

激光的技术应用

《激光手册》第六分册

F. T. 阿 雷 克 主编
E. O. 舒尔茨-杜波依斯

科学出版社

73-7719

335

激光的技术应用

《激光手册》第六分册

F. T. 阿雷克 E. O. 舒尔茨-杜波依斯 主编
《激光手册》翻译组 译



科学出版社

1983

1111095

2039/10

内 容 简 介

本书为《激光手册》第六分册，综述激光在技术上的应用。全书共九章，分别阐述激光在计量学中的应用；全息术；激光在高速照相术中的应用；材料加工；激光在计算机中的应用；光信息处理；激光测距；光通信理论；以及激光在生物学和医学上的应用。各章内容自成系统，可以分章阅读。本书可供对激光应用感兴趣的科研人员及有关大专院校师生参考。

F. T. Arecchi, E. O. Schulz-DuBois
LASER HANDBOOK
North-Holland, 1972

激光的技术应用
《激光手册》第六分册

F. T. 阿雷克 E. O. 舒尔茨-杜波依斯 主编

《激光手册》翻译组 译

科学出版社出版
北京前门内大街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

*

1983年8月第一版 开本，787·1092 1/32

1983年8月第一次印刷 印张，17 5/8

印数：0001—6,200 字数，388,000

统一书号：13031·2346

本社书号：3207-13-3

定价：2.70元

中译本前言

自从第一台激光器出现以来，激光理论和激光技术的发展非常迅速。目前激光已在国防、国民经济和科学技术的许多方面得到了广泛应用。《激光手册》综述了激光的物理原理、技术设计及其应用，虽出版于1972年，但书中论述的许多基本原理和基本技术仍然适用。为此，我们把它译成中文，以供读者参考。

本书原著分为基础理论(*A*)，各类激光器(*B*)，激光器件与技术(*C*)，非线性光学材料(*D*)，物理应用(*E*)及技术应用(*F*)等六个部分，共收综述性文章40篇，分为上、下两册出版。中译本对部分章节作了调整，分六个分册出版。原书的*A*部分为第一分册，原书的*B*与*C*两部分调整为第二和第三分册，从原书*E*部分选出一篇文章与*D*部分合编成为第四分册，*E*部分的其他文章为第五分册，*F*部分为第六分册。

本分册第一至八章由潘承志、张伦、李世英合译；第九章由杜金波译；均由潘承志、李玉文校订。

译文不当之处，欢迎读者批评指正。

目 录

第一章 激光在计量学中的应用——测距 A. Sona	1
1. 引言	1
2. 激光器和长度标准	2
3. 干涉仪技术	7
4. 光束调制遥测技术	16
5. 光雷达系统	26
5.1. 脉冲激光源	27
5.2. 光电探测器	27
5.3. 记时系统	28
6. 空气折射率效应	30
第二章 全息术 J.-Ch. Viènot	39
1. 引言	39
1.1. 经典光学和现代光学	39
1.2. 相干性条件	41
1.3. 全息术的现状	43
2. 全息图的基本理论	45
2.1. 记录下的波阵面的再现	49
2.2. 振幅全息图和相位全息图	56
2.3. 计算全息图	56
2.4. 漫射	58
3. 全息图的性质	59
3.1. 信息容量	59
3.2. 菲涅耳全息图, 夫琅和费全息图和傅里叶全息图	61
3.3. 放大效应	64
3.4. 三维效应	67

4. 全息术的应用	68
4.1. 在测量技术中的应用	68
4.2. 二次谐波的波阵面再现	70
4.3. 全息干涉度量术	71
4.4. 动态全息术	79
4.5. 部分相干光全息术	81
4.6. 全息术在显微术方面的应用	83
4.7. 光学信息处理全息图	88
4.8. 三维电视和傅里叶变换光谱学	99
5. 声全息术	103
第三章 激光器在高速照相术中的应用 G. V.	
Skfizkov	109
1. 引言	109
2. 激光器作为照相的光源	110
3. 用纹影照相法进行记录	115
4. 用扫描照相机实现有帧分隔的分幅照相术	119
5. 有光延迟的分幅照相术	126
6. 超短曝光	136
7. 快速工作的光学快门	138
8. 激光等离子体作为光源	141
9. 高速干涉照相术	142
10. 高速纹影照相术	145
11. 本章结论	146
第四章 材料加工 M. I. Cohen	149
1. 引言	149
2. 激光加工的热学方面	152
2.1. 激光加热模型	152
2.2. 解析处理	154
2.3. 讨论	174
3. 激光加工的其他方面	177
3.1. 模式和光点尺寸	178
3.2. 光学系统	183

3.3. 表面和环境条件·····	185
3.4. 材料加工用激光器的选择·····	189
4. 激光焊接·····	191
5. 激光打孔, 加工和切割·····	204
6. 在薄膜方面的应用·····	220
7. 杂项应用·····	233
7.1. 用激光器熔合制造二极管·····	233
7.2. 运用连续波激光能量蒸发淀积薄膜·····	233
7.3. 激光加热在计算机存储器中的应用·····	234
7.4. 控制易碎衬底的断裂·····	235
第五章 激光在计算机中的应用 N. G. Basov, W. H. Culver and B. Shah·····	240
1. 激光器在计算技术中可能发挥的作用·····	240
2. 激光器应用于计算机元件·····	242
2.1. 引言·····	242
2.2. 带着非线性吸收体的注入式激光器的动力学·····	244
2.3. 注入式激光器制作的光逻辑元件·····	252
3. 激光器用于计算机存储器·····	265
3.1. 引言·····	265
3.2. 光存储器的类型·····	268
3.3. 主要的存储器元件·····	283
4. 输入-输出设备·····	296
第六章 光信息处理 R. V. Pole, K. S. Pennington·····	301
1. 引言·····	301
1.1. 历史背景·····	301
1.2. 技术背景·····	303
2. 基本概念·····	303
2.1. 线性系统·····	303
2.2. 线性的定义·····	304
2.3. 线性的含义·····	306
2.4. 线性和变换计算·····	308
3. 线性光学系统·····	310
3.1. 概述·····	310

3.2.平面波和空间频率.....	312
3.3.透镜的作用与光学系统模型.....	314
4. 简单的滤波运算.....	319
4.1.概述.....	319
4.2.带通滤波器.....	321
4.3.用于相位-幅度变换的滤波器.....	328
5. 其他的幅度和相位滤波器.....	330
5.1.高斯滤波器.....	331
5.2.微分滤波器.....	331
5.3.反演滤波器.....	333
5.4.纯相位滤波器.....	334
6. 全息照相滤波器.....	334
6.1.概述.....	334
6.2.匹配滤波器.....	338
6.3.其他的复滤波器.....	340
6.4.计算机制作全息滤波器.....	347
7. 一些实际的光学处理系统.....	347
7.1.合成孔径雷达.....	347
7.2.艾多福和热塑性投影系统.....	354
7.3.彩色编码和差值提取.....	355
8. 空间域和非相干光学数据处理.....	358
8.1.概述.....	358
8.2.乘法和积分.....	358
8.3.卷积和相关.....	358
9. 结束语.....	360
第七章 激光测距 M. L. Stitch.....	364
1. 引言.....	364
2. 与微波频率相比较.....	368
3. 测距仪的结构.....	369
3.1.基本技术.....	369
3.2.脉冲测距仪的结构.....	371
4. 系统分析.....	372
4.1.测距定位方程.....	372
4.2.能量和功率的关系.....	375

4.3. 信号探测能力	377
4.4. 大气传输	389
4.5. 反射率	392
5. 设计问题和性能问题	396
5.1. 一般方法	396
5.2. 发射机	397
5.3. 接收机	403
5.4. 信号处理机	416
5.5. 系统灵敏度——消光试验	421
6. 激光测距仪的演变和实例	423
6.1. 预Q开关激光测距仪	423
6.2. 陆军用的Q开关激光测距仪	424
6.3. Q开关光雷达、卫星测距仪和月球测距仪	432
第八章 光通信理论 E. V. Hoversten	440
1. 引言	440
2. 表示符号、模型和基本概念	443
2.1. 场的表示	443
2.2. 背景噪声	446
2.3. 检测器统计模型	448
2.4. 结构式接收机与最佳量子接收机的比较	451
3. 自由空间信道	453
3.1. 外差系统	454
3.2. 前置放大器系统和零拍系统	472
3.3. 直接检波系统	475
3.4. 最佳量子系统	493
4. 湍流信道和散射信道	497
4.1. 统计模型	499
4.2. 数字通信	505
第九章 激光在生物学和医学中的应用 D. E. Rounds	520
1. 激光作为生物学的一种研究工具	520
1.1. 单色激光波长的特有反应	521
1.2. 用窄脉冲宽度研究快速反应	523
1.3. 相干性的优点	523

1.4. 依赖于强度的反应.....	524
1.5. 散射激光的应用.....	530
1.6. 全息照相和干涉测量的应用.....	531
2. 激光作为医疗的工具.....	533
2.1. 激光在眼科中的应用.....	533
2.2. 激光在皮肤科中的应用.....	535
2.3. 激光在治疗肿瘤中的应用.....	538
2.4. 激光在牙科中的应用.....	542
3. 小结.....	548

第一章 激光在计量学中的 应用——测距

A. Sona

提要 本章介绍自激光器问世以来，在测距和计量学方面所取得的进展。在光学测距的三种基本技术（即干涉度量学，光调制测量技术和光雷达）方面，可能获得主要改善。由于激光器的时间相干性好得多，现在，用干涉仪技术测量的距离要比使用常规光源测量的大几个数量级。而且，利用激光辐射具有更高亮度以及更好方向性和空间相干性的优点，运用调制光束，还有可能把测量扩展到更远的距离。利用持续时间极短、峰值功率极高的激光脉冲，高精度的光雷达已成为可能。例如，用光雷达测量地球和月球上两个选定点之间的距离，均方根误差只为15厘米。

1. 引 言

激光器为测量各种物理变量（例如角位置、角速度、流体速度、横向位移等）提供了新技术（见CLEA文摘，1969）。然而，它对计量学的主要贡献是在测量长度。运用激光束进行精确测量，可用以下三种不同方法进行，它们的测量范围几乎是互为补充的：

1. 干涉仪技术（在空气中，测长范围可达50米左右）；
2. 采用调制光束的遥测技术（约从100米到50公里左右）；
3. 光雷达（10公里以上）。

1111095

. 1 .

上面所说的测量范围还可能超过。干涉仪技术已使用在抽空的1000米光路上；而光雷达系统则已应用在从地球到月球的距离上，这个距离大约为38000公里。此外，如在本章中将要讨论到的，测量距离的上下限均取决于所要求的准确度。

上述三种方法都是依据测量电磁波在待测距离上的传播时间；因此，欲求出真实的几何距离，需要按照空气折射率进行修正，这个问题将在本章最后部分(1-6节)讨论。因为干涉仪技术最直接地利用了激光源的相干特性，所以，它从激光器的不断发展中受益最大。在采用调制光束的遥测技术中，激光器所起作用就不是那么有决定性了。由Fizeau在光速实验中首先提出的这种方法，在激光器出现以前，一直是采用普通光源(Jordan 1966)。然而，由于激光器具有更高的亮度，故采用激光光源有助于增加测量距离和提高精度。虽然采用普通的脉冲光源制成光雷达，原则上是可能的。然而，只是在发明了Q开关激光器之后，光雷达才成为现实。在此情况下，激光器的作用是作为发射高亮度的极短光脉冲的光源。所有三种技术都可提供关于空气折射率的数据。为此，人们先用别的方法很精确地测出两点间的距离，再测量激光在这两点间的传播时间。

2. 激光器和长度标准

以受激发射为基础的振荡器能够提供长度和时间的标准。例如，最近Mielenz等人(1968)将He-Ne激光器的频率稳定到可见光波段的原子跃迁中心，然后将这频率与 ^{86}Kr 波长标准进行了对比。测得该激光器波长为 $\lambda_{\text{He-Ne}} = 632.9914$ 毫微米，准确度为 $\pm 1 \times 10^{-7}$ 。由于存在着几种扰

动的影响（将在下面讨论），该稳频 He-Ne 激光器所显示的长期稳定性及复现性并不比 Baird(1963) 所介绍的 ^{86}Kr 标准（约 0.3×10^{-8} ）高。

Shimoda(1968) 用充甲烷的外部吸收池，使运转在 3.39 微米跃迁上的 He-Ne 激光器获得了稳定。他的实验结果证明，有可能得到比 ^{86}Kr 标准更高的精确度。这种可能性已由 Barger 等人 (1969) 证实，他们使频率独立稳定在甲烷跃迁上的两只激光器投入运转，获得的复现性为 $\pm 1 \times 10^{-11}$ （亦见 Hall 1968）。同样，Hanes 等人 (1969) 利用碘吸收池通过在 He-Ne 激光器 6329 埃跃迁上对照进行稳频，获得了复现性达 $\pm 2 \times 10^{-9}$ 的可喜结果。虽然，最终确定这些激光器的稳定性和复现性尚需做更多实验，但是，预期在将来某个时候，稳频激光器将列为新的原始长度标准不是没有理由的〔亦见米制定义咨询委员会 (Comité Consultatif Pour la Définition du Mètre) 的报告，1970〕。

1964年，Ramsey(1964) 和 Vessot(1964) 证明了氢脉泽的稳定性和复现性可与铯频标或铷频标相比拟。自那时以来，在频标中，经过对比，氢脉泽已经取得了主导地位（见 Peters 1965a, 1965b）。

从计量的观点看来，对新的长度标准的主要要求是：

- (1) 比现有的标准有更好的复现性；
- (2) 有很高的长期和短期稳定性；
- (3) 易于和其他标准进行对比，例如，为了校准次级标准，就要进行这种对比。

关于第 (3) 点，人们通常认为，稳频激光源可用于干涉仪技术与其他标准源进行既精确又十分方便的对比 (Mielenz 等人 1968a)，例如，精确校准任何尺寸的次级标准，其尺寸

可达激光源的相干长度（1-3节将讨论源的相干特性对干涉仪技术的限制）。

直到大约一年以前，稳频激光源的长期稳定性和复现性都还没有达到 ^{86}Kr 长度标准的水平。只要简要地考察一下激光源赖以稳定的主要因素，就不难理解这一情况的原因。第二分册第五章对稳频技术作了更详细的讨论（亦见Gronchi等人1970年的文章）。

在“无源”稳定法中，激光器支架是与外界扰动（例如温度和压力的变化，声波或冲撞等引起的振动）隔绝的。另一方法则利用光频基准，对照该基准来稳定激光器。可能有以下两种基本选择：

(a) 在基准频率上提供谐振的光干涉仪。

(b) 提供发射或吸收谱线的两个尖能级之间的原子跃迁。

如果让光学干涉仪在经过仔细控制的恒压和恒温环境下运转，它就能提供具有极好的短期稳定性和良好的长期稳定性的基准频率。稳定性问题与无源稳定法中出现的问题相类似。然而，由于在光学谐振腔里没有热源（激光器等离子管），因而稳定性问题不是严重问题。但在这种方法中，很难实现复现性，因为基准频率取决于几何长度，而几何长度却远非是绝对标准。但要进行一系列交叉对比却不容易一直保证恒压恒温的环境。而为了用它定义一个标准，一系列的对比又是必需的。

另一方面，原子跃迁提供了绝对基准。然而，它们是否有效，取决于它们对扰动效应是否敏感，因为有些扰动效应会使得基准频率的稳定性和复现性降低。原子跃迁受到的扰动通常会使得吸收或发射谱线展宽、引起不对称或者漂移。当

然，对计量应用来说，漂移是最麻烦的问题。稳定而尖锐的吸收谱线或发射谱线通常由气体介质提供。在气体介质中，孤立原子的条件已接近达到了。气体中存在的扰动主要是由下列过程引起的：

- (a) 碰撞展宽和漂移；
- (b) 斯塔克效应；
- (c) 塞曼效应；
- (d) 由于出现等离子体而产生的效应。

碰撞引起的谱线展宽，本质上是由于电磁场与原子系统之间的相互作用发生中断而造成的。对于低气压下的光学跃迁来说，这种展宽通常比多普勒展宽小得多。由于原子间的近程相互作用，使原子能级的能量随原子间距而变化，从而产生谱线漂移。在高温及高压下，即当碰撞更频繁时，这种效应以及不对称性便增强〔见 Margenau 等人 (1936) 和 Breene (1961) 的文章〕。由于存在电荷分布，引起了局部电场，从而引起斯塔克效应。这一效应或者导致谱线展宽，或者使谱线漂移。这种效应发生在毛细管放电的场合，例如，由于向放电管壁的双极扩散，而出现了径向场 (Hernqvist 等人 1967)。由杂散磁场引起的塞曼效应通常是不太重要的。在好几种稳频方案中它已得到运用 (见第二分册第五章)。等离子体的存在引起了好几种扰动效应。最重要的是等离子体的不稳定性，它引起放电电流的幅度起伏 (Boldwijn 等人 1964) 和激光器输出强度的起伏。如果有接近于激光器频率的其它原子谱线，这些谱线就会引起与电流有关的漂移，因此便可观察到其他的扰动效应 (Arrathcon 等人 1962)。

可以用好几种不同的方法，使激光器相对于原子谱线实现稳频。与低频鉴频器相似，所有方法都是利用相对于基准

的瞬时频偏成比例的误差信号。然后，激光器频率用伺服放大器修正，后者通常驱动支撑一个激光器反射镜的压电陶瓷元件（见第二分册第五章）。用这种方法能使激光器频率与基准一致。其精确度取决于信噪比，通常为所用线宽的一个小分数。激光器的长期频率稳定性能甚至还要好些。通常采用相位解调技术（锁相放大器）来改善信噪比。

在所有利用“兰姆凹陷”效应的方法中，基准原子跃迁均由激活材料本身提供。采用6328埃 He-Ne 激光器，可以达到相当高的稳定性，一天之内变动不超过 10^9 分之几。在更长的时间间隔内，由于氦气渗漏引起的压力变化，在6328埃跃迁上将产生相当于 ≈ 20 兆赫/毛的频率漂移（Sosnowski 等人 1969），在1.15微米跃迁上，将产生相当于 ≈ 4.1 兆赫/毛的频率漂移（Shimoda 1964, 1965）。

基准频率可由激光器外的吸收池来供给。例如，对于 He-Ne 激光器，可以用低气压的纯氖使其运转，因为不需要反转。虽然这种条件可以使基准频率的稳定性得到改善，但仍需要激励氖气，因为吸收存在于两激发能级之间。与兰姆凹陷稳定法相比，采用 Ne 吸收池稳定法（White 1967）实际上已使长期稳定性获得了改善。此项技术中的某些困难是由于池的吸收系数低造成的。当有一种与激光气体不同的气体（这种气体几乎具有同样的跃迁频率和作为下能级的基态）的吸收谱线时，就有可能使吸收作用更强，而又不致产生激励。对于与3.39微米 He-Ne 激光器有关的 CH_4 来说，情况正是这样（Shimoda 1968）。这种谱线可以在低气压（减少碰撞效应）和没有激励（没有等离子体效应，减少或者没有斯塔克效应）的条件下运转。

当把吸收池放入激光器谐振腔时，如果激光器在吸收谱

线的中心振荡，那么吸收饱和便优先发生，这种过程导致吸收凹陷，即导致在谐振时激光器输出功率中出现很陡的最大值 (Lee 等人1967, Letokhov 1968)。较低的气压可用于内吸收池，因为激光器输出对内部损耗十分敏感。正如本节开始时叙述的那样，用内部甲烷吸收池，在3.39微米跃迁上，这种方法导致了 $\pm 1 \times 10^{-11}$ 的稳定度；用内部 I_2 吸收池，在6328埃跃迁上，得到了 $\pm 1 \times 10^{-9}$ 的稳定度 (Hanes等人1969)。

最后，应该提到一种有发展前途的新方法，它能使光频相对于射频标准得到稳定 (Bay 等人1968)。

稳频激光器已使计量学取得了好几项改进。将来必将导致更大的改进。在计量学中采用更精确的长度标准，将能够更加准确地测定光速和进行其他的基本物理实验。

3. 干涉仪技术

这种技术是将被测距离与基准光源（例如光谱灯或稳频激光器）的波长进行比较。通常是用迈克耳逊干涉仪来进行这种比较，即将被反射镜 M_2 反射的电磁波的相位与被反射镜 M_1 反射的电磁波的相位进行比较 (图1)。两个波之间的相位差是由于传播时间不同所造成的。其大小可由下式给出

$$\begin{aligned} \phi &= 2\pi\tau c/\lambda_{真空} = 2\pi [L_2 \langle n \rangle_2 - L_1 \langle n \rangle_1] / \lambda_{真空} \\ &= 2\pi d / \lambda_{真空}, \end{aligned} \quad (1)$$

式中， L_1 和 L_2 是干涉仪两臂的几何长度， $\langle n \rangle_{1,2}$ 分别是沿光路1或2的相位折射率的平均值， $\lambda_{真空}$ 是基准光源的真空波长。平面波之间的干涉在屏幕上产生直线条纹图样，反之，