

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО СВЯЗИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ
им. проф. М. А. БОНЧ-БРУЕВИЧА»
(СПбГУТ)

ФОТОННО-ЭЛЕКТРОННЫЕ КОМПОНЕНТЫ И УСТРОЙСТВА В ИНФОКОММУНИКАЦИЯХ

**Методические указания
к лабораторным работам**

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

2020

Содержание

- 1 Исследование процессов отражения и преломления света
- 2 Изучение работы полупроводниковых излучателей.
- 3 Изучение работы устройств систем спектрального уплотнения
- 4 Исследование интегрального электрооптического модулятора света

Исследование отражения и преломления света на границе раздела двух сред

1. Цель работы

Целью работы является исследование процессов отражения и преломления электромагнитной оптической волны на границе раздела двух диэлектрических сред с различными показателями преломления.

2. Задание на лабораторную работу

Перед выполнением работы должны быть изучены основные принципы распространения плоской электромагнитной волны, падающей на границу раздела двух сред [1, стр.62-77, 2, стр.54-62].

Перед включением аппаратуры необходимо изучить описание лабораторной установки.

В процессе выполнения лабораторной работы производится:

- изучение принципов прохождения света через границу раздела двух сред;
- изучение состава лабораторного оборудования;
- измерение зависимости интенсивности отраженного излучения от угла падения света на границу раздела двух сред для различных поляризаций падающего излучения;
- измерение угла Брюстера;
- измерение угла полного внутреннего отражения.

3. Описание лабораторной установки

Оптическая схема установки (рис.1) собрана на гониометре ГО-5-М. Автоколлиматор (5) и He-Ne лазер (1) закреплены жестко и соосно. Излучение лазера падает на призму (3), расположенную на поворотном столике. Отсчет углов поворота призмы относительно луча лазера производится с помощью нижнего окуляра гониометра (5). Отраженный от поверхности призмы луч лазера попадает на фотоприемник (6), который может свободно перемещаться по кольцевой направляющей (4). Сигнал фотоприемника попадает на цифровой вольтметр (7). Поляризация излучения лазера может изменяться поворотом поляризатора (3), закрепленного на переднем торце трубки лазера. Направление вектора поляризации указано стрелкой на обойме поляризатора.

4. Методические указания к выполнению работы

4.1. Если на границу раздела двух однородных сред с разными показателями преломления n_1 и n_2 падает плоская электромагнитная волна, она разделяется на две волны: проходящую во вторую среду и отраженную. Углы падения θ_1 и преломления θ_2 связаны соотношением, известным как закон Снеллиуса:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 .$$

Зависимости амплитудных коэффициентов отражения r и пропускания t от углов падения θ_1 и преломления θ_2 описываются формулами Френеля для волн с различной поляризацией (ТМ и ТЕ):

$$r_{TE} = \frac{\cos \theta_1 - \eta \cos \theta_2}{\cos \theta_1 + \eta \cos \theta_2}, \quad \eta = \frac{n_2}{n_1}$$

$$t_{TE} = \frac{2 \cos \theta_1}{\cos \theta_1 + \eta \cos \theta_2},$$

$$r_{TM} = \frac{\cos \theta_i - \eta \cos \theta_t}{\cos \theta_i + \eta \cos \theta_t}, \quad (1)$$

$$t_{TM} = \frac{2 \cos \theta_i}{\cos \theta_i + \eta \cos \theta_t}$$

Анализируя эти формулы, можно остановиться на некоторых интересных моментах.

Полное внутреннее отражение. При отражении волны от поверхности оптически менее плотной среды $n_2 < n_1$, обнаруживается предельный угол падения θ_c , при котором $\sin \theta_2 = 1$, $\sin \theta_c = n_2 / n_1$ и $|r| = 1$. Если $\theta_1 > \theta_c$, то весь падающий свет отражается обратно в первую среду, т.е. происходит полное внутреннее отражение.

Угол Брюстера. Для волны ТМ (т.е. для плоской электромагнитной волны, вектор напряженности электрического поля которой лежит в плоскости падения) существует особый угол падения θ_B (угол Брюстера), при котором коэффициент отражения равен нулю.

В лабораторной работе предлагается исследовать зависимость интенсивности излучения, отраженного от границы раздела двух сред, от угла падения света, и измерить угол Брюстера и угол полного внутреннего отражения. Угол Брюстера измеряется непосредственно по минимуму зависимости интенсивности отраженного света от угла падения луча лазера на гипотенузную грань призмы (рис 5).

Угол полного внутреннего отражения определяется путем наблюдения преломленного луча на гипотенузной грани призмы при прохождении луча через границу призма-воздух (рис.3). Когда преломленный луч распространяется по касательной к гипотенузной грани призмы, угол падения луча на эту грань изнутри призмы равен критическому.

Пусть свет падает на призму под углом θ_1 , тогда

$$\sin \theta_1 = n_p \sin \theta_2 \quad (2)$$

Если на гипотенузной грани происходит полное внутреннее отражение, то можно записать

$$n_p \sin \theta_c = 1 \quad (3)$$

при этом

$$\theta_2 = 90^\circ - \theta_c \quad (4)$$

Измерив θ_1 и пользуясь формулами 2, 3, 4 можно рассчитать θ_c и n_p .

4.2. Ознакомиться с описанием лабораторной установки.

4.3. Измерить исходную интенсивность излучения лазера в каждой из поляризаций. Для этого повернуть столик гониометра так, чтобы луч лазера проходил мимо призмы, параллельно ее гипотенузной грани (рис.2). Наблюдать световое пятно в центре кольцевой направляющей фотоприёмника. Передвинуть фотоприёмник по направляющей таким образом, чтобы пятно излучения точно попадало в центр кристалла фотодиода. Измерить и записать ток фотодиода (ток фотодиода пропорционален мощности излучения $P_{изл}$):

$$I_{фд} = S P_{изл}, \text{ где } S - \text{чувствительность фотодиода.}$$

Изменить поляризацию (повернув поляризатор на 90°) и повторить измерения.

Проверить угловое положение призмы относительно системы отсчета гониометра. Для этого, поворачивая платформу с призмой, установить гипотенузную грань призмы перпендикулярно лучу лазера (при этом отражённый от поверхности призмы луч вернётся в отверстие излучающей апертуры лазера). При этом ось автоколлиматора будет точно перпендикулярна грани призмы. В нижнем (измерительном) окуляре (5) при этом отсчет углов даст значение 0° .

4.4. Измерить угол Брюстера.

Для этого:

- установить стрелку на поляроиде (9) лазера горизонтально (ТМ- волна);
- поворачивать столик с призмой против часовой стрелки от положения $\theta_1 = 10^\circ$ и, передвигая фотоприемник, соответственно перемещению отраженного луча, снять зависимость интенсивности отраженного излучения от угла поворота призмы;
- повернуть стрелку поляризатора на 90° (ТЕ - волна) и повторить измерения.

Измерить угол полного внутреннего отражения.

Для этого:

- установить призму в положение, изображенное на рис.3 и наблюдать луч лазера, вышедший через гипотенузную грань призмы под малым углом к ней и падающий на матовый экран - направляющую фотоприемника. Плавно поворачивая столик гониометра, зафиксировать момент, когда лазерный луч сначала пойдет по касательной к гипотенузной грани призмы, а при дальнейшем увеличении угла падения не выходит наружу через гипотенузную грань призмы, а полностью отражается вовнутрь (ПВО). Измерить угловое положение призмы, соответствующее наступлению ПВО.

Необходимо помнить, что в измерительном окуляре (5) мы всегда измеряем угол $\theta_{\text{изм}}$ между осью автоколлиматора и перпендикуляром к гипотенузной грани призмы, т.е. на рис.3 $\theta_1 = 225^\circ - \theta_{\text{изм}}$.

Используя результаты измерений, построить экспериментальные зависимости коэффициента отражения от угла падения света на границу раздела для ТЕ – и ТМ – волн:

$$R(\theta_i) = P(\theta_i)/P_{\text{изл}} = I_{\text{фд}}(\theta_i)/I_{\text{фд}}(90^\circ), \text{ где } I_{\text{фд}}(90^\circ) - \text{ток фотодиода для полного луча лазера.}$$

По снятым зависимостям определить угол Брюстера и рассчитать угол ПВО, и показатель преломления призмы n_p .

Показатель преломления призмы рассчитывается двумя способами:

1. По измеренной величине угла Брюстера : $\text{tg } \theta_B = n_p$
2. По графику зависимостей $R(\theta_i)$: сначала определяется коэффициент отражения для малого угла падения 10° как $R(\theta_i) = P_{\text{отр}}(\theta_i)/P_{\text{изл}}$, затем по измеренному коэффициенту отражения рассчитывается показатель преломления материала призмы

$$R(10^\circ) \approx (n_p - 1)^2 / (n_p + 1)^2$$

Здесь используется тот факт, что зависимость $R(\theta_i)$ при малых углах падения идёт почти параллельно оси абсцисс (рис.5), и для коэффициента отражения можно воспользоваться приближённой формулой, строго справедливой для случая нормального падения $\theta_i = 0^\circ$.

Сравнить оба полученных значения n_p .

ПРИМЕЧАНИЕ: так как мощность излучения лазера флюктуирует (паспортная нестабильность +/- 5%), рекомендуется производить несколько (5-10) измерений в каждой точке с последующим усреднением. Шаг измерения 10° , однако в окрестностях угла Брюстера рекомендуется использовать малые шаги и возможно точнее локализовать точку минимальной интенсивности.

Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- схему измерительной установки;
- результаты измерений и расчетов;
- графики измеренных зависимостей;
- выводы по проделанной работе.

Литература

1. Борн М., Вольф Э., - Основы оптики, Наука, М., 1970.
2. Козанне А., Флере Ж., - Оптика и связь - Мир, М., 1984.

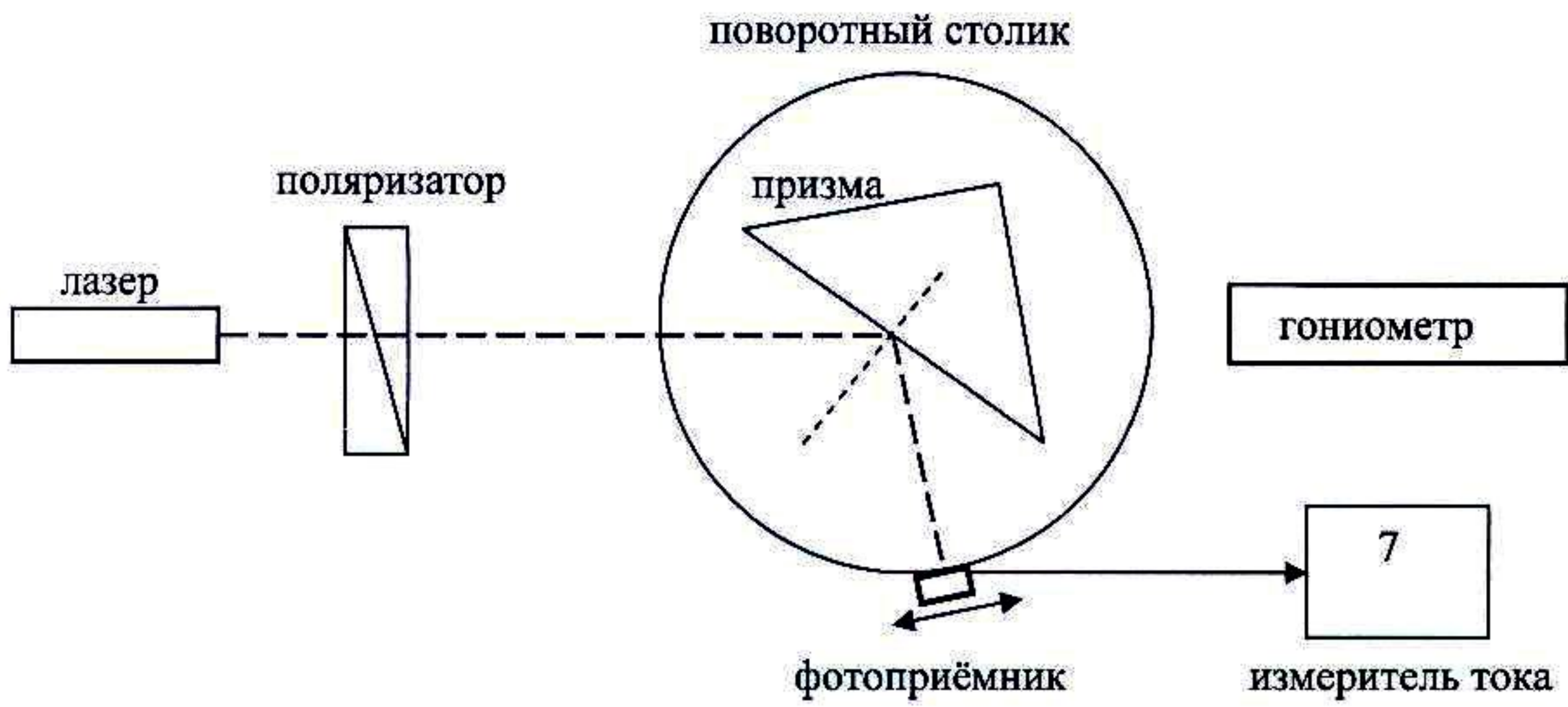


Рис.1 Схема лабораторной установки.

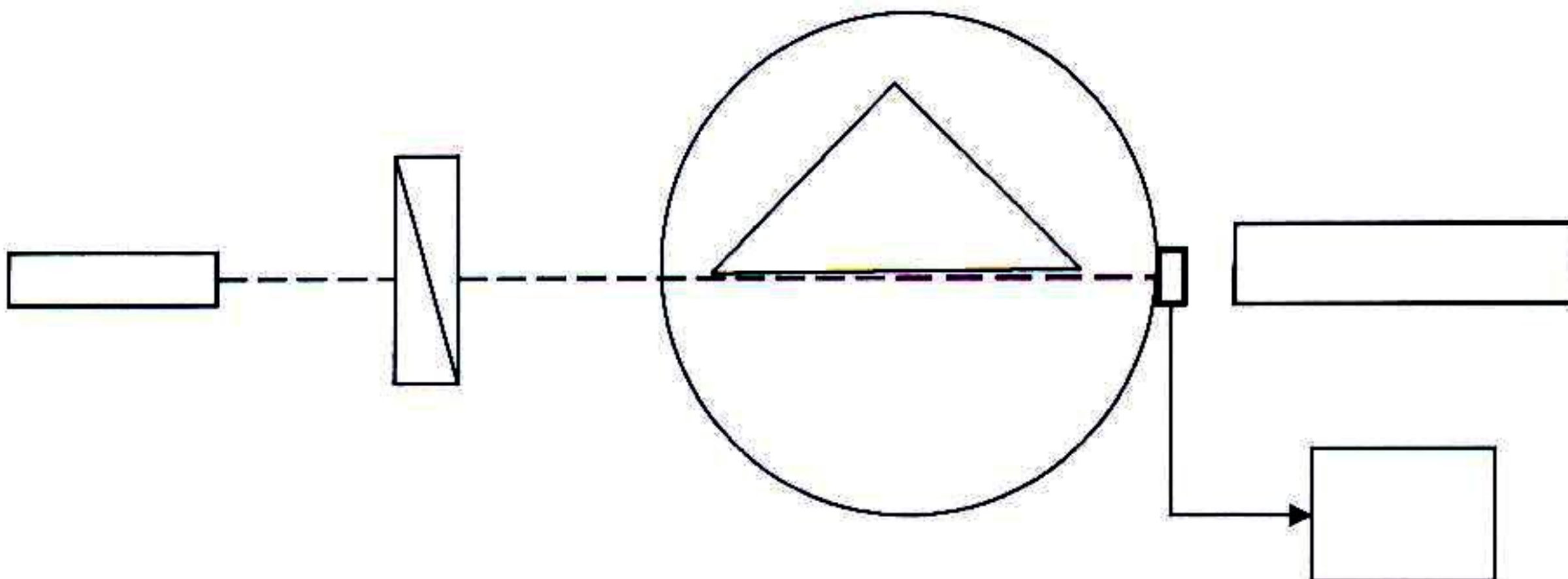


Рис.2 Схема измерения мощности падающего излучения $P_{изл}$.
Луч скользит вдоль призмы, не касаясь её гипотенузной грани.

Рис.3 Ход лучей в призме при измерении критического угла ПВО.
(При наступлении ПВО преломлённый луч должен идти по касательной к гипотенузной грани призмы).

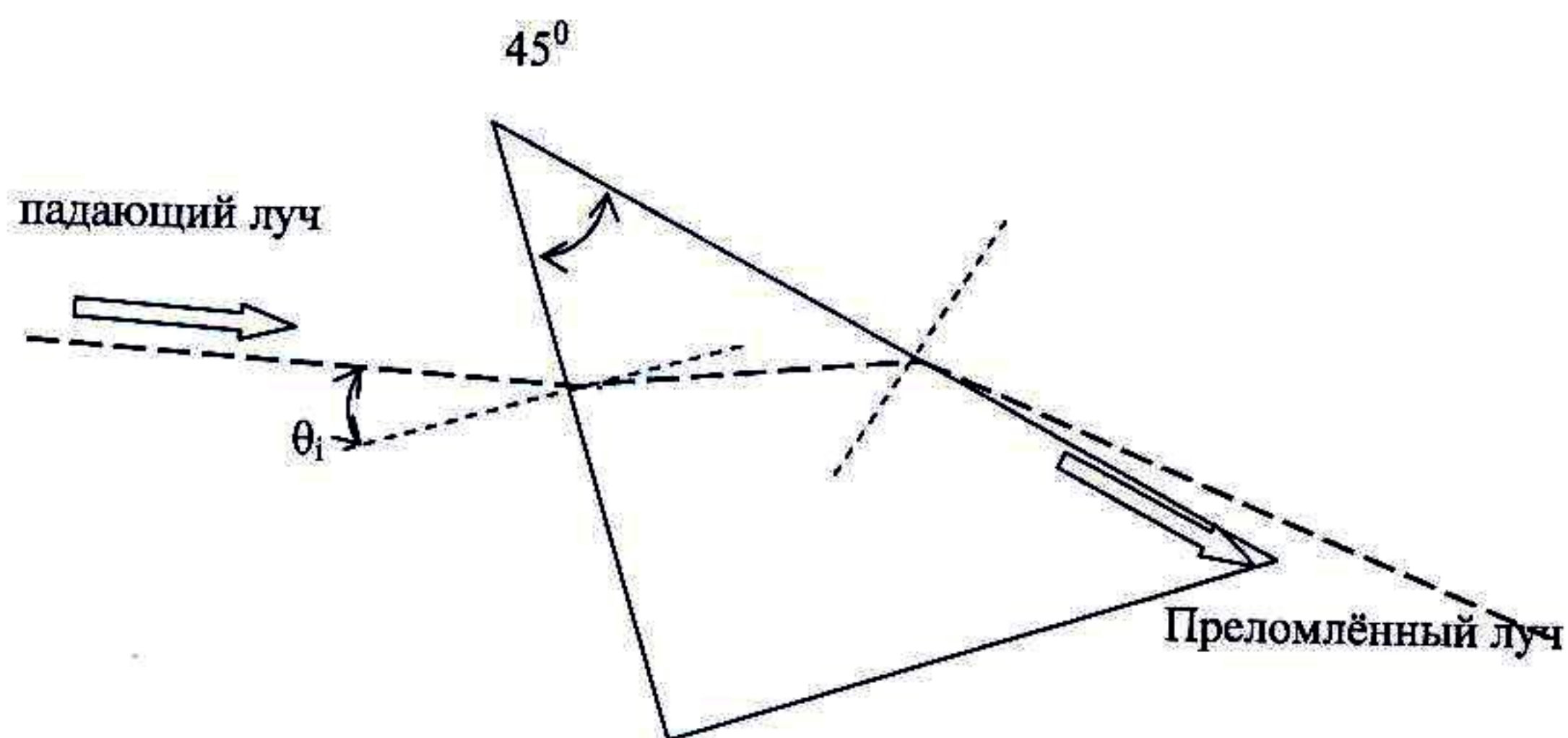


Рис.4 Угол, измеряемый гониометром – между осью гониометра и перпендикуляром к гипотенузной грани призмы.

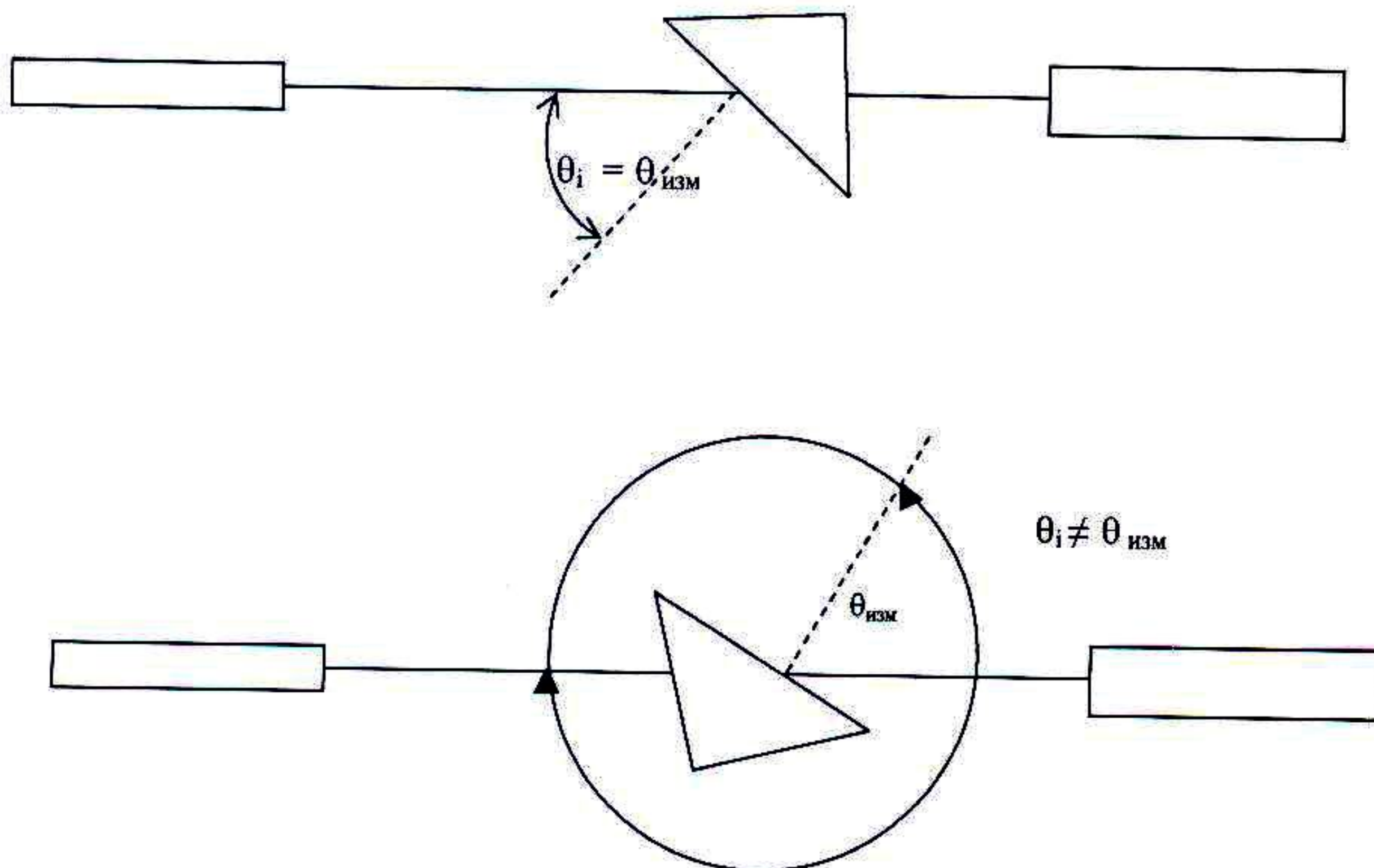


Рис.5 Типичный ход зависимостей $R(\theta_i)$ для ТЕ – волны (а), ТМ – волны (в) и неполяризованного света (б). Здесь угол Брюстера $\theta_B = 56^\circ 40'$.

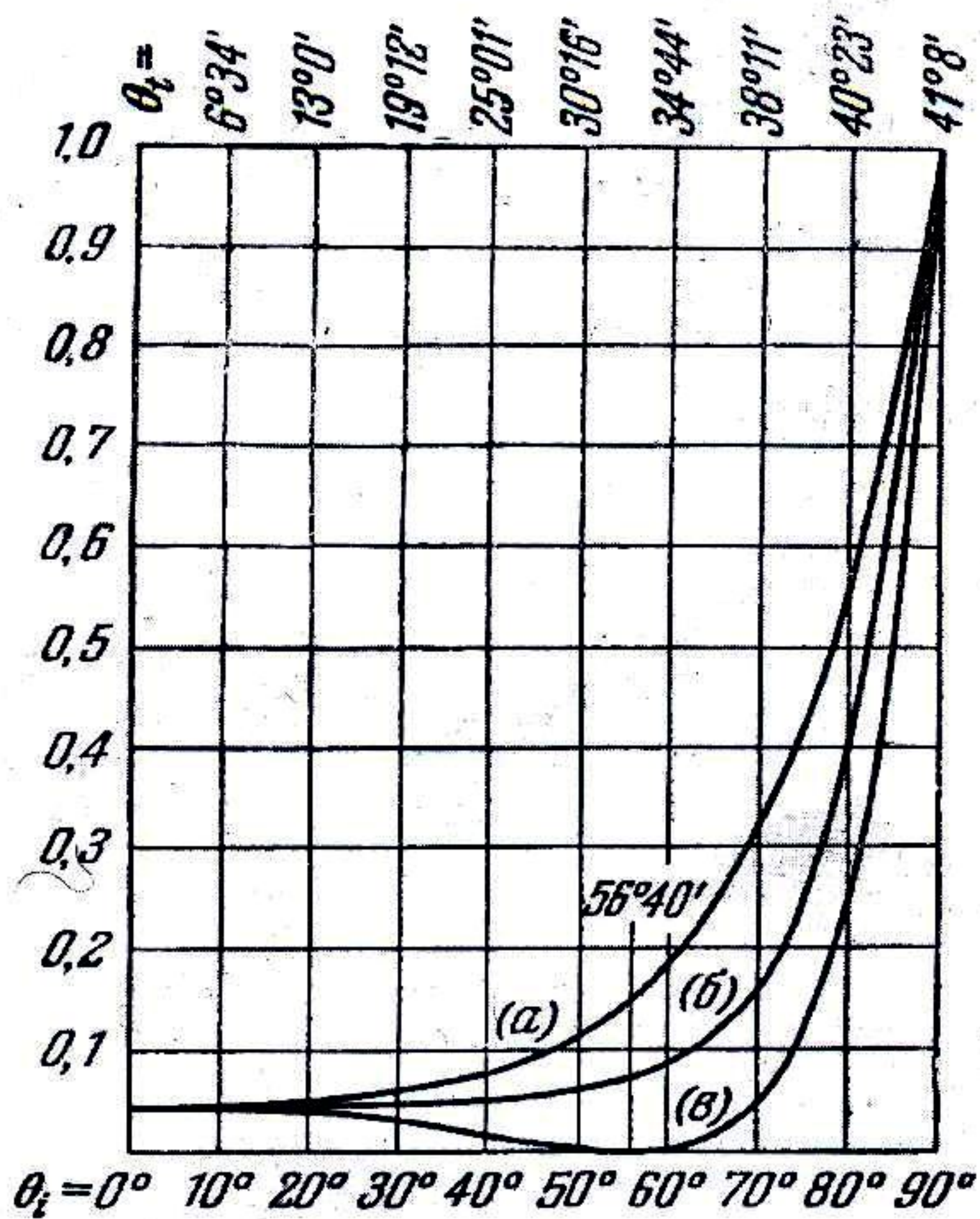


Рис. 1.12. Зависимость отражательной способности от угла падения [22]

а) R_{\perp} ; б) $\frac{1}{2}(R_{\parallel} + R_{\perp})$; в) R_{\parallel} .

Лабораторная работа № 2

Изучение работы полупроводниковых излучателей

Цель работы:

Изучение работы полупроводниковых излучателей.

Выполнение работы.

Зарегистрировать вольт-амперные характеристики полупроводниковых излучателей (светоизлучающий диод, лазер), зарегистрировать спектральные характеристики лазера FP и DFB. Занести результаты измерений в отчет к лабораторной работе.

Теоретические сведения к работе Светоизлучающие диоды

Излучающий диод – полупроводниковый диод, излучающий энергию в оптическом диапазоне длин волн в результате спонтанной рекомбинации электронов и дырок. Принцип работы светоизлучающего диода (СИД) основан на излучательной рекомбинации носителей заряда в активной области гетерогенной структуры при пропускании через нее тока.

Носители заряда - электроны и дырки – проникают в активный слой (гетеропереход) из прилегающих пассивных слоев (р- и n-слоя) вследствие подачи напряжения на р-n структуру и затем испытывают спонтанную рекомбинацию, сопровождающуюся выделением фотонов, обладающих энергией, равной энергии запрещенной зоны материала полупроводника.

Гетерогенные структуры могут создаваться на основе разных полупроводниковых материалов. Обычно в качестве подложки используется GaAs и InP. Соответствующий композиционный состав активного материала подбирается в зависимости от длины волны излучения и создается посредством напыления на подложку. В отличие от индикаторных светодиодов введение в р-n структуру дополнительного слоя позволяет сформировать отличающиеся более высоким КПД светоизлучающий диод. Генерация фотонов только в активной области связана с тем, что в материалах с большей энергетической зоной генерация фотонов невозможна. Кроме того, большая запрещенная энергетическая зона предотвращает поглощение фотонов (генерацию электронов и дырок) и делает встроенные слои прозрачными для излучаемых волн.

По конструкции различают светодиоды с поверхностным излучением и торцевым излучением.

При вводе излучения в волокно непосредственно с излучающей поверхности активного слоя, можно считать, что, по крайней мере, половина оптической мощности теряется, т. к. свет с активного слоя распространяется во всех направлениях. Небольшая часть оптической мощности может быть отражена путем базовой металлизации, внося тем самым часть оптической мощности в полезный световой поток. Другой

простой путь решения заключается в ограничении излучения небольшой областью внутри кристалла большей площади. Этот подход впервые реализовали Баррас и Доусон и поэтому СИД такой геометрии обычно называют излучателями Барраса (рисунок 6).

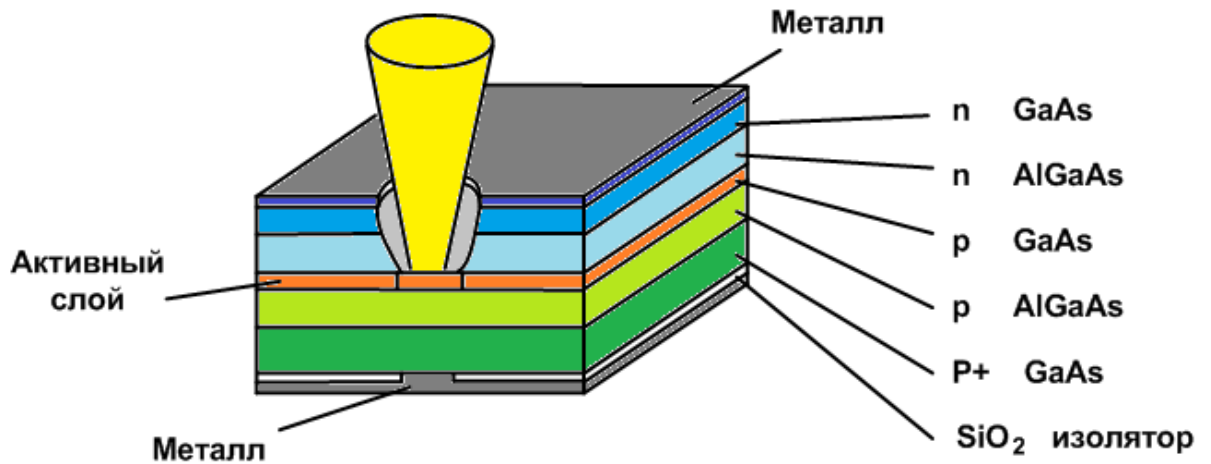


Рисунок 1. Структура светодиода Барраса

В такой конструкции гравированная стенка позволяет минимизировать расстояние между активной зоной и волокном, а соответствующая форма контактов обеспечивает небольшую площадь излучения.

Большинство СИД с поверхностным, близким к ламбертовскому, излучением имеют большую цифровую апертуру, равную приблизительно 0.9. Для ее уменьшения во многих случаях используется особая форма линз, доводя NA до 0.2, но даже в этом случае излучающая поверхность достаточно велика для эффективного ввода излучения в одномодовое волокно. Уровень мощности света, вводимого в волокно, в лучшем случае обычно составляет 20 мкВт для градиентного волокна и 2 мкВт для одномодового волокна.

Лучшей эффективностью ввода излучения в волокно характеризуется СИД с торцевым излучением, обеспечивающим ввод около 50 мкВт (30% доступной оптической мощности) в градиентное волокно и 20 мкВт в одномодовое волокно. Конструкция диода приведена на рисунке 7.

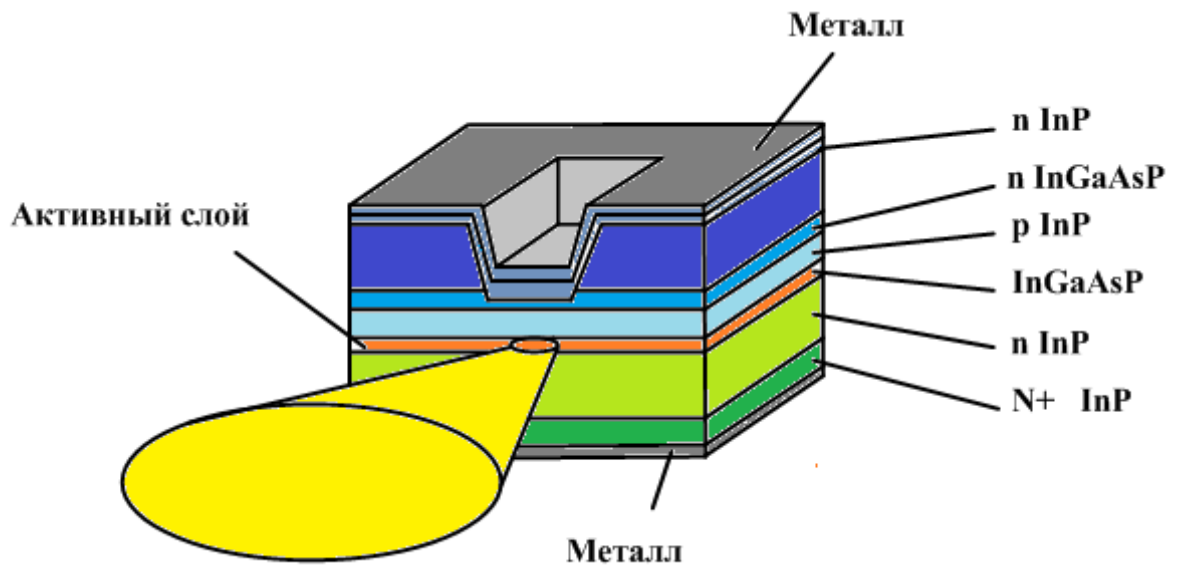


Рисунок 2. Структура светодиода с торцевым излучением.

Один из путей построения СИД с торцевым излучением основан на технологии V-образных канавок, которая была разработана для создания лазерных диодов. В этом случае обычная двойная гетероструктура покрывается двумя слоями типа n, которые образуют отрицательно смещенный p-n переход, а для создания проводящей полосы p типа в V-образной канавке напыляется цинк. Наконец, на переднюю грань наносится антиотражательное покрытие, а электрический контакт выполняется короче длины кристалла с тем, чтобы избежать вынужденной эмиссии. Плотность тока и качество оптического резонатора достаточно высоки для создания эмиссии, близкой к вынужденной. Результатом является более узкая ширина спектра (около 20 нм) и более высокая выходная мощность, но при более сильной температурной зависимости. Как правило, с точки зрения спектрального состава излучения СИД имеет достаточно большую ширину спектра, составляющую обычно от 40 до 80 нм, рисунок 10.

Излучение в дальней зоне СИД с торцевым излучением в этом случае эллиптическую форму. Типовые значения углов дальней зоны составляют 50° в вертикальном направлении и 100° в горизонтальном направлении. При использовании СИД для передачи данных они характеризуются рядом недостатков, основными из которых являются:

- сравнительно низкая полоса частот, равная 100 МГц, хотя достигнуты значения полосы частот до 1 ГГц, поэтому быстродействие СИД как минимум в 5 раз ниже по сравнению с лазером;

- широкий спектр излучения, составляющий около 60 нм, что также снижает полосу частот вследствие монохроматической дисперсии;

низкая эффективность ввода излучения в оптическое волокно, даже для диодов с торцевым излучением.

При постоянном токе возбуждения СИД, имеет отрицательный температурный коэффициент выходной мощности, типовое значение которого находится в пределах от -0.5 до -1.5 %/°C для GaAlAs с $\lambda_0=850$ нм и InGaAs с $\lambda_0=1300$ нм. Поэтому для стабилизации мощности излучения и повышения надежности LED можно использовать термоэлектрические охладители, однако в большинстве случаев необходимость в электронной обратной связи не требуется.

Одной из разновидностей LED являются суперлюминесцентные диоды (SLED, СЛД), которые отличаются большей по сравнению с лазерными диодами стабильностью, имеют меньший уровень шумов, а большая ширина спектра решает все проблемы, связанные с оптической интерференцией. Дополнительными преимуществами SLED в этом случае являются: высокая линейность, меньшее потребление энергии и вследствие низкой плотности тока, высокая надежность. Кроме этого, так как SLED не очень чувствительны к перегрузке, для управления ими можно использовать простые схемы управления. По своим характеристикам SLED занимают промежуточное место между СИД и лазерными диодами.

Лазерные диоды

Принципиальным отличием лазерного диода (ЛД) от СИД является наличие в них встроенного оптического резонатора. Лазерный диод работает при значительно больших значениях токов накачки, чем светодиод. Генерацию света в лазерном диоде определяют два механизма: спонтанная и стимулированная эмиссия. Спонтанная эмиссия имеет место в результате рекомбинации возбужденных электронов в зоне проводимости и дырок в валентной зоне, аналогично генерированию излучения в СИД. Из-за высокого показателя преломления активного слоя свет, достигая границ активного слоя, отражается от них и не выходит в другие слои структуры. Фотоны, созданные в результате спонтанной эмиссии, вызывают генерацию дополнительных фотонов путем стимулирования дополнительных рекомбинаций, а те в свою очередь создают дополнительные фотоны, т. е. происходит стимулированная эмиссия. Локализованный таким образом свет усиливается, и, когда сопутствующая этому процессу добавка энергии становится выше потерь, возникает лазерное излучение. Следовательно, при протекании через структуру полупроводникового лазера электрического тока, вначале, аналогично СИД, возникает естественное излучение, по мощности пропорциональное силе тока, но стоит току возрасти до некоторого порогового значения, мощность излучения резко возрастает, а само излучение становится лазерным.

Так как стимулированные фотоны когерентны с генерирующими фотонами, т. е. имеют одну и ту же длину волны и фазу, такое излучение имеет узкий спектр, а длина волны определяется свойствами материала лазерной структуры. В типовых лазерных диодах высота активной зоны составляет 5-10 мкм, ширина 0.1-0.2 мкм, а длина 300 мкм, при этом грани представляют собой полупрозрачные зеркала, ограничивающие объем резонатора. Эмиссия происходит с обеих граней и имеет идентичные характеристики излучения. Типовые значения порогового тока составляют от единиц до сотен миллиампер, а мощность лазерного излучения несколько десятков милливатт.

Таким образом, для возникновения лазерного излучения необходимо обеспечить определенный уровень тока, а так же выполнить условия электрического и оптического ограничений.

Наибольшее распространение получили лазеры с резонатором Фабри-Перо (FPL), лазер с распределенной обратной связью (DFB) и лазер с распределенным брэгговским отражением (DBR), с внешним резонатором.

В лазерных диодах с резонатором Фабри-Перо (FP лазеры, Fabry-Perot) резонатор образуется торцевыми поверхностями, окружающими с обеих сторон гетерогенный переход. Одна из сторон отражает свет с коэффициентом отражения близким к 100%, другая является полупрозрачной, обеспечивая, таким образом, выход излучения наружу, рисунок 8.

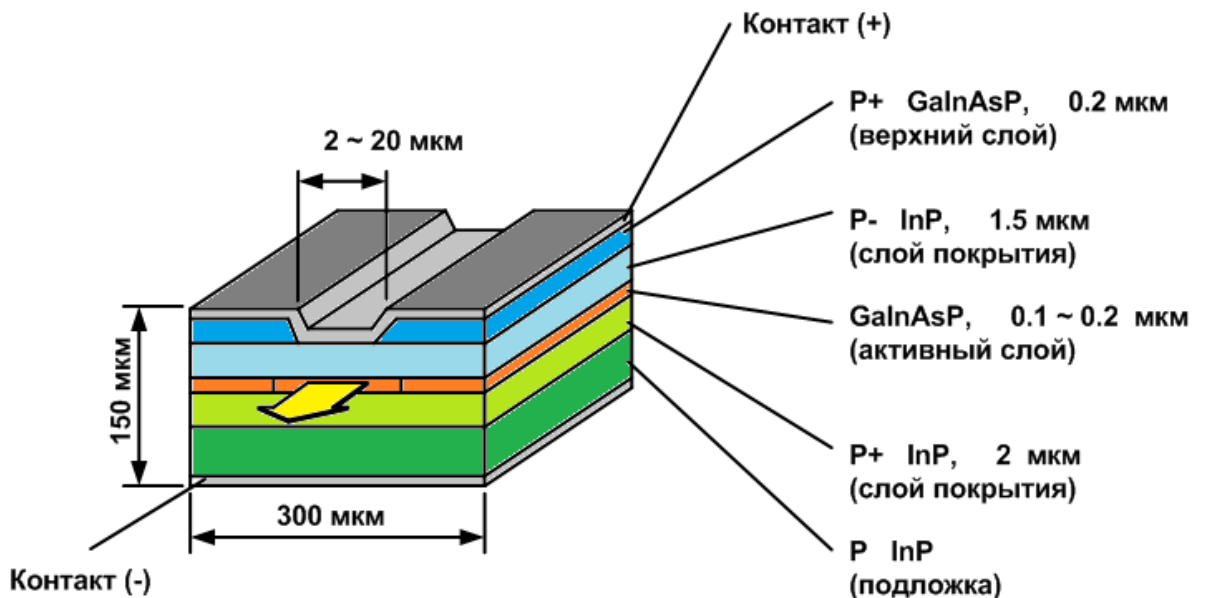


Рисунок 3. Конструкция лазерного диода Фабри-Перо

В диапазоне 1310 нм FP-лазеры изготавливают на подложке из фосфида индия (InP) с активными слоями из InGaAsP. В спектре FP лазера

наряду с главным пиком, в котором сосредоточена основная мощность излучения, существуют побочные максимумы, рисунок 9.

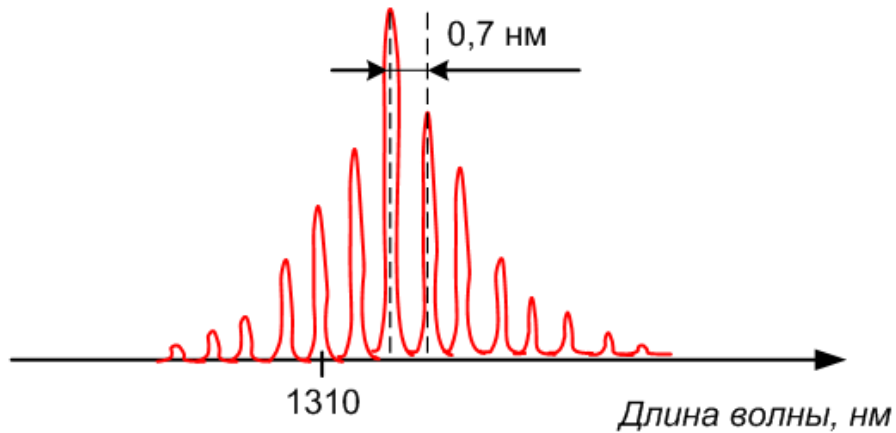


Рисунок 4. Спектр лазера Фабри-Перо

Этот эффект отсутствует у перечисленных трех других типов лазеров (DFB, ЕС, DBR), рисунок 10.

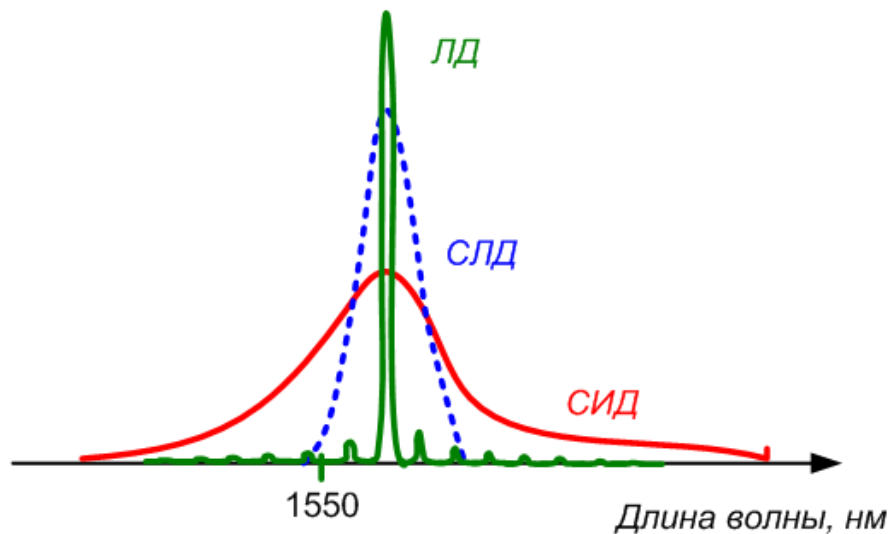


Рисунок 5. Сравнение распределения спектральной интенсивности светоизлучающего диода (СИД), суперлюминисцентного диода (СЛД), лазерного DFB, DBR диода (ЛД)

Лазерные диоды с распределенной обратной связью (DFB лазер) и с распределенным брэгговским отражением (DBR лазер) имеют схожий резонатор с FP лазером, в который добавлена периодическая пространственная модуляционная структура. В DFB лазерах периодическая

структура совмещена с активной областью (рисунок 11), а в DBR лазерах периодическая структура вынесена за пределы активной области (рисунок 12).

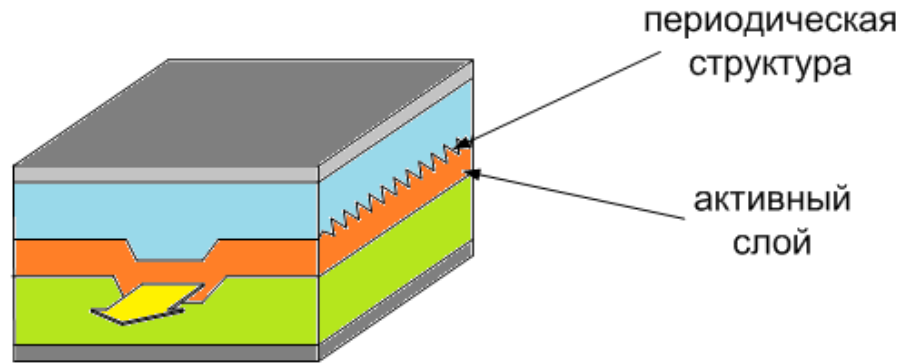


Рисунок 6. Структура DFB лазера

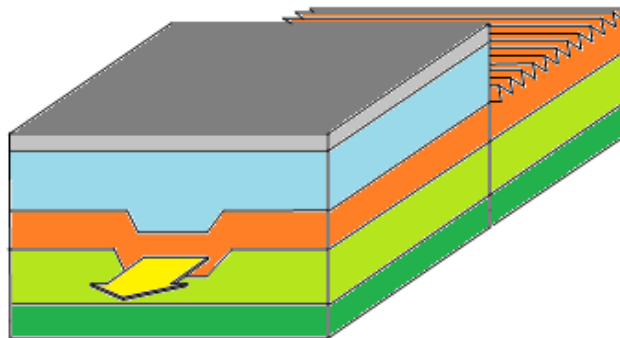


Рисунок 7. Структура DBR лазера

Периодическая структура влияет на условия распространения и характеристики излучения. Преимуществами DFB и DBR лазеров по сравнению с FP лазером являются: уменьшение зависимости длины волны лазера от тока инжекции и температуры, высокая стабильность одномодовости и практически 100-процентная глубина модуляции. Температурный коэффициент $\Delta\lambda/\Delta T$ для FP лазера порядка 0,5-1 нм/°С, в то время как для DFB лазера порядка 0.07-0.09 нм/°С. Основным недостатком DFB и DBR лазеров является сложная технология изготовления и, как следствие, более высокая цена.

Лабораторная работа № 3

Изучение работы устройств систем спектрального уплотнения

Цель работы:

Изучить работу мультиплексора/демультиплексора длин волн

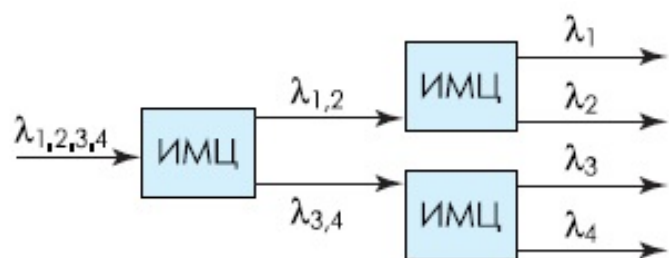
Теоретические сведения к работе

Наиболее простой способ мультиплексирования/демультиплексирования на основе планарных технологий - на оптоволоконных направленных разветвителях (ОВНР). Она построена путем каскадного соединения однотипных ячеек разветвителей типа 2:1 (два входа – один выход), дающего в итоге мультиплексор n:1 (рис.1.1). Такой метод построения схемы имеет значительный недостаток: высокий уровень вносимых потерь. Его можно компенсировать высоким уровнем входных оптических сигналов и установкой на выходе оптического усилителя, но такое решение годится только для мультиплексора, но непригодно для демультиплексора, входные уровни сигналов которого малы.[1]



Рис.1.1. Схема мультиплексирования WDM на ОВНР.

Развитием этого способа является использование интерферометров Маха – Цендера для демультиплексоров вместо разветвителей (рис. 1.2). [2]



ИМЦ – Интерферометр Маха-Цендера

Рис. 1.2. Демультимплексор WDM на интерферометрах Маха – Цендера.

Демультимплексор построен по схеме бинарного дерева, поэтому может быть использован в системах WDM с числом несущих, равных величине 2^n . Явное преимущество этого способа – планарность схем интерферометра Маха-Цендера и простота его реализации в виде оптической интегральной схемы.

Принципы из предыдущих двух способов были объединены для создания технологии, основанной на формировании дифракционной решетки на массиве волноводов (фазосогласованных волноводных решеток) – AWG (Arrayed Waveguide Grating). [3]

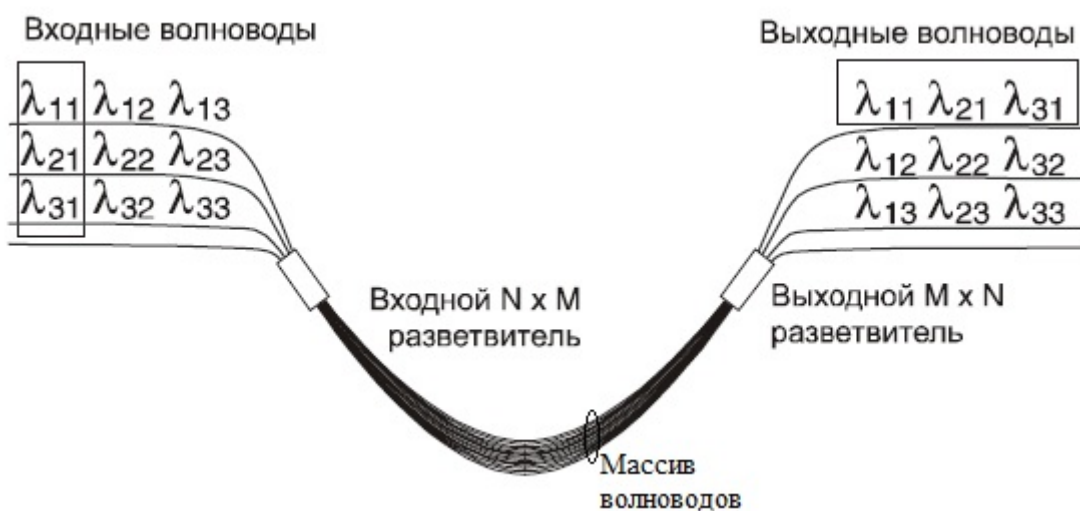


Рис. 1.3. Решетка на основе массива волноводов AWG.

Решетки на основе массива волноводов AWG используются для того, чтобы перераспределять сигналы различных длин волн (каналы) между двумя наборами волокон (рис. 1.3) или выделить (демультимплексировать) отдельные каналы составного сигнала в отдельные волокна. [2,3]

Входной и выходной разветвители и массив волноводов в рассмотренной конструкции можно реализовать на одной кремниевой подложке, что важно для функциональной связи с другими оптоэлектронными элементами схемы (фотодетектором и др.). Волноводы реализуются в виде планарных оптоволоконных световодов (диоксид кремния, легированный Ge или Ta), сформированных на этой же подложке. На рис. 1.4 представлен внешний вид демультимплексора AWG в интегрально-оптическом исполнении.

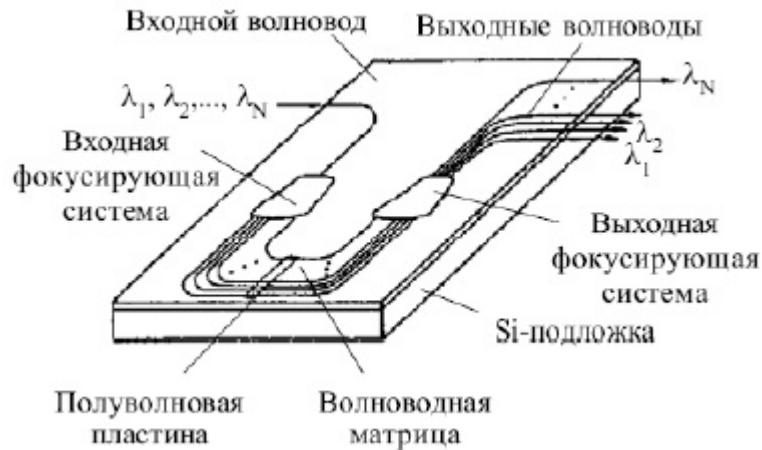


Рис. 1.4. Планарный демультиплексор AWG

Эта технология сейчас становится основной для производителей мультиплексоров и демультиплексоров систем DWDM. Благодаря легко масштабируемой структуре, она может широко применяться в системах с сотнями каналов.

Принцип работы и основные параметры мультиплексора AWG

Мультиплексор $N \times N$ на основе фазированной решетки волноводов AWG (Arrayed Waveguide Grating) широко используется в оптических сетях с применением технологии WDM, которая позволяет увеличить общую пропускную способность одного оптического волокна.

В устройствах, основанных на фазированных массивах, дисперсионные и фокусирующие свойства, необходимые для демультиплексирования, обеспечиваются массивом волноводов, длина которых выбрана такой, чтобы получить требуемые изображения и дисперсионные характеристики. Устройства на фазированных массивах реализуются на обычных волноводных технологиях и не требуют этапа вертикального травления, необходимого в производстве устройств на решетках, поэтому они получают более надежными и технологичными при производстве. [4]

AWG состоит из входных и выходных волноводов, двух пластин (разветвителей), внутри которых происходит фокусировка излучения, и фазированной решетки, образованной группой волноводных каналов разной длины (рис. 2.1).

Длина каждого волноводного канала L_i отличается от соседних на фиксированную величину ΔL и вычисляется по формуле:

$$L_i = L_{i-1} + \Delta L. \quad (2.1)$$

В первой пластине расположены выходы N_{ch} входных волноводов, расстояние между которыми обозначено D_1 , и входы волноводов фазированной решетки, расстояние между которыми обозначено d_1 . Радиус кривизны обозначен f_1 . Во второй пластине расположены выходы

волноводов фазированной решетки и входы N_{ch} выходных волноводов. Параметры волноводов в первой и второй пластинах в общем случае различны, поэтому на рис. 2.1 для них введены другие обозначения: расстояние между соседними выходными волноводами обозначено D , расстояние между соседними волноводами фазированной решетки обозначено d , радиус кривизны обозначен f .

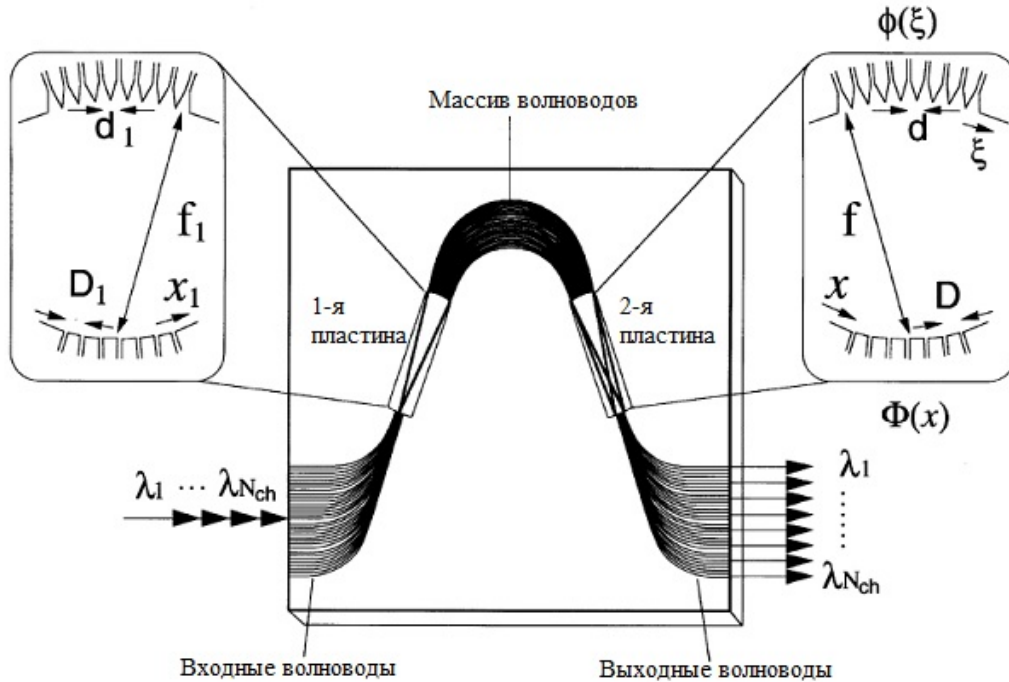


Рис. 2.1. Конструкция AWG мультиплексора

Излучение попадает в первую пластину из входного волновода, расположенного на расстоянии x_1 (x_1 отсчитывается от центра входных волноводов против часовой стрелки, см. рис. 4.1), и возбуждает волноводы фазированной решетки. В каждом из волноводов решетки возникает электрическое поле с амплитудой a_i ($i = 1 - N$), где N – число волноводов в решетке. Амплитуда электрического поля a_i имеет обычное Гауссово распределение.

После прохождения через решетку волноводов лучи света выходят во вторую пластину и в результате интерференции фокусируются в выходной волновод, расположенный на расстоянии x (x отсчитывается от центра выходных волноводов против часовой стрелки, см. рис. 2.1). Величина x зависит от длины волны сигнала, так как относительная фазовая задержка, приобретаемая излучением в каждом волноводе решетки, пропорциональна $\Delta L/\lambda$.

Пространственное разделение каналов, отличающихся по длине волны, получают размещением принимающих волноводов в надлежащие позиции вдоль плоскости изображения.

На рис. 2.2 в увеличенном масштабе показана вторая пластина. Рассмотрим интерференцию двух световых лучей, прошедших через $(i - 1)$ -ый и i -ый волноводы решетки.

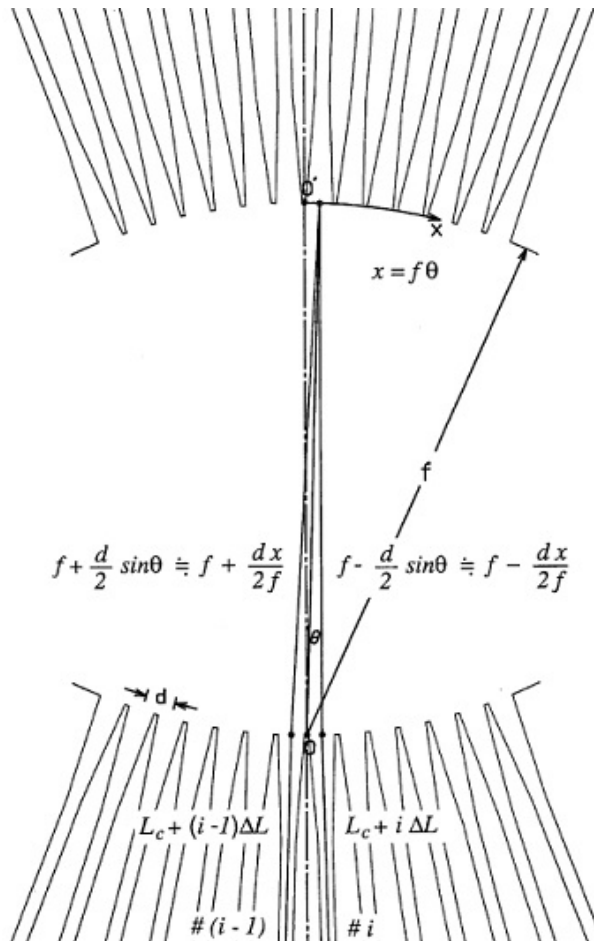


Рис. 2.2. Вторая пластина в увеличенном масштабе

На рис. 2.2 приведены точные и приближенные выражения для геометрических расстояний, которые проходят эти лучи во второй пластине. Приближение заключается в том, что угол θ мал, и можно считать, что $\sin \theta \approx \theta$. Аналогичные соотношения можно получить и для первой пластины. Для того чтобы рассматриваемые лучи в точке x сложились в фазе, их разность фаз должна быть кратна 2π . Соответствующее условие для центрального канала с длиной волны λ_0 имеет вид:

$$\beta_S(\lambda_0) \left(f_1 - \frac{d_1 * x_1}{2f_1} \right) + \beta_c(\lambda_0) [L_c + (i - 1) * \Delta L] + \beta_S(\lambda_0) \left(f + \frac{d * x}{2f} \right) = \beta_S(\lambda_0) \left(f_1 + \frac{d_1 * x_1}{2f_1} \right) + \beta_c(\lambda_0) [L_c + i * \Delta L] + \beta_S(\lambda_0) \left(f - \frac{d * x}{2f} \right) - 2m\pi, \quad (2.2)$$

где β_s и β_c – постоянные распространения пластины и решетки, m – целое число (порядок дифракции), λ_0 – длина волны центрального канала системы WDM, L_c – длина самого короткого волновода решетки.

Из (2.2) путем простых преобразований получаем:

$$\beta_s(\lambda_0) \frac{d_1 * x_1}{f_1} - \beta_s(\lambda_0) \frac{d * x}{f} + \beta_c(\lambda_0) \Delta L = 2m\pi. \quad (2.3)$$

Если выполняется условие $\beta_s(\lambda_0) \Delta L = 2m\pi$, то есть для λ_0 справедливо соотношение

$$\lambda_0 = \frac{n_c \Delta L}{m}, \quad (2.4)$$

то соотношение между x_1 и x должно удовлетворять условию:

$$\frac{d_1 * x_1}{f_1} = \frac{d * x}{f}. \quad (2.5)$$

В (2.4) n_c – эффективный показатель преломления волновода решетки ($n_c = \beta_c / k$, где k – волновое число в вакууме).

Обычно параметры волноводов в первой и второй пластинах одинаковы, то есть $d_1 = d$ и $f_1 = f$. Из (2.5) следует, что в этом случае $x_1 = x$. Смещение x в зависимости от длины волны при фиксированном x_1 можно найти, продифференцировав (2.3) по λ :

$$\frac{\Delta x}{\Delta \lambda} = - \frac{N_c * f * \Delta L}{n_s * d * \lambda_0}, \quad (2.6)$$

где n_s – эффективный показатель преломления пластины, N_c – групповой показатель эффективного показателя преломления n_c волновода решетки ($N_c = n_c - \lambda \cdot dn_c / d\lambda$).

Аналогично смещение x_1 в зависимости от длины волны при фиксированном x определяется выражением:

$$\frac{\Delta x_1}{\Delta \lambda} = \frac{N_c * f_1 * \Delta L}{n_s * d_1 * \lambda_0}. \quad (2.7)$$

Если $\Delta \lambda$ – расстояние между соседними каналами WDM, то для расстояний между входными и выходными волноводами должны быть справедливы соотношения $|\Delta x_1| = D_1$ и $|\Delta x| = D$, соответственно. Подставляя эти соотношения в уравнения (2.6) и (2.7), получим

при фиксированном x_1 :

$$\Delta \lambda_{out} = \frac{n_s * d * D * \lambda_0}{N_c * f * \Delta L}, \quad (2.8)$$

при фиксированном x :

$$\Delta \lambda_{in} = \frac{n_s * d_1 * D_1 * \lambda_0}{N_c * f_1 * \Delta L}. \quad (2.9)$$

Обычно параметры волноводов в первой и второй пластинах одинаковы, то есть $D_1 = D$, $d_1 = d$ и $f_1 = f$. В этом случае $\Delta \lambda_{out} = \Delta \lambda_{in} = \Delta \lambda$ и из (2.8) или (2.9) получаем:

$$\Delta L = \frac{n_s * d * D * \lambda_0}{N_c * f * \Delta \lambda}. \quad (2.10)$$

Пространственное разделение m -го и $(m+1)$ -го порядков дифракции для излучения одной и той же длины волны можно получить из (2.3):

$$X_{FSR} = x_m - x_{m+1} = \frac{\lambda_0 * f}{n_s * d}. \quad (2.11)$$

Величина X_{FSR} (Free Spatial Range of AWG) позволяет рассчитать максимально возможное число спектральных каналов N_{ch} :

$$N_{ch} = \frac{X_{FSR}}{D} = \frac{\lambda_0 * f}{n_s * d * D}. \quad (2.12)$$

Выполнение работы и содержание отчета

Провести программное моделирование работы мультиплексора длин волн, занести результаты моделирования в отчет по лабораторной работе.

На рис. 2.3 показаны результаты моделирования методом ВРМ (Beam Propagation Method) процесса распространения излучения во второй пластине для центральной длины волны λ_0 (рис. 2.3а) и для более короткой длины волны $\lambda < \lambda_0$ (рис. 2.3б). Из рисунка видно, что для сигнала с длиной волны λ появляются более высокие или более низкие порядки дифракции. Так как используется обычно один из двух дифракционных порядков, вносимые потери для боковых спектральных каналов оказываются на 2-3 дБ выше, чем для центрального канала.

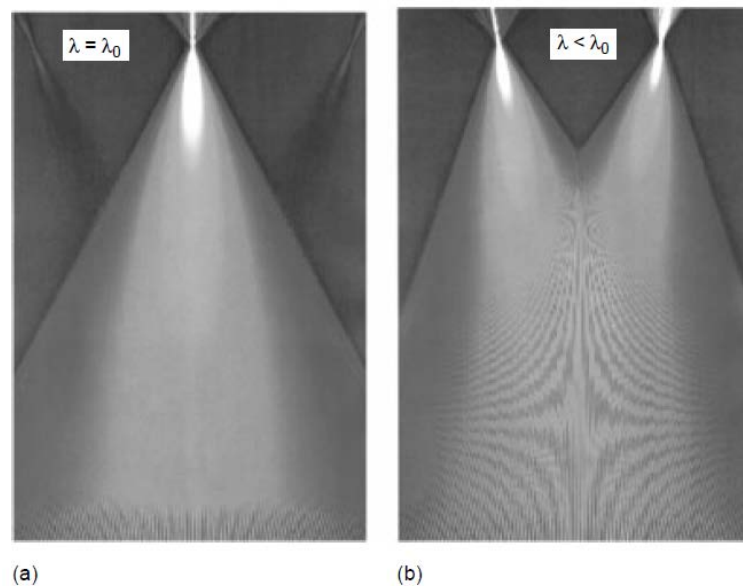


Рис. 2.3 Моделирование процессов распространения излучения во второй пластине:
а – для центрального канала, б – для периферийного канала.

Распределение сфокусированного электрического поля $\Phi(x)$ на входах выходных волноводов мультиплексора AWG (рис. 2.1) можно получить, просуммировав распределения полей каждого из волноводов решетки в дальней зоне. Следовательно $\Phi(x)$ является суммой пространственных преобразований Фурье ϕ_i , где ϕ_i – распределения полей на выходах волноводов решетки. Порядок проведения операций суммирования и преобразования Фурье в линейной системе может быть

любым, то есть распределение сфокусированного электрического поля $\Phi(x)$ является преобразованием Фурье всего профиля электрического поля $\phi(\xi)$ на выходах волноводов решетки.

На рисунке 2.4 схематически показано распределение электрического поля в волноводной решетке. По горизонтальной оси отложен нормированный номер волновода i/N ($i = 1 - N$), где N – число волноводов в решетке. Для того чтобы повысить эффективность захвата излучения решеткой волноводов (снизить потери), число волноводов в решетке должно быть достаточно большим. На рис. 2.5 показан нормированный частотный отклик AWG. Поскольку электрическое поле в волноводной решетке сегментировано (рис. 2.4) и не имеет гладкого гауссового распределения, его преобразование Фурье в фокальной позиции имеет боковые лепестки, которые видны на рис. 2.5. Эти боковые лепестки определяют теоретический уровень перекрестных помех в мультиплексоре AWG. Теоретический уровень мощности перекрестных помех в типичном мультиплексоре AWG составляет около -60 дБ. Он зависит от числа каналов AWG, а также конструкции волноводов. [5]

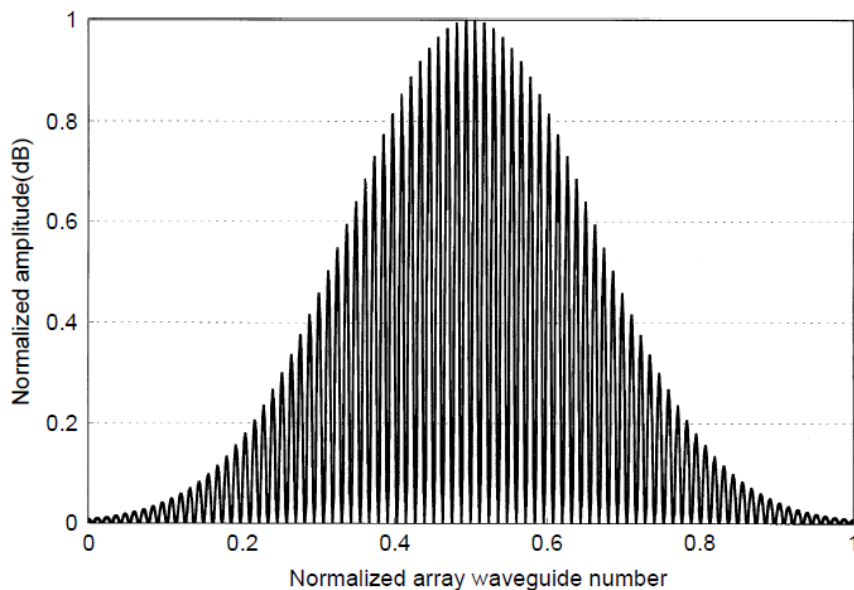


Рис. 2.4 Распределение электрического поля в решетке волноводов

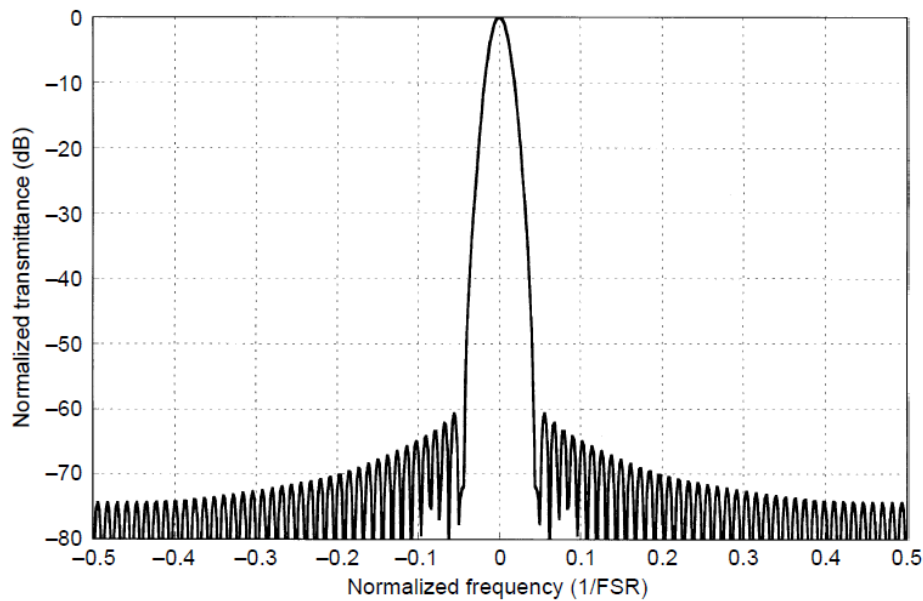


Рис. 2.5 Нормализованный частотный отклик решетки волноводов.

Литература:

Слепов Н.Н. Оптические мультиплексоры и демультиплексоры систем WDM. – Электроника: НТБ, 2004.

Krauss O. DWDM and Optical Networks. Siemens: Publicis Corporate Publishing, 2002.

Ramaswami R. and Sivarajan K.N. Optical Networks: A practical perspective: Morgan Kaufmann Publishers, Inc. San Francisco, California, 1998.

Meint K. Smit, Cor van Dam. PHASAR-based WDM-devices: principles, design and applications. – IEEE journal of selected topics in quantum electronics, vol. 2, no. 2, June 1996.

Katsunary Okamoto. Fundamentals of optical waveguides. Second edition. – Elsevier Inc, 2006.

Лабораторная работа № 4

Изучение интегрального электрооптического модулятора света

Цель работы:

Изучить работу электрооптического модулятора света

Теоретические сведения к работе

Модуляция тока, протекающего через светодиод или лазер, является наиболее простым способом получения оптического излучения модулированного по интенсивности. Такой вариант модуляции называют прямой модуляцией. Как упоминалось во втором разделе, существуют варианты построения передатчиков с применением внешней модуляцией, т.е. с применением оптических модуляторов.

Оптический модулятор – активный компонент ВОСП, предназначенный для модуляции оптического излучения по одному или нескольким оптическим параметрам.

В зависимости от изменяемого параметра различают модуляторы амплитудные, фазовые, поляризационные.

В аналоговых и цифровых волоконно-оптических системах связи большее распространение получили амплитудные электрооптические модуляторы, построенные по схеме интерферометра Маха–Цандера. На рисунке 15 приведено схематичное представление конструкции модулятора интенсивности интерферометрического типа на основе ниобата лития.

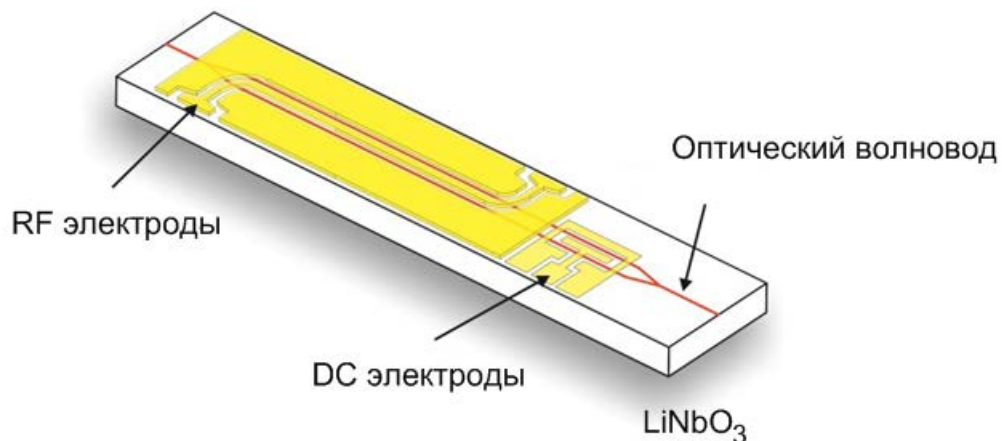


Рисунок 1. Схема модулятора интенсивности на основе ниобата лития (компания iXBlue Photonics, Франция)

Интегрально-оптическая схема модулятора, состоит из системы канальных оптических волноводов сформированных на подложке ниобата

лития. Лазерное излучение входного волновода разделяется на два пути, которые затем объединяются в выходном волноводе. Два пути составляют два плеча интерферометра Маха-Цендера.

Вдоль волноводов сформированы электроды. Обычно есть две пары электродов: RF электроды модуляции (часто называемые радиочастотными электродами) и DC электроды смещения (электроды постоянного тока). Приложенное к электродам напряжение создает электрическое поле изменяющее показатель преломления электрооптического материала волноводов. Лазерное излучение, распространяющееся в плечах модулятора с разными скоростями, приобретает разность фаз, что приводит к модуляции интенсивности на выходе устройства.

Зависимость интенсивности выходного излучения от приложенных напряжений называют передаточной функцией модулятора. На рисунке 16 приведен график передаточной функции, соответствующий модулятору Маха-Цендера с симметричной топологией волноводов. В реальности же из-за технологических допусков и неоднородностей материалов существует дисбаланс в передаточной функции.

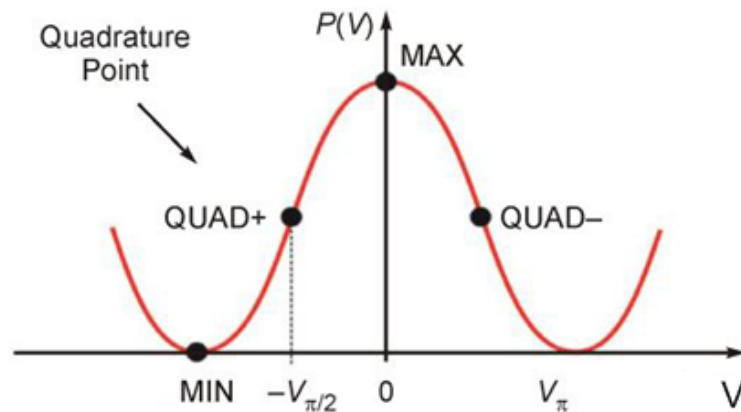


Рисунок 2. Передаточная функция модулятора Маха-Цендера

Чтобы получить желаемую модуляцию света, необходимо подать на модулятор два электрических напряжения с соответствующими параметрами: напряжение смещения (DC) и напряжение модуляции (RF сигнал).

Подаваемое на DC электроды напряжение смещения служит для задания рабочей точки модулятора. Наиболее часто рабочими точками модуляторов являются точки минимума (MIN), максимума (MAX) или квадратурные точки (Quadrature point, QUAD+, QUAD-). Выбор рабочей точки зависит от целей применения модулятора и поясняется рисунками 17-20.

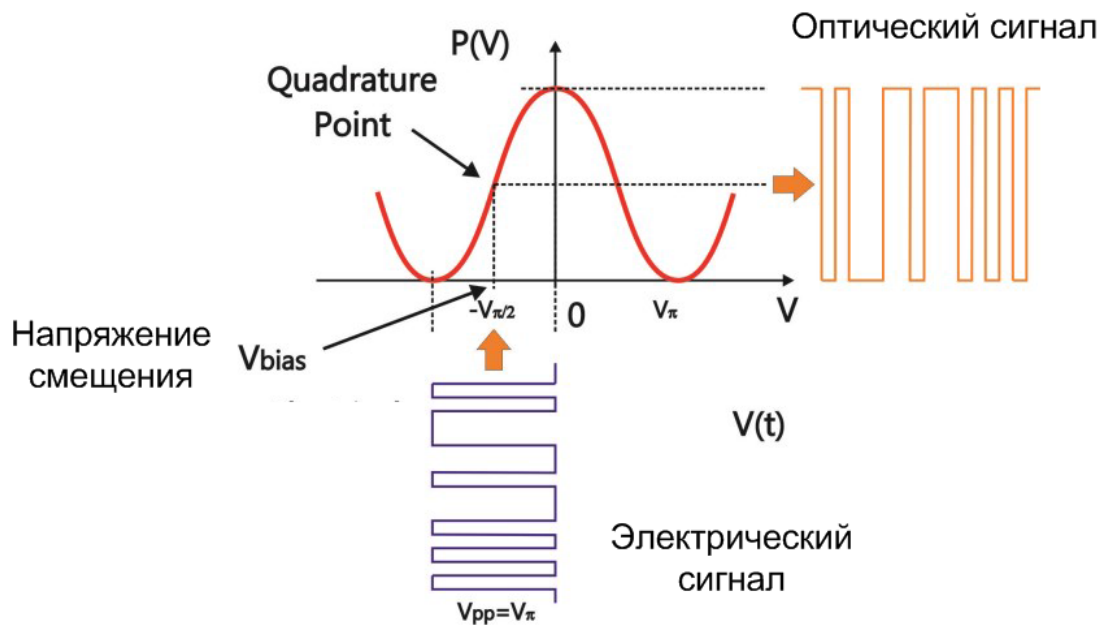


Рисунок 3. Цифровая модуляция (формат NRZ)

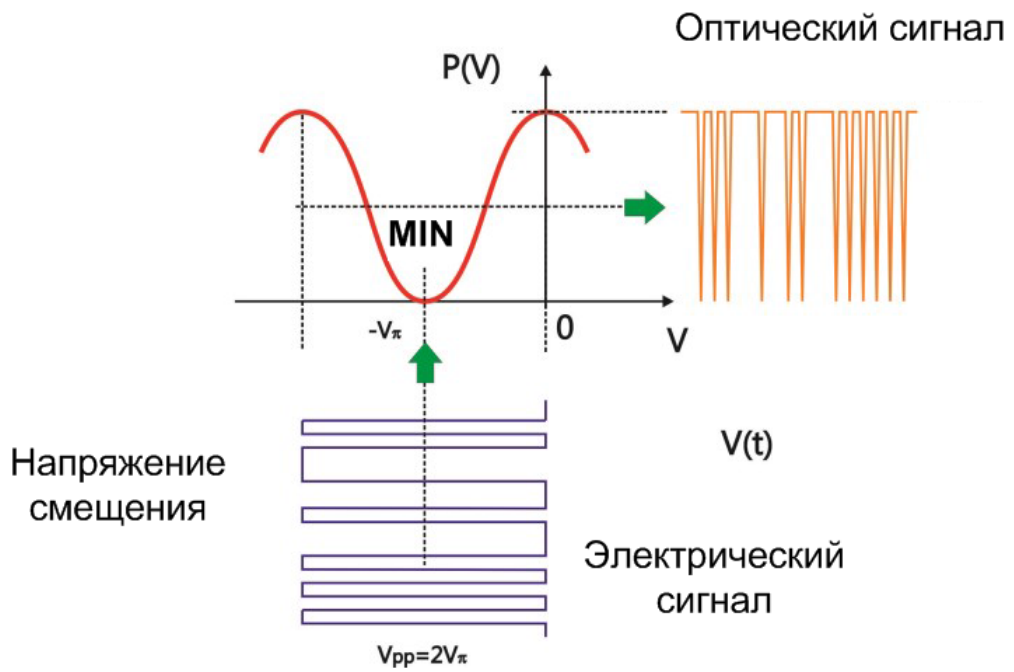


Рисунок 4. Цифровая модуляция (формат DPSK)

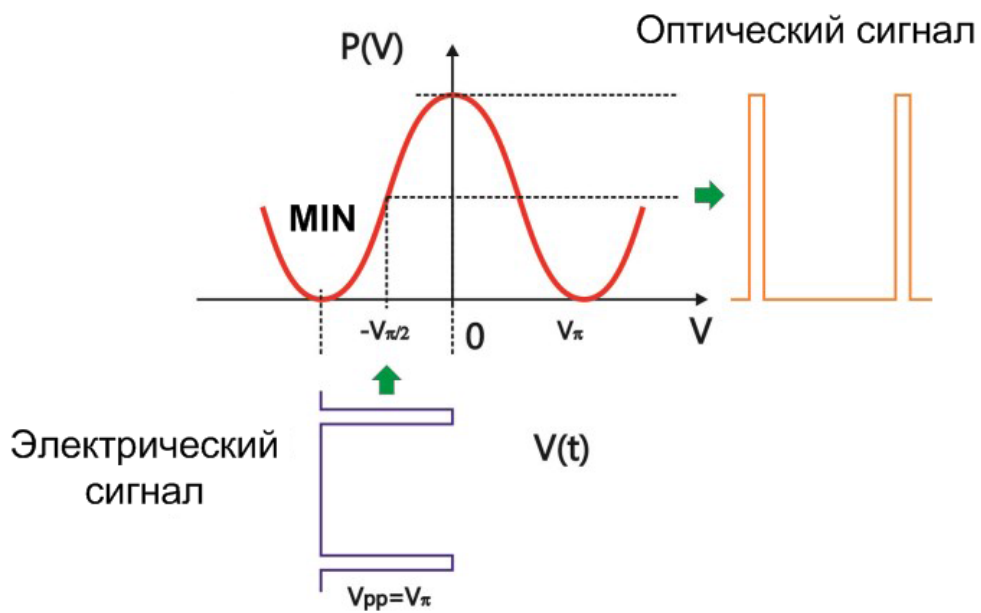


Рисунок 5. Импульсная модуляция (высокий коэф. экстинкции)

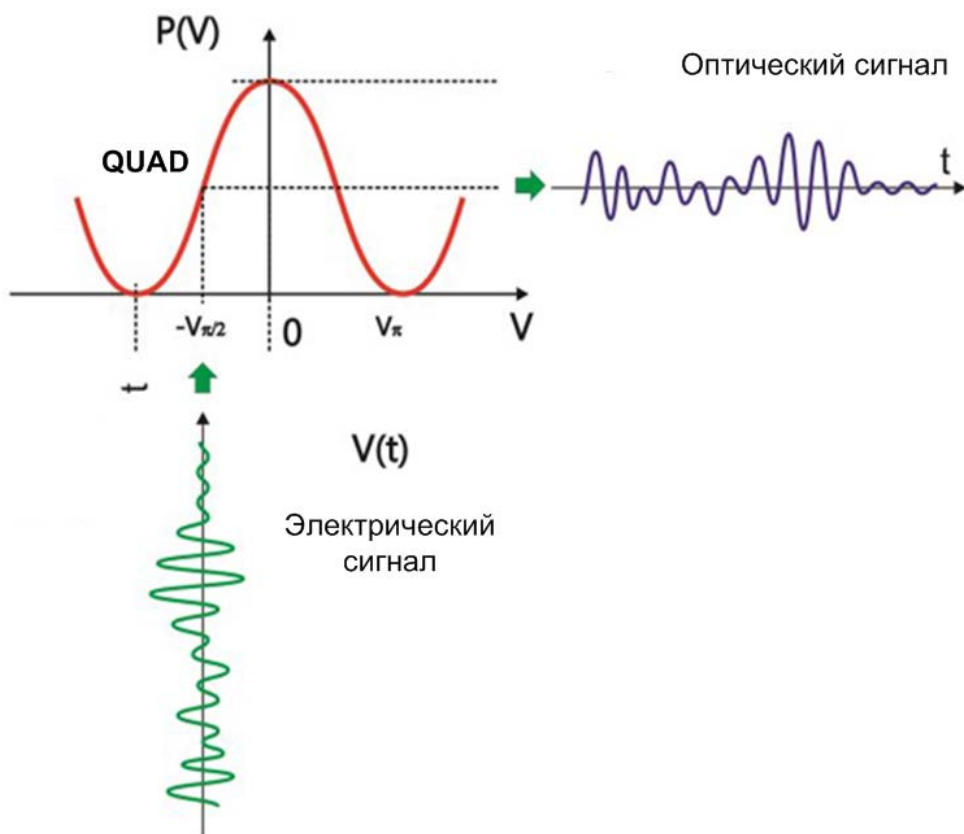


Рисунок 6. Аналоговая модуляция

Точки QUAD+ и QUAD- находятся в середине линейного участка и различаются наклоном передаточной функции модулятора. В области точки QUAD+ наклон передаточной функции положительный, т.е. увеличение напряжения на электродах приводит к возрастанию интенсивности выходного сигнала. Точка QUAD- является инвертирующей, т.е. увеличение напряжения на электродах приводит к снижению интенсивности выходного сигнала модулятора. В квадратурных точках передаточная функция имеет максимальную крутизну. В рабочих точках QUAD+ и QUAD- модулятор имеет минимальные нелинейные искажения.

Применение модулятора при задании рабочей точки MIN или MAX позволяет получать импульсные сигналы, реализовывать удвоение частоты, фазовую модуляцию.

Помимо того, что реальный интерферометр Маха-Цедера не идеально сбалансирован, он также подвержен дрейфу. Колебания температуры и эффекты старения заставляют передаточную функцию медленно перемещаться в горизонтальном направлении, что приводит к смещению положения рабочей точки и искажениям, рисунок 21. Поэтому напряжение смещения должно не только устанавливать желаемую рабочую точку, но и компенсировать возможный дрейф передаточной характеристики модулятора.

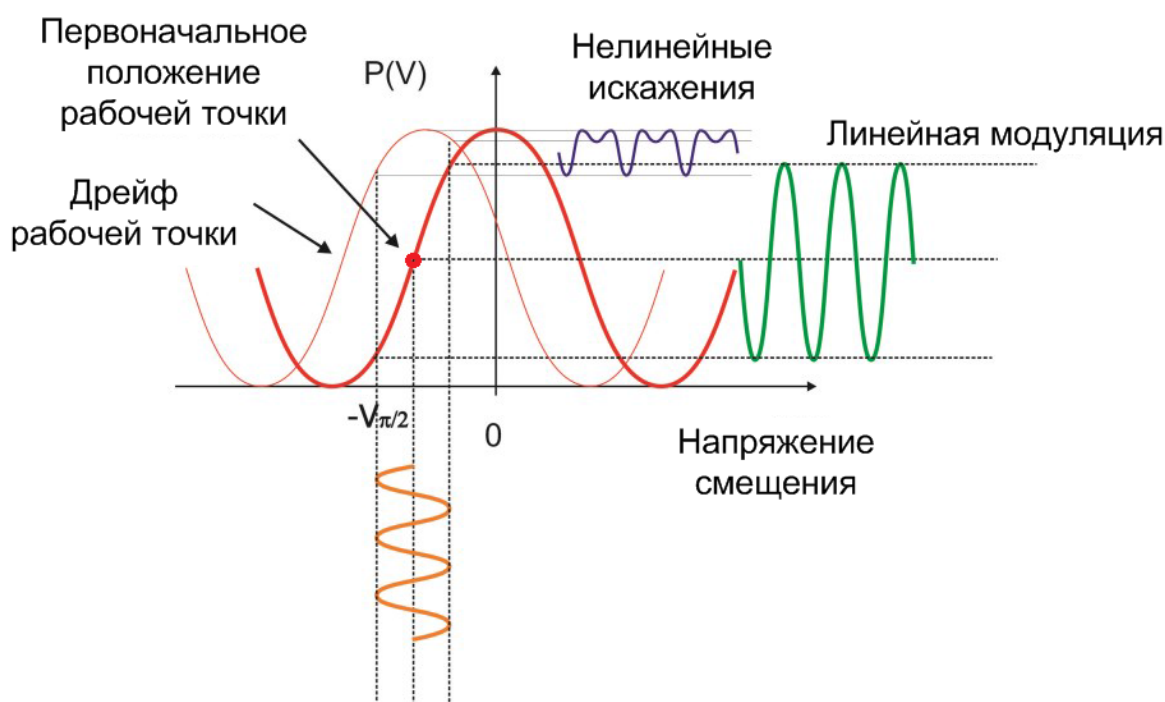


Рисунок 7. Дрейф передаточной функции модулятора

Напряжение смещения может подаваться от простого источника, отрегулированного вручную для достижения желаемой рабочей точки.

Однако в случае дрейфа модулятора источник требует перенастройки. Такое решение может быть приемлемым в условиях лаборатории для модуляторов с низким дрейфом и стабильными характеристиками окружающей среды. Для длительной работы, и особенно в системах, эксплуатирующихся в условиях изменяющихся температур, необходима схема автоматического управления смещением – контроллер рабочей точки (MBC, Modulator Bias Controller).

Напряжение сигнала модуляции подается на RF электроды. Для согласования электрических параметров модулирующего сигнала с входными характеристиками модулятора применяются RF драйверы (RF driver). Задача RF драйверов обеспечить для модулятора оптимизированный по времени и напряжению электрический сигнал. RF драйверы могут выполнять функции высокочастотных широкополосных усилителей и формирователей сигналов, управляемых линий задержек, ограничителей напряжения. Функциональные возможности драйверов позволяют получать импульсные и цифровые сигналы требуемого формата (RZ, NRZ, QPSK, DPSK и т.д.), с низкими фазовыми дрожаниями и малым временем нарастания/спада, без выбросов на фронтах. RF драйверы являются ключевыми устройствами при реализации многоуровневых форматов модуляции.

На рисунке 22 приведена схема включения модулятора.

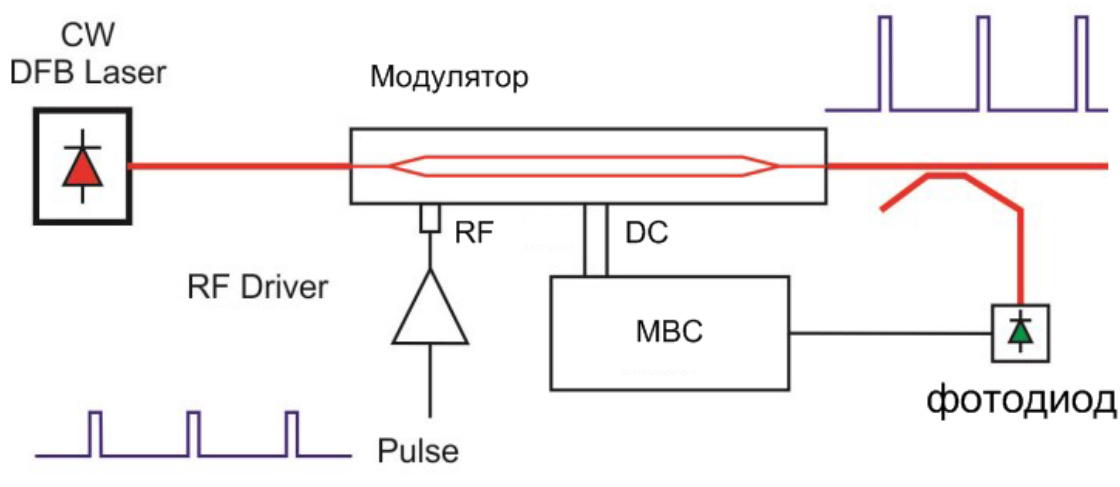


Рисунок 8. Схема включения модулятора

Постоянное по интенсивности излучение DFB лазера (CW DFB Laser) ступает на вход модулятора. Небольшая часть выходного излучения через разветвитель поступает на фотодетектор (фотодиод обратной связи). Электрический сигнал фотодетектора используется схемой контроллера рабочей точки (MBC) для коррекции напряжения смещения. Модулирующий сигнал (Pulse) через RF драйвер подается на электроды RF.

На рисунке 23 приведена схема двойного параллельного электрооптического модулятора Маха-Цендера (модулятор MXIQ-LN-40, компания iXBlue Photonics, Франция).

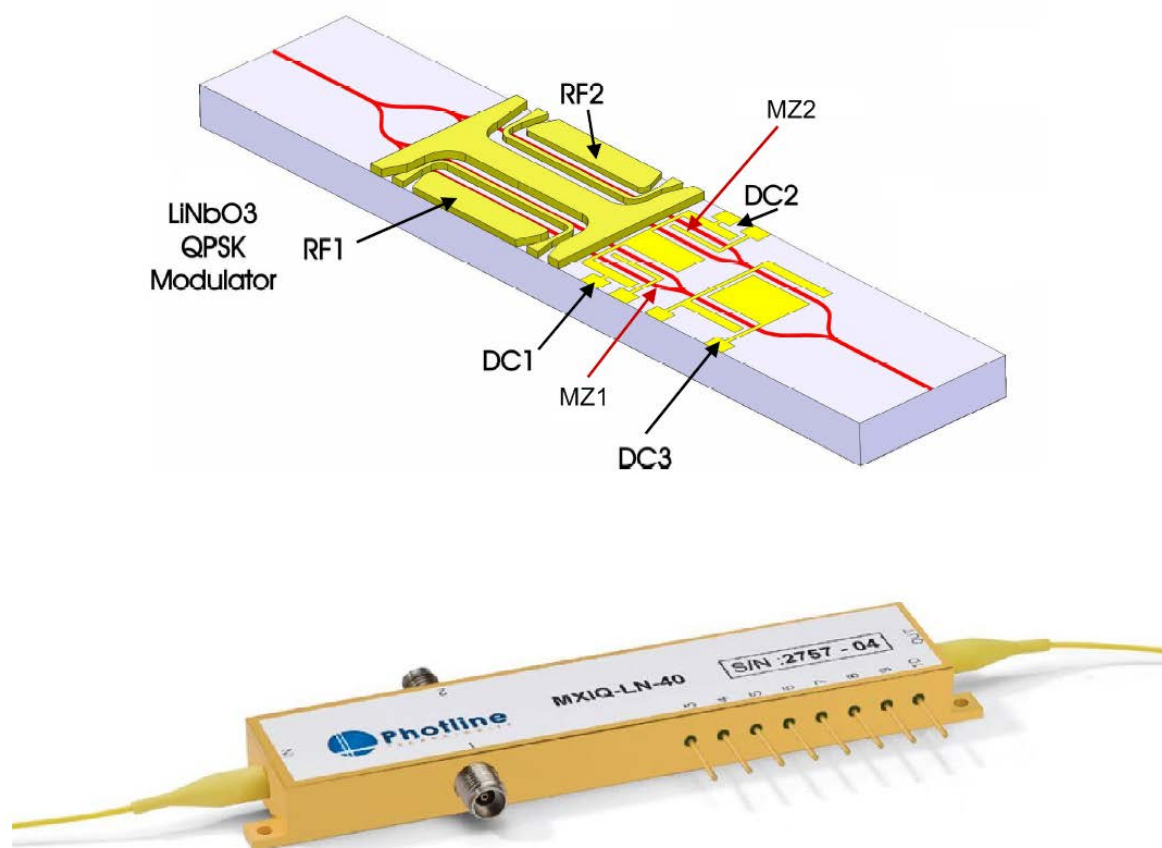


Рисунок 9. Схема и внешний вид двойного параллельного электрооптического модулятора Маха-Цендера

Приведенный модулятор состоит из двух субмодуляторов Маха-Цендера (на рисунке 23 обозначены MZ1 и MZ2) вложенных в большой модулятор Маха-Цендера. Каждому вложенному субмодулятору соответствуют два комплекта электродов: DC1 и DC2 для задания положения рабочей точки на передаточной характеристике и RF1, RF2 для высокочастотных сигналов модуляции. Электроды DC3 позволяют контролировать разность фаз между выходными сигналами субмодуляторов MZ1 и MZ2.

Модулятор позволяет формировать сигналы следующих форматов модуляции: квадратурная фазовая манипуляция (QPSK, quadrature phase shift keying), амплитудная модуляция с одной боковой полосой (SSB, single sideband modulation), мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов (OFDM, orthogonal frequency-division multiplexing), квадратурная амплитудная модуляция (QAM, quadrature amplitude modulation),

В таблицах 1-3 приведены технические характеристики рассмотренного модулятора MXIQ-LN-40.

Таблица 1

Электрические характеристики модулятора MXIQ-LN-40

| Параметр | Значение |
|-------------------------------|----------|
| Электрооптическая полоса | 20 ГГц |
| Пульсация S21 | 0,5 дБ |
| Электрические обратные потери | -12 дБ |
| Vp RF1, RF2 @50 кГц | 5,7 В |
| Vp RF1, RF2 @10 Гбит/с PRBS | 7 В |
| Vp DC1 и DC2 электроды | 7 В |
| Vp DC3 электроды | 17 В |
| Сопротивление RF входа | 35 Ом |
| Сопротивление DC входа | 1 МОм |

Таблица 2

Оптические характеристики модулятора MXIQ-LN-40

| Параметр | Значение |
|------------------------------------------------------------------------|----------------|
| Рабочий диапазон длин волн | 1530 - 1580 нм |
| Вносимые потери (без коннекторов) | 6 дБ |
| Коэффициент экстинкции @DC3 Для источника с шириной линии < 200 МГц | 22 дБ |
| Оптические обратные потери | -45 дБ |
| Чирп | 0 |

Таблица 3

Предельно допустимые параметры модулятора MXIQ-LN-40

| Параметр | Значение |
|-----------------------------|------------------|
| Входная RF мощность | 28 дБм |
| Напряжение смещения | от -20 до +20 В |
| Входная оптическая мощность | не более 20 дБм |
| Диапазон рабочих температур | от 0 до +70 °С |
| Температура хранения | от -40 до +85 °С |

Выполнение работы и содержание отчета

Экспериментально зарегистрировать характеристики интегрального электрооптического модулятора света. Сравнить теоретические и экспериментальные данные. Занести результаты измерения и выводы в отчет к лабораторной работе