

УДК 621.373.8

ПРИМЕНЕНИЕ ДВУХСЕРДЦЕВИННОГО СВЕТОВОДА СО СВЯЗЬЮ МЕЖДУ СЕРДЦЕВИНАМИ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ УЗКОПОЛОСНОГО ЭРБИЕВОГО ЛАЗЕРА

© К. В. Проскурина¹, М. И. Скворцов¹, Е. В. Голиков¹,
С. Р. Абдуллина¹, А. В. Достовалов¹, О. Н. Егорова², С. Л. Семёнов²,
С. А. Бабин¹

¹Институт автоматизации и электрометрии СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1

²Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН,
Научный центр волоконной оптики им. Е. М. Дианова РАН,
119333, Москва, ул. Вавилова, 38
E-mail: quertymikhails@gmail.com

Представлен эрбиевый лазер в конфигурации с полукрытым резонатором, состоящим из узкополосной волоконной брэгговской решётки и случайной распределённой обратной связи в искусственном рэлеевском отражателе. Для дополнительной спектральной фильтрации использовался отрезок десятиметрового двухсердцевинного волоконного световода, намотанного на катушку диаметром 9 см. Достигнут одночастотный режим генерации с максимальной выходной мощностью 4,4 мВт, при этом ширина линии генерации составила 2 кГц.

Ключевые слова: одночастотные волоконные лазеры, волоконная брэгговская решётка, случайная распределённая обратная связь, эрбиевый световод.

DOI: 10.15372/AUT20250105

EDN: WDLA00

Введение. Волоконные узкополосные лазеры привлекательны для широкого спектра применений: от оптических телекоммуникаций [1] и сенсоров [2, 3] до научных исследований и спектроскопии [4, 5]. Как правило, в данных областях уже используются одночастотные волоконные лазеры с распределённой обратной связью (РОС-лазеры) [2, 6, 7], трудно реализуемые ввиду сложной методики изготовления брэгговских решёток с фазовым сдвигом [8, 9]. А более простые лазеры с распределёнными брэгговскими отражателями (РБО-лазеры) [10] имеют проблемы со стабильностью одночастотного режима генерации. В первую очередь, это связано с тем, что даже небольшое воздействие на волокно, находящееся между двумя волоконными брэгговскими решётками (ВБР), а именно: растяжение на доли микрона или незначительное изменение температуры — приводит к сдвигу их относительной фазы и, как следствие, к перескоку между продольными модами или к многочастотной генерации. При этом для конфигурации РБО-лазера с длинным резонатором (>10 см) в генерацию выходит большое количество продольных мод. Применение случайной распределённой обратной связи (СРОС) в искусственном рэлеевском отражателе, изготовленном с использованием фемтосекундной поточечной методики [11] в полукрытой схеме резонатора [12], позволяет реализовать одночастотный режим вблизи порога генерации даже при физической длине резонатора более одного метра. Это связано с тем, что оптический спектр искусственного отражателя состоит из узкополосных пиков, что совместно с ВБР, ширина которой не превышает 70 пм, приводит к данному эффекту. При этом выходная мощность излучения составляет не более 3 мВт в случае одночастотной генерации, а ширина линии — не менее 10 кГц. При дальнейшем повышении мощности

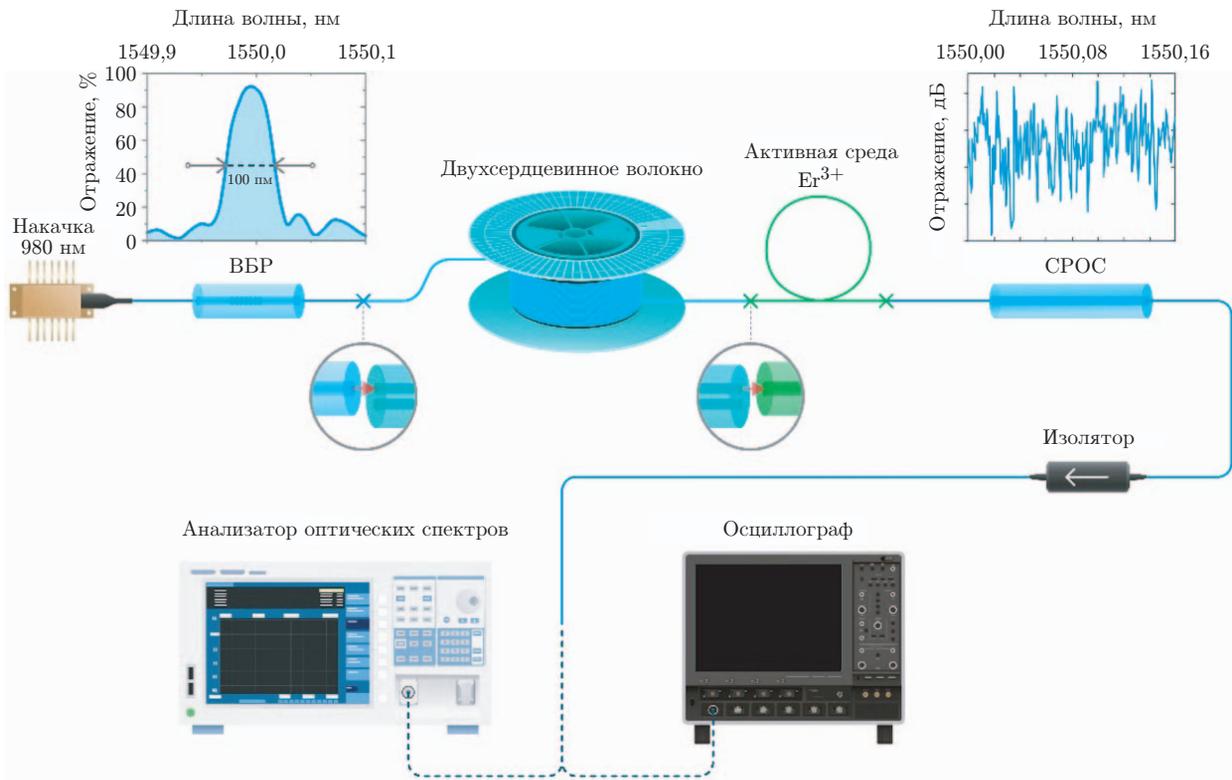


Рис. 1. Экспериментальная схема установки

накачки в спектр генерации могло выходить до четырёх продольных мод. В [13] показано, что намотанный на катушку двухсердцевинный световод со связью между сердцевинами обладает фильтрующими свойствами. Это обусловлено разностью констант распространения мод в сердцевинах, которая может возникнуть из-за кручения волокна при намотке на катушку, что и приводит к модуляции в спектре пропускания.

В представленной работе продемонстрирован эрбиевый лазер на основе полукрытого резонатора, образованного узкополосной ВБР и СРОС. В качестве дополнительного спектрального фильтра, кроме активного волокна, между зеркалами был приварен десятиметровый отрезок двухсердцевинного световода со связью между сердцевинами, намотанный на катушку диаметром 9 см. Для данной конфигурации продемонстрирован одночастотный режим генерации, а также исследованы мощностные и спектральные характеристики выходного излучения.

Экспериментальная часть. На рис. 1 представлена экспериментальная схема лазера: накачка осуществлялась лазерным диодом с длиной волны 980 нм и максимальной выходной мощностью 500 мВт. Полуоткрытый резонатор образован высокоотражающей ВБР и СРОС в искусственном рэлеевском отражателе, изготовленном с применением фемтосекундной поточечной методики. В качестве активной среды использовалось волокно длиной 50 см, легированное эрбием (nLIGHT Er80-8/125-PM), с диодной накачкой через ВБР. Коэффициент поглощения эрбиевого волокна на длине волны 1530 нм составляет 80 дБ/м. В резонатор между ВБР и эрбиевым световодом также помещался двухсердцевинный световод длиной 10 м.

Спектральная фильтрация в резонаторе обеспечивалась ВБР с резонансной длиной волны 1550 нм, коэффициентом отражения 90 % и спектральной шириной ≈ 100 нм и рэлеевским отражателем с интегральным коэффициентом отражения 0,012 % и случайной

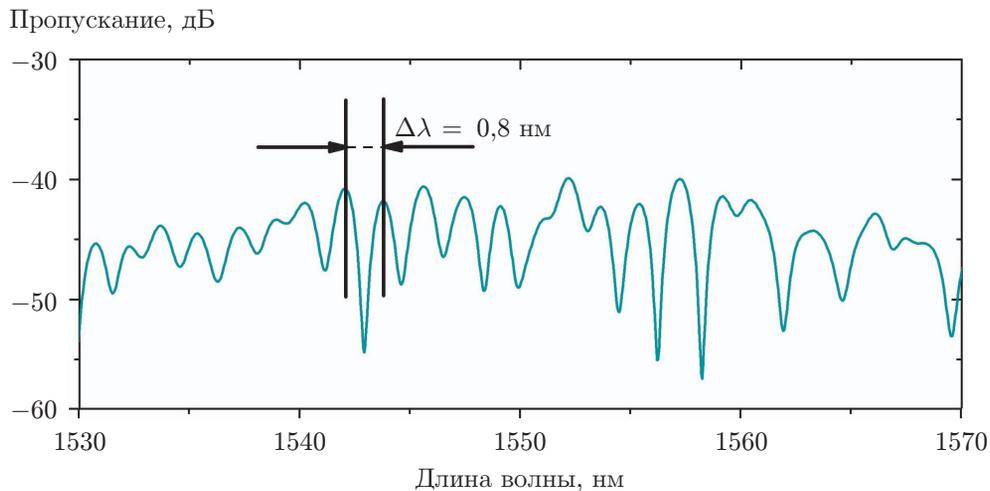


Рис. 2. Спектр пропускания двухсердцевинного световода, намотанного на катушку

модуляцией спектра (спектры приведены схематично на вставках на рис. 1). Выходной отражатель представлял собой случайную структуру показателя преломления длиной 30 см, изготовленную в одномодовом волокне с применением поточечной фемтосекундной методики. Данные структуры описаны в работах [12, 14], где показано, что оптический спектр этих отражателей представляет собой широкополосный набор узких пиков/провалов с шириной, не превышающей 40 нм. Коэффициент отражения такой искусственной структуры эквивалентен естественному рэлеевскому отражению от 5-км отрезка волокна SMF-28. Дополнительно в резонатор помещался двухсердцевинный световод, намотанный на катушку диаметром 9 см, радиус сердцевин равен $3 \pm 0,3$ мкм, а среднее расстояние между ними — $17,1 \pm 0,3$ мкм. Длина биений, характеризующая связь сердцевин, для такой геометрии световода на длине волны излучения 1,55 мкм не превышает 10 см [15]. Спектр пропускания данного волокна, намотанного на катушку, вблизи 1550 нм представлен на рис. 2. Характерный период модуляции спектра варьируется вблизи значения ~ 1 нм, ширина пиков пропускания на уровне -3 дБ составляет ~ 100 пм, а амплитуда модуляции может превышать 10 дБ, что создаёт дополнительную спектральную фильтрацию.

Чтобы свести к минимуму влияние обратного отражения от компонент и элементов измерительной схемы, сразу после рэлеевского отражателя устанавливался оптический изолятор. Спектральные характеристики и выходная мощность лазера измерялись анализатором оптических спектров Yokogawa AQ6370 (Япония) со спектральным разрешением 20 пм. Для изучения частотного состава применялся радиочастотный анализатор (РЧ) спектров Agilent N9010A (США) и 5 ГГц фотодиод Thorlabs DET08CFC (США).

На рис. 3 представлена измеренная зависимость мощности выходного излучения лазера от мощности накачки.

Высокая пороговая мощность накачки 150 мВт обусловлена как большими потерями на сварках между двухсердцевинным и активным световодами, так и изгибными потерями двухсердцевинного световода. Выходная мощность при максимальной мощности накачки 500 мВт составила 11,5 мВт. Таким образом, дифференциальная эффективность лазера соответствует $\eta \approx 3,3$ %. На рис. 4, а, б представлены оптический и РЧ-спектры: одночастотный режим генерации наблюдался до выходной мощности 4,4 мВт, а отношение

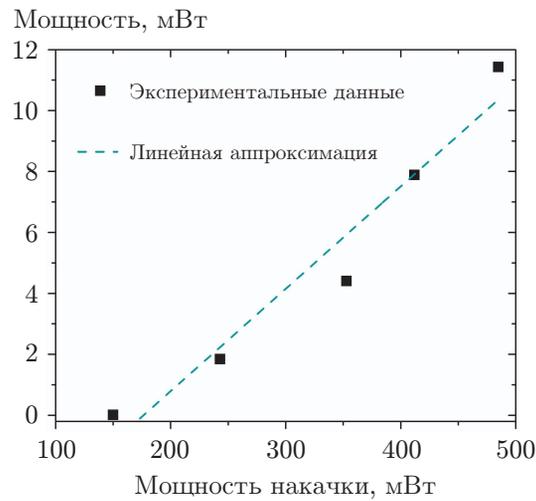


Рис. 3. Зависимость выходной мощности лазера от мощности накачки

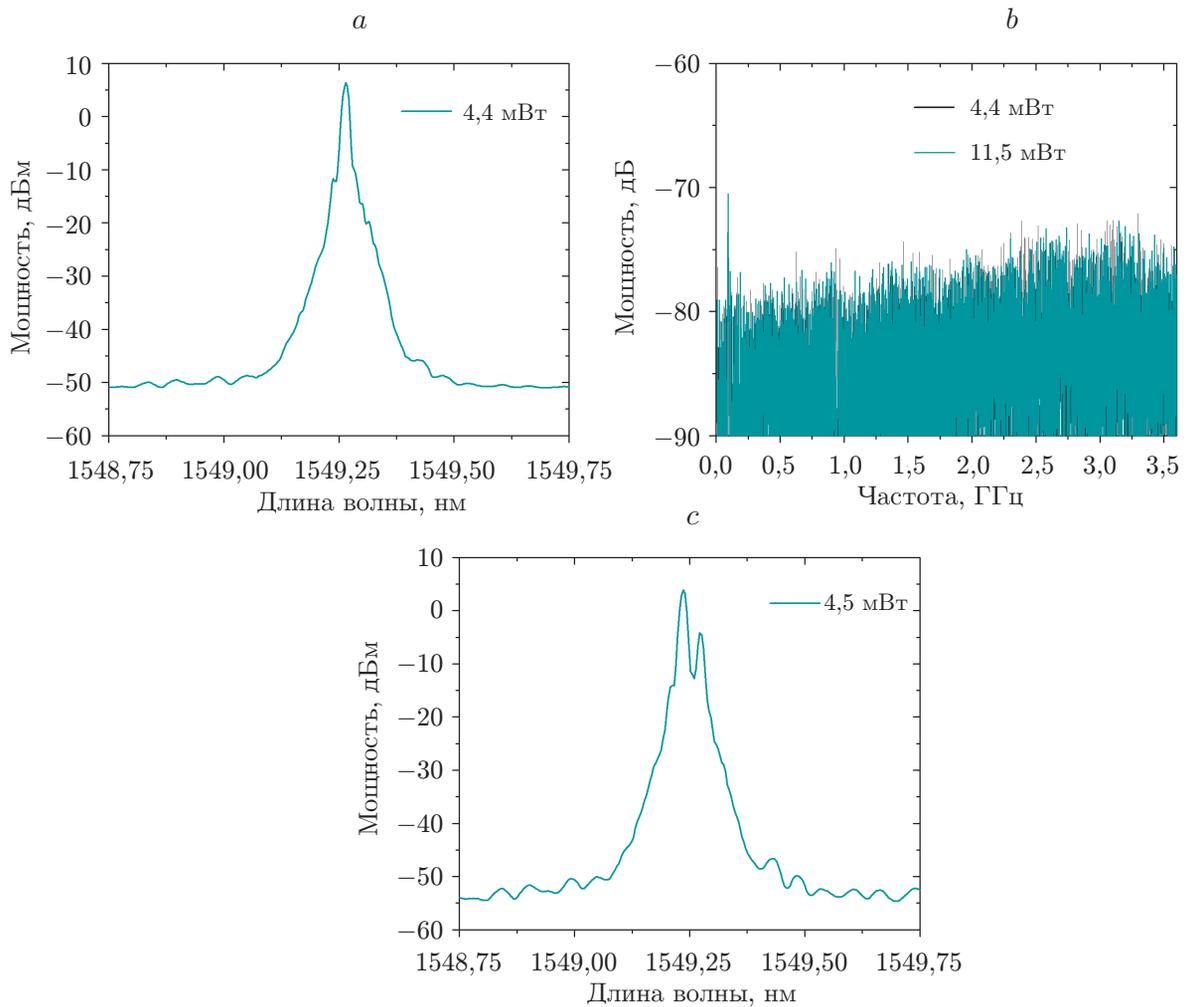


Рис. 4. Оптический спектр при выходной мощности генерации 4,4 мВт (a). Радиочастотные спектры излучения при мощности 4,4 мВт (чёрный цвет) и 11,5 мВт (зелёный цвет) (b). Оптический спектр при выходной мощности генерации 4,5 мВт для конфигурации с односердцевинным световодом (c)

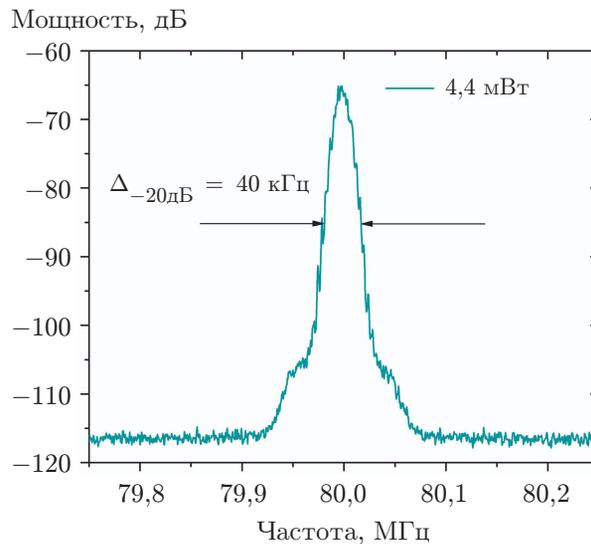


Рис. 5. Радиочастотный спектр биения лазера

сигнал/шум составило ≈ 60 дБ. При повышении выходной мощности до 11,5 мВт линия генерации уширялась до $\approx 0,7$ пм в многочастотном режиме, о чём свидетельствует пик биений продольных мод на частоте 90 МГц.

Для сравнения частотного состава в разных конфигурациях двухсердцевинный световод заменён на катушку односердцевинного волокна SMF-28, длина которого соответствовала 10 м, а диаметр катушки составлял также 9 см. Для максимальной мощности в 4,4 мВт, при которой наблюдался одночастотный режим генерации в конфигурации с двухсердцевинным световодом, в схеме с волокном SMF-28 для эквивалентной выходной мощности в оптическом спектре присутствует вторая мода с отстройкой от основной на $\Delta\lambda \approx 40$ пм (рис. 4, с). Таким образом, использование двухсердцевинного световода обеспечивает дополнительную спектральную фильтрацию излучения, приводящую к одночастотному режиму генерации при данной мощности.

Измерение ширины линии для конфигурации с двухсердцевинным световодом при выходной мощности 4,4 мВт проводилось с применением методики самогетеродинамирования [16]: в интерферометре Маха — Цендера одно из плеч включало линию задержки в 25 км, второе — акустооптический модулятор, управляемый генератором сигналов Agilent 33250A. Измеренный РЧ-спектр биения представлен на рис. 5, ширина линии генерации на временном интервале линии задержки 120 мкс составляет 40 кГц на уровне –20 дБ от максимального значения, что соответствует 2 кГц на полувысоте [17]. Следовательно, спектральные и мощностные характеристики СРОС-лазера в конфигурации с двухсердцевинным световодом выглядят более предпочтительными для прикладных задач, чем в конфигурации с полуоткрытым резонатором, где используется односердцевинное волокно с длиной резонатора на порядок меньше [12].

Закключение. Таким образом, в работе продемонстрирован эрбиевый волоконный лазер в схеме с полуоткрытым резонатором, интегральная длина которого превышает 10 м. Резонатор образован узкополосной ВБР и СРОС в искусственном рэлеевском отражателе в качестве выходного зеркала, для дополнительной спектральной фильтрации в резонатор был включён десятиметровый двухсердцевинный световод на катушке. Данная конфигурация обеспечивает одночастотную генерацию в мощностном диапазоне до 4,4 мВт, ширина линии генерации на временном интервале ~ 100 мкс составила 2 кГц. При максимальной выходной мощности в 11,5 мВт ширина линии достигает 0,7 пм (90 МГц). При этом

исследуемый СРОС-лазер имеет дифференциальную эффективность 3,3 %, что является относительно высокой величиной по сравнению с обычными эрбиевыми РОС-лазерами. Соответственно, данные излучатели потенциально привлекательны для различных сенсорных применений и оптических телекоммуникаций.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 21-72-30024).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Radic S.** Optical communications: Coherent regeneration // *Nat. Photon.* 2010. **4**, Iss. 10. P. 669–670.
2. **Cranch G. A., Flockhart G. M. H., Kirkendall C. K.** Distributed Feedback Fiber Laser Strain Sensors // *IEEE Sensors Journ.* 2008. **8**, Iss. 7. P. 1161–1172.
3. **Zhang X., Zhang F., Jiang S. et al.** Short cavity DFB fiber laser based vector hydrophone for low frequency signal detection // *Photon. Sensors.* 2017. **7**, Iss. 4. P. 325–328.
4. **Wallerand J.-P.** A frequency doubled amplified-fiber laser for molecular iodine spectroscopy near 515 nm // *Proc. of the Conf. on Precision Electromagnetic Measurements.* London, UK, 27 June – 2 July, 2004. P. 50–51.
5. **Chou C. W., Hume D. B., Rosenband T., Wineland D. J.** Optical clocks and relativity // *Science.* 2010. **329**, N 5999. P. 1630–1633.
6. **Butov O. V., Rybaltovsky A. A., Bazakutsa A. P. et al.** 1030-nm Yb³⁺ distributed feedback short cavity silica-based fiber laser // *JOSA B.* 2017. **34**, Iss. 3. P. A43–A48.
7. **Babin S. A., Churkin D. V., Ismagulov A. E. et al.** Single frequency single polarization DFB fiber laser // *Laser Phys. Lett.* 2007. **4**, N 6. P. 428–432.
8. **Asseh A., Storoy H., Kringlebotn J. T. et al.** 10 cm Yb³⁺ DFB fibre laser with permanent phase shifted grating // *Electron. Lett.* 1995. **31**, Iss. 12. P. 969–970.
9. **Wolf A., Dostovalov A., Skvortsov M. et al.** Femtosecond-pulse inscription of fiber Bragg gratings with single or multiple phase-shifts in the structure // *Opt. & Laser Technol.* 2018. **101**. P. 202–207.
10. **Li Y., Deng X., Fu S. et al.** High-power, high-efficiency single-frequency DBR fiber laser at 1064 nm based on Yb³⁺-doped silica fiber // *Opt. Lett.* 2023. **48**, Iss. 3. P. 598–601.
11. **Dostovalov A. V., Wolf A. A., Parygin A. V. et al.** Femtosecond point-by-point inscription of Bragg gratings by drawing a coated fiber through ferrule // *Opt. Exp.* 2016. **24**, Iss. 15. P. 16232–16237.
12. **Skvortsov M. I., Wolf A. A., Dostovalov A. V. et al.** Narrow-Linewidth Er-Doped Fiber Lasers With Random Distributed Feedback Provided By Artificial Rayleigh Scattering // *Journ. Lightwave Technol.* 2022. **40**, Iss. 6. P. 1829–1835.
13. **Budarnykh A. E., Lobach I. A., Zlobina E. A. et al.** Raman fiber laser with random distributed feedback based on a twin-core fiber // *Opt. Lett.* 2018. **43**, Iss. 3. P. 567–570.
14. **Skvortsov M. I., Abdullina S. R., Wolf A. A. et al.** Single-frequency erbium-doped fibre laser with random distributed feedback based on disordered structures produced by femtosecond laser radiation // *Quant. Electron.* 2021. **51**, N 12. P. 1051–1055.

15. **McIntyre P. D., Snyder A. W.** Power transfer between optical fibers // JOSA. 1973. **63**, Iss. 12. P. 1518–1527.
16. **Okoshi T., Kikuchi K., Nakayama A.** Novel method for high resolution measurement of laser output spectrum // Electron. Lett. 1980. **16**, N 16. P. 630–631.
17. **Hui R., O’Sullivan M.** Fiber-Optic Measurement Techniques. 2nd Ed. London: Academic Press, 2022. 846 p.

Поступила в редакцию 15.10.2024

После доработки 12.11.2024

Принята к публикации 10.01.2025
