

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2023 年 10 月 26 日 (26.10.2023)



(10) 国际公布号
WO 2023/201928 A1

(51) 国际专利分类号:

G01N 21/17 (2006.01) **G01B 17/02** (2006.01)

G01N 21/01 (2006.01) **G02B 27/28** (2006.01)

G01N 29/04 (2006.01)

(21) 国际申请号: PCT/CN2022/109944

(22) 国际申请日: 2022 年 8 月 3 日 (03.08.2022)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(30) 优先权:

202210409627.7 2022 年 4 月 19 日 (19.04.2022) CN

(71) 申请人: 浙江大学 (ZHEJIANG UNIVERSITY) [CN/
CN]; 中国浙江省杭州市西湖区余杭塘路
866 号, Zhejiang 310058 (CN)。

(72) 发明人: 陈剑 (CHEN, Jian); 中国浙江省杭州市西湖区余杭塘路 866 号, Zhejiang 310058 (CN)。俞振扬 (YU, Zhenyang); 中国浙江省杭州市西湖区余杭塘路 866 号, Zhejiang 310058 (CN)。曾逸轲 (ZENG, Yike); 中国浙江省杭州市西湖区余杭塘路 866 号, Zhejiang 310058 (CN)。

(74) 代理人: 杭州求是专利事务所有限公司 (HANGZHOU QIUSHI PATENT OFFICE CO., LTD.); 中国浙江省杭州市西湖区古墩路 701 号紫金广场 C 座 1506 室/林超, Zhejiang 310030 (CN)。

(81) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CV, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IQ, IR, IS, IT, JM, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK,

(54) Title: SELF-ADAPTIVE ALL-FIBER LASER ULTRASONIC MEASURING INSTRUMENT

(54) 发明名称: 一种自适应全光纤激光超声测量仪

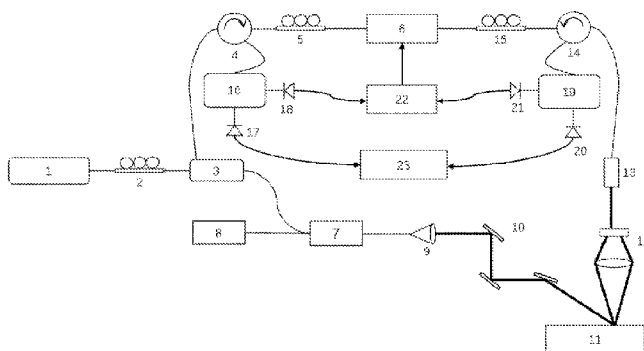


图 1

(57) Abstract: A self-adaptive all-fiber laser ultrasonic measuring instrument and a measuring method thereof. The output light of a narrow-linewidth semiconductor fiber laser (1) is split by a polarization controller (2) and a polarization beam splitter (3) to generate detection light and reference light; the detection light and visible light output by an indication laser (8) are irradiated, through a wave-length division multiplexer (7) and a biaxial scanning galvanometer (10), to a sample (11) to be measured to generate ultrasonic vibration; scattered light modulated by the ultrasonic vibration is converged and collected as signal light; the signal light and the reference light are respectively input into an interferometer (6) from two ends of the interferometer (6) in opposite propagation directions; the reference light demodulated by the interferometer (6) generates a feedback control signal for adjusting the measurement performance of the interferometer (6); the signal light demodulated by the interferometer (6) generates an ultrasonic signal to achieve ultrasonic measurement of said sample (11). The measuring instrument has features such as high environmental adaptability, high measurement sensitivity, compact structure, high portability, and convenient maintenance and adjustment.



MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW。

- (84) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SC, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:

— 包括国际检索报告(条约第21条(3))。

(57) 摘要: 一种自适应全光纤激光超声测量仪及其测量方法。其中, 窄线宽半导体光纤激光器(1)输出光经偏振控制器(2)和偏振分束器(3)分光产生探测光和参考光, 探测光和指示激光器(8)输出的可见光经波分复用器(7)和双轴扫描振镜(10)照射至待测试样(11)产生超声振动, 超声振动调制的散射光汇聚收集作为信号光, 信号光和参考光分别从干涉仪(6)两端以相反传播方向输入到干涉仪(6), 经干涉仪(6)解调的参考光生成反馈控制信号, 调整干涉仪(6)的检测性能, 经干涉仪(6)解调的信号光生成超声波信号, 实现待测试样(11)超声测量。该测量仪具有环境适应性强、测量灵敏度高、结构紧凑、便携性强、维护调整方便等特点。

一种自适应全光纤激光超声测量仪

技术领域

本发明涉及激光超声测量技术领域的一种光纤测量仪，特别是涉及了一种自适应全光纤激光超声测量仪及其测量方法。

背景技术

激光超声是一种完全非接触的测量技术，分别使用激光在待测试样产生和检测超声波信号，无须任何耦合剂，非常适合高温、高压、强辐射、强腐蚀等极端环境下或高速运动、复杂结构等各种零部件的在线测量。相较于常规压电超声检测系统，激光超声系统具备其特有的优势，包括远距离非接触（最远可达 10 米以）、模态多、频带宽、分辨率高以及应用范围广等。因此，激光超声检测技术受到了国内外科研工作者的广泛关注。通常，一个激光脉冲照射到待测试样表面产生热膨胀应力，从而激发出超声波，再用光学方法去探测激光超声波。激光超声非常适合各种工业应用，如高温钢管、涂层厚度和复杂形状复合材料等的测量。但由于工业现场环境比较复杂，如高温、振动等，使得激光超声检测技术的稳定性受到严重影响。同时由于待测试样表面质量一致性较差，激光超声回波信号幅值波动很大。此外，激光超声检测装置光路复杂，体积庞大，难以结合扫描技术实现待测试样整体检测。

现有基于法布里-珀罗干涉仪的激光超声测量系统一个典型缺点是难以控制干涉仪长期稳定工作在最佳灵敏度。这是因为工业现场高温、振动等环境容易造成法布里-珀罗干涉仪腔长变化或者激光频率漂移。为了获得最佳检测性能，法布里-珀罗干涉仪腔长必须能够根据环境和本身变形自适应调整以补偿激光频率漂移和热膨胀引起的腔长变化。

发明内容

为了克服上述现有技术的不足，本发明提供了一种具有自适应能力的全光纤激光超声测量仪和测量方法，同时提出一种基于归一化的激光超声回波信号自动补偿方法。

本发明具有环境适应性强、测量灵敏度高、结构紧凑、便携性强、维护调整方便等特点。

本发明所采用的技术方案是：

一、一种自适应全光纤激光超声测量仪：

包括窄线宽半导体光纤激光器、第一光纤偏振控制器、第一光纤偏振分束器、第一光纤环形器、第二光纤偏振控制器、干涉仪、波分复用器、指示激光器、光纤准直器、双轴扫描振镜、光汇聚收集器、准直透镜、第二光纤环形器和第三光纤偏振控制器；

窄线宽半导体光纤激光器输出端经第一光纤偏振控制器和第一光纤偏振分束器的输入端连接，第一光纤偏振分束器的一个输出端和第一光纤环形器的第一端口连接，第一光纤环形器的第二端口经第二光纤偏振控制器后和干涉仪的一端连接；

第一光纤偏振分束器的另一个输出端和指示激光器共同连接到波分复用器的两个输入端，波分复用器的输出端和光纤准直器连接，光纤准直器输出准直光束经双轴扫描振镜照射到待测试样上，待测试样上方设有光汇聚收集器，光汇聚收集器接收来自待测试样的散射光后入射到准直透镜，准直透镜连接到第二光纤环形器的第一端口，第二光纤环形器的第二端口经第三光纤偏振控制器和干涉仪的另一端连接。

窄线宽半导体光纤激光器发出连续激光，经第一光纤偏振控制器偏振处理后形成具有 p 偏振态和 s 偏振态的正交线偏振光，经第一光纤偏振分束器分束后形成 p 偏振态的线偏振光和 s 偏振态的线偏振光；

以 s 偏振态的线偏振光作为参考光，参考光经第一光纤环形器入射到第二光纤偏振控制器中，经第二光纤偏振控制器偏振处理后输入到干涉仪中；

以 p 偏振态的线偏振光作为探测光，探测光和指示激光器输出的可见光一起经波分复用器复用后输入到光纤准直器，光纤准直器输出空间自由光，空间自由光经双轴扫描振镜照射到的待测试样上产生超声振动，由待测试样表面散射产生超声振动调制的散射光，散射光经光汇聚收集器收集汇聚后入射到准直透镜，经准直透镜后变成信号光，信号光经第二光纤环形器入射到第三光纤偏振控制器中，经第三光纤偏振控制器偏振处理后输入到干涉仪中；

参考光和信号光在干涉仪中均发生了反射和透射；

经干涉仪透射后的信号光和经干涉仪反射后的参考光合束后经第二光纤偏振控制器入射到第一光纤环形器中，从第一光纤环形器的第三端口输出；

经干涉仪透射后的参考光和经干涉仪反射后的信号光合束后经第三光纤偏振控制器入射到第二光纤环形器中，从第二光纤环形器的第三端口输出。

所述光纤偏振控制器为三环机械型光纤偏振控制器，第二光纤偏振控制器和第三光纤偏振控制器的偏振为四分之一波长，第一光纤偏振控制器将线偏振

光的偏振状态变成椭圆偏振态，p 偏振态光和 s 偏振态光比例为 90: 10。

第一光纤偏振控制器用于进行偏振处理，利用光纤在外力作用下产生双折射，将线偏振光的偏振态变成包括 P 态和 S 态偏振正交分量的任意椭圆偏振态。其具体原理为：其中三个环分别等效为 $\lambda/4$ 、 $\lambda/2$ 、 $\lambda/4$ 三种波片，光波进过 $\lambda/4$ 波片转换为线偏振光，再由 $\lambda/2$ 波片调整偏振方向，最后经由 $\lambda/4$ 波片将线偏振光的偏振状态变成任意的偏振态。使用偏振控制器通过 180° 旋转 $\lambda/4$ 波片和 $\lambda/2$ 波片，可以获得偏振态的旋转变化。

还包括第二光纤偏振分束器和第三光纤偏振分束器；第二光纤偏振分束器的输入端连接到第一光纤环形器的第三端口，第二光纤偏振分束器的两个输出端分别连接一个光电探测器；第三光纤偏振分束器的输入端连接到第二光纤环形器的第三端口，第三光纤偏振分束器的两个输出端也分别连接一个光电探测器。

还包括反馈控制系统，反馈控制系统分别连接到第二光纤偏振分束器和第三光纤偏振分束器的输出经干涉仪反射和透射处理后的参考的光输出端口；由反馈控制系统接收经干涉仪反射/透射处理后的参考光后进行处理并反馈到干涉仪，实时调整干涉仪的检测灵敏度。

还包括数据采集卡，数据采集卡分别连接到第二光纤偏振分束器和第三光纤偏振分束器的输出经干涉仪反射和透射处理后的信号光的输出端口，由数据采集卡采集接收经干涉仪反射和透射处理后的信号光作为激光超声信号，后进行针对待测试样表面质量的检测识别处理。

所述的待测试样安置在平台上，在受到双轴扫描振镜的激光照射后，产生超声振动。所述超声由脉冲激光产生，亦即一个激光脉冲照射到待测试样表面产生热膨胀应力，从而激发出超声波。

所述的待测试样具体为高温钢管、涂层和复杂形状复合材料等。

所述的干涉仪为法布里干涉仪。

通过调整干涉仪的腔长，进而调整干涉仪的透射/反射曲线，进而调整干涉仪工作固定频率对应的幅值和斜率，进而调整灵敏度。

本发明采用的光纤均为保偏光纤。

在本发明实现中，待测试样受到脉冲激光束照射并激发产生超声波。同时，基于热膨胀效应产生的超声波会引起检测光的相位变化。然后，经超声振动信号调制的散射光输入至干涉仪。干涉仪则通过解调将输入光的相位调制转换成幅值调制。

二、一种自适应全光纤激光超声测量仪的测量方法：

分光产生参考光和检测光，将探测光入射到的待测试样的目标对象上调制超声振动，汇聚收集待测试样散射出的散射光，经光电转换后耦合至光纤获得超声振动调制的信号光，通过光纤环形器和偏振控制器将信号光和参考光输入干涉仪，在干涉仪内腔内经干涉输出，干涉输出的参考光经光电探测器生成反馈控制信号进而用于调整干涉仪的腔长，进而反馈调节优化干涉仪的检测灵敏度性能，干涉输出的信号光输出经光电探测器生成超声信号实现待测试样的超声测量。

所述参考光和探测光由光源偏振分束产生，所述探测光经双轴振镜引导入射至待测试样，所述信号光由待测对象散射经光学透镜组汇聚收集形成，所述信号光被待测目标中的超声波相位调制。

测量过程中，采用以下方式进行信号补偿：将双轴扫描振镜不同位置扫描采集的激光超声信号合成为一个合路信号，将合路信号经希尔伯特变换后，再做包络处理得到表面波包络信号，取表面波包络信号中具有最大幅值的信号作为基准信号，根据基准信号分别对各个表面波包络信号进行归一化处理。归一化后试样表面质量不佳处的信号强度和信噪比得到提高，再将处理后的合路信号进行成像，在同一幅图上质量不佳处也能够清楚显现，实现对试样表面的高灵敏度测量。

所述表面波包络信号幅值最大的激光超声信号为基准信号。

所述激光超声信号根据基准信号和表面波包络信号进行归一化处理。

本发明通过上述信号补偿处理，能够提高试样表面质量不佳处的信号强度和信噪比，实现了对表面一致性差的待测试样的完整检测，大大提高后续缺陷的判定或涂层厚度测量的准确性。

本发明中，窄线宽半导体光纤激光器输出光经偏振控制器和偏振分束器分光产生探测光和参考光，探测光经波分复用器和双轴扫描振镜照射至待测试样，超声振动调制的散射光汇聚收集作为信号光输入，信号光和参考光分别从干涉仪两端以相反传播方向输入到干涉仪，经干涉仪解调的参考光生成反馈控制信号，用于调整干涉仪的腔长稳定工作在最佳检测灵敏度性能，经干涉仪解调的信号光生成超声波信号，实现待测试样超声测量，包括厚度、缺陷、材料特性等。

与现有技术相比，本发明的有益效果是：

- 1) 本发明环境适应性强，可以实时自适应补偿工业现场环境变化造成的激光频率漂移和干涉仪热膨胀、变形等引起的腔长变化；
- 2) 本发明测量灵敏度高，可以自适应放大待测试样表面弱散射导致的低信

噪比信号；

3) 本发明结构紧凑，便携性强；

4) 本发明维护调整方便。

附图说明

图1为本发明激光超声测量系统的实现框图；

图2为本发明激光超声测量系统的工作流程图；

图3为干涉仪最佳检测灵敏度控制流程图；

图4为基于归一化的激光超声信号自动补偿方法示意图。

图中：窄线宽半导体光纤激光器（1）、第一光纤偏振控制器（2）、第一光纤偏振分束器（3）、第一光纤环形器（4）、第二光纤偏振控制器（5）、干涉仪（6）、波分复用器（7）、指示激光器（8）、光纤准直器（9）、双轴扫描振镜（10）、待测试样（11）、光汇聚收集器（12）、准直透镜（13）、第二光纤环形器（14）、第三光纤偏振控制器（15）、第二光纤偏振分束器（16）、第一光电探测器（17）、第二光电探测器（18）、第三光纤偏振分束器（19）、第三光电探测器（20）、第四光电探测器（21）、反馈控制系统（22）、数据采集卡（23）。

具体实施方式

下面结合附图对本发明进一步说明。

如图1所示，具体实施的仪器包括窄线宽半导体光纤激光器1、第一光纤偏振控制器2、第一光纤偏振分束器3、第一光纤环形器4、第二光纤偏振控制器5、干涉仪6、波分复用器7、指示激光器8、光纤准直器9、双轴扫描振镜10、光汇聚收集器12、准直透镜13、第二光纤环形器14和第三光纤偏振控制器15；窄线宽半导体光纤激光器1输出端经第一光纤偏振控制器2和第一光纤偏振分束器3的输入端连接，第一光纤偏振分束器3的一个输出端和第一光纤环形器4的第一端口连接，第一光纤环形器4的第二端口经第二光纤偏振控制器5后和干涉仪6的一端连接；第一光纤偏振分束器3的另一个输出端和指示激光器8共同连接到波分复用器7的两个输入端，波分复用器7的输出端和光纤准直器9连接，光纤准直器9输出准直光束经双轴扫描振镜10照射到待测试样11上，待测试样11上方设有光汇聚收集器12，光汇聚收集器12接收来自待测试样11的散射光后入射到准直透镜13，准直透镜13连接到第二光纤环形器14的第一端口，第二光纤环形器14的第二端口经第三光纤偏振控制器15和干涉仪6的另一端连接。

窄线宽半导体光纤激光器 1 发出连续激光, 经第一光纤偏振控制器 2 偏振处理后形成具有 p 偏振态和 s 偏振态的正交线偏振光, 经第一光纤偏振分束器 3 分束后形成 p 偏振态的线偏振光和 s 偏振态的线偏振光; 以 s 偏振态的线偏振光作为参考光, 参考光经第一光纤环形器 4 入射到第二光纤偏振控制器 5 中, 经第二光纤偏振控制器 5 偏振处理后输入到干涉仪 6 中; 以 p 偏振态的线偏振光作为探测光, 探测光和指示激光器 8 输出的可见光一起经波分复用器 7 复用后输入到光纤准直器 9, 光纤准直器 9 开始输出空间自由光, 空间自由光经双轴扫描振镜 10 照射到待测试样 11 上, 待测试样 11 照射到的区域会把超声振动信息调制到检测激光中, 由待测试样 11 表面散射产生超声振动调制的散射光, 散射光经光汇聚收集器 12 收集汇聚后入射到准直透镜 13, 经准直透镜 13 后变成信号光, 信号光经第二光纤环形器 14 入射到第三光纤偏振控制器 15 中, 经第三光纤偏振控制器 15 偏振处理后输入到干涉仪 6 中; 参考光和信号光在干涉仪 6 中均发生了反射和透射, 产生了经干涉仪 6 透射后的信号光和参考光、经干涉仪 6 反射后的信号光和参考光; 经干涉仪 6 透射后的信号光和经干涉仪 6 反射后的参考光合束后经第二光纤偏振控制器 5 偏振处理后入射到第一光纤环形器 4 中, 从第一光纤环形器 4 的第三端口输出; 经干涉仪 6 透射后的参考光和经干涉仪 6 反射后的信号光合束后经第三光纤偏振控制器 15 偏振处理后入射到第二光纤环形器 14 中, 从第二光纤环形器 14 的第三端口输出。

光纤偏振控制器优选为三环机械型光纤偏振控制器, 第二光纤偏振控制器 5 和第三光纤偏振控制器 15 的偏振为四分之一波长, 第一光纤偏振控制器 2 将线偏振光的偏振状态变成椭圆偏振态, p 偏振态光和 s 偏振态光比例为 90: 10。

具体地, 原始的参考光经过两次第二光纤偏振控制器 5 的四分之一波片偏振处理形成干涉仪透射和反射的参考光, 由 s 态偏振变成 p 态偏振。

具体地, 原始的信号光经过两次第三光纤偏振控制器 15 的四分之一波片偏振处理形成干涉仪透射和反射的信号光, 由 p 态偏振变成 s 态偏振。

还包括第二光纤偏振分束器 16 和第三光纤偏振分束器 19; 第二光纤偏振分束器 16 的输入端连接到第一光纤环形器 4 的第三端口, 第二光纤偏振分束器 16 的两个输出端分别连接一个光电探测器; 第三光纤偏振分束器 19 的输入端连接到第二光纤环形器 14 的第三端口, 第三光纤偏振分束器 19 的两个输出端也分别连接一个光电探测器。

第二光纤偏振分束器 16 两个输出端连接的光电探测器分别为第一光电探测器 17 和第二光电探测器 18, 第三光纤偏振分束器 19 两个输出端连接的光电探测器分别为第三光电探测器 20 和第四光电探测器 21; 第一光电探测器 17 和第

三光电探测器 20 连接到反馈控制系统 22，第二光电探测器 18 和第四光电探测器 21 连接到数据采集卡 23。

第一光电探测器 17 从第二光纤偏振分束器 16 接收经干涉仪 6 透射后的信号光，第二光电探测器 18 从第二光纤偏振分束器 16 接收经干涉仪 6 反射后的参考光，第三光电探测器 20 从第三光纤偏振分束器 19 接收经干涉仪 6 反射后的信号光，第四光电探测器 21 从第三光纤偏振分束器 19 接收经干涉仪 6 透射后的参考光。

还包括反馈控制系统 22，反馈控制系统 22 分别连接到第二光纤偏振分束器 16 和第三光纤偏振分束器 19 的输出经干涉仪 6 反射和透射处理后的参考的光输出端口；由反馈控制系统 22 接收经干涉仪 6 反射/透射处理后的参考光后进行处理并反馈到干涉仪 6，实时调整干涉仪 6 的检测灵敏度，达到最优灵敏度。

还包括数据采集卡 23，数据采集卡 23 分别连接到第二光纤偏振分束器 16 和第三光纤偏振分束器 19 的输出经干涉仪 6 反射和透射处理后的信号光的输出端口，由数据采集卡 23 采集接收经干涉仪 6 反射和透射处理后的信号光作为激光超声信号，后进行针对待测试样 11 表面质量的检测识别处理。

待测试样 11 中的超声由脉冲激光器产生，亦即一个激光脉冲照射到待测试样表面产生热膨胀应力，从而激发出超声波。

由于环境温度和超声振动会影响光束中的参数，使得光束和干涉仪 6 中的透射/反射曲线之间的匹配关系存在误差，干涉仪 6 对光束的干涉作用效果变差。通过调整干涉仪 6 的腔长，进而调整干涉仪 6 的透射/反射曲线，进而调整干涉仪 6 工作固定频率对应的幅值和斜率，进而调整灵敏度。

透射/反射曲线的横坐标是频率，纵坐标是光强透射系数，表明光强变化响应，响应幅值越大则解调效果越好。

在环境温度局部降低或者超声振动频率局部减小的情况下，干涉仪 6 的透射/反射曲线向左移动，干涉仪 6 的工作固定频率对应的幅值增大，斜率增加，使得灵敏度升高。优先地通过调整干涉仪 6 的腔长，使得工作固定频率对应的幅值位于最大幅值的一半，即使得斜率最大，使得灵敏度最高。

根据经干涉仪 6 反射/透射处理后的参考光其中之一的参考光进行反馈即可。

具体实施中，干涉仪 6 包括一对反射镜，其中至少一个反射镜是可移动的，两个反射镜之间的距离确定干涉仪腔长。

窄线宽半导体光纤激光器 1 用于生成并提供激光超声检测光源，输出波长为 1550nm，功率为 100mW 的连续激光。

第一光纤偏振控制器 2，用于改变连续激光的偏振态；

第一光纤偏振分束器 3, 用于将光纤中含有的正交线偏振光分为参考光和探测光; 具体实施的第一光纤偏振分束器 3 为 1×2 分束比, 工作波长为 1550nm, 探测光和参考光分光比为 90。

指示激光器 8 用于输出 650nm 可见光, 标识探测光位置。

波分复用器 7, 用于将探测光和指示激光器 8 的输出光汇合在一起, 并耦合到同一根光纤中进行传输; 工作波长为 650/1550nm。

光纤准直器 9, 用于将光纤内的传输光变成准直光;

双轴扫描振镜 10, 用于将探测光束引导至待测试样 11 表面不同位置检测激光超声信号;

光汇聚收集器 12 将从待测试样 11 散射出的光汇聚收集后经准直透镜 13 耦合至光纤形成信号光, 并经第二光纤环形器 14 和第三光纤偏振控制器 15 后从另一端输入到干涉仪 6;

信号光在干涉仪 6 内的传播方向与参考光相反。

第二光纤偏振分束器 16 接收从第一环形器输出的光束, 分别由干涉仪透射的信号光和干涉仪反射的参考光而来, 其第一输出口为干涉仪透射的信号光, 经第一光电探测器 17 转换为第一超声信号, 第二输出口为干涉仪反射的参考光, 经第二光电探测器 18 转换为第一反馈控制信号。

第三光纤偏振分束器 19 接收从第二环形器输出的光束, 分别由干涉仪反射的信号光和干涉仪透射的参考光而来, 其第一输出口为干涉仪反射的信号光, 经第三光电探测器 20 转换为第二超声信号, 第二输出口为干涉仪透射的参考光, 经第四光电探测器 21 转换为第二反馈控制信号。

准直器实现激光在光纤与自由空间的耦合, 光纤准直器 9 将探测光和指示光从光纤耦合至自由空间, 准直透镜 13 则将散射信号光耦合至光纤。

光电探测器 17、20 将信号光转换后输出超声信号, 光电探测器 18、21 将参考光转换后输出反馈控制信号。

反馈控制系统 22 接收第一和第二反馈控制信号, 并根据其中一个实现干涉仪腔长实时调节, 基于反馈控制信号实时调制干涉仪腔长使其稳定在最佳检测性能。

数据采集卡 23 存储第一和第二超声信号并进行后处理用于待测试样的超声波测量, 实施存储和处理超声信号, 实现待测试样的超声测量。数据采集卡 23 用于实现待测试样厚度测量、缺陷成像与材料定征等功能。

双轴扫描振镜 10 输出探测光, 在 X 和 Y 方向上可偏转扫描, 引导探测光以斜入射至待测试样 11 的任意检测位置。

具体实施中，光路分光产生参考光和检测光，将探测光入射到待测试样 11 的目标对象上调制超声振动，汇聚收集待测试样 11 散射出的散射光，经光电转换后耦合至光纤获得超声振动调制的信号光，通过不同光纤环形器和偏振控制器将信号光和参考光输入干涉仪 11，在干涉仪 11 内腔内经干涉输出，干涉输出的参考光经光电探测器生成反馈控制信号进而用于调整干涉仪的腔长，进而反馈调节优化干涉仪的检测灵敏度性能，干涉输出的信号光输出经光电探测器生成超声信号实现待测试样 11 的超声测量。待测试样 11 的超声波测量，如测厚、缺陷成像与材料特性参数定征等。

测量过程中，采用以下方式进行信号补偿：将双轴扫描振镜 10 不同位置扫描采集的激光超声信号合成为一个合路信号，将合路信号经希尔伯特变换后，再做包络处理得到表面波包络信号，取表面波包络信号中具有最大幅值的信号作为基准信号，根据基准信号分别对各个表面波包络信号进行归一化处理。归一化后试样表面质量不佳处的信号强度和信噪比得到提高，再将处理后的合路信号进行成像，在同一幅图上质量不佳处也能够清楚显现，实现对试样表面的高灵敏度测量。

本发明结构紧凑，便携性强，维护调整方便。

图 2 为本发明激光超声测量系统的工作流程图。

在步骤 1 中，窄线宽半导体光纤激光器输出光经偏振控制器和偏振分束器分光产生探测光和参考光。

在步骤 2 中，探测光经波分复用器和双轴扫描振镜照射至待测试样，同时指示激光用于标识探测光照射位置。

在步骤 3 中，超声振动调制的散射光汇聚收集作为信号光输入。

在步骤 4 中，信号光和参考光分别从干涉仪两端以相反传播方向输入到干涉仪。

在步骤 5 中，经干涉仪解调的透射/反射的参考光生成反馈控制信号，用于调整干涉仪的腔长稳定工作在最佳检测灵敏度性能。

在步骤 6 中，经干涉仪解调的透射/反射的信号光生成超声波信号。

在步骤 7 中，利用接收到超声波信号实现待测试样测量。

在步骤 8 中，输出待测试样超声波测量结果，譬如厚度、缺陷、材料特性等。

图 3 为本发明干涉仪最佳检测灵敏度控制流程图，其工作过程主要是：

扫描干涉仪腔长得到干涉仪透射/反射曲线。

根据透射/反射曲线选取斜率最大点对应的干涉仪腔长为稳定工作点。

调整干涉仪腔长至最佳工作点。

基于干涉仪透射/反射参考光生成的反馈控制信号调整腔长，如果幅值大于设定值，则减少 PZT 驱动电压，反之则增大 PZT 驱动电压，直至稳定在最佳工作点。

通过调整 PZT 驱动电压用于调节干涉仪的腔长，若减少 PZT 驱动电压则减小干涉仪的腔长。

同时在调整过程中判断干涉仪腔长是否超出了调节范围，如果是的话则需初始化重新开始。

本发明环境适应性强，基于参考光可以实时自适应补偿工业现场环境变化和干涉仪本身变形等引起的激光频率漂移和干涉仪腔长变化，使干涉仪持续稳定维持在最佳工作状态，满足高温、振动等工业现场应用需求。

如图 4 所示，本发明针对信号的测量还进行基于归一化的激光超声信号自动补偿，处理过程如下：

第一步，通过双轴扫描振镜逐点扫描获取不同位置的激光超声信号并保存在数据采集系统中；

第二步，将激光超声信号经希尔伯特变换后分别做包络处理；

第三步，取具有最大幅值表面波的激光超声信号为基准信号，并分别通过表面波实现归一化处理。

本发明检测灵敏度高，可以自适应补偿待测试样表面质量不佳导致的激光超声信号微弱和信噪比低问题。

对于熟悉本领域的研究人员而言，本发明中的一个或多个器件可以用更加分立或者集成的方式，甚至可以在某些具体应用场景下适当移除或者增添光学器件。

以上所述仅为本发明的一个较佳实施例，并不用以限制本发明，凡在本发明的精神和原则之内所做的近似修改、等同替换和改进等，均应包含在本发明的保护范围之内。

权 利 要 求 书

1、一种自适应全光纤激光超声测量仪，其特征在于：

包括窄线宽半导体光纤激光器（1）、第一光纤偏振控制器（2）、第一光纤偏振分束器（3）、第一光纤环形器（4）、第二光纤偏振控制器（5）、干涉仪（6）、波分复用器（7）、指示激光器（8）、光纤准直器（9）、双轴扫描振镜（10）、光汇聚收集器（12）、准直透镜（13）、第二光纤环形器（14）和第三光纤偏振控制器（15）；

窄线宽半导体光纤激光器（1）输出端经第一光纤偏振控制器（2）和第一光纤偏振分束器（3）的输入端连接，第一光纤偏振分束器（3）的一个输出端和第一光纤环形器（4）的第一端口连接，第一光纤环形器（4）的第二端口经第二光纤偏振控制器（5）后和干涉仪（6）的一端连接；第一光纤偏振分束器（3）的另一个输出端和指示激光器（8）共同连接到波分复用器（7）的两个输入端，波分复用器（7）的输出端和光纤准直器（9）连接，光纤准直器（9）输出准直光束经双轴扫描振镜（10）照射到待测试样（11）上，待测试样（11）上方设有光汇聚收集器（12），光汇聚收集器（12）接收来自待测试样（11）的散射光后入射到准直透镜（13），准直透镜（13）连接到第二光纤环形器（14）的第一端口，第二光纤环形器（14）的第二端口经第三光纤偏振控制器（15）和干涉仪（6）的另一端连接。

2、根据权利要求1所述的一种自适应全光纤激光超声测量仪，其特征在于：

窄线宽半导体光纤激光器（1）发出连续激光，经第一光纤偏振控制器（2）偏振处理后形成具有 p 偏振态和 s 偏振态的正交线偏振光，经第一光纤偏振分束器（3）分束后形成 p 偏振态的线偏振光和 s 偏振态的线偏振光；

以 s 偏振态的线偏振光作为参考光，参考光经第一光纤环形器（4）入射到第二光纤偏振控制器（5）中，经第二光纤偏振控制器（5）偏振处理后输入到干涉仪（6）中；

以 p 偏振态的线偏振光作为探测光，探测光和指示激光器（8）输出的可见光一起经波分复用器（7）复用后输入到光纤准直器（9），光纤准直器（9）输出空间自由光，空间自由光经双轴扫描振镜（10）照射到的待测试样（11）上产生超声振动，由待测试样（11）表面散射产生超声振动调制的散射光，散射光经光汇聚收集器（12）收集汇聚后入射到准直透镜（13），经准直透镜（13）后变成信号光，信号光经第二光纤环形器（14）入射到第三光纤偏振控制器（15）中，经第三光纤偏振控制器（15）偏振处理后输入到干涉仪（6）中；

参考光和信号光在干涉仪（6）中均发生了反射和透射；

经干涉仪（6）透射后的信号光和经干涉仪（6）反射后的参考光合束后经第二光纤偏振控制器（5）入射到第一光纤环形器（4）中，从第一光纤环形器（4）的第三端口输出；

经干涉仪（6）透射后的参考光和经干涉仪（6）反射后的信号光合束后经第三光纤偏振控制器（15）入射到第二光纤环形器（14）中，从第二光纤环形器（14）的第三端口输出。

3、根据权利要求1所述的一种自适应全光纤激光超声测量仪，其特征在于：

所述光纤偏振控制器为三环机械型光纤偏振控制器，第二光纤偏振控制器（5）和第三光纤偏振控制器（15）的偏振为四分之一波长，第一光纤偏振控制器（2）将线偏振光的偏振状态变成椭圆偏振态，p 偏振态光和 s 偏振态光比例为 90：10。

4、根据权利要求1所述的一种自适应全光纤激光超声测量仪，其特征在于：

还包括第二光纤偏振分束器（16）和第三光纤偏振分束器（19）；第二光纤偏振分束器（16）的输入端连接到第一光纤环形器（4）的第三端口，第二光纤偏振分束器（16）的两个输出端分别连接一个光电探测器；第三光纤偏振分束器（19）的输入端连接到第二光纤环形器（14）的第三端口，第三光纤偏振分束器（19）的两个输出端也分别连接一个光电探测器。

5、根据权利要求1所述的一种自适应全光纤激光超声测量仪，其特征在于：

还包括反馈控制系统（22），反馈控制系统（22）分别连接到第二光纤偏振分束器（16）和第三光纤偏振分束器（19）的输出经干涉仪（6）反射和透射处理后的参考的光输出端口；由反馈控制系统（22）接收经干涉仪（6）反射/透射处理后的参考光后进行处理并反馈到干涉仪（6），实时调整干涉仪（6）的检测灵敏度。

6、根据权利要求1所述的一种自适应全光纤激光超声测量仪，其特征在于：

还包括数据采集卡（23），数据采集卡（23）分别连接到第二光纤偏振分束器（16）和第三光纤偏振分束器（19）的输出经干涉仪（6）反射和透射处理后的信号光的输出端口，由数据采集卡（23）采集接收经干涉仪（6）反射和透射处理后的信号光作为激光超声信号，后进行针对待测试样（11）表面质量的检测识别处理。

7、根据权利要求1所述的一种自适应全光纤激光超声测量仪，其特征在于：

通过调整干涉仪（6）的腔长，进而调整干涉仪（6）的透射/反射曲线，进而调整干涉仪（6）工作固定频率对应的幅值和斜率，进而调整灵敏度。

8、应用于权利要求 1-7 任一所述的一种自适应全光纤激光超声测量仪的测量方法，其特征在于：

分光产生参考光和检测光，将探测光入射到的待测试样（11）的目标对象上调制超声振动，汇聚收集待测试样（11）散射出的散射光，经光电转换后耦合至光纤获得超声振动调制的信号光，通过光纤环形器和偏振控制器将信号光和参考光输入干涉仪（11），在干涉仪（11）内腔内经干涉输出，干涉输出的参考光经光电探测器生成反馈控制信号进而用于调整干涉仪的腔长，进而反馈调节优化干涉仪的检测灵敏度性能，干涉输出的信号光输出经光电探测器生成超声信号实现待测试样（11）的超声测量。

9、根据权利要求 8 所述的一种自适应全光纤激光超声测量仪的测量方法，其特征在于：

测量过程中，采用以下方式进行信号补偿：将双轴扫描振镜（10）不同位置扫描采集的激光超声信号合成为一个合路信号，将合路信号经希尔伯特变换后，再做包络处理得到表面波包络信号，取表面波包络信号中具有最大幅值的信号作为基准信号，根据基准信号分别对各个表面波包络信号进行归一化处理。

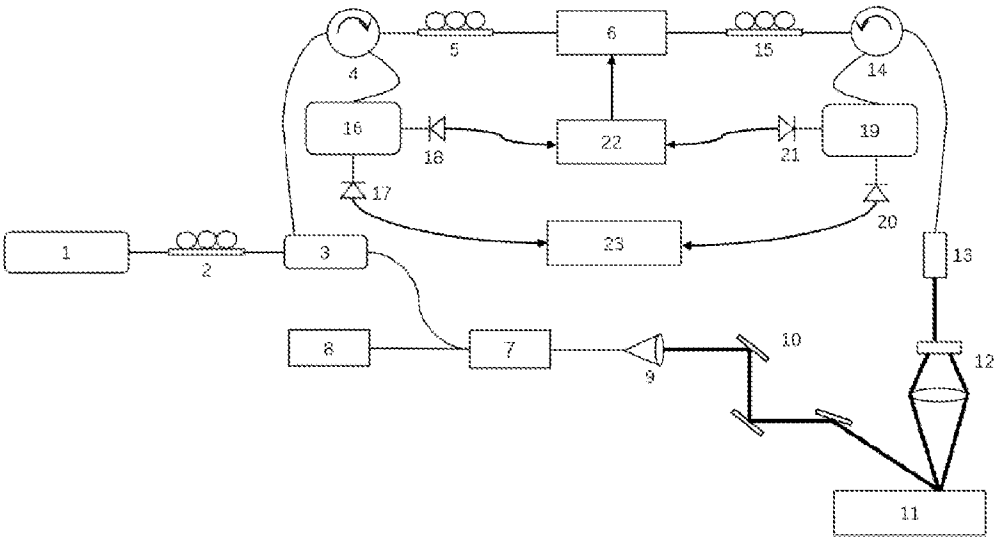


图 1

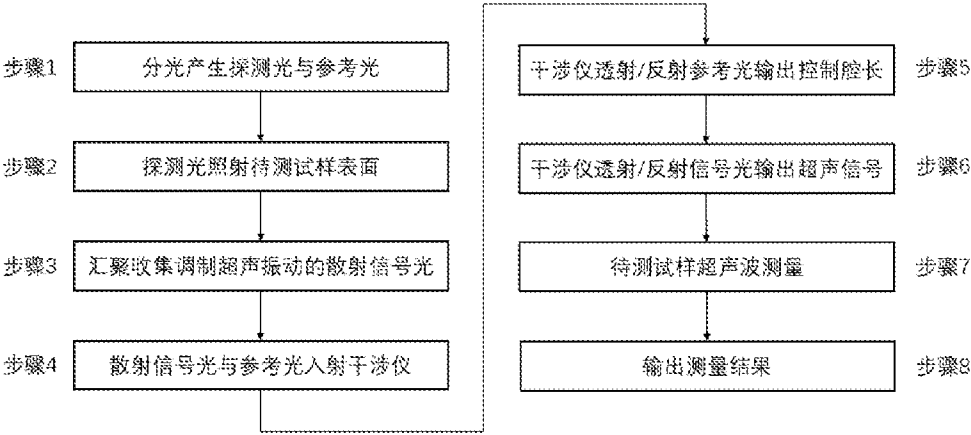


图 2

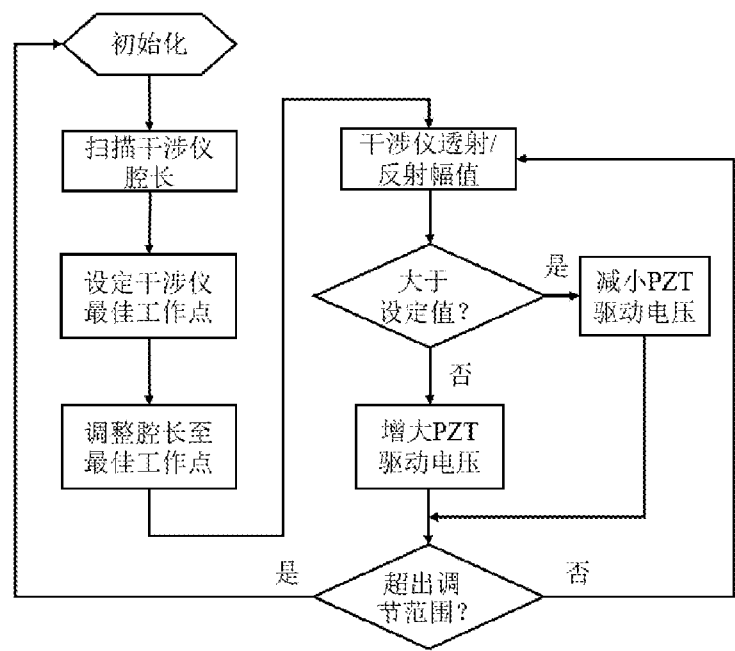


图 3

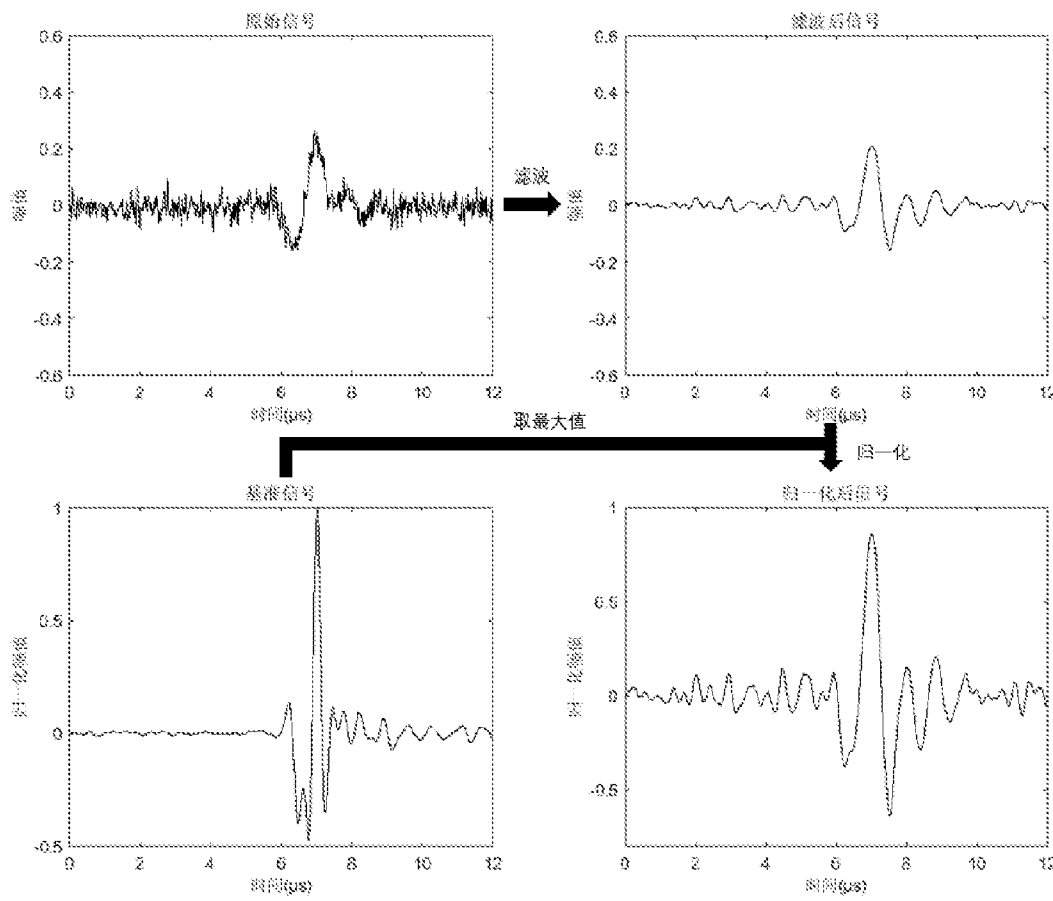


图 4

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2022/109944

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G01N 21/17(2006.01)i; G01N 21/01(2006.01)i; G01N 29/04(2006.01)i; G01B 17/02(2006.01)i; G02B 27/28(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G01N21/-,G01N29/-,G01B17/-,G02B27/-

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNTXT; CNABS; OETXT; WPABS; ENTXT; DWPI; VEN: 浙江大学, 激光, 超声, 偏振, 干涉仪, 参考光, 散射, 腔长, 反馈, 控制, 信号光, 补偿, 适应, laser, ultrason+, polariz+, interferometer, reference light, scatter+, feedback, control, signal light, compensat+, adapt+,

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
PX	CN 114813576 A (ZHEJIANG UNIVERSITY) 29 July 2022 (2022-07-29) entire document	1-9
Y	CN 204101015 U (LASER INSTITUTE, SHANDONG ACADEMY OF SCIENCES) 14 January 2015 (2015-01-14) description, paragraphs 22-24, and figure 1	1, 3
Y	CN 105865751 A (SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY) 17 August 2016 (2016-08-17) description, paragraphs 32-55, and figures 2-3	1, 3
Y	CN 114324177 A (ZHEJIANG UNIVERSITY WENZHOU INSTITUTE OF RESEARCH; ZHEJIANG UNIVERSITY) 12 April 2022 (2022-04-12) description, paragraphs 33-52, and figures 1-3	1, 3
A	CN 203745385 U (YAN XIAOLEI) 30 July 2014 (2014-07-30) entire document	1-9
A	CN 108507981 A (NANJING UNIVERSITY) 07 September 2018 (2018-09-07) entire document	1-9



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date

“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

“&” document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

15 January 2023

Date of mailing of the international search report

20 January 2023

Name and mailing address of the ISA/CN

China National Intellectual Property Administration (ISA/
CN)
No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao, Haidian District, Beijing
100088, China

Facsimile No. (86-10)62019451

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2022/109944**C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT**

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	WO 2022029867 A1 (NIPPON TELEGRAPH & TELEPHONE CORP.) 10 February 2022 (2022-02-10) entire document	1-9
A	JP 2016090280 A (NIPPON TELEGRAPH & TELEPHONE CORP.) 23 May 2016 (2016-05-23) entire document	1-9
A	US 2018080906 A1 (HITACHI LTD.) 22 March 2018 (2018-03-22) entire document	1-9

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2022/109944

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)		Publication date (day/month/year)
CN	114813576	A	29 July 2022	None		
CN	204101015	U	14 January 2015	None		
CN	105865751	A	17 August 2016	None		
CN	114324177	A	12 April 2022	None		
CN	203745385	U	30 July 2014	None		
CN	108507981	A	07 September 2018	None		
WO	2022029867	A1	10 February 2022	None		
JP	2016090280	A	23 May 2016	None		
US	2018080906	A1	22 March 2018	JP	2018048899	A 29 March 2018

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2022/109944

A. 主题的分类 G01N 21/17(2006.01)i; G01N 21/01(2006.01)i; G01N 29/04(2006.01)i; G01B 17/02(2006.01)i; G02B 27/28(2006.01)i 按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和IPC两种分类				
B. 检索领域 检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号) G01N21/-, G01N29/-, G01B17/-, G02B27/- 包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献 在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称, 和使用的检索词(如使用)) CNTXT;CNABS;OETXT;WPABS;ENTXT;DWPI;VEN:浙江大学, 激光, 超声, 偏振, 干涉仪, 参考光, 散射, 腔长, 反馈, 控制, 信号光, 补偿, 适应, laser, ultrason+, polariz+, interferometer, reference light, scatter+, feedback, control, signal light, compensat+, adapt+,				
C. 相关文件				
类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求		
PX	CN 114813576 A (浙江大学) 2022年7月29日 (2022 - 07 - 29) 全文	1-9		
Y	CN 204101015 U (山东省科学院激光研究所) 2015年1月14日 (2015 - 01 - 14) 说明书第22-24段, 图1	1, 3		
Y	CN 105865751 A (上海交通大学) 2016年8月17日 (2016 - 08 - 17) 说明书第32-55段, 图2-3	1, 3		
Y	CN 114324177 A (浙江大学温州研究院 浙江大学) 2022年4月12日 (2022 - 04 - 12) 说明书第33-52段, 图1-3	1, 3		
A	CN 203745385 U (闫晓磊) 2014年7月30日 (2014 - 07 - 30) 全文	1-9		
A	CN 108507981 A (南京大学) 2018年9月7日 (2018 - 09 - 07) 全文	1-9		
A	WO 2022029867 A1 (NIPPON TELEGRAPH & TELEPHONE) 2022年2月10日 (2022 - 02 - 10) 全文	1-9		
☒ 其余文件在C栏的续页中列出。 ☒ 见同族专利附件。				
<table><tr><td>* 引用文件的具体类型: “A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件 “E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利 “L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件(如具体说明的) “O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件 “P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件</td><td>“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件 “X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性 “Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性 “&” 同族专利的文件</td></tr></table>			* 引用文件的具体类型: “A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件 “E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利 “L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件(如具体说明的) “O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件 “P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件	“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件 “X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性 “Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性 “&” 同族专利的文件
* 引用文件的具体类型: “A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件 “E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利 “L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件(如具体说明的) “O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件 “P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件	“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件 “X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性 “Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性 “&” 同族专利的文件			
国际检索实际完成的日期 2023年1月15日		国际检索报告邮寄日期 2023年1月20日		
ISA/CN的名称和邮寄地址 中国国家知识产权局(ISA/CN) 中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088 传真号 (86-10)62019451		受权官员 李晓娜 电话号码 62084133		

C. 相关文件		
类 型*	引用文件，必要时，指明相关段落	相关的权利要求
A	JP 2016090280 A (NIPPON TELEGRAPH & TELEPHONE) 2016年5月23日 (2016 - 05 - 23) 全文	1-9
A	US 2018080906 A1 (HITACHI LTD) 2018年3月22日 (2018 - 03 - 22) 全文	1-9

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2022/109944

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利	公布日 (年/月/日)
CN	114813576	A	2022年7月29日	无	
CN	204101015	U	2015年1月14日	无	
CN	105865751	A	2016年8月17日	无	
CN	114324177	A	2022年4月12日	无	
CN	203745385	U	2014年7月30日	无	
CN	108507981	A	2018年9月7日	无	
WO	2022029867	A1	2022年2月10日	无	
JP	2016090280	A	2016年5月23日	无	
US	2018080906	A1	2018年3月22日	JP 2018048899	A 2018年3月29日