

掺氢与激励电路对钡蒸气激光输出特性的影响^{*}

潘佰良[†] 毛邦宁 陈 钢 方本民 姚志欣

(浙江大学物理系 杭州 310027)

(2004 年 5 月 20 日收到, 2004 年 6 月 15 日收到修改稿)

对用 Blumlein 电路放电激励的钡蒸气激光在掺氢和不掺氢时的输出特性进行了实验研究. 结果表明, 用掺氢 1.5% 的氖气作缓冲气体能使激光功率增加近 2 倍. 在此基础上, 进一步比较了相互作用电路与 Blumlein 电路时钡蒸气激光的输出特性, 发现相互作用电路能显著提高钡蒸气激光的输出功率和效率, 获得了 3 W 最大功率和 0.4% 效率的 1.5 μ m 波长激光输出. 测量并分析了各工作参量与激光功率之间的关系, 定性解释了掺氢与相互作用电路的作用机理.

关键词: Blumlein 电路, 相互作用电路, 掺氢, 钡蒸气激光

PACC: 4255H, 4260H

1. 引 言

自 Cahuzac 于 1970 年在单次脉冲放电中首次观察到钡蒸气的 20 条近红外激光跃迁谱线以来^[1], 许多学者对钡激光进行了持续和深入的研究^[2-5], 迄今为止, 通过对脉冲、串脉冲和准连续脉冲放电等激励方式, 已经获得了从可见到中红外波长范围的多条谱线和不同机理的钡激光振荡.

波长为 1.5 μ m 的钡原子激光是最有希望获得高效高功率运转的红外脉冲激光器件, 对应的激光上、下能级分别是第一共振能级 $6p^1P_1^0$ 和亚稳能级 $5d^1D_2$, 属于典型的共振—亚稳 (resonance—metastable, R—M) 跃迁激光, 它所要求的技术线路与铜蒸气激光类似, 但工作温度 (约 900 $^{\circ}$ C) 比铜蒸气激光的温度 (约 1600 $^{\circ}$ C) 要低得多. 在相继获得碱土金属钙、锶蒸气的 R—M 跃迁多谱线激光振荡的基础上^[6,7], 我们通过改进激光放电管结构和光学谐振腔, 实现了波长为 1.13 和 1.50 μ m 的红外钡蒸气激光振荡^[8]. 已有的研究表明激励电路和掺氢对铜蒸气激光的输出特性影响较大^[9,10], 考虑到 1.5 μ m 波长的钡蒸气激光与 511/578 nm 的铜蒸气激光具有相似的能级结构、激励机理和技术线路, 结合我们先前对金属蒸气激光多种激励电路参量优化的结果, 本文选用非对称 Blumlein 电路和相互作用电路 (interactive

circuit, IC) 为脉冲放电激励电路, 对比研究了不同掺氢比例和激励电路时钡蒸气激光的工作特性, 并定性解释了掺氢和 IC 电路能显著提高激光输出功率和效率的作用机理.

2. 实验装置

实验装置类似于文献[8]. 放电管由外径为 22mm、电极间距为 42cm 的石英基管和用来限制放电通道、内径为 12mm、长为 39cm 的刚玉管组成, 在两管之间填充一层耐高温 α 棉用于绝缘和保温. 约 10g 纯度为 99% 的金属钡片匀分 5 堆放置在刚玉管内. 分别用 Blumlein 电路和 IC 电路为脉冲放电激励电路, 型号为 ZQM-2000/25 的充氢闸流管作快速放电开关. 激光谐振腔由一块镀金平面全反镜和透红外光的 MgF_2 平面输出镜组成. 用 MODEL LPE-1B 激光功率计测激光功率, 型号为 ISC2 的红外上转换卡 (0.85—1.55 μ m) 观测和定位激光光斑, WDC30 红外平面光栅单色仪分辨激光谱线.

3. 实验结果与讨论

3.1. Blumlein 电路时的掺氢研究

根据我们先前对多种金属蒸气激光激励电路的模拟与实验比较, 非对称 Blumlein 电路产生的放电

^{*} 国家自然科学基金 (批准号: 10374081) 资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: pb166@zju.edu.cn

电流脉冲具有快速的上升前沿和陡峭的下降后沿,完全符合钡蒸气激光所要求的放电激励条件.通过优化电路参量,确定非对称 Blumlein 电路的电容组合为 $C_1 = 500 \text{ pF}$ 和 $C_2 = 1000 \text{ pF}$.在 14.2 kHz 脉冲放电重复频率和 4.6 kPa 缓冲气体压强缓慢流动的条件下,实验研究了激光输出功率在不掺氢、掺氢 1.5% 和 2.5% 时随充电电源电压的变化关系如图 1 所示.为了减小因电压变化引起的温度效应,实验时以 3.8 kV 为平衡电压,每次快速提升或降低电压到设定值,在 40 s 内完成测量,再恢复到 3.8 kV 平衡状态重复进行.从图 1 可以看到,在相同电源电压时,掺氢能显著增加激光的输出功率,当电压为 5.3 kV 时,掺氢 1.5% 比不掺氢时的激光功率约提高了 2 倍,在电压小于 4.5 kV 时,掺氢 2.5% 时获得最大的激光输出功率.

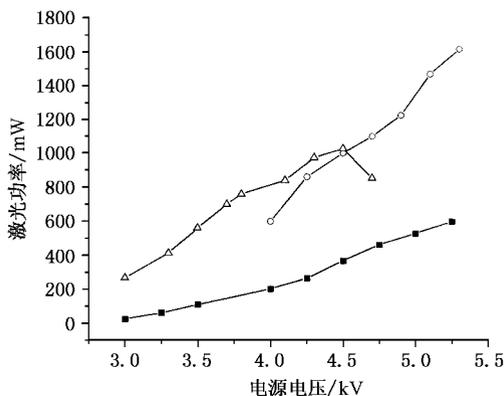


图 1 不同掺氢比例时激光功率与电源电压的关系 ■ 为不掺氢, ○ 为掺氢 1.5% , △ 为掺氢 2.5%

维持 4.8 kV 电源电压和 14.2 kHz 脉冲放电重复频率(对应 980 W 的电输入功率)的放电条件,在缓冲气体缓慢流动的状态下,测量了激光输出功率在不掺氢、掺氢 1.5% 和 2.5% 时与缓冲气体压强的关系曲线如图 2 所示.从图 2 可以看到,激光功率基本上随气压下降而快速上升,预计进一步降低气压还能增加激光功率,但由于更低气压时的放电不稳定导致激光功率的快速下降,故激光器稳定运转的气压范围应在 $2.0\text{—}5.3 \text{ kPa}$ 之间.同时可以看出,在相同气压时,掺氢 1.5% 时具有最大激光功率,比不掺氢时的激光功率提高了 $1.5\text{—}2$ 倍.

维持输入电功率约 850 W 和缓冲气体压强 4.0 kPa 稳定,在缓慢流动状态下实验研究了不掺氢和掺氢 1.5% 时激光功率与脉冲放电重复频率的关系,如图 3 所示.实验时,为了尽可能减小脉冲放电

重复频率对放电管温度的影响,以 14.6 kHz 脉冲重复频率为参考,每次迅速提升或降低脉冲放电重复频率到设定值,在 1 min 内完成测量,再恢复到 14.6 kHz 设定值,待放电管恢复热平衡后重复上述过程.从图 3 可知,掺氢 1.5% 时,虽然激光器稳定运转的工作频率范围明显变窄(只有不掺氢时的 $1/2$ 左右),但在相同脉冲重复频率情况下,激光的输出功率增加了约 2.5 倍.

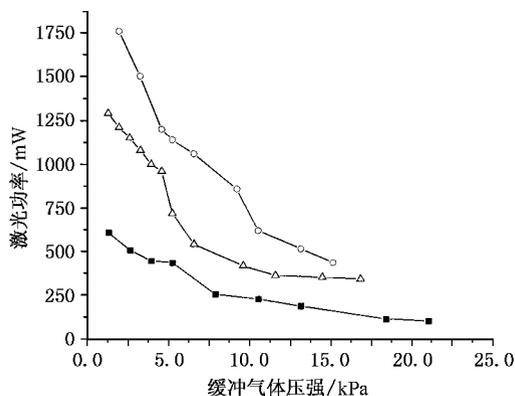


图 2 不同掺氢比例时激光功率与缓冲气体压强的关系 图注同图 1

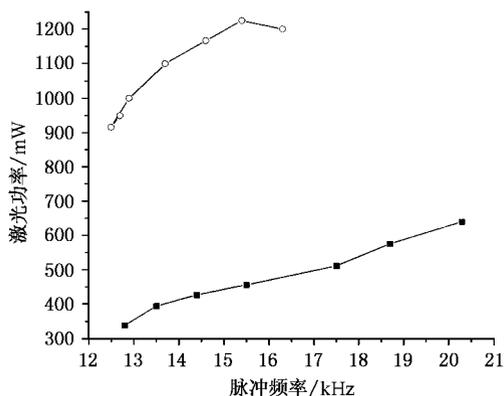


图 3 不掺氢(■)和掺氢 1.5% (○)时激光功率与脉冲放电重复频率的关系

有关掺氢能大幅提高激光功率的原因,我们认为主要是由电子与氢的离解粘附(dissociative attachment)反应决定的.在放电结束余辉期,较低电子温度(约 0.3 eV)使得游离态氢和氢分子与电子发生强烈的吸附反应,显著降低了等离子体的电子密度,从而增加了激光放电管中的等离子体阻抗和放电效率,具体表现为放电期间电压脉冲峰值和电子温度的提高,有利于激光上能级的激励.而在放电

期间,随电子温度的上升,粘附于氢的电子可以被剥离参与雪崩放电,有效降低了钡原子的电离率,增加了基态钡原子密度,同样有利于激光上能级的抽运和激光功率的提高。

3.2. IC 电路与 Blumlein 电路的比较

有关 IC 电路的工作特性在文献 [11] 中已有详细描述,它具有结构对称、放电回路紧凑和有效降低放电时的电泳效应等特点,能显著压缩放电电流脉冲的宽度和提高电流上升率,有利于提高 R—M 跃迁类金属蒸气激光的功率和效率。已有的研究表明,IC 电路能使溴化亚铜激光的输出功率和效率倍增,考虑到 $1.5\mu\text{m}$ 波长的钡蒸气激光与溴化亚铜激光存在相似的激励机理和技术路线,IC 电路理应能有效提高钡蒸气激光的输出功率和效率。为此,对比研究了 IC 电路和 Blumlein 电路时钡蒸气激光的输出特性。根据文献 [11] 对 IC 电路参量优化的结果,IC 电路中的 4 个电容分别取 $C_1 = 1\text{nF}$, $C_2 = C_3 = 0.3\text{nF}$ 和 $C_4 = 3.3\text{nF}$,充电时对应的等效储能电容 $C = 955\text{pF}$ 。根据上面的实验方法和掺氢实验结果,选用掺氢 1.5% 的氖气作缓冲气体。在 14.2kHz 脉冲重复频率和 4.6kPa 气压缓慢流动状态下,测量比较了 IC 电路和 Blumlein 电路时激光功率随电源电压的变化曲线,如图 4 所示。由图 4 可知,两种电路时的激光功率都随电源电压的增加而快速上升,当电压小于 4.35kV 时,IC 电路对应的激光功率比 Blumlein 电路时的要小,当电源电压大于 4.35kV 时,虽然 Blumlein 电路的输入电功率约为 IC 电路的 1.6 倍(在相同电源电压和脉冲重复率时,两种电路的输入电功率比等于对应的储能电容之比: $1500\text{nF}/955\text{nF} \approx 1.6$),但 IC 电路时的激光功率上升得更快,在 5.0kV 时比 Blumlein 电路时的激光功率增加了约 1 倍。在最佳工作参量时(2.6kPa 气压、15.3kHz 脉冲重复率和 5.2kV 电压),获得了 3W 的最大激光功率和 0.4% 的激光效率。

图 5 给出两种电路时的激光功率与缓冲气体压强的关系曲线。由于 IC 电路比 Blumlein 电路具有更高的放电效率和抽运速率,为了维持相对稳定的工作温度,控制 IC 电路和 Blumlein 电路的电源电压分别为 4.5 和 4.7kV 稳定,改变脉冲重复率使两种电路各自保持相同的电功率输入(IC 电路的输入电功率约为 Blumlein 电路的 70%)。从图 5 可以看到,两种电路时激光输出功率都随气压增加呈下降趋势,

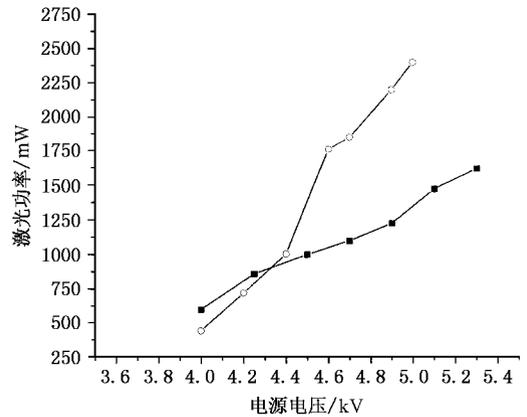


图 4 IC 电路(○)和 Blumlein 电路(■)时激光功率与电源电压的关系

在相同的气压范围内,IC 电路的激光功率是 Blumlein 电路的 1.5—2 倍,由此可见,对脉冲放电激励的钡蒸气激光而言,IC 电路具有更高的放电效率和抽运速率,可大幅提高激光的输出功率和效率。

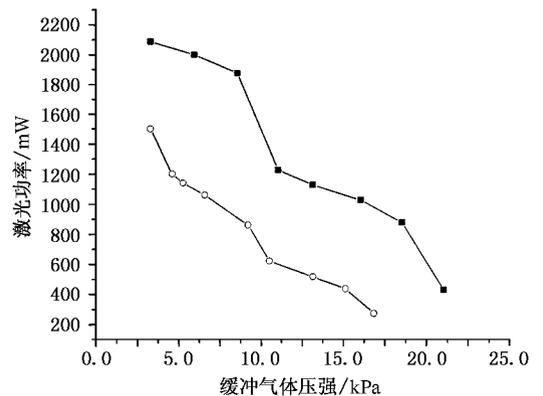


图 5 IC 电路(■)和 Blumlein 电路(○)时激光功率与缓冲气体压强的关系

先前对 IC 电路的理论模拟和实验研究表明 IC 电路具有以下 3 个特点^[11]:首先,IC 电路的两电极间在充电时有约 200V 电压差,这对激光管的导通起到了预电离的作用,而在放电期间,电极正负性的交换避免了等离子体在电场作用下的电泳效应,使轴向钡蒸气密度的分布更加均匀。其次,由于金属板和激光管同轴放置,有效减小了 IC 电路的回路分布电感,从而大幅提高了放电电流脉冲的上升率和压缩了脉宽。另外,两金属板间独有的电磁相互作用对提高激光功率也起到了非常明显的作用。对放电激励的 R—M 跃迁类金属蒸气激光(包括钡蒸气激光)而言,上述三点都非常有利于上能级的激励和放电效

率的提高,从而使激光功率和效率显著增加。

4. 结 论

对用 Blumlein 电路放电激励的钡蒸气激光在稳态流动状态下进行了系统的掺氢实验,比较了不同掺氢比例时钡蒸气激光的输出功率随各工作参数的变化关系,发现当用掺氢 1.5% 的氖气作缓冲气体

时可大幅提高激光输出功率和效率,并给出定性解释。在此基础上,进一步对比研究了 IC 电路和 Blumlein 电路时钡蒸气激光的工作特性,结果表明,IC 电路比 Blumlein 电路具有更高的放电效率和激励速率,使激光输出功率和效率倍增。若进一步优化和匹配各工作参数,钡蒸气激光有望成为高效高功率的近红外脉冲激光器件。

- | | |
|--|--|
| [1] Cahuzac P 1970 <i>Phys. Lett. A</i> 32 150 | [7] Chen G <i>et al</i> 2001 <i>Acta Phys. Sin.</i> 50 1294 (in Chinese) [陈钢等 2001 物理学报 50 1294] |
| [2] Bricks B G, Karras T W and Anderson R S 1978 <i>J. Appl. Phys.</i> 49 38 | [8] Pan B L <i>et al</i> 2002 <i>Acta Phys. Sin.</i> 51 259 (in Chinese) [潘佰良等 2002 物理学报 51 259] |
| [3] Bokhan P A 1986 <i>Sov. J. Quantum Electron.</i> 16 1041 | [9] Sabotinov N V <i>et al</i> 1993 <i>Opt. Commun.</i> 95 55 |
| [4] Pask H M and Piper J A 1990 <i>Proc. SPIE</i> 1225 248 | [10] Nikolay K V <i>et al</i> 1994 <i>IEEE J. Quantum Electron.</i> 30 750 |
| [5] Richard P M <i>et al</i> 1997 <i>J. Appl. Phys.</i> 82 2048 | [11] Chen G <i>et al</i> 2003 <i>J. Optoelectron. · Laser</i> 11 1142 (in Chinese) [陈钢等 2003 光电子·激光 11 1142] |
| [6] Pan B L <i>et al</i> 2000 <i>Acta Phys. Sin.</i> 49 719 (in Chinese) [潘佰良等 2000 物理学报 49 719] | |

Influence of hydrogen additive and excitation circuits on the output performance of barium vapor laser^{*}

Pan Bai-Liang Mao Bang-Ning Chen Gang Fang Ben-Min Yao Zhi-Xin

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

(Received 20 May 2004 ; revised manuscript received 15 June 2004)

Abstract

The output performances of barium vapor laser with and without hydrogen additive excited by pulsed discharge with Blumlein circuit were experimentally investigated. The result indicates that the laser output power increases two times with 1.5% hydrogen mixed into the neon buffer gas. Based on this experimental result, this paper further compares the working characteristics of barium vapor laser with interactive circuit and Blumlein circuit, and finds that the interactive circuit can greatly improve the laser output power and its efficiency. The maximum laser power of 3 W and efficiency of 0.4% have been obtained at 1.5 μ m laser line. The dependence of laser power on working parameters is measured and discussed, and the mechanisms of hydrogen additive and interactive circuit for improvement of the laser performance are qualitatively analyzed.

Keywords: Blumlein circuit, interactive circuit, hydrogen additive, barium vapor laser

PACC: 4255H, 4260H

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10374081).