

Исследование работы Fe:ZnSe-лазера в импульсном и импульсно-периодическом режимах

С.Д.Великанов, Н.А.Зарецкий, Е.А.Зотов, В.И.Козловский, Ю.В.Коростелин, О.Н.Крохин, А.А.Манешкин, Ю.П.Подмарьков, С.А.Савинова, Я.К.Скасырский, М.П.Фролов, Р.С.Чуваткин, И.М.Юткин

Представлены характеристики Fe:ZnSe-лазера с накачкой излучением Er:YAG-лазера, работающего в режиме однократных импульсов (свободная генерация), и излучением импульсно-периодического HF-лазера. При продольной накачке импульсами Er:YAG-лазера длительностью 1 мс с энергией до 15 Дж и охлаждении активного элемента Fe²⁺:ZnSe-лазера жидким азотом достигнута выходная энергия 4.9 Дж. КПД лазера по поглощенной энергии составил 47%. При комнатной температуре получена энергия в импульсе 53 мДж. Снижение выходной энергии объясняется сильной температурной зависимостью времени жизни верхнего лазерного уровня и импульсным нагревом активного элемента. На основе температурной зависимости времени жизни верхнего лазерного уровня определены требования к накачке для достижения высоких энергий в импульсе при комнатной температуре. При накачке серией импульсов HF-лазера длительностью 100 нс, следовавших с частотой 200 Гц в течение 1 с, получен при комнатной температуре стабильный импульсно-периодический режим работы Fe²⁺:ZnSe-лазера со средней мощностью 2.4 Вт и максимальной энергией в импульсе 14 мДж.

Ключевые слова: Fe:ZnSe-лазер, Er:YAG-лазер, HF-лазер, твердотельный перестраиваемый лазер, лазер среднего ИК диапазона.

1. Введение

Особый интерес к лазерам, излучающим на длине волны вблизи 4 мкм, связан с окном прозрачности атмосферы Земли. Для ряда применений необходимо иметь импульсный лазер с энергией в несколько джоулей, а также лазер, работающий в импульсно-периодическом режиме. Важно также, чтобы длина волны лазера могла перестраиваться в области прозрачности атмосферы.

Ведутся разработки нескольких типов лазеров данного диапазона. Мощные DF-лазеры лишь частично перекрывают спектральную область с длиной волны выше 4 мкм. Возможно создание оптических параметрических генераторов, работающих в импульсно-периодическом режиме, с длительностью импульса в несколько наносекунд и энергией до 0.1 Дж. Однако такие генераторы сложны в настройке и недостаточно надежны. Для реализации полупроводниковых квантово-каскадных лазеров необходима эпитаксиальная технология высокого уровня.

Кроме того, на их основе трудно реализовать импульсный источник с энергией джоульного уровня с хорошей направленностью лазерного пучка. В связи с этим представляется перспективным исследование лазеров на основе кристалла Fe²⁺:ZnSe, перестраиваемых в диапазоне 3.77–5.05 мкм [1–3].

Ранее сообщалось [4] о достижении в импульсном Fe:ZnSe-лазере выходной энергии 0.42 Дж при использовании кристаллов, охлаждаемых жидким азотом и накачиваемых излучением Er:YAG-лазера. В работе [5] нам удалось увеличить энергию в импульсе до 2.1 Дж при $T = 85$ К. Результат был получен за счет увеличения энергии накачки и размера активной области в кристалле Fe:ZnSe. При этом наблюдалось насыщение выходной энергии излучения лазера с увеличением энергии накачки, причина которого не была установлена. При повышении температуры кристалла энергия в импульсе падала, что связывалось с сильной температурной зависимостью времени жизни верхнего лазерного уровня и импульсным нагревом активного элемента (АЭ). Так, при комнатной температуре энергия лазера в импульсе составила лишь 42 мДж при дифференциальном КПД только 3%.

Для увеличения эффективности лазера при комнатной температуре необходимо использовать короткий импульс накачки с длительностью, меньшей времени жизни верхнего лазерного уровня. При накачке гигантским импульсом Er:YAG-лазера с пассивной модуляцией добротности нам удалось получить импульс с энергией 6 мДж при дифференциальном КПД 39% [6]. Более высокие энергии были получены при накачке более мощными импульсами излучения HF-лазера [7–9]. Максимальная энергия 192 мДж достигнута при длительности импульса на высоте 90 нс [9]. Применение электроразрядных HF(DF)-лазеров для накачки позволяет получать высокие энергетические характеристики излучения. Это обусловлено малой длительностью импульса (100–200 нс), а также

С.Д.Великанов, Н.А.Зарецкий, Е.А.Зотов, А.А.Манешкин, Р.С.Чуваткин, И.М.Юткин. ФГУП «Российский федеральный ядерный центр» – ВНИИЭФ, Россия, Нижегородская обл., 607190 Саров, просп. Мира, 37; e-mail: velikanov@otd13.vniief.ru
В.И.Козловский, О.Н.Крохин. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, ГПС-1, 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. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, ГПС-1, Ленинский просп., 53
Ю.П.Подмарьков, С.А.Савинова, М.П.Фролов. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, ГПС-1, Ленинский просп., 53, Московский физико-технический институт (государственный университет), Россия, Московская обл., 141707 Долгопрудный, Институтский пер., 9; e-mail: yu@petpo@yandex.ru.

Поступила в редакцию 24 июля 2014 г., после доработки – 2 сентября 2014 г.

возможностью создания источников с достаточно большой выходной энергией излучения, работающих в импульсно-периодическом режиме [10, 11]. Дальнейшее увеличение энергии возможно при использовании активных кристаллов большего объема, при этом необходимо минимизировать паразитный эффект сброса инверсии усиленным спонтанным шумом, характерный для лазерных сред с высоким коэффициентом усиления, в частности в полупроводниковых лазерах [12]. Увеличение активной длины кристалла требует уменьшения концентрации ионов Fe и коэффициента оптического усиления. Для этого необходимо использовать технологию изготовления кристаллов, позволяющую снизить уровень дефектов, определяющих остаточное поглощение в кристалле. С этой точки зрения технология роста из паровой фазы с одновременным легированием в процессе роста [6, 13] имеет существенное преимущество перед широко используемой двухстадийной технологией, основанной на твердотельной диффузии атомов Fe.

Увеличение выходной энергии лазера также может быть достигнуто за счет использования накачки в виде серии коротких импульсов. Рассмотрим случай, когда длительность серии ограничена характерным временем распространения тепла t_0 в пределах размеров активного кристалла:

$$t_0 = r^2 \rho c / \chi, \quad (1)$$

где r – характерный размер кристалла в поперечном к оси резонатора направлении; ρ , c и χ – плотность, удельная теплоемкость и теплопроводность кристалла. При $r = 0.4$ см, $\rho = 5.42$ г·см⁻³, $c = 0.339$ Дж·г⁻¹·К⁻¹ и $\chi = 0.19$ Вт×см⁻¹·К⁻¹ получаем $t_0 = 1.5$ с, т.е. характерное время распространения тепла из центра кристалла с поперечными размерами 8 × 8 мм до боковой поверхности составляет 1.5 с. При большей длительности серии импульсов существенную роль играет теплоотдача кристалла внешнему хладопроводу системы охлаждения АЭ. При $t_0 < 1.5$ с температурные ограничения мало зависят от длительности серии импульсов.

В настоящей работе нам удалось существенно увеличить энергию излучения лазера в миллисекундном диапазоне длительностей импульса накачки при охлаждении кристалла жидким азотом путем подавления сброса инверсии усиленным спонтанным шумом и увеличения энергии накачки, а также увеличить энергию лазера при комнатной температуре путем использования для накачки серии импульсов HF-лазера длительностью ~1 с.

2. Эксперимент

Активные элементы Fe:ZnSe-лазеров были вырезаны из монокристаллов Fe:ZnSe, выращенных из паровой фазы химическим транспортом в водороде на монокристаллической затравке [13]. Легирование ионами Fe²⁺ проводилось непосредственно в процессе роста. Спектральная зависимость сечения поглощения Fe:ZnSe от длины волны при комнатной температуре представлена на рис.1. Приведенные здесь абсолютные значения сечения поглощения получены в результате нормировки на взятое из [14] значение сечения поглощения в максимуме, равное 0.97×10^{-18} см².

В настоящей работе лазерные характеристики кристалла Fe:ZnSe изучались на двух различных установках.

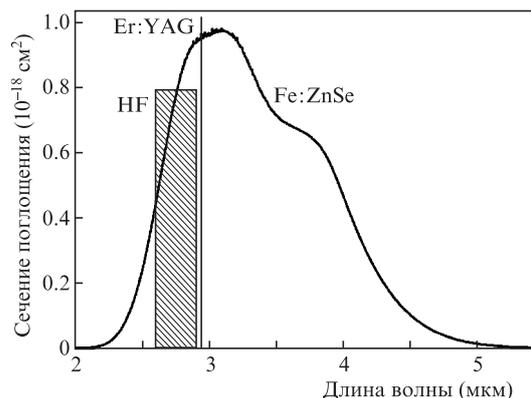


Рис.1. Спектр поглощения кристалла Fe:ZnSe при комнатной температуре, а также линия излучения Er:YAG-лазера (2.94 мкм) и спектральный диапазон излучения HF-лазера (2.6–2.9 мкм).

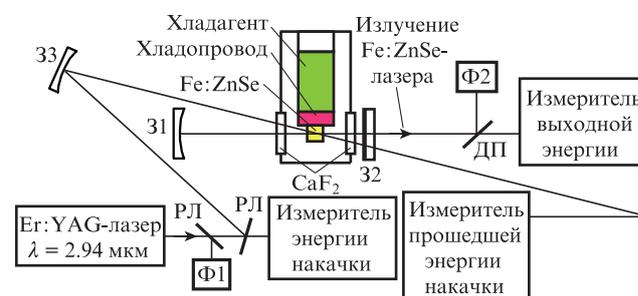


Рис.2. Схема установки с накачкой излучением Er:YAG-лазера: 31–34 – зеркала; Ф1 и Ф2 – фотоспротивления; ДП – делители пучка.

На рис.2 приведена схема установки по исследованию Fe:ZnSe-лазера (концентрация ионов Fe²⁺ составляла 2.5×10^{18} см⁻³) при накачке излучением Er:YAG-лазера, работающего в режиме свободной генерации.

АЭ представлял собой параллелепипед с поперечными размерами 9.7×10.1 мм и длиной (длина усиления) 7.7 мм, торцы которого полировались и не просветлялись. Угол клина между торцевыми поверхностями не превышал 20°. Чтобы уменьшить сброс инверсии усиленным спонтанным шумом, распространяющимся в поперечном к оптической оси резонатора направлении, боковые поверхности кристалла были заматированы и покрыты (зачернены) аквадагом. АЭ закреплялся на медном хладопроводе в вакуумированном криостате, охлаждаемом жидким азотом. Окошки криостата выполнялись из плоскопараллельных пластинок CaF₂ без просветляющих покрытий. Пластины и торцы кристалла были перпендикулярны оптической оси резонатора.

Резонатор лазера Fe:ZnSe образован «глухим» сферическим зеркалом 31 с радиусом кривизны 1000 мм и плоским полупрозрачным выходным зеркалом 32. Коэффициент пропускания выходного зеркала на длине волны генерации составлял 72%, длина резонатора – 350 мм.

Источником накачки служил импульсный Er:YAG-лазер с ламповой накачкой, работавший в режиме свободной генерации на длине волны 2.94 мкм. Длительность импульса составляла 950 мкс. Импульс состоял из хаотических пиков длительностью 0.3–1 мкс. Энергия в импульсе достигала 15 Дж. Пучок излучения Er:YAG-лазера, сфокусированный в пятно диаметром 6 мм (95% энергии), падал на кристалл Fe:ZnSe под углом 3° к опти-

ческой оси резонатора. Площадь пятна накачки на поверхности АЭ приблизительно в два раза превышала площадь пятна накачки, использовавшегося в работе [5].

При охлаждении кристалла Fe:ZnSe происходит сужение его полосы поглощения, а сечение поглощения на длине волны излучения Er:YAG-лазера при температуре жидкого азота увеличивается приблизительно на 20% по сравнению с сечением при комнатной температуре [15].

На второй установке, схема которой представлена на рис.3, изучалась работа Fe:ZnSe-лазера (концентрация ионов Fe^{2+} составляла $1.9 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$), накачиваемого излучением электроразрядного импульсно-периодического HF-лазера при комнатной температуре. В этом случае АЭ имел поперечные размеры 8×8 мм и активную длину 8 мм. Угол клина между торцевыми поверхностями был 2.5°.

В качестве источника накачки использовался химический лазер на HF. Энергия импульса достигала 130 мДж при длительности импульса 100 нс на полувысоте. Частота следования импульсов была 100 или 200 Гц. Спектр излучения HF-лазера состоял из нескольких линий в диапазоне 2.6–2.9 мкм. Поперечные размеры пучка излучения на выходе лазера накачки составляли 15×18 мм. Этот пучок фокусировался сферическим зеркалом с фокусным расстоянием 750 мм на поверхность АЭ в пятно диаметром 3.5–3.7 мм (90% энергии).

При измерении энергии лазера использовалась схема, представленная на рис.3,а. В этом случае накачка кристалла Fe:ZnSe осуществлялась через дихроичское плоское зеркало 5, которое вместе с плоским зеркалом 7 формировало оптический резонатор Fe:ZnSe-лазера. Длина резонатора была 106 мм. Коэффициент пропускания зеркала 5 для излучения накачки составлял 84.2%, а коэффициент отражения на длине волны генерации Fe:ZnSe-ла-

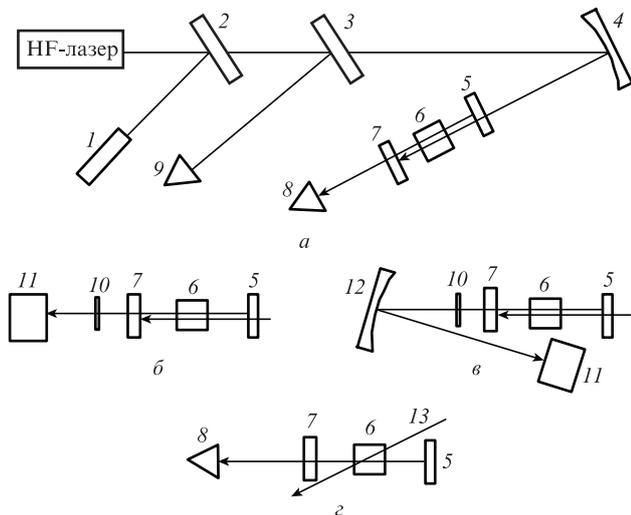


Рис.3. Схема установки при накачке HF-лазером (а), схемы измерения распределения излучения лазера в ближней (б) и дальней зонах (в), а также схема измерения формы импульса (з):

1 – юстировочный лазер; 2, 3 – пластины CaF_2 ; 4 – сферическое зеркало с фокусным расстоянием 750 мм; 5 – «глухое» плоское дихроичское зеркало оптического резонатора; 6 – активный элемент $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$; 7 – плоское выходное зеркало оптического резонатора; 8 и 9 – пироэлектрические измерительные головки Coherent J-25MB-LE (при измерении энергии импульса) или фотоприемники НФПУ «Орион» (при измерении формы импульса); 10 – германиевый светофильтр; 11 – камера Ругосам III; 12 – сферическое зеркало с фокусным расстоянием 1000 мм; 13 – плоское медное зеркало.

зера (4–5 мкм) – более 99%. Коэффициент отражения выходного зеркала 7 был 80% для генерируемого излучения и 95.8% для излучения накачки. Энергии импульсов излучения Fe:ZnSe-лазера и HF-лазера измерялись пироэлектрическими измерительными головками Coherent J-25MB-LE. Осциллограммы импульсов излучения лазеров регистрировались фотоприемниками НФПУ «Орион».

Для регистрации распределения интенсивности излучения в ближней и дальней зонах использовались схемы, фрагментарно представленные на рис.3,б и в соответственно. Картина распределения интенсивности излучения регистрировалась с помощью камеры Ругосам III. Дальнее поле формировалось в фокальной плоскости сферического зеркала с фокусным расстоянием 1000 мм. Схема, показанная на рис.3,з, использовалась для получения временной зависимости импульсов генерации при различных уровнях накачки. В этом случае лазерный пучок накачки направлялся на кристалл под углом 5°, длина резонатора была 178 мм. В качестве глухого зеркала использовалось медное зеркало.

3. Результаты экспериментов

На рис.4 представлена зависимость энергии импульса излучения Fe:ZnSe-лазера от поглощенной энергии импульса Er:YAG-лазера при температуре 85 К. Для сравнения на этом же графике приведена аналогичная зависимость, полученная нами в работе [5]. Нам удалось повысить максимальную энергию в импульсе до 4.9 Дж, т.е. почти в 2.5 раза. При этом КПД лазера по вложенной энергии составил ~47%. Эти показатели достигнуты за счет увеличения поперечных размеров активной области и уменьшения влияния эффекта сброса инверсии усиленным спонтанным излучением в поперечном направлении, что позволило увеличить энергию накачки. Максимальная энергия при $T = 85$ К ограничена лишь вложенной энергией накачки. Порог генерации составил 140 мДж. Импульс генерации, как и импульс накачки, состоял из пиков с характерной длительностью 0.3–1 мкс.

Увеличение температуры до $T = 245$ К привело к уменьшению КПД лазера примерно в два раза, что позволяет получить энергию лазера на уровне 2–3 Дж при охлаждении АЭ с помощью термоэлектрического элемента Пельтье. Однако дальнейшее увеличение температуры при-

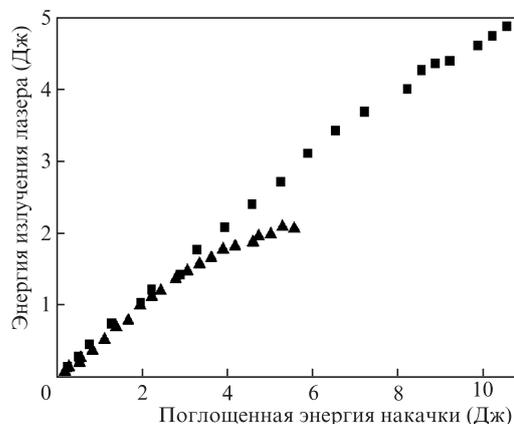


Рис.4. Зависимости энергии импульса Fe:ZnSe-лазера от поглощенной энергии импульса Er:YAG-лазера при $T = 85$ К, полученные в настоящей работе (квадраты) и в нашей предыдущей работе [6] (треугольники).

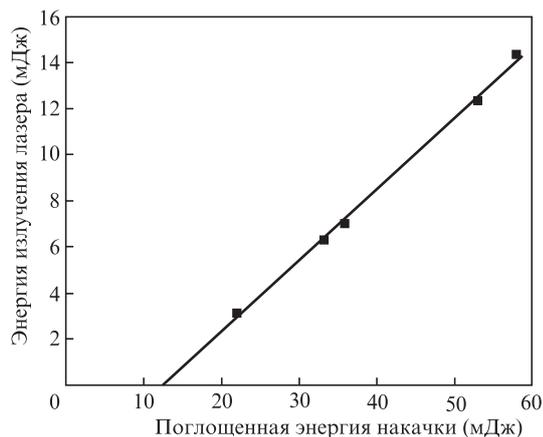


Рис.5. Зависимость энергии генерации Fe:ZnSe-лазера в однократном импульсе от поглощенной энергии HF-лазера.

водит к существенному падению энергии в импульсе, поэтому при комнатной температуре нам удалось получить энергию лишь 53 мДж. Это падение связано с сильной температурной зависимостью времени жизни верхнего лазерного уровня и импульсным нагревом [5]. Последний приводил к укорочению импульса генерации по сравнению с импульсом накачки. Для увеличения эффективности генерации при комнатной температуре следует использовать серию коротких импульсов с длительностью короче времени жизни верхнего лазерного уровня.

На рис.5 представлена зависимость выходной энергии отдельного импульса излучения Fe:ZnSe-лазера от поглощенной энергии накачки излучения HF-лазера при комнатной температуре (295 К). Измерения проводились по схеме, изображенной на рис.3.а. Максимальная энергия составила 14.4 мДж при вложенной энергии 58 мДж, при этом КПД лазера составил 25%, а дифференциальный КПД – 31.3%. Порог генерации, оцененный экстраполяцией полученной зависимости, равен 13 мДж.

Осциллограммы отдельного импульса накачки и генерации приведены на рис.6 для трех значений поглощенной энергии накачки. Использовалась та же схема измерения, что и на рис.3,г. Видно, что импульс генерации содержит релаксационные пикчи. Наблюдается задержка этого импульса относительно импульса накачки, которая уменьшается с увеличением превышения над порогом генерации.

На рис.7 показаны изменения энергии отдельных импульсов генерации и КПД лазера от импульса к импульсу в двух характерных сериях длительностью 1 с при частоте следования импульсов в серии 100 и 200 Гц (схему измерения см. на рис.3.а). При частоте 100 Гц видна высокая стабильность КПД и энергии со временем. Некоторое падение параметров наблюдается при частоте 200 Гц, что связано с небольшим падением энергии накачки и нагревом активного элемента. Средняя мощность по серии составила 1.4 Вт при частоте 100 Гц и 2.4 Вт при частоте 200 Гц. Достигнутые суммарные энергии за серию были 1.4 и 2.4 Дж соответственно.

На рис.8 представлены картины ближнего и дальнего полей излучения Fe:ZnSe-лазера для отдельного импульса. Размер пятна излучения и полный угол расходимости на уровне 1/e от максимальной интенсивности составили 2.2 мм и 3.8 мрад. Это лишь в два раза больше угла расходимости гауссова пучка. Отсутствие осевой симметрии в картинах ближнего и дальнего полей излучения лазера

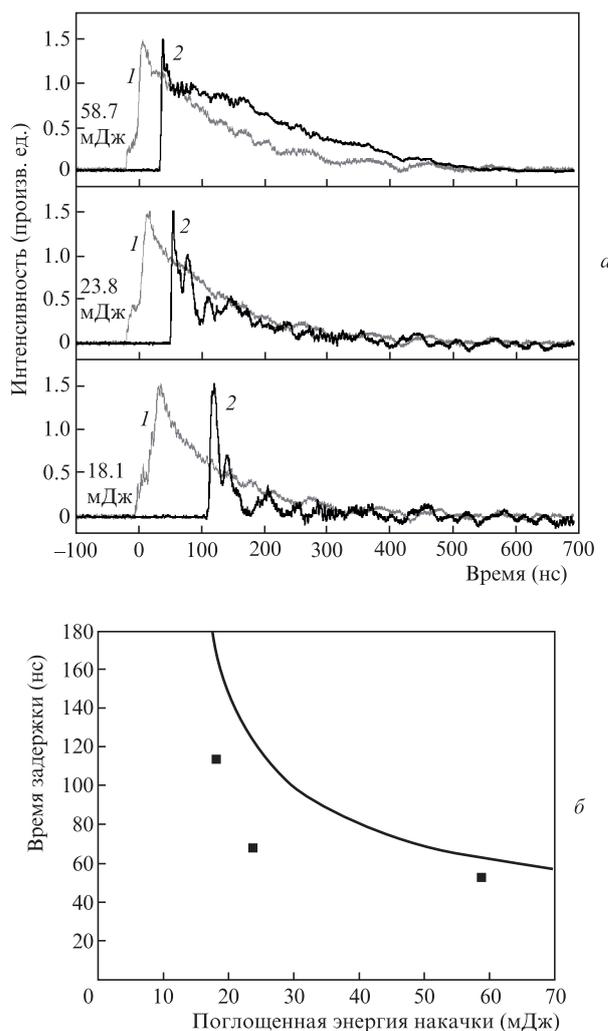


Рис.6. Осциллограммы импульса излучения HF-лазера (1) и импульса излучения Fe:ZnSe-лазера (2) при энергиях импульса накачки 18.1, 23.8 и 58.7 мДж (а), а также зависимость времени задержки импульса генерации относительно импульса накачки на уровне 0.1 интенсивности от поглощенной энергии накачки (б) (точки – эксперимент, кривая – расчет).

может быть связано с овальным пятном накачки и наличием чрезмерно большого клина между торцевыми поверхностями кристалла.

4. Обсуждение результатов

Ухудшение энергетических характеристик лазеров с увеличением температуры связано с температурной зависимостью времени жизни верхнего лазерного уровня. Измерение этой зависимости при температурах выше комнатной было проведено в [5]. Для кристаллов Fe:ZnSe время жизни верхнего уровня можно представить в виде

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_r} + W_{nr} \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right), \quad (2)$$

где τ_r – излучательное время жизни; E_a и W_{nr} – энергия активации и скорость безызлучательной рекомбинации. В измеренной области температур можно пренебречь излучательной рекомбинацией и определить достаточно точно параметры безызлучательной рекомбинации. Для кристаллов Fe:ZnSe оказалось, что $E_a = 277$ мэВ и $W_{nr}^{-1} = 5$ пс.

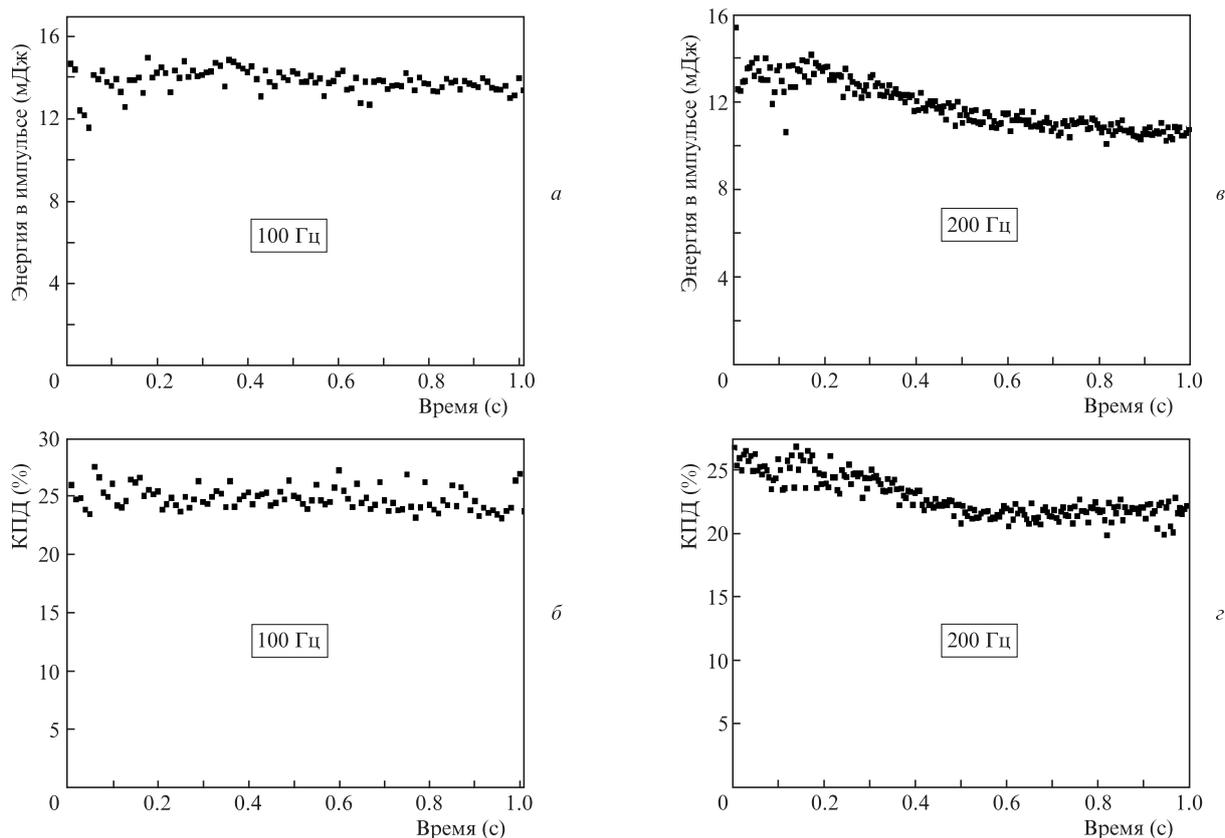


Рис.7. Изменение энергии импульса (а, в) и КПД (б, г) лазера от импульса к импульсу (каждая точка – отдельный импульс) в серии длительностью 1 с при разных значениях частоты следования.

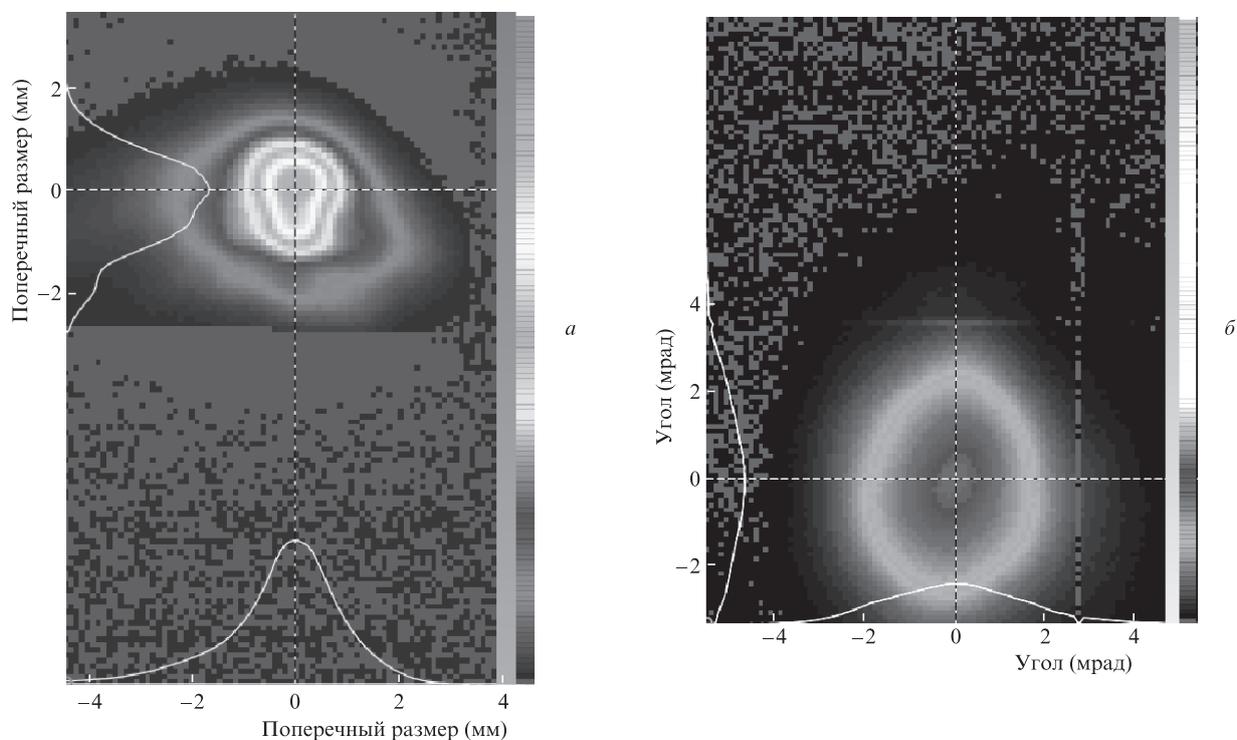


Рис.8. Картины ближнего (а) и дальнего (б) поля излучения Fe²⁺:ZnSe-лазера.

Более того, укорочение времени генерации Fe:ZnSe-лазера с ростом энергии накачки Er:YAG-лазера при комнатной температуре свидетельствует о существенном влиянии на энергию импульса лазерного излучения также

динамического нагрева кристалла в пределах одного импульса [5]. Действительно, при однородном вложении энергии 10 Дж в активный объем 0.15 см³ кристалла ZnSe с объемной теплоемкостью 1.88 Дж·см⁻³·К⁻¹ приращение

температуры составляет 35 К. В реальности накачка неоднородна как вдоль кристалла, так и в поперечном сечении, поэтому максимальное приращение температуры на переднем торце кристалла будет существенно выше. Основываясь на измерениях температурной зависимости времени жизни верхнего уровня (формула (2)), при таких нагревах можно ожидать дальнейшего уменьшения времени жизни верхнего лазерного уровня и возрастания порога генерации в течение импульса накачки. Неоднородность накачки вдоль активного кристалла можно уменьшить при использовании двухсторонней накачки или путем отражения непоглощенного излучения накачки от второго торца кристалла. Однако даже в случае однородной накачки из формулы (2) следует, что если кристалл термостатировать при $T = 295$ К и допустить импульсный нагрев на 35 К (до $T = 330$ К), то время жизни верхнего уровня в конце импульса составит 100 нс.

Порог генерации в квазистационарном режиме в основном определяется временем жизни верхнего уровня. При изменении температуры кристалла от 85 до 295 К время жизни изменяется от 57 до 0.35 мкс, т. е. в 163 раза. Поскольку в работе [5] порог генерации при $T = 85$ К составил 70 мДж, то порог в квазистационарном режиме при комнатной температуре (в начале импульса) должен быть не менее 11.4 Дж. Тем не менее, генерация наблюдается из-за пиковой структуры импульса накачки. Длительность пиков накачки (0.3–0.5 мкс при максимальных энергиях) сравнима с временем жизни верхнего уровня в начале импульса. В пиках пиковая мощность выше средней по импульсу. Однако генерация пропадает во второй половине импульса накачки по мере уменьшения времени жизни возбуждения верхнего лазерного уровня до 100 нс и ниже.

При накачке отдельными импульсами (100 нс) излучения HF-лазера достигнут довольно высокий дифференциальный КПД лазера – 31.3%, хотя и меньший, чем КПД, полученный при низкой температуре кристалла (53%). Выходная энергии составила 14.4 мДж при поглощенной энергии накачки 58 мДж.

В серии из 100 импульсов в течение 1 с поглощалась энергия 5.8 Дж. Учитывая меньшие размеры возбужденной области при накачке HF-лазером, получаем, что удельная вложенная энергия примерно равна удельной вложенной энергии при накачке Er:YAG-лазером. Однако энергия лазера при накачке серией коротких импульсов превышает в 26 раз энергию, которую удастся снять при накачке излучением Er:YAG-лазера при комнатной температуре (1.4 Дж против 53 мДж). В настоящей работе частота следования импульсов в серии не превышала 200 Гц. При этой частоте за 1 с в кристалл вкладывалась энергия 11.6 Дж. Это сравнимо с 10 Дж в случае накачки излучением Er:YAG-лазера. Однако за 1 с тепло распространяется на объем кристалла, превышающий объем области возбуждения, и примерно 25% вложенной энергии приходится на излучение. Согласно оценке, нагрев кристалла составляет меньше 35 К, и, соответственно, время жизни верхнего лазерного уровня будет выше 100 нс к концу серии коротких импульсов.

Чтобы вложить в кристалл 10 Дж за 1 мс (как в случае Er:YAG-лазера), HF-лазер должен работать с частотой 170 кГц. В этом случае нагрев будет выше, а время жизни меньше. Для оценки возможности работы при высокой частоте следования коротких импульсов мы провели численное моделирование работы лазера на основе стан-

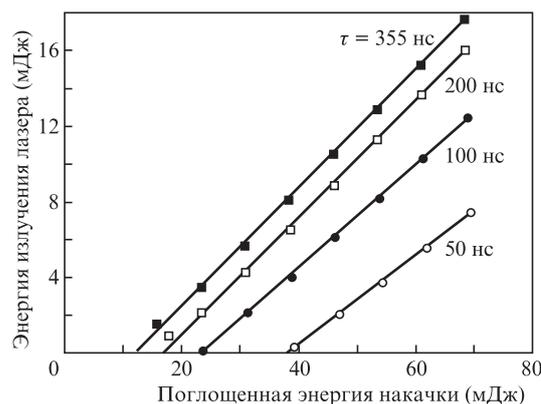


Рис.9. Расчетные зависимости энергии излучения $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера от поглощенной энергии накачки HF-лазера с длительностью импульса 100 нс на полувысоте при различных значениях времени жизни верхнего лазерного уровня.

дартных балансных уравнений для плотности активных частиц и плотности фотонов в резонаторе в предположении четырехуровневой схемы лазерных уровней. В модели учитывалось ослабление накачки по длине кристалла и предполагалось, что накачка однородна по поперечному сечению активной области. Форма импульса накачки была взята из эксперимента. Также учитывалось ослабление излучения генерации в резонаторе за счет длинноволнового крыла поглощения АЭ. В модели использовались значения сечения поглощения на длине волны накачки и сечения усиления на длине волны генерации, рассчитанные на основе данных [14].

На рис.9 представлены расчетные энергетические характеристики импульсного лазера при накачке HF-лазером с длительностью импульсов 100 нс на полувысоте и временной зависимостью импульса генерации, показанной на рис.6. Варьируя внутренние потери, мы привели эти расчетные данные в соответствие с экспериментально измеренной энергетической характеристикой (рис.5) для времени жизни верхнего уровня ($\tau = 355$ нс) при комнатной температуре. Кроме того, были получены аналогичные характеристики при других значениях времени жизни. Из рис.9 видно, что падение энергии лазера на 30% следует ожидать для $\tau = 100$ нс и вложенной энергии 70 мДж. В случае накачки серией импульсов с суммарной энергией 10 Дж и длительности серии 1 мс ожидаемый нагрев кристалла в конце серии импульсов будет 35 К, что вызовет падение времени жизни верхнего лазерного уровня от примерно 350 до 100 нс к концу серии. Согласно проведенным расчетам такое падение приведет к тому, что при вложенной энергии накачки 58 мДж энергия генерации в однократном импульсе будет уменьшаться с 14.4 мДж в начале серии до 10 мДж в конце серии импульсов. В этом случае средний за серию КПД лазера оценивается как 20%. При энергии накачки 10 Дж можно получить энергию лазера выше 1 Дж при комнатной температуре за время накачки 1 мс, что существенно отличается от накачки излучением Er:YAG-лазера, работающего в режиме свободной генерации.

Используя численную модель, мы также рассчитали зависимость времени задержки возникновения генерации от поглощенной энергии накачки (рис.6,б). Расчетная кривая и экспериментальные точки находятся в удовлетворительном соответствии.

5. Заключение

В работе продемонстрирована возможность реализации импульсного лазера на кристаллах Fe:ZnSe (длина волны излучения вблизи 4.1 мкм) с энергией 4.9 Дж при $T = 85$ К. Показано, что существенное падение энергии при комнатной температуре связано с сильной температурной зависимостью времени жизни верхнего лазерного уровня. Для получения энергии лазерного импульса ~ 1 Дж при комнатной температуре необходимо использовать серию коротких импульсов с длительностью меньше времени жизни верхнего лазерного уровня. При использовании импульсно-периодического электроразрядного HF-лазера с длительностью импульсов 100 нс и энергией импульса до 130 мДж удалось при комнатной температуре получить устойчивый импульсно-периодический режим генерации Fe:ZnSe-лазера со средней мощностью 2.4 Вт при частоте следования импульсов 200 Гц, максимальная энергия импульса при этом составила 14 мДж. За время 1 с суммарная энергия всех импульсов была 2.4 Дж. Энергию 1 Дж при комнатной температуре можно получить и за 1 мс, если частоту следования импульсов накачки в серии увеличить примерно до 150 кГц.

Авторы выражают благодарность И.Л.Буцыкину, А.Ф.Запольскому, Е.А.Салтыкову за помощь в работе.

1. 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).
2. 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).
3. Воронов А.А., Козловский В.И., Коростелин Ю.В., Ландман А.И., Подмарьков Ю.П., Скасырский Я.К., Фролов М.П. *Квантовая электроника*, **38**, 1113 (2008).
4. Fedorov V.V., Martyshkin D.V., Mirov M., Moskalev I., Vasylyev S., Mirov S.B. *CLEO Technical Digest* (Washington, OSA, 2012, Paper CM3D.3).
5. 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 (6pp) (2013).
6. 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).
7. 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).
8. Гавришчук Е.М., Казанцев С.Ю., Кононов И.Г., Родин С.А., Фирсов К.Н. *Квантовая электроника*, **44** (6), 505 (2014).
9. Firsov K.N., Gavrishchuk E.M., Kazantsev S.Yu., Kononov I.G., Rodin S.A. *Laser Phys. Lett.*, **11**, 085001 (2014).
10. 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**, 393 (2010).
11. Буцыкин И.Л., Великанов С.Д., Евдокимов П.А., Запольский А.Ф., Ковалев Е.В., Кодола Б.Е., Пегоев И.Н. *Квантовая электроника*, **31**, 957 (2001).
12. Богданкевич О.В., Зверев М.М., Дарзбек С.А., Ушахин В.А. *Квантовая электроника*, **2**, 1757 (1975).
13. Akimov V.A., Frolov M.P., Korostelin Yu.V., Kozlovsky V.I., Landman A.I., Podmar'kov Yu.P., Voronov A.A. *Phys. Stat. Sol. C*, **3**, 1213 (2006).
14. Myoung N., Fedorov V.V., Mirov S.B., Wenger L.E. *J. Luminescence*, **132**, 600 (2012).
15. Adams J.J. *New Crystalline Materials for Nonlinear Frequency Conversion, Electro-Optic Modulation, and Mid-infrared Gain Media. PhD Theses* (LLNL, 2002).