

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.

G02F 1/35 (2006.01)

G02F 1/37 (2006.01)

H04J 14/02 (2006.01)



[12] 发明专利说明书

专利号 ZL 200410068239.9

[45] 授权公告日 2007 年 8 月 1 日

[11] 授权公告号 CN 1329773C

[22] 申请日 2004.8.25

[21] 申请号 200410068239.9

[30] 优先权

[32] 2003.8.26 [33] JP [31] 301475/2003

[73] 专利权人 冲电气工业株式会社

地址 日本东京

[72] 发明人 上条健 徐长青

[56] 参考文献

EP1008898A1 2000.6.14

US6529314B1 2003.3.4

US6459525B1 2002.10.1

审查员 任志伟

[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 曲 瑞

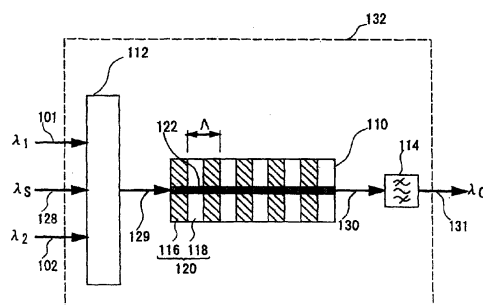
权利要求书 3 页 说明书 25 页 附图 7 页

[54] 发明名称

波长转换元件及其使用方法

[57] 摘要

本发明提出一种波长转换元件及其使用方法。其中波长转换元件可将泵浦光的波长设定为比光通信带内多个信号光的波长和多个转换光的波长更长或更短的波长。波长 λ_1 为 $1.51 \mu\text{m}$ 的第一泵浦光，波长 λ_2 为 $1.57 \mu\text{m}$ 的第二泵浦光和波长 λ_s 为 $1.55 \mu\text{m}$ 的信号光在多路复用器中复用，并且作为入射光引入波长转换元件的光波导中。在光波导中，通过波长 λ_1 为 $1.51 \mu\text{m}$ 的第一泵浦光与波长 λ_2 为 $1.57 \mu\text{m}$ 的第二泵浦光的 SFG 产生波长 λ_{SF} 为 $0.77 \mu\text{m}$ 的 SF 光，通过 SF 光与信号光的 DFG 将信号光波长转换成 DF 光(波长 $1.53 \mu\text{m}$)，并且输出该 DF 光作为转换光(波长 λ_c 为 $1.53 \mu\text{m}$)。



1、一种具有周期性结构、用于实现准相位匹配的波长转换元件，其中所述周期 Λ 被设定为满足下面公式（1），（2），（3）和（4）的值：

$$(2\pi/\lambda_{SF})n_{SF} - (2\pi/\lambda_1)n_1 - (2\pi/\lambda_2)n_2 = 2\pi/\Lambda \quad (1)$$

$$(2\pi/\lambda_{SF})n_{SF} - (2\pi/\lambda_S)n_S - (2\pi/\lambda_C)n_C = 2\pi/\Lambda \quad (2)$$

$$1/\lambda_{SF} = 1/\lambda_1 + 1/\lambda_2 \quad (3)$$

$$1/\lambda_{SF} = 1/\lambda_S + 1/\lambda_C \quad (4),$$

其中：

λ_1 为输入到波长转换元件中的第一泵浦光的波长；

λ_2 为输入到波长转换元件中的第二泵浦光的波长；

λ_S 为输入到波长转换元件中的信号光的波长；

λ_C 为输入到波长转换元件中的转换光的波长；

λ_{SF} 为第一泵浦光与第二泵浦光的合频光的波长；

n_{SF} 为波长转换元件对第一泵浦光与第二泵浦光的合频光的折射率；

n_1 为波长转换元件对第一泵浦光的折射率；

n_2 是波长转换元件对第二泵浦光的折射率；

n_S 为波长转换元件对信号光的折射率；以及

n_C 为波长转换元件对转换光的折射率。

2、根据权利要求1所述的波长转换元件，其中第一泵浦光的波长 λ_1 、第二泵浦光的波长 λ_2 、信号光的波长 λ_S 和转换光的波长 λ_C 之间满足下式（5）和（6）所表示的关系：

$$\lambda_1 < \lambda_S < \lambda_2 \quad (5)$$

$$\lambda_1 < \lambda_C < \lambda_2 \quad (6)$$

3、一种使用波长转换元件的方法，其中波长为 λ_1 的第一泵浦光、波长为 λ_2 的第二泵浦光和波长为 λ_S 的信号光被输入到如权利要求1所述的波长转换元件中，并且从中输出波长为 λ_C 的转换光。

4、一种具有周期性结构、用于实现准相位匹配的波长转换元件，其中所述周期 Λ 被设定为满足下面公式(7)，(8)，(9)和(10)的值：

$$(2\pi/\lambda_{SF})n_{SF} - (2\pi/\lambda_{2j-1})n_{2j-1} - (2\pi/\lambda_{2j})n_{2j} = 2\pi/\Lambda \quad (7)$$

$$(2\pi/\lambda_{SF})n_{SF} - (2\pi/\lambda_S)n_S - (2\pi/\lambda_C)n_C = 2\pi/\Lambda \quad (8)$$

$$1/\lambda_{SF} = 1/\lambda_{2j-1} + 1/\lambda_{2j} \quad (9)$$

$$1/\lambda_{SF} = 1/\lambda_S + 1/\lambda_C \quad (10)$$

其中：

λ_{2j-1} 为输入到波长转换元件中的第(2j-1)个泵浦光的波长；

λ_{2j} 为输入到波长转换元件中的第2j个泵浦光的波长；

λ_S 为输入到波长转换元件中的信号光的波长；

λ_C 为输入到波长转换元件中的转换光的波长；

λ_{SF} 为第(2j-1)个泵浦光与第2j个泵浦光的合频光的波长；

n_{SF} 为波长转换元件对第(2j-1)个泵浦光与第2j个泵浦光的合频光的折射率；

n_{2j-1} 为波长转换元件对第(2j-1)个泵浦光的折射率；

n_{2j} 是波长转换元件对第2j个泵浦光的折射率；

n_S 为波长转换元件对波长为 λ_S 的信号光的折射率；以及

n_C 为波长转换元件对转换光的折射率；以及

j 为从1到N的自然数，N为大于等于2的自然数。

5、根据权利要求4所述的波长转换元件，其中第(2N-1)个泵浦光的波长 λ_{2N-1} 、第(2N-3)个泵浦光的波长 λ_{2N-3} 、第三泵浦光的波长 λ_3 、第一泵浦光的波长 λ_1 、第二泵浦光的波长 λ_2 、第四泵浦光的波长 λ_4 、第(2N-2)个泵浦光的波长 λ_{2N-2} 、第2N个泵浦光的波长 λ_{2N} 、信号光的波长 λ_S 和转换光的波长 λ_C 之间满足下式(11)，(12)和(13)所表示的关系：

$$\lambda_{2N-1} < \lambda_{2N-3} < \dots < \lambda_3 < \lambda_1 < \lambda_2 < \lambda_4 < \dots < \lambda_{2N-2} < \lambda_{2N} \quad (11)$$

$$\lambda_1 < \lambda_S < \lambda_2 \quad (12)$$

$$\lambda_1 < \lambda_C < \lambda_2 \quad (13)$$

6、一种使用波长转换元件的方法，其中波长为 λ_{2N-1} 的第 $(2N-1)$ 个泵浦光、波长为 λ_{2N-3} 的第 $(2N-3)$ 个泵浦光、...、波长为 λ_3 的第三泵浦光、波长 λ_1 的第一泵浦光、波长为 λ_2 的第二泵浦光、波长为 λ_4 的第四泵浦光、...、波长为 λ_{2N-2} 的第 $(2N-2)$ 个泵浦光、波长为 λ_{2N} 的第 $2N$ 个泵浦光和波长为 λ_s 的信号光被输入到如权利要求4所述的波长转换元件，并且从中输出波长为 λ_c 的转换光。

波长转换元件及其使用方法

技术领域

本发明涉及一种用于波长分割多路复用光通信等中的波长转换元件，及这种波长转换元件的使用方法。

背景技术

已经对构造传输速度为 1Tbit/s 或更高的大容量光通信网络的多种方法进行了研究，其中波长分割多路复用（WDM）技术引起广泛关注。波长转换装置是实现 WDM 光通信网络必不可少的。

例如，如果交叉连接的光节点中采用波长转换装置，那么可避免信道之间冲突，并且波长可再次使用。其他优点包括网络控制和网络改进（升级）容易，这样就可以使用新通信带。

准相位匹配（QPM, Quasi-Phase Match）波长转换元件（在下面有时称作“QPM-型波长转换元件”）是使用光波导的元件，并且通过光波导中形成的周期性畴反转结构实现 QPM 来执行波长转换，使用准相位匹配波长转换元件作为构成上述波长转换装置的元件。使用光波导是由于在光波导中传播的光，可以传输必要的距离，同时保持高能量密度。下面有时将 QPM-型波长转换元件中形成的光波导称作 QPM 光波导。

周期性畴反转结构是一种通过周期性地排列多个具有反转铁电自发极化畴组成的结构，如下面所述。这是之所以还称作周期性极化反转结构的原因。

此处，为了便于说明，用作载有光通信中所传播信号的载波的光称作信号光，用于与信号光非线性相互作用，并且转换信号光波长的光称作泵浦光，波长经过转换的信号光称作转换光。

非线性相互作用光（例如信号光和泵浦光）的能量密度越高，非

线性相互作用长度（相互作用长度）越长，则非线性光学效应越强。因此，产生出在光可以通过必要距离传播的波导中实现非线性光学效应的结构，同时保持高能量密度，有利于增大非线性光学效应的强度。

另外，将非线性相互作用光（例如信号光和泵浦光）设计成以最低阶模式（基模）在光波导中一起传播也是有益的。为此，要求非线性相互作用光的波长近似相等。这是由于，当非线性相互作用光之间的波长差较大时，如果设计成具有较短波长的光在光波导中以最低阶模式传播，那么不可能传导具有较长波长的光，如果设计成使具有较长波长的光以最低阶模式在光波导中传播，则不可能传导具有较短波长的光。

下面描述上述类型的传统波长转换元件的一个例子。

提出一种使用 QPM 波长转换元件通过差频生成（DFG）来转换信号光波长的方法（例如，参见 C. Q. Xu 等，Appl. Phys. Lett. Vol. 63, p. 3559（1993）），其中该 QPM 波长转换元件在光波导中形成周期性畴反转结构。因此，导致泵浦光与信号光的差频产生，并且所得到的差频光（下面有时称作“DF 光”）作为转换光。这种波长转换中使用的泵浦光的波长大约为信号光波长或者转换光波长的一半。

另外，报道了一种使用 QPM-型波长转换元件进行信号光波长转换的方法，在 QPM-型波长转换元件中在光波导中形成周期性畴反转结构，并且以级联（cascade）方式实现二阶非线性光学效应（例如，参见 M. H. Chou 等，IEEE Photonic Tech. Lett. Vol. 11, p. 653（1999））。因此，通过这种方法，使用泵浦光作为基波长光，并且该光通过二次谐波产生（SHG）波长转换成波长为基波光一半的二次谐波光（下面有时将其称作“SH 光”）。另外，有一种通过具有一半波长的二次谐波光与信号光同时 DFG 而将信号光转换成具有新波长的转换光（DF 光）的方法。在这种波长转换方法中，泵浦光的波长几乎等于信号光波长和转换光（DF 光）波长。

为了解释本发明要解决的问题，首先，将参照传统的波长转换技术描述 QPM-型波长转换元件及其工作原理。

下面将参照图 1 描述通过 DFG 来转换信号光波长的方法。图 1 为用于说明传统波长转换装置 32 的示意模型，其中波长转换装置 32 由波长转换元件 10，多路复用器 12 和窄带滤波器 14 组成。在该模型中，在各个位置中用阴影显示出存在光波导或畴。从而，阴影不表示三维结构的剖面形状。另外，与图 1 类似，在随后的说明中参照的图 3 中，阴影用于相同目的，并且该阴影也不表示三维结构的剖面形状。

用于这种波长转换的波长转换元件 10 为 QPM-型波长转换元件，其中在光波导 22 中产生周期性畴反转结构 20。波长转换机制包括执行泵浦光（波长 λ_p ）与信号光（波长 λ_s ）的 DFG，并且采用所得到的 DF 光作为转换光（ λ_c ）。

在说明波长转换元件 10 的操作原理之前，将描述波长转换元件 10 的形成方法。下面将要解释的用于形成波长转换元件 10 的方法不仅适用于通过 DFG 转换信号光波长的波长转换元件 10，而且也适用于基于 QPM 形成类似的波长转换元件。

<形成波长转换元件的方法>

畴反转结构 20 由第一畴 16 和第二畴 18 组成。在第一畴 16 和第二畴 18 中，构成波长转换元件 10 基本材料的铁电晶体的自发极化方向彼此成 180° 角。例如，可使用 z-切割 LiNbO_3 基片作为构成波长转换元件的基材。在下面给出的说明中，除非另有说明，否则将 z-切割 LiNbO_3 基片视作铁电晶体物质。

这种 z-切割 LiNbO_3 基片是单畴晶体结构，其中自发极化方向设为垂直于表面。自发极化矢量远端一侧的平面有时称作+z 平面，有时将自发极化矢量的基端一侧称作-z 平面。

通过沿 LiNbO_3 基板的+z 方向周期性地反转畴而形成畴反转区域（第二畴）18。从而，周期性畴反转区域 20 由保持单畴晶体基片自发极化的畴（第一畴 16）和自发极化方向反转的畴（第二畴 18）组成。因此，第一畴 16 的自发极化方向是从-z 平面到+z 平面的方向，而第二畴 18 的自发极化方向是从+z 平面到-z 平面的方向。

由第一畴 16 和第二畴 18 形成的周期性结构的周期为 Λ 。通过使第一畴 16 的尺寸 d_1 等于第二畴 18 的尺寸 d_2 ，可使波长转换效率最大。因此，优选 $d_1 = d_2$ 且 $\Lambda = d_1 + d_2$ 。

众所周知，为了形成自发极化方向反转的区域，或者将 Ti 高温热扩散到 z-切割 LiNbO_3 基片自发极化方向将要反转的区域，或者向该区域施加高压。为了进行 Ti 高温热扩散，可通过真空沉积方法等在将要形成第二畴 18 的部分上形成 50nm 厚的 Ti 薄膜，然后可在 1000°C 温度下执行热扩散 10 小时。为了通过施加高压将自发极化方向反转，可在将要形成畴 18 的部分上形成电极，并且施加瞬时高压。

从而，在 z-切割 LiNbO_3 基片中形成的周期性反转结构上形成光波导 22。已知可通过使用苯甲酸作为交换源的 H^+ - Li^+ 离子交换方法（也称作质子交换方法）形成光波导。例如，可通过用金属掩模涂覆仅仅除了将要形成光波导 22 的区域以外的整个区域，在 200°C 的温度下浸入苯甲酸 2 小时，除去金属掩模或苯甲酸，并在 350°C 温度下在 Ar 气氛下退火 6 小时，形成光波导。

<波长转换元件的工作原理>

将参照图 1 描述通过 DFG 来转换信号光波长的波长转换元件的工作原理。 $0.77\mu\text{m}$ 波长 λ_p 的泵浦光 26 与 $1.55\mu\text{m}$ 波长 λ_s 的信号光 28 在多路复用器 12 中复用，并且作为入射光 29 引入波长转换元件 10 的 QPM 光波导 22 中。在 QPM 光波导 22 中，通过泵浦光 26 与信号光 28 的 DFG 产生 $1.53\mu\text{m}$ 波长 λ_c 的 DF 光。从而，通过多路复用 $0.77\mu\text{m}$ 波长 λ_p 的泵浦光 26、 $1.55\mu\text{m}$ 波长 λ_s 的信号光 28 和 $1.53\mu\text{m}$ 波长 λ_c 的 DF 光而得到的光作为输出光 30 从波长转换元件 10 的 QPM 光波导 22 被输出。

下面将参照图 2 描述上述波长转换过程。在图 2 中，以微米为单位的波长作为横坐标，以任意单位为单位的光强作为纵坐标。向上指箭头的始点位置表示泵浦光（波长 λ_p ）、信号光（波长 λ_s ）和波长为 λ_c 的 DF 光（转换光）的波长中心位置，箭头的长度正比于相应光强、

反映出相对关系。

在图 2 中用半圆形符号表示 $0.77\mu\text{m}$ 波长 λ_p 的泵浦光与 $1.55\mu\text{m}$ 波长 λ_s 的信号光，并用虚线连接它们。示意出通过非线性相互作用如泵浦光 26 与信号光 28 的 DFG，产生出 $1.53\mu\text{m}$ 波长 λ_c 的 DF 光。可以将该结果理解为通过 $1.77\mu\text{m}$ 波长 λ_p 的泵浦光 26， $1.55\mu\text{m}$ 波长 λ_s 的信号光 28 被转换成 $1.53\mu\text{m}$ 波长 λ_c 的转换光。

$1.53\mu\text{m}$ 波长 λ_c 的新光、即 DF 光，是通过将 $0.77\mu\text{m}$ 波长 λ_p 的泵浦光 26 与 $1.55\mu\text{m}$ 波长 λ_s 的信号光 28 导入波长转换元件 10 中产生的。从而，波长转换元件 10 的输出光 30 为通过将 $0.77\mu\text{m}$ 波长 λ_p 的泵浦光 26、 $1.55\mu\text{m}$ 波长 λ_s 的信号光 28 和波长 λ_c 为 $1.53\mu\text{m}$ 的 DF 光多路复用而得到的光。

输出光 30 通过窄带波长滤波器 14 滤波，并且仅提取出 $1.53\mu\text{m}$ 波长 λ_c 的 DF 光作为转换光 31。因此，波长 λ_s 为 $1.55\mu\text{m}$ 的信号光 28 通过包括多路复用器 12，波长转换元件 10 和窄带波长滤波器 14 的波长转换装置 32 后，被波长转换成具有 $1.53\mu\text{m}$ 波长 λ_c 的 DF 光，并转换成转换光 31。

这种波长转换中所使用的泵浦光波长 λ_p 为 $0.77\mu\text{m}$ ，信号光波长 λ_s 为 $1.55\mu\text{m}$ 。从而，泵浦光的波长大约为信号光的一半。不过，如上所述，难以设计出泵浦光和信号光都以最低阶模式传播的光波导。由此，难以增大从信号光到转换光的能量转换效率。提出一种通过引入二阶非线性光学效应的级联而执行信号光波长转换的方法。通过这种方法，可以使泵浦光的波长与信号光的波长几乎彼此相等。

下面将参照图 3 描述通过级联方式产生上述二阶非线性光学效应从而执行信号光波长转换的方法。通过这种方法，泵浦光视作基波光，通过 SHG 将其波长转换成波长为泵浦光波长一半的二次谐波光（SH 光）。同时，通过 SH 光与信号光的 DFG，信号光被转换成具有新波长的转换光（DF 光）。

$1.54\mu\text{m}$ 波长 λ_p 的泵浦光 56 与 $1.55\mu\text{m}$ 波长 λ_s 的信号光 58 在多路复用器 42 中复用，作为入射光 59 进入波长转换元件 40 的 QPM 光波

导 52 中。在 QPM 光波导 52 中，通过 $1.54\mu\text{m}$ 波长 λ_p 的泵浦光 56 的 SHG 产生 SH 光（波长 λ_{SH} 为 $0.77\mu\text{m}$ ），并且通过 SH 光与 $1.55\mu\text{m}$ 波长 λ_s 的信号光 58 的 DFG 产生 $1.53\mu\text{m}$ 波长 λ_c 的 DF 光。

从而，通过复用 $1.54\mu\text{m}$ 波长 λ_p 的泵浦光、 $1.55\mu\text{m}$ 波长 λ_s 的信号光、 $0.77\mu\text{m}$ 波长 λ_{SH} 的 SH 光得到 $1.53\mu\text{m}$ 波长 λ_c 的 DF 光，并且输出 $1.53\mu\text{m}$ 波长 λ_c 的 DF 光作为波长转换元件 40 的 QPM 光波导 52 的输出光 60。

下面将参照图 4 描述上述波长转换过程。在该图中，与图 2 相同，以微米为单位的波长作为图 4 中所示的横坐标，任意单位的光强作为纵坐标。此外，向上箭头的起点位置表示泵浦光（波长 λ_p ）、信号光（波长 λ_s ）、SH 光（波长 λ_{SH} ）和波长为 λ_c 的 DF 光（转换光）的波长中心位置，箭头的长度与相应光强成正比，反映出相对关系。

通过二次非线性光学效应由 $1.54\mu\text{m}$ 波长 λ_p 的泵浦光 56 产生 $0.77\mu\text{m}$ 波长 λ_{SH} 的二次谐波光。图 4 中表示出从表示 $1.54\mu\text{m}$ 波长 λ_p 的泵浦光 56 到 $0.77\mu\text{m}$ 波长 λ_{SH} 的 SH 光的箭头绘出的侧向箭头。

在图 4 中用半圆形符号和虚线表示通过 SHG 产生的 $0.77\mu\text{m}$ 波长 λ_{SH} 的 SH 光和 $1.55\mu\text{m}$ 波长 λ_s 的信号光 58。这就示意出通过非线性相互作用，如 SH 光与信号光 58 的 DFG 而产生 $1.53\mu\text{m}$ 波长 λ_c 的 DF 光的关系。可以将结果理解为，通过以级联方式进行非线性光学效应的 SHG 和 DFG，利用 SH 光和泵浦光 56 将 $1.55\mu\text{m}$ 波长 λ_s 的信号光 58 转换成 $1.53\mu\text{m}$ 波长 λ_c 的转换光。

通过将 $1.54\mu\text{m}$ 波长 λ_p 的泵浦光 56 与 $1.55\mu\text{m}$ 波长 λ_s 的信号光 58 引入波长转换元件 40 中，产生 DF 光，DF 光为具有 $1.53\mu\text{m}$ 波长 λ_c 的新光。从而，波长转换元件 40 的输出光 60 为通过复用 $1.54\mu\text{m}$ 波长 λ_p 的泵浦光 56、 $1.55\mu\text{m}$ 波长 λ_s 的信号光 58、 $0.77\mu\text{m}$ 波长 λ_{SH} 的 SH 光与 $1.53\mu\text{m}$ 波长 λ_c 的 DF 光而获得的光。

用窄带波长滤波器 44 将输出光 60 滤波，仅提取出 $1.53\mu\text{m}$ 波长 λ_c 的 DF 光作为转换光 61。因此，通过包括多路复用器 42，波长转换元件 40 和窄带波长滤波器 44 的波长转换装置 62 后， $1.55\mu\text{m}$ 波长 λ_s

的信号光 58 被波长转换成 $1.53\mu\text{m}$ 波长 λ_C 的 DF 光，并转换成转换光 61。

这种波长转换中所使用的泵浦光的波长 λ_P 为 $1.54\mu\text{m}$ ，信号光的波长 λ_S 为 $1.55\mu\text{m}$ 。从而，泵浦光的波长几乎等于信号光的波长。因此，易于设计出以最低阶模式传播 $1.54\mu\text{m}$ 波长 λ_P 的泵浦光 56 和 $1.55\mu\text{m}$ 波长 λ_S 的信号光 58 的光波导。

不过，如上所述，因为泵浦光的波长 λ_P 为 $1.54\mu\text{m}$ ，信号光的波长 λ_S 为 $1.55\mu\text{m}$ ，波长 λ_P 为 $1.54\mu\text{m}$ 的泵浦光在波长轴上的位置处于信号光（波长 λ_S 为 $1.55\mu\text{m}$ ）与转换光（波长 λ_C 为 $1.53\mu\text{m}$ ）之间。由此，如果该方法用于光通信，则泵浦光至少占有一个通信波长信道。

另一个问题是，正如已经提到的，如图 4 中明显表示出，信号光光谱与泵浦光光谱的中心波长仅差 $0.01\mu\text{m}$ （=10nm）。从而，光谱重叠的基本位置和光通信所必需的信道数量受到限制。

另外，如果泵浦光的功率为几十 mW，那么二阶非线性光学效应的波长转换效率（能量转换效率）最大为大约百分之几。因此，信号光转换成 DF 光的实际波长转换效率为大约一个百分点的十分之一，因为其是二次谐波产生效率（百分之几）与 DF 光转换效率（也是百分之几）的乘积。从而，如果使用引起二阶非线性光学效应的方法执行信号光的波长转换，则转换效率为大约一个百分点的十分之一，并且实际上小于信号光直接转换成 DF 光的方法的波长转换效率。

因此，本发明的第一个目的在于提供一种能以高波长转换效率转换信号光波长的波长转换元件。

另外，本发明的第二个目的在于提供一种波长转换元件，从而可将泵浦光的波长设为比光通信带中多个信号光和多个转换光的波长更长或更短，并且泵浦光的波长带可以设为与信号光和转换光的波长带分离。

本发明的第三目的在于提供一种使用上述波长转换元件的方法。

发明内容

为了实现上述目的，本发明提供第一波长转换元件，其是一种准相位匹配型波长转换元件，包括用于实现准相位匹配的极化反转结构，其中上述极化反转结构的周期 Λ 为满足下面的公式（1），（2），（3）和（4）的数值：

$$(2\pi/\lambda_{SF})n_{SF} - (2\pi/\lambda_1)n_1 - (2\pi/\lambda_2)n_2 = 2\pi/\Lambda \quad (1)$$

$$(2\pi/\lambda_{SF})n_{SF} - (2\pi/\lambda_S)n_S - (2\pi/\lambda_C)n_C = 2\pi/\Lambda \quad (2)$$

$$1/\lambda_{SF} = 1/\lambda_1 + 1/\lambda_2 \quad (3)$$

$$1/\lambda_{SF} = 1/\lambda_S + 1/\lambda_C \quad (4)$$

λ_1 为输入到波长转换元件的第一泵浦光的波长，

λ_2 为输入到波长转换元件的第二泵浦光的波长，

λ_S 为输入到波长转换元件的信号光的波长，

λ_C 为输入到波长转换元件的转换光的波长，

λ_{SF} 为第一泵浦光与第二泵浦光的合频光，

n_{SF} 为波长转换元件对第一泵浦光与第二泵浦光的合频光的折射率，

n_1 为波长转换元件对第一泵浦光的折射率，

n_2 是波长转换元件对第二泵浦光的折射率，

n_S 为波长转换元件对信号光的折射率，以及

n_C 为波长转换元件对转换光的折射率。

当使用根据本发明的第一波长转换元件时，优选第一泵浦光、第二泵浦光和信号光输入波长转换元件，从波长转换元件输出转换光。还优选第一泵浦光、第二泵浦光、信号光和转换光的波长 λ_1 ， λ_2 ， λ_S 和 λ_C 之间满足下式（5）和（6）所表示的关系：

$$\lambda_1 < \lambda_S < \lambda_2 \quad (5)$$

$$\lambda_1 < \lambda_C < \lambda_2 \quad (6)$$

另外，为了实现上述目的，本发明还提供第二波长转换元件，其是一种包括用于实现准相位匹配的极化反转结构的准相位匹配型波长转换元件，其中极化反转结构的周期 Λ 的值满足下式（7），（8），（9）和（10）：

$$(2\pi/\lambda_{SF})n_{SF} - (2\pi/\lambda_{2j-1})n_{2j-1} - (2\pi/\lambda_{2j})n_{2j} = 2\pi/\Lambda \quad (7)$$

$$(2\pi/\lambda_{SF})n_{SF} - (2\pi/\lambda_S)n_S - (2\pi/\lambda_C)n_C = 2\pi/\Lambda \quad (8)$$

$$1/\lambda_{SF} = 1/\lambda_{2j-1} + 1/\lambda_{2j} \quad (9)$$

$$1/\lambda_{SF} = 1/\lambda_S + 1/\lambda_C \quad (10)$$

λ_{2j-1} 为输入到波长转换元件的第 $(2j-1)$ 个泵浦光的波长,

λ_{2j} 为输入到波长转换元件的第 $2j$ 个泵浦光的波长,

λ_S 为输入到波长转换元件的信号光的波长,

λ_C 为输入到波长转换元件的转换光的波长,

λ_{SF} 为波长为 λ_{2j-1} 的第 $(2j-1)$ 个泵浦光与波长为 λ_{2j} 的第 $2j$ 个泵浦光的合频光的波长,

n_{SF} 为波长转换元件对波长为 λ_{2j-1} 的第 $(2j-1)$ 个泵浦光与波长为 λ_{2j} 的第 $2j$ 个泵浦光的合频光的折射率,

n_{2j-1} 为波长转换元件对波长为 λ_{2j-1} 的第 $(2j-1)$ 个泵浦光的折射率,

n_{2j} 是波长转换元件对波长为 λ_{2j} 的第 $2j$ 个泵浦光的折射率,

n_S 为波长转换元件对波长为 λ_S 的信号光的折射率,

n_C 为波长转换元件对波长为 λ_C 的转换光的折射率, 以及

j 为从 1 到 N 的自然数, N 为 2 或更大的自然数。

当使用根据本发明的第二波长转换元件时, 优选将 $2N$ 个泵浦光和信号光输入到波长转换元件, 并且从波长转换元件输出转换光。还优选具有上述不同波长的 $2N$ 种波长为 λ_i 的第 i 个泵浦光 ($i=1, 2, \dots, 2N$; N 为 2 或更大的自然数), 信号光和转换光的波长 $\lambda_{2N-1}, \lambda_{2N-3}, \dots, \lambda_3, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_4, \dots, \lambda_{2N-2}, \lambda_{2N}, \lambda_S$ 和 λ_C 满足下式 (11), (12) 和 (13) 所表示的关系:

$$\lambda_{2N-1} < \lambda_{2N-3} < \dots < \lambda_3 < \lambda_1 < \lambda_2 < \lambda_4 < \dots < \lambda_{2N-2} < \lambda_{2N} \quad (11)$$

$$\lambda_1 < \lambda_S < \lambda_2 \quad (12)$$

$$\lambda_1 < \lambda_C < \lambda_2 \quad (13)$$

根据本发明的第一波长转换元件具有通过波长为 λ_1 的第一泵浦光与波长为 λ_2 的第二泵浦光的合频产生 (SFG) 而生成合频光 (以下

有时称作“SF”光)以及通过 SF 光与波长为 λ_S 的信号光的 DFG 而产生 DF 光(波长 λ_C)作为转换光的功能。另外,输入波长转换元件的第一泵浦光的波长 λ_1 、第二泵浦光的波长 λ_2 和信号光的波长 λ_S 设定为满足上述公式(1),(2),(3)和(4)。第一泵浦光,第二泵浦光和信号光设定为具有几乎相同的波长。从而,易于将这三类光设计成以最低阶模式通过构成波长转换元件的光波导传播。结果,实现高效率转换。

另外,根据本发明的第二波长转换元件具有产生波长为 λ_{2j-1} 的第(2j-1)个泵浦光与波长为 λ_{2j} 的第2j个泵浦光的 SF 光(波长 λ_{SF}),和产生波长为 λ_{SF} 的 SF 光与波长为 λ_S 的信号光的 DF 光(波长 λ_C)作为转换光的功能。输入到第二波长转换元件的第(2j-1)个泵浦光的波长 λ_{2j-1} 、第2j个泵浦光的波长 λ_{2j} 和信号光的波长 λ_S 设为满足上述公式(7),(8),(9)和(10)。可以将第(2j-1)个泵浦光、第2j个泵浦光和信号光设为具有基本相同的波长。此处,j为从1到N的自然数,N为2或更大的自然数。从而,易于将这三类光设计成以最低阶模式通过构成波长转换元件的光波导传播。结果,实现高效率转换。

另外,在根据本发明的第一波长转换元件中,波长为 λ_1 的第一泵浦光、波长为 λ_2 的第二泵浦光、波长为 λ_S 的信号光和波长为 λ_C 的转换光的波长之间满足上述公式(5)和(6)给出的关系。从而,可将泵浦光的波长设定为比光通信带中多个信号光的波长和多个转换光的波长更长或更短,并且可以将泵浦光的波长带设定为与信号光和转换光的波长带相分离。

另外,在根据本发明的第二波长转换元件中,2N类不同波长的、波长为 λ_i 的第i个泵浦光($i=1, 2, \dots, 2N$; N为自然数)、波长为 λ_S 的信号光和波长为 λ_C 的转换光满足上述公式(11),(12)和(13)所给出的关系。从而,可将2N类泵浦光的波长设为比光通信带中多个信号光的波长和多个转换光的波长更长或更短的波长,并且可将2N类泵浦光的波长带设为与信号光和转换光的波长带相分离。

另外，与使用由波长为 λ_1 的第一泵浦光和波长为 λ_2 的第二泵浦光组成的一组泵浦光的第一波长转换元件相比，第二波长转换元件使用N组由波长为 λ_{2j-1} 的第(2j-1)个泵浦光与波长为 λ_{2j} 的第2j个泵浦光组成的泵浦光。从而，可以相应地增大泵浦光的能量。结果，可以实现比第一波长转换元件更高的波长转换效率。

附图说明

根据下面结合附图的描述将更好地理解本发明的上述和其他目的、特征和优点。

图1为用于说明通过DFG实现波长转换的波长转换装置的示意图；

图2说明通过DFG的波长转换过程；

图3所示为用于解释实现波长转换的波长转换装置的示意模型，其说明级联方式下的二阶非线性光学效应；

图4说明通过二阶非线性光学效应的级联实现的波长转换过程；

图5为用于解释使用两种泵浦光实现波长转换的波长转换装置的示意模式；

图6说明使用两种泵浦光实现波长转换的波长转换过程；

图7为用于解释使用2N种泵浦光实现波长转换的波长转换装置的示意模型；和

图8说明使用2N种泵浦光实现波长转换的波长转换过程。

具体实施方式

下面将参照图5至8描述本发明的优选实施例。每一幅图表示有关本发明结构的示例。仅以能理解本发明的程度示意出各构成元件的横截面形状和其相互设置。本发明不限于图中所示的示例。另外，在下面给出的说明中有时使用特殊材料和条件，不过这些材料和条件仅仅是优选示例，从而不以任何方式限定。另外，在图5和7中，在相应位置中用虚线表示存在光波导或畴。从而，这种虚线不表示三维结

构的横截面形状。

第一实施例

下面将参照图5描述可高转换效率地转换信号光波长的波长转换元件的结构，其可以将泵浦光波长设为比光通信带内多个信号光的波长和多个转换光的波长更长或更短，并且可以将泵浦光的波长带设为与信号光和转换光的波长带相分离。

本发明第一实施例的第一波长转换元件110为QPM-型波长转换元件，其包括实现准相位匹配的周期性结构。为了用上述第一波长转换元件实现波长转换，可以将QPM-型波长转换元件的周期性结构的周期值 Λ 设置成满足以下公式(1)，(2)，(3)和(4)。

$$(2\pi/\lambda_{SF})n_{SF} - (2\pi/\lambda_1)n_1 - (2\pi/\lambda_2)n_2 = 2\pi/\Lambda \quad (1)$$

$$(2\pi/\lambda_{SF})n_{SF} - (2\pi/\lambda_S)n_S - (2\pi/\lambda_C)n_C = 2\pi/\Lambda \quad (2)$$

$$1/\lambda_{SF} = 1/\lambda_1 + 1/\lambda_2 \quad (3)$$

$$1/\lambda_{SF} = 1/\lambda_S + 1/\lambda_C \quad (4)$$

此处， λ_{SF} 为通过波长为 λ_1 的第一泵浦光与波长为 λ_2 的第二泵浦光的SFG而得到的SF光的波长， n_{SF} 为QPM-型波长转换元件对波长为 λ_1 的第一泵浦光与波长为 λ_2 的第二泵浦光的SF光的折射率， n_1 为QPM-型波长转换元件对波长为 λ_1 的第一泵浦光的折射率， n_2 为QPM-型波长转换元件对波长为 λ_2 的第二泵浦光的折射率， n_S 为QPM-型波长转换元件对波长为 λ_S 的信号光的折射率， n_C 为QPM-型波长转换元件对波长为 λ_C 的转换光的折射率。

可在一定范围内任意设置第一泵浦光的波长 λ_1 、第二泵浦光的波长 λ_2 、信号光的波长 λ_S 和转换光的波长 λ_C ，使满足上面公式(1)至(4)所示条件的 Λ 为正实数。从而，可将第一泵浦光的波长 λ_1 和第二泵浦光的波长 λ_2 设置在通信带外部，将信号光的波长 λ_S 和转换光的波长 λ_C 设置在通信带内部。

例如，在选择掺铒光纤放大器(EDFA: Erbium-doped Fiber Amplifier)的C-带(波长在从1.53 μm 到1.56 μm 的范围内)作为通信带的光通信系统中，可将第一泵浦光的波长 λ_1 设定在比1.53 μm 短

的波长范围内，将第二泵浦光的波长 λ_2 设定在比 $1.56\mu\text{m}$ 长的波长范围内。另外，可将信号光的波长 λ_s 和转换光的波长 λ_c 设定成从 $1.53\mu\text{m}$ 到 $1.56\mu\text{m}$ 范围内通信带的波长。

从而可以设定第一泵浦光、第二泵浦光、信号光和转换光的相应波长 λ_1 ， λ_2 ， λ_s 和 λ_c 之间满足公式(5)和(6)给出的关系。

$$\lambda_1 < \lambda_s < \lambda_2 \quad (5)$$

$$\lambda_1 < \lambda_c < \lambda_2 \quad (6)$$

此处，可选择 QPM-型波长转换元件周期性结构的周期 Λ 的值，可通过波长 λ_1 为 $1.51\mu\text{m}$ 的第一泵浦光 101 和波长 λ_2 为 $1.57\mu\text{m}$ 的第二泵浦光 102，将波长 λ_s 为 $1.55\mu\text{m}$ 的信号光 128 转换成波长 λ_c 为 $1.53\mu\text{m}$ 的转换光 131。因此，可以实现具有执行波长转换功能的波长转换元件，转换成波长为 λ_c 的转换光，满足下式(5')和(6')。

$$\lambda_1 (=1.51\mu\text{m}) < \lambda_s (=1.55\mu\text{m}) < \lambda_2 (=1.57\mu\text{m}) \quad (5')$$

$$\lambda_1 (=1.51\mu\text{m}) < \lambda_c (=1.53\mu\text{m}) < \lambda_2 (=1.57\mu\text{m}) \quad (6')$$

在用于基于 WDM 等的光通信的波长转换装置中，使用具有将波长 λ_s 满足上述公式(5)的信号光转换成波长 λ_c 满足上述公式(6)的转换光这一功能的波长转换元件，具有可将第一和第二泵浦光的波长(λ_1 和 λ_2)分别设置为 WDM 通信带波长两侧(波长 λ_s 的信号光和波长 λ_c 的转换光处于该波带内)更短波长和更长波长的优点。

通常，第一和第二泵浦光的强度比信号光和转换光的强度高几个数量级。为此，信号光和转换光的波长中心与第一和第二泵浦光的波长中心必须存在足够大的波长间隔。如果可将第一和第二泵浦光的波长(λ_1 和 λ_2)分别设定为 WDM 传输带波长两侧(波长为 λ_s 的信号光和波长为 λ_c 的转换光处于该波带内)更短波长和更长波长，那么在信号光和转换光的波长中心与第一和第二泵浦光的波长中心之间可取得足够大的波长间隔。因此，可避免信号光谱与第一和第二泵浦光谱的基部重叠。结果，WDM 通信中可使用的信道数不受限制。

此处，由上面给出的公式(3)和(4)，得出：

$$1/\lambda_1 + 1/\lambda_2 = 1/\lambda_s + 1/\lambda_c = 1/1.51 + 1/1.57 = 1/1.55 + 1/1.53 = 1/0.77$$

从而,通过波长 λ_1 (=1.51 μm)的第一泵浦光与波长 λ_2 (=1.57 μm)的第二泵浦光的 SFG 而得到的 SF 光的波长 λ_{SF} 为 0.77 μm 。

另外,在使用 QPM 光波导构成的光波导型波长转换元件的情形中,上面公式(1)和(2)中出现的 n_{SF} , n_1 , n_2 , n_{S} 和 n_{C} 为 QPM 光波导的有效折射率。因此,其数值由 LiNbO_3 基片材料的折射率、形成在 LiNbO_3 基片上的 QPM 光波导的折射率和 QPM 光波导的尺寸决定。

实际上,经分析,难以找到上述 n_{SF} , n_1 , n_2 , n_{S} 和 n_{C} 所必须的精度得出 QPM 光波导的折射率和 QPM 光波导的尺寸。此外,即使精确得出 QPM 光波导的折射率和 QPM 光波导的尺寸,也难以由这些数值分析得出上述的 n_{SF} , n_1 , n_2 , n_{S} 和 n_{C} 。

此处,对于上述的 n_{SF} , n_1 , n_2 , n_{S} 和 n_{C} , 作为第一次近似,用作为基片材料的 LiNbO_3 的折射率值取代有关 QPM 波导的有效折射率而得出 QPM-型波长转换元件的极化反转结构的周期 Λ 。从而,制造出多个 QPM 光波导,其相差 $\Delta\Lambda$ 的整数倍,且 $\Delta\Lambda$ 与 Λ 相比足够小,并得出产生最大转换效率的极化反转结构的周期的数值。

因此,在相同条件下制造出总共 $2m+1$ 个 QPM 光波导,其极化反转结构的周期的值为 $\Lambda \pm m\Delta\Lambda$ (m 为自然数)。然后,将波长 λ_1 (=1.51 μm)的第一泵浦光、波长 λ_2 (=1.57 μm)的第二泵浦光和波长 λ_{S} (=1.55 μm)的信号光入射在其上,可从上述 $2m+1$ 个 QPM 光波导中选择出能以最大强度(最大转换效率)获得波长 λ_{C} (=1.53 μm)的转换光的波导。

从而在上面给出的公式(1)和(2)中,所选择出的 QPM 光波导的极化反转结构的周期可以设为 Λ 。通常,通过选择 $\Delta\Lambda$ 为大约 0.1 μm 、制造大约 21 ($m=10$) 个 QPM 光波导并采用产生上述最大转换效率的 QPM 光波导的极化反转结构的周期,可设定优选极化反转结构的周期。

将参照图 5 更详细地描述使用本发明第一实施例的第一波长转换元件构成的波长转换装置。该波长转换装置使用通过波长 λ_1 (=

1.51 μm)的第一泵浦光 101 和波长 λ_2 ($= 1.57\mu\text{m}$)的第二泵浦光 102 的 SFG 的方法产生 SF 光 (波长 $\lambda_{\text{SF}} = 0.77\mu\text{m}$), 并通过 SF 光与信号光的 DFG 将波长 λ_s ($= 1.55\mu\text{m}$)的信号光 128 转换成具有新波长的光 (DF 光)。

波长 λ_1 为 1.51 μm 的第一泵浦光 101、波长 λ_2 为 1.57 μm 的第二泵浦光 102 和波长 λ_s 为 1.55 μm 的信号光 128 在多路复用器 112 中多路复用, 并且作为入射光 129 入射到波长转换元件 110 的 QPM 光波导 122 中。在 QPM 光波导 122 中, 通过波长 λ_1 为 1.51 μm 的第一泵浦光 101 与波长 λ_2 为 1.57 μm 的第二泵浦光 102 的 SFG 而产生波长 λ_{SF} 的 SF 光。通过 SF 光与波长 λ_s 为 1.55 μm 的信号光 128 的 DFG 而产生波长 λ_c 为 1.53 μm 的 DF 光。

从而,从波长转换元件 110 的 QPM 光波导 122 输出的出射光 130 是通过多路复合波长 λ_1 为 1.51 μm 的第一泵浦光 101、波长 λ_2 为 1.57 μm 的第二泵浦光 102、波长 λ_s 为 1.55 μm 的信号光、波长 λ_{SF} 为 0.77 μm 的 SF 光和波长 λ_c 为 1.53 μm 的 DF 光而得到的光。

下面将参照图 6 描述上述波长转换过程。与图 2 和图 4 相同, 在该图中, 波长以 μm 为单位作为横坐标, 光强以任意单位作为纵坐标。此外, 向上箭头的起点位置表示第一和第二泵浦光、信号光、SF 光和 DF 光 (转换光) 的波长中心位置, 箭头的长度正比于相应光强, 反映出相对关系。

通过波长 λ_1 为 1.51 μm 的第一泵浦光 101 与波长 λ_2 为 1.57 μm 的第二泵浦光 102 的 SFG 而产生波长 λ_{SF} 为 0.77 μm 的 SF 光。在图 6 中用从表示波长 λ_1 为 1.51 μm 的第一泵浦光 101 和波长 λ_2 为 1.57 μm 的第二泵浦光 102 的箭头到表示波长 λ_{SF} 为 0.77 μm 的 SF 光的箭头作出的侧向箭头表示出这种情形。

在图 6 中用半圆形符号表示波长 λ_{SF} 为 0.77 μm 的 SF 光和波长 λ_s 为 1.55 μm 的信号光, 并用虚线连接它们。这是通过非线性相互作用如 SF 光与信号光的 DFG 而产生波长 λ_c 为 1.53 μm 的 DF 光的示意表示。可将该结果理解为通过第一和第二泵浦光以及 SF 光, 通过作为

第一与第二泵浦光的非线性光学效应的 SFG，并且通过利用 SFG 产生的 SF 光产生 DFG，将波长 λ_s 为 $1.55\mu\text{m}$ 的信号光转换成波长 λ_c 为 $1.53\mu\text{m}$ 的转换光。

通过将波长 λ_1 为 $1.51\mu\text{m}$ 的第一泵浦光 101，波长 λ_2 为 $1.57\mu\text{m}$ 的第二泵浦光 102 和波长 λ_s 为 $1.55\mu\text{m}$ 的信号光 128 引入波长转换元件 110 中产生 DF 光，DF 光是波长 λ_c 为 $1.53\mu\text{m}$ 的新光。从而，波长转换元件 110 的输出光 130 为通过多路复用波长 λ_1 为 $1.51\mu\text{m}$ 的第一泵浦光、波长 λ_2 为 $1.57\mu\text{m}$ 的第二泵浦光、波长 λ_s 为 $1.55\mu\text{m}$ 的信号光、波长 λ_{SF} 为 $0.77\mu\text{m}$ 的 SF 光和波长 λ_c 为 $1.53\mu\text{m}$ 的 DF 光（转换光）而得到的光。

输出光 130 通过窄带波长滤波器 114 滤波，仅提取出波长 λ_c 为 $1.53\mu\text{m}$ 的 DF 光作为转换光 131。因此，通过包括多路复用器 112、波长转换元件 110 和窄带波长滤波器 114 的波长转换装置 132 后，将 $1.55\mu\text{m}$ 波长的信号光 128 被波长转换成波长 λ_c 为 $1.53\mu\text{m}$ 的 DF 光，从而转换成转换光 131。

这种波长转换中使用的第一泵浦光的波长 λ_1 为 $1.51\mu\text{m}$ ，第二泵浦光的波长 λ_2 为 $1.57\mu\text{m}$ ，信号光的波长 λ_s 为 $1.55\mu\text{m}$ 。从而，第一与第二泵浦光的波长几乎等于信号光的波长。因此，易于设计出这样一种光波导，使进入波长转换元件 110 的第一和第二泵浦光及信号光一起以最低阶模式传播。

另外，已知在 LiNbO_3 晶体中与 SFG 的出现有关的非线性光学常数的数值大约是与出现 SHG 时的非线性光学常数的两倍（例如，参见 Y. R. Shen “The principle of Nonlinear Optics”，John Wiley wavelength conversion elements Inc., 1984）。由 SHG 中的基波长到 SH 光的能量转换效率正比于基波长能量的二次幂与出现（此处，为第一和第二泵浦光）SHG 有关的非线性光学常数的二次幂的乘积。此外，从在 SFG 中将转换的光到 SF 光的能量转换效率正比于将要转换的各光（此处，为第一与第二泵浦光的能量乘积）与出现 SFG 有关的非线性光学常数的二次幂的乘积。

根据以上有关波长转换过程中从待转换光到转换光的能量转换效率的描述显然可以得出以下结论。当使用相同强度的泵浦光时，与出现 SFG 有关的非线性光学常数的值大约为与出现 SHG 有关的非线性光学常数值的两倍。从而，所产生的 SH 光的能量为 SF 光能量的四倍。因此，如果使用本发明第一实施例的波长转换元件，则通过 SF 光的波长转换方法优于通过 SHG 产生 SH 光的波长转换方法。这也是可实现高效率波长转换的原因所在。

此外，由于第一与第二泵浦光的波长可以分别设定为短于和长于 WDM 传输带波长，可避免信号光谱与第一和第二泵浦光谱的基部重叠。从而，对于 WDM 传输中可使用的信道数量没有限制。

第二实施例

下面将描述第二波长转换元件，其能以高于上述第一实施例的第一波长转换元件的效率来转换信号光波长。此外，第二波长转换元件的其他优点，即将泵浦光波长设定为比光通信带中存在的多个信号光波长以及多个转换光波长更长或更短的能力和将泵浦光的波长带设定为与信号光和转换光的波长带分离的能力与第一波长转换元件相同。

在第一波长转换元件中，使用第一和第二泵浦光作为泵浦光。相反，在第二波长转换元件中，使用从第一泵浦光到第 $2N$ 个泵浦光 (N 为 2 或更大的自然数) 的 $2N$ 个泵浦光作为泵浦光。因此，通过第一泵浦光与第二泵浦光的 SFG 而产生波长为 λ_{SF} 的 SF 光。同样，通过第二泵浦光与第四泵浦光的 SFG 而产生波长 λ_{SF} 与上述波长相同的 SF 光。另外，采用这样一种结构，其中通过第 $(2N-1)$ 个泵浦光与第 $2N$ 个泵浦光的 SFG 而产生波长 λ_{SF} 同于上述波长的 SF 光。换言之，是一种通过第 $(2j-1)$ 个泵浦光与第 $2j$ 个泵浦光 (j 是 N 或更小的自然数) 的 N 组泵浦光来产生波长为 λ_{SF} 的 SF 光的结构。

为了用上述第二波长转换元件实现波长转换，QPM-型波长转换元件周期性结构的周期值 Λ 可以设置为满足下面的公式 (7)，(8)，(9) 和 (10)。

$$(2\pi/\lambda_{SF})n_{SF} - (2\pi/\lambda_{2j-1})n_{2j-1} - (2\pi/\lambda_{2j})n_{2j} = 2\pi/\Lambda \quad (7)$$

$$(2\pi/\lambda_{SF})n_{SF} - (2\pi/\lambda_S)n_S - (2\pi/\lambda_C)n_C = 2\pi/\Lambda \quad (8)$$

$$1/\lambda_{SF} = 1/\lambda_{2j-1} + 1/\lambda_{2j} \quad (9)$$

$$1/\lambda_{SF} = 1/\lambda_S + 1/\lambda_C \quad (10)$$

此处， λ_{2j-1} 为输入到波长转换元件的第 $(2j-1)$ 个泵浦光的波长， λ_{2j} 为输入到波长转换元件的第 $2j$ 个泵浦光的波长， λ_S 为输入到波长转换元件的信号光的波长， λ_C 为输入到波长转换元件的转换光的波长， λ_{SF} 为波长为 λ_{2j-1} 的第 $(2j-1)$ 个泵浦光与波长为 λ_{2j} 的第 $2j$ 个泵浦光的合频光， n_{SF} 为波长转换元件对波长为 λ_{2j-1} 的第 $(2j-1)$ 个泵浦光与波长为 λ_{2j} 的第 $2j$ 个泵浦光的合频光的折射率， n_{2j-1} 为波长转换元件对波长为 λ_{2j-1} 的第 $(2j-1)$ 个泵浦光的折射率， n_{2j} 是转换元件对波长为 λ_{2j} 的第 $2j$ 个泵浦光的折射率， n_S 为波长转换元件对波长为 λ_S 的信号光的折射率， n_C 为波长转换元件对波长为 λ_C 的转换光的折射率， j 为从1到 N 的自然数， N 为2或更大的自然数。

可在一定范围内自由设置第 $(2j-1)$ 个泵浦光的波长 λ_{2j-1} 、第 $2j$ 个泵浦光的波长 λ_{2j} 、信号光的波长 λ_S 和转换光的波长 λ_C ，使满足上面公式(7)至(10)所示条件的 Λ 值为正实数。从而，可将 $(2j-1)$ 个泵浦光的波长 λ_{2j-1} 和第 $2j$ 个泵浦光的波长 λ_{2j} 设置在通信带外部，将信号光的波长 λ_S 和转换光的波长 λ_C 设置在通信带内部。

因此，在根据本发明的第二波长转换元件中，实现SFG并用不同波长的 $2N$ 种波长为 λ_i 的第 i 个泵浦光($i=1, 2, \dots, 2N$; N 为自然数)产生SF光。因此，第二波长转换元件可以为具有将波长为 λ_S 的信号光转换成波长 λ_C 的转换光这样一种功能的波长转换元件，满足下式(11)，(12)和(13)。

$$\lambda_{2N-1} < \lambda_{2N-3} < \dots < \lambda_3 < \lambda_1 < \lambda_2 < \lambda_4 < \dots < \lambda_{2N-2} < \lambda_{2N} \quad (11)$$

$$\lambda_1 < \lambda_S < \lambda_2 \quad (12)$$

$$\lambda_1 < \lambda_C < \lambda_2 \quad (13)$$

下面将参照图7描述作为第二实施例的第二波长转换元件的结构。为了便于说明，下面将考虑 $N=3$ 的情形，不过显然下面给出的说

明可适用于任何 N。

作为本发明第二实施例的第二波长转换元件 210 为包括周期性结构、用于实现准相位匹配的 QPM-型波长转换元件。为了使用上述第二波长转换元件实现波长转换，QPM-型波长转换元件的周期性结构的周期 Λ 的值设为满足下面的公式 (7a)，(7b)，(7c)，(8)，(9a)，(9b)，(9c) 和 (10)：

$$(2\pi/\lambda_{SF})n_{SF} - (2\pi/\lambda_1)n_1 - (2\pi/\lambda_2)n_2 = 2\pi/\Lambda \quad (7a)$$

$$(2\pi/\lambda_{SF})n_{SF} - (2\pi/\lambda_3)n_3 - (2\pi/\lambda_4)n_4 = 2\pi/\Lambda \quad (7b)$$

$$(2\pi/\lambda_{SF})n_{SF} - (2\pi/\lambda_5)n_5 - (2\pi/\lambda_6)n_6 = 2\pi/\Lambda \quad (7c)$$

$$(2\pi/\lambda_{SF})n_{SF} - (2\pi/\lambda_S)n_S - (2\pi/\lambda_C)n_C = 2\pi/\Lambda \quad (8)$$

$$1/\lambda_{SF} = 1/\lambda_1 + 1/\lambda_2 \quad (9a)$$

$$1/\lambda_{SF} = 1/\lambda_3 + 1/\lambda_4 \quad (9b)$$

$$1/\lambda_{SF} = 1/\lambda_5 + 1/\lambda_6 \quad (9c)$$

$$1/\lambda_{SF} = 1/\lambda_S + 1/\lambda_C \quad (10)$$

此处， λ_1 至 λ_6 分别为第一至第六泵浦光的波长， λ_S 为输入到波长转换元件的信号光的波长， λ_C 为输入到波长转换元件的第一转换光的波长， λ_{SF} 为波长为 λ_{2j-1} 的第 (2j-1) 个泵浦光与波长为 λ_{2j} 的第 2j 个泵浦光的合频光的波长 ($j = 1, 2, 3$)， n_{SF} 为波长转换元件对波长为 λ_{2j-1} 的第 (2j-1) 个泵浦光与波长为 λ_{2j} 的第 2j 个泵浦光的合频光的折射率 ($j = 1, 2, 3$)， n_1 至 n_6 分别为波长转换元件第一至第六泵浦光的折射率， n_S 为波长转换元件对波长为 λ_S 的信号光的折射率， n_C 为波长转换元件对波长为 λ_C 的转换光的折射率。

例如，与上述第一波长转换元件相同，在选择掺铒光纤放大器 (EDFA: Erbium-doped Fiber Amplifier) 的 C-带 (波长处于 $1.53\mu\text{m}$ 到 $1.56\mu\text{m}$ 范围内) 作为通信带的光通信系统中，可将第 (2j-1) 个泵浦光的波长 λ_{2j-1} 设定在比 $1.53\mu\text{m}$ 短的波长范围内，将第 2j 个泵浦光的波长 λ_{2j} 设定在比 $1.56\mu\text{m}$ 长的波长范围内。另外，可将信号光的波长 λ_S 和转换光的波长 λ_C 设定成从 $1.53\mu\text{m}$ 到 $1.56\mu\text{m}$ 范围内的通信带的波长。

此处,可选择 QPM-型波长转换元件的周期性结构的周期 Λ 的值,可通过波长 λ_1 为 $1.51\mu\text{m}$ 的第一泵浦光、波长 λ_2 为 $1.57\mu\text{m}$ 的第二泵浦光、波长 λ_3 为 $1.50\mu\text{m}$ 的第三泵浦光、波长 λ_4 为 $1.58\mu\text{m}$ 的第四泵浦光、波长 λ_5 为 $1.49\mu\text{m}$ 的第五泵浦光和波长 λ_6 为 $1.59\mu\text{m}$ 的第六泵浦光,基于 SFG,产生波长 λ_{SF} 为 $0.77\mu\text{m}$ 的 SF 光。

因此,波长转换元件通过波长 λ_{SF} 为 $0.77\mu\text{m}$ 的 SF 光与波长 λ_s 为 $1.55\mu\text{m}$ 的信号光的 DFG,可将波长 λ_s 为 $1.55\mu\text{m}$ 的信号光转换成波长 λ_c 为 $1.53\mu\text{m}$ 的转换光。从而,可以实现可将波长 λ_s 为 $1.55\mu\text{m}$ 的信号光转换成波长 λ_c 满足以下公式(11'),(12')和(13')的波长转换元件。

$$\begin{aligned} \lambda_5(=1.49\mu\text{m}) < \lambda_3(=1.50\mu\text{m}) < \lambda_1(=1.51\mu\text{m}) < \lambda_2(=1.57\mu\text{m}) \\ < \lambda_4(=1.58\mu\text{m}) < \lambda_6(=1.59\mu\text{m}) \end{aligned} \quad (11')$$

$$\lambda_1(=1.51\mu\text{m}) < \lambda_s(=1.55\mu\text{m}) < \lambda_2(=1.57\mu\text{m}) \quad (12')$$

$$\lambda_1(=1.51\mu\text{m}) < \lambda_c(=1.53\mu\text{m}) < \lambda_2(=1.57\mu\text{m}) \quad (13')$$

如果使用上面所述的概括表示(上述条件式(7),(9)和(11)),由上述第一至第六泵浦光实现利用六个泵浦光的 SFG 的过程等效于 $N=3$ 的情形。从而,上述条件式(7)相应于条件式(7a),(7b)和(7c),上述条件式(9)相应于条件式(9a),(9b)和(9c),条件式(11)相应于条件式(11')。在这种关系中,第一波长转换元件相当于 $N=1$ 的情形。

在用于 WDM 通信等的波长转换装置中,使用将波长 λ_s 满足上述公式(12)的信号光转换成波长 λ_c 满足上述公式(13)的转换光的波长转换元件,其优点在于可将第一到第 $2N$ 个泵浦光的波长($\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{2N}$)分别设置成 WDM 传输带(在该波带内有波长为 λ_s 的信号光和波长为 λ_c 的转换光)两侧的更短波长和更长波长,该优点与第一波长转换元件类似。

从而,可防止信号光谱与第一到第 $2N$ 个泵浦光谱的基部重叠。结果,与第一波长转换元件相同,对 WDM 通信中可使用的信道数量没有限制。

此处，由上面给出的条件式 (9a)，(9b)，(9c) 和 (10) 得出：

$$\begin{aligned} 1/\lambda_1 + 1/\lambda_2 &= 1/\lambda_3 + 1/\lambda_4 = 1/\lambda_5 + 1/\lambda_6 = 1/\lambda_S + 1/\lambda_C = \\ 1/1.51 + 1/1.57 &= 1/1.50 + 1/1.58 = 1/1.49 + 1/1.59 = 1/1.55 \\ &+ 1/1.53 = 1/0.77 \end{aligned}$$

从而，由 SFG 得到的 SF 光的波长 λ_{SF} 为 $0.77\mu\text{m}$ 。

另外，在由 QPM 光波导组成的光波导型 QPM 型波长转换元件的情形中，上面表示出的 n_{SF} ， n_1 ， n_2 ， n_3 ， n_4 ， n_5 ， n_6 ， n_S 和 n_C 为 QPM 光波导的有效折射率。因此，其数值由 LiNbO_3 基片材料的折射率、形成在 LiNbO_3 基片上的 QPM 光波导的折射率和 QPM 光波导的尺寸决定。与第一波长转换元件的情形类似，通过试验合理确定这些值。因此，通过与上述说明第一波长转换元件时相同的方法制造具有不同周期极化反转结构的多个 QPM 光波导，并且通过试验得出获得最大转换效率时的数值作为第二波长转换元件的极化反转结构的周期 Λ 。

下面，将参照图 7 更佳详细地描述使用根据本发明的第二波长转换元件将波长 λ_S 为 $1.55\mu\text{m}$ 的信号光转换成波长 λ_C 为 $1.53\mu\text{m}$ 的转换光 (DF 光) 的方法。

第一泵浦光 (波长 $\lambda_1 = 1.51\mu\text{m}$) 201、第二泵浦光 (波长 $\lambda_2 = 1.57\mu\text{m}$) 202、第三泵浦光 (波长 $\lambda_3 = 1.50\mu\text{m}$) 203、第四泵浦光 (波长 $\lambda_4 = 1.58\mu\text{m}$) 204、第五泵浦光 (波长 $\lambda_5 = 1.49\mu\text{m}$) 205、第六泵浦光 (波长 $\lambda_6 = 1.59\mu\text{m}$) 206 和波长 λ_S 为 $1.55\mu\text{m}$ 的信号光 228 在多路复用器 212 中复用，并且作为入射光 229 引入到波长转换元件 210 的 QPM 光波导 222 中。

结果，在 QPM 光波导 222 中，用第一泵浦光 201、第二泵浦光 202、第三泵浦光 203、第四泵浦光 204、第五泵浦光 205 和第六泵浦光 206 产生通过 SFG 而得到的波长 λ_{SF} 为 $0.77\mu\text{m}$ 的 SF 光。

从而，从波长转换元件 210 的 QPM 光波导 222 输出的输出光 230 是通过多路复用第一泵浦光、第二泵浦光、第三泵浦光、第四泵浦光、

第五泵浦光、第六泵浦光、波长 λ_S 为 $1.55\mu\text{m}$ 的信号光、波长 λ_{SF} 为 $0.77\mu\text{m}$ 的 SF 光和波长 λ_C 为 $1.53\mu\text{m}$ 的 DF 光而获得的。因此，上述方法是一种将波长 λ_S 为 $1.55\mu\text{m}$ 的信号光转换成波长 λ_C 满足上述公式 (11')，(12') 和 (13') 的转换光的方法。

下面将参照图 8 描述上述波长转换过程。在图中，与图 2，图 4 和图 6 相同，在该图中波长以微米为单位作为横坐标，光强以任意单位为单位作为纵坐标。此外，向上指箭头的始点位置表示第一到第六泵浦光、信号光、SF 光和 DF 光（转换光）的波长中心位置，箭头的长度正比于相应光强、反映出相对关系。

通过波长 λ_1 为 $1.51\mu\text{m}$ 的第一泵浦光 201 和波长 λ_2 为 $1.57\mu\text{m}$ 的第二泵浦光 202 的 SFG 而产生波长 λ_{SF} 为 $0.77\mu\text{m}$ 的 SF 光。另外，通过波长 λ_3 为 $1.50\mu\text{m}$ 的第三泵浦光 203 与波长 λ_4 为 $1.58\mu\text{m}$ 的第四泵浦光 204 的 SFG 而产生波长 λ_{SF} 为 $0.77\mu\text{m}$ 的 SF 光。通过波长 λ_5 为 $1.49\mu\text{m}$ 的第五泵浦光 205 与波长 λ_6 为 $1.59\mu\text{m}$ 的第六泵浦光 206 的 SFG 而产生波长 λ_{SF} 为 $0.77\mu\text{m}$ 的 SF 光。

图 8 中通过从表示波长 λ_1 为 $1.51\mu\text{m}$ 的第一泵浦光和波长 λ_2 为 $1.57\mu\text{m}$ 的第二泵浦光的箭头到表示波长 λ_{SF} 为 $0.77\mu\text{m}$ 的 SF 光的箭头绘出侧向箭头而表示出这种情形，且将这些侧向箭头统称作 SFG1。还表示出从表示 λ_3 为 $1.50\mu\text{m}$ 的第三泵浦光和波长 λ_4 为 $1.58\mu\text{m}$ 的第四泵浦光的箭头到表示波长 λ_{SF} 为 $0.77\mu\text{m}$ 的 SF 光的箭头绘出的侧向箭头，并将这些箭头统称作 SFG2。还表示出从表示波长 λ_5 为 $1.49\mu\text{m}$ 的第五泵浦光和波长 λ_6 为 $1.59\mu\text{m}$ 的第六泵浦光的箭头到表示波长 λ_{SF} 为 $0.77\mu\text{m}$ 的 SF 光的箭头绘出的侧向箭头，并且这些侧向箭头统称作 SFG3。

图 8 中用半圆形符号表示通过将上述 SFG1、SFG2 和 SFG3 相加产生的波长 λ_{SF} 为 $0.77\mu\text{m}$ 的 SF 光以及波长 λ_S 为 $1.55\mu\text{m}$ 的信号光，并用虚线连接它们。示意地表示出通过非线性相互作用，如 SF 光与信号光的 DFG 而产生波长 λ_C 为 $1.53\mu\text{m}$ 的 DF 光的关系。可以将该结果理解为，利用第一到第六泵浦光以及 SF 光，通过 SFG，以及使

通过 SFG 而产生的 SF 光发生 DFG, 将波长 λ_s 为 $1.55\mu\text{m}$ 的信号光转换成波长 λ_c 为 $1.53\mu\text{m}$ 的转换光, 其中 SFG 是第一泵浦光至第六泵浦光的非线性光学效应。

通过将波长 λ_1 为 $1.51\mu\text{m}$ 的第一泵浦光 201、波长 λ_2 为 $1.57\mu\text{m}$ 的第二泵浦光 202、波长 λ_3 为 $1.50\mu\text{m}$ 的第三泵浦光 203、波长 λ_4 为 $1.58\mu\text{m}$ 的第四泵浦光 204、波长 λ_5 为 $1.49\mu\text{m}$ 的第五泵浦光 205、波长 λ_6 为 $1.59\mu\text{m}$ 的第六泵浦光 206 以及波长 λ_s 为 $1.55\mu\text{m}$ 的信号光 228 引入波长转换元件中产生波长 λ_c 为 $1.53\mu\text{m}$ 的新光, 即 DF 光。从而, 从波长转换元件 210 输出的输出光 230 为通过多路复用波长 λ_1 为 $1.51\mu\text{m}$ 的第一泵浦光、波长 λ_2 为 $1.57\mu\text{m}$ 的第二泵浦光、波长 λ_3 为 $1.50\mu\text{m}$ 的第三泵浦光、波长 λ_4 为 $1.58\mu\text{m}$ 的第四泵浦光、波长 λ_5 为 $1.49\mu\text{m}$ 的第五泵浦光、波长 λ_6 为 $1.59\mu\text{m}$ 的第六泵浦光、波长 λ_s 为 $1.55\mu\text{m}$ 的信号光、波长 λ_{SF} 为 $0.77\mu\text{m}$ 的 SF 光和波长 λ_c 为 $1.53\mu\text{m}$ 的 DF 光 (转换光) 而得到的光。

用窄带波长滤波器 214 滤波输出光 230, 仅提取出波长 λ_c 为 $1.53\mu\text{m}$ 的 DF 光作为转换光 231。因此, 通过包括多路复用器 212, 波长转换元件 210 和窄带波长滤波器 214 的波长转换装置 232, 波长 λ_s 为 $1.55\mu\text{m}$ 的信号光 228 被波长转换成波长 λ_c 为 $1.53\mu\text{m}$ 的 DF 光, 从而转换成转换光 231。

这种波长转换中使用的第一泵浦光的波长 λ_1 为 $1.51\mu\text{m}$, 第二泵浦光的波长 λ_2 为 $1.57\mu\text{m}$, 第三泵浦光的波长 λ_3 为 $1.50\mu\text{m}$, 第四泵浦光的波长 λ_4 为 $1.58\mu\text{m}$, 第五泵浦光的波长 λ_5 为 $1.49\mu\text{m}$, 第六泵浦光的波长 λ_6 为 $1.59\mu\text{m}$, 信号光的波长 λ_s 为 $1.55\mu\text{m}$ 。从而, 第一到第六泵浦光的波长基本等于信号光的波长。因此, 易于设计出使进入波长转换元件 210 的第一到第六泵浦光以及信号光一起以最低阶模式传播的光波导。

另外, 与通过 SHG 产生 SH 光进行波长转换的方法相比, 使用根据本发明第二实施例的第二波长转换元件的方法通过 SF 光执行波长转换。从而, 与第一实施例的第一波长转换元件相同, 可实现高效

波长转换。

另外，由于可将第一到第六泵浦光的波长分别设置为 WDM 传输带波长两侧上的更短波长和更长波长，可避免信号光谱与第一到第六泵浦光谱的基部重叠。结果，对于 WDM 通信中可使用的信道数量没有限制，该特征与第一波长转换元件类似。

如上所述，通过第二波长转换元件，使用三组泵浦光，即第一泵浦光与第二泵浦光，第三泵浦光与第四泵浦光，及第五泵浦光与第六泵浦光，这与仅使用波长为 λ_1 的第一泵浦光和波长为 λ_2 的第二泵浦光这一组泵浦光的第一波长转换元件不同。从而，可因而增大泵浦光的能量。结果，可实现比第一波长转换元件更高的波长转换效率。在上述实施例中，说明了使用三组泵浦光的例子。不过，显然如果使用四组或更多组泵浦光（在此情形中有八种泵浦光）显然可获得相同结果。

因此，通常可使用由波长为 λ_{2j-1} 的第 $2j-1$ 个泵浦光与波长为 λ_{2j} 的第 $2j$ 个泵浦光的 N 组泵浦光。此处 j 为从 1 到 N 的自然数；当 $j=N$ 时，使用 N 组泵浦光。

另外，通过组合具有宽光谱范围的泵浦光，即在较宽有效宽度波长带上具有光谱成分的泵浦光，也可以实现与第二实施例的第二波长转换元件类似的波长转换元件。下面说明其原因。

第二波长转换器具有这样一种结构，其中通过组合将光谱的中心波长改变到通信带外部更短波长而设定的 N 个泵浦光和将光谱的中心波长改变到通信带外部更长波长而设定的 N 个泵浦光，可以产生基于 SFG 的 SF 光。设定为通信带外部更短波长和设定为通信带外部更长波长的泵浦光光谱中心波长的设定波长带，必须处于采用二阶非线性光学效应实现 SFG 时呈现出较大数值的区域。从而，具有有限带宽。

如果考虑不加限制地增大 N 值的极限情况，相当于使用在具有有限宽度的整个波长带上具有连续光谱成分的光作为泵浦光。因此，通过组合在宽有限宽度的波长带上具有光谱成分的泵浦光，也可以实现与第二波长转换元件类似的波长转换元件。

泵浦光组数（ N 的设定值）或者光谱成分及用于实现波长转换的

泵浦光的波长带的宽度为设计特征必须通过考虑有效实现二阶非线性光学效应如 DFG, SHG 和 SFG 时的波长带、用于滤波转换光的窄带波长滤波器的传输性质等来确定。

为了有效地实现二阶非线性光学效应, 非线性光学晶体如 LiNbO_3 (波长转换元件的构成部件) 的二阶非线性光学常数必须足够大。因为二阶非线性光学常数的值依赖于波长, 必须考虑到这种对波长的依赖性。

如上所述, 通过本发明的波长转换装置, 可将泵浦光的波长设定为比光通信带中多个信号光或多个转换光的波长更长或更短, 并且可将泵浦光的波长带设定为相对于信号光和转换光的波长带具有足够大的波长间隔。

另外, 该装置具有以下功能, 即通过引起泵浦光之间 SFG 而产生 SF 光, 然后通过引起 SF 光与信号光发生 DFG 而获得 DF 光作为转换光。从而, 易于将泵浦光和信号光设定为在光波导中以最低阶模式传播。结果, 实现高效转换。

而且, 如果增加泵浦光的种类数, 那么泵浦光彼此 SFG 产生的 SF 光的强度将增大, 可获得更高的波长转换效率。

在第一和第二实施例中, 对于 EDFA 的 C 带作为通信带的光通信系统进行了说明, 不过原理上根据信号光所设定的波长可以在任何波长带中实现波长转换。

另外, 在上述实施例中, 针对具有使用 LiNbO_3 晶体的波导的 QPM-型波长转换元件进行了说明, 不过也可以通过在半导体 GaAs 和 InP 晶体中形成周期性结构来制造具有类似波导的 QPM-型波长转换元件。

图1

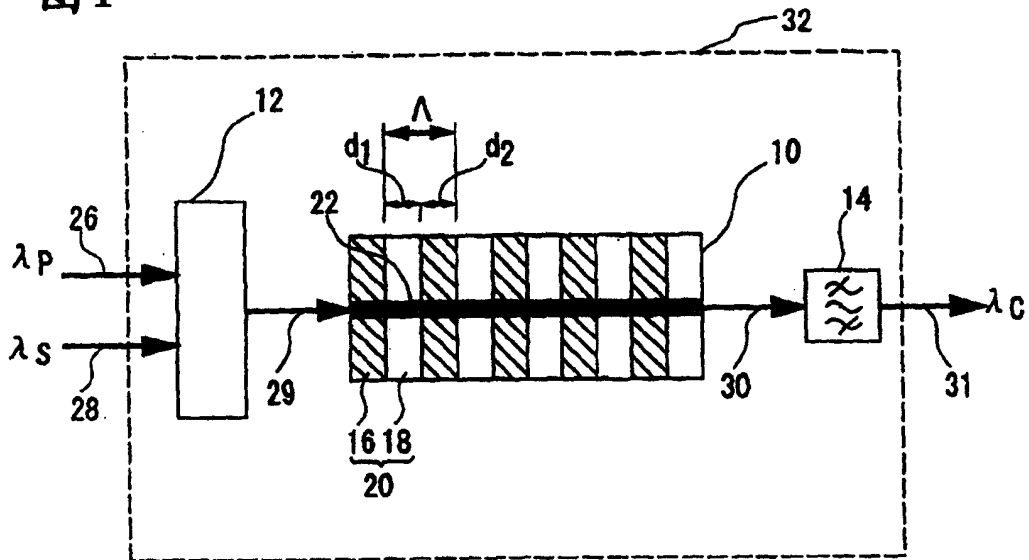


图2

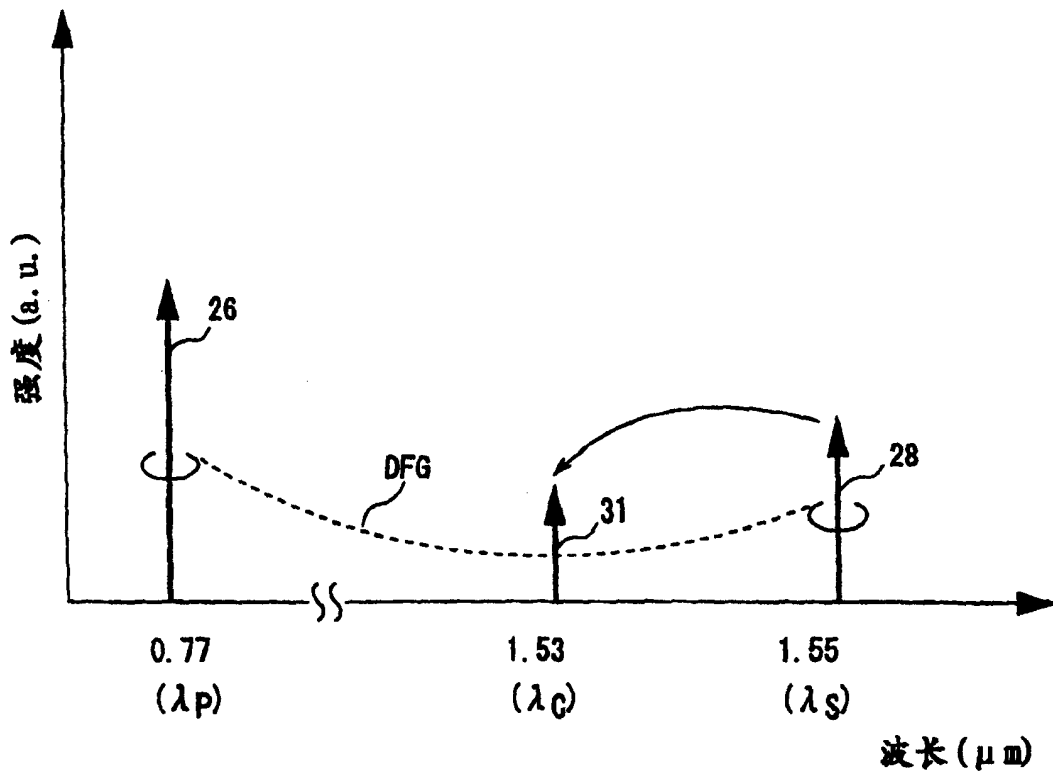


图3

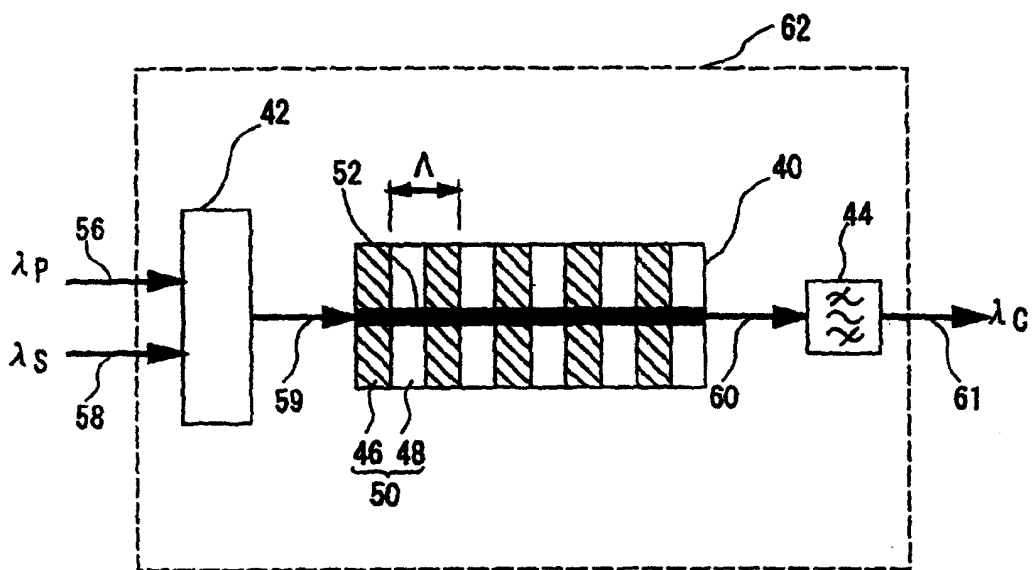


图4

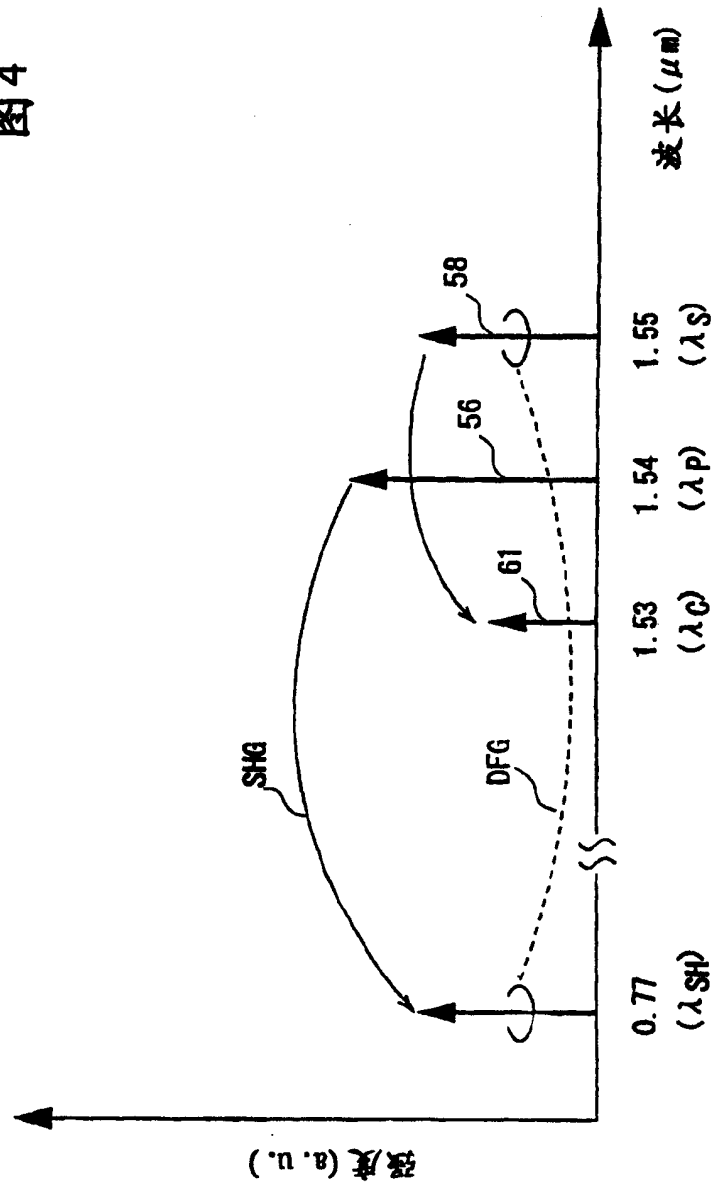


图5

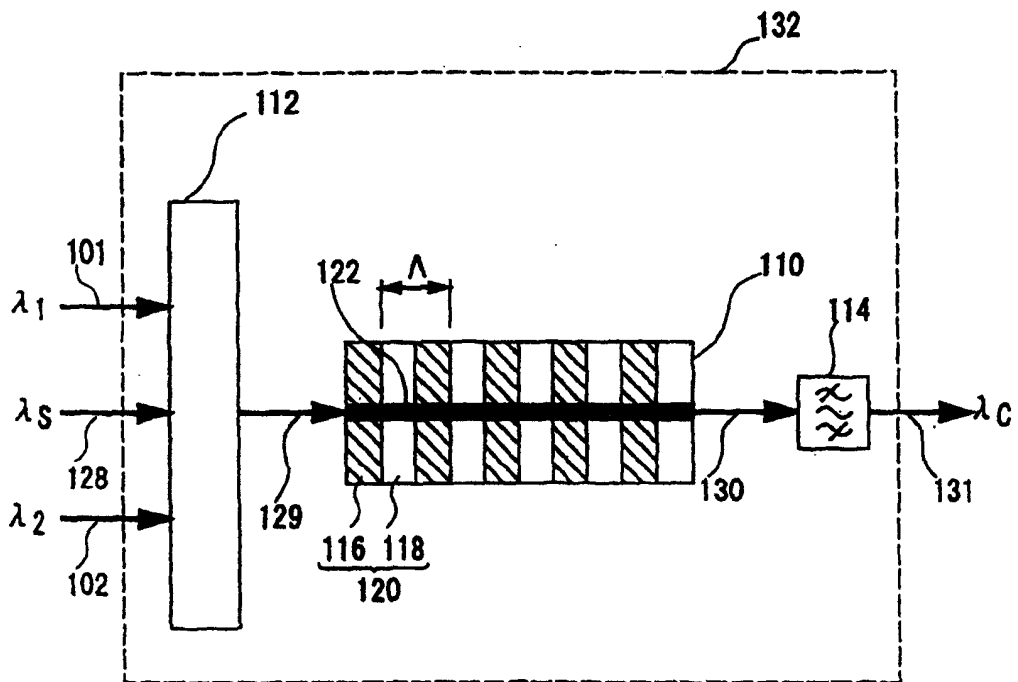


图6

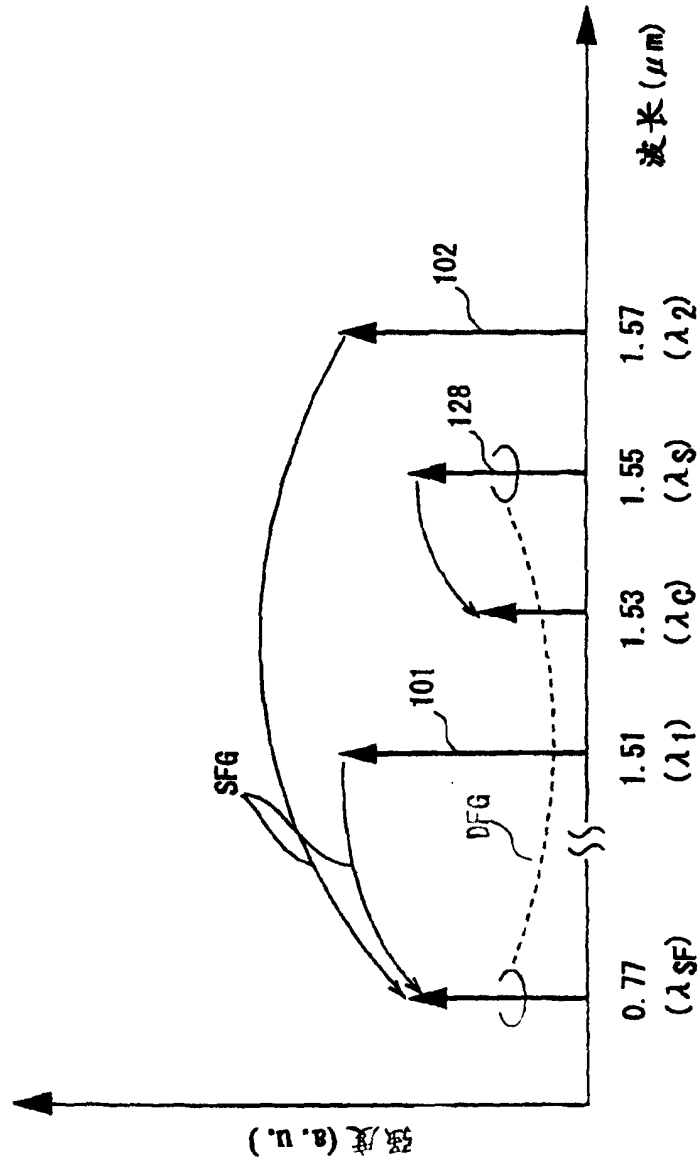


图7

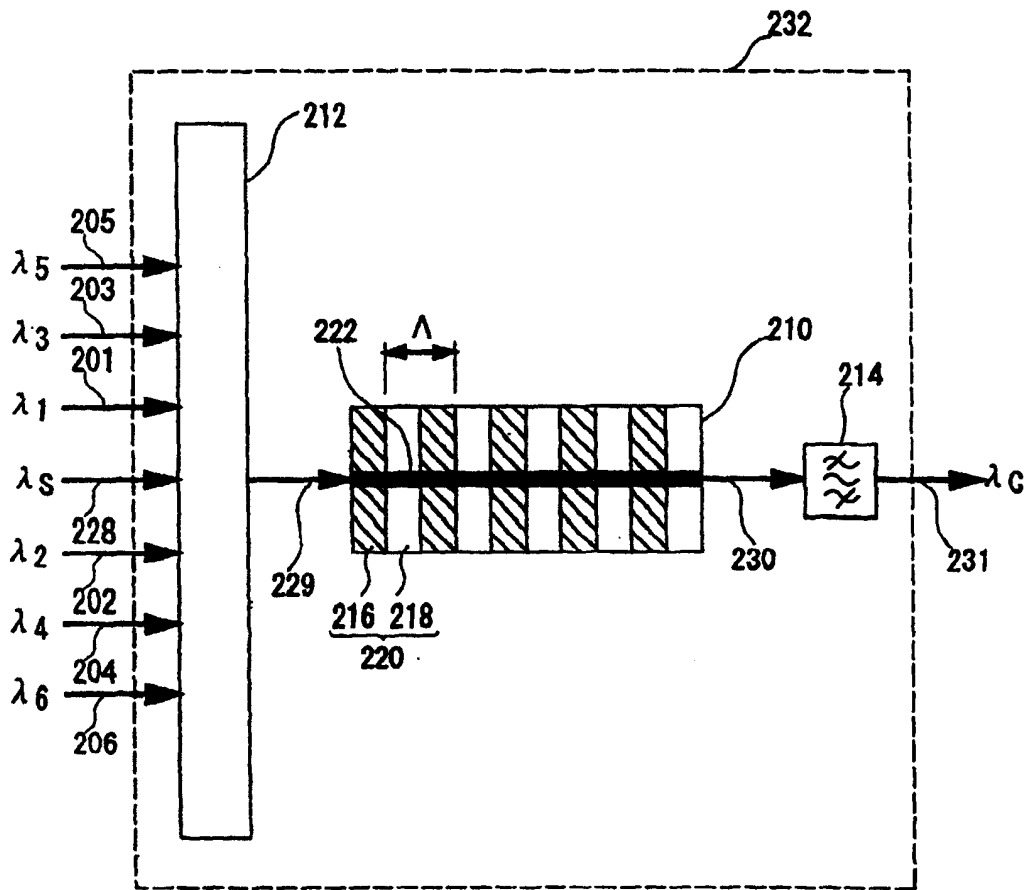


图8

