

Масштабирование энергетических характеристик лазера на поликристалле $\text{ZnSe}:\text{Fe}^{2+}$ при комнатной температуре

Е.М.Гаврищук, В.Б.Иконников, С.Ю.Казанцев, И.Г.Кононов,
С.А.Родин, Д.В.Савин, Н.А.Тимофеева, К.Н.Фирсов

Исследованы генерационные характеристики лазера на легированных методом диффузии поликристаллических образцах $\text{ZnSe}:\text{Fe}^{2+}$, возбуждаемых при комнатной температуре электроразрядным HF-лазером. На образце, легированном с двух сторон (рабочие поверхности), получена энергия генерации $E = 253$ мДж с дифференциальным КПД $\eta_d = 33\%$ и эффективностью по поглощенной энергии $\eta_{abs} \approx 28\%$ при размерах пятна накачки эллиптической формы $a \times b = 6.8 \times 7.5$ мм. Установлено, что возможности дальнейшего увеличения энергии генерации на образцах этого типа посредством увеличения площади пятна накачки (при постоянной плотности энергии накачки) ограничены развитием паразитной генерации, характерной для лазеров с дисковой геометрией. Приводятся первые результаты исследований лазера на поликристаллическом образце, изготовленном по технологии, позволяющей создавать нулевую концентрацию легирующего компонента на поверхности и максимальную в объеме образца (образец с «внутренним легированием»). Обсуждаются перспективы увеличения энергии излучения $\text{ZnSe}:\text{Fe}^{2+}$ -лазера при комнатной температуре за счет разработки многослойных образцов на основе указанной технологии легирования.

Ключевые слова: $\text{ZnSe}:\text{Fe}^{2+}$ -лазер, нецепной электроразрядный HF-лазер, оптическая накачка, диффузионное легирование, метод CVD, баротермическая обработка.

1. Введение

Лазер на кристалле $\text{ZnSe}:\text{Fe}^{2+}$ с оптической накачкой привлекает внимание исследователей возможностью получения мощного когерентного излучения в важном для ряда практических применений спектральном диапазоне 4–5 мкм [1–16]. В настоящее время максимальная энергия генерации $\text{ZnSe}:\text{Fe}^{2+}$ -лазера $E = 4.9$ Дж при эффективности по поглощенной в активном элементе энергии излучения Er:YAG-лазера, работавшего в режиме свободной генерации, $\eta_{abs} \approx 47\%$ получена авторами [14] при температуре $T = 85$ К. Для практических применений предпочтительной является работа лазеров при комнатной температуре. Однако, как показано в [14], увеличение температуры до комнатной в режиме свободной генерации лазера накачки приводило к снижению значения E до 53 мДж ($\eta_{abs} < 1\%$) из-за уменьшения времени жизни верхнего лазерного состояния ${}^5\text{T}_2$ иона Fe^{2+} в матрице ZnSe с ростом температу-

ры (~ 360 нс при комнатной температуре [8]). В условиях накачки кристалла коротким импульсом твердотельного лазера (режим модулированной добротности) максимальные значения E и дифференциального КПД η_d при комнатной температуре составили 6 мДж и 39% соответственно [15], и возможности дальнейшего наращивания энергии ограничены низкими энергетическими характеристиками применяемых в настоящее время для накачки кристалла $\text{ZnSe}:\text{Fe}^{2+}$ твердотельных лазеров трехмикронного диапазона при их работе в режиме модулированной добротности (максимум 35 мДж [6]).

Энергию излучения $\text{ZnSe}:\text{Fe}^{2+}$ -лазера при комнатной температуре удалось значительно увеличить за счет использования для накачки кристалла нецепных электроразрядных HF-лазеров [10–14]. Спектр излучения данного типа лазеров ($\lambda = 2.6\text{--}3.1$ мкм) полностью попадает в область поглощения Fe^{2+} в кристалле ZnSe . Они имеют короткий (100–200 нс) световой импульс и практически неограниченную энергию генерации с точки зрения рассматриваемых здесь применений (см. [17–19] и ссылки в них). Также немаловажно, что эти лазеры могут работать при больших частотах следования импульсов [20, 21]. Максимальная энергия генерации в импульсе E при накачке HF-лазером поликристалла $\text{ZnSe}:\text{Fe}^{2+}$, легированного с двух сторон методом диффузии, составила при комнатной температуре 192 мДж с $\eta_{abs} = 23\%$ [12]. В импульсно-периодическом режиме работы $\text{ZnSe}:\text{Fe}^{2+}$ -лазера, возбуждаемого HF-лазером [13, 14], получена средняя мощность 2.4 Вт при энергии в отдельном импульсе до 14 мДж [14] (частота следования импульсов до 200 Гц).

Целью настоящей работы является исследование возможностей дальнейшего увеличения энергии генерации лазера на поликристаллических образцах $\text{ZnSe}:\text{Fe}^{2+}$, накачиваемых излучением импульсного электроразрядного HF-лазера при комнатной температуре.

Е.М.Гаврищук. Институт химии высокочистых веществ им Г.Г.Де-вятих РАН, Россия, 603950 Н.Новгород, ул. Тропинина, 49; Нижегородский государственный университет им. Н.И.Лобачевского, Россия, 603950 Н.Новгород, просп. Гагарина, 23; e-mail: gavr@ihps.nnov.ru

В.Б.Иконников, С.А.Родин, Д.В.Савин, Н.А.Тимофеева. Институт химии высокочистых веществ им Г.Г.Деятих РАН, Россия, 603950 Н.Новгород, ул. Тропинина, 49; e-mail: ikonnikov@ihps.nnov.ru, rodin@ihps.nnov.ru

С.Ю.Казанцев, И.Г.Кононов. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: kazan@kapella.gpi.ru, kononov@kapella.gpi.ru

К.Н.Фирсов. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия, 115409 Москва, Каширское ш., 31; e-mail: k_firsov@rambler.ru

Поступила в редакцию 27 апреля 2015 г., после доработки – 10 июня 2015 г.

2. Экспериментальная установка

В экспериментах использовались два типа активных элементов на поликристалле $\text{ZnSe}:\text{Fe}^{2+}$. Образцы первого типа изготавливались из поликристаллического ZnSe , выращенного методом химического осаждения из газовой фазы (CVD) по реакции паров цинка с селеноводородом в потоке аргона. Из полученного материала вырезались пластины диаметром 20 мм и толщиной 4.5 мм, которые затем механически шлифовались и полировались. Методика легирования ZnSe ионами Fe не отличалась существенно от методики легирования ионами Cr [22]. На обе поверхности пластины ZnSe методом электронно-лучевого испарения наносились пленки Fe толщиной не более 1 мкм. Пластина отжигалась при температуре $1000 \pm 2^\circ\text{C}$ в течение 7–15 суток в запаянной кварцевой ампуле, заполненной водородом. Отожженный образец подвергался химико-механической полировке. Время отжига образца №1 составляло 15 суток, образца №2 – 7 суток. Образец №2 использовался нами ранее в качестве активного элемента в экспериментах [11–13].

Активный элемент второго типа (образец №3) был изготовлен по оригинальной технологии, подробно описанной в [23, 24] для кристалла $\text{ZnSe}:\text{Cr}^{2+}$. Достоинство данной технологии состоит в том, что она позволяет изготавливать образцы с нулевой концентрацией легирующего компонента на поверхности и максимальной – в объеме образца (назовем его образцом с «внутренним легированием»). Процесс создания образцов $\text{ZnSe}:\text{Fe}^{2+}$ с «внутренним легированием» имел ряд особенностей, позволяющих получать материал более высокого оптического качества с точно заданным числом ионов железа в поглощающем слое на единицу площади. Вначале на полученные методом CVD образцы ZnSe размером $10 \times 15 \times 5$ мм методом химического осаждения из газовой фазы с использованием реакции паров Zn с FeCl_2 наносилась пленка железа. Затем для формирования легированного ионами Fe^{2+} приповерхностного слоя образцы отжигались в запаянных кварцевых ампулах при температуре 1050°C в атмосфере аргона под давлением ~ 1 атм в течение двух суток. Контроль оптического поглощения ионами железа в образцах (контроль числа ионов железа в поглощающем слое на единицу площади) осуществлялся методом ИК фурье-спектроскопии.

Далее образец подвергался высококачественной химико-механической полировке по методике [25] и помещался в CVD-реактор для доращивания слоя ZnSe необходимой толщины на поверхности, легированной ионами Fe^{2+} . В результате получалась трехслойная структура $\text{ZnSe}-\text{ZnSe}:\text{Fe}^{2+}-\text{ZnSe}$ толщиной до 8 мм. С целью создания необходимого концентрационного профиля ионов железа проводилась высокотемпературная газостатическая обработка синтезированной структуры в атмосфере аргона в течение 53 ч при давлении 90 МПа и температуре 1200°C . Использование высокого изостатического давления значительно уменьшает сублимацию селенида цинка, а также позволяет увеличить температуру и уменьшить время процесса обработки по сравнению с диффузионным отжигом. Кроме того, баротермическая обработка приводит к «залечиванию» объемных структурных дефектов, рассеивающих излучение [26]. Размеры образца №3 составляли $10 \times 15 \times 7$ мм, его боковые грани подвергались грубому шлифованию.

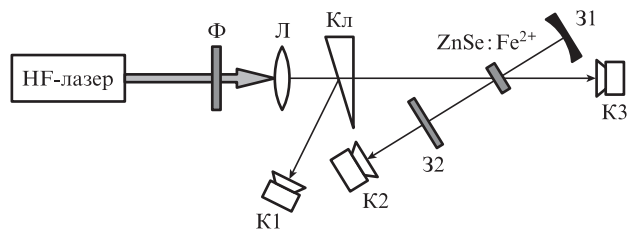


Рис.1. Схема эксперимента:

Кл – клин из BaF_2 ; К1–К3 – калориметры; Ф – светофильтры; Л – сферическая линза; $\text{ZnSe}:\text{Fe}^{2+}$ – активный элемент; 31, 32 – зеркала резонатора.

Все три образца имели близкое пропускание (3%–4%) на длинах волн излучения накачки при низких плотностях падающей на поверхность энергии, поверхностная плотность ионов в поглощающем слое (в случае образцов с двухсторонним легированием – в двух слоях) составляла примерно $(3-4) \times 10^{18} \text{ см}^{-2}$.

Схема эксперимента приведена на рис.1. Резонатор $\text{ZnSe}:\text{Fe}^{2+}$ -лазера длиной 120 мм был образован вогнутым зеркалом 31 (зеркало с золотым покрытием на подложке из кварца) с радиусом кривизны $R = 1$ или 0.5 м и плоским выходным зеркалом 32. В качестве выходных использовались зеркала с интерференционными покрытиями на подложках из CaF_2 , имевшие коэффициенты отражения на длине волны $\lambda = 4.5$ мкм $\rho = 40\%$ и 60% . Образцы $\text{ZnSe}:\text{Fe}^{2+}$ устанавливались перпендикулярно оптической оси резонатора на расстоянии 40 мм от выходного зеркала. Излучение мощного импульсного HF-лазера с длительностью импульса по полувысоте $\tau \approx 130-160$ нс (зависящей от соотношения концентраций компонентов в рабочей смеси) [10–12, 27, 28], ослабляемое калиброванными светофильтрами Ф, фокусировалось на поверхность образца сферической линзой Л с фокусным расстоянием 45 см в пятно эллиптической формы с осями a и b . В процессе экспериментов площадь пятна излучения накачки S , содержащего 0.9 падающей на поверхность образца энергии, варьировалась в пределах $0.057-0.48 \text{ см}^2$ (размер большой оси эллипса пятна накачки b изменялся в пределах 2.6–8.1 мм, а отношение размеров осей b/a – в пределах 1.02–1.08). Угол падения излучения накачки на поверхность образца составлял $\sim 20^\circ$. Энергии падающего на образец излучения накачки, прошедшего через образец излучения и генерации $\text{ZnSe}:\text{Fe}^{2+}$ -лазера измерялись калориметрами К1–К3 (Molelectron) соответственно. Для контроля формы импульсов генерации $\text{ZnSe}:\text{Fe}^{2+}$ - и HF-лазеров использовались фотоприемники (Vigo-system Ltd) с временным разрешением ~ 1 нс. Высокая чувствительность фотоприемников позволяла регистрировать излучение, рассеянное от приемных площадок соответствующих калориметров.

При получении зависимостей пропускания образцов от плотности падающей на поверхность энергии накачки в отсутствие генерации $\text{ZnSe}:\text{Fe}^{2+}$ -лазера зеркала резонатора закрывались неотражающими экранами.

3. Результаты экспериментов и их обсуждение

На рис.2 приведены зависимости пропускания образца №1 T от плотности падающей на поверхность образца энергии излучения HF-лазера W_{in} в отсутствие генерации $\text{ZnSe}:\text{Fe}^{2+}$ -лазера, снятые при разных размерах пятна из-

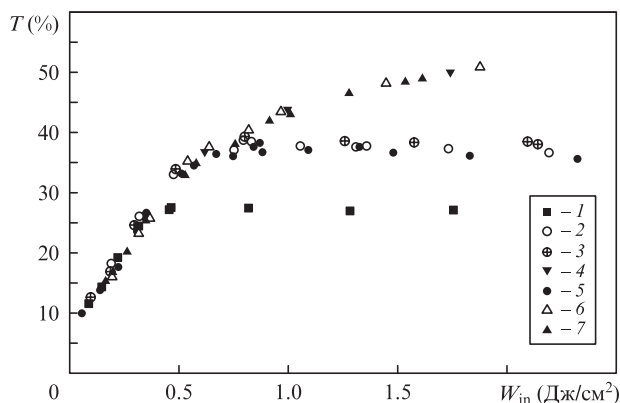


Рис.2. Зависимости пропускания T образца №1 от плотности падающей на поверхность энергии излучения HF-лазера W_{in} в отсутствие генерации при размерах пятна накачки: $a \times b = 7.6 \times 8.1$ мм (1), 6.6×7 мм (2), 6.3×6.8 мм (3), 5.3×5.4 мм (4), 6.3×6.6 мм (5), 4×4.1 мм (6) и 2.6×2.8 мм (7).

лучения накачки $a \times b$ на поверхности. Видно, что характер пропускания сильно зависит от размеров пятна. При относительно малых размерах пятна ($b \leq 5.4$ мм) пропускание монотонно растет с ростом плотности энергии накачки W_{in} , испытывая слабую тенденцию к насыщению. При $6.6 < b \leq 7$ мм наблюдается насыщение пропускания при $W_{in} \approx 0.7$ Дж/см². Увеличение b до 8.1 мм приводит к насыщению пропускания уже при $W_{in} \approx 0.4$ Дж/см². Подобное поведение зависимости T от W_{in} очевидно свидетельствует о развитии при больших размерах пятна накачки паразитной генерации (суперлюминесценции) [27] в приповерхностном слое образца, где концентрация легирующего компонента максимальна и, соответственно, достигается максимальный коэффициент усиления активной среды.

При открытых зеркалах 31 и 32 генерация вдоль оптической оси резонатора развивается быстрее, чем паразитная генерация в приповерхностном слое образца до тех пор, пока максимальный размер пятна b не достигает некоторого критического значения. Это иллюстрируется зависимостями плотности энергии генерации ZnSe: Fe²⁺-лазера $W_{out} = E/S$ (S – площадь пятна накачки) от W_{in} при разных размерах пятна накачки (рис.3). Видно, что точки, снятые при разных размерах пятна, хорошо накладываются на одну кривую. При $W_{in} > 0.25$ Дж/см² зависимость $W_{out}(W_{in})$ является линейной, что свидетельствует о малости излу-

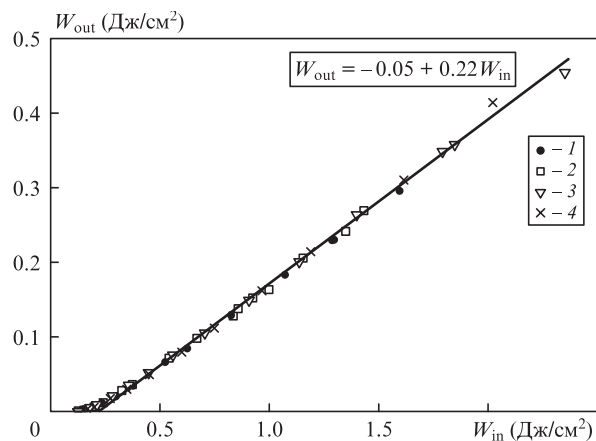


Рис.3. Зависимости плотности энергии генерации ZnSe: Fe²⁺-лазера W_{out} от плотности энергии накачки W_{in} (образец №1) при размерах пятна накачки $a \times b = 4.5 \times 4.7$ мм (1), 5.3×5.4 мм (2), 6.8×7.1 мм (3) и 7.1×7.8 мм (4). Параметры резонатора: $R = 1$ м, $\rho = 40\%$.

тельных потерь энергии в поперечном к оптической оси направлении, несмотря на значительные максимальные размеры пятна ($b = 7.8$ мм) в этой серии измерений.

При больших размерах пятна важна также оптимизация параметров резонатора. На рис.4 приведены зависимости энергии генерации ZnSe: Fe²⁺-лазера от энергии E_{abs} , поглощенной в образце №2, при разных комбинациях ρ и R зеркал резонатора. Размеры пятна накачки ($a \times b = 6.8 \times 7.5$ мм) были такими же, как в [12]. Видно, что оптимизация резонатора позволяет заметно увеличить энергию генерации. При радиусе кривизны зеркала 31 $R = 0.5$ м и коэффициенте отражения выходного зеркала 32 $\rho = 40\%$ все точки на графике (за исключением точки, снятой при максимальном значении E_{abs}) хорошо описываются линейной функцией; на линейном участке дифференциальный КПД $\eta_d = 33\%$. Энергия генерации E достигает 253 мДж при $\eta_{abs} \approx 28\%$.

Таким образом, оптимизация резонатора позволила увеличить энергию генерации по сравнению с полученной нами в [12] ($E = 192$ мДж) при тех же размерах пятна. Однако уже при $b > 8$ мм (как и в [12]) энергия генерации снижалась из-за излучательных потерь в поперечном к оптической оси направлении. Поэтому при максимальной плотности энергии накачки, определяемой порогом разрушения поверхности (~ 3 Дж/см² [11]), для образцов ZnSe: Fe²⁺, легированных с двух сторон диффузионным методом (максимальная концентрация легирующей примеси достигается на поверхности образца), используемых в геометрии дискового лазера [29], энергию генерации $E \approx 250$ мДж, по-видимому, можно считать предельной. Двусторонняя накачка кристалла, предлагавшаяся в [11], безусловно позволит увеличить энергию генерации, но в техническом отношении такая схема накачки не очень удобна.

С целью дальнейшего увеличения энергии излучения лазера на поликристалле ZnSe: Fe²⁺ представляется перспективным создание образцов с несколькими слоями легирования по технологии «внутреннего легирования», предложенной авторами [23, 24]. Такой многослойный образец, в котором слой ZnSe: Fe²⁺ чередуются со слоями ZnSe, схематически изображен на рис.5. Максимальная концентрация Fe²⁺ в каждом из легированных слоев должна уменьшаться обратно пропорционально их количеству, чтобы пропускание многослойного образца на длинах волн накачки оставалось посто-

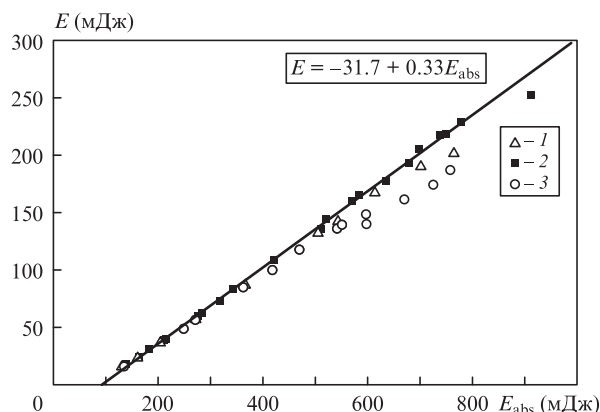


Рис.4. Зависимости энергии генерации Fe²⁺: ZnSe-лазера E от поглощенной в образце №2 энергии HF-лазера E_{abs} , полученные при параметрах резонатора: $\rho = 40\%$, $R = 1$ м (1); 40% , 0.5 м (2); 60% , 1 м (3) ($a \times b = 6.8 \times 7.5$ мм).

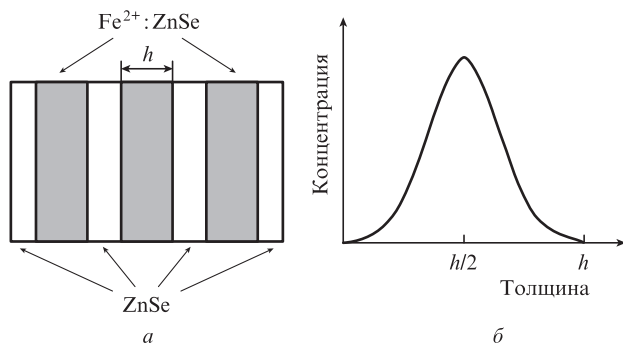


Рис.5. Схематические изображения многослойного образца, изготовленного по технологии «внутреннего легирования» (а), и распределения концентрации Fe^{2+} в легированном слое толщиной h (б).

янным (близким к пропусканию образцов с двусторонним легированием). Для иллюстрации на рис.6 приведена зависимость энергии генерации $\text{ZnSe}:\text{Fe}^{2+}$ -лазера на образце №3, изготовленном по технологии «внутреннего легирования», от поглощенной энергии. Размеры пятна накачки $a \times b = 4.7 \times 5$ мм. При $b > 5$ мм энергия генерации резко снижалась из-за развития паразитной генерации, обусловленной, вероятно, обратным рассеянием излучения от шлифованных боковых граней кристалла, т. е. ограничение по размерам пятна в данном случае связано с не совсем удачной обработкой кристалла. Как следует из рис.6, дифференциальный КПД лазера на образце с «внутренним легированием» $\eta_d = 32\%$, а эффективность по поглощенной энергии $\eta_{\text{abs}} \approx 30\%$ при максимальной энергии генерации $E = 91$ мДж. Отметим, что порог генерации для образца с «внутренним легированием» по плотности поглощенной энергии $E_{\text{th}} = 0.12$ Дж/см² почти в два раза ниже порога генерации для образца №1 с двусторонним легированием ($E_{\text{th}} \approx 0.23$ Дж/см²), генерационные характеристики которого приведены на рис.4. На рис.7 приведены осциллограммы импульсов генерации HF- и $\text{ZnSe}:\text{Fe}^{2+}$ -лазеров, снятые на образце №3 при поглощенной энергии $E_{\text{abs}} = 250$ мДж. Длительность импульса $\text{ZnSe}:\text{Fe}^{2+}$ -лазера на полувысоте в этих условиях накачки составляет ~ 145 нс.

Таким образом, по основным характеристикам образец с «внутренним легированием» не уступает образцам, легированным с двух сторон. Поэтому можно полагать,

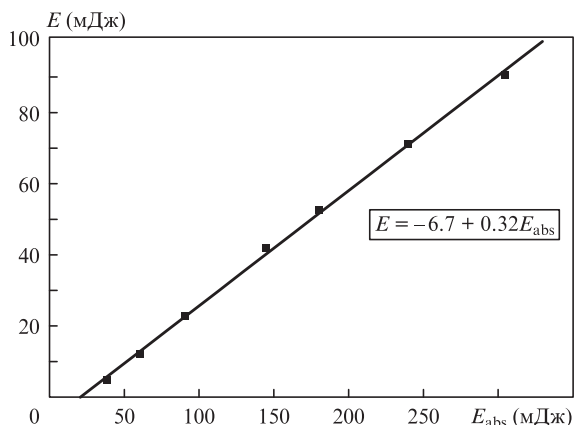


Рис.6. Зависимость энергии генерации $\text{ZnSe}:\text{Fe}^{2+}$ -лазера E от поглощенной энергии HF-лазера E_{abs} для образца №3, изготовленного по технологии «внутреннего легирования» ($a \times b = 4.7 \times 5$ мм, $\rho = 60\%$, $R = 1$ м).

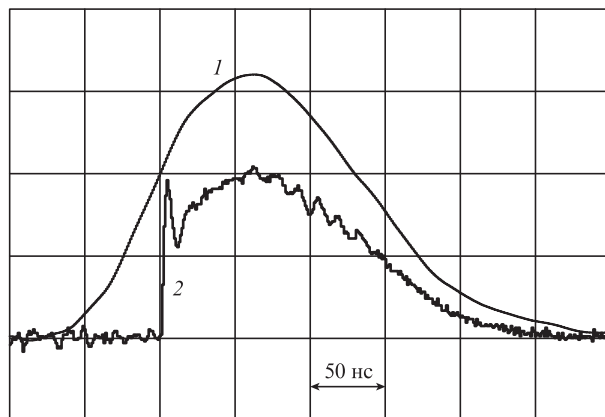


Рис.7. Осциллограммы импульсов генерации HF- (1) и $\text{ZnSe}:\text{Fe}^{2+}$ -лазера (2); $E_{\text{abs}} = 250$ мДж.

что развитие технологии изготовления образцов поликристаллического $\text{ZnSe}:\text{Fe}^{2+}$ с многослойным легированием действительно позволит увеличить энергию лазера за счет увеличения площади пятна накачки.

4. Заключение

В работе исследованы генерационные характеристики лазера на легированных методом диффузии поликристаллических образцах $\text{ZnSe}:\text{Fe}^{2+}$, возбуждаемых при комнатной температуре излучением импульсного нецепного HF-лазера. На образце, легированном с двух сторон, получена энергия генерации $E = 253$ мДж. Установлено, что возможности дальнейшего увеличения энергии лазера за счет увеличения площади пятна накачки на образцах этого типа ограничены развитием паразитной генерации, характерным для лазеров с дисковой геометрией. Обсуждаются перспективы создания лазера с большой энергией излучения на многослойных образцах, изготовленных по технологии «внутреннего легирования», в которых зоны ZnSe , легированного ионами железа, чередуются с зонами нелегированного материала.

Работа поддержана РФФИ (гранты №15-08-02562 и №15-02-06005) и РНФ (грант №15-13-10028).

- Adams J.J., Bibeau C., Page R.H., Krol D.M., Furu L.H., Payne S.A. *Opt. Lett.*, **24** (23), 1720 (1999).
- Kernal J., Fedorov V.V., Gallian A., Mirov S.B., Badikov V.V. *Opt. Express*, **13** (26), 10608 (2005).
- 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).
- Ильичев Н.Н., Данилов В.П., Калинушкин В.П., Студеникин М.И., Шапкин П.В., Насибов А.С. *Квантовая электроника*, **38** (2), 95 (2008).
- Doroshenko M.E., 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. *Laser Phys. Lett.*, **7** (1), 39 (2010).
- Myoung NoSoung, Martyshkin D.V., Fedorov V.V., Mirov S.B. *Opt. Lett.*, **36** (1), 94 (2011).
- Doroshenko M.E., Jelinkova H., Sulc J., Jelinek M., Nemes M., Basiev T.T., Zagoruiko Y.A., Kovalenko N.O., Gerasimenko A.S., Puzikov V.M. *Laser Phys. Lett.*, **9** (4), 301 (2012).
- Frolov M.P., Korostelin Yu.V., Kozlovsky V.I., Mislavskii V.V., Podmar'kov Yu.P., Savinova S.A., Skasyrsky Ya.K. *Laser Phys. Lett.*, **10**, 125001 (2013).
- Mirov S.B., Fedorov V.V., Martyshkin D.V., Moskalev I.S., Mirov M.S., Vasilyev S.V. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **21** (1), 1601719 (2015).

10. 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).
11. Гавришук Е.М., Казанцев С.Ю., Кононов И.Г., Родин С.А., Фирсов К.Н. *Квантовая электроника*, **44** (6), 505 (2014).
12. Firsov K.N., Gavrishchuk E.M., Kazantsev S.Yu., Kononov I.G., Rodin S.A. *Laser Phys. Lett.*, **11** (8), 085001 (2014).
13. Firsov K.N., Gavrishchuk E.M., Kazantsev S.Yu., Kononov I.G., Maneshkin A.A., Mishchenko G.M., Nefedov S.M., Rodin S.A., Velikanov S.D., Yutkin I.M., Zaretsky N.A., Zotov E.A. *Laser Phys. Lett.*, **11**, 125004 (2014).
14. 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).
15. 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** (6), 1553 (2010).
16. Ильичев Н.Н., Пашинин П.П., Гулямова Э.С., Буфетова Г.А., Шапкин П.В., Насибов А.С. *Квантовая электроника*, **44** (3), 213 (2014).
17. Аполлонов В.В., Казанцев С.Ю., Орешкин В.Ф., Фирсов К.Н. *Квантовая электроника*, **24** (3), 213 (1997).
18. 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. *Квантовая электроника*, **40** (5), 393 (2010).
19. Булаев В.Д., Гусев В.С., Казанцев С.Ю., Кононов И.Г., Лысенко С.Л., Морозов Ю.Б., Познышев А.Н., Фирсов К.Н. *Квантовая электроника*, **40** (7), 615 (2010).
20. Великанов С.Д., Запольский А.Ф., Фролов Ю.Н. *Квантовая электроника*, **24** (1), 11 (1997).
21. Великанов С.Д., Евдокимов П.А., Запольский А.Ф., Ковалев Е.В., Пегоев И.Н. *Квантовая электроника*, **25** (10), 925 (1998).
22. Родин С.А., Балабанов С.С., Гавришук Е.М., Еремейкин О.Н. *Оптический журн.*, **80** (5), 89 (2013).
23. Савин Д.В., Гавришук Е.М., Иконников В.Б., Еремейкин О.Н., Егоров А.С. *Квантовая электроника*, **45** (1), 8 (2015).
24. Балабанов С.С., Гавришук Е.М., Иконников В.Б., Родин С.А., Савин Д.В. Заявка на патент РСТ/RU2014/000605, приоритет от 13.08.2014.
25. Тимофеев О.В., Вилкова Е.Ю. *Неорганические материалы*, **46** (3), 297 (2010).
26. Девярых Г.Г., Гавришук Е.М., Коршунов И.А. и др. *Высоко-чистые вещества*, №2, 34 (1993).
27. Andreev S.N., Firsov K.N., Kazantsev S.Yu., Kononov I.G., Samokhin A.A. *Laser Phys.*, **17** (6), 834 (2007).
28. Andreev S.N., Il'ichev N.N., Firsov K.N., Kazantsev S.Yu., Kononov I.G., Kulevskii L.A., Pashinin P.P. *Laser Phys.*, **17** (8), 1041 (2007).
29. Гарнов С.В., Михайлов В.А., Серов Р.В., Смирнов В.А., Цветков В.Б., Щербаков И.А. *Квантовая электроника*, **37** (10), 910 (2007).