

ПРИМЕНЕНИЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРА ФАБРИ-ПЕРО ДЛЯ СЕЛЕКЦИИ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ В УСЛОВИЯХ БОЛЬШОЙ ФОНОВОЙ ЗАСВЕТКИ

С. А. Анциферов, В. В. Калиновский

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Применение лазеров актуально для различных приложений, в которых необходимо зондировать атмосферу на дальние расстояния. Часто излучение, пройдя сквозь атмосферу, имеет слабую интенсивность и почти незаметно в условиях солнечной засветки. Современные отечественные интерференционные фильтры имеют полосу пропускания 10...30 нм, и их часто не хватает для эффективного ослабления фона. Поэтому для регистрации излучения желательно иметь дополнительное устройство, позволяющее ослаблять фон и пропускать только необходимое нам лазерное излучение. Таким устройством может быть интерферометр Фабри-Перо (ИФП). Целью данной работы была разработка селектора на основе интерферометра Фабри-Перо для выделения лазерного излучения и ослабления фоновой засветки до необходимого уровня.

Интерферометр Фабри-Перо представляет собой две плоские зеркальные пластины с коэффициентом отражения r . При прохождении пучка света через интерферометр в результате многократных отражений образуется ряд параллельных, интерферирующих между собой, световых пучков [1].

Важнейшими характеристиками интерферометра Фабри-Перо являются: контраст C (соотношение интенсивностей в максимуме и минимуме в спектральном распределении излучения, прошедшего интерферометр), аппаратная ширина интерферометра $\delta\lambda$ (ширина контура изображения бесконечно узкой спектральной линии на выходе интерферометра); и область свободной дисперсии $\Delta\lambda$ (интервал длин волн, для которых коэффициент пропускания интерферометра минимален) [2, 3]. Область свободной дисперсии определяет ширину спектрального диапазона, который может быть исследован в данном порядке интерференции. Если она окажется меньше ширины линии, излучаемой источником, то соседние кольца сливаются, и юстировка интерферометра при этом невозможна [3, 4]. Важной характеристикой является также отношение величины аппаратной ширины ИФП к величине области свободной дисперсии w . Указанные характеристики ИФП описываются следующими формулами:

$$w = \frac{\delta\lambda}{\Delta\lambda} = \frac{1-r}{\pi\sqrt{r}} \quad (1)$$

$$C = \frac{I_{\max}}{I_{\min}} = \frac{(1+r)^2}{(1-r)^2} \quad (2)$$

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2d} \quad (3)$$

$$\delta\lambda = \frac{\lambda^2(1-r)}{2d\pi\sqrt{r}} \quad (4)$$

где λ – длина волны излучения, r – коэффициент отражения зеркал, d – расстояние между зеркалами.

Распределение интенсивности излучения в интерференционной картине, образованной в фокальной плоскости, определяется следующим выражением [5]:

$$I = \frac{T^2}{(1-r)^2 + 4r\sin^2\pi m} \quad (5)$$

Здесь r – коэффициент отражения, а T – коэффициент пропускания зеркала интерферометра, причем предполагается, что оба зеркала имеют одинаковые r , T и e (e – коэффициент поглощения) [1].

На рис. 1 видно, что спектральное распределение света, прошедшего интерферометр, состоит из линий с шириной, равной аппаратной ширине, отстоящих друг от друга на интервал длин волн, равный $\Delta\lambda$.

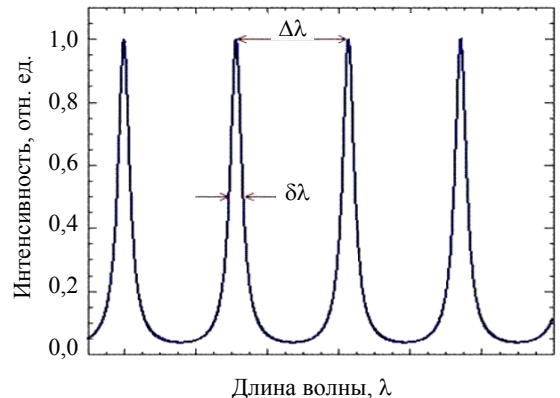


Рис. 1. Спектральное распределение излучения, прошедшего через интерферометр Фабри-Перо

Таким образом, можно выбрать параметры интерферометра так, чтобы излучение лазера соответствовало аппаратной ширине интерферометра и при выполнении условия максимума (то есть когда оптическое расстояние от одного зеркала до другого равно целому числу длин волн) проходило через интерферометр, а остальное излучение отражалось. На этом и основан предлагаемый метод выделения слабого рабочего сигнала и ослабления фоновой засветки.

Было решено проводить исследования с использованием He-Ne лазера с длиной волны 632,8 нм, то есть настроить интерферометр так, чтобы он пропускал излучение данного лазера и ослаблял иное излучение. Для того чтобы определить, какие необходимы настройки интерферометра, были произведены измерения ширины линии излучения лазера. Был сформирован расходящийся пучок, который, пройдя интерферометр, фокусировался линзой на матрицу камеры Spigicon. На матрице формировалась интерференционная картина, представляющая собой концентрические кольца. Измеряя ширину и радиус колец, вычислялась спектральная ширина линии излучения лазера $\delta\lambda$. Расчет проводился по следующей формуле [6].

$$\delta\lambda = \lambda \frac{R\Delta R}{F^2}, \quad (6)$$

где R – радиус интерференционного кольца, ΔR – толщина того же кольца, F – фокусное расстояние линзы.

Была определена ширина линии излучения He-Ne лазера: $\delta\lambda = (1,32 \pm 0,23)10^{-2}$ нм.

По формулам (3, 4) были рассчитаны основные характеристики интерферометра Фабри-Перо для имеющих зеркала с коэффициентами отражения 0,98 и 0,71. Ширина линии излучения He-Ne лазера практически совпала с аппаратурной шириной при коэффициентах отражения зеркал 0,71 и расстоянии между ними 2 мм. Для подтверждения этого, были проведены измерения пропускания интерферометра в зависимости от расстояния между зеркалами.

Параллельный лазерный пучок направлялся на фотоприемник. Измеряя напряжение с него, судили об интенсивности излучения. Затем между источником лазерного излучения и фотоприемником ставился интерферометр, и производилась его юстировка. По изменению напряжения с фотоприемника судили о коэффициенте пропускания ИФП. Результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты измерений пропускания ИФП излучения He-Ne лазера при различных расстояниях между зеркалами. Коэффициент отражения зеркал 0,71

Расстояние между зеркалами, мм	Пропускание ИФП излучения He-Ne лазера, %
0,3	66
0,6	66
1	65
2	63
3	49

То, что с уменьшением расстояния между зеркалами, начиная с 1 мм, пропускание не увеличивается, говорит о том, что аппаратурная ширина становится больше ширины линии излучения лазера. Теоретически пропускание интерферометра может достигать 100%. Полученный результат объясняется низким качеством зеркал и возможной неточностью настройки интерферометра.

Необходимо учитывать, что регистрируемое лазерное излучение может приходиться на фотоприемное устройство с некоторой угловой неопределенностью. При этом для некоторых углов нарушится условие максимума пропускания ИФП, и появятся потери излучения. Для исследования зависимости пропускания интерферометра от угла падения на него излучения был выполнен следующий эксперимент. При помощи телескопа и диафрагмы был сформирован пучок лазера с расходимостью $8 \cdot 10^{-5}$ рад. Излучение направлялось на интерферометр и затем фокусировалось в фотоприемник. Сам интерферометр располагался на поворотном столе для изменения угла падения на него излучения. Результаты измерений приведены на рис. 2, 3.

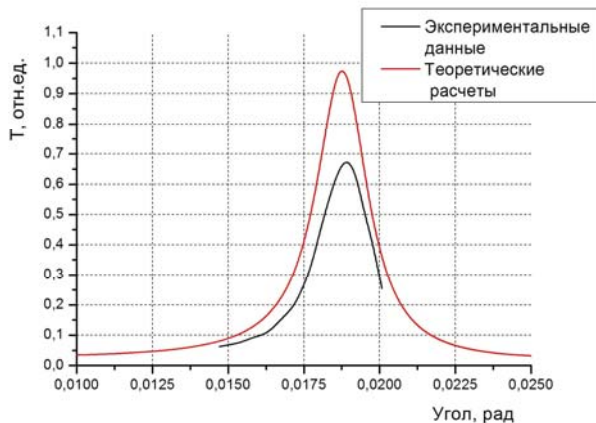


Рис. 2. Теоретическая и экспериментально измеренная зависимость пропускания интерферометра от угла падения на него излучения ($r = 0,71$; $d = 1$ мм)

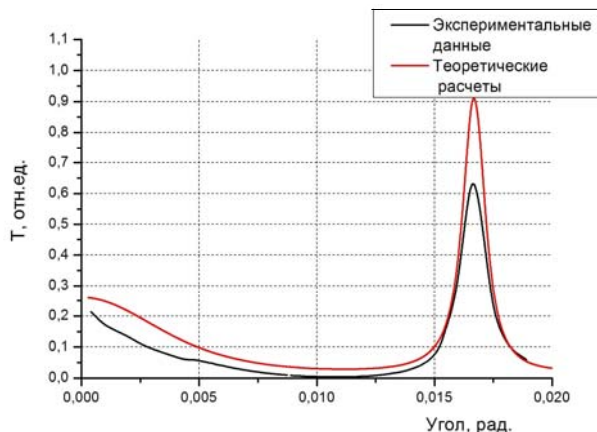


Рис. 3. Теоретическая и экспериментально измеренная зависимость пропускания интерферометра от угла падения на него излучения ($r = 0,71$; $d = 2$ мм)

Видно, что полученная в эксперименте зависимость близка к теоретической. Низкое качество зеркал привело к уменьшению максимума пропускания, но не оказало влияния на зависимость пропускания интерферометра от угла падения на него излучения.

Поскольку регистрируемое излучение может иметь очень низкую интенсивность, в состав фотоприемного устройства обычно входит телескоп, захватывающий

возможно больше излучения, рассеянного в зоне исследования. На рис. 4 показаны варианты использования фотоприемного устройства с интерферометром Фабри-Перо.

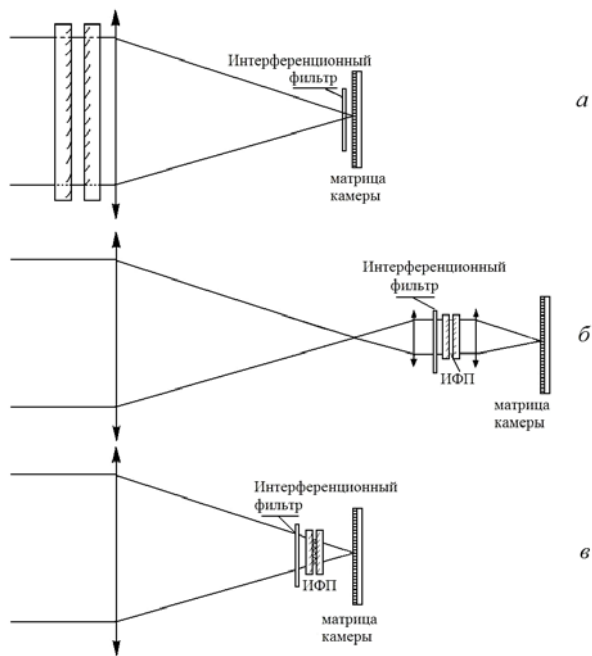


Рис. 4. Схема фотоприемного устройства и возможные варианты его применения с ИФП

Ранее мы показали, что интерферометр имеет высокий коэффициент пропускания для параллельного пучка даже при использовании зеркал условно низкого качества. Однако, использование дополнительных оптических элементов, преобразующих широкий сходящийся пучок в узкий параллельный, как показано на рис. 4 б, усложняет конструкцию фотоприемного устройства. Кроме того, неизбежны потери на каждом оптическом элементе. Наиболее простым вариантом было бы применение интерферометра в схеме, изображенной на рис. 4 в. При этом через него будет проходить сходящийся пучок. Для того, чтобы проверить, как это отразится на коэффициенте пропускания ИФП, были выполнены следующие исследования.

На интерферометр был направлен лазерный пучок с углом схождения пучка $0,1$ рад, который затем попадал на фотоприемник, напряжение с которого регистрировалось осциллографом. Результаты измерений приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты измерений пропускания ИФП излучения He-Ne лазера с углом схождения $0,1$ рад при различных расстояниях между зеркалами.

Коэффициент отражения зеркал $0,71$

Расстояние между зеркалами, мм	Пропускание интерферометра, %
0,3	30,8
0,6	30,8
1	30,8
2	28

Видно, что коэффициент пропускания интерферометра, аппаратурная ширина которого равнялась спектральной ширине линии излучения лазера, равен 28% . То есть применение интерферометра для сходящегося пучка приводит к появлению потерь излучения. Они обусловлены тем, что для части лучей, падающих под определенными углами, условие максимума не выполняется, и эти лучи отражаются.

Эффективность работы интерферометра Фабри-Перо в качестве селектора лазерного излучения подтвердили следующим образом. Свет вольфрамовой лампы накаливания проходил через полосовой светофильтр. После чего его спектр представлял собой полосу в интервале длин волн от 600 до 650 нм. При помощи полупрозрачного зеркала этот пучок света совмещался с пучком He-Ne лазера. Пройдя интерферометр, излучение попадало на фотоприемник. В течение эксперимента исследовалось пропускание интерферометром как лазерного и фонового излучений отдельно, так и суммарного излучения лазера и фона. Для зеркал с коэффициентом отражения $0,71$ коэффициент пропускания фонового излучения составил 10% . Для зеркал с коэффициентом $0,98-0,6\%$. Полученный результат говорит о том, что, в соответствии с теорией, через интерферометр проходит только то излучение, спектр которого соответствует аппаратурной ширине ИФП, и его доля составляет 10% для зеркал с коэффициентом $0,71$. Однако если использовать два интерферометра Фабри-Перо, стоящих друг за другом, можно добиться степени ослабления фонового излучения сравнимой с величиной контраста одного из интерферометров. Для этого необходимо, чтобы коэффициенты отражения зеркал для каждого интерферометра слегка отличались, а расстояния между зеркалами выбирались такими, чтобы аппаратурные ширины интерферометров были одинаковыми. В этом случае спектр излучения, прошедшего оба интерферометра будет представлять собой только одну спектральную линию, обусловленную аппаратурной шириной интерферометров (рис. 5).

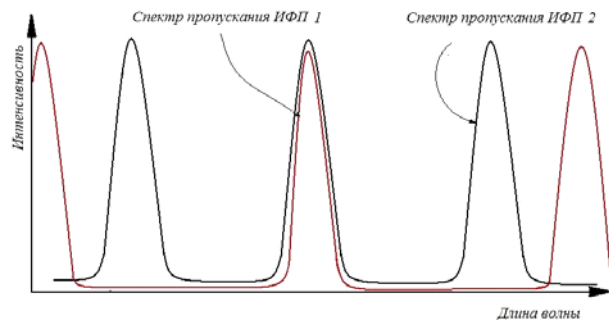


Рис. 5. Принцип работы светофильтра на основе двух интерферометров Фабри-Перо

Так же было определено, что наличие фонового излучения не оказывает влияния на пропускание лазерного излучения интерферометром и наоборот.

Для регистрации слабых сигналов очень важно, чтобы интерферометр не вносил искажения в про-

пространственное распределение излучения, чтобы его можно было сфокусировать в пятно минимальных размеров.

На рис. 6а представлено изображение пятна в фокусе объектива, полученное камерой. После установки перед объективом интерферометра камера по-прежнему регистрировала пятно прежних размеров, как показано на рис. 6б. При перемещении камеры по направлению к объективу и наоборот, наблюдалось увеличение размера пятна, что говорит о том, что интерферометр в данном случае не повлиял на положение фокальной перетяжки. После этого интерферометр был установлен между объективом и фотокамерой так, что через него проходил сходящийся пучок. При этом камера вместо пятна стала регистрировать интерференционные кольца. Но, сдвинув камеру по направлению от объектива, мы вновь зарегистрировали пятно прежних размеров. То есть, присутствие интерферометра в сходящемся пучке не вносит аберраций, но смещает положение перетяжки по направлению от объектива.

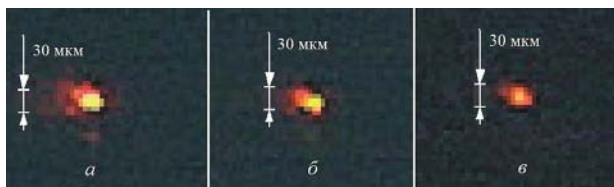


Рис. 6. Пространственное распределение интенсивности сфокусированного лазерного излучения, полученное при помощи фотокамеры Electronic Eye: а) в фокусе линзы (без интерферометра); б) в фокусе линзы (излучение прошло ИФП и затем было сфокусировано линзой); в) излучение было сфокусировано линзой и прошло ИФП, установленный до ее фокуса

Таким образом, для селекции лазерного излучения и ослабления фоновой засветки целесообразно применять интерферометр Фабри-Перо. Для наилучшей селекции (достижения максимального соотношения «сигнал/фон») стоит выбирать лазер с наименьшей спектральной шириной линии излучения. Например, химический кислородно-йодный лазер, спектральная ширина линии излучения которого составляет примерно 0,002 нм. Для наших экспериментальных условий достаточно иметь спектральную полосу селектора 0,03 нм. Поэтому коэффициенты отражения зеркал и расстояние между ними выбирались такими, чтобы аппаратная ширина ИФП была равна 0,03 нм. Так как необходимо возможно сильнее ослабить фоновое излучение, величину контраста стоит выбирать как можно больше, а величину w – как можно меньше. Зависимость контраста и отношения величины аппаратной ширины ИФП к области свободной дисперсии показаны на рис. 7, 8. Из рисунков видно, что увеличение контраста и уменьшение w происходит с увеличением коэффициента отражения зеркал. Исходя из того, что фоновое излучение необходимо ослабить примерно в 50–100 раз, w должно быть пример-

но 0,01. Следовательно, зеркала должны иметь коэффициент отражения 0,94–0,97. Ситуация осложняется тем, что при увеличении коэффициента отражения зеркал для сохранения величины аппаратной ширины ИФП необходимо уменьшать расстояние между зеркалами, а слишком малое расстояние становится сложно выдержать с достаточной точностью. Приемлемое наименьшее расстояние между зеркалами составляет 0,3 мм, так как его можно обеспечить при помощи кольца, которое входит в стандартный комплект интерферометра. Видимо, существует возможность изготовить более тонкие кольца, но это приведет к увеличению стоимости конструкции. Кроме того, изменяя показатель преломления среды между зеркалами, можно добиться увеличения требуемого оптического пути между ними. Для расстояния между зеркалами, равного 0,3 мм, и аппаратной ширины ИФП, равной 0,03 нм, коэффициент отражения зеркал должен быть равным 0,97. С увеличением коэффициента отражения зеркал увеличиваются требования к качеству зеркал и точности выставления зазора между ними. В современных условиях увеличение требований к качеству изготовления зеркал увеличивает их стоимость.

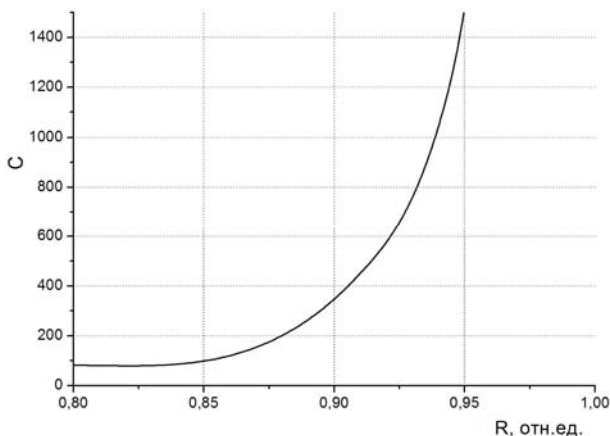


Рис. 7. Зависимость величины контраста ИФП от коэффициента отражения зеркал интерферометра

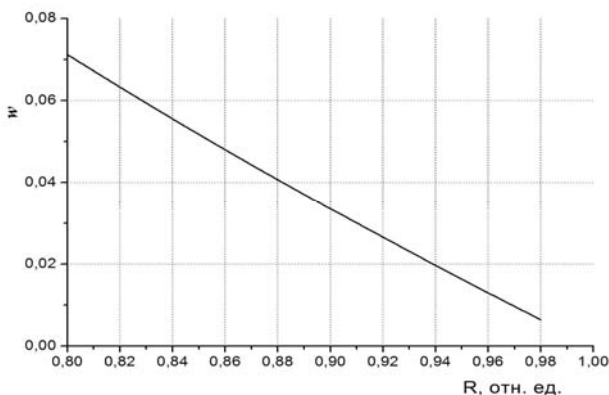


Рис. 8. Зависимость величины отношения аппаратной ширины к области свободной дисперсии ИФП от коэффициента отражения зеркал интерферометра

Потери, связанные с возможным отклонением лазерного пучка от оси телескопа, можно оценить, зная зависимость коэффициента пропускания интерферометра от угла падения на него излучения. Из рис. 9 видно, что при любом коэффициенте отражения зеркал для одной и той же аппаратурной ширины зависимость коэффициента пропускания ИФП от угла падения на него излучения остается постоянной вплоть до 0,01 рад. И угол, для которого интенсивность излучения уменьшается в 2 раза, составляет 0,005 рад. В случае же, если пучок отклонится на угол 0,001 рад, интенсивность излучения на выходе уменьшится только на 0,2 %. Такая угловая неопределенность является приемлемой для системы регистрации.

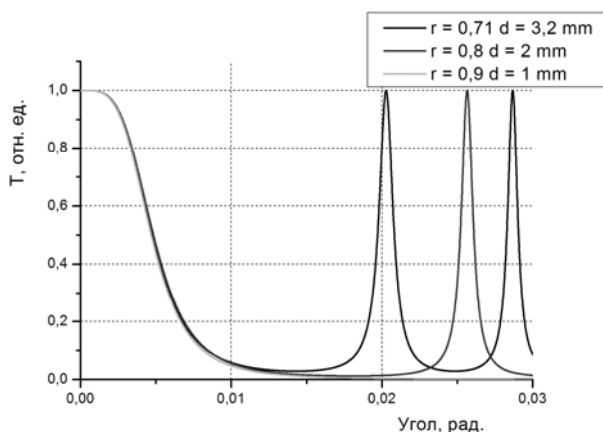


Рис. 9. Зависимость коэффициента пропускания ИФП от угла падения на него излучения при различных расстояниях между зеркалами и коэффициентах отражения зеркал, но при постоянной аппаратурной ширине, равной 0,03 мм

На основании проделанной работы можно сделать следующие выводы:

- интерферометр Фабри-Перо может использоваться как светофильтр, селективирующий рабочее лазерное излучение и ослабляющий излучение фона;
- применяя один ИФП, можно достичь ослабления фонового излучения в 50–100 раз, практически не ослабляя регистрируемого рабочего излучения;
- если ставить ИФП в параллельный пучок, то степень пропускания его остается примерно постоянной при углах падения излучения вплоть до 10^{-3} радиан;
- в сходящемся пучке пропускание ИФП в 3 раза меньше, чем в параллельном;
- интерферометр не оказывает влияния на пространственное распределение излучения в дальней зоне.

Литература

1. Жиглинский А. Г., Кучинский В. В. Реальный интерферометр Фабри-Перо. Л-д, 1983.
2. Засов А. В. Лабораторное исследование эталона Фабри-Перо. <http://www.heritage.sai.msu.ru/ucheb/Zasov/>.
3. Зайдель А. Н., Островская Г. В., Островский Ю. И. Техника и практика спектроскопии. М., «Наука», 1976.
4. Розенберг Г. В. Многолучевая интерферометрия и интерференционные светофильтры. Успехи физических наук. Т. XLVII. Вып. 2. 1952.
5. Фабелинский И. Л. Молекулярное рассеяние света. М., «Наука», 1965.
6. Хирд Г. Измерение лазерных параметров. М., «Мир», 1970.