

Эффективная генерация Fe^{2+} : ZnSe-лазера при комнатной температуре с накачкой излучением Er: YAG-лазера с пассивной модуляцией добротности

С.Д.Великанов, Е.М.Гаврищук, Н.Г.Захаров, В.И.Козловский, Ю.В.Коростелин, В.И.Лазаренко, А.А.Манешкин, Ю.П.Подмарьков, Е.В.Салтыков, Я.К.Скасырский, М.П.Фролов, В.С.Цыкин, Р.С.Чуваткин, И.М.Юткин

Получена эффективная лазерная генерация цуга импульсов на поликристалле Fe^{2+} : ZnSe при комнатной температуре с накачкой излучением Er: YAG-лазера с пассивной модуляцией добротности. Энергия генерации Fe^{2+} : ZnSe-лазера достигала 130 мДж при дифференциальной эффективности по поглощенной энергии накачки 47%. Средняя частота следования лазерных импульсов в цуге составляла ~ 100 кГц.

Ключевые слова: Fe^{2+} : ZnSe-лазер, Er: YAG-лазер, пассивная модуляция добротности, цуг импульсов.

1. Введение

Постоянный интерес к лазерам с активной средой на основе кристаллов A_2B_6 , легированных двухвалентными ионами железа, обусловлен их высокой эффективностью, перестройкой длины волны излучения в широком диапазоне спектра, возможностью работы при комнатной температуре, что позволяет использовать такие лазеры для различных практических применений.

Накачка активного элемента Fe^{2+} : ZnSe-лазера относительно короткими (несколько десятков наносекунд) лазерными импульсами исключает необходимость его работы при низкой температуре. Впервые лазерная генерация на кристалле Fe^{2+} : ZnSe при комнатной температуре была получена при накачке импульсами излучения с длиной волны 2.92 мкм (вторая стоксова компонента излучения Nd: YAG-лазера в дейтерии) [1].

В последующих экспериментах для накачки успешно использовался Er: YAG-лазер с модуляцией добротности резонатора. В работе [2] дифференциальная эффективность по поглощенной энергии составила 13%, а максимальная энергия генерации достигла 0.37 мДж. В [3] при комнатной температуре была получена энергия 0.58 мДж при поглощенной энергии накачки 5.3 мДж, а дифференциальная эффективность достигла 38%. В работе [4] сообщается об увеличении энергии генерации до 1.4 мДж, а в [5] – до 5.8 мДж при дифференциальной эффективности 39%.

Дальнейшее улучшение характеристик Fe^{2+} : ZnSe-лазера при комнатной температуре было осуществлено за счет применения источников накачки на основе фторво-

дородных лазеров [6]. Так, при накачке короткими однократными импульсами электроразрядного HF-лазера на монокристалле Fe^{2+} : ZnSe была достигнута выходная энергия 1.2 Дж [7, 8]. При накачке серийной импульсной HF-лазера длительностью 100 нс, следовавших с частотой 200 Гц в течение 1 с, получен стабильный импульсно-периодический режим работы Fe^{2+} : ZnSe-лазера со средней мощностью 2.4 Вт и максимальной энергией в импульсе 14 мДж [9].

Однако излучатели на основе HF-лазеров громоздки, требуют стабилизации состава рабочей смеси и удаления токсичных продуктов химических реакций при длительной работе в импульсно-периодическом режиме, кроме того, их предельные частоты следования импульсов относительно невелики.

В настоящей работе получена эффективная генерация Fe^{2+} : ZnSe-лазера при комнатной температуре в виде цуга импульсов. Источником накачки являлся Er: YAG-лазер с пассивной модуляцией добротности, осуществляемой насыщающимся поглотителем на основе поликристалла Fe^{2+} : ZnSe.

2. Экспериментальная установка

Настоящая работа проводилась на стенде, схема которого приведена на рис. 1, при нормальных внешних условиях ($T = 19^\circ\text{C}$, относительная влажность воздуха 19%).

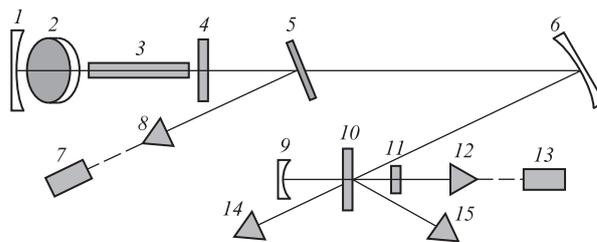


Рис. 1. Схема экспериментального стенда:

1, 4 – зеркала резонатора Er: YAG-лазера; 2 – пассивный модулятор добротности; 3 – стержень Er: YAG; 5 – плоскопараллельная пластина из CaF_2 ; 6 – глухое сферическое медное зеркало ($R = 1000$ мм); 7, 13 – фотодиоды; 8, 12, 14, 15 – калориметры; 9, 11 – зеркала резонатора Fe^{2+} : ZnSe-лазера; 10 – активный элемент.

С.Д.Великанов, Н.Г.Захаров, В.И.Лазаренко, А.А.Манешкин, Е.В.Салтыков, В.С.Цыкин, Р.С.Чуваткин, И.М.Юткин. ФГУП «Российский федеральный ядерный центр – ВНИИЭФ», Россия, Нижегородская обл., 607190 Саров, просп. Мира, 37; e-mail: rinatch@yandex.ru

Е.М.Гаврищук. Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г.Девярых РАН, Россия, 603950 Н.Новгород, ул. Тропинина, 49
В.И.Козловский, Ю.В.Коростелин, Ю.П.Подмарьков, Я.К.Скасырский, М.П.Фролов. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53

Резонатор $\text{Er}:\text{YAG}$ -лазера длиной 200 мм был образован сферическим ($R = 2000$ мм) зеркалом 1 с золотым покрытием и выходным плоским зеркалом 4 с коэффициентом отражения 64% на длине волны $\lambda = 2.94$ мкм. Пассивный модулятор добротности (затвор) 2 представлял собой плоскопараллельную пластину диаметром 25 мм и толщиной 4 мм, изготовленную из поликристаллического ZnSe , легированного ионами Fe^{2+} непосредственно в процессе химического осаждения из газовой фазы (CVD). Для этого в CVD-реактор, используемый для выращивания селенида цинка, одновременно с парами цинка и селеноводорода в потоке аргона подавались пары хлорида железа. Образующиеся в результате химической реакции термически активированные атомы железа встраивались в кристаллическую решетку селенида цинка с образованием $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$. Для улучшения оптической однородности материала синтезированные образцы CVD- $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ подвергались дополнительной послеростовой HIP-обработке в атмосфере аргона при давлении 1000 атм и температуре 1150°C в течение 34 ч.

На рис.2 приведен спектр пропускания изготовленной пластинки (затвора) из CVD- $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$. Эффективная концентрация ионов Fe^{2+} , рассчитанная из спектра пропускания с учетом толщины образца, составляет $2.2 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Затвор помещался в резонатор под углом Брюстера (67.7°, показатель преломления образца $n = 2.44$). Накачка $\text{Er}:\text{YAG}$ -стержня 3 осуществлялась импульсной ксеноновой лампой ИНП2-5/90А.

Резонатор $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера длиной 80 мм был образован сферическим ($R = 1000$ мм) зеркалом 9 с золотым покрытием и плоским зеркалом 11 с коэффициентом отражения 60% для $\lambda = 4.1-4.5$ мкм. Активный элемент 10 в виде диска диаметром 60 мм и толщиной 3.6 мм был изготовлен из поликристаллического CVD- ZnSe диффузионным легированием ионами Fe^{2+} в процессе баротермической обработки при температуре 1000°C в течение 126 ч. Методика легирования подробно описана в [10]. Концентрация ионов железа составляла $6 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Излучение $\text{Er}:\text{YAG}$ -лазера накачки фокусировалось зеркалом 6 на передней грани кристалла $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$, угол падения составлял 15° к нормали кристалла.

Измерения падающей, отраженной и прошедшей через кристалл энергий, а также энергии генерации осуществлялись с помощью калориметров OPHIR PE 50BB и OPHIR 30A-BB-18, кроме того, для измерения энергии использовался OPHIR Laserstar. Регистрация лазерных импульсов проводилась фотодиодами VIGO-SYSTEM PD-3 и PVM-10.6 с постоянной времени не более 1.5 нс,

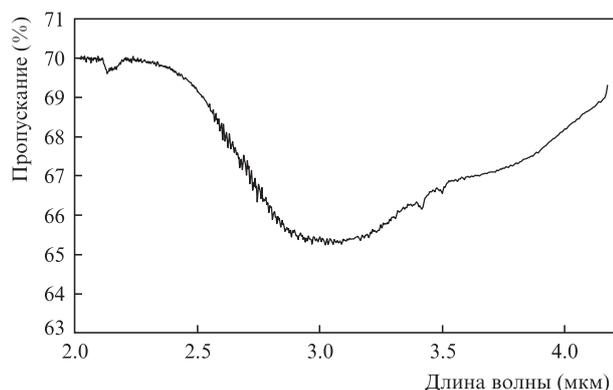


Рис.2. Спектр пропускания затвора.

параметры электрических сигналов измерялись цифровым осциллографом с частотой пропускания 1 ГГц. Распределение интенсивности снималось пироэлектрической камерой Ругосам ПИНР. Пропускание всех оптических элементов измерялось ИК фурье-спектрометром Varian 660-IR.

3. Результаты и их обсуждение

Генерация $\text{Er}:\text{YAG}$ -лазера в режиме модуляции добротности представляла собой цуг гигантских лазерных импульсов с суммарной энергией 0.5 Дж. Ранее подобный режим генерации был реализован в [11], однако число импульсов в цуге было 3, а полная энергия не превышала 23 мДж. В настоящей работе в течение одного цуга длительностью 160 мкс происходила генерация примерно 15 гигантских импульсов с частотой следования 100 ± 20 кГц. Максимальная энергия отдельного гигантского импульса достигала 40 мДж при длительности на полувысоте 90 нс. Характерные формы импульсов лампы накачки и

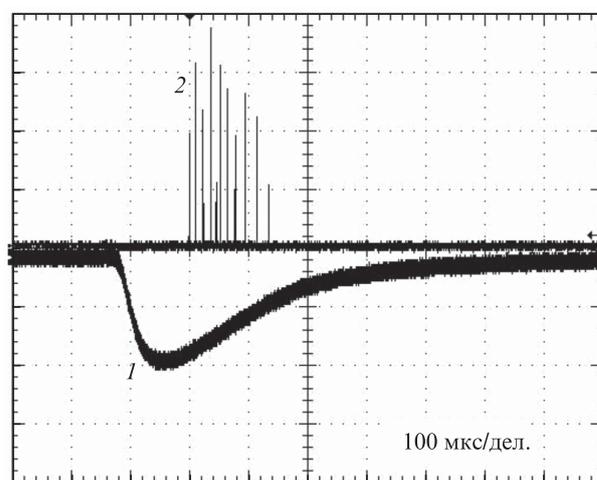


Рис.3. Формы светового импульса лампы накачки (1) и цуга гигантских импульсов $\text{Er}:\text{YAG}$ -лазера (2).

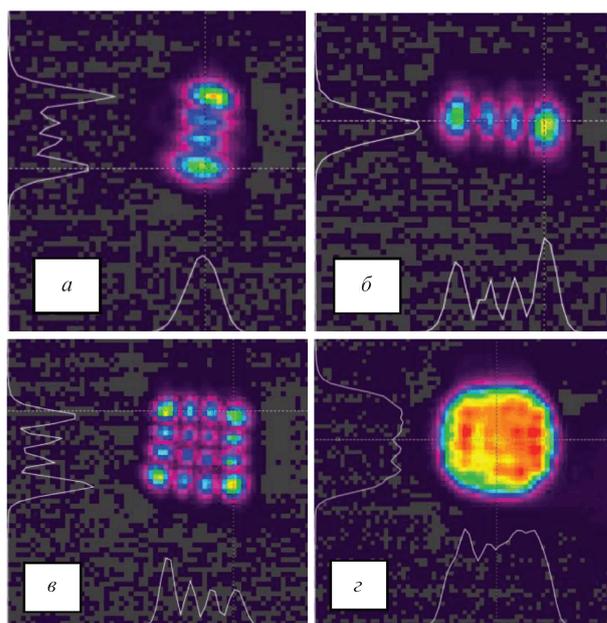


Рис.4. Распределения интенсивности излучения $\text{Er}:\text{YAG}$ -лазера в одном гигантском импульсе (а–в) и во всем цуге (г).

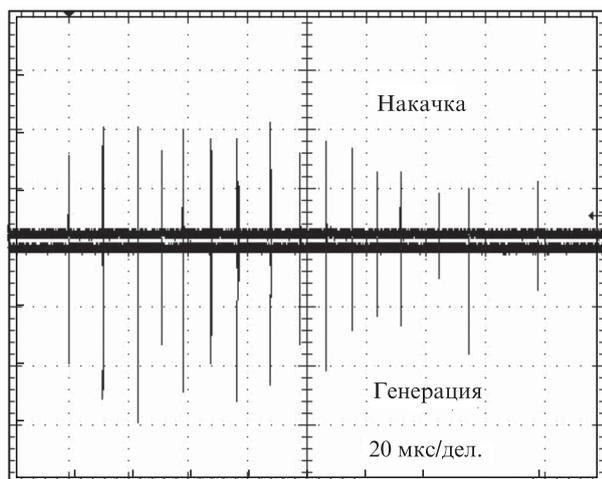


Рис.5. Формы импульсов излучения Er:YAG-лазера (накачки) и Fe²⁺:ZnSe-лазера (генерации).

генерации Er:YAG-лазера приведены на рис.3. Задержка цуга относительно импульса накачки составляла 140 мкс.

На рис.4,а–в приведены различные распределения интенсивности излучения Er:YAG-лазера непосредственно на кристалле Fe²⁺:ZnSe в первом гигантском импульсе из цуга. Увеличение времени экспозиции пироэлектрической камеры приводило к суммированию импульсов излучения (рис.4,г).

Типичные формы цуга импульсов накачки и генерации приведены на рис.5. Нестабильность энергии гигантских импульсов обусловлена непостоянством распределения интенсивности Er:YAG-лазера в многомодовом режиме (см. рис.4,а–в). Плотности энергии на затворе и на активном элементе Fe²⁺:ZnSe-лазера не превышали 0.55 и 1.25 Дж/см² соответственно, что меньше порогового

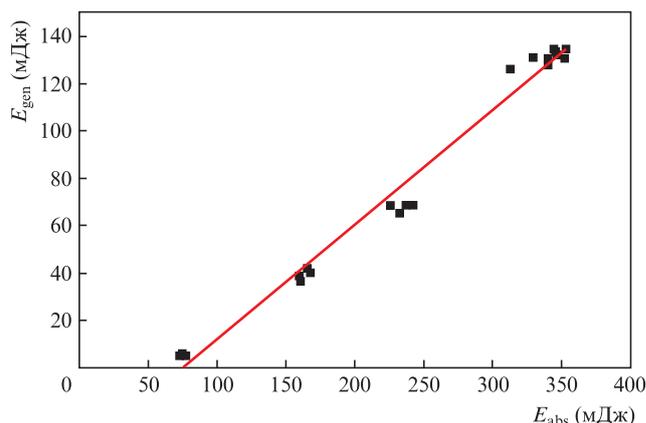


Рис.7. Зависимость энергии генерации Fe²⁺:ZnSe-лазера от поглощенной энергии Er:YAG-лазера.

значения разрушения кристалла Fe²⁺:ZnSe (1.5–2.0 Дж/см² при длительности импульса 100 нс).

Изменение длительности и формы импульсов Fe²⁺:ZnSe-лазера в зависимости от поглощенной энергии накачки показано на рис.6. Уменьшение поглощенной энергии накачки приводило к увеличению задержки импульса генерации и к сокращению его длительности. Вблизи порога генерации импульсы представляли собой короткие пички.

На рис.7 приведена зависимость энергии генерации Fe²⁺:ZnSe-лазера от поглощенной кристаллом энергии накачки. Ослабление падающего на кристалл излучения осуществлялось калиброванными фильтрами. Пороговая энергия накачки составила 74 мДж, суммарная энергия генерации в цуге Fe²⁺:ZnSe-лазера превысила 130 мДж. Эффективность генерации по поглощенной энергии накачки достигла 39%. Дифференциальная эффективность по поглощенной энергии была оценена по наклону пря-

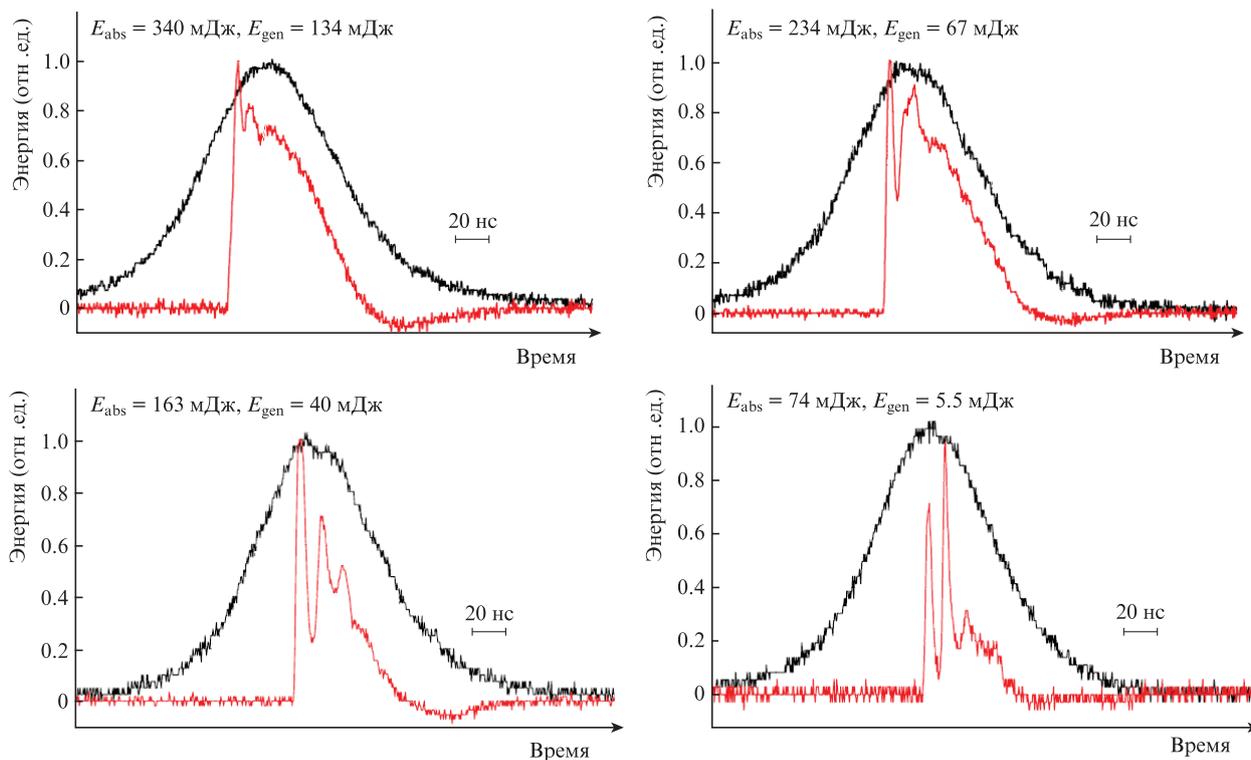


Рис.6. Формы и длительности импульсов излучения накачки и генерации. Указанные значения E_{abs} и E_{gen} соответствуют суммарной энергии импульсов в цуге.

мой, проведенной через экспериментальные точки методом наименьших квадратов, и составила 47%.

Итак, продемонстрирована работа $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера при комнатной температуре с накачкой цугом гигантских импульсов. Энергия генерации превысила 130 мДж, дифференциальная эффективность по поглощенной энергии составила 47% при частоте следования импульсов в цуге 100 ± 20 кГц.

Модуляция добротности $\text{Er}:\text{YAG}$ -лазера накачки позволяет реализовать импульсно-периодический режим $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера с высокой (десятки килогерц) частотой следования коротких импульсов.

1. Kernal J., Fedorov V.V., Gallian A., Mirov S.B., Badikov V.V. *Opt. Express*, **13** (26), 10608 (2005).
2. Акимов В.А., Воронов А.А., Козловский В.И., Коростелин Ю.В., Ландман А.И., Подмарьков Ю.П., Фролов М.П. *Квантовая электроника*, **36** (4), 299 (2006) [*Quantum Electron.*, **36** (4), 299 (2006)].
3. Doroshenko M.E., Basiev T.T., Koranda P., Jelinkova H., Nemes M., Cech M., Sulc J., Komar V.K., Gerasimenko A.S., Badikov V.V., Badikov D.V. *Proc. SPIE*, **7193**, 71931K (2009).
4. Kozlovsky V.I., Akimov V.A., Frolov M.P., Korostelin Yu.V., Landman A.I., Podmar'kov Yu.P., Voronov A.A. *Proc. SPIE*, **6610**, 661009 (2007).
5. Frolov M.P., Korostelin Yu.V., Kozlovsky V.I., Mislavsky V.V., Podmar'kov Yu.P., Skasyrsky Ya.K., Voronov A.A. *J. Russ. Laser Res.*, **32** (6), 528 (2011).
6. Великанов С.Д., Данилов В.П., Захаров Н.Г., Ильичев Н.Н., Казанцев С.Ю., Калинушкин В.П., Кононов И.Г., Насибов А.С., Студеникин М.И., Пашинин П.П., Фирсов К.Н., Шапкин П.В., Щуров В.В. *Квантовая электроника*, **44** (2), 141 (2014) [*Quantum Electron.*, **44** (2), 141 (2014)].
7. 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. *Laser Phys. Lett.*, **13**, 015002 (2016).
8. Великанов С.Д., Зарецкий Н.А., Зотов Е.А., Казанцев С.Ю., Кононов И.Г., Коростелин Ю.В., Манешкин А.А., Фирсов К.Н., Фролов М.П., Юткин И.М. *Квантовая электроника*, **46** (1), 11 (2016) [*Quantum Electron.*, **46** (1), 11 (2016)].
9. Великанов С.Д., Зарецкий Н.А., Зотов Е.А., 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), 1 (2015) [*Quantum Electron.*, **45** (1), 1 (2015)].
10. Dormidonov A.E., Firsov K.N., Gavrishchuk E.M., Ikonnikov V.B., Kazantsev S.Yu., Kononov I.G., Kotereva T.V., Savin D.V., Timofeeva N.A. *Appl. Phys. B*, **122**, 211 (2016), DOI 10.1007/s00340-016-6489-6.
11. Воронов А.А., Козловский В.И., Коростелин Ю.В., Ландман А.И., Подмарьков Ю.П., Полушкин В.Г., Фролов М.П. *Квантовая электроника*, **36** (1), 1 (2006) [*Quantum Electron.*, **36** (1), 1 (2006)].