

## 激光的防护与防护装置

Jesse C. Kaufman

提要 激光器的功率不断增强及其日益广泛的应用,对不知道的操作者和旁观者的眼睛十分有害。

本文对实验室工作人员提出十四条防护常识。

即使少量的光波、红外和紫外辐射也会遭到损害人眼,如果暴露在超过一定的“安全极限”的激光输出中,就会造成严重的损伤。这些极限\*随激光器类型的不同而有所差别(见表1)。

激光损害眼睛有两种不同的方式:(1)强的可见激光,易于穿过眼球,损害视网膜;(2)紫外和红色的激光则由角膜、眼球和玻璃体吸收,而将这些组织加热至危险点以上。例如,新近研制出的CO<sub>2</sub>强功率激光就具有这种破坏能力。

为避免不幸事故的发生,激光的设计者和使用者,应知道安全规则以及从事激光工作所使用的防护装置。

这里对激光工作人员推荐以下一些规则:

1. **决不要**直接看激光束。一般的激光——连续的和脉冲的——能在短距离内(实验室范围内)严重的损害眼睛。此外,由于光束随距离而逐渐扩展,因而这种损伤不只局限在小范围内,站在较远处的旁观者,眼睛和皮肤仍然会被烧伤。

2. **决不要**用眼睛去探测激光束,也不要眼睛对着运转中的激光器。因为有许多变量,故对使眼睛免于受到损害的“安全极限”还没有一个绝对的结论。因此,“安全极限”(表1)只能用作参考,实际上曝光应尽可能趋近于零才是我们的目标。

3. 不能依赖任何的安全装置,例如护目镜,去直接观察激光束。只有在护目镜防护范围大于“安全极限”十倍时才能使用。

4. 应特别注意晶体、架子、条带、铃、工具、精细工艺品、开关旋钮、玻璃等的反射。这些反射很难预测。轴外观察和轴上观察同样危险。

5. 把所有的激光装置罩起来。这样全体工作人员,特别是路过的和不了解情况的工作人员,就不会受意外的激光输出的损伤。

\* 本文不考虑激光辐射对皮肤的影响。对皮肤的辐射损伤阈值较眼的高几个数量级——作者注。

6. 在激光实验室的入口处要有警告标记。通常是在入口处闪亮一盏红灯，表示正在进行激光实验。

7. 在激光实验室内装上听得见及看得见的信号，表示当器件正在工作或即将触发，信号应引起全体工作人员对激光装置的注意。提醒大家注意室内有对眼损害的危险的标志应突出醒目。

**表 1 对激光曝光的安全极限  
最高安全水平**

激光工作方式	射到视网膜上的功率密度	对眼睛的等价输入
连续波 $t_p > 0.1$ 秒	0.35 瓦/[厘米] <sup>2</sup>	$2.7 \times 10^{-7}$ 瓦
一般的脉冲 $\approx 500$ 微秒	$3.2 \times 10^{-2}$ 焦耳/[厘米] <sup>2</sup>	$2.5 \times 10^{-8}$ 焦耳
Q 突变脉冲 $\approx 30$ 微秒	$2.7 \times 10^{-3}$ 焦耳/[厘米] <sup>2</sup>	$2.1 \times 10^{-9}$ 焦耳

注：此表的一部分以对红宝石和钕玻璃激光器的测量为基础。欲推广到其它波长，则应包括图 1 的数据 (TA 对  $\lambda$ )，由于眼睛组织的吸收影响光凝结程度，从而影响到破坏程度。这些阈值只有在容许的误差范围内才认为是准确的。由于下面一些主要参数，在各种场合均不相同，因而不能得出更高的精度。

8. 尽可能随时都在光照充分的室中运转激光器，在黑暗环境中，眼睛的瞳孔会扩大，在不幸的情况下，将会使视网膜遭到较大的损害。

9. 作激光器实物表演时，用一白色无光泽的漫反射表面作幕。如果要用半散射或有光泽的靶时，则其反射不应超过“安全极限”。随时都要注意预防任何反射光到达未保护的眼睛。

10. 对于人工触发脉冲激光器，一般来说，在触发之前就要低头转脸。最好把眼睛闭起来，把脸背着目标。假如后面是重复性脉冲运转，则应事先告诉所有的观察者。对于脉冲装置的偶然输出应当竭力避免。在进行任何调整，需要置身于光束的通路中时，都要事先使电容器放电，关掉电源。

11. 应当注意高压能源；有毒物质的汽化或碎裂；强光源(晶体的光泵)，例如爆炸线光源；气体和液体冷却剂；高速旋转设备(例如 Q 突变实验中旋转的反射镜和截光盘)，和在产生溴氧过程中发出的可见和紫外辐射。

12. 对于所有的工作人员应当建立一个眼睛检查计划。隔一定的时期进行一次眼睛的总检验，应包括两眼底部的相片，从而决定，是否有曾不知不觉地曝露在激光下，导致视网膜破坏的伤痕。特别是对于新的工作人员进行检查，而不管下一次定期的周期性检查是在什么时候。只要有任何一点可能伤害眼睛的怀疑都要立即报告。

#### 1. 眼睛组织：

- 色素：随各个人及其在眼内的位置而变化。
- 光谱吸收：在 4,000 埃~5,000 埃波长时最大；沿红外方向减小；紫外部分不太清楚。
- 血液循环：可把血液流动用来保持组织的温度。

#### 2. 眼睛：

- 瞳孔大小：可改变其大小来控制所允许入射光的大小(假设后者的直径比入射光束小)，也可影响视网膜上物象的大小。
- 光谱透过区域：4,000 埃~9,000 埃很高，红外中的一些谱带也高(见图1)。
- 角膜和水晶体的会聚作用：影响焦平面的位置和视网膜上物象的大小。

#### 3. 环境：

- 激光参量：功率、脉冲宽度和速率、波长、光束发散度。
- 位置：眼睛靠近或远离光源作用孔径。在激光和眼睛之间，插入透镜。目标的散射性质。
- 空间均匀性：激光晶体的缺陷，多模作用，大气的不规则性。

13. 由于可能发生冲击波的危险，特别是由于高能量电容器组引起的，应使得操作的工作人员熟悉人工呼吸技术或最近的急救站的位置。当激光器工作时，至少要有两个工作人员始终在场。

14. 告诉附近工作人员可能受到的损害。特别应该强调由于眼睛对光有高度的放大和吸收而造成的危险。

#### 防护器具：

防护屏或墨镜的作用是可望将入射激光减弱到安全水平。然而，不要指望可以戴上墨镜和任何的安全玻璃直接去看激光束。

在选择防护器具的时候，应作如下的考虑：

- 在所用的激光波长和其他同时发射的波长上，墨镜应有足够高的光学密度，以便将到达视网膜的激光减弱到“安全水平”。

- 应当考虑由于强吸收作用而使滤光片破碎时，对眼睛的防护问题。

- 墨镜只有戴上时才起防护作用，因而必须考虑它的大小、重量，戴它时还应感到舒服。

墨镜的框架应适合脸部的形状，能提供足够宽的视野并能容易地装到普通的眼镜上。

在吸收滤光片和反射滤光片方面，已有选择地进行了广泛的研究，特别注意研究红宝石和钽玻璃的波长。只有一种滤光片对我们考虑中的各种波长都有一定的光密度，并可以长时间使用，这就是德国肖特厂制造的 BG-18 型耶拿有色滤光片。

BG-18 的基本成分是硫酸铜。在厚度为~5 毫米时(根据熔融体的情况而定)，可获得一定的光密度(至少为 10)。但这种滤光片有一个缺点，就是在高于 60 焦耳/(厘米)<sup>2</sup> 的光脉冲的冲击下，可能打碎，这是因为它有较高的吸收率，且其吸收能量的一半集中于其前表面的 0.2 毫米处的结果。有两个办法可以克服这种能量集中的现象：

1. 在强吸收滤光片前面加一块低吸收率的滤光片。这样就使吸收的能量分布在较大的深度上。同 BG-18 有相同光谱特性的耶拿 BG-38 型，且具有较低的光密度，在 2 毫米厚度内将通常到达 BG-18 滤光片入射能量吸收 90%。

2. 第二种方法是在 BG-18 滤光片外面加上双色镜。这种双色镜在红宝石和钽玻璃的激光谱线上，反射大约 80% 的能量，而几乎全部透过波长较短的可见光\*\*。

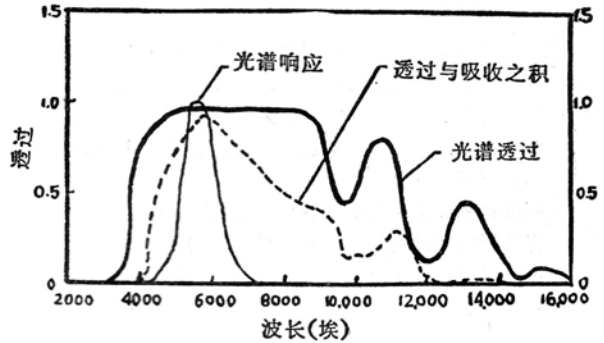


图 1 人眼介质的光谱透过后用黑线表示。人眼的光谱响应——所谓光度函数——图中用细线表示。视网膜的实际损伤曲线用虚线表示。该线为眼睛的透过率与视网膜的吸收率之积。

\*\* 应注意使二色镜的反射光不致危及旁观者——作者注。

第三种方法比前二种方法要好得多，即使在能量入射下有可能破碎仍是如此。这种方法就是将二块 BG-18 型滤光片迭起来，进一步地减弱到达滤光片上的光强度。这样即使第一块破碎了，第二块仍然对眼睛有保护作用（由于前一块滤光片几乎吸收了全部的入射光能，而第二块似乎永远不会被打碎。）

**可利用的墨镜的种类：**

市场上出售的防护墨镜至少有三个单位供应。每个单位产品光谱特性见图 2。应注意，每种类型的墨镜所提供的防护仅限制在一定谱带范围内。使用那一种镜子，则根据特定的应用——振荡波长、能量密度、周围光照等——而定。

美国光学公司的 585 型墨镜是由两块 BG-18 滤光片加上一块支撑盖片组成。这种墨镜对 Nd（波长 1.06 微米）GaAs（0.844 微米）和红外 He-Ne（波长 1.084 微米和 1.152 微米）等波长衰减最大。对于红宝石和更短的波长也能起到一定的防护作用。该公司的 584 型墨镜由一块 BG-18 和一块 BG-36 和一块支撑片组成。它有与 585 型同样的光谱反响，但衰减较小。然而对周围的光照来说，它比 585 型的能见度好。

**菲谢·舍曼公司 (Fish-Schurman**

Corp)生产的 AL/18 型墨镜，由一块 BG-18 滤光片和一块双色镜组成。这家工厂没有提供光谱曲线。在顾客给出对一定的波长的衰减要求后，才选择滤光片的厚度。对于 6 毫米厚度来说，在 1.06 微米、0.6943 微米和 0.6328 微米波长处的光密度是“非常高的”，分别为 10 与 1.5。这是为红宝石、Nd 的波长而特殊设计的，厂商说，AL/18 与美国光学公司的 488 型一样。

对于红宝石(6,943 埃)和可见 He-Ne (6,328 埃) 波长衰减最大的是由鲍谢与朗公司制造的 IR-62-5 型 (6,000 埃~8,000 埃)，这是由吸收塑料和涂镀的双色玻璃板组成的。在这些波长下，IR-62-5 型的衰减性能稍逊于美国光学公司的 570 型。

在蓝线光谱区，特别是 Ar 激光波长(5,150 埃和 4,880 埃)和倍频的 Nd 谱线(5,300 埃)处，其防护作用相当差。在这个区域内的应用，最好直接询问眼镜商。

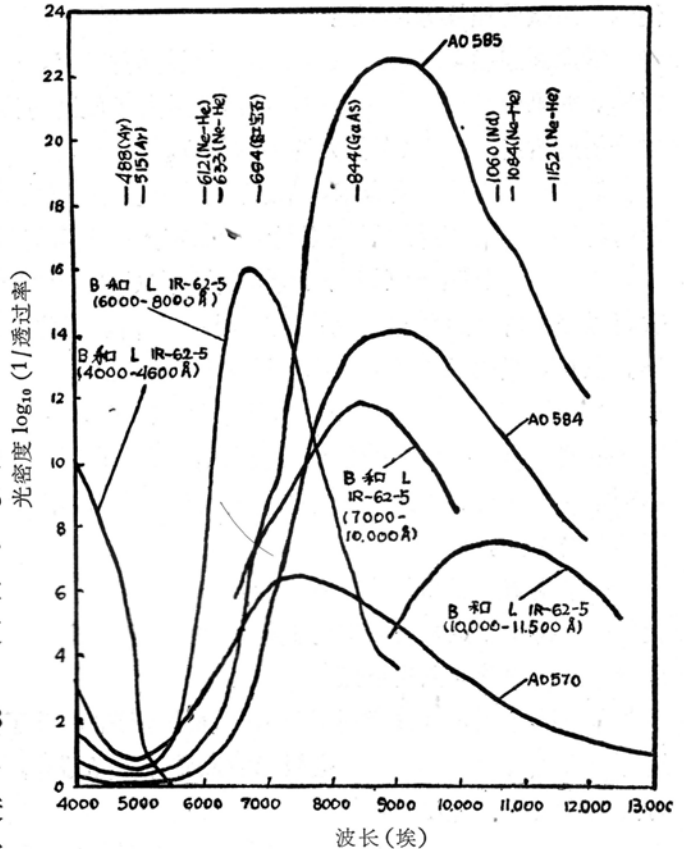


图 2 各种防护镜的比较

图中绘制的是市场上可买到的几种防护墨镜的光谱对光密度的数据。顶部标出几种常用激光的波长。

## 附录:视网膜辐照的实例

### 例 1 直接的连续激光辐照

考虑到连续激光直接辐照眼睛的“最坏的情况”，也就是由于环境照明弱因而瞳孔放大的情况。如果眼睛处于激光的远场，而且考虑了眼睛的光的缺陷，则焦点的尺寸将稍大于由衍射分析所给出的大小(直径大约 10 微米)。

对于波长为 633 毫微米，在眼睛上的直径小于或等于虹膜的 Ne-Ne 激光输出光束，眼睛将透过激光辐射的 95% (见图 1)。对于 1 毫瓦的连续波激光输出，网膜上的辐照  $(H)_r$  为：

$$(H)_r = [(10^{-3})(0.95)] / [\pi/4(10 \times 10^{-4})^2] = 1.21 \times 10^3 \text{ 瓦/厘米}^2$$

这超过表 1 所示的“安全水平”的  $3.46 \times 10^3$  倍。因此，需要最小透射倒数为  $3.46 \times 10^3$  的防护屏。在 633 毫微米所需的最小光学密度(OD)为：

$$OD = \log_{10}(3.46 \times 10^3) = 3.54$$

图 2 表明，AO 670 型勉强满足此要求，而 B&L IR-62-5 型 (6,000—8,000 埃) 则给出该最小衰减的好几倍。但这并不意味着要鼓励大家(甚至当眼睛有最好的屏蔽时)去直视激光，千万不要去尝试。

如果眼睛处于辐射的近场，而且能分辨激光器的有效孔径，那末网膜上的象可能大于 10 微米——衍射和象差所限定的直径。这将使网膜上的辐照降低到上述的计算值之下。

### 例 2 直接的脉冲激光辐照

考虑脉冲激光器直接辐照眼睛的“最坏情况”。除了采用(正常的)输出为 10 焦耳(脉冲持续时间为  $t_p$ )、波长为 1,060 毫微米的钕脉冲激光器外，一般的情况都与例 1 相同。网膜上的时间积分辐照  $(Ht_p)_r$  是：

$$(Ht_p)_r = [(10)(0.78)] / [\pi/4(10 \times 10^{-4})^2] = 10^5 \text{ 焦耳/厘米}^2$$

这超过“安全水平”的  $3.12 \times 10^6$  倍。因此眼睛保护物至少需要 6.48 的光密度。足够的衰减由 AO585 和 584 型以及 FS AL/18 型供给；最小防护由 B&L IR-62-5 型 (10,000—115,000 埃) 供给。

### 例 3 间接连续激光辐照

考虑眼睛遮断从被连续激光照射的非镜目标反向散射回来的辐射的一部分这种情况。典型的情况是 1 毫瓦、633 毫微米的氦-氖激光器照射反射系数为 0.60 的实验室墙壁。如果光束在墙上的直径是 2 毫米，观察者与墙的法线成  $15^\circ$  角(他的虹彩孔径为 3 毫米，眼睛焦距为 17 毫米\*)，则在这一点成象时，网膜上的辐照是  $7.50 \times 10^{-5}$  / [厘米]<sup>2</sup>。这比表 1 中给出的“安全水平”低  $4.67 \times 10^3$  倍。

如果目标表面是准漫射的，而且观察者的位置遮断了突出的反向散射体，则网膜上的象

\* 由于眼睛是在折射率为 1.34—1.44 的介质中聚焦，故应该使用在那种介质中的激光波长，而不应该使用真空中的波长。但为方便计，眼睛的聚焦性质可等价地用一面焦距为 23 毫米的薄透镜来描述，这时便可使用通常所说的真空中的激光波长。

便是发光的。对于几种物质的观察指出,纸、没有淬火的钢板、光亮的镀锡钢板和不锈钢等对漫散射体说来为准漫散射体的反射比的有效增益通常分别是2、27、 $3 \times 10^3$ 和 $10^5$ 。对于后面两种材料,已经超过上述例子中的安全界限。在这些情况下,所需的眼睛屏蔽的最小光密度可仿例1和例2找到。

#### 例4 间接的连续激光辐射

当激光辐射由镜反射表面(即使目标表面不是平面)反向散射时,存在一种非常危险的情况。除球形反射表面因降低了射入眼睛的能量密度而相当于衰减器(类似于插入透镜散焦激光束的方式)外,这种情况的严重性非常接近于直接照射的情况。这也使眼睛处于激光器有效孔径的远场中。

考虑波长为1,060毫微米、输出为10焦耳、有效出口孔径为1毫米的钕激光器照明形状近于2厘米平均半径球体的门钮的情况。眼睛的焦距和目标的反射比与例3相同。然而,在这个波长上,透过眼睛的部分仅有78%,而不是95%(见图1)。假定眼睛(假定其虹膜直径为1毫米)和门钮之间的距离为3米(约10呎)。于是网膜上的辐照为 $1.54$ 焦耳/[厘米]<sup>2</sup>,这比表1给出的“安全水平”高 $4.62 \times 10^3$ 倍。因此保护眼睛的屏蔽须具有3.68的最小光学密度。AO 584和585型、FS AL/18和B&L IR-62-5(10,000—11,500埃)型均适合这种要求。

#### 参 考 文 献

- [1] “Proceedings of the First Annual Conference on Biologic Effects of Laser Radiation”, *Federation Proceedings*, 24, Part III, Suppl. 14, Jan-Feb 1965.
- [2] “Proceedings of the First Annual Biomedical Laser Conference of the Laser Medical Research Foundation”, New Sheraton Hotel, Boston, Mass., June 17-18, 1965.
- [3] Ham, W. T., et. al., “Ocular Effects of Laser Radiation, Part I.”, Virginia Medical College, Richmond, Va.
- [4] Ham, W. T., et. al., “Optical Masers (Lasers).” *Acta. Ophth.* Suppl. 76, 60-78, 1963.
- [5] Geeraets, W. J., et. al., “The Loss of Light Energy in Retina and Choroid.” *A. M. A. Ophth.* 64, 606, 1960.
- [6] Swope, C. H. and Koester, C. J. “Eye Protection against Lasers”, *Appl. Opt.*, 4, 523-526, May 1965.
- [7] Straub, H. W. “Protection of the Human Eye from Laser Radiation.” TR-1153, Harry Diamond Labs., July 10, 1963.
- [8] Kapany, N. S., et. al., “Retinal Photocoagulation by Lasers.” *Nature*, 199, 146-149, July 13, 1963.
- [9] Kapany, N. S., et. al., “Laser Retinal Photocoagulator.” *Appl. Opt.*, 4, 517-522, May 1965.
- [10] Adler, F. H. *Physiology of the Eye*. Chap. XI. C. V. Mosby Co., 1953.
- [11] Strong, J. *Concepts of Classical Optics*. Appendix 1. Freeman and Co., 1958.
- [12] Born. M., Wolf, E. *Principles of Optics*. Section 6. 1. Pergamon press, 1959.
- [13] Corome, E. F., et. al., “Generation of Acoustic Signals in Liquids in Ruby Laser Induced Thermal Stress Transients.” *Appl. Phys. Lett.*, 4, 95-97, March 15, 1964.
- [14] Westheimer, G. “Optical and Motor Factors in the Formation of the Retinal Image.” *J. O. S. A.*, 53,

86-93, Jan. 1963.

- [15] Plumb, W. B., Crilly, J. B., "Eye Protective Devices." *Tech. Note N-643*, AD No. 450,637. U. S. Naval Civil Engineering Lab., Port Hueneme, Calif., Sept. 21, 1964.
- [16] Cirincione, P. A. "Biological Effects of Lasers: Safety Recommendations and a Comment on the Concept of Ocular Damage." *TR Havtradevctr IH-15*. U. S. Naval Training Device Center, Port Wash., N. Y., July 28, 1964.
- [17] Schickman, J. J., Kingston, R. H. "The Dark Side of the Laser." *Electronics*. 93-98, April 19, 1965.
- [18] "Laser Safety." *Martin-Marietta Corp. Manual*, 1965.
- [19] Jones, D. E., Montan, D. N. "Eye Protection Criteria for Laser Radiation." *Hazard Control Quarterly Report No. 16*. UCRL-7811. Lawrence Radiation Lab., Jan-Mar., 1964.
- [20] Jones, D. E., "Comment on Eye Protection Criteria for Laser Radiation, in UCRL-7811." *Hazard Control Quarterly Report No. 17*. UCRL-12,004. Lawrence Radiation Lab., April-June, 1964.
- [21] "Working Safely with Lasers." *Safety Newslettire*. National Safety Council, Chicago, I11., June, 1964.
- [22] "Recommended Safeguards for Personnel Working with Lasers." Industrial Hygiene and Safety Admin. Dept. Bell Telephone Labs., Murray Hill, N. J., Jan. 15, 1965.
- [23] "Lasers and Masers." *Special Hazards Bull. Z-125*. Assoc. of Casualty and Surety Co., N. Y., N. Y., May 1963.
- [24] Groner, W. "Laser Measurements." *Electronics World*. 74, 50, Nov., 1965.
- [25] Zaret, M. "General Precautions for Laser Experiments." N. Y. U. Medical Center, Dept. of Ophthalmology.
- [26] Sykos, M. "Safety Considerations of Lasers." *J. Amer. Soc. of Safety Engineers*, April 1963.
- [27] Fine, S., et. al., "Laser Irradiation of Biological Systems," *IEEE Spectrum*, 1, 81-95, April 1964.
- [28] Kohtiao, A., et. al., "Hazards and Physiological Effects of Laser Radiation," *N. Y. Acad. Sci.*, 22, 777-779, March 28, 1965.
- [29] Goldman, L., et. al., "Laser Radiation of Malignancy in Man," *Cancer*, 18, 533-545, May 1965.
- [30] Goldman, L., Richfield, D. "The Effect of Repeated Exposures to Laser Beams" *Acta Derm-Venereol*, 44, 264-268, 1964.
- [31] Sognnaes, R., Stern, R. "Laser Effect on Resistance of Human Dental Enamel to Demineralization in Vitro," *J. So. Cal. Dent. Assoc.*, 23, 17, 1965.
- [32] Townes, C. H., "Optical Masers and Their Possible Applications to Biology," *Biophys. J.*, 2, 2, 325-329, 1962.

原载 *Microwaves*, 1966, 5, No.4, 38~45 (崔俊文、黄关龙、容 宇译, 王克武、颜绍知校)

## 波兰生产激光医疗设备

华沙的中央光学实验室已经开始连续生产医疗激光产品。今年可望生产五台, 在华沙、洛兹和波兹南的眼科诊所及医科学校中使用。

原载 *Electronics Weekly*, 1966, №302, 15 (容 宇译)