

(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
2022 年 3 月 3 日 (03.03.2022)



(10) 国际公布号
WO 2022/041701 A1

- (51) 国际专利分类号:
G01R 33/032 (2006.01) **A61B 5/00** (2006.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2021/081967
- (22) 国际申请日: 2021 年 3 月 22 日 (22.03.2021)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (30) 优先权:
202010856052.4 2020 年 8 月 24 日 (24.08.2020) CN
- (71) 申请人: 清华大学 (TSINGHUA UNIVERSITY)
[CN/CN]; 中国北京市海淀区清华园,
Beijing 100084 (CN)。
- (72) 发明人: 冯焱颖 (FENG, Yanying); 中国北京市海淀区清华园, Beijing 100084 (CN)。 李晓杰 (LI, Xiaojie); 中国北京市海淀区清华园, Beijing 100084 (CN)。
- (74) 代理人: 北京华进京联知识产权代理有限公司 (ACIP LAW OFFICES); 中国北京市海淀区知春路 7 号致真大厦 A1403, Beijing 100191 (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, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, IT, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX,

(54) Title: ATOMIC MAGNETOMETER AND MAGNETIC FIELD IMAGING SYSTEM

(54) 发明名称: 原子磁强计及磁场成像系统

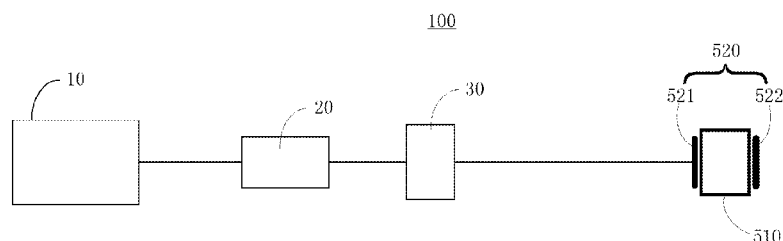


图 1

(57) Abstract: An atomic magnetometer (100) and a magnetic field imaging system (200). A first wavelength laser and a second wavelength laser are formed by a laser light source (10) and a frequency multiplication module (20). The optical power of the first wavelength laser is adjusted by means of an optical attenuation module (30), so as to achieve non-magnetic optical heating of an atomic gas chamber (510), and the attenuation amount is adjusted for temperature control. The second wavelength laser enters the atomic gas chamber (510), so as to achieve magnetic field detection. Thus, the atomic magnetometer (100) can achieve non-magnetic heating and atomic pump detection without coupling of a heating laser and a pump laser, thereby reducing the complexity of an optical path. The laser light source (10) in the magnetic field imaging system (200) is connected to a plurality of atomic magnetometer probes (206). By means of position information of a plurality of atomic magnetometer probes (206) and detected magnetic field information, the magnetic field position can be accurately positioned, so as to achieve multi-dimensional magnetic field space reconstruction.

(57) 摘要: 一种原子磁强计 (100) 及磁场成像系统 (200)。通过一个激光光源 (10) 与倍频模块 (20) 形成第一波长激光与第二波长激光。通过光衰减模块 (30) 调节第一波长激光的光功率, 实现原子气室 (510) 的无磁光加热, 并调节衰减量进行温度控制。通过第二波长激光进入原子气室 (510), 以实现磁场探测。从而, 原子磁强计 (100) 不需要进行加热激光和泵浦激光的耦合, 就可以实现无磁加热和原子泵浦检测, 降低了光路复杂程度。磁场成像系统 (200) 中一个激光光源 (10) 与多个原子磁强计探头 (206) 连接。通过多个原子磁强计探头 (206) 的位置信息和探测到磁场信息, 可以实现对磁场位置的准确定位, 以实现多维磁场空间重构。

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, 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))。

原子磁强计及磁场成像系统

相关申请

本申请要求 2020 年 08 月 24 日申请的，申请号为 202010856052.4，名称为“原子磁强计及磁场成像系统”的中国专利申请的优先权，在此将其全文引入作为参考。

技术领域

本申请涉及精密测量设备技术领域，特别是涉及一种原子磁强计及磁场成像系统。

背景技术

原子磁强计是一种精密测量微弱磁场的传感器。因为原子磁强计工作条件不要求超低温环境，并具有极高的磁测灵敏度，因此在弱磁探测领域，逐渐成为可与超导量子干涉器件相媲美的极弱磁探测方式。原子磁强计在系统体积、与被测体间距、功耗等方面具有优势，可以在心脑磁成像领域，心脑神经电流引起的极弱磁场探测对于冠心病、癫痫等疾病的检测，新生儿心脑健康的评估等具有重要的应用价值。

原子磁强计的工作模式很多，其基本原理是通过光与原子的相互作用，利用光来制备极化的碱金属原子和检测原子电子自旋在外加磁场作用下的拉莫尔（Lamor）进动，从而实现磁场的传感。为了使得原子磁强计达到灵敏度，一般原子磁强计工作在无自旋交换弛豫（Spin-exchange-relaxation-free, SERF）条件下。此时，碱金属原子的气室要加热到一定的高温状态以提升气室中碱金属原子数密度，并使环境磁场降低到接近零磁场，最终 Larmor 进动频率远小于自旋交换弛豫，自旋交换弛豫得到有效抑制。因此，原子磁强计一方面需要较高温度的加热，同时又要保证加热过程不会产生过大的磁噪声而降低磁强计的灵敏度。

然而，传统原子磁强计的加热方式主要包括热气流加热和电加热方式。热气流加热需要外加气流源，气流源会产生一定的热气流波动而影响系统稳定性。电加热方式不可避免地由于加热电流和金属材料的剩磁会引入一定的磁场噪声。因此，传统原子磁强计的加热方式仍然会引入干扰因素，对磁场产生干扰，导致原子磁强计的检测精度偏低。

申请内容

有鉴于此，本申请公开一种原子磁强计及磁场成像系统。

本申请提供一种原子磁强计。所述原子磁强计包括激光光源、倍频模块、原子气室以及光吸收模块。所述激光光源用于发出第一波长激光。所述倍频模块设置于所述第一波长激光的光路上，用于将部分所述第一波长激光转换为第二波长激光。所述原子气室设置于所述第一波长激光的光路上。所述光吸收模块设置于所述第一波长激光的光路上。且所述光吸收模块设置于所述原子气室表面，用于吸收所述第一波长激光，并转换为热能对所述原子气室进行加热。所述第二波长激光用于进入所述原子气室，并与所述原子气室中原子气体发生相互作用，用以实现磁场信号的探测。

上述原子磁强计及磁场成像系统，经过所述倍频模块倍频后，一部分激光被倍频，形成波长为原先波长一半的倍频激光。另一部分激光保持原先的波长，两部分激光在同一个光路进行传输。即，所述第一波长激光的波长为所述第二波长激光的波长的两倍。并且，所述第一波长激光与所述第二波长激光共用同一条光路进行传输。通过所述倍频模块，使得原始的所述第一波长激光的波长倍频，形成所述第二波长激光。此时，经过所述倍频模块倍频后形成的所述第二波长激光对应了敏感气体能级的共振跃迁谱线。

所述原子气室表面设置有所述光吸收模块，对所述第一波长激光具有强吸收。可以理解为，所述光吸收模块对特定波长的激光进行吸收。所述第一波长激光通过所述光吸收模块后会被强烈吸收，转化为热量用于加热所述原子气室。

所述第二波长激光进入所述原子气室的气室内，并与气室中的敏感气体原子发生相互作用后，输出光通过聚焦透镜照射到光电探测模块进行探测，用以实现对磁场信号的探测。当磁场变化时，光电探测模块探测到的光功率会发生变化，从而获得磁场测量的信号。

因此，通过一个固定波长的所述激光光源与所述倍频模块可以实现将激光倍频，并输出所述第一波长激光（原波长激光）与所述第二波长激光（倍频后波长激光）。所述第一波长激光（原波长激光）用于对所述原子气室进行加热。所述第二波长激光（倍频后波长激光）用于进入所述原子气室，实现原子磁强计的泵浦和探测。

从而，本申请所述原子磁强计通过一个所述激光光源与一个所述倍频模块可以实现光加热和光泵浦检测的需求。相比于传统原子磁强计，所述原子磁强计不会引入干扰原子气室周围磁场的电学部分，避免了磁场噪声的引入。同时，所述原子磁强计结构简单，减少了器件个数的使用，有利于降低成本。并且，所述原子磁强计中所述第一波长激光与所述第二波长激光共路，降低了光学系统复杂程度，便于系统集成化。

附图说明

为了更清楚地说明本申请实施例或现有技术中的技术方案，下面将对实施例或现有技

术描述中所需要使用的附图作简单地介绍，显而易见地，下面描述中的附图仅仅是本申请的实施例，对于本领域普通技术人员来讲，在不付出创造性劳动的前提下，还可以根据公开的附图获得其他的附图。

图 1 为本申请提供的一实施例中原子磁强计的结构示意图。

图 2 为本申请提供的一实施例中原子磁强计的结构示意图。

图 3 为本申请提供的一实施例中原子气室的物理封装结构示意图。

图 4 为本申请提供的一实施例中原子磁强计的结构示意图。

图 5 为本申请提供的一实施例中磁场控制锁相放大模块与磁场调制线圈的连接结构示意图。

图 6 为本申请提供的一实施例中原子磁强计的结构示意图。

图 7 为本申请提供的一实施例中原子磁强计的结构示意图。

图 8 为本申请提供的一实施例中原子气室的物理封装结构示意图。

图 9 为本申请提供的一实施例中磁场成像系统的结构示意图。

图 10 为本申请提供的一实施例中磁场成像系统中位置测量控制阵列与原子磁强计探头的结构示意图。

具体实施方式

下面将结合本申请实施例中的附图，对本申请实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述，显然，所描述的实施例仅仅是本申请一部分实施例，而不是全部的实施例。基于本申请中的实施例，本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例，都属于本申请保护的范围。

为了使本申请的目的、技术方案及优点更加清楚明白，以下通过实施例，并结合附图，对本申请进行进一步详细说明。应当理解，此处所描述的具体实施例仅用以解释本申请，并不用于限定本申请。

请参阅图 1，本申请提供一种原子磁强计 100。所述原子磁强计 100 包括激光光源 10、倍频模块 20、原子气室 510 以及光吸收模块 520。所述激光光源 10 用于发出第一波长激光。所述倍频模块 20 设置于所述第一波长激光的光路上，用于将部分所述第一波长激光转换为第二波长激光。所述原子气室 510 设置于所述第一波长激光的光路上。所述光吸收模块 520 设置于所述第一波长激光的光路上。且所述光吸收模块 520 设置于所述原子气室 510 表面，用于吸收所述第一波长激光，并转换为热能对所述原子气室 510 进行加热。所述第二波长激光用于进入所述原子气室 510，并与所述原子气室 510 中原子气体发生相互

作用，用以实现磁场信号的探测。

本实施例中，经过所述倍频模块 20 倍频后，一部分激光被倍频，形成波长为原先波长一半的倍频激光。另一部分激光保持原先的波长，两部分激光在同一个光路进行传输。即，所述第一波长激光的波长为所述第二波长激光的波长的两倍。并且，所述第一波长激光与所述第二波长激光共用同一条光路进行传输。

所述原子气室 510 中包含有敏感气体（如碱金属原子）和缓冲气体（如氮气）。通过所述倍频模块 20 使得原始的所述第一波长激光（如波长为 1590 nm）的波长倍频形成所述第二波长激光（如波长为 795 nm）。此时，经过所述倍频模块 20 倍频后形成的所述第二波长激光（如波长为 795 nm）对应了敏感气体（如铷原子）能级的共振跃迁谱线。

所述原子气室 510 表面设置有所述光吸收模块 520，对所述第一波长激光具有强吸收。可以理解为，所述光吸收模块 520 对特定波长的激光进行吸收。所述第一波长激光通过所述光吸收模块 520 后会被强烈吸收，转化为热量用于加热所述原子气室 510。

所述第二波长激光进入所述原子气室 510 的气室内，并与气室中的敏感气体原子发生相互作用后，输出光通过聚焦透镜照射到光电探测模块进行探测。当磁场变化时，光电探测模块探测到的光功率会发生变化，从而获得磁场测量的信号。

因此，通过一个固定波长的所述激光光源 10 与所述倍频模块 20 可以实现将激光倍频，并输出所述第一波长激光（原波长激光）与所述第二波长激光（倍频后波长激光）。所述第一波长激光（原波长激光）用于对所述原子气室 510 进行加热。所述第二波长激光（倍频后波长激光）用于进入所述原子气室 510，实现原子磁强计的泵浦和探测。

从而，本申请所述原子磁强计 100 通过一个所述激光光源 10 与一个所述倍频模块 20 可以实现光加热和光泵浦检测的需求。相比于传统原子磁强计，所述原子磁强计 100 不会引入干扰原子气室周围磁场的电学部分，避免了磁场噪声的引入。同时，所述原子磁强计 100 结构简单，减少了器件个数的使用，有利于降低成本。并且，所述原子磁强计 100 中所述第一波长激光与所述第二波长激光共路，降低了光学系统复杂程度，便于系统集成化。

在一个实施例中，所述原子气室 510 为包含有敏感气体（如碱金属原子）和缓冲气体（如氮气）的封闭玻璃腔室或者其它有透光窗口的封闭腔室。

在一个实施例中，所述倍频模块 20 为周期性极化铌酸锂（PPLN）晶体。周期性极化铌酸锂（PPLN）晶体的通光波长范围在 0.4 μ m-5 μ m。此时，在可见光和红外波段范围内，周期性极化铌酸锂（PPLN）晶体具有较低的散射和吸收，可以较好地实现激光倍频。

在一个实施例中，所述光吸收模块 520 包括第一光吸收结构 521 与第二光吸收结构 522。所述第一光吸收结构 521 与所述第二光吸收结构 522 设置于所述原子气室 510 的两

个相对表面。所述第一波长激光依次经过所述第一光吸收结构 521、所述原子气室 510 以及所述第二光吸收结构 522。

本实施例中，通过所述第一光吸收结构 521 与所述第二光吸收结构 522 可以从所述原子气室 510 的两侧进行加热。所述第一光吸收结构 521 和所述第二光吸收结构 522 对所述第一波长激光具有强吸收。当所述第一波长激光依次经过所述第一光吸收结构 521 和所述第二光吸收结构 522 后，会依次被所述第一光吸收结构 521 和所述第二光吸收结构 522 吸收。同时，所述原子气室 510 中敏感气体与所述第二波长激光进行相互作用，所述第一波长激光不会对其产生干扰。

在一个实施例中，所述原子气室 510 的腔室外壁（远离敏感气体的表面）设置有所述第一光吸收结构 521 与所述第二光吸收结构 522。通过粘接的方式，将所述第一光吸收结构 521 与所述第二光吸收结构 522 设置于所述原子气室 510 的两侧腔室外壁上。

在一个实施例中，所述第一光吸收结构 521 与所述第二光吸收结构 522 为加热玻璃。加热玻璃粘接在所述原子气室 510 表面。加热玻璃对所述第一波长激光（1590 nm 激光）具有强吸收，而所述第二波长激光则可以较高效率地穿过加热玻璃。

在一个实施例中，所述第二光吸收结构 522 的厚度大于所述第一光吸收结构 521 的厚度。

本实施例中，所述第一波长激光依次经过所述第一光吸收结构 521、所述原子气室 510 以及所述第二光吸收结构 522。所述第二光吸收结构 522 设置于所述原子气室 510 的后侧，比所述第一光吸收结构 521 的厚度更厚，可使前后两侧的吸收加热激光效率相同，吸收的激光能量转换成热能直接对原子气室进行均匀加热。

请参阅图 2，在一个实施例中，所述原子磁强计 100 还包括光衰减模块 30、温度检测模块 530 以及温度控制模块 40。所述光衰减模块 30 设置于所述第一波长激光的光路，用于调节所述第一波长激光的功率。所述温度检测模块 530 设置于所述原子气室 510 表面，用于监测所述原子气室 510 的实时测量温度。所述温度控制模块 40 的监控端与所述温度检测模块 530 连接，用于获取所述实时测量温度。所述温度控制模块 40 的控制端与所述光衰减模块 30 连接，用于根据所述实时测量温度，对所述光衰减模块 30 进行调控以改变所述第一波长激光的功率。

本实施例中，所述光衰减模块 30 用于调节所述第一波长激光的光功率，可以理解为所述光衰减模块 30 对特定波长的激光进行衰减。通过所述光衰减模块 30 可以调节注入到所述光吸收模块 520 的所述第一波长激光的光功率，从而实现对所述原子气室 510 的温度调节。

经所述倍频模块 20 后的所述第一波长激光与所述第二波长激光，经过具有波长选择性的所述光衰减模块 30 来调节未倍频波长激光的功率。所述温度检测模块 530 可以实时监测所述原子气室 510 的温度，并将所述实时测量温度转化成电学信号传输到所述温度控制模块 40。所述温度控制模块 40 基于所述实时测量温度，与目标温度进行对比获得温度差值。同时，所述温度控制模块 40 通过 PID 控制器调控所述光衰减模块 30，以改变所述第一波长激光的功率，实现所述原子气室 510 的控温。

在一个实施例中，所述温度控制模块 40 包括反馈控制模块（图中未标出）。所述反馈控制模块用于根据所述实时测量温度与目标温度进行对比，并采用反馈控制方法调控所述光衰减模块 30，以改变所述第一波长激光的功率。所述反馈控制模块包括但不限于微控制单元（Micro controller Unit, MCU）、中央处理器（Center Processor Unit, CPU）、嵌入式微控制器（Micro Controller Unit, MCU）、嵌入式微处理器（Micro Processor Unit, MPU）、嵌入式片上系统（System on Chip, SOC）等。

在一个实施例中，所述温度控制模块 40 通过控制滤光效率线性可变的 1590 nm 滤光片（可变光衰减片）的角度。或者，所述温度控制模块 40 控制偏振分光棱镜（PBS）分光片前线性偏振光的偏振角度，以此来调控注入到所述原子气室 510 表面的所述第一波长激光的光功率（加热激光光功率），实现所述原子气室 510 的控温。

在一个实施例中，所述温度检测模块 530 可以为温度传感器，如无磁铂电阻。

在一个实施例中，所述原子磁强计 100 还包括光电探测模块 60。所述光电探测模块 60 设置于所述第二波长激光的光路上，用于接收经所述原子气室 510 后的所述第二波长激光。

本实施例中，所述第二波长激光进入所述原子气室 510 的气室内，并与气室中的敏感气体原子发生相互作用后，输出光通过聚焦透镜照射到所述光电探测模块 60 进行探测。当磁场变化时，所述光电探测模块 60 探测到的光功率会发生变化，从而获得磁场测量的信号。

请参阅图 3，在一个实施例中，所述原子磁强计 100 还包括加热腔室 540、磁场调制线圈 550 以及偏置磁场线圈 560。所述加热腔室 540 包围形成加热空间。所述光吸收模块 520、所述原子气室 510 以及所述温度检测模块 530 设置于所述加热空间。所述磁场调制线圈 550 围绕所述加热腔室 540 设置，用于对某一方向的磁场进行调制。所述偏置磁场线圈 560 围绕所述加热腔室 540 设置，用于将所述原子气室 510 在无磁信号时磁场置零。

本实施例中，所述加热腔室 540 形成热屏蔽层，保证所述加热空间的温度稳定。所述温度检测模块 530 设置于所述加热腔室 540 内，并设置于所述原子气室 510 的外侧壁上，

可以实时监测所述原子气室 510 的温度。所述磁场调制线圈 550 可以为二维磁场调制线圈，设置于所述加热腔室 540 周围，用于对某一方向的磁场进行调制。所述偏置磁场线圈 560 可以为三维偏置磁场线圈，设置于所述加热腔室 540 周围，用于补偿所述原子气室 510 中剩余磁场（如地磁）的影响，使所述原子气室 510 在无磁信号时磁场置零。

请参阅图 3、图 4 与图 5，在一个实施例中，所述磁场调制线圈 550 包括第一调制线圈 551 与第二调制线圈 552。

本实施例中，所述第一调制线圈 551 与所述第二调制线圈 552 均设置在垂直于所述第二波长激光的光路方向上，从两个方向进行调制，如图 4 所示。

在一个实施例中，所述原子磁强计 100 还包括物理封装外腔（图中未显示），选用具有低导热性的非金属材料。通过物理封装外腔将所述原子气室 510、所述加热腔室 540、所述磁场调制线圈 550 以及所述偏置磁场线圈 560 进行固定。同时，通过物理封装外腔为所述原子气室 510 提供高温工作环境，使所述原子磁强计 100 满足 SERF 工作条件。其中，所述磁场调制线圈 550 与所述偏置磁场线圈 560 固定在包含所述原子气室 510 的物理封装外腔表面。所述磁场调制线圈 550 与所述偏置磁场线圈 560 为亥姆霍兹线圈结构。

所述原子磁强计 100 需要工作在零磁场附近，所述偏置磁场线圈 560 固定在所述原子气室 510 的物理封装外腔表面，用于补偿所述原子气室 510 中剩余磁场（如地磁）的影响，使所述原子气室 510 在无磁信号时磁场置零。

此时，所述原子磁强计 100 中所述原子气室 510、所述第一光吸收结构 521（加热玻璃）、所述第二光吸收结构 522（加热玻璃）、所述温度检测模块 530（温度传感器）、所述磁场调制线圈 550（二维磁场调制线圈）以及所述偏置磁场线圈 560（三维补偿线圈）形成了敏感部件，用于实现磁场测量。

请参阅图 5，在一个实施例中，所述原子磁强计 100 还包括信号发生模块 810。所述信号发生模块 810 用于产生两路同一频率的调制信号。所述信号发生模块 810 与所述磁场调制线圈 550 连接，用于通过一路调制信号对某一方向的磁场进行调制。

本实施例中，所述信号发生模块 810 输出两路同一频率的正弦波或者方波信号，形成两路同一频率的调制信号。其中，一路调制信号输出到所述磁场调制线圈 550（二维磁场调制线圈）中的一个，用来实现对某一方向磁场的调制。

在一个实施例中，所述信号发生模块 810 为信号发生器，用于输出正弦波或者方波信号。

在一个实施例中，所述原子磁强计 100 还包括移相模块 820 与低通滤波模块 830。所述移相模块 820 的第一输入端与所述信号发生模块 810 连接。所述移相模块 820 的第二输

入端与所述光电探测模块 60 的输出端连接，用于通过另一路调制信号对所述磁场探测信号进行调制。所述低通滤波模块 830 与所述移相模块 820 的输出端连接，用于对调制后的所述磁场探测信号进行锁相放大输出。

本实施例中，所述光电探测模块 60 接收到的所述磁场探测信号中包含了磁场信息。所述信号发生模块 810 输出的另一路调制信号，经过所述移相模块 820 与所述磁场探测信号相乘，实现对所述磁场探测信号进行调制。调制后的所述磁场探测信号，经所述低通滤波模块 830 后，实现磁场信号的锁相放大输出。从而，通过锁相放大输出，提高了所述磁场探测信号的信噪比。

在一个实施例中，所述移相模块 820 为移相器。所述低通滤波模块 830 为低通滤波器。

请参阅图 4，在一个实施例中，所述原子磁强计 100 还包括光放大模块 710、准直模块 720、偏振模块 730 以及第一四分之一波片 740。所述光放大模块 710 设置于所述第一波长激光的光路上，用于对所述第一波长激光进行放大。所述准直模块 720 设置于所述第一波长激光的光路上，用于对经所述倍频模块 20 后形成的所述第一波长激光与所述第二波长激光进行准直。所述偏振模块 730 设置于所述第一波长激光的光路上，用于对经所述光衰减模块 30 后的所述第二波长激光进行偏振。所述第一四分之一波片 740 设置于所述第一波长激光的光路上，用于对经所述偏振模块 730 后的所述第二波长激光进行转换，形成圆偏振光。

本实施例中，所述激光光源 10 输出的所述第一波长激光（如 1590 nm 的激光），一般输出光功率较小。通过所述光放大模块 710 放大，进而增加所述第一波长激光（如 1590 nm 的激光）的激光功率。放大后的所述第一波长激光（如 1590 nm 的激光）输入到所述倍频模块 20 中。通过所述倍频模块 20 使得所述第一波长激光（如 1590 nm 的激光）的波长倍频，形成所述第二波长激光（795 nm 的激光）。此时，倍频后的所述第二波长激光（795 nm 的激光）对应了所述原子气室 510 中的敏感气体（如铷原子）能级的共振跃迁谱线。

经所述倍频模块 20 后的所述第一波长激光与所述第二波长激光，通过所述准直模块 720 准直成平行光束，以使得平行光束照射至所述原子气室 510。

经所述准直模块 720 后的所述第一波长激光与所述第二波长激光，通过所述光衰减模块 30 对所述第一波长激光的光功率进行调控。通过所述光衰减模块 30 后的所述第一波长激光与所述第二波长激光经光纤耦合后，依次经过所述偏振模块 730（所述第二波长激光的起偏器）以及所述第一四分之一波片 740 后，穿过所述原子气室 510 的窗口注入到所述原子气室 510 内部，并与敏感气体发生相互作用。

所述第二波长激光依次经过所述偏振模块 730 与所述第一四分之一波片 740 进入所述

原子气室 510，形成了探测光和泵浦光共路的光路结构。

对于探测光和泵浦光共路的光路结构，通过光衰减模块 30 的所述第二波长激光（如 795 nm 激光）经过相应波长的所述偏振模块 730 和所述第一四分之一波片 740，转换成圆偏振光。此时，圆偏振光自旋极化方向与光束传输的方向同向。所述第二波长激光（如 795 nm 激光）较高效率地依次通过所述第一光吸收结构 521（加热玻璃）和所述原子气室 510 的玻璃气室窗口，进入所述原子气室 510 内。所述第二波长激光（如 795 nm 激光）与所述原子气室 510 内的铷原子气体发生相互作用。

在磁场作用下，原子自旋与探测光相互作用使原子气体的极化特性发生变化，光的偏振方向发生偏转，光功率发生改变。从而，穿过所述原子气室 510 的圆偏振光（即所述原子气室 510 的输出光）通过聚焦透镜被所述光电探测模块 60 接收。或者，通过光纤耦合头将所述原子气室 510 的输出光耦合进光纤。在光纤的另一端用所述光电探测模块 60 探测。所述光电探测模块 60 将光信号转换成电信号，用于分析计算获得磁场测量的信号。

因此，本申请中所述原子磁强计 100，通过一个所述激光光源 10 与一个所述倍频模块 20，可以输出包含原波长的激光成分和倍频后波长的激光成分。原波长的激光成分用于加热原子气室。倍频后波长的激光成分用于实现原子磁强计的泵浦和探测。

在一个实施例中，所述激光光源 10 为激光器。所述偏振模块 730 为起偏器。所述光放大模块 710 为光放大器，可以为掺铒光纤放大器等。所述准直模块 720 为无磁光纤准直器。

在一个实施例中，激光器、光放大器以及倍频晶体都可选用晶体-光纤一体结构。通过光纤转接头连接激光器以及其他放大倍频组件。其中，宽波带的高功率单模保偏光纤可以同时满足所述第一波长激光（1590 nm 激光）和所述第二波长激光（795 nm 激光）的传输，结构简单便于集成化封装。

请参阅图 6，在一个实施例中，所述原子磁强计 100 还包括第一分光模块 910、二分之一波片 920 与第二四分之一波片 930。所述第一分光模块 910 设置于所述第二波长激光的光路上，用于将经所述光衰减模块 30 后的所述第二波长激光分成相互垂直的泵浦光与探测光。所述第二四分之一波片 920 设置于所述探测光的光路上，用于调整所述探测光的偏振角。经所述第二四分之一波片 920 后的所述探测光进入所述原子气室 510。所述第二四分之一波片 930 设置于所述泵浦光的光路上，用于将所述泵浦光转换为泵浦圆偏振光。经所述第二四分之一波片 930 后的所述泵浦光进入所述原子气室 510。

本实施例中，所述第二波长激光通过所述第一分光模块 910 形成两路互相垂直的光路。一路为探测光，经过所述第二四分之一波片 920 进入所述原子气室 510。另一路为泵浦光，经

过所述第二四分之一波片 930 进入所述原子气室 510。从而，通过所述第一分光模块 910、所述二分之一波片 920 以及所述第二四分之一波片 930 形成了探测光和泵浦光垂直的光路结构。

对于探测光和泵浦光垂直的光路结构，通过所述光衰减模块 30 的所述第二波长激光（如 795 nm 激光）被相应波长的所述第一分光模块 910 分成两路。其中，一路泵浦光被所述第二四分之一波片 930 转变成圆偏振光照射到所述原子气室 510 中，用于光泵浦。另一路垂直于泵浦光的探测光，通过所述二分之一波片 920 调整进入所述原子气室 510 前线偏振光的偏振角。经所述二分之一波片 920 后的探测光照射到被泵浦光泵浦极化过的原子气体上，进而被所述光电探测模块 60 探测接收。

当磁场变化时，所述光电探测模块 60 探测到的光功率会发生变化，从而获得磁场测量的信号。所述原子磁强计 100 采用探测光和泵浦光垂直的光路结构，从两路方向进入所述原子气室 510 内，提高了磁场探测精度。

在一个实施例中，所述第一分光模块 910 为分光棱镜，具有波长选择性，用于对所述第二波长激光（如 795 nm 激光）进行分束。

请参阅图 7，在一个实施例中，对于探测光和泵浦光垂直的光路结构，所述激光光源 10、光放大模块 710、倍频模块 20、准直模块 720、光衰减模块 30、温度控制模块 40、磁场控制锁相放大模块 80、光电探测模块 60 的相对位置关系，与探测光和泵浦光共路的光路结构相同，可参见上述实施例。

在一个实施例中，对于探测光和泵浦光垂直的光路结构，所述磁场调制线圈 550 设置于垂直于探测光方向上，从一个方向上进行调制，如图 7 和图 8 所示。通过所述信号发生模块 810 与所述磁场调制线圈 550 连接，用于通过一路调制信号对某一方向的磁场进行调制。

在一个实施例中，所述偏置磁场线圈 560 包括第一偏置线圈 561、第二偏置线圈 562 以及第三偏置线圈 563，分别垂直于光路进行设置，分布于不同方向上。所述偏置磁场线圈 560 与稳流源连接。通过稳流源输出到所述偏置磁场线圈 560（三维偏置磁场线圈），用于磁场清零。

泵浦光的自旋极化方向是与光传输方向一致。扫描磁场在零磁场附近扫描，根据汉勒（Hanle）效应，磁场会影响光的偏振特性。所述光电探测模块 60 接收到经所述原子气室 510 的输出光后，会检测到零磁场位置的吸收峰。通过所述信号发生模块 810 对磁场大小进行调制，后经过锁相放大环路的解调，PID 反馈控制到零场位置。从而，利用标定磁场和反馈信号进行准确的磁场测量。

请参阅图 9，在一个实施例中，本申请提供一种磁场成像系统 200。所述磁场成像系统 200 包括激光光源 10、倍频模块 20、第二分光模块 201、多个原子磁强计探头 206。所述激光光源 10 用于发出第一波长激光。所述倍频模块 20 设置于所述第一波长激光的光路上，用于将部分所述第一波长激光转换为第二波长激光。所述第二分光模块 201 设置于所述第一波长激光的光路上，用于将所述第一波长激光分成多个第一波长子光束，将所述第二波长激光分成多个第二波长子光束。其中，一个所述第一波长子光束与一个所述第二波长子光束共光路。

每个所述原子磁强计探头 206 包括光衰减模块 30、原子气室 510 与光吸收模块 520。所述原子气室 510 设置于所述第一波长子光束的光路上。每个所述光衰减模块 30 设置于所述第一波长子光束的光路上，用于调节所述第一波长子光束的功率。所述光吸收模块 520 设置于所述第一波长子光束的光路上。且所述光吸收模块 520 设置于所述原子气室 510 表面，用于吸收所述第一波长子光束，并转换为热能对所述原子气室 510 进行加热。所述第二波长子光束用于进入所述原子气室 510，并与所述原子气室 510 中原子气体发生相互作用。

本实施例中，一个所述激光光源 10 输出所述第一波长激光。通过所述倍频模块 20 后形成所述第一波长激光与所述第二波长激光。所述第二波长激光对应原子能级共振跃迁，为所述第一波长激光的波长的二分之一。所述第一波长激光与所述第二波长激光共光路，在同一个光路进行传输。通过所述第二分光模块 201 形成多束光路，多光通道连接到多个所述原子磁强计探头 206。因此，多个所述原子磁强计探头 206，共同使用同一个激光器作为光源。

所述激光光源 10 输出所述第一波长激光(1590 nm 激光)。所述第一波长激光(1590 nm 激光)经过所述倍频模块 20 后，形成既含有所述第一波长激光(1590 nm)成分，又含有所述第二波长激光(795 nm 激光)成分。两种不同波长的激光通过所述第二分光模块 201 分束形成多光通道，并连接到多个所述原子磁强计探头 206。所述第二波长激光(795 nm 激光)进入所述原子磁强计探头 206 中所述原子气室 510 内与原子发生相互作用，用于实现磁场信号的测量。

当通过所述磁场成像系统 200 进行脑磁成像时，可以根据脑部形状制备佩戴在头部用来固定多个所述原子磁强计探头 206 的头盔。在需要进行磁场测量的位置处用机械加持的方式固定多个所述原子磁强计探头 206。此时，在脑部表面形成原子磁强计探头阵列，用于测量探头所在位置处的磁场大小。

因此，所述磁场成像系统 200 通过单一激光光源、所述倍频模块 20、所述第二分光模

块 201 以及多个所述原子磁强计探头 206，形成了原子磁强计阵列，可同时实现光加热和磁场探测。同时，由于多个所述原子磁强计探头 206 中的激光都来自于同一激光光源，使得所述磁场成像系统 200 具有良好的共模噪声抑制性，能够获得更低噪声的磁场图像。并且，多个所述原子磁强计探头 206 共用一个所述激光光源 10 与所述倍频模块 20，可以降低制备成本。

在一个实施例中，所述第二分光模块 201 为光纤分束器。所述第二波长激光（795 nm 激光）进入所述原子磁强计探头 206 中所述原子气室 510 内与原子发生相互作用后，输出的激光被所述光电探测模块 60 接收。

在一个实施例中，所述光电探测模块 60 可以集成于所述原子磁强计探头 206 内。或者，通过光纤耦合头将多个所述原子磁强计探头 206 内所述原子气室 510 输出的激光耦合出探头，并与多个所述光电探测模块 60 连接。

请参阅图 9，在一个实施例中，所述磁场成像系统 200 还包括温度控制阵列 202。所述温度控制阵列 202 分别与多个所述原子磁强计探头 206 连接，用于对所述原子磁强计探头 206 进行调控以改变所述第一波长子光束的功率。

本实施例中，多个所述温度控制模块 40 形成所述温度控制阵列 202。每个所述温度控制模块 40 与每个所述原子磁强计探头 206 一一对应连接，用于对所述原子磁强计探头 206 进行调控以改变所述第一波长子光束的功率。所述第一波长子光束的功率为对所述原子气室 510 进行加热的加热激光的光功率。

在一个实施例中，每个所述原子磁强计探头 206 至少还包括上述实施例中涉及到的所述偏振模块 730、所述第一四分之一波片 740、所述温度检测模块 530、所述加热腔室 540、所述磁场调制线圈 550、所述偏置磁场线圈 560 等。

或者，每个所述原子磁强计探头 206 至少还包括上述实施例中涉及到的所述第一分光模块 910、所述第二四分之一波片 920、所述第三四分之一波片 930、所述温度检测模块 530、所述加热腔室 540、所述磁场调制线圈 550、所述偏置磁场线圈 560 等。

每个所述温度控制模块 40 的监控端与所述温度检测模块 530 连接，用于获取所述实时测量温度。每个所述温度控制模块 40 的控制端与所述光衰减模块 30 连接，用于根据所述实时测量温度与所述目标温度进行对比，利用反馈控制对所述光衰减模块 30 进行调控以改变所述第一波长子光束的功率，实现温度调节。

因此，每个所述原子磁强计探头 206 与每个所述温度控制模块 40 一一对应设置。多个所述温度控制模块 40 构成所述温度控制阵列 202，以整体主动调控多个所述原子磁强计探头 206 的温度，即主动调控所述原子气室 510 的温度稳定于某一范围内。

请参阅图 10, 在一个实施例中, 所述磁场成像系统 200 还包括位置测量控制阵列 207。所述位置测量控制阵列 207 包括多个位置传感模块 2071 与多个位移控制模块 2072。每个所述位置传感模块 2071 设置于每个所述原子磁强计探头 206, 用于对所述原子磁强计探头 206 的空间位置进行测量。每个所述位移控制模块 2072 设置于每个所述原子磁强计探头 206, 用于对所述原子磁强计探头 206 的位移进行控制移动。

本实施例中, 在进行磁场测量及成像时, 根据待测对象的磁场空间结构, 多个所述原子磁强计探头 206 被固定并排布成探头阵列。同时, 通过所述位置传感模块 2071 对所述原子磁强计探头 206 所测磁场的空间位置进行测量。通过所述位移控制模块 2072 对所述原子磁强计探头 206 进行微小位移调整。

每个所述原子磁强计探头 206 设置有所述位置传感模块 2071 与所述位移控制模块 2072, 对所述原子磁强计探头 206 所测磁场的空间位置进行测量及调整。从而, 通过所测磁场的空间位置可以对磁场成像过程中的空间进行定位。

在一个实施例中, 所述位置传感模块 2071 为位置传感器, 如光电位置传感器。所述位移控制模块 2072 为位移控制器。

请参阅图 9, 在一个实施例中, 所述磁场成像系统 200 还包括信号采集处理阵列 204。所述信号采集处理阵列 204 包括多个信号采集处理模块 (图中未标出)。每个所述信号采集处理模块与每个所述位置传感模块 2071 连接, 用于采集所述原子磁强计探头 206 的空间位置。每个所述信号采集处理模块与每个所述位移控制模块 2072 连接, 用于调控所述原子磁强计探头 206 的位移。每个所述信号采集处理模块与每个所述原子磁强计探头 206 的输出端连接, 用于采集所述原子磁强计探头 206 探测的磁场信号。

本实施例中, 每个所述原子磁强计探头 206 探测的磁场信号与每个所述原子磁强计探头 206 的空间位置信息, 传输至每个所述信号采集处理模块。所述信号采集处理模块包括但不限于微控制单元 (Micro controller Unit, MCU)、中央处理器 (Center Processor Unit, CPU)、嵌入式微控制器 (Micro Controller Unit, MCU)、嵌入式微处理器 (Micro Processor Unit, MPU)、嵌入式片上系统 (System on Chip, SOC) 等。

请参阅图 9, 在一个实施例中, 所述磁场成像系统 200 还包括磁场线圈驱动阵列 203。所述磁场线圈驱动阵列 203 包括多个磁场控制锁相放大模块 80。每个所述磁场控制锁相放大模块 80 与每个所述原子磁强计探头 206 对应设置, 用于调控周围磁场, 且将所述原子磁强计探头 206 探测的磁场信号进行锁相放大。

本实施例中, 每个所述磁场控制锁相放大模块 80 包括所述信号发生模块 810、所述移相模块 820 以及所述低通滤波模块 830。通过所述信号发生模块 810 对某一方向的磁场进

行调制。通过所述移相模块 820 与所述低通滤波模块 830，对所述光电探测模块 60 探测的磁场信号进行锁相放大输出。具体调控过程可参考上述实施例。

因此，通过所述磁场线圈驱动阵列 203 可以产生一系列特定的输出波形，输入到所述原子磁强计探头 206 中的所述磁场调制线圈 550 与所述偏置磁场线圈 560。从而，通过所述磁场线圈驱动阵列 203 驱动所需的二维磁场调制线圈和三维补偿线圈产生特定磁场，补偿所述原子气室 510 剩余磁场的影响。同时，通过所述磁场线圈驱动阵列 203 对探测的磁场信号进行锁相放大输出。

请参阅图 9，在一个实施例中，所述磁场成像系统 200 还包括微控制模块 205。所述微控制模块 205 分别与所述位置测量控制阵列 207、所述信号采集处理阵列 204、所述磁场线圈驱动阵列 203 以及所述温度控制阵列 202 连接，用于控制并进行磁场图像重建。

本实施例中，所述微控制模块 205 包括但不限于微控制单元（Micro controller Unit, MCU）、中央处理器（Center Processor Unit, CPU）、嵌入式微控制器（Micro Controller Unit, MCU）、嵌入式微处理器（Micro Processor Unit, MPU）、嵌入式片上系统（System on Chip, SOC）、计算机等。

通过所述微控制模块 205 输出调控时序，分别控制所述位置测量控制阵列 207、所述信号采集处理阵列 204、所述磁场线圈驱动阵列 203 以及所述温度控制阵列 202。从而，通过所述微控制模块 205 实现对整个磁场成像系统的控制。其中，所述微控制模块 205 输出调控时序时，可以使用基于 FPGA 的控制程序实现对温度控制、磁场调制、位置控制、信号采集与处理等过程的统一控制。

在一个实施例中，所述信号采集处理阵列 204 输出端与所述微控制模块 205 连接，用于将每个所述原子磁强计探头 206 探测的磁场信号与每个所述原子磁强计探头 206 的空间位置信息传输至所述微控制模块 205。所述微控制模块 205 根据每个所述原子磁强计探头 206 探测的磁场信号，通过显示器呈现出重建的待测磁场图像。

因此，所述磁场成像系统 200 只采用一个所述激光光源 10 驱动多个所述原子磁强计探头 206，有利于各个探头噪声的共模性，进行磁场信号差分处理。从而，通过差分处理获得共模噪声的抑制，可以有效地消除各个探头共模噪声，降低磁场图像的噪声。同时，所述磁场成像系统 200 根据磁场信号和位置信号的对应关系可以重建出高分辨率的磁场图像，且降低了系统成本。

以上所述实施例的各技术特征可以进行任意的组合，为使描述简洁，未对上述实施例中的各个技术特征所有可能的组合都进行描述，然而，只要这些技术特征的组合不存在矛盾，都应当认为是本说明书记载的范围。

以上所述实施例仅表达了本申请的几种实施方式，其描述较为具体和详细，但并不能因此而理解为对本申请专利范围的限制。应当指出的是，对于本领域的普通技术人员来说，在不脱离本申请构思的前提下，还可以做出若干变形和改进，这些都属于本申请的保护范围。因此，本申请专利的保护范围应以所附权利要求为准。

最后，还需要说明的是，在本文中，诸如第一和第二等之类的关系术语仅仅用来将一个实体或者操作与另一个实体或操作区分开来，而不一定要求或者暗示这些实体或操作之间存在任何这种实际的关系或者顺序。而且，术语“包括”、“包含”或者其任何其他变体意在涵盖非排他性的包含，从而使得包括一系列要素的过程、方法、物品或者设备不仅包括那些要素，而且还包括没有明确列出的其他要素，或者是还包括为这种过程、方法、物品或者设备所固有的要素。在没有更多限制的情况下，由语句“包括一个……”限定的要素，并不排除在包括所述要素的过程、方法、物品或者设备中还存在另外的相同要素。

本说明书中各个实施例采用递进的方式描述，每个实施例重点说明的都是与其他实施例的不同之处，各个实施例之间相同相似部分互相参见即可。

对所公开的实施例的上述说明，使本领域专业技术人员能够实现或使用本申请。对这些实施例的多种修改对本领域的专业技术人员来说将是显而易见的，本文中所定义的一般原理可以在不脱离本申请的精神或范围的情况下，在其它实施例中实现。因此，本申请将不会被限制于本文所示的这些实施例，而是要符合与本文所公开的原理和新颖特点相一致的最宽的范围。

权利要求

1、一种原子磁强计，其特征在于，包括：

激光光源（10），用于发出第一波长激光；

倍频模块（20），设置于所述第一波长激光的光路，用于将部分所述第一波长激光转换为第二波长激光，所述第二波长激光的光路与所述第一波长激光的光路共光路；

原子气室（510），设置于所述第一波长激光的光路；

光吸收模块（520），设置于所述原子气室（510）表面，用于吸收所述第一波长激光，并转换为热能对所述原子气室（510）进行加热；

所述第二波长激光进入所述原子气室（510），并与所述原子气室（510）中原子气体发生相互作用，用以实现磁场信号的探测。

2、根据权利要求1所述的原子磁强计，其特征在于，所述光吸收模块（520）包括第一光吸收结构（521）与第二光吸收结构（522）；

所述第一光吸收结构（521）与所述第二光吸收结构（522）设置于所述原子气室（510）相对的两个表面；

所述第一波长激光依次经过所述第一光吸收结构（521）、所述原子气室（510）以及所述第二光吸收结构（522）。

3、根据权利要求2所述的原子磁强计，其特征在于，所述第二光吸收结构（522）的厚度大于所述第一光吸收结构（521）的厚度。

4、根据权利要求1所述的原子磁强计，其特征在于，还包括：

光衰减模块（30），设置于所述第一波长激光的光路，用于调节所述第一波长激光的功率；

温度检测模块（530），设置于所述原子气室（510）表面，用于监测所述原子气室（510）的实时测量温度；

温度控制模块（40），所述温度控制模块（40）的监控端与所述温度检测模块（530）连接，用于获取所述实时测量温度；

所述温度控制模块（40）的控制端与所述光衰减模块（30）连接，用于根据所述实时测量温度，对所述光衰减模块（30）进行调控以改变所述第一波长激光的功率。

5、根据权利要求4所述的原子磁强计，其特征在于，所述温度控制模块（40）包括反馈控制模块；

所述反馈控制模块用于根据所述实时测量温度与目标温度进行对比，并采用反馈控制

方法调控所述光衰减模块(30),以改变所述第一波长激光的功率。

6、根据权利要求5所述的原子磁强计,其特征在于,所述原子磁强计还包括:

光电探测模块(60),设置于所述第二波长激光的光路上,用于接收经所述原子气室(510)后的所述第二波长激光。

7、根据权利要求6所述的原子磁强计,其特征在于,所述原子磁强计还包括:

加热腔室(540),包围形成加热空间,所述光吸收模块(520)、所述原子气室(510)以及所述温度检测模块(530)设置于所述加热空间;

磁场调制线圈(550),围绕所述加热腔室(540)设置,用于对某一方向的磁场进行调制;

偏置磁场线圈(560),围绕所述加热腔室(540)设置,用于将所述原子气室(510)在无磁信号时磁场置零。

8、根据权利要求7所述的原子磁强计,其特征在于,所述原子磁强计还包括:

信号发生模块(810),用于产生两路同一频率的调制信号;

所述信号发生模块(810)与所述磁场调制线圈(550)连接,用于通过一路调制信号对某一方向的磁场进行调制。

9、根据权利要求8所述的原子磁强计,其特征在于,所述原子磁强计还包括:

移相模块(820),所述移相模块(820)的第一输入端与所述信号发生模块(810)连接,所述移相模块(820)的第二输入端与所述光电探测模块(60)的输出端连接,用于通过另一路调制信号对所述磁场探测信号进行调制;

低通滤波模块(830),与所述移相模块(820)的输出端连接,用于对调制后的所述磁场探测信号进行锁相放大输出。

10、根据权利要求4所述的原子磁强计,其特征在于,所述原子磁强计还包括:

光放大模块(710),设置于所述第一波长激光的光路上,用于对所述第一波长激光进行放大;

准直模块(720),设置于所述第一波长激光的光路上,用于对经所述倍频模块(20)后形成的所述第一波长激光与所述第二波长激光进行准直;

偏振模块(730),设置于所述第一波长激光的光路上,用于对经所述光衰减模块(30)后的所述第二波长激光进行偏振;

第一四分之一波片(740),设置于所述第一波长激光的光路上,用于对经所述偏振模块(730)后的所述第二波长激光进行转换,形成圆偏振光。

11、根据权利要求4所述的原子磁强计,其特征在于,所述原子磁强计还包括:

第一分光模块(910), 设置于所述第二波长激光的光路上, 用于将经所述光衰减模块(30)后的所述第二波长激光分成相互垂直的泵浦光与探测光;

二分之一波片(920), 设置于所述探测光的光路上, 用于调整所述探测光的偏振角;
经所述二分之一波片(920)后的所述探测光进入所述原子气室(510);

第二四分之一波片(930), 设置于所述泵浦光的光路上, 用于将所述泵浦光转换为泵浦圆偏振光;

经所述第二四分之一波片(930)后的所述泵浦光进入所述原子气室(510)。

12、一种磁场成像系统, 其特征在于, 包括:

激光光源(10), 用于发出第一波长激光;

倍频模块(20), 设置于所述第一波长激光的光路上, 用于将部分所述第一波长激光转换为第二波长激光;

第二分光模块(201), 设置于所述第一波长激光的光路上, 用于将所述第一波长激光分成多个第一波长子光束, 将所述第二波长激光分成多个第二波长子光束; 其中, 一个所述第一波长子光束与一个所述第二波长子光束共光路;

多个原子磁强计探头(206), 每个所述原子磁强计探头(206)包括光衰减模块(30)、原子气室(510)以及光吸收模块(520);

每个所述光衰减模块(30)设置于所述第一波长子光束的光路上, 用于调节所述第一波长子光束的功率;

所述原子气室(510)设置于所述第一波长子光束的光路上;

所述光吸收模块(520)设置于所述第一波长子光束的光路上, 且所述光吸收模块(520)设置于所述原子气室(510)表面, 用于吸收所述第一波长子光束, 并转换为热能对所述原子气室(510)进行加热;

所述第二波长子光束用于进入所述原子气室(510), 并与所述原子气室(510)中原子气体发生相互作用。

13、根据权利要求12所述的磁场成像系统, 其特征在于, 所述磁场成像系统还包括: 温度控制阵列(202), 分别与多个所述原子磁强计探头(206)连接, 用于对所述原子磁强计探头(206)进行调控以改变所述第一波长子光束的功率。

14、根据权利要求13所述的磁场成像系统, 其特征在于, 所述磁场成像系统还包括: 位置测量控制阵列(207), 包括多个位置传感模块(2071)与多个位移控制模块(2072);
每个所述位置传感模块(2071)设置于每个所述原子磁强计探头(206), 用于对所述原子磁强计探头(206)的空间位置进行测量;

每个所述位移控制模块（2072）设置于每个所述原子磁强计探头（206），用于对所述原子磁强计探头（206）的位移进行控制移动。

15、根据权利要求 14 所述的磁场成像系统，其特征在于，所述磁场成像系统还包括：信号采集处理阵列（204），分别与多个所述位置传感模块（2071）连接，用于采集多个所述原子磁强计探头（206）的空间位置；

所述信号采集处理阵列（204）分别与多个所述位移控制模块（2072）连接，用于调控多个所述原子磁强计探头（206）的位移；

所述信号采集处理阵列（204）分别与多个所述原子磁强计探头（206）的输出端连接，用于采集多个所述原子磁强计探头（206）探测的磁场信号。

16、根据权利要求 15 所述的磁场成像系统，其特征在于，所述磁场成像系统还包括：磁场线圈驱动阵列（203），分别与多个所述原子磁强计探头（206）连接，用于调控周围磁场，且将所述原子磁强计探头（206）探测的磁场信号进行锁相放大。

17、根据权利要求 16 所述的磁场成像系统，其特征在于，所述磁场成像系统还包括：微控制模块（205），分别与所述位置测量控制阵列（207）、所述信号采集处理阵列（204）、所述磁场线圈驱动阵列（203）以及所述温度控制阵列（202）连接，用于控制并进行磁场图像重建。

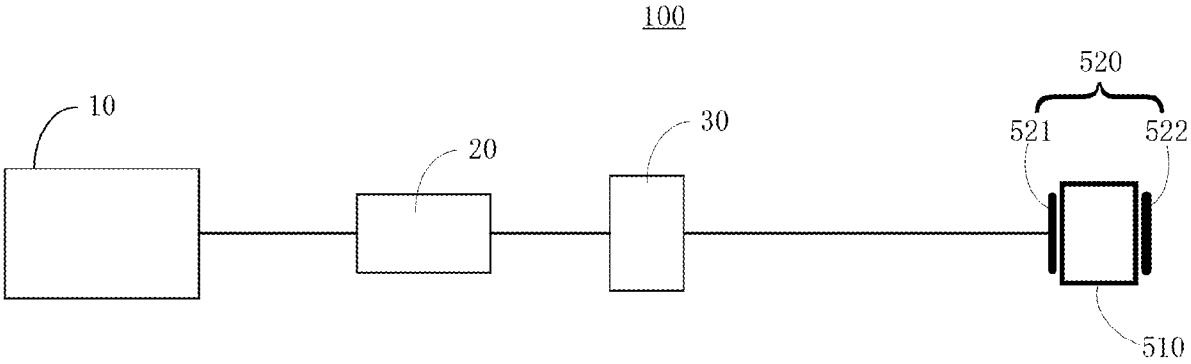


图 1

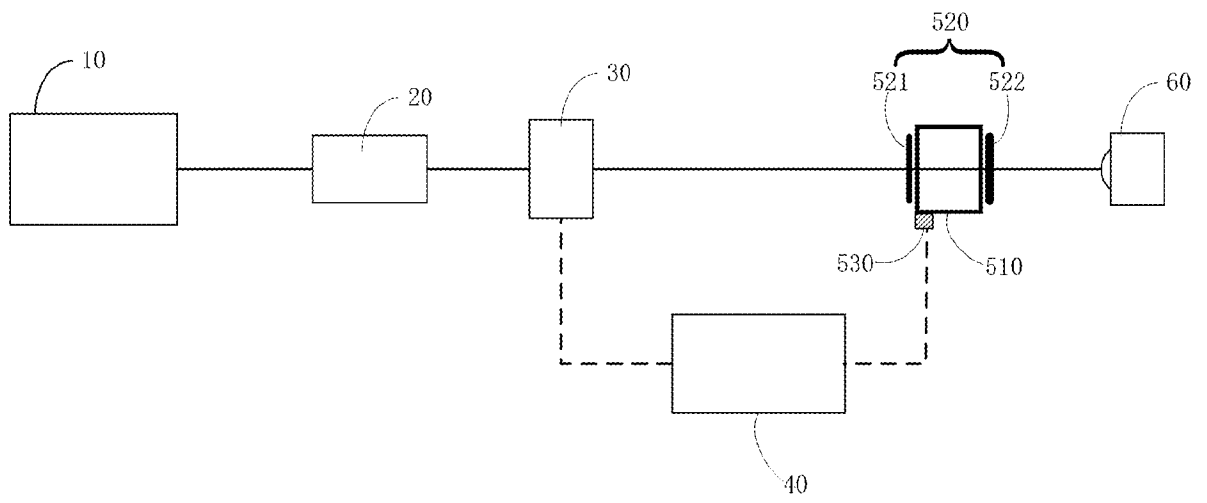


图 2

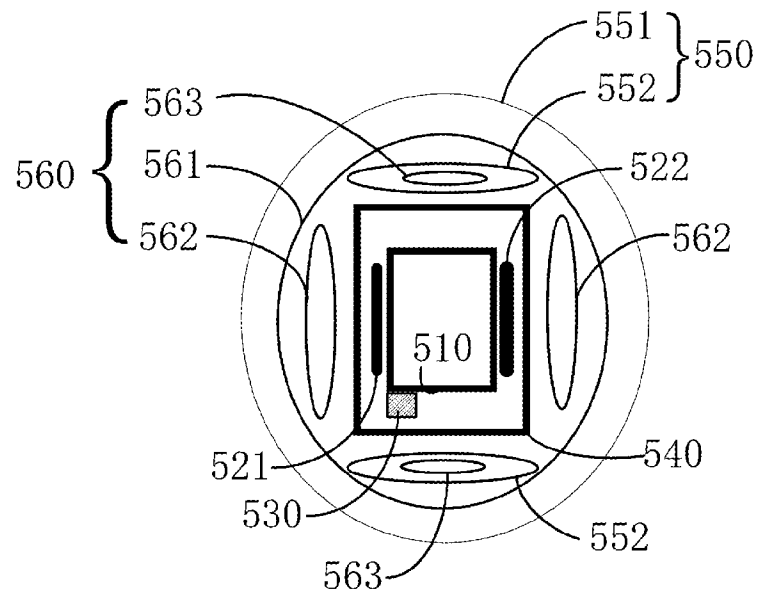


图 3

100

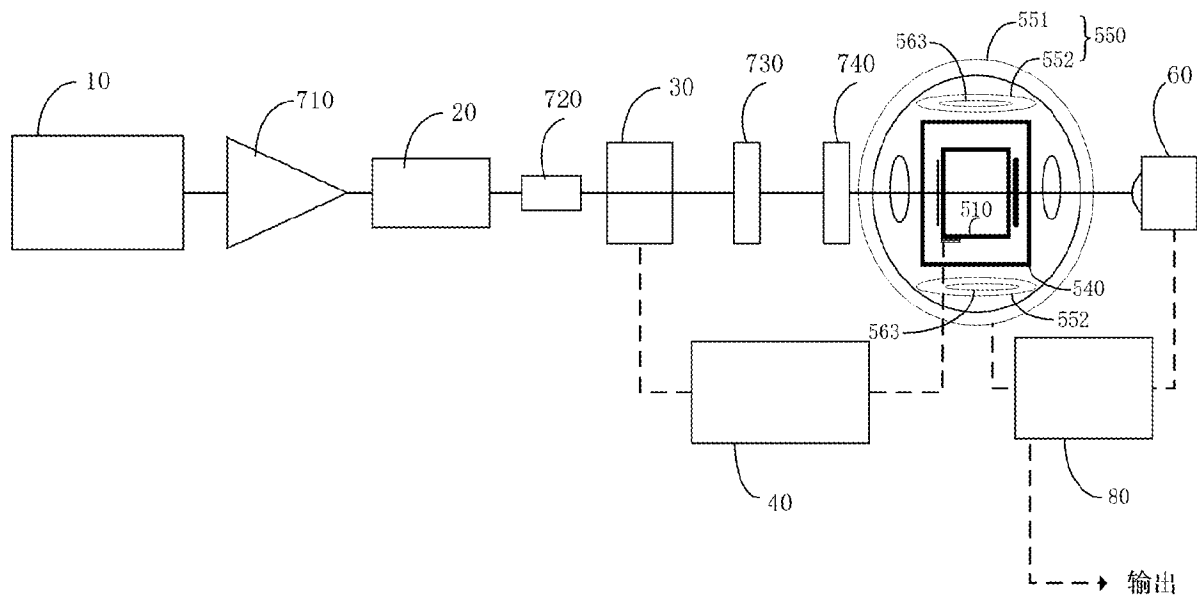


图 4

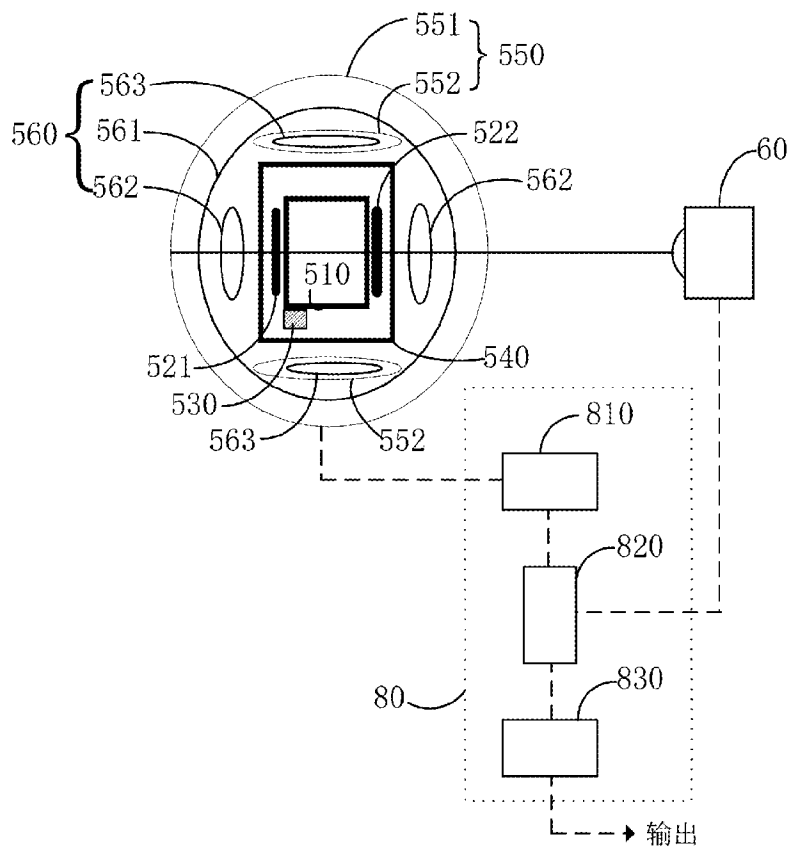


图 5

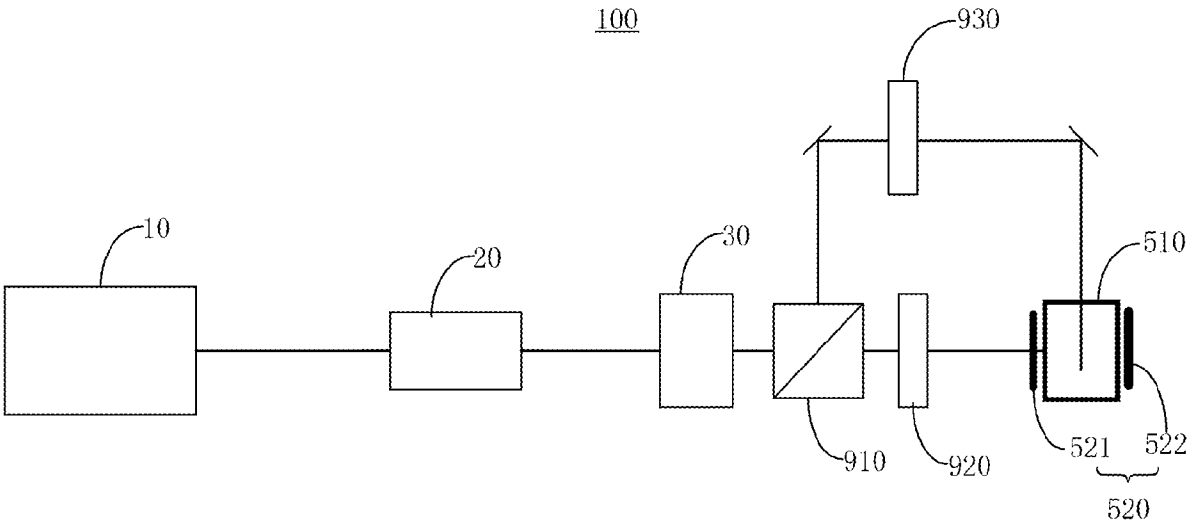


图 6

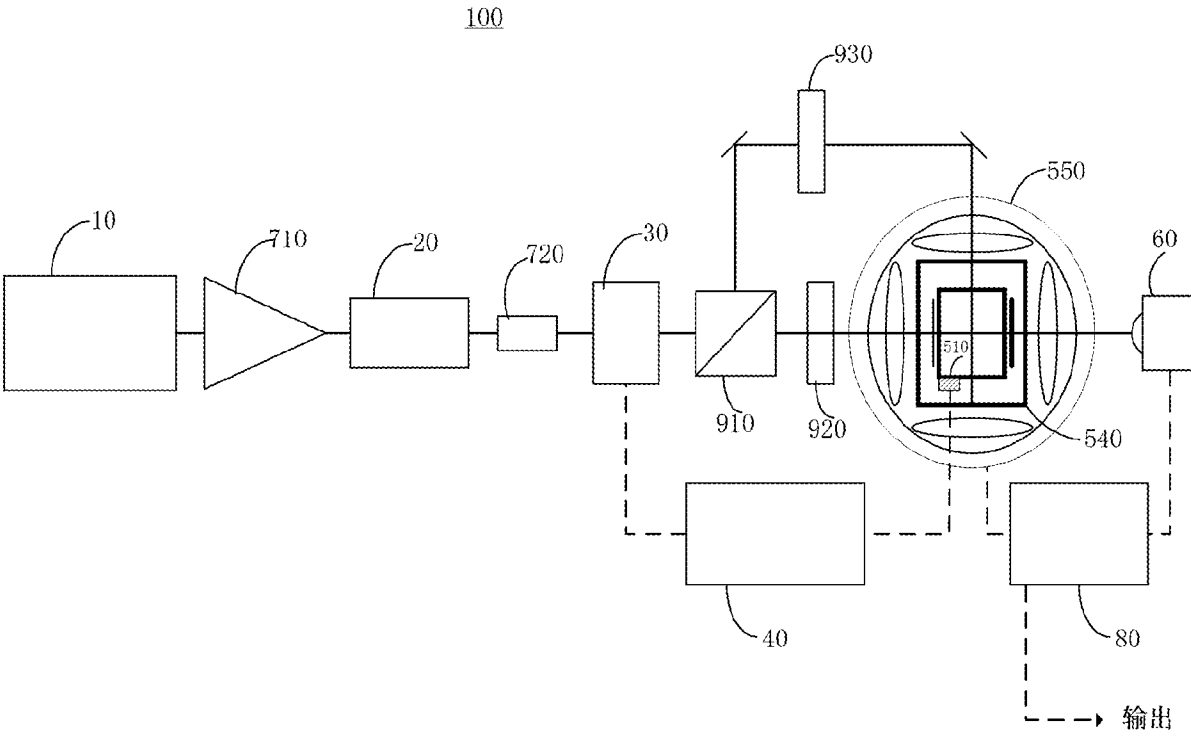


图 7

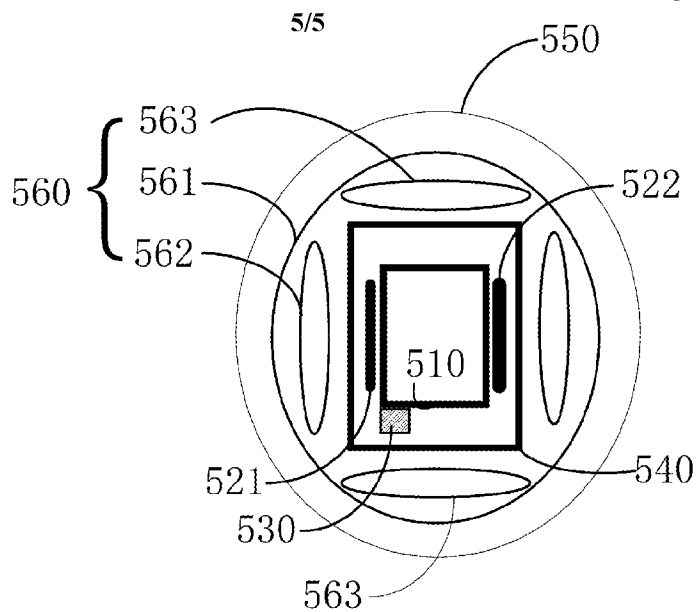


图 8

200

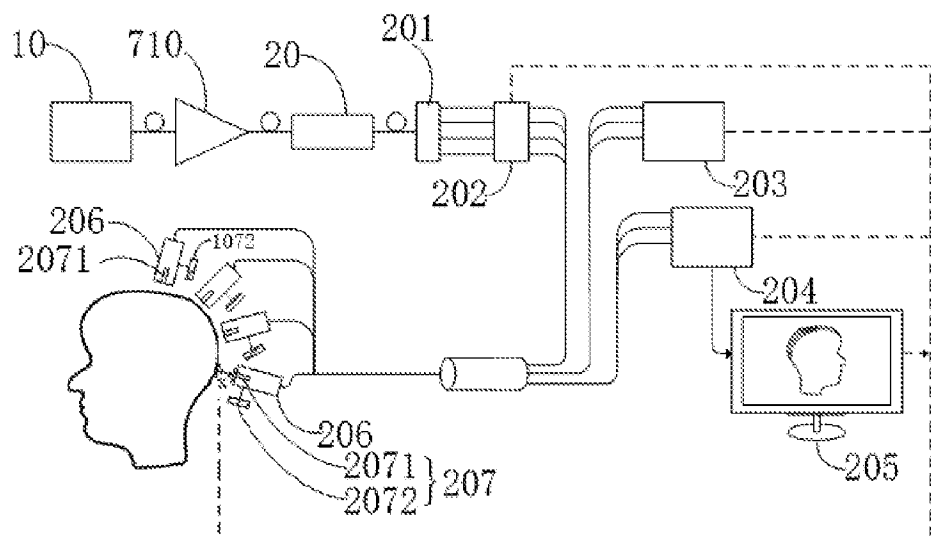


图 9

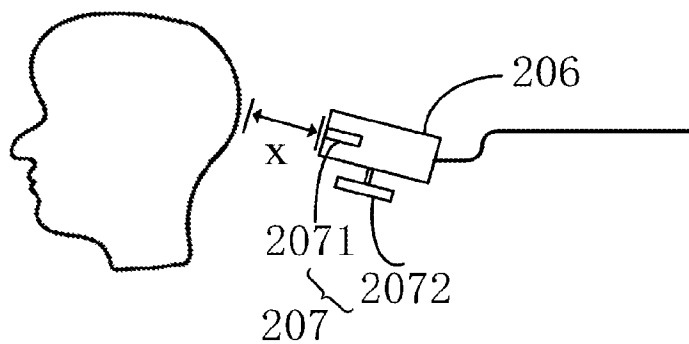


图 10

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2021/081967

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G01R 33/032(2006.01)i; A61B 5/00(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)

G01R33, G01C19, H01S3, AB615

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)

CNABS, CNTXT, VEN, DWPI, CNKI, WEB OF SCIENCE: 清华大学, 冯焱颖, 李晓杰, 倍频, 波长, 频率, 无磁加热, 光加热, 光源, 光, 光吸收, 加热, 原子, 磁强计, 磁力仪, 分束, 分光, 多通道, 阵列, optical, atomic, photonic, SERF, magnetometer, heat, absorber, light, laser, absorption, vapor, wavelength, frequency, multi-channel, array

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
PX	CN 111983526 A (TSINGHUA UNIVERSITY) 24 November 2020 (2020-11-24) claims 1-17	1-17
Y	CN 107062600 A (BEIHANG UNIVERSITY) 18 August 2017 (2017-08-18) description paragraphs 30-41, figure 2	1-17
Y	CN 111048992 A (INSTITUTE OF SEMICONDUCTORS, CHINESE ACADEMY OF SCIENCES) 21 April 2020 (2020-04-21) description, paragraphs 10-14	1-17
Y	Mhaskar R. et al. "A low-power, high sensitivity micromachined optical magnetometer" 《Applied Physics letters》, Vol. 24, No. 101, 11 December 2012 (2012-12-11), ISSN: 0003-6951, p. 1	2-3
Y	CN 109827559 A (WUHAN INSTITUTE OF PHYSICS AND MATHEMATICS, CHINESE ACADEMY OF SCIENCES) 31 May 2019 (2019-05-31) description, paragraphs 17-27	6-11
Y	CN 108209876 A (WUHAN JIXING TECHNOLOGY CO., LTD.) 29 June 2018 (2018-06-29) description, paragraphs 4-49	14-17



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

17 June 2021

Date of mailing of the international search report

24 June 2021

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/CN2021/081967**C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT**

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	CN 103901924 A (HARBIN ENGINEERING UNIVERSITY) 02 July 2014 (2014-07-02) description, paragraph 5	1-17
Y	US 2020057116 A1 (HI LLC) 20 February 2020 (2020-02-20) description, paragraphs 30-56, and figures 1-5	1-3, 6-12
A	CN 109738837 A (BEIHANG UNIVERSITY) 10 May 2019 (2019-05-10) entire document	1-17

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2021/081967

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
CN	111983526	A	24 November 2020	None			
CN	107062600	A	18 August 2017	None			
CN	111048992	A	21 April 2020	None			
CN	109827559	A	31 May 2019	CN	109827559	B	11 August 2020
CN	108209876	A	29 June 2018	None			
CN	103901924	A	02 July 2014	CN	103901924	B	04 January 2017
US	2020057116	A1	20 February 2020	WO	2020036666	A1	20 February 2020
CN	109738837	A	10 May 2019	CN	109738837	B	25 September 2020

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2021/081967

A. 主题的分类

G01R 33/032(2006.01)i; A61B 5/00(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)

G01R33, G01C19, H01S3, AB615

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))

CNABS, CNTXT, VEN, DWPI, CNKI, WEB OF SCIENCE:清华大学, 冯焱颖, 李晓杰, 倍频, 波长, 频率, 无磁加热, 光加热, 光源, 光, 光吸收, 加热, 原子, 磁强计, 磁力仪, 分束, 分光, 多通道, 阵列, optical, atomic, photonic, SERF, magnetometer, heat, absorber, light, laser, absorption, vapor, wavelength, frequency, multi-channel, array

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 111983526 A (清华大学) 2020年 11月 24日 (2020 - 11 - 24) 权利要求1-17	1-17
Y	CN 107062600 A (北京航空航天大学) 2017年 8月 18日 (2017 - 08 - 18) 说明书第30-41段, 图2	1-17
Y	CN 111048992 A (中国科学院半导体研究所) 2020年 4月 21日 (2020 - 04 - 21) 说明书第10-14段	1-17
Y	Mhaskar R. 等. "A low-power, high sensitivity micromachined optical magnetometer" 《Applied Physics letters》, 第24卷, 第101期, 2012年 12月 11日 (2012 - 12 - 11), ISSN: 0003-6951, 第1页	2-3
Y	CN 109827559 A (中国科学院武汉物理与数学研究所) 2019年 5月 31日 (2019 - 05 - 31) 说明书第17-27段	6-11

☒ 其余文件在C栏的续页中列出。☒ 见同族专利附件。

* 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, 或在先申请或专利

“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

2021年 6月 17日

国际检索报告邮寄日期

2021年 6月 24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

授权官员

刘俊杰

电话号码 86-10-62089542

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
Y	CN 108209876 A (武汉技兴科技有限公司) 2018年 6月 29日 (2018 - 06 - 29) 说明书第4-49段	14-17
Y	CN 103901924 A (哈尔滨工程大学) 2014年 7月 2日 (2014 - 07 - 02) 说明书第5段	1-17
Y	US 2020057116 A1 (HI LLC) 2020年 2月 20日 (2020 - 02 - 20) 说明书第30-56段，图1-5	1-3, 6-12
A	CN 109738837 A (北京航空航天大学) 2019年 5月 10日 (2019 - 05 - 10) 全文	1-17

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2021/081967

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	111983526	A	2020年 11月 24日	无			
CN	107062600	A	2017年 8月 18日	无			
CN	111048992	A	2020年 4月 21日	无			
CN	109827559	A	2019年 5月 31日	CN	109827559	B	2020年 8月 11日
CN	108209876	A	2018年 6月 29日	无			
CN	103901924	A	2014年 7月 2日	CN	103901924	B	2017年 1月 4日
US	2020057116	A1	2020年 2月 20日	WO	2020036666	A1	2020年 2月 20日
CN	109738837	A	2019年 5月 10日	CN	109738837	B	2020年 9月 25日