

碱金属激光器在SERF原子磁力计泵浦领域的应用前景

李志永^{1,2}, 谭荣清¹, 柯常军¹, 黄伟^{1,3}, 叶庆²

1. 中国科学院电子学研究所高功率气体激光技术部, 北京 100190
2. 解放军电子工程学院, 脉冲功率激光技术国家重点实验室, 合肥 230037
3. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 碱金属激光器的输出波长无需稳频即可实现中心波长与碱金属原子D₁线波长的匹配, 在无自旋交换弛豫(SERF)原子磁力计泵浦领域具有较为广阔的应用前景。综述了SERF磁力计泵浦源和碱金属激光器的发展现状, 分析了SERF磁力计对泵浦源的需求, 讨论了碱金属激光器用于SERF磁力计泵浦源的潜力及面临的问题。

关键词 气体激光器; 碱金属激光器; 原子磁力计; 无自旋交换弛豫

基于无自旋交换弛豫(SERF)效应搭建的碱金属(钾、铷、铯)原子磁力计^[1]具有磁场强度探测灵敏度高的特点, 目前已达到0.16 fT/Hz^{1/2}, 使其在物质结构分析^[2]、矿产勘探^[3]、生物医疗^[4]、深海反潜^[5]等领域具有广泛应用前景。

SERF磁力计一般使用输出波长在D₁线附近的激光器泵浦碱金属原子。目前, 常见的SERF磁力计使用的泵浦源主要为半导体激光器, 按照激光器的结构类型可以分为普通半导体激光器^[6]、外腔半导体激光器^[6]、分布反馈半导体(DBF)激光器^[7]、垂直腔面发射半导体激光器(VCSEL)^[8]。其中普通半导体激光器的光谱线宽较D₁线宽大很多, 泵浦效率低; 而外腔半导体激光器、DFB激光器、VCSEL等窄线宽半导体激光器, 抽运效率高。但为了实现高稳定的抽运, 需要对该类激光器进行稳频, 且在较高温度或较大泵浦光斑时, 存在功率不足的缺点, 需要加入放大器^[7]或者使泵浦源偏离D₁线^[9]实现均匀抽运。半导体泵浦碱金属激光器(DPAL)因其具有窄线宽输出且无需稳频等优势, 有望用作SERF磁力计泵浦源, 可解决目前SERF磁力计泵浦源面临的问题。本文分析碱金属激光器在该领域的应用前景。

1 SERF磁力计的基本原理

碱金属原子最外层仅有1个电子, ²S_{1/2}为基态能级, ²P_{1/2}、²P_{3/2}为碱金属原子的最外层电子的自旋-轨道相互作用而劈裂的激发态能级。基态²S_{1/2}和激发态²P_{3/2}、基态²S_{1/2}和

激发态²P_{1/2}之间的跃迁谱线分别成为D₂、D₁谱线。碱金属原子是SERF磁力计常用的工作物质。

当原子密度足够大, 且原子所处外磁场足够小, 原子之间的自旋交换碰撞弛豫速率超过原子能级分裂的拉莫尔频率时, 自旋交换碰撞弛豫展宽消失, 将获得更窄的磁共振谱线^[1]。更窄的磁共振谱线使SERF效应实现的原子磁力计具有更高的灵敏度。

SERF磁力计的基本原理如图1所示。该类磁力计采用“泵浦—探测”的工作方式, 泵浦光将²S_{1/2}基态碱金属原子泵浦至第一激发态²P_{1/2}的自旋极化子能态, 将碱金属原子从自旋无序泵浦至自旋趋于一致实现宏观极化, 利用磁场中极化原子改变光偏振的特性, 通过测量探测光的偏振变化得到蒸气室所处位置的磁场强度。

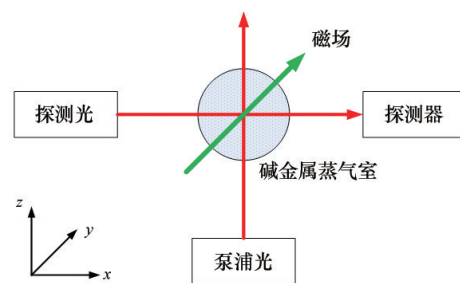


图1 SERF磁力计的原理示意

Fig. 1 Schematic of a typical SERF magnetometer

收稿日期: 2015-05-29; 修回日期: 2016-05-06

基金项目: 脉冲功率激光技术国家重点实验室基金项目(SKL2014KF02); 《科技导报》博士生创新研究资助计划项目(KJDB2012001); 国家自然科学基金项目(61505212, 60708005, 61178029)

作者简介: 李志永, 助理研究员, 研究方向为光泵浦气体激光器, 电子信箱: zhiyongli@mail.ie.ac.cn

引用格式: 李志永, 谭荣清, 柯常军, 等. 碱金属激光器在SERF原子磁力计泵浦领域的应用前景[J]. 科技导报, 2016, 34(23): 99-105; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2016.23.010

2 原子磁力计泵浦源的研究现状及分析

2002年,普林斯顿大学 Romalis 研究组和华盛顿大学 Allred 等首次实现了 SERF 磁力仪^[4]。他们在 SERF 磁力仪搭建中,使用了调谐至钾 D₁线的半导体激光器,开启了半导体激光器在 SERF 磁力计泵浦方面的应用。

目前,用于“泵浦—探测”方式 SERF 磁力仪的泵浦源主要分为两类:宽带(线宽 2~4 nm)半导体激光器和窄线宽半导体激光器(外腔半导体激光器、DFB 激光器^[7]等)。

采用宽带半导体激光器作为泵浦源的 SERF 磁力仪的典型代表为威斯康星-麦迪逊大学 Li 等^[10]的装置。他们搭建的 Rb-SERF 磁力计采用的泵浦源为线宽 4 nm、输出功率 15 W 的 795 nm 激光器。铷气室内的缓冲气体为 101 kPa 的氦气和 0.8 kPa 的氮气,碰撞加宽后 D₁线的线宽约为 20 GHz(40 pm)。因此,Li 等采用的泵浦源光谱宽度约为 D₁线线宽的 100 倍,泵浦效率极低。极低的泵浦效率使得泵浦光穿过碱金属气室后,仍有较大功率的泵浦光,需要使用窄带滤波片(778~782 nm 带通)等措施消除泵浦光对探测光接收的影响。因此,极低的泵浦效率限制了该类激光器在 SERF 磁力计泵浦方面的广泛应用。

伴随着半导体激光技术的发展,外腔、DFB 等类型的窄线宽半导体激光器技术日益成熟,激光器输出线宽可达 kHz~MHz,在 SERF 磁力计泵浦中逐渐得到广泛应用。北京航空航天大学房建成等搭建的 K-SERF^[6]和 Cs-SERF^[11]磁力计均使用外腔半导体激光器作为泵浦源。普林斯顿大学的 Shah 等^[9]的 Rb-SERF 磁力计泵浦源为 DFB 激光器。韩国釜山国立大学的 Lee 等^[7]的 K-SERF 磁力计泵浦源为 DFB 激光器。该类型激光器的线宽窄,可对 D₁线的某一精细谱,高效率地驱动电子自旋。然而,这种泵浦源在 SERF 磁力计应用中主要存在 2 个问题:一是输出功率一般仅几十毫瓦,为实现较大体积均匀的 SERF 态原子,通常需要加入放大器达到瓦(W)级的泵浦功率^[7]或者使泵浦源中心波长偏离 D₁线^[9];二是由于线宽极窄,为得到高稳定度的 SERF 态原子,通常需要辅助的碱金属气室用于稳频^[11-12],增加了泵浦源装置的复杂性。

由以上对 SERF 磁力计泵浦源现状的分析可以看出,优质的泵浦源需要有以下 3 个特点:1) 波长精确对准碱金属原子 D₁线,且谱线线宽窄;2) 激光线偏振,且输出功率可线性放大至瓦级;3) 结构紧凑,便于 SERF 磁力计的小型化。目前的半导体激光器在同时满足上述 3 种要求方面存在一定困难,碱金属激光器有望成为这种高效优质的 SERF 磁力计泵浦源。

3 碱金属激光器在磁力计领域的应用前景分析

3.1 碱金属激光器基本原理

碱金属蒸气激光器是典型的三能级系统^[13],图 2 是参与泵浦和激光作用的碱金属原子能级示意,ΔE 为两上能级之间的能级差。在激励泵浦源的作用下,基态 ²S_{1/2} 上的粒子被抽

运到 ²P_{3/2} 能级上,到达高能级 ²P_{3/2} 的粒子以无辐射跃迁的形式转移到激光上能级 ²P_{1/2} 上,在 ²P_{1/2} 和 ²S_{1/2} 之间(即 D₁线)实现激光输出。

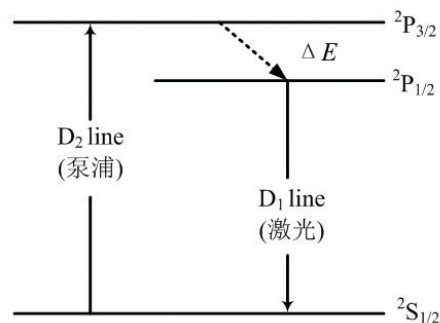


图 2 碱金属激光器能级结构示意图

Fig. 2 Energy levels of alkali laser

碱金属激光器的增益介质是蒸气状态的碱金属原子,主要为钾(K)、铷(Rb)、铯(Cs),各增益介质激光器对应的激光参数如表 1 所示。可以看出,该类激光器可采用半导体激光器(LD)泵浦^[14],且量子效率均大于 95%,显示出其在小型化高效率激光输出方面具有较大潜力。

表 1 碱金属激光器的激光参数

Table 1 Parameters of alkali lasers

增益介质	D ₁ 线波长/ nm	D ₂ 线波长/ nm	ΔE/cm ⁻¹	量子 效率/%
K	770.11	766.70	57.7	99.557
Rb	794.98	780.25	237.9	98.147
Cs	894.59	852.35	554.1	95.278

3.2 碱金属激光器的应用潜力

碱金属激光器和 SERF 磁力计在工作物质、工作条件等方面具有许多共同点。表 2^[3, 6, 9-11, 15-21]是二者碱金属气室的工作条件对比。

由表 2 可以看出,碱金属激光器和 SERF 磁力计的碱金属气室仅在缓冲气体组分上有差异。以铷为例,表 3^[22-24]列举了几种常见的气体与铷原子作用的精细结构混合截面、淬灭截面、碰撞加宽率、中心波长漂移率的关系。

表 3 中, Q₂₁ 为 ⁵P_{3/2}→⁵P_{1/2} 的精细结构混合截面, Q₁₂ 为 ⁵P_{1/2}→⁵P_{3/2} 的精细结构混合截面, Q₂₀ 为 ⁵P_{3/2}→⁵S_{1/2} 的淬灭截面, Q₁₀ 为 ⁵P_{1/2}→⁵S_{1/2} 的淬灭截面。碱金属原子的两上能级之间的弛豫速率与精细结构混合截面成正比,淬灭速率与淬灭截面成正比,由表 3 可以看出,氮气(N₂)、甲烷(CH₄)、乙烷(C₂H₆)均具有较大的 Q₂₁ 和 Q₁₂ 以及较小的 Q₁₀, 能够加快 2 个上能级间的弛豫速率,减少 D₁线的自发辐射荧光。小分子烷烃气体与 N₂ 对碱金属原子作用的不同在于,小分子烷烃还具有较小的 Q₁₀, 即可以减少 D₂线的自发辐射荧光。由于碱金属

表2 碱金属激光器与SERF磁力计的蒸气室工作条件对比

Table 2 Comparisons on the working conditions of alkali lasers and SERF atomic magnetometers

碱金属	器件类型	工作温度/°C	缓冲气体	文献
K	K-DPAL	180	80 kPa He	[15]
		197	202 kPa He	[16]
	K-SERF	180	293 kPa ⁴ He, 8 kPa N ₂	[3]
		185	80 kPa He, 20 kPa N ₂	[6]
Rb	Rb-DPAL	110~160	80 kPa CH ₄	[17]
		135~200	202 kPa He, 12 kPa C ₂ H ₆	[18]
	Rb-SERF	200	40 kPa He, 13 kPa N ₂	[9]
		188	101 kPa ³ He, 0.8 kPa N ₂	[10]
Cs	Cs-DPAL	95~140	80 kPa CH ₄	[19]
		95~160	70 kPa He, 10 kPa C ₂ H ₆	[20]
	Cs-SERF	120	80 kPa ⁴ He, 6.6 kPa N ₂	[11]
		135	17 kPa N ₂	[21]

表3 典型气体与铷原子作用的参数表

Table 3 Parameters of impacts of several typical gases on Rb atoms

气体	Q ₂₁ /10 ⁻¹⁶ cm ²	Q ₁₂ /10 ⁻¹⁶ cm ²	Q ₂₀ /10 ⁻¹⁶ cm ²	Q ₁₀ /10 ⁻¹⁶ cm ²	D ₂ 线线宽加宽率/ (MHz·kPa ⁻¹)	D ₂ 线中心波长 漂移率/(MHz·kPa ⁻¹)
N ₂	23	16	43	3±2	144.21	-46.62
CH ₄	42	30	<1	2±2	210.53	-66.62
C ₂ H ₆	77	57	6±3	58	211.29	-70.53

激光器采用对应D₂线中心波长的半导体激光泵浦,具有较大的Q₂₀气体(如N₂)一方面会引起激光器的热处理问题^[25],另一方面会减弱泵浦光对基态碱金属原子的泵浦作用,表现为激光器阈值的增加。因此,碱金属激光器中的缓冲气体采用了小分子烷烃^[26-27],SERF磁力计则采用了化学性质稳定能够抑制D₁线上能级淬灭速率的氮气^[4]。

由表2还可以看出,两者的工作温度相近,由工作温度引起谱线中心波长漂移相近;缓冲气体气压相近,气体气压一般在几十kPa~几百kPa,均匀加宽机制在激光谱线形成中占主导地位。又由于碱金属激光器在D₁线具有极强的增益,使得碱金属激光器用于SERF磁力计泵浦时,无需稳频即可实现高效稳定的泵浦,与碱金属原子的D₁线获得较好的匹配。

3.3 碱金属激光器与半导体激光器的应用对比

在SERF磁力计泵浦应用中,碱金属激光器与窄线宽半导体激光器的对比分析如表4所示。二者均可实现基模线偏振激光输出,用于SERF磁力计泵浦。在运行机制方面,与碱金属激光器相比,窄线宽半导体激光器的输出波长与驱动电流、热沉温度有关,需要稳频,且在实现瓦级激光时需要使用放大器等器件。在激励方式方面,碱金属激光器使用宽带的半导体激光泵浦,窄线宽半导体激光器使用直流电激励。在辅助设备中,两者均需要辅助的温度控制系统,碱金属激光器用于控制蒸气室温度,窄线宽半导体激光器需要精确控制LD热沉的温度。因此,结构紧凑的低功率碱金属激光器在SERF磁力计领域具有较好的应用前景。

表4 碱金属激光器与半导体激光器的应用对比

Table 4 Comparison of alkali laser and laser diode in pumping of SERF atomic magnetometers

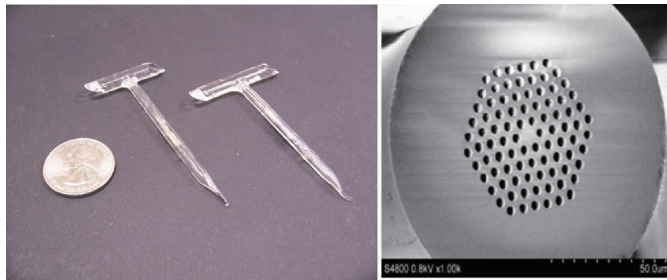
	碱金属激光器	窄线宽半导体激光器
激光模式	均可实现线偏振的TEM ₀₀ 模激光输出	
输出波长	D ₁ 线,不需要稳频	与驱动电流、热沉温度有关,需要稳频
输出功率	单孔径输出功率可比例放大	一般为mW量级,实现W级功率需要放大器等器件
线宽	GHz	kHz~MHz
激励方式	光泵浦	直流电
辅助设备	碱金属蒸气室温控系统	热沉温控系统

4 碱金属激光器小型化的发展现状及分析

碱金属激光器在D₁线具有高增益的特点,基于半导体泵浦蒸气实现的放大器单程小信号放大因子目前已能达到145倍^[28],增益系数达2.5 cm⁻¹。较高的增益意味着碱金属激光器在小型化方面具有发展前景。近年来,碱金属激光器在小型化方面相关的研究工作取得了较快发展,以下从蒸气室结构、谐振腔类型、热问题3方面对碱金属激光器的发展现状进行阐述,并对其在SERF磁力计泵浦领域的应用进行分析。

4.1 蒸气室结构

与其他类型的气体激光器(如氦氖激光器、CO₂激光器)相同,小功率碱金属激光器通常采用玻璃材质的蒸气室。目前,用于碱金属激光器玻璃材质的碱金属蒸气室主要有吹制的大窗口玻璃泡、毛细管结构的玻璃泡和空心光子晶体光纤(图3)。采用“玻璃吹制+熔融封离”技术制作的大窗口(窗口直径通常为20~30 mm)玻璃泡具有工艺成熟、成本低的特点,在碱金属激光器发展初期被普遍采用。最高光光转换效率(62%)的半导体泵浦碱金属激光器^[29]采用的就是该种类型的蒸气室。2008年,美国理波公司的Petersen和Lane使用毛细管结构的碱金属蒸气室,获得了数瓦的碱金属激光^[30]。毛细管结构的蒸气室内径0.9 mm,长度3 cm,实物如图3所示。2014年,以色列班固利恩大学的Sintov等^[31]对使用空心光子晶体光纤作为碱金属气室的DPAL进行了理论研究。其研究表明,该类激光器有望成为百瓦级近红外光源的有力竞争者,是小型化碱金属激光器的优化方案之一。



(a) 毛细管蒸气室 (b) 光子晶体光纤蒸气室

图3 小型化碱金属激光器增益池

Fig. 3 Alkali cells with small dimension

值得注意的是,上述3种常见的用于小功率碱金属激光器的蒸气室结构均需要加热源以保证足够的碱金属原子蒸气压,且需控制窗口温度略高于蒸气室主体部分温度,防止碱金属颗粒在窗口上沉积^[32-39]。这一特征将限制以上3种结构碱金属激光器的微小型化发展。因此,解决蒸气室加热问题,构建高效的温控加热系统,降低加热蒸气室所需功耗,采用结构紧凑的加热装置,将能够促进碱金属激光器在SERF磁力计泵浦领域的应用。

4.2 谐振腔类型

小功率碱金属激光器的谐振腔一般为稳定腔,按照泵浦光与激光的耦合方式技术特征的不同,腔型主要分为4种:双色膜型、L型、II型和V型。

双色膜型谐振腔一般使反射镜在碱金属激光波长高反,在泵浦波长附近高透,是一种典型的光泵浦谐振腔^[20]。泵浦光通过谐振腔的后镜(高反射镜)入射至碱金属蒸气室,使D₁线上下两能级的粒子数翻转,通过谐振腔的光放大作用产生碱金属激光。这种谐振腔可以采用较短的谐振腔,在结构紧凑方面具有优势。但是,该类型激光器的谐振腔呈“一”字

型,泵浦光与碱金属激光同轴,同时,碱金属激光器泵浦光波长与激光波长相差较少,输出耦合镜较难实现对泵浦光的高反,使得部分泵浦光(D₂线光束)穿过输出耦合镜,与碱金属激光混合。混杂在D₁线激光里的D₂线光束将影响SERF磁力计的测量精度,造成本底误差。

L型谐振腔的典型结构如图4所示。该类型的谐振腔一般利用偏振分光元件实现泵浦光与激光的耦合。泵浦光与激光均为线偏振激光,但偏振方向互相垂直,且泵浦光与碱金属激光的传播方向相反。碱金属激光输出为线偏振光,可以通过相位延迟片等光学器件将激光变为左旋圆偏振光,用于SERF磁力计泵浦。因此,在SERF磁力计泵浦中,该类型谐振腔具有较大的潜力。

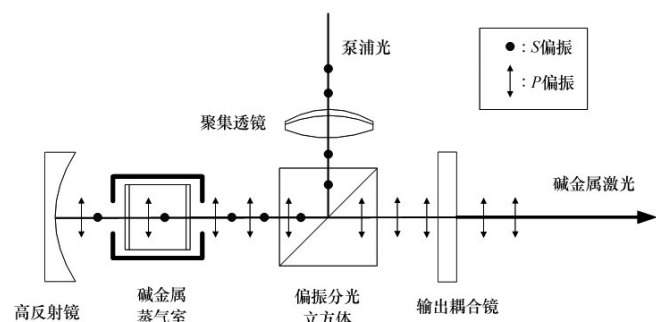


图4 L型谐振腔的碱金属激光器

Fig. 4 Schematic of a typical alkali laser with linear-polarization laser output

II型谐振腔是多端泵浦激光器经常采用的谐振腔结构。该类型激光器可以看做L型谐振腔的扩展结构,即由2个L型谐振腔组成,可以采用2个半导体模块泵浦。II型谐振腔与双色膜谐振腔相结合,可以实现四端泵碱金属激光器^[40]。其结构如图5所示,DM为双色膜镜片,PBS为偏振分光立方体。

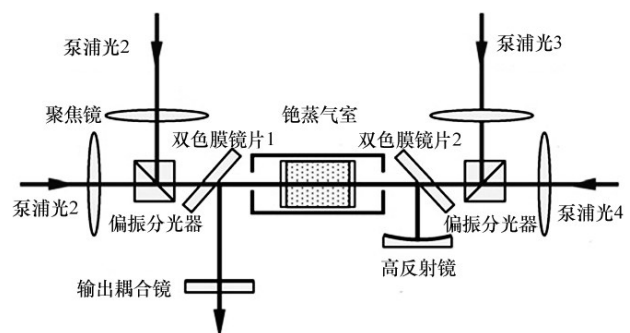


图5 四端泵碱金属激光器结构示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the alkali laser with four LD pumpings

V型谐振腔是一种侧泵谐振腔结构^[41],其典型结构如图6所示。该类型谐振腔的泵浦光与激光虽然同轴,但是通过在聚焦镜、反射镜等在谐振腔内的元件中心开孔的方式,使碱金属激光同泵浦光分离,泵浦光以掠入射的方式进入碱金属蒸气室。该类型谐振腔配合波导结构的碱金属蒸气室,可以实现较高的激光功率(145 W)输出。这种类型谐振腔的碱金属激光器用于SERF磁力计泵浦时,潜在问题在于谐振腔较长,结构不够紧凑。如图6所示,耦合元件是一组中间开孔的聚焦透镜。为了减少泵浦光的损失,聚焦透镜的直径和焦距一般较大。其激光系统采用的聚焦透镜组由12.5 cm聚焦的透镜和20 cm焦距的柱透镜组成。由于泵浦光聚焦的焦点位于碱金属蒸气室附近,因此聚焦透镜的焦距限制了V型谐振腔实现更加紧凑的结构,且需要在谐振腔内加入线偏振元件(布儒斯特窗、偏振片等),用于实现碱金属激光线偏振输出。这些技术特征使得V型谐振腔在SERF磁力计泵浦领域的应用受到局限。

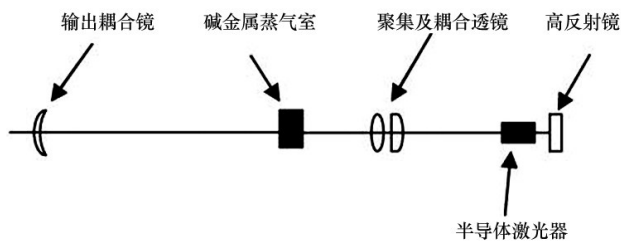


图6 V型谐振腔结构的碱金属激光器

Fig. 6 Alkali laser with a resonator of the V type

4.3 热问题

热问题是碱金属激光器发展的瓶颈问题之一,主要体现在高温高功率密度激光作用下碱金属与烷烃类气体产生碳粒沉积。

在碱金属激光器中,小分子烷烃(甲烷、乙烷、丙烷等)的主要作用是加快2个上能级的弛豫速率,对提高激光器效率和降低激光器阈值具有显著作用^[24]。然而温度过高时,碱金属与小分子烷烃缓冲气体产生碳粒和碱金属氢化物污染^[27, 42]。这一化学反应降低了烷烃类气体的含量,同时,产生的碳粒和碱金属氢化物污染窗口,对碱金属激光器的长时间工作造成不良影响。图7是由于碱金属激光器热问题被污染的窗口。



图7 碳粒污染的蒸气室

Fig. 7 Carbon contaminations on the cell window

目前,解决该问题的主要方法有2种:一是降低碱金属蒸气室的工作温度;二是使用无烃化的碱金属蒸气室。

小功率碱金属激光器通常采用增益介质非流动(扩散冷却)的蒸气室。浙江大学潘佰良等^[43]的理论研究和美国空军研究院Shaffer等^[44]的实验研究均表明,这种蒸气室增益区的温度较非增益区高很多,即激光功率密度较高的区域对应的温度也较高。2015年,美国空军研究院的Shaffer基于Mach-Zehnder干涉仪搭建了在线无损测量碱金属激光器内部温度的装置^[44],对输出功率9 W(泵浦功率20 W)的铯蒸气激光器的温度分布进行在线测量,增益区温度较玻璃壁温度高58℃,在150℃时开始逐渐产生碳粒沉积。因此,降低碱金属蒸气室的工作温度是防止碳粒沉积产生的直接方法。然而碱金属原子的密度与蒸气温度密切相关,存在最佳工作温度,使激光器的输出效率最高。降低温度可能导致激光器效率的下降。因此,探索降低增益区温度梯度的方法是烷烃类碱金属激光器的主要研究方向。

解决碳粒沉积的另一种方法是使用无烃化的碱金属蒸气室。这种方法消除了碳粒产生的根源,是高功率和超功率碱金属激光器备选的方案之一。与含烷烃的碱金属激光器相比,无烃化的碱金属激光器泵浦效率较低,激光器阈值较高。2010年,Zweiback等^[35]实现的无烃化铷激光器,其光光效率约为2%。采用同样的泵浦源,Zweiback等泵浦含有甲烷的铷蒸气室,获得了145 W的平均功率,光光效率约为15%^[41]。这一特征使得无烃化的碱金属激光器功耗大、效率低,限制了其在SERF磁力计泵浦领域的应用。

5 结论

碱金属激光器作为一种新型的光泵浦气体激光器,其输出激光的波长与碱金属原子的D₁线精确匹配,能够克服半导体激光器用于SERF磁力计泵浦时需要稳频的缺点,有助于SERF磁力计紧凑结构的实现。碱金属激光器可以采用宽带的半导体激光器泵浦,在输出功率放大方面不存在技术瓶颈,能够有效解决半导体激光器用于SERF磁力计泵浦时功率不足可能导致的SERF态原子不均匀问题。因此,小型化结构紧凑的含烷烃类碱金属激光器将是SERF磁力计优质泵浦源的最佳选择方案之一,具有较为广阔的应用前景。随着碱金属激光技术的发展,小型化的碱金属激光器必将在SERF磁力计泵浦领域广泛应用。

参考文献(References)

- [1] 刘国斌, 孙献平, 顾思洪, 等. 高灵敏度原子磁力计研究进展[J]. 物理, 2012, 41(12): 803-810.
Liu Guobin, Sun Xianping, Gu Sihong, et al. Progress in high sensitive atomic magnetometers[J]. Physics, 2012, 41(12): 803-810.
- [2] Budker D, Romalis M. Optical magnetometry[J]. Nature Physics, 2007, 3(4): 227-234.
- [3] 董浩斌, 张昌达. 量子磁力仪再评说[J]. 工程地球物理学报, 2010, 7(4): 460-470.

- Dong Haobin, Zhang Changda. A further review of the quantum magnetometers[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2010, 7(4): 460-470.
- [4] Komins I K, Kornack T W, Allred J C, et al. A subfemtotesla multi-channel atomic magnetometer[J]. Nature, 2003, 422(6932): 596-599.
- [5] Zhang J H, Liu Q, Zeng X J, et al. All-optical cesium atomic magnetometer with high sensitivity[J]. Chinese Physics Letters, 2012, 29(6): 068501.
- [6] Fang J C, Wang T, Quan W, et al. In situ magnetic compensation for potassium spin-exchange relaxation-free magnetometer considering probe beam pumping effect[J]. Review of Scientific Instruments, 2014, 85(6): 063108.
- [7] Lee H J, Shim J H, Moon H S, et al. Flat-response spin-exchange relaxation free atomic magnetometer under negative feedback[J]. Optics Express, 2014, 22(17): 19887-19894.
- [8] Jiménez-Martínez R, Knappe S, Kitching J. An optically modulated zero-field atomic magnetometer with suppressed spin-exchange broadening[J]. Review of Scientific Instruments, 2014, 85(4): 045124.
- [9] Shah V, Romalis M V. Spin-exchange relaxation-free magnetometry using elliptically polarized light[J]. Physical Review A, 2009, 80(1): 013416.
- [10] Li Z, Wakai R T, Walker T G. Parametric modulation of an atomic magnetometer[J]. Applied Physics Letters, 2006, 89(13): 134105.
- [11] Fang J C, Wan S G, Qin J, et al. Spin-exchange relaxation-free magnetic gradiometer with dual-beam and closed-loop Faraday modulation [J]. Journal of the Optical Society of America B-Optical Physics, 2014, 31(3): 512-516.
- [12] 刘强, 李九兴, 黄立明, 等. 用于全光铯原子磁力仪的激光器稳频技术研究[J]. 光学技术, 2012, 38(3): 259-262.
Liu Qiang, Li Jiuxing, Huang Liming, et al. Study of frequency stabilization of a diode laser at all optical Cs atom magnetometer[J]. Optical Technique, 2012, 38(3): 259-262.
- [13] Krupke W F, Beach R J, Kanz V K, et al. Resonance transition 795-nm rubidium laser[J]. Optics Letters, 2003, 28(23): 2336-2338.
- [14] Li Z Y, Tan R Q, Xu C, et al. Linewidth-tunable laser diode array for rubidium laser pumping[J]. Quantum Electronics, 2013, 43(2): 147-149.
- [15] Zhdanov B V, Rotondaro M D, Shaffer M K, et al. Efficient potassium diode pumped alkali laser operating in pulsed mode[J]. Optics Express, 2014, 22(14): 17266-17270.
- [16] Zweiback J, Hager G, Krupke W F. High efficiency hydrocarbon-free resonance transition potassium laser[J]. Optics Communications, 2009, 282(9): 1871-1873.
- [17] 徐程, 谭荣清, 李志永, 等. 半导体抽运铷蒸气输出 2.8W 线偏振铷激光[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0102009.
Xu Cheng, Tan Rongqing, Li Zhiyong, et al. 2.8 W linearly polarized output of rubidium vapor laser with diode pumping[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(1): 0102009.
- [18] Page R H, Beach R J, Kanz V K, et al. Multimode-diode-pumped gas (alkali-vapor) laser[J]. Optics Letters, 2006, 31(3): 353-355.
- [19] Li Z Y, Tan R Q, Huang W, et al. A linearly-polarized cesium vapor laser with fundamental mode output and low threshold[J]. Chinese Physics Letters, 2014, 31(4): 044202.
- [20] Wang Y, Niigaki Fukuoka M H, Zheng Y, et al. Approaches of output improvement for a cesium vapor laser pumped by a volume-Bragg-grating coupled laser-diode-array[J]. Physics Letters A, 2007, 360(4-5): 659-663.
- [21] Scholtes T, Schultze V, Ijsselsteijn R, et al. Light-narrowed optically-pumped M-x magnetometer with a miniaturized Cs cell[J]. Physical Review A, 2011, 84(4): 043416.
- [22] Zamoski N D, Hager G D, Rrdolph W, et al. Pressure broadening and collisional shift of the Rb D₂ absorption line by CH₄, C₂H₆, C₃H₈, n-C₄H₁₀, and He[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2011, 112(1): 59-67.
- [23] Pitz G A, Fox C D, Perram. Pressure broadening and shift of the cesium D₂ transition by the noble gases and N₂, H₂, HD, D₂, CH₄, C₂H₆, CF₄, and ³He with comparison to the D₁ transition[J]. Physical Review A, 2010, 82(4): 042502.
- [24] Hrycyszyn E S, Krause L. Inelastic collisions between excited alkali atoms and molecules. VII. Sensitized fluorescence and quenching in mixtures of rubidium with H₂, HD, D₂, N₂, CH₄, CD₄, C₂H₄, and C₂H₆ [J]. Canadian Journal of Physics, 1970, 48(22): 2761-2768.
- [25] Fox C D, Perram G P. Investigation of radial temperature gradients in diode pumped alkali lasers using tunable diode laser absorption spectroscopy[J]. Proceedings of SPIE- The International Society for Optical Engineering, 2012, 8238(1): 51-59.
- [26] Beach R J, Krupke W F, V. Kanz K, et al. End-pumped continuous-wave alkali vapor lasers: Experiment, model and power scaling[J]. Journal of the Optical Society of America B-Optical Physics, 2004, 21(12): 2151-2163.
- [27] Hrycyszyn E S, Krause L. Inelastic collisions between excited alkali atoms and molecules 7 sensitized fluorescence and quenching in mixtures of rubidium with H₂, Hd, D₂, N₂, Cd₄, C₂H₄, and C₂H₆[J]. Canadian Journal of Physics, 1970, 48(22): 2761-2768.
- [28] Zhdanov B V, Knize R J. Efficient diode pumped cesium vapor amplifier[J]. Optics Communications, 2008, 281(15-16): 4068-4070.
- [29] Zhdanov B V, Knize R J. Diode-pumped 10 W continuous wave cesium laser[J]. Optics Letters, 2007, 32(15): 2167-2169.
- [30] Petersen A, Lane R. Second harmonic operation of diode-pumped Rb vapor lasers[J]. Proceedings of SPIE, 2008(7005): 529.
- [31] Sintov Y, Malka D, Zalevsky Z. Prospects for diode-pumped alkali-atom-based hollow-core photonic-crystal fiber lasers[J]. Optics Letters, 2014, 39(16): 4655-4658.
- [32] Li Z Y, Tan R Q, Xu C, et al. A Linearly-polarized rubidium vapor laser pumped by a tunable laser diode array with an external cavity of a temperature-controlled volume Bragg Grating[J]. Chinese Physics Letters, 2013, 30(3): 034202.
- [33] Zhdanov B V, Rotondaro M D, Shaffer M K, et al. Power degradation due to thermal effects in potassium diode pumped alkali laser[J]. Optics Communications, 2015, 341(0): 97-100.
- [34] Zheng Y J, Niigaki M, Kan Hirofumi. Efficient operation of a cesium-vapor laser longitudinally pumped by a fine-tunable bandwidth-narrowed laser-diode bar[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2007, 46(12): 7768-7770.
- [35] Zweiback J, Krupke W F. 28 W average power hydrocarbon-free rubidium diode pumped alkali laser[J]. Optics Express, 2010, 18(2): 1444-1449.
- [36] Zweiback J, Hager G, Krupke W F. High efficiency hydrocarbon-free resonance transition potassium laser[J]. Optics Communications, 2009, 282(9): 1871-1873.
- [37] 李志永, 谭荣清, 黄伟, 等. 半导体泵浦铯蒸气实现激光输出[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(1): 010102.
Li Zhiyong, Tan Rongqing, Huang Wei, et al. Diode pumped cesium vapor laser[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26(1):

- 010102.
- [38] Zhdanov B V, Stooke, Boyadjian G, et al. Laser diode array pumped continuous wave Rubidium vapor laser[J]. Optics Express, 2008, 16(2): 748-751.
- [39] Zhdanov B V, Stooke, Boyadjian G, et al. Rubidium vapor laser pumped by two laser diode arrays[J]. Optics Letters, 2008, 33(5): 414-415.
- [40] Zhdanov B V, Sell J, Knize R J. Multiple laser diode array pumped Cs laser with 48 W output power[J]. Electronics Letters, 2008, 44(9): 582-583.
- [41] Zweiback J, Komashko A, Krupke W F. Alkali-vapor lasers[C]//SPIE LASE. International Society for Optics and Photonics, San Francisco: SPIE, 2010: 75810G-75810G-5.
- [42] Li Z Y, Tan R Q, Huang W, et al. Quasicontinuous wave linearly polarized rubidium vapor laser pumped by a 5-bar laser diode stack [J]. Optical Engineering, 2014, 53(11): 116113.
- [43] Yang J, Shen B L, Qian A Q, et al. Thermal effects of high-power side-pumped alkali vapor lasers and the compensation method[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2014, 50(12): 1029-1035.
- [44] Shaffer M K, Lilly T C, Zhdanov B V, et al. In situ non-perturbative temperature measurement in a Cs alkali laser[J]. Optics Letters, 2015, 40(1): 119-122.

Prospects of diode pumped alkali lasers' application to the pumping of atomic magnetometer

LI Zhiyong^{1,2}, TAN Rongqing¹, KE Changjun¹, HUANG Wei^{1,3}, YE Qing²

1. Department of High Power Gas Laser, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China
2. State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology; Electronic Engineering Institute of PLA, Hefei 230037, China
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Since its central wavelength is exactly equal to that of alkali D_1 line without frequency stabilization, alkali laser is of great potential in the spin-exchange relaxation free (SERF) atomic magnetometer. In this paper, the research developments of SERF atomic magnetometers' pumping source and alkali lasers are presented. The qualifications of a good pumping source for SERF atomic magnetometers are analyzed. And the prospects and the challenges for alkali lasers' application to the pumping of SERF atomic magnetometer are also discussed.

Keywords gas laser; alkali laser; atomic magnetometer; spin-exchange relaxation free

(责任编辑 傅雪)