

中华人民共和国国家标准

GB/T 7247.13—2018/IEC TR 60825-13:2011
代替 GB/T 7247.13—2013

激光产品的安全 第 13 部分：激光产品的分类测量

Safety of laser products—
Part 13: Measurements for classification of laser products

(IEC TR 60825-13:2011, IDT)

2018-07-13 发布

2019-02-01 实施

国家市场监督管理总局
中国国家标准化管理委员会 发布

目 次

前言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 适用性	2
4.1 一般要求	2
4.2 初始条件	2
5 仪器要求	4
6 分类流程	4
7 计算可达发射极限的参数	6
7.1 波长(λ)	6
7.2 多波长光源	8
7.3 宽谱光源	9
7.4 光源时间特性	10
7.5 对向角(α)	12
7.6 发射持续时间	21
7.7 测量条件	21
7.8 扫描光束	25
附录 A (资料性附录) 范例	31
附录 B (资料性附录) 常用转换	46
参考文献	47
图 1 连续波激光器分类流程图	5
图 2 脉冲激光器分类流程图	6
图 3 重要的波长和波长范围	7
图 4 脉冲持续时间定义	11
图 5 平顶脉冲和不规则脉冲	12
图 6 对象角示例	13
图 7 高斯光束的束腰位置	14
图 8 表观光源测量示意图	16
图 9 线性阵列表观光源尺寸	18
图 10 光源测量示意图	19
图 11 简单非圆光源的有效对向角	21
图 12 扫描光束顶点之外的静止表观光源成像图	26
图 13 扫描光束顶点之外的扫描表观光源成像图	26
图 14 具有任意扫描角倍增系数的扫描镜	30

图 A.1 距扫描顶点的距离为 $C_6 = 1$ 时多条光栅线穿过测量孔径	35
表 1 参考点	13
表 2 四光源阵列	19
表 A.1 光源数量例子	44
表 A.2 光源数量例子	45

前 言

《激光产品的安全》分为以下部分：

- 第 1 部分：设备分类、要求；
- 第 2 部分：光纤通信系统(OFCs)的安全；
- 第 3 部分：激光显示与表演指南；
- 第 4 部分：激光防护屏；
- 第 5 部分：生产者关于 GB 7247.1 的检查清单；
- 第 8 部分：医疗激光设备的安全使用指南；
- 第 9 部分：非相干光辐射最大允许照射量；
- 第 12 部分：用于信息传输的自由空间光通信系统的安全；
- 第 13 部分：激光产品的分类测量；
- 第 14 部分：用户指南；
- 第 17 部分：在高功率光纤通信系统使用被动光学元件和光缆的安全。

本部分为《激光产品的安全》的第 13 部分。

本部分按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本部分代替 GB/T 7247.13—2013《激光产品的安全 第 13 部分：激光产品的分类测量》。

本部分与 GB/T 7247.13—2013 相比，主要技术差异如下：

- 增加了超短脉冲激光器的定义(见 3.13)；
- 修改了分类流程(见第 6 章,2013 年版的第 6 章)；
- 修改了表观光源的内容(见 7.5.1,2013 年版的 7.5)；
- 修改了扫描激光器的内容(见 7.4.3.2,2013 年版的 7.4.2.1)；
- 增加了用于确定任意光源对向角的方法(见 7.5.3.4)；
- 增加了危害评估的测量条件(见 7.7.3)；
- 增加了扫描角倍增系数的内容(见 7.8.9)；
- 修改了附录 A,增加了范例(见附录 A,2013 年版的附录 A)；
- 增加了附录 B:常用转换(见附录 B)。

本部分使用翻译法等同采用 IEC TR 60825-13:2011《激光产品的安全 第 13 部分：激光产品的分类测量》第 2 版(英文版)。

本部分做了下列编辑性修改：

- 修改了原文中超短脉冲激光器的定义,由原文的“能够发射短于 100 fs 的脉冲并且包含相当大的光谱成分的激光器。”改为“能够发射短于 100 ps 的脉冲并且包含相当大的光谱成分的激光器。”(见 3.13)；
- 增加了“注：对于超短脉冲,采用其他适宜的仪器测量”(见 7.6.2)。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本部分由中国机械工业联合会提出。

本部分由全国光辐射安全和激光设备标准化技术委员会(SAC/TC 284)归口。

本部分起草单位：北京泰瑞特检测技术服务有限责任公司(国家广播电视产品质量监督检验中心)、中国科学院光电研究院、北京工业大学、中国计量科学研究院、深圳市大族激光科技股份有限公司、武汉华工激光工程有限责任公司、中国电子科技集团公司第十一研究所。

GB/T 7247.13—2018/IEC TR 60825-13:2011

本部分主要起草人：刘志刚、高宏伟、吴爱平、孙殿中、陈虹、邓玉强、卢飞星、周小庄、李婷、曾丽霞、戚燕。

本部分所代替标准的历次版本发布情况为：

——GB/T 7247.13—2013。

激光产品的安全

第 13 部分:激光产品的分类测量

1 范围

《激光产品的安全》的本部分为制造商、检测机构、安全人员及其他人士提供了进行辐射测量或分析的实用指导,是依据 GB 7247.1—2012 建立的激光能量发射水平的测量和分析方法。本部分所述的测量程序旨在作为激光产品的分类指南。如果其他程序更好或者更适合也可以接受。

本部分为计算可达发射极限(AELs)和最大允许照射量(MPEs)提供了信息,由于计算这些限值的某些参数还依赖于其他测量值。

本部分适用于激光器,包括扩展光源和激光器阵列。本部分的使用者宜注意,相对更严格的方法,本部分中对扩展光源观察条件的程序可能产生更保守的结果。

注:关于更复杂光源的评估工作仍在继续,而且将作为国际通用办法达成一致。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB 7247.1—2012 激光产品的安全 第 1 部分:设备分类、要求(IEC 60825-1:2007, IDT)

3 术语和定义

GB 7247.1—2012 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

角速度 angular velocity

扫描光束的速度,单位:弧度/秒。

3.2

光束轮廓 beam profile

光束横截面的辐射分布。

3.3

光束束腰 beam waist

轴对称光束的最小直径。

注:对于非轴对称光束,沿着每条主轴可以有一个离光源不同距离的束腰。

3.4

电荷耦合器件 charge-coupled device

CCD

利用氧化金属半导体技术(MOS)、表面存储和信息转换的自扫描半导体成像器件。

3.5

临界频率 critical frequency

在激光危害评估时,用于判别适用于连续波(CW)模型的脉冲激光重复频率。重复频率高于此频

率时,脉冲激光可按连续波(CW)模型处理。

3.6

高斯光束轮廓 Gaussian beam profile

在最低阶横模(TEM₀₀)工作时,激光束的轮廓。

注:高斯光束轮廓也可能由非 TEM₀₀激光束通过光束整形光学元件得到。

3.7

测量孔径 measurement aperture

用于对激光器进行分类的孔径,以确定相对于每一类别的 AEL 激光的功率或能量。

3.8

脉冲重复频率 pulse repetition frequency

PRF

每秒产生的脉冲数,单位:赫兹(Hz)。

3.9

Q 开关 Q-switch

通过增强激光介质储存和释放能量的性能,产生窄脉宽、高峰值功率激光脉冲的器件。

3.10

调 Q 激光器 Q-switched laser

采用 Q 开关的方式产生高功率、短脉冲的激光器。

3.11

瑞利距离 Rayleigh distance

Z_r

沿光束传播的方向,从光束束腰到光束直径或光束宽度增大到束腰的 $\sqrt{2}$ 倍的距离。

注:瑞利距离通常被称作 1/2 共焦参数。

3.12

响应度 responsivity

R

以 $R = O/I$ 表达的探测器的输出与对应输入的比, O 为探测器的电输出, I 为光功率或能量的输入。

3.13

超短脉冲激光器 ultrashort pulse laser

能够发射短于 100 ps 的脉冲并且包含相当大的光谱成分的激光器。

4 适用性

4.1 一般要求

本部分适用于(但不限于)制造商、测试实验室、安全工作人员以及工业或政府机构官员的参考文件。本部分也包含了标准对关于测量事项的解释并提供了补充说明材料。

4.2 初始条件

在进行辐射测量以确定产品分类或符合 GB 7247.1—2012 的其他适用要求之前,应首先确定激光器的几个参数。

- a) 发射波长(λ)

激光器可能发射一个或多个不同波长的激光辐射。

一般能够从激光器的制造商处获得发射波长、多波长或光谱分布。依据激光器的类型,制造商可以指定一个波长范围而不是单一波长值,或者通过测量确定发射波长或光谱分布,但这超出了本部分的范围。多波长(AEL)评估见 7.1。

b) 工作方式

工作方式是指能量发射的时间特性。有些激光器发射连续波(CW)辐射,另一些激光器以脉冲辐射发射能量。脉冲激光器可以是单脉冲、重复脉冲、调 Q 和锁模方式。在固定位置对连续波辐射进行扫描或调制均产生脉冲串。

此外,对脉冲串编码时要有一个平均的占空比(出光时间与工作时间之比,以十进制小数或百分比表示)。

c) 合理可预见的单一故障条件

GB 7247.1—2012 规定试验宜在每一个合理可预见的单一故障条件下进行。制造商有责任确保在任何情况下可达辐射不超过指定类别的 AEL。

d) 测量不确定度

在测量激光辐射时考虑潜在误差源非常重要。第 5 章讲述了测量不确定度。

e) 伴随辐射(见 GB 7247.1—2012 中伴随辐射的定义)

进入测量孔径的伴随辐射可能影响激光功率或能量和脉冲持续时间的测量值,测试人员宜确保测量装置能够遮挡进入探测器的伴随辐射或考虑伴随辐射的影响。

f) 产品配置

如果测量的目的是分类,在操作、维护和保养手册中列出的所有的控制和设定都要被组合调整到可产生最大可接触的辐射水平。测量也要求使用可能增加辐射危险的附件(例如,光学校准器),这些附件是由激光产品的制造商提供或指定用于整机产品的。

注: 这包括产品的任何配置,可能不使用工具即可获得,或者要违背操作和维护指南中的警告使包含控制和设定的联锁开关失效。例如:当滤波器、扩散器或者透镜等光学元件在激光束的光学路径中不需要工具就可以移走时,产品测试就要在可导致最高危害水平的配置下进行。制造商提供的说明书中不要移开光学元件的警告不能用来证明分类是更低等级的。分类是基于工程师对产品的设计,而不是基于使用者适当的行为。

如果测量是为了确定安全联锁、标签和用户信息的要求,应按照 GB 7247.1—2012 在适用于每一个指定的使用类别(操作、保养和维修)的配置下评估产品。

IEC/TC 76 承认存在等效测量程序,其所得结果与本部分所述的程序的结果一样有效。需要测量时,本部分所述的测量程序足以满足 GB 7247.1—2012 的测量要求。在很多情况下,可能不需要实际的光辐射测量,可以通过对准确标识的光源的分析 and 实际产品的设计来确定是否符合 GB 7247.1—2012 的要求。

适用时,可接触辐射水平的测量应在操作和保养时人可接触的空间位置上。(例如,如果操作时可能需要移开部分防护罩或断开安全联锁装置,在那个产品配置中测量点应是可以接触的。)因此,在某些情况下,尤其是在合理可预见的单一故障条件下,可能有必要在规定的测量位置部分拆解产品进行测量。当一个最终激光产品包含其他激光产品或系统时,符合 GB 7247.1—2012 规定的是该最终激光产品。

测量时,应使测量仪器探测器的位置及导向面向激光产品,保证检测到最大辐射。可以移动探测器或者改变角度以获得仪表上的最大读数。应采取相适宜的措施以避免或消除测量中伴随辐射的影响。例如,有必要和激光系统的输出端保持一定的距离进行测量,以避免来自闪光灯或泵浦二极管/激光二极管辐射对测量数据影响。又如,可以用线性滤波器来滤除伴随辐射。

5 仪器要求

使用的测量仪器宜符合 IEC 61040 的要求。使用哪一类仪器(测量不确定度近似值在 1 类和 20 类之间)取决于所需的精度要求。

当所用仪器不完全符合 IEC 61040 的要求时,应单独地评估不同误差源对总测量不确定度的影响。IEC 61040 中给出了需要考虑的要点:

- 响应度随时间的变化;
- 探测器表面响应度的不均匀性;
- 响应度在照射期间的变化;
- 响应度随温度的变化;
- 响应度随入射角的变化;
- 非线性;
- 响应度随波长的变化;
- 响应度随偏振的变化;
- 重复脉冲辐射随时间变化的平均误差;
- 零点漂移;
- 校准不确定度。

校准宜溯源到国家基准。

确定仪器测量不确定度的试验应参照 IEC 61040 进行。

CCD 阵列和照相机的测量不确定度参见 ISO 11146-3。

6 分类流程

依据产品的已知或测量参数可进行 AEL 和测量条件的计算。此外,应分析增加危险的故障条件。然后,产品的发射测量(或几个不同的测量)将确定发射是否处于预想的 AEL 类别之内。

GB 7247.1—2012 中表 4~表 9 提供了可达发射极限。这些表格的行为波长范围,列为发射持续时间,在每一行和列所对应的每一格中,有一个或多个公式,公式中包含了 GB 7247.1—2012 表 10 中定义参数。

图 1 和图 2 给出了分类流程。最初的方法是使用 GB 7247.1—2012 中 9.3.2 的默认(简单的)评估。如果不知道辐射表观光源尺寸,保守的做法是认为发射的光束是从点光源 $C_s = 1$ 发出的。如果认为产品的输出是由扩展光源产生的,并且在 400 nm~1 400 nm 的波长范围内,而且不接受简化的分类评定,可以使用另一种较为复杂的评估方法来确定分类。对可见光的光化学危害,需要考虑对向角 α 等附加参数,对向角 α 是距离和测量接受角 γ_p 的函数。

首先,确定激光是脉冲波还是连续波。如果脉冲持续时间大于 0.25 s,则认为激光是连续波。对于连续波激光参照图 1 中的流程图,对于脉冲激光,参照图 2 中的流程图。

然后,应确定波长。

如果激光是脉冲的或扫描的,应确定脉冲宽度(PW)和脉冲重复频率(PRF)。

确定激光属于哪一类或哪几类。例如,对于不在 400 nm~700 nm 范围内的低功率应用,可以考虑 1 类,1M 类和 3R 类。对于可见波长光源,可以考虑 1 类,1M 类,2 类,2M 类和 3R 类。

其次,应确定分类的时间基准。这可以根据 GB 7247.1—2012 中的默认值[8.3 e)]来确定,或从 T_2 参数的定义(GB 7247.1—2012 中表 10)来确定,或通过考虑产品特定的时间输出特性来确定。

通过以上信息可以找到 GB 7247.1—2012 中包含适用公式的表 4~表 9 的行和列,由此确定 AEL

限值。

下一步,应确定测量条件(GB 7247.1—2012 中 9.3 和表 11)。对于脉冲激光,应评估 GB 7247.1—2012 中 8.3 f)给出的条件,以确保所有的条件都在 AEL 之内。

一旦确定了 AEL,就可对输出数据进行该评估。输出数据可以由制造商提供,也可以直接测量。如果输出数据由制造商提供,应核实其测试方法符合 GB 7247.1—2012 中第 9 章的规定。如果可达发射小于 AEL,可将此激光器指定为该类别。对于一台脉冲激光器,该类 AEL 适用于时间基准内的所有发射持续时间。

如果可达发射不小于 AEL,宜选择更高一级的 AEL 进行评估。重复该步骤直至可达发射不超过 AEL 或者激光产品被指定为 4 类。

应按照 GB 7247.1—2012 对系统进行评估,以确保合理可预见的单一故障不会导致激光器发射辐射超过指定类别的 AEL。如果满足该判据,就可以知道激光器的分类。

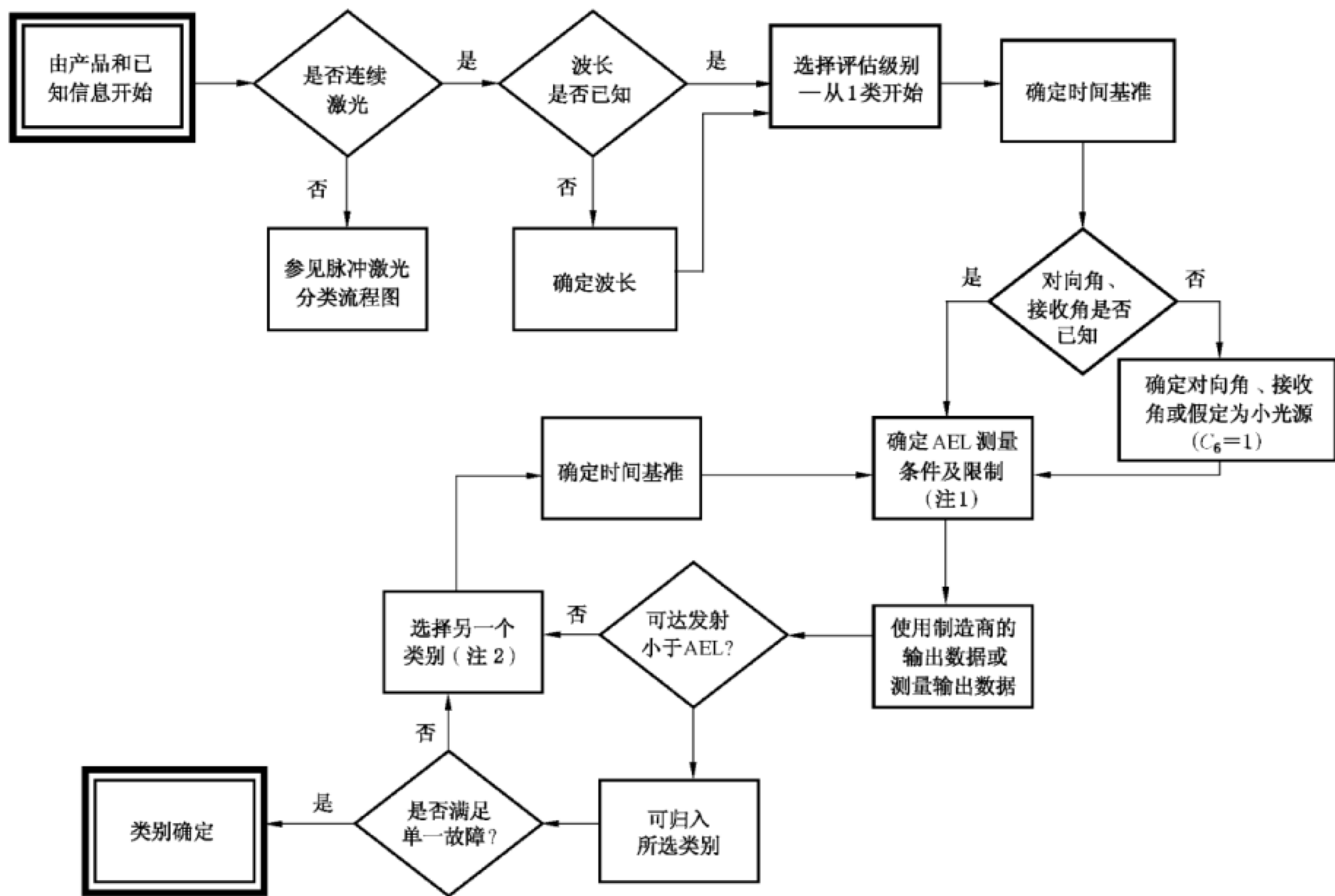


图 1 连续波激光器分类流程图

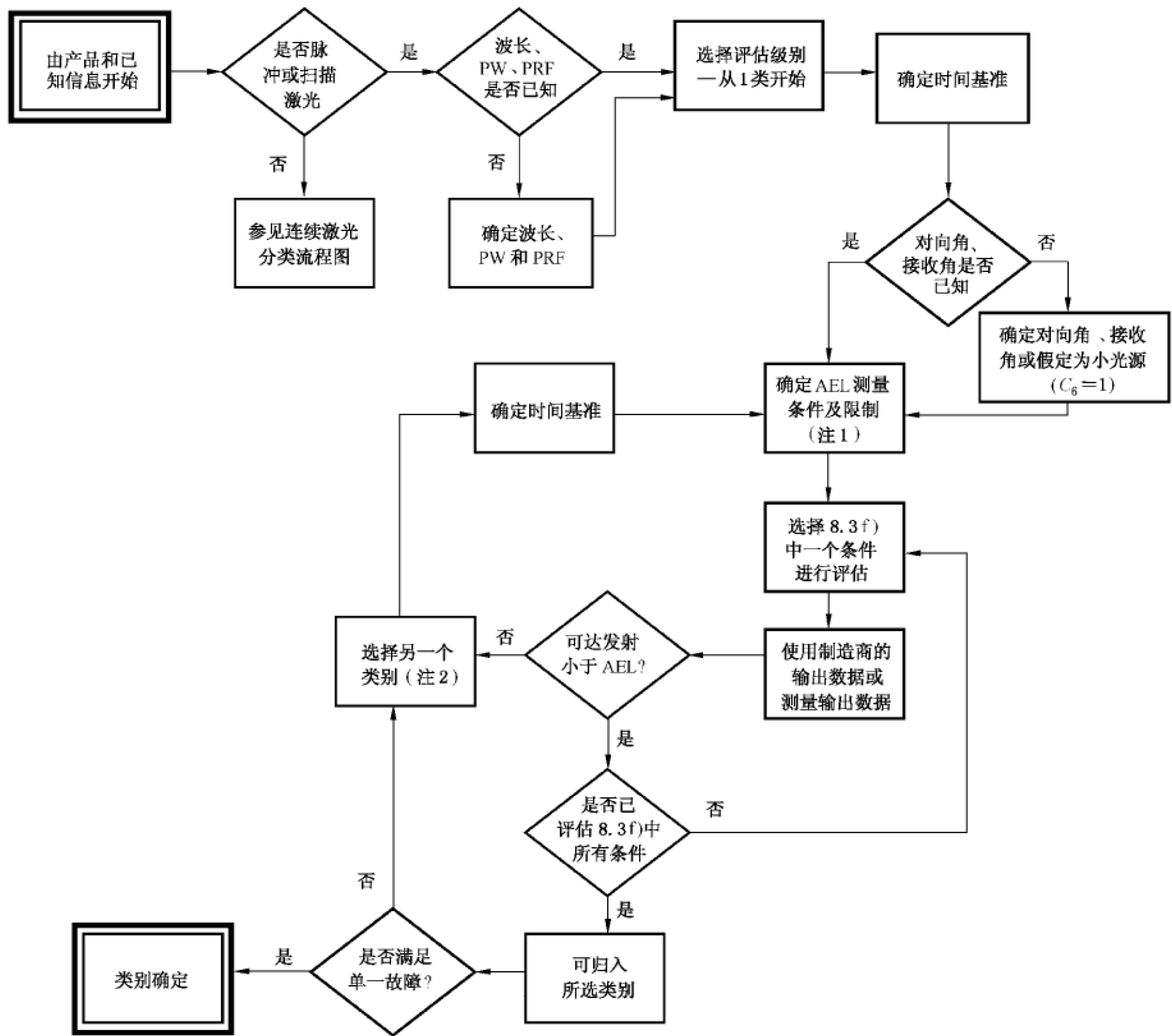


图 2 脉冲激光器分类流程图

注 1: 如果某一产品被指定为某一类,可能满足不止一个条件。例如,在 400 nm~600 nm 波长范围适用的某一类产品既不能超过热极限值也不能超过光化学极限值(每个都有各自的测量条件)。同样,如果一个产品为脉冲输出,则三个极限值(单脉冲、脉冲串和平均功率)都不能被超过。

注 2: 如果使用一个扩展光源,AEL 与光源的距离之间是函数关系,使用最不利的测量距离进行分类。

注 3: 如果不能满足 1 类或 2 类的要求,宜采用 1M 类或 2M 类的要求来评估产品的发射类别。如果产品发射满足 1 类或 2 类的要求,则不必满足 3R 类的要求。

7 计算可达发射极限的参数

7.1 波长(λ)

7.1.1 确定波长

确定波长一般不需要很高的精度,通常光生物性危害随波长变化不大。以下是几个例外的情况(见图 3):

- a) 302.5 nm~315 nm:该范围内,参数 T_1 和 C_2 变化显著;

- b) 450 nm~600 nm:该范围内,光化学危害降低 1 000 倍;
- c) 1 150 nm~1 200 nm:该范围内,热危害降低 8 倍;
- d) 400 nm:大于 400 nm 的波长,主要是对视网膜的危害,小于该波长,主要是非视网膜的危害;
- e) 1 400 nm:大于 1 400 nm 的波长主要是非视网膜的危害,小于该波长,主要是对视网膜的危害。

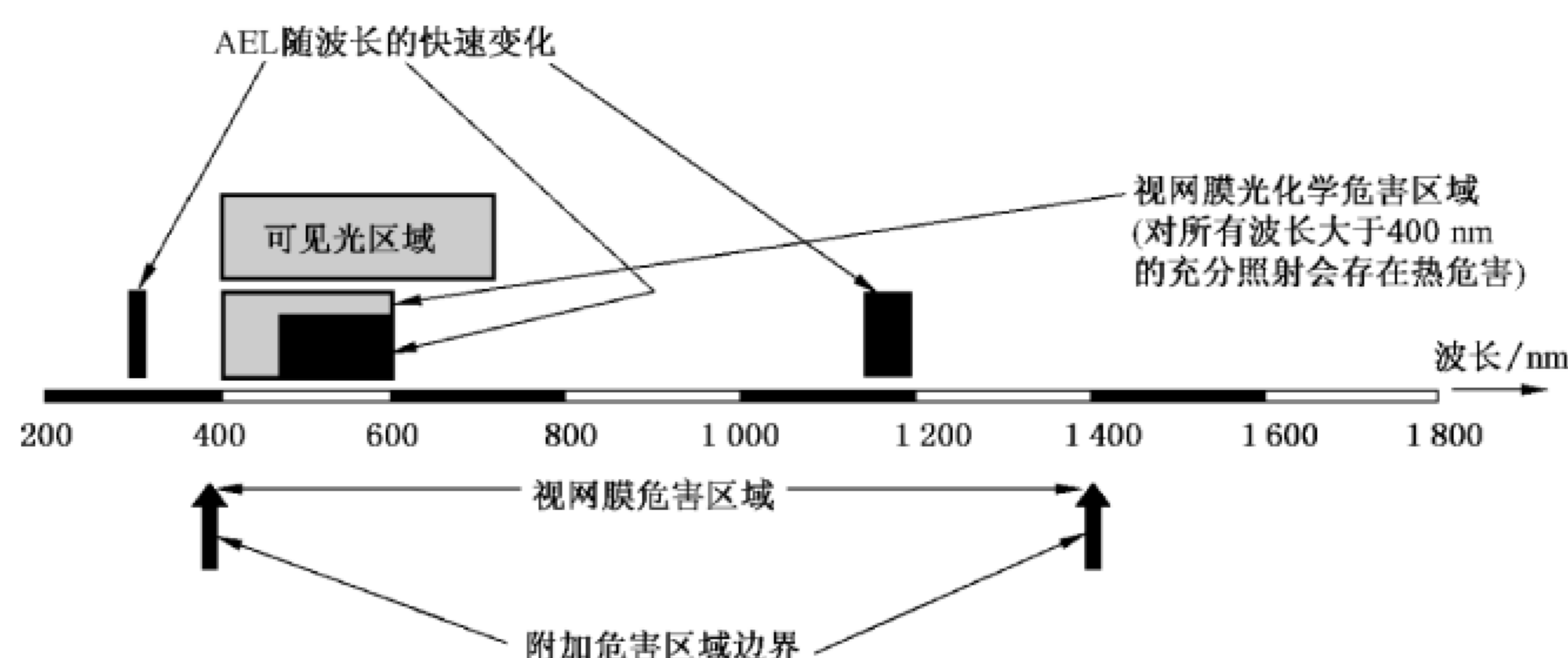


图 3 重要的波长和波长范围

对于窄带激光(或单波长激光),制造商仅需提供波长,7.1 的其他部分以及 7.2 和 7.3 均不必考虑。如果可能的波长范围(不同产品之间有差异)占上述 a)、b)或 c)规定的波长范围中很大的比例,可以用其中最危险(最短)的波长判断,也可以用给定产品的实测波长判断。

在 a)、b)或 c)范围内,可能需要分段求和,确定在各波长处的极限值,以及各输出波长的权重。7.2.2 和 7.3 有详细讨论。

叠加危害指应一起考虑的危害。例如,小于 400 nm,或 400 nm~1 400 nm 之间,或大于 1 400 nm 的多波长辐射是叠加危害。对于每个区域的宽谱或多波长辐射,危害是叠加的,应按 GB 7247.1—2012 中 8.3 b)所述进行分段求和。如果产品发射的多个激光波长处于上述两个范围(如,700 nm 和 1 500 nm),那么宜对每个波长用相应的 AEL 分别评价。对该产品进行分类时,选择用较高的级别。

对于可能的输出波长或输出光谱包含了大于 1 400 nm 和/或小于 400 nm 的激光器,宜对 AEL 做特殊考虑。边界波长两端的危害是不同的,影响也是不同的。为了对其进行分类,每一个光谱范围内的功率或能量不应超过相应的 AEL。

波长参数的测量和确定是激光危害评估和安全分类的基础,波长的确定决定了使用哪种类型的功率计或能量计。一些辐射计探测元件在可见光和近红外波段响应非常灵敏,但在远红外、紫外波段则几乎没有响应,反之亦然。此外,照射极限同样依赖于波长。在大多数情况下,没有必要直接测量激光的工作波长。通常工作波长由制造商提供且是可信的。

对于能发射多个波长或激光波长处于视网膜危害区任一光谱边缘的激光器,发射光谱的确定至关重要。有多种设备可测量激光波长或发射光谱。光谱仪和类似的仪器(如波长计)的操作都极为简单。这些设备中大部分仅仅是通过采样光束并给出了数字读取波长或光谱。一些设备有几何结构和视野限制区,但数据通常是非常可靠的。尤其是手动操作时,单色仪更加费时费力,但可靠精确。另一种选择可以考虑光学滤波器,如光窄带通滤波器,但是他们有一定的局限性。这些滤波器的使用需要事先了解大概是什么波长。同时,对多波长激光器或具有广泛发射的激光器,用滤波器确定波长或发射光谱相当麻烦的,如果不是徒劳的。

7.1.2 眼危害区域

当充分暴露在大于 400 nm 波长的辐射下时,存在热危害。

只有在发射激光波长处于 400 nm~600 nm 之间且照射时间超过 1 s 时,才考虑视网膜受到的光化学危害。

危害区域按以下分段:

- 180 nm~400 nm:对于连续波辐射主要是光化学和非视网膜危害,对于脉冲辐射主要是热危害。(GB 7247.1—2012 中没有说明波长小于 180 nm 的情况)
- 400 nm~600 nm:在此范围,光化学危害和热危害都应考虑。发射时间小于 10 s(或波长处于 400 nm~484 nm 区域、发射角 1.5 mrad~82 mrad 的表观光源发射时间小于 1 s)时不必考虑光化学危害。
- 400 nm~1 400 nm:在此范围,是视网膜危害区域,主要考虑视网膜的危害。
- 1 400 nm~1 mm:波长大于 1 400 nm 时,辐射的穿透深度远小于 400 nm~1 400 nm 波长时的情况。此时的危害属热危害,但主要是非视网膜危害。

7.2 多波长光源

7.2.1 一般要求

多波长光源是指发射两个或两个以上分离的辐射波长的光源。多谱线激光明显属于这一类。这些不同的波长可能落入导致不同生物效应的光谱危害区域,需要单独考虑,见 7.1.1,7.1.2 和图 3。

超短脉冲激光可以包含一个相对较大的光谱带宽,对于这种带宽脉冲激光,如果 AEL 或 MPE 限值变化超过 10%,宜采用 7.3 的方法进行评估。

7.2.2 单一危害区域

对于产生同种危害类型的辐射、具有不同波长的几个光源,应采用加权求和的方法确定产品是符合还是超过给定类别的 AEL。对于单一波长,判断标准可以表示为:

如果 $P_{\text{meas}} < \text{AEL}$,那么产品未超过该分类极限。

此处, P_{meas} 是所测功率(或能量或其他指定的量),AEL 是分类功率(或能量或其他指定的量)极限值。上式可重新表示为:

如果 $P_{\text{meas}}/\text{AEL} < 1$,那么产品未超过该分类极限。

按此形式,可以扩展到两个波长:

如果 $P_{\text{meas}}(\lambda_1)/\text{AEL}(\lambda_1) + P_{\text{meas}}(\lambda_2)/\text{AEL}(\lambda_2) < 1$

那么产品未超过该分类极限。

对于两个以上的波长,可以扩展为一个通用求和公式:

如果 $\sum_{i=1,2,3,\dots} [P_{\text{meas}}(\lambda_i)/\text{AEL}(\lambda_i)] < 1$,

那么产品未超过该分类极限。

这只适用于每次一种危害情况(即,光化学危害和热危害分别处理)。

注:对于可见光范围(700 nm~1 400 nm)和近红外范围(700 nm~1 400 nm)的热危害极限值不同时,时间基准(发射时间 t 或者计算的参数 T_2)是一样的。因此,上面的求和公式仍然适用。

7.2.3 两种或两种以上危害区域

如果产品发射两种不同的波长,且处于不同的危害区域(例如, $\lambda_1 = 300 \text{ nm}$, $\lambda_2 = 430 \text{ nm}$),则应分别评估每一个波长:

如果 $P_{\text{meas}}(\lambda_1) < \text{AEL}(\lambda_1)$ 且 $P_{\text{meas}}(\lambda_2) < \text{AEL}(\lambda_2)$,

那么产品未超过该分类极限。

如果其中有一个条件没有满足,应考虑与更高级别的 AEL 相比较。

7.3 宽谱光源

7.3.1 一般要求

某些激光器(例如,超短脉冲激光器)光谱带宽相当大,这就意味着可能需要在不止一个光谱范围内进行分类评估。

7.3.2 AEL 随波长发生微小变化的光谱区域

如果光源的发射光谱未包含上述 a)、b)、c) 中的任何范围或者 d)、e) 的任何边界波长(见上述 7.1), 该光源可近似为单一波长光源:

- a) 如果 AEL 不随波长发生变化,在光源光谱内选择任何波长都是等效的;
- b) 如果 AEL 随波长缓慢变化,而且光源发射光谱处于极限值表中某一光谱范围之内,则能够计算该分布的峰值极限值或中心极限值,包括该分布峰值辐射 10% 处的较短波长。如果 AEL 的差值小于 1%,可以使用峰值波长或中心波长。保守的处理方法是选择关注范围内要求最严格的波长。

7.3.3 AEL 随波长变化大的光谱区域(302.5 nm~315 nm, 450 nm~600 nm 以及 1 150 nm~1 200 nm)

如果光源的发射光谱包含部分或全部上述三个区域,且极限值随波长变化大,可以使用以下两种近似方法:

- a) 对于适当的发光区域使用下限波长计算 AEL。由于较短波长的 AEL 比较长波长的 AEL 具有更加严格的要求,因此通常采用这种简单保守的处理方法。当然,这可能导致过于严格的极限值。如果计算的 AEL 是可以接受的(例如,按照这种假设产品为 1 类),则不需要进一步的计算;
- b) 使用上述 7.2.2 的求和公式,计算所测功率除以作为波长函数的 AEL 后的和。例如,假设一个具有三角光谱分布的光源,其下限波长为 400 nm,峰值波长 460 nm,上限波长 520 nm。400 nm~450 nm 的 AEL 是常数。450 nm 以上,AEL 以 C_3 因子呈指数增长。如果:

$$P_{\text{meas}}(400 \text{ nm} < \lambda < 450 \text{ nm}) / \text{AEL}(400 \text{ nm} < \lambda < 450 \text{ nm}) + \sum_{450 < \lambda_i < 520 \text{ nm}} [P_{\text{meas}}(\lambda_i) / \text{AEL}(\lambda_i)] < 1$$

那么,不超过适用的 AEL。

7.3.4 包含危害类型边界的光谱范围(接近 400 nm 和 1 400 nm)

如果输出光谱分布包含危害区域边界(400 nm 和 1 400 nm),每个区域的输出是独立的。如果有必要,应分别对于每一个光谱区域按照 7.2.3 和 7.3.3 规定的方法处理。

7.3.5 极宽光谱光源

对于极宽光谱需要确定单位波长的功率或能量。如果不能从制造商处获得此信息,宜进行光谱测量。具体细节不在本部分介绍。IEC 62471 提供了有关宽带光源测量的相关信息。

如果激光产品不发射 315 nm 以下的辐射,可以简化计算。考虑到部分的光谱随波长不同有不同的生物反应需要以下信息(见 7.1.1):

- a) 按 GB 7247.1—2012 要求测得的 315 nm~400 nm 之内的总功率或总能量(P_a 或 Q_a);
- b) 按 GB 7247.1—2012 热极限值要求测得的 400 nm~700 nm 之内的总功率或总能量(P_b 或 Q_b);
- c) 按 GB 7247.1—2012 光化学极限值要求测得的 400 nm~450 nm 之内的总功率或总能量(P_c 或 Q_c);

- d) 按 GB 7247.1—2012 光化学极限值要求测得的 450 nm~600 nm 之内的功率光谱分布或能量光谱分布 $[P_d(\lambda)$ 或 $Q_d(\lambda)]$;
- e) 按 GB 7247.1—2012 热极限值要求测得的分布从 700 nm 至上限波长的功率或能量光谱分布 $[P_e(\lambda)$ 或 $Q_e(\lambda)]$ 。

如果测量方法(或步骤)对于功率和能量都适用,仅需使用功率 P 。

——选择一个 AEL。(见 GB 7247.1—2012 第 9 章关于计算极限值的公式和说明)

——计算紫外辐射极限值 AEL_a 和比值 $R_a = (P_a/AEL_a)$ 。

——计算可见光热极限值 AEL_b 和比值 $R_b = (P_b/AEL_b)$ 。

——计算可见光化学极限值 AEL_c ($400\text{ nm} < \lambda < 450\text{ nm}$)和 $AEL_d(\lambda)$ ($450\text{ nm} < \lambda < 600\text{ nm}$)。计算比值并求和,见式(1):

$$R_{cd} = P_c/AEL_c + \sum_{450\text{ nm} < \lambda_i < 600\text{ nm}} [P_d(\lambda_i)/AEL_d(\lambda_i)] \dots\dots\dots(1)$$

——计算 700 nm 至波长范围的上限波长的红外热辐射极限值 $AEL_e(\lambda)$ 和计算比值并求和,见式(2):

$$R_e = \sum_{700\text{ nm} < \lambda_i < \lambda_{\max}} [P_e(\lambda_i)/AEL_e(\lambda_i)] \dots\dots\dots(2)$$

——如果符合以下所有条件,可将产品认定为最低激光产品级别:

- $R_a < 1.0$;
- $R_b + R_e < 1.0$;以及
- $R_{cd} < 1.0$ 。

7.4 光源时间特性

7.4.1 一般要求

如果产品连续发射辐射且功率恒定,确定级别的过程比较简单。应确定发射时间。按 GB 7247.1—2012 固定时间或计算时间确定(即 T_2 是表观光源尺寸或者光源对向角的函数)。由此,可进行适用的 AEL 计算,对于这种产品,7.4 的其他部分不必考虑。

7.4.2 具有限定“开启”时间的光源

如果产品仅在有限的时间周期内发射辐射,并且该时间周期小于 GB 7247.1—2012 中规定的类别的时间基准,可采用较短的时间来计算适用的 AEL。较短的发射时间会导致较高的峰值功率极限值。注意,需要考虑所有高于时间基准的持续时间的 AEL。

7.4.3 周期性或恒定占空比的光源

7.4.3.1 一般要求

有些产品包含有产生规则序列脉冲或编码(不规则)序列脉冲的光源。如果已知最大占空比,可将不规则序列脉冲视作规则序列脉冲。此处占空比是指一个周期内光源发射的时间的百分比。

对于每秒 120 个、脉宽为 3 μs 的脉冲,占空比为 $120 \times 3 \times 10^{-6} / 1$ 或 0.036%。

对于编码脉冲序列,使用每秒 120 个、脉宽为 3 μs 、编码率为 50%的脉冲序列(50%的脉冲位置有脉冲,50%的位置没有脉冲),占空比为 $0.5 \times 120 \times 3 \times 10^{-6} / 1$ 或 0.018%。

关于如何计算极限值的其他信息可参考 GB 7247.1—2012 中表 3(包含有效脉冲组的时间周期 T_i)。为计算有效脉冲功率、持续时间以及有效脉冲率需要知道脉冲率、占空因数、编码占空因数、以及表 3 中有关 AEL 的数据。

以下三个极限值应考虑:

- a) 基于脉冲宽度的单脉冲极限值；
- b) 针对规定或计算的分类时间基准的平均功率极限值；
- c) 考虑 C_5 因素, 来自一个脉冲串的平均脉冲能量极限值。

GB 7247.1—2012 中 8.3 f) 规定了在确定重复脉冲激光或调制脉冲激光在波长 400 nm 及其以上的热危害的 AEL 时应使用的最严格的要求 a)、b)、c)。要求 c) 使用了对基于在适用的时间基准或 T_2 (取更短者) 内所发射脉冲数的单脉冲 AEL 修正因子。

7.4.3.2 脉冲持续时间

GB 7247.1—2012 将脉冲持续时间定义为在脉冲前沿和后沿的半峰值功率点之间测得的时间增量。因此所述持续时间就是在前沿上幅值达到峰值的 50% 点与在后沿上幅值返回同样的值的点之间的时间间隔(见图 4)。

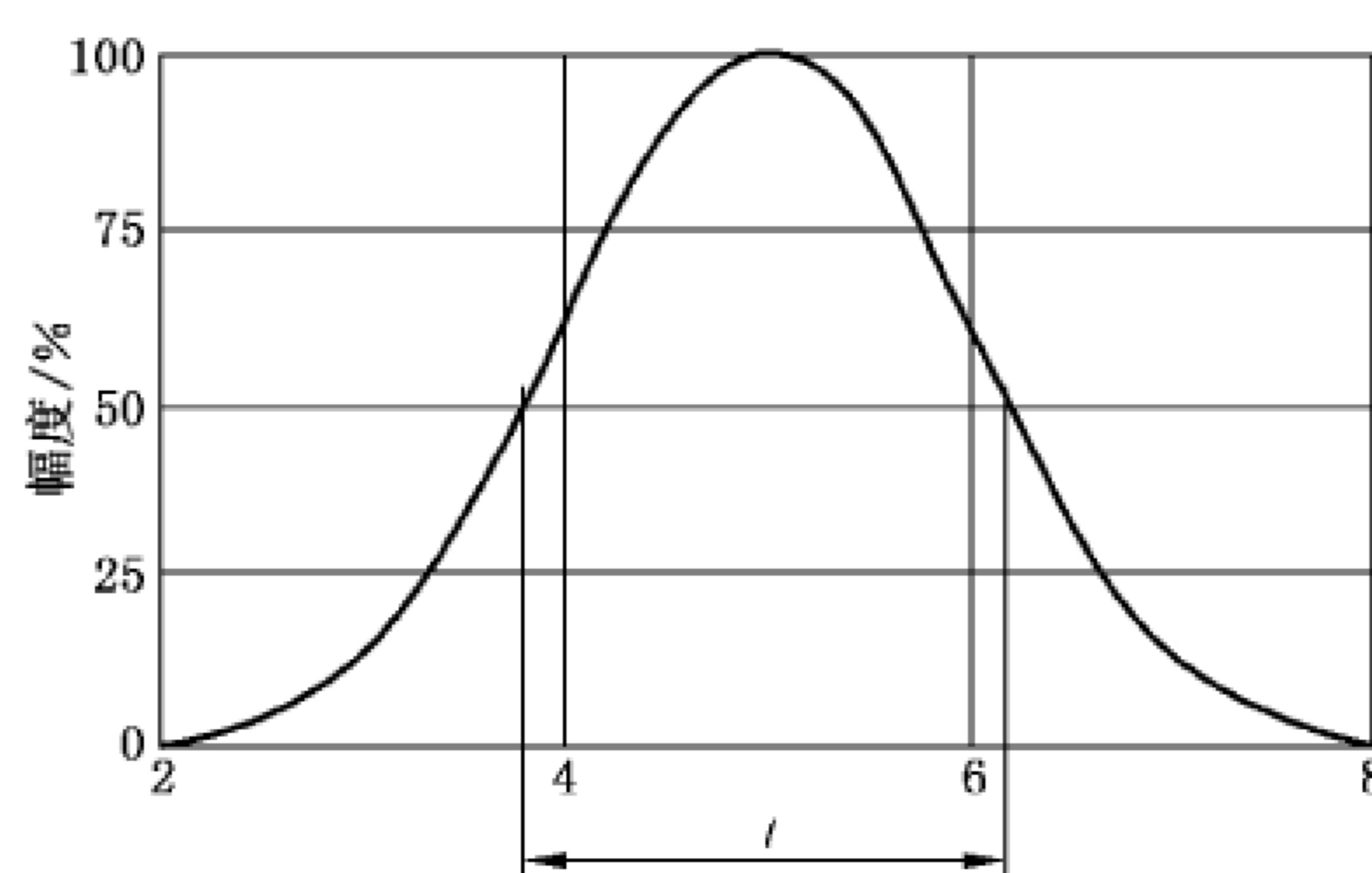


图 4 脉冲持续时间定义

脉冲持续时间 t 可用光敏探测器和示波器组成的测量设备或类似设备精确地确定。测量仪器应符合以下要求：

- a) 整套测量装备的时间响应或频率响应应满足持续时间精确测量要求；
- b) 被测辐射应充分地散射后照射在探测器的光敏面上, 以保证探测器的响应度既不会有局部饱和点也不会有局部灵敏度差异；
- c) 光辐射强度不得超过仪器的标称最大测量值。

此外, 检测设备应与激光波长相匹配, 且时间常数小于激光脉冲上升时间至少十倍。这些通常被称为快速检测设备。宜减少阻抗以缩短测量仪器的时间常数。为了得到真正的脉冲宽度, 使用 50Ω 阻抗匹配的电缆和标准连接器, 一些现代数字示波器内设有不同的匹配终端, 并在菜单中列出。检测设备放置在光束范围内, 并设置脉冲上升沿触发; 当获得一个合适的脉冲波形, 测量脉冲上升沿和下降沿的半峰值点间的全宽就是脉冲宽度。

为了给激光产品分类, 需要了解单脉冲激光器、Q 开关激光器、锁模激光器和重复率脉冲或扫描激光器的一些脉冲持续时间的知识。对于扫描光辐射, 应当在扫描模式中所有可达位置确定脉冲持续时间。因为偏转器的种类不同, 在扫描线的整个长度上光束扫描速度可能不是恒定的。对于连续波 (CW) 工作模式下的扫描激光器产品, 脉冲持续时间取决于光束直径和光束扫描速度。对于脉冲或调制激光器产品分类, 计算发射持续时间时应考虑调制频率、光束直径和扫描速度。此外, 对于扫描光束, 脉冲持续时间还取决于测量距离; 对于一个扩展光源, 可包括在不同测量距离确定脉冲持续时间, 以找到最不利的测量距离。

7.4.3.3 脉冲重复频率

通常用示波器测量脉冲重复频率 (PRF), 但是这些测量方法可能并不简单, 许多因素可能导致错误

的读数或者根本无法检测到激光脉冲序列。像测量功率或能量一样,探测器将光信号转换为电信号后再用示波器测量。测量中,探测器的光谱响应率与激光波长的匹配通常是很重要的,还应该注意发生饱和的情况。此外,前期了解脉冲重复频率的概况将帮助设置示波器的时间域;为确保脉冲测量范围,从探测器到示波器需要合适的连线接头,大多数示波器默认设置为兆欧档是足够的。有些辐射计具有测量脉冲重复频率的功能,确保理解制造商的仪器说明书是很重要的。其他仪器,如频率计或脉冲计数器也可以用来确定 PRF。

应该注意,如果激光器发出的脉冲序列由不均匀间隔的脉冲组成,示波器的触发就会有问题。我们需要单一轨迹,而连续采样会产生重叠的轨迹,将导致计数误差,建议采用性能更好的脉冲计数器。

7.4.4 幅值变化的光源

如果脉冲不是“平顶”(在脉冲开启时间内,幅度恒定,见图 5),有必要详细分析脉冲结构。

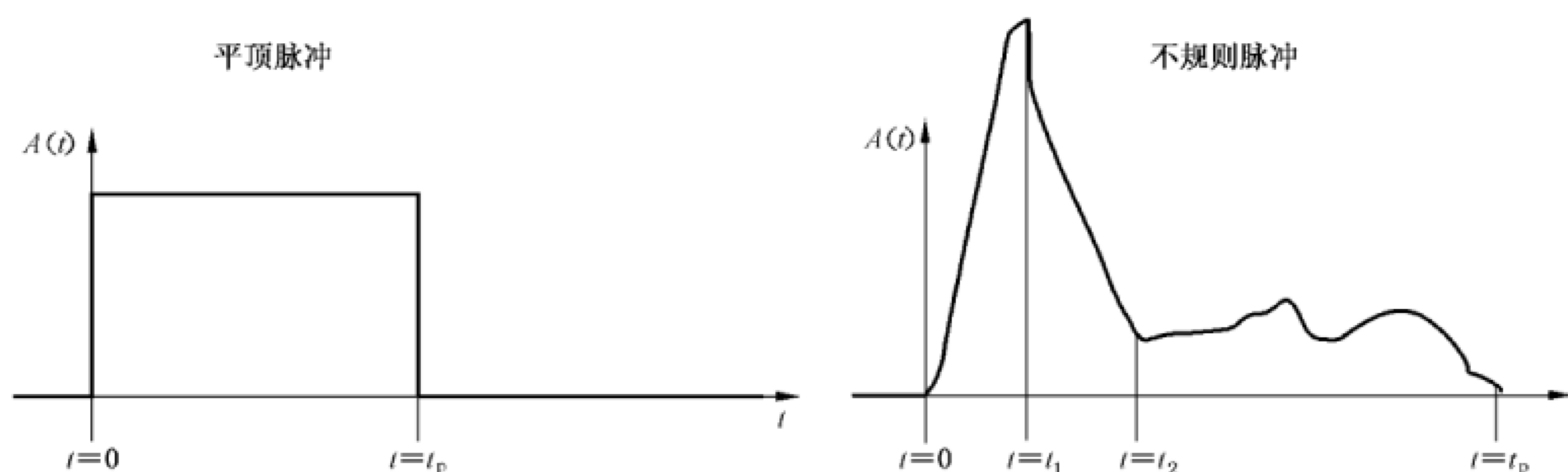


图 5 平顶脉冲和不规则脉冲

对于平顶脉冲,分析可能简化。只要考虑脉冲幅度 $A(t)$ 和脉冲持续时间 t_p 。

对于第二种脉冲,半峰值最大宽度(FWHM)可能很难确定。针对脉冲能量,需要用图 5 所示传统的分段分析峰值脉冲方法评估,将总能量分为 $t=0$ 至 $t=t_1$ 、 $t=0$ 至 $t=t_2$ 和 $t=0$ 至 $t=t_p$ 的几小段,在每段持续时间内用适当的 $A(t)$ 来获得峰值。应用 7.4 对所有持续时间的评估进行确认。

7.4.5 脉冲持续时间变化或不规则脉冲的光源

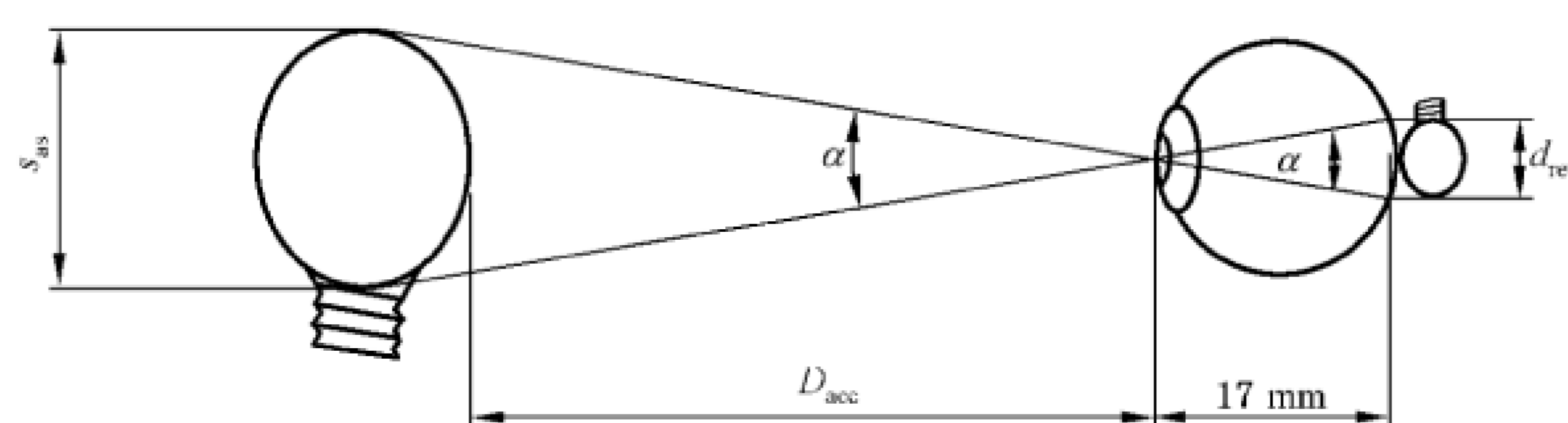
对于持续时间变化和/或幅值变化的脉冲序列,可以使用 GB 7247.1—2012 中 8.3 f) 3) ii) 所述的 total-on-time-pulse 脉冲总持续时间(TOTP)方法。

7.5 对向角(α)

7.5.1 一般要求

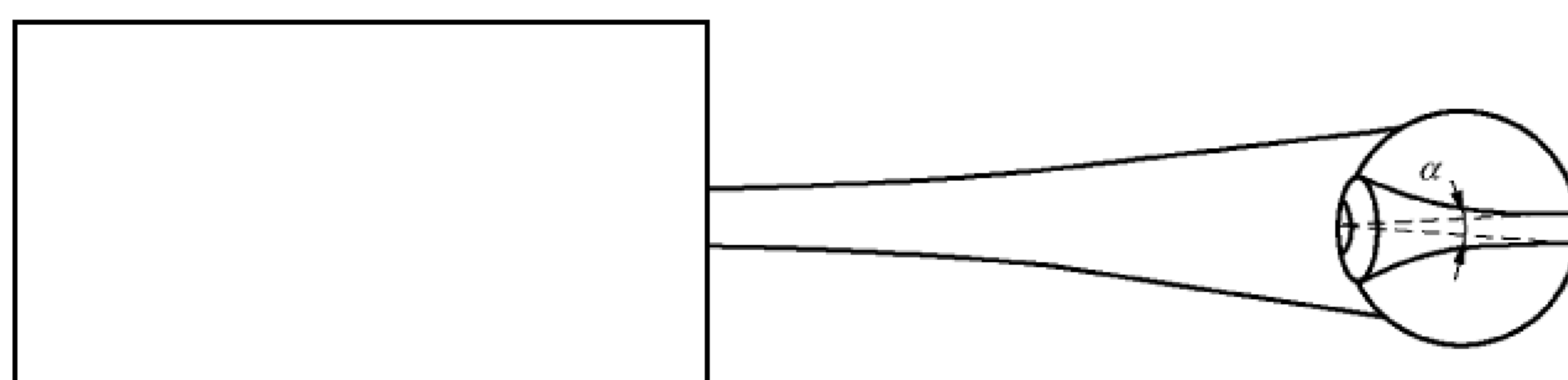
在视网膜热危害区域(波长范围 400 nm~1 400 nm),AEL 通过修正因子 C_6 (见 GB 7247.1—2012 中表 4~表 9)与表观光源的对向角 α 相关。计算 AEL 的公式取决于 T_2 的值,而 T_2 取决于 α 。

对一个给定的视网膜危害评估位置,表观光源是形成最小视网膜影像的实像或虚像。对向角作为表观光源的视网膜影像尺寸的一个度量,是表观光源的直径通过眼睛聚焦形成的平面角,见图 6 a) 和图 6 b)。眼睛能够通过适应性调节(即,通过改变晶状体的焦距)产生的最小视网膜影像尺寸决定了表观光源的对向角。表观光源的对向角沿光束轴向的位置变化而变化。除了表面发射光源(例如,完全漫透射或漫反射光束或没有封装透镜或反射镜的 LED)外,也是眼睛距离表观光源沿轴向位置的函数。



图示显示了光束由漫射器传输通过或反射,如磨砂灯泡,此处灯泡既是真实的光源也是表观光源。

a) 非相干光源或漫射光源的对向角(α)和表观光源的尺寸(s_{as})



此种情况比图 6 a)显示的单一光源的情况要复杂,对向角和表观光源的位置都随着光束的位置而显著变化。

b) 普通激光束在光束某位置处的对向角

图 6 对象角示例

在大多数情况下,同样的功率或能量分布在较大的视网膜区域上会减少视网膜危害,用修正系数 C_6 表达。因此,对于中等角度($1.5 \text{ mrad} < \alpha < 100 \text{ mrad}$)和大角度($\alpha > 100 \text{ mrad}$)单光源以及阵列光源 C_6 可能是一个重要参数。然而,通常不必确定对向角, C_6 可以假定为等于 1。该方法提供了最保守的评估。激光危害或者分类的评估应总是以假设 $C_6 = 1$ 开始。如果这种假设成立,即在此情况下没有超过假定的激光器类别的 AEL 的值,则没有必要做进一步的分析。

大多数不带有光束整形器的单一激光器是小光源, $C_6 = 1$,表观光源的位置对于激光的安全不重要。对于这样的产品,7.5 的以下部分不必考虑。

对于一个普通的激光光束, α 的确定以及 $C_6 > 1$ 的应用,都不在本次版本范围内,按 7.5.3 执行。

对于面光源,例如漫透射或漫反射的激光光束或裸激光二极管(不带有整形光学器件),可以采用 7.5.3.3 所述的简化方法。

对于假定每个单个光源都是小光源($\alpha_s \leq 1.5 \text{ mrad}$)的光源阵列的特殊情况,在 7.5.4 中分析。

7.5.4.5 以图例说明了非圆形发射模式的简单光源。针对扫描激光的专门评估方法见 7.8。

7.5.2 参考点的位置

对于小光源或者假定 $C_6 = 1$ 的所有光源,可在距参考点预定距离处测量可达发射水平。表 1 列出了不同情况下的参考点位置。对于漫射光源和不带整形光学器件的半导体或大面积光源,表 1 中用于确定可达发射水平的参考点在 $C_6 > 1$ 时测量中等光源和大光源也有效。

表 1 参考点

产品类型	参考点
半导体发射器(激光二极管,超发光二极管)	发光芯片的物理位置
扫描发射器(包括扫描线性激光器)	扫描顶点(扫描光束的中心点)

表 1 (续)

产品类型	参考点
线性激光器	线的焦点(扇角的顶点)
光纤输出	光纤顶点
扩散光源	扩散器表面
其他	光束腰

注 1: 如果参考点位于防护罩内(即,不可接触),此时离人员通路的最近点的距离比 GB 7247.1—2012 中规定的测量距离远,则应在人员通路的最近点进行测量。

下列给出的评估光束束腰位置的方法适用于小光源和高斯光束。此类评估有效的一个必要条件是应在射线光学适用的瑞利范围以外的位置进行分析,因此能够(而且应当)使用远场发散角。

注 2: 有关表观光源位置的信息可以从 Enrico Galbiati 的文献《激光安全中表观光源的评估》获得(见参考文献)。

选择一个方便的参考平面(确保辐射发散角是恒定值,即参考平面位于远场)。确定远场发散角 θ 。光束束腰位于距离参考平面 r 的位置处,见式(3)、图 7:

$$r = (d) / [2 \tan(\theta/2)] \quad \dots\dots\dots (3)$$

此处 r 是从参考平面到小光源的虚焦点的距离。

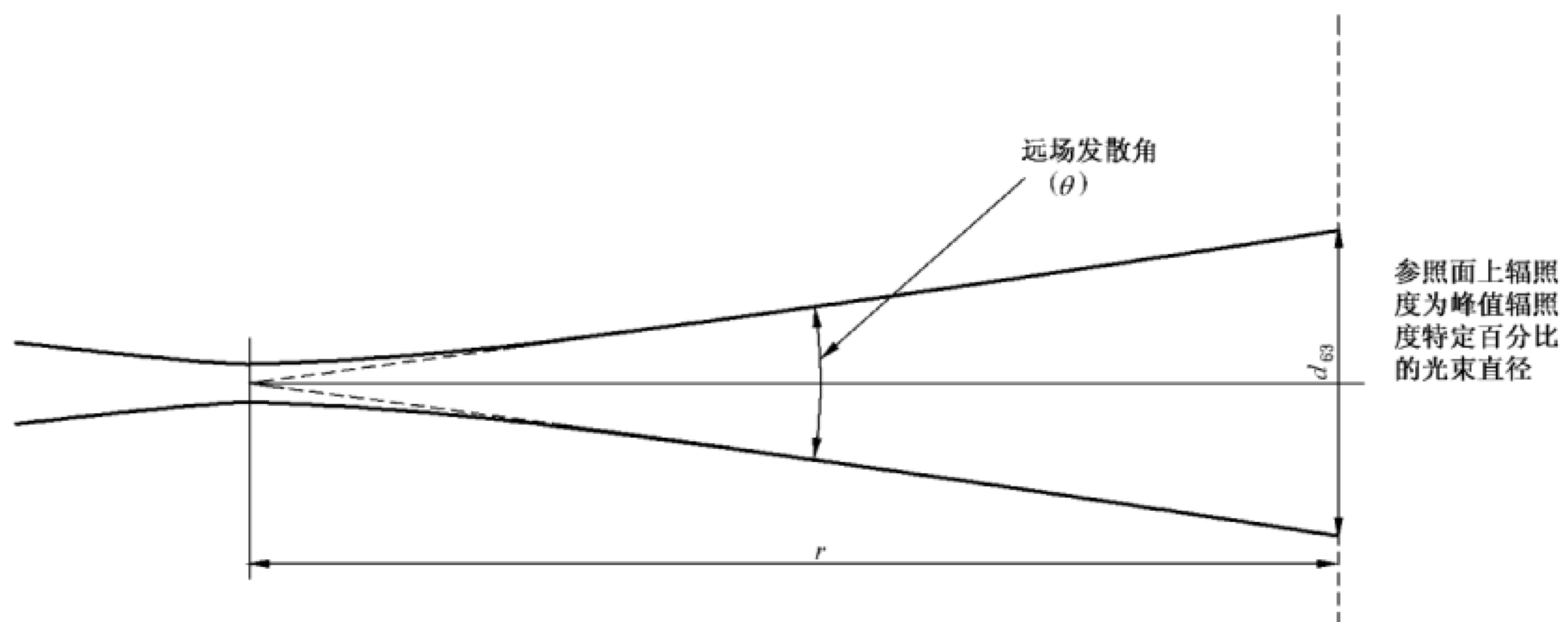


图 7 高斯光束的束腰位置

在某些情况下(例如,对装了柱透镜的线激光或普通像散光束)可能有多个束腰。线激光的参考点位置见表 1。对于在 x 和 y (垂直于光轴)具有分离束腰的像散光束,应当分析两束腰位置和中间点两种情况,并考虑最严格重的情况。

扫描光束在 7.8 作进一步分析。

7.5.3 确定对向角的方法

7.5.3.1 一般要求

有几种推荐的确定表观光源对向角的方法。不同的方法得到的精确度是不同的,显然,付出的努力和成本也是不同的。具体选择何种方法取决于所需要的精度,即 MPEs 或 AELs 的接近度,有时取决于问题的复杂程度。本部分讨论的下列方法是针对复杂情况的方法:

- a) 保守的默认方法(见 7.5.3.2);

- b) 用于简单光源如面光源或完全漫射光的方法(见 7.5.3.3);
- c) 光束传播方法(见 7.5.3.4);
- d) 人工眼方法(见 7.5.3.5)。

7.5.3.2 保守的默认方法

如果不知道 α , 而且无法进行实验评估, 此时可以选择可定量调整的合理估计, 也可以选择保守默认值。

α 的默认值为 1.5 mrad, 小于 1.5 mrad 时 AEL 无变化, 因此 $C_6 = 1, T_2 = 10$ s。虽然采用该方法可能人为造成计算的极限值偏低, 但却是一种安全的方法。正如上面所指出的, 以该方法作为首次评估是一种不错的选择。通常情况下, 不再需要进一步的分析。

7.5.3.3 用于简单光源如面光源或完全漫射光方法

对于面光源, 如漫射透射或漫反射激光光束或裸激光二极管(不带整形光学器件), 可使用简化的方法。对于这些光源, 真实的光源同表观光源是一样的, 因此可用真实光源的尺寸来确定对向角。因此, 图 6 a) 中的 s_{as} 等于真实光源的直径, 眼睛所处位置到光源的距离 D_{acc} 等于眼睛和光源的实际距离。确定 α 的公式如下, 见式(4):

$$\alpha = 2 \tan^{-1}(s_{as}/2D_{acc}) = 2 \tan^{-1}(d_s/2r) \quad \dots\dots\dots(4)$$

此处 arctan 是反正切三角函数, 如果 α 足够小, 三角函数可以简化为:

$$\alpha \sim (d_s/r)$$

d_s 是面光源的直径, r 是面光源与眼睛(或测量孔)之间的距离。

使用光学器件(例如, 整体透镜, 保护透镜或反射镜), 可以改变表观光源的尺寸和位置。这需要更详细的分析, 不在本部分的范围内, 将在下一个修订版中陈述。

7.5.3.4 用于任意光源的方法

通常确定对向角 α 的方法是将表观光源成像在探测平面上, 如图 8 a) 所示。物平面(即成像平面)是表观光源平面(其可能既包括物理物源或者波前)。

正确的成像平面是获得最小(或最大危害)图像的平面(假设像的位置位于透镜焦点之上)。

注: 改变成像距离等同于成像不同的源物体平面, 因为每个图像平面对应于“共轭”物体平面。这几乎相当于眼睛通过调节晶状体改变焦距以将不同物体成像到视网膜上——除了眼睛中图像距离是固定的并且晶状体的焦距改变。由于仅以小直径确定晶状体的焦距, 因此更容易保持固定焦距并且调节不同的像距。

对于远距离物体和平行光束, 视力正常的眼睛将会轻松地在视网膜上形成清晰的像。如果物体在较近的距离或发散光束, 眼睛将通过晶状体调节减少焦距, 在视网膜上形成清晰的像。然而, 如果是汇聚光束或者光束照射在眼睛上, 眼睛不能通过调节晶状体在视网膜上形成清晰的像。因此, 当确定对向角 α 时, 不必考虑像距小于成像透镜焦距的情况。但是, 如果清晰的像处于成像透镜焦平面之内, 表明激光产品有外部焦点或束腰。通过像平面的位置, 可以近似确定外部焦点或焦平面的位置。因此, 可以把外部焦平面作为源平面, 并以外部焦点作为物源进行测量。

注: 对于复杂光源(例如多衍射或全息光学元件或柱面透镜), 表观光源可能沿光轴存在多焦点。这些都需要通过评估以找到危害最大的观察位置。扫描系统面临着同样的困难。

确定光源直径:

正如 7.5.3.3 描述, 光源像的直径用于确定对向角 α :

$$\alpha \sim (d_{si}/r_i) = (d_s/r)$$

这里 d_{si} 表示像源直径, r_i 表示像距。(注意: 这里不需要透镜的焦距。然而, 为了精确测量, 宜注意到像距是从成像透镜的第二主平面测量的, 对于薄透镜, 就是透镜的中心; 但是对于厚透镜, 第二主平面

是发生所有折射的透镜的图像侧上的平面。)使用高质量透镜以避免由像差引起的误差是重要的。

对于光束横截面能量均匀(平顶)分布的光束,光束直径可以容易地从外延光束确定。对其他分布的光束,光束直径可能存在不同的定义,例如,FWHM、 $1/e$ 直径或 $1/e^2$ 直径,会产生不同的结果。因此,在 GB 7247.1—2012 中 8.3 d)中规定了用于确定对向角的一般方法。提出应使用受危险最大的视网膜面积。而实际上:

- 1) 对于给定的像距,接收角 γ 因定义不同的接收面而不同;
- 2) 对每一个接收角 γ 值,发射(能量或辐照度) $Q(\gamma)$,在测量面积内定义;
- 3) 可达发射极限由每一个接收角 γ 决定,假定 $\alpha = \gamma$;
- 4) 危害因子由每一个接收角 γ 确定,危害因子= $Q(\gamma)/AEL(\gamma)$;
- 5) 危害因子用 α 值确定时,接收角 γ 值为最高值。

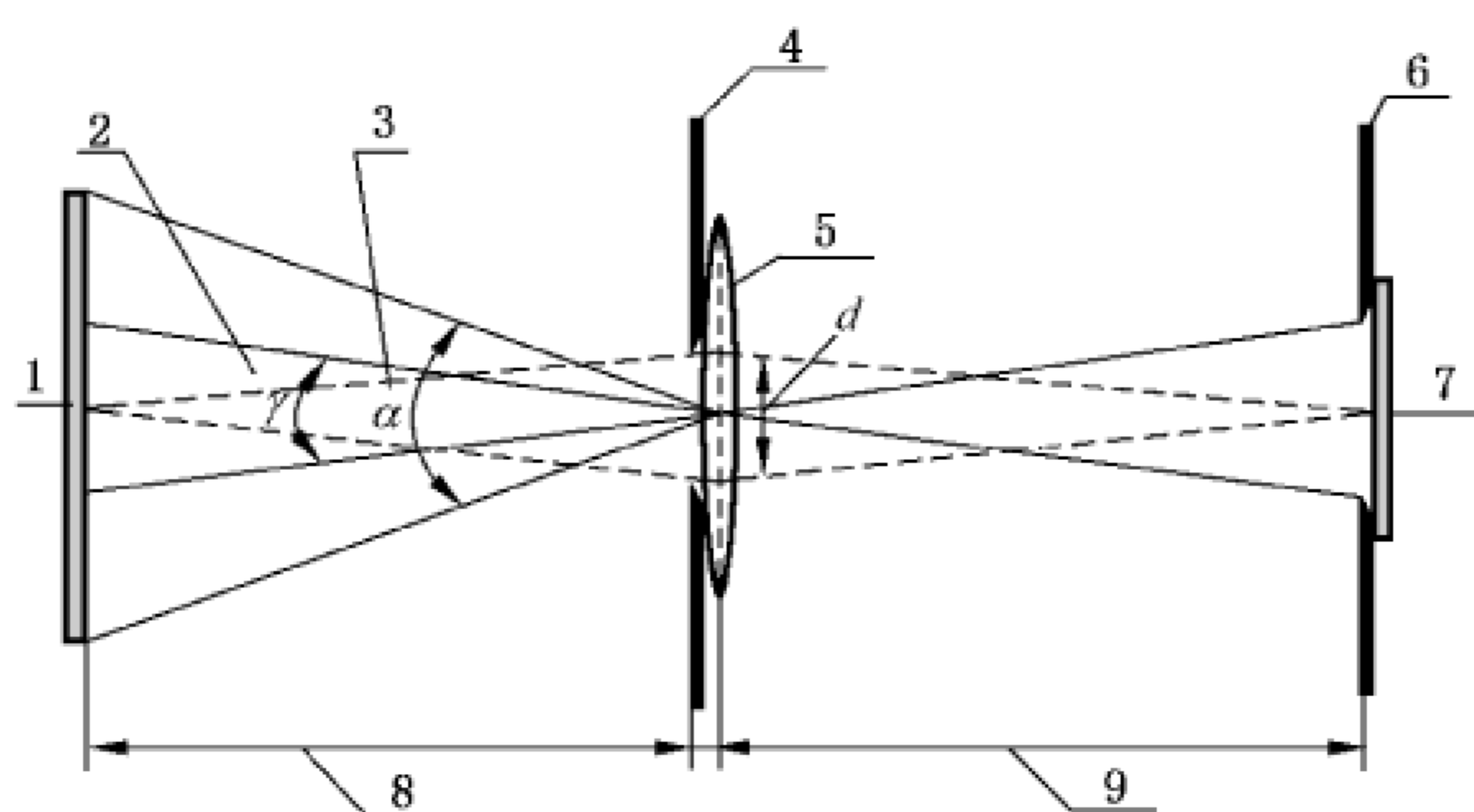
对于一般光源来说,照射图样不必是圆形对称的。在某些情况下,有可能更适合改变接收角以获得椭圆或矩形图样。上述程序依然是有效的,这一区域给出最大“危害因子”将用于定义对向角。7.5.4 对非圆形光源进一步指导。

接收角 γ 可以通过采用不同光阑直径控制光场来改变。

像平面上光阑位置需要调节至光场直径的最大读数(例如: γ)。对于具有不规则形状的光源,用 CCD 阵列抓取图像是有帮助的,因为有助于图像分析。因此,可以在单个图像上对上述过程进行编程和执行。应小心消除杂散光,使光束大小不被高估。

接收角 γ 应总是被限制在最小 1.5 mrad 至最大 100 mrad 范围内。视场光阑直径调整的分辨率或 CCD 阵列以及成像透镜的放大率可以用于确定探测器或 CCD 阵列的尺寸。

如果平面上的表观光源是已知的和可接触的,则可以使用图 8 b)所示的测量装置。

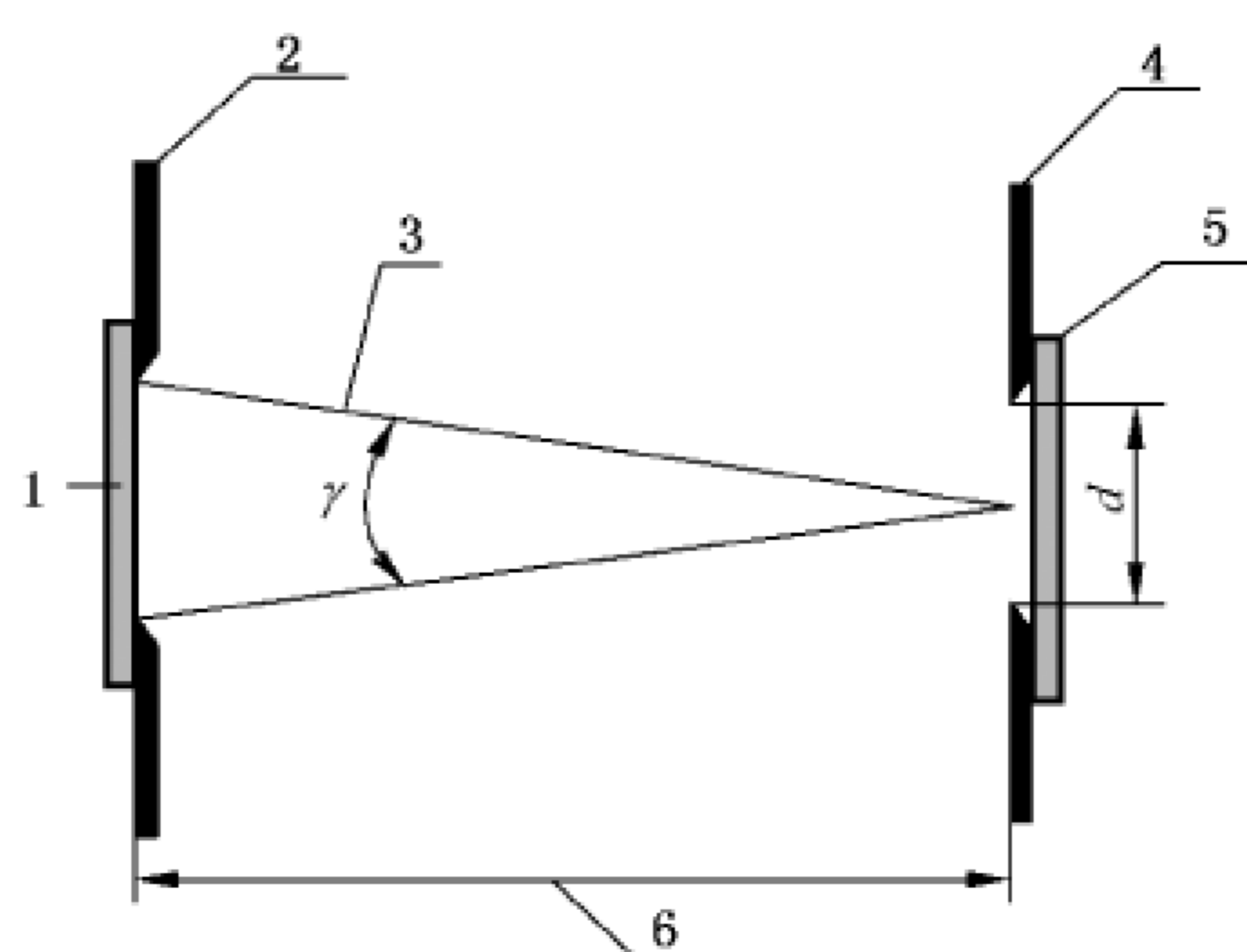


说明:

- | | |
|-------------|-------------|
| 1——表观光源; | 6——圆形视场光阑; |
| 2——接收角; | 7——探测器有效区域; |
| 3——表观光源对向角; | 8——测量距离; |
| 4——圆形孔径光阑; | 9——像距。 |
| 5——透镜; | |

a) 光源成像测量示意图

图 8 表观光源测量示意图



说明:

1——光源;
2——圆形视场光阑;
3——接收角;

4——圆形孔径光阑;
5——探测器有效区域;
6——测量距离。

b) 可接触光源测量示意图

图 8 (续)

最大危害测量距离宜使用条件 1 和条件 3。注意表观光源的位置和对向角因测量距离的不同而不同。因此,需要在每一个测量位置确定表观光源的位置和尺寸。本部分中关于这个问题会给出更多的信息。

7.5.3.5 光束传播方法

该方法以波动光学而不是几何光学为基础。该方法的一个重要发现就是危害最大的观测距离可能大于 100 mm。该方法的详细分析超出了本部分的范围。第二版方法不能使用是因为 α 的尺寸和孔径的容许量两种已知的风险被严重低估。

7.5.4 多光源和简单非圆形光束

7.5.4.1 一般要求

不是所有的激光产品都发射单一光源或圆形光斑。多光源的例子有:多通道光纤输出,多元符号或信号(例如交通灯和指示箭头),多段符号和字符,和其他激光阵列。简单光源(例如漫射光束)可能有任意的形状,如果它们是均匀的,仍然可做简化处理(见 7.5.4.5)。对于简单光源例如漫射光束,无论是位置还是尺寸,发射光源与表观光源相同。

理论上,对多点发射光源,应考虑所有的组合以确定最危险的情况。一个小亮光源可能是或者不是最危险的情况。与之类似,将所有小光源放在一起也可能是或者不是最危险的。

实际上,不是所有的组合都需要考虑,例如一些亮度明显偏低的光源,如果所有的光源亮度一样,通常可以简化分析。

虽然分析线性阵列比二维阵列简单,但在确定最危险的情况时,仍然需要采用二维矩阵分析。

7.5.4.2 步骤

首先从单一光源开始。阵列应用中的单一光源通常是小光源($C_s = 1$)。如果不是此种情况,考虑到单一光源的有限尺寸,使用相同的方法。

确定要分析的光源的顺序。确定各种情况下光源组合的对向角(见下述)。这样可以计算每种情况的 AEL。分析小光源的组合时,表观光源的位置可近似为实际光源阵列(光束上所有的位置)的位置,

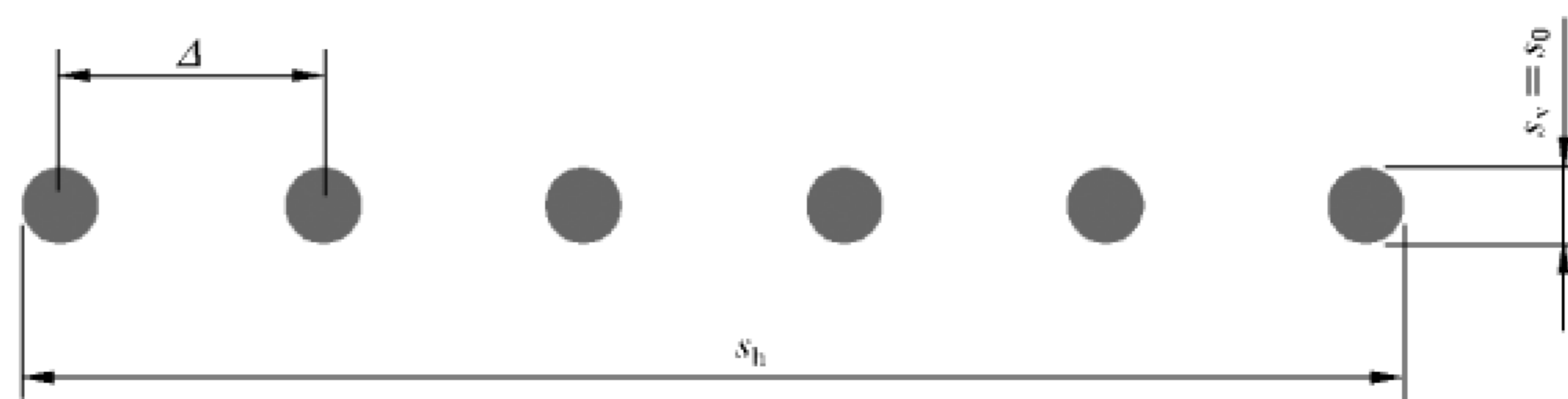
用各个光源间的实际间距计算对向角,如图 9 所示。只需考虑对应任一方向的 $\alpha_{\max} = 100 \text{ mrad}$ 视场范围内的阵列尺寸。

然后,对每一种光源组合进行可达发射测量(通过指定测量孔的功率),并与 AEL 计算值相比较。在测量装置中采用可变光阑限制视场(或接收光锥),以保证在各种情况下,确保被测功率全部来自光源[见图 10 a)和图 10 b)所示]。

7.5.4.3 线性阵列的对向角

为了简便,假定一个线性阵列由相同的光源组成且光源间距相同(见图 9)。如果这两个假定中有一个不适用,分析将更加复杂。如果是二维矩阵,且间距不同,参数 Δ 变为 Δ_x 和 Δ_y 该分析仅适用于视网膜危害的光谱范围(400 nm~1 400 nm)。

图 9 显示了如何确定线性光源阵列的对向角。假设单个光源为小光源,则根据光源阵列的尺寸可计算对向角。除以所测距离 r [见图 8 a)和图 8 b)],得到每个正交维数的对向角。而等效的 α 值通过求两个正交的 α'_s ,即 α_v 和 α_h 的平均值得出。采用几乎所有芯径小于 0.15 mm(对应 100 mm 处 1.5 mrad 的最小 α 值)的光纤纤芯以及光纤的光源时,计算 s_v 常采用默认最小值。根据 GB 7247.1—2012,在计算阵列的算术平均值 α 之前,每个正交方向上的对向角(α_v 或 α_h)通常被限定为 $\geq \alpha_{\min}$ (和 $\leq \alpha_{\max}$)。



说明:

Δ ——中心距;

n ——被测光源的数量;

s_0 ——单一光源尺寸;

s_v ——垂直尺寸 = s_0 或 1.5 mrad,取较大者;

s_h ——水平尺寸 = $[s_0 + (n - 1) \times \Delta]$ 或 1.5 mrad,取较大者;

α_v —— s_v / r ;

α_h —— s_h / r ;

$\alpha = (\alpha_v + \alpha_h) / 2$ 。

图 9 线性阵列表观光源尺寸

对于每个光源组合,可由 α 值确定 T_2 和 C_6 的值。使用这两个值以及由发射波长得出的参数 C_4 和 C_7 ,可计算出每个通道的 AEL 值。如果评估位置处于远场位置且假设每个单个光源的光束为高斯光束,可根据光束发散角确定不同距离的单光源的光束直径,使用耦合参数(见 7.8.8),可计算穿过 7 mm 孔径的发射功率。这可用于确定每个光源组合的每个通道的允许功率,并且所得最小值可能是最严格的情况。

表 2 显示了平均功率相同、间距相等、四光源一维阵列光纤光源的一个例子。最严格的情况按照最后一列 AEL/P 的最小比值。

表 2 四光源阵列

光源数 n	表面光源尺寸 mm	对向角 mrad	评估类别的 AEL mW	可达发射 mW	AEL/ P
1	$s_{v1} = s_{h1} = s_0$	$\alpha_{v1} = \alpha_{h1} = \alpha_1 = s_0/r$	AEL ₁	P_1	AEL ₁ / P_1
2	$s_{v2} = s_0$ $s_{h2} = s_0 + \Delta$	$\alpha_{v2} = s_{v2}/r; \alpha_{h2} = s_{h2}/r$ $\alpha_2 = (\alpha_{v2} + \alpha_{h2})/2$	AEL ₂	P_2	AEL ₂ / P_2
3	$s_{v3} = s_0$ $s_{h3} = s_0 + 2\Delta$	$\alpha_{v3} = s_{v3}/r; \alpha_{h3} = s_{h3}/r$ $\alpha_3 = (\alpha_{v3} + \alpha_{h3})/2$	AEL ₃	P_3	AEL ₃ / P_3
4	$s_{v4} = s_0$ $s_{h4} = s_0 + 3\Delta$	$\alpha_{v4} = s_{v4}/r; \alpha_{h4} = s_{h4}/r$ $\alpha_4 = (\alpha_{v4} + \alpha_{h4})/2$	AEL ₄	P_4	AEL ₄ / P_4

如果各光源间功率或能量有变化,或光源间距不相等,要分析的情况的数量将增加。例如,在一个四光源阵列内的两个光源有三种可能的组合。光源之间的几何位置和相似程度将决定可能的简化程度。

对所有评估的情况,评估类别的 AEL 除以可达发射值 P 应大于 1,那么可将该产品确定为相应的评估类别。

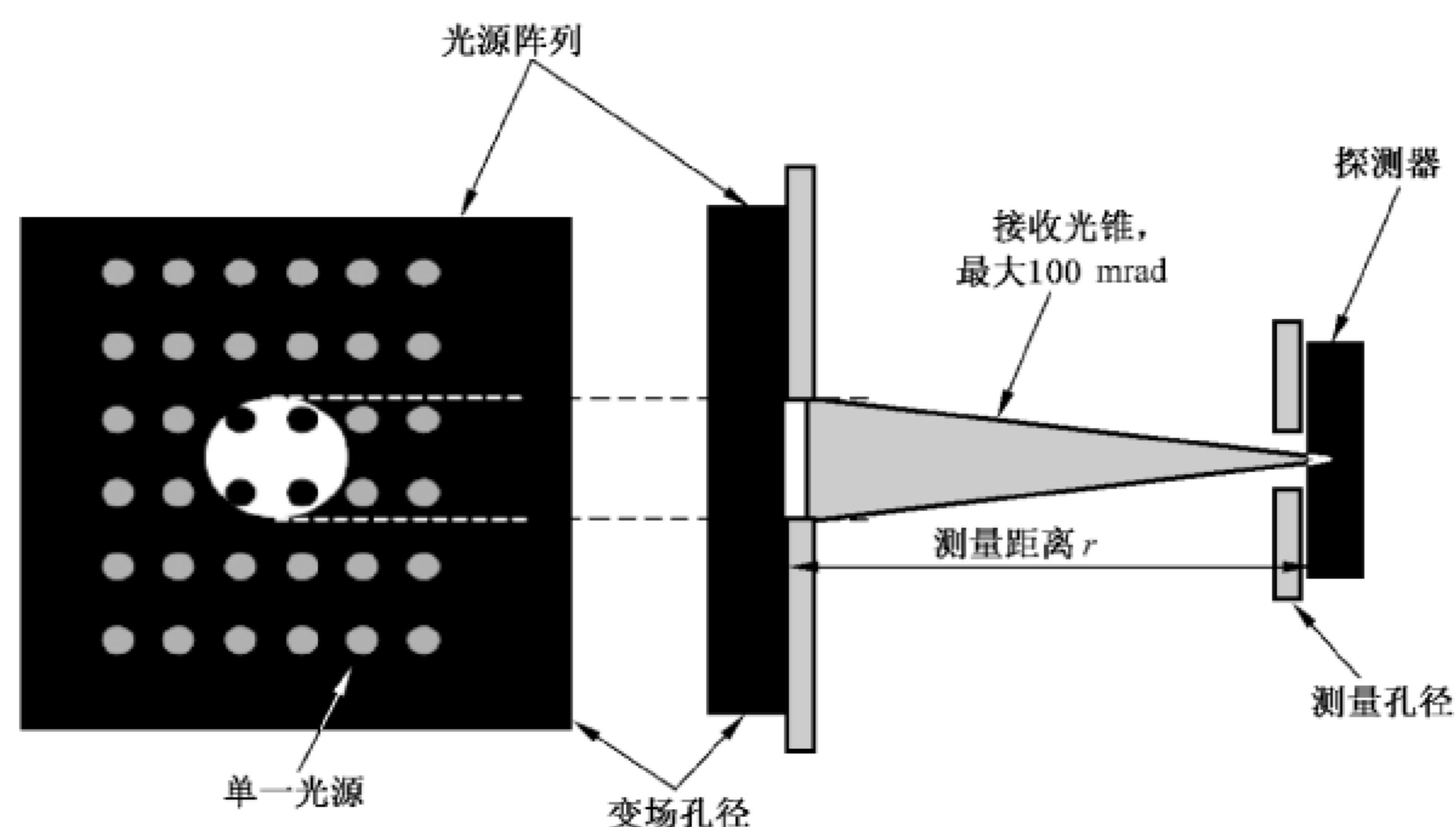
7.5.4.4 多光源阵列的复杂性

对于 n 个光源的情况,应考虑光源 1 至光源 n 的所有情况,以确定最严格的极限值。通常所做的简化假设是,所有光源发射的平均功率与峰值功率均相同,否则分析将更为复杂。但是这样使用严格条件计算的结果仍是有价值的。如果阵列是二维的(不局限于直线或曲线),应考虑对一定的中间数(1 和 n 之间)的几种排列。

依据发射平面上可变圆孔来确定要评估的情况。最小光源发射孔直径包含一个通道。最大发射光源孔直径对应 7 mm 测量孔径,100 mrad 的接收全角。由待评估情况的光源阵列尺寸确定 α ,通过 7 mm 孔测量可达发射。将该种情况下 α 所对应的 AEL 与测量的可达发射比较。对任何可能的光源组合,可达发射均不得超过指定类别的 AEL。

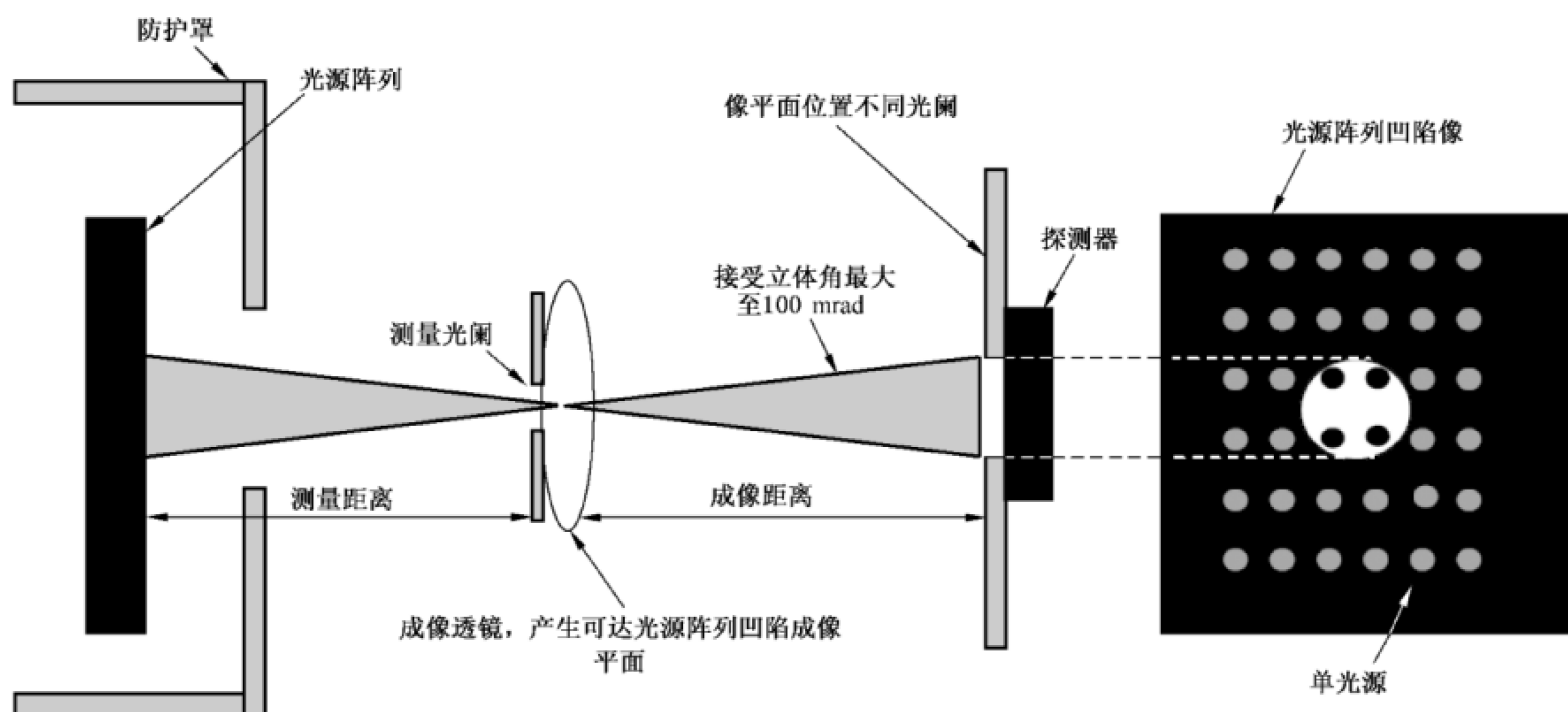
注:如果本次评估(举例,使用一个平行光源的条件)7 mm 不是指定的测量孔径,则使用适当的孔径和距离。

图 10a)和图 10b)是测量装置的几何示意图。计算的依据是对向角 α (被评估的光源组合的)。因此,确定适当的对向角 α 值是多通道计算的关键。将每个单一光源视为小光源, α 对应图 10a)或图 10b)的接收立体角(对于单一通道,假设最小默认值 $\alpha = 1.5$ 就足够了)。



a) 可接触光源的测量示意图

图 10 光源测量示意图



b) 内嵌光源的测量示意图

图 10 (续)

- a) 对于扩展光源,可以看到 GB 7247.1—2012 中条件 3 的要求高于条件 2,因此表观光源的对向角 α 取决于在 100 mm 的测量距离下光源的区分(平均)规模。
- b) 然后需要测量或计算被评估的阵列结构在测量孔径聚集的功率。如果测量不方便或来自光源的 $(1/e)$ 光束发散是已知的,则计算在测量孔径光束图形的直径。如果光束发散是未知的,则单一光源的对向角采用保守的最小值。然后计算在 7 mm 孔径聚集的光束的部分(见 7.8.8 耦合参数)。如果光束溢出孔径,那么没有透射部分也被认为在限定许可的总功率内。
- c) 基于光束部分聚集在 7 mm 孔径和 α 的值,我们能计算估计出分类极限和每个假定配置的总的允许功率。阵列的分类极限由总的允许功率除以光源的最少数量的配置决定。

7.5.4.5 简单非圆光源

到目前为止仅考虑了圆形对称光源。如果光源为非圆的,则其有效对向角可由式(5)得出:

$$\alpha_{x+y} = (\alpha_x + \alpha_y) / 2 \quad \dots\dots\dots (5)$$

式中, α_x 和 α_y 为两个正交方向的对向角,如图 11 所示。

在计算平均值前,大于 α_{max} 或者小于 α_{min} 的对向角将分别被限定为 α_{max} 或者 α_{min} 。

对于矩形光源, α_x 和 α_y 分别为实际光源的长和宽。

对于椭圆光源, α_x 和 α_y 分别为椭圆的长半轴和短半轴的两倍。

可以采用 7.5.4.3 给出的类似测量程序完成对向角的测量。

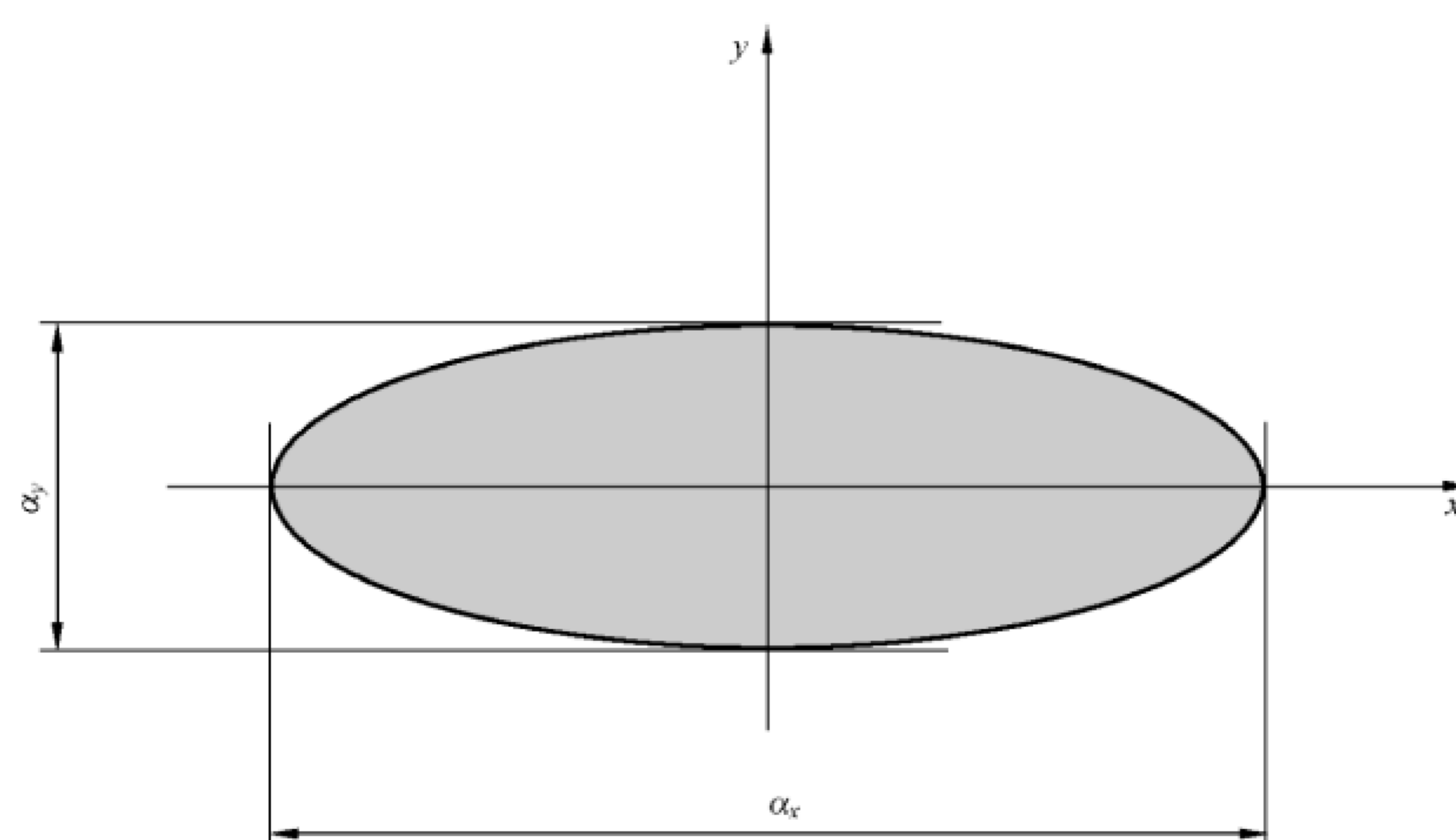


图 11 简单非圆光源的有效对向角

7.6 发射持续时间

7.6.1 一般要求

GB 7247.1—2012 中 8.3 e) 规定了下述三类时间基准：

- 可见光波长范围内,对 2 类、2M 类和 3R 类激光辐射的时间基准为 0.25 s；
- 除 a) 和 c) 中列举的情况外,其他激光辐射的时间基准为 100 s；
- 对于紫外和本身要求有意识长期观察的激光辐射,时间基准为 30 000 s。

唯一的一个例外情况为,400 nm~1 400 nm 视网膜危害区的热危害。如果给出极限计算公式的列表中规定了参数 T_2 的近似值,则计算出 T_2 并在适当的情况下使用。 T_2 的范围为从小光源的 10 s 到大光源的默认值 100 s [见 GB 7247.1—2012 中 8.3.f)]。

7.6.2 脉冲持续时间

以单脉冲方式发射激光或发射一系列脉冲或脉冲串的激光系统,利用 7.4.3.2 确定相应的 MPE 或 AEL 限值,经常需要测量单次脉冲持续时间。此外,许多激光参数,如脉冲宽度需要制造商提供。如果需要测量脉冲宽度,示波器是最佳选择。

注：对于超短脉冲,采用其他适宜的仪器测量。

7.6.3 脉冲重复频率

确定脉冲重复频率 (PRF) 需要计算在给定曝光时间 (或分类时间) 内已发送的脉冲数量,从而帮助确定 C_5 。这个校正系数适用于正确的 MPE (或 AEL) 的计算。一旦脉冲重复频率 PRF 被确定,发生在曝光时间中的脉冲数量是 PRF 和曝光时间的乘积 (见 7.4.3.3 中对脉冲重复频率 PRF 的充分讨论)。

7.7 测量条件

7.7.1 一般要求

以下特定的测量条件用于分类,而其他测量条件仅用于激光危害的评估。这些用于激光危害评估的测量条件适用于计算激光防护的标称眼危害距离 (NOHD) 和光学密度 (OD)。

7.7.2 分类测量条件

按照 GB 7247.1—2012 表 11 中适当的测量孔径和位置。

测量条件包括：

- a) 测量窗口(孔径)的直径；
- b) 测量孔径光阑与光源或表观光源之间的距离；
- c) 辐射测量装置的接收角；
- d) 被测辐射的发射角度限值(表观光源的对向角)。

需注意的是，所测辐射限定为主光束的辐射。应消除任何通过非测量系统表面反射或散射进入探测器的离轴辐射。

对于直径明显小于限制孔径的小光源，分类时只需要测量它的总功率。

对于小光源，条件 2 中从参考点开始的测量距离是 70 mm。发射波长在 400 nm~1 400 nm 范围内，很多情况下，依据最严格的标准，使用条件 2(放大镜观察)比条件 3(肉眼观察)大大减少危害。

如果裸眼在距参考点 100 mm 距离处观察，其明显是扩散的($\alpha > 1.5$ mrad)，则条件 2 不需要考虑。

如果肉眼无法观察到光源的扩展(也就是说，距离参考点 100 mm 处的表观光源对向角小于 1.5 mrad)，或者如果表观光源对向角(通过默认简化评估)不能确定，需要考虑条件 2，因为条件 2 比条件 3 有更具有限制性。

对于考虑扩展光源(GB 7247.1—2012 中图 5)的条件 2 可选用的情况，可以分为以下情形：

- a) 如果在距离参考点 100 mm 处，表观光源的对向角确定小于 1.5 mrad，但采用扩展光源(GB 7247.1—2012 图 5)的条件 2 时，出现扩展($\alpha > 1.5$ mrad)(由于放大镜的放大倍率)，扩展光源的条件 2 可能比简化的条件 2 具有更低的限制性，并可以申请测试。如果采用扩展光源(GB 7247.1—2012 图 5)的条件 2，相应的对向角也要采用这种测量设置。宜注意在这种情况下，扩展光源(GB 7247.1—2012 图 5)的条件 3(此时 $C_s = 1$)比条件 2 有更多的限制，应考虑条件 3；
- b) 如果在距离参考点 100 mm 处，表观光源对向角确定小于 1.5 mrad，采用扩展光源(GB 7247.1—2012 图 5)的条件 2 也小于 1.5 mrad，简化的条件 2(GB 7247.1—2012 表 11)是适用的。

注：对于 GB 7247.1—2012 第 9.3.2 条所描述的默认(简化)评定，没有必要确定表观光源对向角。为简化分析，可以把表观光源作为一束小光源，因为这将是最严格的情况。将采用 GB 7247.1—2012 表 11 中所列的简化测量条件。

对于扩展光源，为满足 GB 7247.1—2012 表 11 中条件 3 要求的评估，表观光源的对向角在距离表观光源 100 mm 或更远的最危险测量距离处确定；为满足 GB 7247.1—2012 表 11 中条件 2 的评估，表观光源对向角从距离表观光源 70 mm 处确定。如果超过 GB 7247.1—2012 指定的测量距离使表观光源处于隐蔽的位置，那么，对条件 2 或条件 3 的评估在人员可达的最近点。对向角和可达发射是在相同距离确定的成对值。

对满足 GB 7247.1—2012 表 11 中条件 1 要求的评估，规定在距离人员可达最近点 2 m 处进行。如果对向角用于计算 $C_s > 1$ 的值，那么，在找到最大危害之前，应考虑所有的距离。在一些条件 1 的评估下，应用因子 7 乘以对向角以将放大的图像和典型光学辅助的增益考虑在内。对于条件 1 的这些情况，需要采集的激光能量的最大角应为 $(100 \text{ mrad})/7 = 14.3 \text{ mrad}$ 。然而，放大因子也可能小于 7(关于放大因子的更多信息见 GB 7247.1—2012 第 9 章)。

由于辐射测量的最大接收角度对于热评估为 100 mrad，对于光化学评估为 110 mrad，因此对于大光源，来自于该接收角之外的光源能量都不能收集。

7.7.3 危害评估测量条件

7.7.3.1 一般要求

危害评估的测量条件至少包括功率/能量测量、辐照度和辐照量、光束直径和最小光束角。以下部分提供有关这些测量的信息。

7.7.3.2 功率/能量测量

激光危险评估和激光分类所需测量的另一个关键参数是由所述激光发射的总辐射功率或总辐射能量。辐射功率以瓦特为单位,连续波(CW)工作模式的激光,在时间轴上发射能量的速率是恒定的。辐射能量以焦耳为单位,是指发射单脉冲或系列脉冲的激光。

最常用的测量辐射功率或辐射能量是探测器与激光波长相匹配的辐射计。在某些情况下,量热计也是测量辐射功率或能量的最有效装置。当测量激光束辐射功率或辐射能量时,探测器面积应大于光束面积以确保捕获整个光束。这意味着需要预先了解光束直径范围。光束直径通常由制造商给出。用肉眼对可见激光的目视检查,以及用红外观察器、磷光卡或热敏液晶板对红外或紫外激光进行目视检查,也可用于近似确定光束直径与探测器面积比。

单脉冲激光辐射能量的测量方法基本上与辐射功率的测量方法相同,从而确保探测器捕获整个光束。发射多脉冲或系列脉冲时,每个激光脉冲的能量可以使用能量计直接测量或者通过峰值功率和脉冲宽度计算。峰值功率和脉冲宽度的乘积近似等于功率随时间变化曲线下的面积。因此,已有能随时间进行功率积分、简化该测量的辐射计。

虽然辐射功率和辐射能量的测量看起来非常简单,但是由于各种原因可能出现潜在的误差。如前所述,辐射探测器仅对光谱的一部分敏感。使用探测器测量发射波长处于光谱响应范围边缘的激光,或超出探测器的光谱响应范围的激光,将导致读数可能低于实际发射值。相反,超过探测器制造商推荐的平均功率或脉冲能量的最大额定值将导致的饱和或损坏,这也将导致读数低于实际发射值。针对饱和的简单测试方法有:使用中密度滤波器减少探测器的输入功率,或通过光阑截取十分之一的光束并确定读数与其对应。量子探测器有时也受到可承受的脉冲重复频率的限制,如果激光的脉冲重复频率超过探测器制造商推荐的最大值,也可能发生饱和或损坏。

7.7.3.3 辐照度和辐照量

有些情况下,在探测器的区域内无法捕捉到整个光束。根据不同的应用,激光束可被扩展至其直径大于可用探测器。这种情况未必不利于危害分析或分类。MPEs 是根据辐照度或辐照量给出的,因此该类测量方法将提供直接比较。一些仪器被特别设计为通过将收集的功率或能量除以探测器的有效区域,给出关于辐照度和辐照量的读数。辐照度和辐照量也可以通过探测器的读数(功率或能量)除以激光束的面积来计算。

7.7.3.4 光束直径

在确定危害距离时需要在激光输出处测量光束直径,标称眼危害距离方程要考虑该参数。

对于圆形对称激光束,可以使用光阑技术来确定光束直径。以光束的光轴为中心的可变圆形光阑位于探测器和激光源之间。光阑全部打开以允许全光束通过,并且进行功率或能量测量。然后将光阑孔径减小至可达总读数的 63.2%。如果光束具有高斯分布,则该光阑孔径将对应于激光束的 $1/e$ 直径。

另一种光阑技术适用于具有圆对称性的高斯光束的光束直径测量。该方法使用以激光束的光轴为中心的直径为 D_{in} 的固定小圆形孔。通过该孔测量功率,从而获得 Φ_d 。然后将其表示为相对于总激光功率的比率 Φ_d/Φ_0 。假设光束具有高斯分布并且比率小于 80%,则光束直径 d 可以近似为[见式(6)]:

$$d_{63} = \sqrt{\frac{-D_{in}^2}{\ln\left(1 - \frac{\Phi_d}{\Phi_0}\right)}} \dots\dots\dots(6)$$

对于平顶分布见式(7)：

$$d_{100} = D_{in} \sqrt{\frac{\Phi_0}{\Phi_d}} \dots\dots\dots(7)$$

使用狭缝扫描光束是用于确定高斯光束直径的另一种测量技术。为了获得最高的精度，狭缝宽度应明显小于光束尺寸狭缝位于探测器和激光源之间，随着狭缝扫描光束记录探测器读数，光束径向上探测器读数为最大值的 36.8% 点之间的距离就是光束直径。当扫描轴能够旋转以测量不同轴向的光束直径时，该技术也适用非圆形分布的光束。

类似的方法使用针孔替代狭缝。原理是一样的：在激光源和探测器之间放置针孔光阑；当针孔光阑扫过光束时，监测通过针孔光阑的辐照度读数。与狭缝技术一样，光束直径是辐照度读数为从光束中心获取的最大读数的 36.8% 时，光束中心两侧点之间的距离。

也可以使用诸如 CCD 照相机和热电阵列等仪器来测量光束直径。这类仪器对光束的整个二维横截面进行采样。类似于针孔方法，该技术在一个平面位置采样整个光束轮廓。这些设备大多数由计算机操作，并且可以通过编程给出 1/e、1/e² 或 d₀ 点处的直径。

视觉检查能对光束直径产生相当好的估计。在光束出口附近放置尺子，并读取测量值是最简单的方法。当然，如果激光处于红外线中，则需要用红外观察器来观察光束。一种替代方案是测量放置在光束中的目标材料散射或发射的辐射。这些目标材料可以是磷光卡、热敏液晶板或简单的一张纸。由于光束表观尺寸会随着测量时存在的环境光的量而改变，在两种方法中引入误差。较高功率激光可以从目标材料的烧蚀或曝光模式中测量。较高功率的激光要求目标材料更坚固。这种材料的实例可以是照相胶片、热敏纸、聚碳酸酯、丙烯酸、有机玻璃形式的塑料，以及压舌板或类似的木材。测量这些烧蚀或曝光模式比仅观察和测量激光光斑更准确，但仍然不完全精确。

7.7.3.5 光束发散角

光束发散角不总是测量分类的必要参数，但是对于完整的危害分析，该参数应量化，因为它影响危害距离计算。有多种技术能用于确定光束发散角的方法，部分方法如下所述：

- a) 一种发散角测量方法是两点直径测量技术。在光束束腰或靠近激光输出孔径的最小点处测量光束直径，在传播方向上的另一点处测量光束直径，然后测量点之间的距离。确定两点的直径的平方差的平方根，然后除以两点间的距离，就得到发散角。对高斯光束用式(8)表示：

$$\phi = \frac{\sqrt{(d^2) - (d_w^2)}}{r - r_0} \dots\dots\dots(8)$$

式中：

r₀——光束束腰的位置。

- b) 类似的方法是沿着传播轴选择两个点，该处光束直径远大于沿光束路径的最小直径（最小直径是光束束腰或出口孔处的直径）。光束的该区域称为远场。测量所选点的直径和间隔距离。发散角仅仅是直径差除以点之间的距离差。在数学上用式(9)表示：

$$\phi = \frac{d_2 - d_1}{r_2 - r_1} \dots\dots\dots(9)$$

这是一个相当直截了当的简单化方法，但它不是没有缺陷。为了确保精度，应在如上所述的远场中。远场是辐照度值遵从平方反比定律，并且与非相干源服从相似的 1/r² 下降的光束区域。在一些激光中，远场可以离激光出口相距一段距离，有时甚至相距几公里。

- c) 考虑到空间问题时，另一种确定高斯激光束发散角的方法是采用长焦距透镜和光阑。使用具

有非常高质量的长焦距透镜很重要。光束发散角可以通过激光波长下的透镜焦点处聚焦激光束的光束直径计算。透镜的几何焦距取决于所讨论的特定波长。在一些情况下,对于典型的激光波长,这些焦距可以由制造商指定。然而,如果需要对特定波长的焦距进行量化,则可以使用标准灯和窄通滤波器来实现该目的。当灯放置在与透镜距离 s_1 处时,图像将出现在距透镜另一侧的距离 s_2 处。一旦图像距离 s_2 确定,式(10)透镜焦距方程可以用于计算该特定波长透镜的焦距。

$$\frac{1}{s_1} + \frac{1}{s_2} = \frac{1}{f} \quad \dots\dots\dots(10)$$

这种测量装置要求在激光前放置一个透镜,透镜位置与焦距的关系并不重要,但不应将透镜置于束腰位置。激光束通过透镜后,应对其进行参考功率或能量测量。该测量不应直接在焦点处进行,因为聚焦光束可能损坏探测器。将孔径光阑放置在透镜的焦平面以测量光束直径。注意,测量放在透镜焦距处进行,而不是一定在找到最小光斑尺寸的地方。通过孔径光阑的能量应为测量参考读数的 63.2%,以对应于 $1/e$ 点。一旦已知或确定了几何焦距,并且测量了焦点处的聚焦光束直径,则可以使用式(11)计算发散角:

$$\phi = \frac{d_{fp}}{f} \quad \dots\dots\dots(11)$$

- d) 对于有足够空间位置的高斯分布激光,可以仅用辐射计的简单技术来确定光束发散角。对于该方法,应首先测量总功率或能量。然后在光束直径远远大于初始光束直径的远场中,获得最大辐照度或辐射量测量值 E_{max} 或 H_{max} 。辐照度应在光束中心附近处测量,探测头应明显小于该点的光束直径。以下公式涉及总功率 Φ 或总能量值 Q ,最大辐照度 E_{max} 或最大辐照量 H_{max} ,以及为确定发散角 ϕ 而进行最大辐照度测量处的距离 r ,见式(12)。

$$\phi = \frac{\sqrt{\frac{4\Phi}{\pi E_{max}}}}{r} \quad \text{或} \quad \phi = \frac{\sqrt{\frac{4Q}{\pi H_{max}}}}{r} \quad \dots\dots\dots(12)$$

7.8 扫描光束

7.8.1 一般要求

在许多应用中,一个假定 $C_6 = 1$ 的简单计算,以及脉冲持续时间对应于距离扫描光束顶点 100 mm 处扫描过整个测量孔径的光束,即可得出满足制造商要求的分类。若想得到较低的限制极限,这些条款概述了允许较低的分类或者在同一类中允许更大的输出功率的更加精确的 AEL 的确定方法。附录 A 中有扫描光束的例子。

注:如 GB 7247.1—2012 中 9.3 所述,条件 1 和条件 2 不适用于扫描光束。

7.8.2 静态对向角(α_s)

如果我们假设扫描系统不能扫描,并且眼睛聚焦在一个特定的距离 Z 处,那么,静态对向角就是光束直径在距离 Z 处的张角。图 12 给出了一个不能扫描的扫描系统的光学图,图中被眼睛成像的点的位置超出了扫描光束的最高点,见式(13):

$$\alpha_s = d/Z \quad \dots\dots\dots(13)$$

式中:

d —— 注视点位置处的光束直径;

Z —— 测量孔径光阑与注视点位置间的距离。

注 1: 当形成光束的所有光线实际进入到孔径光阑 AP 时,视网膜像辐照度截面与孔径光阑处的光束辐照度截面成正比。在其他情况下,用“人工眼”模型或试验去确定对向角。

注 2: 对向角可以通过 GB 7247.1—2012 中 8.3 d); 或者 7.5.3 来确定。对于高斯光束, 包含 63% 能量的直径, 用 d_{63} 来表示, 可以用来确定对向角。

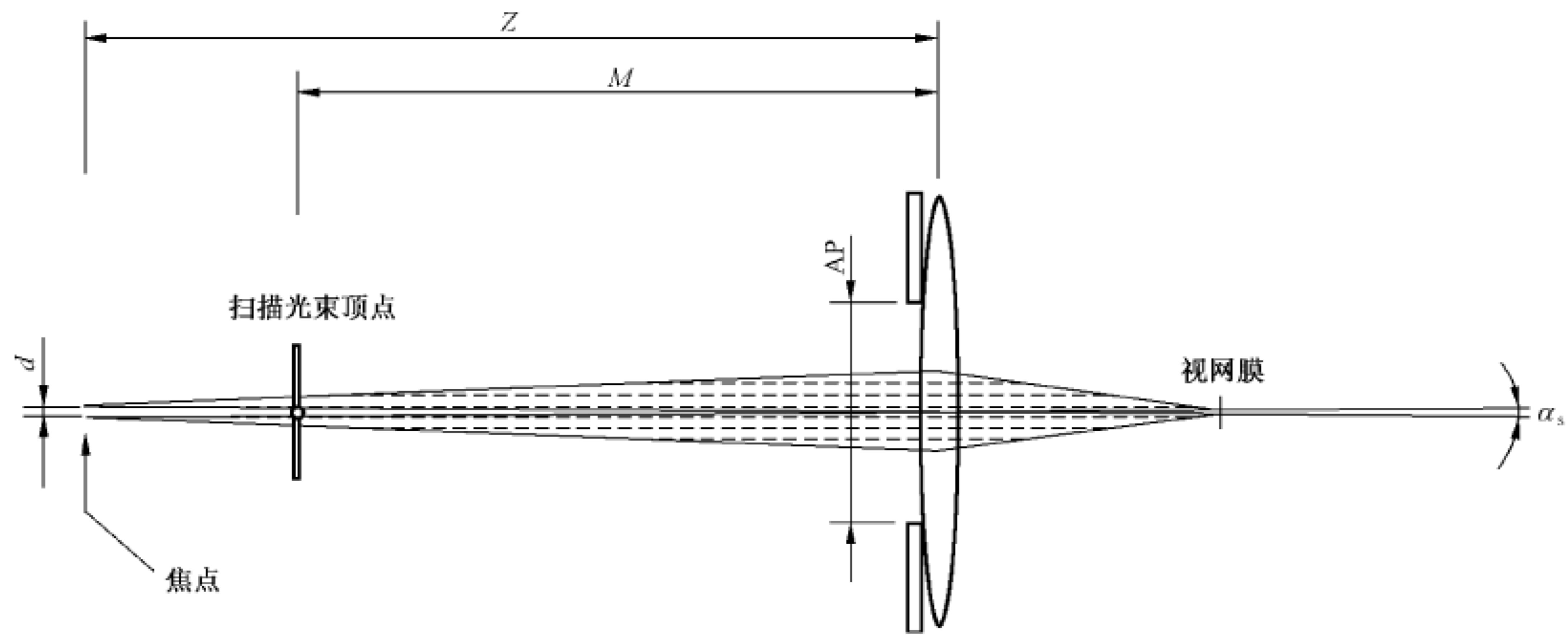


图 12 扫描光束顶点之外的静止表观光源成像图

7.8.3 扫描脉冲持续时间 (T_p)

图 13 为扫描光束的中心分别到达测量孔径光阑 (AP) 两个边缘的两个不同时间 (t_0 和 t_1) 的光学系统图。

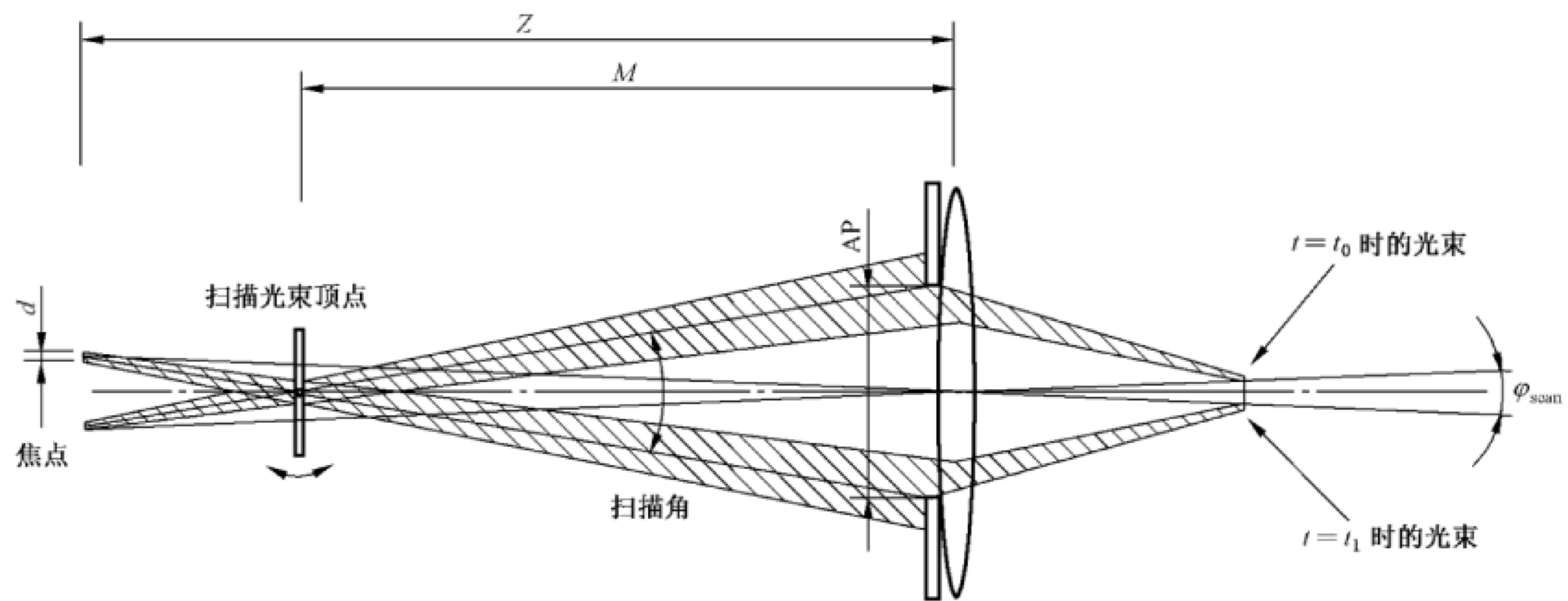


图 13 扫描光束顶点之外的扫描表观光源成像图

注 1: 为了简化光路, 此处的扫描元件是透明的, 而非反射性的。

对于恒定角速度, 用于分类的脉冲持续时间, 见式 (14):

$$T_p = t_1 - t_0 = \frac{\tan^{-1}(AP/M)}{\omega} \approx \frac{AP}{M\omega} \dots\dots\dots (14)$$

式中,

ω —— 扫描光束的角速度 (单位 rad/s);

AP —— GB 7247.1—2012 表 11 中定义的测量孔径光阑直径 (例如 $\lambda < 1\ 400\ \text{nm}$ 时, 对应的直径为 7 mm);

M —— 测量孔径光阑到扫描顶点之间的距离。

注2: 由于 M 值远远大于 AP 值, 此处采用了小角度近似值以简化公式。

随着扫描元件的距离的增大, 测量孔径的张角会随之减小, 从而导致脉冲持续时间减小。但是, 当光束大于测量孔径或者扫描速度函数为非线性时, 不会出现这种情况。关于脉冲持续时间和脉冲重复频率的测量, 见 7.4.3 和 7.6。

7.8.4 扫描对向角(α_{scan})

扫描对向角(α_{scan})用于计算扫描角覆盖一条线或一个比瞳孔大的区域的扫描光束的 C_6 。如果扫描停留在瞳孔内, 则光束可以被视为 CW, 或者应进行更精细的分析。若眼睛不聚焦于扫描光束的顶点, 则光束在视网膜上形成一条扫描线, 对应的张角为 φ_{scan} , 该角度取决于测量孔径、距离以及注视点见式(15):

$$\varphi_{scan} = \left| 2 \tan^{-1} \left[\frac{AP}{2} \left(\frac{1}{M} - \frac{1}{Z} \right) \right] \right| \approx \left| AP \left(\frac{1}{M} - \frac{1}{Z} \right) \right| \dots\dots\dots(15)$$

注1: 扫描光束的顶点不一定在扫描元件的表面, 但往往是这样。

注2: 无论眼睛聚焦点位于扫描光束顶点的哪一侧, 本公式均有效。

由于所有能量在很短的时间内聚集在视网膜的一个点上, 因此计算 C_6 时, 不能用 φ_{scan} 定义扫描方向上的对向角。但是, 当持续时间小于 GB 7247.1—2012 表 3 中规定的 T_i (例如, 波长处于 400 nm ~ 1 050 nm, 持续时间 18×10^{-6} s) 时, 危害不取决于光束形状, 并且允许光束合成。因此, 可将扫描对向角增至 φ_T , φ_{scan} 对应于光束在时间 T_i 期间在视网膜上的移动, 则 φ_T 由式(16)得出:

$$\varphi_T = \begin{cases} (T_i/T_p)\varphi_{scan} & T_p \geq T_i \\ \varphi_{scan} & T_p < T_i \end{cases} \dots\dots\dots(16)$$

将 T_p 和 φ_{scan} 公式代入, 则得出式(17):

$$\varphi_T = \begin{cases} T_i M \omega \left| \frac{1}{M} - \frac{1}{Z} \right| & T_p \geq T_i \\ AP \left(\frac{1}{M} - \frac{1}{Z} \right) & T_p < T_i \end{cases} \dots\dots\dots(17)$$

扫描对向角 α_{scan} 由下列公式得出[见式(18)]:

$$\alpha_{scan} = \max[(\alpha_s + \varphi_T), \alpha_{min}] \dots\dots\dots(18)$$

式中, α_s = 沿扫描轴向的静态对向角。

注3: 若 α_s 小于 α_{min} , 则不用 α_{min} 代替 α_s 。

对于任意眼睛注视点, 可采用下列公式计算出 C_6 , 见式(19):

$$C_6 = \frac{\alpha_{nscan} + \alpha_{scan}}{2\alpha_{min}} \dots\dots\dots(19)$$

此处, α_{nscan} = 沿非扫描轴的对向角或者 α_{min} , 取较大者。

7.8.5 双向扫描

若扫描系统为双向的, 则在扫描线端点位置, 光束会停止, 并转换扫描方向。如果该点是可达的, 在确定 AEL 时, 应将其考虑在内。由于角速度是非线性的, 脉冲持续时间 T_p 不能由 7.8.3 的公式得出, 应进行测量或者将速度作为角度的函数推算得出。为了计算 C_6 , 应对 φ_T 进行测量或者从光束在 $(T_i/2)$ 或 $(T_p/2)$ (取二者较短的一个) 时间内从端点离开的角度推算得出。持续时间减半是因为光束在扫描线的末端转换方向, 而同时它仍然停留在视网膜上的同一区域。如果回转(零速度)点是不可达的(例如, 被某种光束整形), 则可得到扫描线的端点速度最慢, 因此, 脉冲持续时间最长。这种情况下, φ_T 仍然可从扫描线的端点处得到, 但测量时间只是 T_i 或 T_p 中较短的一个。对于双向扫描, 脉冲持续时间取决于沿扫描线的测量孔径(AP)位置。对于正弦扫描且测量孔径 AP 位于扫描线端点(回转点)的扫描镜, 用于分类的脉冲持续时间为小角度近似, 见式(20)。

$$T_p = \frac{1}{\pi f} \cos^{-1} \left(1 - \frac{2AP}{\theta M} \right) \dots\dots\dots (20)$$

式中:

- f ——扫描频率;
- θ ——全扫描角;
- AP ——测量孔径光阑直径;
- M ——测量孔径光阑到扫描顶点之间的距离。

应该注意的是,正弦运动是双向扫描元件的常用形式,但其真正的运动状态依赖于所使用的装置,可能会跟真正的正弦曲线有所不同。如果是正弦运动,可以很容易地导出方程确定脉冲持续时间(请参阅附录 A 正弦扫描的例子)。其他情况下直接测量光束的运动可能是首选方法。

如果激光功率是不同扫描角的函数,则这将可能用于某些类型的性能优化,例如改善亮度均匀性,而产生最长脉冲持续时间的光束位置可能不对应该设备 AEL。在这种情况下,AEL 应被确定为扫描角(以及距扫描仪的距离)和激光功率相比的函数。功率与 AEL 的最高比率将是限制条件。

7.8.6 孔径内扫描线数(n)

在源于扫描线一个点的多扫描线情况,随着与扫描元件距离的增加,各扫描线之间的间隔也增大。孔径内扫描线的数量影响适用时间基准内脉冲串的脉冲数。下面的等式表达了脉冲串的脉冲数 N 与脉冲重复频率、孔径内扫描线数量以及适用的时间基准的函数关系,见式(21)。

$$N = (\text{PRF}) \cdot n \cdot T \dots\dots\dots (21)$$

式中:

- N ——适用时间基准或 T_2 (二者中较小者)时间内,脉冲串所包含的脉冲数;
- PRF——单个扫描线的脉冲重复频率;
- n ——孔径内扫描线数量;
- T ——适用时间基准或 T_2 ,二者中较小者。

为了确定进入孔径内的扫描线数,孔径的大小可以不用考虑。例如,如果两个扫描线的间隔恰好是 7 mm,那么要计算通过瞳孔的两个完整脉冲持续时间将是非常难的,因为瞳孔是圆形的。对于在 7 mm 孔径上相距 6 mm 的两个扫描线情况,会产生两个脉冲,每一个脉冲的脉冲持续时间是单个扫描线集中在孔径上产生的脉冲的脉冲持续时间的一半。因此,对于通过 7 mm 孔径的计数脉冲而言,最大相距 6 mm 是保守的基础。如果想得到一个更精确、严酷程度较低的结果,可以采用 GB 7247.1—2012 中 8.3 f)3)ii)的 TOTP 方法来确定每次重复的有效总脉冲。采用该方法,每个脉冲的持续时间及其光束穿过孔径的情况都可以考虑到。

关于脉冲持续时间和脉冲重复频率测量,见 7.4.3 和 7.6。

若扫描系统的多条扫描线从不同的场源进入瞳孔,则视网膜上相应的成像分布于不同的点。如果这些场源相互间距超过 100 mrad,则它们被认为是相互独立的,可视为孤立场源。对于小于 100 mrad 的角间距,则需分别计算每个场源以及多光源的所有组合的 AEL,以确定最严格的情况。如果将多光源视为一个不规则光源,则脉冲数等于不规则图案形成的次数。例如,如果光源 A 和光源 B 有一个综合的 C_6 值 $C_6(A+B)$,且二者在测量期间通过测量孔径同时被扫描 N 次,则 AEL 将为 A 和 B 的功率之和减去 N (而非 $2 \times N$)个脉冲的重复脉冲判据。关于多光源和不规则光源的测量,见 GB 7247.1—2012 中 8.3。

7.8.7 最大危害位置

7.8.7.1 一般要求

最大危害位置是指得出最严格分类的综合对向角、脉冲持续时间、脉冲数、眼调节以及所测能量(功

率)的位置。确定该位置是复杂的过程,因为眼睛将在不同情况下寻求并聚焦在不同的物体上。此外,特定激光装置的细节可在扫描场中产生感兴趣的点。例如,如果静态光束收敛且离开该装置的尺寸大于测量孔径,则最大危害位置可能比基于进入眼睛的光束全能量确定的距离更远。这是由于耦合参数对测量距离的依赖(见 7.8.8)。在多条扫描线的情况下,最大危害点可能位于由多条扫描线过渡到测量孔径内较少扫描线之前的距离处。类似地,最大危害点可以处于脉冲持续时间为 GB 7247.1—2012 表 4、表 5、表 7 或表 8(例如,热危险区域中的 18 μs)边界值的距离处。在评估一个距离以确定最大危害位置时,所有变量将在该距离处测量。

对于专门的、复杂的扫描系统,应考虑系统所有参数的变化,包括眼睛的焦点,以便找到临界组合。对于简单扫描光束系统,为确定最大危害条件,应考察以下两种情况。另请参考附录 A.1 的例子。

7.8.7.2 无穷远焦距(眼睛放松状态下)

若考虑了用 α_{scan} 计算出 $C_6 > 1$,应重点考虑眼睛聚焦到无穷远条件下的情况。此时, $Z = \infty$ 且 α_s 接近光束的发散角 β 。这从 α_s 的定义为 d/Z 可以看出。随着到测量平面的距离 Z 趋向于无穷大,在该平面中测量的光斑尺寸 d 也将变得无穷大。那么,就可以得出以下结论:对于 T_p 大于 T_i 的测量距离, α_{scan} 与到扫描顶点的距离 M 无关,仅与 T_i (见 GB 7247.1—2012 中表 3)和角扫描速度有关,见式(22)。

$$\alpha_{scan} = \begin{cases} \max[(\beta + T_i \omega), \alpha_{min}] & T_p \geq T_i \\ \max[(\beta + AP/M), \alpha_{min}] & T_p < T_i \end{cases} \dots\dots\dots (22)$$

如果最小可访问测量距离小于该值,则扫描器附近范围的 α_{scan} 仅随距离 M 变化。如果角速度小于 $[(\alpha_{min} - \beta)/T_i]$,则在此范围内 α_{scan} 等于 α_{min} 。如果光束是发散的, α_{scan} 可能足够大以致 $C_6 > 1$,但 100 mm 的测量距离常常是最危险的情况。这一结论通过改变测量距离,寻找最坏情况时的位置的方法验证。

7.8.7.3 聚焦于扫描顶点

另一个需要评估的条件是眼睛聚焦在扫描顶点处并且测量孔径位置足够远,这样 α_s 和 α_{nscan} 小于 α_{min} 。这种情况下 $C_6 = 1$ 。距离 Z_0 见式(23):

$$Z_0 = d_{max}/0.0015 \dots\dots\dots (23)$$

式中:

d_{max} ——在扫描顶点位置处的两个光束尺寸中的较大者。

7.8.8 高斯光束耦合参数(η)

不论光束的总能量多大,分类时,仅考虑通过给定测量距离处限制孔径内的能量。

不同的束腰宽度和光束发散角,在沿可达光路的部分或所有位置,光束尺寸可能大于测量孔径。对于非高斯光束,应直接测量获得通过限制孔径内的功率。

对于对称高斯分布,通过位于光束中心的圆形限制孔径的能量比例,见式(24):

$$\eta = 1 - e^{-(AP/d_{ap})^2} \dots\dots\dots (24)$$

式中:

AP ——测量孔径的直径;

d_{ap} ——孔径光阑处的光束直径(根据标准确定,例如 d_{63})。

7.8.9 扫描角倍增系数

为了确定合适的脉冲持续时间,无法直接在感兴趣的每个点处测量的,应知道扫描装置的角束速度。扫描元件通常是旋转镜或具有恒定旋转速度的镜组,但重要的是不要混淆镜旋转速度与角束速度。

对于旋转轴垂直于扫描平面的简单情况,角束速度将比镜旋转速度快 2 倍。该因子被称为扫描角倍增 (SAM) 系数,并且对于简单的旋转镜,它始终在 0 和 2 之间。

图 14 给出了 SAM 因子不为 2 时的情况。定 SAM 因子 K_{SAM} ,可以使用式(25)确定:

$$K_{SAM} = \cos\theta_i + \cos\theta_r \dots\dots\dots(25)$$

式中:

θ_i 和 θ_r ——图 14 中定义的人射角和反射角。

注:当反射镜 360°全旋转时,SAM 因子不一定恒定。因此,这个方程仅在扫描的对称中心处时完全准确。然而,通常,全扫描角度在某种程度上受到表面有限大小的限制,并且 SAM 因子变化不是很大。对于广角扫描,应注意光束速度的方差的确定。

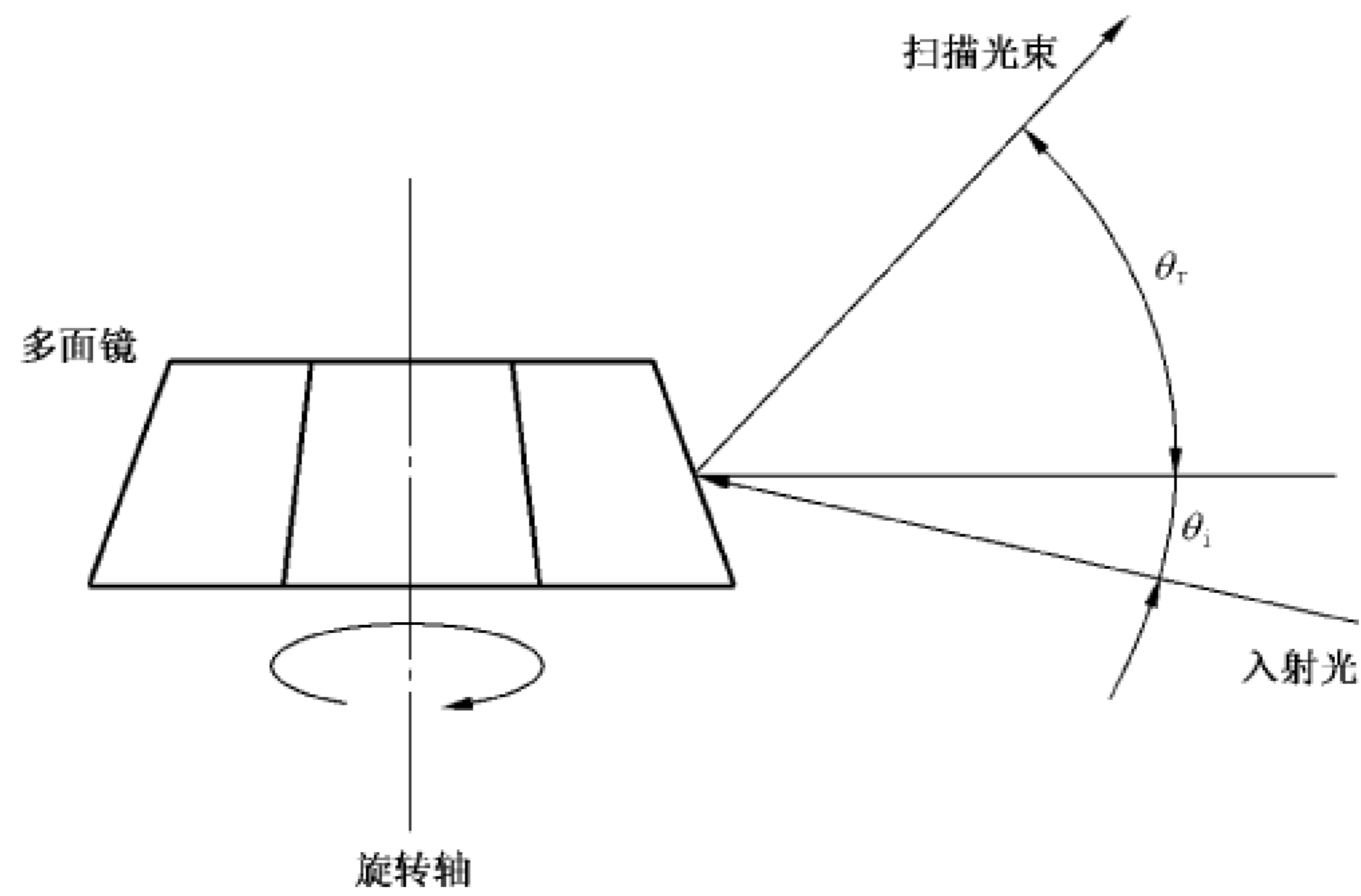


图 14 具有任意扫描角倍增系数的扫描镜

在许多情况下,镜像多边形的不同面将以不同角度倾斜,以便产生线光栅。在这种情况下,由于不同的反射角度,每条线具有不同的光束速度。对于紧密间隔的光栅,光束速度的差异很小,并且最慢的速度可适用于所有的线;但是对于较宽的光栅,对每条线进行独立计算可能是适当的。

附 录 A
(资料性附录)
范 例

A.1 大光源分类范例

A.1.1 一般要求

这个范例说明了具有大表观光源(>100 mrad)产品的分类方法。假定接近垂直于平面的光源能量是均匀的,并且因为不存在光束结构(即光源是非相干或者全漫射的),实际发射区域是表观光源。假设的参数是直径为 d 和 $1/e$ 处光束发散度为 Φ 的圆形光源。

分析确定 1 类的总的可允许功率。对不同距离,分析确定了在 100 mrad 最大接收角内的总能量比例,由测量孔径收集的能量比例,以及表观光源的对向角。这些参数可用于确定 1 类的 AEL,以及在辅助观察条件和无辅助装置观察下总发射功率。

A.1.2 无辅助装置观察的极限

A.1.2.1 无辅助装置观察可收集的发射能量

应确定来自距离(r)、最大接收角 $\delta=100$ mrad 内的光源发射能量的比例。任何投射到 100 mrad 圆外侧的发射能量都不予考虑。我们指定 100 mrad 以内的比例为 F_c 。

有两种几何情况需要考虑:

当 $r < 10d$, 100 mrad 投影到光源上的圆,其直径小于 d mm,此时:

$$F_c = \pi/4(0.1r)^2 \text{ mm}^2 / (\pi/4d^2 \text{ mm}^2) = (0.1r/d)^2$$

当 $r \geq 10d$, 100 mrad 投影的圆内收集整个光源,此时 $F_c = 1$ 。

A.1.2.2 无辅助装置观察的光源对向角

α 的值取决于评估的光源比例以及到光源的距离 r 。

若 $r < 10d$, 光源充满接收角,则:

$$\alpha = 100 \text{ mrad and } C_6 = 100/1.5 = 66.7。$$

若 $r \geq 10d$, 则: $\alpha = d/r$ rad, $C_6 = 667d/r$ 。

A.1.2.3 无辅助装置观察收集的能量

当 $r < 10d$, 来自直径 $0.1r$ 那部分光源的、在 r mm 处发散光束图形的面积近似为:

$$A_r = \pi/4(\Phi r + 0.1r)^2 = 0.79(\Phi + 0.1)^2 r^2$$

收集在 7 mm 孔径内的比例为:

$$F_c = 38.4 \text{ mm}^2 / [0.79(\Phi + 0.1)^2 r^2] = 49 \text{ mm}^2 / [(\Phi + 0.1)^2 r^2]$$

当 $r \geq 10d$, 来自全光源、在 r mm 处的发散光束图形的面积近似为:

$$A_r = \pi/4(\Phi r + d)^2$$

收集在 7 mm 孔径内的比例为:

$$F_c = 38.4 \text{ mm}^2 / [\pi/4(\Phi r + d)^2] = 49 \text{ mm}^2 / (\Phi r + d)^2$$

1 类判据

给定波长和脉冲持续时间,可以计算能量极限。例如,对于波长 $700 \text{ nm} \sim 1050 \text{ nm}$, GB 7247.1—

2012 表 5 中 1 类产品的能量极限为:

$$E = 0.7C_4C_6T_2^{3/4} \text{ mJ}$$

上式可用功率表示为,见式(A.1):

$$AEL = E/T_2 = 0.7C_4C_6T_2^{3/4} \times 1/T_2 = 0.7C_4C_6/T_2^{1/4} \text{ mW} \quad \dots\dots\dots(A.1)$$

A.1.2.4 无辅助装置观察的总允许功率

为了确定总的可允许的发射功率,对特定的评估距离,应使用正确的 T_2 和 C_6 值。本分析在 $r > 100 \text{ mm}$ 的距离处确定表观光源的对向角 α ,该参数估算是一个保守的近似。

在任意距离的总的允许发射功率可使用式(A.1)得到,考虑到孔径光阑和视场光阑的损耗[见式(A.2)]:

$$P_T = AEL/(F_e \times F_c) = 0.7C_4C_6/(F_e \times F_c \times T_2^{1/4}) \text{ mW} \quad \dots\dots\dots(A.2)$$

A.1.3 辅助观察分析

A.1.3.1 方法

为了评估条件 1,将遵循上述无辅助装置观察使用的方法,但有如下调整:

- 50 mm 孔径的收集面积增大;
- 由于光学器件的放大倍率,光源的对向角增大 7 倍。
- 由于光学器件的放大倍率,发射能量的接收角降至 $\delta = 100/7 \text{ mrad}$;
- 如 GB 7247.1—2012 中表 11 所规定,最小距离为 2 000 mm。

A.1.3.2 辅助观察可收集的发射能量

有两种几何情况需要考虑:

对于 $2\,000 \text{ mm} < r < 70d$ 的情况,自距离 r 、以 $100/7 \text{ mrad}$ 投射到光源上的圆,其直径小于 $d \text{ cm}$ 。收集能量的近似比例为:

$$F_{ca} = \pi/4 \times (0.1r/7)^2 \text{ cm}^2 / (\pi/4d^2) = (0.1r/7d)^2$$

对于 $r \geq 70d \text{ cm}$ 的情况,整个光源聚集在投影的 $100/7 \text{ mrad}$ 圆内,因此 $F_{ca} = 1$ 。

A.1.3.3 辅助观察的光源对向角

若 $2\,000 \text{ mm} < r < 70d$,则:

$$\alpha = 100 \text{ mrad} \text{ 且 } C_{6a} = 100/1.5 = 66.7。$$

若 $r \geq 70d$,则:

$$\alpha = 7d/r \text{ rad, 且 } C_{6a} = 4\,670d/r。$$

A.1.3.4 辅助观察收集的能量

对于 $r < 70d$ 的情况,从部分光源到距离 r 处,直径为 $0.1r/7$ 的发散光束的面积近似为:

$$A_r = \pi/4(\Phi r + 0.1r/7)^2 = 0.79(\Phi + 0.014\,3)^2 r^2$$

收集到 50 mm 孔径中的比例为:

$$F_{ca} = 1\,960 \text{ mm}^2 / [0.79(\Phi + 0.014\,3)^2 r^2] = 2\,500 \text{ mm}^2 / [(\Phi + 0.014\,3)^2 r^2]$$

对于 $r \geq 70d$ 的情况,从全光源到距离 r 处的发散光束的面积近似为:

$$A_r = \pi/4(\Phi r + d)^2$$

收集到 7 mm 孔径中的比例为:

$$F_{ca} = 1\,960 \text{ mm}^2 / [\pi/4(\Phi r + d)^2] = 2\,500 \text{ mm}^2 / (\Phi r + d)^2$$

A.1.3.5 辅助观察的总允许功率

采用式(A.2)的形式但在任何距离辅助观察的参数下,从 AEL 推导得出的总功率为[见式(A.3)]:

$$P_{Ta} = AEL / (F_{ea} \times F_{ca}) = 0.7C_4 C_{6a} / (F_{ea} \times F_{ca} \times T_{2a}^{1/4}) \text{ mW} \dots\dots\dots (A.3)$$

A.1.3.6 产品允许的总功率

通过确定条件 1 和条件 2 下不同距离处的总发射功率,可确定任意距离处的最小值,以将其作为产品可允许的功率水平。

注意,在无辅助装置观察条件下,对 $r < 10d$ 的所有距离,极限将是常数;而在辅助观察下, $r < 70d$ 的所有距离,极限是常数。这些常数值可能是极限判据,也可能不是。

A.1.3.7 采样结果

如果假设光源直径 $d = 3 \text{ cm}$, 发散角 $\theta = 0.05 \text{ rad}$, 则在条件 3 下,由式(A.2),在最受限距离 $r < 30 \text{ cm}$ 上无辅助装置观察,根据式(A.2)计算的可允许功率是 0.61 W 。在条件 1 下,在 $r < 210 \text{ cm}$ 最受限制的距离上,根据式(A.3)计算的可允许的功率将是 0.11 W 。

A.2 扫描光束实例

A.2.1 简单面镜多边形

一束红色的扫描光束沿直线穿过一个以每分钟 5 000 转速度旋转的三菱镜。这镜面放置在距电机轴 20 mm 的位置,而且扫描平面垂直于这个正多边形的旋转轴。光束要近似为准直光束(光束发散角小于 α_{min})且该光束要在镜面上形成一个 1 mm 乘以 0.5 mm 的椭圆(分别 1/e 扫描和交叉扫描)。从下列选项中最严酷的情况作为 1 类激光的 AEL:

- a) 关注扫描元件,在最近的距离处测量;
- b) 放松眼睛,在最近的位置处测量;
- c) 关注扫描元件,在 $C_6 = 1$ 的位置处测量;
- d) 关注扫描元件,在脉冲持续发射 18 μs 的距离处测量。

所有情况下,重复脉冲要求采用表 11 的条件 3(对于扫描装置采用条件 1 和条件 2 进行研究是没有必要的)根据 8.3 f)的条款 1)、2)和 3)来确定 AEL。

一个旋转面轮,扫描顶点通常在这个晶体面的表面,测试的距离应当以这个点作为参考点,脉冲期间这个顶点会发生微小的移位,但是这个移位仅仅引起这个斑点轻微的模糊,使得 AEL 的计算值更保守。

因为扫描平面垂直于旋转轴,下面所有案例中扫描角乘法(SAM)因子是 2:

$$K_{\text{SAM}} = 2.0 \rightarrow \omega = (5\,000 \text{ rpm}) (2\pi/60) (2.0) = 1\,047.2 \text{ rad/s}$$

由于在旋转镜面上有 3 个相同的面,因而脉冲重复的频率(PRF)为 3。

案例 1) 关注扫描元件上,在最近的位置处测量

由于扫描顶点是一个像点,光束不能通过视网膜扫描。假设距离扫描顶点 100 mm 处是可接触的,那这个点用于测量和调节适当的值。

$Z = 100 \text{ mm}$	$M = 100 \text{ mm}$	$d_{\text{nscan}} = 0.5 \text{ mm}$	$d_{\text{scan}} = 1.0 \text{ mm}$
$AP = 7.0 \text{ mm}$	$\alpha_{\text{nscan}} = 5.0 \text{ mrad}$	$\alpha_s = 10.0 \text{ mrad}$	$\varphi_s = 0 \text{ mrad}$
$\varphi_T = 0 \text{ mrad}$	$\alpha_{\text{scan}} = 10.0 \text{ mrad}$	$\alpha = 7.5 \text{ mrad}$	$C_6 = 5.0$
$T_2 = 11.51 \text{ s}$	$T_p = 66.9 \mu\text{s}$	$N = 2\,876$	$C_5 = 0.137$
$AEL_{(1)} = (C_6 \cdot 7 \times 10^{-4}) / (T_p)^{0.25} \text{ W} \rightarrow AEL_{(1)} = 38.7 \text{ mW}$			

$$AEL_{2)} = [(C_6 \cdot 7 \times 10^{-4}) / (T_2)^{0.75}] / (NT_p) \text{ W} \rightarrow AEL_{2)} = 114 \text{ mW}$$

$$AEL_{3)} = (AEL_{1)}) C_5 \text{ W} \rightarrow AEL_{3)} = 5.29 \text{ mW}$$

案例 2) 放松眼睛,在最近的位置处测量

对于这个案例,调节的距离是无穷的,因为光束是平行光 $\beta=0$ 。准确的说,截面扫描对向角达到了 1.5 mrad 和 $\alpha_{scan} = T_i \omega$ 的极限。

$Z = \infty$	$M = 100 \text{ mm}$	$d_{nscan} = 0.5 \text{ mm}$	$d_{scan} = 1.0 \text{ mm}$
$AP = 7.0 \text{ mm}$	$\alpha_{nsan} = 1.5 \text{ mrad}$	$\alpha_s = 0.0 \text{ mrad}$	$\varphi_s = 70 \text{ mrad}$
$\varphi_T = 18.9 \text{ mrad}$	$\alpha_{scan} = 18.9 \text{ mrad}$	$\alpha = 10.2 \text{ mrad}$	$C_6 = 6.78$
$T_2 = 12.25 \text{ s}$	$T_p = 66.9 \mu\text{s}$	$N = 3\ 062$	$C_5 = 0.134$

$$AEL_{1)} = (C_6 \cdot 7 \times 10^{-4}) / (T_p)^{0.25} \text{ W} \rightarrow AEL_{1)} = 52.5 \text{ mW}$$

$$AEL_{2)} = [(C_6 \cdot 7 \times 10^{-4}) / (T_2)^{0.75}] / (NT_p) \text{ W} \rightarrow AEL_{2)} = 152 \text{ mW}$$

$$AEL_{3)} = (AEL_{1)}) C_5 \text{ W} \rightarrow AEL_{3)} = 7.06 \text{ mW}$$

案例 3) 关注扫描元件,在 $C_6 = 1$ 的距离处测量

为了找到合适的测量距离,使用两束光束中尺寸较大的光束,在这个案例中 1 mm 光束在 667 mm 处的对向角是 1.5 mrad,这个值就是 Z 和 M ,注意越短的脉冲持续时间会改变 $AEL_{1)}$ 的等式。

$Z = 667 \text{ mm}$	$M = 667 \text{ mm}$	$d_{nscan} = 0.5 \text{ mm}$	$d_{scan} = 1.0 \text{ mm}$
$AP = 7.0 \text{ mm}$	$\alpha_{nsan} = 1.5 \text{ mrad}$	$\alpha_s = 1.5 \text{ mrad}$	$\varphi_s = 0 \text{ mrad}$
$\varphi_T = 0 \text{ mrad}$	$\alpha_{scan} = 1.5 \text{ mrad}$	$\alpha = 1.5 \text{ mrad}$	$C_6 = 1.0$
$T_2 = 10.0 \text{ s}$	$T_p = 10.0 \mu\text{s}$	$N = 2\ 500$	$C_5 = 0.141$

$$AEL_{1)} = (C_6 \cdot 2 \times 10^{-7}) / (T_p) \text{ W} \rightarrow AEL_{1)} = 20.0 \text{ mW}$$

$$AEL_{2)} = [(C_6 \cdot 7 \times 10^{-4}) / (T_2)^{0.75}] / (NT_p) \text{ W} \rightarrow AEL_{2)} = 157 \text{ mW}$$

$$AEL_{3)} = (AEL_{1)}) C_5 \text{ W} \rightarrow AEL_{3)} = 2.82 \text{ mW}$$

案例 4) 集中扫描元件,在等同脉冲持续发射 18 μs 的距离处测量

最后这个案例光束决定测量距离,用 7 mm 孔径发现 18 μs 脉冲可以获得 371 mm 的距离,用上述案例中任一个 AEL 公式都将得到几乎相同的限值(舍去系数引起的细微差别)。

$Z = 371 \text{ mm}$	$M = 371 \text{ mm}$	$d_{nscan} = 0.5 \text{ mm}$	$d_{scan} = 1.0 \text{ mm}$
$AP = 7.0 \text{ mm}$	$\alpha_{nsan} = 1.5 \text{ mrad}$	$\alpha_s = 2.69 \text{ mrad}$	$\varphi_s = 0 \text{ mrad}$
$\varphi_T = 0 \text{ mrad}$	$\alpha_{scan} = 2.69 \text{ mrad}$	$\alpha = 2.10 \text{ mrad}$	$C_6 = 1.40$
$T_2 = 10.14 \text{ s}$	$T_p = 18.0 \mu\text{s}$	$N = 2\ 535$	$C_5 = 0.141$

$$AEL_{1)} = (C_6 \cdot 7 \times 10^{-4}) / (T_p)^{0.25} \text{ W} \rightarrow AEL_{1)} = 15.0 \text{ mW}$$

$$AEL_{2)} = [(C_6 \cdot 7 \times 10^{-4}) / (T_2)^{0.75}] / (NT_p) \text{ W} \rightarrow AEL_{2)} = 122 \text{ mW}$$

$$AEL_{3)} = (AEL_{1)}) C_5 \text{ W} \rightarrow AEL_{3)} = 2.12 \text{ mW}$$

由于采用最严格的 AEL 进行分类因而案例 4 中 1 类激光设备允许的最大功率是 2.12 mW,注意这四个案例可能不是唯一情况,需要考虑任何给定应用的情况。

A.2.2 扫描光栅

以 1 000 rpm 旋转的多边形面镜可产生等间隔的扫描线光栅。入射激光束到多边形旋转轴的法线为 $20^\circ(\theta_i)$ 。随着每条线变化 0.5° ,反射角 θ_r 从 $20^\circ \sim 60^\circ$ 变化。小平面上的圆形光斑尺寸为 0.4 mm。找到 1 类 AEL 的极限,假设它发生在 $C_6 = 1$,眼睛聚焦在扫描顶点时。

由于该扫描器产生光栅,所以多条线将进入瞳孔直到离开扫描顶点一定距离。如果孔径光阑为 7 mm 距离 100 mm,那么只需旋转一次多面体,多达 8 条线能够穿过该孔。不用考虑距离超过 688 mm 的多条线(距离 6 mm 时包括 0.5°)。由于在 267 mm 处 $C_6 = 1$,此时有必要考虑复杂多线。

由于所有的线都由相同的光束产生,每条线将产生单个的,短时分离的脉冲。我们将使用脉冲总持

续时间(TOTP)方法来确定组合线的有效脉冲。在 267 mm 处,光栅线之间的间距为 233 mm。在这个间距,无论是三条或是四条线将穿过 7 mm 的孔径。两种可能的情况如图 A.1 所示。有效脉冲宽度 T_{eff} 是穿过孔径的 n 条线的单脉冲宽度的总和,并且可以通过将孔径内部的总扫描线长度相加来确定:

$$T_{\text{eff}} = \frac{\sum_1^n L_i}{7 \text{ mm}} T_1 = K_n T_1$$

T_1 是单条线脉冲宽度。经检查两种情况,确定 $n=3$ 时, K_n 较大, $K_3=2.49$ (相比较于 $K_4=2.03$)。因此,多边形单次旋转的有效脉冲为 $T_{\text{eff}}=2.49T_1$ 。然而,这不是全脉冲串的有效脉冲。用于分类的全脉冲持续时间 T_{TOTP} 等于 T_{eff} 乘以脉冲数 N 。

现在需要确定 T_1 。为此,我们需要知道光束速度,其将取决于孔径位于光栅图形中的位置。当反射角度变化时, SAM 因子将随着光栅变化。对于最小反射角度 20° , K_{SAM} 为 1.88; 对于最大角度 60° , K_{SAM} 为 1.44。最小的 SAM 因子将提供最慢的速度,并因此提供最长的 T_1 , 因此应当使用该最长的 T_1 。由此我们可以得出孔径上的线性光束速度为 40 200 mm/s 以及 $T_1=174 \mu\text{s}$ 。因此得出单旋转有效脉冲持续时间 T_{eff} 为 434 μs , 其将在时间基准 T_2 期间每转重复一次。这给出了我们计算 AEL 所需的所有信息:

$Z=267 \text{ mm}$	$M=267 \text{ mm}$	$d_{\text{scan}}=0.4 \text{ mm}$	$d_{\text{scan}}=0.4 \text{ mm}$
$AP=7.0 \text{ mm}$	$\alpha_{\text{scan}}=1.5 \text{ mrad}$	$\alpha_s=1.5 \text{ mrad}$	$\varphi_{\text{scan}}=0 \text{ mrad}$
$\varphi_T=0 \text{ mrad}$	$\alpha_{\text{scan}}=1.5 \text{ mrad}$	$\alpha=1.5 \text{ mrad}$	$C_6=1.0$
$T_2=10.0 \text{ s}$	$T_1=174 \mu\text{s}$	$T_{\text{eff}}=434 \mu\text{s}$	$N=167$
$T_{\text{TOTP}}=NT_{\text{eff}}=72.3 \text{ ms}$			
$\text{AEL}_{(1)}=(C_6 \cdot 7 \times 10^{-4})/(T_1)^{0.25} \text{ W}$			$\text{AEL}_{(1)}=6.09 \text{ mW}$
$\text{AEL}_{(2)}=[(C_6 \cdot 7 \times 10^{-4})(T_2)^{0.75}]/(T_{\text{TOTP}}) \text{ W}$			$\text{AEL}_{(2)}=54.4 \text{ mW}$
$\text{AEL}_{(3)}=[(C_6 \cdot 7 \times 10^{-4})/(T_{\text{TOTP}})^{0.25}] \text{ W}$			$\text{AEL}_{(3)}=1.35 \text{ mW}$

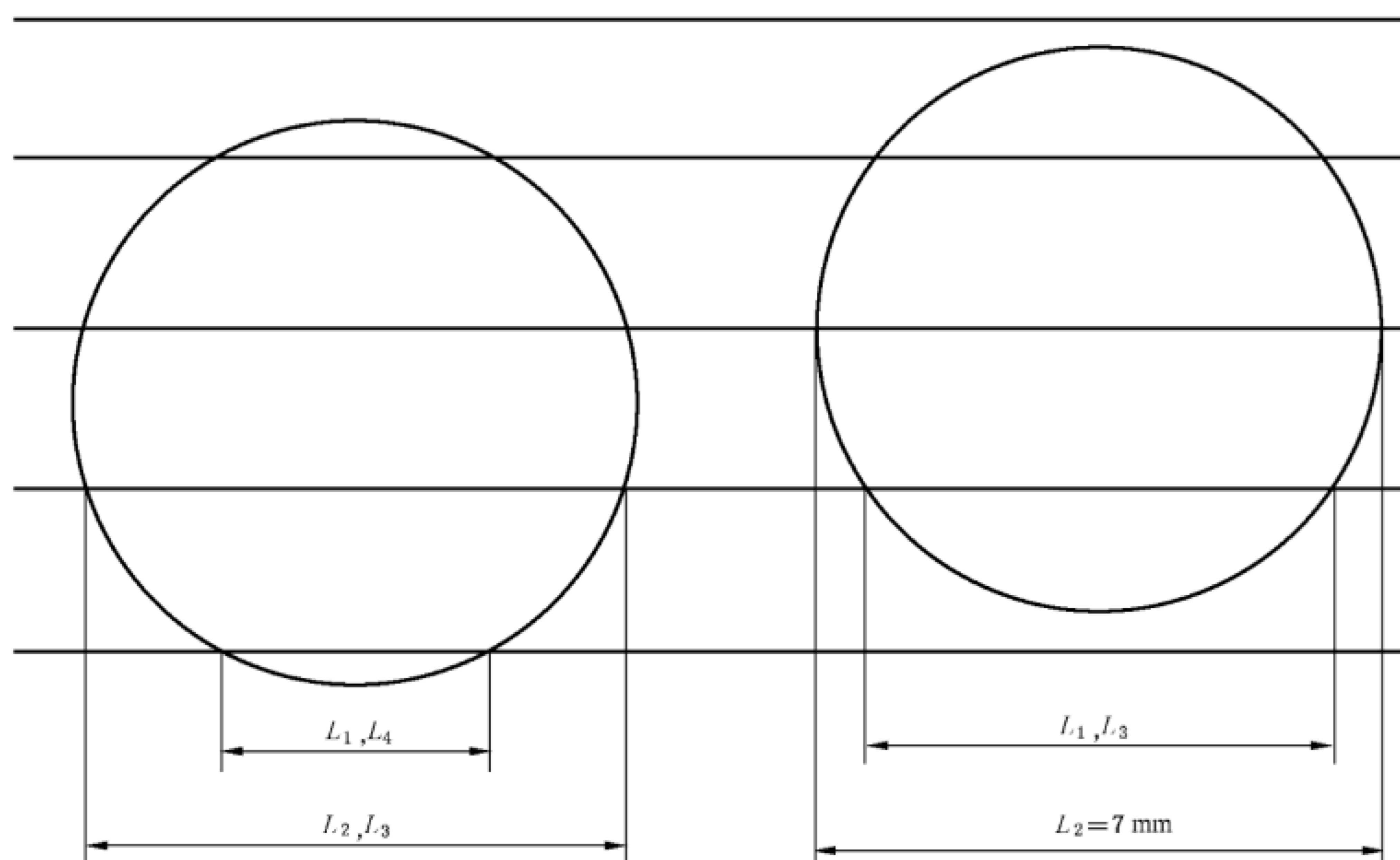


图 A.1 距扫描顶点的距离为 $C_6=1$ 时多条光栅线穿过测量孔径

A.2.3 双向扫描

振动反射镜以 50 Hz 频率正弦运动,在 60°全角扫描宽度范围内扫描红色激光束。在反射镜上的光束尺为 0.8 mm 的圆形光斑。假设发生最坏的情况,即当反射镜聚焦到眼睛并且位于 $C_6 = 1$ 时的位置,若用户在全扫描角范围内,1 类激光的 AEL 值是多少? 如果扫描线被物体遮挡,用户只能接触中间 50°的扫描角,AEL 值是多少?

为了继续说明,需要定义何为“正弦运动”。它有两个合理的定义:1)光束角度位置为正弦函数;2)投射到屏幕上光斑的运动为正弦函数。当扫描角度较小时,这两种定义是相同的,但当扫描角度较大时,二者则存在差异。

对于第一种情况,脉宽由式(A.4)确定:

$$T_p = \frac{1}{2\pi f} \left\{ \cos^{-1} \left[\frac{1}{\theta_{\max}} \left(\theta_a - \frac{2AP}{M} \right) \right] - \cos^{-1} \left(\frac{\theta_a}{\theta_{\max}} \right) \right\} \dots\dots\dots (A.4)$$

这里, f 为频率, θ_{\max} 为光束全扫描角度。 θ_a 为可接触的扫描角度, M 为直接测量反射镜到光阑 AP 的距离。当 θ_a 不等于 θ_{\max} 时,由于光束前向和后向扫描,脉冲频率为 $2f$ 。当 θ_a 设置为与 θ_{\max} 相等时,上式减化为[见式(A.5)]:

$$T_p = \frac{1}{\pi f} \cos^{-1} \left(1 - \frac{2AP}{\theta_{\max} M} \right) \dots\dots\dots (A.5)$$

当照射到转折点时,两个脉冲合二为一,脉冲频率等于周期频率。

对于第二种正弦运动情况,脉宽由式(A.6)确定:

$$T_p = \frac{1}{2\pi f} \left\{ \cos^{-1} \left[\frac{\tan(\theta_a/2)}{\tan(\theta_{\max}/2)} - \frac{AP/\cos(\theta_a/2 - AP/2M)}{M \tan(\theta_{\max}/2)} \right] - \cos^{-1} \left[\frac{\tan(\theta_a/2)}{\tan(\theta_{\max}/2)} \right] \right\} \dots\dots\dots (A.6)$$

这里的变量与前面相同,除了 M 是从反射镜到光束投射的屏幕的法线距离。同样 θ_a 不等于 θ_{\max} 时脉冲频率为 $2f$ 。当可接触全角度扫描线时,脉冲频率为 f ,公式简化为[见式(A.7)]:

$$T_p = \frac{1}{\pi f} \cos^{-1} \left[1 - \frac{AP/\cos(\theta_{\max}/2 - AP/2M)}{M \tan(\theta_{\max}/2)} \right] \dots\dots\dots (A.7)$$

对于这个例子的情况,我们将应用前两个方程使用正弦角运动。式(A.4)用来确定可接触全部扫描线的脉宽。光阑 AP 尺寸为 7 mm,频率 f 为 50 Hz, θ_{\max} 为 60°(1.05 rad)。测量距离 M 为 533 mm,聚焦到反射镜上的光斑会产生 1.5 mrad 的对向角。将这些参数代入方程得 $T_p = 1.428$ ms。当 $C_6 = 1$,1 类激光的时基 T_2 为 10 s。脉冲频率为每秒 50 个脉冲,即在 10 秒内可产生 500 个脉冲,从而得到 C_5 因子为 $(1/500)^{1/4} = 0.211$ 。由 GB 7247.1—2012 确定的 AEL 为:

$$\begin{aligned} AEL_{1)} &= (C_6 \cdot 7 \times 10^{-4}) / (T_p)^{0.25} \text{ W} && \rightarrow AEL_{1)} = 3.60 \text{ mW} \\ AEL_{2)} &= [(C_6 \cdot 7 \times 10^{-4}) / (T_2)^{0.25}] / (f T_p) \text{ W} && \rightarrow AEL_{2)} = 5.51 \text{ mW} \\ AEL_{3)} &= (AEL_{1)}) C_5 \text{ W} && \rightarrow AEL_{3)} = 0.761 \text{ mW} \end{aligned}$$

加入光束遮挡使可接触扫描角度减小至 50°时,需要根据式(A.6)重新计算 T_p 值: $T_p = 139.8 \mu\text{s}$ 。脉宽减小为 1/10,但脉冲频率增加一倍,为每秒 100 个脉冲,得到 $C_5 = 0.178$ 。新的 AEL 如下:

$$\begin{aligned} AEL_{1)} &= (C_6 \cdot 7 \times 10^{-4}) / (T_p)^{0.25} \text{ W} && \rightarrow AEL_{1)} = 6.44 \text{ mW} \\ AEL_{2)} &= [(C_6 \cdot 7 \times 10^{-4}) / (T_2)^{0.25}] / (2f T_p) \text{ W} && \rightarrow AEL_{2)} = 28.2 \text{ mW} \\ AEL_{3)} &= (AEL_{1)}) C_5 \text{ W} && \rightarrow AEL_{3)} = 1.14 \text{ mW} \end{aligned}$$

因此,增加光束遮挡允许激光功率提升约 50%。

A.2.4 激光投影仪分类

投影仪使用单个反射镜在水平和垂直两个方向摆动。水平方向上反射镜在全扫描角度 50°范围内

以 18 000 Hz 为周期频率做正弦扫描运动。竖直方向以 60 Hz 的速率扫描。扫描模式从顶角开始,双向扫描到底部,共扫描 480 条线,此时再回扫到顶部起始位置。回扫恰好需要 20% 的时间,在此期间激光器关闭。反射镜处的光束尺寸为 0.9 mm 圆形光斑。假设光束是准直的。当光束扫描由中心至边缘时,光束功率将减小,以确保亮度的均匀性,并保证在所有位置满足 AEL 值。

定义:

Z = 测量光阑到眼睛焦点的距离

M = 测量光阑到扫描顶点的距离

AP = GB 7247.1—2012 中表 11 定义的测量光阑直径

d_{scan} = 眼睛焦点位置在扫描方向上的光束直径(1/e)

d_{nscan} = 眼睛焦点位置与扫描方向正交的方向上的光束直径(1/e)

f_{HSCAN} = 水平扫描镜振动频率(Hz)

f_{VSCAN} = 垂直帧频(Hz)

n = 每一帧孔径内扫描线的数量

T = 适用时基($\lambda = 400 \text{ nm} \sim 700 \text{ nm}$ 时的第 2 类激光辐射为 0.25 s)

N = 适用时基期间脉冲序列中的脉冲数量,或 T_2 ,取二者中的较小者

= $f_{\text{VSCAN}} \times n \times T$ 对于本例,使用 0.25 s 的第 2 类激光时基。

α_s = 沿扫描轴的固定对向角 [$\alpha_s = d/Z$]

α_{scan} = 扫描对向角 $\{\alpha_{\text{scan}} = \max[(\alpha_s + \varphi_T), \alpha_{\text{min}}]\}$

$T_p = 7 \text{ mm}$ 孔径的扫描脉宽,此变量取决于光阑相对扫描镜顶点的位置以及扫描镜的摆动速率 (f_{HSCAN})。

光阑位于扫描中心时记作: T_{p_center}

光阑位于扫描端点时记作: $T_{p_scanend}$

T_i = GB 7247.1—2012 表 3 的值,根据 λ 的范围提供相应的“热约束时间”。(例如 $400 \text{ nm} < \lambda < 1050 \text{ nm}$ 时为 $18 \times 10^{-6} \text{ s}$)

$\varphi_T = (T_i/T_p) \times \varphi_{\text{scan}}$ 当 $T_p \geq T_i$ 时

$\varphi_T = \varphi_{\text{scan}}$ 当 $T_p < T_i$ 时

φ_{scan} = 扫描线在视网膜上的角度 = $2 \times \tan^{-1}\{(AP/2) \times [(1/M) - (1/Z)]\}$

$\pi/4$ = 由方形到圆形扫描时间的校正系数

• 水平几何参数

$f_{\text{HSCAN}} = 18\,000 \text{ Hz}$

θ_{max} = 水平方向扫描光束的偏角

$\theta_{\text{max}} = 50.0 \text{ deg}$

H_{active} = 水平线的活动部分 = 90%

θ_{ah} = 水平方向有效扫描角度 = $2 \times \tan^{-1}[H_{\text{active}} \times \tan(\theta_{\text{max}}/2)] = 45.5 \text{ deg}$

• 竖直几何参数

纵横比 = $16\text{H}:9\text{V} = \frac{\text{Horz_Active_Scan}}{\text{Vert_Active_Scan}}$

$f_{\text{VSCAN}} = 60 \text{ Hz}$

θ_{av} = 竖直方向有效扫描角度 = $2 \times \tan^{-1}[1/\text{高宽比} \times \tan(\theta_{\text{ah}}/2)] = 26.6 \text{ deg}$

V_{res} = 垂直分辨率 = 480 线

光束特性

在反射镜中由红光、绿光和蓝光合成的直径为 0.9 mm(1/e)的光束。

可接触发射极限的要求

AEL_{single} = 要求 1 对于重复脉冲或调制激光器,参照 GB 7247.1—2012 中的条款 8.3。

脉冲序列内任何单脉冲的曝光量不应超过单个脉冲的 AEL 值。

$AEL_{s,p,T}$ = 要求 2 对于重复脉冲或调制激光器,参照 GB 7247.1—2012 中的条款 8.3。

发射持续时间为 T 的脉冲列的平均功率 AEL_T ,不应超过对应持续时间 T 内单个脉冲的 AEL 功率。(注意,对于本例, AEL_T 的值由 2 类激光时基 0.25 s 和一个扫描帧内脉冲列在孔径中的曝光时间计算)。

$AEL_{s,p,train}$ = 要求 3 对于重复脉冲或调制激光器,参照 GB 7247.1—2012 中的条款 8.3。

AEL 由 T_2 或总接通时间脉冲(TOTP)的持续时间来确定,取其较小者。其中 TOTP 是发射期间内所有脉宽之和。

情况 1) 聚焦在扫描元件上,在最近距离 100 mm 处测量

$$\begin{aligned} Z &= 100 \text{ mm} & M &= 100 \text{ mm} & d_{scan} &= 0.9 \text{ mm} & d_{nscan} &= 0.9 \text{ mm} \\ AP &= 7.0 \text{ mm} & N &= 1\ 087 & \varphi_{scan} &= 0 \text{ mrad} & T_{p_center} &= 1.42 \mu\text{s}, T_{p_scanend} = 2.62 \mu\text{s} \\ \alpha_s &= 9 \text{ mrad} & \varphi_T &= 0 \text{ mrad} & \alpha_{scan} &= 9 \text{ mrad} & \alpha_{nscan} &= 9 \text{ mrad} \end{aligned}$$

$$C_6 = (\alpha_{scan} + \alpha_{nscan}) / (2 \times \alpha_{min}) = 6$$

T_{p_center} 的计算:

$$\theta_r = 100 \text{ mm 处的半孔径角} = \tan^{-1}[(AP/2)/M] = 2^\circ$$

$$T_{p_center} = 2 / (2 \times \pi \times f_{HSCAN}) \times \sin^{-1}[\theta_r / (\theta_{max}/2)] = 1.42 \mu\text{s}$$

$T_{p_scanend}$ 的计算:

$$T_p = \frac{1}{2\pi f} \left\{ \cos^{-1} \left[\frac{1}{\theta_{max}} \left(\theta_{ah} - \frac{2AP}{M} \right) \right] - \cos^{-1} \left(\frac{\theta_{ah}}{\theta_{max}} \right) \right\}$$

$$T_{p_scanend} = 2.62 \mu\text{s}$$

N 的计算:

$$n = 2 \times \tan^{-1}[(AP/2)/M] / \theta_{av} \times V_{res} = 72.4$$

$$N = n \times f_{VSCAN} \times T = 1\ 087$$

$$t_7 = \text{一帧内孔径中脉冲列的曝光时间} = n \times 1 / (2 \times f_{HSCAN}) = 0.002 \text{ s}$$

$$AEL_{single} = (C_6 \times 2 \times 10^{-7}) / (T_{p_center}) \text{ W} = 854 \text{ mW}$$

$$AEL_{s,p,T \text{ timebase}} = [(C_6 \times 7 \times 10^{-4}) \times (0.25)^{0.75}] / (T_{p_center} \times \pi/4 \times N) \text{ W} = 1\ 225 \text{ mW}$$

$$AEL_{s,p,T \text{ time in aperture}} = [(C_6 \times 7 \times 10^{-4}) \times (0.002)^{0.75}] / (T_{p_center} \times \pi/4 \times n) \text{ W} = 494 \text{ mW}$$

$$AEL_{s,p,train} = (C_6 \times 7 \times 10^{-4}) \times (18 \times 10^{-6})^{(0.75)} / (N^{(0.25)} \times T_{p_center} \times \pi/4) \text{ W} = 181 \text{ mW}$$

$$AEL_{single} = (C_6 \times 2 \times 10^{-7}) / (T_{p_scanend}) \text{ W} = 458 \text{ mW}$$

$$AEL_{s,p,T \text{ timebase}} = [(C_6 \times 7 \times 10^{-4}) \times (0.25)^{0.75}] / (T_{p_scanend} \times \pi/4 \times N) \text{ W} = 664 \text{ mW}$$

$$AEL_{s,p,T \text{ time in aperture}} = [(C_6 \times 7 \times 10^{-4}) \times (0.002)^{0.75}] / (T_{p_scanend} \times \pi/4 \times n) \text{ W} = 268 \text{ mW}$$

$$AEL_{s,p,train} = (C_6 \times 7 \times 10^{-4}) \times (18 \times 10^{-6})^{(0.75)} / (N^{(0.25)} \times T_{p_scanend} \times \pi/4) \text{ W} = 98 \text{ mW}$$

情况 2) 眼睛放松时(聚焦于无穷处),至最近距离 100 mm 处测量

$$\begin{aligned} Z &= \infty & M &= 100 \text{ mm} & d_{scan} &= 0.9 \text{ mm} & d_{nscan} &= 0.9 \text{ mm} \\ AP &= 7.0 \text{ mm} & N &= 1\ 087 & \varphi_{scan} &= 70 \text{ mrad} & T_{p_center} &= 1.42 \mu\text{s}, T_{p_scanend} = 2.62 \mu\text{s} \\ \alpha_s &= 9 \text{ mrad} & \varphi_T &= 70 \text{ mrad} & \alpha_{scan} &= 70 \text{ mrad} & \alpha_{nscan} &= 1.5 \text{ mrad} \end{aligned}$$

$$C_6 = (\alpha_{scan} + \alpha_{nscan}) / (2 \times \alpha_{min}) = 23.83$$

$$AEL_{single} = (C_6 \times 2 \times 10^{-7}) / (T_{p_center}) \text{ W} = 3\ 357 \text{ mW}$$

$$AEL_{s,p,T \text{ timebase}} = [(C_6 \times 7 \times 10^{-4}) \times (0.25)^{0.75}] / (T_{p_center} \times \pi/4 \times N) \text{ W} = 4\ 866 \text{ mW}$$

$$AEL_{s,p,T \text{ time in aperture}} = [(C_6 \times 7 \times 10^{-4}) \times (0.002)^{0.75}] / (T_{p_center} \times \pi/4 \times n) \text{ W} = 1\ 962 \text{ mW}$$

$$AEL_{s,p,train} = (C_6 \times 7 \times 10^{-4}) \times (18 \times 10^{-6})^{(0.75)} / (N^{(0.25)} \times T_{p_center} \times \pi/4) \text{ W} = 720 \text{ mW}$$

$$AEL_{\text{single}} = (C_6 \times 2 \times 10^{-7}) / (T_{\text{p_scanend}}) \text{ W} = 1\,819 \text{ mW}$$

$$AEL_{\text{s,p,T timebase}} = [(C_6 \times 7 \times 10^{-4}) \times (0.25)^{0.75}] / (T_{\text{p_scanend}} \times \pi/4 \times N) \text{ W} = 2\,637 \text{ mW}$$

$$AEL_{\text{s,p,T time in aperture}} = [(C_6 \times 7 \times 10^{-4}) \times (0.002)^{0.75}] / (T_{\text{p_scanend}} \times \pi/4 \times n) \text{ W} = 1\,063 \text{ mW}$$

$$AEL_{\text{s,p,train}} = (C_6 \times 7 \times 10^{-4}) \times (18 \times 10^{-6})^{(0.75)} / (N^{(0.25)} \times T_{\text{p_scanend}} \times \pi/4) \text{ W} = 390 \text{ mW}$$

情况 3) 聚焦在扫描元件上, 在 $C_6 = 1$ 的距离处测量

计算 $C_6 = 1$ (当 $\alpha_{\text{scan}} = d_{\text{scan}}/Z = 1.5 \text{ mrad}$ 时发生) 的距离:

$$Z = (d_{\text{scan}}/1.5 \text{ mrad}) = 0.9 \text{ mm}/0.0015 = 600 \text{ mm}$$

$$Z = 600 \text{ mm} \quad M = 600 \text{ mm} \quad d_{\text{scan}} = 0.9 \text{ mm} \quad d_{\text{nscan}} = 0.9 \text{ mm}$$

$$AP = 7.0 \text{ mm} \quad N = 181 \quad \varphi_{\text{scan}} = 0 \text{ mrad} \quad T_{\text{p_center}} = 0.236 \mu\text{s}, T_{\text{p_scanend}} = 0.535 \mu\text{s}$$

$$\alpha_s = 1.5 \text{ mrad} \quad \varphi_T = 0 \text{ mrad} \quad \alpha_{\text{scan}} = 1.5 \text{ mrad} \quad \alpha_{\text{nscan}} = 1.5 \text{ mrad}$$

$$C_6 = (\alpha_{\text{scan}} + \alpha_{\text{nscan}}) / (2 \times \alpha_{\text{min}}) = 1$$

N 的计算:

$$n = 2 \times \tan^{-1}[(AP/2)/M] / \theta_{\text{av}} \times V_{\text{res}} = 12.1$$

$$N = n \times f_{\text{VSCAN}} \times T = 181$$

$$t_7 = \text{孔径中脉冲列的曝光时间} = n \times 1 / (2 \times f_{\text{HSCAN}}) = 0.00034 \text{ s}$$

$$AEL_{\text{single}} = (C_6 \times 2 \times 10^{-7}) / (T_{\text{p_center}}) \text{ W} = 847 \text{ mW}$$

$$AEL_{\text{s,p,T timebase}} = [(C_6 \times 7 \times 10^{-4}) \times (0.25)^{0.75}] / (T_{\text{p_center}} \times \pi/4 \times N) \text{ W} = 7\,377 \text{ mW}$$

$$AEL_{\text{s,p,T time in aperture}} = [(C_6 \times 7 \times 10^{-4}) \times (0.00034)^{0.75}] / (T_{\text{p_center}} \times \pi/4 \times n) \text{ W} = 775 \text{ mW}$$

$$AEL_{\text{s,p,train}} = (C_6 \times 7 \times 10^{-4}) \times (18 \times 10^{-6})^{(0.75)} / (N^{(0.25)} \times T_{\text{p_center}} \times \pi/4) \text{ W} = 285 \text{ mW}$$

$$AEL_{\text{single}} = (C_6 \times 2 \times 10^{-7}) / (T_{\text{p_scanend}}) \text{ W} = 374 \text{ mW}$$

$$AEL_{\text{s,p,T timebase}} = [(C_6 \times 7 \times 10^{-4}) \times (0.25)^{0.75}] / (T_{\text{p_scanend}} \times \pi/4 \times N) \text{ W} = 3\,254 \text{ mW}$$

$$AEL_{\text{s,p,T time in aperture}} = [(C_6 \times 7 \times 10^{-4}) \times (0.00034)^{0.75}] / (T_{\text{p_scanend}} \times \pi/4 \times n) \text{ W} = 342 \text{ mW}$$

$$AEL_{\text{s,p,train}} = (C_6 \times 7 \times 10^{-4}) \times (18 \times 10^{-6})^{(0.75)} / (N^{(0.25)} \times T_{\text{p_scanend}} \times \pi/4) \text{ W} = 126 \text{ mW}$$

结论: 最严格的情况为 1 类激光, 在扫描中心处 $AEL = 181 \text{ mW}$, 扫描边缘处为 98 mW , 符合 GB 7247.1—2012 的 2 类激光。

A.3 准直激光二极管实例

将激光二极管放置在透镜焦点, 用来产生直径为 d 的准直输出。对于波长 $400 \text{ nm} \sim 1\,400 \text{ nm}$ 范围内的连续光束, 1 类激光允许的功率是多少?

对此波长范围, 由 GB 7247.1—2012 中表 4 和表 5 确定的热判据得连续 1 类激光功率极限为:

$$P = 0.7C_4 C_6 C_7 / T_2^{1/4} \text{ mW}$$

即使存在透镜, 由于激光二极管也将是一个点光源, 所以表观光源的尺寸将会小于 1.5 mrad 。因此, 扩展光源校正因子值为 $C_6 = 1$ 时的最小值。

按照小光源的分类, 持续时间指定为最小值 $T_2 = 10 \text{ s}$, 因此允许功率变为[见式(A.8)]:

$$P = 0.7C_4 \times 1 \times C_7 / 10^{1/4} \text{ mW} = 0.39C_4 C_7 \text{ mW} \quad \dots\dots\dots (\text{A.8})$$

若波长在 $400 \text{ nm} \sim 600 \text{ nm}$ 范围内, 则还需评定 1 类激光的光化学判据。GB 7247.1—2012 的表 4 和表 5 的限值为[见式(A.9)]:

$$P = 39C_3 \mu\text{W} \quad \dots\dots\dots (\text{A.9})$$

C_3, C_4 和 C_7 的值由 GB 7247.1—2012 中表 10 定义的发射波长确定。

1 类激光辐射功率极限将分别与位于透镜附近 7 mm 光阑的测量功率极限和位于透镜 2 m 处孔径为 50 mm 的测量功率极限进行比较。因此, 如果光束直径小于 50 mm , 则所有能量将被收集, 即也是

1类激光允许的总功率。注意,若所有能量可在7 mm光阑内收集,则不必用大口径探测器进行测量。

若光束直径 >7 mm,并且在2 m处50 mm孔径中测得的功率高于极限值,但在孔径为7 mm时测量的功率值小于极限值时,该产品应为1M级。

情况1:考虑波长850 nm来自透镜,直径为3 mm光束

在该波长, $C_4=2,C_7=1$ 。由式(A.8)得到的功率限值为:

$$P=0.39 \times 2 \times 1 \text{ mW}=0.78 \text{ mW}$$

由于波长 >600 nm,不必用光化学判据,也不需要使式(A.9)计算。因此功率限值为0.78 mW,由于 $d<50$ mm时,这个值也是总允许功率。

情况2:考虑波长为480 nm,来自透镜,直径为3 mm的光束

在该波长, $C_3=4,C_4=1,C_7=1$ 。由式(A.8)得到的功率限值为:

$$P=0.39 \times 1 \times 1 \text{ mW}=0.39 \text{ mW}$$

由于波长 <600 nm,应也用光化学判据评估。由式(A.9)可得:

$$P=39C_3 \mu\text{W}=39 \times 4 \mu\text{W}=0.16 \text{ mW}$$

由于等式(A.9)的限值更严格,因此允许的功率为0.16 mW。

情况3:考虑波长为850 nm,来自透镜,直径为20 mm的光束。2 mW的连续激光输出为几类?

允许功率在情况1中已经确定。对于1类激光,在透镜附近处7 mm光阑中测得的功率应 <0.78 mW,在2 m处50 mm光阑中测得功率应 <0.78 mW。对于1M类激光,这个值是透镜附近处7 mm光阑中的总允许功率。

在50 mm的光阑中测得的功率高于1类限值。然而,直径为20 mm的光束由7 mm的光阑收集的部分近似为 $(7/20)^2=0.12$ 或 $0.12 \times 2 \text{ mW}=0.24 \text{ mW}$ 。在7 mm光阑中测得的该功率值小于功率限值0.78 mW,因此输出为1M类。

情况4:考虑波长为1310 nm,来自透镜,直径为3 mm的光束

在该波长, $C_4=5,C_7=8$ 。由式(A.8)可得功率限值为:

$$P=0.39 \times 5 \times 8 \text{ mW}=15.6 \text{ mW}$$

由于波长 >600 nm,不必用光学化判据,也不需要使式(A.9)。因此,功率限值为15.6 mW,因为 $d<50$ mm,故该值也是总允许功率。

A.4 单模光纤实例

• 散光束的直径

发散光束的直径是 d_{63} ,在距离表观光源 r 处,要求符合AEL和MPE计算的孔径光阑或限制孔径的要求。大多数扩散光源制造商为了计算数值孔径NA都会明确给出发散角。点光源数值孔径NA定义为光束发散半角 ϕ 的正弦函数,测量位置为输出峰值辐射度的5%,公式为:

$$\text{NA}=\sin \frac{\phi}{2} \quad \text{和} \quad \frac{\phi}{2}=\arcsin(\text{NA})$$

对于高斯光束,光束直径相应为能量降至峰值辐射度95%时的光束宽度 d_{95} ,到表观光源的距离为 r 时,光束直径 d_{95} 表示为:

$$d_{95}=d_{63}+2 \cdot r \cdot \tan \frac{\phi}{2}=d_{63}+2 \cdot r \cdot \tan [\arcsin(\text{NA})]$$

因为 d_{63} 在几十微米量级,大多数情况下可以忽略。而且,为实际精确(安全)计算的考虑,包含63%总功率(或能量)的光束束宽,比包含95%总功率(或能量)的光束束宽更加适合作为光束直径。它们之间高斯光束的转换系数为1.7,即 $d_{95}/d_{63}=1.7$,光束直径大约可以表示为:

$$d_{63}=\frac{d_{95}}{1.7}=\frac{2 \cdot r}{1.7} \tan [\arcsin(\text{NA})]=\frac{2 \cdot r \cdot \text{NA}}{1.7}$$

单模光纤激光是点光源激光的一个特例,单模光纤发散角术语上由光纤模场直径 w_0 和光束波长决定。距离 r 处单模光纤光束直径大约可以表示为:

$$d_{63} = \frac{2\sqrt{2} \cdot r \cdot \lambda}{\pi \cdot w_0}$$

这里, λ 表示波长,单位与模场直径 w_0 的单位相同。

在数据传输中,传输速率为 630 Mbits/s 时,使用光纤发射波长为 1 300 nm。使用平衡代码作为传输代码,已消除数据对平均功率的影响。将传输器耦合到单模光纤中,获得的模场直径为 10 μm 。

注:模场直径 w_0 依赖于光纤类型和波长。

a) 决定 1M 类和 3R 类激光产品可达发射极限值时的最大平均输出功率;

b) 决定发射波长 1 550 nm 时,1M 类和 3R 类激光产品可达发射极限值时的最大平均输出功率。

解决方法:

由于高数据传输速率和平衡代码,输出可以被看作是连续输出,功率水平与平均发射功率相当。

a) 1 300 nm

当波长为 1 300 nm,时间基准为 100 s,1M 类和 3R 类激光产品的最大平均发射功率如下:

1M 类激光产品

1 类激光产品的时间基准是 100 s。对 $\alpha < \alpha_{\min}$ 的小光源,根据表 4,波长在 1 050 nm~1 400 nm 范围内,照射时间在 10 s~ 3×10^4 s 时的可达发射极限表示为:

$$P_{\text{AEL}} = 3.9 \times 10^{-4} C_4 C_7 \text{ W}$$

这里 $C_4 = 5, C_7 = 8$,因此:

$$P_{\text{AEL}} = 15.6 \text{ mW}$$

光阑功率需要通过耦合系数 η 进行修正以弥补耦合损耗,从而获得可达发射极限条件下的最大发射功率水平。耦合系数取决于光阑位置处的光束直径(1M 类激光产品在条件 3 下,距离为 100 mm,同样条件下的 3R 类激光产品距离为 70 mm)。本例中单模光纤光束直径根据公式计算为:

$$d_{63} = \frac{2\sqrt{2} r \lambda}{\pi w_0} = \frac{2.83 \times 100 \text{ mm} \times 1.3 \times 10^{-3} \text{ mm}}{\pi \times 10 \times 10^{-3} \text{ mm}} = 11.7 \text{ mm}$$

在距离光源 100 mm 处,通过 7 mm 测量孔径后,功率为总发射功率的比例为:

$$P_a = \eta \times P_0 = [1 - e^{-\left(\frac{d_a}{d_{63}}\right)^2}] \times P_0 = 0.301 \times P_0$$

相应的,1M 类激光产品最大发射功率为:

$$P_{0,\max} = \frac{P_{\text{AEL}}}{\eta} = 51.8 \text{ mW}$$

51.8 mW 小于 3B 类激光产品的可达发射极限 500 mW,Class 1M=51.8 mW。

3R 类激光产品

波长为 1 300 nm,时间基准为 100 s,根据表 7,对 $\alpha < \alpha_{\min}$ 的小光源,其总发射功率下可达发射极限表达为:

$$P_{\text{AEL}} = 2 \times 10^{-3} C_4 C_7 \text{ W}$$

这里 $C_4 = 5, C_7 = 8$,因此:

$$P_{\text{AEL}} = 2 \times 10^{-3} \times 5 \times 8 \text{ W} = 80 \text{ mW}$$

在距离 70 mm 处,光束直径 d_{63} 的值为:

$$d_{63} = \frac{2\sqrt{2} r \lambda}{\pi w_0} = \frac{2.83 \times 70 \text{ mm} \times 1.3 \times 10^{-3} \text{ mm}}{\pi \times 10 \times 10^{-3} \text{ mm}} = 8.20 \text{ mm}$$

在距离光源 70 mm 处,通过 7 mm 测量孔径后,功率为总发射功率的比例为:

$$P_a = \eta \times P_0 = [1 - e^{-\left(\frac{d_a}{d_{63}}\right)^2}] \times P_0 = 0.518 \times P_0$$

相应的,3R 类激光产品最大发射功率为:

$$P_{0,\max} = \frac{P_{\text{AEL}}}{\eta} = 155 \text{ mW}$$

由于 $155 \text{ mW} > 51.8 \text{ mW}$, 本例中 1M 类、3R 类都可能存在。因此, 本例中, 根据发射功率, 激光产品可能为 1 类、1M 类、3R 类、3B 类或 4 类。

b) 1 550 nm

1M 类

运行波长为 1 550 nm 的同样激光系统, 计算步骤是一样的, 但是可达发射极限需要与 1 550 nm 波长一致。

由于是小光源 $\alpha < \alpha_{\min}$, 时间基准为 100 s, 根据表 4:

$$P_{\text{AEL}} = 10 \text{ mW}$$

在距离 100 mm 处的光束直径为:

$$d_{63} = \frac{2\sqrt{2}r\lambda}{\pi w_0} = \frac{2.83 \times 100 \text{ mm} \times 1.55 \times 10^{-3} \text{ mm}}{\pi \times 10 \times 10^{-3} \text{ mm}} = 14.0 \text{ mm}$$

在距离光源 3.5 mm 处, 通过 100 mm 测量孔径后, 功率为总发射功率的比例为:

$$P_a = \eta \times P_0 = [1 - e^{-\left(\frac{d_a}{d_{63}}\right)^2}] \times P_0 = 0.061 \times P_0$$

相应的, 1M 类激光产品最大发射功率为:

$$P_{0,\max} = \frac{P_{\text{AEL}}}{\eta} = 165 \text{ mW}$$

因为 165 mW 小于 3B 类可达发射极限 500 mW, Class 1M = 165 mW。

3R 类激光产品

波长为 1 550 nm, 时间基准为 100 s, 根据表 4, 小光源 $\alpha < \alpha_{\min}$ 总发射功率下可达发射极限表达为:

$$P_{\text{AEL}} = 5 \times 10^{-2} \text{ W} = 50 \text{ mW}$$

在距离 70 mm 处, 光束直径 d_{63} 的值为:

$$d_{63} = \frac{2\sqrt{2}r\lambda}{\pi w_0} = \frac{2.83 \times 70 \text{ mm} \times 1.55 \times 10^{-3} \text{ mm}}{\pi \times 10 \times 10^{-3} \text{ mm}} = 9.78 \text{ mm}$$

在距离光源 70 mm 处, 通过 3.5 mm 测量孔径后, 功率为总发射功率的比例为:

$$P_a = \eta \times P_0 = [1 - e^{-\left(\frac{d_a}{d_{63}}\right)^2}] \times P_0 = 0.401 \times P_0$$

相应的, 3R 类激光产品最大发射功率为:

$$P_{0,\max} = \frac{P_{\text{AEL}}}{\eta} = 125 \text{ mW}$$

由于 $165 \text{ mW} > 125 \text{ mW}$, 125 mW 是 1M 类激光产品的可达发射极限, 所以, 本例中不存在 3R 类激光产品。

因此, 本例中, 激光产品仅能根据输出功率确定为: 1 类、1M 类、3B 类或 4 类激光产品。

A.5 光束束腰示例

考虑如下激光产品:

- 波长 —— 635 nm
- 重复频率 —— 1 Hz
- 脉宽 —— 500 ms
- 辐射能量 —— 0.98 mJ/pulse
- 光束直径 —— 5 mm
- 光束发散角 —— 0.35 mrad

有些时候,在假设正常发散情况下,仍会有少量光束聚焦到激光谐振腔以外。聚焦光束或者焦点被称为“光束束腰”。为了正确地评估危害,距离束腰与激光器出光口的距离需要被加入到计算危害距离中。

我们以前述激光作为如何测量和量化光束束腰的示例。在开始测量步骤之前进行视觉观察是一个很好的习惯。这是一个很好的实践,不仅仅测量光束束腰,而且可以识别其他光束异常,例如光斑已经被某些内部部件“剪裁”的热斑或暗区。在视觉观察过程中,我们发现在距离激光器出光口数米位置处,光斑看上去变小了。这表明那里就是束腰。整个测量程序不会改变,但需要更加深入的研究光束直径,特别是在束腰位置。

我们假定本例及其他示例中所有的激光参数都已经经过测量技术的验证。现在来检查光束束腰。需要确定两个数值。第一个是束腰直径,第二个是相对于激光器出光口的束腰位置。

确定光束束腰直径需要需要极大的努力,除非有人幸运地在最初的几次尝试中找到它,因为应进行多个光束直径测量以获得最小的直径。

使用本部分 7.7.3.4 中的一种计算方法,发现光束束腰位于激光器出口 7 m 处,其直径为 3.5 mm。

采用如上参数得到激光产品的最大允许照射量 MPE 值是 10 mW/cm²,1 类激光产品的可达发射极限值 AEL 是 0.39 mW,所以确定这个激光产品为 3R 类激光产品。假设没有光束束腰,高斯激光,可以使用式(A.10):

$$NOHD = \frac{1}{\phi} \sqrt{\frac{4\Phi}{\pi MPE} - d^2} \dots\dots\dots (A.10)$$

将得到标称眼危害距离为 43 m。然而,用我们确定的光束束腰直径 d 于长方形光场,标称眼危害距离为 44 m,考虑到束腰在光场中的位置,再增加 7 m,所以标称眼危害距离为 51 m。

A.6 多波长激光的实例

具有均匀光束的倍频 Nd:YAG 激光工作波长是 1 064 nm 和 532 nm,作为高空大气成像系统的一部分。这类激光系统的参数如下:

	激光系统 1	激光系统 2
波长, λ	1 064 nm	532 nm
单脉冲能量, Q	75 mJ	100 mJ
发散角, ϕ	1 mrad	1 mrad
脉宽	18 ns	18 ns
重复频率	20 Hz	20 Hz
光束直径, d	1.5 cm	1.5 cm

确定这个激光系统的标称眼危害距离(在高海拔使用忽略大气衰减)。

在相同时间相同组织上有两种波长的能量,应确定联合效应。

如果 $H_1/MPE_1 + H_2/MPE_2 > 1$,这里 H_i 表示可能的激光照射, MPE_i 表示在每个波长 λ_i 下的最大允许照射量,那么最大允许照射量会超出。

$$H_i = \frac{4Q}{\pi a_i^2}$$

从这个公式我们可以得出, $H_1 = 42.44 \text{ mJ/cm}^2$, $H_2 = 56.6 \text{ mJ/cm}^2$ 。还可以计算出 $MPE_1 = 1.3 \times 10^{-6} \text{ J/cm}^2$, $MPE_2 = 1.3 \times 10^{-7} \text{ J/cm}^2$ 。 $H_1/MPE_1 + H_2/MPE_2$ 的值大于 1,所以超过安全辐射水平限制。

用 H_{eff} 表示有效照射水平,它是从计算任何观察者距离处的辐射照射的一般激光范围方程导出的。远场有效照射水平的计算公式为:

$$H_{\text{eff}} = \frac{1.27e^{-\mu r}}{r^2} \sum_{i=1}^N S_i \frac{Q_i}{\phi_i^2}$$

这里 r 表示到激光束的距离, μ 是大气衰减系统, $S_i = \text{MPE}_{\text{min}}/\text{MPE}_i$ 。(MPE_{min}表示可发现的最大允许照射量,本例中为 MPE₂)。

由于 $\lambda_1 = 1\ 064\ \text{nm}$, $S_1 = 0.1$, 且 $\lambda_2 = 532\ \text{nm}$, $S_2 = 1$ 。

由于 r 就是标称眼危害距离, 当 $H_{\text{eff}} = \text{MPE}_{\text{min}}$ 时, 标称眼危害距离(NOHD)公式可以表示为:

$$\text{NOHD} = \sqrt{\frac{1.27e^{-\mu \text{NOHD}}}{\text{MPE}_{\text{min}}} \sum_{i=1}^N S_i \frac{Q_i}{\phi_i^2}}$$

忽略大气衰减后为:

$$\text{NOHD} = \sqrt{\frac{1.27e^{-\mu \text{NOHD}}}{\text{MPE}_{\text{min}}} \left(S_1 \frac{Q_1}{\phi_1^2} + S_2 \frac{Q_2}{\phi_2^2} \right)}$$

得出这一激光系统的标称眼危害距离为 10 km。

A.7 激光纤维线阵举例

考虑多模光纤激光阵列具有如下参数:

$\Delta =$ 中心到中心空间距离 = 250 μm

$N =$ 光源数值孔径 = 12

$S_o =$ 单光源尺寸 = 50 μm

$S_v =$ 垂直尺寸 = 50 $\mu\text{m} \rightarrow 150\ \mu\text{m}$

$\lambda = 850\ \text{nm}$, 所以 $C_4 = 2$ 和 $C_7 = 1$

光纤数值孔径 $\text{NA} = 0.2$, 发散角的 $1/e^2 \times 0.2/1.7 = 0.235\ \text{rad}$

$n =$ 评估的光源数量

$S_h =$ 水平尺寸 = $S_o + (n-1) \times \Delta = 50 + (n-1) \times 250$

$\alpha = S_v/r$ 和 $\alpha_h = S_h/r$

$\alpha = (\alpha_v + \alpha_h)/2 = \{150/100 + [(50 + (n-1) \times 250)]/100\}/2\ \text{mrad} \quad n > 1$

1 类激光产品限制下所允许的总发射功率是多少?

$$\text{AEL} = 0.7C_4C_6 / (T_2)^{1/4} \text{mW}$$

需要考虑阵列结构至 1 cm 空间尺寸(其对应于在 100 mm 处的 100 mrad 的最大接收角)。

表 A.1 光源数量例子

n	α_h mrad	α_v mrad	α mrad	T_2 s	C_6	C_4	AEL mW	P_n mW	AEL/ P_n
1	1.5	1.5	1.5	10	1	2	0.785	$1 \times P$	$0.785/P$
2	3.0	1.5	2.25	10.2	1.5	2	1.173	$2 \times P$	$0.586/P$
3	5.5	1.5	3.5	10.5	2.33	2	1.811	$3 \times P$	$0.604/P$
4	8.0	1.5	4.75	10.8	3.17	2	2.440	$4 \times P$	$0.610/P$
8	18	1.5	9.75	12.1	6.5	2	4.865	$8 \times P$	$0.608/P$
12	28	1.5	14.75	13.6	9.8	2	7.148	$12 \times P$	$0.596/P$

因此, 受到最大限制的情况是 $n = 2$ 结构光源, 比例为 $0.586/P$ 。以上计算均假定光源均有相同的功率水平, 引入 P_n 作为不同功率水平的调节。

如果我们假设所有这些光源都从同一点出光,在 1 类激光产品测量距离 70 mm 处的光束直径为 $2rNA/1.7=2\times 70\text{ mm}\times 0.2/1.7=16.5\text{ mm}$ 。使用 7.8.8 节的耦合公式,在 7 mm 光阑收集到的部分比例为 0.165。因此所允许的从 12 道光纤发出的总功率为:

$$P=12\text{ fibres}\times 0.586\text{ mW per fiber}/0.165=42.6\text{ mW}$$

随着光源数量的增加,AEL/ P_i 比例会降低,低于 5.0。实际上,这些限制会微量的增加以上数值,由于光源水平尺寸结构将影响在测量距离处的光束直径(在测量距离处的上述计算,光源结构尺寸假设为零)。

A.8 激光线阵举例

考虑光束激光阵列具有如下参数:

Δ =中心到中心空间距离=2 500 μm

N =光束总数量=10

S_o =单光源尺寸=50 μm

S_v =垂直尺寸=50 μm \rightarrow 150 μm

$\lambda=850\text{ nm}$,所以 $C_4=2$

输出 $NA=0.2$,发散角的 $1/e^2\times 0.2/1.7=0.235\text{ rad}$

n =评估的光源数量

S_h =水平尺寸= $S_o+(n-1)\times\Delta=50+(n-1)\times 2\ 500$

$\alpha_o=S_v/r$ and $\alpha_h=S_h/r$

$\alpha=(\alpha_v+\alpha_h)/2=\{150/100+[(50+(n-1)\times 2\ 500)]/100\}/2\text{ mrad}$,对于 $n>1$

1M 类激光产品限值下所允许的总发射功率是多少?

$$AEL=0.7C_4C_6/(T_2)^{1/4}\text{ mW}$$

需要考虑阵列结构至 1 cm 空间尺寸或者 4 个光源(其对应于在 100 mm 处的 100 mrad 的最大接收角)。

表 A.2 光源数量例子

n	α_h mrad	α_v mrad	α mrad	T_2 s	C_6	C_4	AEL mW	P_n mW	AEL/ P_n
1	1.5	1.5	1.5	10	1	2	0.785	$1\times P$	$0.79/P$
2	25.5	1.5	13.5	13.2	9	2	6.6	$2\times P$	$3.3/P$
3	50.5	1.5	26	17.7	17.3	2	11.8	$3\times P$	$3.9/P$
4	75.5	1.5	38.5	23.7	25.6	2	16.2	$4\times P$	$4.1/P$

因此,受到最大限制的情况是 $n=1$ 结构光源,比例为 $0.586/P$ 。以上计算均假定光源均有相同的功率水平,引入 P_n 作为不同功率水平的调节。

1M 类激光产品在测量距离 100 mm 处,根据光束发散光束直径为 $2rNA/1.7=2\times 100\text{ mm}\times 0.2/1.7=23.6\text{ mm}$ 。使用 7.8.8 节的耦合公式,在 7 mm 光阑收集到的部分比例为:

$$1-e^{-\left[\frac{7^2}{23.6^2}\right]}=0.084$$

因此,所允许的从 10 道发出的总功率为:

$$P=10(\text{激光器})\times 0.79\text{ mW(每激光器)}/0.084=93.5\text{ mW}$$

本例提供了一种对大于 100 mrad 表观光源激光产品进行分类的方法。

能量被假定大致垂直于光源平面均匀地发射,并且由于不存在光束结构(例如,不相干或者完全漫射光源),实际就是表观光源发射面积。假设参数是圆形光源, d 为光束直径, Φ 为 $1/e$ 光束发散角。

附 录 B
(资料性附录)
常用转换

B.1 立体角(Ω)和线性全角或发散角(ϕ)

小角度近似: $\phi = (4\Omega/\pi)^{1/2}$ $\Omega = \pi/4\phi^2$

精确公式: $\Omega = 2\pi[1 - \cos(\phi/2)]$

B.2 高斯光束发散角和直径

$\frac{D_{0.5}}{D_{1/e^2}} = 0.59 = \frac{1}{1.7}$, 这里 $D_{0.50}$ 表示半辐射度时光束直径。

$\frac{D_{1/e}}{D_{1/e^2}} = 0.71 = \frac{1}{1.4}$

$\frac{D_{0.5}}{D_{1/e}} = 0.83 = \frac{1}{1.2}$

$\frac{D_{1/e}}{D_{0.95}} = 0.59 = \frac{1}{1.7}$

B.3 角度和弧度

将角度除以 57.3 以获得弧度,或将角度乘以 17.5 以得到毫弧度 mrad。

B.4 多模光纤直径

覆盖 95% 的点: $NA = \sin(\phi/2)\phi = 2\sin^{-1}(NA)$

在距离 r 处, $r = 2rNA/1.7$ 在 $(1-1/e)$ 点处的高斯光束

B.5 单模光纤直径

在距离 r 处, $r = 2 \times 2^{1/2} r\lambda / (\pi\omega_0)$, 为能量降至总能量 $1/e$ 处多模场光束直径 ω_0 和波长 λ 。

参 考 文 献

- [1] IEC 61040, Power and energy measuring detectors, instruments and equipment for laser radiation
 - [2] IEC 62471, Photobiological safety of lamps and lamp systems
 - [3] ISO 11554, Optics and photonics—Lasers and laser-related equipment—Test methods for laser beam power, energy and temporal characteristics
 - [4] ISO 11146-3, Lasers and laser-related equipment—Test methods for laser beam widths, divergence angles and beam propagation ratios—Part 3: Intrinsic and geometrical laser beam classification, propagation and details of test methods
 - [5] GALBIATI, Enrico. Evaluation of the apparent source in laser safety. *Journal of Laser Applications* 2001, 13: p.141-149
 - [6] LYON, Terry. Hazard Analysis Technique for Multiple Wavelength Lasers. *Health Physics*, August 1985, 49(2): p.221-226
-