

文章编号 2095-1531(2015)05-0873-08

峰值功率等激光术语的理解与应用问题

李殿军*, 王化龙, 杨贵龙, 李世明, 于洪君

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 光电对抗技术创新研究室
激光与物质相互作用国家重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要: 本文根据激光术语国家标准和 ISO 国际标准对某些常用激光术语概念的理解与应用问题进行了讨论, 并针对国内外科技期刊和专著经常将脉冲功率与峰值功率混为一谈的问题提出了质疑, 同时也指出了在激光术语使用过程中存在的其它错误现象, 分析了产生类似错误的原因并给出了规范的使用方法。最后, 以脉冲激光器术语定义为例通过脉冲激光振荡过程的物理原理分析提出了关于该术语定义的一些修改考虑与建议。

关键词: 激光术语; 标准定义; 峰值功率; 错误使用

中图分类号: TN248.1 文献标识码: A doi: 10.3788/CO.20150805.0873

Comprehension and usage of ordinary terminologies for laser taking peak power as example

LI Dian-jun*, WANG Hua-long, YANG Gui-long, LI Shi-ming, YU Hong-jun

(*Innovation Laboratory of Electron-Optical Countermeasures Technology,
State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Changchun Institute of Optics,
Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*)

* Corresponding author, E-mail: lidj0906@163.com

Abstract: For the consistency with the national standard and ISO international standard on laser vocabulary and symbols, this paper discusses the comprehension and usage problems of some ordinary terminologies for laser. The paper oppugns the misuse between pulse power and peak power often used in certain papers published in science and technology magazines as well as academic monographs, meanwhile indicates the other improper phenomenon in writing papers, analyzes the reason of misuse and gives the canonical usage direction. Finally, we propose the modified advisement and suggestion on a pulse laser standard definition according to physical resonant process of the pulse laser.

Key words: terminology for laser; standard definition; peak power; misuse

收稿日期: 2015-03-11; 修订日期: 2015-05-13

基金项目: 吉林省重大科技攻关专项基金资助项目 (No. 20140203010G X); 激光与物质相互作用国家重点实验室基金资助项目 (No. SKLLM1413)

1 引言

与激光技术有关的某些概念和术语存在着经常被错误使用的问题。本刊2014年刊登的一篇文章^[1]在论述激光峰值功率问题时,从其关于激光峰值功率一词所表达的物理意义来看,若按照《激光术语》国家标准^[2]和ISO国际标准^[3]的定义推断,其表达方式是错误的。峰值功率术语错误使用的现象不仅普遍地发生在国内科技期刊上,而且在很多有影响力的国外期刊和专著上,也同样如此,例如《固体激光工程》^[4]和《Fundamentals of Fiber Lasers and Fiber Amplifiers》^[5]中,都错误地将峰值功率定义为脉冲能量与脉冲宽度之比。需要指出的是,与此相类似的其它误用现象还有很多,遗憾的是,这类错误迄今为止仍未见有人指正。

激光术语误用现象归纳起来主要有两方面原因,一是作者写作习惯与术语标准定义没有统一,二是某些作者概念不清引起的混淆问题。此外,还有一个比较特殊的现象,即不同语种翻译时存在的含义差异,比如,“按照《激光术语》国家标准规定,在中文里激光与激光器是有差别的,这一点与英文稍有不同;在英文里,激光和激光器几乎都由laser一个词来表示,其所代表的意思需要根据上下文内容来确定,只是在需要特指时,才加上其它限定词来表达,例如写成laser radiation表示激光”^[6]。若不清楚中英文关于激光(器)用法的不同,写作时就容易出错。此外,随着科技的发展,某些标准术语的定义也会随着时间的推移而显得不合时宜。科学研究需要表达严谨,误用本身是对科学的不严谨,既不利于知识的准确传播,也不利于学术的严肃讨论。澄清激光术语的不当用法和术语概念混淆等方面的问题,无疑是有科研价值和现实意义的。

2 激光术语

2.1 脉冲功率与峰值功率

《激光术语》国家标准和IOS国际标准关于激光脉冲功率(pulse power)和峰值功率(peak

power)定义是一致的,均定义其为“脉冲能量 Q 与脉冲持续时间 τ_H 之比”与“功率时间函数的最大值”。标准还对脉冲持续时间(pulse duration)概念所代表的两种意义进行了说明,一种叫做“脉冲宽度(pulse width)”,使用符号 τ_H 表示:“激光脉冲上升和下降到它的50%峰值功率点之间的时间间隔”;另一种叫做“10%脉冲持续时间”,使用符号 τ_{10} 表示:“激光脉冲上升和下降到它的10%峰值功率点之间的时间间隔”。相当多的论文作者混淆了脉冲功率和峰值功率之间的区别,错误地将脉冲功率当作峰值功率使用。论文^[1]在计算峰值功率时有如下的描述:“在目前的专业文献中,计算脉冲激光的峰值功率公式是 $P_p = E/\tau$,式中 P_p 代表峰值功率, E 为脉冲能量, τ 为脉冲宽度(峰值半宽)。这个公式逻辑清楚,计算简单,成为计算峰值功率使用范围最广的公式。”显而易见,此处的脉冲宽度 τ 与脉冲持续时间 τ_H 代表相同的意思,由公式 $P_p = E/\tau$ 计算得出的数据完全没有表现出“功率时间函数的最大值”的含义。毫无疑问,该论文存在着术语错误使用的问题。此外,《激光术语》国家标准和IOS国际标准规定峰值功率符号为 P_{pk} ,脉冲功率符号为 P_H ,脉冲能量符号为 Q ,脉冲功率规范的写法为 $P_H = Q/\tau_H$,而在一般情况下 $P_{pk} \neq Q/\tau_H$ 。

脉冲功率与峰值功率之间既有联系,又有区别,从物理意义上讲,激光脉冲的功率性质表现为在任意时刻都具有不同的量并处于不断的变化之中,最大的瞬态功率等于峰值功率;而脉冲功率则是在脉冲宽度内的平均功率,按“定义”所得的脉冲功率主要取决于脉冲波型的具体形状,其值可以大于、等于或者小于峰值功率——在此必须注意的是,即使获得了脉冲功率大于峰值功率的结果,也只能将其理解为是对于特定波形求平均“计算”方法造成的特殊情形,其真实的物理量值绝不会高于峰值功率——因为那是整个波形的最高点。为直观理解脉冲功率与峰值功率的物理含义,以矩形、三角形、尖峰矩形和尖峰矩形+矩形组合4种波形为例说明脉冲功率与峰值功率的特性比较,参见图1。这些波形的共同特点是具有完全相等的峰值功率但各自的脉冲功率性质却不相同,其中:矩形激光的脉冲功率与峰值功率完全

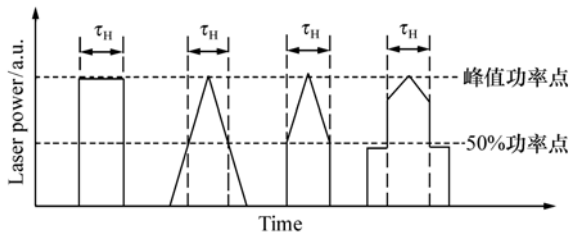


图 1 矩形、三角形、尖峰矩形和尖峰矩形 + 矩形四种规则脉冲波形示意图

Fig. 1 Four regular pulses shape of rectangle, triangle, pinnacle-rectangle and pinnacle-rectangle with rectangle

相等;三角形激光的脉冲功率也等于峰值功率,但在任意时刻的瞬时功率则处于不断的变化中;尖峰矩形激光的脉冲功率则小于峰值功率,其瞬时功率的初始值为 50% 峰值功率且一直处于不断的变化中;而尖峰矩形 + 矩形激光的脉冲功率则可大于、等于或小于峰值功率,取决于 50% 峰值功率点下矩形脉冲持续时间的长短。实际脉冲激光在功率性质上与图 1 的组合波形情况相类似,参见图 2 脉冲的时间波形。图 2(a) 显示的是理想高斯基模脉冲(注:其光强的空间分布也与

此图类似),图 2(b)和(c)则为探测器实测的 TEACO₂激光脉冲,两者差别在于是否带有 50% 峰值功率点下的拖尾。在很多实际情况下,人们直接获得的往往是脉冲功率,因此,一些作者常用脉冲功率来近似地替代峰值功率(这与某些作者错误地就将脉冲功率当作峰值功率完全不是一回事)。按定义计算,图 2(b)波形基本对称且无拖尾,与图 1 三角型激光性质类似,其脉冲功率与峰值功率基本相等;而图 2(a)和(c)则分别因曲线形状和存在拖尾将会造成计算所得的脉冲功率与峰值功率存在(可能较大的)差值。下面以高斯脉冲为例说明如何确定脉冲功率与峰值功率之间的关系问题。根据论文^[1],高斯脉冲功率的解析函数 $P(t)$ 为:

$$P(t) = P_0 \exp\left[-\frac{(4\ln 2)t^2}{\tau^2}\right], \quad (1)$$

式中, P_0 为具有功率量纲的常数, t 为时间,而 τ 则为高斯包络的半高宽。显然当 $t=0$ 时,函数 $P(t)$ 有最大值 P_0 ,对应着图 2(a)曲线的最高点,故由式(1)物理意义可知 P_0 代表了激光脉冲的峰值功率。按照标准规范,式(1)正确的写法为:

$$P(t) = P_{pk} \exp\left[-\frac{(4\ln 2)t^2}{\tau_H^2}\right]. \quad (2)$$

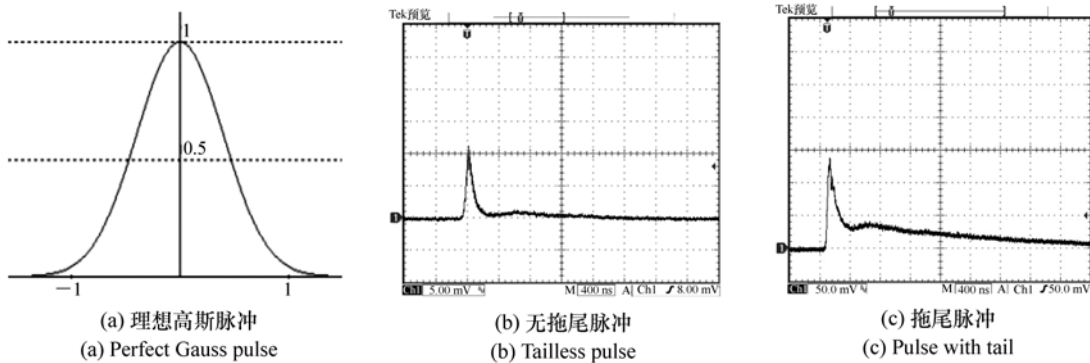


图 2 典型的脉冲

Fig. 2 Typical pulses

功率的时间积分为能量,故式(2)的时间积分给出了脉冲能量 Q 、峰值功率 P_{pk} 和脉冲功率 P_H 三者之间有如下关系:

$$P_{pk} = \frac{Q}{\tau_H} \sqrt{\frac{4\ln 2}{\pi}} = P_H \sqrt{\frac{4\ln 2}{\pi}}. \quad (3)$$

而在更广泛的一般情况下可定义脉冲功率与峰值功率的关系为:

$$P_{pk} = AP_H, \quad (4)$$

式中,系数 $A(0 < A)$ 表示峰值功率和脉冲功率之间的比值。式(4)提供了一种办法,即可借助系数 A 由脉冲功率直接表示峰值功率。例如,由式(3)可知,基模高斯脉冲的峰值功率为 0.939 倍的脉冲功率。而对于有解析表达式的其它脉冲,

如双曲正割脉冲和洛伦兹脉冲而言,其 A 值可由计算得出,分别为 0.881 和 0.819。但对于与图 2 (c) 相类似的各种不规则脉冲波形,无法从计算中获得 A 值,需要采用表格法或者其它合适的方式剔除拖尾脉冲对于实际结果的影响。

2.2 束散角和发散角

《激光术语》国家标准只有束散角 (divergence angle) 定义:“光束宽度 [内含功率 (或能量) 定义的] 在远场增大形成的渐进面锥所构成的全角度。”从规范的角度看,发散角应用束散角代替;遗憾的是现行期刊中大量采用的写法是发散角。与束散角相关的其它定义有——远场:“自束腰到比瑞利长度大得多的距离处的辐射场”;瑞利长度:“自束腰处沿光传播方向到光束直径或束宽增加到束腰处的对应值倍的距离”;束腰:“光束直径或光束宽度的最细处”。需要指出的是,近场没有束散角的定义,因为从工程应用的实际情况出发,在近场情况下测得的束散角往往不能代表激光束真实的束散性,其值往往偏小很多。若用近场测量数据表示远场束散角,则需要根据激光束的模式性质对该数据进行拟合与修正才能得到较为精确的真实结果。作者所在研究组应用高功率脉冲 TEACO₂ 激光所获得的试验结果为:在十倍瑞利长度处测得的束散角与远场束散角之间的测量误差小于 5%。

2.3 泵浦和抽运

泵浦和抽运皆由英文 pump 翻译产生,《激光术语》国家标准规定采用的术语是泵浦而不是抽运。现行文献中仍然存在着这两个名词混用的现象,至今仍未得到有效的纠正。无论如何,对于需要表达严谨的科技期刊而言,应该采用正确与规范的写法,应该对于所投稿件做出统一的要求。论文中还常有采用“激励”一词表达与“泵浦”相类似的意思,但标准并没有对于该词做出相应的定义。

3 术语概念不清引起的混淆问题

3.1 激光(器)概念问题

对激光定义概念认识不清引起混淆与误用的现象很多,如在光学非线性频率变换研究中,某些

作者经常将激光照射倍频晶体产生的输出光束称为倍频激光。而按照标准定义:激光是“由激光器产生的,波长直到 1 mm 的相干电磁辐射。它由物质的粒子受激发射放大产生,具有良好的单色性、相干性和方向性。”激光倍频过程不存在像激光器那样的受激发射放大过程,虽然产生了具有激光性质的光束,但这远非激光器输出意义上的激光,故称之为倍频激光是不恰当的。从语法角度看,倍频激光主语是激光,倍频是定语,用来修饰主语激光,即使将“倍频激光”理解为“在倍频过程产生的具有激光性质的光束”也是不合适的;正确的方式应叫做倍频光,或者像国外论文那样称之为 SHG (Second harmonic generation),意思是二次谐波产生。因此,可以说激光倍频,但不能说倍频激光。与此类似的混淆例子还有很多,例如由两束激光差频技术产生 THz 波段的辐射,经常被写成 THz 激光,属于同一错误类型。激光振荡器是激光器,而激光放大器也是激光器吗?回答是肯定的:激光器的定义与谐振腔毫无关系,激光放大器与激光振荡器的差别仅在于没有谐振腔,在有外加辐射场作用下,放大器的增益介质能完全够实现受激辐射的光放大过程。以上例子说明,只要概念清楚,即可以正确区分和判断某种辐射或者某种器件是否属于激光(器)。

3.2 激光谐振腔与激光模式

虽然激光谐振腔不是产生激光的必备元件,但为了获得优良的光束输出,绝大多数激光器都由谐振腔构成,通常分为两类,即稳定腔与非稳(定)腔^[7-8]。稳定腔激光器输出的光束为高斯型的,而非稳腔激光器腔内电磁场的自再现波为非高斯型的,故输出也非高斯型的,没有简单的函数形式,其强度分布必须以数值说明。由于非稳腔采用衍射方式输出,其远场输出光强应由弗朗和费衍射性质决定,即可近似地由下式表示:

$$I(\theta) = \frac{I_0}{\left[1 - \left(\frac{a_2}{a_0}\right)^2\right]^2} \left\{ \frac{2J_1(ka_0\theta)}{(ka_0\theta)} - \left[\left(\frac{a_2}{a_0}\right)^2 \frac{2J_1(ka_2\theta)}{(ka_2\theta)} \right] \right\}^2, \quad (5)$$

式中, $I(\theta)$ 为远场模式光强分布, I_0 远场图中心处光强, a_0 和 a_2 分别为近场图中的亮环外径与内径, J_1 一阶贝塞尔函数, k 波矢的标量, λ 波长, θ

远场光强分布角度。非稳腔输出光束一般是环绕输出反射镜以衍射耦合方式取出的,典型的近场光强分布为空心的亮环。图3为根据实际非稳腔TEACO₂激光器参数实测与计算得到的输出光强情况。图3(a)为距离输出窗口0.3~20 m不同位置处激光在热敏纸上形成的光强分布;图3(b)为探测器测得数据与理论曲线的比较。由图3可看出非稳腔模式与稳定腔模式分布存在着较大的不同:非稳腔远场模式在主光环外存在着一系列的次极大值,而高斯型光斑则是边缘逐渐减小的,因此,一些文献中出现“非稳腔输出远场模式为基模”的说法肯定是错误的。即使仅仅考虑高斯

基模光斑和非稳腔主极大值部分,两者波形的形状也完全不一样,一个是贝塞尔函数型的,另一个则是一个高斯函数型的。非稳腔与稳定腔输出模式还存在着如下的差别:非稳腔输出光斑在由近场向远场传播过程中,其光束空间模式一直在发生剧烈的变化,由一个空心光斑转变为具有中心主极大的衍射花样;而稳定腔则不具备这样的性质,激光输出的模式完全由腔内的振荡过程确定,输出后在自由空间则以不变分布形式传播。某些非稳腔固体激光器因热效应对模式耦合的影响,特殊情况下有可能输出高斯或者类高斯光束,但该事件出现的概率很低。

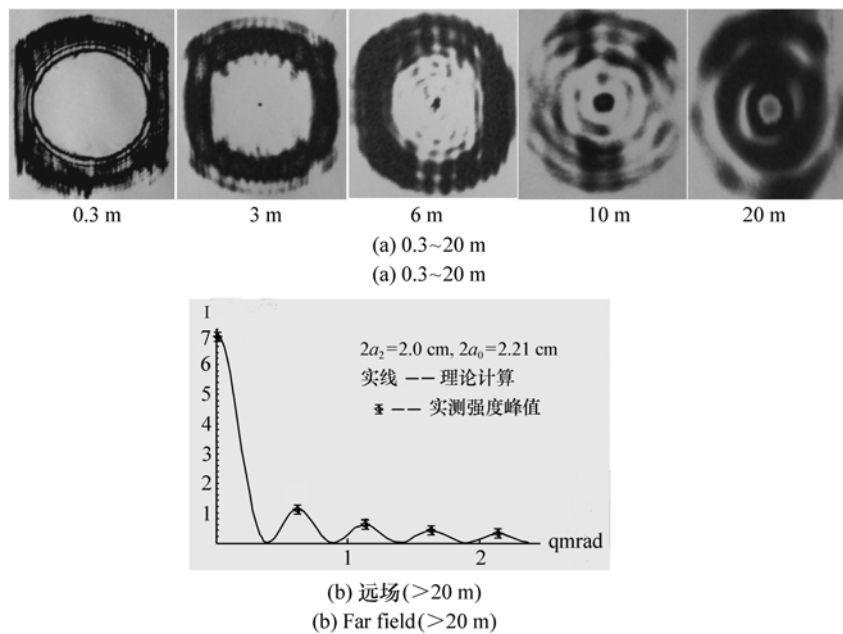


图3 非稳腔TEACO₂激光器输出强度分布

Fig. 3 Output intensity distribution of TEACO₂ laser with unstable resonance

4 某些激光术语的讨论

4.1 符号问题

《激光术语》标准关于符号的命名有值得商榷的地方,如规定脉冲宽度符号为 τ_H ,角标H的意义仅是为了区别10%脉冲持续时间符号 τ_{10} ,但角标的存在给论文撰写带来麻烦,特别是当公式较为复杂时,其实完全省略角标H而默认 τ 即代表脉冲宽度。脉冲功率符号 P_H 也有角标,而在术语标准定义中这样的现象很多,若能修改,将会

受到科技工作者的欢迎。

4.2 脉冲激光器

《激光术语》标准定义脉冲激光器为:“以单脉冲或序列脉冲形式输出能量的激光器,一个脉冲的持续时间小于0.25 s。”假定有一个连续激光器,控制其输出时间维持很短,比如说是0.5 s,显然会产生一个0.5 s持续时间的“脉冲”激光输出,按定义该激光器应是一个连续激光器。只有当这个时间从0.5 s改变为小于0.25 s时,才被认为是脉冲激光器。作者认为,连续激光器就是连续激光器,不能因其输出时间短就被人为地判

定为脉冲激光器,因为即使输出的时间较短,但在激光物理方面仍然呈现连续激光器的性质,这种仅凭小于0.25 s的固定时间界限限定激光脉冲,没有体现出脉冲激光器本质方面的东西。在连续泵浦条件下,大多数激光器在经过弛豫振荡过程后就形成了稳定的连续激光输出,波形一般为一个脉冲尖峰外和一个连续输出的组合;只有采用首尖峰脉冲泵浦抑制技术,才能实现平稳的连续输出,这两种情况分别如图4(a)和(b)所示。但在较短持续时间情况下,如图4(c)和(d)的两种情况都属于脉冲激光器,然而,这两个波形的性质是不一样的:图4(c)是一个典型的尖峰脉冲输出,图4(d)主体部分则具有连续激光的性质,至少应该是一个脉冲+连续的输出模式,将其称之为脉冲激光确有名不副实之嫌。是否可以采用一个新的技术术语,例如可将图4(d)这样的脉冲称

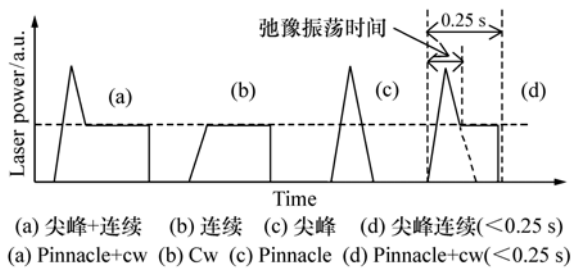


图4 脉冲激光器定义相关的波形

Fig. 4 Waveforms related with definition of pulse laser

为准脉冲激光,这样在进行激光物理性质的讨论时,都有一个可以共同遵循的准确概念。如何认定脉冲激光器才是恰当的呢?当增益介质受到泵浦作用形成粒子数反转时,就会因自发辐射和受激辐射跃迁过程产生增益,一旦增益超过振荡阈值则会逐步地形成激光输出;而在激光形成的初始阶段,受激辐射消耗的反转粒子数与泵浦新产生的粒子数剧烈地变化,形成所谓的弛豫振荡过程,即在激光器达到稳定工作之前,谐振腔内激光振荡与激发粒子之间相互制约而出现一段不稳定的振荡。这个不稳定振荡过程持续时间的长短主要由激光增益介质能级寿命、泵浦强度、谐振腔Q值以及激光建立时间等因素共同确定。从物理性

质方面考虑,这样定义脉冲激光器更为合适:能够产生持续时间等于或者小于弛豫振荡时间的激光器为脉冲激光器,而大于弛豫振荡时间的为连续激光器。这样脉冲激光器的定义就有了一个客观的标准而不是主观地选择的0.25 s。由于一般激光器的弛豫振荡时间远远小于0.25 s,按本文之定义,缩小了脉冲激光器划分的范围,但在物理意义上更为清楚,反映了激光振荡的细节过程。随着瞬态技术发展的日新月异,激光的脉冲宽度早已从ms、 μ s、ns发展到如今常见的ps、fs量级,并已经进入as量级的研究与应用阶段^[9-16],仍用0.25 s来划分脉冲激光已然不再适应激光技术的发展。

4.3 自由电子激光器

《激光术语》国家标准定义自由电子激光器为“以真空中的相对论电子束为激光介质,通过与摇摆场(如周期变化的磁场或电磁场)的相互作用将自由电子的动能转变成相干辐射的激光器。”而ISO国际标准未见有自由电子激光器的定义。在电子束与摇摆场(wiggler或undulator)相互作用时产生的电磁辐射中,有些并没有经过受激辐射光放大的过程,但国内外一律称之为自由电子激光(Free-electron laser)。按照类似过程,可以衍生出很多类似于倍频激光器、拉曼激光器(通过受激拉曼散射产生具有激光基本性质的光束)等称呼。现实论文中这样的混淆实例非常多,希望引起重视。

5 建议

为激光术语的规范应用,本文就常见激光术语错误使用问题提出了质疑与分析,同时建议编辑对于本刊所投的论文手稿做出规范的术语使用规定。随着科技进步的日新月异,以往定义的术语不一定适合现行的写作需求,如何重新修改术语中某些不合时宜的定义,使得类似于倍频激光、拉曼激光、自由电子激光等词汇能够符合标准规范,期望读者进一步参与讨论。

参考文献:

- [1] 田金荣,宋晏蓉,王丽.常用激光峰值功率公式误差分析[J].中国光学,2014,7(2):253-259.
TIAN J R, SONG Y R, WANG L. Error analysis of peak power formula in pulsed lasers[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(2): 253-259. (in Chinese)
- [2] 麦绿波,陈亦庆,刘庆明,等.激光术语[M].中华人民共和国国家标准 GB/T 15313-2008.
MAI L B, CHEN Y Q, LIU Q M, et al. *Terminology for Laser*[M]. The People's Republic of China National Standard GB/T 15313-2008.
- [3] ISO 11145-2006, Optics and Photonics—Laser and Laser-related Equipment—Vocabulary and Symbols[S]. ISO. Publication; standards catalyze, 2006
- [4] 克希耐尔 W. 固体激光工程[M]. 北京:科学出版社,2002:414.
KOECHNER W. *Solid-State Laser Engineering*[M]. Beijing: Science Press, 2002: 414. (in Chinese)
- [5] Valerii (Vartan) Ter-Mikirtychev. *Fundamentals of Fiber Lasers and Fiber Amplifiers*[M]. Switzerland: Springer, 2014: 101.
- [6] 郭劲,李殿军,王挺峰.高功率 CO₂激光器及其应用技术[M].北京:科学出版社,2013:2.
GUO J, LI D J, WANG T F. *High Power CO₂ Lasers and Their Applied Technologies*[M]. Beijing: Science Press, 2013: 2. (in Chinese)
- [7] 郭汝海,张合勇,王挺峰. TEACO₂非稳腔激光器远场光束质量的评价[J].光学精密工程,2011,19(2):407-413.
GUO R H, ZHANG H Y, WANG T F. Evaluation of far field optical quality of TEACO₂ laser with unstable resonator[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(2): 407-413. (in Chinese)
- [8] 陈虹,王旭葆.制造用高功率激光器光束质量的评价与测量[J].光学精密工程,2011,19(2):297-303.
CHEN H, WANG X B. Evaluation and measurement of beam quality of high power manufacturing laser[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(2): 297-303. (in Chinese)
- [9] 蔡跃,叶锡生,马志亮,等.170 ps 激光脉冲辐照可见光面阵 Si-CCD 的实验[J].光学精密工程,2011,19(2):457-462.
CAI Y, YE X SH, MA ZH L, et al. Experiment of 170 ps laser pulse irradiation effect on visible plane array Si-CCD[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(2): 457-462. (in Chinese)
- [10] 王明,王挺峰,邵俊峰.面阵 CCD 相机的飞秒激光损伤分析[J].中国光学,2013,6(1):96-102.
WANG M, WANG T F, SHAO J F. Analysis of femtosecond laser induced damage to array CCD camera[J]. *Chinese Opt.*, 2013, 6(1): 96-102. (in Chinese)
- [11] 高静,干峰,匡鸿深,等.纳秒声光调 Q 光纤激光器产生超连续谱[J].光学精密工程,2014,22(5):1138-1142.
GAO J, GAN F, KUANG H SH, et al. Generation of supercontinuum spectra from acousto-optic Q-switched nanosecond fiber lasers[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(5): 1138-1142. (in Chinese)
- [12] TRTICA M S, GAKOVIC B M, RADAK B B, 等.纳秒、皮秒和飞秒激光脉冲对材料表面的改性[J].光学精密工程,2011,19(2):221-227.
TRTICA M S, GAKOVIC B M, RADAK B B, et al. Material surface modification by ns, ps and fs laser pulses[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(2): 221-227.
- [13] 高慧,赵佳宇,刘伟伟.超快激光成丝现象中多丝控制综述[J].光学精密工程,2013,21(3):598-607.
GAO H, ZHAO J Y, LIU W W. Survey on control multiple filamentation induced by ultrafast laser pulses[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(3): 598-607. (in Chinese)
- [14] 张永生,郑国鑫.500 fs 紫外激光系统及其在闪烁体荧光特性测试中的应用[J].光学精密工程,2011,19(2):475-481.
ZHANG Y SH, ZHENG G X. 500 fs UV laser system and its application to fluorescence test of thin film scintillators[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(2): 475-481. (in Chinese)
- [15] 张振容,胡志云,黄梅生,等.纳秒级激光脉冲展宽系统的分析及应用[J].光学精密工程,2011,19(2):310-315.

- ZHANG ZH R, HU ZH Y, HUANG M SH, *et al.*. Analysis and application of nanosecond laser pulse stretching system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(2):310-315. (in Chinese)
- [16] LOSEV V, ALEKSEEV S, IVANOV N, *et al.*. 基于 XeF(C-A)放大器的混合(固态/气态)超高功率飞秒激光系统 [J]. *光学精密工程*, 2011, 19(2):252-259.
- LOSEV V, ALEKSEEV S, IVANOV N, *et al.*. Development of hybrid ultra-high power femtosecond laser system on the basis of XeF(C-A) amplifier [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(2):252-259.

作者简介:



李殿军(1957—),男,吉林长春人,研究员,主要从事激光技术方面的研究。E-mail: lidj0906@163.com



李世明(1964—),男,黑龙江牡丹江人,高级实验师,主要从事激光技术方面的研究。E-mail: ciomplsm@163.com



杨贵龙(1966—),男,黑龙江牡丹江人,研究员,主要从事激光技术方面的研究。E-mail: yanggl@ciomp.ac.cn