

1. Использование регенераторов и оптических усилителей в ВОЛС.

Оптический усилитель (ОУ) непосредственно усиливает проходящий оптический сигнал без преобразования его в электрический. Его основное назначение – компенсация потерь на усилительном участке волоконно-оптического линейного тракта (ВОЛТ). Использование ОУ позволяет отказаться от промежуточных регенераторов и значительно увеличить протяженность регенерационного участка, состоящего из нескольких усилительных участков. Значительным преимуществом ОУ перед регенераторами является возможность усиления многочастотного сигнала с плотным спектральным уплотнением (DWDM).

Установка в ВОЛТ оптических усилителей позволяет существенно удешевить оборудование волоконно-оптических систем связи (ВОСС). До начала 90-х годов единственным способом компенсации потерь на отдельных участках ВОЛТ было применение регенераторов. Регенератор работает по схеме: прием оптического сигнала - оптоэлектрическое преобразование - электрическое усиление - регенерация (распознавание и восстановление) электрического сигнала - электрооптическое преобразование - передача оптического сигнала.

В современных ВОСС восстановление (регенерация) сигнала происходит в, так называемых, 3R регенераторах. Акроним 3R означает, что электрический сигнал с амплитудной модуляцией регенерируется (восстанавливается) не только по амплитуде (Reamplifying) и по форме (Reshaping) импульсов, но и по положению импульсов на временной шкале (Retiming). Регенерация носит пороговый характер: когда напряжение сигнала в схеме сравнения в момент принятия решения больше порогового значения, то восстанавливается «1», а если оно меньше, то восстанавливается «0» (рис. 1.1). Слабые возмущения сигнала при этом устраняются полностью, что и обуславливает высокую помехозащищенность цифровых ВОСС. В силу случайной природы шумов вероятность появления сильного возмущения всегда отлична от нуля, поэтому полностью восстановить цифровой сигнал невозможно и существует некоторая вероятность битовых ошибок (BER), которая должна быть меньше допустимой величины, например 10^{-12} . Вероятность ошибок быстро уменьшается с увеличением отношения сигнал/шум.



Рис. 1.1. Схема появления ошибки при восстановлении бинарного сигнала с модуляцией по интенсивности с NRZ кодированием; (а) сигнал на входе в линию, (б) сигнал на входе в регенератор, (в) сигнал на выходе регенератора.

На рис. 1.2 показан приемник оптического сигнала, который может входить в состав регенерационного или оконечного пункта. После приема цифрового оптического сигнала его преобразования в электрический сигнал в усилителе фототока (УФТ) и усилителе напряжения (УН) он поступает на вход 3R регенератора. Для нормальной работы регенератора амплитуды импульсных сигналов обычно должны составлять хотя бы доли вольта. В состав регенератора входят: усилитель ограничитель (УО - LIA, Limiting Amplifier) с корректирующим фильтром, D – триггер и схема выделения (восстановления) тактовой частоты (CRC, Clock Recovery Circuit). УО выравнивает амплитуды импульсов, обостряет их фронты. На второй вход УО подается пороговое напряжение. К выходу УО присоединен вход D – триггера, который в момент прихода стробимпульса устанавливается в состояние логической «1», если напряжение на выходе УО больше определенного уровня и в состояние «0», если напряжение на выходе УО

меньше определенного уровня. На выходе D – триггера образуется восстановленный сигнал. На рис. 1.1б. показано, как возникла ошибка (вместо «1» восстановился «0»).

При скоростях передачи $V \leq 10$ Гбит/с в приемных устройствах ВОСС предварительные ОУ обычно не используют, а в качестве фотоприемника применяют р-і-п ФД или лавинные фотодиоды (ЛФД). При увеличении скоростей передачи до $V=40$ и более Гбит/с вместо УН, который становится сверхвысокочастотным (СВЧ) устройством и изготовить который становится сложно, используют предварительный ОУ на входе ФД с большой мощностью насыщения ($P_{max} \geq 10$ мВт). Это позволяет получить необходимую амплитуду импульсов на входе регенератора без использования УН. Отметим, что широко распространенные р-і-п ФД на основе InGaAs при таких мощностях входят в насыщение.

Р-і-п ФД для современных ВОСС помимо большой мощности насыщения P_{max} должны обладать также большими значениями чувствительности S и полосы пропускания Δf . Качество быстродействующих ФД часто характеризуют произведением $S \Delta f$.

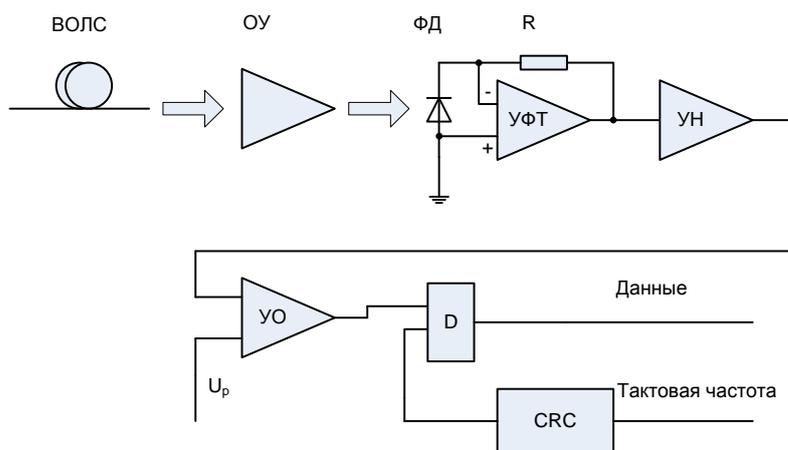


Рис. 1.2. Схема цифрового приемника оптических сигналов

В настоящее время в стадии разработки и исследования находятся чисто оптические регенераторы. Они должны стать одним из основных устройств для полностью оптических ВОСС.

Использование ОУ в ВОСС позволяет значительно увеличить длину регенерационного участка, за счет разбивки его на несколько усилительных участков. Это уменьшает число регенераторов в ВОЛТ и упрощает схему связи.

Все ОУ являются нелинейными устройствами. Типовые зависимости выходной оптической мощности от входной и коэффициента усиления от выходной оптической мощности показаны на рис. 1.3а. ОУ могут использоваться (рис. 1.3б) в качестве предусилителя на входе фотоприемного устройства (ФПУ) (область А на рис. 1.3а) и усилителя мощности (бустера) на выходе источника излучения (область В на рис. 1.3а).

Установка перед оптическим приемником предварительного ОУ позволяет уменьшить вклад в суммарный шум ФПУ со стороны собственно фотоприемника и усилителя фототока за счет увеличения оптического сигнала на входе ФПУ. Это позволяет значительно увеличить длину регенерационного участка. К оптическому предусилителю предъявляются требования высокой линейности, большого коэффициента усиления и малого уровня шума (таблица 1.1).

Использование ОУ мощности на выходе регенератора позволяет увеличить длину участка регенерации за счет повышения мощности сигнала при той же пороговой мощности ФПУ. К ОУ мощности предъявляется основное требование большой выходной мощности (десятки и сотни мВт). Требования к высокой линейности и низким шумам не являются жесткими (таблица 1.1).

Для компенсации затухания в линейном волоконно-оптическом тракте может использоваться каскадное включение линейных ОУ (рис.5.3б). К линейному ОУ одновременно предъявляются требования высокого коэффициента усиления и линейности, малых шумов и большой выходной мощности. Обычно линейный усилитель является многокаскадным, содержащим, как минимум, два каскада: предусилитель и усилитель мощности.

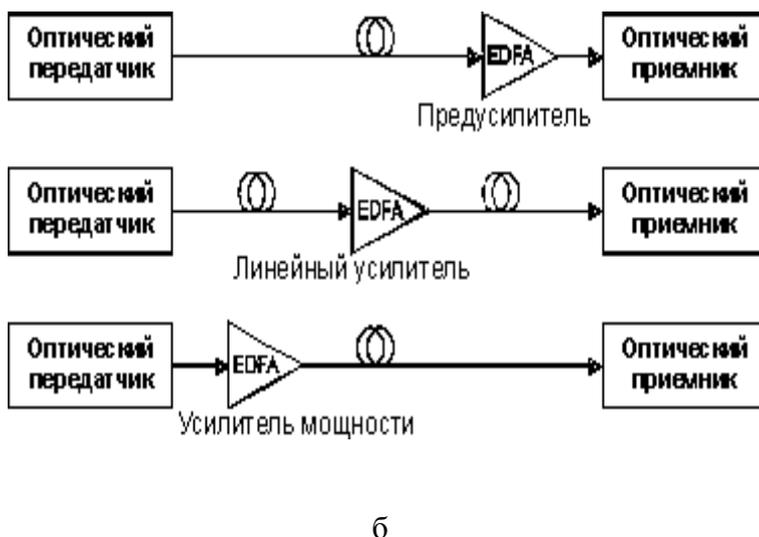
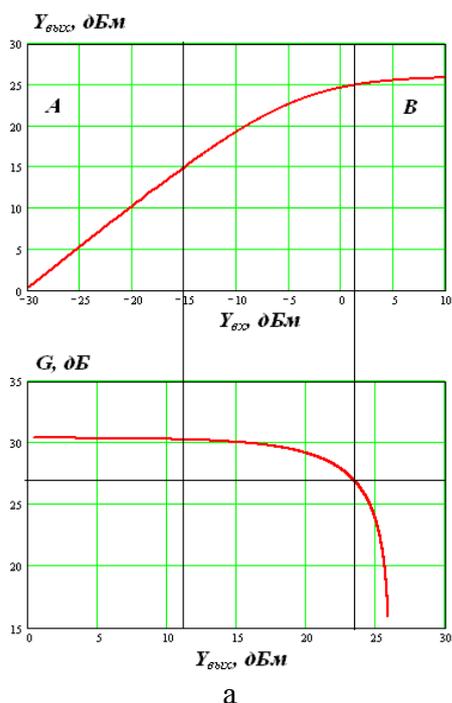


Рис. 1.3. Зависимость уровней выходной оптической мощности от входной и коэффициента усиления от выходной мощности (а) и применение оптических усилителей в ВОЛТ.

В таблице 1.1 указана степень значимости некоторых параметров ОУ в зависимости от их назначения.

Таблица 1.1. Сравнительные параметры ОУ различного назначения

Параметр	Предусилитель	Линейный усилитель	Усилитель мощности
Коэффициент усиления	высокий	средний	низкий
Коэффициент шума	низкий	средний	высокий
Мощность насыщения	низкая	средняя	высокая
Нелинейность	низкая	средняя	высокая

Существуют разные типы ОУ. Общая классификация ОУ и диапазоны длин волн, в которых они используются, показаны на рис. 1.4.

Из рисунка видно, что существует принципиальная возможность усиливать оптические сигналы во всем диапазоне длин волн, используемых для оптической связи. Для усиления в диапазонах длин волн 1530–1570 нм (C-диапазон) и 1570-1610 нм (L-диапазон), которые используют системы DWDM, применяют структуры на основе эрбия. Это могут быть структуры, выполненные в виде ОВ (EDFA) или в виде планарных волноводов (EDWA). В диапазонах 1260-1360 нм и 1450-1490 нм используют ОВ, легированные редкоземельными элементами: празеодимом (PDFFA) и тулием (TDFA), соответственно. Полупроводниковые усилители (SOA) используют в диапазонах 1260-

1360 нм и 1500-1550 нм. Во всем диапазоне от 1260 до 1650 нм могут использоваться распределенные рамановские усилители (RFA), использующие в качестве активной среды телекоммуникационные ОВ.

Наиболее распространенными ОУ в настоящее время являются:

- Усилители на основе специальных оптических волокон (ОВ), легированных редкоземельными элементами (причем наибольшее распространение получили эрбиевые усилители EDFA),
- Усилители, использующие вынужденное комбинационное рассеяние (ВКР) в кварцевых ОВ для усиления оптических сигналов (рамановские усилители RFA),
- Полупроводниковые усилители (SOA) с конструкцией, подобной лазерным диодам с резонатором Фабри-Перо.

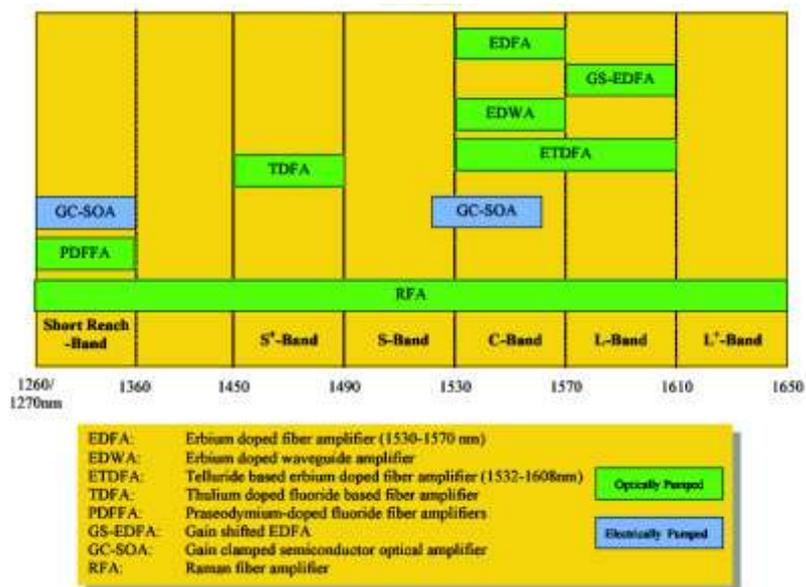


Рис. 1.4. Классификация оптических усилителей

Различают дискретные и распределенные ОУ. Дискретные ОУ представляют собой электронно-оптические блоки относительно небольших размеров. Полупроводниковые и эрбиевые ОУ относят к дискретным. Рамановские ОУ часто используют в качестве активной среды рабочее ОВ и тогда их считают распределенными, но в некоторых случаях они могут выполняться и в виде дискретных ОУ, использующих в качестве активной среды специальные ОВ, например типа DCF, компенсирующие дисперсию стандартного одномодового ОВ.

5. Волоконно-оптические усилители на основе редкоземельных элементов

5.1. Общие сведения об оптических усилителях

Оптический усилитель (ОУ) непосредственно усиливает проходящий оптический сигнал без преобразования его в электрический. Его основное назначение – компенсация потерь на усилительном участке волоконно-оптического линейного тракта (ВОЛТ). Использование ОУ позволяет отказаться от промежуточных регенераторов и значительно увеличить протяженность регенерационного участка, состоящего из нескольких усилительных участков. Значительным преимуществом ОУ перед регенераторами является возможность усиления многочастотного сигнала с плотным спектральным уплотнением (DWDM).

Установка в ВОЛТ оптических усилителей позволяет существенно удешевить оборудование волоконно-оптических систем связи (ВОСС). До начала 90-х годов единственным способом компенсации потерь на отдельных участках ВОЛТ было применение регенераторов. Регенератор работает по схеме: прием оптического сигнала - оптоэлектрическое преобразование - электрическое усиление - регенерация (распознавание и восстановление) электрического сигнала - электрооптическое преобразование - передача оптического сигнала.

В современных ВОСС восстановление (регенерация) сигнала происходит в, так называемых, 3R регенераторах. Акроним 3R означает, что электрический сигнал с амплитудной модуляцией регенерируется (восстанавливается) не только по амплитуде (Reamplifying) и по форме (Reshaping) импульсов, но и по положению импульсов на временной шкале (Retiming). Регенерация носит пороговый характер: когда напряжение сигнала в схеме сравнения в момент принятия решения больше порогового значения, то восстанавливается «1», а если оно меньше, то восстанавливается «0» (рис. 5.1). Слабые возмущения сигнала при этом устраняются полностью, что и обуславливает высокую помехозащищенность цифровых ВОСС. В силу случайной природы шумов вероятность появления сильного возмущения всегда отлична от нуля, поэтому полностью восстановить цифровой сигнал невозможно и существует некоторая вероятность битовых ошибок (BER), которая должна быть меньше допустимой величины, например 10^{-12} . Вероятность ошибок быстро уменьшается с увеличением отношения сигнал/шум.



Рис. 5.1. Схема появления ошибки при восстановлении бинарного сигнала с модуляцией по интенсивности с NRZ кодированием; (а) сигнал на входе в линию, (б) сигнал на входе в регенератор, (в) сигнал на выходе регенератора.

На рис. 5.2 показан приемник оптического сигнала, который может входить в состав регенерационного или оконечного пункта. После приема цифрового оптического сигнала его преобразования в электрический сигнал в усилителе фототока (УФТ) и усилителе напряжения (УН) он поступает на вход 3R регенератора. Для нормальной работы регенератора амплитуды импульсных сигналов обычно должны составлять хотя бы доли вольта. В состав регенератора входят: усилитель ограничитель (УО - LIA, Limiting Amplifier) с корректирующим фильтром, D – триггер и схема выделения (восстановления) тактовой частоты (CRC, Clock Recovery Circuit). УО выравнивает амплитуды импульсов, обостряет их фронты. На второй вход УО подается пороговое

напряжение. К выходу УО присоединен вход D – триггера, который в момент прихода стробимпульса устанавливается в состояние логической «1», если напряжение на выходе УО больше определенного уровня и в состояние «0», если напряжение на выходе УО меньше определенного уровня. На выходе D – триггера образуется восстановленный сигнал. На рис. 5.1б. показано, как возникла ошибка (вместо «1» восстановился «0»).

При скоростях передачи $B \leq 10$ Гбит/с в приемных устройствах ВОСС предварительные ОУ обычно не используют, а в качестве фотоприемника применяют р-і-п ФД или лавинные фотодиоды (ЛФД). При увеличении скоростей передачи до $B=40$ и более Гбит/с вместо УН, который становится сверхвысокочастотным (СВЧ) устройством и изготовить который становится сложно, используют предварительный ОУ на входе ФД с большой мощностью насыщения ($P_{max} \geq 10$ мВт). Это позволяет получить необходимую амплитуду импульсов на входе регенератора без использования УН. Отметим, что широко распространенные р-і-п ФД на основе InGaAs при таких мощностях входят в насыщение.

Р-і-п ФД для современных ВОСС помимо большой мощности насыщения P_{max} должны обладать также большими значениями чувствительности S и полосы пропускания Δf . Качество быстродействующих ФД часто характеризуют произведением $S \Delta f$.

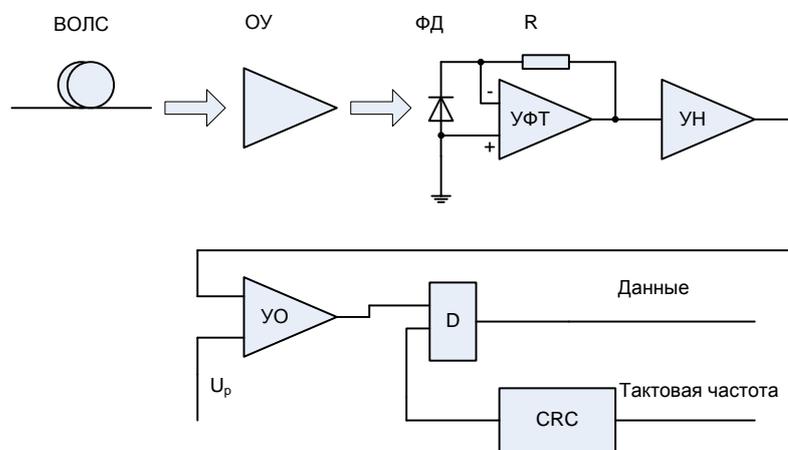


Рис. 5.2. Схема цифрового приемника оптических сигналов

В настоящее время в стадии разработки и исследования находятся чисто оптические регенераторы. Они должны стать одним из основных устройств для полностью оптических ВОСС.

Использование ОУ в ВОСС позволяет значительно увеличить длину регенерационного участка, за счет разбивки его на несколько усилительных участков. Это уменьшает число регенераторов в ВОЛТ и упрощает схему связи.

Все ОУ являются нелинейными устройствами. Типовые зависимости выходной оптической мощности от входной и коэффициента усиления от выходной оптической мощности показаны на рис. 5.3а. ОУ могут использоваться (рис. 5.3б) в качестве предусилителя на входе фотоприемного устройства (ФПУ) (область А на рис. 5.3а) и усилителя мощности (бустера) на выходе источника излучения (область В на рис. 5.3а).

Установка перед оптическим приемником предварительного ОУ позволяет уменьшить вклад в суммарный шум ФПУ со стороны собственно фотоприемника и усилителя фототока за счет увеличения оптического сигнала на входе ФПУ. Это позволяет значительно увеличить длину регенерационного участка. К оптическому предусилителю предъявляются требования высокой линейности, большого коэффициента усиления и малого уровня шума (таблица 5.1).

Использование ОУ мощности на выходе регенератора позволяет увеличить длину участка регенерации за счет повышения мощности сигнала при той же пороговой мощности ФПУ. К ОУ мощности предъявляется основное требование большой выходной

Тема 5. Волоконно-оптические усилители на основе редкоземельных элементов.

мощности (десятки и сотни мВт). Требования к высокой линейности и низким шумам не являются жесткими (таблица 5.1).

Для компенсации затухания в линейном волоконно-оптическом тракте может использоваться каскадное включение линейных ОУ (рис.5.3б). К линейному ОУ одновременно предъявляются требования высокого коэффициента усиления и линейности, малых шумов и большой выходной мощности. Обычно линейный усилитель является многокаскадным, содержащим, как минимум, два каскада: предусилитель и усилитель мощности.

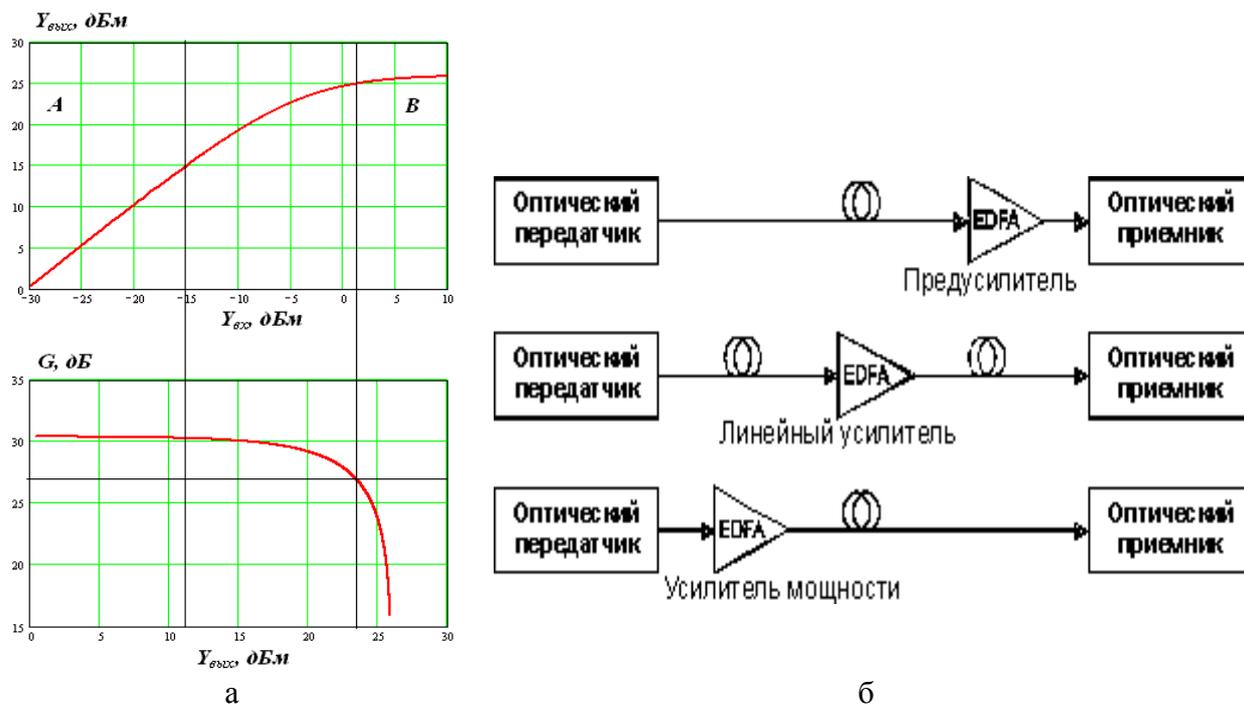


Рис. 5.3. Зависимость уровней выходной оптической мощности от входной и коэффициента усиления от выходной мощности (а) и применение оптических усилителей в ВОЛТ.

В таблице 5.1 указана степень значимости некоторых параметров ОУ в зависимости от их назначения.

Таблица 5.1. Сравнительные параметры ОУ различного назначения

Параметр	Предусилитель	Линейный усилитель	Усилитель мощности
Коэффициент усиления	высокий	средний	низкий
Коэффициент шума	низкий	средний	высокий
Мощность насыщения	низкая	средняя	высокая
Нелинейность	низкая	средняя	высокая

Существуют разные типы ОУ. Общая классификация ОУ и диапазоны длин волн, в которых они используются, показаны на рис. 5.4.

Из рисунка видно, что существует принципиальная возможность усиливать оптические сигналы во всем диапазоне длин волн, используемых для оптической связи. Для усиления в диапазонах длин волн 1530–1570 нм (С-диапазон) и 1570-1610 нм (L-диапазон), которые используют системы DWDM, применяют структуры на основе эрбия.

Это могут быть структуры, выполненные в виде ОВ (EDFA) или в виде планарных волноводов (EDWA). В диапазонах 1260-1360 нм и 1450-1490 нм используют ОВ, легированные редкоземельными элементами: празеодимом (PDFFA) и тулием (TDFA), соответственно. Полупроводниковые усилители (SOA) используют в диапазонах 1260-1360 нм и 1500-1550 нм. Во всем диапазоне от 1260 до 1650 нм могут использоваться распределенные рамановские усилители (RFA), использующие в качестве активной среды телекоммуникационные ОВ.

Наиболее распространенными ОУ в настоящее время являются:

- Усилители на основе специальных оптических волокон (ОВ), легированных редкоземельными элементами (причем наибольшее распространение получили эрбиевые усилители EDFA),
- Усилители, использующие вынужденное комбинационное рассеяние (ВКР) в кварцевых ОВ для усиления оптических сигналов (рамановские усилители RFA),
- Полупроводниковые усилители (SOA) с конструкцией, подобной лазерным диодам с резонатором Фабри-Перо.

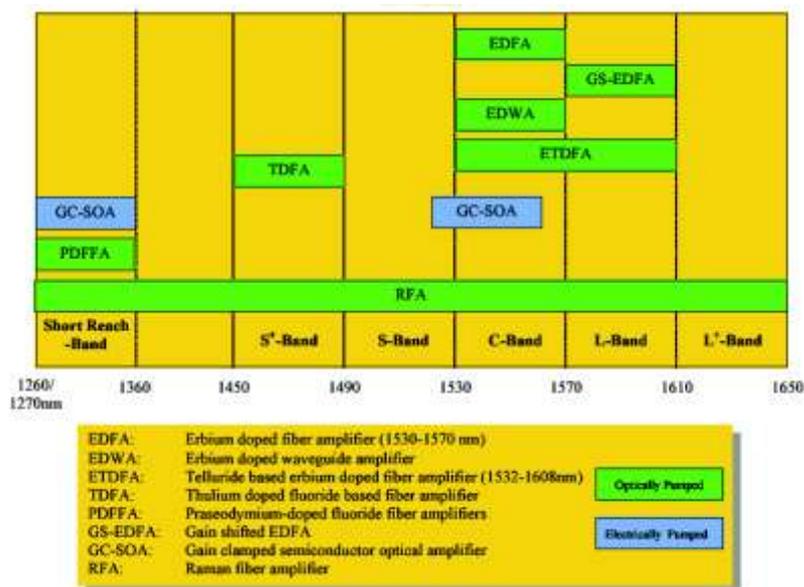


Рис. 5.4. Классификация оптических усилителей

Различают дискретные и распределенные ОУ. Дискретные ОУ представляют собой электронно-оптические блоки относительно небольших размеров. Полупроводниковые и эрбиевые ОУ относят к дискретным. Рамановские ОУ часто используют в качестве активной среды рабочее ОВ и тогда их считают распределенными, но в некоторых случаях они могут выполняться и в виде дискретных ОУ, использующих в качестве активной среды специальные ОВ, например типа DCF, компенсирующие дисперсию стандартного одномодового ОВ.

5.2. Принцип действия волоконно-оптических усилителей на основе специальных оптических волокон (ОВ), легированных редкоземельными элементами

Усилительной средой волоконно-оптических ОУ является специальное ОВ, которое в процессе изготовления легируется редкоземельными металлами. Ионы этих металлов создают активную среду для усиления оптического излучения в диапазоне длин волн, соответствующем полосе поглощения легирующего материала.

Первый ОУ на неодимовом стекле (не на ОВ) при длине волны 1.06 мкм был впервые продемонстрирован в 1960 году, а в 1987 году стало известно о создании

оптического усилителя на легированном эрбием ОВ (EDFA-Erbium-doped fiber amplifier) с рабочей длиной волны 1.55 мкм.

До сих пор наибольшее распространение в качестве активной среды для волоконно-оптических усилителей имеют ОВ, легированные эрбием. Эрбиевое волокно содержит, также, как и обычное одномодовое ОВ, сердцевину легированную германием или другим веществом, увеличивающим показатель преломления, диаметром 3-6 мкм и оболочку из чистого кварца диаметром 125 мкм. Центральная часть сердцевины диаметром примерно 2 мкм дополнительно легирована ионами эрбия. Концентрация ионов эрбия составляет $10^{18} - 10^{19} \text{ см}^{-3}$, что обеспечивает длину используемого активного ОВ от нескольких единиц до нескольких десятков метров. Защитное покрытие диаметром 250 мкм имеет большой коэффициент преломления и эффективно выводит из оболочки постороннее излучение. Эрбиевые ОВ имеют большую числовую апертуру 0.2-0.35 и малый диаметр сердцевины. Для уменьшения потерь при их стыковке с традиционными одномодовыми ОВ используют линзовые устройства или фоконы. Эрбиевые ОВ имеют очень большое затухание для волн сигнала (2.5-8 дБ/м) и накачки (1.6-6 дБ/м).

Рассмотрим принцип работы ОУ на основе трехуровневой модели активных частиц находящихся в сердцевине ОВ. Известно, что в соответствии с квантовыми представлениями энергия активных частиц принимает дискретную совокупность уровней. Уровень с наименьшей возможной энергией называют основным. Возможные энергетические уровни представляют в виде диаграммы. На рис. 5.5а показана упрощенная трехуровневая квантовая система. На диаграмме показаны уровни с энергиями соответствующих состояний $W_3 > W_2 > W_1$ и с населенностями N_i , которые определяются числом частиц на данном энергетическом уровне в единице объема.

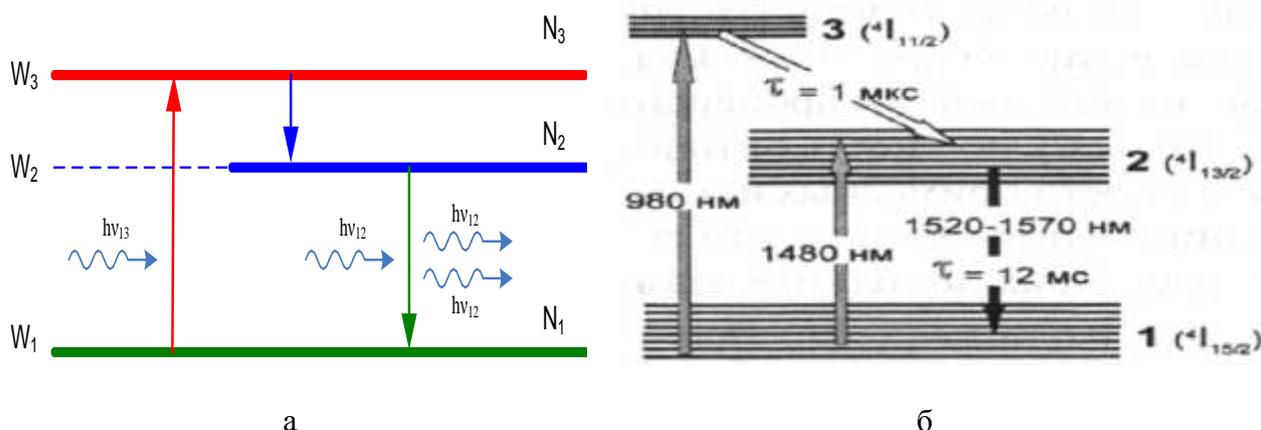


Рис. 5.5. Трехуровневая квантовая система.

В соответствии с основным принципом квантовой механики, сформулированным Вольфгангом Паули, на одном энергетическом уровне не могут находиться разные частицы. Поэтому отдельные уровни, показанные на рис. 5.5а, распадаются на множество подуровней, образующих полосы, как показано на рис. 5.5б. Каждый из трех уровней может характеризоваться средней энергией W_1, W_2, W_3 и населенностью N_1, N_2, N_3 .

Переход с 1 (основного) уровня (полосы) на другой, например 3 уровень возможен при поглощении квантов (фотонов) с энергиями, лежащими в некоторой полосе. Можно ввести понятие средней энергии фотона W_{13} и частоты ν_{13}

$$W_{13} = h\nu_{13} = W_3 - W_1, \quad (5.1)$$

где $h = 6.63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} = 4.14 \cdot 10^{-15} \text{ эВ} \cdot \text{с}$ - постоянная Планка.

Это излучение мы будем называть излучением накачки.

Переходы с более высоких уровней, например с 3 уровня на 2 и со 2 уровня на 1 также сопровождаются излучением квантов. Это могут быть фотоны или фононы. Обычно

фотонами называют кванты света УФ, видимого или ближнего ИК диапазона, фонами называют кванты теплового (инфракрасного) излучения с большой длиной волны.

Для рассматриваемой квантовой системы переходы с третьего уровня на второй сопровождаются спонтанным (самопроизвольным) излучением фононов. Переходы со второго уровня на первый сопровождаются излучением фотонов. Оно может быть как спонтанным, так и вынужденным (индуцированным, стимулированным).

Рассмотрим спонтанное излучение. Возбужденное состояние частицы является неустойчивым и через некоторое время пребывания на верхнем уровне она самопроизвольно под действием внутренних возмущений, совершает переход на нижний энергетический уровень с испусканием кванта. При этом частоты фотонов лежат в некотором диапазоне, начальные фазы волновых пакетов, направления распространения и состояние поляризации имеют случайный характер. Излучение при этом носит шумовой (некогерентный) характер и не может использоваться для усиления или генерации когерентного света. Для каждого спонтанного перехода может быть введена величина τ_{ij} среднего времени жизни (времени релаксации). Она определяет время, в течение которого первоначальная населенность верхнего уровня уменьшается в $e \approx 2.73$ раз. Время релаксации для различных переходов может лежать в широком диапазоне значений от 10^{-2} до 10^{-9} . Для эрбиевого ОВ $\tau_{32}=1$ мкс, а для $\tau_{21}=12$ мс. Уровень 2 можно назвать метастабильным. Такие уровни могут долго сохранять высокую концентрацию (населенность). Именно такие уровни используются для усиления и генерации излучения.

Под действием фотонов накачки частицы переходят с 1 уровня на 3 (вспомогательный) уровень, который обладает малым временем релаксации. Переход с 3 уровня на 2 происходит с малой задержкой и без излучения фотонов. Населенность второго (метастабильного) уровня возрастает и начинает выполняться условие

$$N_2 > N_1. \quad (5.2)$$

Возникает так называемая инверсная населенность для 2 уровня.

Для создания инверсной населенности используется система энергетической накачки. В качестве накачки можно использовать излучение лазера соответствующей длины волны для создания фотонов нужной энергии. В трехуровневой квантовой системе для накачки обычно используют излучение с длиной волны $\lambda=980$ нм. Возможна также, так называемая двухуровневая схема накачки, когда излучение накачки переводит квантовые частицы в верхние подуровни второго уровня. В этом случае используется накачка с длиной волны 1480 нм. Обычно для накачки используется излучение мощностью 20-500 мВт (13-27 дБм).

Если рассмотренная квантовая система с инверсной населенностью метастабильного второго уровня облучается квантами со средней энергией фотона W_{12} и частотой ν_{12} . Эти кванты можно рассматривать как оптический сигнал, который мы хотим усилить. В принципе эти кванты могут, как поглощаться, вызывая переходы на более высокий уровень (рис. 5.6б), так и вызывать вынужденное излучение на той же частоте (рис. 5.6а). Причем при инверсной населенности вероятность возникновения вынужденных фотонов значительно больше, чем вероятность поглощения. В этом случае излученные кванты когерентны, то есть имеют ту же частоту, фазу, поляризацию и направление, что и вызвавший излучение квант. Это процесс когерентного оптического усиления. Таким образом, излучение накачки отдает свою энергию сигналу. Процесс усиления носит распределенный характер.

К сожалению, в этой схеме могут возникать в результате спонтанных переходов фотоны имеющие частоту сигнала. При дальнейшем распространении по активному ОВ эти спонтанные фотоны усиливаются, образуя усиленное спонтанное излучение (УСИ), которое имеет постоянную и шумовую составляющие интенсивности (мощности) излучения. УСИ выходит из эрбиевого ОВ в обе стороны. Попадая вместе с полезным сигналом на фотоприемник, УСИ ухудшает отношение сигнала к шуму.

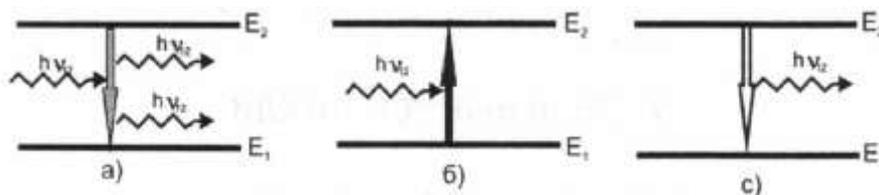


Рис. 5.6. Квантовые переходы при взаимодействии фотона сигнала: вынужденный переход с испусканием дополнительного фотона сигнала (а), вынужденный переход с поглощением фотона сигнала (б), спонтанный переход с испусканием фотона (с)

Для практической реализации оптического эрбиевого усилителя излучение накачки вводится в то же ОВ, по которому распространяется сигнал с помощью ответвителя WDM. Использование для объединения излучений сигнала и накачки ответвителя WDM обусловлено тем, что такой ответвитель обеспечивает минимальные вносимые потери, как для накачки, так и для сигнала. В зависимости от направления распространения излучения сигнала и накачки различают попутную (рис. 5.7а), встречную (рис. 5.7б) и двунаправленную накачки (рис. 5.7 а и б). В результате взаимодействия излучения сигнала и накачки она отдает свою энергию сигналу.

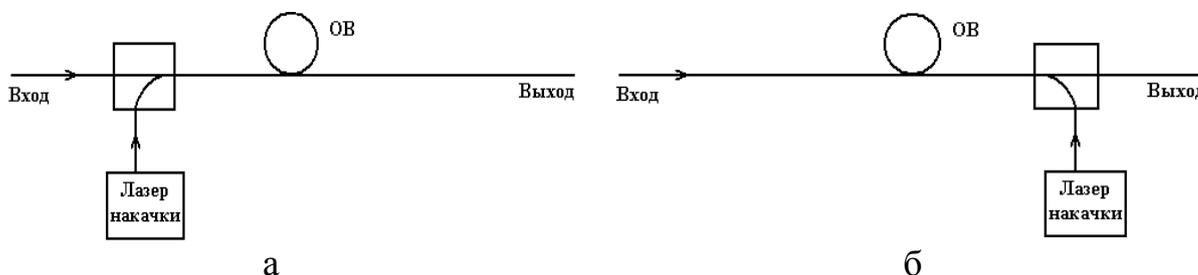


Рис. 5.7. Упрощенные схемы накачки волоконных ОУ.

Под эффективностью накачки понимают прирост коэффициента усиления G в дБ при увеличении мощности накачки P_p в мВт на наиболее крутом участке характеристики $G(P_p)$. В принципе для накачки эрбиевого ОУ могут использоваться и другие длины волн. В таблице 5.2 приведены сведения о них и эффективности накачки.

Таблица 5.2. Эффективность накачки эрбиевых ОУ

Длина волны, нм	980	1480	664	532	827
Максимальная эффективность накачки, дБ/мВт	11	6.3	3.8	2.0	1.3

Длина волны отсечки эрбиевых ОВ находится в пределах 800-950 нм, т.е. для излучения накачки с длинами волн 980 и 1480 нм они являются одномодовыми. Нелинейное взаимодействие излучений сигнала и накачки происходит в легированной эрбием центральной части сердцевины.

5.3. Коэффициент перекрытия. Сечения рассеяния.

Эффективность взаимодействия излучения накачки с ионами эрбия определяется коэффициентом перекрытия, который равен доли мощности излучения сигнала, проходящей через площадь поперечного сечения (πR^2) распределения ионов эрбия в сердцевине ОВ (рис. 5.8) [2].

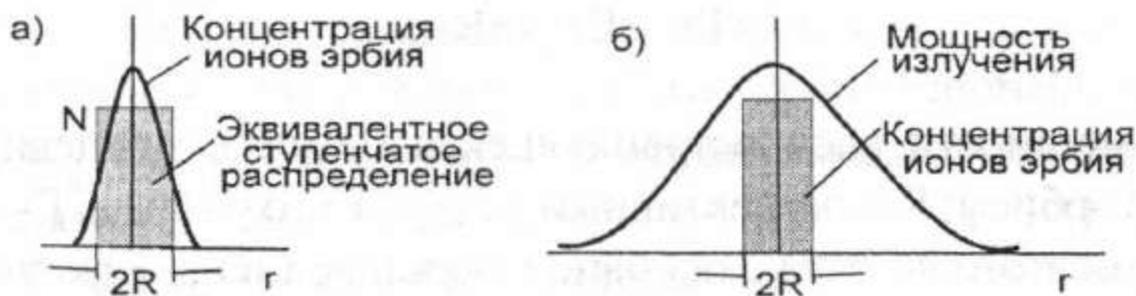


Рис. 5.8. Распределения концентрации ионов эрбия (а) и мощности излучения (б) в поперечном сечении волокна

В приближении, когда функция распределения ионов эрбия в поперечном сечении ОВ аппроксимирована ступенчатой функцией с диаметром $2R$, а распределение интенсивности основной моды волокна описывается функцией Гаусса

$$I(r) = \frac{P_0}{\pi \cdot r_{pm}^2} \cdot \exp\left(-\frac{r^2}{r_{pm}^2}\right), \quad (5.3)$$

выражение для коэффициента перекрытия представляется в виде [2]:

$$\Gamma = 1 - \exp\left(-\frac{R^2}{r_{pm}^2}\right) \quad (5.4)$$

где r_{pm} — радиус модового пятна.

При $R \ll r_{pm}$, как видно из (5.4), коэффициент перекрытия равен отношению площади сердцевинки к площади модового пятна:

$$\Gamma = \frac{\pi \cdot R^2}{\pi \cdot r_{pm}^2}. \quad (5.4a)$$

Он получается тем больше, чем большая часть моды содержится в части сердцевинки ОВ, легированной эрбием.

Зависимость коэффициента перекрытия от длины волны излучения и числовой апертуры волокна определяется зависимостью радиуса модового пятна r_{pm} от нормированной частоты ОВ

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot a \cdot NA \quad (5.5),$$

где a — радиус сердцевинки ОВ.

Радиус модового поля r_{pm} может быть рассчитан с помощью формулы:

$$\frac{r_{pm}}{2 \cdot a} = 0.65 + 1.619 \cdot V^{-1.5} + 2.879 \cdot V^{-6} \quad (5.5a)$$

(точность формулы 1% при $1.2 < V < 2.4$) [6].

При $V < 2.5$ для оценок удобно использовать приближенную формулу:

$$\frac{r_{pm}}{R} \cong \frac{5.2}{V}. \quad (5.5b)$$

С ее помощью получаем приближенное выражение для радиуса модового пятна:

$$r_{pm} \cong \frac{0.4 \cdot \lambda}{NA} \quad (5.5b)$$

Оценим интенсивность излучения в области эрбиевого ОВ, легированного эрбием. Оно выражается через оптическую мощность P соотношением:

$$\langle I \rangle = \frac{\Gamma \cdot P}{\pi \cdot R^2}, \quad (5.6)$$

где $\Gamma \cdot P$ — доля мощности, распространяющейся в центральной части сердцевины ОВ, легированной эрбием; R — эффективный радиус этого участка; Γ — коэффициент перекрытия этого участка с основной модой ОВ. Таким образом, коэффициент перекрытия Γ учитывает неоднородность распределения оптической мощности в поперечном сечении ОВ. Как видно из (5.6), средняя интенсивность получается тем больше, чем больше коэффициент перекрытия и чем меньше площадь поперечного сечения распределения ионов эрбия. Поэтому в оптических усилителях используются ОВ с малой площадью модового пятна и соответственно с большой числовой апертурой.

Усилительная способность эрбиевого ОВ зависит от соотношения вероятностей вынужденного излучения (переход с уровня 2 на 1) и вынужденного поглощения (переход с уровня 1 на 2). Для расчета вероятностей индуцированных переходов вводят понятия сечений рассеяния, которые имеют размерность м^2 [2]. Усредненные по поперечному сечению ОВ вероятности индуцированных переходов записываются в виде:

$$\text{для вынужденного излучения } W_{iz} = \frac{\sigma_{iz} \cdot \langle I \rangle}{h \cdot \nu} = \sigma_{iz} \cdot \langle F \rangle \quad (1/c) \quad (5.7a)$$

$$\text{и для вынужденного поглощения } W_{pg} = \frac{\sigma_{pg} \cdot \langle I \rangle}{h \cdot \nu} = \sigma_{pg} \cdot \langle F \rangle \quad (5.7b)$$

где σ_{pg} и σ_{iz} - сечения рассеяния для вынужденного поглощения и излучения.

Вероятности пропорциональны средней плотности фотонов ($1/(\text{м}^2 \text{ с})$)

$$\langle F \rangle = \langle I \rangle / (h \cdot \nu), \quad (1/(\text{м}^2 \text{ с})) \quad (5.8)$$

где $\langle I \rangle$ - средняя интенсивность излучения в легированной эрбием части сердцевины ОВ (Вт/м^2).

В геометрической интерпретации сечения поглощения σ_{pg} можно полагать, что поток фотонов рассеивается на мишенях с эффективной площадью σ_{pg} . Аналогично можно представить сечение излучения σ_{iz} в виде эффективной площади, с которой происходит излучение от точечных излучателей. Спектры сечений для перехода 1-2 и 1-3 ионов эрбия в кварцевом волокне с сердцевиной, легированной германием с добавкой алюминия, приведены на рис. 5.9.

Отметим, что в поперечном направлении ОВ вероятности индуцированных переходов получаются разными, так как интенсивность основной моды в этом направлении не постоянна. Поэтому при строгих расчетах характеристик волоконного усилителя необходимо проводить интегрирование не только по продольной координате ОВ, но и по поперечным координатам.

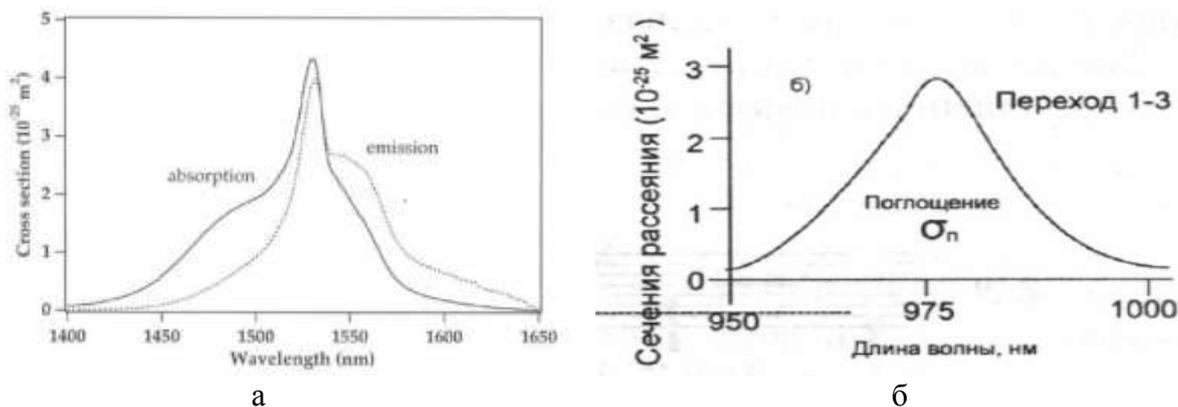


Рис. 5.9. Спектры сечений поглощения и испускания ионов эрбия в кварцевом стекле: а) переход между основным 1 и метастабильным состоянием 2; б) переход между основным и возбужденным состоянием 3

Как видно из рис. 5.9а, для перехода 1-2 сечение поглощения на $\lambda=1480$ нм равно примерно $\sigma_{pg}=1.5 \cdot 10^{-25} \text{ м}^2$. Для перехода 1-3 в максимуме на $\lambda=980$ нм сечение поглощения почти в 2 раза больше: $\sigma_{pg}=2.7 \cdot 10^{-25} \text{ м}^2$. Но этот максимум достаточно острый, что увеличивает требования к стабильности длины волны ЛД накачки. Для перехода 1-2 на $\lambda=1480$ нм выполняется условие $\eta = \frac{\sigma_{iz}}{\sigma_{pg}} < 1$, т.е. вероятность поглощения

превышает вероятность излучения, что и позволяет эффективно осуществлять накачку на этой длине волны через этот переход. Сечение испускания на $\lambda=980$ нм (рис. 5.9б) не приводится, так как концентрация ионов эрбия в состоянии 3 мала, т.к. они быстро релаксируют в состояние 2 без излучения.

Сечения σ_{iz} и σ_{pg} лазерного перехода совпадают в середине диапазона на $\lambda_0=1535$ нм. В коротковолновой части диапазона $\eta = \frac{\sigma_{iz}}{\sigma_{pg}} < 1$, а в длинноволновой части

$\eta = \frac{\sigma_{iz}}{\sigma_{pg}} > 1$. Соответственно вероятность поглощения коротковолнового излучения

больше вероятности испускания и наоборот, вероятность испускания длинноволнового излучения больше вероятности поглощения. Эти различия обусловлены тем, что населенность верхних энергетических уровней в силу распределения Больцмана меньше населенности нижних уровней (рис. 5.10).

Величина η , учитывая, что время установления (~ 1 мс) теплового равновесия на уровне 2 (в мультиплете 2) заметно меньше времени перехода $\tau_{sp} \sim 10$ мс, определяется простым выражением [2]:

$$\eta = \frac{\sigma_{iz}}{\sigma_{pg}} = \exp\left[\frac{h \cdot (\nu - \nu_0)}{kT}\right], \quad (5.9)$$

где h - постоянная Планка; k — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура волокна; $\nu_0 = \frac{c}{\lambda_0}$, $\lambda_0 \approx 1535$ нм - длина волны, на которой $\eta=1$. Зависимость η от λ при комнатной температуре приведена на рис. 5.11. Соотношение (5.9) устанавливает однозначную связь между сечениями испускания и поглощения. Измерить спектр поглощения проще, чем спектр испускания. По измеренному спектру поглощения с помощью (5.9), можно рассчитать спектр испускания.

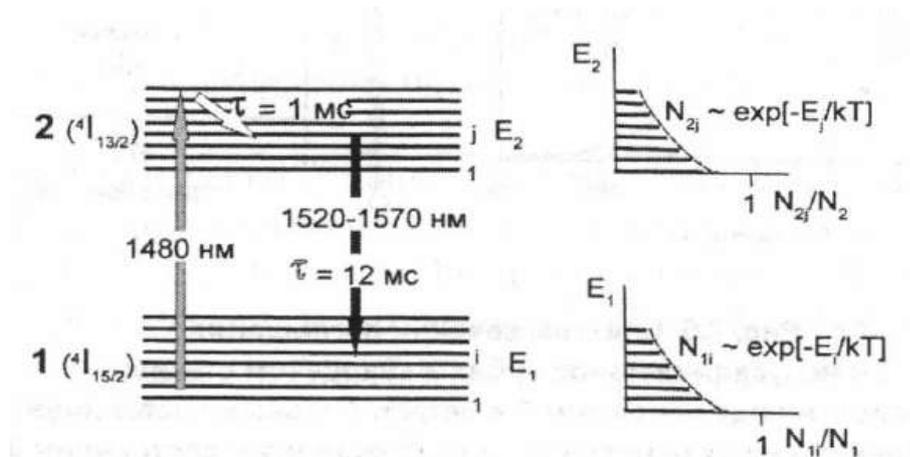


Рис. 5.10. Основное 1 и метастабильное 2 состояния иона эрбия в кварцевом стекле. Населенность их энергетических уровней описывается распределением Больцмана

Ширина спектра испускания ионов эрбия, внедренных в сердцевину ОВ, заметно превышает ширину спектра испускания свободного иона эрбия. Определяющее влияние материала сердцевины ОВ на спектр испускания связано с тем, что ионы эрбия окружены молекулами этого материала. Под действием молекул окружения уровни энергии ионов расщепляются на подуровни (рис. 5.10). Величина расщепления и определяет ширину полосы излучения. Наиболее широким спектром испускания обладают ионы эрбия в стекле, легированном германием с добавкой алюминия [2]. Причем в первом приближении этот спектр уширен однородно. В ОВ, сердцевина которых легирована только Ge, в спектре испускания наблюдаются два пика. Добавка Al уменьшает амплитуду длинноволнового пика так, что в спектре испускания образуется полка шириной примерно 20 нм (1535...1555 нм) (рис. 5.9а).



Рис. 5.11. Зависимость отношения сечения испускания к сечению поглощения от длины волны

5.4. Спектры усиления

Спектр усиления (поглощения), показанный на рис. 5.12 определяется результирующим сечением рассеяния σ

$$\sigma_y = \frac{N_2}{N} \cdot \sigma_{iz} - \frac{N_1}{N} \cdot \sigma_{pg} = n_2 \cdot \sigma_{iz} - n_1 \cdot \sigma_{pg}, \quad (5.10)$$

где N_1 и N_2 концентрации ионов эрбия на 1 и 2 уровнях, соответственно,
 $N = N_1 + N_2$ (5.11)

- концентрация ионов эрбия в ОВ.

$$n_1 = \frac{N_1}{N} \text{ и } n_2 = \frac{N_2}{N} \quad (5.12)$$

- относительные концентрации ионов эрбия на 1 и 2 уровнях, соответственно.

Относительная концентрация ионов эрбия на 2 уровне изменяется от $\gamma=0$ (концентрация ионов эрбия на уровне 2 равна 0) до $\gamma=1$ (все ионы эрбия перешли на уровень 2). При выключенной накачке населенность состояния 2 практически нулевая и усилитель интенсивно поглощает свет. При 50% инверсии населенностей ОВ в усилителе просветляется ($\sigma_{iz}/\sigma_{pg}=1$) на длине волны $\lambda \sim 1535$ нм, поглощает свет в коротковолновой части диапазона ($\sigma_{iz}/\sigma_{pg} < 1$) и усиливает свет в длинноволновой части диапазона ($\sigma_{iz}/\sigma_{pg} > 1$).

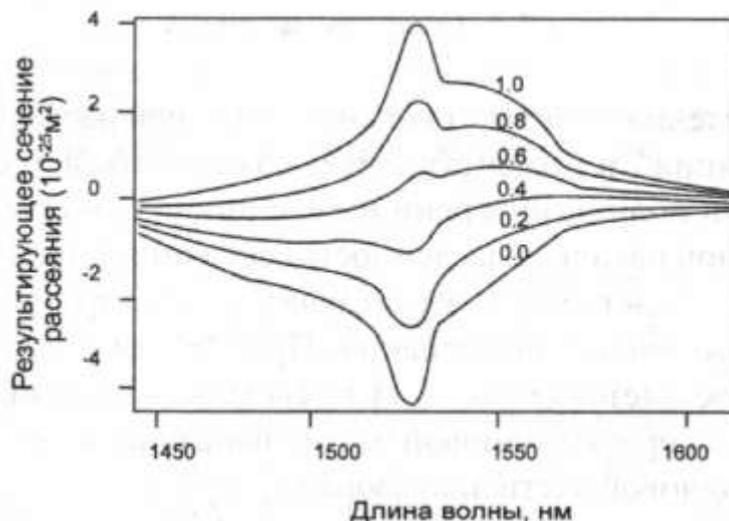


Рис. 5.12. Спектральная зависимость результирующих сечений усиления/поглощения эрбиевого ОВ при разных значениях относительной средней населенности γ метастабильного состояния 2. Верхняя кривая – населенность 100 % ($\gamma=1$), нижняя кривая – населенность 0 % ($\gamma=0$).

Полагаем, что изменения мощности излучения сигнала происходит только в области сердцевин, легированной ионами эрбия. Приращение мощности на участке сердцевин ОВ длиной dz общей площадью $\pi \cdot R^2$ равно разности между излучаемой и поглощаемой мощностями:

$$dP_c/dz = P_c(z) \cdot \Gamma(z) \cdot (n_2 \cdot \sigma_{iz} - n_1 \cdot \sigma_{pg}) = g(z) \cdot P_c, \text{ Вт/м} \quad (5.13)$$

где $n_1 = N_1/N$ и $n_2 = N_2/N$, причем $n_1 + n_2 = 1$;

$\Gamma(z)$ — коэффициент перекрытия;

$$g(z) = \Gamma_c \cdot [n_2 \cdot (\sigma_{iz} + \sigma_{pg}) - \sigma_{pg}] = \Gamma_c \cdot N \cdot \sigma_y(z) \quad (5.14)$$

усилительная способность, 1/м.

В оставшейся части сердцевин поглощением на участке dz можно пренебречь. В выражении (5.14) мы также пренебрегли спонтанным излучением в области легированной ионами эрбия, так как оно не когерентно с усиливаемым сигналом, а также изменением населенности состояний 1 и 2 в поперечном направлении. В дальнейшем рассмотрении это спонтанное излучение будет учтено как усиленное спонтанное излучение (УСИ).

При $n_2=1$ результирующее сечение равно сечению испускания σ_{iz} , а при $n_2=0$ — сечению поглощения σ_{pg} . Спектры результирующего сечения (или иначе спектры усилительной способности) при разных значениях средней населенности приведены на рис. 5.12.

Большее распространение в литературе, посвященной теории эрбиевых усилителей, получила форма записи через максимальные показатели усиления

$$g^* = \Gamma_c \cdot N \cdot \sigma_{iz} \quad (5.15)$$

и поглощения

$$\alpha^* = \Gamma_c \cdot N \cdot \sigma_{pg} \cdot \quad (5.16)$$

Тогда для усилительной способности можно записать:

$$g(z) = n_2(z) \cdot (g^* + \alpha^*) - \alpha^* = \Gamma_c \cdot N \cdot [n_2(z) \cdot (\sigma_{iz} + \sigma_{pg}) - \sigma_{pg}] \cdot \quad (5.17)$$

Это выражение будем использовать в дальнейшем при расчете коэффициента усиления.

Оценим коэффициент усиления G в эрбиевом ОВ длиной L , интегрируя (5.14)

$$G = \exp \left[\int_0^L g(z) \cdot dz \right] = \exp \left\{ \int_0^L \Gamma_c \cdot N \cdot [n_2(z) \cdot (\sigma_{iz} + \sigma_{pg}) - \sigma_{pg}] \cdot dz \cdot \right\} \quad (5.18)$$

Запишем выражение (5.19) с учетом (5.18)

$$G = \exp \left\{ \int_0^L [n_2 \cdot (g^* + \alpha^*) - \alpha^*] \cdot dz \cdot \right\} = \quad (5.19a)$$

$$\exp \left\{ (g^* + \alpha^*) \cdot \int_0^L n_2 \cdot dz - \alpha^* \cdot L \right\} = \exp \left\{ L \cdot [(g^* + \alpha^*) \cdot \langle n_2 \rangle - \alpha^*] \right\}$$

$$\text{где } \langle n_2 \rangle = \frac{1}{L} \cdot \left[\int_0^L n_2 \cdot dz \right] \quad (5.19б)$$

- усредненная по длине L эрбиевого волокна относительная населенность состояния 2.

Для того чтобы с помощью (5.19а) найти численное значение коэффициента усиления, кроме показателей g^* и α^* необходимо знать еще и величину $\langle n_2 \rangle$ которая зависит от мощности накачки, сигнала и усиленного спонтанного излучения, а также от длины волны накачки и сигнала, длины волокна и т.д. Учесть все эти факторы удастся только путем численных методов расчета EDFA [2]. Задача усложняется при использовании многоканального сигнала и многочастотной накачки.

Отметим, что при малых сигналах величина $\langle n_2 \rangle$ зависит только от излучения накачки и не зависит от направления распространения сигнала. При усилении же сильного сигнала коэффициент усиления может зависеть от направления сигнала, так как в этом случае величина $\langle n_2 \rangle$ зависит от его мощности.

Как видно из рис. 5.12, при уменьшении $\langle n_2 \rangle$ усилительная способность уменьшается, усиление становится более однородным, а максимум усиления смещается в длинноволновую сторону. Поэтому для того чтобы получить необходимое значение коэффициента усиления в длинноволновом диапазоне (диапазоне L), приходится увеличивать длину ОВ. Спектры коэффициента усиления, рассчитанные при оптимально подобранной длине ОВ в приближении слабого сигнала [2], приведены на рис. 5.13. Из этого рисунка видно, что максимально широкая полка получается при $\langle n_2 \rangle = 0,4$, а при $\langle n_2 \rangle = 0,3$ спектр усиления смещается в длинноволновый диапазон L .

На практике важно корректировать изменение наклона полки в спектре усиления. Эти изменения возникают в длинной линии из-за изменения потерь в ОВ и мощности накачки в усилителях. Для коррекции наклона спектра между двумя оптическими усилителями, входящими в состав линейного усилителя, помещается аттенюатор [2]. Наклон полки корректируется путем изменения мощности накачки в одном из усилителей, а изменение величины коэффициента усиления - изменением потерь в аттенюаторе.

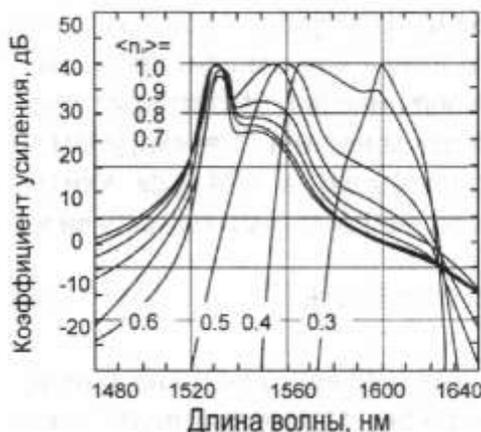


Рис. 5.13. Спектры коэффициентов усиления при разных значениях средней населенности метастабильного состояния 2 и оптимально подобранной длине эрбиевого ОВ

Спектр усиления ОУ удобно измерять путем сканирования длины волны монохроматического сигнала (рис. 5.14а). При сканировании слабого (пробного) сигнала ($p_{вх} = -40$ дБм) форма спектра усиления совпадает с одной из кривых, приведенных на рис. 5.12, для фиксированного значения средней населенности $\langle n_2 \rangle$. В этом случае эффектом насыщения сигнала можно пренебречь и величина $\langle n_2 \rangle$ не зависит от длины волны и мощности сигнала. При сканировании сильного сигнала ($p_{вх} = 0$ дБм) форма спектра усиления получается плоской и не совпадает ни с одной из кривых, приведенных на рис. 5.12. Объясняется это тем, что при сканировании мощного источника излучения ($p_{вх} = 0$ дБм) величина $\langle n_2 \rangle$ уменьшается из-за эффекта насыщения сигнала (рис. 5.14б). Сильнее всего $\langle n_2 \rangle$ уменьшается вблизи пиков усиления (например, на 1530 нм), и спектр усиления получается более плоским. Плоский спектр усиления (такой, как на рис. 5.14б, при $p_{вх} = 0$ дБм) – это то, что нужно для DWDM системы. Казалось бы, он достигается автоматически при работе в режиме сильного насыщения. Но это не так. Дело в том, что в DWDM системе длины волн передатчиков фиксированы и распределены в широком диапазоне длин волн. Поэтому при насыщении усилителя многоканальным сигналом $\langle n_2 \rangle$ примет какое-то определенное значение, не зависящее от длины волны. Форма спектра усиления будет определяться этим значением $\langle n_2 \rangle$ и совпадет с одной из кривых на рис. 5.12. Поэтому в DWDM системе, для того чтобы сделать спектр усиления EDFA более плоским, приходится использовать оптические фильтры для выравнивания спектра (GFF).

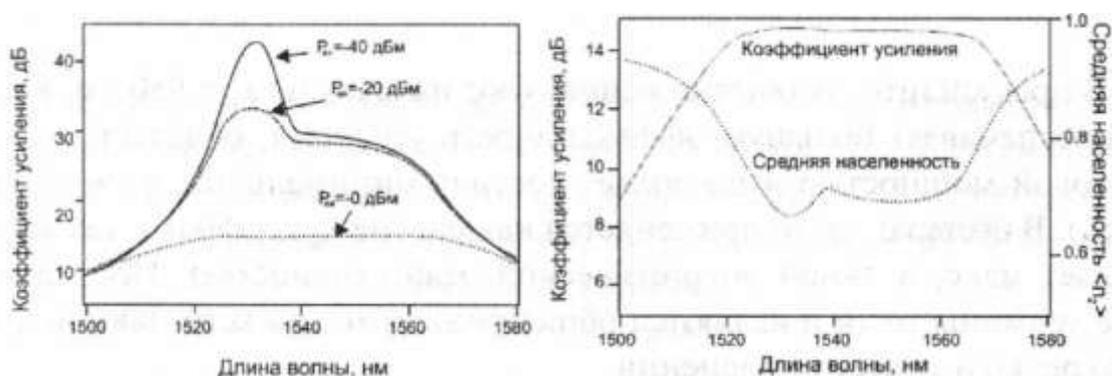


Рис. 5.14. Спектры коэффициента усиления при входной мощности -40 дБм, -20 дБм, и 0 дБм (а). Спектры коэффициента усиления и средней населенности $\langle n_2 \rangle$ при входной мощности 0 дБм (б).

Для того чтобы уменьшить величину усиленного спонтанного излучения (УСИ) усилитель делают двухкаскадным, с оптическим фильтром между каскадами. Это

уменьшает уровень спонтанного излучения на входе второго каскада. Таким образом, удается достичь коэффициента усиления ~ 50 дБ [2].

5.5. Эффективность усиления

В предусилителях обычно используют накачку на длине волны 980 нм, так как она обеспечивает большую эффективность усиления, обладает меньшей пороговой мощностью и позволяет достичь минимального шум-фактора (~ 3 дБ). В бустерах часто применяется накачка на длине волны 1480 нм, так как она обладает максимальной энергетической эффективностью. Приведенные выше термины, хотя и являются общепринятыми, но встречаются достаточно редко и требуют пояснений.

Эффективность усиления (обусловленная длиной волны накачки). На рис 5.14 приведены наилучшие результаты, полученные при исследовании эффективности накачки на длинах волн накачки 532 нм, 664 нм, 820 нм, 980 нм и 1480 нм [2]. Эффективность усиления измеряется в единицах дБ/мВт и определяется, как тангенс угла касательной, проведенной из начала координат к графику зависимости коэффициента усиления от мощности накачки.

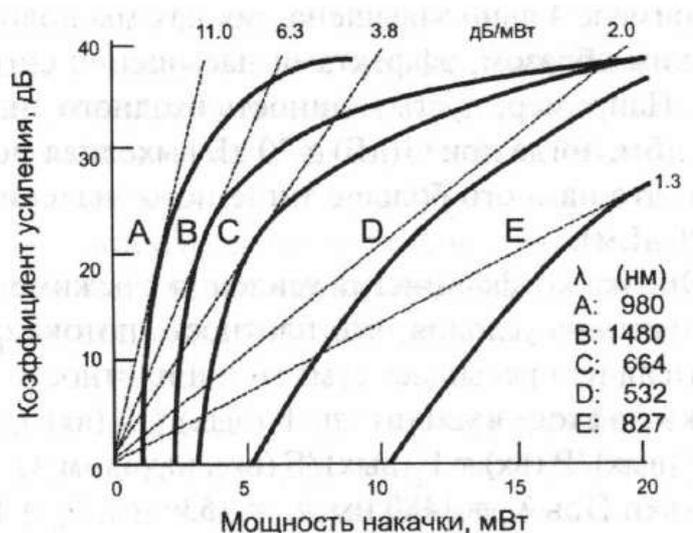


Рис. 5.15. Зависимости коэффициента усиления от входной мощности накачки (лучшие результаты на 1992 г.)

Как видно из рис. 5.15, высокое значение коэффициента усиления может быть получено при накачке EDFA практически на любой длине волны, соответствующей полосе поглощения эрбиевого волокна. Но наименьшая мощность накачки требуется на длинах волн 980 нм и 1480 нм, на которых мало поглощение накачки в возбужденном состоянии ионов эрбия [2]. Максимальная эффективность усиления ~ 11 дБ/мВт достигается при накачке на длине волны 980 нм.

5.6. Шум фактор

Спонтанное излучение возникает во всех сечениях эрбиевого ОВ, однако спонтанное излучение, распространяющееся в одном направлении с сигналом возникающее на входе усилителя, распространяясь вдоль всего активного волокна, усиливается сильнее, чем излучение, возникающее в его последующих частях. Поэтому основной вклад в результирующее спонтанное излучение вносит излучение, возникающее в начальном участке ОВ длиной $\approx 1/g$ (эффективная длина по усилению эрбиевого ОВ). Отметим, что существует также эффективная длина для любого ОВ $\approx 1/\alpha$. В любом случае эффективная длина определяет расстояние $1/\alpha$, на котором проявляются нелинейные явления, или расстояние $1/g$, на котором проявляется усиление. Это означает, что

существует оптимальная длина эрбиевого ОВ, а дальнейшее увеличение длины не имеет смысла.

Оценим мощность УСИ, возникающего на выходе усилителя, которое выражается через коэффициент усиления G и шум-фактор F следующим образом

$$P_{sp}(\nu) = h \cdot \nu \cdot \Delta\nu \cdot [F \cdot (G(\nu) - 1) + 1], \quad (5.20)$$

где $\Delta\nu$ - полоса частот, в которой измеряется мощность спонтанного излучения.

Шум-фактор, в предположении, что инверсия постоянна по длине ОВ, равен [2]:

$$F = 2 \cdot n_{sp} \cdot (G - 1) / G + 1 / G, \text{ где } n_{sp} = n_2 / [n_2 - (\sigma_{pg} / \sigma_{iz}) \cdot n_1]. \quad (5.21a)$$

При $G \gg 1$ можно считать $F \cong 2 \cdot n_{sp} = 2 \cdot n_2 / [n_2 - (\sigma_{pg} / \sigma_{iz}) \cdot n_1]. \quad (5.21б)$

Накачка на $\lambda_p=980$ нм позволяет почти полностью инвертировать состояния 1 и 2 ($N_2 \rightarrow N_1, N_I \rightarrow 0$). В этом случае достигается минимальное значение $F \approx 2$ (3 дБ). Поэтому накачка на $\lambda=980$ нм применяется в тех случаях, когда необходим маломушмющий усилитель.

5.7. Энергетическая эффективность накачки

Для усиления сигнала на входе в линию и в выходных каскадах линейных усилителей применяются оптические усилители мощности (бустеры). Их качество характеризуется энергетической эффективностью накачки (PCE - Power Conversion Efficiency) и величиной максимальной выходной мощности сигнала $P_{вых}$. Большая энергетическая эффективность позволяет использовать для накачки менее мощные и более дешевые источники излучения. Это весьма существенно, так как заметная доля стоимости оптического усилителя приходится на источник накачки. **Энергетическая эффективность накачки** равна отношению приращения мощности сигнала к мощности накачки [2]:

$$PCE = (P_{вых} - P_{вх}) / P_p \cong P_{вых} / P_p \quad (5.22)$$

Для того чтобы обеспечить высокую энергетическую эффективность, необходимо, чтобы практически все фотоны накачки передали свою энергию фотонам сигнала. Отношение числа фотонов сигнала m_c , появившихся в процессе усиления сигнала, к числу m_p поглощенных фотонов накачки за определенный интервал времени ΔT называется **квантовой эффективностью накачки**:

$$QCE = m_c / m_p. \quad (5.23)$$

Подставив в (5.22)

$$P_{вых} = m_c \cdot h \cdot \nu_c / \Delta T = m_c \cdot h \cdot c / (\lambda_c \cdot \Delta T) \text{ и } P_p = m_p \cdot h \cdot \nu_p / \Delta T = m_p \cdot h \cdot c / (\lambda_p \cdot \Delta T),$$

выразим PCE через QCE:

$$PCE = \lambda_p / \lambda_c \cdot QCE. \quad (5.24)$$

Из (5.24) видно, что при одном и том же значении QCE величина PCE тем больше, чем больше длина волны накачки. Максимальная величина QCE при накачке на $\lambda_p=1480$ нм и на $\lambda_p=980$ нм примерно одинакова (~80%, табл. 5.3). Поэтому для достижения максимальной энергетической эффективности целесообразнее использовать накачку на $\lambda_p=1480$ нм, а не накачку на $\lambda_p=980$ нм, обладающую максимальной эффективностью усиления. Максимальная энергетическая эффективность, достигнутая при накачке на $\lambda_p=1480$ нм, - порядка 86%, а при накачке на $\lambda_p=980$ нм - порядка 55%. Энергетическая эффективность накачки зависит от направления накачки, и ее максимальное значение достигается при встречной накачке [2] (рис. 5.16).

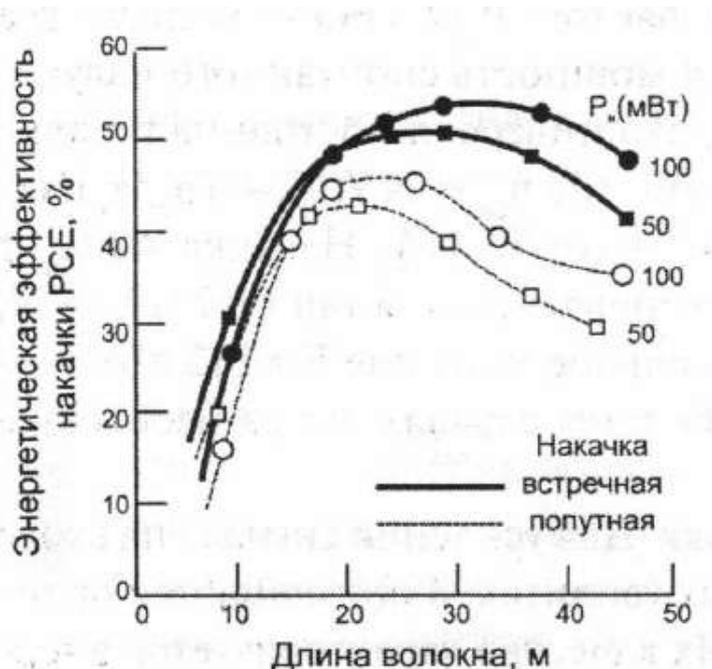


Рис. 5.16. Зависимости энергетической эффективности накачки от длины волокна для попутной и встречной накачек

Накачка эрбиевых усилителей осуществляется с помощью WDM ответвителя излучением одномодового ЛД с максимальной выходной мощностью порядка нескольких десятков-сотен мВт. Мощность ограничивается тем, что для эффективного ввода излучения в одномодовое ОВ необходимо использовать относительно маломощные одномодовые ЛД.

5.8. Пороговая мощность накачки

Под пороговой мощностью накачки понимается мощность, при которой населенность составляет 50%, т.е. эрбиевое ОВ становится прозрачным. Из рис. 5.17 видно, что для предусилителей и усилителей мощности используются эрбиевые ОВ различной конструкции.

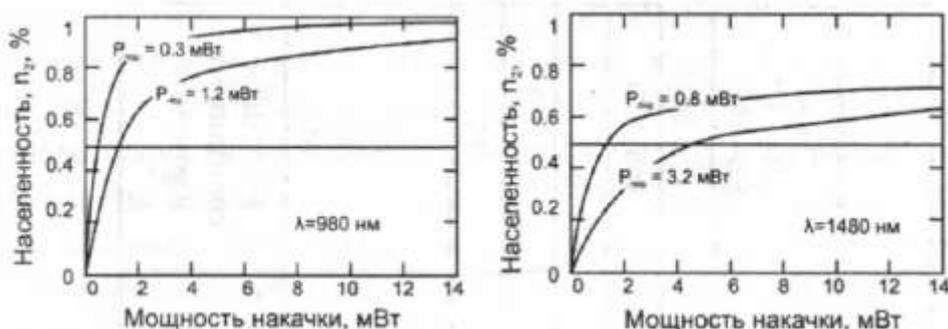


Рис. 5.17. Зависимость относительной населенности метастабильного состояния 2 от мощности накачки. Верхняя кривая для оптического предусилителя, нижняя для усилителя мощности.

5.9. Типы эрбиевых волокон

Требования, предъявляемые к параметрам эрбиевых ОВ, зависят от режима работы оптического усилителя. Предусилитель и усилитель с удаленной оптической накачкой (ROPA) работают обычно в ненасыщенном режиме. Мощность сигнала в них мала, так как она используется для усиления слабых сигналов. Мощность спонтанного излучения в них также мала, так как для получения малой величины шум-фактора необходимо, чтобы

усилители не находились в режиме самонасыщения. Усилитель мощности (бустер) работает в режиме глубокого насыщения мощностью сигнала. Влияние спонтанного излучения при этом мало, так как при глубоком насыщении усилителя его коэффициент усиления сильно уменьшается. Одним из основных требований для этих усилителей является высокая энергетическая эффективность накачки (PCE). Линейный усилитель занимает промежуточное положение между двумя этими типами усилителей: в нем нельзя пренебрегать мощностью сигнала и усиленного спонтанного излучения и, кроме того, необходима высокая PCE. Параметры основных типов эрбиевых ОВ, применяемых в оптических усилителях, приведены в табл. 5.3 [2].

Волокна 1-го типа используются в предусилителях ФПУ и усилителях с удаленной оптической накачкой (ROPA). Волокна изготавливаются с малым диаметром модового пятна (малым радиусом сердцевины и большой числовой апертурой), что приводит к увеличению интенсивности излучения и эффективности усиления. Из-за большой числовой апертуры ОВ увеличиваются потери, вызванные релеевским рассеянием, и уменьшается энергетическая эффективность накачки PCE. В данном случае это не так существенно, так как такие ОВ используются для усиления слабых сигналов. Кроме того, влияние потерь уменьшается за счет увеличения концентрации ионов эрбия, так как при этом оптимальная длина ОВ уменьшается.

Таблица 5.3

Типы промышленных эрбиевых волокон, используемых в усилителях [24]

Типы волокон	1	2	3	4	5
Пик поглощения (дБ/м) на $\lambda = 1530$ нм на $\lambda = 980$ нм	3,0–6,0 2,5–6,0	2,0–5,0 1,4–4,5	2,0–5,0 1,4–4,5	2,0–5,0 1,4–4,5	8,0–14,0 5,6–14,0
Числовая апертура	$\geq 0,33$	$0,29 \pm 0,03$	$0,23 \pm 0,03$	$0,17 \pm 0,03$	$0,29 \pm 0,04$
Длина волны отсечки (мкм)	800–950	800–950	800–950	800–950	800–950
Радиус сердцевины (мкм)	$\leq 1,1$	1,0–1,4	1,3–1,8	1,6–2,6	0,9–1,5
Диаметр модового пятна (мкм)	$\leq 4,0$	3,6–5,2	4,9–6,3	6,0–9,0	3,6–5,2
Потери на $\lambda = 1550$ нм (дБ/км)	≤ 30	≤ 8	≤ 8	≤ 4	15
Квантовая эффективность					
Накачка 100 мВт на 980 нм, %	71	78	80	80	65
Накачка 500 мВт на 980 нм, %	44	56	64	74	45
Накачка 100 мВт на 1480 нм, %	79	83	82	78	65
Применения	Предусилитель с удаленной оптической накачкой	Пре-дусилитель, 1-й каскад линейного усилителя	Бустер, 2-й каскад линейного усилителя	Мощный бустер	Источник спонтанного излучения

Волокна 2-го типа используются в первых каскадах линейных усилителей и в должны обладать одновременно большой эффективностью усиления и высокой энергетической эффективностью накачки. Диаметр модового пятна у них больше, а концентрация ионов эрбия меньше. Соответственно эффективность усиления у них больше, а энергетическая эффективность накачки меньше, чем у волокон 1-го типа.

В волокнах 3-го и 4-го типа диаметр модового пятна больше, чем у волокон 2-го типа. С увеличением диаметра модового пятна уменьшаются интенсивность накачки и влияние нелинейных эффектов, ограничивающих энергетическую эффективность в мощных бустерах, например таких эффектов, как поглощение накачки возбужденными состояниями ионов эрбия (ESA - Exited State Absorption).

Литература

нм по полувысоте, достигается при использовании в качестве добавки алюминия. Поэтому этот элемент стал необходимой составляющей материала сердцевины эрбиевых ОВ. Кварцевое стекло, легированное алюминием называют алюмосиликатным.

Основным источником шума в ОУ является усиленное спонтанное излучение. Усиленное спонтанное излучение возникает из-за того, что активная среда оптического усилителя генерирует вторичные фотоны не только в результате попадания возбуждающего излучения усиливаемого сигнала, но и в ответ на фотоны, возникающие в результате самопроизвольного перехода частиц с верхнего уровня на нижний. Для уменьшения шума, вызванного усиленным спонтанным излучением, сигнал на выходе оптического усилителя фильтруют с помощью полосового оптического фильтра.

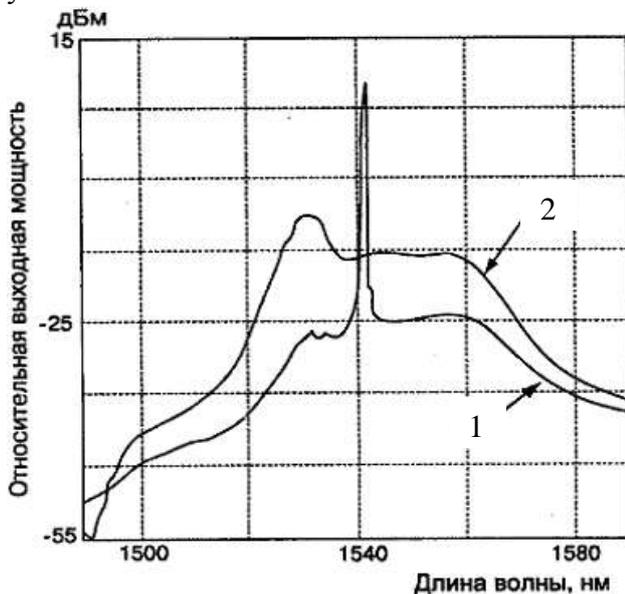
Рассчитать мощность усиленного спонтанного излучения (УСИ) на выходе ОУ после фильтрации можно следующим образом:

$$P_n = 2h\nu_s \cdot \Delta\nu \cdot F_n \cdot (G-1) \quad (8.3)$$

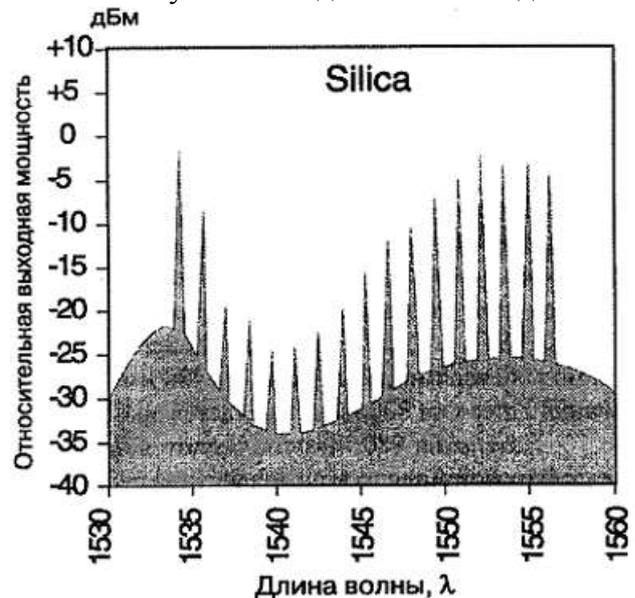
где $h = 6.63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с - постоянная Планка, ν_s - частота сигнала, $\Delta\nu$ - ширина спектра оптического фильтра, G - коэффициент усиления на частоте ν_s , F_n - шум-фактор.

Максимальный уровень УСИ будет при отсутствии усиливаемого сигнала. Изменение УСИ с частотой или длиной волны отражает изменение усиления ОУ.

На рис. 8.6 показаны амплитудно-волновые характеристики (АВХ) эрбиевого оптического усилителя с учетом усиленного спонтанного излучения. Из рис. 8.6 следует, что оптическое усиление значительно изменяется в используемом диапазоне длин волн.



а



б

Рис. 8.6. Амплитудно-волновые характеристики эрбиевого ОУ:

а – при отсутствии входного сигнала (1), при одной несущей с уровнем –6 дБм;

б – при многоканальном входном сигнале.

Это приводит к значительным трудностям при усилении сигналов в системах спектрального уплотнения с различными несущими. При прохождении многоканального сигнала по длинной линии через ряд усилителей информация в каналах с меньшим усилением может оказаться потерянной.

Для выравнивания амплитудно-волновой характеристики могут использоваться:

- оптические фильтры со специально сформированной зависимостью поглощения от длины волны,
- разделение общей полосы пропускания оптического усилителя на диапазоны и параллельное включение узкополосных усилителей,
- каскадное соединение оптических усилителей на активированных ОВ и усилителей на основе эффекта Рамана.

Таблица 8.4

Основные параметры	Эрбиевый ОУ	Рамановский ОУ	Полупроводниковый ОУ
Диапазон усиливаемых длин волн, нм	1530 - 1570	1200 - 1600	1460 – 1520
Полоса усиления, нм	30 – 50	40-100	60-100
Длина волны накачки, нм	980 1480	1080, 1365, 1395, 1410, 1427, 1450, 1455, 1480, 1487, 1497	840-1560
Коэффициент усиления при малом входном сигнале, дБ	17-45	3-30	15-30
Шум – фактор, дБ	3-6	3-5	5-6
Выходная мощность, мВт	10-2000	10-2000	10-100
Эффективность использования накачки, дБ/мВт	11 (980 нм) 6 (1480 нм)	0.08	28
Неравномерность АВХ	значительна	низкая	низкая
Чувствительность усиления к поляризации	незначительна	значительна	значительна

Эффективность использования ОУ определяется максимально допустимой длиной регенерационного участка.

8.1.6.1. Длина регенерационного участка без использования ОУ

Для оценки сравнительной эффективности использования оптических усилителей вначале необходимо оценить максимальные длины участков регенерации по затуханию без использования ОУ. Предполагаем, что борьба с хроматической дисперсией все равно должна проводиться, но другими методами. В табл. 8.5 приведены результаты расчетов длин регенерационных участков по затуханию для различных скоростей передачи. Выходная мощность конечных пунктов принималась равной 100 мВт. Шумы источника излучения не учитывались. Расчеты проводились для длины волны 1550 нм. Рассматривалась возможность использования в качестве фотоприемника лавинного диода (ЛФД) с коэффициентом лавинного умножения M .

Таблица 8.5

Система передачи	STM-1	STM-4	STM-16	STM-64
------------------	-------	-------	--------	--------

Скорость передачи, Гбит/с		0.155	0.62	2.5	10
$M = 1$	a_{max} , дБ	46.3	38.1	29.3	20.4
	l_{pe} , км	187	150	109	68
$M = 10$	a_{max} , дБ	51.9	45.0	37.7	29.6
	l_{pe} , км	209	177	143	106
$M = 30$	a_{max} , дБ	48.9	42.7	36.5	30.2
	l_{pe} , км	199	171	142	113

Из табл. 8.5 видно, что использование ЛФД позволяет увеличить длину регенерационного участка по сравнению с использованием р-і-п фотодиода, а коэффициент лавинного умножения M может быть оптимизирован.

8.1.6.2. Длина регенерационного участка с использованием предварительного ОУ

При тех же исходных данных были проведены расчеты максимальной длины регенерационного участка с использованием предварительного ОУ. В расчетах были использованы следующие параметры ОУ: коэффициент усиления ОУ $G_{py} = 30$ дБ в полосе $\Delta\lambda_{\phi} = 0.8$ нм и коэффициент шума $F = 6$ дБ. Результаты расчетов приведены в табл. 8.6.

Таблица 8.6

Система передачи		STM-1	STM-4	STM-16	STM-64
Скорость передачи, Гбит/с		0.155	0.62	2.5	10
$M = 1$	a_{max} , дБ	72.6	65.4	57.7	49.5
	l_{pe} , км	308	275	240	202

Из таблицы видно, что использование предварительного ОУ позволяет существенно (в 1.6-3 раза или на 120-130 км) увеличить длину регенерационного участка.

8.1.6.3. Длина регенерационного участка с использованием каскадного включения линейных дискретных ОУ

Рассмотрим также возможности использования каскадного включения линейных дискретных ОУ. Подразумеваем использование эрбиевых ОУ. Будем полагать, что все линейные ОУ имеют одинаковые параметры. Примем коэффициент усиления линейного ОУ равным $G_y = 30$ дБ, коэффициент шума равным $F = 6$ дБ, максимальную мощность равной $P_m = 100$ мВт (20 дБм) и мощность УСИ $P_{ASEy} = 2.6$ мВт (4.1 дБм) в полосе $\Delta\lambda_{УСИ}$. Вначале полагаем, что оптическая фильтрация в линейных ОУ не используется. Это позволяет их использовать для усиления многочастотных сигналов DWDM в полосе $\Delta\lambda_{УСИ} = 40$ нм. Максимальное затухание в пределах усилительного участка выбираем равным усилению в линейном ОУ $a_y = G_y = 30$ дБ. Считаем, что на выходе регенераторов также установлены ОУ мощности с коэффициентом усиления $G_b = 20$ дБ, коэффициентом шума $F = 6$ дБ, максимальной выходной мощностью $P_m = 100$ мВт (20 дБм), мощностью УСИ $P_{ASEb} = 0.26$ мВт (-5.9 дБм) в полосе $\Delta\lambda_{УСИ}$.

Были проведены расчеты максимальных мощностей оптического сигнала и УСИ на входе ФПУ при использовании нескольких линейных ОУ в широкой $\Delta\lambda_{УСИ} = 40$ нм и узкой $\Delta\lambda_{\phi} = 0.8$ нм оптических полосах, а также достижимой длины регенерационного участка. Результаты расчетов помещены в табл. 8.7 и показаны в виде диаграммы уровней на рис. 8.20.

Таблица 8.7

Кол-во ОУ, n	УСИ в полосе $\Delta\lambda = 40$ нм		УСИ в полосе $\Delta\lambda = 0.8$ нм		l_p , км
	P_{ASE} , мкВт	p_{ASE} , дБм	P_{ASE} , нВт	p_{ASE} , дБм	
0	0.26	-35.8	5.2	-52.8	112
1	2.8	-25.5	57	-42.5	224
2	5.4	-22.7	108	-39.7	337
3	8.0	-21.0	159	-38.0	449

4	11.0	-19.7	211	-36.8	561
5	13	-18.8	262	-35.8	673
6	16	-18.0	314	-35.0	786
7	18	-17.4	365	-34.4	898

На рис. 8.20 показаны уровни оптического сигнала для одноканальной системы и 10-канальной WDM с суммарной мощностью 100 мВт и уровни УСИ в широкой $\Delta\lambda_{УСИ} = 40$ нм и узкой $\Delta\lambda_{\phi} = 0.8$ нм оптических полосах. Видно, что с увеличением количества усилительных каскадов уровень УСИ и шумов растет, но вклад последующих каскадов в общий шум по сравнению с предыдущими ОУ уменьшается. Из табл. 8.7 следует, что длина регенерационного участка в 1000 км вполне достижима и не является пределом.

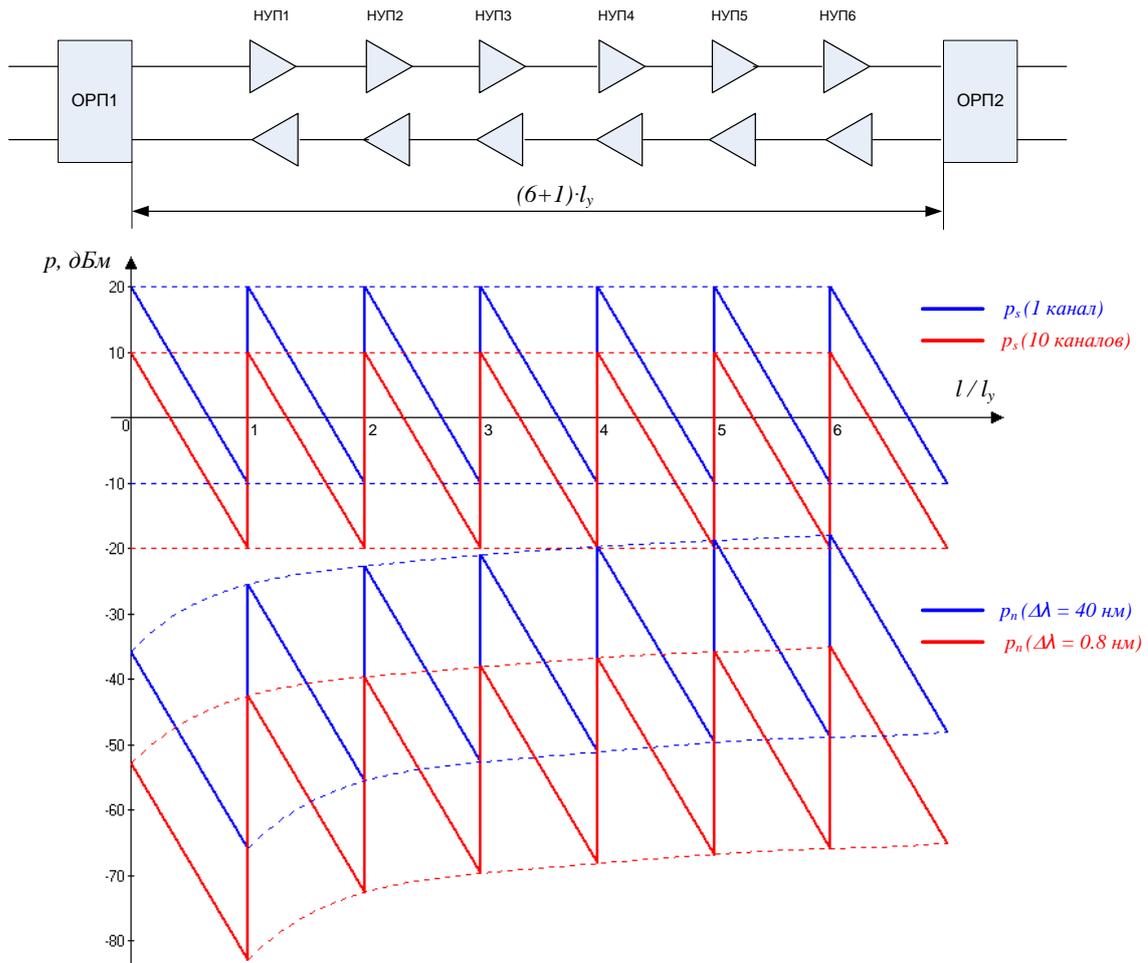


Рис. 8.20. Диаграммы уровней сигнала и шумов на регенерационном участке с 6-ю линейными ОУ

7. Вынужденное комбинационное рассеяние Рамана

7.1. Теоретическое описание эффекта вынужденного комбинационного рассеяния

Отметим, что у комбинационного рассеяния (КР), называемого также рассеянием Рамана по имени его открывателя индийского физика лауреата нобелевской премии Чандрасеkhара Венката, много общего с РМБ, а у вынужденного КР (ВКР) с ВРМБ. При этом различия в математическом описании этих явлений носят часто скорее количественный, чем качественный характер [1-5, 7, 12].

На рис. 7.1а показаны два вида рассеяния излучения в одномодовом оптическом волокне (ОВ). Первое это линейное рассеяние Рэля, которое не изменяет длины волны излучения и происходит во все стороны на микро неоднородностях среды. Его интенсивность обратно пропорциональна длине волны излучения в 4 степени. Второе это нелинейное рассеяние Рамана, при котором частота рассеянного излучения отличается от излучения накачки.

Сначала в ОВ при относительно небольших интенсивностях накачки возникает спонтанное рамановское или комбинационное рассеяние (КР) этого излучения. Этот нелинейный эффект (возникают новые частоты) приводит к тому, что небольшая часть мощности излучения накачки преобразуется в излучение с более низкой (стоксова составляющая КР) и более высокой (антистоксова составляющая КР) частотами. На рис. 7.1б показано изменение спектра излучения за счет стоксовой составляющей КР.

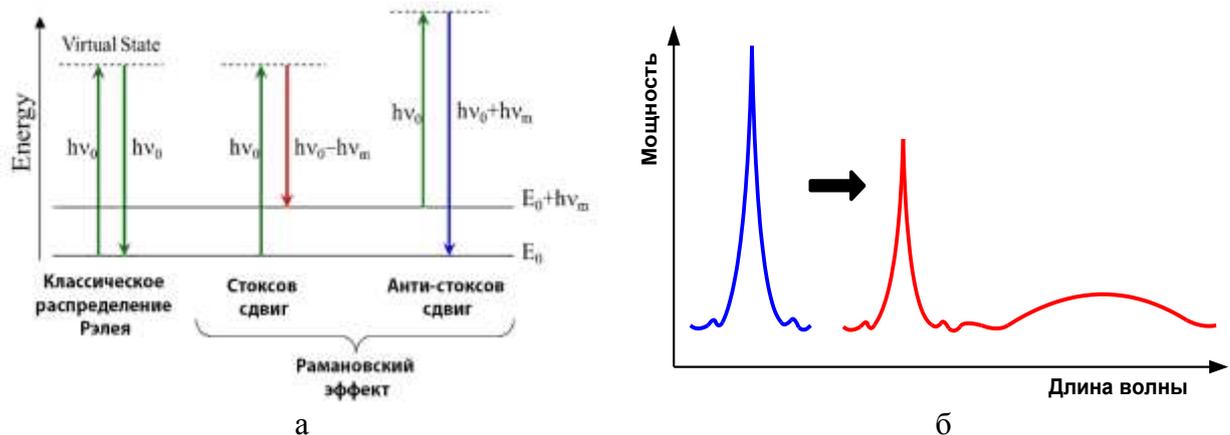


Рис. 7.1. Энергетические переходы в молекуле при рассеяниях Рэля и Рамана (а) и изменения спектра при рассеянии Рамана.

Изменение энергии и частоты фотона накачки и преобразование его в комбинационно рассеянный фотон происходит за счет обмена энергии фотона накачки с колебательной и/или вращательной модой молекулы вещества с энергией $h\nu_R$. При стоксовом рассеянии фотон накачки делится своей энергией с веществом, энергия и частота рассеянного фотона становится меньше, а молекула приобретает дополнительную энергию (остаточное возбуждение). При антистоксовом рассеянии фотон накачки заимствует энергию у вещества, энергия и частота рассеянного фотона увеличивается за счет энергии ранее возбужденной молекулы. Таким образом, спектр рассеянного света содержит несмещенную компоненту рэлеевского рассеяния на частоте падающего света, а также симметрично смещенные боковые компоненты стоксова и антистоксова КР. Относительная интенсивность боковых компонент КР для нерезонансных взаимодействий мала и составляет обычно $10^{-6} - 10^{-7}$ от интенсивности падающего света [4]. Стекла, используемые для изготовления ОВ, имеют широкие колебательные спектры, которые порождают широкие рамановские спектры.

В квантовой механике процесс КР описывается как рассеяние фотонов накачки на молекулах рассеивающей среды. Запишем выражения для энергий и частот спонтанно рассеянных фотонов. Для стоксова и антистоксова фотонов

$$h\nu_s = h\nu_p - h\nu_R \text{ и } \nu_s = \nu_p - \nu_R, \quad (7.1)$$

$$h\nu_A = h\nu_p + h\nu_R \text{ и } \nu_A = \nu_p + \nu_R. \quad (7.2)$$

При испускании каждого рассеянного фотона исчезает один фотон накачки. В кварцевом ОВ, легированном германием, центральная частота боковых полос, которой соответствует максимум рассеянного излучения, смещается на величину примерно $\nu_{Rm} = 13$ ТГц (смещение по длине волны примерно $\Delta\lambda_{pm} \approx 100$ нм, например $\lambda_p = 1450$ нм для $\lambda_{sm} = 1550$ нм).

Отметим, что вероятность возникновения стоксовых фотонов примерно на 1-2 порядка больше вероятности возникновения антистоксовых фотонов при небольших уровнях накачки. Это связано с тем, что количество уже возбужденных молекул, отдающих свою энергию фотону накачки, всегда меньше количества невозбужденных молекул, увеличивающих свою энергию за счет фотона накачки. Следовательно, меньше будет и интенсивность антистоксовой составляющей рассеянного излучения. Далее в этой главе мы будем в основном рассматривать стоксову составляющую рассеяния Рамана.

При увеличении мощности накачки наряду со спонтанным комбинационным рассеянием (КР) возникает вынужденное (стимулированное) комбинационное рассеяние (ВКР). Это явление также заключается в исчезновении фотона возбуждающего излучения и испускании фотона стоксовой или антистоксовой частоты, но вероятность этого процесса пропорциональна интенсивности возбуждающего и рассеянного излучения. Возникающий в результате ВКР фотон не отличим от возбуждающего фотона и имеет ту же частоту, фазу, поляризацию и направление движения.

Итак, если в ОВ вводится только интенсивное излучение с частотой ν_p (накачка), сначала имеет место спонтанное КР в некотором диапазоне длин волн с максимумом на частоте ν_{sm} . Затем рассеянное излучение начинает действовать, как стимулирующее и возникает вынужденное комбинационное рассеяние (ВКР), которое приводит к возникновению усиленного спонтанного излучения (УСИ), которое выходит из ОВ в обе стороны.

Явление ВКР, также как и ранее рассмотренное ВРМБ, может использоваться для усиления света в довольно широком диапазоне стоксовых частот. Для этого нужно, чтобы фотоны накачки и сигнала распространялись параллельно в одномодовом ОВ, но необязательно в одном направлении. Сигнальный фотон со стоксовой частотой ν_s , является стимулирующим и вызывает испускание второго фотона, который имеет такую же частоту, фазу, направление распространения и состояние поляризации. Таким образом, излучение сигнала, если он есть, когерентно усиливается за счет ВКР.

Спектр стоксовой составляющей ВКР для кварцевого ОВ показан на рис. 7.2. Фактически эта зависимость интенсивности ВКР или УСИ от частоты. Эта же зависимость отражает изменения усилительной способности от частоты. Отметим, что стоксов сдвиг ν_R , показанный на рисунке, реально имеет знак минус, т.е. частота стоксовой компоненты ниже частоты накачки. Его ширина определяется колебательными характеристиками атомов (молекул) материала. Кварцевое стекло, германий, фосфор и другие легирующие добавки в ОВ имеют сильно отличающиеся по форме и величине спектральные распределения. В кварцевом ОВ, легированном германием, частота пика коэффициента усиления ВКР ниже частоты накачки на $\nu_{Rm} = 13$ ТГц. Спектр усиления рамановского ОУ (рис. 7.1) достаточно широкий и составляет обычно $\Delta\nu_R = 5-7$ ТГц ($\Delta\lambda_R = 35-55$ нм).

Для расширения спектра усиления сигналов в окне прозрачности $\lambda_{sm}=1550$ нм может использоваться накачка от нескольких источников с длинами волн от $\lambda_p=1.34$ до 1.47 мкм.

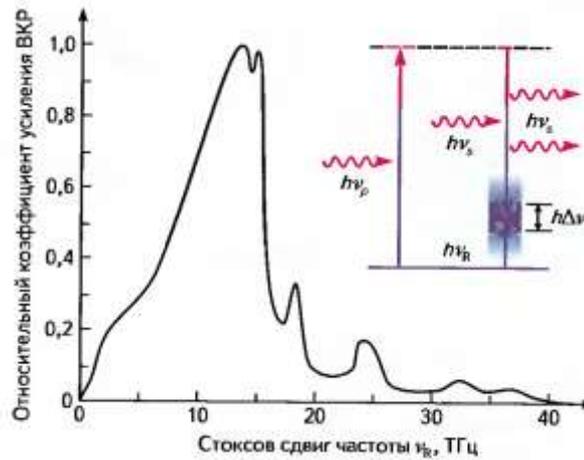


Рис. 7.2. Спектр ВКР и энергетическая диаграмма процессов усиления.

ВКР используется не только для создания волоконных оптических усилителей (ОУ), но и волоконных лазеров. Достоинство рамановского усиления и генерации заключается в том, что ширина полосы, в пределах которой они могут работать, определяется колебательным спектром материала, например кварцевого ОВ, а не шириной узкой линии перехода для вынужденного излучения, как при ВРМБ. Колебательные спектры достаточно широки и позволяют создавать рамановские ОУ и лазеры ВКР в полосе до 100 нм. Преимуществом ВКР также является большой разнос по частоте между сигналом и накачкой (13 ТГц).

Еще одним применением ВКР в ОВ является создание источников широкополосного излучения. Накачка вызывает в ОВ спонтанное комбинационное рассеяние, которое усиливается по мере распространения по ОВ за счет ВКР. При достаточной длине ОВ и интенсивности накачки возникает широкополосное достаточно мощное излучение (суперконтинум).

Коэффициент усиления (передачи) G рамановского ОУ зависит от длины пути L взаимодействия излучения накачки с излучением сигнала в ОВ, усилительной способности этого ОВ $g_R(\nu_p-\nu_s)=g_R(\nu_R)$, которая имеет размерность см/Вт. Коэффициент усиления зависит от разности частот накачки и сигнала ν_R , а также от интенсивности накачки I_p (Вт/см²). В первом приближении без учета затухания для накачки и сигнала в ОВ коэффициент усиления определяется выражением

$$G(\nu_s) = \frac{I_{se}}{I_{si}} = \exp[g_R(\nu_R) \cdot I_p \cdot L], \quad (7.3)$$

где I_{se} , I_{si} - интенсивности оптических сигналов на выходе и входе оптического усилителя, Вт/см².

Максимальная усилительная способность ВКР g_{Rm} в стандартном ОВ для частоты сигнала $\nu_{0sm}=287$ ТГц составляет $g_{0Rm} = 10^{-11}$ см/Вт при частоте накачки $\nu_{0p} = 300$ ТГц ($\lambda_p = 1$ мкм). Для других частот ν_{sm} длин волн g_{Rm} можно рассчитать по выражению

$$g_{Rm}(\nu_{sm}) = g_{Rm}(\nu_{0sm}) \cdot \frac{\nu_{0sm}}{\nu_{sm}}. \quad (7.3a)$$

Эффект ВКР находит практическое применение благодаря широкому спектру усиливаемых длин волн и большому разнесу по частоте между сигналом и накачкой. Изменяя частоту накачки можно создать ОУ на любой диапазон длин волн, а используя

несколько источников с разными длинами волн можно расширять полосу усиливаемых длин волн.

7.2. Упрощенная модель волоконно-оптического ВКР усилителя

7.2.1. Основные уравнения и их упрощенное решение

Для практической реализации волоконно-оптического рамановского ОУ излучение накачки вводится в то же ОВ, по которому распространяется сигнал с помощью ответвителя WDM. Так же, как и в эрбиевых волоконно-оптических усилителях (EDFA), различают попутную (рис. 7.3а), встречную (рис. 7.3б) и двунаправленную накачки (рис. 7.3а и 7.3б вместе).

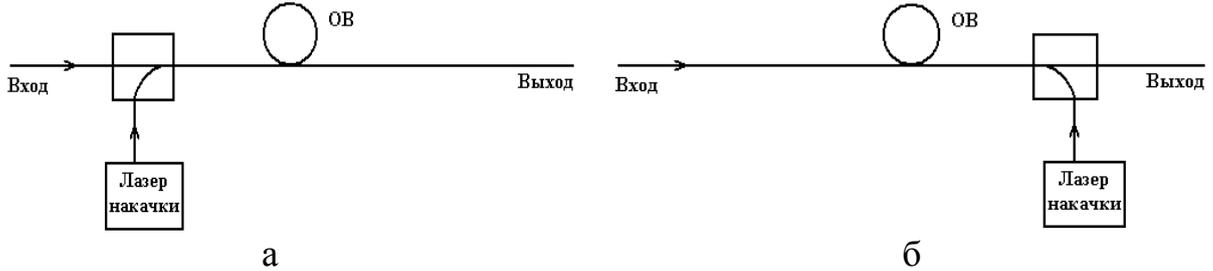


Рис. 7.3. Упрощенные схемы накачки волоконных ОУ.

Рассмотрим процессы, происходящие в однокаскадных волоконных ОУ (рис. 7.3а и 7.3б). Их основными элементами являются: лазер накачки, активная среда (обычно это телекоммуникационное ОВ) и направленный разветвитель (двухпортовый мультиплексор в волновой области - WDM), который обеспечивает ввод с малыми потерями в одно ОВ сигнала и накачки, где и происходит их взаимодействие.

Для изменений мощностей сигнала P_s на длине волны λ и накачки P_p (Вт) при прохождении расстояния dL в активной среде справедливо [5, 7, 12]:

$$\frac{dP_s}{dL} = \frac{g_R(v_R)}{S_p} \cdot P_p \cdot P_s - \alpha_s \cdot P_s, \quad (7.5)$$

$$\pm \frac{dP_p}{dL} = -\frac{v_p}{v_s} \cdot \frac{g_R(v_R)}{S_s} \cdot P_p \cdot P_s - \alpha_p \cdot P_p, \quad (7.6)$$

где $g_R(v_R)$ – усилительная способность активной среды на частоте $v_s = v_p - v_R$, м/Вт, v_s , v_p – частоты сигнала и накачки, соответственно, Гц, α_s , α_p – коэффициенты затухания для сигнала и накачки, соответственно, 1/м (Нп/м), S_s и S_p – эффективные площади поперечного сечения сердцевины ОВ для излучения сигнала и излучения накачки (м²). В выражении (7.6) знак «+» соответствует накачке в попутном, а знак «-» во встречном направлениях. В выражении (7.5) первый член правой части характеризует истощение мощности накачки за счет возрастания мощности сигнала, а второй обычное затухание накачки.

Система уравнений (7.5) и (7.6) не имеют строгого аналитического решения. Однако, если можно пренебречь истощением накачки, их можно решить аналитически [4]. В этом случае уравнение (7.6) примет вид:

$$\pm \frac{dP_p}{dL} = -\alpha_p P_p, \text{ или } \pm \frac{dP_p}{P_p} = -\alpha_p dz \quad (7.6a)$$

Интегрируя (7.6a), получим аналитическое решение (7.6a) для накачки:

$$P_p(L) = P_{p0} \cdot \exp(\mp \alpha_p \cdot L) \quad (7.6b)$$

где P_{p0} – мощность накачки в начале усилительного участка, L – расстояние, пройденное сигналом и накачкой в активной среде.

Подставив выражение (7.6б) в (7.5), можно получить

$$\frac{dP_s}{dL} = \left[\frac{g_R(\nu_R) \cdot P_{p0}}{S_p} \cdot \exp(\mp \alpha_p \cdot L) - \alpha_s \right] \cdot P_s, \quad (7.7)$$

где P_{p0} - мощность накачки при $L=0$, верхний знак в экспоненте соответствует накачке в попутном направлении, нижний - во встречном.

В результате интегрирования (7.7) получим выражения для мощностей сигнала и накачки на выходе ОВ длиной L :

$$P_s(L) = P_s(0) \cdot \exp\left(\pm \frac{g_R(\nu_R) \cdot P_{p0}}{S_p} \cdot L_{ef} - \alpha_s \cdot L\right), \quad (7.8)$$

$$P_p(L) = P_p(0) \cdot \exp(\mp \alpha_p \cdot L) \quad (7.9)$$

где L_{ef} - эффективная длина активной среды, в которой происходит оптическое усиление сигнала, и вообще проявляются нелинейные эффекты.

Величину L_{ef} можно рассчитать по выражению:

$$L_{ef} = \frac{1 - \exp(\mp \alpha_p \cdot L)}{\alpha_p}, \quad (7.10)$$

верхний знак в экспонентах соответствует накачке в попутном направлении, нижний - во встречном.

На рис. 7.4а приведен нормализованный измеренный спектр комбинационного усиления $g_R(\nu_R) = g_R(\nu_p - \nu_s)$ для плавленого кварца при накачке с длиной волны $\lambda_p = 1$ мкм. Ширина спектра усиления на уровне 0,5 составляет $\Delta\nu_s = 8$ ТГц или $\Delta\lambda_s = 63$ нм. Максимум усиления приходится на стоксову частоту, которая для плавленого кварца смещена относительно частоты накачки на $g_{Rm} = 13,2$ ТГц (примерно 100 нм). Следует отметить, что рамановское усиление максимально, если направления поляризации излучений сигнала и накачки совпадают (кривая а) и минимально, если их поляризации ортогональны (кривая б).

Для дальнейших расчетов была проведена аппроксимация экспериментальной зависимости рамановского усиления от частотного сдвига ν_R выражением:

$$Y_0(\nu_R) = \frac{K_1}{(\Delta\nu_1)^2 + (\nu_R - \nu_{01})^2} + \frac{K_2}{(\Delta\nu_2)^2 + (\nu_R - \nu_{02})^2}, \quad (7.11)$$

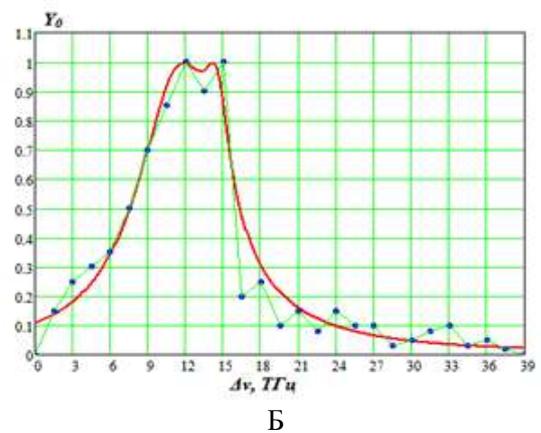
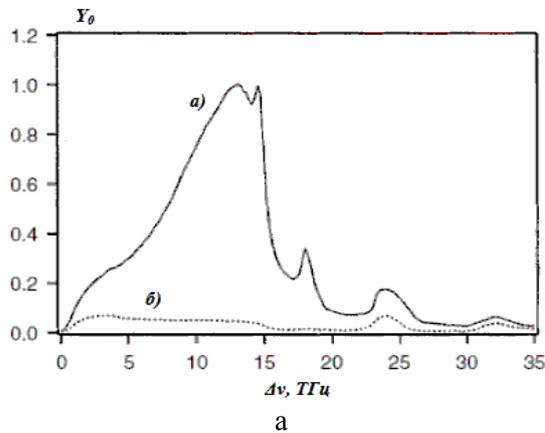


Рис. 7.4. Нормализованный спектр рамановского усиления, полученный экспериментально (а) и аппроксимированный (б).

Аппроксимация представляет собой сумму двух резонансных кривых с различными резонансными частотами ν_{01} и ν_{02} . На рис. 7.4б показана аппроксимирующая

кривая и экспериментальные точки. Полученные значения аппроксимирующих параметров: $K_1=15,8 \text{ ТГц}^2$, $K_2=0,518 \text{ ТГц}^2$, $\Delta\nu_1=4,1 \text{ ТГц}$, $\Delta\nu_2=1,2 \text{ ТГц}$, $\nu_{01}=11,5 \text{ ТГц}$, $\nu_{02}=14,5 \text{ ТГц}$.

Определим эквивалентную ширину аппроксимированного спектра усилительной способности $\Delta\nu_R$ путем интегрирования (7.11)

$$\Delta\nu_R = \int_0^{\nu_{Rmax}} Y(\nu_R) \cdot d(\nu_R) \quad (7.11a)$$

При $\nu_{Rmax} = 39 \text{ ТГц}$ $\Delta\nu_R = 11.5 \text{ ТГц}$.

Для стандартного ОВ максимальное значение усилительной способности на длине волны 1550 нм в соответствии с (7.3а) составляет $g_{Rm} = 6 \cdot 10^{-14} \text{ м/Вт}$.

На рис. 7.5 приведены результаты расчетов мощностей по выражениям (7.8-7.10) для рамановского ОУ при следующих исходных данных: $g_R = 6 \cdot 10^{-14} \text{ м/Вт}$, $S_p = 63,6 \text{ мкм}^2$, $\alpha_s = 0,2 \text{ дБ/км}$, $\alpha_p = 0,26 \text{ дБ/км}$, $P_{s0} = 0,1 \text{ мВт}$, $P_{p0} = 0,5 \text{ Вт}$ (для попутной накачки); $P_{p0} = 0,12 \text{ мВт}$ и $P_{pL} = 0,5 \text{ Вт}$ (для встречной накачки).

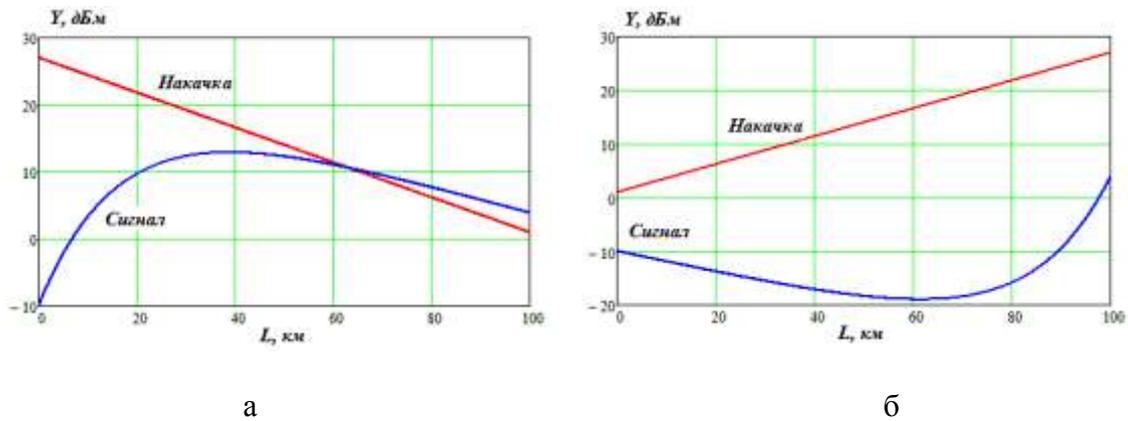


Рис. 7.5. Результаты расчетов зависимостей мощности сигнала и накачки от длины ОВ накачки для попутной (а) и встречной (б) накачки без учета ее истощения

Видно, что при попутной накачке сигнал с увеличением расстояния сначала растет, потом достигает максимума, и ослабляется, а накачка монотонно ослабляется.

При встречной накачке сигнал вначале может даже ослабляться, а потом при приближении к источнику накачки быстро возрастает.

Для волоконных ОУ существует оптимальная длина ОВ, при которой усиление достигает максимума. Для рамановских усилителей, использующих в качестве активной среды кварцевое ОВ, эта длина составляет десятки км.

7.2.2. Коэффициент усиления

Коэффициент усиления оптического усилителя зависит как от усилительной способности активной среды $g_R(\nu_p - \nu_s)$, так и от длины активной области L . Из упрощенного выражения (7.8) можно получить коэффициент оптического усиления:

$$G(\nu_s) = \frac{P_s(L)}{P_s(0)} = \exp\left(\frac{g_R(\nu_R)}{S_p} \cdot P_{p0} \cdot L_{ef} - \alpha_s \cdot L\right). \quad (7.12)$$

На рис. 7.6а показаны результаты расчетов эффективной длины L_{ef} по выражению (7.10), а на рис. 7.6б результаты расчетов коэффициента усиления G по выражению (7.12) от длины ОВ для рамановского ОУ с попутной накачкой для ранее приведенных исходных данных. Видно, что эффективная длина L_{ef} с увеличением длины ОВ при малых значениях $L \ll 1/\alpha_p$ растет, а потом при больших значениях $L \gg 1/\alpha_p$ стремится к постоянной величине $1/\alpha_p$. Коэффициент усиления G при попутной накачке с

увеличением L вначале экспоненциально возрастает при малых значениях $L \ll 1/\alpha_p$, достигает максимума, и при больших значениях $L \gg 1/\alpha_p$ начинает уменьшаться, стремясь к нулю.

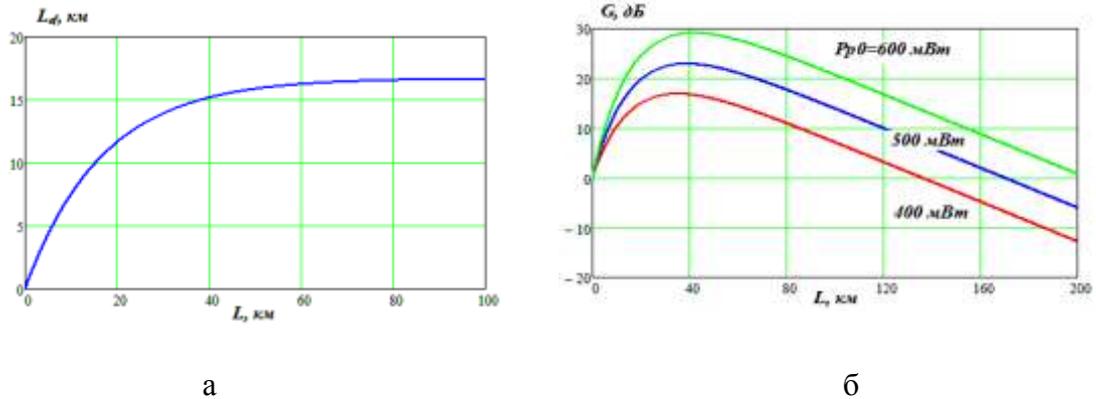


Рис. 7.6. Эффективная длина (а) и коэффициент усиления (б) Рамановского ОУ в зависимости от расстояния при попутной накачке

Следует отметить, что упрощенное решение может давать значительную погрешность расчета. Далее мы рассмотрим более сложную и адекватную модель рамановского ОУ с учетом истощения накачки и усиленного спонтанного излучения.

7.2.3. Источники шума. Порог возникновения ВКР.

Напомним, что когерентное усиление сигнала в ОУ ВКР возникает из-за того, что фотоны сигнала, распространяются в ОВ совместно с накачкой, которая возбуждает атомы среды. Наличие сигнала делает излучение возбужденных атомов вынужденным. Возникают новые фотоны не отличимые от фотонов сигнала. Причем одновременно усиливаемых в ОУ сигналов может быть много.

Однако активная среда ОУ генерирует вторичные фотоны не только за счет вынужденного излучения, но и за счет спонтанных переходов возбужденных атомов в более низкое энергетическое состояние. Эти спонтанно возникшие фотоны также при дальнейшем распространении усиливаются в ОУ и создают УСИ, которое является фоновым излучением и основным источником шума в ОУ. Для уменьшения УСИ полезный сигнал на выходе ОУ фильтруют с помощью полосового оптического фильтра с оптимальной шириной и формой амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ). В многоканальных системах используют оптические фильтры на каждый канал. Роль такого фильтра в системах DWDM выполняет демультиплексор.

Проведем расчет мощности УСИ. Будем полагать, что спектральная плотность мощности спонтанного излучения в районе частоты сигнала в любом сечении ОВ равна [4]

$$S_{ss} = h \cdot \nu_s / \Delta\nu \text{ (Дж/Гц)}. \quad (7.13)$$

Это эквивалентно наличию одного фотона на моду (на $\Delta\nu=1$ Гц). Исходя из (7.13) и спектральной зависимости ВКР усиления $g_R(\nu_p-\nu_s)$, показанной на рис. 7.2 и 7.4, и аппроксимированной выражением (7.11) можно определить мощность УСИ на выходе ОВ с коэффициентом усиления $G(\nu_p-\nu_s)$

$$P_{ase}(L) = \int_0^\infty S_{ss} \cdot G(\nu_R) \cdot d\nu_R = \int_0^\infty S_{ss} \cdot \exp[g_R(\nu_R) \cdot I_p(0) \cdot L_{ef} - \alpha_s \cdot L] \cdot d\nu_R \quad (7.14)$$

Реально интегрирование надо проводить в пределах существования УСИ, т.е. до некоторого значения ν_{Rmax} . Для оценки величины мощности УСИ можно ввести следующие упрощения. Отказаться от учета реальной зависимости $g_R(\nu_R)$, принять

значение $g_R(\nu_R)$ равным максимальному значению g_{Rm} , и ввести эквивалентную полосу частот УСИ B_{ecv} , исходя из условия

$$\int_0^\infty g_R(\nu_R) \cdot d\nu_R = g_{Rm} \cdot B_{ecv} \quad (7.15)$$

Тогда выражение (7.14) примет вид

$$P_{ase}(L) = S_{ss} \cdot \exp \left[g_{Rm} \cdot \frac{P_p(0)}{S_p} \cdot L_{ef} - \alpha_s \cdot L \right] \cdot B_{ecv} \quad (7.16)$$

Эффект ВКР также как и эффект ВРМБ является пороговым, т.е. возникает при большом уровне излучения накачки на входе в ОВ. Проведем оценку пороговой мощности попутной накачки для ВКР усилителя на основе упрощенного расчета. Порог ВКР определяется как мощность накачки на входе в ОВ, при которой на выходе ОВ мощность УСИ становится равной мощности накачки в отсутствие входного сигнала

$$P_{ase}(L) = P_p(L) = P_p(0) \cdot \exp(-\alpha \cdot L), \quad (7.17)$$

где $P_p(0) = I_p(0) \cdot S_p$ - мощность накачки на входе ОВ, $I_p(0)$ - интенсивность накачки.

Из выражений (7.17) и (7.16) получим уравнение для пороговой мощности попутной накачки P_{ppr}

$$S_{ss} \cdot \exp \left[g_{Rm} \cdot \frac{P_{ppr}}{S_p} \cdot L_{ef} - \alpha_s \cdot L \right] \cdot B_{ecv} = P_{ppr} \cdot \exp(-\alpha_p \cdot L) \quad (7.18)$$

Для дальнейшего упрощения выражения (7.18) примем $\alpha_s = \alpha_p$ и полагая $L_{ef} = 1/\alpha$ при $L \rightarrow \infty$ получим следующее трансцендентное уравнение относительно P_{ppr}

$$S_{ss} \cdot \exp \left[g_{Rm} \cdot \frac{P_{ppr}}{\alpha \cdot S_p} \right] \cdot B_{ecv} - P_{ppr} = 0 \quad (7.19)$$

с разновидностями

$$\exp \left[g_{Rm} \cdot \frac{P_{ppr}}{\alpha \cdot S_p} \right] - \frac{P_{ppr}}{S_{ss} \cdot B_{ecv}} = 0 \quad \text{или} \quad g_{Rm} \cdot \frac{P_{ppr}}{\alpha \cdot S_p} - \ln \left(\frac{P_{ppr}}{S_{ss} \cdot B_{ecv}} \right) = 0$$

Решение уравнения (7.19) при $\alpha = 0.2$ дБ/км (0.046 1/км), $S_p = 80$ мкм², $B_{ecv} = 4$ ГГц, $g_{Rm} = 6.4 \cdot 10^{-14}$ м/Вт на стоксовой длине волны $\lambda_{sm} = 1550$ нм дает $P_{ppr} = 0.816$ Вт.

Сравним полученную таким образом величину пороговой мощности со значением, вычисленным по выражению [1]

$$P_{ppr} = 16 \cdot \alpha \cdot A_{ef} / g_R(\nu_{s0}). \quad (7.19a)$$

Расчет по (7.19a) дает значение $P_{ppr} = 0.914$ Вт.

Расчитать мощность УСИ на выходе ОУ в узкой полосе оптических частот $d\nu_s$ можно следующим образом:

$$dP_n = 2h \cdot F_n \cdot (G(\nu_s) - 1) \cdot \nu_s \cdot d\nu_s \quad (7.20)$$

где $h = 6.63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с - постоянная Планка, ν_s - частота сигнала, G - коэффициент усиления на частоте ν_s , F_n - шум-фактор.

Шум-фактор показывает во сколько раз реальная мощность УСИ превышает теоретическую. Это означает, что бесшумных усилителей не существует.

Для определения полной мощности УСИ необходимо интегрировать выражение (7.20) в полосе частот усиления ОУ.

Существует еще один специфический источник шума в ОУ - остаточный сигнал накачки на выходе (входе) усилителя, влияние которого (на передатчик или детектор в системе связи) может быть уменьшено с помощью заграждающего фильтра на выходе (входе) ОУ, настроенного на частоту накачки. Как правило, этого достаточно.

Для многоканальных оптических усилителей в системах со спектральным уплотнением характерны перекрестные помехи, проявляющиеся как паразитная амплитудная (ПАМ), частотная (ПЧМ) или фазовая (ФЧМ) модуляция сигнала одного канала сигналами других каналов.

Следует отметить, что рассмотренное упрощенное решение без учета истощения накачки может давать значительную погрешность расчета, особенно для ОУ с попутной накачкой.

7.2.4. Более строгая модель волоконно - оптического усилителя Рамана

В упрощенной модели волоконно-оптического усилителя не учитывалось усиленное спонтанное излучение (УСИ) и истощение накачки за счет сигнала и усиленного спонтанного излучения. С учетом этих факторов работа волоконно-оптического усилителя может быть описана следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\frac{dP_s}{dL} = \frac{g_R}{S_p} \cdot P_p \cdot P_s - \alpha_s \cdot P_s, \quad (7.21)$$

$$\pm \frac{dP_p}{dL} = -\frac{v_p}{v_s} \cdot \frac{g_R}{S_s} \cdot P_p (P_s + P_n) - \alpha_p P_p, \quad (7.22)$$

$$\text{где } P_n(L) = (2h \cdot v_s \cdot F_n \cdot \Delta v_{oy} + P_{n0}) \cdot \frac{P_s(L)}{P_s(0)}, \quad (7.23)$$

P_{n0} – мощность шумов на входе ОУ от предыдущих каскадов.

В выражении (7.23), полученном из (7.20) мы обычно можем пренебречь 1 по сравнению с коэффициентом усиления G , полагая $G \gg 1$. Тогда после дифференцирования (7.23) по L получим третье уравнение в систему уравнений (7.21) и (7.22)

$$\frac{dP_n(L)}{dL} = \frac{2h \cdot v_s \cdot F_n \cdot \Delta v + P_{n0}}{P_s(0)} \cdot \frac{dP_s(L)}{dL}. \quad (7.24)$$

Эта система уравнений (7.21), (7.22) и (7.24) отличается от ранее рассмотренной системы (7.5) и (7.6) тем, что учитывает истощение накачки за счет УСИ и позволяет определить уровень УСИ на выходе ОУ.

На кафедре ФиЛС разработана программа для расчетов рамановских оптических усилителей (РОУ) с попутной и встречной накачкой. На рис. 7.7 и 7.8. показаны экраны этой программы при расчете рамановских ОУ с попутной и встречной накачками, соответственно. На рисунках показаны зависимости уровней мощности сигнала, накачки и УСИ от расстояния для мощности накачки 1 Вт.

С.Ф. Глаголев Нелинейная оптика и активные компоненты
 Тема 7. Вынужденное комбинационное рассеяние Рамана

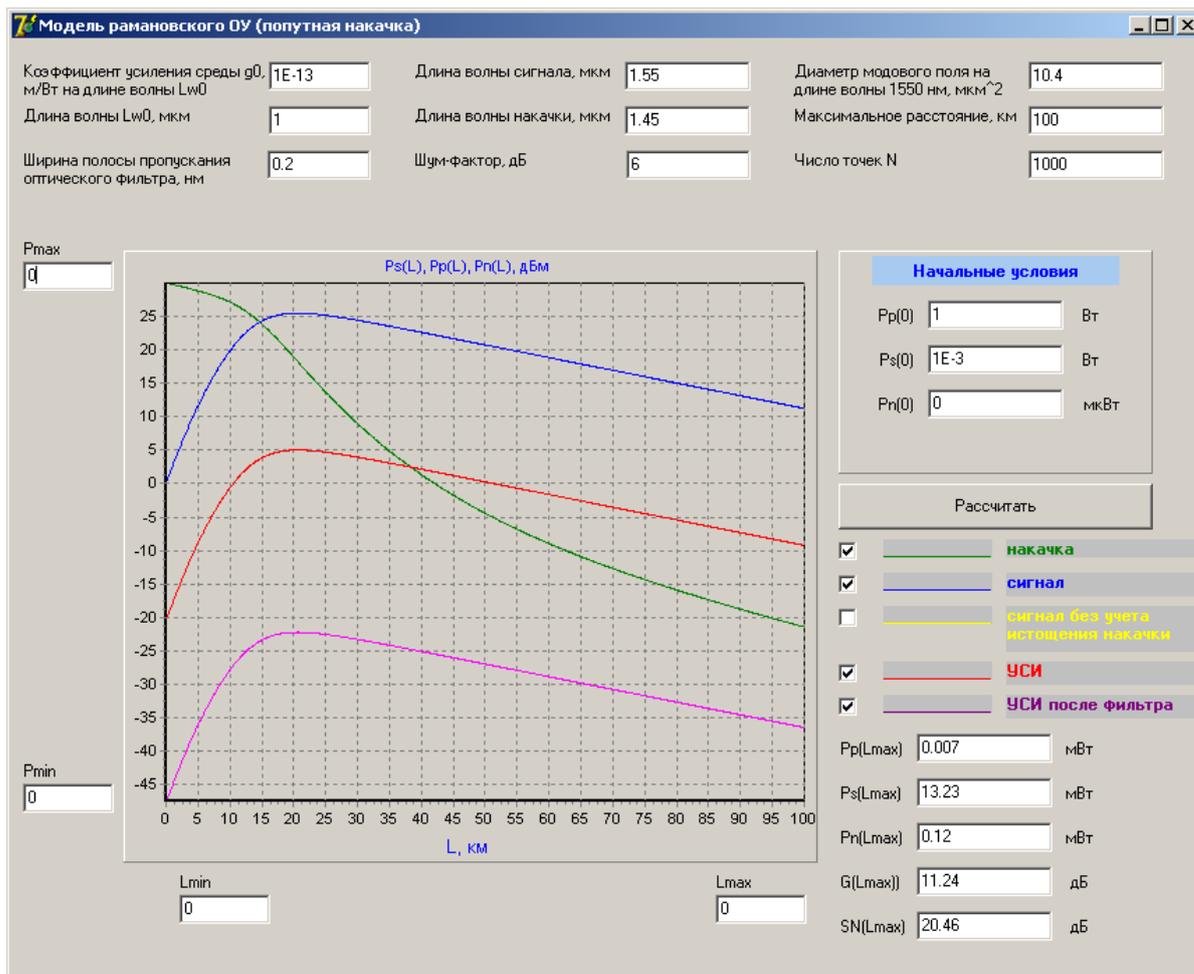


Рис. 7.7. Зависимости мощностей сигнала, накачки и усиленного спонтанного излучения от расстояния при использовании попутной накачки в рамановском ОУ.

На рис. 7.7 показано изменение полезного сигнала и попутной накачки вдоль ОВ. Видно, что в начальной области ОВ с увеличением расстояния сигнал и коэффициент усиления быстро возрастают, достигая максимума на некотором расстоянии, зависящем от начального уровня сигнала. С увеличением уровня сигнала это расстояние уменьшается, что связано с более быстрым истощением накачки. При дальнейшем увеличении расстояния сигнал и коэффициент усиления падают. На экране также показано изменение УСИ в широкой полосе частот всего усилителя и УСИ в одном канале с узкой полосой частот. Видно, что УСИ достигает максимума при той же длине, что и полезный сигнал. Отметим, что с увеличением расстояния истощение накачки вначале идет сравнительно медленно, т.к. сигнал еще мал. В дальнейшем накачка истощается быстро, отдавая свою энергию сигналу и УСИ. После прохождения сигналом и УСИ максимума скорость истощения накачки также снижается, стремясь к величине затухания, обусловленному простым рэлеевским рассеянием и поглощением в ОВ на длине волны накачки.

Из рис. 7.8 видно, что при встречной накачке в начале усилительного участка сигнал и УСИ с увеличением расстояния даже уменьшаются, достигая минимума на некоторой длине. После чего быстро возрастает. При встречной накачке при прочих равных условиях отношение сигнала к УСИ такое же, как и при попутной.

С.Ф. Глаголев Нелинейная оптика и активные компоненты
 Тема 7. Вынужденное комбинационное рассеяние Рамана

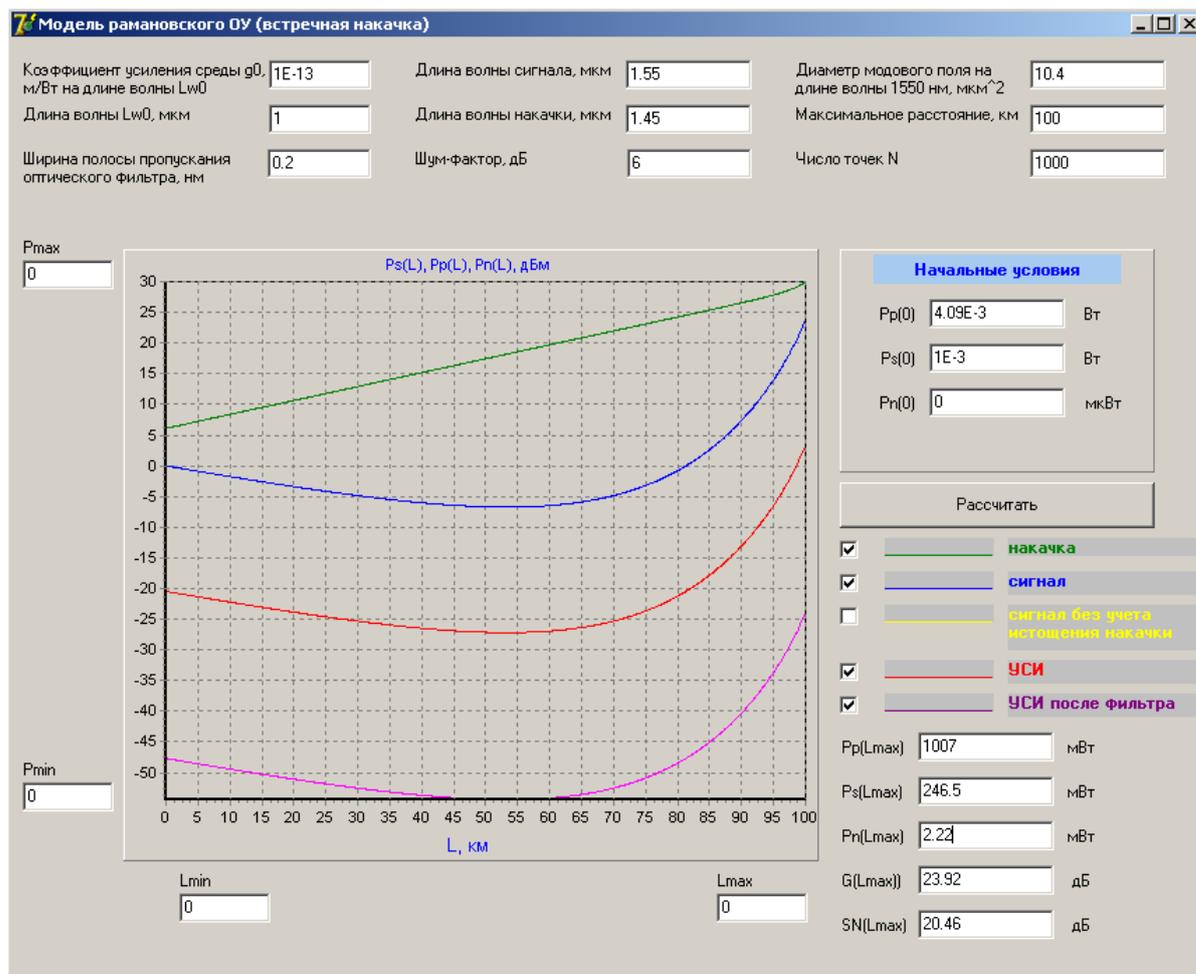


Рис.7.8. Зависимости мощностей сигнала, накачки и усиленного спонтанного излучения от расстояния при использовании встречной накачки.

Разработанная программа позволяет также рассчитывать различные варианты схем построения ВОСС с несколькими усилительными пунктами. На рис. 7.9 показана схема десятиканальной ВОСС с DWDM, состоящая из трех участков и двух рамановских ОУ с попутной накачкой. Там же показаны диаграммы уровней суммарного сигнала и УСИ в широкой полосе частот пропускания ОУ, а также диаграммы уровней сигнала и УСИ в узкой полосе частот одного канала. При построении диаграмм уровней предполагалось, что многоканальная ВОСС содержит 10 высокоскоростных каналов с суммарным уровнем 20 дБм, а в каждом канале уровень составляет 10 дБм.

При разработке конкретных схем связи с рамановскими ОУ выбирается количество усилительных участков, места размещения ОУ, параметры каждого ОУ, т.е. количество излучателей и их мощности. В нашем примере для обеспечения дуплексной связи и размещения усилительных пунктов обоих направлений передачи в одних и тех же местах для ОУ необходимо использовать накачку разной мощности. Также накладывалось условие, при котором усилительные участки, прилегающие к оконечным пунктам, должны были иметь одинаковую протяженность, а остальные участки могли иметь большие протяженности. В примере первый из двух усилителей обеспечивает большее усиление и увеличивает длину участка регенерации до 160 км при мощности накачки 1 Вт. Для второго усилителя с меньшим усилением достаточно мощности накачки 0.4 Вт. Использование оптических предусилителей в оконечных пунктах в данном случае не предполагалось.

С.Ф. Глаголев Нелинейная оптика и активные компоненты
 Тема 7. Вынужденное комбинационное рассеяние Рамана

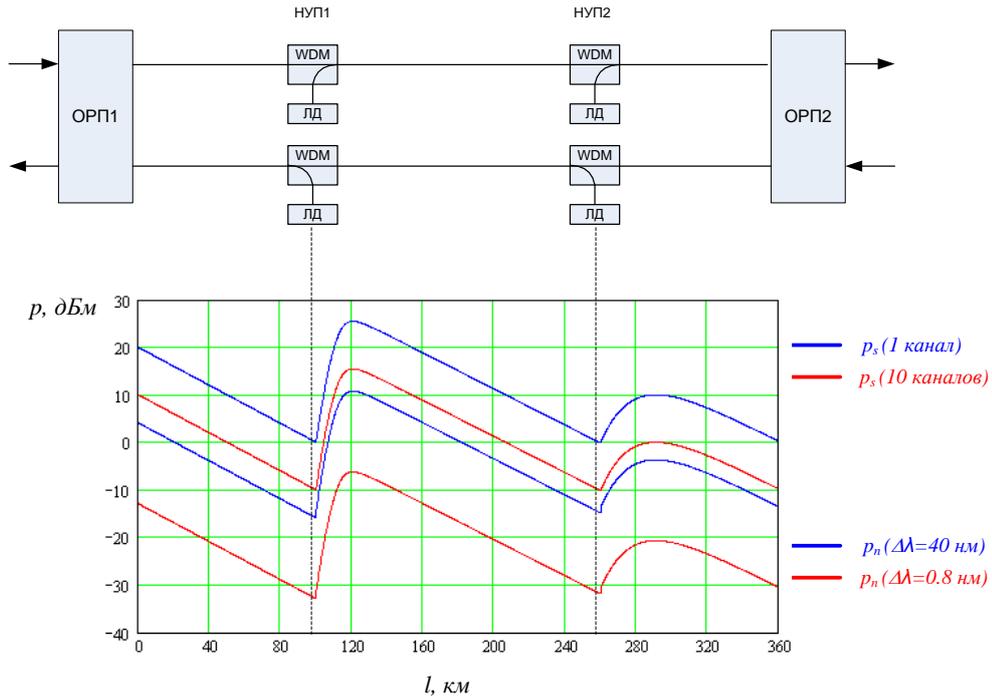


Рис. 7.9. Каскадное включение распределенных рамановских ОУ с попутной накачкой

На рис. 7.10 показана схема десятиканальной ВОСС с DWDM, состоящая из трех участков, двух рамановских ОУ со встречной накачкой, а также диаграммы уровней для сигнала, накачки и УСИ. При размещении ОУ на трассе предполагалось, что на входах ФП установлены дискретные предварительные ОУ (полупроводниковые или эрбиевые). Это позволяет увеличить длину крайних секций у конечных пунктов до 200 км. Второй ОУ обеспечивает большее усиление и увеличивает длину участка регенерации до 280 км при мощности накачки 1 Вт. Первый ОУ имеет меньшую мощность накачки и обеспечивает единичный коэффициент передачи на длине 200 км.

Сравнение попутной и встречной накачек показывает преимущества встречной накачки, как по максимальному приросту длины участка регенерации на одном пролете между двумя линейными ОУ, так и по большему отношению сигнала к УСИ.

С.Ф. Глаголев Нелинейная оптика и активные компоненты
Тема 7. Вынужденное комбинационное рассеяние Рамана

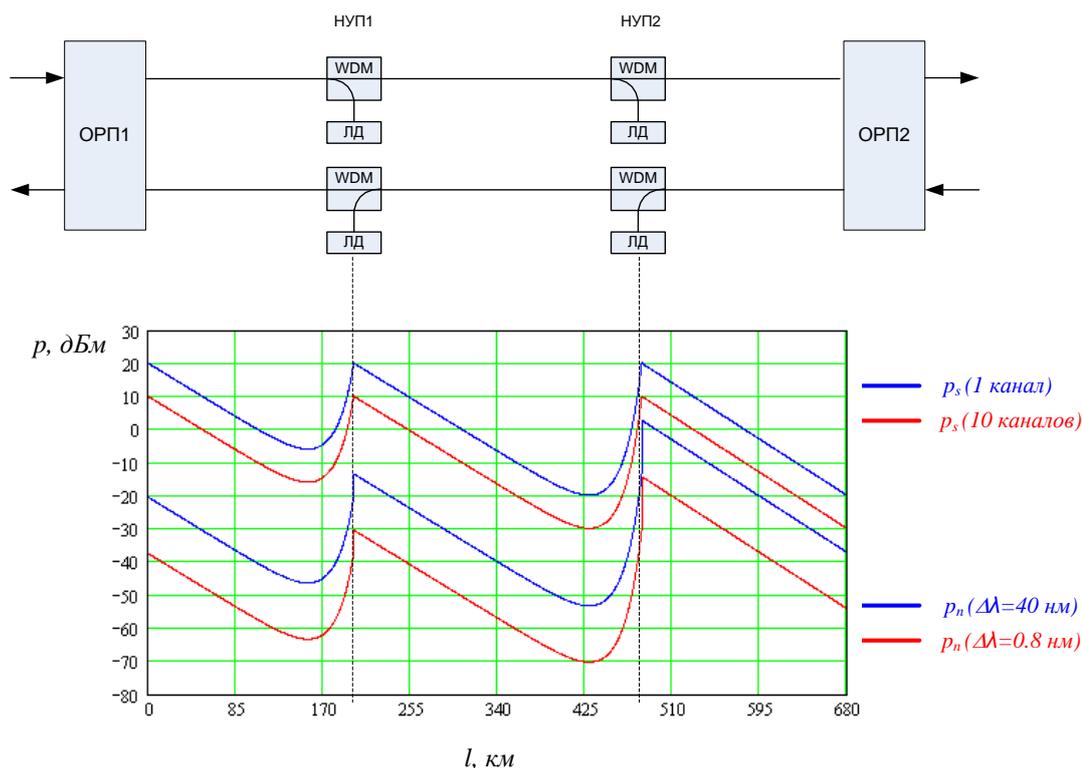


Рис. 7.10. Каскадное включение распределенных рамановских ОУ со встречной накачкой

Литература

1. Агравал Г. Нелинейная волоконная оптика: Пер. с англ.- М.: Мир, 1996.- 323 с., ил.
2. Воронин В.Г., Наний О.Е. Основы нелинейной волоконной оптики: учебное пособие/В.Г. Воронин, О.Е. Наний. - М.: Университетская книга, 2011.- 128 с. ил.
3. Рамановские усилители на волоконно-оптических линиях передачи : Монография / В.А. Андреев, М.В. Дашков. – М. : Ириас, 2008.- 219 с.

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАМАНОВСКИХ ОПТИЧЕСКИХ УСИЛИТЕЛЕЙ В ВОЛС

Оптический усилитель (ОУ) непосредственно усиливает проходящий оптический сигнал без преобразования его в электрический [1-3]. Это позволяет отказаться от промежуточных регенераторов и значительно увеличить протяженность регенерационного участка. Значительным преимуществом ОУ перед регенераторами является возможность усиления многочастотного сигнала WDM.

Наиболее распространенными ОУ в настоящее время являются:

- Полупроводниковые усилители с конструкцией, подобной лазерным диодам,
- Усилители на основе оптических волокон (ОВ), легированных редкоземельными элементами (наибольшее распространение получили эрбиевые усилители),
- Усилители, использующие вынужденное комбинационное рассеяние в кварцевых ОВ (рамановские усилители).

ОУ могут использоваться в качестве усилителя мощности (бустера) на выходе источника излучения, линейного усилителя и предусилителя на входе фотоприемника.

Использование ОУ мощности на выходе регенератора позволяет увеличить длину участка регенерации за счет повышения мощности сигнала при той же пороговой мощности фотоприемного устройства (ФПУ). Установка перед ФПУ предварительного ОУ позволяет уменьшить вклад в суммарный шум ФПУ со стороны собственно фотоприемника и усилителя фототока за счет увеличения входного оптического сигнала. Для компенсации затухания в линейном тракте может использоваться каскадное включение линейных ОУ. Различают дискретные и распределенные ОУ. Полупроводниковые и эрбиевые ОУ относят к дискретным. Рамановские ОУ обычно являются распределенными, но могут выполняться и в виде дискретных ОУ, использующих в качестве активной среды специальные ОВ, например, компенсирующие дисперсию стандартного одномодового ОВ.

Рассмотрим процессы, происходящие в однокаскадном волоконном ОУ. Его основными элементами являются: лазер накачки, активная среда (ОВ) и направленный разветвитель, который обеспечивает ввод в одно волокно сигнала и накачки, где и происходит их взаимодействие. Существуют три разновидности волоконного ОУ с попутной, встречной и двунаправленной накачками.

Активная среда может характеризоваться коэффициентами усиления $g_r(\nu_s)$ (м/Вт) и затухания α_s (Нп/м) на частоте сигнала ν_s (Гц) и коэффициентом затухания α_p на частоте накачки ν_p . Для изменений мощностей сигнала P_s и накачки P_p (Вт) при прохождении расстояния dz (м) в активной среде справедливо [3]:

$$\frac{dP_s}{dz} = \frac{g_r}{S_p} P_p P_s - \alpha_s P_s, \quad (1)$$

$$\pm \frac{dP_p}{dz} = -\frac{\nu_p}{\nu_s} \frac{g_r}{S_s} P_p P_s - \alpha_p P_p, \quad (2)$$

где S_s и S_p - эффективные площади поперечного сечения сердцевины ОВ для излучения сигнала и излучения накачки (м^2). В (2) знак «+» соответствует накачке в попутном направлении, «-» - во встречном.

Система уравнений (1,2) аналитического решения не имеет. Однако можно найти приближенное решение, если пренебречь истощением накачки, т.е. первым членом правой части выражения (2). В этом случае уравнение (2) имеет простое решение, которое можно подставить в (1) и получить аналитическое решение для мощностей сигнала и накачки

$$P_s(L) = P_s(0) \exp\left(\pm \frac{g_r P_{p0}}{S_p} L_{\text{эфф}} - \alpha_s L\right), \quad (3)$$

$$P_p(L) = P_p(0) \exp(\mp \alpha_p L) \quad (4)$$

где $P_s(0)$ и $P_p(0)$ - начальные значения мощностей сигнала и накачки; $L_{\text{эфф}}$ - эффективная длина активной среды, в которой происходит оптическое усиление:

$$L_{\text{эфф}} = \frac{1 - \exp(\mp \alpha_p L)}{\alpha_p}. \quad (5)$$

Точное численное решение системы дифференциальных уравнений (1) и (2) позволит учесть истощение накачки усиливаемым сигналом, однако оно не учитывает истощения накачки за счет усиленного спонтанного излучения (УСИ)

$$P_n = 2h\nu_s \cdot \Delta\nu \cdot F_n \cdot (G-1), \quad (6)$$

где h - постоянная Планка; $\Delta\nu$ - оптическая полоса; G - оптическое усиление; F_n - фактор шума.

С учетом (6) была получена следующая система дифференциальных уравнений, моделирующая работу волоконного ОУ:

$$\frac{dP_s}{dz} = \frac{g_r}{S_p} P_p P_s - \alpha_s P_s, \quad (7)$$

$$\pm \frac{dP_p}{dz} = -\frac{\nu_p}{\nu_s} \frac{g_r}{S_s} P_p (P_s + P_n) - \alpha_p P_p, \quad (8)$$

$$P_n(z) = (2h\nu_s F_n \cdot \Delta\nu + P_{n0}) \cdot \frac{P_s(z)}{P_s(0)}. \quad (9)$$

где P_{n0} - мощность шумов предыдущих каскадов.

Для решения системы уравнений (7-9) методом Рунге-Кутты четвертого порядка на языке Delphi была разработана программа, позволяющая рассчитывать мощности сигнала, накачки и УСИ в зависимости от длины усилительного участка. На рис. 1а представлены результаты расчетов для рамановского распределенного ОУ с попутной накачкой мощностью 1 Вт. Все исходные данные представлены на экране программы.

Из рис. 1а видно, что при попутной накачке в начале с увеличением длины усилительного участка коэффициент усиления быстро возрастает, достигая максимума на некоторой длине, зависящей от начального уровня сигнала. С увеличением уровня эта длина уменьшается, что связано с более быстрым истощением накачки. При дальнейшем увеличении длины усилительного участка коэффициент усиления падает.

На рис. 1б представлены результаты расчетов для рамановского распределенного ОУ со встречной накачкой мощностью 1 Вт. Из рис. 1б видно, что при встречной накачке в начале с увеличением длины усилительного мощность сигнала может даже уменьшаться, достигая минимума на некоторой длине. После чего быстро возрастает. При встречной накачке при прочих равных условиях отношение сигнала к УСИ такое же, как и при попутной.

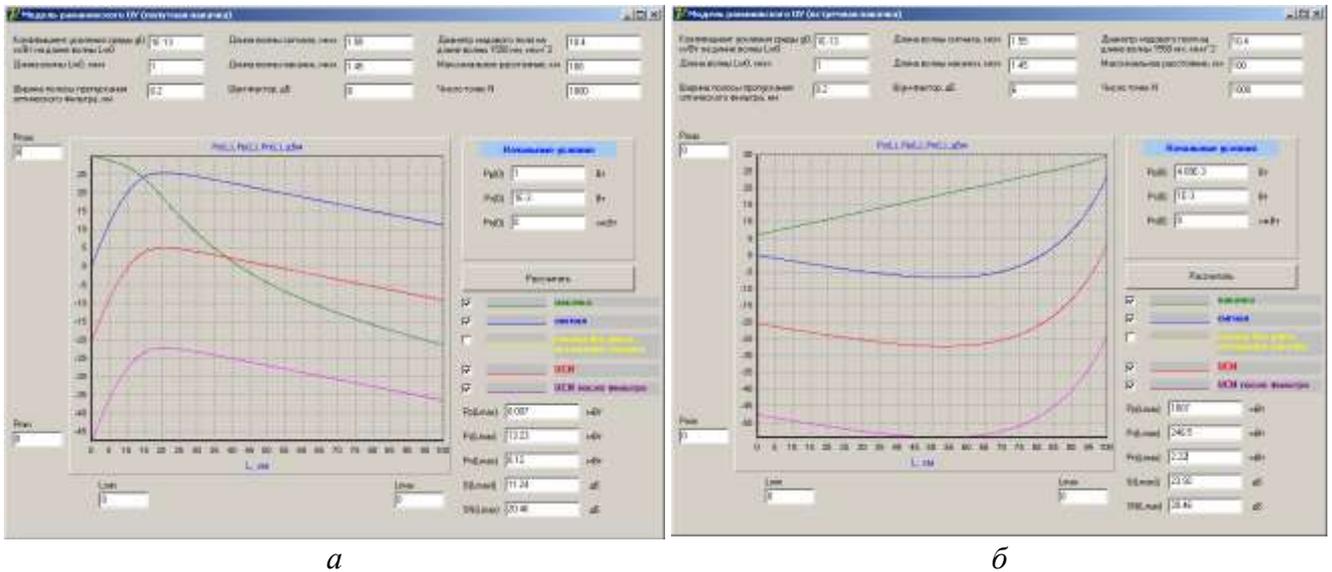


Рис. 1. Результаты моделирования рамановского ОУ с попутной (а) и встречной (б) накачкой.

В [4] были проведены максимально строго теоретические расчеты сигналов и шумов на входе регенератора одномодовой ВОЛС с учетом затухания и хроматической дисперсии. При этом проводилось исследование по выбору оптимальной длительности импульса для различных ВОСП. Расчеты показали, что основным фактором, ограничивающим максимальную длину регенерационного участка, является затухание сигнала, т.к. выбором типа ОВ с малой хроматической дисперсией и узкополосного источника излучения можно снять ограничения по дисперсии. Результаты расчетов максимально допустимого затухания и длины участка регенерации по затуханию для длины волны 1550 нм приведены в таблице 1.

Из таблицы видно, что использование лавинного фотодиода (ЛФД) позволяет увеличить длину регенерационного участка по сравнению с использованием р-і-n фотодиода, а коэффициент лавинного умножения M может быть оптимизирован.

Таблица 1

Система передачи (Скорость передачи, Гбит/с)	STM-1 (0.155)		STM-4 (0.62)		STM-16 (2.5)		STM-64 (10)		
	a_{max} , дБ	l_{pe} , км							
Коэффициент лавинного умножения M	1	46.3	187	38.1	150	29.3	109	20.4	68
	10	51.9	209	45.0	177	37.7	143	29.6	106
	30	48.9	199	42.7	171	36.5	142	30.2	113

При тех же исходных данных были проведены расчеты максимальной длины регенерационного участка с использованием дискретного предварительного ОУ. В расчетах были использованы следующие параметры ОУ: коэффициент усиления ОУ $G_{py} = 30$ дБ в полосе $\Delta\lambda_{\phi} = 0.8$ нм и коэффициент шума $NF = 6$ дБ. Результаты расчетов приведены в таблице 2.

Таблица 2

Система передачи (Скорость передачи, Гбит/с)	STM-1 (0.155)		STM-4 (0.62)		STM-16 (2.5)		STM-64 (10)	
	a_{max} , дБ	l_{pe} , км						
$M=1$	46.3	187	46.2	187	46.0	186	44.8	181

Расчеты показывают, что максимальные длины регенерационного участка практически одинаковы для систем с различными скоростями передачи. Это означает, что преобладающими являются оптические шумы. В таблице 3 приведены результаты расчетов с учетом фильтрующих свойств ФНЧ в ФПУ.

Таблица 3

Система передачи (Скорость передачи, Гбит/с)	STM-1 (0.155)		STM-4 (0.62)		STM-16 (2.5)		STM-64 (10)	
	a_{max} , дБ	l_{pe} , км						
$M=1$	72.6	308	65.4	275	57.7	240	49.5	202

Из таблицы видно, что использование предварительного ОУ позволяет существенно (в 1.6-3 раза или на 120-130 км) увеличить длину регенерационного участка.

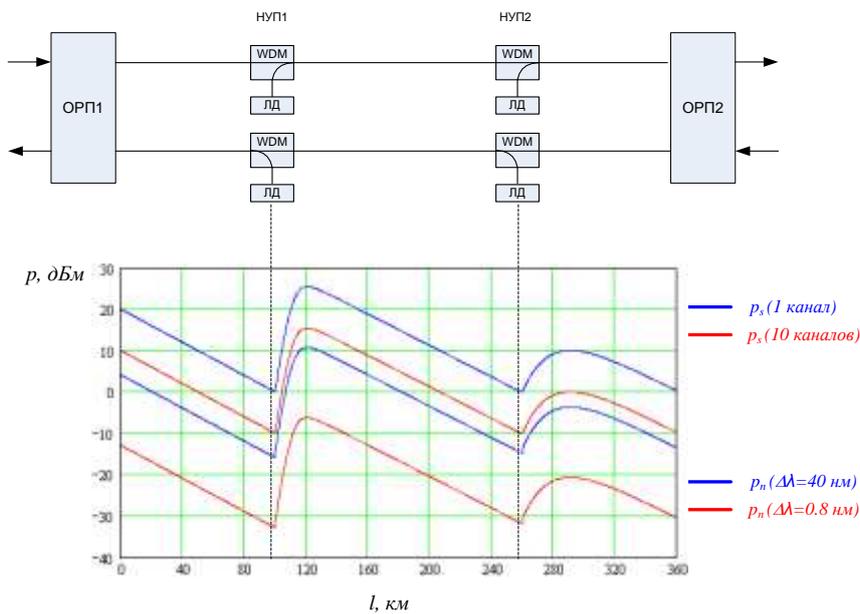


Рис. 2. Каскадное включение распределенных рамановских ОУ с попутной накачкой (вариант 1)

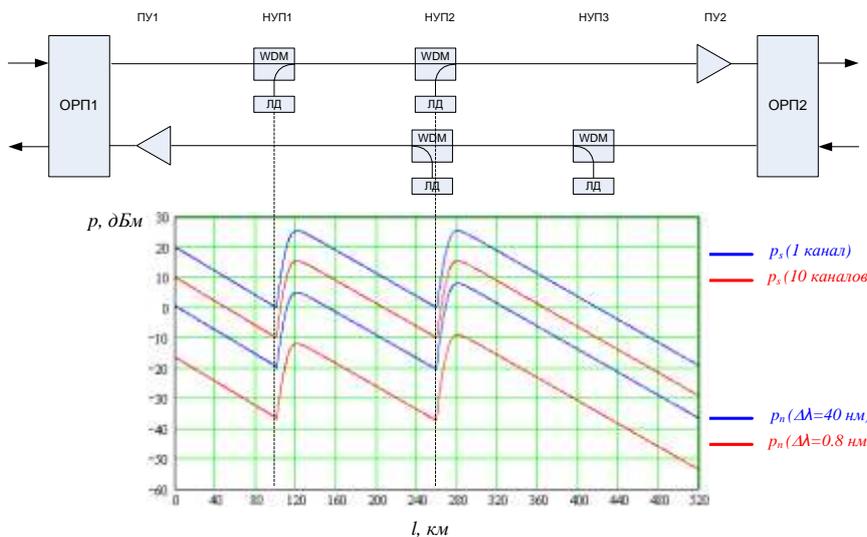


Рис. 3. Каскадное включение распределенных рамановских ОУ с попутной накачкой (вариант 2)

существенно (в 1.6-3 раза или на 120-130 км) увеличить длину регенерационного участка.

Диаграммы уровней для ВОЛС с распределенными рамановскими ОУ имеют более сложную форму по сравнению с дискретными ОУ. Для их расчета использовалась разработанная авторами программа.

На рис. 2 показана диаграмма уровней для регенерационного участка, содержащего два рамановских ОУ с попутной накачкой. Дополнительные потери в линейном тракте и энергетический запас не учитывались. Для обеспечения дуплексной связи и размещения усилительных пунктов обоих направлений передачи в одних и тех же местах для ОУ используют накачку разной мощности. Первый из двух усилителей обес-

печивает большее усиление и увеличивает длину участка регенерации на 160 км при мощности накачки 1 Вт. Для второго усилителя достаточно мощности накачки 0.4 Вт. Использование оптических предусилителей в оконечных пунктах не предполагалось.

При конкретном проектировании или реконструкции ВОЛС и размещении по трассе линейных ОУ в одних и тех же точках необходимо иметь в виду, что усилительные участки, прилегающие к оконечным пунктам должны иметь одинаковую протяженность (как на рис. 2), а остальные участки могут иметь большую протяженность.

Другой вариант проектного решения состоит в том, что усилительные участки, прилегающие к оконечным пунктам, могут иметь разную длину для различных направлений передачи (рис. 3). Длина участка от линейного ОУ до ФПУ может быть больше, чем от источника излучения до линейного ОУ. В этом случае возрастает количество точек, в которых располагаются линейные ОУ, но не возрастает и даже может быть уменьшено количество линейных ОУ. Длина участка регенерации при таком подходе всегда возрастает. Платой за это является увеличение количества точек подключения на трассе и необходимость использования предварительных ОУ в оконечных пунктах.

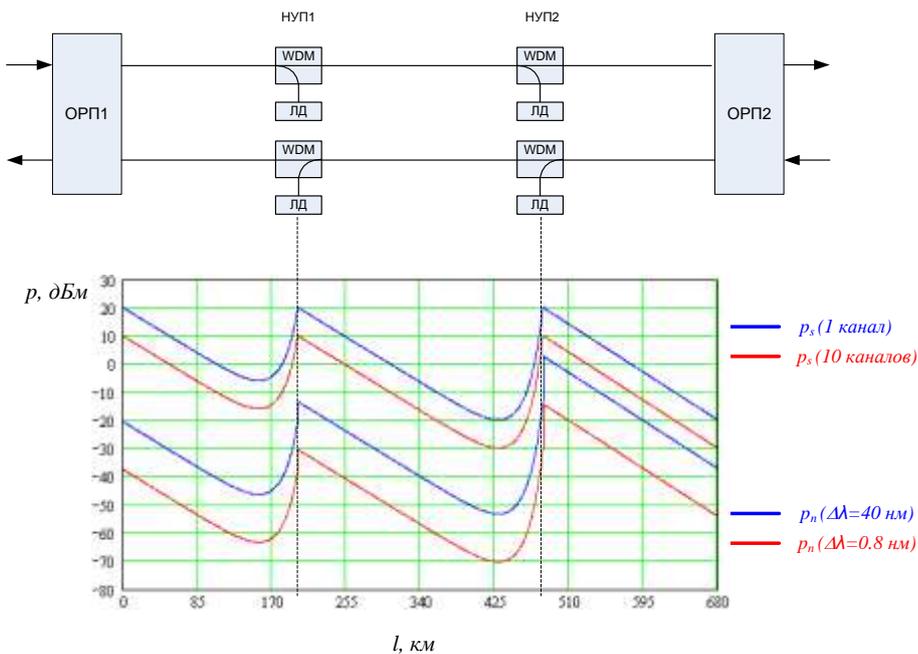


Рис. 4. Каскадное включение распределенных рамановских ОУ со встречной накачкой

обеспечивает большее усиление и увеличивает длину участка регенерации на 280 км при мощности накачки 1 Вт. Первый ОУ имеет меньшую мощность накачки и обеспечивает единичный коэффициент передачи на длине 200 км.

Сравнение попутной и встречной накачек показывает преимущества встречной накачки по максимальной длине участка регенерации.

Следует также отметить, что задача выбора типа ОУ и размещения их по трассе носит конкретный характер. Ее надо решать для конкретных условий

На рис. 4 показана диаграмма уровней для регенерационного участка, содержащего два рамановских ОУ со встречной накачкой. При размещении ОУ на трассе предполагалось, что на входах ФП установлены дискретные предварительные ОУ. Это позволяет увеличить длину крайних секций у оконечных пунктов до 200 км (в соответствии с табл. 3). Второй усилитель

строительства и реконструкции с учетом предлагаемых в данной работе технических решений.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Слепов Н.Н. Современные технологии цифровых оптоволоконных сетей связи. - М.: Радио и связь, 2000.- 468 с.: ил.
- [2] Иванов А.Б. Волоконная оптика: компоненты, системы передачи, измерения.- М.: Компания Сайрус СИСТЕМС, 1999, 672 с.: ил.
- [3] Агравал Г. Нелинейная волоконная оптика: Пер. с англ.- М.: Мир, 1996.- 323 с., ил.
- [4] Глаголев С.Ф. Проектирование современных магистральных волоконно-оптических линий передачи. Сборник трудов 5 Всероссийской конференции «Современные технологии проектирования, строительства и эксплуатации линейно-кабельных сооружений», СПб, 2006, с.16-25.

Полупроводниковые оптические усилители

Полупроводниковые оптические усилители (ППОУ) были первыми оптическими усилителями, доведенными до уровня промышленного производства.

Такой усилитель представляет собой простую двухуровневую систему с двумя энергетическими уровнями – нижним (валентной зоной) и верхним (зоной проводимости), разделенными потенциальным барьером. Инверсия населенности уровней (избыток электронов в зоне проводимости) достигается за счет накачки электрическим током.

Существуют два типа ППОУ – подпороговые и надпороговые. Подпороговые усилители – это лазеры, работающие в режиме ниже порога генерации излучения. Надпороговые усилители – это лазеры, работающие в режиме выше порога генерации излучения.

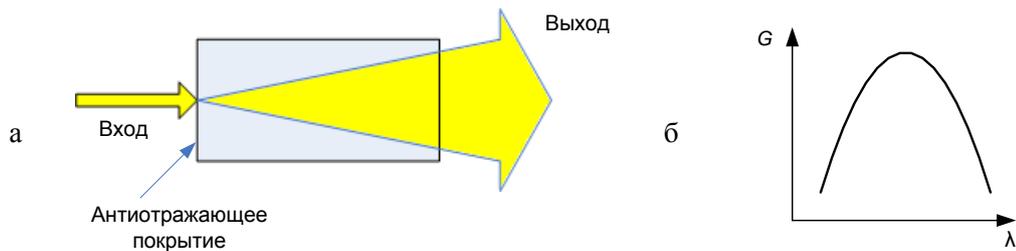


Рис. 8.17. Оптический усилитель бегущей волны (а) и его АВХ (б)

Подпороговые ППОУ могут как иметь обратную связь, так и не иметь ее. Если усиление осуществляется за один проход (обратная связь отсутствует), то оптический усилитель называется усилителем бегущей волны. На входном и выходном торцах такого усилителя (полупроводникового блока длиной L) формируются грани с антиотражающим покрытием (см. рис. 8.17), чтобы минимизировать отраженный луч, приводящий к колебательности амплитудно-волновой характеристики. Это позволяет поддерживать ее неравномерность на уровне не выше 1 дБ.

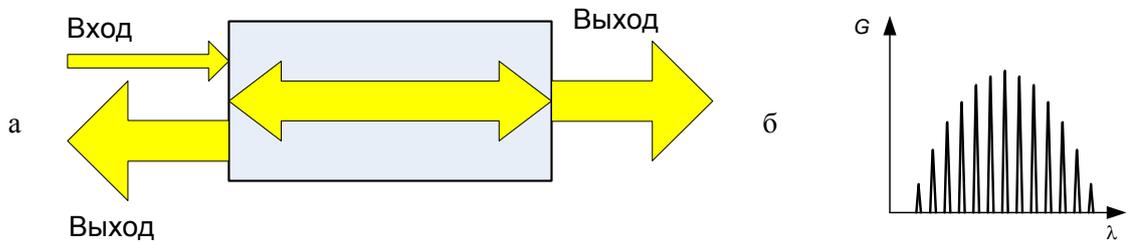


Рис. 8.18. Оптический усилитель Фабри-Перо (а) и его АВХ (б)

В многопроходных усилителях, наоборот, применяется оптическая обратная связь, в качестве которой используется оптический резонатор. Им может быть, например, плоский линейный резонатор Фабри-Перо. Резонатор Фабри-Перо представляет собой пару параллельных полупрозрачных зеркал, между которыми в процессе многократного отражения оптической волны происходит усиление интенсивности оптического сигнала. Такой ОУ называется усилителем (с резонатором) Фабри-Перо (рис. 8.18).

Из рис. 8.17 и 8.18 видно, что усилитель бегущей волны имеет непрерывную АВХ с достаточно большим плоским участком (порядка 60-100 нм на уровне -3 дБ). АВХ для усилителя Фабри-Перо имеет вид гребенки с узкими пиками импульсного усиления и постоянным шагом пиков, обусловленным наличием у резонансной системы ряда продольных мод с равномерным пространственным распределением. Для широкополосных оптических систем плоская АВХ более предпочтительна, чем гребенчатая, которая к тому же чувствительна к изменению характеристик оптической системы в целом.

Надпороговый оптический усилитель использует нормальный (лазерный) режим функционирования, когда поддерживается постоянное усиление, необходимое для генерации основной излучаемой моды. В этих условиях могут быть без искажения усилены и нужные нам сигналы, если их частоты достаточно далеки от частоты указанной моды. Различают два типа лазеров, генерирующих одну продольную моду, которые могут играть роль такого усилителя:

- лазеры с распределенной обратной связью;
- лазеры с распределенными Брэгговскими отражателями.

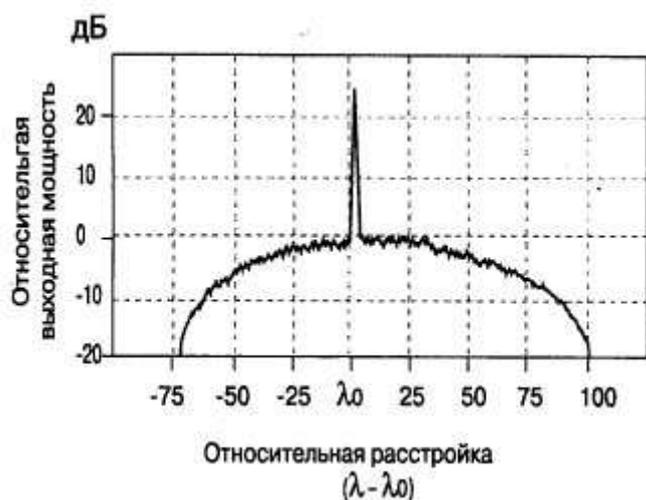


Рис. 8.19. АВХ надпорогового оптического усилителя

Усиление у таких лазеров в режиме оптического усилителя осуществляется на частотах, отличных от резонансной, и оказывается возможным благодаря тому, что АВХ лазера имеет достаточно большое усиление на широком, непрерывном и гладком пьедестале, который обычно симметричен относительно резонансного пика генерируемой продольной моды (рис. 8.19). Такие усилители легко могут обеспечить усиление 10-15 дБ и отличаются пониженным значением переходной помехи при использовании в многоканальном режиме.

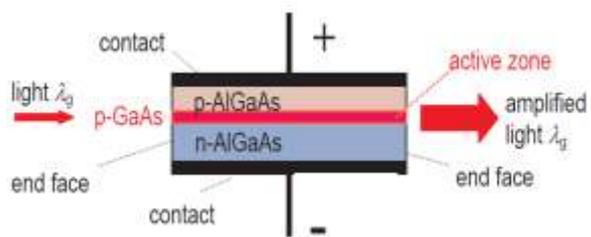
Рассмотрим характеристики ППОУ. Реализуемые коэффициенты усиления составляют: для усилителя бегущей волны - 15 дБ (волна ТМ) или 22 дБ (волна ТЕ); для усилителя Фабри-Перо - 22-25 дБ. Максимум коэффициента усиления зависит от величины тока через полупроводник и лежит в диапазоне 1520 - 1460 нм, смещаясь в сторону меньших длин волн при большей величине тока.

Динамический диапазон без учета шума ППОУ может достигать 35-45 дБ. Полупроводниковый усилитель, как и любой оптический усилитель, добавляет к усиливаемому оптическому сигналу шум за счет усиления спонтанного излучения. Шум приводит не только к уменьшению динамического диапазона, но и к снижению максимально допустимого усиления. На рис. 8.19 показан типичный спектр шума, вызванного усилением спонтанного излучения. Этот спектр много шире АВХ усилителя и имеет характерную форму пьедестала. Из рисунка видно, что уровень мощности шума составляет около 20 дБ, а уровень усиления сигнала на его фоне - 25 дБ. Это означает, что динамический диапазон, который мог бы в отсутствие шума составить 45 дБ, уменьшается при наличии шума до величины 25 дБ.

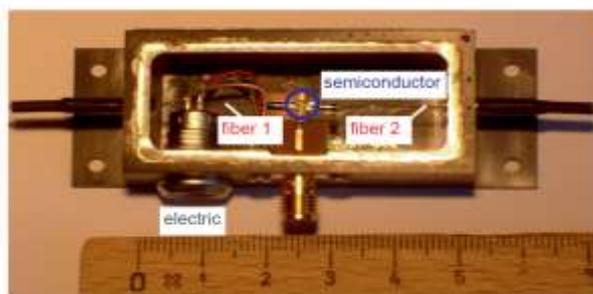
ППОУ могут быть использованы в качестве предусилителей перед детектированием оптического сигнала, а также в качестве усилителей мощности в линейных системах для компенсации распределенных потерь в линии, позволяющих увеличить длину регенерационного участка. ППОУ могут быть интегрированы вместе с полупроводниковым лазером для создания эффективного источника в когерентных оптических системах.

ППОУ могут также использоваться в составе волновых конверторов (см. ниже).

Полупроводниковые ОУ имеют конструкцию такую же, как ЛД FP, и используют в качестве активной среды полупроводниковый *p-n* переход. Накачка полупроводниковых ОУ осуществляется электрическим током.



а



б

Рис. 2.22. Упрощенная схема (а) и пример конструкции полупроводникового ОУ.

В настоящее время существуют полупроводниковые ОУ, работающие в диапазоне 0.82 - 1.56 мкм и имеющие полосу усиливаемых длин волн от 30 до 200 нм и выходные мощности до 100-200 мВт [36].

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ

С.Ф. Глаголев
Санкт-Петербургский государственный университет
телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Одним из основных вопросов, решаемых при проектировании волоконно-оптических линий передачи (ВОЛП), является расчет длины регенерационного участка. Представленная статья посвящена обоснованию методики такого расчета. Этим вопросам посвящены также работы [1-3]

Существующая методика расчета длины регенерационного участка [4] состоит из двух независимых расчетов по затуханию и дисперсии. Она отличается простотой, но имеет ряд неточностей.

При расчете по затуханию не учитывается или учитывается без основательных доводов

1. увеличение затухания для коротких оптических импульсов из-за дисперсионного расширения импульсов;
2. ширина глаз – диаграммы сигнала на входе решающего устройства;
3. коэффициент гашения (экстинкции);
4. форма оптических импульсов;
5. амплитудно-частотная характеристика фотоприемного устройства (ФПУ).

При расчете по дисперсии:

1. необоснованно выбирается длительность информационного оптического импульса и его допустимое расширение;
2. не учитывается влияние
 - скорости передачи на ширину спектра излучения источника,
 - амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) ФПУ на расширение регистрируемого импульса на входе решающего устройства.

Для создания новой методики расчета длины регенерационного участка в данной работе с максимальной полнотой проводятся следующие расчеты.

1. Расчет формы оптического импульса на выходе регенерационного участка заданной длины с учетом:
 - тактового интервала (скорости передачи);
 - формы и амплитуды входного оптического импульса;
 - относительной длительности входного оптического импульса;
 - ширины спектра источника излучения;
 - длины волны источника излучения;
 - коэффициента гашения;
 - хроматической дисперсии;
 - количества разъемных и неразъемных соединений;
 - строительной длины;
 - коэффициента затухания.
2. Расчет формы электрического импульса и относительной ширины глаз-диаграммы на входе решающего устройства регенератора с учетом всех перечисленных выше параметров, а также
 - параметров фотоприемника;
 - постоянной времени и коэффициента передачи ФПУ.
3. Расчет зависимости вероятности ошибки от отношения сигнала к шуму с учетом всех перечисленных выше параметров.
4. Расчет оптимальной относительной длительности входного оптического импульса, обеспечивающей максимум отношения сигнала к шуму на входе решающего устройства.
5. Расчет длины регенерационного участка по дисперсии с учетом всех перечисленных выше параметров для оптимальной длительности оптического импульса.
6. Определение уровня шума на входе решающего устройства регенератора и максимально допустимого затухания на регенерационном участке.
7. Определение длины регенерационного участка по затуханию с учетом эксплуатационного запаса и дополнительных затуханий из-за хроматической дисперсии и АЧХ ФПУ.

2. ИСКАЖЕНИЯ ФОРМЫ ИМПУЛЬСОВ

Полагаем, что мощность оптических импульсов P_0 на выходе регенератора (оптического усилителя мощности) имеет гауссовскую форму.

$$P_0 = P_m \cdot \left[(1 - A) \exp\left(-\frac{(t/t_T)^2}{2 \cdot K^2}\right) + A \right], \quad (1)$$

где P_m , – максимальная мощность оптического импульса на выходе регенератора,

t_T – полуширина тактового интервала,

$P_m(1-A)$ – амплитуда гауссовского импульса,

$K = t_0/t_T$ – коэффициент, равный отношению полуширины гауссовского импульса t_0 на выходе регенератора к полуширине тактового интервала; он всегда меньше 1,

A – отношение оптической мощности, излучаемой при длинной последовательности нулей, к мощности одиночной единицы. Величина A однозначно связана с коэффициентом гашения (экстинкции) KG

$$A = 10^{-\frac{KG}{10}}.$$

Выбор параметра A можно провести в соответствии с рекомендациями Международного союза электросвязи в пределах $0.08 \div 0.15$.

Известно, что хроматическая дисперсия совместно с затуханием приводит к расширению оптического импульса на выходе регенерационного участка и уменьшению его амплитуды. Форма импульса при этом остается гауссовской.

Для полуширины оптического импульса на выходе регенерационного участка длиной l_p можно записать [5]

$$t_l = K \cdot t_T \sqrt{1 + \left[1 + (2 \cdot \pi \cdot \Delta\nu \cdot K \cdot t_T)^2\right] \cdot \frac{\lambda^4 \cdot D_x^2 \cdot l_p^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot c^2 \cdot K^4 \cdot t_T^4}} = K_l \cdot K \cdot t_T, \quad (2)$$

где $\Delta\nu$ – полуширина гауссовского спектра излучения источника на уровне $1/e$,

D_x – хроматическая дисперсия,

K_l – коэффициент, учитывающий дисперсионное расширение; он всегда больше 1.

Учитывая хроматическую дисперсию D_x , коэффициент затухания α в ОВ, дополнительное затухание из-за дисперсионного расширения

$$a_d = 10 \cdot \lg(K_l), \quad (3)$$

запишем выражение для формы оптического импульса на выходе регенерационного участка с учетом средних потерь в разъёмных a_p и неразъёмных a_n соединениях

$$P_l = P_m \cdot 10^{-\alpha \cdot l_p - n_p \cdot a_p - n_n \cdot a_n} \cdot \left[(1 - A) \frac{1}{K_l} \cdot \exp\left(-\frac{(t/t_T)^2}{2 \cdot K^2 \cdot K_l^2}\right) + A \right], \quad (4)$$

где n_p и n_n – количество разъёмных и неразъёмных соединений на регенерационном участке.

Из последнего выражения следует, что затухание на регенерационном участке с учетом дисперсии составляет

$$a_p = \alpha \cdot l_p + n_p \cdot a_p + n_n \cdot a_n + a_d. \quad (5)$$

Для определения формы и ширины импульса на входе порогового устройства необходимо учесть искажения, которые возникают при преобразовании оптического гауссовского импульса (4) в электрическое напряжение из-за частотных искажений в ФПУ. Полагаем, что ФПУ можно представить фильтром нижних частот (ФНЧ) первого порядка с постоянной времени τ_f . Тогда форму импульса напряжения на входе решающего устройства можно найти как свертку выходного оптического импульса P_l с импульсной характеристикой ФНЧ первого порядка

$$u_1(t) = \frac{S \cdot M \cdot R_f}{\tau_f} \cdot \int_{-\infty}^t P_1(t') \cdot \exp\left(-\frac{t-t'}{\tau_f}\right) \cdot dt', \quad (6)$$

где S, M – чувствительность и коэффициент умножения лавинного фотодиода (ЛФД) [3],
 R_f – коэффициент преобразования фототока в выходное напряжение ФПУ.

Численные расчеты по выражению (6) позволили получить зависимость отношения амплитуды выходного импульса U_{2m} к амплитуде входного импульса U_{1m} от отношения постоянной времени ФНЧ τ_f к полуширине тактового интервала t_T для различных значений произведения $K \cdot K_1$. Эту зависимость можно с достаточной степенью точности аппроксимировать выражением

$$\frac{U_{2m}}{U_{1m}} = 1 + a_1 \cdot \frac{\tau_f}{t_T} + a_2 \cdot \left(\frac{\tau_f}{t_T}\right)^2 + a_3 \cdot \left(\frac{\tau_f}{t_T}\right)^3, \quad (7)$$

$$a_1 = -0.606 + 1.771 \cdot K \cdot K_1 - 1.315 \cdot (K \cdot K_1)^2,$$

$$\text{где } a_2 = -0.295 - 1.062 \cdot K \cdot K_1 + 1.117 \cdot (K \cdot K_1)^2,$$

$$a_3 = -0.387 - 0.01 \cdot K \cdot K_1 - 0.221 \cdot (K \cdot K_1)^2.$$

На рис.1 показано семейство аппроксимирующих зависимостей, рассчитанное по выражению (7).

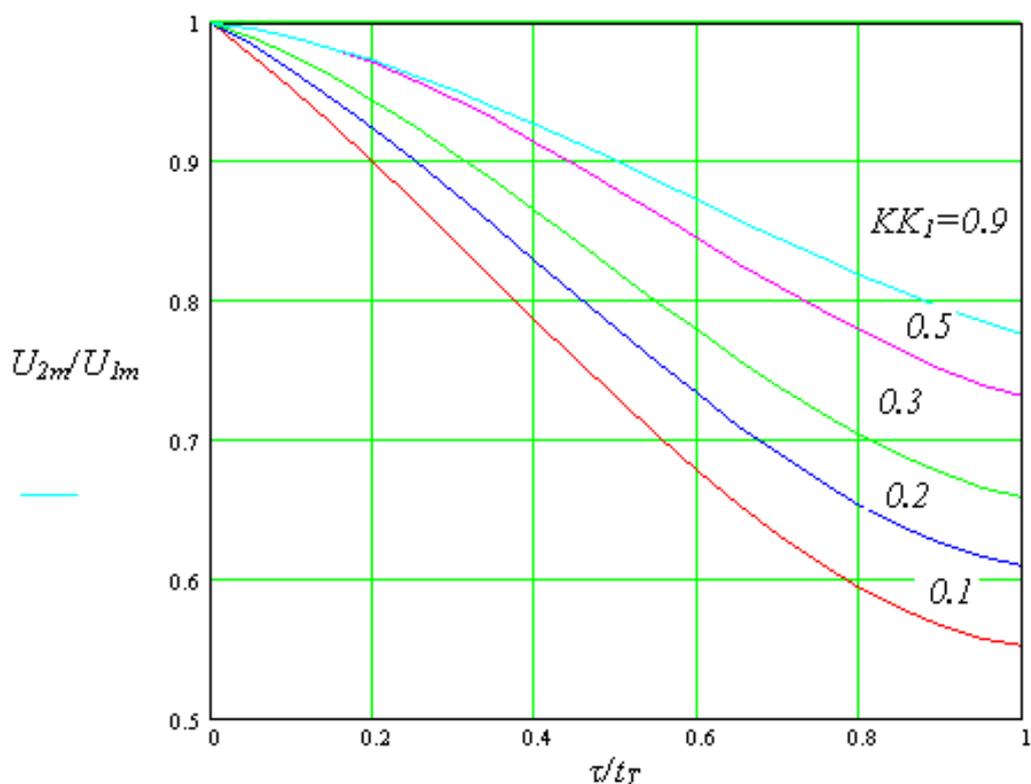


Рис.1.

Расчеты по выражению (6) также показали (рис.2), что при малых отношениях $\tau_f/t_T < 1$ можно полагать, что импульсы на входе решающего устройства имеют форму, близкую к гауссовской с длительностью t_p , которую можно определить с достаточно высокой точностью по выражению

$$t_p = K \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot t_T = B \cdot t_T \quad (8)$$

где B – отношение полуширины импульса на входе решающего устройства t_p к полуширине тактового интервала

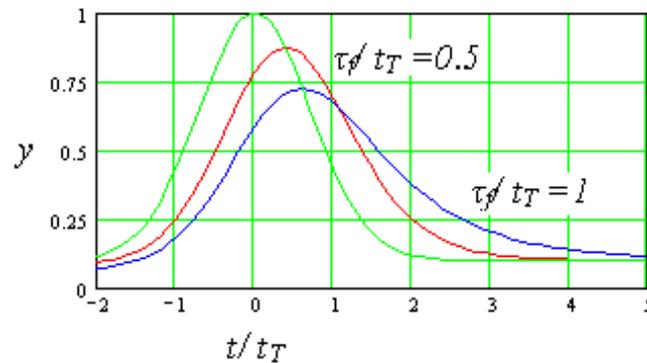


Рис.2.

На рис.2 показаны входной и два выходных импульса ФНЧ первого порядка при разных соотношениях между полушириной тактового интервала t_T и постоянной времени ФНЧ τ_f .

Принимая гипотезу о гауссовском характере импульса на выходе ФНЧ с известным соотношением между относительным расширением импульса и уменьшением его относительной амплитуды, можно полагать, что

$$K_2 = \frac{U_{1m}}{U_{2m}}. \quad (9)$$

3. УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ГЛАЗ-ДИАГРАММЫ

Определим относительные параметры глаз-диаграммы на входе решающего устройства, принимая за единицу амплитуду одиночного импульса. Рассмотрим две крайние кодовые последовательности, которые формируют глаз-диаграмму (рис.3). Первая последовательность содержит одну единицу, окруженную нулями.

$$y1 = A + (1 - A) \cdot \exp\left(-\frac{(t/t_T)^2}{2 \cdot B^2}\right), \quad (10)$$

Вторая последовательность содержит один ноль среди сплошных единиц

$$y2 = A + (1 - A) \cdot \left\{ \sum_{i=-q}^q \exp\left[-\frac{(t/t_T - 2 \cdot i)^2}{2 \cdot B^2}\right] - \exp\left(-\frac{(t/t_T)^2}{2 \cdot B^2}\right) \right\}. \quad (11)$$

Расчет проведен для $B=0.75$ и $q=3$. Для проверки правильности выбора q рекомендуется повторить расчет при большем на единицу значении q . При этом результаты расчета не должны существенно отличаться.

Относительная ширина глаз-диаграммы определяется выражением

$$y = y1 - y2. \quad (12)$$

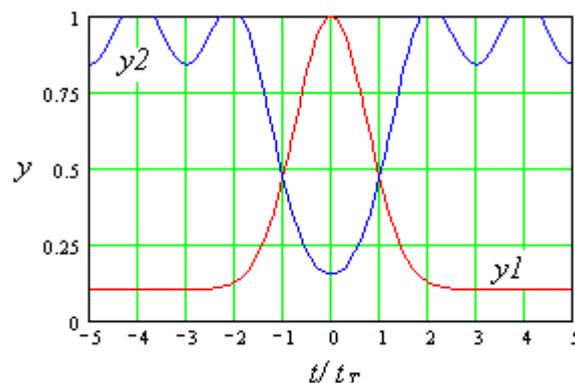


Рис.3

На рис. 4 показана зависимость относительной ширины глаз-диаграммы y от относительного смещения стробирующих импульсов t/t_T в решающем устройстве регенератора.

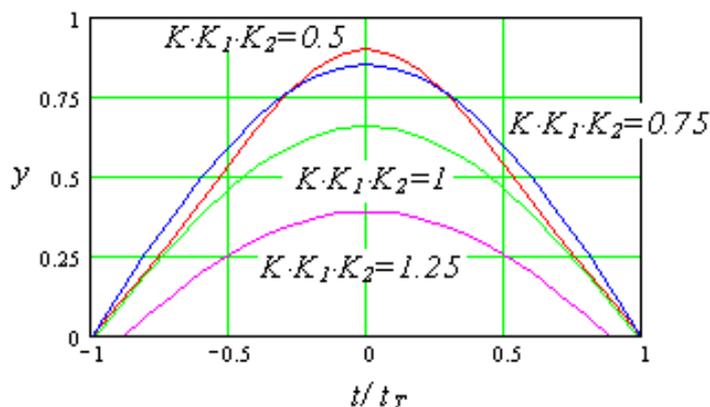


Рис.4

4. ОТНОШЕНИЕ СИГНАЛА К ШУМУ

Определим минимально необходимое отношение сигнала к шуму SN_{min} при посылке логической единицы на входе решающего устройства регенератора, исходя из допустимой вероятности ошибки p_e , для которой справедливо следующее выражение [3]

$$p_e = \frac{0.4 \cdot \exp(-0.5 \cdot Q^2)}{Q}, \quad (13)$$

$$\text{где } Q = \frac{y \cdot SN}{2}.$$

На рис.5 приведены результаты расчета по выражению (13) для различных отношений полуширины импульса на входе решающего устройства к полуширине такта линейного кода B . Видно, что с уменьшением B требуемое отношение сигнала уменьшается. Однако при этом увеличивается требуемая полоса пропускания ФПУ и уровень шума.

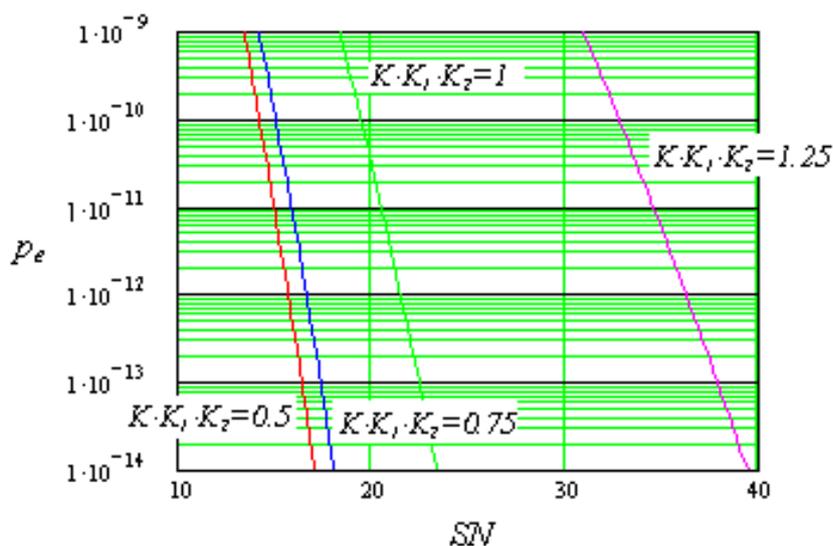


Рис.5

Для выбранной вероятности ошибки, например $p_e=10^{-12}$, была аппроксимирована зависимость требуемого отношения сигнала к шуму SN от B (рис.6)

$$SN_T = 10.567 + 34.622 \cdot B - 71.986 \cdot B^2 + 48.442 \cdot B^3. \quad (14)$$

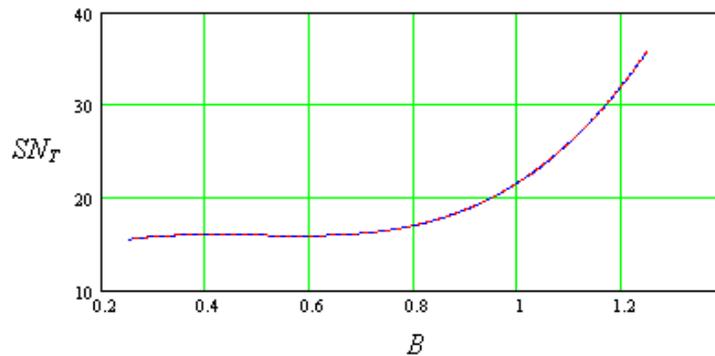


Рис.6

Из рис.6 видно, что с увеличением относительной ширины импульса на входе решающего устройства B требуемое отношение сигнала к шуму SN_T сначала почти не изменяется, а при $B > 0.8-0.9$ быстро растет.

5. РАСЧЕТ ДЛИНЫ РЕГЕНЕРАЦИОННОГО УЧАСТКА ПО ДИСПЕРСИИ

Из рис.5 и 6 видно, что величина B , как правило, не должна превышать 1. Для предварительного расчета полагаем $B=0.75$ и $K_1=K_2$. Тогда из выражения (2) можно получить зависимость длины участка регенерации от полуширины импульса на выходе регенератора.

$$l_{pd} = \frac{2 \cdot \pi \cdot c \cdot K^2 \cdot t_T^2}{\lambda^2 \cdot D_x} \cdot \sqrt{\frac{K_1^2 - 1}{1 + (2 \cdot \pi \cdot \Delta\nu \cdot K \cdot t_T)^2}} \quad (15)$$

На рис. 7 показано семейство зависимостей длины регенерационного участка по дисперсии в зависимости от относительной длительности импульса логической единицы K для различных ВОСП синхронной цифровой иерархии от STM-1 до STM-64. Расчеты проведены для следующих исходных данных: $B = 0.75$, $\lambda = 1.31$ мкм, $D_x = 3.5$ пс/(нм км), $\Delta\nu = 10^9$ Гц, при $K_1 = K_2 = \sqrt{B/K}$. Видно, что длина участка регенерации сильно зависит от скорости передачи C_T , имеет довольно плавный максимум при определенном значении K . Значения оптимального K возрастают с увеличением скорости передачи.

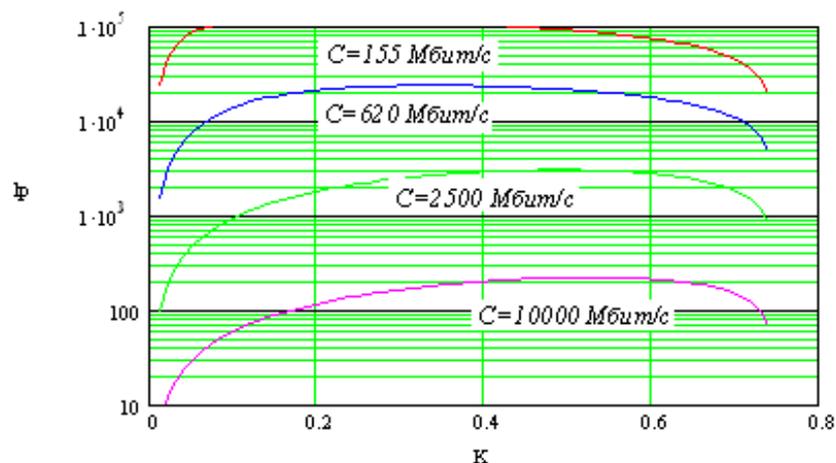


Рис.7

6. РАСЧЕТ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ПОТЕРЬ

Проведем для тех же исходных данных расчеты дополнительных потерь из-за хроматической дисперсии a_d и ФНЧ a_{df} , используя выражение (3)

$$a_d = a_{df} = 5 \cdot \lg\left(\frac{B}{K}\right) \quad (16)$$

Результаты расчетов приведены на рис. 8.

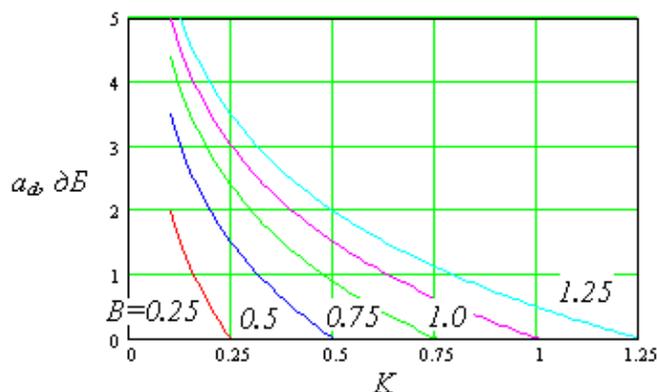


Рис.8

Проведем также расчеты относительной постоянной времени τ_f/t_T по уравнению, полученному из выражений (7), (9) и (16)

$$\sqrt{\frac{K}{B}} = 1 + a_1 \cdot \frac{\tau_f}{t_T} + a_2 \cdot \left(\frac{\tau_f}{t_T}\right)^2 + a_3 \cdot \left(\frac{\tau_f}{t_T}\right)^3. \quad (17)$$

На рис. 9 приведены результаты расчетов по выражению (17). Полоса пропускания ФНЧ может быть определена по выражению

$$\Delta F \cdot t_T = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \tau_f / t_T}. \quad (18)$$

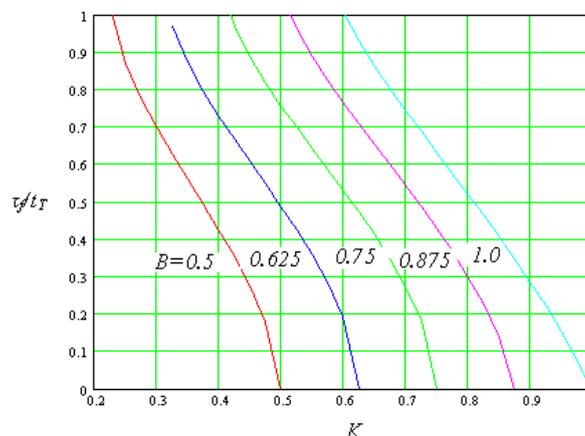


Рис. 9

7. ОПТИМИЗАЦИЯ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ВХОДНОГО ИМПУЛЬСА

Для оптимального выбора относительной длительности оптического импульса K и постоянной времени ФНЧ τ_f/t_T проведем расчет некоторой целевой функции, которая прямо пропорциональна отношению сигнала к шуму с учетом требуемой полосы пропускания, дополнительных затуханий за счет дисперсии и ФНЧ

$$D = \frac{SN_0}{SN_T \cdot \sqrt{\Delta F \cdot t_T}} \cdot \text{dec} \left(\frac{-(a_d + a_{df})}{10} \right), \quad (19)$$

где $\text{dec}(x)$ обозначает 10^x ,

SN_0 – требуемое отношение сигнала к шуму при $B \rightarrow 0$ (рис.6) при заданной вероятности ошибки p_e ,

SN_T – требуемое отношение сигнала к шуму при любом значении B

На рис.10 представлены результаты расчетов по выражению (19). Видно, что для каждого отношения B длительности импульса на входе решающего устройства к длительности тактового интервала существует оптимальное отношение K длительности входного импульса к тактовому интервалу. Кроме того видно, что максимальное значение функция D принимает при $B=0.75$ и $K=0.55$. Тогда при сделанных ранее допущениях получаем $K_1=1.168$ и $a_d=a_{df}=0.67$ дБ. Для дальнейших расчетов будем использовать эти значения.

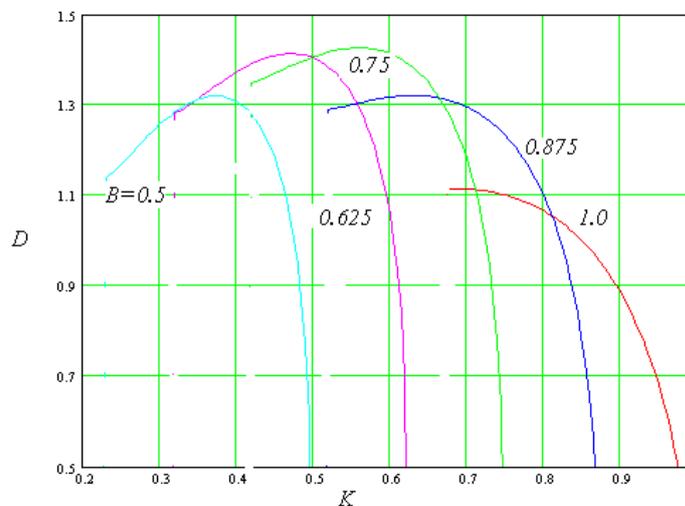


Рис. 10

8. СВОДНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ДЛИНЫ РЕГЕНЕРАЦИОННОГО УЧАСТКА ПО ДИСПЕРСИИ

Результаты расчетов длин регенерационных участков с наиболее распространенными типами одномодовых ОВ для различных систем передачи синхронной цифровой иерархии приведены в таблице 1.

Таблица 1

Системы передачи		STM-1	STM-4	STM-16	STM-64
СТ, Мбит/с		155	620	2500	10000
t_0 , нс		1.77	0.44	0.11	0.027
τ_f , нс		2.10	0.524	0.13	0.032
ΔF , МГц		75.9	303	1224	4897
$l_{pd,км}$ DSF 1550 нм	$\Delta\nu=100$ ГГц	381	95.4	23.6	5.9
	$\Delta\nu=10$ ГГц	3817	953	234	51.2
	$\Delta\nu=1$ ГГц	38020	8982	1346	100
$l_{pd,км}$ DSF 1310 нм	$\Delta\nu=100$ ГГц	105	26.4	6.5	1.6
	$\Delta\nu=10$ ГГц	1055	263	64.7	14.1
	$\Delta\nu=1$ ГГц	10510	2483	372	27.8
$l_{pd,км}$ SSF 1550 нм	$\Delta\nu=100$ ГГц	74.2	18.5	4.6	1.1
	$\Delta\nu=10$ ГГц	742	185	45.5	9.96
	$\Delta\nu=1$ ГГц	7392	1746	262	19.6
$l_{pd,км}$ SSF 1310 нм	$\Delta\nu=100$ ГГц	542	135	33.6	8.4
	$\Delta\nu=10$ ГГц	5426	1356	333	72.8
	$\Delta\nu=1$ ГГц	54050	12770	1913	143

7. УРОВЕНЬ ШУМА НА ВХОДЕ РЕШАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА

Будем полагать, что в качестве фотоприемника используется р-и-п фотодиод или лавинный фотодиод (ЛФД), а усилитель фототока (УФТ) построен по трансимпедансной схеме (рис.11).

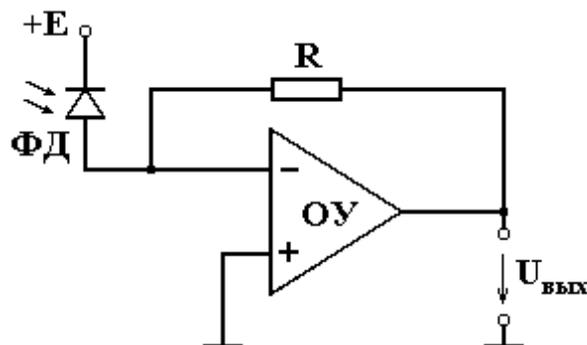


Рис.11.

Приведенная схема является преобразователем фототока I_f в выходное напряжение $U_{\text{вых}}$. Коэффициент преобразования равен сопротивлению резистора обратной связи R_f . При определении эквивалентного шумового тока ЛФД I_n , приведенного к входу УФТ, будем учитывать дробовой ток I_d фотодиода с учетом шума лавины, тепловые шумы U_t резистора обратной связи, шумовой входной ток операционного усилителя (ОУ) I_y и шумовое напряжение ОУ U_y , приведенное к входу [6, 7]

$$I_n^2 = I_d^2 + \frac{U_t^2}{R_f^2} + I_y^2 + \frac{U_y^2}{R_f^2} = \left\{ 2 \cdot e \cdot [(I_{ty} + I_f) \cdot M^m + I_{tn}] + S_I + \frac{S_U}{R_f^2} + \frac{4 \cdot k \cdot T}{R_f} \right\} \cdot \Delta F$$

$$= \left\{ 2 \cdot e \cdot \left[\left(I_{ty} + \frac{P_0}{S \cdot 10^{10}} \right) \cdot M^m + I_{tn} \right] + S_I + \frac{S_U}{R_f^2} + \frac{4 \cdot k \cdot T}{R_f} \right\} \cdot \Delta F \quad (20)$$

где $e = 1.6 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд электрона,

$k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана,

T – абсолютная температура,

I_{ty} – умножаемая часть темнового тока ЛФД без учета лавины,

I_{tn} – неумножаемая часть темнового тока ЛФД без учета лавины,

I_f – фототок ЛФД без учета лавины,

P_0 – мощность источника излучения,

S – чувствительность ЛФД без учета лавины,

M – коэффициент лавинного умножения, который для р-и-п ФД равен 1,

m – коэффициент, характеризующий шум лавины, который принимает значения от 2 (для идеального ЛФД) до 3; конкретно его значение можно принять равным 2.5 для Si лавинного фотодиода, 3 для Ge ЛФД и 2.75 для InGaAs ЛФД,

S_I – спектральная плотность шумового тока УФТ,

S_U – спектральная плотность шумового напряжения УФТ, приведенная ко входу,

ΔF – полоса пропускания ФПУ (ФНЧ),

$$a_p = \alpha \cdot l_p + 2 \cdot a_p + a_n \cdot \frac{l_p}{l_{cd}} + a_d + a_{df} \quad (21)$$

– затухание на участке регенерации длиной l_p с двумя разъёмными соединениями, где l_{cd} – строительная длина оптического кабеля.

Для фотоприемника с известной емкостью перехода C можно определить максимально возможное сопротивление обратной связи по выражению

$$R_f = \frac{\tau_f}{C}. \quad (22)$$

Пороговую оптическую мощность ФПУ P_n , при которой отношение сигнала к шуму равно $SN=1$, и минимальную мощность ФПУ, при которой отношение сигнала к шуму равно минимально допустимому SN_{min} , можно определить по выражениям

$$P_n = \frac{I_n}{S \cdot M}, \quad P_{min} = SN_{min} \cdot P_n. \quad (23)$$

8. РАСЧЕТ ДЛИНЫ РЕГЕНЕРАЦИОННОГО УЧАСТКА ПО ЗАТУХАНИЮ

Задаваясь амплитудой мощности на выходе источника излучения P_0 , можно определить максимально допустимое затухание в линейном тракте, решив уравнение

$$SN_{min} \cdot P_n(a_{max}) = P_0 \cdot (1 - A) \cdot 10^{-\frac{a_{max}}{10}} \quad (24)$$

Уравнение (23) является трансцендентным, и получить аналитическое решение не возможно. Однако его легко решить численным методом. Ниже приведен пример решения уравнения в среде MathCad.

Строки MathCad	Комментарий
ap:=0	Начальное значение
Given	Служебное слово
$SN \cdot P_n(a_p) - P_0 \cdot (1 - A) \cdot 10^{-\frac{a_p}{10}} = 0$	Запись уравнения
amax:=Find(ap)	Нахождение корня
amax=34.56	Корень уравнения

для следующих исходных данных:

- параметры ВОСП: $A=0.1$, $p_e=10^{-12}$, $SN=16.48$, $P_0=10^{-1} \text{ Вт}$, $l_{cd}=4 \text{ км}$; $C=2.5 \text{ Гбум/с}$
- параметры GaInAs ЛФД: $S=0.94 \text{ А/Вт}$ при $\lambda=155 \text{ мкм}$, $I_{ny}=1 \cdot 10^{-9} \text{ А}$, $I_{in}=0 \text{ А}$, $M=1$, $m=2.74$, $C=1 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}$, $T=300 \text{ К}$;
- параметры ОУ[4]: $S_i=3.2 \cdot 10^{-26} \text{ А}^2/\text{Гц}$, $S_v=6.6 \cdot 10^{-18} \text{ В}^2/\text{Гц}$.

Определить максимальную длину участка регенерации l_{pe} по затуханию можно по следующему выражению

$$l_{pe} = \frac{a_{max} - 2 \cdot a_p - a_d - a_{df} - a_{эз}}{\alpha + \frac{a_n}{l_{cd}}}. \quad (25)$$

При расчете также использовались следующие данные: $a_p=0.2 \text{ дБ}$, $a_n=0.1 \text{ дБ}$ и $a_{эз}=3 \text{ дБ}$.

В таблице 2 приведены результаты расчетов длин регенерационных участков для различных скоростей передачи, длин волн и коэффициентов лавинного умножения.

Сравнение результатов расчета по дисперсии и затуханию позволяет уточнить длину регенерационного участка по затуханию l_{pe} в том случае, когда длина регенерационного участка по дисперсии l_{pd} (таблица 1) значительно превышает расчетное значение l_{pe} в таблице 2. В этом случае длина регенерационного участка по затуханию может быть увеличена в $a_d/(\alpha + a_c/l_{cd})$ раз.

Таблица 2

Система передачи		STM-1	STM-4	STM-16	STM-64
Скорость передачи, Гбит/с		0.155	0.62	2.5	10
R, Ом		2000	500	130	30
1550 нм M=1	а _{max} , дБ	51.4	43.3	34.6	25.6
	l _{ре} , км	207.6	171.5	132.5	92.7
1310 нм M=1	а _{max} , дБ	50.7	42.6	33.8	24.9
	l _{ре} , км	108.2	89	68.4	47.4
1550 нм M=10	а _{max} , дБ	60.0	52.4	44.1	35.3
	l _{ре} , км	245.7	212.0	174.8	136.1
1310 нм M=10	а _{max} , дБ	59.3	51.7	43.3	34.6
	l _{ре} , км	128.3	110.5	90.8	70.3

9. ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Проведенный анализ методики расчета длины регенерационного участка позволяет сделать рекомендации разработчикам оптической части ВОСП:

- длительность оптического импульса на выходе регенератора должна быть порядка половины длительности тактового интервала;
- длительность импульса на входе решающего устройства должна составлять примерно 75% от длительности тактового интервала;
- ориентировочные значения для полосы частот и постоянной времени фотоприемного устройства для различных скоростей передачи приведены в таблице 1.

Проведенные примеры расчетов позволяют проектировщикам оценивать максимально возможные длины участков регенерации. Предлагаемые выражения могут использоваться при проектировании магистральных ВОЛП.

Не решенными в данной работе вопросами остаются:

- влияние формы используемых оптических импульсов на длину регенерационного участка;
- возможности использования оптических усилителей в качестве предварительных (на входе фотоприемника) и линейных (вместо промежуточных регенераторов);
- компенсация хроматической дисперсии для увеличения длины участков регенерации;
- учет влияния поляризационно-модовой дисперсии на длину участка регенерации;
- особенности расчета длины участка регенерации для ВОСП со спектральным уплотнением.

Автор понимает, что представленный материал не бесспорен и ждет критических замечаний от специалистов по существу высказанных положений. Работа над нерешенными вопросами продолжается.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глаголев С.Ф., Кочановский Л.Н. Определение длины регенерационного участка ВОЛС, Сборник трудов 4 всероссийской конференции «Современные технологии проектирования, строительства и эксплуатации линейно-кабельных сооружений», СТЛКС-2005, СПб, СПб ГУТ, 2005, с. 55-65
2. Глаголев С.Ф. Проектирование современных магистральных волоконно-оптических линий передачи. Сборник трудов 5 всероссийской конференции «Современные технологии проектирования, строительства и эксплуатации линейно-кабельных сооружений», СТЛКС-2006, СПб, СПб ГУТ, 2006, с. 16-25
3. Глаголев С.Ф., Никитин Б.К. Оптимизация линий связи первичных сетей: учебное пособие (направления 654400, 550400)/ СПбГУТ. СПб, 2005, 84 с., ил.
4. Андрушко Л.М., Гроднев И.И., Панфилов И.П. Волоконно-оптические линии связи: Учеб. Пособие для вузов. - М.: Радио и связь, 1985.
5. Агравал Г. Нелинейная волоконная оптика: Пер. с англ. – М.: Мир, 1996. – 323 с., ил.
6. Шевцов Э.А., Белкин М.Е. Фотоприемные устройства волоконно-оптических систем передачи. - М.: Радио и связь, 1992. - 224 с.: ил.
7. Достал И. Операционные усилители: Пер. с англ. – М.: Мир, 1982. – 512 с., ил.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАМАНОВСКИХ УСИЛИТЕЛЕЙ ДЛЯ РЕКОНСТРУКЦИИ ВОЛП.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ.

При реконструкции перед проектировщиками стоит задача использования уже проложенного оптического кабеля, в котором, как правило, используется стандартное одномодовое оптическое волокно (ОВ), жестко определены места возможного расположения активного оборудования (оптических усилителей и регенераторов). Проектировщик для выполнения требований технического задания (ТЗ) должен решить технико-экономическую задачу оптимизации реконструируемой ВОЛП с учетом существующих ограничений. Он может выбирать параметры системы DWDM, количество каналов в каждом ОВ, интервал между каналами, скорость передачи в каждом канале. Все это определяет выбор активного оборудования. Эта задача имеет много решений, и каждое из них может быть наилучшим в каком-либо смысле. Рассмотреть в одной статье все возможные варианты проектных решений не возможно. Ограничимся рассмотрением лишь некоторых наиболее общих решений.

Отметим, что при строительстве новых магистральных волоконно-оптических линий передачи (ВОЛП) большой пропускной способности и протяженности у проектировщиков существует возможность использования оптических кабелей с большим количеством ОВ, выбора ОВ с оптимальными параметрами для технологии DWDM, использующей диапазон длин 1550 нм. Эту задачу в данной работе мы не рассматриваем.

2. ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ОДНОВРЕМЕННОЙ КОМПЕНСАЦИИ ЗАТУХАНИЯ И ДИСПЕРСИИ.

Для одновременной компенсации затухания и хроматической дисперсии в усилительной секции на стандартном ОВ (SF) длиной l можно использовать отрезок ОВ для компенсации дисперсии (DCF), который имеет хроматическую дисперсию противоположного знака и служит активной средой для дискретного рамановского оптического усилителя (ОУ). Рамановские ОУ располагаются в усилительных пунктах линейного тракта. Каждый ОУ содержит следующие основные элементы: катушку с ОВ DCF длиной l_c , лазер накачки с уровнем мощности p_p и мультиплексор WDM для объединения оптических излучений многоканального сигнала и накачки.

Длина компенсирующего ОВ DCF l_c определяется из условия полной компенсации хроматической дисперсии на определенной длине волны, например на центральной длине волны λ_c системы DWDM [1]

$$l_c(\lambda_c) = l \cdot \left| \frac{D_x(\lambda_c)}{D_{xc}(\lambda_c)} \right|, \quad (1)$$

где $D_x(\lambda_c)$ и $D_{xc}(\lambda_c)$ - хроматические дисперсии ОВ SF и DCF.

Отметим, что для полной компенсации хроматической дисперсии на всех длинах волн, используемых в системе DWDM, необходимо выполнение условия

$$\left| \frac{D_x(\lambda_c)}{D_{xc}(\lambda_c)} \right| = const. \quad (2)$$

При разработке ОВ DCF стремятся к выполнению условия (2), но точно выполнить его для всех длин волн не удается, и компенсация дисперсии будет не полной. Однако, остаточная хроматическая дисперсия должна лежать в допустимых пределах.

Требуемое усиление рамановского ОУ, которое можно задавать подбором мощности накачки, определим, исходя из суммарного затухания в усилительной секции, которое складывается из суммы затуханий в стандартном и компенсирующем ОВ, а также потерь в мультиплексоре WDM α_{WDM} для сигнала. Для требуемого усиления ОУ на центральной длине волны λ_c системы DWDM можно записать

$$G(\lambda_c) = \alpha(\lambda_c) \cdot l + \alpha_c(\lambda_c) \cdot l_c + \alpha_{WDM}(\lambda_c), \quad (3)$$

где $\alpha(\lambda_c)$ и $\alpha_c(\lambda_c)$ – коэффициенты затухания ОВ SF и DCF, соответственно.

Полная компенсация затухания в усилительной секции для всех каналов длин волн также невозможна. Это приводит к неодинаковости выходных сигналов в разных каналах. Далее будет показано, как практически можно выровнять сигналы разных каналов.

3. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТОВ. ПРИМЕР ВЫБОРА ИСХОДНЫХ ДАННЫХ.

Будем полагать, что для увеличения пропускной способности каждого ОВ реконструируемой ВОЛП используется технология DWDM с необходимым числом каналов. Такую ВОЛП можно представить себе в виде последовательности усилительных секций, каждую из которых можно рассматривать и рассчитывать отдельно. При необходимости ввода/вывода отдельных длин волн (каналов) в промежуточных точках можно использовать оптические мультиплексоры ввода/вывода (OADM). В этом случае усиление ОУ должно быть увеличено на величину потерь в OADM.

В качестве примера рассмотрим методику расчета параметров одной усилительной секции ВОЛП с длиной l . Предполагаем, что реконструируемая секция построена на стандартном ОБ (SF) и характеризуется следующими параметрами:

- Длина стандартного ОБ – l ,
- Скорость передачи в каждом канале – C_T ,
- Количество каналов – N ,
- Интервал между каналами в соответствии с частотным планом Международного союза электросвязи (МСЭ) – $\Delta\nu$,
- Центральная длина волны (частота) в канале в соответствии с частотным планом МСЭ – λ_c (ν_c),
- Максимальный уровень оптической мощности многоканального сигнала на входе в стандартное ОБ (SF) – p_{\max} ,
- Минимальный уровень оптической мощности на входе приемника, который обеспечивает требуемый коэффициент ошибок – p_{\min} ,
- Шум-фактор рамановского ОУ – F_n .

Предлагаемую методику расчета усилительной секции будем сопровождать примером расчета, для которого выберем следующие данные: $\nu_c = 193500$ ГГц, $\Delta\nu = 100$ ГГц, $\lambda_c = 1550.38$ нм, $l = 100$ км, $C_T = 2.5$ Гбит/с, $N = 5$, $p_{\max} = 20$ дБм, $p_{\min} = -25$ дБм, $F_n = 4$ (6 дБ).

На рис. 1 показана схема усилительной секции, прилегающей к оконечному пункту (ОП), в котором формируется сигнал DWDM. Сама секция включает 100 км стандартного ОБ и рамановский ОУ с попутной накачкой, содержащий источник накачки, WDM мультиплексор и компенсирующее ОБ, длина которого определяется выражением (1). Возможно также применение в ОУ встречной и двунаправленной накачки.

Транспондеры (ТПП) в ОП выполняют функции преобразования N входных оптических сигналов с одинаковыми длинами волн и со скоростями от 2.5 до 100 Гбит/с в оптические сигналы с длинами волн, соответствующими частотному плану МСЭ. Выходные сигналы транспондеров объединяются мультиплексором DWDM и после усиления в усилителе мощности (ОУ1) поступают в одно ОБ линейного тракта (ОБ1 SF).

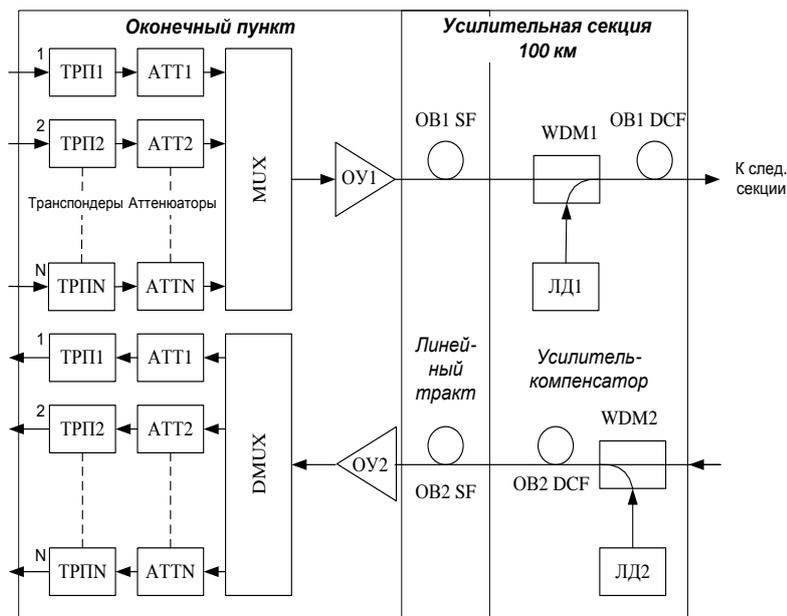


РИС. 1. СТРУКТУРНАЯ СХЕМА N -КАНАЛЬНОЙ УСИЛИТЕЛЬНОЙ СЕКЦИИ DWDM ВМЕСТЕ С ОКОНЕЧНЫМ ПУНКТОМ

Приходящие из другого ОБ (ОБ2 SF) сигналы DWDM после усиления в предварительном усилителе ОУ2 разделяются демультиплексором на N каналов и поступают на транспондеры, которые выполняют преобразования разных длин волн в одну.

Кроме преобразования длин волн транспондеры также выполняют функции усиления, выделения тактовой частоты, регенерации, кодирования и декодирования сигналов с использованием корректирующих кодов, исправляющих ошибки. Такие коды в литературе обозначают аббревиатурой FEC (Forward Error Correction – опережающая коррекция ошибок).

Для обеспечения высокого качества связи в каждом канале DWDM нужно, чтобы принимаемые сигналы и желательны отношения сигнала к шуму на приемных входах транспондеров были бы одинаковыми. В связи с неодинаковой величиной затухания в ОБ SF и усиления в рамановских ОУ для разных каналов DWDM необходимо иметь возможность изменения уровней сигналов на входах и выходах транспондеров в оконечных и промежуточных пунктах с помощью аттенуаторов АТТ, включаемых в каждый канал. Выбором затухания регулируемых аттенуаторов можно добиться допустимой неоднородности коэффициентов передачи во всех каналах.

4. ПАРАМЕТРЫ ОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В УСИЛИТЕЛЬНОЙ СЕКЦИИ.

В каждой усилительной секции используются ОВ двух типов: стандартные ОВ SF и компенсирующие хроматическую дисперсию ОВ DCF. Для упрощения расчетов желательно знать аналитические зависимости коэффициентов затухания, хроматической дисперсии и эффективной площади сердцевин ОВ от длины волны излучения. Необходимые расчетные выражения были получены в работе путем аппроксимации экспериментальных значений этих величин в отдельных точках для известных значений длин волн [4].

4.1. Параметры стандартных ОВ SF

Стандартные одномодовые ОВ со ступенчатым профилем показателя преломления имеют торговую марку SMF-28, и выпускаются в соответствии с рекомендациями МСЭ G.652.

Приведем средние значения параметров ОВ SMF-28 [4] для центральной длины волны $\lambda_c = 1550$ нм: $\alpha_c = 0.185$ дБ/км, эффективная площадь сердцевин $S_{ef} = 76.5$ мкм², $D_x = 16.5$ пс/(нм км), наклон дисперсионной характеристики $\delta D_x = 0.05$ пс/(нм² км).

В результате аппроксимации получены формулы, которые справедливы в диапазоне изменения длин волн λ от 1400 до 1650 нм.

Для коэффициента затухания ОВ (рис. 2)

$$\alpha(\lambda_c) = \alpha_c(\lambda_c) + a \cdot (\lambda - \lambda_c) + b \cdot (\lambda - \lambda_c)^2 + c \cdot (\lambda - \lambda_c)^3 + d \cdot (\lambda - \lambda_c)^4, \quad (4)$$

где $\alpha_c = 0.18$ дБ/км – коэффициент затухания на длине волны $\lambda_c = 1550$ нм, $a = 4.5 \cdot 10^{-5}$ дБ/(нм км), $b = 4.657 \cdot 10^{-6}$ дБ/(нм² км), $c = 1.8 \cdot 10^{-8}$ дБ/(нм³ км), $d = 2.2 \cdot 10^{-10}$ дБ/(нм⁴ км).

Для хроматической дисперсии ОВ (рис. 3а)

$$D_{xc}(\lambda) = D_{xc}(\lambda_c) + \delta D_x \cdot (\lambda - \lambda_c) - a_x \cdot (\lambda - \lambda_c)^2, \quad (5)$$

где $D_x(\lambda_c) = 16.5$ пс/(нм км), $\delta D_x = 0.055$ пс/(нм² км), $a_x = 3.8 \cdot 10^{-5}$ пс/(нм³ км);

Для эффективной площади S_{ef} сердцевин ОВ (рис. 3б)

$$S_{sef}(\lambda) = S_{sefc}(\lambda_c) + \delta S_{sef}(\lambda - \lambda_c) - a_{sef} \cdot (\lambda - \lambda_c)^2, \quad (6)$$

где $S_{sefc}(\lambda_c) = 76.5$ мкм², $\delta S_{sef} = 0.07$ мкм²/нм, $a_{sef} = 4.5 \cdot 10^{-5}$ мкм²/нм².

На рис. 2 и 3 показаны результаты расчетов по (4-6) и нанесены экспериментальные точки, которые близки к расчетным значениям.

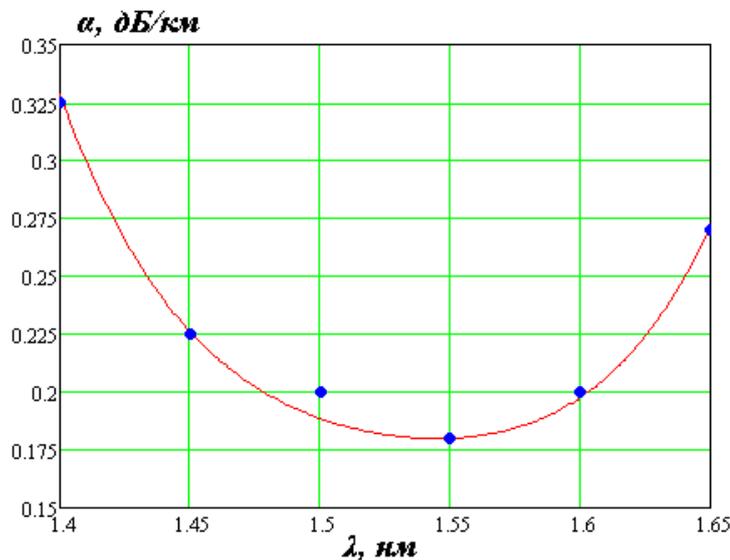


РИС. 2. ПОЛУЧЕННАЯ АНАЛИТИЧЕСКАЯ ЗАВИСИМОСТЬ КОЭФФИЦИЕНТА ЗАТУХАНИЯ СТАНДАРТНОГО ОВ ОТ ДЛИНЫ ВОЛНЫ.

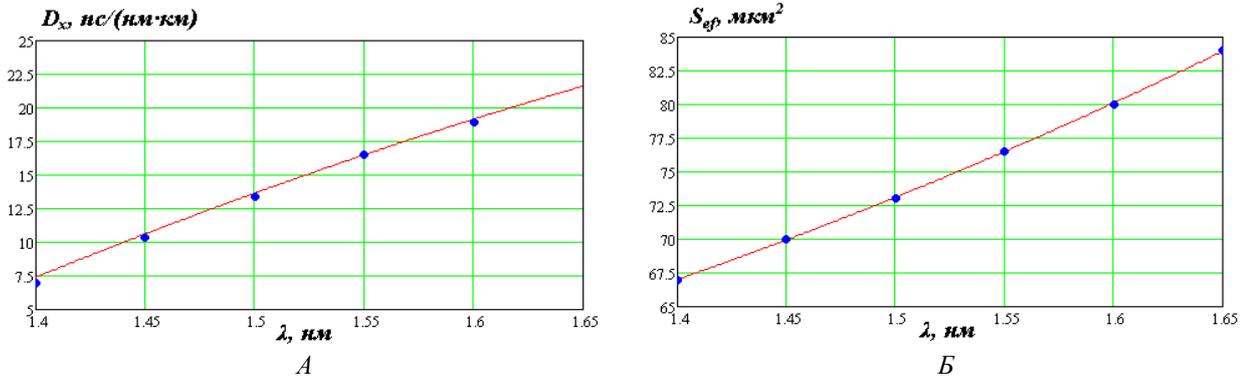


РИС. 3. ПОЛУЧЕННЫЕ АНАЛИТИЧЕСКИЕ ЗАВИСИМОСТИ ХРОМАТИЧЕСКОЙ ДИСПЕРСИИ (А) И ЭФФЕКТИВНОЙ ПЛОЩАДИ СЕРДЦЕВИНЫ (Б) СТАНДАРТНОГО ОВ ОТ ДЛИНЫ ВОЛНЫ.

4.1. Параметры компенсирующих дисперсию ОВ DCF

Для расчетов используем параметры компенсирующего хроматическую дисперсию ОВ DCF, приведенные в библиотеке компонентов к программе имитационного моделирования OptiSystem [4].

Минимальный коэффициент затухания $\alpha = 0.3$ дБ/км ОВ DCF имеет на длине волны $\lambda_{01} = 1600$ нм. Значения хроматической дисперсии $D_x = -82$ пс/(нм·км), наклона дисперсионной характеристики $\delta D_x = 0.33$ пс/(нм²·км) и эффективной площади сердцевинки $S_{ef} = 32$ мкм² ОВ DCF приведены для длины волны $\lambda_{02} = 1550$ нм.

В результате аппроксимации получены формулы, которые справедливы в диапазоне изменения длин волн λ от 1400 до 1650 нм.

Для коэффициента затухания ОВ (рис. 4)

$$\alpha(\lambda) = \alpha_0(\lambda_{01}) + a \cdot (\lambda - \lambda_{01}) + b \cdot (\lambda - \lambda_{01})^2 + d \cdot (\lambda - \lambda_{01})^4, \quad (7)$$

где $\alpha_0(\lambda_{01}) = 0.3$ дБ/км, $a = -6 \cdot 10^{-6}$ дБ/(нм·км), $b = 4.5 \cdot 10^{-6}$ дБ/(нм²·км), $d = 2 \cdot 10^{-11}$ дБ/(нм⁴·км).

Для хроматической дисперсии ОВ (рис. 5а)

$$D_x(\lambda) = D_{x0}(\lambda_{02}) + \delta D_x \cdot (\lambda - \lambda_{02}), \quad (8)$$

где $D_{x0}(\lambda_{02}) = -82$ пс/(нм·км), $\delta D_x = 0.24$ пс/(нм²·км).

Для эффективной площади S_{ef} сердцевинки ОВ (рис. 5б)

$$S_{ef}(\lambda) = S_{ef0}(\lambda_{02}) + \delta S_{ef} \cdot (\lambda - \lambda_{02}) + a_{ef} \cdot (\lambda - \lambda_{02})^2, \quad (9)$$

где $S_{ef0}(\lambda_{02}) = 32$ мкм², $\delta S_{ef} = 0.13$ мкм²/нм, $a_{ef} = 2.5 \cdot 10^{-4}$ мкм²/нм².

На рис. 4 и 5 показаны результаты расчетов по (7-9) и нанесены экспериментальные точки, которые близки к расчетным значениям.

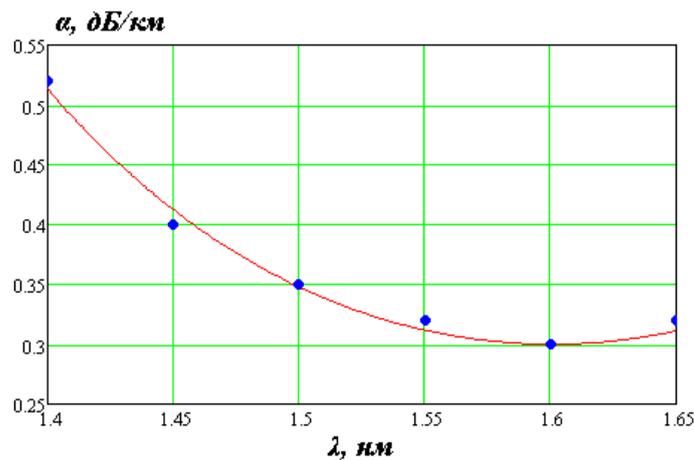


РИС. 4. ПОЛУЧЕННАЯ АНАЛИТИЧЕСКАЯ ЗАВИСИМОСТЬ КОЭФФИЦИЕНТА ЗАТУХАНИЯ ОВ DCF ОТ ДЛИНЫ ВОЛНЫ.

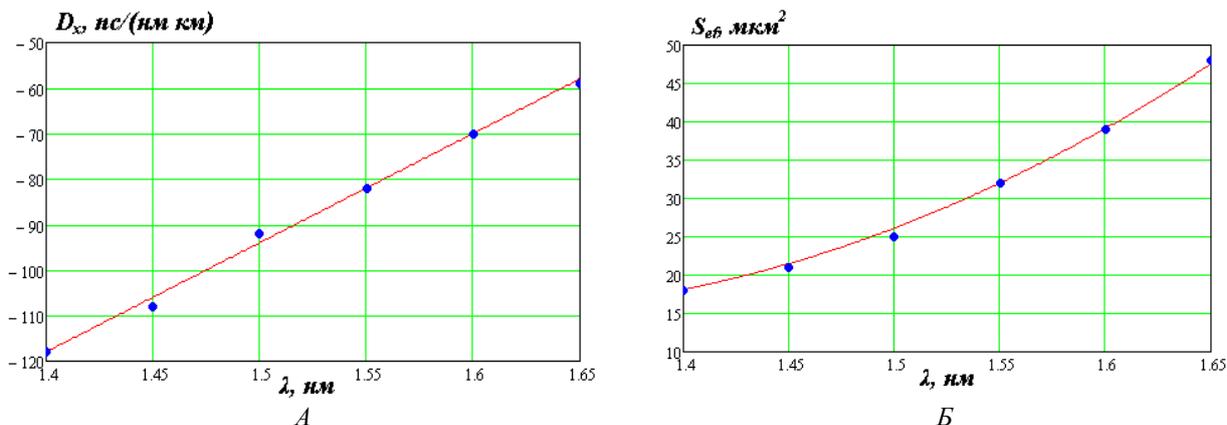


РИС. 5. ПОЛУЧЕННЫЕ АНАЛИТИЧЕСКИЕ ЗАВИСИМОСТИ ХРОМАТИЧЕСКОЙ ДИСПЕРСИИ (А) И ЭФФЕКТИВНОЙ ПЛОЩАДИ СЕРДЦЕВИНЫ (Б) ОВ DCF ОТ ДЛИНЫ ВОЛНЫ.

5. ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССОВ УСИЛЕНИЯ В РАМАНОВСКИХ ОПТИЧЕСКИХ УСИЛИТЕЛЯХ.

Принцип действия рамановских оптических усилителей основан на эффекте комбинационного рассеяния (ВКР или эффекте Рамана) в ОВ [3]. Этот нелинейный эффект приводит к тому, что небольшая часть (обычно $10^{-6} - 10^{-7}$) мощности излучения накачки преобразуется в излучение с более низкой частотой. В квантовой механике этот процесс описывается как рассеяние фотона на молекуле, которая поглощает часть энергии фотона (определяемую одной из собственных частот ее колебаний ν_m), а частота фотона ν_p уменьшается до величины $\nu_{st} = \nu_p - \nu_m$ (стоксова частота). Иными словами происходит спонтанное испускание фотона $h\nu_{st}$ при исчезновении фотона $h\nu_p$ возбуждающего излучения. Для кварцевых ОВ средняя собственная частота $\nu_m = (13.1 - 13.2)$ ТГц, а рассеянное излучение при этом имеет среднюю частоту $\nu_{st} = \nu_p - \nu_m$ и непрерывный спектр излучения с шириной полосы $\Delta\nu$ на уровне 0.5 от 6 до 8 ТГц.

Наряду со спонтанным комбинационным рассеянием возникает стимулированное или вынужденное комбинационное рассеяние (ВКР). Это явление также заключается в исчезновении фотона возбуждающего излучения и испускании фотона стоксовой частоты, но вероятность этого процесса пропорциональна интенсивности возбуждающего и рассеянного излучения и зависит от их частот. В отличие от спонтанного излучения, при котором излученный фотон имеет случайную частоту (в пределах ранее указанного диапазона частот), фазу, поляризацию и направление распространения, вынужденный фотон имеет ту же частоту, фазу, поляризацию и направление распространения, что и вынуждающий фотон. На этом основана возможность увеличения количества фотонов сигнала с частотой ν_s , введенных вместе с накачкой в ОВ, которое является активной усиливающей средой. Возможно одновременное усиление сигналов нескольких частот в диапазоне $\Delta\nu$, например многочастотных сигналов DWDM. В процессе усиления фотоны накачки отдают свою энергию излучению сигналов.

Если в ОВ вводится только излучение с частотой ν_p (накачка), то сначала возникает спонтанное комбинационное рассеяние с частотой ν_{st} в том же диапазоне частот $\Delta\nu$. Затем рассеянное излучение по мере распространения по ОВ начинает действовать, как стимулирующее и возникает ВКР, которое приводит к возникновению усиленного спонтанного излучения (УСИ). На рис. 6 показаны спектры излучения на входе (а) и выходе (б) ОВ при отсутствии полезного сигнала. Выходной спектр содержит сравнительно узкий спектр остаточного излучения накачки и широкий спектр возникшего УСИ.

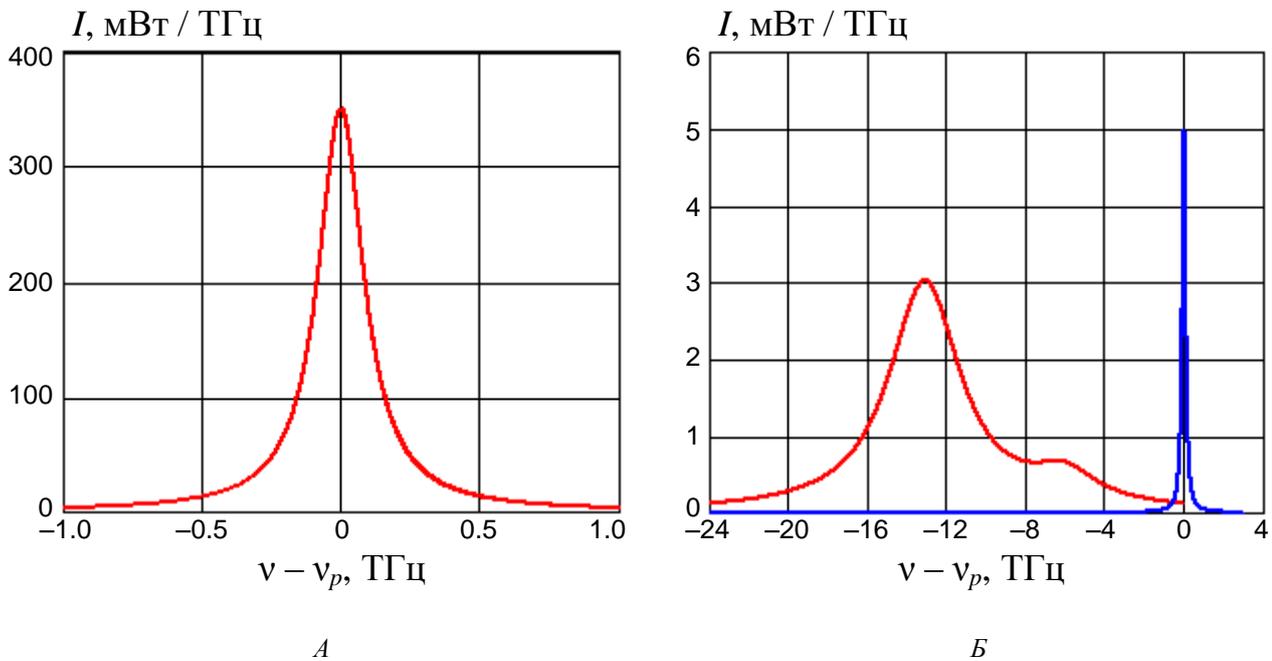


РИС.6. СПЕКТРЫ НАКАЧКИ НА ВХОДЕ В ОВ (А) И ВЫНУЖДЕННОГО КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ ВМЕСТЕ С ИСТОЩЕННОЙ НАКАЧКОЙ (Б)

На выходе реального рамановского ОУ, на вход которого поданы сигналы, будут существовать: усиленные полезные сигналы, остаточное излучение накачки и УСИ. Причем УСИ играет роль шумов ОУ.

Для усиления оптических сигналов кроме эффекта ВКР может также использоваться эффект вынужденного рассеяния Мандельштамма-Бриллюена (ВРМБ). Однако на практике для усиления оптических сигналов используют только эффект ВКР, который выгодно отличается от эффекта ВРМБ. Рамановские ОУ имеют широкий спектр усиливаемых длин волн и большой разнос по частоте между сигналом и накачкой. Достоинством рамановских усилителей по сравнению с эрбиевыми усилителями является принципиальная возможность усиления сигналов в различных диапазонах длин волн, используемых для оптической связи. Для этого надо только изменить длину волны накачки.

Запишем выражение для изменения интенсивности оптического сигнала I_s и накачки I_p на малом участке длиной dZ в ОВ рамановского усилителя с попутной накачкой [2, 3].

$$\frac{dI_s}{dZ} = (g_r \cdot I_p - \alpha_s) \cdot I_s, \quad (10)$$

$$\frac{dI_p}{dZ} = \left(-g_r \cdot \frac{\nu_p}{\nu_s} I_s - \alpha_s \right) \cdot I_p, \quad (11)$$

где $I_s = P_s / S_{efs}$ – интенсивность оптического сигнала с частотой ν_s , Вт/м²; S_{efs} – эффективная площадь ОВ на частоте сигнала ν_s , м²; $I_p = P_p / S_{efp}$ – интенсивность накачки с частотой ν_p , Вт/м²; S_{efp} – эффективная площадь ОВ на частоте накачки ν_p , м²; g_r – усилительная способность эффекта ВКР для частоты ν_s , которая зависит от разностной частоты $\nu_p - \nu_s$, м/Вт; α_s – коэффициент затухания ОВ для сигнала с частотой ν_s , Нп/м.

Отметим, что для всех ОВ $S_{efs} > S_{efp}$ и, следовательно, в первом приближении можно считать, что взаимодействие сигнала и накачки, а также затухание накачки происходит в пределах площади S_{efp} , а затухание сигнала в пределах площади S_{efs} . Учитывая это обстоятельство, преобразуем выражение для интенсивностей (10) и (11) в выражение для мощностей

$$\frac{dP_s}{dZ \cdot S_{efp}} = \left(g_r \cdot \frac{P_p}{S_{efp}} - \alpha_s \right) \cdot \frac{P_s}{S_{efs}} \quad \rightarrow \quad \frac{dP_s}{dZ} = (g_r \cdot P_p - \alpha_s \cdot S_{efp}) \cdot \frac{P_s}{S_{efs}}, \quad (12)$$

$$\frac{dP_p}{dZ \cdot S_{efp}} = \left(-g_r \cdot \frac{\nu_p \cdot P_s}{\nu_s \cdot S_{efs}} - \alpha_p \right) \cdot \frac{P_p}{S_{efp}} \quad \rightarrow \quad \frac{dP_p}{dZ} = \left(-g_r \cdot \frac{\nu_p \cdot P_s}{\nu_s \cdot S_{efs}} - \alpha_p \right) \cdot P_p. \quad (13)$$

6. ПАРАМЕТРЫ РАМАНОВСКИХ УСИЛИТЕЛЕЙ НА КОМПЕНСИРУЮЩЕМ ОВ.

Максимальная усилительная способность ВКР в ОВ DCF при длине волны накачки $\lambda_{p1} = 1$ мкм ($\nu_{p1} = 300.0$ ТГц) составляет $g_{r1max} = 2.94 \cdot 10^{-13}$ м/Вт [3] при длине волны сигнала $\lambda_{s1} = 1.046$ мкм ($\nu_{s1} = 286.8$ ТГц). Усилительная способность ВКР зависит от частоты сигнала, а также сильно зависит от взаимной поляризации сигнала и накачки, и максимальна при совпадении направлений линейных поляризаций сигнала и накачки.

Экспериментальная зависимость относительной усилительной способности ВКР от сдвига частоты сигнала относительно накачки при одинаковых направлениях линейных поляризаций сигнала и накачки показана на рис. 7а [3].

Если ОВ не сохраняет состояние поляризации распространяющегося в нем излучения, то усилительная способность уменьшается в K_p раз. Значение этого коэффициента, который учитывает случайный характер соотношений между состояниями поляризации сигнала и накачки, можно принять в расчетах равным $K_p = 1.5 - 2$. Отметим, что относительный спектр УСИ повторяет зависимость усилительной способности активной среды от частоты сигнала.

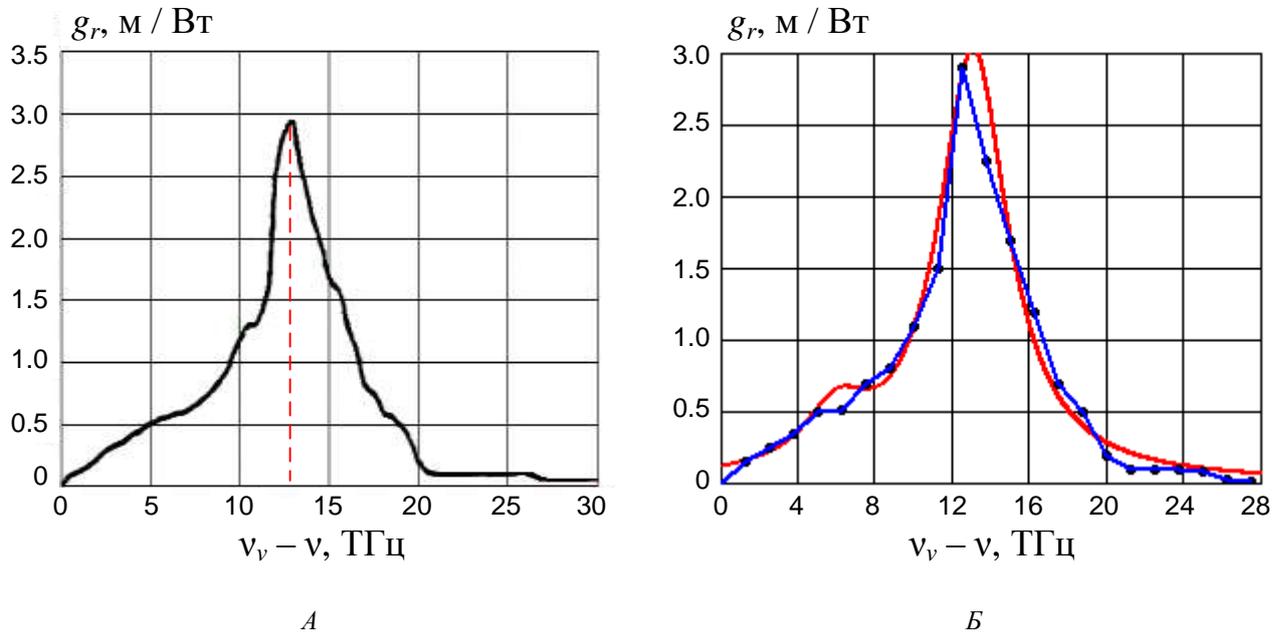


РИС. 7. СПЕКТР РАМАНОВСКОГО УСИЛЕНИЯ ВОЛОКНА DCF, ПОЛУЧЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО (А) И АППРОКСИМИРОВАННЫЙ (Б) НА ДЛИНЕ ВОЛНЫ НАКАЧКИ 1 МКМ.

Максимальная усилительная способность ВКР зависит от частоты накачки, а относительный спектр усиления (рис. 7а) сохраняет свою форму. Оценим максимальную усилительную способность ВКР на длине волны сигнала $\lambda_{s2} = 1.55$ мкм ($\nu_{s2} = 193.55$ ТГц), при длине волны накачки $\lambda_p = 1.45$ мкм ($\nu_p = 180.45$ ТГц), используя то, что с уменьшением частоты сигнала максимальная усилительная способность уменьшается пропорционально отношению частот. Тогда максимальная усилительная способность на длине волны сигнала λ_s составит $g_{rmax} = 1.98 \cdot 10^{-13}$ м/Вт.

Эффект ВКР является пороговым, т.е. начинает проявляться при значительных интенсивностях накачки. Из (10) следует, что при интенсивности накачки

$$I_p \leq I_{pth} = \alpha_s / g_r \quad (14)$$

усиление не возможно. При $I_p = I_{pth}$ затухание сигнала отсутствует, но и усиления нет. Для ОВ DCF на длине волны 1550 нм $I_{pth} = 0.37$ мВт/мкм², а для пороговой мощности при эффективной площади сердцевинки $S_{efp} = 21$ мкм² получим $P_{pth} = I_{pth} \cdot S_{efp} = 7.81$ мВт.

В [2] пороговую мощность определяют как такую мощность накачки на входе ОВ, при которой мощность сигнала и накачки на выходе ОВ становятся равными. В [1] для пороговой мощности предлагается в соответствии с этим определением выражение

$$I_{pth} = 16 \cdot \alpha_s / g_r \quad (15)$$

В соответствии с (15) пороговая мощность составляет 125 мВт, а с учетом рассогласования состояний поляризаций сигнала и накачки пороговая мощность не превышает 200 мВт. Это примерно в 5 раз меньше чем для рамановских ОУ, использующих в качестве активной среды стандартное одномодовое ОВ.

Спектр ВКР усиления достаточно широкий. В нашем случае он составляет не менее $\Delta\nu_a = 4$ ТГц ($\Delta\lambda_a = 32$ нм). Это позволяет одновременно усиливать более 40 каналов DWDM шириной 0.8 нм (100 ГГц) при одной длине волны накачки.

Для удобства дальнейших расчетов была проведена аппроксимация экспериментальной зависимости относительной усилительной способности от частотного сдвига сигнала относительно накачки и получена аналитическая зависимость

$$Y_0 = \frac{K_1}{(\Delta\nu_1)^2 + (\Delta\nu - \nu_{01})^2} + \frac{K_2}{(\Delta\nu_2)^2 + (\Delta\nu - \nu_{02})^2} \quad (16)$$

Аппроксимация представляет собой сумму двух резонансных кривых с различными резонансными частотами ν_{01} и ν_{02} . На рис. 7б показана аппроксимирующая кривая и экспериментальные точки. Полученные значения

аппроксимирующих параметров: $K_1 = 14.52 \text{ ТГц}^2$, $K_2 = 1.6 \text{ ТГц}^2$, $\Delta\nu_1 = 2.2 \text{ ТГц}$, $\Delta\nu_2 = 2 \text{ ТГц}$, $\nu_{01} = 13.1 \text{ ТГц}$, $\nu_{02} = 6 \text{ ТГц}$.

Проведена также оценка эквивалентной ширины спектра ВКР усиления по аппроксимирующей зависимости, которая составила $\Delta\nu_a = 6.98 \text{ ТГц}$.

7. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВКР УСИЛЕНИЯ.

Для моделирования процессов ВКР усиления многоканальных сигналов DWDM будем использовать ранее полученные выражения (12) и (13). Будем полагать, что на входе рамановского усилителя с попутной накачкой действуют N оптических сигналов с частотами, соответствующими сетке частот МСЭ, для каждого из которых составлено дифференциальное уравнение (всего N уравнений)

$$\frac{dP_{si}}{dZ} = \left(\frac{g_{ri} \cdot P_p}{K_p} - \alpha_{si} \cdot S_{efp} \right) \cdot \frac{P_{si}}{S_{efsi}}. \quad (17)$$

В уравнения входят: мощность i -го сигнала P_{si} , мощность накачки P_p , параметры ОБ DCF для i -ой частоты: коэффициент затухания α_{si} , эффективная площадь взаимодействия сигнала и накачки S_{efsi} , усилительная способность g_{ri} . Само уравнение описывает изменение мощности i -го сигнала вдоль оси Z ОБ. Индекс i изменяется от 1 до N .

Истощение накачки происходит из-за того, что она отдает свою энергию всем N усиливаемым сигналам, а также потому, что в активном ОБ происходят обычные собственные потери на рэлеевское рассеяние и поглощение, а также дополнительные потери. Собственные и дополнительные потери характеризуются коэффициентом затухания α_p на длине волны накачки λ_p . Кроме того истощение накачки происходит из-за того, что она отдает свою энергию шумоподобному УСИ, имеющему мощность P_n в широкой полосе частот ВКР $\Delta\nu_a$. Для расчетов истощения накачки за счет УСИ можно принять: среднюю частоту УСИ равной $\nu_c = \nu_p - \nu_m$, где $\nu_m = 13.1 \text{ ТГц}$, коэффициент, учитывающий взаимную поляризацию сигнала и накачки, равным $K_p = 2$, усилительную способность равной максимальной $g_{rmax} = 1.98 \cdot 10^{-13} \text{ м/Вт}$, а эффективную площадь сердцевинки равной ее значению S_{efc} на средней частоте УСИ ν_c . Истощение накачки описывает $N+1$ уравнение:

$$\frac{dP_p}{dZ} = - \left(\sum_{i=1}^N \frac{g_{ri} \cdot \nu_p \cdot P_{si}}{\nu_{si} \cdot S_{efsi} \cdot K_p} + \frac{\nu_p \cdot g_{rmax} \cdot P_n}{2 \cdot \nu_c \cdot S_{ecc}} + \alpha_p \right) \cdot P_p. \quad (18)$$

Рассчитать зависимость полной мощности УСИ P_n в широкой полосе частот $\Delta\nu_a$, распространяющейся в прямом направлении вместе с сигналом, от расстояния Z , можно по выражению [2]:

$$P_n(Z) = [2 \cdot h \cdot \nu_{sc} \cdot \Delta\nu_a \cdot F_n] \cdot [G_c(Z) - 1] + P_n(0) \cdot G_c(Z), \quad (19)$$

где $h = 6.63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ – постоянная Планка, F_n – шум-фактор, $G_c(Z)$ – коэффициент усиления ОУ на частоте ν_c , $P_n(0)$ – мощность шума в полосе $\Delta\nu_a$ на входе ОУ.

Можно полагать, что частота ν_c совпадает с частотой ν_{sc} одного из каналов DWDM, обычно центрального. Одно из дифференциальных уравнений (17) описывает изменения мощности $P_{sc}(Z)$ в этом канале в зависимости от расстояния Z . Тогда для усиления в этом канале можно записать

$$G_c(Z) = \frac{P_{sc}(Z)}{P_{sc}(0)}, \quad (20)$$

$P_{sc}(Z)$ и $P_{sc}(0)$ – мощности сигнала в канале c на расстоянии Z и на входе ОБ, соответственно.

Выражение (19) можно продифференцировать с учетом (20) и получить дифференциальное уравнение для УСИ

$$\frac{dP_n}{dZ} = \frac{2 \cdot h \cdot \nu_{sc} \cdot \Delta\nu_a \cdot F_n + P_n(0)}{P_{sc}(0)} \cdot \frac{dP_{sc}}{dZ}. \quad (21)$$

Систему дифференциальных уравнений для рамановского ОУ образуют уравнения (17, 18 и 21). Они могут быть решены методом Рунге-Кутты четвертого порядка, например, с использованием специальной процедуры rkfixed() в программе MathCad.

8. ПРИМЕР РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ УСИЛИТЕЛЬНОЙ СЕКЦИИ.

В соответствии с исходными данными определим уровни мощности, частоты и длины волн в отдельных каналах на выходе ОП по следующим выражениям

$$P_{bx} = P_{\max} - 10 \cdot \lg N. \quad (22)$$

В примере расчета $P_{bx} = P_{\max} - 10 \cdot \lg N = 20 - 10 \cdot \lg(5) = 13 \text{ дБм}$.

Определим частоты (длины волн) всех N каналов многочастотного сигнала, полагая, что они нумеруются от $i = 1$ до N , а номер центрального канала c

$$\nu_i = \nu_c - (c - i) \cdot \Delta\nu \quad \lambda_i = c / \nu_i. \quad (23)$$

Выбираем частоту и длину волны центрального канала $\nu_c = 193500 \text{ ГГц}$ ($\lambda_c = 1549.32 \text{ нм}$).

Результаты расчетов приведены в таблице 1. Там же приведены результаты расчетов параметров ОБ по выражениям: (4), (5), (6), (7), (8) и (9) на каждой длине волны многоканального сигнала.

ТАБЛИЦА 1.

Тип ОБ	Параметры каналов	Номер канала				
		1	2	3 (с)	4	5
	ν , ГГц	193700	193600	193500	193400	193300
	λ , нм	1547.72	1548.52	1549.32	1550.12	1550.92
<i>Параметры ОБ</i>						
SF	α_i , дБ/км	0.2099	0.2100	0.2100	0.2100	0.2101
	D_{xi} , пс/(нм км)	16.4119	16.4559	16.5	16.5441	16.5881
	S_{sefi} , мкм ²	76.3878	76.4439	76.5	76.5561	76.6122
DCF	α_{ci} , дБ/км	0.3122	0.3119	0.3115	0.3111	0.3108
	D_{cxi} , пс/(нм км)	-82.3842	-82.1922	-82.0000	-81.8076	-81.6150
	S_{cefi} , мкм ²	26.73	26.78	26.83	26.88	26.93

Определим длину волны λ_p и частоту ν_p накачки из условия обеспечения максимального усиления рамановского усилителя в центральном канале, которое достигается при сдвиге частоты сигнала ν_0 относительно частоты накачки ν_p на 13.1 ТГц. Тогда параметры излучения накачки: $\lambda_p = 1452$ нм, $\nu_p = 2.066 \cdot 10^5$ ГГц.

Определим длину компенсирующего ОБ, исходя из полной компенсации хроматической дисперсии на длине волны центрального канала $\lambda_0 = 1549.52$ нм, по выражению (1), которая составила $l_{c0} = 20.12$ км.

Определим уровни оптических сигналов каждого канала на входе ОУ по выражению

$$P_{bxyi} = P_{bx} - \alpha_i \cdot l - a_{WDM}, \quad (24)$$

где a_{WDM} – потери в мультиплексоре для сигнала.

Определим усилительную способность ОБ DCF для каждого канала по выражению

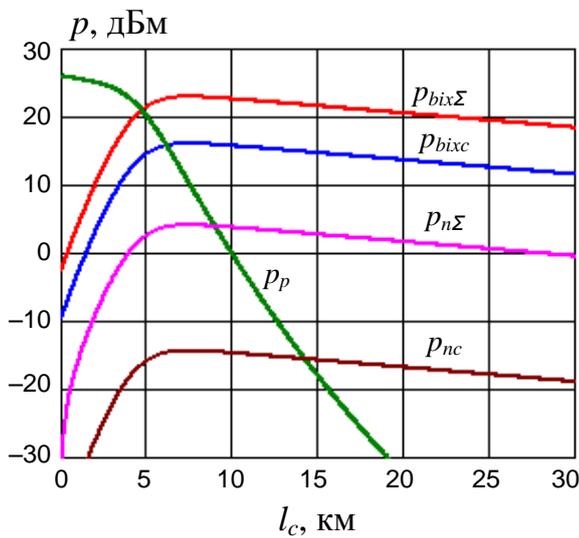
$$g_{ri} = \frac{g_{r \max} \cdot Y_{0i}}{K_p}. \quad (25)$$

Результаты расчетов по выражениям (24) и (25) помещены в таблицу 2.

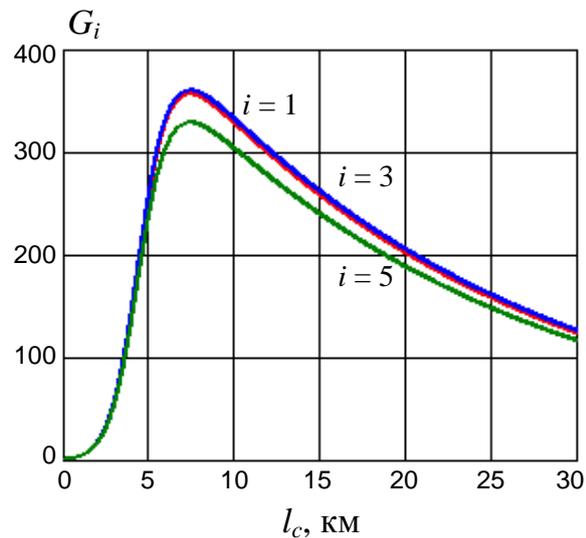
ТАБЛИЦА 2

Параметры каналов	Номера каналов, i				
	1	2	3 (с)	4	5
ν , ГГц	193700	193600	193500	193400	193300
λ , нм	1547.72	1548.52	1549.32	1550.12	1550.92
P_{bxyi} , дБм	-9.461	-9.465	-9.471	-9.477	-9.483
g_{ri} , м/Вт	$1.984 \cdot 10^{-13}$	$1.995 \cdot 10^{-13}$	$1.999 \cdot 10^{-13}$	$1.995 \cdot 10^{-13}$	$1.982 \cdot 10^{-13}$

Результаты решения системы дифференциальных уравнений (17), (18) и (21) представлены на рис. 9а в виде зависимостей уровней мощности сигнала в центральном канале, суммарного сигнала, накачки и УСИ в широкой и узкой полосе частот от длины компенсирующего ОБ. Те же уровни мощностей для рамановского ОУ с длиной ОБ DCF l_{c0} , полностью компенсирующего хроматическую дисперсию стандартного ОБ, приведены в таблице 3. Расчеты проводились для значений: мощности накачки $P_p = 0.4$ Вт, коэффициента поляризации $K_p = 1.5$ и шум-фактора $F = 4$ (6 дБ).



А



Б

РИС. 9. ЗАВИСИМОСТИ УРОВНЕЙ МОЩНОСТИ ДЛЯ СИГНАЛА ЦЕНТРАЛЬНОГО КАНАЛА p_{bixc} , СУММАРНОГО СИГНАЛА $p_{bix\Sigma}$, НАКАЧКИ p_p И УСИ В ШИРОКОЙ $p_{n\Sigma}$ И УЗКОЙ p_{nc} ПОЛОСЕ ЧАСТОТ (А) И КОЭФФИЦИЕНТОВ УСИЛЕНИЯ В РАЗНЫХ КАНАЛАХ (Б) ОТ РАССТОЯНИЯ ВДОЛЬ КОМПЕНСИРУЮЩЕГО ОВ.

Были также рассчитаны для каждого канала:

усиление рамановского ОУ в дБ, как разность уровней на его выходе и входе

$$G_i = P_{bixoyi} - P_{bxoyi}, \quad (26)$$

остаточное затухание

$$\Delta a_i = a_i \cdot l + a_{WDM} - G_i, \quad (27)$$

остаточное расширение импульсов при ширине спектра излучения источника $\Delta\lambda = 0.2$ нм

$$\Delta t_i = |D_{xi} \cdot l + D_{cxi} \cdot l_{c0}| \cdot \Delta\lambda. \quad (28)$$

Результаты расчетов по (26-28) приведены в таблице 3.

ТАБЛИЦА 3

Параметры	Номер канала				
	1	2	3 (с)	4	5
ν , ТГц	193700	193600	193500	193400	193300
λ , нм	1547.72	1548.52	1549.32	1550.12	1550.92
p_{bixoyi} , дБм	13.61	13.69	13.66	13.53	13.28
$p_{bixov\Sigma}$, дБм	20.55				
p_p , дБм	-32.5				
p_{nc} , дБм при $\Delta\nu_c = 100$ ГГц	-16.77				
$p_{n\Sigma}$, дБм при $\Delta\nu_a = 6.98$ ТГц	1.67				
G , дБ	23.07	23.16	23.14	23.00	22.76
Δa , дБ	-0.60	-0.68	-0.65	-0.52	-0.27
Δt , пс	3.31	1.65	0	1.66	3.31

Таким образом, цель достигнута. Результаты расчетов изменений сигналов, накачки и шумов вдоль усилительной секции показаны на рис. 10а. Рассчитанная усилительная секция компенсирует затухание с небольшим превышением усиления над затуханием. Неравномерность усиления в отдельных каналах не превышает 0.5 дБ. Остаточное расширение импульсов в отдельных каналах не превышает 3.5 пс на расстоянии 100 км. Отношение оптического сигнала к УСИ в узкой полосе составляет 30.4 дБ.

Для оценки максимального расстояния, на которое можно передавать сигналы с высоким качеством связи был проведен расчет второй усилительной секции с аналогичными параметрами, за исключением мощности накачки, которая увеличена до с 0.4 до 0.42 Вт для обеспечения превышения усиления над затуханием во всех каналах. Результаты расчетов 2 секции показаны на рис. 10б. В расчете 2 секции предполагалось, что на ее вход поступают усиленные первой секцией сигналы и УСИ после первой секции. Расчет показал, что после 2 секции

неравномерность усиления в отдельных каналах возросла до 0.8 дБ, а расширение импульсов не превосходит 7 пс. Мощность УСИ возросла на 2.8 дБ.

Полагая, что ВОЛС состоит из одинаковых стокилометровых секций, а скорость передачи в каждом канале составляет 10 Гбит/с (тактовый интервал 100 пс), можно определить допустимую общую длину ВОЛС. Если принять минимальную величину отношения сигнала к шуму в канале 10 дБ и уменьшение отношения сигнала к шуму в каждой секции такое же, как после второй секции, то ограничение по затуханию наступает при общей длине ВОЛС 800 км. По остаточной хроматической дисперсии при допустимом расширении импульса на 35 пс, ограничение по дисперсии наступает при общей длине ВОЛС 1000 км.

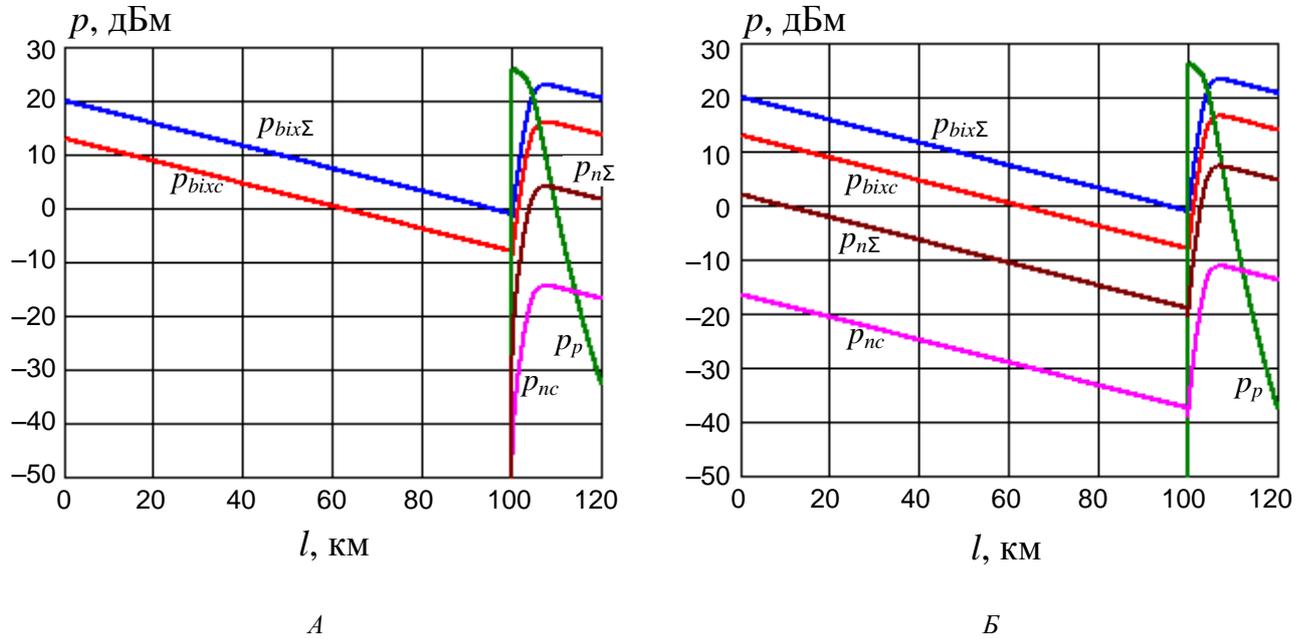


РИС. 10. ЗАВИСИМОСТИ УРОВНЕЙ МОЩНОСТИ ДЛЯ СИГНАЛА ЦЕНТРАЛЬНОГО КАНАЛА, СУММАРНОГО СИГНАЛА, НАКАЧКИ И УСИ В ШИРОКОЙ И УЗКОЙ ПОЛОСЕ ЧАСТОТ ДЛЯ ПЕРВОЙ (А) И ВТОРОЙ (Б) УСИЛИТЕЛЬНОЙ СЕКЦИИ ОТ РАССТОЯНИЯ ПО ОВ.

Рассмотрим еще некоторые закономерности использования рамановского ОУ в качестве компенсатора затухания и дисперсии.

На рис. 11 показаны зависимости уровней мощности для сигнала центрального канала, суммарного сигнала, накачки и УСИ в широкой и узкой полосе частот от расстояния вдоль компенсирующего ОВ для малых входных сигналов -27 дБм (а) и -37 дБм (б).

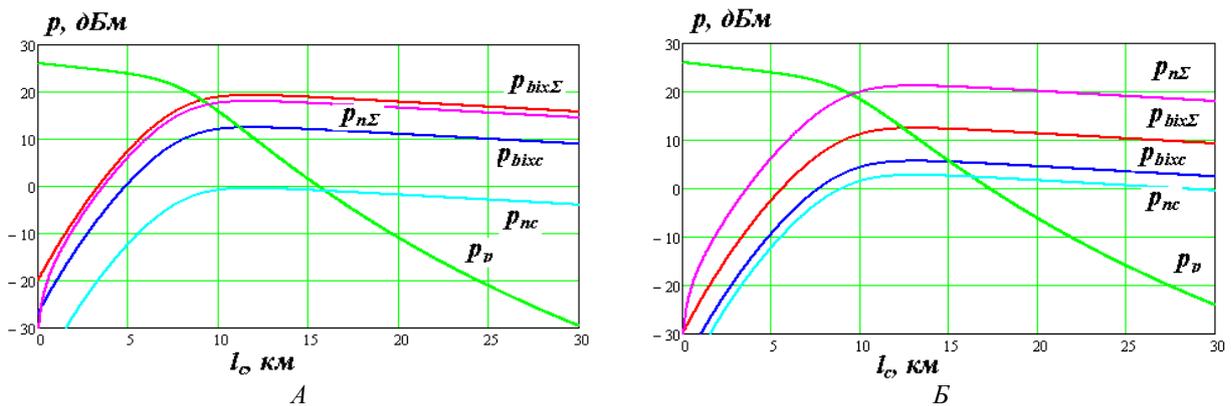


РИС. 11. ЗАВИСИМОСТИ УРОВНЕЙ МОЩНОСТИ ДЛЯ СИГНАЛА ЦЕНТРАЛЬНОГО КАНАЛА, СУММАРНОГО СИГНАЛА, НАКАЧКИ И УСИ В ШИРОКОЙ И УЗКОЙ ПОЛОСЕ ЧАСТОТ ОТ РАССТОЯНИЯ ПО ОВ DCF ДЛЯ ВХОДНЫХ СИГНАЛОВ В КАЖДОМ КАНАЛЕ -27 ДБМ (А) И -37 ДБМ (Б).

Из рис. 11 и 9а видно, что при уменьшении входных сигналов накачка истощается медленнее, расстояние на котором усиление достигает максимума увеличивается. Растет также уровень УСИ. В таблице 4 приведены сведения о результатах расчетов входных и выходных уровней сигнала, накачки, а также уровне УСИ на выходе ОУ.

$P_{sin\Sigma}$, дБм ($P_{sin\Sigma}$, мВт)	P_{pin} , дБм (P_{pin} , мВт)	$P_{sout\Sigma}$, дБм ($P_{sout\Sigma}$, мВт)	P_{pout} , дБм (P_{pout} , мВт)	$P_{nout\Sigma}$, дБм ($P_{nout\Sigma}$, мВт)	$P_{out\Sigma}$, дБм ($P_{out\Sigma}$, мВт)
-2.48 (0.56)	26.0 (400)	20.5 (112)	-32.5 (5.6 10^{-4})	1.67(1.47)	20.6 (114.8)
-27.0 (2 10^{-3})	26.0 (400)	17.9 (61.2)	-10.9 (0.082)	16.6 (45.7)	20.3 (107.1)
-37.0 (2 10^{-4})	26.0 (400)	11.4 (13.7)	-6.1 (0.24)	20.1 (102.5)	20.7 (116)

Видно, что для рассматриваемого ОУ мощность накачки практически полностью истощается, отдавая свою энергию:

- сигналу, если он имеет сравнительно большую величину,
- сигналу и УСИ, если сигнал имеет малую величину.

При этом суммарная мощность сигнала и УСИ практически не зависит от уровня входного сигнала.

На рис. 12 показаны зависимости уровней мощности для сигнала центрального канала, суммарного сигнала, накачки и УСИ в широкой и узкой полосе частот от расстояния вдоль компенсирующего ОВ при различных уровнях накачки 400 и 200 мВт.

Видно, что с уменьшением мощности накачки она истощается медленнее, выходные сигналы, усиление и УСИ уменьшаются, максимум усиления смещается в сторону больших расстояний.

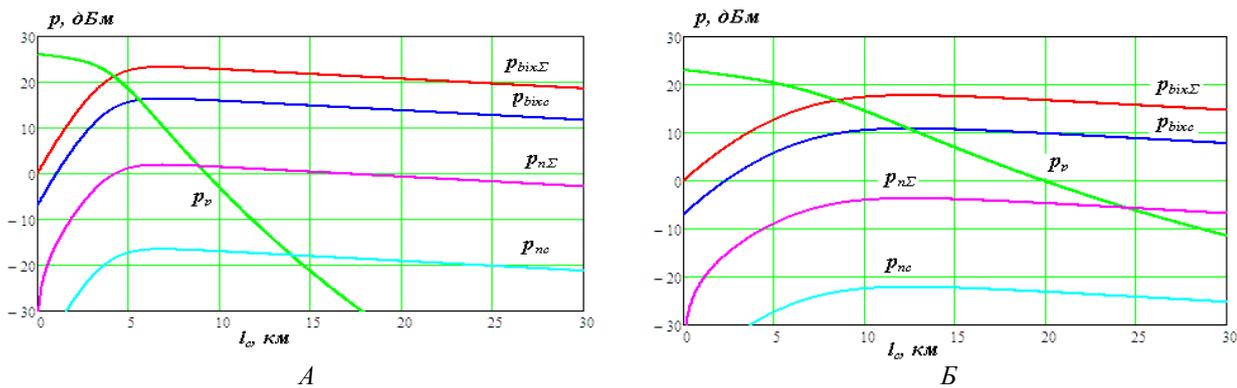


РИС. 12. ЗАВИСИМОСТИ УРОВНЕЙ МОЩНОСТИ ДЛЯ СИГНАЛА ЦЕНТРАЛЬНОГО КАНАЛА, СУММАРНОГО СИГНАЛА, НАКАЧКИ И УСИ В ШИРОКОЙ И УЗКОЙ ПОЛОСЕ ЧАСТОТ ОТ РАССТОЯНИЯ ПО ОВ DCF ПРИ ВХОДНЫХ СИГНАЛАХ В КАЖДОМ КАНАЛЕ -7 дБм И МОЩНОСТЯХ НАКАЧКИ 400 мВт (А) И 200 мВт (Б).

Заключение

В данном докладе предложено проектное решение для увеличения скорости передачи и увеличения расстояния между регенераторами и оконечными пунктами реконструируемой ВОЛП.

Выполнена аппроксимация зависимостей основных параметров стандартного ОВ и ОВ для компенсации дисперсии, включая спектры ВКР.

Проведено моделирование узла для одновременной компенсации хроматической дисперсии и затухания в усилительной секции ВОЛП с учетом влияния УСИ не только на отношение сигнала к шуму, но и на истощение накачки. Исследованы особенности работы этого узла в широком диапазоне изменения входных сигналов и накачки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Былина М.С., Глаголев С.Ф., Кузнецова Н.С., Рык О.Н. Компенсация дисперсии в оптических линейных трактах с использованием DWDM. – Фотон-Экспресс – № 7 (79) – М., 2009.
2. Bylina M., Glagolev S. Optical amplifiers for telecommunications. Technical conference «Optical Technologies for Telecommunications» (Ufa, Russia, November, 2007). Proc. of SPIE Vol. 7026 702609-1.
3. Headley C., Agrawal G.A. Raman Amplification in Fiber Optical Communication Systems. – Elsevier Academic Press, 2005.
4. OptiSystem. Component. Library. Optical Communication System Design Software. Version 12.