

# 激光在大地测量中的应用

(苏) M. T 帕里列宾 著  
A. H 高鲁别夫

科学出版社

# 激光在大地測量中的應用

[苏] M. T. 帕里列賓 A. H. 高魯別夫 著

浙江大學光儀系激光儀器教研組 譯

科學出版社

1976

## 内 容 简 介

最近十余年,激光器在各类测量(大地测量、重力测量、航空摄影、工程测量,以及人造地球卫星的观测和月球的光学定位等宇宙测量)中发展很快,测量方法不断革新,测量精度显著提高,促成了测量领域内的深刻变化。因此,如何更好地掌握和使用激光器,已越来越受到广大测量工作者和有关专业人员的重视。

本书集中地论述了激光器在各类测量中的应用。共收集了截至1970年上半年的有关资料,阐明了当今各类测量中应用激光器的理论与实际问题,分析了有关实验的结果,全面地介绍了各种激光测量仪器、系统和测量方法。本书是一种专著,故未涉及激光器的工作原理和结构等一般性问题。书中附有表格12个、插图66幅、参考文献277条。

本书可供测量工作者、光学精密仪器研究人员、高等院校有关专业师生参考。

М. Т. Прилепин, А. Н. Голубев  
ОПТИЧЕСКИЕ КВАНТОВЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ  
В ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЯХ

Издательство «Недра» Москва, 1972

### 激光在大地测量中的应用

[苏] М. Т. 帕里列宾 А. Н. 高鲁别夫 著  
浙江大学光仪系激光仪器教研组 译

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

\*

1976年4月第一版 开本: 787×1092 1/32

1976年4月第一次印刷 印张: 5 3/4

印数: 0001—12,450 字数: 129,000

统一书号: 15031·123

本社书号: 648·15—4

定价: 0.60元

## 譯者的話

激光，作为一门新的学科和一种新的技术，发展越来越快，应用越来越广。国外如此，国内同样如此。

激光在大地测量中的应用，国外从事研究较早。六十年代初，在制成首批激光器之后不久，便相继出现有关激光测距仪、激光经纬仪等的报道，试图为测绘工作提供更新更有效的工具。我国工人阶级和科技人员，在毛主席关于“自力更生”的伟大方针指引下，奋发图强，近年来也在这一领域内不断获得可喜的成就。

为了适应我国激光技术的飞跃发展，我们本着“洋为中用”的精神，把《激光在大地测量中的应用》一书译出，介绍给有关方面的工人和科技人员参考。全书共四章，除讲述激光器、发射与接收、大气传布等一般知识外，着重介绍了几种激光测距方法的基本原理，激光在宇宙、大地测量和航空摄影中的应用，以及苏美日英等国研制和生产测量用激光仪器的状况。但本书限于篇幅，有些内容难免讲得不够深入；加以激光技术发展迅速，书中无法将近年所出的资料一一纳入。

本书译、校工作主要由朱裕栋和缪家鼎负责。由于水平所限，译文中定有缺点和错误，欢迎读者提出批评指正。

最后，本书付印前，承国家测绘总局测绘研究所大地室、武汉地震大队精密激光测距研究组等单位对译稿作了一次专业上的校阅，我们谨向他们表示衷心的感谢。

# 目 录

|                               |        |
|-------------------------------|--------|
| 第一章 大地测量中应用激光器的一般问题 .....     | ( 1 )  |
| § 1. 激光器是一种辐射源 .....          | ( 1 )  |
| § 2. 激光的发射和接收 .....           | ( 9 )  |
| § 3. 激光在大气中的传播 .....          | ( 23 ) |
| 第二章 激光器在大地测量和测距装置中的应用 .....   | ( 33 ) |
| § 4. 一般概念 .....               | ( 33 ) |
| § 5. 脉冲式测距仪 .....             | ( 36 ) |
| § 6. 相位式激光测距仪的几个理论问题 .....    | ( 41 ) |
| § 7. 苏产相位式激光测距仪 .....         | ( 59 ) |
| § 8. 外国相位式激光测距仪 .....         | ( 74 ) |
| § 9. 采用激光器的光测距仪-折射计系统 .....   | ( 78 ) |
| § 10. 激光干涉仪 .....             | ( 92 ) |
| § 11. 利用激光器测量距离的其它方法 .....    | (101)  |
| 第三章 激光器在宇宙大地测量和航空摄影中的应用 ..... | (108)  |
| § 12. 人造地球卫星的观测 .....         | (108)  |
| § 13. 月球的光学定位 .....           | (117)  |
| § 14. 激光器在航空摄影中的应用 .....      | (132)  |
| 第四章 激光器在大地测量中的其它应用 .....      | (137)  |
| § 15. 激光器和测角 .....            | (137)  |
| § 16. 用激光器考察角度测量中折光的影响 .....  | (138)  |
| § 17. 激光水准测量 .....            | (139)  |
| § 18. 激光器在工程测量中的应用 .....      | (140)  |
| § 19. 测量地面变形和大陆漂移的激光方法 .....  | (149)  |
| § 20. 激光器在重力测量中的应用 .....      | (162)  |

# 第 一 章

## 大地测量中应用激光器的一般问题

### § 1. 激光器是一种辐射源

大地测量的许多作业中，都要用到光源。光源有各种功用。光源本身可当作一种观测目标(诸如天文观测中的太阳、恒星，三角测量中角观测用的人造光源)，但这时它的作用仅在保证观测点的能见度。在其它场合，光源的作用根本不同。例如用干涉法测量距离，便是利用光源所发光的波动特性(即构成干涉图样)。在光电测距仪中，光源作为信号的载体，对测量更不可少。

不久前，在大地测量中，基本上仍用各种白炽灯和气体发光管作为人造光源。此类光源的特点是能量分布在极宽的光谱范围内。在多数的大地测量中，均要求光源的发光体尺寸越小越好，表面亮度越大越好。表 1 列出大地测量中几种常

表 1

| 灯 型          | 类 别     | 发光体尺寸<br>或发光点<br>直径(毫米) | 平均亮度<br>(100熙提) | 电 源 电 压<br>(伏)   | 所需<br>功率<br>(瓦) | 平均<br>寿命<br>(小时) |
|--------------|---------|-------------------------|-----------------|------------------|-----------------|------------------|
| СГ-2         | 白 炽 灯   | 1×0.9                   | 5               | 6                | 7.5             | 500              |
| СП-70        | 白 炽 灯   | 3.0×2.0                 | 3.5             | 6                | 30              | 80               |
| ДАЦ-50       | 氙气弧光灯   | 1.0                     | 30              | 220<br>(灯上为16.5) | 50              | 75               |
| ДРШ-100      | 水银弧光灯   | 0.3                     | 1000            | 110<br>(灯上为20)   | 100             | 150              |
| КИМ<br>12-90 | 碘 循 环 灯 | 3.5×1.9                 | 30              | 12               | 90              | 50               |

用光源的基本特性；图 1 则是这些光源的光谱特性。

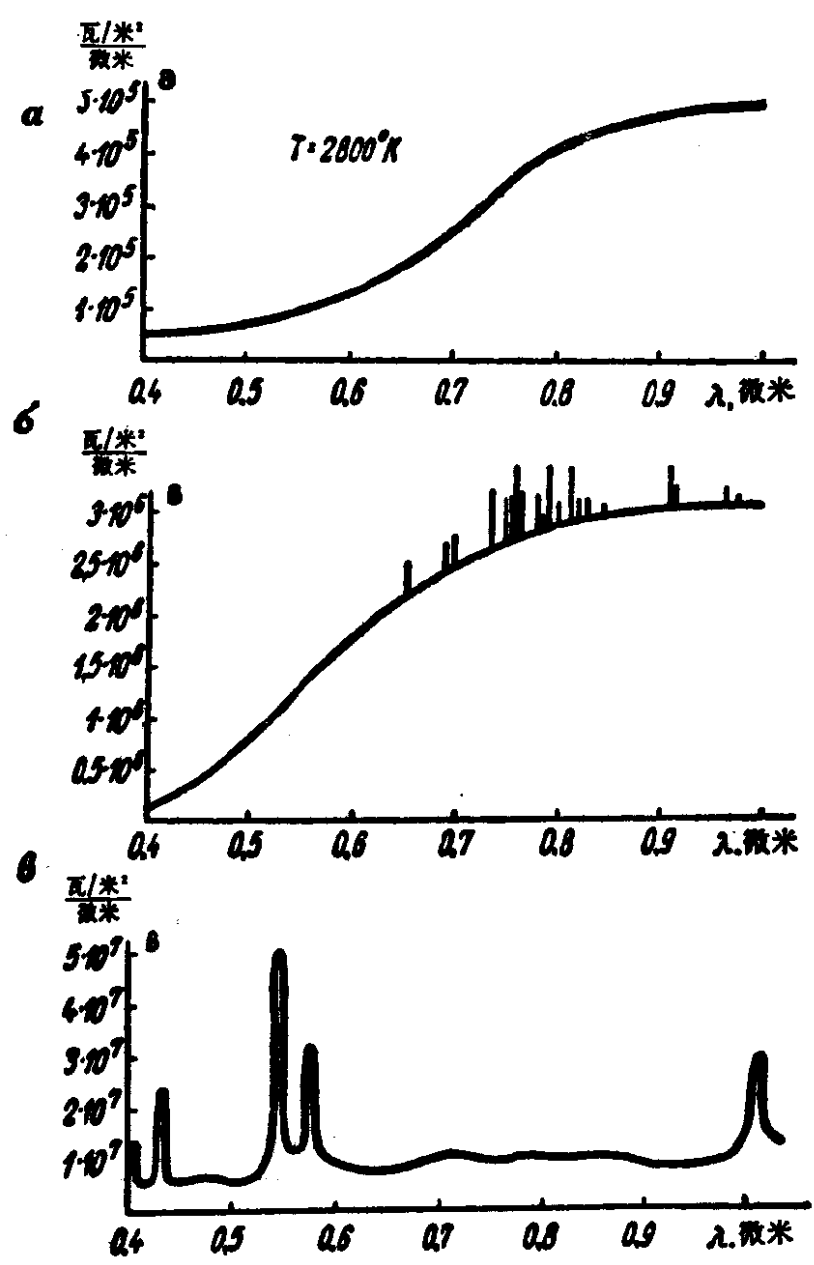


图 1 几种光源的光谱特性  
a——钨丝白炽灯；б——ДЛН 型弧光灯；в——ДРШ 型超高压石英水银灯

用干涉法测量距离时，也可使用具有线光谱的气体发光管，它的谱线狭窄，宽度不到  $10^{-2} \text{\AA}$  [145]。

激光器这一新型光源问世后，便以其独特的性能强烈吸

引了广大测量人员。原来，大地测量中可以有效地利用激光辐射的特性；并且在许多场合下，采用激光器又可研制出某些崭新的测量方法。

大家知道，激光器的作用是基于反转介质中的感应辐射（强迫或受激辐射）现象；所谓反转介质，乃是处在受激态的介质。激光器按其起反转介质作用的工作物质类型不同，可分固体、气体、液体和半导体四种。激光器的基本部分包括：工作物质，谐振腔（内装工作物质）和泵浦系统（即激励系统，为建立工作物质中的反转条件所必需）。

目前，关于激光的特性和激光器的工作原理，已有大量专著乃至科普读物作了全面而完整的介绍，业已成为普通的常识，因而本书对此论述从简，仅围绕激光器在大地测量中的应用问题提供一些必要的资料。

激光与一般光源的辐射不同，前者单色性高，空间相干性和时间相干性也高，因而方向性好，光谱的功率密度大。

此外，在多数场合下，激光为偏振辐射。

空间相干性和时间相干性 ‘空间相干性’这个术语，是指光源各点所发单色辐射的相位的关联关系<sup>[125]</sup>。在一般光源中，仅对间距相当于辐射谱范围内一个波长的光源诸点存在这种关联关系。至于从扩展光源取任意两点所发光的振动相位，则不存在关联关系；因此光源尺寸超过一定数值，就不发生光的干涉。

激光器则不受此限制。激光器发射的电磁波几乎具有平面波阵面，就是说，在光束整个截面上波阵面各点的相位均相等。按光学中著名的杨氏方法进行实验，很容易观察到激光的空间相干性。

所谓时间相干性，是指任意两个连续的瞬时内空间某一点上振动相位的关联关系。间隔  $\Delta t = 1/\Delta\nu$ （式中  $\Delta\nu$  是辐射谱

线宽度)惯称相干时间。二空间相干波(例如从一点发射但经不同途径传送的二波)的时间相干性,也可用二波的程差表示,在此程差内,二波重合时尚能构成干涉图样。此程差等于  $c\Delta t$  ( $c$  为光速),叫做相干长度。若用非激光光源,该程差不超过 30 厘米<sup>[75,141]</sup>。程差很大时,凡同时抵达干涉场同一点的光波,已不属于同一发射动作,因而这些光波的相位差也不恒定。

激光的时间相干性高,是因为辐射谱线宽度极小,也即具有单色性的缘故。由于  $\Delta\nu$  很小,相干时间也就很大。在这种场合,理论上可在二干涉光束的数百公里的程差下观察到干涉图样(实际上,由于大气的影 响,程差只能为几百米数量级)。

空间和时间这两类相干性,可用一个表示场中两点的振动的互相相干性函数来描述。对于座标分别为  $r_1$  及  $r_2$  的波场任意两点,此函数有如下形式<sup>[23]</sup>,

$$\Gamma(r_1, r_2, \tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_0^T V(r_1, t + \tau) V^*(r_2, t) dt,$$

式中  $\tau = t_2 - t_1$  是从  $r_1$  和  $r_2$  两点发出的辐射抵达干涉点的时延;  $V$  是表示振动的函数;  $V^*$  是此函数的复数共轭。

互相相干性函数也表示同一瞬时内各点上的振动的相关关系(空间相干性)以及同一点上按滞后时间不同的关联关系(时间相干性)。函数  $\Gamma(r_1, r_2, 0)$  相当于前一种情况,函数  $\Gamma(r_1, r_1, \tau)$  或  $\Gamma(r_2, r_2, \tau)$  则相当于后一种情况。为了说明相干性,尚引用相干度的概念,即互相相干性的标准函数:

$$g(r_1, r_2, \tau) = \frac{\Gamma(r_1, r_2, \tau)}{\sqrt{\Gamma(r_1, r_1, 0)} \sqrt{\Gamma(r_2, r_2, 0)}}.$$

一般均按干涉图样的能见度(清晰度、对比度)来判断相

干度。  $|\gamma| = 1$  时, 振动完全相干, 干涉图样的清晰程度大。若  $\gamma = 0$ , 振动便完全不相干, 也根本观察不到干涉。在介乎两者之间的情况下, 也即  $0 < |\gamma| < 1$  时, 振动只有部分相干。

**单色性** 激光器具有其它光源所难以达到的极高的单色性, 其原因在于感应辐射的谐振性质。激光器可将激发源的能量(它可能分布在极宽的频带上)转换成几乎单色的辐射。各类激光器转换能量的效率从百分之几到百分之几十。

辐射的谱线宽度, 或者用绝对单位(频率单位  $\Delta\nu$  或波长单位  $\Delta\lambda$ , 且二者关系为  $\Delta\nu = \Delta\lambda \cdot c/\lambda^2$ ) 表示, 或者用相对单位  $\Delta\nu/\nu = \Delta\lambda/\lambda$  表示。一般都把相对度量称作单色度。成批生产的气体激光器(例如 OKΓ-11, ЛГ-56), 其辐射光谱由几条线(模)构成, 它们分别对应于谐振腔的每一固有振动; 每一振动模的谱线宽度约为  $10^3$  赫<sup>1)</sup>, 两模之间则相隔  $(3-5)10^8$  赫。激光器的辐射线通常是一组谐振模, 用多普勒宽度表示, 其半宽度由下式决定<sup>[55]</sup>:

$$\Delta\nu_A = 2\nu \sqrt{\frac{2kT \ln 2}{Mc^2}},$$

式中  $k$  是玻耳兹曼常数,  $T$  是绝对温度,  $M$  是原子质量。

氩-氟激光器所辐射的  $6328 \text{ \AA}$  的多普勒宽度按半宽度计算为 1700 兆赫<sup>[10]</sup>。单模激光器的相对谱线宽度约为  $10^{-11}$ — $10^{-12}$  数量级; 而标准‘单色’光源(钠光灯)的谱线宽度却为  $10^{-5}$ 。

**辐射的方向性** 激光器的方向性好, 也即光线的发散度小, 是因为从其谐振腔发出的只能是经反射镜多次反射后无法显著偏离谐振腔轴线的光波。由于出射孔径上存在衍射现象, 就连激光器也根本不能构成发散度为零的理想平行光

1) 在某些单模激光器的研制中, 往往可获  $\Delta\nu$  的数值约为 1—2 赫。

束。由衍射决定的光线偏离于谐振腔轴线的最小角度，按瑞利公式计算，即

$$\theta_{\min} = 1.22 \frac{\lambda}{d},$$

式中  $\lambda$  是波长， $d$  是辐射面直径。

由光学可知，从光源中心观察时， $\theta_{\min}$  值就是对衍射图样中心亮环直径的张角。这个圆环叫做爱里圆平模。显然，光线的衍射发散角相应于爱里圆平模的角直径，即等于

$$2 \frac{1.22 \lambda}{d}.$$

但必须指出，一般说来，甚至在使用激光器的场合，按衍射公式计算的 actual 发散角也是不确切的。激光器的出射光线的构成决定于谐振腔的类型；在一般情况下，谐振腔附近限制光束的表面总是不呈锥面。在一定位置上，激光束的截面最小，被称为聚束面（图 2）。若用二相同反射镜组成谐振腔，聚

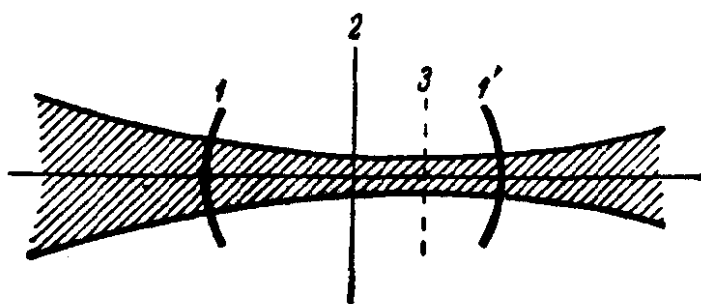


图 2 激光器的辐射束结构

1——谐振腔反射镜； 2——谐振腔中心截面； 3——聚束面

束面便与谐振腔的中心截面重合；反之，若谐振腔二反射镜曲率各异，聚束面则不与中心截面重合（即不在谐振腔的中间）。如果谐振腔的一块反射镜是平面的，则聚束面和它重合；二反射镜若为凹凸形，聚束面便位于谐振腔之外。在一般

1) 文献中常把  $\theta_{\min}$  值也即偏离中心轴的倾斜角称作发散角。由上述内容可见，自然应把  $2\theta_{\min}$  值叫做发散角。在以后的叙述中，我们仍将沿用此概念。

场合下, 聚束面常由中心截面移至曲率较小的一块反射镜的方向。激光束发散的半角(由轴向一边倾斜的角)可按下式计算<sup>[55]</sup>;

$$\frac{\theta}{2} = \frac{2\mu}{\sqrt{kR_0}} + \frac{3.83}{rk},$$

式中  $k=2\pi/\lambda$  是波数;  $r$  是谐振腔孔径光阑的半径;  $R_0$  是共焦参量(等效谐振腔即共焦谐振腔的反射镜的曲率半径, 此谐振腔与一般谐振腔的空间特性相同);  $\mu$  是考虑到模的脚码的因子(对基模  $\mu=1$ )。

式中第一项是由谐振腔构形造成的发散角, 第二项是瑞利衍射的修正量 $\left(\frac{3.83}{rk} = \frac{1.22\lambda}{d}\right)$ 。若  $R_0$  的数值极小(谐振腔远非平行平面), 第一项就比第二项大得多, 此时衍射修正量即可略去不计。

如果谐振腔的孔径光阑(即对场起限制作用的光阑)不是圆形, 或模由两个不同的脚码表示, 则在不同子午面上的光束便具有不同的发散度。

在许多场合下, 气体激光器(见表 2)的最小发散角接近于衍射极限。大批量生产的气体激光器, 其最小发散角等于几分(以弧度计)<sup>[57]</sup>。若在激光器上采用光学准直的附加装置, 光束的发散度便可减至  $10^{-5}$  弧度数量级( $2''$ )。

**辐射的功率** 气体激光器的典型的功率为 1—100 毫瓦; 红宝石固体激光器的一个脉冲功率可达数千瓦至数百兆瓦, 在连续状态下则达数毫瓦至数百毫瓦; 半导体激光器在脉冲状态下的功率约为数瓦, 在连续状态下(室温时)可达 20 毫瓦。感应辐射时, 由于单色性高, 全部能量均集中在一个极窄的光谱范围内, 因此辐射功率的谱线密度很大。例如以脉冲方式工作的红宝石激光器, 在约  $0.1 \text{ \AA}$  光谱范围内功率密度

可达  $10^8$  瓦/厘米<sup>2</sup>；但就太阳而言，同样的光谱范围，辐射的功率密度约为  $2 \cdot 10^{-6}$  瓦/厘米<sup>2</sup>。

**辐射的偏振** 一般的人造光源或天然光源的辐射都是非偏振或部分偏振的；激光器则是发出完全偏振辐射。激光辐射的偏振决定于激光器的结构和工作介质的特性<sup>[55]</sup>。通常，辐射都是线偏振的。凡出射窗口与谐振腔轴线成一布儒斯特角的气体激光器，其辐射均为完全线偏振。红宝石激光器的辐射也几乎为 100% 的线偏振，且电的（或磁的）向量的振荡方向决定于红宝石光轴与棒轴间的夹角。

**各类激光器特性的简单比较** 此处所述特性，为各类激光器——固体的、气体的、液体的和半导体的——的辐射所共有，只是程度不同而已。气体激光器的单色性和相干性最好，光的发散度最小，尚有较易建立连续辐射状态的优点，并且同时存在的振动模要比固体激光器的少；但其功率却比固体激光器小得多。半导体激光器的输出功率平均接近于气体激光器的辐射功率；半导体激光器的优点是效率高达百分之几十（气体激光器仅为百分之几），工作物质的激发方法较简便，可用改变激励电流的办法实现辐射的调制，结构简单，尺寸小。

目前，一般认为半导体激光器有下列缺点，辐射的相干性太小，谱线宽度大，光的发散度大，辐射功率比固体激光器小。

半导体激光器可分两种工作状态：‘激光状态’和‘非激光状态’（又称‘相干状态’和‘非相干状态’）。在后一种状态下，就辐射特性而言，相干性、带宽和方向性变坏了。有些半导体激光器根本无法在室温下工作；有些半导体激光器则只能以脉冲的方式在室温下工作。必须把非相干辐射的所谓发光二极管<sup>1)</sup>和半导体二极管激光器区分开来<sup>[86]</sup>。

1) 发光二极管常称半导体复合辐射源，又称电致发光二极管。

发光二极管也能用作光源,其辐射功率一般不超过 1—3 毫瓦,辐射谱线宽度为数百埃(激光二极管的谱线宽度则可达几分之一埃)<sup>[93]</sup>。

激光二极管和发光二极管不同,前者的晶体表面经磨平抛光(谐振腔),且注入  $p-n$  结区的电流密度较大。电流密度超过某一阈值(对应用最广的砷化镓激光器说来为  $10^4$  安/厘米<sup>2</sup>)时,辐射带宽显著缩小,辐射强度逐渐增大,此时即成为相干辐射。若继续增大通过二极管的电流,便会导致激光振动频率的增长<sup>[24]</sup>。

半导体激光器和发光二极管的辐射有惯性小(约数毫秒)的特点。这说明半导体辐射源具有一种最突出的优良特性,即可用很高的频率调制辐射。

凡用有机化合物(包括有机染料溶液)制备的激光器均属液体激光器<sup>[143]</sup>,它们要比红宝石激光器便宜得多。由于这种染料数量众多,故可在很多波长(从紫外到近红外区的波段内)上获得振荡。但到目前为止,液体激光器的普及程度尚不及其它几类激光器。

最近又有了用塑料研制激光器的报道<sup>[72]</sup>。

表 2 所列是几类应用较广的激光器的特性数据,其中有的已实际用作大地测量中的辐射源,有的则可望在今后供作此用。

## § 2. 激光的发射和接收

激光器的应用要求发射和接收装置的结构具有一定特点。

首先,由于激光器发光的明显方向性,且具有足够的辐射功率,这样就能在某些场合下无须再用附加的光学发射系

表 2 应用最广的几类激光器的典型特性

| 激光器类型 | 工作物质   | 典型工作状态 | 波长<br>(微米)       | 谱宽<br>(Å)             | 辐射功率<br>(瓦)或脉冲能量<br>(焦耳)   | 脉冲持续时间<br>(秒)         | 脉冲重复率<br>(赫)  | 有效利用系数<br>(效率)<br>(%) | 工作温度<br>(°K) | 光束发散度   |
|-------|--------|--------|------------------|-----------------------|----------------------------|-----------------------|---------------|-----------------------|--------------|---------|
| 1     | 2      | 3      | 4                | 5                     | 6                          | 7                     | 8             | 9                     | 10           | 11      |
| 固体    | 红宝石    | 脉冲态    | 0.6943           | $10^{-2}$ — $10^{-1}$ | 0.1—100<br>焦耳              | $10^{-4}$ — $10^{-3}$ | 0.1—10        | 0.1—1                 | 300          | 10—20′  |
|       | 钕玻璃    | 脉冲态    | 1.06             | 10—50                 | 1—1000<br>焦耳               | $10^{-3}$             | $10^{-2}$ —10 | 1—3                   | 300, 77      | 10—20′  |
| 气体    | 氦-氟混合气 | 连续态    | 0.6328<br>1.1530 | $10^{-2}$ — $10^{-2}$ | $10^{-3}$ — $10^{-2}$<br>瓦 | —                     | —             | 0.01                  | 300          | 1—10′   |
|       | 氩      | 连续态    | 0.4880<br>0.5145 |                       | 1瓦以下                       | —                     | —             | 0.02                  | 300          | 5′      |
| 半导体   | 砷化镓    | 脉冲态    | 0.82—0.92        | 1—10                  | $\sim 10^{-6}$ 焦耳          | $10^{-7}$ — $10^{-6}$ | —             | 1—10                  | 300          | 20—30°  |
|       |        | 连续态    | 0.82—0.84        | 1—10                  | 1—10瓦                      | —                     | —             | 30—70                 | 77, 4.2      | 20—200′ |
|       | 砷磷化镓   | 脉冲态    | 0.64—0.85        | 1—10                  | —                          | —                     | —             | —                     | 90—125       | —       |

统。在较短距离的大地测量中，是可以做到这一点的。但要测量较大的距离，激光器上便须附加准直用的光学系统。制造光学系统部件时应予考虑的一些要求，实质上与用几何光学来构成普通非相干光的要求类同。就光学接收系统而言，要求也同。通常，光学接收系统的功用是将所接收的辐射聚焦并发送到光敏元件上。

在许多场合下，为了辐射的发射，尚须配备一种辅助装置以控制辐射的某些特性。

因此，发射系统可能有下列几种结构：（一）激光器，（二）激光器加光学系统，（三）激光器加辐射控制装置，（四）激光器、辐射控制装置再加光学系统。

光学系统 必须指明，此处‘光学系统’这一术语，系就该词的狭义而言，即指按几何光学的法则来构成光线<sup>1)</sup>。图3是构成激光的光学发射系统的几种基本示意图：透镜系统(a, b)，反射镜系统(c)，反射镜-透镜系统或称折反射系统(d)，它们都是望远镜系统<sup>2)</sup>。大家知道，在这些系统中，物镜的后焦点或第一块反射镜的焦点和聚焦透镜的前焦点或第二块反射镜的焦点相重合。光束通过这些光学系统后，直径增大，发散度减小。激光光学系统的一大特点是，可使所辐射的光通量全部进入系统内；在 $4\pi$ 弧度的立体角内辐射的普通光源却无法做到这一点。用普通光源时，被有效利用的也即射入光学系统的光通量多少，系由光学系统的短焦元件（聚光镜）的孔径决定：孔径越大，所收集的从光源向四处辐射的光通量便越多。为了增加这部分光通量，光源周围须置一辅助

---

1) 从广义上说，凡能建立、构成、控制、发送和接收光辐射的诸装置的综合，包括辐射源和调制器等等，均称光学系统。

2) 指由两块平行平面反射镜构成谐振腔的激光器。谐振腔二反射镜（或其中之一）若为球面，上述光学系统可近似地认作望远镜系统。

反射镜或采用其它相当复杂的聚光系统。用激光器时，聚光镜的孔径不起作用，仅要求它不小于发射的激光束的直径即可；因此允许使用尺寸极小的聚光镜。至于发射用物镜或反射镜的参量选择，须视所要求的光束发散度而定，并与投射系统的作用距离有关。若不计及衍射和象差，望远镜系统大致可使光束的平面发散角减小  $d_2/d_1=f_2/f_1$  倍，其中  $d_1, f_1$  和

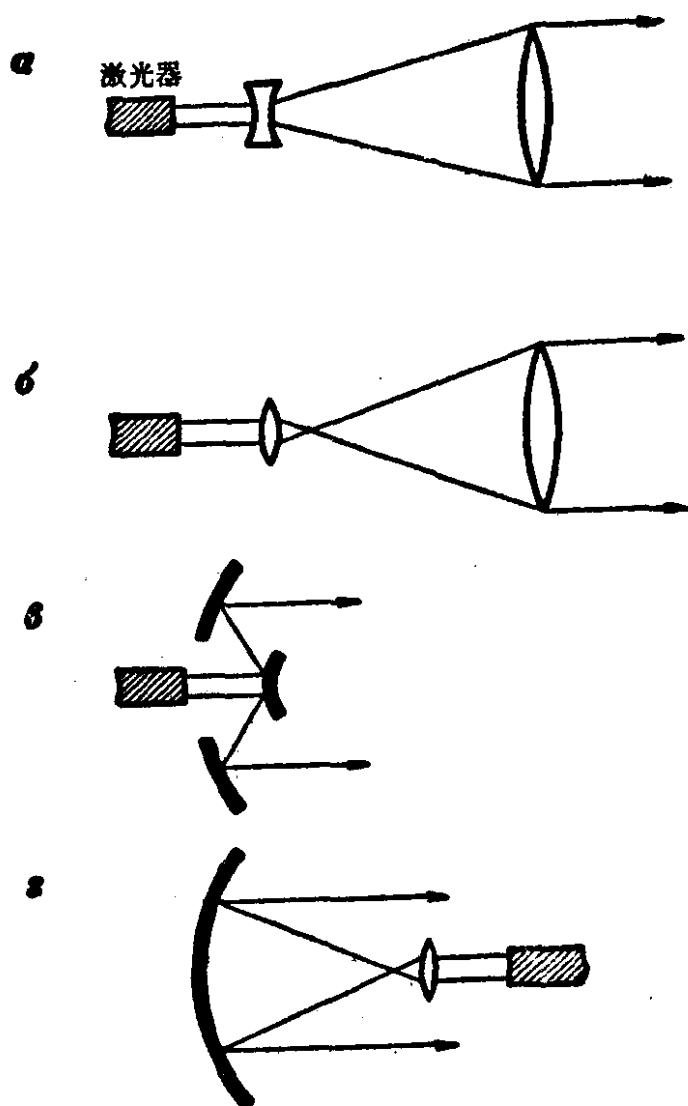


图 3 激光器用光学望远镜系统  
 a——伽利略系统； b——卡普勒系统； c——卡赛格林系统，  
 d——反射镜-透镜系统