

Лазер на кристалле ZnSe:Fe^{2+} с накачкой излучением нецепного электроразрядного HF лазера при комнатной температуре*

Исследованы характеристики ZnSe:Fe^{2+} лазера в схеме с поперечной накачкой кристалла излучением нецепного электроразрядного HF лазера при комнатной температуре. Экспериментально исследована структура импульса излучения ZnSe:Fe^{2+} лазера. Получена энергия генерации 30,6 мДж в импульсе при длительности импульса по полуамплитуде ~ 125 нс (при высоких уровнях накачки), обсуждаются возможности дальнейшего увеличения энергии ZnSe:Fe^{2+} лазера с накачкой излучением нецепного HF лазера.

**С. Д. Великанов, В. П. Данилов,
Н. Г. Захаров, Н. Н. Ильичев,
С. Ю. Казанцев, В. П. Калинушкин,
И. Г. Кононов, А. С. Насибов,
М. И. Студеникин, П. П. Пашинин,
К. Н. Фирсов, П. В. Шапкин,
В. В. Щуров**

Введение

Мощное лазерное излучение в спектральном диапазоне $\lambda = 3-5$ мкм представляет значительный интерес для научных исследований и ряда технических приложений, что стимулирует интенсивный поиск и изучение перспективных материалов для создания в этом диапазоне мощных и компактных лазеров. Особое внимание уделяется кристаллу ZnSe , легированному ионами Fe^{2+} , при накачке которого излучением Er:YAG лазера впервые наблюдалась [1] генерация с длиной волны излучения $\lambda = 4,0-4,5$ мкм в интервале изменения температуры кристалла 15–180 К. Дальнейшие исследования с короткими импульсами накачки (в режиме модуляции добротности) [2] показали возможность получения генерации на этом материале в диапазоне длин волн $\lambda = 3,9-4,8$ мкм и при комнатной температуре. В работе [3], при использовании в качестве генератора накачки Er:YAG лазера в режиме свободной генерации (выходная энергия лазера до 8 Дж, полная длительность импульса накачки ~ 650 мкс, импульс промодулирован короткими пачками с длительностью по полувысоте 0,3–0,5 мкс), генерация на ZnSe:Fe^{2+} при комнатной

*Квантовая электроника, 2014, 44, 141–144.

температуре также наблюдалась, но КПД лазера был низким из-за малого времени жизни верхнего лазерного уровня (360 нс при температуре 292 К [3]). При выходной энергии ZnSe:Fe²⁺ лазера 42 мДж КПД по поглощенной в кристалле энергии накачки в [3] составил ≈0,9 %. В [4] сообщалось о достижении при комнатной температуре суперлюминесцентного режима излучения с длиной волны $\lambda = 4,6-4,7$ мкм в схеме с поперечной лазерной накачкой кристалла ZnSe:Fe²⁺. Выходная энергия излучения в [4] составила приблизительно 1 мДж при энергии накачки 15 мДж (энергии, падающей на кристалл). Особенностью материала, позволившей добиться таких характеристик, было то, что в процессе легирования ZnSe ионами Fe²⁺ диффузионным методом примесь концентрировалась в узкой приповерхностной зоне кристалла. Эта геометрия позволила эффективно использовать излучение накачки и одновременно получить очень высокий коэффициент усиления. Обзор исследований в области создания лазеров на кристаллах, легированных Fe²⁺, можно найти в [5].

Энергия генерации лазеров на ZnSe:Fe²⁺ при комнатной температуре в большой степени ограничивается низкой выходной энергией использующихся для накачки твердотельных лазеров, работающих с целью получения короткого светового импульса в режиме модулированной добротности (лазеры на Er:YAG и Er:Cr:YSGG с длиной волны 2,92 мкм и 2,8 мкм соответственно). Так, например, в [6], где описывается эксперимент, когда при комнатной температуре была достигнута самая высокая в настоящее время энергия излучения ZnSe:Fe²⁺ лазера (3,6 мДж) с накачкой коротким световым импульсом, максимальная энергия Er:Cr:YSGG лазера в режиме модулированной добротности, применявшегося для накачки, не превышала 35 мДж. Нецепные электро-разрядные HF лазеры, спектр излучения которых ($\lambda = 2,6-3,1$ мкм) полностью попадает в область поглощения Fe²⁺ в кристалле ZnSe, при длительности светового импульса ≈150 нс имеют практически неограниченную энергию генерации, с точки зрения рассматриваемых здесь применений, и могут работать с большой частотой следования импульсов [7–9]. Поэтому представляет несомненный интерес исследование характеристик лазера на кристалле ZnSe:Fe²⁺ при его накачке излучением HF лазера, что и являлось целью настоящей работы. Основные усилия были направлены на демонстрацию возможностей масштабирования описанного в [4] лазерного излучателя на кристалле, легированном диффузионным методом, в сторону увеличения выходной энергии.

Экспериментальная установка

Как и в [4], примесь Fe²⁺ вводилась в ZnSe методом диффузии в условиях термодинамического равновесия [10] одновременно через две грани кристалла. Толщина обогащенного ионами Fe²⁺ приповерхностного слоя составляла ~100 мкм, концентрация ионов в слое достигала ~10²⁰ см⁻³ [4]. Грани, через которые осуществлялось легирование кристалла, подвергались полировке, с обеих граней снимались слои материала приблизительно одинаковой толщины. Пропускание кристалла в перпендикулярном к грани направлении на длинах волн излучения HF лазера составляло ~6 %. Оно определялось поглощением двумя легированными слоями и отражением излучения от двух непросветленных граней кристалла.

В экспериментах использовались 4 образца кристалла ZnSe:Fe²⁺, отличавшиеся, главным образом, размерами. Размеры грани образцов, через которую в кристалл вводилось излучение накачки, и размеры зоны облучения приведены в табл. 1. Толщина образцов составляла ≈1 мм. После легирования кристаллы, из которых изготавливались исследуемые здесь образцы, имели следующую нумерацию: № 1 – № 498; № 2–№ 406; № 3–№ 473; № 4–№ 406 (этот образец был вырезан из образца № 2 после случайного разрушения последнего). Торцы образцов, перпендикулярные длинной стороне зоны облучения (через которые выводилось излучение ZnSe:Fe²⁺ лазера),

скальвались так, чтобы они были максимально параллельны друг другу. Никакой дополнительной обработки торцов после скальвания не проводилось. Большая часть измерений выполнялась с использованием образца № 1. Остальные образцы служили, в основном, для демонстрации возможности получения больших значений энергии излучения E_1 и КПД η ZnSe:Fe²⁺ лазера с накачкой излучением нецепного HF лазера. Предварительно был измерен порог разрушения поверхности образца (использовались тестовые образцы, сходные с образцами, параметры которых приведены в табл. 1) излучением накачки. Порог разрушения по плотности энергии накачки составил $E_p^{th} \approx 1$ Дж/см². Поэтому в экспериментах плотность энергии накачки не превышала 0,9 Дж/см². Схема эксперимента представлена на рис. 1.

Таблица 1

Размеры кристалла ZnSe:Fe²⁺ $a \times b$ и зоны облучения поверхности $c \times d$

№ образца	Размеры образца $a \times b$, мм	Размеры зоны облучения $c \times d$, мм
1	13×9	12×8
2	25×11	20×7
3	17×11	17×7
4	12×11	12×7, 12×2,5

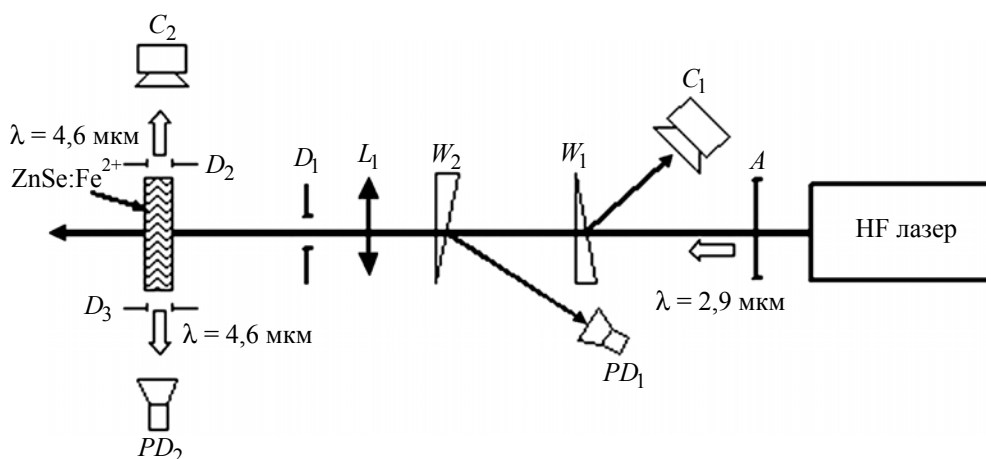


Рис. 1. Схема эксперимента: W_1, W_2 – клинья из BaF₂; PD_1, PD_2 – фотоприемники; $D_1 - D_3$ – прямоугольные диафрагмы; C_1, C_2 – калориметры; A – калиброванные светофильтры; L_1 – сферическая линза; ZnSe:Fe²⁺ – накачиваемый кристалл

Поперечная накачка кристалла ZnSe:Fe²⁺ осуществлялась нецепным электроразрядным HF лазером, характеристики которого подробно описаны в [11, 12]. Максимальная энергия излучения лазера составляла 5 Дж. Излучение ослаблялось калиброванными фильтрами A . Для контроля энергии и формы импульса накачки часть пучка лазера ответвлялась клиньями W_1 и W_2 на фотоприемник PD_1 фирмы «Vigo-system Ltd.» с временным разрешением ~ 1 нс и калориметр C_1 фирмы «Gentec-EO» соответственно. Прошедший через клинья пучок поджимался сферической линзой L до диаметра ~ 25 мм на расстоянии 1 см от поверхности кристалла ZnSe:Fe²⁺ и обрезался прямоугольной диафрагмой D_1 так, чтобы его размеры на поверхности образца соответствовали размерам зоны облучения, указанным в табл. 1. Соотношение величин энергии HF лазера перед диафрагмой D_1 и на поверхности образца определялось в отдельном эксперименте. Для это-

го вместо образца устанавливался калориметр. Форма и энергия импульса генерации ZnSe:Fe²⁺ лазера контролировались фотоприемником PD₂ фирмы «Vigo-system Ltd.» с временным разрешением ~1 нс и калориметром C₂ фирмы «Molelectron» соответственно. Предварительные измерения показали, что через оба торца кристалла выводятся импульсы излучения (ZnSe:Fe²⁺ лазера) с одинаковой энергией, временные структуры импульсов также не отличаются. Это позволяет одновременно регистрировать форму и энергию импульса без дополнительных ответвляющих оптических клиньев, как показано на рис. 1. Прямоугольные диафрагмы D₂ и D₃ на рис. 1 служат для предотвращения попадания на фотоприемник и калориметр рассеянного излучения накачки. Сигналы с фотоприемников подавались на цифровой осциллограф с полосой пропускания 500 МГц.

Результаты экспериментов и их обсуждение

На рис. 2 приведена зависимость энергии генерации ZnSe:Fe²⁺ лазера E₁ от энергии накачки E_p (энергии, падающей на кристалл), снятая на образце № 1. Как видно из этого рисунка, зависимость носит типичный для лазерной генерации пороговый характер. Максимальная величина E₁ для образца № 1 составила 11,7 мДж. С учетом того, что через второй торец кристалла выводится импульс с такой же энергией, суммарная энергия генерации составляет E₁^Σ = 23,4 мДж.

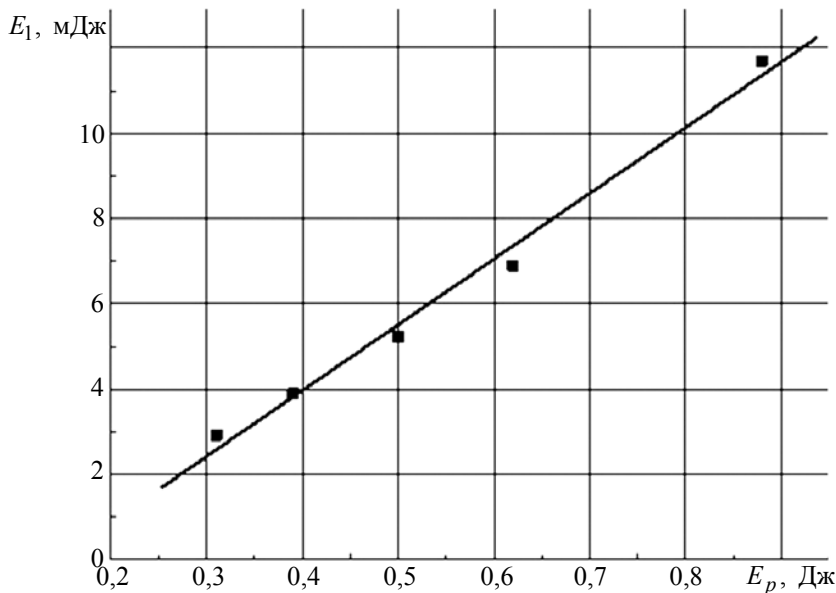


Рис. 2. Зависимость энергии генерации ZnSe:Fe²⁺ лазера E₁ от энергии накачки E_p для образца № 1

На рис. 3 представлены осциллограммы импульсов генерации ZnSe:Fe²⁺ и HF лазеров P₁ и P_p соответственно, снятые при разных значениях энергии накачки. Из рис. 3 видно, что световые импульсы промодулированы короткими пичками. Длительность отдельного пичка (по полуамплитуде) в импульсе генерации вблизи порога по энергии накачки составляет 3–7 нс. При высоких уровнях накачки (рис. 3,з), когда пиковая структура не слишком выражена, длительность

импульса ZnSe:Fe^{2+} лазера по полуамплитуде составляет приблизительно 125 нс. Анализ осциллограмм показывает, что пички на импульсе ZnSe:Fe^{2+} лазера никак не связаны с пичками на импульсе накачки. Временная структура импульса накачки хаотически меняется от выстрела к выстрелу при том, что энергия HF лазера воспроизводится с точностью не хуже 5%. Природа пиковой структуры импульса накачки связана с неодновременностью развития генерации на разных переходах молекулы HF, в том числе с каскадным характером генерации [13]. Для накачки кристалла ZnSe:Fe^{2+} изменение во времени в течение импульса спектрального состава излучения накачки большого значения не имеет, поскольку коэффициенты поглощения излучения ионами Fe^{2+} близки для всех генерируемых в импульсе линий [4]. Поэтому воспроизводимость временной структуры импульса ZnSe:Fe^{2+} лазера оказывается лучше, чем лазера накачки. Как видно из рис. 3, количество пичков в импульсе генерации ZnSe:Fe^{2+} лазера и глубина модуляции импульса зависят от энергии накачки. При приближении к порогу генерации количество пичков уменьшается, а глубина модуляции растет. Подобная временная форма импульса (со значительно большей длительностью пичков) наблюдается в импульсных твердотельных лазерах, работающих в режиме свободной генерации (см., например, [3]). Из рис. 3 также видно, что импульс ZnSe:Fe^{2+} лазера задержан относительно импульса накачки. На рис. 4 приведена зависимость времени этой задержки Θ от энергии накачки. Естественно, что задержка уменьшается с увеличением энергии накачки.

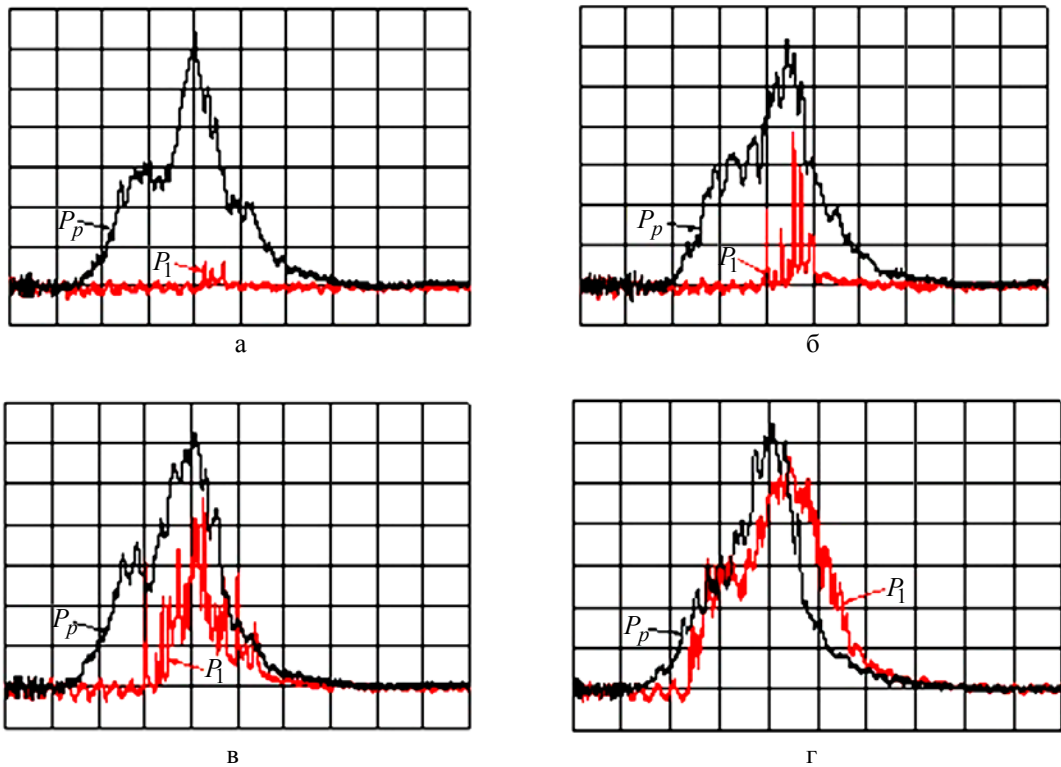


Рис. 3. Осциллограммы импульсов излучения ZnSe:Fe^{2+} лазера P_l и лазера накачки P_p : а – $E_p = 0,35$ Дж; б – $E_p = 0,36$ Дж; в – $E_p = 0,44$ Дж; г – $E_p = 0,65$ Дж. Развертка 50 нс/дел. Образец № 1

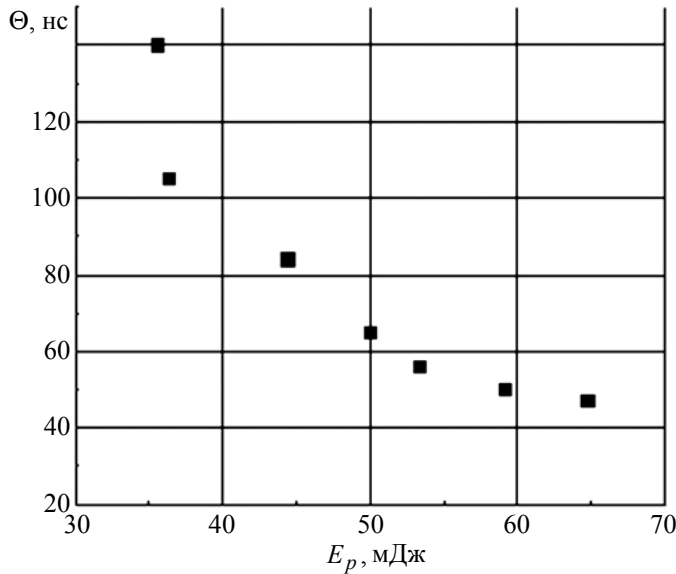


Рис. 4. Зависимость времени задержки Θ импульса генерации ZnSe:Fe²⁺ лазера относительно импульса накачки от энергии накачки E_p для образца № 1

В табл. 2 приведены максимальные значения энергии излучения E_1^{\max} и КПД ZnSe:Fe²⁺ лазера $\eta^{\max} = 2E_1^{\max} / E_p^{\max}$ (E_p^{\max} – максимальная в эксперименте энергия накачки, при которой достигается максимальный КПД в случае линейной, как на рис. 2, зависимости энергии излучения ZnSe:Fe²⁺ лазера E_1 от энергии накачки E_p), полученные на разных образцах. При определении КПД учитывалось, что через оба торца кристалла выводится одинаковая энергия, измеряется же энергия, выводимая через один торец (см. рис. 1). Поэтому суммарная энергия лазера составляет $E_1^{\Sigma} = 2E_1$. Как следует из табл. 2, самое большое значение энергии излучения $E_1^{\max} = 15,3$ мДж ($E_1^{\Sigma} = 30,6$ мДж) было получено на образце № 2. Обращает на себя внимание заметное отличие КПД для разных образцов. Самый высокий КПД, $\eta^{\max} = 4,7\%$, был достигнут на наиболее коротком образце № 4 при сравнимой с остальными образцами выходной энергии лазера. Можно полагать, что в значительной мере это связано с параллельностью торцов кристалла, которые в данном случае могут играть роль зеркал резонатора лазера (параллельность трудно контролировать при ручном скалывании торцов кристалла). Проверка данного предположения производилась в следующих экспериментах. Ширина зоны облучения образца № 4 была уменьшена до 2,5 мм. При одинаковой энергии накачки измерялись величины E_1 в обычном положении образца (рис. 5,а) и при повороте образца приблизительно на 45° вокруг оси пучка накачки (рис. 5,б). Такой поворот образца, эквивалентный уменьшению длины активной среды в «резонаторе», привел к более чем двукратному уменьшению E_1 . Для иллюстрации на рис. 6 приведена зависимость энергии излучения ZnSe:Fe²⁺ лазера на образце № 4 от длины облучаемой зоны l при плотности энергии накачки 0,62 Дж/см² и ширине облучаемой зоны 2,5 мм. Другим важным фактором, который может влиять на КПД, является дополнительное поглощение на длине волны генерации в образцах, которое, скорее всего, обусловлено недостаточной чистотой железа, использовавшегося для проведения процесса диффузии.

Таблица 2

Максимальные значения энергии излучения (E_1^{max}) и КПД (η^{max}) $ZnSe:Fe^{2+}$ лазера, полученные на разных образцах

№ образца	E_1^{max} , мДж	η^{max} , %
1	11,7	2,9
2	15,3	3,1
3	14,8	3,9
4	14,0	4,7

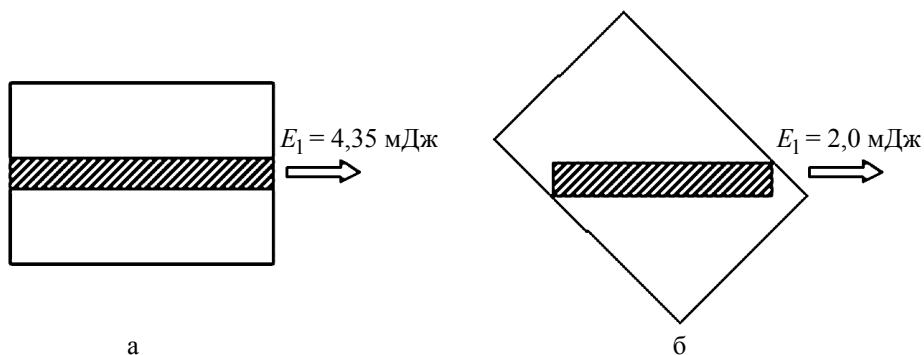


Рис. 5. Положение кристалла $ZnSe:Fe^{2+}$ относительно пучка накачки: а – обычное положение кристалла; б – кристалл повернут на 45° вокруг оси пучка накачки. Образец № 4, ширина зоны облучения 2,5 мм. Плотность энергии накачки $0,62$ Дж/см²

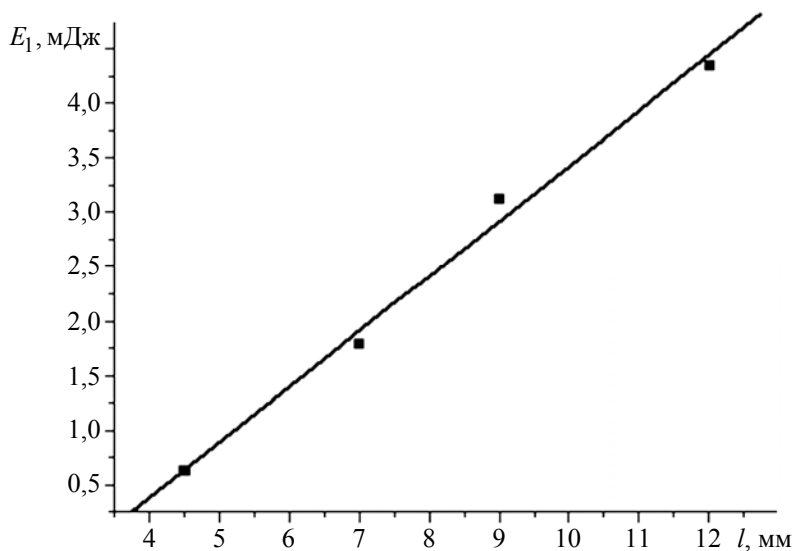


Рис. 6. Зависимость энергии генерации $ZnSe:Fe^{2+}$ лазера E_1 от длины зоны облучения. Образец № 4, ширина облучаемой зоны 2,5 мм. Плотность энергии накачки $0,62$ Дж/см²

Заключение

Таким образом, в настоящей работе исследованы характеристики ZnSe:Fe²⁺ лазера в схеме с поперечной накачкой кристалла излучением нецепного электроразрядного HF лазера при комнатной температуре. Примесь Fe²⁺ вводилась в кристалл ZnSe методом диффузии в условиях термодинамического равновесия одновременно через две грани, концентрация Fe²⁺ в приповерхностных слоях толщиной ~100 мкм составляла ~10²⁰ см⁻³. Установлено, что импульс излучения ZnSe:Fe²⁺ лазера имеет выраженную пиковую структуру. Количество пиков в импульсе уменьшается, а глубина модуляции импульса увеличивается при уменьшении энергии накачки. Получена суммарная энергия генерации ZnSe:Fe²⁺ лазера $E_1^{\Sigma} = 30,6$ мДж, что почти на порядок (в 8,5 раз) превышает максимальное полученное до настоящего времени значение (3,6 мДж [6]) при использовании для накачки при комнатной температуре твердотельного лазера с модулированной добротностью.

В заключение заметим, что при накачке кристаллов ZnSe:Fe²⁺ с объемным легированием ионами Fe²⁺ [3–6, 14, 15] излучением нецепных HF лазеров энергия генерации в спектральном диапазоне $\lambda = 4,6–4,7$ мкм будет определяться лишь размерами образцов. Для образцов, легированных методом диффузии, с тонким приповерхностным слоем примеси масштабирование к большим энергиям генерации также возможно за счет простого увеличения поверхности кристалла, через которую проводится диффузия примеси и осуществляется оптическая накачка.

Список литературы

1. Adams J. J., Bibeau C., Page R. H., Krol D. M., Furu L. H., Payne S. A. 4.0–4.5 μm lasing of Fe:ZnSe below 180 K, a new mid-infrared laser material // *Optics Letters*, 1999, 24, N 23, 1720–1722.
2. Kernal J., Fedorov V. V., Gallian A., Mirov S. B., Badikov V. V. 3.9–4.8 μm gain-switched lasing of Fe:ZnSe at room temperature // *Optics Express*, 2005, 13, N 26, 10608–10612.
3. Frolov M. P., Korostelin Yu. V., Kozlovsky V. I., Mislavskii V. V., Podmarkov Yu. P., Savinova S. A., Skasyrsky Ya. K. Study of a 2 – J pulsed Fe:ZnSe 4- μm laser // *Laser Phys. Letters*, 2013, 10, 125001.
4. Ильичев Н. Н., Данилов В. П., Калинушкин В. П., Студеникин М. И., Шапкин П. В., Насибов А. С. Суперлюминесцентный ИК излучатель на кристалле ZnSe:Fe²⁺, работающий при комнатной температуре // *Квантовая электроника*, 2008, т. 38 (2), с. 95–96.
5. Mirov S. B., Fedorov V. V., Martyshkin D. V., Moskalev I. S., Mirov M. S., Gapontsev V. P. Progress in mid-IR Cr²⁺ and Fe²⁺ doped II-VI materials and lasers // *Optical Materials Express*, 2011, 1, N 5, p. 898–910.
6. NoSung Myoung, Dmitri V. Martyshkin, Vladimir V. Fedorov, Sergey B. Mirov. Energy scaling of 4.3 μm room temperature Fe:ZnSe laser // *Optics Letters*, 2011, 36, N 1, p. 94–96.
7. Аполлонов В. В., Казанцев С. Ю., Орешкин В. Ф., Фирсов К. Н. Возможности увеличения выходной энергии нецепного HF(DF)-лазера // *Квантовая электроника*, 1997, 24 (3), 213–215.

8. Великанов С. Д., Гаранин С. Г., Домажиров А. П., Ефанов Е. М., Ефанов М. В., Казанцев С. Ю., Кодола Б. Е., Комаров Ю. Н., Кононов И. Г., Подлесных С. В., Сивачев А. А., Фирсов К. Н., Щуров В. В., Ярин П. М. Мощный электроразрядный HF-лазер с твердотельным генератором накачки // Квантовая электроника, 2010, 40 (5), 393–396.
9. Булаев В. Д., Гусев В. С., Казанцев С. Ю., Кононов И. Г., Лысенко С. Л., Морозов Ю. Б., Познышев А. Н., Фирсов К. Н. Электроразрядный импульсно-периодический HF-лазер с большой энергией излучения // Квантовая электроника, 2010, 40 (7), 615–618.
10. Pichev N. N., Shapkin P. V., Kulevsky L. A., Gulyamova E. S., Nasibov A. S. Nonlinear transmittance of ZnSe:Fe²⁺ crystal at wavelength of 2.92 μm // Laser Phys., 2007, 17, 130.
11. Andreev S. N., Pichev N. N., Firsov K. N., Kazantsev S. Yu., Kononov I. G., Kulevskii L. A., ashinin P. P. Generation of an Electrical Signal upon the Interaction of Laser Radiation with Water Surface // Laser Physics, 2007, 17 (8), p. 1041.
12. Андреев С. Н., Казанцев С. Ю., Кононов И. Г., Пашинин П. П., Фирсов К. Н. Временная структура электрического сигнала при взаимодействии излучения HF лазера с донной поверхностью столба воды // Квантовая электроника, 2009, 39 (2), 179–184.
13. Баранов В. Ю., Высикайло Ф. И., Демьянов А. В., Кочетов И. В., Малюта Д. Д., Толстов В. Ф. Спектрально-временные и энергетические характеристики импульсного нецепного HF-лазера // Квантовая электроника, 1983, 10 (10), с. 2075.
14. Doroshenko M. T., Jelinkova H., Koranda P., Sulc J., Basiev T. T., Osiko V. V., Komar V. K., Gerasimenko A. S, Puzikov V. M., Badikov V. V., Badikov D. V. Tunable mid-infrared laser properties of Cr²⁺:ZnMgSe and Fe²⁺: ZnSe crystals // Laser Phys. Lett., 2010, 7 (1), p. 39–45.
15. Акимов В. А., Воронов А. А., Козловский В. И., Коростелин Ю. В., Ландман А. И., Подмарьков Ю. П., Фролов М. П. Эффективная лазерная генерация кристалла Fe²⁺:ZnSe при комнатной температуре // Квантовая электроника, 2006, 36 (4), 299–302.

ZnSe:Fe²⁺ laser pumped by a nonchain electric-discharge HF laser at room temperature

S. D. Velikanov, V. P. Danilov, N. G. Zakharov, N. N. Il'ichev, S. Yu. Kazantsev, V. P. Kalinushkin, I. G. Kononov, A. S. Nasibov, M. I. Studenikin, P. P. Pashinin, K. N. Firsov, P. V. Shapkin, V. V. Shchurov

The characteristics of a ZnSe:Fe²⁺ laser in a scheme with transverse pumping by a non-chain electric-discharge HF laser at room temperature are studied. The pulse structure of a ZnSe:Fe²⁺ laser is studied experimentally. A laser pulse energy of 30.6 mJ is achieved at a pulse duration at half maximum of ~125 ns (at high pump energies); the possibility of a further increase in the energy of ZnSe:Fe²⁺ lasers pumped by nonchain HF lasers is discussed.