

碱金属激光器窗口损坏过程与机理研究

李云飞 杨子宁* 王红岩 华卫红

国防科技大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073

摘要 以玻璃材料为例对含烃和无烃类半导体抽运碱金属蒸气激光器(DPAL)窗口在高功率连续抽运条件下的损伤过程和机理进行实验研究,通过相机的观察记录铷蒸气池窗口在高功率密度抽运光入射条件下的表面形貌变化,以及对照射后铷蒸气池窗口形貌的显微观察,得到实验结果表明 DPAL 窗口损伤存在热致物理损伤和化学损伤两种不同的过程,并对其机理进行了分析。该研究方法可应用于其他材料(如蓝宝石)DPAL 窗口性能的诊断测试。

关键词 激光器;碱金属蒸气激光器;碱金属原子;烃类气体

中图分类号 O436 **文献标识码** A

doi: 10.3788/CJL201542.s102011

Experimental Research of Damage Process and Mechanism of Alkali Vapor Laser Windows

Li Yunfei Yang Zining Wang Hongyan Hua Weihong

College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China

Abstract In this paper, the damage process and mechanism of diode pumped alkali vapor laser (DPAL) windows have been experimental studied and analyzed. The results show that two different processes exist in DPAL windows (take glass as example): the heat induced physical damage and the reaction (between alkali and hydrocarbon) induced chemical damage. The mechanism of these two processes has been analyzed. The research method in this paper can be applied to study the performance of other DPAL windows.

Key words lasers; diode pumped alkali vapor laser; alkaliatom; hydrocarbons

OCIS codes 140.3460 140.1340 140.3480

1 引言

2001 年美国利弗莫尔国家实验室的 Krupke^[1]首次提出半导体抽运碱金属蒸气激光器(DPAL)的概念,并于 2006 年首次实现了铷 DPAL。DPAL 综合了传统气体和固体激光器的优势,具有全电操作、结构紧凑、高量子效率、气体介质可循环使用流动散热等优势^[2-6],具有单口径功率放大潜力。在碱金属激光器中,通常需要添加 1~10 个大气压的氦气缓冲气体增加碱金属原子吸收线宽与半导体抽运源的发射线宽相匹配实现充分的抽运吸收,同时充入 0.2~1 个大气压的烃类气体(甲烷、乙烷)以促进精细结构弛豫过程。实验中人们发现连续波(CW)高抽运功率密度下碱金属原子会与烃类分子发生化学反应,造成激光器的窗口污染并影响激光器正常运行^[7,8]。目前人们对这一反应的过程和机理还认识有限,美国空军研究实验室分析了不同材料 DPAL 窗口在辐照前后的形貌变化,基于透射率参数表征 DPAL 窗口的破坏程度^[9]。本文以玻璃窗口材料为例,分别针对无烃和含烃类 DPAL,研究了高功率连续抽运条件下窗口损坏的时间演化过程,通过对实验结果对比分析,进一步深化了对 DPAL 窗口损坏过程和机理的认识,对 DPAL 窗口选择和材料性能

收稿日期: 2015-02-15; **收到修改稿日期:** 2015-03-15

作者简介: 李云飞(1991—),男,硕士研究生,主要从事半导体抽运碱金属激光器等方面的研究。

E-mail: 841765210@qq.com

导师简介: 华卫红(1968—),女,博士,教授,博士生导师,主要从事化学激光器技术及数值模拟等方面的研究。

E-mail: rosehua@hotmail.com

*通信联系人。E-mail: diablo_3rd@126.com

分析提供研究手段。

2 实验装置介绍

实验装置见图 1 所示,半导体激光器(LD)作为抽运源,中心波长 780.2 nm,采用体布拉格光栅(VBG)进行线宽压窄^[10-14]后谱宽为 0.2 nm[半峰全宽(FWHM)],可实现最高 150 W 功率连续输出。输出光束由焦距为 6 cm 的柱透镜 1 进行快轴方向整形,使光束快轴方向压缩透过斩波器,通过调节斩波器占空比以实现平均抽运功率的调节,再由焦距为 10 cm 的柱透镜 2 进行准直,最后经由圆透镜聚焦的抽运光经过偏振分束器(PBS)分光,一束光通过积分球后由 YOKOGAWA 公司生产的 AQ6373 系列光谱仪光谱测量;另一束光进入铷蒸气池作为抽运光,并通过功率计测透射功率^[15],由于总功率之前已经测得且基本恒定,由透射功率可知吸收功率。铷蒸气池为直径 2 cm、长度 1 cm 的圆柱结构,材料为普通玻璃,软化点为 600℃左右,采用加热片由窗口处对其进行加热^[16],实验中分别采用了充入不同缓冲气体的铷蒸气池。整形聚焦后的抽运光束焦点位于铷蒸气池的中心,并且在焦点附近 1 cm 区间范围内具有较好的准直效果。采用连续 532 nm 激光器作为照明光,经过衰减片后垂直照射铷蒸气池,入射至 CCD 相机,参考光光轴与抽运光光轴之间的角度为 20°,帧频为 10 frame/s,在相机镜头前添加 532 nm 窄带滤光片,目的是消除抽运散射光、增益介质荧光以及其他外界杂散光的干扰,CCD 相机将记录激光辐照过程中碱金属吸收池的抽运光入射一侧窗口形貌的损坏过程。

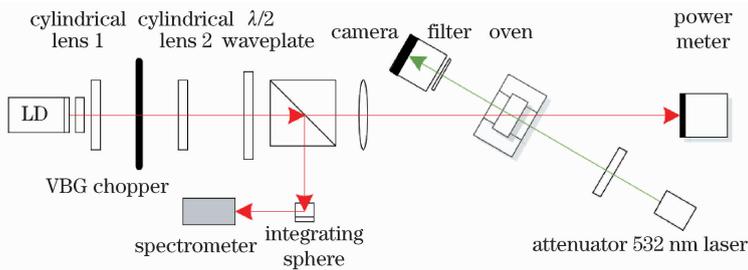


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of experiment equipment

3 实验结果及分析

3.1 铷吸收池窗口形貌损坏过程观察实验

作为具有对比性的参考,采用吸收池窗口材料进行辐照实验,将功率为 156 W 的抽运光聚焦成 3 mm² 的光斑入射至温度为 130℃真空铷池,由测温仪测得窗口此时温度为 200℃,在 150 s 的实验时间内玻璃窗口表面并没有明显变化。因此,可以确定抽运激光在该功率密度条件下照射玻璃,不足以对玻璃材料窗口造成破坏。

在上述实验基础上,选择充入 2.67×10^4 Pa 甲烷和 5.33×10^4 Pa 氦气的新铷蒸气池(第一次使用)开展实验,加热温度为 130℃,抽运光功率密度为 5.2 kW/cm²,采取连续抽运的方式对铷池进行辐照。实验过程中窗口变化如图 2 所示,激光进行辐照前($t=0$),视场内为铷池的原始形貌;接下来开启抽运光,观察到抽运区域由暗变亮($t=15$ s),且铷池内有荧光产生(铷原子吸收抽运光的自发辐射),推测是由于高功率抽运光将附着于窗口的少量铷金属层清除导致透射率增加;在辐照时间达到 60 s 时,视场内光斑变暗,玻璃材料表面已经发生了破损,破损的形貌与光斑入射形貌相似,在 75 s 时可以看到玻璃表面平整度损坏严重,这时荧光现象消失,表明池子已经泄露,池内铷原子被空气消耗。

辐照后的铷池形貌如图 3(a)所示,铷池表面损坏部分玻璃熔化凸出,推测由于铷蒸气在高功率密度抽运条件下产生荧光的同时释放了大量的热,使玻璃温度达到了其软化点,池内气体受热后气压大于大气压力,破坏了玻璃的软化部分。但是没有观察到明显的黑色物质,将损坏的铷池进行拉曼谱检测,没有发现碳元素。说明在该功率密度下,碱金属原子并未与烃类分子反应,玻璃窗口的损坏主要是由于热损伤使其熔化后,内外部气压差造成的形变;需要说明的是,采用充入纯氦气(无甲烷)的铷池进行实验,得到的实验结果与

含烃类铷池类似的窗口损伤效果,进一步证实了此时窗口损坏主要是热致物理损伤导致的。

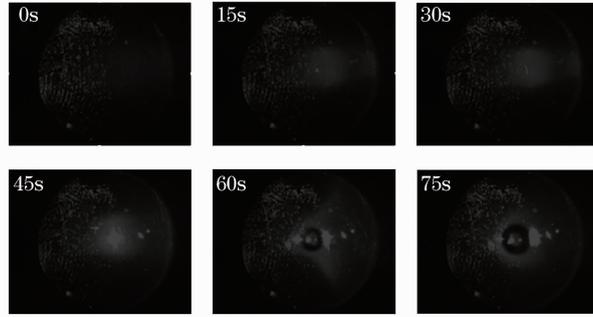


图2 窗口烧蚀过程

Fig. 2 Ablation on the optical windows

为了进一步研究玻璃表面损坏机制,选取甲烷含量为 6.67×10^4 Pa,氦气 7.33×10^4 Pa 的铷蒸气池,加热温度不变,与之前的实验效果基本相同,实验开始视场内铷蒸气池的抽运位置变亮,在时间进行到 80 s 时窗口开始出现损伤,损伤的形貌与光斑入射形貌相似,直到 103 s 时荧光消失,表明铷蒸气池已经泄露,视场内可以看见明显裂纹。

辐照后的铷池如图 3(b)所示,抽运光入射处有明显的凸起,铷池表面已经破裂,经过拉曼谱检测也无碳元素生成。说明在高功率密度抽运光束的照射下,DPAL 中碱金属原子与缓冲气体同时存在时,产生比较明显的荧光并放出大量的热,缓冲气体中烃类气体含量多的情况下对玻璃材料造成热损伤的现象更加剧烈。



图3 实验结果。(a) 2.67×10^4 Pa 甲烷, 5.33×10^4 Pa 氦气; (b) 6.67×10^4 Pa 甲烷, 7.33×10^4 Pa 氦气; (c) 6.67×10^4 Pa 甲烷, 7.33×10^4 Pa 氦气, 占空比 1:1

Fig. 3 Result of the experiments. (a) 2.67×10^4 Pa methane, 5.33×10^4 Pa He; (b) 6.67×10^4 Pa methane, 7.33×10^4 Pa He; (c) 6.67×10^4 Pa methane, 7.33×10^4 Pa He, duty cycle 1:1

3.2 低平均功率辐照光的铷池窗口实验

在这一组实验中,采用甲烷气体含量为 6.67×10^4 Pa,氦气含量为 7.33×10^4 Pa 的铷池,在抽运光功率密度为 5.2 kW/cm^2 的情况下,通过斩波器对抽运光平均功率进行调节,占空比为 1:1,降低平均功率为 78 W,利用加热片将铷蒸气池加热到 130°C ,再对其进行 200 s 的抽运光照射并利用 CCD 相机观察铷池表面变化。可以观察到铷蒸气池内有荧光产生,随着实验时间的增长,视场内铷蒸气池表面明显的变亮,但是并没有明显的形貌变化。辐照后的铷池如图 3(c)所示,铷池表面仅在抽运光入射处通透性增强,并无明显形变,可以认为在该功率密度条件下,产生的热效应降低无法对玻璃材料造成破坏。

3.3 铷原子与烃类分子反应实验

考虑到本次实验采用的铷池均为窗口表面铷原子附着较少的新铷蒸气池,在同样的实验条件下更换进行过多次实验的铷池,铷池中甲烷含量为 2.67×10^4 Pa,氦气 5.33×10^4 Pa。在 5.2 kW/cm^2 功率密度的激光辐照条件下,仅过了 10 s 荧光现象消失,铷池损坏如图 4 所示,损坏部分玻璃熔化突出,中心已经破漏导致空气进入吸收池,坏点周围呈黑色。采用拉曼光谱仪进行物质成分检测,可以判断坏点处黑色物质为碳。推测认为,在高功率密度的抽运光入射条件下,窗口表面附着铷原子较多的铷池更易于在界面上发生碱金属原子与烃类气体发生反应,且该过程会对窗口表面造成破坏。

4 结 论

实验通过观察碱金属蒸气池在高功率密度 CW 激光照射下窗口(以玻璃材料为例)损坏过程以及对辐照后窗口形貌和化学组分进行分析,探究分析 DPAL 窗口损坏机理。实验结果表明,窗口损伤包括热致物



图 4 窗口表面图

Fig. 4 Picture of window surface

理损伤和化学损伤两种机制:热致物理损伤机制即在高功率密度 CW 抽运条件下增益介质抽运区域温升会导致玻璃窗口材料软化,内外压差导致窗口形变损伤;化学损伤机制即高功率密度 CW 抽运条件下碱金属原子与烃类分子(甲烷)在窗口表面发生化学反应,生成碳及碱金属氢化物,污染激光窗口,并且推测认为碱金属原子在窗口表面的附着会促进化学反应及窗口损伤的程度。实际的 DPAL 窗口将采用蓝宝石等机械、热和化学性能更为优良的基质材料,本实验研究方法可应用于其他 DPAL 窗口性能的诊断测试。

参 考 文 献

- 1 Krupke W F. Diode Pumped Alkali Laser: U. S. 6643311 [P]. 2003-11-4.
- 2 Krupke W F, Beach R J, Kanz V K, *et al.*. Resonance transition 795-nm rubidium laser [J]. *Opt Lett*, 2003, 28(23): 2336-2338.
- 3 Krupke W F, Beach R J, Kanz V K, *et al.*. DPAL: A new class of CW, near-infrared, high-power diode-pumped alkali (vapor) lasers [C]. *SPIE*, 2004, 5334: 156-167.
- 4 Liu Y, Pan B, Yang J, *et al.*. Thermal effects in high-power double diode-end-pumped Cs vapor lasers [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2012, 48(4): 485-489.
- 5 Page R H, Beach R J, Kanz V K, *et al.*. Multimode diode pumped gas (alkali-vapor) laser [J]. *Opt Lett*, 2006, 31(3): 353-355.
- 6 Tan Yannan, Li Yimin, Gong Faquan, *et al.*. 420 nm alkali blue laser based on two-photon absorption [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(10): 1002011.
- 谭彦楠, 李义民, 公安全, 等. 双光子吸收 420 nm 碱金属蒸气蓝光激光器 [J]. *中国激光*, 2013, 40(10): 1002011.
- 7 Zhdanov B V, Knize R J. Diode-pumped 10W continuous wave cesium laser [J]. *Opt Lett*, 2007, 32(15): 2167-2169.
- 8 Lindsay, O'Brien, Quarrie. The effects of atomic rubidium vapor on the performance of optical windows in Diode Pumped Alkali Lasers (DPAL) [J]. *Opt Materials*, 2013, 35: 843-851.
- 9 Volodin B L, Dolgy S V, Melnik E D, *et al.*. Wavelength stabilization and spectrum narrowing of high-power multimode laser diodes and arrays by use of volume Bragg gratings [J]. *Opt Lett*, 2004, 29(16): 1891-1893.
- 10 Zining Y, Hongyan W, Qisheng L, *et al.*. An 80-W laser diode array with 0.1 nm linewidth for rubidium vapor laser pumping [J]. *Chin Phys Lett*, 2011, 28(10): 104202.
- 11 Gourevitch A, Venus G, Smirnov V, *et al.*. Continuous wave, 30W laser-diode bar with 10 GHz linewidth for Rb laser pumping [J]. *Opt Lett*, 2008, 33(7): 702-704.
- 12 Podvyaznyy A, Venus G, Smirnov V, *et al.*. 250W diode laser for low pressure Rb vapor pumping [C]. *SPIE*, 2010, 7583: 758313.
- 13 Wang H, Xu X, Yang Z, *et al.*. DPAL research in Changsha [C]. *SPIE Security + Defence. International Society for Optics and Photonics*, 2014: 92510T.
- 14 Li Zhiyong, Tan Rongqing, Xu Cheng, *et al.*. Laser diode array with narrow linewidth for rubidium vapor laser pumping [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(4): 875-878.
- 李志永, 谭荣清, 徐程, 等. 用于铷蒸气激光抽运的窄线宽阵列半导体激光器 [J]. *强激光与粒子束*, 2013, 25(4): 875-878.
- 15 Liu Jinlian, Li Jijian, Chen Dongqun, *et al.*. Experimental research of electrical breakdown for water dielectric coaxial capacitor with microsecond charging [J]. 2003, 15(3): 310-312.
- 刘金亮, 李继健, 陈冬群, 等. μs 级充电时水介质同轴电容击穿实验研究 [J]. *强激光与粒子束*, 2003, 15(3): 310-312.
- 16 Que Yiqin, Wang Hongyan, Yang Zining, *et al.*. Measurement of alkali concentration in diode pumped alkali vapor lasers by 100 GHz spectral scanning [J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(5): 0515001.
- 阙义钦, 王红岩, 杨子宁, 等. 100 GHz 光谱扫描测量碱金属蒸气激光器增益介质浓度 [J]. *中国激光*, 2014, 41(5): 0515001.