

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Ф.А. Губарев

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

*Методические указания к выполнению лабораторной работы
по курсу «Оптические методы в биологии и медицине» для
студентов магистратуры по направлению 12.04.04
«Биотехнические системы и технологии»*

2017

Цель работы:

Провести измерения геометрических параметров лазерного пучка - расходимость пучка и его поперечные размеры. Понять причины возникновения расходимости излучения.

Предварительное задание

Изучить геометрические методы измерения параметров лазерного пучка. Определить дифракционную расходимость луча диаметром 1,5 мм для длин волн $\lambda_1=632,8$ нм и $\lambda_2=532$ нм и диаметр дифракционно-ограниченного пучка на расстоянии 25 м.

Теоретические сведения

Важной характеристикой лазерной системы является расходимость излучения, выраженная в радианах. Чем меньше расходимость, тем меньше диаметр пучка на расстоянии от источника будет отличаться от исходного. Кроме того, этот параметр ответствен за то, в каком минимальном объеме может быть сконцентрировано лазерное излучение. Известно, что предельный размер пятна фокусировки определяется дифракционными явлениями и примерно равен длине волны излучения. Однако в реальных лазерных системах ограничение на степень фокусировки наступает на более ранней стадии из-за расходимости пучка. Ограничения на расходимость в мощных лазерных установках возникают из-за многих причин, прежде всего в результате неоднородности активной среды в больших объемах и отклонения от идеальных оптических поверхностей призм, линз, зеркал и других элементов, используемых в усилителях. Неоднородности активной среды могут возникнуть из-за несовершенства технологии ее изготовления (например, микропримеси, вкрапления, дефекты кристаллической решетки и т.п.). Они могут также появиться в процессе работы лазера: термические искажения из-за неравномерной накачки и, следовательно, неравномерного нагрева объема активной среды, самофокусировка, облегчающаяся при наличии неоднородностей интенсивности в поперечном сечении лазерного пучка и т.д.

При определении расходимости лазерного пучка необходимо различать структуру поля излучения в «ближней» и «дальней» зонах.

Некогерентная компонента излучения (а таковая в той или иной мере всегда присутствует в выходном пучке), дифракция на выходной апертуре, рассеяние на неоднородностях активной среды и зеркал и пр. дадут в «ближней» зоне смесь плоских и сферических волн. Эту область еще называют «френелевой».

Как видно из рис. 1, на расстоянии

$$l_0 = D^2 / \lambda \quad (1)$$

некогерентная компонента выходит за пределы основного «когерентного» пучка излучения. Далее остается компонента с плоским фронтом волны, которую обычно описывают приближением Фраунгофера. Таким образом, при

$$l < l_0 = D^2 / \lambda$$

мы имеем ближнюю («френелеву») зону, а при

$$l > l_0 = D^2 / \lambda$$

дальнюю («фраунгоферову») зону.

Для He-Ne-лазера ($\lambda = 632,8$ нм) с диаметром пучка 4 мм из формулы (3.1) получаем $l_0 = 25$ м.

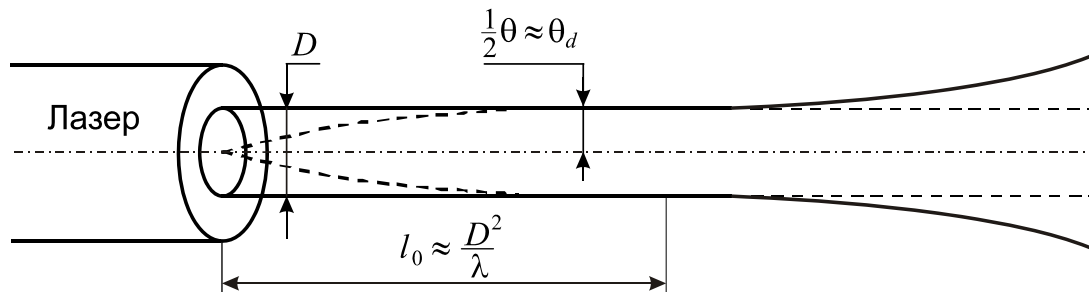


Рис. 1. Ближняя и дальняя зоны лазерного пучка

Рассмотрим волну с полной пространственной когерентностью (идеальный случай). Даже в этом случае пучок с конечной апертурой будет неизбежно расходиться вследствие дифракции. На рис. 3.2, а изображена волна с однородным поперечным распределением интенсивности и плоским волновым фронтом, падающая на экран S с круговым отверстием диаметром D. Согласно принципу Гюйгенса-Френеля волновой фронт пучка в некоторой плоскости P за экраном можно представить как результат суперпозиции элементарных волн (вэйвлетов), испущенных из каждой точки отверстия. Видно, что из-за конечности диаметра отверстия D пучок должен иметь конечную расходимость. Величину угла дифракционной расходимости (относительно оси пучка) можно определить из выражения:

$$\theta_d = \beta\lambda / D, \quad (2)$$

где β – числовой коэффициент порядка единицы, точное значение которого зависит от формы отверстия и вида распределения интенсивности излучения в его плоскости. В случае бесконечной щели шириной D коэффициент $\beta=1$. В случае равномерно освещенного круглого отверстия $\beta=1,22$. Пучок, угол расходимости которого может быть выражен соотношением (3.2), в котором $\beta \sim 1$, называют дифракционно-ограниченным. В случае если лазерный луч выходит через круглое отверстие диаметром D, полная расходимость дифракционно-ограниченного пучка будет определяться как

$$\theta_{DL} = 2\theta_d = 2,44\lambda / D \quad (3)$$

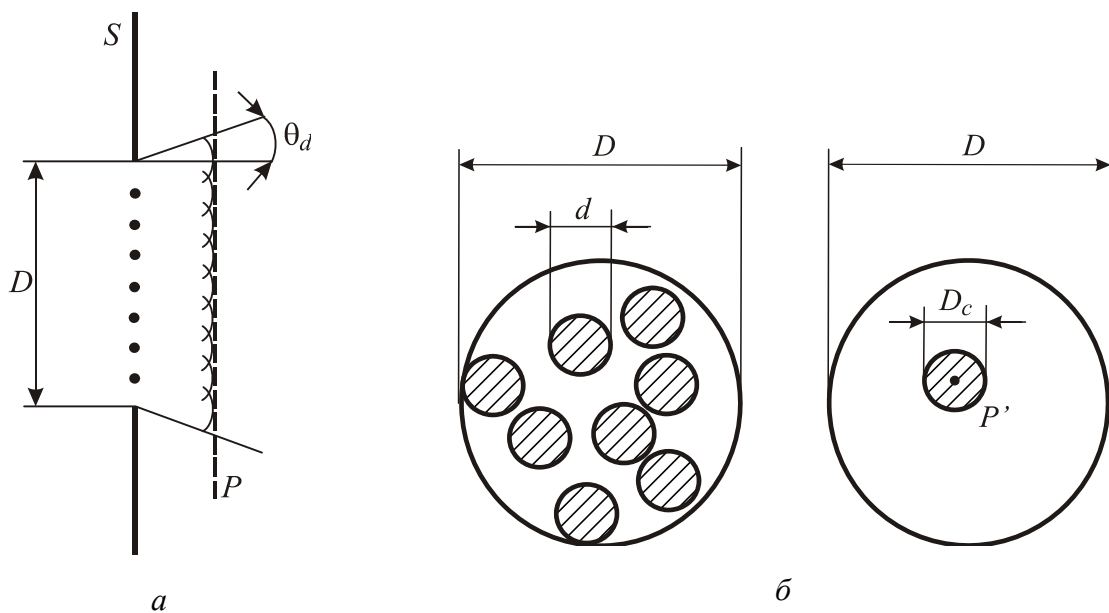


Рис. 2. Расходимость плоской, пространственно-когерентной, электромагнитной волны вследствие дифракции (а) и примеры пучков с частичной пространственной когерентностью (б)

Если пучок имеет только частичную пространственную когерентность, то его расходимость будет больше минимальной величины, обусловленной дифракцией. Действительно, для любой точки P' волнового фронта принцип Гюйгенса-Френеля может быть применен только к точкам, лежащим в пределах площади когерентности S_c вблизи P' . Таким образом, размеры области когерентности играют роль ограничивающего отверстия для когерентной суперпозиции элементарных волн. В случае если пучок диаметром D состоит из множества некоррелированных пучков меньшего диаметра d (рис. 2б), каждый из которых является дифракционно-ограниченным (т.е. пространственно когерентным), расходимость всего пучка в целом будет равна $\theta_d = \beta\lambda/d$. Если бы такие пучки были коррелированными (т.е. их излучение являлось бы синхронным), то расходимость бы равнялась $\theta_d = \beta\lambda/D$. В общем случае, когда пучок имеет заданное распределение интенсивности по диаметру и область когерентности диаметром D_c в заданной точке P (рис. 2б), угол расходимости будет определяться как

$$\theta_d = \beta\lambda / D_c . \quad (4)$$

Итак, понятие направленности тесно связано с понятием пространственной когерентности.

Поскольку волны, испущенные из каждой области когерентности, в общем случае не когерентны друг с другом, на больших расстояниях (в дальней зоне) необходимо суммировать не напряженности, а интенсивности полей. Пусть волна представляет собой два когерентных пучка от соседствующих источников, с диаметром поперечного сечения D_c каждый (рис. 3), причем эти пучки не когерентны друг с другом. Положим $D_c = 100$ мкм и $\lambda = 0,5$ мкм. В соответствии с соотношением (4) имеем $\theta_d = 2 \cdot 10^{-2}$ рад, так что на расстоянии, например, $L = 25$ м диаметр поперечного сечения пучка, исходящего из первой области когерентности, будет равен

$$D \approx D_c + 2\theta_d L \approx 2\theta_d L = 1 \text{ м} .$$

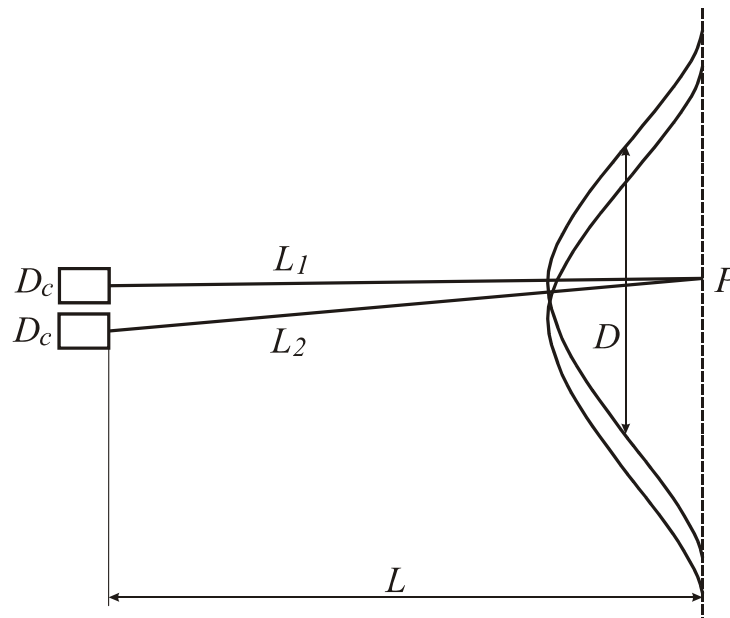


Рис. 3. Поперечные профили излучения от двух некогерентных источников на большом расстоянии

В той же плоскости диаметр поперечного сечения пучка, исходящего из второй области когерентности, будет также равен D , при этом сечения будут сдвинуты на пренебрежимо малую величину, равную D_c . Таким образом, на больших расстояниях суммарный пучок

будет иметь такие же поперечные размеры, что и пучок, приходящий из одной зоны когерентности.

Итак, имеем

$$D = 2\theta_d L = 2(\beta\lambda / D_c)L . \quad (5)$$

Следовательно, угол расходимости пучка составляет

$$\theta = D/2L = \beta\lambda / D_c . \quad (6)$$

Измерение расходимости излучения

Расходимость интересующего нас излучения определяется, конечно, структурой поля в дальней зоне. Существует два основных способа, с помощью которых можно измерить направленность или расходимость лазерного пучка.

1) Путем измерения диаграммы направленности пучка на большом расстоянии от источника. Пусть D_1 – диаметр пучка, измеренный на очень большом расстоянии L от источника (в дальней зоне). Тогда половинный угол диаграммы направленности пучка θ (рис. 3.4) может быть получен из соотношения:

$$\theta = 2 \cdot \arctg(D_1/2L) \approx D_1/L . \quad (7)$$

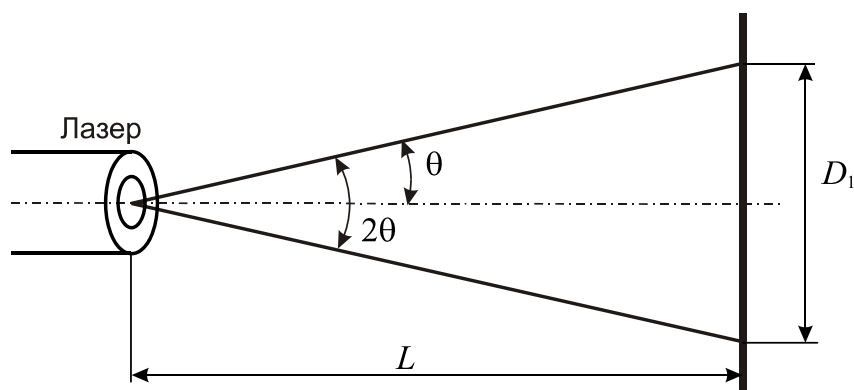


Рис. 4. Измерение расходимости излучения в дальней зоне

В лабораторных измерениях проводить измерения характеристик лазерного пучка непосредственно в дальней зоне порой проблематично из-за линейных размеров. Как указывалось выше при $D = 4$ мм и $\lambda = 632,8$ нм длина ближней зоны составляет порядка 25 м. Соответственно, измерения расходимости и поперечных размеров пучка следует проводить на расстояниях больших 25 м. Поэтому в лабораторной практике для измерения поля в дальней зоне используют обычно метод фокусировки излучения.

2) Метод фокусировки излучения заключается в измерении радиального распределения интенсивности $I(r)$ пучка, сфокусированного в фокальной плоскости линзы.

Объектив (в отсутствие aberrаций) превращает плоский фронт волны в сферический, т.е. в точечное изображение в фокусе оптической линзы. Если же волна не плоская (т.е. луч расходится), то в фокальной плоскости получается круглое изображение конечных размеров с диаметром d

$$d = \theta \cdot F , \quad (8)$$

где F - фокусное расстояние объектива.

Тем самым, чтобы измерить расходимость θ , т.е. на половине интенсивности, необходимо использовать безаберрационный объектив с известным фокусным расстоянием и апертурой большей сечения пучка, измерить величину d на уровне $I_{\max}/2$ и подставив в формулу (8) получить величину θ . Чем больше фокусное расстояние объектива (линзы), тем точнее будет определено значение θ .

Величину d можно определить фотографическим способом – размещая фотопленку в фокальной плоскости, с последующим фотометрированием по стандартным методикам.

Можно воспользоваться и методом калиброванных диафрагм. В этом случае, размещая поочередно диафрагмы с известным диаметром отверстия d_1 в фокальной плоскости, измеряют мощность (интенсивность) прошедшего излучения (используя стандартный измеритель мощности лазерного излучения, либо ФЭУ, с последующим усилением сигнала, если его величина мала). Соответственно, при $d_1 > d$ все излучение пройдет через диафрагму, при $d_1 < d$ – лишь часть. При прохождении половины интенсивности $d_1 = d$. И далее определяем θ .

Возможен еще один простой вариант определения θ , объединяющий оба предыдущих способа, и более точный.

В фокальной плоскости длиннофокусной линзы размещают диафрагму с диаметром d_1 заведомо много меньшим d . Затем, прецизионно перемещая диафрагму поперек оси пучка, получают радиальное распределение интенсивности пучка, определяют I_{\max} , и d на уровне $I_{\max}/2$. В качестве приемника излучения здесь также используется либо измеритель мощности, либо другой стандартный прибор.

Более точное определение расходимости лазерного пучка возможно с привлечением более сложных методов.

Измерение поперечных размеров пучка

Поперечные размеры пучка легко определять для видимого излучения имеющего размеры более нескольких миллиметров.

Самый простой способ - визуальный. Здесь возможно несколько вариантов. Первый – просто измеряя линейкой диаметр пучка (обязательно с использованием защитных очков!). Второй - пропуская несфокусированный луч через набор калиброванных диафрагм (но естественно здесь существенно большего диаметра d_2 , чем в случае определения расходимости излучения). При $d_2 = D$ все излучение должно проходить через диафрагму. Это значение и принимается за диаметр пучка. При поперечных размерах пучка около 1–2 мм и меньше описанные приемы дают большую ошибку. В этом случае, расширив размеры пучка с помощью объектива с большей апертурой, чем сечение пучка и известным фокусным расстоянием имеют следующую картину (рис. 5).

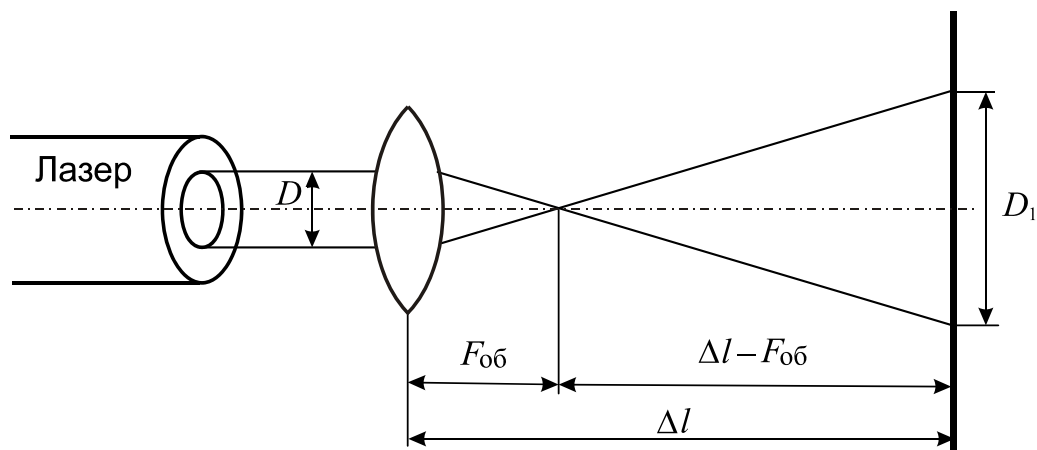


Рис. 5. Схема измерения поперечных размеров лазерного пучка

Из геометрического рассмотрения имеем:

$$D = \frac{D_1 \cdot F_{об}}{\Delta l - F_{об}} \quad (9)$$

С определением поперечных размеров пучка излучения невидимого диапазона спектра дело обстоит несколько сложнее. Здесь надо использовать специальные приемники излучения (как впрочем, и при измерении расходимости излучения).

Программа работы

1. Измерить расходимость излучения гелий-неонового лазера.
2. Измерить диаметр пучка излучения гелий-неонового лазера.
3. Измерить расходимость излучения твердотельного лазера.
4. Измерить диаметр пучка излучения твердотельного лазера.
5. Сравнить полученные результаты с расчетными данными для случая дифракционной расходимости.
6. Высказать свои соображения о точности измерения указанных величин.

Контрольные вопросы

1. Что такое расходимость лазерного излучения?
2. Чем обусловлена расходимость излучения?
3. Из каких компонент состоит лазерное излучение?
4. Чем ограничивается минимальная расходимость пучка излучения?
5. Как уменьшить расходимость? Можно ли сделать её нулевой?
6. Какие методы измерения расходимости вы знаете?
7. Поясните понятия дифракции Френеля и дифракции Фраунгофера.
8. Как соотносится диаметр пучка с диаметром ГРТ?
9. Как нужно выбирать расстояние от выходного окна лазера до линзы и от линзы до экрана при измерении расходимости?
10. На каком расстоянии от источника излучения следует измерять расходимость пучка?