

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

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

G02F 1/09

G02B 5/30



# [12] 发 明 专 利 说 明 书

[21] ZL 专利号 98120842.8

[45] 授权公告日 2004 年 9 月 22 日

[11] 授权公告号 CN 1167970C

[22] 申请日 1998.9.29 [21] 申请号 98120842.8

[30] 优先权

[32] 1998. 1. 23 [33] JP [31] 011795/1998

[71] 专利权人 富士通株式会社

地址 日本神奈川

[72] 发明人 寺原隆文 福岛畅洋

审查员 钟焱鑫

[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

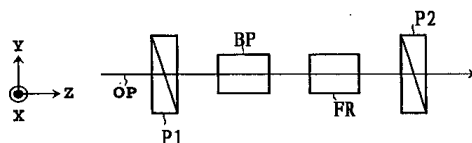
代理人 蒋世迅

权利要求书 5 页 说明书 23 页 附图 33 页

[54] 发明名称 可调谐光滤波器

[57] 摘要

本发明涉及有可变透射率波长特性的可调光滤波器。该可调光滤波器包括：第一和第二偏振器；双折射元件；和法拉第转子，用于给传输的偏振光一个可变法拉第转角。双折射元件和法拉第转子放在第一偏振器与第二偏振器之间，双折射元件和法拉第转子的安排顺序以及双折射元件光轴与每个偏振器传输轴之间相对位置关系的设定，使之给出透射率波长特性的特征曲线形状随法拉第转角的变化而沿透射率轴变化。



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

1.一种可调谐光滤波器, 包括:

5 第一偏振器和第二偏振器, 各自有一根决定传输偏振光偏振轴的传输轴;

放在所述第一偏振器与第二偏振器之间的双折射元件, 有一根决定传输偏振光两个正交分量之间相位差的光轴;

放在所述第一偏振器与第二偏振器之间的法拉第转子, 给传输偏振光一个可变法拉第转角;

10 所述双折射元件和所述法拉第转子的安排顺序以及所述双折射元件所述光轴与所述第一和第二偏振器所述每根传输轴之间相对位置关系是这样设置, 给出透射率波长特性的特征曲线形状随所述法拉第转角的变化而沿透射率轴变化。

2.按照权利要求1的可调谐光滤波器, 其中:

15 输入光射入到所述第一偏振器;

所述输入光有一预定波段;

所述预定波段比给出所述特征曲线周期的  $1/2$  谱宽还窄。

3.按照权利要求1的可调谐光滤波器, 其中:

输入光射入到所述第一偏振器; 和

20 所述第二偏振器也包括部分偏振器。

4.按照权利要求1的可调谐光滤波器, 其中:

所述法拉第转子放在所述双折射元件与所述第二偏振器之间;

输入光按顺序通过所述第一偏振器, 所述双折射元件, 所述法拉第转子, 和所述第二偏振器; 以及

25 所述第一偏振器传输轴与所述双折射元件光轴之间形成的夹角满足  $\phi \neq n\pi/2$  ( $n$  是整数)。

5.按照权利要求4的可调谐光滤波器, 其中所述夹角  $\phi$  等于  $\pi/4$ 。

6.按照权利要求5的可调谐光滤波器, 其中所述第一偏振器传输轴与所述第二偏振器传输轴互相平行。

7.按照权利要求 5 的可调谐光滤波器,其中所述第二偏振器传输轴与所述双折射元件光轴互相平行。

8.按照权利要求 4 的可调谐光滤波器,其中所述夹角 $\phi$ 不等于 $\Pi/4$ 。

5 9.按照权利要求 4 的可调谐光滤波器,还包括所述第一偏振器与所述双折射元件之间一个  $1/4$  波片。

10.按照权利要求 1 的可调谐光滤波器,其中:

所述法拉第转子放在所述第一偏振器与所述双折射元件之间;

10 输入光按顺序通过所述第一偏振器,所述法拉第转子,所述双折射元件,和所述第二偏振器;以及

所述双折射元件光轴与所述第二偏振器传输轴之间形成的夹角 $\theta$ 满足 $\theta \neq n\Pi/2$  ( $n$  是整数)。

11.按照权利要求 10 的可调谐光滤波器,其中所述 $\theta$ 等于 $\Pi/4$ 。

12.按照权利要求 11 的可调谐光滤波器,其中所述第一偏振器  
15 传输轴与所述第二偏振器传输轴互相平行。

13.按照权利要求 11 的可调谐光滤波器,其中所述第二偏振器传输轴与所述双折射元件光轴互相平行。

14.按照权利要求 10 的可调谐光滤波器,其中所述夹角 $\theta$ 不等于 $\Pi/4$ 。

20 15.按照权利要求 10 的可调谐光滤波器,还包括所述双折射元件与所述第二偏振器之间一个  $1/4$  波片。

16.按照权利要求 1 的可调谐光滤波器,其中:

所述法拉第转子包括第一法拉第转子和第二法拉第转子;

25 所述双折射元件放在所述第一法拉第转子与所述第二法拉第转子之间;以及

输入光按顺序通过所述第一偏振器,所述第一法拉第转子,所述双折射元件,所述第二法拉第转子,和所述第二偏振器。

17.按照权利要求 16 的可调谐光滤波器,还包括控制所述第一和第二法拉第转子的装置,使所述第一法拉第转子给出的法拉第转

角大致等于所述第二法拉第转子给出的法拉第转角。

18.按照权利要求 1 的可调谐光滤波器，其中：

所述双折射元件包括第一双折射元件和第二双折射元件；

5 所述法拉第转子放在所述第一双折射元件与所述第二双折射元件之间；以及

输入光按顺序通过所述第一偏振器，所述第一双折射元件，所述法拉第转子，所述第二双折射元件，和所述第二偏振器。

19.按照权利要求 18 的可调谐光滤波器，其中所述第一双折射元件和所述第二双折射元件有互相平行的光轴。

10 20.按照权利要求 1 的可调谐光滤波器，还包括放在所述第一偏振器与所述第二偏振器之间一个可变相移器；

其中输入光射入所述第一偏振器。

21.按照权利要求 20 的可调谐光滤波器，其中所述可变相移器包括第一和第二 1/4 波片以及放在所述第一 1/4 波片与所述第二 1/4 波片之间另一个法拉第转子，用于给出一个可变法拉第转角。

15 22.按照权利要求 1 的可调谐光滤波器，其中所述法拉第转子包括：放在光路上的磁光晶体；磁场施加装置，把有不同方向的第一磁场和第二磁场加到所述磁光晶体上，使所述第一磁场与第二磁场的合成磁场强度大于预定值；和磁场调整装置，用于至少改变所述

20 所述第一磁场和第二磁场二者之一。

23.按照权利要求 22 的可调谐光滤波器，其中所述第一磁场和第二磁场是在包含光通过所述磁光晶体传播方向的平面内以互相正交方向加上去的。

24.按照权利要求 22 的可调谐光滤波器，其中：

25 所述磁场施加装置包括电磁铁和永磁铁，分别施加所述第一磁场和所述第二磁场；和

所述磁场调整装置调整所述电磁铁的驱动电流。

25.按照权利要求 22 的可调谐光滤波器，其中：

所述磁场施加装置包括第一电磁铁和第二电磁铁，分别施加所

述第一磁场和所述第二磁场；和

所述磁场调整装置至少调整所述第一电磁铁和所述第二电磁铁二者之一的驱动电源。

26.按照权利要求 22 的可调谐光滤波器，其中所述预定值是一个相应于使所述磁光晶体中磁化强度饱和所需的磁场强度值。

27.按照权利要求 1 的可调谐光滤波器，其中：

所述第一偏振器和第二偏振器分别包括各自由双折射材料制成的第一楔形板和第二楔形板；

所述第一楔形板与第二楔形板这样安排，所述第一楔形板的顶部和底部分别与所述第二楔形板的底部和顶部相对放置，所述第一楔形板和第二楔形板的对应面互相平行；

所述可调谐光滤波器还包括：

第一光纤；

第一透镜，使来自所述第一光纤的光射入所述第一楔形板；

第二透镜，会聚来自所述第二楔形板的光束；以及

第二光纤，在给定条件下把所述第二透镜会聚的所述光束耦合到所述第二光纤中。

28.按照权利要求 27 的可调谐光滤波器，其中满足条件  $f \sin \theta < a$ ， $\theta$  是所述第一和第二楔形板中每个楔形板的偏振分离角， $a$  是所述第二光纤的纤芯直径， $f$  是所述第二透镜的焦距。

29.按照权利要求 1 的可调谐光滤波器，其中：

所述第一偏振器包括由双折射材料制成的第一楔形板；和

所述第二偏振器包括各自由双折射材料制成的第二和第三楔形板；

所述第一，第二，和第三楔形板是这样安排，所述第一楔形板的顶部和底部分别与所述第二楔形板的底部和顶部相对放置，所述第二楔形板的顶部和底部分别与所述第三楔形板的底部和顶部相对放置；

所述可调谐光滤波器还包括：

第一光纤；

第一透镜，使来自所述第一光纤的光射入所述第一楔形板；

第二透镜，会聚来自所述第三楔形板的光束；以及

5 第二光纤，在给定条件下把所述第二透镜会聚的所述光束耦合到所述第二光纤中。

30.按照权利要求 1 的可调谐光滤波器，其中：

所述第一偏振器和第二偏振器分别包括各自由双折射材料制成的第一平行平板和第二平行平板；

所述可调谐光滤波器还包括：

10 第一光纤；

第一透镜，使来自所述第一光纤的光射入所述第一平行平板；

第二透镜，会聚来自所述第二平行平板的光束；

第二光纤，在给定条件下把所述第二透镜会聚的所述光束耦合到所述第二光纤中。

15 31.按照权利要求 1 的可调谐光滤波器，还包括放在所述第一偏振器与所述第二偏振器之间至少一个滤波器单元；

所述滤波器单元分别包括相应于所述第一偏振器，所述双折射元件，和所述法拉第转子的元件。

20 32.按照权利要求 31 的可调谐光滤波器，还包括放在所述第一偏振器与所述第二偏振器之间的可变相移器；

所述滤波器单元还包括相应于所述可变相移器的元件。

## 可调谐光滤波器

## 技术领域

5 一般而言,本发明涉及应用于光纤通信系统的可调谐光滤波器,更具体的是,本发明涉及这样一种可调谐光滤波器,其中给出透射率波长特性的特征曲线形状沿透射率轴而变化。

## 背景技术

10 近年来,低损耗(例如,0.2dB/km)光纤的制造技术和使用技术已经成熟,利用光纤作为传输线的光纤通信系统已投入实际使用。而且,为了补偿光纤中的损耗,从而实现长距离传输,已建议或许已付诸实施使用放大信号光的光放大器。

15 专业上熟知的光放大器包括光放大媒质和泵浦光放大媒质的装置,待放大的信号光供给光放大媒质,泵浦装置使光放大媒质提供一个包括信号光波长在内的增益波段。例如,掺铒光纤放大器(EDFA)包括作为光放大媒质的掺铒光纤(EDF)和给EDF提供泵浦光的泵浦光源,此泵浦光具有预定的波长。通过预先设定泵浦光的波长在0.98 $\mu$ m波段或1.48 $\mu$ m波段内,能够获得包括1.55 $\mu$ m波长在内的增益波段。此外,以半导体芯片作为光放大媒质的另一种类型光放大媒质也是大家知道的。在这一情况下,把电流注入到半导体芯片中实现泵浦作用。

25 作为增大单根光纤传输容量的方法,波分多路复用技术(WDM)是大家知道的。在采用WDM的系统中,使用具有不同波长的多个光载波。多个光载波被分别调制,从而获得多个光信号,这些光信号被光学多路复用器波分多路复用以得到WDM信号光,WDM信号光输出到光纤传输线上。在接收端一侧,接收到的WDM信号光被光学多路分配器分成单独的光信号,传送的数据按照每个光信号被再现出来。因此,通过采用WDM,单根光纤中的传输容量可以随WDM信道数目而增大。

30 在把光放大器合并到采用WDM系统的情况下,传输距离受到

增益特性（增益的波长特性）的限制，这种增益特性往往称之为增益斜度。例如，在 EDFA 中，在  $1.55\mu\text{m}$  邻近的波长内产生增益偏差。当多个 EDFA 级联引起增益斜度积累时，包含在小增益波段内一个信道中的光学 SNR（信噪比）下降了。

5        为了克服光放大器的增益斜度，可以使用增益均衡器。在某一信道中由于增益斜度积累而使光学 SNR 的下降变得过大以前，放在适当位置处的增益均衡器完成增益均衡。

      可调谐光滤波器作为用做增益均衡器的光学器件是大家知道的。在可调谐光滤波器中，透射率（或损耗）的波长特性（透射率与波长的依赖关系）是可变的。例如，设置或控制可调谐光滤波器的波  
10        长特性，用于抵消光放大器的增益斜度，从而减小接收端各个光信号功率的信道之间偏差。

      通常的可调谐光滤波器有一个机械上可移动的部分。在这类可调谐光滤波器中，例如，光学干涉薄膜或衍射光栅上光束的入射角是  
15        位置上变化的，从而改变传输频带中的中心波长或拒斥频带中的中心波长。即，给出透射率波长特性的特征曲线形状沿波长轴而变化。此外，光子学技术公司（Photonics Technologies, Inc.）制成的可调谐光滤波器应用分束傅里叶（Fourier）滤波器作为基本原理，通过机械方法不仅使中心波长发生变化，也使拒斥量（透射率）本身发生变化。  
20        即，给出透射率波长特性的特征曲线形状不仅沿波长轴变化，也沿透射率轴变化。

      而且，作为用电学方法而不使用任何机械上可移动部分能够改变损耗波长特性的可调谐光滤波器，例如波导型马赫 - 陈德（Mach-Zehnder, MZ）光滤波器和声光可调谐滤波器（AOTF）是  
25        大家知道的。

      此外，已经提出应用双折射滤波器作为基本原理，能够改变中心波长的一种光学带通滤波器（日本专利公开出版物 No.6-130339）。

      有机械上可移动部分的可调谐光滤波器具有这样的缺点，高速运行是困难的，且没有可靠性。而且，MZ 光滤波器和 AOTF 目前具有这样一些缺点：（1）驱动电压高，（2）功率消耗大，（3）需要一个温度  
30        稳定装置，不可避免地造成体积庞大，和（4）不能获得可靠性。

      所以，希望设计一种满足以下条件的可调谐光滤波器，（1）没

有机械上可移动部分以获得高可靠性，（2）此滤波器可以用电学方法控制，和（3）驱动电压低，且功率消耗少。

作为满足上述条件的可调谐光滤波器，日本专利公开出版物 No.6-130339 中描述的可调谐光滤波器是值得注意的。这个可调谐光滤波器有一个可变法拉第转子，用于给出可变法拉第转角，其中给出透射率波长特性的特征曲线形状随法拉第转角的变化而沿波长轴变化。然而，此特征曲线形状不能沿透射率轴变化。在现有的增益均衡器应用中，例如，要求拒斥频带中的损耗深度是可变的，所以，不能说这种可调谐光滤波器总是具有作为增益均衡器可以胜任的性能。

#### 发明内容

所以，本发明的一个目的是，提供这样一种可调谐光滤波器，其中给出透射率波长特性的特征曲线形状沿透射率轴变化。本发明的其他目的会从以下描述中变得显而易见。

按照本发明的一个方面，提供一个包含第一偏振器和第二偏振器，双折射元件，以及法拉第转子的可调谐光滤波器。第一偏振器和第二偏振器各有一个决定传输偏振光偏振轴的传输轴，双折射元件放在第一偏振器与第二偏振器之间，用于给出传输偏振光中两个正交分量之间相位差。相位差是由双折射元件的光轴所决定。法拉第转子放在第一偏振器与第二偏振器之间，用于给传输偏振光一个可变法拉第转角。双折射元件和法拉第转子的安排顺序以及双折射元件光轴与第一偏振器和第二偏振器传输轴的相对位置关系，例如，这样设置，给出透射率波长特性的特征曲线形状随法拉第转角的变化沿透射率轴变化。

借助这种配置，安排顺序和相对位置关系按照特定方式设置，使特征曲线形状沿透射率轴可变，因此，可以改变拒斥频带中损耗深度，从而实现本发明诸多目的之一。

在本专利技术说明书中，术语“透射率”规定为功率透射率。

#### 附图说明

根据以下对本发明带有附图几个优选实施例的描述和所附权利要求书的研究，本发明的以上及其他目的，特征和优点，以及实现的方式，会变得更加显而易见，对本发明也理解得最透彻。

图 1 是说明现有技术的双折射滤波器图；

图 2A 和 2B 是曲线图，说明现有技术的可调谐光滤波器特性；

图 3A 和 3B 是曲线图，说明所要求的可调谐光滤波器特性；

图 4 是图 1 所示双折射滤波器中各个元件位置关系图；

图 5 是曲线图， $(1/\lambda)$  近似表示成一个线性函数；

图 6 是曲线图，说明透射率波长特性随图 4 中规定的角度  $\theta$  变化而变化；

图 7A 和 7B 分别表示本发明第一个和第二个优选实施例的可调谐光滤波器；

图 8 表示本发明每个优选实施例的可调谐光滤波器中各个元件之间位置关系；

图 9 是曲线图，表示本发明第一例的透射率波长特性；

图 10 是说明损耗斜度的曲线图；

图 11 是曲线图，表示本发明第二例的透射率波长特性；

图 12A 和 12B 是曲线图，表示本发明第三例的透射率波长特性；

图 13 是曲线图，表示本发明第四例的透射率波长特性；

图 14A 和 14B 分别表示本发明第三个和第四个优选实施例的可调谐光滤波器；

图 15 是曲线图，表示本发明第五例的透射率波长特性；

图 16 是曲线图，表示本发明第六例的透射率波长特性；

图 17 表示本发明第五个优选实施例的可调谐光滤波器；

图 18 是曲线图，表示本发明第七例的透射率波长特性；

图 19 表示本发明第六个优选实施例的可调谐光滤波器；

图 20 是曲线图，表示本发明第八例的透射率波长特性；

图 21 表示本发明第七个优选实施例的可调谐光滤波器；

图 22 表示本发明第八个优选实施例的可调谐光滤波器；

图 23 表示本发明第九个优选实施例的可调谐光滤波器；

图 24A 和 24B 是曲线图，表示图 23 所示可调谐光滤波器得到的一个透射率波长特性例子；

图 25 表示可适用于本发明的一种法拉第转子；

图 26 是说明图 25 中磁场和磁化强度的图；

图 27 表示可应用于本发明的另一种法拉第转子；

图 28 是说明图 27 中磁场和磁化强度的图；

图 29 表示可应用于本发明的又一种法拉第转子；

图 30 是说明图 29 中磁场和磁化强度的图；

图 31 表示本发明第十个优选实施例的可调谐光滤波器；

图 32 表示本发明第十一个优选实施例的可调谐光滤波器；

图 33 表示本发明第十二个优选实施例的可调谐光滤波器；

5 图 34A 是对应于图 31 所示的那种可调谐光滤波器；以及

图 34B 表示本发明第十三个优选实施例的可调谐光滤波器。

具体实施方式

现在参照附图详细地描述本发明的一些优选实施例。

首先参照图 1 描述一个双折射滤波器，因为它对于了解本发明  
10 可调谐光滤波器的结构和运行是有用的。图 1 所示双折射滤波器的配置是，在光路 OP 上有第一偏振器 P1，双折射片 BP，和第二偏振器 P2，并按这个顺序排列。此处采用正交的三维座标系统 (X, Y, Z)，其中 Z 轴平行于光轴 OP。我们假定，X 轴和 Y 轴分别与双折射片 BP 的两根光轴 (C1 轴和 C2 轴) 平行，且第一偏振器 P1 传输轴与 Y  
15 轴之间形成的夹角为  $45^\circ$ 。第二偏振器 P2 传输轴与 Y 轴之间形成的夹角是任意的。“偏振器的传输轴”指向通过此偏振器的线偏振光振动方向，一般定义成确定通过此偏振器的偏振光偏振轴的一根轴。

当通过第一偏振器 P1 的线偏振光进入到双折射片 BP 时，此线偏振光被分成偏振面平行于 C1 轴的一个分量和偏振面平行于 C2 轴的一个分量，这两个分量在双折射片 BP 中传播。在从双折射片 BP  
20 中输出时，这两个分量按照波长决定的相位差组合在一起。在双折射片 BP 厚度充分地大于入射光波长的情况下，在双折射片 BP 输出端的组合光偏振状态随波长而异。即，组合光可以随波长而成为线偏振光，或圆偏振光，或椭圆偏振光。第二偏振器 P2 的透射率取决于入射到第二偏振器 P2 上光的偏振状态，因而随波长而异。例如，假定  
25 第二偏振器 P2 的传输轴是固定的，使它平行于具有某一波长的线偏振光，则第二偏振器 P2 对于这个波长光的透射率原则上为 100%。在另一个波长上，第二偏振器 P2 对垂直于第二偏振器 P2 传输轴的线偏振光透射率原则上为 0%。此外，第二偏振器 P2 对于具有另一  
30 波长圆偏振光的透射率原则上为 50%，第二偏振器 P2 对于具有另一波长椭圆偏振光的透射率随椭圆偏振光的椭圆率而变化。因此，这个双折射滤波器的透射率随入射光的波长而变化。

图 2A 和 2B 是曲线图, 说明普通可调光滤波器的特性, 在日本专利公开出版物 No.6-130339 所描述的可调光滤波器中, 例如, 有一个包含法拉第转子和两个 1/4 波片的相移器代替图 1 所示双折射滤波器的双折射片 BP, 从而得到透射率随波长周期性变化的波长特性。如图 2A 中实线和虚线所示, 给出这个波长特性的特征曲线形状沿波长轴而变化。所以, 利用这种可调光滤波器, 就可以提供这样一种光学带通滤波器, 其特征曲线形状沿着图 2B 所示波长轴而变化。

图 3A 和 3B 是曲线图, 说明本发明所要求的可调光滤波器特性。在图 2A 中, 特征曲线形状沿着波长轴是变化的。与此进行对照, 本发明所要求的可调光滤波器有这样一种特征曲线, 其形状是沿着透射率轴而变化, 如图 3A 所示。更具体些说, 考虑到作为增益均衡器, 就要求实现一种陷波滤波器, 其中拒斥频带内的损耗深度是变化的, 如图 3B 中所示的一个例子。

现在, 对图 1 所示双折射滤波器进行定量分析, 其次, 发展成一个提供可调光滤波器的方法, 这种可调光滤波器具有图 3A 和 3B 所示的特性。我们现在假设, 在图 1 所示的双折射滤波器中, 第一偏振器 P1 的传输轴 P1A, 双折射片 BP 的两根光轴 (C1 轴和 C2 轴), 和第二偏振器 P2 的传输轴 P2A 互相之间的位置关系如图 4 所示。即, 令  $\phi$  表示传输轴 P1A 与 C2 轴之间形成的夹角,  $\theta$  表示传输轴 P2A 与 C2 轴之间形成的夹角。

当线偏振光  $\sin(\omega t)$  以平行于传输轴 P1A 的方向进入双折射滤波器时, 通过双折射片 BP 平行于 C1 轴传输光的分量 E1 和平行于 C2 轴传输光的分量 E2 可以按照如下表示:

$$E1 = \sin\phi \sin(\omega t + \epsilon_1)$$

$$E2 = \cos\phi \sin(\omega t + \epsilon_2)$$

其中  $\epsilon_1$  和  $\epsilon_2$  分别是分量 E1 和 E2 的相位延迟。从第二偏振器 P2 射出的光振幅按照如下给出:

$$\begin{aligned} & E1 \sin\theta + E2 \cos\theta \\ &= \sin\phi \sin\theta \sin(\omega t + \epsilon_1) + \cos\phi \cos\theta \sin(\omega t + \epsilon_2) \\ &= (\sin\phi \sin\theta \cos\epsilon_1 + \cos\phi \cos\theta \cos\epsilon_2) \sin\omega t + \end{aligned}$$

$$(\sin\phi\sin\theta\sin\varepsilon_1+\cos\phi\cos\theta\sin\varepsilon_2)\cos\omega t$$

所以，传输光的强度  $I$  由下式给出：

$$I=\cos^2(\phi+\theta)+\sin(2\phi)\sin(2\theta)\cos^2((\varepsilon_1-\varepsilon_2)/2)$$

令  $d$  表示双折射片 BP 的厚度， $\mu$  表示双折射片 BP 中寻常光线与非常光线之间折射率差， $\lambda$  表示波长，则下列式子成立，

$$(\varepsilon_1-\varepsilon_2)/2=\pi\mu d/\lambda$$

因此，传输光的强度  $I$  可以表示成波长  $\lambda$  的函数  $I(\lambda)$ ，得到公式 (1)

$$I(\lambda)=\cos^2(\phi+\theta)+\sin(2\phi)\sin(2\theta)\cos^2(\pi\mu d/\lambda) \quad \cdots (1)$$

根据公式 (1) 知道，传输光强度具有与波长的依赖关系，且周期性地随波长而变化。若波长  $\lambda$  值大于实际运行波段，则  $1/\lambda$  可以近似地表示成如下的线性函数：

$$1/\lambda = a\lambda + b$$

若波段设定在 1500nm 至 1600nm 范围，例如，如图 5 所示，则  $a = -4.165 \times 10^{-7} (1/\text{nm}^2)$ ， $b = 1.291 \times 10^{-3} (1/\text{nm})$ 。

忽略  $b$ ，且只考虑相对波长，得到公式 (1)，

$$I(\lambda)=\cos^2(\phi+\theta)+\sin(2\phi)\sin(2\theta)\cos^2(\pi\lambda/\text{FSR}) \quad \cdots (1)$$

其中 FSR (Free spectral Range 自由光谱区) 代表透射率波长特性中的波长周期，它按照以下式子表示：

$$\text{FSR} = 1/a\mu d \quad \cdots (2)$$

因此，可以知道，只要由双折射片 BP 材料确定的折射率差是恒定，通过调整双折射片 BP 的厚度  $d$ ，能够得到所需的 FSR。

公式 (1) 说明传输光强度随角度  $\phi$  和/或  $\theta$  的变化而变化。参照图 6，例如，在角度  $\phi$  固定在  $\pi/4(45^\circ)$  和角度  $\theta$  变化的情况下，说明透射率波长特性的变化。在图 6 中，竖直轴代表透射率 (真值)，水平轴代表 FSR 归一化的相对波长。角度  $\theta$  有正值和负值，角度  $\theta$  值的符号用来表示 C2 轴与传输轴 P2A 之间相对转动方向，以下要对此进行详细描述。

改变角度  $\theta$  的一个直接方法是旋转第二偏振器 P2 的传输轴 P2A。在现有的技术中，并不知道有不用机械方法能旋转其传输轴的任何偏振器。虽然可以提供用机械方法能旋转其传输轴的偏振器，但是有机械上可移动部分的可调光滤波器存在这样的问题，高速运行是困难的，且没

有可靠性。鉴于这个情况，本发明提出了利用可变法拉第转子的方法，如以下所详细描述。

角度 $\theta$ 是第二偏振器 P2 的传输轴 P2A 与 C2 轴之间形成的夹角，可以说，角度 $\theta$ 是入射到第二偏振器 P2 上光的偏振轴与第二偏振器 P2 的传输轴 P2A 之间形成的夹角。换句话说，“旋转第二偏振器 P2 的传输轴 P2A”基本上与“旋转入射到第二偏振器 P2 上光的偏振轴”相同。因此，设置法拉第转子以给出双折射片 BP 与第二偏振器 P2 之间一个可  
5 变法拉第转角，并旋转入射到第二偏振器 P2 上偏振光的方位角，能够实现与改变角度 $\theta$ 所得到的相同条件，所以，传输光强度可以随方位角的旋转而改变。  
10 转而改变。

类似地，在第一偏振器 P1 与双折射片 BP 之间设置一个法拉第转子，并旋转入射到双折射片 BP 上偏振光的方位角，能够实现与改变角度 $\phi$ 所得到的相同条件，所以，传输光强度可以随方位角的旋转而改变。

参照图 7A 和 7B，这两个图分别表示本发明第一个和第二个优选实施例的可调光滤波器。在图 7A 所示的第一个优选实施例中，可变法拉第  
15 转子 FR 放在双折射片 BP 与第二偏振器 P2 之间。在图 7B 所示的第二个优选实施例中，可变法拉第转子 FR 放在第一偏振器 P1 与双折射片 BP 之间。

现在再次确认实现本发明第一个和第二个优选实施例中可调光滤波器的最简单和最明确要求。在上述每个优选实施例中，双折射片 BP 和可  
20 变法拉第转子 FR 放在第一偏振器 P1 与第二偏振器 P2 之间。第一偏振器 P1 有一根决定被传输的偏振光偏振轴的传输轴 P1A，第二偏振器 P2 有一根决定被传输的偏振光偏振轴的传输轴 P2A。双折射片 BP 有决定被传输的偏振光两个正交分量之间相位差的光轴（C1 轴和 C2 轴，或二者中任意一个）。可变法拉第转子 FR 给被传输的偏振光一个可变法拉第  
25 转角。双折射片 BP 与可变法拉第转子 FR 的安排顺序以及光轴（例如，C1 轴）与传输轴 P1A 和 P2A 之间相对位置关系是这样设定的，给出透射率波长特性的特征曲线形状随法拉第转角的变化而沿透射率轴变化。

此外，双折射片 BP 的厚度设计成可以得到所需的 FSR。为了实现  
30 透射率的波长依赖关系，厚度大于  $1/4$  波片或  $1/2$  波片的双折射片，明确

地说，厚度充分大于工作波长的双折射片用作双折射片 BP。更明确些说，能够给出相当于工作波长 20 倍至 100 倍长度相位差的双折射片用作双折射片 BP。

在图 7A 所示第一个优选实施例中，输入光沿着光路 OP 按顺序通过第一偏振器 P1，双折射片 BP，可法拉第转子 FR，和第二偏振器 P2。

在图 7B 所示第二个优选实施例中，输入光沿着光路 OP 按顺序通过第一偏振器 P1，可法拉第转子 FR，双折射片 BP，和第二偏振器 P2。

图 8 表示本发明上述每个优选实施例的可调光滤波器中各个元件的位置关系。我们假定，在正交三维座标系统 (X, Y, Z) 中，Z 轴平行于光路 OP，Y 轴平行于第一偏振器 P1 的传输轴 P1A。而且， $\phi$ ， $\theta$ ，和  $\delta$  将重新定义，更确切的按如下所述：

$\phi$ ：双折射片 BP 的 C1 轴与第一偏振器 P1 的传输轴 P1A (Y 轴) 之间形成的夹角。我们假定，当 Y 轴向 C1 轴按顺时针方向旋转时，角度  $\phi$  取正的符号。

$\theta$ ：双折射片 BP 的 C1 轴与第二偏振器 P2 的传输轴 P2A 之间形成的夹角。我们假定，当传输轴 P2A 向 C1 轴按顺时针方向旋转时，角度  $\theta$  取正的符号。

$\delta$ ：第一偏振器 P1 的传输轴 P1A (Y 轴) 与第二偏振器 P2 的传输轴 P2A 之间形成的夹角。我们假定，当 Y 轴向传输轴 P2A 按顺时针方向旋转时，角度  $\delta$  取正的符号。

所以， $\phi = \theta + \delta$ 。此外，当 X 轴向 Y 轴按逆时针方向旋转时，法拉第转子 FR 给出的法拉第转角  $\alpha$  取正的符号。

在图 8 中，参考符号 PS 表示的椭圆 (包括圆) 与几条直线的组合代表  $\alpha = 0$  情况下在双折射片 BP 输出端偏振状态的波长依赖关系。

为了使可调光滤波器的传输光强度具有与波长的依赖关系，从公式 (1) 可以看出，必须避免 “ $\sin(2\phi)\sin(2\theta)$  总是为零” 的条件。所以，如图 7A 所示第一个优选实施例中所描述的，利用法拉第转子 FR，在与实际上改变角度  $\theta$  所得到的相同条件情况下，角度  $\phi$  必须满足  $\phi \neq n\pi/2$  ( $n$

是整数)。而且,如图7B所示第二个优选实施例中所描述的,利用法拉第转子FR,在与实际上改变角度 $\phi$ 所得到的相同条件下,角度 $\theta$ 必须满足 $\theta \neq n\pi/2$  ( $n$ 是整数)。

5 根据光学理论,光的偏振状态和光学元件作用在传输光上的操作可以分别用称之为琼斯矢量的 $1 \times 2$ 矩阵和称之为琼斯矩阵的 $2 \times 2$ 矩阵表示。而且,在每个传输点上的光功率可以表示成琼斯矢量中两个分量平方之和。

利用琼斯矢量和琼斯矩阵的矩阵运算,能够计算本发明可调光滤波器的透射率(功率透射率)。

10 图9表示在角度 $\phi$ 和 $\delta$ 设置成 $\phi = \pi/4$ 和 $\delta = 0$ ,以及法拉第转角 $\alpha$ 发生变化的条件下,图7A所示第一个优选实施例中透射率波长特性的计算结果。在图9中,竖直轴代表透射率(dB),水平轴代表FSR归一化的相对波长。由图9显而易见,在对应于相对波长为0.25和-0.25的两个点是固定点的条件下,给出透射率波长特性的特征曲线形状随法拉第  
15 转角 $\alpha$ 的变化而沿透射率轴(竖直轴)变化。

在 $\phi = \pi/4$ 情况下,在 $-\delta < \alpha < \pi/2 - \delta$  ( $\pi/2$ 范围)范围内改变改变法拉第转角 $\alpha$ ,或在 $\phi = -\pi/4$ 情况下,在 $-\delta > \alpha > -\pi/2 - \delta$  ( $\pi/2$ 范围)范围内改变法拉第转角 $\alpha$ ,能够实现透射率波长特性所有可以获得的条件。

20 根据以上这个关系,很清楚,在 $\delta = 0$ 情况下,即,在使传输轴P1A与P2A互相平行的情况下,对变化的法拉第转角 $\alpha$ 选取正符号或负符号就足够了。因此,设置 $\delta = 0$ ,给出 $0 < \alpha < \pi/2$ ,或 $0 > \alpha > -\pi/2$ ,所以,可以利用只给出一个方向变化的法拉第转角 $\alpha$ 的法拉第转子,从而简化法拉第转子FR的结构。这一效果也在图7B所示第二个优选实施例中类似  
25 地显示出来。

与此相反,利用能给出两个相反方向变化的法拉第转角 $\alpha$ 的法拉第转子并设置 $\delta = \phi$ ,当 $\alpha = 0$ 时,透射率成为与波长无关的常数。例如,在本发明可调光滤波器合并入一个系统的情况下,当切断控制而导致 $\alpha = 0$ 时,出现这样一种情况,与波长无关的恒定透射率是最好的。在此  
30 情况下, $-\pi/4 < \alpha < \pi/4$ 成立,所以,法拉第转角 $\alpha$ 的绝对值小于 $\pi/4$ 。因

此,在利用有磁光效应的可变法拉第转子情况下,当法拉第转角 $\alpha$ 设置成最大值时,就可以降低功率消耗。类似的讨论也适用于图 7B 所示的第二个优选实施例,其中设置 $\delta = 0$ 就足够了。

例如,具有图 9 所示特性的可调光滤波器可能加到有可变损耗斜度的功率均衡器中。术语“损耗斜度”指明给出用对数表示透射率波长特性的线性特征曲线斜率,如图 10 所示。这种有可变损耗斜度的功率均衡器,例如,对于光纤通信系统中均衡光放大器的增益斜度或补偿光纤的损耗斜度是有效的。

在利用有图 9 所示特性的可调光滤波器作为有可变损耗斜度的均衡器情况下,例如,按照以下方法选取工作波段,可以使此工作波段中损耗的平均值(以下称之为“平均损耗”)保持恒定。即,某些波长下有最大损耗或最小损耗,选取这些波长中相邻两个波长的中心值作为工作波段的中心波长,工作波段的带宽设置成小于  $1/2$  FSR。

图 11 表示所得到的这样一个例子,选取点 C 作为工作波段内的中心波长,点 C 给出点 A 与点 B 之间的中心值,这两个点在图 9 所示曲线中各自有最大损耗或最小损耗,并设置工作波段的带宽等于  $1/5$  FSR。由图 11 显而易见,得到有可变损耗斜度的特性。此外,也由图 11 显而易见,平均损耗并不因法拉第转角 $\alpha$ 的变化而变化。在图 11 所示曲线中,用虚线表示的完全直线清楚地说明,每条特征曲线大体上是线性的(图 13 和图 16 的情况也是如此)。

然而,具有图 11 特性的可调光滤波器存在一个问题,平均损耗达到 3dB。为了解决这个问题,考虑以下两个方法。

第一个方法是使传输轴 P1A 和 P2A 二者之一与双折射片 BP C1 轴之间夹角( $\phi$ 或 $\theta$ )不等于 $\pm \pi/4$ 。

例如,在图 7A 所示第一个优选实施例中,角度 $\phi$ 设置成满足  $0 < \phi < \pi/4$ ,法拉第转角 $\alpha$ 在  $-\delta < \alpha < 2\phi - \delta$  范围内变化。或者,角度 $\phi$ 设置成满足  $-\pi/4 < \phi < 0$ ,法拉第转角 $\alpha$ 在  $-\delta > \alpha > 2\phi - \delta$  范围内变化。

图 12A 和 12B 表示在角度 $\phi$ 和 $\delta$ 设置成 $\phi = \pi/6$ 和 $\delta = 0$ 以及法拉第转角 $\alpha$ 发生变化的条件下,透射率波长特性的计算结果。图 13 表示按照图 11 所示相对波长范围放大图 12A 和 13B 所示波长特性的一部分所得

到的波长特性。由图 13 显而易见，平均损耗小于图 11 所示波长特性的平均损耗。然而，在图 13 的例子中，平均损耗随法拉第转角 $\alpha$ 的变化而变化。

在图 7B 所示第三个优选实施例中，角度 $\theta$  设置成满足  $0 < \theta < \pi/4$ ，法拉第转角 $\alpha$  在  $-\delta > \alpha > -2\theta - \delta$  范围内变化。或者，角度 $\theta$  设置成满足  $-\pi/4 < \theta < 0$ ，法拉第转角 $\alpha$  在  $-\delta < \alpha < -2\theta - \delta$  范围内变化。在这个情况下，也能得到类似于图 7A 所示第一个优选实施例中的效果。

按照第一个方法，也在使角度 $\phi$  或 $\theta$  不等于  $\pm \pi/4$  上述情况下，设置  $\delta = 0$ ，可以利用只在一个方向变化的法拉第转角 $\alpha$  的法拉第转子。而且，在图 7A 所示第一个优选实施例中设置  $\delta = \phi$ ，或在图 7B 所示第二个优选实施例中设置  $\delta = \theta$ ，当切断控制导致  $\alpha = 0$  时，透射率可以保持恒定而与波长无关。

在适当位置处以适当角度插入一个  $1/4$  波片以改变偏振方向取向，如图 14A 和 14B 中每一个图所示，也能实现使 $\phi$  或 $\theta$  不等于  $\pm \pi/4$  所得到的效果。

图 14A 表示本发明第三个优选实施例的可调光滤波器。与图 7A 所示第一个优选实施例进行对照，第三个优选实施例的特征是， $1/4$  波片 2 添加在第一偏振器 P1 与双折射片 BP 之间。

图 14B 表示本发明第四个优选实施例的可调光滤波器。与图 7B 所示第二个优选实施例进行对照，第四个优选实施例的特征是， $1/4$  波片 2 添加在双折射片 BP 与第二偏振器 P2 之间。

第二个方法是利用部分偏振器作为第二偏振器 P2。术语“部分偏振器”指的是这样一种偏振器，在偏振面与传输轴正交的线偏振光入射时，其透射率值不等于零（反对数）。在部分偏振器中，具有偏振面与传输轴正交的线偏振光透射率规定为  $t$ 。

图 15 表示在角度 $\phi$  和 $\delta$  设置成  $\phi = \pi/4$  和  $\delta = 0$  以及法拉第转角 $\alpha$  发生变化的情况下，利用具有透射率  $t=0.25$ （-6dB）的部分偏振器作为第二偏振器 P2 的透射率波长特性的计算结果。

图 16 表示放大图 15 所示波长特性的一部分所得到的波长特性。与图 11 所示特性进行比较，在图 16 所示特性中平均损耗较小。此外，平

均损耗并不随法拉第转角 $\alpha$ 的变化而变化。

在图 7A 所示第一个优选实施例中实行第二个方法的情况下，设置 $\phi = \pm \pi/4$ ，可以使可变量（在某一波长下透射率的变化范围）成为最大，如上所述因为可以实现透射率波长特性中所有可能获得的条件。在图 7B 所示第二个优选实施例中实行第二个方法的情况下，设置 $\theta = \pm \pi/4$ ，可变量可以类似地成为最大。

在实行第二个方法中，设置 $\delta = 0$ ，也可以利用只在一个方向上变化的法拉第转角 $\alpha$ 的法拉第转子。而且，在图 7A 所示第一个优选实施例中设置 $\delta = \phi$ ，或在图 7B 所示第二个优选实施例中设置 $\delta = \theta$ ，当切断控制导致 $\alpha = 0$ 时，透射率能够保持恒定而与波长无关。

第一个方法和第二个方法对于给出有限值至最大损耗也是有效的。例如，在图 7A 所示第一个优选实施例中设置 $\phi = \pi/4$ 的情况下，功率透射率原则上为 0（反对数），所以由图 9 显而易见，最大损耗（dB）变为无穷大。在某些情况下，这种特性对于运行一个系统是不希望有的。利用第一个方法和第二个方法，最大损耗（dB）可以抑制成有限值。这一点由图 12A 和 12B 以及图 15 是显而易见的。

图 17 表示本发明第五个优选实施例的可调光滤波器。在以上每个优选实施例中，使用一个可变量法拉第转子 FR。与此进行对照，第五个优选实施例的特征是，两个可变量法拉第转子 FR1 和 FR2 放在第一偏振器 P1 与第二偏振器 P2 之间。双折射片 BP 放在法拉第转子 FR1 与 FR2 之间。这种配置能够提供一个不同于上述各个波长特性的波长特性。

例如，在角度 $\phi$ 和 $\delta$ 设置成 $\phi = \pm \pi/4$ 和 $\delta = n\pi/2$ （ $n$ 是整数）的条件下，考虑法拉第转子 FR1 给出的旋转法拉第转角 $\alpha_1$ 和法拉第转子 FR2 给出的旋转法拉第转角 $\alpha_2$ 的情况并保持 $\alpha_1 = \alpha_2$ 的关系不变。输入光沿着光路 OP 按顺序通过第一偏振器 P1，法拉第转子 FR1，双折射片 BP，法拉第转子 FR2，和第二偏振器 P2。

图 18 表示角度 $\phi$ 和 $\delta$ 设置成 $\phi = \pi/4$ 和 $\delta = 0$ 条件下，在 $0 < \alpha < \pi/4$ 范围内旋转法拉第转角 $\alpha$ （ $\alpha_1$ 和 $\alpha_2$ ）情况下的透射率波长特性。在此情况下，部分偏振器用作第二偏振器 P2。由图 18 显而易见，透射率波长特性中的最小损耗总是为零，而与法拉第转角 $\alpha$ 无关。

为了改变每个法拉第转角并保持关系式 $\alpha_1 = \alpha_2$ 不变,图17所示第五个优选实施例中采用一个连接到法拉第转子FR1和FR2的控制单元4。控制单元4控制法拉第转子FR1和FR2,使法拉第转子FR1给出的法拉第转角 $\alpha_1$ 与法拉第转子FR2给出的法拉第转角 $\alpha_2$ 大致相等。

5 图19表示本发明第六个优选实施例的可调光滤波器。在以上各个优选实施例中,使用一个双折射片BP,与此进行对照,第六个优选实施例的特征是,两个双折射片BP1和BP2放在第一偏振器P1与第二偏振器P2之间。可变法拉第转子FR放在双折射片BP1与BP2之间。输入光沿着光路OP按顺序通过第一偏振器P1,双折射片BP1,法拉第转子FR,10 双折射片BP2,和第二偏振器P2。

利用两个双折射片BP1和BP2,可以得到类似于图18所示波长特性的波长特性。例如,角度 $\phi_1$ 和 $\phi_2$ 分别规定为相对于双折射片BP1和BP2的光轴,类似于上述的角度 $\phi$ ,且角度 $\phi_1$ 与 $\phi_2$ 设置成相同( $\phi_1 = \phi_2$ )。此外,角度 $\phi_1$ , $\phi_2$ ,和 $\delta$ 设置成 $\phi_1 = \pm \pi/4$ , $\phi_2 = \pm \pi/4$ ,和 $\delta = n\pi/2$ 15 ( $n$ 是整数)。

图20表示在角度 $\phi_1$ , $\phi_2$ ,和 $\delta$ 设置成 $\phi_1 = \phi_2 = \pi/4$ 和 $\delta = 0$ 的条件下,法拉第转子FR给出的在 $0 < \alpha < \pi/2$ 范围内旋转法拉第转角 $\alpha$ 的透射率波长特性。在此情况下,部分偏振器用作第二偏振器P2。由图20显而易见,透射率波长特性中的最小损耗总是为零,而与法拉第转角 $\alpha$ 无20 关。

在图19所示第六个实施例中也是一样,设置 $\delta = 0$ ,可以利用只在一个方向上变化的可变法拉第转角的法拉第转子。

图21表示本发明第七个优选实施例的可调光滤波器。这个优选实施例的特征是,可变相移器6添加在第一偏振器P1与第二偏振器P2之间。25 可变相移器6给出平行于光轴的偏振分量与垂直于光轴的偏振分量之间一个相位差(推迟)。利用加到可变相移器6的控制信号使相位差是可变的。第一偏振器P1,双折射片BP,可变法拉第转子FR,和第二偏振器P2的安排是按照图7A所示的第一个优选实施例。此外,可变相移器6放在第一偏振器P1与双折射片BP之间。

30 按照图21所示的优选实施例,给出透射率波长特性的特征曲线形

状, 不仅随可变法拉第转子 FR 给出的法拉第转角变化而沿透射率轴变化, 而且随可变相移器 6 给出的相位差变化而沿波长轴变化。所以, 不仅可以得到图 3A 和 3B 所描述的可调光滤波器特性, 而且可以得到图 2A 和 2B 所描述的可调光滤波器特性。

5 为了最有效地改变沿波长轴的特征曲线形状, 最好是, 把可变相移器 6 光轴与双折射片 BP 光轴之间的夹角设定为  $n\pi/2$  ( $n$  是整数)。

可以采用有电光效应的光学元件, 如  $\text{LiNbO}_3$ , 作为可变相移器 6。然而, 这种有电光效应的可变相移器一般需要很高的驱动电压。

图 22 表示本发明第八个优选实施例的可调光滤波器。这个优选实施例采用有特定结构的可变相移器 6, 其目的是减小可变相移器 6 的驱动电压。图 22 所示的可变相移器 6 包含两个  $1/4$  波片 10 和 12 以及放在  $1/4$  波片 10 与 12 之间另一个可变法拉第转子 8。  $1/4$  波片 10 的光轴与  $1/4$  波片 12 的光轴之间形成的夹角设定为  $\pi/2$ 。把  $1/4$  波片 10 和 12 的每根光轴与双折射片 BP 的光轴之间夹角设定为  $n\pi/2$  ( $n$  是整数), 给出这个可调光滤波器透射率波长特性的特征曲线形状可以随可变法拉第转子 8 给出的法拉第转角变化而沿波长轴变化。

在法拉第转子 8 给出的法拉第转角为  $\beta$  情况下, 可变相移器 6 给出的偏振光两个正交分量之间相位差就是  $2\beta$ 。其原理从披露的日本专利公开 No.6-130339 的内容和已知的专业中是显而易见的, 所以此处省略了对其的描述。

图 23 表示本发明第九个优选实施例的可调光滤波器。与图 22 所示第八个优选实施例进行对照, 第九个优选实施例的特征是, 至少有一个滤波器单元添加在第一偏振器 P1 与第二偏振器 P2 之间。更具体些说, 有  $N$  组 ( $N$  是大于 1 的整数) 滤波器单元 14 ( $\#1$  至  $\#N$ )。在这些滤波器单元 14 ( $\#1$  至  $\#N$ ) 中, 第  $i$  个 ( $i$  是满足  $1 \leq i \leq N$  的整数) 滤波器单元 14 ( $\#i$ ) 包含偏振器 P1 ( $\#i$ ), 可变相移器 6 ( $\#i$ ), 双折射片 BP ( $\#i$ ), 和法拉第转子 FR ( $\#i$ ), 它们分别对应于第一偏振器 P1, 可变相移器 6, 双折射片 BP, 和可变法拉第转子 FR。

这个可调光滤波器整体的透射率波长特性是由图 22 所示可调光滤波器的透射率波长特性与每个滤波器单元 14 ( $\#1$  至  $\#N$ ) 的透射率波长

特性之和给出的。因此，可以任意设置透射率波长特性。

例如，在图 23 所示可调光滤波器中，得到了各自给出透射率波长特性的三条特征曲线情况，如图 24A 所示，总的透射率波长特性是由这三条特征曲线之和给出，所以可以得到所需要的透射率波长特性，如图 24B 所示。

虽然在这个优选实施例中利用多个滤波器单元 14，每个滤波器单元 14 ( $\#i$ ) 有可变相移器 6 ( $\#i$ )，用于改变沿波长轴的特征曲线，以及有双折射片 BP ( $\#i$ ) 和法拉第转子 FR ( $\#i$ )，用于改变沿透射率轴的特征曲线，但是，可变相移器 6 ( $\#i$ ) 或双折射片 BP ( $\#i$ ) 和法拉第转子 FR ( $\#i$ ) 可以根据要求而省去。

现在描述给出可变法拉第转角的九个具体实施例法拉第转子。

一般来说，例如，在某个磁场加到磁光晶体上的条件下，即，磁光晶体放置在某个磁场条件下，当线偏振光通过此磁光晶体时，线偏振光的偏振方向（定义为包含线偏振光电场矢量平面到垂直于线偏振光传播方向平面的投影）总是绕着固定的方向旋转，而与传播方向无关。这个现象称之为法拉第旋转，偏振方向转角的大小（法拉第转角）取决于所加磁场产生的磁光晶体中电磁化强度和方向。更具体些说，法拉第转角是由磁光晶体中磁化强度在光传播方向上分量的大小所决定。因此，配置一个带磁光晶体的法拉第转子和在与光传播方向相同的方向上施加磁场到磁光晶体的装置，看起来似乎可以通过调整所加磁场有效地调整法拉第转角。

然而，此处应当考虑到，当所加磁场的幅度相对小时，所加磁场产生的磁光晶体中磁化强度并不达到饱和状态，而是在磁光晶体中存在着许多磁畴。这许多磁畴的存在破坏了法拉第转角的重复性，或者，即使保证了很好的重复性，也很难连续地改变法拉第转角。此外，当许多磁畴存在于磁光晶体中时，产生了由于一些相邻磁畴之间界面处光散射引起的衰减现象，给实际应用带来不利的影响。

在试图解决这个问题本发明的优选实施例中，可变法拉第转子包括：位于光路上的磁光晶体；磁场施加装置，把有不同方向的第一磁场和第二磁场加到磁光晶体上，使第一磁场和第二磁场和合成磁场强度大

于预定值（例如，相当于使磁光晶体中磁化强度饱和和所需的磁场强度值）；和磁场调整装置，用于至少改变第一磁场和第二磁场二者之一。

磁光晶体中磁化强度已经饱和的条件可以理解为磁光晶体中许多磁畴已经变成单个磁畴的条件，

5 最好是，第一磁场和第二磁场是在包含光通过磁光晶体的传播方向平面上以两个正交方向施加上去的。

图 25 表示可适用于本发明的可变化拉第转子 32。可变化拉第转子 32 可用作可变化拉第转子 FR 或可变化拉第转子 8。法拉第转子 32 包括磁光晶体 41；永磁铁 42 和电磁铁 43，以两个互相正交方向的磁场加到  
10 磁光晶体 41 上；以及可变电流源 44，用于给电磁铁 43 一个驱动电流。

例如，利用薄片 YIG（钇铁石榴石）或外延生长的  $(\text{GdBi})_3(\text{FeAlGa})_5\text{O}_{12}$  晶体作为磁光晶体 41，可以降低驱动电流。

例如，磁光晶体 41 的厚度方向平行于 Y 轴。在此情况下，永磁铁 42 和电磁铁 43 加到磁光晶体 41 上的两个磁场方向分别与 Z 轴和 X 轴平  
15 行。参考数字 45 表示穿过磁光晶体 41 的光束。

图 26 是说明图 25 所示法拉第转子 32 中加到磁光晶体 41 上磁场的方向和强度（幅度），以及磁光晶体 41 中磁化强度的方向和大小。

在只有永磁铁 42 把磁场矢量 51 加到磁光晶体 41 上的情况下，磁光晶体 41 中的磁化强度矢量平行于 Z 轴，如参考数字 52 所示。在此情况  
20 下，所加磁场强度（磁场矢量 51 的长度）设置成使磁光晶体 41 中磁化强度（磁化强度矢量 52 的长度）饱和。我们假设，所需最大法拉第转角是在这个条件下得到的。

当磁场矢量 53 是由电磁铁 43 以平行于 X 轴方向加上时，合成磁场是由磁场矢量 51 与 53 的合成矢量给出的，如参考数字 54 所示。这个合  
25 成磁场 54 在磁光晶体 41 中产生一个磁化强度矢量 55。磁化强度矢量 55 与磁场矢量 54 互相平行，磁化强度矢量 55 的长度与磁化强度矢量 52 的长度相等。

虽然磁光晶体 41 中磁化强度是固定的，但是磁光晶体 41 中磁化强度对法拉第转角的贡献程度并不总是相同，因为法拉第转角取决于磁化  
30 强度方向与光传播方向之间的关系。即，把磁化强度矢量 52 的状况与磁

化强度矢量 55 的状况进行比较,磁化强度矢量 55 的 Z 方向分量 56 小于磁化强度矢量 52 的 Z 方向分量(磁化强度矢量 52 自身)。顺便说一句,对应于磁化强度 55 的法拉第转角小于对应于磁化强度矢量 52 的法拉第转角。

- 5 按照这个优选实施例,磁光晶体 41 中的磁化强度在法拉第转角整个变化范围内总是饱和的,从而消除了磁光晶体 41 中形成许多磁畴造成的不利影响。即,可以提高法拉第转角的重复性,且法拉第转角能够连续地变化。并且,通过调节从可变电流源 44 提供的驱动电流,法拉第转角能够以良好的重复性连续地发生变化。因此,把法拉第转子 32 应用于本
- 10 发明,就可以提供一个能够高速运行且有高度重复性的可调光滤波器。

所以,把这样一个可变法拉第转子应用于本发明,就可以提供一个透射率波长特性重复性好且可连续变化的可调光滤波器。

- 图 27 表示可适用于本发明的另一种法拉第转子 32'。法拉第转子 32' 不同于图 25 所示法拉第转子 32 的是,两个平行平表面 61 和 62 是在矩
- 15 形磁光晶体 41 相对的两个边缘上形成的,且光束 63 穿过两个平表面 61 和 62。因此,由永磁铁 42 产生的磁场方向和由电磁铁 43 产生的磁场方向都与光传播方向(平行于 Z 轴)倾斜约  $45^\circ$ 。

- 图 28 是说明图 27 所示法拉第转子 32' 中加到磁光晶体 41 上磁场的方向和强度,以及磁光晶体 41 中磁化强度的方向和大小。电磁铁 43 施
- 20 加的磁场在强度和方向上是可以调节的,其范围是在参考数字 71 所示状态与参考数字 72 所示状态之间。参考数字 73 表示永磁铁 42 所加的磁场。在此情况下,合成磁场在强度和方向上的变化范围是在参考数字 74 所示状态与参考数字 75 所示状态之间。与此相联系,磁光晶体 41 中磁化强度在强度和方向上的变化范围是在参考数字 76 所示状态与参考数字 77
- 25 所示状态之间。利用这种法拉第转子 32',可以增大法拉第转角的变化范围而无需使电磁铁 43 驱动电流的变化范围增大很多。

永磁铁 42 施加的磁场设置成这样,使磁光晶体 41 中磁化强度在参考数字 78 所示状态下已充分饱和,此时磁化强度为最小(电磁铁 43 所加的磁场为零)。

- 30 图 29 表示可适用于本发明的又一种可变法拉第转子 32''。法拉第转

子 32”不同于图 25 所示法拉第转子 32 的是，电磁铁 81 代替图 25 所示的永磁铁 42，且添加一个可变电流源 82，以便给电磁铁 81 提供驱动电流。

图 30 是说明图 29 所示法拉第转子 32”中加到磁光晶体 41 上磁场的方向和强度，以及磁光晶体 41 中磁化强度的方向和大小。按照图 29 所示的优选实施例，通过调节由磁场 43 和 81 所加的磁场，可以连续地改变合成磁场而保持饱和磁化强度不变，如参考数字 91 至 94 所示。与此相联系，磁光晶体 41 中磁化强度连续地变化，如参考数字 95 至 98 所示。按照图 30 所示的优选实施例，法拉第转角的变化范围可以很容易地增大，且无需使用图 27 所示一个复杂形状的磁光晶体。

在利用法拉第转子 32”的情况下，磁光晶体 41 中磁化强度  $Z$  分量的方向可以随可变电流源 44 或 82 极性的变化而变化。因此，法拉第旋转方向可以按照要求进行变化。例如，法拉第转角可以在相对于  $0^\circ$  的  $\pm 45n^\circ$ （ $n$  是正整数）范围内变化。因此，把法拉第转子 32”应用于本发明，例如，如上所述设定角度  $\delta$  为  $\delta = \phi$  或  $\delta = \theta$ ，当法拉第转角为  $0^\circ$  时，透射率可以保持恒定而与波长无关。例如，当法拉第转子 32”合并入一个系统并切断控制以关闭可变电流源 44 和 82 时，法拉第转角就变为  $0^\circ$ 。所以，透射率成为常数而与波长无关，从而便于重新启动系统。

图 31 表示本发明第十个优选实施例的可调光滤波器。在这个优选实施例中，各自用双折射材料制成的楔形板 121 和 122 分别用作第一偏振器 P1 和第二偏振器 P2。与此相联系，这个优选实施例还包括：光纤 123；透镜 124，用于改变从光纤 123 射出的光束参量（例如，使出射光成为平行光），并把此光束射向楔形板 121；透镜 125，用于会聚从楔形板 122 射出的光束；和光纤 126，在给定的条件下由透镜 125 会聚的光束耦合到此光纤中。

楔形板 121 和 122 安排成这样，使楔形板 121 的顶部和底部分别与楔形板 122 的底部和顶部相对放置，楔形板 121 和 122 相应的表面互相平行。即，楔形板 121 和 122 具有相同的形状。

例如，楔形板 121 的光轴与  $Y$  轴平行，楔形板 122 的光轴与  $Y$  轴平行。

作为偏振器的每个楔形板 121 和 122 的传输轴定义为非常光线的偏

振方向，其偏振面与光轴平行，或定义为寻常光线的偏振方向，其偏振面与光轴垂直。

从光纤 123 激励端射出的光被透镜 124 准直成为一个平行光束。这个光束用参考数字 130 表示，其厚度忽略不计。光束 130 在楔形板 121 中被分成相应于寻常光线的光束 131 和相应于非常光线的光束 132。

光束 131 和 132 按顺序通过双折射片 BP 和可变法拉第转子 FR，分别成为光束 133 和 134。光束 133 和 134 的偏振状态是由法拉第转子 FR 给出的法拉第转角所决定。

光束 133 在楔形板 122 中被分成相应于寻常光线的光束 135 和相应于非常光线的光束 136。光束 134 在楔形板 122 中被分成相应于非常光线的光束 137 和相应于寻常光线的光束 138。

考虑到光束 135 至 138 以前折射的经过以及楔形板 121 和 122 的形状和布置，光束 135 与光束 137 互相平行，而光束 136 与光束 138 互相不平行。因此，只有光束 135 和 137 可以会聚通过透镜 125，耦合到光纤 126 的激励端。

光束 135 和 137 的总功率与光束 136 和 138 的总功率之比率取决于法拉第转子 FR 给出的法拉第转角。例如，在光束 133 和 134 是线偏振光且与光束 131 和 132 分别有相同偏振面的情况下，光束 133 和 134 分别完全转变成光束 135 和 137。在光束 133 和 134 是线偏振光且其偏振面分别垂直于光束 131 和 132 偏振面的情况下，光束 133 和 134 分别完全转变成光束 136 和 138。

当法拉第转子 FR 给出的法拉第转角恒定时，光束 135 和 137 的总功率与光束 130 的偏振状态无关。由以上描述显而易见，光束 135 和 137 的总功率与其波长有关。

按照这个优选实施例，所以能使可调光滤波器的透射率与输入光的偏振状态无关。即，可以提供一个与偏振方向无关的可调光滤波器。

图 32 表示本发明第十一个优选实施例的可调光滤波器。在这个优选实施例中，双折射材料制成的楔形板 141 用作第一偏振器 P1，各自由双折射材料制成的两个楔形板 142 和 143 用作第二偏振器 P2。楔形板 141 的顶部和底部分别与楔形板 142 的底部和顶部相对放置。楔形板 143 的

顶部和底部分别与楔形板 142 的底部和顶部相对放置。

令 $\theta_1$ ， $\theta_2$ ，和 $\theta_3$ 分别表示楔形板 141，142，和 143 的楔角； $d_1$ 表示楔形板 141 与 142 之间距离， $d_2$ 表示楔形板 142 与 143 之间距离，做成并安排每个楔形板以满足以下两个方程

5 
$$\theta_2 = \theta_1 + \theta_3, \quad d_1 \sin\theta_1 = d_2 \sin\theta_3$$

楔形板 141 的光轴与 Y 轴平行，楔形板 142 和 143 的两根光轴互相平行。例如，楔形板 142 和 143 的光轴与 Y 轴平行。

在图 31 所示的优选实施例中，楔形板 121 与 122 之间的距离必须相对较大，因为双折射片 BP 和法拉第转子 FR 放在楔形板 121 与 122 之间。  
10 因此，光束 135 和 137 之间距离变得相对较大，所以，光束 135 和 137 容易受到象差的影响，例如，受到球面象差的影响。

按照图 32 所示的优选实施例，从透镜 124 射出的光束被楔形板 141 分解，其次被楔形板 142 和 143 组合。此时，从楔形板 143 输出的寻常光线分量和非常光线分量的两条光程大体上互相重合。因此，这两个分  
15 量被透镜 125 有效地输入到光纤 126 中，几乎不受透镜象差的影响。

图 33 表示本发明第十二个优选实施例的可调光滤波器。在这个优选实施例中，各自用双折射材料制成的两个平行平板 151 和 152 分别用作第一偏振器 P1 和第二偏振器 P2。两个平行平板 151 和 152 有相同的厚度。平行平板 151 和 152 的两根光轴这样安排，它们互相正交，且每根  
20 光轴相对于 Z 轴倾斜  $45^\circ$ 。

作为偏振器的平行平板 151 和 152 中的每根传输轴定义为非常光线的偏振方向，其偏振面与光轴平行，或定义为寻常光线的偏振方向，其偏振面与光轴垂直。

从光纤 123 激励端射出的光因透镜 124 而改变其光束参量，例如，  
25 变成一个会聚光束 160。光束 160 在平行平板 151 中被分成相应于寻常光线的光束 161 和相应于非常光线的光束 162。光束 161 与光束 162 互相平行。光束 161 和 162 按顺序通过双折射片 BP 和法拉第转子 FR，分别成为光束 163 和 164。光束 163 和 164 的偏振状态是随法拉第转子 FR 给出的法拉第转角而决定。光束 163 在平行平板 152 中被分成相应于寻常  
30 光线的光束 165 和相应于非常光线的光束 166。光束 164 在平行平板

152 中被分成相应于寻常光线的光束 167 和相应于非常光线的光束 168。

光束 165 与光束 168 重合，因为平行平板 151 与 152 互相平行，且沿 Z 轴有相同的厚度。因此，只有光束 165 和 168 能够被透镜 125 会聚，进入光纤 126 中。光束 165 和 168 的总功率与光束 166 和 167 的总功率之比率取决于法拉第转子 FR 给出的法拉第转角。

当法拉第转子 FR 给出的法拉第转角恒定时，光束 165 和 168 的总功率与光束 160 的偏振状态无关。由以上描述显而易见，光束 165 和 168 的总功率与其波长有关。

按照这个优选实施例，也可以提供一个与偏振方向无关的可调光滤波器。

在利用双折射材料制成的平行平板作为每个偏振器情况下，通过添加一个 1/2 波片，可以采用各种布置。

图 34A 和 34B 说明本发明第十三个实施例的可调光滤波器。图 34A 对应于图 31 所示第十个实施例，而图 34B 展示第十三个实施例。

在图 34A 所示的配置中，楔形板 121 和 122 都有一个偏振分离角或楔形角  $\theta'$ 。光束 135 和 137 被透镜 125 耦合到光纤 126 中，但是光束 136 和 138 并不被耦合到光纤 126 中。

在图 34B 所示第十三个实施例中，所用楔形板 121' 和 122' 都有小于楔形角  $\theta'$  的楔形角  $\theta''$ 。光束 135' 至 138' 从楔形板 122' 输出。原则上，光束 135' 和 137' 被透镜 125 完全耦合到光纤 126 中。因为楔形角  $\theta''$  小于楔形角  $\theta'$ ，原先并不期望耦合到光纤 126 中的光束 136' 和 138' 可能部分地耦合到光纤 126 中。若出现光束 136' 和 138' 的这种部分耦合，就可以得到类似于利用部分偏振器作为第二偏振器 P2 所得到的效果。

光束 136' 和 138' 部分耦合到光纤 126 中的条件是  $a > f \sin \theta''$ ，其中  $a$  是光纤 126 的纤芯直径， $f$  是透镜 125 的焦距。在满足这个条件下，可以降低可调光滤波器的平均损耗，如同利用部分偏振器作为第二偏振器 P2 的情况一样。

至此已经描述了本发明各种优选实施例，上述优选实施例中的两个或多个可以组合起来实现本发明。

如上所述，按照本发明可以提供这样一种可调光滤波器，其中给出

透射率波长特性的特征曲线形状沿透射率轴变化。从以上描述中本发明的其他效果也变得显而易见。

本发明并不局限于上述几个优选实施例的细节。本发明的范围是由所附权利要求书规定，所有属于权利要求书范围内相当内容的变化和改  
5 动都包含在本发明内。

图 1  
现有技术

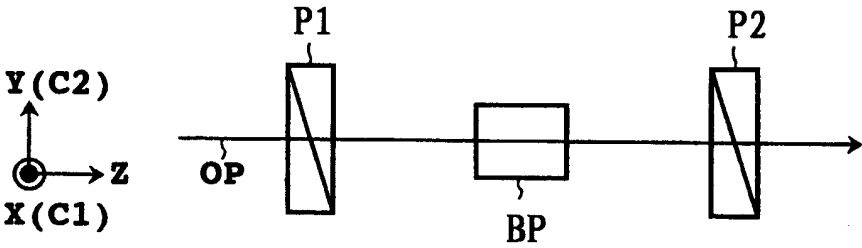


图 2A  
现有技术

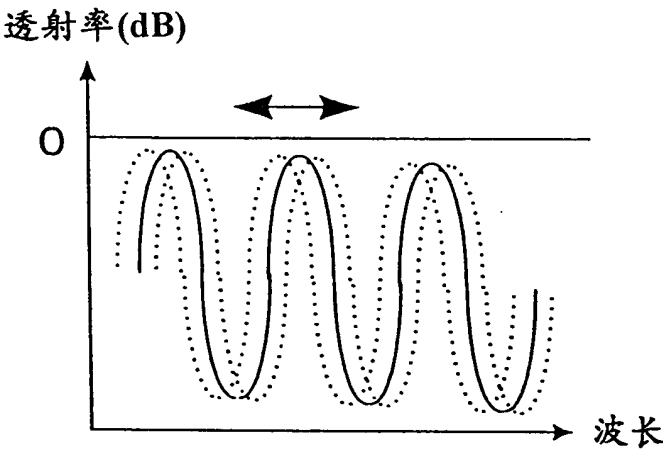


图 2B  
现有技术

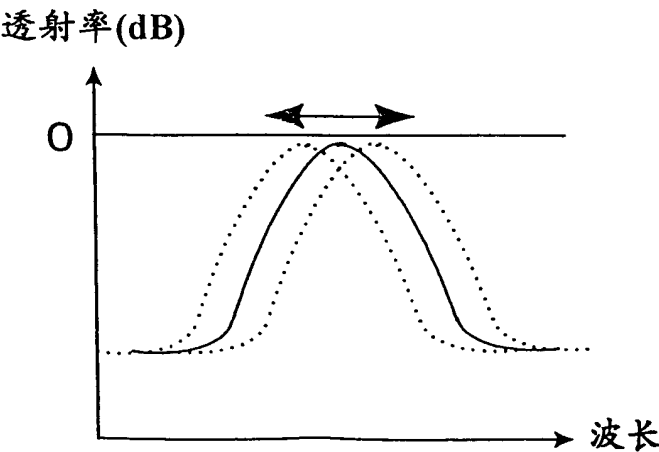


图 3A

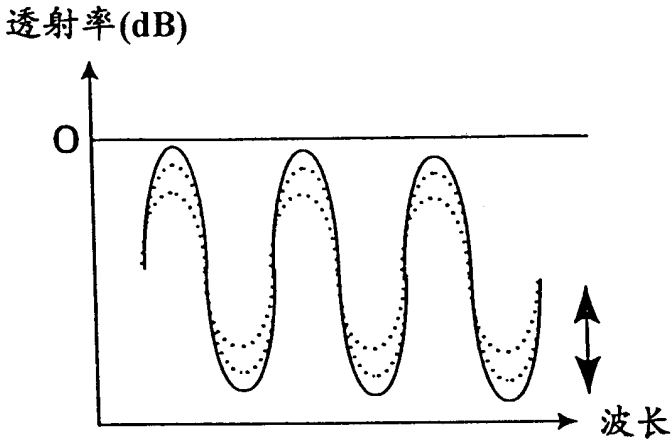


图 3B

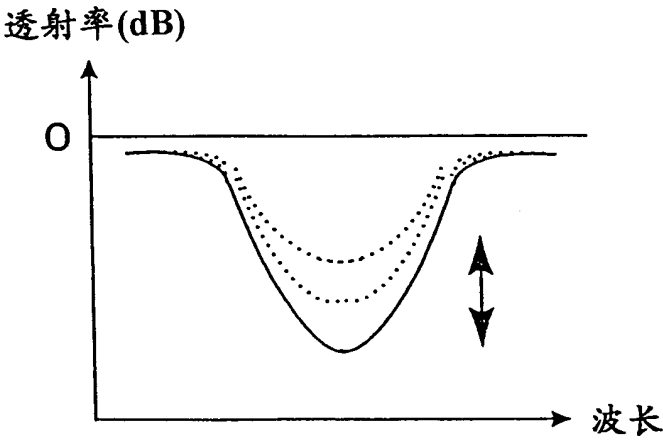


图 4

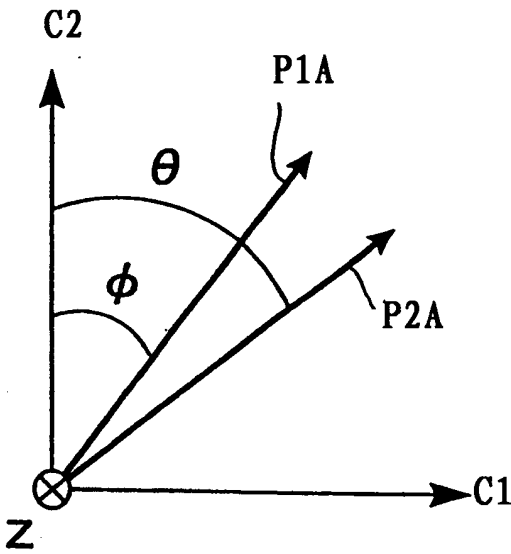


图 5

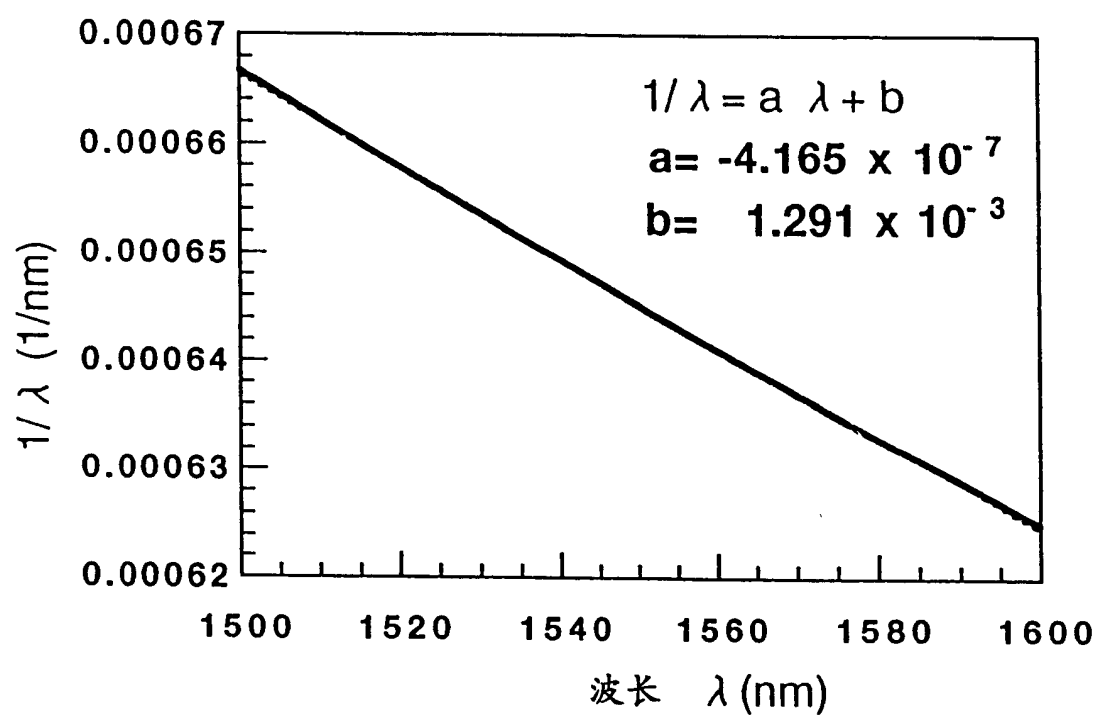


图 6

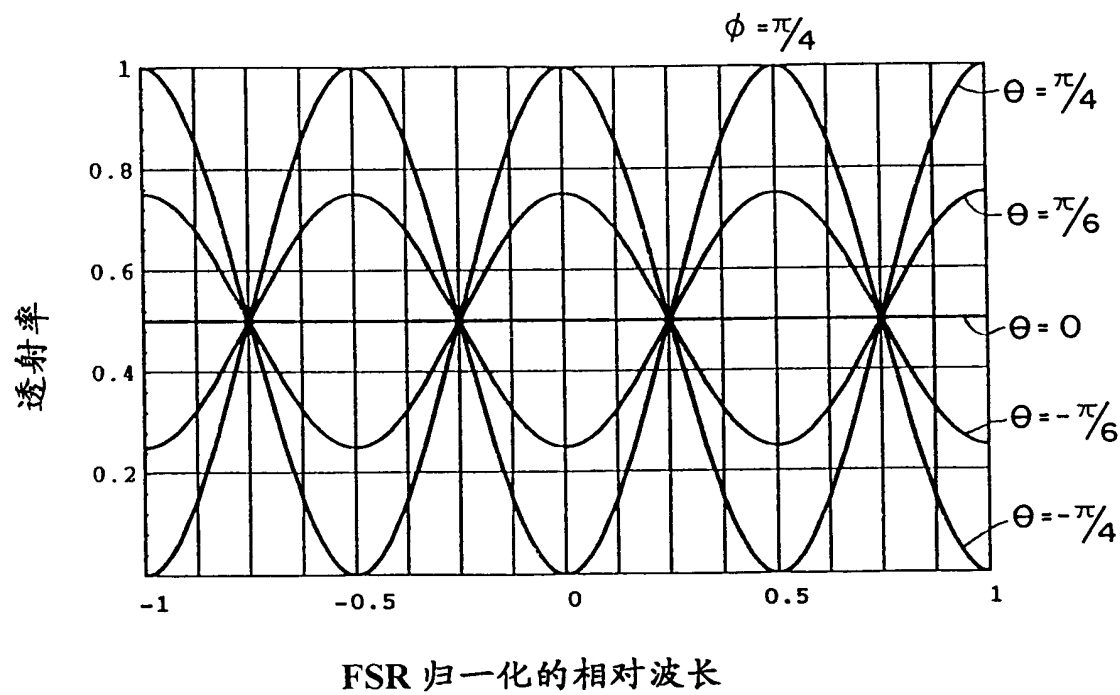


图 7A

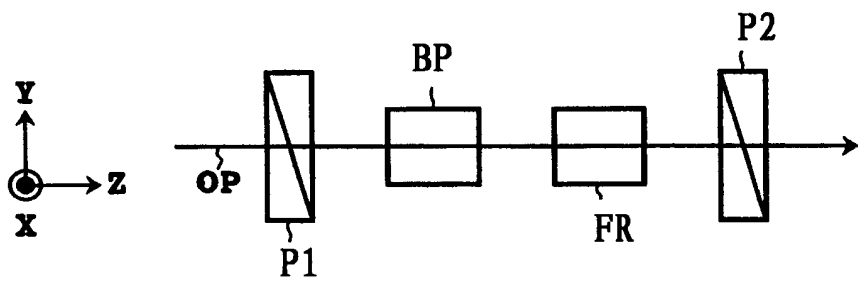


图 7B

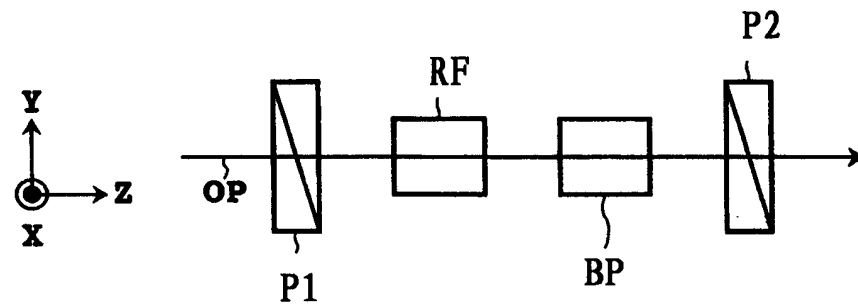


图 8

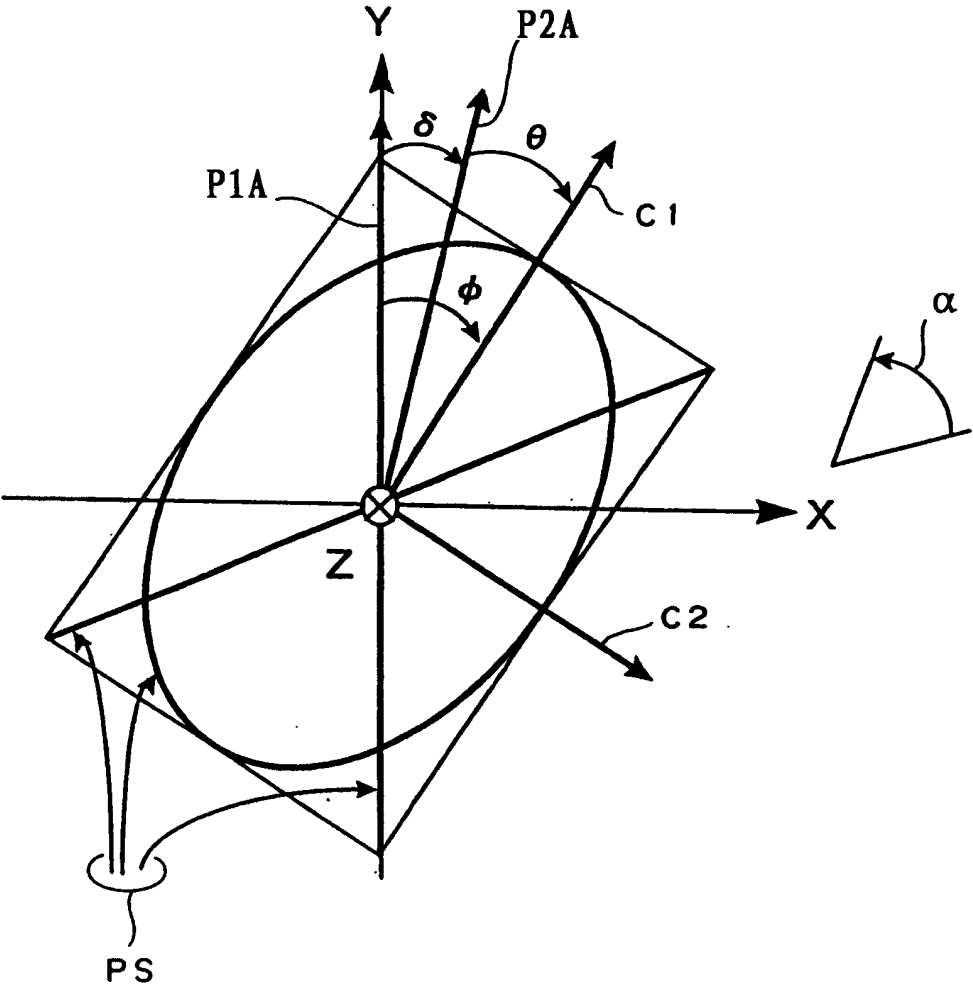


图 9

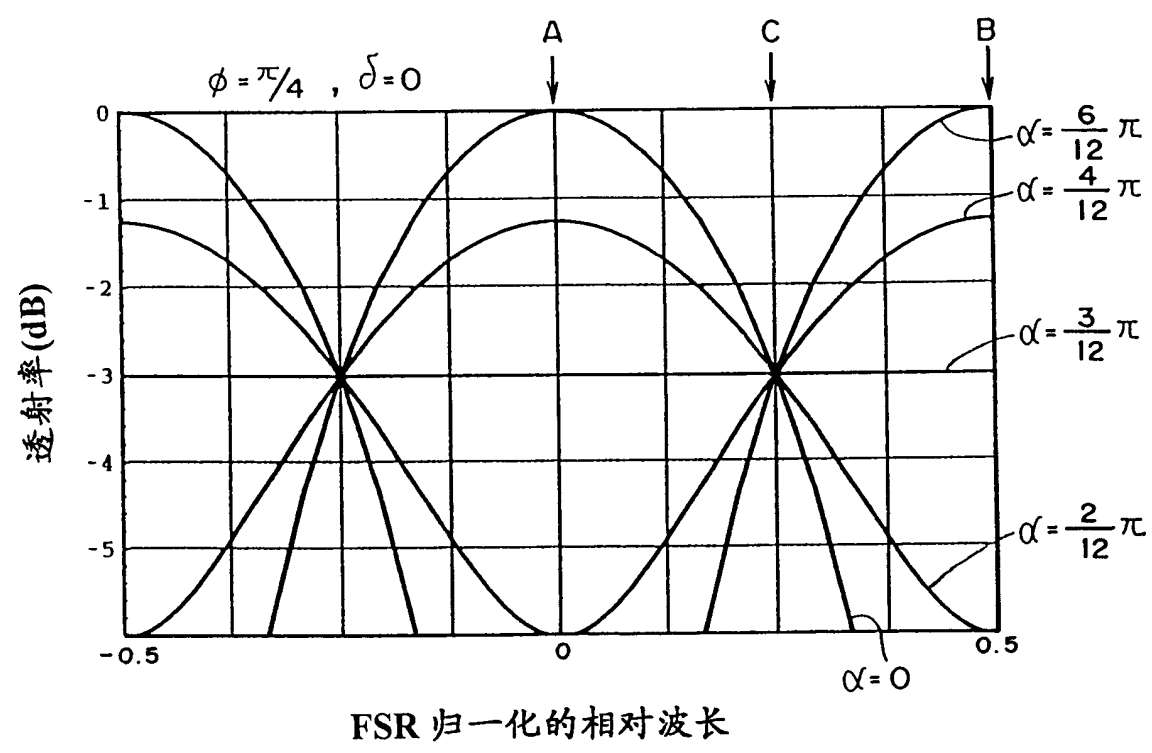


图 10

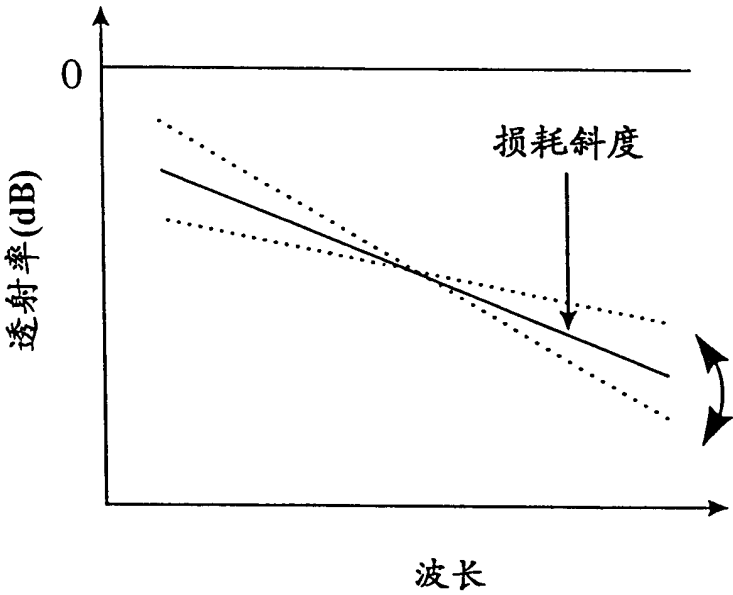


图 11

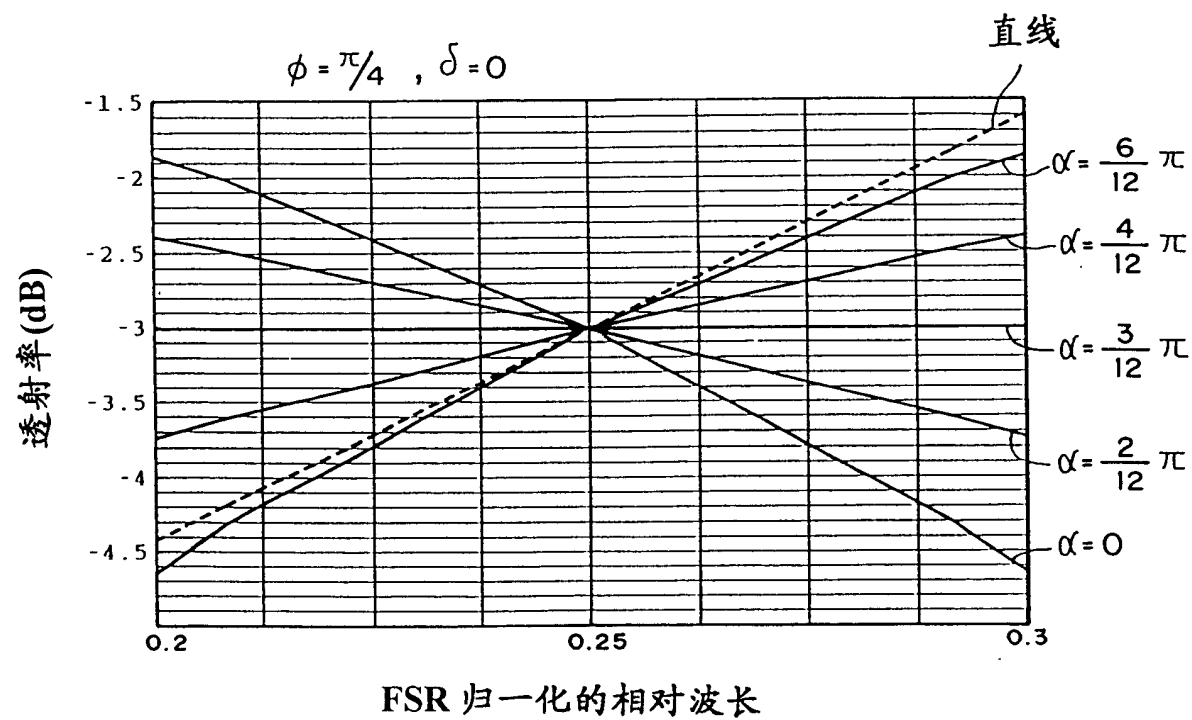
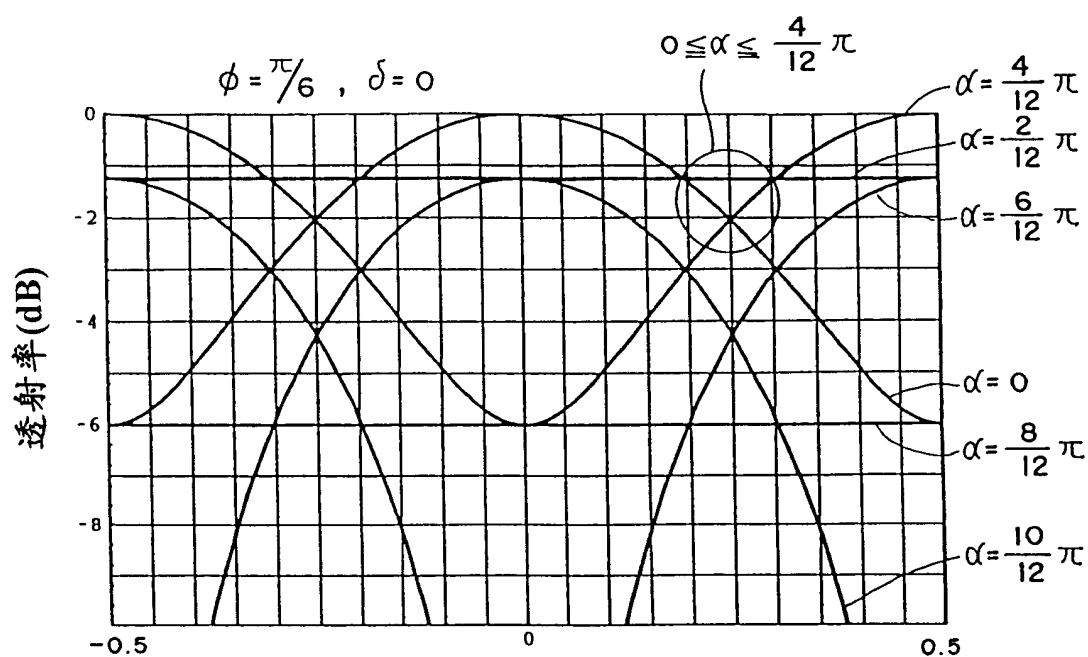
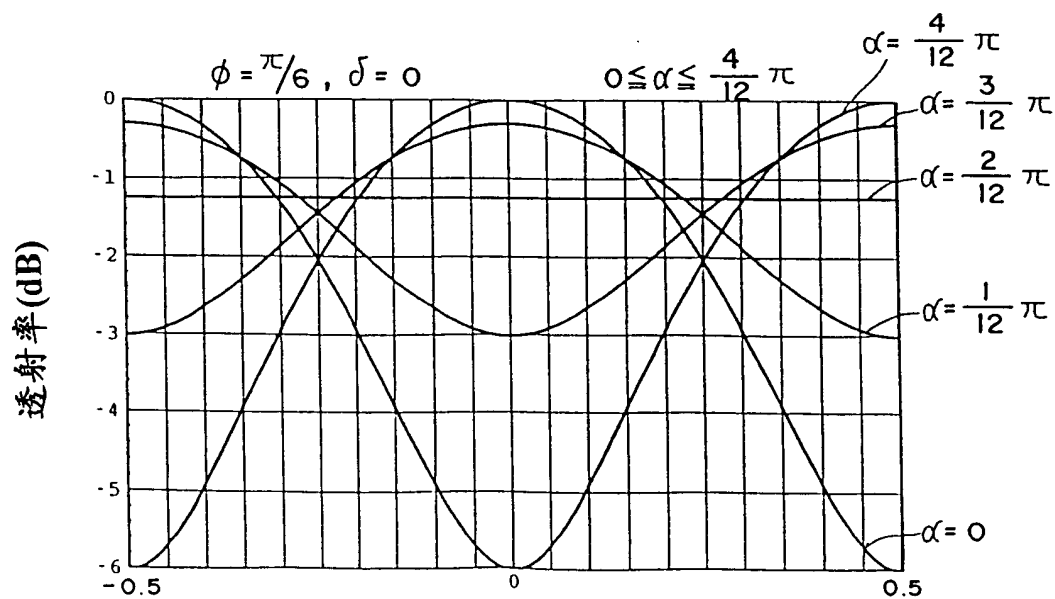


图 12A



FSR 归一化的相对波长

图 12B



FSR 归一化的相对波长

图 13

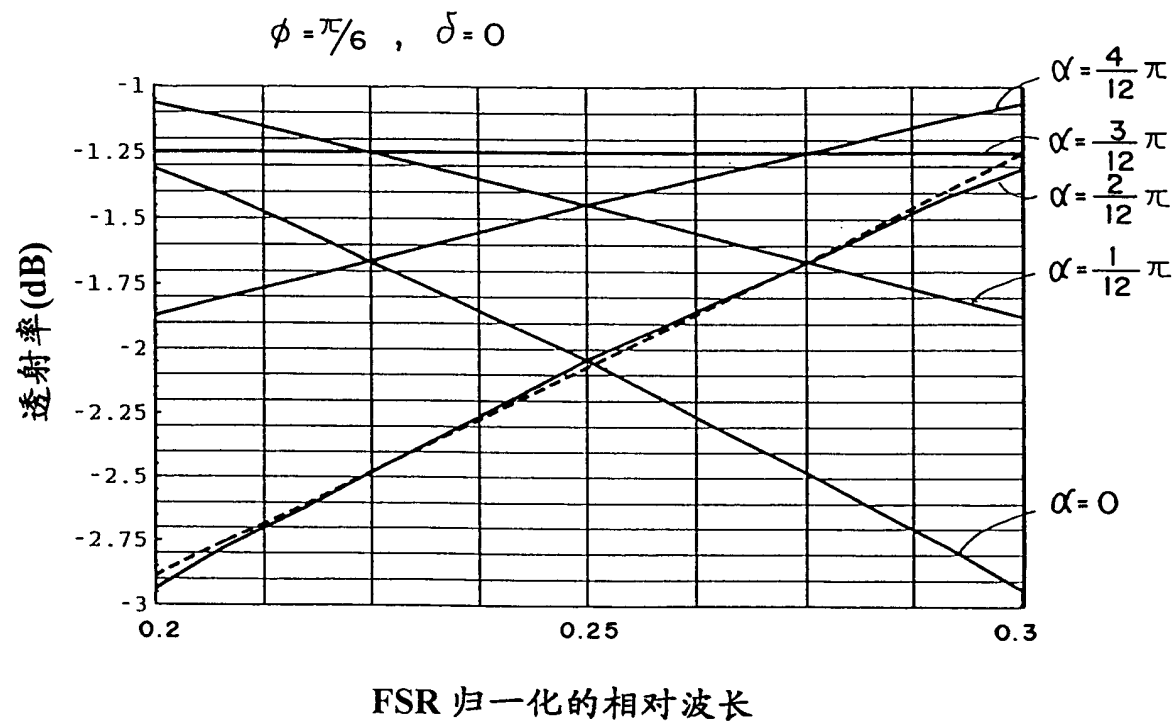


图 14A

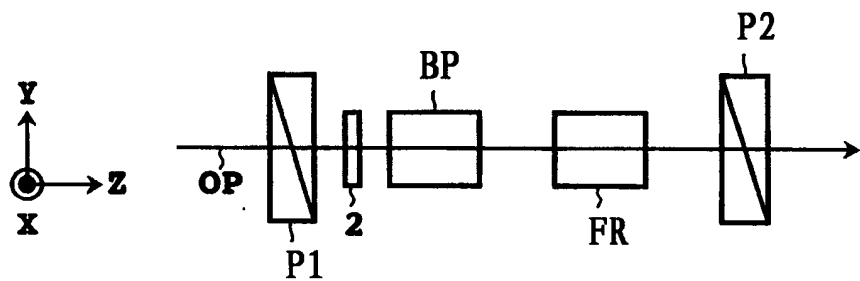


图 14B

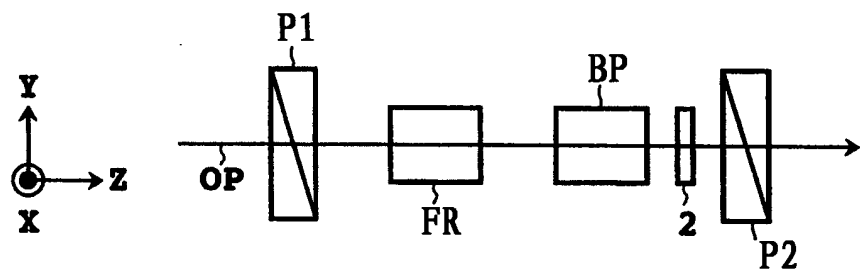


图 15

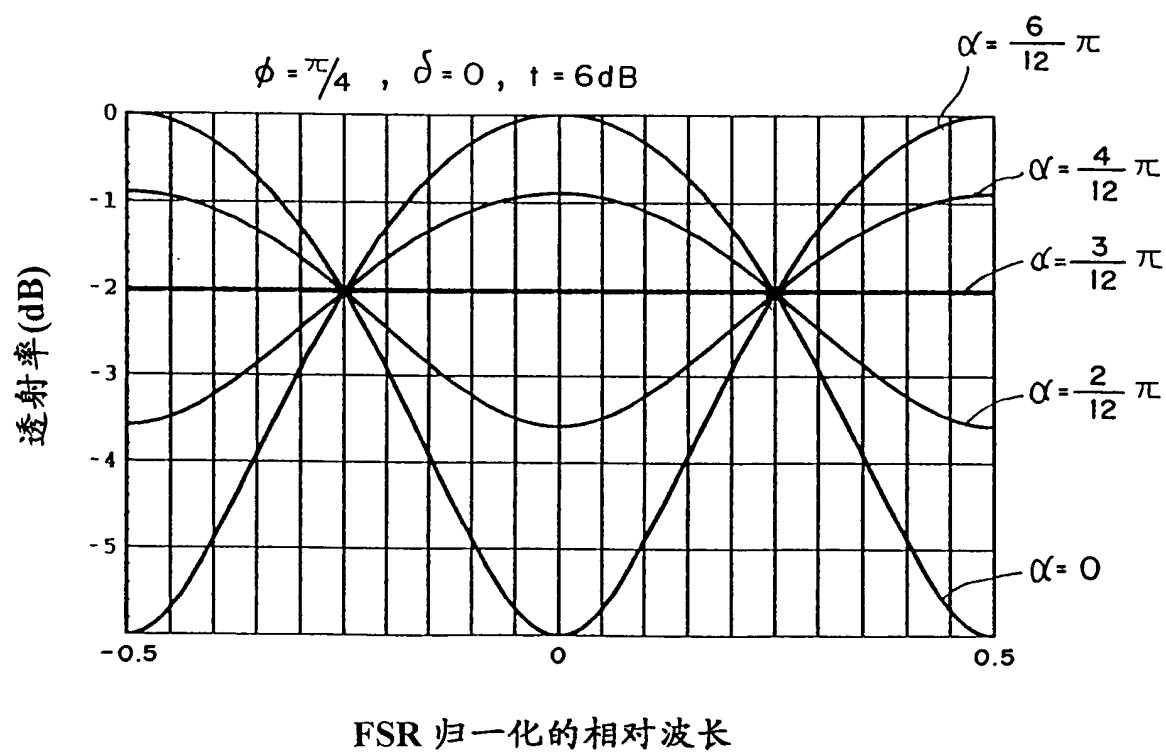


图 16

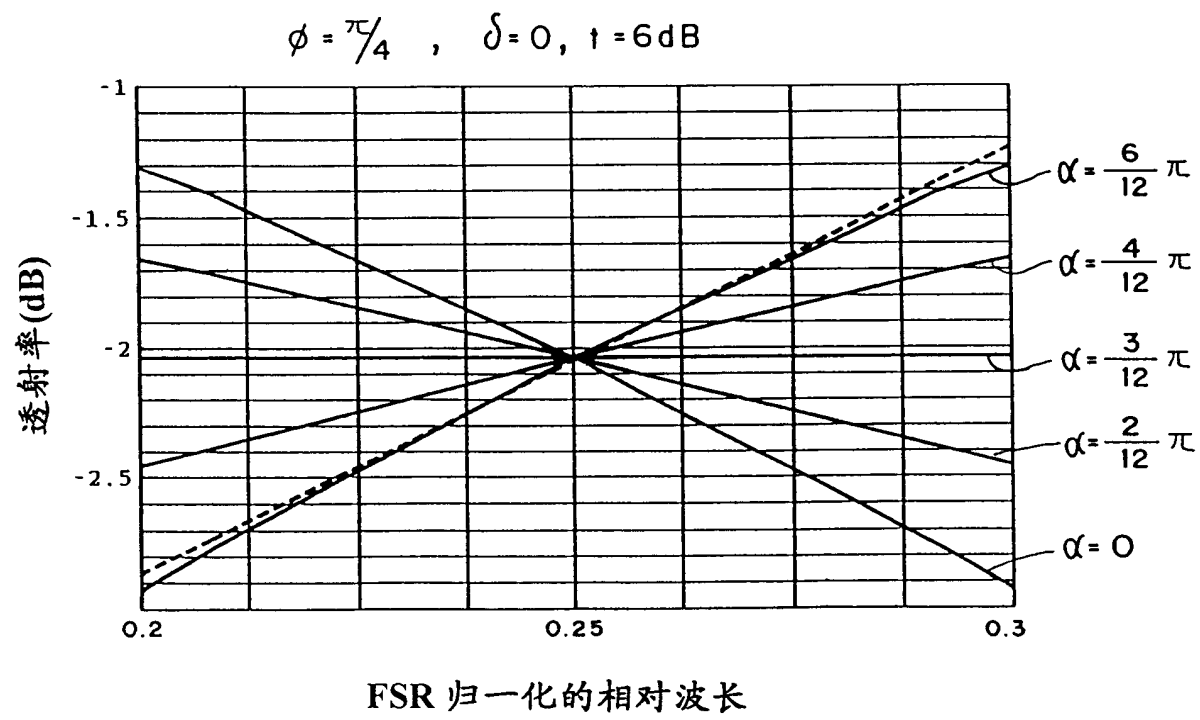


图 17

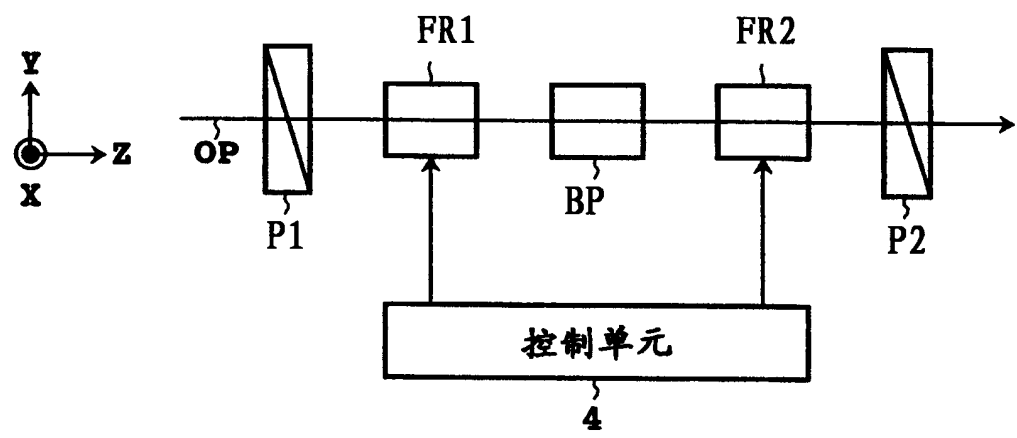


图 18

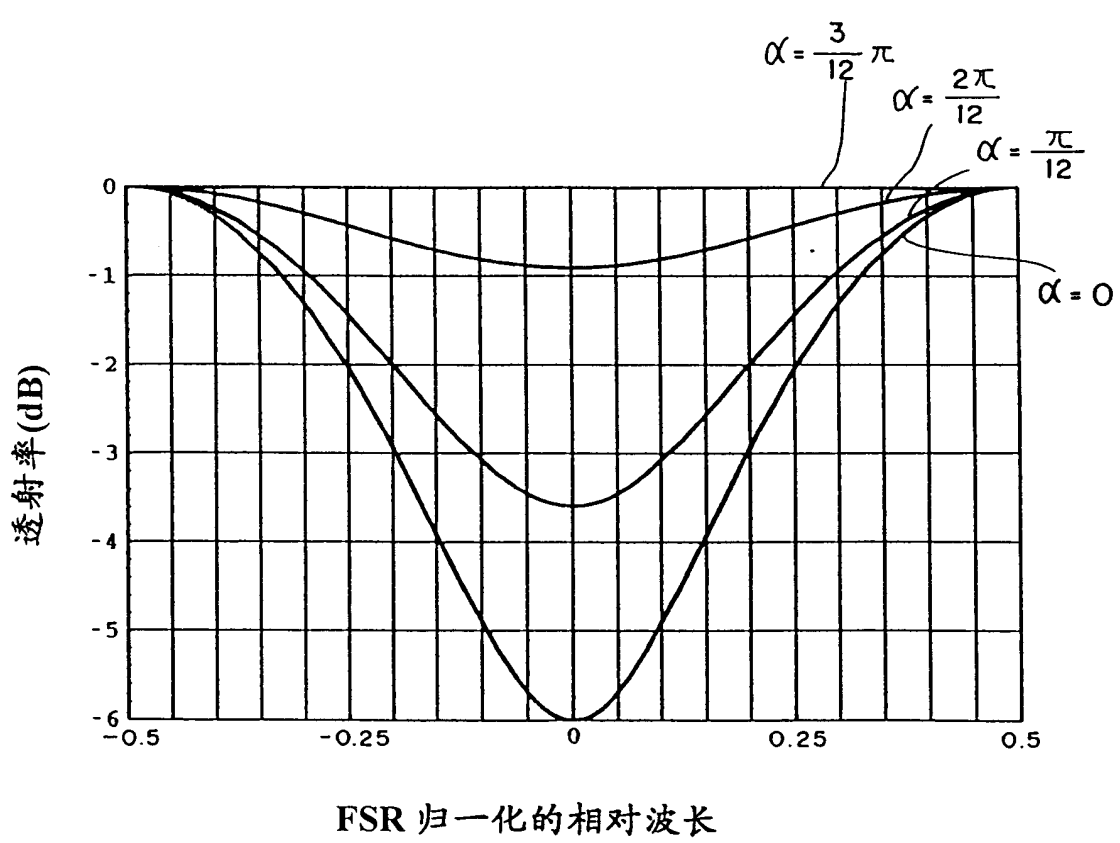


图 19

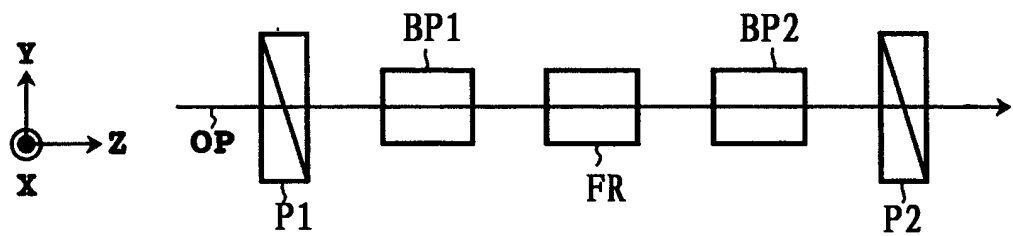


图 20

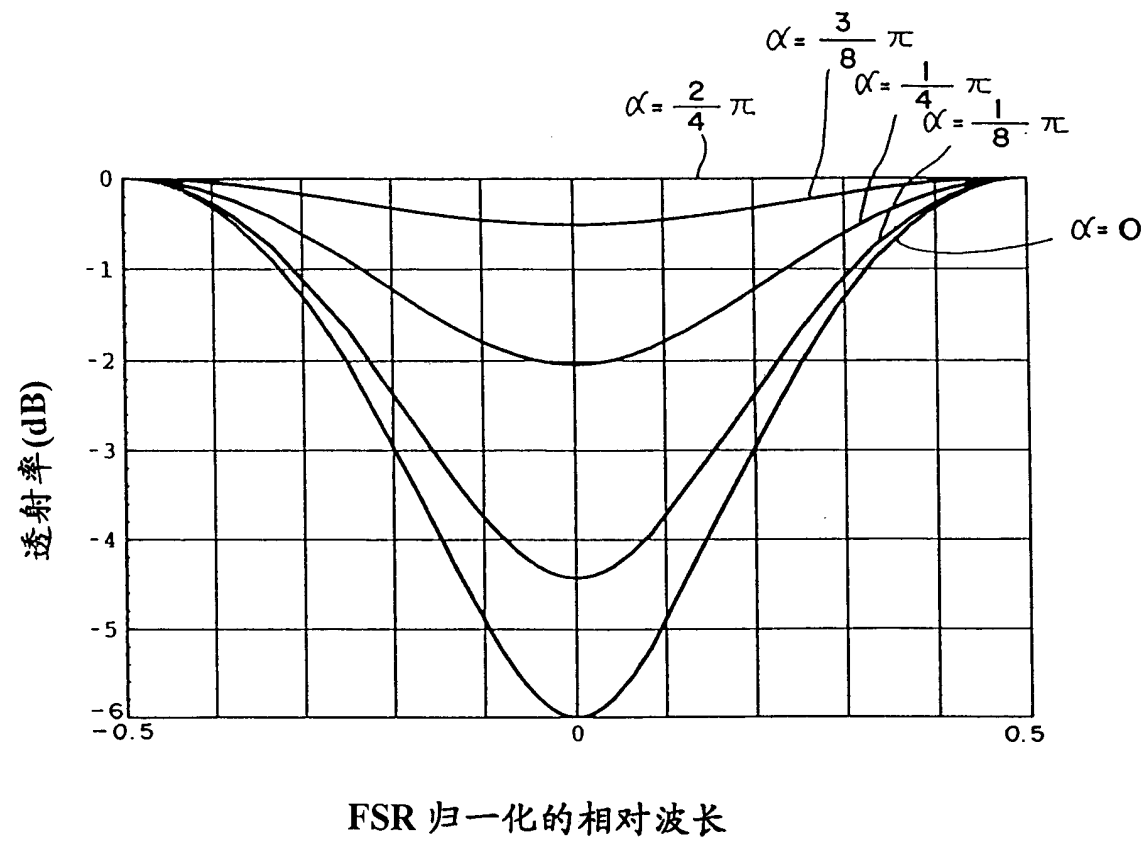


图 21

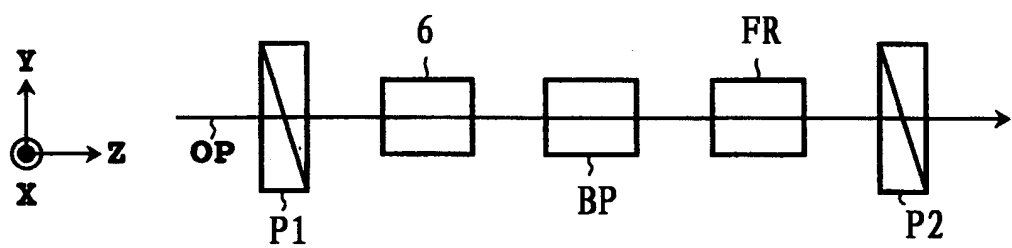


图 22

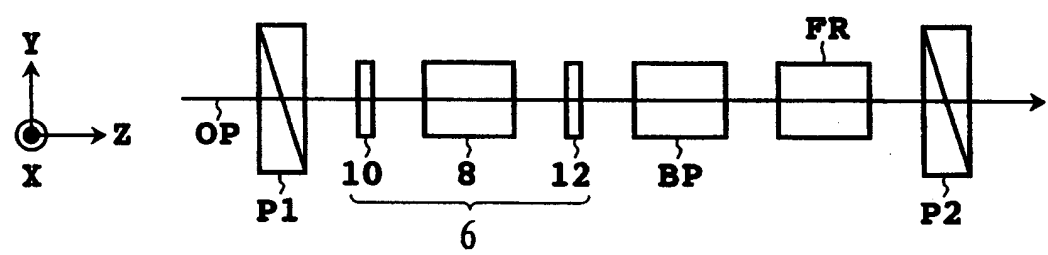


图 23

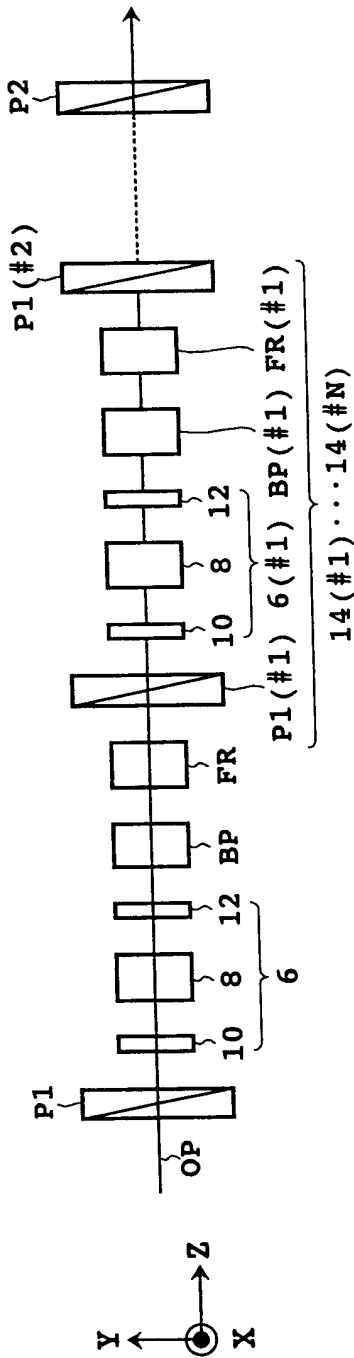


图 24A

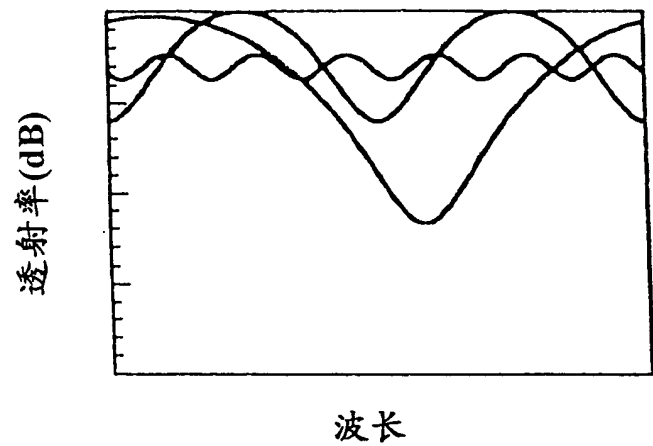


图 24B

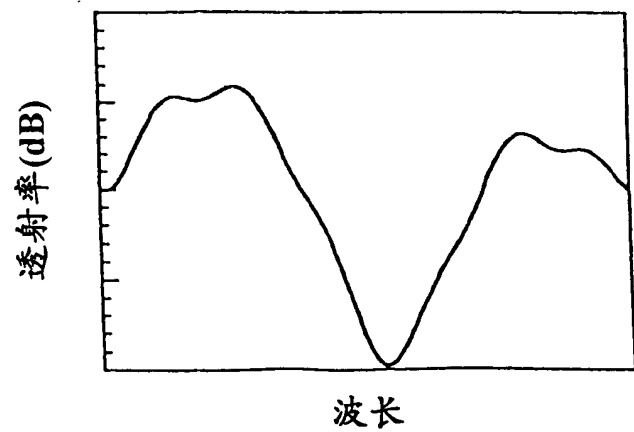


图 25

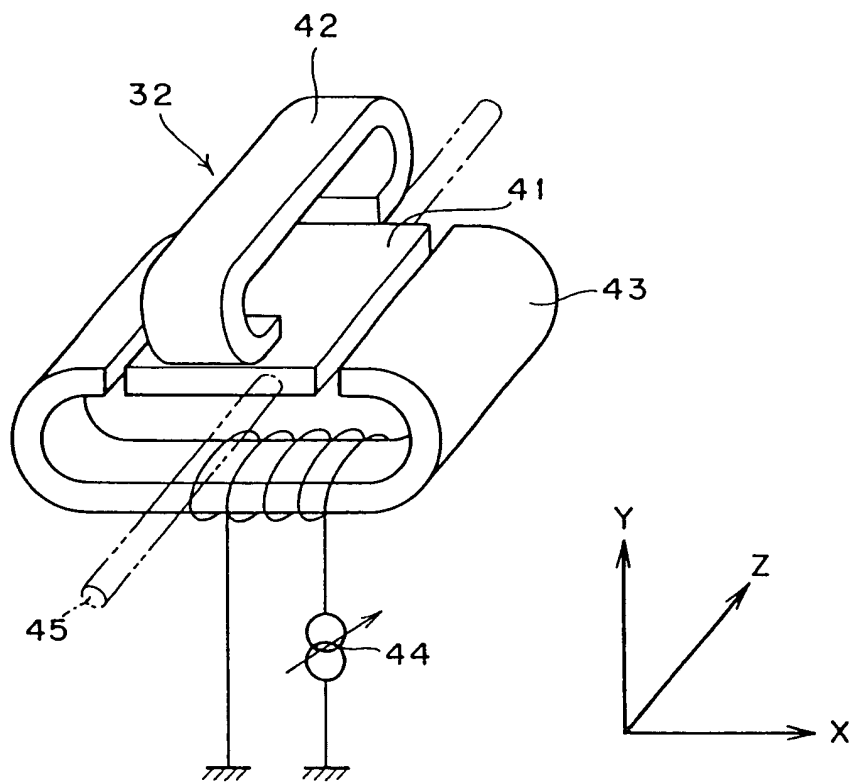


图 26

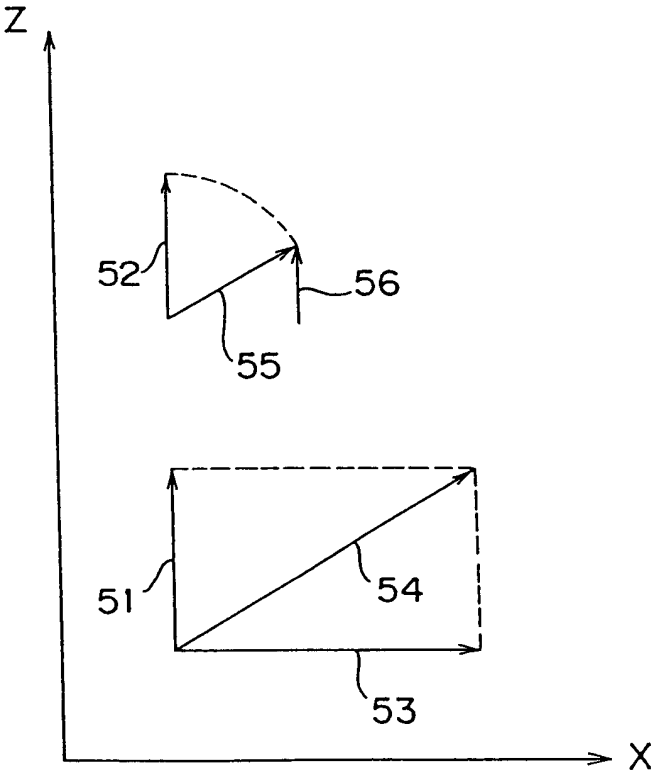


图 27

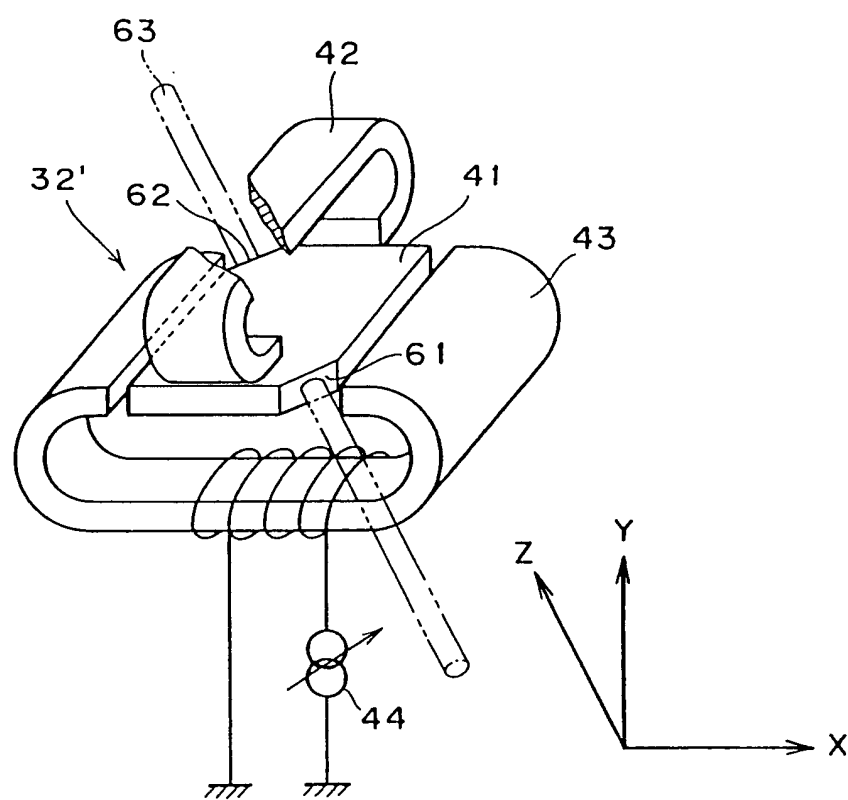


图 28

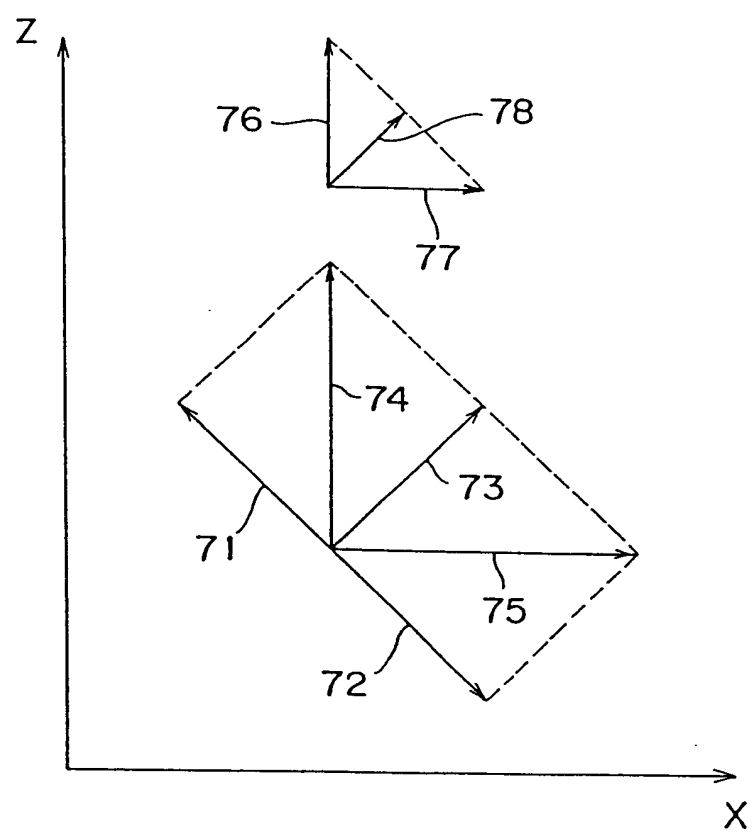


图 29

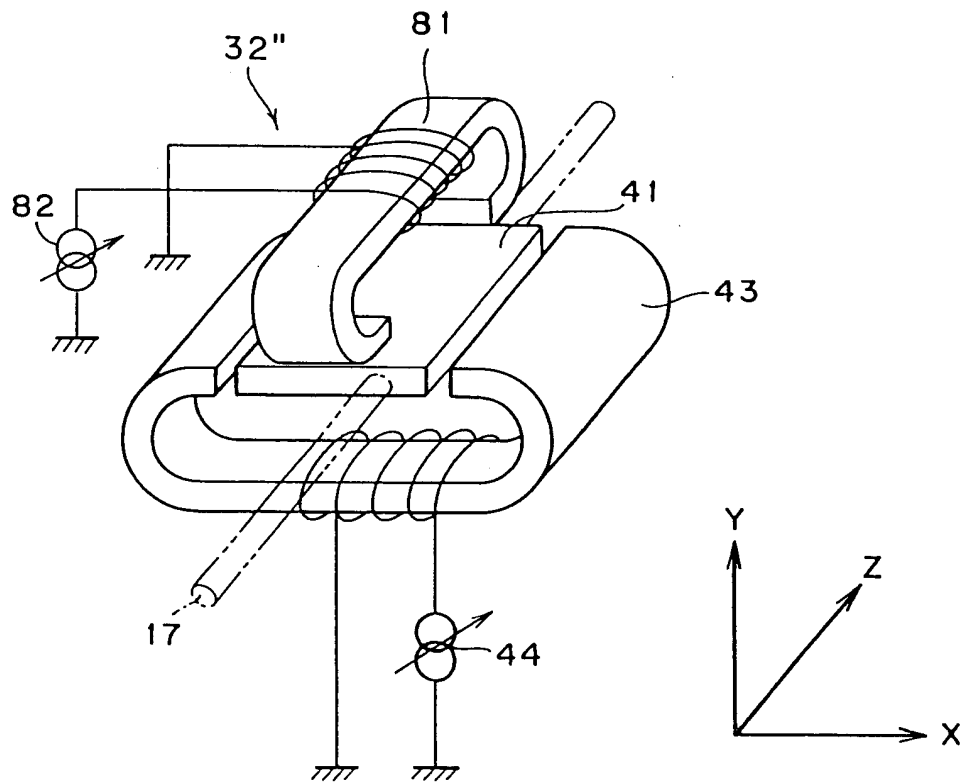


图 30

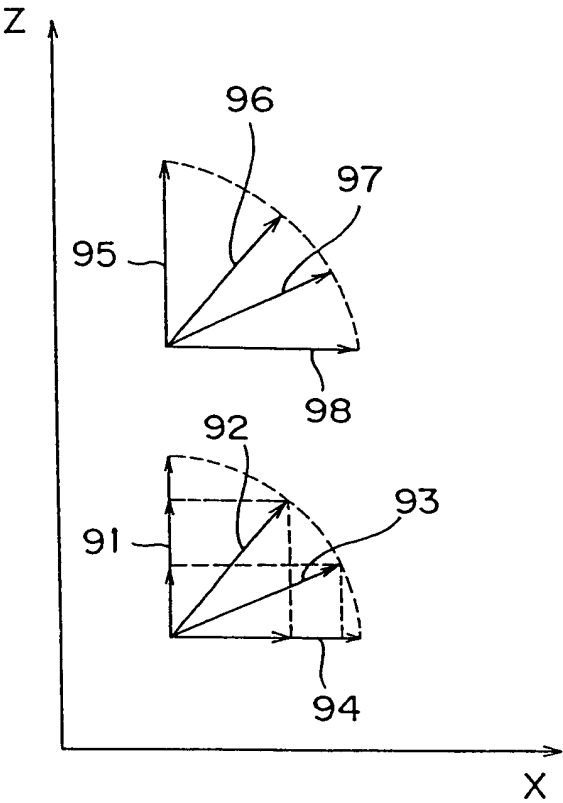


图 31

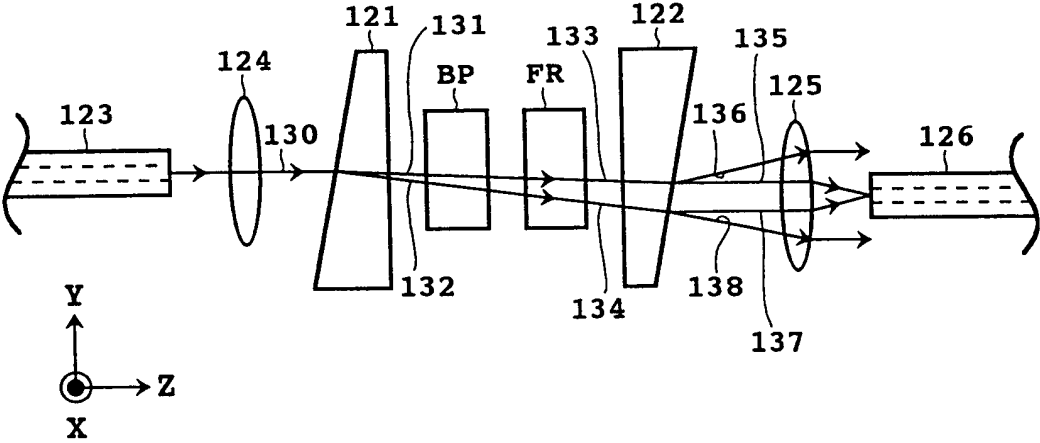


图 32

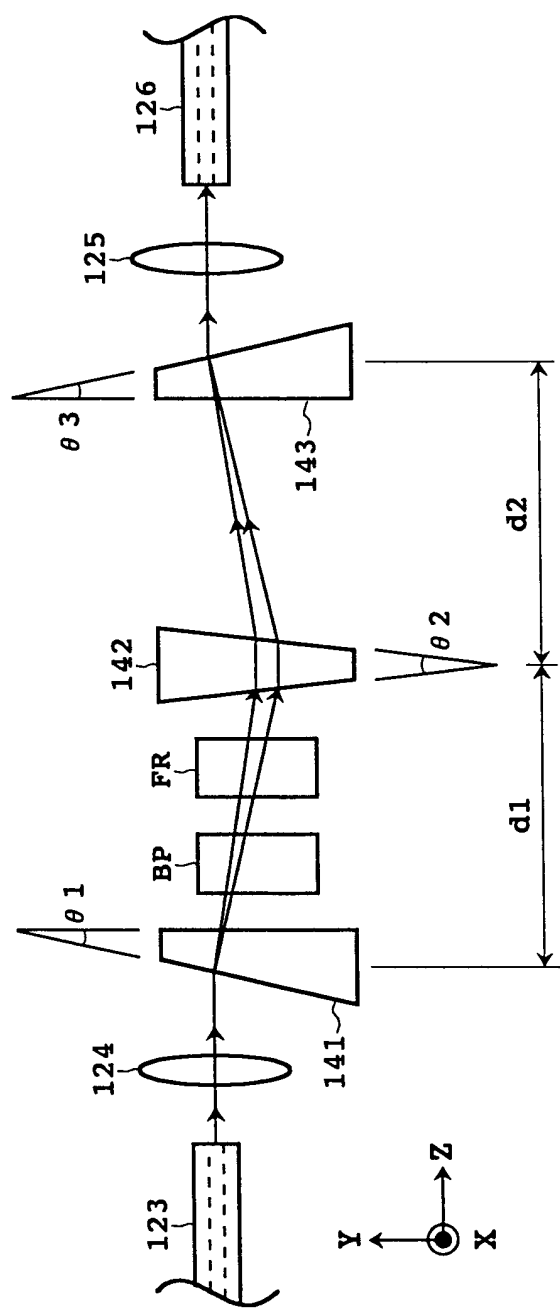


图 33

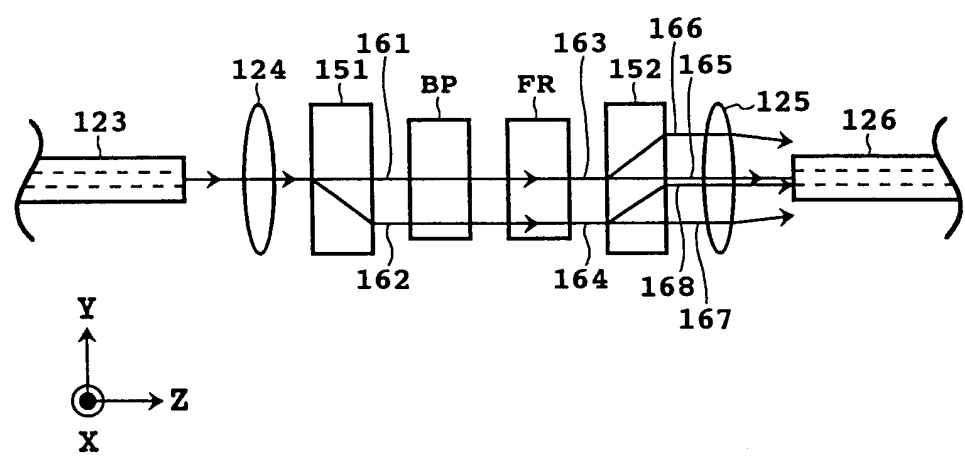


图 34A

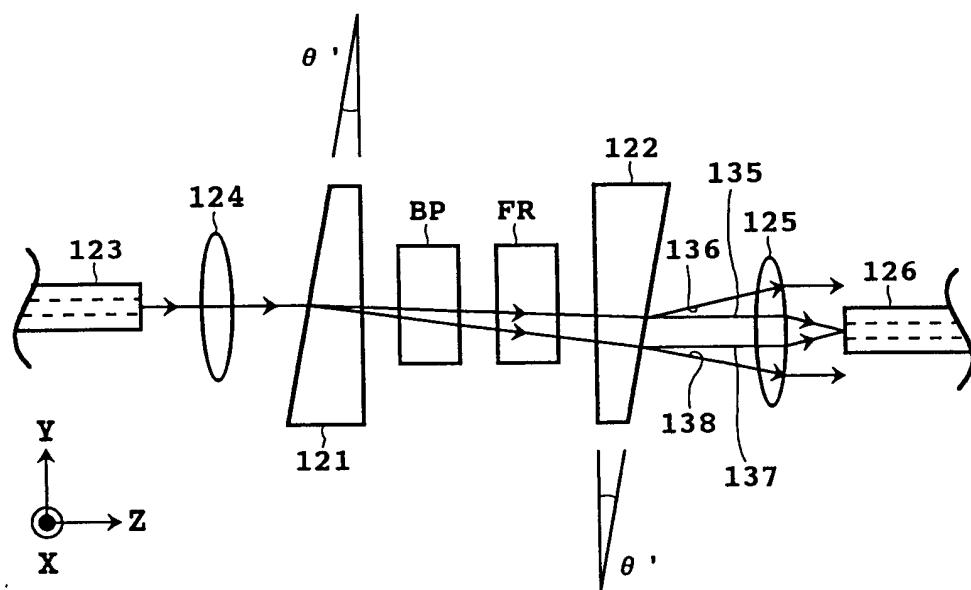


图 34B

