

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО СВЯЗИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«ПОВОЛЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ И ИНФОРМАТИКИ»

Кафедра линий связи и измерений в технике связи

М.В. ДАШКОВ, К.А. ВОЛКОВ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК
ОПТИЧЕСКИХ УСИЛИТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ
ВОЛОКОН, ЛЕГИРОВАННЫХ ЭРБИЕМ**

Методические указания
по выполнению лабораторной работы

Самара
2016

УДК 621.39.082.5

ББК 621.391.63

Д

Рекомендовано к изданию методическим советом ПГУТИ, протокол
№ 42 от 07.06.2016 г.

Рецензент:

доцент, кафедра систем связи ФГБОУ ВО ПГУТИ,
к.т.н., Трошин А.В.

Дашков, М.В., Волков, К.А.

Д Исследование характеристик оптических усилителей на основе волокон, легированных эрбием методические указания по выполнению лабораторной работы/ М.В. Дашков, К.А. Волков. – Самара: ПГУТИ, 2016. –18 с.

В учебно-методической разработке приводится систематизированный материал, посвященный оптическим усилителям на основе волокна легированного эрбием. В результате выполнения лабораторной работы студенты получают навыки моделирования оптических усилителей и исследуют зависимость основных параметров усилителей от схемы накачки и характеристик эрбиевого волокна.

Методические указания предназначены для студентов 4 курса, обучающихся по направлению подготовки 11.03.02 Инфокоммуникационные технологии и системы связи, 12.03.03 Фотоника и оптоинформатика, и предназначены для проведения лабораторных занятий.

©, Дашков М.В., 2016

©, Волков К.А., 2016

Цель работы: Изучение принципов построения оптических усилителей. Исследование характеристик усиления в оптических волокнах, легированных эрбием, с учетом спектральной зависимости их параметров. Исследование влияния параметров накачки и длины эрбиевого волокна на характеристики оптического усилителя.

Литература.

1. Иванов А.Б. Волоконная оптика. Компоненты, системы передачи, измерения. – М.: Изд-во Sygus Systems, 1999.
2. Волоконно-оптическая техника: история, достижения, перспективы: Сб. статей под ред. С.А.Дмитриева, Н.Н.Слепова. – М.: Connect, 2000.
3. Убайдуллаев Р.Р. Волоконно-оптические сети, Москва, Экотрендз, 1998
4. Курков А.С., Наний О.Е. Эрбиевые волоконно-оптические усилители // Lightwave Russian Edition, №1, 2003, 14-19
5. Убайдуллаев Р.Р. Протяженные ВОЛС на основе EDFA // Lightwave Russian Edition, №1, 2003, 22-29

Контрольные вопросы

1. Спектральная зависимость коэффициента затухания оптических волокон. Составляющие потерь в оптическом волокне. Нормы на коэффициент затухания
2. Классификация оптических усилителей, используемых на ВОЛП, по области применения. Сравнительная характеристика.
3. Классификация оптических усилителей, используемых на ВОЛП, по способу реализации. Сравнительная характеристика.
4. Основные параметры оптических усилителей.
5. Принцип работы оптического усилителя на основе волокна, легированного эрбием
6. Типовые характеристики оптических эрбиевых усилителей.
7. Типовые схемы реализации эрбиевых усилителей.
8. Влияние параметров накачки и эрбиевого волокна на характеристики эрбиевого усилителя.
9. Принцип работы оптического усилителя на основе вынужденного комбинационного рассеяния – рамановские усилители
10. Типовые характеристики рамановских усилителей.
11. Типовые схемы реализации рамановских усилителей.
12. Принцип работы полупроводниковых оптических усилителей.
13. Типовые характеристики рамановских усилителей.
14. Расчет суммарного затухания элементарного кабельного участка.
15. Расчет оптического отношения сигнал-шум на ВОЛП с оптическими усилителями.

Порядок выполнения работы.

1. Загрузите программное обеспечение для моделирования оптических усилителей GainMaster
2. Согласно номеру бригады (см. табл. 1) выберите файл с конфигурацией усилителя

Таблица 1

№	Конфигурация	Имя файла
1	Сонаправленная накачка, Длина волны накачки 980 нм Эрбиевое волокно $\alpha(@ 980 \text{ нм}) = 4 \text{ дБ/м}$	EDFA980_Forward_I4.amp
2	Встречная накачка, Длина волны накачки 980 нм Эрбиевое волокно $\alpha(@ 980 \text{ нм}) = 4 \text{ дБ/м}$	EDFA980_Backward_I4.amp
3	Сонаправленная накачка, Длина волны накачки 1480 нм Эрбиевое волокно $\alpha(@ 980 \text{ нм}) = 4 \text{ дБ/м}$	EDFA1480_Forward_I4.amp
4	Встречная накачка, Длина волны накачки 1480 нм Эрбиевое волокно $\alpha(@ 980 \text{ нм}) = 4 \text{ дБ/м}$	EDFA1480_Backward_I4.amp
5	Сонаправленная накачка, Длина волны накачки 980 нм Эрбиевое волокно $\alpha(@ 980 \text{ нм}) = 6 \text{ дБ/м}$	EDFA980_Forward_I6.amp
6	Встречная накачка, Длина волны накачки 980 нм Эрбиевое волокно $\alpha(@ 980 \text{ нм}) = 6 \text{ дБ/м}$	EDFA980_Backward_I6.amp
7	Сонаправленная накачка, Длина волны накачки 1480 нм Эрбиевое волокно $\alpha(@ 980 \text{ нм}) = 6 \text{ дБ/м}$	EDFA1480_Forward_I6.amp
8	Встречная накачка, Длина волны накачки 1480 нм Эрбиевое волокно $\alpha(@ 980 \text{ нм}) = 6 \text{ дБ/м}$	EDFA1480_Backward_I6.amp

Зарисуйте схему исследуемого усилителя.

3. Запишите параметры эрбиевого волокна. Для этого дважды кликните на пиктограмму



В диалоговом окне нажмите на кнопку “Giles alpha Parameter (Signal)” и зарисуйте спектр поглощения в диапазоне длин волн сигнала.

Затем нажмите на кнопку “Giles alpha Parameter (Pump)” и зарисуйте спектр поглощения накачки в эрбиевом волокне.

Нажав на кнопку “Giles g* Parameter ” зарисуйте спектр коэффициента усиления эрбиевого волокна.

4. Задайте длину эрбиевого волокна равную 10 м. Для этого в диалоговом окне параметров эрбиевого волокна в строке “Fiber Length” введите нужное значение. Нажмите “Apply”.

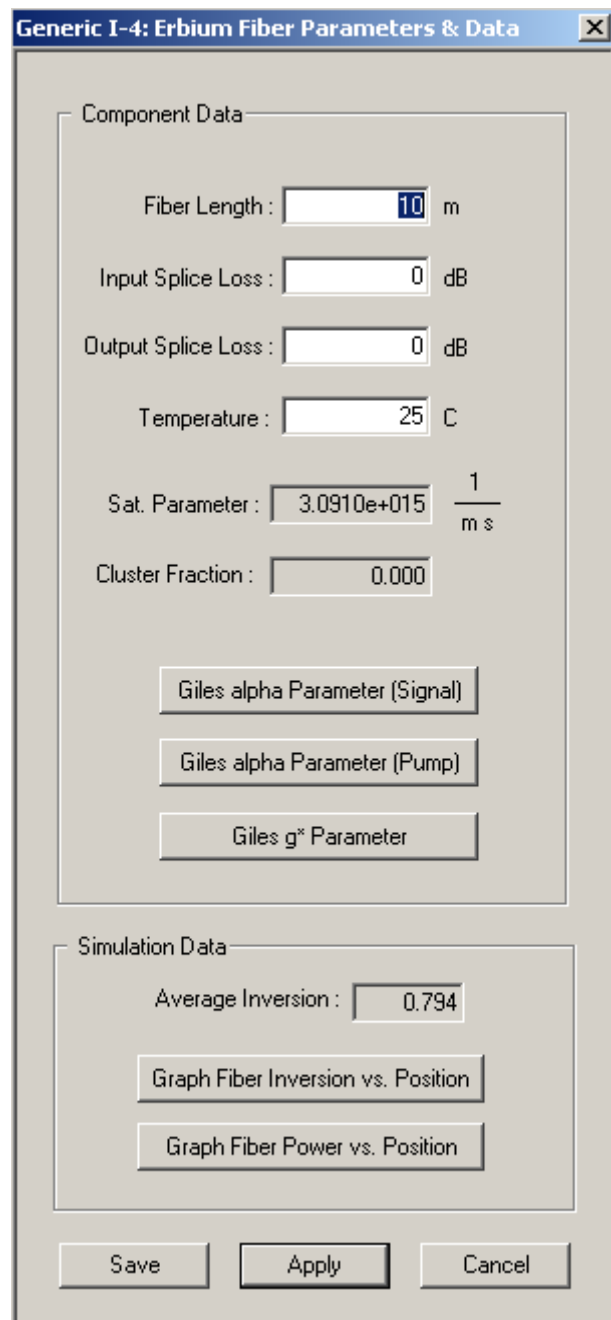
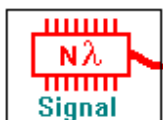


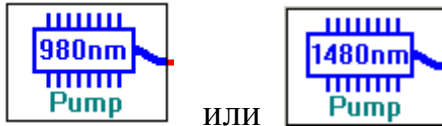
Рис. 1 – Меню установки параметров эрбиевого волокна

5. Установите параметры информационного сигнала системы уплотнения. Для этого дважды кликните на пиктограмме “Multiply Source”



В диалоговом окне задайте границы С-диапазона (1530 – 1565 нм) и количество оптических каналов равное 40. Мощность каждого оптического канала задайте на уровне минус 30 дБм. Нажмите кнопку “Apply”.

6. Установите параметры накачки. Для этого дважды кликните на пиктограмме модуля накачки “980 Pump” или “1480 Pump”



В диалоговом окне выставьте длину волны накачки в соответствии с вариантом. Мощность накачки установите на уровне 50 мВт. Нажмите кнопку “Apply”.

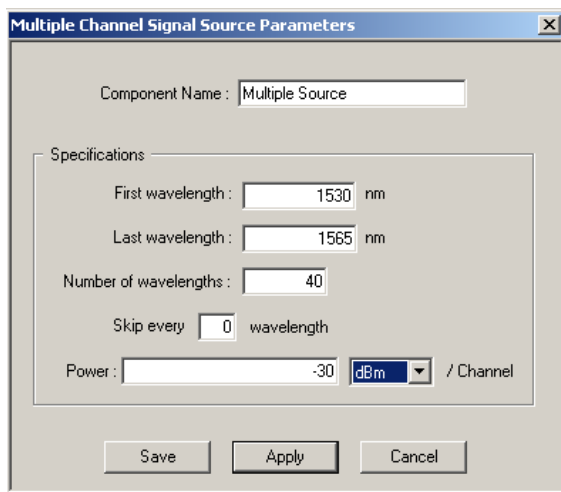


Рис. 2 – Меню настройки сигнала

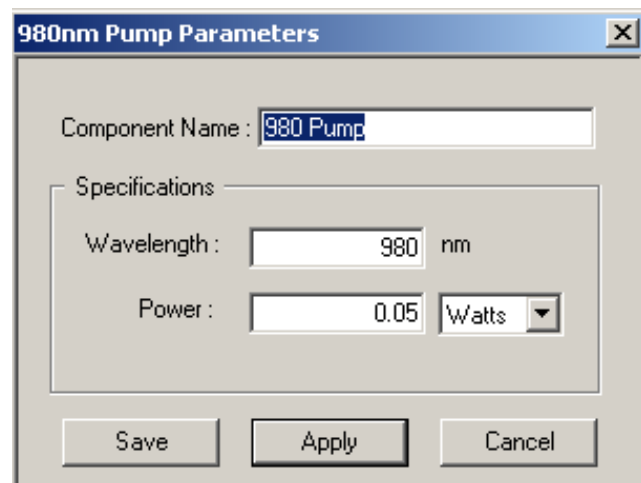

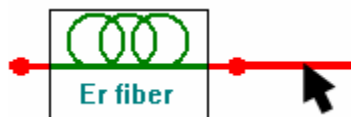


Рис. 3 – Меню настройки накачки

8. Запустите процесс моделирования, нажав на кнопку  в панели инструментов.

9. Зарисуйте спектры шума усиленного спонтанного излучения (ASE) в прямом и обратном направлении. Для этого дважды кликните на красной линии на выходе эрбиевого волокна.



В окне “Optical Power Spectra” выставьте единицу измерения дБм – dBm и выберите режим ASE. Для снятия спектра ASE в прямом направлении выберите режим “Forward”, а для встречного направления - режим “Backward”.

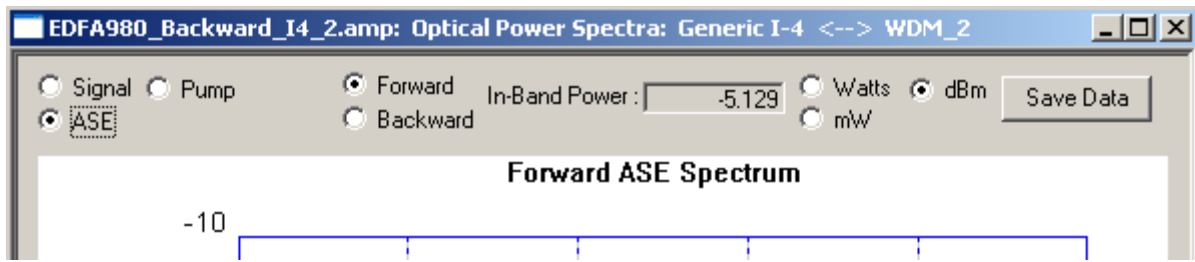


Рис. 4 – Измерение спектра шума усиленного спонтанного излучения

10. Зарисуйте спектр сигнала на выходе эрбиевого волокна. Для этого в окне “Optical Power Spectra” выберите режимы “Signal” и “Forward”.

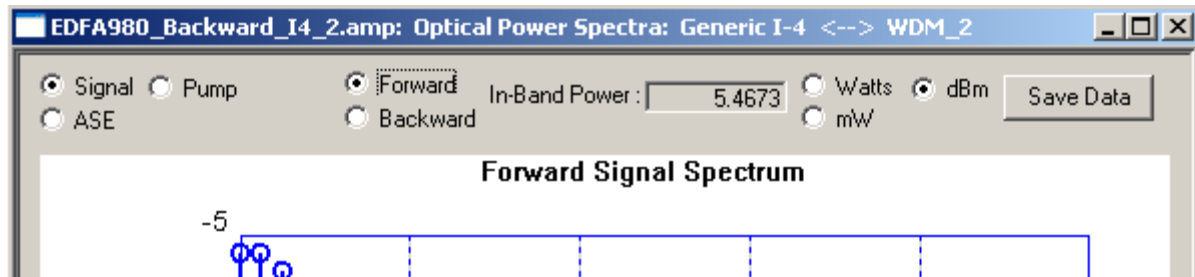


Рис. 5 – Измерение спектра усиленного сигнала

11. Дважды кликните на пиктограмме пробника, подключенного непосредственно к выходу эрбиевого волокна (для большинства вариантов это Probe).



Зарисуйте спектр усиления. Для этого нажмите кнопку “Gain”.

Примечание. Полученные значения можно сохранить в файл, который будет содержать два столбца: длину волны и мощность.

12. Оцените равномерность спектра усиления

Запишите значения в позициях

Average Gain – Среднее значения усиления

Maximum Gain – Максимальное усиление

Minimum Gain – Минимальное усиление

Gain Flatness (P-P) – Равномерность усиления

Gain Tilt – Наклон усиления

Сделайте выводы о качестве усиления.

13. Зарисуйте спектр шум-фактора. Для этого нажмите кнопку “Noise Figure”.

Сделайте выводы о характеристике спектра шум-фактора.

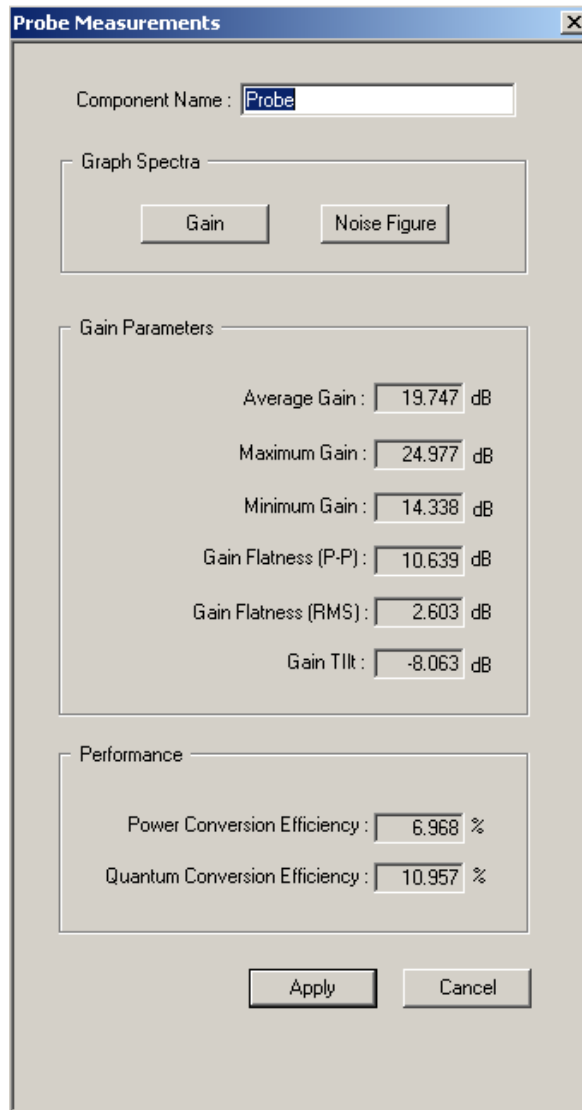


Рис. 6 – Измерение параметров усиления

14. Для получения равномерного спектра усиления в исследуемой схеме используется оптический фильтр-эквалайзер.

Для оптимизации передаточной функции фильтра-эквалайзера в панели инструментов нажмите кнопку “GFF OPT”



В диалоговом окне выставьте имя фильтра “GFF Filter Name”, для которого производите оптимизацию и имя пробника “Gain Probe Name”, который подключен к выходу этого фильтра (для большинства вариантов это Probe_2).

Равномерность характеристики фильтра выставьте равным 0.5 дБ по критерию “Peak-to-Peak”

Нажмите кнопку “Optimize”.

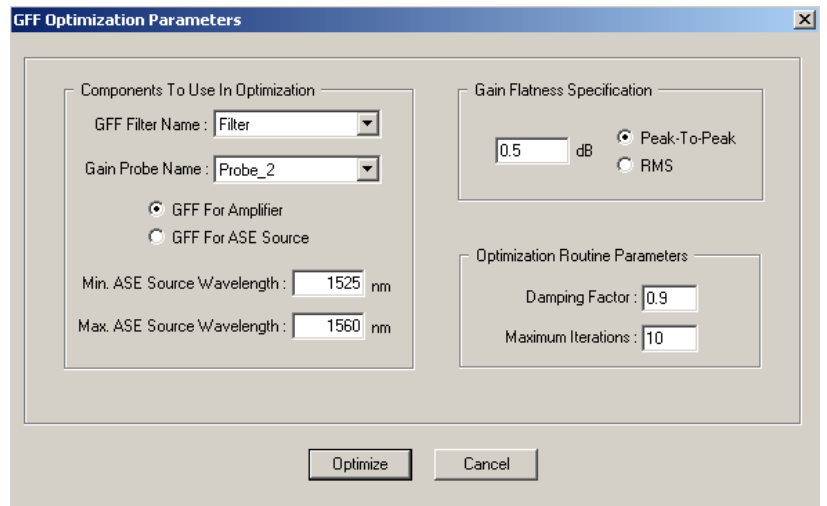


Рис. 7 – Меню настройки фильтра

15. После окончания оптимизации дважды кликните на пиктограмме пробника, подключенного к выходу фильтра-эквалайзера (для большинства вариантов это Probe_2).

Зарисуйте спектр усиления. Для этого нажмите кнопку “Gain”.

16. Оцените равномерность спектра усиления, аналогично п. 12. Сделайте выводы о качестве характеристики усиления.

17. Зарисуйте спектр шум-фактора, аналогично п. 13. Сделайте выводы о характеристике спектра шум-фактора.

18. Далее увеличивая мощность накачки на 25 мВт (см. п. 6) повторите пункты п. 11, п. 13. Всего измерения произвести при 4-х значениях мощности сигнала накачки. Результаты привести в виде двух графиков, на которых будут изображены спектры усиления и шума-фактора, соответственно. Значения для минимального коэффициента усиления и максимального шум-фактора записать в таблицу 2.

19. Далее, изменяя длину эрбиевого волокна до 20 метров, произвести измерения аналогично п. 18, только заполняя таблицу 2, без построения графиков.


Примечание. При изменении параметров накачки или длины эрбиевого волокна не забывайте заново запускать процесс моделирования, нажатием на кнопку  в панели инструментов.

Таблица 2. Зависимость характеристик оптического усилителя

Мощность накачки, мВт	Коэффициент усиления G (минимальный), дБ				Шум-фактор NF (максимальный), дБ			
	5 м	10 м	15 м	20 м	5 м	10 м	15 м	20 м
50								
75								
100								
125								

20. По данным таблицы 2 построить графики зависимости коэффициента усиления от мощности накачки и графики зависимости шум-фактора от мощности накачки для четырех значений длин эрбиевого волокна.

Сделайте выводы о зависимости G и NF от параметров накачки и длины эрбиевого волокна.

21. Произведите исследование зависимости коэффициента усиления от мощности сигнала на входе. Для этого выставьте параметры накачки и длины волокна примерно соответствующие коэффициенту усиления 25 дБ. Изменяйте уровень мощности оптического канала от -30 до -9 дБм с шагом в 3 дБм. (см. п.5). Определите суммарную мощность на входе, используя формулу:

$$P_{\Sigma} = P_{ch} + 10 \log_{10}(N_{ch})$$

Дважды кликнув на пиктограмме пробника, подключенного непосредственно к выходу эрбиевого волокна (Probe), определите минимальное (minimum), среднее (average) и максимальное (maximum) значения коэффициента усиления. Полученные значения запишите в таблицу 3.

Постройте график зависимости коэффициентов усиления от суммарной мощности на входе.

Таблица 3. Зависимость коэффициента усиления от входной мощности сигнала

Мощность опт. канала, дБм	Кол-во каналов	Суммарная мощность на входе, дБм	Коэффициент усиления, дБ		
			Мин.	Средний	Макс.
-30					
...					
-10					

Определите уровень суммарной мощности на входе и мощности оптического канала при заданном количестве несущих, при котором средний коэффициент усиления уменьшается на 3 дБ.

22. Отчет должен содержать: цели и задачи лабораторной работы, схему исследуемого усилителя и параметры эрбиевого волокна, результаты моделирования в виде таблиц и графиков, выводы о зависимости коэффициента усиления и шум-фактора от параметров эрбиевого волокна и источника накачки, выводы о зависимости коэффициента усиления от мощности входного сигнала.

Приложение 1. Оптический усилитель на основе волокна, легированного эрбием

П1.2. Принцип работы оптических усилителей на основе эрбиевого волокна

Оптические усилители на основе волокна легированного эрбием (EDFA) являются основой для построения экономически эффективных ВОЛП с ВОСП-СП и сетей на их основе. Усилители EDFA обеспечивают непосредственное усиление оптических сигналов, без их преобразования в электрические сигналы и обратно, обладают низким уровнем шумов, а их рабочий диапазон длин волн практически точно соответствует окну прозрачности кварцевого оптического волокна и основным рабочим диапазонам ВОСП-СП (С и L диапазоны). Оптические усилители работают независимо от протокола сигнала или метода модуляции оптического сигнала. Усилители EDFA открывают возможность передачи модулированного оптического сигнала на очень большие расстояния без необходимости восстановления и регенерации передаваемой информации. Применение усилителей EDFA позволяет создавать полностью оптические сети, в которых обработка сигнала электронными компонентами происходит только в начальной (где информация впервые попадает в сеть) и конечной (где информация достигает конечного получателя) точках сети.

Усилитель EDFA состоит из отрезка волокна, легированного эрбием. В таком волокне сигналы определенных длин волн могут усиливаться за счет энергии внешнего излучения накачки.

На рисунке П1 представлена стандартная оптическая структура оптического усилителя на волокне, легированного эрбием с источником двойной накачки. Излучение сигнала и лазера накачки объединяются вместе в волновом мультиплексоре WDM, и затем вводятся в волокно, легированное эрбием (EDF). Два лазера формируют двухкаскадный лазер накачки. Возбужденное излучением лазера накачки EDF выполняет функцию усиления. Оптические изоляторы служат для предотвращения проникновения в оптический усилитель постороннего излучения с линии. Оптические ответвители отводят малую часть сигнала (порядка 1%) на фотодетекторы системы контроля.

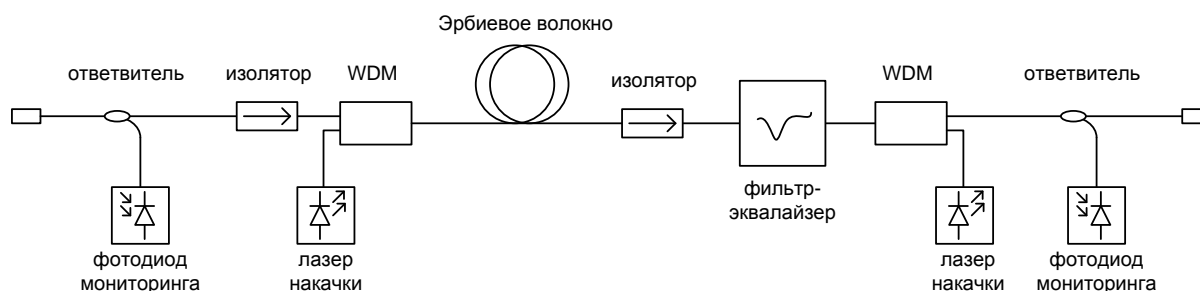


Рисунок П1. Структурная схема оптического усилителя EDFA

Волокно, легированное эрбием (EDF), легированное с Er^{3+} заданной плотности, является центральной частью оптоволоконного усилителя. На рис. 7.5. приведена диаграмма энергетических уровней Er^{3+} . Валентный ион элемента Er^{3+} имеет трехуровневую структуру (E1, E2 и E3), где E1 - основное состояние, E2 – метастабильное состояние и E3 – верхний уровень (возбужденное состояние).

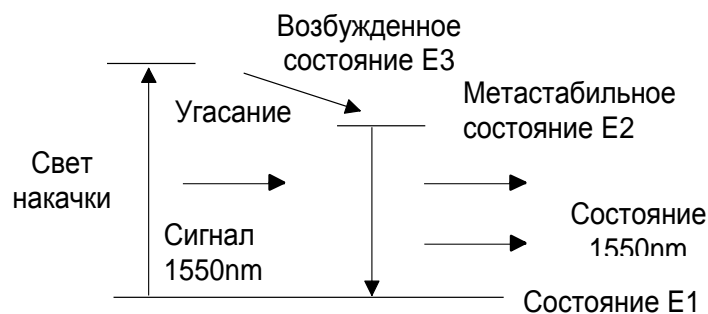


Рисунок П2. Диаграмма энергетических уровней EDFA

Когда применяется мощный лазер накачки для возбуждения EDF, большое количество ионов эрбия возбуждаются от основного состояния до верхнего уровня E3. Однако верхний уровень не является стабильным, и ионы эрбия вскоре переходят в метастабильное состояние E2 вследствие неизлучательного убывающего процесса (т. е. фотоны не излучаются). Уровень E2 является метастабильной энергетической зоной, у которой период жизни довольно большой. Таким образом, осуществляется распределение инверсии населенности. Когда оптический сигнал с длиной волны 1550 нм проходит через волокно, легированное эрбием, ионы в метастабильном состоянии переходят в основное состояние за счет вынужденного излучения и генерации фотонов, схожих с фотонами светового сигнала. Таким образом, значительно увеличивается количество фотонов в световом сигнале, то есть, выполняется функция непрерывного усиления светового сигнала, передаваемого в EDF.

П1.2 Технические параметры оптических усилителей

Ключевые параметры, характеризующие оптический усилитель на основе волокна, легированного эрбием: рабочий диапазон длин волн, коэффициент усиления, минимальный и максимальный уровень сигнала на входе, мощность насыщения, шум-фактор.

Коэффициент усиления G (gain) – одна из самых важных измеряемых характеристик оптического усилителя определяется из соотношения

$$G = \frac{P_{s.out}}{P_{s.in}}$$

где $P_{s.in}$ и $P_{s.out}$ - мощности информационных сигналов на входе и выходе усилителя. Логарифмический эквивалент определяется по формуле

$$g = 10 \lg \overline{G}, \text{ дБ.}$$

Коэффициент усиления зависит от множества параметров, которые по отдельности или вместе, могут влиять на эффективность усилителя. Коэффициент усиления зависит от длины волны сигнала, состояния поляризации на входе и мощности сигнала. Коэффициент усиления оптического усилителя в значительной степени зависит от уровня входного сигнала. Обычно усилитель хорошо усиливает слабые входные сигналы (например, типичный коэффициент усиления >30 дБ для предусилителя EDFA достигается при входном сигнале < -20 дБм). Для входных сигналов средней мощности коэффициент усиления начинает отклоняться от прежнего значения. Точка спада на кривой коэффициента усиления является важным параметром усилителя. Она определяется по уровню спада на 3 дБ коэффициента усиления относительно усиления слабых сигналов (см. рисунок ПЗ).

Мощность насыщения $P_{out.sat}$ (saturation output power) - определяет максимальную выходную мощность усилителя. Большее значение мощности позволяет увеличивать расстояние безретрансляционного участка. Этот параметр варьируется в зависимости от модели оптического усилителя. У мощных EDFA он может превосходить 36 дБм (4 Вт).

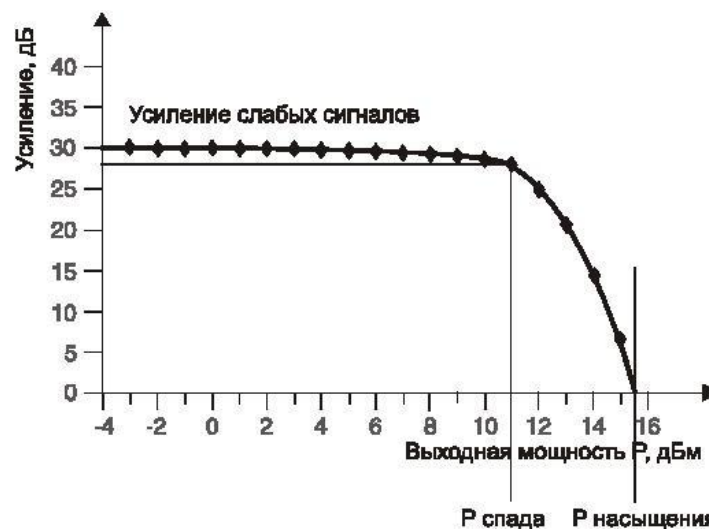


Рисунок ПЗ. Зависимость уровня усиления от мощности сигнала на входе

Шумовые характеристики усилителя определяются мощностью усиленного спонтанного излучения P_{ASE} . В отсутствие входного сигнала EDFA является источником спонтанного излучения фотонов. Спектр излучения зависит от формы энергетической зоны атомов эрбия и от статистического распределения заселенностей уровней зоны. Спонтанно образованные фотоны, распространяясь по волокну в активной зоне

усилителя EDFA, тиражируются, в результате чего создаются вторичные фотоны на той же длине волны, с той же фазой, поляризацией и направлением распространения. Результирующий спектр спонтанных фотонов называется усиленным спонтанным излучением (см. рисунок П4). Его мощность нормируется в расчете на 1 Гц и имеет размерность Вт/Гц. Если на вход усилителя подается сигнал, от лазера, то определенная доля энергетических переходов, ранее работавшая на усиленное спонтанное излучение, начинает происходить под действием сигнала от лазера, усиливая входной сигнал. Таким образом происходит не только усиление полезного входного сигнала, но и ослабление P_{ASE} . (см. рисунок П4).

При подаче на вход мультиплексного сигнала происходит дальнейший отток мощности от P_{ASE} в пользу усиливаемых мультиплексных каналов. Обычно усилители работают в режиме насыщения по отношению к сигналу на выходе. Это создает естественное выравнивание уровней сигналов в каналах, что крайне желательно особенно для протяженных линиях с большим числом последовательных усилителей. Если лазер, предшествующий усилителю, генерирует излучение в спектральном окне $\Delta\nu$ ($\Delta\nu = \frac{c}{\lambda^2} \Delta\lambda$, где c - скорость света), и соответственно в этом же окне пропускает сигнал фильтр в приемном оптоэлектронном модуле, то вклад в мощность шума на выходе благодаря усиленному спонтанному излучению будет равен

$$P_{ASE_{\Delta\nu}} = P_{ASE} \Delta\nu.$$

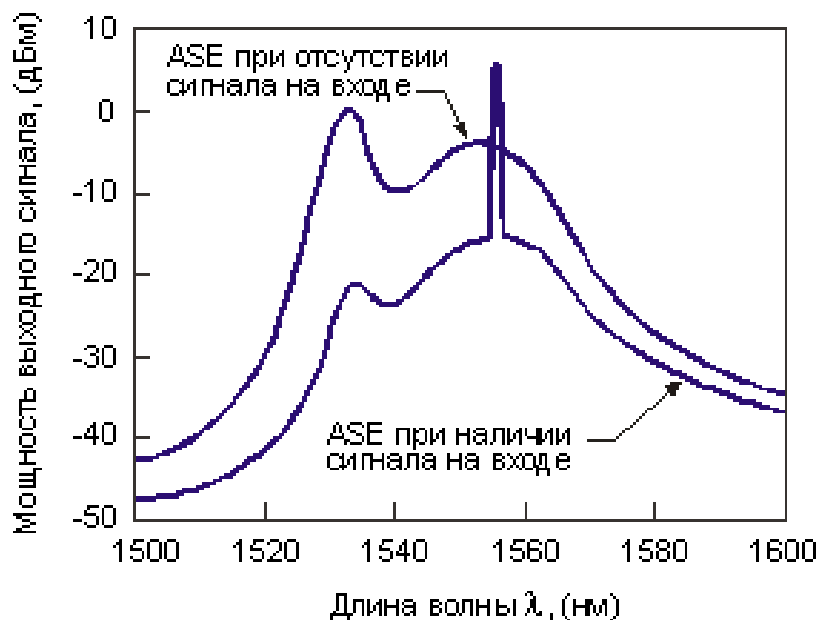


Рисунок П4 Спектр на выходе EDFA

Таким образом, оптические линии с каскадом EDFA проявляют себя лучше, когда мультиплексный сигнал представлен более узкими в

спектральном отношении отдельными каналами. Использование узкополосных фильтров непосредственно перед приемным оптоэлектронным модулем, настроенных на рабочую длину волны, также помогает уменьшить уровень шума от усиленного спонтанного излучения.

Большие собственные временные постоянные EDFA – постоянная времени перехода в метастабильное состояние ~ 1 мкс, время жизни метастабильного состояния ~ 10 мкс – устраняют кросс-модуляцию ASE в усилителе и делает более стабильной работу каскада оптических усилителей. Мощность усиленного спонтанного излучения связана к коэффициентом усиления формулой

$$P_{ASE} = h\nu \frac{n_{sp}}{\eta} (G - 1)$$

где h - постоянная планка, равная $6,6252 \cdot 10^{-34}$ Вт·с², ν - частота (Гц), соответствующая длине волны λ из диапазона 1530-1560 нм, n_{sp} - коэффициент спонтанной эмиссии, η - квантовая эффективность. В идеальном случае $n_{sp} = \eta = 1$ при $G \gg 1$ отнесенная ко входу мощность усиленного спонтанного излучения идеального квантового усилителя P_{ASE}/G просто равна $h\nu$, что при $\lambda = 1550$ нм составляет 1.28×10^{-19} Вт/Гц в расчете на спектральную полосу 1 Гц. Размеру окна анализатора в 0,8 нм соответствует спектральное окно в 100 ГГц, что определяет приведенную к входу величину эффективной мощности усиленного спонтанного излучения 1.28×10^{-8} Вт или -48,9 дБм.

Шум-фактор NF (noise figure) характеризует ухудшение отношения сигнал/шум после прохождения сигнала через оптический усилитель и определяется как отношение сигнал/шум на входе (SNR_{in}) к отношению сигнал/шум на выходе (SNR_{out}):

$$NF = \frac{SNR_{in}}{SNR_{out}} = \frac{P_{s.in}}{P_{n.in}} \bigg/ \frac{P_{s.out}}{P_{n.out}}$$

Важно отметить, что мощность шума на входе является квантово-ограниченной минимальной величиной и определяется нулевыми флуктуациями вакуума $P_{n.in} = h\nu\Delta\nu$. Мощность шума на выходе состоит из суммы мощности усиленного спонтанного излучения $P_{ASE\Delta\nu}$ и мощности шума нулевых флуктуаций вакуума, которые проходят через усилитель без изменения: $P_{n.out} = P_{ASE\Delta\nu} + h\nu\Delta\nu$. Если учесть, что $\frac{P_{s.out}}{P_{s.in}} = G$, то шум-фактор можно выразить через коэффициент усиления и

мощность усиленного спонтанного излучения:

$$NF = \frac{1}{G} \left(1 + \frac{P_{ASE}}{h\nu} \right),$$

Часто при описании EDFA значение шум-фактора указывается в дБ:

$$nf = 10 \lg(NF)$$

Минимальный шум-фактор равен 1 (0 дБ) и достигается при $n_{sp}/\eta=1$ или при $G=1$. Это означает, что усилитель вносит минимальный шум, равный шуму идеального оптического усилителя. На практике nf идеального EDFA составляет 3 дБ ($10 \lg 2$), так как существует два направления поляризации (две моды), в связи с чем $n_{sp} = 2$, а типичные значения составляют 5÷6 дБ.

При использовании каскада из нескольких усилителей полный шум-фактор возрастает. Полный шум-фактор NF двух усилителей, характеризующихся соответственно усилением G_1 и G_2 , и шум-факторами NF_1 и NF_2 . Тогда полный шум-фактор записывается в виде

$$NF_{tot} = NF_1 + \frac{NF_2 - 1}{G_1}$$

Как и в случае радиочастотных усилителей, лучший способ получения устройства с низкошумящими характеристиками состоит в использовании низкошумящего усилителя с большим усилением в качестве первого каскада и шумящего усилителя высокой мощности в качестве второго каскада. Первый каскад определяет также шумовую характеристику многокаскадного усилителя.

Для ВОСП-СР также важна такие характеристики оптического усилителя как ширина полосы усиления и равномерность коэффициента усиления во всей полосе (плоскостность спектральной характеристики). Равномерность коэффициента усиления определяется максимальным разбросом коэффициента усиления различных каналов при одной и той же входной мощности. Требование к равномерности спектра усиления обусловлено необходимостью иметь одинаковое усиление сигнала в каждом спектральном канале. Как правило, ни один из усилителей не имеет плоской спектральной характеристики, поэтому выравнивание спектра усиления осуществляется оптическими фильтрами различных типов. В основном усилители, применяемые в системах со спектральным уплотнением, имеют неравномерность коэффициента усиления в пределах не более 1-2 дБ во всей полосе усиления.

Накопление шумов за счет проявления шум-фактора в нескольких последовательно расположенных в линии связи усилителях EDFA может привести к непоправимой дегрдации оптического сигнала. Точный учет шум-фактора усилителей необходим для определения предельного числа каскадов усиления, а, следовательно, и максимальной длины линии связи.