

ОПТИЧЕСКИЕ ВОЛОКОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ

Н. С. Макаров

Работа посвящена обзору различных вариантов волоконных оптических усилителей, принципов их работы, преимуществ и недостатков. Также рассматривается предложенный нами метод одновременного стокового и антистокового ВКР-усиления в волокнах.

Введение

При передаче оптических сигналов по волоконным линиям связи на большие расстояния, вследствие рассеяния и поглощения, ослабляющих информационный сигнал, необходимо использовать последовательно расположенные усилители-повторители. Известны два типа повторителей – оптико-электронные, основанные на преобразовании свет – электронный сигнал – свет, и полностью оптические, которые в последнее время получили большое распространение. В качестве полностью оптических повторителей используют волоконные усилители, основанные на явлении вынужденной эмиссии в волокнах, активированных ионами редкоземельных металлов, а также рамановские усилители, в которых используется нелинейно-оптический эффект вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) в волокнах. Такие системы усиливают оптические сигналы в относительно широком диапазоне частот, включающем десятки и сотни информационных каналов, мультиплексированных по длинам волн. Они не чувствительны к скорости передачи данных вплоть до 100 Гб/с и работают с любыми форматами передачи данных [1-13]. В данной работе рассматриваются различные варианты волоконных оптических усилителей, принципы их работы, преимущества и недостатки.

Эрбиевые волоконные усилители

В настоящее время наиболее распространение получили усилительные системы на основе волокна, активированного ионами эрбия Er^{3+} (erbium-doped fiber amplifier – EDFA) и позволяющего эффективно усиливать сигналы в спектральной полосе наименьшего поглощения кварцевого стекла 1535...1565 нм, а также в области 1570...1610 нм [4].

В линиях связи применяются три различных варианта эрбиевых волоконных усилителей (ЭВУ) [4, 5].

В первом варианте *усилитель мощности (УМ)* устанавливается непосредственно после мультиплексирующей системы, суммирующей излучение полупроводниковых лазеров, которые генерируют излучение на различных длинах волн и формируют спектральные информационные каналы. УМ предназначен для усиления широкополосного сигнала до уровня, который не может быть достигнут в отдельных полупроводниковых лазерах. Усиление по мощности в УМ достигает 30 дБ.

Во втором варианте *линейный усилитель (ЛУ)* устанавливается в промежуточных точках протяженных линий связи между регенераторами на расстояниях до 160 км с целью компенсации ослабления сигнала, которое происходит из-за затухания в оптическом волокне. Усиление в ЛУ обычно составляет 18...23 дБ.

В третьем варианте *предварительный усилитель (ПУ)* устанавливается непосредственно перед устройством демультиплексирования по длинам волн и обеспечивает увеличение отношения сигнал/шум на входе электронных каскадов усиления после системы оптоэлектронных детекторов, регистрирующих информационные сигналы на различных длинах волн. Усиление в ПУ составляет 18...23 дБ.

Конструктивно типы ЭВУ различаются по уровням мощности накачки, концентрации ионов активатора и длине самого волокна.

Простой однокаскадный ЭВУ [4, 5] состоит из бобины с намотанным на нее эрбиевым волокном длиной 1...30 м (рис. 1).

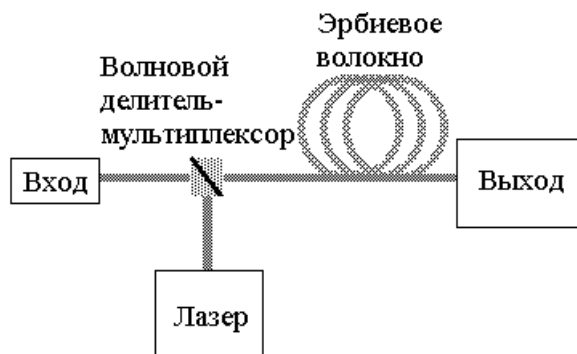


Рис. 1. Принципиальная схема однокаскадного эрбиевого волоконного усилителя

Оптическая накачка волокна осуществляется на длинах волн 980 нм и/или 1480 нм, после чего лазерное излучение с помощью оптического мультиплексора вводится в усилительное волокно. Энергия накачки поглощается ионами эрбия, которыми активировано кварцевое волокно, переводя их в возбужденное состояние. Усиление происходит, когда сигнальный фотон с длиной волны 1550 нм инициирует переход возбужденного иона эрбия в основное состояние с излучением идентичного фотона на длине волны 1550 нм.

Однокаскадный усилитель [9, 10] обычно содержит один или два лазера накачки, при этом для увеличения усиления осуществляется поляризационное или частотное комбинирование большего числа источников накачки. Усиление информационного оптического сигнала возможно при попутном распространении излучения накачки, при встречном, а также при их комбинации.

Простой однокаскадный усилитель не вполне удовлетворяет требованиям современных телекоммуникационных систем, поэтому его дополняют рядом специальных устройств. Для предотвращения попадания излучения накачки или усиленной спонтанной эмиссии эрбиевого волокна в линию передачи на входе и/или выходе усилителя необходимо использовать оптические изоляторы. Для получения информации о мощности и спектре сигнала на входе и выходе используются оптические разветвители с измерительными устройствами. Сигналы этих устройств используются для управления мощностью лазерного излучения накачки, контроля коэффициента усиления, или для оповещения об аварийной ситуации [4, 5].

При передаче большого числа информационных каналов, мультиплексированных по длинам волн (wavelength-division multiplexing – WDM), используется расширенный диапазон частот, в котором сложно обеспечить равномерную частотную характеристику ЭВУ. Частотная зависимость становится острой проблемой в системах большой протяженности, в которых используются несколько последовательно расположенных секций с ЭВУ между ними. Указанный недостаток устраняется за счет применения узкополосных сглаживающих оптических фильтров для ослабления сигналов на частотах, которым соответствуют большие коэффициенты усиления. Для коммерческих ЭВУ с неравномерностью усиления менее 1 дБ в диапазоне рабочих частот фильтры тщательно согласовываются с архитектурой усилителя. Сглаживание частотной характеристики усиления обычно достигается при обеспечении требуемых значений ряда параметров, таких как уровни входной мощности сигнала и накачки, длины волокна и т.д. В однокаскадных усилителях сглаживание частотной характеристики приводит либо к потере выходной мощности, либо к дополнительному ослаблению информационного сигнала до его усиления. Поэтому обычно для сглаживающих усилителей используются многокаскадные схемы [4, 5].

В системах ЭВУ с мультиплексированием по длинам волн обычно необходимы управление усилением, добавление или удаление информационных сигналов на различных длинах волн, а также компенсация дисперсии групповых скоростей, которая возникает при прохождении длинного оптического волокна. Это вносит дополнительные потери, которые могут достигать 10 дБ и более, и могут быть компенсированы только в многокаскадных усилителях [4, 5].

Оптическая схема двухкаскадного ЭВУ приведена на рис. 2. Как правило, в подобных устройствах используется попутный лазер накачки с длиной волны 980 нм в первом каскаде и встречный лазер накачки с длиной волны 1480 нм – во втором, что позволяет избежать попадания лазерного излучения накачки на вход и выход информационной сети.

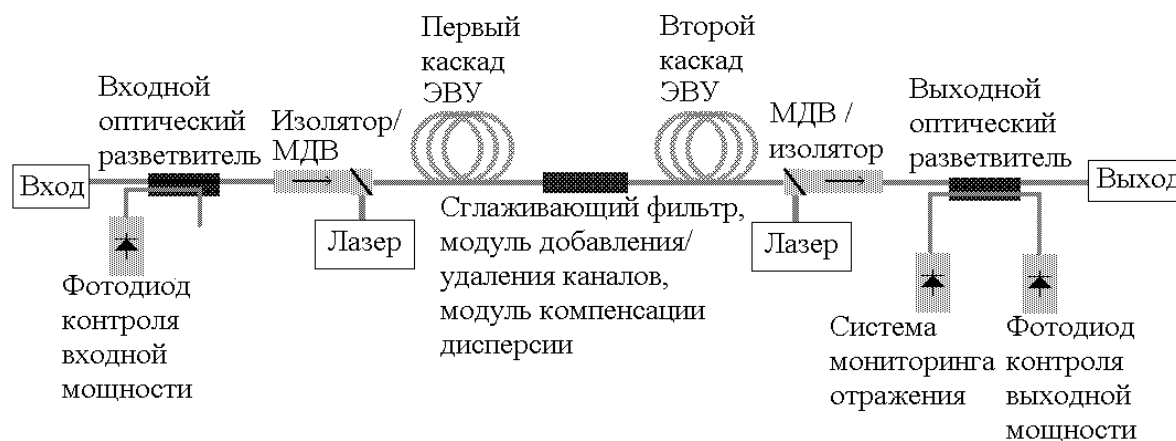


Рис. 2. Многокаскадный эрбиевый усилитель, МДВ – система мультиплексирования по длинам волн

Сглаживающий фильтр, модуль добавления/удаления каналов и модуль компенсации дисперсии вносят существенные потери в двухкаскадном ЭВУ, поэтому их, как правило, располагают между каскадами усиления.

Из кривых спектров усиления многокаскадного ЭВУ, представленных на рис. 3, следует, что применение сглаживающего фильтра приводит к неравномерности усиления менее 0,3 дБ во всей частотной полосе усиления.

До недавнего времени ЭВУ были основным, если не единственным, видом оптических усилителей при передаче данных по волоконным линиям связи на большие дистанции [4]. Возрастающие потребности в скорости передачи данных и количестве спектральных каналов обусловили появление альтернативных технологий.

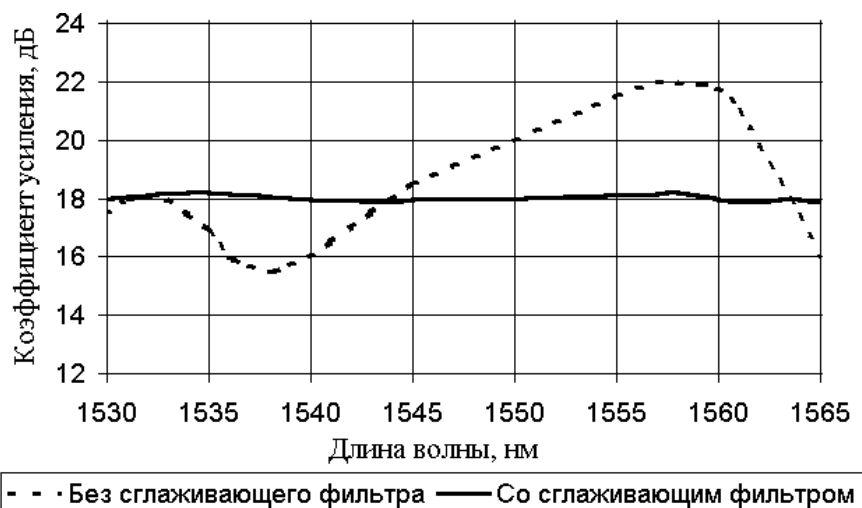


Рис. 3. Спектральные кривые усиления многокаскадного эрбиевого усилителя

Тулиевые волоконные усилители

Усилительные системы на основе волокна, активированного ионами тулия Ti^{3+} (thulium-doped fiber amplifier – TDFA) работают подобно ЭВУ: оптическое усиление сигнала в них происходит в результате преобразования энергии накачки в энергию сигнала в результате распространения излучения в усилительном волокне [6, 7]. Разница между ЭВУ и тулиевыми волоконными усилителями (ТВУ) заключается в способе усиления, определяемом ионами-активаторами и схемой накачки (рис. 4).

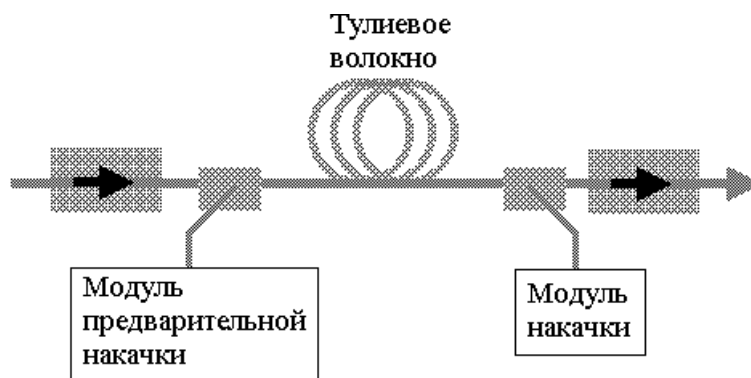


Рис. 4. Принципиальная схема тулиевого волоконного усилителя

Схема энергетических уровней (рис. 5) иллюстрирует процесс оптического усиления в ТВУ. Усиление осуществляется с использованием двух волн накачки с одинаковыми или различными частотами. Фотоны предварительной накачки переводят ионы активатора на энергетический уровень E_2 , являющийся нижним рабочим уровнем, затем фотоны основной накачки используются для заселения верхнего рабочего энергетического уровня E_3 , вынужденный переход с которого на уровень E_2 обеспечивает усиление оптических сигналов.

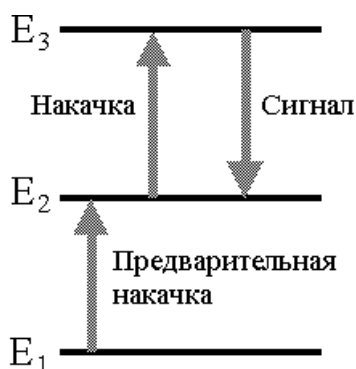


Рис. 5. Схема энергетических уровней тулиевого волоконного усилителя

При использовании указанной схемы накачки центр усиления фтористого, фтористодиркониевого или многокомпонентного кварцевого волокна с высокой концентрацией ионов тулия находится вблизи длины волны 1460 нм (рис. 6). Ширина спектральной полосы усиления с уровнем 20 дБ составляет в таких волокнах примерно 35 нм, а максимальное усиление может достигать 31 дБ [6, 7]. Применяя иные схемы накачки можно также получить усиление в диапазоне длин волн 1480...1510 нм [6].

Основным препятствием широкому распространению ТВУ является недостаточно высокая прочность используемого в усилителе оптического волокна. В отличие от кварцевого волокна, оно более ломкое, поэтому при его производстве, прокладке и обслуживании требуются специальные методики. Другой проблемой является сложность обеспечения высокого качества оптического соединения различных по физико-химическому составу волокна ТВУ и обычного кварцевого волокна. Так как сварка этих волокон невозможна, используются менее надежные способы механического соединения торцов различных волокон или соединения с помощью эпоксидной смолы. Подобные соединения вносят потери более 0,3 дБ, в отличие от потерь 0,05 дБ при сварке [7]. Кроме этого, в состав волокна входит цирконий, что обуславливает высокую себестоимость производства. На сегодняшний день низкая надежность и высокая стоимость ТВУ препятствуют их широкому распространению.

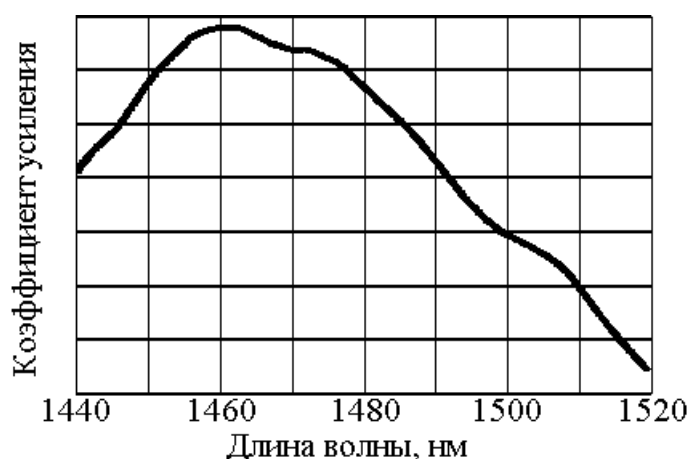


Рис. 6. Спектральная кривая усиления тулиевого волоконного усилителя

ВКР волоконные усилители

Системы, построенные на основе ЭВУ и ТВУ, обладают большим уровнем шумов на частотах информационных сигналов, что обусловлено влиянием спонтанного

излучения ионов активаторов. Усиление на основе ВКР позволяет обеспечить дополнительное повышение уровня сигнала без существенного увеличения шума на частоте сигнала [7].

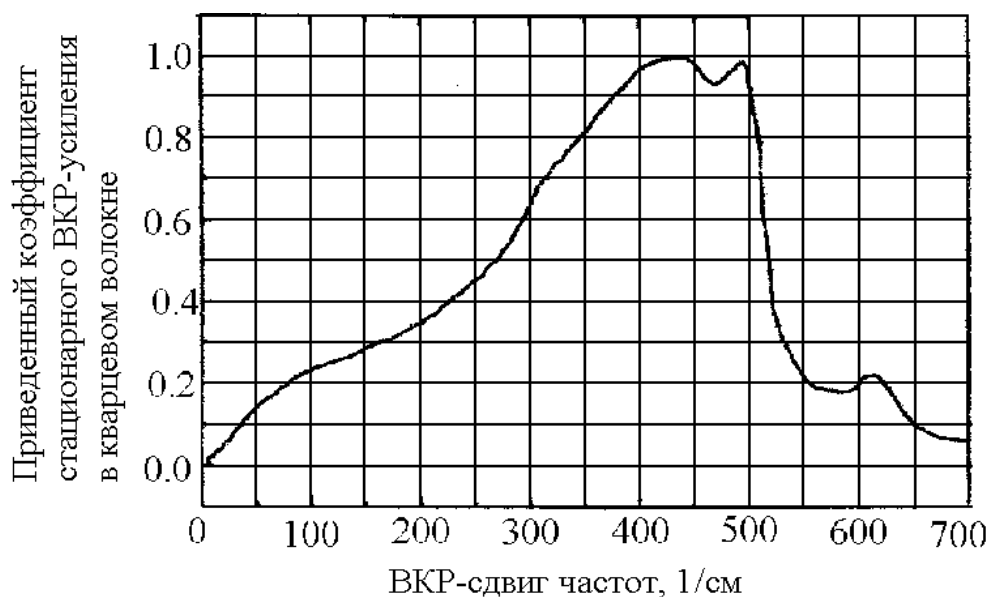


Рис. 7. Зависимость коэффициента ВКР-усиления в кварцевом волокне от сдвига частот

Усиление в процессе ВКР обусловлено нелинейно-оптической перекачкой энергии накачки в энергию Стокса с участием фоновой волны среды. Например, для достижения усиления на длине волны 1550 нм (информационный сигнал), необходима накачка на длине волны 1455 нм, при этом за счет широкой полосы ВКР усиления кварцевого волокна усиление происходит и на соседних частотах (рис. 7) [7, 8]. Коэффициент ВКР-усиления в кварцевом волокне является поляризационно-зависимым, и оптимальное усиление происходит только тогда, когда поляризации сигнала на стоксовой частоте и частоте накачки совпадают. Высокое усиление без поляризационно-зависимых потерь достигается при использовании источников накачки с ортогональными поляризациями (рис. 8).

Процесс ВКР-усиления происходит в любом оптическом волокне при соответствующей накачке и поэтому его можно использовать для улучшения параметров не только новых, но и уже существующих оптических линий передачи информации. Для сглаживания кривой усиления и для обеспечения большей мощности усилителя возможно применение накачки на нескольких длинах волн (рис. 9) [7, 8].

Основным недостатком ВКР-усилителей является их низкая эффективность по сравнению с ЭВУ. Для достижения усиления 30 дБ ЭВУ необходима мощность накачки около 50 мВт, тогда как для аналогичного усиления ВКР-усилителя необходима мощность накачки более 1 Вт [7].

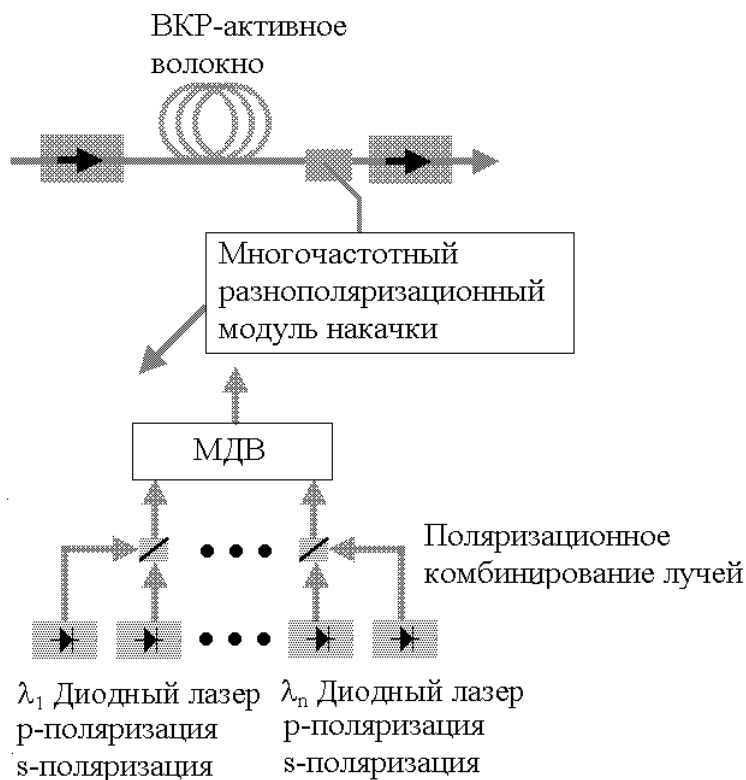


Рис. 8. Схема ВКР-усилителя с использованием накачки на нескольких длинах волн с различной поляризацией

В последнее время [7] появились мощные диодные лазеры с мощностью до 1 Вт и фазированные линейки диодных лазеров с мощностью более 10 Вт, что позволило создать эффективные ВКР-усилители, способные конкурировать с ЭВУ. На этой основе ожидается скорое появление коммерческих ВКР-усилителей.

ВКР-усилители могут быть использованы для усиления в S-полосе (1480...1520 нм), в L-полосе (1570...1610 нм) и в диапазоне от 1642 до 1672 нм [7, 8]. В оптических сетях ВКР-усиление может использоваться как единственный механизм усиления или в комбинации с ЭВУ.

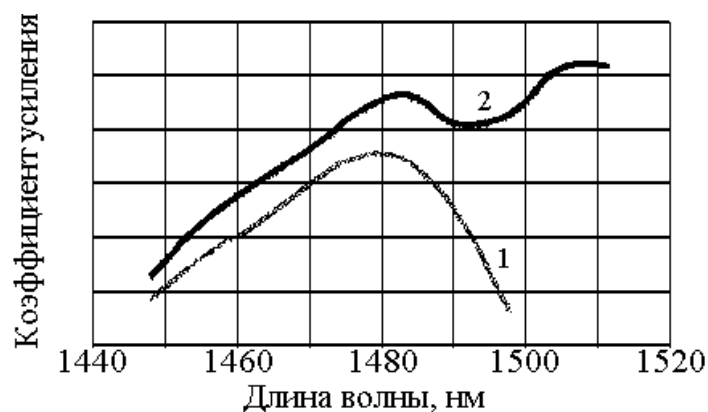


Рис. 9. Спектральные кривые усиления ВКР-усилителя при накачке на одной (1) и на двух (2) длинах волн

Гибридные усилители

Ни один из существующих видов оптических усилителей не может удовлетворить всем современным потребностям телекоммуникационных систем, поэтому в настоящее время активно ведутся разработки новых видов оптических усилителей.

Благодаря тому, что полоса усиления ВКР-усилителя может быть сдвинута в сторону более высоких или низких частот по отношению к полосе усиления ЭВУ [9, 10], при использовании достаточно мощных лазеров накачки можно согласовать усилители таким образом, чтобы результирующая полоса усиления была значительно шире, чем у каждого из усилителей в отдельности. При этом можно значительно сгладить неравномерность кривых усиления отдельных усилителей (рис. 10).

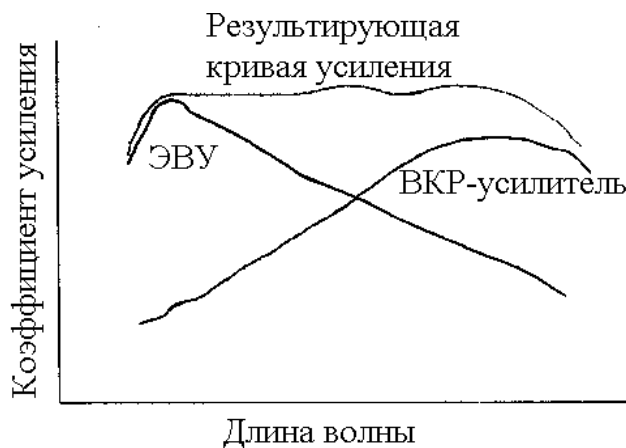


Рис. 10. Сглаживание кривой общего усиления при использовании ВКР-усилителя и ЭВУ

Экспериментальная система, разработанная в лаборатории Нортел Харлоу (Эссекс, Англия), при использовании данной гибридной схемы обеспечила передачу 32-х спектральных каналов на расстояние 1000 км с пропускной способностью каждого канала 40 Гб/с с общей скоростью передачи 1,28 Тб/с [11].

Стокс-антистоксовые ВКР-усилители

Для одновременного усиления в окнах прозрачности 1310 и 1550 нм кварцевого волокна можно использовать комбинированное стоксовое и антистоксовое ВКР-усиление в условиях фазового квазисинхронизма [11-12]. Для обеспечения условия фазового квазисинхронизма волокно должно состоять из чередующихся областей с нелинейными свойствами (активные слои) и без нелинейных свойств (пассивные слои). Толщины слоев должны выбираться таким образом, чтобы в каждом активном слое происходила эффективная перекачка энергии из волны накачки в антистоксовую компоненту ВКР. Основные свойства фазового квазисинхронизма при ВКР были подробно исследованы в [13]. Расчеты, проведенные с использованием данной методики, показали, что длина волокна, на которой усиление достигает 13 дБ, составляет примерно 3 км.

За счет широкой полосы усиления кварцевого волокна ВКР-усиление происходит не на одной частоте, а в некоторой полосе частот (рис. 11) [11-12]. Так как в широком диапазоне длины волны накачки (1400...1500 нм) слоистая структура остается неизменной, для увеличения мощности усилителя, увеличения и сглаживания полос усиления можно использовать накачку на нескольких длинах волн.



Рис. 11. Спектральная кривая стоксового и антистоксового усиления в кварцевом волокне

Одновременное стоксовое и антистоксовое ВКР-усиление обладает всеми преимуществами и недостатками стоксового ВКР-усиления (при этом немного снижается результирующий коэффициент усиления). Основным недостатком данного метода является высокая сложность реализации слоистой структуры, состоящей из большого числа слоев.

Заключение

В настоящее время в волоконно-оптических линиях связи реально используются только эрбиевые полностью оптические усилители, хотя их возможностей явно недостаточно для удовлетворения требований, предъявляемых к телекоммуникационным системам следующего поколения. Для увеличения полосы пропускания (числа спектральных каналов) необходимо использование гибридных усилителей, сглаживающих кривую усиления. Реализация гибридного усилителя с одновременным стоксовым и антистоксовым усилением позволит увеличить полосу пропускания. С ростом скоростей передачи данных относительно низкое быстродействие эрбиевых усилителей вызовет ряд проблем, в результате чего ВКР-усилители займут лидирующие позиции на рынке волоконных оптических усилителей.

Литература

1. Nakagawa K., Nishi S., Yoneda E. // J. Lightwave Technol. 1991. V. 9. P. 198-207.
2. Randy G., Tingyc L. I. // Proc. IEEE. 1996. V. 84. P. 870-883.
3. Urquhart P. // Proc. IEEE. 1988. V. 6. P. 385-407.
4. Trivedi D. A., Strite T., Gerlas van den Hoven // WDM solutions. 2000. № 4. P. 14-20.
5. Daniel C. McCarthy // Photonics Spectra. 2001. № 7. P. 88-98.
6. Yvonne Carls-Powell // WDM solutions. 2001. № 7. P. 9, 20.
7. Islam M., Nietubyc M. // WDM solutions. 2001. № 3. P. 53-62.
8. Hecht J. // Laser Focus World. 2001. № 6. P. 135-140.
9. Ahmed M. H., Shalaby M., Misk F. M. // Pure Appl. Opt. 1998. V. 7. P. 659-666.
10. Savage N. // WDM solutions. 2000. № 4. P. 8.
11. Bains S. // WDM Solution. 2001. № 4. P. 9.
12. Bespalov V. G., Makarov N. S. // Proc. SPIE. 2001. V. 4605. P. 280-285.
13. Беспалов В. Г., Макаров Н. С. // Известия РАН. Серия физическая. 2002. Т. 66. № 3. С. 350-352.
14. Bespalov V. G., Makarov N. S. // Proc. SPIE. 2001. V. 4268. P. 109-116.