

## 浅谈医用激光器的临床选择



张佳莹<sup>1,3</sup> 顾瑛<sup>1</sup> 刘喜文<sup>2</sup> 魏志义<sup>3</sup>

1 中国人民解放军总医院激光医学科

2 第四军医大学护理系

3 中科院物理研究所光物理重点实验室

激光自50多年前诞生以来，已在临床医学诊断及治疗中得到广泛应用，目前不仅成为治疗疾病的一种先进手段，而且也发展成为一门重要的医学分支。实际上，几乎每一种激光器问世后，人们都会探索发掘其在医疗领域的有效应用。根据病理诊断和临床治疗的不同需求，目前在医学诊断方面，激光诊断的方法可分为激光光谱分析法、激光干涉分析法、激光散射分析法、激光衍射分析法、激光透射分析法及激光偏振法等；在临床治疗方面，主要的方法有采用激光“光刀”的精细分割、采用光动力疗法的光化学方法、采用低功率激光的光生物调节和穴位照射以及采用高功率激光对病灶组织的凝固、烧灼、汽化等。近年来随着激光技术的快速发展和激光器件的不断增多，可供临床使用的激光种类也越来越多，无论是从高功率连续激光到飞秒超短脉冲激光，还是从深紫外激光到中红外激光，无不在外科手术、疾病诊断、美容保健等方面表现出重要的应用潜力。因此在选用医用激光器时，应根据不同的临床需求并结合激光器件的最新发展，确定最适合的激光参数及指标，从而对

医用激光器做出合理而实用的选择。

一般而言，在选择医用激光器之前，首先需要针对应用目的及诊断与治疗机理，明确所需要激光的主要参数指标。进而根据这些参数指标，确定并选择以合理的激光器件及工作方式为核心的激光医疗设备，从而实现所选择的医用激光器械在疾病诊断和临床治疗上的有效利用。本文将根据以上原则及笔者的一点体会，对医用激光的选择作一浅显分析。

### 1 激光的性能参数

#### 1.1 激光波长

激光诊断及临床治疗的大量应用主要依据的是与波长相关的选择吸收原理，即不同组织及病灶对不同波长激光的不同吸收，因此激光波长是选择医用激光最重要的物理量之一。传统的医用激光，如氦氖、氩离子、Nd:YAG等激光可以提供一些典型波长，但总体上实用激光波长有限。目前利用直接产生技术得到的激光波长已覆盖了从紫外到近红外的波段，如掺

## TEST & REVIEW

Ce, Pr, Cr, Er, Tm, Ho, Mo等元素的固体激光及钛宝石激光等。而利用倍频及参量等非线性频率变换技术,在一台激光器上可进一步取得在更宽范围内波长可调谐的激光输出。

### 1.2 激光能量与能量密度

激光能量(也叫激光辐射能量)表示一束激光所包含的光子集体的能量,即激光束所包含的所有光子能量的总和。通常用 $E$ 表示,单位为焦耳(J)。对于手术医用激光,所用的能量一般在微焦耳到毫焦耳;对于诊断所用的能量,一般到纳焦耳甚至皮焦耳就足够。

激光能量密度是指激光传播方向单位面积 $S$ 上的激光辐射能量 $E$ 。通常用 $D$ 表示,单位为焦耳/平方厘米( $J/cm^2$ )。 $D$ 也称为激光的物理剂量。通常通过聚焦激光后可以在很小的点上产生高的激光能量密度,从而真正向“光刀”一样开展微创手术。

### 1.3 激光功率与功率密度

激光功率表示单位时间内发射或传播的激光辐射能量。通常用 $P$ 表示,单位为瓦特(W),由上述定义可知: $P=E/t$ ,其中 $t$ 是激光照射(作用)时间。激光功率有平均功率与峰值功率之分,对于连续及高平均功率激光,通常用平均功率表示;对于低重复频率及单发的激光,通常用峰值功率表示。

激光功率密度(也叫激光强度)指通过激光传播方向单位面积内的激光辐射功率。通常用 $I$ 表示,单位为瓦特/平方厘米( $W/cm^2$ )。 $I$ 是决定激光生物效应强弱的一个重要参量,通常对于能量一定的一个激光脉冲,持续时间越短、聚焦后的光斑面积越小,其对应的激光强度也就越高,这样作为激光手术所具有的效果一般也就越显著。

### 1.4 激光照射方式

激光临床应用采用的照射方式有点照射、面照射、柱面照射、球面照射、点阵照射、面阵照射、组织间照射、腔内照射、内镜下照射等多种方式,实际应用中可根据具体的情况选用合适的方式。

### 1.5 光斑

激光的光斑通常用其传播方向上的面积 $S$ 表示,习惯单位为平方厘米( $cm^2$ )。理想的激光光斑多为圆对称到高斯分布,所以其大小也常用直径 $d$ 描述。按照高斯光束的定义,一般以最大强度的 $1/e$ 处为边缘来确定直径。需要指出的是:激光束的光斑面积与治疗面积是有区别的,治疗面积应以被激光照射到的面积计算。

### 1.6 作用时间

作用时间是指激光照射生物组织的时间或者说是激光与生物组织相互作用的时间。通常用 $t$ 表示,单位为秒(s)。这里也需要指出的是激光作用时间与脉冲激光的持续时间是不同的。对脉冲激光而言,在作用时间内可能有多个甚至大量激光脉冲参与作用。

### 1.7 激光模式

激光模式是指光波在激光器谐振腔中的振荡方式,分为纵模和横模。

纵模是指光波在谐振腔中沿谐振腔轴向(也即纵向)传播时的振荡方式,表示输出激光的频率(波长),即单色性。只有一个频率输出称为单纵模,若含有两个以上频率就称为多纵模。

横模是指光波沿着谐振腔径向(也即横向)的稳定场分布,即激光束在其横截面上的光强分布,通常用 $TEM_{mn}$ 表示。 $m$ 和 $n$ 分别代表水平方向与竖直方向上的波节数或暗斑数。每一种分布称为一个横模。例如: $m=n=0$ 时,即 $TEM_{00}$ 称为单横模或基模,其光斑为一个圆形亮斑; $m$ 和 $n$ 不等于零时,为高阶模。由于激光的纵模和横模分别对应着激光到单色性和空间光束质量,因此对于依赖波长选择性吸收要求高的应用,需要选择单纵模激光;而对于要求聚焦光斑非常小的应用,则需要选择单横模激光。

## 2 激光工作方式

医用激光在临床应用中依据的主要原理有两个:一是上述的不同波长激光对应生物组织的不同吸收,即选择性吸收原理;二是治疗组织热弛豫时间的差异。从这两个基本原理出发,就决定了不同激光治疗机的类型,前者对应激光器的波长,后者对应激光器的工作方式。由于激光的工作方式极大地决定着激光的输出能量、强度甚至光斑,因此医用激光器工作方式的选择至关重要。

激光的工作方式简单地可分为连续及脉冲两种。连续方式单一,主要用平均功率表征;而脉冲激光根据采用技术的不同,可进一步分为准连续方式、高重复频率方式、低重复频率方式、单次工作方式等。一般而言,激光振荡器的重复频率越高,其所输出单个脉冲的能量也就越低。采用锁模激光技术的激光振荡器的重复频率可从数MHz到数十GHz,这样高的重复频率通常被认为是准连续方式,输出激光的脉宽在数十皮秒到数十飞秒之间。采用声光调Q技术的激光重复频率多在kHz量级,通常被认为是高重复频率,典型脉宽约数100 ns;而采用电光调Q技术的激光重复频率多在10 Hz量级,通常被认为是低重复频率,典型

脉宽约10 ns。当然实际的激光脉宽与激光增益介质、抽运条件及激光腔型等多种因素有关,采用特殊技术,也可以实现10 ns量级脉宽的高重复频率运行。由于低重复频率甚至单次运转的激光脉冲可以通过对高重复频率脉冲激光的选单而获得,因此飞秒及皮秒脉宽的超短脉冲激光也可以实现低重复频率或单次运行。

脉冲激光也可以通过自由运行的激光获得,这样的激光脉宽通常可到数百微秒,通常也称之为长脉冲,在常规的激光临床中也有应用。

### 3 医用激光器的种类及主要临床应用

确定所需医用激光的参数性能和所需要的工作方式后,基本就可以确定适合的具体激光种类了,下面我们依据常用工作物质分类对一些典型的医用激光器件及主要临床应用作简要介绍。

#### 3.1 固体激光器

固体激光器是目前使用最广泛、最成熟的医用激光器。典型的固体医用激光当属Nd:YAG激光,亦即掺钕钇铝石榴石激光,主要的工作波长为1064 nm。作为手术刀应用一般采用连续输出,功率在几十瓦左右;作为皮肤科色素类疾病治疗,多采用调Q输出,能量可达1 J每脉冲,脉宽可窄至几纳秒,还可用于膜性白内障、晶状体囊膜切开术、虹膜切开术、晶体及前房内的玻璃体条索切断等内眼手术。这类激光作为长脉冲输出时,还可用于祛除毛发,脉宽可长至200 ms;作为自由振荡模式,可用于眼科慢性泪道阻塞性疾病的治疗。此外Nd:YAG激光经倍频后的532 nm波长激光在多个治疗领域也有着重要的应用,例如眼科、牙科、皮肤科、前列腺切除等,并能用于皮肤科皱纹、脱毛的对症病症的治疗及眼底疾病治疗等。

Nd:YAG激光的另一个波长为1320 nm,可适用于由于血液逆流导致的大、小隐静脉曲张及无功能性的浅表支静脉曲张等疾病的治疗。Nd:YAP(掺钕铝酸钇)激光器输出的1.3  $\mu\text{m}$ 激光与该波长相近,由于人眼相对安全的特性,这种波长激光在医用手术中曾被广泛看好,并可以用于牙髓的祛除及牙髓腔的备洞、牙本质过敏症、牙龈瘤及血管瘤切除、口腔溃疡的体外照射等治疗。近年来,波长到2  $\mu\text{m}$ 以上中红外固体激光的出现和发展,为激光医学提供大量新的理想选择,如典型的掺钬(Ho)、钪(Tm)及铒(Er)的YAG激光器。这些激光大多采用脉冲工作方式,其中Ho:YAG(掺钬钇铝石榴石)激光器的波长为2.1  $\mu\text{m}$ ,适用于软组织的接触与非接触切割、切除和凝固,如用于泌尿系统结石;皮肤科治疗化脓性肉芽肿、老年疣、老年

角化;妇产科治疗宫颈糜烂;耳鼻喉科治疗鼻息肉、咽喉部乳头状瘤;椎间盘经皮手术等;该激光系统应用于经皮心血管重建术,作为血管成型术中的理想器具,被誉为“冠心病治疗的第四个里程碑”。Tm:YAG(掺钪钇铝石榴石)激光器输出的2.0  $\mu\text{m}$ 波长与Ho:YAG激光相近,并可适用于软硬组织的接触与非接触切割、切除和凝固。另一种Er:YAG(掺铒钇铝石榴石)激光器的输出波长为2.9  $\mu\text{m}$ ,由于水对于此波长强烈吸收,因此主要应用于浅层组织的激光治疗,如打孔采血、眼科治疗、嫩肤手术等,此外在耳鼻喉科,肿瘤的治疗等他领域也有应用,其治疗原理基本可以归结为激光手术刀。类似的还有所谓的“水激光”(Er,Cr:YSGG激光,因使用水流导光而得名),其波长2780 nm,在牙科中有应用。

一些早期的固体激光器,如波长694.3 nm的红宝石激光器、波长为755 nm的紫翠宝石激光器等,作为最早的激光医疗器应用在皮肤色素祛、皮肤脱毛、去除纹身和治疗良性皮肤色素性损伤等方面。近年来随着综合性能先进激光器件的不断出现,这类激光已逐渐退出医用激光领域。值得一提的是目前科研上广泛使用的飞秒掺钛蓝宝石激光器,其不仅具有包括上述波长的宽带光谱及波长调谐能力,而且脉冲宽度可到100 fs以下,在疾病诊断及精密外科手术方面表现出越来越广泛的应用。如利用其超宽光谱特性发展起来的OCT(光学相干成像术)比常规OCT在病灶诊断上有更高的分辨率,飞秒激光作为手术刀用于光动力治疗、近视眼及视力老花等方面展现出更好的效果与前景。

医用激光的另外一个趋势是光纤激光,作为固体激光的一种,光纤激光不仅在波长上已覆盖了1.064  $\mu\text{m}$ , 1.3  $\mu\text{m}$ , 1.5  $\mu\text{m}$ 及2  $\mu\text{m}$ 等常用固体医用激光的波长,而且也在飞秒超短脉冲、高功率输出等运行方式上进展迅速。可以预见,光纤激光在未来医用激光中将会占到越来越多的份额。

#### 3.2 气体激光器

常用的医用气体激光器有:

二氧化碳激光器,输出波长10.6  $\mu\text{m}$ ,属远红外激光。具有连续和脉冲两种工作方式,临床上一般通过导光关节臂传输。由于二氧化碳激光易于实现高功率输出(千瓦以上),成本也相对低廉,其波长对水的吸收率又极高,因此多用于强激光治疗。

氦氖激光器,输出波长为632.8 nm。主要为连续工作方式,功率仅10 mW量级,仅可用于弱激光治疗,即激光理疗与激光针灸;也可用作光动力疗法的治疗光源。

## TEST & REVIEW

氩离子激光器，输出波长主要为514.5 nm和488 nm，连续工作方式，功率可到数十瓦。该激光工作寿命较短，运转费用较高，原则上每隔3~4年就得花费大笔费用更换激光管。其可见的蓝绿波长激光，可经光纤传输，血红蛋白对该段波长的吸收率极高，可用作光动力疗法的治疗光源。与其类似的还有铜蒸汽激光。目前利用二极管激光抽运的倍频Nd:YAG类激光可以获得连续工作方式下平均功率大于10 W及高重复频率工作方式下平均功率大于100 W的532 nm绿激光，因此在许多医疗方面不仅可以取代氩离子激光、铜蒸汽激光，而且在眼科、前列腺等方面具有新的应用，并表现出较强的经济实用性。

氩离子激光器，工作波长主要有406.7 nm，415.4 nm，568 nm，647 nm。主要为连续工作方式。可用作光动力疗法的诊断光源。

氩镉激光器，输出波长441.6 nm。主要为连续工作方式。可用作光动力疗法的诊断光源。

### 3.3 半导体激光器

目前半导体激光的输出波长从405~1500 nm有多种选择，工作方式有连续和脉冲运行。一般用波长和工作方式来限定其名称，如：630 nm连续半导体激光器、780 nm脉冲半导体激光器等；也有用半导体材料来直接限定名称，如：砷化镓半导体激光器、砷铝镓半导体激光器等。半导体激光具有体积小、效率高、能直接利用电源对输出激光进行调制等独特优点，适用于要求装置轻便且激光输出功率要求不高的场合。一台大小与普通计算机差不多的半导体激光单元，具备比其体积大得多的激光器所具有的同样功能。它除了价格低廉外，由于电、光效率较高、工作寿命较长，所以运转费用也较低，二极管激光管的寿命要比离子激光器长得多。由于其波长从紫外到红外波段可选择范围宽，可经光纤传输，临床应用范围越来越宽。

### 3.4 染料激光器

染料激光可以说是覆盖波长最宽的一种激光，选择不同染料能实现从400~950 nm的调谐输出，工作方式主要有连续波和脉冲波，依抽运方式不同分为闪光灯抽运和激光抽运的染料激光器。染料激光联合倍频Q开关Nd:YAG激光器，可用于祛除纹身、治疗血管性和色素性病损、普通皮肤科软组织的切割、切除、烧蚀和汽化及祛除人体多余毛发等。

### 3.5 准分子激光器

准分子激光的输出波长一般在紫外光范围，常用激光介质限定其名称，如：氟化氩准分子激光器、氟化氙准分子激光器。工作方式多为脉冲波。目前在眼

科和皮肤科应用较为成熟。

医用激光目前可谓灿若星辰，为造福人类健康、提高生活质量，发挥着越来越重要的作用，由于篇幅所限，本文也无法一一提及。在实际选购激光器时，还要考虑到以下几个方面：1) 光学元件的损坏，抽运元件的寿命仍然是难以解决的问题；2) 维护费用偏高、缺少专门维护人员等问题值得注意。通常进口一台激光治疗机的年平均维护费用在6万元左右；3) 激光器的稳定输出、安全标准与防护问题；4) 遵循激光医学的循证医学研究，可以为医院选择医用激光器提供新的标准。医用激光器临床疗效的循证医学论证对医用激光器本身提出了更高的要求：1) 医用激光器的生产标准化和操作参量数字化，前者可以避免用于循证医学试验的医用激光器与用于临床的医用激光器存在差别，后者可以避免不同操作人员的个体差异；2) 医用激光器本身的稳定性，厂家应该给出明确的稳定性测试曲线，并声明经过多长时间必须校正医用激光器的输出参量；3) 医用激光器生产厂家必须获得开展医用激光器临床疗效循证医学试验的经费，必须具有一定的经济实力。

## 4 展望

激光治疗机是高科技产品应用于医疗的具体体现，激光器能否安全、稳定、有效的运转是临床医生和患者、乃至激光器设计者和工程师们所共同关注的问题，例如激光器电转换效率的提高、热效应的消除、谐振腔稳定性的改进、以及光学元件可靠性的提高等诸方面的问题，仍是公认的技术难题，同时也是医用激光器面向临床应用时所必须要解决的应用问题。总之，医用激光器带来挑战的同时，也给致力于激光技术进步的广大工程技术人员带来了广阔的舞台。

---

张佳莹，中国人民解放军总医院激光医学科副主任医师；  
顾瑛，主任、教授；刘喜文，第四军医大学护理系，教授；  
魏志义，中科院物理研究所光物理重点实验室研究员，  
zywei@iphy.ac.cn