

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего профессионального образования  
«Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет»

# **ПРИКЛАДНАЯ ФОТОНИКА**

№ 1

Издательство  
Пермского национального исследовательского  
политехнического университета  
2014

УДК 621.383

П

В журнале публикуются статьи, содержащие фундаментальные и прикладные результаты в области лазерной оптики, в том числе связанные с исследованиями в области технологии и свойств оптических компонентов, источников, приемников и преобразователей оптического излучения, оптических коммуникаций, оптических датчиков и информационных систем, лазерных технологий обработки материалов, фотоники в биологии и медицине, радиофотоники.

Предназначено для научных сотрудников, специализирующихся в области фотоники и оптоэлектронного приборостроения, студентов старших курсов направлений «Фотоника и оптоэлектроника», «Приборостроение», «Лазерная техника», «Волоконная оптика».

**Главный редактор:** *А.С. Курков*, д-р физ.-мат. наук (Москва, Россия)

**Заместитель главного редактора:** *В.П. Первадчук*, д-р техн. наук, профессор (Пермь, Россия)

**Ответственный секретарь:** *Т.А. Осечкина*, канд. физ.-мат. наук (Пермь, Россия)

**Редакционная коллегия:**

*Е.М. Дианов*, акад. РАН (Москва, Россия)

*Ю.Н. Кульчин*, акад. РАН (Владивосток, Россия)

*В.П. Матвеев*, акад. РАН (Пермь, Россия)

*С.А. Бабин*, чл.-корр. РАН (Новосибирск, Россия)

*А.Н. Гурьянов*, чл.-корр. РАН (Нижний Новгород, Россия)

*А.Б. Волынец*, д-р физ.-мат. наук, профессор (Пермь, Россия)

*Н.А. Гиппиус*, д-р физ.-мат. наук, профессор (Сколтех, Москва)

*В.В. Криштон*, д-р физ.-мат. наук, профессор (Хабаровск, Россия)

*А.С. Курков*, д-р физ.-мат. наук (Москва, Россия)

*О.Е. Наний*, д-р физ.-мат. наук, профессор (Москва, Россия)

*В.П. Первадчук*, д-р техн. наук, профессор (Пермь, Россия)

*Д.И. Семенцов*, д-р физ.-мат. наук, профессор (Ульяновск, Россия)

*Е.В. Сорокин*, профессор (Венский технический университет, Австрия)

*Н.А. Труфанов*, д-р физ.-мат. наук, профессор (Пермь, Россия)

*С.К. Турицын*, профессор (университет Астон, Бирмингем, Англия)

*М.П. Федорук*, д-р физ.-мат. наук, профессор (Новосибирск)

*А.И. Цаплин*, д-р техн. наук, профессор (Пермь, Россия)

*В.Б. Цветков*, д-р физ.-мат. наук, профессор (Москва, Россия)

*И.Н. Шардаков*, д-р физ.-мат. наук, профессор (Пермь, Россия)

*В.Я. Шур*, д-р физ.-мат. наук, профессор (Екатеринбург, Россия)

*Ю.В. Чеботаревский*, д-р физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)

*Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).  
Свидетельство о регистрации: ПИ № ФС77-59184 от 3 сентября 2014 г.*

ISBN 978-5-398-01336-8

© ПНИПУ, 2014

## СОДЕРЖАНИЕ

<i>Фирстов С.В., Алышев С.В., Мелькумов М.А., Рюмкин К.Е., Шубин А.В., Дианов Е.М.</i> Волоконные световоды, легированные висмутом, – новая активная среда для лазеров и усилителей ближнего ИК-диапазона.....	5
<i>Вебер А.А., Пырков Ю.Н., Серегин В.С., Русанов С.Я., Бессарабская И.Э., Цветков В.Б.</i> Экспериментальные исследования оптических характеристик стали при высоких температурах.....	19
<i>Леонов А.В., Наний О.Е., Трещиков В.Н.</i> Усилители на основе вынужденного комбинационного рассеяния в оптических системах связи .....	26
<i>Смирнов А.С., Бурдин В.В., Константинов Ю.А.</i> Об оценке <i>h</i> -параметра в сохраняющем поляризацию оптическом волокне на основе данных поляризационной рефлектометрии.....	50
<i>Ляпин А.А., Рябочкина П.А., Чабушкин А.Н., Ушаков С.Н., Федоров П.П.</i> Визуализатор двухмикронного лазерного излучения на основе CaF <sub>2</sub> :Ho.....	57
<i>Белюсов А.А., Вольхин Ю.Н., Гамиловская А.В., Дубровская А.А., Тихонов Е.В.</i> О применении методов и средств радиофотоники для обработки сигналов дециметрового, сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн.....	64
<i>Первадчук В.П., Давыдов А.Р.</i> Имитационная модель процесса вытяжки кварцевых оптических волокон ....	86
<i>Труфанов А.Н., Труфанов Н.А.</i> О моделях формирования напряженного состояния в анизотропных оптических волокнах.....	96
<i>Бессонов Д.А., Конюшин А.В., Попов И.А., Соколова Т.Н., Сурменко Е.Л.</i> Улучшение характеристик автоэмиссионных катодов из стеклоуглерода методом прогрессивного лазерного структурирования .....	111
<i>Генинг Т.П., Воронова О.С., Долгова Д.Р., Абакумова Т.В., Полуднякова Л.В., Курков А.С., Золотовский И.О.</i> Влияние лазерного излучения на длине волны 1265 нм на редокс-зависимые процессы в организме-опухоленосителе .....	119
<i>Филатова С.А., Цветков В.Б., Курков А.С.</i> Импульсный гольмиевый волоконный лазер с длиной волны излучения 2,1 мкм для медицинского применения.....	128

УДК 681.7.068: 621.375

**А.В. Леонов<sup>1</sup>, О.Е. Наний<sup>1,2</sup>, В.Н. Трещиков<sup>1</sup>**<sup>1</sup> ООО «Т8», Москва, Россия<sup>2</sup> Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
Москва, Россия

## **УСИЛИТЕЛИ НА ОСНОВЕ ВЫНУЖДЕННОГО КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЙЯНИЯ В ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ СВЯЗИ**

Представлен обзор истории разработки и применения ВКР-усилителей, включая распределенные, дискретные (или точечные) и гибридные ВКР-усилители. Рассмотрен принцип работы ВКР-усилителя, физические механизмы спонтанного комбинационного рассеяния света (КРС) и вынужденного комбинационного рассеяния света (ВКР). Приведены формулы для расчета коэффициента усиления слабого сигнала в процессе ВКР в телекоммуникационном волокне, а также коэффициента усиления с учетом насыщения. Приведена экспериментальная зависимость коэффициента комбинационного усиления материала от разности частот накачки и сигнала для кварцевого волокна. Рассмотрены схемы оптических систем связи с распределенными ВКР-усилителями с разными вариантами накачки, а также ВКР-усилители с полихроматической накачкой. В заключение проанализированы преимущества и недостатки применения ВКР-усилителей в системах связи.

**Ключевые слова:** ВКР-усилитель, рамановский усилитель, ON/OFF-усиление, двунаправленная накачка, многокаскадная накачка, полихроматическая накачка.

**A.V. Leonov<sup>1</sup>, O.E. Nanii<sup>1,2</sup>, V.N. Treshchikov<sup>1</sup>**<sup>1</sup> Company "T8", Moscow, Russian Federation<sup>2</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

## **RAMAN AMPLIFIERS IN OPTICAL COMMUNICATION SYSTEMS**

An overview of the history of development and application of Raman amplifiers is provided (including distributed, discrete and hybrid Raman amplifiers). The principle of Raman amplifier is discussed, as well as physical mechanisms of spontaneous Raman scattering (RS) and stimulated Raman scattering (SRS). The formulas are presented for calculating of the SRS small-signal gain in the telecommunication fiber, and for calculating of the SRS gain taking into account the saturation. The experimental dependence of the Raman gain of the material on the difference between the pumping frequency and signal frequency for quartz fiber is shown. Schemes of optical communication systems with distributed Raman amplifiers with different methods of pumping are discussed, as well as Raman amplifiers with polychromatic pumping. In conclusion, the advantages and drawbacks of implementation of the Raman amplifiers in communication systems are analyzed.

**Keywords:** Raman amplifier, ON-OFF gain, bidirectional pumping, multi-stage pumping, polychromatic pumping.

ВКР-усиление в оптическом волокне было впервые продемонстрировано в 1973 г. Столеном и Иппеном [1]. В ВКР-усилителях часть излучения накачки преобразуется в излучение на частоте сигнальной волны в результате когерентного процесса, который в отечественной научной литературе получил название вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР), а в зарубежной литературе – вынужденного рамановского рассеяния (stimulated Raman scattering, SRS). Соответственно, в зарубежной литературе и технике связи ВКР-усилители называются рамановскими усилителями (Raman amplifier, RA).

В середине 1980-х гг. в литературе обсуждалась перспективность ВКР-усилителей для телекоммуникационных применений, но до практики дело так и не дошло – в определенной мере из-за появления в конце десятилетия высокоэффективных эрбиевых усилителей. В применявшихся тогда системах связи мощность световых сигналов не превышала нескольких милливатт, и эрбиевые усилители существенно превосходили ВКР-усилители по эффективности накачки, а главное – они могли работать с маломощными полупроводниковыми лазерами накачки.

В конце 1990-х гг. интерес к ВКР-усилителям возродился вновь. Это было связано в первую очередь с потребностью в увеличении скорости передачи информации по линиям дальней и сверхдальней связи. Для этого нужны усилители, способные работать во всех спектральных областях, включая область 1300 нм и S-область, открывшуюся в связи с созданием волокон без водородного пика поглощения. ВКР-усилители благодаря широкой полосе усиления и отсутствию привязки к длине волны удовлетворяют этим требованиям. Так, были продемонстрированы полосы усиления шириной до 100 нм [2–4], причем во всем окне прозрачности от 1300 до 1650 нм.

ВКР-усилители могут быть распределенными, дискретными (или точечными) и гибридными [3, 5]. Они могут использоваться либо совместно с эрбиевыми усилителями, либо без них. Интерес к ВКР-усилителям стимулируется развитием технологии спектрального мультиплексирования [6].

Кроме того, в ВКР-усилителях на одном участке волокна можно комбинировать усиление и компенсацию дисперсии [3, 5]. На выходе волокна, компенсирующего дисперсию, усиление превышает потери, благодаря чему растет энергетический запас системы и появляется возможность включать в систему другие элементы, такие как мультиплексоры ввода-вывода (OADM, optical add-drop multiplexers).

Распределенный ВКР-усилитель – это усилитель, в котором в качестве среды усиления выступает само телекоммуникационное волокно. Применение распределенных ВКР-усилителей в волоконно-оптических линиях связи снижает шумы и нелинейные искажения, благодаря чему можно использовать более длинные участки волокна, более высокую скорость передачи, меньшие промежутки между каналами, а также приблизить рабочий диапазон к длине волны нулевой дисперсии.

Множество экспериментов продемонстрировали достоинства распределенных ВКР-усилителей [7–14]. Среди них эксперименты на подводных линиях без использования повторителей [9], демонстрация наземных и подводных систем связи с высокой пропускной способностью [10–12], одноканальных систем из небольших участков со скоростью передачи 320 Гбит/с [13] и солитонных систем [14].

Несмотря на сравнительно долгую историю исследования распределенных ВКР-усилителей, только недавно предложено применять многокаскадную систему накачки. Такая накачка в еще большей степени снижает нежелательные изменения мощности сигнала вдоль оптического волокна [8, 15–19]. Таким образом, ВКР-усилители не только стали неотъемлемой частью современных систем дальней и сверхдальней связи, но и сохраняют потенциал дальнейшего развития.

### **1. Принцип работы ВКР-усилителя**

Комбинационное рассеяние – результат взаимодействия в нелинейной среде между световым излучением и флуктуациями поляризации среды, вызванными колебаниями заряженных частиц. Такое взаимодействие приводит к обмену энергией между световой волной и средой и к возникновению или усилению рассеянных световых волн. Если интенсивность световой волны невелика, то ее влиянием на колебания среды можно пренебречь. В этом случае рассеяние происходит на хаотических тепловых колебаниях заряженных частиц, и данное явление называется спонтанным комбинационным рассеянием света (КРС).

В кварцевом волокне тепловые колебания ионов Si и O на частоте  $\Omega_{AK}$  приводят к модуляции поляризации среды на комбинациях частот, равных  $\omega \pm \Omega_{AK}$ , где  $\omega$  – частота световой волны накачки. Вследствие этого возникает излучение на комбинационных частотах  $\omega - \Omega_{AK}$  (стоксова компонента) и  $\omega + \Omega_{AK}$  (антистоксова компонента). На языке энергии фотонов стоксова компонента соответствует рассеянию с по-

терей энергии фотонами, а антистоксова компонента – рассеянию с ростом энергии фотонов.

Сдвиги стоксовой и антистоксовой компонент по длине волны различаются и зависят от длины волны накачки. В кварцевых волокнах КРС вызывает сдвиг частоты сигнала на величину примерно  $\pm 13$  ТГц от частоты волны накачки, что соответствует сдвигу длины волны примерно на  $-90$  и  $+85$  нм для накачки на длине волны 1480 нм.

При вынужденном комбинационном рассеянии (ВКР) в оптическом волокне падающая электромагнитная волна достаточно большой мощности (волна накачки), взаимодействуя с сигнальной волной, когерентно возбуждает колебательную моду молекулы кварца ( $\text{SiO}_2$ ). В процессе распространения по волокну энергия излучения накачки преобразуется в энергию упругих колебаний молекул среды и в энергию сигнальной волны. Сигнальная волна, наоборот, усиливается за счет энергии волны накачки (рис. 1, 2).

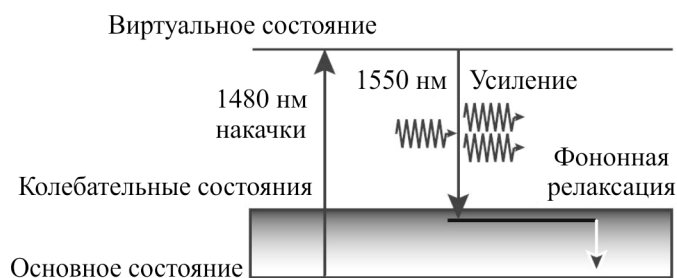


Рис. 1. Механизм ВКР

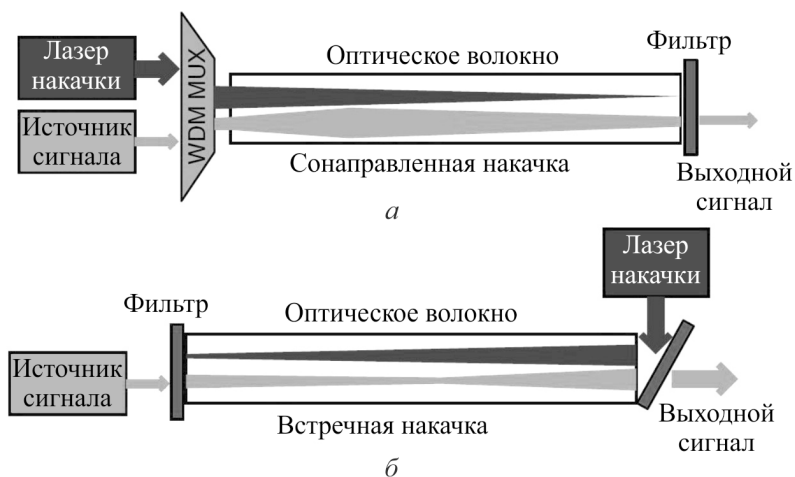


Рис. 2. Оптические схемы ВКР-усилителей с сонаправленной (а) и встречной (б) накачками

## 2. Коэффициент усиления слабого сигнала ВКР-услителем (ON/OFF-усиление)

Коэффициент усиления слабого сигнала в процессе ВКР в телекоммуникационном волокне определяют следующим выражением:

$$G_R(\lambda, L) \equiv \frac{P_S(L)}{P_S(0) \exp(-\alpha_S L)} = \exp \int_0^L g_R(\lambda) k_{\text{pol}} P_P(z) dz, \quad (1)$$

где  $P_P(z)$  – зависимость мощности накачки от координаты вдоль оси усилителя;  $P_S(0)$  – мощность сигнала на входе в усилитель;  $P_S(L)$  – мощность сигнала на выходе из усилителя;  $g_R(\lambda)$  – коэффициент комбинационного усиления, зависящий от характеристик волокна;  $k_{\text{pol}}$  – коэффициент, зависящий от поляризации сигнала и накачки ( $k_{\text{pol}} = 1$  при совпадающих поляризациях и  $k_{\text{pol}} = 0,5$  для полностью деполяризованной накачки; для ортогональных поляризаций  $k_{\text{pol}} \ll 1$ ).

Поскольку  $G_R(\lambda, L)$  – это отношение мощности сигнала на выходе волокна при включенном усилителе к мощности сигнала на выходе при выключенном ВКР-усилителе, его называют ON/OFF-усилением.

Подставим значение для  $P_P(z) = \exp(-\alpha_P z) P_{0P}$  в формулу (1):

$$\begin{aligned} G_R(\lambda, L) &= \exp \int_0^L g_R k_{\text{pol}} P_P(z) dz = \\ &= \exp(g_R k_{\text{pol}} \int_0^L P_{0P} \exp(-\alpha_P z) dz) = \exp(g_R k_{\text{pol}} P_{0P} L_{\text{eff}}), \end{aligned}$$

где

$$L_{\text{peff}} = \int_0^L \exp(-\alpha_P z) dz = \frac{1 - \exp(-\alpha_P L)}{\alpha_P}. \quad (2)$$

Итоговая короткая формула для коэффициента ON/OFF-усиления слабого сигнала:

$$G_{R,\text{ON/OFF}} = \exp(g_R k_{\text{pol}} P_{0P} L_{\text{eff}}). \quad (3)$$

Коэффициент комбинационного усиления волокна  $g_R$  может быть связан с эффективностью комбинационного усиления материала  $g_M$  и эффективной площадью сечения волокна  $A_{\text{eff}}$ :

$$g_R = g_M / A_{\text{eff}}. \quad (4)$$

Экспериментальная зависимость коэффициента комбинационного усиления материала  $g_M^{\text{ref}}$  на референсной длине волны накачки  $\lambda_{\text{ref}} = 1$  мкм от разности частот накачки и сигнала для кварцевого волокна приведена на рис. 3 [20]. Максимум коэффициента усиления достигается на частоте, смещенной относительно частоты накачки примерно на 13 ТГц. Форма кривой не зависит от длины волны накачки, а эффективность комбинационного усиления материала  $g_M$  на другой длине волн накачки  $\lambda_P$  связана с  $g_M^{\text{ref}}$  следующим выражением:

$$g_M = g_M^{\text{ref}} \frac{\lambda_{\text{ref}}}{\lambda_P} = g_M^{\text{ref}} \frac{v_P}{v_{\text{ref}}}. \quad (5)$$

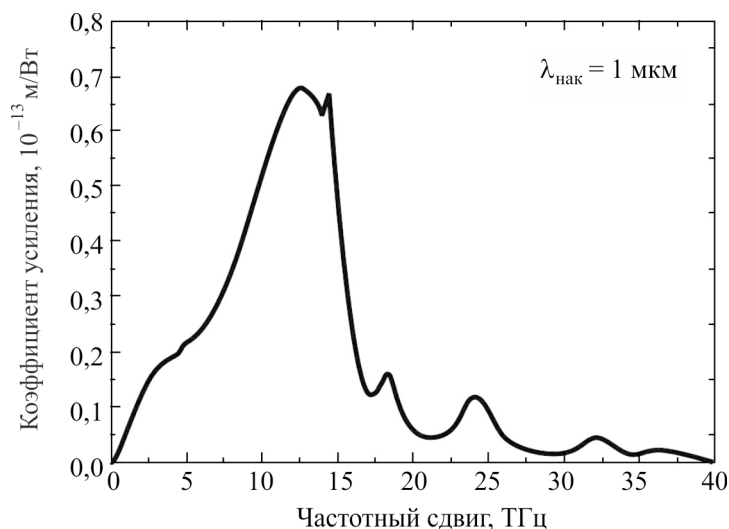


Рис. 3. Спектр ВКР-усиления. Экспериментальная зависимость коэффициента комбинационного усиления материала  $g_M^{\text{ref}}$  на референсной длине волны накачки  $\lambda_{\text{ref}} = 1$  мкм от разности частот накачки и сигнала для кварцевого волокна [20]

Строго говоря, выражения (4) и (5) можно применять только для волокон одинакового состава (такого же, как у волокон, использованных в работе [20]). В общем случае форма спектра усиления и материальный коэффициент могут отличаться, например, из-за разной концентрации германия и/или других примесей. Результаты экспериментальных измерений спектров ВКР-усиления в разных типах волокон приведены на рис. 4 [21].

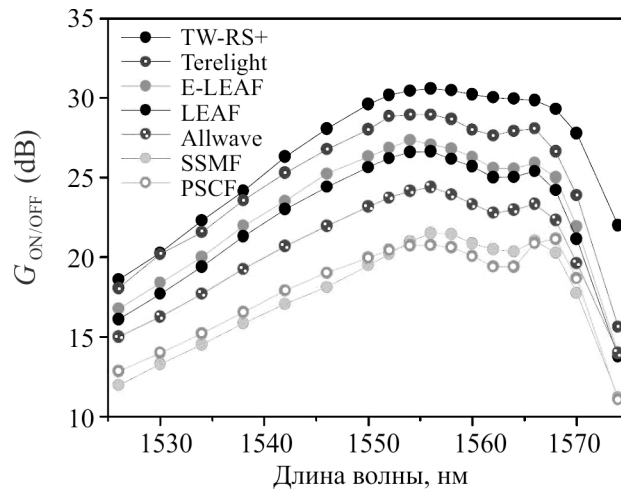


Рис. 4. Экспериментальные спектры ВКР-усиления  $G_{R,ON/OFF}$  в 100 км волокна разных типов при мощности накачки 700 мВт на 1455 нм; мощность входного сигнала 1 мВт [21]

Коэффициент усиления в волокнах G.655 выше, чем в волокнах G.652 и G.654, из-за меньшего размера модового пятна (эффективной площади) и более высокой концентрации примеси  $GeO_2$  в сердцевине [22, 23]. Наличие германия изменяет также форму спектра усиления, в частности сглаживается провал на длине волны 1562 нм (рис. 4).

Различные физические параметры волокон для длины волны сигнала 1555 нм и длины волны накачки 1455 нм приведены в таблице.

Параметры волокна при длине волны сигнала 1555 нм

Тип волокна	$A_{eff}$ , мкм <sup>2</sup>	$D$ , пс/нм/км	$\alpha_p$ , дБ/км	$G_{R,ON/OFF}$ , дБ	$P_{OP}$ , мВт	$OSNR_{DRS}$ , дБ	$k_R$ , $10^{-8} м^{-1}$
Truewave-RS <sup>TM</sup>	55	4,4	0,25	21	383	40,0	8,0
TeraLight <sup>TM</sup>	65	8	0,27	21	502	39,0	8,6
E-LEAF <sup>TM</sup>	72	4,3	0,25	21	510	39,6	8,3
LEAF <sup>TM</sup>	72	3,8	0,25	21	518	40,3	7,6
Allwave <sup>TM</sup>	80	17	0,24	20	582	41,5	7,2
SSMF	80	17	0,25	20	633	43,0	6,0
PSCF	80	20	0,22	18	620	46,4	4,9

Здесь  $A_{eff}$  – эффективная площадь сечения волокна;  $D$  – дисперсия;  $\alpha_p$  – затухание на длине волны накачки;  $G_{R,ON/OFF}$  – коэффициент

ВКР-усиления (ON/OFF);  $P_{0P}$  – мощность накачки;  $OSNR_{DRS}$  – отношение мощности сигнала к мощности двойного релеевского рассеяния;  $k_R$  – коэффициент релеевского рассеяния.

### 3. Коэффициент усиления с учетом насыщения

В общем случае, когда влиянием усиливаемого сигнала на накачку пренебрегать нельзя, необходимо описывать одновременно эволюцию сигнала и накачки с помощью следующей системы связанных уравнений:

$$\frac{dP_S}{dz} = -\alpha_S P_S + g_R k_{\text{pol}} P_P P_S, \quad (4)$$

$$\frac{dP_P}{dz} = -\alpha_P P_P - \frac{v_P}{v_S} g_R k_{\text{pol}} P_P P_S, \quad (5)$$

где  $P_P, P_S$  – средние мощности сигнальной (стоксовой) волны и волны накачки.

Система уравнений (4), (5) может быть решена аналитически, если пренебречь истощением мощности излучения накачки. Это решение корректно только для случая, когда  $P_S$  относительно невелика и длина взаимодействия относительно мала. Предполагая, что излучение накачки не истощается, для мощности излучения накачки имеем:

$$P_P(z) = P_P(0) \exp(-\alpha_P z). \quad (6)$$

Подставляя (6) в уравнение (4), легко получить выражение (1).

В общем случае необходимо решать уравнения (4), (5) численно.

### 4. Распределенные ВКР-усилители

В распределенном ВКР-усилителе усиление сигнала происходит в самом телекоммуникационном волокне, используемом для передачи информации. Слабое поглощение света на длине волны накачки обеспечивает проникновение накачки на большую глубину, т.е. усиление оказывается распределенным вдоль волокна [7–19]. В этом случае удастся достичь более равномерного распределения мощности сигнала вдоль направления распространения, при этом энергия сигнала не опускается до уровня шумовых компонент и в то же время не достигает уровня энергии, при котором становятся существенными нелиней-

ные искажения сигналов вследствие как самовоздействия, так и кросс-взаимодействия между различными спектральными каналами.

Свойство распределенности ВКР-усиления позволяет существенно увеличить отношение сигнал/шум при усилении сигнала в волоконных линиях связи. По сравнению с усилителями точечного типа применение распределенных усилителей оптического сигнала обеспечивает восстановление уровня сигнала на более ранних участках линии связи (рис. 5). Это позволяет одновременно увеличить и отношение сигнал/шум, и протяженность оптических линий связи.

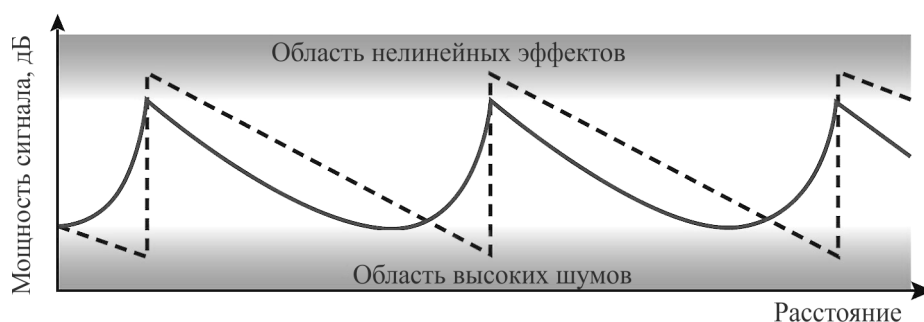


Рис. 5. Эволюция мощности оптического сигнала в волоконной линии связи при использовании распределенного (сплошная кривая) и точечного (пунктир) усилителя сигнала. Восстановление сигнала начинается на более ранних участках линии связи, а колебания мощности вдоль линии снижаются [3]

Интуитивно понятно, а также подтверждено экспериментально и теоретически, что чем более равномерно распределена мощность сигнала вдоль линии, тем большее отношение сигнал/шум достигается на приемнике. Применение двунаправленной накачки путем объединения сонаправленной и встречной накачек обеспечивает более равномерное распределение мощности сигнала вдоль волокна. Схема двунаправленной накачки показана на рис. 6.

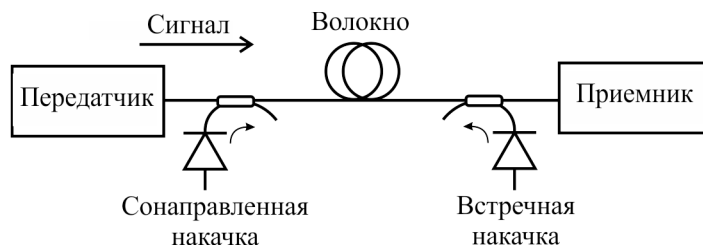


Рис. 6. Схема оптической системы связи с распределенным ВКР-усилителем, использующим двунаправленную накачку

Пример эволюции мощности сигнала при двунаправленной накачке приведен на рис. 7 (кривая 4). В данном примере мощности накачек, вводимых с двух сторон волокна, были равны. Шум-фактор усилительного участка при двунаправленной накачке был улучшен на 4 дБ по сравнению со случаем лишь встречной накачки.

В еще большей степени сгладить распределение мощности сигнала вдоль линии связи позволяет более сложная двухкаскадная схема накачки, рис. 7. В двухкаскадном ВКР-усилителе излучение накачки первого каскада, которое и усиливает сигнал, само усиливается излучением накачки второго каскада. При использовании встречной двухкаскадной накачки (рис. 8, а) в линии связи длиной 80 км шум-фактор уменьшается на 14 дБ по сравнению со случаем эрбиевого усилителя в конце линии связи [16].

Наибольшей равномерности сигнала вдоль волокна можно достигнуть при объединении двух идей: 1) двусторонняя накачка; 2) накачка высокого порядка.

При двунаправленной двухкаскадной накачке (рис. 8, б) можно получить практически равномерное распределение мощности сигнала

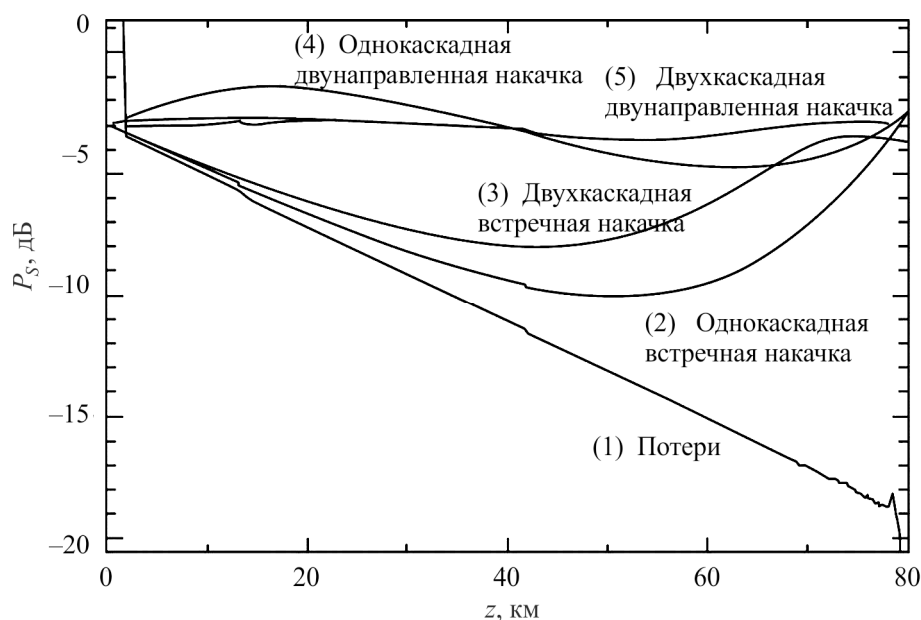


Рис. 7. Результаты экспериментального измерения эволюции мощности сигнала вдоль оптической линии связи длиной 80 км при использовании различных схем накачки [18]

вдоль линии связи на участках длиной до 80 км (см. рис. 7). В этом случае необходимо использовать минимум четыре источника накачки – по два с каждой стороны линии связи. Две первичные волны накачки вводятся в волокно на длине волны 1365 нм, вдоль распространения сигнала и навстречу ему. Энергия первичных фотонов передается вторичной волне на длине волны 1455 нм. На этой длине волны (1455 нм) в начале и в конце волокна используются отражающие брэгговские решетки, которые играют роль зеркал, запирая эти фотоны. Поэтому, когда вторичная волна передает свою энергию сигналу, усиление получается равномерным по длине волокна.

Исследования, проведенные в работе [17], показали, что трехкаскадная встречная накачка позволяет еще несколько улучшить характеристики линии связи, однако ценой введения мощной (3 Вт) накачки на длине волны третьего каскада накачки (в цитируемой работе 1276 нм). Третий каскад сдвинут на 13 ТГц относительно второго каскада или на 39 ТГц относительно сигнала.

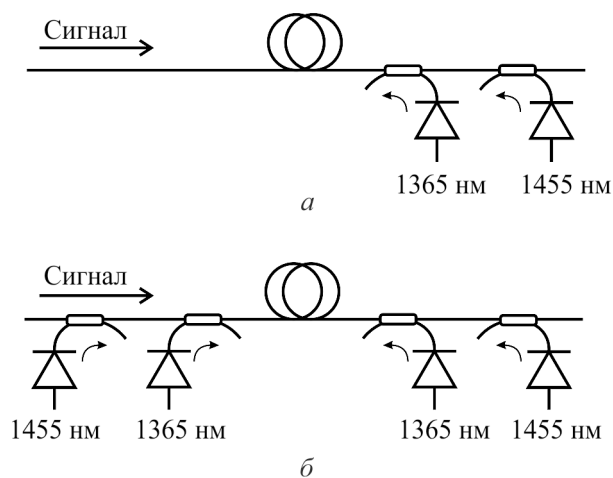


Рис. 8. Схемы оптической системы связи с распределенным ВКР-услителем, использующим двухкаскадную накачку:  
*а* – встречную; *б* – двунаправленную

Интересный вариант двухкаскадной накачки рассмотрен в работах [24, 25]. Для усиления сигнала используется сверхдлинный (длиной около 50 км) лазер, накачиваемый излучением накачки второго каскада. Такая схема позволяет создать передающую оптоволоконную среду, в которой сигнал распространяется практически без затухания.

Схема распределенного усилителя на основе лазерного преобразования излучения второго каскада приведена на рис. 9.

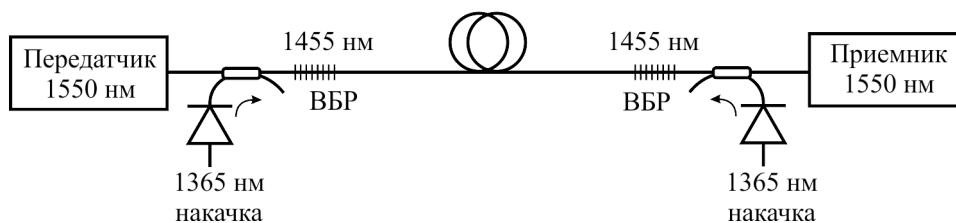


Рис. 9. Модифицированная схема рамановского усилителя

Предложенная схема позволяет повысить энергоэффективность сверхдлинного рамановского усилителя с сохранением высокого качества сигнала при передаче на большие расстояния. В работе [25] выполнено теоретическое исследование новой схемы распределенного рамановского усилителя с двумя каскадами ВКР-преобразования излучения. С помощью математического моделирования показана возможность уменьшения энергозатрат в такой системе свыше 50 % при сохранении высокого качества передачи сигнала. Картина изменения мощности сигнала в телекоммуникационном волокне, в котором созданы условия лазерной генерации на длине волны накачки (1455 нм), приведена на рис. 10.

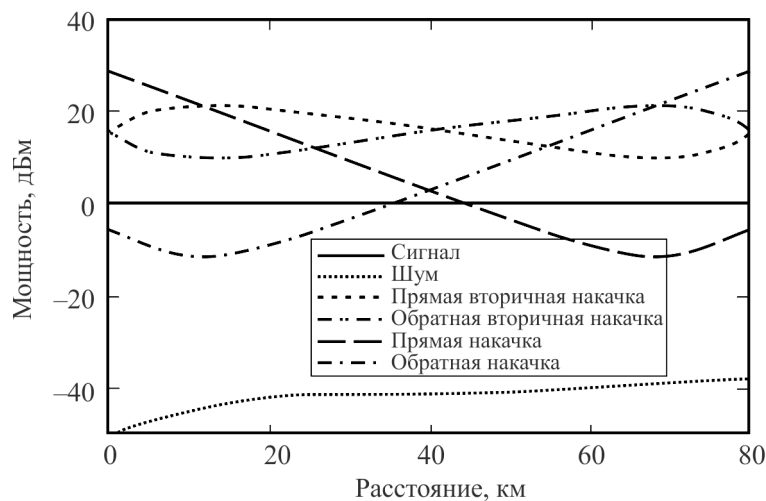


Рис. 10. Изменение мощности сигнала в телекоммуникационном волокне, в котором созданы условия лазерной генерации на длине волны накачки (1455 нм)

В работе [15] исследована оптимальная спектральная область работы линий связи с одно- и двухкаскадными ВКР-усилителями. Установлено, что оптимальная длина волны для передачи сигнала сдвинута в длинноволновую область относительно минимума затухания сигнала.

### **5. ВКР-усилители с полихроматической накачкой**

Характерная ширина полосы ВКР-усиления, которую обеспечивает один монохроматический источник излучения накачки, составляет около 5 нм. Для расширения спектральной полосы усиления и одновременного сглаживания неравномерности контура ВКР-усиления в заданной области требуется комбинированная накачка на нескольких длинах волн с соответствующими мощностями излучения [26–31].

Одна из первых реализаций ВКР-усилителя с накачкой набором узкополосных источников излучения была представлена в работе [26]. Проведена оптимизация спектра усиления 25-километрового ВКР-усилителя с накачкой 12 диодными лазерами в диапазоне длин волн 1412,5–1504,5 нм. В результате достигнута неравномерность контура усиления, не превышающая 0,1 дБ в спектральной полосе 80 нм (1527–1607), при этом среднее значение усиления слабого сигнала составило 10,5 дБ. В результате контур усиления, перекрывающий два основных коммуникационных диапазона и неравномерность контура, в перспективе позволяет использовать данный ВКР-усилитель для многоканальной передачи оптического сигнала на относительно большие расстояния.

Следует отметить, что теоретическое предсказание и оптимизация ВКР-усиления затруднены для случая относительно большого числа независимых источников накачки. Результат ВКР-усиления не является простой суперпозицией стоксовых компонент, поскольку спектральные компоненты накачки оказывают взаимное влияние друг на друга при распространении по волокну. Влияние взаимодействия компонент накачки иллюстрируют рис. 11 и 12. Как видно из рис. 11, реальное ВКР-усиление распределенного усилителя превышает сумму индивидуальных коэффициентов усиления от монохроматических компонент накачки в длинноволновой области и, наоборот, меньше в коротковолновой области. Причина этого эффекта в том, что коротковолновые компоненты накачки усиливают длинноволновые компоненты, а сами при этом истощаются. Эволюция мощности компонент накачки вдоль волокна показана на рис. 12. На входе в волокно пять спектральных компонент имеют равные

мощности (по 100 мВт). Длинноволновая компонента (1495 нм) на первом этапе усиливается благодаря ВКР-взаимодействию с более коротковолновыми компонентами.

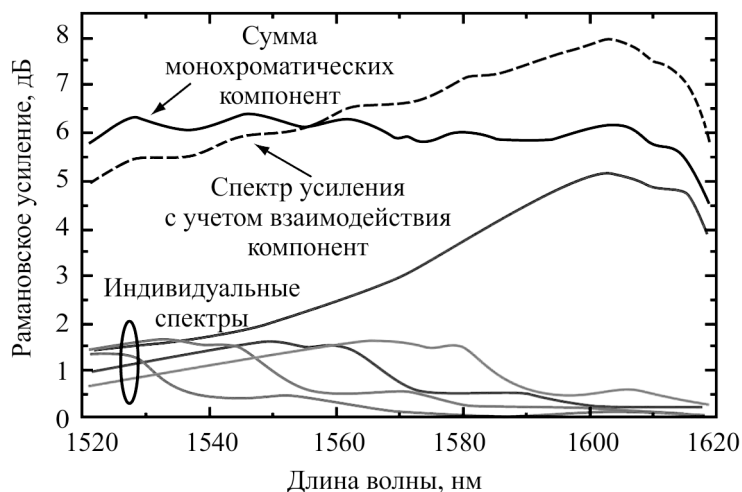


Рис. 11. Спектр ВКР-усиления распределенного усилителя с полихроматической накачкой. Для сравнения приведены спектральная кривая – сумма спектров составляющих монохроматических компонент – и индивидуальные спектры компонент (индивидуальные спектры получены для монохроматических накачек)

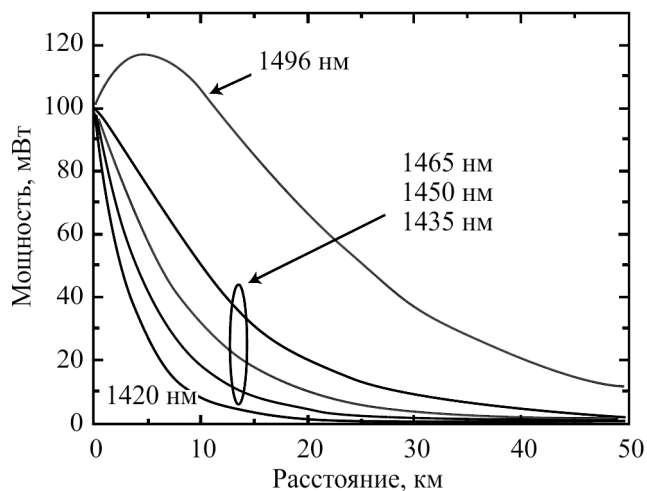


Рис. 12. Результаты численного моделирования распространения спектральных компонент накачки вдоль волокна

Расширение спектральной полосы ВКР-усиления одновременно с минимизацией неравномерности контура усиления внутри этой полосы и увеличением расстояния передачи оптического сигнала за счет применения схем полихроматической накачки узкополосными источниками излучения – не единственный путь для создания высокоэффективных ВКР-усилителей оптического сигнала. Ведется интенсивный поиск альтернативных схем накачки ВКР-усилителей, способных уменьшить количество источников излучения накачки при сохранении необходимых параметров ВКР-усиления. Это возможно при использовании широкополосных источников накачки. В данном случае спектр усиления ВКР-усилителя в первом приближении является сверткой спектра ВКР-усиления волокна со спектром источника накачки.

В настоящее время достаточно хорошо разработаны алгоритмы численных расчетов, позволяющие достаточно точно моделировать характеристики ВКР-усилителей с полихроматической накачкой<sup>1</sup>.

## **6. Преимущества и недостатки ВКР-усилителей**

ВКР-усилители перспективны в силу следующих принципиальных преимуществ:

1. ВКР-усиление существует в волокнах любого типа, поэтому активной средой усилителя может быть волокно для передачи оптического сигнала либо используемое в компенсаторах дисперсии.

2. Усиление не привязано к резонансным спектрам примесей и может быть получено практически на любой длине волны в области прозрачности (для кварца диапазон прозрачности простирается примерно от 0,3 до 2 мкм) при наличии источника в нужном спектральном диапазоне.

3. Спектр усиления зависит от спектра накачки, поэтому подбор формы спектра полихроматичной накачки позволяет формировать очень широкую (более 100 нм) полосу усиления с низкой неравномерностью контура усиления.

4. Низкий уровень шумов и распределенность усиления при встречной накачке, когда излучение накачки распространяется навстречу сигналу.

Однако ряд недостатков ВКР-усилителей на первом этапе препятствовал их практическому применению. Самый существенный недоста-

---

<sup>1</sup> Материалы сайтов [www.vpiphotonics.com](http://www.vpiphotonics.com), [www.rsoftdesign.com](http://www.rsoftdesign.com).

ток – относительно низкая эффективность накачки по сравнению с эрбиевыми усилителями (EDFA) для сигналов малой мощности. Вторым недостатком состоит в том, что для ВКР-усиления требуются длинные отрезки волокна. Но этот недостаток может стать преимуществом, если ВКР-усилитель совмещен с передающим телекоммуникационным волокном или с волоконным компенсатором дисперсии. Третий недостаток ВКР-усилителей связан с их быстрым временным откликом, приводящим к трансформации шумов накачки в шумы усиливаемого сигнала. Четвертый недостаток – наличие избыточных шумов, связанных с двойным рэлеевским рассеянием (DRS). И наконец, пятый недостаток связан с наличием нелинейных искажений в ВКР-усилителе при усилении сигналов множества каналов WDM.

Относительно невысокая эффективность усиления приводит к необходимости использовать довольно мощную непрерывную накачку (~1 Вт), чтобы получать усиление около 30 дБ (типичная величина для систем оптической связи). Поэтому особенно сильным препятствием к внедрению ВКР-усилителей на первом этапе стало отсутствие достаточно мощных полупроводниковых источников накачки. Позднее их практическое использование стало возможным благодаря следующим техническим достижениям:

- ◆ разработка мощных малошумящих полупроводниковых лазеров накачки, а также высокоэффективных волоконных ВКР-лазеров, генерирующих практически на любой длине волны в диапазоне 1,2–1,5 мкм;
- ◆ создание волокон с высоким значением ВКР-усиления благодаря большому содержанию германия;
- ◆ создание доступных волоконных компонентов (брэгговские решетки, волоконные разветвители/соединители, спектральные мультиплексоры и др.);
- ◆ широкое внедрение многоканальных систем связи со спектральным уплотнением (систем WDM).

Особенно перспективно использование ВКР-усилителей в системах дальней связи с плотным спектральным мультиплексированием (DWDM). Такие усилители особенно хороши тем, что позволяют получить широкополосное усиление практически в любом спектральном диапазоне. Они могут использоваться либо как предусилители в комбинации с эрбиевыми усилителями, либо самостоятельно.

В то же время, поскольку с увеличением числа спектральных каналов в системах WDM растет суммарная мощность передаваемых сиг-

налов, в системах с большим числом каналов эффективность ВКР-усилителей может оказаться не только не меньше, но даже больше, чем у традиционно используемых эрбиевых усилителей. Так, при суммарной мощности усиливаемого сигнала 20 мВт и коэффициенте усиления 25 дБ эффективность использования мощности накачки ВКР-усилителем становится больше, чем у эрбиевого усилителя [3].

### **7. Использование ВКР-усилителей в сверхдлинных однопролетных линиях**

Одна из областей, где ярко проявляются преимущества ВКР-усилителей, – это сверхдлинные однопролетные линии связи, работающие без использования активных элементов вне конечных узлов. Такие линии могут использоваться для соединения островов, создания отводов от подводных магистральных линий связи, соединения нефтегазодобывающих скважин с материком. Для многих российских регионов актуальна разработка однопролетных линий связи со сверхдлинными пролетами (от 300 до 500 км) для прокладки по малонаселенной и труднодоступной территории, когда построение промежуточных усилительных или регенерационных пунктов невозможно или экономически нецелесообразно.

Для достижения максимальной дальности передачи необходимо использовать волокно с минимальным затуханием и оптимальное сочетание распределенных усилителей с удаленно накачиваемыми усилителями, причем рекордная дальность достигается при использовании дополнительных волокон для накачки ROPA.

Для экспериментальной проверки возможностей передачи DWDM-сигналов с канальной скоростью 100 Гбит/с в сверхдлинных однопролетных линиях связи была собрана установка, схема которой приведена на рис. 13 [32]. Максимальное число DWDM-каналов в ней равно 8, канальная скорость передачи информации 100 Гбит/с, битовая скорость с учетом FEC 120 Гбит/с, длина линии 502 км. Тестирование работоспособности сверхдлинной линии проводилось при одновременной передаче 100G трафика на 8 DWDM-каналах с 22 по 28 (несущие частоты от 192,2 до 192,8 ТГц с шагом 100 ГГц). Линия стабильно работала в течение 12 ч. Данный результат является текущим рекордом дальности для канальной скорости 100 Гбит/с и суммарной скорости передачи данных в однопролетной линии [32].

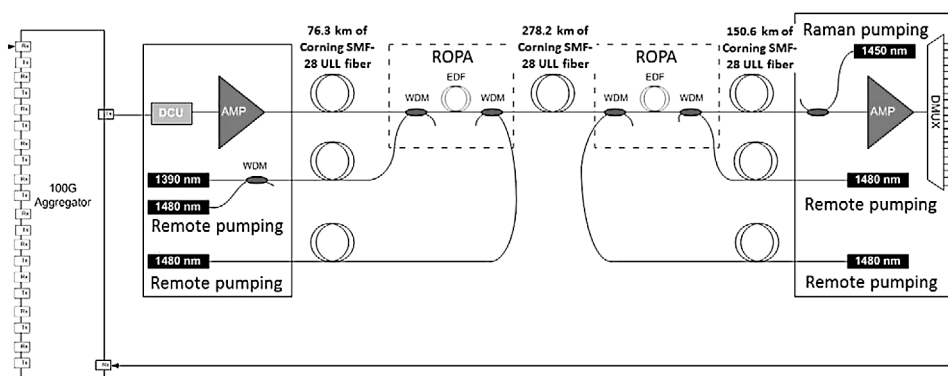


Рис. 13. Схема сверхдлинной однопролетной линии связи с рекордной дальностью передачи: DCU – настраиваемый модуль компенсации дисперсии; AMP – оптический усилитель; ROPA – оптический усилитель с удаленной накачкой; EDF – волокно, легированное эрбием; DMUX – демультиплексор [32]

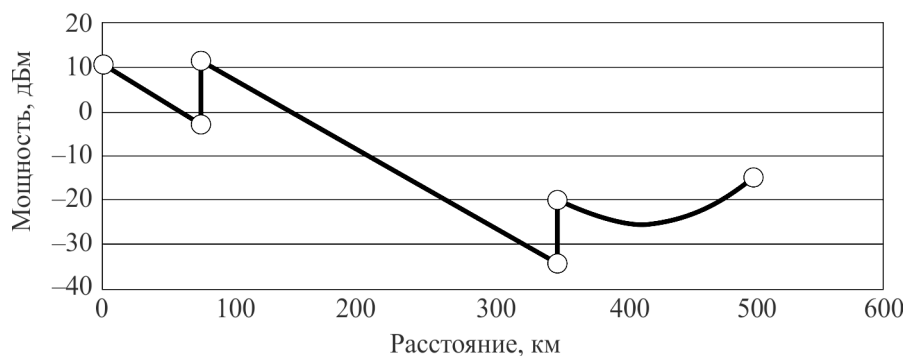


Рис. 14. Зависимость мощности сигнала от расстояния (кружки – экспериментально измеренные значения; линия – теоретический расчет) [32]

В реализованной схеме важную роль играет распределенный ВКР-усилитель, накачка которого осуществляется со стороны приемника. Именно ВКР-усиление со стороны приемника позволило достичь рекордной дальности передачи. На рис. 14 приведен график зависимости мощности сигнала от расстояния, на котором хорошо виден вклад ВКР-усиления на участке 350–500 км от начала линии.

### Список литературы

1. Stolen R.H., Ippen E.P. Raman gain in glass optical waveguides // *Applied Physics Letters*. – 1973. – Vol. 22, № 6. – P. 276–278.
2. Gapontsev D.V., Chernikov S.V., Taylor J.R. Fibre Raman amplifiers for operation at 1,3  $\mu\text{m}$  // *Optics Communications*. – 1999. – Vol. 166. – P. 85–88.
3. Islam M. N. Raman amplifiers for telecommunications // *IEEE Journal of Selected topics in Quantum Electronics*. – 2002. – Vol. 8, № 3. – P. 548–559.
4. Pump interactions in 100 nm bandwidth Raman amplifier / H. Kidorf, K. Rottwitt, M. Nissov, M. Ma, E. Rabarjaona // *IEEE Photonics Technology Letters*. – 1999. – Vol. 11, № 5. – P. 530–532.
5. Raman amplification in fiber optical communication systems / Ed. by H. Clifford, Govind P. Agrawal. – Elsevier Academic Press, 2005. – 374 p.
6. Наний О.Е. Основы технологии спектрального мультиплексирования каналов передачи (WDM) // *Lightwave Russian Edition*. – 2004. – № 2. – С. 47–52.
7. Bromage J. Raman amplification for fiber communication systems // *IEEE Journal of Lightwave Technology*. – 2004. – Vol. 22, no.1. – P. 79–93.
8. Турицын С.К. Распределенное усиление с использованием сверхдлинных волоконных лазеров: передающая среда с незатухающим сигналом // *Lightwave Russian Edition*. – 2007. – № 2. – С. 8–10.
9. 442 km repeaterless transmission in a 10 Gbit/s system experiment / P.B. Hansen, L. Eskildsen, S.G. Grubb [et al.] // *Electronics Letters*. – 1996. – Vol. 32, no.11. – P. 1018–1019.
10. 3.28Tb/s transmission over  $3 \times 100$  km of nonzero-dispersion fiber using dual C- and L-band distributed Raman amplification / T.N. Nielsen, A.J. Stentz, K. Rottwitt [et al.] // *IEEE Photonics Technology Letters*. – 2000. – Vol. 12, no. 8. – P. 1079–1081.
11. 3.2Tb/s ( $80 \times 42,7\text{Gb/s}$ ) transmission over  $20 \times 100$  km of nonzero dispersion fiber with simultaneous C + L-band dispersion compensation / B. Zhu, L. Leng, L.E. Nelson [et al.] // *Proc. OFS 2002. Postdeadline paper FC8*. – 2002. – P. FC8-1–FC8-3.
12. 100 Gb/s ( $10 \times 10\text{Gb/s}$ ) WDM transmission over 7200 km using distributed Raman amplification / M. Nissov, C.R. Davidson, K. Rottwitt [et al.] // *Proc. of IOOC – ECOC'1997*. – Edinburgh, Scotland, 1997. – P. 9–12.

13. 320-Gb/s single-channel pseudolinear transmission over 200 km of nonzero-dispersion fiber / B. Mikkelsen, G. Raybon, R.-J. Essiambre [et al.] // *IEEE Photonics Technology Letters*. – 2000. – Vol. 12, no. 10. – P. 1400–1402.
14. Comparison of Return-to-Zero Differential Phase- Shift Keying and On-Off Keying in Long-Haul Dispersion Managed Transmission / C. Xu, X. Liu, L.F. Mollenauer, X. Wei // *IEEE Photonics Technology Letters*. – 2003. – Vol. 15. – P. 617–619.
15. Казанцева Н.А., Наний О.Е. Оптимальная спектральная область работы ВОЛС с одно- и двухкаскадным рамановским усилителем // *Вестник Московского университета. Сер. 3: Физика, астрономия*. – 2004. – Т. 45, № 5. – С. 70–71.
16. Transparent 80 km bi-directionally pumped distributed Raman amplifier with second-order pumping / K. Rottwitt, A. Stentz, T. Nielson [et al.] // *Proc of ECOC'1999*. – Nice, France, 1999. – P. 144–145.
17. Papernyi S.B., Karpov V.J., Clements W.R.L. Third-order cascaded Raman amplification // *Proc. OFS'2002*. Anaheim, CA. 2002. Postdeadline paper FB4.
18. Bouteiller J.-C., Brar K., Headley C. Quasiconstant signal power transmission // *Proc. of ECOC'2002*. Copenhagen, Denmark, 2002. Paper S3.04.
19. Analysis of bidirectional and second order pumping in long-haul systems with distributed Raman amplification / C. Martinelli [et al.] // *Proc. of ECOC'2002*. Copenhagen, Denmark, 2002. Paper P3.30.
20. Raman response function of silica core fibers / R.H. Stolen, J.P. Gordon, W.J. Tomlinson [et al.] // *Journal of Optical Society of America B*. – 1989. – Vol. 6, no. 6. – P. 1159–1166.
21. Full characterization of modern transmission fibers for Raman amplified-based communication systems / S. Jiang, B. Bristiel, Y. Jaouën [et al.] // *Optics Express*. – 2007. – Vol. 15, no. 8. – P. 4883–4892.
22. An analysis of the improvement in OSNR from distributed Raman amplifiers using modern transmission fibers / C.R.S. Fludger, A. Maroney, N. Jolley, R. Mears // *Proc. OFC'2000*. Baltimore, OSA, FF2, 2000. – P. 100–102.
23. Bromage J., Rottwitt K., Lines M.E. A method to predict the Raman gain spectra of Germanosilicate fibers with arbitrary index profiles // *IEEE Photonics Technology Letters*. – 2002. – Vol. 14, no. 1. – P. 24–26.

24. Ultralong Raman fiber lasers as virtually lossless optical media / J.D. Ania-Castanon [et al.] // *Physical Review Letters*. – 2006. – Vol. 96. – P. 023902–023905.

25. Bednyakova A.E., Fedoruk M.P., Harper P., Turitsyn S.K. Hybrid gain-flattened and reduced power excursion scheme for distributed Raman amplification // *Optics Express*. – 2013. – Vol. 21, no. 24. – P. 29140–29144.

26. Emory Y., Tanaka K., Namiki S. 100-nm bandwidth flat-gain Raman amplifiers pumped and gain-equalized by 12-wavelength channel WDM laser diode unit // *Electronics Letters*. – 1999. – Vol. 35. – P. 1355–1356.

27. Pump interactions in a 100-nm bandwidth Raman amplifier / H. Kidorf, K. Rottwitt, M. Nissov [et al.] // *IEEE Photonics Technology Letters*. – 1999. – Vol. 11, no. 5. – P. 530–532.

28. A simplified model and optimal design of a multiwavelength backward pumped Raman amplifier / X. Zhou, C. Lu, P. Shum, T.H. Cheng // *IEEE Photonics Technology Letters*. – 2001. – Vol. 13, no. 9. – P. 945–947.

29. Perlin V., Winful H. Optimal design of flatgain wide-band fiber Raman amplifiers // *Journal of Lightwave Technology*. – 2002. – Vol. 20, iss. 2. – P. 250–254.

30. Grant A.R. Calculating the Raman pump distribution to achieve minimum gain ripple // *Quantum Electronics*. – 2002. – Vol. 38, no. 11. – P. 1503–1509.

31. Mollenauer L.F., Grant A.R., Mamyshev P.V. Time-division multiplexing of pump wavelengths to achieve ultrabroadband, flat, backward-pumped Raman gain // *Optics Letters*. – 2002. – Vol. 27, no. 8. – P. 592–594.

32. Record 500 km unrepeated 100 Gb s<sup>-1</sup> transmission / V.V. Gainov, N.V. Gurkin, S.N. Lukin [et al.] // *Laser Physics Letters*. – 2013. – Vol. 10, no. 7. – P. 075107.

### References

1. Stolen R.H., Ippen E.P. Raman gain in glass optical waveguides. *Applied Physics Letters*, 1973, vol. 22, no. 6, pp. 276-278.

2. Gapontsev D.V., Chernikov S.V., Taylor J.R. Fibre Raman amplifiers for operation at 1.3  $\mu\text{m}$ . *Optics Communications*, 1999, vol. 166, pp. 85-88.

3. Islam M.N. Raman amplifiers for telecommunications. *IEEE Journal of Selected topics in Quantum Electronics*, 2002, vol. 8, no. 3, pp. 548-559.

4. Kidorf H., Rottwitt K., Nissov M., Ma M., Rabarijaona E. Pump interactions in 100 nm bandwidth Raman amplifier. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1999, vol. 11, no 5, pp. 530-532.

5. Raman amplification in fiber optical communication systems. Ed. C. Headley, G.P. Agrawal. Elsevier Academic Press, 2005, 374 p.
6. Nanii O.E. Osnovy tekhnologii spektral'nogo multipleksirovaniia kanalov peredachi (WDM) [Fundamentals of the WDM technology]. *Lightwave Russian Edition*, 2004, no. 2, pp. 47-52.
7. Bromage J. Raman amplification for fiber communication systems. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 2004, vol. 22, no.1, pp. 79-93.
8. Turitsyn S.K. Raspredelenoie usileniie s ispolzovaniem sverkh-dlinnykh volokonnykh lazerov: peredaiushchaia sreda s nezatukhayushchim signalom [Distributed amplification with the use of extra-long haul fiber lasers: transmitting medium with zero-decrement signal]. *Lightwave Russian Edition*, 2007, no. 2, pp. 8-10.
9. Hansen P.B., Eskildsen L., Grubb S.G. [et al.] 442 km repeaterless transmission in a 10 Gbit/s system experiment. *Electronics Letters*, 1996, vol. 32, no.11, pp. 1018-1019.
10. Nielsen T.N., Stentz A.J., Rottwitt K. [et al.] 3.28Tb/s transmission over 3×100 km of nonzero-dispersion fiber using dual C- and L-band distributed Raman amplification. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2000, vol. 12, no. 8, pp. 1079-1081.
11. Zhu B., Leng L., Nelson L.E. [et al.] 3.2Tb/s (80 × 42.7Gb/s) transmission over 20×100 km of non-zero dispersion fiber with simultaneous C + L-band dispersion compensation. *Proc. OFS 2002*. Postdeadline paper FC8, 2002, pp. FC8-1-FC8-3.
12. Nissov M., Davidson C.R., Rottwitt K. [et al.] 100 Gb/s (10×10Gb/s) WDM transmission over 7200 km using distributed Raman amplification. *Proc. of IOOC – ECOC'1997*. Edinburgh, Scotland, 1997, pp. 9-12.
13. Mikkelsen B., Raybon G., Essiambre R.-J. [et al.] 320-Gb/s single-channel pseudolinear transmission over 200 km of nonzero-dispersion fiber. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2000, vol. 12, no. 10, pp. 1400-1402.
14. Xu C., Liu X., Mollenauer L.F., Wei X. Comparison of Return-to-Zero Differential Phase- Shift Keying and On-Off Keying in Long-Haul Dispersion Managed Transmission. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2003, vol. 15, pp. 617-619.
15. Kazantseva N.A., Nanii O.E. Optimal'naia spektral'naia oblast' raboty VOLS s odno- i dvukhkaskadnym ramanovskim usilitelem [Optimal spectral range of OFCL with one- and two-stage Raman amplifiers]. *Moscow University Physics Bulletin*, 2004, vol. 59, pp. 67-69.

16. Rottwitt K., Stentz A., Nielson T. [et al.] Transparent 80 km bi-directionally pumped distributed Raman amplifier with second-order pumping. *Proc of ECOC'1999*, Nice, France, 1999, pp. 144-145.
17. Papernyi S.B., Karpov V.J., Clements W.R.L. Third-order cascaded Raman amplification. *Proc OFS'2002*. Anaheim, CA. 2002. Post-deadline paper FB4.
18. Bouteiller J.-C., Brar K., Headley C. Quasiconstant signal power transmission. *Proc. of ECOC'2002*. Copenhagen, Denmark, 2002. Paper S3.04.
19. Martinelli C. [et al.] Analysis of bidirectional and second order pumping in long-haul systems with distributed Raman amplification. *Proc. of ECOC'2002*. Copenhagen, Denmark, 2002. Paper P3.30.
20. Stolen R.H., Gordon J.P., Tomlinson W.J. [et al.] Raman response function of silica core fibers. *Journal of Optical Society of America B*, 1989, vol. 6, no. 6, pp. 1159-1166.
21. Jiang S., Bristiel B., Jaouën Y. [et al.] Full characterization of modern transmission fibers for Raman amplified-based communication systems. *Optics Express*, 2007, vol. 15, no. 8, pp. 4883-4892.
22. Fludger C.R.S., Maroney A., Jolley N., Mears R. An analysis of the improvement in OSNR from distributed Raman amplifiers using modern transmission fibers. *Proc. OFC'2000*. Baltimore, OSA, FF2, 2000, pp. 100-102.
23. Bromage J., Rottwitt K., Lines M.E. A method to predict the Raman gain spectra of Germanosilicate fibers with arbitrary index profiles. *IEEE Photonics Technology Letter*, 2002, vol. 14, no. 1, pp. 24-26.
24. Ania-Castanon J.D. [et al.] Ultralong Raman fiber lasers as virtually lossless optical media. *Physical Review Letters*, 2006, vol. 96, pp. 023902-023905.
25. Bednyakova A.E., Fedoruk M.P., Harper P., Turitsyn S.K. Hybrid gain-flattened and reduced power excursion scheme for distributed Raman amplification. *Optics Express*, 2013, vol. 21, no. 24, pp. 29140-29144.
26. Emory Y., Tanaka K., Namiki S. 100-nm bandwidth flat-gain Raman amplifiers pumped and gain-equalized by 12-wavelength channel WDM laser diode unit. *Electronics Letters*, 1999, vol. 35, pp. 1355-1356.
27. Kidorf H., Rottwitt K., Nissov M. [et al.] Pump interactions in a 100-nm bandwidth Raman amplifier. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1999, vol. 11, pp. 530-532.
28. Zhou X., Lu C., Shum P., Cheng T.H. A simplified model and optimal design of a multiwavelength backward pumped Raman amplifier. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2001, vol. 13, no. 9, pp. 945-947.

29. Perlin V., Winful H. Optimal design of flatgain wide-band fiber Raman amplifiers. *Journal of Lightwave Technology*, 2002, vol. 20, iss. 2, pp. 250-254.

30. Grant A.R. Calculating the Raman pump distribution to achieve minimum gain ripple. *Quantum Electronics*, 2002, vol. 38, no. 11, pp. 1503-1509.

31. Mollenauer L.F., Grant A.R., Mamyshev P.V. Time-division multiplexing of pump wavelengths to achieve ultrabroadband, flat, backward-pumped Raman gain. *Optics Letters*, 2002, vol. 27, no. 8, pp. 592-594.

32. Gainov V.V., Gurkin N.V., Lukin S.N. [et al.] Record 500 km unrepeated 100 Gb s<sup>-1</sup> transmission. *Laser Physics Letters*, 2013, vol. 10, no. 7, pp. 075107.

Получено 17.10.2013