**Воздействие лазерного излучения**

Введение

Использование лазерных приборов связано с определенной опасностью для человека. В данной работе будут рассмотрены только особенности конструирования и практического применения лазерных приборов, связанные с возможностью поражения глаз и кожных покровов человека. При этом основополагающими норматив­ными документами являются: 825-я публикация Международной тех­нической комиссии (МЭК) под названием "Радиационная безопас­ность лазерных изделий, классификация оборудования, требования и руководство для потребителей" как наиболее компетентная реко­мендация мирового класса; новейшая отечественная разработка СНиП; ГОСТы.

1. Физиологические эффекты при воздействии лазерного излучения на человека

Непосредственно на человека оказывает лазерное излучение любой длины волны; однако в связи со спектральными особенностя­ми поражения органов и существенно различными предельно до­пустимыми дозами облучения обычно различают воздействие на гла­за и кожные покровы человека.

1.1 Воздействие лазерного излучения на органы зрения

Основное вредное воздействие лазерное излучение оказывает на сетчатку глаза, причем хрусталик (и глазное яблоко), действуя как дополнительная фокусирующая оптика, существенно повышает концентрацию энергии на сетчатке.

Диапазон длин волн вредного воздействия на сетчатку глаза от 0.4 до 1.4 мкм.

1.1.1 МДУ прямого облучения сетчатки

Основное воздействие при импульсном воздействии оказывает тепловое разрушение сетчатке, при длительном воздействии излу­чения на сетчатку глаза приводит в основном к фотохимическим процессам ее разрушения.

Нормы плотности энергии для импульсного воздействия на сетчатку глаза [Дж/м^2]:

dt[мс] \ &[мкм] 0.4-0.7 1.05-1.4

< 2E-5 5E-3

2E-5..5E-5 5E-2

> 2E-5 18\*dt^0.75

> 5E-5 90\*dt^0.75

При наличии последовательности импульсов не только ни один из них, но и усредненная облученность не должны превышать МДУ. При усреднении воздействия последовательности импульсов с дли­тельностью dt<10 мкс и частотой повторения f>1 Гц МДУ одиночно­го импульса должен быть уменьшен в C5 раз:

C5= 1/sqrt(f) при 1<f<278 Гц. C5=0.06 при f>278 Гц.

Если длительность отдельных импульсов dt в последовательности превышает 10 мкс, то для длительностью Ndt за ограничение облу­ченности принимают 1/N часть МДУ

В сериях до 10-ти импульсов принимают длительность импуль­са равным длительности серии и счетают как в предыдущем пункте.

1.1.2 МДУ для наружных покровов глаз человека.

Невидимое УФ-(0.2..0.4мкм) или ИК-излучение (1.4..1000мкм) практически не доходят до сетчатки и поэтому может повреждать лишь наружные части глаза человека

1.1.3 Представление МДУ облучения как поверхности в координатах - t

В 825-й публикации МЭК определены МДУ облучения роговой оболочки глаза человека прямым (т.е. направленным) лазерным из­лучением.

1.1.4 МДУ облучения глаз рассеянным лазерным излучением.

На практике наиболее вероятно рассеянное лазерное излуче­ние. В этом случае очень важно при определении МДУ облучения перенормировать плотность излучения в диапазоне 0.4< <1.4 мкм. Достигающего сетчатки, поражая ее. Эта перенормировка связана с тем, что характер и размер поражения сетчатки изменяются в свя­зи с резким увеличением зоны облучения - от 0.01 мм., т.е. уг­ловой размер составляет 1' до a=0.015...0.24 рад.

1.2 МДУ лазерного облучения кожных покровов

МДУ лазерного облучения для кожных покровов человека опре­деляется по рекомендациям МЭК, и они несколько отличаются от значений, рассмотренных ранее для глаз в области видимого и ближнего ИК-излучения ( <1.4 мкм.)

Для определения МДУ для глаз и для кожных покровов пользу­ются таблицами, созданными по рекомендации МЭК.

2. Требования к изготовителям лазерных приборов в связи с обеспечением безопасности пользователей

МЭК рекомендует в связи с унификацией требований к конс­трукциям лазерных приборов разделять эти приборы на четыре класса с точки зрения опасности лазерного излучения для пользо­вателей.

2.1 Лазерные излучатели класса 1

Наиболее безопасными как по своей природе, так и по конс­труктивному исполнению являются приборы класса 1. Допустимые пределы излучения (ДПИ) лазерных приборов класса 1 в спектраль­ной области от 0.4 до 1.4 мкм, приведены в таблице

3. Технико-гигиеническая оценка лазерных изделий в России.

В систему документов, устанавливающих единую систему обес­печения лазерной безопасности, входят: технические средства снижения опасных и вредных производственных факторов, организа­ционные мероприятия, контроль условий труда на лазерных уста­новках.

К опасным и вредным производственным факторам относятся:

- лазерное излучение (прямое рассеянное, прямое, отраженное);

- световое излучение (УФ, видимое, ИК) от источников накачки или кварцевых газоразрядных трубок, а также от плазменных фа­келов и материалов мишени;

- шум и вибрации;

- ионизирующие и рентгеновское излучение (при анодом напряжении более 5 КВ);

- продукты взаимодествия ЛИ и мишеней;

- высокое напряжение в цепях питания;

- ВЧ- и СВЧ-поля от генераторов накачки;

- нагретые поверхности;

- токсичные и агрессивные вещества, используемые в конструкции лазера;

- опасность взрывов и пожаров.

Все факторы нормируются соответствующими ГОСТами.

3.1. Классы опасности лазерного излучения по СНиП 5804-91.

Наиболее опасно лазерное излучение с длинной волны: 0.38 -

1.40 мкм. - для сетчатки глаза; 0.18 - 0.38 мкм. и свыше 1.40 мкм. - для передних сред глаза; 0.18 - 100 мкм. (т.е. во всем диапазоне) - для кожи.

При конструировании лазерных установок руководствуются принцыпом исключения воздействия ЛИ на человека.

По степени опасности ЛИ делится на 4 класса:

1 класс - полностью безопасное ЛИ;

2 класс - ЛИ представляет опасность для кожи и глаз при облуче­нии коллимированным пучком, но безопасно при диффузном об­лучении;

3 класс - ЛИ видимого диапазона опасно для глаз (коллимирован­ное и диффузное излучение на расстоянии менее 10 см. от от­ражающей поверхности) и кожи (коллимированный пучок);

4 класс - диффузно отраженное ЛИ опасно для кожи и глаз на расстоянии менее 10 см.

3.2. Гигиеническое нормирование ЛИ.

Для кождого режима работы лазера и спектрального диапазона рекомендуются соответствующие предельно допустимые уровни (ПДУ) для энергии (W) и мощности (P) излучения, прошедшего ограничи­вающую апертуру d = 7 мм. для видимого диапазона или d = 1.1 мм. для остальных, энергетической экспозиции (H) и облученности (E), усредненных по ограничивающей апертуре:

H = W / Sa , E = P / Sa ,

где Sa - ограничивающая апертура.

Хронические ПДУ в 5 - 10 раз ниже ПДУ однократного воздейс­твия.При одновременном воздействии ЛИ разного диапазона их действие суммируется с умножением на соответствующий энер­го-вклад.

Лазерное излучение характеризуется некоторыми особеннос­тями :

1 - широкий спектральный (&=0.2..1 мкм) и динамический (120..200 дБ);

2 - малая длительность импульсов (до 0.1 нс);

3 - высокая плотность мощности (до 1e+9 Вт/см^2) энергии;

1. Измерение энергетических параметров и характеристик лазерного излучения

1.1 Измерение мощности и энергии лазерного излучения.

Энергия[Дж] - энергия,переносимая лазерным излучением - W Мощность [Вт] - энергия, переносимая лазерным излучением

в единицу времени - P

Средства измерения содержат :

1) ПИП - приемник (первичный) измерительный преобразова­тель

2) Измерительное устройство

3) Регулирующее или отсчетное устройство

В ПИП энергия преобразуется в тепловую или механическую или в электрический сигнал

ПИП делятся на два типа : поглощающего и проходного

В ПИП поглощающего типа, поступая на вход энергия лазер­ного излучения почти полностью поглощается и рассеивается в нем.

В ПИП проходящего типа рассеивается лишь поступившей на вход энергии излучения, а большая часть излучения проходит че­рез преобразователь и может быть использована для требуемых целей.

Измерительное устройство включает преобразовательные эле­менты и измерительную цепь. Их назначение - преобразование вы­хходного сигнала ПИП в сигнал, подаваемый на отсчетное уст­ройство.

Отсчетное или регистрирующее устройство служит для считы­вания или регистрации значения измеряемой величины.

1.1.1 Тепловой метод

Сущность метода состоит в том, что энергия излучения при взаимодействии с веществом ПИП превращается в тепловую энер­гию, которая впоследствии измеряется.

Для измерения тепловой энергии, выделяющейся в ПИП, обыч­но используют:

-термоэлектрический эффект Зеебека (возникновение тепло­вой ЭДС между нагретыми и холодными спаяными проводниками из двух разных металлов или проводников );

-боллометрический эффект (явлении изменения сопротивления металла или полупроводника при изменении температуры);

-фазовые переходы "твердое тело-жидкость" (лед-вода);

-эффект линейного или обьемного расширения веществ при нагревании ;

Необходимо отметить, что все тепловые ПИП в принципе яв­ляются калориметрами .

К достоинствам калориферов относятся :

-широкий спектральный и динамический диапазон работы;

-высокая линейность ,точность ,стабильность характеристик;

-простота конструкции ;

Тепловой поток : Ф=Gt (Tk -To ), где Gt - тепловая прово­димость; Rt/1=1/Gt - тепловое сопротивление.

Уравнение теплового равновесия имеет вид: dT(t) T(t)

P(t)=C\*----- + ---- , где P(t) - мощность, рассеиваемая в dT Rt

калориметре; C - теплоемкость;

T=Tk-To

Если в ПИП чувствительным элементом является термометри­ческое сопротивление, которое непосредственно воспринимает оп­тическое излучение и в нем присутствует приемный элемент, то такой ПИП называется болометром.

Принцип работы пироэлектрических ПИП основан на использо­вании пироэлектрического эффекта, наблюдаемого у ряда нецент­росимметричных кристаллов при их облучении и проявляющегося в возникновении зарядов на гранях кристалла перпендикулярных особенной полярной оси. Если изготовить небольшой конденсатор и между его обкладками поместить пироэлектрик, то изменения температуры, обусловленное поглощением излучения, будут прояв­ляться в виде изменения заряда этого конденсатора и могут быть зарегестрированы.

Выходной сигнал пироэлектрических ПИП пропорционален ско­рости изменения среднего прироста температуры (d T/dt) чувс­твительного элемента. Следствием этого является высокое быст­родействие пироприемников (до 1E- c), а также их чувствительность, большой динамический диапазон; широкий спектральный диапазон (0.4..10.6 мкм). Конструктивно чувстви­тельный элемент пироприемника не отличается от калометрических ПИП, за исключение самого чувствительного элемента, выполнен­ного из пироэлектрика.

В промышленности наибольшее распространение получили при­емники на основе титана бария, на основе керамики цирконат - титанат бария.

1.1.2 Фотоэлектрический метод

Основан на переходе носителей заряда под действием фото­нов измеряемого излучения на более высокие энергетические уровни.

В качестве ПИП используют фотоприемники (ФП), которые де­лятся на 2-е группы : с внешним и внутренним фотоэффектом. Внешний заключается в выбивании фотоном электрона из металла, находящегося в вакууме, внутренний - в переходе электронов из связывающего состояния под действием фотонов в свободное т.е. в возбужденное состояние внутри материалов. В обоих случаях переход происходит при поглощении веществом отдельных квантов излучения, поэтому ФП являются квантовыми преобразователями. Выходной электрический сигнал ФП зависит не от мощности падаю­щего излучения, а от количества квантов излучения и энергии каждого кванта.

Общее выражение преобразования входного оптического сиг­нала в выходной электрический сигнал :

I-Iфп+Iт=S P+Iт

Где I - полный ток, протекающий через фотоприемник [A] Iфп - ток через фотоприемник, вызванный падающим по-

током излучения [A]

Iт - темновой ток [A]

S - абсолютная спектральная чувствительность [A/Вт] P - мощность падающего на ФП излучения [Вт]

Фотоприемники с внешним фотоэффектом

Энергия фото ЭДС, испущенных с поверхности катода под действием Э/М излучения :

W=hv-w

где w - постоянная, зависящая от природы материала фото­катода.

Испускание e происходит лишь при hv > w = hv , где v - пороговая частота, наже которой фотоэффект невозможен.

Длину волны &=C/v называют границей фотоэффекта.

К ФП на основе внешнего фотоэффекта относятся вакуумные приборы : фотоэлементы (ФЭ) и фотоумножители (ФЭУ).

S&=Qэф\*&/1.24, где Qэф - эффективный квантовый выход. Шумы и шумовые токи ФЭ сравнительно невелики, однако

из-за низкой чувствительности ФЭ нецелесообразно применять их для измерения малых уровней сигналов.

ФЭУ обладают высокой чувствительностью благодаря наличию умножительной (динодной) системы.

m

Коэффициент усиления ФЭУ : M=П ,

i=1

Где - коэффициент вторичной эмиссии i-го динода

- коэффициент сбора электронов m - число каскадов усиления.

S = S \* M , где S - абсолютная спектральная чувствитель­ность фотокатода.

Чувствительность ФЭУ может достигать ~1E А/Вт в max спектральной характеристике.

Фотопреобразователи на основе внутреннего фотоэффекта

К ним относятся фоторезисторы, фотодиоды, фототранзисторы. Действие ФР основано на явлении фотопроводимости, заклю-

чающееся в возникновении свободных носителей заряда в некото­рых п/п и диэлектриках при падении на них оптического излуче­ния. Фотопроводимость приводит к уменьшению электрического сопротивления, и соответственно, к увеличению тока, протекаю­щего через ф/р.

U &

S = e\*V\*Q --- \* ----

e 1.24

где e - заряд электрона

V - объем освещенной части п/п

Q - квантовый выход внутреннего фотоэффекта

- подвижность носителей

U - напряжение, приложенное к ФР

Действие кремниевых и германиевых ФД: возникновение под действием излучения неосновных носителей, которые диффундируют через p-n переход и ослабляют электрическое поле последнего, что приводит к изменению электричекого тока в цепи. Фототок зависит от интенсивности падающего излучения. Для измерения энергетических параметров лазерного излучения обычно использу­ют фотодиодный режим (с питанием).

S =т\* \*Q\*&(1-p)/1.24 где т - коэффициент пропускания окна прибора; - коэффициент собирания носителей; Q - квантовый вы­ход; & - длина волны излучения; p - коэффициент отражения.

Темновые токи у кремниевых фотодиодов примерно на порядок ниже, чем у германиевых и достигают 1E-5 .. 1E-7 A.

Для измерения относительно больших уровней мощности и энергии целесообразно применять ПИП с невысокой чувствитель­ностью, т.е. ФЭ. Для измерения средних уровней энергетических параметров лазерного излучения можно применять как вакуумные приборы так и п/п.

Фотодиоды уступают по чувствительности ФЭУ, однако ФД об­ладают низким уровнем шума.

Преимущества ФД по сравнению с ФЭУ:

- небольшие габариты

- низковольтное питание

- высокая надежность

- механическая прочность

- более высокая стабильность чувствительности

- низкий уровень шумов

Недостатки :

- меньшее быстродействие

- сильное влияние температуры на параметры и характерис­тики прибора.

1.1.3 Пондеромоторный метод

В пондеромоторных измерителях энергии и мощности лазерно­го используется эффект П.Н. Лебедева. Лазерное излучение падает на тонкую приемную пластинку и давит на нее. Давление (сила) измеряется чувствительным преобразователем.

Классический прибор для измерения малых сил - крутильные весы. При попадании оптического излучения на приемное крыло подвижная система отклоняется от положения равновесия на неко­торый угол, по величине которого можно судить о значении мощ­ности или энергии.

Значение угла \_\_ при воздействии на нее непрерывного из­лучения мощностью P:

где p - коэффициент отражения пластины

т - коэффициент пропускания входного окна камера

- угол падения излучения на пластинку

C - скорость света

K - жесткость подвеса

где W - энергия излучения

J - момент инерции вращающейся системы

Для отсчета угла поворота крутильных весов часто исполь­зуют емкостной преобразователь. В этом случае пластина проти­вовеса является одной из пластин конденсатора, включаемого в резонансный контур генератора. При повороте подвижной системы емкость конденсатора изменяется, меняется частота генерации, что измеряется частотным детектором. Такая конструкция гро­моздка, хотя и очень чувствительна.

Другой способ реализации высокочувствительной системы отсчета является схема с 2-мя ф/р. При отклонении системы, ос­вещенность ф/р меняется, мост разбалансируется и в его измери­тельной диагонали появляется ток, пропорционален углу отклоне­ния, который регистрирует mA.

Помимо крутильных весов для измерения широко используется механотроны, которые представляют собой электровакуумный при­бор с механически управляемой электродами. При воздействии внешнего механического сигнала в механотроне происходит пере­мещение подвижных электронов, что вызывает соответствующее из­менение анодного тока.

Достоинства и недостатки методов:

Достоинства теплового метода:

1) широкий спектр и динамический диапазон измерений

2) простота и надежность измерительных средств

3) высокая точность

Недостатки:

1) малое быстродействие и чувствительность

Достоинства ф/э метода:

1) максимальная чувствительность и быстродействие

Недостатки:

1) сравнительно узкий спектральный диапазон

2) большая погрешность измерения (5..30%) по сравнению с тепловыми приборами.

Достоинства пондеромоторного метода:

1) высокий верхний предел измеряемой энергии и мощности

2) высокая точность измерений

Недостатки:

1) жесткие требования к условиям эксплуатации (вибрации)

1.2 Измерение основных параметров импульса лазерного излучения

Ряд активных сред работают в импульсных режимах генерации:

1) это лазеры на самоограниченных переходах - азотный ла­зер, генерирующий в УФ диапазоне, и лазер на парах Cu, дающий мощные импульсы зеленого цвета

2) рубиновые лазеры

В результате возникает задача: измерить основные параметры генерации импульсных лазеров. Разделяют измерение временных и энергетических параметров.

Измерение энергии импульса проводится обычно с помощью ф/э приемника с высоким временным разрешением.

1.2.1 Анализ параметров импульса с помощью осциллографа

Для измерения формы импульса и его временных параметров (длительности т, tнар и tспада) используют быстродействующие фотоприемники с высокой линейностью световой характеристики. Это коаксиальные ф/э серии ФЭК : их временное разрешение 1e-9..1e-10 с.

Для измерения формы импульса используют обычные уни­версальные осциллографы с половой пропускания до 1e7 Гц, и спе­циальные сверхкороткие осциллографы.

1.2.2 Изучение формы сверхкоротких лазерных импульсов

Используют косвенные методы, основанные на применении вре­менной развертки, используемой в оптико-электронных осциллогра­фах. Использование оптико-механической развертки не позволяет сколь либо угодно улучшить временное разрешение, но позволяет осуществить набор двумерных или одномерных изображений.

ЭОПы с разверткой обычно используют для исследования толь­ко временных зависимостей интенсивности сфокусированного пучка излучения (т.к. частота смены кадров гораздо ниже, что затруд­няет исследование динамики процесса генерации).

Однако сложность, высокая стоимость, громоздкость и необ­ходимость высококвалифицированного обслуживания затрудняет использование камер с оптико-механической и электронной. Поэто­му использую часто оптический метод измерения длительности им­пульса.

"Световая" развертка была предложена в 1967 г. Джордмейном при изучении длительности "nс" импульсов при распространении двух одинаковых световых пучков навстречу друг другу в растворе нелинейно люминесцирующего красителя.

В первом эксперименте "стоячая" волна образовывалась путем отражения основного пучка "nс" импульсов в зеркале кюветы с красителем. Возле зеркала (и далее с шагом l=TC/n) плотность энергии прямого и отраженного пучка будет max из-за совпадения i-го импульса. Левее зеркала на l будут совпадать (i-1)-й им­пульс в прямой волне и (i+1)-й импульс - в отраженной. При уда­лении от зеркала на 2l двуфотонная люминесценция красителя бу­дет ярче из-за наложения (i-2) и (i+2)-го импульсов луча. Яр­кость фонового свечения 2-х фотонной люминесценции B~I^2 ин­тенсивности, а max яркости возле зеркала : B~(2\*I)^2=4\*Ш^2, т.е. заметно выше.

1.3 Измерение пространственного распределения энергии в лазерном пучке

Наиболее полная пространственно-энергетическая характе­ристика лазерного излучения является диаграмма направленности, т.е. угловое распределение энергии или мощности в лазерном

пучке. Практичекий интерес представляет распределение поля из­лучения в дальней зоне, когда форма распределения перестает зависеть от расстояния, превышающее d^2/&, где d - диаметр из­лучающей апертуры лазера.

На практике используют два понятия расходимости, в первом случае имеют ввиду плоский или телесный угол Q или Qs опреде­ляющий ширину диаграмму направленности в дальней зоне по за­данному уровню углового распределения энергии или мощности, отнесенного к его max значению. Чаще всего значение уровня принимается равным 0.5 и 1/e^2. Это определение характеризует излучение одномодового лазера, т.е. распределение, близкое к гауссовому. В случае многомодового режима диаграмма имеет мно­гочисленные боковые лепестки, содержащие значительную часть энергии. Поэтому величина расходимости по заданному уровню энергии или мощности, т. е. по существу центрального max расп­ределение не очень показательна. В таких случаях более удобной характеристикой является энергетическая расходимость лазерного излучения. (Qn,p или Qw,s), т.е. плоский или телесный угол, внутри которого распространяется заданная доля энергии излуче­ния.

Лазерное излучение характеризуется значением диаметра пучка лазерного излучения, внутри которого происходит заданная доля энергии или мощности.

Для практического определения расходимости используют три основных метода:

1) Метод 2-х сечений

2) Метод регистрации диаграммы направленности

3) Метод фокального пятна

Наиболее распространенный метод измерения расходимости пучка - метод фокального пятна.

1.4 Измерение поляризации лазерного пучка.

В лазерах излучение должно обладать 100% поляризацией (линейной или круговой). Вид поляризации определяется особен­ностями используемой в лазере активной среды - поляризацией ее спонтанного излучения, и величиной коэффициента усиления для элементарных поляризаций.

Все "элементарные" состояния поляризации могут быть полу­чены из 2-х линейно поляризованных во взаимно - плоскостях из­лучений с амплитудой Ax и Ay.

2. Измерение спектральных и корреляционных параметров и характеристик лазерного излучения.

Когерентность характеризуется двумя основными параметрами

- временной когерентностью

- степенью пространственной когерентности

2.1 Влияние параметров лазера на когерентность его излучения

Лазер - прибор, в котором частота генерации зависит от собственных (резонансных) частот резонатора. К вторичным эф­фектам, изменяющим частоту генерации лазера оказывают эффекты затягивания или отталкивания. Гораздо сильнее на частоту гене­рации лазера влияют параметры активной среды: центральная час­тота лазерного перехода, ширина спектральной линии.

Измерение лазерных характеристик может быть разделено на 3 группы:

1) Измерение спектра излучения многомодовых лазеров неп­рерывного действия и "nc" лазеров

2) Прецезионное измерение длины волны или чатоты генера­ции

3) Измерение ширины полосы генерации одночастотного лазе­ра или разности частот генерации 2-х однотипных частотностаби­лизированных лазеров.

3. Измерение основных параметров главных компонентов лазера

Главные компоненты лазера: активная среда и оптический резонатор. Активная среда, преобразующая энергию накачки в ко­герентное излучение, определяет энергетические характеристики лазера и длину волны излучения, а от резонатора - частотные и пространственные.

Для измерения потерь или усиления лазерных компонентов используют компенсационный метод, для измерения ненасыщенного усиления - метод комбинированных потерь, прямой метод.