

Федеральное агентство связи РФ
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Поволжский государственный университет
телекоммуникаций и информатики»

Кафедра «Линии связи и измерения в технике связи»

Методическая разработка к лабораторной работе
**«Исследование параметров волоконно-оптического
интерферометра Фабри-Перо»**

по подготовки магистров, обучающихся по направлению
12.03.03 «Фотоника и оптоинформатика»
профиль «Оптические информационные технологии»

Составители: к.т.н., доц. Дашков М.В.
к.т.н. Никулина Т.Г.

Рецензент: к.т.н. Головкина М.В.

Самара
2015

ББК 621.391.63

Д 21

Исследование параметров волоконно-оптического интерферометра Фабри-Перо: учебно-методическая разработка / Т.Г. Никулина, М.В. Дашков. Самара: ИНУЛ ПГУТИ. 2015

Рецензент: к.т.н. М.В. Головкина

В учебно-методической разработке приводится систематизированный материал принципу работы волоконно-оптического интерферометра Фабри-Перо, определению его передаточных характеристик и основных параметров.

Рекомендовано Методическим советом ГОУ ВПО ПГУТИ в качестве учебно-методического пособия для магистров, обучающихся по направлению 200700.

Протокол заседания Методического совета ПГУТИ

Цель работы

Изучение принципов интерферометрии, измерение параметров волоконно-оптического интерферометра Фабри-Перо, исследование зависимости параметров от конструкции.

Литература

1. Волоконно-оптическая техника: современное состояние и новые перспективы. Сборник статей / С.А. Дмитриев, Н.Н. Слепов. – 3-е изд. – М.: Техносфера, 2010. – 608 с.

2. Лиокумович Л.Б. Волоконно-оптические интерферометрические измерения. Ч.1. Волоконно-оптические интерферометры – С.-Петербург: Изд.-во Полиитехн. ун-та, 2007. – 110 с.

3. Кульчин Ю.Н. Распределенные волоконно-оптические измерительные системы. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. – 272 с.

4. Волоконно-оптические датчики. Вводный курс для инженеров и научных работников. Под ред. Э. Удда. – М.: Техносфера, 2008. – 520 с.

5. Волоконная оптика и приборостроение / М.М. Бутусов, С.Л. Галкин, С.П. Оробинский, Б.П. Пал; Под общ. Ред. М.М. Бутусова. – Л.: Машиностроение, 1987. – 328 с.

6. Окоси Т. И др. Волоконно-оптические датчики. Пер. с япон. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.

Подготовка к работе

1. Ознакомиться с инструкцией по технике безопасности.
2. Изучить принцип работы волоконно-оптических интерферометров Фабри-Перо.
3. Изучить методы измерения оптической мощности с помощью комплекта оптических тестеров.
4. Изучить порядок выполнения лабораторной работы.
5. Подготовить бланки протоколов измерений.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение интерференции.
2. Как определяется интенсивность света? Как рассчитать интенсивность света для плоской световой волны? Как расчи-

тывается интенсивность, если известна оптическая мощность на выходе интерферометра?

3. Как определяется контраст (видность) интерференционной характеристики?

4. Что характеризует временная когерентность источника излучения?

5. Каким образом рассчитывается длина когерентности?

6. Опишите классическую схему интерферометра Фабри-Перо.

7. Как определяется оптическая разность хода интерферометра?

8. Как строится передаточная характеристика интерферометра. Приведите вид передаточных характеристик двулучевого интерферометра и интерферометра Фабри-Перо.

9. Приведите типичную схему волоконно-оптического интерферометра Фабри-Перо.

10. Поясните такие понятия как «рабочая точка» и «склон характеристики», «интерференционная полоса».

11. Какие основные параметры интерферометра могут быть определены из участка передаточной характеристики вблизи рабочей точки?

12. Какие интерферометры называют низкодобротными? В чем особенность низкодобротных интерферометров Фабри – Перо?

13. Опишите принцип работы волоконно-оптического низкодобротного интерферометра Фабри – Перо.

14. Как зависит передаточная функция интерферометров Фабри – Перо от коэффициента отражения R ?

15. Как учитываются потери на излучение в зазоре между торцами волокон в схеме волоконно-оптического интерферометра Фабри-Перо?

Техника безопасности при работе с когерентными лазерными источниками излучения

При выполнении лабораторных работ, связанных с использованием когерентных лазерных источников излучения, необходимо соблюдать следующие правила техники безопасности:

1. Не смотреть в выходной порт источника и на торцы коннекторов патч-кордов или оптических адаптеров.
2. Контроль качества оптического коннектора или адаптера допускается только при отсутствии в волокне излучения.
3. Для определения активности оптического волокна рекомендуется использовать измеритель оптической мощности или специальный индикатор излучения.

Внимание! Излучение, используемое в телекоммуникационных системных и измерительных приборах, невозможно обнаружить визуально.



Техника безопасности при работе с оптическим волокном

1. На рабочем столе должны находиться только те инструменты и материалы, которые необходимы для выполнения работы. Перед началом выполнения лабораторной работы необходимо убрать со стола все личные вещи (сумки, тетради и т.д.).
2. Перед началом работы с ОВ изучить методику выполнения скола.
3. Все работы с ОВ выполнять над рабочим столом.
4. Осколки ОВ утилизировать в специальные контейнеры, выданные лаборантом.
5. В случае если осколок ОВ упал за пределы контейнера (например, на поверхность стола) необходимо удалить его при помощи липкой ленты или пинцета. Лента после этого также утилизируется в контейнер. Не допускается убирать упавший осколок ОВ голыми руками.
6. В процессе выполнения лабораторной работы запрещается тереть глаза руками.

7. В случае попадания ОВ под кожу немедленно сообщить об этом преподавателю. Не допускается самостоятельное удаление волокна.

8. После окончания выполнения лабораторной работы внимательно осмотреть руки, одежду и рабочее место на предмет наличия осколков ОВ. При необходимости удалить осколки волокна при помощи липкой ленты или пинцета.

9. Вымыть руки с мылом для удаления возможных незамеченных осколков ОВ с рук.

Материалы, инструменты и оборудование для выполнения работы

1. Безворсовые салфетки



2. Спирт в дозаторе



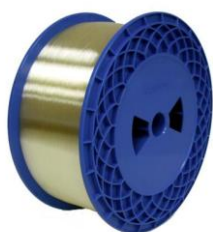
3. Ручка-скальватель



4. Стриппер Miller



5. Оптическое волокно



6. Оптический разветвитель Y-типа



6. Источник оптического излучения FOD 2112



7. Измеритель оптической мощности FOD 1024



Порядок выполнения работы

1. Собрать схему измерений (рис. 1).

1.1. Один оконцованный коннектором выход оптического разветвителя Y-типа подключите к источнику оптического излучения FOD 2112, а второй оконцованный выход к приемнику оптического излучения FOD 1012 (рис. 1).



Рис. 1. Схема измерения мощности на выходе волоконно-оптического интерферометра Фабри-Перо

1.2. Для подключения разъемов типа FC/PC совместите ключ на коннекторе с пазом на оптическом адаптере, зафикси-

руйте круглой накладной гайкой (рис. 2). **Не прикладывайте чрезмерных усилий!**



Рис. 2. Этапы подключения разъемов типа FC/PC

1.3. Волокно с неоконцованного входа оптического разветвителя подготовьте для ввода в юстировочную систему (для юстировки используется сварочный аппарат КСС-111). Для этого выполните скол оптического волокна (ОВ).

1.4. Для выполнения скола стриппером на расстоянии 3 см снимите акриловое покрытие с ОВ.

1.5. Очистите оптическое волокно от остатков акрила безворсовой салфеткой смоченной в спирте.

1.6. Ручкой - скальвателем сделайте надсечку на поверхности волокна и выполните скол.

1.7. После выполнения скола поместите оптическое волокно в канавки юстировочной системы сварочного аппарата КСС-111.

1.8. Возьмите отрезок волокна длиной 5-10 см. Удалите с одного конца акриловое покрытие на расстоянии 5 мм и выполните оплавление торца ОВ.

1.9. На втором конце волокна выполните скол и поместите волокно во вторую канавку юстировочной системы сварочного аппарата КСС-111.

1.10. Выровняйте волокна при помощи юстировочных винтов КСС-111 (рис. 3) так, как это показано на рис. 4. Торцы волокон должны быть сведены вплотную друг к другу, при этом сердцевина ОВ от разветвителя находится на уровне оболочки отрезка волокна длиной 5-10 см (рис. 4).

2. Подготовьте к работе источник оптической мощности FOD 2112 и приемник оптического излучения FOD 1012.

2.1. Включите источник излучения и выберите длину волны излучения. Измерения проводятся сначала на длине волны 1550 нм, затем на длине волны 1310 нм.

2.2. Включите измеритель оптической мощности и выберите длину волны нажатием на клавишу SET λ .

2.3. Прогрейте источник и приемник излучения в течение 5-15 мин.

2.4. Выберите на измерителе оптической мощности единицу измерения Вт.

2.5. Запишите, показываемое при установленном положении волокон (торцы волокон сведены вплотную), значение оптической мощности P_0 .

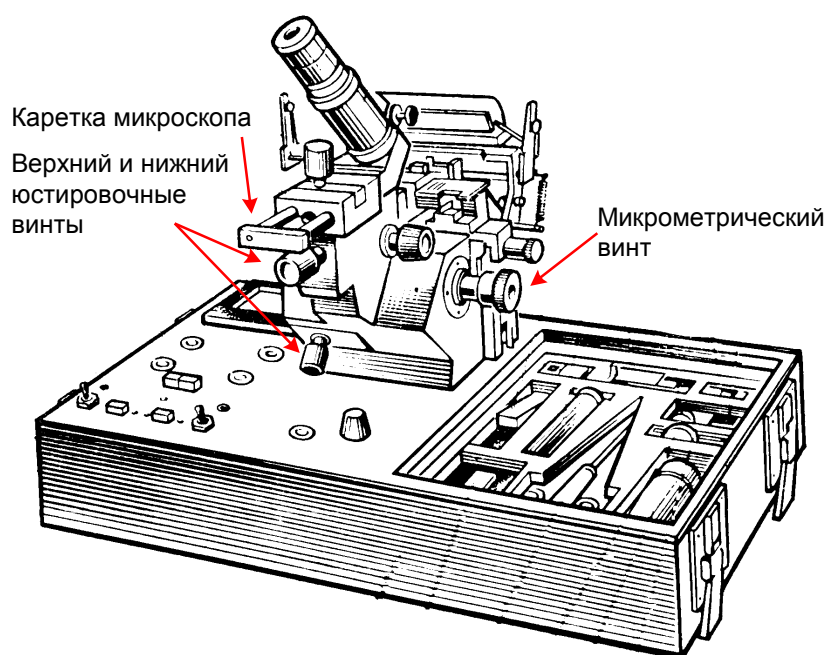


Рис. 3. Ручки юстировки сварочного аппарата КСС-111

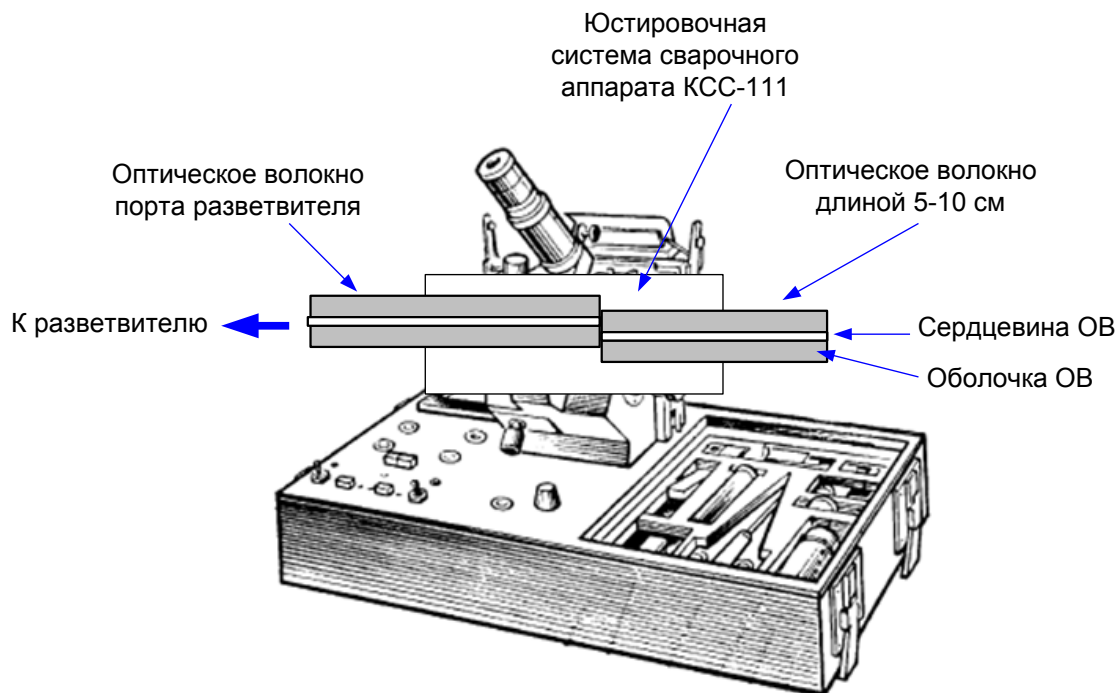


Рис. 4. Юстировка волокон в КСС-111

3. Выполните измерения оптической мощности на выходе волоконно-оптического интерферометра Фабри-Перо.

3.1. Плавно раздвигая волокна в горизонтальном положении микрометрическим винтом, так чтобы зазор между волокнами увеличивался, наблюдайте за показаниями измерителя оптической мощности. При увеличении зазора между волокнами l_i значение оптической мощности будет уменьшаться, но не линейно, а по синусоиде. При определенных значениях зазора мощность сигнала будет то увеличиваться, то уменьшаться.

3.2. Запишите максимальные и минимальные значения оптической мощности P_i и l_i , при которых они наблюдаются. Значения l_i снимаются по шкале на микрометрическом винте КСС-111.

3.3. Рассчитайте значения интенсивности I_i по формуле: $I_i = P_i / S_{\text{ОВ}}$, где $S_{\text{ОВ}}$ - площадь сечения сердцевины ОВ.

3.4. Рассчитайте значения $\Delta\varphi_i = 4\pi l_i / \lambda$.

3.5. Результаты измерений и вычислений занесите в таблицу 1.

Табл. 1.

Длина волны $\lambda =$, нм			
Значение оптической мощности P_i , мВт	Величина зазора между торцами ОВ l_i , мм	Интенсивность световой волны I_i , Вт/мм	Разность фаз $\Delta\varphi_i$, рад
:			
:			
:			

3.6. Повторите измерения на другой длине волны. Результаты занесите в таблицу 2, аналогичную таблице 1.

3.7. Пользуясь данными таблиц 1 и 2, постройте передаточные характеристики $K(\Delta\varphi)$ исследуемого интерферометра для длин волн 1310 и 1550 нм.

3.8. Определите следующие параметры интерферометра:

- ширину интерференционной полосы и соответствующее ей значение зазора между торцами ОВ;
- рабочую точку интерферометра, лежащую в области максимального контраста V ;
- чувствительность интерферометра s .

3.9. Постройте зависимость контраста V от зазора между торцами волокон l_i .

3.10. Сделайте выводы по работе.

4. Выполните измерения свободной области спектра FSR_λ .

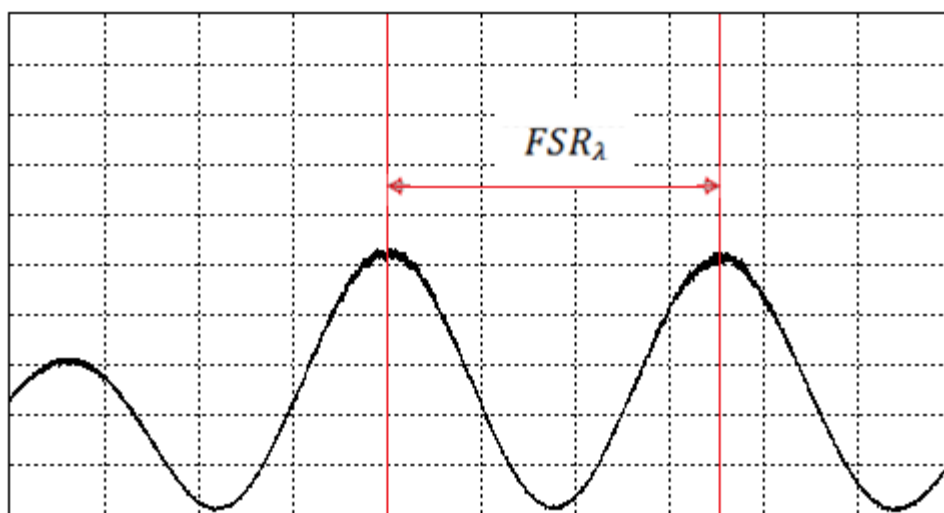


Рис.4.3 – Определение свободной области спектра

- ширина резонанса кривой пропускания $\Delta\lambda_{FWHM}$ определяется как по рис.4.4:

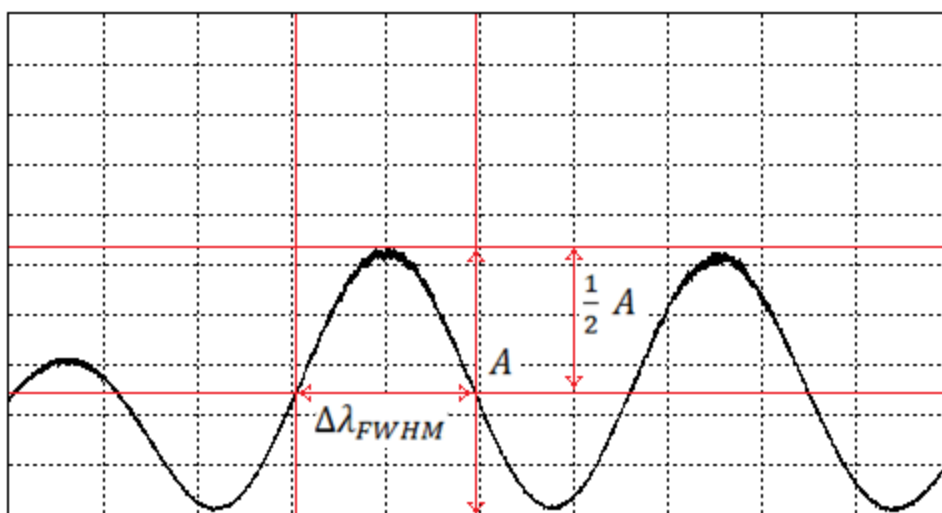


Рис.4.4 – Определение ширины резонанса кривой пропускания

- для расчета контрастности V_0 необходимо определить максимальное и минимальное значение мощности излучения как на рис.4.5 и посчитать по формуле 3.8:

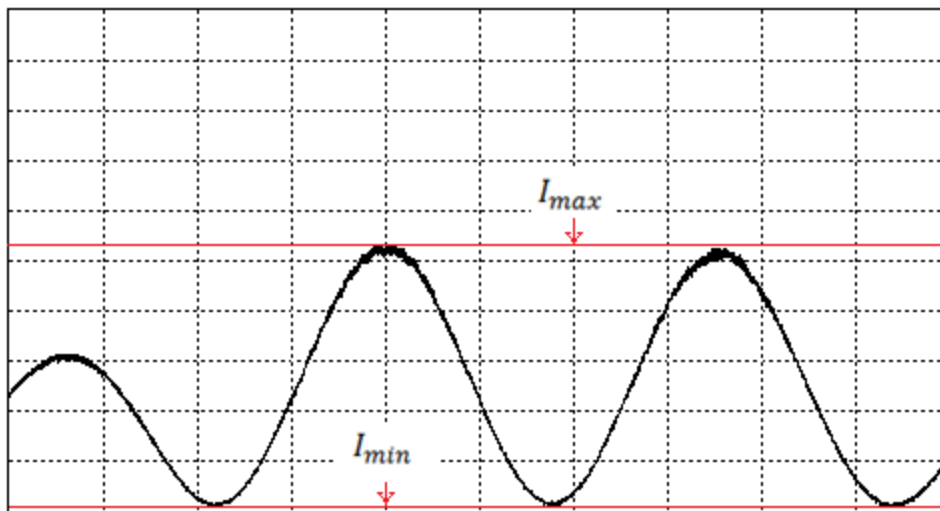


Рис.4.5 – Определение максимального и минимального значений мощности излучения

- показатель качества рассчитываем по формуле 3.9.

Приложение 1. Классическая схема интерферометра Фабри-Перо

Интерференция - явление, возникающее при наложении двух или нескольких волновых колебаний и заключающееся в формировании устойчивого чередования областей повышения и понижения интенсивности.

Интенсивность света определяется как среднее значение энергии переносимой световой волной за единицу времени через поверхность, нормальную к направлению распространения волны, деленное на площадь поверхности. Для плоской световой волны:

$$I = \frac{c}{4\pi} \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} \cdot \langle E^2 \rangle = \frac{c}{4\pi} \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} \cdot \langle H^2 \rangle,$$

где c – скорость света; ε - диэлектрическая проницаемость среды; μ - магнитная проницаемость среды; E и H - абсолютные величины векторов напряженности электрического и магнитного поля; символ $\langle \rangle$ - означает усреднение по времени. Время усреднения должно быть много больше, чем период колебания поля электромагнитной волны.

На практике прямой регистрации подвергается не интенсивность, а оптическая мощность P , поступающая на чувствительную площадку фотодетектора $S_{\text{фд}}$. В этом случае величина $I = P/S_{\text{фд}}$. В случае применения волоконно-оптического интерферометра, можно записать: $I = P/S_{\text{ов}}$. Здесь $S_{\text{ов}}$ - площадь сечения сердцевины ОВ.

Уровень проявления интерференции характеризует *видность (глубина модуляции, контраст)*:

$$V = \frac{I_{\text{max}} - I_{\text{min}}}{I_{\text{max}} + I_{\text{min}}},$$

где I_{max} , I_{min} - значения интенсивности в точках ее максимума и минимума.

Для наблюдения явления интерференции необходимо получить хотя бы две разные световые волны, которые были бы когерентными или хотя бы частично когерентными. Волны двух работающих независимо оптических источников практически

всегда оказываются некогерентными. Поэтому в большинстве случаев для получения оптической интерференции используют волны одного источника.

В интерферометра Фабри-Перо для создания эффекта интерференции наложению подвергаются несколько волн (или две волны в случае низкодобротных интерферометров), которые формировались из одной точки, но в разные моменты времени. Такая схема формирования называется схемой с делением амплитуды волны источника. При делении амплитуды, локальная область фронта разделяется в пространстве на две волны. Затем эти волны соединяются вместе. Но до этого одна из волн проходит геометрически больший путь, чем вторая, что приводит к разности задержек по времени. Таким образом, интерферируют волны, сформированные в разные моменты времени.

Для реальных квазимонохроматических источников света колебания в разных точках фронта волны, так же как и колебания в одной точке, но в разное время могут быть частично когерентны или даже некогерентны. Поэтому для источников света вводят понятие *временной когерентности*, которая характеризует время, в течение которого создаваемые квазитоочечным источником волны можно полагать когерентными. Количественным параметром временной когерентности является *время когерентности* τ_k или связанный с ним параметр – *длина когерентности* l_k : $l_k = (c \cdot \tau_k) / n$.

В волоконно-оптических интерферометрах применяются лазеры, характеристикой некогерентности которых является ширина линии излучения $\Delta\lambda$ или ширина спектра излучения $\Delta\nu$. В этом случае можно записать: $\tau_k \approx 1 / \Delta\nu$; $\Delta\nu = c \cdot \Delta\lambda / \lambda^2$. Тогда $\tau_k \approx \lambda^2 / c\Delta\lambda$, и длина когерентности $l_k = \lambda^2 / (\Delta\lambda n)$.

Классическая схема интерферометра Фабри-Перо приведена на рис. 5.

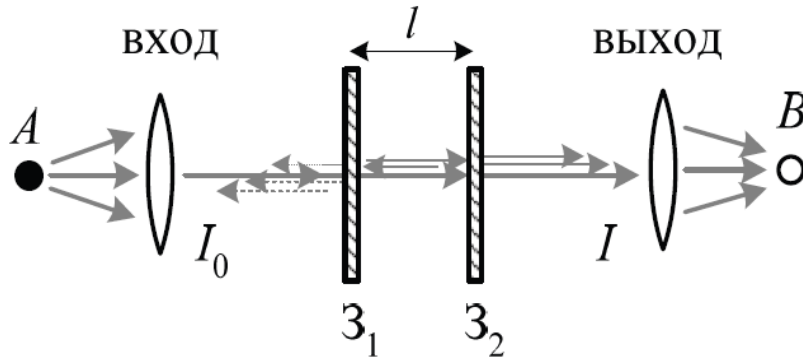


Рис. 5. Классическая схема интерферометра Фабри-Перо

В данной схеме первая часть излучения проходит оба зеркала и поступает на выход системы. Вторая часть излучения переотражается от зеркал и затем также поступает на выход. Переотраженная от зеркал вторая часть излучения проходит расстояние l между зеркалами три раза. Далее можно выделить части излучения, прошедшие между зеркалами 5, 7, 9 раз и так далее. В результате на выходе системы получается суперпозиция лучей с убывающей амплитудой и нарастающей фазовой задержкой. Выходная интенсивность формируется за счет многолучевой интерференции и определяется разностью фаз при двойном проходе расстояния l . Также может использоваться и альтернативный вариант работы интерферометра на «отражение». При этом если разность фаз лучей в интерферометре создает максимальную интенсивность в «основном» выходе, то в «инверсном» наблюдается минимум и наоборот. Если внутренними потерями оптической мощности в интерферометре можно пренебречь, то рассмотрение обоих выходов схемы интерференции показывает, что при колебаниях выходной интенсивности интерферометра излучение никуда не «пропадает», оно направляется в альтернативный выход.

Основным количественным параметром интерферометра Фабри – Перо является расстояние между зеркалами l , которое задает такой важнейший параметр интерферометра как *разность хода*: $\Delta l = 2l$ (при перпендикулярном распространении света относительно зеркал). Иногда говорят об *оптической разности хода* $\Delta L = n\Delta l = 2nl$ и о *разности фаз* интерферирующих лучей $\Delta\varphi = 2\pi\Delta L / \lambda = 4\pi nl / \lambda$.

Также к базовым параметрам интерферометра следует отнести и коэффициенты отражения (пропускания) полупрозрачных зеркал.

Действие интерферометра описывают через *передаточную характеристику интерферометра* K – зависимость коэффициента передачи по интенсивности от разности хода лучей или разности фазовых задержек лучей: $K(\Delta l) = I(\Delta l)/I_0$, $K(\Delta\varphi) = I(\Delta\varphi)/I_0$. При этом остальные параметры схемы, такие как коэффициенты отражения зеркал, частота, когерентность источника, полагаются фиксированными.

Рассматривая изменение частоты (длины волны) входного излучения, вводят спектральную передаточную характеристику интерферометра $H(\nu) = I(\nu)/I_0$, которая отличается от K тем, что аргументом является частота (или длина волны), а разность хода подразумевается фиксированным параметром.

При фиксированных параметрах и высокой степени когерентности величины K и H являются периодическими функциями. Если в аргументах этих функций использовать нормировку 2π для разности фаз интерферирующих лучей, нормировку на длину волны λ для разности хода и нормировку $c/\Delta\lambda$ для частоты, то характеристики совпадут. Типичный вид передаточных характеристики интерферометров с нормированным аргументом приведен на рис. 6.

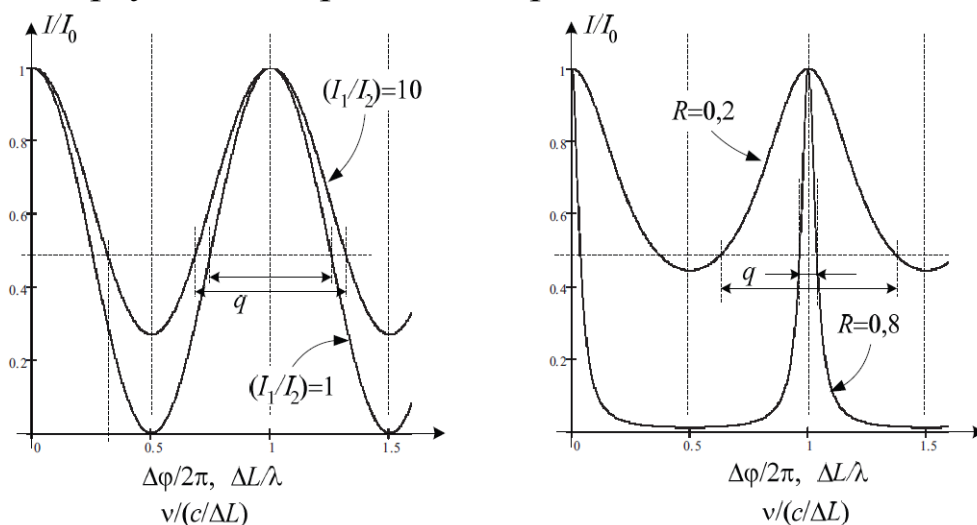


Рис. 6. Примеры передаточных характеристик: а – для двухлучевых интерферометров; б – интерферометра Фабри-Перо

Приложение 2. Волоконно-оптический интерферометр Фабри-Перо

В схемах волоконно-оптических интерферометров Фабри-Перо вместо зеркал могут использоваться оптические волокна на торцы которых нанесено напыление или без напыления для низкодобротных интерферометров. При этом коэффициент отражения торца волокна равен френелевскому коэффициенту отражению на границе стекло-воздух $R=0,04$. Типичная схема волоконно-оптического интерферометра приведена на рис. 7.

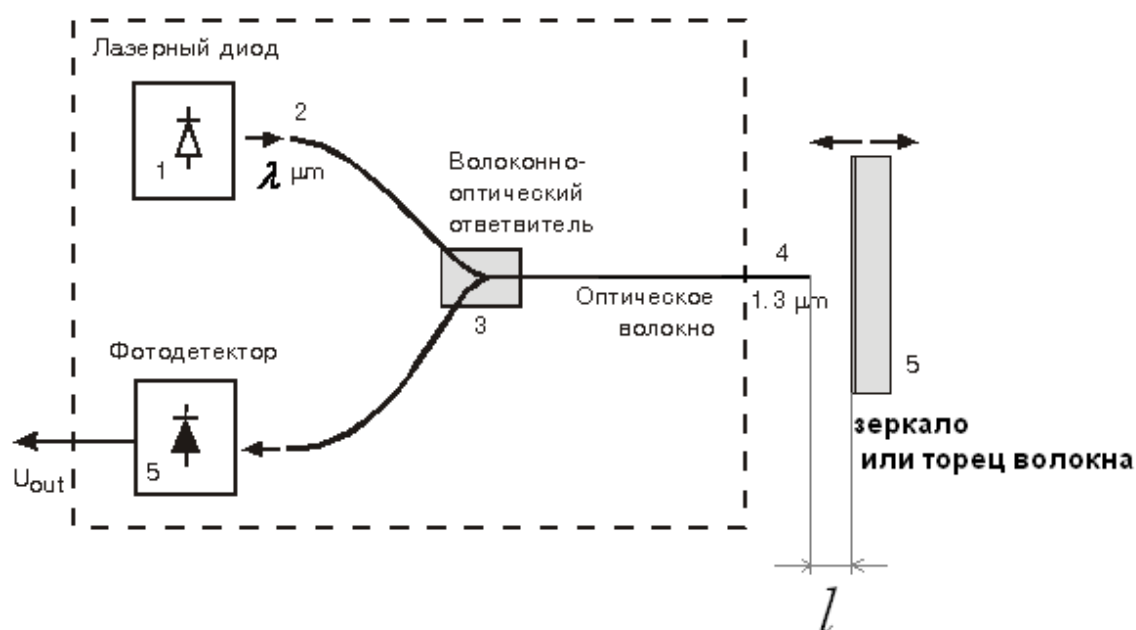


Рис. 7. Волоконно-оптический интерферометр Фабри-Перо

При анализе работы волоконно-оптических интерферометров используются такие понятия как «рабочая точка» и «склон характеристики», «интерференционная полоса» (рис. 8).

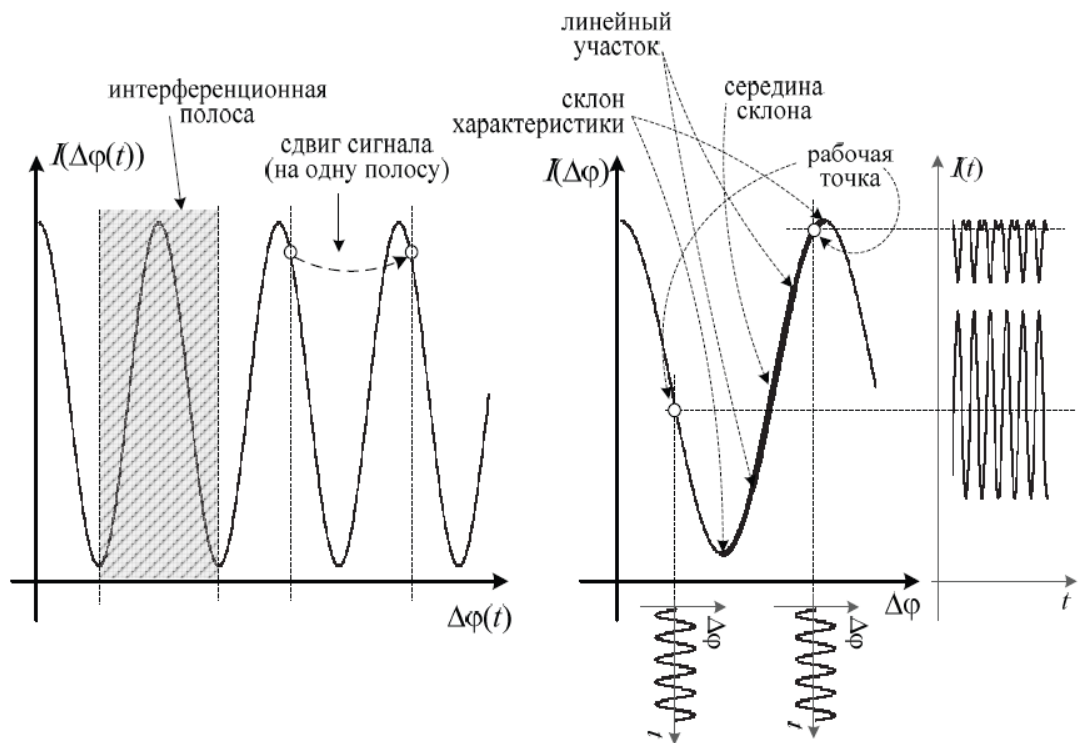


Рис. 8. Типичный интерференционный сигнал волоконного интерферометра и его параметры

Основные параметры интерферометра могут быть определены из участка передаточной характеристики вблизи рабочей точки (рис. 9). Рабочая точка интерферометра выбирается обычно в середине склона линейного участка (между максимумом интенсивности I_{\max} и минимумом I_{\min}).

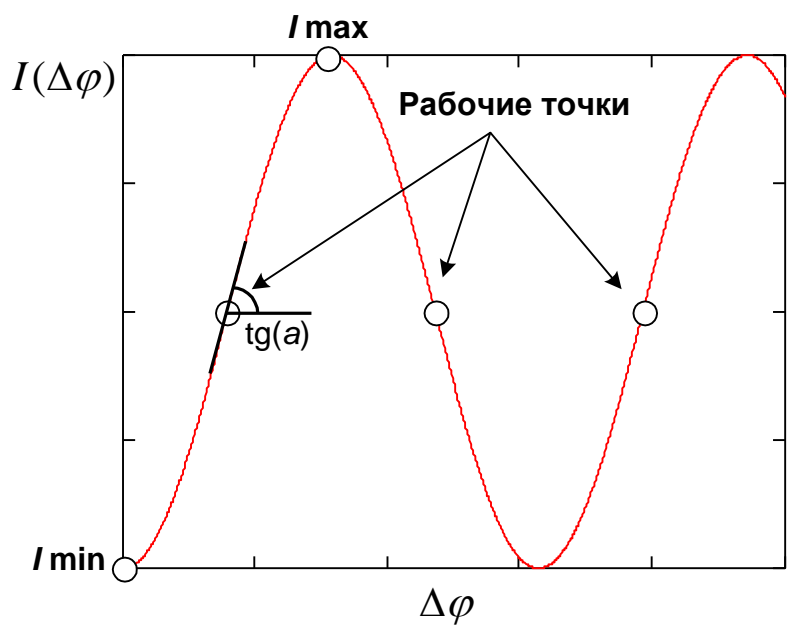


Рис. 19. Определение параметров интерферометра

Тангенс угла наклона касательной проведенной в рабочей точке определяет чувствительность интерферометра: $s = tg(a)$.

Интерференционная полоса определяется как расстояние между двумя максимумами или минимумами интенсивности сигнала.

Рассмотрим режим работы волоконно-оптического низкодобротного (коэффициент отражения зеркал $R \ll 1$) интерферометра Фабри-Перо. Для таких интерферометров можно записать:

$$I(t) = I_0 \cdot (1 - R)^2 \cdot [1 + 2R \cos(\Delta\varphi(t))],$$

где R – коэффициент отражения зеркал по интенсивности. В случае если зеркала имеют разные коэффициенты отражения: $R = \sqrt{R_1 \cdot R_2}$.

Сигнал низкодобротного интерферометра Фабри-Перо по структуре аналогичен сигналу двулучевых интерферометров. Это связано с тем что при малых R основной вклад в интерференционный сигнал вносят два луча: луч прошедший через зазор между волокнами один раз и луч переотразившийся от торцов. Вкладом же от лучей более высоких порядков переотражений можно пренебречь. В этом случае интерферометр Фабри-Перо работает как двулучевой интерферометр с относительно низким контрастом.

Сигнал в этом случае имеет структуру:

$$I(t) = A_0 + A_m \cos(\Delta\varphi(t)),$$

где A_0 - постоянная составляющая, $A_m \cos(\Delta\varphi(t))$ - переменная составляющая, A_m - амплитуда, $\Delta\varphi(t)$ - фаза интерференционного сигнала.

При этом: $A_0 = I_1 + I_2$; $A_m = (I_1 + I_2)V = I_0 K_0 V$. Параметры K_0 , V , A_0 и A_m выражаются следующим образом:

$$K_0 = (1 - R)^2, V = 2R, A_0 = I_0(1 - R)^2, A_m = 2I_0 \cdot R \cdot (1 - R)^2.$$

Следует отметить, что от величины R зависит и вид передаточной функции интерферометра (рис. 9).

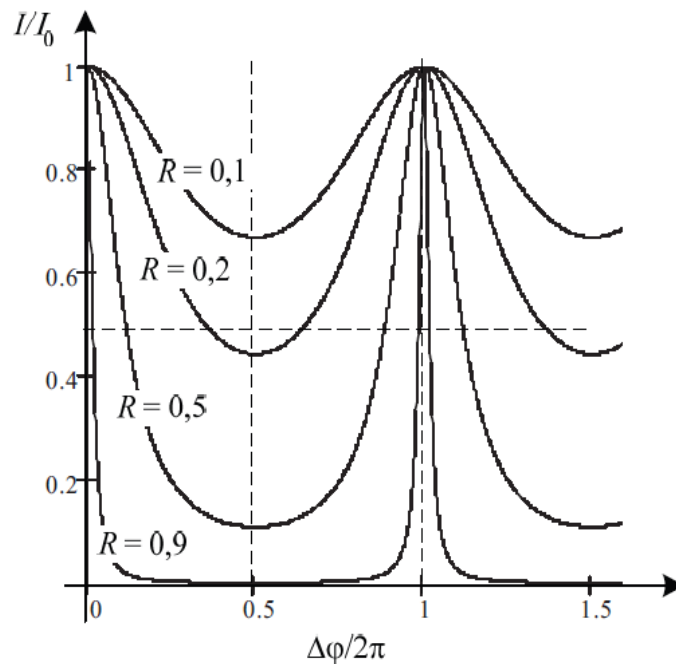


Рис. 9. Графики передаточных функций интерферометров Фабри – Перо с разными значениями R

В общем случае процент излучения, отражённого от зеркала и возвращённого в волокно, зависит и от расстояния между отражателями. Это связано с тем, что свет, исходящий из волокна, расходится под некоторым углом и лишь часть его, будучи отражённой от зеркала, попадает обратно в волокно и участвует в интерференции. Угловая расходимость излучения, выходящего из волоконного световода, характеризуется числовой апертурой NA :

$$NA = n \sin \theta_A.$$

В этой формуле n - показатель преломления среды, окружающей волокно (обычно воздух), n_1 - показатель преломления сердцевины волокна, n_2 - показатель преломления оболочки волокна, θ_A - максимальное отклонение луча, выходящего из волоконного световода, от его оси. Типовое значение числовой апертуры одномодового волокна $NA = 0,12$. Соответственно $\theta_A \approx 7$ градусов.

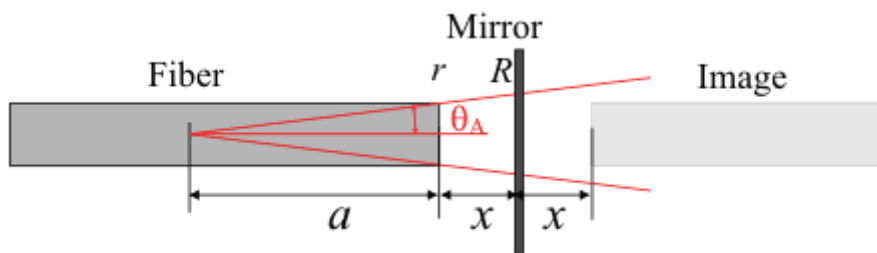


Рис. 10. Расходимость излучения из ОВ

Пусть излучение из волокна падает под углами от 0 до θ_A . Можно представить его выходящим из точечного источника, расположенного на глубине a от торца волокна. Расстояние от зеркала до волокна - l . Зеркало создаёт изображение волокна, как показано на рис. 10. Соответственно площадь пятна на уровне торца волокна будет:

$$S = S_0 \left(\frac{a + 2l}{a} \right)^2.$$

С учётом интенсивности света эффективный коэффициент отражения зеркала можно записать следующим образом:

$$R_{eff} = \frac{R}{(1 + 2l/a)^2}$$

В данной формуле не учитывается гауссово распределение интенсивности света в волоконной моде, дифракционные эффекты и некоторые другие моменты. Тем не менее, она позволяет оценить характер уменьшения коэффициента отражения внешнего зеркала от расстояния до торца волокна. Типовая расчётная зависимость оптической мощности, отражённой интерферометром, от расстояния между волокном и зеркалом приведена на рис. 11 [7].

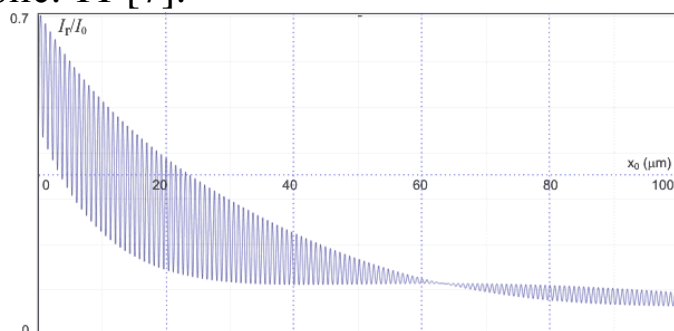


Рис. 11. Зависимость оптической мощности, отражённой интерферометром, от величины зазора

**Исследование передаточной
характеристики низкодобротного
волоконно-оптического
интерферометра Фабри-Перо**

**Никулина Татьяна Геннадьевна
Дашков Михаил Викторович**