Усилители для оптических сетей связи: достижения и перспективы

А.Ю.Игуменов, к.ф.-м.н., доцент МФТИ, инженер-исследователь ООО "Т8" / igumenov@t8.ru,
В.А.Конышев, к.ф.-м.н., начальник отдела теоретических исследований ООО "Т8", доцент РАНХиГС при Президенте РФ, Институт ЭМИТ,
С.Н.Лукиных, инженер 1-й категории ООО "Т8 НТЦ", м.н.с. МГУ им. М. В. Ломоносова,
О.Е.Наний, д.ф.-м.н., заместитель генерального директора по науке ООО "Т8", проф. МГУ им. М. В. Ломоносова,
И.И.Петренко, руководитель группы разработки научно-технической документации ООО "Т8 НТЦ",
В.Н.Трещиков, д.т.н., генеральный директор ООО "Т8", с.н.с. Фрязинского филиала ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН,
Р.Р.Убайдуллаев, к.ф.-м.н., ведущий инженер отдела теоретических исследований ООО "Т8", доцент РАНХиГС при Президенте РФ, Институт ЭМИТ

УДК 535.2, DOI: 10.22184/2070-8963.2026.139.7.56.63

Усилители мощности – ключевой элемент волоконно-оптических линий связи (ВОЛС), которые уже более 40 лет создают фундамент глобальных коммуникаций. Дальнейшее развитие основных характеристик ВОЛС невозможно без совершенствования существующих и внедрения новых типов оптических усилителей. В статье произведен обзор современных достижений в разработке и внедрении оптических усилителей разных типов.

Введение

Усилители EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier) уже много лет применяются в DWDM-системах связи, использующих диапазоны C и L. В настоящее время исследования EDFA направлены на снижение их стоимости, совершенствование конструкций усилителей с удаленной накачкой, улучшение равномерности спектра, увеличение надежности и оптимизацию других эксплуатационных характеристик [3, 4].

Для расширения рабочего спектрального диапазона многопролетных ВОЛС за пределы диапазонов C и L требуются волоконные усилители на основе других редкоземельных элементов или усилители других классов, такие как ВКР-усилители (рамановские), полупроводниковые и параметрические усилители [5].

В ВОЛС на основе традиционного кварцевого телекоммуникационного волокна доступна для оптической передачи информации спектральная полоса примерно от 1260 до 1675 нм, разделенная на шесть спектральных диапазонов: O (1260–1360 нм); E (1360–1460 нм); S (1460–1530 нм); C (1530–1565 нм); L (1565–1625 нм) и U (1625–1675 нм).

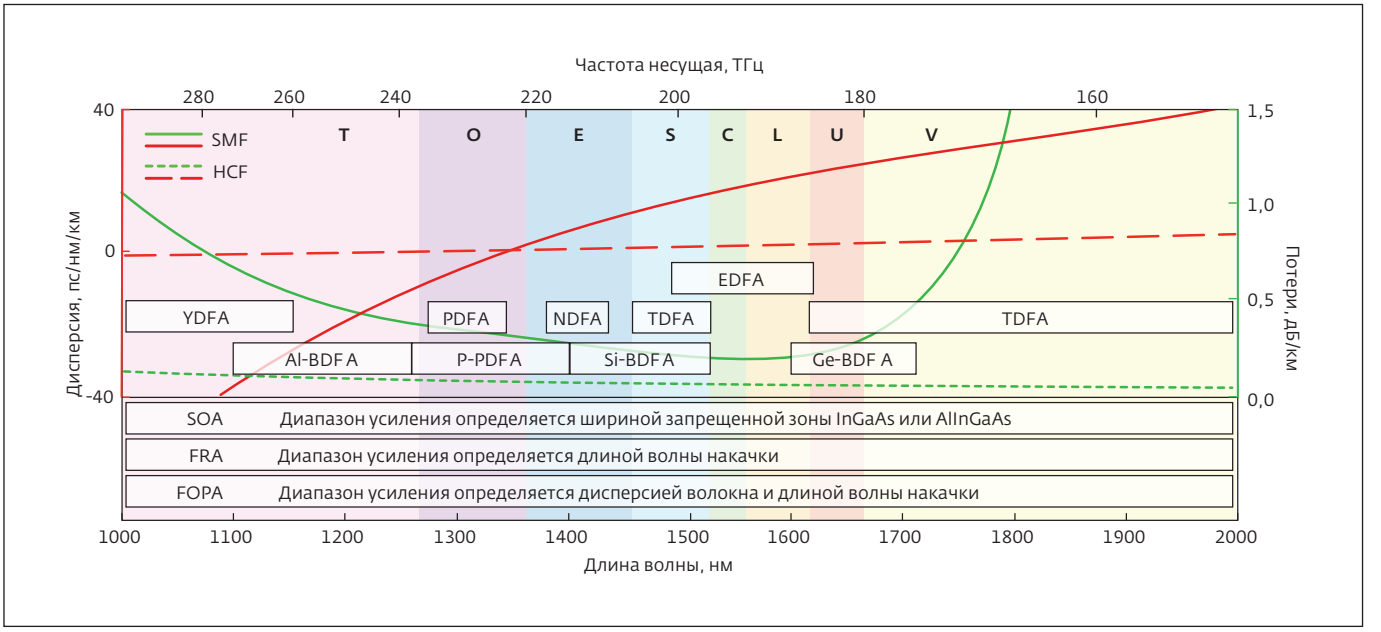


Рис.1. Телекоммуникационные диапазоны и рабочие полосы разных классов усилителей

Потери в кварцевом волокне резко растут за пределами полосы 1260–1675 нм. В недавно разработанном, но уже выпускаемом промышленно волокне с полой сердцевиной (Hollow Core Fiber – HCF) потери могут оставаться малыми в гораздо более широком спектральном диапазоне: примерно от 1000 до 2000 нм [6, 7]. В работе [8] введены два новых спектральных диапазона: T-диапазон (от 1000 до 1260 нм) и V-диапазон (от 1670 до 2000 нм). Передача данных в этих дополнительных спектральных областях обеспечивается использованием различных оптических усилителей, каждый из которых оптимизирован для определенного диапазона длин волн. На рис.1. показаны телекоммуникационные диапазоны и рабочие диапазоны оптических усилителей.

В настоящем обзоре приведен анализ достигнутого уровня телекоммуникационных применений различных классов и типов усилителей, направления их совершенствования и ожидаемые результаты.

1. Эрбиевые оптические усилители

EDFA являются наиболее коммерчески успешными оптическими усилителями благодаря широкой полосе усиления в области минимальных потерь в телекоммуникационных волокнах, то есть в C- или L-диапазоне, высокой эффективности, низкому уровню шума и большому времени релаксации люминесценции (примерно 10 мс), что обеспечивает исключительно высокое качество одновременного усиления множества спектральных каналов DWDM [9–11].

Современные исследования направлены не только на совершенствование самих эрбиевых усилителей, но и на улучшение использующих их систем связи [3, 4]. В работе [3] исследованы и разработаны оптимальные схемы оптических усилителей с удаленной накачкой для передачи информации по сверхдлинным однопролетным линиям связи.

В [4] продемонстрирована эффективность полностью оптической стабилизации коэффициента усиления эрбиевого усилителя с удаленной сонаправленной оптической накачкой (Remote Optically Pumped Amplifier – ROPA). Установлено, что этот метод можно использовать в реконфигурируемых оптических сетях, в которых изменяется общее число DWDM-каналов из-за их подключения или отключения. На рис.2 представлена схема экспериментальной установки по оптической стабилизации ROPA с сонаправленной накачкой (Forward ROPA – FROPA).

В работе [12] предложен метод динамической оптимизации усиления EDFA в реальном времени для реконфигурируемых магистральных оптических сетей с плотным спектральным мультиплексированием (DWDM), использующий модели машинного обучения.

2. Оптические усилители на основе легированных редкоземельными элементами волокон

Многополосная передача информации с использованием в дополнение к диапазонам C и L новых

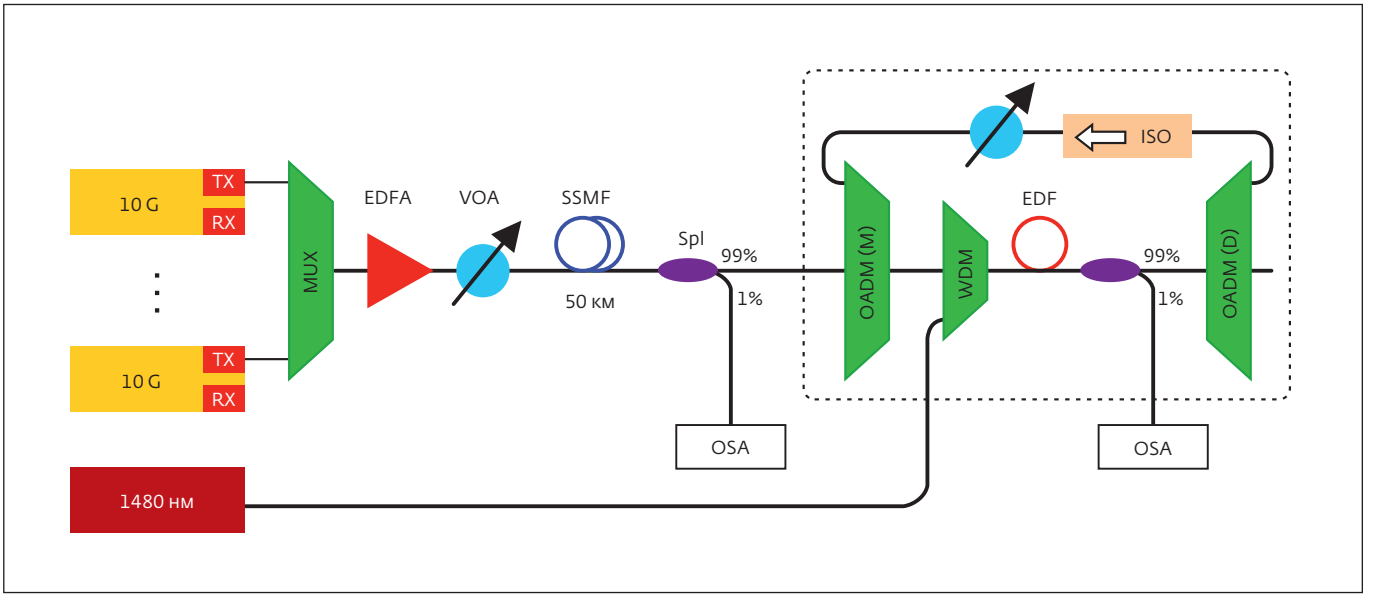


Рис.2. Схема экспериментальной установки по оптической стабилизации ROPA: 10G TX – каналы транспондеров; MUX – мультиплексор; EDFA – сосредоточенный эрбиевый усилитель; VOA (Variable Optical Attenuator) – переменный аттенюатор; SSMF – стандартное одномодовое волокно длиной 50 км; 1% spl – оптический сплиттер 1/99%; OSA (Optical Spectrum Analyzer) – анализатор оптического спектра; OADM (Optical Add-Drop Multiplexer) (M/D) – мультиплексор/демультиплексор ввода/вывода; WDM – спектрально-селективный сплиттер; EDF – оптическое волокно, легированное ионами эрбия; ISO – оптический изолятор. *Источник: [4]*

диапазонов (O, E, S и U), лежащих в широкой полосе прозрачности кварцевого волокна (1260–1675 нм, см. рис.1), – это экономичный и удобный способ расширения пропускной способности действующих сетей на существующей кабельной инфраструктуре [13]. Продемонстрированная в [13] суммарная скорость передачи в кварцевом волокне превышает 400 Тбит/с.

Для практического применения наиболее востребованы усилители O-диапазона – для масштабирования оптических межсоединений центров обработки данных ближнего действия, уже работающих в этом диапазоне. Для данного диапазона были разработаны усилители на основе легированных празеодимом (Pr^{3+}) волокон (PDFA) с полосой усиления 1280–1330 нм [5]. Однако в PDFA используются фторидные волокна (такие как ZBLAN), для обеспечения надежной работы которых требуется герметизация, что препятствует их широкому распространению.

Для использования в E-диапазоне исследовались волокна, легированные неодимом (Neodymium-Doped Fiber Amplifier – NDFA), однако NDFA обеспечивают довольно малые усиление и выходную мощность. Кроме того, в NDFA необходимо подавлять конкурирующее паразитное усиление на длинах волн 850 и 1150 нм.

Для работы в S-диапазоне можно использовать тулиевые усилители (Thulium-Doped Fiber Amplifier – TDFA) на основе фторидных стекол. Низкая температура стеклования фторидных волокон затрудняет их сварку с телекоммуникационными волокнами, что делает TDFA непрактичными для использования в системах связи. Альтернативой является EDFA для S-диапазона, который обеспечивает лишь умеренное усиление и выходную мощность [5, 8]. Для работы в U-диапазоне можно использовать тулиевые усилители TDFA и модифицированные эрбиевые усилители.

Быстрый прогресс технологии волокон с полой сердцевиной существенно расширил спектральную полосу, доступную для оптической передачи информации, которая теперь простирается от 1 до 2 мкм [6, 7] и включает в себя два новых диапазона: T (1000–1260 нм) и V (1670–2000 нм). Низкие потери (менее 0,1 дБ/км), очень слабая нелинейность в сочетании с широкой полосой пропускания делают многодиапазонную передачу особенно привлекательной для расширения пропускной способности систем оптической связи следующего поколения. Усиление в T-диапазоне могут обеспечить волоконные усилители, легированные иттербием (Ytterbium-Doped Fiber Amplifier – YDFA). YDFA основаны на зрелой

и хорошо изученной технологии, которая совершенствовалась на протяжении нескольких десятилетий. Они обеспечивают усиление до 40 дБ, шум-фактор в диапазоне 5–7,5 дБ и высокую энергоэффективность благодаря малому квантовому дефекту между длинами волн накачки и сигнала. Важно отметить, что для T-диапазона в больших масштабах выпускаются компоненты активного оборудования.

Наконец, V-диапазон может быть полностью охвачен усилителями на основе легированного тулием волокна (V-TDFA) на основе силикатных матриц [14]. В зависимости от состава и длины волокна могут быть реализованы два окна усиления: 1725–1900 нм и 1840–2020 нм. Окно 1725–1900 нм достигается с помощью относительно коротких волокон (порядка 50 см), обеспечивая усиление около 30 дБ с низким коэффициентом шума: 5–7,5 дБ. Использование более длинных волокон (1,5–5 м) расширяет диапазон работы до 1840–2020 нм и позволяет достичь усиления до 40 дБ, хотя и с более высоким шум-фактором 5–12 дБ [15]. Как и в U-диапазоне, в этой области спектра отсутствуют полупроводниковые лазеры для передатчиков.

Полоса усиления BDFA, в отличие от полос усиления волокон, легированных редкоземельными элементами, сильно зависит от состава кварцевого волокна и от длины волны накачки. Варьируя эти параметры, удается создавать усилители с полосами усиления почти во всех диапазонах.

В недавно разработанных и уже выпускаемых серийно висмутовых усилителях O-диапазона используются фосфосиликатные волокна ((P)-BDFA), которые легко сваривать с телекоммуникационными волокнами, что делает более практичным их использование в сравнении с празеодимовыми волоконными усилителями (PDFA). Длина волны накачки (P)-BDFA для работы в O-диапазоне находится в полосе от 1200 до 1300 нм и обеспечивает диапазон усиления приблизительно 1250–1360 нм.

Усиление в E-диапазоне обеспечивают (P)-BDFA и германо-силикатные висмутовые волокна (SiGe)-BDFA. Наибольшую полосу усиления обеспечивают (P)-BDFA, однако в (SiGe)-BDFA достигается более высокая эффективность преобразования энергии и более высокий коэффициент усиления слабого сигнала в диапазоне 1390–1470 нм. Работу в T-диапазоне могут поддерживать висмутовые волоконные усилители на основе алюмосиликатного волокна (Al-BDFA) с полосой усиления 1150–1250 нм. В U-диапазоне и частично в V-диапазоне работают германатные висмутовые усилители Ge-BDFA с полосой усиления 1660–1760 нм [8].

3. Полупроводниковые оптические усилители

Еще один класс усилителей, способных работать в любом диапазоне длин волн в инфракрасной области, – это полупроводниковые усилители (SOA). Управление спектром усиления достигается модификацией структуры составных полупроводниковых материалов. Достоинство SOA – возможность интегрального исполнения [16]. Однако из-за быстрой релаксации усиления в SOA возникают сильные нелинейные искажения усиленных оптических сигналов.

Тем не менее, SOA могут работать в насыщенном режиме, когда нелинейные искажения ослаблены. Были продемонстрированы полупроводниковые оптические усилители с полосой усиления 100 нм, КУ 17 дБ и средним шум-фактором 6,5 дБ, успешно усиливающие DWDM-сигналы с интегральной скоростью 100 Тбит/с [17]. Помимо этого, в [17] показано, что увеличение количества WDM-каналов снижает нелинейные искажения, возникающие в режиме насыщения SOA, что делает такие усилители перспективными для сверхширокополосных систем передачи.

Малые размеры, низкое потребление энергии и экономичность SOA позволяют надеяться на их практическое применение в недалеком будущем.

Благодаря быстрому развитию технологии квантовых ям (Quantum Well – QW) SOA постепенно преодолевают недостатки, связанные с поляризационной чувствительностью и высоким уровнем шума. Есть основания полагать, что дальнейшее развитие оптоэлектронной промышленности и разработка новых технологий неизбежно будут способствовать устойчивому совершенствованию технологии SOA. Полупроводниковые оптические усилители привлекают особое внимание как усилители в гигабитных пассивных оптических сетях и в целом в сетях доступа.

4. Усилители на основе вынужденного комбинационного рассеяния

Преимущество ВКР-усиления, как дискретного с использованием специальных высоко-нелинейных волокон (Highly Nonlinear Fiber – HNLF), так и распределенного в передающих волокнах, состоит в возможности управления спектром усиления путем

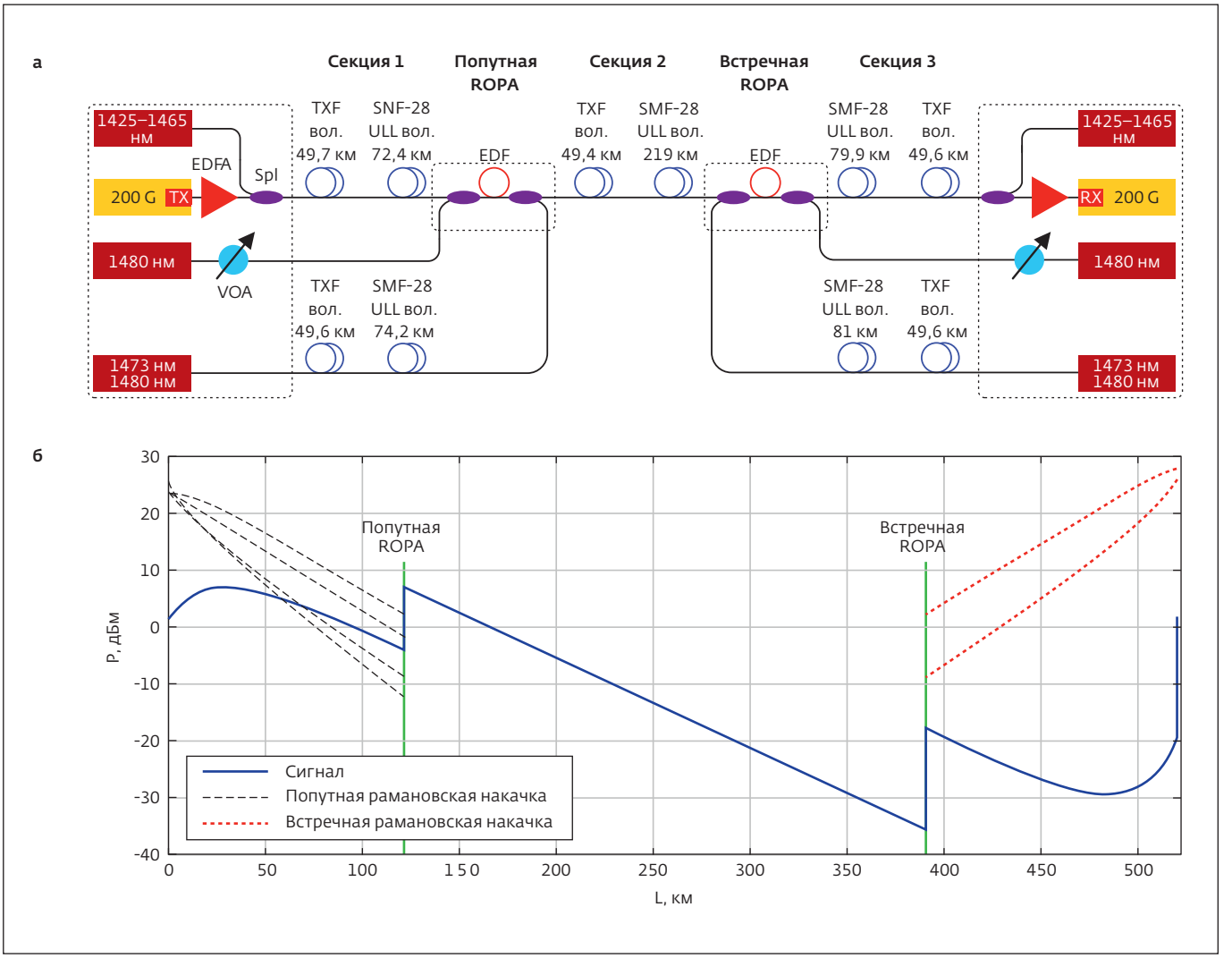


Рис.3. Схема экспериментальной установки для одноканальной передачи со скоростью 200 Гбит/с (а). Зависимость оптической мощности сигнала и рамановских накачек в сигнальном волокне (б). *Источник: [20]*

варьирования длины волны накачки. Спектр ВКР-усиления в кварцевом волокне при монохроматической накачке довольно широк (примерно 5 ТГц) благодаря аморфной природе кварцевого стекла и может быть значительно расширен при полихроматической накачке. Правильно рассчитанная многоволновая накачка обеспечивает плоский профиль усиления в полосе более 100 нм без использования сглаживающих фильтров.

Работа [18] посвящена использованию многоступенчатого дискретного ВКР-усиления широкополосного сигнала в диапазонах E–L, обеспечивающего передачу в полосе 25 ТГц (195 нм). Недостаток дискретных ВКР-усилителей – сильные нелинейные искажения из-за большой длины усиливающего волокна (примерно 10 км).

Распределенные усилители превосходят дискретные усилители по уровню шума, однако их коэффициент усиления ограничен двойным рэлеевским рассеянием. Самый широкий достигнутый спектр распределенного рамановского усиления составил 200 нм [19].

В настоящее время ВКР-усилители используют в дополнение к EDFA с удаленной накачкой для увеличения дальности работы ВОЛС (в C-диапазоне), в частности линий со сверхдлинными пролетами [20]. На рис.3 приведена схема из [20], в которой демонстрируется передача сигнала со скоростью 200 Гбит/с в реальном времени без повторителей по наземному волоконно-оптическому каналу связи протяженностью 520 км.

Это было достигнуто с использованием волокон со сверхнизкими потерями и большой эффективной

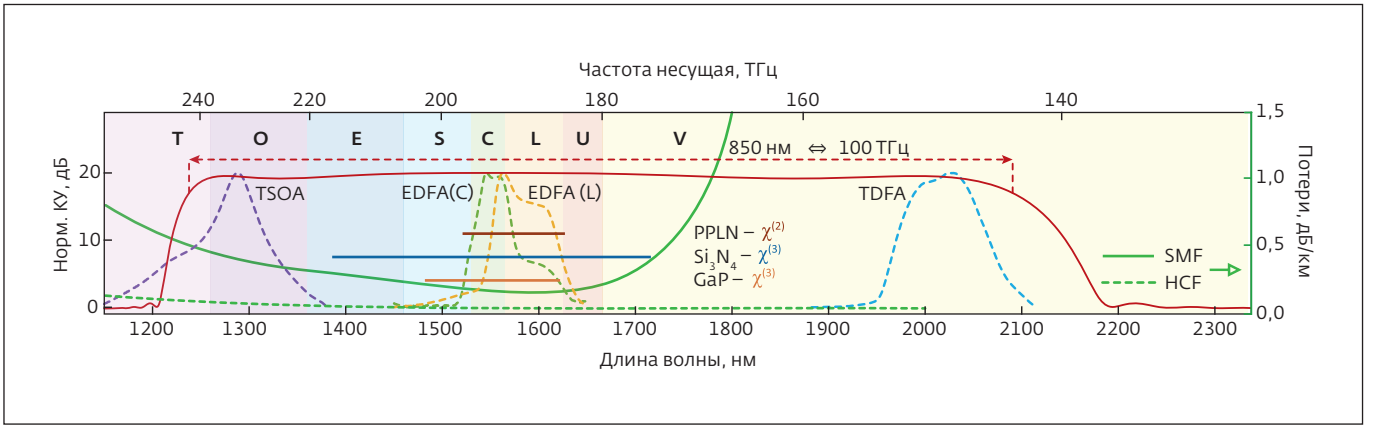


Рис.4. Сравнение полосы усиления оптического параметрического усилителя PPLT, продемонстрированного в работе [22] (сплошная красная линия), с другими усилителями. Полоса усиления по уровню 3 дБ усилителя PPLT, достигающая 850 нм, отмечена красной стрелкой. Зеленые и желтые пунктирные линии – усилители EDFA C- и L-диапазона, соответственно. Фиолетовая пунктирная линия в O-диапазоне – «конический» полупроводниковый оптический усилитель (TSOA). Светло-голубая пунктирная линия на больших длинах волн – тулиевый волоконный усилитель (TDFA). Все профили усиления нормализованы и предназначены только для сравнения полос пропускания; значения усиления (КУ) выровнены. Цветные полосы показывают спектры усиления современных интегральных фотонных параметрических усилителей, использующих квадратичную (x^2) и кубическую (x^3) нелинейности. Жирной зеленой сплошной линией показан спектр потерь стандартного телекоммуникационного волокна, а жирной зеленой пунктирной – спектр потерь волокна с полой сердцевиной (HCF)

площадью, ROPA с выделенными волокнами и распределенных рамановских усилителей с попутными и встречными накачками.

В работе [21] экспериментально исследована система оптической стабилизации коэффициента усиления ВКР-усилителя. Для оптической стабилизации создана спектрально-селективная в пределах одного канала оптическая обратная связь в виде линейного резонатора на фарадеевских зеркалах. Показано, что оптическая стабилизация позволяет уменьшить вариации коэффициента усиления при изменении мощности лазеров накачки и суммарной входной мощности многоканального сигнала.

5. Параметрические усилители

Обеспечить широкие полосы усиления оптических сигналов могут волоконные параметрические усилители (FOPA) [5]. Спектр усиления определяется хроматической дисперсией волокна и длиной волны накачки. FOPA работают в однонаправленном режиме, что устраняет необходимость использования оптических изоляторов. FOPA также используются в качестве устройств фазового сопряжения оптических сигналов и для преобразования спектров широкополосных DWDM-сигналов.

Для широкополосных FOPA разработаны и выпускаются высоконелинейные волокна. В то же время параметрические усилители могут быть реализованы в интегральном исполнении (на чипе).

Чувствительные к фазе параметрические усилители (ФЧПУ, Phase-Sensitive Amplifier – PSA) характеризуются зависимостью усиления/ослабления сигнала от соотношения фаз входного сигнала, накачки и холостой волны. Шум-фактор ФЧПУ может быть снижен до 0 дБ, тогда как шум-фактор обычных усилителей не может быть меньше 3 дБ [9].

Поскольку для работы чувствительных к фазе усилителей (PSA) требуется точное согласование оптических фаз и состояний поляризации накачки, усиливаемого и холостого сигналов, их практическая применимость с использованием кубической нелинейности в оптических волокнах остается очень ограниченной [5].

Существенно ближе к практическому использованию могут оказаться параметрические усилители в интегральном исполнении, использующие квадратичную нелинейность в средах с периодически изменяемой поляризацией на основе тонкопленочного ниобата лития (Periodically Poled Lithium Niobate – PPLN) и танталата лития (Periodically Poled Lithium Tantalate – PPLT).

В дополнение к общим преимуществам параметрических усилителей – низкому уровню шума, однонаправленному усилению и генерации фазово-сопряженного сигнала на частоте холостой волны – оптические

параметрические усилители в интегральном исполнении обладают низким энергопотреблением, малыми размерами и возможностью усиления в очень широком спектральном диапазоне.

Недавно в работе [22] было продемонстрировано каскадное оптическое параметрическое усиление непрерывного излучения с широкой (до 850 нм) и равномерной полосой усиления.

На рис.4 приведено сравнение полосы усиления оптического параметрического усилителя на квадратичной нелинейности в волноводах из тонкопленочного танталата лития с периодической поляризацией (PPLT) с полосами усилителей других типов [22].

Сравнение экстремально-широкого спектра усиления оптического параметрического усилителя (PPLT), достигнутого в [22], со спектрами затухания волокон разного типа показывает, что полностью потенциал нового типа усилителей может быть раскрыт только в сочетании с новым типом оптических волокон с полой сердцевиной.

Заключение

Ближайшие десятилетия развития оптической связи, скорее всего, будут посвящены решению ключевых задач, направленных на то, чтобы сделать волоконно-оптические сети более эффективными и практичными. При этом акцент смещается с масштабных исследовательских проектов по достижению рекордных скоростей передачи информации в сторону изучения энергоэффективности, надежности и возможности плавного перехода от современных к инновационным технологиям с сохранением существующей кабельной инфраструктуры.

Для успешного дальнейшего развития телекоммуникаций совершенствование технологий оптического усиления является одним из важнейших факторов. Последние достижения в области волоконных усилителей на основе активных примесей демонстрируют, что эффективное оптическое усиление теперь может быть достигнуто далеко за пределами наиболее освоенных диапазонов C и L.

Наряду с традиционными диапазонами (O, E, S, C, L, U) можно ожидать начало освоения новых для волоконно-оптической связи диапазонов: T (1000–1260 нм) и V (1675–2000 нм) с использованием волокон с полой сердцевиной и параметрических усилителей на основе волноводов из тонкопленочного танталата/ниобата лития с периодической поляризацией (PPLT/PPLN).

Больших достижений в практическом применении висмутовых волоконных усилителей можно ожидать уже в ближайшее время. Для этого необходимо решить задачи совершенствования контроля и управления составом матрицы волокна, выбора оптимальной концентрации примеси и подавления паразитных эффектов.

Благодаря углубленным исследованиям и технологическому прогрессу, а также зрелости теории квантовых точек и связанных с ней технологий, следующее поколение мощных полупроводниковых оптических усилителей (SOA) в диапазоне 1550 нм сможет решить существующие проблемы высокого уровня шума, поляризационной чувствительности и сильной нелинейности. Можно ожидать, что благодаря своим беспрецедентным преимуществам в стоимости и интеграции, мощные SOA будут играть ключевую роль в будущем развитии оптоэлектроники. Есть основания полагать, что непрерывное развитие оптоэлектронной промышленности, разработка новых технологий и постоянное появление новых требований будут способствовать устойчивому развитию и дальнейшему успеху технологии SOA.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Конышев В.А.** и др. Тенденции и перспективы развития волоконно-оптических систем передачи информации // Квантовая электроника. 2022. Т. 52. № 12. С. 1102–1113.
2. **Трещиков В.Н.** и др. Достижения и перспективы отечественных DWDM-систем связи // Фотоника. 2022. Т. 16. № 7. С. 564–583.
3. **Жулидова М.О.** и др. Влияние параметров накачки на максимальную длину однопролетных линий связи с эрбиевыми усилителями с удаленной оптической накачкой // Квантовая электроника. 2025. Т. 55. № 3. С. 182–193.
4. **Игуменов А.Ю.** и др. Полностью оптическая стабилизация коэффициента усиления волоконного усилителя с удаленной оптической накачкой // Квантовая электроника. 2023. Т. 53. № 6. С. 484–489.
5. **Agrell E.** et al. Roadmap on optical communications // Journal of Optics. 2024. Vol. 26. P. 093001.
6. **Petrovich M.** et al. Broadband optical fibre with an attenuation lower than 0.1 decibel per kilometre // Nature Photonics. 2025. Vol. 19. PP. 1203–1208.
7. **Прямиков А.Д.** и др. Полые световоды: современное состояние и перспективы развития // УФН. 2024. Т. 194. № 2. С. 138–168.
8. **Donodin A.** et al. What's Next for Doped-Fiber Amplifiers? New Materials, Spectral Bands, and Applications // Optical Fiber Communication Conference (OFC). 2026. P. Tu3D.1.

9. **Трещиков В.Н.**, **Листвин В.Н.** DWDM системы. М.: ТЕХНОСФЕРА, 2024. 476 с.
10. **Курков А.С.** и др. Эрбиевые волоконно-оптические усилители // Lightwave RE. 2003. № 1. С. 14–19.
11. **Убайдуллаев Р.Р.** Протяженные ВОЛС на основе EDFA // Lightwave RE. 2003. № 1. С. 22–28.
12. **Xu Z.** et al. Bridging Static Modeling and Real-Time Control: A Hybrid AI-Physics Approach for EDFA Gain Dynamics // Optical Fiber Communication Conference (OFC). 2026. P. M2E.3.
13. **Puttnam B.** et al. 402 Tb/s GMI data-rate OESCLU-band transmission // Optical Fiber Communication Conference (OFC). 2024. P. Th4A–3.
14. **Курков А.С.** Волоконные усилители двухмикронного диапазона (обзорная статья) // Прикладная фотоника. 2015. Т. 2. № 1. С. 88-101.
15. **Aubrecht J.** et al. Broadband thulium fiber amplifier for spectral region located beyond the L-band // Opt. Express. 2024. Vol. 32. No. 10. PP. 17932–17941.
16. **Konoike R.** et al. SOA-integrated silicon photonics switch and its lossless multistage transmission of high-capacity WDM signals // J. Lightwave Technol. 2019. Vol. 37. PP. 123–130.
17. **Renaudier J.** et al. Recent Advances in 100+nm Ultra-Wideband Fiber-Optic Transmission Systems Using Semiconductor Optical Amplifiers // J. Lightwave Technol. 2020. Vol. 38. PP. 1071–1079.
18. **Hazarika P.** et al. E-, S, C- and L-band coherent transmission with a multistage discrete Raman amplifier // Opt. Express. 2022. Vol. 30. No. 24. P. 43118.
19. **Tanaka T.** et al. 200-nm bandwidth WDM transmission around 1.55 μm using distributed Raman amplifier // European Conf. on Optical Communication. 2002. P. 28TH.
20. **Starykh D.** et al. 200 Gb/s per Channel Unrepeatered Transmission Over 520 km Terrestrial Fibers // IEEE Photon. Technol. Lett. 2019. Vol. 31. P. 1799.
21. **Игуменов А.Ю.** и др. Оптическая стабилизация распределенного волоконного усилителя на вынужденном комбинационном рассеянии // Журнал технической физики. 2024. Т. 94. № 4. С. 652–657.
22. **Kuznetsov N.** et al. All-band photonic integrated optical parametric amplification [Электронный ресурс]. URL: https://arxiv.org/abs/2605.22704 (дата обращения 26.08.2026).

