

Влияние длины легированного волокна на солитонные импульсы двунаправленного волоконного лазера с синхронизацией мод*

Х.Ахмад, Н.А.Алви Кутти, М.З.Зулкифли, С.В.Харун

Продемонстрирован двунаправленный волоконный лазер с пассивной синхронизацией мод, активной средой которого служило волокно с высокой концентрацией эрбия. Для достижения режима синхронизации мод в коротком резонаторе в качестве насыщающегося поглотителя использовались углеродные нанотрубки. В спектральной области 1560 нм получены солитонные импульсы с изменяющимся частотой следования (43.92–46.97 МГц) и длительностью (0.56–0.41 пс) при уменьшении длины эрбиевого волокна от 60 до 30 см.

Ключевые слова: волоконный лазер с пассивной синхронизацией мод, волокно с высокой концентрацией эрбия, углеродные нанотрубки, солитонный импульс.

1. Введение

Синхронизация мод применяется для генерации сверхкоротких импульсов в волоконных лазерах [1, 2]. Волоконные лазеры с пассивной синхронизацией мод имеют много приложений, начиная от фундаментальных исследований до оптических коммуникаций, обработки материалов и медицины, что обусловлено их простотой, низкой стоимостью (по сравнению с лазерами с активной синхронизацией мод) и генерацией импульсов высокого качества [3, 4]. Известны методы пассивной синхронизации мод с использованием нелинейного вращения поляризации (НВП), зеркал на основе полупроводникового насыщающегося поглотителя (SESAM), эволюции нелинейной поляризации (ЭНП), графена и углеродных нанотрубок (УНТ) [5–10]. Заметим, что НВП, основанное на эффекте Керра, может иметь очень быстрый отклик, что позволяет генерировать импульсы с высокой энергией [11]. Зеркала на основе SESAM часто используются для пассивной синхронизации мод, несмотря на сложность, дороговизну и трудоемкость процесса их изготовления. Тем не менее SESAM как насыщающийся поглотитель является более предпочтительным по сравнению с ЭНП, способной приводить к долговременным нестабильностям [12]. В последние годы в волоконных лазерах с синхронизацией мод в качестве насыщающихся поглотителей используются графен и углеродные нанотрубки. Они имеют более быстрый отклик, чем SESAM, и могут быть нанесены непосредственно на торцы волокна.

Насыщающиеся поглотители на основе УНТ также применяются для пассивной синхронизации мод [13]. УНТ, интенсивно изучавшиеся с точки зрения возможно-

сти их использования в научных и промышленных приложениях, стали широко применяться в различных высокоэффективных электронных и фотонных устройствах [13, 14]. После открытия УНТ многие исследователи изучали эту новую форму углерода на предмет оптического ограничения суспензиями нанотрубок [15]. УНТ представляют особый интерес для фотоники благодаря своим уникальным свойствам, таким как низкие потери, поляризационная нечувствительность, простота интеграции в оптических системах и быстрое время восстановления, что особенно важно для режима синхронизации мод лазера на легированном эрбием волокне (ЭВ) [16]. Исследовались различные конфигурации и схемы использования УНТ для синхронизации мод в лазере на основе ЭВ [17].

В настоящее время известны многочисленные схемы двунаправленных волоконных лазеров с синхронизацией мод [18–20]. Волоконные лазеры с пассивной синхронизацией мод без оптического изолятора внутри резонатора могут одновременно генерировать два цуга импульсов (двунаправленная синхронизация мод). За последние несколько десятилетий двунаправленные лазеры с синхронизацией мод стали широко использоваться в многочисленных сенсорных устройствах [21].

В настоящей статье демонстрируется двунаправленный волоконный лазер с пассивной синхронизацией мод на основе высоколегированного активного (Liekki EDF) ЭВ и насыщающегося поглотителя УНТ. Для генерации импульсов с высокой частотой следования в волоконных лазерах с синхронизацией мод используется короткий резонатор. Мы исследовали влияние длины ЭВ на эффективность лазера с синхронизацией мод.

2. Экспериментальная установка

На рис.1 представлена конфигурация эрбиевого лазера с синхронизацией мод. Резонатор состоит из высоколегированного ЭВ, одномодового мультиплексора (М) 980/1550 нм, 1%-ного выходного ответвителя (Отв) и насыщающегося поглотителя (НП) на основе УНТ. Активной средой служило ЭВ (Liekki Er-110-4/1250) с пиковым поглощением сердцевины 110 дБ/м на длине вол-

*Перевод с англ. В.В.Шувалова.

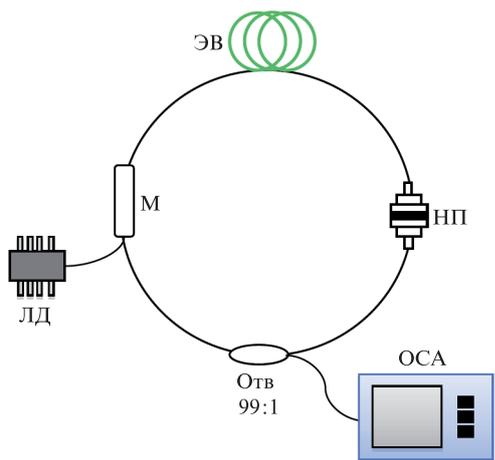


Рис.1. Экспериментальная схема волоконного лазера с синхронизацией мод.

ны 1530 нм. В эксперименте длина ЭВ варьировалась от 30 до 60 см. Резонатор накачивался через мультиплексор излучением лазерного диода (ЛД) с длиной волны 980 нм, который при максимальном токе 180 мА обеспечивал оптическую мощность 59 мВт. Общий порт мультиплексора соединен с отрезком ЭВ. Другой конец мультиплексора соединен с ответвителем 99:1. Между ответвителем и ЭВ находится насыщающийся поглотитель из УНТ в виде пленки, помещенной между дву-

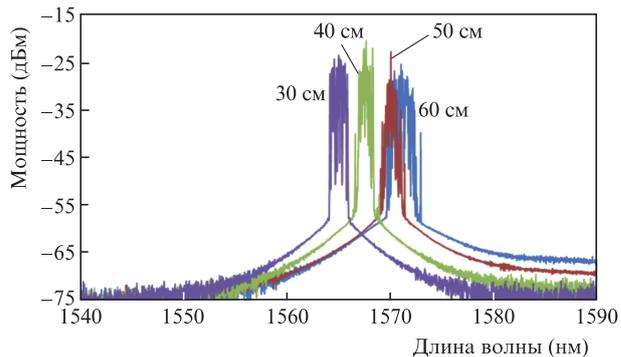


Рис.2. Спектры выходной мощности при разных длинах ЭВ.

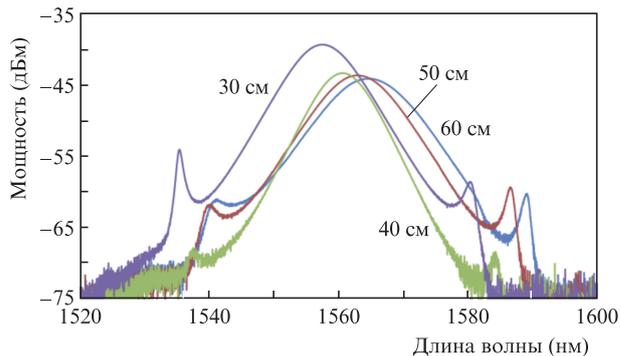


Рис.3. Оптические спектры выходного излучения солитонного волоконного лазера с синхронизацией мод при разных длинах ЭВ.

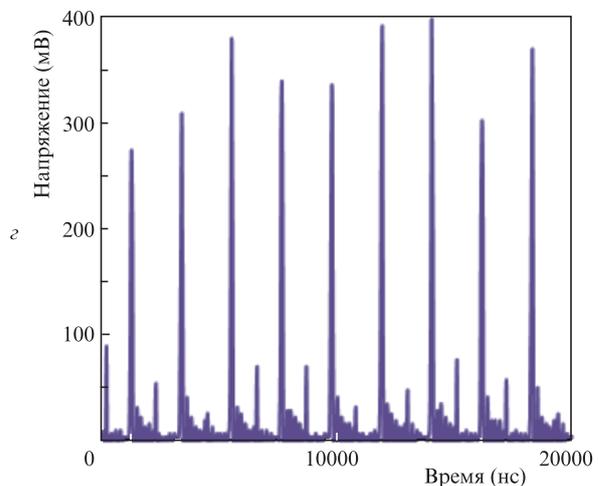
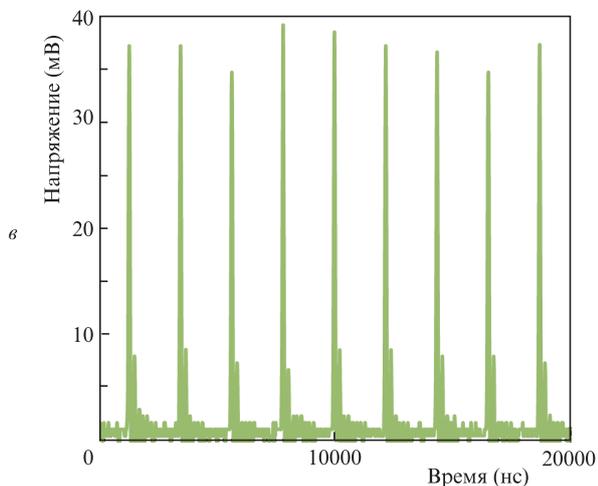
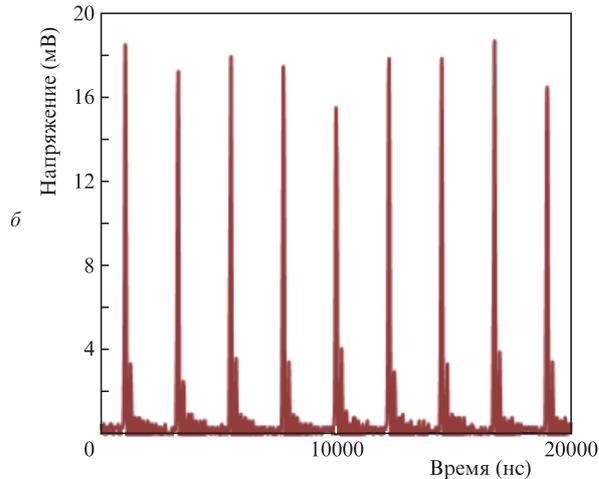
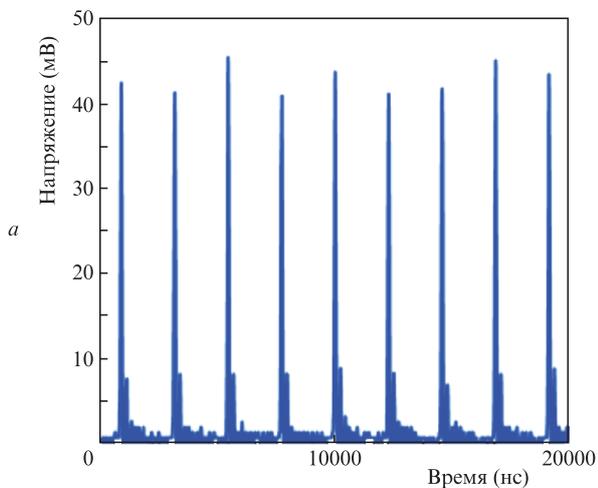


Рис.4. Цуги выходных импульсов, полученные при длинах ЭВ 60 (а), 50 (б), 40 (в) и 30 см (г).

мья волоконными муфтами. В отличие от других волоконных кольцевых лазеров, в этом резонаторе не используются никакие оптические изоляторы и поляризационные контроллеры. Общая длина резонатора лазера составляет ~ 5 м. Выходное излучение лазера с синхронизацией мод извлекается с помощью 1%-ного порта ответвителя, соединенного с оптическим спектралитизатором (ОСА) (Yokogawa) с разрешением 0.02 нм. Осциллограф LeCroy 352a вместе с фотодетектором Agilent 83440C используется для измерения свойств цуга импульсов с синхронизованными модами. Радиочастотный спектр импульса наблюдается с помощью радиочастотного анализатора спектра Anritsu MS2683A. Длины легированного ЭВ в эксперименте были равны 50, 40 и 30 см.

3. Результаты и их обсуждение

На рис.2 показаны спектры выходной мощности лазера для разных длин ЭВ. Видно, что с их уменьшением длина волны излучения сдвигается влево.

На рис.3 демонстрируются оптические спектры излучения волоконного лазера с синхронизованными модами при разных длинах ЭВ. Пороговая мощность излучения накачки (на 980 нм) для установления непрерывного режима работы лазера составляет около 59 мВт. Поэтому именно это значение мощности фиксировалось в эксперименте. Для длин ЭВ 30, 40, 50 и 60 см ширины полос по уровню 3 дБ составили 8.1, 8.8, 10.1 и 11.4 нм при центральных длинах волн 1557, 1560, 1563 и 1565 нм соответ-

ственно. Имеется существенное различие между спектрами лазеров с синхронизацией мод для длин ЭВ 30 и 40 см из-за действия дисперсии групповой скорости (ДГС) и нелинейности. Когда ДГС вкуче с керровской нелинейностью является аномальной, импульсы формируются в результате баланса между положительными и отрицательными изменениями фаз вследствие нелинейности и дисперсии соответственно. Чистая дисперсия резонатора составляла примерно -0.13 пс², что допускало формирование солитона в лазере при средней внутррезонаторной дисперсии -14 пс²/км.

На рис.4 показаны цуги выходных импульсов лазера, наблюдаемые с помощью осциллографа. Видно, что периоды следования импульсов составляют 22.8, 22.4, 21.8 и 21.3 нс, что отвечает частотам их следования 43.92, 44.62, 45.87 и 46.97 МГц для длин ЭВ 60, 50, 40 и 30 см соответственно. Таким образом, чем короче резонатор, тем меньше модовый интервал, что согласуется с формулой $\tau = 2L/c$, где τ – модовый интервал и L – длина резонатора. При мощности излучения накачки 59 мВт средняя мощность для ЭВ длиной 60, 50, 40 и 30 см составляла 23.4, 24.04, 30.20 и 36.64 мкВт соответственно. Расчетная энергия импульса равнялась 0.52, 0.54, 0.66 и 0.78 пДж соответственно.

На рис.5 представлены радиочастотные спектры излучения лазеров с синхронизацией мод при разных длинах ЭВ. Основной пик сигнала при длине ЭВ 60 см соответствовал частоте обхода резонатора 43.92 МГц с отношением сигнал/шум 63 дБ (рис.5,а). При длинах ЭВ 50, 40 и 30 см наблюдаемые отношения составляли 59, 58 и 26 дБ

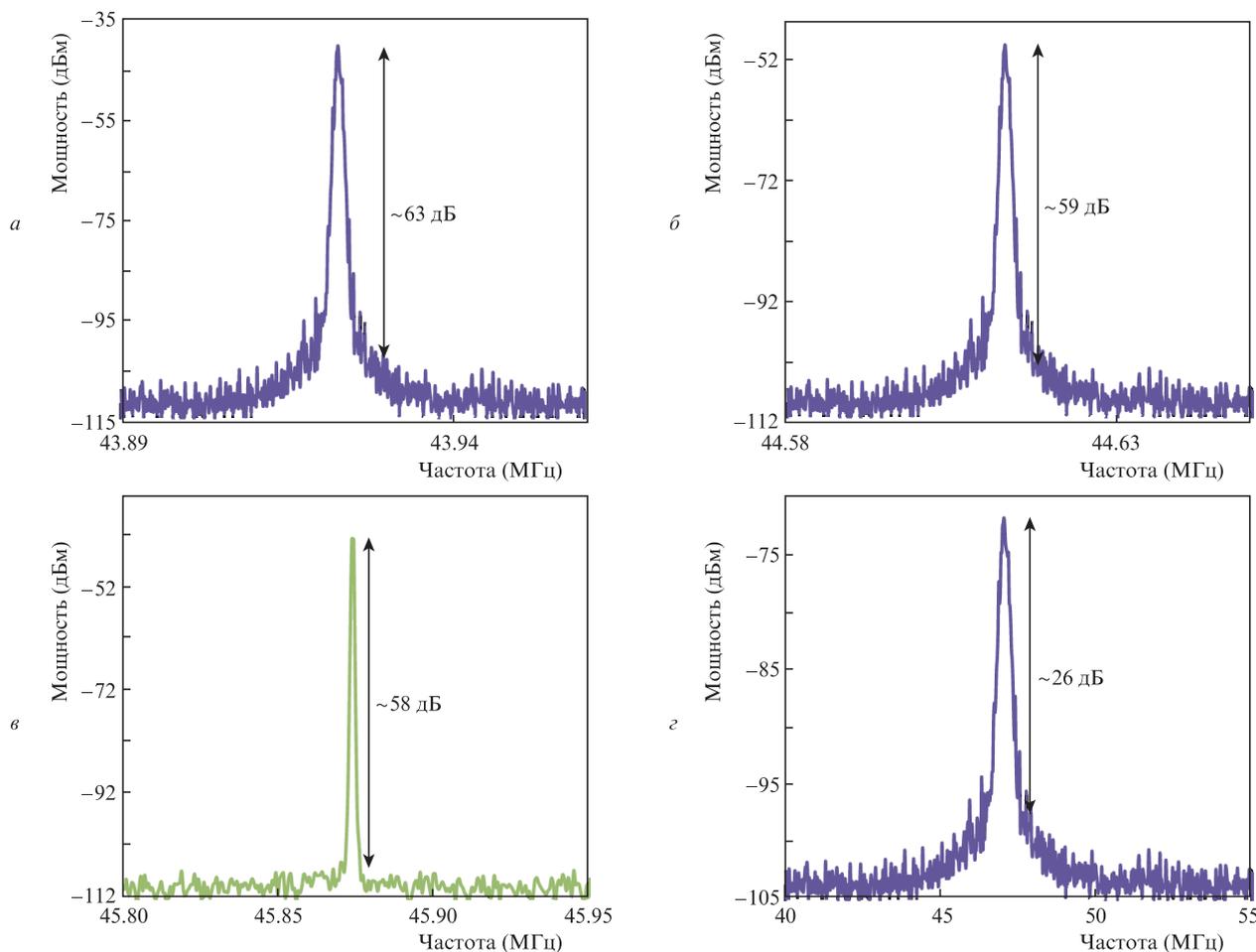


Рис.5. Радиочастотные спектры лазеров при длинах ЭВ 60 (а), 50 (б), 40 (в) и 30 см (г).

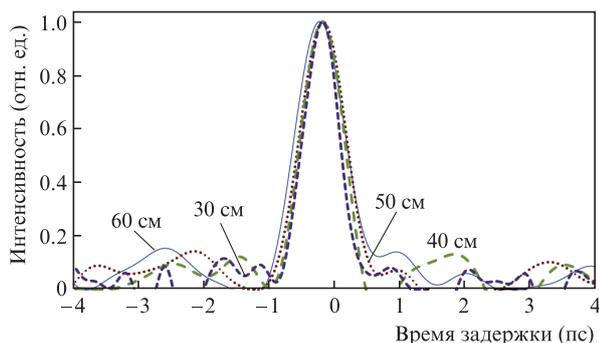


Рис.6. Автокорреляционная функция выходного импульса лазера при разных длинах ЭВ.

при эквивалентных частотах 44.62, 45.87 и 46.97 МГц (рис.5,б–г). Таким образом, с уменьшением длины резонатора отношение сигнал/шум также уменьшается.

Временные формы импульсов представляемого волоконного лазера при разных длинах ЭВ показаны на рис.6. Из автокорреляционной функции импульса следует, что профиль импульса описывается функцией sech^2 с шириной по полувысоте (FWHM) 0.41, 0.48, 0.52 и 0.56 пс при длинах ЭВ 30, 40, 50 и 60 см соответственно; таким образом наблюдается тенденция к снижению длительности импульса по мере уменьшения длины усиливающей среды.

Изменение частоты следования и длительности импульсов с изменением длины ЭВ показано на рис.7. Видно, что с ростом длины ЭВ частота следования импульсов уменьшается, а их длительность возрастает.

Экспериментально установлено, что работа двунаправленного кольцевого лазера не зависит от направления поляризации. Поскольку в конфигурации лазера не используются оптический изолятор и контроллер поляризации, то его стоимость ниже стоимости однонаправленного лазера. Кроме того, отсутствие изолятора и контроллера позволяет уменьшить потери излучения внутри резонатора.

Таким образом, с использованием углеродных нанотрубок в качестве насыщающегося поглотителя продемонстрирован двунаправленный волоконный лазер с пассивной синхронизацией мод эрбиевого волокна с высокой концентрацией легирующей примеси. Предлагаемый лазер генерирует солитонные импульсы с длительностью и частотой следования от 0.41 до 0.56 пс и от 43.92 до 46.97 МГц по мере увеличения длины ЭВ от 30 до 60 см. Установлено, что частота следования импульсов возрастает с уменьшением длины ЭВ.

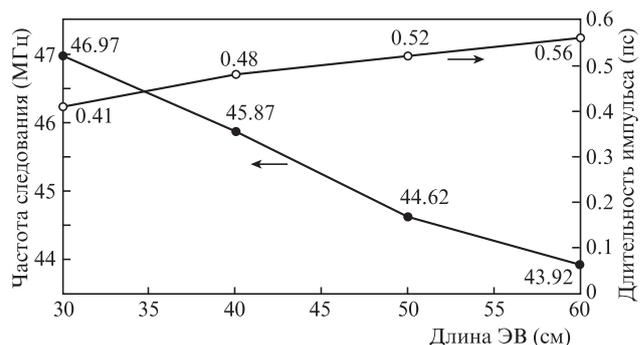


Рис.7. Изменение частоты следования и длительности импульса с изменением длины ЭВ.

Авторы благодарят Университет Малайи за предоставление грантов PG032-2014A, ER006-2013A, FRGS FP044-2014A, NICOE и HIR UM.C/625/1/HIR/МоHE/SC/29/01.

- Haus H.A. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **6**, 1173 (2000).
- Kobtsev S.M., Kukarin S.V., Fedotov Y.S. *Laser Phys.*, **21** (2), 283 (2011).
- Yamashita S., Yoshida T., Set S., Polynkin P., Peyghambarian N. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **6453**, 64531Y (2007).
- Mamidala V. et al. *Opt. Express*, **22** (4), 4539 (2014).
- Grudin A.B., Gray S. *J. Opt. Soc. Am. B*, **14** (1), 144 (1997).
- Ismail M.A., Tan S.J., Shahabuddin N.S., Harun S.W., Arof H., Ahmad H. *Chin. Phys. Lett.*, **29** (5), 054216 (2012).
- Huang P.L., Lin S.C., Yeh C.Y., Kuo H.H., Huang S.H., Lin G.R., Li L.J., Su C.Y., Cheng W.H. *Opt. Express*, **20** (3), 2460 (2012).
- Isomaki M.D., Guina A., Tuomisto P., Okhotnikov O.G. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **18** (20), 2150 (2006).
- Kobtsev S.M., Smirnov S.V. *Laser Phys.*, **21** (2) 272 (2011).
- Mou C., Arif R., Rozhin A., Turitsyn S. *Opt. Mater. Express*, **2** (6), 884 (2012).
- <http://www.optics.unm.edu/sbahae/physics568/studentpapers2011/Xu.pdf>.
- Matsas V.J. et al. *Electron. Lett.*, **28** (15), 1391 (1992).
- Della Valle G. et al. *Appl. Phys. Lett.*, **89** (23), (2006).
- Cheng K.N., Lin Y.H., Lin G.R. *Laser Phys.*, **23** (4), 045105 (2013).
- Chen Y.-C. et al. *Appl. Phys. Lett.*, **81** (6), 975 (2002).
- Sun Z., Rozhin A.G., Wang F., Scardaci V., Milne W.I., White I.H., Hennrich F., Ferrari A.C. *Appl. Phys. Lett.*, **93**, 061114 (2008).
- Set S.Y., Yaguchi H., Tanaka Y., Jablonski M. *J. Lightwave Technol.*, **22** (1), 51 (2004).
- Kieu K., Mansuripur M. *Opt. Lett.*, **33** (1), 64 (2008).
- Zhou W. et al. *Opt. Express*, **21** (7), 8945 (2013).
- Ouyang Ch. et al. *Quantum Electronics Conf. & Lasers and Electro-Optics (CLEO/IQEC/PACIFIC RIM)* (New York: IEEE, 2011).
- Ouyang Ch. et al. *Opt. Lett.*, **36** (11), 2089 (2011).