

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРИЕМА-ПЕРЕДАЧИ СИГНАЛА В РАСПРЕДЕЛЕННОМ АКУСТИЧЕСКОМ ДАТЧИКЕ¹

© 2023 г. А. Т. Туров^{a,b,*}, Ф. Л. Барков^a, М. Е. Белокрылов^{a,c},
Д. Клод^a, Ю. А. Константинов^a

^aПермский федеральный исследовательский центр УрО РАН
Россия, 614990, Пермь, ул. Ленина, 13а

^bПермский национальный исследовательский политехнический университет
Россия, 614990, Пермь, Комсомольский просп., 29

^cПермский государственный национальный исследовательский университет
Россия, 614068, Пермь, ул. Букирева, 15

*e-mail: artemtur442@gmail.com

Поступила в редакцию 21.01.2023 г.

После доработки 30.03.2023 г.

Принята к публикации 01.05.2023 г.

Проводится анализ спектральных, пространственных и временных характеристик зондирующего импульса в опытном образце волоконно-оптического распределенного акустического датчика. Получены зависимости спектрального распределения сигнала, среднего уровня сигнала и видности интерференционной картины от длительности импульса источника излучения и величины тока накачки оптического усилителя. Предложены направления дальнейших исследований в этой области. Собранные данные позволили сделать выводы о возможностях снижения стоимости подобных установок и пригодности предлагаемой конструкции к эксплуатации.

DOI: 10.31857/S0032816223050269, EDN: ZWPVJ1

1. ВВЕДЕНИЕ

Мониторинг вибрационной (акустической) обстановки на сегодняшний день является жизненно важным во многих областях человеческой деятельности — разведке месторождений полезных ископаемых [1, 2], нефте- и газодобыче, переработке [3] и транспортировке [4–6], эксплуатации инженерных сооружений [7, 8] и транспорта [9], охране территорий [10]. Появляются новые потенциальные области применения, например, сельское хозяйство [11, 12]. Зачастую такой вид мониторинга осуществляется при помощи волоконно-оптического распределенного акустического датчика (distributed acoustic sensor, DAS). Интеграция технологии в новые отрасли зачастую ограничивается в том числе высокой стоимостью подобных устройств. Снижение стоимости подобных устройств может быть достигнуто как за счет избавления от некоторых составляющих, допустимого для конкретного применения [13, 14], так и за счёт подбора оборудования с наиболее подходящими для определенных целей па-

раметрами. Последнее позволит избежать включения в установку продуктов с высокой стоимостью и избыточными для данного измерения характеристиками.

DAS, в свою очередь, нередко используют технологию оптической рефлектометрии с разрешением во времени (optical time domain reflectometer, OTDR). В ней пространственное разрешение зависит от длительности импульса. Такая же зависимость связывает отношение сигнал/шум и протяженность датчика. Уменьшение длительности импульса в подобных установках невозможно постоянно компенсировать увеличением его пиковой мощности ввиду того, что при превышении определенного предела в волоконно-оптическом чувствительном элементе помимо используемого технологией упругого, рэлеевского, рассеяния начинает проявляться неупругое, например, бриллюэновское, а также другие нелинейные эффекты. Поэтому одним из наиболее важных компромиссов в DAS и OTDR является соотношение между длительностью импульса (длиной чувствительного элемента, контрастностью получаемых данных) и пространственным разрешением [15].

Зачастую мощности источника излучения в DAS и OTDR оказывается недостаточно для до-

¹ Международная конференция “Оптическая рефлектометрия, метрология и сенсорика 2023”, Россия, Пермь, 24–26 мая 2023 г. (International conference “Optical Reflectometry, Metrology & Sensing 2023”, Russia, Perm, 24–26, May 2023).

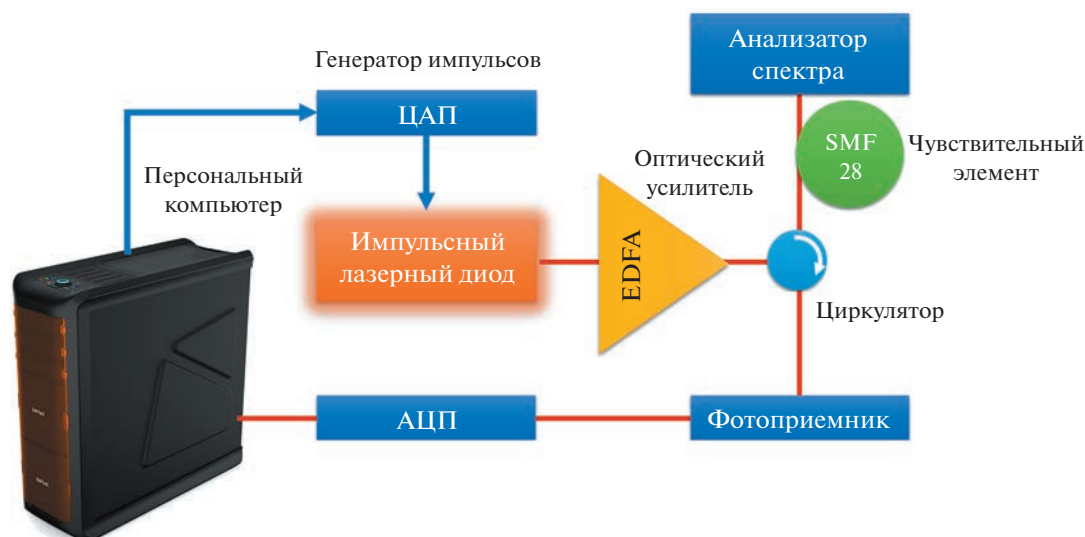


Рис. 1. Схематическое изображение установки, использованной для исследования.

стижения требуемых рабочих параметров, и перед запуском в волоконно-оптический чувствительный элемент импульс пропускается через оптический усилитель. В качестве последнего обычно используется оптический усилитель на волокне, легированном ионами эрбия (EDFA). EDFA также составляет немалую часть конечной стоимости установки, поэтому исследование его влияния на характеристики сигнала в спектральной и пространственной областях является неотъемлемой частью на пути к оптимизации и удешевлению DAS. Однако в большинстве таких исследований [16–21] изучается лишь часть связанных параметров, и восстановить полную картину по экспериментам, выполненным на разных установках, довольно сложно.

В настоящей работе изучаются зависимости пространственных и спектральных характеристик DAS от параметров работы источника излучения и оптического усилителя, связанного с ним. Получение характерных зависимостей для одной и той же “классической” реализации датчика с прямым детектированием, сравнение с теоретическими оценками и объяснение отклонений могут оказаться чрезвычайно полезными при дальнейшем создании простых и доступных устройств подобного рода, а также адаптации их под требования новых заинтересованных отраслей. Данное исследование в отрыве от запланированных будущих работ, конечно же, не претендует на заявленную полноту, а является лишь стартом цикла эмпирического исследования, направленного на проведение экспериментов на единственной “классической” установке DAS прямого детектирования и получение важных для разработчиков DAS зависимостей, ранее описанных теоретически, с учетом различных допущений.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Для изучения зависимости характеристик сигнала обратного рэлеевского рассеяния, несущего информацию о внешних воздействиях на чувствительный элемент, от характеристик зондирующего сигнала и параметров работы источника излучения и усилителя использовалась установка, представленная на рис. 1. Она представляет из себя DAS, основывающийся на технологии когерентной оптической рефлектометрии. Более подробное описание представлено в работе [14]. Источник излучения “DenseLight DL-B12-CLSwwB-Sxxxx-yy-zz” генерировал импульсы с шириной полосы 5 кГц, длиной волны 1550 нм и мощностью 10 мВт, которые затем усиливались “Amonics AEDFA-23” и запускались в чувствительный элемент, состоящий из 1 км оптического волокна “SMF-28”, через циркулятор. В конце линии импульсы попадали в анализатор спектра “Yokogawa”. Сигнал обратного рэлеевского рассеяния из чувствительного элемента записывался ПК через АЦП “la-nlusb” и фотоприемник “Femto HCA-S-200M” на основе InGaAs, настроенный на 1550 нм, как функция времени.

3. ЭКСПЕРИМЕНТ И ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Изучение обозначенных ранее зависимостей было решено сосредоточить на исследовании характера зависимости среднего уровня обратно-рассеиваемого сигнала (рефлектограммы, рис. 2) от тока усиления EDFA и длительности импульса, а также ширины на половине максимума (FWHM) спектра зондирующего сигнала от тех же параметров. В первой серии экспериментов величина тока накачки второго каскада эрбиево-

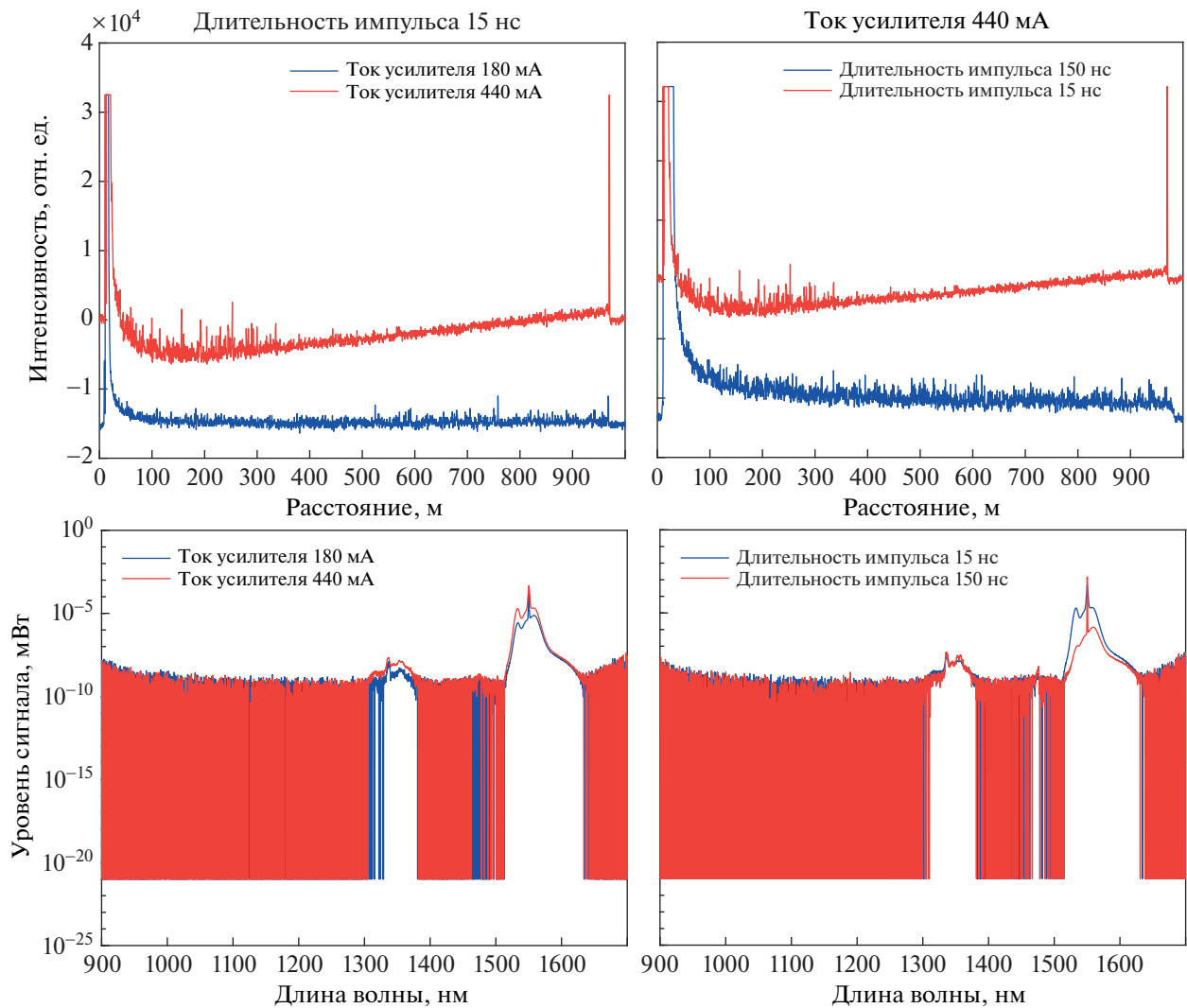


Рис. 2. Спектры и рефлектограммы при различных величинах тока усиления и длительности импульса.

го усилителя изменялась от 180 мА до 440 мА с шагом 20 мА при длительности импульса 15 нс. Ток накачки первого каскада оставался неизменным (70 мА) и был выбран, исходя из минимального значения, при котором наблюдался интерференционный паттерн надлежащего качества. Для каждой величины тока записывались рефлектограмма и спектр зондирующего импульса в конце линии. Затем то же повторялось для длительности импульса в 150 нс.

Во второй серии экспериментов ток накачки второго каскада равнялся 440 мА, для длительностей импульса 10 нс, 100 нс, 1000 нс также записывались рефлектограмма и спектр.

Значительный подъем уровня сигнала к концу линии при короткой длительности импульса и большом токе усиления можно объяснить увеличенной долей спонтанной эмиссии EDFA в сигнале: такой длительности импульса оказывается

недостаточно для существенного усиления. Рефлектограмма представляет собой интерференционную картину. В данном случае интерференция происходит между составляющими сигнала обратного рассеяния в пределах длительности импульса. Излучение спонтанной эмиссией в оптическом усилителе не обладает достаточной для образования интерференционной картины когерентностью. При небольших длительностях импульса не вся энергия накачки успевает реализоваться в виде вынужденного излучения, в связи с чем довольно быстро начинает подниматься уровень непрерывного спонтанного излучения. В этих условиях при определенном токе усиления спонтанная эмиссия начинает преобладать над обратным рассеянием от импульса полезного сигнала раньше, чем фотоприемник успевает получить информацию о рассеянии в конце чувствительного элемента. Таким образом можно

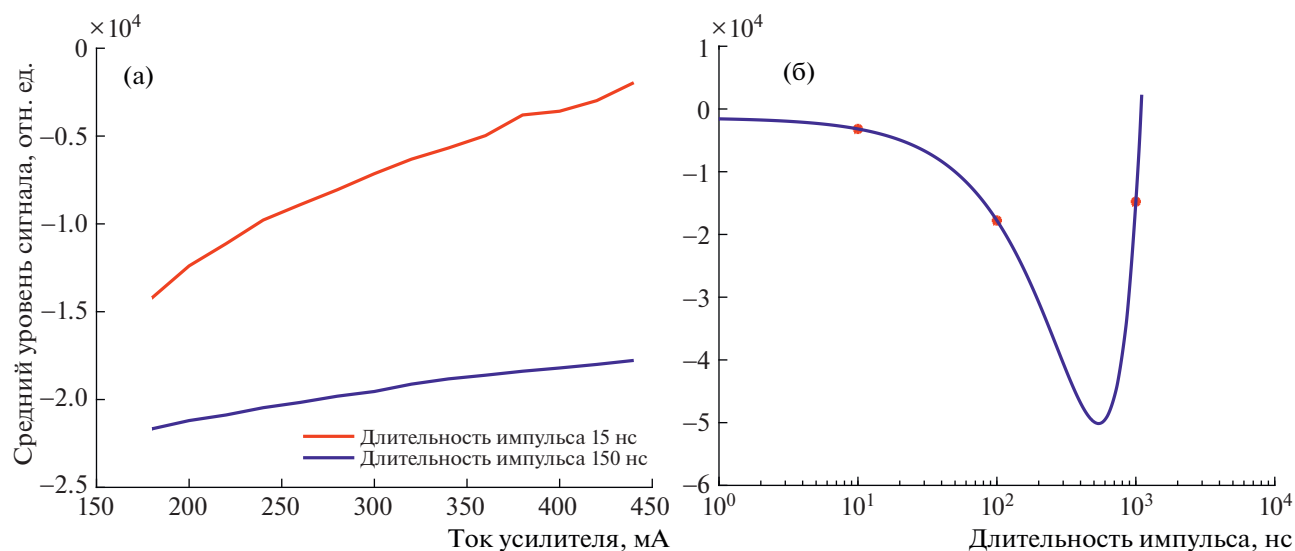


Рис. 3. Зависимость среднего уровня сигнала от тока усиления (а) и длительности импульса (б), красным отмечены точки, полученные в ходе эксперимента.

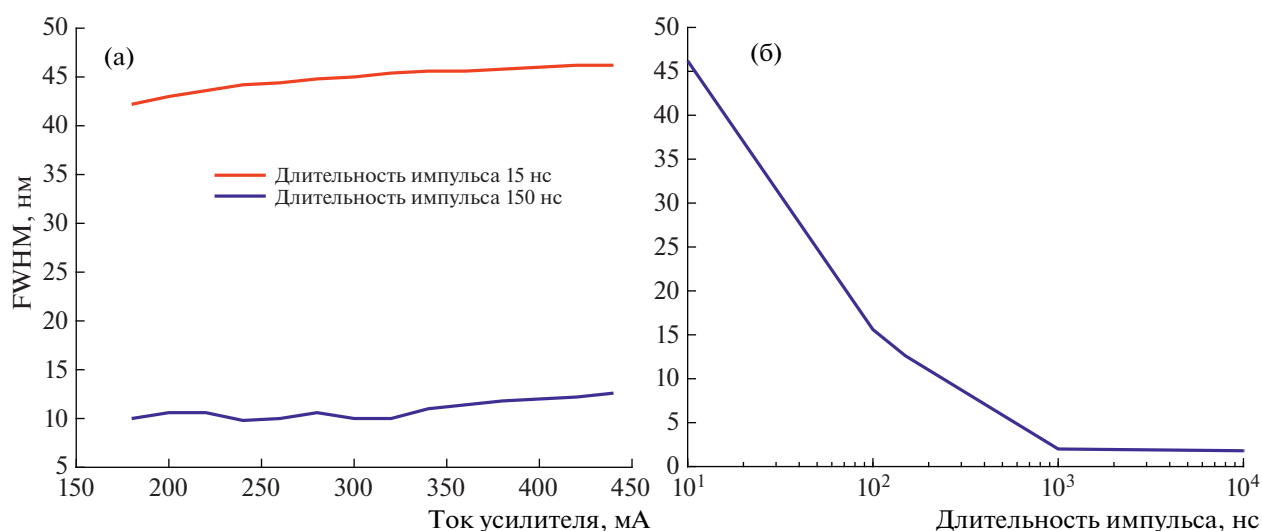


Рис. 4. Зависимость FWHM от тока усиления (а) и длительности импульса (б).

объяснить наклон рефлектограммы при определенных значениях длительности импульса и тока усиления. При больших длительностях импульса этот процесс смещается во времени так, что сигнал обратного рассеяния от конца чувствительного элемента доходит до фотоприемника раньше, чем спонтанная эмиссия поднимается до его уровня. Это, однако, лишь означает, что явление может наблюдаться при большей длине чувствительного элемента. Вид спектров, полученных с конца чувствительного элемента при различных величинах тока и длительности импульса, подтверждает это предположение (рис. 2, нижний ряд).

Для каждой рефлектограммы рассчитан средний уровень сигнала и построены его зависимости от тока усиления (рис. 3) и длительности импульса. Для каждого спектра рассчитана FWHM и построены ее зависимости от тока усиления и длительности импульса (рис. 4).

В то время как зависимости для FWHM не представляют особого интереса, поскольку сходятся с ожиданиями (спектр тем шире, чем меньше длительность импульса, из-за преобладания широкополосной спонтанной эмиссии EDFA и чирпа импульса, вносимого импульсным лазером с управлением по току), зависимости среднего уровня сигнала несколько отклоняются от изначальных

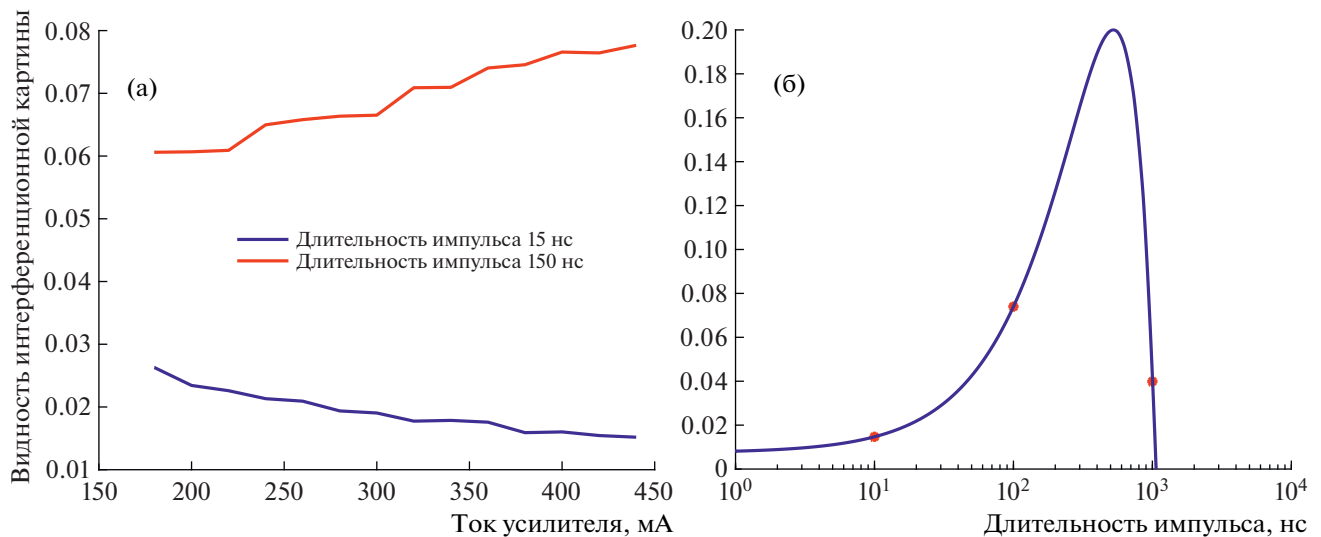


Рис. 5. Зависимость видности интерференционной картины от тока усиления (а) и длительности импульса (б).

теоретических предположений. При длительности импульса в 150 нс, которой должно быть достаточно для хорошего усиления полезного сигнала (рис. 2), его средний уровень оказывается ниже при всех величинах тока усиления, чем для импульса длительностью в 15 нс. Более того, зависимость среднего уровня сигнала от длительности импульса обнаруживает некоторый его рост при больших длительностях (в районе 1000 нс).

Было выдвинуто предположение, что при длительности импульса порядка 100 нс из-за достаточного усиления увеличивается контрастность интерференционной картины (рефлектограммы) — уровень сигнала становится больше в максимумах, но меньше в минимумах. Вероятно, на понижении уровня сигнала из-за этого может сказываться в общем довольно сложный вид получаемой картины интерференции. При больших длительностях импульса на ухудшении контрастности сказывается многолучевая интерференция.

Для подтверждения этой гипотезы было решено рассчитать для каждой рефлектограммы видимость интерференционной картины (рис. 5), а для каждого спектра — отношение спектральной плотности мощности полезного сигнала (узкий пик в окрестностях 1550 нм) и спонтанной эмиссии (рис. 6), для чего были построены зависимости от тока усиления и длительности импульса.

Видность интерференционной картины (контрастность рефлектограммы) вычислялась по формуле

$$V = \frac{\max - \min}{\max + \min},$$

где $\max$ — среднее значение уровня сигнала в пиках рефлектограммы, $\min$ — среднее значение уровня сигнала во впадинах рефлектограммы.

Для расчета использовалась область рефлектограммы от 200 до 960 м.

Полученные зависимости подтверждают предположение: при малых длительностях импульса и при увеличении тока усиления и без того малая видность ухудшается из-за усиления спонтанной эмиссии. При оптимальных для этой длины чувствительного элемента длительностях импульса видность лучше и она увеличивается с увеличением тока усиления. При слишком больших длинах импульса видность снова несколько ухудшается, но в этом случае, вероятно, из-за многолучевой интерференции.

Ни при какой длительности импульса не наблюдается существенных изменений соотношения между спектральной плотностью полезного сигнала и спонтанной эмиссии при изменении тока усиления. При малой длительности импульса наблюдается небольшое уменьшение отношения полезного сигнала к спонтанной эмиссии, что согласуется с предположениями и соответствующей зависимостью для видности. При длительности импульса в 150 нс и увеличении тока усиливается и доля полезного сигнала в общем, что также соотносится с теоретическим предсказанием и функцией видности. Наблюдается ожидаемое значительное увеличение доли полезного сигнала относительно спонтанной эмиссии при увеличении длительности импульса. В исследованном диапазоне длительностей импульса наблюдается лишь рост доли полезного сигнала в общем, что также хорошо согласуется с ожиданиями.

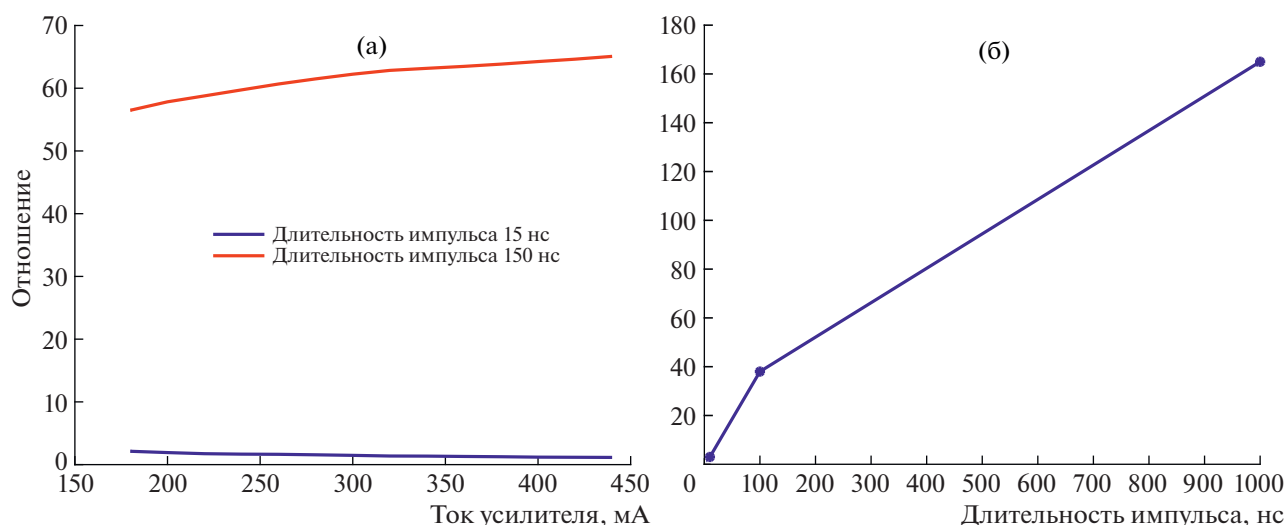


Рис. 6. Зависимость отношения спектральных плотностей полезного сигнала и спонтанной эмиссии от тока усиления (а) и длительности импульса (б).

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение стоит отметить, что в данной работе были исследованы зависимости пространственных и спектральных характеристик выходного сигнала DAS от параметров зондирующего импульса и, в свою очередь, параметров генерирующего и усиливающего оборудования. Выявлено и объяснено влияние длительности импульса лазера и тока усиления EDFA на средний уровень выходного сигнала и его контрастность, ширину и вид спектра зондирующего сигнала. Ни при каких исследованных значениях параметров в спектре не обнаруживалось посторонних компонент, отвечающих нелинейным эффектам, либо используемое оборудование не позволяло их разрешить (разрешение анализатора спектра составляло 0.2 нм). Не вполне линейный характер зависимостей среднего уровня сигнала для 1550 нм от тока усиления и длительности импульса с учетом имеющейся спектральной информации остается объяснимым и не предполагает перекачки энергии из основной длины волны в те, что соответствуют нелинейным эффектам. Дальнейшая работа в этой области может быть направлена на получение спектральной информации с большим разрешением и получение большего количества промежуточных точек для расчета зависимостей, связанных с длительностью импульса. Кроме того, точность получаемых данных может быть увеличена звукоизоляцией чувствительного элемента, использованием лазера с непрерывным излучением и оптическим модулятором, фильтрацией излучения на выходе оптического усилителя (например, при помощи ВБР). Тем не менее, стоит отметить, что предыдущие работы [12, 14] демонстрируют возможность применения DAS в новых

отраслях и без использования упомянутых выше элементов, что позволяет снизить стоимость и чувствительность к условиям внешней среды при сохранении производительности в допустимых пределах. В данной работе исследовались спектральные характеристики проходящего излучения — анализатор спектра устанавливался в конце чувствительного элемента. Однако также остается немаловажным изучение спектральных характеристик обратно-рассеянного излучения, поступающего на входной конец чувствительного элемента и формирующего рефлектограмму.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания с номером государственной регистрации темы 122031100058-3.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность сотруднику Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН, В.Н. Сорокину.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hartog A., Frignet B., Mackie D., Clark M. // *Geophys. Prosp.* 2014. V. 62. P. 693. <https://doi.org/10.1111/1365-2478.12141>
2. Parker T.R., Shatalin S.V., Farhadiroushan M., Miller D. In *Second EAGE Workshop on Permanent Reservoir Monitoring 2013. Current and Future Trends*, 2013. P. 351. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20131303>

3. Liu Q., Liu T., He T., Li H., Yan Z., Zhang L., Sun Q. // Opt. Express. 2021. V. 29. P. 11538. <https://doi.org/10.1364/OE.412935>
4. Ren L., Jiang T., Jia Z.G., Li D.S., Yuan C.L., Li H.N. // Measurement. 2018. V. 122. P. 57. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.03.018>
5. Peng Z., Jian J., Wen H., Gribok A., Wang M., Liu H., Huang S., Mao Z.-H., Chen K.P. // Opt. Express. 2020. V. 28. P. 27277. <https://doi.org/10.1364/OE.397509>
6. MacLean A., Moran C., Johnstone W., Culshaw B., Marsh D., Parker P. // Sensors. Actuators A: Phys. 2003. V. 109. P. 60. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2003.09.007>
7. Bakhout E.G., Zhang C., Cheng M.H. // Aerospace. 2020. V. 7. P. 125. <https://doi.org/10.3390/aerospace7090125>
8. Chen M., Li B., Masoudi A., Bull D., Barton J.M. In 2020 International Conference on Intelligent Transportation, Big Data & Smart City (ICITBS). 2020. P. 102. <https://doi.org/10.1109/ICITBS49701.2020.00030>
9. Li Z., Zhang J., Wang M., Zhong Y., Peng F. // Opt. Express. 2020. V. 28. P. 2925. <https://doi.org/10.1364/OE.28.002925>
10. Taylor H.F., Lee C.E. U.S. Patent No. 5,194,847. Washington DC: U.S. Patent and Trademark Office. 1993.
11. Wang B., Mao Y., Ashry I., Al-Fehaid Y., Al-Shawaf A., Ng T.K., Yu C., Ooi B.S. // Sensors. 2021. V. 21. P. 1592. <https://doi.org/10.3390/s21051592>
12. Туров А.Т., Константинов Ю.А., Белокрылов М.Е., Максимов А.Ю. // Фотон-экспресс. 2021. Т. 6. С. 383. <https://doi.org/10.24412/2308-6920-2021-6-383-384>
13. Белокрылов М.Е., Константинов Ю.А., Кривошеев А.И., Туров А.Т. // Фотон-экспресс. 2021. Т. 7. С. 16. <https://doi.org/10.24412/2308-6920-2021-7-16-18>
14. Туров А.Т., Константинов Ю.А., Белокрылов М.Е., Максимов А.Ю. // Прикладная фотоника. 2021. Т. 8. С. 33.
15. Lu P., Lalam N., Badar M., Liu B., Chorpening B.T., Buric M.P., Ohodnicki P.R. // Appl. Phys. Rev. 2019. V. 6. P. 041302. <https://doi.org/10.1063/1.5113955>
16. Muanenda Y., Oton C.J., Faralli S., Di Pasquale F. // IEEE Photonics J. 2015. V. 8. P. 1. <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2015.2508427>
17. Fernández-Ruiz M.R., Costa L., Martins H.F. // Sensors. 2019. V. 19. P. 4368. <https://doi.org/10.3390/s19204368>
18. Jia Z., Campos L.A., Xu M., Zhang H., Gonzalez-Herandez M., Martins H.F., Zhan Z. In Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). 2021. P. 1.
19. Nesterov E.T., Zhirnov A.A., Stepanov K.V., Pnev A.B., Karasik V.E., Tezadov Y.A., Kondrashin E.V., Ushakov A.B. // J. Phys.: Conference Series. 2015. V. 584. P. 012028. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/584/1/012028>
20. Zhou J., Pan Z., Ye Q., Cai H., Qu R., Fang Z. // J. Lightwave Technol. 2013. V. 31. P. 2947. <https://doi.org/10.1109/JLT.2013.2275179>
21. Chernutsky A.O., Zhirnov A.A., Fedorov A.K., Nesterov E.T., Stepanov K.V., Tezadov Y.A., Kondrashin E.V., Karasik V.E., Pnev A.B. In Electromagnetics Research Symposium-Spring (PIERS). 2017. P. 2231. <https://doi.org/10.1109/PIERS.2017.8262121>