



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 102506904 B

(45) 授权公告日 2014. 05. 21

(21) 申请号 201110314519. 3

(22) 申请日 2011. 10. 17

(73) 专利权人 南京大学

地址 210093 江苏省南京市鼓楼区汉口路  
22 号

(72) 发明人 张旭苹 胡君辉

(74) 专利代理机构 南京知识律师事务所 32207

代理人 张苏沛

(51) Int. Cl.

G01D 3/028 (2006. 01)

审查员 张瀛

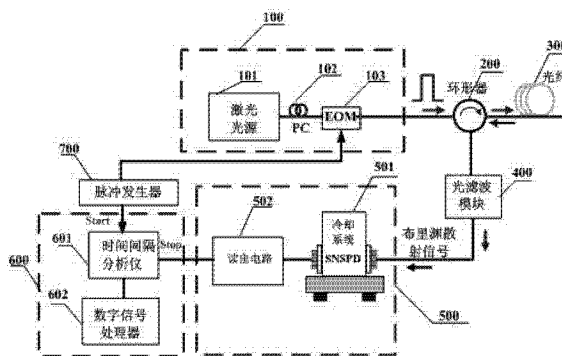
权利要求书1页 说明书5页 附图2页

(54) 发明名称

一种基于超导纳米线单光子探测器的自发布里渊散射光时域反射仪

(57) 摘要

本发明公开一种基于超导纳米线单光子探测器的自发布里渊散射光时域反射仪 (BOTDR), 它由光脉冲产生单元发出的光脉冲经环形器耦合进传感光纤, 从传感光纤散射回的后向散射光经光滤波单元滤除瑞利散射光后得到布里渊散射光, 由超导纳米线单光子探测单元探测背向散射光信号, 最后从探测单元输出的电信号由数据采集处理单元对信号进行采集和处理, 通过一定的解调关系给出结果。与目前已有的 BOTDR 系统不同之处在于, 本发明所述的 BOTDR 系统采用了等效噪声功率 (NEP) 低和无带宽限制的超导纳米线单光子探测器作为探测单元, 并采用了单光子计数技术进行数据采集和处理。



1. 一种基于超导纳米线单光子探测器的自发布里渊散射光时域反射仪,其特征在于:它包括光脉冲产生单元(100),产生的光脉冲经环形器(200),耦合进传感光纤(300),由传感光纤散射回的背向散射光经光滤波单元(400)滤除背向瑞利散射信号后得到背向布里渊散射信号,由探测单元(500)探测该布里渊散射信号,最后由数据采集处理单元(600)对探测器输出信号进行采集和处理,脉冲发生器(700)用于光脉冲产生单元的脉冲调制和数据采集处理单元的时钟控制;所述光脉冲产生单元(100)包括窄线宽激光光源(101),偏振控制器(102)和电光调制器(103);所述探测单元(500)包括置于温度低于4k冷却系统中的超导纳米线单光子探测器(501)(SNSPD)和探测器的读出电路(502);所述数据采集处理单元(600)包括时间间隔分析仪(601)和数字信号处理单元(602)。

2. 根据权利要求1所述基于超导纳米线单光子探测器的自发布里渊散射光时域反射仪,其特征在于:所述探测单元(500)为超导纳米线单光子探测单元,反射仪并采用了单光子计数技术进行数据采集和处理。

3. 根据权利要求1所述基于超导纳米线单光子探测器的自发布里渊散射光时域反射仪,其特征在于:所述光脉冲产生单元(100)由窄线宽连续光激光器,偏振控制器和具有高消光比的电光调制器组成,窄线宽激光器发射探测光,经偏振控制器(102)后,由经脉冲发生器控制的具有高消光比的电光调制器(103)调制成一定脉宽的光脉冲信号,调制频率视传感光纤长度而定。

4. 根据权利要求1所述基于超导纳米线单光子探测器的自发布里渊散射光时域反射仪,其特征在于:所述滤波器单元(400)是能达到将背向瑞利散射光和背向布里渊散射光分离的带宽小于0.09nm的反射式光纤光栅,两个光纤光栅及隔离器组成的双光纤光栅滤波器,法布里-珀罗干涉仪,马赫-曾德干涉仪。

5. 根据权利要求1所述基于超导纳米线单光子探测器的自发布里渊散射光时域反射仪,其特征在于:所述数据采集处理单元(600)包括时间间隔分析仪和数字信号处理单元,具有时间相关的光子计数能力,即能对所探测的光子数进行统计,并能记录探测器输出光电信号与光脉冲产生单元发光脉冲的时间间隔。

6. 根据权利要求1所述基于超导纳米线单光子探测器的自发布里渊散射光时域反射仪,其特征在于:所述数据采集处理单元(600)由具有光子计数性能的光子计数器与高速数字示波器组合,或采集卡与计算机组合,或多道分析仪。

## 一种基于超导纳米线单光子探测器的自发布里渊散射光时域反射仪

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种基于超导纳米线单光子探测器的自发布里渊散射光时域反射仪，主要应用于光纤传感网技术领域。

### 背景技术

[0002] 在目前全分布式光纤传感技术中，基于布里渊散射的全分布式光纤传感技术能够实现光纤中的温度和应变的长距离连续分布式测量，可应用于大型建筑、公路、隧道、桥梁、大坝、通信光缆、油气管道等健康状况的监测和测量，有着广阔的应用前景。基于自发布里渊散射光时域反射仪 (BOTDR) 相对于其他分布式光纤传感器，具有单端进行传感测量和能对温度和应变同时传感的优点。光纤中的布里渊散射是一种非弹性散射，源于入射光的部分光子与光纤介质的声学声子相互作用。布里渊散射光的强度和频移受光纤所处环境的温度和应力影响，所以通过测量背向布里渊散射信号的强度或频移就可以得到光纤的温度和应变的分布情况。传统 BOTDR 系统对布里渊散射信号的探测方法相干探测和直接探测两种。直接探测的原理为直接通过解调背向布里渊散射信号强度进行传感的 BOTDR 采用了光时域反射 (OTDR) 技术，即向光纤中耦合进一个光脉冲，通过接收到反射信号与发射光脉冲之间的时间差来确定空间位置，通过直接测量背向布里渊散射信号的强度或测定布里渊散射和瑞利散射信号的强度比 (Landau-Placzek ratio) 来解调出沿光纤相应位置的温度、应变信息。P. C. Wait 等于 1996 年报道了该方法 (P. C. Wait, T. P. Newson, "Landau Placzek ratio applied to distributed fibre sensing", Optics Communications, 1996, 122: pp. 141-146)。对 BOTDR 而言，虽然具有便捷的单端测量的优点，但由于利用的自发布里渊散射光强微弱，传统探测器测量的信噪比较低，检测困难。BOTDR 系统的空间分辨率受探测脉冲宽度和探测器的带宽限制，要提高空间分辨率必须提高减小探测脉冲宽度并且增加探测器的带宽，而模拟探测器带宽越宽，等效噪声功率值越大，即可探测到的最小功率越大，因此系统的空间分辨率和温度、应变的分辨率难以同时提高。

[0003] 传统的自发布里渊散射光时域反射仪 (BOTDR) 由于采用的是模拟探测器，受到模拟探测器等效噪声功率 (NEP) 和带宽的限制，对微弱的背向布里渊散射信号的探测能力有限，因此传统基于模拟探测器的 BOTDR 系统难以同时实现大动态范围，高空间分辨率和高应变 / 温度测量精度的测量。

[0004] 目前，国外采用模拟探测器的 BOTDR 系统已有商业产品，这些产品采用相干探测的探测方法，也有一些相关的专利资料，但是没有发现将超导纳米线单光子探测器应用于 BOTDR 系统的专利资料和文献。超导纳米线单光子探测器是一种新型的光电探测器，具有低的抖动时间 (典型值为 50ps) 和超低的等效噪声功率 (典型值为  $NEP \approx 10^{-18} \text{WHz}^{-1/2}$ ，比模拟探测器小 3-4 个数量级)，因此，理论上将超导纳米线单光子探测器作为 BOTDR 系统的探测单元并采用光子计数技术，可以提高系统的灵敏度，可以同时提高 BOTDR 系统的空间分

分辨率和测量精度。

### 发明内容

[0005] 针对现有技术中存在的问题,本发明要解决的技术问题是提供一种基于超导纳米线单光子探测器的自发布里渊散射光时域反射仪,用于同时提高 BOTDR 系统的空间分辨率和测量精度。

[0006] 为实现本发明的目的,本发明采取以下技术方案:由光脉冲产生单元发出的光脉冲经环形器耦合进传感光纤,从传感光纤散射回的后向散射光经光滤波单元滤除瑞利散射光后得到布里渊散射光,由超导纳米线单光子探测单元探测背向散射光信号,最后从探测单元输出的电信号由数据采集处理单元对信号进行采集和处理,通过一定的解调关系给出结果。与目前已有研究的 BOTDR 系统不同之处在于,本发明所述的 BOTDR 系统采用了等效噪声功率 (NEP) 低和无带宽限制的超导纳米线单光子探测器作为探测单元,并采用了单光子计数技术进行数据采集和处理。

[0007] 所述基于超导纳米线单光子探测器的自发布里渊散射光时域反射仪,其特征是所述光脉冲产生单元由窄线宽激光器发射探测光,经偏振控制器后由经脉冲发生器控制的具有高消光比的电光调制器调制成一定脉宽的光脉冲信号,调制频率视传感光纤长度而定。

[0008] 所述基于超导纳米线单光子探测器的自发布里渊散射光时域反射仪,其特征是所述光脉冲产生单元也可以是能产生脉冲宽度满足要求的窄线宽脉冲激光器。

[0009] 所述基于超导纳米线单光子探测器的自发布里渊散射光时域反射仪,其特征是用于传感的光纤一般是标准的单模光纤,也可以是其他类型的单模光纤。

[0010] 所述基于超导纳米线单光子探测器的自发布里渊散射光时域反射仪,其特征是所述环形器可以由 3dB 光纤耦合器代替。

[0011] 所述基于超导纳米线单光子探测器的自发布里渊散射光时域反射仪,其特征是所述滤波器单元可以是能达到将瑞利散射光和布里渊散射光分离的反射式光纤光栅,两个光纤光栅及隔离器组成的双光纤光栅滤波器,法布里-珀罗 (Fabry-Perot) 干涉仪,马赫曾德 (Mach-Zehnder) 干涉仪,窄带宽 (3dB 带宽小于 0.09nm) 的其他光滤波器中的一种。

[0012] 所述基于超导纳米线单光子探测器的自发布里渊散射光时域反射仪,其特征是超导纳米线单光子探测单元由超导纳米线单光子探测器和读出电路组成。

[0013] 所述基于超导纳米线单光子探测器的自发布里渊散射光时域反射仪,其特征是所述超导纳米线单光子探测器以 NbN 超导纳米线为敏感材料并置于所述冷却系统中。

[0014] 所述基于超导纳米线单光子探测器的自发布里渊散射光时域反射仪,其特征是数据采集处理单元由能记录光电信号达到与光脉冲发射时间间隔,并能对所探测的光子数进行统计的硬件构成。

[0015] 所述基于超导纳米线单光子探测器的自发布里渊散射光时域反射仪,其特征是数据采集处理单元包括时间间隔分析仪和数字信号处理器。

[0016] 所述基于超导纳米线单光子探测器的自发布里渊散射光时域反射仪,其特征是所述的数据采集处理单元可以由能实现时间相关光子计数功能的其他硬件构成,如光子计数器与高速数字示波器组合,或采集卡与计算机组合,或多道分析仪 (Multichannel Analyzer)。

[0017] 所述基于超导纳米线单光子探测器的自发布里渊散射光时域反射仪,其特征是脉冲发生器能同时对所述电光调制器进行电脉冲调制和对所述数据采集处理单元进行时钟控制。

[0018] 所述基于超导纳米线单光子探测器的自发布里渊散射光时域反射仪具有以下优点:

[0019] 1. 将超导纳米线单光子探测器应用于 BOTDR 传感系统,并为 BOTDR 传感系统添加了一种光子计数的信号探测和处理方法。

[0020] 2. 具有高空间分辨率和高测量精度。超导纳米线单光子探测器具有低的抖动时间(典型值为 50ps)和低暗计数率的双重优点,与模拟探测器相比,其最小可探测功率约小 7 个量级,与基于雪崩二极管的单光子探测器相比,其最小可探测功率约小 3 个量级,因此,基于超导纳米线单光子探测器的 BOTDR 系统具有更高的灵敏度,可以同时提高 BOTDR 系统的空间分辨率和测量精度,解决空间分辨率和测量精度同时提高的矛盾。

[0021] 3. 采用对传感光纤进行分段测量的方法,可以突破探测器受饱和功率的限制,在保持高空间分辨率和高测量精度的同时,能进一步提高系统的动态范围,具体方案如实施例二。

#### 附图说明

[0022] 附图说明是对本发明的进一步叙述,为本申请的一部分,但不构成对本发明的限定。

[0023] 在附图中:图 1 是本发明实施例一的结构示意图。

[0024] 图 2 是本发明实施例二的结构示意图。

[0025] 图 3 是本发明实施例三的结构示意图。

[0026] 图 4 是本发明实施例四的结构示意图。

#### 具体实施方式

[0027] 下面结合附图和实施例对本发明作进一步详细说明和描述。

[0028] 实施例一。

[0029] 本实施例提供一种基于超导纳米线单光子探测器的自发布里渊散射光时域反射仪。如图 1 所示,本实施例包括光脉冲产生单元 100,产生的光脉冲经环形器 200,耦合进传感光纤 300,由传感光纤散射回的背向散射光经光滤波单元 400 滤除背向瑞利散射信号后得到背向布里渊散射信号,由超导纳米线单光子探测单元 500 探测该布里渊散射信号,最后由数据采集处理单元 600 对探测器输出信号进行采集和处理,脉冲发生器 700 用于光脉冲产生单元的脉冲调制和数据采集处理单元的时钟控制。所述光脉冲产生单元 100 包括窄线宽激光光源 101,偏振控制器 102 和具有高消光比的电光调制器 103;所述超导纳米线单光子探测单元 500 包括置于温度低于 4k 冷却系统中的超导纳米线单光子探测器 501(SNSPD)和探测器的读出电路 502;所述数据采集处理单元 600 包括时间间隔分析仪 601 和数字信号处理单元 602。

[0030] 光脉冲产生单元 100 用于产生所需脉宽宽度的光脉冲信号。一般由窄线宽(典型值为:1-5MHz)的分布反馈式半导体激光器(DFB)101 发射连续光,然后由经脉冲发生器

700 控制的电光调制器 103 产生光脉冲, 由于电光调制器对光的偏振态有依赖, 所以连续光进入电光调制器之前采用偏振控制器 102 控制光的偏振态, 减小偏振态的影响; 探测所用的超导纳米线单光子探测器灵敏度很高, 所调制的脉冲要求其消光比应大于 35dB, 避免连续光基底对探测信号的影响。

[0031] 经电光调制器 103 调制的光脉冲通过环形器 200 耦合进传感光纤 300, 从传感光纤 300 散射回的背向瑞利和布里渊散射光经环形器 200 进入光滤波单元 400, 其中环形器 200 也可以由 3dB 光纤耦合器代替。

[0032] 要将背向布里渊散射光信号从总的背向散射信号中分离出来, 光滤波单元可以是反射式光纤光栅, 两个光纤光栅及隔离器组成的双光纤光栅滤波器, 法布里-珀罗 (Fabry-Perot) 干涉仪, 马赫曾德 (Mach-Zehnder) 干涉仪, 窄带宽 (3dB 带宽小于 0.09nm) 的其他光滤波器中的一种。标准单模光纤中背向布里渊散射光和瑞利散射光相差只有约 0.088nm, 并且背向布里渊散射光强比背向瑞利散射光强小约 3 个量级, 所以滤波器的性能要求较高。滤波器滤除背向瑞利散射光, 得到的背向布里渊散射光由超导纳米线单光子探测器 501 进行光电检测。

[0033] 超导纳米线单光子探测单元 500 包括超导纳米线单光子探测器 501 和读出电路 502; 探测器 501 由 NbN 纳米线作为敏感材料并置于低于 4k 的冷却系统冷中。入射探测器的光信号很微弱, 可以看成是一个个的光子, 光子经探测器后形成电脉冲信号输出。

[0034] 由探测器读出电路输出的电脉冲信号由数据采集处理单元 600 进行数据采集和处理。时间间隔分析仪 601 记录光探测脉冲进入传感光纤与探测器接收到后散射光的时间间隔, 用于计算传感光纤链路中发生散射的位置, 数字信息处理器 602 完成时间相关的直方图统计, 得出沿光纤不同位置背向布里渊散射信号光的强度分布, 通过布里渊散射光强度与温度、应变的解调关系, 得出沿光纤分布的温度和应变的信息, 实现全光纤分布式传感。

[0035] 实施例二。

[0036] 本实施例提供一种能提高动态范围的基于超导纳米线单光子探测器的自发布里渊散射光时域反射仪, 其结构如图 2 所示, 与图 1 结构的基于超导纳米线单光子探测器的自发布里渊散射光时域反射仪相比, 不同之处在于: 光脉冲产生单元 100 增加了掺铒光纤放大器 (EDFA) 104 和光纤光栅与环形器组合滤波器 105, 增加了所述脉冲发生器 700 对所述探测器的读出电路进行偏置电流控制。

[0037] 掺铒光纤放大器 (EDFA) 104 是为了进一步放大探测光脉冲, 光纤光栅与环形器组合滤波器 105 是为了滤除放大器的自发辐射噪声 (ASE noise), 组合滤波器中的光纤光栅的反射率要求达到 99%, 隔离度大于 35dB, 中心波长因激光器波长而异, 3dB 带宽约为 1nm。

[0038] 按本实施例测量时, 在一个脉冲周期 (脉冲周期视传感光纤 300 长度而定) 内, 由脉冲发生器 700 控制探测器 500 的偏置电流, 将传感光纤 300 分成若干段, 测量每一段传感光纤时探测器 500 的偏置电流设置为不同值, 光强较大时采用小的偏置电流, 以防止探测器饱和。然后再将各段的测量结果依顺序进行合理的拼接得到整段传感光纤 300 的光强分布信息, 这样可以在保持高测量精度的前提下, 提高测量的动态范围。

[0039] 实施例三。

[0040] 本实施例提供另一种能提高动态范围的基于超导纳米线单光子探测器的自发布

里渊散射光时域反射仪,其结构如图3所示,与图1结构的基于超导纳米线单光子探测器的自发布里渊散射光时域反射仪相比,不同之处在于:光脉冲产生单元100增加了掺铒光纤放大器(EDFA)104和光纤光栅与环形器组合滤波器105,在光滤波单元400和超导纳米线单光子探测单元500之间增加了一个可调光衰减器400A。

[0041] 本实施例与实施例二不同的是在一个脉冲周期内,探测器500的偏置电流恒定,而控制入射到探测器的背向布里渊散射信号的大小,将传感光纤300分成若干段,为防止探测器饱和,测量每一段传感光纤时可调衰减器400A对背向布里渊散射信号衰减值不一样,对于背向布里渊散射光强时采用大的衰减值,背向布里渊散射光强较小时采用小的衰减值。然后再将各段的测量结果依顺序进行合理的拼接得到整段传感光纤300的光强分布信息,这样可以在保持高测量精度的前提下,提高测量的动态范围。

[0042] 实施例四。

[0043] 本实施例提供另一种基于超导纳米线单光子探测器的自发布里渊散射光时域反射仪,其结构如图4所示,与图1结构的基于超导纳米线单光子探测器的自发布里渊散射光时域反射仪相比,不同之处在于:在光滤波单元400要求能将背向瑞利散射光和背向布里渊散射光分离,并分别由超导纳米线单光子探测单元500和数据采集处理单元600测量出它们的光功率,沿传感光纤300的温度、应变信息通过瑞利光功率与布里渊散射光功率的比值(Landau-Placzek ratio, LPR)进行解调,这种方法可以减小光纤的弯曲损耗、接头、耦合、输入激光功率的波动以及脉冲宽度的波动等因素导致散射光功率的变化的影响,得到更加准确的测量结果。

[0044] 虽然本发明通过具体实施例进行了描述,但具体实施例和附图并非用来限定本发明。本领域技术人员可在本发明的精神的范围内,做出各种变形和改进,所附的权利要求应包括这些变形和改进。

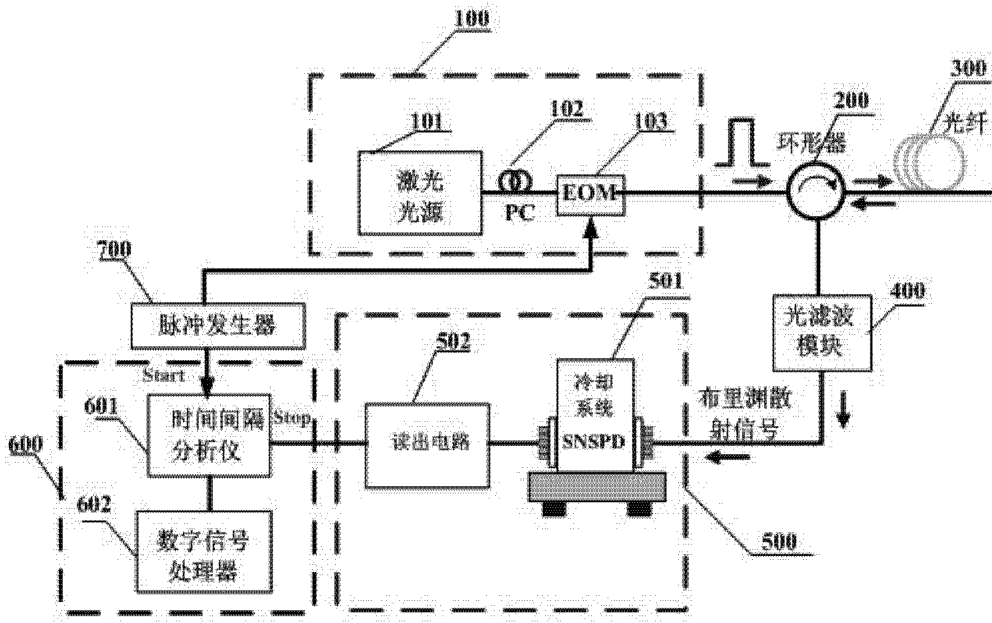


图 1

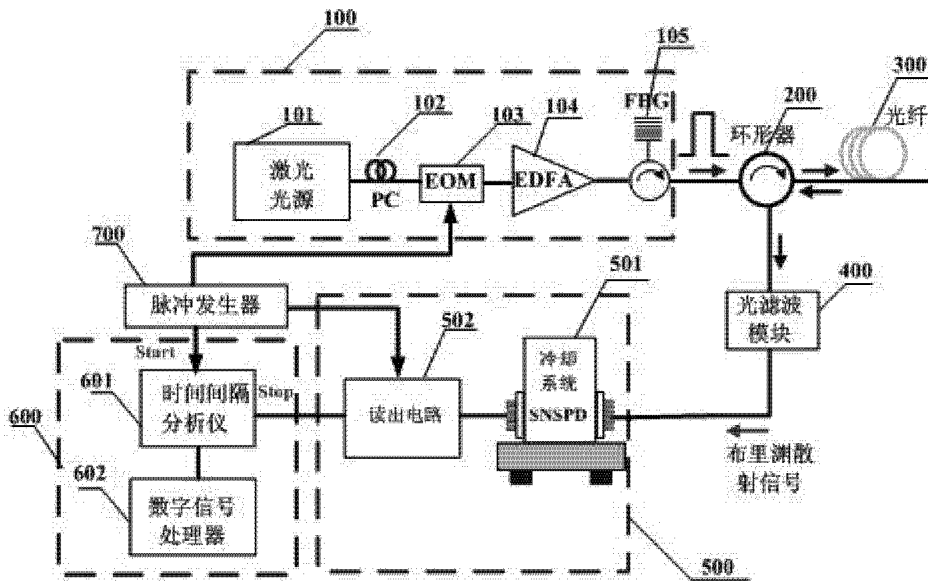


图 2



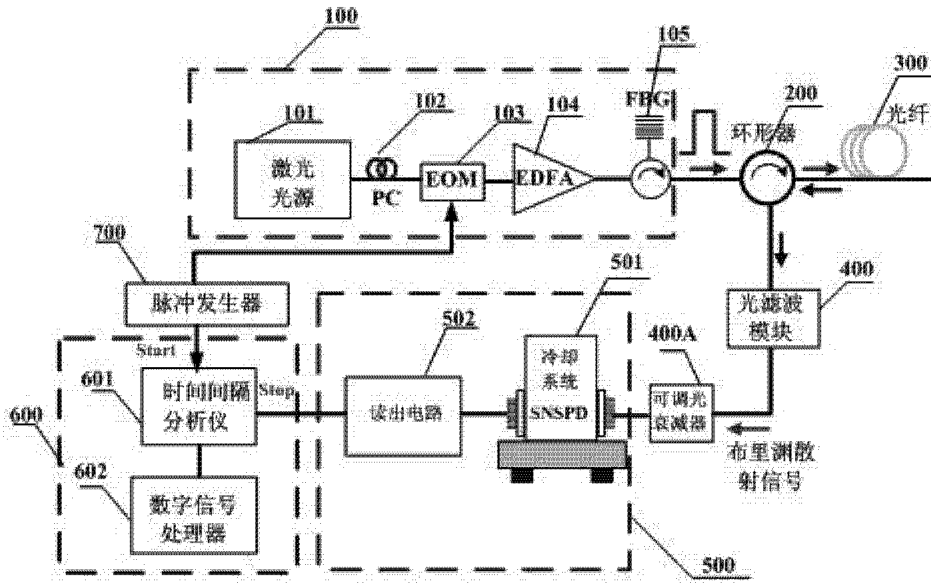


图 3

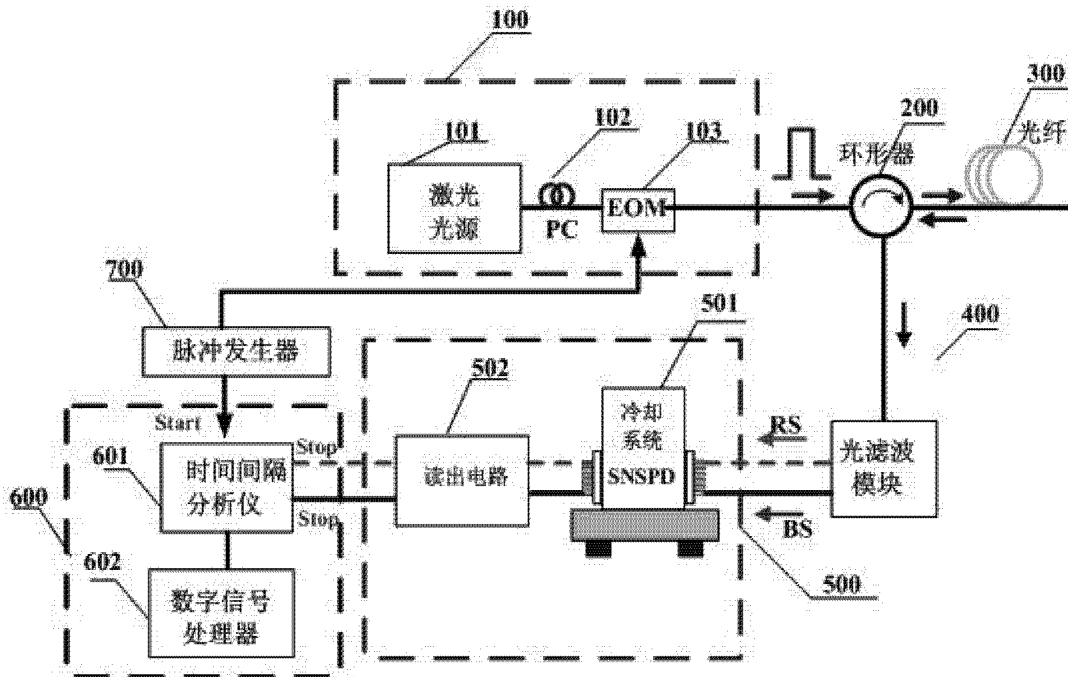


图 4