

# Одномодовый тулиевый волоконный лазер мощностью 7 Вт с накачкой на длине волны 1230 нм

К.С.Кравцов, И.А.Буфетов, О.И.Медведков, Е.М.Дианов, М.В.Яшков, А.Н.Гурьянов

*Продемонстрирована возможность создания эффективного волоконного тулиевого лазера для области длин волн  $\lambda \approx 2$  мкм с накачкой в длинноволновое крыло линии поглощения  ${}^3H_6 \rightarrow {}^3H_5$  ионов  $Tm^{3+}$ . Максимальная выходная мощность одномодового тулиевого лазера с накачкой на  $\lambda = 1230$  нм составила 7 Вт на длине волны генерации 1956 нм при эффективности 35 % относительно мощности излучения накачки.*

**Ключевые слова:** волоконный лазер, ВКР-лазер, тулий.

## 1. Введение

Тулиевые волоконные лазеры являются в настоящее время одним из самых эффективных источников одномодового излучения в области длин волн около 2 мкм. Как и в волоконных лазерах на ионах  $Yb^{3+}$  и  $Nd^{3+}$ , для получения непрерывного лазерного излучения мощностью от нескольких ватт и выше в тулиевых волоконных лазерах используются световоды с двойной оболочкой. При этом излучение накачки вводится в первую оболочку, а выходное двухмикронное излучение распространяется по одномодовой сердцевине. Обычно используются следующие две схемы накачки:

1. Накачка лазера на световоде, легированном ионами  $Tm^{3+}$ , через первую оболочку излучением многомодовых лазерных диодов с длиной волны  $\sim 800$  нм.

2. Накачка лазера на световоде, легированном одновременно ионами  $Yb^{3+}$  и  $Tm^{3+}$ , через первую оболочку излучением многомодовых лазерных диодов с длиной волны 975 нм.

На рис.1 приведены схемы энергетических уровней ионов  $Yb^{3+}$  и  $Tm^{3+}$ . Лазерная генерация ( $\lambda \approx 2$  мкм) происходит на переходе ионов тулия  ${}^3F_4 \rightarrow {}^3H_6$ . Следует отметить, что на рис.1 используются обозначения уровней  $Tm^{3+}$ , приведенные, например, в [1] и отличающиеся от более распространенных порядком следования уровней  ${}^3F_4$  и  ${}^3H_4$ . Использование таких обозначений, с нашей точки зрения, более корректно.

При накачке по схеме 1 ионы  $Tm^{3+}$  возбуждаются из основного состояния  ${}^3H_6$  в состояние  ${}^3H_4$ . Затем, согласно анализу, проведенному в [2], из состояния  ${}^3H_4$  ионы переходят на верхний лазерный уровень  ${}^3F_4$  как путем комбинации излучательных и безызлучательных переходов, так и за счет кросс-релаксации с одновременным

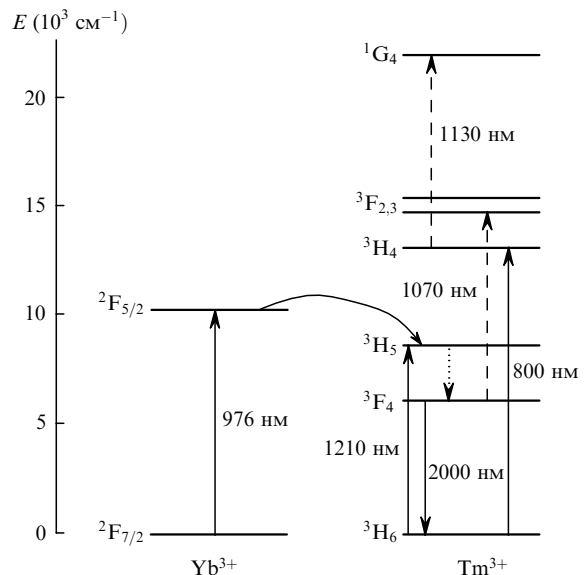


Рис.1. Схема энергетических уровней ионов  $Yb^{3+}$  и  $Tm^{3+}$ .

переходом одного иона вниз с уровня  ${}^3H_4$  на верхний лазерный уровень  ${}^3F_4$  и другого – вверх с основного уровня  ${}^3H_6$  также на верхний лазерный уровень  ${}^3F_4$ . Таким образом, в этой схеме заложена возможность достижения квантовой эффективности больше единицы, и действительно, в [3] была достигнута дифференциальная квантовая эффективность  $\sim 1.2$ , что соответствует энергетической дифференциальной эффективности  $\sim 49$  %.

При накачке по схеме 2 излучение на длине волны 975 нм сначала поглощается ионами  $Yb^{3+}$  на переходе  ${}^2F_{7/2} \rightarrow {}^2F_{5/2}$ , а затем возбуждение передается ионам тулия и переводит их в состояние  ${}^3H_5$  с последующим безызлучательным переходом на верхний лазерный уровень  ${}^3F_4$ . Максимальная дифференциальная эффективность, достигнутая таким способом, составила  $\sim 35$  % [3]. Накачка по этой схеме требует использования специального лазерного световода, содержащего одновременно ионы иттербия и тулия. Ее преимуществом является возможность использования систем накачки иттербиевых лазеров для накачки тулиевых.

К.С.Кравцов, И.А.Буфетов, О.И.Медведков, Е.М.Дианов. Научный центр волоконной оптики Института общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: iabuf@fo.gpi.ru

М.В.Яшков, А.Н.Гурьянов. Институт химии высокочистых веществ РАН, Россия, 603600 Н. Новгород, ул. Тропинина, 49

Поступила в редакцию 18 апреля 2004 г.

Существуют и другие возможности накачки ионов  $\text{Tm}^{3+}$ . Одна из них – использование линии поглощения  ${}^3\text{H}_6 \rightarrow {}^3\text{H}_5$  ионов  $\text{Tm}^{3+}$  с центром около  $\lambda = 1.21$  мкм. Максимальное сечение поглощения в этой полосе примерно в 2 раза меньше, чем в полосе  ${}^3\text{H}_6 \rightarrow {}^3\text{H}_4$ , кроме того, в настоящее время отсутствуют мощные лазерные диоды с длиной волны излучения в этой области. Однако полоса поглощения 1.21 мкм достаточно широка (примерно 1–1.3 мкм), поэтому для накачки тулиевых лазеров можно использовать различные одномодовые источники излучения в этой области для ввода излучения накачки непосредственно в сердцевину световода, легированного ионами  $\text{Tm}^{3+}$ . Такая возможность исследовалась как теоретически [4], так и экспериментально при накачке одномодовым излучением ( $\lambda = 1064$  нм) неодимового лазера [5] и излучением ( $\lambda = 1210$  нм) волоконного ВКР-лазера [6].

Принципиальная возможность получения излучения мощностью в единицы ватт при накачке в полосу  ${}^3\text{H}_6 \rightarrow {}^3\text{H}_5$  излучением твердотельного Nd:YAG-лазера ( $\lambda = 1064$  нм) была впервые продемонстрирована в [5]. При выходной мощности 1 Вт на длине волны 2 мкм эффективность преобразования составила 27% (дифференциальная эффективность 37%). Однако наличие в области  $\lambda = 1.1$  мкм линии поглощения из возбужденного состояния (см. рис.2), может накладываться, по-видимому, существенные ограничения на КПД подобных схем. Отметим, что положение и форма полос поглощения существенно определяются составом стекла сердцевины световода. Поэтому при сравнении результатов различных работ необходимо учитывать возможное влияние состава световодов.

Более высокой эффективности генерации можно ожидать при использовании длин волн накачки, удаленных от полос поглощения излучения из возбужденного состояния. Так, при накачке одномодовым излучением на  $\lambda = 1.57$  мкм в полосу поглощения  ${}^3\text{H}_6 \rightarrow {}^3\text{F}_4$  максимальная дифференциальная эффективность генерации составила 71% [7]. Разумеется, здесь сказывается и то обстоятельство, что при накачке в указанную полосу стоксовы потери минимальны. Однако излучение в области 1.6 мкм может быть получено, главным образом, с помощью эрбиевого волоконного лазера, который сам не отличается высокой эффективностью, или с помощью

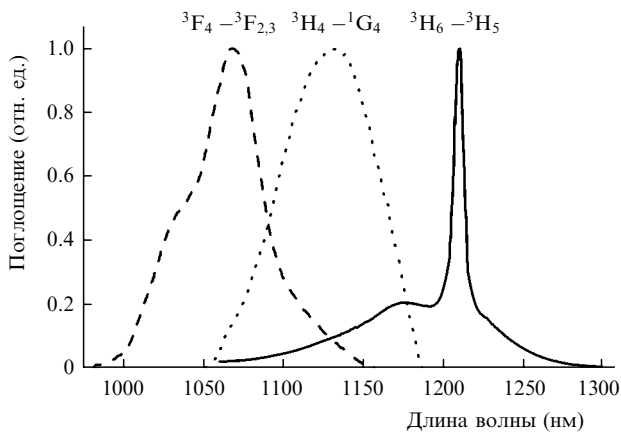


Рис.2. Зависимость нормированного коэффициента поглощения тулиевого световода, использовавшегося в настоящей работе, от длины волны в области около 1200 нм, соответствующей переходу  ${}^3\text{H}_6 \rightarrow {}^3\text{H}_5$  (сплошная линия), а также примерное положение полос поглощения из возбужденного состояния [4].

каскадных ВКР-лазеров, преобразующих излучение иттербиевого лазера. В то же время из-за большой разности соответствующих частот требуется, по-видимому, не менее трех ВКР-каскадов преобразования (даже при использовании двух каскадов со стоксовым сдвигом частоты  $1330 \text{ см}^{-1}$  в фосфоросиликатных световодах), что снижает полную эффективность такой схемы накачки.

Еще одна возможность накачки тулиевого лазера состоит в использовании волоконных ВКР-лазеров для смещения длины волны генерации иттербиевого волоконного лазера за пределы полос поглощения из возбужденного состояния ионов тулия (но в пределах полосы  ${}^3\text{H}_6 \rightarrow {}^3\text{H}_5$ ). Впервые подобная схема накачки тулиевого лазера была применена в работе [6]. Использование для сдвига длины волны накачки трехкаскадного волоконного ВКР-лазера на германатном световоде позволило достичь выходной мощности 400 мВт на длине волны 1790 нм. При этом активным элементом служил световод, легированный ионами тулия и гольмия, но генерация наблюдалась на переходах ионов  $\text{Tm}^{3+}$ . Эффективность генерации составила 18%, а дифференциальная эффективность – 23%. Возможно, такие низкие значения эффективности обусловлены тем, что длина волны накачки в этом случае недостаточно удалена от полос поглощения из возбужденного состояния (положение которых известно только приблизительно).

Представляет интерес исследование лазера на тулиевом световоде с накачкой, лежащей в области длинноволнового крыла линии поглощения  ${}^3\text{H}_6 \rightarrow {}^3\text{H}_5$ , наиболее удаленной от возможного положения линий поглощения ионов тулия из возбужденного состояния. Настоящая работа посвящена исследованию такого лазера с накачкой на длине волны 1.23 мкм.

## 2. Волоконный ВКР-лазер на $\lambda = 1231$ нм

В качестве источника излучения накачки для тулиевого лазера использовался однокаскадный волоконный ВКР-лазер, который, в свою очередь, накачивался одномодовым излучением волоконного иттербиевого лазера. ВКР-лазер был изготовлен на основе фосфоросиликатного световода длиной 50 м. Брэгговские решетки показателя преломления были записаны непосредственно в световоде, что позволило получить высокую эффективность преобразования. Более подробное описание конструкции лазера приведено в работе [8] (где он обозначен как 1L1). Источником накачки ВКР-лазера в настоящих экспериментах служил непрерывный одномодовый волоконный иттербиевый лазер с длиной волны 1058 нм и выходной мощностью до 32 Вт. Схема экспериментальной установки показана на рис.3.

Благодаря использованию для накачки ВКР-конвертора иттербиевого лазера с большей, чем в работе [8] (там максимальная мощность накачки составляла 5 Вт), выходной мощностью, нам удалось получить на выходе ВКР-лазера значительно большие (до 20 Вт) мощности на длине волны 1231 нм. И хотя при такой выходной мощности спектр излучения лазера значительно уширяется по сравнению со спектром при мощности  $\sim 1$  Вт (см. рис.4), это обстоятельство практически не приводит к снижению эффективности преобразования. Зависимость выходной мощности ВКР-лазера от мощности накачки остается линейной вплоть до 20 Вт без признаков насыщения (см. рис.5).

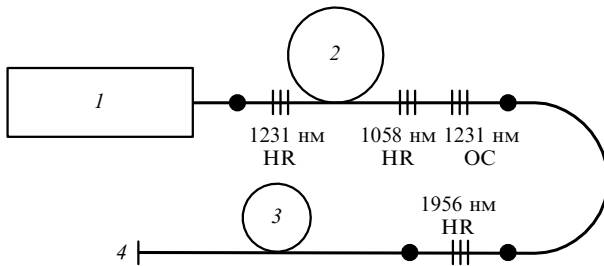


Рис.3. Схема тулиевого лазера:

1 – одномодовый волоконный иттербиевый лазер с длиной волны 1058 нм; 2 – фосфоросиликатный световод; 3 – тулиевый световод; 4 – выходной торец тулиевого световода. На схеме показаны места сварки (точки) и брэгговские решетки показателя преломления (HR – решетка с высоким коэффициентом отражения, ОС – выходная решетка).

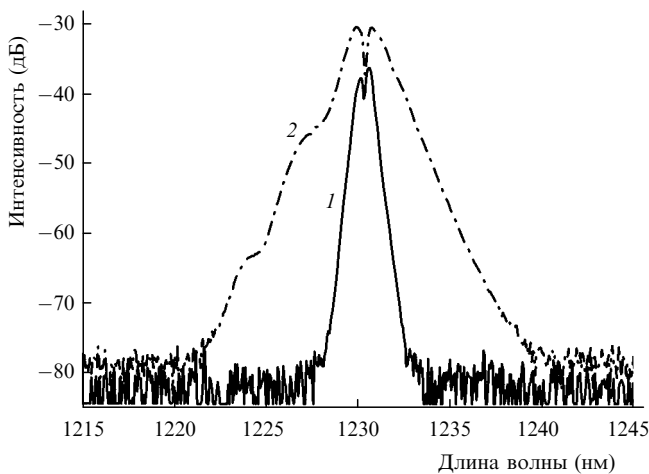
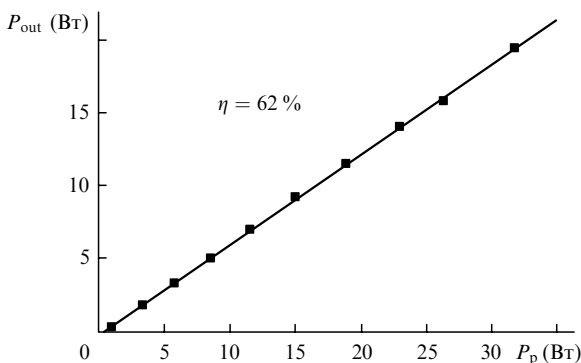


Рис.4. Спектры генерации ВКР-конвертора при выходной мощности 1.15 (1) и 12.3 Вт (2).

Рис.5. Зависимость выходной мощности однокаскадного волоконного ВКР-лазера ( $\lambda = 1231$  нм) от мощности излучения накачки ( $\lambda = 1058$  нм). Эффективность ВКР-лазера  $\eta = 62\%$ .

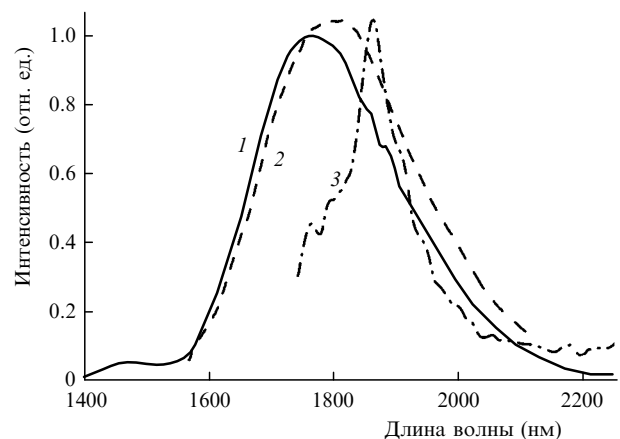
### 3. Волоконный тулиевый лазер

В наших экспериментах в качестве активного элемента тулиевого лазера использовался волоконный световод на основе кварцевого стекла, сердцевина которого была легирована  $Al_2O_3$  с весовым содержанием 4%,  $GeO_2$  – 1.5% и  $Tm_2O_3$  – 0.8%. Световод был изготовлен методом MCVD, все легирующие элементы вводились из газовой фазы. Диаметр сердцевины составлял 16 мкм, длина волны отсечки второй моды была равна  $\sim 3.0$  мкм. Спектральная зависимость нормированного на единицу

коэффициента поглощения излучения, распространяющегося по сердцевине, в районе  $\lambda \approx 1200$  нм представлена на рис.2. Максимальное значение коэффициента составляет 185 дБ/м. Большая ширина линии поглощения  ${}^3H_6 \rightarrow {}^3H_5$  позволяет эффективно поглощать накачку в диапазоне длин волн 1050–1270 нм. Но, как следует из рис.2, спектры поглощения из возбужденного состояния сильно перекрываются со спектром этой линии, что может значительно ограничивать эффективность генерации лазера. Для наших экспериментов мы выбрали длину волны 1231 нм, находящуюся в длинноволновом крыле линии поглощения  ${}^3H_6 \rightarrow {}^3H_5$ , достаточно удаленную от полюс поглощения из возбужденного состояния.

Спектр люминесценции используемого нами световода в районе 2 мкм при накачке на длине волны 1.23 мкм представлен на рис.6. Излучение люминесценции регистрировалось в перпендикулярном оси световода направлении, что позволило практически полностью избежать эффектов перепоглощения. Максимум линии люминесценции соответствует длине волны 1765 нм. Отметим, что в тулиевом световоде, исследованном в [5], максимум люминесценции наблюдался на длине волны 1860 нм, а по данным о сечении люминесценции из работы [4] – на 1800 нм. По-видимому, это связано, в первую очередь, с различием химических составов сердцевины используемых световодов. Однако обращает на себя внимание и существенное различие формы спектров люминесценции, представленных кривыми 1, 2 и 3. Значительно более узкая линия 3 свидетельствует, по-видимому, о меньшем неоднородном уширении линии, что указывает на более высокий уровень упорядоченности структуры световода, содержащего ионы тулия, в [5].

Измеренное нами время жизни верхнего лазерного уровня  ${}^3F_4$  оказалось равным 670 мкс. Измерения проводились с помощью фотоприемника на основе PbS с временным разрешением не хуже 25 мкс. Для выделения излучения люминесценции, соответствующего переходу  ${}^3F_4 \rightarrow {}^3H_6$ , на фоне излучения накачки и люминесценции других переходов использовался германиевый фильтр. При возбуждении люминесценции излучением на длине волны 1.23 мкм ее спад практически не отличался от экспоненциального. Измеренное нами время жизни уровня  ${}^3F_4$  (670 мкс) значительно отличается от значений, полученных в [5] (200 мкс) и в [9] (500 мкс). По-видимому,

Рис.6. Спектры люминесценции перехода  ${}^3F_4 \rightarrow {}^3H_6$ :

1 – спектр используемого нами световода; 2 – спектр, вычисленный по данным о сечении люминесценции из [4]; 3 – спектр из работы [5].

времена жизни, так же как и спектры люминесценции, очень сильно зависят от состава стекла и в разных световодах могут различаться более чем в три раза.

Коэффициент поглощения слабого сигнала на длине волны накачки (1231 нм) в тулиевом световоде равнялся 27 дБ/м. Резонатор лазера был образован брэгговской решеткой показателя преломления со стороны ввода излучения накачки и сколом торца световода – с противоположной стороны. Длина волны генерации в такой схеме определялась резонансной длиной волны брэгговской решетки, составлявшей в наших экспериментах 1956 нм. Длина активного световода подбиралась экспериментально с целью достижения максимальной эффективности и оказалась равной ~1 м. При этом практически вся мощность излучения накачки, введенного в световод, поглощалась ионами тулия.

Пороговая мощность накачки в описанной схеме была равна 860 мВт. Дифференциальная эффективность (по отношению к мощности излучения накачки, введенного в тулиевый световод) составила 37 % (рис.7); соответствующая квантовая эффективность была равна 59 %. Максимальная полученная выходная мощность достигала 7.0 Вт на длине волны 1956 нм при мощности накачки 20 Вт (эффективность 35 %). Спектральная ширина линии генерации определялась шириной линии отражения брэгговской решетки показателя преломления и составляла около 1 нм. Генерация происходила в одномодовом режиме, несмотря на сравнительно большую длину волны отсечки второй моды используемого световода.

С практической точки зрения важным является вопрос, можно ли использовать излучение самого иттербиевого лазера для накачки тулиевых лазеров. Такая возможность позволила бы исключить из схемы ВКР-конвертор и получить большую мощность накачки, а также более высокую эффективность всей системы в целом.

Однако, как уже упоминалось и многократно обсуждалось в литературе [4, 5], особенности системы уровней иона  $Tm^{3+}$  приводят к значительному поглощению из возбужденного состояния. Его переходы  ${}^3F_4 \rightarrow {}^3F_{2,3}$  и  ${}^3H_4 \rightarrow {}^1G_4$  обладают широкими линиями поглощения с центрами приблизительно на 1070 и 1130 нм соответственно (см. рис.2). Поэтому поглощение излучения накачки с длиной волны в районе 1100 нм вызывает трехсту-

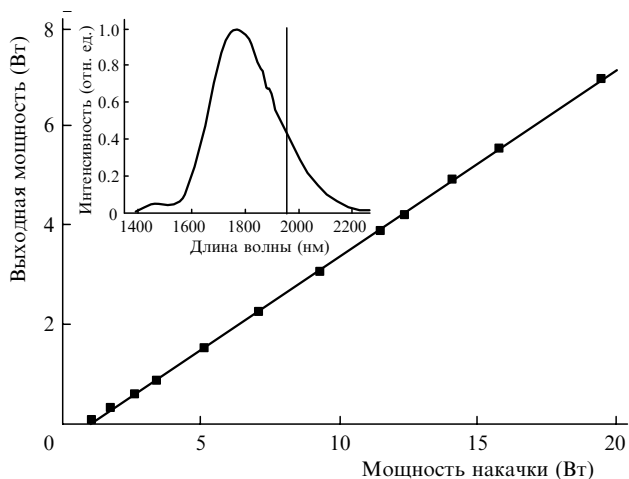


Рис.7. Зависимость выходной мощности тулиевых лазеров от мощности излучения накачки. На врезке показано относительное положение линии люминесценции ионов тулия и линии генерации лазера.

пенчатый процесс возбуждения, в результате которого значительно заселяется уровень  ${}^1G_4$ . Визуально это выражается в синем свечении, порождаемом переходами  ${}^1G_4 \rightarrow {}^3H_6$  (рис.8).

Для экспериментальной проверки возможности использования излучения иттербиевого волоконного лазера в качестве источника накачки, а также влияния описанных процессов на лазерную генерацию, мы использовали одномодовый иттербиевый волоконный лазер с длиной волны 1085 нм. Хотя эта длина волны расположена на краю линии поглощения ионов  $Tm^{3+}$ , излучение накачки поглощается сравнительно хорошо; коэффициент поглощения в используемом нами световоде составил для слабого сигнала 6 дБ/м.

При такой длине волны накачки и мощности до 3.5 Вт генерация на  $\lambda = 1.95$  мкм не возникала; при этом наблюдалась значительно более яркая синяя люминесценция, нежели при работе с накачкой на  $\lambda = 1.23$  мкм. Кроме того, не наступало заметного просветления среды, типичного для высоких мощностей накачки. Все наблюдаемые явления свидетельствуют о том, что ионы  $Tm^{3+}$ , находящиеся на верхнем лазерном уровне  ${}^3F_4$ , активно поглощают излучение накачки и совершают переход  ${}^3F_4 \rightarrow {}^3F_{2,3}$ . При этом населенность уровня  ${}^3F_4$  не может стать достаточной для создания усиления, необходимого для начала генерации.

Поглощение излучения накачки на длине волны 1085 нм ионами, находящимися на верхнем лазерном уровне  ${}^3F_4$ , наблюдалось нами в следующем эксперименте. Непрерывное излучение накачки мощностью ~230 мВт с помощью механического модулятора с временем переключения ~5 мкс преобразовывалось в последовательность прямоугольных импульсов длительностью около 5 мс. Интервалы между импульсами были равны их длительности. Промодулированное излучение вводилось в тулиевый световод длиной около 30 см, и наблюдалась зависимость мощности излучения накачки на выходе из световода от времени (см. рис.9). На осциллограмме видно, что в момент включения накачки мощность нарастает до максимума, а затем, по мере заселения уровня  ${}^3F_4$ , снижается до стационарного значения вследствие появления дополнительного поглощения из возбужденного состояния. Причем это дополнительное поглощение существенно превышает уменьшение поглощения из-

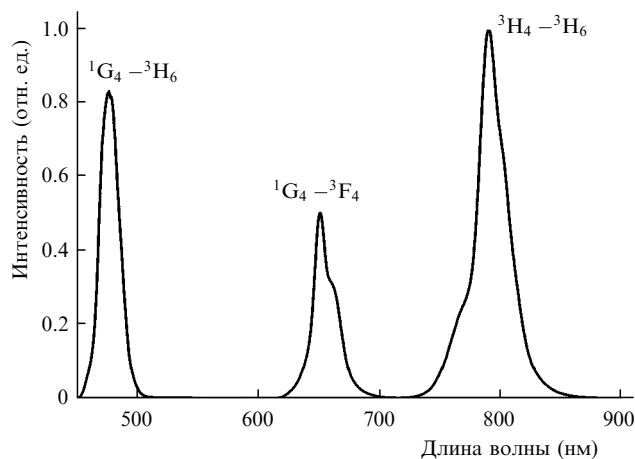


Рис.8. Спектры люминесценции исследуемого световода, легированного ионами  $Tm^{3+}$ , в видимой и ближней ИК областях при возбуждении на длине волны 1085 нм.

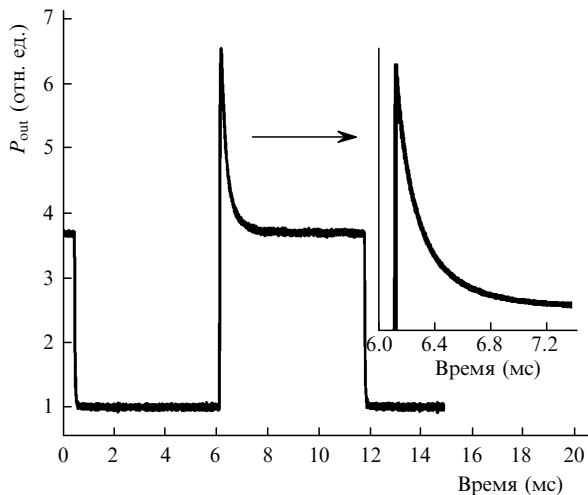


Рис.9. Зависимость мощности накачки от времени на выходе тулиевого световода длиной  $\sim 30$  см при накачке прямоугольными импульсами на длине волны 1085 нм. На врезке показано снижение прошедшей мощности накачки с лучшим разрешением по времени.

за частичного опустошения основного уровня. Таким образом, данный эксперимент является прямой демонстрацией проявления значительного поглощения из возбужденного состояния при накачке в районе 1100 нм.

Как уже упоминалось, в [5] была получена генерация в световоде, легированном ионами тулия, при длине волны излучения накачки 1064 нм, близкой к используемой в наших экспериментах. В отличие от наших результатов генерация характеризовалась низкой пороговой мощностью накачки (600 мВт) и сравнительно высокой эффективностью. Это различие, по-видимому, можно объяснить следующим образом. Во-первых, в [5] для снижения инверсной населенности использовался резонатор с низким коэффициентом пропускания выходного зеркала. Во-вторых, спектр люминесценции ионов  $Tm^{3+}$  в световоде [5] был настолько уже спектра люминесценции в нашем световоде и спектров люминесценции в ряде других работ [4, 6], что, вероятно, и процессы перепоглощения излучения накачки в нем существенно различались из-за значительно меньшего уширения линий переходов.

Таким образом, наши эксперименты свидетельствуют о серьезных трудностях, возникающих при использовании излучения с длиной волны в районе 1070 нм для на-

качки волоконных тулиевых лазеров с активным световодом на основе алюмосиликатного стекла.

#### 4. Заключение

Полученные результаты свидетельствуют о возможности получения больших мощностей генерации в области 2 мкм в волоконном лазере на ионах  $Tm^{3+}$  в сердцевине алюмосиликатного световода при накачке в длинноволновое крыло линии поглощения  ${}^3H_6 \rightarrow {}^3H_5$ . В случае накачки в коротковолновое крыло этой линии поглощение из возбужденного состояния препятствует эффективной генерации.

С использованием излучения накачки с длиной волны, значительно удаленной от линий поглощения из возбужденного состояния, нами получена лазерная генерация в районе  $\lambda = 2$  мкм. Мощность одномодового тулиевого волоконного лазера с длиной волны 1956 нм составила 7 Вт. В качестве источника накачки с  $\lambda = 1231$  нм использовался волоконный ВКР-лазер мощностью 20 Вт. Квантовая эффективность по отношению к введенной мощности накачки была равна 59%. Данная схема накачки фактически позволяет получать генерацию на длине волны в области 2 мкм с помощью диодных источников, предназначенных для накачки иттербиевых лазеров, не применяя специальных световодов, легированных одновременно ионами Yb и Tm. Прямое использование излучения с длиной волны 1085 мкм для накачки тулиевого лазера с активным световодом на основе алюмосиликатного стекла не эффективно из-за значительного поглощения из возбужденного состояния.

1. Digonnet M.J.F. *Rare Earth Doped Fiber Lasers and Amplifiers* (New York: Marcel Dekker, 1993).
2. Jackson S.D. *Opt. Commun.*, **230**, 197 (2004).
3. Jackson S.D. *Opt. Lett.*, **28**, 2192 (2003).
4. Jackson S.D., King T.A. *J. Lightwave Technol.*, **17**, 948 (1999).
5. Hanna D.C., Perry I.R., Lincoln J.R., Townsend J.E. *Opt. Commun.*, **80**, 52 (1990).
6. Taniguchi A., Kuwayama T., Shirakawa A., et al. *Appl. Phys. Lett.*, **81**, 3723 (2002).
7. Yamamoto T., Miyajima Y., Komukai T. *Electron. Lett.*, **30**, 220 (1994).
8. Bufetov I.A., Bubnov M.M., Larionov Y.V., et al. *Laser Phys.*, **13**, 234 (2003).
9. Barnes W.L., Townsend J.E. *Electron. Lett.*, **26**, 746 (1990).