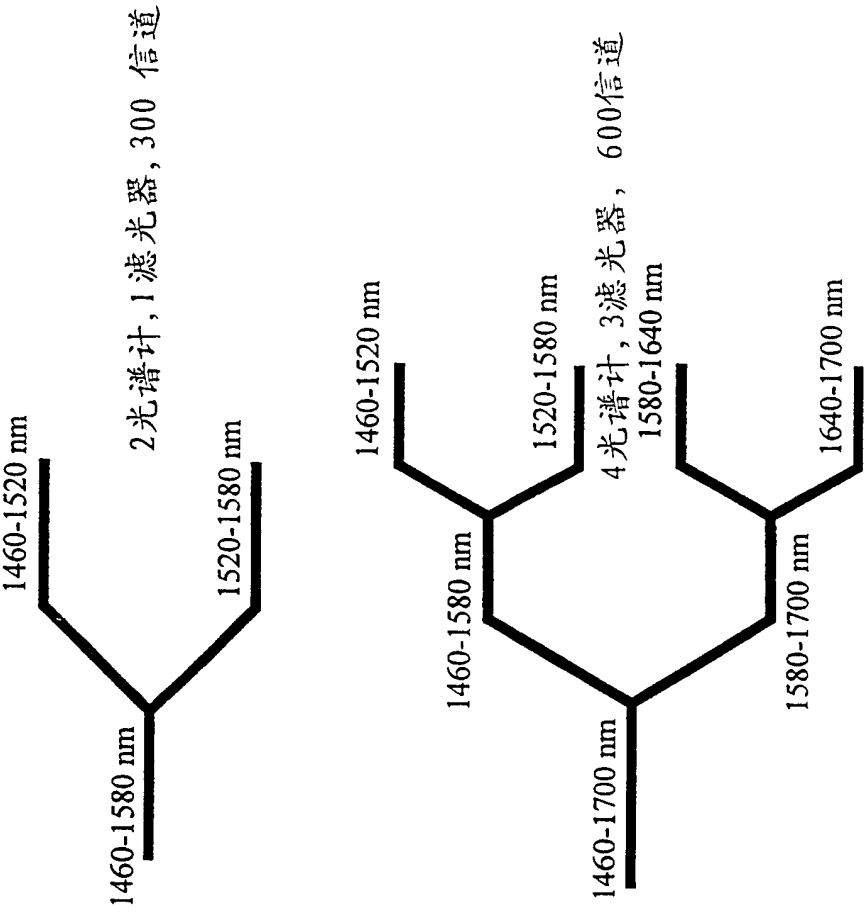


图 13

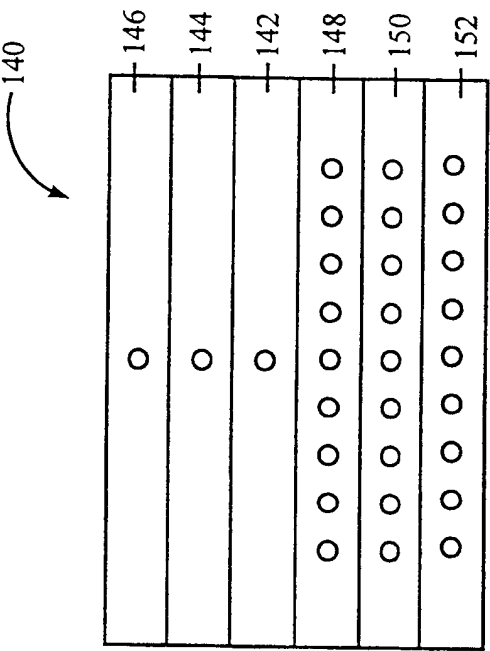


图 14

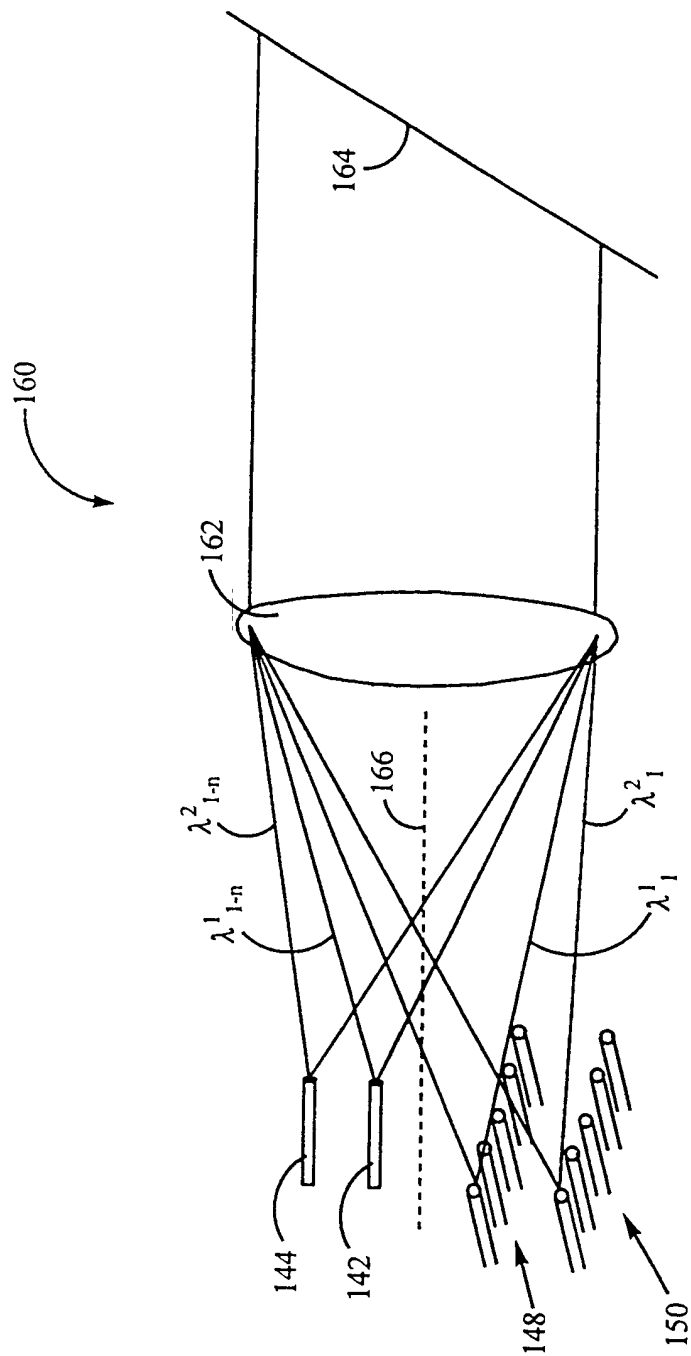
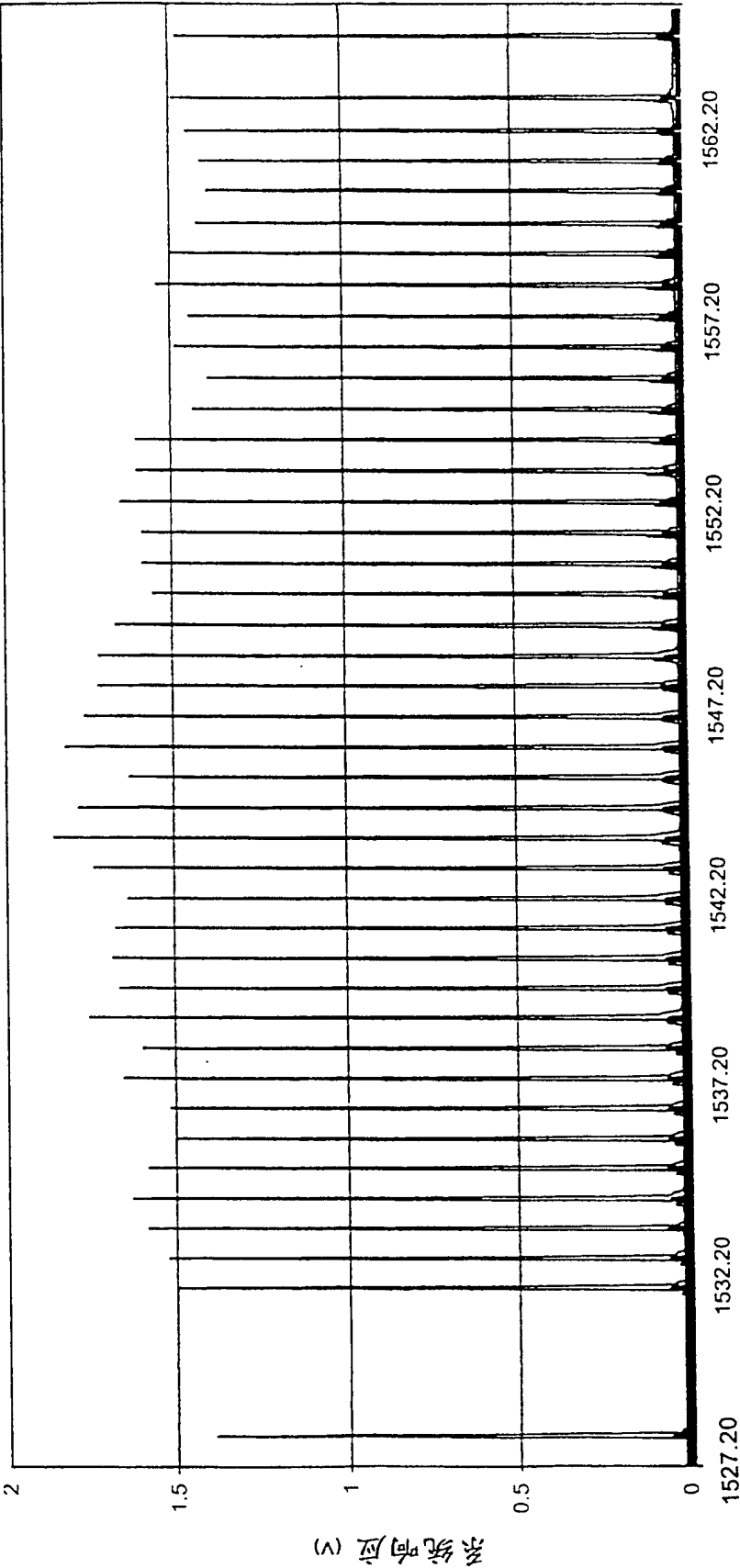


图15



波长 (NM)
图16