

Спектральные и временные характеристики лазера на ZnSe:Fe^{2+} с накачкой излучением нецепного HF(DF) лазера при комнатной температуре*

С. Д. Великанов, Е. М. Гаврищук,
Н. А. Зарецкий, Е. А. Зотов,
А. А. Манешкин, Г. М. Мищенко,
С. Ю. Казанцев, И. Г. Кононов,
С. М. Нефедов, С. А. Родин,
К. Н. Фирсов, И. М. Юткин

Исследованы спектральные и временные характеристики лазера на ZnSe:Fe^{2+} с неселективным резонатором, возбуждаемого при комнатной температуре излучением импульсно-периодического электроразрядного HF(DF) лазера. Установлено, что спектральные распределения энергии и пиковой мощности генерации ZnSe:Fe^{2+} лазера зависят от спектрального состава излучения накачки. Спектры имеют линейчатую структуру, спектральный интервал между соседними линиями составляет $\delta\lambda \approx 6,8 - 8,6$ нм. Форма импульса генерации ZnSe:Fe^{2+} лазера зависит от длины волны. В коротковолновой области спектра импульс имеет вид пика с длительностью по полуамплитуде ~ 5 нс. При увеличении длины волны к пику добавляется «хвост». Длительность и амплитуда «хвоста» растут относительно пика с ростом длины волны, в длинноволновой области спектра пик становится практически незаметным на фоне «хвоста». Спектральная зависимость формы импульса генерации ZnSe:Fe^{2+} лазера приводят к различию положений максимумов энергии и пиковой мощности по длине волны. Обсуждается динамика развития генерации ZnSe:Fe^{2+} лазера в условиях импульсной накачки излучением HF(DF) лазера.

Введение

В последние 15 лет исследованиям лазера на ZnSe:Fe^{2+} с оптической накачкой уделяется повышенное внимание [1–12]. Это обусловлено необходимостью получения мощной лазерной генерации в важном для ряда практических приложений спектральном диапазоне $\lambda = 4 - 5$ мкм. В настоящее время максимальная энергия генерации ZnSe:Fe^{2+} лазера составляет $E = 2,1$ Дж при КПД по поглощенной в активном элементе энергии $\approx 40\%$ [8]. Накачка кристалла в [8] осуществлялась Er:YAG лазером в режиме свободной генерации при температуре $T = 85$ К. Для практических приложений желательно, чтобы лазер мог функционировать при комнатной температуре или в условиях неглубокого охлаждения [2, 3]. Однако с ростом температуры время жизни

*Laser Phys. Lett, 2014, 11.

верхнего лазерного состояния ${}^5\text{T}_2$ иона Fe^{2+} в матрице ZnSe быстро уменьшается в результате увеличения скорости безызлучательных потерь [1, 3], при $T = 292$ К оно составляет ~ 360 нс [8]. Поэтому при высоких температурах необходимо уменьшать длительность импульса накачки, т. е., в случае использования для накачки твердотельных лазеров, работать в режиме модулированной добротности. Энергетические возможности твердотельных лазеров трехмикронного диапазона длин волн (Er:YAG и Er:Cr:YSGG лазеры) в таком режиме функционирования крайне ограничены. Вследствие этого максимальная энергия излучения ZnSe:Fe^{2+} лазера, возбуждаемого коротким импульсом твердотельного лазера (Er:YAG лазер), при комнатной температуре не превышает в настоящее время $E = 6$ мДж [9]. Использование для накачки нецепного электроразрядного HF лазера [13–15], спектр излучения которого полностью попадает в полосу поглощения Fe^{2+} в кристалле ZnSe , позволило значительно увеличить энергию генерации ZnSe:Fe^{2+} лазера при комнатной температуре [10–12]. Максимальная энергия в импульсе составила $E = 192$ мДж при КПД по поглощенной в образце энергии 23 % [12].

В [10–12] подробно анализировались зависимости энергии генерации ZnSe:Fe^{2+} лазера от энергии накачки и размеров пятна облучения на поверхности кристалла, но изучения спектральных характеристик не проводилось. Целью настоящей работы является исследование спектральных и временных характеристик ZnSe:Fe^{2+} лазера с неселективным резонатором, возбуждаемого при комнатной температуре излучением электроразрядных HF и DF лазеров.

Экспериментальная установка

Активный элемент ZnSe:Fe^{2+} лазера был изготовлен из поликристаллического ZnSe , выращенного методом химического осаждения из газовой фазы (CVD) в реакции паров цинка с селеноводородом в потоке аргона. Из полученного по этой технологии 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, описанной в [16]. На обе поверхности пластины ZnSe методом электронно-лучевого испарения наносились пленки Fe толщиной не более 1 мкм. Пластина отжигалась при температуре 1000 ± 2 °C в течение 7 суток в запаянной кварцевой ампуле, заполненной водородом. Отожженный образец подвергался химико-механическому полированию.

Схема эксперимента приведена на рис. 1. Неселективный резонатор ZnSe:Fe^{2+} лазера длиной 120 мм был образован вогнутым зеркалом M_1 (зеркало с золотым покрытием на подложке из кварца) с радиусом кривизны $R = 0,5$ м и плоским выходным зеркалом M_2 . В качестве выходного зеркала использовалась плоскопараллельная пластина из Si толщиной 4 мм, коэффициент отражения которой в спектральном диапазоне $\lambda = 4\text{--}5$ мкм слабо зависит от длины волны. Пластина ZnSe:Fe^{2+} (образец) устанавливалась перпендикулярно оптической оси резонатора на расстоянии 40 мм от выходного зеркала. Накачка образца осуществлялась импульсно-периодическим HF(DF) лазером, принципы работы которого описаны в [17, 18]. Максимальная энергия излучения лазера в импульсе на HF и DF составляла 55 мДж и 42 мДж соответственно. Лазер мог работать при частоте следования импульсов до 400 Гц. Излучение накачки фокусировалось на поверхность образца сферической линзой L из BaF_2 с фокусным расстоянием 60 см в пятно диаметром ~ 2 мм. Угол падения излучения накачки на поверхность образца составлял $\sim 5^\circ$. Величины энергии излучения накачки и генерации ZnSe:Fe^{2+} лазера измерялись калориметрами C_1 и C_2 (Molelectron) соответственно. Формы импульсов генерации HF(DF) и ZnSe:Fe^{2+} лазеров контролировались фотоприемниками PD_1 и PD_2 соответственно (Vigo-system Ltd) с временным разрешением ~ 1 нс.

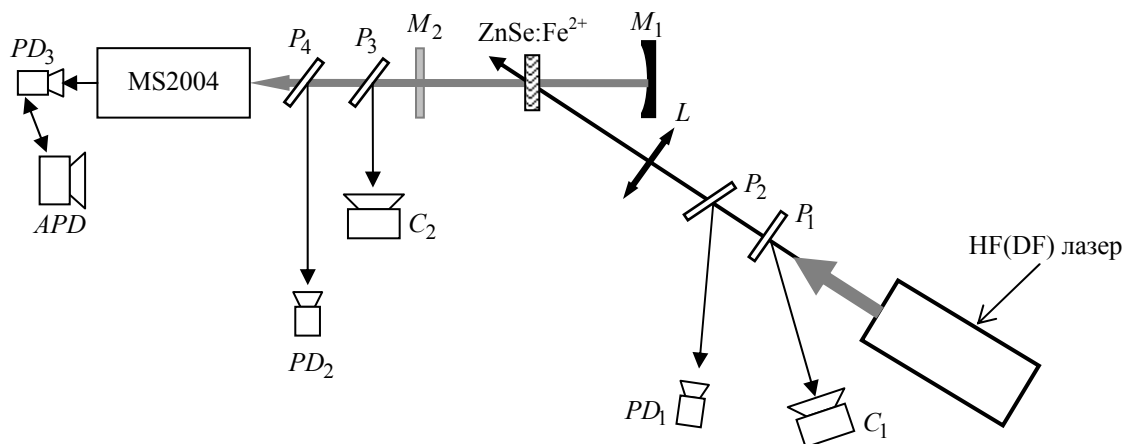


Рис. 1. Схема экспериментов: $PD_1 - PD_3$ – фотоприемники; L – линза; C_1, C_2 – калориметры; M_1, M_2 – зеркала резонатора $ZnSe:Fe^{2+}$ лазера; $ZnSe:Fe^{2+}$ – активный элемент; $P_1 - P_4$ – плоскопараллельные пластины из CaF_2 ; APD – линейка пироэлектрических приемников; MS 2004 – монохроматор

Спектры генерации HF(DF) и $ZnSe:Fe^{2+}$ лазеров снимались с помощью монохроматора MS 2004 (SOLAR TII) с дифракционными решетками 75, 300 и 400 штр/мм. На выходе монохроматора устанавливались либо скоростной фотоприемник PD_3 (Vigo-system Ltd), либо линейка пироэлектрических фотоприемников APD марки HPL-256-500 (HEIMANN Sensor). Линейка состояла из 256 элементов, длина ее приемной части составляла 12,8 мм.

Сигналы с фотоприемников регистрировались осциллографом Le Croy 432 с полосой пропускания 350 МГц, сигналы с калориметров – осциллографом Tektronix TDS 3014 В.

Результаты экспериментов и их обсуждение

Значения энергии генерации $ZnSe:Fe^{2+}$ лазера в импульсе при накачке кристалла HF и DF лазерами составляли 6 мДж и 3,5 мДж соответственно. В отсутствие специальных мер по охлаждению активного элемента $ZnSe:Fe^{2+}$ лазер мог работать при частотах следования импульсов до 200 Гц и продолжительности серии импульсов до 1 с без заметного снижения энергии генерации в течение серии. Для иллюстрации на рис. 2 приведены осциллограммы сигналов с калориметров, снятые при частоте следования импульсов 200 Гц. Как видно, отклонения энергии генерации $ZnSe:Fe^{2+}$ лазера от среднего значения в течение серии не превышают $\pm 10\%$. Можно полагать, что эти отклонения в данном случае обусловлены некоторой нестабильностью диаграммы направленности излучения HF лазера в процессе работы в импульсно-периодическом режиме с большой частотой следования импульсов.

Спектры генерации $ZnSe:Fe^{2+}$ и HF(DF) лазеров снимались при частоте следования импульсов 50 Гц и продолжительности серии 0,25 с.

На рис. 3 приведены спектры генерации (распределения плотности энергии генерации по длине волны) HF и DF лазеров соответственно, снятые с использованием линейки пироэлектрических приемников. Поскольку распределение энергии генерации HF(DF) лазера по линиям может меняться от импульса к импульсу [19], спектры усреднялись по 20 импульсам.

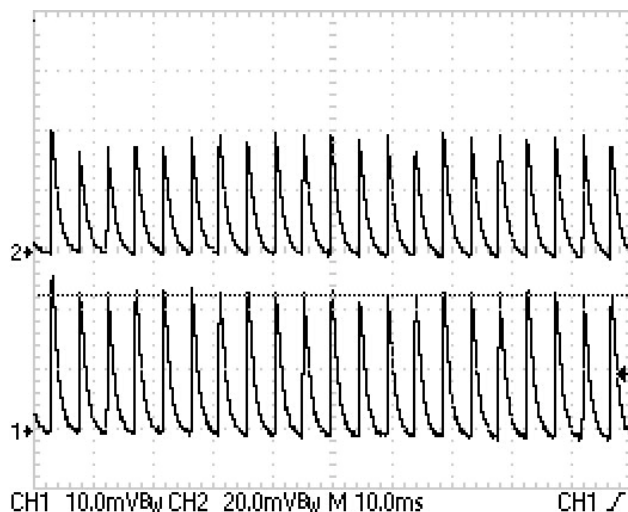


Рис. 2. Осциллограммы сигналов с калориметров, регистрирующих энергию генерации $ZnSe:Fe^{2+}$ лазера (верхний луч) и HF лазера (нижний луч). Развертка 10 мс/дел.

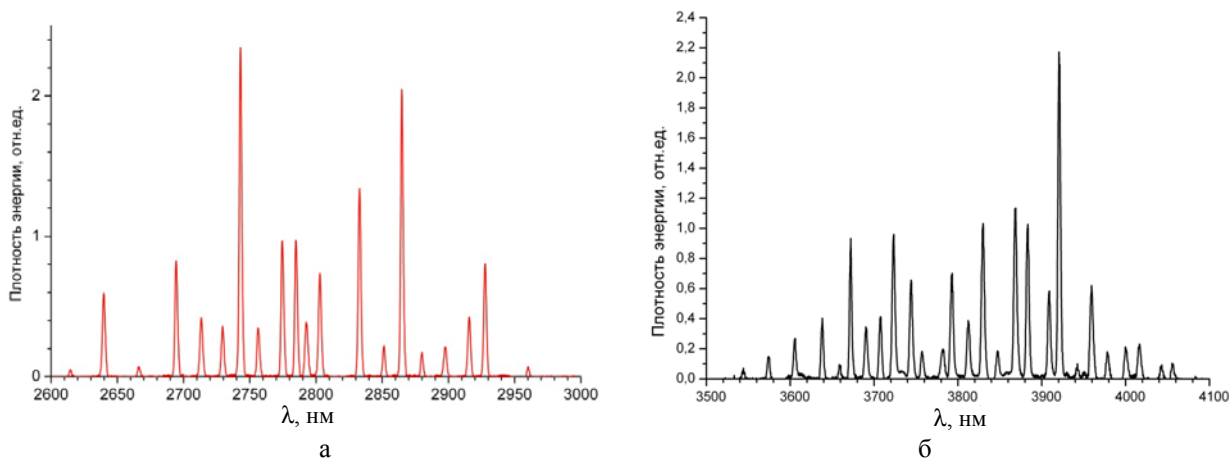


Рис. 3. Спектры генерации (распределения плотности энергии излучения по длине волны) HF (а) и DF (б) лазеров: а – решетка 400 штр/мм, обратная линейная дисперсия 11,5 нм/мм, б – решетка 300 штр/мм, обратная линейная дисперсия 15,1 нм/мм. Усреднение по 20 импульсам

Как видно из этих рисунков, в спектрах HF и DF лазеров присутствуют линии в диапазонах $\lambda = 2615-2960$ нм и $\lambda = 3545-4060$ нм соответственно.

На рис. 4 приведены спектры генерации (распределения пиковой интенсивности излучения по длине волны) $ZnSe:Fe^{2+}$ лазера, полученные при накачке кристалла излучением HF и DF лазеров соответственно.

Для получения спектров за выходной щелью монохроматора устанавливался быстродействующий фотоприемник PD_3 (см. рис. 1), поэтому они представляют собой распределения пиковой интенсивности излучения лазера по длине волны. Использовалась дифракционная решетка 75 штр/мм с обратной линейной дисперсией 68,4 нм/мм. Наблюдался значительный разброс амплитуд регистрируемых сигналов излучения от импульса к импульсу, особенно в коротковолно-

вой и длинноволновой областях спектра, при том, что разброс значений суммарной энергии генерации ZnSe:Fe^{2+} лазера не превышал 5 %. Следовательно, мощность излучения лазера перераспределяется по спектру от импульса к импульсу. Спектры, приведенные на рис. 4, усреднялись по 16 и 32 импульсам соответственно. Из рис. 4,а следует, что распределение пиковой интенсивности излучения по длине волны при накачке кристалла излучением HF лазера имеет два максимума, при $\lambda \approx 4180$ нм и $\lambda \approx 4380$ нм. При накачке кристалла DF лазером максимум в спектре генерации ZnSe:Fe^{2+} лазера приходится на длину волны $\lambda \approx 4438$ нм (см. рис. 4,б). Таким образом, из приведенного материала следует, что спектр излучения ZnSe:Fe^{2+} лазера с неселективным резонатором зависит от спектра излучения накачки.

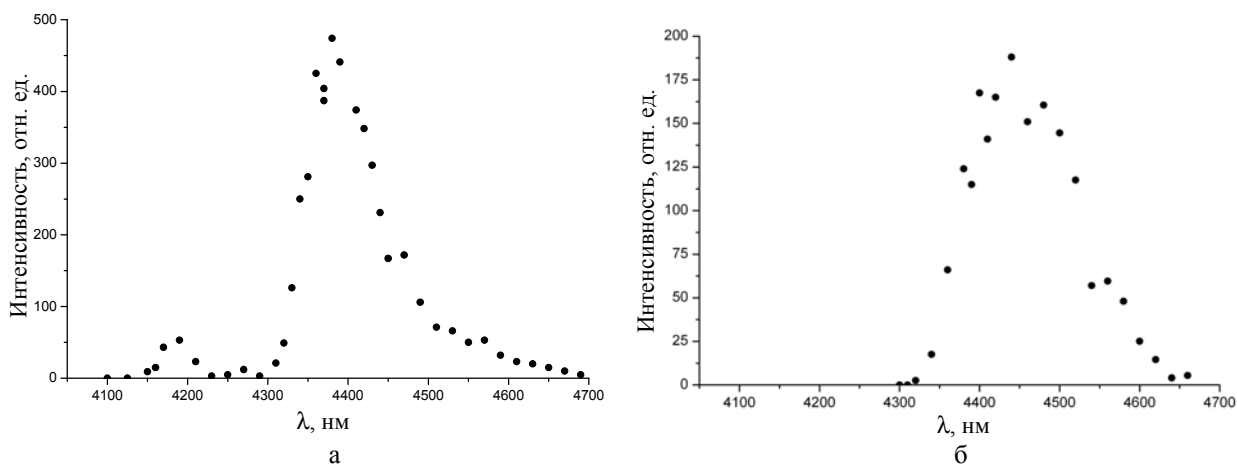


Рис. 4. Спектры генерации ZnSe:Fe^{2+} лазера (распределения пиковой интенсивности излучения по длине волны) при накачке кристалла излучением HF (а) DF (б) лазеров: а – усреднение по 16 импульсам; б – усреднение по 32 импульсам. Решетка 75 штр/мм с обратной линейной дисперсией 68,4 нм/мм

На рис. 5 показаны осциллограммы импульсов генерации HF и ZnSe:Fe^{2+} лазеров, снятые без спектральной селекции излучения последнего (фотоприемники PD_1 и PD_2 соответственно на рис. 1). Как видно из этого рисунка, длительности импульсов HF и ZnSe:Fe^{2+} лазеров по полуамплитуде составляют 35 нс и ~ 9 нс соответственно, но значительная доля энергии импульсов сосредоточена в «хвостах».

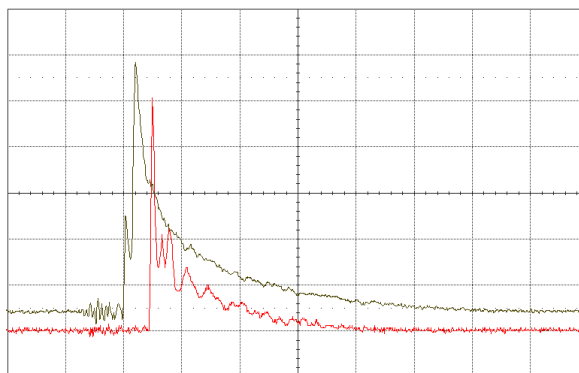


Рис. 5. Осциллограммы импульсов генерации HF (верхний луч) и ZnSe:Fe^{2+} (нижний луч) лазеров. Развертка 100 нс/дел. Спектральной селекции излучения ZnSe:Fe^{2+} лазера не проводилось

На рис. 6 приведены осциллограммы импульсов генерации ZnSe:Fe^{2+} лазера, возбуждаемого излучением HF лазера, снятые на разных длинах волн. Осциллограммы снимались приемником PD_3 за выходной щелью монохроматора при получении спектра, показанного на рис. 4,а (см. схему эксперимента на рис. 1). Как видно из этого рисунка, в области коротких длин волн импульс ZnSe:Fe^{2+} лазера имеет форму пика с длительностью по полуамплитуде ~ 5 нс. При длинах волн $\lambda \geq 4310$ нм к пику добавляется «хвост», длительность и амплитуда которого растут относительно пика с увеличением длины волны. При $\lambda \geq 4460$ нм амплитуда «хвоста» начинает превышать амплитуду пика, и при $\lambda \geq 4560$ нм пик становится практически незаметным на фоне «хвоста». Аналогичная ситуация наблюдается и в случае накачки кристалла DF лазером: в коротковолновой области генерируется пик с длительностью ~ 5 нс, а в длинноволновой области основная часть энергии импульса сосредоточена в «хвосте». Следует заметить, что временная задержка импульса генерации ZnSe:Fe^{2+} лазера относительно импульса накачки не зависит от длины волны. Небольшое увеличение задержки на рис. 6,е по сравнению с рис. 6,а–д обусловлено небольшим снижением (также небольшим) энергии излучения HF лазера из-за изменения состава газовой смеси в конце серии экспериментов.

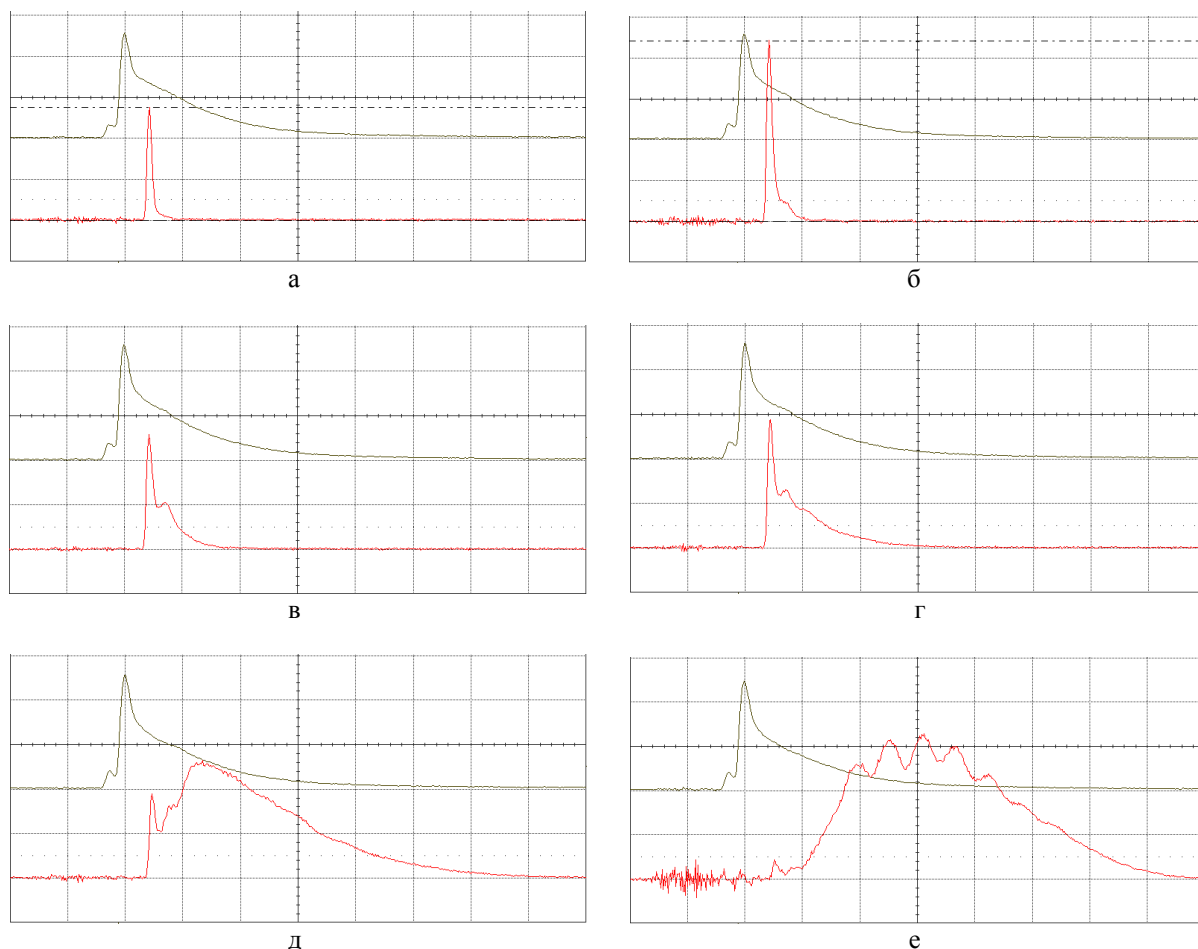


Рис. 6. Осциллограммы импульсов генерации ZnSe:Fe^{2+} лазера (нижний луч) на разных длинах волн и HF лазера (верхний луч): а – $\lambda = 4180$ нм; б – $\lambda = 4320$ нм; в – $\lambda = 4360$ нм; г – $\lambda = 4400$ нм; д – $\lambda = 4500$ нм; е – $\lambda = 4600$ нм. Развертка 50 нс/дел.

Следствием отмеченной выше особенности импульса генерации является существенное отличие положений максимумов пиковой интенсивности излучения и плотности энергии ZnSe:Fe²⁺ лазера на спектральных распределениях. На рис. 7 приведены спектры генерации ZnSe:Fe²⁺ лазера при накачке кристалла HF и DF лазерами соответственно, снятые с помощью линейки пироэлектрических приемников. Использовалась дифракционная решетка 75 штр/мм. Очевидно, в данном случае спектры представляют собой распределения плотности энергии генерации по длине волны. Усреднение при получении спектров проводилось по 20 импульсам.

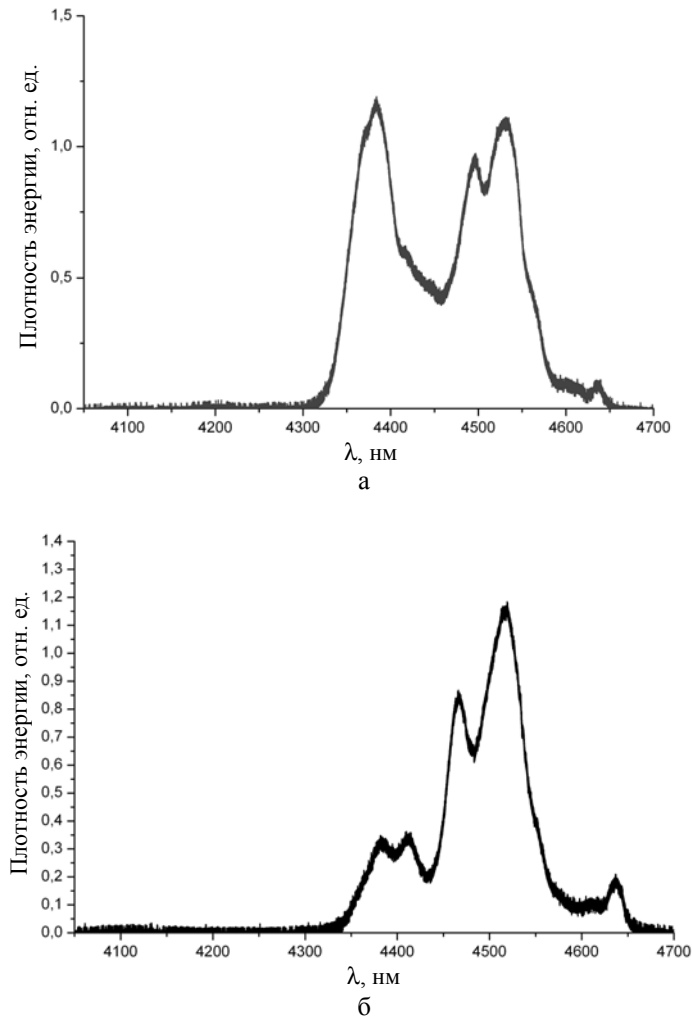


Рис. 7. Спектры генерации ZnSe:Fe²⁺ лазера при накачке кристалла HF (а) и DF (б) лазерами, снятые с использованием линейки пироэлектрических приемников. Решетка 75 штр/мм

Из рис. 7,а видно, что в случае накачки кристалла HF лазером спектр генерации имеет два выраженных максимума при $\lambda \approx 4388$ нм и $\lambda \approx 4536$ нм. Генерация в области $\lambda < 4200$ нм, в отличие от спектра, приведенного на рис. 4,а, незаметна. При накачке DF лазером (рис. 7,б) максимум наблюдается при $\lambda \approx 4517$ нм. Как указывалось выше, из-за спектральной зависимости формы импульса излучения положения максимумов плотности энергии и пиковой интенсивности по длине волны не совпадают.

Большую ширину спектра генерации ZnSe:Fe²⁺ лазера, наблюдаемую в эксперименте, и зависимость формы лазерного импульса от спектрального диапазона можно объяснить существенным превышением пороговых значений инверсии населенности в момент развития генерации и возникновением колебаний инверсии населенности по типу релаксационных. Коэффициент усиления (поглощения) активной среды может быть записан в виде

$$\alpha = \sigma_{amp} N_2 - \sigma_{abs} N_1 = N_s [\sigma_{amp} \beta - \sigma_{abs} (1 - \beta)],$$

где N_1 и N_2 – населенности основного (⁵E) и возбужденного (⁵T₂) состояния иона Fe²⁺, $N_s = N_1 + N_2$ – суммарная концентрация ионов железа в ZnSe, σ_{abs} и σ_{amp} – эффективные сечения поглощения и усиления соответственно. Величина β характеризует долю ионов Fe²⁺, находящихся в возбужденном состоянии. На рис. 8 приведены зависимости величины α/N_s от длины волны при различной степени возбуждения среды, полученные по данным для $\sigma_{abs}(\lambda)$ и $\sigma_{amp}(\lambda)$ при комнатной температуре из работы [2].

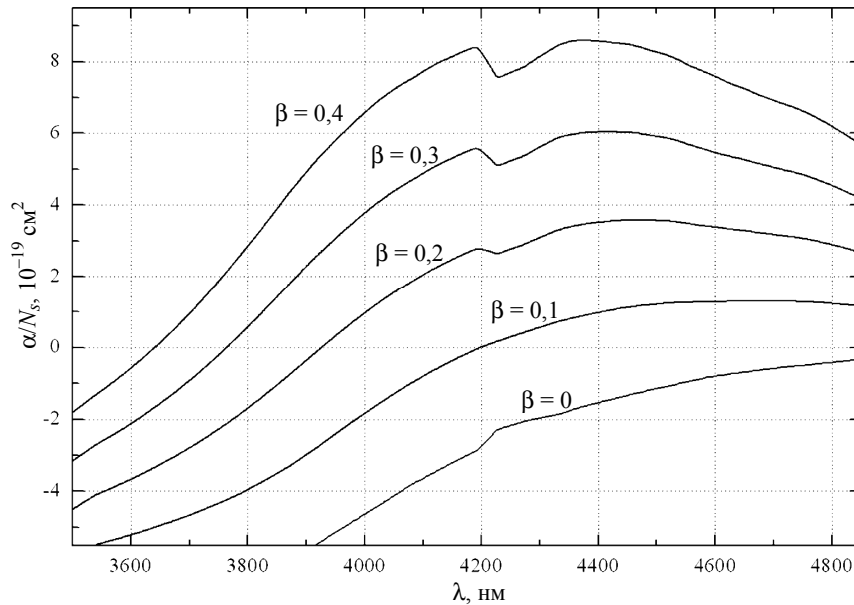


Рис. 8. Зависимости величины α/N_s от длины волны при различной степени возбуждения среды β

Анализ полученных в эксперименте спектров генерации и зависимостей на рис. 8 показывает, что порог генерации достигается при $\beta \approx 0,1$ на длине волны $\lambda \approx 4640$ нм. При мощной импульсной накачке излучением HF лазера к моменту достижения высоких значений интенсивности лазерного излучения степень возбуждения среды, по-видимому, доходит до значений $\beta > 0,3$. Поэтому генерация развивается в очень широком спектральном диапазоне. В течение первого пика генерации происходит быстрый сброс инверсии до значений $\beta < 0,1$. При этом коротковолновая часть излучения ZnSe:Fe²⁺ лазера начинает поглощаться в активной среде. За счет данного эффекта и продолжающейся накачки среды излучением HF лазера населенность верхнего уровня начинает увеличиваться и опять проходит через пороговое значение, но теперь превышение порога имеет место только для $\lambda > 4320$ нм (см. рис. 6,б). Как видно из рис. 5, колебания суммарной ин-

тенсивности лазерного излучения продолжают в течение всего импульса генерации. При этом с каждым колебанием населенности коротковолновая граница спектра смещается в сторону больших значений.

Есть основания полагать, что при комнатной температуре активная среда является квазитрехуровневой в случае ее накачки излучением HF лазера ($\lambda < 3000$ нм), а в случае накачки излучения DF лазера ($\lambda = 3545\text{--}4060$ нм) она становится квазидвухуровневой. Поэтому при большой мощности накачки среда быстро просветляется (см. рис. 8), и к моменту развития генерации ($\beta \leq 0,2$) достигается существенно меньший уровень возбуждения, чем при накачке HF лазером. Как результат, коротковолновая граница спектра генерации ZnSe:Fe^{2+} лазера, возбуждаемого DF лазером, лежит выше.

Отметим, что спектр генерации ZnSe:Fe^{2+} лазера, возбуждаемого HF лазером (рис. 4,а), заметно отличается от спектра, снятого в работе [5] при накачке кристалла импульсом Er:YAG лазера длительностью 160–300 нс (комнатная температура). В [5] наблюдался один максимум при $\lambda \approx 4470$ нм, полуширина спектра составляла 102 нм, а коротковолновая часть ограничивалась длиной волны $\lambda \approx 4200$ нм. Эти отличия, по-видимому, объясняются тем, что средняя удельная мощность накачки в работе [5] составляла ≈ 3 МВт/см³, что много меньше значения, реализуемого в первые 50 нс при накачке HF лазером. Поэтому в [5] к моменту достижения высоких значений интенсивности лазерного излучения населенность верхнего уровня не сильно превышала пороговое значение. Это обстоятельство и определяло отсутствие генерации в коротковолновой части спектра.

На рис. 9 соответственно приведены фрагменты спектров ZnSe:Fe^{2+} лазера при накачке кристалла HF и DF лазерами, снятые с помощью линейки пироэлектрических приемников. В монохроматоре использовалась дифракционная решетка 300 штр/мм, усреднение по импульсам не проводилось. Наблюдалось сильное перераспределение энергии генерации по спектру от импульса к импульсу при близкой к постоянной полной энергии ZnSe:Fe^{2+} лазера. Из рис. 9 видно, что спектры имеют линейчатую структуру. Спектральный интервал (минимальный) между соседними линиями составляет $\delta\lambda \approx 6,8\text{--}8,6$ нм. Величина $\delta\lambda$ измерялась по большому количеству спектров, снятых в разных сериях экспериментов. Линейчатая структура спектра генерации наблюдалась ранее в [20] в непрерывном режиме работы ZnSe:Fe^{2+} лазера при температуре жидкого азота, величина $\delta\lambda$ составляла приблизительно 5 нм. Авторы [20] объясняют подобную структуру тем, что генерация происходит одновременно на множестве продольных мод резонатора. В [21] наблюдаемая модуляция спектра лазера на ZnSe:Cr^{2+} объясняется следствием интерференционных явлений при отражении излучения от поверхностей активного элемента. В рассматриваемом нами случае межмодовый интервал, а также любые спектральные интервалы $\Delta\lambda \approx \lambda^2/2dn$ (при $\Delta\lambda \ll \lambda$, n – показатель преломления среды, d – длина среды (толщина пластинки)), которые можно связать с присутствием в резонаторе элементов, образующих интерферометры Фабри–Перо, оказываются почти на порядок меньше $\delta\lambda$. При установке образца ZnSe:Fe^{2+} под углом Брюстера к оптической оси резонатора и замене плоскопараллельной пластины из кремния, служащей выходным зеркалом, зеркалом с широкополосным интерференционным покрытием на одной из поверхностей клина (угол клина – 20 угловых минут) из CaF_2 характер спектра не изменялся. Поэтому маловероятно, что наблюдаемая нами линейчатая структура обусловлена интерференцией на поверхностях активного элемента. В настоящее время мы не имеем адекватной интерпретации природы такой структуры.

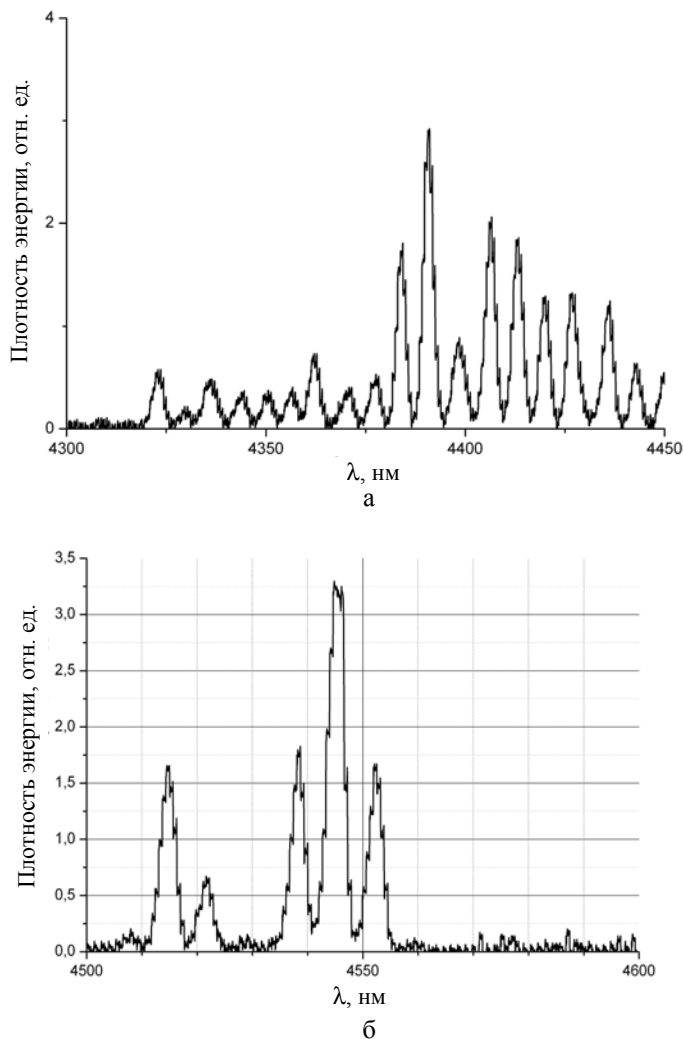


Рис. 9. Фрагменты спектров ZnSe:Fe^{2+} лазера при накачке кристалла HF (а) и DF (б) лазерами, снятые с помощью линейки пироэлектрических приемников. Решетка 300 штр/мм

Заключение

Таким образом, в настоящей работе исследованы спектрально-временные характеристики лазера на поликристаллическом образце ZnSe:Fe^{2+} с неселективным резонатором, возбуждаемого при комнатной температуре излучением импульсно-периодического нецепного электроразрядного HF(DF) лазера. Значение энергии генерации ZnSe:Fe^{2+} лазера слабо зависело от частоты следования импульсов HF(DF) лазера при частотах следования до 200 Гц и продолжительности серии до 1 с. Спектры генерации ZnSe:Fe^{2+} лазера имеют линейчатую структуру. Спектральный интервал между соседними линиями составляет $\delta\lambda \approx 6,8-8,6$ нм. Природа линейчатой структуры в настоящее время неясна. Распределения пиковой мощности и энергии по длине волны изменяются от импульса к импульсу при постоянной полной энергии генерации.

В коротковолновой области спектра импульс генерации ZnSe:Fe^{2+} лазера имеет форму пика с длительностью по полуамплитуде ~ 5 нс. При увеличении длины волны к пику добавляется «хвост». Длительность и амплитуда «хвоста» растут относительно пика с увеличением длины волны, и в длинноволновой области спектра пик становится практически незаметным на фоне «хвоста». Отмеченные особенности спектрально-временных характеристик приводят к различию положений максимумов пиковой мощности и энергии в спектре ZnSe:Fe^{2+} лазера.

В заключение авторы выражают искреннюю благодарность Н. А. Распопову и Ю. Н. Фролову за полезные обсуждения результатов, а также А. Ф. Запольскому, Р. С. Чуваткину и И. Л. Буцыкину за подготовку HF(DF) лазера к экспериментам.

Список литературы

1. Adams J. J., Bibeau C., Page R. H. et al. 4.0–4.5 μm lasing of Fe:ZnSe below 180 K, a new mid-infrared laser material // *Optics Letters*. 1999. Vol. 24, N 23. P. 1720–1722.
2. Kernal J., Fedorov V. V., Gallian A. et al. 3.9–4.8 μm gain-switched lasing of Fe:ZnSe at room temperature // *Optics Express*. 2005. Vol. 13, N 26. P. 10608–10612.
3. Акимов В. А., Воронов А. А., Козловский В. И. и др. Эффективная лазерная генерация кристалла $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ при комнатной температуре // *Квантовая электроника*. 2006. Т. 36, № 4. С. 299–302.
4. Ильичев Н. Н., Данилов В. П., Калинушкин В. П. и др. Суперлюминесцентный ИК излучатель на кристалле ZnSe:Fe^{2+} , работающий при комнатной температуре // *Квантовая электроника*. 2008. Т. 38, № 2. С. 95–96.
5. Doroshenko M. E., Jelinkova H., Koranda P. et al. Tunable mid-infrared laser properties of $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnMgSe}$ and $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ crystals // *Laser Phys. Letters*. 2010. Vol. 7, N 1. P. 39–45.
6. Myoung N., Martyshkin D. V., Fedorov V. V., Mirov S. B. Energy scaling of 4.3 μm room temperature Fe : ZnSe laser // *Optics Letters*. 2011. Vol. 36, N 1. P. 94–96.
7. Doroshenko M. E., Jelinkova H., Sulc J. et al. Laser properties of Fe:Cr:Zn_{1-x}Mg_xSe crystal for tunable mid – infrared laser sources // *Laser Phys. Letters*. 2012. Vol. 9, N 4. P. 301–305.
8. Frolov M. P., Korostelin Y. V., Kozlovsky V. I. et al. Study of a 2 – J pulsed Fe:ZnSe 4- μm laser // *Laser Phys. Letters*. 2013. Vol. 10. P. 125001.
9. Kozlovsky V. I., Akimov V. A., Frolov M. P. et al. // *Phys. Status Solidi*. 2010. Vol. 247, N 6. P. 1553–1556.
10. Великанов С. Д., Данилов В. П., Захаров Н. Г. и др. Лазер на кристалле ZnSe:Fe^{2+} с накачкой излучением нецепного электроразрядного HF лазера при комнатной температуре // *Квантовая электроника*. 2014. Т. 44, № 2. С. 141–145.
11. Гавришук Е. М., Казанцев С. Ю., Кононов И. Г., Родин С. А., Фирсов К. Н. Лазер на ZnSe:Fe^{2+} с большой энергией излучения, работающий при комнатной температуре // *Квантовая электроника*. 2014. Т. 44, № 6. С. 505.
12. Firsov K. N., Gavrishchuk E. M., Kazantsev S. Y., Kononov I. G., Rodin S. A. Increasing the radiation energy of ZnSe:Fe^{2+} laser at room temperature // *Laser Phys. Letters*. 2014. Vol. 11. P. 085001.
13. Аполлонов В. В., Казанцев С. Ю., Орешкин В. Ф., Фирсов К. Н. Возможности увеличения выходной энергии нецепного HF(DF)-лазера // *Квантовая электроника*. 1997. Т. 24, № 3. С. 213–215.

14. Великанов С. Д., Гаранин С. Г., Домажиров А. П. и др. Мощный электроразрядный HF-лазер с твердотельным генератором накачки // Квантовая электроника. 2010. Т. 40, № 5. С. 393–396.
15. Булаев В. Д., Гусев В. С., Казанцев С. Ю. и др. Электроразрядный импульсно-периодический HF-лазер с большой энергией излучения // Квантовая электроника. 2010. Т. 40, № 7. С. 615–618.
16. Родин С. А., Балабанов С. С., Гаврищук Е. М., Еремейкин О. Н. Использование Tm:YLF лазера для определения коэффициента диффузии хрома в ZnSe // Оптический журнал. 2013. Т. 80, № 5. С. 89–93.
17. Великанов С. Д., Запольский А. Ф., Фролов Ю. Н. Физические аспекты работы HF- и DF-лазеров с замкнутым циклом смены рабочей смеси // Квантовая электроника. 1997. Т. 24, № 1. С. 11–14.
18. Великанов С. Д., Евдокимов П. А., Запольский А. Ф. и др. Особенности формирования объемного разряда в HF(DF)-лазере с применением лезвийных электродов // Квантовая электроника. 1998. Т. 25, № 10. С. 925.
19. Баранов В. Ю., Высикайло Ф. И., Демьянов А. В. и др. Спектрально-временные и энергетические характеристики импульсного нецепного HF-лазера // Квантовая электроника. 1983. Т. 10, № 10. С. 2075.
20. Evans J. W., Berry P. A., Schepler K. L. 840 mW continuous-wave Fe:ZnSe laser operating at 4140 nm // Optics Letters. 2012. Vol. 37, N 23. P. 5021–5023.
21. Акимов В. А., Козловский В. И., Коростелин Ю. В. и др. Внутррезонаторная лазерная спектроскопия с использованием Cr²⁺:ZnSe-лазера // Квантовая электроника. 2004. Т. 34, № 2. С. 185–188.

Spectral and temporal characteristics of a ZnSe:Fe²⁺ laser pumped by a non-chain HF(DF) laser at room temperature

S. D. Velikanov, E. M. Gavrishchuk, N. A. Zaretsky, E. A. Zotov, A. A. Maneshkin,
G. M. Mishchenko, S. Y. Kazantsev, I. G. Kononov, S. M. Nefedov, S. A. Rodin,
K. N. Firsov, I. M. Yutkin

Spectral and temporal characteristics of a ZnSe:Fe²⁺ laser with a nonselective resonator pumped at room temperature by the radiation of a pulse-periodical electrodischarge HF(DF)-laser are studied. It was established that the spectral distributions of the energy and peak power of ZnSe:Fe²⁺ laser generation depend on a spectral composition of the pumping radiation. The spectra exhibit a line structure with spectral intervals between neighboring lines $\delta\lambda \approx 6.8\text{--}8.6$ nm. The shape of the ZnSe:Fe²⁺ laser generation pulse is wavelength dependent. In a short-wavelength range, the pulse has the form of a peak with a duration of ~ 5 ns at half-maximum. At a longer wavelength, the peak is accompanied by a 'tail'. The duration and amplitude of the tail increase with wavelength, in a long-wavelength spectrum range, the peak actually becomes unnoticeable on a background of the 'tail'. The spectral dependence of the ZnSe:Fe²⁺ laser generation pulse's shape affects the positions of the energy and peak power maxima on the wavelength axis. The dynamics of ZnSe:Fe²⁺ laser generation under the pumping by the pulsed HF(DF) laser is discussed.