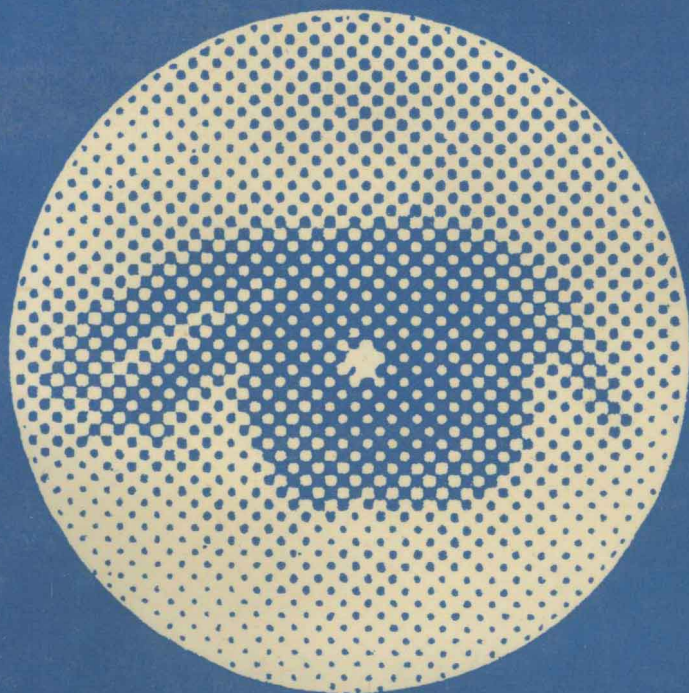


激光眼科手术 作用机理与临床应用

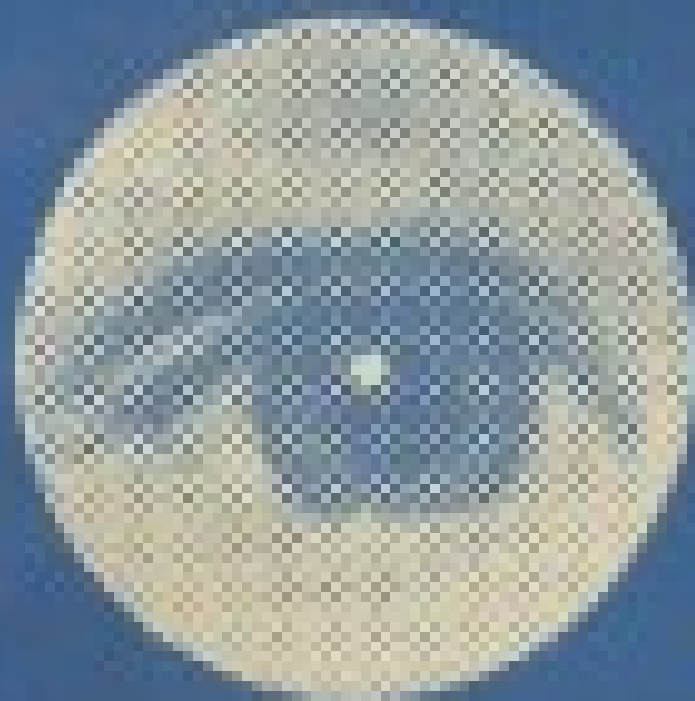
倪晓武 陆建 李永年 编著
贺安之 审阅



兵器工业出版社

激光眼科手术 作用机理与临床应用

周成武 编 著 李永平 编著
傅耀文 审稿



人民卫生出版社

激光眼科手术作用机理与临床应用

倪晓武 陆建 李永年 编著

贺安之 审阅

兵器工业出版社

(京)新登字 049 号

内 容 简 介

在激光眼科手术中如何确定适应症, 如何提高疗效是手术的关键问题, 也是激光眼科学中的基本问题。本书对激光在眼科手术中的作用机制及临床应用进行了讨论。在激光眼科手术时, 决定手术疗效的因素既有激光技术和激光参量, 又有眼组织的性质, 所以本书前三章的内容是激光的产生和激光的特性、眼科常用的激光设备和眼组织的物理性质; 第四章到第七章分别讨论了激光手术中的几种作用机理: 热的、机械的、电磁场的和其它生物作用机理; 最后的三章对激光在临床的实际应用进行了讨论。

本书突出现代性和实用性, 内容深入浅出、便于自学; 有一定的图表和数据便于查阅并对实际工作有参考价值。可供激光生物工作者、眼科医生和有关激光学科的科研人员阅读; 也可供在军事上研究激光武器和激光防护的科研人员参考。

激光眼科手术作用机理与临床应用

倪晓武 陆 建 李永年 编著

责任编辑 苏雪琴

*

兵器工业出版社出版发行

(北京市海淀区车道沟 10 号)

南京华东工学院印刷厂印装

*

开本: 787×1092 1/32 印张: 10.56 字数: 271 千字

1993 年 3 月第 1 版 1993 年 3 月第 1 次印刷

印数: 1~1500 册 定价: 8.00 元

ISBN 7-80038-618-X/R·4

前 言

激光医学作为激光应用领域的一个重要方面,在我国已有近 20 年的历史,并已在临床应用中取得了引人注目的成果。对某些疾病,激光有独特的疗效,是其他医疗手段所无法比拟的。如氩离子激光治疗视网膜裂孔和眼底血管病变,已列为眼科的常规疗法;Nd:YAG 激光治疗后发障,一年要做 20 万余病例。但是,我国在激光医学基础研究方面一直是薄弱环节,并明显地妨碍了激光医学向更高层次的发展,因而大部分临床实践只是在经验指导下进行的,并无理论根据。这种摸索前进的研究方法,将使激光医疗应用停留在感性认识的初级阶段。因而,对激光眼科手术中如何确定适应症、如何提高疗效等有关手术关键问题的回答单凭经验就不够了,其答案涉及激光对组织乃至细胞作用机理的根本性研究。因此,大力开展激光对动物和人体组织作用规律和作用机理的研究,为激光医学提供科学理论和依据,在我国尤感迫切。本书就是编著者根据国内外已有的激光与眼组织相互作用机理研究成果,结合我们在同类研究中的成果,试图在激光眼科学的基础研究方面起点抛砖引玉的作用。

在激光眼科手术时,决定手术疗效的因素既有激光技术和激光参量,又有眼组织的性质,所以作为基础知识,本书第一章介绍了激光的产生和特性,其中也对所涉及的光学知识进行了简单的介绍;第二章着重讨论了眼科常用的激光器件和元件;第三章对眼组织的物理性质,包括光学特性和热学特性进行了较系统的讨论。作为本书的重点,第四章到第七章分别讨论了激光手术中的几种作用机理:热的、机械的、电磁场的和其它生物作用机理。最后的三章是对激光在眼外部、眼前节和眼底疾病的临床应用进行了讨论。

本书力求以物理机理为基础，突出现代性和实用性，内容安排深入浅出、便于自学；在介绍眼科常用的激光器件和元件时，贯彻为我所用的精神，尽量反映国内外激光医疗器械的最新成果，便于实际工作者参考；有一定的图表和数据，有利于查阅并对实际工作有参考价值。可供激光生物工作者、眼科医生和有关激光学科的科研人员阅读；也可供在军事上研究激光武器和激光防护的科研人员参考。

随着激光眼科学基础研究的进一步深入发展，本书中的有些模型或理论难免有缺陷，敬请读者不吝指教。

编著者

1993 年 1 月于南京

目 录

第一章 激光的产生和特性	1
§ 1.1 光的基本知识	1
§ 1.2 激光辐射基础	19
§ 1.3 激光的形成	26
§ 1.4 激光的单色性	34
§ 1.5 激光的相干性	40
§ 1.6 激光的方向性	42
§ 1.7 激光的亮度	47
§ 1.8 激光的电场强度	49
§ 1.9 激光应用的若干技术	49
第二章 眼科常用激光器械及元件	55
§ 2.1 激光器及其分类	55
§ 2.2 气体激光器	56
§ 2.3 固体激光器	71
§ 2.4 染料激光器	81
§ 2.5 眼科激光治疗仪的结构	85
§ 2.6 激光手术用接触镜原理与结构	92
第三章 眼的物理性质	99
§ 3.1 人眼结构	99
§ 3.2 眼的光学特性	105
§ 3.3 眼组织的热学特性	117

第四章 激光的热作用	122
§ 4.1 热传导的基本定律	123
§ 4.2 激光热凝	135
§ 4.3 激光汽化	141
§ 4.4 激光切割	145
§ 4.5 视网膜损伤的热平衡模型	149
§ 4.6 人眼热损伤模型	150
第五章 激光的机械作用和强电磁场作用	158
§ 5.1 光压	160
§ 5.2 表面汽化时的反冲压	160
§ 5.3 体内汽化时的膨胀压	164
§ 5.4 体膨胀引起的声波	166
§ 5.5 激光引起压强瞬变对眼组织的生物效应	170
§ 5.6 电致伸缩	175
§ 5.7 受激布里渊散射和特超声	177
§ 5.8 自聚焦和自陷	179
§ 5.9 光学击穿	185
§ 5.10 等离子体和冲击波的作用	189
§ 5.11 激光的其它电磁场效应	203
第六章 激光的其它作用	206
§ 6.1 光化学原理和定律	206
§ 6.2 激光敏化作用	208
§ 6.3 血卟啉衍生物光动力学治疗眼内肿瘤	212
§ 6.4 激光生物刺激作用	213
§ 6.5 光烧蚀	220

第七章 激光参量对眼组织的影响	224
§ 7.1 波长因素的影响	224
§ 7.2 激光辐射剂量的影响	228
§ 7.3 激光对眼的损伤	234
§ 7.4 激光工作方式、模式、相干和偏振特性 对生物作用的影响	242
第八章 外眼部疾病的激光治疗	245
§ 8.1 睑腺炎	245
§ 8.2 翼状胬肉	246
§ 8.3 角膜新生血管	248
§ 8.4 单纯疱疹性角膜炎	248
§ 8.5 睑内翻	250
§ 8.6 倒睫的激光治疗	251
第九章 眼前节疾病的激光治疗	253
§ 9.1 激光眼内手术的模拟操作和手术指南	253
§ 9.2 屈光不正的激光治疗	257
§ 9.3 软性白内障	264
§ 9.4 白内障囊外摘除术前的激光前囊膜切开术	265
§ 9.5 老年性核性白内障透明皮质激光乳化术	266
§ 9.6 无晶体眼和人工晶体眼后囊膜混浊	268
§ 9.7 后囊膜皱褶激光松解术	272
§ 9.8 后发性白内障	274
§ 9.9 先天性青光眼	276
§ 9.10 激光虹膜切除术	278
§ 9.11 激光小梁成形术	281
§ 9.12 玻璃体激光松解术	284

§ 9.13 瞳孔移位矫正术	286
第十章 眼底疾病的激光治疗	288
§ 10.1 视网膜血管瘤	290
§ 10.2 视网膜静脉周围炎	293
§ 10.3 Coats 病	295
§ 10.4 脉络膜血管瘤	298
§ 10.5 黄斑部脉络膜新生血管膜	301
§ 10.6 糖尿病性视网膜病变	304
§ 10.7 中心性浆液性视网膜脉络膜病变	311
§ 10.8 视网膜裂孔	316
§ 10.9 视网膜劈裂症	323
参考文献	327

第一章 激光的产生和特性

激光眼科手术就是利用激光作为手段，对眼组织的疾患进行治疗，因其治疗方法独具特色，治疗效果异常显著，为医学事业的发展创立了新领域。在激光手术中，决定手术疗效的重要因素之一就是激光的特性。因此，本章将对激光的特性进行讨论。为使讨论得以深入，就必须对激光的产生进行必要的介绍，同时也对与本书后续讨论有关的光的基本知识进行简要的介绍。本章的最后一节是对激光医疗中常用的激光技术问题，如聚焦、能量测量等进行介绍。

本章中除 § 1.2 和 § 1.3 之间有联系外，各节内容相对独立，可分开阅读或选择感兴趣的部分阅读。

§ 1.1 光的基本知识

根据统计，在人类通过触觉、味觉、嗅觉、听觉和视觉等方法得到的客观世界的知识中，来自视觉的占 70% 以上。而视觉的感知，是由光来实现的。因而，我们的祖先就试图回答“人为什么能看到物体”这样的问题，开始了对光的研究。随着人类对光的本质认识的深入，形成了光学学科。本节将对光学学科中最基本也是最重要的一些原理和定律进行讨论，为突出物理概念并限于篇幅，将省略大部分数学推导过程，有兴趣了解详情和进展的读者，可参阅有关书籍或论文。

一、光的微粒说和三条基本规律

早在我国先秦时代（公元前 470~400 年）的《墨经》中，就有关于光的传播性质的最早记载。《墨经》中有八条是关于光学方面的，其核心内容是利用小孔成像现象，论述了光是沿直线传播的这一基本规律。

除了光在均匀介质中是沿直线传播的规律外，古代科学家也从实验测量中归纳出光的反射定律。当光从物体表面法线之一侧射到表面上时，将从法线另一侧反射出来（见图 1-1）。当入射光线与反射光线位于同一平面上时，入射角 i 等于反射角 i' ，即有

$$i = i' \quad (1-1)$$

而光从一种介质进入另一种介质时的折射现象虽在古代亦已发现，但寻找入射角与折射角之间的规律，却经过 1000 多年的岁月，直到 1621 年才被发现。光的折射规律是：若 i_1 是光在介质 n_1 中的入射角， i_2 是光在介质 n_2 中的折射角，则当入射光线、法线与折射光线位于同一平面时（见图 1-2），有

$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2 \quad (1-2)$$

以上所述的光的直线传播、反射和折射规律三条基本规律与下面要介绍的光的独立传播规律一起，构成了几何光学的基础。

17 世纪上半叶，人们弄清了光线的几何性质，但对光的本性

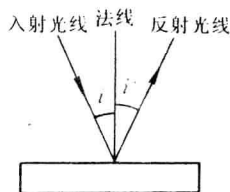


图 1-1 反射定律的示意图

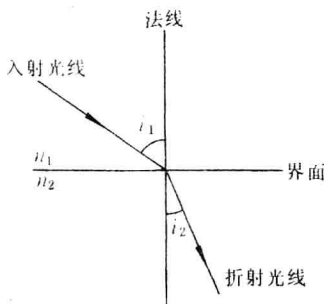


图 1-2 折射定律的示意图

的认识还是未知的。牛顿 (Newton) 从力学观点出发, 提出了光的微粒说。他认为光是由很小的物质颗粒组成的, 这些质点从发光体中飞射出来, 犹如一群飞行的枪弹; 这种微粒如此之轻, 以致于地球对它们的引力根本表现不出来, 因而在均匀介质中按力学规律作匀速直线运动。牛顿认为, 这些微粒能够自由地穿过透明物质, 它们撞在视神经上就引起视觉。

光的微粒说在解释直线传播和反射规律时, 还未遇到困难, 但在解释折射规律时就显得牵强了。而在解释光的独立传播现象时, 就更显得无能为力了。尽管如此, 由于牛顿的盛名, 光的微粒说居然统治了 100 余年, 而能较好地解释微粒说不能解释的实验现象的波动说丝毫未引起重视。

二、光的波动说和独立传播规律

与牛顿同时代的惠更斯 (Huygens) 在一篇论文中用波动原理解释了一些常见的光学现象, 其解释简洁明了, 而且与实验结果非常符合。例如, 他把光理解为一种波动后, 能很好地解释光的独立传播现象。假设在均匀空间中有二束光线向前传播, 这二束光线在相遇区域可能发生波的干涉迭加或简单的迭加, 而通过公共区域后, 各自继续向前传播的情况就和另一束光线不存在时的单独传播的情况一样。光的独立传播规律是很重要的, 否则我们在观察某个目标时将会因有其它光源的存在而受到影响。光的独立传播规律是几何光学的四大支柱之一。

光的波动说就认为光是一种波动, 因而波动具有的一些特性光都具有 (例如, 干涉和衍射等), 并且光波不必一定要借助介质才能传播, 它可以在真空或宇宙空间中传播。

在理解时应该抛弃对质点运动已习惯了的轨迹概念, 这也是波动说和微粒说之间的根本区别所在。在此应当指出, 几何光学中光线的概念含有轨迹的意思, 即认为光能是沿着光线有轨迹地

传播的，但光线的概念只是波动过程在一定条件下的近似，并非是严格的概念。

惠更斯在研究了波阵面传播的问题后，建立了一个原理，根据这个原理，可以从已知波阵面的位置求出其后各时刻波阵面的位置。

我们知道，波是从波源发出的，而一定大小的波源可视为点波源的集合。因此，我们把点波源作为波动过程的基元细胞来进行分析和推演。一个振动的点源将向外发出球面波，若图 1-3 中原始点波源 Q 引起了波阵面 S 上各点的振动，那么 S 上所有各点也就成了新的波源，为与原波源 Q 区别，将它们称为次波源。从每个次波源也将发出球面波，因而在研究波阵面 S 经过一段时间后传到什

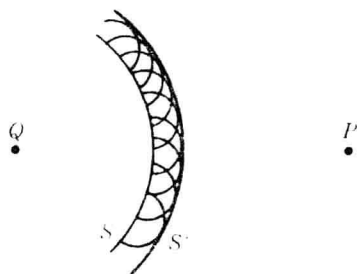


图 1-3 惠更斯原理的图解

么位置时，只要把 S 上各点视为次波源，从它们分别向外发出的球面波（称为次波）的总效果中寻找答案即可。

惠更斯原理说，波阵面上任意点均可视为新的次波源；这些次波源发出的次波的包迹^①，就是新的波阵面。因此，根据惠更斯原理可知，图 1-3 中的波阵面 S 上各次波源发出的次波的包迹就是新的球面 S' 。惠更斯还说，光线是垂直于波面的法线族。

惠更斯原理的第一个成功之处是从波动观点解释了光的反射、尤其是折射定律，并且还建立了折射率与光的传播速度之间的关系为

① 包迹是微分几何中的一个术语，一族曲线的包迹就是该曲线族的公切面。

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2} \quad (1-3)$$

式中： n_1 、 v_1 分别为光在第 1 种介质中折射率和速度， n_2 、 v_2 分别为光在第 2 种介质中的折射率和速度。由式 (1-3) 可见：光在光密物质 (n 较大) 中比在光疏物质 (n 较小) 中传播得慢。而真空的折射率为 1，因此，光在某种物质中的传播速度 v 与它在真空中的传播速度 c 之间有如下关系

$$v = \frac{c}{n} \quad (1-4)$$

其中 n 为该物质的折射率。对于透明物体， $n > 1$ ，所以光在其中传播的速度比在真空中小。注意到：式 (1-3) 和 (1-4) 至今仍然适用。

为了研究光的波动性的各种表现，必须讨论如何描述光源所发出的光波场。在此，我们采用下述经典模型来讨论：发光物质内原子发生一次能级跃迁（有关能级跃迁的概念将在 § 1.2 中详细讨论）看做一个单振子在一段时间内发生了振动，从而向外辐射一列波。

在光学中，不同的振动频率是与不同的颜色相对应的。因而，一个频率为 ν 的简谐振动可以写成

$$f(t) = A \sin(2\pi\nu t + \delta) \quad (1-5)$$

式中， A 为振幅， δ 为初位相。在理想状态时，振子发出的波列是无限长的，因而上式中的 t 有 $-\infty < t < +\infty$ 。实际的振动只发生在有限长的时间内，例如 $-\tau/2 \leq t \leq \tau/2$ ，则式 (1-5) 应写成

$$f(t) = \begin{cases} A \sin(2\pi\nu t + \delta) & \text{当 } |t| \leq \tau/2; \\ 0, & \text{当 } |t| \geq \tau/2 \end{cases} \quad (1-6)$$

这是在下面讨论光的干涉时必须明确的概念。但是，在此我们仍从式 (1-5) 出发进行讨论。

若将点波源置于一个理想透镜的前焦点处，则由点波源发出

的球面波经透镜后就成为平面波，而此平面波给问题的讨论带来了方便。若取坐标轴 x 垂直于平面波，且指向与平面波的传播方向相同，并给定一个坐标原点 O 和一个初始时刻 $t=0$ ，如图 1-4 所示。则平面波可表述为

$$E(x, t) = A \sin(2\pi\nu t - 2\pi \frac{\nu}{v} x + \delta) \quad (1-7)$$

式中： x, t 为自变量， A, ν, v, δ 皆为常量。上式表示，光场 E 是空间坐标 X 和时间 t 的函数，即为时空变量的函数。

为分析式 (1-7) 中诸量的物理意义，首先将空间变量 x 视为参量而取定值，

这时式 (1-7) 中的 $-(2\pi \frac{\nu}{v})x + \delta$ 为常数参量，用 θ 表示，则式 (1-7) 成为

$$E(t) = A \sin(2\pi\nu t + \theta) \quad (1-8)$$

此式与式 (1-5) 形式完全相同，就是简谐振动表达式。这就是说，在空间任一固定点，光场 E 都在随时间 t 作简谐振动，其振幅为 A ，频率为 ν ，初位相为 θ 。对于不同的空间点 x ， θ 值不同。

再令式 (1-7) 中 t 作参量而取为定值，这时 $2\pi\nu t + \delta$ 为常量，用 ψ 表示，则式 (1-7) 成为

$$\begin{aligned} E(x) &= A \sin[-(2\pi \frac{\nu}{v})x + \psi] \\ &= A \sin[(2\pi \frac{\nu}{v})x + (\pi - \psi)] \end{aligned} \quad (1-9)$$

此式与式 (1-5) 也相似，也是一个简谐变化，不过这一变化是随空间位置 x 的分布函数。这说明，若在某一时刻 t 将光场“冻结”，

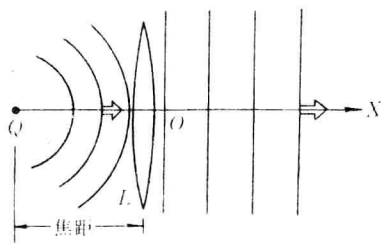


图 1-4

则光场 E 随 x 呈正弦式分布, A 仍为振幅。

式 (1-9) 中的 ν/v 与式 (1-8) 中的 ν 处于同样地位, 因而也应是一种类似频率的物理量, 称之为空间频率, 以 f 表示

$$f = \frac{\nu}{v} \quad (1-10)$$

它与时间频率 ν (单位时间内振动的周期) 对应, 是单位长度内呈正弦变化的波的周期, 单位为 $1/\text{mm}$ 。

在时间性的振动中, 振幅变化一个周数所需的时间为周期 T , 即有

$$T = \frac{1}{\nu} \quad (1-11)$$

与之对应, 在空间正弦变化中, 下列数值

$$\lambda = 1/f = \frac{v}{\nu} \quad (1-12)$$

亦可视为空间周期, 即为振幅变化一个周期所占的长度, 这就是波长。

若让式 (1-7) 中 x 和 t 都作变化, 来研究某个波阵面的行为。所谓波阵面, 就是式 (1-7) 中的整个位相表达式 [即式 (1-7) 中括号内表达式] 保持常量的那些空间位置的集合, 即

$$\Phi = 2\pi(\nu t - \frac{\nu}{v}x) + \delta = \text{常量} \quad (1-13)$$

由于 ν 、 ν 和 δ 均为常量, 故由上式得到

$$x = \nu t + x_0 \quad (1-14)$$

式中 x_0 为一常量。式 (1-14) 表示一个速度为 v 的匀速运动。因可以说, 平面光波场中任一波面的位置皆以速度 v 沿 x 轴方向匀速推进。由此也可明了 ν 的物理意义: ν 表示波面传播的速度, 简称波速。

若令

$$\omega = 2\pi\nu \quad (1-15)$$