

Переходные процессы и перекрестные помехи в висмутовом оптическом усилителе для О-диапазона

С.В.Алышев, А.В.Харахорин, А.М.Хегай, Я.Ж.Ососков, А.С.Вахрушев, Е.Г.Фирстова, К.Е.Рюмки, М.А.Мелькумов, А.С.Лобанов, А.Н.Гурьянов, С.В.Фирстов

Сообщается о переходных процессах и перекрестных помехах (кросс-модуляция) в оптическом усилителе на основе фосфоросиликатного волоконного световода, легированного висмутом и предназначенного для О-диапазона (1260 – 1360 нм). Экспериментально определены времена, которые характеризуют динамические параметры изучаемого усилителя, накачиваемого излучением на длине волны 1.23 мкм. Получены данные о влиянии частоты модуляции Ω в диапазоне 10 Гц – 1 МГц одного из каналов на интенсивность перекрестных помех в другом канале. Исходя из полученной зависимости и результатов численного расчета установлено, что перекрестные помехи в изучаемом висмутовом усилителе становятся несущественными на частотах модуляции Ω выше 100 кГц. Проведенные исследования показывают возможность практического применения висмутовых усилителей для О-диапазона в многоканальных высокоскоростных системах передачи данных.

Ключевые слова: висмут, усилитель, световод, О-диапазон, передача данных.

1. Введение

Интерес к исследованию волоконных световодов, легированных висмутом, был обусловлен необходимостью получения сред, усиливающих оптическое излучение в тех областях длин волн, где практически не работают световоды, активированные редкоземельными ионами. За почти 15 лет, прошедших с момента создания первых висмутовых световодов [1], выполнен значительный объем исследований, позволивших создать линейку Вi-световодов, предназначенных, прежде всего, для работающих в ближнем ИК диапазоне оптических усилителей (см., напр., обзорные статьи [2–4] и ссылки в них). В последнее время наблюдается рост числа исследований [5–7], посвященных детальному изучению поведения таких усилителей в экспериментальных системах связи, что обусловлено вниманием к этому вопросу со стороны коммерческих компаний (см., напр., [8]).

В этом отношении висмутовые усилители для спектральной области вблизи 1.3 мкм (О-диапазон) представляют несомненный интерес, поскольку их использование может существенно увеличить пропускную способность и дальность существующих внутригородских систем связи. Недавно нами был продемонстрирован компактный висмутовый волоконно-оптический усилитель (Bismuth-Doped Fiber Amplifier, BDFA), работающий в О-диапазоне и обеспечивающий при накачке на длине волны 1230 нм усиление 20 дБ при рекордной эф-

фективности усиления 0.18 дБ/мВт [9]. Улучшение параметров усилителя было достигнуто благодаря реализации конструкции световода с W-образным профилем распределения показателя преломления [10]. Основные характеристики разработанного BDFA указывают на потенциальную возможность его практического применения для передачи данных. Однако при внедрении таких усилителей в системы со спектральным уплотнением (WDM) каналов, в которых происходят управляемые процессы удаления или добавления WDM-каналов, перенаправление трафика, защитное переключение и т. д., могут возникать проблемы, связанные с динамическими характеристиками усилителя, поскольку управление одним каналом может влиять на мощность и шум в других каналах. При этом могут возникать перекрестные помехи, связанные с насыщением усиления из-за эффекта уменьшения инверсии населенности в оптическом усилителе.

Это обстоятельство стимулировало исследования динамических свойств BDFA, в частности анализ переходной динамики усиления BDFA, а также изучение перекрестных помех, возникающих в результате модуляции инверсной населенности.

2. Эксперимент и расчет

На рис.1 показана экспериментальная установка, используемая для исследования динамических характеристик BDFA. В усилителе была использована схема с попутной накачкой излучением лазерного диода на длине волны $\lambda = 1230$ нм, т. е. излучения сигнала и накачки распространялись в одном направлении. Длина активного волокна составляла 110 м [9]. Для изучения динамических свойств BDFA использовались два сигнала – на длинах волн 1.31 мкм (модулированный) и 1.33 мкм (непрерывный), которые вводились в BDFA с помощью мультиплексора М. Возможность использования относительно далеко разнесенных сигналов обусловлено тем, что вис-

С.В.Алышев, А.В.Харахорин, А.М.Хегай, Я.Ж.Ососков, А.С.Вахрушев, Е.Г.Фирстова, К.Е.Рюмки, М.А.Мелькумов, С.В.Фирстов. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Научный центр волоконной оптики им. Е.М.Дианова, Россия, 119333 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: sergevlad@gmail.com, fir@fo.gpi.ru
А.С.Лобанов, А.Н.Гурьянов. Институт химии высококачественных веществ им. Г.Г.Десятых РАН, Россия, 603950 Н.Новгород, ул. Тропинина, 49

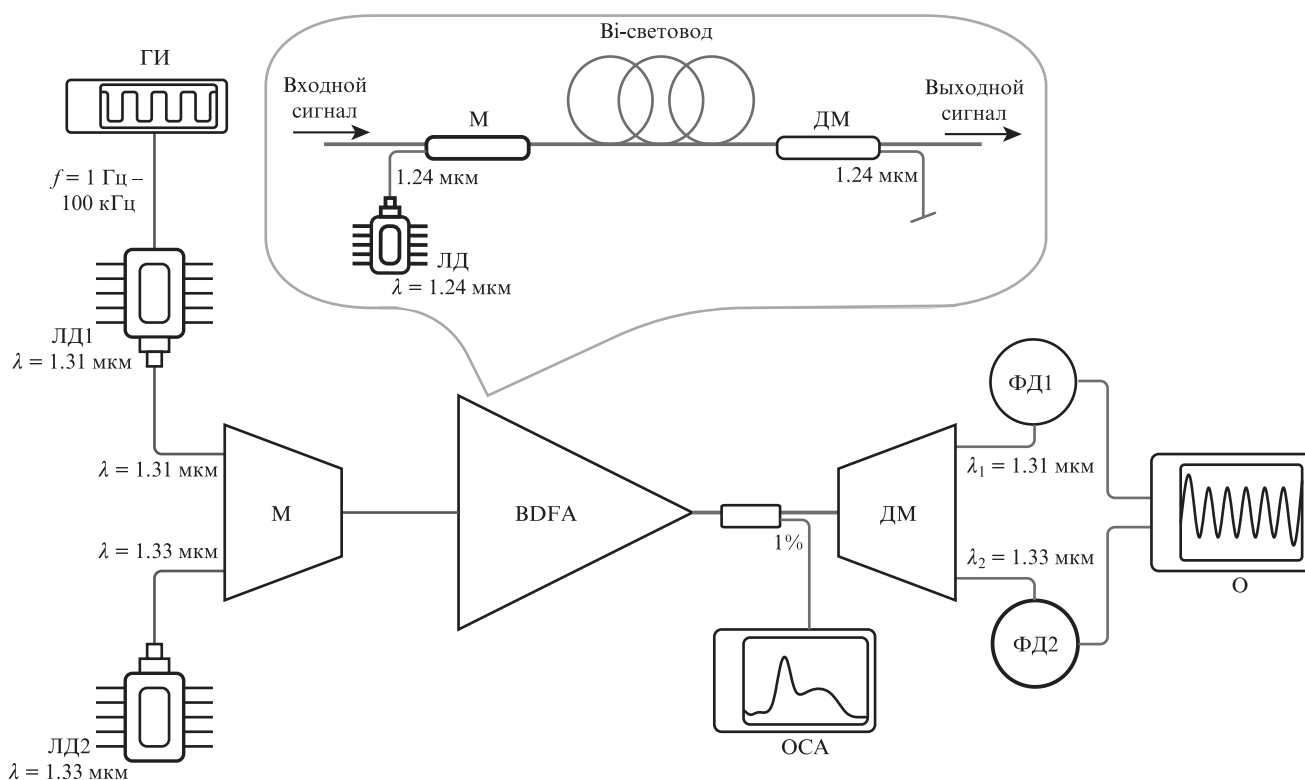


Рис.1. Схема экспериментальной установки:

ГИ – генератор импульсов; ФД1, 2 – фотоприемники; ЛД, ЛД1,2 – лазерные диоды накачки, модулирующего и пробного излучения соответственно; О – осциллограф; М – мультиплексор; ДМ – демультиплексор; ОСА – оптический спектроанализатор; на вставке приведена схема BDFA.

мутовый активный световод обладает однородно уширенным контуром усиления.

Управление модуляцией сигнала на $\lambda = 1.31$ мкм осуществлялось с помощью генератора электрических импульсов Agilent 33220A (модулировался ток питания лазерного диода). Для изучения переходных процессов использовалась модуляция в виде прямоугольных импульсов, а для эффектов кросс-модуляции – импульсов синусообразной формы. Мощность модулированного сигнала (на $\lambda = 1.31$ мкм) изменялась от 0.1 до 0.8 мВт, что было достаточным для изменения населенности метастабильного уровня (прямо пропорционально связанной с усилением и обратно пропорционально – с интенсивностью входного сигнала), т.е. перехода BDFA из режима усиления слабого сигнала в режим насыщения (подробнее см. в [9]). Непрерывный (пробный) сигнал на длине волны 1.33 мкм, в отличие от модулированного сигнала, имел мощность всего 50 мкВт и не оказывал влияния на населенность лазерного уровня. Таким образом, величина пробного сигнала, проходящего через BDFA, должна варьироваться под действием модулированного сигнала; оба сигнала регистрировались с помощью фотоприемников PDA 10D-EC и PDA 10CS-EC, подключенных к осциллографу Agilent DSO-X 2024A. Для разделения сигналов, прошедших через BDFA, на выходе усилителя был установлен демультиплексор ДМ (рис.1). Вариации пробного сигнала измерялись при различных частотах (от 10 Гц до 1 МГц) модуляции сигнала на $\lambda = 1.31$ мкм. Спектры выходного излучения BDFA регистрировались с помощью оптического спектроанализатора Agilent 86140B.

На рис.2,а приведены типичные осциллограммы сигналов на выходе BDFA при модуляции прямоугольными

импульсами с частотой 1 кГц. Видно, что после усиления в BDFA передние фронты выходных импульсов на длине волны 1.31 мкм имеют выбросы усиления (с последующим экспоненциальным спадом), что обусловлено изменением населенности лазерного уровня [11]. При включении сигнала на $\lambda = 1.31$ мкм непрерывный (пробный) сигнал на $\lambda = 1.33$ мкм уменьшался примерно на 25%–30%, а при его отключении – восстанавливался до исходного уровня. Наблюдаемые изменения объясняются вариацией инверсной населенности. По спаду сигнала на $\lambda = 1.31$ мкм можно оценить характерные времена выхода BDFA на установившийся режим работы, что обусловлено насыщением усиления.

Зависимость времени насыщения усиления от мощности накачки показана на рис.2,б. Как и ожидалось, с увеличением мощности накачки время насыщения усиления (выхода на стационарный режим работы усилителя) сокращается с 45 до примерно 18 мкс. Аналогичным образом определялись времена насыщения усиления пробного сигнала. Их зависимость от мощности накачки (рис.2,в) оказалась близка к таковой для модулированного сигнала. После отключения модулированного сигнала (мощностью 0.55 мВт) усиление пробного сигнала возрастало до исходного значения за 25–50 мкс (в зависимости от мощности накачки), что несколько больше времен восстановления усиления. На рис.2,г приведена зависимость времени насыщения усиления пробного сигнала от мощности входного модулированного сигнала, показывающая, что при увеличении мощности сигнала на 1.31 мкм ожидаемо происходит сокращение времени насыщения/восстановления усиления пробного сигнала при неизменной мощности накачки. В этом случае времена

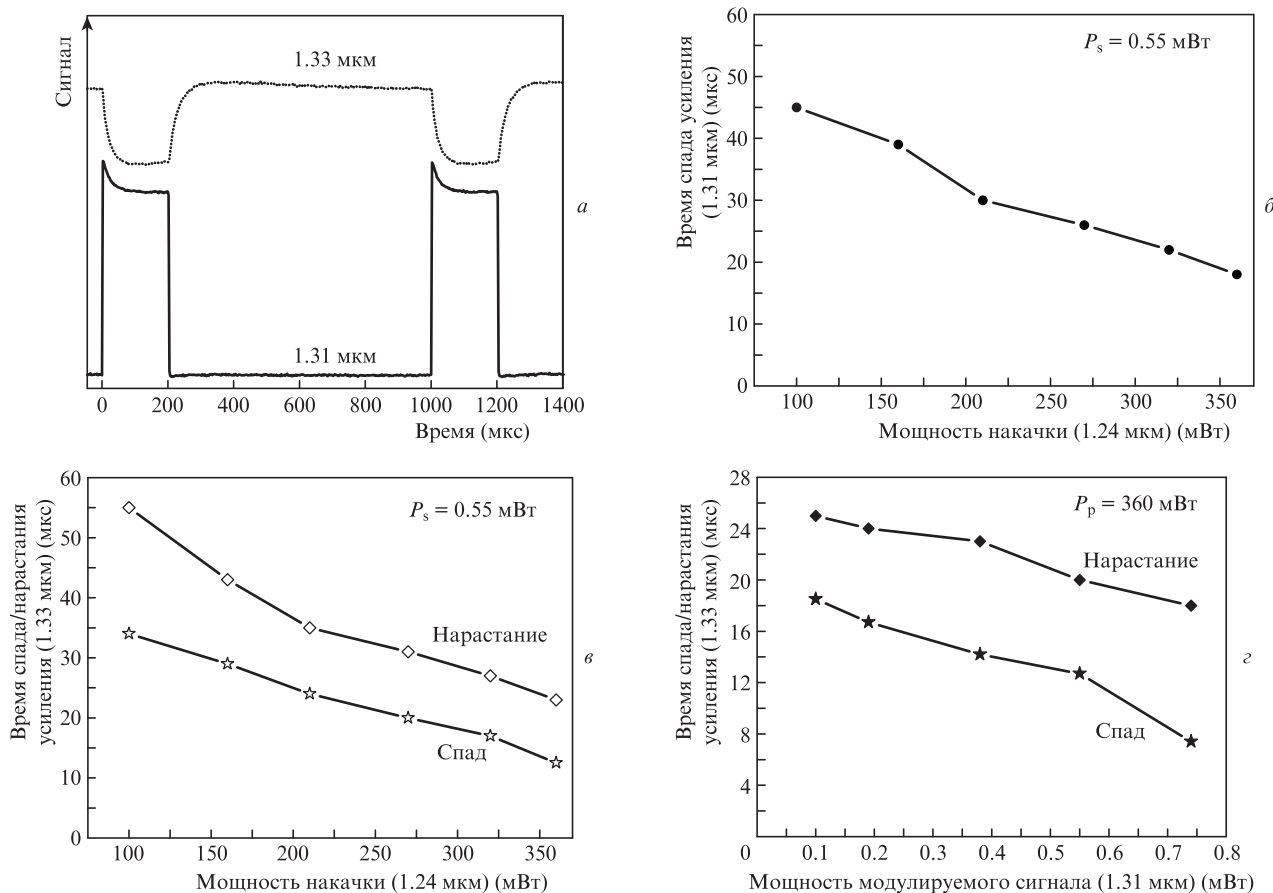


Рис.2. Осциллограммы сигналов на выходе из усилителя (а), а также зависимости от мощности накачки времени спада/нарастания сигнала на длинах волн 1.31 мкм (б) и 1.33 мкм (в) и зависимости времени спада/нарастания сигнала на 1.33 мкм от мощности сигнала на 1.31 мкм при постоянной мощности накачки (г).

насыщения и восстановления усиления пробного сигнала также получились достаточно близкими.

Зная параметры висмутового световода (мощность насыщения на длине волны накачки $P_p^{sat} = 0.9$ мВт и время жизни активных центров на лазерном уровне $\tau = 720$ мкс), можно оценить предельное время восстановления усиления, используя следующее выражение [11]:

$$\tau_{rec} = \frac{\tau}{1 + P_p/P_p^{sat}} = \frac{720}{390} \approx 1.8 \text{ мкс.}$$

Оценка времени выхода BDFA на стационарный режим работы τ_{sat} показала, что $\tau_{sat} \approx \tau_{rec}$. Полученные в результате оценки предельные параметры коррелируют с экспериментальными данными.

Для изучения эффектов перекрестных помех (кросс-модуляции) в висмутовом усилителе сигнал на длине волны 1.31 мкм модулировался с помощью генератора синусоидальных импульсов. На рис.3 показаны формы модулированного и пробного сигналов для частот $\Omega = 100$ Гц и 1 МГц. Видно, что синусообразная модуляция ($\Omega = 100$ Гц) сигнала на $\lambda = 1.31$ мкм приводит к соответствующей модуляции пробного сигнала на $\lambda = 1.33$ мкм. Как и ожидалось, наблюдаемый эффект сильно зависит от Ω : на более высокой частоте модуляция пробного сигнала заметно ниже, и наоборот.

Для оценки влияния кросс-модуляционных процессов на работу любого усилителя используется зависимость отношения минимальной и максимальной оптических мощностей сигнала G от частоты модуляции. Такая зави-

симость (рис.4) была экспериментально получена для тестируемого BDFA. Видно, что при $\Omega < 10$ кГц процесс кросс-модуляции оказывает заметное влияние на пробный сигнал и практически не существует при $\Omega > 100$ кГц. Аналогичные результаты для подобного усилителя были получены в работе [12].

Для численного расчета влияния помех, вызванных кросс-модуляцией, на работу BDFA с накачкой излучением на длине волны 1240 нм использовалась типичная квазидвухуровневая система энергетических уровней, плотность населенности возбужденного уровня в которой описывается в соответствии со стандартным уравнением [11]:

$$\frac{dN_2(z,t)}{dt} = \frac{1}{\tau} [\tau W_{12} N - \tau (W_{12} + W_{21}) N_2(z,t) - N_2(z,t)], \quad (1)$$

где

$$\tau W_{12} = \sum_{i=P, S_1, S_2} \frac{1}{1 + \eta_i} \frac{P_i(z,t)}{P_{sat}(v_i)}, \quad \tau (W_{12} + W_{21}) = \sum_{i=P, S_1, S_2} \frac{P_i(z,t)}{P_{sat}(v_i)},$$

$$\eta_i = \frac{\sigma_e(v_i)}{\sigma_a(v_i)}, \quad P_{sat}(v_i) = \frac{h\nu_i}{\tau[\sigma_e(v_i) + \sigma_a(v_i)]} A_{eff};$$

τ – время жизни активных центров в возбужденном состоянии; $\sigma_{e,a}(v_i)$ – сечения излучения (е) и поглощения (а) на частоте v_i ; N – концентрация активных центров; $A_{eff} = \pi \omega_i^2 / \Gamma_i$ – эффективная площадь, учитывающая раз-

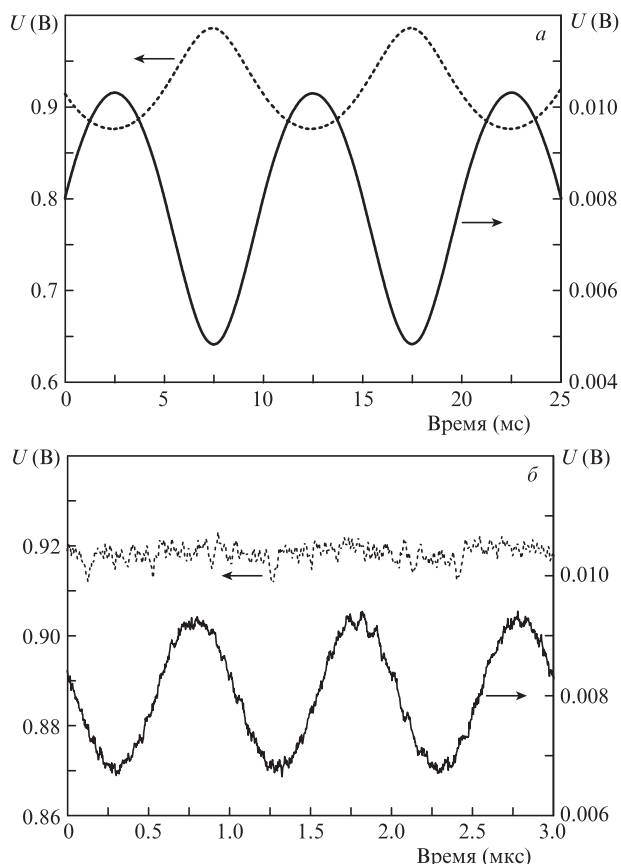


Рис.3. Осциллограммы модулированного (сплошная кривая, $\lambda = 1.31$ мкм) и пробного (пунктир, $\lambda = 1.33$ мкм) сигналов на выходе BDFA при частоте модуляции $\Omega = 100$ Гц (а) и 1 МГц (б).

мер пятна интенсивности света основной моды ($\bar{\omega}_i^2$), а также перекрытие Γ профиля данной моды с профилем распределения активных центров; P , S_1 и S_2 – мощности накачки, пробного и основного сигналов соответственно; W_{12} и W_{21} – вероятности вынужденных переходов из основного в возбужденное состояние и наоборот соответственно.

Если предположить, что самонасыщение BDFA пренебрежимо мало, а время изменения населенности воз-

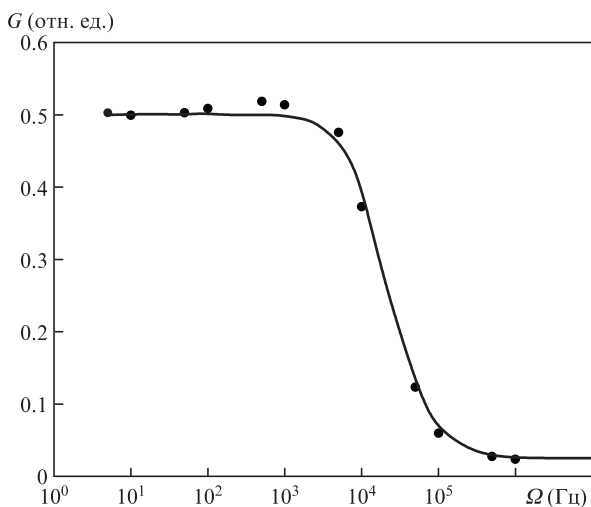


Рис.4. Зависимость отношения минимальной и максимальной оптических мощностей пробного сигнала G от частоты модуляции входного сигнала Ω (сплошная кривая – расчет, точки – эксперимент).

бужденного состояния меньше времени прохождения света через BDFa, скоростные уравнения для мощности накачки и сигналов могут быть выражены следующим образом [11]:

$$\frac{dP_i(z,t)}{dt} = \left[(1 + \eta_i) \frac{N_2(z,t)}{N} - 1 \right] \times \alpha(v_i) P_i(z,t) - \alpha_{BG}(v_i) P_i(z,t), \quad (2)$$

где $\alpha(v_i) = \Gamma_i \sigma_a(v_i) N$ – поглощение слабого сигнала висмутовыми активными центрами (активное поглощение); $\alpha_{BG}(v_i)$ – оптические фоновые потери. Численное решение уравнений (1) и (2) для накачки и сигналов прямого распространения осуществлялось в «экосистеме» Python, включающей в себя библиотеки SciPy, содержащие алгоритмы, в том числе для решения дифференциальных уравнений (см. www.scipy.org). Численный расчет выполнялся с использованием приведенных ниже параметров. Распределение активных центров по поперечному сечению и профиль основной моды висмутового световода были взяты из работы [9].

| | |
|--|--------------------------|
| Сечение поглощения на длине волны накачки (1.24 мкм) $\sigma_a(v_p)$ (м ²) | 2.36 × 10 ⁻²⁴ |
| Сечение излучения на длине волны накачки (1.24 мкм) $\sigma_e(v_p)$ (м ²) | 8.75 × 10 ⁻²⁵ |
| Сечение поглощения на длине волны модулированного сигнала (1.31 мкм) $\sigma_a(v_{S_1})$ (м ²) | 1.86 × 10 ⁻²⁴ |
| Сечение излучения на длине волны модулированного сигнала (1.31 мкм) $\sigma_e(v_{S_1})$ (м ²) | 1.86 × 10 ⁻²⁴ |
| Сечение поглощения на длине волны пробного сигнала (1.33 мкм) $\sigma_a(v_{S_2})$ (м ²) | 1.47 × 10 ⁻²⁴ |
| Сечение излучения на длине волны пробного сигнала (1.33 мкм) $\sigma_e(v_{S_2})$ (м ²) | 1.94 × 10 ⁻²⁴ |
| Время жизни люминесценции τ (мкс) | 720 |
| Длина активного световода L (м) | 110 |
| Активное поглощение на длине волны накачки $\alpha(v_p)$ (дБ) | 0.45 |
| Активное поглощение на длине волны модулированного сигнала $\alpha(v_{S_1})$ (дБ) | 0.41 |
| Активное поглощение на длине волны пробного сигнала $\alpha(v_{S_2})$ (дБ) | 0.4 |
| Оптические потери на длине волны накачки $\alpha_{BG}(v_p)$ (дБ) | 0.06 |
| Оптические потери на длине волны модулированного сигнала $\alpha_{BG}(v_{S_1})$ (дБ) | 0.03 |
| Оптические потери на длине волны пробного сигнала $\alpha_{BG}(v_{S_2})$ (дБ) | 0.03 |
| Мощность накачки P (мВт) | 350 |
| Мощность модулированного сигнала S_1 (мВт) | 1 |
| Мощность пробного сигнала S_2 (мкВт) | 100 |
| Интеграл перекрытия основной моды и профиля легирования A_{eff} (мкм ²) | 20 |

Результаты проведенного расчета представлены на рис.4. Хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных свидетельствует о корректности использования данной модели для описания процессов, протекаю-

щих в BDFa; в дальнейшем она может применяться для изучения режимов работы и более детальной оптимизации параметров BDFa.

3. Заключение

Таким образом, в представленной работе продемонстрированы результаты экспериментов и численных расчетов, посвященных переходным процессам усиления, а также перекрестным помехам в BDFa, вызванным модуляцией усиления. Получены зависимости характерных времен снижения и восстановления усиления от мощности модулированного сигнала и мощности накачки. Показано, что при изменении мощности накачки и сигнала характерные времена снижения/восстановления усиления могут изменяться в пределах (10–30 мкс)/(20–60 мкс) соответственно. Эксперименты по изучению кросс-модуляции показали практическую нечувствительность BDFa к перекрестным помехам на частотах свыше 100 кГц, что свидетельствует о потенциальной возможности использования усилителя в приложениях по высокоскоростной передаче данных.

Настоящее исследование было выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 19-79-00034).

1. Дианов Е.М., Двойрин В.В., Машинский В.М., Умников А.А., Яшков М.В., Гурьянов А.Н. *Квантовая электроника*, **35**, 1083 (2005) [*Quantum Electron.*, **35**, 1083 (2005)].
2. Bufetov I.A., Melkumov M.A., Firstov S.V., Riumkin K.E., Shubin A.V., Khopin V.F., Guryanov A.N., Dianov E.M. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **20**, 0903815 (2014).
3. Firstov S.V., Alyshev S.V., Riumkin K.E., Khagai A.M., Kharakhordin A.V., Melkumov M.A., Dianov E.M. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **24**, 0902415 (2018).
4. Thipparapu N., Wang Y., Wang S., Umnikov A., Barua P., Sahu J. *Opt. Mater. Express*, **9**, 2446 (2019).
5. Mikhailov V., Melkumov M.A., Inniss D., Khagai A.M., Riumkin K.E., Firstov S.V., Afanasiev F.V., Yan M.F., Sun Y., Luo J., Puc G.S., Shenk S.D., Windeler R.S., Westbrook P.S., Lingle R.L., Dianov E.M., DiGiovanni D.J., in *Proc. Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2019, OSA Techn. Digest* (Optical Society of America, 2019, paper M1J.4).
6. Taengnoi N., Bottrill K.R.H., Thipparapu N.K., Umnikov A.A., Sahu J.K., Petropoulos P., Richardson D.J. *J. Lightwave Technol.*, **37**, 1826 (2019).
7. Мелькумов М.А., Михайлов В., Хегай А.М., Рюмки К.Е., Фирстов С.В., Афанасьев Ф.В., Гурьянов А.Н., Ян М.Ф., Сан Я., Луо Дж., Пак Дж.С., Шенк С.Д., Винделер Р.С., Вестбрук П.С., Лингл Р.Л., ДиДжиованни Д.Дж., Дианов Е.М. *Квантовая электроника*, **48**, 989 (2018) [*Quantum Electron.*, **48**, 989 (2018)].
8. <https://www.bbcmag.com/breaking-news/ofs-demonstrates-o-band-amplification-with-bismuth-doped-fiber>.
9. Firstov S.V., Khagai A.M., Kharakhordin A.V., Alyshev S.V., Firstova E.G., Ososkov Y.J., Melkumov M.A., Iskhakova L.D., Evlampieva E.B., Lobanov A.S., Yashkov M.V., Guryanov A.N. *Sci. Rep.*, **10**, 11347 (2020).
10. Firstov S., Khagai A., Riumkin K., Ososkov Y., Firstova E., Melkumov M., Alyshev S., Evlampieva E., Iskhakova L., Lobanov A., Khopin V., Abramov A., Yashkov M., Guryanov A. *Opt. Lett.*, **45**, 2576 (2020).
11. Desurvire E. *Erbium-Doped Fiber Amplifiers: Principles and Applications* (New Jersey: Wiley, 2002).
12. Taengnoi N., Bottrill K.R.H., Hong Y., Wang Y., Thipparapu N.K., Sahu J.K., Petropoulos P., Richardson D.J., in *Proc. Conference on Lasers and Electro-Optics, OSA Techn. Digest* (Optical Society of America, 2020, paper SW3R.2).