

(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
2018 年 1 月 18 日 (18.01.2018)



(10) 国际公布号
WO 2018/010288 A1

- (51) 国际专利分类号:
H01S 3/091 (2006.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2016/098238
- (22) 国际申请日: 2016 年 9 月 6 日 (06.09.2016)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (30) 优先权:
201610559077.1 2016 年 7 月 15 日 (15.07.2016) CN
- (71) 申请人: 华中科技大学(HUAZHONG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY) [CN/CN]; 中国湖北省武汉洪山路喻路 1037 号, Hubei 430074 (CN)。
- (72) 发明人: 高俊 (GAO, Jun); 中国湖北省武汉洪山路喻路 1037 号, Hubei 430074 (CN)。 王

新兵 (WANG, Xinbing); 中国湖北省武汉洪山路喻路 1037 号, Hubei 430074 (CN)。 左都罗 (ZUO, Duluo); 中国湖北省武汉洪山路喻路 1037 号, Hubei 430074 (CN)。 陆培祥 (LU, Peixiang); 中国湖北省武汉洪山路喻路 1037 号, Hubei 430074 (CN)。

(74) 代理人: 华中科技大学专利中心 (HUAZHONG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PATENT AGENCY CENTER); 中国湖北省武汉洪山路喻路 1037 号华中科技大学东一楼 340, Hubei 430074 (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, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE,

(54) Title: RESONANCE REINFORCED TRANSVERSE OPTICAL PUMPING DEVICE AND METHOD FOR METASTABLE GAS LASER

(54) 发明名称: 一种亚稳态气体激光的共振增强横向光泵浦装置及方法

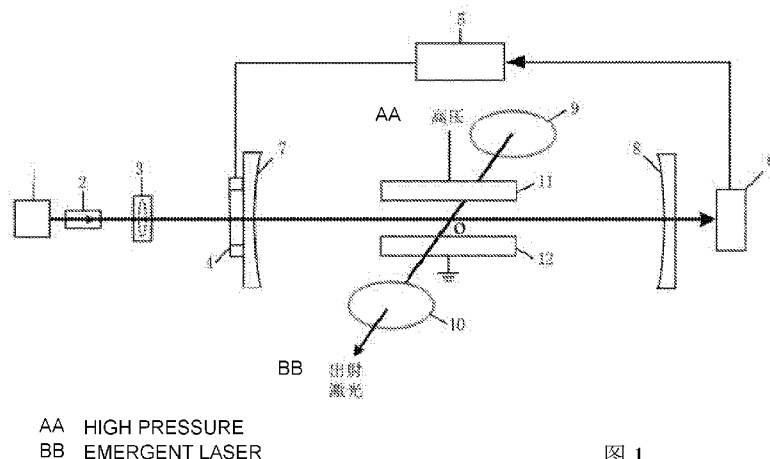


图 1

(57) Abstract: A resonance reinforced transverse optical pumping device and method for a metastable gas laser; by means of resonance reinforcement technology, absorption of pump light may be increased so as to improve the optical-to-optical efficiency and electrical-to-optical efficiency of the entire system. Separating a pumped laser from an emergent laser may overcome the drop in laser extraction power and the corresponding insertion loss brought about by using a polarized device, thus avoiding the use of a dichroic mirror, and lowering the requirements on the power and beam quality of each individual pumped laser module. The pumping scheme can also be expanded to a multi-channel transverse pumping intrinsic excitation and a seed-injection type master oscillator power amplifier structure, and is conducive to promoting an optical pump metastable gas laser to achieve a higher-power laser output, and an application thereof in fields such as laser-induced plasma. In addition, the resonance reinforced transverse pumping method is also suitable for other optically pumped gas lasers such as optically pumped oxygen-iodine lasers.

KG, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, 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, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, 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))。

(57) 摘要: 一种亚稳态气体激光的共振增强横向光泵浦装置及方法, 通过共振增强技术, 可增大对泵浦光的吸收从而提高光光效率和整个系统的电光效率。通过将泵浦激光和出射激光分离, 可克服使用偏振器件带来的激光提取功率的下降和相应的插入损耗, 避免了双色镜的使用, 降低了对单个泵浦激光模块的功率和光束质量的要求。该泵浦方案还可扩展至多路横向泵浦的本征激励及种子注入式的主振荡功率放大器结构, 有利于推动光泵浦亚稳态气体激光实现更高功率的激光输出及其在激光诱导等离子体等领域的应用。此外, 共振增强的横向泵浦方法也适用于光泵浦氧碘激光器等其他光泵浦气体激光器。

一种亚稳态气体激光的共振增强横向光泵浦装置及方法

【技术领域】

本发明属于激光技术领域，更具体地，涉及一种亚稳态气体激光的共振增强横向光泵浦装置及方法。

【背景技术】

激光诱导等离子体(Laser Produced Plasma, LPP)极紫外光刻光源是下一代光刻的核心技术之一。目前，气体激光器特别是 CO₂ 激光器用于极紫外光刻光源的激光驱动。但是，CO₂ 激光器的电光效率低，体积大，导致极紫外光刻光源系统的能耗高、占用空间大，限制了极紫外光刻光源的大规模量产和应用。

光泵浦亚稳态气体激光 (Optically Pumped Metastable Gas Laser, OPMGL) 是一种放电激励和光泵浦相结合的新型气体激光器，它采用电激励产生的气体亚稳态粒子作为增益介质，再利用激光泵浦实现粒子数反转以出射激光。凭借自身极高的量子效率、气体介质良好的流动型和均匀性，该型激光可将小体积、高电光效率的高功率半导体激光转化为具有高光束质量的高功率输出，具有结构紧凑、电光效率高的优势和实现高光束质量的高功率输出的巨大潜力。

目前，光泵浦亚稳态气体激光的实验研究均采用双程纵向的泵浦方式 (J.D. Han, et al., “Demonstration of a diode-pumped metastable Ar laser”, Optics letters, 38 (2013), W.T. Rawlins, et al. “Optically pumped micro plasma rare gas laser”, Optics express, 23 (2015), Paul J. Moran, et al., “Plasma and Laser Kinetics and Field Emission from Carbon Nanotube Fibers for an Advanced Noble Gas Laser (ANGL)”, Proc. SPIE 9729, 9729 C (2016))。在双程纵向泵浦实验中，泵浦光和出射激光共用光学元件 (双色镜)，并通

过偏振器件对激光进行分离和探测。此种泵浦方法存在以下问题：对光学元件和泵浦光的光束质量要求较高、可能增加腔内损耗；利用偏振特性提取出射激光将直接导致激光功率的下降；此外，双程泵浦的吸收路径有限，可能会造成对泵浦光的吸收不完全，不利于提升光泵浦亚稳态气体激光系统的电光效率。

【发明内容】

针对现有技术的缺陷，本发明的目的在于提供一种亚稳态气体激光的共振增强横向光泵浦装置，旨在解决现有技术中由于采用了偏振棱镜、对泵浦光的吸收路径有限导致激光出射功率和电光效率低的技术问题。

本发明提供了一种亚稳态气体激光的共振增强横向光泵浦装置，包括泵浦激光模块、共振增强泵浦腔、激光谐振腔和放电激励模块；所述泵浦激光模块的光轴与所述共振增强泵浦腔的轴线重合，所述共振增强泵浦腔的轴线、所述激光谐振腔的轴线和所述放电激励模块的电场方向三者彼此正交且相交于所述放电激励模块的放电区域的中心；所述泵浦激光模块用于泵浦增益介质以实现粒子数反转；所述共振增强泵浦腔通过采用共振增强方法增大腔内的泵浦功率和泵浦光的吸收路径，进而提高对泵浦光的吸收效率；所述激光谐振腔用于实现激光输出；所述放电激励模块用于产生增益介质（亚稳态粒子）。

本发明中，泵浦激光和出射激光相互分离，不需使用偏振器分离，可降低插入损耗，提高出射激光的提取功率；不需使用双色镜这类光学元件。通过共振增强增大泵浦腔腔内功率和泵浦光的吸收路径以促进吸收，而激光诱导荧光中的激光谱线成分不会在泵浦腔中放大而激射。

更进一步地，所述泵浦激光模块包括依次同轴设置的泵浦激光器、光隔离器和模式匹配单元；所述光隔离器用于阻止共振增强泵浦腔与泵浦激光器本征腔之间的耦合，所述模式匹配单元用于实现泵浦激光和共振增强泵浦腔之间的横模匹配。

更进一步地，所述共振增强泵浦腔包括压电陶瓷、电压控制器、探测器、第一凹镜和第二凹镜；所述压电陶瓷、第一凹镜和第二凹镜沿泵浦激光传播方向依次同轴放置，所述第一凹镜和第二凹镜的凹面相对，第一凹镜装在压电陶瓷上，第二凹镜经镜架固定于光学平台上；所述第一凹镜和所述第二凹镜用于搭建泵浦腔，所述压电陶瓷、所述电压控制器和所述探测器用于反馈调节泵浦腔的腔长以实现共振增强。

更进一步地，所述激光谐振腔包括：第三凹镜和输出耦合镜；所述第三凹镜的凹面朝向腔内，且与所述输出耦合镜同轴放置；所述输出耦合镜用于实现激光输出。

更进一步地，放电激励模块包括高压电极和接地电极；在所述高压电极和所述接地电极之间产生激光运转所需的增益介质（亚稳态粒子）。

在本发明实施例中，该横向泵浦方法可向多路横向泵浦扩展。该横向泵浦方法不仅适用于本征起振出射激光，还可用于种子注入式的主振荡功率放大器结构。利用共振增强的横向泵浦方法促进对泵浦光的吸收也适用于光泵浦泵浦氧碘激光器等其他光泵浦气体激光器。该光泵浦亚稳态气体激光可凭借其更为紧凑的体积、高电光效率作为极紫外光刻光源的驱动激光器。

本发明还提供了一种根据上述的共振增强横向光泵浦装置实现亚稳态气体激光的共振增强横向光泵浦方法，包括下述步骤：

- （1）利用所述放电激励模块产生增益介质（亚稳态粒子）；
- （2）利用所述第一凹镜和第二凹镜在与放电电场方向垂直的方向搭建泵浦激光腔；
- （3）将所述泵浦激光模块与所述泵浦激光腔同轴放置，并将泵浦激光引入至泵浦激光腔，利用腔长反馈控制元件和腔长控制方法对腔长进行控制以实现共振增强；
- （4）在与放电电场方向和泵浦增强腔轴线均垂直的方向搭建激光谐振

腔；

(5) 监测激光输出耦合镜处的激光输出，微调激光谐振腔的腔镜使激光输出功率或能量最高。

更进一步地，在步骤(3)中，所述腔长控制方法包括：开环腔长扫描步骤和闭环腔长控制步骤。

更进一步地，所述开环腔长扫描步骤具体为：

第一步，根据压电陶瓷的分辨率和泵浦激光的波长来设置扫描的步长和步数，并满足：步长大于压电陶瓷的分辨率，步长与步数的乘积的值大于泵浦激光波长的一半；

第二步，将第一步中设置的步长根据压电陶瓷位移和驱动电压的关系换算成电压步长，给压电陶瓷一个单向增大的驱动电压信号，使得泵浦腔的腔长单向增加；

第三步，记录每个扫描点下的驱动电压信号和探测器探测到的光强信号并比较，找出最大光强信号 $I_{\max}$ 及相应的驱动电压信号 $V_{\max}$ 。

更进一步地，所述闭环腔长控制步骤具体为：

第一步，设置闭环腔长扫描控制程序下的控制步长，控制步长满足：控制步长大于压电陶瓷的分辨率，小于等于开环扫描程序的扫描步长；

第二步，将第一步中设置的步长根据压电陶瓷位移和驱动电压的关系换算成电压步长，在程序中引入所述开环腔长扫描步骤中获得的最大光强的驱动电压信号 $V_{\max}$ 和光强信号 $I_{\max}$ ，给压电陶瓷施加驱动电压信号 $V_{\max}$ 并采集该电压信号下的光强信号 I ；

第三步，比较 I 与 $I_{\max}$ ，若 I 与 $I_{\max}$ 不等，则进入闭环系统：

增加一个电压步长，即腔长增加一个步长后：若光强信号增大，则继续增加一个电压步长，若光强信号减小，则减小一个电压步长；

减小一个电压步长，即腔长减少一个步长后：若光强信号增大，则继续减小一个电压步长，若光强信号减小，则增加一个电压步长。

本发明采用分离泵浦激光和出射激光的横向泵浦方式，不需使用偏振元件提取出射激光，提高同等泵浦条件下的出射功率；不需在腔内使用光学元件，降低插入损耗；能够避免双色镜的使用，降低对光学元件的要求；通过对泵浦腔采用共振增强可增大泵浦腔内的泵浦激光功率和泵浦吸收路径，提高对泵浦光的吸收效率和整个激光系统的电光效率。此外，本发明还可扩展至多路横向泵浦，降低对单个半导体激光泵浦单元在功率和光束质量方面的要求。

【附图说明】

图 1 为本发明实施例提供的亚稳态气体激光的共振增强横向光泵浦装置的结构示意图。

其中，1 为泵浦激光器，2 为光隔离器，3 为模式匹配单元，4 为压电陶瓷，5 为电压控制器，6 为探测器，7 为第一凹镜，8 为第二凹镜，9 为第三凹镜，10 为激光输出耦合镜，11 为高压电极，12 为接地电极。

图 2 为本发明实施例提供的亚稳态气体激光的共振增强横向光泵浦方法中开环腔长扫描步骤的流程实现图。

图 3 为本发明实施例提供的亚稳态气体激光的共振增强横向光泵浦方法中闭环腔长控制步骤的流程实现图。

【具体实施方式】

为了使本发明的目的、技术方案及优点更加清楚明白，以下结合附图及实施例，对本发明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仅用以解释本发明，并不用于限定本发明。

为实现上述目的，本发明提供了一种共振增强的横向泵浦装置，装置包括泵浦激光模块、共振增强泵浦腔、激光谐振腔和放电激励模块。泵浦激光模块与共振增强泵浦腔等高同轴，共振增强泵浦腔、激光谐振腔的轴线和放电激励模块的电场三者彼此正交并相交于放电区域的中心。

通过横向泵浦分离泵浦激光和出射激光避免使用双色镜和偏振元件，

减少腔内光学元件的使用并提高提取功率；基于相干叠加的共振增强腔，增大腔内功率和吸收路径进而促进吸收，提高对泵浦激光的吸收效率和激光系统的电光效率。

如图 1 所示，泵浦激光模块包括泵浦激光器 1、光隔离器 2 和模式匹配单元 3。光隔离器 2 用于阻止泵浦激光器本征腔和共振增强泵浦腔之间的耦合，模式匹配单元 3 用于实现泵浦激光和泵浦腔之间的横模匹配。

作为本发明的一个实施例，模式匹配单元 3 可以为透镜或者透镜组。

共振增强泵浦腔包括第一凹镜 7、第二凹镜 8，压电陶瓷 4，电压控制器 5，探测器 6。第一凹镜 7、第二凹镜 8 用于构成对称共焦腔或稳定腔，两凹镜的凹面和另一面均分别镀有与泵浦激光相应的窄带高反膜和宽带增透膜，且其中一凹镜上放置压电陶瓷 4。通过探测器 6 监测泵浦腔的出射信号，对压电陶瓷 4 的电压控制器 5 进行反馈控制，进而调节泵浦腔的腔长以实现共振增强。作为本发明的一个实施例，压电陶瓷 4 可以采用环形压电陶瓷，也可采用外方内圆的压电陶瓷，还可以采用多块 (≥ 3) 压电陶瓷沿圆周均匀分布的组合形式。

激光谐振腔包括第三凹镜 9 和输出耦合镜 10。第三凹镜 9 的凹面镀有与出射激光波长相应的高反膜，第三凹镜 9 的另一面的形状以及是否镀膜则不做要求。充当激光输出耦合镜 10 的透射率可根据最佳透射率公式获得： $T_m = \sqrt{2g^0(\nu)la} - a$ ，其中 T_m 为最佳透射率， ν 为激光频率， $g^0(\nu)$ 为激光频率处的小信号增益系数， l 为增益介质沿光轴方向的长度， a 为往返净损耗率。

放电激励模块包括高压电极 11 和接地电极 12，放电激励模块用于产生激光所需的增益介质（亚稳态原子或分子）。

在本发明实施例中，所述电极可以是平行放置的两平板电极；也可以是高压电极为条状电极阵列，接地电极为平板电极，条状电极阵列组成的平面和平板电极的平面平行。在放电方式的选择上，放电可以采用直流脉

冲放电、射频放电、微波放电，还可以采用场发射的方式。

总体而言，通过本发明所构思的以上技术方案与现有的双程纵向泵浦方法相比，能够取得以下有益效果：采用分离泵浦激光和出射激光的横向泵浦方式，不需使用偏振元件提取出射激光，提高同等泵浦条件下的出射功率；能够避免双色镜的使用，降低对光学元件的要求；不需在腔内使用光学元件，降低插入损耗；通过对泵浦腔采用共振增强可增大腔内的泵浦功率和泵浦吸收路径，提高对泵浦光的吸收效率和整个激光系统的电光效率。此外，本发明还可扩展至多路横向泵浦，降低对单个半导体激光泵浦单元在功率和光束质量方面的要求。

为了使本发明的目的、技术方案及优点更加清楚明白，以下结合附图及实施例，对本发明进行进一步详细说明。

具体的操作实施步骤为：

S1：利用放电激励模块（11，12）产生增益介质（亚稳态粒子）；

S2：将两块凹镜（7和8）的凹面相对放置，将泵浦激光引入泵浦腔、搭建泵浦腔，保证泵浦腔的光轴穿过放电区域中心并与电场方向垂直；

S3：结合模式匹配单元3、利用压电陶瓷4、电压控制器5和探测器6反馈控制调节泵浦腔的腔长，使泵浦激光和泵浦腔共振；

S4：在与泵浦腔和电场方向均垂直的方向，利用第三凹镜9和激光输出耦合镜10搭建激光谐振腔，保证谐振腔的光轴穿过放电区域中心；

S5：监测激光输出耦合镜10处的激光输出，微调激光谐振腔的腔镜使激光输出功率或能量最高。

下面结合实施例及前述实施步骤，对本发明作进一步详细说明。应当理解，此处所描述的具体实施例仅仅用以解释本发明，并不用于限定本发明。

下面的实施例中，以半导体激光泵浦亚稳态氩气激光为例：

（1）利用射频平行平板放电的方式实现氩气和氦气混合气体（氩气含

量为 2%) 在大气压下的稳定辉光放电以获得激光运转的亚稳态氩原子。

(2) 利用两块完全相同的平凹镜 (凹面对 811.53 nm 附近窄带反射率为 99%, 平面对 811.53 nm 宽带增透, 曲率半径 $R=150\text{ mm}$) 7 和 8 搭建对称共焦腔, 保证共焦腔的轴线和放电区域中心等高并与电场方向垂直。搭建中可利用可见光波段的激光 (如长春新产业光电技术有限公司的 532nm 的绿光激光器, MGL-III-532) 作为指示光辅助调整。

(3) 将 811.53 nm 的窄线宽半导体泵浦激光 (OptiGrate, SEOP Laser 811-20GHz-30W) 经过光隔离器 2 (Throlabs, IO-5-TIS2-HP) 和模式匹配单元 3 (Throlabs, LB1779-B) 后引入 (2) 中搭建的共焦腔内。在第二凹镜 8 的出口处放置硅光探测器 6 (Throlabs, PDA8A) 监测激光输出信号 (需要指出的是, 激光在进入硅光探测器之前需大幅度衰减)。利用压电陶瓷 4 (PI, PD080.30, 环形) 的电压控制器 5 (PI, E-753.1CD) 驱动压电陶瓷 4, 结合计算机和实现共振增强所需的腔长控制程序寻找最佳腔长。

腔长的控制程序包括两部分: 开环腔长扫描程序和闭环腔长控制程序。

如图 2 所示, 在开环腔长扫描程序中设置腔长扫描的位移步长和步数分别为 2 nm 和 300, 将 2 nm 的位移步长换算成电压步长。通过电压控制器 5 给压电陶瓷 4 施加一个单向增大的锯齿波电压信号使谐振腔的腔长线性增加。在此过程中, 采集每一个扫描点下的透射光强即硅光探测器 6 的信号并进行比较, 以获得最大透射信号 $I_{\max}$ 和对应的电压信号 $V_{\max}$ 。通过开环控制程序可迅速将腔长定位至泵浦腔的最佳工作点附近。

在开环腔长扫描程序后, 进入闭环腔长控制程序。如图 3 所示, 闭环腔长控制程序主要是利用爬坡法对泵浦腔的腔长进行实时控制以锁定在最佳腔长附近。闭环控制程序开始时, 设置腔长控制的位移步长为 1nm 并换算成电压扫描步长, 将开环扫描程序中的 $V_{\max}$ 赋值给电压控制器 5, 采集此时的透射光强 I_1 , 应有 $I_1=I_{\max}$ 。若 $I_1 \neq I_{\max}$, 则增大电压使腔长增加, 采集

此时的透射光强 I_2 :

若 $I_1 < I_2$, 继续增大一个步长的电压; 若 $I_1 > I_2$, 则减小一个步长的电压。如此, 按照: 增大一个步长电压后, 若透射光强增大则继续增大一个步长, 若透射光强减小则减小一个步长电压; 减小一个步长电压后, 若透射光强增大则继续减小一个步长, 若透射光强减小则增大一个步长电压的闭环控制将腔长稳定在最佳腔长附近的一个小区间内。

具体控制程序的编写参照图 2 和图 3 所示的腔长控制程序流程图。

(4) 在与泵浦腔和电场方向均垂直的方向, 利用第三凹镜 9 (平凹镜, 凹面朝向放电区域, 且凹面对 912nm 全反) 和激光输出耦合镜 10 (两面均抛光的平面镜) 搭建非稳定谐振腔 (同样可借助 (2) 中所述 532 nm 激光作为指示光搭建)。

(5) 激光谐振腔搭建后, 利用功率计监测平面镜 10 处的出射激光功率。微调激光谐振腔使得出射激光功率最高。

以上所述为本发明的较佳的实施例而已, 但本发明不局限于该实施例和附图所公开的内容。例如在放电方式的选择上, 并不局限于射频的平行平板放电, 而且适用于直流脉冲放电、微波 (含阵列) 放电、阴极场发射 (含阵列) 产生亚稳态粒子的情况。共振增强的泵浦腔不限于对称共焦腔, 还包括稳定腔, 而且泵浦腔的腔镜不限于平凹镜, 曲率半径也无需一致。激光谐振腔的输出镜不限于平面镜, 也可以是凹面镜。激光出射不局限于实施例中所展示的本征起振, 还适用于种子注入式的主振荡功率放大器结构。此外, 利用共振增强的横向泵浦方法促进对泵浦光的吸收的方法也适用于光泵浦氧碘激光器等其他光泵浦气体激光器。

本领域的技术人员容易理解, 以上所述仅为本发明的较佳实施例而已, 并不用以限制本发明, 凡在本发明的精神和原则之内所作的任何修改、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

1、一种亚稳态气体激光的共振增强横向光泵浦装置，其特征在于，包括泵浦激光模块、共振增强泵浦腔、激光谐振腔和放电激励模块；

所述泵浦激光模块的光轴与所述共振增强泵浦腔的轴线重合，所述共振增强泵浦腔的轴线、所述激光谐振腔的轴线和所述放电激励模块的电场方向三者彼此正交且相交于所述放电激励模块的放电区域的中心；

所述泵浦激光模块用于泵浦增益介质以实现粒子数反转；所述共振增强泵浦腔通过采用共振增强方法增大腔内的泵浦功率和泵浦吸收路径，进而提高对泵浦光的吸收效率；所述激光谐振腔用于实现激光输出；所述放电激励模块用于产生增益介质。

2、如权利要求1所述的共振增强横向光泵浦装置，其特征在于，所述泵浦激光模块包括依次同轴设置的泵浦激光器（1）、光隔离器（2）和模式匹配单元（3）；

所述光隔离器（2）用于阻止共振增强泵浦腔与泵浦激光器本征腔之间的耦合，所述模式匹配单元（3）用于实现泵浦激光和共振增强泵浦腔之间的横模匹配。

3、如权利要求1或2所述的共振增强横向光泵浦装置，其特征在于，所述共振增强泵浦腔包括压电陶瓷（4）、电压控制器（5）、探测器（6）、第一凹镜（7）和第二凹镜（8）；

所述压电陶瓷（4）、第一凹镜（7）和第二凹镜（8）沿泵浦激光传播方向依次同轴放置，所述第一凹镜（7）和第二凹镜（8）的凹面相对，第一凹镜（7）装在压电陶瓷（4）上，第二凹镜（8）经镜架固定于光学平台上；

所述第一凹镜（7）和所述第二凹镜（8）用于搭建泵浦腔，所述压电陶瓷（4）、所述电压控制器（5）和所述探测器（6）用于反馈调节泵浦腔

的腔长以实现共振增强。

4、如权利要求 1-3 任一项所述的共振增强横向光泵浦装置，其特征在于，所述激光谐振腔包括：第三凹镜（9）和输出耦合镜（10）；

所述第三凹镜（9）的凹面朝向腔内，且与所述输出耦合镜（10）同轴放置；所述输出耦合镜（10）用于出射激光。

5、如权利要求 1-4 任一项所述的共振增强横向光泵浦装置，其特征在于，所述放电激励模块包括高压电极（11）和接地电极（12）；在所述高压电极（11）和所述接地电极（12）之间产生激光运转所需的增益介质。

6、一种根据权利要求 1-5 任一项所述的共振增强横向光泵浦装置实现亚稳态气体激光的共振增强横向光泵浦方法，其特征在于，包括下述步骤：

（1）利用所述放电激励模块产生增益介质；

（2）利用所述第一凹镜和第二凹镜在与放电电场方向垂直的方向搭建泵浦激光腔；

（3）将所述泵浦激光模块与所述泵浦激光腔同轴放置，并将泵浦激光引入至泵浦激光腔，利用腔长反馈控制元件和腔长控制方法对腔长进行控制以实现共振增强；

（4）在与放电电场方向和泵浦增强腔轴线均垂直的方向搭建激光谐振腔；

（5）监测激光输出耦合镜处的激光输出，微调激光谐振腔的腔镜使激光输出功率或能量最高。

7、如权利要求 6 所述的共振增强横向光泵浦方法，其特征在于，在步骤（3）中，所述腔长控制方法包括：开环腔长扫描步骤和闭环腔长控制步骤。

8、如权利要求 7 所述的共振增强横向光泵浦方法，其特征在于，所述开环腔长扫描步骤具体为：

（1）根据泵浦激光波长和压电陶瓷的分辨率设置开环腔长扫描的步长

和步数；

其中，所述步长大于压电陶瓷的分辨率，所述步长与所述步数的乘积的值大于泵浦激光波长的一半；

(2) 根据压电陶瓷位移和驱动电压的关系将所述步长换算成电压步长，并给压电陶瓷施加单向增大的驱动电压信号，使得泵浦腔的腔长单向增加；

(3) 记录每个扫描点下的驱动电压信号和探测器探测到的光强信号并比较，找出最大光强信号 $I_{\max}$ 下的扫描点对应的驱动电压信号 $V_{\max}$ 。

9、如权利要求 8 所述的共振增强横向光泵浦方法，其特征在于，所述闭环腔长控制步骤具体为：

(1) 设置闭环腔长扫描的控制步长；

其中所述控制步长大于压电陶瓷的分辨率，且小于等于所述开环腔长扫描步骤中的扫描步长；

(2) 根据压电陶瓷位移和驱动电压的关系将所述扫描步长换算成电压步长，在程序中引入所述开环腔长扫描步骤中获得的最大光强的驱动电压信号 $V_{\max}$ 和光强信号 $I_{\max}$ ，给压电陶瓷施加驱动电压信号 $V_{\max}$ 并采集该电压信号下的光强信号 I ；

(3) 比较 I 与 $I_{\max}$ ，若 I 与 $I_{\max}$ 不等，进入闭环控制；

所述闭环控制具体包括：

增加一个电压步长，即腔长增加一个步长后：若光强信号增大，则继续增加一个电压步长，若光强信号减小，则减小一个电压步长；

减小一个电压步长，即腔长减小一个步长后：若光强信号增大，则继续减小一个电压步长，若光强信号减小，则增加一个电压步长。

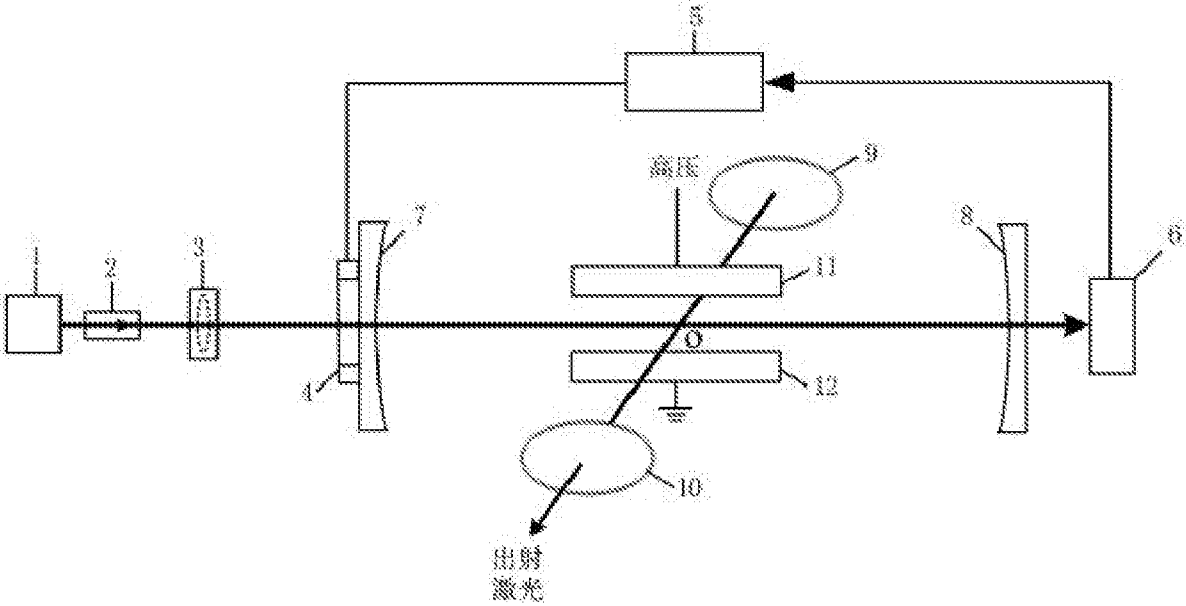


图 1

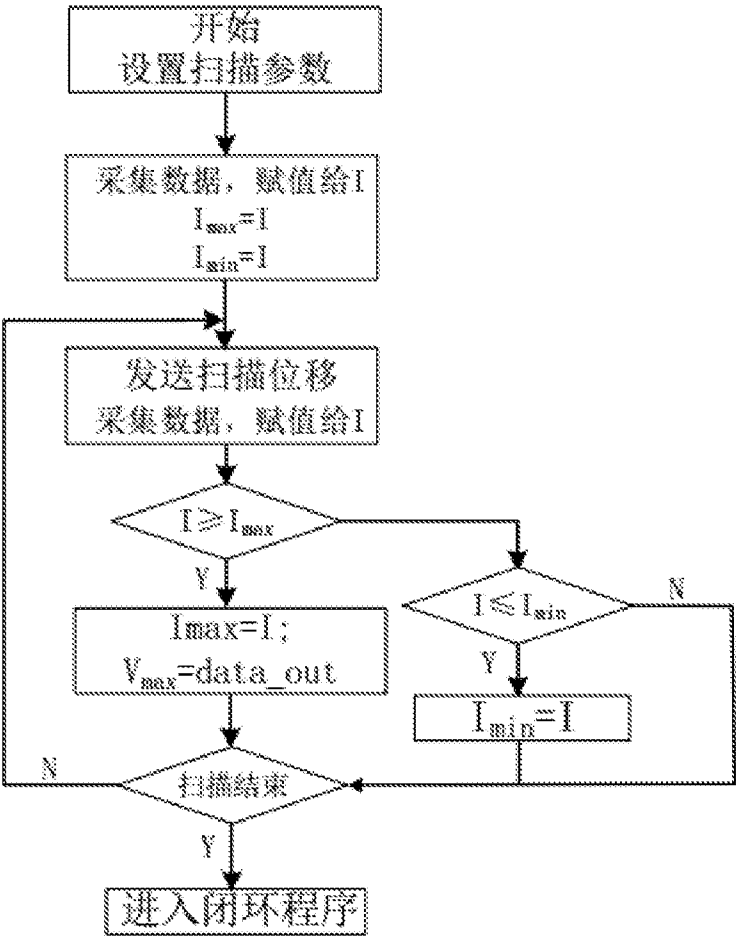


图 2

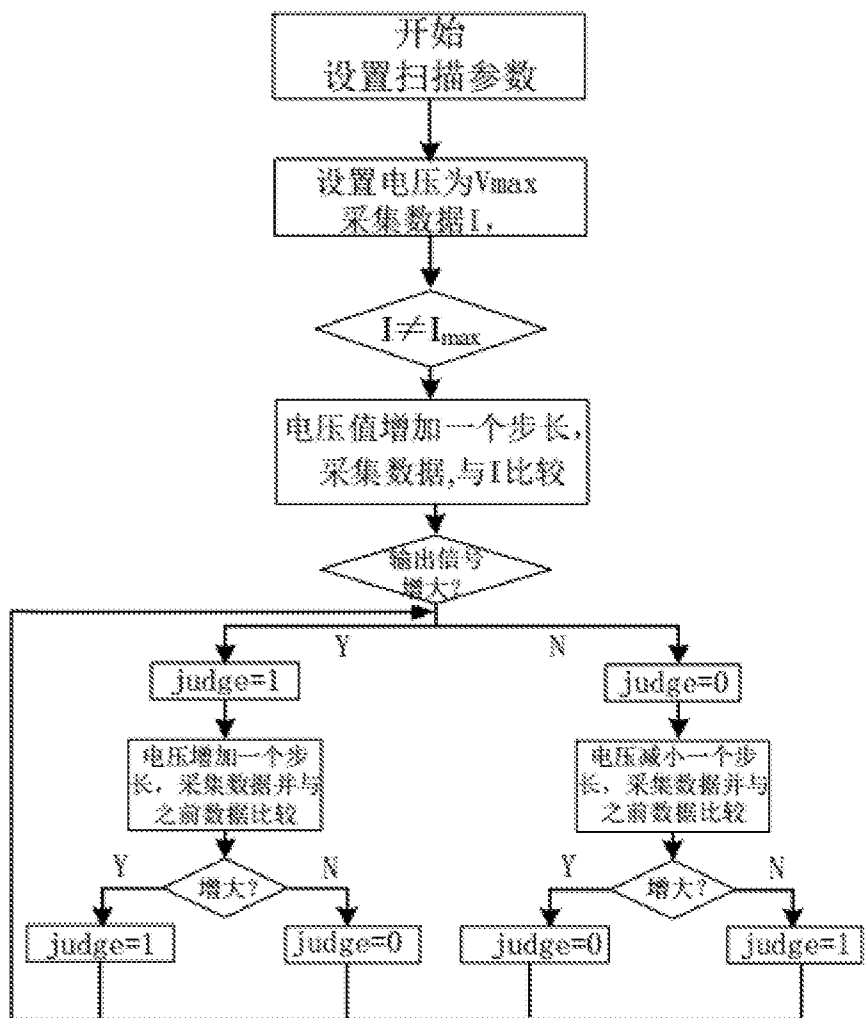


图 3

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2016/098238**A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER**

H01S 3/091 (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)

H01S 3

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)

WPI, EPODOC, CNPAT, CNKI: metastable, laser, gas, pump, strength+, discharge, piezoelectric, ceramic, cavity, length, gain, transverse

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	CN 105305215 A (HUAZHONG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY), 03 February 2016 (03.02.2016), description, paragraphs [0005]-[0026], and figures 1-2	1-5
Y	CN 105305215 A (HUAZHONG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY), 03 February 2016 (03.02.2016), description, paragraphs [0005]-[0026], and figures 1-2	6-9
A	CN 101588012 A (XIDIAN UNIVERSITY), 25 November 2009 (25.11.2009), the whole document	1-9
A	US 4334199 A (THE UNIVERSITY OF ROCHESTER), 08 June 1982 (08.06.1982), the whole document	1-9
A	US 4259645 A (THE UNITED STATES OF AMERICA AS REPRESENTED BY THE UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY), 31 March 1981 (31.03.1981), the whole document	1-9
Y	ZHAO, Li et al., "The Piezoelectric Ceramic Controlling System and It's Application to Laser", PIEZOELECTRICS & ACOUSTOOPTICS, volume 29, number 5, 31 October 2007 (31.10.2007), pages 550-552	6-9

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C.☒ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:	"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
"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	"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
"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)	"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
"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	"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search 20 March 2017 (20.03.2017)	Date of mailing of the international search report 17 April 2017 (17.04.2017)
Name and mailing address of the ISA/CN: State Intellectual Property Office of the P. R. China No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing 100088, China Facsimile No.: (86-10) 62019451	Authorized officer HE, Li Telephone No.: (86-10) 62413587

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2016/098238

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	HAN, Jiande et al., "Demonstration of A Diode-Pumped Metastable Ar Laser", OPTICS LETTERS, volume 38, number 24, 15 December 2013 (15.12.2013), the whole document	1-9

International application No.
PCT/CN2016/098238

Form PCT/ISA/210 (patent family annex) (July 2009)

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2016/098238

A. 主题的分类

H01S 3/091 (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)

H01S3

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))

WPI, EPODOC, CNPAT, CNKI: 亚稳态, 激光, 气体, 泵浦, 增强, 放电, 压电, 陶瓷, 腔, 长度, 增益, 横向
metastable, laser, gas, pump, strength+, discharge, piezoelectric, ceramic, cavity, length, gain, transverse

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
X	CN 105305215 A (华中科技大学) 2016年 2月 3日 (2016 - 02 - 03) 说明书第【0005】-【0026】段, 附图1-2	1-5
Y	CN 105305215 A (华中科技大学) 2016年 2月 3日 (2016 - 02 - 03) 说明书第【0005】-【0026】段, 附图1-2	6-9
A	CN 101588012 A (西安电子科技大学) 2009年 11月 25日 (2009 - 11 - 25) 全文	1-9
A	US 4334199 A (THE UNIVERSITY OF ROCHESTER) 1982年 6月 8日 (1982 - 06 - 08) 全文	1-9
A	US 4259645 A (THE UNITED STATES OF AMERICA AS REPRESENTED BY THE UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY) 1981年 3月 31日 (1981 - 03 - 31) 全文	1-9
Y	赵丽 等. “压电陶瓷控制系统及其在激光器中的应用” 《压电与声光》, 第29卷, 第5期, 2007年 10月 31日 (2007 - 10 - 31), 第550-552页	6-9

☒ 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

2017年 3月 20日

国际检索报告邮寄日期

2017年 4月 17日

ISA/CN的名称和邮寄地址

中华人民共和国国家知识产权局 (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

何理

电话号码 (86-10) 62413587

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	HAN, Jiande 等. "Demonstration of a diode-pumped metastable Ar laser" 《OPTICS LETTERS》，第38卷，第24期，2013年 12月 15日 (2013 - 12 - 15)， 全文	1-9

国际申请号	PCT/CN2016/098238
-------	-------------------

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	105305215	A	2016年 2月 3日	无	
CN	101588012	A	2009年 11月 25日	CN	101588012 B 2011年 1月 12日
US	4334199	A	1982年 6月 8日	无	
US	4259645	A	1981年 3月 31日	无	

表 PCT/ISA/210 (同族专利附件) (2009年7月)