[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.
G01B 11/16 (2006.01)
G01K 11/12 (2006.01)

[12] 发明专利申请公布说明书

[21] 申请号 200480043385.4

[43] 公开日 2007 年 5 月 30 日

[11] 公开号 CN 1973178A

[22] 申请日 2004.6.25
[21] 申请号 200480043385.4
[86] 国际申请 PCT/JP2004/009352 2004.6.25
[87] 国际公布 WO2006/001071 日 2006.1.5
[85] 进入国家阶段日期 2006.12.20
[71] 申请人 光纳株式会社
地址 日本国兵库县
[72] 发明人 岸田欣增 李哲贤 林绳缤

[74] 专利代理机构 上海市华诚律师事务所
代理人 徐申民 张惠萍

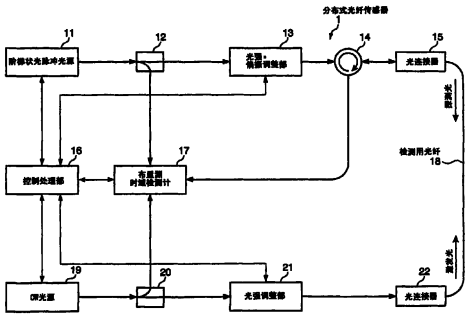
权利要求书 3 页 说明书 36 页 附图 25 页

[54] 发明名称

分布式光纤传感器

[57] 摘要

本发明提供一种不用手动调整，而能够以高精度、高空间分辨率测定变形和/或温度的分布式光纤传感器。 本发明的利用布里渊散射现象的分布式光纤传感器，包括：生成光强越向内侧越大，光强呈阶梯状的光脉冲的阶梯式光脉冲光源；生成连续光的 CW 光源；光脉冲作为探测光入射，同时连续光作为激发(pump)光入射，在探测光与激发光之间发生布里渊散射现象的检测用光纤；以及根据从检测用光纤射出的布里渊散射现象的光，求布里渊损耗光谱或布里渊增益光谱，根据其测定检测用光纤长度方向上检测用光纤中产生的变形和/或温度的分布的布里渊时域检测计。



1．一种分布式光纤传感器，是一种利用布里渊散射现象测定变形和/或温度的分布式光纤传感器，其特征在于包括：

生成光强越向内侧越大，光强呈阶梯状的光脉冲的阶梯状光脉冲光源；

生成连续光的连续光光源；

在所述光脉冲作为探测光入射、所述连续光作为激发光入射时，检测在所述探测光与所述激发光之间发生的布里渊散射现象的检测用光纤；以及

根据从所述检测用光纤射出的布里渊散射现象的光，求布里渊损耗光谱或布里渊增益光谱，根据求得的所述布里渊损耗光谱或布里渊增益光谱，测定所述检测用光纤中产生的变形和/或温度的布里渊时域检测计。

2．根据权利要求 1 所述的分布式光纤传感器，其特征在于，

所述探测光从所述检测用光纤的一端入射，

所述激发光从所述检测用光纤的另一端入射，

所述布里渊时域检测计根据从所述检测用光纤的一端射出的布里渊散射现象的光，求布里渊损耗光谱或布里渊增益光谱，根据求得的所述布里渊损耗光谱或布里渊增益光谱，测定所述检测用光纤中产生的变形和/或温度。

3．根据权利要求 1 所述的分布式光纤传感器，其特征在于，

所述探测光从所述检测用光纤的一端入射，

所述激发光从所述检测用光纤的一端入射，

所述检测用光纤以其另一端反射传播的所述激发光，

所述布里渊时域检测计根据从所述检测用光纤的一端射出的布里渊散射现象的光，求布里渊损耗光谱或布里渊增益光谱，根据求得的所述布里渊损耗光谱或布里渊增益光谱，测定所述检测用光纤中产生的变形和/或温度。

4．根据权利要求 1～3 中的任一项所述的分布式光纤传感器，其特征在于，

以从所述检测用光纤射出的布里渊散射现象的光为依据的所述检测用光纤长度方向的 1m 及其以下的各区域部分的布里渊损耗光谱或布里渊增益光谱实质上是洛伦兹曲线。

5．根据权利要求 1～3 中的任一项所述的分布式光纤传感器，其特征在于还包括，调整入射光的光强，并随机改变入射光的偏振面后射出的光强·偏振调整部、以及

调整入射光的光强的光强调整部，其中，

所述探测光通过所述光强·偏振调整部射入所述检测用光纤，

所述激发光通过所述光强调整部射入所述检测用光纤。

6．根据权利要求 1～3 中的任一项所述的分布式光纤传感器，其特征在于，所述阶梯状光脉冲光源以及所述连续光源包括：

以谱线宽度狭窄的规定频率连续发射具有大致一定的光强的光的发光元件、

使所述发光元件的温度实质上保持一定的温度控制部、以及

使所述发光元件发射的所述光的频率实质上保持一定的频率控制部。

7．根据权利要求 1～3 中的任一项所述的分布式光纤传感器，其特征在于，所述阶梯状光脉冲光源包括：

以谱线宽度狭窄的规定频率连续发射具有大致一定的第 1 光强的光的发光元件、

调制入射光光强的第 1 和第 2 光强调制器、

驱动第 1 光强调制器，调制从所述发光元件连续入射的光线的光强，使所述第 1 光强的光脉冲存在于比所述第 1 光强小的第 2 光强的连续光中的第 1 光强调制器驱动部、以及

驱动第 2 光强调制器，调制从所述第 1 光强调制器入射的光线的光强，使得只在所述光脉冲的前后各规定的宽度上残留所述第 2 光强的连续光，去除残余的部分的第 2 光强调制器驱动部。

8．根据权利要求 1～3 中的任一项所述的分布式光纤传感器，其特征在于，

所述阶梯状光脉冲光源生成光强越向内侧越大，光强呈阶梯状的第 1 光脉冲，并以具有与所述第 1 光脉冲相等的时间宽度，生成与所述第 1 光脉冲的最低光强相等光强的第 2 光脉冲，

所述布里渊时域检测计，使所述阶梯状光脉冲光源生成所述第 2 光脉冲作为探测光射入所述检测用光纤，并使所述连续光光源生成所述连续光作为激发光射入所述检测用光纤，存储从所述检测用光纤射出的布里渊散射现象的光的第 1 光强，使所述阶梯状光脉冲光源生成所述第 1 光脉冲作为探测光射入所述检测用光纤，并使所述连续光光源生成所述连续光作为激发光射入所述检测用光纤，存储从所述检测用光纤射出的布里渊散射现象的光的第 2 光强，根据所述存储的第 1 光强和第 2 光强求布里渊损耗光谱或布里渊增益光谱，根据求得的所述布里渊损耗光谱或布里渊增益光谱，测定所述检测用光纤中产生的变形和/或温度。

9．根据权利要求 1～3 中的任一项所述的分布式光纤传感器，其特征在于还包括，与所述检测用光纤品质相同，与空间分辨率相当的长度，而且具有比用所述光脉冲的时间宽度的倒数表示的变形还要大的变形的基准光纤，其中，

所述布里渊时域检测计，使所述阶梯状光脉冲光源生成所述光脉冲作为探测光射入所述基准光纤，并使所述连续光光源生成所述连续光作为激发光射入所述基准光纤，根据从所述基准光纤射出的布里渊散射现象的光，求布里渊损耗光谱或布里渊增益光谱的中心频率作为基准值存储，根据从所述检测用光纤射出的布里渊散射现象的光，求布里渊损耗光谱或布里渊增益光谱的中心频率作为检测值，根据预先存储的修正值变换式，从所述修正值、所述检测值、以及布里渊损耗光谱或布里渊增益光谱求修正值，根据求得的所述修正值测定所述检测用光纤中产生的变形和/或温度。

10．根据权利要求 1～3 中的任一项所述的分布式光纤传感器，其特征在于，所述检测用光纤是布里渊频率偏移量周期变化的光纤。

11．根据权利要求 1～3 中的任一项所述的分布式光纤传感器，其特征在于，所述检测用光纤被固定于要测量变形和/或温度的测量对象物体上。

分布式光纤传感器

技术区域

本发明涉及将光纤作为传感器使用，能够在其长度方向上以高精度而且高空间分辨率测定变形和/或温度的分布式光纤传感器。

背景技术

向来，作为测定变形和温度的技术有以光纤中发生的布里渊散射现象为依据的方法。在这种方法中，光纤作为检测该光纤所处环境中的变形和/或温度检测用的媒体被使用。

所谓布里渊散射现象，是一种在光纤中频率不同的两束光错过时，功率通过光纤中的声子从高频率的光向低频率的光转移的现象。相互错过的两束光波之间的频率差记为 νd 时，转移的功率与近似地按式 1 定义的布里渊增益光谱 $BSg(\nu d)$成正比。

$$BSg(\nu d)=1/(1+(2(\nu d-\nu b)/\triangle \nu b)^2) \quad \cdots式\ 1$$

在这里，νb 是布里渊频率偏移，$\triangle \nu b$ 被称为布里渊增益谱线宽度（半高宽（日文—半值全幅）），这些参数是以布里渊增益光谱 $BSg(\nu d)$为特征的参数。

布里渊频率偏移由式 2 给出。

$$\nu b=2nva/\lambda \quad \cdots式\ 2$$

在这里，n 为光纤的折射率，va 为光纤中的音速，λ 是射入光纤的光的波长。

音速 va 与光纤的变形以及温度有关，因此通过测定布里渊频率偏移 νb 能够测定变形和/或温度。

从而，为了测定光纤的长度方向上的光纤的变形分布和/或温度分布，只要分别测定光纤的各部分的布里渊增益光谱即可。而且为了实现高空间分辨率，必须使该部分的长度比较短。

图 24 表示背景技术中所述的分布式光纤传感器的结构以及探测光。图 24（A）是表示背景技术中所述的分布式光纤传感器的结构的方框图。图 24（B）表示第 1 探测光，而图 24（C）表示第 2 探测光。图 25 表示布里渊损耗/增益光谱。图 25 的横轴表示频率，其纵轴表示损耗/增益。

在图 24 中，背景技术中所述的分布式光纤传感器 500 形成包括探测光光源 501、光耦合器 502、检测用光纤 503、激发光光源 504、检测器 505 的结构。

探测光光源 501 生成如图 24（B）所示的脉冲状的光脉冲，将该生成的光脉冲作为探测光射出。该探测光光源 501 射出的探测光通过光耦合器 502 入射到检测用光纤 503 的一端。检测用光纤 503 是检测所处环境中的变形和/或温度用的光纤，作为传感器使用。激发光光源 504 生成比探测光的频率低的频率连续的光，这一生成的连续光（CW 光）作为激发光射出。从激发光光源 504 射出的激发光射入检测用光纤 503 的另一端。在检测用光纤 503 中，探测光和激励光产生布里渊散射现象，这种布里渊散射现象的光通过光耦合器 502 射入检测器 505。检测器 505 在时域测定布里渊散射现象的光的光强。分布式光纤传感器 500 一边依序改变激发光或探测光的频率一边对每一频率在时域测定布里渊散射现象的光的光强，分别求出检测用光纤 503 的长度方向上的各部分的布里渊增益光谱 BSg(ν d)，求出沿着检测用光纤的 503 的变形分布和/或温度分布。

还有，在上面所述中，出示了从布里渊增益光谱 BSg(ν d)求变形和/或温度的方法，但是通过使激发光的频率高于探测光的频率，采用布里渊损耗光谱 BSl(ν d)代替布里渊增益光谱 BSg(ν d)也同样能够求出变形和/或温度。

这种分布式光纤传感器 500 的空间分辨率受到测定中使用的光脉冲的宽度的限制。也就是在光纤中的光速记为 Vg〔m/s〕的情况下，在使用光脉冲宽度为 Tp〔s〕的光脉冲进行测定中，空间分辨率△z 为 VgTp/2〔m〕。具体地说，光纤中的光速因光纤的材料不同而稍有不同，但是通常使用的一般的光纤中，布里渊增益光谱 BSg(ν d)或布里渊损耗光谱 BSl(ν d)（以下简称为“布里渊损耗/增益光谱 BSl/g(ν d)”）在光脉冲的光脉冲宽度 30ns 以下为洛伦兹曲线（图 25 所示的曲线 a），如果使光脉冲宽度比其更窄，则成为宽带曲线（图 25 所示的曲线 b），形成中心频率附近旁不再陡峭的平缓的形状。因此空间分辨率△z 约为 2～3m。为了提高空间分辨率，有必要采用光脉冲宽度短的光脉冲，但是，在这种情况下，光脉冲具有的谱线宽度宽，其结果是变形的测定精度变差。因此以高精度（例如小于等于 200μ ε）高空间分辨率（例如小于等于 1m）测定变形和/或温度分布被认为是困难的，但是人们希望能以高精度高分辨率测定变形和/或温度分布。还有，100μ ε ＝0.01 %。

因此，例如如下述文献 1～文献 3 所示，探测光光源 501 如图 24（C）所示，一边将光强 Cs^2 的微弱的连续光（泄漏光）射入检测用光纤 503 一边将规定光强的 As^2 的光脉冲射入，借助于此，如图 25 中曲线 a 所示，布里渊损耗/增益光谱 BSl/g(ν d)大致形成为在能够清楚识别中心频率的大致中心频率处具有陡峭的峰值的洛伦兹曲线，因此，知道能够以高精度、高空间分辨率测定变形和/或温度。

在这里，洛伦兹曲线通常以式 3 的洛伦兹函数 g（x）表示。

$$g(x)= 1/\pi a/(a^2+(x-a)^2) \quad \text{... 式 3}$$

文献 1

X.Bao and A.Brown, M. DeMerchant, J.Smith,"Characterization of the Brillouin-loss spec trum of single-mode fibers by use of very short(<10-ns)pulses", OPTICS LETTERS, Vol.24,N 0.8,April 15,1999

文献 2

V.Lecoeuche,D.J.Webb,C.N.Pannell,and D.A. Jackson," Transient response in high-resolut ion Brillouin-based distributed sensing using probe pulses shorter than the acoustic rel axation time", OPTICS LETTERS,Vol.25,No.3,February 1,2000

文献 3

Shahraam Afshar V.,Graham A.Ferrier,Xiaoyi Bao, and Liang Chen,"Effect of the finite extinction ratio of an electro-optic modulator on the performance of distributed probe-pump Brillouin sensor systems", OPTICS LETTERS,Vol.28, No.16,August 15,2003

但是，泄漏光的光强 Cs^2 的设定由于取决于检测用光纤的长度，所以在每次测定时要靠手动细致地进行调整使其光强与检测用光纤的长度一致。因此在分布式光纤传感器为工业产品使用的情况下，用户要进行这种困难的手动调整，这妨碍了分布式光纤传感器作为工业产品进行工业化生产。

而在文献 2 中，其作者虽然通过模拟对文献 1 的现象进行确认，但是没有进行清楚的理论分析。在文献 2 中，通过一边将光强微弱的连续光（泄漏光）射入检测用光纤一边将规定光强的光脉冲射入，能够以高精度、高空间分辨率测定变形和/或温度，但是其主要原因尚未明了。因此为了能以高精度、高空间分辨率测定变形和/或温度，尚不清楚如何调整光强微弱的连续光和规定光强的光脉冲的各物理量才好。

再有，背景技术中所述的分布式光纤传感器中，在变形在大范围（例如设定的空间分辨率的 25 倍及其以上）均匀分布的情况下，检测出其中 200με及其以下的微小变形是相当困难的。

本发明是鉴于这样的情况而作出的，其目的在于提供一种在理论上能对这样的现象进行清楚的分析，根据理论分析结果，不需要手动调整泄漏光的光强使光强与检测用光纤的长度一致的分布式光纤传感器。而且其目的在于提供一种在变形在大范围均匀分布的情况下，能够检测其中的 200με及其以下的微小变形的分布式光纤传感器。

发明内容

为了实现上述目的，本申请的一种形态的利用布里渊散射现象测定变形和/或温度的分布式光纤传感器，其特点是，包括：生成光强越向内侧越大，光强呈阶梯状光脉冲的阶梯状光脉冲光源、生成连续光的连续光光源、阶梯状的所述光脉冲作为探测光入射，并所述连续光作为激发（pump）光入射，在所述探测光与所述激发光之间发生布里渊散射现象的检测用光纤、以及根据从所述检测用光纤射出的布里渊散射现象的光，求布里渊损耗光谱或布里渊增益光谱，根据求得的所述布里渊损耗光谱或布里渊增益光谱，测定所述检测用光纤中产生的变形和/或温度的布里渊时域检测计。

而且，在上述一种形态的分布式光纤传感器中，其特点是，所述探测光从所述检测用光纤的一端入射，所述激发光从所述检测用光纤的另一端入射，所述布里渊时域检测计根据从所述检测用光纤的一端射出的布里渊散射现象的光，求布里渊损耗光谱或布里渊增益光谱，根据求得的所述布里渊损耗光谱或布里渊增益光谱，测定所述检测用光纤中产生的变形和/或温度。

又，在上述一种形态的分布式光纤传感器中，其特点是，所述探测光从所述检测用光纤的一端入射，所述激发光从所述检测用光纤的另一端入射，所述检测用光纤以其另一端反射传播的所述激发光，所述布里渊时域检测计根据从所述检测用光纤的一端射出的布里渊散射现象的光，求布里渊损耗光谱或布里渊增益光谱，根据求得的所述布里渊损耗光谱或布里渊增益光谱，测定所述检测用光纤中产生的变形和/或温度。

而且，在这些所述的分布式光纤传感器中，其特点是，以接收从所述检测用光纤射出的布里渊散射现象的激发光为依据的所述检测用光纤的长度方向的 1m 及其以下的各区域部分的布里渊损耗光谱或布里渊增益光谱实质上是洛伦兹曲线。

而且，在这些所述的分布式光纤传感器中，其特点是，还包括调整入射光的光强，并随机改变入射光的偏振面后射出的光强·偏振调整部、以及调整入射光光强的光强调整部；所述探测光通过所述光强·偏振调整部射入所述检测用光纤；所述激发光通过所述光强调整部射入所述检测用光纤。

而且，在这些所述的分布式光纤传感器中，其特点是，所述阶梯状光脉冲光源以及所述连续光源包括：以谱线宽度狭窄的规定频率连续发射具有大致一定的光强的光的发光元件、使所述发光元件的温度实质上保持一定的温度控制部、以及使所述发光元件发射的所述光的频率实质上保持一定的频率控制部。

而且，在这些所述的分布式光纤传感器中，其特点是，所述阶梯状光脉冲光源包括：以谱线宽度狭窄的规定频率连续发射具有大致一定的第 1 光强的光的发光元件、调制入射光的光强的第 1 和第 2 光强调制器、驱动第 1 光强调制器，调制从所述发光元件连续入射的光线的光强，使所述第 1 光强的光脉冲存在于比所述第 1 光强小的第 2 光强的连续光中的第 1 光强调制器驱动部、以及驱动第 2 光强调制器，调制从所述第 1 光强调制器入射的光线的光强，只在所述光脉冲的前后各规定的宽度上残留所述第 2 光强的连续光，去除残余的部分的第 2 光强调制器驱动部。

而且，在这些所述的分布式光纤传感器中，其特点是，所述阶梯状光脉冲光源生成光强越向内侧越大，光强呈阶梯状的第 1 光脉冲，并以具有与所述第 1 光脉冲相等的时间宽度，生成与所述第 1 光脉冲的最低光强相等光强的第 2 光脉冲，所述布里渊时域检测计，使所述阶梯状光脉冲光源生成所述第 2 光脉冲作为探测光射入所述检测用光纤，并使所述连续光光源生成所述连续光作为激发光射入所述检测用光纤，存储从所述检测用光纤射出的布里渊散射现象的光的第 1 光强，使所述阶梯状光脉冲光源生成所述第 1 光脉冲作为探测光射入所述检测用光纤，并使所述连续光光源生成所述连续光作为激发光射入所述检测用光纤，存储从所述检测用光纤射出的布里渊散射现象的光的第 2 光强，根据所述存储的第 1 光强和第 2 光强求布里渊损耗光谱或布里渊增益光谱，根据求得的所述布里渊损耗光谱或布里渊增益光谱，测定所述检测用光纤中产生的变形和/或温度。

而且，在这些所述的分布式光纤传感器中，其特点是，还包括与所述检测用光纤品质相同，与空间分辨率相当的长度而且具有比用所述光脉冲的时间宽度的倒数表示的变形还要大的变形的基准光纤；所述布里渊时域检测计使所述阶梯状光脉冲光源生成所述光脉冲作为探测光射入所述基准光纤，并使所述连续光光源生成所述连续光作为激发光射入所述基准光纤，根据从所述基准光纤射出的布里渊散射现象的光，求布里渊损耗光谱或布里渊增益光谱的中心频率作为基准值存储，根据从所述检测用光纤射出的布里渊散射现象的光，求布里渊损耗光谱或布里渊增益光谱的中心频率作为检测值，根据预先存储的修正值变换式，从所述修正值、所述检测值、以及布里渊损耗光谱或布里渊增益光谱求修正值，根据求得的所述修正值测定所述检测用光纤中产生的变形和/或温度。

而且，在变形在大范围均匀分布的情况下，从能够检测出其中 200μ ε及其以下的微小的变形的要求出发，在这些所述的分布式光纤传感器中，其特点是，所述检测用光纤是布里渊频率偏移量周期性变化的光纤。

而且，在这些所述的分布式光纤传感器中，其特征在于，所述检测用光纤被固定于要

测定变形和/或温度的测量对象物体上。

在具有这样的结构的分布式光纤传感器中，将光强越向内侧越大，呈阶梯状的光脉冲（以下称为“光强呈阶梯状的光脉冲”）作为探测光使用。因此只在光强最大的部分的前方的有限的部分、或光强最大的部分的前方的有限的部分以及后方的有限的部分存在与背景技术中的泄漏光相当的光强弱的部分，而不是像背景技术中那样的连续的泄漏光。其结果是，能够预先设定光强呈阶梯状的光脉冲的波形，因此不必像背景技术中所述那样每一次测定都手动调整探测光（光脉冲）的泄漏光的光强 Cs^2 使其与检测用光纤的长度一致。因此本发明的分布式光纤传感器能够作为工业产品进行工业化生产。

下面，利用图 1～图 3 对光强呈阶梯状的光脉冲作为探测光使用时的布里渊散射现象的理论分析进行说明。然后利用图 4 和图 5 对对光强呈阶梯状的光脉冲的波形进行说明。

图 1 是说明本发明的布里渊散射现象的理论分析用的图。图 1（A）表示本发明的布里渊散射现象的理论分析的测定系统，图 1（B）表示激发光，而图 1（C）表示探测光。图 2 表示以理论分析为依据模拟的一个例子（之一）。图 3 表示以理论分析为依据模拟的一个例子（之二）。图 4 表示光强呈阶梯状的光脉冲的波形。图 5 表示以理论分析为依据的，H2/（H1＋H3＋H4）相对比 Prx 的模拟。

首先，对理论分析进行说明。在图 1 中，本理论分析导出光强为 AL^2 的连续光（CW）的激发光从检测用光纤 SOF 的一端入射，时间宽度为 Tf 光强为 Cs^2 的光纤前方光 OPf 与脉冲宽度为 D 光强为（As＋Cs）^{2} 的光脉冲 OP 构成的光强呈阶梯状的光脉冲 OPs 作为探测光从检测用光纤 SOF 的另一端入射的情况下的布里渊损耗光谱。光强 As^2 是以光脉冲前方光 OPf 的光强 Cs^2 为基准的光强。

这里，在本说明书中，将该光强呈阶梯状的光脉冲 OPs 的光脉冲 OP 的前方在规定的时间宽度 Tf 中残留的连续的泄漏光称为光脉冲前方光 OPf，将光强呈阶梯状的光脉冲 OPs 的光脉冲 OP 的后方在规定的时间宽度 Tb 中残留的连续的泄漏光称为光脉冲后方光 OPb。

在本理论分析中，检测用光纤 SOF 的长度记为 L，检测用光纤 SOF 的长度方向上的位置坐标记为 z（0≤z≤L，原点为检测用光纤 SOF 的一端），然后，设时间坐标为 t，在检测用光纤上有变形的情况下的布里渊散射的方程式由式 4～式 6 表示。

$$\left(\frac{1}{\mathrm{Vg}}\frac{\partial}{\partial \mathrm{t}}+\frac{\partial}{\partial \mathrm{z}}\right)E_L = i\beta E_A E_S \qquad \bullet\bullet\bullet(\text{式 4})$$

$$\left(\frac{1}{\mathrm{Vg}}\frac{\partial}{\partial \mathrm{t}}-\frac{\partial}{\partial \mathrm{z}}\right)E_S = i\beta E_A^* E_L \qquad \bullet\bullet\bullet(式5)$$

$$\left(\frac{1}{\Gamma}\frac{\partial}{\partial \mathrm{t}}+1+i\frac{\Omega_B(\mathrm{z})-\Omega}{\Gamma}\right)E_A = iE_L E_S^* \qquad \bullet\bullet\bullet(式6)$$

在这里，Vg 是检测用光纤 SOF 中的光的群速度（Vg＝c/n，c 为光速，n 为检测用光纤 SOF 的折射率），E_L 是激发光的电场强度，E_S 是斯托克斯光的电场强度，E_A 是Γ×ρ/Λ。*表示共轭。Γ 是 $\Gamma_B/2$，ρ 是检测用光纤的密度，Λ 是（γ×q×q）/（16×π×Ω）。Γ_B 为当设音响声子的寿命为 τ_B 时 $\Gamma_B=1/\tau_B$，γ 被称为电致变形（電歪；Electrostrietive）耦合常数，$\gamma=\rho(\delta\varepsilon/\delta\rho)$，其中 ε 为介电常数，$q=k_L+k_S$，其中 k_L 为激发光的波数，k_S 为斯托克斯光的波数，Ω 是没有发生变形的情况下的布里渊角频率偏移，激发光的角频率记为 ω_L，斯托克斯光的角频率记为 ω_S 时，$\Omega=\omega_L-\omega_S$，Ω_B 是某变形发生的情况下的布里渊角频率偏移，激发光的角频率记为 ω_{BL}，斯托克斯光的角频率记为 ω_{BS} 时，$\Omega_B=\omega_{BL}-\omega_{BS}$。i 为复数单位，i×i＝－1。β 是 κ×Λ/Γ，κ 为（γ×ω_L）/（4×ρ_0×n×c）≒（γ×ω_S）/（4×ρ_0×n×c）。ρ_0 为检测用光纤的密度的平均值。又，当感应布里渊散射（SBS）的增益系数记为 gSBS 时，β 为 gSBS＝16×π×β/（n×c），gSBS＝2.5×10^{-11}m/W，这些示于例如文献 4。

文献 4

ALGaeta and R.W.Boyd,"Stochastic dynamoics of stimulated Brillouin scattering in an optical fiber", Physical Review A,Vol.44,no.5,1991,pp3205-3209

式 4 是涉及激发光的公式，式 5 是涉及探测光的公式，式 6 是涉及音响声子的寿命的公式。解式 4～式 6，求布里渊损耗 V（t、Ω）作为近似解，得到式 7～式 11。

$$V(t,\Omega)=\frac{1}{2}\beta A_L^2(H_1+H_2+H_3+H_4)+c.c \qquad \bullet\bullet\bullet(式7)$$

$$H_1=A_S^2\int_{v_g(t-T_f-D)/2}^{v_g(t-T_f)/2}\int_0^{t-T_f-2\varsigma/v_g}h^c(\varsigma,s)dsd\varsigma \qquad \bullet\bullet\bullet(式8)$$

$$H_2=A_S C_S\int_{v_g(t-T_f-D)/2}^{v_g(t-T_f)/2}\int_0^{t-2\varsigma/v_g}h^c(\varsigma,s)dsd\varsigma \qquad \bullet\bullet\bullet(式9)$$

$$H_3=A_S C_S\int_{v_g(t-T_f-D)/2}^{v_g(t-T_f)/2}\int_0^{t-T_f-2\varsigma/v_g}h^c(\varsigma,s)dsd\varsigma \qquad \bullet\bullet\bullet(式10)$$

$$H_4 = C_S^2 \int_{v_g(t-T_f-D)/2}^{v_g t/2} \int_0^{t-2\varsigma/v_g} h^c(\varsigma, s) ds d\varsigma \qquad \bullet\bullet\bullet(式11)$$

这里，ζ表示检测用光纤长度方向上的位置，s 表示时间。c.c 为常数，当 LL 表示检测用光纤的总长度时，h（z、s）是在位置为 z、时间为 s 中的 $\Gamma \times e^{-(\Gamma + i(\Omega B(z) - \Omega))}$，$h^c$（ζ、s）=h（z、s）=h（(LL－ζ)、s)。

用式 8 表示的 H1，表示依据由光脉冲 OP 与激发光激励的音响声子的布里渊损耗光谱。用式 9 表示的 H2，表示依据由光脉冲前方光 OPf 与激发光激励，再由光脉冲 OP 与激发光激励的音响声子的布里渊损耗光谱。用式 10 表示的 H3，表示依据由光脉冲 OP 与激发光激励，再由光脉冲前方光 OPf 与激发光激励的音响声子的布里渊损耗光谱。用式 11 表示的 H4，表示依据由光脉冲前方光 OPf 与激发光激励的音响声子的布里渊损耗光谱。

作为一个示例，在光强呈阶梯状的光脉冲 Ops 中设时间宽度为 14ns、光脉冲 OP 的时间宽度 D 为 1ns、$10\times\log((As+Cs)^2 / Cs^2)$为 20dB，检测用光纤 SOF（全长 10m 的零变形的集束光纤）的 3.05m 处产生 100με 的变形，在 3.05m±0.2m 处没有发生变形的情况下，对于 3.05m－0.2m、3.05m、3.05m＋0.2m 的 H1＋H3、H2、以及 H4 的各模拟结果示于图 2 和图 3。图 2（A）表示 H1＋H3 的情况，图 2（B）表示 H2 的情况，图 3（A）表示 H4 的情况，图 3（B）表示 H（＝H1＋H2＋H3＋H4）的情况。各图的横轴表示频率，实线是有 100με 变形的情况，虚线是没有变形的情况。而且各图由于布里渊损耗光谱以中心频率（布里渊损耗光谱的峰值的频率）为中心轴左右对称，因此显示右半部分。也就是说，各图的纵轴是中心频率，是中心轴。从图 2 可知，仅 H2 的分量显著地表示出布里渊频率偏移。

从式 7～式 11 可知，H3 和 H4 由于从探测光向激发光的能量转移遍及较大范围，难于得到局部变形的信息。另一方面，H1 和 H2 由于从探测光向激发光的能量转移局部地进行，容易得到局部变形的信息。但是，根据模拟结果，H3 比其他 H1、H2 以及 H4 小一个数量级，H1 的半值全幅从例如图 2（A）可知约有 1GHz，因此与 H2 相比 H1 形成宽带曲线，不容易发现中心频率。

从而，通过设定得能够检测出 H2，能够用脉冲宽度较窄的光脉冲以高精度、高空间分辨率检测变形和/或温度。

下面对能够检测该 H2 的光强呈阶梯状的光脉冲 OPs 的波形进行说明。

本发明的探测光预先设定波形，不需要根据检测用光纤的光纤长度进行调整，因此有必要采用例如图 4 所示的光强呈阶梯状的光脉冲 OPs。

这里，在本说明书中将这种在光强呈阶梯状的光脉冲 OPs 的光脉冲 OP 的前方以规定的时间宽度 Tf 残留的连续的泄漏光称为光脉冲前方光 OPf，将在光强呈阶梯状的光脉冲 OPs 的光脉冲 OP 的后方以规定的时间宽度 Tb 残留的连续的泄漏光称为光脉冲后方光 Opb。

为了规定光强呈阶梯状的光脉冲 OPs 的波形，有必要规定光脉冲前方光 OPf 的时间宽度 Tf、光脉冲 OP 的脉冲宽度（时间宽度）Tp、光脉冲后方光 Opb 的时间宽度 Tb、以及光脉冲 OP 的光强 P1 和光脉冲前方光 OPf 的光强 P2（光脉冲后方光 OPb 的光强 P2）。

首先对光脉冲前方光 OPf 的时间宽度 Tf、光脉冲 OP 的脉冲宽度 Tp 以及光脉冲后方光 OPb 的时间宽度 Tb 进行说明。

该光脉冲前方光 OPf 的时间宽度 Tf，在将例如当前通常使用的 1300nm 波长单模光纤和 1550nm 波长单模光纤用于检测用光纤 SOF 的情况下，在根据音响声子的上升时间其音响声子相应上升到 90%时，其布里渊散射光谱的半高宽（日文—半值全幅）约为 35MHz，因此只要 Tp＜Tf≤（1/35MHz）＝28.57ns 即可。

又，如果加长光脉冲前方光 OPf 的时间宽度 Tf（Tf＞28.57ns），则布里渊损耗/增益光谱 BSl/g(νd)的形状更加接近洛伦兹曲线，因此能够以高精度得到布里渊频率偏移的值，变形和/或温度的精度良好，另一方面，由于检测用光纤 SOF 的某一位置上的布里渊频率偏移中混入该某一位置周边的布里渊频率偏移的信息，因此该某一位置上的布里渊频率偏移的信噪比（SNR）变劣，该某一位置上的变形和/或温度的精度变劣。这样，加长光脉冲前方光 OPf 的时间宽度 Tf 在变形和/或温度的精度变好的方向和变坏的方向上都起作用。

为了得到 1m 及其以下的高空间分辨率，光脉冲 OP 的脉冲宽度 Tp 只要是满足 10ns≥Tp＞0 即可。光脉冲后方光 OPb 的时间宽度 Tb 满足 Tb＜Tf，越短越好，也可以是 0。

而且在本发明中，光强呈阶梯状的光脉冲 OPs 在检测用光纤 SOF 中不是以图 24（C）所示的波形存在，而必须以图 4 所示的波形存在。因此在上述范围内，首先决定光脉冲前方光 OPf 的时间宽度 Tf、光脉冲 OP 的时间宽度 Tp、以及光脉冲后方光 OPb 的时间宽度 Tb，规定具有该决定的各时间宽度的光强呈阶梯状的光脉冲 OPs 在检测用光纤 SOF 内以图 4 所示的波形存在的检测用光纤 SOF 的最小长度。从而，由于将该规定的大于等于最小长度的光纤使用于检测用光纤 SOF，就不必像背景技术中所述的那样在每一次测定时根据检测用光纤 SOF 的光纤长度手动调整探测光。

下面对光脉冲 OP 的光强 P1 与光脉冲前方光 OPf 的光强 P2（光脉冲后方光 OPb 的光强 P2）进行说明。

在这里，利用式 12 对光脉冲 OP 的光强 P1 与光脉冲前方光 OPf 的光强 P2（光脉冲后方光 OPb 的光强 P2）之比 Prx 进行定义。

$$Prx=10\times\log(P1/P2)$$

$$=10\times\log((As+Cs)^2/Cs^2) \quad \cdots式\ 12$$

而且为了检查容易检测出上述 H2 的条件，模拟相对由式 12 定义的比 Prx 的 H2/（H1＋H3＋H4）。还有，H2/（H1＋H3＋H4）分别用 H1、H2、H3、H4 的各峰值计算。例如光脉冲前方光 OPf 的时间宽度为 11ns，光脉冲 OP 的时间宽度 Tp 为 1ns，而且，以在使用光脉冲后方光 OPb 的时间宽度 Tb 为 0ns 的光强呈阶梯状的光脉冲 OPs 的情况下的理论分析为依据的模拟结果示于图 5。图 5 的横轴是以 dB 为单位表示的比 Prx，图 5 的纵轴是 H2/（H1＋H3＋H4）。还假定模拟的检测用光纤的 SOF（全长 10m 的零变形的集束光纤）上，在 3.05m 处发生 100μ ε 的变形，在 3.05±0.2m 处没有发生变形进行模拟。

从图 5 可知，表示 H2/（H1＋H3＋H4）与比 Prx 的关系的曲线是比 Prx 在规定值处具有峰值的凸状的高次曲线。为了检测出 H2，只要 H2/（H1＋H3＋H4）为 0.5 及其以上即可，因此通过得到这样的曲线，能够求得 H2/（H1＋H3＋H4）为 0.5 及其以上的比 Prx 的范围（a≤比 Prx≤b），为了能够以最高精度检测出 H2，采用 H2/（H1＋H3＋H4）为最高值、即为峰值的比 Prx 值（比 Prx＝c）即可。

从而，在各时间宽度采用如上所述设定的光强呈阶梯状的光脉冲 OPs 的情况下，为了以高精度、高空间分辨率检测变形和/或温度，只要将光强呈阶梯状的光脉冲 OPs 的比 Prx 设定为 H2/（H1＋H3＋H4）为 0.5 及其以上的比 Prx 的范围内即可，而为了以最高精度、高空间分辨率检测变形和/或温度，只要将光强呈阶梯状的光脉冲 OPs 的比 Prx 设定为 H2/（H1＋H3＋H4）成为峰值的比 Prx 的值即可。

根据以上说明，为了以高精度、高空间分辨率检测出变形和/或温度，而且检测出微小的变形的变化，在上述各范围分别决定光强呈阶梯状的光脉冲 OPs 的各时间宽度 Tf、Tp、Tb，在具有该决定的各时间宽度 Tf、Tp、Tb 的光强呈阶梯状的光脉冲 OPs 中，根据式 8～式 11 模拟相对于用式 12 定义的比 Prx 的 H2/（H1＋H3＋H4），然后将模拟结果中的 H2/（H1＋H3＋H4）成为 0.5 及其以上的比 Prx、特别是该 H2/（H1＋H3＋H4）成为峰值的比 Prx 设定为光强呈阶梯状的光脉冲的比 Prx 即可。又根据具有该决定的各时间宽度 Tf、Tp、Tb 的光强呈阶梯状的光脉冲 OPs 规定检测用光纤 SOF 中能够使用的最小长度。

附图说明

图 1 是说明本发明的布里渊散射现象的理论分析用的图。

图 2 表示以理论分析为依据的模拟的一个例子（之一）。

图 3 表示以理论分析为依据的模拟的一个例子（之二）。

图 4 表示光强呈阶梯状的光脉冲的波形。

图 5 表示以理论分析为依据的，H2/（H1＋H3＋H4）相对比 Prx 的模拟。

图 6 是表示第 1 实施形态的分布式光纤传感器的构成的方框图。

图 7 是表示分布式光纤传感器的阶梯状光脉冲光源的构成的方框图。

图 8 是表示分布式光纤传感器的自动温度控制器的构成的方框图。

图 9 是表示分布式光纤传感器的自动频率控制器的构成的方框图以及说明其工作原理用的图。

图 10 是说明阶梯状光脉冲的生成用的图。

图 11 是表示分布式光纤传感器的光强·偏振调整部的构成的方框图。

图 12 是表示第 1 实施形态的分布式光纤传感器的 CW 光源的构成的方框图。

图 13 是表示分布式光纤传感器的光强调整部的构成的方框图。

图 14 表示布里渊损耗/增益光谱的分布以及距离 L1 以及距离 L2 上的布里渊损耗/增益光谱。

图 15 是表示第 2 实施形态的分布式光纤传感器的构成的方框图。

图 16 是表示第 2 实施形态的分布式光纤传感器的 CW 光源的构成的方框图。

图 17 是表示第 3 实施形态的分布式光纤传感器的构成的方框图。

图 18 表示第 4 实施形态的光强呈阶梯状的光脉冲以及泄漏光的光脉冲。

图 19 表示第 4 实施形态的分布式光纤传感器的动作。

图 20 是表示与第 1 实施形态的分布式光纤传感器对应的第 5 实施形态的分布式光纤传感器的构成的方框图。

图 21 表示第 5 实施形态的分布式光纤传感器的动作。

图 22 是表示频率误差比（表示对于频率误差比的修正值）－修正值特性曲线用的图。

图 23 表示检测用光纤的长度方向上的布里渊频率偏移量。

图 24 表示背景技术中所述的分布式光纤传感器的构成以及探测光。

图 25 表示布里渊损耗/增益光谱。

具体实施方式

下面根据附图对本发明的实施形态进行说明。还有，对各图中相同的构成标注相同的标号，其说明省略。

第 1 实施形态

本发明第 1 实施形态的分布式光纤传感器通过从检测变形和/或温度用的检测用光纤的一端射入光强呈阶梯状的光脉冲的探测光，并从该检测用光纤的另一端射入连续的激发光，接收检测用光纤中发生的布里渊散射现象的光，进行布里渊增益光谱时域分析（B^{Gain}－OTDA、Brillouin Gain Optical Time Domain Analysis）或布里渊损耗光谱时域分析（B^{Loss}－OTDA、Brillouin Loss Optical Time Domain Analysis），从而根据布里渊频率偏移检测出变形和/或温度的分布。以下将布里渊增益光谱时域分析或布里渊损耗光谱时域分析简称为布里渊损耗/增益光谱时域分析。在该布里渊损耗/增益光谱时域分析中，布里渊散射现象的光是受到布里渊衰减/放大的光。

图 6 是表示第 1 实施形态的分布式光纤传感器的构成的方框图。图 7 是表示分布式光纤传感器的阶梯状光脉冲光源的构成的方框图。图 8 是表示分布式光纤传感器的自动温度控制器的构成的方框图。图 9 是表示分布式光纤传感器的自动频率控制器的构成的方框图以及说明其工作原理用的图。图 10 是说明阶梯状光脉冲的生成用的图。图 11 是表示分布式光纤传感器的光强・偏振调整部的构成的方框图。图 12 是表示第 1 实施形态的分布式光纤传感器的 CW 光源的构成的方框图。图 13 是表示分布式光纤传感器的光强调整部的构成的方框图。

在图 6 中，第 1 实施形态的分布式光纤传感器 1 形成包括阶梯状光脉冲光源 11、光耦合器 12、光强・偏振调整部 13、光循环器 14、光连接器 15、控制处理部 16、布里渊时域检测计 17、检测用光纤 18、CW 光源 19、光耦合器 20、光强调整部 21、以及光连接器 22 的结构。

阶梯状光脉冲光源 11，是由控制处理部进行控制，生成光强越向内侧越大，呈阶梯状的光脉冲的光源装置。这样的光脉冲在表观上看上去是光强互不相同的光脉冲多个重叠。阶梯状光脉冲光源 11 的输出端子（射出端子）与光耦合器 12 的输入端子（入射端子）光学连接。

这样的阶梯状光脉冲光源 11 如图 7 所示，形成包括基板 101、温度检测元件 102、发光元件 103、光耦合器 104、法布里-珀罗标准滤波器（Fabry-perot Etalon Filter；以下简称“EF”）105、第 1 受光元件 106、第 2 受光元件 107、温度调整元件 108、自动温度控制器（Automatic Temperature Controller，以下简称“ATC”）109、自动频率控制器（Automatic

Frequency Controller，以下简称“AFC”）110、第 1 光强调制器 111、第 1 光强调制器驱动部 112、第 2 光强调制器 113、以及第 2 光强调制器驱动部 114 的结构。

基板 101 是承载温度检测元件 102、发光元件 103、光耦合器 104、EF105、第 1 受光元件 106、以及第 2 受光元件 107 的载台。

温度检测元件 102 是配置于发光元件 103 附近，检测发光元件 103 的温度用的零件，例如是利用电阻值随着温度的变化而变化的现象检测温度的热敏电阻。从温度检测元件 102 能够精确检测发光元件 103 的观点考虑，基板 101 最好是采用铝或铜等热传导率高的金属材料（包括合金）。又，基板 101 最好是其热容量大，从而能够使得温度变化小。

温度调整元件 108 是通过发热和吸热调整基板 101 的温度的零件，例如珀尔帖元件或塞贝克元件等热电变换元件。在本实施形态中，采用将 P 型与 N 型热电半导体钎焊于铜电极上的珀尔帖元件，在基板 101 与配置发光元件 103 等的面相反的面上以紧贴的状态配置装置该珀尔帖元件。

ATC109 是根据温度检测元件 102 的检测输出控制强度调整元件 108，以此将基板 101 的温度自动地大致一定地保持于规定的温度的电路。

ATC109 如图 8 所示，形成例如包括：输入温度检测元件 102 的检测输出和控制处理部 16 来的参考电压 Vref1，输出两者之差的放大器 201、输入放大器 201 的差分输出的例如由低通滤波器电路构成的积分电路 202、输入放大器 201 的差分输出的例如由高通滤波器电路构成的微分电路 203、输入积分电路 202 的积分输出和微分电路 203 的微分输出，输出与其成比例的比例电路 204、根据比例电路 204 的正输出以及负输出相应得到驱动温度调整元件 207 的输出的放大器 205、206、以及根据比例电路 204 的比例输出相应生成温度调整元件 108 的驱动电流的由桥式电路构成的驱动调整元件驱动器 207 的结构。即 ATC109 形成能够根据温度检测元件 102 的检测输出对温度调整元件 108 进行 PID 控制的结构。参考电压 Vref1 被设定为与基板 101 为规定的温度时温度检测元件 102 的检测输出相同的值。

利用这样的结构，ATC109 在基板 101 比规定的温度高的情况下驱动温度调整元件 108，使温度调整元件 108 吸热，在基板 101 比规定的温度低的情况下驱动温度调整元件 108，使温度调整元件 108 发热。在本实施形态中，在吸热时对作为温度调整元件 108 的珀尔帖元件提供＋1.4A 的电流，在发热时提供－0.6A 的电流。这样，通过 ATC109 对温度调整元件 108 的驱动，使基板 101 的温度自动地大致一定地保持在规定的温度。其结果是，发光元件 103 的温度也自动地大致一定地保持在规定的温度。因此，在发光元件 103 发出光的频率与温度有关的情况下，能够抑制其对温度的依附性。而且，规定的温度是在发光元件

103 以应振荡的振荡频率 f_0 发生振荡的情况下的温度。又，为了对基板 101 的温度稳定程度进行监控，比例电路 204 的比例输出经过模拟/数字变换后被输出到控制处理部 16。

再回到图 7，发光元件 103 是发射谱线宽度狭窄的规定频率的光，并通过改变元件温度和驱动电流能够改变振荡波长（振荡频率）的元件，例如多量子阱结构的 DFB 激光器和可变波长分布喇格反射型激光器等波长可变的半导体激光器（频率可变的半导体激光器）。频率可变半导体激光器发射的激光的频率是与温度有关的，但是由于如上所述利用 ATC109 大致一定地自动保持于规定的温度，所以能够抑制频率随温度的变化，频率可变半导体激光器能够利用驱动电流稳定地改变改变振荡频率。

光耦合器 104 是将入射光分配给两束光射出的光学零件，例如是半透半反镜等光束分离器。EF105 是根据频率（波长）的变化周期地改变透射光强度的具有周期性的透射频率特性（周期性的透射波长特性）的周期性的滤波器。EF105 的 FSR（Free Spectral Range 自由光谱范围）在本实施形态中是 100GHz。第 1 和第 2 受光元件 106、107 是发生与接收的光的光强相应的电流，将该发生的电流变换为电压输出的光电变换元件，由例如由发光二极管和电阻器构成。

发光元件 103 的前方和后方射出的光线（在本实施形态中为激光），分别射入第 1 光强调制器 111 和光耦合器 104。从发光元件 103 的后方射入光耦合器 104 的光线的光由光耦合器 104 以规定的分配比分配给两束光束，所分配的一束光束射入第 2 受光元件 107，所分配的另一光束通过 EF105 射入第 1 受光元件 106。第 1 和第 2 受光元件 106、107 将与入射的光的光强相应的电压作为受光输出分别向 AFC110 射出。

AFC110 是根据第 1 和第 2 受光元件 106、107 的受光输出 PDv1、PDv2 对发光元件 103 进行控制，以此将发光元件 103 发出的光线频率自动地大致一定地保持在规定的频率的电路。

AFC110 例如如图 9（A）所示，形成包括：将第 1 受光元件 106 的受光输出 PDv1 放大的放大器 211、将第 2 受光元件 107 的受光输出 PDv2 放大的放大器 212、进行将放大器 211 放大的第 1 受光元件 106 的受光输出 PDv1 除以放大器 212 放大的第 2 受光元件 107 的受光输出 PDv2 的除法运算的除法电路 213、将除法电路 213 的除法输出 PDv1/PDv2 放大，然后进行模拟/数字变换再输出到控制处理部 16 的放大器 216、输入除法电路 213 的除法运算输出 PDv1/PDv2 与控制处理部 16 来的参考电压 Vref2 然后输出两者之差的放大器 214、将放大器 214 的差分输出放大然后进行模拟/数字变换再输出到控制处理部 16 的放大器 217、以及输入放大器 214 的差分输出与控制处理部 16 来的参考电压 Vref3 然后输

出两者之差的放大器 215 的结构。

下面对将发光元件 103 发出的光的频率自动地大致一定地保持在发光元件 103 应振荡的规定频率 f_0 的 AFC110 的动作进行说明。

上述除法运算输出 PDv1/PDv2 是从发光元件 103 通过具有周期性透过频率特性的 EF105 接收的光的光强（受光输出 PDv1）除以从发光元件 103 直接接收的光的光强（受光输出 PDv2）的值，因此如图 9（B）的曲线 c 所示，按照 EF105 的 FSR 随着频率的变化而周期性变化。

与发光元件 103 应该振荡的振荡频率 f_0（即发光元件 103 应该发出的光的频率 f_0）对应的曲线 c 上的点作为锁定点（Lock point），将该除法运算输出 PDv1/PDv2 的值作为锁定点值 LP_0。

从而，假如发光元件 103 的光的频率比应该振荡的振荡频率 f_0 高，则除法运算输出 PDv1/PDv2 比锁定点值 LP_0 大，反之，如果低于振荡频率 f_0，则除法运算输出 PDv1/PDv2 比锁定点值 LP_0 小。

因此，AFC110 在除法运算输出 PDv1/PDv2 比锁定点值 LP_0 大的情况下，由于是发光元件 103 的光的频率比应该振荡的振荡频率 f_0 高的情况，只要驱动发光元件 103，使发光元件 103 的光的频率下降即可，另一方面，在除法运算输出 PDv1/PDv2 比锁定点值 LP_0 小的情况下，由于是发光元件 103 的光的频率比应该振荡的振荡频率 f_0 低的情况，只要驱动发光元件 103，使发光元件 103 的光的频率上升即可。

因此上述参考电压 Vref3 被设定为，发光元件 103 的光的频率与以应该振荡的振荡频率 f_0 驱动的情况下的除法运算输出 PDv1/PDv2 相同的值，而且，上述参照电压 Vref2 是进行微调用的参考电压，而且能设定应正确地与锁定点值 LP_0 一致的参考电压 Vref2。这样，参考电压 Vref2、Vref3 设定成使得发光元件 103 的光的频率成为以应该振荡的振荡频率 f_0 驱动的锁定点值 LP_0。

就这样地设定参照电压 Vref2 和 Vref3，借助于 AFC110 动作，AFC110 当发光元件 103 的光的频率偏离应该振荡的振荡频率 f_0 时，能够驱动发光元件 103 将该偏离消除。在本实施形态中，由于发光元件 103 采用频率可变半导体激光器，AFC110 根据偏离应该振荡的振荡频率 f_0 的偏移量调整注入的电流，因此波长可变半导体激光器能够以自动地大致一定地保持的规定频率 f_0 发出激光。

为此，光耦合器 104、EF105、第 1 和第 2 受光元件 106、107 以及 AFC110 构成使发光元件 103 发出的光的波长（频率）大致固定的所谓波长锁定器。

第 1 和第 2 光强调制器 111、113 是调制入射光光强的光学零件，是例如马赫—泽德型光调制器（以下简称“MZ 光调制器”）和半导体电场吸收型光调制器等。

MZ 光调制器在例如铌酸锂、钽酸锂、铌酸锂·钽酸锂本征体等具有电—光学效应的基板上形成光波导路、信号电极、接地电极。光波导路是两个 Y 分叉波导路，其中间部分分为两支，形成第 1 和第 2 波导路支路，构成马赫·泽德干涉仪（Mach-Zehnder interferometer）。信号电极分别形成于该两支波导路支路上，接地电极以规定的间隔形成于基板，而且与信号电极平行。射入 MZ 光调制器的光通过光波导路传播，在第 1Y 分叉波导路分叉为两束，分别在各波导路支路中传播，在第 2Y 分叉波导路再度汇合然后从光波导路射出。在这里，各信号电极上施加电信号、例如高频信号时，由于电光学效应，各波导路支路的折射率发生变化，所以通过第 1 和第 2 波导路支路传播的第 1 和第 2 光的行进速度就发生变化。因此通过在各电信号间设定规定的相位差，在第 2Y 分叉波导路中，第 1 和第 2 光以不同的相位汇合。汇合后的光形成与入射光的模式不同的模式、例如高次模式。这种不同模式汇合的光不能在光波导路传播，因此光受到强度调制。MZ 光调制器以电信号→折射率变化→相位变化→强度变化这样的步骤调制入射光的光强。除了利用电—光学效应的调制器外，还有利用磁—光学效应的磁光调制器、利用声—光学效应的声光调制器，以及利用 Franz-Keldysh 效应和量子禁闭 Stark 效应的电场吸收型光调制器等。

第 1 和第 2 光强调制器驱动部 112、114 分别由控制处理部 16 控制，是分别驱动第 1 和第 2 光强调制器 111、113 的驱动电路，例如形成具有：发生施加于第 1 和第 2 光强调制器 111、113 的电压脉冲的脉冲发生电路、以及控制该电压脉冲的发生定时用的定时发生电路构成。该电压脉冲在第 1 和第 2 光强调制器 111、113 为 MZ 光调制器的情况下相当于上述电信号。

下面对这样构成的阶梯状光脉冲光源 11 生成阶梯状光脉冲的动作进行说明。图 10（A）表示发光元件 103 的输出光（图 7 所示的箭头 A 的位置），图 10（B）表示第 1 光强调制器 111 的输出光（图 7 所示的箭头 B 的位置），而图 10（C）表示第 2 光强调制器 113 的输出光、即阶梯状光脉冲光源 11 的输出光（图 7 所示箭头 C 的位置）。

如图 10（A）所示，发光元件 103 由基于控制处理部 16 的控制的 AFC110 连续发光射出谱线宽度狭窄的规定频率 f_0 的具有大致一定光强 P1 的光 CW_0。该发光元件 103 发射出的连续光 CW_0 射入第 1 光强调制器 111。

在背景技术中所述的光强调制器在通常状态下是关闭的，通过在规定的定时接通·关闭，以此生成图 24（B）所示的光脉冲。光强调制器是马赫—泽德型光调制器的情况下，

通过调整施加于波导路上的电压，利用将在第 1 波导路支路传播的光与在第 2 波导路支路传播的光之间的相位差设定为 180° 来实现关闭，利用使在第 1 波导路支路传播的光与在第 2 波导路支路传播的光的相位一致来实现接通。

如图 10（B）所示，本实施形态的第 1 光强调制器 111 在通常状态下由基于控制处理部 16 的控制的第 1 光强调制器驱动部 112 驱动，使第 1 光强调制器 111 射出的光的光强成为比光强 P1 小的微弱的光强 P2，由基于控制处理部 16 的控制的第 1 光强调制器驱动部 112 驱动，以在定时 T1 接通之同时，在定时 T2 返回通常状态。通过这样，通过由第 1 光强调制器驱动部 112 驱动第 1 光强调制器 111，射入第 1 光强调制器 111 的连续光 CW_0 在定时 T1 之前被调制为光强 P2，从定时 T1 到定时 T2 不受调制地保持光强 P1，从定时 T2 起再度被调制为光强 P2。即通过这样，利用第 1 光强调制部驱动器 112 进行驱动，第 1 光强调制器 111 射出在图 10（B）所示的光强 P2 的连续的泄漏光 CWL 中具有光强 P1 的光脉冲 OP 的光。该光强 P1 对应于图 1 和图 4 中的光强 P1（$=(As+Cs)^2$），光强 P2 对应于图 1 和图 4 所示的光脉冲前方光 OPf 以及光脉冲后方光 OPb 的光强 P2（$=Cs^2$）。在光强调制器是马赫—泽德型光调制器的情况下，第 1 光强调制器驱动部 112 通过调整外加于马赫—泽德型光调制器的第 1 和第 2 波导路支路上的电压，以此调整在通常状态下通过第 1 波导路支路传播的光与通过第 2 波导路支路传播的光之间的相位差，使光强为 P2，在定时 T1，使通过第 1 波导路支路传播的光与通过第 2 波导路支路传播的光的相位一致，在定时 T2，调整通过第 1 波导路支路传播的光与通过第 2 波导路支路传播的光之间的相位差使通常状态的光强为 P2。

然后，由连续的泄漏光 CWL 与光脉冲 OP 构成的图 10（B）所示的波形的光从第 1 光强调制器 111 射入第 2 光强调制器 113。如图 10（C）所示，第 2 光强调制器 113，在通常状态下是关闭的，由基于控制处理部 16 的控制的第 2 光强调制器驱动部 114 驱动，使其在定时 T3 接通，同时在定时 T4 返回通常的关闭状态。通过这样，利用第 2 光强调制器驱动部 114 驱动第 2 光强调制器 111，从第 1 光强调制器 111 射入第 2 光强调制器 113 的图 10（B）所示的波形的光，在定时 T3 之前调制为光强 0（被关闭），从定时 T3 到定时 T4 不受调制地保持原来状态，在定时 T4 以后再度被调制为光强 0（被关闭）。即通过这样由第 2 光强调制器驱动部 114 进行驱动，第 2 光强调制器 113 仅在光脉冲 OP 的前方残留光强 P2 的连续的泄漏光 OPf（光脉冲前方光 OPf），将残余部分去除。借助于此，第 2 光强调制器 113 生成在光强 P2 的光脉冲中存在光强比 P2 大的光强 P1 的光脉冲的、光强有一个阶梯状变化的阶梯状的、谱线宽度狭窄的光强呈阶梯状的光脉冲 OPs。还有，也可以通过

调制定时 T4 形成具有光脉冲后方光 OPb 的光强呈阶梯状的光脉冲 OPs。

这里，光强呈阶梯状的光脉冲 OPs 的光脉冲前方光 OPf 的时间宽度 Tf、光脉冲 OP 的时间宽度 Tp、以及由式 12 定义的比 Prx 如上所述地设定。

在本实施形态中，光脉冲前方光 OPf 的时间宽度 Tf 设定为例如 5ns、10ns、15ns、以及 20ns 等。又，光脉冲 OP 的脉冲宽度 Tp 如上所述为了得到 1m 及其以下的高空间分辨率，有必要设定为 10ns 及其以下，但是出于能够抑制检测用光纤 18 的某一位置上的布里渊频率偏移中混入该某一位置的周边的布里渊频率偏移的信息的考虑，最好使布里渊损耗/增益光谱 BSl/g（νd）与布里渊时域检测计 17 进行测定时的取样时间间隔一致，在本实施形态中，光脉冲 OP 的脉冲宽度 Tp 设定为 5ns、2ns、和 1ns。而且，比 Prx 如上所述根据式 8～式 11 模拟 H2/（H1＋H3＋H4）相对于比 Prx，然后根据该模拟的结果进行设定。本实施形态能够检测出布里渊损耗光谱 BSl/g(νd)的峰值，而且能够得到最好的洛伦兹曲线，能够以最高精度、高空间分辨率检测出变形和/或温度，因此比 Prx 被设定为模拟结果中提供 H2/（H1＋H3＋H4）的峰值的数值。比 Prx 即使是被设定为模拟结果中 H2/（H1＋H3＋H4）的值为 0.5 及其以上的比 Prx 的数值，仍能以最高精度、高空间分辨率检测出变形和/或温度。例如在光脉冲前方光 OPf 的时间宽度 Tf 为 12ns，光脉冲 OP 的时间宽度 Tp 为 1ns 的情况下，比 Prx 被设定为约 15dB～约 27dB 之间的值，而且为了得到最好的洛伦兹曲线，设定为约 21dB。

还有，为了补偿第 1 光强调制器 111 和第 2 光强调制器 113 的损耗，也可以将对光进行放大的放大器 115 设置于从发光元件 103 到光耦合器 12 的光程上。特别是从在作为噪声的自然发射光（ASE、Amplifier Spontaneous Emission）小的情况下从进行放大的考虑出发，最好是如图 7 的虚线所示配置于第 1 光强调制器 111 与第 2 光强调制器 113 之间的光程上。光放大器 115 例如是对发光元件 103 发射的光的频率具有放大增益的光纤放大器或半导体光放大器。光纤放大器有在光纤中添加铒 Er、钕 Nd、镨 Pr、铥 Tm 等稀土元素的添加稀土元素的光纤放大器和利用拉曼放大的拉曼放大光纤放大器等.

再回到图 6，光耦合器 12、22 是将入射光分配为两束光射出的光学零件，可以采用例如半透半反镜等微小光学元件型光分叉耦合器、熔融光纤的光纤型光分叉耦合器、光波导路型光分叉耦合器等。光耦合器 12 的一个输出端子与光强・偏振调整部 13 的输入端子光学连接，另一输出端子与布里渊时域检测计 17 的第 1 输入端子光学连接。

光强・偏振调整部 13 被控制处理部 16 控制，是调整入射光的光强同时还随机改变入射光的偏振面然后使其射出的零件。光强・偏振调整部 13 的输出端子与光循环器 14 的第

1 端子光学连接。

光强·偏振调整部 13 例如如图 11 所示，形成包括：光可变衰减器 121 和偏振光控制器 122 的结构。光可变衰减器 121 是能够使入射光光强衰减后射出，同时能够改变其衰减量的光学零件。光可变衰减器 121 可以采用例如在入射光与出射光之间插入衰减圆板，在衰减圆板的表面上蒸镀在旋转方向上厚度连续改变的金属膜，通过使该衰减圆板旋转调节衰减量的光可变衰减器、或在入射光与出射光之间插入磁—光学结晶以及在该磁—光学结晶的出射侧插入起偏振器，在磁—光学结晶上施加磁场，通过改变该磁场的强度调整衰减量的可变衰减器等。偏振光控制器 122 是随机改变入射光的偏振面后射出的光学零件。射入光强·偏振调整部 13 的入射光在光可变衰减器 121 经控制处理部 16 的控制，其光强调整为规定的光强后射入偏振光控制器 122，在偏振光控制器 122 随机改变偏振面后射出。

光循环器 14 是第 1～第 3 三个端子的光循环器，是入射光与出射光对于该端子编号具有循环关系的非可逆性的光学零件。即射入第 1 端子的光，从第 2 端子射出但不从第 3 端子射出，射入第 2 端子的光，从第 3 端子射出但不从第 1 端子射出，射入第 3 端子的光，从第 1 端子射出但不从第 2 端子射出。光连接器 15、22 是光纤之间或光学零件与光纤之间实现光学连接用的光学零件。光循环器 14 的第 2 端子通过光连接器 15 与检测用光纤 18 的一个端子光学连接，光循环器 14 的第 3 端子与布里渊时域检测计 17 的第 3 输入端子光学连接。

CW 光源 19 由控制处理部 16 进行控制，是在规定的频率范围 fr 发射光强大致一定的连续光 CWpump1 的装置。CW 光源 19 例如，如图 12 所示，形成包括基板 131、温度检测元件 132、发光元件 133、光耦合器 134、EF135、第 1 受光元件 136、第 2 受光元件 137、温度调整元件 138、ATC139、AFC140 的结构。即 CW 光源 19 由于能够以规定的频率范围 fr 发射光强大致为一定的连续光 CWpump1，不需要使发光元件 133 射出的连续光像阶梯状光脉冲光源 11 那样形成光强呈阶梯状的光脉冲，因此形成不具备阶梯状光脉冲光源 11 中的第 1 和第 2 光强调制器 111、113 以及第 1 和第 2 光强调制器驱动部 112、114 的结构。CW 光源 19 中的基板 131、温度检测元件 132、发光元件 133、光耦合器 134、EF135、第 1 受光元件 136、第 2 受光元件 137、温度调整元件 138、ATC139、以及 AFC140 除了根据控制处理部 16 的控制改变发光元件 133 的光的频率以外，包括光学连接关系和电气连接关系在内，分别与阶梯状光脉冲光源 11 中的基板 101、温度检测元件 102、发光元件 103、光耦合器 104、EF105、第 1 受光元件 106、第 2 受光元件 107、温度调整元件 108、ATC109、以及 AFC110 相同，因此其说明省略。

本实施形态的分布式光纤传感器 1，通过将作为探测光的阶梯状光脉冲的频率 f_0 加以固定，在规定的频率范围 fr 对作为激发光的连续光 CWpump1 的频率进行扫描，以此测定布里渊损耗/增益光谱 BSl/g(ν d) ，测定布里渊频率偏移 ν b。

为此，形成如下所述的结构，即能够通过与控制处理部 16 进行扫描用的频率一致改变 AFC140 的参考电压 Vref2 以及参考电压 Vref3，以此改变 AFC140 的锁定点值 LP_0，发出保持于扫描用的频率的连续光 CWpump1 的结构。

在本发明的实施形态中，如图 9（C）所示，规定的频率范围 fr 是 4GHz，设与该规定的频率范围 fr 的下限频率 fL 对应的锁定点值为 LPL，与该规定的频率范围的上限频率 fu 对应的锁定点值为锁定点值 LPu，锁定点值 LP_0 在 $LPL \leqslant LP_0 \leqslant LPu$ 的范围变更。

CW 光源 19 的输出端子与光耦合器 20 的输入端子光学连接。光耦合器 20 的一个输出端子与光强调整部 21 的输入端子光学连接，另一输出端子与布里渊时域检测计 17 的第 2 输入端子光学连接。

再回到图 6，光强调整部 21 被控制处理部 16 控制，对入射光的光强进行调整后使其射出的零件。光强调整部 21 的输出端子通过光连接器 22 与检测用光纤 18 的另一端光学连接。

光学调整部 21 例如，如图 13 所示，形成包括光可变衰减器 151 以及光隔离器 152 的结构。光可变衰减器 151，与光可变衰减器 121 一样是使入射光光强衰减后射出的光学零件。光隔离器 152 是使光从入射端子只向输出端子单向通过的光学零件，例如可以通过在偏离 45° 状态下的两个起偏器之间配置法拉第转子而构成。光隔离器 152 起着防止分布式光纤传感器 1 内的各光学零件的连接部等处发生的反射光的传播和防止探测光向 CW 光源 19 传播的作用。射入光强调整部 21 的入射光由光可变衰减器 151 将光强调整到规定的光强然后通过光隔离器 152 射出。

还有，通过检测用光纤 18 传播的的激发光通过光连接器 15 和光循环器 14 射入布里渊时域检测计 17，因此没有射入光强・偏振调整部 13 或阶梯状光脉冲光源 11。在这里，在使用光耦合器代替光循环器 14 的情况下，为了防止激发光射入光强・偏振调整部 13 和阶梯状光脉冲光源 11，最好是在光强・偏振调整部 13 的输出端子上配置光隔离器或切断激发光，使阶梯状光脉冲 OPs 透过的滤光器。

检测用光纤 18 是检测变形和/或温度的传感器用光纤，探测光从其一端入射，从另一端射入激发光，受到布里渊散射现象的作用的探测光和激发光从其另一端和一端分别射出。在这里，在测量桥、隧道、堤坝、建筑物等结构物体和地基等测量对象中发生的变形

和/或温度的情况下，可以将检测用光纤 18 固定于被测量对象上进行测量。

控制处理部 16，是通过和布里渊时域检测计 17 输入或输出信号，控制阶梯状光脉冲光源 11、光强·偏振调整部 13、CW 光源 19、以及光强调整部 21，以能用高空间分辨率测定检测用光纤 18 长度方向上的检测用光纤 18 的变形和/或温度的分布的电子电路，形成包括例如微处理器、工作存储器、以及存储 ATC109 用的参考电压 Vref1、AFC110 用的参考电压 Vref2、Vref3、ATC139 用的参考电压 Vref1、AFC140 用的参考电压 Vref2、Vref3、定时 T1、T2、T3、T4、比 Prx 等各数据的存储器等的结构。

布里渊时域检测计 17 控制分布式光纤传感器 1 的各部分，以规定的取样间隔检测接收到的布里渊散射现象的光，以此分别求出检测用光纤 18 长度方向的检测用光纤 18 的各区域部分的布里渊损耗/增益光谱 BSl/g(ν d)，根据求得的各区域部分的布里渊损耗/增益光谱 BSl/g(ν d)，分别求各区域部分的布里渊频率偏移 ν b，根据求得的各区域部分的布里渊频率偏移 ν b，检测出检测用光纤 18 的变形分布和/或温度分布。然后，布里渊时域检测计 17 存储得到洛伦兹曲线的上述比 Prx，检测阶梯状光脉冲光源 11 射出的光强呈阶梯状的光脉冲 OPs 的光强，通知控制部 16 光强呈阶梯状的光脉冲 OPs 的 P1/P2 成为该比 Prx。而且布里渊时域检测计 17 存储应能够得到洛伦兹曲线的最佳的探测光的光强和最佳的激发光的光强，检测出阶梯状光脉冲光源 11 射出的光强呈阶梯状的光脉冲 OPs 的光强，同时检测出 CW 光源 19 射出的连续光 CWpump1 的光强，通知能够对光强·偏振调整部 13 以及光强调整部 21 进行调整的控制处理部 16，以实现该最佳的探测光的光强以及最佳的激发光的光强。布里渊时域检测计 17 形成包括光开关、光谱分析器、以及计算机等的结构。

能够将如此地得到洛伦兹曲线的上述比 Prx 预先存储于布里渊时域检测计 17，是由于探测光为阶梯状光脉冲。又，由于将得到洛伦兹曲线的上述比 Prx 预先存储于布里渊时域检测计 17，所以就不必像背景技术中所述那样在每次测定中手动调整光脉冲使其与检测用光纤的光纤长度一致。

下面对第 1 实施形态的分布型光纤传感器的动作进行说明。

图 14 表示布里渊损耗/增益光谱的分布以及距离 L1 和距离 L2 上的布里渊损耗/增益光谱。图 14（A）表示布里渊损耗/增益光谱的分布， x 轴表示离开检测用光纤 18 一端的距离，y 轴表示频率，z 轴表示光强。图 14（B）表示距离 L1 与距离 L2 上的布里渊损耗/增益光谱，x 轴表示频率，y 轴表示光强。又，为了说明的方便，假定在距离 L1 上，检测用光纤 18 没有发生变形，在距离 L2 上检测用光纤 18 发生变形。

首先，布里渊时域检测计 17 作准备以通过光耦合器 12 对来自阶梯状光脉冲光源 11 的

光谱进行测定，将使光从阶梯状光脉冲光源 11 射出的信号通知控制处理部 16。

控制处理部 16 一旦接收到该信号，就将既定的 ATC109 用的参考电压 Vref1 和 AFC110 用的参考电压 Vref2、Vref3 分别加于 ATC109 和 AFC110，使发光元件 103 发光，光从阶梯状光脉冲光源 11 射出。

从阶梯状光脉冲光源 11 射出的光通过光耦合器 12 输入布里渊时域检测计 17，布里渊时域检测计 17 对该光的光谱进行测定。布里渊时域检测计 17 根据该测定结果确认阶梯状光脉冲光源 11 是否正在射出规定振荡频率 f_0 的光线。不是规定振荡频率 f_0 的情况下，布里渊时域检测计 17 将调整 AFC110 用的参考电压 Vref2、Vref3 使其为规定的振荡频率 f_0 的信号通知控制处理部 16。

一旦接收到这一信号，控制处理部 16 就调整 AFC110 用的参考电压 Vref2、Vref3 使其为规定的振荡频率 f_0。当从阶梯状光脉冲光源 11 射出的光线的振荡频率 f 一旦成为规定的振荡频率 f_0，布里渊时域检测计 17 就将该光强 P1 通知控制处理部 16。

控制处理部 16，根据该通知的光强 P1 和存储的比 Prx，通过第 1 光强调制器驱动部 112 控制第 1 光强调制器 111，通过第 2 光强调制器驱动部 114 控制第 2 光强调制器 113，使光脉冲 OP 的光强 P1 与光强呈阶梯状的光脉冲 OPs 的光脉冲前方光 OPf（在有光脉冲后方光 OPb 的情况下为光脉冲前方光 OPf 以及光脉冲后方光 OPb）的光强 P2 之比为前面所述的规定的比 Prx。

从阶梯状光脉冲光源 11 射出的光强呈阶梯状的光脉冲 OPs 通过光耦合器 12 被射入布里渊时域检测计 17，布里渊时域检测计 17 对该光强呈阶梯状的光脉冲 OPs 的光谱进行测定。布里渊时域检测计 17 根据该测定结果确认阶梯状光脉冲光源 11 是否正在射出规定的比 Prx 的光强呈阶梯状的光脉冲 OPs。在不是规定的比 Prx 的情况下，布里渊时域检测计 17 将调整第 1 光强调制器 111 使其成为规定的比 Prx 的信号通知控制处理部 16。

一旦接收到这一信号，控制处理部 16 就对第 1 光强调制器 111 进行调整，以实现规定的比 Prx。反复进行这样的调整，当从阶梯状光脉冲光源 11 射出的光强呈阶梯状的光脉冲 OPs 的比成为规定的比 Prx 时，布里渊时域检测计 17 将根据光谱的测定结果对光强·偏振调整部 13 的衰减量进行调整的信号通知控制处理部 16，以使阶梯状光脉冲光源 11 射出的光强呈阶梯状的光脉冲 OPs 以能够得到洛伦兹曲线的布里渊损耗/增益光谱 BSl/g(ν d)的最佳的光强射入检测用光纤 18。

一旦接收到这一信号，控制处理部 16 就对光强·偏振调整部 13 的衰减量进行调整，控制处理部 16 将表示内容为衰减量调整结束的信号通知布里渊时域检测计 17。

一旦接收到这一信号，布里渊时域检测计 17 就判断为阶梯状光脉冲光源 11 发射规定的光强呈阶梯状的光脉冲 OPs 的准备已经就绪，使控制处理部 16 控制阶梯状光脉冲光源 11，以停止规定的光强呈阶梯状的光脉冲 OPs 的发射。

然后，布里渊时域检测计 17 开始测定布里渊损耗/增益光谱 BSl/g(ν d)。

首先，布里渊时域检测计 17 进行通过光耦合器 20 测定来自 CW 光源 19 的光线的光谱的准备。然后布里渊时域检测计 17 将从 CW 光源 19 射出进行扫描的频率范围中最低频率 fL 的连续光的信号通知控制处理部 16。

一旦接收到这一通知，控制部 16 就分别将既定的 ATC139 用的参考电压 Vref1 与对应于最低频率 fL 的 AFC140 用的参考电压 Vref2、Vref3 加于 ATC139、和 AFC140，使发光元件 133 发光，从 CW 光源 19 射出连续光。

从 CW 光源 19 射出的连续光通过光耦合器 20 射入布里渊时域检测计 17，布里渊时域检测计 17 对该光的光谱进行测定。布里渊时域检测计 17 对 CW 光源 11 是否正在射出最低频率 fL 的连续光进行确认。在不是最低频率 fL 的情况下，布里渊时域检测计 17 将调整 AFC110 用的参考电压 Vref2、Vref3 使其实现最低频率 fL 的信号通知控制处理部 16。再有，布里渊时域检测计 17 将根据光谱的测定结果将对光强调整部 21 的衰减量进行调整的信号通知控制处理部 16，以使 CW 光源 19 射出的连续光以能够得到洛伦兹曲线的布里渊损耗/增益光谱 BSl/g(ν d)的最佳的光强射入检测用光纤 18。

一旦接收到这些信号，控制处理部 16 就对 AFC140 用的参考电压 Vref2、Vref3 进行调整，以实现最低的频率 fL。再有，控制处理部 16 对光强调整部 21 的衰减量进行调整，控制处理部 16 将表示内容为衰减量调整结束的信号通知给布里渊时域检测计 17。

一旦接收到这一信号，当 CW 光源 19 射出的光的频率为最低频率 fL 时，就进行测定通过光循环器 14 的布里渊散射现象的光线的光谱的准备，布里渊时域检测计 17 将使光强呈阶梯状的光脉冲 OPs 从阶梯状光脉冲光源 11 射出的信号通知控制处理部 16。

一旦接收到这一控制信号，控制处理部 16 就使阶梯状光脉冲光源 11 射出光强呈阶梯状的光脉冲 OPs，并且将使其知道射出的定时的信号通知给布里渊时域检测计 17。

从阶梯状光脉冲光源 11 发射的光强呈阶梯状的光脉冲 OPs 通过光耦合器 14 射入光强・偏振调整部 13，在光源・偏振调整部 13 对其光强以及偏振面进行调整，通过光循环器 14 和光连接器 15，作为探测光向检测用光纤 18 的一端射入，向检测用光纤 18 的一端射入的探测光（光强呈阶梯状的光脉冲 OPs）与从检测用光纤 22 的另一端射入，通过检测用光纤 18 传播的激发光（连续光 CWpump1）边发生布里渊散射现象并边从检测用光纤 18

的一端向另一端传播。

布里渊散射现象的光从检测用光纤 18 的一端射出，通过光循环器 14 向布里渊时域检测计 17 射入。布里渊时域检测计 17 根据控制处理部 16 通知的使光强呈阶梯状的光脉冲 OPs 射出的定时，对接收到的布里渊散射现象的光进行时域分析，测定检测用光纤 18 长度方向上的布里渊散射现象的光的光强分布。

这样，布里渊时域检测计 17 使 CW 光源 19 射出最低频率 fL 的连续光作为激发光，同时使阶梯状光脉冲光源 11 射出光强呈阶梯状的光脉冲 OPs 作为探测光，在检测用光纤 18 利用探测光和激发光产生布里渊散射现象，对布里渊散射现象的光进行时域分析，测定检测用光纤 18 长度方向上的布里渊散射现象的光的光强分布。通过这样测定，得到与最低频率 fL 的激发光对应的布里渊散射现象的光的光强分布、即图 14（A）所示的曲线 m_1。

这里，布里渊散射现象的探测光与激发光之间的相互作用程度取决于探测光的偏振面与激发光的偏振面之间的相对关系。本实施形态的分布式光纤传感器 1 由于在每一次测定时用光强·偏振调整部 13 随机改变光强呈阶梯状的光脉冲 OPs 的偏振面，因此通过多次测定与最低频率 fL 的激发光对应的布里渊散射现象的光的光强分布，采用其平均值，从而能够在实质上消除这种依附关系。因此能够高精度地取得布里渊散射现象的光强分布 m1。在本实施形态中，例如进行 500 次或 1000 次的测定。

布里渊时域检测计 17 在结束与最低频率 fL 的激发光对应的布里渊散射现象的光强分布 m1 的测定时，须测定与下一频率的激发光对应的布里渊散射现象的光的光强分布，布里渊时域检测计 17 通过与上面所述相同的动作，首先使 CW 光源 19 射出作为下一频率的激发光的连续光，然后使阶梯状光脉冲光源 11 射出作为探测光的光强呈阶梯状的光脉冲 OPs。然后，布里渊时域检测计 17 根据发射光强呈阶梯状的光脉冲 OPs 的定时对从检测用光纤 18 的一端射出，通过光循环器 14 射入布里渊时域检测计 17 的布里渊散射现象的光进行时域分析，测定对于下一频率的，检测用光纤 18 的长度方向上的布里渊散射现象的光的光强分布 m2。

布里渊时域检测计 17 在结束与下一频率的激发光对应的布里渊散射现象的光的光强分布 m2 的测定时，就一个接着一个依序改变激发光的频率直到最高频率 fu，与上面所述一样测定与该频率的激发光对应的布里渊散射现象的光的光强分布 m3、m4、…、mn。在这里，分布 mn 表示与扫描频率范围中的第 n 个频率的激发光对应的布里渊散射现象的光的光强分布 m。

通过这样测定，如图 14（A）所示，能够以高精度而且高空间分辨率得到扫描频率范

围的各频率的检测用光纤 18 长度方向上的布里渊散射现象的光的光强分布 m1、m2、m3、m4、…、mn，其结果是能够以高精度而且高空间分辨率得到检测用光纤 18 长度方向的各区域部分的布里渊损耗/增益光谱 BSl/g(ν d)。

然后，布里渊时域检测计 17 以与在检测用光纤 18 上没有发生变形的部分的布里渊损耗/增益光谱 BSl/g(ν d)的峰值对应的频率为基准，通过求出与检测用光纤 18 长度方向的各区域部分的布里渊损耗/增益光谱 BSl/g(ν d)的峰值对应的频率之差，从而以高精度而且高空间分辨率求得检测用光纤 18 长度方向的各部分的布里渊频率偏移 ν b。

例如，如图 14（A）、（B）所示，假定在距离检测用光纤 18 的一端为 L1 的部分没有变形，在距离为 L2 的部分发生变形。距离 L1 处的布里渊损耗/增益光谱 BSl/g(ν d)用图 14（B）中的实线形式的曲线 e 表示，距离 L1 上的布里渊损耗/增益光谱 BSl/g(ν d)用图 14（B）中的虚线形式的曲线 f 表示。在这种情况下，求与距离 L1 上的布里渊损耗/增益光谱 BSl/g(ν d)的峰值对应的频率 ν b1 和与距离 L2 上的布里渊损耗/增益光谱 BSl/g(ν d)的峰值对应的频率 ν b2 之间的差，求出布里渊频率偏移 ν b＝ ν b1－ ν b2。

然后，布里渊时域检测计 17 根据该各区域部分的布里渊频率偏移 ν b 以高精度而且高空间分辨率求得检测用光纤 18 长度方向各区域部分的变形和/或温度。该求出的检测用光纤 18 的长度方向各区域部分的变形和/或温度的分布在 CRT 显示装置、XY 绘图仪或打印机等图中未示出的输出部上进行显示。

这样，第 1 实施形态的分布式光纤传感器 1 由于使用光强呈阶梯状的光脉冲 OPs 作为探测光，由于能够将得到洛伦兹曲线的上述比 Prx 预先存储于布里渊时域检测计 17，因此不必像背景技术中所述那样，在每一次测定中手动调整光脉冲使其与检测用光纤 18 的光纤长度一致。从而，也能够对分布式光纤传感器 1 实行工业化生产，又因，理论分析的结果可以设定为最佳的比 Pix，布里渊损耗/增益光谱 BSl/g(ν d)成为洛伦兹曲线，所以能以高精度而且高空间分辨率测定检测用光纤 18 中产生的变形和/或温度。

第 2 实施形态

本发明的第 2 实施形态的分布式光纤传感器，从检测变形和/或温度用的检测用光纤的一个端面射入探测光和激发光，接收在检测用光纤中受布里渊散射现象作用的激发光，进行布里渊增益光谱时域反射分析（B^{Gain}－OTDR、Brillouin Gain Optical Time Domain Reflectometer）或布里渊损耗光谱时域反射分析（B^{Loss}－OTDR、Brillouin Loss Optical Time Domain Reflectometer），根据布里渊频率偏移检测变形和/或温度。以下，将布里渊增益光谱时域反射分析或布里渊损耗光谱时域反射分析简称为布里渊增益/损耗光谱时域反射分

析。在该布里渊损耗/增益光谱时域反射分析中，布里渊散射现象的光是布里渊散射光。

首先对第 2 实施形态的分布式光纤传感器的构成进行说明。图 15 是表示第 2 实施形态的分布式光纤传感器的构成的方框图。图 16 是表示第 2 实施形态的分布式光纤传感器中 CW 光源的构成的方框图。

在图 15 中，第 2 实施形态的分布式光纤传感器 2 形成包括：阶梯状光脉冲光源 11、光耦合器 12、光强·偏振调整部 13、光循环器 14、光耦合器 33、光连接器 15、控制处理部 31、布里渊时域检测计 17、检测用光纤 18、CW 光源 32、光耦合器 20、以及光强调整部 21 的结构。

阶梯状光脉冲光源 11 的输出端子与光耦合器 12 的输入端子光学连接。光耦合器 12 的一个输出端子与光强·偏振调整部 13 的输入端子光学连接。光强·偏振调整部 13 的输出端子与光循环器 14 的第 1 端子光学连接。光循环器 14 的第 2 端子与光耦合器 33 的一个输入端子光学连接。光耦合器 33 的输出端子通过光连接器 15 与检测用光纤 18 的一端光学连接。

又，CW 光源 32 的输出端子与光耦合器 20 的输入端子光学连接。光耦合器 20 的一个输出端子与光强调整部 21 的输入端子光学连接。光强调整部 21 的输出端子与光耦合器 33 的另一输入端子光学连接。

而且，光耦合器 12 的另一输出端子与布里渊时域检测计 31 的第 1 输入端子光学连接，光耦合器 20 的另一输出端子与布里渊时域检测计 31 的第 2 输入端子光学连接，光循环器 14 的第 3 端子与布里渊时域检测计 31 的第 3 输入端子光学连接。

这些阶梯状光脉冲光源 11、光耦合器 12、光强·偏振调整部 13、光循环器 14、光连接器 15、布里渊时域检测计 17、检测用光纤 18、光耦合器 20、以及光强调整部 21 与第 1 实施形态相同，因此其说明省略。

光耦合器 33 是将入射光分配为两束光射出的光学零件，是与光耦合器 12、22 相同的光学零件。

CW 光源 32 被控制处理部 16 控制，是在规定的频率范围 fr 发射大致一定的连续光 CWpump2 的装置，连续光 CWpump2 在规定的定时中只在规定的期间发射。CW 光源 32 例如如图 16 所示，形成包括基板 131、温度检测元件 132、发光元件 133、光耦合器 134、EF135、第 1 受光元件 136、第 2 受光元件 137、温度调整元件 138、ATC139、AFC140、第 3 光强调制器 161、以及第 3 光强调制器驱动部 162 的结构。即 CW 光源 32 由于要在规定的定时中只在一定的期间射出连续光 CWpump2，因此如图 12 所示，CW 光源 19 中还

形成包括第 3 光强调制器 161 以及对其进行驱动的第 3 光强调制器驱动部 162 的结构。CW 光源中的基板 131、温度检测元件 132、发光元件 133、光耦合器 134、EF135、第 1 受光元件 136、第 2 受光元件 137、温度调整元件 138、ATC139、以及 AFC140，除了 AFC140 根据控制处理部 16 的控制改变发光元件 133 的振荡频率外，包括光学连接关系和电气连接关系在内，分别与阶梯状脉冲光源 11 中的基板 101、温度检测元件 102、发光元件 103、光耦合器 104、EF105、第 1 受光元件 106、第 2 受光元件 107、温度调整元件 108、ATC109、以及 AFC110 相同，因此其说明省略。

第 3 光强调制器 161 与第 1 和第 2 光强调制器 111、113 一样，是调制入射光的光强的光学零件。第 3 光强调制器驱动部 162 与第 1 和第 2 光强调制器驱动部 112、114 一样，被控制处理部 16 控制，是驱动第 3 光强调制器 161 的驱动电路。从发光元件 133 来的光射入第 3 光强调制器 161。第 3 光强调制器 161 根据第 3 光强调制器驱动部 162 的控制对该发光元件 133 来的连续光 CWpump2 进行接通・断开（ON・OFF）控制。第 3 光强调制器 161 在接通（ON）的情况下，从第 3 光强调制器 161 射出的光作为 CW 光源 32 的输出光入射到光耦合器 20。CW 光源 32 靠这样的动作在规定的定时中只在一定的期间射出连续光 CWpump2。

还有，如图 16 的虚线所示，为了补偿第 3 光强调制器 161 的损耗，也可以将对光进行放大的光放大器 163 配置于第 3 光强调制器 161 之后。

控制处理部 31 是通过与布里渊时域检测计 17 进行信号输入输出，使激发光和探测光在检测用光纤 18 中传播，在射入检测用光纤 18 一端的激发光在另一端反射的时刻，使探测光射入检测用光纤 18 的一端，控制阶梯状光脉冲光源 11、光强・偏振调整部 13、CW 光源 19、以及光强调整部 21，以便能够以高空间分辨率测定检测用光纤 18 长度方向上的检测用光纤 18 的变形和/或温度的分布的电子电路，形成包括例如微处理器、工作存储器以及存储数据的存储器的结构。

还有，为了使从检测用光纤 18 的一端向另一端传播的激发光在其另一端功率能无损耗地高效地反射，也可以在检测用光纤 18 的另一端还包括反射入射光的镜子部，也可以对检测用光纤 18 的另一端进行镜面处理。

下面对第 2 实施形态的分布式光纤传感器的动作进行说明。

第 2 实施形态的分布式光纤传感器 2 利用与第 1 实施形态的分布式光纤传感器 1 相同的动作从阶梯状光脉冲光源 11 射出具有规定的比 Prx 的光强呈阶梯状的光脉冲 OPs。第 2 实施形态的分布式光纤传感器 2 利用与第 1 实施形态的分布式光纤传感器 1 相同的动作，

调整光强·偏振调整部 13 的衰减量，以得到洛伦兹曲线的布里渊损耗/增益光谱 BSl/g(ν d)的最佳的光强将光强呈阶梯状的光脉冲 OPs 作为探测光射入检测用光纤 18。一旦调整结束，第 2 实施形态的分布式光纤传感器 2 就使控制处理部 16 控制阶梯状光脉冲光源 11，以停止射出规定的光强呈阶梯状的光脉冲 OPs。

然后，第 2 实施形态的分布式光纤传感器 2 利用与第 1 实施形态的分布式光纤传感器 1 相同的动作，控制 CW 光源 11 和光强调整部 21，须将激发光的光强调整成能得到洛伦兹曲线的布里渊损耗/增益光谱 BSl/g(ν d)的最佳的光强。一旦调整结束，第 2 实施形态的分布式光纤传感器 2 就让控制处理部 16 控制 CW 光源 19，以停止连续光 CWpump2 的出射。

然后，第 2 实施形态的分布式光纤传感器 2 为了能以高精度而且以高空间分辨率得到扫描频率范围 fr 的各频率中的检测用光纤 18 长度方向上的布里渊散射现象的光的光强分布 m1、m2、m3、m4、…、mn，开始测定布里渊损耗/增益光谱 BSl/g(ν d) 。

这里，第 2 实施形态的分布式光纤传感器 2 由于进行布里渊损耗/增益光谱时域反射分析，在扫描频率范围 fr 的各频率上，使激发光和探测光在检测用光纤 18 中传播，以在射入检测用光纤 18 一端的激发光在另一端反射的时刻探测光射入检测用光纤 18 的一端，用布里渊散射现象检测计 17 分析布里渊散射现象的光。

就这样，根据能以高精度、高空间分辨率得到的扫描频率范围 fr 的各频率上的检测用光纤 18 长度方向上的布里渊散射现象的光的光强分布 m1、m2、m3、m4、…、mn，第 2 实施形态的分布式光纤传感器 2，利用与第 1 实施形态的分布式光纤传感器 1 相同的动作，以高精度、高空间分辨率求出检测用光纤 18 长度方向上各区域部分的变形和/或温度，显示于图中未示出的输出部。

这样，第 2 实施形态的分布式光纤传感器 2，与第 1 实施形态的分布式光纤传感器 1 一样，使用阶梯状光脉冲为探测光，因能够将得到洛伦兹曲线的上述比 Prx 预先存储于布里渊时域检测计 17，所以不必像背景技术中所述那样在每一次测定都要手动调整光脉冲使其与检测用光纤 18 的光纤长度一致。因而，也能用工业生产方式生产分布式光纤传感器 2。又，根据理论分析的结果，可以设定为最佳的比 Prx，因此布里渊损耗/增益光谱 BSl/g(ν d)成为洛伦兹曲线，所以能够以高精度、高空间分辨率测定检测用光纤 18 中产生的变形和/或温度。

第 3 实施形态

本发明的第 3 实施形态的分布式光纤传感器是用一台设备能够进行布里渊损耗/增益光

谱时域分析以及布里渊损耗/增益光谱时域反射分析的传感器。

首先，对第 3 实施形态的分布式光纤传感器的构成进行说明。图 17 是表示第 3 实施形态的分布式光纤传感器的构成的方框图。在图 17 中，第 3 实施形态的分布式光纤传感器 3 形成包括：阶梯状光脉冲光源 11、光耦合器 12、光强・偏振调整部 13、光循环器 14、光耦合器 33、光连接器 15、控制处理部 41、布里渊时域检测计 17、检测用光纤 18、CW 光源 32、光耦合器 20、光强调整部 21、光开关 42、以及光连接器 22 的结构。

阶梯状光脉冲光源 11 的输出端子与光耦合器 12 的输入端子光学连接。光耦合器 12 的一个输出端子与光强・偏振调整部 13 的输入端子光学连接。光强・偏振调整部 13 的输出端子与光循环器 14 的第 1 端子光学连接。光循环器 14 的第 2 端子与光耦合器 33 的一个输入端子光学连接。光耦合器 33 的输出端子通过光连接器 15 与检测用光纤 18 的一端光学连接。

又，CW 光源 32 的输出端子与光耦合器 20 的输入端子光学连接。光耦合器 20 的一个输出端子与光强调整部 21 的输入端子光学连接。光强调整部 21 的输出端子与光开关 42 的输入端子光学连接。光开关 42 的一个输出端子与光耦合器 33 的另一输入端子光学连接，另一输出端子通过连接器 24 与检测用光纤 18 的另一端光学连接。

而且光耦合器 12 的另一输出端子与布里渊时域检测计 17 的第 1 输入端子光学连接，光耦合器 20 的另一输出端子与布里渊时域检测计 17 的第 2 输入端子光学连接，光循环器 14 的第 3 端子与布里渊时域检测计 17 的第 3 输入端子光学连接。

控制处理部 41 输入布里渊时域检测计 17 的输出加以输入，而且分别控制阶梯状光脉冲光源 11、光强・偏振调整部 13、CW 光源 32、光强调整部 21、以及光开关 42。

这些阶梯状光脉冲光源 11、光耦合器 12、光强・偏振调整部 13、光循环器 14、光连接器 15、布里渊时域检测计 17、检测用光纤 18、光耦合器 20、光强调整部 21 以及连接器 22 与第 1 实施形态相同，因此其说明省略。而且 CW 光源 32 和光耦合器 33 与第 2 实施形态相同，因此其说明也省略。

又，光开关 42 是一个输入两个输出的 1×2 的光开关，根据控制处理部 41 的控制将从输入端子射入的光有选择地自两个输出端子中的任意一个射出。

光开关 42 可以采用例如机械式光开关或光波导路开关等。机械式开关是棱镜、棒形透镜（**ロッドレンズ**）以及镜子等微小光学元件或通过使光纤自身移动・旋转从而切换光程的光学零件。还有，利用半导体微细加工技术在光波导路之间封入折射率调整液，使该调整液机械移动或用静电执行机构使镜子移动的光微电气机械系统（Opto Micro Electro-

Mechanical Systems）的光开关。光波导路开关用例如光波导路构成马赫·泽德（Mach-Zehnder）型干涉计，是一种通过在各光波导路支路上外加电场从而改变各光波导路支路的折射率，进行光程切换的光学零件。此外还知道有一种利用通过注入载流子造成折射率变化的半导体光开关和将半导体放大器作为导通、截止的门（ゲート）使用的分配合流型半导体开关。

控制处理部 31 是一种通过与布里渊时域检测计 17 进行信号输入输出，借助于布里渊损耗/增益光谱时域分析以及布里渊损耗/增益光谱时域反射分析，控制阶梯状光脉冲光源 11、光强·偏振调整部 13、CW 光源 19、光强调整部 21、以及光开关 42，以便能够以高空间分辨率测定检测用光纤 18 长度方向上的检测用光纤 18 的变形和/或温度的分布的电子电路，形成包括：例如微处理器、工作存储器、以及存储数据的存储器的结构。

下面对第 3 实施形态的分布式光纤传感器的动作进行说明。

首先，在用第 3 实施形态的分布式光纤传感器 3 进行布里渊损耗/增益光谱时域分析的情况下，控制处理部 41 对光开关 42 进行控制，使得从输入端子入射的光通过光连接器 22 从与检测用光纤 18 光学连接的另一端的输出端子射出。而且，第 3 实施形态的分布式光纤传感器 3 由于与第 1 实施形态的分布式光纤传感器一样动作，其说明省略。

接着，在用第 3 实施形态的分布式光纤传感器 3 进行布里渊损耗/增益光谱时域反射分析的情况下，控制处理部 41 对光开关 42 进行控制，使得从输入端子入射的光通过光耦合器 33 和光连接器 22 从与检测用光纤 18 的一端光学连接的输出端子射出。而且，第 3 实施形态的分布式光纤传感器 3 由于与第 2 实施形态的分布式光纤传感器一样动作，其说明省略。

还有，在这种情况下，在检测用光纤 18 中受到探测光与布里渊散射现象的相互作用，从检测用光纤 18 的一端射出的激发光在光耦合器 33 被一分为二，其中一光束通过光循环器 14 射入布里渊时域检测计 17。即受到相互作用的激发光在光耦合器 33 其功率受到损耗。因此为了补偿这一损耗，也可以在光循环器 14 到布里渊时域检测计 17 的光程上还包括光放大器。或是在布里渊时域检测计 17 上还包括放大器，在受光元件接收激发光，进行光电变换之后再放大。

这样，第 3 实施形态的分布式光纤传感器 3，与第 1、第 2 实施形态的分布式光纤传感器 1、2 一样，使用阶梯状光脉冲为探测光，因此能够将得到洛伦兹曲线的上述比 Prx 预先存储于布里渊时域检测计 17，所以不必像背景技术中所述那样每一次测定都用手动调整光脉冲使其与检测用光纤 18 的光纤长度一致。从而，也能用工业生产方式生产分布式光纤

传感器 3。又，根据理论分析的结果，可以设定为最佳的比 Prx，因此布里渊损耗/增益光谱 BSl/g(ν d)成为洛伦兹曲线，所以能够以高精度、高空间分辨率测定检测用光纤 18 中产生的变形和/或温度。

第 4 实施形态

第 1～第 3 实施形态的分布式光纤传感器 1、2、3，是一种采用光强呈阶梯状的光脉冲 OPs 作为探测光，不必根据检测用光纤 18 的长度手动调整光脉冲就能够以高精度、高空间分辨率测定在检测用光纤 18 发生的变形和/或温度的传感器。第 4 实施形态的分布式光纤传感器按照第 1～第 3 实施形态的分布式光纤传感器 1、2、3 的构成分别测定光脉冲前方光 OPf 的光强 P2 的脉冲光与光强呈阶梯状的光脉冲 OPs 中的布里渊散射现象的光的光强的分布 M1、M2，求这些测出的布里渊散射现象的光的光强分布 M1、M2 之差 M2－M1，通过求出检测用光纤 18 长度方向上各区域部分的布里渊损耗/增益光谱 BSl/g(ν d)，能改进用第 1～第 3 实施形态的分布式光纤传感器 1、2、3 检测出的结果中发生的误差、特别是改进 1/（Tp＋Tf）的附近发生的误差。

而且，第 4 实施形态的分布式光纤传感器通过形成这样的结构能够减小误差，因此在第 1～第 3 实施形态中的分布式光纤传感器 1、2、3 中，将光强呈阶梯状的光脉冲 OPs 的光脉冲前方光 OPf 的时间宽度 Tf 设定成在 Tp＜Tf≤（1/35MHz）＝28.57ns 的范围内的值，但是在第 4 实施形态的分布式光纤传感器可以采用超过 Tp＜Tf≤28.57ns 的范围的光脉冲前方光 OPf 的时间宽度 Tf、例如时间宽度 Tf＝50ns。当然，可以采用 Tp＜Tf≤28.57ns 的范围内的光脉冲前方光 OPf 的时间宽度 Tf。再因第 4 实施形态的分布式光纤传感器采用这样的结构能够减小误差，在变形在大范围内均匀分布的情况下，适于检测其中 200μ ε 及其以下的微小变形。

第 4 实施形态的分布式光纤传感器的结构，除了通过布里渊时域检测计 17 如以下所述地动作，从而求出检测用光纤 18 长度方向上各区域部分的布里渊损耗/增益光谱 BSl/g(ν d)外，其余均与第 1～第 3 实施形态相同，因此其说明省略。

图 18 表示第 4 实施形态的光强呈阶梯状的光脉冲以及泄漏光的光脉冲。图 19 表示第 4 实施形态的分布式光纤传感器的动作。

在图 19，在第 4 实施形态中，布里渊时域检测计 17 首先使作为连续光的激发光射出，同时使阶梯状光脉冲光源 11 射出图 18（B）所示的泄漏光光脉冲 OPL 作为探测光（S101），对检测用光纤 18 长度方向上的布里渊散射现象的光的光强分布 M1 进行测定，存储其测定结果（S102）。

在将图 18（A）所示的由时间宽度 Tp 光强 P1 的光脉冲 OP 与时间宽度 Tf、光强 P2 的光脉冲前方光 OPf 构成的光强呈阶梯状的光脉冲 OPs 用作光强呈阶梯状的光脉冲的情况下，泄漏光光脉冲 OPL 如图 18（B）所示，是时间宽度为（Tp＋Tf）光强 P2 的光脉冲。即泄漏光光脉冲 OPL 其时间宽度为光强呈阶梯状的光脉冲 Ops 的时间宽度，其光强为光强呈阶梯状的光脉冲 OPs 中的光强最小的光脉冲前方光 OPf 的光强。

再回到图 19，接着，布里渊时域检测计 17 使作为连续光的激发光射出，同时使阶梯状光脉冲光源 11 射出图 18（A）所示的光强呈阶梯状的光脉冲 OPs 作为探测光（S103），对检测用光纤 18 长度方向上的布里渊散射现象的光的光强分布 M2 进行测定，将该测定结果加以存储（S104）。

接着，布里渊时域检测计 17 求处理步骤 S102 中的分布 M1 与处理步骤 S104 中的分布 M2 之差 M2－M1，将该差 M2－M1 加以存储（S105）。该差 M2－M1 对应于第 1 实施形态中的 m。

在扫描频率范围的各个频率执行这样的处理步骤 S101～S105 的动作（S106），求检测用光纤 18 长度方向上的布里渊散射现象的光的光强分布 m1、m2、m3、m4、…、mn，从这些求检测用光纤 18 长度方向上各区域部分的布里渊损耗/增益光谱 BSl/g(ν d) ，根据求出的布里渊损耗/增益光谱 BSl/g(ν d)求得检测用光纤 18 长度方向上的变形分布和/或温度分布（S107）。

利用这样的动作，第 4 实施形态的分布式光纤传感器比第 1～第 3 实施形态的分布式光纤传感器 1、2、3 能够更好地减小误差，另外，即使采用光脉冲前方光 OPf 的时间宽度 Tf 超过 Tp＜Tf≤28.57Ns 的范围的时间宽度的光强呈阶梯状的光脉冲 OPs，也能够以高精度、高空间分辨率测定在检测用光纤 18 中产生的变形和/或温度。而且第 4 实施形态的分布式光纤传感器在变形在大范围均等分布的情况下，也能够检测出其中 200μ ε 及其以下的微小变形。而且毋用多言，在第 4 实施形态中也不必像背景技术中所述的那样在每次测定中都要用手动调整光脉冲使其与检测用光纤 18 的光纤长度一致。从而也能够将分布式光纤传感器 3 作为工业产品进行工业化生产。

第 5 实施形态

第 4 实施形态的分布式光纤传感器是一种第 1～第 3 实施形态的分布式光纤传感器 1、2、3 的结构，通过采用光脉冲前方光 OPf 的光强 P2 的脉冲光与光强呈阶梯状的光脉冲 OPs 作为探测光，从而改进第 1～第 3 实施形态中分布式光纤传感器 1、2、3 检测出的结果中产生的误差，而第 5 实施形态的分布式光纤传感器在第 1～第 3 实施形态中的分布式光纤

传感器 1、2、3 的结构上，将基准光纤与检测用光纤 18 的一端连接，通过根据从基准光纤求得的基准值修正测定结果的布里渊损耗/增益光谱 BSl/g(ν d)中的中心频率，从而改进第 1～第 3 实施形态中的分布式光纤传感器 1、2、3 检测出的结果中产生的误差。

图 20 是表示与第 1 实施形态的分布式光纤传感器对应的第 5 实施形态的分布式光纤传感器的构成的方框图。

在图 20 中，第 5 实施形态的分布式光纤传感器 5 的构成为检测用光纤 18 的一端，在图 20 所示的例子中是射入激发光的一端还连接基准光纤 51，取代布里渊时域检测计 17，在存储下述修正值变换式的同时，如下所述动作，通过这样根据从基准光纤 51 求出的基准值从修正值变换式求出修正值，以该修正值对作为测定结果的布里渊损耗/增益光谱 BSl/g(ν d)中的中心频率进行修正，除了如上所述地使用布里渊时域检测计 52 以外，其余均与第 1～第 3 实施形态相同，因此其说明省略。

基准光纤 51 是与检测用光纤 18 品质相同的光纤，是长度与该分布式光纤传感器 5 的空间分辨率相当的光纤。而且对基准光纤 51，赋予比用于该分布式光纤传感器 5 的光强呈阶梯状的光脉冲 OPs 的以时间宽度（Tp＋Tf）的倒数表示的变形足够大的变形、例如用 2/（Tp＋Tf）表示的变形、或用 3/（Tp＋Tf）表示的变形、或用 4/（Tp＋Tf）表示的变形。

图 21 表示第 5 实施形态的分布式光纤传感器的动作。图 22 是表示频率误差比（表示对于频率误差比的修正值）－修正值特性曲线用的图\。

在图 21 中，布里渊时域检测计 52 首先求基准光纤 51 中的布里渊损耗/增益光谱 BSl/g(ν d)，以求得的布里渊损耗/增益光谱 BSl/g(ν d)的峰值处的频率（中心频率）作为基准值 f_{H0}（S201）。即布里渊时域检测计 52 分别测定扫描频率范围的各频率的基准光纤 51 中的布里渊散射现象的光的光强。接着，布里渊时域检测计 52 从该测定的各光强求出基准光纤 51 中的布里渊损耗/增益光谱 BSl/g(ν d)。然后，布里渊时域检测计 52 求出该布里渊损耗/增益光谱 BSl/g(ν d)的中心频率，将该值作为基准值 f_{H0}。

接着，布里渊时域检测计 52 借助于与第 1～第 3 实施形态相同的动作求检测用光纤 18 长度方向各区域部分处的布里渊损耗/增益光谱 BSl/g(ν d)，在这些区域部分，分别求出各布里渊损耗/增益光谱 BSl/g(ν d)的峰值处的频率（中心频率）作为各检测值 f_{Hn}（S202）。即，布里渊时域检测计 52 测定扫描频率范围的各频率的检测用光纤 18 长度方向上的布里渊散射现象的光的光强分布 m1、m2、m3、m4、…、mn。接着，布里渊时域检测计 52 从该测定的分布 m1、m2、m3、m4、…、mn 分别求出检测用光纤 18 长度方向各区域部分的布里渊损耗/增益光谱 BSl/g(ν d)，分别求出各布里渊损耗/增益光谱 BSl/g(ν d)的中心频率，

将这些值分别作为各检测值 f_{Hn}。在这里，检测值 f_{Hn} 表示第 n 个区域部分的检测值 f_H。

接着，布里渊时域检测计 52 在各区域部分中分别求利用式 13 定义的检测值 f_H 与基准值 f_{H0} 之比 frx（频率误差比）（S203），将求得的频率各误差比 frxn 用于修正值变换式分别求出与频率误差比 frxn 对应的修正值 f_{En}（S204）。在这里，频率误差比 frxn，表示第 n 个区域部分的频率误差比 frx，修正值 f_{En} 表示第 n 个区域部分的修正值 f_E。修正值变换式是关于 H4 提供给 H2 的误差大小的算式，是根据作为探测光使用的光强呈阶梯状的光脉冲 OPs，假定给检测用光纤规定的变形，根据使用上述式（7）～式（11）进行模拟得到的值与该规定的变形之差求得的函数式，是表示例如图 22 所示的频率误差比（表示对于频率误差比 frx 的修正值 f_E）－修正值特性曲线间关系的函数式。图 22 所示的频率误差比—修正值特性曲线是在 Tp＝1ns、Tf＝14ns、比 Prx＝22dB 的条件下进行模拟的结果。

$frx＝（f_{H0}－f_H）/f_{H0}$ …式 13

还有，在本实施形态中，布里渊时域检测计 52 用以函数式的形态存储的修正值变换式从频率误差比 frx 变换为修正值，但是也可以用以表格的形态存储的频率误差比 frx 与修正值一一对应存储的查询表从频率误差比 frx 变换为修正值。

接着，布里渊时域检测计 52 在各区域部分的布里渊损耗/增益光谱 BSl/g(ν d)中，根据其各检测值 f_{Hn} 分别求出低频侧的布里渊损耗/增益光谱 BSl/g(ν d)的各面积 S_{Ln}、而且根据该检测值 f_{Hn} 分别求出高频侧的布里渊损耗/增益光谱 BSl/g(ν d)的各面积 S_{Rn}（S205）。在这里，面积 S_{Ln} 表示第 n 个区域部分的面积 S_L，面积 SRn 表示第 n 个区域部分的面积 S_R。

然后，布里渊时域检测计 52 在各区域部分的布里渊损耗/增益光谱 BSl/g(ν d)中根据求出的各面积 S_{Ln} 以及各面积 S_{Rn} 分别决定处理步骤 S204 求得的各修正值 f_{En} 的符号（S206）。即布里渊时域检测计 52 在面积 S_L＞面积 S_R 的情况下，设在处理步骤 S204 中求出的修正值 f_E 的符号为负（－），在面积 S_L＜面积 S_R 的情况下，设在处理步骤 S204 中求出的修正值 f_E 的符号为正（＋）。还有，在面积 S_L＝面积 S_R 的情况下，修正值 f_E＝0。

接着，布里渊时域检测计 52 在各个区域部分，对处理步骤 S202 求得的布里渊损耗/增益光谱 BSl/g(ν d)的各检测值 f_{Hn} 分别加上利用处理步骤 S206 得到的各个带符号的修正值 f_{En}（修正值 f_E 的符号为正的情况下对检测值 f_H 加修正值 f_E，修正值 f_E 的符号为的情况下从检测值 f_H 减去修正值 f_E），分别求出修正后的布里渊损耗/增益光谱 BSl/g(ν d)的检测值 f_{Hn}（修正后的检测值 f_{HEn}）（步骤 S207）。

接着，布里渊时域检测计 52 以检测用光纤 18 中没有发生变形的部分的布里渊损耗/增益光谱 BSl/g(ν d)的中心频率为基准，求与检测用光纤 18 长度方向上各区域部分的布里渊

损耗/增益光谱 BSl/g(νd)修正后的检测值 f_{HEn} 之差，通过这样分别求出检测用光纤 18 长度方向上各部分的布里渊频率偏移 νb，布里渊时域检测计 52 根据求出的检测用光纤 18 的长度方向上的各部分的布里渊频率偏移 νb 求得检测用光纤 18 的长度方向上的变形分布和/或温度分布（S208）。

还有，在上面的叙述中，对与第 1 实施形态的分布式光纤传感器 1 的结构对应的第 5 实施形态的分布式光纤传感器 5 进行了说明，但是在第 2 和第 3 实施形态的分布式光纤传感器 2、3 的结构中通过执行上述处理步骤 S201～处理步骤 S208，同样能够构成与第 2 和第 3 实施形态的分布式光纤传感器 2、3 的结构对应的第 5 实施形态的分布式光纤传感器。借助于这样的动作，第 5 实施形态的分布式光纤传感器比第 1～第 3 实施形态的分布式光纤传感器 1、2、3 能够误差能更加减小，能够以更高的精度和空间分辨率测定检测用光纤 18 上发生的变形和/或温度。而且第 5 实施形态的分布式光纤传感器在变形在大范围均匀分布的情况下能够检测出其中 200με 及其以下的微小的变形。另外，当然毋用多言，在第 5 实施形态中也不必像背景技术中所述的那样每次测定都用手动对光脉冲进行调整使其与检测用光纤 18 的长度一致。从而分布式光纤传感器 3 也能够作为工业产品进行工业化生产。

又，在第 1～第 3 实施形态中，在变形在大范围均匀分布的情况下，从能够检测出其中 200με 及其以下的微小的变形的考虑出发，也可以采用将布里渊频率偏移量周期变化的光纤作为检测用光纤 18。

图 23 表示检测用光纤长度方向上的布里渊频率偏移量。

这种布里渊频率偏移量周期变化的检测用光纤 18 例如，如图 23 所示，是具有第 1 布里渊频率偏移量 νb（1）的长度 l1 的部分 DMl1 与具有不同于第 1 布里渊频率偏移量 νb（1）的第 2 布里渊频率偏移量 νb（2）的长度 l2 的部分 DMl2 的反复形成的光纤。这第 1 和第 2 布里渊频率偏移量 νb（1）、νb（2）可以通过给予光纤适当的变形来实现。

还有，在第 1～第 5 实施形态中，分布式光纤传感器 1、2、3 是一种通过将作为探测光的阶梯状光脉冲的频率 f_0 加以固定，在规定的频率范围 fr 对作为激发光的连续光 CWpump1 的频率进行扫描，以此测定布里渊损耗/增益光谱 BSl/g(νd)，测定布里渊频率偏移 νb 的传感器。因此，阶梯状光脉冲光源 11 的发光元件 103 未必是频率可变半导体激光器，也可以是半导体激光器。而且，在上述实施形态中，其结构也可以是分布式光纤传感器 1、2、3 通过对作为探测光的阶梯状光脉冲的频率 f_0 在规定的频率范围 fr 进行扫描，而将作为激发光的连续光 CWpump1 的频率加以固定，以此测定布里渊损耗/增益光谱

BSl/g(v d)，测定布里渊频率偏移 v b。

为了阐明本发明，在上面的叙述中边参照附图边利用实施形态对本申请的发明确切而又充分地进行了说明，但是应该认识到，只要是从事本行业的人员，能容易地改变或/以及改进上述实施形态。因此只要从事本行业的人员所作的变更形态或改进形态不脱离权利要求书记载的权项的权利要求范围，则该变更形态或该改进形态被解释为包含于该权项的权利要求范围内。

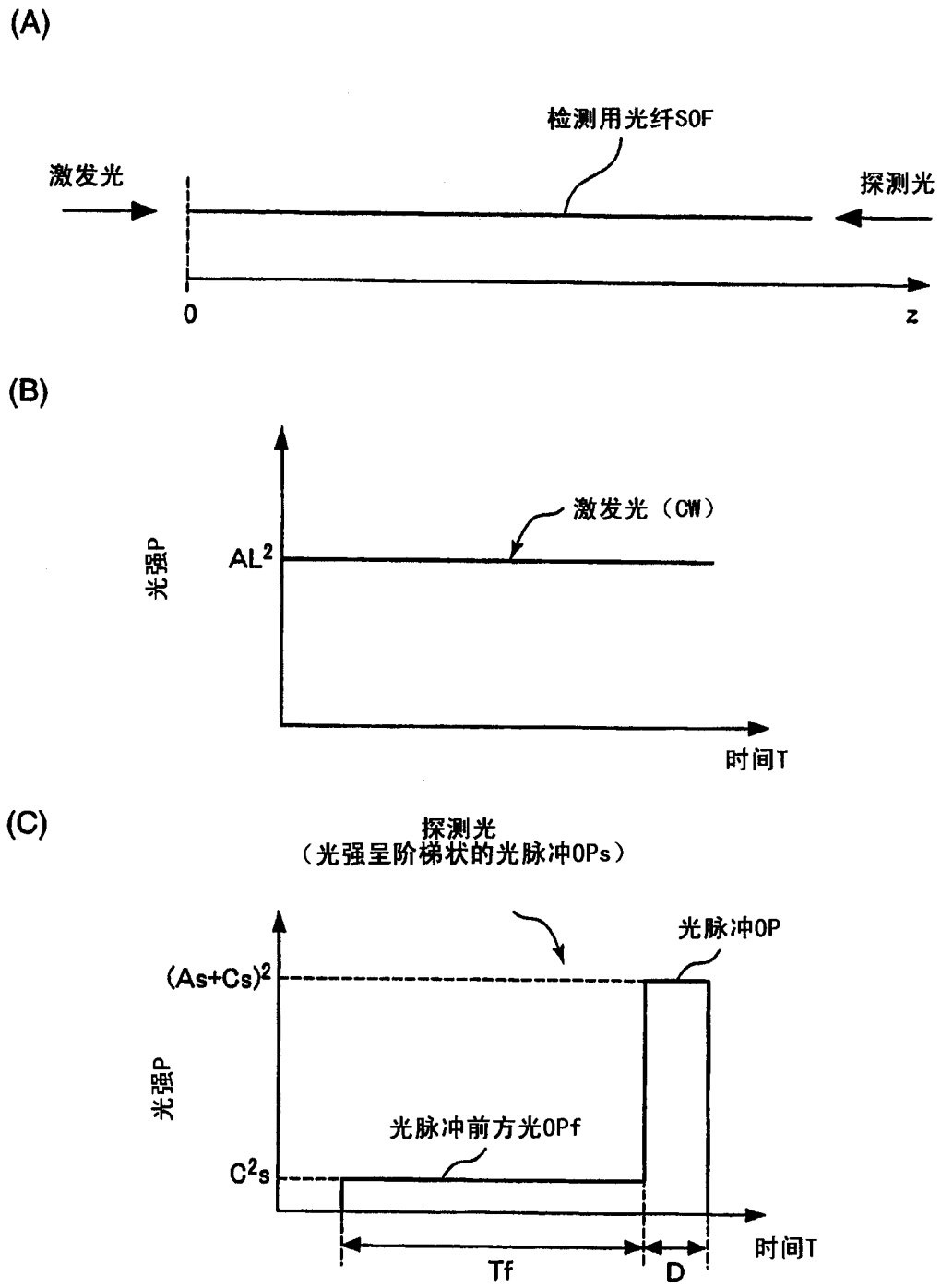

(A)
检测用光纤SOF
激发光
探测光
0
z
(B)
光强P
AL²
激发光（CW）
时间T
(C)
探测光
（光强呈阶梯状的光脉冲OPs）
光脉冲OP
(As+Cs)²
光强P
光脉冲前方光OPf
C²s
时间T
Tf
D

图 1

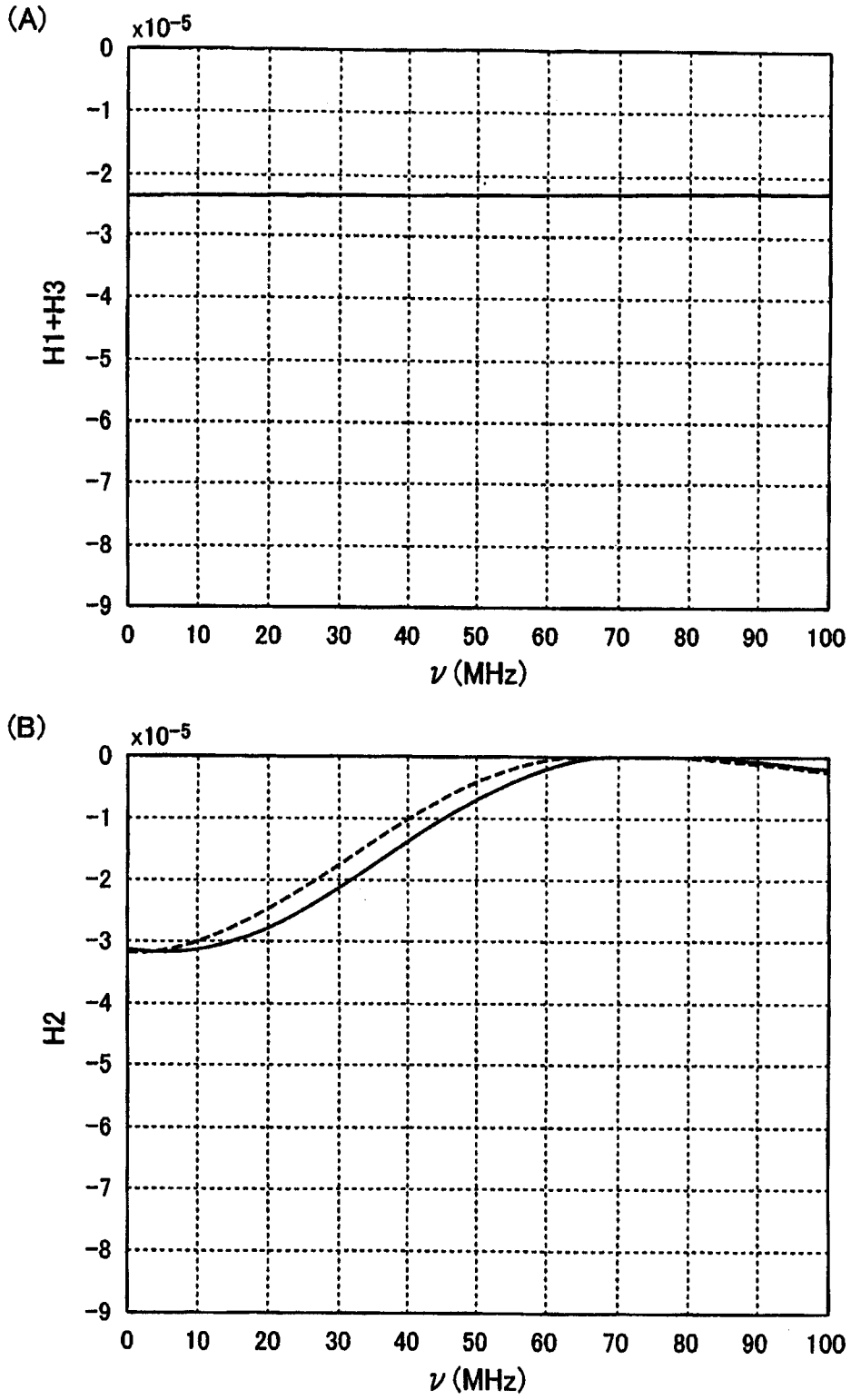

(A)
x10-5
0
-1
-2
-3
-4
-5
-6
-7
-8
-9
H1+H3
0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100
ν (MHz)
(B)
x10-5
0
-1
-2
-3
-4
-5
-6
-7
-8
-9
H2
0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100
ν (MHz)

图 2

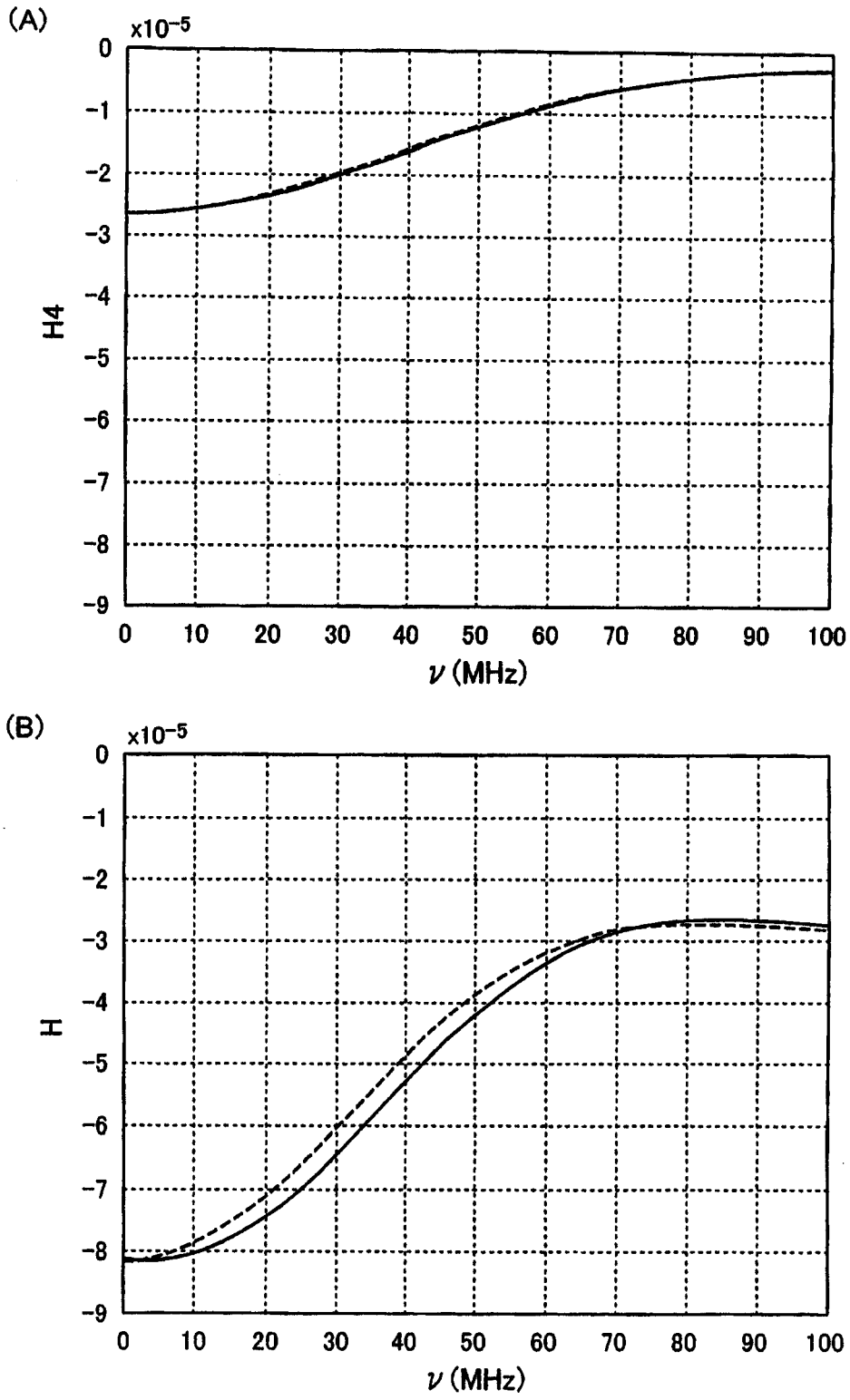

(A)
x10⁻⁵
0
-1
-2
-3
-4
-5
-6
-7
-8
-9
H4
0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100
ν (MHz)
(B)
x10⁻⁵
0
-1
-2
-3
-4
-5
-6
-7
-8
-9
H
0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100
ν (MHz)

图 3

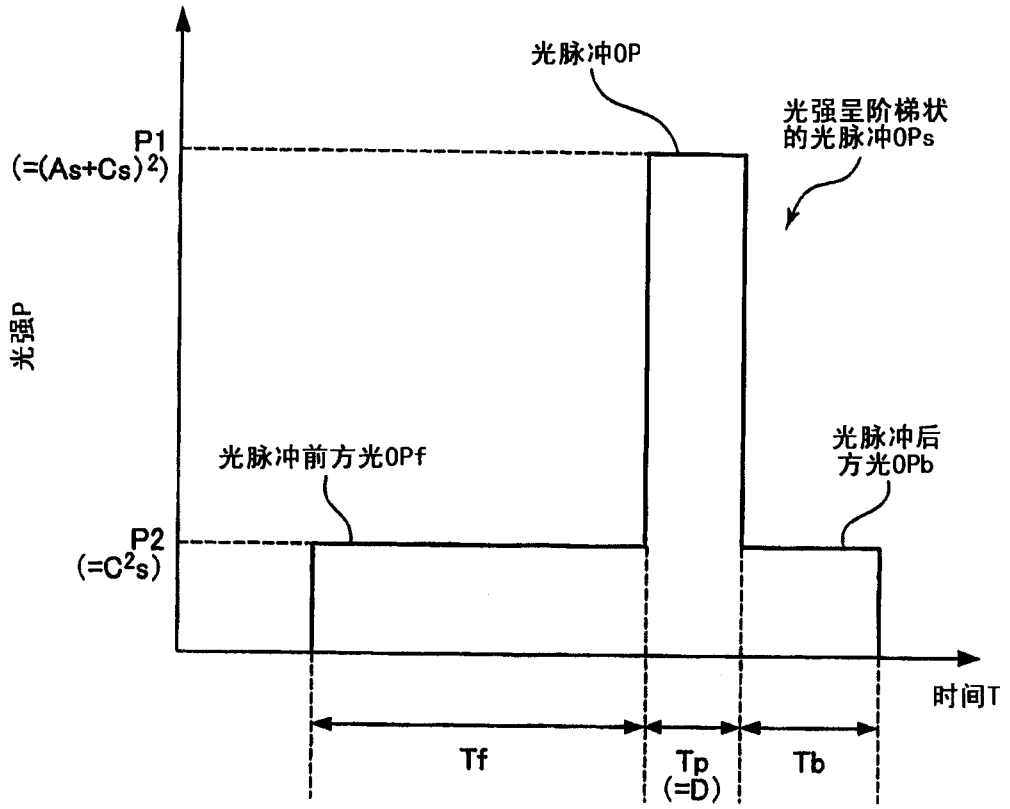

光脉冲0P
光强呈阶梯状
的光脉冲0Ps
P1
(=(As+Cs)2)
光强P
光脉冲前方光0Pf
光脉冲后
方光0Pb
P2
(=C2s)
时间T
Tf
Tp
(=D)
Tb

图 4

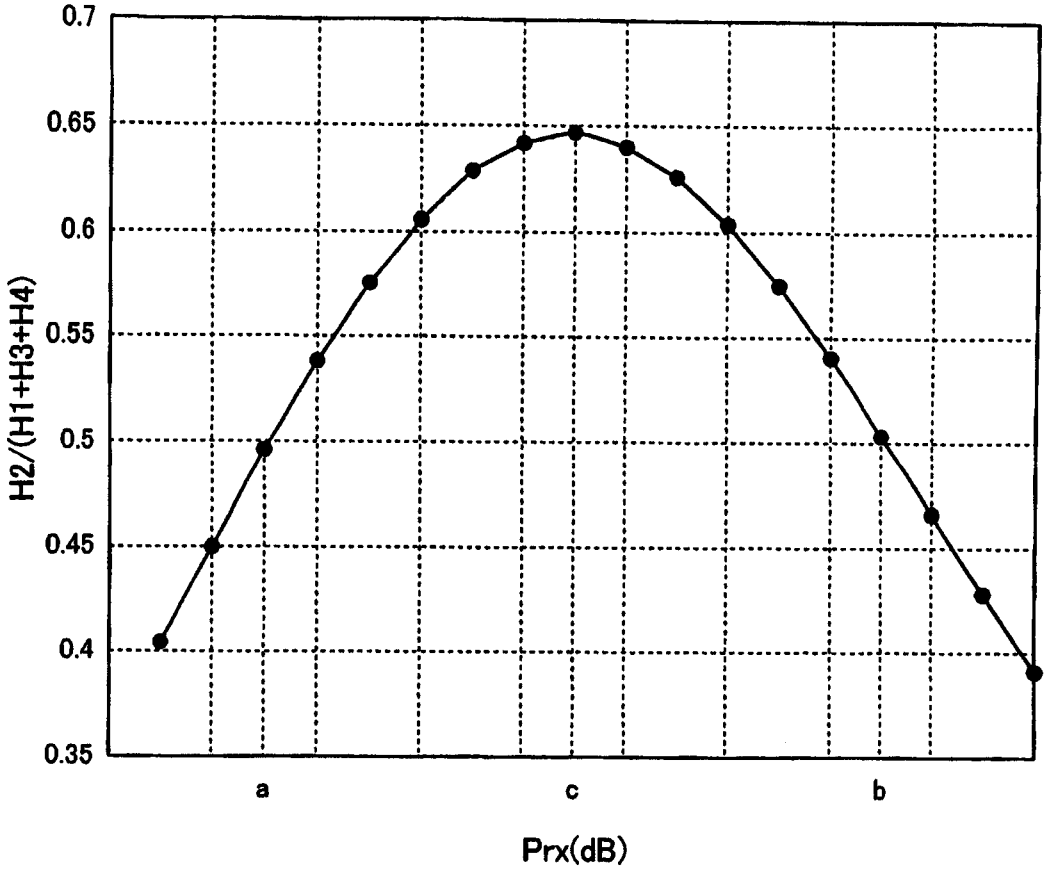


图 5

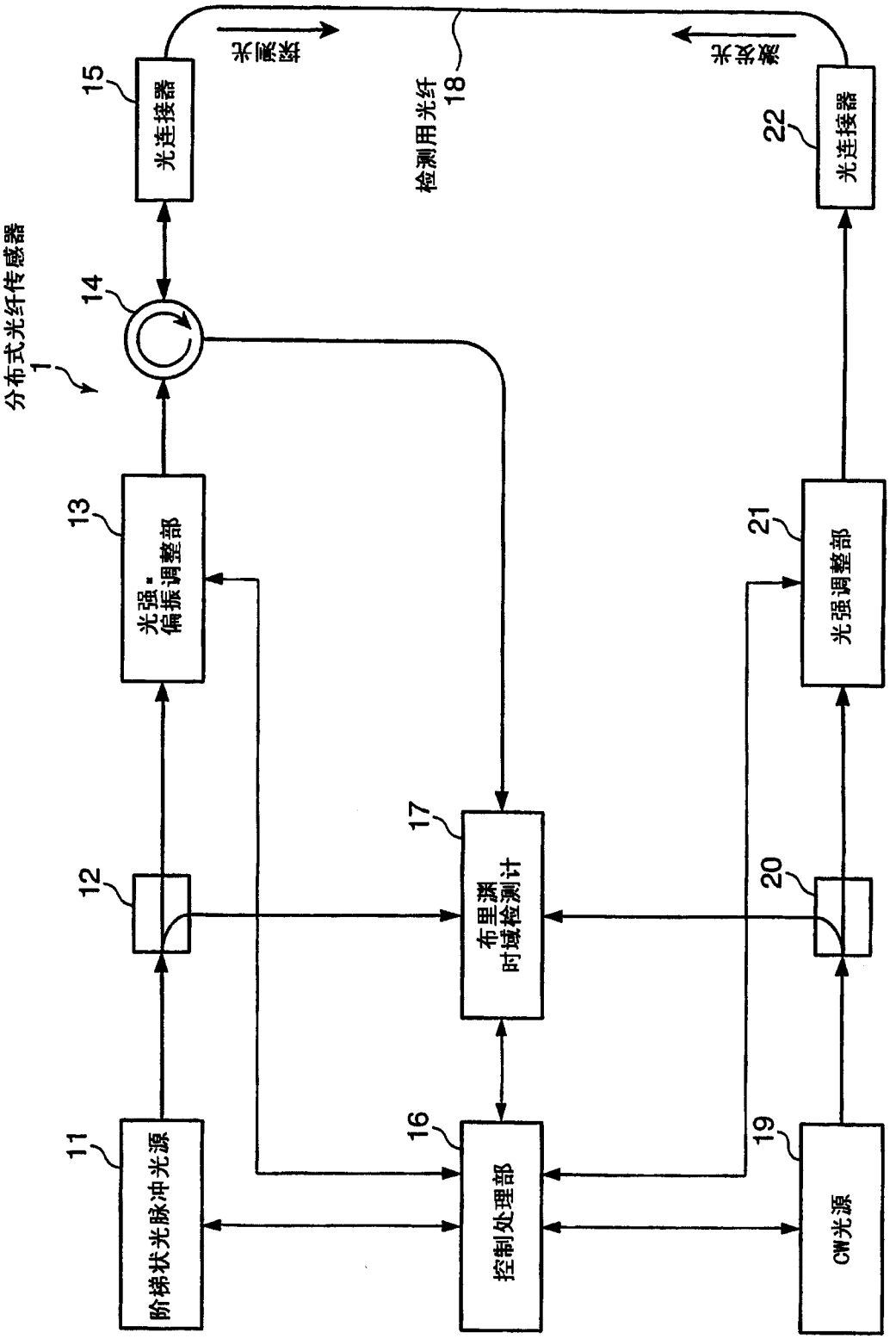

分布式光纤传感器
1
光连接器
15
光连接器
22
检测用光纤
18
14
13
光强·偏振调整部
21
光强调整部
12
20
17
布里渊时域检测计
11
16
19
阶梯状光脉冲光源
控制处理部
CW光源

图 6

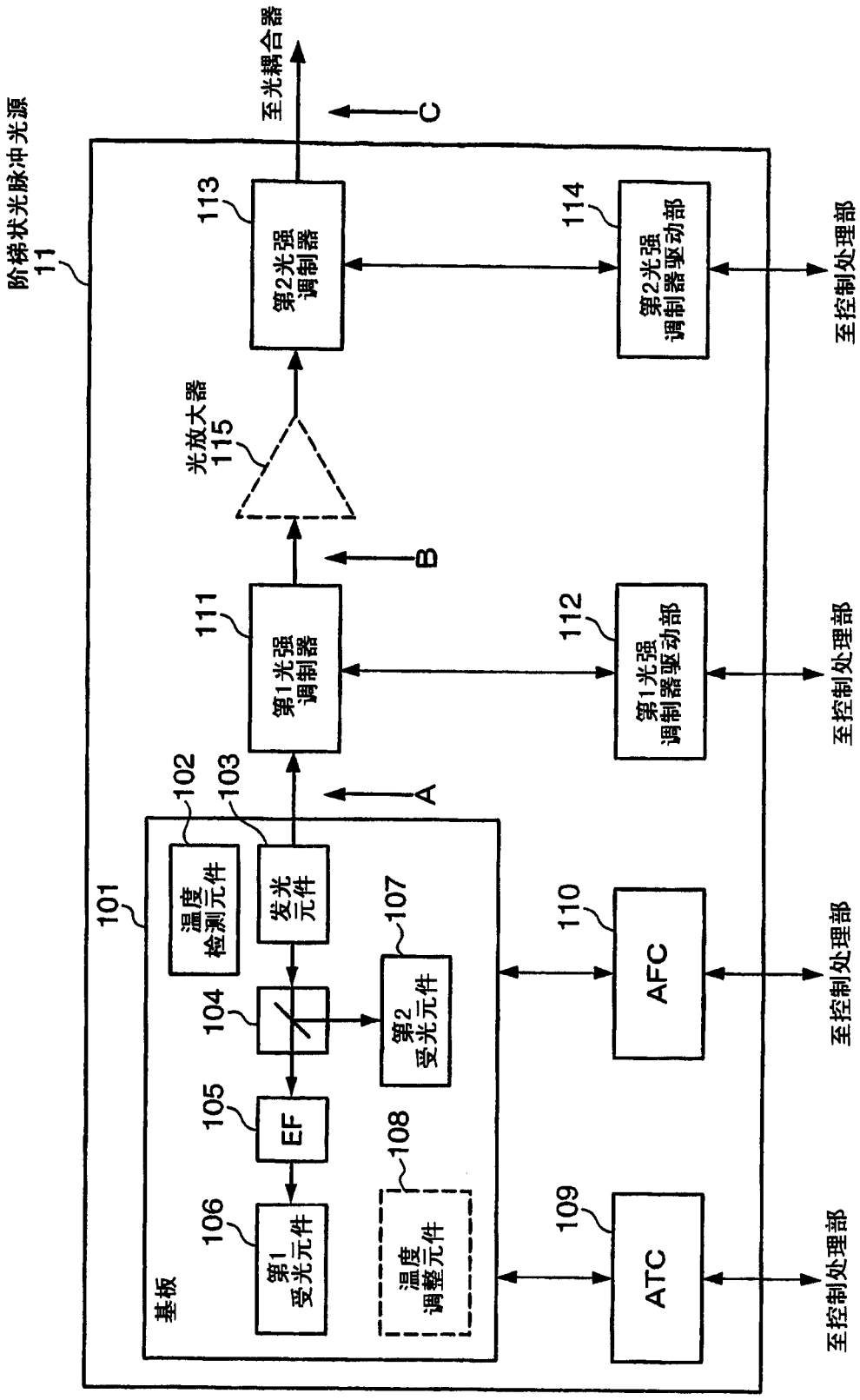

阶梯状光脉冲光源
11
至光耦合器
C
113
第2光强调制器
114
第2光强调制器驱动部
至控制处理部
光放大器
115
B
111
第1光强调制器
112
第1光强调制器驱动部
至控制处理部
A
102
103
101
温度检测元件
发光元件
107
第2受光元件
110
AFC
至控制处理部
104
105
EF
108
106
第1受光元件
温度调整元件
109
ATC
至控制处理部
基板

图 7

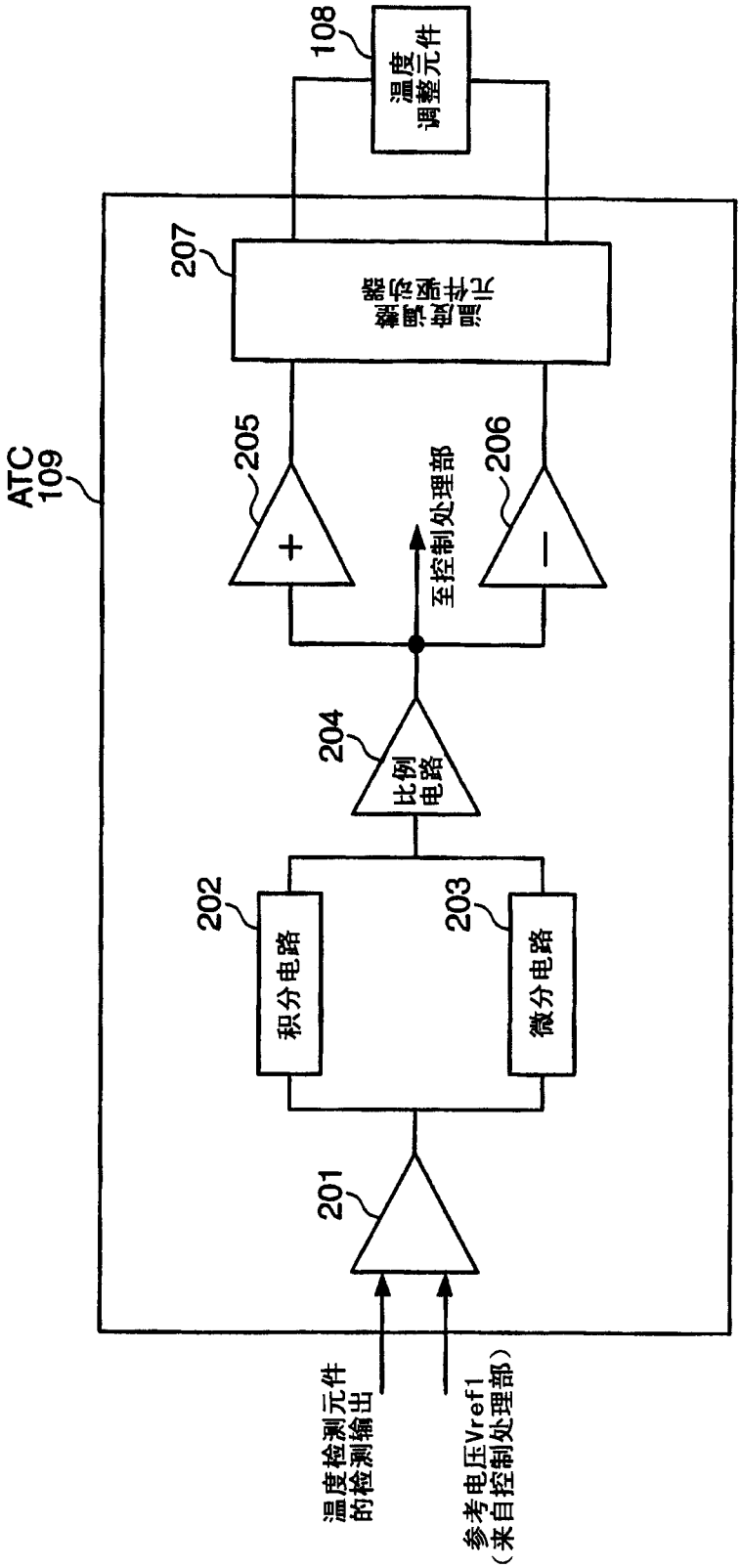

108
温度调整元件
207
元件温度检测器
ATC
109
205
206
至控制处理部
+
−
204
比例电路
202
积分电路
203
微分电路
201
温度检测元件的检测输出
参考电压Vref1（来自控制处理部）

图 8

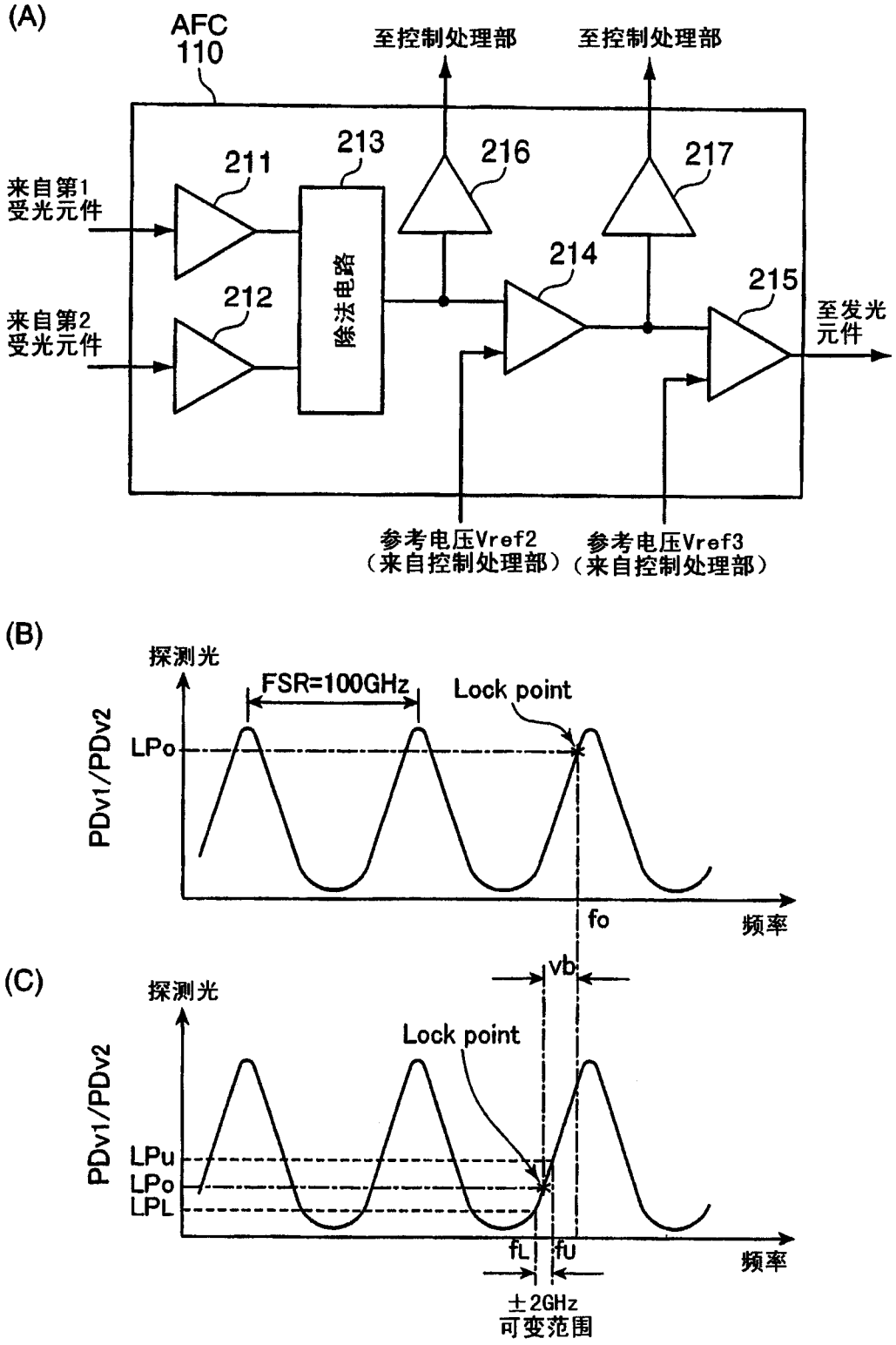

(A)
AFC
110
至控制处理部
至控制处理部
211
213
216
217
来自第1
受光元件
212
除法电路
214
215
来自第2
受光元件
至发光
元件
参考电压Vref2
（来自控制处理部）
参考电压Vref3
（来自控制处理部）
(B)
探测光
FSR=100GHz
Lock point
PDv1/PDv2
LPo
fo
频率
(C)
vb
探测光
Lock point
PDv1/PDv2
LPu
LPo
LPL
fL
fU
频率
±2GHz
可变范围

图 9

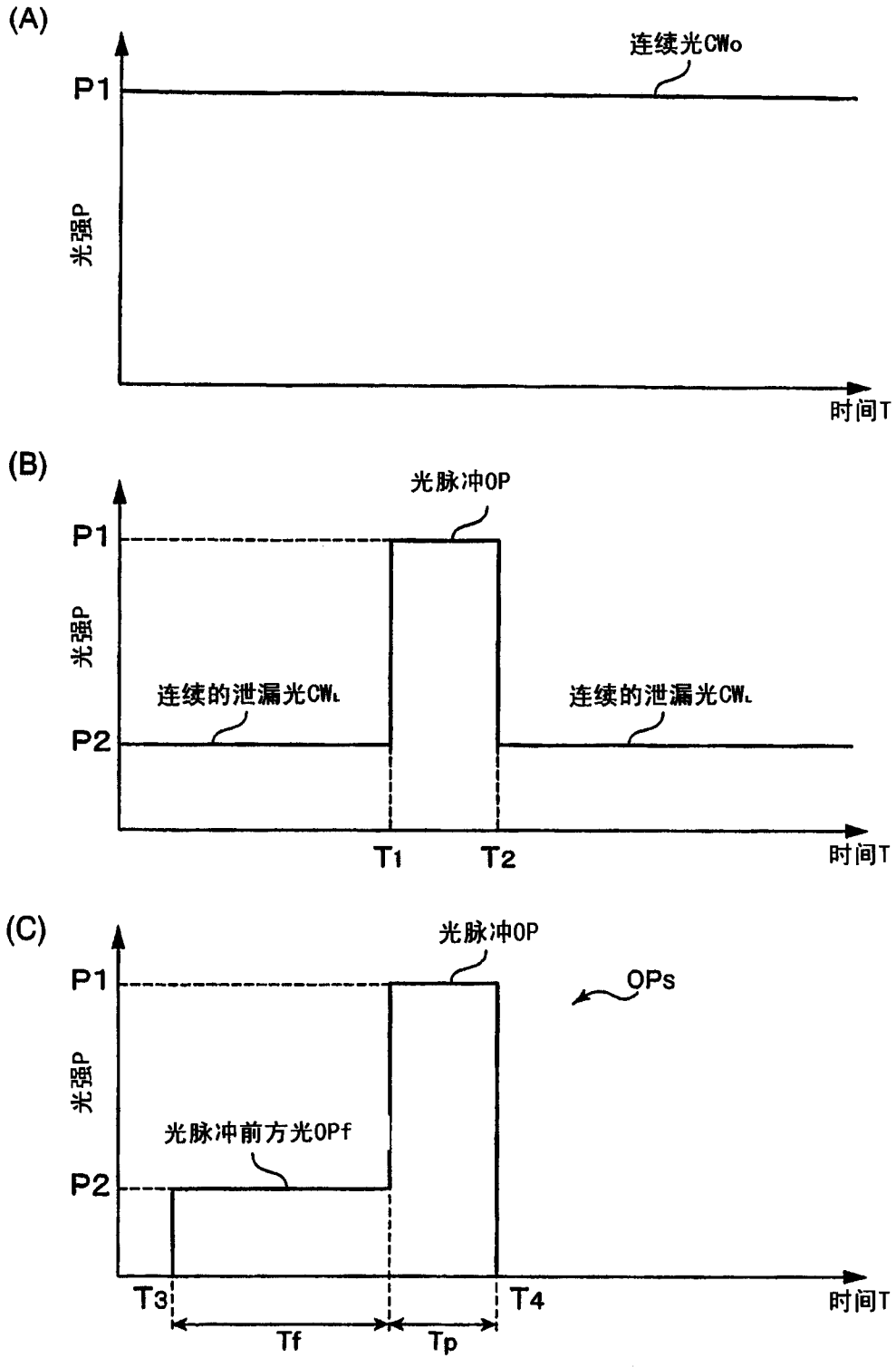

(A)
连续光CWo
P1
光强P
时间T
(B)
光脉冲OP
P1
光强P
连续的泄漏光CWL
连续的泄漏光CWL
P2
T1
T2
时间T
(C)
光脉冲OP
OPs
P1
光强P
光脉冲前方光OPf
P2
T3
T4
时间T
Tf
Tp

图 10

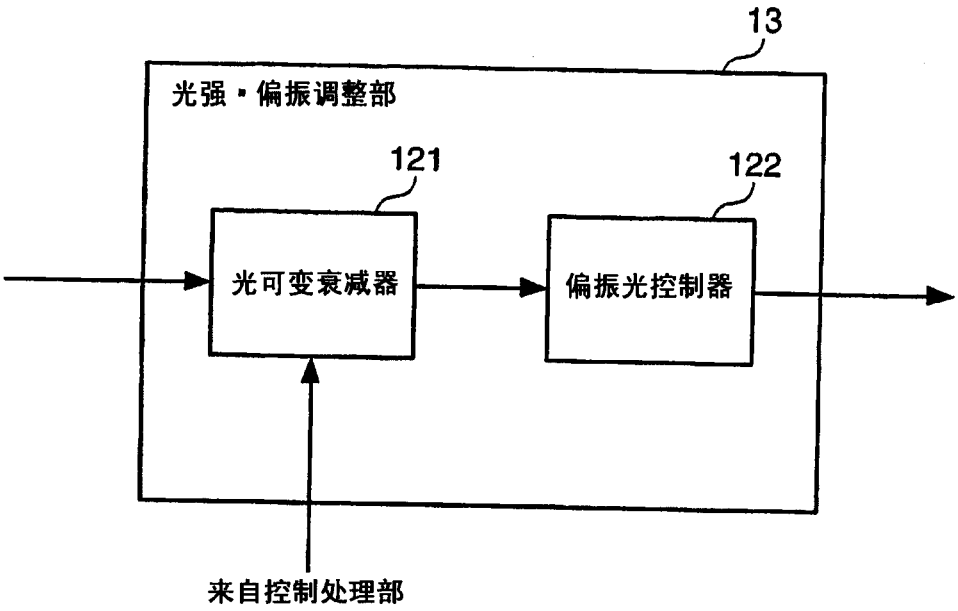


图 11

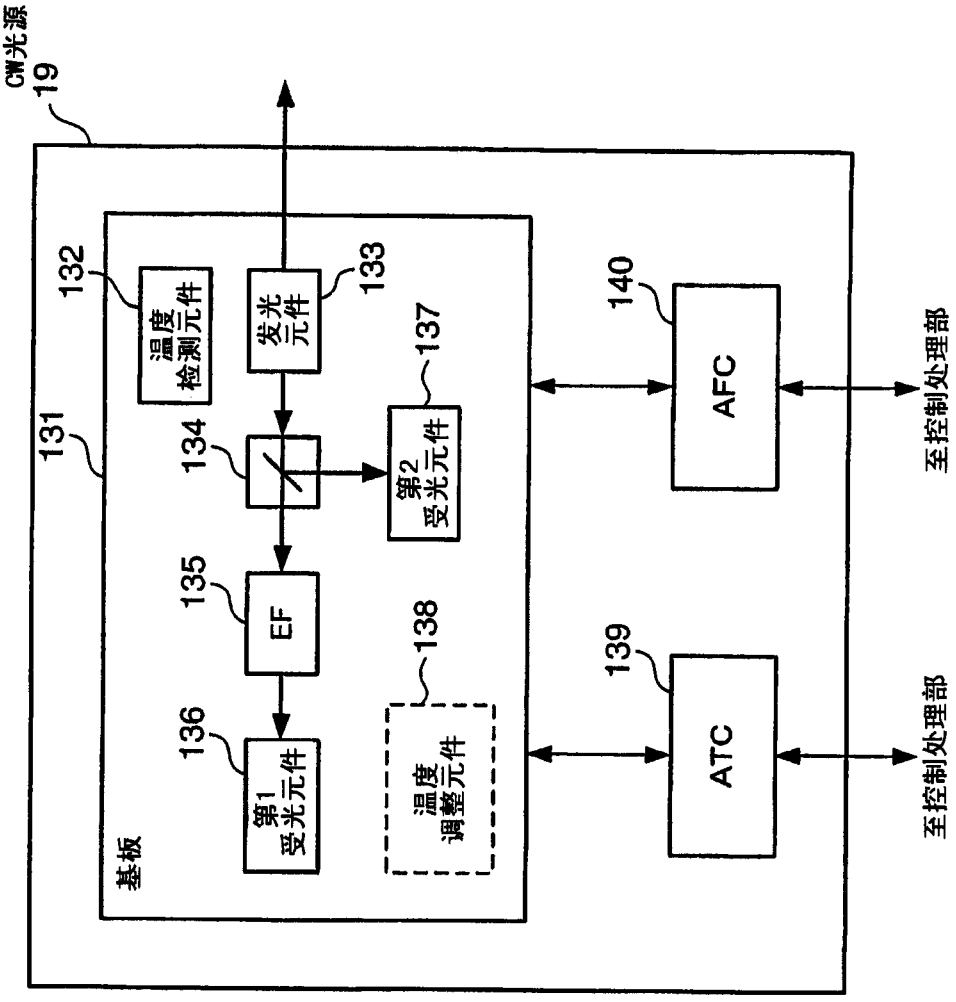

CW光源
19
131
基板
132
温度检测元件
133
发光元件
134
135
EF
136
第1受光元件
137
第2受光元件
138
温度调整元件
139
ATC
140
AFC
至控制处理部
至控制处理部

图 12

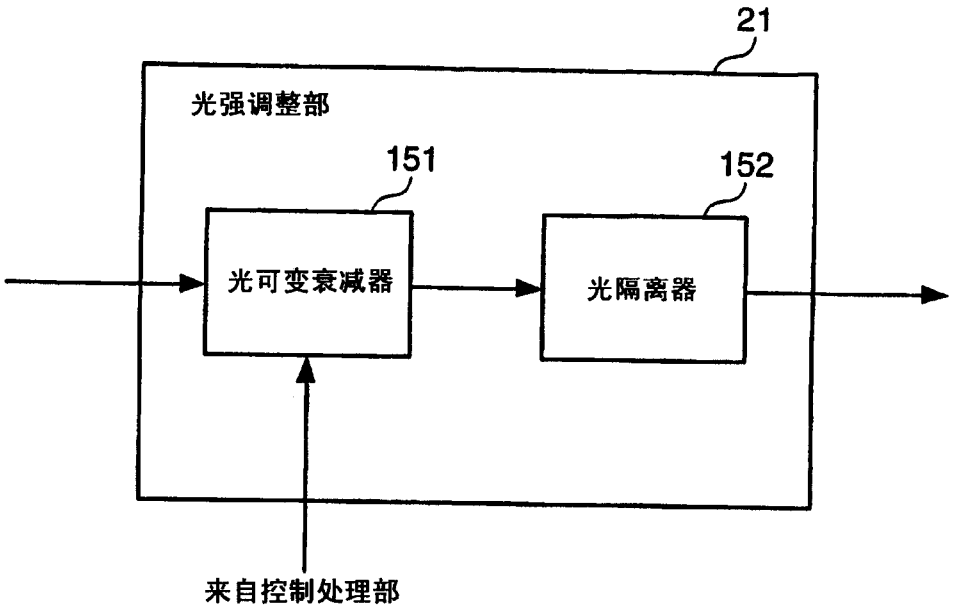
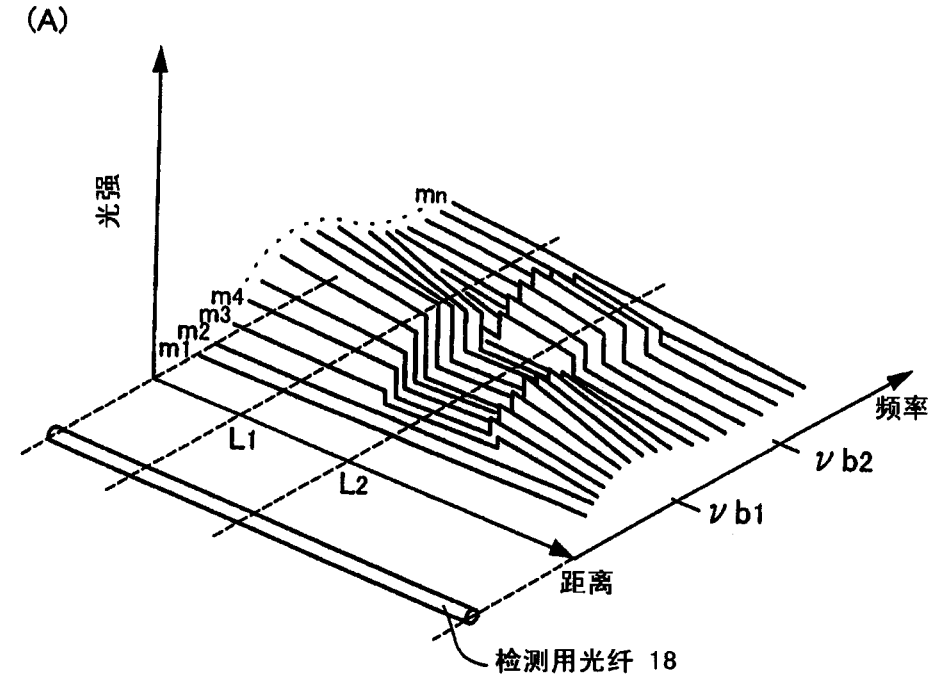


图 13


(A)
光强
mn
m4
m3
m2
m1
L1
L2
频率
νb2
νb1
距离
检测用光纤 18

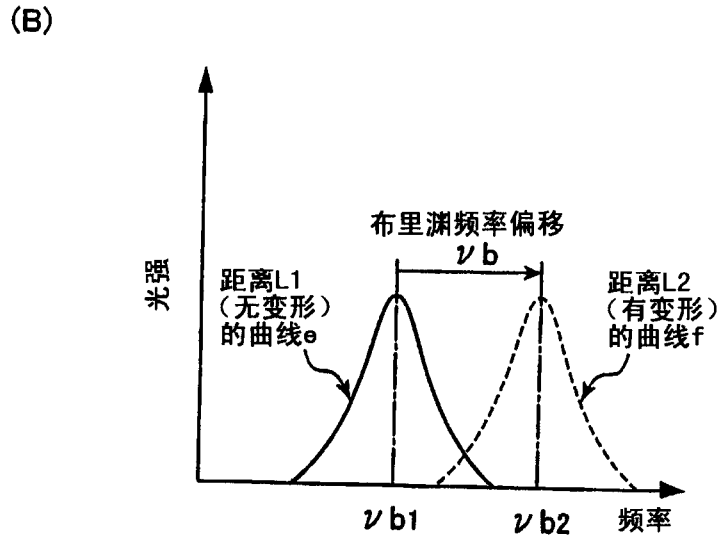

(B)
光强
布里渊频率偏移
νb
距离L1
（无变形）
的曲线e
距离L2
（有变形）
的曲线f
νb1
νb2
频率

图 14

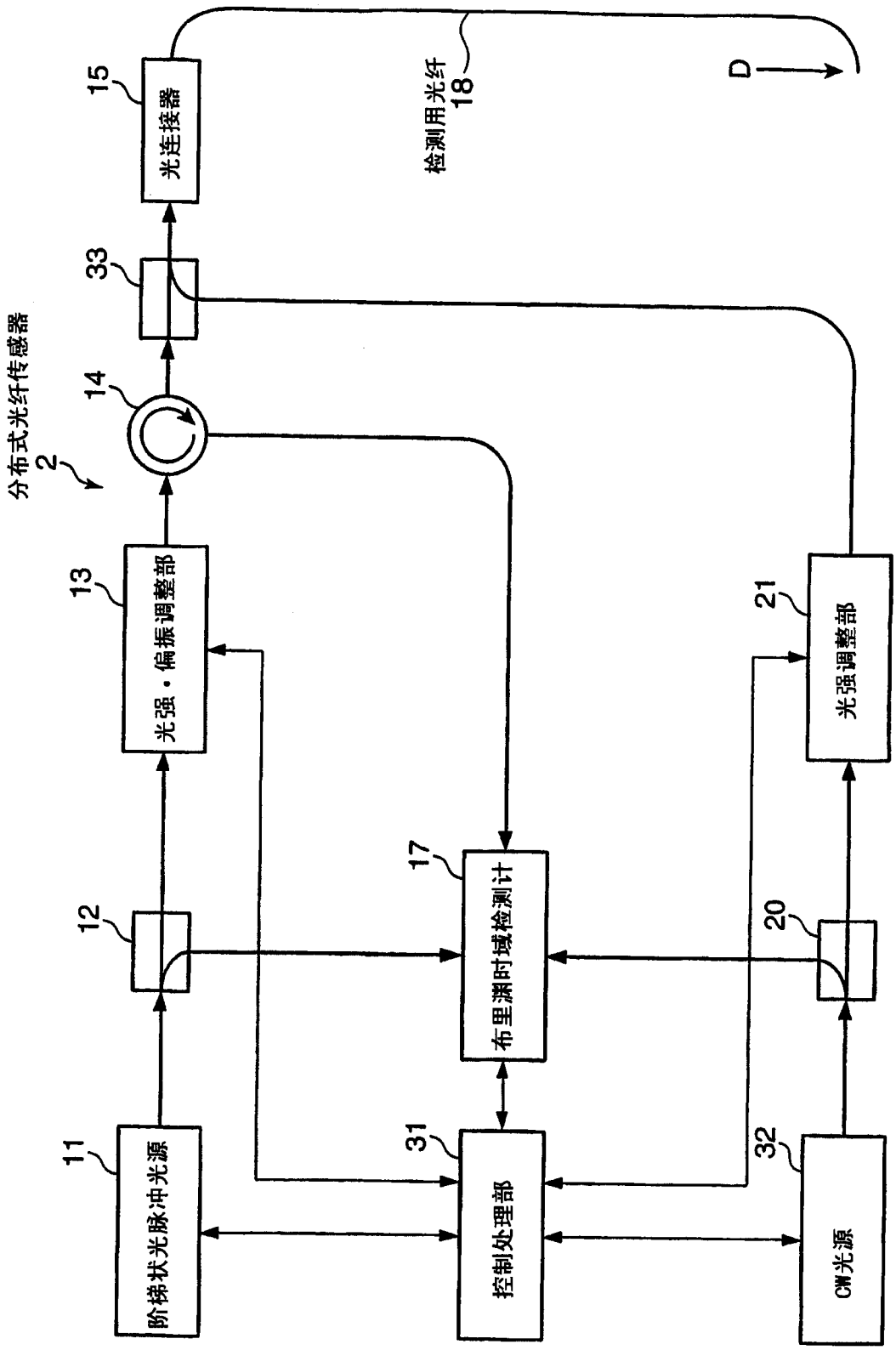

分布式光纤传感器
2
11
阶梯状光脉冲光源
12
13
光强·偏振调整部
14
15
光连接器
检测用光纤
18
D
17
布里渊时域检测计
20
21
光强调整部
31
控制处理部
32
CW光源
33

图 15

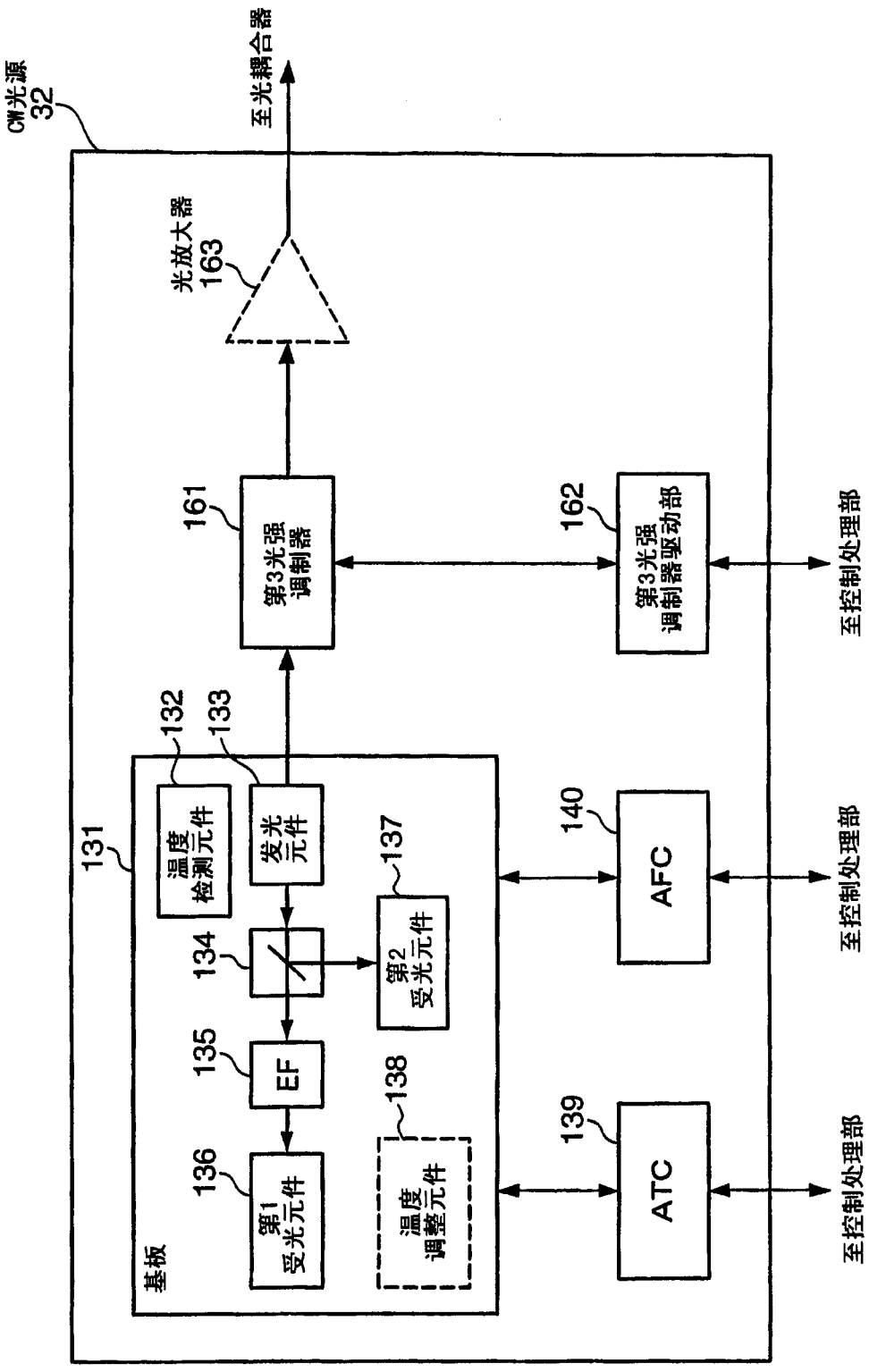

CW光源
32
至光耦合器
光放大器
163
161
第3光强
调制器
162
第3光强
调制器驱动部
至控制处理部
131
基板
132
温度
检测元件
133
发光
元件
134
135
EF
136
第1
受光元件
137
第2
受光元件
138
温度
调整元件
140
AFC
至控制处理部
139
ATC
至控制处理部

图 16

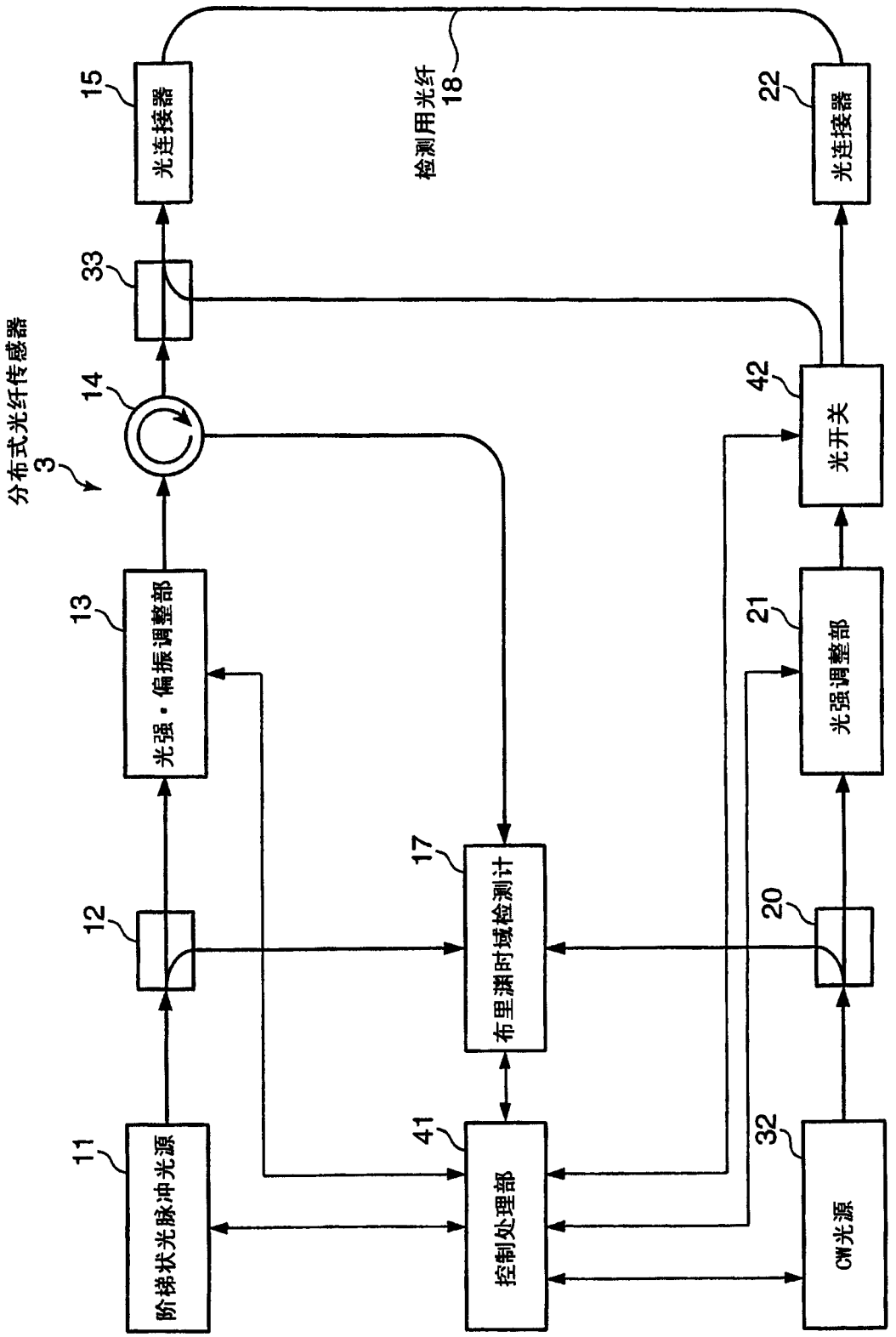

分布式光纤传感器
3
光连接器
15
检测用光纤
18
光连接器
22
33
14
光开关
42
光强·偏振调整部
13
光强调整部
21
布里渊时域检测计
17
12
20
阶梯状光脉冲光源
11
控制处理部
41
CW光源
32

图 17

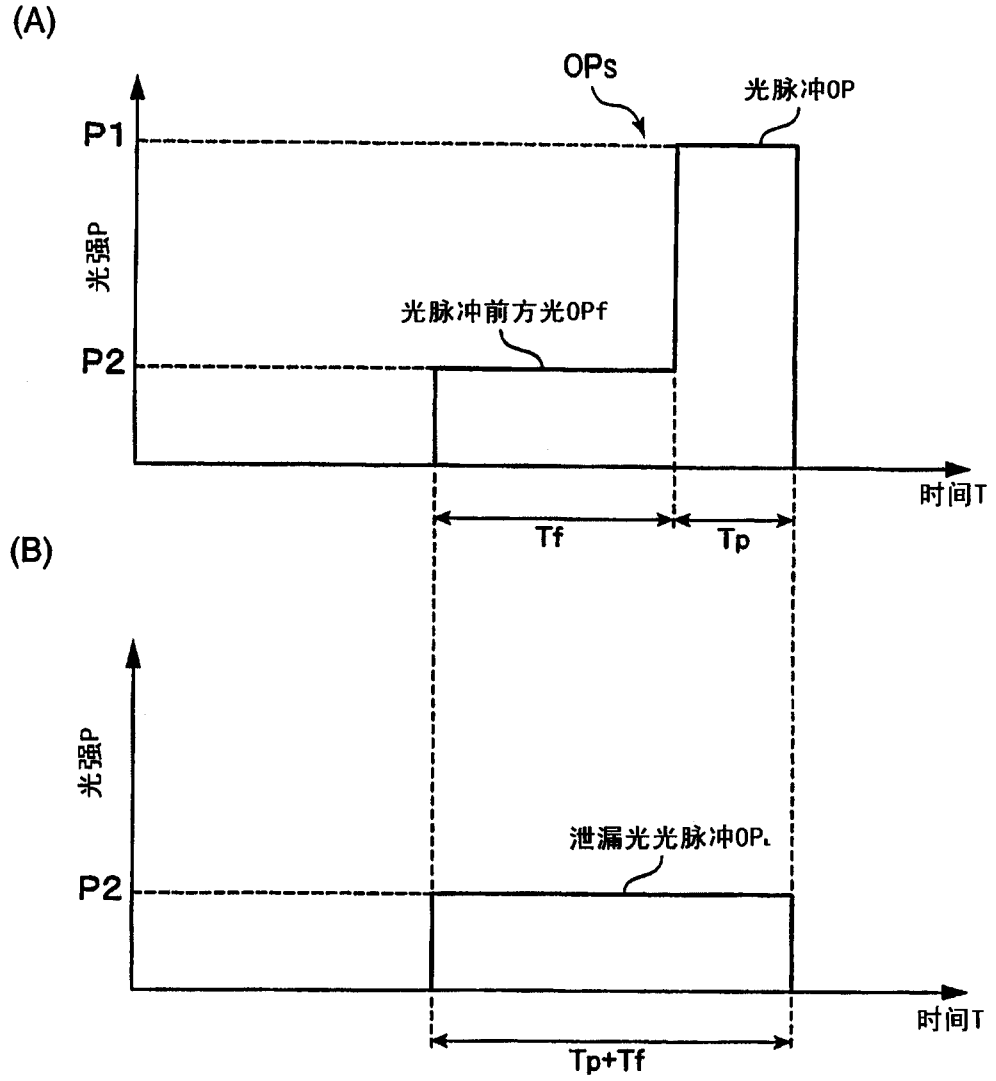

(A)
OPs
光脉冲OP
P1
光强P
光脉冲前方光OPf
P2
时间T
Tf
Tp
(B)
光强P
泄漏光光脉冲OPL
P2
时间T
Tp+Tf

图 18

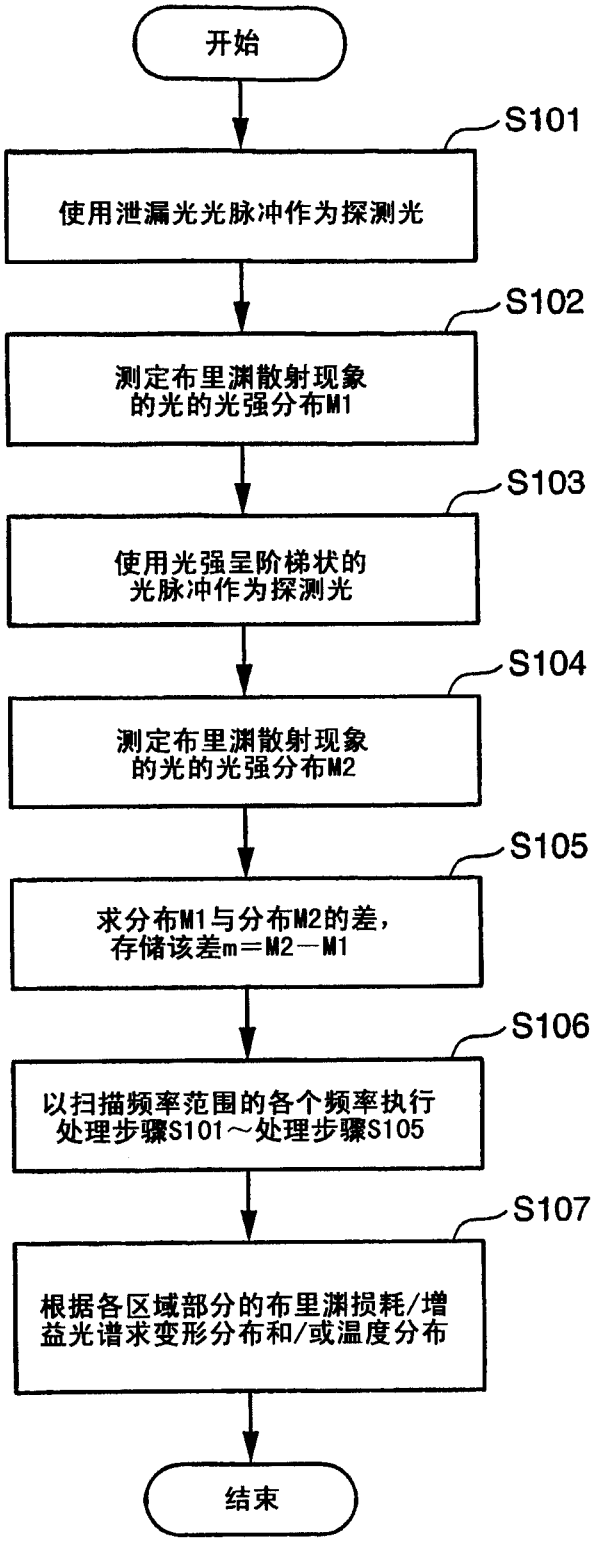

开始
S101
使用泄漏光光脉冲作为探测光
S102
测定布里渊散射现象
的光的光强分布M1
S103
使用光强呈阶梯状的
光脉冲作为探测光
S104
测定布里渊散射现象
的光的光强分布M2
S105
求分布M1与分布M2的差，
存储该差m＝M2－M1
S106
以扫描频率范围的各个频率执行
处理步骤S101～处理步骤S105
S107
根据各区域部分的布里渊损耗/增
益光谱求变形分布和/或温度分布
结束

图 19

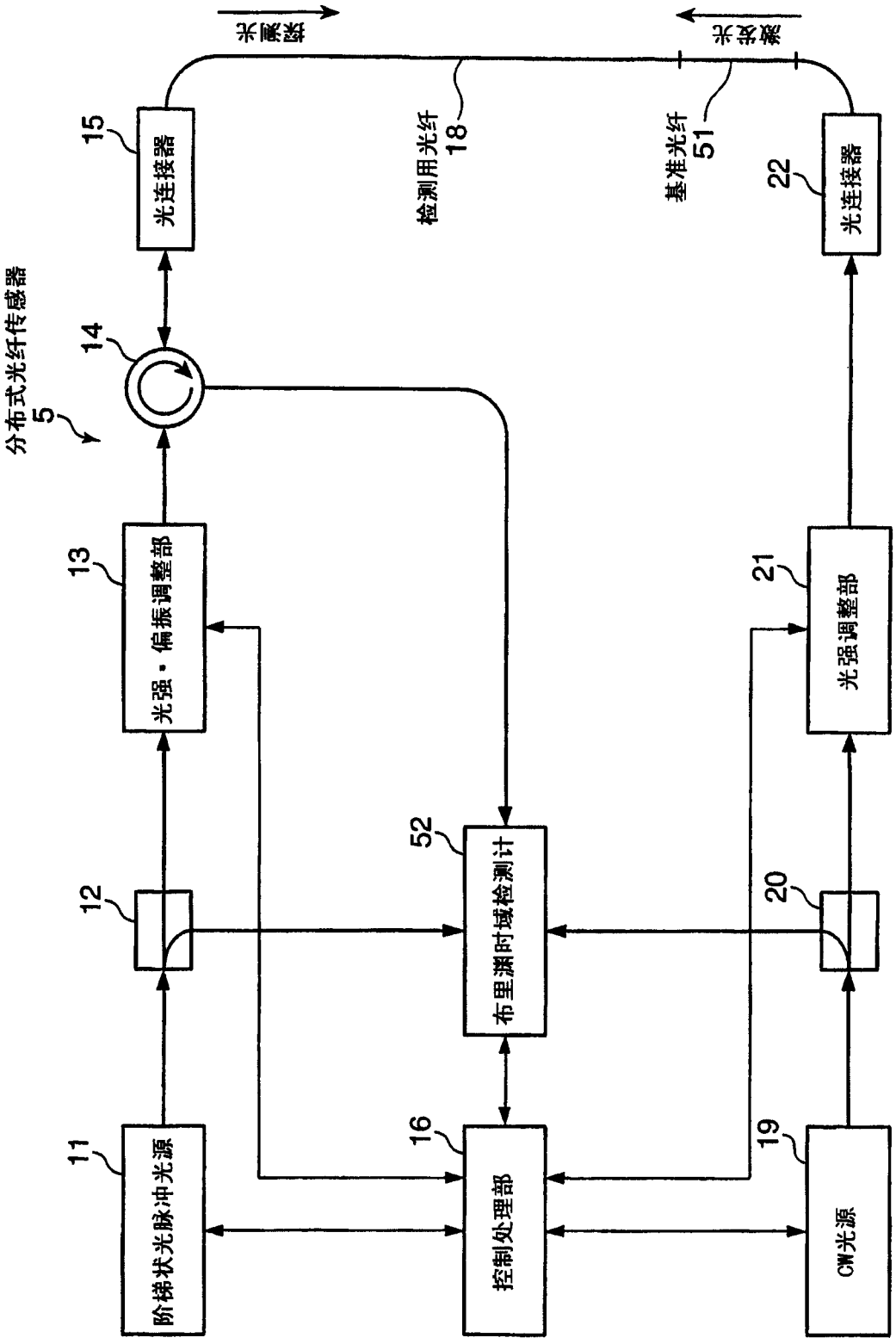

脉冲光
激光
检测用光纤
18
基准光纤
51
15
光连接器
22
光连接器
分布式光纤传感器
5
14
13
光强·偏振调整部
21
光强调整部
52
布里渊时域检测计
12
20
11
阶梯状光脉冲光源
16
控制处理部
19
CW光源

图 20

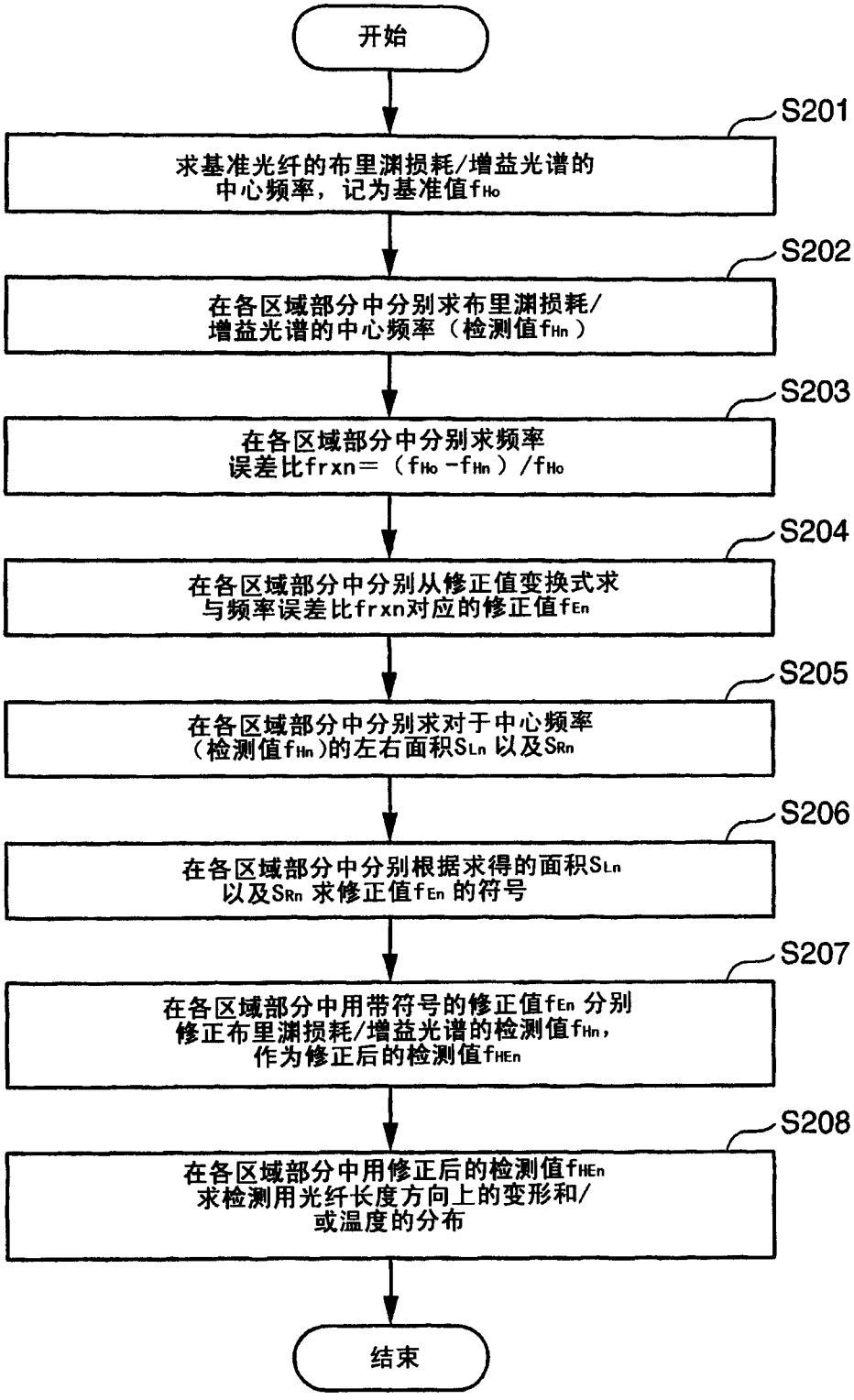

开始
S201
求基准光纤的布里渊损耗/增益光谱的中心频率，记为基准值f_{Ho}
S202
在各区域部分中分别求布里渊损耗/增益光谱的中心频率（检测值f_{Hn}）
S203
在各区域部分中分别求频率误差比$frxn=(f_{Ho}-f_{Hn})/f_{Ho}$
S204
在各区域部分中分别从修正值变换式求与频率误差比frxn对应的修正值f_{En}
S205
在各区域部分中分别求对于中心频率（检测值f_{Hn}）的左右面积S_{Ln}以及S_{Rn}
S206
在各区域部分中分别根据求得的面积S_{Ln}以及S_{Rn}求修正值f_{En}的符号
S207
在各区域部分中用带符号的修正值f_{En}分别修正布里渊损耗/增益光谱的检测值f_{Hn}，作为修正后的检测值f_{HEn}
S208
在各区域部分中用修正后的检测值f_{HEn}求检测用光纤长度方向上的变形和/或温度的分布
结束

图 21

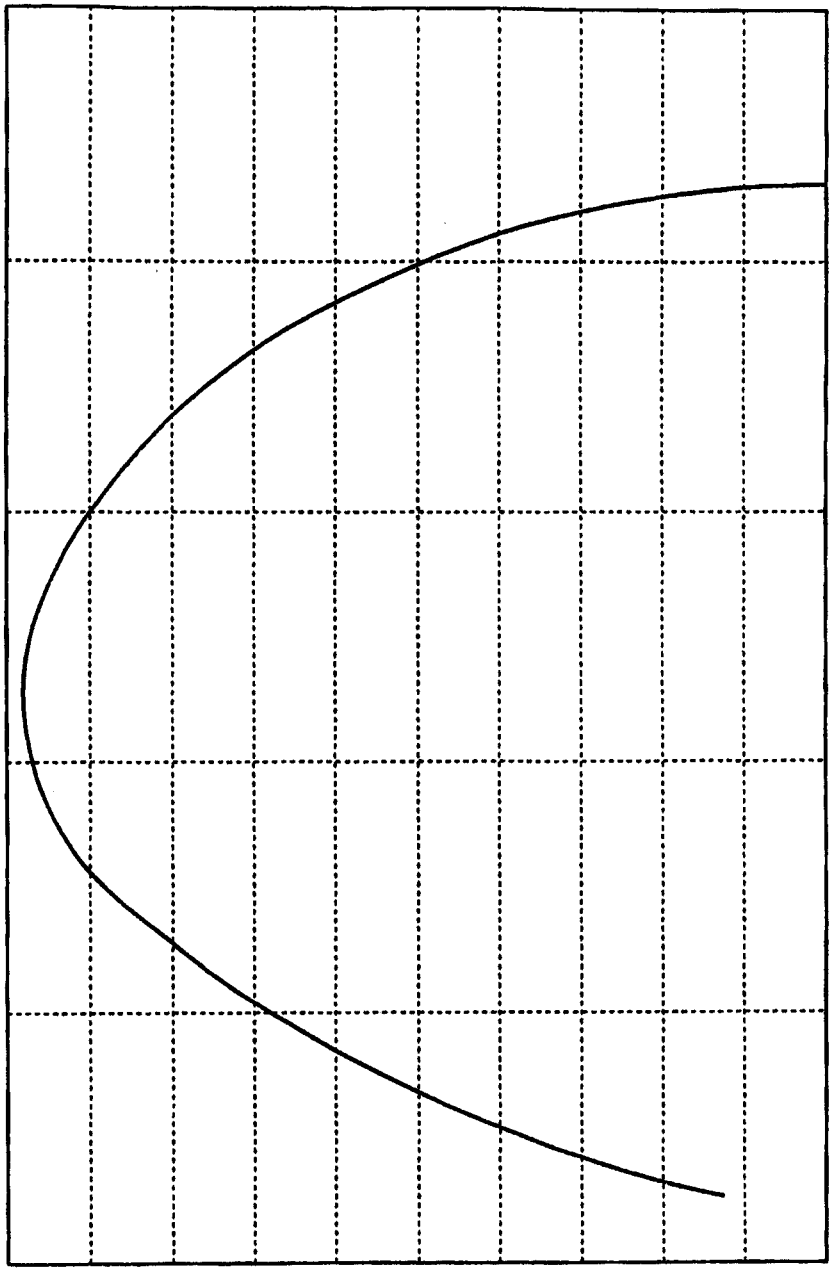


图 22

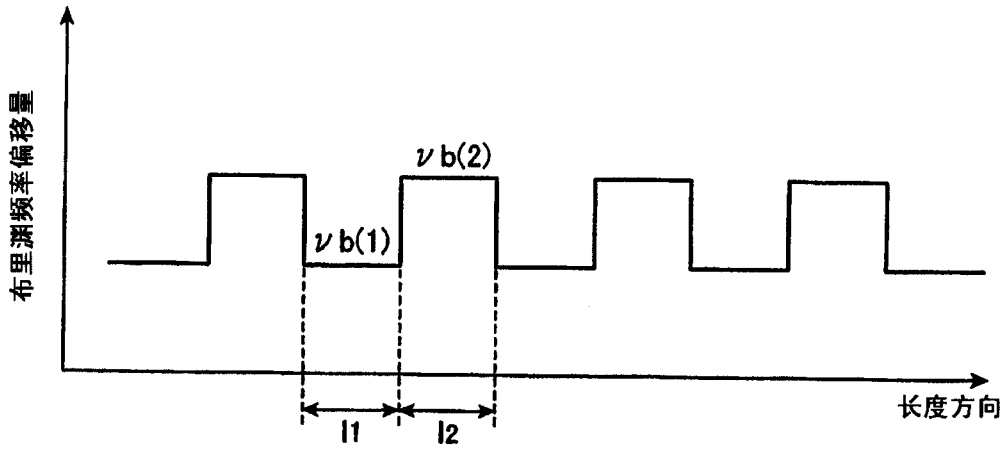


图 23

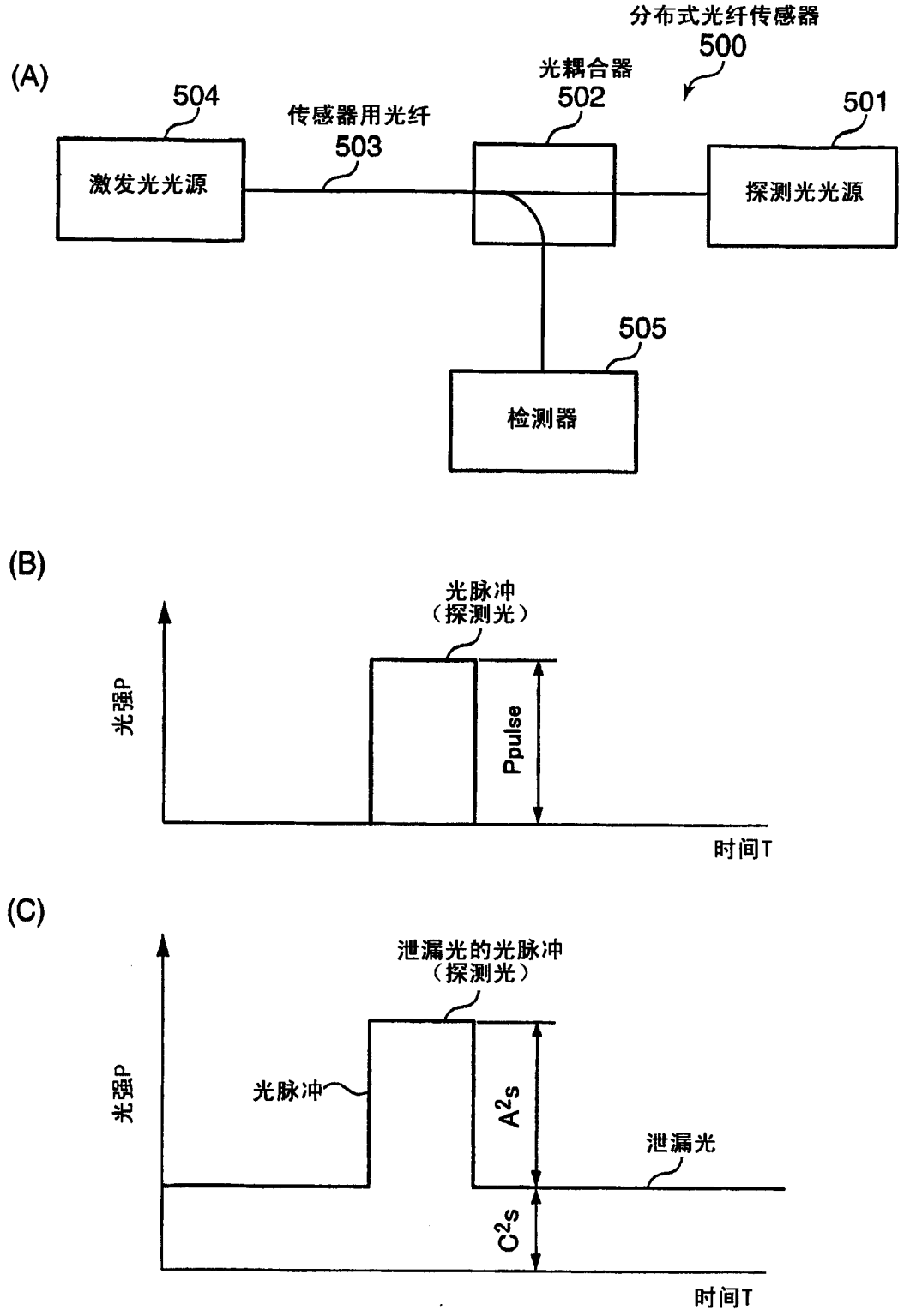

(A)
分布式光纤传感器
500
光耦合器
502
504
传感器用光纤
503
501
激发光光源
探测光光源
505
检测器
(B)
光脉冲
（探测光）
光强P
Ppulse
时间T
(C)
泄漏光的光脉冲
（探测光）
光强P
光脉冲
A²s
泄漏光
C²s
时间T

图 24

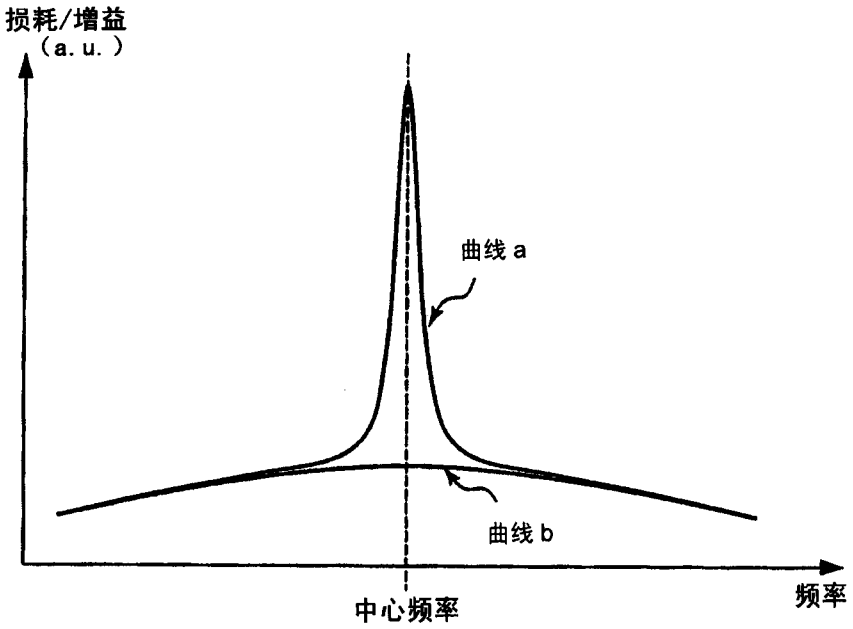


图 25