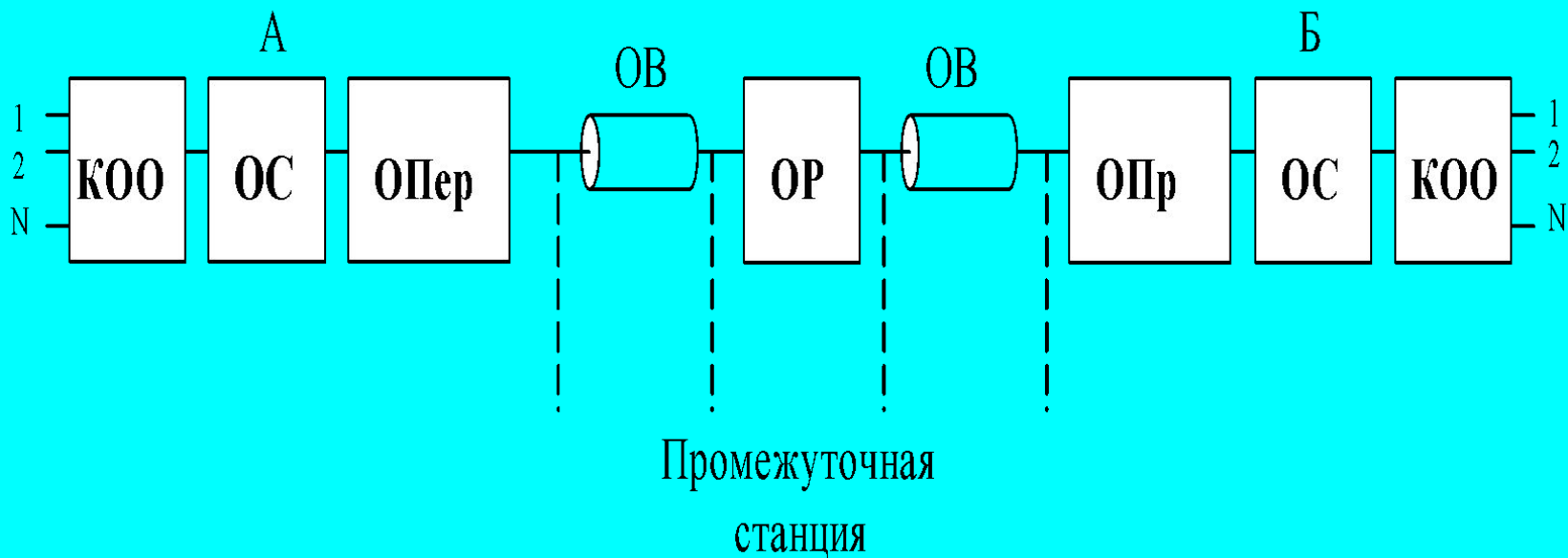


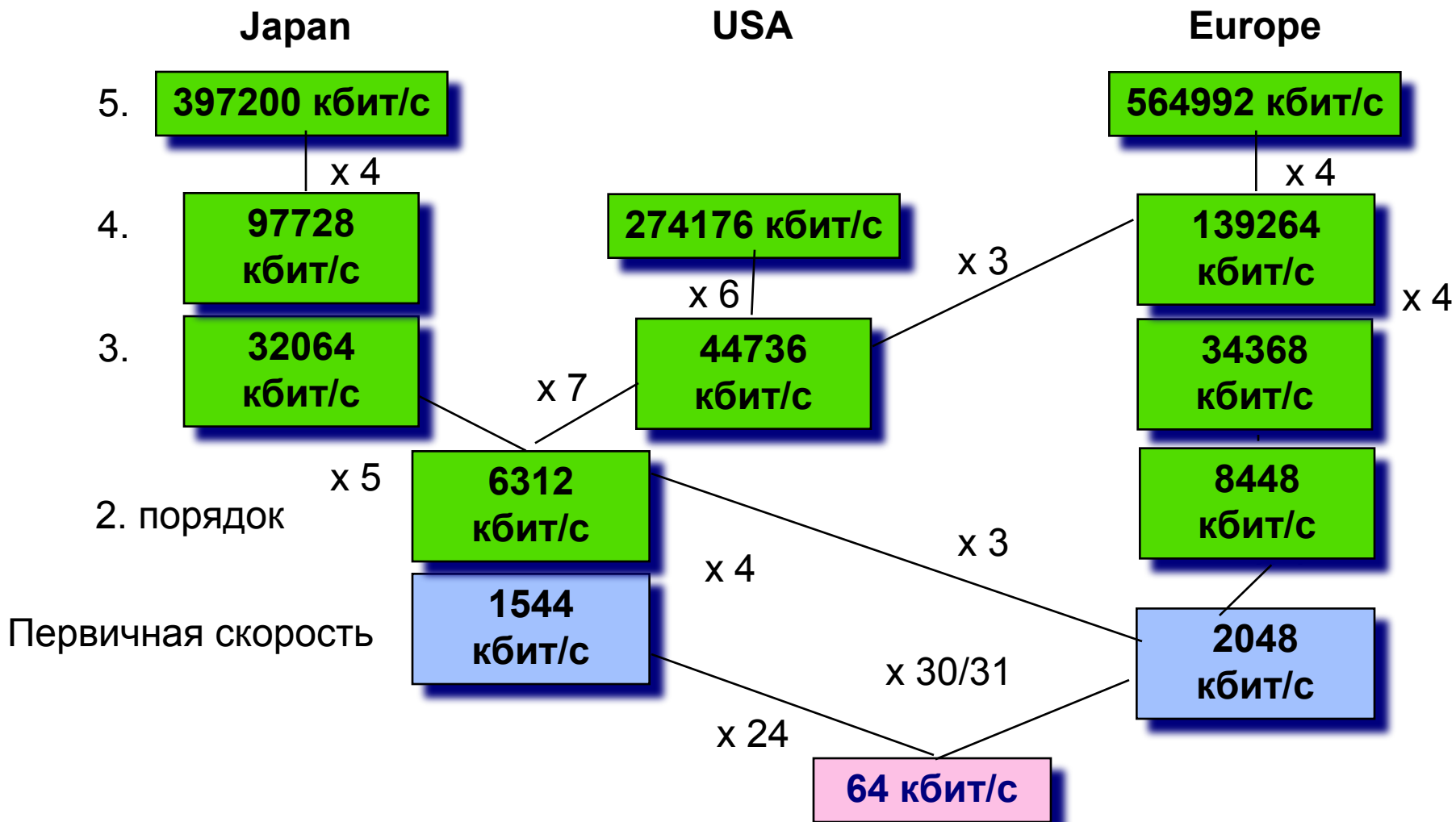
Цифровые многоканальные телекоммуникационные системы

Бакалавриат

Принцип организации волоконно-оптической связи

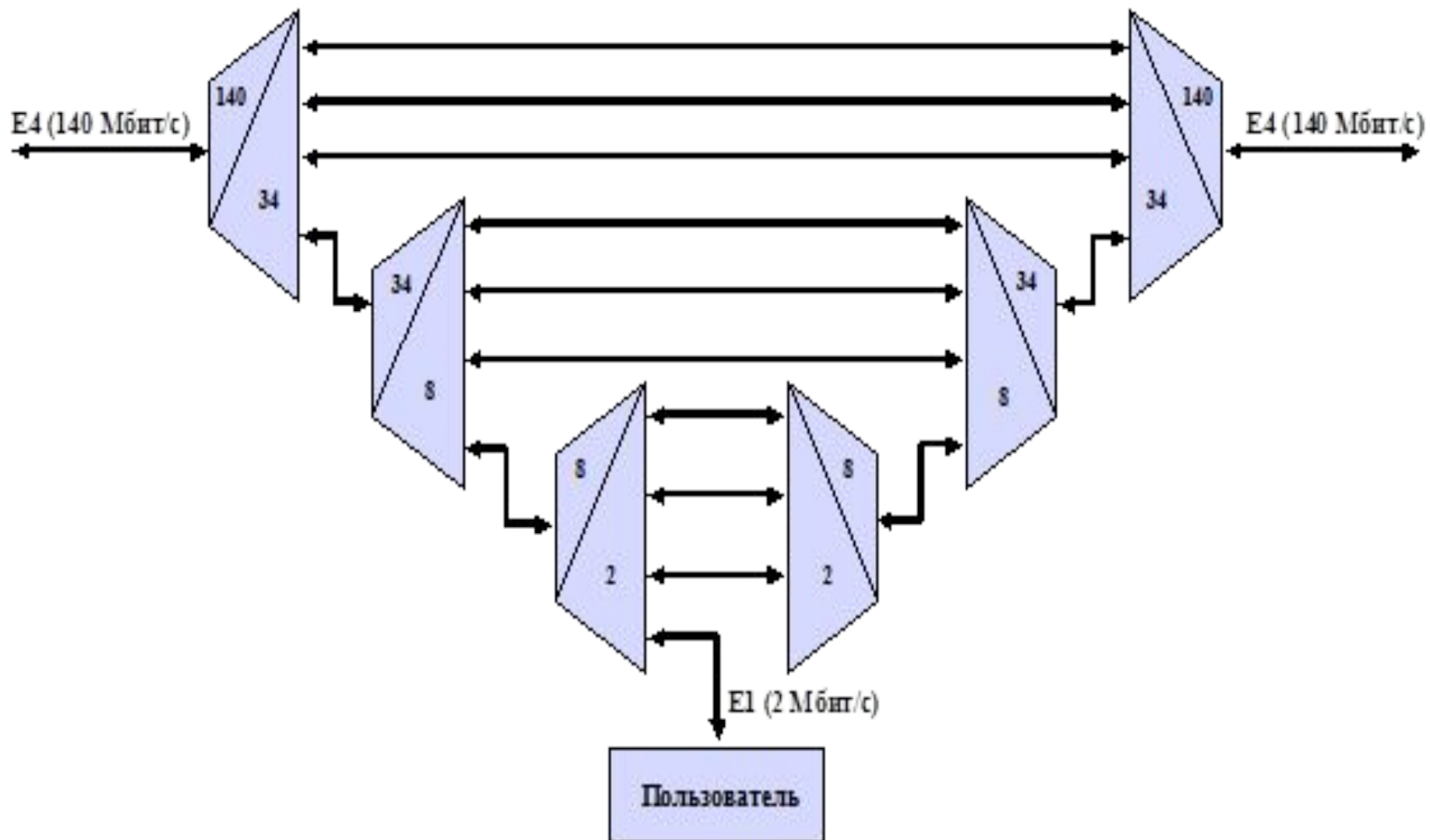


Мировые системы РДН

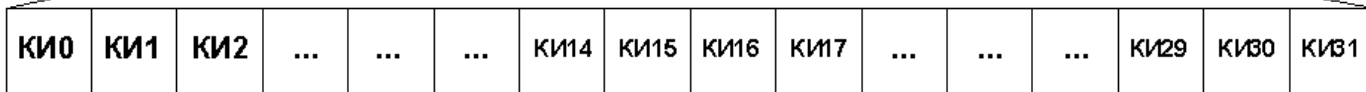
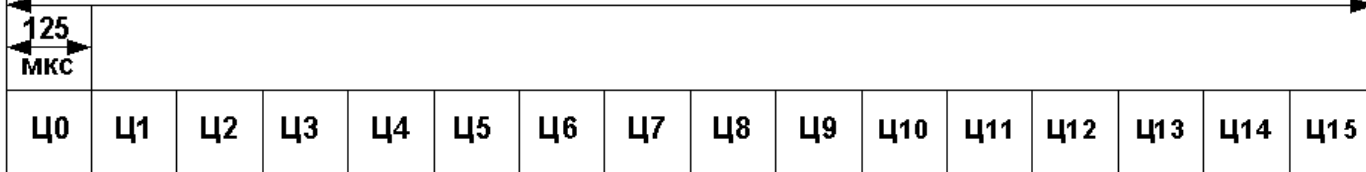


Наличие в PDH потоках выравнивающих битов, делает невозможным прямое извлечение из потока, составляющих его компонентов. Так, чтобы извлечь из потока 140 Мбит/сек (E4) поток 2 Мбит/сек (E1) необходимо демультиплексировать E4 на четыре потока 34Мбит/сек (E3), затем один из E3 на четыре потока 8 Мбит/сек (E2), и только после этого можно вывести требуемый E1. А для организации ввода/вывода требуется трехуровневое демультиплексирование, а затем трехуровневое мультиплексирование (Рис.2). Понятно, что использование систем PDH в сетях передачи данных, требует большого количества мультиплексоров, что значительно удорожает сеть и усложняет ее эксплуатацию.

Операция ввода/вывода потока в PDH

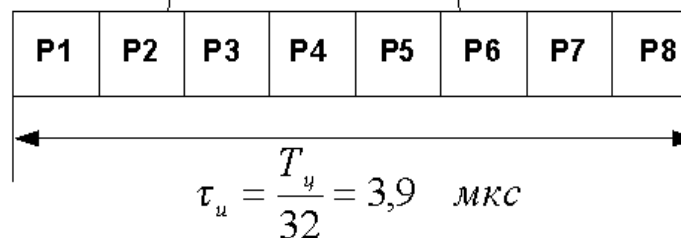


$T_{\text{ц}}=2 \text{ мс}$ $f_{\text{ц}}=500 \text{ Гц}$



	Р1	Р2	Р3	Р4	Р5	Р6	Р7	Р8
Д	Четные циклы - сигнал цикловой синхронизации							
	0	0	1	1	0	1	1	
Д	Нечетные циклы							
	1	А	Х	Х	З	Х	Х	

	Р1	Р2	Р3	Р4	Р5	Р6	Р7	Р8
Нулевой цикл - сигнал сверхцикловой синхронизации					1	03	0	1
	0	0	0	0				
Циклы с 1 по 15								
СУВ	СУВ	0	1	СУВ	СУВ	0	1	



$$\tau_u = \frac{T_u}{32} = 3,9 \text{ мкс}$$

- К недостаткам PDH следует, также, отнести слабые возможности в организации служебных каналов для целей контроля и управления потоком в сети и полное отсутствие средств маршрутизации низовых мультиплексированных потоков, что крайне важно для использования в сетях передачи данных.

Цели и задачи разработки SDH. Основные понятия.

Желание преодолеть указанные недостатки PDH привели к разработке в США иерархии синхронной оптической сети (SONET), а в Европе аналогичной синхронной цифровой иерархии (SDH), предложенными для использования на волоконно-оптических линиях связи.

Целью разработки, в обоих случаях, было создание иерархии, которая позволила бы:

- вводить/выводить исходные потоки без необходимости производить сборку/разборку;
- разработать структуру кадров, позволяющую осуществлять развитую маршрутизацию и управление сетями с произвольной топологией;
- загружать и переносить в кадрах новой иерархии кадры PDH иерархии и других типов трафика (ATM, IP);
- разработать стандартные интерфейсы для облегчения стыковки оборудования.

Мировые системы SDH

64кбит/с

2Мбит/с

34Мбит/с

140Мбит/с

STM-1 155 Мбит/с

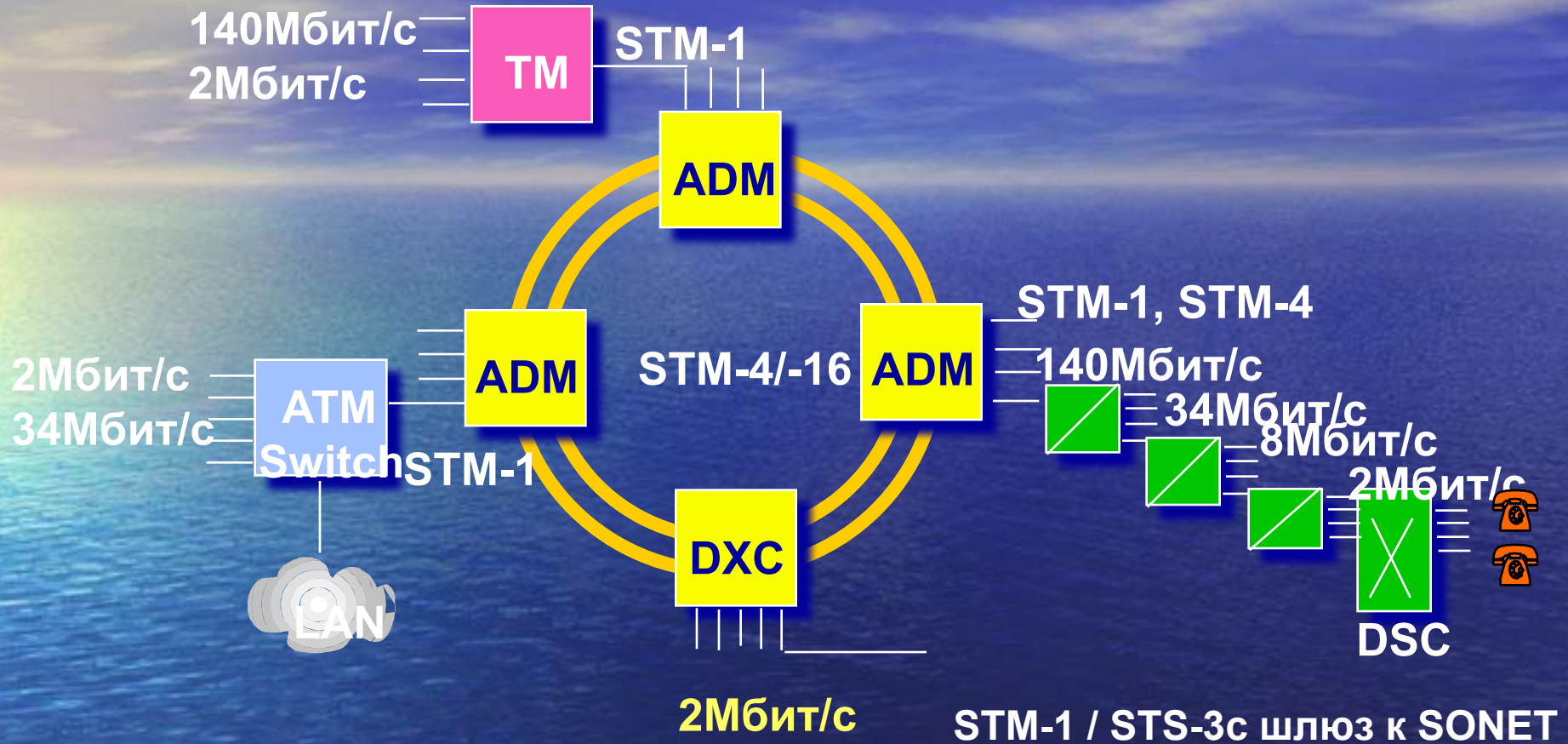
STM-4 622 Мбит/с

STM-16 2.5 Гбит/с

STM-64 10Гбит/с

STM-256 40 Гбит/с

Структура синхронной сети



ADM : Add Drop Multiplexer

DXC : Цифровой кросс-коннект

TM : Terminal Multiplexer

DSC: Центр цифровой коммутации

LAN: Локальная вычислительная

сеть

2 Мбит/с

34 Мбит/с

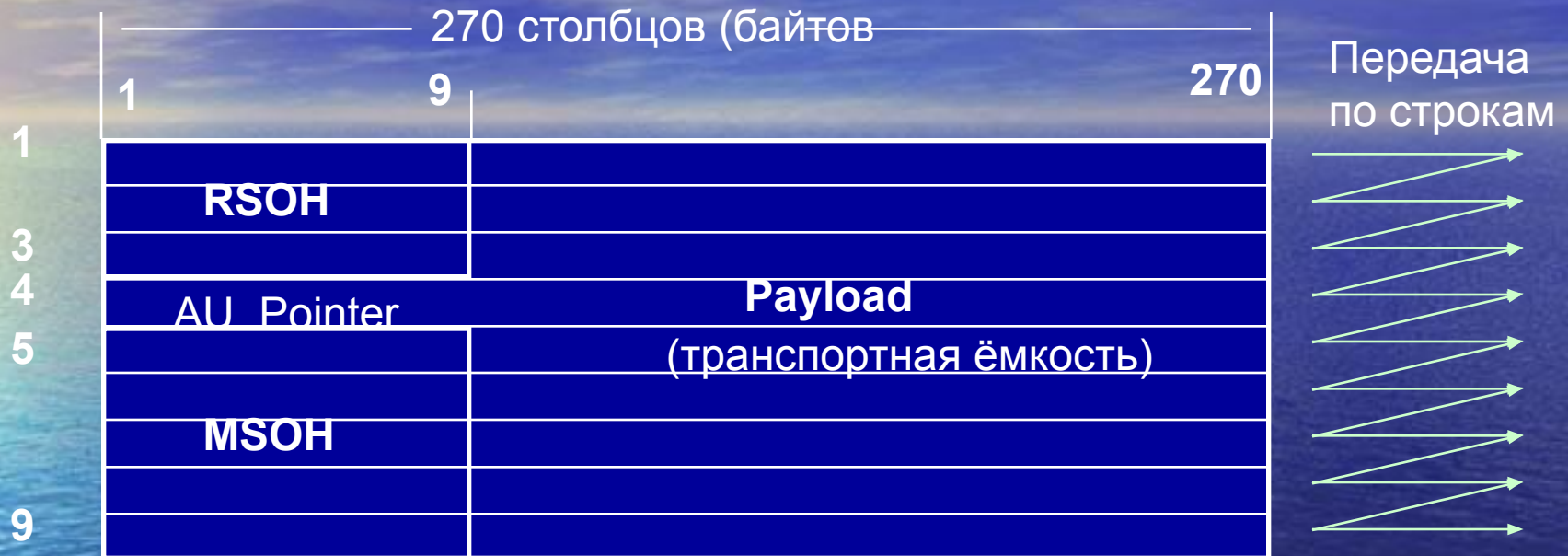
140 Мбит/с

STM-1

STM-4

STM-1 / STS-3c шлюз к SONET

Структура цикла STM-1



RSOH: Заголовок регенерационной секции

MSOH: Заголовок мультиплексорной секции

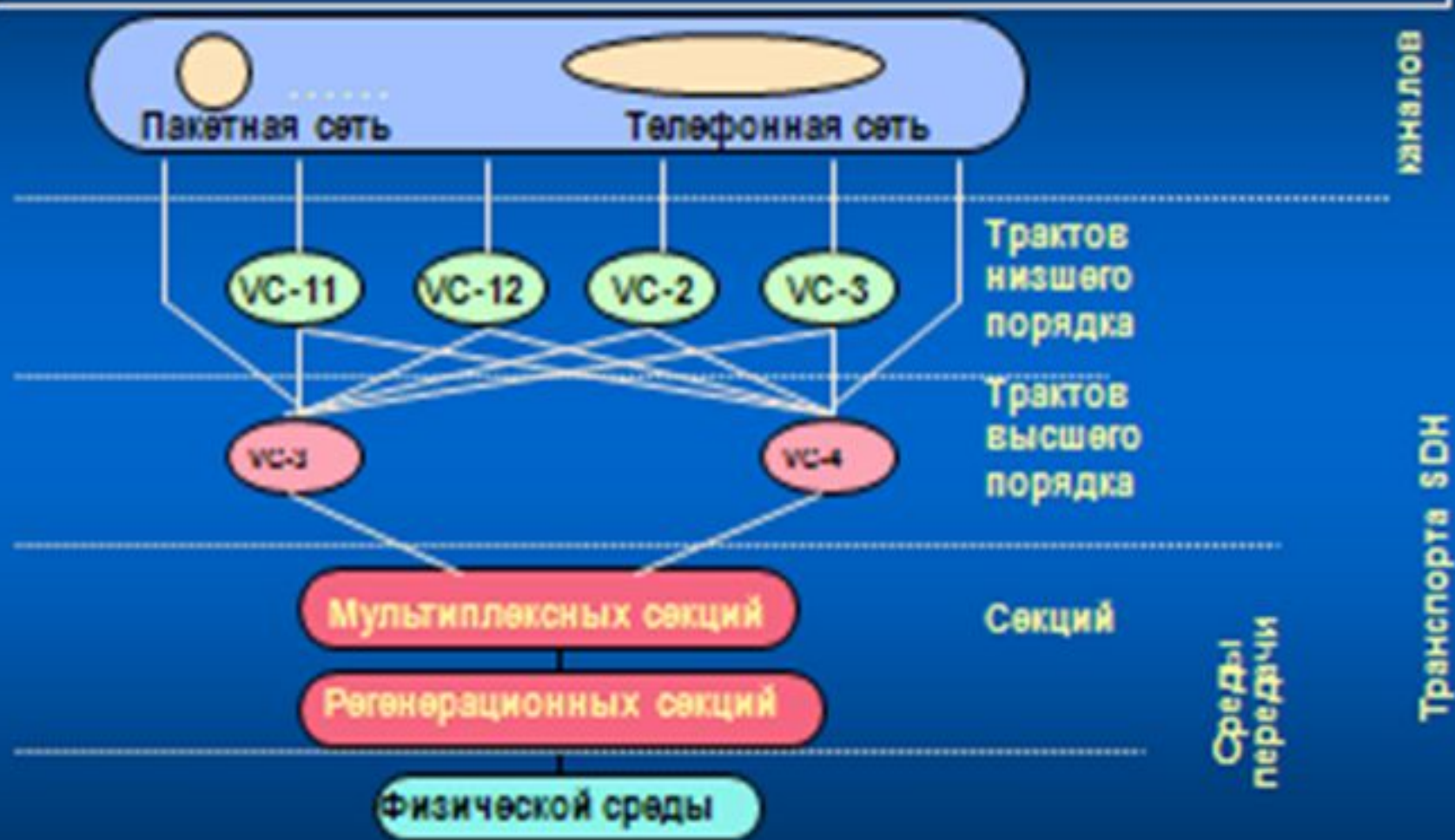
Payload: Пространство для информации

Транспортная ёмкость для одного байта: 64 кбит/с

Ёмкость цикла: $270 \times 9 \times 8 \times 8000 = 155.520$ Мбит/с

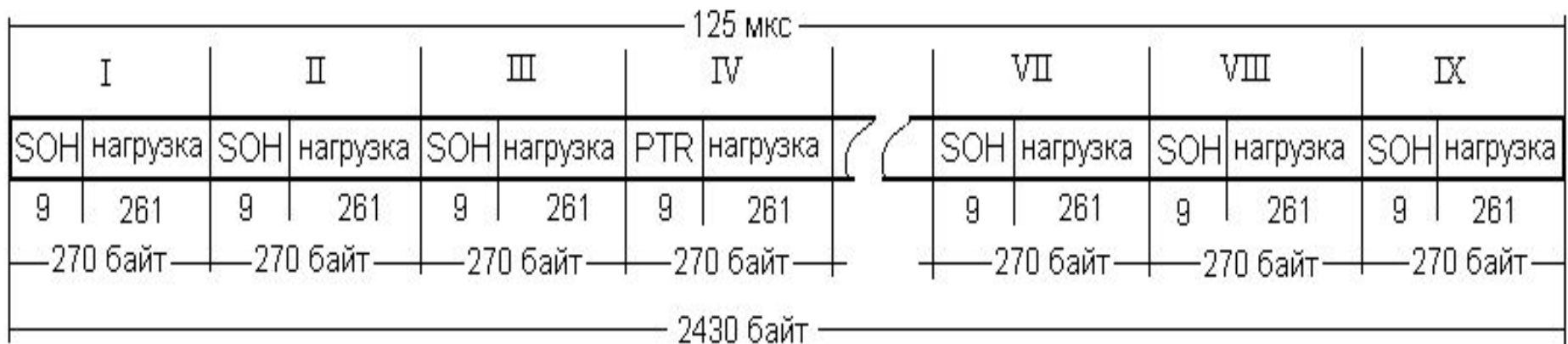
Период повторения цикла: 125 μ s

Уровневая модель сети SDH



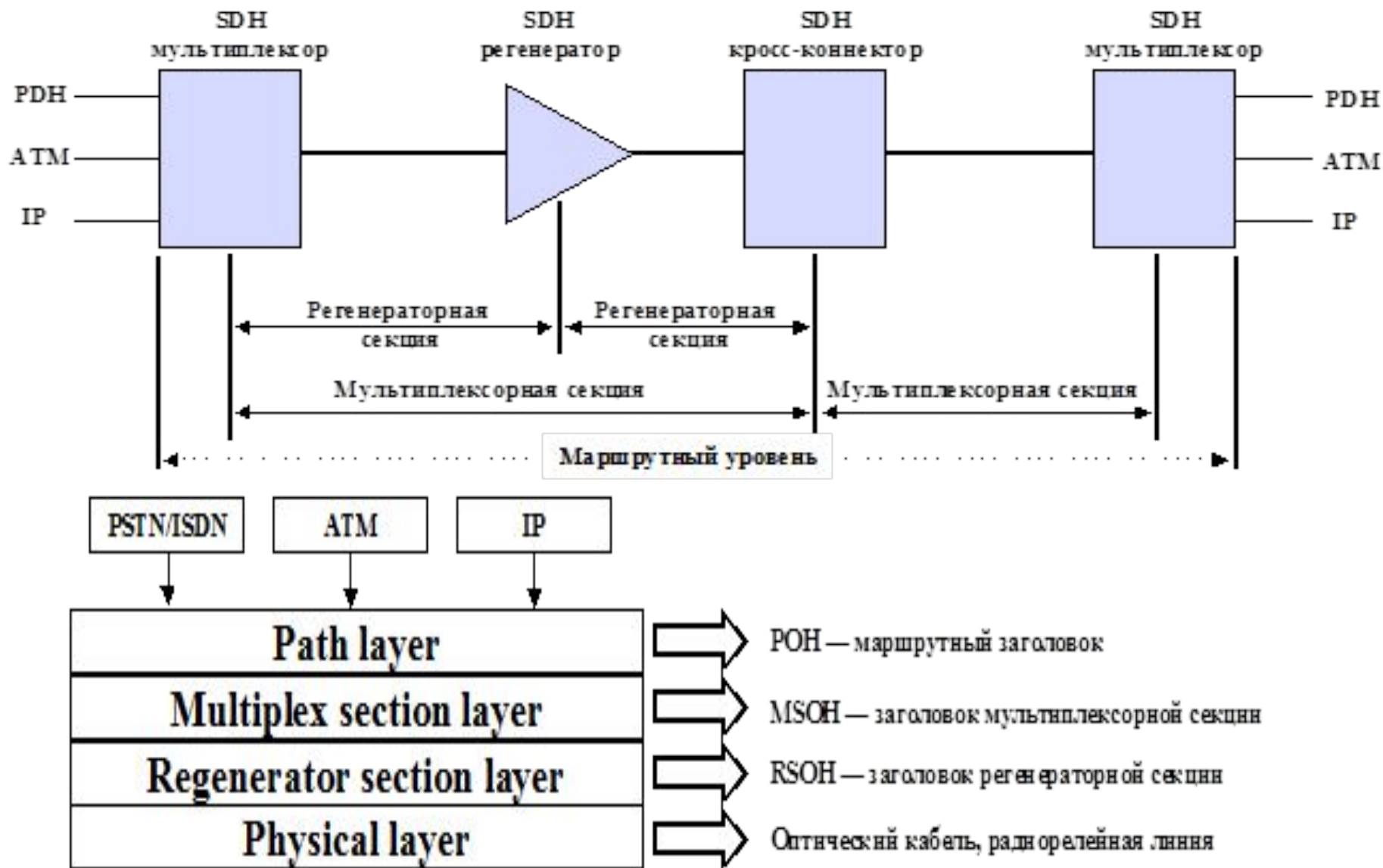
Структура кадра STM-1

Полезной нагрузкой для SDH являются групповые цифровые потоки образованные любой ступенью PDH от E1 (2,048 Мбит/с) до E4 (139,264 Мбит/с). Для синхронизации всех входных потоков в структуре технологии SDH периодически на определённых позициях в кадре размещается служебная информация (секционный заголовок – SOH (Section Overhead), который используется для контроля и управления сетью SDH, а так же для организации размещения полезной нагрузки) и байты фиксированной вставки (стаффинг). Поэтому цифровой поток первичного синхронного транспортного модуля – STM-1 можно условно разделить на 9 интервалов по 270 байт в каждом . Первые 9 байт каждого интервала несут сигналы управления и контроля, а в оставшиеся 261 байт размещается соответствующим образом полезная нагрузка и стаффинг.



Обозначение контейнера	Передаваемый поток, кбит/с
C-11	T1 – 1 544
C-12	E1 – 2 048
C-21	T2 – 6 312
C-22	E2 – 8 448
C-3	T3 – 44 736 E3 – 34 368
C-4	E4 – 139 264

Многоуровневая модель SDH



Самый низкий — **физический уровень**, представляющий передающую среду.

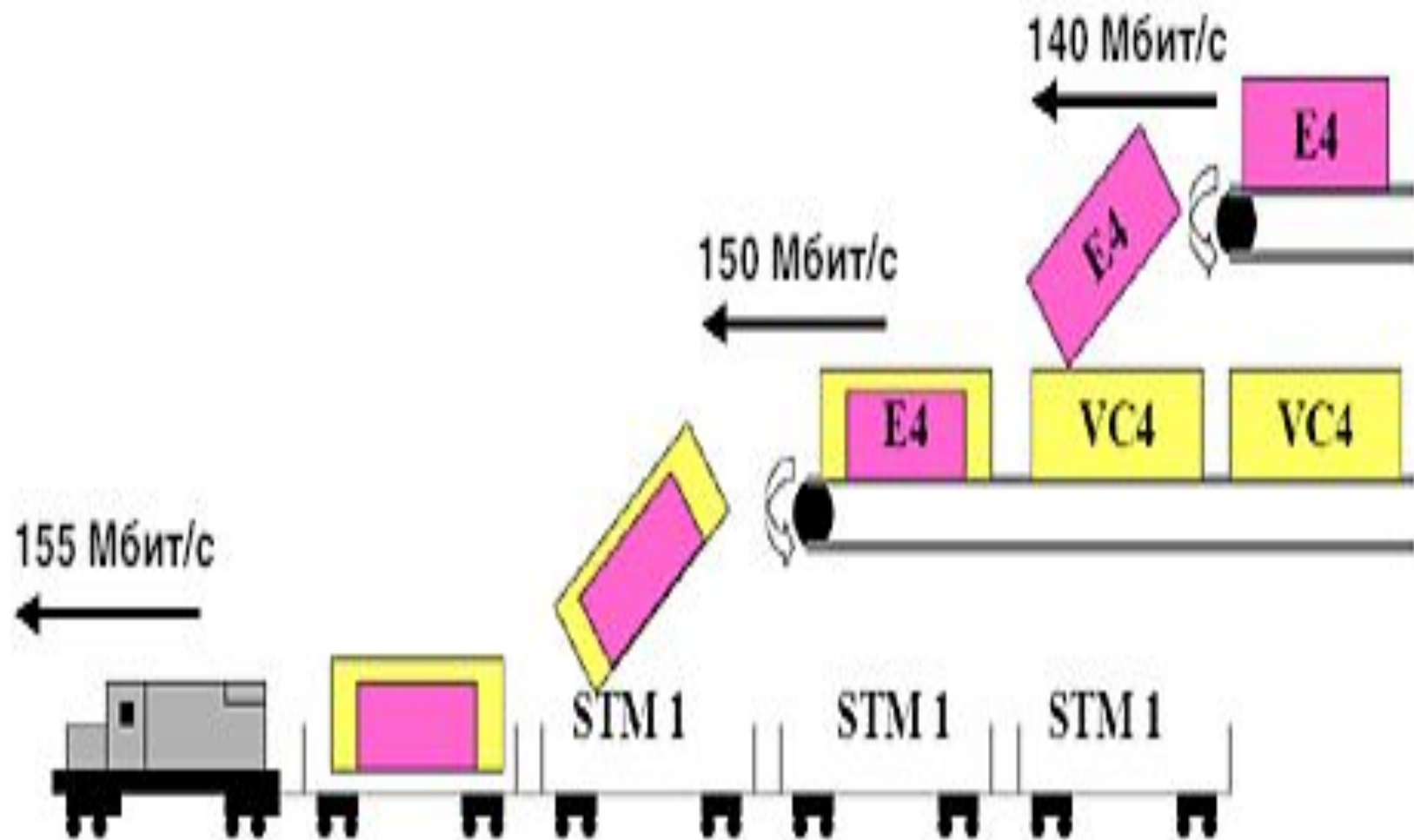
Секционный уровень отвечает за сборку синхронных модулей STM-N и транспортировку их между элементами сети. Он подразделяется на **регенераторную** и **мультиплексорную** секции.

Маршрутный уровень отвечает за доставку сигналов, предоставляемых сетью для конечного пользователя (PDH, ATM и др.), и упакованных в полезной нагрузке STM-N. Согласно терминологии SDH, эти сигналы называют **компонентными** или **трибутарными** сигналами, а предоставляемые пользователю интерфейсы доступа к сети — **трибутарными интерфейсами**.

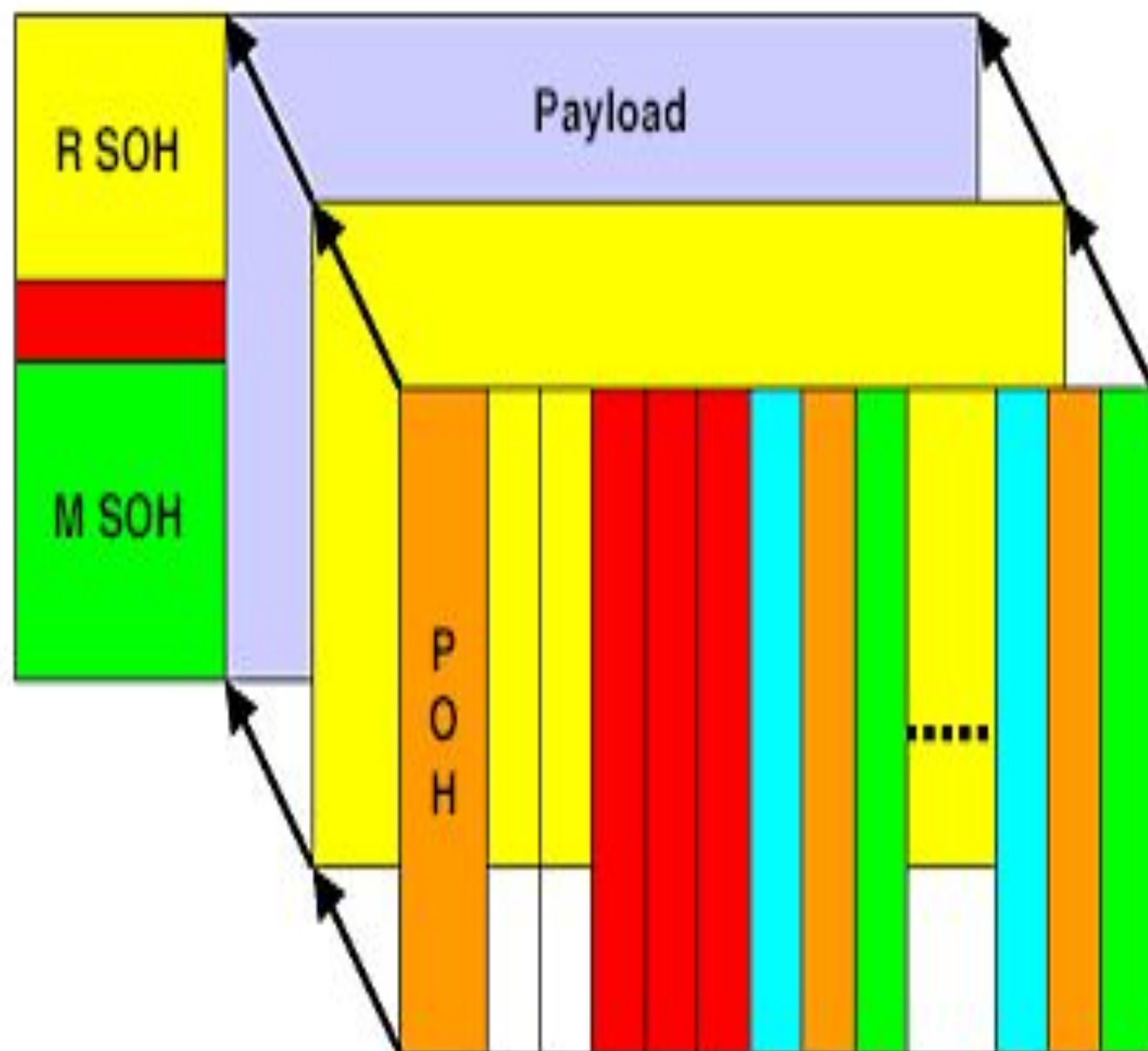
Передача сигнальной информации для каждого уровня в SDH осуществляется при помощи механизма заголовков. **Каждый STM-N кадр** имеет **секционный заголовок SOH** (Section OverHead), состоящий из двух частей: заголовка **регенераторной секции RSOH** (Regenerator Section OverHead) и **мультиплексорной секции MSOH** (Multiplex Section OverHead).

Для упаковки и транспортировки в STM-N трибутарных сигналов предложена технология **виртуальных контейнеров**.

Виртуальный контейнер состоит из поля **полезной нагрузки** — контейнера, на которое отображается трибутарный сигнал, и **маршрутного заголовка** PON (Path OverHead), который указывает тип контейнера и служит для сбора статистики о прохождении контейнера по сети.



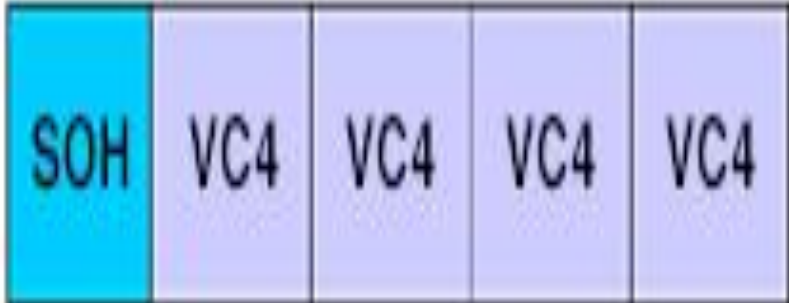
ЦИКЛ STM1



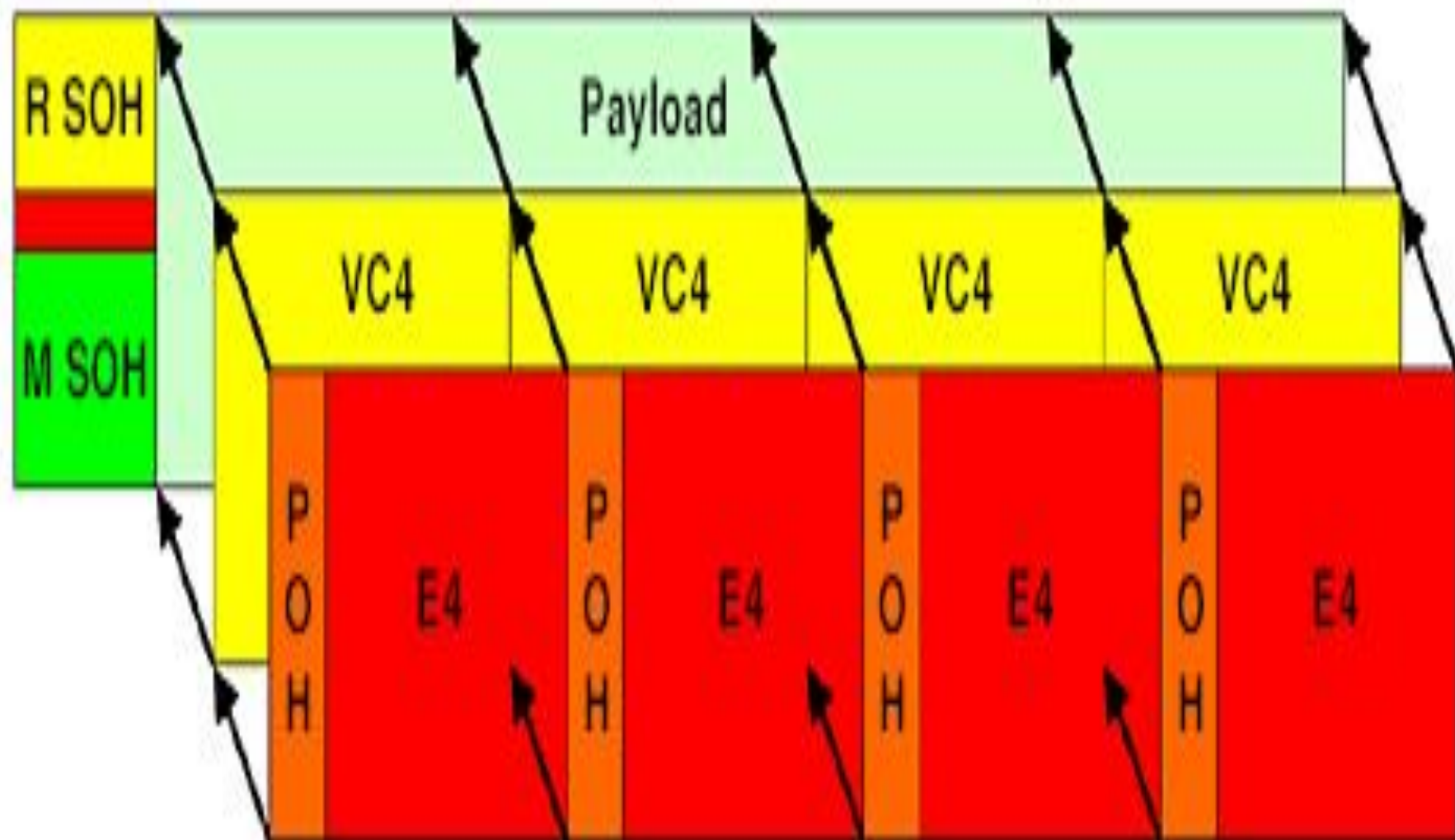
STM4



4 standard VC4
1 concatenated VC4-4c



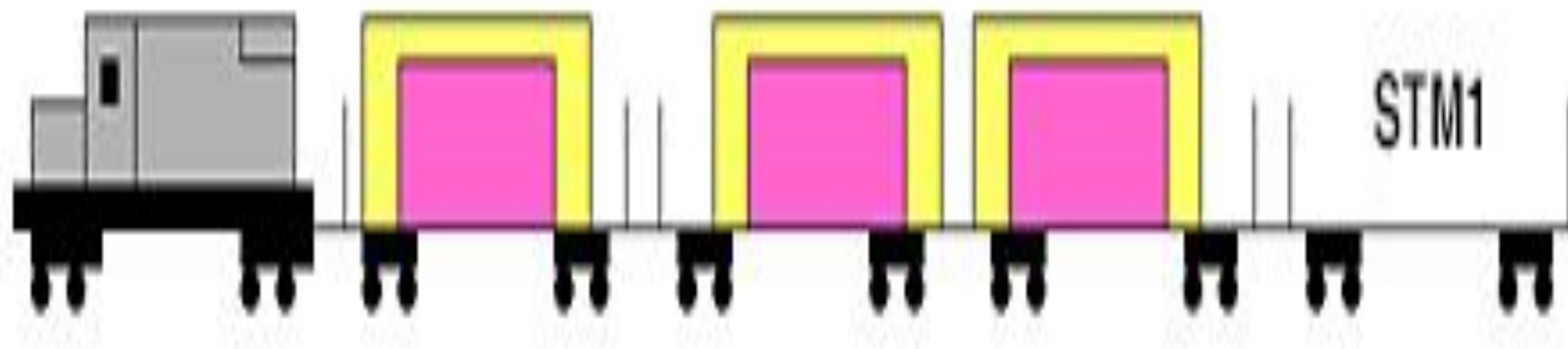
цикл STM4



155 Мбит/с



Контейнер может
перемещаться внутри вагона



STM16



16 standard VC4
4 concatenated VC4-4c
1 concatenated VC4-16c

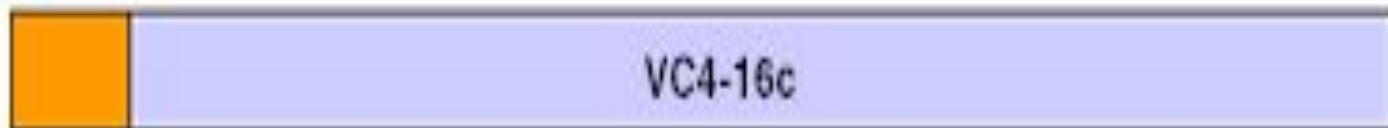
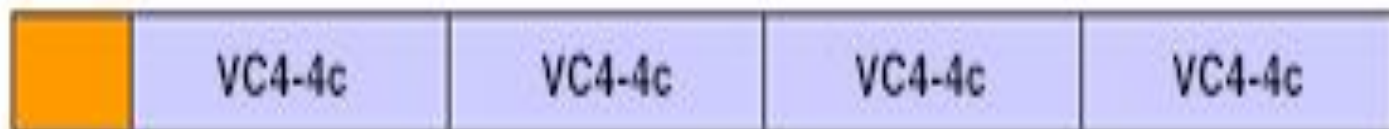
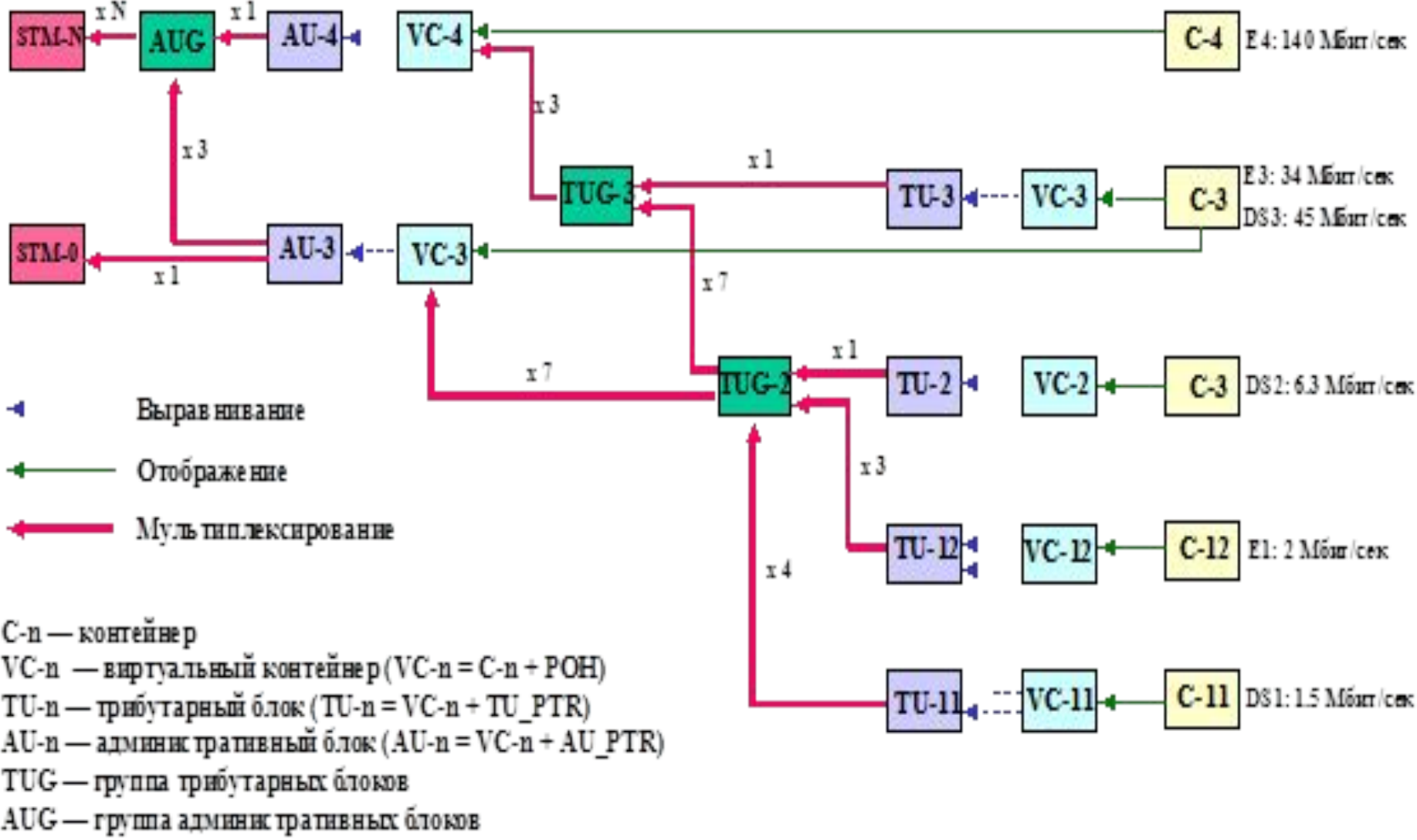


Схема мультиплексирования SONET/SDH



Виртуальный контейнер "VC"

К каждому контейнеру С добавляется трастовый заголовок РОН (Path OverHead). Эта совокупность называется виртуальным контейнером VC (Virtual Container) и передается через сеть как неизменяемая единица.

В РОН содержится служебная информация, позволяющая отслеживать надежность транспортировки контейнера через сеть от источника к получателю. РОН добавляется в начале тракта при формировании VC и устраняется в конце тракта при расформировании контейнера. Кроме того, в РОН содержится служебная информация для целей контроля и управления сетью.

В зависимости от размера виртуальный контейнер может транспортироваться в модуле STM-1 в одиночку или может быть объединен в больший VC, который затем непосредственно транспортируется в STM-1.

Различают виртуальные контейнеры высшего уровня НО (high-order) и низшего уровня LO (low-order). Все контейнеры, передаваемые в составе одного “большого” контейнера относятся к нижнему уровню LO. Контейнерами уровня LO являются VC-11, VC-12 и VC-2. VC-3 относят к уровню LO, если этот контейнер передается в составе VC-4.

Контейнеры, непосредственно переносимые в модуле STM-1, относятся к уровню НО. VC-4 – контейнер уровня НО. То же относится и к VC-3, если он передается непосредственно.

Нагрузочный блок "TU"

За исключением VC-4 все VC могут быть объединены в большие VC и транспортироваться в STM-1. “Меньшие” VC могут плавать по фазе внутри “больших” (высшего уровня) VC. Для отражения фазовых соотношений между двумя VC используются указатели, помещаемые в фиксированном месте VC высшего уровня. Нагрузочным блоком TU (Tributary Unit) называется информационная структура, используемая для описания составляющей контейнера высшего уровня НО, внутри которой может плавать VC низшего уровня LO, и соответствующие указатели (TU pointer). Стандартизированы нагрузочные блоки TU-11, TU-12, TU-2, TU-3.

Группа нагрузочных блоков "TUG"

Перед объединением в контейнер высшего уровня несколько TU побайтно объединяются в одну группу. Такая группа называется группой нагрузочных блоков TUG (Tributary unit group). Определены TUG-2 и TUG-3.

Административный блок " AU "

Виртуальные контейнеры высшего уровня VC-4 и VC-3 транспортируются непосредственно в STM-1.

В этом случае указатели (блок AU_PTR) в составе STM-1 отражают фазовые соотношения между модулем и соответствующим виртуальным контейнером. Та часть модуля STM-1, в пределах которой может “плавать” VC, называется административной группой AU (Administrative Unit). Соответствующий указатель, называемый указателем AU (AU_PTR), рассматривается как часть AU. Трехбайтные указатели AU помещаются в первые 9 байт четвертой строки модуля STM-1.

Различают AU-4 и AU-3. В модуле STM-1 можно передавать один AU-4 или три AU-3. Передача VC-3 возможна непосредственно (AU-3) в STM-1 или через AU-4. Во втором случае три VC-3 должны быть объединены в один VC-4 (см. рис. 1.7).

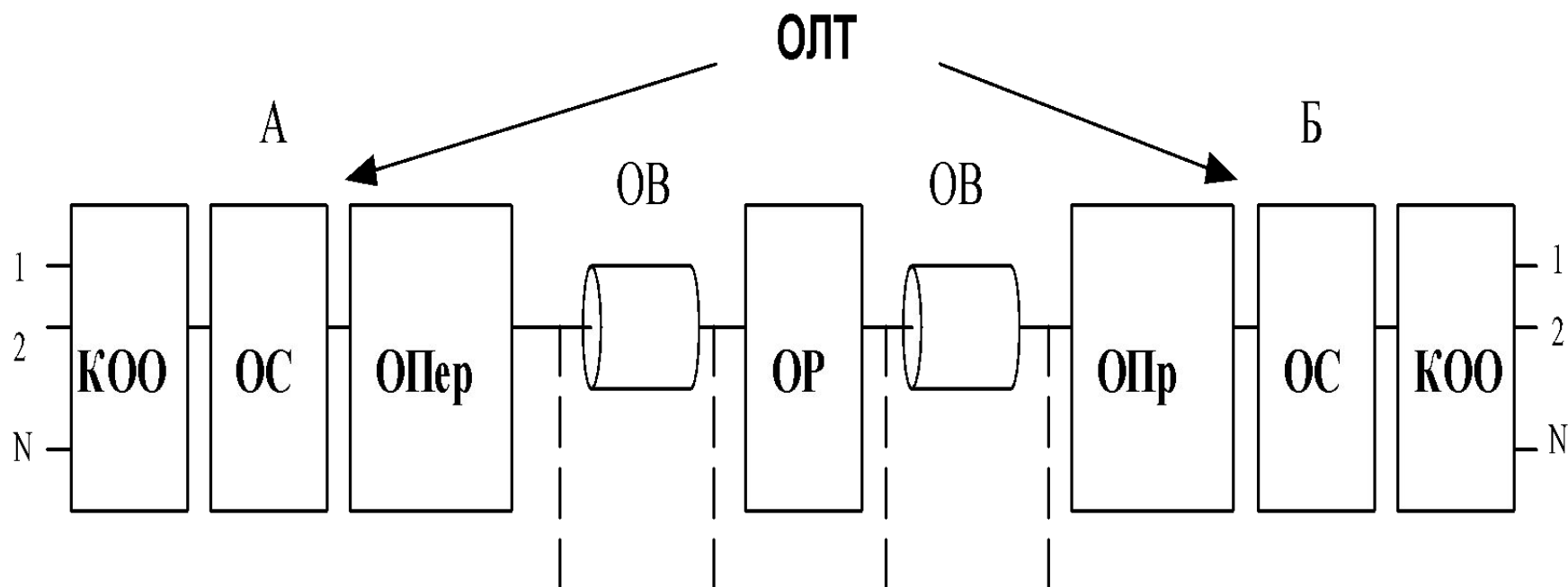
Группа административных блоков "AUG"

Несколько AU могут быть побайтно объединены в одну группу AU (AUG – AU group). AUG представляет собой информационную структуру, соответствующую STM-1 без SOH. AUG может состоять из одного AU-4 или трех AU-3.





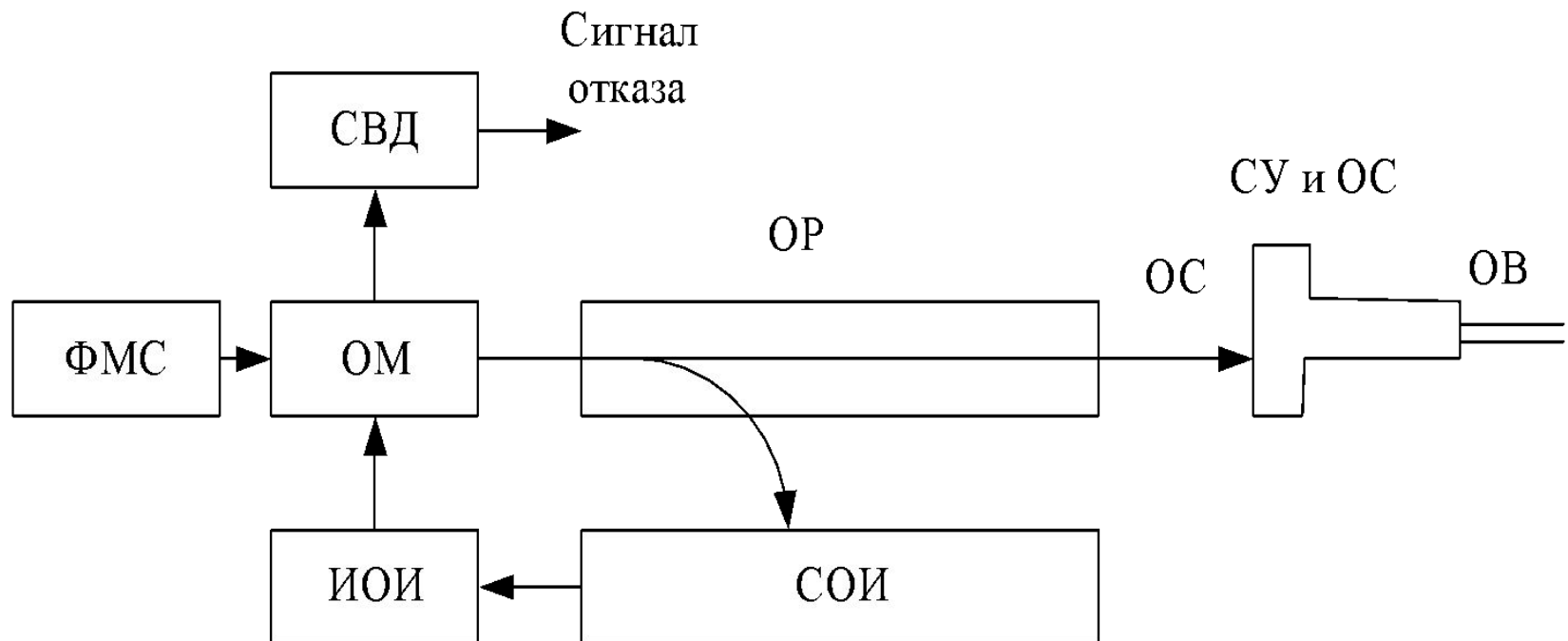
Схема организации волоконно-оптической линии передачи



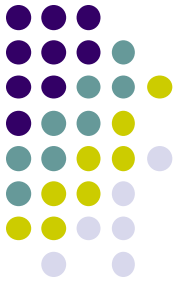
Передающие оптические модули



- *Оптические передатчики* ВОСП реализуются в форме единого передающего оптического модуля (ПОМ) - электронно-оптического преобразователя, осуществляющего преобразование электрических сигналов в оптические сигналы. ФМС — формирователь модулирующего сигнала;
- ОМ — оптический модулятор; ИОИ — источник оптического излучения; ОР — оптический разветвитель; СОИ — стабилизатор режима работы источника оптического излучения; ОС — линейный оптический сигнал; СВД — схема встроенной диагностики; СУ и ОС — согласующее устройство и оптический соединитель; ОВ — оптическое волокно.



Источники оптического излучения

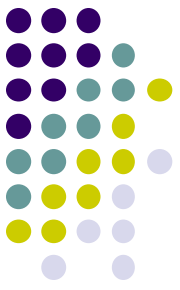


Требования к источникам оптического излучения:

- - 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)**

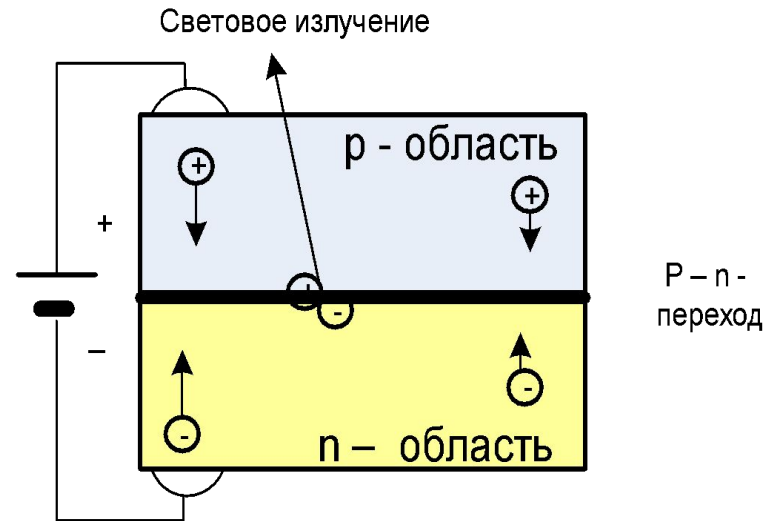
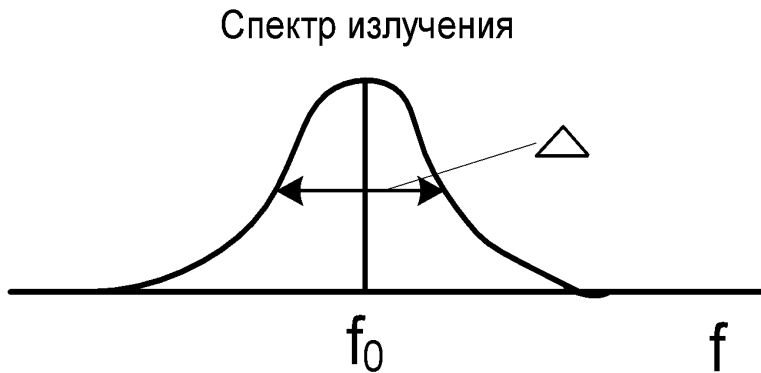
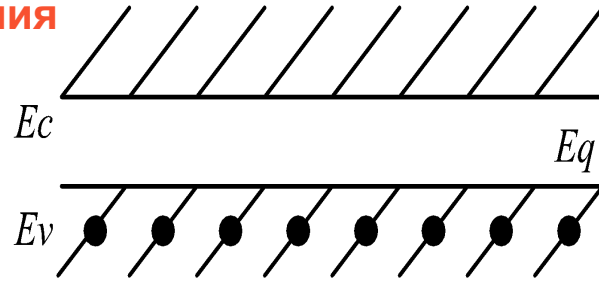
Когерентные и некогерентные источники оптического излучения



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 извне?

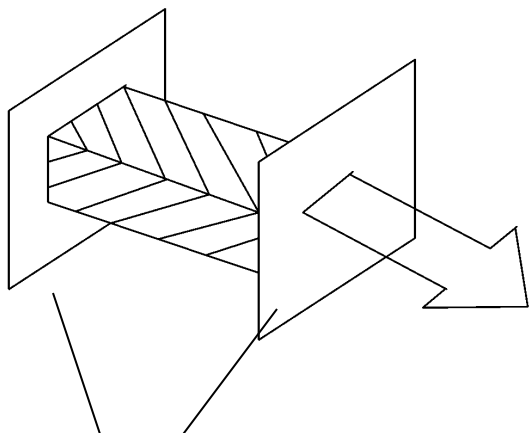


$$E(t) = [A + a(t)] \sin[2\pi f t + \varphi(t)],$$

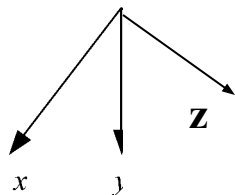
$a(t)$ – колебания амплитуды (шумы амплитудной модуляции); $\varphi(t)$ – колебания частоты (шумы частотной модуляции).

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

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

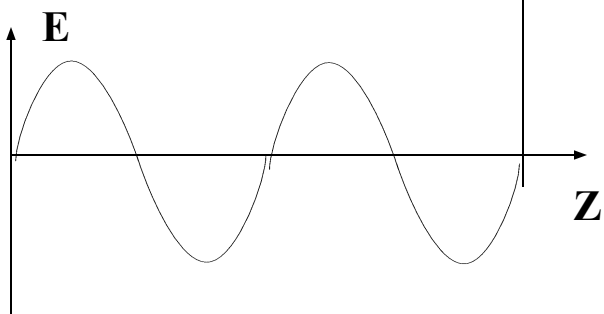
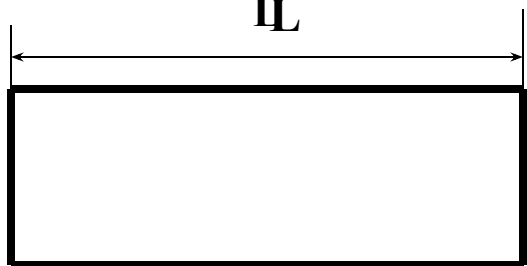
L – длина резонатора

λ_N, f_N – длина и частота стоячей волны в резонаторе

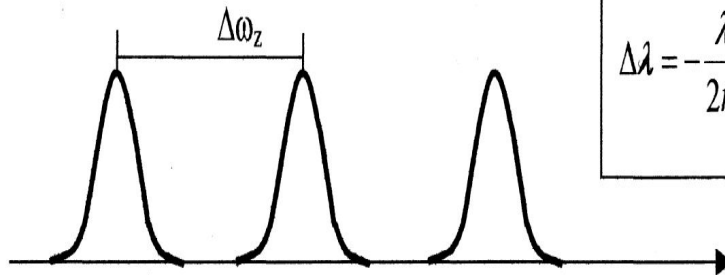
Стабильные условия существуют только для света с длиной волны λ и частотой f_N

Аналогично существуют поперечные моды N_x и N_y

L

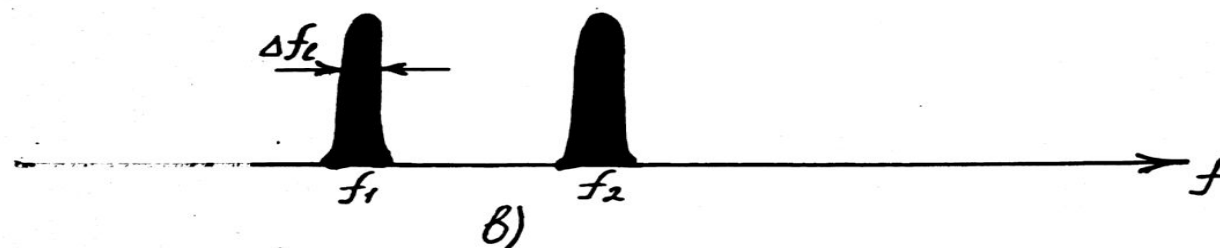
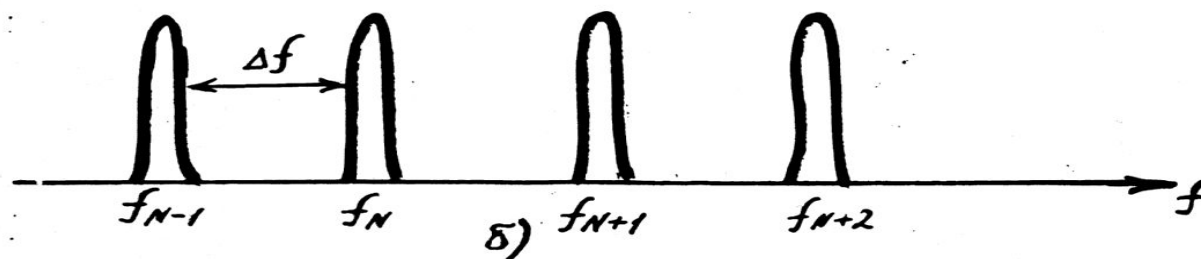
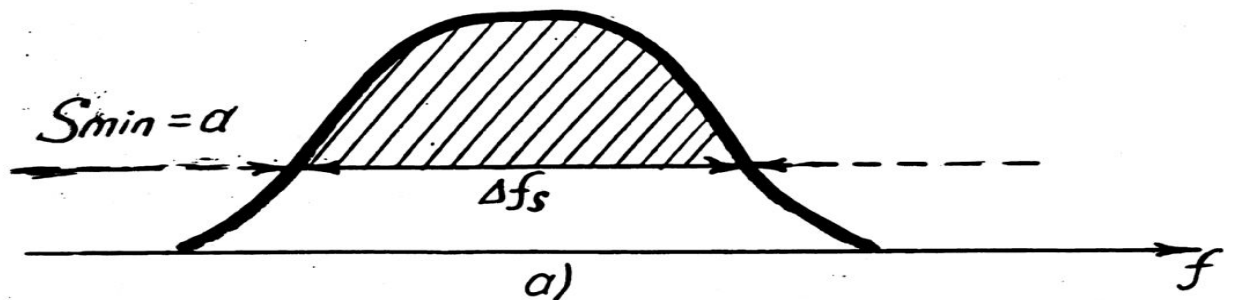
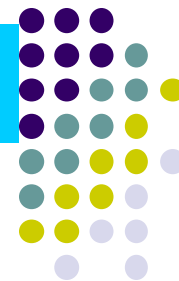


Спектр продольной моды



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

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
$AlGaAsSb$	$AlGaAsSb$	$GaSb$
$InAsSbP$	$InAsSbP$	$InAs$
$PbSnSeTe$	$PbSnSeTe$	$PbTe$

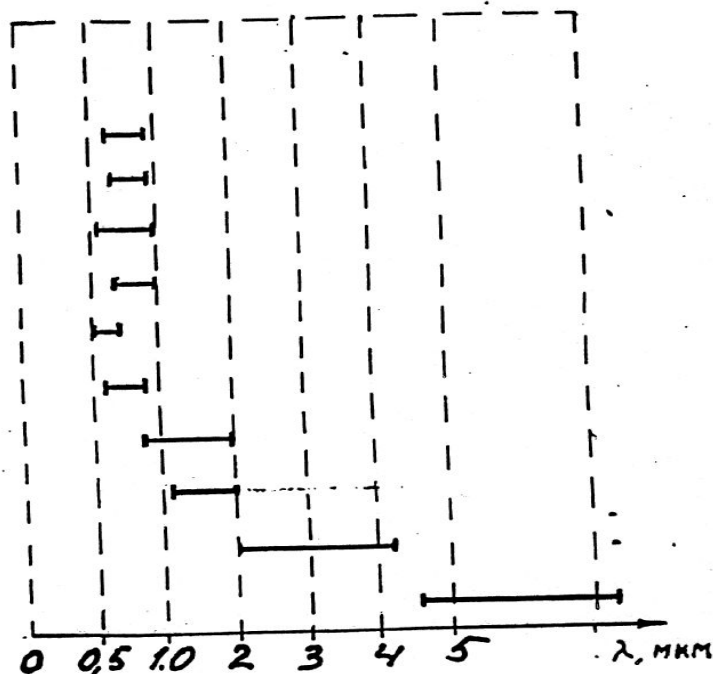


Рис. 3.6

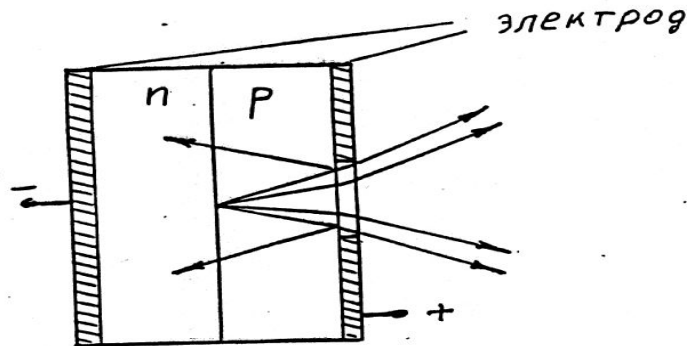
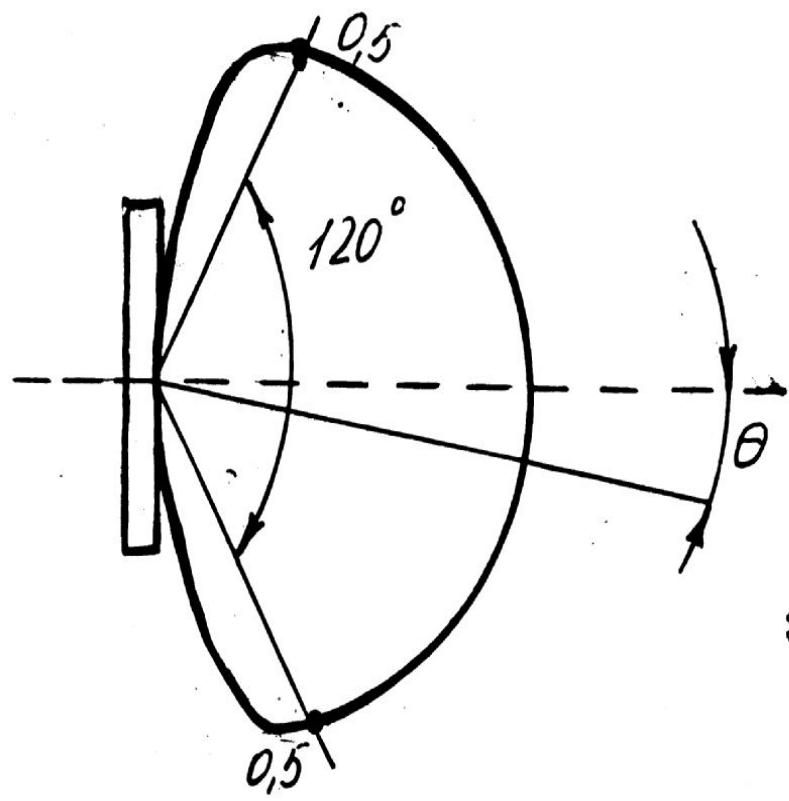


Рис. 3.7



ДИАГРАММА НАПРАВЛЕННОСТИ СВЕТОДИОДА



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

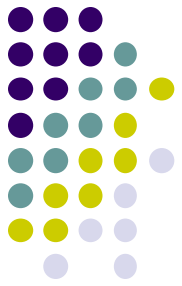
$$\Delta F(O) = \frac{J(\theta)}{J_0} = 120^\circ$$

$$P_0 = \pi J_0$$

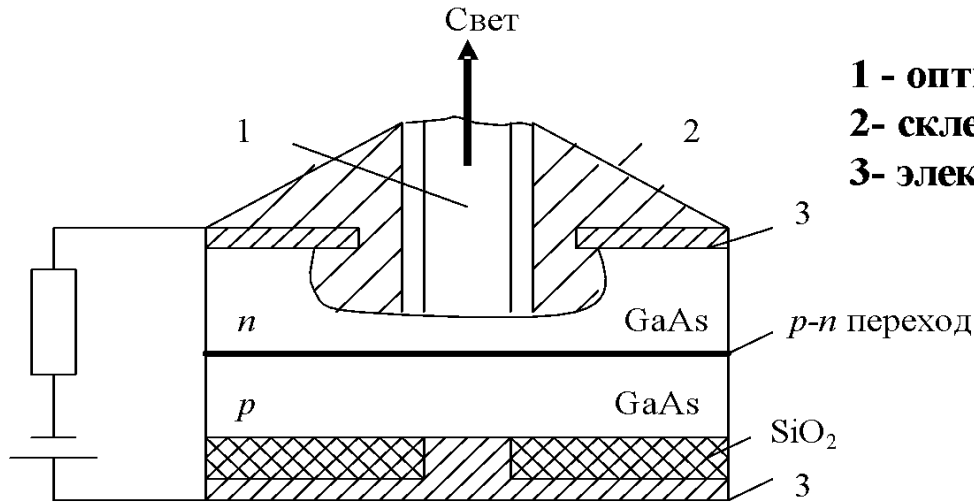
$$P_c = \pi J_0 (NA)^2 = P_0 (NA)^2$$

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

Светоизлучающие диоды.



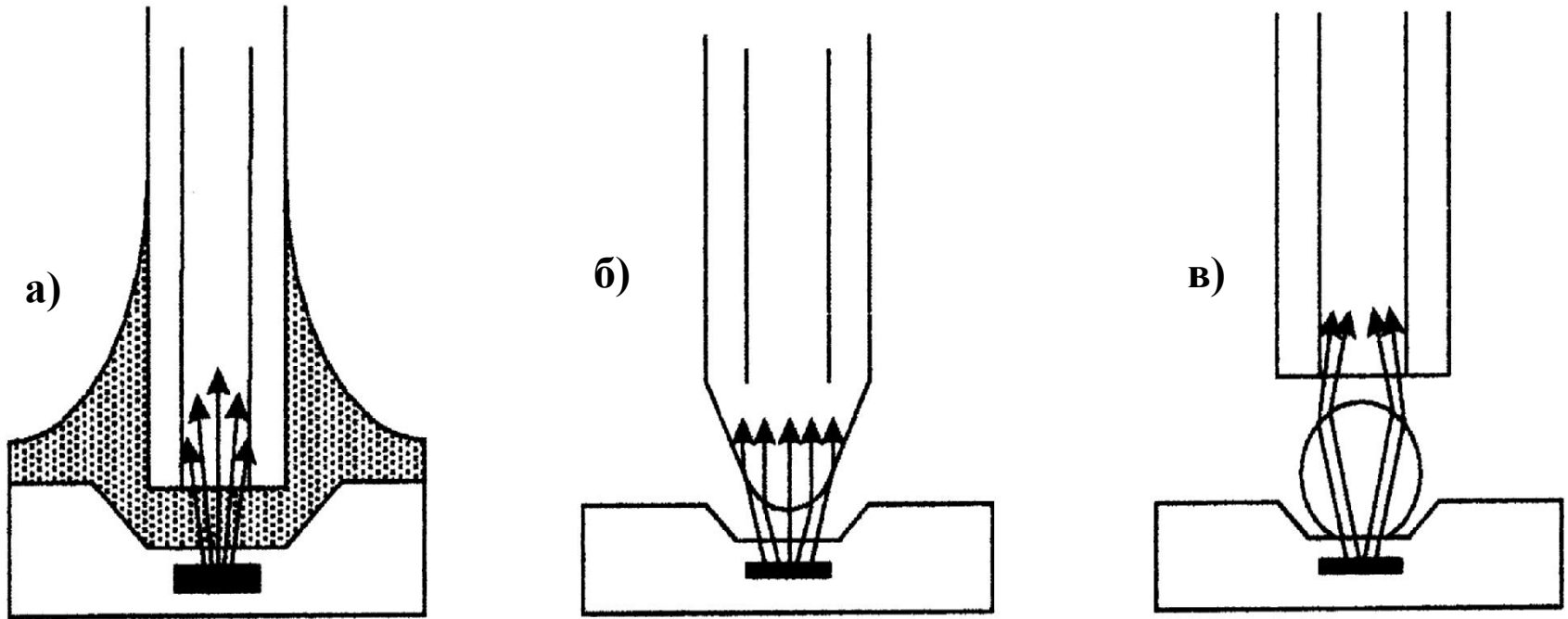
Структура светоизлучающего диода с поверхностным излучением



- 1 - оптическое волокно;
- 2- склеивающий состав;
- 3- электрод.

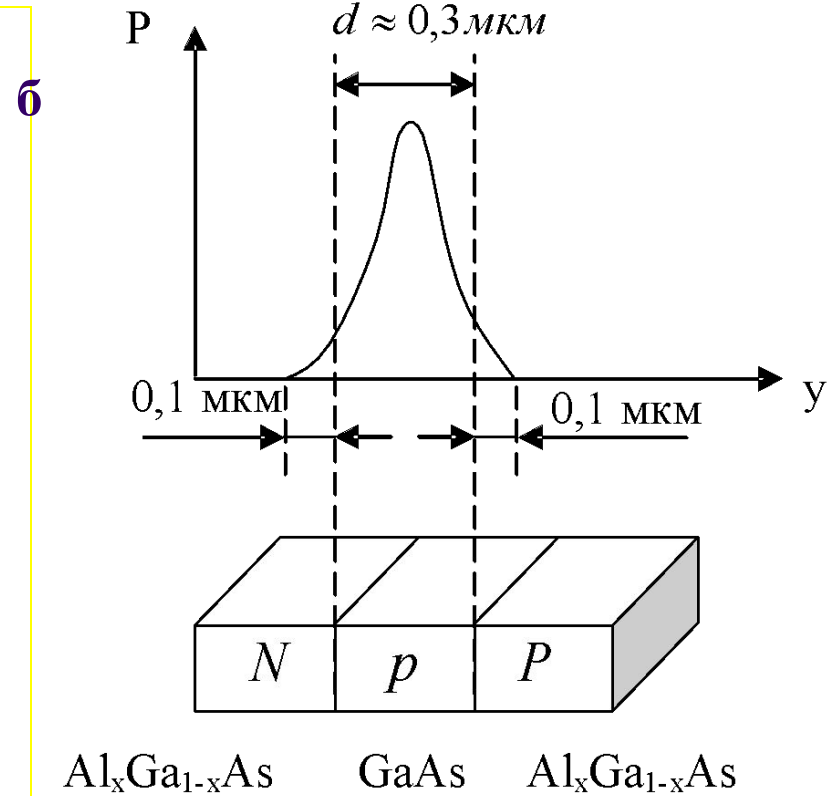
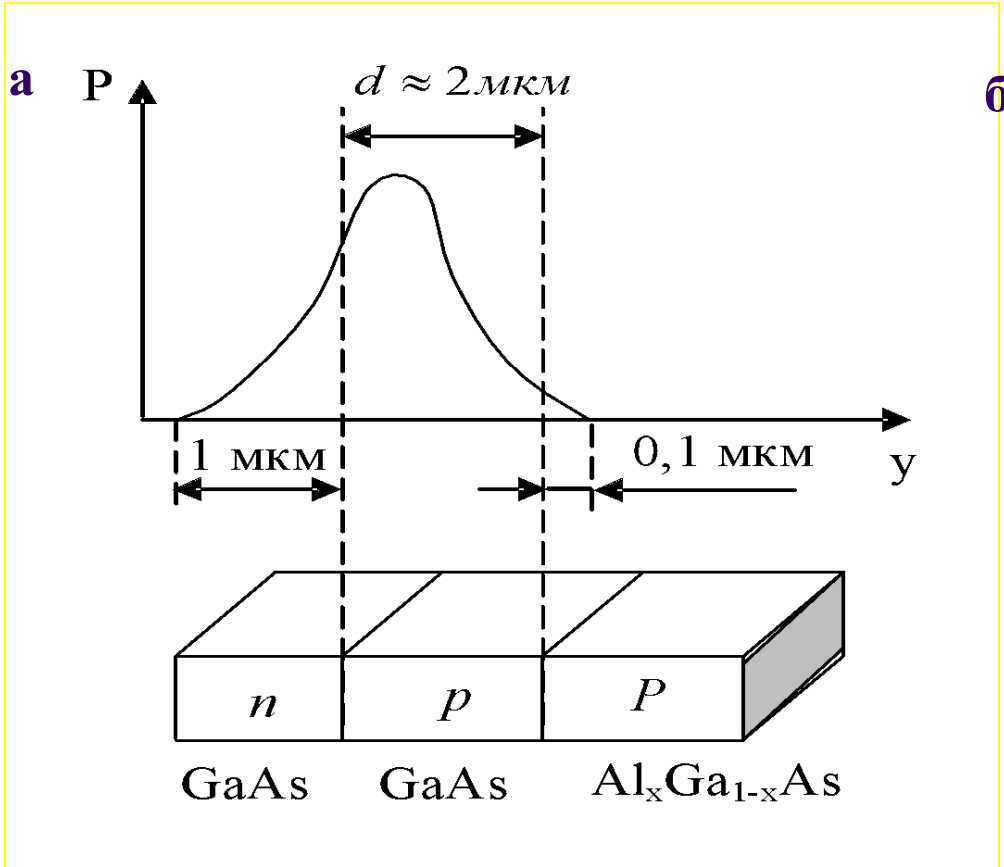
Выше обсуждались р-п - переходы, образованные введением небольшого количества примесей в полупроводниковый материал. Они называются **гомопереходами**.

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

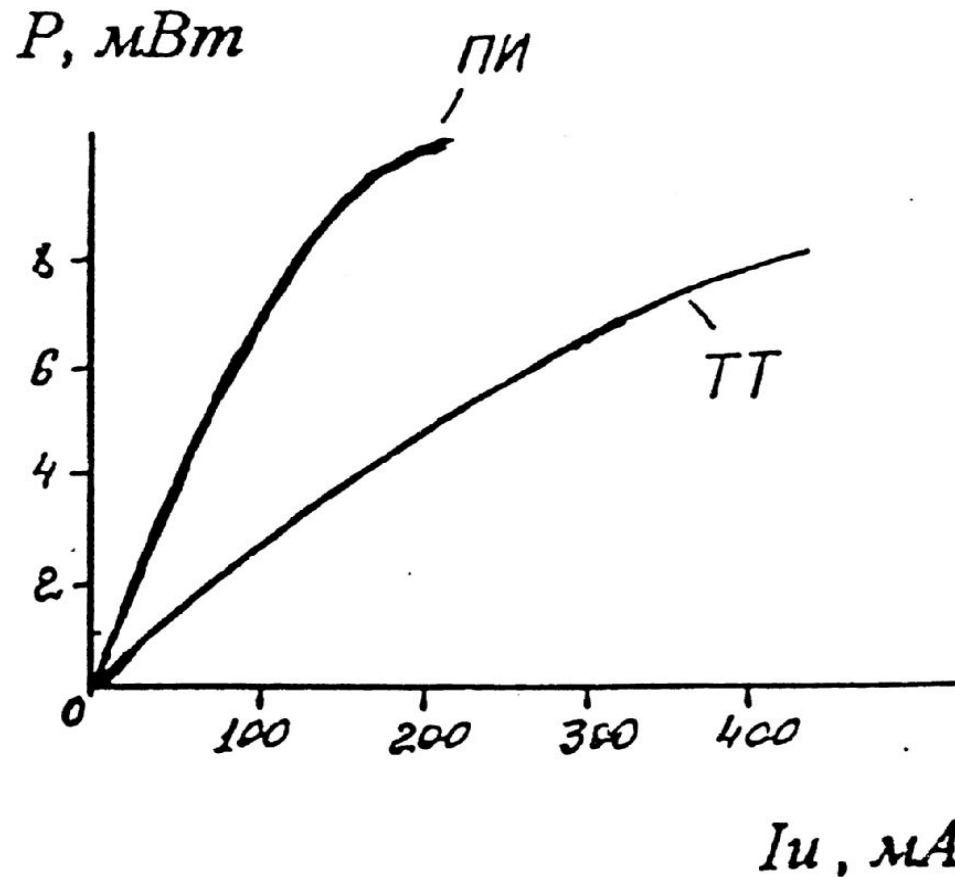
Гетероструктуры с ОГС (а) и ДГС (б)



Характеристики СИД



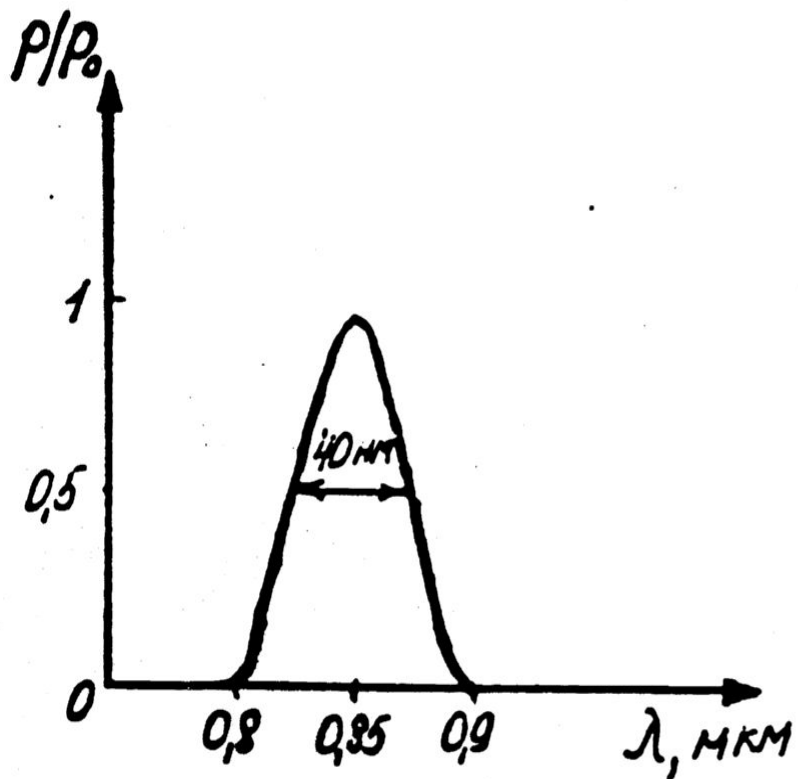
1. $P = f(I_u)$



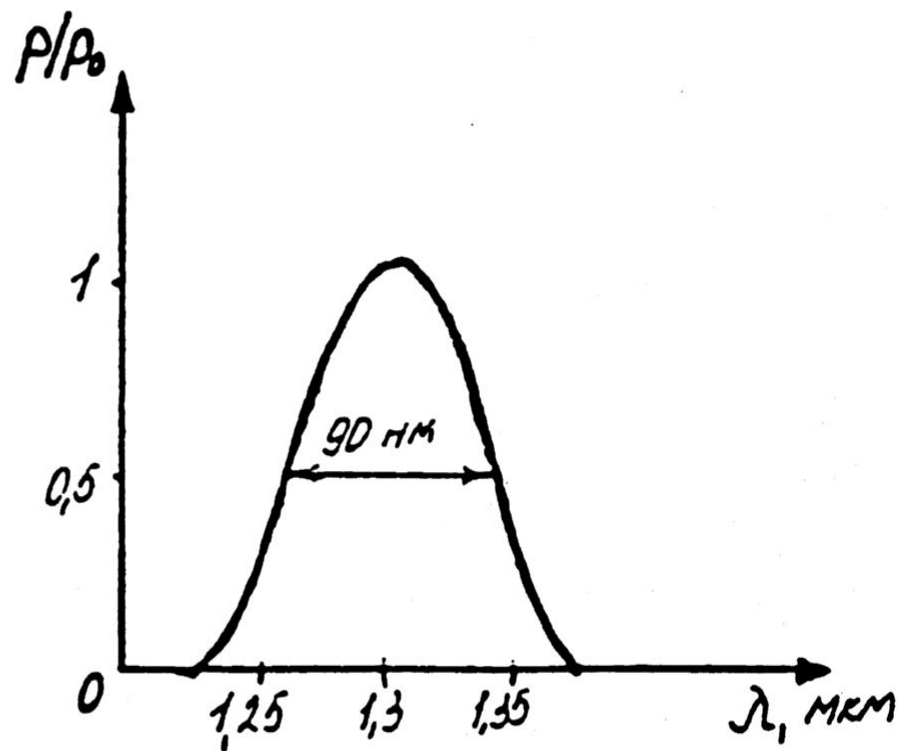
Спектральное распределение СИД



ШИ



ТТ





3. Внутренняя квантовая эффективность

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

$$\eta_{\text{вн}} = \frac{1/\tau_{\text{и}}}{1/\tau_{\text{и}} + 1/\tau_{\text{д}}} = \frac{1}{1 + \tau_{\text{и}}/\tau_{\text{д}}}$$

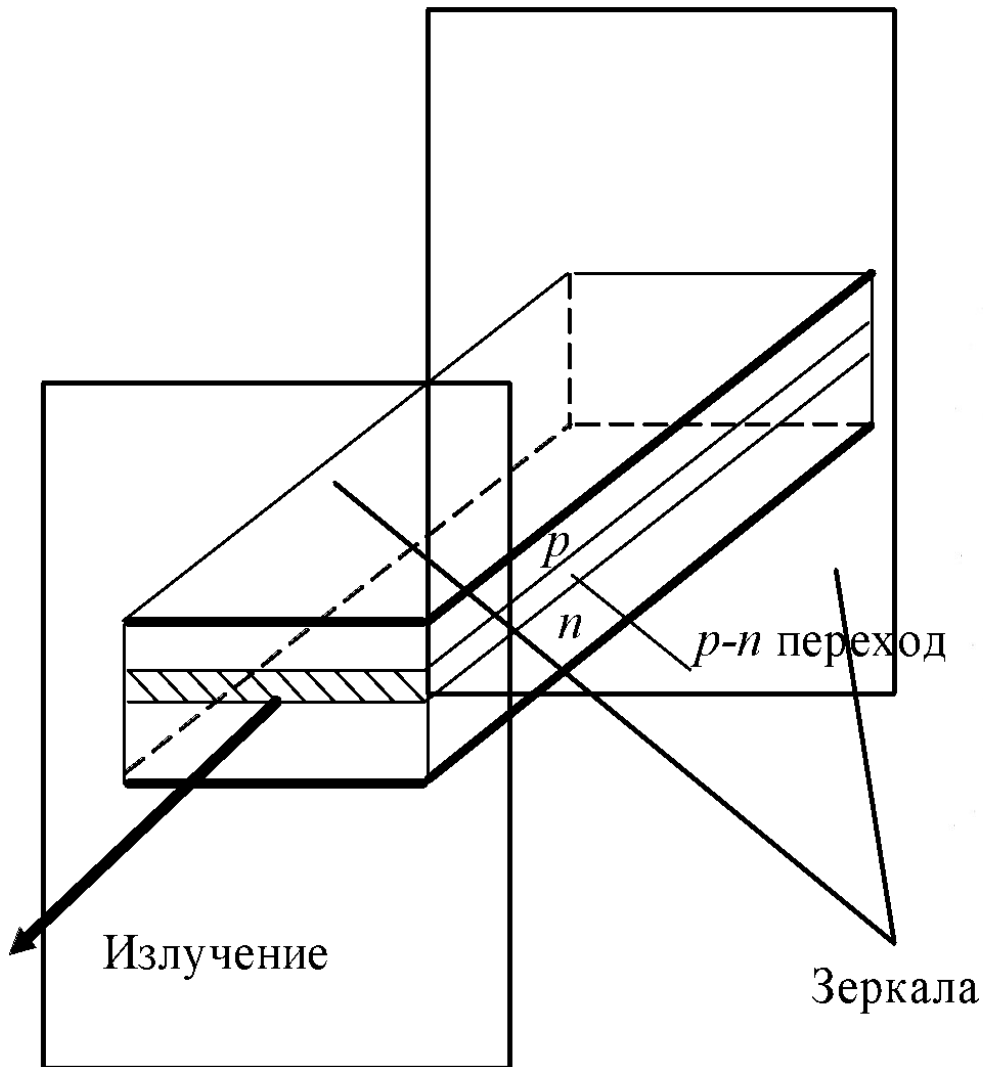
4. Срок службы, надежности

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

$$m = 1 \dots 2$$

$$t_{\text{сл}} \approx 10^5 \div 10^6 \text{ часов}$$

Лазерные диоды

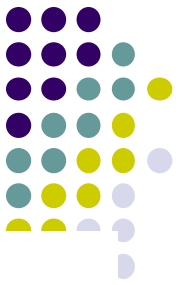


$$S = \alpha + \frac{20}{L} \lg \frac{1}{\sqrt{\rho_1 \rho_2}}$$

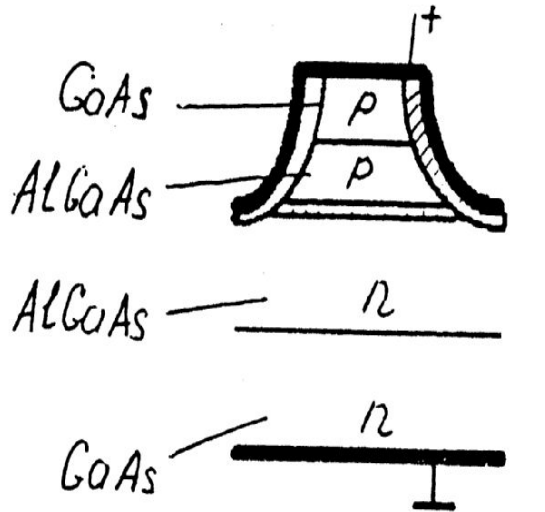
$$I_n = \frac{8\pi \cdot 10^{-4} \cdot q \cdot n^2 \Delta E_g d \delta}{\eta_{вн} \cdot c^2 h^3} \left(d + \frac{20}{L} \lg \frac{1}{\rho} \right)$$

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

Лазеры с полосковой геометрией

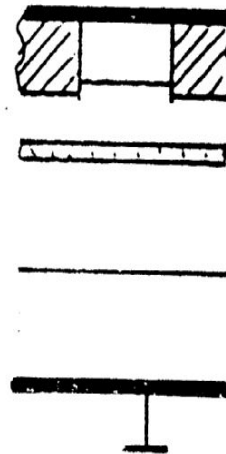


Мезаполосковая структура



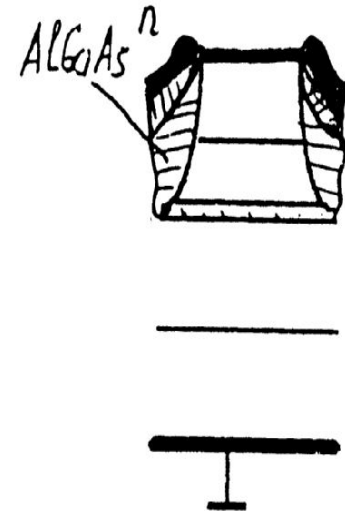
— электрод

ПЛ с протонной бомбардировкой



— изолирующий

ПЛ с погруженной структурой



— n или p GaAs

Характеристики ЛД

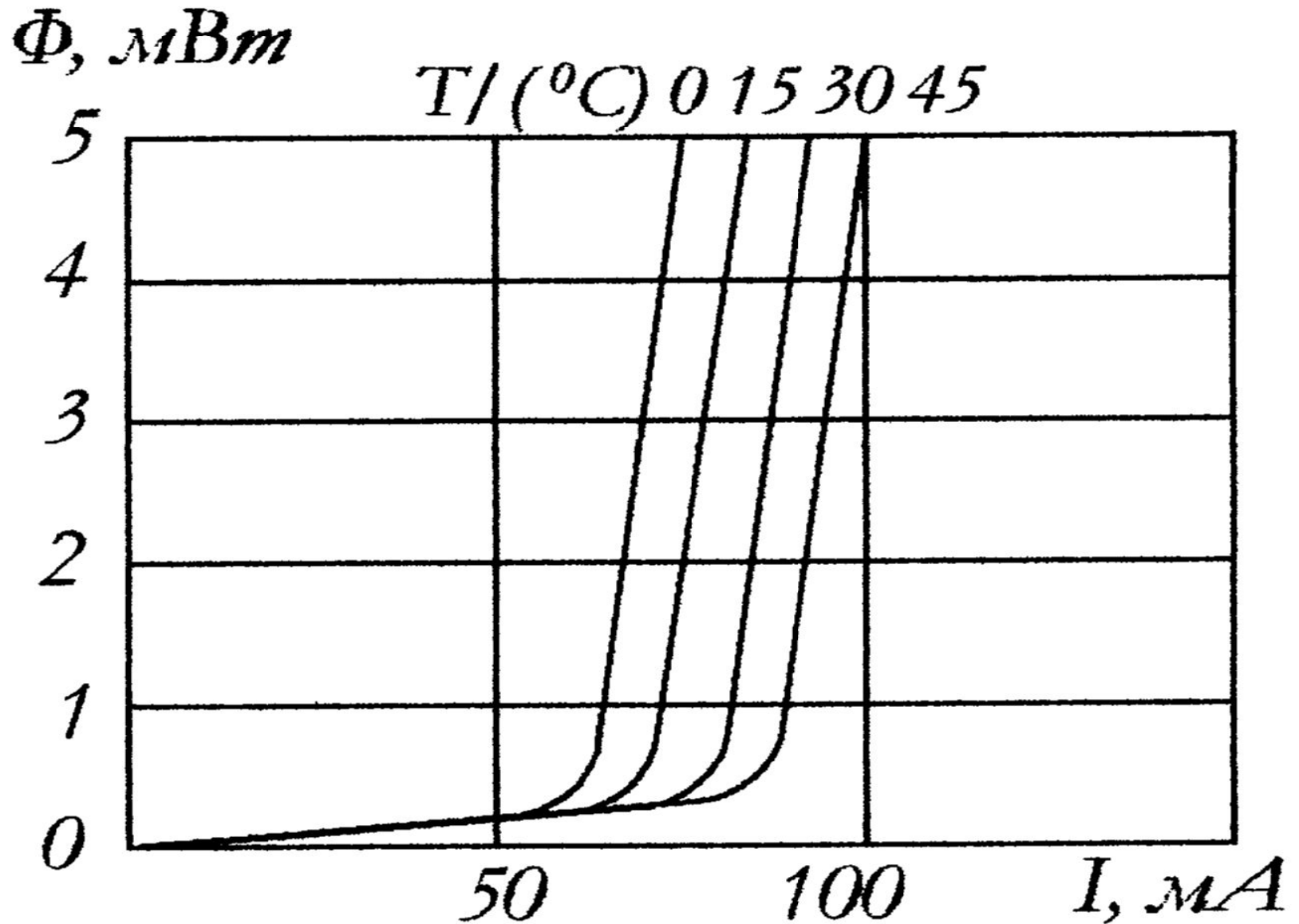
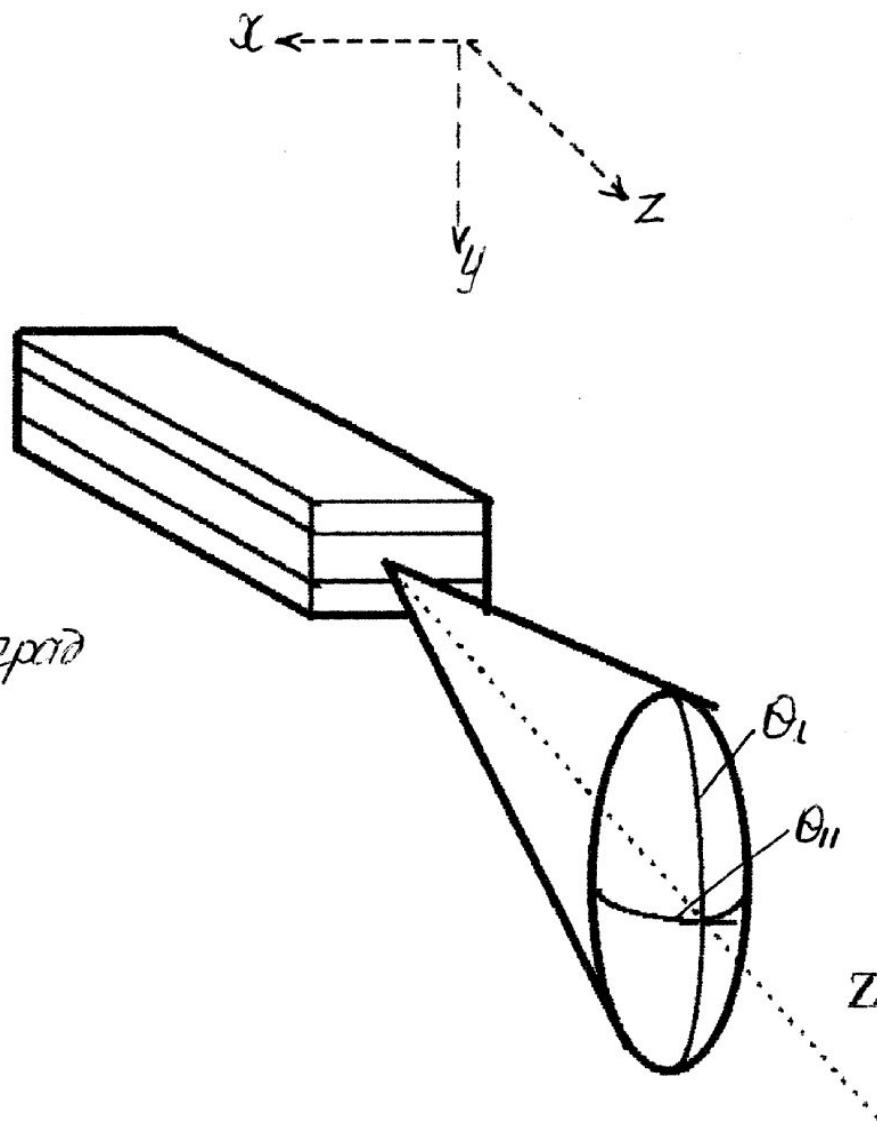
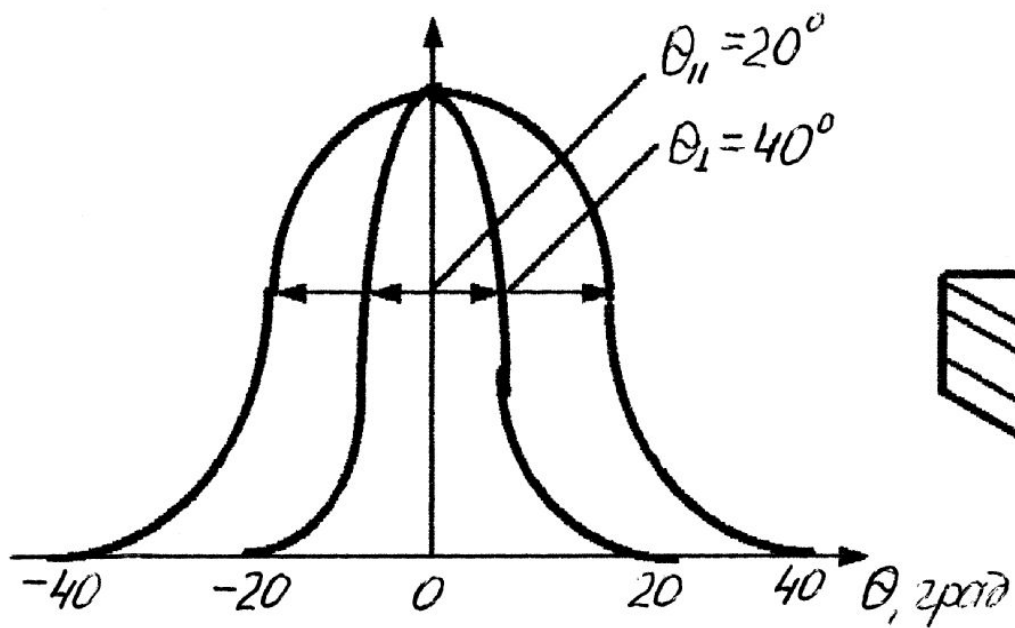
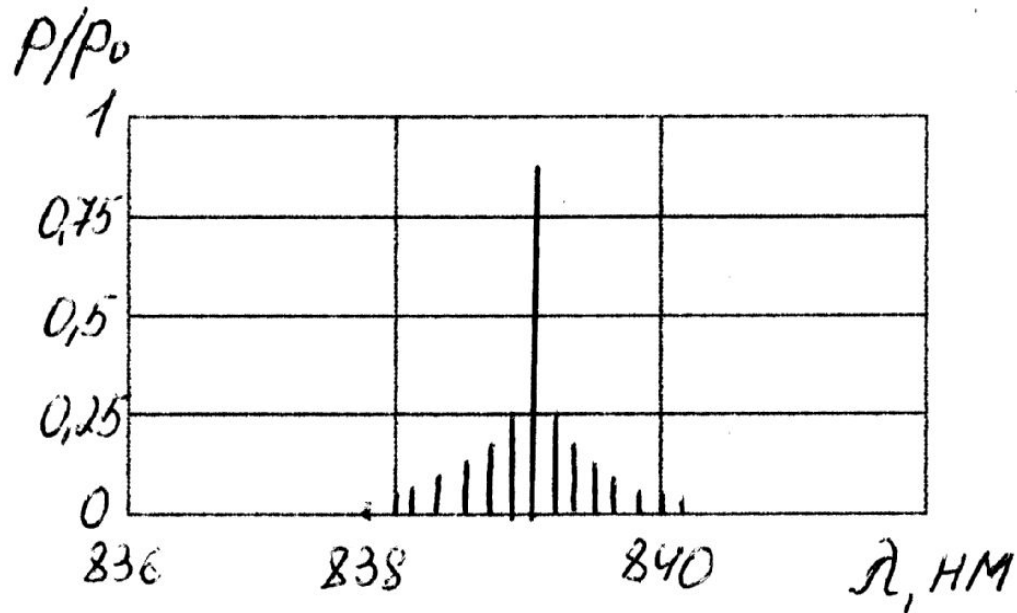


Диаграмма направленности



Спектр излучения лазера

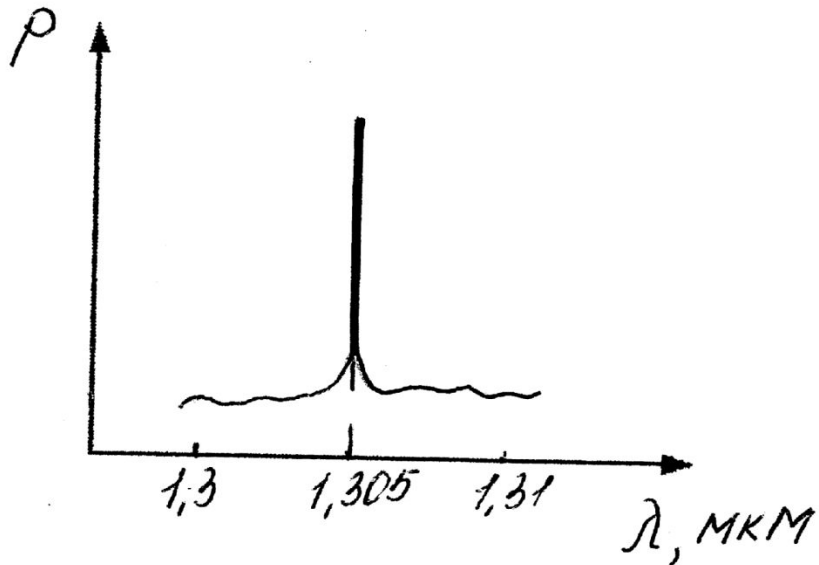
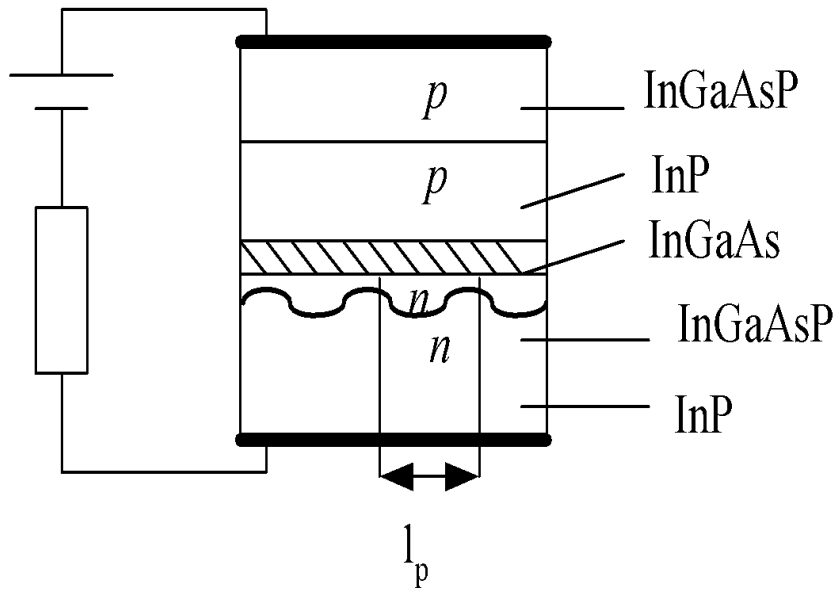


$$N\lambda_N = 2nL, \quad \text{для } N+1, \quad \lambda_{N+1} \rightarrow (N+1)\lambda_{N+1} = 2nL$$

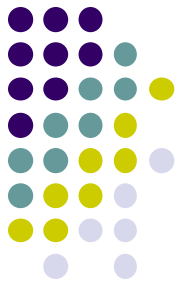
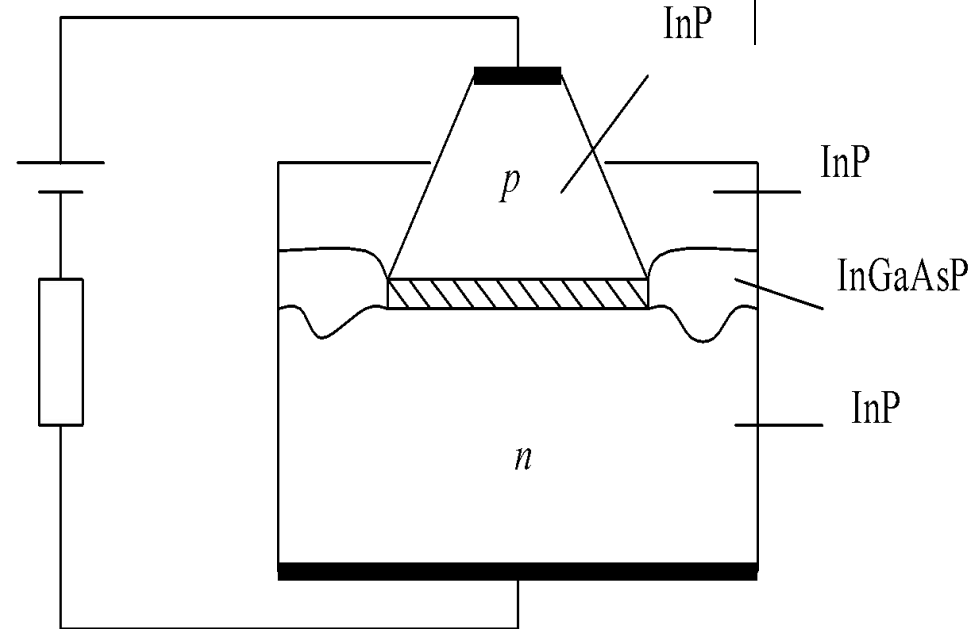
$$\lambda = 0,9 \text{ мкм}, \quad n = 3,6 \text{ и } L = 300 \text{ мкм} \quad \Delta\lambda = 0,4 \text{ нм}$$

Ширина линии излучения < 0,01 нм

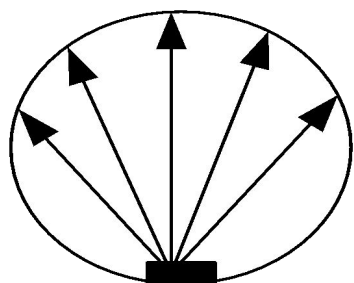
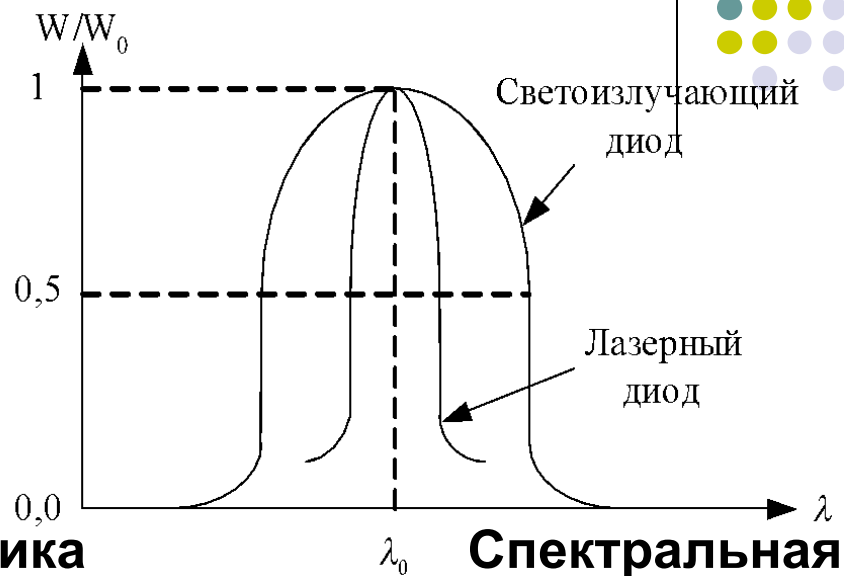
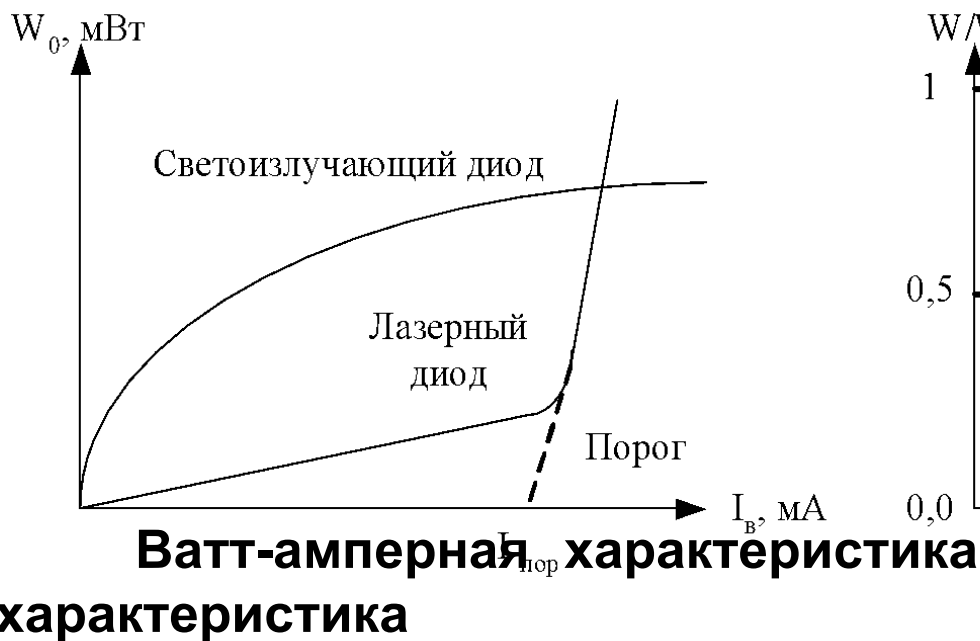
Структура лазера РОС



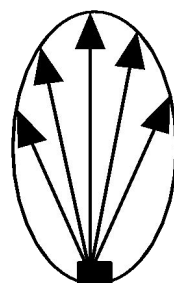
Структура лазера РВО



Основные характеристики СИД, ПЛ(ЛД)



Светоизлучающий диод



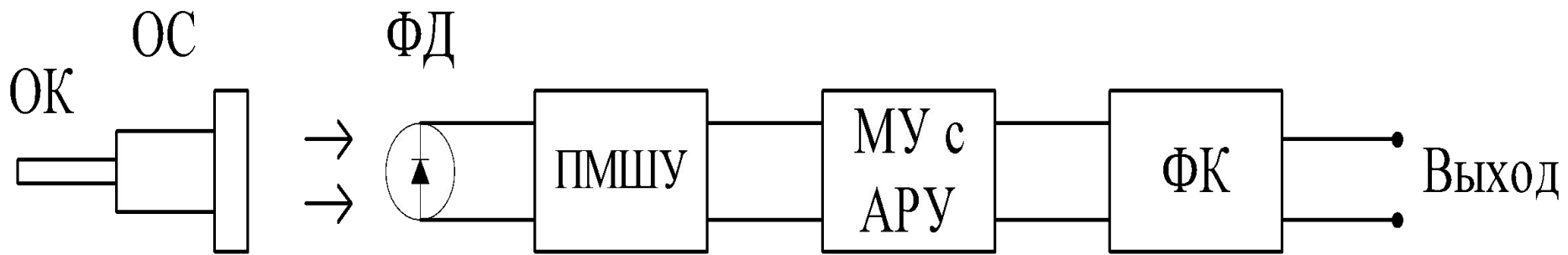
Лазерный диод

Диаграмма направленности источников оптического излучения

Приемные оптические модули



- ОК — оптический кабель; ОС — оптический соединитель; ФД — фотодиод или фотодетектор; ПМШУ — предварительный малошумящий усилитель; МУ с АРУ — мощный усилитель с автоматической регулировкой усиления; ФК — фильтр-корректор.



Фотодетекторы



Базовым элементом оптического приемника ВОСП является **фотодетектор** — оптоэлектронный прибор, преобразующий оптический сигнал в электрический сигнал соответствующей формы.

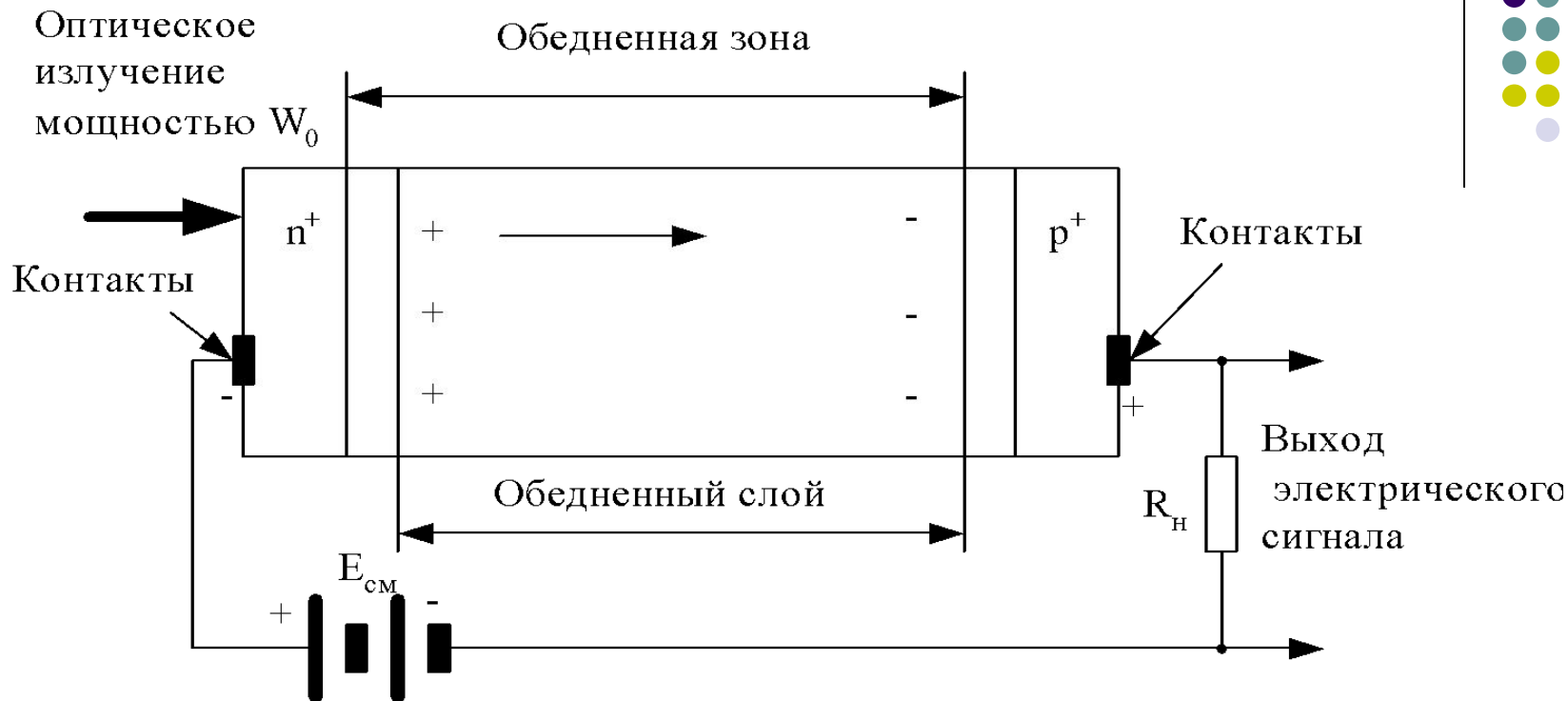
Фотодетектор реализуется на основе полупроводниковых фотодиодов (ФД) с **p-n** обратносмещенными переходами, работающих на принципах внутреннего фотоэффекта.

В технике ВОСП широкое применение находят два типа фотодиодов: **p-i-n** и **лавинный ФД**.

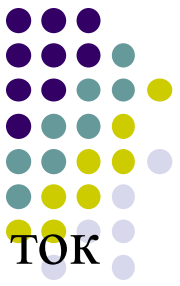
Сущность внутреннего фотоэффекта в полупроводнике заключается в поглощении фототока, энергия которого $hf = hc/\lambda$ более ширины запрещенной зоны материала E_g полупроводникового материала, а длина волны оптического излучения не превышает критического значения $\lambda_{кр} = 1,24/E_g$, и сопровождается переходом электрона из валентной зоны в зону проводимости, а дырок — из зоны проводимости в валентную зону (генерация пар «электрон-дырка»). **Фотоны с энергией, меньшей ширины запрещенной зоны, или длиной волны больше критической, не поглощаются и, следовательно, не происходит генерации пары «электрон-дырка».**

Эффективное поглощение падающего излучения, как правило, связано с эффектом примесного поглощения.

Структурная схема р-і-п-фотодиода



Из сокращенных названий составляющих его слоев: p — positive (положительный), i — intrinsic (внутренний), n — negative (отрицательный). Обедненный i слой такого ФД сделан максимально широким из полупроводникового материала, легированного в такой степени, чтобы не относиться ни к полупроводникам n-типа с электронным видом проводимости, ни к полупроводникам p-типа с дырочкой проводимостью.



Широкий i - слой приводит к увеличению интенсивности поглощения фотонов в обедненном слое. В результате чего падающие фотоны возбуждают ток во внешней цепи более эффективно и с меньшим запаздыванием. Носители, возникающие внутри обедненной зоны, мгновенно сдвигаются в сильном электрическом поле к p^+ и n^+ областям диода.

В результате поглощения кванта света с энергией hf в нагрузке диода R_H протекает импульс тока. Если каждый поглощенный квант рождает электронно-дырочную пару, то число носителей тока N , равное отношению мощности оптического излучения W умноженное на величину носителя q , определит средний ток I_ϕ , протекающий через нагрузку R_H :

$$I_\phi = q \cdot N = q \cdot \frac{W}{h \cdot f}$$

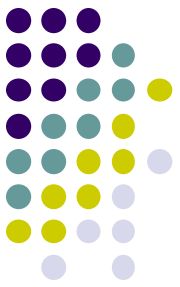
Коэффициент, характеризующий эффективность преобразования фотонов в электрический сигнал η_{ϕ} называется квантовой эффективностью (выходом) фотодетектора. Следовательно, средний фототок, протекающий через нагрузку фотодетектора, будет равен:

$$I_{\phi} = \eta_{\phi} \cdot q \cdot \frac{W}{h \cdot f}$$

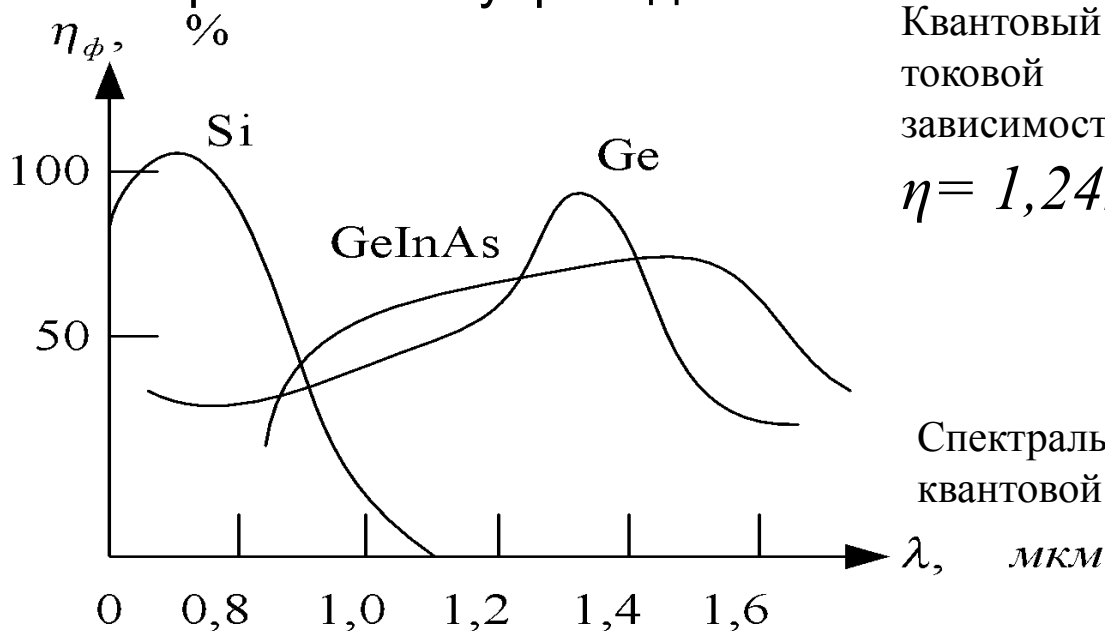
Коэффициент полезного действия фотодетектора, определяемый как отношение среднего значения фототока I_{ϕ} к среднему значению оптической мощности (A/Вт), называется **ТОКОВОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬЮ**:

$$S = \frac{1}{W} = \frac{\eta_{\phi} \cdot q}{h \cdot f}$$

Отсюда следует, что чувствительность оптического приемника тем выше, чем больше квантовый выход η_{ϕ} , т.е. чем больше доля светового потока, поглощаемая в активной зоне фотодиода.



Токовая чувствительность зависит от длины волны падающего излучения. Характер этой зависимости определяется спектральной характеристикой квантового выхода, которая обычно имеет вид плавной кривой с более или менее выраженным максимумом и определяется материалом полупроводника



Квантовый выход фотодиода однозначно связан с токовой чувствительностью следующей зависимостью:

$$\eta = 1,24S / \lambda, \text{ где } \lambda \text{ — длина волны, мкм.}$$

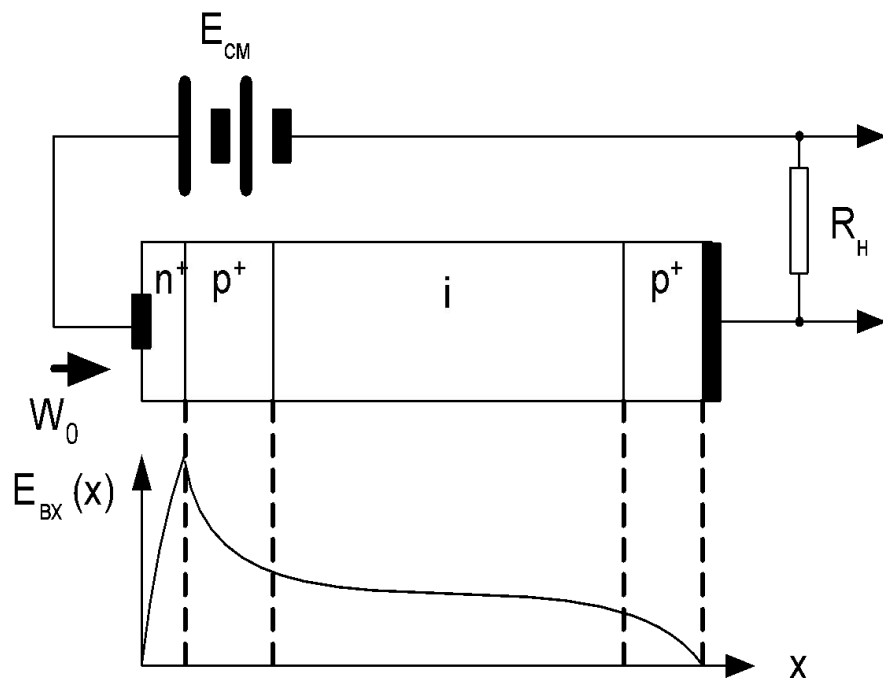
Спектральная характеристика квантового выхода — квантовой эффективности

Конструктивно p-i-n — ФД выполняется так, чтобы максимально уменьшить долю поглощения излучения вне i-слоя. С этой целью переход формируется у самой поверхности кристалла. Следовательно, постоянная времени такого ФД определяется временем перехода носителей заряда через обедненный слой в сильном электрическом поле.

Лавинные фотодиоды (ЛФД)



В фотодиодах $p-i-n$ — типа каждый поглощенный фотон в идеале приводит к образованию одной пары «электрон-дырка», которая приводит к генерации тока во внешней цепи. Квантовую эффективность ФД можно повысить путем использования лавинного усиления (умножения), реализуемого в структуре, называемой лавинным фотодиодом (ЛФД), где один фотон порождает M электронов.



Для создания условий ударной ионизации в структуре фотодиода необходимо создать сильное электрическое поле. Такое поле создается добавлением в структуру $p-i-n$ фотодиода дополнительного $n-p$ — перехода, усиленное обратным смещением,

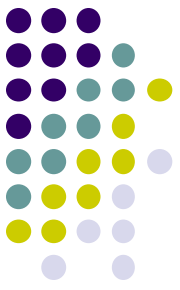
В основе работы ЛФД лежит процесс ударной ионизации в сильном электрическом поле, т.е. образования положительных и отрицательных ионов и свободных электронов из электрически нейтральных молекул и атомов полупроводника. При этом электроны в зоне проводимости могут приобрести кинетическую энергию, большую, чем ширина запрещенной зоны, и «выбивать» электроны из валентной зоны. В валентной зоне образуются дырки, в зоне проводимости вместо каждого «быстрого» электрона появляются два «медленных», которые, ускоряясь в сильном электрическом поле, становятся «быстрыми» и вызывают повторную ударную ионизацию. Вероятность ударной ионизации возрастает с напряженностью электрического поля (или ростом обратного смещающего напряжения) Отметим, что при некоторой напряженности поля ударная ионизация приводит к резкому увеличению плотности тока, т.е. к электрическому пробое полупроводника.



Лавинное усиление или лавинное умножение



- При воздействии оптического излучения мощностью W на i -слой образуются пары «электрон-дырка», называемые **первоначальными носителями**. Затем происходит направленное движение носителей к соответствующим полюсам батареи смещения. При попадании свободных электронов из i -слоя в p -слой их ускорение становится более ощутимым из-за высокой напряженности электрического поля n - p — перехода. Ускоряясь в зоне проводимости p -слоя, такие «быстрые» электроны накапливают кинетическую энергию достаточную, чтобы **«выбить» (возбудить) два «медленных» электрона из валентной зоны в зону проводимости**. В результате появляются свободные носители, называемые **вторичными**. В зоне проводимости p -слоя происходит их повторное ускорение до получения кинетической энергии, соответствующей «быстрому» электрону, который снова порождает ударной ионизацией пару «медленных» электронов из валентной зоны. Этот процесс называется **лавинным усилением или лавинным умножением**.



Условия лавинного умножения достигаются увеличением напряжения обратного смещения до значения, чуть меньше напряжения пробоя полупроводника, так чтобы на n^+p — переходе установилось очень сильное поле (с напряженностью не менее 10 В/см). Электроны и дырки, двигаясь в таком поле, приобретают значительную кинетическую энергию, необходимую для образования вторичных носителей путем ударной ионизации. Энергия получаемых при этом электронов, обеспечивает их перенос из валентной зоны в зону проводимости. Процесс лавинного умножения (усиления) ЛФД оценивается коэффициентом умножения M , который приближенно может быть представлен эмпирической формулой:

$$M = \frac{1}{1 - \left(\frac{U_{см}}{U_{пр}}\right)^n}$$

где $U_{см}$ — напряжение обратного смещения; $U_{пр}$ — напряжения пробоя; величина $n = 2...6$ и определяется материалом проводника и конструкцией фотодиода. Величина фототока через нагрузку R_n для ЛФД определяется по формуле

$$I_{\phi} = 0,8 \cdot \lambda \cdot \eta_{\phi} \cdot M \cdot W$$

Лавинный эффект приводит к увеличению **темнового тока** ЛФД

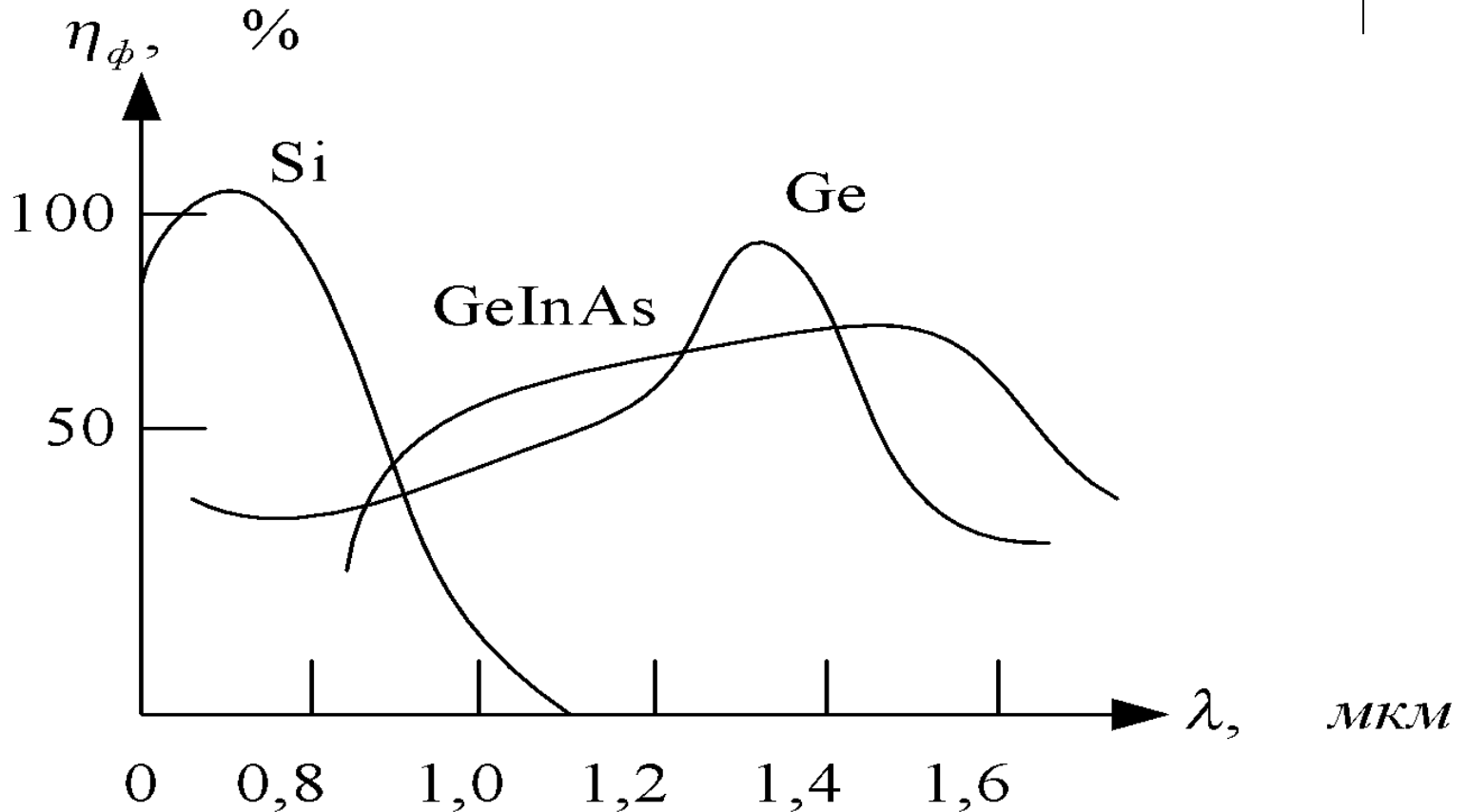
в **M** раз по сравнению с темновым током $p-i-n$ — фотодиода.

При **$U_{см} = U_{пр}$** происходит резкое увеличение коэффициента M , которое может принимать высокие значения. При низком напряжении **$U_{см}$ ЛФД работает как $p-i-n$ -фотодиод без усиления (умножения)**. Существует пороговое напряжение U_D , для получения лавинного процесса ударной ионизации. Выше этого порога ЛФД будет генерировать ток без наличия возбуждающего оптического излучения. Отметим, что коэффициент умножения сильно зависит от температуры, что является серьезным недостатком ЛФД.

Типовой компромисс между величиной умножения и стабильностью работы ЛФД достигается при напряжении смещения, равном **$0,95 U_{пр}$** .

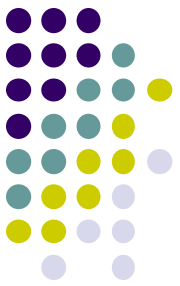


P-i-n- фотодиоды. Лавинные фотодиоды (ЛФД). Основные характеристики.



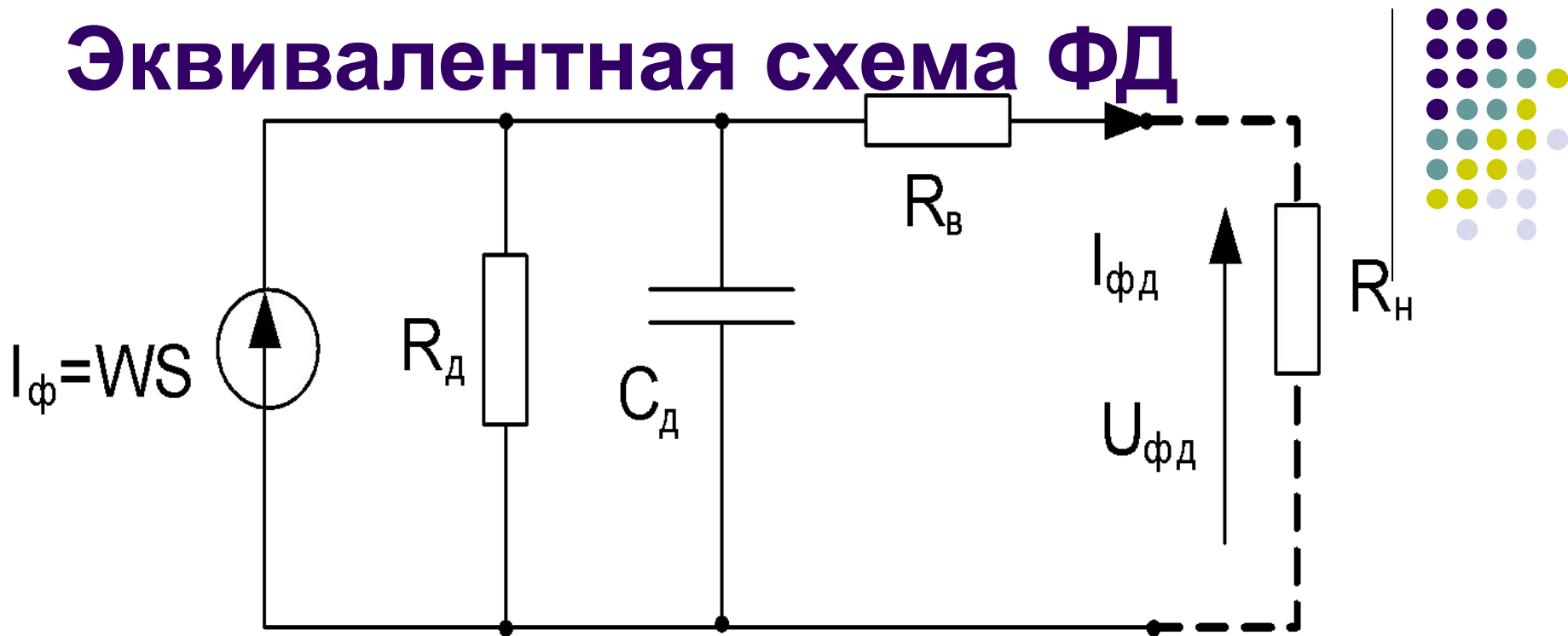
Спектральная характеристика квантового выхода – квантовой эффективности

Шумы фотодиодов



- 1. Дробовые шумы**
- 2. Темновые шумы**
- 3. Тепловые шумы (или шумы Джонсона-Найквиста)**

Эквивалентная схема ФД

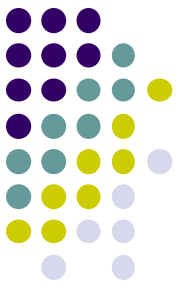


$R_\text{д}$ — дифференциальное сопротивление обратносмещенного перехода фотодиода; обычно это сопротивление настолько велико, что его шунтирующим действием можно пренебречь;

$R_\text{в}$ — внутреннее сопротивление диода, состоящее из сопротивления необедненной зоны диода, контактного сопротивления и общего сопротивления, величина этого сопротивления не превышает нескольких десятков Ом;

$C_\text{д}$ — емкость обратносмещенного перехода, зависящая от его площади;

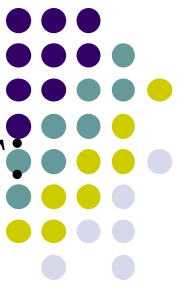
$R_\text{н}$ — сопротивление нагрузки ФД



- Можно показать, что для эквивалентной схемы ширина полосы пропускания или предельная частота равна ,

$$\Delta F_{\phi} = \frac{1}{2\pi \cdot C_{\phi} \cdot R_n}$$

здесь R_n - сопротивление нагрузки ФД (как правило, входное сопротивление предварительного малошумящего усилителя фототока).



- В состав тока $I_{\phi\partial}$ на выходе схемы входят фототок I_{ϕ} , темновой ток I_m , а также токи шумов различного происхождения, являющиеся естественным ограничением чувствительности фотодиодов.

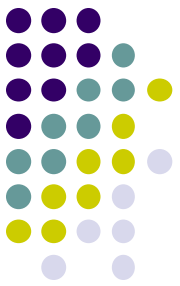
Среднеквадратическое значение тока фотодиода определяется следующей формулой:

$$I_{\phi}^2 = 2 \cdot (W_{oc} \cdot S)^2 \cdot M_2 = 2 \cdot I_{\phi}^2 \cdot M^2$$

Дробовые шумы



Обусловленные дискретной природой фотонов и генерируемых ими пар «электрон-дырка». Фототок не является непрерывным и однородным потоком, а представляет поток отдельных дискретных электронов. Фототок флуктуирует в зависимости от того, насколько много или мало пар «электрон-дырка» возникает в данный момент времени. Дробовые шумы присутствуют и тогда, когда свет не падает на фотодиод. Даже в отсутствие оптического сигнала малые флуктуации фототока генерируются за счет темнового тока и температурных колебаний,



- Среднеквадратическое значение тока дробовых шумов (дробный шум) фотодиода равно: ,

$$I_{\text{ш}}^2 = 2 \cdot q \cdot I_{\text{ф}} \cdot M^2 \cdot F(M) \cdot \Delta F_{\text{ф}}$$

- где q — заряд электрона; $F(M)$ — коэффициент избыточного шума лавинного умножения (усиления), учитывающий увеличение дробовых шумов ЛФД из-за нерегулярного характера процесса умножения; для некоторых типов ЛФД коэффициент $F(M)$ вблизи напряжения пробоя может быть представлен в форме:

$$F(M) = M^x$$

где показатель степени x для кремниевых ЛФД лежит в пределах $0,2 \dots 0,5$ и для германиевых — $0,9 \dots 1$, для ЛФД на основе гибридного соединения вида InGaAs — $0,7 \dots 0,8$; $\Delta F_{\text{ф}}$ — ширина полосы пропускания фотодиода.

Темновой ток

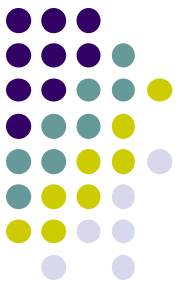


- Среднеквадратическое значение темнового тока определяется по формуле:

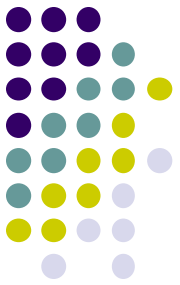
$$I_m^2 = 2 \cdot q \cdot I_m \cdot M^2 \cdot F(M) \cdot \Delta F_\phi$$

- Здесь: I_m — среднее значение темнового тока; его величина для кремниевых р-і-п — фотодиодов лежит в пределах $(1...8)10$ А, а для германиевых — на два порядка выше. Темновой ток возрастает примерно на 10% с ростом температуры на 1°C .

Тепловые шумы (или шумы Джонсона-Найквиста)



- обусловленных флуктуациями отдельных электронов в проводнике, создающих на его концах напряжение случайного характера. Электроны в пространстве между электродами фотодиода ведут себя непостоянно. Их тепловая энергия позволяет им случайным образом смещаться. В каждый момент времени суммарный поток случайного движения электронов может быть направлен к одному либо к другому электроду. Таким образом, появляется постоянно меняющийся случайный ток. Он накладывается на полезный сигнал и изменяет его.



- Среднеквадратическое значение тока тепловых шумов определяется выражением:

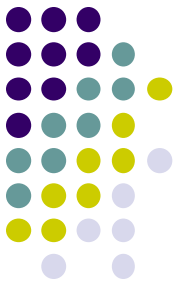
$$I_{\text{шш}}^2 = \frac{4KT\Delta F_{\phi}}{R_n}$$

- где $K=1,38 \times 10^{-23}$ Дж/К — постоянная Больцмана;
- T — абсолютная температура по шкале Кельвина; Дж/К
- F_{ϕ} — ширина полосы пропускания фотодиода (фотодетектора);
- R_n — сопротивление нагрузки.

Среднеквадратическое значение суммарных шумов (полного шума) на выходе фотодетектора определяется суммой вида .

$$I_{\text{ш}}^2 = I_{\text{др}}^2 + I_{\text{т}}^2 + I_{\text{шш}}^2$$

Помехозащищенность



Помехозащищенность полезного электрического сигнала от полного шума на выходе фотодетектора определяется отношением сигнал — шум, которое можно представить в виде

$$A_{\text{ЭШ}} = 10 \lg \frac{W_c}{W_{\text{ш}}} \quad A_{\text{ЭШ}} = \frac{W_c}{W_{\text{ш}}} = \frac{I_{\phi}^2}{I_{\text{ш}}^2} = \frac{2 \cdot I_{\phi}^2 \cdot M^2}{2 \cdot q \cdot M^2 \cdot F(M) \cdot \Delta F_{\phi} (I_{\text{дп}}^2 + I_m^2) + 4KT \cdot \Delta F_{\phi}}$$

где W_c — мощность фототока на единичном сопротивлении нагрузки $R_n = 1 \text{ Ом}$;

$W_{\text{ш}}$ — полная мощность шумов на единичном сопротивлении нагрузки