第一章　激光诊治胃肠肿瘤学简史

第一节　激光医学简史

激光医学历经 30多年，可粗分为三个阶段：60 年代为基础研究阶段，临床应用少；70 年代，基础研究进一步发展，其成果积极用于临床，临床应用较为突出，有学者认为，70 年代可简称为临床应用阶段；80 年代则形成了一门新兴的交叉学科——激光医学。70 年代，激光医学应用向医学各分支学科渗透，应用更加广泛，发展更加成熟。

一、60年代基础研究阶段

1960 年美国人梅曼（Maiman TH）制造了第一台红宝石激光器，因当时没有激光功率计，就用激光照射兔眼的视网膜，通过生物效应对眼的损伤程度来粗测激光的能量和功率，从而拉开了激光用于生物学和医学的序幕；1961 年美国人用红宝石激光对剥离的视网膜进行焊接，开创了激光医用的先声；同年 Solon，Zeret 和 Eichler 等人在美国发表了“激光的生物作用”、“光脉冲引起的眼损伤”及“相干光源产生的光凝固”等首批激光医学论文。历史表明，在激光的各种应用中起步最早的是激光在医学方面的应用。

从美国开始的激光基础医学研究很快地于 1962 年传到前苏联，1965 年传到中国，1966 年传到日本。研究方向主要是激光生物效应，激光对眼、皮肤、肿瘤和细胞的作用等，既有实验研究又有理论研究。1964 年从美国开始，相继在英国、前苏联等国召开了激光生物医学方面的学术会议；60 年代末出版激光医学专著 10 余本；发表论文几百篇。上述工作为激光临床应用做了某种准备。临床方面，1963 年首次做了用红宝石消除尸体血管粥样斑块的尝试，而后几乎停顿了 20 年，其原因部分是由于缺乏相应的技术和设备。用激光焊接剥离的视网膜的实验研究很早，但真正的临床应用，则始于 1968 年。

我国 1961 年由长春光机所研制了首台红宝石激光器，因此当时我国在激光器的研制上是走在世界前列的。1965 年北京同仁医院开始了红宝石激光视网膜凝固的动物实验。

二、70年代临床应用阶段

激光临床应用继眼科后，1970 年 Bopohuha 等应用 He－Ne 激光治疗高血压等内科疾病；同时 CO_2 激光也获得较大发展，促进了激光在外科临床上的应用；据 1971 年统计，全球 5万名病人接受激光手术，治愈率达 76%。1972 年 YAG 激光已用于胃肠、泌尿外科并用于内镜实验；1973 年 Plog 用激光代替针灸做了实验；1975 年制成了 He－Ne 激光针用于经络穴位治疗疾病；同年 YAG 激光内镜用于胃肠道急性出血凝固治疗。1976 年 Hofstetter 用 YAG 激光切除膀胱肿瘤；Leheta 首次用 YAG 激光作神经外科手术；1978 年 YAG 激光开始用于胸外科、皮肤科、五官科、妇科。从此激光临床应用较全面地铺开。

第一届国际激光外科会议于 1975 年 11 月 5～6 日在以色列召开。虽然这次会议仅几十

需要全本请访问 www.ertongbook.com

位代表，在范围上主要是欧美诸国。但它却发表了以往数年激光医学及生物学研究的成果，展示了激光医学发展的新阶段；对以后激光医学临床与基础研究及有关激光器械的发展都起到了促进作用。

第二届国际激光外科会议于 1977 年 10 月 23～26 日在美国达拉斯举行。这次会议的内容较第一次广泛。除 CO_2 激光外，还有少数 Ar^+ 及 YAG 激光应用及研究报道，出席人数超过 100 位，国家也增多了。

第三届国际激光外科会议于 1979 年在奥地利的格拉兹召开。出席人数及国家较前更多，这次会议突出的内容为脑外科的激光应用研究报告。三次国际会议，促进了世界范围内的激光医学交流和发展。以后每两年召开一次国际激光外科会议。

整个 70 年代，激光临床应用论文平均每年发表近 70 篇，医用激光器销售逐年上升，每年平均达数千万美元，掀起了世界范围激光临床应用的热潮。

在我国，70 年研制成功激光视网膜凝固机，1971 年上海第六人民医院发表了首篇红宝石激光凝固视网膜的临床应用报道。 1973 年上海医科大学附属耳鼻喉科医院利用国产 CO_2 激光成功地施行了外科手术；同年中山医科大学利用自制的 CO_2 激光治疗机开展了在外科、皮肤科、五官科、妇科、理疗科、针灸科和肿瘤科等方面的治疗。1974 年开始研制激光内窥镜系统；1975 年开始用 He－Ne 激光治疗头痛、哮喘、高血压、遗尿病 同时用 He－Ne 激光穴位麻醉作胃、甲状腺和拔牙等手术。1977 年我国在武汉召开了首届全国激光医学学术交流会，宣读了 80余篇论文，有 23个省、市，243 个单位，270 多名专家出席会议，会后形成了全国性的激光医学应用、研究热潮。

70 年代末，我国已拥有 10 余种常用激光医疗器，能治疗 250 多种疾病，有近百万患者接受数百万次激光治疗。我国激光治疗的病种病例之多，超过了国外总和，使全球瞩目。

三、80 年代形成激光医学新学科阶段

80 年代已形成了一门新兴的边缘科学—— 激光医学。国内外已建立了激光医学的教学、科研和医疗的专业队伍；90 年代，我国中山医科大学和第三军医大学已招收激光医学硕士生和博士生 不少国家有了“ 激光门诊 ”和“ 激光医院 ”国际性、地区性、国家级和省、市级的激光医学学会和专委会如雨后春笋成立，定期开会宣读论文，十分活跃 世界卫生组织成立了“ 激光医学咨询委员会 ”国内外激光医学杂志、丛书、专著和教科书基本上系列化 国际上医用激光器已形成大产业，产品 40 多种，年销售量已突破 10 亿美元 激光医学已深入人心，激光已被公认为“ 治病之光 ”。

1985 年初在夏威夷召开的太平洋地区激光医学会议上，美国 Utah 大学著名激光医学专家 Dixoa 指出所谓激光医学成熟指标：眼科 10，胃肠、妇、耳鼻喉科 6，皮肤及矫形外科 5，神经科 4，泌尿科 3，肺、普外科 2，血管外科、光动力学疗法 1，同时“ Lasers and Applications ”杂志载文指出：各科医生中对医用激光已有正确认识的比例是：眼科 65％，耳鼻喉科 30％，胃肠科 25％，妇科 20％，皮肤及矫形外科 15％，神经科 14％ ，泌尿科 7％ ，普通外科 2％，其余肿瘤、口腔和心血管尚处于实验阶段。

80 年代，特别是国外正在对激光血管成形(动脉斑清除)术、激光光动力学疗法、准分子激光角膜切开术、激光微血管和神经吻合术、 CO_2 激光光纤、蓝宝石(其融点 2 030℃ ，硬度为 9(金刚石为 10)，透射率为 85％，折射率为 1.77)头激光器、激光粉碎胆结石、激光机的多种激

光输出和多功能激光内窥镜等，进行积极的研制、试验并逐步转入临床应用。医用激光器与电子计算机、光纤、图像分析、摄像录像、荧光光谱、激光光谱和超声等新技术相结合，为激光医学展示着美好前景，激光诊断和治疗相结合也是激光医学发展的方向。

目前成功地用于眼科的激光角膜成形术（即 PRK）已成为国内外最为热点的项目，193 nmArF准分子激光可消融角膜表面几十微米的厚度，以达到矫正屈光（近视、远视、散光）的目的。术前先测出角膜曲率，将其数据输入计算机，最后由计算机控制激光束从眼轴中心开始由小到大进行切削，其临床成功率高达 93% 以上，其优点是热损伤很小，仅 1 μm，切削后角膜透明。上述方法用于治疗轻度近视最好。对于中、高度近视则用激光基质内角膜磨镶术（LASIK）进行治疗，即将角膜揭开，在角膜基质内进行激光切削，在前部角膜基质内进行激光切削，以保持前部角膜组织的正常结构。

1991 年解放军总医院激光科用 Cu 蒸气激光（510.6，577.0 nm ）加光敏剂治疗鲜红斑痣，已取得不损伤表皮的良好效果， 40 例病人除 2 例因药量过低无效外，其余 38 例的异常红色均明显至完全消退，无 1 例瘢痕形成，随访 2～12 个月无 1 例复发，对病变呈紫红色和有增生者仍有良效。

用Cu 蒸气激光直接治疗鲜红斑痣，显效率达 96% ，但激光扫描照射时要均匀不要重迭，因重复照射可导致瘢痕。用 755 nm 的红色激光治疗蓝色的太田痣能收到满意的效果。

超短脉冲射频 CO_2 激光器（每个脉冲的能量可达 0.5 J，平均功率 1～100 W，脉宽 < 1.4 ns）是新型的第三代 CO_2 激光器，因其热局限在病灶不影响正常组织，故炭化也不会产生。此激光可将全层表皮和部分真皮削除以达到除皱的目的，还可除疤痕、汗腺瘤、浅表性色素，也可做双眼睑、去除眼袋脂肪、矫正眼睑下垂、头发移植手术等。

1984年用 He－Ne 激光血管内照射治疗闭塞性脉管炎在前苏联获得成功后，先传入东欧，1991 年引入我国并掀起高潮，它对循环系统、免疫系统及神经系统疾病有较好的疗效。

激光血管成形术受阻，原因是平滑肌细胞异常增生所引起的再狭窄的问题尚未解决。有人试图用牛磺酸、心痛定或脂质体抑制平滑肌的再生来解决问题，但正在试验阶段。

一机多用型激光治疗机应运而生，如 Schwany 公司推出的金绿宝石， Nd：YAG，Ho：YAG（2.1 μ），Er：YAG（2.94 μ）三波段治疗机。英国 Laser Lines 公司多波长（0.75 μ，1.06 μ，1.32 μ，2.1 μ，2.94 μ）脉冲固体激光器。Lambda Photo－metic 公司的 CO_2/Nd：YAG组合激光机。Abiomed 公司的双波长（1.06 μ，1.9 μ）激光治疗机，可用于神经外科，其 1.9 μ 波长用于精确切割，1.06 μ 则用于愈合。美国 Coherent 公司推出了四波长多功能美容机，包括 Q 开关 Nd：YAG，Q 开关翠绿宝石，Q 开关倍频 Nd：YAG 和可调脉宽倍频 Nd：YAG，用以治疗难治的太田痣、鲜红斑痣纹身等疾病。国内尚无上述产品。

激光革新了传统的显微成像术，作为微操作手段的激光微束与光镊已作为细胞融合、转基因、染色体操作的工具；激光流式细胞仪促进了分析细胞学的发展；用激光分选技术建立了世界上第一个染色体库。用激光高速定序 DNA 的分子结构，X 激光亚微全息术和 X 激光显微成像术，将揭示人类生命的奥秘。半导体激光向多波段发展将为医用激光器的微型化拓宽大道。

激光医学经过 30 余年的发展，虽已长足直进，但尚处在青年时代，美国外科手术中使用激光刀在 80 年代占 1%，将来可能扩展到 50% 。应该指出的是激光是一种先进的治疗和诊断手段，但它不可能完全取代其他的治疗和诊断手段，而且它本身尚需不断发展和完善。国内外学

者普遍认为，现在基础研究还远落后于临床应用，由于激光医学基础研究的复杂性，需要多学科的长期协作攻关，才可能逐步解决。

（唐建民）

第二节　激光诊治肿瘤的回顾

自 1960 年 Maiman TH 在世界上首次发明发明红宝石激光器以来，医学是激光应用最早的领域之一。激光在眼科和肿瘤领域的应用则是激光在医学中应用最早的专业。肿瘤，尤其是恶性肿瘤是严重威胁人类健康的疾病，在很多国家肿瘤是引起死亡的主要原因之一，治疗肿瘤的方法很多，有的已取得了可喜的成绩；但目前还没有非常有效能完全根治恶性肿瘤的方法。激光由于自身的诸多优点，发明后便用于肿瘤的诊断治疗和研究。 1963 年 Mcguff 采用红宝石激光治疗黑色素瘤的动物模型，肿瘤全部消失，病理检查未发现有肿瘤残留。 1964 年 Mcguff、Goldman 等将激光治疗成功地用于人的皮肤黑色素瘤，并取得了良好的效果。 1964～1970 年间 Helsper、Mcguff、Minton、Riggle 等将激光治疗分别与钴放射治疗、 X 线射放治疗、抗癌药环磷酰胺等联合用于黑色素瘤、乳腺癌等肿瘤治疗研究，其效果优于单用一种方法治疗。但 Riggle 在 70 年代初对脉冲激光治疗肿瘤的研究认为：脉冲激光作用肿瘤时，可使肿瘤飞溅到 8 英尺外，仍具有活性，且癌组织受强脉冲激光挤压可推入邻近的血管和淋巴管，从而引起医原性肿瘤转换与扩散。因此认为脉冲激光不宜于肿瘤治疗。在以美国为代表的医学界，激光治疗肿瘤进入低潮，这以前亦未有将激光用于胃肠肿瘤治疗及研究报道。

连续 CO_2 激光由于克服了脉冲 CO_2 激光治疗肿瘤中可能导致的医原性远处转移，人们逐渐开展连续 CO_2 激光治疗肿瘤的研究和临床应用。当初人们仍主要利用激光对肿瘤组织的凝固、气化来治疗肿瘤。1970～1975 年期间，Kaplan、Polanyi、Goldman、Jako 等报道了大量采用连续 CO_2 激光治疗体表和浅体腔肿瘤的研究和临床应用，我国的刘德民 1973 年也成功地采用 CO_2 激光治疗舌、唇、鼻腔、眼眶等部位的肿瘤，取得了良好的效果。1973 年 Kaplan 曾用 CO_2 激光作为光刀对乳腺纤维瘤进行切除术，与采用普通手术刀切除对比失血明显减少。同期出现 Ar^+、Nd:YAG 激光治疗肿瘤的报道。但这些治疗均是采用激光的热效应，虽然 Ar^+、Nd:YAG 等激光可达到切除、气化或碳化肿瘤组织，起到杀癌作用。但激光对肿瘤的选择性作用很差，它既可杀伤肿瘤细胞，还可损伤正常组织，且治疗中一大局限在于人们采用激光治疗肿瘤操作时，仅能对看得见的肿瘤进行治疗，对有的微小病变或远处转移灶、还未引起组织改变时则无能为力；尽管有的报道治疗效果良好，但由于治疗时间短，病例并未长期观察随访，因此从本质上讲，这之前开展的激光治疗体表、浅体腔肿瘤，对边界清楚的良性肿瘤来说，效果满意，但对边界不清，尤其是恶性肿瘤来说，还是一种姑息治疗。而且大部分肿瘤还在体内，其治疗相当局限。随着 1973 年第一台具有导光纤维传输系统的激光内窥镜问世，为激光诊治进入体腔，尤其是胃肠道开辟了新的途径。同时 70 年代初 Diamond 采用光动力学疗法治疗动物恶性肿瘤，获得成功，因光动力学疗法可选择性地杀伤肿瘤，把激光治疗恶性肿瘤推向一个崭新阶段。

（陈祖林）

第三节　光动力学疗法治疗肿瘤简史

激光出现的历史仅 30 余年，而光动力学作用已有近一个世纪的历史。早在 1900 年 Raab 发现草履虫在含丫啶橙染料溶液中可被可见光杀死，这是最早的光动力学作用现象。 1903 年 Tappenier 等采用伊红做光敏剂开展治疗肿瘤研究，因伊红对肿瘤的亲和的特异性和效率差，且照射光为普通光，效果差、副作用大而未能付诸临床。 1909 年 Hausman 第一次描述了光动力学作用——光动力学疗法(photodynamic therapy,PDT) 静脉给予光敏剂后一定时间,光敏剂在肿瘤组织内有较多滞留，这时用适当波长的光照射肿瘤组织可使之坏死。此后， Auler、Banzer、Policard、Korbler 等对光动力学作用机理、应用特点、卟啉特征等进行了较深入和广泛的研究，为其临床应用提供了必不可少的基本参数。但初制品血卟啉效果差，副作用大，未找到合适的其他光敏剂和特异的光，研究未有大进展。

60 年代初期，Liposon 将血卟啉用化学处理制成血卟啉衍生物 (hematoporphyrin derivative,HpD),它在肿瘤内滞留多、杀伤癌细胞能力强、用量少 同时随 1960 年第一台红宝石激光器研制成功，各种波长激光器相继诞生，光动力学治癌效果大大提高，用于诊断肿瘤准确率达 85% 以上，且可用来诊断隐型早期癌变和异型增生，动物模型的治愈率达 90% 以上。PDT 迎来了一度辉煌。Dougherty、Tomson、Kelly、Snell、Diamond 等随之进行了大量的 PDT 治疗肿瘤，尤其是恶性肿瘤的细胞和动物等临床前期研究。1974 年后，Dougherty 博士采用 PDT 对乳腺癌、子宫癌、基底细胞癌、鳞状上皮癌、黑色素瘤等 10 余种癌症进行诊治，收到了非常满意的结果,于 1978年报告其治疗结果和 PDT 临床应用经验。1980 年以后日本 Hayata 应用染料激光器为光源,HpD 为光敏剂，治疗了近百例早期肺癌、胃癌和食道癌，两周内可杀伤癌细胞，治愈率为 90% 他还第一次把 PDT 应用治疗胃肠道肿瘤。随后世界各地迅速掀起了一股 PDT 治癌热潮,中国也不例外,在‘六五’‘七五’期间,国家投入了大量资金,组织了全国 10 余个单位参加 PDT 治疗有关的攻关研究,在基础研究、临床应用方面取得了一些成就 特别是 PDT 临床应用方面，病例数和治疗癌症的种类居世界前列，受到国际同行较高评价。

随着光动力学疗法治疗肿瘤的基础研究和临床应用的广泛开展，有关的学术活动、国际交流日益活跃。1984 年，我国便组织召开了“全国血卟啉——激光学术会议”，为推动我国的 PDT 治疗肿瘤研究和临床应用起到了积极的作用。国际上，1986 年成立了国际光动力治疗学会 每两年都要举行有关光动力学内容学术会议。同时美国、加拿大、荷兰、日本等国政府都先后正式批准 PDT 可用于肺癌、食管癌、膀胱癌等的治疗。PDT 治疗肿瘤已逐渐得到社会和病人的认可，已走上正规化的道路。

(陈祖林　周传农)

第四节　激光内镜诊治胃肠肿瘤

最早将激光用于胃肠道疾病研究的是 Goodale 等 1970 年应用硬管胃镜,以 CO_2 激光治疗犬的胃糜烂出血，效果良好。因当时还没有传输激光的光纤，所以还不能将激光用于可屈纤维内镜。至 1973 年 Nath 报道研制成功可传导高能 Ar^+ 激光纤维，激光纤维内镜才进入到动物

需要全本请访问 www.ertongbook.com

实验和临床应用阶段。从这时起才真正开始激光诊治胃肠肿瘤的时代。

最早应用于内镜的激光仅 Ar^+激光和 Nd:YAG 激光。在大量动物实验的基础上，德国的 Fruhmorgen于 1975 年 6 月第一次将激光用于胃肠道出血凝固治疗获得成功。随后他和 Kiefhaber等将 Ar^+、Nd:YAG激光广泛地应用于胃肠道血管瘤、胃糜烂出血、食管静脉曲张等治疗，取得了良好的效果，且积累了丰富的经验。我国自 1977年开始进行动物实验研究，1981年萧树东首先报道了 Ar^+ 激光和 Nd:YAG 激光成功治疗上消化道出血，因 Nd:YAG激光在止血效果、功率方面都优于 Ar^+激光，故 Nd:YAG 激光内镜应用更为广泛。

80年代初，Takemoto、Lambert、Fleischer等都先后报道用 Nd:YAG激光内镜治疗食管癌、胃癌的成功经验，其治愈率在 90% 以上。同时 Nd:YAG 激光治疗胃息肉、肠道息肉，疗效几乎达 100% ，尤其适宜于胃肠道宽底息肉。1984 年，Hanter等应用 Ar^+激光对结肠癌、直肠癌及伴有梗阻者进行了治疗，从此开始了治疗结直肠癌的研究和临床应用。至 1986 年美国就有近 1 000 例激光治疗结直肠癌病例报告。我国的齐德成 1986 年报道采用激光治疗 3 例低位直肠癌。1982 年日本 Hayata还首次报道将光动力学疗法用于胃肠道恶性肿瘤的治疗，治愈率在 90% 以上。这为激光治疗胃肠道肿瘤又提供了一条新途径。我国的金懋林、黄英才、萧树东等 80 年后也先后开展 PDT 治疗胃食管癌、胃癌等研究及临床应用，在国内引起广泛重视。北京、上海、河南、吉林、湖北、浙江、天津、四川、山东等省市先后开展了激光内镜及 PDT 治疗胃肠道肿瘤的研究和临床应用。

1985 年上海的叶衍铭、杨远龙等通过内窥镜对胃癌、直肠肿瘤的荧光光谱分析，发现恶性肿瘤出现有特征性荧光光谱，据此可用来诊断胃肠道癌。 1988 年萧树东等采用内镜氩离子激光激发自体荧光诊断胃癌 19 例，17 例出现特异荧光峰，与病理切片检查比，符合率达 89.5%。激光内镜在胃肠肿瘤诊断方面显示了良好的应用前景。80 年代开始，已有大量关于弱激光刺激作用增强机体免疫力研究，有的已用于临床，如弱激光脾区照射、血管内照射等都可显著增强机体的某些免疫功能，从而达到增强胃肠肿瘤患者抗癌能力。但其疗效还不肯定，需进一步研究。

总之，尽管激光内窥镜用于胃肠疾病诊治已有 20 余年历史，用于诊治胃肠道肿瘤也有 10 余年历史 现世界各国，尤其是我国已报道大量的激光(包括 PDT) 诊治胃肠道肿瘤成功的病例，其病例数在国际上也是领先的；同时也总结出了一整套诊治胃肠肿瘤的经验和失败教训等，认识到激光内镜治疗胃肠肿瘤的的某些优点是其他方法无可比拟的。但其应用远没有达到成熟的地步，有些方面刚起步，还有待进一步研究和总结临床经验教训。我们国家，由于种种原因，将已有的方法大量应用于临床，却缺少必要的基础研究，这使我们许多临床医务人员、科技工作者深感需要加强研究。

(陈祖林)

参 考 文 献

1 唐建民等主编 .实用激光医学 .重庆 科技文献出版社重庆分社，1989

2 朱平 .国内激光医学现状和国外差距 .激光集锦，1997;7(1):23

3 许松林 .激光医学与激光工业 .激光集锦，1997;7(1):16

4 陈祖林等大肠癌光动力学治疗研究的困惑与曙光 .医学与哲学，1994;15(7):41

5 萧树东等.纤维内窥镜激光的研究概况.见：国外激光医学上海：上海科学技术出版社，1980
6 吴思恩，徐国祥主编.激光肿瘤学.广州：广东科技出版社，1993
7 陈祖林等大肠癌光动力学治疗研究进展.国外医学肿瘤学分册，1994;21(4):228
8 Daniell MD, *et al*. A history of Photodynamic therapy. Aust N Z J Surg, 1991;61:340
9 Karanov S, *et al*. Photodynamic therapy in gastrointestinal Cancer. Lasers Surg Med, 1991;11(5):395
10 Hayata y, *et al*. Application of Laser in cancer diagnosis and treatment. Med Imag Inform, 1982;14:19
11 Nath G, *et al*. Transmission of a powerful argon laser beam through a fibreoptic flexible gastroscope for operative gastroscopy. Endoscopy, 1973;5:213
12 沈明大肠癌的 Nd:YAG激光治疗. 中国激光医学杂志，1993;2(1):48
13 胡运彪.激光在内镜应用的近况. 内镜，1994;11(3):157
14 陈祖林等.激光治疗早期胃癌进展. 中华消化内镜杂志，1998;5(3):186

第二章　激光的发光机理

激光(laser) 是受激辐射式光频放大器(light amplification by stimulated emission of radiation)的简称。我国曾直译为莱塞,也称死光,又叫“光受激发射”。1964年根据钱学森教授的建议,正名为“激光”。港、澳、台则直译为“镭射”。

激光就是“受激辐射”发光,但是为了实现光的受激放大,必须使工作物质发生“粒子数反转”,通常在粒子数反转的介质两端加入“谐振腔”,就可以得到一束强激光。因此为了弄清激光的发生机理,就应了解“受激辐射”、“粒子数反转”、“三能级工作物质”和“光学谐振腔”这些概念,现分述如下。

第一节　受激辐射

如图 2-1 所示：如果原子处于高能级 E_2 上,当自发辐射频率为

$\upsilon=(E_2-E_1)/h$　　$h=6.63\times10^{-34}J\cdot s$(h 为普朗克常数)

的外来光子逼近它时，就可能受光子的作用，使原子从 E_2 跃迁到低能级 E_1，同时又多发射一个相同的光子，这就是受激辐射。输入一个光子，经受激原子跃迁($E_2\rightarrow E_1$),放大为二个光子，其光能增加一倍。所以受激辐射就是放大辐射，每一个受激原子就是一个光量子放大器，这就是受激辐射的微观机理。相反当原子在低能级 E_1 时,它将吸收靠近它的 $\upsilon=(E_2-E_1)/h$ 的外来光子,而跃迁到高能级 E_2，称为受激吸收。通常在一定温度下，物质中的原子处在低能级 E_1 的数目,多于处在高能级 E_2 的数目，因此受激吸收的原子占优势，而受激辐射的原子占劣势，所以我们看到的出射光总是小于入射光。显然，为了使出射光大于入射光，就必须使处于高能级 E_2 的粒子数超过低能级 E_1 的粒子数，这就是粒子数反转。

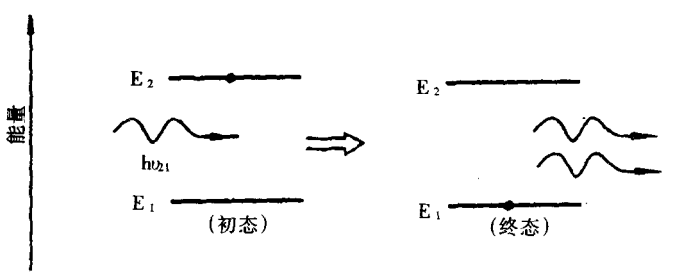


图 2-1　受激辐射

第二节　　粒子数反转

某一高能级 E_2 的原子数多于某一低能级 E_1 的原子数时，就称为粒子数反转。为实现工作物质的粒子数反转，通常的办法是光激励、放电激励和化学激励等。现以红宝石激光器的工作物质 Cr^{3+} 为例，来说明光激励使粒子数反转的过程。

第三节三、四能级工作物质

红宝石的主要成分是 Al_2O_3，其中含有万分之 3.5 的 Cr^{3+}。在 Al_2O_3 基质中 Cr^{3+} 有三个特殊能级状态（如图 2－2 所示）。

在一定温度下，大部分的 Cr^{3+} 处在基态能级 E_1 上，当用脉冲氙灯照射红宝石时，使处在基态能级的 Cr^{3+} 大量激发到吸收能带 E_3 中，而 E_3 的平均寿命很短（10^{-7}s），因此 E_3 中的 Cr^{3+} 就很快地跃迁到 E_2 中，在 E_2 中的平均寿命较长（10^{-3}s），称为亚稳态。相对地说 $E_3 \rightarrow E_2$ 的跃迁极快（10^{-7}s），而 $E_2 \rightarrow E_1$ 的跃迁极慢（10^{-3}s），因此 Cr^{3+} 在 E_2 中就愈聚愈多，若氙灯照射的光足够强时，就可使 E_2 中的 Cr^{3+} 数目超过 E_1 中的 Cr^{3+} 数目而形成粒子数反转。这时，当有 $\upsilon=(E_2-E_1)/h$ 的光子通过红宝石时，出射光的能量一定会超过入射光的能量，实现受激辐射放大。

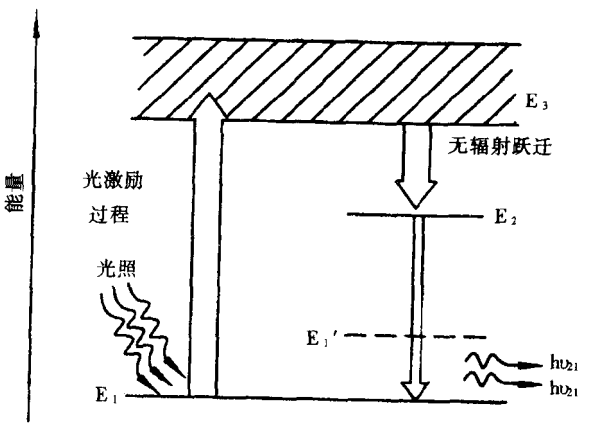


图 2－2　红宝石粒子数反转的建立

Nd:YAG 激光等四能级工作物质，它与三能级系统不同的是在 E_2（亚稳态）与基态 E_1 之间还有一个能级 E_1'，它通常是空能级，因此 E_2 与 E_1' 之间更容易实现粒子数反转，而且能量转换效率高于三能级系统。

实现粒子数反转的三、四能级工作物质都可以产生光受激放大，但这种放大很有限，无实用价值。为了产生足够强的激光，还必须借助光学谐振腔。

第四节　　光学谐振腔

以红宝石激光器为例，红宝石一般制成圆棒状，直径 1 cm 左右，棒长 5～20 cm。棒的两端磨得平整光滑，并且互相平行，在两端镀上反射膜（或单独制成反射镜），一端反射率接近 100%，称为全反射面，另一端约为 90%，称为部分反射面。这一对相互平行的反射膜（或反射镜）就构成光学谐振腔。如图 2－3 所示：当用脉冲氙灯照射红宝石，使它产生粒子数反转时从 $E_2 \rightarrow E_1$ 的 Cr^{3+} 离子所发出的光，其方向是任意的。凡是偏离谐振腔轴线的光子，就会从侧

面逸出到腔外；而沿着轴线方向的光子，将在腔内继续前进。光子在前进的过程中，就会与腔内其他受激离子发生作用，使之发生受激辐射，因此，光子数不断增加。这些光子就是下一次受激辐射的引发因素。当腔长适合驻波条件时，由于受激辐射在两反射面之间往复反射（即所谓光振荡），使得光束愈来愈强，这就产生了光放大作用，并从部分反射面透射出一束强光，这就是激光。

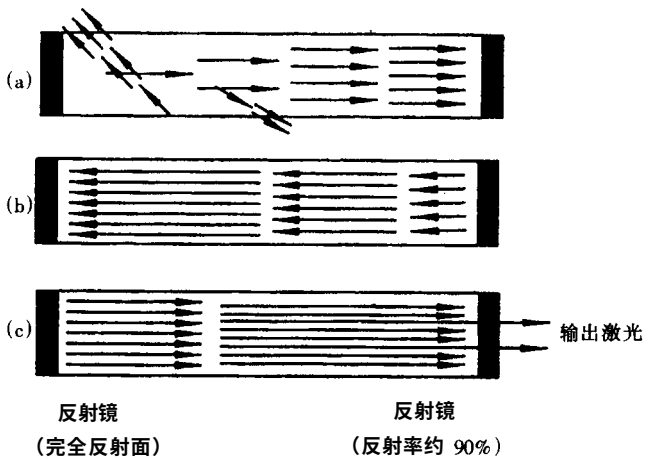


图 2－3　光学谐振腔示意图

由于受激辐射的特点和谐振腔的作用，输出光束的发射方向、频率、位相和振动面等都是一致的，因此激光具有亮度高、方向性好、单色性好、相干性好等特点。

根据原子中内层电子的受激辐射原理，已发明了 X 激光，并准备用强大的 X 激光建立反导弹系统。美国学者认为 υ 射线激光器的发明也有希望，由于受激核的亚（介）稳态的寿命可长达几百年，能大规模储存能量，每升核材料可使受激发射 υ 光子的功率达 3×10^{21}W，这样的激光器提供了不同于裂变和聚变的第三种核能源。自身电子激光器从理论上说，它能产生由微波到 X 线的连续可调激光，现在正在实验室加紧研制。

由上可知，一般激光器是由具有亚稳态的工作物质、激励能源和光学谐振腔三部分组成。

激光器不是能量放大器，它的能量是由激励能源转化为在波长和空间上均高度集中的光子团能量。所谓在波长和空间上都高度集中，也可以用光子简并度描述，光子简并度就是同一量子状态所含的平均光子数。它在数值上等于线度为波长的光源，在单位时间、单位立体角内发出的单位频宽的光子数目。光源的光子简并度，从微观上反映出光源的单色亮度。它表示有多少个性质完全相同的光子共处于一个量子状态（即一个波型）之中。例如：单模（见下节）激光器，若功率为 1 毫瓦(mW)，频宽为 1 赫兹(Hz)，光子能量 $h\upsilon=3\times10^{-12}$尔格(erg)，则光子简并度为 10^{16}量级。如以 $\lambda=500$ nm 来估算，常用激光器的光子简并度数值如下：一般气体激光器为 $10^{3}\sim10^{12}$，一般固体激光器为 $10^{11}\sim10^{13}$，Q 突变功率激光器为 $10^{14}\sim10^{17}$。太阳是普通光的光中之王，对波长为 500 nm 的太阳光来说其光子简并度仅为 8×10^{-3}左右 对于其他的人造普通光而言，其光子简并度也近于或略高于太阳光相应值，它们的值远小于 1。

可见，激光比普通光源的光子简并度高出十几个数量组，这表明激光的单色亮度高，有大量光子处于相同的量子状态，都处于同一种光模式（即同一波型）中。这种同模式的光有相同的运动方向、位相、频率和偏振，所以又是相干光。激光的高光子简并度能很好地说明激光的高单色亮度、高单色性、高相干性、高定向性以及激光的非线性效应等。

应该指出，在工作物质的增益系数足够高的情况下，也可以不用谐振腔，只要对工作物质进行强激励使之造成粒子数反转，这时它也可以对自发辐射的行波单程放大，也能获得相干性、方向性强的光束，这种情况称为“超辐射”。超辐射是介于激光和自发辐射荧光之间的一种现象。从目前来看，利用谐振腔获得激光振荡是普遍情况，而不用谐振腔来获得相干光则是特殊情况。如激活 N_2 分子系统可观察到超辐射，但这是很个别的。至于从控制光束特性这方面的作用来看，谐振腔则是不可取代的。

第五节　模式　纵模　横模

所谓“模式”就是光波（电磁波）在腔中的振荡方式。模又分为纵模和横模。现分述如下。

1.纵模光波在光学谐振腔中沿纵向（即轴向）传播时振动方式称为纵向模式，简称纵模。

我们知道，当光波在腔镜上反射时，入射波和反射波将会发生干涉，多次来回反射就会产生多光束干涉，为了在腔内形成稳定振荡，要求干涉的结果使光加强，即产生相长干涉。要得到相长干涉，就要求其波从某一点出发，经腔轴方向来回一周再回到原始位置时，应与初始波同相，也就是要求其光程差 $2nL$ 为波长的整数倍。

$$2nL = K\lambda \qquad 2-1$$

式中 n 为腔中工作物质的折射率，L 为腔长（即两反射镜间距离），K 为正整数，λ 为光波波长。上式又称为光腔的驻波条件，它告诉我们只有满足光腔驻波条件的光波才可能形成激光。光的频率 υ、波长 λ 和光速 C 三者的关系为：

$$\upsilon = \frac{C}{\lambda} \qquad 2-2$$

将式 $2-1$ 代入上式：

$$\upsilon = \frac{KC}{2nL}$$

$K=1、2、3$ 等自然数，每个 K 值对应着腔内可能起振的光波频率数，即对应着一个纵向模式，所以 K 值就是纵向可能产生的模式数。$K=1$，表示腔内只有一个频率的光在振荡，则称为纵向单模，或称单纵模。$K=2$ 以上表示腔内有两个以上频率的光在振荡，这时激光的模式称为多模，或称为多纵模。

光腔的纵模数还要受到受激辐射频宽等条件的限制。

2.横模　光腔内光束在横截面上的稳定光场分布称为激光束的横向模式，简称横模。纵模无法直接看到，只能用仪器来测定；横模却可直接看到（对可见激光而言），如将 He－Ne 激光器输出的 632.8 nm 的红光垂直投射到白屏幕上，当调节外腔式光学谐振腔的反射镜的距离

需要全本请访问 www.ertongbook.com

和角度时，就可在屏幕上看到几种光图样，如图 2－4所示。通常用符号 TEMmn 来表示横模的模数,其中 TEM 代表横电磁波。角标 m、n 分别表示垂直于光轴的平面上 X、Y 方向的暗斑数,如图 2－4 中 TME_{00}为基模,整个亮团没有暗斑,其中央最亮,然后向边沿柔和减弱,这是一种很理想光束，全息照相则要求较好的横向基模； TEM_{10}表示在 X 方向有一暗斑，Y 方向没有,余类推。

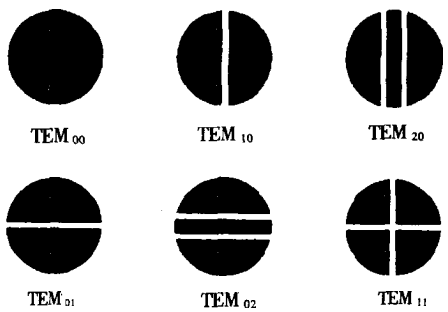


图 2－4　横模及标记

（唐建民）

第三章　激光的特性及医用激光器

激光与普通（自然）光都具有波粒二象性，这是它们的共同点。激光具有非常广泛的应用，是由于它具有普通光无可比拟的特点，概括起来说，激光具有两高（频率高、亮度高）三好（方向好、单色性好、相干性好）的特点。

第一节　频率高、信息容量大

激光的频率高达几百兆兆赫，比短波、微波还有高一百万至一千万倍，因此用激光通信，信息容量极大。这正如收音机的短波段要比中波段的电台数目多，是一样的道理。一条激光通信线路，理论上可同时传输一百亿路电话或一千万套电视。如此巨大的通信容量，是目前其他任何通信系统所无法比拟的。因此人们预言：亿万台激光器，将把世界联系起来，形成一个巨大的信息网，即一个全球性的激光村。美国等国政府已立法：以后只许铺设光纤通信系统，不许再铺设电缆通信系统。我国专家指出：如用电缆使我国达到现在美国的通信水平，将全世界的铜都用完也还不够。因此我国极为重视光纤通信，现在我国的光纤通信水平只落后先进国家 5 年，大家知道，人体器官、组织、细胞和生物大分子发出的信息总量极大，如要传输这些信息最好的手段是光通信，也许人类有一天，通过光通信，会实现对这些信息的监护和遥控。

第二节　亮度高

一台红宝石巨脉冲激光器的亮度竟比太阳高出一百亿倍，聚焦后的焦点处产生几百万至几千万度高温、几百万个气压和几千万伏特·厘米$^{-1}$（$V\cdot cm^{-1}$）的强电场，并可将能量集中到 0.1 μm的线度上。在时间上也可把激光集中到飞秒的瞬间，让它突然射出，可产生上亿度高温和上亿个大气压。利用激光的高温高压强电场，可以研制激光武器和实现可控核聚变。在医学上常用中等功率的激光束切割组织和骨质，炭化和汽化肿瘤、疣、痣等。

第三节　方向性好

激光的发散角极小，只有 2 分，聚焦后只有几秒。把光射到 384 000 km的月球上，光束照射面积的直径也只有 3.2 km；若探照灯光线能射到月球上的话，照射面积的直径竟达 40 000 km。人类即将在月球设立居民点，无疑地球至月球间的通信，将通过方向性极好的激光来实现，并可通过中空的激光束向月球输送氧气。激光微束由于方向性极好，可准确对细胞和 DNA等生物大分子进行手术，从而改变细胞染色体的结构，修补基因的某些缺陷，重组 DNA，甚至创造新的生命。正像美国著名未来学家阿尔温·托夫勒（《第三次浪潮》的作者）所预言的一样，人类将在信息社会之后，进入以改造人种为目的的“第四次浪潮”。

第四节　单色性好

自然光中最好的单色光是氪灯所发出的光，谱线宽度 $\triangle\lambda=0.047$ nm 而氦氖激光的 $\triangle\lambda=10^{-6}$ nm，比氪灯光纯几万倍，是当今颜色最纯的光。这个特性的最重要的用途，是可以最精确地测量物体的长度，所以国际计量局决定“米”的长度用激光的波长定义。用激光光波长作标准，测量几十米的长度，误差仅为零点一微米。显然生物大分子中原子间的结构和距离，也只有用激光尺，才能精确测量。

第五节　相干性好

根据量子力学的测不准关系和多普勒效应等原理，任何原子分子都不可能发出绝对的单色光，因而也没有绝对的相干光。但相对而言激光是最好的单色光，因而也是最好的相干光。

利用激光相干性好的原理，可使物光和参考光在干板上相干涉，从而得到全息照相底片，再利用激光或白光照在底片上，就可使物光的‘波前再现”，从而展示出原物体的三维立体全息像，并具有明显的视差效应。

今天全息照相已渐普及，全息电影也已成功。目前超声全息摄影用激光照射再现已受到重视，并已用于临床。现在 X 激光已经出现，人们可以期待，三维全息术和激光全息显微术必将用于临床和基础医学研究，那时，在我们的面前将展现组织、细胞和生物大分子的三维的动态图像，而使 X－CT，B 超和 γ 照相这三大影像诊断相形见拙。

第六节　医用激光器

医用激光器可以根据激光穿透软组织（除眼屈光介质外）的深度来分类，大体上可分成 3 类。

一、低穿透深度激光

这是由于组织对这类激光具有强吸收低散射所致。其激光波长为小于 300 nm 的紫外线和大于 2 000 nm 的红外线，软组织对它们的反射仅为 4%～5% 。对此波段组织可近似地视为黑体，几乎全部光能被组织吸收且作用范围浅而窄。如 F（波长为 157 nm）、ArF（193 nm）、KrCl（233 nm）、KrF（248 nm）、XeCl（308 nm）等准分子紫外气体激光器。这类激光作用于组织时，由于光子能量大，光子能打裂生物长链分子，成为挥发性的碎片，然后从表面烧蚀掉，这称为烧蚀光分解作用；但同时还伴随少量的热作用。它们对组织的损伤仅为 1～10 μm，且切口光滑，波长愈短其热损伤愈浅甚至到无。它们用于对组织精细雕刻，如 ArF（193 nm）用于眼角膜精细雕刻加工以矫正眼屈光不正。由于准分子激光庞大昂贵有毒，对组织有光诱变作用，特别是 260 nm 的紫外线，为 DNA 和 RNA 的吸收峰，有组织诱变和致癌的可能性。因此有的学者建议用安全的红外激光 Er：YAG（2 940 nm）取而代之，由于其波长正好靠近水的吸收主峰 2 950 nm，能为组织的水充分吸收，又无光化诱变作用，对组织的热损伤为 10～20 μm，所以它是用于组织精细加工中很有潜力的激光器，现已用于皮肤精细去皱。 Ho：YAG（2 100 nm）激光特别引入注目，其优点是可以通过光纤传输，有取代 CO_2 激光（10 600 nm）之势，其组织热损

伤在 CO_2 和 Nd:YAG 之间，现在成功地用于心肌血运重建术（心肌打孔）和消除动脉粥样硬斑。Tm:YAG(2 010 nm、1 960 nm)，THC:YAG(2 150 nm)和 Ho:YSGG(2 209 nm)等红外激光由于它们都是固体激光器（CO_2 外），波长＞2 000 nm，它们可用于表浅组织的治疗。

二、强穿透深度激光器

这是由于组织对这类激光具有强散射和低吸收所致（散射系数比吸收系数约大 2 个数量级）。称为低光学吸收窗口（简称光窗）。

第一光窗的波段为 600～1 300 nm，这是由于组织吸收体的电子跃迁弱和红外吸收（吸收主峰为 2 950 nm，次峰为 5 400 nm）不强所引起的。

第二光窗的波段为 1 600～1 850 nm ，是因水对其透明所致。

光窗波段的激光对组织的作用范围深而广，能量衰减 1%时，近红外光(750～1 300 nm)能透过 10 mm 的软组织，常用于深部组织的治疗。

在现有的激光器中，Nd:YAG(1 064 nm)、Nd:YLF(YLF＝YLiFu，波长 1 050 nm ，国内尚无)、半导体(1 500、1 300、980、904、850、830、810、808、780 nm)和翠绿宝石(755 nm)激光器穿透组织最深，半导体(700、670、650、630 nm)、红宝石(694 nm)、He－Ne(632.8 nm)、Au 蒸气(630 nm)和 Kr^+ 离子(647.1 nm) 等激光器其穿透深度次之。由此可见用于光动力学治疗的光敏剂其吸收峰波长应迭在光窗波段、最好迭在 750～1 300 nm 波段，由于光窗波长穿透组织的深度有限，因此对于大而深的病灶（如大肿瘤）都须将激光光纤插入病灶内进行接触照射才能有效。

三、中等穿透深度的激光器

这是由于组织对此类激光器的吸收和散射介于上述二者之间，即吸收和散射相当，没有一方占压倒优势。其波段为 450～590 nm 。相应的医用激光器有闪光灯泵浦脉冲染料(585 nm)，Cu 蒸气(577、510.6 nm)，Kr^+(568 nm)，Ar^+(514.5、488 nm)，KTP、倍频 Nd:YAG 和半导体(532 nm) 等激光器。上述激光可穿透表皮到达真皮，但不能到达真皮底层和皮下。

半导体激光器由于体积小、重量轻、结构简单、坚固耐用、效率高(10%～60%)、无须水冷却，现已获得的激光波长已从 330 nm 的紫外线一直扩展到 34 000 nm 的远红外线，半导体阵列可获得成百上千瓦的连续功率，其研究成果迅速地从实验室走向市场，并占领了激光市场总产值的 1/4，它有取代其他激光器的趋势。

自由电子激光器是一种新型的高科技产品，它有令人瞩目的优点。

(1)它无须固、液、气体作为工作物质，波动的自由电子束就是工作物质。

(2)它将高能电子束能量转变成激光的能量。无固定的能级局限，其频率范围很宽，可产生从毫米波、微米波、可见光、紫外光直到 X 激光。能实现一机产生所有激光波长的理想。

(3)由于没有工作物质，因此没有工作物质的内部热损耗、介质吸收破坏和自聚焦效应，也没有中间能量转换环节，所以输出功率和能量转换效率可以很高。

我国 863计划已列入自由电子激光的研制，北京和绵阳的自由电子激光器已经出光，可惜光源不够稳定，输出波长有限。如它一旦研制成功，又能降低成本的话，它将使所有的激光器黯然失色。

多波长能量、光斑和频率可调激光器的研制成功，可以在一个疗室内进行多种疾病的治

疗。第一章已介绍，国外不少厂家已有这种产品。

表 3-1 常见医用激光的波长

激光器	He-Ne	Nd:FAG	CO_2	Ar离子	红宝石	Cu蒸气	Au蒸气
波 长	632.8	1 064	10 600	488.0	694.3	510.6	630
(nm)				514.5		577.0	
激光器	半导体	Ho:YAG	Er:YAG	Tm:YAG	钕玻璃	有机染料	Kr离子
波 长	532 810			1 960			
(nm)	630 830	2 100	2 940		1 540	波长可调	647.1
	808 980			2 010			
激光器	ArF	KrCl	KrF	XeCl	翠绿宝石	倍频 Nd:YAG	
波 长	193	223	248	308	755	532	
(nm)							

（唐建民）

第四章　激光剂量及导光系统

第一节　物理剂量

1.物理剂量的定义和单位　物理剂量 D 是激光束垂直照射到生物体单位面积上的功率 P/A 与照射时间 t 的乘积,即：

$$D=(P/A)t\cdot\cos\theta \qquad 4-1$$

式中 θ 是激光束与受照面间的入射角。

物理剂量的单位是焦耳·厘米$^{-2}$($J\cdot cm^{-2}$)。即激光的能量密度。

2.物理剂量四要素

(1)激光功率：对连续激光而言，用激光功率计直接读出，但激光束应垂直入射功率计接收头。

对脉冲激光应用能量计记录其单个脉冲的能量，用宽频（几十至千兆赫）示波器记录每个脉冲的脉宽（脉宽前后半功率点间的时间）和峰值功率。

(2)受照面积 常用目测法(弱可见光)或仪器(不可见光或强可见光)测定。

(3)照射时间：连续激光用计时器记录即可，对脉冲激光还须记录其重复频率，即单位时间的脉冲个数。有效照射时间＝照射时间×脉宽×单位时间的重频。

(4)入射角 通常要求垂直照射,否则应求出其入射角 θ。

第二节　生物剂量

1.定义　生物体吸收激光的能量后，将引起生物反应，直接对生物组织反应的强弱程度进行分级，并定出分级的标准，按照这种标准所分的级，称为生物剂量。

2.生物剂量的复杂性

(1)同一物理剂量辐照不同个体或同一个体不同部位时其生物反应（剂量）往往不同。如白种人、黄种人、黑种人,同一人皮肤和眼。

(2)同一物理剂量不同波长对同一生物组织所产生的生物反应（剂量）往往不同。如红外线主要是热效应，紫外线主要是光化效应。

(3)同一物理剂量不同工作方式（连续、脉冲），不同模式、不同功率的激光对同一生物组织所产生的生物效应（剂量）一般都不同。其生物剂量（效应）脉冲＞连续，短脉冲＞长短冲、单基模＞多模、高功率＞低功率。

在一些局部领域内，如眼科，对眼底光凝分为四级。皮肤科对激光红斑反应分为 6 级。

在弱激光理疗中，由于没有明显的生物反应，常常只报道物理剂量，但同时应指出激光的波长、连续激光的功率、脉冲激光的单脉冲能量、脉宽、峰值功率和重复频率。

需要全本请访问 www.ertongbook.com