

电泳式 He-Sr⁺ 复合激光特性研究^{*}

王煜博 毛邦宁 陈立 王丽敏 潘佰良[†]

(浙江大学物理系 杭州 310027)

(2007 年 5 月 6 日收到 2007 年 5 月 23 日收到修改稿)

设计制作了 7 mm 内径和 38 cm 有效激励长度的电泳式 He-Sr⁺ 激光管,采用修饰 Blumlein 电路,通过纵向高重复率脉冲放电激励,实现了一价锶离子复合激光 430.5 nm 和 R-M 跃迁激光 1.03 μm 的同时振荡,其中复合激光占主要成分.测量分析了复合激光输出功率与工作参量(脉冲频率,充电电源电压和氩压)的关系曲线,获得了最大激光功率 819 mW 和 56 mW/cm³ 功率密度的实验结果.

关键词: 锶离子激光, 电泳, 脉冲放电

PACC: 4255H, 4260D, 4260H

1. 引 言

纵向周期脉冲放电激励的金属蒸气激光通常可分为自终止 R-M 跃迁(resonance to metastable transition)和碰撞辐射复合(collisional radiation recombination)这两类激光^[1,2].迄今为止,通过电子碰撞激励,已在铜、金、锰、铅、钙、锶和钡等几十种金属元素的原子和离子介质中实现了从紫外到红外光谱范围的多谱线激光振荡,被广泛应用在激光工业加工、材料处理、微电子技术、生物育种和激光医疗等方面^[3,4].自 Deech 等^[5]和 Latash 等^[6]分别在实验上实现锶离子 1030/1090 nm 的 R-M 跃迁激光和 416/430 nm 的复合激光振荡以来,人们对这两种激光进行了持续深入地研究并取得较大进展^[7-9].传统的锶离子激光器通常把金属锶片等间距地放在石英或陶瓷放电管的内壁,通过放电自加热方式获得产生激光所需的锶蒸气密度,由于放电期间锶蒸气与石英或陶瓷放电管壁发生不相容的化学反应和对锶片放电产生的不可控过量锶蒸气密度,使得这类锶离子激光存在寿命短和稳定性差等缺点.为了改善锶激光的输出特性,人们采用 BeO 陶瓷管为放电管和通过快速流动氩气将锶蒸气注入放电激活区等方式并取得较好效果^[10,11].在纵向直流放电激励的 He-Cd⁺ 激光中,早已成功利用电泳效应实现镉蒸气

密度的轴向均匀分布并获得稳定激光输出^[12].已有的理论分析表明在高重复率脉冲放电的金属蒸气激光中,电泳效应也会影响金属蒸气密度的轴向分布^[13],在一定放电条件下能实现轴向金属蒸气密度的均匀分布.

我们在深入研究放电自加热式 He-Sr⁺ 激光的工作特性和动力学机理基础上^[14,15],本文设计了一种新型的电泳式激光管,对锶离子激光作了较系统的参量研究,得到了复合激光的输出功率与各工作参量的关系,获得了 819 mW 最大功率和 56 mW/cm³ 功率密度的 430 nm 激光输出,为实现实用化瓦级激光功率输出的锶离子复合激光提供了新途径.

2. 实验装置

实验装置如图 1 所示.激光放电管由石英基管和刚玉管组成,电极间距 45 cm,在内径 12 mm 的石英管内插入一根长 38 cm、内外径分别为 7 mm 和 10.3 mm 的陶瓷管用来限制放电通道并防止锶蒸气与石英管的相互作用.在靠近阳极的环形凹槽放置锶块,在凹槽内壁与锶块间衬一层金属钼皮以防止锶蒸气与石英直接相互作用.在保温铝套和环形凹槽间用温度可控的加热炉来辅助调节锶蒸气密度.这种设计比原来的实验装置^[14]有了很大的改进,其优点是避免挡住光路和对锶块放电引起的放电不稳

^{*} 国家自然科学基金(批准号:30574111,10374081)资助的课题.

[†] E-mail: pbl66@zju.edu.cn

以及由此产生的过量铯蒸气密度等问题. 由放电和外加热产生的铯蒸气通过电泳和缓慢流动的氦气在纵向放电激励区实现均匀分布. 采用修饰 Blumlein 电路为激励电路 ($C_1 : C_2 = 500 : 500$), 氦气为缓冲气体. 全反镜 M_1 是一块曲率半径为 5 m、对 430.5 nm 中心波长反射率为 99.5% 的凹面镜, 输出镜 M_2 为对 430 nm 波长反射率约 85% 的平镜. 用红外上转换测试板(适用于 0.85—1.55 μm)来鉴别 1.03 μm /1.09 μm 红外谱线的超辐射, 当激光输出中包含这两条红外谱线成分时, 在测试板上将显示明显的暗红色光斑. 由于本实验所使用的腔镜主要对 430 nm 复合激光具有高反射率, 故主要分析复合激光的特性. 放电电压和电流脉冲分别用 Tektronix 的 P6015A 型高压探头和 Pearson 的 Model 410 电流脉冲感应圈测量, 快响应光电管(THORLABS, DET110)探测激光脉冲. 所有光电脉冲波形被同时显示在 TDS 754c 型 500MHz、4 通道数字存储示波器上. 激光输出功率用 THORLABS 公司的 PM100 型激光功率计探测.

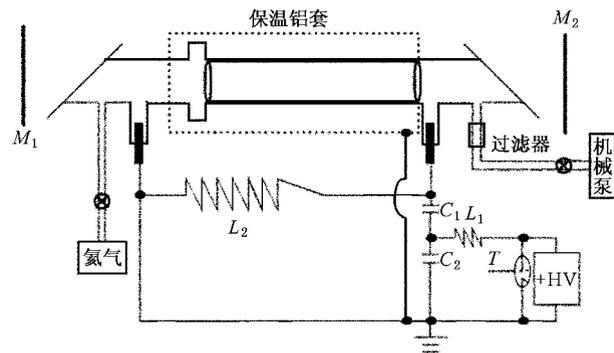


图 1 实验装置示意图

3. 实验结果及分析

3.1. 脉冲频率对激光功率的影响

在充电电源电压为 4.8—5.2 kV 稳定放电条件下, 分别测量了不同氦压下(10.1 kPa—25.5 kPa)激光输出功率随脉冲重复频率变化的关系曲线如图 2 所示. 测量时为了避免激光放电管过热, 每次迅速提升频率到设定值, 记录最大激光输出功率, 再恢复到某一低频率值, 待放电管到达热平衡后重复上述过程, 频率测量间隔约为 1 kHz. 从图 2 可知: 在一定氦压条件下, 激光功率基本上随频率增加而线性上升,

这是因为频率增加有利于通过电泳实现轴向铯蒸气密度的均匀分布和输入电功率的增加, 从而增大激光输出功率. 而且在相同频率条件下, 对应高氦压的激光功率比低氦压的要高, 这是因为较高氦压使得电子与氦气的碰撞频率增加, 导致放电余辉早期电子温度迅速降低, 因此有利于复合激光的产生. 从图 2 趋势来看, 激光输出功率还可以通过增加氦压得到进一步提高, 但氦压太高会导致放电不易击穿和不稳定等问题, 故未能进一步提高氦压进行实验.

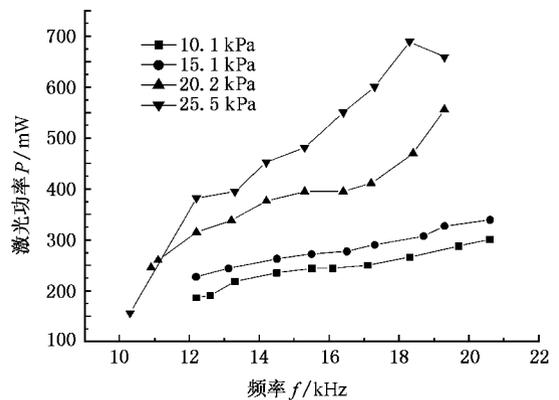


图 2 激光输出功率随脉冲频率的变化关系

3.2. 电源电压对激光功率的影响

在脉冲频率为 12.3—14.4 kHz 稳定放电条件下, 分别测量了不同氦压下(10.1 kPa—25.5 kPa)激光输出功率随电源电压变化的关系曲线, 如图 3. 其测量方法与频率的相同, 每次迅速从低电压提高到高电压, 同时记录最大激光输出功率, 再恢复到某一低电压值, 待放电管到热平衡后重复上述过程, 每次改变电压约为 0.2 kV. 由图 3 可知: 在低氦压下, 激光功率随电压增加而缓慢上升, 而在 25.5 kPa 高氦压下, 激光功率随电压上升而迅速增加. 这和图 2 的趋势是相似的, 在一定电源电压范围内, 激光输出功率随氦压的增加而上升, 对应的最佳电源电压也增加. 这也符合复合激光的特点. 由图 3 还可以看出, 在较高氦压条件下, 若进一步增加电源电压还会提高激光输出功率, 但由于受放电条件限制(闸流管和工作电容放电时的峰值电压达 4 倍电源电压), 更高的电源电压会使闸流管连通导致放电熄灭.

3.3. 温度对激光功率的影响

在 10.1 kPa 氦压(对应较低的激光功率), 频率为 12.2 kHz, 电源电压为 4.6 kV 的条件下, 测量了放

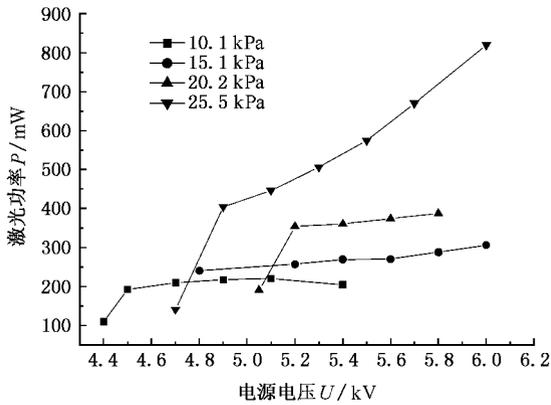


图3 激光输出功率与电源电压的关系

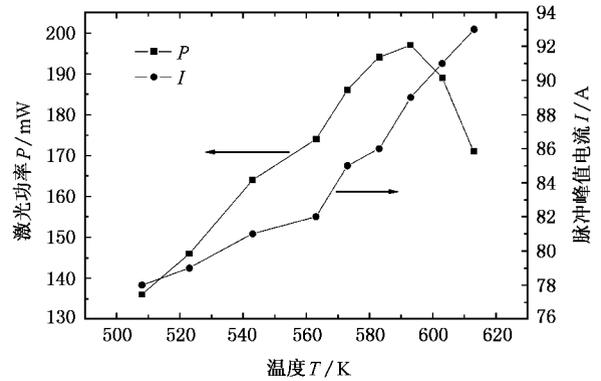


图4 外加热温度对激光输出功率和峰值电流的影响

置锶块的凹槽外壁温度和激光功率的关系,同时给出了温度和脉冲峰值电流的关系,如图4所示。可以看出脉冲峰值电流随温度线性增长,这是因为温度的增加使锶蒸气密度增加,激光管阻抗减小,从而导致峰值电流的增加。而激光功率随温度先增大后减小,这是因为温度太高会产生过量锶蒸气密度,导致电流脉冲幅度快速增加并在后沿出现较大反峰,这显然不利于放电余辉早期电子温度的快速冷却,从而使得激光功率下降。由此可知,和其他金属蒸气激光一样,电泳 He-Sr⁺ 复合激光在一定放电条件下也存在一个最佳的工作温度。由于实验条件限制,放电自加热和外加热都对激光管内的锶蒸气密度有影响,输出功率对外加热的温度控制并不敏感,其功率变化幅度只有 60 mW 左右。

4. 结 论

本文设计制作了一种新型电泳式 He-Sr⁺ 激光管,对锶离子复合激光作了较系统的参量研究,得到了激光输出功率随放电脉冲频率、电源电压、外加热温度等工作参量变化的关系并给出合理的解释。获得了 819 mW 最大激光输出功率和 56 mW/cm³ 功率密度,为研制实用化瓦级功率的 He-Sr⁺ 复合激光提供了借鉴和参考。若进一步改进激光管结构和电路参量组合,避免放电自加热对锶蒸气密度的影响,实现外加热对锶蒸气密度的独立控制,则有望实现长寿命电泳 He-Sr⁺ 复合激光的高效稳定运转。

- [1] Markova S V, Petrash G G 1993 *Proc. SPIE* **2110** 165
- [2] Zhukov V V, Latush E L, Mikhalevskii V S, Sem M F 1977 *Sov. J. Quantum Electron.* **7** 704
- [3] Zinchenko S P, Latush E L, Sem M F, Tikidzhi R A 1992 *Sov. J. Quantum Electron.* **22** 798
- [4] Mackanos M A, Ivanov B, Soldatov A N, Kostadinov I, Mendenhall M H, Piston D W, Jansen E D 2004 *Proc. SPIE* **5319** 201
- [5] Deech J S, Sanders J H 1968 *IEEE J. Quantum Electron.* **4** 474
- [6] Latush E L, Sem M F 1973 *Sov. J. Quantum Electron.* **3** 216
- [7] Bethel J W, Little C E 1991 *Opt. Commun.* **82** 317
- [8] Carman R J 1990 *IEEE J. Quantum Electron.* **26** 1588
- [9] Hentschel R M, Piper J A 1994 *Opt. Commun.* **113** 91
- [10] Latush E L, Chebotarev G D 2000 *Quant. Electron.* **30** 471
- [11] Loveland D G, Orchard D A, Zerrouk A F, Webb C E 1991 *Meas. Sci. Technol.* **2** 1083
- [12] Fendley J R, Gorog I, Hernqvist K G, Sun C 1970 *IEEE J. Quantum Electron.* **6** 8
- [13] Xia T T, Zhong J W, Mao B N, Chen G, Yao Z X, Pan B L 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 202 [in Chinese] [夏婷婷、钟建伟、毛邦宁、陈钢、姚志欣、潘佰良 2006 物理学报 **55** 202]
- [14] Pan B L, Chen K, Chen G, Yao Z X 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 445 (in Chinese) [潘佰良、陈坤、陈钢、姚志欣 2004 物理学报 **53** 445]
- [15] Pan B L, Chen G, Chen X, Yao Z X 2004 *J. Appl. Phys.* **96** 34

Characteristics of a cataphoresis He-Sr⁺ recombination laser^{*}

Wang Yu-Bo Mao Bang-Ning Chen Li Wang Li-Min Pan Bai-Liang

(Department of Physics , Zhejiang University , Hangzhou 310027 , China)

(Received 6 May 2007 ; revised manuscript received 23 May 2007)

Abstract

A cataphoresis discharge tube of 7 mm inner diameter and 38 cm active length was made for the He-Sr⁺ laser. The recombination laser at 430.5 nm and the R-M transition laser at 1.03 μm were obtained with the modified Blumlein circuit by high-frequency longitudinal pulsed discharge. The laser components are concentrated on the 430.5 nm wavelength. Dependence of working parameters , such as the pulse frequency , the supply voltage and the helium pressure on laser output characteristics were measured and discussed. The maximum laser output power of 819 mW and specific power of 56 mW/cm³ were obtained.

Keywords : strontium ion laser , cataphoresis , pulsed discharge

PACC : 4255H , 4260D , 4260H

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10574111 , 10374081).