

# Люминесцентные и генерационные характеристики кристаллов $KY(WO_4)_2 : Yb^{3+}$ с высоким уровнем легирования

В.Э.Кисель, А.Е.Трошин, В.Г.Щербицкий, Н.В.Кулешов, А.А.Павлюк,  
Ф.Брюннер, Р.Пашотта, Ф.Морие-Геноуд, У.Келлер

*Проведены измерения времени затухания люминесценции с учетом эффектов перепоглощения для кристаллов  $KY(WO_4)_2 : Yb$  ( $KYW : Yb$ ) с атомными концентрациями активных ионов от 0.2% до 30%. Измеренное радиационное время жизни ионов  $Yb^{3+}$  составило 233 мкс. В непрерывном режиме генерации достигнута выходная мощность 1.46 и 1.62 Вт с эффективностью 52% и 47% для лазеров на кристаллах  $KYW : Yb$  с атомной концентрацией ионов  $Yb^{3+}$  10% и 30% соответственно. При использовании полупроводникового зеркала с насыщающимся поглотителем (SESAM) в режиме пассивной синхронизации мод были получены импульсы с длительностями 194 и 180 фс на длинах волн 1042 и 1039 нм для кристаллов с концентрациями  $Yb^{3+}$  10% и 30% соответственно, при этом средняя выходная мощность составила 0.63 и 0.75 Вт.*

**Ключевые слова:** твердотельный лазер, люминесценция, высококонцентрированные активные среды.

## 1. Введение

В последние годы легированные ионами  $Yb^{3+}$  кристаллы вольфраматов  $KY(WO_4)_2 : Yb^{3+}$  ( $KYW : Yb$ ) и  $KGd(WO_4)_2 : Yb^{3+}$  ( $KGW : Yb$ ) вызывают большой интерес как активные среды для создания лазеров с полупроводниковой накачкой, работающих в спектральной области вблизи 1 мкм [1, 2]. Достоинствами этих материалов являются интенсивная полоса поглощения на  $\lambda = 980$  нм, позволяющая использовать для накачки промышленно выпускаемые лазерные диоды на основе  $InGaAs$ ; широкая полоса усиления, сравнимая с полосой усиления ионов  $Yb^{3+}$  в стекле, что необходимо для создания перестраиваемых лазеров и получения УКИ; высокие сечения стимулированного излучения, а также малый квантовый дефект (разность энергий квантов поглощения и лазерного излучения), равный 4%–5%, который приводит к снижению тепловых потерь.

Длительность импульсов первого фемтосекундного  $Yb : KGW$ -лазера была равна 176 фс, а средняя выходная мощность – 1.1 Вт [3]. При мощности 0.2 Вт длительность импульсов в этом лазере была еще меньше и составляла 112 фс. В  $Yb : KYW$ -лазере при накачке диодным лазером мощностью 2 Вт с хорошим качеством пучка были получены импульсы длительностью 101 фс со средней выходной мощностью 100 мВт [4]. В работе [5] исследован фемтосекундный  $Yb : KYW$ -лазер с эффективностью 35%.

**В.Э.Кисель, А.Е.Трошин, В.Г.Щербицкий, Н.В.Кулешов.** НИИ оптических материалов и технологий Белорусского национального технического университета, Белоруссия, 220013 Минск, просп. Ф.Скорины, 65, корп. 17; e-mail: nkuleshov@ilc.by

**А.А.Павлюк.** Институт неорганической химии СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. акад. Лаврентьева, 3

**F.Brunner, R.Paschotta, F.Morier-Genoud, U.Keller.** ETH Zurich, Physics Department, Institute of Quantum Electronics, Wolfgang-Pauli-Str. 16, CH-8093 Zürich, Switzerland

Поступила в редакцию 10 ноября 2005 г., после доработки – 12 января 2006 г.

В  $Yb : KYW$ -лазере на тонком диске средняя выходная мощность равнялась 22 Вт при длительности импульсов 240 фс [6]. Разработаны также  $Yb : KYW$ -лазеры с полупроводниковой накачкой, работающие в режиме синхронизации мод с использованием эффекта Керра [7, 8]. Наименьшая длительность импульсов этих лазеров составила 71 фс при средней выходной мощности 120 мВт [7]. Во всех описанных случаях атомная концентрация ионов  $Yb^{3+}$  была не более 10%.

Для мощных фемтосекундных лазеров на тонком диске кристаллы  $KYW : Yb$  представляют больший интерес, чем  $KGW : Yb$ , т. к. как они имеют лучшее оптическое качество при высокой концентрации ионов  $Yb^{3+}$  (до 100% в кристаллах  $KYb^{3+}(WO_4)_2$  ( $KYbW$ ) [9]). Использование таких кристаллов в лазере на тонком диске [10] позволяет улучшить эффективность охлаждения и упростить схему накачки. Последнее существенно снижает требования к качеству излучения накачки. Таким образом, исследование лазерных свойств кристаллов  $KYW : Yb$  с высокими уровнями легирования для получения генерации, включая генерацию УКИ, представляет значительный интерес.

Источником потерь для высоколегированных кристаллов может быть концентрационное тушение флуоресценции. Измеренное при комнатной температуре время жизни верхнего лазерного уровня  $Yb^{3+}$  составляет около 200 мкс для  $KYbW$  [9] и 300–400 мкс для  $KYW : Yb$  (1%–20%) [11]. Хорошо известно, что перепоглощение может сильно влиять на измеренное время жизни для иттербийсодержащих материалов из-за значительного перекрытия полос поглощения и испускания [12]. Это особенно важно учитывать для кристаллов вольфраматов, легированных ионами иттербия, где перекрытие полос намного сильнее чем, например, у  $YAG : Yb$ . Относительно высокий показатель преломления  $KYW$  ( $n \approx 2.0$ ) также увеличивает возможность перепоглощения даже в оптически тонких образцах из-за полного внутреннего отражения. Следовательно, чтобы исключить пере-

поглощение излучения и точно определить время жизни люминесценции в таких материалах, особенно при высоких уровнях легирования ионами  $\text{Yb}^{3+}$ , следует применять специальные методы, описанные в работах [9, 12].

В настоящей работе представлены результаты измерений времени жизни люминесценции ионов  $\text{Yb}^{3+}$  в монокристаллах и мелкодисперсных порошках  $\text{KYW}:\text{Yb}$  в этиленгликоле. Порошок использовался для того, чтобы избежать перепоглощения, а этиленгликоль – для выравнивания значений показателей преломления, что необходимо для уменьшения влияния полного внутреннего отражения. Проведено также исследование непрерывного режима генерации и режима пассивной синхронизации мод для кристаллов  $\text{KYW}:\text{Yb}$  при концентрации активных ионов 10 % и 30 %. Целью данных экспериментов являлось сравнение лазерных характеристик концентрированных кристаллов  $\text{KYW}:\text{Yb}$  с широко используемыми материалами с концентрацией активных ионов 10 %, необходимое для исследования возможных негативных эффектов и ограничений, связанных с высоким содержанием  $\text{Yb}^{3+}$ .

## 2. Измерения времени жизни люминесценции

Схема эксперимента показана на рис.1. В качестве источника возбуждения с  $\lambda = 981$  нм использовался параметрический генератор света с длительностью импульсов  $\sim 20$  нс, который, в свою очередь, накачивался третьей гармоникой  $\text{Nd}:\text{YAG}$ -лазера, работающего в режиме модуляции добротности. Излучение люминесценции собиралось с поверхности образца, на которую падало возбуждающее излучение, проходило через монохроматор и регистрировалось германиевым фотодиодом с постоянной времени 500 нс и цифровым осциллографом с полосой пропускания 500 МГц. Результаты усреднялись по 20 измерениям для каждого образца, погрешность измерений составляла не более 5 %.

Монокристаллы  $\text{KYW}:\text{Yb}$  были выращены по модифицированному методу Чохральского. Для измерений применялись образцы с концентрациями ионов иттербия 0.2 %, 2 %, 5 %, 10 % и 30 %. Все образцы, кроме кристалла с концентрацией 0.2 %, изготовлены в виде суспензии порошка в жидком этиленгликоле. Для получения порошка кристалл измельчался в ступке. Диаметр частиц не превышал 50 мкм, что меньше длины поглощения (по уровню  $1/e$ ) даже для кристаллов с концентрацией ионов иттербия 30 % (около 70 мкм на  $\lambda = 981$  нм). Использование этиленгликоля увеличивало угол полного внутреннего отражения для кристалла  $\text{KYW}$  до  $44^\circ$  по сравнению с  $30^\circ$  в воздухе. Кроме того, измерения проводились для

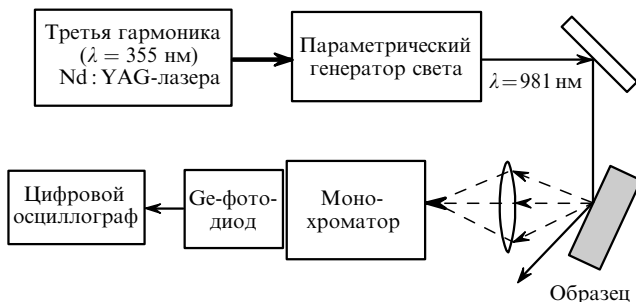


Рис.1. Схема экспериментальной установки для измерения времени жизни люминесценции в кристаллах  $\text{KYW}:\text{Yb}$ .

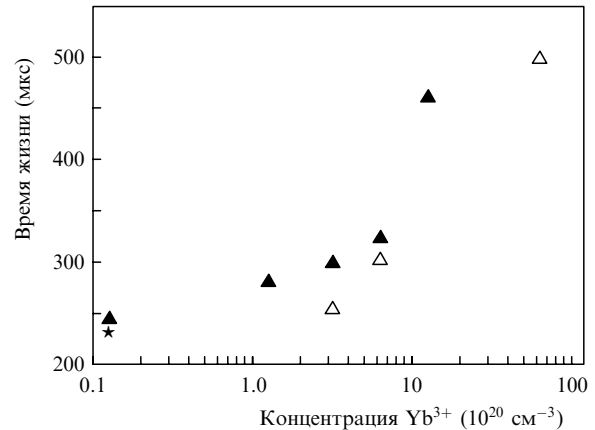


Рис.2. Время жизни люминесценции в кристаллах  $\text{KYW}:\text{Yb}$  толщиной 3 мм (▲) и 70 мкм (△), а также в порошке кристалла  $\text{KYW}:\text{Yb}$  (0.2 %), помещенном в этиленгликоль (★).

порошков в воздухе и неразмолотых кристаллов, включая тонкие (70–150 мкм) пластины.

Затухание во всех образцах имело одноэкспоненциальный характер. Данные, приведенные на рис.2 и 3, показывают, что измеренное время жизни ионов  $\text{Yb}^{3+}$  значительно уменьшается при уменьшении как концентрации иттербия в кристалле (рис.2), так и весовой концентрации порошков  $\text{KYW}:\text{Yb}$  в суспензии (рис.3). Это свидетельствует о сильном влиянии перепоглощения. Для образца  $\text{KYW}:\text{Yb}$  (0.2 %) в этиленгликоле измеренное время жизни составило 233 мкс. Мы полагаем, что оно соответствует радиационному времени жизни  $\text{Yb}^{3+}$  в  $\text{KYW}$ .

Времена жизни люминесценции для суспензий (порошков в этиленгликоле) в зависимости от весовой концентрации  $\text{KYW}:\text{Yb}$  представлены на рис.3 и в табл.1. Разбавление суспензий, эквивалентное уменьшению средней концентрации  $\text{Yb}^{3+}$ , позволяет достичь предельных значений времени жизни. Для всех образцов в виде порошков (2 %, 5 %, 10 % и 30 %), а также для неразмолотого образца с концентрацией ионов иттербия 0.2 % в этиленгликоле это значение составило около 233 мкс. Таким образом, концентрационного тушения люминесценции не наблюдалось даже для кристаллов  $\text{KYW}:\text{Yb}$  с уровнями легирования до 30 %.

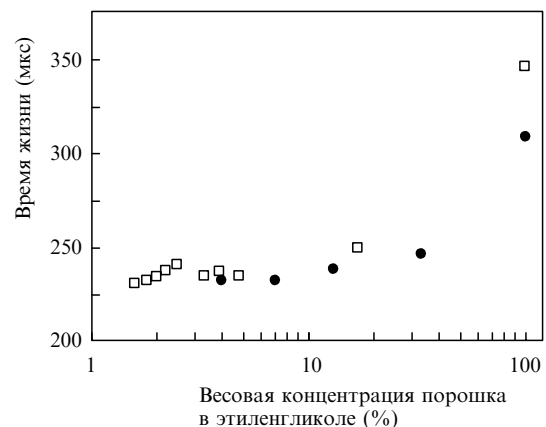


Рис.3. Зависимости времени жизни люминесценции в порошках кристаллов  $\text{KYW}:\text{Yb}$  (10 %) (●) и  $\text{KYW}:\text{Yb}$  (30 %) (□), помещенных в этиленгликоль, от весовой концентрации порошка в суспензии.

Табл.1. Результаты измерений времени жизни в кристаллах  $\text{KYW} : \text{Yb}$ .

| Материал                         | Весовая концентрация порошка в этиленгликоле (%) | Время жизни (мкс) |
|----------------------------------|--|-------------------|
| $\text{KYW} : \text{Yb}$ (30 %)  | – (кристалл в воздухе)                           | 460               |
|                                  | 100 (порошок в воздухе)                          | 347               |
|                                  | 17   | 250               |
|                                  | 4.8  | 235               |
|                                  | 3.9  | 237               |
|                                  | 3.3  | 235               |
|                                  | 2.5  | 237               |
|                                  | 2.2  | 235               |
|                                  | 2  | 231               |
| $\text{KYW} : \text{Yb}$ (10 %)  | – (кристалл в воздухе)                           | 327               |
|                                  | 100 (порошок в воздухе)                          | 309               |
|                                  | 33   | 247               |
|                                  | 13   | 239               |
|                                  | 7  | 232               |
|                                  | 4  | 234               |
| $\text{KYW} : \text{Yb}$ (0.2 %) | – (кристалл в воздухе)                           | 272               |
|                                  | – (кристалл в этиленгликоле)                     | 233               |

### 3. Лазерные эксперименты

Лазерные эксперименты проводились в резонаторе, схема которого приведена на рис.4. В качестве активного элемента использовались расположенные под углом Брюстера кристаллы  $\text{KYW} : \text{Yb}$  толщиной 2 и 0.8 мм с концентрациями ионов иттербия 10 % и 30 % соответственно. Спектр поглощения для поляризации  $E \parallel N_m$  ( $N_m, N_g, N_p$  – оси оптической индикатрисы) показан на рис.5. Для продольной накачки активного элемента вдоль кристаллографической оси  $b$  ( $N_p$ ) применялся лазерный диод с волоконным выходом ( $\lambda = 984$  нм, диаметр волокна 100 мкм,  $\text{NA} = 0.22$ , мощность на выходе световода 7 Вт), работающий в непрерывном режиме. Вследствие близости длин волн накачки и генерации пропускание выходного зеркала на длине волны накачки не превышало 75 %, и максимальная мощность излучения, падающего на кристалл, составляла 5 Вт. Излучение накачки фокусировалось в пятно с диаметром в перетяжке 110 мкм. Из-за установки активного элемента под

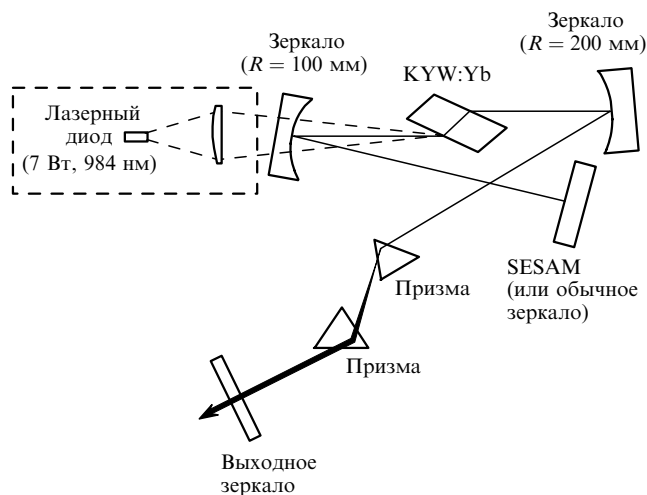
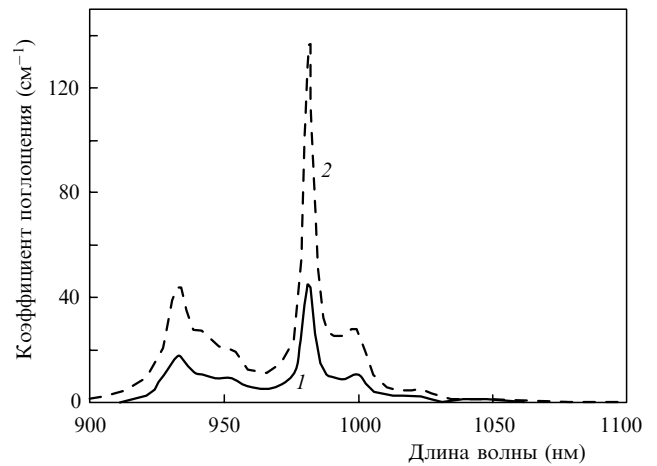


Рис.4. Схема установки для лазерных экспериментов.

Рис.5. Спектры поглощения кристаллов  $\text{KYW} : \text{Yb}$  (10 %) (1) и  $\text{KYW} : \text{Yb}$  (30 %) (2) для поляризации  $E \parallel N_m$ .

углом Брюстера пятно излучения накачки в кристалле имело эллиптическую форму с размерами полуосей 110 и 220 мкм. Размер перетяжки  $\text{TEM}_{00}$ -моды резонатора в активном элементе составлял  $105 \times 210$  мкм. Активные элементы располагались на медном теплоотводе, температура которого поддерживалась равной  $10^\circ\text{C}$ .

Для получения режима пассивной синхронизации мод использовалось полупроводниковое зеркало (затвор) с насыщающимся поглотителем (SESAM [13, 14]). Глубина модуляции этого затвора составляла около 1 %, плотность энергии насыщения –  $350$  мДж/ $\text{см}^2$ , время релаксации равнялось 100 нс. Чтобы обеспечить отрицательную дисперсию групповой скорости, необходимую для получения солитонных импульсов, применялась пара призм из стекла SF10 [15] с расстоянием между ними  $\sim 48$  см, что обеспечивало дисперсию групповой скорости порядка  $-3000$  фс<sup>2</sup> за полный проход по резонатору. Устойчивый режим синхронизации мод был получен для обоих кристаллов при пропускании выходного зеркала 1.6 %.

Автокорреляционная функция и спектр выходного излучения  $\text{Yb} : \text{KYW}$ -лазера приведены на рис.6. Средняя выходная мощность лазера на кристалле  $\text{KYW} : \text{Yb}$  (30 %) составила 0.75 Вт на  $\lambda = 1040$  нм при длительности импульсов около 180 фс (рис.6, а, б). Импульсы были близки к спектрально ограниченным с произведением  $\Delta\nu\Delta t = 0.320$ , частота повторения импульсов равнялась 155 МГц, а пиковая мощность – 23 кВт. Средняя выходная мощность  $\text{Yb}$  (10 %) :  $\text{KYW}$ -лазера составила 0.63 Вт на  $\lambda = 1037$  нм при длительности импульсов около 197 фс (рис.6, в, г) и пиковой мощности 18 кВт.

В режиме синхронизации мод длина волны излучения лазера перестраивалась посредством внесения «ножа» в резонатор вблизи выходного зеркала. Для кристалла с концентрацией ионов иттербия 10 % диапазон перестройки составил 1030–1050 нм. Несколько меньший диапазон перестройки (1035–1053 нм) был получен при концентрации ионов иттербия 30 %.

В конфигурации, предназначенной для реализации непрерывного режима генерации, т. е. с высокоотражающим зеркалом вместо SESAM и без призм внутри резонатора, использовалось выходное зеркало с пропусканием 4.5 %. Максимальная выходная мощность была равна 1.46 Вт на  $\lambda = 1040$  нм и 1.62 Вт на  $\lambda = 1050$  нм при дифференциальной эффективности по поглощенной

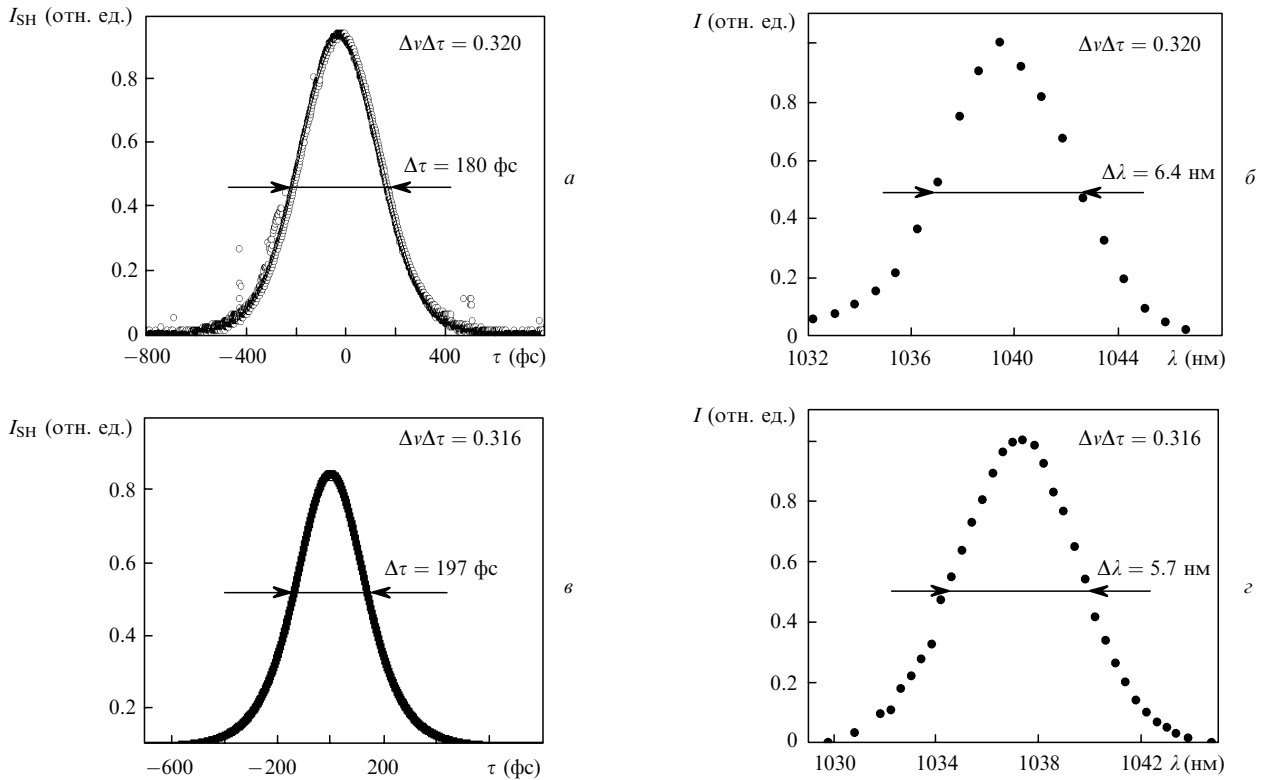


Рис.6. Экспериментальные (точки) и расчетные (линии) автокорреляционные функции (а, в), а также спектры излучения (б, г) Yb:KYW-лазеров с концентрацией ионов иттербия 30% (а, б) и 10% (в, г);  $I_{SH}$  – интенсивность излучения второй гармоники;  $I$  – спектральная интенсивность.

мощности накачки 52% и 47% для кристаллов KYW:Yb (10%) и KYW:Yb (30%) соответственно.

Выходные характеристики Yb:KYW-лазеров, работающих в непрерывном режиме, представлены на рис.7. Из-за сравнительно малого спектрального интервала (60–70 нм) между длинами волн накачки и генерации, потери на зеркале с  $R = 100$  мм составляли около 1% на длине волны генерации лазера. Это одна из причин, по которой эффективность генерации в непрерывном режиме в обоих кристаллах была ниже, чем в работах [3, 8].

Еще одной причиной являлось неоптимальное перекрытие пучка накачки (качество пучка  $M^2 \approx 18$ ) и TEM<sub>00</sub>-

моды резонатора, т. к. при диаметре перетяжки пучка 110 мкм рэлеевская длина (двойное расстояние, на котором размер пучка увеличивается в  $\sqrt{2}$  раз по сравнению с его размером в перетяжке) была меньше толщины кристалла и составляла около 1.8 мм. Более низкая эффективность генерации при концентрации ионов иттербия 30% (по сравнению с эффективностью при концентрации 10%) отчасти может быть объяснена более сильным локальным тепловыделением и снижением эффективности охлаждения, поскольку отвод тепла осуществляется через тонкие грани активного элемента.

Результаты, полученные в непрерывном режиме и режиме синхронизации мод, сведены в табл.2. Измеренные длительности импульсов превышают известные из литературы, т. к. параметры резонатора (включая компенсацию дисперсии) не были оптимизированы. Несмотря на это, данные результаты свидетельствуют о том, что существенного ухудшения генерационных характеристик Yb:KYW-лазера, связанных с высокой концентрацией ионов Yb<sup>3+</sup> как в непрерывном режиме, так и в режиме синхронизации мод, не наблюдается.

Табл.2. Результаты лазерных экспериментов на кристаллах KYW:Yb с различными концентрациями ионов Yb<sup>3+</sup>.

| $C$ (%) | $P_1$ (Вт) | $\eta$ (%) | $P_2$ (Вт) | $\tau$ (фс) | $f$ (МГц) | $\Delta\lambda$ (нм) |
|---------|------------|------------|------------|-------------|-----------|----------------------|
| 10      | 1.46       | 52         | 0.63       | 197         | 155       | 1030–1050            |
| 30      | 1.62       | 47         | 0.75       | 180         | 155       | 1035–1053            |

Примечания:  $C$  – атомная концентрация ионов Yb в KYW;  $P_1$  и  $P_2$  – средние выходные мощности в непрерывном режиме и в режиме синхронизации мод;  $\eta$  – эффективность по поглощенной мощности накачки;  $\tau$  – длительность импульсов;  $f$  – частота следования импульсов;  $\Delta\lambda$  – диапазон перестройки.

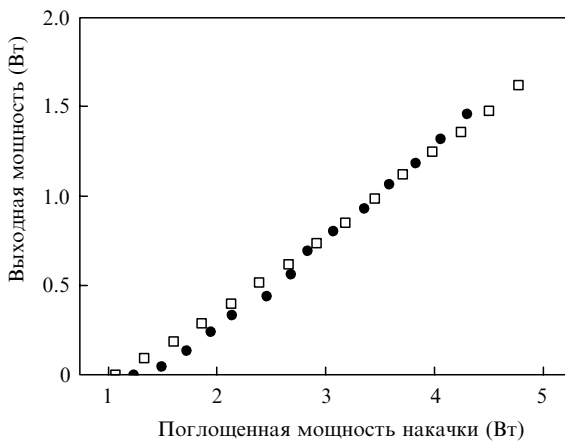


Рис.7. Выходные характеристики лазеров на кристаллах KYW:Yb (10%) (●) и KYW:Yb (30%) (□), работающих в непрерывном режиме, при дифференциальной эффективности генерации по поглощенной мощности 52% (●) и 47% (□).

#### 4. Заключение

Измерены времена жизни ионов  $\text{Yb}^{3+}$  в кристаллах  $\text{KYW} : \text{Yb}$  с различными степенями легирования при использовании суспензии порошков в этиленгликоле для подавления эффектов перепоглощения и полного внутреннего отражения. Измеренное время жизни составило 233 мкс при атомной концентрации  $\text{Yb}^{3+}$  до 30 %. Реализованы непрерывный режим генерации и режим пассивной синхронизации мод в лазере с диодной накачкой на основе кристалла  $\text{KYW} : \text{Yb}$  (30 %). Максимальная выходная мощность в непрерывном режиме была равна 1.62 Вт при эффективности по поглощенной мощности накачки 47 %. В режиме синхронизации мод получены импульсы длительностью 180 фс со средней выходной мощностью 0.75 Вт. Эти результаты свидетельствуют о том, что увеличение концентрации ионов  $\text{Yb}^{3+}$  до 30 % не приводит к концентрационному тушению люминесценции и практически не сказывается на генерационных характеристиках кристалла  $\text{KYW} : \text{Yb}$ .

1. Kuleshov N.V., Lagatsky A.A., Podlipensky A.V., Mikhailov V.P., Huber G. *Opt. Lett.*, **22** (17), 1317 (1997).
2. Lagatsky A.A., Kuleshov N.V., Mikhailov V.P. *Opt. Commun.*, **165**, 71 (1999).
3. Brunner F., Spühler G.J., Aus der Au J., Krainer L., Morier-Genoud F., Paschotta R., Lichtenstein N., Weiss S., Harder C., Lagatsky A.A., Abdolvand A., Kuleshov N.V., Keller U. *Opt. Lett.*, **25** (15), 1119 (2000).
4. Klopp P., Petrov V., Griebner U., Erbert G. *Opt. Express*, **10**, 108 (2002).
5. Lagatsky A.A., Rafilov E.U., Leburn C.G., Brown C.T.A., Xiang N., Okhotnikov O.G., Sibbett W. *Electron. Lett.*, **39**, 1108 (2003).
6. Brunner F., Südmeyer T., Innerhofer E., Morier-Genoud F., Paschotta R., Kisel V.E., Shcherbitsky V.G., Kuleshov N.V., Gao J., Contag K., Giesen A., Keller U. *Opt. Lett.*, **27** (13), 1162 (2002).
7. Liu H., Nees J., Mourou G. *Opt. Lett.*, **26** (21), 1723 (2001).
8. Lagatsky A.A., Brown C.T.A., Sibbett W. *Opt. Express*, **12**, 3928 (2004).
9. Pujol M.C., Bursukova M.A., Güell F., Mateos X., Sole R., Gavalda Jna., Aguilo M., Massons J., Diaz F., Klopp P., Griebner U., Petrov V. *Phys. Rev. B*, **65**, 165121-11 (2002).
10. Giesen A., Hügel H., Voss A., Wittig K., Brauch U., Opower H. *Appl. Phys. B*, **58**, 363 (1994).
11. Demidovich A.A., Kuzmin A.N., Ryabtsev G.I., Danailov M.B., Strek W., Titov A.N. *J. Alloys and Comp.*, **300-301**, 238 (2000).
12. Sumida D.S. et al. *Opt. Lett.*, **19** (17), 1343 (1994).
13. Keller U., Miller D.A.B., Boyd G.D., Chiu T.H., Ferguson J.F., Asom M.T. *Opt. Lett.*, **17**, 505 (1992).
14. Keller U., Weingarten K.J., Kärtner F.X., Kopf D., Braun B., Jung I.D., Fluck R., Hönninger C., Matuschek N., Aus der Au J. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **2**, 435 (1996).
15. Fork R.L., Martinez O.E., Gordon J.P. *Opt. Lett.*, **9** (5), 150 (1984).