

激光与测量

—新测量领域的开拓

[日] 田中敬一 著

朴大植 译



中国计量出版社

激 光 与 测 量

新测量领域的开拓

〔日〕田中敬一著

朴大植 译

倪育才 校

中国计量出版社

DT21/17
内 容 提 要

本书为中级科普读物。全书分两篇。第一篇主要介绍了激光的基本概念；第二篇介绍了激光在精密测量如物体位置和尺寸、地球—月球距离、重力加速度、地壳应变、光速、角速度等的测量，以及在准直、天文学、新米定义中的应用。语言通俗而不失深入和具体，内容新颖，很有启发性。

本书可供具有高中以上文化程度的计量测试、激光研制和应用、天文、宇航工作人员以及科技管理干部等参考。

レーザと計測

極限への挑戦

〔日〕田中敬一 著

共立出版株式会社 1983

激 光 与 测 量
新测量领域的开拓

〔日〕田中敬一 著

朴大植译 倪育才校

责任编辑 陈小林

中国计量出版社出版

（北京和平里11区7号）

中国计量出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经营

开本 787×1092 1/32 印张 6.375

字数 144 千字 印数 1—6000

1987年4月第一版 1987年4月第一次印刷

统一书号 15210·530

定价 1.60 元

译 者 的 话

各种物理量测量的水平如今已发展到何种程度，激光在精密测量中扮演了什么角色，这在科学技术高度发展的今天，不仅对于从事激光应用和计量测试的专业人员，而且对于一般的科研人员和科技管理干部来说，很有了解的必要。在许多精密测量领域中，与传统的方法相比，激光具有明显压倒的优势。它使测量的精度和范围有了重大的突破，许多达到或接近测量极限的方法正在实现。本书为读者提供了这方面的信息。

全书分两篇。第一篇主要介绍激光的基本概念；第二篇介绍了激光在精密测量如物体位置和尺寸、地球—月球距离、重力加速度、地壳应变、光速、角速度等的测量，以及在准直、天文学、新米定义中的应用。

本书为中级科普读物，语言通俗易懂而不失深入和具体，思路开阔，很有启发性。作者田中敬一是日本北海道大学教授，曾任日本计量研究所第一部部长，从事长度、形状、应变、速度、激光波长和频率等的测量工作三十多年，是国际米定义咨询委员会的委员，日本计量学界有声望的科学家。

鲁绍曾同志对本书进行了评审，并对该书的翻译给予了大力支持，译者在此深表谢意。

由于译者水平所限，译文中难免有不当之处，请读者给予指正。

译 者

1984年9月于北京

前 言

自 1960 年崭新的人造光源——激光出现以来，已有二十四年了。人们对这一新事物给予强烈的关注，尽一切努力解释其现象和机理，并致力于使它为我们的知识开发和日常生活服务。在这二十四年期间，已研制出了各种各样的激光器。从激光器所发射的电磁波波长范围来看，最早的红宝石激光器发射红色可见光，而现在长波端已扩展到亚毫米波区，短波端则已达到紫外区。随着测试用气体激光器和半导体激光器的研制成功，已制造出各种各样的适用于激光输出的反射镜、透镜和调制晶体等光学元件，以及具有高灵敏度或高频率响应的半导体光检测元件，来满足激光的应用研究。

激光器受到世人的注目，并称它为“第二太阳”，这是因为激光辐射的谱线很锐，并且很纯的缘故。关于激光出现前的光学，早已在经典的著作里叙述过。所谓单色光，就是具有一个波长（或频率）的电磁波，其数学关系符合正弦函数。但实际上，过去我们所观测的光学现象，与其说是用纯正弦函数的模式来说明光，倒不如说验证了光具有更复杂的特性。而激光是非常符合正弦函数模式的。在干涉、衍射或全息照相等方面采用激光要比普通光好得多，特别是能够实现光的拍频观察和频率测量，这在激光出现以前是不可能的。

由氦氖或氩离子等气体激光器发射的可见光，不仅表现出光的性质，而且还表现出微波或无线电波的性质。于是光与

8710737

电磁波之间的界线变得不很明显。激光的这一特性显著地扩大了传统光学测量方法的应用范围，并开发了新的激光应用。

目前，激光的应用范围很广，而且还有各种各样的特殊应用。因此本书不可能包罗万象，只能介绍本人从事过的长度、形状、应变和速度等测量方法。重点有两方面：

(1) 利用激光后明显地提高了测量精度和效率的方法；

(2) 使用激光后才能实现的方法。

此外，还例举了大型物体的测量以及超精密测量法，也就是接近于测量极限的测量方法。激光必须具有什么特性，才能使以前不可能做到的测量得以实现，怎样才能提高测量精度和效率，对这些问题本书均将深入浅出地加以说明。

本书的第一部分着重说明与应用有关的一些激光的基本概念。第二部分则尽可能具体地说明应用方法。还例举了本人和同事们合作进行的具体事例。当然，对于同样的工作，他人也进行了很好的实验和研究，但为了使读者更好地理解内容，对他人的实验只作简单介绍，重点是介绍我们的亲身体会和国外还未发表而我们经过艰苦努力已获得的成果。

此外，在本书中出现了各种物理量和与此相应的各种单位（国际单位制），为便利读者，在本书的最后附加了单位表。

如果本书有助于那些有初步自然科学知识的读者，了解激光如何推进科学发展，了解我们的测量水平已达到何种程度，并引起对将来科学发展的兴趣的话，本人将感到非常高兴。

最后，在此对提供宝贵文献和照片等资料的东京大学天文台的古在由秀教授，赤羽贤司教授，森本雅树教授，和海

部宣男副教授，東京大学工学部の東口実教授，日立造船公司技术研究所的山本昌彦以及三菱精密株式会社精密机器课的早川義彰深表谢意。另外，在介绍计量研究所的研究工作方面受到了该所的清野昭一第一部长，大石忠尚光学测量课长，櫻井慧雄、伊藤信彦，黑泽富藏，盛永笃郎等主任研究官以及岩崎茂雄研究员等人的大力协助，对此表示感谢。

此外，共立出版社编辑部的福村比佐史在通读本稿后帮助推敲定稿，使本书内容通俗易懂，表达方式更好，对此也表示感谢。

作 者

1983年夏

目 录

I 光, 激光

第一章 自然光, 人造光	(1)
1 气体放电管和自发辐射.....	(1)
2 光是一种电磁波.....	(2)
3 相干波.....	(3)
4 光谱、波长和颜色.....	(4)
5 光和多普勒效应.....	(6)
第二章 人造光——激光	(7)
1 气体激光器.....	(7)
2 氦氖激光器.....	(8)
3 激光的高单色性.....	(10)
4 激光的方向性.....	(11)
5 激光的聚焦特性.....	(11)

II 测量与激光

第一章 激光束——准直标准	(13)
1 隧道工程测量.....	(13)
2 激光应用于隧道工程.....	(15)
3 挖掘机的自动导向.....	(15)
4 准直用激光器.....	(16)
第二章 大尺寸的精密测量	(18)
1 以毫米量级精度建造大型船舶.....	(18)
2 激光反复扫描测量法.....	(19)
3 激光三维测量实例.....	(21)

第三章 地球—月球距离的测量	(24)
1 置于月球的反射器	(24)
2 用激光测量地球—月球距离	(27)
3 来自月球的响应	(29)
第四章 光干涉的应用	(32)
1 光的干涉现象	(32)
2 利用光干涉仪测量长度	(33)
3 分辨率为 40 nm 的测长仪	(35)
第五章 长度标准及碘稳频激光器	(39)
1 使用了七十年的米原器	(39)
2 明线光谱用于长度标准	(40)
3 氦氖激光器的波长稳定度	(41)
4 波长稳定激光器	(42)
5 激光的复现性	(44)
6 碘稳频激光器	(44)
第六章 地球重力加速度“g”的测量	(48)
1 伽利略的实验	(48)
2 g 值固定不变吗?	(49)
3 g 值绝对测量的新方法	(50)
第七章 佐久间博士的重力加速度绝对测量	(53)
1 专心致力于 g 值测量的佐久间博士	(53)
2 佐久间的测量原理	(53)
3 使用迈克尔逊干涉仪的测量装置	(54)
4 测量值的判断	(57)
5 广泛采用的佐久间式测量装置	(58)
第八章 地壳应变的测量	(60)
1 松代地震群和地壳变动	(60)
2 用一般手段无法测量的地壳应变	(61)
3 隧道内的石英管应变仪	(62)
第九章 用激光干涉仪测量地球潮	(65)
1 干涉仪的关键在于光源的光谱纯度	(65)

2	地壳应变测量的开拓者	(65)
3	计量研究所的地壳应变测量	(66)
4	使用新研制的激光器进行精密测量	(69)
5	最后得到的地球潮	(71)
第十章	利用无线电波观测天体	(74)
1	射电天文学的开端	(74)
2	射电望远镜	(75)
第十一章	射电望远镜和激光测距仪	(79)
1	日本的毫米波射电望远镜	(79)
2	抛物面天线和激光测距仪	(82)
3	激光三维测量仪的构造	(84)
第十二章	激光实验中的透镜成像	(91)
1	实象是衍射象的集合	(91)
2	象的清晰度和爱里斑	(93)
3	爱里斑的参量	(94)
4	爱里斑和天文望远镜的分辨率	(96)
第十三章	威尔德博士的大型射电望远镜	(99)
1	射电太阳摄影机	(99)
2	观察太阳的爆发现象	(99)
3	视直径 $3.5'$ 的意义	(100)
4	三种形式的抛物面天线	(101)
5	直径 3 km 的射电太阳摄影机	(102)
6	用射电太阳摄影机观察太阳的爆发	(103)
第十四章	用氦氛激光进行射电太阳摄影机的模拟实验	(106)
1	威尔德博士模拟	(106)
2	用激光进行模拟实验	(107)
第十五章	用环形激光器测量角速度	(111)
1	环形激光器的结构	(111)
2	环形激光的测量原理	(112)
3	能否测量地球的自转?	(114)
4	角度测量	(116)

5 日本计量研究所的环形激光实验	(117)
第十六章 宇宙时代的激光陀螺仪	(120)
1 高精度陀螺仪的作用	(120)
2 环形激光器用于陀螺仪	(121)
3 旋转角速度的测定	(123)
4 今后的环形激光陀螺仪	(125)
第十七章 光速测量	(127)
1 光速 c 测量的历史	(127)
2 罗麦的天文观测和光速值	(128)
3 菲索在地面上的光速测量	(131)
第十八章 迈克尔逊和光速测量	(134)
1 海军少尉迈克尔逊的光速测量	(134)
2 帕萨迪纳的迈克尔逊	(135)
第十九章 激光和光速测量的进展	(138)
1 弗鲁姆的微波测量法	(138)
2 用激光进行测量	(140)
3 根据原子确定长度和时间基准	(141)
第二十章 激光的频率和波长测量	(143)
1 波长的绝对测量	(143)
2 频率的绝对测量	(144)
3 检测光波的天线和混频器	(147)
4 钨-镍点接触二极管	(148)
第二十一章 关键性的光速值	(150)
1 伊文森测得的关键性的光速值	(150)
2 日本计量研究所的频率绝对测量小组	(152)
3 日本计量研究所的波长绝对测量小组	(156)
第二十二章 从光速到新的“米”定义	(160)
1 CCDM和CCU的作用	(160)
2 基本物理常数 c 的意义	(161)
3 新米定义的建立和测量方法	(161)
4 激光测量技术的发展推进科学技术的进步	(162)

附录 国际单位制及本书中出现的单位	(164)
参考文献	(168)
索引	(171)

第一章 自然光、人造光

1 气体放电管和自发辐射

有一种所谓“气体放电管”。一上街就映入眼帘的霓虹灯就是最常见的一种。家庭里常用的荧光灯也属于气体放电管。

气体放电管是在细玻璃管的两端封入钨杆作电极，用真空泵抽出管内的空气，然后充入氖气或氙气。当电极上加以电压并通过管内气体进行放电时，被激发的气体会发射出各种不同颜色的光。对于白炽灯，当通以电流时，钨丝产生热而发光，这就是白炽灯的发光原理。无论哪种情况，一部分电能转变成光，而另一部分则变成热而消耗掉。

不仅是这种人造光，还有自人类在地球上诞生以前就在光芒四射的太阳光，都是由不同波长的电磁波组合成的。我们的肉眼所能感觉到的光仅仅是波长从 $0.4\mu\text{m}$ 到 $0.75\mu\text{m}$ 范围内的电磁波。

这里所说的组合不仅意味着不同波长光的混合，而且每一波长的光并不是象晶体振荡器所产生的那种连续电磁波。光源发射的电磁波是不规则的，在无数个波的长度约为几十厘米的电磁波之间不存在任何关系。因此，把具有这种性质的光，也就是在激光诞生以前的自然光和人造光都叫做自发辐射。自1960年激光在美国诞生以来，激光器的研制工作开展得非常迅速。当时称它为第二太阳，其基本原理将在后面叙述。在谐振腔内产生“光的受激发射和放大”的特殊现象而

发光，它具有与自发辐射完全不同的性质。这种不同性质的光是从来没有的。从此在人们面前展现了新一代光的世界，开辟了光学方面的新的发现和应用方向。

2 光是一种电磁波

光是电磁波的一种，其本质与无线电波或用于导航的电磁波相同。图 1 示出典型的正弦电磁波。阴影部分的电波和空白部分的磁波垂直相交成两个平面，即 $Y-Z$ 平面和 $X-Z$ 平面，该正弦电磁波在这两个平面内以每秒约三十万公里的速度在 Z 轴方向传播。

电波和磁波具有相似的特性，因此这里仅对电波的特性作简单说明。例如在日本广播电台第一频道的发射天线上，以 594 kHz 的交流信号来发射电磁波。则一秒后，在辐射方向 OZ 上的三十万公里内连续产生 $594\,000$ 个波。在 YZ 平面内，以垂直于 OZ 方向的高度表示电场 E 的大小，其极大值叫做“振幅”，一个波的长度叫做波长。从某一点 P 观察电波时，电场以 594 kHz 来回振动。振动一次所需的时间

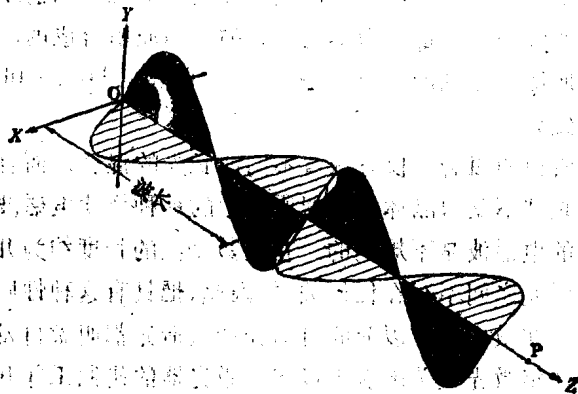


图 1 正弦电磁波，在 $X-Z$ 平面内振动的正弦磁波和在 $Y-Z$ 平面内振动的正弦电波同时在媒质中传播

(周期) 等于频率 (每秒的振动次数) 的倒数。所有波动现象都满足如下关系式:

$$\begin{aligned} [\text{波的传播速度}] &= [\text{波长}] \times [\text{频率}] \\ &= [\text{波长}] + [\text{周期}] \end{aligned} \quad (1)$$

图 2 示出频率为 f 的电磁波的电场大小随时间的变化。当图中左边圆半径 E_0 以等角速度旋转时, 将 R 点在 OY 轴上的投影画在时间轴 OT 上。以时间轴上的原点 O 作为基准, t 时刻的电场大小 E 可表示为

$$E = E_0 \sin(2\pi ft) \quad (2)$$

式中, 括弧内的值表示波的位相, 圆半径的旋转角以弧度表示。因此, 波的某一位相每隔 2π , 即 360° 后重复出现, 这就相当于周期*。

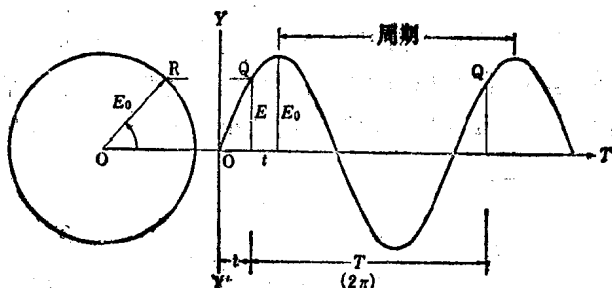


图 2 正弦函数波形是等速旋转的圆周上点的投影

8 相 干 波

选择石英晶体的晶轴方向, 并研磨成具有一定尺寸的长方体或圆柱状, 使它具有特定的谐振频率, 然后与电子放大

* 原文此处和图 2 中文字均为“波长”, 因图 2 中的横坐标为时间轴, 故将此两处改为“周期”——校者注

电路组合成为以该频率振荡的振荡器。这种晶体振荡器可以持续产生一定波长（频率），并具有连续波形的交流电压或电波。这种具有连续性的波叫做“相干波”。

可是如前所述，日常生活中常用的自然光，如钨丝灯或荧光灯等所发射的光都叫做自发辐射。它们属于杂乱无章的电磁波群，所以这种波不能叫做相干波。

4 光谱、波长和颜色

当太阳光通过带有狭缝的光屏后，成为带状平行光，然后射到棱镜上。这时可以看到透过棱镜的光呈现彩虹一样的颜色变化，形成从红色长波到紫色短波连续变化的颜色带（见图3）。早在1665年左右，当时的剑桥大学学生牛顿首先发现了这一现象。产生这种光色散的原因是光入射和出射棱镜表面时会产生折射而引起光线方向的改变。光的波长越长，折射越小；波长越短，则折射越大。因此可以用光带扩展方向的位置来连续地表示波长的大小。由此可知，太阳光

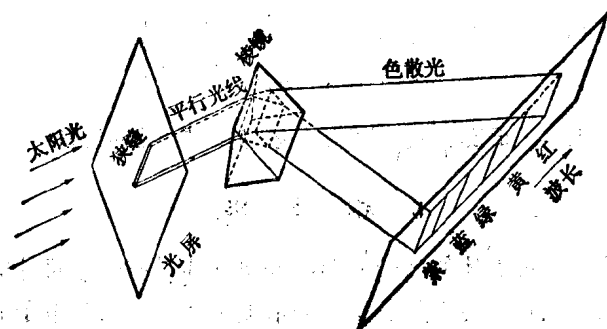


图3 棱镜产生的光色散

是由无数不同波长的光所组成的。

单色仪是用来分析光源的颜色，即含有哪些波长的光学仪器，它由狭缝、透镜和棱镜构成。如果用单色仪分析氖放电管的光谱成分，则可以看到如图 4(a) 那样具有很多不同颜色的很细的线状分布的光，叫做“明线光谱”。不同的波长对应于不同的颜色。根据氖原子或分子的物理性质和状态，构成了其独特的颜色。这可以从理论上加以说明。相反，如果知道光谱的强度分布状态（见图 4(b)），就可以分析该发光体是何种物质。

先考虑氖原子明线光谱中波长为 632.8nm 的红色谱线。如图 4(b) 所示，该谱线是具有一个波长的颜色单纯的光，即单色光。但实际上如将波长分度更细即将横轴放大，并以

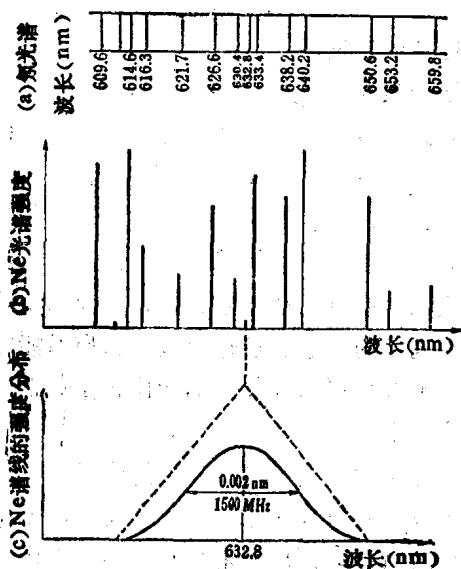


图 4 (a) 氖原子的明线光谱，(b) 各明线光谱的强度，(c) 各明线光谱具有如图示那样的钟形分布