



## (12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 113497403 B

(45) 授权公告日 2022.08.26

(21) 申请号 202010277671.8

(22) 申请日 2020.04.08

(65) 同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 113497403 A

(43) 申请公布日 2021.10.12

(73) 专利权人 华为技术有限公司  
地址 518129 广东省深圳市龙岗区坂田华为总部办公楼

(72) 发明人 吴波 张楷

(74) 专利代理机构 北京同达信恒知识产权代理有限公司 11291

专利代理师 落爱青

(51) Int. Cl.

H01S 3/067 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 1246182 A, 2000.03.01

审查员 罗文飞

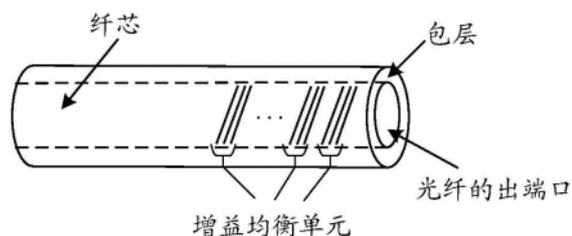
权利要求书1页 说明书10页 附图8页

(54) 发明名称

一种光纤、光放大器及光通信系统

(57) 摘要

一种光纤、光放大器及光通信系统,用于解决现有技术中因对光放大器进行增益平坦时噪声增加的问题。本申请中,光纤可应用于光放大器,该光纤包括掺杂稀土的纤芯和包层,纤芯上包括增益均衡单元;纤芯用于对接收到的合波中的各波长的光信号分别进行放大;增益均衡单元用于对各波长的光信号的增益进行均衡,使得从光纤的出端口射出的各波长的光信号的增益均在预设范围,各波长的光信号中的每个波长的光信号的增益是根据放大后的光信号的功率与放大前的光信号的功率的比值确定的。即,经掺杂稀土的纤芯放大的光信号传输至增益均衡单元时,增益均衡单元可对各波长的光信号的增益进行均衡(即平坦化),可在不增加噪声的情况下,实现光信号的增益均衡。



1. 一种光纤,其特征在于,应用于光放大器,所述光纤包括从内向外依次分布的掺杂稀土的纤芯和包层,所述包层的折射率小于所述掺杂稀土的纤芯的折射率,所述掺杂稀土的纤芯上包括增益均衡单元,所述增益均衡单元包括M个长周期光纤光栅,所述M大于1,所述M个长周期光纤光栅从起始位置开始分散式分布在所述掺杂稀土的纤芯上,所述起始位置是根据所述掺杂稀土的纤芯的吸收谱中最大吸收峰对应的吸收系数和对应的预设的吸收总量确定的,所述预设的吸收总量为所述最大吸收峰对应波长处的吸收总量;

所述掺杂稀土的纤芯,用于对接收到的合波中的各波长的光信号分别进行放大;

所述增益均衡单元,用于对所述各波长的光信号的增益进行均衡,使得从所述光纤的出端口射出的各波长的光信号的增益均在预设范围,所述各波长的光信号中的每个波长的光信号的增益是根据放大后的光信号的功率与放大前的光信号的功率的比值确定的。

2. 如权利要求1所述的光纤,其特征在于,所述增益均衡单元,具体用于:

根据所述光纤的总衰减函数,对所述各波长的光信号的增益中大于阈值的增益所对应的光信号进行能量衰减。

3. 如权利要求2所述的光纤,其特征在于,所述增益均衡单元还用于:

向所述包层的方向辐射衰减的能量。

4. 如权利要求1~3任一项所述的光纤,其特征在于,所述M个长周期光纤光栅中每个长周期光纤光栅的衰减函数与所述光纤的总衰减函数的函数相同,且所述M个长周期光纤光栅的衰减幅度之和等于所述总衰减函数的幅度。

5. 一种光放大器,其特征在于,包括至少一级放大结构,所述放大结构包括如权利要求1~4任一项所述的光纤、合波器、第一光选择器、泵浦源和第二光选择器;

所述第一光选择器,用于接收各波长的光信号,并向所述合波器传输所述各波长的光信号;

所述泵浦源,用于向所述合波器发射泵浦光;

所述合波器,用于将所述泵浦光和所述各波长的光信号合成一路合波,并将所述合波耦合进所述光纤;

所述第二光选择器,用于将来自所述光纤的放大且增益均衡后的各波长的光信号输出。

6. 如权利要求5所述的光放大器,其特征在于,所述第一光选择器和所述第二光选择器还用于隔离放大后的光信号的反向传播。

7. 一种光通信系统,其特征在于,包括发射器、接收器以及如权利要求5或6所述的光放大器;

所述发射器,用于向所述光放大器发射各波长的光信号;

所述接收器,用于接收来自所述光放大器输出的放大且增益均衡后的各波长的光信号,并将所述放大且增益均衡后的各波长的光信号转为电信号。

## 一种光纤、光放大器及光通信系统

### 技术领域

[0001] 本申请涉及光纤技术领域,尤其涉及一种光纤、光放大器及光通信系统。

### 背景技术

[0002] 随着通信技术的发展,通信系统中的流量呈爆炸式增长,因此,对通信系统的频谱宽度和噪声提出了更高的要求。以波分复用(wavelength division multiplexer,WDM)光通信系统为例,在该WDM光通信系统中,C波段的单波频谱效率的提升遇到了瓶颈,开始向C波段之外的波段进行扩展。由于L波段在光纤中的衰减系数较低,成为扩展的首选波段。

[0003] 在WDM光通信系统中,掺铒光纤放大器(erbium doped fiber amplifier,EDFA)是比较重要的器件,由于EDFA对不同波长的光信号有不同的饱和特性,因此,EDFA对WDM光通信系统中的各波长的光信号会产生不同增益,从而导致一些信道产生严重的误码率,使得整个WDM光通信系统性能下降。

[0004] 为了保证EDFA输出的放大后的光信号的增益是平坦的,通常会在EDFA中加入增益平坦器滤波器(gain flattening filter,GFF)等器件。但是由于GFF等器件自身有插入损耗(insertion loss,IL),IL会导致EDFA的噪声较大。特别是,需要级联较多的GFF时,EDFA的噪声显著增大。

### 发明内容

[0005] 本申请提供一种光纤、光放大器及光通信系统,用于在不增加光放大器的噪声的情况下,对光放大器的增益进行平坦。

[0006] 第一方面,本申请提供一种光纤,该光纤可应用于光放大器。该光纤包括从内向外依次分布的掺杂稀土的纤芯和包层,包层的折射率小于掺杂稀土的纤芯的折射率,掺杂稀土的纤芯上包括增益均衡单元。其中,掺杂稀土的纤芯用于对接收到的合波中的各波长的光信号分别进行放大;增益均衡单元用于对各波长光信号的增益进行均衡,使得从光纤的出端口射出的各波长的光信号的增益均在预设范围,各波长的光信号中的每个波长的光信号的增益是根据放大后的光信号的功率与放大前的光信号的功率的比值确定的。

[0007] 基于该方案,掺杂稀土的纤芯可以对各波长的光信号分别进行放大,放大的光信号经过增益均衡单元时,增益均衡单元可以对各波长的光信号的增益进行均衡(或称为平坦化)。如此,应用该光纤的光放大器不需要引入新的器件来均衡各波长的光信号的增益,从而可以在不增加噪声的情况下,实现增益均衡。

[0008] 为了进一步降低应用该光纤的光放大器的噪声,需要控制增益均衡单元在掺杂稀土的纤芯上起始位置。在一种可能的实现方式中,增益均衡单元在掺杂稀土的纤芯上的起始位置是根据掺杂稀土的纤芯的吸收谱中的最大吸收峰对应的吸收系数和对应的预设吸收总量确定的。

[0009] 在一种可能的实现方式中,增益均衡单元具体可用于根据光纤的总衰减函数,对各波长的光信号的增益中大于阈值的增益所对应的光信号进行能量衰减。

[0010] 为了防止光反射至起始位置之前的纤芯的区域,增益均衡单元用于向包层的方向辐射衰减的能量。

[0011] 在一种可能的实现方式中,增益均衡单元可包括M个长周期光纤光栅,M为大于或等于1的整数。当M大于1时,M个长周期光纤光栅从起始位置开始,分散式分布在掺杂稀土的纤芯上。如此,有助于进一步降低光放大器的噪声;而且,如果光线是弯曲的,分散式分布便于将增益均衡单元设置在非弯曲的部分。

[0012] 进一步,M个长周期光纤光栅中每个长周期光纤光栅的衰减函数与光纤的总衰减函数的函数相同,且M个长周期光纤光栅的衰减幅度之和等于总衰减函数的幅度。通过M个长周期光纤光栅,可将总衰减函数等效的均分为M份,并分散式分布到掺杂稀土的纤芯的一定长度内,从而实现分散式对应用该光纤的光放大器的增益进行平坦化。

[0013] 在一种可能的实现方式中,每个长周期光纤光栅的衰减幅度等于总衰减函数的幅度/M。

[0014] 在一种可能的实现方式中,长周期光纤光栅可以是倾斜光栅。

[0015] 第二方面,本申请提供一种光放大器,该光放大器可包括至少一级放大结构,至少一级放大结构可包括上述第一方面或第一方面任一种光纤、合波器、第一光选择器、泵浦源和第二光选择器。其中,第一光选择器用于接收各波长的光信号,并向所述合波器传输各波长的光信号;泵浦源用于向合波器发射泵浦光;合波器用于将泵浦光和各波长的光信号合成一路合波,并将合波耦合进光纤;第二光选择器用于将来自光纤的放大且增益均衡后的各波长的光信号输出。

[0016] 基于该光放大器,掺杂稀土的纤芯可以对各波长的光信号分别进行放大,放大的光信号经过增益均衡单元时,增益均衡单元可以对各波长的光信号的增益进行均衡(亦称为平坦化)。如此,在该光放大器中,不需要引入新的器件来均衡各波长的光信号,从而可在不增加噪声的情况下,实现增益均衡。

[0017] 在一种可能的实现方式中,第一光选择器和第二光选择器还用于隔离放大后的光信号的反向传播。

[0018] 第三方面,本申请提供一种光通信系统,该光通信系统可包括上述第二方面或第二方面任一种光放大器、发射器和接收器;发射器用于向光放大器发射各波长的光信号;接收器用于接收来自光放大器输出的放大且增益均衡后的各波长的光信号,并将放大且增益均衡后的各波长的光信号转为电信号。

[0019] 第三方面可以达到的技术效果可以参照上述第二方面中的有益效果的描述,此处不再重复赘述。

## 附图说明

[0020] 图1a为本申请提供了一种铷离子的能级简化示意图;

[0021] 图1b为本申请提供了一种EDFA的本征增益谱的示意图;

[0022] 图1c为现有技术中的一种EDFA的结构示意图;

[0023] 图1d为现有技术中的另一种EDFA的结构示意图;

[0024] 图2a为本申请提供了一种工作EDFA在L波段在不同增益下的NF曲线示意图;

[0025] 图2b为本申请提供的另一种工作EDFA在L波段在不同增益下的NF曲线示意图;

- [0026] 图3为本申请提供的一种光纤的结构示意图；
- [0027] 图4为本申请提供的一种理想增益谱的示意图；
- [0028] 图5a为本申请提供的一种增益均衡单元在纤芯上的位置分布示意图；
- [0029] 图5b为本申请提供的一种掺杂铒的纤芯的吸收谱的示意图；
- [0030] 图6a为本申请提供的一种M个长周期光纤光栅在纤芯上的分布示意图；
- [0031] 图6b为本申请提供的另一种M个长周期光纤光栅在纤芯上的分布示意图；
- [0032] 图7为本申请提供的一种光纤的衰减曲线示意图；
- [0033] 图8为本申请提供的一种总衰减函数和长周期光纤光栅的衰减函数之间关系示意图；
- [0034] 图9为本申请提供的一种光纤环形器的结构示意图；
- [0035] 图10a为本申请提供的一种光放大器的结构的示意图；
- [0036] 图10b为本申请提供的另一种光放大器的结构的示意图；
- [0037] 图11a为本申请提供的一种不同波长与增益之间的关系示意图；
- [0038] 图11b为本申请提供的一种不同波长与噪声之间的关系示意图；
- [0039] 图12为本申请提供的一种光通信系统架构示意图。

### 具体实施方式

[0040] 以下,对本申请中的部分用语进行解释说明,以便于本领域技术人员理解。

[0041] 一、掺铒光纤放大器(erbium doped fiber application amplifier,EDFA)

[0042] EDFA的工作原理是把泵浦光的能量转换为光信号的能量。具体过程为:在掺铒光纤(EDF)中,铒离子有三个能级,如图1a所示,示例性地示出了一种铒离子的能级简化示意图。能级1代表基态,能量最低;能级2是亚稳态,处于中间能级;能级3代表激发态,能量最高。当泵浦光的光子能量等于能级3和能级1的能量差时,铒离子吸收泵浦光从基态跃迁到激发态。由于激发态是不稳定的,铒离子很快返回到能级2。如果输入的光信号的能量等于能级2和能级1的能量差,则处于能级2的铒离子将跃迁到基态,产生受激辐射光,因而光信号得到放大。也就是说,光信号的放大是由于泵浦光的能量转换为光信号能量,因此,为了提高EDFA的增益,可提高对泵浦光的吸收,使基态铒离子尽可能跃迁到激发态。

[0043] 二、增益平坦

[0044] 光放大器的增益(Gain)表示光放大器的放大能力。以光放大器为EDFA为例,由于EDFA的输出功率并不总是与输入功率成正比例增加,而是呈饱和趋势。EDFA的饱和输出特性与光信号的波长相关。作为光放大器,希望在宽的频带内获得高的增益,EDFA的增益谱是比较宽的,可达45nm,即EDFA对不同波长的光信号产生的增益不同。这种增益的变化会使各传输通道的功率不平衡。因此,需要对各波长的光信号的进行增益均衡,或者也称为增益平坦。

[0045] 所谓增益平坦是指经光放大器放大后的各个波长的光信号的增益是相同的或相近的,即增益谱是平坦的,如此,可对需要放大的各个信道提供相同的增益。如图1b所示,为本申请提供的一种EDFA的增益谱的示意图。该增益谱在1530nm和1555nm附近分别有一个增益峰,1530nm附近的增益峰较尖,谱宽约5nm;在1555nm附近的增益峰相对平坦,谱宽约15~20nm,EDFA的增益平坦主要是将这两个增益峰降低。

[0046] 三、增益平坦滤波器(gain flattening filter,GFF)

[0047] GFF也称为增益均衡滤波片,用于在指定波长范围内平坦或平滑不同的增益。通常GFF与光放大器一起使用,以确保放大的光信号都具有相同的增益。可根据光放大器的增益谱及光纤的损耗谱,确定对应的GFF的损耗特性曲线(或称为衰减函数),最后选择合乎要求的GFF并将其置于相应的光放大器中。

[0048] 如图1c所示,为一种在EDFA内插无源滤波器的结构示意图。该EDFA可包括两级或两级以上的放大结构。图1c以EDFA内插入的无源滤波器为GFF,EDFA包括S1级放大结构、GFF和S2级放大结构为例。其中,S1级放大结构和GFF之间可通过光纤连接,GFF与S2级放大结构之间也可通过光纤连接。由于EDFA工作在一个较宽的动态增益区间,如19~25dB、或20~32dB等,为了保证EDFA输出的放大后的光信号的增益是平坦的,通常会加入GFF来均衡各个波长光信号的增益。进一步,为了更精细的调整增益,可在GFF后级联可调光功率衰减器(variable optical attenuator,VOA),GFF与VOA之间也可通过光纤连接。

[0049] 进一步,由于光放大器的饱和输出光功率受限,光信号经两级放大结构后输出的光功率接近饱和后,仍不能满足需求,则需要级联多级放大结构来满足光功率放大需求。此时,为了兼顾光放大器的噪声,通常将衰减值较大的集中式的GFF的衰减值分散到EDFA的多级放大结构之间,即将GFF的总衰减值拆分成为GFF1的衰减值和GFF2的衰减值。也就是说,EDFA中插入GFF1和GFF2,请参阅图1d,其中,GFF1的衰减值与GFF2的衰减值之和约等于GFF的总衰减值。

[0050] 四、插入损耗

[0051] 插入损耗是指在传输系统的某处由于某些器件的插入而发生的负载功率的损耗。即插入损耗表示某些器件插入前负载上所接收到的功率与插入后同一负载上所接收到的功率以分贝为单位的比值。结合上述图1c和图1d,EDFA中因GFF插入后所引起的损耗即为插入损耗。

[0052] 五、波分复用(wavelength division multiplexing,WDM)

[0053] 波分复用是指将两种或多种不同波长的光载波信号(携带各种信息)在发送端经复用器(亦称合波器(multiplexer))汇合在一起,并耦合到光线路的同一根光纤中进行传输的技术;在接收端,经解复用器(亦称分波器或称去复用器,demultiplexer)将各种波长的光载波分离,然后由光接收机作进一步处理以恢复原信号。这种在同一根光纤中同时传输两个或两个以上的不同波长光信号的技术,称为波分复用。

[0054] 前文介绍了本申请所涉及的一些用语的解释,下面介绍本申请涉及的技术特征。

[0055] 光放大器的性能不仅需要考虑输出的光信号的增益,还需要考虑光放大器的噪声对性能的影响。为了便于方案的说明,如下以光放大器为EDFA为例说明。

[0056] 目前,EDFA的增益平坦通常有如下两种方式。方式一,优化EDF的本征增益谱。例如在EDF中掺杂其它杂质,如铝;再比如,改变EDF的基质;再比如,改变EDF的结构参数,如包层的宽度、纤芯的宽度等;再比如,改变EDF的光学参数,如包层的折射率、纤芯的折射率等。方式二,在EDFA内插GFF等用于实现增益平坦的器件,基于该方式二的结构和增益均衡的原理可参见上述图1c或图1d的介绍,此处不再重复赘述。

[0057] EDFA在每个增益值下都对应一个噪声系数(noise figure,NF), $NF=10\log_{10}\frac{\text{输出信噪比}}{\text{输入信噪比}}$

EDFA的NF在C波段较好,通常为3.5~5dB,在L波段的NF比在C波段的NF性能差,约劣化1~3dB。为了保证C波段和L波段的光信号能无差异的传输至目标,需要降低EDFA在L波段的噪声。

[0058] 针对上述图1c,EDFA在L波段的噪声可用如下公式1表示;针对上述图1d,EDFA在L波段的噪声可用如下公式2表示。

$$[0059] \quad NF_{Total} = NF_1 + [L_{12} * NF_2 - 1] / G_1 \quad \text{公式1}$$

$$[0060] \quad NF_{Total} = NF_1 + [L_{12} * NF_2 - 1] / G_1 + [L_{23} * NF_3 - 1] / G_2 \quad \text{公式2}$$

[0061] 其中, $L_{12}$ 表示S1级放大结构和S2级放大结构之间的器件的插入损耗,结合上述图1c, $L_{12}$ 表示插入EDFA的GFF、VOA、ISO和WDM的插入损耗;结合上述图1d, $L_{12}$ 表示GFF<sub>1</sub>、以及S1级放大结构中的ISO和WDM的插入损耗; $L_{23}$ 表示S2级放大结构和S3级放大结构之间的器件的插入损耗,结合上述图1d, $L_{23}$ 表示GFF<sub>2</sub>、VOA、以及S2级放大结构中的ISO和WDM的插入损耗; $NF_1$ 表示S1级放大结构的噪声系数, $NF_2$ 表示S2级放大结构的噪声系数, $NF_3$ 表示S3级放大结构的噪声系数, $G_1$ 表示S1级放大结构的增益, $G_2$ 表示S2级放大结构的增益。应理解, $NF_1$ 、 $NF_2$ 、 $NF_3$ 、 $G_1$ 和 $G_2$ 通常是取决于EDF本身的质量优劣。

[0062] 基于上述图1c,图2a示例性示出了EDFA在L波段的不同增益下的NF曲线示意图。基于上述图1d,图2b示例性地示出了EDFA在L波段的不同增益下的NF曲线。由图2a可以看出,增益变化区间为19~25dB时,采用两级放大结构的EDFA的NF值的变化为2.7dB;由图2b可以看出,增益变化区间为19~25dB时,采用三级放大结构、且将GFF总的损耗值分散成GFF1的损耗值和GFF2的损耗值时,NF值的变化为1.7dB。由此可见,将总的损耗值分散的EDFA在整个增益区间的NF值波动变小。

[0063] 由上述内容可以看出,通过上述方式一和方式二实现了EDFA的增益平坦,但是由于方式一是改变EDF的材料,需要重新制作新的EDF,实现较为复杂。对于方式二,由于每增加一个GFF都需要引入WDM和ISO,但是GFF、WDM和ISO都有自身的插入损耗。随着放大级数的增加,需要引用更多的ISO和WDM;例如,一个ISO和一个WDM的插入损耗是1.5dB,将GFF的总损耗值分散在5级放大结构,就会引入7.5dB的插入损耗,这些插入损耗对于GFF的衰减函数中的损耗值为0的波长的光信号来说,是额外引入的损耗,会导致EDFA的总噪声会增加。为了使EDFA的噪声比较低,则不能级联较多的放大结构。也就是说,方式二的增益均衡的方式不能级联较多级的放大结构;若级联较多的放大结构,光放大器的噪声会比较大。

[0064] 鉴于上述问题,本申请提出一种光纤。该光纤中,增益均衡单元设置于掺稀土的纤芯上,当该光纤应用于光放大器时,光放大器可利用增益均衡技术,实现对各波长的光信号进行增益均衡,且可不增加光放大器的噪声。其中,增益均衡技术是指利用特性与光放大器的增益相反的增益均衡单元来抵消增益的不均匀性。例如,特性与EDFA增益谱相反的增益均衡单元将EDFA的增益谱平坦化。

[0065] 基于上述内容,下面结合附图3至附图12,对本申请提出的光纤进行具体阐述。

[0066] 如图3所示,为本申请提供的一种光纤的结构示意图。该光纤可应用于光放大器,该光纤包括从内向外依次分布的掺杂稀土的纤芯和包层,包层的折射率小于掺杂稀土的纤芯的折射率,掺杂稀土的纤芯上包括增益均衡单元;其中,掺杂稀土的纤芯用于对接收到的合波中的各波长的光信号分别进行放大;增益均衡单元用于对各波长的光信号的增益进行均衡,使得从光纤的出端口射出的各波长的光信号的增益均在预设范围,各波长的光信号

中的每个波长的光信号的增益是根据放大后的光信号的功率与放大前的光信号的功率的比值确定的。

[0067] 其中,每个波长的放大后的光信号的功率即为该波长的光信号的输出信号功率,每个波长的放大前的光信号的功率即为该波长的光信号的输入信号功率。示例性地,每个波长的增益G可通过如下公式3确定。

$$[0068] \quad G(\text{dB}) = 10 \log_{10} \frac{\text{输出信号功率}}{\text{输入信号功率}} \quad \text{公式 3}$$

[0069] 需要说明的是,理想情况下,从该光纤的出端口射出的各波长的光信号的增益是相同的。参阅图4,为本申请提供的一种理想增益谱的示意图。该图4中,各波长的光信号经该光纤的增益均衡单元进行增益均衡后,从光纤的出端口射出的各波长的光信号的增益是相同的,即增益谱是一条直线。在实际中,由于无源器件(例如ISO和WDM)的制造工艺偏差等影响,增益谱中各波长的光信号的增益可能会存在一些差异,但是各波长的光信号的增益均在预设范围,该预设范围可以是 $\pm 1\text{dB}$ 。

[0070] 基于上述光纤,掺杂稀土的纤芯可以对各波长的光信号分别进行放大,放大的光信号经过纤芯上的增益均衡单元时,增益均衡单元可以对各波长的光信号的增益进行均衡(或称为平坦化)。如此,不需要引入新的器件来均衡各波长的光信号,从而可以在不增加噪声的情况下,实现增益均衡。进一步,将增益均衡单元设置在掺稀土的纤芯上,可以实现在对各波长的光信号进行放大的同时,并对各波长的光信号的增益进行均衡。也就是说,将增益均衡单元设置在掺稀土的纤芯上,可实现对纤芯提供增益的同时,并通过增益均衡单元对各波长的光信号的增益进行同步均衡。

[0071] 下面对图3所示的各个结构分别进行介绍说明,以给出示例性的具体实施方案。

[0072] 一、掺杂稀土的纤芯

[0073] 本申请中,掺杂稀土的纤芯用于对接收到的合波中的各波长的光信号分别进行放大。进一步,可选地,可根据掺杂稀土的纤芯的本征参数,经过设计得到各波长的光信号对应的增益,从而确定出各波长的增益谱。例如,掺杂稀土的纤芯为掺杂铒离子的纤芯,该掺杂铒离子的纤芯的增益谱可参见上述图1b。

[0074] 需要说明的是,纤芯中掺杂的稀土还可以是铥离子、或钕离子等,本申请对此不做限定。

[0075] 二、包层

[0076] 包层是指在纤芯外面覆盖的一层玻璃或其它透明材料,包层的折射率小于掺杂稀土的纤芯的折射率,从而可以将光信号限制在纤芯内传输。

[0077] 在一种可能的实现方式中,包层可包括内包层和外包层,紧包裹于纤芯的环形结构称为内包层,最外层的环形结构称为外包层,内包层和外包层之间还可以包括沟壑层(亦称为下陷层)。

[0078] 三、增益均衡单元

[0079] 本申请中,应用光纤的光放大器的NF受第一级放大结构的NF1(可结合上述公式1)的影响比较大,因此,确定增益均衡单元在掺杂稀土的纤芯上的起始位置很重要。所谓起始位置是指从光纤的入端口到开始设置增益均衡单元的位置,如图5a所示,A位置即为增益均衡单元在掺杂稀土的纤芯上的起始位置,增益均衡单元的起始位置与光纤的入端口之间的

距离用 $L_0$ 表示。

[0080] 在一种可能的实现方式中,增益均衡单元在掺杂稀土的纤芯上的起始位置可根据掺杂稀土的纤芯的吸收谱中的最大吸收峰对应的吸收系数(或称为吸收能力)和对应的预设吸收总量确定,其中,预设的吸收总量为最大吸收峰对应波长处的吸收总量。也可以理解为,增益均衡单元设置在掺杂稀土的纤芯起始位置时,应用该光纤的光放大器对噪声的钳制效果较好。

[0081] 如下,以掺杂铒离子的纤芯为例说明。参阅图5b,为本申请提供的一种掺杂铒的纤芯的吸收谱的示意图。该纤芯的吸收谱中最大吸收峰在1530nm,最大吸收峰对应的吸收系数约为85dB/m,最大吸收峰处预设的吸收总量约为40~90dB,因此,增益均衡单元在掺杂稀土的纤芯上的起始位置等于最大吸收峰处预设的吸收总量/最大吸收峰对应的吸收系数。也就是说,增益均衡单元可从距离纤芯的入端口约0.47~1.06m的位置开始设置,即 $L_0$ 约为0.47~1.06m。

[0082] 在一种可能的实现方式中,增益均衡单元可以包括M个长周期光纤光栅(long period fiber grating,LPFG),M为大于或等于1的整数。其中,长周期光纤光栅为周期大于1 $\mu$ m的光纤光栅。也可以理解为,M个长周期光纤光栅组合即为本申请的增益均衡单元,增益均衡单元的特定与EDFA增益相反。

[0083] 在一种可能的实现方式中,可通过长周期光纤光栅的刻写技术,在掺杂稀土的纤芯上刻写M个长周期光纤光栅。例如可通过二氧化碳(CO<sub>2</sub>)激光器或飞秒激光器从确定出的起始位置开始,在纤芯上刻写M个长周期光纤光栅。

[0084] 当M大于1时,M个长周期光纤光栅从起始位置开始,可以分散式分布在掺杂稀土的纤芯上。可以是均匀的分布在纤芯上,也可以是非均匀的分布在纤芯上。如图6a所示,为本申请提供的一种M个长周期光纤光栅在纤芯上的分布示意图。图6a以M=4为例,从起始位置开始,4个长周期光纤光栅均匀的分布在掺杂的稀土的纤芯上。

[0085] 请参阅图6b,为本申请提供的另一种M个长周期光纤光栅在纤芯上的分布示意图。该光纤为环形光纤,长周期光纤光栅可处于非弯折区域。例如,M个长周期光纤光栅可以设置在区域A、区域B、区域C和区域D中的任一个区域或任多个区域上。进一步,可选地,当非弯折区域比较小时,相邻两个长周期光纤光栅之间的距离可以比较小;例如,区域B和区域D比较小,则在区域B和区域D中设置的长周期光纤光栅中,相邻两个长周期光纤光栅之间的距离比较小。当非弯折区域比较长时,相邻两个长周期光纤光栅之间的距离可以较大;例如,在区域A和区域C中设置的长周期光纤光栅中,相邻两个长周期光纤光栅之间的距离可以比较大。需要说明的是,在区域A、区域B、区域C和区域D中,相邻两个长周期光纤光栅之间的距离也可以均是相等(图6b即是以长周期光纤光栅在各个区域均匀分布,且相邻两个长周期光纤光栅之间的距离在4个区域中都是相同的示例),本申请对此不做限定。

[0086] 本申请中,增益均衡单元可用于根据光纤的总衰减函数,对各个波长的光信号的增益中大于阈值的增益对应的光信号进行能量衰减。其中,阈值可以是掺杂的纤芯的本征增益谱中最小增益的值,或者也可以是设置的任意一个值。本申请中,增益均衡单元对光纤的增益谱进行均衡是通过把增益大的波长的光能量进行衰减,增益小的波长的光能量不进行衰减,进而达到增益均衡的效果。或者也可以理解为,增益均衡单元进行增益均衡的原理为:把各波长的光信号分开,分别对不同波长的光信号进行不同的衰减,使增益大的波长的

光信号对应大的衰减能量。

[0087] 光纤的总衰减函数可通过仿真或测试得到,如图7所示,为本申请提供的一种光纤的衰减曲线示意图。该光纤的衰减曲线是基于图1b的增益谱设计得到的,可表示不同波长与衰减能量之间的分布关系。从图7可以看出,波长在1530nm和1555nm的衰减能量较大,当1530nm和1555nm波长的光信号经过应用该光纤的光放大器后,被衰减的能量较大,从而实现各波长的光信号的增益均衡。

[0088] 在一种可能的实现方式中,M个长周期光纤光栅中每个长周期光纤光栅的衰减函数与光纤的总衰减函数的函数相同,且M个长周期光纤光栅的衰减幅度之和等于光纤的总衰减函数的幅度。

[0089] 如下示例性地示出两种M个长周期光纤光栅的衰减幅度之和等于光纤的总衰减函数的幅度的实现方式。

[0090] 实现方式一,M个长周期光纤光栅中每个长周期光纤光栅的衰减幅度等于光纤的总衰减函数的幅度/M。

[0091] 也可以理解为,将光纤的总衰减函数的幅度均匀的分为M份,可参阅图8所示出的总衰减函数与长周期光纤光栅的衰减函数、以及总衰减函数的幅度与长周期光纤光栅的衰减幅度之间的关系示意图。进一步,可结合上述图5a,若光纤的总衰减函数为 $L_{\text{loss}}(\lambda)$ ,则M个长周期光纤光栅中每个长周期光纤光栅的衰减函数也均为 $L_{\text{loss}}(\lambda)$ ,每个长周期光纤光栅的衰减幅度为 $1/M$ 。

[0092] 实现方式二,M个长周期光纤光栅中每个长周期光纤光栅的衰减幅度等于总衰减函数的幅度\*小于1的值,即将总衰减函数的幅度按一定的比例分为M份。

[0093] 示例性地,以 $M=4$ 为例,可将总衰减函数的幅度分为1:2:4:1,在四个长周期光纤光栅中,四个长周期光纤光栅的衰减函数与光纤的总衰减函数相同,其中,第一个长周期光纤光栅的幅度为总衰减函数的幅度\* $1/8$ ,第二长周期光纤光栅的幅度为总衰减函数的幅度\* $2/8$ ,第三个长周期光纤光栅的幅度为总衰减函数的幅度\* $4/8$ ,第四个长周期光纤光栅的幅度为总衰减函数的幅度\* $1/8$ 。

[0094] 通过上述M个长周期光纤光栅,可将总衰减函数分为M份,并分散分布到掺杂稀土的纤芯的一定长度内,构成了本申请中的增益均衡单元,从而实现分散式对应用该光纤的光放大器的增益进行平坦化。

[0095] 进一步,可选地,为了防止放大后的光信号反射至起始位置之前的纤芯的区域上,增益均衡单元对衰减能量的耗散方向也有要求。在一种可能的实现方式中,增益均衡单元可用于向包层方向(可参见图5a)辐射(或称为逸散)衰减能量,剩余的光信号沿光纤的正方向(即垂直于包层的方向)传输。示例性地,可通过倾斜的长周期光纤光栅实现向包层方向辐射衰减能量。也就是说,增益均衡单元可以是M个倾斜的长周期光纤光栅。

[0096] 基于上述描述的光纤的结构和功能原理,本申请还可以提供一种光放大器。该光放大器可以包括至少一级放大结构,至少一级放大结构中的每级放大结构包括上述光纤、合波器、第一光选择器、泵浦源和第二光选择器。其中,光纤可以是掺铒光纤(EDF),EDF是光放大器的主体;第一光选择器用于接收各波长的光信号,并向合波器传输各波长的光信号。泵浦源用于发射泵浦光,即用于向EDF提供能量,主要是向EDF中的铒离子提供能量,使铒离子吸收能量后从基态跃迁到亚稳态。合波器也可称为波分复用器,用于将泵浦光和接

收到的各波长的光信号合成一路合波,并将合波耦合进光纤;第二光选择器用于将来自光纤的放大且增益均衡后的各波长的光信号输出。当然,光放大器还可以包括其他器件,本申请对此不做限定。也就是说,具有光放大功能的装置中均可以采用上述实施例中提供的光纤。

[0097] 本申请中,第一光选择器和第二光选择器还用于隔离放大后的光信号的反向传播。也可以理解为,第一光选择器还可用于隔离光纤因自发辐射放大的光信号的反向传播。第二光选择器可用于将放大且增益均衡后的各波长的光信号输出,还可用于防止下一跨段的光信号的反向反射。进一步,可选地,第一光选择器和第二光选择器还可用于隔离噪声。

[0098] 在一种可能的实现方式中,第一光选择器和第二光选择器可以是光隔离器(Isolator),光隔离器是一种单向光传输器件,可以抑制光的来回反射,从而可保证光放大器稳定工作。

[0099] 在另一种可能的实现方式中,第一光选择器和第二光选择器也可以光纤环形器,光纤环形器是一种多端口非互易光学器件,光只能沿一个方向传播。如图9所示,为本申请提供的一种光纤环形器的结构示意图。若光从端口1输入,则从端口2输出;若光从端口2输入,则从端口3输出,其输出损耗都很小。若光从端口2输入时,从端口1输出时损耗很大,同样光从端口3输入时,从端口1或端口2中输出时损耗很大。

[0100] 如图10a所示,为本申请提供的一种光放大器的结构示意图。该光放大器包括一级放大结构,该放大结构包括上述光纤,合波器、第一光选择器、泵浦源和第二光选择器,其中,第一光选择器和第二光选择器以光隔离器为例,各结构的功能和原理可参见前述相关内容介绍,此处不再重复赘述。

[0101] 如图10b所示,为本申请提供的另一种光放大器的结构示意图。该光放大器的结构以包括两级放大结构为例,即光放大器包括S1级放大结构和S2级放大结构,S1级放大结构和S2级放大结构之间可通过光波导连接,光波导包括但不限于光纤。S1级放大结构与S2级放大结构中各结构的功能和原理的介绍可参见前述内容的介绍。

[0102] 需要说明的是,S1级放大结构中包括的长周期光纤光栅的数量可以与S2级放大结构中包括的长周期光纤光栅的数量相同,也可以不相同,本申请对此不做限定。另外,“至少一级”是指一级或者多级,“多级”是指两级或两级以上。

[0103] 基于上述光放大器,掺杂稀土的纤芯可以对各波长的光信号分别进行放大,放大的光信号经过增益均衡单元时,增益均衡单元可以对各波长的光信号的增益进行均衡(亦称为平坦化)。如此,在该光放大器中,不需要引入新的器件来均衡各波长的光信号,从而可在不增加光放大器的噪声的情况下,实现对各波长的放大后的光信号的增益进行均衡。也就是说,在光放大器噪声比较低的情况下,该光放大器可以级联较多级的放大结构,实现较大的放大作用。

[0104] 采用上述图10a或图10b所示的光放大器,可以得到增益平坦的增益谱且光放大器的噪声较低。以图10a所示的光放大器为EDFA、增益均衡单元包括10个长周期光纤光栅、预设的吸收总量为50dB为例,根据预设的吸收总量和EDFA的吸收谱中最大吸收峰对应的吸收系数和对应的预设的吸收总量可确定出长周期光纤光栅在掺杂稀土的纤芯上的起始位置,即 $L_0 \approx 0.6\text{m}$ ,通过模拟可分别得到不同波长的增益分布关系(如图11a),以及不同波长的噪声的分布关系(如图11b)。

[0105] 由上述图11a可以看出,通过本申请的EDFA可以实现对各波长的光信号进行增益均衡;由上述图11b可以看出,当EDFA的增益从25dB下降到19dB,NF增大0.25dB。因此,采用本申请中的光放大器,可以实现在不增加噪声的情况下,实现对各波长的光信号的增益平坦。

[0106] 基于上述描述的光放大器的结构和功能原理,本申请还可以提供一种光通信系统。如图12所示,为本申请提供的一种光通信系统的架构示意图。该光通信系统可以包括光放大器、发射器和接收器。发射器用于向光放大器发射各波长的光信号;接收器用于接收来自光放大器输出的放大且增益均衡后的各波长的光信号,并将放大且增益均衡后的各波长的光信号转为电信号;光放大器的功能和可能的实现方式可参见上述相关描述,此处不再重复赘述。

[0107] 需要说明的是,光通信系统中在发射器和接收器之间可以包括两个或两个以上的光放大器,图12仅是以一个光放大器示例性地说明。

[0108] 在一种可能的实现方式中,发射器可包括光源,光源可用于发射不同波长的光信号。示例性地,光源可以是激光器,该激光器可以发射波长范围在C波段和L波段之间的光信号。

[0109] 本申请中,光放大器在WDM通信系统中可以作为前置放大器(pre-amplifier)、线路放大器(line-amplifier)或功率放大器(power-amplifier)。作为前置放大器,一般要求噪声系数很小,对输出功率没有太大的要求,信号输入功率约为-40dBm。作为线路放大器,可以直接插入到光纤传输链路中作为光中继放大器,省去了电中继器的光/电/光转换过程,直接放大光信号,以补偿传输线路损耗,延长中继距离。一般要求比较小的噪声指数,较大的输出光功率。作为功率放大器,对噪声系数、增益要求并不是很高,但要求放大后的光信号,有较大的输出功率。

[0110] 在本申请的各个实施例中,如果没有特殊说明以及逻辑冲突,不同的实施例之间的术语和/或描述具有一致性、且可以相互引用,不同的实施例中的技术特征根据其内在的逻辑关系可以组合形成新的实施例。

[0111] 可以理解的是,在本申请中涉及的各种数字编号仅为描述方便进行的区分,并不用来限制本申请的实施例的范围。上述各过程的序号的大小并不意味着执行顺序的先后,各过程的执行顺序应以其功能和内在逻辑确定。术语“第一”、“第二”等是用于区别类似的对象,而不必用于描述特定的顺序或先后次序。此外,术语“包括”和“具有”以及他们的任何变形,意图在于覆盖不排他的包含,例如,包含了一系列步骤或单元。方法、系统、产品或设备不必限于清楚地列出的那些步骤或单元,而是可包括没有清楚地列出的或对于这些过程、方法、产品或设备固有的其它步骤或单元。

[0112] 尽管结合具体特征及其实施例对本申请进行了描述,显而易见的,在不脱离本申请的精神和范围的情况下,可对其进行各种修改和组合。相应地,本说明书和附图仅仅是所附权利要求所界定的方案进行示例性说明,且视为已覆盖本申请范围内的任意和所有修改、变化、组合或等同物。

[0113] 显然,本领域的技术人员可以对本申请进行各种改动和变型而不脱离本发明的精神和范围。这样,倘若本申请实施例的这些修改和变型属于本申请权利要求及其等同技术的范围之内,则本申请也意图包含这些改动和变型在内。

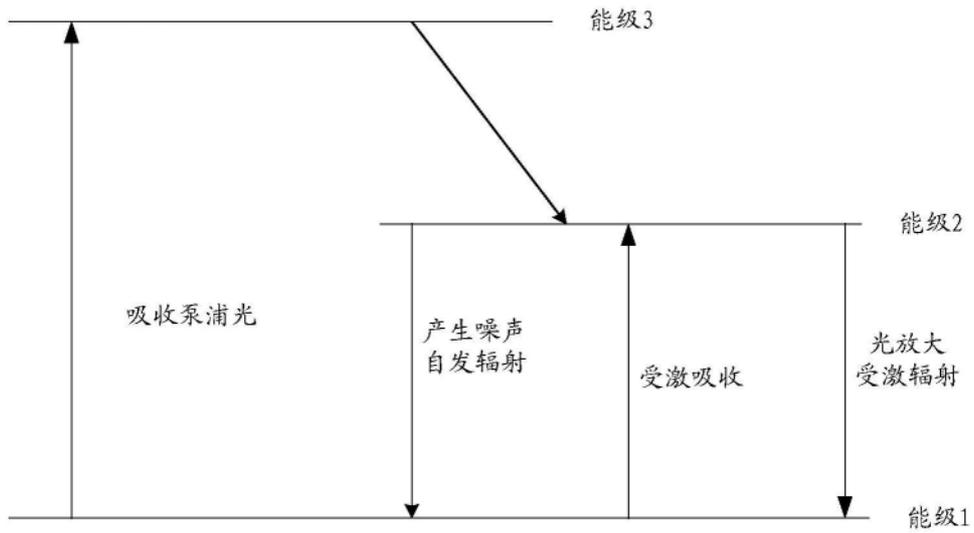


图1a

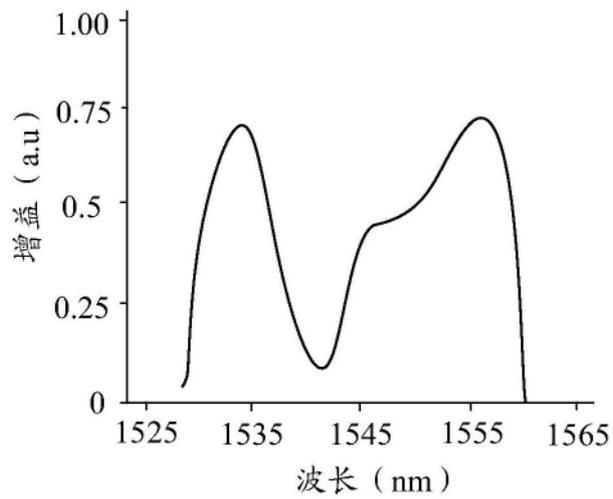


图1b

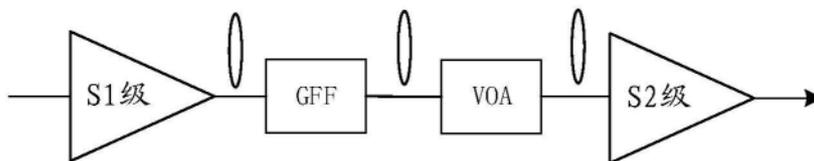


图1c

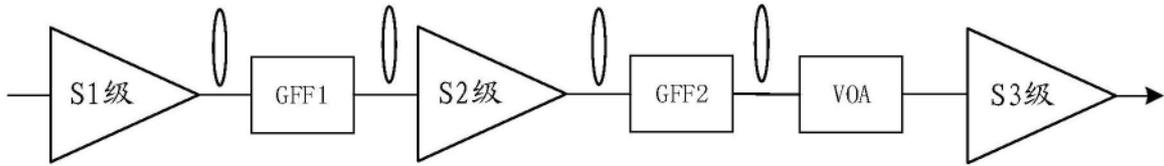


图1d

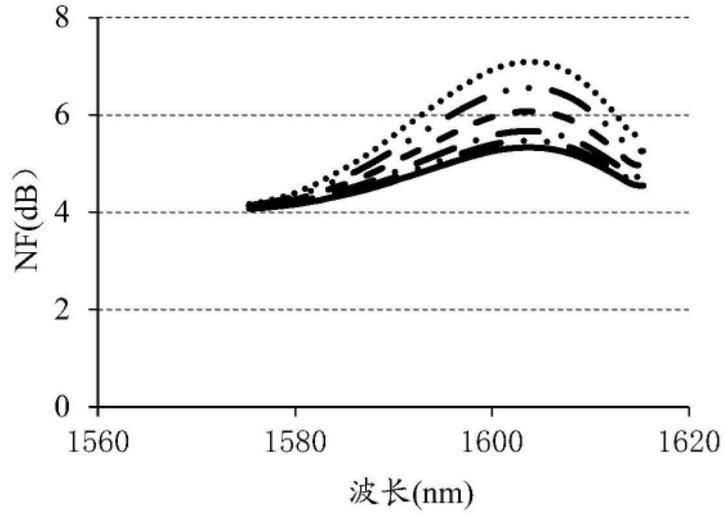


图2a

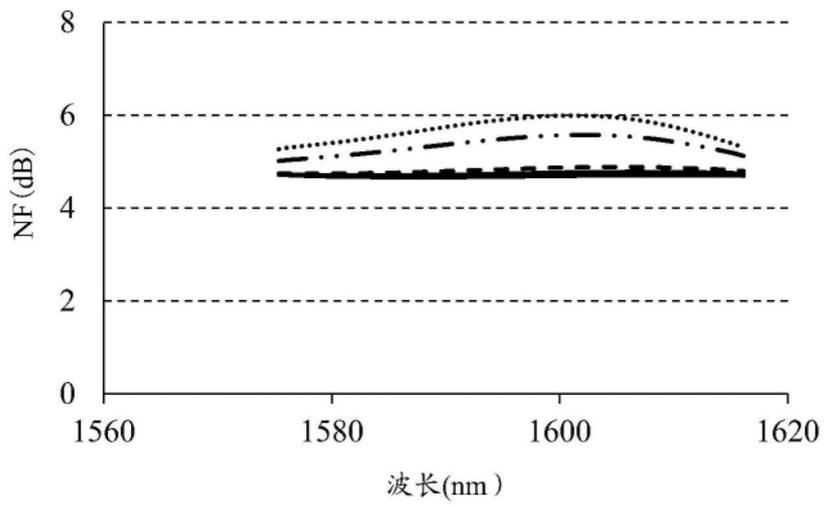


图2b

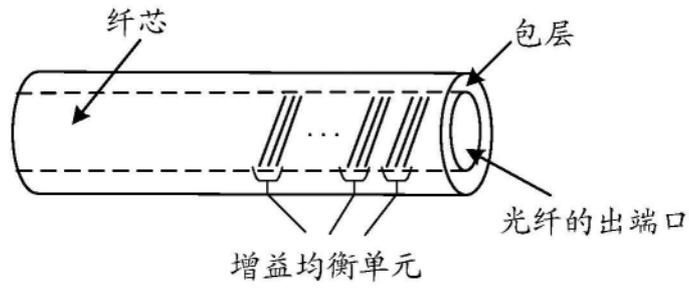


图3

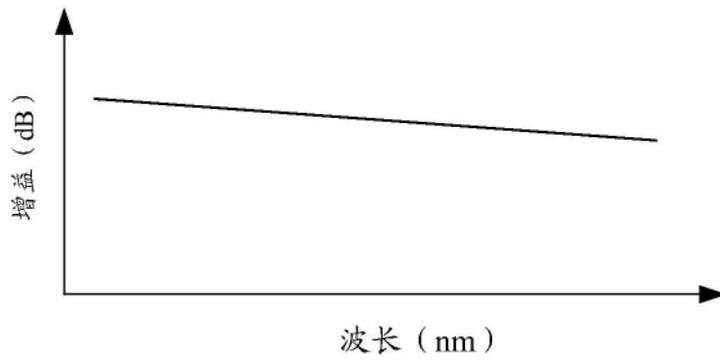


图4

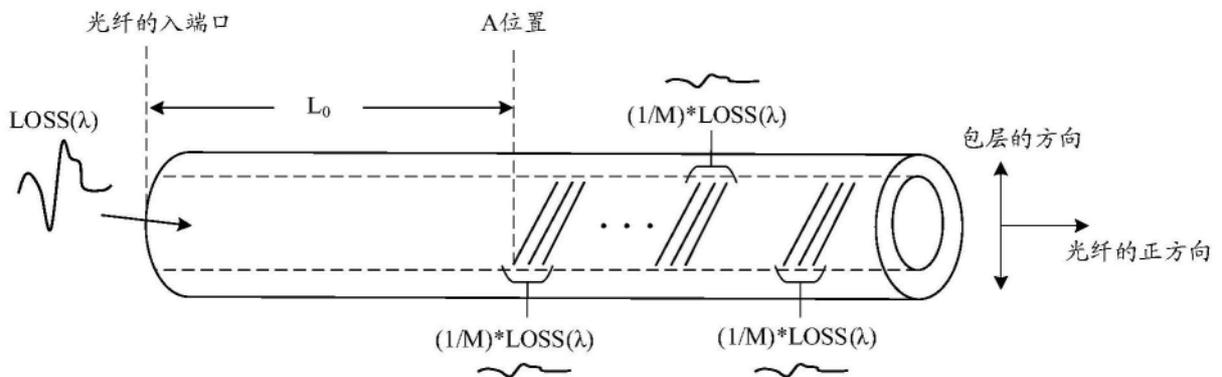


图5a

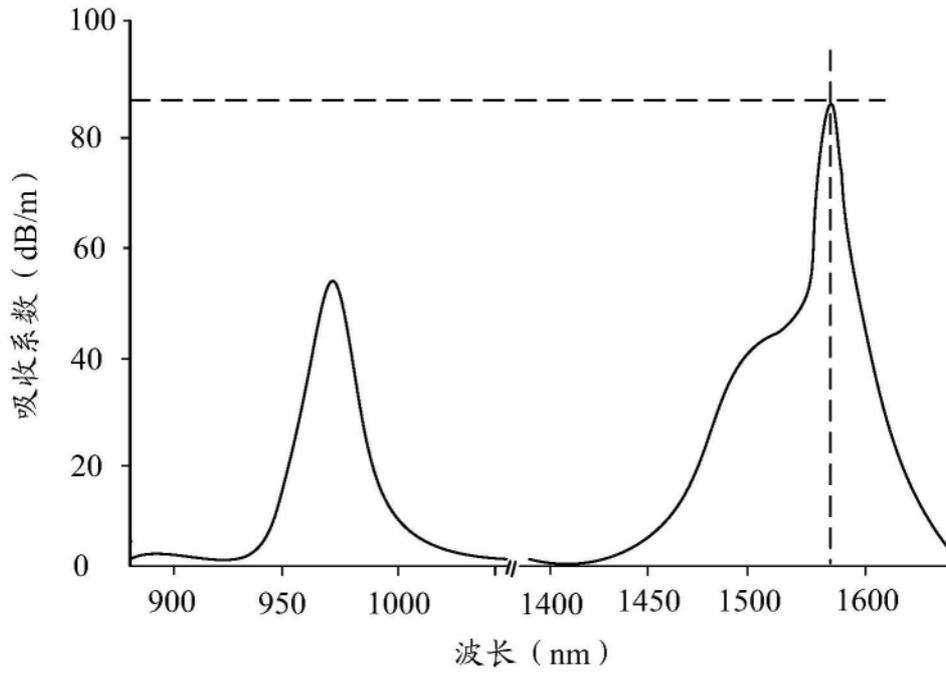


图5b

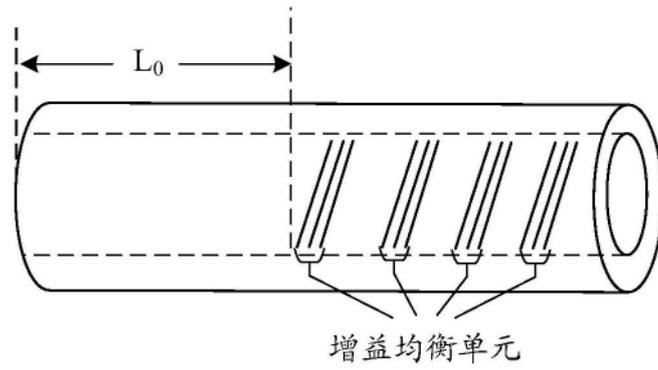


图6a

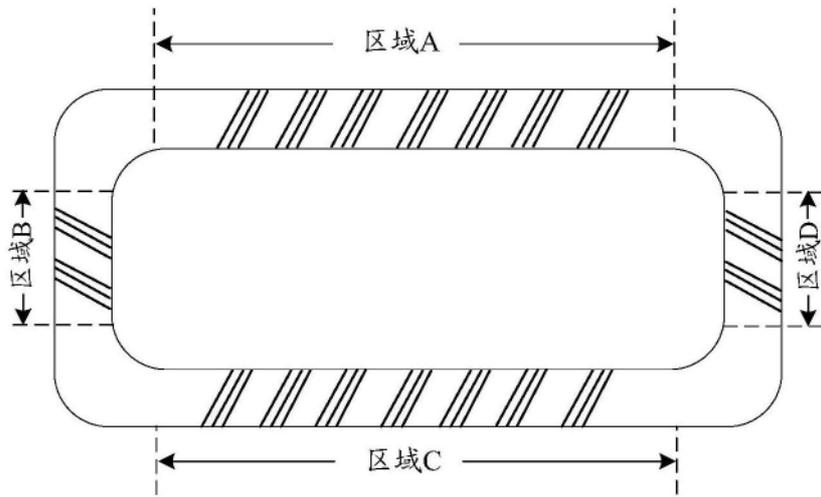


图6b

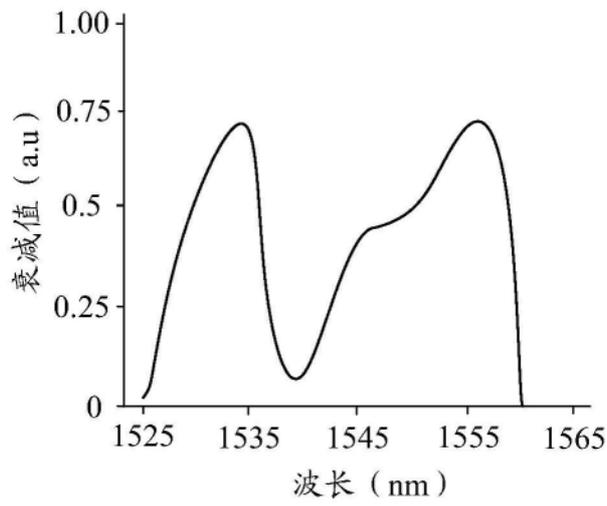


图7

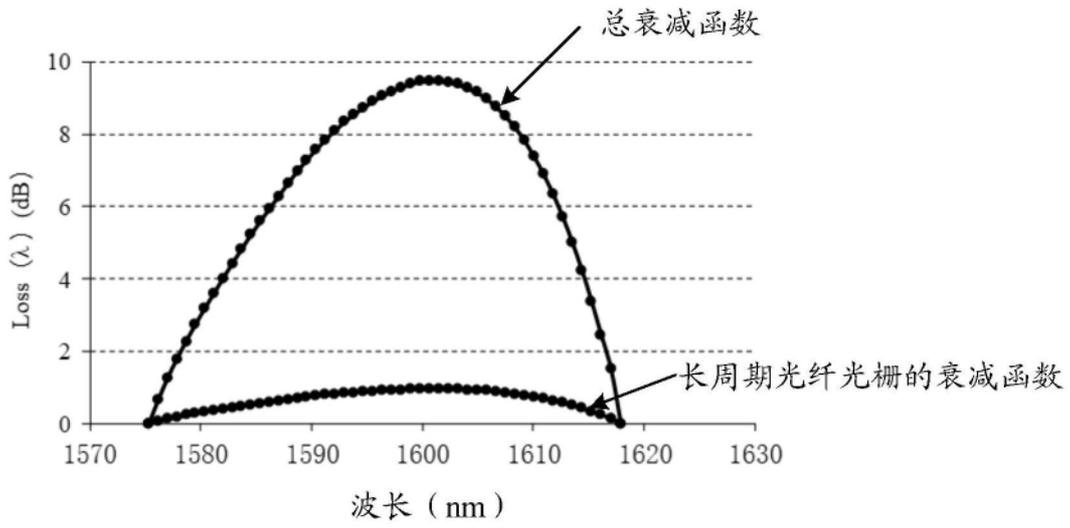


图8

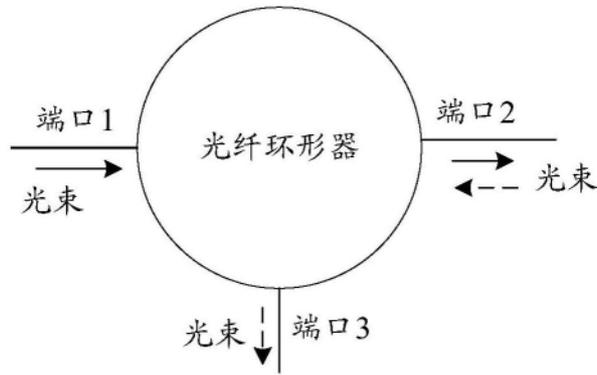


图9

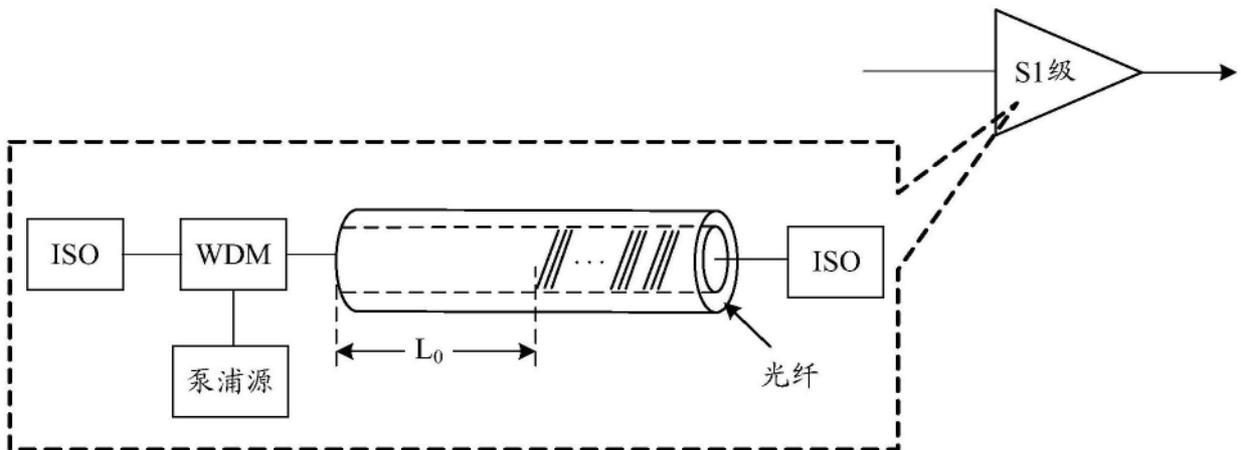


图10a

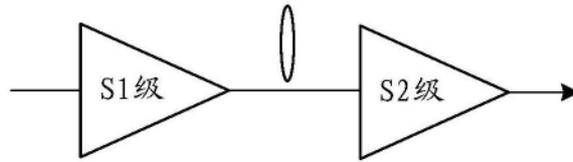


图10b

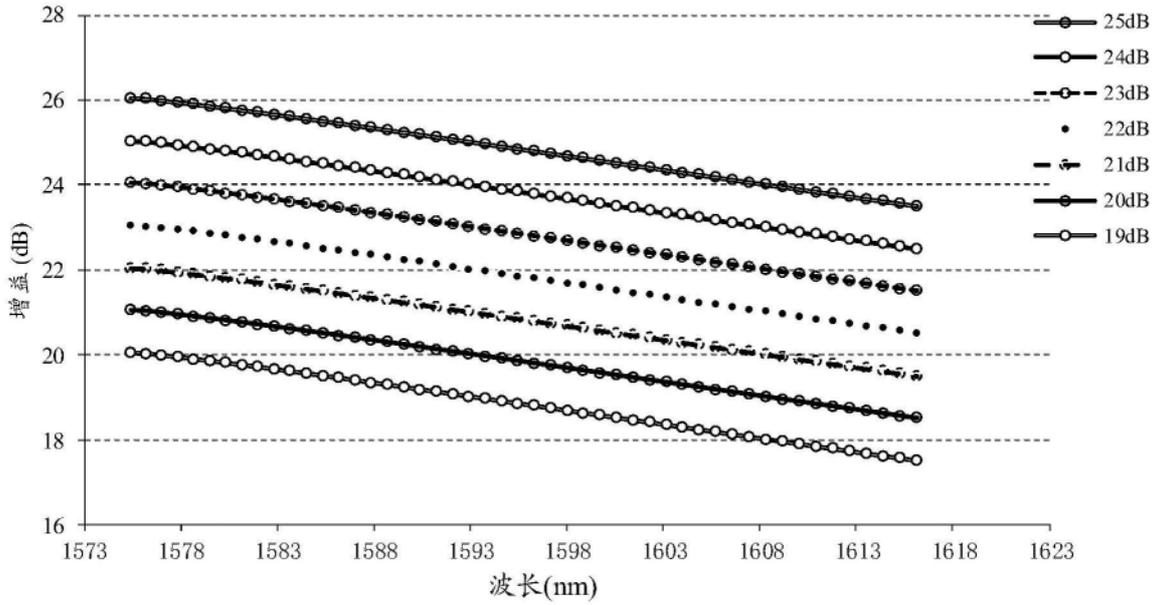


图11a

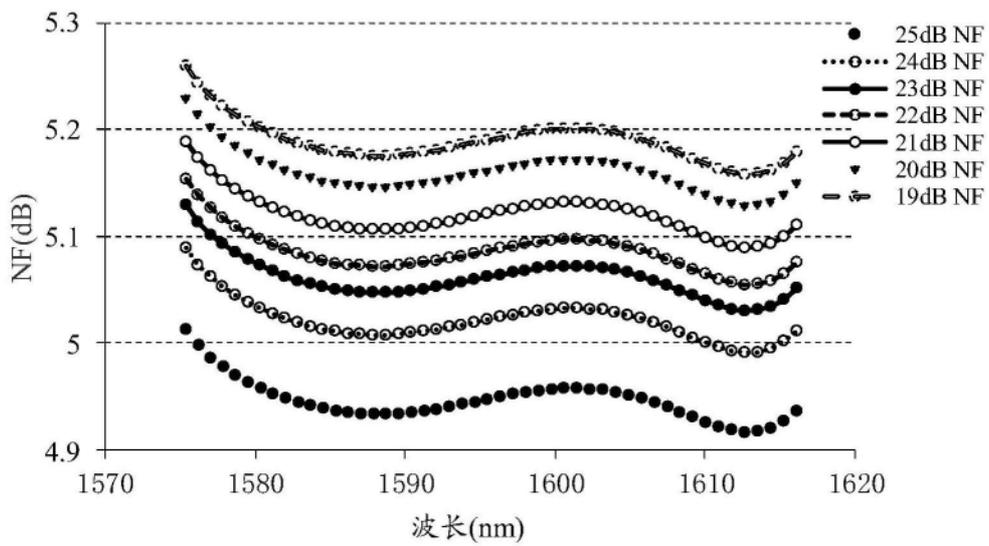


图11b

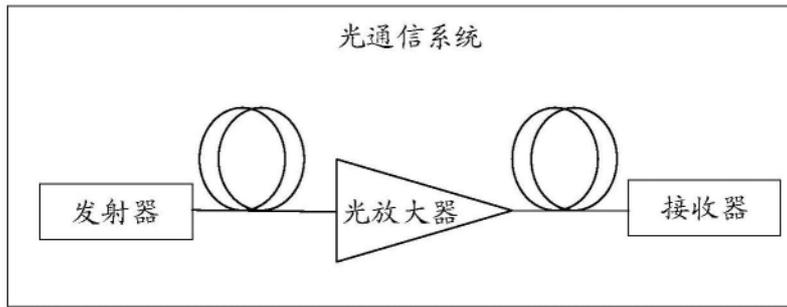


图12