

УДК 535:535.92

ВОЛНОВОДНЫЙ Tm:YAP ЛАЗЕР С ЧАСТОТОЙ ПОВТОРЕНИЯ ИМПУЛЬСОВ 8 ГГц

М. В. Понарина¹, А. Г. Охримчук^{1,2}, М. Г. Рыбин¹,
В. В. Букин¹, П. А. Образцов¹

Разработан компактный волноводный Tm:YAP лазер с частотой повторения импульсов 8 ГГц. Контролируемое изменение внутрирезонаторных потерь обеспечивает непрерывную перестройку центральной длины волны излучения лазера, работающего в режиме синхронизации мод с модуляцией добротности в диапазоне от 1925 до 1950 нм, а также обеспечивает возможность двухволновой генерации. Основным подходом, примененным в данной работе, является использование волноводных структур внутри кристалла Tm:YAP и насыщающегося поглотителя на основе графена. Данный подход является универсальным для создания компактных лазеров с гигагерцовой частотой повторения импульсов, работающих в широком спектральном диапазоне.

Ключевые слова: волноводные лазеры, гигагерцовая частота повторения импульсов, Tm:YAP, синхронизация мод, графен.

Введение. Твердотельные лазеры, работающие в диапазоне длин волн около 2 мкм, являются источниками безопасного для глаз излучения и имеют преимущество для ряда приложений: лидары, системы обнаружения газов, прямая оптическая связь [1, 2]. Благодаря хорошему поглощению в воде эти лазеры также важны для медицинских применений [3]. Генераторы лазерных импульсов с частотой повторения, превышающей 1 ГГц, имеют широкий спектр применений, например, для быстрой передачи данных или нелинейных биофотонных приложений [4–6]. В последнем случае лазер с высокой частотой повторения снижает вероятность фотоповреждения [4].

¹ ИОФ РАН, 119991 Россия, Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: ponarinamariya@gmail.com.

² РХТУ им. Д. И. Менделеева, 125047 Россия, Москва, Миусская площадь, 9.

Одна из простейших схем компактного твердотельного лазера, генерирующего импульсы с высокой частотой повторения, состоит из плоскопараллельного оптического резонатора, заполненного активной средой, и сверхбыстрого оптического модулятора. Как правило, для генерации лазерного излучения на длине волны ~ 2 мкм используются твердотельные среды, активированные ионами тулия (Tm^{3+}) или гольмия (Ho^{3+}). Однако требование малой длины резонатора ~ 1 см для работы с гигагерцовой частотой повторения накладывает определенные ограничения и технологические сложности при конструировании таких лазеров [7, 8].

Для эффективной и стабильной генерации лазерных импульсов необходимо обеспечить работу лазера в основной поперечной моде со стабилизированным диаметром и заданным пространственным профилем интенсивности света. Достижение одномодового режима в таких компактных твердотельных лазерах часто затруднено появлением тепловых эффектов в кристаллах, влияние которых возрастает с ростом интенсивности накачки [9]. Разработчики твердотельных лазерных систем часто сталкиваются с проблемой выбора между малым размером пятна и большой длиной взаимодействия излучения накачки с активной средой. В последнее время большое внимание уделяется волноводной конфигурации резонатора благодаря ее значительному потенциалу для разработки стабильных лазеров с высокой частотой повторения. Волновод обеспечивает плотное перекрытие поперечных мод излучения накачки и генерации в сердцевине волновода благодаря чему может достигаться более низкий порог генерации и повышенная дифференциальная квантовая эффективность. Малые размеры цилиндрических волноводов гарантируют хорошее качество пучка и высокую стабильность резонатора. Цилиндрический волновод с размером, соответствующим диаметру основной поперечной моды ТЕМ₀₀, обеспечивает генерацию в одномодовом режиме. Таким образом, использование волноводных структур в твердотельных лазерах с коротким резонатором является перспективным подходом для получения эффективной генерации лазера с высокой частотой повторения импульсов. Поэтому волноводные структуры являются перспективной платформой для создания компактных импульсных твердотельных лазеров.

Для обеспечения пассивной синхронизации мод в твердотельных лазерах чаще всего используют нелинейные оптические элементы – насыщающиеся поглотители (НП). Одним из наиболее важных свойств насыщающегося поглотителя, осуществляющего пассивную модуляцию добротности или синхронизацию мод, в лазерах с высокой частотой повторения импульсов является его интегрируемость в короткий резонатор лазера. По-

этому, в последние годы низкоразмерные материалы, например, такие, как графен и углеродные нанотрубки, привлекают особое внимание как насыщающиеся поглотители [10]. Благодаря своим необычным электронным и оптическим свойствам эти материалы демонстрируют сверхширокополосное нелинейное поглощение, обладают высокой оптической нелинейностью, сверхбыстрыми временами релаксации и высокой оптической стойкостью [11, 12]. Кроме этого, синтез таких материалов может осуществляться с использованием относительно простой и дешевой технологии. Насыщающиеся поглотители на основе графена успешно применялись в различных твердотельных объемных и волоконных лазерах, работающих в режиме пассивной синхронизации мод [13–16]. В частности, из-за малой толщины и возможности нанесения графена непосредственно на оптический элемент, этот насыщающийся поглотитель особенно перспективен для создания миниатюрных лазерных систем [17–20].

В данной работе сообщается о разработке нового волноводного Tm:YAP лазера, работающего в области 2 мкм. Объединение преимуществ волноводов, созданных методом прямой лазерной записи в объеме активного кристалла, и насыщающегося поглотителя на основе графена позволило создать компактный лазер с синхронизацией мод, генерирующий импульсы с частотой повторения импульсов 8 ГГц.

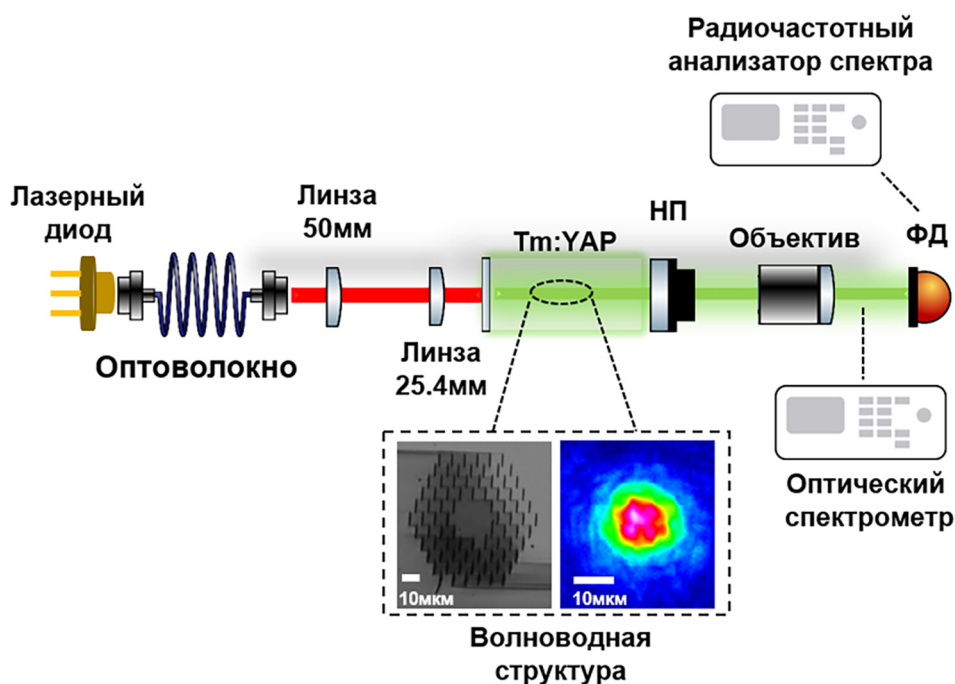


Рис. 1: Схема волноводного Tm:YAP лазера: НП – выходное зеркало с нанесенным насыщающимся поглотителем на основе графена, ФД – фотодиод.

Экспериментальная часть. Схема разработанной лазерной установки представлена на рис. 1.

Канальные волноводные структуры диаметром 30 мкм были созданы в кристалле Тм:УАР (5 ат.%, $n = 1.9228$) вдоль оси кристалла [010] методом прямой лазерной записи [21, 22]. Запись волноводов осуществлялась с помощью излучения фемтосекундного иттербиевого лазера с длительностью импульса 180 фс и частотой следования 5 кГц на длине волны 1030 нм. В процессе записи лазерный луч распространялся перпендикулярно оси кристалла в направлении [110] и фокусировался объективом Olympus 50× с коррекцией сферической аберрации. Таким образом, в кристалле Тм:УАР на глубине 200 мкм от полированной поверхности были созданы волноводные структуры диаметром 30 мкм, образованные 64–72 параллельными треками с уменьшенным на 0.0067 показателем преломления. После записи волноводов кристалл Тм:УАР был отшлифован до прямоугольного кристалла длиной ~ 9.6 мм. Микрофотография волновода и пространственное распределение излучения накачки показаны на вставке рис. 1.

Для осуществления оптической накачки волноводной структуры использовался лазерный диод с волоконным выходом (диаметр сердцевины волокна 100 мкм), работающий на длине волны 804 нм (PUMA-808-15). Излучение накачки фокусировалось в волновод с помощью системы из двух линз (линзы $f = 50$ мм и 25.4 мм, соответственно), обеспечивающих уменьшение диаметра пятна в 2 раза. Эффективность ввода излучения накачки в волновод составляла 13%.

Резонатор лазера с длиной 9.7 мм был образован двумя плоскими зеркалами: дихроичным зеркалом с коэффициентом отражения $R > 99.5\%$ в спектральном диапазоне 1.9–2.0 мкм и $R < 10\%$ в диапазоне 0.8 мкм, нанесенным непосредственно на грань кристалла, и выходным зеркалом с коэффициентом отражения $R = 85\%$ в спектральном диапазоне 1.95 мкм.

Чтобы обеспечить пассивную синхронизацию мод, моноатомный графен осаждался непосредственно на выходное зеркало резонатора, образуя пассивный насыщающийся поглотитель (НП). Графен был нанесен на часть выходного зеркала. Такая конструкция обеспечивала возможность прямого сравнения режимов генерации с внутрирезонаторным насыщающимся поглотителем и без него. Общая длина созданного оптического резонатора составляла ~ 9.7 мм, что соответствует частоте повторения импульсов ~ 8 ГГц.

Непросветленный торец кристалла Tm:YAP и выходное зеркало образуют эквивалент интерферометра Жира–Турнуа. Выходное зеркало было оснащено пьезоэлементами, которые обеспечивали контроль ширины воздушного зазора между торцом кристалла и НП (базы интерферометра) в диапазоне от 0 до 2 мкм.

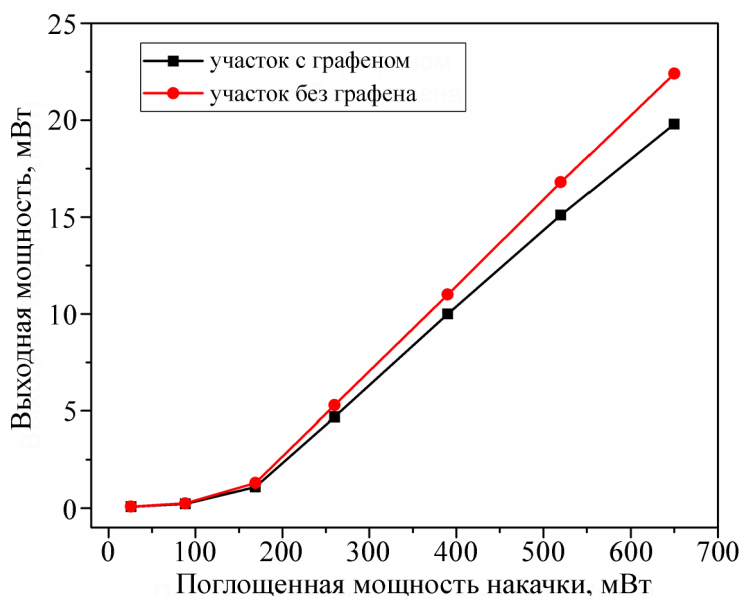


Рис. 2: Зависимость выходной мощности излучения от поглощенной мощности накачки.

Результаты. Для экспериментального подтверждения работы НП в разработанной конфигурации Tm:YAP лазера были измерены зависимости выходной мощности лазера от поглощенной мощности накачки при генерации лазера на участке выходного зеркала с графеном и без. Прямое сравнение измеренных зависимостей показано на рис. 2. Как показано на рис. 2, в обоих случаях генерация в волноводном Tm:YAP лазере достигалась при мощности накачки около 100 мВт, а дифференциальная квантовая эффективность, измеренная без графена, была несколько выше (4.4%), чем с графеном (3.9%).

Без НП лазер работает в режиме пиковой генерации, излучая последовательность микросекундных импульсов. Характерный вид временной развертки выходного излучения, полученный без НП, показан на рис. 3(а).

Временные формы сигналов измерялись с помощью высокоскоростного фотодиода InGaAs (EOT ET-5000, полоса пропускания 10 ГГц) и цифрового осциллографа (Tektronix DPO 71604C, полоса пропускания 16 ГГц).

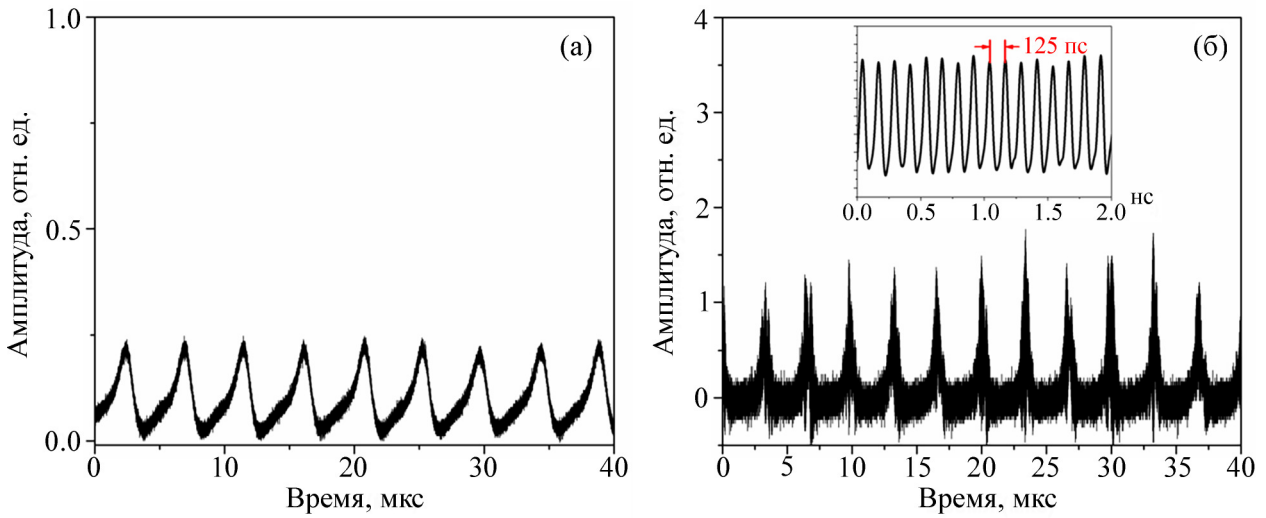


Рис. 3: Осциллограмма выходного излучения волноводного $Tm:YAP$ лазера, полученная (а) в режиме свободной генерации, (б) в режиме синхронизации мод с модуляцией добротности. На вставке представлена развертка по времени в наносекундном масштабе.

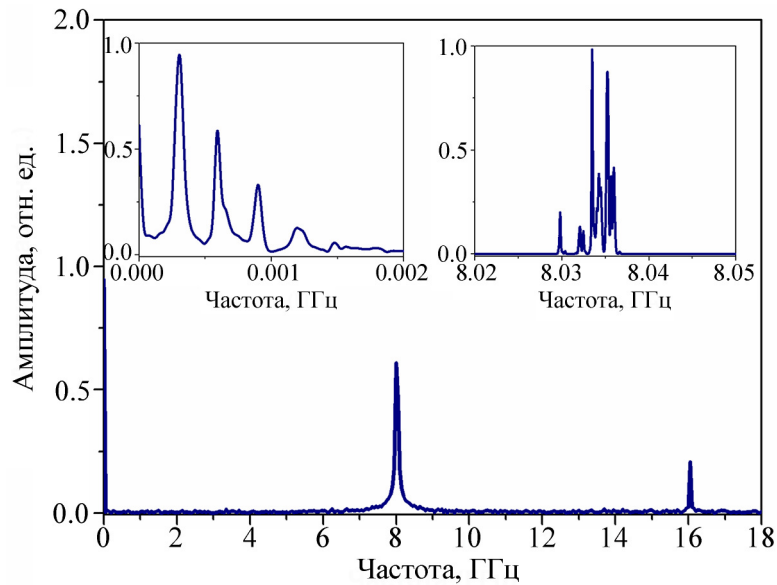


Рис. 4: Радиочастотный спектр излучения волноводного $Tm:YAP$ лазера. На левой вставке показаны частоты в мегагерцовом диапазоне, связанные с режимом модуляции добротности. На правой вставке показана несущая частота 8 ГГц, с разрешением 10 кГц, в диапазоне частот 30 МГц.

Рис. 3 наглядно демонстрирует, что с использованием НП режим генерации значительно изменяется. С насыщающимся поглотителем на основе графена лазер работает в режиме синхронизации мод с модуляцией добротности. Период модуляции, связанной с синхронизацией продольных мод резонатора, составляет ~ 125 пс, что соответствует времени полного обхода резонатора волноводного лазера. На рис. 4 представлен радиочастотный спектр выходного излучения при работе лазера в режиме синхронизации мод с модуляцией добротности, измеренный с помощью высокоскоростного фотодиода InGaAs и анализатора радиочастотного спектра с полосой пропускания 26.5 ГГц (AnritsuMS2840A). Спектральный пик в диапазоне 8 ГГц связан с синхронизацией мод, а набор пиков в диапазоне от 0 до 2 МГц – с модуляцией добротности. Также на рис. 4 показана спектральная линия, соответствующая второй гармонике основной частоты повторения импульсов ~ 16 ГГц, что подтверждает наличие режима синхронизации мод. Следует отметить, что амплитуда этой спектральной линии ограничена полосой пропускания фотодиода (10 ГГц) и осциллографа (16 ГГц).

Оптический спектр выходного излучения волноводного Tm:YAP лазера с насыщающимся поглотителем на основе графена, измеренный с помощью анализатора оптического спектра (Yokogawa AQ6375B, разрешение 0.1 нм) при фиксированной ширине воздушного зазора, представлен на рис. 5(а). Как было показано в наших предыдущих работах [23, 24], в волноводных лазерах с коротким резонатором, работающих в режиме синхронизации мод, точная подстройка базы интерферометра Жира–Турнуа приводит к периодическому изменению внутрирезонаторных потерь, что позволяет осуществлять плавную перестройку длины волны. На рис. 5(б) представлены оптические спектры выходного излучения Tm:YAP лазера, работающего в режиме синхронизации мод с модуляцией добротности, при различных положениях выходного зеркала.

Таким образом, в волноводном Tm:YAP при изменении ширины воздушного зазора между торцом кристалла и выходным зеркалом с насыщающимся поглотителем на основе графена в диапазоне от 0 до 2 мкм наблюдается одно- и двухволновая генерация с перестройкой длины волны в диапазоне 1925–1950 нм.

Заключение. На основе волновода, записанного пучком фемтосекундного лазера в кристалле Tm:YAP, создан компактный твердотельный лазер с частотой повторения импульсов 8 ГГц. Оптическая накачка волноводного Tm:YAP лазера осуществляется многомодовым лазерным диодом на длине волны 804 нм. Пассивная синхронизация мод с модуляцией добротности реализована с помощью насыщающегося поглотителя на основе графена. Управление потерями и дисперсией за счет настройки внутрирезо-

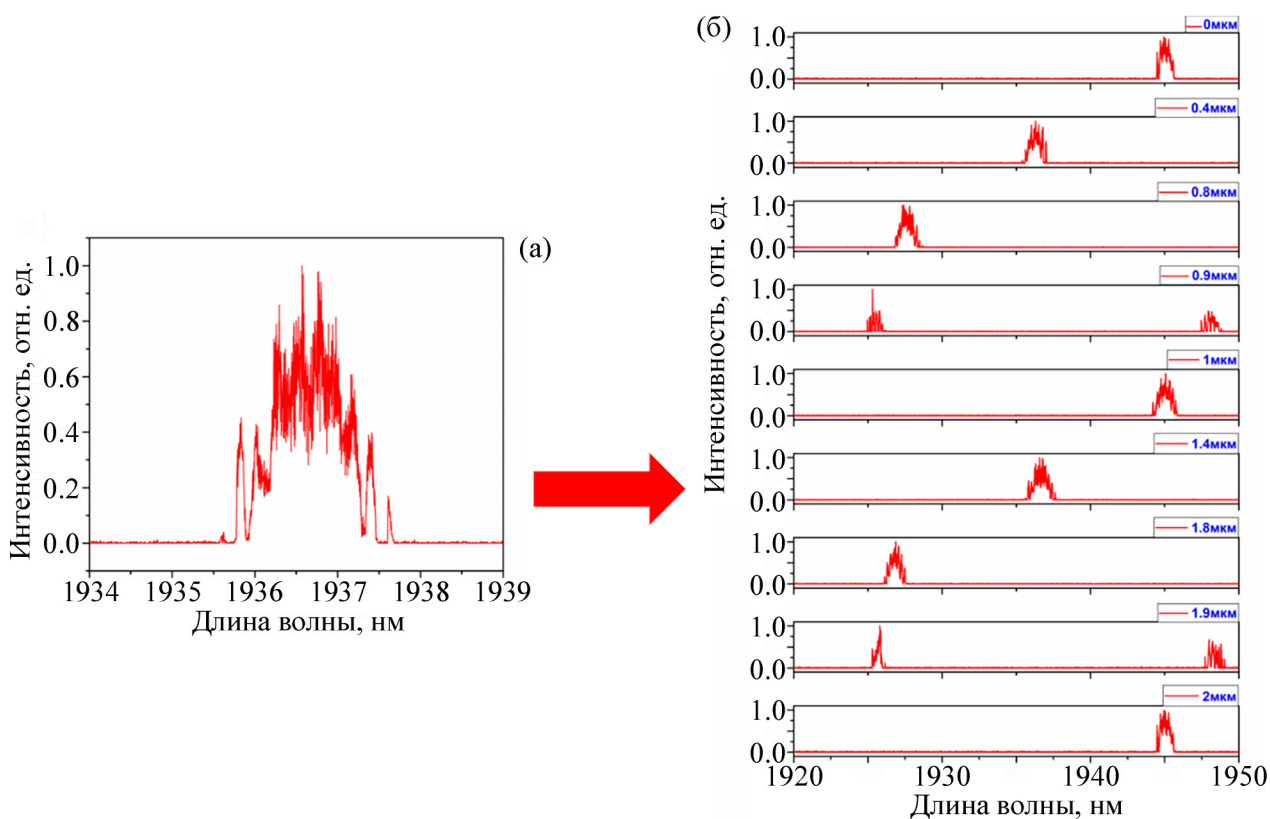


Рис. 5: (а) Типичный оптический спектр волноводного $Tm:YAP$ лазера, работающего в режиме синхронизации мод с модуляцией добротности, (б) зависимость выходных оптических спектров от смещения пьезоэлемента, установленного на выходное зеркало резонатора (от 0 до 2 мкм).

наторного интерферометра позволяет перестраивать центральную длину волны лазера в спектральном диапазоне от 1925 до 1950 нм. Предложенный подход, основанный на использовании волноводных структур и насыщающегося поглотителя на основе графена, не ограничивается активной средой $Tm:YAP$ и может применяться для создания лазеров со сверхвысокой частотой повторения импульсов на основе различных твердотельных лазерных сред, работающих в ближнем и среднем ИК диапазонах.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] M. Ebrahim-Zadeh, I. T. Sorokina, *Mid-Infrared Coherent Sources and Applications* (Dordrecht, Springer Netherlands, 2008). DOI: 10.1007/978-1-4020-6463-0.

- [2] V. W. S. Chan, IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. **6**(6), 959 (2000). DOI: 10.1109/2944.902144.
- [3] B. E. Bouma, L. E. Nelson, G. J. Tearney, et al., J. Biomed. Opt. **3**(1), 76 (1998). DOI: 10.1117/1.429898.
- [4] S.-W. Chu, T.-M. Liu, C.-K. Sun, et al., Opt. Express **11**(8), 933 (2003). DOI: 10.1364/OE.11.000933.
- [5] A. Bartels, R. Gebs, M. S. Kirchner, S. A. Diddams, Opt. Lett. **32**(17), 2553 (2007). DOI: 10.1364/OL.32.002553.
- [6] D. J. Jones, *Carrier-Envelope Phase Control of Femtosecond Mode-Locked Lasers and Direct Optical Frequency Synthesis*, Science (80-.), **288**(5466), 635 (2000). DOI: 10.1126/science.288.5466.635.
- [7] C. Hönninger, R. Paschotta, F. Morier-Genoud, et al., J. Opt. Soc. Am. B **16**(1), 46 (1999). DOI: 10.1364/JOSAB.16.000046.
- [8] J. E. Bae, X. Mateos, M. Aguiló, et al., Opt. Express **28**(12), 18027 (2020). DOI: 10.1364/OE.395701.
- [9] R. C. Powell, S. A. Payne, L. L. Chase, G. D. Wilke, Opt. Lett. **14**(21), 1204 (1989). DOI: 10.1364/OL.14.001204.
- [10] A. K. Geim, K. S. Novoselov, Nat. Mater. **6**(3), 183 (2007). DOI: 10.1038/nmat1849.
- [11] D. Sun, Z. Wu, C. Divin, et al., Phys. Rev. Lett. **101**(15), 157402 (2008). DOI: 10.1103/PhysRevLett.101.157402.
- [12] E. Malic, A. Knorr, *Relaxation Dynamics in Graphene, in Graphene and Carbon Nanotubes* (Weinheim, Germany, Wiley, 2013), pp. 83–143. DOI: 10.1002/9783527658749.ch4.
- [13] Z. Sun, T. Hasan, F. Torrisi, et al., ACS Nano **4**(2), 803 (2010). DOI: 10.1021/nn901703e.
- [14] Q. Bao, H. Zhang, Y. Wang, et al., Adv. Funct. Mater. **19**(19), 3077 (2009). DOI: 10.1002/adfm.200901007.
- [15] C. Cihan, C. Kocabas, U. Demirbas, A. Sennaroglu, Opt. Lett. **43**(16), 3969 (2018). DOI: 10.1364/OL.43.003969.
- [16] A. V. Pushkin, E. A. Migal, S. Tokita, et al., Opt. Lett. **45**(3), 738 (2020). DOI: 10.1364/OL.384300.
- [17] R. Mary, G. Brown, S. J. Beecher, et al., Opt. Express **21**(7), 7943 (2013). DOI: 10.1364/OE.21.007943.
- [18] A. G. Okhrimchuk, P. A. Obraztsov, Sci. Rep. **5**(1), 11172 (2015). DOI: 10.1038/srep11172.

- [19] Y. Ren, G. Brown, R. Mary, et al., IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. **21**(1), 395 (2015). DOI: 10.1109/JSTQE.2014.2350016.
- [20] A. Martinez, S. Yamashita, Appl. Phys. Lett. **101**(4), 2012 (2012). DOI: 10.1063/1.4739512.
- [21] A. Okhrimchuk, V. Mezentsev, A. Shestakov, I. Bennion, Opt. Express **20**(4), 3832 (2012). DOI: 10.1364/OE.20.003832.
- [22] A. G. Okhrimchuk, A. V. Shestakov, I. Khrushchev, J. Mitchell, Opt. Lett. **30**(17), 2248 (2005). DOI: 10.1364/OL.30.002248.
- [23] М. В. Понарина, А. Г. Охримчук, М. Г. Рыбин, П. А. Образцов, Краткие сообщения по физике ФИАН **46**(3), 35 (2019). DOI: 10.3103/S1068335619030072.
- [24] M. Ponarina, A. Okhrimchuk, G. Alagashev, et al., Appl. Phys. Express **14**(7), 72001 (2021). DOI: 10.35848/1882-0786/ac06af.

Поступила в редакцию 7 июня 2022 г.

После доработки 8 июня 2022 г.

Принята к публикации 9 июня 2022 г.