

Повышение эффективности СТЭЛСС.

ВРЕМЕННЫЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ КАБЕЛЬНЫЕ ВСТАВКИ (ВОКВ)



И вот здесь начинается самое интересное. Если первые два параметра в структуре времени восстановления, могут быть определены очень быстро в результате постоянного мониторинга ВОЛС, то вторые два зависят от того, сколько ремонтных бригад находится в распоряжении, какими приборами и инструментом они оборудованы, на чем поедут к месту повреждения, и доедут ли туда вообще, а это всё, затраты на эксплуатацию, которые должны быть соизмеримы с теми доходами, которые приносит эта ВОЛС.

ВОКВ для линий связи на металлических кабелях



- развертывание временных кабельных вставок на длине усилительных или регенерационных участков;
- проектирование комбинированных линий связи с включением в состав реконструируемой линии на металлическом кабеле, постоянной волоконно-оптической кабельной вставки;
- резервирование линейных трактов, организованных по металлическим кабелям связи, по проходящим, как бы параллельно, волоконно-оптическим линиям.

ВОКВ для линий связи на волоконно-оптических кабелях



- **короткая ВОКВ**

протяженность элемента вставки не более 250 - 300 м, что позволяет выполнить развертывание вставки без использования каких-либо механизмов, т.е. вручную, что особенно важно в условиях сложнопереесеченной местности;

- **многоэлементная ВОКВ**

наиболее широко разлекрамированная представляет из себя комплект из нескольких последовательно соединяемых элементов;

- **одноэлементная ВОКВ**

представляет из себя один, максимум два элемента, обеспечивающих перекрытие всей строительной длины магистрального ВОК.

Основные требования



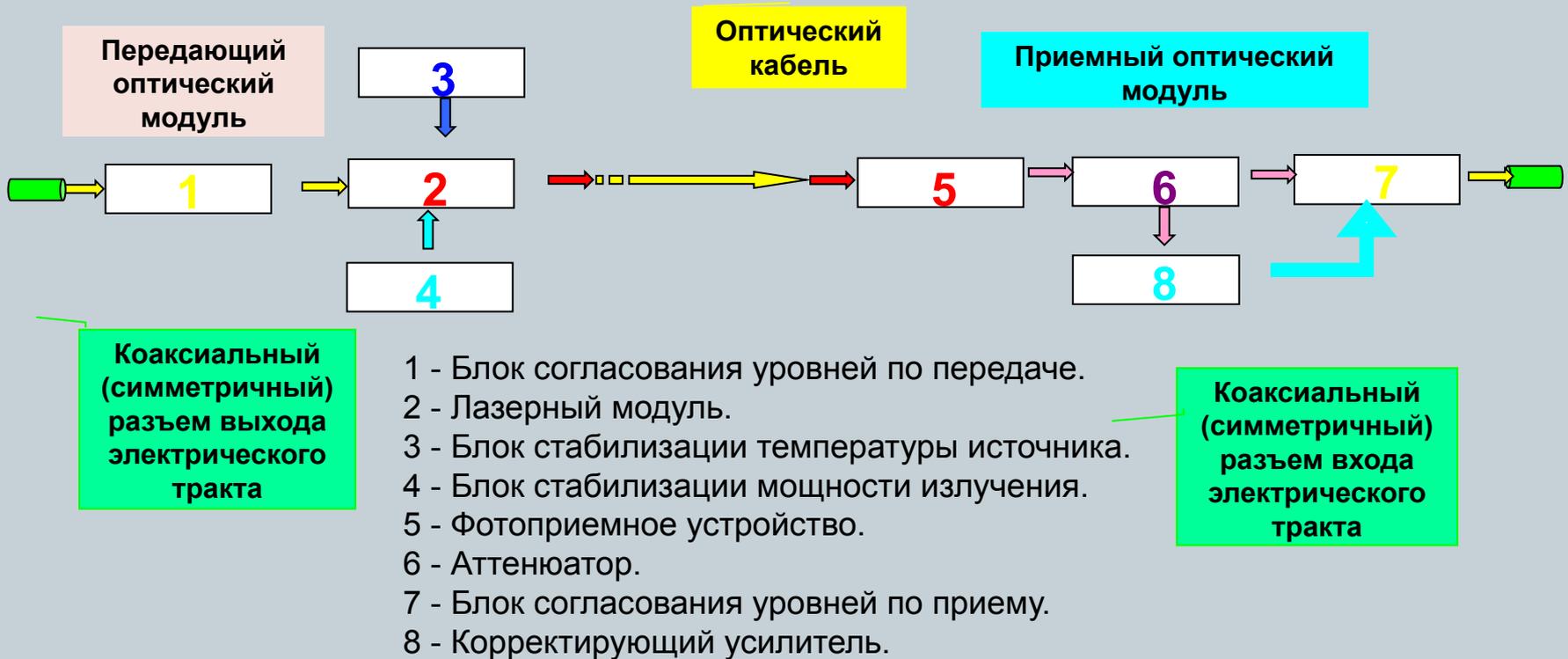
- многократное использование вставки – большое число циклов развертывания;
- возможность быстрого подключения к магистральному кабелю;
- возможность развертывания вставки в сложных условиях пересеченной местности при наличии различного рода переходов через автомобильные и железные дороги, реки, овраги и пр.;
- обеспечение работоспособности вставки в течение необходимого и достаточного времени на проведение требуемых ремонтно-восстановительных работ;
- сохранение всех характеристик тракта, на котором используется вставка, в пределах требуемых нормами значений.

ВОКВ для линейных трактов, организованных по металлическим кабелям.



Временные волоконно-оптические кабельные вставки (ВОКВ), предназначенные для развертывания на усилительном или регенерационном участке представляют из себя совокупность линейной части и активного оборудования, в качестве которого выступают так называемые электро-оптические модемы (ЭОМ). Они выполняют функцию преобразования линейного сигнала АСП, ЦСП в оптический диапазон, и обратно. Эти ВОКВ могут применяться для проведения планово-профилактических и аварийно-восстановительных работ на линейных трактах как аналоговых систем передачи (которых еще очень много на сети), так и цифровых.

Структура ВОКВ



Структурная схема использования ЭОМ в линейном тракте (одно направление передачи).

Основные вопросы применения ВОКВ.



ВОКВ целесообразно использовать на следующих трактах, организованных по металлическим кабелям:

- АСП - К-3600, К -1920;
- ЦСП - LA 140 x 2, ИКМ – 1920, РСМ – 480, LC – 34.

Для линейных трактов, организованных по металлическим линиям связи, применение ВОКВ не должно нарушать работу последних и качество каналов. Установка ВОКВ не должна приводить к возрастанию уровня шумов в аналоговых трактах и росту значения ВВЕР в цифровых, т.е. линейный тракт не должен чувствовать, что в его структуре появилось «инородное тело».

Это может быть обеспечено только правильным построением активного оборудования для ВОКВ.

Принципы построения ЭОМ для аналоговых и цифровых систем передачи.



АСП

Для выравнивания защищенности каналов вводят перекося уровней.

При вводе пред искажений необходимо учитывать, что они вносят изменения в спектральную характеристику продуктов нелинейности, поэтому выравнивание защищенности каналов от суммарных помех, обусловленных термическим шумом и нелинейностью, возможно лишь при некоторой оптимальной величине перекося уровней.

Как правило, вводят пред искажения с линейной зависимостью уровня передачи от номера канала. При линейном перекося уровней

$$p(f) = p(f_1) + k(f_2 - f_1),$$

где, $p(f_1)$ – измерительный уровень при нижней граничной частоте линейного спектра;

k – коэффициент пропорциональности, равный $\Delta p / (f_2 - f_1)$;

Δp – перекося уровней в линейном спектре.

В этом случае спектральная характеристика многоканального сигнала определяется выражением

$$P(f) = P(f_1) * e^{2k(f - f_1)}$$

Общая же мощность сигнала

$$P_c = P(f_1) * (e^{2k(f_2 - f_1)} - 1) / 2k$$

Введение пред искажений существенно усложняет преобразование линейного сигнала АСП, тем более, что например для АСП К-3600 линейный спектр занимает полосу частот 0,812 – 18,6 МГц. При введении контура наклона восстанавливающего плоскую диаграмму уровней, изменяется соотношение мощностей теплового шума и шумов от нелинейности, в результате чего суммарная психофотометрическая мощность шумов в каналах, приведенная к точке с нулевым относительным уровнем, расположенных в разных частотных промежутках линейного спектра будет неодинакова.

Постоянно изменяющийся уровень загрузки системы, приводит к изменениям в результатах преобразования сигналов в оптический и обратно, что приводит к возникновению дополнительных нелинейных шумов.

Принцип непосредственной модуляции сигналом линейного спектра АСП источника излучения по интенсивности – самый простой и дешевый способ преобразования. Необходимо подчеркнуть, что предлагаемая система не является постоянной, поэтому некоторые отклонения по надежности, контролю и другим, не определяющим качество, параметрам не играют определяющей роли на очень короткий период. В этом случае основными факторами, которые будут определять качество каналов транслируемых по составному тракту это добавка суммарных шумов за счет шумов преобразования в источнике излучения и шумов фотоприемника.

Основные шумовые характеристики полупроводниковых источников излучения



Флуктуации мощности излучения лазерного диода.

Относительная интенсивность шума RIN (relative intensity noise).

Этот параметр учитывает дополнительные аддитивные шумы (по отношению к дробовым шумам фототока), которые появляются на выходе фотодетектора.

Спектральная плотность шума тока фотодиода при освещении его излучением лазера может быть записана в виде:

$$i_{\text{пол}}^2 = i_{\text{лаз}}^2 + i_{\text{др}}^2,$$

где $i_{\text{лаз}}^2$ - спектральная плотность шумового тока, обусловленного флуктуациями интенсивности излучения,

$i_{\text{др}}^2$ - спектральная плотность дробового шума при среднем фототоке $I_{\text{ф}}$.

$$i_{\text{др}}^2 = 2eI_{\text{ф}}, \quad I_{\text{ф}} = SP_{\text{лаз}},$$

где S - токовая чувствительность фотодетектора, а $P_{\text{лаз}}$ - средняя мощность лазерного излучения.

Относительная интенсивность шума, дБ/Гц,

$$RIN = (\Delta P)^2 / (P_0)^2,$$

где (ΔP) – среднеквадратическая флуктуация интенсивности;

(P_0) – усредненная оптическая выходная мощность.

Таким образом, **RIN** показывает возможное отношение сигнал/шум на приемнике.

У одночастотных лазеров **RIN** меньше, чем у многомодовых лазеров.

Для различных лазеров **RIN** лежит в пределах -130 ÷ -150 дБ/Гц.

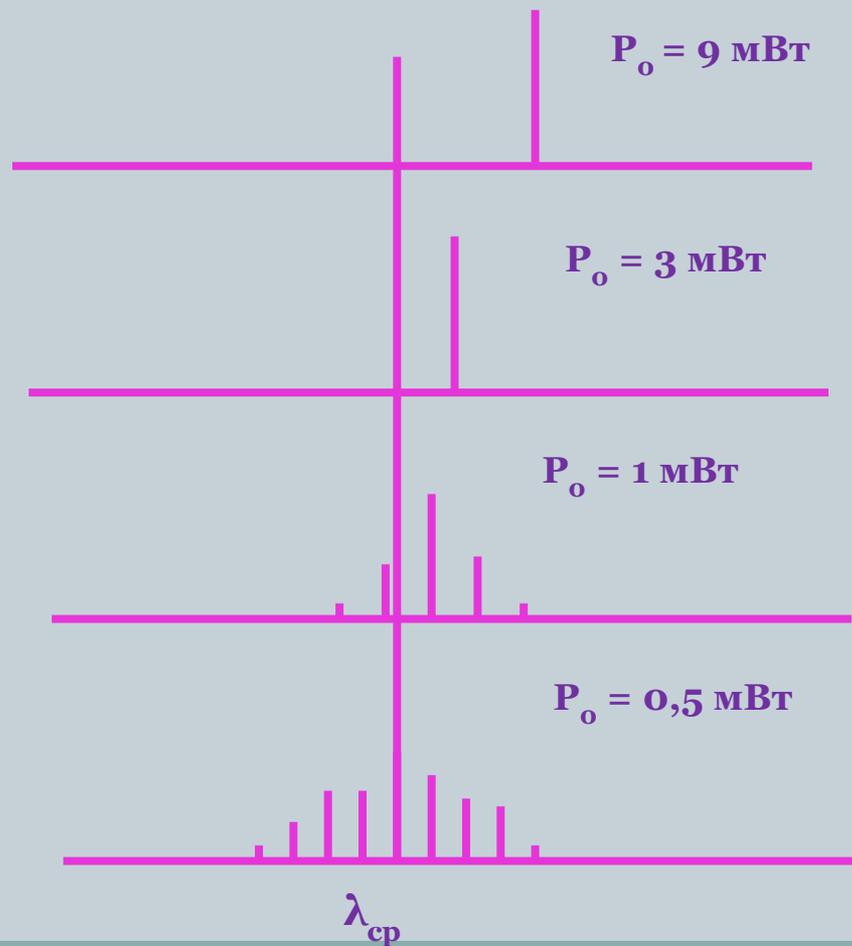
У многомодовых лазеров с увеличением тока накачки **RIN** основной моды уменьшается, а **RIN** прочих мод увеличивается.

Этот источник шумов следует учитывать при модуляции интенсивности широкополосным аналоговым сигналом при большом требуемом отношении сигнал/шум.

Шум распределения мод (SNR).



Спектр излучения одномодового лазера является функцией тока возбуждения



Изменения в спектре излучения одномодового лазера при модуляции по интенсивности

Среднеквадратическая доля мощности, которая флуктуирует между модами, количественно описывается с помощью k – фактора Огава. Обычно значения k изменяются в интервале от 0,2 – 0,5.



С приемником без шума максимальное отношение сигнал/шум будет равно:

$$\text{SNR}_{\max} = 20 \log [2/kx^2 (\Delta\lambda\text{DBL})],$$

где k – фактор Огава, x^2 – компенсационный множитель, примерно равный – 2, $\Delta\lambda$ – полная ширина спектра излучения по половине интенсивности, D – дисперсия волокна, B – требуемая широкополосность системы, L – длина линии.

Проведем оценку уровня мощности шума для одномодового лазера с $k=0,45$ и среднеквадратической шириной спектра $\Delta\lambda=2$ нм, который предполагается использовать в составе волоконно-оптической кабельной вставки в линейном тракте К-3600. При этом допустимое соотношение сигнал/шум собственно в тракте в точке с измерительным уровнем –35 дБ должно быть не хуже 95 дБ, а широкополосность системы составляет 18,6 МГц.

Длину вставки в рассматриваемом примере выберем равной 3,0 км. Хроматическая дисперсия оптического волокна составляет 3,0 (пс/нм)*км.

Тогда:

$$\Delta\lambda\text{DBL} = 2*3*18,6*30 = 3330$$
$$\text{SNR}_{\max} = 20 \log |2/(0,45*2*10^6)| \cong -126 \text{ дБ}$$

Влияние обратного света



Отраженное излучение, попадая в резонатор лазера, нарушает линейность характеристик лазера, спектральную стабильность и ухудшает шумовые свойства. Искажения могут возникнуть за счет небольшого изменения расстояния между лазером и торцом оптического волокна. Это вызывает скачкообразную смену лазерных мод, и из-за дисперсии материала волокна появляются временные скачки сигнала. На выходе оптического волокна скачкообразная смена мод проявляется в виде фазовой модуляции ИКМ-сигналов.

Влияние обратного света на характеристики лазера заметно уже при попадании в лазер 0,003% излученного света, а при попадании 5% - обратное оптическое излучение приводит к генерации импульсного типа.

Вследствие попадания отраженного сигнала в лазер могут происходить следующие изменения характеристик:

- изменение формы ватт-амперной характеристики, величины порогового тока,
- изменение спектра колебаний (сдвиг резонансной длины, изменение числа генерируемых продольных мод).

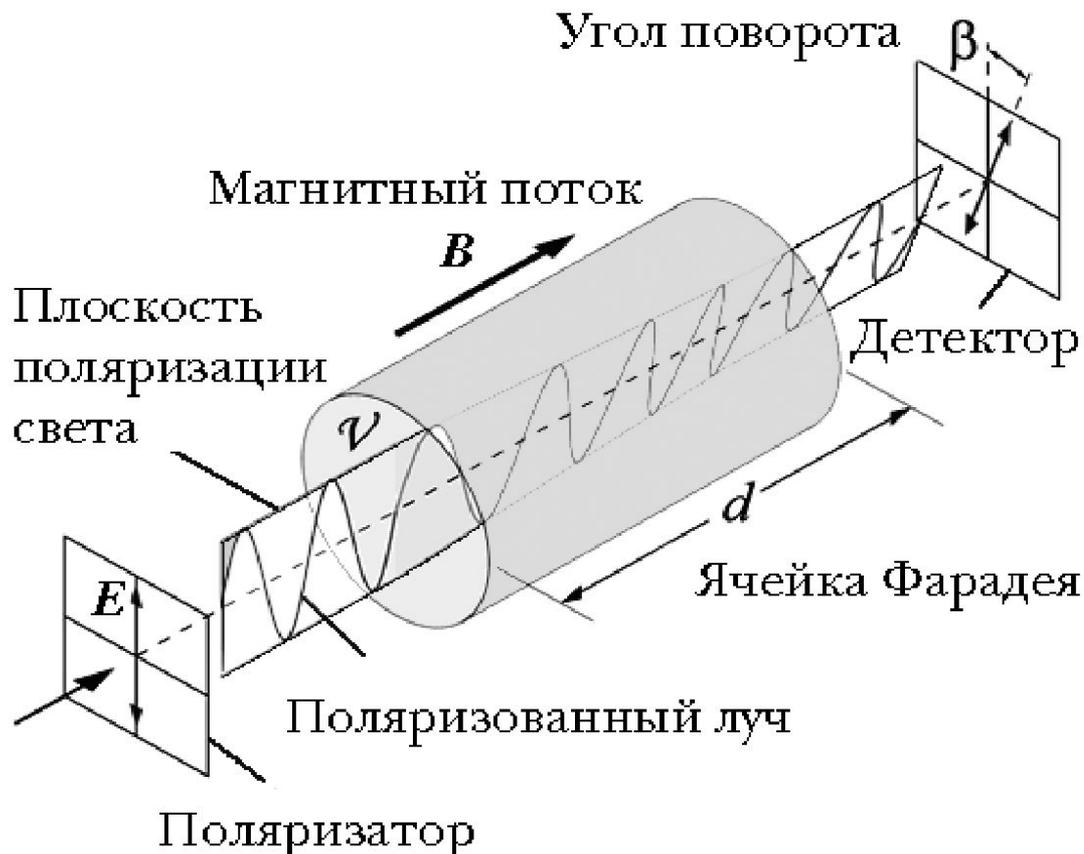
Для устранения влияния обратного света на излучение лазера используется оптический изолятор, принцип действия которого основан на невзаимном повороте плоскости поляризации в результате эффекта Фарадея. Основным элементом изолятора – это стержень из ферромагнитного материала, например, железо-иттриевого граната (ЖИГ). Стержень намагничен продольным полем H_0 , которое вызывает поворот плоскости поляризации оптической волны на 45° . Поворот всегда происходит против часовой стрелки навстречу вектору H_0 . В результате двукратного прохождения оптической волны через стержень плоскость поляризации её оказывается повернутой на 90° . На входе лазера можно поставить поляризатор. Изолятор обеспечивает развязку 30 ... 40 дБ, потери – около 1 дБ.

Принцип действия оптического изолятора

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. 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 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.



Угол поворота плоскости поляризации света, рад., определяется следующим

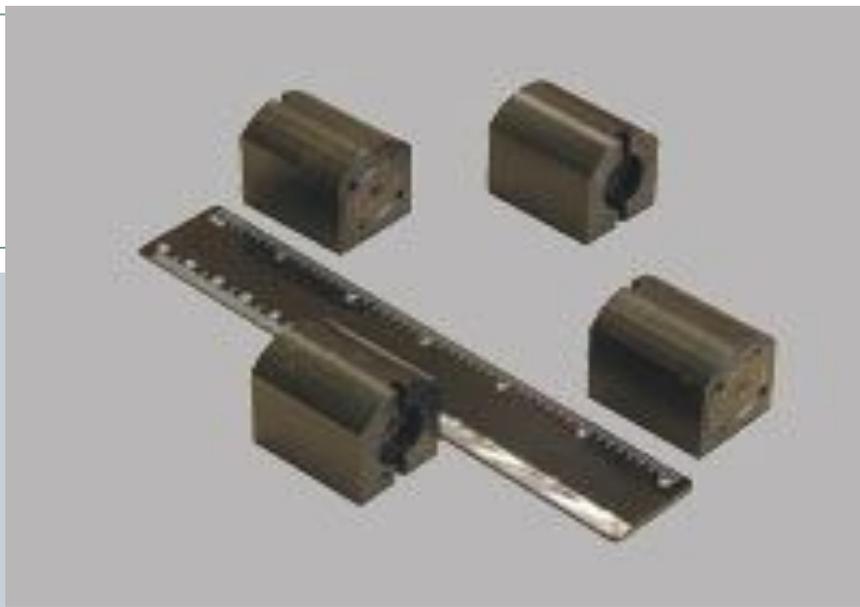
соотношением:

$$\beta = \nu B d,$$

где B — плотность магнитного потока, Тл;
 d — длина части ячейки Фарадея, взаимодействующей с магнитным потоком, м;
 ν — константа Вердета для данного материала ячейки Фарадея.

В качестве рабочего вещества в магнито-оптических преобразователях используют стекла, содержащее оксид свинца (так называемые флинты, кроны), а также плавленый кварц.

Особенно большую чувствительность к магнитному полю имеют пленки из феррита граната.



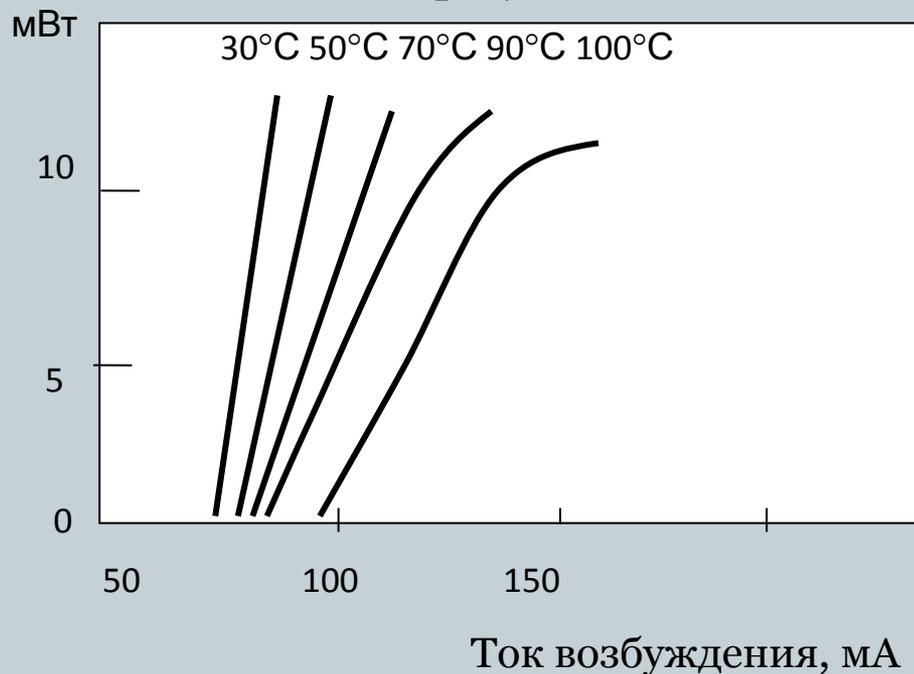
В основе работы оптического изолятора лежит эффект Фарадея – вращение плоскости поляризации света оптически неактивными веществами под действием продольного магнитного поля.

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.

Температурная нестабильность

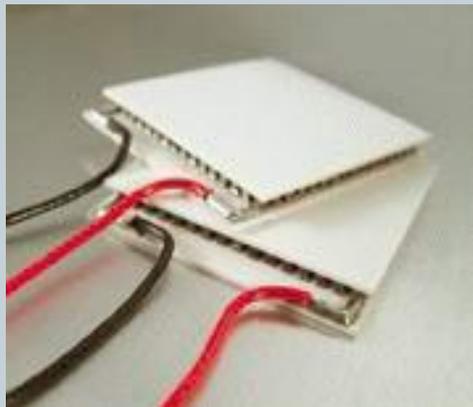
Стабилизация температурного режима осуществляется с использованием холодильника на ячейке Пельтье, что становится особенно важно, при установке модемов в цистернах НУП (НРП).



Температурная зависимость выходной оптической мощности от тока смещения.

Для получения низких значений уровня шумов в составном аналоговом тракте в последнее время начинают применяться одномодовые одночастотные лазеры следующих групп – лазерный диод (C^3), лазерный диод с внешним изолятором (ЕС), лазерные диоды с распределенной обратной связью (DFB).

Что такое эффект Пельтье и термоэлектрический модуль?



В основе работы термоэлектрического модуля лежит эффект Пельтье, открытый в 1834 г. Суть этого эффекта состоит в том, что при протекании электрического тока в цепи, состоящей из разнородных проводников (термопара), в местах контактов проводников поглощается или выделяется, в зависимости от направления тока, теплота Пельтье. Количество тепла пропорционально току, проходящего через термопару.

Термоэлектрический модуль является уникальным устройством по преобразованию электрической и тепловой энергии. Он позволяет осуществлять как прямое преобразование энергии (из электрической в тепловую) – режимы охлаждения или нагрева, так и обратное преобразование – режим генерации электрической энергии. Термоэлектрический модуль может также использоваться как устройство для измерения температуры или потока тепловой энергии. Таким образом, можно выделить три основные сферы применения модулей:

- охлаждение или нагрев;
- генерация электрической энергии;
- термометрия.



Область применения интересная для нас

Радиоэлектроника:

- миниатюрные охладители для входных каскадов высокочувствительных приемников и усилителей;
- охладители для мощных генераторов и радиоэлементов;
- лазерных излучателей, лазерных систем и ПЗС (CCD) матриц;
- фотоприемников (фотодиоды, фототранзисторы, фотоумножители);
- охладители для микропроцессоров, электронных плат и блоков.

Ввод излучения в оптические волокна.



Эффективность ввода оптического излучения будет оказывать существенное влияние как на допустимую протяженность волоконно-оптической вставки, так и на рост нелинейных шумов возникающих за счет обратного отражения от стыка кристалл лазера – соединительная вилка, а также соединительная вилка – оптическое волокно.

Существует несколько методов соединения полупроводниковых излучателей с оптическими волокнами:

- непосредственное соединение, торец волоконного световода устанавливается и фиксируется непосредственно вблизи поверхности излучения лазера;
- соединение с использованием различных согласующих устройств (микролинз сферических и цилиндрических, фоконов, графанов).

Ввод излучения из одномодового лазера в одномодовое оптическое волокно через согласующую вставку из анизотропного оптического волокна (АОВ), в котором градиент показателя преломления в середине волокна создается не за счет изменения химического состава стекла, а в результате упорядочения внешним электрическим полем в процессе производства внутренней молекулярной структуры.

При этом анизотропные молекулы и образующиеся микрокристаллы материала сердцевины ориентированы (эффект Керра – Погкельса) так, что их оптические оси направлены вдоль силового электрического поля.

АОВ с плоским торцом на входе можно рассматривать как протяженную сферическую линзу, для которой фокусное расстояние

$$f_1 = Rn_e/2(n_e - 1),$$

где $n_e = \sqrt{\epsilon_e}$ – показатель преломления для необыкновенной волны на оси АОВ;

R – радиус кривизны силовой линии внешнего электрического поля.

Чтобы скомпенсировать сферическую аберрацию частичной дефокусировкой необходимо приемный плоский торец АОВ разместить на расстоянии $l_1 < f_1$ от источника.

Другой конец АОВ стыкуется с одномодовым оптическим волокном непосредственно, например, сваркой.

Следовательно, потери будут определяться Френелевским отражением от торца АОВ, которые появятся из-за различия показателей преломления источника излучения n_e ($n_e = 3,6$ для арсенида галлия) и сердцевины торца АОВ $n_1 \approx n_e \approx 1,5$.

Формула Френеля для случая нормального падения волны на плоскую границу раздела между двумя средами с n_{c1} и n_{c2} определяет потери на отражение

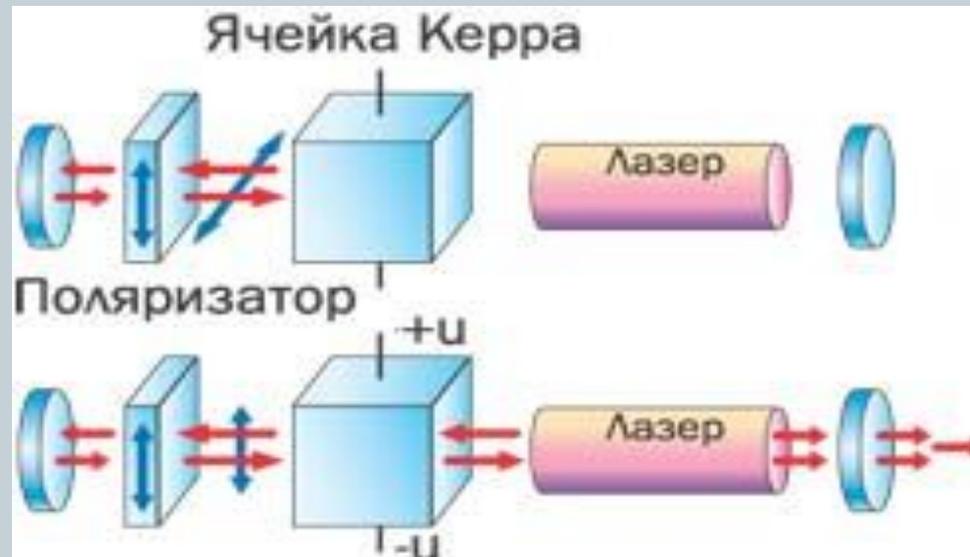
$$A_0 = 10 \lg (n_{c1} + n_{c2})^2 / (4n_{c1} * n_{c1})$$

Если между ними имеется воздушный зазор с $n_3 = 1$, то $A_0 = A_{из} + A_{з1} \approx 1,67$ дБ + 0,18 дБ = 1,85 дБ. Если зазор заполнить иммерсионной жидкостью (клеем) с $n_ж = 1,5$, то $A_0 = 0,8$ дБ.

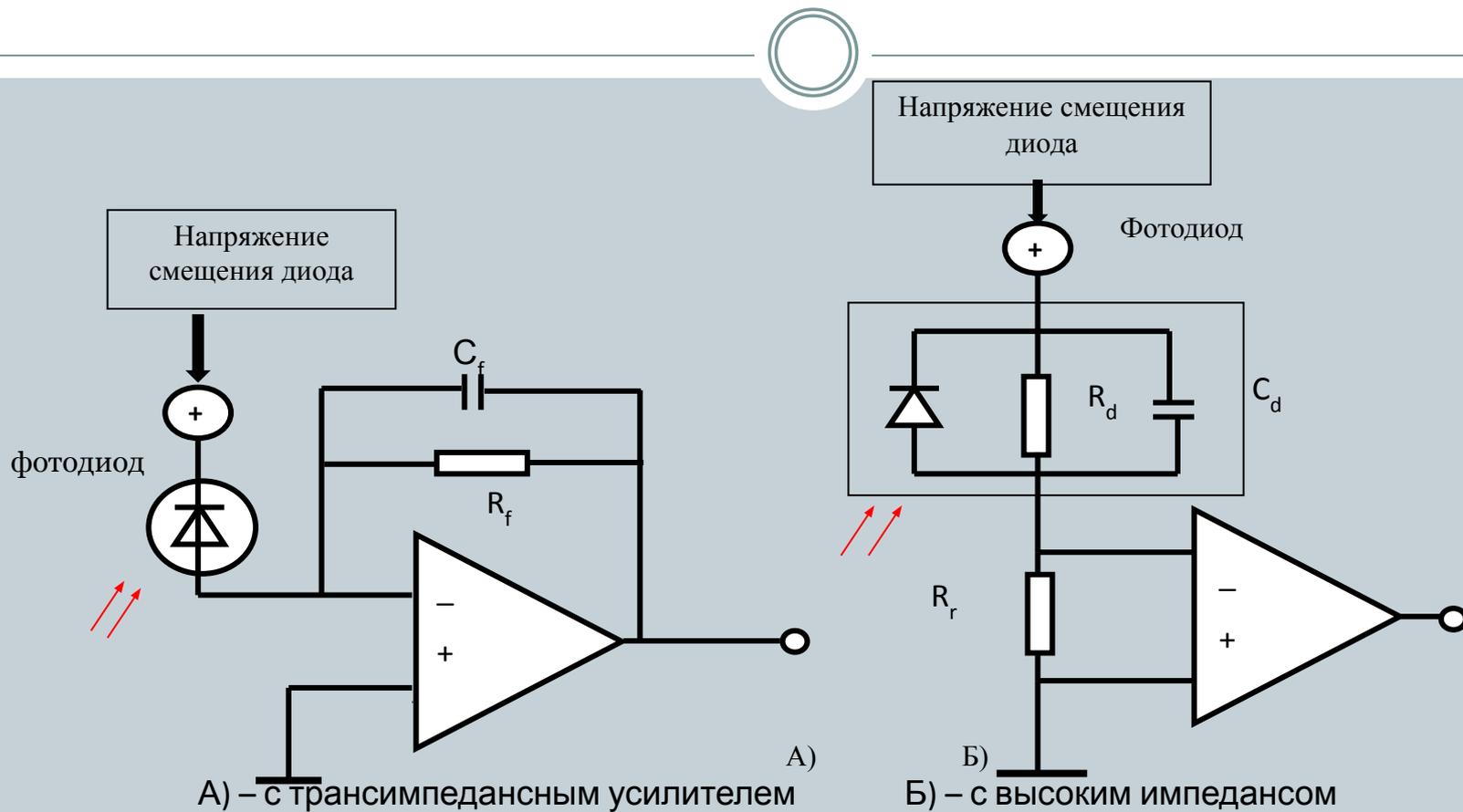
Эффект Керра - Погкельса



Это явление возникновения двойного лучепреломления в оптических средах при наложении постоянного или переменного электрического поля. Он отличается от эффекта Керра тем, что линеен по полю, в то время как эффект Керра квадратичен. Эффект Погкельса может наблюдаться только в кристаллах, не обладающих центром симметрии: в силу линейности при изменении направления поля эффект должен менять знак, что невозможно в центрально-симметричных телах. Эффект хорошо заметен на кристаллах ниобата лития или арсенида галлия.



Шумы оптических фотоприемников и их влияние на качество каналов составного тракта.



Основные схемы приемников оптического излучения.



Оптические приемники состоят из фотодетектора, подключенному к предварительному усилителю. Эффективность преобразования – это отношение электронов, образующих фототок к числу падающих на детектор фотонов (квантовая эффективность η). Она достигает как правило 80 – 90 % .

В настоящее время применяются приемники с трансимпедансным усилителем и с высоким импедансом.

Усилитель с высоким импедансом обеспечивает наиболее низкий уровень шума и максимальную чувствительность. Однако вследствие высокого нагрузочного импеданса на входном каскаде частотная характеристика ограничивается постоянной времени RC входной цепи.

Трансимпедансный усилитель применяется для устранения ограничения динамического диапазона усилителя с высокоомным входом. Он обеспечивает динамический диапазон вплоть до 40 дБ. Кроме того, используемая отрицательная обратная связь обеспечивает расширение полосы пропускания.

Эквивалентная мощность шума (NEP).



Шум на входе предварительного усилителя вызывают следующие факторы:

- тепловой шум (I_{th});
- дробовый шум темнового тока (I_{Dsh});
- квантовый дробовый шум (I_{Qsh});
- лавинный избыточный шум (I_{ex});
- шум распределения мод ИЛД (I_{Lpn});
- шум распределения мод волоконного световода (I_{Fpn});
- относительная интенсивность шума ИЛД (I_{RIN}).

Тепловой шум.



Он объясняется движением случайных электронов в цепи из параллельно включенных сопротивлений r_d фотодиода с обратным смещением и резистора R_b в цепи смещения:

$$(I_{th})^2 = 4kTB/R$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана;

T – температура, °К; B – рабочий интервал частот, МГц;

$$R = r_d / R_b.$$

Для P-I-N фотодиода на основе InGaAs, который имеет темновой ток порядка 5 нА, его принимаемая оптическая мощность составляет –27 дБм. Если в схему включен резистор цепи смещения 4000 Ом, то тепловой шум в полосе 1 Гц получится равным 2,04

$$\frac{nA}{\sqrt{Гц}}$$

Дробовый шум темнового тока.



Дробовый шум темнового тока вызван случайным потоком носителей заряда темнового тока через смещенный переход. Он определяется из соотношения:

$$(I_{sh})^2 = 2eI_{du}$$

где e – заряд электрона; I_{du} – темновой ток.

У всех полупроводниковых диодов темновой ток очень сильно зависит от частоты и интервале температур от 20 до 50°C изменяется от 2-х до 10 раз. Среднее значение для фотодиода на основе InGaAs $I_{sh} = 4,0 \cdot 10^{-14}$

$$\frac{A}{\sqrt{\Gamma_y}}$$

Квантовый дробовый шум.

Квантовый дробовый шум возникает в результате случайного попадания фотонов на поверхность детектора. Испускание фотонов является статистическим процессом и всегда существует определенная вероятность того, что не все фотоны попадут на приемник. Поскольку энергия оптических фотонов значительно выше энергии теплового шума практически соотношение сигнал/шум ограничивается значением квантового дробового шума.

- Типичное расчетное значение квантового шума для рассматриваемого выше фотодиода при зарегистрированной принимаемой мощности 2 мкВт составляет $(I_{qsh}) = 0,74 \cdot 10^{-13}$

$$\frac{A}{\sqrt{\Gamma_y}}$$

Лавинный избыточный шум.



Избыточный шум в лавинных фотодиодах обусловлен различием в ионизации электронов и дырок и определяется из следующего соотношения:

$$(I_{ex}) = 2eI_{dm} G^2 F(G),$$

где I_{dm} – ток, G – лавинное усиление, $F(G) = kG + (1-k)(2-1/G)$ – коэффициент лавинного избыточного шума, k – отношение постоянной ионизации дырок к постоянной ионизации электронов.

Лавинный избыточный шум приводит к значительной деградации отношения сигнал/шум при высоких значениях лавинного усиления. В фотоприемниках на основе кремния электроны преобладают в лавинном процессе и значение k изменяется в диапазоне от 0,02 до 0,1, и избыточный шум минимален.

Для фотоприемников на основе германия составляющие шума от дырок и электронов сопоставимы и значение k варьируется от 0,7 до 1,0, что приводит к существенному возрастанию избыточного шума.

Расчет избыточного шума для выбранного фотодиода при $k = 0,4$ и лавинным усилением 25 показывает, что его величина будет равна

$$(I_{ex}) = 3,35 * 10^{-12} \frac{A}{\sqrt{\Gamma_y}}$$

Шум распределения мод.



Шум распределения обусловлен перескоком спектральных мод в ИЛД. Это особенно важно при работе с одномодовым оптическим волокном.

Шум распределения мод волоконного световода. Этот шум обусловлен изменением в распределении света среди распространяющихся по волоконному световоду мод. В результате, при использовании различных типов источников соотношение сигнал/шум на выходе фотоприемника уменьшается на 1-5 дБ.

Относительная интенсивность шума.

Представляет серьезную проблему при непосредственной модуляции источника излучения в широкой полосе частот:

$$(I_{\text{RIN}})^2 = \text{RIN} * I_{\text{rek}},$$

где I_{rek} – усредненный зарегистрированный фототок.

Расчет шумовых характеристик приемника выполненного на основе наиболее широко распространенного лавинного фотодиода – InGaAs.



Исходные данные:

- спектр сигналов до 20,0 МГц;
 - темновой ток - 5 нА;
 - лавинное усиление – 25;
 - чувствительность ЛФД составляет 0,86 – 2,5 А/Вт;
 - лавинный фототок 42,9 мкА;
 - резистор в цепи смещения детектора имеет сопротивление 4000 Ом.
- Коэффициент шума предварительного усилителя равен 1,5 дБ. Предположим, что на вход приемника поступает мощность – -27 дБм.

Сначала вычислим шумовые составляющие. Тепловой шум будет равен, $(I_{Th})^2 = 2,62 \cdot 10^{-16} \text{ A}^2$, квантовый дробовый шум будет равен $(I_{Qsh})^2 = 1,97 \cdot 10^{-17} \text{ A}^2$, избыточный лавинный шум – при $k = 0,4$ избыточный коэффициент шума при лавинном усилении 25 $F(25) = 11,2$, а избыточный дробовый шум $(I_{ex})^2 = 6,92 \cdot 10^{-15} \text{ A}^2$.

В результате суммарный шумовой ток $(I_N)^2 = 7,2 \cdot 10^{-15} \text{ A}^2$, а отношение сигнал/шум $\text{SNR} = 75,9 \text{ дБ}$.