

Наносекундный Fe:ZnSe-лазер, накачиваемый внутри резонатора Er:YLF-лазера с поперечной диодной накачкой и работающий при комнатной температуре

В.И.Козловский, Ю.В.Коростелин, Я.К.Скасырский, М.П.Фролов

Получена лазерная генерация при комнатной температуре в кристалле Fe:ZnSe, установленном в качестве пассивного затвора в резонаторе Er:YLF-лазера с диодной накачкой. Минирезонатор Fe:ZnSe-лазера был образован прижатыми к оптическим поверхностям кристалла зеркалами с большими коэффициентами отражения для $\lambda = 4-4.5$ мкм и большими коэффициентами пропускания для линий генерации Er:YLF-лазера. Внутри резонатора Er:YLF-лазера генерировались короткие импульсы излучения длительностью ~ 100 нс на $\lambda = 2.65$ мкм, вызванные пассивной модуляцией добротности резонатора кристаллом Fe:ZnSe. Поглощение излучения Er:YLF-лазера в кристалле Fe:ZnSe приводило к накачке Fe:ZnSe-лазера, который генерировал импульсы излучения длительностью менее 50 нс с энергией ~ 0.5 мкДж на $\lambda = 4.2$ мкм. Лазер работал в импульсно-периодическом режиме накачки с частотой следования импульсов до 200 Гц.

Ключевые слова: *средний инфракрасный диапазон, кристаллы A_2B_6 , Fe:ZnSe-лазер, Er:YLF-лазер, пассивная модуляция добротности, внутриврезонаторная накачка.*

1. Введение

Лазер на кристалле ZnSe, легированном двухвалентными ионами Fe, является одним из наиболее перспективных лазеров для среднего ИК диапазона спектра (4–5 мкм) [1–3], в который попадает окно прозрачности атмосферы. Наилучшие энергетические характеристики этого лазера достигнуты при охлаждении кристалла жидким азотом [4, 5]. Это связано с тем, что внутренняя квантовая эффективность лазерного перехода падает с увеличением температуры из-за активации многофононной безызлучательной рекомбинации. Недавно высокая энергия импульса 7.5 Дж была достигнута при охлаждении кристалла до температуры 220 К с помощью термоэлектрических элементов [6]. Порог генерации Fe:ZnSe-лазера при комнатной температуре довольно высок, и для получения высокой эффективности лазера приходится использовать в качестве накачки мощные наносекундные импульсы излучения с $\lambda = 2.5-3$ мкм. Однако создание таких импульсов накачки сопряжено с рядом проблем. В работах [7, 8] в качестве источника накачки использовался HF-лазер с длительностью импульса ~ 100 нс. Эти лазеры неудобны для практического применения из-за токсичности используемой среды и громоздкости устройства. Другим источником накачки является импульсный Er:YAG-лазер с модуляцией добротности резонатора [9]. Пока такие лазеры работают с ламповой накачкой. Хотя в работе [10] были

получены короткие импульсы и при накачке лазерными диодами, но достигнутая энергия в импульсе слишком мала для эффективной накачки Fe:ZnSe-лазера при комнатной температуре. В последнее время в лазерах с диодной накачкой в качестве активной среды используют более низкороговые кристаллы Er:YLF [11, 12]. При пассивной модуляции добротности таких лазеров получены наносекундные импульсы с энергией 3 мДж, но с низкой эффективностью [13].

В настоящей работе реализована генерация наносекундных импульсов в Fe:ZnSe-лазере при комнатной температуре и относительно маломощной накачке лазерными диодами при использовании новой схемы накачки для данного типа лазера. Минирезонатор с кристаллом Fe:ZnSe помещался внутри резонатора Er:YLF-лазера с поперечной накачкой излучением линейки лазерных диодов. В этой схеме кристалл Fe:ZnSe выполняет функцию пассивного затвора для Er:YLF-лазера и одновременно является активным элементом Fe:ZnSe-лазера. Аналогичный подход впервые был использован в работах [14, 15], где лазер на кристалле LiF с центрами окраски F_2^- накачивался внутри трехзеркального резонатора Nd^{3+} -лазера. При этом кристалл $F_2^- : LiF$ являлся пассивным затвором для Nd^{3+} -лазера.

2. Эксперимент

На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки. В экспериментах использовались две монокристаллические пластины Fe:ZnSe толщиной 1.3 мм (П1) и 1.7 мм (П2). Пластины были вырезаны из двух кристаллов, выращенных из паровой фазы методом физического транспорта на затравку [16]. Концентрация ионов Fe в первой пластине была $2.3 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$, а во второй пластине – $9.5 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Спектры пропускания пластин представлены на рис. 2. Пластины полировались с обеих сторон, угол между полированными поверхностями не пре-

В.И.Козловский. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия, 115409 Москва, Каширское ш., 31; e-mail: viko@sci.lebedev.ru

Ю.В.Коростелин, Я.К.Скасырский, М.П.Фролов. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53

Поступила в редакцию 8 мая 2018 г., после доработки – 24 мая 2018 г.

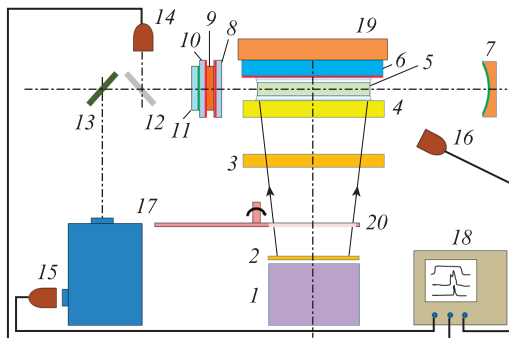
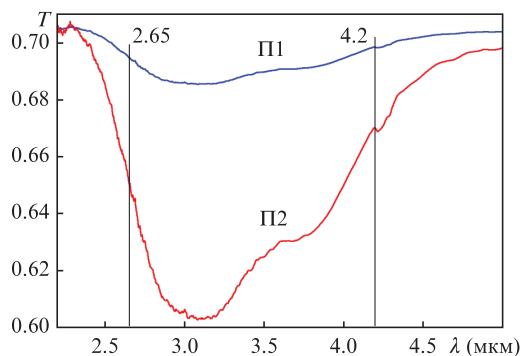


Рис.1. Схема экспериментальной установки:

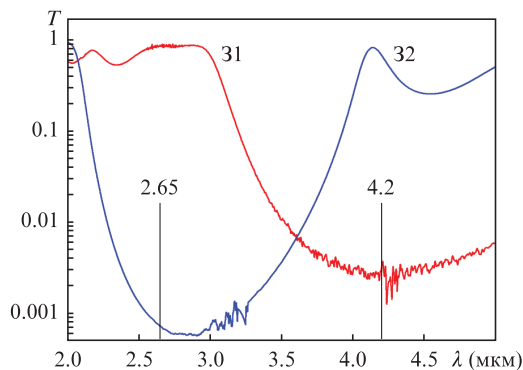
1 – линейка лазерных диодов; 2 – коллимирующая цилиндрическая линза; 3 – фокусирующая цилиндрическая линза; 4 – пластина MgF_2 ; 5 – кристалл Er:YLF ; 6 – золотое зеркало на сапфировой пластине; 7 – алюминиевое сферическое зеркало; 8 и 10 – дихроические зеркала с большими коэффициентами отражения на $\lambda = 4\text{--}4.5$ мкм и большими коэффициентами пропускания на $\lambda = 2.6\text{--}2.8$ мкм; 9 – кристалл Fe:ZnSe ; 11 – дихроическое зеркало с высоким коэффициентом отражения в окрестности $\lambda = 2.7$ мкм, пропускающее в окрестности 4.2 мкм с $T \approx 65\%$; 12 – съемное поворотное зеркало; 13 – поворотное зеркало; 14, 15 и 16 – фотодиоды; 17 – монохроматор; 18 – осциллограф; 19 – медный теплоотвод, охлаждаемый водой; 20 – механический прерыватель.

Рис.2. Спектр пропускания пластин Fe:ZnSe . Линиями указаны длины волн генерации лазеров на кристаллах Er:YLF (2.65 мкм) и Fe:ZnSe (4.2 мкм).

вышал 30". Пластины первоначально использовались в качестве пассивного затвора для Er:YLF -лазера. В этом случае зеркала 8 и 10 (см. рис.1) удалялись.

Зеркала 8, 10 и 11 представляли собой плоскопараллельные сапфировые пластины базисной ориентации толщиной 1.8 мм с интерференционным покрытием из чередующихся слоев Si и SiO_2 . В схеме на рис.1 использовались одинаковые зеркала 8 и 10. Спектры пропускания зеркал приведены на рис.3. Шумы в спектрах вблизи $\lambda = 3.1$ мкм и $\lambda = 4.2$ мкм связаны с поглощением парами воды и CO_2 . Зеркала 8 и 10 были плотно прижаты к кристаллу 9, так что между зеркалами и кристаллом достигался оптический контакт. При падении плоской волны на зеркала 8 и 10 (31 на рис.3) не из воздуха, а из ZnSe (показатель преломления 2.4) коэффициент отражения уменьшается. Расчет показал, что в области $\lambda = 4\text{--}4.5$ мкм коэффициент отражения составляет 99.36%.

Предварительно характеристики лазера на основе сборки из кристалла 9 и зеркал 8 и 10 были исследованы при накачке гигантскими импульсами Er:YAG -лазера, работавшего в режиме модуляции добротности резонатора, схема которого представлена в работе [9]. Максимальная энергия импульса накачки составляла 25 мДж при дли-

Рис.3. Спектры пропускания зеркал 31 и 32, использованных в качестве зеркал 8, 10 и 11 (см. рис.1) соответственно. Линиями указаны длины волн генерации лазеров на кристаллах Er:YLF (2.65 мкм) и Fe:ZnSe (4.2 мкм).

тельности 40 нс. Диаметр пучка на сборке был 2 мм. Излучения накачки и лазера регистрировались с помощью охлаждаемых жидким азотом фотосопротивлений ФСГ-22 на основе германия, легированного золотом. Временное разрешение составляло ~ 5 нс. В этих предварительных экспериментах исследовались возможности достижения генерации в Fe:ZnSe -лазере с использованием минирезонатора при комнатной температуре и оценена пороговая энергия импульса накачки. Энергия импульса изменялась путем использования калиброванных фильтров.

Кристалл Er:YLF с концентрацией Er 15% имел длину 28 мм, ширину 4 мм и толщину 2 мм. На полированные торцы размером 4×2 мм было нанесено просветляющее покрытие на длину волны генерации вблизи 2.7 мкм с коэффициентом остаточного отражения менее 0.5%. На две боковые поверхности, каждая размером 28×2 мм, было нанесено просветляющее покрытие на длину волны излучения накачки 975 нм с коэффициентом остаточного отражения также менее 0.5%. Грани размером 28×4 мм были матовыми. Изначально данный кристалл накачивался через боковую поверхность размером 28×2 мм. Однако для уменьшения объема области возбуждения и порога генерации было решено осуществлять накачку через грани размером 28×4 мм. Кристалл 5 (см. рис.1) приклеивался оптическим эпоксидным клеем EPOTEK-301 к сапфировой пластине 6 с нанесенным на нее слоем золота. Слой золота, обладающий высоким коэффициентом отражения в инфракрасной области спектра, возвращал излучение накачки, непоглощенное за один проход кристалла, назад в область поглощения. Близкие значения показателей преломления клея ($n_g = 1.52$) и кристалла Er:YLF ($n_{\text{YLF}} = 1.45$) обеспечивали слабое рассеяние излучения накачки при переходе границы раздела клей–кристалл. Чтобы снизить рассеяние излучения накачки и на входной грани, к кристаллу приклеивалась пластина 4 из MgF_2 , показатель преломления которой $n_{\text{MgF}_2} = 1.37$. Сапфировая пластина крепилась на медном хладопроводе 19, охлаждаемом проточной водой. Резонатор Er:YLF -лазера формировался сферическим зеркалом 7 с покрытием из Al , имеющим радиус кривизны 100 мм, и плоским зеркалом 11 (спектр пропускания 32 на рис.3). Физическая длина резонатора составила 100 мм, т.е. резонатор был близок к полуконцентрическому.

Кристалл Er:YLF накачивался по нормали к оптической оси резонатора излучением линейки лазерных диодов 1, смонтированной на медном хладопроводе, охлаждаемом проточной водой. Излучение линейки лазерных

диодов коллимировалось цилиндрической линзой 2 и фокусировалось на грань кристалла Er:YLF с помощью фокусирующей цилиндрической линзы с фокусным расстоянием $F = 30$ мм. Излучающая поверхность линейки лазерных диодов находилась на расстоянии 240 мм от грани кристалла Er:YLF , что обеспечивало засветку кристалла по всей длине, хотя интенсивность излучения накачки центральной части кристалла заметно превышала интенсивность накачки вблизи его торцов. Кристалл накачивался вдоль полоски шириной ~ 50 мкм и длиной 28 мм. Глубина накачиваемой области соответствовала толщине кристалла, равной 2 мм. Максимальная мощность излучения линейки лазерных диодов была 50 Вт. Для уменьшения нагрева кристалла Er:YLF излучение накачки прерывалось механическим прерывателем 20, выполненным в виде вращающегося диска с прорезями. Скважность импульсов составляла 12.5. Длина волны в максимуме спектра излучения накачки изменялась от 975 до 980 нм с увеличением мощности накачки до максимального значения. При этом коэффициент поглощения кристалла Er:YLF изменялся незначительно. Доля поглощенной в кристалле мощности накачки оценивается в 50%.

Осциллограммы импульсов накачки и генерации регистрировались с помощью фотодиодов ФД-36 и ФД-48 (ООО «АИБИ»). Фотодиод первого типа имеет большую чувствительность, но она резко падает при $\lambda > 3.6$ мкм. Пик чувствительности ФД-48 находится вблизи $\lambda = 4.5$ мкм. При измерениях использовались три фотодиода – 14, 15 и 16. Фотодиод 14 регистрировал интегральный по спектру импульс генерации лазера, фотодиод 15 – импульс генерации на определенной длине волны, вырезаемой монохроматором 17 (МДР-4 с решеткой 150 штрих./мм), и фотодиод 16 фиксировал рассеянное излучение импульса накачки. Сигналы с фотодиодов направлялись на осциллограф 18 (Tektronics TDS 2024B). Сопротивление нагрузки фотодиодов изменялось от 50 Ом (обеспечивало лучшее временное разрешение) до 51 кОм (обеспечивало увеличение сигнала при регистрации лазерного импульса, прошедшего через монохроматор).

3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

3.1. Fe: ZnSe-лазер с накачкой гигантскими импульсами Er: YAG-лазера

На рис.4,а представлены осциллограммы импульсов накачки и импульсов генерации в кристалле Fe: ZnSe (П2) в минирезонаторе, образованном зеркалами 31. Видно, что импульс генерации при небольшом превышении порога возникает на спаде импульса накачки и имеет релаксационные колебания. По мере увеличения энергии возбуждения начало импульса генерации перемещается к началу импульса накачки, и энергия импульса увеличивается. Эти изменения характерны для импульсного режима. Пороговая энергия накачки оценивается величиной 1 мДж. Отметим, что поглощенная энергия накачки значительно меньше. Если не учитывать насыщение поглощения, то доля энергии накачки, поглощенная в кристалле Fe: ZnSe , составляет не более 8%. Таким образом, пороговая поглощенная энергия накачки равна ~ 100 мкДж.

На рис.4,б приведены аналогичные осциллограммы, но при использовании другого выходного зеркала с расчетным коэффициентом отражения 97.5% для излучения,

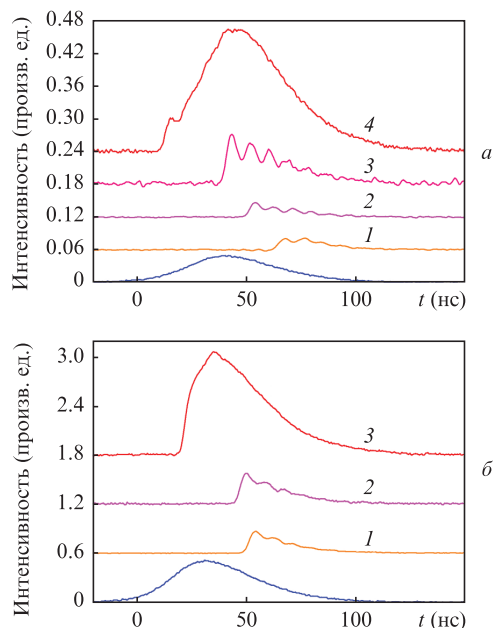


Рис.4. Осциллограммы импульсов накачки (нижние кривые) и импульсов генерации в кристалле Fe: ZnSe при использовании различных ослабляющих энергию накачки фильтров и выходных зеркал с $R_{\text{out}} = 99.36\%$ при энергиях возбуждения $E/E_p = 0.0558$ (1), 0.072 (2), 0.208 (3), 1.0 (4) (а) и 97.5% при $E/E_p = 0.159$ (1), 0.208 (2) и 1.0 (3) (б). Энергия накачки $E_p \approx 25$ мДж, длина резонатора – 1.7 мм, $R_1 = 99.36\%$.

падающего из ZnSe ($n_{\text{ZnSe}} = 2.4$). В этом случае энергия импульса генерации возросла примерно в 4 раза, а пороговая энергия импульса накачки – примерно до 3 мДж.

3.2. Er: YLF-лазер

Сначала исследовался Er: YLF -лазер без сборки из элементов 8, 9 и 10. В качестве выходного зеркала 11 использовалось глухое зеркало 32 с коэффициентом пропускания менее 0.1% на длинах волн вблизи 2.7 мкм. На рис.5 представлены осциллограммы импульса накачки и импульсов лазерного излучения, интегрального по спектру и прошедшего через монохроматор, настроенный на длины волн 2.65 и 2.71 мкм. Длительность импульса накачки составляла 5.5 мс.

Начало генерации соответствует $\lambda = 2.65$ мкм. Порог генерации равен ~ 4 Вт. Затем генерация переходит на $\lambda = 2.71$ мкм. Момент этого перехода сдвигается к началу импульса накачки по мере увеличения его мощности, т. е. генерация на $\lambda = 2.71$ мкм является более высокопороговой. Такой характер генерации типичен для Er: YLF -лазера [13, 17]. Более того, при накачке непрерывным излучением генерация переходит на $\lambda \approx 2.81$ мкм [11], но для этого нужны большие мощности накачки.

Средняя мощность излучения лазера при использовании глухого резонатора была предсказуемо низкой и при скважности импульсов 12.5 не превышала 1 мВт. Мощность измерялась прибором Gentec TPM-300 с измерительной головкой PS-310. При замене глухого выходного зеркала на зеркало с пропусканием 9% мощность существенно увеличивалась и составляла ~ 45 мВт. Средняя мощность импульса при этом была равна 0.56 Вт при вложенной мощности накачки ~ 25 Вт. Полученная эффективность лазера ($\sim 2.2\%$) была существенно меньше эффективности, достигнутой в работе [11], составившей 15%. Это

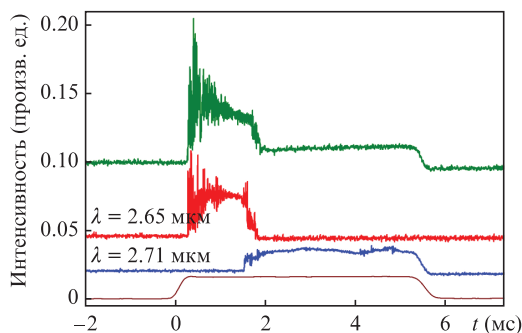


Рис.5. Осциллограммы импульса накачки (нижняя кривая) и импульсов излучения Eг:YLF-лазера, интегрального по спектру (верхняя кривая), а также на длинах волн 2.65 и 2.71 мкм. Излучение регистрировалось фотодиодом ФД-36. Мощность излучения накачки 50 Вт. Пассивный затвор отсутствовал.

связано в первую очередь с плохим пространственным согласованием области возбуждения с генерируемыми модами резонатора.

При размещении внутри резонатора Eг:YLF-лазера пластины П1 в качестве пассивного затвора генерируются короткие импульсы и пороговая мощность накачки возрастает до 17–18 Вт. Характерные осциллограммы импульсов генерации показаны на рис.6.

В начальной части импульса накачки генерируются короткие импульсы излучения на $\lambda = 2.65$ мкм. Их появление хаотично. В конечной части импульса накачки лазерные импульсы следуют реже и более регулярно. При этом их пиковая мощность существенно не увеличилась по сравнению с пиковой мощностью импульсов, генерируемых в начале импульса накачки. Это связано с небольшим превышением мощности накачки пороговой мощности. Длительность лазерных импульсов равна ~ 300 нс в начальной части импульса накачки и ~ 400 нс в его конечной части.

При замене пассивного затвора П1 на затвор П2 с более высоким коэффициентом поглощения импульсы генерации в конечной части импульса накачки не возникали,

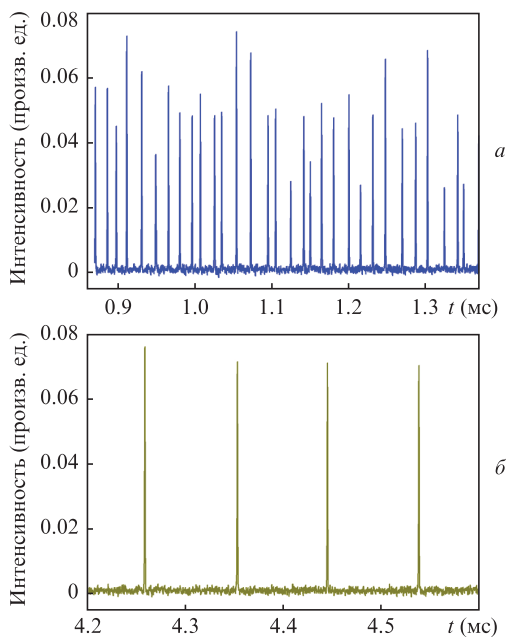


Рис.6. Характерные осциллограммы импульсов излучения Eг:YLF-лазера с пассивным затвором П1, зарегистрированные в начале импульса накачки ($\lambda = 2.65$ мкм) (а) и в конце импульса накачки ($\lambda = 2.71$ мкм) (б). Мощность излучения накачки 50 Вт.

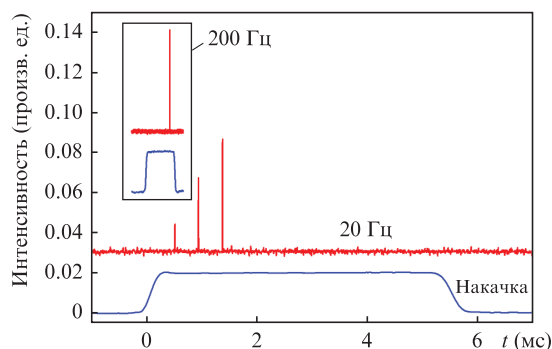


Рис.7. Осциллограммы импульсов генерации и накачки с частотами следования 20 и 200 Гц. Мощность излучения накачки 50 Вт.

поскольку не достигался порог генерации на $\lambda = 2.71$ мкм. Порог генерации излучения на $\lambda = 2.65$ мкм вырос до 25 Вт. Осциллограммы импульсов накачки и генерации при использовании затвора П2 представлены на рис.7. Длительность импульсов генерации составила 130–150 нс.

Поскольку гигантские импульсы возникали только в передней части импульса накачки длительностью ~ 5.5 мс, то далее мы использовали импульсы накачки длительностью 0.5–1 мс.

3.3. Fe:ZnSe-лазер с накачкой внутри резонатора Eг:YLF-лазера

При помещении внутрь резонатора Eг:YLF-лазера сборки из элементов 8, 9 и 10 форма гигантских импульсов существенно изменялась. Характерные осциллограммы отдельных гигантских импульсов приведены на рис.8.

Весь гигантский импульс имел полуширину примерно 100 нс (см. рис.8,а). Его форма определялась наложением короткого импульса с полушириной менее 50 нс на более протяженный импульс с полушириной 100 нс. Если перед регистрирующим фотодиодом ФД-48 помещался фильтр – зеркало 32, обрезаящее излучение с $\lambda = 2.65$ мкм, то на осциллограмме оставался только короткий импульс. Мы предположили, что это импульс генерации Fe:ZnSe-лазера, а более широкий импульс – это излучение Eг:YLF-лазера. Для подтверждения данного предположения импульс лазерного излучения пропускался через монохроматор. В результате были зарегистрированы импульсы излучения как на длине волны 2.65 мкм, так и на длине волны 4.2 мкм. При использовании регистрирующей системы с высоким временным разрешением в импульсе генерации до входа в монохроматор на длинноволновой компоненте наблюдались релаксационные колебания (см. рис.8,б). После прохождения монохроматора мощность излучения существенно ослаблялась, и для его уверенной регистрации использовалось большее нагрузочное сопротивление фотодиода, что ухудшало временное разрешение.

При частоте следования импульсов накачки 160 Гц средняя мощность излучения лазера составляла 0.2–0.3 мВт. В каждом импульсе в среднем генерировался один гигантский импульс. Исходя из этого, энергию гигантского импульса можно оценить как 1.5 мкДж. Доля излучения с $\lambda = 4.2$ мкм в этом импульсе составляет не менее 30%. Отсюда оценка энергии импульса излучения Fe:ZnSe-лазера дает 0.5 мкДж. При длительности импульса 50 нс это соответствует пиковой мощности 10 Вт.

Энергию импульса генерации Eг:YLF-лазера положим равной 1 мкДж. Учитывая малое пропускание вы-

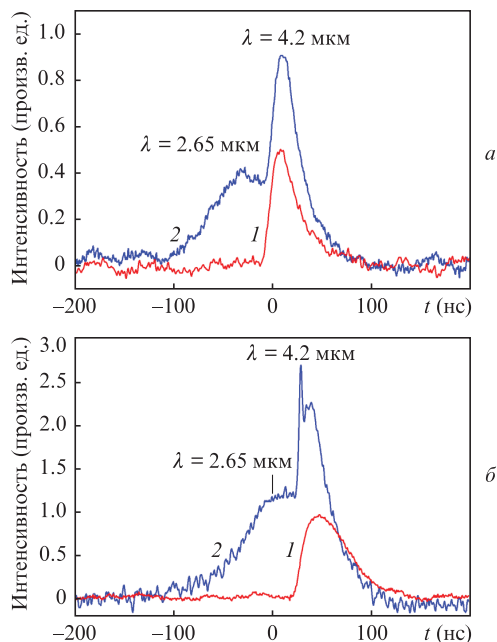


Рис.8. Осциллограммы импульсов генерации Er:YLF-лазера с пассивным затвором П2, имеющим собственный минирезонатор: *a* – излучение регистрировалось фотодиодом ФД-48 после прохождения фильтра–зеркала 32 (*1*) и в его отсутствие (*2*); *б* – сравнение осциллограмм, зарегистрированных до монохроматора (*2*) и после монохроматора, настроенного на длину волны 4.2 мкм (*1*). Мощность излучения накачки 50 Вт.

ходного зеркала этого лазера, энергия импульса внутри резонатора может достигать 1 мДж. Это значение сравнимо с полученной оценкой для порога генерации Fe:ZnSe-лазера при внешней накачке (1 мДж). Однако, учитывая, что площадь поперечного сечения пучка внутри резонатора (менее 0.2 мм²) заметно меньше, чем площадь возбуждения при внешней накачке (свыше 3 мм²), а эффективность поглощения накачки кристаллом внутри резонатора значительно выше, чем при однопроходной накачке, можно сделать вывод, что внутри резонатора Er:YLF-лазера достигается достаточно большое превышение порога генерации Fe:ZnSe-лазера с минирезонатором. Дальнейшее увеличение энергии импульса Fe:ZnSe-лазера возможно при увеличении пропускания выходного зеркала минирезонатора, эффективности Er:YLF-лазера и интенсивности излучения его накачки.

Ширина спектра генерации Fe:ZnSe-лазера, измеренная с помощью монохроматора, составляла ~70 нм. Расходимость излучения оценивалась по изменению сигнала с ФД-48 при его сканировании в фокальной плоскости линзы из CaF₂ с фокусным расстоянием 89 мм. Полный угол расходимости составил ~15 мрад. Это примерно в два раза больше угла расходимости излучения Er:YLF-лазера. Улучшить направленности излучения Fe:ZnSe-лазера можно путем увеличения пропускания зеркала 8 и использования составного резонатора с участием сферического зеркала 7 (см. рис.1).

4. Заключение

В настоящей работе предложена новая схема Fe:ZnSe-лазера, генерирующего наносекундные импульсы при комнатной температуре активного кристалла. Накачка кристалла осуществляется внутри резонатора Er:YLF-лазера,

у которого активный элемент, в свою очередь, накачивается излучением линейки лазерных диодов по нормали к оси резонатора. Накачка осуществляется в импульсно-периодическом режиме с частотой следования импульсов 20–200 Гц и скважностью 12.5. Активный элемент Fe:ZnSe-лазера одновременно выполняет функцию пассивного затвора для Er:YLF-лазера. На выходе Er:YLF-лазера регистрируются гигантские импульсы длительностью 50–100 нс, которые являются наложением двух импульсов генерации на длинах волн 2.65 и 4.2 мкм. Второй импульс сдвинут относительно первого на 20–40 нс. Энергии этих импульсов оцениваются соответственно как 1 и 0.5 мкДж. Первый импульс является излучением Er:YLF-лазера, а второй – Fe:ZnSe-лазера. Для увеличения энергии импульсов, средней мощности и эффективности Fe:ZnSe-лазера необходимы дальнейшие исследования.

Работа подготовлена при поддержке программы Президиума РАН №7 «Актуальные вопросы фотоники, зондирование неоднородных сред и материалов» и отчасти при поддержке Программы повышения конкурентоспособности НИЯУ МИФИ (проект №02.а03.21.0005).

- Adams J.J., Bibeau C., Page R.H., Krol D.M., Furu L.H., Payne S.A. *Opt. Lett.*, **24**, 1720 (1999).
- Акимов В.А., Воронов А.А., Козловский В.И., Коростелин Ю.В., Ландман А.И., Подмарьков Ю.П., Фролов М.П. *Квантовая электроника*, **34**, 912 (2004) [*Quantum Electron.*, **34**, 912 (2004)].
- Fedorov V.V., Mirov S.B., Gallian A., Badikov V.V., Frolov M.P., Korostelin Yu.V., Kozlovsky V.I., Landman A.I., Podmar'kov Yu.P., Akimov V.A., Voronov A.A. *IEEE J. Quantum Electron.*, **42**, 907 (2006).
- Kozlovsky V.I., Korostelin Y.V., Podmar'kov Y.P., Skasyrsky Y.K., Frolov M.P. *J. Phys.: Conf. Ser.*, **740**, 012006 (2016).
- Vasilyev S., Moskalev I., Mirov M., Smolski V., Martyshkin D., Fedorov V., Mirov S., Gapontsev V. *Proc. SPIE*, **10193**, 101930U (2017).
- Frolov M.P., Korostelin Yu.V., Kozlovsky V.I., Podmar'kov Yu.P., Skasyrsky Ya.K. *Opt. Lett.*, **43**, 623 (2018).
- Firsov K.N., Frolov M.P., Gavrishchuk E.M., Kazantsev S.Yu., Kononov I.G., Korostelin Yu.V., Maneshkin A.A., Velikanov S.D., Yutkin I.M., Zaretsky N.A., Zotov E.A. *Laser Phys. Lett.*, **13**, 015002 (2016).
- Великанов С.Д., Зарецкий Н.А., Zotov E.A., Козловский В.И., Коростелин Ю.В., Крохин О.Н., Манешкин А.А., Подмарьков Ю.П., Савинова С.А., Скасырский Я.К., Фролов М.П., Чуваткин Р.С., Юткин И.М. *Квантовая электроника*, **45**, 1 (2015) [*Quantum Electron.*, **45**, 1 (2015)].
- Акимов В.А., Воронов А.А., Козловский В.И., Коростелин Ю.В., Ландман А.И., Подмарьков Ю.П., Фролов М.П. *Квантовая электроника*, **36**, 299 (2006) [*Quantum Electron.*, **36**, 299 (2006)].
- Воронов А.А., Козловский В.И., Коростелин Ю.В., Ландман А.И., Подмарьков Ю.П., Полушкин В.Г., Рагимов Т.И., Скасырский Я.К., Филипчук М.Ю., Фролов М.П. *Кр. сообщ. физ. ФИАН*, **37**, 9 (2010).
- Dergachev A., Flint J.H., Isyanova Y., Pati B., Slobodtchikov E.V., Wall K.F., Moulton P.F. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **13**, 647 (2007).
- Messner M., Heinrich A., Unterrainer K. *Appl. Opt.*, **57**, 1497 (2018).
- Иночкин М.В., Назаров В.В., Сачков Д.Ю., Хлопонин Л.В., Храмов В.Ю., Коростелин Ю.В., Ландман А.И., Подмарьков Ю.П., Фролов М.П. *Оптический журнал*, **79**, 31 (2012).
- Basiev T.T., Denker B.I., Mirov S.B., Osiko V.V., Park V.G., Prokhorov A.M., Kertesz I., Kroo N., Ferencz K. *OSA TOPS Adv. Sol. St. Lasers*, **5**, 332 (1989).
- De Rossi W., Costa F.E., Vieira N.D.Jr., Wetter N.U., Morato S.P., Basiev T.T., Konyushkin V.A., Mirov S.B. *Appl. Opt.*, **31**, 2719 (1992).
- Kozlovsky V.I., Akimov V.A., Frolov M.P., Korostelin Yu.V., Landman A.I., Martovitsky V.P., Mislavskii V.V., Podmar'kov Yu.P., Skasyrsky Ya.K., Voronov A.A. *Phys. Stat. Sol. B*, **247**, 1553 (2010).
- Inochkin M.V., Nazarov V.V., Sachkov D.Yu., Khloponin L.V., Khramov V.Yu. *J. Opt. Technol.*, **77**, 413 (2010).