

Эрбиевые

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ УСИЛИТЕЛИ



А.С. Курков, д.ф.м.н., с.н.с. НЦВО при ИОФ РАН, kurkov@fo.gpi.ru
О.Е. Наний, д.ф.м.н., главный редактор журнала Lightwave RE, editor@lightwave-russia.com

Введение

Хорошо известно, что через каждые 50 – 100 км волоконно-оптического тракта происходит ослабление оптического сигнала на 10 – 20 дБ, что требует его восстановления. До начала 90-х г. в действующих линиях связи единственным способом компенсации потерь в линии было применение регенераторов. Регенератор – это сложное устройство, включающее в себя как электронные, так и оптические компоненты. Регенератор преобразует световой сигнал в электрический, распознает его и производит электронное восстановление первоначальной формы сигнала, а затем вновь излучает оптический сигнал, передаваемый дальше по волокну. Пропускная способность сети или линии дальней связи с регенераторами ограничена возможностями электроники (на сегодняшний день предельная скорость обработки сигналов для электроники порядка 40 Гбит/с, а в 1986 г. она не превышала 1 Гбит/с).

Интенсивные исследования нескольких групп ученых в 1985 – 1990 годах, каскад открытий и изобретений привели, в конечном счете к появлению технически совершенных промышленных эрбиевых усилителей (Erbium-Doped Fiber Amplifier – EDFA). Усилители на волоконном световоде, легированном ионами эрбия (Er-doped fiber), обладают сочетанием уникальных свойств, обеспечившим им быстрое внедрение в системы дальней связи. Среди этих свойств следующие:

- 1) Возможность одновременного усиления сигналов с различными длинами волн.
- 2) Непосредственное усиление оптических сигналов, без их преобразования в электрические сигналы и обратно.
- 3) Практически точное соответствие рабочего диапазона эрбиевых усилителей области минимальных оптических потерь световодов на основе кварцевого стекла.
- 4) Низкий уровень шума и простота включения в волоконно-оптическую систему передачи.

Преимущества оптических усилителей над регенераторами были очевидными и до их

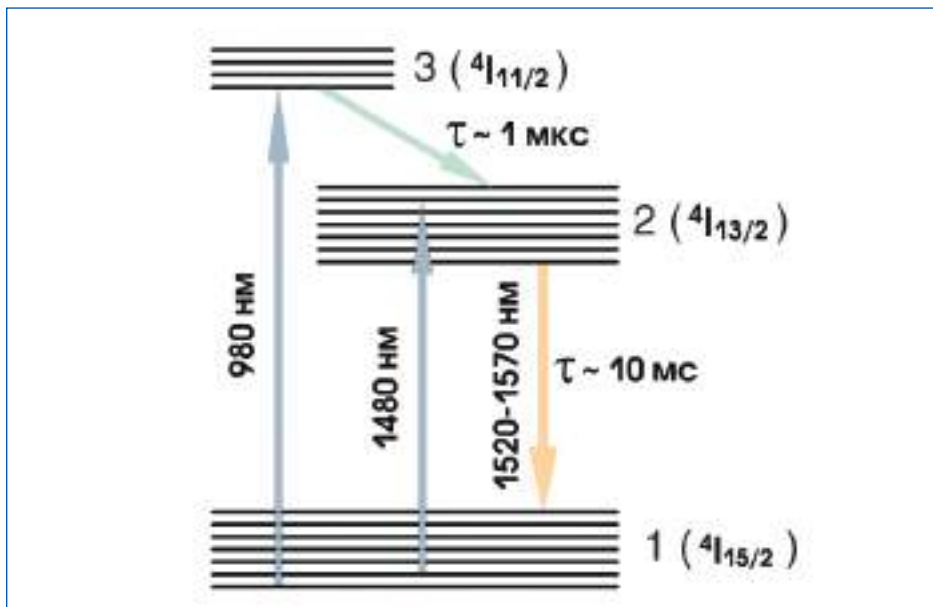


Рис.1. Упрощенная схема уровней энергии ионов эрбия (Er^{3+}) в кварцевом стекле

практической реализации. Поэтому первое же сообщение (1987 г.) об успешных экспериментах научной группы из Университета Саутгемптона (Великобритания) под руководством Д. Пэйна (D. Payne) по усилению света в волоконном световоде, легированном ионами эрбия, привлекло пристальное внимание ученых и разработчиков [1]. За короткое время были проведены экспериментальные и теоретические исследования, подтвердившие практическую возможность создания компактного, обладающего хорошими характеристиками чисто оптического усилителя [2-4]. В 1990 г. были проведены крупные конференции, посвященные исключительно эрбиевым усилителям и их компонентам; на эту тему было опубликовано множество статей и уже в 1992 г. на рынке появились готовые для применения модули таких усилителей. Существенный вклад наряду с группой из Саутгемптона внесла научная группа под руководством Эммануила Десурвира (Emmanuel Desurvire) из лаборатории Bell (США). В нашей стране работы в этом направлении велись под ру-

ководством Е.М. Дианова в отделе волоконной оптики Института общей физики АН СССР (в настоящее время Научный центр волоконной оптики при ИОФ им. А.М. Прохорова РАН). Разработка и применение эрбиевых волоконных усилителей привели к революционным изменениям в линиях дальней связи и обеспечили внедрение технологии спектрального уплотнения DWDM. Быстрый рост информационной емкости волоконно-оптических линий связи, основанных на новых технологиях, способствовал возникновению телекоммуникационного бума и росту инвестиций в эту область в конце 90-х.

Принцип работы эрбиевого усилителя

Принцип работы усилителей EDFA основан на явлении *усиления света при вынужденном излучении (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)*. Это то же самое явление, которое обеспечивает возникновение генерации в лазерах и, собственно говоря, дало им название (слово LASER это и

есть аббревиатура вышеприведенной фразы). Возможность усиления света в световодах, легированных ионами эрбия, обуславливается схемой уровней энергии данного редкоземельного элемента, представленной в упрощенном виде на рис. 1.

Усиление света в эрбиевом усилителе происходит благодаря переходу между уровнями $2 \rightarrow 1$ ($4I_{13/2} \rightarrow 4I_{15/2}$). Каждый из этих уровней расщеплен на ряд подуровней из-за взаимодействия ионов эрбия с внутрикристаллическим полем кварцевого стекла (эффект Штарка). Под действием накачки за счет поглощения фотонов накачки ионы эрбия переходят из основного состояния (уровень 1) в верхнее возбужденное состояние (уровень 3), которое является короткоживущим (время жизни $\tau_3=1$ мкс), и за счет процессов релаксации переходят в долгоживущее состояние (на метастабильный уровень 2 энергии). Термин метастабильный означает, что время пребывания иона эрбия на этом уровне энергии (его также называют временем жизни) относительно велико ($\tau_2=10$ мс, т.е. $\tau_2=10\,000\tau_3$). Поэтому число ионов, находящихся на уровне 2, при соответствующей мощности накачки может превышать число ионов на уровне 1. Уровень 1 называется основным состоянием, т.к. в отсутствие накачки практически все ионы эрбия находятся на этом энергетическом уровне. Доля частиц, находящихся на остальных уровнях, в отсутствие накачки мала.

Число ионов в единице объема, находящихся на некотором уровне энергии, называется населенностью этого уровня энергии. В нормальных условиях, т.е. в отсутствие накачки, населенность основного уровня энергии вещества максимальна, населенности всех остальных уровней энергии быстро уменьшаются с увеличением энергии уровня. Состояние среды, при котором населенность некоторого более высокого уровня энергии иона превышает населенность некоторого нижележащего уровня, является очень необычным и получило название состояния с инверсией населенностей уровней, или, более коротко, инверсией населенности.

Если в среду с инверсией населенности попадает излучение с энергией фотона, совпадающей с энергией перехода из метастабильного состояния в основное, то с большой вероятностью происходит переход иона с метастабильного уровня 2 на основной уровень 1 с одновременным рождением еще одного фотона. Увеличение числа фотонов при их взаимодействии с ионами эрбия означает, что происходит усиление света, распространяющегося в среде с инверсией населенности.

Отметим, что длина волны и спектр усиления жестко определены типом активных ионов. Тот факт, что спектр усиления воло-

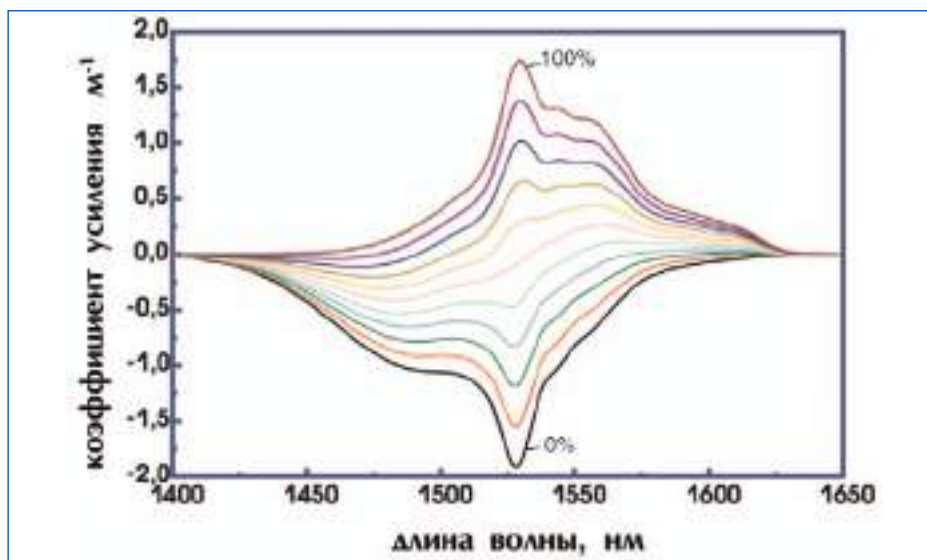


Рис.2. Спектральная зависимость усиления/поглощения эрбиевого волокна при разных значениях относительной населенности метастабильного уровня энергии. Нижняя (черная) кривая — населенность 0%, верхняя кривая — населенность 100%. Кривые проведены для населенностей, изменяющихся с шагом 10%

на, легированного ионами эрбия, совпадает с областью минимальных потерь кварцевого оптического волокна, является удачным совпадением.

Не все ионы эрбия находятся в метастабильном состоянии и обеспечивают усиление. Часть ионов находится на уровне 1 и эти ионы, взаимодействуя с фотонами, энергия которых совпадает с энергией перехода, эффективно их поглощают, переходя на уровень 2. При этом спектр усиления ионов эрбия практически совпадает со спектром поглощения. Если количество ионов, находящихся на уровне 2, меньше числа ионов, находящихся на основном уровне 1, то наблюдается поглощение. Именно поэтому необходимым условием усиления света является создание инверсии населенностей между двумя рабочими уровнями энергии 2 и 1. Для создания инверсии населенностей в эрбиевом усилителе необходимо перевести примерно половину ионов эрбия на метастабильный уровень 2. Мощность накачки оптического усилителя, при которой населенность уровней 1 и 2 равны, называется *пороговой мощностью*.

При мощности накачки ниже пороговой наблюдается не усиление, а поглощение светового сигнала. На рис.2 представлены спектры поглощения/усиления при различных значениях относительной населенности уровня 2, определяемой уровнем мощности накачки. Нижняя кривая, наблюдающаяся в отсутствие накачки (все частицы находятся в основном состоянии, населенность уровня 2 равно 0%), соответствует «отрицательному усилению», т.е. поглощению во всем рабочем спектральном диапазоне.

По мере увеличения мощности накачки все большее число активных ионов переходит в возбужденное состояние. Это приводит, как видно из рис.2, сначала к уменьшению ко-

эффициента поглощения, а затем к усилению света. Отметим также, что спектр усиления несколько сдвинут в длинноволновую область относительно спектра поглощения. Следовательно, для усиления в длинноволновой части спектра требуется меньшее значение инверсии.

Использование трехуровневой схемы накачки приводит к появлению следующих важных свойств эрбиевого усилителя:

- Наличию пороговой мощности накачки, при которой происходит «просветление» активного волоконного световода, т.е. достигаются нулевые потери. При превышении пороговой мощности накачки начинается усиление сигнала. В зависимости от структуры активного волоконного световода, концентрации легирующей примеси и длины волны накачки величина пороговой мощности составляет от долей до нескольких единиц мВт.
- Необходимости выбора оптимальной длины эрбиевого волокна, то есть длины, при которой достигается максимальное усиление при заданной концентрации ионов эрбия. При длине волокна больше оптимальной в дальних участках волокна будет наблюдаться поглощение сигнала, а при использовании эрбиевого волокна недостаточной длины излучение накачки используется не полностью. Оптимальная длина эрбиевого волокна, вообще говоря, зависит от частоты усиливаемого сигнала. Чем меньше частота сигнала, тем более длинный отрезок эрбиевого волокна соответствует максимальному усилению.

При отсутствии усиливаемого сигнала ионы эрбия переходят в основное состояние самопроизвольно, излучая фотоны с энергией, соответствующей данному переходу. То есть появляется спонтанное излучение.



Рис.3. Упрощенная схема эрбиевого волоконного усилителя

Следует подчеркнуть, что и в рабочем режиме при наличии усиливаемого сигнала часть возбужденных ионов переходит в основное состояние спонтанно, при этом спонтанное излучение также усиливается, приводя к появлению усиленного спонтанного излучения. Усиленное спонтанное излучение является основным источником шумов, а также ограничивает коэффициент усиления, особенно в случае слабого сигнала.

Оптическая схема эрбиевого волоконного усилителя

Упрощенная схема эрбиевого волоконного усилителя представлена на рис.3.

Оптическая накачка, необходимая для перевода ионов эрбия в возбужденное состояние, осуществляется на длинах волн, соответствующих одной из их полос поглощения. В табл.1 приведены значения эффективности использования накачки, определяемой максимальным значением отношения коэффициента усиления к мощности накачки, для нескольких полос поглощения. Источники накачки видимого диапазона на основе твердотельных и газовых лазеров использовались на начальном этапе исследований эрбиевых волоконных усилителей, пока не были разработаны необходимые полупроводниковые источники. Наибольшая эффективность использования накачки достигается на длинах волн 980 и 1480 мкм. Отметим, что именно этот факт дал мощный толчок развитию полупроводниковой техники высоких мощностей. Если в первых экспериментах по усилению сигнала использовались полупроводниковые лазеры с максимальной мощностью 20 – 30 мВт, то в настоящее время разработаны устройства накачки с мощностью в несколько сотен мВт, введенной в одномодовое волокно. Большая мощность накачки требуется, например, для обеспечения высокого коэффициента усиления одновременно большого числа информационных каналов в системах со спектральным уплотнением (DWDM). Для объединения входного оптического сигнала и излучения накачки используются мультиплексоры. Необходимыми элементами оптических усилителей являются оптические изоляторы – устройства, пропускающие световые сигналы только в одном направлении. Оптические изоляторы на входе и выходе усилителя применяются для того, чтобы предотвратить проникновение в усилитель паразитных отраженных от неоднородностей линии связи сигналов. Отраженные

сигналы, усиленные в эрбиевом волокне, являются источником шумов, ухудшающих работу усилителя.

Собственно усилительной средой усилителя является эрбиевое волокно – волоконный световод с примесями ионов эрбия. Изготавливаются такие световоды теми же методами, что и световоды для передачи информации, с добавлением промежуточной операции пропитки не проплавленного материала сердцевины раствором солей эрбия либо операции легирования ионами эрбия из газовой фазы непосредственно в процессе ос-

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

Таблица 1. Эффективность использования накачки [5]

аждения сердцевин. Волноводные параметры эрбиевого волоконного световода делаются сходными с параметрами световодов, используемых для передачи информации, в целях уменьшения потерь на соединения.

Принципиальным является выбор легирующих добавок, формирующих сердцевину активного световода, а также подбор концентрации ионов эрбия. Различные добавки в кварцевое стекло изменяют характер шарикового расщепления уровней энергии ионов эрбия (рис.1). В свою очередь это приводит к изменению спектров поглощения и излучения. На рис. 4. представлены спектры излучения ионов эрбия в кварцевом стекле, легированном наиболее часто применяемыми в технологии волоконных световодов добавками. Из представленных данных видно, что наиболее широкий спектр излучения (а значит, и спектр усиления), составляющий около 40 нм по полувисоте, достигается при использовании в качестве добавки алюминия. Поэтому этот элемент стал необходимой составляющей материала сердцевин эрбиевых волоконных световодов. Концентрация ионов эрбия в сердцевине оптического волокна фактически определяет его длину, используемую в усилителе при заданных уровнях сигнала и накачки. Верхний предел концентрации активных ионов определяется возникновением эффекта кооперативной апконверсии. Это явление состоит в том, что при большой концентрации активных ионов возможно образование кластеров, состоящих из двух и более ионов эрбия. Когда эти ионы оказываются в возбужденном состоянии, происходит обмен энергиями, в результате чего один из них переходит в состояние с еще более высокой энергией, а второй – безызлучательно релаксирует на основной уровень. Таким образом, часть ионов эрбия поглощает излучение усиленного сигнала, снижая эффективность усилителя.

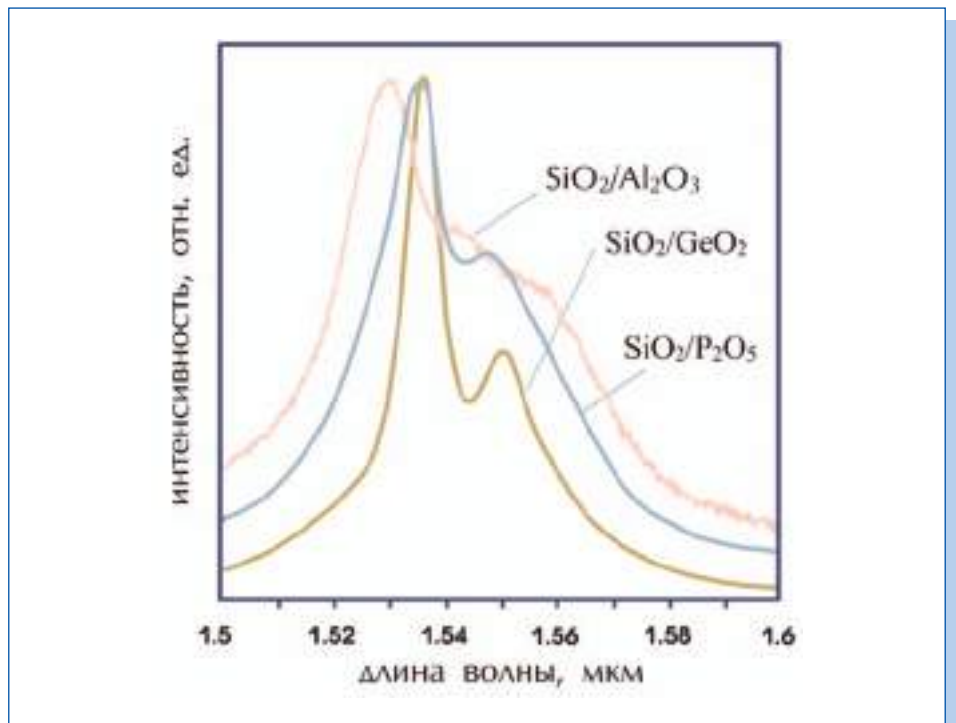


Рис.4. Спектры излучения ионов эрбия в кварцевом стекле с различными добавками



Нижний предел по концентрации ионов эрбия определяется тем, что слишком длинный активный световод неудобен при изготовлении усилителя, а также тем, что при использовании большого количества активного световода повышается стоимость усилителя. На практике концентрация ионов эрбия составляет $10^{18} - 10^{19} \text{ см}^{-3}$, что обеспечивает длину используемого активного световода от нескольких единиц до нескольких десятков метров.

Изображенная на рис.3 схема усилителя представляет собой вариант схемы с попутной накачкой, когда сигнал и излучение накачки распространяются в одном и том же направлении. Возможным является вариант со встречной накачкой, а также применение накачки в двух направлениях. Двухнаправленная накачка позволяет использовать два источника накачки, повышая суммарную мощность накачки.

Основные параметры волоконных усилителей

Для практического использования в системах волоконно-оптической связи наибольшее значение имеют следующие параметры эрбиевых усилителей:

- коэффициент усиления;
- выходная мощность сигнала;
- шум-фактор и мощность усиленного спонтанного излучения;
- спектральная ширина и равномерность полосы усиления.

Рассмотрим их более подробно.

Коэффициент усиления

Коэффициент усиления G определяется как отношение мощности P_{out} сигнала на выходе оптического усилителя к мощности P_{in} сигнала на его входе с учетом дополнительных потерь на мультиплексоре и в оптическом изоляторе

$$G = P_{out}/P_{in}$$

В технических спецификациях коэффициент усиления выражают в децибелах $g[\text{дБ}] = 10 \lg G$.

Если мощность входного и выходного сигналов также выражена в логарифмических единицах (дБм), то коэффициент усиления равен разности мощностей выходного и входного сигналов:

$$g[\text{дБ}] = P_{out}[\text{дБ}] - P_{in}[\text{дБ}].$$

При оптимизированных параметрах активного волоконного световода коэффициент усиления определяется мощностями накачки P_p и входного сигнала P_{in} . Коэффициент усиления слабого сигнала, влиянием которого на величину населенностей уровней энергии ионов эрбия можно пренебречь, называется ненасыщенным коэффициентом усиления. Ненасыщенный коэффициент усиления увеличивается при увеличении мощности накачки и длины эрбиевого волокна. В то же время неограниченному возрастанию коэффициента усиления препятствуют самонасыщение усилителя усиленным спонтанным излучением и возникновение паразитной лазерной генерации.

В лабораторных условиях достигнуто усиление 50 дБ. В серийных эрбиевых усилителях типичные значения коэффициента усиления слабого сигнала находятся в районе 30 дБ. Увеличение мощности входного сигнала уменьшает населенность метастабильного лазерного уровня 2 и, тем самым, снижает коэффициент усиления (рис.2).

Для оценки эффекта насыщения в эрбиевых усилителях часто используется значение выходной насыщающей мощности P_{Sout} или входной насыщающей мощности P_{Sin} . Выходная насыщающая мощность P_{Sout} определяется как значение мощности сигнала на выходе, при которой насыщенный коэффициент усиления G_S в два раза меньше коэффициента усиления при малом входном сигнале G (при этом $g_S[\text{дБ}] = (g-3)[\text{дБ}]$). Аналогично определяется входная насыщающая мощность P_{Sin} .

Выходная мощность сигнала и энергетическая эффективность накачки

Одно из применений оптических усилителей в системах связи – усиление мощности сигналов, вводимых в волоконно-оптическую линию связи. Выходная мощность сигнала определяет расстояние до следующего усилителя. Поэтому важными параметрами эрбиевых усилителей, работающих в качестве усилителей мощности, являются выходная мощность P_{out} и энергетическая эффективность PCE накачки. Энергетическая эффективность определяется отношением изменения мощности сигнала к мощности накачки

$$PCE = \frac{P_{out} - P_{in}}{P_p}$$

Для того чтобы обеспечить высокую энергетическую эффективность, необходимо, чтобы практически все фотоны накачки передавали свою энергию фотонам сигнала. Отношение числа фотонов сигнала N_{Fs} , появившихся в процессе усиления сигнала, к числу N_{Fp} поглощенных фотонов накачки называется квантовой эффективностью накачки $QE = N_{Fs} / N_{Fp}$. Так как энергия фотона выходного излучения меньше энергии фотона накачки, то энергетическая эффективность меньше квантовой и зависит от соотношения длин волн накачки λ_p и сигнала λ_s :

$$PCE = \frac{\lambda_p}{\lambda_s} QE.$$

Следовательно, для получения максимальной энергетической эффективности перспективнее использовать накачку на длине волны 1480 нм, а не на длине волны 980 нм. В настоящее время при накачке на длине волны 1480 нм достигнута энергетическая эффективность 86%, при квантовой эффективности 91%. Накачка на длине волны 980 нм позволяет получить энергетическую эффективность 55% при квантовой эффективности 86%.

Большая энергетическая эффективность позволяет использовать для накачки источники излучения меньшей мощности, а следовательно, более дешевые. Эта характеристика особенно важна в системах со спектральным уплотнением, где требуется усилить одновременно большее количество сигналов большой суммарной мощности.

Для достижения уровней выходной мощности в сотни мВт и выше разработаны специальные волоконные световоды с двойной оболочкой и схемы накачки таких световодов. Усилители на основе эрбиевых волоконных световодов с двойной оболочкой обеспечивают получение выходного излучения мощностью более 1,5 Вт (33 дБ).

Таким образом, для получения максимальной энергетической эффективности для накачки эрбиевого усилителя целесообразно использовать излучение на длине волны 1480 нм, в то же время накачка на длине волны 980 нм обеспечивает меньшее значение шума усиленного спонтанного излучения (будет показано ниже).

Шум-фактор

Основным источником шума в усилителе на волокне, легированном эрбием, является самопроизвольное (спонтанное) излучение при переходе иона эрбия с метастабильного уровня энергии 2 на основной уровень 1 (рис.1). Это спонтанное излучение усиливается и повторно поглощается по всей длине усилителя приблизительно так же, как слабый сигнал, распространяющийся по усилителю. Именно этим объясняется отличие между формами спектра усиленного спонтанного излучения (ASE) и спектра неусиленного спонтанного излучения (SE).

Усиленное спонтанное излучение при распространении по волоконно-оптической линии поглощается и усиливается так же, как и сам информационный сигнал. Увеличение мощности ASE приводит к увеличению шума фотоприемника, который является источником ошибок в цифровых системах связи. Полуклассическая теория дает следующее выражение для среднеквадратичного отклонения фототока от среднего значения [5]:

$$\sigma_{eN} = \sigma_{shot} + \sigma_{S-ASE} + \sigma_{ASE-ASE} + \sigma_{th}$$

Первый член σ_{shot} приведенного выражения соответствует флуктуациям фототока, вызванным шумом Шоттки (его еще называют дробовым шумом), происхождение которого связано с квантовой природой света. Вторым член σ_{S-ASE} – это флуктуации фототока, вызванные биениями между сигналом и усиленным спонтанным излучением. Третий член $\sigma_{ASE-ASE}$ связан с биениями между различными спектральными компонентами усиленного спонтанного излучения, и последний член σ_{th} определяет тепловые флуктуации тока фотоприемника. Качество принятого системой передачи информации цифрового сигнала определяется величиной отношения мощности принятого электрического сигнала к мощности шума. Эта вели-

чина, кратко называемая электрическим отношением сигнал/шум (SNR_e), равна отношению квадрата фототока, создаваемого сигналом, к среднеквадратичному отклонению фототока

$$SNR_e = \frac{I_s^2}{\sigma_{eN}^2}$$

Величина электрического отношения сигнал/шум зависит от характеристик фотоприемника и поэтому не может непосредственно характеризовать качество оптического информационного сигнала. Поэтому для характеристики оптического сигнала вводится понятие оптического отношения сигнал/шум $OSNR$. Оптическое отношение сигнал/шум $OSNR$ в оптической спектральной полосе B_o численно равно электрическому отношению сигнал/шум SNR_e в идеальном фотоприемнике с электрической спектральной полосой $B_e = B_o$. Идеальным называется фотоприемник, в котором отсутствуют тепловые шумы и квантовая эффективность которого равна 100%.

Для характеристики качества оптического усилителя вводится параметр N_f , получивший название шум-фактор. Величина шум-фактора является мерой ухудшения отношения сигнал/шум входного когерентного сигнала $OSNR_{INCOG}$ при прохождении через оптический усилитель

$$N_f = \frac{OSNR_{INCOG}}{OSNR_{OUT}}$$

Следует обратить внимание на тот факт, что шум-фактор определяет ухудшение идеального когерентного сигнала. При приеме идеального оптического сигнала в фототоке отсутствуют флуктуации фототока σ_{s-ASE} и $\sigma_{ASE-ASE}$, связанные с усиленным спонтанным излучением. Поэтому выражение для оптического отношения сигнал/шум входного сигнала имеет вид (шумом Шоттки пренебрегают, считая фотоприемник идеальным):

$$OSNR_{INCOG} = \frac{I_s^2}{\sigma_{shot}^2} = \frac{P_s}{2h\nu_s B_o}$$

Оптическое отношение сигнал/шум выходного сигнала имеет вид:

$$(G I_s)^2$$

$$OSNR_{OUT} = \frac{I_s^2}{\sigma_{shot}^2 + \sigma_{s-ASE}^2 + \sigma_{ASE-ASE}^2}$$

В приближении слабых шумов биениями спектральных компонент усиленного спонтанного излучения можно пренебречь, тогда

$$OSNR_{OUT} = \frac{I_s^2}{2h\nu_s B_o + 4(G-1)h\nu_s B_o n_{sp}}$$

где G – коэффициент усиления, n_{sp} – фактор спонтанного излучения, зависящий от средних населенностей рабочих уровней. Величина фактора спонтанного излучения определяет относительные вероятности спонтанного и вынужденного излучения фотона. Поскольку вероятность спонтанного излучения определяется средней населен-

ностью \bar{N}_2 метастабильного уровня энергии 2, а вероятность вынужденного перехода разностью населенностей $(\bar{N}_2 - \bar{N}_1)$ уровней 2 и 1 (рис.1), то

$$n_{sp} \approx \bar{N}_2 / \left(\bar{N}_2 - \frac{\sigma_a(\lambda_s)}{\sigma_e(\lambda_s)} \bar{N}_1 \right),$$

где $\sigma_a(\lambda_s)$ и $\sigma_e(\lambda_s)$ – сечения поглощения и излучения ионов эрбия на длине волны сигнала.

Из полученных выражений для отношения сигнал/шум входного и выходного сигналов получаем значение шум-фактора эрбиевого усилителя

$$N_f = \frac{1}{G} [1 + 2n_{sp}(G - 1)].$$

Минимальное значение фактора спонтанного излучения $n_{sp} = 1$ достигается при полной инверсии населенностей рабочего перехода ($\bar{N}_1 = 0$). В этом случае в усилителях с большим усилением $N_f = 2$ (шум-фактор в логарифмических единицах равен 3 дБ). Значение шум-фактора 3 дБ является минимально возможным для усилителей любого типа с большим усилением. Типичные значения шум-фактора серийных эрбиевых усилителей составляют 5 дБ.

Если во входном сигнале присутствует «классический» шум, например усиленное спонтанное излучение от предыдущего усилителя, то ухудшение отношения сигнал/шум будет меньше значения шум-фактора:

щей по трехуровневой схеме. В этом случае теоретически населенность основного уровня 1 может быть снижена практически до нуля. Излучение накачки на длине волны 1480 нм само эффективно взаимодействует с ионами эрбия, находящимися на метастабильном уровне энергии 2, а это приводит к тому, что населенность уровня 1 не может быть снижена до нуля. Поэтому уровень шума при использовании накачки на длине волны 1480 нм выше, чем при использовании накачки на длине волны 980 нм. При накачке во встречном по отношению к сигналу направлении шум-фактор также несколько выше, чем при сонаправленной накачке, поскольку очень важно обеспечить большую населенность метастабильного уровня 2 и малую населенность уровня 1 там, где сигнал слабый.

На рис. 5 представлены спектральные зависимости шум-фактора при двух значениях входного сигнала – -30 дБм и -0,5 дБм. Видно, что данная величина не превышает уровня 5 дБ в диапазоне 60 нм.

Ширина и равномерность полосы усиления

Ширину полосы усиления можно определять разными способами. В любом случае этот параметр должен давать информацию о том, что в определенном диапазоне длин волн значение усиления не ниже некоторого граничного уровня. Как правило, этот уровень составляет -3 дБ от максимального значения коэффициента усиления. Для мно-

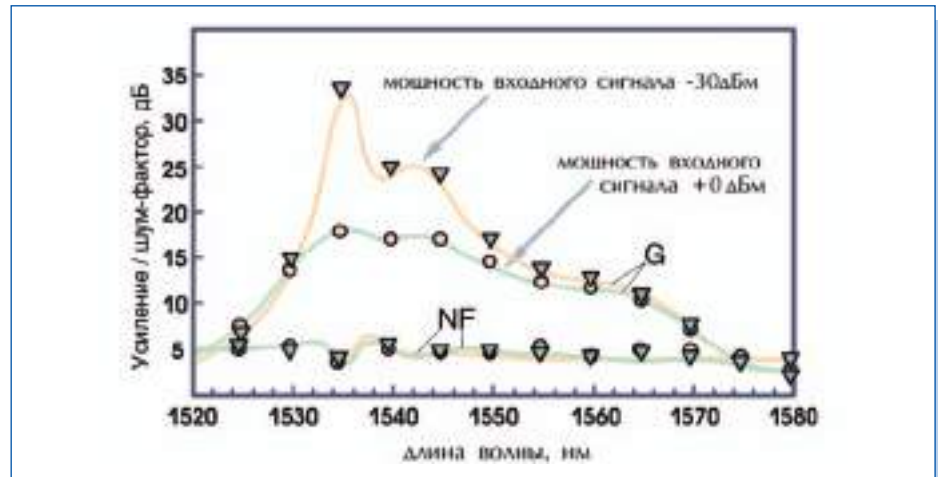


Рис.5. Спектральные зависимости коэффициентов шума и усиления эрбиевого усилителя для двух значений входного сигнала

$$1 < \frac{OSNR_{IN}}{OSNR_{OUT}} \leq N_f$$

Поскольку коэффициент шума при большом усилении зависит только от соотношения населенностей метастабильно уровня 2 и основного уровня 1

$$N_f \approx 2n_{sp} \approx \bar{N}_2 / \left(\bar{N}_2 - \frac{\sigma_a(\lambda_s)}{\sigma_e(\lambda_s)} \bar{N}_1 \right),$$

обеспечить минимальное значение шума можно с использованием накачки большой мощности на длине волны 980 нм, работаю-

гоканальных волоконно-оптических систем со спектральным мультиплексированием этот параметр является принципиальным. Поскольку в настоящее время число каналов достигает 100 и практически трудно реализовать разделение отдельных спектральных каналов с интервалами менее чем 0,4 нм (100 ГГц), то ширина спектра усиленного излучения может превышать 40 нм. В этих условиях ширина полосы усиления начинает оказывать определяющее влияние на число спектральных каналов, используемых для передачи информации, а значит, и

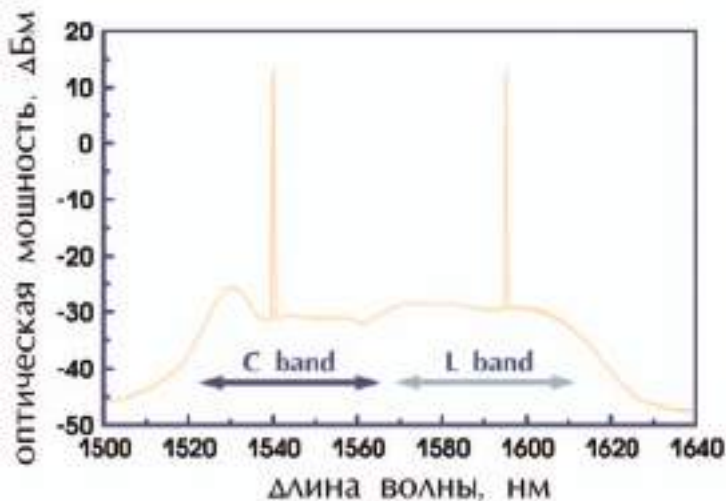


Рис.6. Спектральные характеристики двухдиапазонного усилителя

на общую информационную пропускную способность волокна.

Вообще говоря, ширина полосы усиления определяется спектром излучения ионов эрбия в материале сердцевинного оптического волокна. Определяющее влияние материала сердцевинного волокна на спектр излучения связан с тем, что ионы эрбия окружены молекулами этого материала. Под действием ионов эрбия уровни энергии ионов эрбия расщепляются на подуровни (рис.1). Величина расщепления и определяет ширину полосы излучения. Чем шире полоса излучения, тем более широкого спектра усиления можно добиться при конструировании усилителя. Наиболее широким спектром излучения обладают ионы эрбия в алюмосиликатном стекле (рис.4). Спектры усиления типичного эрбиевого усилителя на алюмосиликатном стекле при двух значениях мощности входного сигнала представлены на рис.5.

Увеличивая длину активного волокна, удается получать достаточно большой коэффициент усиления вплоть до длины волны 1560 нм, при превышении которой усиление резко падает. Таким образом, ширина полосы усиления для традиционной конфигурации усилителя составляет примерно 30 нм (1530 – 1560 нм). Эта полоса усиления имеет название стандартного диапазона (conventional band), или С-диапазона. Как видно из рис.4, интенсивность люминесценции имеет заметное значение вплоть до 1600 нм. При этом поглощение в области 1560 – 1600 нм падает очень быстро, что позволяет использовать и этот диапазон для усиления световых сигналов. Таким образом, оказывается возможным усиление в так называемом длинноволновом диапазоне (long wavelength band) или L-диапазоне, если использовать длинное эрбиевое волокно. Следует отметить, что при такой конструкции усилителя активная среда оказывается не полностью инвертированной, и для оптических сигналов в С-диапазоне такое устройство работает как поглотитель. Поэтому перед усилением оптические сигналы

разделяются по диапазонам С и L, и для каждого используется свой усилитель. Спектральные характеристики усиления в обоих диапазонах представлены на рис.6.

Дальнейшее расширение рабочего спектрального диапазона эрбиевых усилителей связано с использованием области 1480 – 1530 нм, или S-диапазона (short wavelength band – коротковолновый диапазон). Интенсивность люминесценции ионов эрбия в этой области не меньше, чем в L-диапазоне, однако существенным является сильное поглощение сигнала. Эта проблема решается использованием более мощных источников накачки по сравнению с другими усилителями. Вторая проблема выглядит более серьезной и связана она с сильной конкуренцией между усилением сигнала в S-диапазоне и спонтанным излучением в С-диапазоне, для которого условия усиления являются более благоприятными. В последнее время опубликованы несколько работ, в которых показана возможность усиления в S-диапазоне при использовании фильтров или введении изгибных потерь в диапазоне 1530 – 1560 нм для подавления усиленного спонтанного излучения.

Другое направление исследований в области расширения полосы усиления эрбиевых усилителей связано с поиском материала сердцевинного волокна, позволяющего расширить спектр люминесценции. Так, в последнее время появился значительный интерес к эрбиевым волокнам на основе теллуричного стекла. Однако усилители на основе теллуричного волокна пока находятся на стадии лабораторных исследований. Важной характеристикой усилителя в системах связи со спектральным разделением каналов (WDM) является равномерность коэффициента усиления в пределах рабочего спектрального диапазона. Как видно из рис.5 неравномерность коэффициента усиления слабого сигнала может превышать 10 дБ в пределах одной спектральной полосы. В рабочих условиях неравномерность коэффициента усиления уменьшается из-за повышения суммарной мощности оптиче-

ского сигнала. Тем не менее при прохождении в длинной линии через ряд усилителей суммарная неоднородность усиления может привести к потере информации в каналах с меньшим усилением. Таким образом, актуальным является *сглаживание спектра усиления*. Для этого в схему усилителя обычно вводятся спектрально селективные поглощающие фильтры на основе как световодных, так и объемных элементов [6,7]. Одним из популярных видов фильтра является фотоиндуцированная длиннопериодная решетка (LPG, long-period grating)[7]. Такие решетки изготавливают путем пространственно периодического облучения сердцевинного световода ультрафиолетовым излучением через его поверхность. Решетка, период которой, как правило, лежит в диапазоне 0,1 – 1 мм, обеспечивает резонансное взаимодействие фундаментальной моды с модами оболочки. Следствием такого взаимодействия являются преобразование части энергии основной моды волоконного световода с резонансной длиной волны на энергию оболочечных мод и быстрое затухание этих мод. Спектр и интенсивность поглощения задаются периодом решетки и временем облучения световода. Применение сглаживающих фильтров, изготовленных с использованием этой техники, позволяет уменьшить вариации коэффициента усиления до десятых долей дБ в пределах рабочего диапазона.

Литература

1. Mears R.J., Reekie L., Jancie I.M., and Payne D.N., «High-gain rare-earth doped fiber amplifier at 1.54 mm», in *Optical Fiber Communication Conference, Vol.3, 1987 OSA Technical Digest Series, (Optical Society of America, Washington, DC., 1987) p.167.*
2. Desurvire E.E., Simpson R.J., and Becker P.C., «High-gain Erbium doped traveling-wave fiber amplifier», *Opt. Lett.*, v.12, pp.888-890, 1987.
3. Mears R.J., Reekie L., Jancie I.M., and Payne D.N., «Low noise erbium-doped fiber amplifier operating at 1.54 mm», *Elect. Lett.*, v.23, pp.1026-1028, 1987.
4. Zyskind J.L., Nagel J.A., and Kidorf H.D., «Erbium-doped fiber amplifiers for optical communications», in *Optical Fiber Telecommunications, v. IIIB, edited by I.P. Kaminov and T.L. Koch, Academic Press, San Diego, 1997, pp.13-68.*
5. Desurvire E. *Erbium-doped fiber amplifiers. A Wiley-Interscience publication, 1994.*
6. Дианов Е.М., Карпов В.И., Курков А.С., Протопопов В.Н. «Методы сглаживания спектра усиления эрбиевых волоконных усилителей». *Квантовая электроника, 1996, т.23, сс.1059-1064.*
7. Васильев С.А., Дианов Е.М., Курков А.С., Медведков О.И., Протопопов В.Н. «Фотоиндуцированные внутриволоконные решетки показателя преломления для связи мод сердцевина-оболочка», *Квантовая электроника, 1997, т. 24, сс. 151–154.*



Е.А. Заркевич,

О.К. Скляров,

С.А. Устинов, ЦНИИС

ЭЛЕМЕНТНАЯ ОСНОВА МАГИСТРАЛЬНЫХ ВОЛОКОННО- ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ СО СПЕКТРАЛЬНЫМ РАЗДЕЛЕНИЕМ КАНАЛОВ

Единая сеть связи Российской Федерации (ЕСС России) является одной из самых динамично развивающихся отраслей экономики. В настоящее время кабельная составляющая сети, в особенности магистральные и зонные ее участки, полностью выполнена на основе оптических кабелей. Для удовлетворения непрерывно растущих потребностей в увеличении пропускной способности сетей связи РФ интенсивно внедряются системы передачи с временным уплотнением – системы синхронной цифровой информации различных иерархий скоростей – STM-4, STM-16, STM-64, в ближайшей перспективе STM-256 (40 Гбит/с), являющейся предельной для электронных методов обработки сигналов. В этих системах перечисленные цифровые потоки передаются на одной оптической несущей с определенной длиной волны. Дальнейшее повышение скорости передачи возможно только с использованием чисто оптических методов временного уплотнения, обозначаемых в англоязычной технической литературе аббревиатурой OTDM (Optical Time Division Multiplexing). В настоящее время ведутся интенсивные теоретические и экспериментальные исследования и разработки по созданию волоконно-оптических систем передачи (ВОСП) с OTDM. Прошли успешные испытания экспериментальных ВОСП с OTDM по передаче цифровых потоков информации со скоростью 160 Гбит/с на расстояние до 300 км [1] и 1,28 Тбит/с на расстояние до 70 км [2]. Однако эти системы пока не вышли из стадии лабораторных образцов. Альтернативным методом повышения пропускной способности ВОСП является передача необходимого количества (например, m) цифровых потоков информации упомянутых выше иерархий ско-

ростей на соответствующих оптических длинах волн ($\lambda_1 \dots \lambda_m$) по одному оптическому волокну. Такой метод увеличения пропускной способности оптического тракта получил название «уплотнение оптических сигналов по длинам волн» – WDM (Wavelength Division Multiplexing), при плотном размещении оптических каналов в заданном (рабочем) диапазоне длин волн (окно прозрачности) – DWDM (где первая D – dense (плотный)). В отечественной отраслевой технической литературе в соответствии с РД 45.286.2003 [3] используются термин «волоконно-оптические системы передачи со спектральным разделением оптических каналов» и аббревиатура ВОСП-СП. В настоящее время ВОСП-СП получили широкое распространение во многих странах мира, включая Россию. Оборудование ВОСП-СП производят также ведущие компании мира, такие, как Nortel Networks (Канада), Lucent Technologies (США), NEC (Япония), Siemens и Alcatel (Германия), Huawei (Китай), ИРЭ-Полюс (Россия), и некоторые другие, а отдельные компоненты для ВОСП-СП производят более 20 компаний мира.

Увеличение пропускной способности магистральных и зонных ВОСП происходит благодаря широкому внедрению оптических и квантово-электронных технологий. В развитии этих технологий утвердилась устойчивая тенденция полного вытеснения электронных методов обработки сигналов оптическими. Этот процесс получил название фотонизации сетей связи. Для оптического тракта магистральных и зонных ВОСП-СП этот процесс фотонизации можно считать состоявшимся, поскольку на этом участке ВОСП-СП используются полностью оптические компоненты: оптические волокна и ОК на их основе, опти-

ческие усилители передачи и приема, оптические промежуточные усилители, полностью оптические компенсаторы хроматической дисперсии, полностью оптические 2R- и 3R-регенераторы.

Следует отметить, что один из самых важных компонентов оптического тракта – оптическое волокно по такому параметру, как коэффициент затухания, приблизился на длине волны 1550 нм к теоретическому пределу 0,151 дБ/км (теоретический предел 0,14 дБ/км) [4]. Для уменьшения влияния оптических нелинейных явлений, возникающих в ОВ при введении в него оптического группового сигнала с повышенным уровнем мощности (+23...30 дБм), созданы одномодовые оптические волокна с большой эффективной площадью поперечного сечения $A_{эфф} = 211 \text{ км}^2$ [5]. Исследования в области создания микроструктурированных (дырчатых) оптических волокон указывают на возможность снижения коэффициента потерь до $\alpha \approx 0,1$ дБ/км за счет уменьшения релеевского рассеяния. Уменьшение релеевского рассеяния в «дырчатых» волокнах обусловлено тем, что значительная часть энергии оптического сигнала распространяется в физических каналах, представляющих собой трубки диаметром 1...1,5 мкм, содержащие воздух или вакуум.

Оптический тракт регенерационных секций магистральных ВОСП-СП большой протяженности, как правило, содержит до 7...8 оптических промежуточных усилителей и до 9 элементарных кабельных участков (ЭКУ). Длина ЭКУ $L_{ЭКУ}$ обычно не превышает 180 – 200 км. Достаточно часто возникает необходимость существенного увеличения $L_{ЭКУ}$ в тех местах, где нет населенных пунктов и источников электрического питания. Такая ситуация особенно



характерна, например, для азиатской части территории России. Существенное увеличение длин ЭКУ для ВОСП-СР, проходящих через такие территории, может быть достигнуто с помощью применения на ЭКУ рамановских оптических усилителей. Преимущество этих усилителей состоит в том, что активной (усиливающей) средой является обычное рабочее волокно, по которому передается информационный оптический сигнал, т.е. часть самого оптического тракта в виде оптического кабеля превращается в распределенный оптический усилитель длиной до 50 км. Одним из основных факторов, ограничивающих длину регенерационной секции ВОСП-СР, является увеличение длительности информационных оптических импульсов в процессе их распространения в ОВ, что приводит к взаимному наложению информационных символов и возникновению ошибок при приеме сигналов. Это увеличение длительности вызвано хроматической дисперсией в оптическом волокне. Для одноволновых ВОСП влияние хроматической дисперсии практически снимается путем ее компенсации с помощью дискретных компенсаторов, основанных на использовании сдвоенных дифракционных решеток Брэгга. Основным достоинством компенсаторов хроматической дисперсии дискретного типа являются малые вносимые потери (менее 1 дБ) и малые габариты, недостаток – значительная температурная зависимость параметров, вследствие чего такие компенсаторы требуют температурной стабилизации. Применение дискретных компенсаторов хроматической дисперсии в системах со спектральным уплотнением нецелесообразно, поскольку в этом случае такие компенсаторы пришлось бы ставить для каждого спектрального канала. Если в системе передаются 20 – 30 и более спектральных сигналов, устройство компенсатора резко усложняется, что приводит к необходимости дополнительного увеличения потребляемой электрической мощности для температурной стабилизации, увеличению габаритов и неприемлемого повышения стоимости. В системах ВОСП-СР проблема компенсации хроматической дисперсии решается с помощью использования оптического волокна с отрицательным коэффициентом хроматической дисперсии. Компенсаторы, в которых используется такое волокно, являются распределенными. Их достоинства: широкополосность, позволяющая с помощью одного компенсатора осуществлять компенсацию дисперсии во всем рабочем диапазоне. Кроме того, такие компенсаторы не требуют температурной стабилиза-

ции, и, следовательно, отпадает необходимость в электропитании. Основной недостаток распределенных волоконных компенсаторов – большой коэффициент затухания компенсирующего волокна. Большое затухание, вносимое в оптический тракт компенсирующим волокном, нейтрализуется дополнительным оптическим усилением. На практике бухта с компенсирующим волокном располагается в оптическом промежуточном усилителе, состоящем из двух каскадно соединенных ВОУ-предусилителя и усилителя мощности, между которыми включена упомянутая бухта. Включение дополнительного оптического усилителя приводит к возрастанию мощности усиленного спонтанного излучения, в результате чего снижается отношение сигнал/шум. В реальных системах передачи компенсирующее волокно распределяется на все (или часть) промежуточные усилители регенерационной секции. Очевидно, что применение дополнительных усилителей в промежуточных пунктах и, как следствие этого, снижение отношения сигнал/шум уменьшают энергетический потенциал и длину регенерационных секций системы ВОЛС-СР. Магистральные ВОСП-СР большой протяженности, как правило, состоят из нескольких регенерационных секций и регенерационных пунктов, в которых применяются оптические регенераторы. В настоящее время в реализованных проектах ВОСП-СР используются оптические квантово-электронные регенераторы, в которых оптический сигнал преобразовывается в электронный и после соответствующей обработки по восстановлению формы и временных параметров цифровых сигналов происходит обратное их преобразование в оптические цифровые сигналы. Однако, как уже упоминалось выше, в настоящее время созданы полностью оптические 2R- и 3R-регенераторы без преобразования в электронную форму энергии сигналов [6,7]. Тем не менее эти наукоемкие изделия высоких технологий пока имеют высокую стоимость, препятствующую их использованию в коммерческих ВОСП-СР. Таким образом, проблема уменьшения влияния хроматической дисперсии остается актуальной. Решение этой проблемы просматривается по трем направлениям: разработка и снижение стоимости оптического волокна с пониженным коэффициентом дисперсии и малым коэффициентом наклона дисперсионной характеристики (ОВ стандарта G.655 ITU-T); применение в оптическом тракте чередующихся участков с волокнами с положительным и отрицательным коэффициентом дисперсии в сочетании с рамановским усилителем; использование в передающих устройствах на стороне передачи или в

регенерационных пунктах полупроводниковых лазеров с внешними модуляторами. Использование внешней модуляции дает возможность ограничить ширину линии излучения практически только спектром модулирующего сигнала. Наибольший эффект это дает в системах со скоростями передачи 622 Мбит/с или 2,5 Гбит/с. Успешная фотонизация магистральных и зональных сетей практически снимает ограничения по пропускной способности и дальности передачи информации на ближайшие 5 – 10 лет. Эти утверждения могут быть подтверждены тем, что достигнутая пропускная способность экспериментальной ВОСП-СР 11 Тбит/с [8] далеко превосходит потребности сегодняшних дней, а начало реализации проекта SAT-3/WASL протяженностью 28 тыс.км [9] свидетельствует о решении проблемы дальности передачи.

Литература

1. *Signal Channel 160 Gbit/s (40 Gbit/s x4) 300 km – Transmission Using EA Modulator based – OTDM module and 40 GHz External -Cavity Mode-locked LD.* Murai, Hitoshi at al ECOC 2002, Copenhagen, Sept. 2002 SS.2.1.
2. *1,28 Tbit/s – 70 km OTDM transmission with a phase thirb and fourth – order simultaneously dispersion compensation with a phase modulator* Yamamoto T., Tamura K.R. *Electronics Letters – 2000 V.36 – N24, p.2027 – 2028.*
3. *РД 45.286.2002 Аппаратура волоконно-оптической системы передачи со спектральным разделением. Технические требования.*
4. *Ultra Low Loss 10,151 dB/km Fiber and its Impact on Submarine Transmission Systems.* K. Nagayama, T. Saitoh at al OFC 2002, USA Postdidline Papers.
5. *Ulyra Low Nonlinearity Pure-Silica-Core Fiber with an Effective Area of 211 mm² and Transmission Loss of 0,159 dB/km.* Masno Trukitani, Masahiko Matsui at al ECOC 2002, Copenhagen, Sept. 2002, SS.6.3.
6. *Optical 3R regeneration with all-optical timing extraction and simultaneous wavelength conversion using a single Electro-Absorbtion Modulator.* Awad Ehab, Goldhar, Julius at al ECOC 2002, Copenhagen, Sept. 2002, SS.6.3.
7. *Novel 3R Regenerator architecture with wavelength flexible output.* Sartorius Bernd, Slovak Juray (Germany) ECOC 2002.
8. *1092 Tbit/s, 273 Channel, 40 Gbit/s per channel spacing bandwidth efficiency 50 GHz.* Fucuchi R. et al NEC Corporation, OFC Post didline, OFC 2001.
9. *20000 km under the sea.* Mark Telford LIGHTWAVE EUROPE October 2002, pp. 3031.