



ITMO UNIVERSITY

Введение в оптоинформатику

Лекция 4. Элементы ВОЛС

Асеев Владимир Анатольевич, доцент Кафедры ОТиМ

aseev@oi.ifmo.ru

Начало

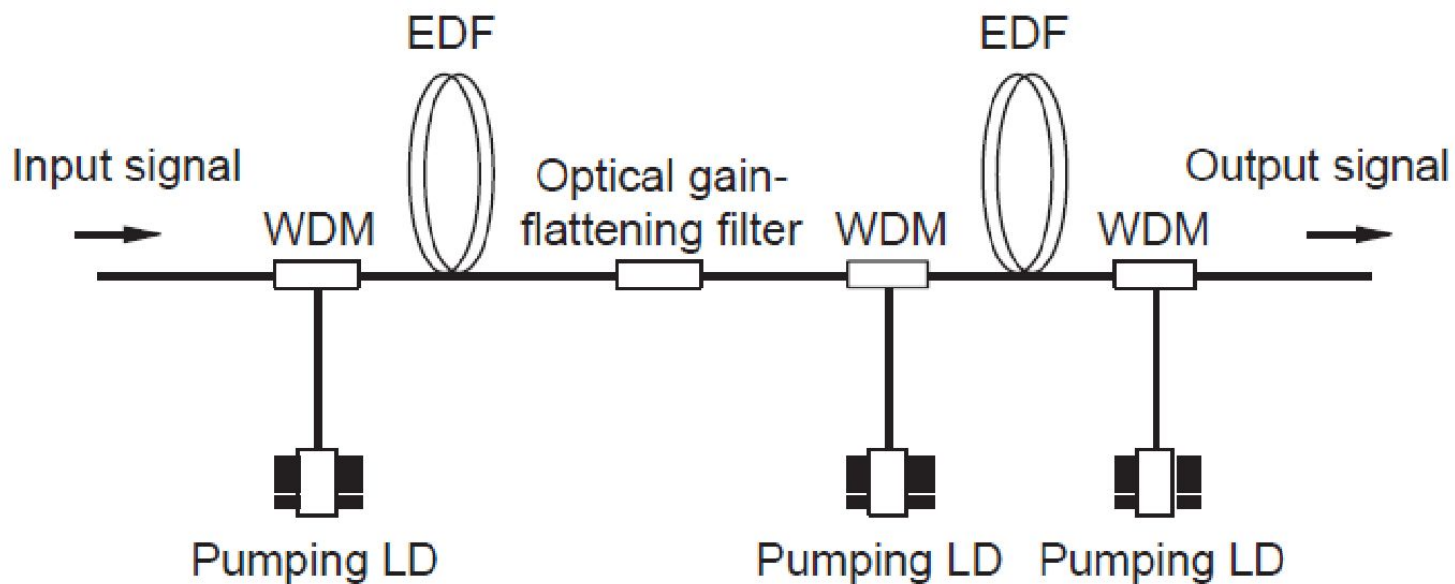
**Суббота, — говорит Он, — для
человека, а не человек для
суббот**

Мк, 10 зач., 2, 23—3, 5

Содержание

- Оптические разветвители
- Мультиплексоры и демультиплексоры
- Приемники излучения
- Оптические изоляторы
- Фильтры

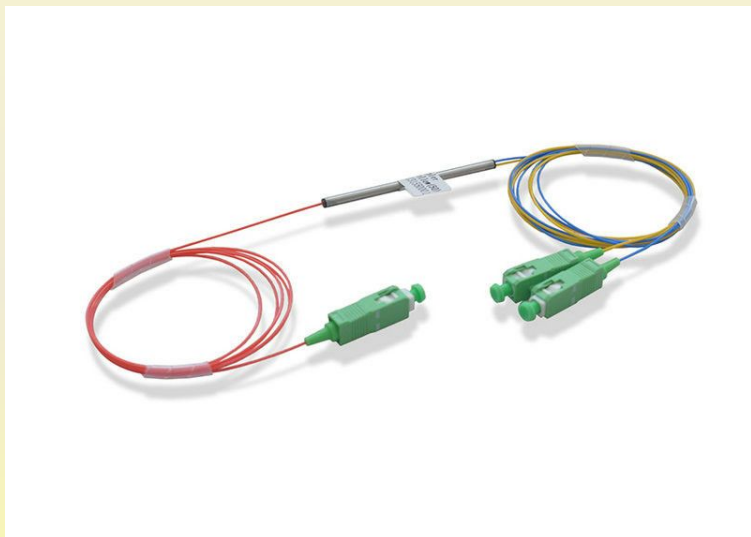
Усилитель света



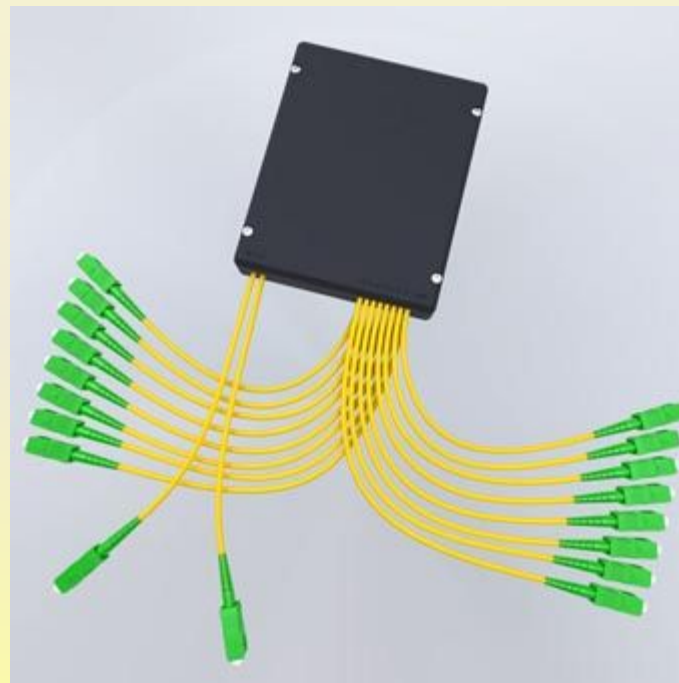
Типы разветвителей

По топологии

Т-образные

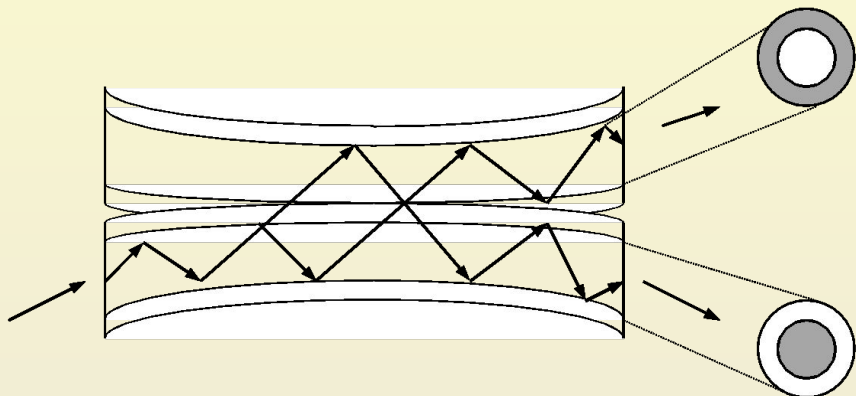


и звездообразные.



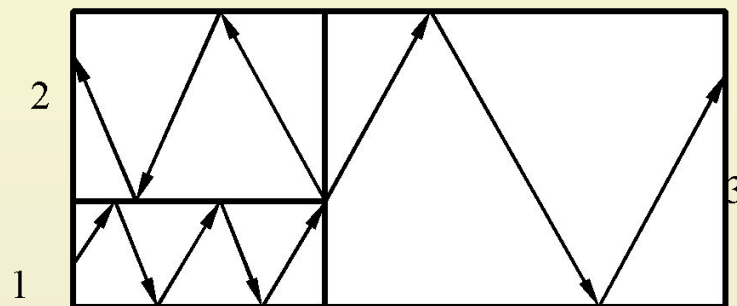
Типы разветвителей

биконические, в которых излучение передается через боковую поверхность



Преобразование распространяющейся волны в моды излучения получают при изгибе ВС, при снятии оболочки или коническом сужении сердцевины. Вносимые потери составляют 0,2 - 1,0 дБ.

торцевые, в которых излучение передается через торец



1 - входной ВС; 2, 3 - выходные ВС

Изменяя взаимное расположение торцов ВС и подбирая их поперечное сечение, можно варьировать в широких пределах отношение мощностей в разных выходных каналах. Вносимые потери составляют 0,3 - 1,2 дБ

Типы разветвителей

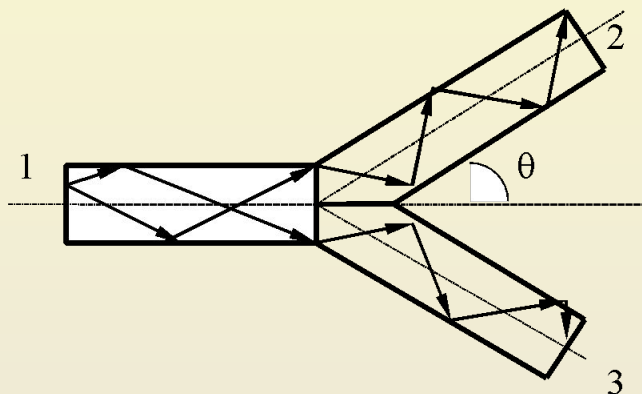
типу **распределения входной мощности** между выходными портами
оптические ответвители

равномерные (пропорциональные, симметричные). При этом на каждом выходном порту получают равные доли (как правило оцениваются в процентах) подводимой на вход мощности сигнала. (Делим 100% входной мощности на количество выходов и получаем: для 1x2 по 50% на каждом выходе, для 1x4 по 25% ...). Для равномерных ответвителей чаще используют термин splitter (разветвитель, делитель).

- неравномерные (непропорциональные, несимметричные, направленные). При этом на каждый выходной порт отводится заданная часть (%) входной мощности (например 1x4 с делением 10/20/25/45). Для таких изделий чаще применяют термины: ответвитель, куплер (coupler).

Разветвители Т образные

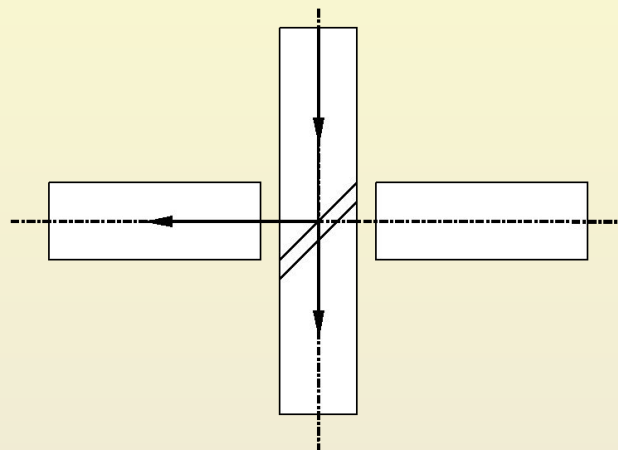
с ветвящейся структурой, сформированный путем склеивания или сплавления выходных ВС вдоль сошлифованных под малым углом сердечника и соединения с торцом входного ВС



1 - входной ВС; 2, 3 - выходные ВС

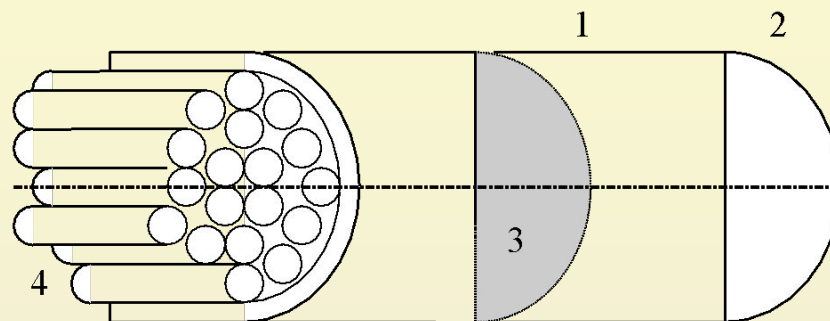
Разделение мод и потери растут с ростом угла θ , под которым соединены ВС

с расщеплением пучка



Световод разрезан под углом 45^0 к оси, торцы его отполированы и покрыты частично отражающими и диэлектрическими зеркалами. Величина потерь составляет 0,5 дБ

Разветвители звездообразные



1 - смешительный стержень; 2 - сферическое зеркало;
3 - просветляющее покрытие; 4 - пучок ВС

Он состоит из цилиндрического корпуса со стеклянным смешительным стержнем. Один из концов смешительного стержня представляет собой сферическое зеркало, на другой конец нанесено просветляющее покрытие. Излучение, выходящее из какого-либо световода, отражается от зеркала и равномерно распределяется всем ВС. Это дает возможность каждому терминалу в системе передавать и принимать данные от любого другого терминала

Разветвители звездообразные

Звездообразный разветвитель обычно имеет одинаковое число входных и выходных полюсов. Оптический сигнал в таком разветвителе приходит на один из n входных полюсов и в равной степени распределяется между n выходными полюсами. Наибольшее распространение получили звездообразные разветвители 2×2 и 4×4 . Звездообразные разветвители распределяют мощность в равной степени между всеми выходными полюсами



Мультиплексирование сигналов

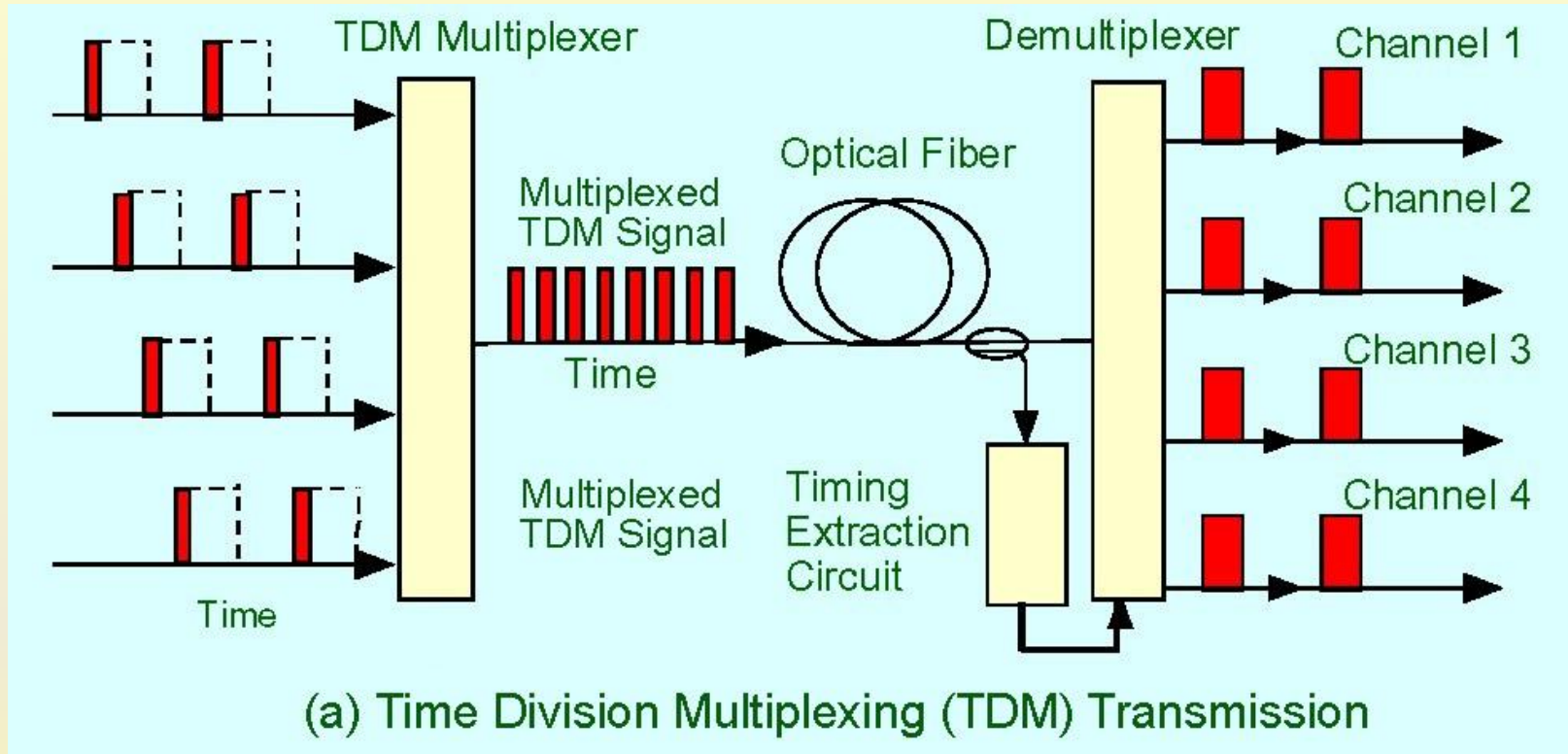
Мультиплексирование (англ. multiplexing, muxing) — уплотнение канала, т. е. передача нескольких потоков (каналов) данных с меньшей скоростью (пропускной способностью) по одному каналу.

В телекоммуникациях мультиплексирование подразумевает передачу данных по нескольким логическим каналам связи в одном физическом канале. Под физическим каналом подразумевается реальный канал со своей пропускной способностью — медный или оптический кабель, радиоканал. Мультиплексирование позволяет увеличить информационную емкость ВОЛС. Применяемые в линиях устройства для объединения сигналов с различными несущими длинами волн (мультиплексоры) и разъединения (демультиплексоры) должны иметь малые вносимые потери

Мультиплексирование сигналов

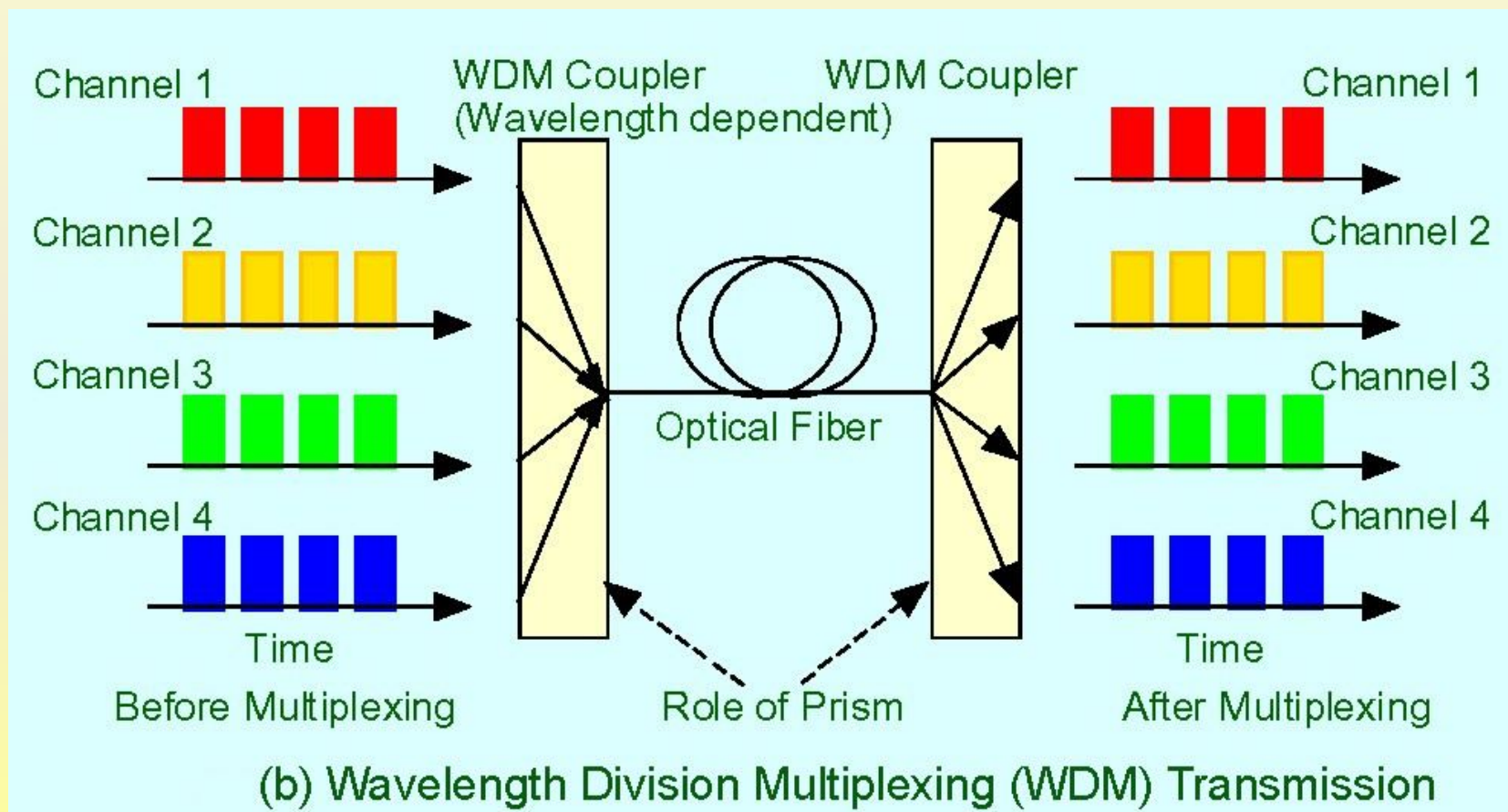
Временное мультиплексирование (англ. Time Division Multiplexing, TDM) — технология аналогового или цифрового мультиплексирования, в котором несколько сигналов или битовых потоков передаются одновременно как подканалы в одном коммуникационном канале. Принцип временного мультиплексирования заключается в выделении канала каждому соединению на определенный период времени. Применяются два типа временного мультиплексирования — асинхронный и синхронный. Асинхронный режим применяется в сетях с коммутацией пакетов. Каждый пакет занимает канал определенное время, необходимое для его передачи между конечными точками канала. Между различными информационными потоками нет синхронизации, каждый пользователь пытается занять канал тогда, когда у него возникает потребность в передаче информации. Рассмотрим теперь синхронный режим TDM1. В этом случае доступ всех информационных потоков к каналу синхронизируется таким образом, чтобы каждый информационный поток периодически получал канал в своё распоряжение на фиксированный промежуток времени. Аппаратура TDM-сетей — мультиплексоры, коммутаторы, демультимплексоры — работает в режиме разделения времени, поочередно обслуживая в течение цикла своей работы все абонентские каналы. Цикл равен 125 мкс, что соответствует периоду следования замеров голоса в цифровом абонентском канале. Это значит, что мультиплексор или коммутатор успевает вовремя обслужить любой абонентский канал и передать его очередной замер далее по сети. Каждому соединению выделяется один квант времени цикла работы аппаратуры, называемый также тайм-слотом. Длительность тайм-слота зависит от числа абонентских каналов, обслуживаемых мультиплексором или коммутатором

Мультиплексирование сигнала



Мультиплексирование сигнала

Спектральное уплотнение каналов (англ. wavelength-division multiplexing, сокр. WDM — мультиплексирование с разделением по длине волны) — технология, позволяющая одновременно передавать несколько информационных каналов по одному оптическому волокну на разных несущих частотах.



Мультиплексор

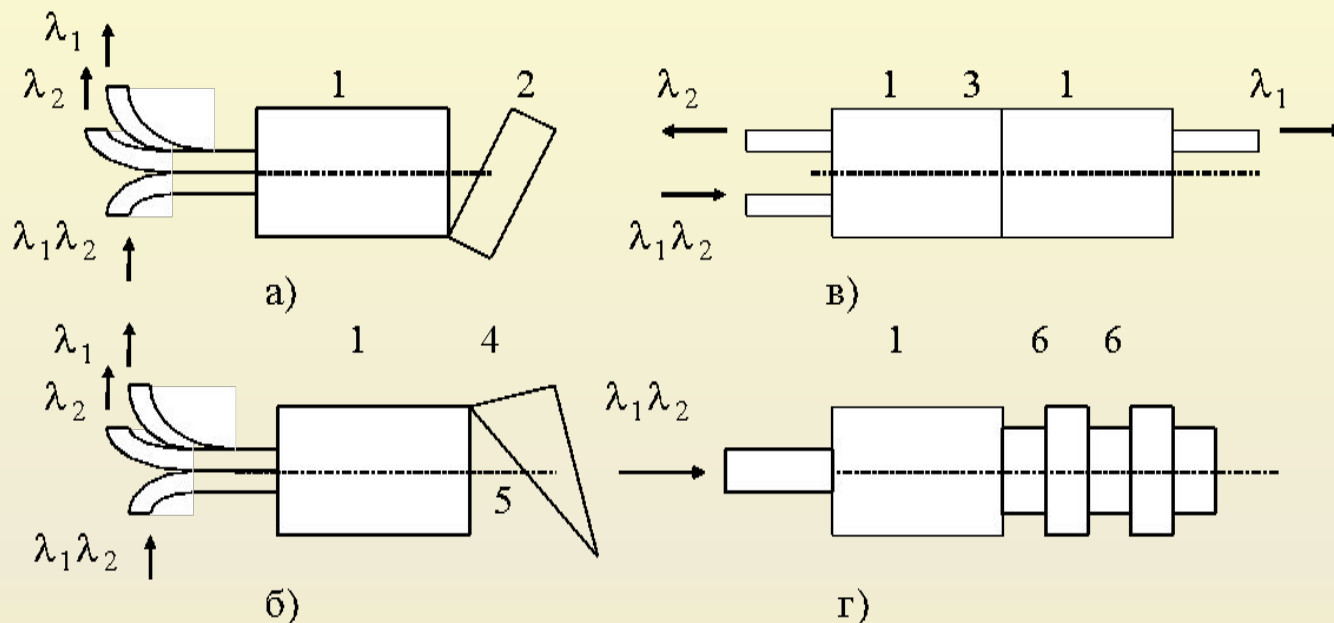


Рис. 1.

а) - с решеткой; б) - с призмой; в) - с интерференционным фильтром;

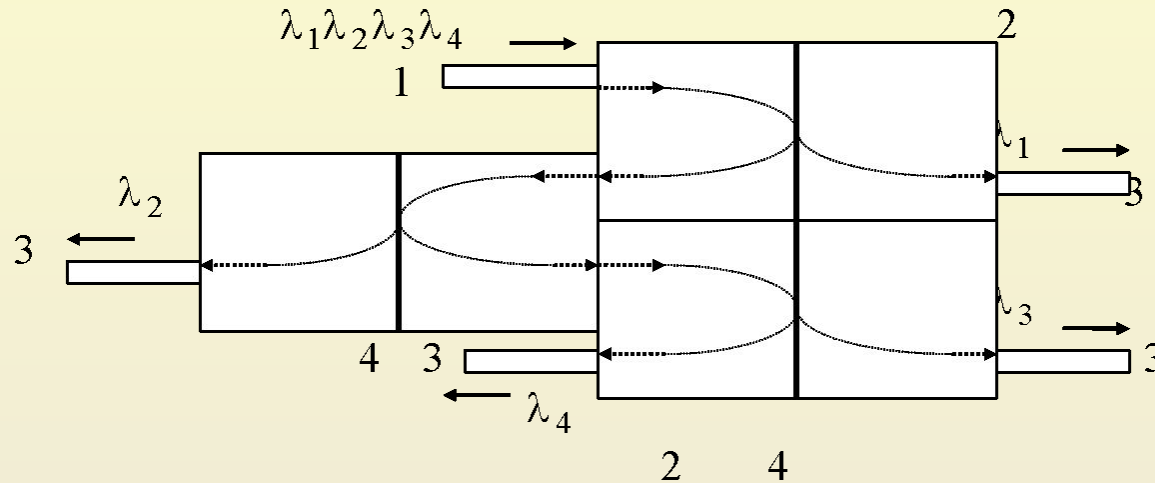
г) - с поглощающим фильтром;

1 - градиентная цилиндрическая линза; 2 - дифракционная решетка;

3 - хроматический фильтр; 4 - призма; 5 - отражающее покрытие;

6 - селективный фотодетектор.

Последовательное разделение каналов



1 - входной ВС; 2 - фокусирующий элемент; 3 - выходные ВС;
4 - интерференционные фильтры

Интерференционные фильтры пропускают узкую область спектра, а остальное излучение эффективно отражают. В приведенной схеме шесть фокусирующих элементов состыкованы торцами, между которыми размещены интерференционные фильтры, причем каждый из них пропускает лишь одну оптическую несущую. Потери при выделении одной несущей от лазерного источника излучения составляют $\sim 2,5$ дБ, интервал между несущими 30 нм

Демультимплексор

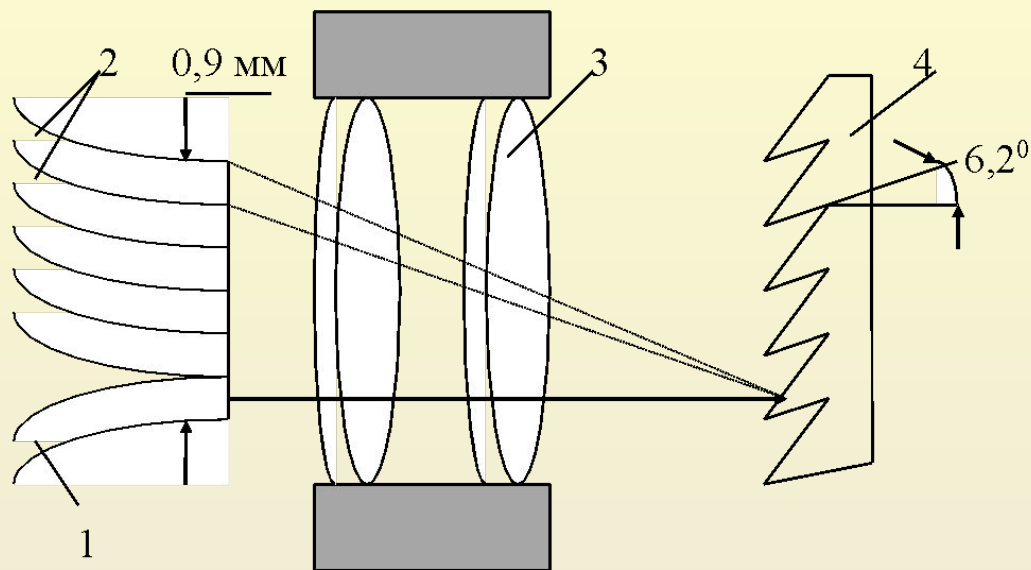


Рис. 3

1 - входной ВС; 2 - выходные ВС; 3 - объектив; 4 - дифракционная решетка

Угловая дисперсия первого порядка для решетки определяется ее пространственным периодом - постоянной решетки A и описывается выражением

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \lambda} = \frac{1}{\sqrt{A^2 - \left(\frac{\lambda}{2}\right)^2}}$$



Демультимплексор

Если оптическая мощность в каждом канале практически монохроматична, то разделение каналов определяется соотношением:

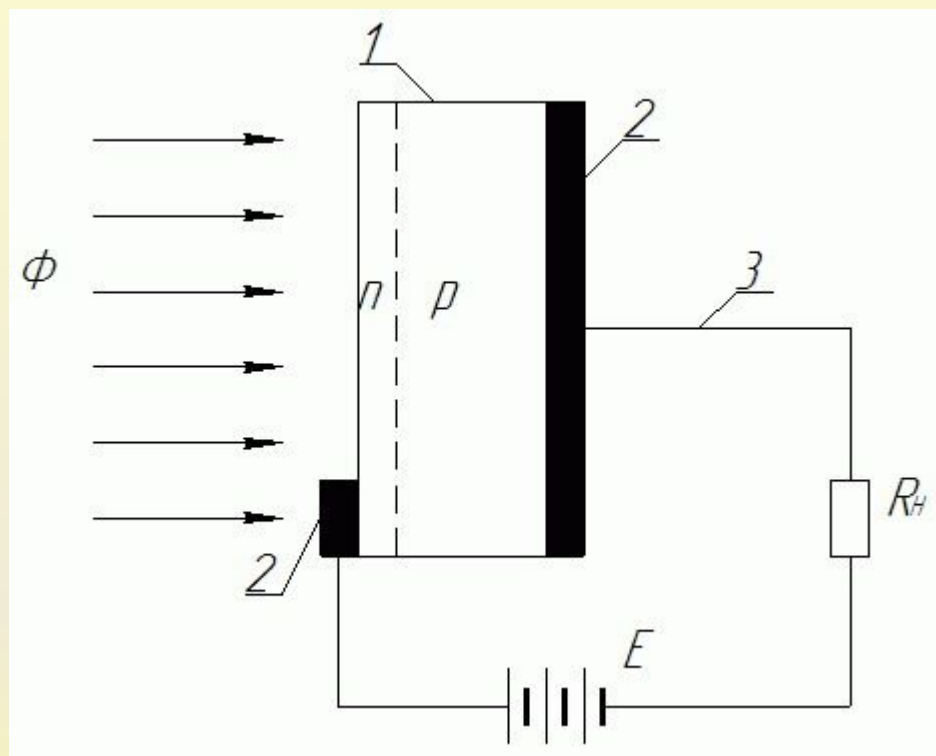
$$\Delta\lambda = \frac{D}{f} \sqrt{A^2 - \left(\frac{\lambda}{2}\right)^2}$$

где f - фокусная длина линзы;
волоконного световода.

D - пространственное разделение выходов

Принцип работы фотодиода

При воздействии квантов излучения в базе происходит генерация свободных носителей, которые устремляются к границе р-п-перехода. Ширина базы (п-область) делается такой, чтобы дырки не успевали рекомбинировать до перехода в р-область. Ток фотодиода определяется током неосновных носителей - дрейфовым током. Быстродействие фотодиода определяется скоростью разделения носителей полем р-п-перехода и емкостью р-п-перехода C_{p-n}



Принцип работы pin фотодиода



ITMO UNIVERSITY

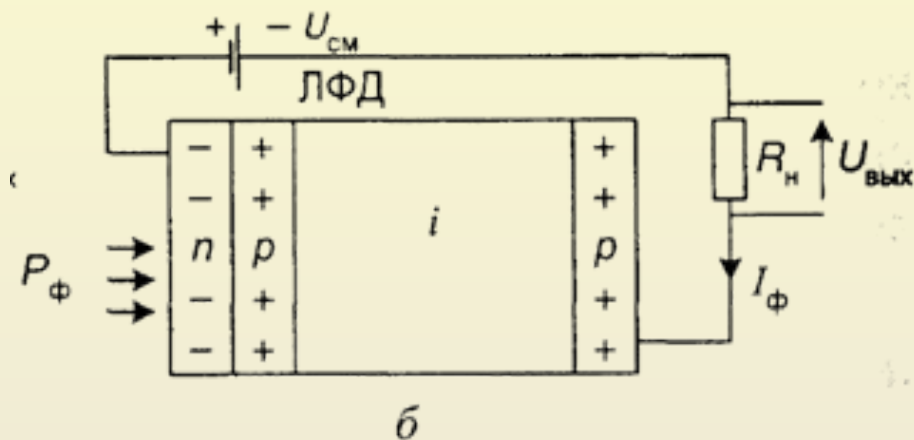
В р-і-п-фотодиоде есть широкий внутренний (і-) полупроводниковый слой, разделяющий зоны р- и п-типа. На диод подается обратное смещение (5-20 вольт), это помогает удерживать носители заряда от внутренней области



Падающие кванты энергии фотонов (энергия фотона $E_{\text{ф}} = hf = hc/\lambda$) через тонкий *p*-слой проникают в *i*-область, где создают пары свободных носителей зарядов (электронов и дырок). Под действием постоянного электрического поля, создаваемого специальным источником напряжения обратного смещения $U_{\text{см}}$, носители зарядов двигаются во встречных направлениях. В результате через сопротивление нагрузки $R_{\text{н}}$ протекает возникающий на выходе *PIN*-ФД фототок $I_{\text{ф}}$, который и является результатом преобразования принятого потока фотонов в электрический сигнал. Ток $I_{\text{ф}}$ пропорционален интенсивности принимаемого оптического излучения, но для *PIN*-ФД фототок очень мал – это основной недостаток таких ФД.

Принцип работы лавинного фотодиода

Суть лавинного усиления состоит в следующем. В устройство *PIN*-ФД вводится еще один *p*-слой. В результате появляется дополнительный *p-n*-переход



Этот переход находится под воздействием сильного электрического поля за счет высоковольтного источника напряжения обратного смещения. Основная часть фотонов при этом, как и в *PIN*-ФД, поглощается в *i*-слое, порождая первичные носители зарядов. Эти заряды, проходя через дополнительный *p-n*-переход, где внешнее электрическое поле велико, сильно ускоряются. За счет механизма ударной ионизации ускоренные носители создают новые носители, которые в свою очередь создают дополнительные носители зарядов и т. д. В результате в ЛФД получается усиление фототока (образуется лавина носителей зарядов)

Требования к ФД

- Иметь максимальные чувствительность и быстродействие на заданной длине принимаемого оптического излучения;
- вносить минимальные шумы в полученный электрический сигнал;
- обладать высокой временной и температурной стабильностью параметров;
- иметь линейную характеристику преобразования в широком динамическом диапазоне поступающего оптического сигнала;
- отличаться высокой надежностью, иметь большой срок службы, малые размеры, стоимость и энергопотребление.

Основные характеристики фотодиода

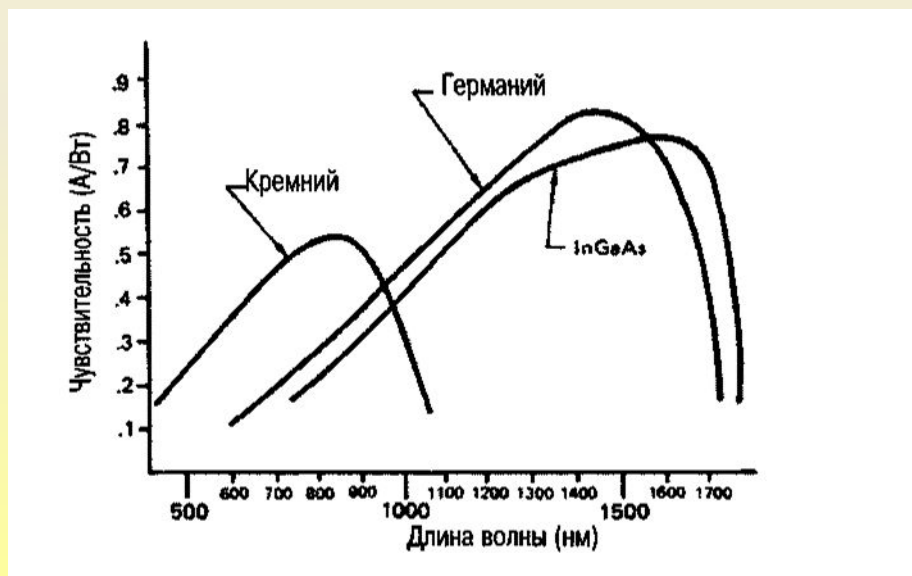
Квантовая эффективность. В идеальном фотодиоде все падающие на чувствительную площадку ФД фотоны поглощаются в обедненном слое и все рождающиеся носители зарядов собираются на контактах полупроводника. Квантовый выход ФД в таком случае равен единице. На практике, конечно, часть падающих фотонов отражается от чувствительной площадки ФД, а оставшиеся фотоны не полностью поглощаются в обедненном слое, т. е. не все падающие на ФД фотоны принимаемого оптического сигнала вызывают появление основных носителей заряда и протекание фототока в цепи нагрузки. Отношение числа носителей заряда, возникающих в ФД, к полному числу падающих на него фотонов, называется *эффективностью оптоэлектронного преобразования* (η), или *квантовой эффективностью ФД*. Для повышения квантовой эффективности необходимо:

- а) уменьшить число отраженных от чувствительной площадки ФД фотонов;
- б) увеличить число поглощаемых фотонов внутри обедненного слоя;
- в) предотвратить преждевременную рекомбинацию носителей.

Основные характеристики фотодиода

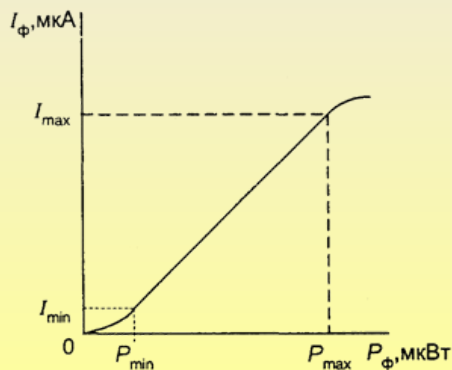
Чувствительность ФД – это отношение фототока, протекающего через нагрузку, к полной принимаемой оптической мощности потока фотонов: $S = I_{\text{ф}}/P_{\text{ф}}$. Чувствительность является основным параметром ФД. С учетом приведенного выше выражения для фототока, получим: $S = \eta q \lambda / h c$.

Отсюда следует, что чувствительность ФД тем выше, чем больше квантовая эффективность, т. е. чем большая доля принимаемого потока фотонов поглощается в активной зоне ФД. Чувствительность зависит также от материала ФД, длины волны принимаемого оптического сигнала, приложенного напряжения смещения и температуры ФД.



Основные характеристики фотодиода

Энергетическая характеристика $I_{\phi} = SP_{\phi}$ указывает на непосредственную связь между фототоком в нагрузке ФД и мощностью принимаемого потока фотонов, падающих на чувствительную площадку ФД. Анализ выражения для чувствительности $S_{\phi} = \eta q \lambda / hc$ позволяет заключить, что энергетическая характеристика является линейной, т. е. ток I_{ϕ} в нагрузке – линейная функция мощности падающего на чувствительную площадку ФД потока фотонов. В современных ФД ее линейность обеспечивается при изменении мощности оптического потока в пределах шести порядков, т. е. $10 \lg(P_{\phi \max} / P_{\phi \min}) \leq 60$ дБ. Когда мощность принимаемого оптического излучения P_{ϕ} падает на ФД, он генерирует определенный средний ток I_{ϕ} . Этот ток пропорционален мощности P_{ϕ} , где коэффициентом пропорциональности является чувствительность S .



Основные характеристики фотодиода

Шумы фотодетекторов. Предельная чувствительность ФД определяется наличием хаотических флуктуации тока I_{ϕ} на его выходе, которые вызваны шумами. Задача обработки сигналов в ОПМ является классической: обнаружить ток I_{ϕ} , вызванный на выходе ФД приемом оптических сигналов, в условиях хаотических шумов, которые имеются как в присутствии оптического сигнала, так и без него.

Шумы бывают:

- Квантовый шум
- Тепловой шум
- Темновой шум
- Шум тока утечки
- Фоновый шум



Оптический изолятор

В основе работы оптического изолятора лежит эффект Фарадея — вращение плоскости поляризации света оптически неактивными веществами под действием продольного магнитного поля.

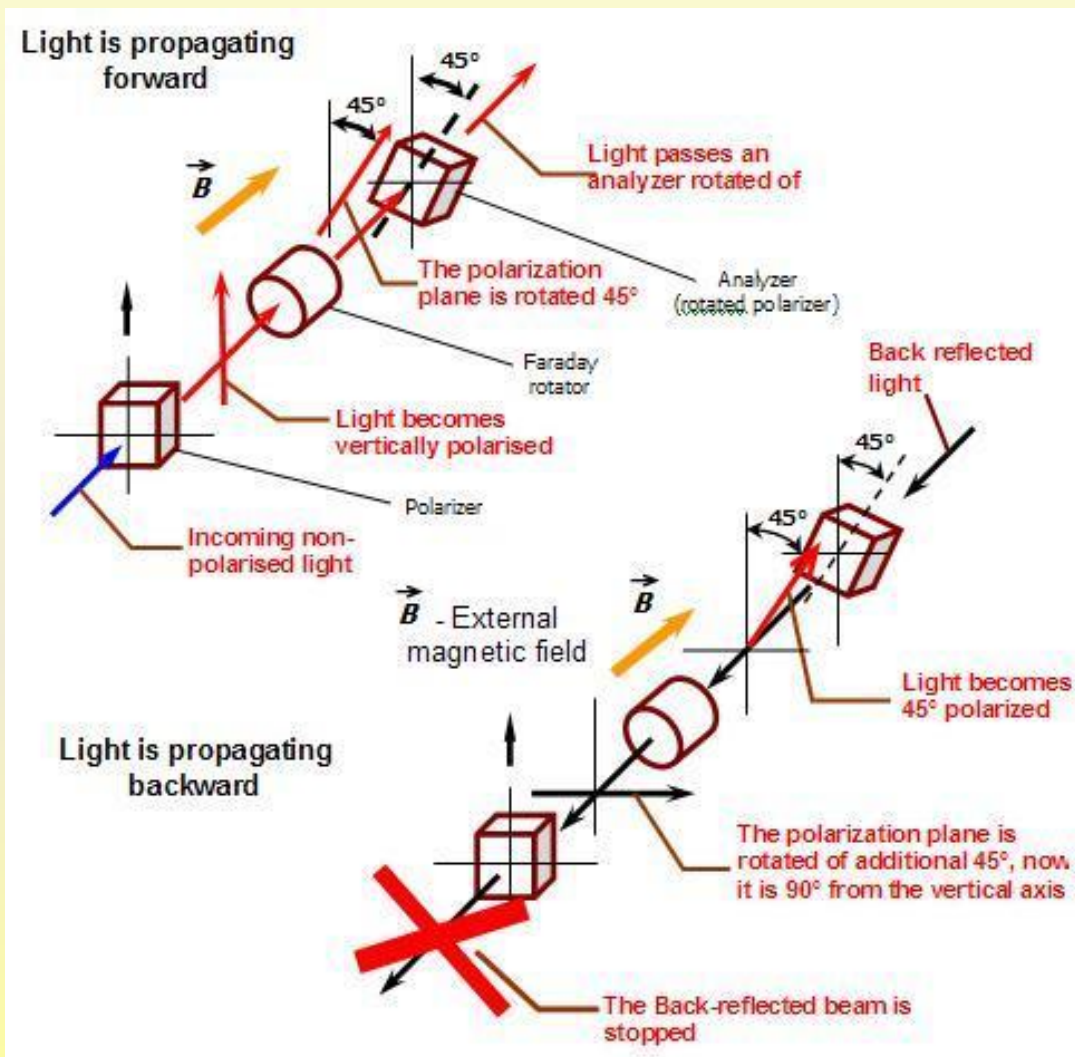
Угол поворота плоскости поляризации равен

$\theta = VB_z d$, где V — постоянная Верде (Verdet) — удельное магнитное вращение, зависящая от природы вещества, температуры и длины волны света, B_z — продольная составляющая индукции магнитного поля, d — длина пути света в веществе — размер ячейки Фарадея. Направление вращения зависит только от природы вещества и направления магнитного поля. Знак вращения отсчитывается для наблюдателя, смотрящего вдоль магнитного поля. Магнитное вращение плоскости поляризации обусловлено возникновением асимметрии оптических свойств вещества под действием магнитного поля.

Зависимость вращения плоскости поляризации от длины волны света называется вращательной дисперсией



Оптический изолятор



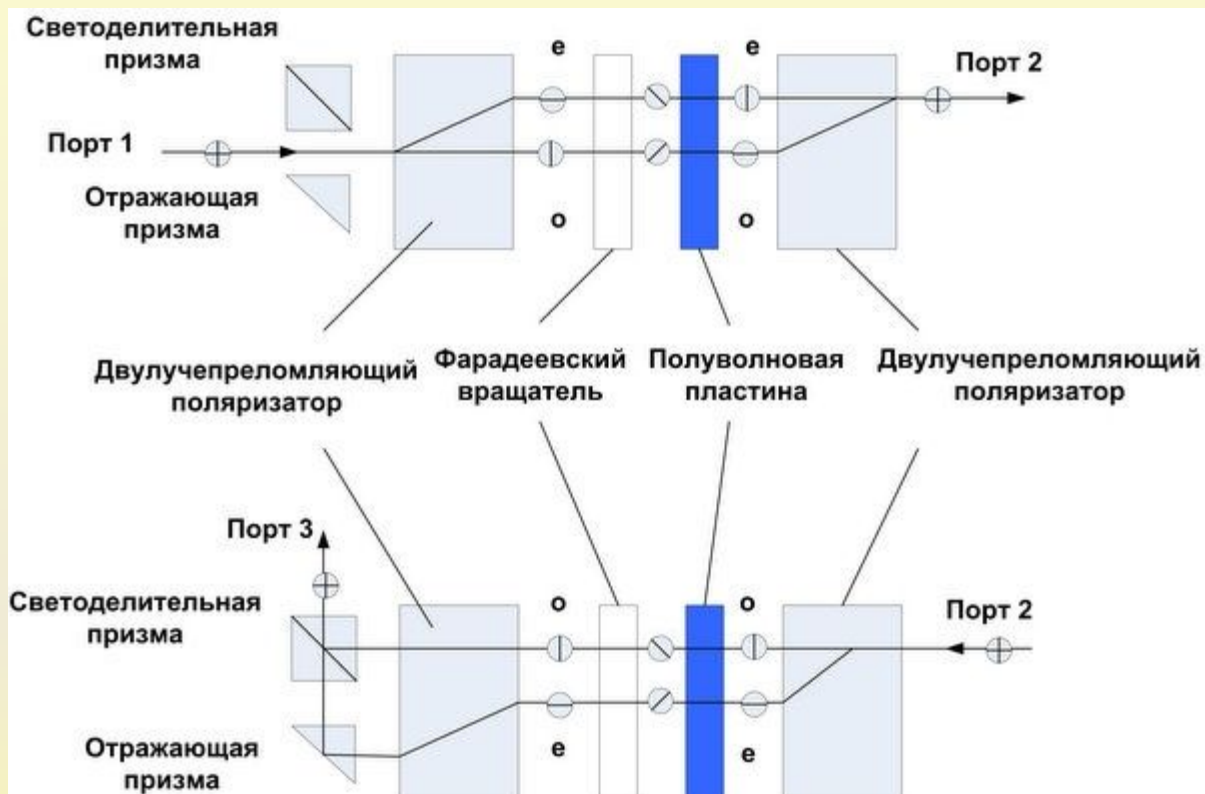
Оптический изолятор состоит из трех элементов: поляризатора 1 (входного поляризатора), ячейки Фарадея 2 и анализатора 3 (выходного поляризатора). Параметры ячейки Фарадея выбираются так, чтобы ось поляризации света, проходящего через нее, разворачивалась на 45° . Под таким же углом устанавливаются оси поляризаторов.

Входной полезный сигнал, проходя через поляризатор 1, оставляет свою вертикальную составляющую без изменения, устраняя горизонтальную составляющую, рис. 3.17 а. Далее вертикально поляризованный свет проходит через ячейку Фарадея 2, разворачивает плоскость поляризации на 45° и беспрепятственно проходит через анализатор 3.

При распространении света в обратном направлении (рис. 3.17 б) он также поляризуется в плоскости анализатора 3, затем, проходя через ячейку Фарадея 2, становится горизонтально поляризованным. Таким образом, оси поляризации света и поляризатора 1 составляют угол 90° , поэтому поляризатор 1 не пропускает обратное излучение.



Оптический изолятор



В качестве поляризаторов используются [двулучепреломляющие элементы](#) из кристалла рутила. При прохождении через этот элемент входной пучок разделяется на два луча с ортогональной поляризацией - обыкновенный (о-луч) и необыкновенный (е-луч), при этом е-луч отклоняется от первоначального направления и на выходе элемента оказывается смещенным относительно о-луча.

На рисунке видно, что поляризатор делит пучок света на два луча - с горизонтальной и вертикальной поляризациями (SOP - state of polarization, состояние поляризации). Далее легко проследить на иллюстрации за "судьбой" излучение на каждом этапе пути "туда и обратно". Основой момент - Фарадеевский вращатель поворачивает плоскость поляризации на угол +45 градусов **вне зависимости** от направления распространения света, полуволновая пластина поворачивает плоскость поляризации на угол +45 или -45 градусов **в зависимости** от направления распространения света



Спектральный фильтр

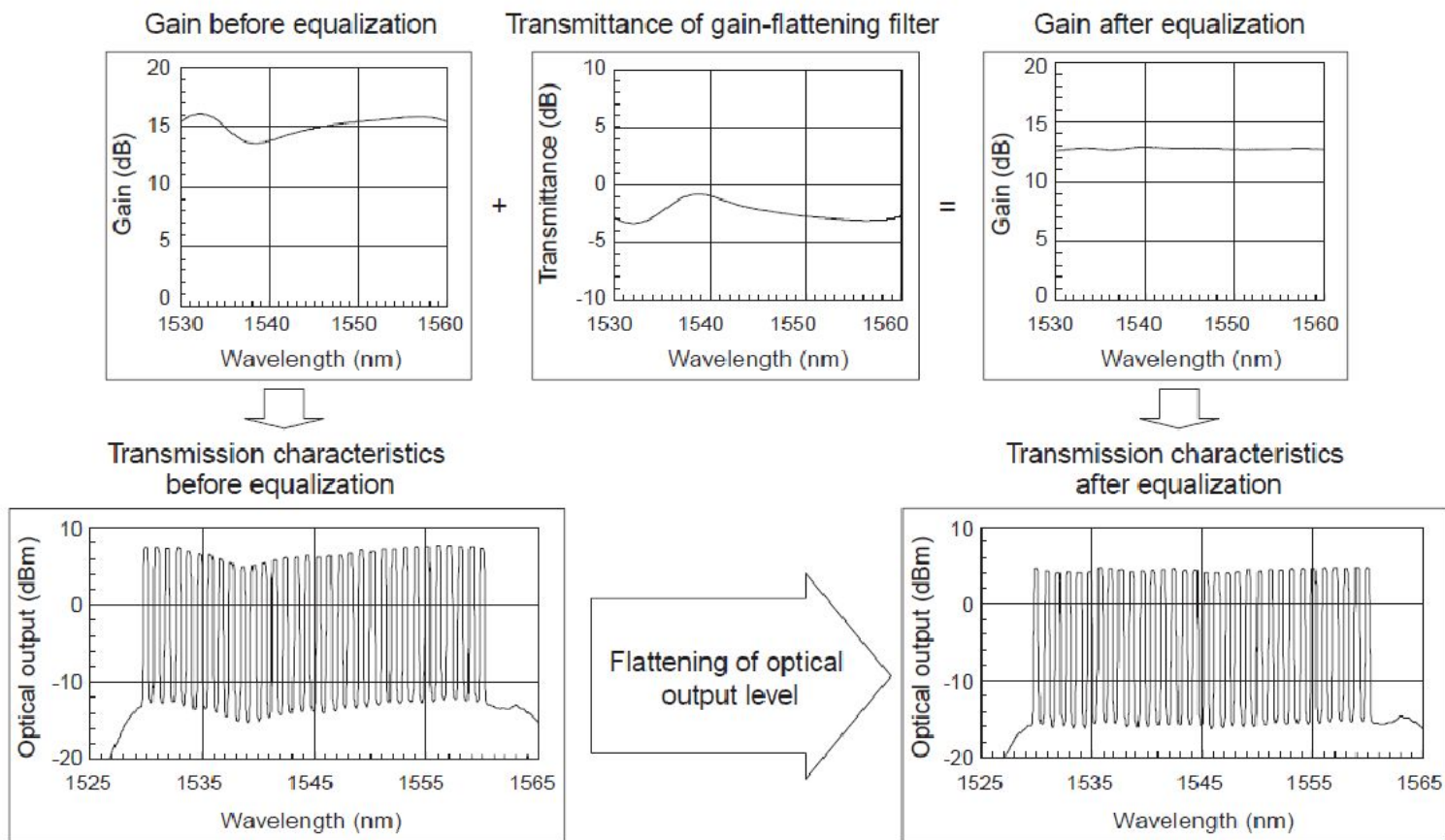
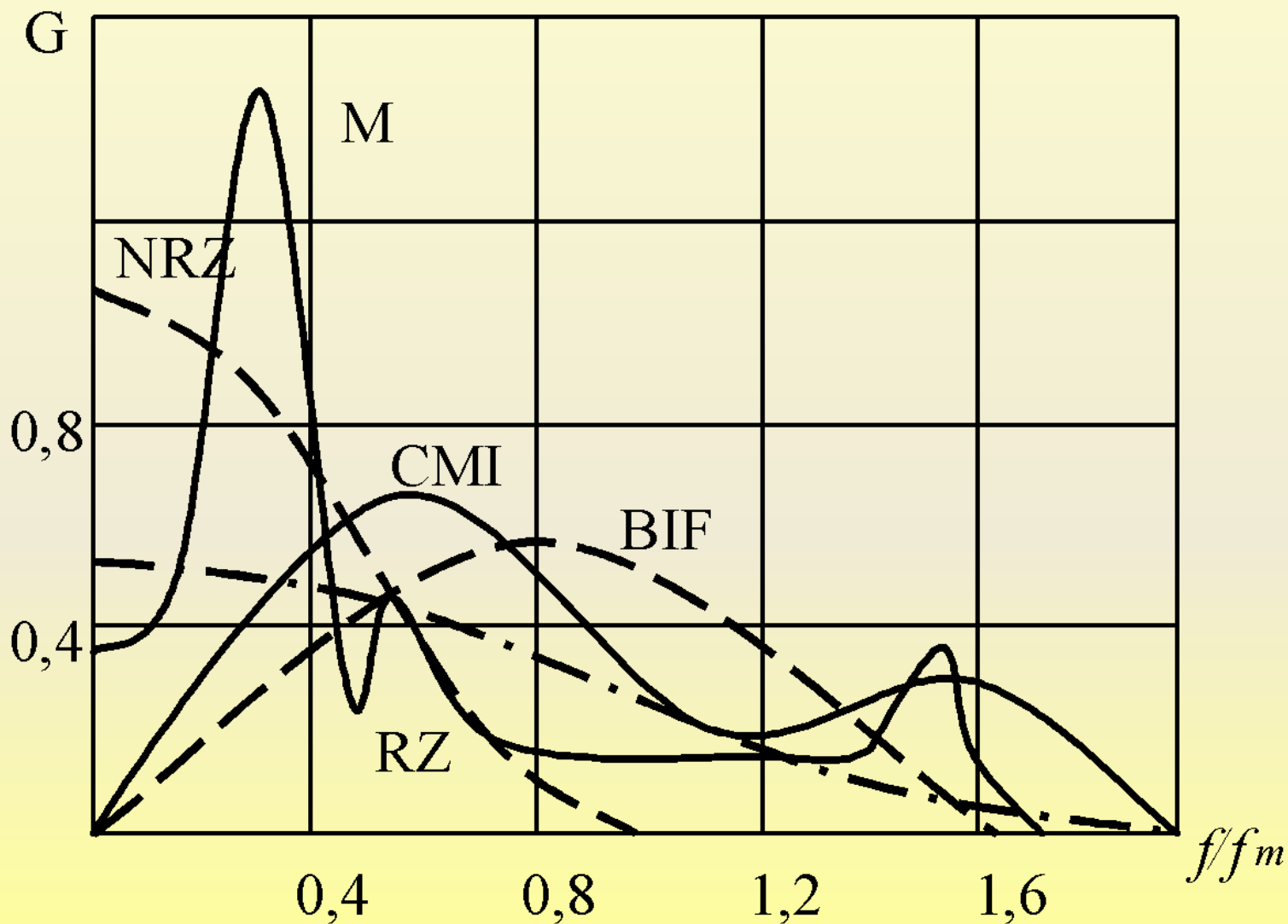


Figure 1 Function of optical gain-flattening filter

Требования к линейным кодам ОЦТКС

- - спектр сигнала должен быть узким и иметь ограничение как сверху, так и снизу. Чем уже спектр сигнала, тем меньше требуется полоса пропускания фотоприемника, а соответственно уменьшаются мощность шума и его влияние. Ограничение спектра сверху снижает уровень межсимвольной помехи, а ограничение снизу — флуктуации уровня принимаемого сигнала в электрической части фотоприемника, имеющей цепи развязки по постоянному току. Минимальное содержание низкочастотных составляющих позволяет также обеспечивать устойчивую работу цепи стабилизации выходной мощности оптического передатчика;
- - код линейного сигнала должен обеспечивать возможность выделения колебания тактовой частоты, необходимой для нормальной работы тактовой синхронизации;
- - код линейного сигнала должен обладать максимальной помехоустойчивостью, которая позволяет получать при прочих равных условиях максимальную длину участка регенерации;
- - код линейного сигнала должен обладать избыточностью, которая позволяет по нарушениям правила образования кода судить о возникновении ошибок;
- - код линейного сигнала должен быть простым для практической реализации преобразователей кода.

Нормированные спектры линейных кодов ВОСП



Источники оптического излучения

Требования к источникам оптического излучения:

- - длина волны оптического излучения должна совпадать с одним из окон прозрачности оптического волокна;
- - достаточно большая мощность выходного излучения и эффективность его ввода в оптическое волокно;
- - возможность модуляции оптического излучения различными способами; достаточно большой срок службы; минимальное потребление электрической энергии или высокая эффективность;
- - минимальные габариты и вес; простота технологии производства, обеспечивающая невысокую стоимость и высокую воспроизводимость параметров и характеристик.
- **Известны три класса** источников оптического излучения для ВОСП: планарные полупроводниковые; волоконные; объемные микрооптические источники (микролазеры).

Все они в той или иной мере удовлетворяют изложенным выше требованиям, однако только **планарные полупроводниковые источники** – светоизлучающие диоды и лазеры – широко используются в реальных системах. *(непосредственное преобразование энергии электрического тока в оптическое излучение с высокой эффективностью, возможность прямой модуляции параметров излучения током накачки с высокой скоростью, малые масса и габаритные размеры.)*

Механизмы оптического излучения

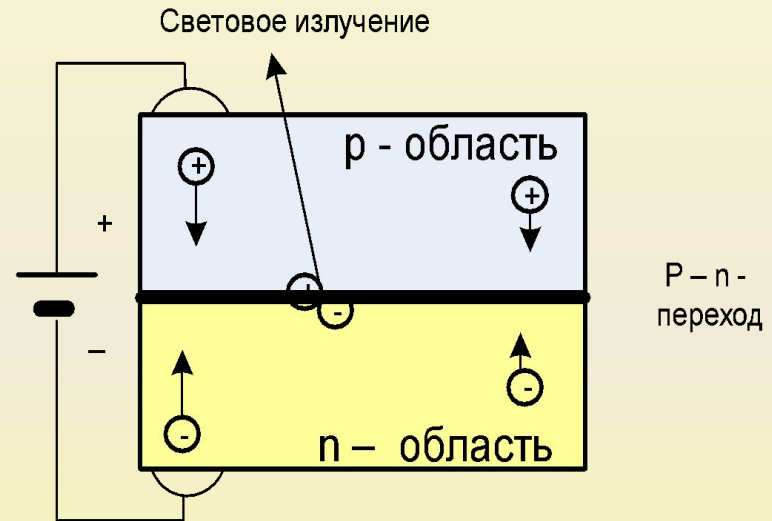
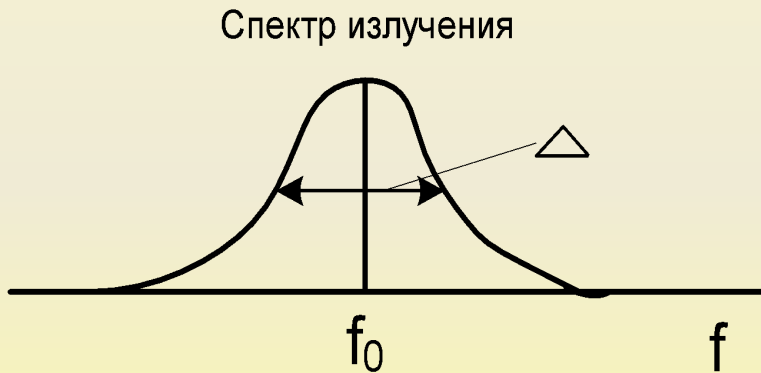
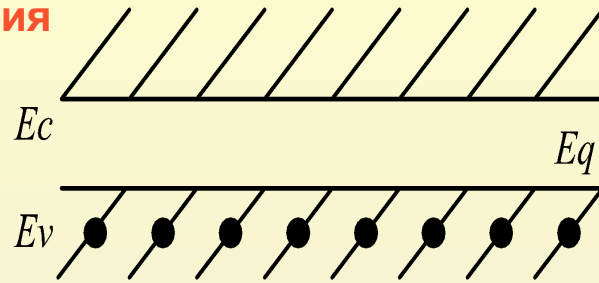
- **Спонтанное оптическое излучение** возникает при переходе любого электрона с одного энергетического уровня на другой. Так как время перехода всех электронов не совпадает, то происходит наложение излучения и возникают оптические волны одинаковой амплитудой и фазой, а вследствие этого наблюдается неоднородность и по частоте. Кроме того, мельчайшие колебание энергии E_q тоже, пусть и не в такой мере, влияют на частотный разброс излучения.
(**некогерентный источник оптического излучения**)
- **Индукцированное (вынужденное) излучение** Суть вынужденного излучения состоит в том, что если на электрон, находящийся в зоне проводимости падает свет с частотой f_0 , примерно равной частоте f , определяемой то возникает излучение с частотой f_0 и направлением падающего света.
(**когерентный источник оптического излучения**)

Когерентные и некогерентные источники оптического излучения

Некогерентные источники оптического излучения

В полупроводниках плотность электронов значительна и поэтому многочисленные энергетические уровни расположены плотно, образуя зоны. Имеется два типа таких зон – верхняя зона – проводимости с энергией E_c и нижняя зона – валентных электронов с энергией E_v . Между этими зонами находится запрещенная зона с энергией E_g . При тепловом равновесии почти все электроны находятся в валентной зоне.

Что происходит, если подвести энергию из вне?

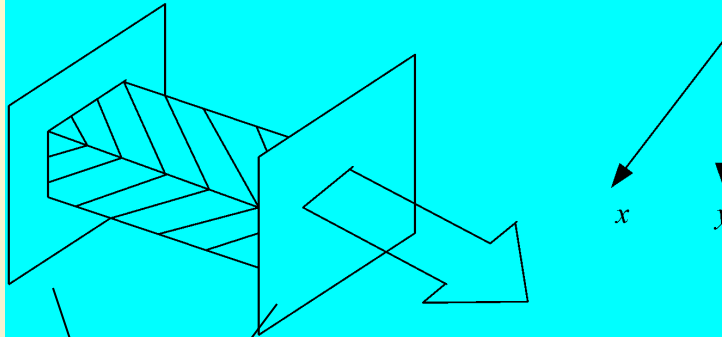


$$E(t) = [A + a(t)] \sin[2\pi f t + \phi(t)],$$

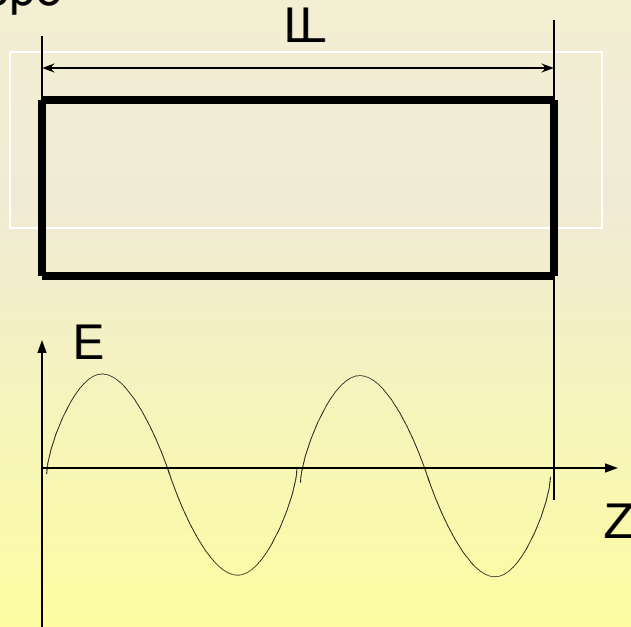
$a(t)$ – колебания амплитуды (шумы амплитудной модуляции); $\phi(t)$ – колебания частоты (шумы частотной модуляции).

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{E_g}{h}$$

Когерентные источники оптического излучения



Резонатора Фабри –
Перо



$$\frac{\lambda N}{2n} Nz = L \quad f_N = c / \lambda N$$

из условия существования стоячих волн

n – коэффициент прелом. среды

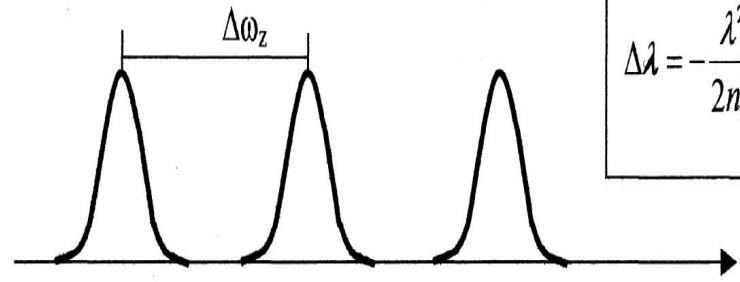
L – длина резонатора

λ_N, f_N – длина и частота стоячей волны в резонаторе

Стабильные условия существуют только для света с длиной волны λ и частотой f_N

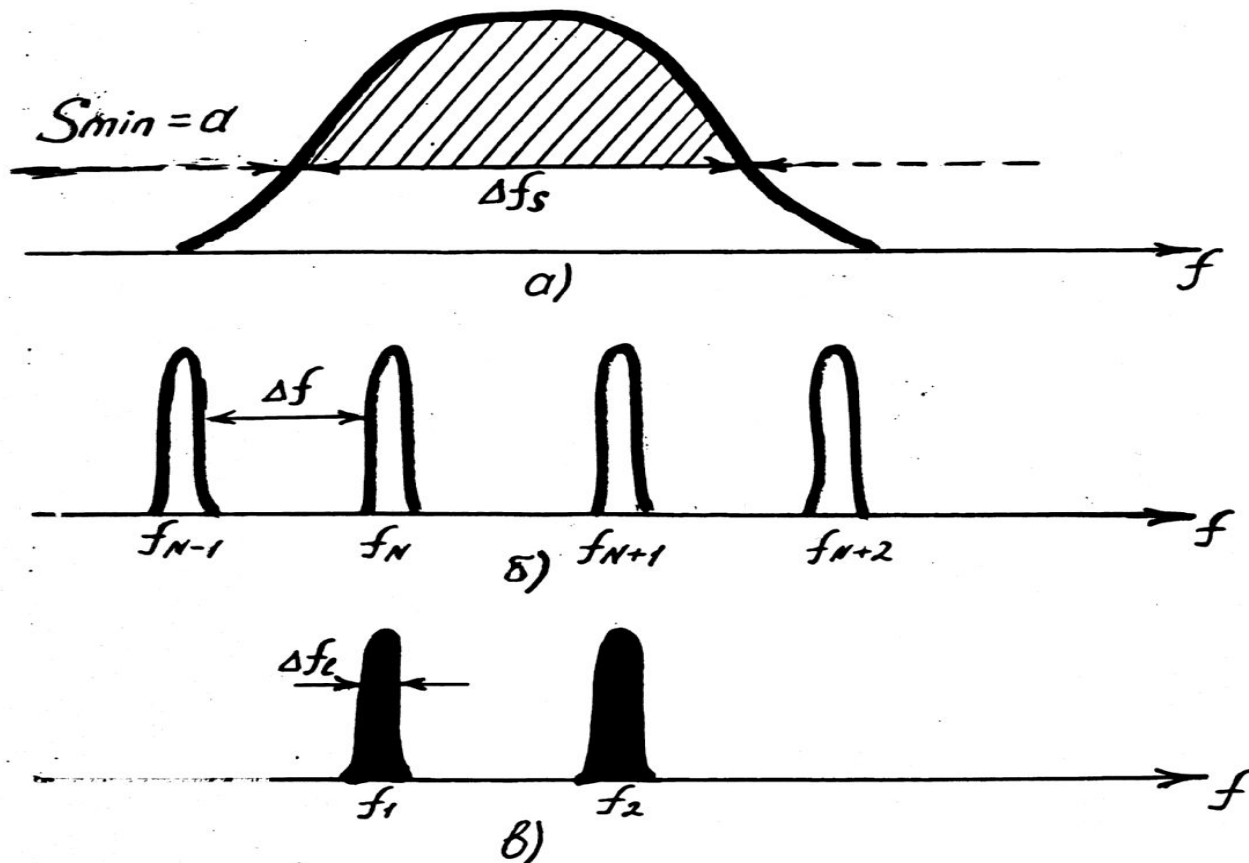
Аналогично существуют поперечные моды N_x и N_y

Спектр продольной моды



$$\Delta\lambda = -\frac{\lambda^2}{2nL} \quad \Delta\omega = \frac{c}{2\pi L}$$

Спектр колебаний лазерного диода



- a** - спектр спонтанного излучения;
- б** - спектр когерентного излучения;
- в** - спектр генерации лазера.

Светоизлучающие диоды

Активный слой	Слой оболочки	Подложка
$AlGaAs$	$AlGaAs$	$GaAs$
$GaInAsP$	$GaInP$	$GaAs$
$GaInAsP$	$GaInP$	$GaAs$
$GaInAsP$	$AlGaInP$	$GaAs$
$AlGaInP$	$AlGaInP$	$GaAs$
$GaInAsP$	$AlGaAs$	$GaAs$
$GaInAsP$	InP	InP
$AlGaAsSb$	$AlGaAsSb$	$GaSb$
$InAsSbP$	$InAsSbP$	$InAs$
$PbSnSeTe$	$PbSnSeTe$	$PbTe$

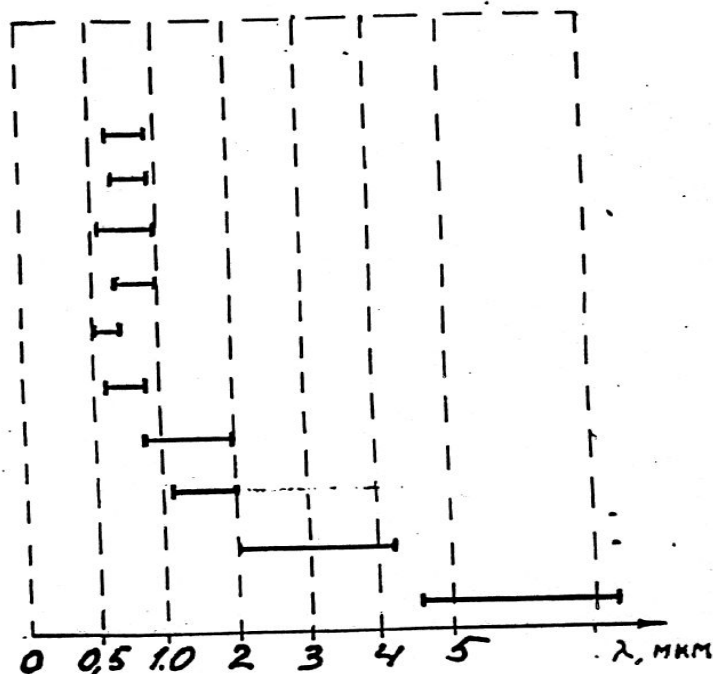


Рис. 3.6

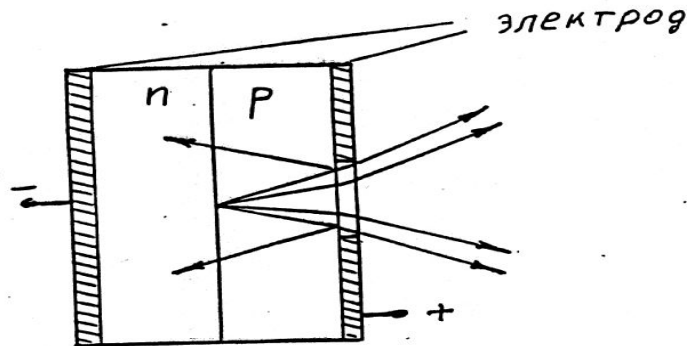
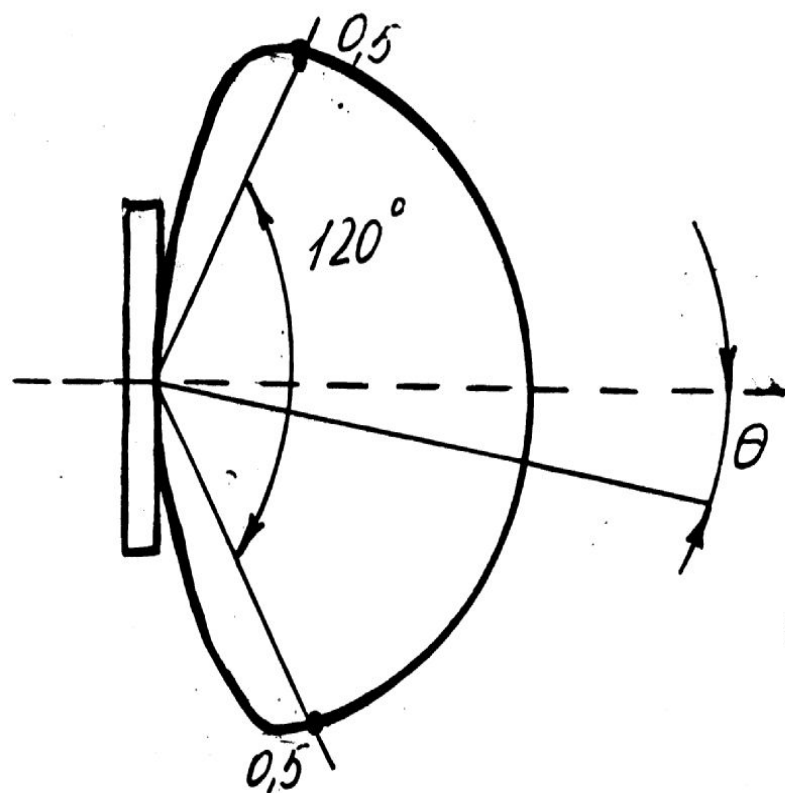


Рис. 3.7

ДИАГРАММА НАПРАВЛЕННОСТИ СВЕТОДИОДА



$$J(\theta) = J_0 \cos \theta$$

$$\Delta F(O) = \frac{J(\theta)}{J_0} = 120^\circ$$

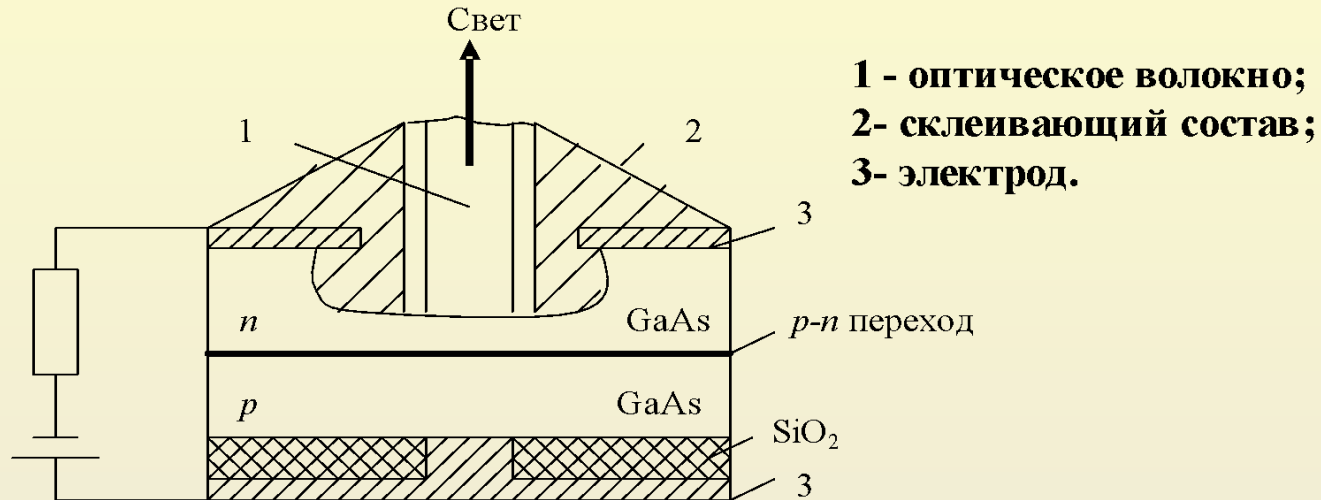
$$P_0 = \pi J_0$$

$$P_c = \pi J_0 (NA)^2 = P_0 (NA)^2$$

: $NA = 0,15 \div 0,24$ 4% потери 14 дБ

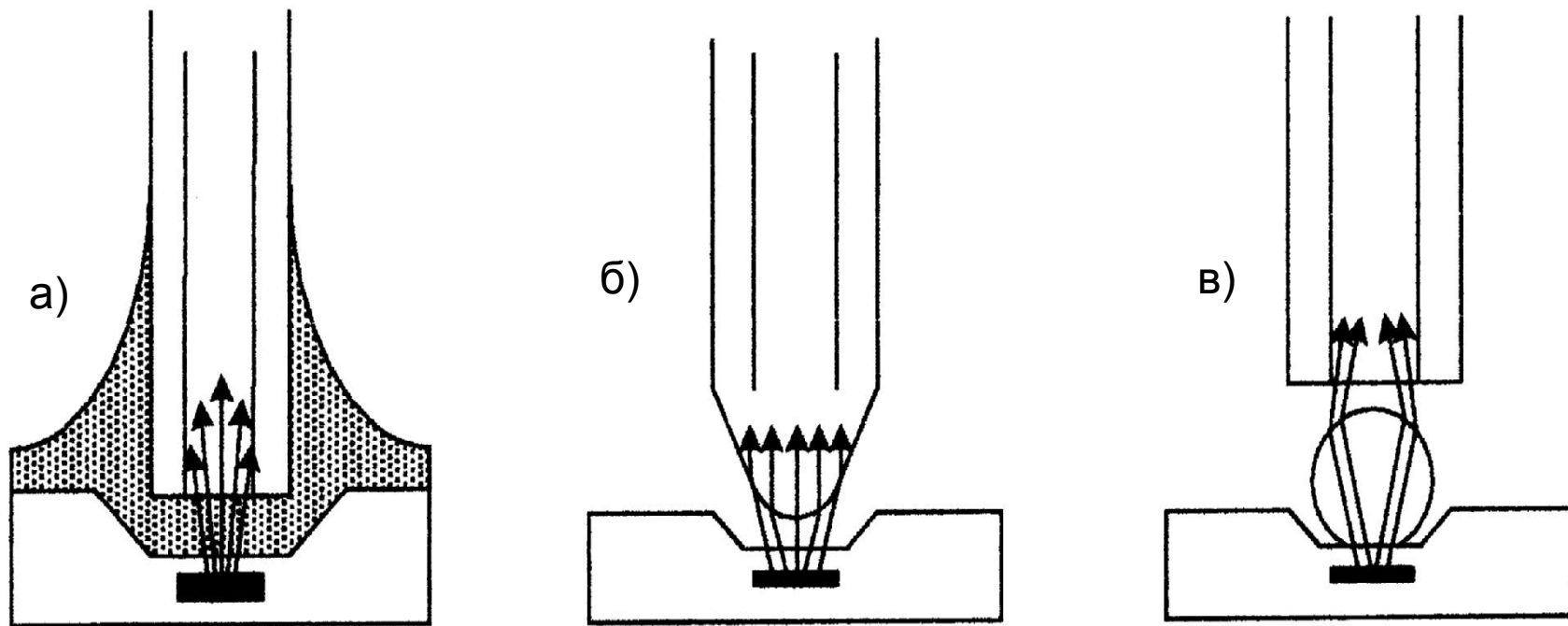
Светоизлучающие диоды.

Структура светоизлучающего диода с поверхностным излучением



Выше обсуждались *p-n* - переходы, образованные введением небольшого количества примесей в полупроводниковый материал. Они называются **гомопереходами**.

Согласующие устройства светодиод - волокно

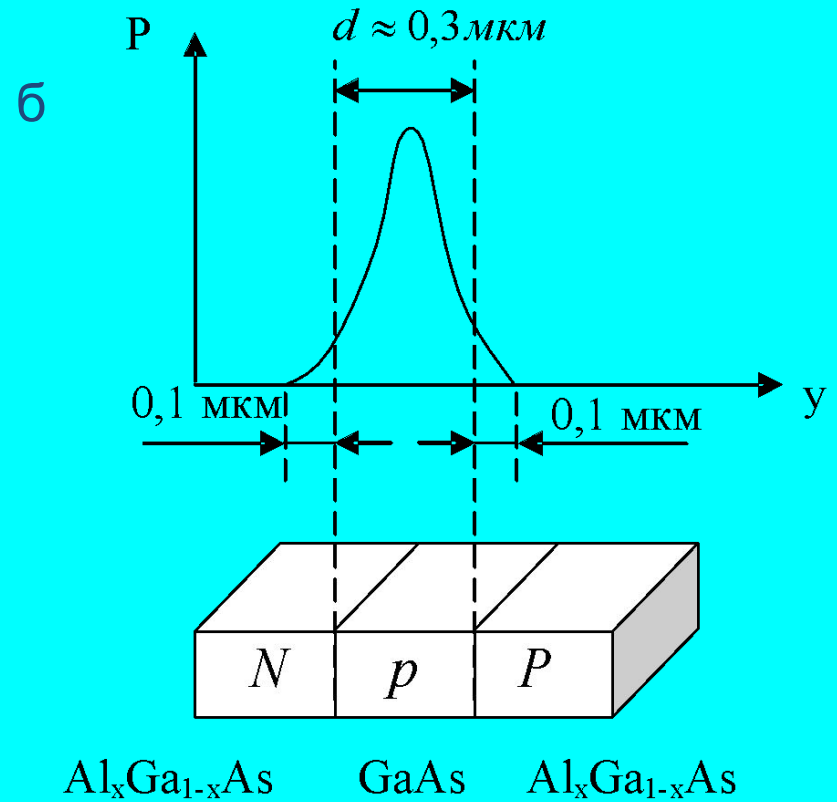
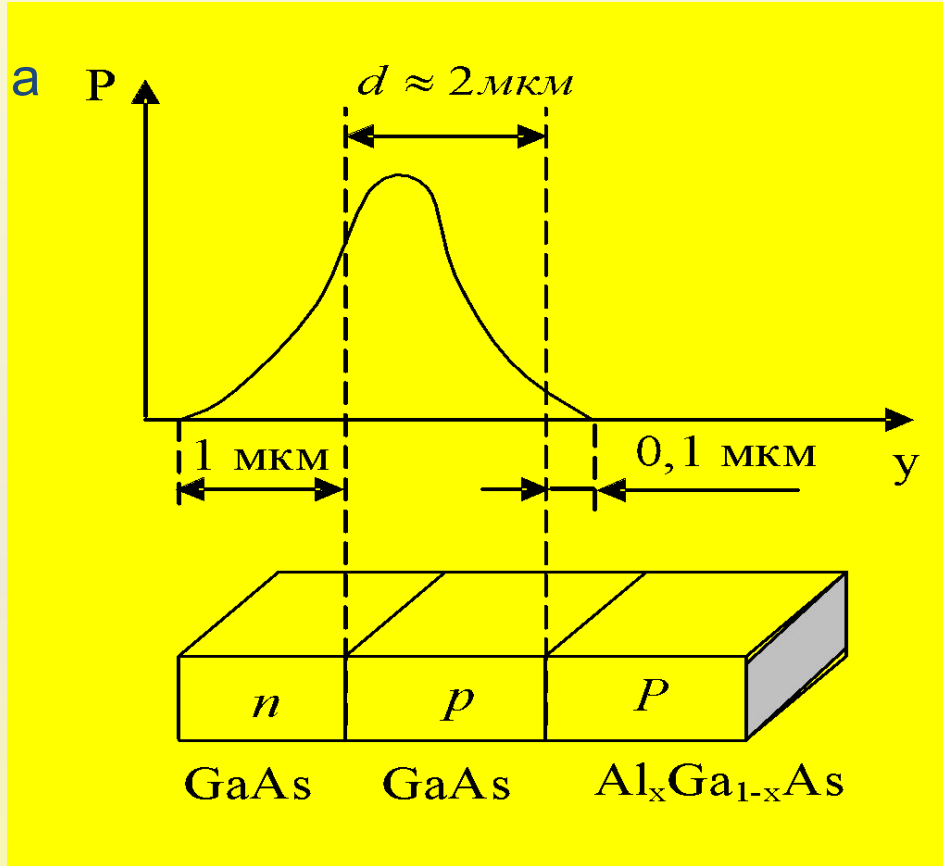


а) - использование специального иммерсионного наполнителя с коэффициентом преломления, близкий к коэффициенту преломления волокна;

б) - конец волокна заострен и закруглен в форме линзы, собирающей расходящееся излучение;

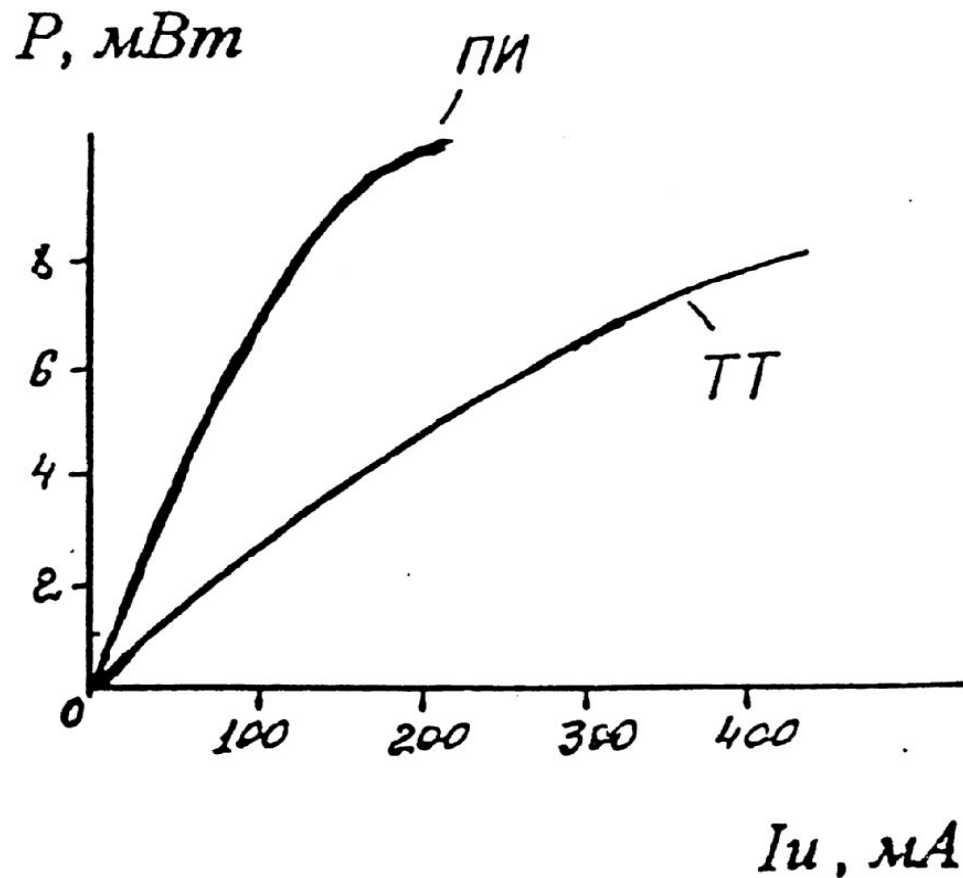
в) - сферическая линза, расположенная на поверхности светодиода

Гетероструктуры с ОГС (а) и ДГС (б)



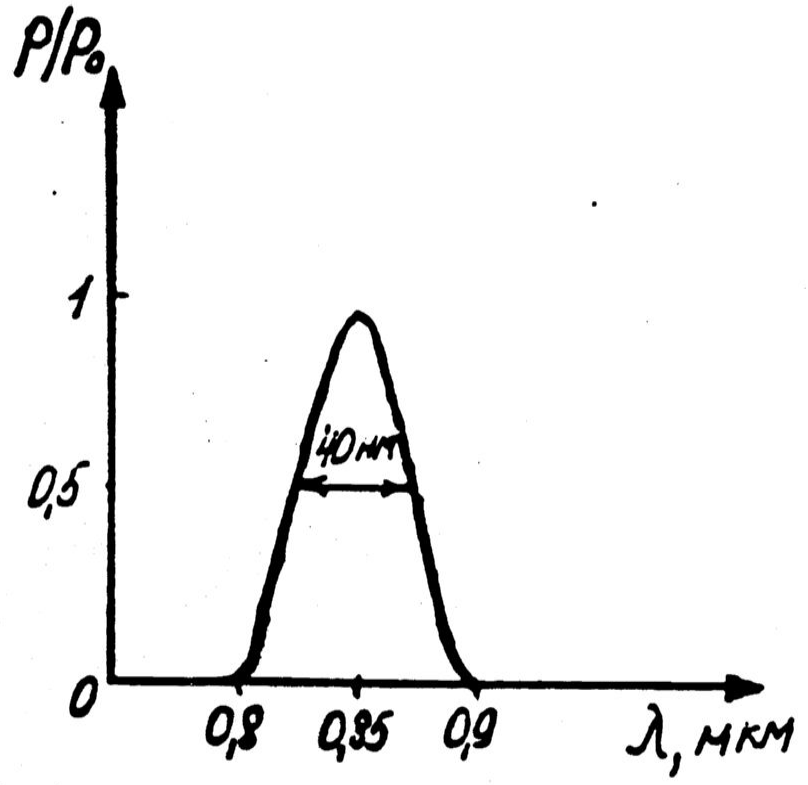
Характеристики СИД

1. $P = f(I_u)$

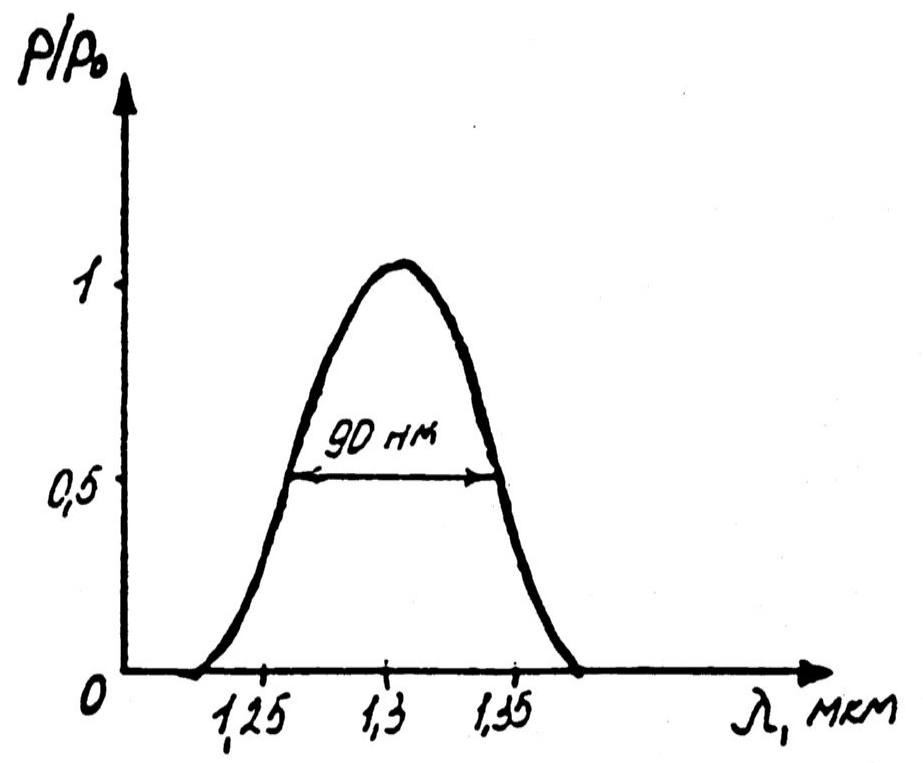


Спектральное распределение СИД

ШИ



ТТ



Характеристики СИД

3. Внутренняя квантовая эффективность

$$P_{\sim} = h \cdot f \cdot \eta_{\text{вн}} I_n / e^{(1+j\omega\tau)} ; \quad \frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_n} + \frac{1}{\tau_{\delta}}$$

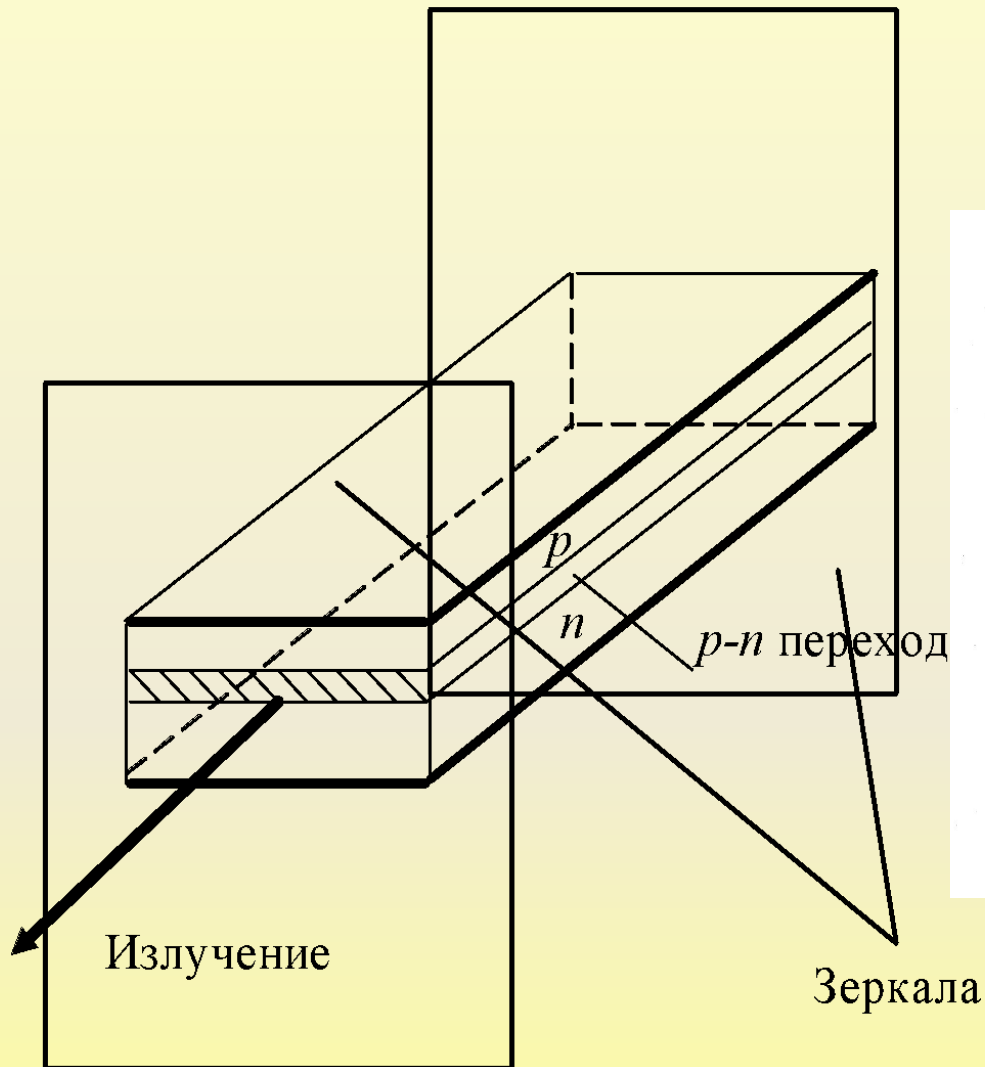
$$\eta_{\text{вн}} = \frac{1/\tau_n}{1/\tau_n + 1/\tau_{\delta}} = \frac{1}{1 + \tau_n/\tau_{\delta}}$$

4. Срок службы, надежности

$$P(t) = P(0) e^{-t/t_{\text{сл}}} ; \quad t_{\text{сл}} = A \cdot I_n^{-m} \cdot e^{-E/(kT)}$$

$$m = 1 \dots 2 \quad t_{\text{сл}} \approx 10^5 \div 10^6 \text{ часов}$$

Лазерные диоды



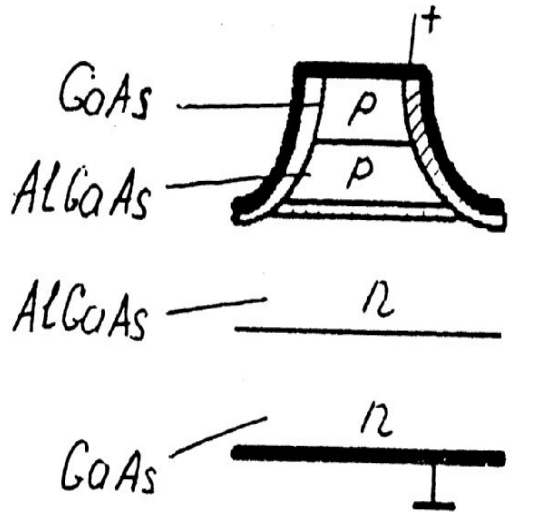
$$S = \alpha + \frac{20}{L} \lg \frac{1}{\sqrt{\rho_1 \rho_2}}$$

$$I_n = \frac{8\pi \cdot 10^{-4} \cdot q \cdot n^2 \Delta E_g d \delta}{\eta_{вн} \cdot c^2 h^3} \left(d + \frac{20}{L} \lg \frac{1}{\rho} \right)$$

Д.б. $I_n \sim 30 \dots 100 \text{ A/cm}^2$

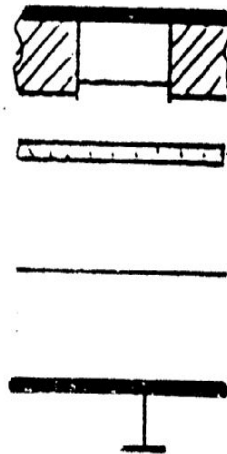
Лазеры с полосковой геометрией

Мезаполосковая структура



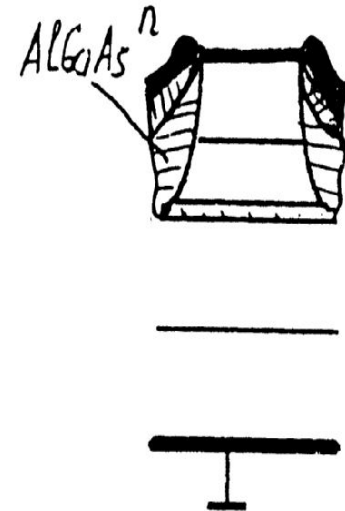
электрод

ПЛ с протонной бомбардировкой



изолирующий

ПЛ с погруженной структурой



n или p
 GaAs

Характеристики ЛД

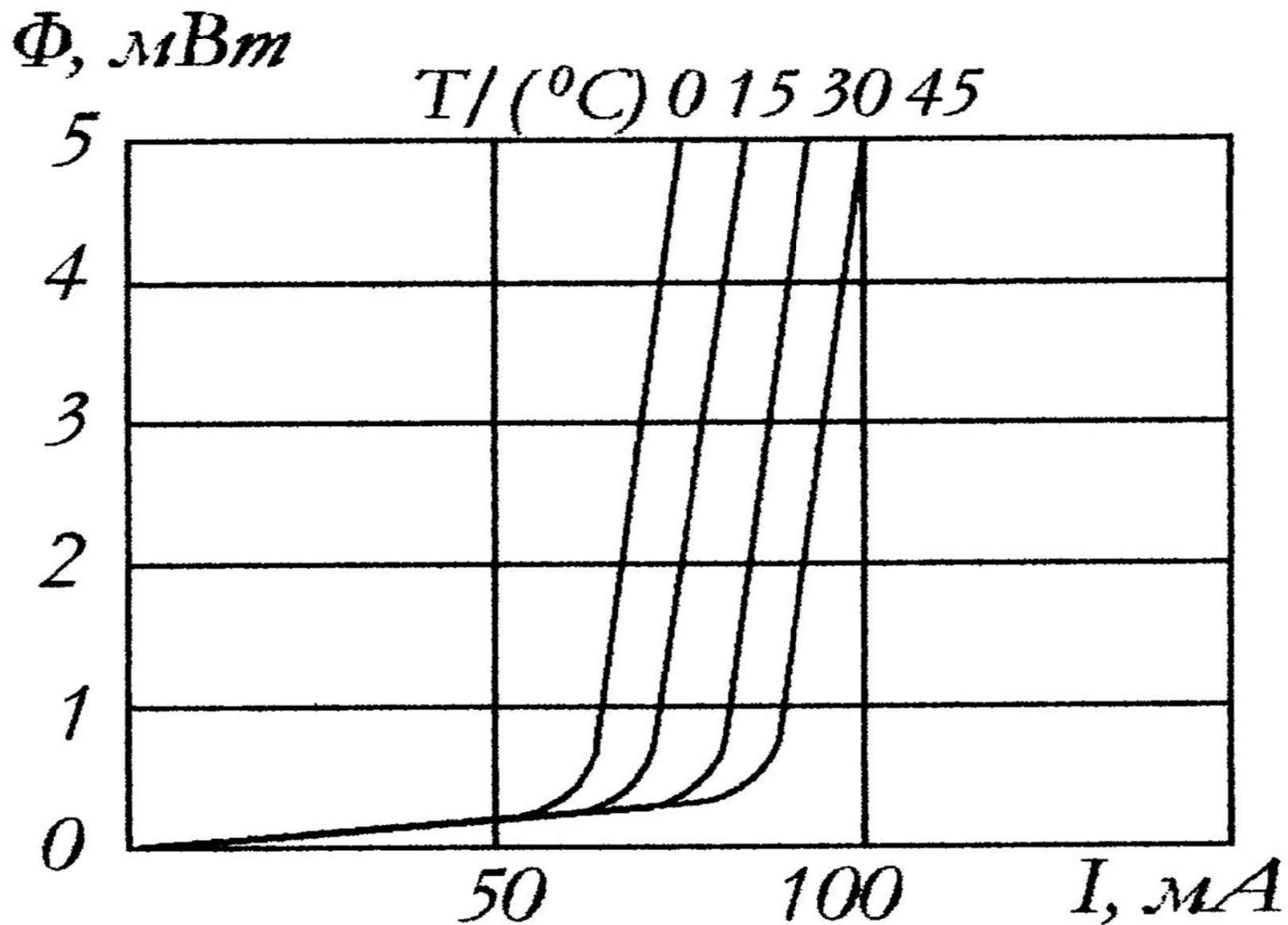
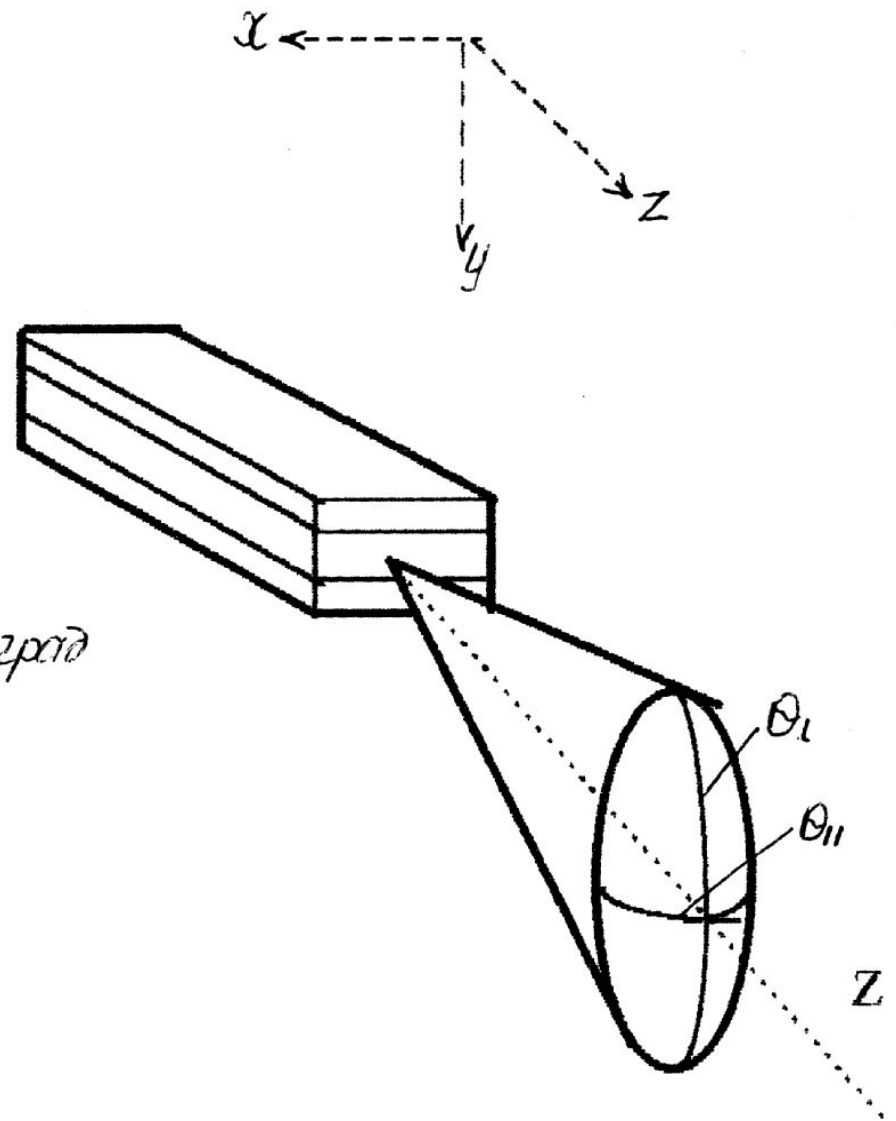
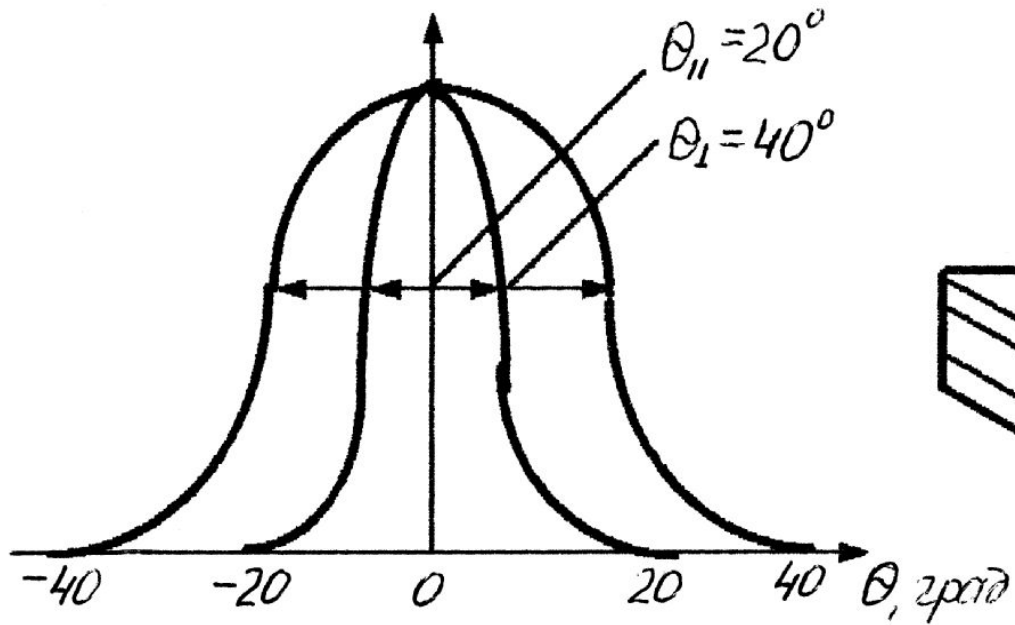
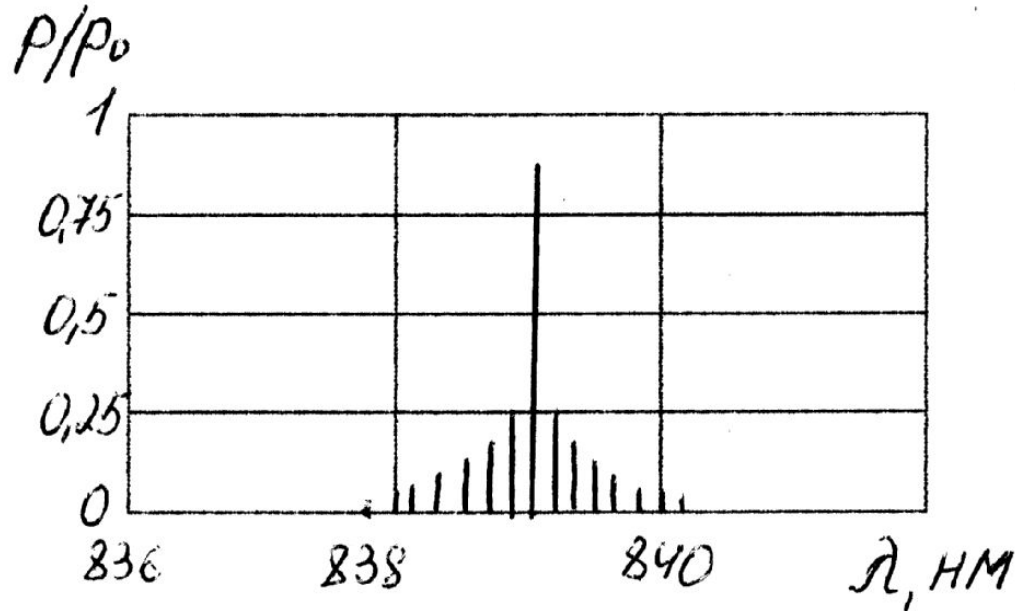


Диаграмма направленности



Спектр излучения лазера

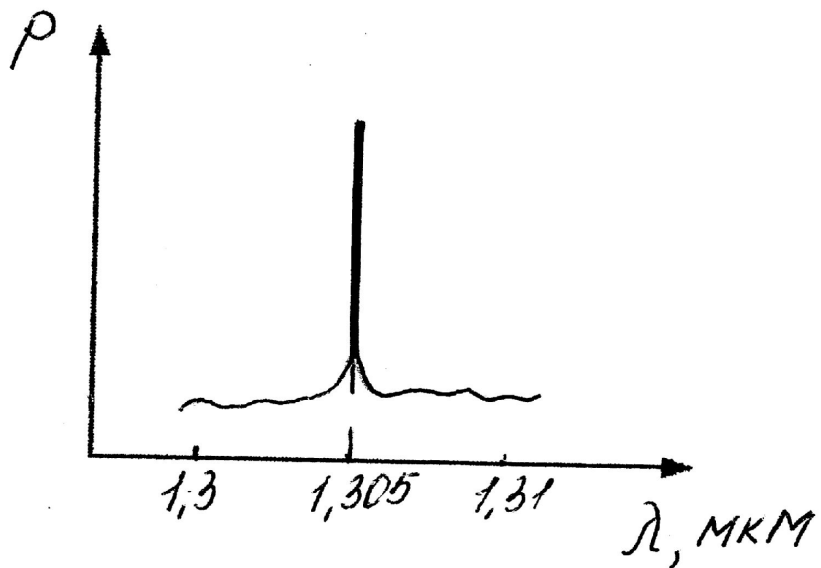
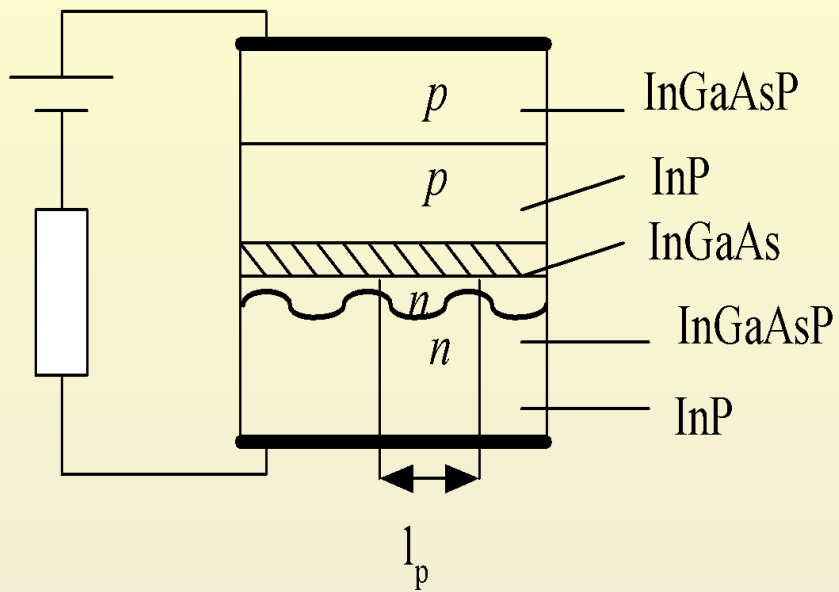


$$N\lambda_N = 2nL, \quad \text{для } N+1, \quad \lambda_{N+1} \rightarrow (N+1)\lambda_{N+1} = 2nL$$

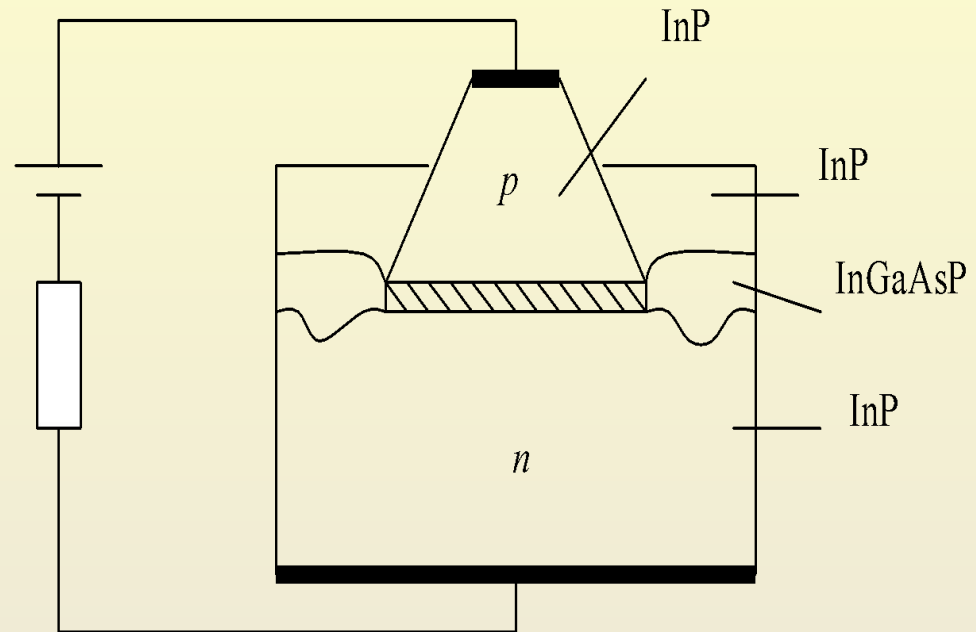
$$\lambda = 0,9 \text{ мкм}, \quad n = 3,6 \text{ и } L = 300 \text{ мкм} \quad \Delta\lambda = 0,4 \text{ нм}$$

Ширина линии излучения $< 0,01$ нм

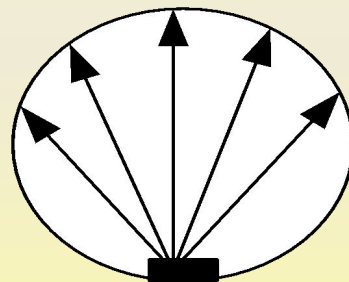
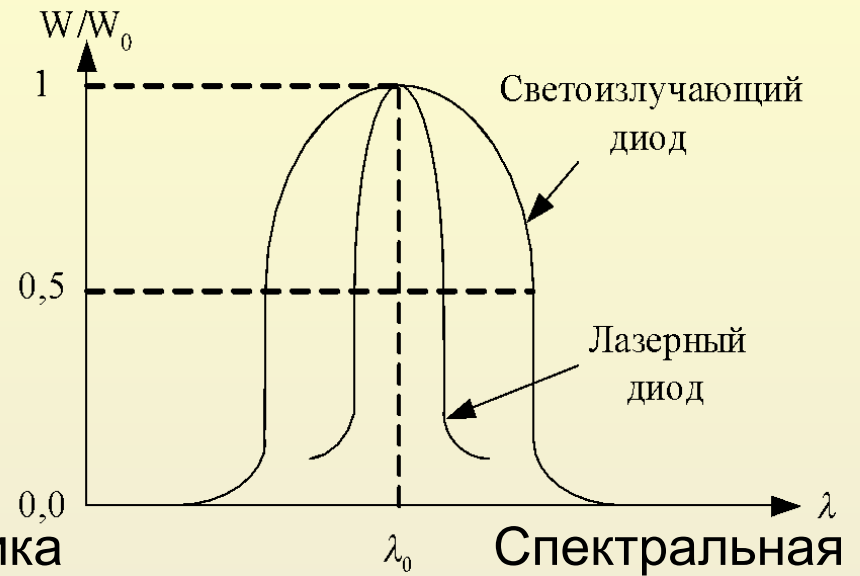
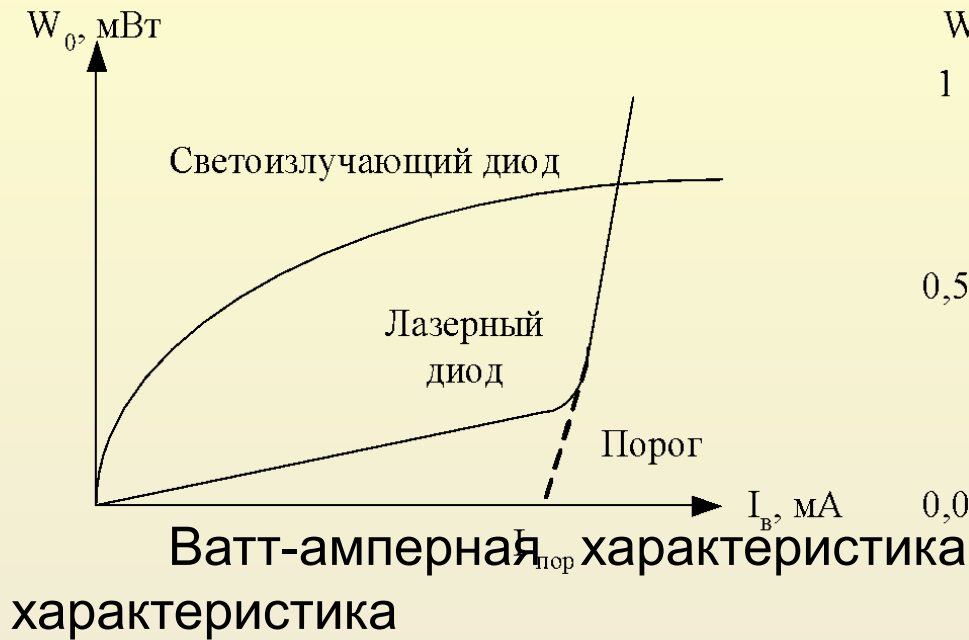
Структура лазера РОС



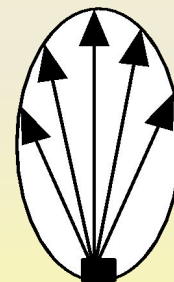
Структура лазера РВО



Основные характеристики СИД, ПЛ(ЛД)



Светоизлучающий диод



Лазерный диод

Диаграмма направленности источников оптического излучения