

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl<sup>7</sup>

G02F 1/39

H01S 3/06



# [12] 发明专利说明书

专利号 ZL 02104782.0

[45] 授权公告日 2005 年 7 月 20 日

[11] 授权公告号 CN 1211700C

[22] 申请日 2002.2.21 [21] 申请号 02104782.0

[30] 优先权

[32] 2001. 2. 21 [33] JP [31] 2001 - 44477

[32] 2001. 3. 19 [33] JP [31] 2001 - 79017

[71] 专利权人 日本电信电话株式会社

地址 日本东京都

[72] 发明人 青笹真一 增田浩次 阪本匡

清水诚 西田好毅

审查员 张惠军

[74] 专利代理机构 北京银龙知识产权代理有限公司

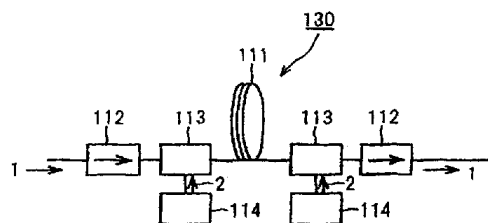
代理人 皋吉甫

权利要求书 2 页 说明书 18 页 附图 27 页

[54] 发明名称 光纤放大器

[57] 摘要

具有高转换率的光纤放大器，可利用由激光二极管所发射的波长带宽上的泵浦光，该光纤放大器是由至少在其芯体内包含有铈的供光信号进入的放大光纤和泵浦光输入单元构成，该泵浦光输入单元用于将至少一个波长在 1320—1520nm 范围内，最好在 1320—1480nm 范围内的泵浦光输入到放大光纤放大器内。



I S S N 1 0 0 8 - 4 2 7 4

1. 一种光纤放大器，包括：

一放大光纤，在其芯体内至少包含有浓度不小于 3000ppmwt 的铥并利用交叉弛豫，其光信号进入到放大光纤内；以及

一泵浦光输入单元，其中，将至少一个波长在 1320—1520nm 范围内的泵浦光输入到放大光纤放大器内。

2. 如权利要求 1 的光纤放大器，其中泵浦光输入单元输入至少一个波长在 1320—1480nm 范围内的泵浦光。

3. 如权利要求 1 的光纤放大器，其中泵浦光输入单元输入至少一个波长在 1370—1460nm 范围内的泵浦光。

4. 如权利要求 1 的光纤放大器，进一步包括：

一辅助泵浦光输入单元，用于将波长至少在 630-720nm，740-830nm，1100-1300nm 以及 1500-2000nm 范围内的辅助泵浦光输入到放大光纤内。

5. 如权利要求 1 的光纤放大器，进一步包括：

一光信号转向传播单元，用于使光信号通过放大光纤正向和反向传播。

6. 如权利要求 5 的光纤放大器，其中光信号转向传播单元只用于使光信号通过放大光纤正向和反向传播，在放大光纤的一端具有一个反射镜。

7. 如权利要求 1 的光纤放大器，其中光信号转向传播单元只用于使光信号或者只用于使光信号和至少一个泵浦光通过放大光纤正向和反向传播。

8. 如权利要求 7 的光纤放大器，其中放大的自发发射光通过光信号转向传播单元传送。

9. 如权利要求 1 的光纤放大器，进一步包括：

一光隔离器或者光环形器，与放大光纤相连，用于通过放大光纤使光信号仅仅在一个方向上传播。

10. 一个光纤放大器，包括：

多个放大光纤，每一个放大光纤至少在其芯体内包含有浓度不小于 3000ppmwt 的铥并利用交叉弛豫，其光信号输入到放大光纤，多个放大光纤串行或者并行连接；以及

多个泵浦光输入单元，每一个用于将至少一个波长在 1320-1520nm 范围内的泵浦光输入到放大光纤放大器中一个相应的放大光纤内。

11. 如权利要求 10 的光纤放大器，进一步包括：  
至少一个与放大光纤相连的增益均衡器。

## 光纤放大器

### 技术领域

本发明涉及一种具有放大带宽在 1489—1520nm 之间的宽带光纤放大器，1489—1520nm 的带宽是光纤的低损耗区。

### 背景技术

随同互联网等的传播，传输能力在迅速的增加，以致在WDM（波分多路复用）系统中通过利用通信系统作为大容量的光通信系统变得很流行。在WDM系统中，必须使用EDFA（掺杂铒的光纤放大器）作为转发器，并且存在放大带宽在1.53—1.60 $\mu\text{m}$ 的具有EDFA的WDM系统。

然而，为了实现大容量的通信设备，必须扩大光纤放大器的放大带宽，并且很需要开发能够覆盖硅质光纤的低损耗区（1.45—1.65 $\mu\text{m}$ ）的光纤放大器。

为此目的，采用S—带宽（1480—1520nm）的光纤放大器已经开发出来，在该带宽中硅质光纤具有与已可利用的C—带宽（1530—1560nm）相等的低损耗和低波散。目前在S—带宽中有三种类型的这样的光纤放大器。

第一种是利用了感应拉曼散射的拉曼光纤放大器，该感应拉曼散射在硅质光纤处于强烈的泵浦光入射的状态下，光信号进入到硅质光纤时发生（例如，参见 J.Kanl, et al., Electronics Letters, 第 34 卷, 第 18 期, 第 1745—1747 页, 1998 年 9 月）。

第二种是双重激励波长 TDFA（掺杂铥的光纤放大器），在该放大器中布局反转是低的并且通过在放大带宽在 S<sup>+</sup>—带宽（1450—1480nm）的具有 1000nm 频带的未转换激励带宽的 TDFA 内增加高效率波长从基态能级激励到放大的终态能级而使放大带宽被转换到长波长侧（例如，参见 T.Kasamatsu, et al., Optical Amplifiers and their Applications' 99, Optical Society of America Trends in Optics and Photonics series, 第 30 卷, 第 46—50 页, 1999 年 6 月）。

图 1A 给出了 Tm 的能级图和双重激励波长 TDFA 的放大状态。作为 S—

带宽的放大, 受激发射从  ${}^3H_4$  到  ${}^3F_4$ 。在双重波长激励的情况下, 光信号通过 1560nm 的泵浦光从基态能级  $3H_6$  激励到放大的终态能级  $3F_4$ , 并且光信号接着通过 1000nm 的泵浦光从放大的终态能级  $3F_4$  激励到放大的起动能级  $3F_2$ 。通过控制两个波长上的泵浦光的能量, 以便控制每一个能级上的  $Tm$  离子的数目, 形成低的布局反转状态, 并且在  $S^+$ -带宽上的 TDFA 的放大带宽被转换到  $S^-$ -带宽。

此外, 如图 1B 所示, 当从放大的终态能级  $3F_4$  激励到放大的起动能级  $3F_2$  的波长从 1000nm 变为 1400nm 时, 此处具有较高的激励效率, 可实现高效的  $S^-$  带宽光纤放大器。(例如, 参见 T. KaSAMATSU, et al., Electronics Letters, 第 36 卷, 第 19 期, 第 1607—1609 页, 2000 年 9 月)。

第三个是具有高浓度  $Tm^{3+}$  的 TDFA, 在该 TDFA 中通过在激励状态所产生的  $Tm^{3+}$  中的交叉弛豫而形成低的布局反转, 并且在 1000nm 带宽上未转换激励 TDFA 内, 通过给光纤芯体内加入  $Tm$  而使放大带宽被转换到长波长范围的  $S^-$  带宽, 其中  $Tm$  是掺入的离子, 光纤芯体是高浓度的放大介质(例如, 参见 S. Aozasa, et al. Electronics Letters, 第 36 卷, 第 5 期, 第 418—419 页, 2000 年 3 月)。

图 2 给出了  $Tm$  的能级图和有高浓度  $Tm^{3+}$  的 TDFA 的放大状态。光信号先通过 1000nm 泵浦光从基态能级  $3H_6$  激励到放大的终态能级  $3F_4$ , 并接着进一步通过同样波长的泵浦光从放大的终态能级  $3F_4$  激励到放大的起动能级  $3F_2$ 。

现在, 在低浓度  $Tm^{3+}$  的 TDFA 内, 因为相对于泵浦光在从放大的终态能级  $3F_4$  激励到放大的起动能级  $3F_2$  时的  $Tm^{3+}$  的吸收高于相对于泵浦光在从基态能级  $3H_6$  激励到放大的终态能级  $3F_4$  时  $Tm^{3+}$  的吸收, 所以形成了高布局反转。

这样的低浓度  $Tm^{3+}$  的 TDFA 具有上述  $S^+$ -带宽上的大部分放大带宽, 其结果是具有高布局反转的状态, 并且尽管它偏离了增益光谱的峰值波长, 在  $S^-$  带宽上仍可实现放大操作,。这种低浓度  $Tm^{3+}$  的 TDFA 的  $S^-$  带宽上的放大效率小于或者相等高浓度  $Tm^{3+}$  的 TDFA 的放大效率。

相反，在高浓度  $Tm^{3+}$  的 TDFA 中，发生了  $Tm^{3+}$  中的干涉，如图 2 所示，以致于激励到放大的起始能级 3F<sub>2</sub> 的  $Tm^{3+}$  由于引起能量传送到临近的基态能级 3H<sub>6</sub> 上的  $Tm^{3+}$  中而弛豫到放大的终态能级 3F<sub>4</sub>，同时接收到能量的  $Tm^{3+}$  激励到放大的终态能级 3F<sub>4</sub>。其结果是，激励到放大的终态能级 3F<sub>4</sub> 的  $Tm^{3+}$  的数目增加了，以致形成了低布局反转并且发生了增益转移。

然而，在上述的高浓度  $Tm^{3+}$  TDFA 中，用于发射 1000nm 波长的用作泵浦光的激光二极管 (LD) 还没有开发出来，以致事实上很难实现，因为很难实现低成本和紧凑的尺寸，并且转换效率也不十分的高 (大约为 5%)。

同时，在低 TDFA 的情况下，用于发射 1000nm 波长的用作泵浦光的激光二极管 (LD) 也没有开发出来，以致事实上很难实现，因为很难实现低成本和压缩的尺寸，并且 S-带宽中的转换效率小于或者与高浓度  $Tm^{3+}$  的 TDFA 的转换效率相等。

#### 发明内容

因此本发明的一个目的就是提出了一种具有高转换率的光纤放大器，该光纤放大器可利用在由激光二极管所发射的波长带宽上的泵浦光。

根据本发明的一个方面提出了一个光纤放大器，包括：至少在芯体内包含有铥的放大光纤，光信号进入到该放大光纤内；以及一个泵浦光输入单元，用于将至少一个波长在 1320—1520nm 范围内的泵浦光输入到放大光纤放大器内。

根据本发明的另一个方面提出了一个光纤放大器，包括：多个放大光纤，每一个放大光纤至少在其芯体内包含有铥，光信号输入到该放大光纤，多个放大光纤串行或者并行连接；以及多个泵浦光输入单元，每一个用于将至少一个波长在 1320—1520nm 范围内的泵浦光输入到放大光纤中一个相应的放大光纤内。

从结合附图的下述描述中可很清楚的看到本发明其他的特征和优点。

#### 附图说明

图 1A 和图 1B 是用于说明传统的双重激励波长 TDFA (掺杂铥的光纤放大器) 的工作原理的能级图；

图 2 是用于说明传统的高浓度  $Tm^{3+}$  的 TDFA 的工作原理的能级图；

图 3A, 3B 以及 3C 分别给出了根据本发明第一实施例的光纤放大器的正向激励型，反向激励型，以及双向激励型的结构示意图；

图 4 给出了利用第一实施例的示例性光纤放大器和传统的光纤放大器所获得的转换效率的数据表；

图 5 给出了泵浦光的波长与第一实施例的光纤放大器的转换效率之间的特性曲线；

图 6A, 6B, 以及 6C 分别给出了根据本发明第二实施例的光纤放大器的正向激励型，反向激励型，以及双向激励型的结构示意图；

图 7 给出了用在第二实施例的光纤放大器中的铥的吸收光谱的曲线图；

图 8 给出了利用第一实施例的示例性光纤放大器和第二实施例的示例性光纤放大器所获得的转换效率的数据表；

图 9A, 9B, 以及 9C 分别给出了根据本发明第三实施例的光纤放大器的正向激励型，反向激励型，以及双向激励型的结构示意图；

图 10 给出了在如图 3 C 和 9C 所示的光纤放大器使用了包含有 2000ppmw 的铥的放大光纤的情况下的增益光谱曲线图；

图 11 给出了在如图 3 C 和 9C 所示的光纤放大器使用了包含有 6000ppmw 的铥的放大光纤的情况下的增益光谱曲线图；

图 12 给出了放大光纤的长度与第三实施例的光纤放大器的转换效率之间的特性曲线；

图 13A, 13B, 13C, 13D, 13E 以及 13F 给出了用在第三实施例的光纤放大器中的反射镜的示例性形式的示意图；

图 14A, 14B 以及 14C 分别给出了根据本发明第四实施例的光纤放大器的正向激励型，反向激励型，以及双向激励型的结构示意图；

图 15 给出了第四实施例的光纤放大器和第三实施例的光纤放大器中的光信号光谱；

图 16A, 16B 以及 16C 分别给出了根据本发明第五实施例的光纤放大器的正向激励型，反向激励型，以及双向激励型的结构示意图；

图 17 给出了根据本发明第六实施例的光纤放大器的示例性结构的示意图；

图 18 给出了根据本发明第七实施例的光纤放大器的示例性结构的示意图；

图 19 给出了根据本发明第八实施例的光纤放大器的示例性结构的示意图；

图 20 给出了根据本发明第九实施例的光纤放大器的一个示例性结构的示意图；

图 21 给出了根据本发明第九实施例的光纤放大器的另一个示例性结构的示意图；

图 22 给出了根据本发明第九实施例的光纤放大器的又一个示例性结构的示意图；

图 23 给出了根据本发明第九实施例的光纤放大器的再一个示例性结构的示意图；

图 24 给出了根据本发明第九实施例的光纤放大器的再一个示例性结构的示意图；

图 25 给出了根据本发明第九实施例的光纤放大器的再一个示例性结构的示意图；

图 26 给出了根据本发明第九实施例的光纤放大器的再一个示例性结构的示意图；

图 27 给出了根据本发明第九实施例的光纤放大器的再一个示例性结构的示意图。

## 具体实施方式

### 第一实施例

现在参考图 3A 至图 5，详细说明根据本发明的第一实施例的光纤放大器。

图 3A 至 3C 给出了第一实施例的光纤放大器的结构示意图；

图 3A 给出了正向激励型光纤放大器 110，在该放大器中泵浦光 2 沿着与光信号 1 传播方向相同的方向进入。如图 3A 所示，这种光纤放大器

110 具有这样的结构,在该结构中光隔离器 112 与放大光纤 111 的两端相连,放大光纤 111 在其芯体内包含有铥 ( $Tm$ ) (最好不小于 2000ppmw, 更好的是不小于 3000ppmw), 波分多路复用型耦合器 113 用于分离光信号 1 并且泵浦光 2 连接在光信号 1 (1480—1520nm) 输入侧的光隔离器 112 与放大光纤 111 之间,用于产生泵浦光 (1320—1480nm) 的泵浦光源 114 与耦合器 113 相连。

图 3B 给出了反向激励型光纤放大器 120, 在该放大器中泵浦光 2 沿着与光信号 1 传播方向相反的方向进入。如图 3B 所示, 这种光纤放大器 120 具有这样的结构, 在该结构中耦合器 113 和泵浦光源 114 连接在光信号 1 输出侧的光隔离器 112 与放大光纤 111 之间, 而不是连接在光信号 1 输入侧的光隔离器 112 与放大光纤 111 之间。

图 3C 给出了双向激励型光纤放大器 130, 在该放大器中泵浦光 2 沿着与光信号 1 传播方向相同和相反的方向进入。如图 3C 所示, 这种光纤放大器 130 具有这样的结构, 在该结构中两个耦合器 113 分别连接在光信号 1 输入侧的光隔离器 112 与放大光纤 111 之间以及光信号 1 输出侧的光隔离器 112 与放大光纤 111 之间, 并且两个泵浦光源 114 分别与这两个耦合器相连。

在放大光纤 111 中, 给  $Tm$  中加入的基质玻璃是氟化物型玻璃 (例如, 具有  $ZrF_4$ ,  $BaF_2$ ,  $LaF_3$  或者类似化合物作为主要成分的 ZBLAN 玻璃, 或者是具有  $InF_3$ ,  $BaF_2$ ,  $PbF_2$  或类似化合物作为主要成分的 In-Pb 玻璃) 或者是具有  $TeO_2$  或类似化合物作为主要成分的亚碲酸盐玻璃, 在氟化物型玻璃中很难发生非辐射跃迁。

在这种放大光纤 111 中, 至少在其芯体内包含有  $Tm$  以致可能由于  $Tm$  离子的受激发射而引起跃迁, 并且因此可以在 S-带宽实现放大。

这里, 放大光纤最好是至少在其芯体内包含有浓度不小于 2000ppmw 的  $Tm$ , 因为通过压缩放大光纤 111 的长度而使它可实现紧凑的尺寸。特别是, 放大光纤至少在其芯体内包含有浓度不小于 3000ppmw 的  $Tm$  则更佳, 因为当明显出现交叉弛豫的影响时, 它可使放大起始能级的荧光寿命减小到不大于 90%。值的注意的是, 从现行的玻璃和光纤生产技术的

术的观点来看,上述所描述的浓度最好不大于 10wt% (或者更好是不大于 6 wt%)。

耦合器 113 是熔焊锥式耦合器,多层电介质薄膜型耦合器,与光纤光栅相结合的循环器,等等。

泵浦光源 114 是光纤拉曼激光器、激光二极管等等。

在这个实施例中,耦合器 113 和泵浦光源 114 组成了泵浦光输入单元。

在通过泵浦光 2 (1320—1480nm) 利用任一种作为基质玻璃的 ZBLAN 玻璃 (Zr 型), In—Pb 玻璃以及亚硝酸盐玻璃,并利用给上述光纤放大器 110, 120 或 130 中的放大光纤 111 加入浓度为 2000ppmwt 和 3000ppmwt 的  $Tm$  (共 6 种情况) 而激励光信号 1 (1320—1480nm) 所获得的转换效率如图 4 所示。这里,为了比较,给出了利用传统泵浦光 (1047nm) 的情况下的转换效率。

从图 4 可以看出,对于放大光纤 111 所有类型的基质玻璃而言可以提高转换效率。特别是,与  $Tm$  的浓度为 2000ppmwt 的情况相比,可进一步提高浓度为 3000ppmwt 的转换效率。

现在,图 5 给出了泵浦光 2 的波长与转换效率之间的特性曲线。当泵浦光 2 的波长变为大于 1320nm 时,至少在其芯体内包含有  $Tm$  的放大光纤 111 的转换效率在 1400nm 附近变为最大值,并且当泵浦光 2 超过 1520nm 时几乎不存在转换效率的问题。由于这个原因,泵浦光 2 的波长最好在 1320—1520nm 之间,但是为了将放大带宽设置在 S-带宽 (1480—1520nm),泵浦光 2 的波长最好在 1320—1480nm 之间,或者更好的是在 1370—1460nm 范围之内,因为在这种情况下转换效率十分的高 (相对于 2000ppmwt 超过了 20%, 相对于 3000PPmwt 超过了 25%)

这样,根据第一实施例,使用了其波长在 1400nm 带宽的泵浦光 2 以致可以提高了光信号 1 的转换效率,其中泵浦光 2 的波长与光信号 1 的波长相同。

## 第二实施例

现在参考图 6A 至图 8,对根据本发明第二实施例的光纤放大器进行详细的说明。这里,与上述第一实施例中的单元相对应的大体相同的单

元使用相同的附图标号，并且省略对他们的说明。

图 6A 至 6C 给出了第二实施例的光纤放大器的结构示意图。

图 6A 给出了正向激励型光纤放大器 210，在该放大器中泵浦光 2 和辅助泵浦光沿着与光信号 1 传播方向相同的方向进入。如图 6A 所示，这种光纤放大器 210 具有这样的结构，在该结构中对上述第一实施例的放大光纤 110 做了修改使辅助光耦合器 213 连接在光信号 1 输入侧的光隔离器 112 与耦合器 113 之间并且与辅助泵浦光源 214 相连以向辅助耦合器 213 产生波长至少在 630—720nm，740—830nm，1100—1300nm 以及 1500nm 范围内的泵浦光 3。这里范围 630—720nm，740—830nm，1100—1300nm 以及 1500nm 都是 Tm 的高吸收范围，如图 7 所示。

值的注意的是，在正向激励型光纤放大器 210 中，辅助耦合器 213 和辅助泵浦光源 214 位于光信号 1 输入侧的光隔离器 112 与耦合器 113 之间的位置 A1，以致辅助泵浦光 3 沿着与光信号 1 传播方向相同的方向进入，如图 6A 所示，但是同时辅助耦合器 213 和辅助泵浦光源 214 也位于耦合器 113 与放大光纤 111 之间的位置 A2，以致辅助泵浦光 3 沿着与光信号 1 传播方向相同的方向进入，或者辅助耦合器 213 和辅助泵浦光源 214 位于放大光纤 111 与光信号 1 输出侧的光隔离器 112 之间的位置 B，以致辅助泵浦光 3 沿着与光信号 1 传播方向相反的方向进入，或者通过结合这些结构中任一种而使辅助泵浦光 3 进入。

图 6B 给出了反向激励型光纤放大器 220，在该放大器中泵浦光 2 和辅助泵浦光 3 沿着与光信号 1 传播方向相反的方向进入。如图 6B 所示，这种光纤放大器 220 具有这样的结构，在该结构中对上述第一实施例的放大光纤 120 做了修改使辅助光耦合器 213 连接在光信号 1 输出侧的光隔离器 112 与耦合器 113 之间的位置 B2，并且辅助泵浦光源 214 与辅助耦合器 213 相连。

值的注意的是，在反向激励型光纤放大器 220 中，辅助耦合器 213 和辅助泵浦光源 214 位于光信号 1 输出侧的光隔离器 112 与耦合器 113 之间的位置 B2，以致辅助泵浦光 3 沿着与光信号 1 传播方向相反的方向进入，如图 6B 所示，但是同时辅助耦合器 213 和辅助泵浦光源 214 也位于

放大光纤 111 与耦合器 113 之间的位置 B1，以致辅助泵浦光 3 沿着与光信号 1 传播方向相反的方向进入，或者辅助耦合器 213 和辅助泵浦光源 214 位于光信号 1 输入侧的光隔离器 112 与放大光纤 111 之间的位置 A，以致辅助泵浦光 3 沿着与光信号 1 传播方向相同的方向进入，或者通过结合这些结构中任一种而使辅助泵浦光 3 进入。

图 6C 给出了双向激励型光纤放大器 230，在该放大器中泵浦光 2 和辅助泵浦光 3 沿着与光信号 1 传播方向相同方向和相反方向进入。如图 6C 所示，这种光纤放大器 230 具有这样的结构，在该结构中对上述第一实施例的放大光纤 130 做了修改使辅助光耦合器 213 分别连接在光信号 1 输入侧的光隔离器 112 与放大光纤 111 之间的位置 A2 以及连接在放大光纤 111 与光信号 1 输出侧的光隔离器 112 之间的位置 B1，并且辅助泵浦光源 214 分别与辅助耦合器 213 相连。

值得注意的是，在双向激励型光纤放大器 210 中，辅助耦合器 213 和辅助泵浦光源 214 位于光信号 1 输入侧的光隔离器 112 与放大光纤 111 之间的位置 A2 以及放大光纤 111 与光信号 1 输出侧的光隔离器 112 之间的位置 B1，以致辅助泵浦光 3 沿着与光信号 1 传播方向相同和相反的方向进入，如图 6C 所示，但是通过辅助耦合器 213 和辅助泵浦光源 214 位于上述 A1，A2，B1，B2 至少一个位置上也可使辅助泵浦光 3 进入。

在这个实施例中，耦合器 213 和泵浦光 214 组成了辅助泵浦光输入单元。

在通过两种波长的泵浦光 2 和辅助泵浦光 3 利用任一种作为基质玻璃的 ZBLAN 玻璃 (Zr 型)，In-Pb 玻璃以及亚硝酸盐玻璃，并利用给上述结构的光纤放大器 210，220 或 230 中的放大光纤 111 加入浓度为 2000ppmwt 或 3000ppmwt 的 Tm 而泵浦光信号 1 的情况下所获得的转换效率如图 8 所示。这里，辅助泵浦光的波长被设置为 650nm，800nm，1200nm，1560nm 中的任一种。同时为了比较给出了在上述第一实施例（在只利用泵浦光 2 一种波长的情况下）的情况下的转换效率。

从图 8 可以看出，与只利用一种波长的泵浦光 2 情况相比，对于利用两种波长的泵浦光 2 和辅助泵浦光源 3 情况，对于放大光纤 111 所有类

型的基质玻璃而言都可提高在 S-带宽的转换效率。特别是，与浓度为 2000ppmw 的  $T_m$  相比，可进一步提高浓度为 3000ppmw 的在 S-带宽的转换效率。

这样，根据第二实施例，除了波长在 1400nm 带宽的泵浦光 2 之外，具有基态能级吸收较大的波长的辅助泵浦光 3 也进入，以致光信号 1 的转换效率比上述第一实施例的情况更加提高。

### 第三实施例

现在参考图 9A 至图 13F，对根据本发明第三实施例的光纤放大器进行详细的说明。这里，与上述第一和第二实施例中的单元相对应的大体相同的单元使用相同的附图标号，并且省略对他们的说明。

图 9A 至 9C 给出了第三实施例的光纤放大器的结构示意图。

图 9A 给出了正向激励型光纤放大器 310 的示意性结构，在该放大器中泵浦光 2 沿着与光信号 1 传播方向相同的方向进入。如图 9A 所示，这种光纤放大器 310 具有这样的结构，在该结构中对上述第一实施例的放大光纤 110 做了修改使光信号 1 输出侧的光隔离器 112 由反射镜 315 代替以在光信号 1 和泵浦光 2 中至少反射光信号 1，并且光信号 1 输入侧的光隔离器 112 由光环行器 316 代替以分离输入光信号 1 与输出光信号 1。

图 9B 给出了反向激励型光纤放大器 320 的示意性结构，在该放大器中泵浦光 2 沿着与光信号 1 传播方向相反的方向进入。如图 9B 所示，这种光纤放大器 320 具有这样的结构，在该结构中对上述第一实施例的放大光纤 220 做了修改使光信号 1 输出侧的光隔离器 112 由反射镜 315 代替，并且光信号 1 输入侧的光隔离器 112 由光环行器 316 代替。

图 9C 给出了双向激励型光纤放大器 330 的示意性结构，在该放大器中泵浦光 2 沿着与光信号 1 传播方向相同和相反方向进入。如图 9C 所示，这种光纤放大器 330 具有这样的结构，在该结构中对上述第一实施例的放大光纤 130 做了修改使光信号 1 输出侧的光隔离器 112 由反射镜 315 代替，并且光信号 1 输入侧的光隔离器 112 由光环行器 316 代替。

在这个实施例中，反射镜 315 构成了光信号的换向传播单元。

在通过泵浦光 2 利用上述结构的双向传输型光纤放大器 330 而对光信

号 1 激励的情况下所获得的增益光谱如图 10（在 2000ppmwt 的情况下）和图 11（在 6000ppmwt 的情况下）所示，其中光纤放大器 330 结构中的放大光纤 111 将 ZBLAN 玻璃(Zr 型)作为基质玻璃和 Tm 浓度为 2000ppmwt 和 6000ppmwt 两种情况。这里，光信号 1 的输入能量为 -13db/ch(\*4ch)，来自一泵浦光源 114 的泵浦光 2 的波长为 1400nm，来自另一泵浦光源 114 的泵浦光 2 的波长为 1415nm，泵浦光源总的输出能量为 500mW，并且优化了放大光纤的长度以致可以获得 S-带宽内的高增益。为了比较，同时给出了在上述第一实施例的图 3C 情况（利用放大光纤 111 的长度为 16m 的单一传输型）下的增益光谱。

可以从图 10 和图 11 中看出，与上述第一实施例（单一传输型）相比较，通过第三实施例（双向传输型）提高了 S-带宽的增益。特别是，与 Tm 的浓度为 2000ppmwt 的情况相比较，在 Tm 的浓度超过了 3000ppmwt 的情况下（在这个例子中为 6000ppmwt）可进一步提高了 S-带宽的增益并且可以改善增益的平坦性。

同时，图 12 给出了放大光纤 111（Tm 的浓度：6000ppmwt）的长度和上述第一实施例（单一传输型）和第三实施例（双向传输型）的情况下在 S-带宽的转换效率之间关系的曲线图。值得注意的是，在这两种情况下光信号 1 的条件相同。

如图 12 所示，获得了单一传输型和双向传输型的特性曲线，在单一传输型的特性曲线中，当光纤长度为 15.5—17m 时与在 1480nm 和 1510nm 的增益大约相等，而在双向传输型的特性曲线中，当光纤长度为 6—8m 时与在 1480nm 和 1510nm 的增益大约相等。增益大约相等的光纤长度转换效率对单一传输型大约为 25%，对双向传输型大约是 35%。

在第三实施例的图 9A 至图 9C 的结构中，反射镜 315 被提供为诸如图 13A 至 13F 所示的各种形式。更具体的说，图 13A 给出了通过给垂直切开的光纤的端面真空镀金膜而形成的反射镜。图 13B 给出了通过在垂直切开的光纤的端面附着多层电介质薄膜而形成的反射镜。图 13C 给出了通过金属反射镜将从光纤端面发出的光反射回光纤而形成的反射镜。图 13D 给出了通过在光纤端面与图 13C 的反射镜中的金属反射镜之间插入一个

法拉弟旋转器而形成的反射镜。图 13E 给出了通过沿着光纤的长度方向折射率周期性的变化以致所进入的光通过布拉格反射而被反射所形成的光纤光栅型反射镜。图 13F 给出了环形反射镜型的反射镜，在该反射镜中光通过环形极化存储的光纤传播并且通过 3db 的耦合器再耦合。

这样，根据第三实施例，光信号 1 的转换效率比上述第一实施例的情况进一步提高。

#### 第四实施例

现在参考图 14A 至图 15，对根据本发明第四实施例的光纤放大器进行详细的说明。这里，与上述第一和第三实施例中的单元相对应的大体相同的单元使用相同的附图标号，并且省略对他们的说明。

图 14A 至 14C 给出了第四实施例的光纤放大器的结构示意图。

图 14A 给出了正向激励型光纤放大器 410，在该放大器中泵浦光 2 沿着与光信号 1 传播方向相同的方向进入。如图 14A 所示，这种光纤放大器 410 具有这样的结构，在该结构中对上述第三实施例的放大光纤 310 做了修改使反射镜 315 由可以传送 ASE 光（放大的自发发射）的反射镜 415 代替。

图 14B 给出了反向激励型光纤放大器 420，在该放大器中泵浦光 2 沿着与光信号 1 传播方向相反的方向进入。如图 14B 所示，这种光纤放大器 420 具有这样的结构，在该结构中对上述第三实施例的放大光纤 320 做了修改使反射镜 315 由反射镜 415 代替，通过反射镜 415 可以传送 ASE 光（放大的自发发射）。

图 14C 给出了双向激励型光纤放大器 430，在该放大器中泵浦光 2 沿着与光信号 1 传播方向相同和相反方向进入。如图 14C 所示，这种光纤放大器 430 具有这样的结构，在该结构中对上述第三实施例的放大光纤 330 做了修改使反射镜 315 由反射镜 415 代替，通过反射镜 415 可以传送 ASE 光（放大的自发发射）。

反射镜 415 以各种形式提供，包括硅质玻璃金属真空镀膜的反射镜，多层电介质薄膜型反射镜，光纤光栅型反射镜等等。

在这个实施例中，反射镜 415 构成了光信号的换向传播单元。

在通过泵浦光 2 利用上述结构的光纤放大器 410, 420, 430 的情况下所获得的光信号光谱如图 15 的 (a) 部分所示。同时, 给出了在利用上述第一实施例中的光纤放大器 310, 320, 330 的情况下所获得的光信号光谱, 其目的是为了与图 15 中的 (b) 部分比较。

从图 15 中可以看出, 与第三实施例中的光纤放大器 310, 320 或 330 的情况 (图 15 中的 (b) 部分) 相比较, 当利用第四实施例的光纤放大器 410, 420 或 430 时 (图 15 中的 (a) 部分), 信噪比变大了以致改善了噪声特性并因为通过 ASE 而减小了泵浦光 2 的浪费性消耗而增加了光信号的输出强度。

这样, 根据第四实施例, 光信号 1 的转换效率比上述第一实施例的情况进一步提高。

#### 第五实施例

现在参考图 16A 至图 16C, 对根据本发明第五实施例的光纤放大器进行详细的说明。这里, 与上述第一和第四实施例中的单元相对应的大体相同的单元使用相同的附图标号, 并且省略对他们的说明。

图 16A 至 16C 给出了第五实施例的光纤放大器的结构示意图。

图 16A 给出了正向激励型光纤放大器 510, 在该放大器中泵浦光 2 沿着与光信号 1 传播方向相同的方向进入。如图 16A 所示, 这种光纤放大器 510 具有这样的结构, 在该结构中对上述第二实施例的放大光纤 210 做了修改使光信号 1 输出侧的光隔离器 112 由用在上述第三实施例的光纤放大器 310 中的反射镜 315 代替, 并且光信号 1 输入侧的光隔离器 112 由用在上述第三实施例的光纤放大器 310 中的光环行器 316 代替。

图 16B 给出了反向激励型光纤放大器 520, 在该放大器中泵浦光 2 沿着与光信号 1 传播方向相反的方向进入。如图 16B 所示, 这种光纤放大器 520 具有这样的结构, 在该结构中对上述第二实施例的光纤放大器 220 做了修改使光信号 1 输出侧的光隔离器 112 由反射镜 315 代替, 并且光信号 1 输入侧的光隔离器 112 由光环行器 316 代替。

图 16C 给出了双向激励型光纤放大器 530, 在该放大器中泵浦光 2 沿着与光信号 1 传播方向相同和相反方向进入。如图 16C 所示, 这种光纤

放大器 530 具有这样的结构, 在该结构中对上述第二实施例的放大光纤 230 做了修改使光信号 1 输出侧的光隔离器 112 由反射镜 315 代替, 并且光信号 1 输入侧的光隔离器 112 由光环行器 316 代替。

换句话说, 第五实施例的光纤放大器 510, 520, 或者 530 具有将上述第二实施例中的光纤放大器 210, 220, 或者 230 的构造与上述第三实施例中的光纤放大器 310, 320, 或者 330 的构造相结合的结构。

这样, 根据第五实施例, 同时可以获得上述第二实施例的效果与上述第三实施例的效果, 以致进一步提高了光信号 1 的转换效率。

#### 第六实施例

现在参考图 17, 对根据本发明第六实施例的光纤放大器进行详细的说明。这里, 与上述第一和第五实施例中的单元相对应的大体相同的单元使用相同的附图标号, 并且省略对他们的说明。

图 17 给出了第六实施例的光纤放大器的结构示意图。

图 17 给出了双向激励型光纤放大器 630, 在该放大器中泵浦光 2 沿着与光信号 1 传播方向相同和相反方向进入。如图 17 所示, 这种光纤放大器 630 具有两级结构, 在该结构中上述第一实施例的两个光纤放大器 130 串连连接, 也就是说, 多个放大光纤 111 串连连接并且泵浦光源 114 通过耦合器 113 与这些放大光纤 111 相连。注意的是输入光信号的第一级的光纤放大器 130 输出侧的光隔离器 112 以及输出光信号的第二级的光纤放大器 130 输入侧的光隔离器 112 由单一的光隔离器 112 提供。

在上述结构的光纤放大器 630 中, 由第一级光纤放大器 130 放大的光信号 1 进一步被第二级光纤放大器 130 放大并输出。

因此, 根据第六实施例, 可以实现比上述第三实施例更高增益和更高输出能量的光信号放大。

值得注意的是, 上述第六实施例是指利用将两个双向激励型光纤放大器 130 串连连接的结构的情况, 但是也可以用正向激励型光纤放大器 110 或者反向激励型光纤放大器 120 代替第一级和第二级光纤放大器中的至少一个。

#### 第七实施例

现在参考图 18，对根据本发明第七实施例的光纤放大器进行详细的说明。这里，与上述第六实施例中的单元相对应的大体相同的单元使用相同的附图标号，并且省略对他们的说明。

图 18 给出了第七实施例的光纤放大器的结构示意图。

图 18 给出了双向激励型光纤放大器 730，在该放大器中泵浦光 2 沿着与光信号 1 传播方向相同和相反方向进入。如图 18 所示，这种光纤放大器 730 具有两级结构，在该结构中上述第三实施例的两个光纤放大器 330 串连连接，也就是说，多个放大光纤 111 串连连接并且泵浦光源 114 通过耦合器 113 与这些放大光纤 111 相连。

在上述结构的光纤放大器 730 中，由第一级光纤放大器 330 放大的光信号 1 进一步被第二级光纤放大器 330 放大并输出。

因此，根据第七实施例，可以实现比上述第三实施例更高增益和更高输出功率的光信号放大。除此之外，通过对从第一级的光纤放大器输出的光信号压缩几个 dBm，第二级光纤放大器 330 中的放大光纤 111 前端部的布局反转状态变高了，以致抑制了噪声系数的下降。

值得注意的是，上述第七实施例是指利用将两个双向激励型光纤放大器 330 串连连接的结构的情况，但是也可以用正向激励型光纤放大器 310 或者反向激励型光纤放大器 320 代替第一级和第二级光纤放大器中的至少一个。

#### 第八实施例

现在参考图 19，对根据本发明第八实施例的光纤放大器进行详细的说明。这里，与上述第七实施例中的单元相对应的大体相同的单元使用相同的附图标号，并且省略对他们的说明。

图 19 给出了第八实施例的光纤放大器的结构示意图。

图 19 给出了双向激励型光纤放大器 830，在该放大器中泵浦光 2 沿着与光信号 1 传播方向相同和相反方向进入。如图 19 所示，这种光纤放大器 830 具有这样的结构，在该结构中对上述第七实施例的光纤放大器 730 进行修改使增益均衡器 817 连接在第一级光纤放大器 330 与第二级光纤放大器 330 之间。

在上述结构的光纤放大器 830 中,由第一级光纤放大器 330 放大的光信号 1 通过增益均衡器 817 被均衡以具有平坦的增益特性曲线并且由第一级光纤放大器 330 放大的光信号 1 进一步被第二级光纤放大器 330 放大并输出。

因此,根据第八实施例,输出的光信号 1 通过比上述第七实施例的情况在 1480—1520nm 带宽内更均衡的增益特性而放大。

值得注意的是,上述第八实施例是指利用将两个双向激励型光纤放大器 330 串连连接的结构的情况,但是也可以用正向激励型光纤放大器 310 或者反向激励型光纤放大器 320 代替第一级和第二级光纤放大器中的至少一个。

还值得注意的是,上述第八实施例是指利用一个增益均衡器 817 的情况,但是也可使用多个增益均衡器 817。

#### 第九实施例

现在参考图 20 至图 27,对根据本发明第九实施例的光纤放大器进行详细的说明。这里,与上述第八实施例中的单元相对应的大体相同的单元使用相同的附图标号,并且省略对他们的说明。

图 20 至图 27 给出了第九实施例的光纤放大器的结构示意图。

在上述第六至第八实施例中,多个放大光纤 111 串连连接,并且泵浦光源 114 通过耦合器 113 与这些放大光纤 111 相连。相反,在第九实施例中,多个放大光纤 111 通过分光器/光组合器并联连接。按照这种方式,也可以实现光信号的放大和高输出功率。

更具体的说,图 20 给出了双向激励型光纤放大器的结构示意图,在该放大器中泵浦光 2 沿着与光信号 1 传播方向相同和相反的方向进入,并且这种光纤放大器具有这样的结构,在该结构中上述两个第一实施例的光纤放大器 130 并联连接。

类似的,图 21 给出了双向激励型光纤放大器的结构示意图,在该放大器中泵浦光 2 沿着与光信号 1 传播方向相同和相反的方向进入,并且这种光纤放大器具有这样的结构,在该结构中由两个上述第一实施例的光纤放大器 130 串连连接的两组并行连接。

类似的，图 22 给出了双向激励型光纤放大器的结构示意图，在该放大器中泵浦光 2 沿着与光信号 1 传播方向相同和相反的方向进入，并且这种光纤放大器具有这样的结构，在该结构中两个上述第一实施例的光纤放大器 130 并行连接，并且在两个光纤放大器 130 的输出侧分别增加了两个增益均衡器 817。

类似的，图 23 给出了双向激励型光纤放大器的结构示意图，在该放大器中泵浦光 2 沿着与光信号 1 传播方向相同和相反的方向进入，并且这种光纤放大器具有这样的结构，在该结构中由两个上述第一实施例的光纤放大器 130 串连连接的两组并行连接，并且两组光纤放大器 130 的每一组中的第一级光纤放大器与第二级光纤放大器之间分别增加了两个增益均衡器 817。

类似的，图 24 给出了双向激励型光纤放大器的结构示意图，在该放大器中泵浦光 2 沿着与光信号 1 传播方向相同和相反的方向进入，并且这种光纤放大器具有这样的结构，在该结构中两个上述第三实施例的光纤放大器 330 并行连接。

类似的，图 25 给出了双向激励型光纤放大器的结构示意图，在该放大器中泵浦光 2 沿着与光信号 1 传播方向相同和相反的方向进入，并且这种光纤放大器具有这样的结构，在该结构中由两个上述第三实施例的光纤放大器 330 串连连接的两组并行连接。

类似的，图 26 给出了双向激励型光纤放大器的结构示意图，在该放大器中泵浦光 2 沿着与光信号 1 传播方向相同和相反的方向进入，并且这种光纤放大器具有这样的结构，在该结构中由两个上述第三实施例的光纤放大器 330 串连连接的两组并行连接，并且在两个光纤放大器 130 的输出侧分别增加了两个增益均衡器 817。

类似的，图 27 给出了双向激励型光纤放大器的结构示意图，在该放大器中泵浦光 2 沿着与光信号 1 传播方向相同和相反的方向进入，并且这种光纤放大器具有这样的结构，在该结构中由两个上述第三实施例的光纤放大器 330 串连连接的两组并行连接，并且两组光纤放大器 330 的每一组中的第一级光纤放大器与第二级光纤放大器之间分别增加了两个

增益均衡器 817。

#### 其他实施例

在每一个上述第一至第九实施例中，提出用于分离光信号 1 和泵浦光 2 的耦合器。

同样，在每一个上述第一至第九实施例中，使用了其芯体有 Tm 的放大光纤 111，但是作为替代，也可用其芯体和金属包层都有 Tm 的光纤放大器，并且只要至少其芯体内有 Tm 就可获得与第一至第九实施例相同情况的效果。

如所述的，根据本发明的光纤放大器，通过使用波长在 1400nm 带宽上的泵浦光而激励光信号，泵浦光的波长与激光二极管 (LD) 所发射的光信号波长相同，这样可抑制在  ${}^3\text{H}_4$  中发生 ESA (受激状态吸收)，以致可实现高效的 S-带宽，紧凑的尺寸，以及低成本。同样，通过使用双向传输型结构或者双重波长激励型结构也可实现高效率。

同时值得注意的是，除了上述已经提出的，在不脱离本发明新颖的和有利的特征的情况下，可以对本发明做出修改和变化。因此，所有的修改和变化都包括在所附的权利要求范围内。

图 1

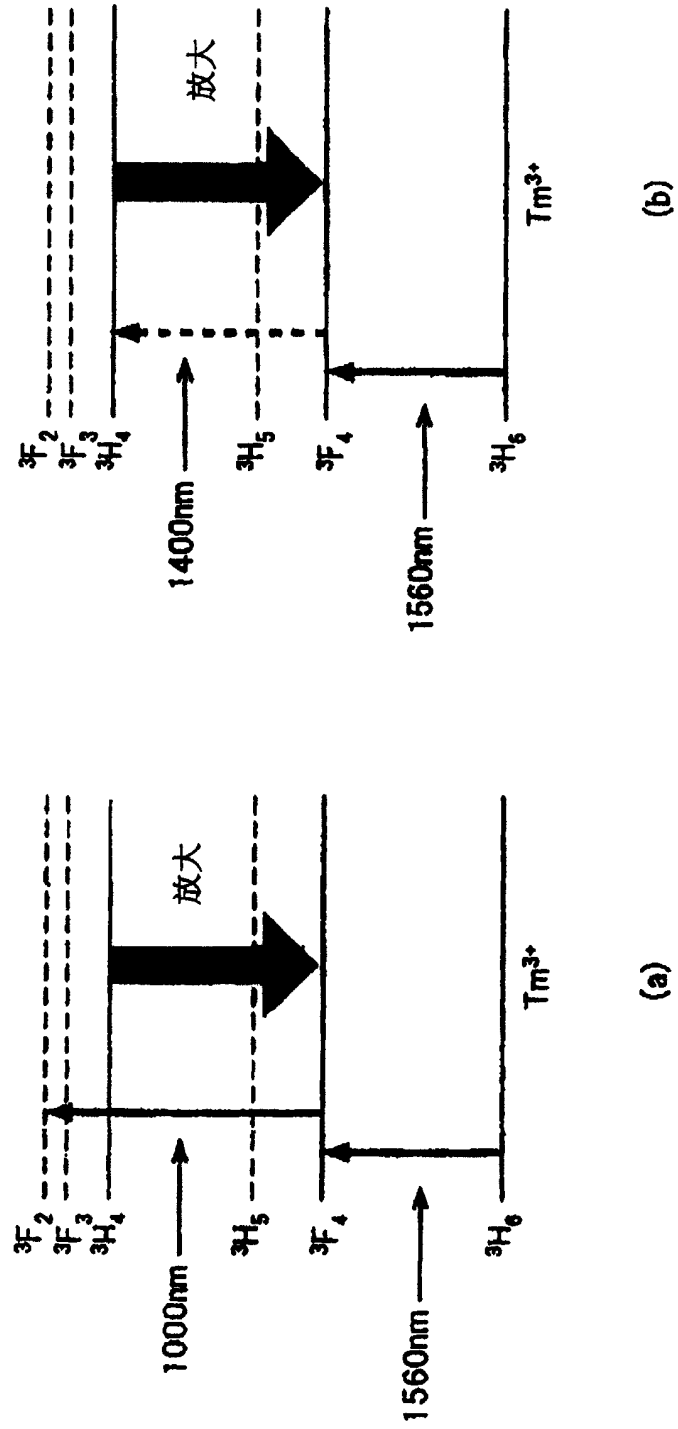


图 2

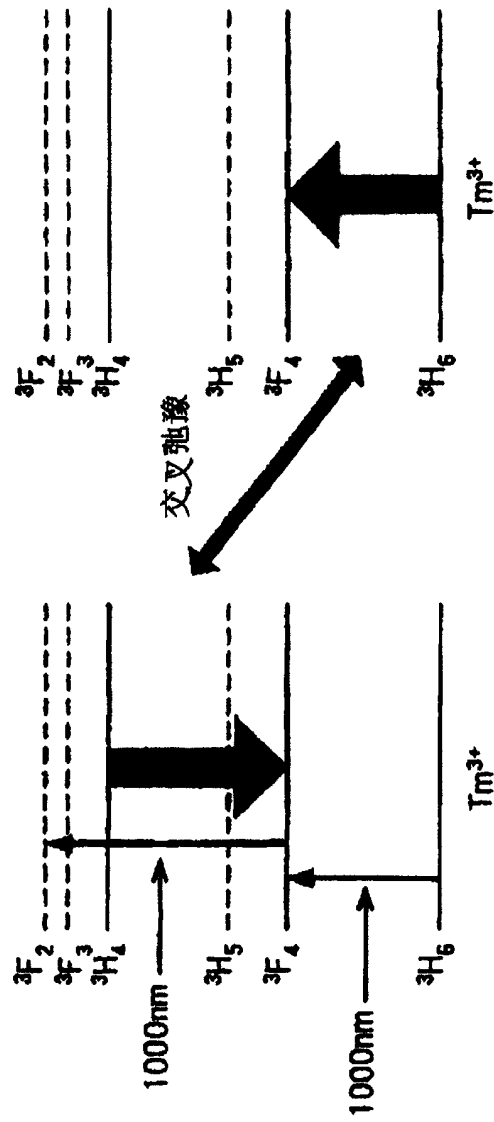


图 3

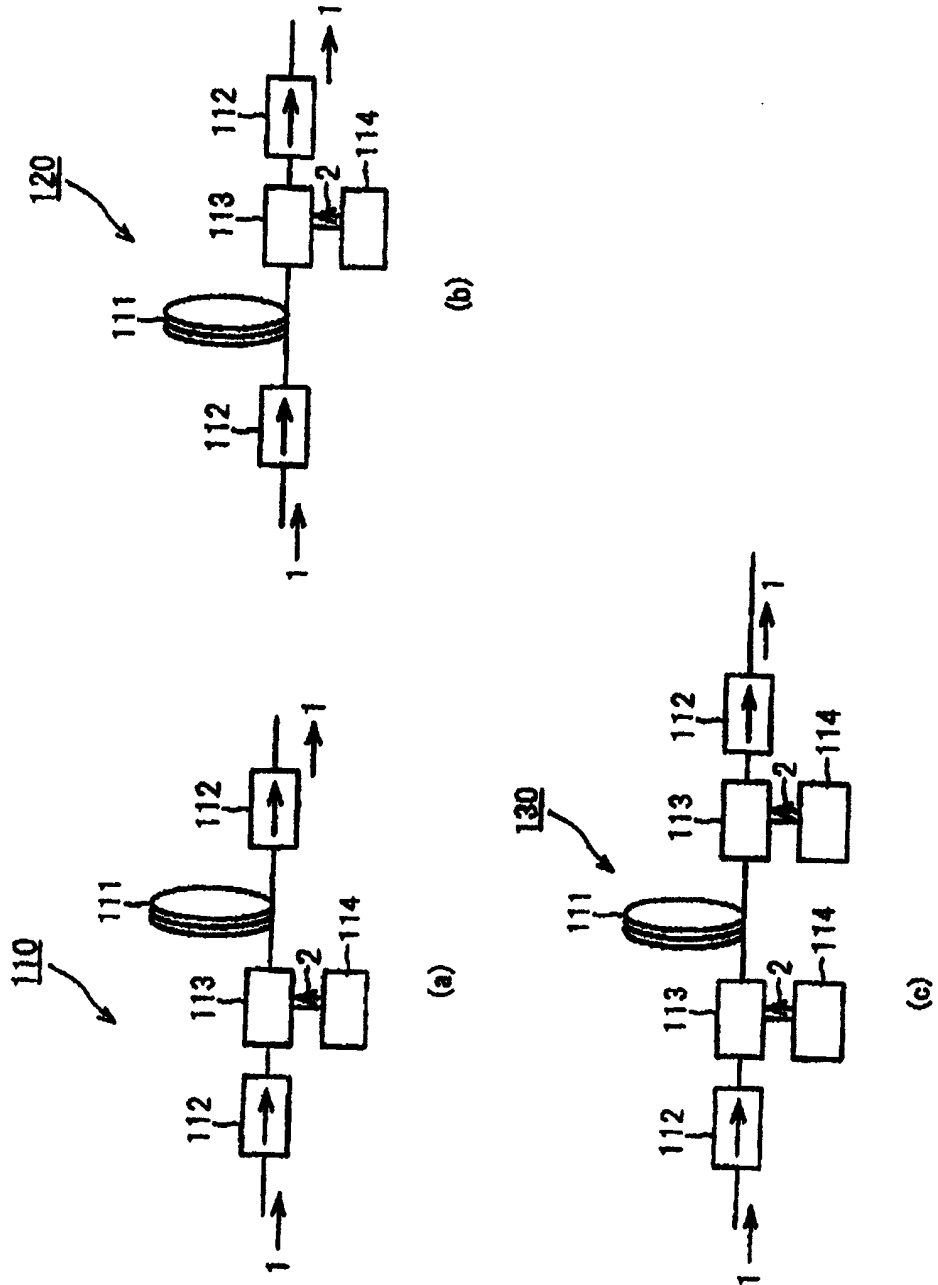
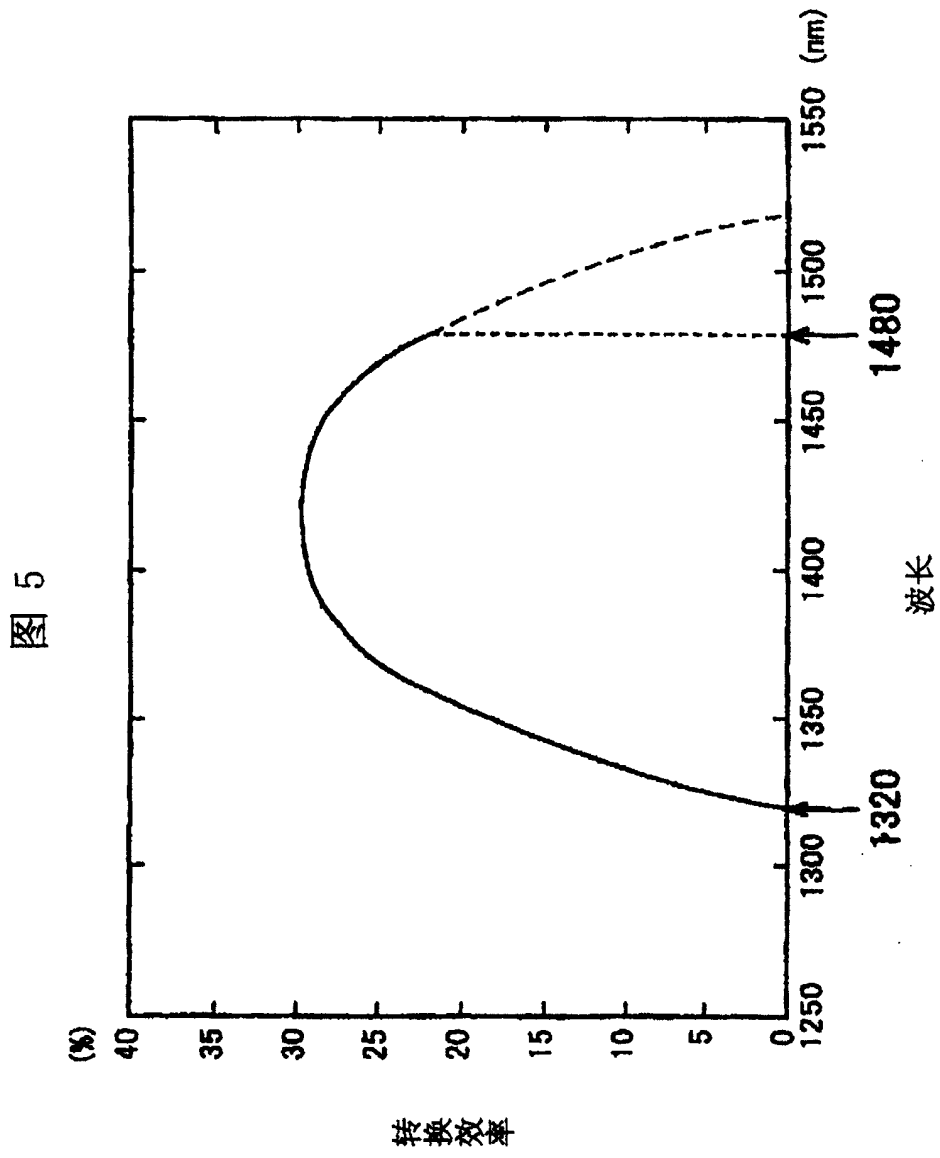


图 4

浓度	波长	ZBLA 玻璃	In-Pb 玻璃	亚硝酸盐玻璃
2000 ppm wt	1400nm 频带	26%	17%	4%
	1000nm 频带	6%	4%	1%
3000 ppm wt	1400nm 频带	30%	20%	5%
	1000nm 频带	8%	5%	1%



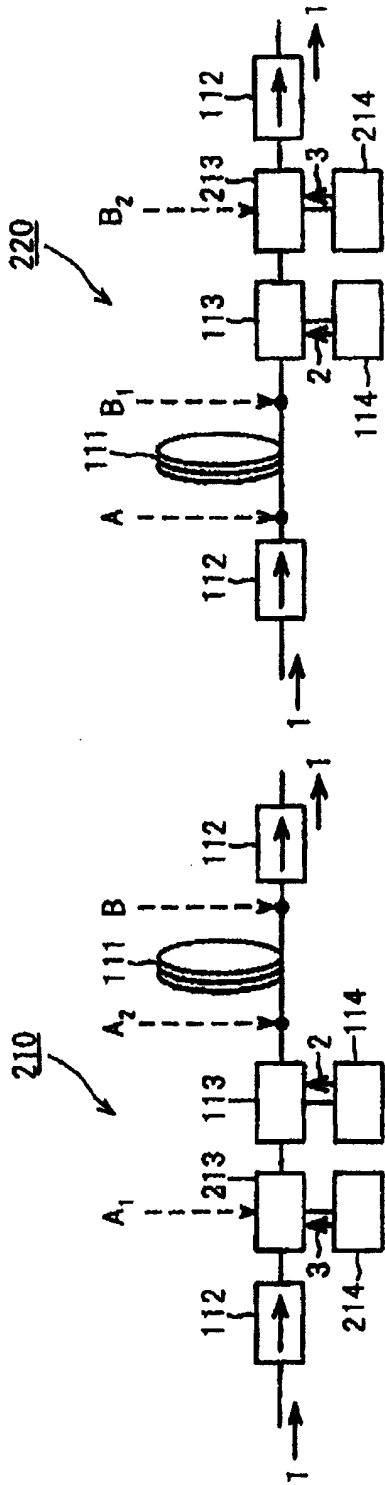


图 6 (a)

图 6 (b)

图 6 (c)

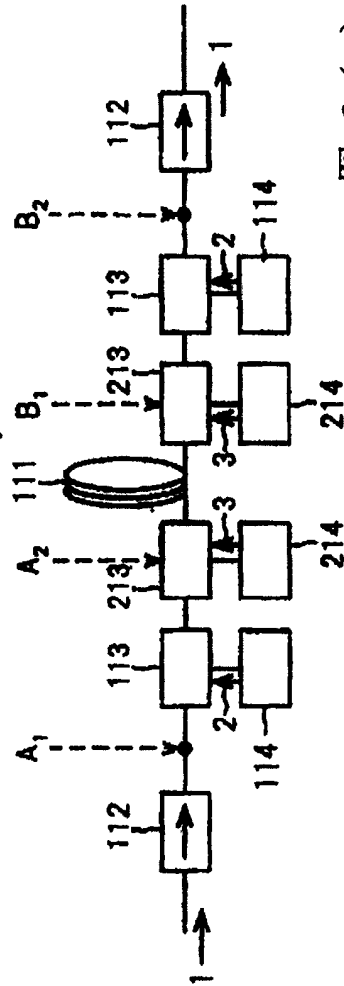


图 6 (c)

图 7

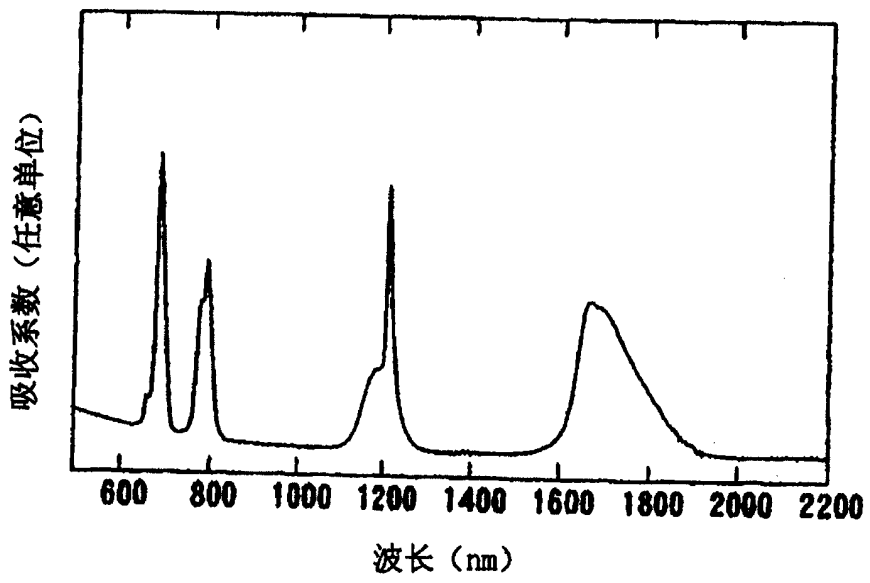


图 8

浓度	波长	ZBLA 玻璃	In-Pb 玻璃	亚硝酸盐玻璃
2000 ppm wt	650nm	28%	20%	5%
	800nm	30%	22%	8%
	1200nm	33%	25%	10%
	1560nm	35%	30%	15%
	泵浦光 2	26%	17%	4%
3000 ppm wt	650nm	35%	25%	10%
	800 nm	40%	30%	15%
	1200nm	45%	35%	20%
	1560 nm	50%	40%	25%
	泵浦光 2	30%	20%	5%

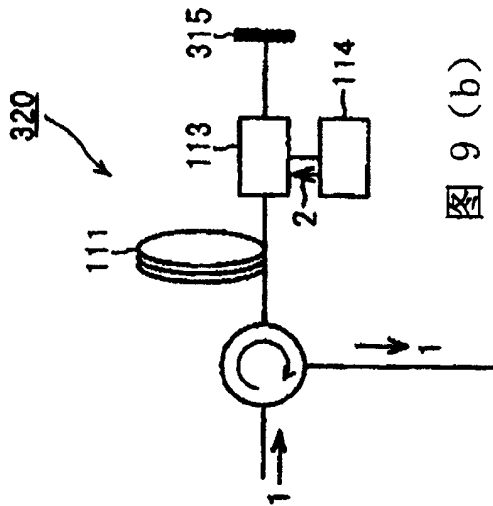


图 9 (b)

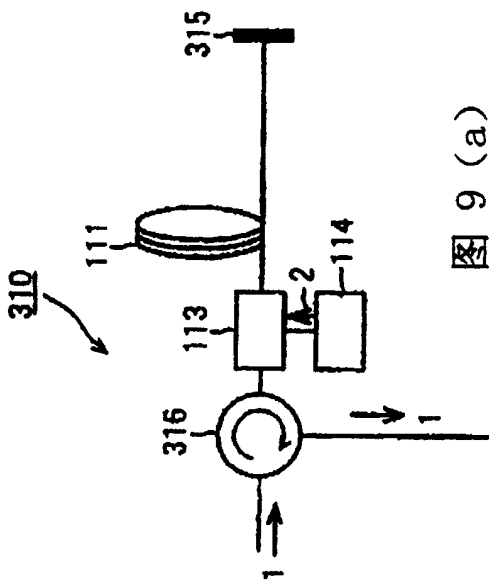


图 9 (a)

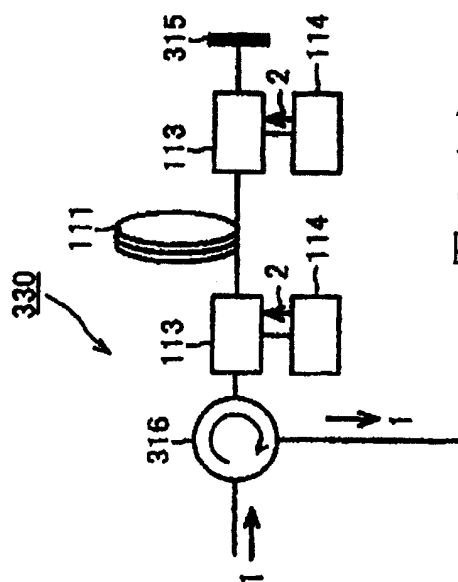


图 9 (c)

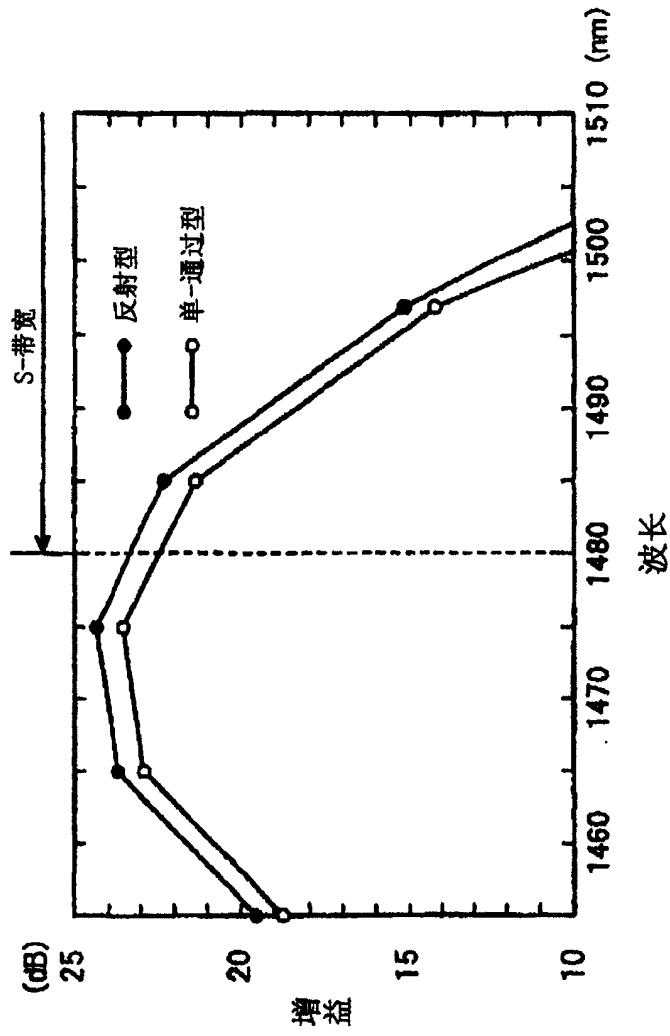
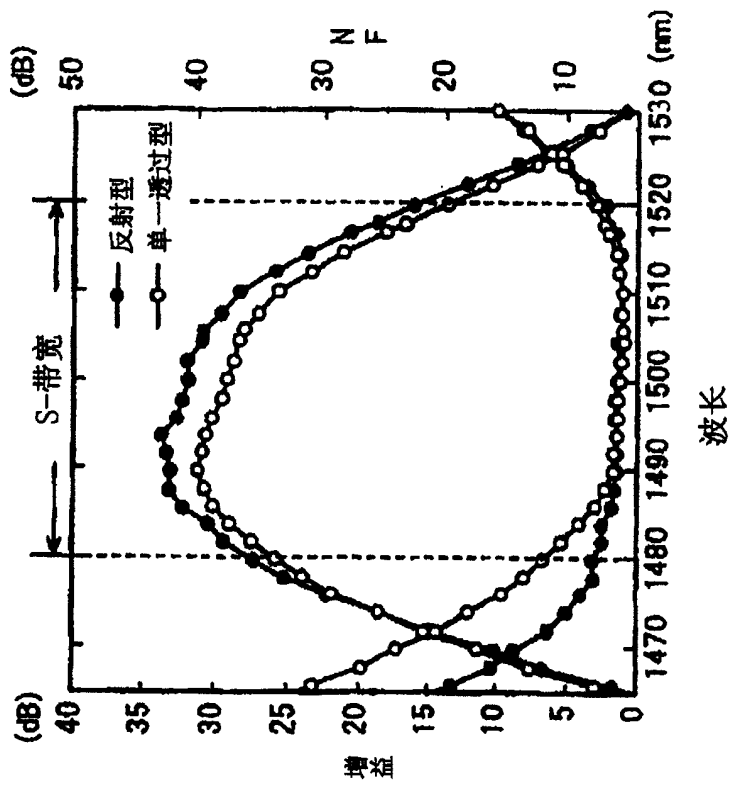
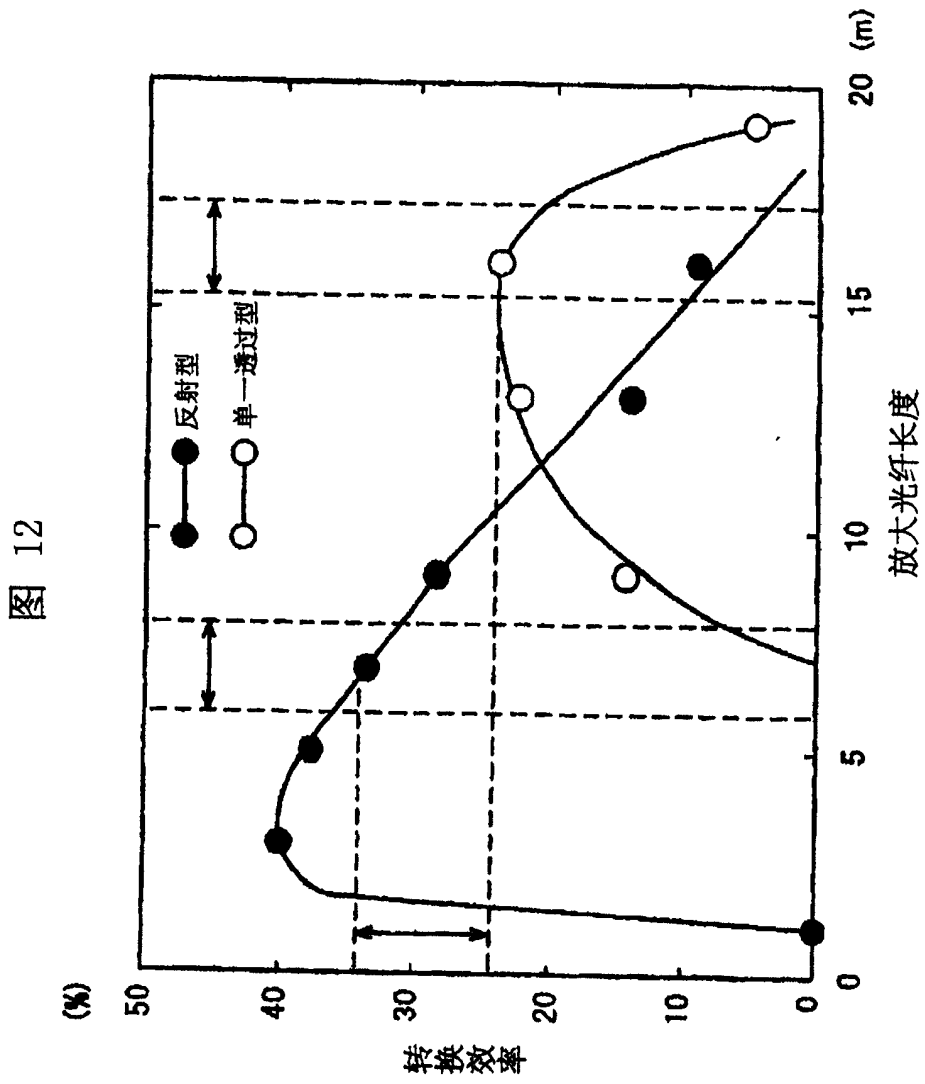
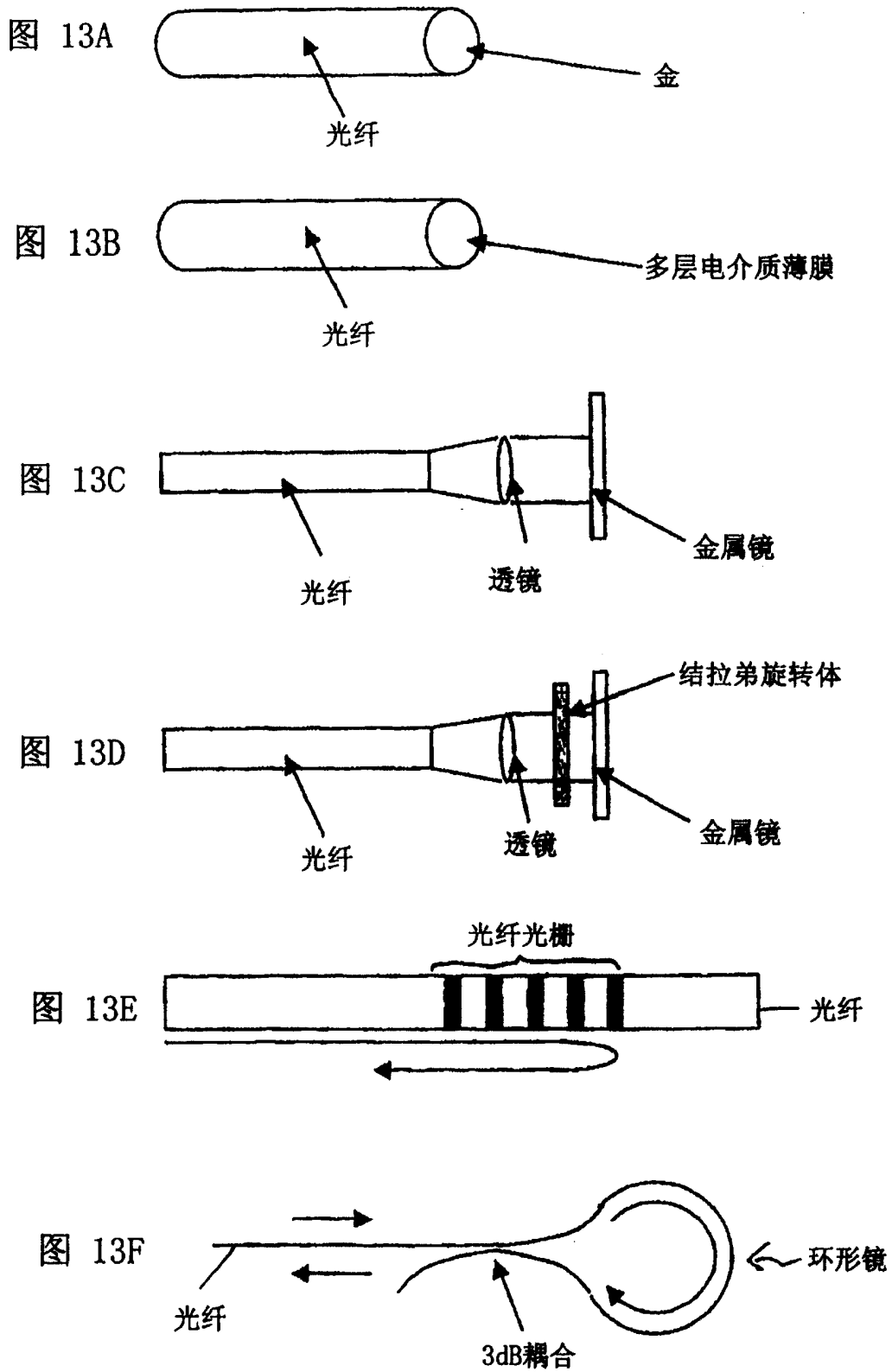


图 10







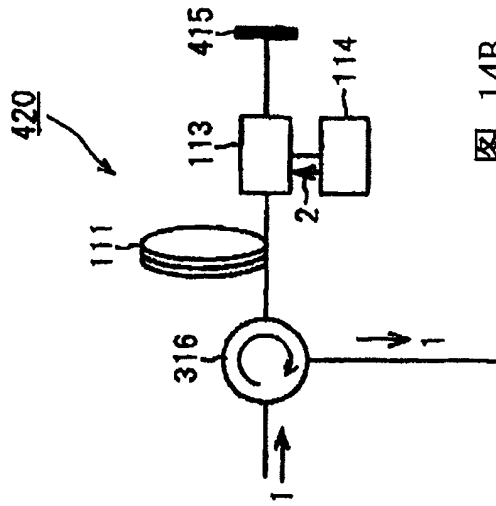


图 14B

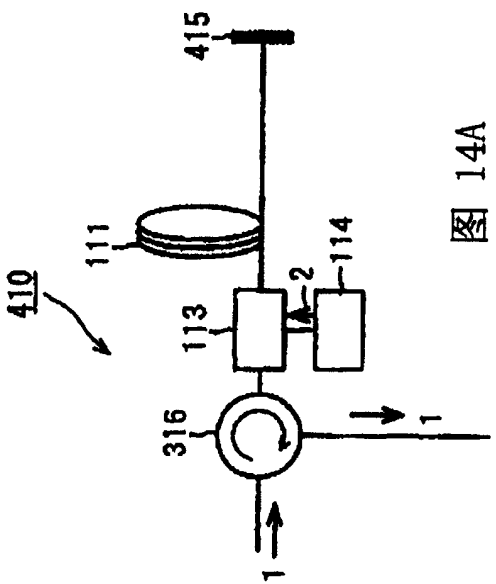


图 14A

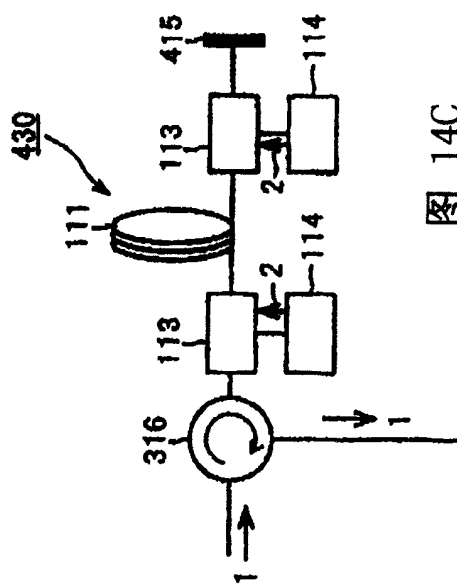
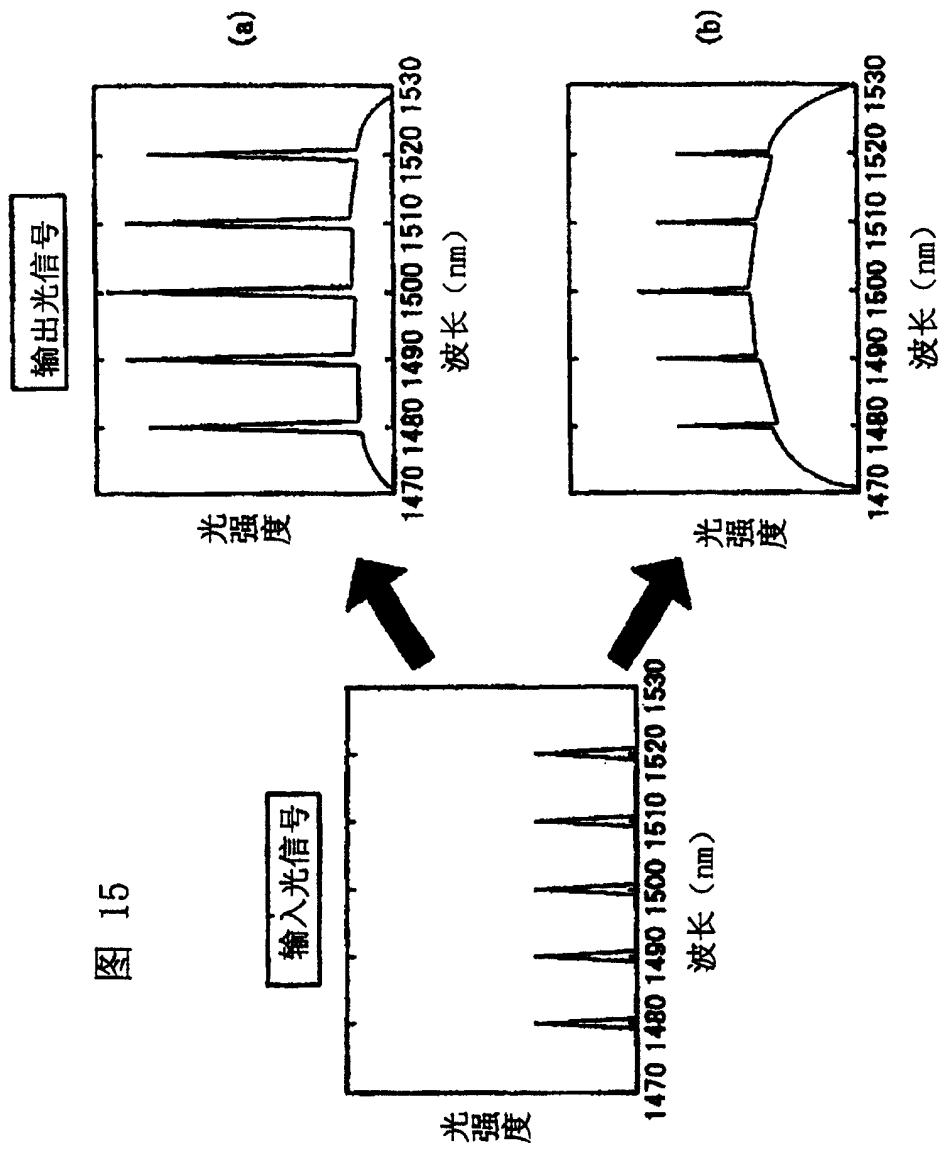


图 14C



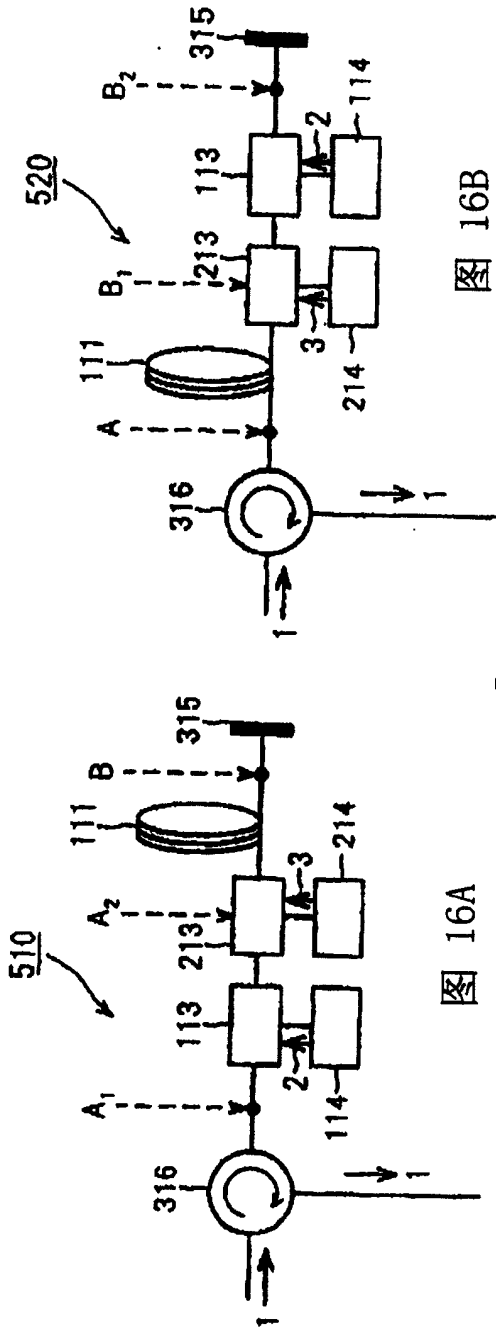
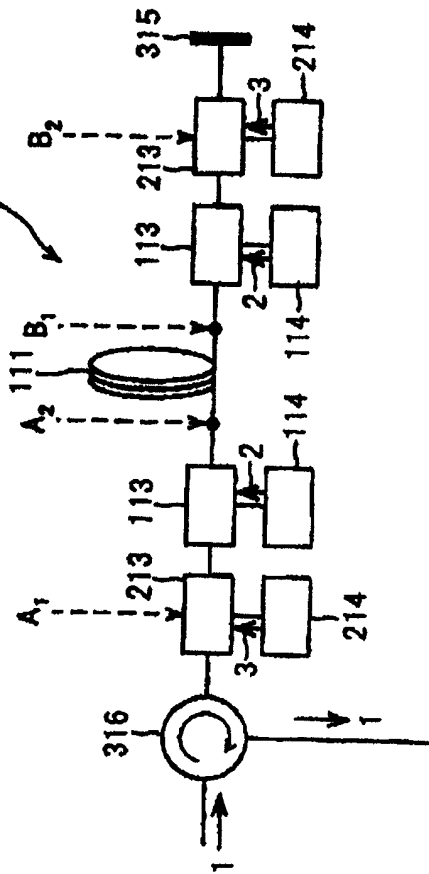
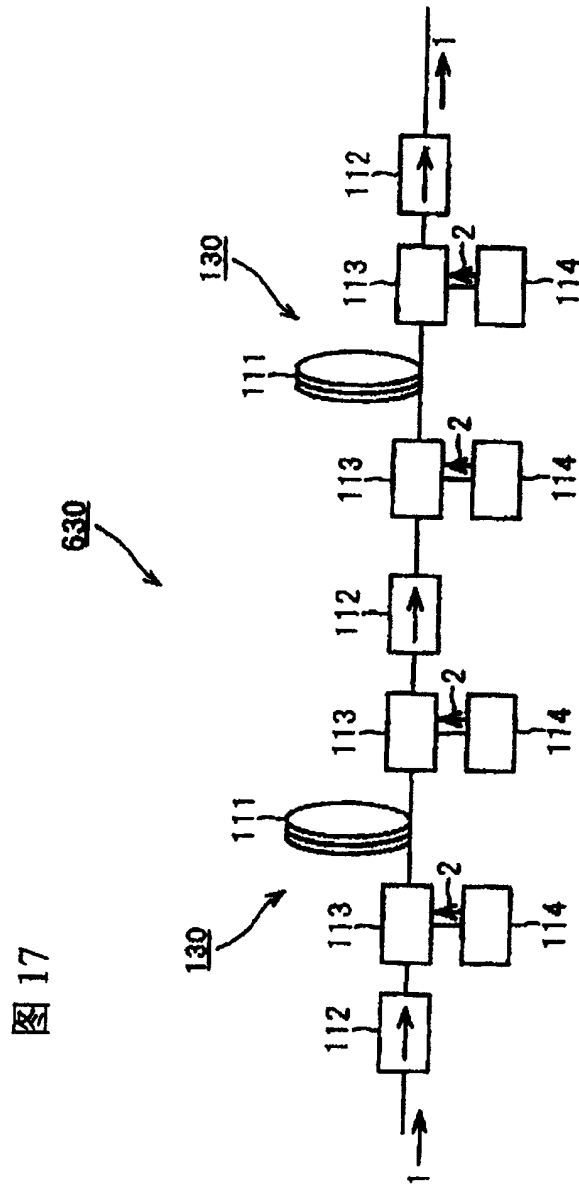


图 16B





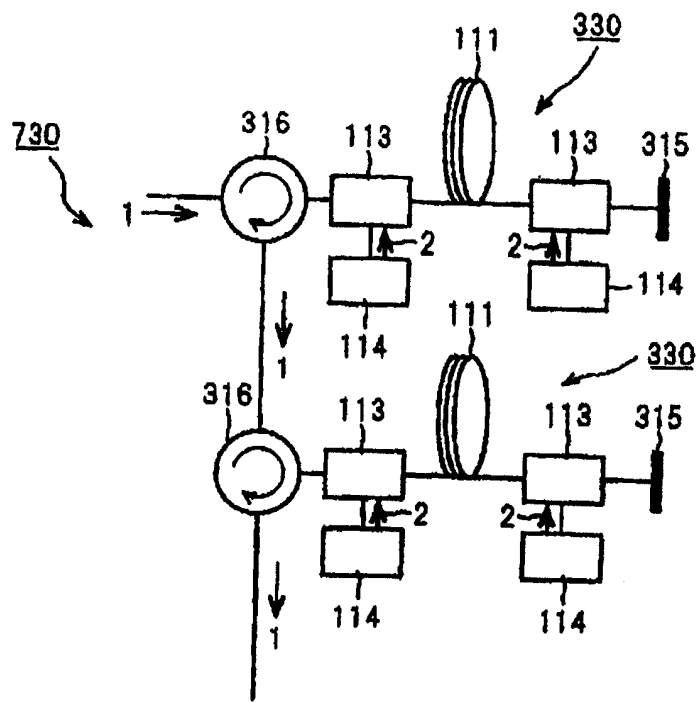


图 18

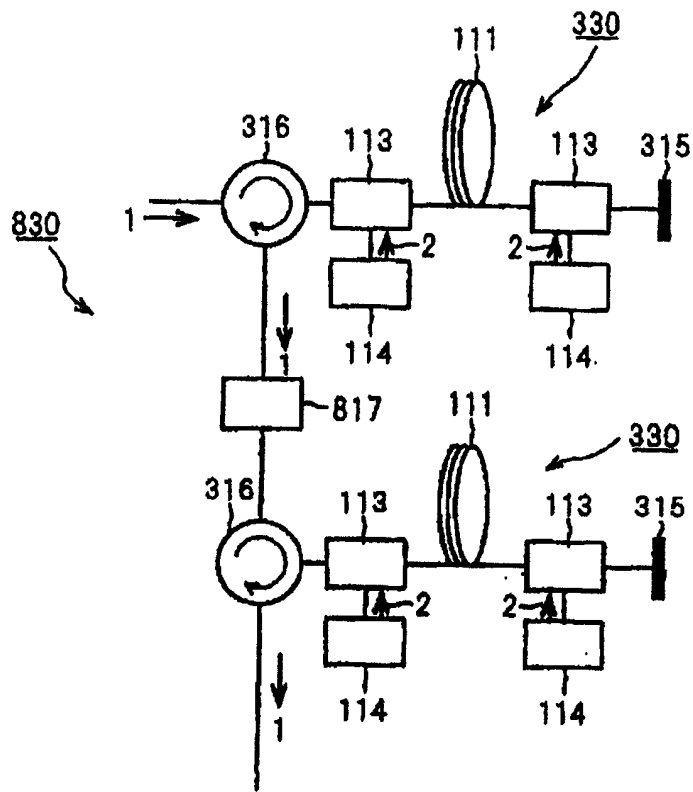


图 19

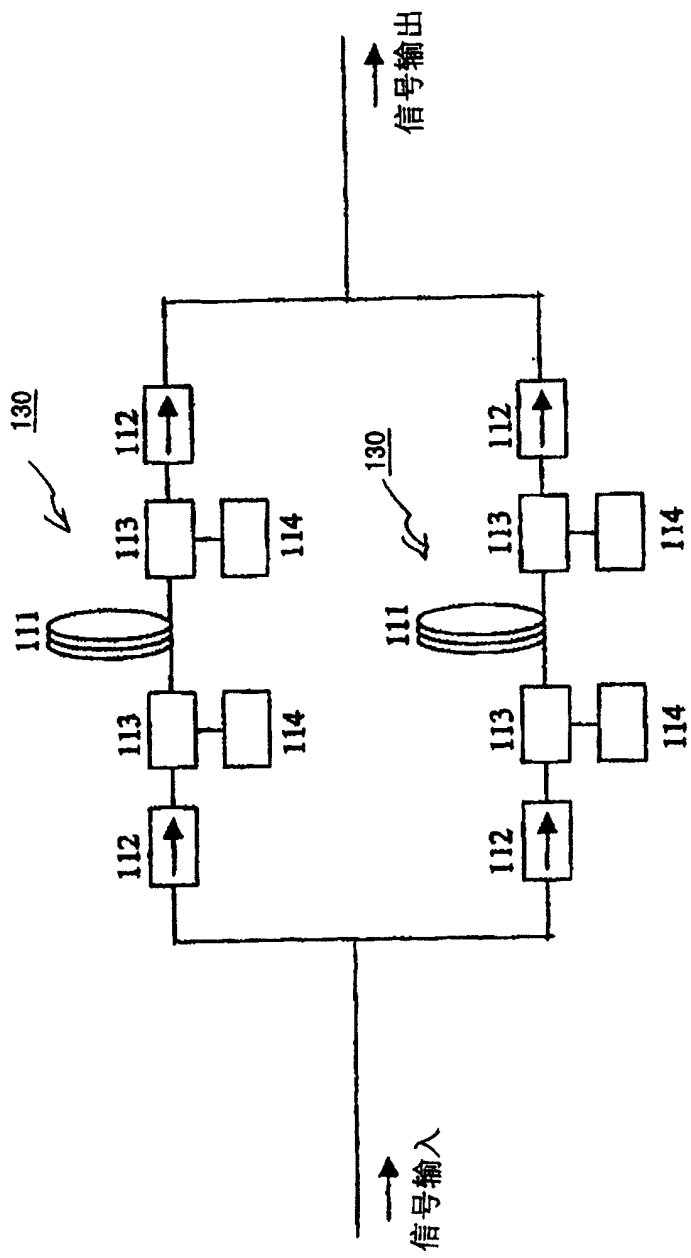


图 20

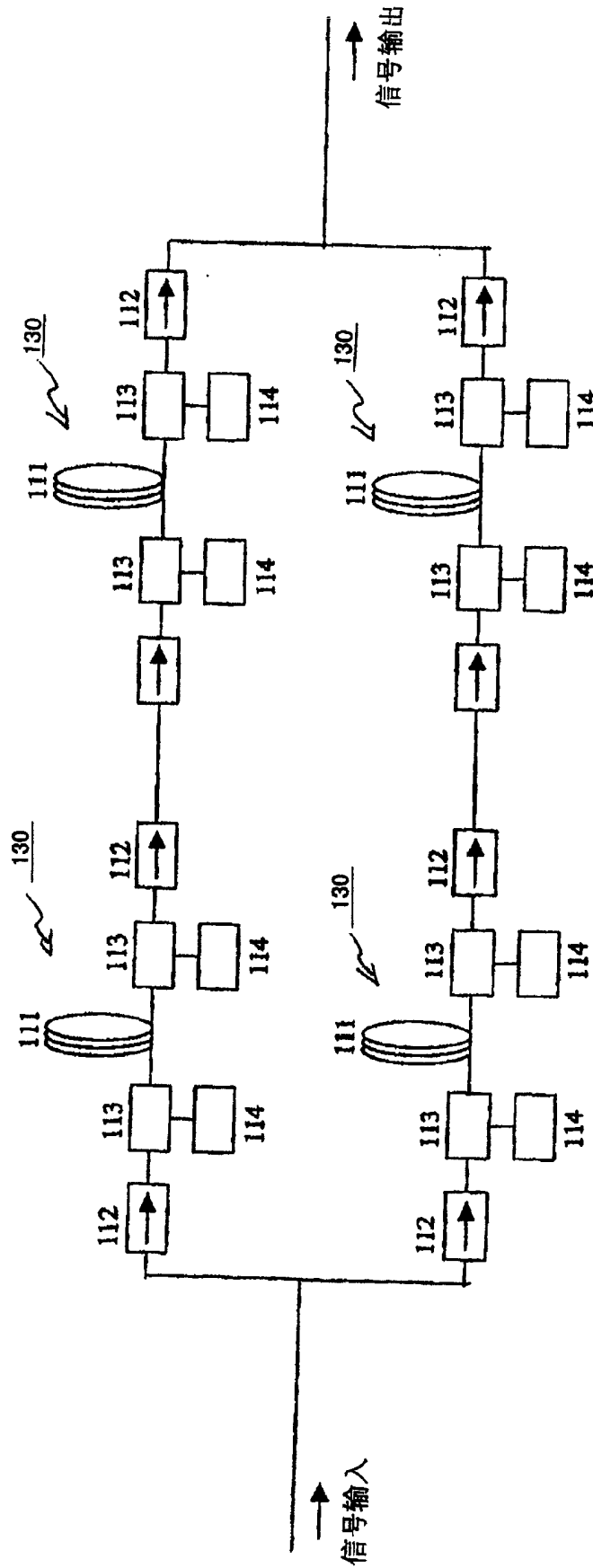


图21

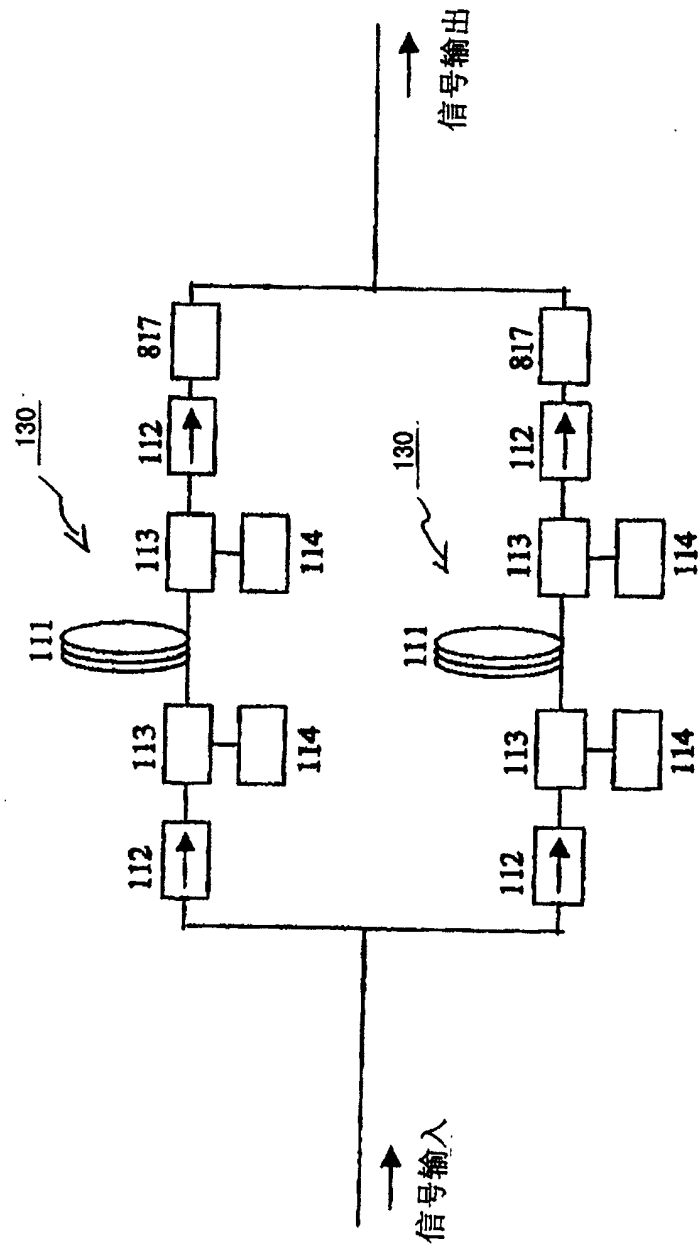


图 22

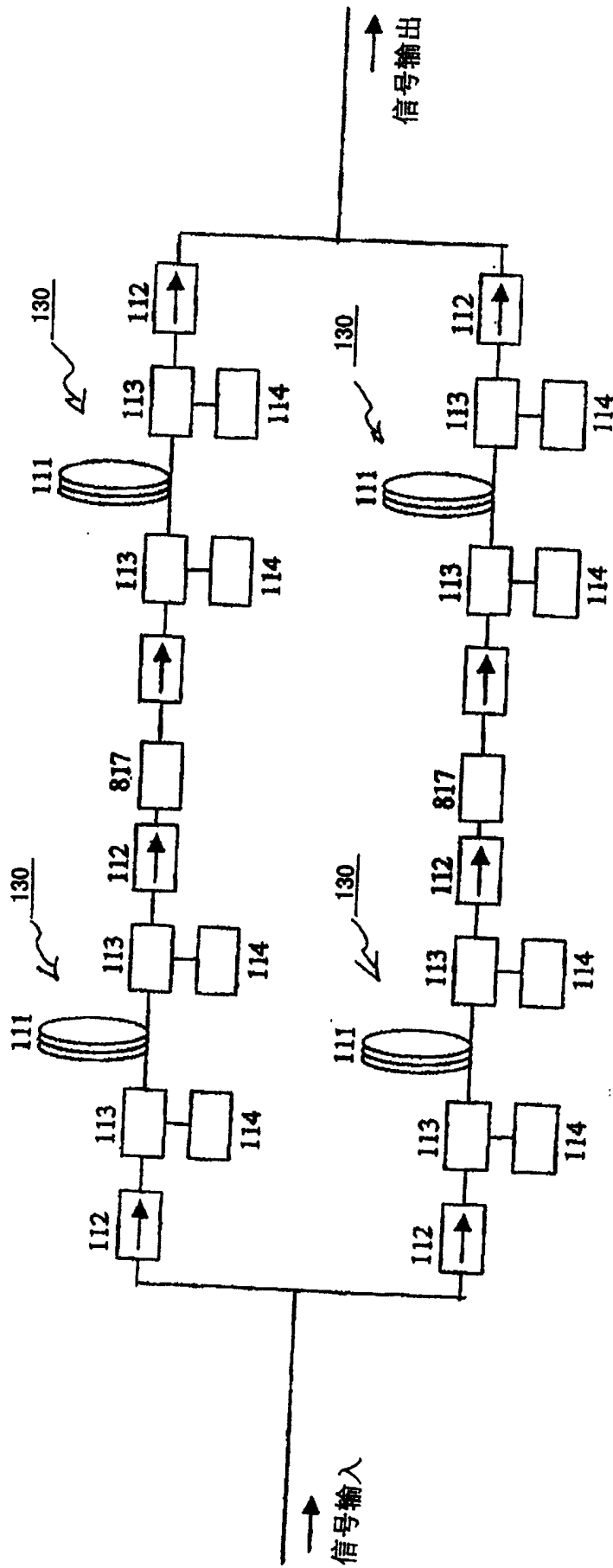


图 23

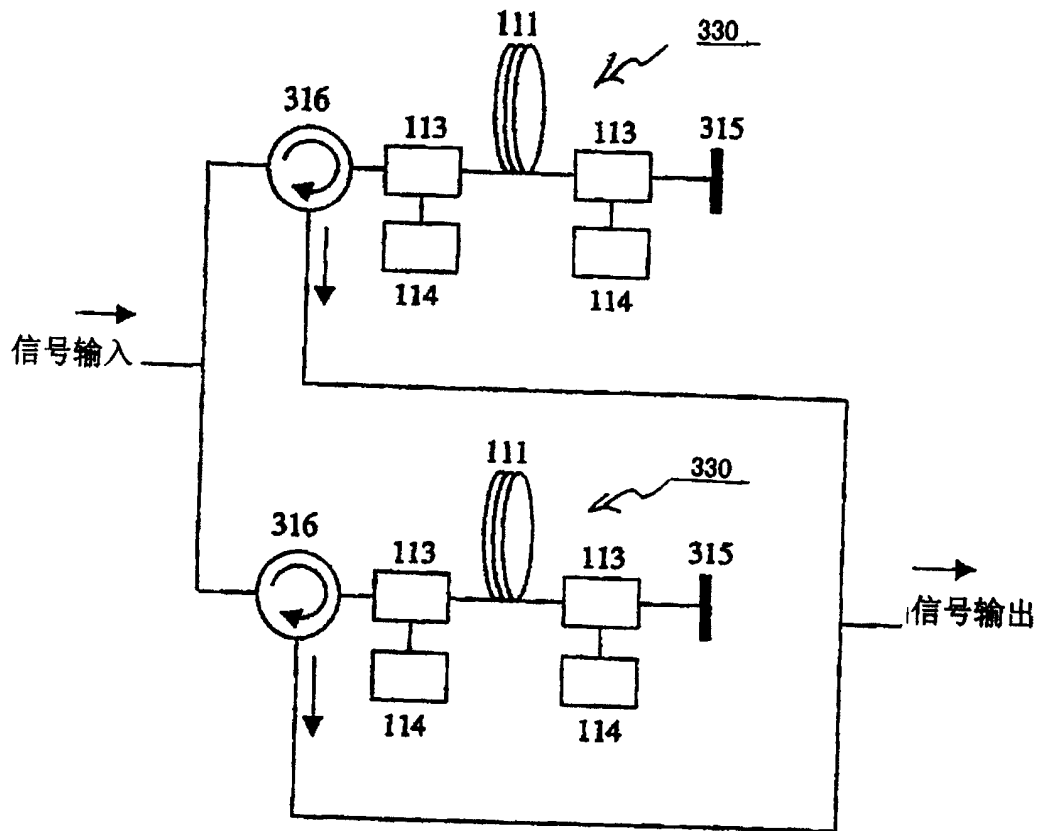


图 24

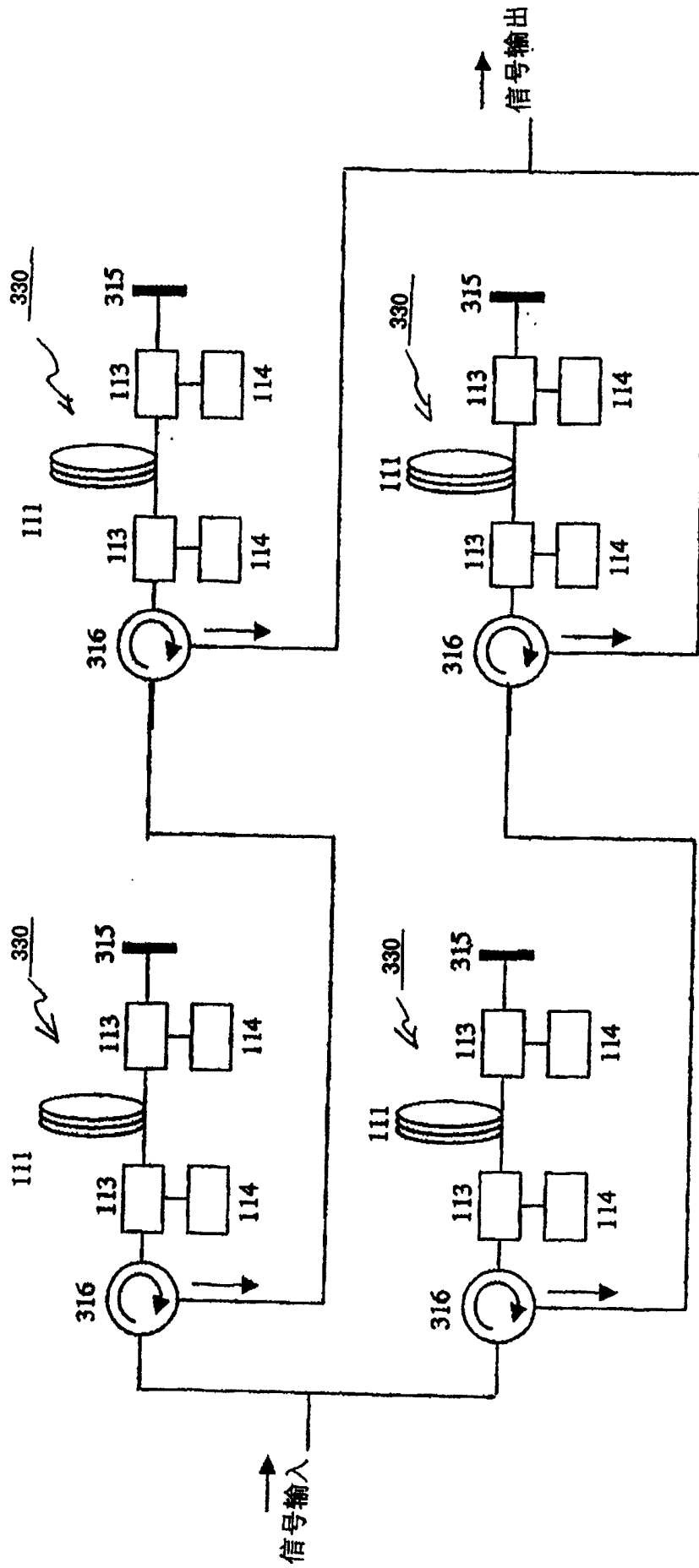


图 25

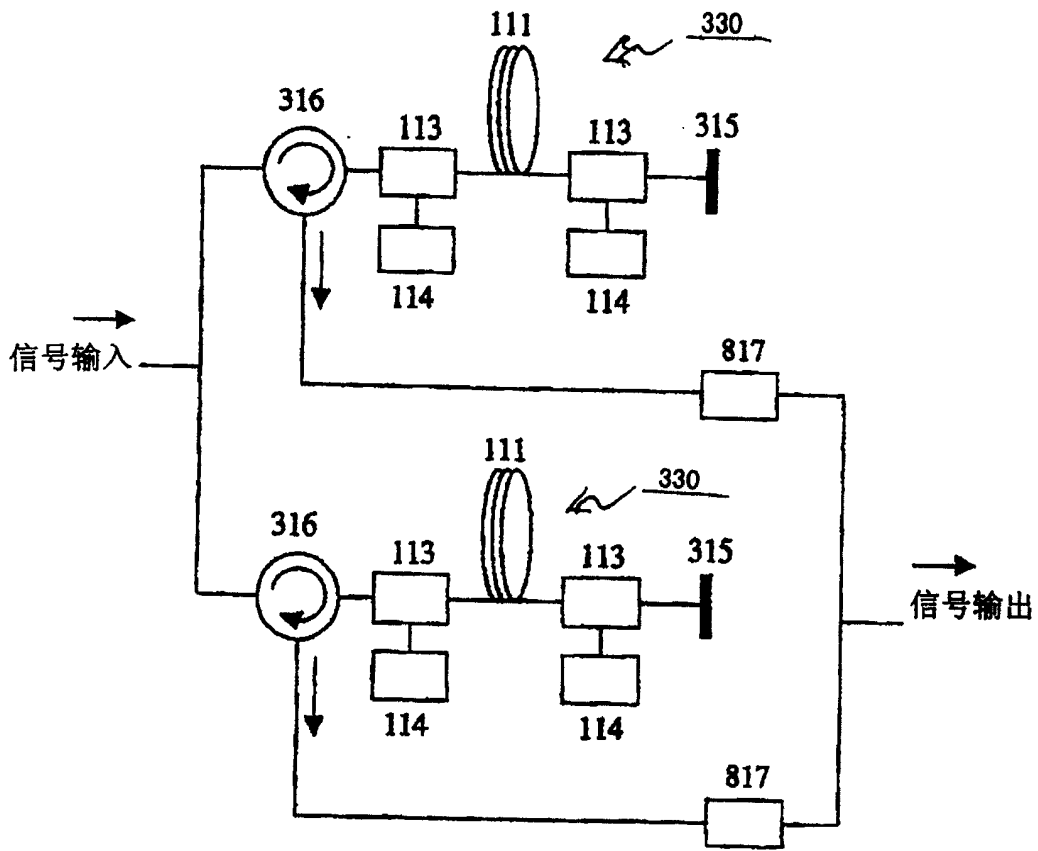


图 26

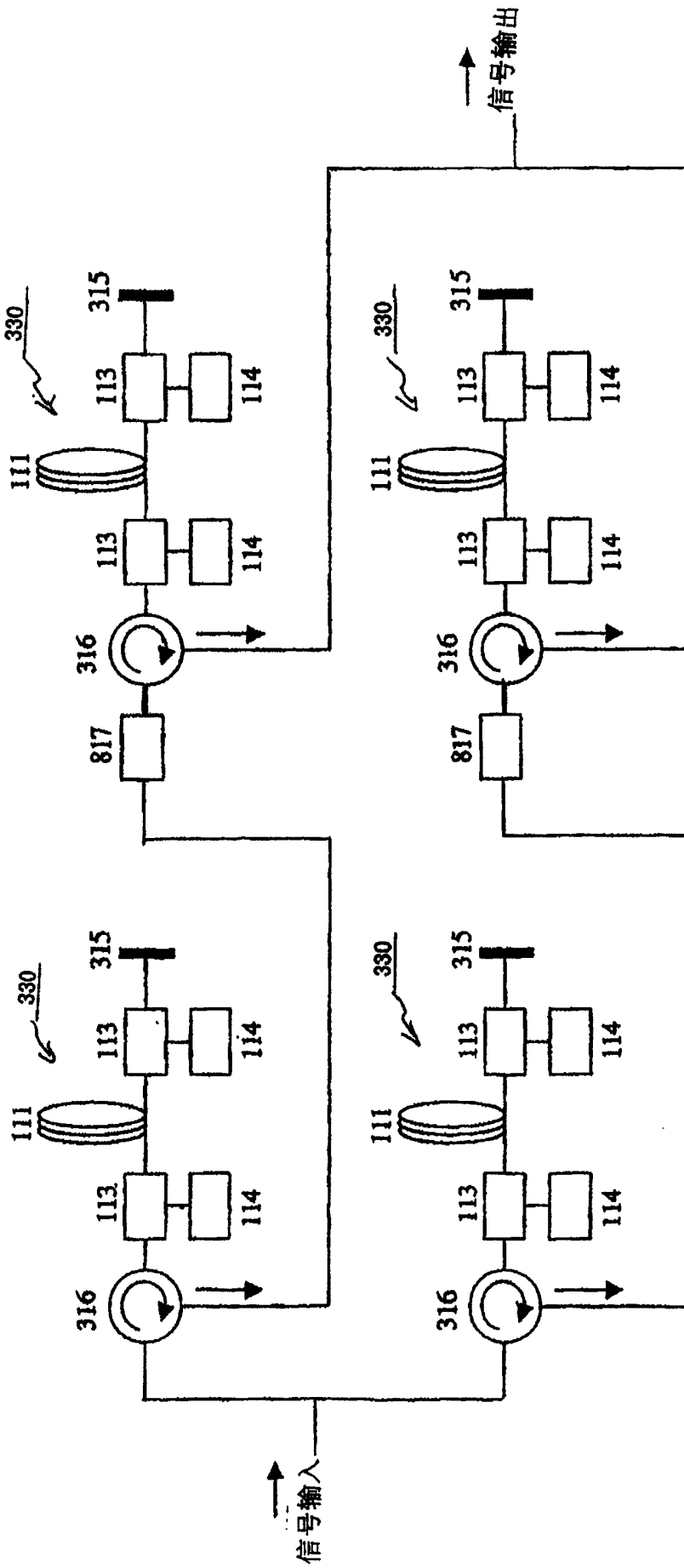


图 27