

氦氖激光器在点燃过程中输出功率的变化规律

杨之昌 沈长洪

(复旦大学物理系, 上海)

摘要: 氦氖激光器的输出功率随点燃时间的增加而不断变化。本文介绍的是通过大量的可靠性试验, 把许多离散的数据经过微机处理, 找到了长寿命激光管输出功率的变化规律。

The change rule of He-Ne laser output during the igniting procedure

Yang Zhichang, Shan Chenghong

(Department of Physics, Fudan University)

Abstract: The output of He-Ne laser will change with increasing igniting time. By means of many reliability experiments, we proceeded a great deal of data processing by micro-computer and have found the change rule of the long-life He-Ne laser output.

一、原 理

输出功率是氦氖激光器最重要的参数。在长寿命激光管可靠性试验中, 我们发现激光器的输出功率随点燃时间的增加而下降。它的变化规律究竟如何? 可从以下几方面进行讨论:

1. 激光器的寿命

一般的教科书^[1]上定义: 当激光器的输出功率下降到原来获得的最高功率的 e 分之一 (37%) 时, 这段时间称为激光器的寿命。寿命包括激光器的储存寿命和使用寿命。

在电子工业部标准^[2]中, 定义激光管产品的使用寿命是输出功率不低于额定功率的一半的连续点燃时间。

在可靠性试验中, 因为假设激光管的寿命分布是符合威布尔分布, 又符合两项判定激光管失效标准^[3]中的一项就认为管子失效。激光管的寿命是指失效前的点燃时间。本文中提到的寿命采用这一定义。

2. 激光器的输出功率及其与点燃时间的关系

氦氖激光管在正常工作情况下其输出功率由下式决定:

$$W = \frac{1}{4} \pi d T \eta I_s \left(\frac{3 \times 10^{-4} l}{\alpha + T/2} - d \right) \quad (1)$$

式中, d 是放电毛细管的直径; l 是有效放电长度; $\eta = \frac{V_{\text{模}}}{V_{\text{管}}}$, 而 $V_{\text{模}}$ 是振荡模体积, $V_{\text{管}}$ 是放电毛细管的体积; I_s 是常数, 称为饱和强度; α 是腔内光损耗系数; T 是输出镜的透过率(假设谐振腔的另一端是全反镜)。输出功率就可以用(1)式估计出来, 实验值也可以用功率计直接进行测量。在可靠性试验中测量最大输出功率时, (1)式可简化为:

$$W_{\text{max}} = \frac{1}{4} \pi d^2 \eta I_s (\sqrt{g_0 L} - \sqrt{\alpha})^2 \quad (2)$$

式中, g_0 是小信号增益系数。

根据氦氖激光管失效机理的研究^[6], 对长寿命激光管来说, 气体成分的变化不是激光管失效的主要原因, 而反射镜的污染和损伤是激光管失效的重要因素。也就是随着激光管点燃时间的增加, 反射镜的镜面就会发生污染和损伤, 这样光损耗系数就会增大, 从(2)式可知, 输出功率也就随之减小, 可以假设^[6] $\alpha(t) = \alpha_0 + \beta t$ (β 是光损耗增加的速率), 代入(1)式得到:

$$W_{\text{max}} = \frac{1}{4} \pi d^2 \eta I_s (\sqrt{g_0 L} - \sqrt{\alpha_0 + \beta t})^2$$

对长寿命激光管来说, 它的光损耗的增加是非常缓慢的, 所以 β 是很小的, 利用近似公式把上式改写一下, 则

$$\begin{aligned} W_{\text{max}} &= \frac{1}{4} \pi d^2 \eta I_s (g_0 L - 2\sqrt{g_0 L \alpha} + \alpha) \\ &\approx \frac{1}{4} \pi d^2 \eta I_s (g_0 L + \alpha_0 + 2\sqrt{g_0 L \alpha_0}) + \left(\beta - \frac{1}{2} \frac{\beta}{\alpha_0} \right) t \\ &\approx W_0 + \beta' t \end{aligned} \quad (3)$$

这就得到输出功率随着时间线性下降的规律, 这个规律可用实验来验证。

3. 寿命试验和加速寿命试验中激光器输出功率的测试方法

在可靠性试验中, 待测样管是放在寿命试验台上长期点燃, 点燃的工作电流分别是 7mA、11mA、15mA、20mA。激光管在不同的工作电流下, 管内的温度就不一样。我们曾用点接触温度计测定管壳表面的温度, 现将测量的平均结果整理在表1中。

为了保持测试的一致性, 规定在每次测试前先关闭电源, 使激光管自然冷却到室温,

表1 (室温在 24℃)

应力水平(mA)	20	15	11	7
玻壳表面温度(℃)	60	54	48	40.5
与室温之差(℃)	36	30	24	16.5

然后再开启电源,调到正常工作电流,用数字式功率计测定激光器的输出功率,测五次取平均值。测试周期先是二周一次,在试验后期改为一个月测试一次。在可靠性试验的六年中,测试仪器正常,测试方法基本一致。

二、试验结果和处理

我们在这一期试验中共取7mA、11mA、15mA、20mA四个应力水平共24支样管,其中有5支样管因客观原因中途失效,试验结果有效的样管是19支。以740 III₃为例(15mA应力水平)测试结果整理在表2中。

表2

累计点燃时间 t(h)	输出功率 (mW)	累计点燃时间 t(h)	输出功率 (mW)	累计点燃时间 t(h)	输出功率 (mW)
0	2.43 ± 0.01	2015	1.77 ± 0.02	5084	1.71 ± 0.01
206	2.03 ± 0.02	2297	1.64 ± 0.02	5400	1.55 ± 0.01
377	1.89 ± 0.01	2458	1.64 ± 0.02	5742	1.44 ± 0.01
538	1.77 ± 0.01	2599	1.62 ± 0.02	6074	1.55 ± 0.01
699	1.83 ± 0.02	3120	1.94 ± 0.02	6394	1.56 ± 0.02
862	1.65 ± 0.02	3445	1.91 ± 0.01	6728	1.62 ± 0.02
1025	1.62 ± 0.02	3637	1.51 ± 0.01	7062	1.60 ± 0.01
1188	1.66 ± 0.01	4088	1.83 ± 0.01	7395	1.46 ± 0.02
1325	1.55 ± 0.02	4420	1.62 ± 0.02	7680	1.05 ± 0.01
1511	1.52 ± 0.02	4752	1.73 ± 0.02	/	/

将表2的数据作W-t曲线,见图1。

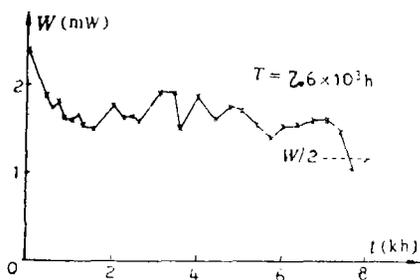


图1 W-t曲线

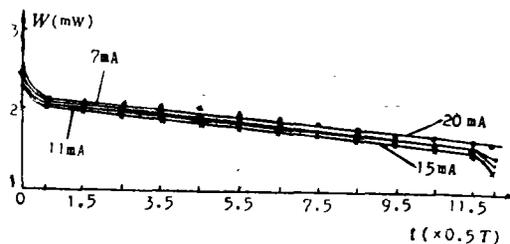


图2 W-t曲线

△—7mA ×—15mA ⊙—20mA •—11mA

从图1可以看出：输出功率的每次测量偏差在1%~2%，但是 $W-t$ 曲线的起伏很大，其它样管也是如此，所以从一支样管的试验结果很难看出它的规律性，只能把所有样管的试验结果进行统计。由于每支样管的寿命不一样，测试次数也不同，数据有多有少，离散性很大，因此，我们用微机来处理数据。基本思想是把每支样管的寿命用 T 表示，用微机分成十二等分的时间间隔，每个时间间隔的测量结果取平均值，然后把属于同一应力水平的样管的测试结果进行统计平均。现将微机处理的结果整理在表3中。

我们以 W 为纵坐标， t 为横坐标，作输出功率和点燃时间的关系曲线，见图2所示，可以清楚地看出输出功率随点燃时间的延伸呈现出线性下降曲线。

表3a 20mA 应力水平输出功率和点燃时间的关系

试验编号 功率(mW) $t = T/12$	740 III					平均值
	740 III ₁₁	740 III ₁₇	740 III ₂₀	740 III ₂₇	740 III ₃₂	
0	2.75	2.29	2.20	2.79	2.75	2.56
0.5	2.00	1.85	2.12	2.14	2.32	2.09
1.5	1.72	1.95	2.21	2.09	2.12	2.02
2.5	1.82	1.81	2.01	1.89	2.20	1.95
3.5	1.87	1.73	2.13	1.89	2.11	1.95
4.5	2.00	1.69	2.12	1.76	2.14	1.94
5.5	1.93	1.75	1.85	1.85	1.87	1.88
6.5	/	1.75	1.91	1.89	1.89	1.86
7.5	1.86	1.84	1.61	1.95	1.79	1.81
8.5	1.84	1.69	1.71	1.92	1.61	1.75
9.5	1.78	1.55	1.57	1.87	1.63	1.68
10.5	1.72	1.62	1.68	1.64	1.63	1.66
11.5	1.74	1.46	1.56	1.74	1.07	1.60
12.0	1.79	1.33	1.39	1.70	1.54	1.55
$T(h)$	9.08×10^3	3.40×10^3	11.2×10^3	5.40×10^3	7.30×10^3	

表3b 15 mA应力水平输出功率和点燃时间的关系

试验编号 功率(mW) $t = T/12$	试验编号				平均值
	740 III ₅	740 III ₁₀	740 III ₂₄	740 III ₂₅	
0	2.43	2.59	2.48	2.42	2.48
0.5	1.89	1.98	1.94	2.24	2.00
1.5	1.68	2.11	2.00	2.18	1.96
2.5	1.53	2.05	2.04	2.01	1.94
3.5	1.68	1.96	1.93	1.89	1.87
4.5	1.78	1.92	1.91	1.77	1.85
5.5	1.71	1.87	1.84	/	1.81
6.5	1.72	1.70	1.62	1.89	1.73
7.5	1.72	1.75	1.70	1.66	1.71
8.5	1.62	1.65	1.61	2.02	1.72
9.5	1.47	1.52	1.50	1.71	1.55
10.5	1.59	1.35	1.39	1.75	1.50
11.5	1.53	1.51	1.28	1.62	1.48
12	1.04	1.22	1.10	1.62	1.25
T(h)	7.6×10^3	14.0×10^3	8.50×10^3	5.70×10^3	

表3c 11 mA应力水平输出功率和点燃时间的关系

试验编号 功率(mW) $t = T/12$	试验编号					平均值
	740 III ₂₃	740 III ₂₅	740 III ₃₅	740 III ₄₁	740 III ₄₃	
0	2.77	1.98	2.28	2.73	2.39	2.43
0.5	2.27	1.82	2.09	2.13	2.16	2.09
1.5	2.23	1.83	2.08	1.90	2.03	2.01
2.5	2.02	1.70	1.97	1.92	1.95	1.91
3.5	1.87	1.80	1.82	1.97	1.70	1.82
4.5	1.87	1.76	1.88	1.76	1.76	1.81

续表3c

5.5	1.89	1.79	2.08	1.75	1.63	1.83
6.5	1.93	1.71	2.04	1.87	1.55	1.82
7.5	2.03	1.60	1.86	1.63	1.59	1.74
8.5	1.99	1.37	1.73	1.57	1.50	1.63
9.5	1.75	1.37	1.72	1.71	1.55	1.62
10.5	1.78	1.45	1.85	1.62	1.39	1.62
11.5	1.67	1.27	1.82	1.58	1.37	1.54
12	1.51	1.03	1.79	1.24	1.18	1.35
T(h)	20.3×10^3	14.1×10^3	7.30×10^3	11.0×10^3	17.5×10^3	

表3d 7mA应力水平输出功率和点燃时间的关系

试验编号 功率(mW) $t = T/12$	740 III ₄	740 III ₆	740 III ₁₄	740 III ₁₈	740 III ₃₃	平均值
0	2.80	2.58	2.20	2.04	2.83	2.49
0.5	2.41	2.41	1.99	1.75	2.23	2.16
1.5	2.40	2.33	1.87	1.77	2.26	2.13
2.5	2.46	2.28	2.17	1.64	2.25	2.16
3.5	2.08	2.17	2.27	1.62	2.20	2.07
4.5	1.78	2.17	2.10	1.62	2.20	1.97
5.5	1.89	2.25	2.04	1.45	2.19	1.96
6.5	1.84	1.91	1.95	1.39	1.98	1.81
7.5	1.63	1.79	1.88	1.40	2.07	1.75
8.5	1.60	1.76	1.92	1.33	2.00	1.72
9.5	1.51	1.72	1.81	1.48	1.81	1.67
10.5	1.45	1.68	1.79	1.20	1.86	1.60
11.5	1.47	1.62	1.38	1.05	1.90	1.48
12	1.13	1.23	1.02	1.01	2.04	1.28
T(h)	28.2×10^3	36.0×10^3	11.5×10^3	20.9×10^3	23.4×10^3	

三、结果分析和结论

1. 结果分析

从输出功率 W 和点燃时间 t 的曲线上(图2)可以看出:

(1) 虽然测试数据的离散度很大,然而在计算技术的配合下进行统计平均得到 $W-t$ 是线性下降的规律。

(2) 每根曲线可以分成三段:在 $0\sim 0.1T$ 的时间内, $W-t$ 曲线呈非线性,这是激光管开始点燃阶段,它逐步走向动态平衡;在 $0.1\sim 0.9T$,曲线是线性下降,四个应力水平的直线斜率也基本相等,这一关系与(3)式是一致的;在 $0.9T\sim T$ 的时间内,曲线开始下降,并很快趋向失效。

(3) $W-t$ 曲线中,初始功率是激光管的最佳输出功率,失效时的输出功率是指失效时刻的测量值,而其它数据是每一阶段的测量平均值。

2. 结论

(1) 从图2可以看出四个应力水平的 $W-t$ 曲线基本上是平行的,这说明用加大工作电流进行加速寿命试验是可行的,失效机理基本上没有改变。

(2) 由于 $W-t$ 曲线是线性关系,所以证明 $at = \alpha_0 + \beta t$ 的假设是正确的。也就是说,长寿命的氦氛激光管随着点燃时间的增加,使反射镜逐步地受污染和损伤,从而导致激光管的失效。

本项工作曾得到东南大学杨正名教授,740厂姜荫周、郭良敏、陈爱娣等同志的支持和帮助,借此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] 赫光生、雷仕湛,《激光器设计基础》,上海科技出版社,1979年,第四章。
- [2] SJ 1870-81,气体激光器总技术条件。
- [3] 杨之昌等,《中国激光》,1989年,第16卷,第7期,第411页。
- [4] GB 3187-82,可靠性基本名词术语及定义。
- [5] 罗宗南等,《应用激光联刊》,1983年,第3卷,第6期,第28页。
- [6] 刘志国等,《应用激光联刊》,1983年,第3卷,第2期,第61页。

* * *

作者简介:杨之昌,见本刊1990年第2期第16页。

沈长洪,男,1961年11月出生。工程师。现从事光学测试工作。

收稿日期:1989年10月16日。

· 简 讯 ·

全国光学设计和CAD软件系统研讨会在长春召开

1990年8月中国光学学会工程光学专委会同吉林省光学学会共同在长春召开全国光学设计和CAD软件系统研讨会,交流光学设计经验,提高设计水平。

(摘自学会活动计划)