

Магистрант ФИТ Э.И. Сиразов,
науч. рук. д.т.н. А.М. Назаров, ТашГТУ

ПЕРСПЕКТИВЫ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ УСИЛИТЕЛЕЙ С ПРИСАДКАМИ ИЗ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ

В статье рассматриваются перспективы различных вариантов волоконно-оптических усилителей с присадками из редкоземельных металлов. Описаны особенности их работы, такие как: рабочая полоса частот, рабочее окно прозрачности, условия расположения, мощность накачки и коэффициент усиления. Указаны преимущества, недостатки, распространенность каждого из типов усилителей в современных условиях. Представлен способ параллельного стоксового и антистоксового усиления на основе вынужденного комбинационного рассеяния в оптических волокнах. Исходя из наибольшей перспективности, в данной работе рекомендованы следующие волоконно-оптические усилители: эрбиевый, тулиевый, гибридный и стокс-антистоксовый на основе вынужденного комбинационного рассеяния.

Мақолада оптик толали кучайтиргичларнинг турли хил вариантлари ва уларнинг модификациялари ҳақида маълумотлар берилган. Улар фаолиятининг хусусиятлари, масалан, ишчи частота диапазони, шаффофлик ойналари, жойлаштириши шартлари, нурлантириши қуввати ва кучайтириши коэффициенти таърифланган. Хар бир турдаги кучайтиргичнинг замонавий шароитларда тарқалиши, афзалликлари, камчиликлари кўрсатилган. Шунингдек оптик толаларда параллел Stokes ва анти Stokes Raman кучайтириши усули тавсифланган. Энг кенг тарқалганлиги хусусиятларидан келиб чиқиб, ушбу мақолада эрбийли, тулийли, Раман кучайтиргичи, гибрид ва стокс ҳамда антистокс Раман оптик толали кучайтиригичлари кўриб чиқилган.

The article gives an overview of various variants of optical fiber amplifiers and their modifications. Features of their operation are described, such as the working frequency band, the opacity window, the location conditions, the pumping power, and the amplification factor. Advantages, disadvantages, and prevalence of each type of amplifier in modern conditions are indicated. A method of parallel Stokes and anti-Stokes Raman amplification in optical fibers is also described. Proceeding from the greatest popularity, the following fiber-optic amplifiers are considered in this paper: erbium, tulium, amplifier, hybrid and Stokes-anti-Stokes stimulated Raman scattering amplifier.

В процессе передачи оптических сигналов вдоль волоконных линий связи на большие расстояния, из-за таких процессов, как рассеяние и поглощение, которые приводят к ослаблению информационного сигнала, приходится использовать последовательно расположенные усилители-повторители. Существуют повторители двух типов: оптико-электронные, выполняющие преобразование свет – электрический сигнал – свет, и чисто оптические, которые в настоящее время приобрели большое распространение. В роли полностью оптических повторителей применяются волоконные усилители, использующие для своей работы явление вынужденной эмиссии в волокнах, которые активированы ионами редкоземельных металлов, а также рамановские усилители, которые используют нелинейно-оптический эффект вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) в волокнах. Такие устройства служат для усиления оптических сигналов в сравнительно широком диапазоне частот, включающем десятки и даже сотни информационных каналов, которые мультиплексированы по длинам волн. Они не имеют чувствительности к скорости передачи данных вплоть до 100 Гб/с и могут работать со всеми имеющимися форматами передачи данных [1-4].

В последнее время наибольшее распространение получили усилительные устройства на основе волокна, активированного с помощью ионов эрбия Er^{3+} (erbium-doped fiber amplifier – EDFA) который позволяет эффективно усиливать сигналы в полосе спектра с наименьшим поглощением кварцевого стекла 1535...1565 нм, а также в полосе 1570...1610 нм [4].

В линиях передачи данных используются три типа эрбиевых волоконных усилителей (ЭВУ) [4,5]. В первом типе усилитель мощности располагается непосредственно сразу после системы мультиплексирования, суммирующей излучение от полупроводниковых лазеров, которые данное излучение генерируют на различных длинах волн и создают спектральные информационные каналы. Во втором типе линейный усилитель располагается в промежутках линий связи между регенераторами на расстоянии до 160 км для компенсации ослабления сигнала, которое возникает из-за затухания в оптоволокне. ВЛУ усиление доходит до 18...23 дБ.

В третьем типе предварительный усилитель располагается непосредственно перед самим демультиплексором по длинам волн и позволяет увеличить отношения сигнал/шум на входе электронных усилительных каскадов после оптоэлектронных детекторов, регистрирующих информационные сигналы на различных длинах волн. Усиление в ПУ достигает 18...23 дБ.

Типы ЭВУ различаются между собой по мощности накачки, длине волокна и концентрации ионов активатора.

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

Оптическая накачка волокна реализуется на длинах волн 980 нм или 1480 нм, после чего излучение лазера при помощи оптического мультиплексора направляется в усилительное волокно. Энергия накачки поглощается через ионы эрбия, с помощью которых активировано кварцевое волокно, вводя их в состояние возбуждения. Само усиление осуществляется, когда сигнальный фотон с длиной волны 1550 нм запускает переход возбужденного иона эрбия в основное состояние с излучением аналогичного фотона на волны длиной в 1550 нм.

Однокаскадный усилитель [9,10], как правило, содержит один либо два лазера накачки, а для большего усиления используется поляризационное или частотное комбинирование большего числа источников накачки. Усиление информационного оптического сигнала достигается за счет попутного распространения излучения накачки, встречного распространения, и при их комбинации.

Простейший однокаскадный усилитель не полностью отвечает требованиям нынешних систем телекоммуникации, в связи с чем его дополняют рядом специальных устройств. Чтобы исключить попадание излучения накачки или усиленной спонтанной эмиссии эрбиевого волокна в линию передачи, на входе или выходе усилителя следует установить оптические изоляторы.

В процессе передачи большого количества информационных каналов, мультиплексированных по длинам волн (wave length-division multiplexing – WDM), применяется расширенный диапазон частот, в котором затруднительно достичь равномерную частотную характеристику ЭВУ. Частотная зависимость создает большую проблему в линиях большой протяженности, в которых используются несколько последовательно расположенных друг за другом секций с ЭВУ между ними. Данный недостаток решается применением узкополосных сглаживающих оптических фильтров с целью ослабления сигналов на тех частотах, на которых построены большие коэффициенты усиления. Сглаженность частотной характеристики усиления достигается как правило достижением требуемых значений ряда параметров, таких как длины волокна, уровни входной мощности сигнала и накачки, и т.д. В однокаскадных усилителях сглаживание частотной характеристики создает либо потерю выходной мощности, либо дополнительное

ослабление информационного сигнала до момента его усиления. В связи с этим для сглаживающих усилителей чаще используются многокаскадные схемы [4,5]. Спектральные кривые усиления многокаскадного эрбиевого усилителя приведены на рис. 1.

В системах ЭВУ с использованием мультиплексирования по длинам волн, как правило требуются контроль усиления, добавление или удаление информационных сигналов на различных длинах волн, и помимо этого компенсация дисперсии групповых скоростей, которая возникает при прохождении длинного оптического волокна. Это создает лишние потери, которые могут достигать 10 дБ и более, и могут компенсироваться лишь в многокаскадных усилителях [4,5].

Обычно, в подобных устройствах применяется попутный лазер накачки на длине волны 980 нм в первом каскаде и встречный лазер накачки на длине волны 1480 нм – во втором, что исключает попадание лазерного излучения накачки на вход и выход сети передачи данных.

Модуль добавления или удаления каналов, сглаживающий фильтр, и модуль компенсации дисперсии создают значительные потери в двухкаскадном ЭВУ, из-за чего их, в основном, располагают между каскадами усиления.

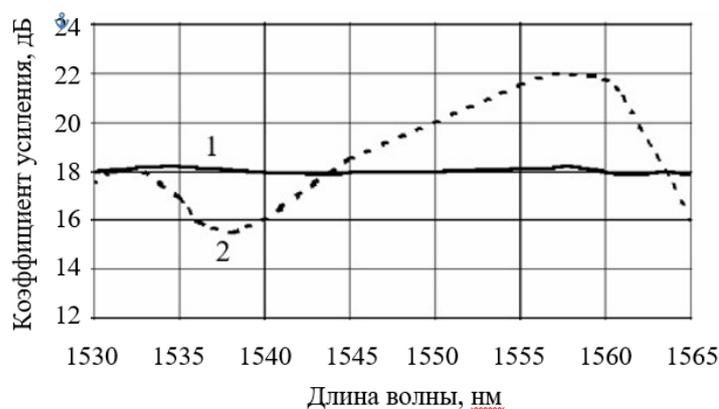


Рис. 1. Зависимости коэффициента усиления от длины волны многокаскадного эрбиевого усилителя: 1 – со сглаживающим фильтром; 2 – без сглаживающего фильтра

ЭВУ до недавнего времени были основным, видом волоконно-оптических усилителей при передаче данных на большие дистанции [4]. Необходимость в большей скорости передачи данных и количестве спектральных каналов требовали создания более совершенных технологий.

Другой разновидностью оптической системы усиления, построенной на основе волокна, активированного ионами редкоземельных элементов является оптические усилители на присадках тулия Tl^{3+} (thulium-doped fiber amplifier – TDFA). Они работают по принципу ЭВУ: оптическое усиление сигнала происходит в результате преобразования энергии накачки в энергию сигналов при распространении излучения в усилительном волокне [6,7]. Отличие между ЭВУ и тулиевыми волоконными усилителями (ТВУ) заключается в особенности усиления, определяемого ионами-активаторами и схемой накачки.

Широкому распространению ТВУ мешает недостаточно высокая прочность применяемого в усилителе оптического волокна. Еще одной проблемой является обеспечение высокого качества соединения разных по физико-химическому составу волокна ТВУ и кварцевого волокна. По причине того, что сварка данных волокон практически невозможна, применяется менее надежное механическое соединение торцов волокон, либо соединение на основе эпоксидной смолы. Данные соединения создают потери более 0,3 дБ, в отличие от потерь 0,05 дБ при способе со сваркой [7]. Также в состав волокна входит и

цирконий, который приводит к высокой себестоимости производства. В настоящее время высокая стоимость и низкая надежность ТВУ не позволяют им широко распространяться. Спектральная кривая усиления тулиевого волоконного усилителя приведена на рис. 2.

Сети передачи данных, построенные на эрбиевых и тулиевых волоконных усилителях имеют большой уровень шумов на частотах информационных сигналов, что вызвано влиянием спонтанного излучения ионов активаторов.

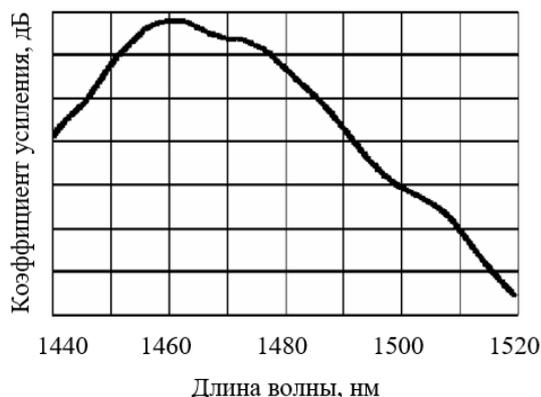


Рис. 2. Зависимость коэффициента усиления от длины волны тулиевого волоконного усилителя

Использование метода вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) света в волоконном усилителе позволяет достичь дополнительного повышения уровня сигнала без особого возрастания шума на частоте сигнала [7].

Усиление в ВКР реализовано за счет нелинейно-оптической перекачки энергии накачки в энергию Стокса с участием фоновой волны среды. Например, для получения усиления на длине волны 1550 нм, нужна накачка на длине волны 1455 нм, и в этом случае за счет широкой полосы ВКР усиления кварцевого волокна усиление происходит и на соседних частотах [7,8]. В кварцевом волокне коэффициент ВКР-усиления является поляризационно-зависимым, а наилучшее усиление происходит только тогда, когда поляризации сигнала на стоксовой частоте и частоте накачки совпадают. Высокий уровень усиления без поляризационно-зависимых потерь достигается использованием источников накачки с ортогональными поляризациями.

ВКР-усиление при соответствующей накачке происходит в любом оптическом волокне, в связи с чем его можно применять в улучшении параметров как новых, так и уже существующих оптических линий передачи информации. Чтобы сгладить кривую усиления и обеспечить больше мощности усилителя можно применять накачку на нескольких длинах волн [7,8].

Главным недостатком ВКР-усилителей является их низкая эффективность по сравнению с ЭВУ. Для усиления до уровня 30 дБ ЭВУ требуется мощность накачки примерно 50 мВт, в то время как для аналогичного усиления ВКР-усилителя нужна мощность накачки более 1 Вт [7].

В последнее время [7] появились диодные лазеры с мощностью до 1Вт и фазированные линейки диодных лазеров с мощностью более 10 Вт, что дало возможность создать более совершенные ВКР-усилители, конкурирующие с ЭВУ. В связи с чем ожидается создание доступных ВКР-усилителей. В оптических сетях ВКР-усиление может использоваться как единственный механизм усиления или в комбинации с ЭВУ. ВКР-усилители могут применяться для усиления в S-полосе (1480...1520 нм), в L-полосе (1570...1610 нм) и в диапазоне от 1642 до 1672 нм [7,8]. Спектральные кривые усиления ВКР-усилителя при накачке на одной и на двух длинах волн приведены на рис. 3.

Ни один из существующих оптических усилителей не способен соответствовать всем современным требованиям телекоммуникационных систем, поэтому в наше время активно ведутся разработки иных видов оптических усилителей.

За счет того, что полоса усиления ВКР-усилителя может сдвигаться в сторону более высоких или низких частот по отношению к полосе усиления ЭВУ [9,10], используя достаточно мощные лазеры накачки возникает возможность согласовать усилители таким образом, чтобы результирующая полоса усиления была значительно шире, чем по отдельности у каждого из усилителей. И можно значительно сгладить неравномерность кривых усиления отдельных усилителей.

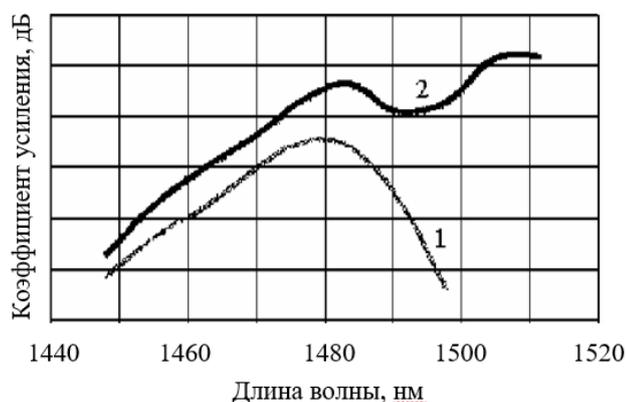


Рис. 3. Зависимости коэффициента усиления от длины волны ВКР-усилителя при накачке с использованием одной длины волны (1) и двух длин волн (2)

Экспериментальный прототип, разработанный в лаборатории Нортел Харлоу (Эссекс, Англия), по принципу данной гибридной схемы позволил достичь передачу 32-х спектральных каналов на расстояние до 1000 км с пропускной способностью каждого канала 40 Гб/с с общей скоростью передачи 1,28 Тб/с [11].

Для достижения усиления одновременно в окнах прозрачности 1310 и 1550 нм кварцевого волокна, есть возможность применить комбинированное стоксовое и антистоксовое ВКР-усиление в условиях фазового квазисинхронизма [11,12]. Чтобы обеспечить требования фазового квазисинхронизма волокно состоит из чередующихся областей с нелинейными свойствами (активные слои) и без нелинейных свойств (пассивные слои). Чтобы в каждом активном слое происходила эффективная перекачка энергии из волны накачки в антистоксовую компоненту ВКР, толщины слоев должны выбираться определенным образом. Подробное исследование свойств фазового квазисинхронизма при ВКР было проведено Беспаловым В.Г. Макаровым Н.С. [13,14]. Осуществленные с применением данной методики расчеты, показывают, что длина волокна, на которой усиление доходит до 13 дБ, равняется примерно 3 км. Спектральная кривая стоксового и антистоксового усиления в кварцевом волокне приведена на рис. 4.

Одновременное стоксовое и антистоксовое ВКР-усиление имеет все преимущества и недостатки стоксового ВКР-усиления (причем конечный коэффициент усиления слегка понижается). Главный недостаток данного метода – трудоемкость создания многослойной структуры.

Благодаря широкой полосе усиления кварцевого волокна ВКР-усиление протекает не на одной частоте, а в определенной полосе частот [14]. В связи с тем, что в широком диапазоне длины волны накачки (1400-1500 нм) слоистая структура сохраняется неизменной, то для увеличения мощности усилителя, увеличения и сглаживания полос усиления есть возможность использовать накачку на нескольких длинах волн.

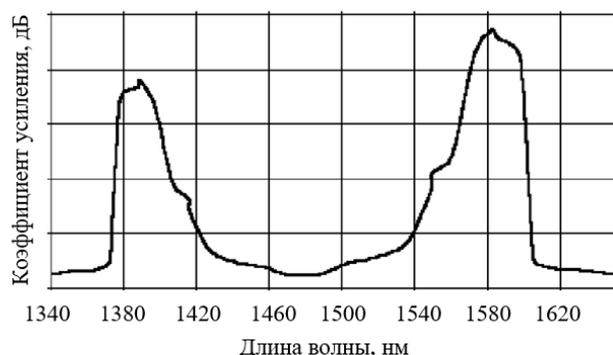


Рис. 4. Зависимость коэффициента усиления от длины волны стоксового и антистоксового усиления в кварцевом волокне

Таким образом, усовершенствование ВОСП идёт и в направлении увеличения дальности расстояния между ретрансляторами путём использования более мощных лазеров, так и в направлении исследования эффективных технологий изготовления волоконных усилителей, легированных разными редкоземельными элементами.

В заключение следует отметить, что эрбиевые и тулиевые усилители имеют больший уровень шумов на частотах информационных сигналов, чем ВКР-усилители, которые повышают уровень сигнала без особого возрастания шума.

Литература

1. Пихтин А.Н. Квантовая и оптическая электроника. Компоненты ВОЛС. – М.: Абрис, 2015. – 656 с.
2. Назаров А.М. Эффективные оптические усилители для высокоскоростных систем передачи информации на активных волокнах//ж. Доклады Академии Наук РУз. №3, 2008, с.56-58.
3. Назаров А.М. Усилитель для волоконно-оптических линий связи, использующих двухуровневые амплитудно-модулированные сигналы// Патент РУз. №04403.Официальный бюллетень 8(124), 2011, с. 70-71.
4. Trivedi D. A., Strite T., Gerlas van den Hoven. Absorption spectra // WDM solutions, 2000. № 4. P. 14-20.
5. Daniel C. McCarthy. Photonics Spectra // Optical amplifiers, 2001. № 7. P. 88-98.
6. Yvonne Carls-Powell. Pump energy // WDM solutions, 2001. № 7. P. 9, 20.
7. Islam M., Nietubyc M. Signal energy // WDM solutions, 2002. № 3. P. 53-62.
8. Hecht J. Laser Focus // World of optics. 2001. № 6. P. 135-140.
9. Берикашвили В. Элементы высокоскоростных волоконно-оптических систем. – М.: LAP Lambert Academic Publishing, 2012. – 320 с.
10. Savage N. Types of optical amplifiers // WDM solutions. 2000. № 4. P. 8.
11. Bains S. Channel transmission // WDM Solution. 2001. № 5. P. 9.
12. Bepalov V. G., Makarov N. S. Stokes and anti-Stokes Raman amplification // Proc. SPIE, 2001. V. 4605. P. 280-285.
13. Беспалов В. Г., Макаров Н. С. Фазовый квазисинхронизм // Известия РАН. Серия физическая, 2002. Т. 66. № 3. С. 350-352.
14. Bepalov V. G., Makarov N. S. Phase quasisynchronism // Proc. SPIE, 2001. V. 4268. P. 109-116.

**ПЕРСПЕКТИВЫ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ УСИЛИТЕЛЕЙ С
ПРИСАДКАМИ ИЗ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ**

А.М. Назаров, Э.И. Сиразов

**ИСТИКБОЛЛАРИ КАМЁБ ЁР МЕТАЛЛАРИ ҚАТЛАМЛАРИДАГИ ОПТИК ТОЛАЛИ
КУЧАЙТИРГИЧЛАР**

А.М. Назаров, Э.И. Сиразов

**PROSPECTS OF FIBER OPTIC AMPLIFIERS WITH RED-EARTH METALS
ADDITIVES**

A.M.Nazarov, E.I. Sirazov

Сведения об авторах:

1. Назаров Абдулазиз Муминович, д.т.н., заведующий кафедрой «Радиотехнические устройства и системы» ТГТУ им.И.А.Каримова. Домашний адрес: 100027,Ташкент, Шайхантаурский район, ул.А.Ходжаева,д.1,кв.33,тел.2457999, E-mail: nazarov_58@rambler.ru
2. Сиразов Эльдар Искандерович, студент магистратуры ТГТУ. Домашний адрес: г. Ташкент, Яшнабадский район, 22- авиагородок 14-17. E-mail eldarsirazov0511@gmail.com, тел.+99899 802 51 58.