

文章编号: 1001-3806(2006)02-0113-03

CuBr 激光器放电回路参数优选的正交设计实验

路峻岭¹, 王兰俊²

(1. 清华大学 物理系, 北京 100084 2 北京信息工程学院, 北京 100101)

摘要: 为使 CuBr 蒸气激光器的工作状态最佳(稳定且高效), 利用正交设计实验方法对其放电回路参数实行最佳搭配实验, 得到了一组放电回路参数, 可使 CuBr 蒸气激光器工作在最佳状态。

关键词: 激光器; CuBr 蒸气激光器; 放电回路; 正交设计实验

中图分类号: TN248.2 文献标识码: A

The orthonormal design of experiments for the optimization of the parameters of the discharge circuit in the CuBr vapour lasers power supply

LU Jun-ling¹, Wang Lan-jun²

(1. Department of Physics Tsinghua University, Beijing 100084, China 2 Beijing Institute of Technology Information, Beijing 100101, China)

Abstract To make the CuBr vapour lasers work efficiently and stably, the orthonormal design of experiments is used to test the optimization of the parameters of the discharge circuit in the laser power supply. The optimum set of parameters is found.

Key words laser; CuBr vapour laser; discharge circuit; orthonormal design of experiments

引 言

CuBr 蒸气激光器用 CuBr 作工作物质, 在中小型功率情况下, 常靠放电自加热使放电管体达到所需要的温度^[1,2], 借以使工质熔化但不沸腾, 维持一定的蒸气压, 再由放电脉冲使 CuBr 分子离解成原子, 放电的过程直接影响放电管的工作状态, 因此, 选择适当的放电电路, 并确定恰当的元件参数是非常重要的^[3-5]。本文中介绍用正交法设计实验, 最快地找到电路元件的最佳工作参数组合, 以满足激光器工作的要求。

1 CuBr 蒸气激光器工作原理简介

铜蒸气激光器是以铜原子作工作物质的一种大功率可见光激光器, 纯铜要达到一定的蒸气压需要使工作物质处于 1500℃ 以上的高温中^[1], 但若用铜的化合物在放电过程中离解而得到铜原子就不需要那么高的温度, 如用 CuBr 则可在约 460℃ 时, 使激光管工作在最佳状态^[3,6]。CuBr 蒸气激光器中工作物质的相关能级如图 1 所示。

该激光器是工作在脉冲放电状态的, 放电脉冲使 CuBr 分解为 Cu 原子和 Br 原子, 低速电子使 Cu 原子通过彭宁过程(原子与低速电子作非弹性碰撞, 吸收

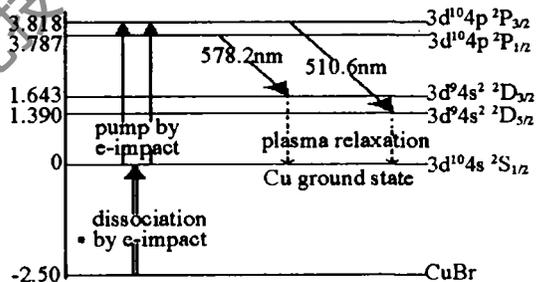


Fig 1 Partial energy level diagram of the working matter of CuBr vapour lasers

部分能量使自己处于激发态的过程)到达 3d¹⁰ 4p 电子组态, 相应能级为 ²P_{3/2} 和 ²P_{1/2}, 处于激发态能级上的原子作辐射跃迁, 发出 510.6nm 和 578.2nm 的光子跃迁至电子组态 3d⁹ 4s², 相应能级为 ²D_{3/2}, ²D_{5/2}, 这就是激光下能级。由于跃迁选择定则的限制, 处于激光下能级的原子不能通过辐射跃迁回到基态, 因此激光的下能级量是亚稳态能级, 寿命较长, 这就使得工作于这样的上下能级之间的激光器不可能是连续激光器, 只能是脉冲激光器。利用快放电过程中处于基态的铜原子往上能级跃迁有较大的作用截面, 迅速在上下能级之间建立起布居数反转, 若有谐振腔, 则可以产生激光振荡。然而, 一旦有激光出现, 下能级上很快地就堆集大量原子而使布居数反转破坏掉, 激光也就终止了, 因此, 快放电是该激光器工作的最重要的条件^[3]。

2 CuBr 蒸气激光器的放电回路

CuBr 蒸气激光器的放电回路如图 2 所示^[2,3,7], 其

作者简介: 路峻岭(1946-), 男, 副教授, 主要从事教学和传感器技术及激光技术研究。

E-mail: wly@tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2005-01-13 收到修改稿日期: 2005-04-12

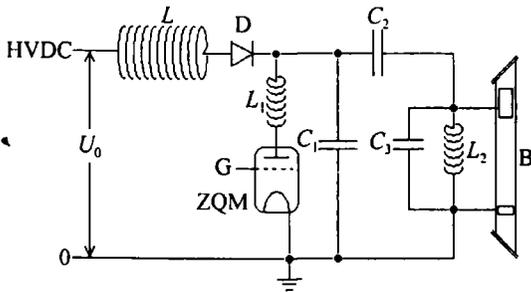


Fig 2 The discharge circuit diagram of the supply of the CuBr vapour lasers

中 ZQM 为氢脉冲闸流管,它是一个高速开关元件,其特点是在很短的时间(如几个纳秒)内实现开通,实验中所用闸流管 ZQM 130/10可以在阳极电压为 10kV 下工作,脉冲电流峰值可以达到 130A。高压直流电源通过电感 L , 高压硅堆 D 给储能电容 C_1 和 C_2 充电, L_2 是充电电感,它的存在可使 C_1 充上电,一般常取 L, C_1, C_2 满足:

$$f = \frac{1}{\pi \sqrt{L(C_1 + C_2)}} \quad (1)$$

可使放电回路处于谐振充电工作状态,储能电容充电电压可高达高压直流电源电压的两倍 $2U_0$ 。高压硅堆 D 的作用是防止脉冲电流回流而烧毁高压直流电源的前级电路。当闸流管栅极 G 有触发脉冲作用时,闸流管导通,电容 C_1 上的电荷通过电感 L_1 放电,由于放电过程很快, C_1 上的电荷极性可以反向,与 C_2 上的电压相加,一同向激光管 B 放电, L_2 上的电流极小不能突变, C_1 和 C_2 上的电荷就只向激光管 B 放电,脉冲电流的前沿越高越陡,越有利于激光的出现。为了提高激光管 B 中电流脉冲的峰值和前沿,特在激光管 B 上并联一小电容 C_3 ,称为峰化电容。由于放电过程很快,在零点几微秒即可完成,电感 L 就承担起高压直流电

压上的电压,也就是说, L 和 D 的共同作用使放电过程只在放电回路中进行,而不影响到前级。放电结束,脉冲闸流管恢复到断开状态,高压电源又实行第 2 次通过 L, D 对储能电容 C_1 和 C_2 的充电。

在这里,工作频率 f 和 L 一旦确定了,由 (1) 式, $C_1 + C_2$ 就被确定了下来,但仍有一些参数尚未被确定下来,而且它们常常无法通过理论分析完全确定,只有通过实验对比来确定它们。具体地说, L_1, C_1, C_2, C_3 需要由实验确定,其中独立变量只有 3 个,即 L_1, C_1 和 C_3 。作者的目的是通过实验找出它们的最佳组合,使激光器在给定的输入功率条件下,有最大的激光功率输出,而完成此项工作最有效的方法是正交设计实验方法。

3 激光电源放电回路独立变量的最佳搭配

正交设计实验方法的前提是人们根据对具体问题的了解确定各个实验因素的变化范围,在此范围内进行组合实验,正交设计的本质是组合的平衡搭配,使实验具有可比性而从中找出最佳搭配^[8]。

在本实验中,把 L_1, C_1, C_3 作为影响因素进行研究,每一因素各取两个值,称为两个水平,即选 L_1 取 2.6μH 和 3μH, C_1 取 1250pF 和 1350pF, C_3 取 200pF 和 250pF。因为电感电容的影响往往不只由其自身的值来决定,还会受其它元件取值的作用,即:一个因素水平结果的好坏与另一因素水平的选取有紧密的依赖关系,称之为有交互作用,即在本问题中必须考虑交互作用,故选 $L_8(2^7)$ 正交表,如表 1 所示。

首先把影响因素及其交互作用按次序填入第 1 行

Table 1 $L_8(2^7)$ orthonormal table

test No	factors							laser power P_i / mW
	1 L_1	2 C_1	3 $L_1 \times C_1$	4 C_3	5 $L_1 \times C_3$	6 $C_1 \times C_3$	7 $L_1 \times C_1 \times C_3$	
1	1	1	1	1	1	1	1	165
2	1	1	1	2	2	2	2	103
3	1	2	2	1	1	2	2	184
4	1	2	2	2	2	1	1	163
5	2	1	2	1	2	1	2	200
6	2	1	2	2	1	2	1	176
7	2	2	1	1	2	2	1	94
8	2	2	1	2	1	1	2	163
j	615	644	525	643	688	691	598	
j	633	604	723	605	560	557	650	
$j/4$	153.75	161	131.25	160.8	172	172.8	149.5	
$j/4$	158.25	151	180.75	151.3	140	139.3	162.5	
max- min	4.5	10	49.5	9.5	32	33.5	13	
influence	7	5	1	6	3	2	4	

的各列,再在第 1 列列出实验序号,最后一列为评定实验结果的指标,这里是激光功率,每次实验对各因素水平的选取按正交表列出,上表的下半部为对实验结果的处理,其中 \bar{y}_j 表示相应因素 j 的一水平实验结果的和, \bar{y}_{j1} 表示二水平实验结果的和, $\bar{y}_j/4$ 和 $\bar{y}_{j1}/4$ 分别表示因素 j 的每一水平实验结果的平均值,极差即 $\bar{y}_j/4 - \bar{y}_{j1}/4$ 的绝对值,表示该因素的两个水平对应的实验结果的平均值之差,最后一行为按极差大小排出的顺序。本实验中, L_1, C_1 交互作用项的极差最大,因此首先要确定 L_1, C_1 的取值。这里做出它们的二元表和二元图见表 2 图 3。

Table 2 L_1, C_1 2-factors table

test No	L_1	C_1	datum
1 2	1	1	268
3 4	1	2	347
5 6	2	1	376
7 8	2	2	257

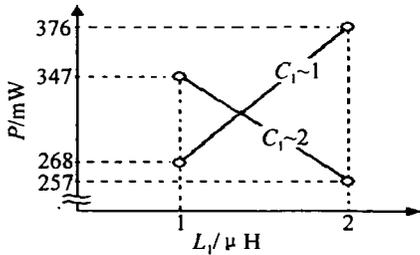


Fig 3 The mutual act of L_1, C_1

按类似方法列出 C_1, C_3 的二元图。

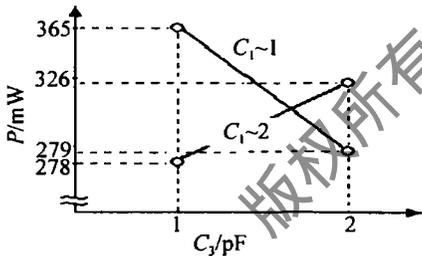


Fig 4 The mutual act of C_1, C_3

类似上面列出 L_1, C_3 二元图。

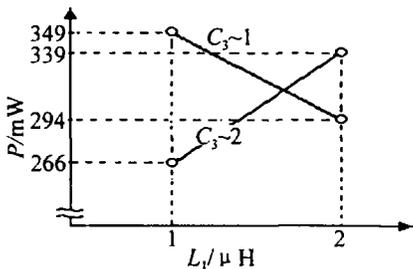


Fig 5 The mutual act of L_1, C_3

从图 3 可见, L_1 和 C_1 有交互作用,取 $(L_1)_2 (C_1)_1$ 组合较好。再从图 4 看到,取 $(C_3)_1 (C_1)_1$ 较好,它与 $L_1 C_1$ 的选取没有矛盾。从图 5 看到,若 L_1 取 2 则 C_3 宜取 2 这和 $C_3 C_1$ 的选取结果产生了矛盾,但这时重要的是首先确定 $L_1 C_1$,再权衡 L_1 和 C_3, C_1 和 C_3 的交互作用

选取适当的 C_3 。最后结果为 L_1 取 $3\mu\text{H}$, C_1 取 1250pF , C_3 取 200pF 。这一组合正是作者进行的第 5 个实验,它体现了一个最佳参数组合。

4 讨论

(1)实验的结果与作者对放电回路的理解是一致的,即, $L_1 C_1$ 决定了闸流管导通时电容 C_1 上电压极性的变化,直接影响激光管的放电与激光的产生。

(2)三因素二水平正交设计实验实质上是在三维空间中取了一个立方体,实验条件是由此立方体的顶点所确定的 8 种组合 (L_1, C_1, C_3) ,如图 6 所示。

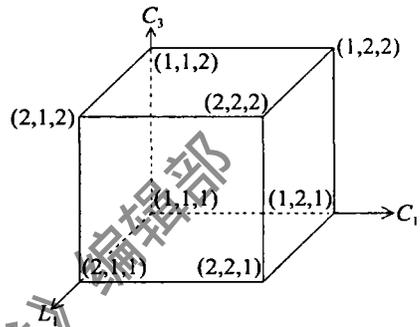


Fig 6 The homologue diagram of the arrangements of a 2-factors 3-levels orthogonal design of experiments

在不考虑交互作用时,评价结果的好坏是从立方体的棱上入手的,即把立方体 8 个顶角都压向一条棱(棱两端对应的 4 个实验结果求和),比较此线段两端的的结果。如研究 C_1 的取值,比较它取的两个值的哪一个时的结果好,确定下它来再看 L_1 ,最后再确定 C_3 。而当考虑到交互作用时,不但要看立方体的棱还要看立方体的面,比如 $L_1 C_1$ 交互作用强烈,则首先要在 $L_1 C_1$ 的面上看,先把立方体压缩为一个长方形,比较其 4 个顶点表示的实验条件所对应的结果哪一个好从而确定两个因素该取的水平,再看第 3 个因素进而确定之。

(3)三因素取值的空间是一个三维空间,最佳搭配是指此空间中的某些个别点,而正交设计实验就是人为地选定此空间中的一个立方体,尽量高效率地靠近或找到最佳搭配点。因此,因素水平的设定是很有学问的,其选定的原则有两条:一是实验可行,二是尽量接近最佳搭配点。用二水平正交表的优点是简便易行,实验次数少,缺点是不能一次就找到最佳搭配点,这样就要进行多次使用二水平正交表的实验或直接使用高水平正交表来设计实验。在本实验中,把 L_1 取 $5\mu\text{H}$, C_1 取 1100pF , C_3 取 180pF 补充了一些实验,结果仍以 $L_1 = 3\mu\text{H}$, $C_1 = 1250\text{pF}$, $C_3 = 200\text{pF}$ 为最佳搭配。

5 小结

介绍了用三因素二水平正交表设计实验,找到了

(下转第 122 页)

半径, α 是抽运光吸收系数。

2 4 近阈值时的激光输出功率和斜效率

在近阈值时, 有 $\varphi_0(r, z) \ll I_{sat} = n/c\sigma\tau\beta_{Ho}$, 输出功率和腔内光子数的关系为 $P_{out} = \phi h\nu_c T / 2nl_{eff}$, 从 (3)式近似计算得到激光输出功率和斜率效率:

$$P_{out} = \frac{2h\nu_c T B_0}{3l_{eff}\sigma\tau\beta_{Ho}B_1} \frac{(P_{in} - P_{th})}{P_0} = \frac{4\eta_a \eta_p B_0^2 \nu_c T}{3B_1 \nu_p n \delta} (P_{in} - P_{th}) \quad (5)$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in} - P_{th}} = \frac{4\eta_a \eta_p B_0^2 \nu_c T}{3B_1 \nu_p n \delta} \quad (6)$$

从上述推导出的 (4)式明显看出, 上转换系数 K_u 的存在使激光阈值增加, 因此, 从 (5)式得出的输出功率降低。并且从 (1)式右边第 3项可以发现, 上转换过程是非线性的, 上转换速率与激光上能级粒子数平方成正比。此外值得注意的是, 在大功率运转时, 上转换的影响会越来越显著, 尤其在调 Q 和放大器运转时。计算参数为: $\eta_p = 1.5$, $\sigma = 2.6 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$, $\omega_p = \omega_1 = 280\text{THz}$, $\nu\delta = 3\% + 30\%$, $\tau = 10\text{ms}$, $\alpha = 6\text{cm}^{-1}$, $\beta_{Ho} = 0.5$, $K_u = 6 \times 10^{-18} \text{ cm}^3 / \text{s}$, $l_c = 15\text{cm}$, $l = 1\text{cm}$, 理论计算斜率效率 26.3%, 阈值抽运功率 747mW, 上转换对阈值的贡献占 40%以上。

3 结 论

在低温时, 双掺 Tm/Ho:GdVO₄ 激光器是准四能级系统。建立了含有上转换过程的双掺 Tm/Ho准四能级速率方程, 得出阈值抽运功率和斜率效率的表达式; 对光纤耦合 LD 端面抽运 Tm/Ho:GdVO₄ 晶体进行了实验研究, 获得最大激光输出功率 3.5W、光-光转换效率 25%、阈值抽运功率 838mW 的结果, 理论和实验基本符合。另外, 对实验中观测到的上转换绿荧光现

象进行定性的分析, 上转换过程是非线性的, 上转换速率与激光上能级粒子数平方成正比, 在抽运功率提高时, 上转换的影响会越来越显著。上转换过程分析对今后的调 Q 激光器及其放大器实验起到指导作用。

参 考 文 献

[1] HENDERSON SW, SUNI P JM, HALE C P *et al* Coherent laser radar at 2 μm using solid-state lasers [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 1993 31(1): 4~ 15

[2] TACZAK TM, KILLINGER D K. Development of a tunable narrow linewidth CW 2.066 μm Ho:YLF laser for remote sensing of atmospheric CO₂ and H₂O [J]. Appl Opt 1998, 37(36): 8460~ 8465.

[3] WYSS C P, LUTHY W. Performance of a Tm³⁺:GdVO₄ microchip laser at 1.9 μm [J]. Opt Commun, 1998 153: 63~ 67.

[4] WYSS C P, LUTHY W, WEBER H P *et al* Emission properties of a Tm³⁺:GdVO₄ microchip laser at 1.9 μm [J]. Appl Phys 1998 B67 (5): 545~ 548

[5] MORRIS P J, LUTHY W, WEBER H P. Laser operation and spectroscopy of Tm:Ho:GdVO₄ [J]. Opt Commun 1994, 111: 493~ 496.

[6] ZHANG X L, WANG Zh YAO B Q *et al* Experiment study of 2 μm wavelength Tm:Ho:YLF microchip laser [J]. Laser Technology 2002 26(6): 407~ 408 (in Chinese).

[7] FALCONERIM, LANZIA, SALVETTI G. Spectroscopic investigation of the visible and mid-infrared emission in Tm- and Ho-doped YAG and YLF crystals [A]. Proc of CLEO [C]. Europe CLEO, 1994. 132~ 133

[8] BARNES N P, FILER E D, MORRISON C A. Ho:Tm lasers - Theoretical [J]. IEEE J Q E, 1996, 32(1): 92~ 103

[9] TACZAK TM. Development of a tunable narrow linewidth 2.066 μm external-cavity, thulium:yttrium lithium fluoride laser for open-path remote sensing of atmospheric carbon dioxide and water vapor [D]. South Florida University of South Florida 1996 46~ 48

[10] DOSHIDA M, TERAGUCHI K, OBARA M. Gain measurement and upconversion analysis in Tm³⁺, Ho³⁺ co-doped alumina-zirconia-fluoride glass [J]. IEEE J Q E, 1995, 31(5): 910~ 915

[11] CHEN Y F, LAN Y P, WANG S C. Influence of energy-transfer upconversion on the performance of high-power diode-end-pumped CW lasers [J]. IEEE J Q E, 2000 36(5): 615~ 619

(上接第 115 页)

CuBr 蒸气激光器放电回路元件参数一种最佳搭配, 实现了一定电功率输入条件下的最大激光功率输出, 所介绍的方法可直接用于指导其它类型的卤化铜蒸气激光器放电回路的实验研究, 也可对其它科学实验过程给以有益的参考。

参 考 文 献

[1] LEI Sh Zh A handbook of laser technology [M]. Beijing Science Press 1992. 660~ 675 (in Chinese).

[2] HUANG Zh G, CHEN T, SHAN H Y. Optimization of discharge circuit elements for copper vapour lasers [J]. Chinese Journal of Lasers 1985 12(4): 233~ 236 (in Chinese).

[3] LITTLE C E M *et al* vapour lasers [M]. Chichester New York Wiley

1999 145~ 187, 223~ 232

[4] ZHAO N J, DENG G Q, ZHANG Y L. A new circuit of Ti:sapphire laser power supply [J]. Laser Technology, 2004 28(6): 569~ 571 (in Chinese).

[5] LIU Q, ZHU JM. Study on Ca⁺ / CuBr self-terminating laser pulse [J]. Laser Technology, 2002, 26(4): 290~ 294 (in Chinese).

[6] WU P, WANG Y Zh Improving on structure of the condenser of metal vapour lasers [J]. Laser Technology 1999 23(5): 271~ 273 (in Chinese).

[7] YING X X, XIA T J, YAO Zh X. Investigation on temperature dependence of yellow-green light pulses of CVL [J]. Acta Optica Sinica 1986 6(10): 870~ 874 (in Chinese).

[8] GAO Y Y. The methods of the orthonormal design of experiments [M]. Beijing Metallurgical Industry Press 1988 17~ 69 (in Chinese).