

Генерация второй стоксовой компоненты при ВКР чирпированных лазерных импульсов

А.В.Конященко, Л.Л.Лосев, С.Ю.Теняков

Проведено экспериментальное исследование оптических схем генерации второй стоксовой компоненты при ВКР широкополосных чирпированных лазерных импульсов в сжатых газах. Измерены энергетическая эффективность преобразования и пространственные характеристики светового пучка второй стоксовой компоненты при однократной и двукратной фокусировках излучения накачки в кювету с газом, а также в схемах с использованием кварцевого капилляра и двух газовых кювет. Показано, что максимальная энергетическая эффективность преобразования во вторую стоксову компоненту достигается при каскадной генерации в оптической схеме с двумя кюветами со сжатыми газами. В такой схеме при ВКР в водороде излучение лазера на сапфире с титаном с длиной волны 0.79 мкм преобразовано во вторую стоксову компоненту с длиной волны 2.3 мкм с эффективностью 8.5%.

Ключевые слова: фемтосекундные импульсы, вынужденное комбинационное рассеяние.

1. Введение

В настоящее время ведутся достаточно интенсивные исследования, нацеленные на создание мощных фемтосекундных лазерных систем ближнего и среднего ИК диапазонов. Фемтосекундные лазеры с длиной волны излучения $\lambda = 1.5 - 3$ мкм требуются для проведения экспериментов по генерации высших гармоник [1, 2] и аттосекундных световых импульсов [3], по лазерной химии [4, 5] и т. д. Одним из методов создания таких фемтосекундных лазерных систем является генерация стоксовых импульсов при ВКР излучения широко применяемых лазеров – лазера на сапфире с титаном ($\lambda \sim 0.8$ мкм), иттербиевого лазера (~ 1 мкм) и хром-форстеритового лазера (~ 1.2 мкм).

Понижение несущей частоты лазерного импульса длительностью менее 100 фс путем ВКР осуществляется, в основном, по следующей схеме. Вначале импульсы чирпируют по частоте посредством его пропускания через дисперсионный элемент. При этом длительность импульса существенно увеличивается, вплоть до 0.1 – 1 нс. Это необходимо для того, чтобы снизить интенсивность излучения в области преобразования и, таким образом, подавить конкурирующие нелинейные эффекты (фазовая самомодуляция, самофокусировка). В процессе ВКР чирпированного лазерного импульса чирп стоксова импульса воспроизводит чирп импульса накачки. На заключительном этапе частотного преобразования осу-

ществляется временная компрессия стоксова импульса. Данная схема была предложена и реализована в [6]. Ее недостатками являются увеличение в несколько раз длительности стоксова импульса по сравнению с длительностью исходного лазерного импульса и низкая воспроизводимость формы стоксова сигнала. Последующее усовершенствование оптической схемы позволило устранить указанные недостатки и успешно осуществить эффективное преобразование в газообразной [7, 8] и кристаллической [9] активных средах в первую стоксову компоненту с длительностью импульса, близкой к длительности импульса накачки.

Генерация еще более длинноволнового излучения при ВКР и, следовательно, расширение области применения лазерной системы, могут быть осуществлены путем генерации второй стоксовой компоненты. Например, при использовании лазера на сапфире с титаном и водорода в качестве комбинационно-активной среды длина волны второй стоксовой компоненты составит ~ 2.5 мкм.

Ключевыми параметрами при построении нелинейного фемтосекундного преобразователя на основе ВКР являются эффективность преобразования и пространственное качество светового пучка стоксова излучения. Что касается генерации второй стоксовой компоненты, то экспериментальные данные для режима с накачкой широкополосными чирпированными импульсами практически отсутствуют. Этот режим имеет ряд отличий от случая накачки узкополосными наносекундными и пикосекундными лазерными импульсами. Исследование схем и особенностей генерации второй стоксовой компоненты при чирпированной широкополосной накачке и было целью настоящей работы.

2. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Эксперименты проводились с использованием лазерной системы на сапфире с титаном Regulus RAPOR+ (ООО «Авеста-Проект»). В систему входили задающий

А.В.Конященко. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; ООО «Авеста-Проект», Россия, Московская обл., 142190 Троицк, территория ФИАН, КРФ-2; e-mail: fs@avesta.ru

Л.Л.Лосев. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; e-mail: losev@pluton.fpi.troitsk.ru

С.Ю.Теняков. ООО «Авеста-Проект», Россия, Московская обл., 142190 Троицк, территория ФИАН, КРФ-2; e-mail: tenyakov@avesta.ru

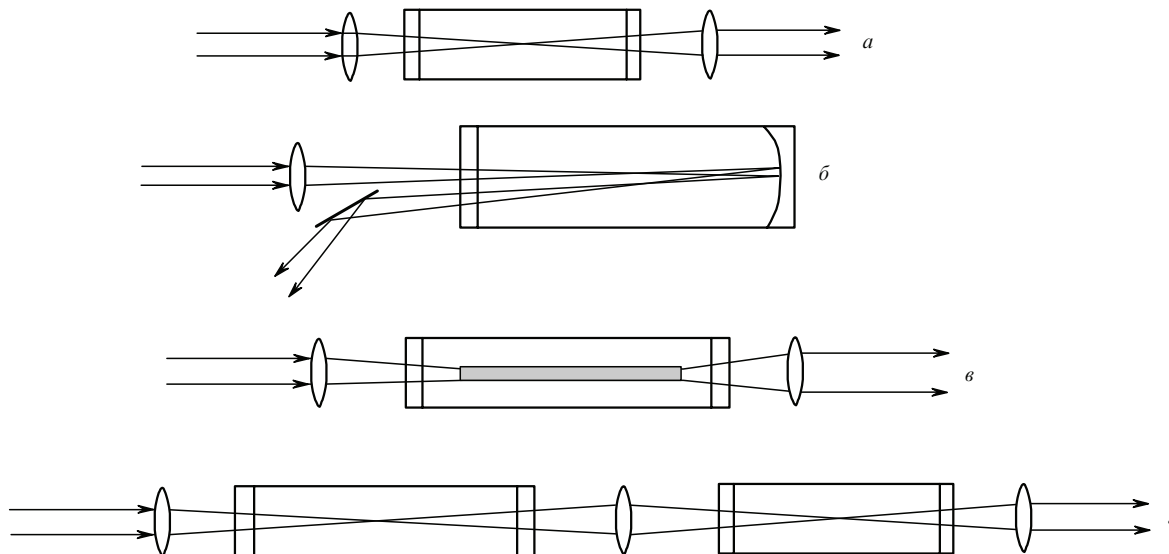


Рис.1. Оптические схемы преобразования во вторую стоксову компоненту: с однократной фокусировкой (а), с двукратной фокусировкой (б), с кварцевым капилляром (в) и с двумя кюветами (д).

генератор, система чирпирования импульсов (стретчер), регенеративный и многопроходный усилители. После многопроходного усилителя энергия импульса достигала значений свыше 7 мДж, а частота следования импульсов f составляла при этом 20 Гц. При использовании лишь регенеративного усилителя максимальная энергия импульса достигала 150 мкДж при $f = 2$ кГц. Длительность чирпированного импульса на выходе системы равнялась ~ 100 пс, ширина спектра излучения составляла ~ 300 см $^{-1}$. Расходимость светового пучка с распределением интенсивности, близким к гауссову, не превышала 1.5 дифракционного предела.

Оптические схемы исследованных источников второй стоксовой компоненты представлены на рис.1. Во всех схемах (с однократной фокусировкой (рис.1,а), с двукратной фокусировкой (рис.1,б), с диэлектрическим капилляром (рис.1,в) и с двумя кюветами (рис.1,д)) генерация стоксова излучения осуществлялась при одном проходе излучения накачки через активную среду. Применение схем комбинационных преобразователей с внешним резонатором не представлялось возможным вследствие малой длительности импульса накачки и чирпирования частоты. Ниже представлены результаты исследований каждой из показанных на рис.1 оптических схем.

2.1. Схема с однократной фокусировкой

Схема генерации комбинационных компонент с однократной фокусировкой излучения накачки в центр кюветы, заполненной активной средой, используется чаще других и является наиболее исследованной. Показано, что в такой схеме вторая стоксова компонента на начальном этапе развивается в результате четырехволнового параметрического процесса [10]. Экспериментальные результаты, представленные на рис.2, находятся в соответствии с таким механизмом генерации. Нами измерялась зависимость эффективности преобразования в первую ($\lambda = 1.2$ мкм) и во вторую (2.5 мкм) стоксовы компоненты от давления при фокусировке чирпированного импульса накачки линзой с фокусным расстоянием 1.1 м в центр кюветы длиной 1.2 м, заполненной сжатым водородом. Диаметр пятна накачки равнялся 3 мм (по уро-

вню $1/e^2$ интенсивности), энергия импульса накачки составляла 5 мДж, частота следования импульсов – 20 Гц.

Как видно из рис.2, первая и вторая стоксовы компоненты возникают практически при одном и том же давлении водорода. Это подтверждает четырехволновой параметрический механизм генерации второй стоксовой компоненты, поскольку при параметрическом механизме генерации пороговые энергии накачки (или пороговое значение давления активной среды в нестационарном режиме, который реализуется в данном случае) должны быть близки для первой и второй стоксовых компонент [11].

Максимальные эффективности преобразования по энергии в первую и вторую стоксовы компоненты составили 32% и 5% соответственно. Достоинствами этой схемы генерации второй стоксовой компоненты являются достаточно высокая эффективность преобразования и простота. Существенный недостаток связан с качеством светового пучка. Известно [12], что при парамет-

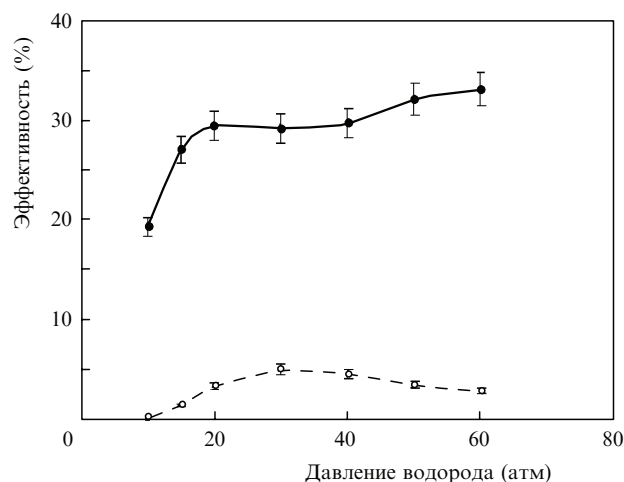


Рис.2. Зависимости эффективности преобразования в первую ($\lambda = 1.2$ мкм, сплошная кривая) и вторую (2.5 мкм, штриховая кривая) стоксовы компоненты от давления водорода в схеме с однократной фокусировкой при энергии импульса накачки 5 мДж и частоте следования импульсов 20 Гц.

рическом режиме генерации, когда существует сильная параметрическая связь накачки, стоксовых и антистоксовых волн, пространственное распределение световых пучков комбинационных компонент имеет кольцеобразную структуру. В нашем случае измерения, проведенные с помощью диафрагмы переменного диаметра, показали, что распределение светового пучка как первой, так и второй стоксовой компоненты представляет собой кольцо с центральным керном. Причем в центральном керне содержится не более 20 % общей энергии. Вследствие этого прикладное использование такой схемы генерации ИК излучения сильно ограничено.

Аналогичные зависимости были получены при ВКР импульса лазера на сапфире с титаном в сжатом метане. Эффективность преобразования в первую стоксову компоненту с длиной волны 1.04 мкм составила 38 %, во вторую, с длиной волны 1.5 мкм, – 6 %.

Воспроизведение поперечного распределения интенсивности светового пучка накачки второй стоксовой компонентой возможно при каскадном режиме генерации. В этом случае предполагается отсутствие параметрической связи между световыми полями и последовательное преобразование энергии импульса накачки сначала в первую, а затем во вторую стоксову компоненту. Каскадная генерация комбинационных компонент может быть осуществлена на многопроходной кювете. При определенных условиях на первых проходах накачки через активную среду происходит эффективная генерация только первой стоксовой компоненты, которая при последующих проходах преобразуется во вторую [13]. С целью выяснения возможности использования многопроходной кюветы для комбинационного преобразования широкополосных chirпированных импульсов нами был исследован процесс ВКР в двухпроходной кювете.

2.2. Схема с двукратной фокусировкой

Оптическая схема эксперимента показана на рис.1,б. Лазерное излучение фокусировалось линзой с фокусным расстоянием 60 см в центр кюветы длиной 1 м и затем падало на поверхность зеркала с золотым покрытием (радиус кривизны 50 см), установленного на торце кюветы. После повторной фокусировки этим зеркалом излучение выводилось из кюветы под небольшим углом по отношению к падающему.

Пороги генерации первой и второй стоксовых компонент измерялись при однократной и двукратной фокусировках излучения накачки. В качестве активного вещества использовался сжатый водород. Было установлено, что снижения пороговой энергии импульса накачки при переходе от однократной фокусировки к двукратной не происходит, т.е. стоксов импульс, генерируемый при первом проходе через активную среду, при втором проходе не взаимодействует с импульсом накачки. Причина этого может заключаться в следующем. При прохождении активной среды длиной L между импульсом накачки, распространяющимся с групповой скоростью v_p , и стоксовым импульсом, имеющим скорость v_s , возникает задержка $\Delta t = L(v_s^{-1} - v_p^{-1})$. Для chirпированных импульсов она приводит к изменению разности мгновенных частот импульсов $\Delta\Omega = \Delta t d\omega/dt$, где $d\omega/dt$ – chirп импульса накачки и стоксовой компоненты. Если изменение разности частот волн превышает ширину линии спонтанного комбинационного рассеяния Γ , то комбинационное взаимодействие между импульсами прекращается. От-

сюда следует условие на ограничение длины активной среды:

$$L < \Gamma \left[\frac{d\omega}{dt} \left(\frac{1}{v_s} - \frac{1}{v_p} \right) \right]^{-1}.$$

Для газообразного водорода при давлении 60 атм $\Gamma \approx 10^{-1} \text{ см}^{-1}$ [14]. При $d\omega/dt = 3 \times 10^{12} \text{ см}^{-1}/\text{с}$ (ширина спектра 300 см^{-1} , длительность chirпированного импульса 100 пс) максимальная длина, при которой не происходит выхода из резонанса комбинационно-взаимодействующих волн накачки и первой стоксовой компоненты ($\lambda = 0.8$ и 1.2 мкм соответственно), составляет $\sim 12 \text{ см}$. Следовательно, в нашей схеме с двукратной фокусировкой возникшая в области первой фокальной перегретости стоксова волна после прохождения слоя газа между двумя фокальными областями, толщина которого составляет $\sim 1 \text{ м}$, не будет взаимодействовать с накачкой во второй фокальной области вследствие выхода из комбинационного резонанса.

Таким образом, применение многопроходных кювет для генерации высших комбинационных компонент при широкополосной chirпированной накачке представляется малоперспективным.

2.3. Схема с капилляром

Осуществить каскадную генерацию второй стоксовой компоненты можно также в схеме с диэлектрическим капилляром. По сравнению со схемой однократной фокусировки при использовании капилляра длина области высокой интенсивности накачки больше, что позволяет достичь инкремента усиления, необходимого для развития второй стоксовой компоненты с уровня спонтанного рассеяния. Снижение эффективности ВКР, связанное с дисперсией активной среды, в капилляре проявляется значительно слабее, чем в многопроходных кюветах. Это обусловлено меньшей длиной капилляра, отсутствием областей с низкой интенсивностью излучения, в которых не происходит усиления стоксова сигнала (в области быстрого роста стоксовой волны возникает эффект нелинейного затягивания фазы [15]), и аномальной дисперсией капилляра, частично компенсирующей нормальную дисперсию активной среды [16]. Достоинством преобразования в капилляре является также высокое качество светового пучка на выходе, поскольку капилляр действует аналогично пространственному фильтру.

На рис.3 показаны экспериментальные зависимости эффективности преобразования в первую ($\lambda = 1.2 \text{ мкм}$) и вторую (2.5 мкм) стоксовы компоненты излучения лазера на сапфире с титаном (800 нм) от давления водорода. Исследовалось преобразование в кварцевых капиллярах с внутренним диаметром 470 мкм и длиной 25 см (рис.3,а), а также с диаметром 300 мкм и длиной 30 см (рис.3,б). Энергия импульса накачки составляла 4 мДж, частота следования импульсов – 20 Гц. Измеренное пропускание капилляров для излучения лазера на сапфире с титаном в случае капилляра диаметром 300 мкм равнялось 82 %, капилляра диаметром 470 мкм – 90 %.

Измеренная эффективность преобразования в капиллярах меньше по сравнению с полученной при однократной фокусировке, что обусловлено потерями стоксовых волн при распространении в кварцевом капилляре. Коэффициент потерь α определяется выражением $\alpha \sim \lambda^2/a^3$ [17], где a – радиус капилляра. Этой зависимостью можно

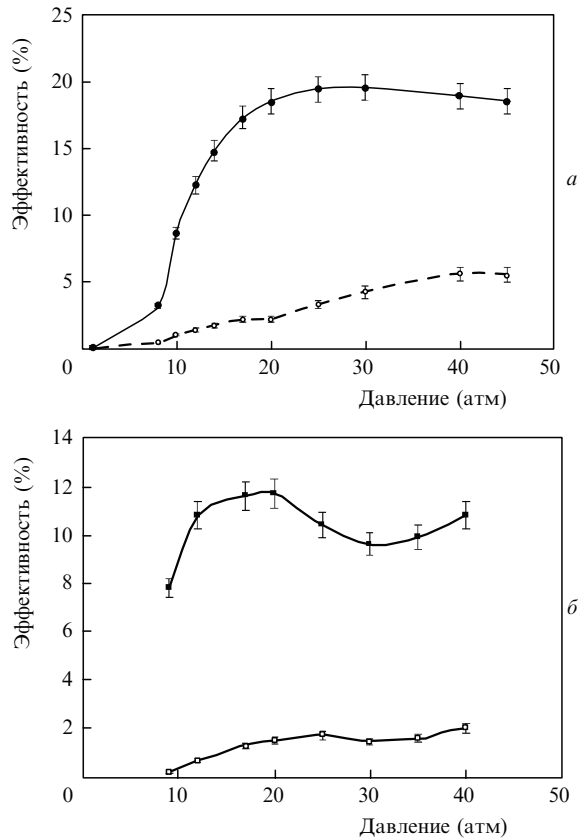


Рис.3. Зависимости эффективности преобразования в первую ($\lambda = 1.2$ мкм, сплошная кривая) и вторую (2.5 мкм, штриховая кривая) стоксовы компоненты от давления водорода в схемах с кварцевыми капиллярами диаметром 470 мкм и длиной 25 см (а) и диаметром 300 мкм и длиной 30 см (б) при энергии импульса накачки 4 мДж и частоте следования импульсов 20 Гц.

объяснить более чем двукратное снижение эффективности преобразования во вторую стоксову компоненту в капилляре диаметром 300 мкм по сравнению с капилляром большего диаметра. Несмотря на падение эффективности преобразования, схема с капилляром может быть использована благодаря высокому пространственному качеству световых пучков комбинационных компонент. В частности измерения показали, что в схеме с капилляром диаметром 300 мкм распределение световых пучков на выходе близко к гауссову.

К достоинствам капиллярной схемы можно также отнести возможность преобразования лазерных импульсов малой энергии и увеличения частоты следования импульсов. Снижение энергии импульса накачки становится возможным вследствие увеличения длины области высокой интенсивности накачки по сравнению с длиной фокальной перетяжки при фокусировке в свободное пространство. Частота следования импульсов накачки в комбинационных преобразователях на газовых средах ограничивается энерговыделением в области генерации стоксова излучения. Этот процесс приводит к неоднородному нагреву газа, оптическим неоднородностям, к искажению оптического пучка и, как следствие, к снижению эффективности преобразования. Наши измерения показали, что при энергии импульса накачки ~ 1 мДж заметное снижение эффективности преобразования в схеме с однократной фокусировкой начинает наблюдаться уже с частоты следования импульсов ~ 100 Гц. В капилляре из-за однородного нагрева газовой среды, ограниченной

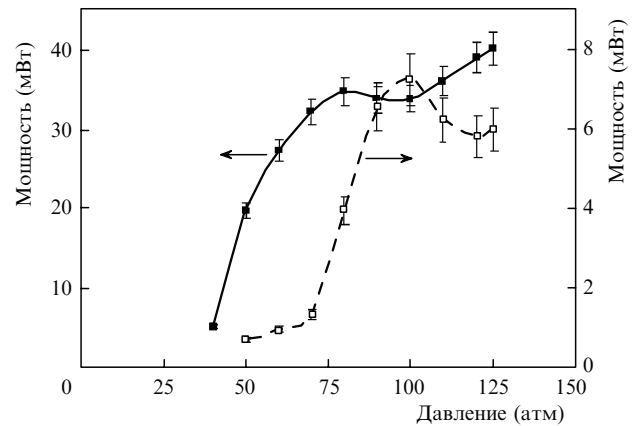


Рис.4. Зависимости средней мощности первой ($\lambda = 1.2$ мкм, сплошная кривая) и второй (2.5 мкм, штриховая кривая) стоксовых компонент от давления водорода при ВКР в капилляре диаметром 100 мкм и длиной 10 см. Средняя мощность накачки 300 мВт, частота следования импульсов 2 кГц.

стенками капилляра, поперечных конвекционных потоков и искажений светового пучка не возникает.

В исследованном преобразователе с использованием капилляра диаметром 100 мкм и длиной 10 см эффективность преобразования и распределение интенсивности светового пучка на выходе были неизменными вплоть до частоты следования импульсов 2 кГц – максимальной возможной для данного лазера на сапфире с титаном. Энергия одиночного импульса накачки не зависела от частоты следования импульсов и равнялась 150 мкДж. На рис.4 показаны зависимости средней выходной мощности стоксова излучения этого преобразователя при частоте следования импульсов 2 кГц. В данном случае эффективность преобразования во вторую стоксову компоненту составляла 2.5%. Невысокая эффективность, как уже отмечалось выше, вызвана ростом потерь в капилляре при увеличении длины волны. Тем не менее компактность преобразователя (длина кюветы 20 см, внешний диаметр 2 см), достаточная высокая средняя мощность и высокое качество светового пучка делают этот источник ИК излучения вполне пригодным для некоторых прикладных задач.

2.4. Схема с двумя кюветами

Использование газовых комбинационно-активных сред открывает возможности создания источников второй стоксовой компоненты, включающих две последовательно расположенные оптические кюветы. Путем независимого варьирования давления, состава газовой смеси, длины кюветы можно добиться максимальной эффективности генерации лишь одной стоксовой компоненты в каждой из кювет и таким способом оптимизировать каскадную генерацию второй стоксовой компоненты.

Экспериментальное исследование каскадной генерации второй стоксовой компоненты по схеме, представленной на рис.1,д, проводилось с использованием кювет длиной 1.2 м (первый этап преобразования) и 0.3 м (второй этап). Источником накачки служил лазер на сапфире с титаном МАТЕКО-10 (ООО «Авеста-Проект»), генерирующий chirпированные импульсы длительностью 100 пс с энергией 7 мДж при частоте следования импульсов 15 Гц. Центральная длина волны равнялась 0.79 мкм, ширина спектра – 300 см^{-1} . Диаметр гауссова светового пучка составлял 3 мм.

В первой кювете длиной 1.2 м проводилось преобразование в первую стоксову компоненту с длиной волны 1.18 мкм. Излучение накачки фокусировалось в центр кюветы линзой с фокусным расстоянием 1.5 м. Известно [18], что для преобразования с высокой эффективностью гауссова светового пучка в первую стоксову компоненту, воспроизводящую волновой фронт накачки, необходимо обеспечить 2–3-кратное превышение энергии импульса накачки над пороговой энергией и исключить параметрическую связь стоксовых и антистоксовых компонент. При фиксированной энергии импульса накачки необходимое превышение над пороговой энергией ВКР достигается выбором давления рабочего газа, а комбинационно-параметрические процессы подавляются путем добавления буферного газа, обладающего высокой дисперсией. В качестве буферного газа был выбран криптон. Оптимальный режим ВКР в условиях нашего эксперимента был достигнут при давлении водорода 10 атм и добавлении криптона при давлении 10 атм. При этих значениях энергетическая эффективность преобразования накачки в первую стоксову компоненту составила 34 %. Расходимость стоксова светового пучка с распределением интенсивности, близким к гауссову, не превышала 1.5 дифракционного предела.

Излучение первой стоксовой компоненты фокусировалось во вторую кювету линзой с фокусным расстоянием 50 см. На рис.5 представлены зависимости эффективности преобразования во вторую стоксову компоненту с длиной волны 2.3 мкм от давления водорода. В данном случае вследствие высокого рабочего давления водорода буферного газа не требовалось. Генерация второй стоксовой компоненты осуществлялась в двух режимах накачки. В первом режиме в кювету фокусировалось излучение лишь первой стоксовой компоненты, выходящей из первой кюветы (одночастотная накачка). Непреобразованное в первой кювете излучение лазера на сапфире с титаном отсекалось с помощью фильтра из цветного стекла. Во втором режиме спектральной фильтрации излучения не проводилось (двухчастотная накачка). Максимальная эффективность преобразования в одно-

частотном режиме составила 25 %, что в полтора раза больше максимальной эффективности преобразования при двухчастотной накачке, равной 17 %. Падение эффективности преобразования при двухчастотной накачке может быть связано с обратным преобразованием первой стоксовой компоненты в исходное лазерное излучение. Этот процесс протекает на динамической решетке поляризуемости, которая записывается в активной среде второй кюветы при ВКР вышедшего из первой кюветы непреобразованного импульса лазерного излучения. Причем этот импульс предшествует импульсу первой стоксовой компоненты. Для такого четырехволнового процесса условие фазового синхронизма выполняется автоматически. В пользу данного объяснения свидетельствует также снижение порога генерации второй стоксовой компоненты при двухчастотной накачке. (В этом случае вторая стоксова компонента возникает при меньшем давлении водорода.) Снижение порога ВКР в преобразователях с бигармонической накачкой происходит в случае слабого излучения, обычно более длинноволнового, чем сильная накачка [19].

Измеренная квантовая эффективность преобразования при ВКР (отношение числа стоксовых фотонов к числу фотонов накачки) в каждой из кювет составила ~50 % как для преобразования излучения с длиной волны 0.79 мкм в 1.18 мкм, так и для преобразования 1.18 мкм в 2.3 мкм. В результате квантовая эффективность преобразования накачки во вторую стоксову компоненту системы в целом достигла 25 %, а энергетическая – 8.5 %. При этом световой пучок второй стоксовой компоненты имел пространственное распределение колоколообразной формы, без колец, окружающих центральную часть.

Применение оптической схемы с двумя кюветами также позволяет использовать комбинации двух различных газов. В частности нами было осуществлено преобразование излучения лазера на сапфире с титаном в излучение с длиной волны 1.8 мкм при каскадном ВКР в сжатом метане (на первом этапе) и водороде с энергетической эффективностью 12 %.

3. Заключение

Проведены исследования оптических схем генерации второй стоксовой компоненты при накачке широкополосными chirпированными импульсами. Измерены энергетическая эффективность преобразования и параметры светового пучка при однократной и двукратной фокусировках излучения накачки в активную среду, а также в схеме с кварцевым капилляром и в схеме с двумя оптическими кюветами. Максимальная эффективность преобразования достигнута в схеме с двумя кюветами. Chirпированное импульсное излучение лазера на сапфире с титаном с центральной длиной волны 0.79 мкм преобразовано с эффективностью 8.5 % во вторую стоксову компоненту с длиной волны 2.3 мкм при ВКР в сжатом водороде. Использование схемы с капилляром позволило повысить частоту следования импульсов до 2 кГц при дифракционном качестве светового пучка второй стоксовой компоненты.

Отметим также, что в предварительных экспериментах по генерации второй стоксовой компоненты в метане в режиме двухимпульсной накачки [7] были получены chirпированные импульсы второй стоксовой компоненты с шириной спектра, равной ширине спектра импульса

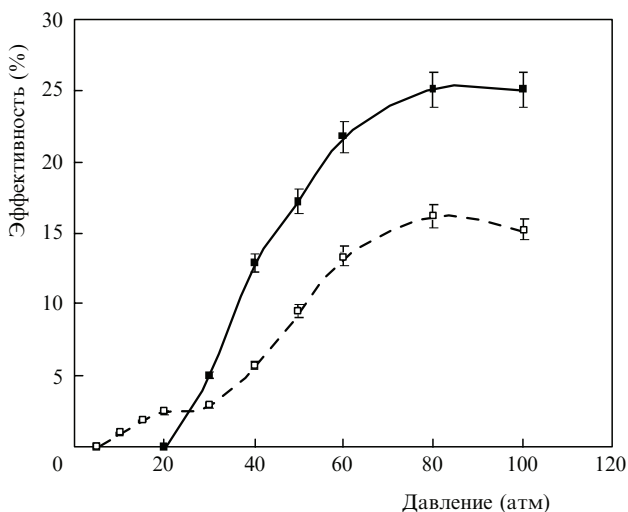


Рис.5. Зависимости эффективности преобразования в стоксово излучение с длиной волны 2.3 мкм во второй кювете в схеме с двумя кюветами при одночастотной (первая стоксова компонента с $\lambda = 1.18$ мкм, сплошная кривая) и двухчастотной (первая стоксова компонента и исходное лазерное излучение с $\lambda = 0.79$ мкм, штриховая кривая) накачках.

накачки, – импульса лазера на сапфире с титаном с шириной спектра 300 см^{-1} . Ожидается, что после временной компрессии импульс второй стоксовой компоненты будет сжат до 50–70 фс. В результате появится возможность генерации мощных фемтосекундных световых импульсов в диапазоне длин волн 1.5–3 мкм на основе процесса ВКР.

Авторы выражают благодарность М.Н.Герке за предоставление фемтосекундной лазерной системы для проведения экспериментов.

1. Popmintchev T., Chen M.-C., Cohen O., Grishan M. E., Rocca J.J., Murnane M.M., Kapteyn H.C. *Opt. Lett.*, **33**, 2128 (2008).
2. Chen M.-C., Arpin P., Popmintchev T., Gerrity M., Zhang B., Seaberg M., Popmintchev D., Murnane M.M., Kapteyn H.C. *Phys. Rev. Lett.*, **105**, 173901 (2010).
3. Yakovlev V.S., Ivanov M., Krausz F. *Opt. Express*, **15**, 15351 (2007).
4. Sugiharto A.B., Johnson C.M., De Aguiar H.B., Alloatti L., Roke S. *Appl. Phys. B*, **91**, 315 (2008).
5. Imahoko T., Takasaso K., Sumiyoshi T., Sekita H., Takahashi K., Obara M. *Appl. Phys. B*, **87**, 629 (2007).
6. Jordan C., Stankov K.A., Marowsky G., Canto-Said E. *J. Appl. Phys. B*, **59**, 471 (1994).
7. Konyashchenko A.V., Losev L.L., Tenyakov S.Yu. *Opt. Express*, **15**, 11855 (2007).
8. Konyashchenko A.V., Losev L.L., Pazyuk V.S., Tenyakov S.Yu. *Appl. Phys. B*, **93**, 455 (2008).
9. Конященко А.В., Лосев Л.Л., Теняков С.Ю. *Квантовая электроника*, **40**, 700 (2010).
10. Андреев Р.Б., Горбунов В.А., Гулидов С.С., Паперный С.Б., Серебряков В.А. *Квантовая электроника*, **9**, 56 (1982).
11. Guntermann C., Schulz-von der Gathen V., Dobele H. F. *Appl. Opt.*, **28**, 135 (1989).
12. Chiao R.Y., Stoicheff V.P. *Phys. Rev. Lett.*, **12**, 290 (1964).
13. Antognini A. et al. *Opt. Commun.*, **253**, 362 (2005).
14. Murray J.R., Goldhar J., Eimerl D., Szoke A. *IEEE J. Quantum Electron.*, **15**, 342 (1979).
15. Бутылкин В.С., Венкин Г.В., Кулюк Л.Л., Малеев Д.И., Хронопупло Ю.Г., Шаляев М.Ф. *Квантовая электроника*, **4**, 1537 (1977).
16. Burzo A.M., Chugreev A.V., Sokolov A.V. *Opt. Commun.*, **264**, 454 (2006).
17. Marcatili E.A.J., Schmeltzer R.A. *Bell Syst. Tech. J.*, **43**, 1783 (1964).
18. Зельдович Б.Я., Пилипецкий Н.Ф., Шкунов В.В. *Обращение волнового фронта* (М.: Наука, 1985).
19. Венкин Г.В., Крочик Г.М., Кулюк Л.Л., Малеев Д.И., Хронопупло Ю.Г. *Письма в ЖЭТФ*, **21**, 235 (1975).