

Комбинированный непрерывный одночастотный кольцевой лазер на красителях/титан-сапфире

С.М.Кобцев, В.И.Барауля, В.М.Луниин

Представлен новый комбинированный непрерывный одночастотный лазер на красителях/титан-сапфире с горизонтальной ориентацией плоскости кольцевого резонатора и улучшенной стабильностью частоты генерации. Кратковременная ширина линии излучения не превышает 10 кГц для титан-сапфирового лазера и составляет менее 100 кГц для лазера на красителях, скорость дрейфа линии излучения не превышает 25 МГц/ч. Приведены схемные и конструктивные решения разработанного лазера, позволяющие легко переключать его между твердотельной и жидкостной конфигурациями.

Ключевые слова: непрерывный одночастотный кольцевой лазер, лазер на красителях, лазер на титан-сапфире, стабилизация частоты генерации лазера.

1. Введение

Лазеры на красителях и на титан-сапфире характеризуются возможностью перестройки длины волны излучения в широких спектральных диапазонах, которые являются одними из наибольших для перестраиваемых лазеров. Спектральные диапазоны этих лазеров пересекаются в области 700–800 нм, однако, как правило, при работе с длинами волн излучения свыше 700 нм исследователи предпочитают титан-сапфировый лазер как более эффективный и простой для этой области длин волн; область с $\lambda < 700$ нм традиционно остается за лазером на красителях. Идея создания комбинированного перестраиваемого лазера на базе титан-сапфирового лазера и лазера на красителях вполне естественна, поскольку такой лазер способен перекрыть значительную спектральную область, включающую видимый диапазон и ближнюю ИК область.

Создание комбинированного перестраиваемого источника излучения на базе этих лазеров особенно целесообразно в случае непрерывных лазеров, которые весьма схожи по используемым селектирующим элементам и имеют аналогичные схемные решения (активная среда размещается между двумя короткофокусными сферическими зеркалами и т. д.). Еще одним важным доводом в пользу создания комбинированного лазера является то, что лазеры накачки, используемые для лазера на титан-сапфире, могут применяться и для лазера на многих красителях.

До настоящего времени существовала только одна разработка комбинированного непрерывного одночастотного кольцевого лазера на красителях и титан-сапфире,

реализованная компанией Coherent в моделях серии 899. Впервые резонатор такого лазера был представлен в конфигурации лазера на красителях в работе [1], а затем на его основе был создан комбинированный жидкостно-твердотельный лазер [2]. Основным компонентом конструкции этого лазера является массивный инваровый стержень, к которому крепятся держатели всех оптических элементов, образующих вертикальный резонатор лазера. Большинство элементов расположено вблизи несущего инварового стержня, однако часть элементов резонатора находится на некотором удалении от него, что, конечно, ухудшает пассивную стабильность резонатора. Ширина линии излучения этого лазера в режиме стабилизации частоты излучения составляет примерно 500 кГц, скорость дрейфа линии излучения не превышает 50 МГц/ч [3]. Во времена разработки данного лазера, более двух десятков лет назад, эти параметры считались «передовыми», однако сегодня некоторые модели даже коммерческих титан-сапфировых лазеров [4, 5] обеспечивают ширины линий излучения менее 100 кГц.

Целью настоящей работы являлось создание комбинированного непрерывного одночастотного кольцевого лазера нового поколения на красителях/титан-сапфире с улучшенными параметрами излучения лазеров обоих типов. В данной работе впервые проводятся подробные результаты экспериментальных испытаний этого лазера.

2. Конфигурация разработанного лазера

В качестве базовой схемы резонатора комбинированного лазера мы использовали схему титан-сапфирового лазера, предложенную в [6]. Отличительной чертой и преимуществом схемы кольцевого резонатора этого лазера является отсутствие супертонкой кварцевой двулучепреломляющей пластинки, традиционно применяемой совместно с фарадеевским элементом в других кольцевых лазерах [2, 4] для создания режима генерации одной бегущей волны. Поворот плоскости поляризации излучения в описанном в [6] резонаторе осуществляется с по-

С.М.Кобцев, В.И.Барауля. Новосибирский государственный университет, Россия, 630090 Новосибирск, ул. Пирогова, 2; e-mail: kobtsev@lab.nsu.ru

В.М.Луниин. ЗАО «Техноскан», Россия, 630058 Новосибирск, ул. Сиреневая, 37, корп. 141; e-mail: service@tekhnoscan.com

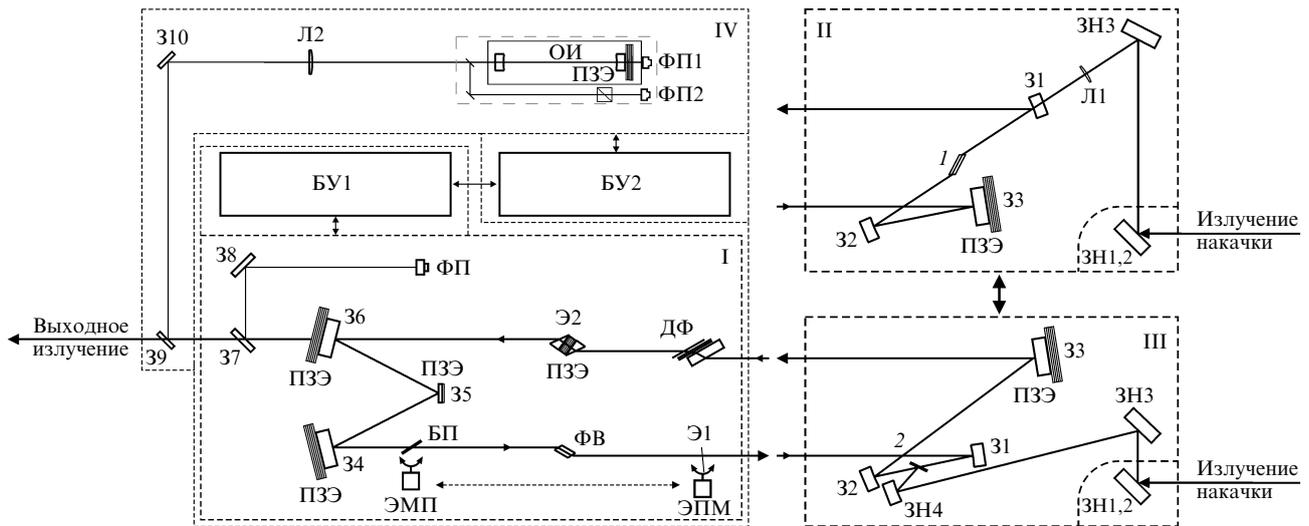


Рис.1. Схема комбинированного частотно-стабилизированного непрерывного одночастотного кольцевого лазера на красителях и титан-сапфире (I – часть схемы лазера, используемая в обеих конфигурациях комбинированного лазера, II – подключаемая часть схемы титан-сапфирового лазера, III – подключаемая часть схемы лазера на красителях, IV – система стабилизации частоты генерации лазера по опорному интерферометру (ОИ));

БУ1 – электронный блок управления лазером; БУ2 – электронный блок управления системой стабилизации частоты генерации; 1 – кристалл титан-сапфира; 2 – струя раствора красителя; ЗН1 – 4 – зеркала для заведения излучения накачки; 31,2 – сферические зеркала резонатора лазера; 33 – 6 – плоские зеркала резонатора лазера (зеркало 35 выведено из плоскости резонатора); ДФ – двулучепреломляющий фильтр; Э1,2 – тонкий и толстый эталоны Фабри-Перо; ФВ – фарадеевский вращатель; БП – брьюстеровская пластинка; ЭМП – электромеханический привод; ПЗЭ – пьезоэлемент; ФП – фотоприемник блока управления лазером; ФП1,2 – фотоприемники системы стабилизации частоты; Л1,2 – линзы; 37 – 10 – вспомогательные зеркала.

мощью зеркала, выведенного из плоскости резонатора. Кроме того, конфигурация лазера позволяет легко реализовать генерацию в линейном резонаторе, в том числе со всеми селектирующими элементами и даже с фарадеевским вращателем, что важно для предварительной оптимизации настройки этих элементов.

Идея реализации лазера на красителях на базе данной схемы заключается в размещении струи раствора красителя в коротком плече резонатора (см. схему резонатора на рис.1). Из промежуточного (по длине) плеча резонатора убирается титан-сапфировый кристалл, сферическое зеркало 31 резонатора титан-сапфирового лазера заменяется плоским (зеркало 33 резонатора лазера на красителях), а плоское зеркало 33 резонатора титан-сапфирового лазера – сферическим (зеркало 31 резонатора лазера на красителе). Кроме того, сферическое зеркало 32 (для титан-сапфирового лазера $R = 100$ мм) заменяется сферическим зеркалом с $R = 75$ мм, и пучок накачки заводится в струю раствора красителя с помощью дополнительного сферического зеркала ЗН4. При этом положение большинства держателей оптических элементов комбинированного лазера при переключении лазера из одной конфигурации в другую и наоборот остается неизменным (часть I на рис.1).

Таким образом, переключение резонатора из конфигурации лазера на красителях в конфигурацию титан-сапфирового лазера и наоборот производится заменой зеркал резонатора, фарадеевского вращателя и перестановкой нескольких держателей оптических элементов. При этом двулучепреломляющий фильтр и толстый эталон могут быть использованы для обеих конфигураций комбинированного лазера. Предложенная схема удобна также тем, что в обеих конфигурациях лазер может работать как с кольцевым резонатором, так и с линейным. Возможность генерации обоих лазеров в случае линей-

ного резонатора (без зеркала 35) существенно упрощает предварительную оптимизацию настройки резонатора и селекторов. Электронные системы управления и системы стабилизации частоты излучения обоих лазеров идентичны.

3. Вертикальное направление струи раствора красителя

Вертикальное направление струи раствора красителя накладывает ограничения на расстояние h от сопла до точки соприкосновения струи со стенкой сливной трубки

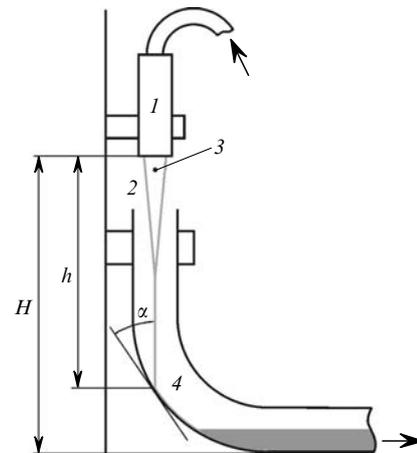


Рис.2. Геометрия вертикального потока раствора красителя в разработанном лазере:

1 – сопло; 2 – струя раствора красителя; 3 – точка падения пучка накачки на струю; 4 – сливная трубка; h – расстояние от сопла до точки соприкосновения струи со стенкой сливной трубки; H – высота сопла над опорной плоскостью.

(рис.2). При вертикально направленной струе это расстояние должно быть минимальным, т. к. увеличение h является, по сути, увеличением высоты сопла над оптическим столом, а значит, и расстояния между ним и плоскостью резонатора лазера. Последнее ведет в общем случае к уменьшению стабильности положения оптических элементов резонатора. При минимизации расстояния h типичной проблемой является вспенивание раствора красителя в месте падения струи и его нежелательное насыщение пузырьками воздуха. В разработанном лазере эта проблема решена при относительно небольшом расстоянии h (~ 90 мм) в результате нахождения оптимальных условий падения струи на стенку сливной трубки. Минимизация угла α между струей и касательной к стенке сливной трубки в месте соприкосновения струи со стенкой (рис.2), а также ограничение скорости потока раствора величиной ~ 15 м/с, достаточной для высокоэффективной генерации при мощностях излучения накачки до 10 Вт, позволяют избежать образования пузырьков воздуха при падении струи на поверхность сливной трубки. При этом высота H сопла над опорной плоскостью, на которой расположен лазер, составляет 110–115 мм.

Следствием относительно небольшого расстояния h могут также являться дополнительные вибрации струи, приводящие к увеличению ширины линии генерации лазера. Однако, как это показано ниже, вертикальное направление струи не ухудшает стабильности генерационных характеристик лазера; более того, при оптимизированных параметрах сопла такой лазер способен обеспечить более узкую линию излучения по сравнению с лазерами, в которых используется горизонтально ориентированная струя раствора красителя.

4. Стабилизация частоты излучения лазера

Горизонтальная ориентация плоскости резонатора комбинированного лазера предпочтительнее и с точки зрения улучшения пассивной стабильности частоты лазера (в случае, когда он работает без системы стабилизации частоты). В режиме свободной генерации ширина линии излучения лазера не превышает 5 МГц для титан-сапфирового лазера и 10 МГц для лазера на красителях.

Дальнейшее сужение линии генерации лазера осуществляется с помощью системы стабилизации частоты излучения по склону пика пропускания термостатированного интерферометра с областью свободной дисперсии 750 МГц и спектральной резкостью до 400 (типичная ширина склона пика пропускания интерферометра составляет ~ 2 МГц). Интерферометр размещается рядом с лазером на оптическом столе, к которому он крепится через виброизолирующие резиновые прокладки.

Стабилизация частоты излучения комбинированного лазера производится с использованием двух цепей обратной связи – быстрой и медленной. Ширина частотной полосы обработки системы стабилизации составляет ~ 100 кГц, исполняющим элементом является маленькое зеркало (35) на тонкой пьезокерамике. Относительно широкая частотная полоса обработки системы стабилизации позволяет эффективно сузить линию генерации титан-сапфирового лазера до ~ 20 кГц (аналогичные ширины линии генерации были получены в [7, 8]), при этом в спектре остаточных возмущений частоты генерации нашего лазера превалирует двухкилогерцовая компонента, вызванная модуляцией базы толстого эталона

Э2 на этой частоте (эта модуляция используется автоматической системой привязки максимума пропускания толстого эталона к частоте генерации лазера). Для достижения ширины линий излучения менее 20 кГц мы с целью подавления остаточной двухкилогерцовой модуляции частоты генерации титан-сапфирового лазера использовали дополнительный электронный контур. Назначение контура состоит в том, что на пьезоэлементы зеркал резонатора лазера подается малый противофазный сигнал на частоте 2 кГц (его амплитуда и фаза регулируются), который в точности компенсирует эту остаточную модуляцию и позволяет сузить линию излучения титан-сапфирового лазера примерно до 10 кГц. Наименьшая ширина линии излучения, полученная нами в титан-сапфировом лазере, составила 7 кГц.

Лазер на красителях обладает более богатым спектром возмущений частоты излучения из-за остаточных дрожаний струи раствора красителя, в том числе высокочастотных, поэтому обычно ширина его линии излучения больше, чем у титан-сапфирового лазера. Кроме того, ширина линии излучения лазера на красителях зависит от скорости струи раствора красителя. На рис.3 приведены экспериментальные зависимости ширины линии и выходной мощности излучения лазера на красителях от давления раствора красителя на входе в сопло. Зависимость ширины линии излучения достигает наименьших среднеквадратичных значений (около 80 кГц) при минимальных давлениях раствора, в то время как выходная мощность лазера с увеличением давления растет. Компромисс достигается в области давлений раствора красителя 1.5–1.6 атм (скорость струи составляет при этом 12–13 м/с) при ширинах линии излучения лазера на красителях 90–105 кГц и выходной мощности излучения 1.3–1.35 Вт. Ширина линии излучения лазера на красителях также достаточно чувствительна к конструкции сопла. На рис.4 приведены спектры остаточных шумов частоты излучения лазера на красителях для двух конструкций сопел – кварцевого с сечением выходной щели 3.5×0.25 мм и сапфирового с сечением щели 5×0.3 мм, обеспечивающих скорость истечения струи на уровне 10–12 м/с. Видно, что в лазере с кварцевым соплом спектр остаточных шумов имеет максимум в области частот возмущений 20–40 кГц, которые слабо обрабатываются системой стабилизации. В результате ширина линии излучения лазера с этим соплом составляет 200 кГц. Ширина линии излучения лазера с сапфировым соплом в тех

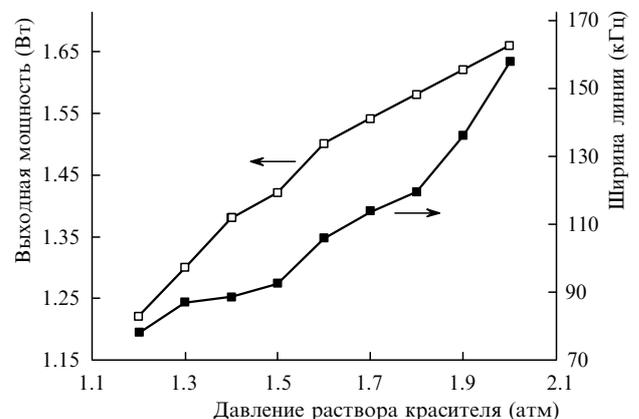


Рис.3. Зависимости ширины линии и выходной мощности излучения лазера на красителях от давления раствора красителя на входе в сопло.

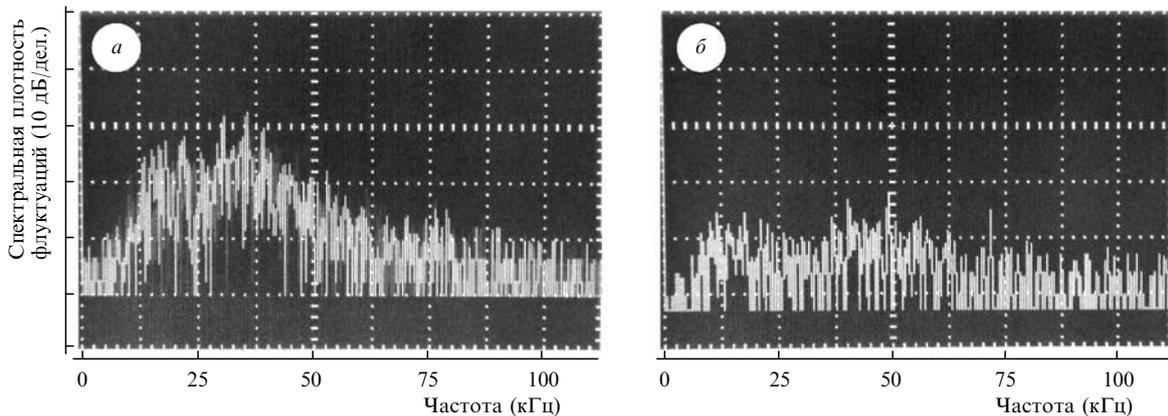


Рис.4. Спектры плотности остаточных флуктуаций частоты генерации стабилизированного лазера на красителях с кварцевым соплом с сечением выходной щели 3.5×0.25 мм (а) и сапфировым соплом с сечением щели 5×0.3 мм (б).

же условиях не превышает 100 кГц. При этом частотная зависимость спектральной плотности возмущений частоты генерации данного лазера является более пологой (рис.4,б).

Приведенные ширины линий излучения лазера в режиме активной стабилизации частоты генерации измерялись с помощью остаточных сигналов ошибки, которые регистрировались мультиметром Fluke 189 с функцией измерения истинных эффективных значений (True RMS) сигналов любой формы в полосе частот 100 кГц. Следует отметить, что сигналы ошибки, получаемые в стандартной схеме стабилизации частоты лазера по склону пика пропускания опорного интерферометра, не учитывают возможной нестабильности положения самого пика пропускания. Поэтому приведенные ширины линий являются относительными (по отношению к опорному интерферометру), хотя мы и предполагаем, что абсолютные ширины линий излучения лазера мало отличаются от измеренных нами относительных ширин в силу высокой виброизоляции опорного интерферометра, возможной благодаря его независимому размещению.

5. Долговременный дрейф линии излучения лазера

Долговременный дрейф линии излучения комбинированного лазера в режиме стабилизации частоты определялся с помощью прецизионного измерителя длин волн излучения Angström WS/Ultimate с относительной точностью измерений 10^{-9} и температурной коррекцией показаний. Приведенные на рис.5 результаты измерений ско-

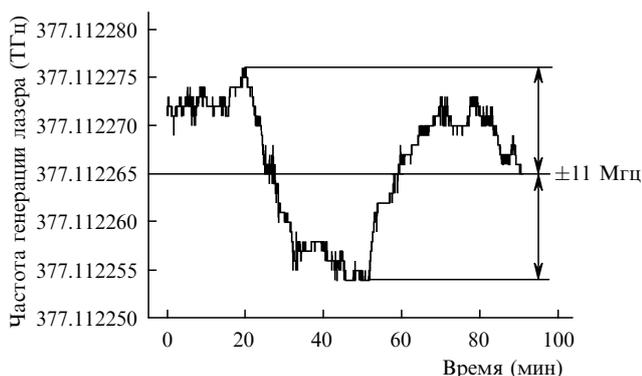


Рис.5. Зависимость частоты генерации лазера от времени, полученная с помощью измерителя WS/Ultimate.

рости дрейфа в течение 1.5 ч для титан-сапфирового лазера свидетельствуют о том, что скорость долговременного дрейфа линии излучения лазера не превышает 22 МГц/ч, причем в реальных лабораторных условиях (не термостатированная комната) она может быть переменной.

Долговременный дрейф линии излучения оценивался нами также с помощью настройки лазера на линию насыщенного поглощения рубидия. Этот эксперимент дал нам аналогичную верхнюю оценку скорости долговременного дрейфа линии излучения стабилизированного по частоте лазера – не более 20 МГц/ч.

Существенно меньшая скорость долговременного дрейфа линии излучения представленного лазера по сравнению с его комбинированным предшественником [2] является, очевидно, следствием лучшего термостатирования разработанного нами опорного интерферометра. Изменение базы в этом интерферометре осуществляется только с помощью пьезокерамик (одной или нескольких), и в нем не используется брюстеровская пластинка с приводом, нагрев или охлаждение которого при работе способны заметно ухудшить термостабильность опорного интерферометра.

6. Плавное сканирование частоты излучения лазера

Плавное сканирование базы интерферометра осуществляется с помощью пьезоуправляемого зеркала, область сканирования может достигать 18 ГГц для титан-сапфирового лазера и 20 ГГц для лазера на красителях. С целью обеспечения аналогичного диапазона плавного сканирования резонатора в него добавляется брюстеровская пластинка, наклоняемая электромеханическим приводом. В процессе плавного сканирования частоты генерации лазера управление этим приводом осуществляется сигналом, пропорциональным сигналу управления пьезоэлементом интерферометра. При таком управлении пьезоэлемент интерферометра и брюстеровская пластинка резонатора лазера обеспечивают почти синхронное сканирование резонатора лазера и резонатора интерферометра без использования цепи стабилизации частоты. Небольшая остаточная несинхронность их сканирования (из-за гистерезиса пьезоэлемента и т.д.) компенсируется системой стабилизации частоты генерации лазера, которая «досинхронизирует» длину резонатора с помощью пьезоэлементов зеркал резонатора лазера.

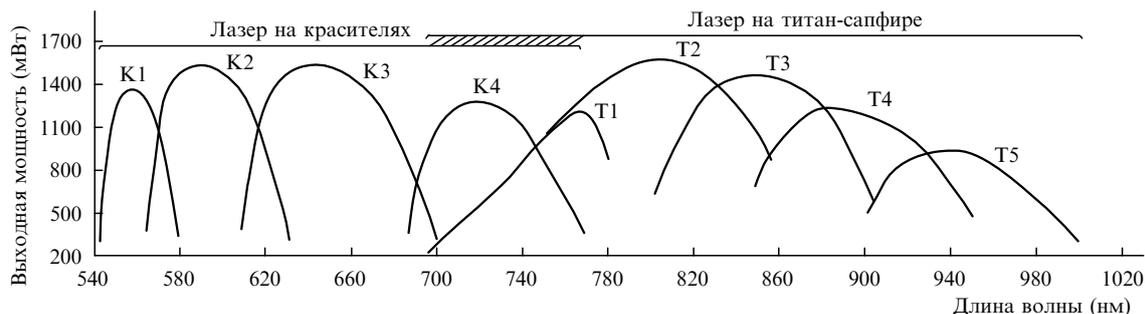


Рис.6. Распределение выходной мощности излучения одночастотного комбинированного лазера по длинам волн для различных красителей – родамина 110 (K1), родамина 6Ж (K2), ДЦМ (K3), пиридина 2 (K4) и пяти комплектов зеркал: T1 (695–780 нм), T2 (750–850 нм), T3 (800–900 нм), T4 (850–950 нм) и T5 (900–1000 нм).

7. Перестроечные характеристики комбинированного лазера

На рис.6 представлены типичные перестроечные кривые комбинированного одночастотного лазера при накачке Ag-лазером (все сине-зеленые линии излучения) или твердотельным лазером с длиной волны излучения 532/515 нм и мощностью 10 Вт. В конфигурации лазера на красителях длина волны излучения перестраивается в диапазоне 545–770 нм (при использовании четырех красителей). Рабочий спектральный диапазон титан-сапфирового лазера составляет 695–1000 нм при использовании пяти комплектов зеркал. Во всем спектральном диапазоне 545–1000 нм длина волны излучения комбинированного лазера может перестраиваться с помощью предложенного в [9] комплекта из двух трехкомпонентных двулучепреломляющих фильтров, перестроечные кривые которых оптимальным образом перекрывают этот диапазон.

Типичные максимальные мощности излучения комбинированного лазера в одночастотном режиме на наиболее эффективных лазерных красителях R6G и DCM, а также в области максимального усиления титан-сапфирового кристалла (около 800 нм) составляют более 1.5 Вт при мощности излучения накачки 10 Вт. Для лучших образцов этого кристалла выходная мощность излучения лазера превышает 2 Вт (рис.7).

В диапазоне длин волн 695–770 нм комбинированный лазер может работать как в титан-сапфировой конфигурации, так и в конфигурации лазера на красителях.

8. Заключение

Таким образом, нами представлены результаты разработки комбинированного кольцевого одночастотного лазера универсальной конструкции, позволяющего эффективно использовать в качестве активной среды как титан-сапфировый кристалл, так и раствор красителя. Впервые такая комбинированная компоновка реализована в горизонтальной схеме резонатора, обеспечивающей повышенную стабильность положения оптических элементов и удобство эксплуатации. Суммарный рабочий спектральный диапазон лазера составляет 550–1000 нм (500–700 нм в случае лазера на красителях и 695–1000

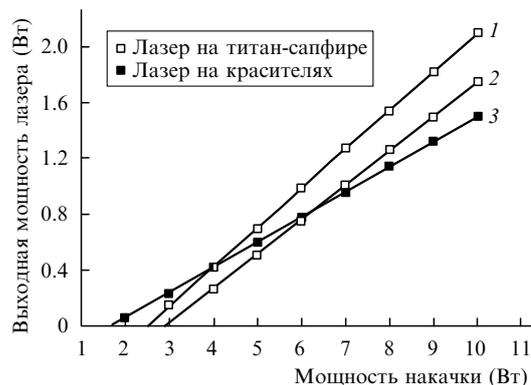


Рис.7. Зависимости максимальной мощности выходного излучения комбинированного лазера от мощности излучения накачки (1 – титан-сапфировый лазер с кристаллом и оптикой наилучшего качества, 2, 3 – типичные лазеры).

нм для титан-сапфирового лазера) при накачке излучением с длиной волны 532/515 нм. Максимальная выходная мощность излучения при мощности накачки 10 Вт составляет более 2 Вт для титан-сапфирового лазера и выше 1.5 Вт для лазера на красителях; кратковременная ширина линии без частотной стабилизации не превышает 5 МГц (титан-сапфировый лазер) и 10 МГц (лазер на красителях), а с частотной стабилизацией по специально разработанному опорному термостатированному высокочастотному интерферометру она составляет менее 10 кГц (титан-сапфировый лазер) и менее 100 кГц (лазер на красителях).

1. Johnston T.F., Brady R.H., Proffitt W. *Appl. Opt.*, **21**, 2307 (1982).
2. http://www.radiant-dyes.de/PDF/Actively_Stabilized_cw_ring_laser.pdf.
3. Zhao W.Z., Simsarian J.E., Orozco L.A., Sprouse G.D. *Rev. Sci. Instrum.*, **69**, 3737 (1998).
4. <http://www.tekhnoscan.com/english/TIS-SF-077.htm>.
5. http://www.coherent.com/downloads/MBR110_DS.pdf.
6. Bourzeix S., Plimmer M.D., Nez F., Julien L., Biraben F. *Opt. Commun.*, **99**, 89 (1993).
7. Багаев С.Н., Барауля В.И., Бонерт А.Э., Гончаров А.Н., Сейдалиев М.Р., Фарносов С.А. *Квантовая электроника*, **31**, 495 (2001).
8. Onisto H.J., Cavasso-Filho R.L., Scalabrin A., Pereira D., Cruz F.C. *Opt. Eng.*, **41**, 1122 (2002).
9. Кобцев С.М., Свенцицкая Н.А. *Оптика и спектроскопия*, **73**, 196 (1992).