

金属蒸气激光器窗口污染问题的研究

王欲知 吴平

(西南交通大学应用物理系, 成都 610031)

周艳

(西南物理研究所, 成都 610041)

提要 提出了金属蒸气激光器中金属原子在激光器隔离头中运动的理论模式——无规行走模式。从实验上验证了该模式。在此理论模式的基础上, 设计出一种新的抗金属蒸气污染的隔离头, 其原理是, 在金属蒸气原子无规行走过程中, 用多片高凝结系数的金属片来吸附碰撞在它上面的金属蒸气原子, 从而实现对窗口的保护作用。还用 Monte Carlo 数值模拟方法, 模拟了金属原子的运动, 显示了新型隔离头的抗污作用, 它的抗污能力比普通的隔离头有明显的提高。

关键词 金属蒸气激光器, 窗口污染, 无规行走模式, 新型隔离头

1 引言

金属蒸气激光器是一类很有前途的激光器, 它有丰富的激光谱线, 谱线范围覆盖了紫外区、可见光区和红外区, 因而金属蒸气激光器被广泛应用于科学研究、信息存贮、印制、彩色显示、测污、医疗、检验、测速等各个领域^[1]。发展高效、长寿命、高功率的金属蒸气激光器是目前气体激光器研究的重要方向之一。

金属蒸气激光器、多数是利用窗口引出光束在反射镜之间形成振荡产生激光的外腔式结构, 有少量产品是直接利用膜片振荡产生激光的内腔式^[2]。金属蒸气激光器由于它固有的特点, 决定了在放电管与窗片或膜片之间存在较大的温差。这样, 金属蒸气很容易在常温的窗口或膜片上凝结, 造成污染, 从而严重影响激光器的输出功率, 同时对输出光束的方向性、噪声、激光器的寿命也影响较大。因此, 解决窗口污染问题成了提高激光器质量的一个关键问题。

在 He-Cd 激光器中有人早已利用电泳效应, 采用辅助阳极的方法来减少金属蒸气对窗口的污染^[3]。但是这种方法不能克服中性金属原子对窗口的污染。Wang Shuguang(王曙光)提出了用具有喇叭形的挡板来保护窗口, 他认为金属蒸气是从放电管管口喷射出来的^[4]。喇叭形挡板有一定的“收集”金属蒸气的作用。但实际上防污效果欠佳。在铜蒸气激光器中, V. A. Burmakin 等人提出了利用足够高压力的缓冲气体来防止金属蒸气扩散, 达到保护窗口的目的^[5], 结果也不十分理想。

本文通过对 He-Cd 空心阴极白光激光器窗口受污机理的研究, 提出了金属原子在隔离头中运动的物理模式——无规行走模式。在此理论模式的基础上, 设计出了一种新型的防止金属蒸气污染的隔离头。实验证明, 其效果良好。本文还用 Monte Carlo 数值模拟法, 模拟了镉原子的运动, 生动地显示了这种隔离头的抗污染效果。

2 理论模式

王曙光喇叭形挡板方法是建立在 Cd 原子从放电管口喷射出来的设想的基础上,但是在封离型的 He-Cd 激光器中,氦气整体处于不流动的稳定状态,而镉蒸气压比氦气压小 100~1000 倍, Cd 原子从放电管口进入隔离头,要穿越气压比它高千倍的氦气,是不可能产生喷射效应的。

在 He-Cd 白光激光器中,氦的工作气压一般在 $1.0 \times 10^3 \sim 2.4 \times 10^3$ Pa 的范围内,镉蒸气压在 1.3~14 Pa 之间^[6~11],若设氦工作气压为 2×10^3 Pa,镉蒸气压为 6.7 Pa,当工作温度为 600 K 时,可计算出 He-Cd 的混合平均自由程^[12]为:

$$\lambda_{Cd} = \frac{4kT}{\pi \left[4 \sqrt{2 P_{Cd} \sigma_{Cd}^2 + P_{He} (\sigma_{Cd} + \sigma_{He})^2} \sqrt{1 + M_{Cd}/M_{He}} \right]} = 0.003528 \text{ mm}$$

其中, σ_{Cd} , σ_{He} 为 Cd 和 He 的原子直径, M_{Cd} , M_{He} 为 Cd 和 He 原子的量, P_{Cd} , P_{He} 为 Cd 和 He 原子的蒸气压, T 为工作温度, k 为玻耳兹曼常数。

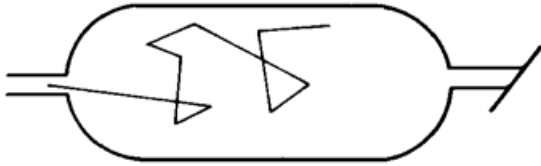


Fig. 1 Schematic diagram of random walk

工作气体的平均自由程相对于放电管的几何尺寸小 3~4 个数量级。当 Cd 原子从高浓度区向低浓度区扩散时, Cd 原子将同作为背景的 He 原子及其他 Cd 原子发生多次碰撞,每次碰撞都将改变它的运动方向。因此,在大量背景粒子作用下

Cd 原子只能以无规行走的方式来实现其从高浓度区向低浓度区的扩散^[13],如示意图 1 所示。事实上,这就是在热运动的基础上迭加上了原子的定向运动。

Cd 原子在隔离头中做无规行走运动,运动中要与背景的 He 原子和其他 Cd 原子发生碰撞,碰撞后速度方向是随机的。由于 He-Cd 的混合平均自由程很短,一个 Cd 原子从放电管口出来要经过成千上万次碰撞,才能抵达窗口。在此过程中, Cd 原子不仅要与背景原子碰撞,还会与隔离头内设置的表面发生碰撞。与这些表面碰撞的 Cd 原子有一部分会凝结在表面上,因此,减少了向窗口运动的原子数。这就是商品隔离头起防污作用的原理。事实上,容易观察到,使用了较长时间的管子,靠近窗口玻璃管内壁上有一层灰黑色膜,这就是吸附的金属粒子膜。

内表面有减少 Cd 原子对窗口污染的作用,实质上是基于内表面对金属原子的吸附作用。因此,增加吸附表面积固然可以大大减少污染,而采用具有高凝结系数的表面,效果将更为显著。表 1 给出了 Cd 蒸气、Cu 蒸气在一些表面上的凝结系数^[14]。

Table 1 Condensation coefficient for Cd and Cu on several kinds of surface

Metal vapour	Surface	Condensation coefficient
Cd	Glass, mica	~ 0
	Al (vacuum deposited)	1.0
	Ag, Au, Cu (vacuum deposited)	0.3~ 0.6
	Cd (high purity)	0.4~ 0.7
	Cd (polished)	1.0
Cu	Cu (vacuum deposited)	0.2~ 0.4
	Cu (vacuum deposited)	0.4~ 0.7
	Cu (vacuum deposited)	1.0

Note: For Cu-Cu (vacuum deposited), data of condensation coefficient belong to different authors.

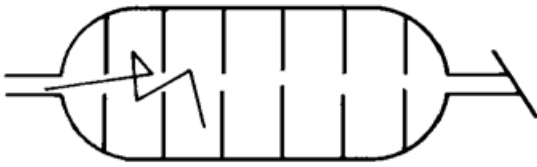


Fig. 2 Schematic constructional diagram of the new-type condenser

3 实验装置及实验概述

实验管外型如图 3 所示, 该管的空心阴极用铝管制作, 铝管的内径 $\phi_{\text{内}} = 8 \text{ mm}$, 外径 $\phi_{\text{外}} = 10 \text{ mm}$, 管长 $l = 80 \text{ mm}$, 管子正中有一笛型孔, 孔径 $\phi_{\text{孔}} = 5 \text{ mm}$ 。阴极引线用钨杆通过攻螺纹与阴极连接, 阴极玻璃套管管长 $L = 100 \text{ mm}$, 管径 $D = 12 \text{ mm}$ 。阳极与外加热钨炉合二为一。在钨炉中装有 3.5 g 的 Cd, Cd 与阳极杆之间用阳极套管分隔开。隔离头长 40 mm , 其内径 24 mm 。为了进行对比实验, 在右边的隔离头中, 装上了间隔等距的 6 片中心有孔的圆形紫铜片(孔径 = 6 mm , 片距 = 6 mm), 紫铜片中心圆孔正对光路, 不挡光路。在另一“隔离头”中没有安装任何东西。隔离头由 17# 玻璃烧制, 窗口由一光学平板玻璃代替, 平板玻璃片与隔离头之间用真空黑膏密封。用黑膏密封的目的在于实验后易于取下, 进行观察及测量。

将实验管连接到真空系统上抽气, 并适当加热除气。当本底真空达 10^{-3} Pa 量级时, 开始充 He 气, He 气压达 $2 \times 10^3 \text{ Pa}$ 时, 封下实验管, 模拟 He-Cd 空心阴极白光激光器的工作条件^[6~11], 选择实验管的工作参数, Cd 炉温度控制在 $290 \sim 360 \text{ }^\circ\text{C}$ 之间, 着火电压为 $340 \sim 360 \text{ V}$, 管压降为 $180 \sim 200 \text{ V}$, 放电电流为 $75 \sim 100 \text{ mA}$, 每天连续放电 10 h , 总共放电 60 h 。

4 实验现象及分析

4.1 工作 60 h 后, 实验管有防护铜片组的隔离头, 其窗口在强光照射下, 没有肉眼可观察到的 Cd 膜, 拆下窗口玻片, 用干涉显微镜测量, 测不出任何膜厚。

4.2 取出防护铜片观察, 发现第一片(从空心阴极放电管出口处计算)铜片正对放电管的一面(正面)沉积有一层较厚的 Cd 膜, 而它的背面沉积较少, 重要的是, 此背面沉积的情况(厚度、分布)与第二片正面上沉积的情况基本一致, 它们的分布都是靠近孔口的部位, Cd 沉积较厚, 越往深处(隔离头玻璃壁处)越稀少。以上现象证实了金属粒子在隔离头中无规行走模式的正确性。当 Cd 粒子进入两铜片和玻璃围成的空间时, 原子在其间作无规行走运动, 各方向运动的几率相同, 到达两相邻铜片上, 被凝结的几率也基本相同, 因此, 在宏观上表现为两相邻铜片的相对面上 Cd 膜分布的一致。在第三片铜片上只发现很少的 Cd 沉积, 在其余铜片上没有肉眼可观察到的 Cd 膜。

4.3 工作 60 h 后, 在对比用的无防护铜片“隔离头”的窗口上, 有直径大约为 16 mm 的 Cd 膜沉积于窗口中央, 用干涉显微镜测量窗口玻片上 Cd 膜的平均膜厚 $d = 124.25 \text{ nm}$, 在隔离头的玻璃壁上距放电管口 20 mm 的范围内有明显的 Cd 沉积, 且 Cd 膜厚度与到端口的距离

选择对金属原子有高凝结系数的金属(对 Cd 蒸气而言, 真空蒸镀的 Al, Ag, Cu, Au, 高纯 Cd 和抛光的 Cd)作吸附挡板, 隔离头的防污效果将更好。在不挡光路的前提下, 安排多片具有高凝结系数的金属片做挡板, 这就是本文提出的新型隔离头的原理。

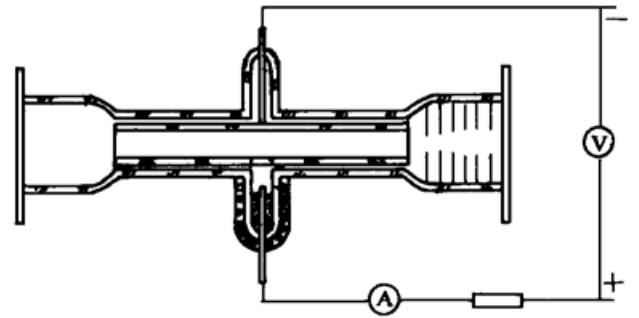


Fig. 3 Schematic diagram of the test tube

约成反比关系。

上面的比较实验,说明新型隔离头具有优良的抗污效果。

5 数值计算及分析

为了反映 Cd 粒子的无规行走运动,我们同时采用 Monte Carlo 数值模拟法,进行了模拟计算。在隔离头中,Cd 粒子可视为从放电管口按余弦分布向外发射出来^[15],然后在 He 气的本底中作随机运动。由于 He 气压比 Cd 蒸气压大几百倍,因此,Cd 粒子的运动可简化为只与 He 原子、防污铜片及玻壁发生碰撞。参考表 1,Cd 粒子在玻壁上的凝结系数取 0.01,Cd 粒子在铜片上的凝结系数取 0.6。我们用 Monte Carlo 方法,模拟了 10^4 个粒子在隔离头中的运动,隔离头的结构及尺寸与实验所用隔离头结构尺寸完全相同。计算得到了 Cd 粒子在铜片、玻壁、窗片和返回放电管的粒子数分布如表 2 所示。表 3 是在没有设置铜片的“隔离头”中的窗口、玻壁和返回放电管的 Cd 粒子的分布情况。

Table 2 Distribution of Cd particles condensated at glass wall, Cu pieces, window and returned with Cu pieces

Order of pieces	1	2	3	4	5	6	Window	Glass wall	Returned
Number of particles condensated	3950	657	263	66	0	0	0	475	4607

Table 3 Distribution of Cd particles condensated at glass wall, window and returned to the tube

Glass wall	Window	Returned
3354	294	6352

对比表 2、表 3 结果清楚地看出,有防污铜片的新型隔离头有很好的抗污效果,它可有效地保护窗口。

6 结 论

本文提出了金属蒸气激光器中金属蒸气原子在隔离头中的无规行走模式,并从实验上作了证实。在此基础上提出了新型隔离头的原理,还用 Monte Carlo 数值模拟法对 10^4 个镉原子求出了它们的分布,显示了新型隔离头良好的抗污效果。这种新型隔离头将有很好的应用前景。雷建求等在铜蒸气激光器窗口保护方面提出的加长器件端部管长的方法^[16],实质上就是通过增加吸附表面来减少铜蒸气对窗口的污染,这种方法不利于激光器的小型化。显然如果采用新型隔离头,可以大大减少激光器的长度,同时由于高凝结系数金属挡板的采用,防污效果还可进一步提高。

本文仅就镉蒸气的情况作了研究,显然,对于其他金属蒸气,在原理上是相同的,但因凝结系数具体数值不同,抗污染效果亦将有所不同。对于非蒸气状的其他污染颗粒,如电极溅射物,则需根据具体情况而言。如颗粒甚小,可进行无规行走,且也能吸附于金属片上,本文所提出的原理也能适用;如颗粒较大、较重,则另当别论。

参 考 文 献

- 1 李志惠. 国外各类激光器的市场情况. 光学与激光快报, 1984, 5(8): 5

- 2 Omnichrome Corporation. Omnichrome laser light years ahead. *Laser Focus World*, 1995, (1): 46
- 3 Kan-ichi Fujii. Confining process of negative glow in concentric cylinder type hollow cathode laser tube and design principle. *J. Appl. Phys.*, 1975, **14**: 1339
- 4 Wang Shuguang. Relationship between electrical field distribution of cathode holds and brief arc discharge in a white laser. Proceeding of Intern. School of Lasers and Applications, Beijing, 1987. 45
- 5 V. A. Burmakin, A. N. Evtyunin, M. A. Lensnoi *et al.*. Long-life sealed copper vapor laser. *Sov. J. Quant. Electr.*, 1978, **8**(5): 574
- 6 J. R. Grace, A. I. McIntosh. Design and performance of a improved hollow cathode He-Cd laser. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1979, **12**: 2043
- 7 Akira Fuke, Yasuhiro Tokita, Katsuhiko Masuda *et al.*. Characteristics of 325 mm CW oscillation of a hollow cathode He-Cd laser. *Jan. J. Appl. Phys.*, 1989, **28**: L1836
- 8 Masahiro Otaka, Takashi Oshima, Manabu Takeuchi *et al.*. He-Cd white light laser by a novel tube structure. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1981, **QE-17**: 414
- 9 曲世浦, 王兴因, 贾祖鑫. 空心阴极 He-Cd 白激光. 应用激光, 1984, **3**(4): 15
- 10 J. A. Piper, C. E. Webb. A hollow cathode device for CW helium-metal vapour laser systems. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1973, **6**: 400
- 11 赵刚, 王欲知. He-Cd 白光激光器中降低红光振荡阈值提高输出功率新机理. 激光技术, 1990, **14**(2): 49
- 12 Jeans. An introduction to the kinetic theory of gases. Van Chong Book Co., 1964. 137
- 13 R. D. Present. Kinetic theory of gases. McGraw-Hill Book Co. Inc., 1958. 63
- 14 高本辉, 崔素言. 真空物理, 北京: 科学出版社, 1983. 318
- 15 王欲知. 真空技术, 成都: 四川人民出版社, 1985. 29
- 16 雷建求, 梁培辉, 沈琪敏 等. 铜蒸气激光器窗口污染实验研究. 中国激光, 1994, **A21**(7): 553

Study on the Mechanism of Metal Vapor Pollution of the Window of Metal Vapor Lasers

Wang Yuzhi Wu Ping

(Department of Applied Physics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031)

Zhou Yan

(Southwest Institute of Physics, Chengdu 610041)

Abstract In this paper, a theoretical random walk model for the metal vapor condenser of metal vapor lasers is presented. The proposed model was verified qualitatively by experiment. Based on this model, a new type of condenser was proposed. Its principle is as follows: several metal pieces of high metal vapor condensation coefficients were used to adsorb the random walking metal vapor particles that collide upon them, as a result, a protection of the laser windows from the metal vapor pollution was achieved. A Monte Carlo simulation showed that the ability of antipollution for this new type condenser was much higher than that of the common condenser.

Key words metal vapor pollution, random walk model, new type condenser, metal vapor laser