МЕЖГОСУДАРСТВЕННЫЙ СОВЕТ ПО СТАНДАРТИЗАЦИИ, МЕТРОЛОГИИ И СЕРТИФИКАЦИИ
(МГС)

INTERSTATE COUNCIL FOR STANDARDIZATION, METROLOGY AND CERTIFICATION
(ISC)

МЕЖГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ

ГОСТ IEC/TR 60825-13— 2016

БЕЗОПАСНОСТЬ ЛАЗЕРНОЙ АППАРАТУРЫ

Часть 13

Измерения для классификации лазерной аппаратуры

(IEC/TR 60825-13:2011, IDT)

Издание официальное

Москва
Стандартинформ
2016

gost.e-ecolog.ru

Предисловие

Цели, основные принципы и основной порядок проведения работ по межгосударственной стандартизации установлены в ГОСТ 1.0—2015 «Межгосударственная система стандартизации. Основные положения» и ГОСТ 1.2—2015 «Межгосударственная система стандартизации. Стандарты межгосударственные, правила и рекомендации по межгосударственной стандартизации. Правила разработки, принятия, обновления и отмены»

Сведения о стандарте

1 ПОДГОТОВЛЕН Автономной некоммерческой организацией «Научно-технический центр сертификации электрооборудования «ИСЭП» (АНО «НТЦСЭ «ИСЭП») на основе собственного перевода на русский язык англоязычной версии документа, указанного в пункте 5

2 ВНЕСЕН Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии

3 ПРИНЯТ Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол от 28 июня 2016 г. № 49)

За принятие проголосовали:

Краткое наименование страны по МК (ИСО 3166) 004–97	Код страны по МК (ИСО 3166) 004 -97	Сокращенное наименование национального органа по стандартизации
Армения	AM	Минэкономики Республики Армения
Беларусь	BY	Госстандарт Республики Беларусь
Казахстан	KZ	Госстандарт Республики Казахстан
Киргизия	KG	Кыргызстандарт
Россия	RU	Росстандарт

4 Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 01 ноября 2016 г. N 1551-ст межгосударственный стандарт ГОСТ IEC/TR 60825-13—2016 введен в действие в качестве национального стандарта Российской Федерации с 1 ноября 2017 г.

5 Настоящий стандарт идентичен международному документу IEC/TR 60825-13:2011 «Безопасность лазерной аппаратуры. Часть 13. Измерения для классификации лазерной аппаратуры» («Safety of laser products — Part 13: Measurements for classification of laser products», IDT).

Международный документ разработан Техническим комитетом 76 МЭК «Безопасность оптического излучения и лазерное оборудование» Международной электротехнической комиссией (IEC). Официальные экземпляры международного документа, на основе которого подготовлен настоящий межгосударственный стандарт, и международные стандарты, на которые даны ссылки имеются в Федеральном информационном фонде технических регламентов и стандартов.

При применении настоящего стандарта рекомендуется использовать вместо ссылочных международных стандартов соответствующие им межгосударственные стандарты, сведения о которых приведены в дополнительном приложении ДА

6 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

*Информация об изменениях к настоящему стандарту публикуется в ежегодном информационном указателе «Национальные стандарты», а текст изменений и поправок — в ежемесячном информационном указателе «Национальные стандарты». В случае пересмотра (замены) или отмены настоящего стандарта соответствующее уведомление будет опубликовано в ежемесячном информационном указателе «Национальные стандарты». Соответствующая информация, уведомление и тексты размещаются также в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет (*gost.e-ecolog.ru

© Стандартинформ, 2016

В Российской Федерации настоящий стандарт не может быть полностью или частично воспроизведен, тиражирован и распространен в качестве официального издания без разрешения Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии

Содержание

1 Область применения . . . 1
2 Нормативные ссылки . . . 1
3 Термины и определения . . . 1
4 Применимость . . . 2
4.1 Общие положения . . . 2
4.2 Предварительное рассмотрение . . . 2
5 Требования к контрольно-измерительной аппаратуре . . . 4
6 Алгоритм классификации . . . 4
7 Параметры для расчета пределов допустимого уровня излучения/эмиссии . . . 7
7.1 Длина волны, λ . . . 7
7.2 Источники с множеством длин волн . . . 8
7.3 Источники с широким спектром . . . 9
7.4 Временные характеристики источника . . . 11
7.5 Стягиваемый угол, α . . . 13
7.6 Длительность излучения/эмиссии . . . 23
7.7 Условия измерений . . . 23
7.8 Сканирующие пучки . . . 28
Приложение А (справочное) Примеры . . . 34
Приложение В (справочное) Полезные преобразования . . . 49
Приложение ДА (справочное) Сведения о соответствии ссылочных международных стандартов межгосударственным стандартам . . . 50
Библиография . . . 51

Введение

1) Международная электротехническая комиссия (МЭК) является международной организацией по стандартизации, объединяющей все национальные электротехнические комитеты (национальные комитеты МЭК). Задачей МЭК является продвижение международного сотрудничества во всех вопросах, касающихся стандартизации в области электротехники и электроники. Результатом этой работы и в дополнение к другой деятельности МЭК является издание международных стандартов, технических требований, технических отчетов, публично доступных технических требований (PAS) и руководств (в дальнейшем именуемых «публикации МЭК»). Их подготовка поручена техническим комитетам. Любой национальный комитет МЭК, заинтересованный в объекте рассмотрения, может участвовать в этой предварительной работе. Международные, правительственные и неправительственные организации, кооперирующиеся с МЭК, также участвуют в этой подготовке. МЭК близко сотрудничает с Международной организацией по стандартизации (ИСО) в соответствии с условиями, определенными соглашением между этими двумя организациями.

2) Формальные решения или соглашения МЭК означают выражение положительного решения технических вопросов, практически международный консенсус в соответствующих областях, так как у каждого технического комитета есть представители ото всех заинтересованных национальных комитетов МЭК.

3) Публикации МЭК имеют форму рекомендаций для международного использования и принимаются национальными комитетами МЭК в этом качестве. Приложены максимальные усилия для того, чтобы гарантировать правильность технического содержания публикаций МЭК, однако МЭК не может отвечать за порядок их использования или за любое неверное толкование конечным пользователем.

4) В целях содействия международной гармонизации, национальные комитеты МЭК обязуются применять публикации МЭК в их национальных и региональных публикациях с максимальной степенью приближения к исходным. Любые расхождения между любой публикацией МЭК и соответствующей национальной или региональной публикацией должно быть четко обозначено в последней.

5) МЭК не устанавливает процедуры маркировки знаком одобрения и не берет на себя ответственность за любое оборудование, о котором заявляют, что оно соответствует публикации МЭК.

6) Все пользователи должны быть уверены, что они используют последнее издание этой публикации.

7) МЭК или его директора, служащие или агенты, включая отдельных экспертов и членов его технических комитетов и национальных комитетов МЭК, не несут ответственности за любые причиненные телесные повреждения, материальный ущерб или другое повреждение любой природы, как прямое так и косвенное, или за затраты (включая юридические сборы) и расходы, проистекающие из использования публикации МЭК, или ее разделов, или любой другой публикации МЭК.

8) Следует обратить внимание на нормативные ссылки, указанные в настоящем стандарте. Использование ссылочных международных стандартов является обязательным для правильного применения настоящего стандарта.

9) Следует обратить внимание на то, что имеется вероятность того, что некоторые из элементов настоящего стандарта могут быть предметом патентного права. МЭК не несет ответственности за идентификацию любых таких патентных прав.

Основная задача технических комитетов МЭК состоит в подготовке международных стандартов. Однако технический комитет, когда им накоплены данные, отличающиеся по виду от той информации, которую обычно представляют в виде международного стандарта, например «современное состояние дел», может предложить опубликовать технический отчет.

IEC 60825-13, являющийся техническим отчетом, подготовлен Техническим комитетом 76 МЭК «Безопасность оптического излучения и лазерное оборудование».

Настоящее второе издание отменяет и заменяет первое издание IEC 60825-13, опубликованное в 2006 году. Данное издание представляет собой технический пересмотр.

Настоящее издание включает следующие существенные технические изменения относительно предыдущего издания:

В определения введены небольшие изменения и добавления: обновлен алгоритм классификации, уточнено содержание разделов, относящихся к видимым источникам, обновлена информация по сканированию, и в приложения включено больше примеров и полезных преобразований.

Текст настоящего стандарта основан на следующих документах:

Проект технического отчета	Отчет о голосовании
76/424/DTR	76/447/RVC

Полную информацию о голосовании по одобрению настоящего технического отчета можно найти в вышеприведенном отчете о голосовании.

Настоящая публикация разработана в соответствии с Директивами ИСО/МЭК, часть 2.

Настоящий технический отчет следует использовать совместно с IEC 60825-1:2007.

Перечень всех частей стандартов серии IEC 60825 под общим названием «Безопасность лазерной аппаратуры» можно найти на сайте МЭК.

Комитет принял решение, что содержание настоящей публикации останется без изменений до даты окончания сопровождения настоящей публикации, указанной на сайте МЭК с адресом gost.e-ecolog.ru в составе данных, относящихся к конкретной публикации. На это время публикация будет:

- подтверждена заново;
- аннулирована;
- заменена пересмотренным изданием; или
- изменена.

МЕЖГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ

БЕЗОПАСНОСТЬ ЛАЗЕРНОЙ АППАРАТУРЫ

Часть 13

Измерения для классификации лазерной аппаратуры

Safety of laser products. Part 13. Measurements for classification of laser products

Дата введения — 2017 — 11 — 01

1 Область применения

Настоящий стандарт устанавливает практические рекомендации по методам проведения радиометрических измерений или методам анализа для обеспечения уровня излучения/эмиссии лазерной энергии в соответствии с IEC 60825-1:2007 и предназначен для изготовителей аппаратуры, испытательных центров, персонала, отвечающего за безопасность и т. п. Процедуры измерений, описанные в настоящем стандарте, применяют как руководство по классификации лазерной аппаратуры в соответствии с IEC 60825-1:2007. Допускается использовать другие процедуры, если они более совершенные или подходящие.

Информация приведена для расчета пределов допустимого(ой) излучения/эмиссии (AELs) и максимально допустимого(ой) облучения/экспозиции (MPEs), т.к. некоторые параметры, используемые для расчета пределов, зависят от других измеряемых величин.

Настоящий стандарт распространяется на лазеры, включая протяженные источники и лазерные матрицы. Пользователи настоящего стандарта должны быть уверены, что приведенные в нем процедуры условий наблюдения для протяженных источников могут обеспечить более устойчивые результаты, чем результаты, полученные при использовании более строгих/точных методов.

Примечание — Продолжается работа над более полными методами оценки источников и результаты будут представлены по достижении международного согласия по этим методам.

2 Нормативные ссылки

Для применения настоящего стандарта необходимы следующие ссылочные документы. Для датированных ссылок применяют только указанное издание ссылочного документа, для недатированных ссылок применяют последнее издание ссылочного документа (включая любые изменения).

IEC 60825-1:2007 Safety of laser products — Part 1: Equipment classification and requirements (Безопасность лазерной аппаратуры. Часть 1. Классификация оборудования и требования)

3 Термины и определения

В настоящем стандарте применены термины и определения, приведенные в IEC 60825-1:2007, а также следующие термины с соответствующими определениями.

3.1 **угловая скорость** (angular velocity): Скорость сканирующего пучка в радианах в секунду.

3.2 **профиль пучка** (beam profile): Распределение плотности потока излучения/энергетической освещенности сечения пучка.

3.3 **перетяжка/сужение пучка** (beam waist): Минимальный диаметр осесимметричного пучка.

Примечание 1 — При несимметричных пучках сужение может быть на каждой главной оси, каждое из которых находится на разном расстоянии от источника.

Издание официальное

3.4 **устройство с зарядовой связью, CCD** (charge-coupled device, CCD): Самосканирующий полупроводниковый формирователь изображения на основе применения МОП-технологии (металл-оксид-полупроводник), использующий накопительную поверхность и осуществляющий передачу информации.

3.5 **критическая/предельная частота** (critical frequency): Частота повторения импульсов, выше которой импульсный лазер при проведении оценки лазерной опасности может быть смоделирован, как лазер непрерывного излучения.

3.6 **профиль Гауссовых пучков** (Gaussian beam profile): Профиль лазерного пучка, который работает на поперечной моде низшего порядка TEM_{00}.

Примечание 1 — Профиль Гауссовых пучков также может создаваться при прохождении лазерных не-TEM_{00} пучков через оптические элементы, формирующие пучок.

3.7 **апертура измерения/измерительная апертура** (measurement aperture): Апертура, используемая для классификации лазера при определении мощности или энергии, которая сравнивается с пределом допустимого излучения/эмиссии (AEL) для каждого класса.

3.8 **частота повторения импульсов, PRF** (pulse repetition frequency, PRF): Количество импульсов, возникающих за одну секунду, выраженное в герцах (Гц).

3.9 **лазерный затвор/переключатель добротности** (Q-switch): Устройство формирования очень коротких лазерных импульсов с высокой пиковой мощностью за счет улучшения накопления энергии в среде лазерного излучения и сброса (демпинга) энергии из среды лазерного излучения.

3.10 **лазер с модуляцией добротности** (Q-switched laser): Лазер, излучающий короткие импульсы с высокой пиковой мощностью с помощью лазерного затвора.

3.11 **Релеевская длина, Z_r** (Rayleigh length, Z_r): Расстояние от перетяжки/сужения пучка в направлении распространения, на котором диаметр пучка или значения ширины пучка равны $\sqrt{2}$ от значения в перетяжке пучка.

Примечание 1— Релеевской длиной часто называют ½ конфокального параметра.

3.12 **чувствительность, *R*** (responsivity, *R*): Отношение сигнала на выходе детектора к соответствующему входному сигналу, выраженное как

$$R = O/I,$$

где *O* — электрический выходной сигнал детектора;

I — оптическая мощность или энергия на входе.

3.13 **лазер со сверхкороткими импульсами** (ultrashort pulse laser): Лазер, излучающий импульсы короче 100 фемтосекунд, который может вмещать относительно большой спектральный контент.

4 Применимость

4.1 Общие положения

Настоящий стандарт предназначен для использования в качестве основных рекомендаций (которыми он не ограничивается) для изготовителей, испытательных лабораторий, специалистов по технике безопасности и официальных представителей органов власти. В настоящем стандарте также приведены интерпретации стандарта IEC 60825-1:2007 в отношении вопросов измерений и приведена дополнительная пояснительная информация.

4.2 Предварительное рассмотрение

Предварительно перед началом выполнения радиометрических измерений с целью классификации аппаратуры или сравнения с другими применимыми требованиями IEC 60825-1:2007, следует определить несколько параметров лазеров:

а) длину(ы) волны(волн) излучения

Лазеры могут создавать излучение на одной или более различающихся длинах волн.

Длину волны (длины волн) излучения или спектральное распределение излучения обычно можно узнать от изготовителя лазера. В зависимости от типа лазера изготовитель может указать диапазон длин волн, а не одно значение длины волны. В ином случае длину волны (длины волн) излучения или спектральное распределение излучения может быть определено посредством измерения, которое не входит в область рассмотрения настоящего стандарта. Оценки предела допустимого излучения/эмиссии (AEL) для кратных длин волн см. 7.1.

b) временной режим работы

Временной режим работы относится к режиму работы, при которой энергия излучается. Некоторые лазеры излучают непрерывную волну (CW), другие излучают энергию в виде импульсов. Импульсные лазеры могут быть лазерами одиночных импульсов, с модуляцией добротности, импульсно-периодическими или с синхронизированными модами. Сканирующее или модулированное излучение непрерывной волны при фиксированном размещении также приводят к появлению последовательности импульсов.

Помимо этого, последовательность импульсов может быть кодированной, но иметь средний коэффициент заполнения (время излучения как часть фактического времени работы, выраженное в десятичной дроби или в процентах).

c) обоснованно прогнозируемые условия единичной неисправности

В IEC 60825-1:2007 установлено, что испытания должны выполняться при всех без исключения обоснованно прогнозируемых условий единичной неисправности. Изготовитель обязан гарантировать, что при всех условиях единичной неисправности доступное излучение не превышает AEL заданного класса.

d) неопределенности измерения

Важно рассмотреть потенциальные источники погрешности при измерении лазерного излучения. Неопределенности измерений рассмотрены в разделе 5 настоящего стандарта.

e) сопутствующее излучение (определение термина «сопутствующее излучение» см. IEC 60825-1:2007)

Сопутствующее излучение, проникающее в апертуру измерения, может влиять на измеренные значения мощности или энергии и длительность импульсов. Персонал, проводящий испытания, должен гарантировать, что измерительная установка блокирует сопутствующее излучение или учитывает его, если оно все же попадает на детектор.

f) конфигурация аппаратуры

Если измерения проводят в целях классификации, все органы контроля и установки, перечисленные в рабочих инструкциях, инструкциях по техническому обслуживанию и эксплуатации, должны настраиваться совместно для получения максимального допустимого уровня излучения. Измерения следует проводить с использованием дополнительных приспособлений, которые могут увеличить радиационную опасность (например, с коллимирующей оптикой), поставляемых или предлагаемых изготовителем лазерной(ых) аппаратуры для использования с такой(им) аппаратурой.

Примечание — Это относится к любой конфигурации аппаратуры, которую можно получить без использования инструментов или снятия блокировки, включая конфигурации и установки, относительно которых в рабочих инструкциях и инструкциях по техническому обслуживанию содержатся предупреждения об опасности. Например, если оптические элементы, такие как фильтры, рассеиватели или линзы, в оптической части лазерного пучка могут быть сняты без помощи инструмента, аппаратуру следует испытывать в конфигурации, при которой достигается наивысший уровень опасности. Наличие в инструкции указания изготовителя не снимать оптические элементы не может служить основанием для отнесения аппаратуры к более низкому классу. Классификация основывается на технической конструкции аппаратуры и не может быть основана на адекватном поведении пользователя.

Если измерения проводят для определения требований к защитным блокировкам, ярлыкам и информации для пользователя, то аппаратуру следует оценивать при конфигурациях, применимых для каждой из указанных категорий использования (функционирование, техническое обслуживание и сервисное обслуживание) в соответствии с IEC 60825-1:2007.

Технический комитет 76 МЭК (ТС 76) признает существование эквивалентных процедур измерения, которые могут дать результаты, имеющие такую же достоверность, как и результаты процедур, приведенные в настоящем стандарте. В стандарте описаны процедуры измерений, которые необходимо проводить, в достаточной мере отвечающие требованиям к измерениям IEC 60825-1:2007. Во многих случаях не обязательно проводить реальные радиометрические измерения, и соответствие требованиям IEC 60825-1:2007 можно определить проведением анализа источника, имеющего хорошо описанные характеристики, и конструкции реальной аппаратуры.

Измерения допустимых уровней излучения необходимо проводить в точках пространства, к которым возможен доступ человека во время работы и обслуживания, в зависимости от необходимости. (Например, если для работы может потребоваться снять часть защитного корпуса и снять защитные блокировки, измерения требуется проводить в точках, доступных при такой конфигурации аппаратуры). Поэтому при некоторых обстоятельствах может потребоваться частично демонтировать аппаратуру, чтобы провести измерения в необходимом месте, в частности при рассмотрении обоснованно про-

гнозируемых условий единичной неисправности. Если в состав конечной лазерной аппаратуры входит другая лазерная аппаратура или системы, то соответствовать положениям IEC 60825-1:2007 должна конечная аппаратура.

Измерения следует проводить детектором измерительного прибора, размещенным и ориентированным относительно лазерной аппаратуры таким образом, чтобы прибор обнаруживал максимальное излучение. Т. е., детектор необходимо перемещать или менять угол его наклона для получения максимального показания прибора. Следует предпринять определенные меры, чтобы не допустить или исключить «вклад» сопутствующего излучения в результат измерения. Например, может потребоваться проводить измерения на некотором расстоянии от выхода лазерной системы, чтобы не допустить искажения данных при излучении от импульсных ламп или лазеров с диодов с накачкой/диодных лазеров. В качестве другого примера можно привести необходимость отфильтровать сопутствующее излучение линейным/сетевым фильтром.

5 Требования к контрольно-измерительной аппаратуре

Используемая контрольно-измерительная аппаратура должна соответствовать IEC 61040. Определение класса контрольно-измерительной аппаратуры, используемой при измерениях (от 1 класса до 20 класса, обеспечивающих приблизительное значение возможной неопределенности измерения) зависит от требуемой точности измерения.

При использовании контрольно-измерительной аппаратуры, которая не в полной мере соответствуют требованиям IEC 61040, следует оценивать отдельные вклады разных параметров в суммарную неопределенность измерения по отдельности.

Рассматривают основные положения, приведенные в IEC 61040, вопросы:

- изменение чувствительности от времени;
- неоднородность чувствительности по поверхности детектора;
- изменение чувствительности во время облучения;
- зависимость чувствительности от температуры;
- зависимость чувствительности от угла падения;
- нелинейность;
- зависимость чувствительности от длины волны;
- зависимость чувствительности от поляризации,
- погрешности при усреднении импульсно-периодического излучения во времени;
- дрейф нуля;
- неопределенность калибровки.

Калибровка должна быть прослеживаемой в соответствии с требованиями национальных стандартов.

Испытания для определения неопределенностей измерения контрольно-измерительной аппаратуры, должны выполняться согласно IEC 61040.

Определение неопределенностей измерения CCD-матриц (матриц с зарядовой связью) и камер см. ISO 11146-3.

6 Алгоритм классификации

Пределы допустимого(ой) излучения(эмиссии) (AEL) и условия измерения позволяют рассчитать известные или измеренные параметры аппаратуры. Дополнительно следует провести анализ условий неисправности, которые увеличивают опасность. Затем по измерению (или нескольким различным измерениям) излучения (эмиссии) аппаратуры можно определить находится ли излучение(эмиссия) в установленных пределах AEL для рассматриваемого класса.

В таблицах 4 — 9 IEC 60825-1:2007 приведены пределы допустимого излучения (эмиссии) (AEL). В строках указанных таблиц приведены диапазоны длин волн, а в столбцах — длительность излучения(эмиссии). На пересечении каждой строки и каждого столбца указаны одна или несколько формул, в которых есть параметры, определенные в таблице 10 IEC 60825-1:2007.

Алгоритм классификации представлен на рисунках 1 и 2. Первым шагом является использование стандартной упрощенной оценки согласно 9.3.2 IEC 60825-1:2007. В нем рассматривают пучок, который будет излучать малый (точечный) источник с коэффициентом C_6 = 1 — консервативный подход, если

размер видимого источника неизвестен. Если выходной сигнал аппаратуры генерируется внешним источником и находится в диапазоне от 400 до 1400 нм и если класс, определенный по методу упрощенной оценки, неприемлем, то можно в качестве альтернативы класс определить на основании более комплексной оценки. Она включает использование дополнительных параметров, включая стягиваемый угол, α, в функции от расстояния, и угол приема при измерении, γ_p, при видимой фотохимической опасности.

Первоначально следует определить, является лазер импульсным или лазером непрерывного излучения. Если длительность импульсов больше 0,25 с, лазер считается лазером непрерывного излучения. Относительно лазеров непрерывного излучения действует алгоритм, приведенный на рисунке 1, а для импульсных лазеров — представленный на рисунке 2.

Затем следует определить длину волны.

Если лазер является импульсным или сканирующим, также должны быть определены ширина импульса (PW) и частота повторения импульсов (PRF).

Определить применимый класс или классы. Например, при применении низкой мощности в диапазоне длин волн 400 — 700 нм, могут быть рассмотрены классы 1, 1M и 3R. Для источника с длиной волны в видимом диапазоне можно рассматривать классы 1, 1M, 2, 2M и 3R.

Далее должна быть установлена временная база классификации. Временная база может быть определена на основе стандартного значения по умолчанию перечисление e) подраздела 8.3 IEC 60825-1:2007 или установлена из определения параметра T_2 (таблица 10 IEC 60825-1:2007), или при рассмотрении конкретных временных свойств выходного сигнала рассматриваемой аппаратуры.

Эта информация необходима для определения содержания строк и столбцов таблиц 4 — 9 IEC 60825-1:2007, включая нужную формулу или формулы, и, следовательно, для определения значений AELs.

Затем должны быть определены условия измерений (9.3 и таблица 11 IEC 60825-1:2007). Для импульсного лазера для обеспечения полного попадания в пределы AEL необходимо оценить несколько условий, приведенных в перечислении f) подраздела 8.3 IEC 60825-1:2007.

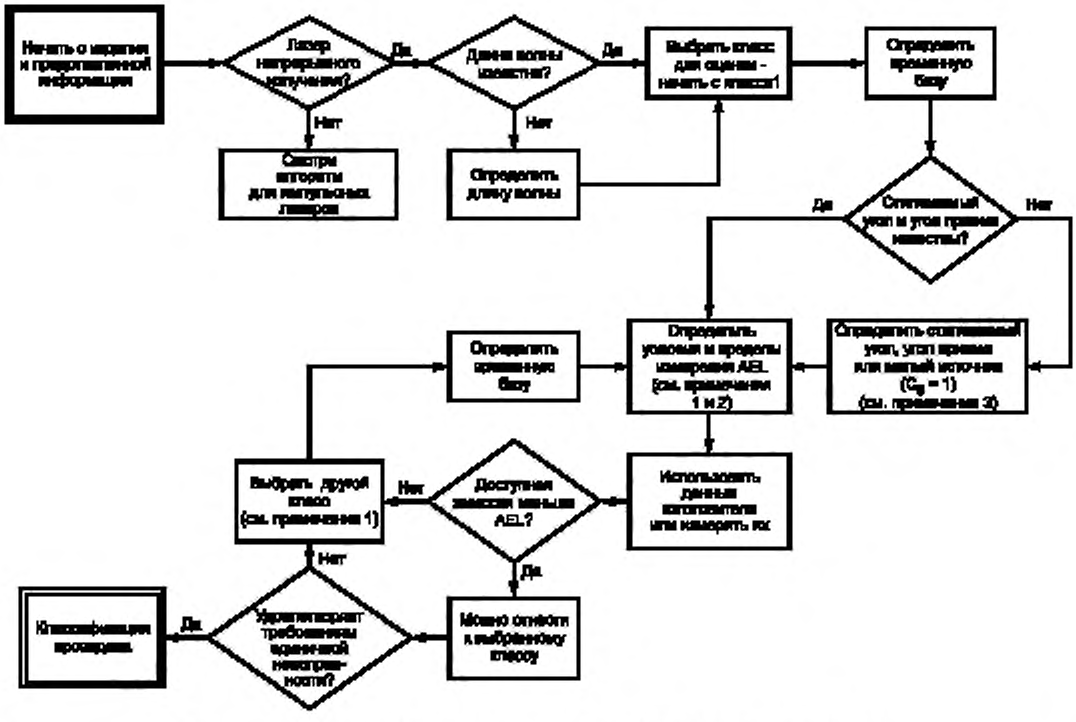


Рисунок 1 — Алгоритм классификации лазеров непрерывного излучения

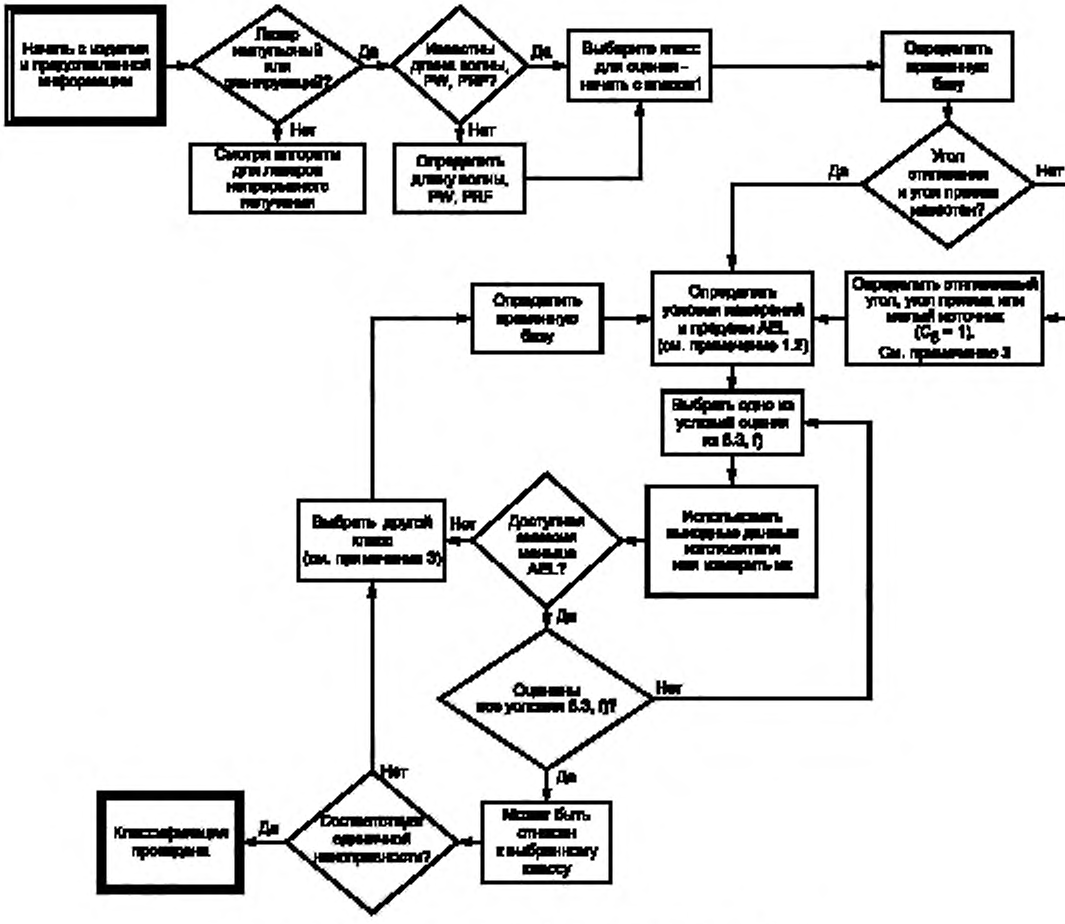


Рисунок 2 — Алгоритм классификации импульсных лазеров

После определения AEL, необходимо оценить данные на выходе. Данные на входе может представить изготовитель или они могут быть измерены непосредственно. Если их предоставляет изготовитель, то должно быть подтверждение, что измерения проводились в соответствии с разделом 9 IEC 60825-1:2007. Если допустимое излучение(эмиссия) меньше AEL, то лазер можно отнести к заданному классу. Для импульсного лазера AEL заданного класса применяют при всех длительностях излучения(эмиссии) в пределах временной базы.

Если допустимое излучение больше или равно AEL, следует выбрать AEL более высокого класса и провести оценку. Оценку повторяют до тех пор, пока не будет получено значение меньше AEL или лазерная аппаратура не будет отнесена к классу 4.

Систему оценивают в соответствии с IEC 60825-1:2007, чтобы гарантировать, что обосновано прогнозируемая единичная неисправность не может привести к тому, что лазер будет испускать излучение больше чем AEL для заданного класса. Если данный критерий выполнен, классификация лазера считается известной.

Примечания

1 При отнесении аппаратуры к определенному классу может быть установлено более одного условия, которым должна соответствовать аппаратура. Например, в диапазоне длин волн 400 — 600 нм для отнесения аппаратуры к какому-либо классу не должен быть превышен ни температурный, ни фотохимический предел (каждый со своими собственными условиями измерения). Также, если аппаратура имеет импульсный выходной сигнал, не должен быть превышен ни один из трех пределов (для одиночного импульса, последовательности импульсов и средней мощности).

2 Для протяженного источника AEL является функцией расстояния от источника. При проведении классификации следует использовать наиболее опасное расстояние.

3 Если требования, установленные для классов 1 или 2 не выполнены, можно оценить излучение аппаратуры с использованием требований установленных для классов 1М или 2М. Если излучение аппаратуры соответствует требованиям для классов 1М или 2М, оно не обязательно должно отвечать требованиям установленных для класса 3R.

7 Параметры для расчета пределов допустимого уровня излучения/эмиссии

7.1 Длина волны, λ

7.1.1 Определение длины волны

Обычно данный параметр не требуется определять с большой точностью. В большинстве случаев биологическая опасность не сильно зависит от длины волны. Существует несколько исключений (см. рисунок 3):

a) область 302,5 — 315 нм: в данном диапазоне параметры T_1 и C_1 меняются существенно;

b) область 450 — 600 нм: в данном диапазоне фотохимическая опасность уменьшается в одну тысячу раз;

c) область 1150 — 1200 нм: в данном диапазоне тепловая опасность уменьшается в восемь раз;

d) 400 нм: на длинах волн более 400 нм опасность в основном ретинальная (касается сетчатки глаз); при более коротких длинах волн опасность в основном неретинальная;

e) 1400 нм: на длинах волн более 1400 нм опасность в основном неретинальная (не касается сетчатки глаз); при более коротких длинах волн опасность в основном ретинальная;

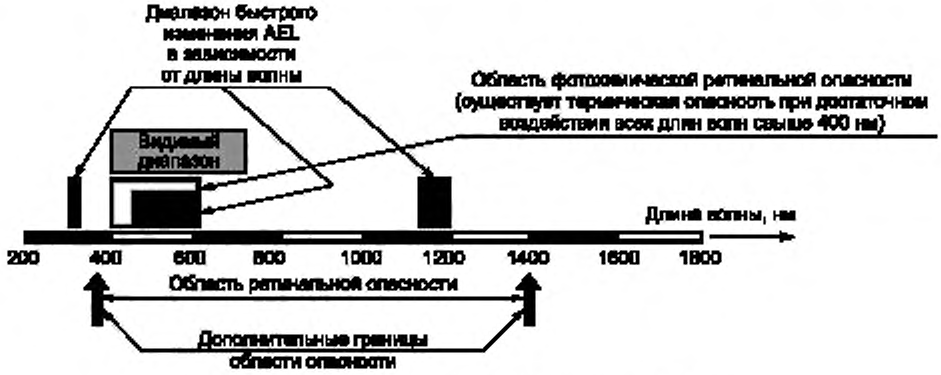


Рисунок 3 — Важные длины волн и диапазоны длин волн

Для лазеров с узкой линией излучения, длина волны, устанавливаемая изготовителем, вероятно, будет единственным, что необходимо для классификации, и оставшуюся часть подраздела 7.1, а также приведенных ниже подразделов 7.2 и 7.3 не рассматривают.

Если диапазон возможных длин волн (варьируется от изделия к изделию) является значительной частью областей, указанных в перечислениях a), b) или c), то можно использовать наиболее опасную (наименьшую) длину волны, либо измерить длину волны для конкретной аппаратуры.

В областях длин волн, указанных в перечислениях a), b) или c), может потребоваться кусочно-линейное суммирование, определение предела при нескольких длинах волн и взвешивание относительно выходного сигнала соответствующего этой длине волны. Более подробно рассматривается в 7.2.2 и 7.3.

Опасности, которые необходимо рассматривать совместно, рассматривают как аддитивные. Например, множественные излучения с длиной волны менее 400 нм или в диапазоне длин волн от 400 до 1400 нм или больше 1400 нм являются аддитивными. Для излучения с широким спектром или множественных излучений в каждой области, опасности являются аддитивными, и необходимо выполнять кусочно-линейное суммирование, как указано в перечислении b) подраздела 8.3 IEC 60825-1:2007. Если аппаратура излучает длины волн в двух из этих диапазонов (например, 700 и 1500 нм), то эти две длины

волны следует рассматривать по отдельности с использованием соответствующих AEL для каждой длины волны. В целях классификации будет применен более высокий класс.

Для лазеров, возможный диапазон выходной волны или выходной спектр которых включает длины волн больше 1400 нм и/или меньше 400 нм, должно быть проведено специальное рассмотрение AEL. Опасности на каждом краю граничных длин волн разные и воздействие тоже разное. Для отнесения аппаратуры к конкретному классу, мощность или энергия в каждой спектральной области должны быть меньше каждого соответствующего AEL.

Измерение или определение такого параметра как длина волны является фундаментальным для оценки лазерной опасности и классификации лазера. Идентификация длины волны требуется для определения типа необходимого измерителя мощности или энергии. В составе некоторых радиометров есть детекторные элементы, которые очень эффективно реагируют в области видимого излучения (оптический диапазон) и в ближней инфракрасной области спектра, но имеют низкую чувствительность в дальней инфракрасной области спектра или ультрафиолетовом диапазоне, и наоборот. Помимо этого, от длины волны также зависит соответствующее применение пределов воздействия/экспозиции. В большинстве случаев нет необходимости напрямую измерять рабочую длину волны лазера. Это обычно устанавливает изготовитель с более чем приемлемой достоверностью.

Для лазеров, которые могут излучать более одной длины волны или излучать вблизи предела области ретинальной опасности, исключительно важное значение имеет определение спектра излучения. Измерение длины волны или спектрального излучения может выполняться методами, использующими разнообразное оборудование. Наиболее просто работать с оптическими спектрометрами и аналогичными приборами, например, волномерами. Большинство таких устройств просто выбирает пучок и выдается цифровое показание длины волны или спектра. Некоторые приборы имеют геометрические ограничения и ограничения по полю зрения, но являются весьма надежными. Монохроматоры, особенно управляемые вручную, могут потребовать чуть большей трудоемкости и временных затрат, но тоже очень надежны и точны. Оптические фильтры такие как, узкополосные полосовые фильтры, также можно рассматривать как другой вариант, но имеющий некоторые ограничения. Использование таких фильтров требует предварительного приближенного знания возможной длины волны. Также для лазеров с множеством длин волн или широкополосным излучением использование фильтров для определения длины волны или спектрального излучения может быть довольно обременительным и даже безрезультатным.

7.1.2 Область опасности для глаз

Тепловая опасность существует при достаточном воздействии (облучении) на всех длинах волн выше 400 нм.

Ретинальную фотохимическую опасность рассматривают только при воздействии в диапазоне длин волн от 400 до 600 нм и при времени воздействия более 1 с.

Области опасности разделены следующим образом:

- 180 — 400 нм. Опасность в основном фотохимическая и неретинальная при воздействии непрерывной волны и тепловая — при импульсном воздействии (IEC 60825-1:2007 не рассматривают длины волн меньше 180 нм);
- 400 — 600 нм. В данном диапазоне следует рассматривать тепловую и фотохимическую опасности. Фотохимическую опасность не требуется рассматривать, если время излучения менее 10 с (или 1 с для области длин волн от 400 до 484 нм при мнимых (видимых) источниках от 1.5 до 82 мрад);
- 400 — 1400 нм. В данном диапазоне находится область ретинальной опасности, и преобладает опасность для сетчатки глаз;
- 1400 нм — 1 мм. При длинах волн более 1400 нм глубина проникновения излучения намного меньше, чем при длинах волн от 400 до 1400 нм. Опасность тепловая, но, в основном, неретинальная.

7.2 Источники с множеством длин волн

7.2.1 Общие положения

Термин «источники с множеством длин волн» относится к источнику, излучающему на двух или более дискретных длинах волн. В эту категорию четко попадают многомодовые (многолинейные) лазеры. Эти разные длины волн могут входить в разные области опасности спектра, создающие разные биологические воздействия, и их следует рассматривать по отдельности. См. 7.1.1, 7.1.2 и рисунок 3.

Лазеры со сверхкороткими импульсами могут иметь относительно широкий диапазон длин волн. Ширину диапазона длин волн таких лазеров следует оценивать по процедуре, приведенной в 7.3, если предел AEL или MPE отличается более чем на 10 % от диапазона длин волн импульса лазера.

7.2.2 Область единичной опасности

При нескольких источниках, излучающих одновременно при разных длинах волн, которые генерируют излучение, относящееся к одному типу опасности, должна быть использована взвешенная сумма для определения будет аппаратура соответствовать или превышать AEL для данного класса. Для единичной длины волны может быть установлен следующий критерий по мощности:

Если $P_{meas} < AEL$, то аппаратура не превышает предел данного класса,

где P_{meas} — измеренная мощность (или энергия, или другая установленная величина), а AEL — предел класса мощности (или энергии, или другой установленной величины). Это выражение можно переформулировать как:

Если $P_{meas}/AEL < 1$, то аппаратура не превышает предел данного класса.

В таком виде выражение может быть применимо к двум длинам волн:

Если $P_{meas}\ (\lambda_1)/AEL(\lambda_1) + P_{meas}\ (\lambda_2)/AEL(\lambda_2) < 1$, то аппаратура не превышает предел данного класса.

Если количество длин волн больше двух, можно получить общую сумму:

Если $\sum[P_{meas}\ (\lambda_i)/AEL(\lambda_i)] < 1$,

где $i = 1, 2, 3,\ldots$, то аппаратура не превышает предел данного класса.

Такой расчет применяют только к одному виду опасности единовременно (т.е. фотохимическую и тепловую опасности рассматривают по отдельности).

Примечание — Несмотря на то, что значения предела тепловой опасности для оптического диапазона (400 — 700 нм) и для ближней инфракрасной области спектра (700 — 1400 нм) разные, временные базы (либо длительность излучения t, либо расчетный параметр T_2) одинаковы. Поэтому применима приведенная выше формула суммирования.

7.2.3 Две и более области опасности

Если аппаратура излучает две разные длины волны и они не относятся к области одинаковой опасности (например, λ_1 = 300 нм и λ_2 = 430 нм), каждую длину волны необходимо рассматривать отдельно:

Если мощность $P_{meas}\ (\lambda_1) < AEL(\lambda_1)$ и $P_{meas}\ (\lambda_2) < AEL(\lambda_2)$, то аппаратура не превышает предел данного класса.

Если какое-либо из этих условий не выполнено, следует рассмотреть вариант сравнения с AEL более высокого класса.

7.3 Источники с широким спектром

7.3.1 Общие положения

Некоторые лазеры (например, лазеры сверхкоротких импульсов) имеют достаточно широкий спектр. Вследствие этого при классификации может потребоваться провести оценку в более чем одной спектральной области.

7.3.2 Спектральные области с небольшим изменением AEL в зависимости от длины волны

Если спектр на выходе излучателя не включает какую-либо из спектральных областей из перечислений a), b) или c) или граничные длины волн из перечислений d) или e) (см. 7.1), распределение можно аппроксимировать посредством единичной(единственной) длины волны.

a) Если AEL не меняется в зависимости от длины волны, равнозначен выбор любой длины волны в пределах спектра излучателя.

b) Если AEL медленно меняется в зависимости от длины волны, а спектр длин волн излучателя входит в один спектральный диапазон, представленный в таблице пределов AEL, можно рассчитать предел для пика или центра распределения, включая более короткие длины волн, соответствующие 10 % пиковой плотности потока излучения в распределении. Если изменение AEL составляет менее 1 %, можно использовать пиковую или центральную длину волны. Консервативный подход заключается в использовании наиболее чувствительной рассматриваемой длины волны.

7.3.3 Спектральные области с большим изменением AEL в зависимости от длины волны (302,5 — 315 нм, 450 — 600 нм и 1150 — 1200 нм)

Если некоторые или все выходные сигналы излучателя попадают в три области, в которых пределы сильно меняются в зависимости от длины волны, можно использовать два метода:

a) расчет AEL с использованием нижней границы длин волн для соответствующей области. Так как AEL для более коротких длин волн всегда более чувствительны(сдерживающие), чем AEL для более длинных длин волн, можно использовать этот простой и консервативный метод. Однако это может привести к чрезмерно ограничительному пределу. Если расчетный AEL приемлем (например, при данном допущении аппаратура относится к классу 1), последующие расчеты не требуются;

b) расчет суммы измеренных мощностей, деленных на AEL как функцию от длины волны. Использовать общее суммирование согласно 7.2.2.

Допустим, что имеется источник с треугольным спектральным распределением, у которого нижний предел длины волны составляет 400 нм, пик на длине волны 460 нм, а верхний предел длины волны равен 520 нм. AEL в диапазоне длин волн от 400 до 450 нм остается постоянным. Для длин волн выше 450 нм AEL растет экспоненциально с коэффициентом C_3. Если мощность

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

то приемлемый AEL не превышен.

7.3.4 Спектральные области с включением границ по типу опасности (длины волн около 400 и 1400 нм)

Если спектральное распределение выходного сигнала включает границы области опасности (длины волн 400 и 1400 нм), выходной сигнал в каждой области является независимым. Проводят процедуры, приведенные 7.2.3 и 7.3.3 для каждой спектральной области, при необходимости.

7.3.5 Сверхширокополосные источники

Требуется определить мощность или энергию на единичную длину волны. Если изготовитель не представил такую информацию, должны быть проведены спектральные измерения. Эта процедура не входит в область применения настоящего стандарта и поэтому не детализируется. Некоторая информация по измерениям широкополосных источников приведена в IEC 60825-1:2007.

Если лазерная аппаратура не излучает длины волн ниже 315 нм, расчеты можно упростить. Для расчета частей спектра, в которых биологические реакции меняются с частотой, необходима следующая информация (см 7.1.1):

a) полная мощность или энергия в диапазоне от 315 до 400 нм, измеренная в соответствии с IEC 60825-1:2007 (P_a или Q_a);

b) полная мощность или энергия в диапазоне от 400 до 700 нм, измеренная в соответствии с IEC 60825-1:2007 при тепловых пределах (P_b или Q_b);

c) полная мощность или энергия в диапазоне от 400 до 450 нм, измеренная в соответствии с IEC 60825-1:2007 при фотохимических пределах (P_c или Q_c);

d) спектральное распределение мощности или спектральное распределение энергии в диапазоне от 450 до 600 нм, измеренное в соответствии с IEC 60825-1:2007 при фотохимических пределах [$P_d(\lambda)$ или $Q_d(\lambda)$];

e) спектральное распределение мощности или энергии в диапазоне от 700 нм до предела наибольшей длины волны распределения, измеренное в соответствии с IEC 60825-1:2007 при тепловых пределах[$P_e(\lambda)$ или $Q_e(\lambda)$].

Несмотря на то, что процедуру применяют и к мощности, и к энергии, в нижеприведенном расчете будем использовать только мощность (P).

Последовательность процедуры:

- выбрать AEL (формулы и рекомендации по расчету пределов см. раздел 9 IEC 60825-1:2007);
- рассчитать предел для ультрафиолетового диапазона AEL_a и отношение $R_a = (P_a/AEL_a)$;
- рассчитать тепловой предел видимого диапазона AEL_b и отношение $R_b = (P_b/AEL_b)$;
- рассчитать фотохимический предел видимого диапазона AEL_c для длин волн 400 нм<λ<450 нм и $AEL_d(\lambda)$ для диапазона длин волн 450 нм <λ< 600 нм. Суммарные соотношения рассчитывают по формуле

$$P_{cd} = P_c / AEL_c + \sum_{450<\lambda_i<600\text{нм}} [P_d(\lambda_i) / AEL_d(\lambda_i)];$$

- рассчитать тепловой предел инфракрасного диапазона $AEL_e(\lambda)$ для диапазона длин волн от 700 нм до границы диапазона наибольших длин волн. Суммарные соотношения рассчитывают по формуле

$$P_e = \sum_{700<\lambda_i<\lambda_{max}} [P_e(\lambda_i) / AEL_e(\lambda_i)].$$

Аппаратуру относят к низшему классу лазеров, для которых справедливо следующее:
$R_a < 1,0$;
$R_b + R_e < 1,0$;
$R_{cd} < 1,0$.

7.4 Временные характеристики источника

7.4.1 Общие положения

Для аппаратуры с непрерывным излучением постоянной мощности, проводят анализ в следующей последовательности. Должно быть определено время излучения, которое либо установлено в соответствии с IEC 60825-1:2007 как фиксированная длительность, либо его устанавливают по расчетной длительности (т.е. T_2 является функцией размера видимого источника или стягиваемого угла источника). Время излучения позволяет рассчитать приемлемый AEL. Для такой аппаратуры остальные требования 7.4 рассматривать не требуется.

7.4.2 Источники с ограниченным временем включения (ВКЛ)

Если аппаратура может излучать только в ограниченный период времени, который меньше временной базы для данного класса, установленного IEC 60825-1:2007, для расчета приемлемого AEL можно использовать меньшее время. Более короткое время излучения ведет к более высоким пределам пиковой мощности. Отметим, что для классификации необходимо рассматривать AEL при всех длительностях вплоть до временной базы.

7.4.3 Периодические источники или источники с постоянным коэффициентом заполнения

7.4.3.1 Общие положения

Некоторая аппаратура содержит в своем составе источники, генерирующие регулярные серии импульсов или кодированные (нерегулярные) серии. Нерегулярные серии можно рассматривать как регулярные, если известен максимальный коэффициент заполнения. Коэффициент заполнения в данном случае относится к части или проценту времени, в течение которого источник излучает энергию.

При длительности импульсов 3 мкс и частоте следования 120 импульсов в секунду коэффициент заполнения будет $120 \cdot 3 \cdot 10^{-6}/1$, т.е. 0,036 %.

Для кодированных серий импульсов, использующих последовательность импульсов из 120 возможных позиций с длительностью 3 мкс в каждую секунду при 50 % режиме кодирования (50 % импульсных позиций содержатся в импульсе, а 50 % отсутствует) коэффициент заполнения будет $0,5 \cdot 120 \cdot 3 \cdot 10^{-6}/1$, т.е. 0,018 %.

Дополнительная информация для расчета пределов приведена в таблице 3 IEC 60825-1:2007 (продолжительность времени T_i, ниже которой группы импульсов суммируются). Для расчета эффективной мощности и длительности, а также эффективной частоты повторения импульсов требуется знать частоту следования импульсов, коэффициент заполнения, коэффициент кодирования данных, таблицу 3 IEC 60825-1:2007 и таблицы AEL.

Следует рассмотреть три предела:

a) предел для единичного импульса, основанный на ширине импульса;

b) предел для средней мощности при указанной или рассчитанной для классификации временной базе;

c) предел для средней энергии импульсов от импульсов, входящих в последовательность импульсов, с учетом C_5.

В перечислении f) 8.3 IEC 60825-1:2007 установлено, что при определении AEL для лазеров с повторяющимися импульсами или модулированных лазеров при тепловых пределах для длин волн 400 нм и выше применяют наиболее строгие требования перечислений a), b) и c). В требовании перечисления c) к AEL единичного импульса применяют коэффициент коррекции на основании количества импульсов, излучаемых за применимую временную базу или T_2, в зависимости от того, что меньше.

7.4.3.2 Длительность импульсов

В IEC 60825-1:2007 длительность импульсов определена как приращение времени, измеренное между точками, соответствующими половине пиковой мощности на переднем и заднем фронтах импульса. Рассматриваемая длительность — это интервал времени между точкой, находящейся на переднем фронте, в которой амплитуда достигает 50 %-ного пикового значения, и точкой на заднем фронте, в которой амплитуда возвращается к этому же значению (см. рисунок 4).

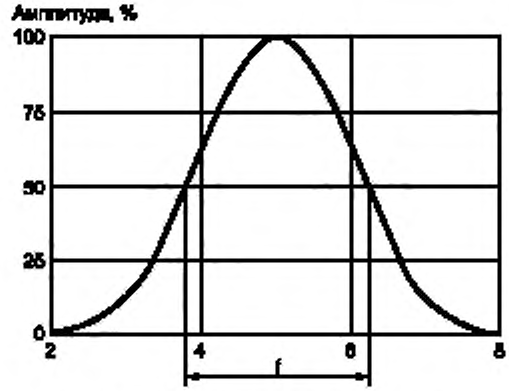


Рисунок 4 — Определение длительности импульса

Длительность импульса, *t*, можно точно определить с помощью контрольно-измерительной аппаратуры, включающей фоточувствительный детектор и осциллограф или аналогичный прибор. К контрольно-измерительной аппаратуре предъявляют следующие требования:

a) временная и частотная характеристики всей измерительной установки должны быть такими, чтобы можно было точно измерить длительность;

b) измеряемое излучение должно быть распределено в достаточно широкой активной области детектора так, чтобы не было ни точек локального насыщения, ни локальных изменений в чувствительности детектора;

c) воздействие излучения/энергетическая экспозиция или плотность потока излучения не должны превышать максимума, указанного для контрольно-измерительной аппаратуры.

Дополнительно, детектор должен соответствовать длине волны лазера и должен иметь постоянную времени, по крайней мере, в десять раз меньше времени нарастания импульса. Такие детекторы часто называют быстрыми. При этом измерении для уменьшения постоянной времени необходимо уменьшить сопротивление. Оконечная нагрузка 50 Ом — это стандартный соединитель для данного применения, соответствующая сопротивлению кабеля, для последующего обеспечения реальной ширины импульса. Некоторые современные цифровые осциллографы имеют разные нагрузки, встроенные и перечисленные в меню. При проведении измерения детектор помещают в пучок излучения и устанавливают запуск на старт роста импульса. При получении подходящей осциллограммы, измеряют ширину импульса при половине максимальной амплитуды на переднем и заднем фронте импульса.

В целях классификации лазеров единичных импульсов, лазеров с модуляцией добротности, лазеров с синхронизацией мод и лазеров периодических импульсов или сканирующих лазеров необходимо знать длительность импульса. В случае использования сканирующего излучения длительность импульса следует определять во всех доступных позициях на растровом изображении. Это необходимо, т.к. в зависимости от типа отражателя скорость пучка может быть непостоянной по всей длине линии сканирования/строки развертки. Для сканирующей аппаратуры, включающей лазер, работающий в режиме непрерывного излучения, длительность импульсов зависит от диаметра и скорости пучка. Для сканирующей аппаратуры, включающей импульсный или модулированный лазер, при классификации аппаратуры и в расчетах длительности излучения необходимо рассматривать частоту модуляции, диаметр пучка и скорость сканирования. Помимо этого, при сканирующем пучке длительность импульса будет зависеть от измерительного расстояния. Для протяженного источника в состав измерений может входить определение длительностей импульсов, а также других параметров при разных измерительных расстояниях.

7.4.3.3 Частота повторения импульсов

Для измерения частоты повторения импульсов (PRF) наиболее часто используют осциллографы, однако такие измерения могут быть нетривиальными. Многие факторы могут приводят к ошибочному считыванию или даже полной невозможности обнаружения последовательности импульсов лазера. Как и при измерениях мощности или энергии в осциллографах используют детектор для преобразования оптического сигнала в электрический. При проведении такого измерения также важно, чтобы спектральная чувствительность детектора соответствовала длине волны лазера. Следует принять меры, чтобы

при измерениях мощности или энергии не возникало насыщение. К тому же, предварительная информация о приблизительной PRF поможет в установке временной области осциллографа. При измерениях такого вида требуется соответствующая нагрузка кабеля, идущего от детектора к осциллографу, для гарантии того, что импульсы можно измерить осциллографом. Большинство осциллографов имеет значение сопротивления по умолчанию порядка единиц мегаом, что более чем достаточно. Некоторые радиометры позволяют измерить частоту повторения импульсов (PRF) при этом важно гарантировать правильность понимания технических требований к контрольно-измерительному оборудованию, установленных изготовителем. Для определения PRF также можно использовать другие контрольно-измерительное оборудование, например, частотомеры или счетчики импульсов.

Несколько большее внимание требуется лазерам, излучающим последовательность импульсов, состоящую из импульсов с неравномерным распределением в пространстве. Проблемой становится запуск осциллографа. Необходимо получить одну осциллограмму, а не непрерывную выборку, при которой происходит перекрытие осциллограмм. Перекрывающиеся осциллограммы могут стать причиной подсчета большего количества импульсов, чем есть в действительности, что ведет к погрешности в расчетах.

7.4.4 Источники с изменением (колебанием) амплитуды

Если импульсы не являются импульсами с плоской вершиной (постоянной амплитудой в течение времени включения импульсов (ВКЛ), см. рисунок 5), может потребоваться детальный анализ структуры импульса.

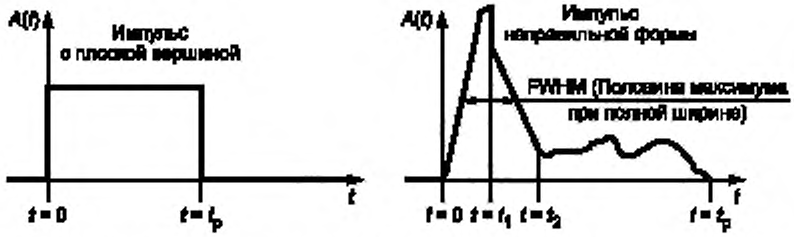


Рисунок 5 — Импульсы с плоской вершиной (плоские импульсы) и нерегулярные импульсы (импульсы неправильной формы)

Для импульса с плоской вершиной возможен упрощенный анализ, при проведение которого необходимо рассмотреть только амплитуду импульсов A(t) и длительность импульсов t_p.

Для нерегулярного импульса может потребоваться кусочно-линейный анализ. Для энергии импульса необходимо рассмотреть полную энергию как минимум от $t = 0$ до $t = t_1$, от $t = 0$ до $t = t_2$ и от $t = 0$ до $t = t$. Для определения длительности импульса необходимо зарегистрировать пик с соответствующим уровнем амплитуды A(t). Определить половину максимума амплитуды при полной ширине (FWHM) может быть трудно, и потребуется консервативная оценка, показанная на рисунке 5, с использованием только пикового импульса. Оценки, приведенные в 7.4, следует применить ко всем указанным постепенно увеличивающимся длительностям.

7.4.5 Источники с меняющимися длительностями импульсов или нерегулярными импульсами (импульсами неправильной формы)

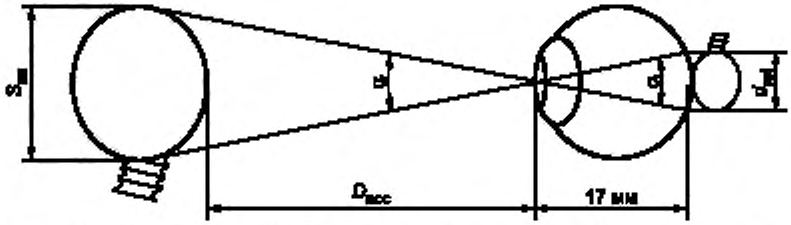
Для последовательности импульсов с меняющейся длительностью и/или меняющимися амплитудами можно использовать метод «полной длительности импульса» (TOTP), представленный в 8.3 перечисление f) и перечисление 3) b) в IEC 60825-1:2007.

7.5 Стягиваемый угол, α

7.5.1 Общие положения

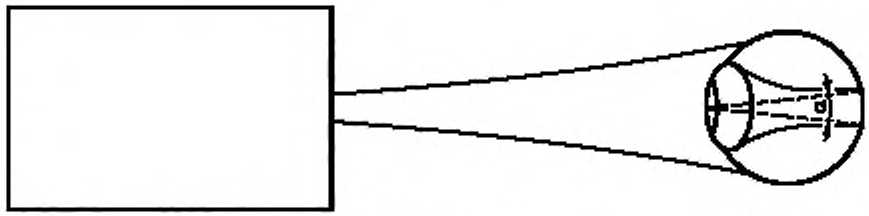
В области тепловой ретинальной опасности (диапазон длин волн 400 — 1400 нм) значения AELs зависят от стягиваемого угла, α, мнимого(видимого) источника с учетом коэффициента коррекции C_6 (см. таблицы 4 — 9 в IEC 60825-1:2007). Используемая для расчета AEL формула зависит от T_2, а T_2 зависит от α.

Видимый источник — это реальный или виртуальный объект-источник, формирующий наименьшее изображение на сетчатке глаза при заданном месте оценки ретинальной опасности. Стягиваемый угол видимого источника определяется наименьшим размером изображения на сетчатке, которое глаз может воспроизвести за счет аккомодации (т.е. за счет изменения фокусного расстояния глазной линзы). Стягиваемый угол видимого источника используют в качестве меры размеров изображения на сетчатке. Стягиваемый угол — это плоский угол, стягиваемый диаметром видимого источника в линзе глаза, см. рисунки 6a и 6b. Стягиваемый угол видимого источника может изменяться в зависимости от позиции вдоль оси пучка. За исключением поверхностных излучателей (таких как полностью диффузно прошедших или отраженных пучков или светодиодов без крышек объектива или отражателей) местоположение видимого источника также является функцией позиции глаза вдоль пучка.



На данном примере показано прохождение пучка через диффузор или отражение от диффузора, такого как матированная колба лампы, где электролампа является и реальным, и видимым источником.

6a — Стягиваемый угол (α) и размер видимого источника (s_{ap}) некогерентного или диффузного источника



Данная ситуация более сложная, чем при простом источнике, как например, на рисунке 6a, и как стягиваемый угол, так и местоположение видимого источника обычно изменяются в зависимости от положения в пучке

6b — Стягиваемый угол основного лазерного пучка в одной из точек размещения в пучке

Рисунок 6 — Стягиваемый угол

Такая же мощность или энергия, растекающаяся по большому рентинальному пятну в большинстве случаев, уменьшает ретинальную опасность на коэффициент C_6. Поэтому это является важным параметром для средних ($1.5 < \alpha < 100$ мрад) и больших ($\alpha > 100$ мрад) отдельных источников и для групповых источников. Однако часто определять стягиваемый угол совсем необязательно, и можно предположить, что коэффициент C_6 равен единице. Это обеспечивает наиболее стабильную оценку. Оценку опасности или классификации лазера всегда следует начинать с допущения, что коэффициент $C_6 = 1$. Если этого достаточно и значения AEL предполагаемого класса лазера не превышены, проводить дальнейший анализ не требуется.

Большинство единичных лазеров без оптики, модифицирующей пучок являются малыми источниками, коэффициент C_6=1, и местоположение видимого источника не является важным для безопасности лазера. Для такой аппаратуры требования последующей части 7.5 не рассматривают.

Определение стягиваемого угла, α, при использовании коэффициента $C_6 > 1$ для основного лазерного пучка приведено в 7.5.3.

Для поверхностных излучателей, таких как, диффузно-пропускающих или диффузно-отражающих лазерные пучки, или бескорпусных лазерных диодов (без модифицирующей оптики) можно использовать упрощенный анализ, представленный в 7.5.3.3.

Особый случай анализа для матричных источников при условии, что каждый отдельный источник является малым ($\alpha_s \leq 1{,}5$ мрад), рассмотрен в 7.5.4. Простые источники с некруговыми диаграммами излучения приведены в 7.5.4.5. Некоторые положения, относящиеся конкретно к оценке сканирующих лазеров приведены в 7.8.

7.5.2 Местоположение эталонной/опорной точки

Для малых источников и для всех источников при условии, что коэффициент $C_6 = 1$, предел допустимого изучения/эмиссии можно измерить на определенном заранее расстоянии от эталонной/опорной точки. Эталонные точки приведены в таблице 1. Для случая диффузных источников и полупроводниковых излучателей или излучателей большой площади без модифицирующей оптики эталонные точки для определения предела допустимого излучения/эмиссии, приведенные в таблице 1, справедливы также для измерений средних и больших источников с использованием коэффициента $C_6 > 1$.

Таблица 1 — Эталонные точки

Тип аппаратуры	Эталонная/опорная точка
Полупроводниковые излучатели (лазерные диоды, суперлюминесцентные диоды)	Физическое местоположение излучающего чипа
Сканирующая эмиссия (включая сканирующие линейные лазеры)	Вершина сканирования (центр вращения сканирующего пучка)
Линейный лазер	Фокальная точка линии/строки (вершина веера углов)
Выход оптоволокна	Кончик оптоволокна
Диффузные источники	Поверхность диффузора
Другие	Перетяжка/сужение пучка

Примечание 1 — Если эталонная точка находится внутри защитного кожуха (т.е. недоступна) на расстоянии от ближайшей точки доступа человека, которое больше чем измерительное расстояние, указанное в IEC 60825-1:2007, измерение следует проводить в ближайшей точке доступа человека.

Методы оценки места сужения пучка, приведенные ниже, можно использовать для малых источников и Гауссовых пучков. Необходимым условием, когда оценка будет считаться приемлемой, является то, что анализ осуществляется в позиции расположенной за пределами Релеевского диапазона, где применяют геометрическую/лучевую оптику, и можно (и нужно) использовать дивергенцию поля в дальней зоне.

Примечание 2 — Информацию по местоположению видимого источника можно найти в работе Энрико Гальбьяти (Enrico Galbiati) «Оценка видимого источника в лазерной безопасности» (см. раздел «Библиография»).

Измерение проводят в следующей последовательности:

- выбирают удобную эталонную плоскость (и убедитесь, что дивергенция постоянна, т.е. эталонная плоскость находится в дальнем поле);
- определяют угол расхождения в дальнем поле, θ. Перетяжка/сужение пучка находится на расстоянии, *r*, от эталонной плоскости (см. рисунок 7) по формуле

$$r = (d)/(2 \tan(\theta/2)),$$

где *r* — расстояние от эталонной плоскости до виртуальной точки фокуса малого источника.

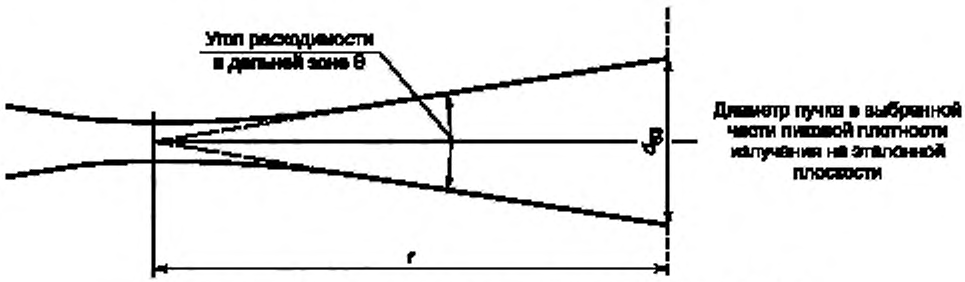


Рисунок 7 — Местоположение перетяжки пучка при Гауссовом пучке

В некоторых случаях (например, для линейных лазеров с цилиндрическими линзами или основных астигматических пучков) могут существовать несколько перетяжек пучка. Сведения, относящиеся к линейным лазерам приведены в таблице 1. Для астигматических пучков с перетяжками отдельных пучков в *x* и *y* (перпендикуляр к оптической оси) необходимо проанализировать и местоположения перетяжки пучка, и среднюю точку. Следует использовать наихудший случай.

Сканирующие пучки рассмотрены в 7.8.

7.5.3 Методы определения стягиваемого угла, α

7.5.3.1 Общие положения

Существуют несколько рекомендуемых методов определения стягиваемого угла видимого источника. Разные методы обеспечивают разные степени точности и объективно требуют разного объема работ и материальных затрат. Выбор используемого метода определяется необходимой степенью точности, т.е. приближением к MPE или AEL, и в некоторых случаях сложностью.

В настоящем стандарте рассмотрены следующие методы в порядке увеличения их сложности:

a) консервативный стандартный метод (по умолчанию) (7.5.3.2);

b) метод, используемый для простых источников, таких как поверхностные излучатели или полностью диффузные пучки (7.5.3.3);

c) метод измерения стягиваемого угла, используемый для произвольных источников (7.5.3.4);

d) метод распространения пучка (7.5.3.5).

7.5.3.2 Консервативный стандартный метод (по умолчанию)

Если стягиваемый угол, α, неизвестен и не существует метода его экспериментальной оценки, можно либо выполнить приемлемую оценку, подтверждаемую количественно, либо выбрать консервативное стандартное значение.

Стандартное значение (значение по умолчанию) стягиваемого угла, α, составляет 1,5 мрад; при α ниже этого значения AEL не меняется. Такое значение стягиваемого угла α определяет значения коэффициента C_6 = 1,0 и параметра T_2 = 10 с. Рассчитанные таким образом пределы могут быть искусственно заниженными, поэтому метод применять не опасно. Как указано выше, этот метод хорошо использовать в качестве первого приближения. Часто последующий анализ не требуется.

7.5.3.3 Метод, используемый для поверхностных излучателей или диффузных пучков

Для поверхностных излучателей, таких как диффузно пропускающие или отражающие лазерных пучки, можно использовать упрощенный анализ. Для таких источников реальный источник является таким же, как видимый источник, и поэтому для определения стягиваемого угла можно использовать размер реального источника. При таком рассмотрении размер s_{as} на рисунке 6a становится равным диаметру реального источника, а D_{acc} — аккомодационное расстояние глаза до источника становится равным реальному расстоянию между глазом и источником. Для определения стягиваемого угла, α, можно использовать следующую формулу

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

где $\tan^{-1}$ — величина, обратная тангенциальной тригонометрической функции.

Если значение стягиваемого угла, α, достаточно мало, тригонометрическую функцию можно упростить согласно выражению

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

где d_s — диаметр поверхностного излучателя;

r — расстояние между поверхностным излучателем и глазом (или измерительной апертурой).

При использовании оптики (например, встроенных линз, проекционных объективов или отражателя) размер и местоположение видимого источника изменяются. В этом случае требуется проведение более детального анализа, представленное в следующем подразделе.

7.5.3.4 Метод, используемый для произвольных источников

Общим методом определения стягиваемого угла α является изображение плоскости видимого источника на плоскости детектора, см. рисунок 8a. Плоскость объекта (отображаемая) — это плоскость видимого источника (в которой может быть либо объект физического источника, либо волновой фронт).

Корректной плоскостью изображения считают плоскость, когда получено самое маленькое (или самое опасное) изображение (при условии, что изображение находится за фокусом линзы).

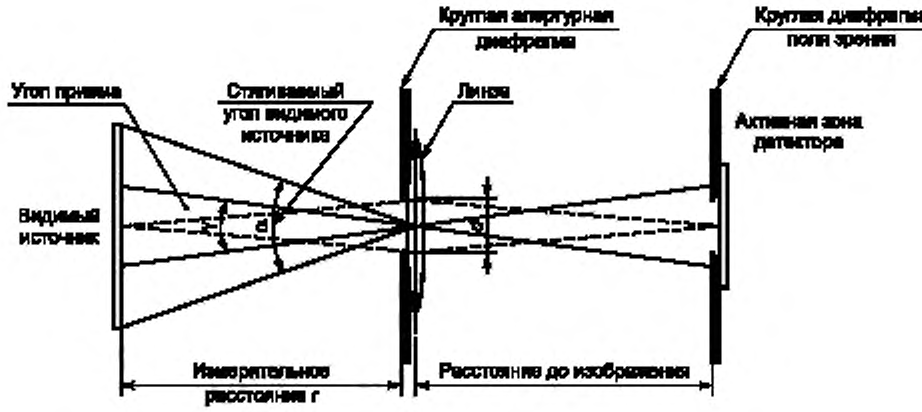


Рисунок 8a — Измерительная установка с изображением источника

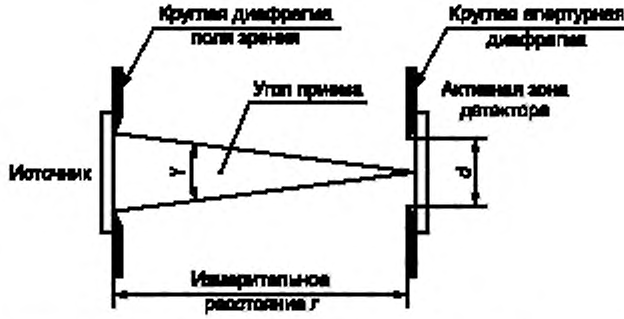


Рисунок 8b — Измерительная установка для доступного источника

Рисунок 8 — Измерительная установка видимых источников

Примечание — Изменение расстояния до изображения аналогично формированию разных плоскостей объекта-источника, т.к. каждая плоскость изображения соответствует «сопряженной» плоскости объекта. Это почти аналогично процессу, когда глаз меняет фокусное расстояние своей линзы, чтобы сформировать разные плоскости объекта на сетчатке — за исключением случая, когда расстояние до изображения в глазу фиксируется, а меняется фокусное расстояние линзы. Поскольку линзы с переменным фокусным расстоянием до настоящего времени производят только малых диаметров, проще сохранять фокусное расстояние фиксированным и менять расстояние до изображения.

Для объектов, находящихся на больших расстояниях и при параллельных лучах нормальный глаз сформирует четкое изображение на сетчатке при расслаблении. Если объект находится на более близком расстоянии или пучок лучей расходится, глаз для получения четкого изображения на сетчатке будет приспосабливаться и уменьшать фокусное расстояние своей линзы. Однако, если на глаз падает расходящийся пучок или пучок лучей, глаз не может уменьшить фокусное расстояние при расслаблении и поэтому не может сформировать четкое изображение на сетчатке. По этой причине при определении стягиваемого угла α не рассматривают расстояния до изображения меньше фокусного расстояния линзы, формирующей изображение. Тем не менее, если существует четкое изображение ближе фокусной плоскости линзы изображения, это указывает на то, что лазерная аппаратура имеет внешний фокус или перетяжку/сужение пучка. Приблизительную плоскость внешнего фокуса можно определить по местоположению плоскости изображения. В дальнейшем рассмотрении внешний фокус следует рассматривать как плоскость источника, и проводить измерения при внешнем фокусе как источнике-объекте.

Примечание — При сложных оптических источниках (например, встроенных дифракционных или голографических оптических элементах или цилиндрических линзах) может существовать несколько фокусов (видимых источников) вдоль оптической оси. Может потребоваться провести оценку всех этих фокусов, чтобы найти наиболее опасное расстояние наблюдения. С такими же трудностями сталкиваются и при сканирующих системах.

Определение диаметра источника и стягиваемого угла α проводится в нижеприведенной последовательности.

Для определения стягиваемого угла α согласно 7.5.3.3 используют диаметр изображения источника, рассчитанный по формуле

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

где d_{si} — диаметр отображенного источника,

r_i — расстояние наблюдения.

(Отметим, что знание фокусного расстояния линзы не требуется. Однако для точных измерений следует измерять расстояние наблюдения от второй главной плоскости линзы, формирующей изображение. Для тонких линз это будет центром линзы, но при толстых линзах вторая главная плоскость — это плоскость на стороне изображения линзы, от которой появляются все преломления.) Следует использовать линзу хорошего качества для недопущения погрешностей, обусловленных аберрацией.

При равномерном (прямоугольном) распределении диаметр легко определить по внешнему фактору пучка. При всех других распределениях могут существовать разные способы определения диаметра, например, половина максимума при полной ширине (FWHM), 1/e диаметра, $1/e^2$ диаметра, что дает очень разные результаты. Поэтому в перечислении d) подраздела 8.3 IEC 60825-1:2007 указан основной метод, который необходимо использовать для определения стягиваемого угла. Метод устанавливает, что следует использовать наиболее опасную область сетчатки глаза. На практике это означает, что:

1) при заданном расстоянии наблюдения угол приема, γ, меняется, определяя таким образом меняющуюся область приема;

2) излучение/эмиссию (энергию или энергетическую экспозицию) $Q(\gamma)$ измеряют при каждом значении γ внутри указанной области;

3) определяют AEL для каждого γ при $\alpha = \gamma$;

4) коэффициент/фактор опасности определяют для каждого γ, коэффициент/фактор опасности = $Q(\gamma)$/AEL(γ);

5) значение γ, при котором коэффициент/фактор опасности будет максимальным, является значением стягиваемого угла α, которое следует использовать.

При основном источнике диаграмма плотности потока излучения не должна быть симметрично круговой. В некоторых случаях более целесообразно менять угол приема, чтобы получить эллиптическую или прямоугольную форму области приема. При этом приведенная выше процедура остается в силе и площадь, определяющая наибольший коэффициент/фактор опасности, будет площадью, определяющей стягиваемый угол. Дополнительные рекомендации по некруговым источникам см. 7.5.4.

Угол приема γ можно менять с помощью диафрагмы поля зрения с изменяющимся диаметром апертуры. Позиция апертуры должна быть настраиваемой в плоскости изображения, и ее необходимо настроить для получения максимального показания при каждом значении диаметра диафрагмы поля зрения, γ. Для источника с неопределенной формой может быть полезной матрица устройств с зарядовой связью (CCD- матрица) для «захвата» изображения, т.к. это позволяет использовать анализ изображения. Таким образом, представленный выше процесс можно запрограммировать и выполнить на единичном изображении. Следует принять меры по устранению постороннего света, чтобы размер пучка не был переоценен.

Угол приема, γ, всегда должен ограничиваться снизу 1,5 мрад и сверху 100 мрад. Это можно использовать для определения размера детектора или CCD- матрицы, дискретности шагов диаметра диафрагмы поля зрения или разрешающей способности указанной матрицы и коэффициента увеличения используемой линзы, формирующей изображение.

Если плоскость видимого источника известна и доступна, можно использовать измерительную установку, приведенную на рисунке 8b.

Для условия 1 и условия 3 следует использовать измерительное расстояние наихудшего случая. Отметим, что местоположение видимого источника и стягиваемый угол в зависимости от измерительного расстояния могут изменяться. Следовательно, может потребоваться определить местоположение

и размер видимого источника при каждом измерительном расстоянии. Более подробная информация приведена в IEC 60825-1:2007.

7.5.3.5 Метод распространения пучка

Этот метод основан на волновой, а не на геометрической/лучевой оптике. Одним из важных параметров данного метода является то, что наиболее опасное расстояние наблюдения может быть больше 100 мм. Более подробный анализ данного метода не входит в область рассмотрения настоящего стандарта. Метод моментов второго порядка нельзя использовать, т.к. известно, что при его использовании происходит серьезная недооценка риска при определении размера стягиваемого угла α и пропускной способности апертуры.

7.5.4 Множественные/многолучевые источники и простые некруговые пучки

7.5.4.1 Общие положения

Не вся лазерная аппаратура имеет по одному излучателю или круговую диаграмму излучения. Примерами аппаратуры с множественными источниками являются многоканальные волоконно-оптические передатчики, многоэлементные знаки и сигналы, многосегментные знаки и символы и другие лазерные матрицы. Простые источники (например, диффузные пучки) могут иметь спорные формы, но все же их можно просто трактовать, если они являются гомогенными (см. 7.5.4.5). Для простого источника, такого как диффузный пучок, излучающий источник будет таким же как видимый источник в отношении местоположения и размера.

Теоретически, при многолучевых излучателях для определения наиболее опасного комплекта, необходимо рассмотреть все комбинации. Один небольшой яркий излучатель может являться или может не являться наихудшим случаем. Аналогично все источники вместе могут быть или могут не быть наиболее опасными.

В реальности требуется рассматривать не все комбинации, т.к. совершенно очевидно, что некоторые источники будут иметь меньшую интенсивность. Также, если предполагается, что все источники имеют одинаковую яркость, часто анализ можно упростить.

Линейные матрицы анализировать проще, чем двумерные. Тем не менее, можно выполнить двумерный анализ, чтобы определить наиболее опасный случай.

7.5.4.2 Процедура

Процедуру начинают с единичного источника. При применении матриц, единичным источником часто является малый источник (коэффициент $C_6 = 1$). Если это не так, можно использовать эту же процедуру, но с учетом конечного размера единичного источника.

Далее следует определить ряд подлежащих анализу источников. В каждом случае определяют стягиваемый угол комбинации источников (см. ниже). Это позволит рассчитать AEL для каждого случая. При анализе комбинации малых источников, местоположение видимого источника можно приблизительно определить, как местоположение реальной группы источников (при всех позициях в пучках), и для расчета стягиваемого угла (см. рисунок 9) следует использовать реальное расстояние между отдельными источниками. Необходимо рассматривать матрицы размером превышающем поле обзора(зрения) соответствующего стягиваемому углу $\alpha_{max} = 100$ мрад в любом направлении.

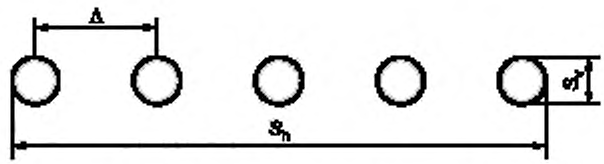
Затем выполняют измерение допустимого излучения (эмиссии) (мощности через установленный измерительный диаметр) при каждой комбинации источников и сравнивают результат с расчетным AEL для этой комбинации. Поле обзора(зрения) (или конус приема) в измерительной установке ограничивают (с помощью перестраиваемой апертуры поля (полевой апертуры), таким образом учитывается измеряемая мощность только конкретного источника, рассматриваемого в каждом случае (см. рисунки 10a и 10b).

7.5.4.3 Стягиваемый угол линейной матрицы

Для простоты предположим, что имеется линейная матрица одинаковых источников с одинаковым пространственным интервалом между ними (см. рисунок 9). Если какое-либо из этих условий не выполняется, анализ будет более сложным. Если группа двумерная и пространственные интервалы в двух направлениях разные, параметр Δ разбивается на Δ_x и Δ_y. Данный анализ применяют только к выходным сигналам в спектральной области ретинальной опасности (400 — 1400 нм).

На рисунке 9 показано как определить стягиваемый угол источника в виде линейной матрицы. Предполагая, что отдельные источники малы, стягиваемый угол вычисляют по размерам матричного источника. Стягиваемый угол для каждого ортогонального размера получаем путем деления на измерительное расстояние r (см. рисунки 10a и 10b). Эквивалентное значение стягиваемого угла, α, вычисляют путем усреднения двух ортогональных значений α's, α_v и α_h. Почти всегда для всех волоконно-оптиче-

ские жил и большинства лазерных видимых источников, имеющих размер менее 0,15 мм (соответствует минимальному значению α, равному 1,5 мрад при расстоянии 100 мм) в расчете S_v часто используют минимальное стандартное значение (по умолчанию). Согласно IEC 60825-1:2007 перед расчетом среднего арифметического матрицы, стягиваемый угол, α, в каждом ортогональном направлении (α_v или α_h) сводится к значению $\geq \alpha_{min}$ ($и \leq \alpha_{max}$).



Δ — расстояние между центрами; n — количество оцениваемых источников: S_0 — размер единичного источника;
S_v — вертикальный размер = S_0 или 1,5 мрад, в зависимости от того, что больше;
S_h — горизонтальный размер = $[S_0 + (n - 1) \Delta]$ или 1,5 мрад, в зависимости от того, что больше;
$\alpha_v = S_v / r$ и $\alpha_h = S_h / r$, $\alpha = (\alpha_v + \alpha_h) /2$.

Рисунок 9 — Размер видимого источника линейной матрицы

Значения параметра T_2 и коэффициента C_6 может быть определено из значения стягиваемого угла, α, для каждой комбинации источников. Используя это значение и коэффициенты C_4 и C_7, получаемые из длины волны излучения, можно рассчитать AEL на каждый источник. Если оцениваемая позиция находится в дальнем поле и можно предположить, что пучок от каждого единичного источника является Гауссовым, диаметр пучка единичного источника при каждом расстоянии можно определить из дивергенции пучка, и можно рассчитать часть излучаемой мощности, накапливаемой в апертуре 7 мм с использованием параметра взаимодействия (см.7.8.8). Такую оценку можно использовать для определения допустимой мощности на канал при каждой комбинации, минимальное значение которой будет наиболее жестким случаем.

В таблице 2 представлен пример одномерной матрицы из четырех волоконно-оптических источников с одной средней мощностью и равным пространственными интервалами между ними. Наиболее ограничительный случай будет определен минимальным отношением AEL/P указанном в последнем столбце.

Т а б л и ц а 2 — Матрица из четырех источников

Количество источников, n	Размер видимого источника, мм	Стягиваемый угол, мрад	AEL оцениваемого класса, мВт	Доступное(ая) излучение/ эмиссия, мВт	AEL/ коэффициент мощности
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

Если мощность или энергия отдельных источников разная или источники, разнесены на разные пространственные расстояния, количество случаев, подлежащих анализу, увеличивается. Например, будут три возможные комбинации из двух источников в рамках матрицы из четырех источников. Возможная степень упрощения будет определяться геометрией и подобием источников.

Частное от деления парных значений AEL оцениваемого класса на доступную эмиссию (P) должно быть больше единицы для всех оцениваемых классов. В этом случае аппаратуру можно отнести к оцениваемому классу.

7.5.4.4 Сложность множественных матричных источников

При количестве источников n для определения наиболее ограничительного случая следует рассмотреть все случаи при количестве источников от 1 источника до n. Обычно вводят упрощение, а именно, что все источники излучают одинаковую среднюю мощность, такую же как источник с максимальным излучением. Такой вариант рассмотрен в настоящем пункте. В ином случае анализ может быть более сложным, но, может быть, самое плохой вариант при этом состоит в том, что расчетное ограничительное условие худшего случая не будет полностью ограничительным. Если матрица является двумерной (не обязательно находящейся на прямой линии или кривой), может быть рассмотрено несколько схем расположения для конкретного промежуточного количества источников (от 1 до n).

Подлежащие оценке классы определяют путем рассмотрения перестраиваемой круговой апертуры в плоскости излучения. Минимальный диаметр излучающей апертуры источника вмещает один источник. Максимальный диаметр излучающей апертуры источника соответствует полному углу приема 100 мрад при апертуре измерения 7 мм. Стягиваемый угол, α, определяют по размерам матричного источника, подлежащего оценке, и измерению доступного излучения (эмиссии) через апертуру 7 мм. Измеренное доступное излучение (эмиссию) сравнивают с AEL, соответствующим данному стягиваемому углу, α. Доступное излучение (эмиссия) не должна превышать AEL заданного класса при любой возможной комбинации источников.

Примечание — Если для такой оценки не указанно, что измерительная апертура должна составлять 7 мм (например, при использовании условия 1 для матрицы коллимированных источников), используйте подходящую апертуру и расстояние.

Геометрия при проведении измерений приведена рисунках 10a и 10b. Расчеты зависят от стягиваемого угла, α, (оценивают комбинацию источников). Следовательно, определение соответствующих значений стягиваемого угла, α, в случае множественных источников весьма критично. При условии, что каждый единичный источник является малым источником, стягиваемый угол, α, соответствует конусу приема, представленному на рисунке 10a или 10b. (Для случая единичного источника достаточно считать, что минимальное стандартное значение (по умолчанию) α = 1,5).

a) при протяженном источнике может быть показано, что условие 3 в IEC 60825-1:2007 будет более ограничительным, чем условие 2. Следовательно, стягиваемый угол видимого источника, α, можно определить путем деления (средних) размеров источника на измерительное расстояние 100 мм (см. рисунки 9 и 10).

b) затем необходимо измерить или рассчитать мощность, накопленную в измерительной апертуре, для оцениваемой конфигурации матрицы. Если измерение проводить нецелесообразно и если известна дивергенция пучка от источника (1/e), рассчитывают диаметр диаграммы пучка в измерительной апертуре. Если дивергенция неизвестна, в качестве консервативного минимального значения можно использовать стягиваемый угол единичного источника. Затем рассчитывают мощность той части пучка, которая накапливается в апертуре 7 мм. (Параметр взаимодействия см. 7.8.8). Если пучок перезаполнит такую апертуру, то при определении полной допустимой мощности будет также учтена и его непереданная часть.

c) на основании части пучка, которая накоплена в апертуре 7 мм, и значения стягиваемого угла, α, можно рассчитать оценки для пределов классов и полную допустимую мощность при каждой предполагаемой конфигурации. Предел класса для матрицы будет определяться конфигурацией, при которой полная допустимая мощность, деленная на количество источников, минимальна.

7.5.4.5 Простые некруговые источники

Предыдущее рассмотрение относилось только к круговым симметричным источникам. Если источник некруговой, эффективный стягиваемый угол задается формулой

$$\alpha_{x+y} = (\alpha_x + \alpha_y)/2,$$

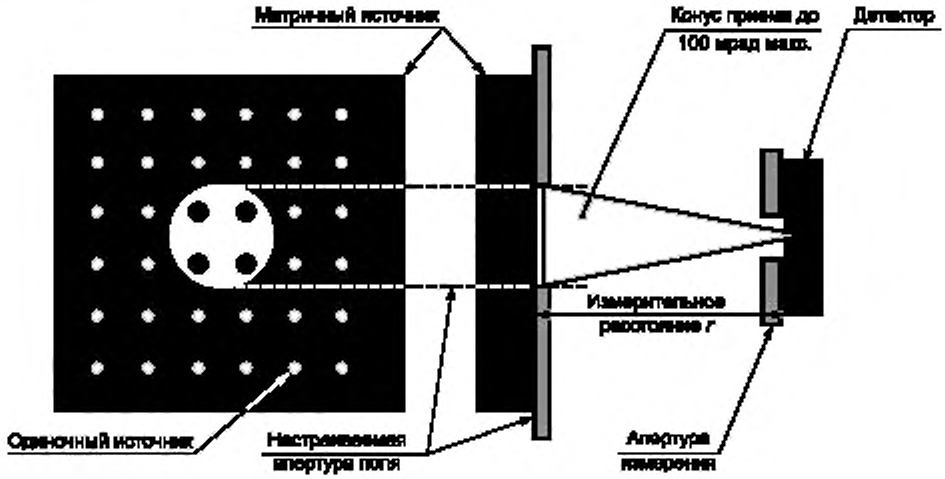
где α_x и α_y — стягиваемые углы по двум ортогональным направлениям, как показано на приведенном ниже рисунке 11.

Стягиваемый угол больше α_{max} или меньше α_{min} должен быть приведен к значениям α_{max} или α_{min} соответственно, до расчета среднего значения.

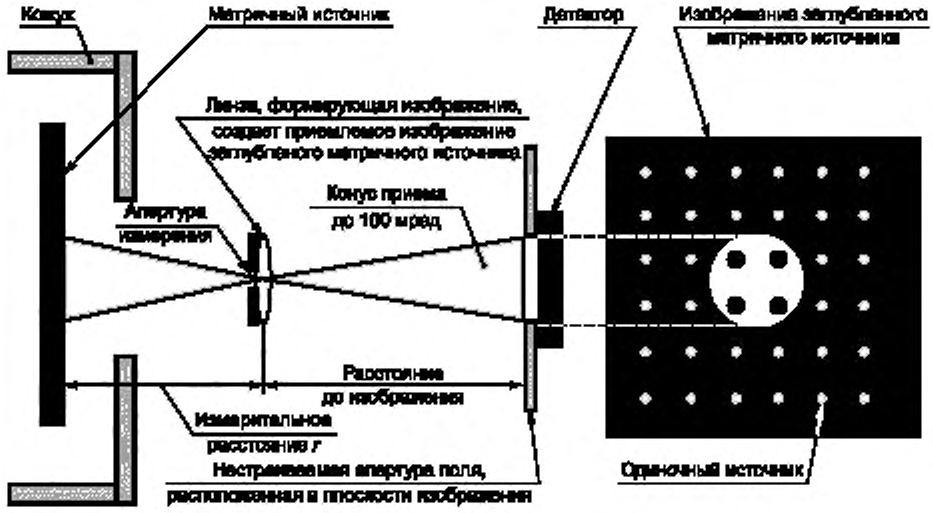
Для прямоугольного источника α_x и α_y — большой и малый размеры реальных источников.

Для эллиптического источника α_x и α_y — удвоенные большая и малая полуоси эллипса.

Измерение стягиваемого угла можно выполнить согласно процедуре, аналогичной процедуре, приведенной в 7.5.4.3.



10a -- Геометрия измерения для доступного источника



10b -- Геометрия измерения для заглубленного источника

Рисунок 10 — Геометрия измерений

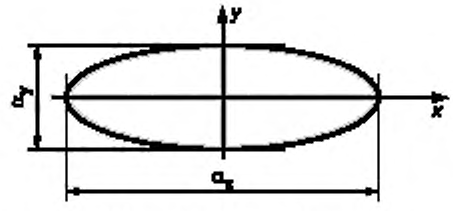


Рисунок 11 — Эффективный стягиваемый угол простого некругового источника

7.6 Длительность излучения/эмиссии

7.6.1 Общие положения

Согласно IEC 60825-1:2007 8.3 перечисление e) установлены три временные базы классификации:

a) 0,25 с для длин волн видимого диапазона для классов 2, 2M и 3R;

b) 100 с для всех случаев, исключенных из применения согласно перечислений 1) и 3);

c) 30000 с для намеренного долгосрочного наблюдения и для опасности в ультрафиолетовой области.

В области ретинальной опасности для дин волн от 400 до 1400 нм существует исключение для тепловой опасности. Если параметр T_2 установлен в соответствующей таблице, в которой приведены формулы для расчета пределов, рассчитайте этот параметр и используйте его, где уместно. Значения параметра T_2 изменяются от 10 с для малых источников до стандартного значения (по умолчанию) 100 с для больших источников (см. 8.3 перечисление f) в IEC 60825-1:2007).

7.6.2 Длительность импульса

Для определения соответствующих пределов MPE (максимально допустимого облучения) или AEL (предела допустимого излучения/эмиссии) часто необходимо измерить длительность единичного импульса, как указано в 7.4.3.2. Такой подход справедлив не только для лазерных систем, излучающих только в режиме единичного импульса, но и лазерных систем, которые излучают серии или последовательности импульсов. Сведения о ширине импульсов, также как многие другие параметры могут быть получены от изготовителя лазерной аппаратуры. Оптимальным контрольно-измерительным оборудованием для измерения ширины импульса, при необходимости, является осциллограф.

7.6.3 Частота повторения импульсов

Частоту повторения импульсов (PRF) следует определить для расчета количества импульсов, переданных в течение заданного времени облучения (или продолжительности классификации), и, следовательно, для определения коэффициента C_5. Для расчета соответствующего MPE (или AEL) следует использовать коэффициент коррекции. После определения частоты повторения импульсов, проводят расчет количества импульсов, проходящих в течение времени облучения, который является произведением PRF и времени облучения (полное рассмотрение PRF см. 7.4.3.3).

7.7 Условия измерений

7.7.1 Общие положения

Конкретные условия измерений применяют при классификации, а другие условия — только при оценке лазерной опасности. Условия, которые использовались при оценке лазерной опасности, используют и в расчетах номинального опасного для глаза расстояния (NOHD) и оптической плотности (OD), необходимых для защиты.

7.7.2 Условия измерений при классификации

Информация о соответствующих апертурах измерений и размещении при измерениях в целях классификации приведены в таблице 11 IEC 60825-1:2007.

Измерительные условия включают:

a) диаметр апертуры измерения;

b) расстояние между апертурой измерения и источником или видимым источником;

c) угол приема устройства измерения излучения;

d) предельный угол излучения/эмиссии (стягиваемый угол видимого источника) измеряемого излучения.

Следует принять меры по ограничению измеряемого излучения до излучения в главном лепестке. Должно быть исключено любое внеосевое излучение, которое приходит на детектор путем отражения или рассеяния от поверхностей системы, не относящихся к измерению.

При малых источниках, диаметр которых значительно меньше ограничительной апертуры, для классификации требуется измерить только полную мощность.

Для малых источников при Условии 2 измерительное расстояние от опорной точки должно составлять 70 мм. При излучении в области длин волн от 400 до 1400 нм необходимость измерений при Условии 2 (наблюдение глазом через лупу/увеличительное стекло) можно существенно уменьшить,

если признать, что во многих случаях наиболее жестким будет Условие 3 (наблюдение невооруженным глазом).

Условие 2 можно не рассматривать, если можно показать, что видимый источник является протяженным при наблюдении невооруженным глазом (α > 1,5 мрад) на расстоянии 100 мм от опорной точки.

Если источник при наблюдении невооруженным глазом не является протяженным (т.е. стягиваемый угол видимого источника менее 1,5 мрад на расстоянии 100 мм от опорной точки) или если стягиваемый угол видимого источника не определен (упрощенная оценка по стандартному значению), Условие 2 должно быть рассмотрено, т.к. оно может быть более жестким, чем Условие 3.

При опциональном применении Условия 2 к протяженным источникам (рисунок 5 IEC 60825-1:2007) различают следующие случаи:

a) если установлено, что стягиваемый угол видимого источника меньше 1,5 мрад при расстоянии 100 мм от опорной точки, но кажется расширенным (α > 1,5 мрад) (из-за увеличения создаваемого глазной лупой) при использовании Условия 2 для протяженных источников (рисунок 5 IEC 60825-1:2007), то Условие 2 для протяженных источников может быть менее жестким, чем упрощенное Условие 2, и его можно применить для испытания. Если используют Условие 2 для протяженных источников (см. рисунок 5 IEC 60825-1:2007), также необходимо определить соответствующий стягиваемый угол с использованием этой измерительной установки. Следует отметить, что в данном случае Условие 3 (когда коэффициент C_6 = 1) может быть более жестким, чем Условие 2 для протяженных источников (рисунок 5 IEC 60825-1:2007), и его необходимо рассматривать.

b) если установлено, что стягиваемый угол видимого источника меньше 1,5 мрад при расстоянии 100 мм от опорной точки, и также меньше 1,5 мрад при использовании Условия 2 для протяженных источников (рисунок 5 IEC 60825-1:2007), применимо упрощенное Условие 2 (таблица 11 IEC 60825-1:2007).

Примечание — При упрощенной оценке по стандартному значению (по умолчанию), приведенной в 9.3.2 IEC 60825-1:2007, нет необходимости определять стягиваемый угол видимого источника. Для упрощения анализа можно допустить, что видимый источник является малым источником, т.к. это будет наиболее жестким случаем. Следует использовать условия упрощенных измерений, приведенные в таблице 11 IEC 60825-1:2007.

Для протяженных источников необходимо определить стягиваемый угол видимого источника с наиболее опасного измерительного расстояния 100 мм или более от видимого источника для оценки на соответствие Условию 3 из таблицы 11 IEC 60825-1:2007 и с расстояния 70 мм от видимого источника для оценки соответствия Условию 2. Если видимый источник заглублен более чем на указанное измерительное расстояние согласно IEC 60825-1, оценку для Условий 2 или 3 выполняют в ближайшей точке доступа человека. Стягиваемый угол и доступное излучение/эмиссия являются парными величинами, которые определяют на одинаковом расстоянии.

При оценке на соответствие Условию 1 из таблицы 11 IEC 60825-1:2007 установленным минимальным расстоянием будет расстояние 2 м от ближайшей точки доступа человека. Если для расчета величины коэффициента C_6 > 1 необходимо использовать стягиваемый угол, требуется рассматривать все расстояния, пока не будет установлено/обнаружено условие максимальной опасности. При некоторых оценках при Условии 1 можно умножить стягиваемый угол на коэффициент 7, чтобы учесть увеличенное изображение и усиление типовых оптических устройств. В таких случаях при Условии 1 максимальным углом, в котором будет собираться лазерная энергия, будет угол (100 мрад)/7 = 14,3 мрад. Однако коэффициент умножения может быть меньше 7 (относительно более подробной информации по коэффициенту умножения см. раздел 9 IEC 60825-1:2007).

При больших источниках нет необходимости «собирать» энергию от какой-либо части источника вне этих углов, так как максимальный угол приема при измерениях излучения составляет для тепловых оценок 100 мрад, а для фотохимических оценок — 110 мрад.

7.7.3 Условия измерений для оценки опасности

7.7.3.1 Общие положения

Измерения для оценки опасности включают измерения мощности/энергии, плотности потока излучения и энергетической экспозиции (количества облучения), диаметра пучка и его дивергенции при минимуме. В приведенных ниже пунктах приведена информация о таких измерениях.

7.7.3.2 Измерения мощности/энергии

Полная мощность излучения или полная энергия излучения, излучаемая рассматриваемым лазером, является еще одним критичным параметром, который необходимо измерять при оценке лазерной

опасности и классификации лазеров. Мощность излучения, измеряемая в ваттах, относится к лазерам, с непрерывной волной (CW), когда уровень излучаемой энергии во времени остается постоянным. Энергия излучения, измеряемая в джоулях, относится к лазерам, излучающим единичный импульс или серию импульсов.

Для измерения мощности или энергии излучения наиболее часто используют радиометр с детектором, соответствующим длине волны лазера. В отдельных случаях наиболее эффективным устройством для измерения этих параметров будет калориметр. При измерении мощности или энергии лазерного пучка площадь детектора должна быть больше площади пучка, чтобы можно было уверенно охватить весь пучок целиком. Это подразумевает необходимость предварительной осведомленности относительно приблизительного диаметра пучка. В большинстве случаев диаметр пучка указывает изготовитель. Также приблизительный диаметр лазерного пучка относительно площади детектора можно определить визуальным осмотром невооруженным глазом у лазеров в диапазоне видимых длин волн или с помощью инфракрасных видеоустройств, фосфоресцирующих карт или тепловых жидкокристаллических пластин у лазеров, работающих в инфракрасном или ультрафиолетовом диапазоне.

Метод измерения энергии излучения лазера единичных импульсов по существу такой же, что и метод измерения мощности излучения с обеспечением попадания в детектор всего пучка целиком. Приходящуюся на один импульс энергию лазера, излучающего множество или серию импульсов, можно измерить непосредственно с помощью измерителя энергии излучения или рассчитать по пиковой мощности и ширине импульсов. Произведение пиковой мощности и ширины импульса определяет приблизительное значение области, расположенной под графиком мощности в зависимости от времени. Однако существуют радиометры, которые могут выполнять интегрирование мощности по времени, что упрощает данное измерение.

Несмотря на то, что измерение энергии или мощности излучения считается прямым/непосредственным, по многим причинам могут возникать потенциальные погрешности. Как уже упоминалось, радиометрические детекторы/приемники реагируют только на часть оптического спектра. Используя детектор для измерения лазера, излучающего длину волны, находящуюся на границах диапазона спектральной характеристики чувствительности детектора или вне его, можно получить показание, которое с большой долей вероятности будет ниже реального излучения. И с другой стороны, превышение номинального максимального значения средней мощности или энергии импульса, рекомендованного изготовителем детектора, приведет к насыщению или поломке детектора, что, естественно, приведет к ошибочному результату. Простая проверка на насыщение — это уменьшить входной сигнал детектора за счет использования фильтра нейтральной плотности (фотографического или оптического фильтра, одинаково поглощающего свет всех длин волн, уменьшающего свет без изменения цвета) или затемнения на порядок пучка через апертуру и определить степень соответствия показания. Применение квантовых приемников излучения также иногда ограничивается частотой повторения импульсов, которую они могут воспринимать. Если частота повторения импульсов лазера превышает рекомендованное изготовителем максимальное значение, то тоже может идти речь о насыщении или поломке.

7.7.3.3 Плотность потока излучения и энергетическая экспозиция

В некоторых случаях невозможно захватить весь пучок целиком в рамках площади детектора. В зависимости от применения лазерный пучок может расширяться так, что его диаметр будет больше чем у имеющегося детектора. Такая ситуация не обязательно неблагоприятна для анализа или классификации опасности. Максимально допустимое облучение (MPE) задают в единицах плотности потока излучения или энергетической экспозиции (количества облучения), следовательно, при этом виде измерения получают прямое сравнение. Некоторые приборы специально разработаны для выдачи показаний в единицах плотности потока излучения или энергетической экспозиции (количества облучения) за счет деления мощности или энергии, накопленной в активной зоне детектора. Плотность потока излучения и энергетическая экспозиция (количество облучения) также можно рассчитать путем деления показания детектора (мощности или энергии) на площадь лазерного пучка.

7.7.3.4 Диаметр пучка

Диаметр пучка допускается измерять на выходе лазера, когда установлено опасное расстояние. Определение параметра при рассмотрении в уравнении дальности действия, это номинальное окулярное опасное расстояние.

Для лазерных пучков с круговой симметрией для определения диаметра пучка можно использовать метод апертуры. Регулируемую круговую апертуру, центрированную на оптической оси пучка,

помещают между детектором и лазерным источником. Апертуру раскрывают, чтобы проходил весь полный пучок, и получают мощность или энергию. Затем апертуру уменьшают до получения показания, составляющего 63,2 % от полного показания. Диаметр апертуры будет соответствовать 1/e диаметра лазерного пучка, если пучок имеет Гауссов профиль.

Существует и другой апертурный метод для измерения диаметра пучка, который можно применять к Гауссовым пучкам с круговой симметрией. В этом методе используют небольшую фиксированную круговую апертуру диаметром D_{fa}, центрированную на оптической оси лазерного пучка. Через эту апертуру измеряют мощность Φ_d. Затем ее представляют в отношении к полной мощности лазера, а именно как Φ_d/Φ_0. При условии, что пучок имеет Гауссово распределение и отношение меньше 80 %, диаметр пучка d можно приблизительно выразить как

$$d_{63} = \sqrt{\frac{-D_{fa}^2}{\ln\left(\frac{\Phi_d}{\Phi_0}\right)}}.$$

Для распределения с плоской вершиной диаметр пучка выразить как

$$d_{100} = D_{fa}\sqrt{\frac{\Phi_0}{\Phi_d}}.$$

Еще одним способом определения диаметра Гауссова пучка является измерение с помощью узкой щели, сканируемой по пучку. Для обеспечения наибольшей точности ширина щели должна быть существенно меньше размера пучка. Щель находится между детектором и лазерным источником. Когда щель сканируется по пучку, снимают показания детектора, при этом диаметр пучка — это расстояние между точками на разных концах диаметра в которых показание детектора через щель, составляет 36,8 % от максимального показания. Этот способ удобен при пучках с некруговым профилем, когда ось сканирования можно вращать для измерения диаметров пучка при разных осях.

В аналогичном методе вместо щели используют точечную апертуру. Принцип остается тем же; точечную диафрагму помещают между лазером и детектором. Снимают показание плотности потока излучения через апертуру при сканировании апертуры по пучку. Как и в методе с использованием щели, диаметр пучка — это расстояние между точками с разных сторон от центра пучка, в которых показания плотности потока излучения составляют 36,8 % от максимального показания, снятого в центре пучка.

Для измерения диаметра пучка также можно использовать такие средства как камеры на приборах с зарядовой связью (CCD-камеры) и пироэлектрические матрицы. Такие устройства замеряют два полных пространственных сечения пучка. Аналогично методу точечной апертуры в данном методе замеряют полный профиль пучка при одном размещении плоскости. Большинство таких устройств управляется компьютером, и их можно программировать для выдачи диаметра в точках 1/e, $1/e^2$ или d_u.

Достаточно хорошую оценку диаметра пучка можно получить за счет визуальной проверки. Самым простым способом является установка масштабной линейки в пучок у выхода и считывание результата измерения. Естественно, если лазер является прибором инфракрасного диапазона, для того, чтобы увидеть пучок, потребуется устройство просмотра инфракрасного диапазона. В качестве альтернативы можно измерять рассеянное или испускаемое излучение от материала мишени, находящейся в пучке. Такими мишенями могут быть фосфоресцирующие карты, термические пластины на жидких кристаллах или просто лист бумаги. Из-за видимого/кажущегося размера пучка, изменяющегося в зависимости от количества окружающего света во время измерения, в обоих методах могут быть погрешности. Для лазеров с большей мощностью можно измерять диаграмму выгорания или экспозиции от материала мишени. Для лазеров с большей мощностью требуется, чтобы материал мишени был более жестким в зависимости от мощности лазера. Примерами такого материала могут быть фотографические пленки, термобумага, поликарбонат, акрил, плексиглас или пластмасса и медицинский шпатель для отдавливания языка или аналогичный кусочек дерева. Измерение таких диаграмм горения или экспозиции будет несколько точнее, чем просто наблюдение лазерного пятна и его измерение, но все же совершенно точным его не назовешь.

7.7.3.5 Дивергенция пучка

Измерение дивергенции пучка не всегда является необходимым параметром для классификации, но для полного анализа опасности этот параметр необходимо определить количественно, т. к. он влияет на расчеты опасного расстояния. Для определения дивергенции пучка существует ряд методов. Несколько из них приведены ниже:

a) одним из методов измерения дивергенции является метод измерения диаметра в двух точках. Первоначально измеряют диаметр пучка в месте, где он самый маленький, т.е. либо в перетяжке пучка, либо вблизи выходной апертуры лазера. Затем проводят другое измерение диаметра в какой-либо точке направления распространения. После этого измеряют расстояние между точками измерения. Дивергенция определяется как частное от деления корня квадратного из разности квадратов диаметров в двух точках на расстояние между точками. Для Гауссовых пучков это можно выразить в цифровом виде с помощью формулы

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

где r_0 — местоположение перетяжки пучка.

b) подобный метод состоит в выборе двух точек на оси распространения, при диаметре пучка намного больше наименьшего диаметра на траектории пучка (при этом наименьший диаметр — это перетяжка пучка или диаметр у выходной апертуры). Эту область пучка называют дальним полем. Измеряют диаметры и разделительное расстояние между выбранными точками. Дивергенция определяется как частное от деления разности диаметров на расстояние между точками. Математически это представляется следующим уравнением

$$\phi = \frac{d_2 - d_1}{r_2 - r_1}.$$

Это достаточно упрощенный прямой метод, но имеющий недостатки. Для обеспечения точности, необходимы условия дальнего поля, как сказано выше. Дальнее поле — это область пучка, в которой значения плотности потока излучения подчиняются закону обратных квадратов и уменьшаются с зависимостью $1/r^2$, аналогично некогерентному источнику. У некоторых лазеров таким дальним полем может быть непосредственно расстояние от выходной апертуры лазера, иногда простирающееся на километры.

c) при наличии проблемы с пространством, существует другой метод определения дивергенции пучка для Гауссовых лазерных пучков, в котором необходимо использовать длиннофокусные линзы и апертуру. Важно, чтобы качество используемых длиннофокусных линз было очень высоким. Дивергенцию пучка можно рассчитать по диаметру сфокусированного лазерного пучка в фокальной точке линзы, соответствующей длине волны лазера. Геометрическое фокусное расстояние линзы зависит от конкретной рассматриваемой длины волны. В некоторых случаях при типовых значениях длины волны эти фокусные расстояния могут определяться изготовителем. Однако, если необходимо дать численную оценку фокусного расстояния для конкретной длины волны, то можно использовать стандартную лампу и узкополосный фильтр. Когда лампа находится на определенном расстоянии s_1 от линзы, изображение появляется на расстоянии s_2 с другой стороны линзы. Если расстояние до изображения s_2 определено, для расчета фокусного расстояния линзы для конкретной длины волны можно использовать приведенное ниже уравнение

$$\frac{1}{s_1} + \frac{1}{s_2} = \frac{1}{f}.$$

В физической установке для такого измерения требуется, чтобы линза находилась перед лазером. Местоположение линзы с точки зрения ее фокусного расстояния несущественно, но все же линза не должна помещаться в перетяжку пучка. Измерение опорной мощности или энергии лазерного пучка следует проводить после его прохождения через линзу. Его нельзя выполнять непосредственно в фокальной точке, т.к. сфокусированный пучок может повредить детектор. Затем для измерения диаметра пучка небольшую апертуру помещают в фокусную плоскость линзы. Измерение выполняют на фокусном расстоянии линзы, что не является обязательным, если определен наименьший размер пятна. Измеренная энергия, проходящая через апертуру, должна составлять 63,2 % от опорного показания, чтобы соответствовать точкам 1/e. Если геометрическое фокусное расстояние известно или определе-

но и диаметр сфокусированного пучка измеряют в фокусной точке, то дивергенцию можно рассчитать, используя следующую формулу

$$\phi = \frac{d_{fp}}{f}.$$

d) для лазеров с Гауссовым профилем и отсутствии проблемы с пространством, для определения дивергенции пучка можно применять простой метод с использованием радиометра. В этом методе сначала необходимо измерить полную мощность или энергию. Затем проводят измерение максимизированной плотности потока излучения или энергетической экспозиции (количества облучения) (E_{max} или H_{max}) в дальнем поле, где диаметр пучка существенно больше его исходного диаметра. Измерение плотности потока излучения следует выполнять вблизи центра пучка, и головка детектора должна быть значительно меньше диаметра пучка в этой точке. Дивергенцию, ϕ, как соотношение между значением полной мощности или энергии (Φ или Q), максимизированной плотностью потока излучения или энергетической экспозицией (количеством облучения) (E_{max} или H_{max}), и расстоянием r, при котором проводилось измерение максимизированной плотностью потока излучения при определении дивергенции можно рассчитать по формулам

$$\phi = \frac{\sqrt{\frac{4\Phi}{\pi E_{max}}}}{r} \quad \text{или} \quad \phi = \frac{\sqrt{\frac{4Q}{\pi H_{max}}}}{r}.$$

7.8 Сканирующие пучки

7.8.1 Общие положения

Во многих применениях простой расчет с допущением, что коэффициент $C_6 = 1$ и длительность импульса соответствует длительности сканирования пучка по всей апертуре измерения при расстоянии 100 мм от вершины сканирующего пучка обеспечивает классификацию, отвечающую требованиям изготовителя. При желании иметь менее жесткий (ограничительный) предел можно использовать приведенный в данном разделе метод определения более точного AEL, что позволит провести классификацию по более низкому классу или увеличить выходную мощность при той же классификации. Примеры сканирующих пучков приведены в приложении А.

Примечание — Как установлено в 9.3 IEC 60825 -1:2007 к сканирующим пучкам Условие 1 и Условие 2 не применяют.

7.8.2 Стационарный стягиваемый угол, α_s

Если предположить, что система сканирования заблокирована, а глаз сфокусирован на конкретном расстоянии Z, стационарным стягиваемым углом будет стягиваемый угол с диаметром пучка d при расстоянии Z. На рисунке 12 приведена оптическая схема заблокированной сканирующей системы, где местоположение точки, воспринимаемой глазом, находится за вершиной сканирующего пучка

$$\alpha_s = d/Z,$$

где d — диаметр пучка в точке фокуса глаза;

Z — расстояние от измерительной апертуры до местоположения точки фокуса глаза.

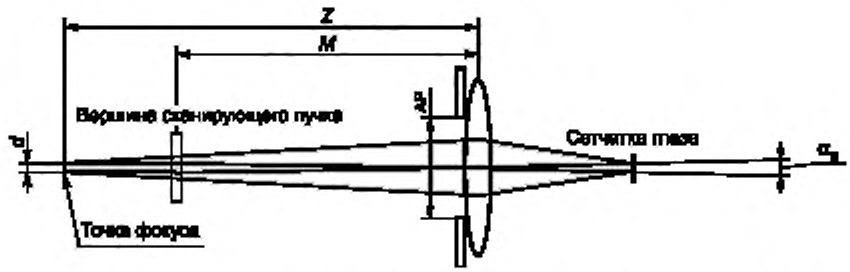


Рисунок 12 — Изображение стационарного видимого источника, находящегося за вершиной сканирующего пучка

Примечания

1 Профиль плотности потока излучения ретинального изображения прямо пропорционален только профилю плотности потока излучения пучка в точке аккомодации, когда все лучи, формирующие пучок, реально попадают в апертурную диафрагму АР. В других случаях для определения стягиваемого угла необходимо использовать модель «эквивалента глаза» или экспериментальную установку.

2 Стягиваемый угол определяется в соответствии с 8.3 перечисление d) IEC 60825-1:2007 см. также 7.5.3 настоящего стандарта. Для Гауссова пучка при определении стягиваемого угла можно использовать диаметр, охватывающий 63 % энергии (d_{63}).

7.8.3 Длительность сканирующего импульса, T_p

На рисунке 13 представлена оптическая система со сканированием при двух разных значениях времени (t_0 и t_1), соответствующих моменту, когда центр пучка достигает краев измерительной апертуры (АР).

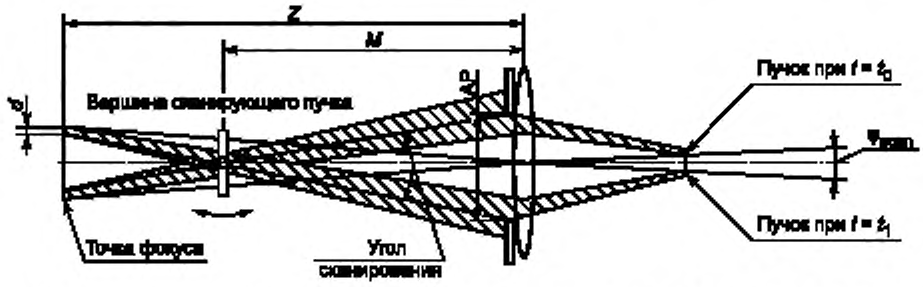


Рисунок 13 — Изображение сканирующего видимого источника, находящегося за вершиной сканирующего пучка

Примечание 1 — Для упрощения оптической схемы элемент сканирования представлен как прозрачный/светопроницаемый, а не отражающий элемент.

Длительность импульса, используемого для классификации, при постоянной угловой скорости будет выражена уравнением

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

где ω — угловая скорость сканирующего пучка, рад/с,

AP — диаметр измерительной апертуры, определяемый из таблицы 11 IEC 60825-1 (например, 7 мм при λ < 1400 нм);

M — расстояние от измерительной апертуры до вершины сканирования.

Примечание 2 — Для упрощения уравнений используют малоугловую аппроксимацию, так как M намного больше AP.

При увеличении расстояния от элемента сканирования, угол, стягиваемый измерительной апертурой, уменьшается, что ведет к уменьшению длительности импульса. Это может не происходить, когда пучок больше измерительной апертуры или функция скорости сканирования является нелинейной. Относительно измерения длительности импульса и частоты повторения импульсов см. 7.4.3 и 7.6.

7.8.4 Сканирующий стягиваемый угол, α_{scan}

Сканирующий стягиваемый угол (α_{scan}) используют для расчета параметра C_6 при сканирующих пучках, когда угол сканирования охватывает линию или площадь, которая больше зрачка. Если сканирование остается в пределах зрачка, пучок можно рассматривать как непрерывную волну (CW), или необходимо произвести более подробный анализ. Если глаз не сфокусирован на вершине сканирующего пучка, пучок формирует на сетчатке линию сканирования, которая стягивает угол φ_{scan}. Зависимость угла φ_{scan} от размера измерительной апертуры, расстояния, и точки фокуса глаза выражается формулой

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

Примечания

1 Вершина сканирующего пучка необязательно находится на поверхности сканирующего элемента, но часто это бывает именно так.

2 Данная формула справедлива вне зависимости от того, с какой стороны от вершины сканирующего пучка находится точка фокуса глаза.

Угол φ_{scan} нельзя использовать для определения стягиваемого угла по направлению сканирования при расчете коэффициента C_6, так как при коротком периоде времени вся энергия направлена в одну точку сетчатки глаза. Однако при длительностях менее T_i, указанных в таблице 3 IEC 60825-1:2007 (например, $18 \cdot 10^{-6}$ с при 400 нм < λ < 1050 нм), опасность не зависит от формы пучка, и допускается интегрирование. Соответственно, сканирующий стягиваемый угол может увеличиться на угол φ_T (часть угла φ_{scan}, соответствующую перемещению пучка по сетчатке за время T_i), задаваемый формулой

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

Подставляя уравнения для T_p и φ_{scan}, получаем:

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

Сканирующий стягиваемый угол α_{scan} задается формулой

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

где α_s — стационарный стягиваемый угол вдоль оси сканирования.

Примечание 3 — Если α_s меньше α_{min}, его не заменяют α_{min}.

При любой точке фокуса глаза параметр C_6 можно вычислить по формуле

$$C_6 = \frac{\alpha_{nscan} + \alpha_{scan}}{2\alpha_{min}},$$

где α_{scan} — стягиваемый угол вдоль не сканирующей оси или α_{min}, в зависимости от того, что больше.

7.8.5 Двунаправленное сканирование

Если система сканирования является двунаправленной, существует место в конце линии сканирования, где пучок останавливается и меняет направление на противоположное. Если эта точка доступна, ее необходимо рассматривать при определении AEL. Так как угловая скорость является нелинейной функцией, длительность импульса T_p не будет задаваться формулой, приведенной в 7.8.3, а должна быть измерена или получена при скорости в зависимости от углового положения. Для расчета коэффициента C_6 угол φ_T должен быть измерен или получен как угол, при котором пучок возвращается из конечной точки через время $T_i/2$ или $T_p/2$ в зависимости от того, что меньше. Длительность составляет половину значения времени, так как пучок в конце линии сканирования меняет направление на противоположное, оставаясь при этом в той же области сетчатки. Если точка разворота (нулевой скорости) недоступна (например, ограничена каким-либо видом блокировки пучка), тогда на конце доступной линии сканирования скорость пучка часто будет самой низкой и, следовательно, длительность импульса самой большой. В таком случае φ_T измеряют от конца доступной линии сканирования, но время измерения будет просто меньше T_i или T_p. При двунаправленном сканировании длительность импульса зависит от позиции измерительной апертуры AP вдоль линии сканирования. При сканирующем зеркале с синусоидальными колебаниями и измерительной апертурой AP, находящейся в конце линии сканиро-

вания (точка возврата), длительность импульса, используемая для классификации с помощью малоугловой аппроксимации, будет выражена формулой

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

где f — частота сканирования;

θ — полный угол сканирования;

AP — диаметр измерительной апертуры;

M — расстояние от измерительной апертуры до вершины сканирования.

Следует отметить, что для элемента двунаправленного сканирования часто предполагают, что перемещение будет синусоидальным, однако реальное перемещение зависит от используемого механизма и может отличаться от чисто синусоидального. Если перемещение характеризуется как синусоидальное, для определения длительности импульса можно просто использовать приведенные уравнения (пример синусоидального сканирования см. приложение А). При других вариантах можно рекомендовать метод прямого измерения перемещения пучка.

Если мощность лазера меняется в зависимости от угла сканирования (что могут делать при некоторых видах оптимизации характеристик, например, при улучшении однородности яркости), то позиция в пучке, в которой длительность импульса будет самой большой, может не соответствовать предельному AEL для данного устройства. В таком случае AEL следует определить в зависимости от угла сканирования (а также расстояния от сканера) и сравнить с мощностью лазера. Наибольшее отношение мощности к AEL будет наиболее жестким (предельным) условием.

7.8.6 Количество линий сканирования в апертуре (n)

В случае нескольких линий сканирования, исходящих из единичной точки на элементе сканирования, разделение между линиями обычно увеличивается с увеличением расстояния от элемента сканирования. Количество линий сканирования в апертуре влияет на количество импульсов в цепочке импульсов за применимую временную базу. Количество импульсов в последовательности импульсов N в зависимости от частоты повторения импульсов, количества линий сканирования в апертуре и применимой временной базы рассчитывают по формуле

$$N = (PRF) \cdot n \cdot T,$$

где N — количество импульсов в последовательности импульсов за применимую временную базу или T_2 в зависимости от того, что меньше;

PRF — частота повторения импульсов одной линии сканирования;

N — количество линий сканирования в апертуре;

T — применимая временная база или T_2 в зависимости от того, что меньше.

Чтобы определить необходимое количество линий сканирования, считающихся входящими в апертуру, необходимо рассмотреть полный размер апертуры. Например, если на конкретном расстоянии две линии сканирования разнесены на 7 мм, расчет двух полных длительностей импульсов на зрачке будет давать слишком жесткий (ограничительный) результат, так как зрачок круглый. В случае двух линий сканирования, разделенных расстоянием 6 мм на апертуре 7 мм, создаются два импульса, длительность каждого из которых будет равна половине длительности импульса одной линии, идущей по центру апертуры. При этом максимальное разделение в 6 мм является устойчивой основой для расчета импульсов, пересекающих апертуру 7 мм. Если нужен более точный, менее жесткий (ограничивающий) результат, то для определения полного/суммарного импульса за повторение можно использовать метод «полной длительности импульсов» (TOTP) установленного 8.3 перечисления f), 3), b) IEC 60825-1:2007. При использовании такого метода учитывают длительность каждого отдельного импульса и его зависимость от того, где пучок пересекает апертуру.

Измерения длительности импульсов и частоты повторения импульсов рассмотрены в 7.4.3 и 7.6.

В системах сканирования, в которых несколько линий сканирования попадают на зрачок от разных источников поля, соответствующие изображения на сетчатке находятся в разных местах. Если такие источники находятся на расстоянии более 100 мрад, их рассматривают как независимые и трактуют как отдельные источники. При угловом разделении менее 100 мрад рассчитывают AEL для каждого источника отдельно, а также для всех комбинаций нескольких источников для определения наиболее жесткого (ограничивающего) случая. Если несколько источников рассматривают как один нестандарт-

ный источник, количество импульсов должно приниматься равным количеству сформированных нестандартных диаграмм. Например, если для источников А и В суммарное значение параметра C_6 такое же как $C_{6(A+B)}$ и оба они одновременно сканируются по измерительной апертуре N раз в течение периода измерения, AEL будет относиться в сумме мощностей А и В, уменьшенной на критерии периодических импульсов для N импульсов, а не для $2 \cdot N$ импульсов. Измерения нескольких и нестандартных источников рассмотрены в 8.3 IEC 60825-1:2007.

7.8.7 Максимально опасное местоположение

7.8.7.1 Общие положения

Максимально опасным местоположением является позиция размещения, в которой комбинация стягиваемого угла, длительности импульса, количества импульсов, аккомодации глаза и накопленной энергии (или мощности) ведет к наиболее жесткой (ограничивающей) классификации. Определение такой позиции размещения может быть сложным процессом, так как глаз при разных обстоятельствах будет искать фокус на разных объектах. К тому же отдельные элементы конкретного лазерного устройства могут создавать соответствующие точки в поле сканирования. Например, если стационарный пучок конвергентен и выходит из устройства, имея размер больше измерительной апертуры, место максимальной опасности может быть намного дальше, чем в случае, когда расстояние определялось на основании полной энергии пучка, попадающего в глаз. Это может объясняться зависимостью связанного параметра от измерительного расстояния (см. 7.8.8). В случае нескольких линий сканирования местом максимальной опасности может быть расстояние непосредственно перед переходом к более низким линиям сканирования внутри измерительной апертуры. Аналогично, место максимальной опасности может быть на расстоянии, на котором длительность импульса равна граничному значению из таблиц 4, 5, 7 или раздела 8 IEC 60825-1:2007 (например, 18 мкс в области тепловой опасности). При оценке расстояния для определения наиболее опасного местоположения все переменные должны измеряться на этом расстоянии.

Для специализированных комплексных систем сканирования для определения критичной комбинации необходимо рассматривать изменения всех параметров системы, включая фокус глаза. Для простых систем сканирующих пучков при условии максимальной опасности необходимо проверить как минимум два варианта приведенные ниже. Дополнительная информация, а также примеры приведены в разделе А.1 приложения А.

7.8.7.2 Фокус в бесконечности (отдыхающий/расслабленный глаз)

Если стягиваемый угол, α_{scan}, рассматривают для расчета коэффициента $C_6 > 1$, важно рассмотреть условие, когда глаз сфокусирован в бесконечности. В этом случае расстояние $Z = \infty$ и стягиваемый угол, α_s, почти равен углу расхождения пучка β. Это можно видеть из определения стягиваемого угла, α_s, представленного в виде d/Z. Поскольку расстояние Z до плоскости измерения стремится к бесконечности, к бесконечности стремится и размер пятна d, измеренный в этой плоскости. Это приводит к тому, что при измерительных расстояниях, когда T_p больше T_i, стягиваемый угол, α_{scan}, не зависит от расстояния до вершины сканирования M, а зависит только от T_i (приведено в таблице 3 IEC 60825-1:2007) и скорости углового сканирования и выражается формулой

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

Когда время T_p меньше T_i, уравнение меняется. Измерительное расстояние, при котором уравнение меняется, будет $M = AP/T_i\omega$. Если минимальное доступное измерительное расстояние меньше этого значения, такой сектор вблизи сканера будет иметь стягиваемый угол, α_{scan}, который меняется только с расстоянием M. Если угловая скорость меньше $(\alpha_{min} - \beta)/T_i$, то стягиваемые углы, α_{scan} и α_{min}, в этом секторе будут равны. Если пучок астигматический, стягиваемый угол, α_{nscan}, может быть достаточно большим, чтобы обеспечить коэффициент $C_6 > 1$, но часто наиболее опасным условием будет измерительное расстояние 100 мм. Это можно проверить путем изменения измерительного расстояния для обнаружения позиции наихудшего случая.

7.8.7.3 Фокус в вершине сканирования

Другим подлежащим оценке условием является условие, когда глаз сфокусирован на вершине сканирования, и местоположение измерительной апертуры находится достаточно далеко так, что стя-

гиваемые углы α_s и α_{nscan} будут меньше α_{min}. В этом случае коэффициент $C_6 = 1$. Расстояние Z_0 определяется по формуле

$$Z_0 = d_{max}/0{,}0015,$$

где d_{max} — наибольший из двух размеров пучка в точке вершины сканирования.

7.8.8 Зависимый параметр Гауссова пучка, η

Вне зависимости от суммарного количества энергии в пучке при классификации учитывают только энергию, проходящую через ограничительную апертуру при заданном измерительном расстоянии.

В зависимости от ширины перетяжки и дивергенции пучка он может быть больше измерительной апертуры в некоторых или во всех позициях вдоль доступной части пучка. При негауссовых пучках мощность, проходящую через апертуру, следует измерять напрямую.

При симметричном Гауссовом профиле пучка часть всей энергии, проходящей через круговую апертуру, находящуюся в центре пучка, будет выражаться как

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

где AP — диаметр измерительной апертуры;

d_{ap} — диаметр пучка в апертуре (определенный в соответствии с IEC 60825-1:2007, т.е. d_{63}).

7.8.9 Коэффициент умножения угла сканирования

Чтобы определить подходящую длительность импульса, не проводя ее измерение непосредственно в каждой рассматриваемой точке, необходимо знать угловую скорость пучка сканирующего устройства. Обычно сканирующим элементом является вращающееся зеркало или набор зеркал с постоянной скоростью вращения, но важно не путать скорость вращения зеркала с угловой скоростью пучка. В простом случае, когда ось вращения перпендикулярна плоскости сканирования, угловая скорость пучка будет больше скорости вращения зеркала на коэффициент 2. Этот коэффициент считают коэффициентом умножения угла сканирования (SAM), и для одного вращающегося зеркала он всегда будет в пределах от 0 до 2.

На рисунке 14 показан случай, когда коэффициент SAM отличается от 2. Математически этот коэффициент, обозначаемый как K_{SAM}, можно определить по формуле

$$K_{SAM} = \cos\theta_i + \cos\theta_r,$$

где θ_i и θ_r — углы падения и отражения, указанные на рисунке 14.

Примечание — Коэффициент SAM не обязательно остается постоянным при вращении зеркала на 360 °. Если это так, то данное уравнение будет точным только при симметрированном центре развертки. Однако обычно полные углы развертки каким-либо образом ограничиваются конечным размером скошенной поверхности, и коэффициент SAM меняется не сильно. При развертках с большим углом необходимо определить изменение скорости пучка.

Во многих случаях, чтобы обеспечить растр линий, разные грани зеркальной фигуры будут наклонены под разными углами. В таких случаях в результате разных углов отражения каждая линия будет иметь разную скорость пучка. Для узких растров разница будет небольшой, и для всех линий можно использовать самую низкую скорость, но при более широких растрах может оказаться целесообразным выполнить отдельный расчет для каждой линии.

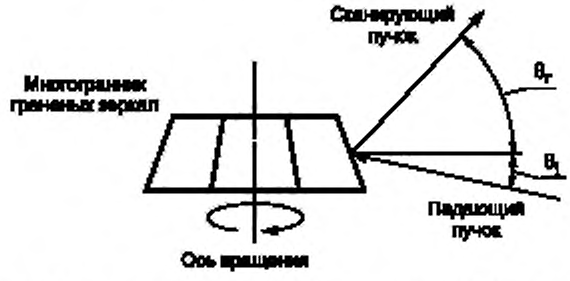


Рисунок 14 — Сканирующее зеркало с произвольным коэффициентом умножения угла сканирования

Приложение А
(справочное)

Примеры

А.1 Пример классификации больших источников

А.1.1 Общие положения

В настоящем примере приведен метод классификации аппаратуры с большим видимым источником (> 100 мрад). Считается, что равномерно излучаемая энергия строго перпендикулярна плоской поверхности, и поскольку пучок не структурирован (т.е. источник некогерентный или полностью диффузный), реальная площадь излучения является видимым источником. Исходными параметрами являются диаметр d и дивергенция Φ пучка 1/e кругового источника.

Путем анализа определяют полную допустимую мощность для класса 1. Анализ проводят при разных расстояниях, и определяют долю всей энергии находящейся в пределах максимального угла накопления 100 мрад, и долю этой энергии накапливаемой измерительной апертурой, а также стягиваемый угол видимого источника. Эти параметры затем можно использовать для определения AEL класса 1, а затем полной излучаемой мощности в условиях наблюдения вооруженным и невооруженным глазом.

А.1.2 Предел при наблюдении невооруженным глазом

А.1.2.1 Излучаемая накопленная энергия при наблюдении невооруженным глазом

Необходимо определить, какая доля излученной энергии исходит от части источника в пределах максимального угла приема δ = 100 мрад на расстоянии r. Любую излученную энергию, которая находится вне окружности 100 мрад, проецируемой на источник, не требует рассмотрения. Долю энергии в пределах угла приема 100 мрад обозначают как F_e.

Рассматривают два геометрических условия:

Если $r < 10\ d$, диаметр окружности 100 мрад, проектируемой на источник, меньше d, и $F_e = \pi/4\cdot(0{,}1\cdot r)^2/(\pi/4\cdot d^2) = (0{,}1\cdot r/d)^2$.

Если $r \geq 10\ d$, весь источник накапливается в проектируемой окружности 100 мрад и $F_e = 1$.

А.1.2.2 Стягиваемый угол источника при наблюдении невооруженным глазом

Значение стягиваемого угла, α, зависит от части оцениваемого источника и от расстояния r от него.

Если $r < 10\ d$, то источник попадает в угол накопления энергии и α = 100 мрад и $C_6 = 100/1{,}5 = 66{,}7$.

Если $r \geq 10\cdot d$, то $\alpha = d/r$ мрад и $C_6 = 667\ d/r$.

А.1.2.3 Накопленная энергия при наблюдении невооруженным глазом

Если $r < 10\ d$, площадь диаграммы расходящегося пучка на расстоянии r от части источника 0,1r в диаметре приблизительно составляет:

$A_r = \pi/4\cdot(\Phi\cdot r + 0{,}1\cdot r)^2 = 0{,}79\cdot(\Phi + 0{,}1)^2\cdot r^2$.

Доля энергии такой диаграммы, накопленная в апертуре 7 мм, составляет:

$F_c = 38{,}4\ \text{мм}^2/[0{,}79\cdot(\Phi + 0{,}1)^2\cdot r^2] = 49\ \text{мм}^2/[(\Phi + 0{,}1)^2\cdot r^2]$.

Если $r \geq 10\ d$, площадь диаграммы расходящегося пучка на расстоянии r от полного источника приблизительно составляет:

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

Доля энергии такой диаграммы, накопленная в апертуре 7 мм, составляет:

$F_c = 38{,}4\ \text{мм}^2/[\pi/4\cdot(\Phi\cdot r + d)^2] = 49\ \text{мм}^2/(\Phi\cdot r + d)^2$.

Критерий класса 1

При заданной длине волны и длительности импульса, можно рассчитать предел энергии. Например, предел энергии для класса 1 из таблицы 5 IEC 60825-1:2007 при длине волны от 700 до 1050 нм составляет

$$E = 0{,}7\cdot C_4\cdot C_6\cdot T_2^{3/4}\ \text{мДж}.$$

В единицах мощности выражение приобретает вид уравнения

$$\text{AEL} = E / T_2 = 0{,}7\cdot C_4\cdot C_6\cdot T_2^{3/4}\cdot 1/T_2 = 0{,}7\cdot C_4\cdot C_6/T_2^{1/4}\ \text{мВт}. \quad (\text{А.1})$$

А.1.2.4 Полная допустимая мощность при наблюдении невооруженным глазом

Для определения полной допустимой излучаемой мощности необходимо использовать корректные значения параметра T_2 и коэффициента С6, для оцениваемого расстояния. Такой анализ определяет стягиваемый угол, α, видимого источника на оцениваемом измерительном расстоянии при r >100 мм и является консервативным методом.

Используя уравнение (А.1), можно определить полную допустимую излучаемую мощность на любом расстоянии с учетом потерь от апертурной диафрагмы и диафрагмы поля зрения:

$$P_T = AEL/(F_e \cdot F_c) = 0{,}7C_4 \cdot C_6/(F_e \cdot F_c \cdot {}_2{}^{1/4}) \text{ мВт.} \quad (A.2)$$

А.1.3 Анализ при наблюдении вооруженным глазом

А.1.3.1 Методика анализа

Для оценки Условия 1 используют методику анализа, применяемую при наблюдении невооруженным глазом со следующими поправками:

- площадь накопления энергии при апертуре 50 мм должна быть больше;
- стягиваемый угол источника увеличен в семь раз из-за коэффициента увеличения оптики;
- угол приема для накопления излучаемой энергии уменьшается до δ = 100/7 мрад из-за коэффициента увеличения оптики;
- минимальное расстояние составляет 2000 мм, как указано в таблице 11 IEC 60825-1:2007.

А.1.3.2 Излучаемая накопленная энергия при наблюдении вооруженным глазом

Рассматривают два геометрических условия:

Если 2000 мм < r < 70 d, диаметр окружности 100/7 мрад, проектируемой на источник с расстояния r, меньше d, и приблизительная часть накопленной энергии составляет

$$F_{ea} = \pi/4 \cdot (0{,}1r/7)^2/(\pi/4 \cdot d^2) = (0{,}1 \cdot r/7d)^2.$$

Если $r \geq 70\ d$, весь источник накапливается в проектируемой окружности 100/7 мрад и F_{ea} = 1.

А.1.3.3 Стягиваемый угол источника при наблюдении вооруженным глазом

Если 2000 мм < r < 70 d, то α = 100 мрад и C_{6a} = 100/1,5 = 66,7.

Если $r \geq 70\ d$, то α = 70 d/r рад и C_{6a} = 4670 d/r.

А.1.3.4 Накопленная энергия при наблюдении вооруженным глазом

Если r < 70 d, площадь диаграммы расходящегося пучка на расстоянии r от части источника 0,1r/7 в диаметре приблизительно составляет

$A_r = \pi/4 \cdot (\Phi \cdot r + 0{,}1 \cdot r/7)^2 = 0{,}79 \cdot (\Phi + 0{,}0143)^2 \cdot r^2$.

Часть такой диаграммы, накопленная в апертуре 50 мм, составляет:

F_{ca} = 1960 мм^2/[0,79· $(\Phi + 0{,}0143)^2 \cdot r^2$] = 2500 мм^2/[$(\Phi + 0{,}0143)^2 \cdot r^2$].

Если $r \geq 70\ d$, площадь диаграммы расходящегося пучка на расстоянии r от полного источника приблизительно составляет:

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

Часть такой диаграммы, накопленная в апертуре 7 мм, составляет:

F_{ca} = 1960 мм^2/[π/4· $(\Phi \cdot r + d)^2$] = 2500 мм^2/$(\Phi \cdot r + d)^2$.

А.1.3.5 Полная допустимая мощность при наблюдении вооруженным глазом

Полную мощность получают из AEL, используя уравнение (А.2), но с параметрами при наблюдении вооруженным глазом на любом расстоянии

$$P_{Ta} = AEL/(F_{ea} \cdot F_{ca}) = 0{,}7 \cdot C_4 \cdot C_{6a}/(F_{ea} \cdot F_{ca} \cdot T_{2a}{}^{1/4}) \text{ мВт.} \quad (A.3)$$

А.1.3.6 Допустимая полная мощность от аппаратуры

Путем определения полной излучаемой мощности на разных расстояниях при Условиях 1 и 2 можно установить минимальное значение на любом расстоянии и использовать его в качестве допустимого уровня мощности для данной аппаратуры.

Интересно отметить, что предел при условии наблюдения невооруженным глазом будет постоянным при всех расстояниях r < 10·d, а предел при наблюдении вооруженным глазом будет постоянным при всех расстояниях r < 70·d. Эти постоянные значения могут быть, а могут и не быть ограничивающими критериями.

А.1.3.7 Результат выборки

Если полагают, что диаметр источника d = 3 см и значение дивергенции составляет θ = 0,05 рад, то допустимая мощность по Условию 3 при наблюдении невооруженным глазом на наиболее ограничительном расстоянии r < 30 см согласно уравнению (А.2) составляет 0,61 Вт. Допустимая мощность по Условию 1 на наиболее ограничительном расстоянии r < 210 см согласно уравнению (А.3) составляет 0,11 Вт. Таким образом полная излучаемая мощность, допустимая для класса 1, будет составлять 0,11 Вт.

А.2 Примеры сканирующего пучка

А.2.1 Простой зеркальный многоугольник со скошенными поверхностями/фасетами

Красным пучком сканируют по единичной линии с тремя наклонными зеркалами, вращающимися со скоростью 5000 об/мин. Фасеты смещены от вала двигателя на 20 мм, и сканирующая плоскость перпендикулярна оси вращения многогранника. Пучок почти коллимированный (дивергенция пучка меньше стягиваемого угла α_{min})

и имеет эллиптическую форму 1,0 на 0,5 мм (сканирование 1/e и поперечное сканирование соответственно) на фасетах зеркала. Определим AEL наихудшего случая для класса 1, исходя из следующих вариантов:

a) фокусировка на элементе сканирования, измерение на ближайшем расстоянии;

b) расслабленный/отдыхающий глаз, измерение на ближайшем расстоянии;

c) фокусировка на элементе сканирования, измерение на расстоянии, на котором коэффициент $C_6 = 1$;

d) фокусировка на элементе сканирования, измерение на расстоянии, на котором длительность импульса равна 18 мкс.

Во всех случаях при повторяющихся импульсах необходимо определить AEL для перечислений 1), 2) и 3) из 8.3 перечисления f) для Условия 3 из таблицы 11 (исследование Условий 1 и 2 для сканирующих устройств не требуется).

При вращающемся колесе фасетных зеркал, вершина сканирования обычно находится на поверхности фасета. Измерительные расстояния должны отсчитываться от этой точки. Во время импульса может происходить некоторый зеркальный сдвиг вершины, но он только создает небольшую размытость пятна, что делает расчетный AEL более консервативным.

Поскольку сканирующая поверхность перпендикулярна оси вращения, коэффициент SAM равен двум для всех случаев.

$K_{SAM} = 2{,}0$ ➡ $\omega = (5000 \text{ об/мин}) \cdot (2\pi/60) \cdot (2{,}0) = 1047{,}2$ рад/с.

Так как на вращающемся зеркале есть три идентичных фасета, частота повторения импульсов (*PRF*) будет равна трем.

Случай 1) Фокусировка на элементе сканирования, измерение на ближайшем расстоянии

Поскольку отображается вершина сканирования, пучок не сканирует сетчатку. Принимая, что расстояние 100 мм от вершины сканирования достижимы, это значение будет подходящим значением для использования при измерении и аккомодации. Расчет AEL приведен ниже.

$Z = 100$ мм	$M = 100$ мм	$d_{nscan} = 0{,}5$ мм	$d_{scan} = 1{,}0$ мм
$AP = 7{,}0$ мм	$\alpha_{nscan} = 5{,}0$ мрад	$\alpha_s = 10{,}0$ мрад	$\varphi_{scan} = 0$ мрад
$\varphi_T = 0$ мрад	$\alpha_{scan} = 10{,}0$ мрад	$\alpha = 7{,}5$ мрад	$C_6 = 5{,}0$
$T_2 = 11{,}51$ с	$T_p = 66{,}9$ мкс	$N = 2876$	$C_5 = 0{,}137$

$AEL_{1)} = (C_6 \cdot 7 \cdot 10^{-4})/(T_p)^{0,25}$ Вт ➡ $AEL_{1)} = 38{,}7$ мВт

$AEL_{2)} = [(C_6 \cdot 7 \cdot 10^{-4})/(T_2)^{0,75}]/(N \cdot T_p)$ Вт ➡ $AEL_{2)} = 114$ мВт

$AEL_{3)} = (AEL_{1)}) \cdot C_5$ Вт ➡ $AEL_{3)} = \underline{5{,}29 \text{ мВт}}$

Случай 2) Расслабленный/отдыхающий глаз, измерение на ближайшем расстоянии

Для этого случая аккомодационное расстояние уходит в бесконечность. Так как пучок коллимированный, то $\beta = 0$. Соответственно стягиваемый угол при поперечном сканировании стремится к пределу 1,5 мрад и $\alpha_{scan} = T_i\omega$.

$Z = \infty$	$M = 100$ мм	$d_{nscan} = 0{,}5$ мм	$d_{scan} = 1{,}0$ мм
$AP = 7{,}0$ мм	$\alpha_{nscan} = 1{,}5$ мрад	$\alpha_s = 0{,}0$ мрад	$\varphi_{scan} = 70$ мрад
$\varphi_T = 18{,}9$ мрад	$\alpha_{scan} = 18{,}9$ мрад	$\alpha = 10{,}2$ мрад	$C_6 = 6{,}78$
$T_2 = 12{,}25$ с	$T_p = 66{,}9$ мкс	$N = 3062$	$C_5 = 0{,}134$

$AEL_{1)} = (C_6 \cdot 7 \cdot 10^{-4})/(T_p)^{0,25}$ Вт ➡ $AEL_{1)} = 52{,}5$ мВт

$AEL_{2)} = [(C_6 \cdot 7 \cdot 10^{-4})/(T_2)^{0,75}]/(N \cdot T_p)$ Вт ➡ $AEL_{2)} = 152$ мВт

$AEL_{3)} = (AEL_{1)}) \cdot C_5$ Вт ➡ $AEL_{3)} = \underline{7{,}06 \text{ мВт}}$

Случай 3) Фокусировка на элементе сканирования, измерение на расстоянии, на котором коэффициент $C_6 = 1$

Для определения подходящего измерительного расстояния используют наибольший из двух размеров пучка. В данном случае размер пучка 1 мм стягивает угол 1,5 мрад при 667 мм. Это значение используют для параметров *Z* и *M*. Заметим, что при более короткой длительности импульсов, меняется уравнение для $AEL_{1)}$.

$Z = 667$ мм	$M = 667$ мм	$d_{nscan} = 0{,}5$ мм	$d_{scan} = 1{,}0$ мм
$AP = 7{,}0$ мм	$\alpha_{nscan} = 1{,}5$ мрад	$\alpha_s = 1{,}5$ мрад	$\varphi_{scan} = 0$ мрад
$\varphi_T = 0$ мрад	$\alpha_{scan} = 1{,}5$ мрад	$\alpha = 1{,}5$ мрад	$C_6 = 1{,}0$
$T_2 = 10{,}0$ с	$T_p = 10{,}0$ мкс	$N = 2500$	$C_5 = 0{,}141$

$AEL_{1)} = (C_6 \cdot 2 \cdot 10^{-7})/(T_p)$ Вт ➡ $AEL_{1)} = 20{,}0$ мВт

$AEL_{2)} = [(C_6 \cdot 7 \cdot 10^{-4})/(T_2)^{0,75}]/(N \cdot T_p)$ Вт ➡ $AEL_{2)} = 157$ мВт

$AEL_{3)} = (AEL_{1)}) \cdot C_5$ Вт ➡ $AEL_{3)} = \underline{2{,}82 \text{ мВт}}$

Случай 4) Фокусировка на элементе сканирования, измерение на расстоянии, на котором длительность импульса равна 18 мкс

В этом случае для определения измерительного расстояния используют скорость пучка. При апертуре 7 мм установлено, что импульс 18 мкс получается на расстоянии 371 мм. При использовании любого уравнения для AEL в приведенных выше случаях получают приблизительно тот же предел (с округлением на коэффициенты, создающие небольшую разницу).

Z = 371 мм M = 371 мм d_{nscan} = 0,5 мм d_{scan} = 1,0 мм

AP = 7,0 мм α_{nscan} = 1,5 мрад α_s = 2,69 мрад φ_{scan} = 0 мрад

φ_T = 0 мрад α_{scan} = 2,69 мрад α = 2,10 мрад C_6 = 1,40

T_2 = 10,14 с T_p = 18,0 мкс N = 2535 C_5 = 0,141

$AEL_{1)} = (C_6 \cdot 7 \cdot 10^{-4})/(T_p)^{0,25}$ Вт ➡ $AEL_{1)}$=15,0 мВт

$AEL_{2)} = [(C_6 \cdot 7 \cdot 10^{-4})/(T_2)^{0,75}]/(N \cdot T_p)$ Вт ➡ $AEL_{2)}$=122 мВт

$AEL_{3)} = (AEL_{1)}) \cdot C_5$ Вт ➡ $AEL_{3)}$=2,12 мВт

Максимальная мощность для случая 4, допустимая для класса 1, составляет 2,12 мВт, так как для классификации необходимо использовать наиболее ограничивающий AEL. Отметим, что эти четыре случая могут быть не единственными, которые необходимо рассмотреть при каком-либо заданном применении.

А.2.2 Растр сканирования

Фасетный зеркальный многоугольник, вращающийся со скоростью 1000 об/мин, создает пространственный растр со случайным образом разнесенными линиями сканирования. Падающий лазерный пучок составляет 20 °(θ_i) от нормали к оси вращения многоугольника. Углы отражения θ_r меняются от 20 ° до 60 °по одной линии каждую половину градуса. Размер пятна на фасете составляет 0,4 мм и имеет форму круга. Найдем наиболее ограничивающий AEL для класса 1, принимая условие, что он существует, когда параметр C_6 = 1 и глаз сфокусирован на вершине сканирования.

Так как такой сканер создает растр, то вплоть до определенного расстояния от вершины сканирования в зрачок будут входить несколько линий. Апертуру 7 мм на расстоянии 100 мм могут пересекать до восьми линий в пределах одного поворота многоугольника. Расстояние, ниже которого не требуется рассматривать несколько линий, составляет 688 мм (расстояние, на котором 6 мм стягивают половину градуса). Так как параметр C_6 = 1 обеспечивается при расстоянии 267 мм, то необходимо рассматривать несколько линий.

Поскольку все линии генерируются одним и тем же пучком, каждая из них будет создавать один, разделенный по времени, импульс. Для определения эффективного импульса совмещенных линий мы используем метод «полной длительности импульсов» (TOTP). При расстоянии 267 мм разделение между линиями растра составляет 2,33 мм. При таком разделительном расстоянии апертуру 7 мм будут пересекать три или четыре линии. На рисунке А.1 представлены два возможных случая. Ширина эффективного импульса T_{eff} является суммой отдельных значений ширины импульсов n линий, пересекающих апертуру, и ее можно определить при помощи увеличения общей длины линии сканирования внутри апертуры при помощи формулы

$$T_{eff} = \frac{\sum_{1}^{n} L_i}{7mm} T_1 = K_n T_1,$$

где T_1 — ширина импульса одной линии.

При изучении этих двух случаев установлено, что коэффициент K_n при n = 3 будет больше, т.е. коэффициент K_3 = 2,49 (по сравнению с коэффициентом K_4 = 2,03). Следовательно, ширина эффективного импульса при одном повороте многогранника составляет $T_{eff} = 2,49 T_1$. Однако это не является эффективным импульсом всей последовательности импульсов. Полная длительность импульсов, которую используют для классификации T_{TOTP}, равна произведению T_{eff} на количество импульсов N.

Далее следует определить параметр T_1. Для определения этого параметра необходимо знать скорость пучка, которая предположительно зависит от местоположения апертуры в растровой диаграмме. Так как угол отражения меняется, будет меняться коэффициент SAM в пределах растра. При наименьшем угле отражения 20 ° коэффициент K_{SAM} составляет 1,88; при наибольшем угле отражения 60 ° коэффициент K_{SAM} = 1,44. Наименьший коэффициент SAM определяет самую низкую скорость и, следовательно, самую большую T_1, и поэтому необходимо использовать именно это значение. Такие значения параметров приводят к линейной скорости пучка на апертуре, равной 40200 мм/с и длительности T_1 = 174 мкс. При этом значении длительность эффективного импульса при одном повороте T_{eff} составляет 434 мкс, которая будет повторяться единожды за вращение в течение временной базы T_2. Эти данные являются достаточными для расчета AEL:

Z = 267 мм M = 267 мм d_{nscan} = 0,4 мм d_{scan} = 0,4 мм

AP = 7,0 мм α_{nscan} = 1,5 мрад α_s = 1,5 мрад φ_{scan} = 0 мрад

φ_T = 0 мрад α_{scan} = 1,5 мрад T_{eff} = 434 мкс C_6 = 1,0

T_2 = 10,0 с T_1 = 1174 мкс N = 167

$T_{TOTP} = N \cdot T_{eff}$ = 72,3 мс

$AEL_{1)} = (C_6 \cdot 7 \cdot 10^{-4})/(T_1)^{0,25}$ Вт ➡ $AEL_{1)}$=6,09 мВт

$AEL_{2)} = [(C_6 \cdot 7 \cdot 10^{-4})/(T_2)^{0,75}]/(T_{TOTP})$ Вт ➡ $AEL_{2)}$=54,4 мВт

$AEL_{3)} = [(C_6 \cdot 7 \cdot 10^{-4})/(T_{TOTP})^{0,25}]$ Вт ➡ $AEL_{3)}$=1,35 мВт

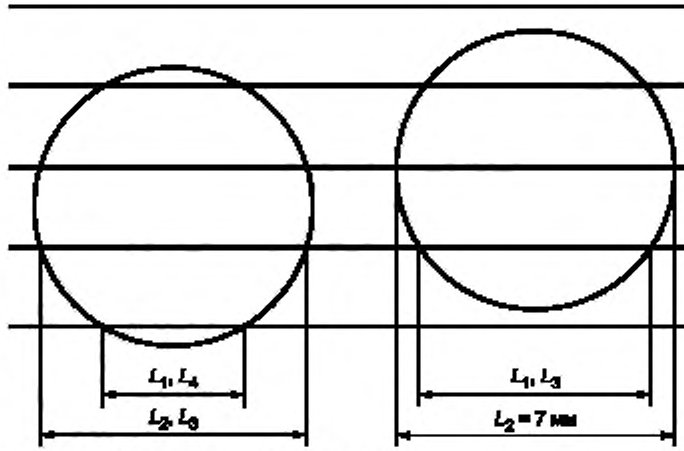


Рисунок А.1 — Несколько линий растра, пересекающих измерительную апертуру на расстоянии от вершины сканирования, при котором коэффициент $C_6 = 1$

А.2.3 Двунаправленное сканирование

Колеблющееся зеркало сканирует красный лазерный пучок при синусоидальном перемещении с частотой цикла 50 Гц при полной ширине углового сканирования 60 °. Размер пучка у зеркала составляет 0,8 мм и имеет круговую форму. Если принять, что наихудшие условия существуют, когда глаз сфокусирован на зеркале и находится на расстоянии, на котором параметр $C_6 = 1$, каким будет AEL для класса 1, если полный угол сканирования доступен пользователю? Каким будет AEL, если линия сканирования блокируется физически так, что доступны только 50 ° области сканирования?

Чтобы продолжить рассмотрение, следует определить термин «синусоидальное перемещение». Существует два приемлемых определения:

1) угловое положение пучка определяется синусоидальной функцией;

2) перемещение пятна, спроектированного на экран, определяется синусоидальной функцией.

При очень малых углах эти два случая одинаковы, но при бо́льших углах развертки они различны.

В первом случае длительность импульса определяется уравнением

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

где f — частота;

θ_{max} — полный угол сканирования, развернутый пучком;

θ_a — доступный угол сканирования;

M — измеряется непосредственно от зеркала к апертуре AP.

Когда углы сканирования θ_a и θ_{max} не равны, частота импульсов равна $2f$ из-за прямой и обратной развертки пучка. Если θ_a установлен равным θ_{max}, уравнение имеет вид

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

и частота импульсов равна частоте цикла из-за слияния двух импульсов в один при облучении точки возврата.

При втором виде синусоидального перемещения длительность импульса определяет следующее уравнение:

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

где переменные будут такими же, за исключением того, что M является расстоянием по нормали к экрану, на котором проектируется пучок, при измерении от зеркала. Частота импульсов составляет $2f$. Когда доступна вся линия сканирования, импульсная частота равна f, и уравнение упрощается до вида

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

В случае такого примера будет использоваться синусоидальное угловое перемещение с применением первых двух уравнений. Для определения длительности импульсов при полностью доступной линии сканирования,

используют уравнение из А.1.3.2. Размер апертуры *AP* составляет 7 мм, частота f = 50 Гц и угол θ_{max} = 60 ° (1,05 рад). Измерительное расстояние *M* равно 533 мм, что обеспечивает стягиваемый угол 1,5 мрад при фокусировке на пятне на зеркале. Подставляя эти значения в уравнение, получаем T_p = 1,428 мс. Для класса 1 при параметре C_6 = 1 временная база T_2 составляет 10 с. При импульсной частоте, равной 50 импульсам в секунду, за 10 с пройдет 500 импульсов, что ведет к значению коэффициента C_5= $(1/500)^{1/4}$ = 0,211. AEL определяют из IEC 60825-1:2007:

$AEL_{1)} = (C_6 \cdot 7 \cdot 10^{-4})/(T_p)^{0,25}$ Вт ➡ $AEL_{1)}$=3,60 мВт

$AEL_{2)} = [(C_6 \cdot 7 \cdot 10^{-4})/(T_2)^{0,25}]/(f \cdot T_p)$ Вт ➡ $AEL_{2)}$=5,51 мВт

$AEL_{3)} = (AEL_{1)}) \cdot C_5$ Вт ➡ $AEL_{3)}$=0,761 мВт

Введение блокировки пучка для уменьшения доступного угла сканирования до 50 ° требует пересчета параметра T_p с помощью уравнения из А.1.3.1: T_p = 139,8 мкс. Длительность импульса уменьшается на коэффициент 10, а частота импульсов удваивается до 100 импульсов в секунду, что определяет коэффициент C_5 = 0,178. Новые AEL будут следующими:

$AEL_{1)} = (C_6 \cdot 7 \cdot 10^{-4})/(T_p)^{0,25}$, Вт ➡ $AEL_{1)}$=6,44 мВт

$AEL_{2)} = [(C_6 \cdot 7 \cdot 10^{-4})/(T_2)^{0,25}]/(2 \cdot f \cdot T_p)$ Вт ➡ $AEL_{2)}$=28,2 мВт

$AEL_{3)} = (AEL_{1)}) \cdot C_5$ Вт ➡ $AEL_{3)}$=1,14 мВт

Следовательно, введение блокировки пучка позволяет увеличить мощность лазера приблизительно на 50 %.

А.2.4 Классификация лазерных проекторов

В проекторе используют единичное зеркало, колеблющееся в горизонтальном и вертикальном направлении. Зеркало сканирует при синусоидальном перемещении в горизонтальном направлении при частоте цикла 18000 Гц с полной шириной углового сканирования 50 °. Вертикаль сканируют при скорости 60 Гц. Диаграмма сканирования начинается с верхнего угла, охватывает четыреста восемьдесят линий при выполнении двунаправленного сканирования вниз до точки обратного хода или возврата луча и возвращается в верхнюю стартовую позицию. Такой возврат занимает приблизительно 20 % времени, и в течение этого времени лазеры находятся в выключенном состоянии. Размер пучка на зеркале составляет 0,9 мм и имеет круговую форму. Пучок считают коллимированным. Мощность пучка будет уменьшена, так как пучок сканируется от центра к краю для обеспечения однородности яркости и гарантии того, что AEL соблюдается во всех позициях.

Обозначения:

Z — расстояние от измерительной апертуры до местоположения фокуса глаза;

M — расстояние от измерительной апертуры до вершины сканирования;

AP — диаметр измерительной апертуры, указанный в таблице 10 IEC 60825-1:2007;

d_{scan} — диаметр пучка *в направлении сканирования* в точке фокуса глаза (1/e);

d_{nscan} — диаметр пучка *в направлении, ортогональном сканированию*, в точке фокуса глаза (1/e);

f_{HSCAN} — частота колебания сканирующего зеркала в горизонтальном направлении (Гц);

f_{VSCAN} — частота кадров по вертикали, Гц;

n — количество линий сканирования в апертуре за кадр;

T — применимая временная база (0,25 с для излучения лазера класса 2 при длине волны λ, равной от 400 до 700 нм);

N — количество импульсов в последовательности импульсов за применимую временную базу или T_2, в зависимости от того, что меньше; или $N = f_{VSCAN} \cdot n \cdot T$, в данном примере используют временную базу 0,25 с для класса 2;

α_s — *стационарный* стягиваемый угол по оси сканирования [$\alpha_s = d/Z$];

α_{scan} — *сканирующий* стягиваемый угол ($\alpha_{scan} = \max[(\alpha_s + \varphi_T), \alpha_{min}]$);

T_p — длительность сканированного импульса в апертуре 7 мм. Меняется в зависимости от позиции апертуры относительно вершины сканирующего зеркала и частоты колебания этого зеркала (f_{HSCAN}).

T_{p_center} — апертура находится в центре сканирования:

$T_{p_scanned}$ — апертура находится в конце сканирования:

T_i — значение из таблицы 3 IEC 60825-1:2007, обеспечивающее «тепловое время удержания», соответствующее диапазону значений длин волн λ (например, $18 \cdot 10^{-6}$ с при 400 нм < λ < 1050 нм);

$\varphi_T = (T_i / T_p)\ \varphi_{scan}$, при $T_p \geq T_i$

$\varphi_T = \varphi_{scan}$, при $T_p < T_i$

φ_{scan} — угол линии сканирования на сетчатке, равный $2 \cdot \tan^{-1}\{(AP/2) \cdot [(1/M) - (1/Z)]\}$;

π/4 — поправка при времени сканирования в квадратной области относительно круговой области.

Горизонтальные геометрические параметры:

f_{HSCAN}= 18000 Гц;

θ_{max} — угловое отклонение сканированного пучка в горизонтальном направлении;

θ_{max} = 50,0 °;

H_{activ} — активная часть горизонтальной линии равная 90 %;

θ_{ah} — доступный угол сканирования по горизонтали равный $2 \cdot \tan^{-1}(H_{activ} \cdot \tan(\theta_{max}/2))$ = 45,5 °.

Вертикальные геометрические параметры:

Форматное соотношение горизонтали и вертикали (ar)

$$ar = 16H : 9V = \frac{Horz_Active_Scan}{Vert_Active_Scan};$$

f_{VSCAN}= 60 Гц

θ_{av} — доступный угол сканирования по вертикали равный

$2 \cdot \tan^{-1}[1/ar \cdot \tan(\theta_{ah}/2)] = 26{,}6$ °;

V_{res} — разрешение по вертикали равно 480 линий/строк.

Характеристика пучка

Диаметр суммарного пучка красного, зеленого и голубого составляет 0,9 мм (1/e) на зеркале.

Требования к пределу допустимого излучения/эмиссии (AEL)

AEL_{single} — требование номер 1 для повторяющихся импульсов или модулированных лазеров, подраздел 8.3 IEC 60825-1:2007.

Экспозиция/облучение при любом единичном импульсе в последовательности импульсов не должно превышать AEL для одиночного импульса.

$AEL_{s.p.T}$— требование номер 2 для повторяющихся импульсов или модулированных лазеров, подраздел 8.3 IEC 60825-1:2007.

Средняя мощность последовательности импульсов с длительностью излучения T, т. е. AEL_T, не должна превышать мощности, соответствующей AEL единичного импульса длительностью T.

(Отметим, что в данном примере AEL_T рассчитывают с использованием временной базы класса 2, равной 0,25 с, и времени облучения при последовательности импульсов в апертуре за один сканированный кадр).

$AEL_{s.p.train}$— требование номер 3 для повторяющихся импульсов или модулированных лазеров, подраздел 8.3 IEC 60825-1:2007.

AEL определяют при полной длительности всех импульсов (TOTP), которая является суммой длительностей всех импульсов в течение времени излучения или T_2, в зависимости от того, что меньше.

Случай 1) Фокусировка на элементе сканирования, измерение на ближайшем расстоянии 100 мм

Z = 100 мм	M = 100 мм	d_{scan} = 0,9 мм	d_{nscan} = 0,9 мм
AP = 7,0 мм	N = 1087	φ_{scan} = 0 мрад	T_{p_center} = 1,42 мкс, $T_{p_scanned}$ = 2,62 мкс
α_s = 9 мрад	φ_T = 0 мрад	α_{scan} = 9 мрад	α_{nscan} = 9 мрад

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

Расчет T_{p_center}:

θ_r = Половина угла апертуры при 100 мм = $\tan^{-1}((AP / 2) / M) = 2$ °

$T_{p_center} = 2/(2 \cdot \pi \cdot f_{HSCAN}) \cdot \sin^{-1}(\theta_r/(\theta_{max}/2)) = 1{,}42$ мкс.

Расчет $T_{p_scanned}$:

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

$T_{p_scanned}$ = 2,62 мкс

Расчет N:

$n = 2 \cdot \tan^{-1}[(AP/2)/M]/\theta_{av} \cdot V_{res} = 72{,}4$

$N = n \cdot f_{VSCAN} \cdot T = 1087$

t_7 = экспозиция последовательности импульсов в апертуре за один кадр = $n \cdot 1/(2 \cdot f_{HSCAN}) = 0{,}002$ с

$AEL_{single} = (C_6 \cdot 2 \cdot 10^{-7})/(T_{p_center})$ Вт = 845 мВт

$AEL_{s.p.T\ timebase} = [(C_6 \cdot 7 \cdot 10^{-4}) \cdot (0{,}25)^{0{,}75}]/(T_{p_center} \cdot \pi/4 \cdot N)$ Вт = 1225 мВт

$AEL_{s.p.T\ time\ in\ aperture} = [(C_6 \cdot 7 \cdot 10^{-4}) \cdot (0{,}002)^{0{,}75}]/(T_{p_center} \cdot \pi/4 \cdot n)$ Вт = 494 мВт

$AEL_{s.p.train} = (C_6 \cdot 7 \cdot 10^{-4}) \cdot (18 \cdot 10^{-6})^{(0{,}75)}/(N^{(0{,}25)} \cdot T_{p_center} \cdot \pi/4)$ Вт= 181 мВт

$AEL_{single} = (C_6 \cdot 2 \cdot 10^{-7})/(T_{p_scanned})$ Вт = 458 мВт

$AEL_{s.p.T\ timebase} = [(C_6 \cdot 7 \cdot 10^{-4}) \cdot (0{,}25)^{0{,}75}]/(T_{p_scanned} \cdot \pi/4 \cdot N)$ Вт = 664 мВт

$AEL_{s.p.T\ time\ in\ aperture} = [(C_6 \cdot 7 \cdot 10^{-4}) \cdot (0{,}002)^{0{,}75}]/(T_{p_scanned} \cdot \pi/4 \cdot n)$ Вт = 268 мВт

$AEL_{s.p.train} = (C_6 \cdot 7 \cdot 10^{-4}) \cdot (18 \cdot 10^{-6})^{(0{,}75)}/(N^{(0{,}25)} \cdot T_{p_scanned} \cdot \pi/4)$ Вт= 98 мВт.

Случай 2) Расслабленный/отдыхающий глаз (фокусировка в бесконечности), измерение на расстоянии наиболее близком к 100 мм

$Z = \infty$	M = 100 мм	d_{scan} = 0,9 мм	d_{nscan} = 0,9 мм
AP = 7,0 мм	N = 1087	φ_{scan} = 70 мрад	T_{p_center} = 1,42 мкс, $T_{p_scanned}$ = 2,62 мкс
α_s = 9 мрад	φ_T = 70 мрад	α_{scan} = 70 мрад	α_{nscan} = 1,5 мрад

$C_6 = (\alpha_{scan} + \alpha_{nscan})/(2 \cdot \alpha_{min}) = 23,83$

$AEL_{single} = (C_6 \cdot 2 \cdot 10^{-7})/(T_{p_center})$ Вт = 3357 мВт

$AEL_{s.p.T\ timebase} = [(C_6 \cdot 7 \cdot 10^{-4}) \cdot (0,25)^{0,75}]/(T_{p_center} \cdot \pi/4 \cdot N)$ Вт = 4866 мВт

$AEL_{s.p.T\ time\ in\ aperture} = [(C_6 \cdot 7 \cdot 10^{-4}) \cdot (0,002)^{0,75}]/(T_{p_center} \cdot \pi/4 \cdot n)$ Вт =1962 мВт

$AEL_{s.p.train} = (C_6 \cdot 7 \cdot 10^{-4})\ (18 \cdot 10^{-6})^{(0,75)}/(N^{(0,25)} \cdot T_{p_center} \cdot \pi/4)$ Вт = 720 мВт

$AEL_{single} = (C_6 \cdot 2 \cdot 10^{-7})/(T_{p_scanned})$ Вт = 1819 мВт

$AEL_{s.p.T\ timebase} = [(C_6 \cdot 7 \cdot 10^{-4}) \cdot (0,25)^{0,75}]/(T_{p_scanned} \cdot \pi/4 \cdot N)$ Вт = 2637 мВт

$AEL_{s.p.T\ time\ in\ aperture} = [(C_6 \cdot 7 \cdot 10^{-4}) \cdot (0,002)^{0,75}]/(T_{p_scanned} \cdot \pi/4 \cdot n)$ Вт = 1063 мВт

$AEL_{s.p.train} = (C_6 \cdot 7 \cdot 10^{-4}) \cdot (18 \cdot 10^{-6})^{(0,75)}/(N^{(0,25)} \cdot T_{p_scanned} \cdot \pi/4)$ Вт = 390 мВт.

Случай 3) Фокусировка на элементе сканирования, измерение на расстоянии, на котором параметр $C_6 = 1$

Расчетное расстояние, на котором коэффициент $C_6 = 1$ (имеет место, когда $\alpha_{scan} = d_{scan}/Z = 1,5$ мрад): $Z = (d_{scan}/1,5\ мрад) = 0,9$ мм/0,0015 = 600 мм

$Z = 600$	$M = 600$ мм	$d_{scan} = 0,9$ мм	$d_{nscan} = 0,9$ мм
$AP = 7,0$ мм	$N = 181$	$\varphi_{scan} = 0$ мрад	$T_{p_center} = 0,236$ мкс, $T_{p_scanned} = 0,535$ мкс
$\alpha_s = 1,5$ мрад		$\varphi_T = 0$ мрад	$\alpha_{scan} = 1,5$ мрад $\alpha_{nscan} = 1,5$ мрад

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

Расчет N:

$n = 2 \cdot \tan^{-1}[(AP/2)/M]/\theta_{av} \cdot V_{res} = 12,1$

$N = n \cdot f_{VSCAN} \cdot T = 181$

t_7 = экспозиция последовательности импульсов в апертуре = $n \cdot 1/(2 \cdot f_{HSCAN}) = 0,00034$ с

$AEL_{single} = (C_6 \cdot 2 \cdot 10^{-7})/(T_{p_center})$ Вт = 847 мВт

$AEL_{s.p.T\ timebase} = [(C_6 \cdot 7 \cdot 10^{-4}) \cdot (0,25)^{0,75}]\ /(T_{p_center} \cdot \pi/4 \cdot N)$ Вт = 7377 мВт

$AEL_{s.p.T\ time\ in\ aperture} = [(C_6 \cdot 7 \cdot 10^{-4}) \cdot (0,002)^{0,75}]/(T_{p_center} \cdot \pi/4 \cdot n)$ Вт = 775 мВт

$AEL_{s.p.train} = (C_6 \cdot 7 \cdot 10^{-4}) \cdot (18 \cdot 10^{-6})^{(0,75)}/(N^{(0,25)} \cdot T_{p_center} \cdot \pi/4)$ Вт = 285 мВт

$AEL_{single} = (C_6 \cdot 2 \cdot 10^{-7})/(T_{p_scanned})$ Вт = 374 мВт

$AEL_{s.p.T\ timebase} = [(C_6 \cdot 7 \cdot 10^{-4}) \cdot (0,25)^{0,75}]/(T_{p_scanned} \cdot \pi/4 \cdot N)$ Вт = 3254 мВт

$AEL_{s.p.T\ time\ in\ aperture} = [(C_6 \cdot 7 \cdot 10^{-4}) \cdot (0,002)^{0,75}]/(T_{p_scanned} \cdot \pi/4 \cdot n)$ Вт = 342 мВт

$AEL_{s.p.train} = (C_6 \cdot 7 \cdot 10^{-4}) \cdot (18 \cdot 10^{-6})^{(0\ 75)}/(N^{(0,25)} \cdot T_{p_scanned} \cdot \pi/4)$ Вт=126 мВт.

Заключение: Наиболее ограничивающим случаем является случай 1 при котором AEL= 181 мВт в центре сканирования и AEL= 98 мВт на краю сканирования, что соответствует классу 2 IEC 60825-1:2007.

А.3 Пример коллимированного лазерного диода

Лазерный диод располагают в фокусе линз для генерации коллимированного выходного сигнала диаметром d. Какова допустимая мощность для класса 1 пучка непрерывного излучения в диапазоне от 400 до 1400 нм?

Для такого диапазона длин волн рассматривают ограничения по тепловым критериям для класса 1 пучка излучения непрерывного излучения (SW) установленным в таблицах 4 и 5 IEC 60825-1:2007 и предельное значение мощности, мВт, будет рассчитана как

$$P = 0,7 \cdot C_4 \cdot C_6 \cdot C_7/T_2^{1/4}.$$

Так как лазерный диод является малым (точечным) источником даже при наличии линз, размер видимого источника будет меньше 1,5 мрад. Следовательно, значение коэффициента коррекции для протяженного источника будет минимальным значением коэффициента $C_6 = 1$. Временную продолжительность (временную базу) для классификации малого источника определяют при минимальном значении $T_2 = 10$ с, и поэтому допустимая мощность, мВт, будет рассчитана по формуле

$$P = 0,7 \cdot C_4 \cdot 1 \cdot C_7/T_2^{1/4} = 0,39\ C_4 \cdot C_7. \quad (A.8)$$

Если длина волны находится в диапазоне от 400 до 600 нм, следует оценить фотохимические критерии для класса 1. Предельное значение мощности, мкВт, рассчитывают из таблиц 4 и 5 IEC 60825-1:2007 по формуле

$$P = 39 \cdot C_3. \quad (A.9)$$

Значения коэффициентов C_3, C_4 и C_7 определяют по излучаемой длине волны, указанной в таблице 10 IEC 60825-1:2007.

Предельное значение мощности для класса 1 необходимо сравнить с мощностью, измеренной в апертуре 7 мм вблизи линз и в апертуре 50 мм на расстоянии 2 м. При этом, если диаметр пучка меньше 50 мм, вся энергия накапливается, и, следовательно, она также является полной мощностью допустимой для класса 1. Отметим, что если вся энергия может аккумулироваться в апертуре 7 мм, проводить измерения с детектором большего диаметра необязательно.

Если диаметр пучка больше 7 мм и если мощность, измеренная в апертуре 50 мм на расстоянии 2 м, выше предельного значения, но мощность, измеренная в апертуре 7 мм, меньше установленного предела, аппаратуру относят к классу 1М.

Случай 1: Рассмотрим пучок диаметром 3 мм от линзы при длине волны 850 нм

При этой длине волны параметры $C_4 = 2$ и $C_7 = 1$. Предельное значения мощности, мВт, полученное из уравнения (А.8) будет

$$P = 0{,}39 \cdot 2 \cdot 1 \text{ мВт} = 0{,}78 \text{ мВт}$$

Так как длина волны больше 600 нм, фотохимические критерии не применяют, и применение уравнения (А.9) не требуется. Соответственно, предельное значение мощности равно 0,78 мВт, и т.к. диаметр d < 50 мм, это значение является полной допустимой мощностью.

Случай 2: Рассмотрим пучок диаметром 3 мм от линзы при длине волны 480 нм

При этой длине волны коэффициенты $C_3 = 4$, $C_4 = 1$ и $C_7 = 1$. Предельное значение мощности, мВт, полученное из уравнения (А.8) будет

$$P = 0{,}39 \cdot 1 \cdot 1 \text{ мВт} = 0{,}39 \text{ мВт}$$

Так как длина волны меньше 600 нм, также необходимо оценить фотохимические критерии. Из уравнения (А.9) получаем

$$P = 39 \cdot C_3 \text{ мкВт} = 39 \cdot 4 \text{ мкВт} = 0{,}16 \text{ мВт}$$

Так как предельное значение, полученное из уравнения (А.9) более ограничивающее/жесткое, значение допустимой мощности будет 0,16 мВт.

Случай 3: Рассмотрим пучок диаметром 20 мм, полученный от линзы при длине волны 850 нм. Каким будет класс при выходной мощности непрерывного излучения 2 мВт?

Допустимая мощность определена в случае 1. Для класса 1 мощность должна быть менее 0,78 мВт в апертуре 7 мм вблизи линзы и менее 0,78 мВт в апертуре 50 мм на расстоянии 2 м. Для класса 1М это будет полной мощностью, допустимой в апертуре 7 мм вблизи линзы.

В апертуре 50 мм предельное значение для класса 1 будет превышен. Однако доля пучка 20 мм, аккумулируемая в апертуре 7 мм, будет составлять приблизительно $(7/20)^2 = 0{,}12$ или значение мощности будет составлять 0,12·2 мВт = 0,24 мВт. Это значение мощности в апертуре 7 мм меньше предела 0,78 мВт, следовательно, по выходному сигналу будет выбран класс 1М.

Случай 4: Рассмотрим пучок диаметром 3 мм, полученный от линзы при длине волны 1310 нм.

При этой длине волны коэффициенты $C_4 = 5$ и $C_7 = 8$. Предельное значение мощности, мВт, полученное из уравнения (А.8) будет

$$P = 0{,}39 \cdot 5 \cdot 8 \text{ мВт} = 15{,}6 \text{ мВт}$$

Так как длина волны больше 600 нм, фотохимические критерии не применяют, и применение уравнения (А.9) не требуется. Соответственно, предельное значение мощности равно 15,6 мВт, и т.к. диаметр d < 50 мм, это значение является полной допустимой мощностью.

А.4 Пример одномодового оптического волокна

Диаметр расходящегося пучка

Для расчетов AEL и MPE, включая апертуру, необходимо знать диаметр расходящегося пучка d_{63} на расстоянии r от видимого источника. Большинство изготовителей источников расходящегося пучка указывают дивергенцию на основе числовой апертуры NA. Числовую апертуру NA точечного источника определяют, как синус половины дивергенции ϕ пучка на выходе, измеренного в точках, в которых плотность потока излучения составляет 5 % от пикового значения. То есть

$$NA = \sin(\phi/2) \quad \text{и} \quad \phi/2 = \arcsin(NA)$$

Диаметр для Гауссового пучка, соответствующий точкам, в которых плотность потока излучения составляет 5 % от пикового значения, включает 95 % полной мощности или энергии. Диаметр пучка d_{95} на расстоянии r от видимого источника задается формулой

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

Поскольку диаметр d_{63} имеет порядок в несколько десятых микрон, в большинстве случаев его можно не принимать во внимание. Помимо этого, при расчетах безопасности обычно используют диаметр пучка в точках, в которых мощность или энергия составляет 63 %, а не 95 % полной мощности или энергии. Коэффициент преобразования для Гауссового пучка равен 1,7 (т. е. $d_{95}/d_{63} = 1,7$), следовательно, диаметр пучка приблизительно будет:

$$d_{63} = \frac{d_{95}}{1,7} = \frac{2 \cdot r}{1,7} \tan[\arcsin(NA)] = \frac{2 \cdot r \cdot NA}{1,7}.$$

Одномодовое оптическое волокно представляет собой особый случай оптического источника точечного типа. Дивергенцию одномодового оптического волокна устанавливают на основе диаметра волокна с полевой модой w_0 и длины волны источника λ. Диаметр пучка одномодового оптического волокна на расстоянии r приблизительно рассчитывают по формуле

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

Длина волны λ выражена в тех же единицах, что и диаметр волокна с полевой модой w_0.

Оптоволоконный передатчик, излучающий длину волны 1300 нм, используют для передачи цифровых данных со скоростью 630 Мбит/с. Используемый код передачи является сбалансированным/симметричным кодом и поэтому средняя излучаемая мощность не зависит от данных. Комплект передатчика состоит из косичек одномодовых оптоволокон с диаметром моды поля 10 мкм.

Примечание — Диаметр волокна с полевыми модами w_0 зависит от типа волокна и длины волны.

a) Определим максимальную среднюю выходную мощность для AEL_s класса 1M и класса 3R.

b) Определим максимальную среднюю выходную мощность для AEL_s класса 1M и класса 3R, если излучаемая длина волны составляет 1550 нм.

Решение (классификация):

Из-за высокой скорости передачи данных и сбалансированного/симметричного кода выходной сигнал можно трактовать как непрерывное излучение при уровне мощности равном средней излучаемой мощности.

a) классификация при длине волны 1300 нм

Максимальная средняя излучаемая мощность для класса 1M и класса 3R при длине волны 1300 нм и временной базе 100 с основана на следующем рассмотрении:

Расчет для класса 1M.

Временная база, используемая для системы класса 1, составляет 100 с. Для малого источника при стягиваемом угле $\alpha < \alpha_{min}$ в таблице 4 IEC 60825-1:2007 установлено, что AEL для мощности, Вт, для излучения в диапазоне длин волн от 1050 до 1400 нм при длительности облучения в диапазоне от 10 до $3 \cdot 10^4$ с рассчитывают как

$$P_{AEL} = 3,9 \cdot 10^{-4} C_4 \cdot C_7.$$

При значении коэффициентов $C_4 = 5$ и $C_7 = 8$ значение мощности $P_{AEL} = 15,6$ мВт.

Значение мощности в апертуре корректируют на параметр связи, η учитывающий апертурные потери для получения максимального излучаемого уровня мощности при условии заданной AEL. Параметр связи зависит от диаметра пучка на расстоянии, на котором находится апертура от источника (100 мм, т.к. для класса 1M установлено условие измерения 3, для класса 3R используют 70 мм).

Для одномодового волокна, представленного в настоящем примере, диаметр пучка, мм, задается уравнением

$$d_{63} = \frac{2\sqrt{2}\, r \lambda}{\pi w_0} = \frac{2,83 \cdot 100 \text{ мм} \cdot 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ мм}}{\pi \cdot 10 \cdot 10^{-3} \text{ мм}} = 11,7 \text{ мм}.$$

Часть полной излучаемой мощности, P_a, которая проходит через измерительную апертуру 7 мм на расстоянии 100 мм от источника, рассчитывают по формуле

$$P_a = \eta \cdot P_0 = \left[1 - e^{-\left(\frac{d_a}{d_{63}}\right)^2}\right] \cdot P_0 = 0,301 \cdot P_0.$$

Максимальную излучаемую мощность, $P_{0,\,max}$, мВт, соответствующую классу 1M рассчитывают по формуле

$$P_{0,\,max} = \frac{P_{AEL}}{\eta} = 51,8 \text{ мВт}.$$

Полученное значение максимальной излучаемой мощности 51,8 мВт меньше 500 мВт — предела установленного для класса 3B, поэтому выбирают класс 1M для которого предел равен 51,8 мВ.

Расчет для класса 3R.

Для длины волны 1300 нм и временной базы 100 с в таблице 7 IEC 60825-1:2007 установлено, что AEL для полной излучаемой мощности, Вт, при малом источнике при стягиваемом угле $\alpha < \alpha_{min}$ можно рассчитать по формуле

$$P_{AEL} = 2 \cdot 10^{-3} \cdot C_4 \cdot C_7.$$

При значении коэффициентов $C_4 = 5$ и $C_7 = 8$, значение составляет

$$P_{AEL} = 2 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \cdot 8 \text{ Вт} = 80 \text{ мВт}.$$

Значение диаметра d_{63}, мм, на расстоянии 70 мм рассчитывают по формуле

$$d_{63} = \frac{2\sqrt{2}\, r\, \lambda}{\pi w_0} = \frac{2{,}83 \cdot 70 \cdot 1{,}3 \cdot 10^{-3}}{\pi \cdot 10 \cdot 10^{-3}} = 8{,}20 \text{ мм}.$$

Часть полной излучаемой мощности, P_a, которая проходит через измерительную апертуру 7 мм на расстоянии 70 мм от источника рассчитывают по формуле

$$P_a = \eta \cdot P_0 = \left[1 - e^{-\left(\frac{d_a}{d_{63}}\right)^2}\right] \cdot P_0 = 0{,}518 \cdot P_0.$$

Максимальная излучаемая мощность, $P_{0,\,max}$, мВт, соответствующая классу 3R составляет

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

Полученное значение максимальной излучаемой мощности 155 мВт больше чем 51,8 мВт, установленной для класса 1M, поэтому выбирают класс 3R. Аппаратуру, рассмотренную в настоящем примере, можно отнести к какому-либо из классов, основанных на пределах по выходной мощности: классу 1, классу 1M, классу 3R, классу 3B или классу 4.

b) классификация при длине волны 1550 нм

Расчет для класса 1M.

Если подобная система работает и при длине волны 1550 нм, то процедура выполнения расчетов будет такой же, за исключением того, что будет использовано выражение для AEL и апертуры, которые относятся к длине волны 1550 нм.

Так как рассматривается малый источник при стягиваемом угле $\alpha < \alpha_{min}$ и $t = 100$ с, то из таблицы 4 IEC 60825-1:2007 получаем значение $P_{AEL} = 10$ мВт.

Диаметр пучка, мм, на расстоянии 100 мм будет рассчитан по формуле

$$d_{63} = \frac{2\sqrt{2}\, r\, \lambda}{\pi w_0} = \frac{2{,}83 \cdot 100 \cdot 1{,}55 \cdot 10^{-3}}{\pi \cdot 10 \cdot 10^{-3}} = 14{,}0 \text{ мм}.$$

Часть полной излучаемой мощности, P_a, которая проходит через измерительную апертуру 3,5 мм на расстоянии 100 мм от источника рассчитывают по формуле

$$P_a = \eta \cdot P_0 = \left[1 - e^{-\left(\frac{d_a}{d_{63}}\right)^2}\right] \cdot P_0 = 0{,}061 \cdot P_0.$$

Максимальная излучаемая мощность, $P_{0,\,max}$, мВт, соответствующая классу 1M составляет

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

Полученное значение максимальной излучаемой мощности 165 мВт меньше предела 500 мВт, установленного для класса 3B, поэтому выбираем класс 1M для которого предел равен 165 мВт.

Расчет для класса 3R.

Для длины волны 1550 нм и временной базы 100 с в таблице 7 IEC 60825-1:2007 установлено, что AEL для полной излучаемой мощности, мВт, для малого источника при стягиваемом угле $\alpha < \alpha_{min}$ рассчитывают как

$$P_{AEL} = 5 \cdot 10^{-2} \text{ Вт} = 50 \text{ мВт}$$

Значение диаметра d_{63} на расстоянии 70 мм составляет

$$d_{63} = \frac{2\sqrt{2}r\lambda}{\pi w_0} = \frac{2{,}83 \cdot 70 \cdot 1{,}55 \cdot 10^{-3}\ \text{мм}}{\pi \cdot 10 \cdot 10^{-3}\ \text{мм}} = 9{,}78\ \text{мм}.$$

Часть полной излучаемой мощности, P_a, которая проходит через измерительную апертуру 7 мм на расстоянии 70 мм от источника, рассчитывают как

$$P_a = \eta \cdot P_0 = \left[1 - e^{-\left(\frac{d_a}{d_{63}}\right)^2}\right] \cdot P_0 = 0{,}401 \cdot P_0.$$

Максимальная излучаемая мощность, $P_{0,\,max}$, мВт, соответствующая классу 3R составляет

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

Полученное значение максимальной излучаемой мощности 165 мВт больше чем 125 мВт, установленной для класса 1М, поэтому класс 3R исключают из рассмотрения. Аппаратуру, рассмотренную в настоящем примере, можно отнести к какому-либо из классов, основанных на пределах по выходной мощности: классу 1, классу 1М, классу 3В или классу 4.

А.5 Пример рассмотрения перетяжки/сужения пучка

Рассмотрим лазер со следующими характеристиками:

Длина волны:	635 нм;
Частота повторения импульсов (PRF):	1 Гц;
Ширина импульса:	500 мс;
Энергия излучения:	0,98 мДж/импульс;
Диаметр пучка на выходе:	5 мм;
Дивергенция/расходимость:	0,35 мрад.

Иногда пучок будет сфокусирован на незначительном расстоянии от резонатора лазера прежде чем выйти на нормальную/стандартную дивергенцию. Сфокусированный пучок или фокальную точку называют «перетяжкой пучка». Для корректной оценки безопасности к расчетному безопасному расстоянию необходимо добавить расстояние, на котором находится перетяжка от выходного порта лазера.

Рассмотрим указанный выше лазер в качестве примера измерения и численной оценки перетяжки пучка. Первоначально, до проведения процедуры измерений, рекомендуется провести визуальный осмотр пучка. Рекомендуется ввести в состав измерений не только процедуру обнаружения перетяжки пучка, но и определение других его аномалий, например, активных зон или темных зон, где пучок вероятно «зажат» каким-либо внутренним компонентом. Во время такой визуальной проверки можно проконтролировать уменьшение лазерного пятна на расстоянии нескольких метров от выходного порта лазера. Этот признак показывает, что существует перетяжка пучка. В этом случае вся процедура измерения не изменится, но потребуется более детальное исследование диаметра пучка, особенно в зоне перетяжки пучка.

Допустим, что все другие указанные параметры лазера проверены с использованием методов измерения, приведенных в настоящем пункте или в других примерах, приведенных в настоящем стандарте. После визуального осмотра и проверки параметров лазера проверяют перетяжку пучка. Следует определить значения двух параметров. Первый параметр, это диаметр перетяжки пучка, второй — местоположение перетяжки пучка относительно выходного порта лазера.

Определение диаметра перетяжки пучка может потребовать кропотливой работы (если не удастся найти его всего с нескольких попыток), т.к. для получения наименьшего диаметра будет необходимо провести множество измерений диаметров пучка.

Используя методы расчета, указанные в 7.7.3.4, определяем, что для данного лазера перетяжка пучка находится на расстоянии 7 м за выходным портом лазера и имеет диаметр 3,5 мм.

Используя указанные выше параметры, получаем MPE, равное 1,0 мВт/см^2, и AEL класса 1 — 0,39 мВт, что определяет данный лазер как лазерную систему класса 3R. Принимая, что перетяжка пучка отсутствует, пучок является Гауссовым и имеет круговую форму, и используя для расчета уравнение

$$NOHD = \frac{1}{\phi}\sqrt{\frac{4\Phi}{\pi MPE} - d^2},$$

получаем значение NOHD = 43 м. Однако, используя определенный нами диаметр перетяжки пучка для d и произведя пересчет, получим номинальное окулярное опасное расстояние NOHD = 44 м, а затем, добавив 7 м для учета местоположения перетяжки пучка, получим NOHD = 51 м.

А.6 Пример рассмотрения многоволнового лазера

Частота удвоения Nd: лазер на алюмоиттриевом гранате (ИАГ лазер), работающий при длинах волн 1064 и 532 нм с однородным пучком предназначенный для использования в составе системы формирования изображения в высоких слоях атмосферы. Система имеет следующие параметры:

	Лазер 1	Лазер 2
Длина волны, λ, нм	1064	532
Энергия на импульс, Q, мДж	75	100
Дивергенция, ϕ, мрад	1	1
Ширина импульса, нс	18	18
Частота повторения импульсов (PRF), Гц	20	20
Диаметр пучка, d, см	1,5	1,5

Определяем NOHD для данной лазерной системы (без учета затухания в атмосфере, т.к. используется в высоких слоях атмосферы).

Так как мы имеем дело с энергиями при двух длинах волн, действующими на одну и ту же ткань/материю одновременно, необходимо изучить суммарное воздействие.

Если $H_1/MPE_1 + H_2/MPE_2 > 1$,

где, H_i — возможное воздействие лазерного излучения;

MPE_i — максимальное допустимое облучение при каждой λ_i,

то максимальное допустимое облучение будет превышено.

Возможное воздействие лазерного излучения рассчитывают по формуле

$$H_i = 4Q/\pi a_i^2$$

Из этого уравнения находим $H_1 = 42{,}44$ мДж/см^2 и $H_2 = 56{,}6$ мДж/см^2. Можно найти, что $MPE_1 = 1{,}3 \cdot 10^{-6}$ Дж/см^2, а $MPE_2 = 1{,}3 \cdot 10^{-7}$ Дж/см^2. В результате $H_1/MPE_1 + H_2/MPE_2$ намного больше 1, следовательно, предел безопасного облучения превышен.

Пусть H_{eff} — эффективный уровень облучения, полученный из основного уравнения общего лазерного диапазона, по которому рассчитывают количество облучения на любом расстоянии наблюдения. Уравнение для расчета H_{eff} в дальнем поле будет

$$H_{eff} = \frac{1{,}27e^{-\mu r}}{r^2} \sum_{i=1}^{N} S_i \frac{Q_i}{\phi_i^2},$$

где r — расстояние в направлении от лазера;

μ — коэффициент затухания в атмосфере;

$S_i = MPE_{min}/MPE_i$ (MPE_{min} — найденное наиболее консервативное отдельное MPE, в данном случае — MPE_2).

При $\lambda_1 = 1064$ нм $S_1 = 0{,}1$;

при $\lambda_2 = 532$ нм $S_2 = 1$.

Так как r = NOHD при $H_{eff} = MPE_{min}$, для расчета NOHD можно применить следующее уравнение

$$NOHD = \sqrt{\frac{1{,}27e^{-\mu NOHD}}{MPE_{min}} \sum_{i=1}^{N} S_i \frac{Q_i}{\phi_i^2}},$$

NOHD Без учета затухания в атмосфере NOHD рассчитывают по формуле

$$NOHD = \sqrt{\frac{1{,}27}{MPE_{min}} \left(S_1 \frac{Q_1}{\phi_1^2} + S_1 \frac{Q_2}{\phi_2^2} \right)}.$$

Следовательно, NOHD для данной системы составляет приблизительно 10 км.

А.7 Пример рассмотрения линейной лазерной оптоволоконной матрицы

Рассмотрим мультиволоконную матрицу со следующими параметрами:

Δ — расстояние между центрами равно 250 мкм;

N — общее количество источников 12;

S_0 — размер одного источника 50 мкм;

S_v — размер по вертикали 50 мкм → 150 мкм;

λ —длина волны 850 нм, следовательно, коэффициенты $C_4 = 2$ и $C_7 = 1$;

NA — числовая апертура волокна 0,2 при 1/e дивергенции 2·0,2/1,7 = 0,235 рад;

n — количество оцениваемых источников;

S_h — размер по горизонтали $S_0 + (n - 1) \cdot \Delta = 50 + (n - 1) \cdot 250$;
α_ω — стягиваемый угол S_v/r и $\alpha_h = S_h/r$;
α — стягиваемый угол $(\alpha_v + \alpha_h)/2 = \{150/100 + [(50 + (n - 1) \cdot 250)]/100\}/2$ мрад при $n > 1$.
Какова будет полная излучаемая мощность, мВт, допустимая в соответствии с пределом для класса 1?

$$AEL = 0{,}7 \cdot C_4 \cdot C_6/(T_2)^{1/4}$$

Необходимо рассмотреть конфигурации матрицы вплоть до размера 1 см (что соответствует максимальному углу приема 100 мрад при 100 мм).

Таблица А.1 — Количество вариантов источников

n	α_h, мрад	α_v, мрад	α, мрад	T_2, с	C_6	C_4	AEL, мВт	P_n, мВт	AEL/P_n
1	1,5	1,5	1,5	10	1	2	0,785	1·P	0,785/P
2	3,0	1,5	2,25	10,2	1,5	2	1,173	2·P	0,586/P
3	5,5	1,5	3,50	10,5	2,33	2	1,811	3·P	0,604/P
4	8,0	1,5	4,75	10,8	3,17	2	2,440	4·P	0,610/P
8	18	1,5	9,75	12,1	6,5	2	4,865	8·P	0,608/P
12	28	1,5	14,75	13,6	9,8	2	7,148	12·P	0,596/P

Таким образом, наиболее ограничивающим/предельным случаем является конфигурация из двух источников $n = 2$ с отношением 0,586/P. В приведенных выше расчетах предполагалось, что источники имеют одинаковые уровни мощности, поэтому для согласования разных уровней мощности табличные данные P_n могут быть модифицированы.

Если предположить, что все источники излучают из одной точки, диаметр пучка на измерительном расстоянии 70 мм для класса 1 будет $2nNA/1{,}7 = 2 \cdot 70$ мм$\cdot 0{,}2/1{,}7 = 16{,}5$ мм. Используя формулу из 7.8.8, получим часть энергии, аккумулируемую в апертуре 7 мм, равную 0,165. Следовательно, полная мощность, допустимая от 12-канального волокна будет составлять

$$P = 12 \text{ волокон} \cdot 0{,}586 \text{ мВт на волокно}/0{,}165 = 42{,}6 \text{ мВт}$$

Показано, что отношение AEL/P_i уменьшается с ростом количества источников выше значения 5. В реальности предел будет несколько выше этого значения, т. к. на измерительном расстоянии горизонтальный размер конфигурации источников будет влиять на/сжимать диаметр пучка (для приведенного выше расчета диаграммы пучка на измерительном расстоянии размер конфигурации источников предполагался равным нулю).

А.8 Пример рассмотрения линейной матрицы лазеров

Рассмотрим мультилазерную матрицу со следующими параметрами:
Δ — расстояние между центрами равное 2500 мкм;
N — общее количество источников 10;
S_0 — размер одного источника 50 мкм;
S_v — размер по вертикали 50 мкм → 150 мкм;
λ — длина волны 850 нм, следовательно, коэффициент $C_4 = 2$;
NA— числовая апертура выхода равна 0,2 при 1/e дивергенции $2 \cdot 0{,}2/1{,}7 = 0{,}235$ рад;
n — количество оцениваемых источников;
S_h — размер по горизонтали $S_0 + (n - 1) \cdot \Delta = 50 + (n - 1) \cdot 2500$;
α_ω — стягиваемый угол S_v/r и $\alpha_h = S_h/r$;
α — стягиваемый угол$(\alpha_v + \alpha_h)/2 = \{150/100 + [(50 + (n - 1) \cdot 2500)]/100\}/2$ мрад при $n > 1$.
Какова будет полная излучаемая мощность, мВт, допустимая в соответствии с пределом для класса 1М?

$$AEL = 0{,}7 \cdot C_4 \cdot C_6/(T_2)^{1/4}.$$

Необходимо рассмотреть конфигурации матрицы вплоть до размера 1 см или 4 источников (что соответствует максимальному углу приема 100 мрад при 100 мм).

Таблица А.2 — Количество вариантов источников

n	α_h, мрад	α_v мрад	α, мрад	T_2,с	C_6	C_4	AEL, мВт	P_n, мВт	AEL/ P_n
1	1,5	1,5	1,5	10	1	2	0,785	$1 \cdot P$	**0,79**/P
2	25,5	1,5	13,5	13,2	9	2	6,6	$2 \cdot P$	3,3/P
3	50,5	1,5	26	17,7	17,3	2	11,8	$3 \cdot P$	3,9/P
4	75,5	1,5	38,5	23,7	25,6	2	16,2	$4 \cdot P$	4,1/P

Таким образом, наиболее ограничивающим/предельным случаем является конфигурация источников n = 1 с отношением 0,79/P. В приведенных выше расчетах предполагалось, что источники имеют одинаковые уровни мощности, поэтому для согласования разных уровней мощности табличные данные P_n могут быть модифицированы.

Дивергенция пучка на измерительном расстоянии для класса 1М 100 мм сформирует диаметр 2rNA/1,7 = 2·100 мм·0,2/1,7 = 23,6 мм. Используя формулу из 7.8.8, рассчитаем часть энергии, аккумулируемую в апертуре 7 мм которая составляет

$$1 - e^{-[(7^2/23,6^2)]} = 0,084$$

Следовательно, полная мощность, допустимая от 10-канальной матрицы будет составлять

$$P = 10 \text{ лазеров} \cdot 0,75 \text{ мВт на лазер}/0,084 = 93,5 \text{ мВт}$$

В данном примере показан метод классификации аппаратуры с большим видимым источником (> 100 мрад). Считается, что энергия излучается равномерно и строго перпендикулярно плоской поверхности, и т.к. пучок не структурирован (т.е. источник некогерентный или полностью диффузный), то реальная площадь излучения является видимым источником. Диаметр d и 1/e дивергенция пучка $Ф$ являются предполагаемыми параметрами.

Приложение В
(справочное)

Полезные преобразования

В.1 Пространственный угол, Ω, и линейный (полный) угол (или дивергенция), ϕ

Малоугловая аппроксимация: $\phi = (4\Omega/\pi)^{1/2}$ $\Omega = \pi/4\phi^2$;
Точная формула: $\Omega = 2\pi(1 - \cos(\phi/2))$.

В.2 Дивергенция Гауссового пучка или диаметр

$D_{0,50}/D_{1/e2} = 0,59 = 1/1,7$, где $D_{0,50}$ — диаметр в точках половинной плотности излучения;
$D_{1/e}/D_{1/e2} = 0,71 = 1/1,4$;
$D_{0,50}/D_{1/e} = 0,83 = 1/1,2$;
$D_{1/e}/D_{0,95} = 0,59 = 1/1,7$.

В.3 Градусы и радианы

Чтобы перевести градусы в радианы необходимо значение в градусах разделить на 57,3, а чтобы получить значение в миллирадианах необходимо значение в градусах умножить на 17,5.

В.4 Диаметр многомодового/мультимодового оптоволокна

$NA = \sin(\phi/2)$ $\phi = 2\sin^{-1}(NA)$ для 95 % точек.
Диаметр при $r = 2rNA/1,7$ в точках (1 — 1/e) для Гауссовых пучков.

В.5 Диаметр одномодового волокна

Диаметр на расстоянии $r = 2\cdot 2^{1/2}\cdot r\cdot\lambda/(\pi\omega_0)$ в точках 1/e для модополевого диаметра(диаметра при нескольких модах) ω_0 и длины волны λ.

Приложение ДА
(справочное)

Сведения о соответствии ссылочных международных стандартов межгосударственным стандартам

Таблица ДА.1

Обозначение ссылочного международного стандарта	Степень соответствия	Обозначение и наименование соответствующего межгосударственного стандарта
IEC 60825-1:2007	IDT	ГОСТ IEC 60825-1—2013 «Безопасность лазерной аппаратуры. Часть 1. Классификация оборудования, требования и руководство для пользователей»
Примечание — В настоящей таблице использовано следующее условное обозначение степени соответствия стандарта: - IDT — идентичный стандарт.		

Библиография

IEC 61040 (МЭК 61040)	Power and energy measuring detectors, instruments and equipment for laser radiation (Детекторы для измерения мощности и энергии, приборы и оборудование для лазерного излучения)
IEC 62471 (МЭК 62471)	Photobiological safety of lamps and lamp systems (Фотобиологическая безопасность ламп и ламповых систем)
ISO 11554 (ИСО 11554)	Optics and photonics — Lasers and laser-related equipment — Test methods for laser beam power, energy and temporal characteristics (Оптика и фотоника. Лазеры и оборудование с лазерным излучением. Методы контроля мощности лазерного пучка, энергии и тепловых характеристик)
ISO 11146-3 (ИСО 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 (Лазеры и оборудование с лазерным излучением. Методы контроля ширины лазерного пучка, углов дивергенции и коэффициентов распространения пучка. Часть 3. Сущностная и геометрическая классификация лазерного пучка, распространение и подробная информация о методах испытаний)
GALBIATI, Enrico	Evaluation of the apparent source in laser safety. *Journal of Laser applications* 2001, 13: p.141-149 (Оценка видимого источника при рассмотрении лазерной безопасности)
LYON, Terry	Hazard analysis technique for multiple wavelength lasers. *Health physics*, August 1985, 49(2): 221-226 (Методика анализа опасности для лазеров с множеством длин волн)

УДК 681.3:331.4:006.354 МКС 31.260 IDT

Ключевые слова: апертура, алгоритм классификации, временные характеристики источников, дивергенция, длина волны, источники, источники с широким спектром, источники с множеством длин волн, лазеры, матрицы, пределы допустимого уровня излучения, стягиваемый угол, сканирующие пучки

Редактор *Е.С. Романенко*
Технический редактор *В.Ю. Фотиева*
Корректор *С.И. Фирсова*
Компьютерная верстка *А.А. Ворониной*

Сдано в набор 03.11.2016. Подписано в печать 22.12.2016. Формат 60×84 1/8. Гарнитура Ариал.
Усл. печ. л. 6,51. Уч.-изд. л. 5,85. Тираж 25 экз. Зак. 3261

Подготовлено на основе электронной версии, предоставленной разработчиком стандарта

Издано и отпечатано во ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ», 123995 Москва, Гранатный пер., 4
gost.e-ecolog.ru gost.e-ecolog.ru

gost.e-ecolog.ru