

Непрерывный твердотельный ВКР-лазер, генерирующий излучение на частотах двух стоксовых компонент

А.С.Грабчиков, В.А.Лисинецкий, В.А.Орлович, М.Шмитт, С.Шлюкер, Б.Кюстнер, В.Кифер

Приведены результаты экспериментального исследования первого непрерывного твердотельного ВКР-лазера, одновременно генерирующего излучение на частотах первой и второй стоксовых компонент. Одновременная генерация обеспечена применением резонатора с повышенной добротностью на частотах обеих стоксовых компонент. Последовательное достижение порогов генерации первой (3.4 Вт) и второй (3.67 Вт) стоксовых компонент указывает на каскадный механизм развития второй стоксовой компоненты. Впервые продемонстрировано получение преобразованного ВКР-излучения со стабильностью интенсивности, превышающей стабильность возбуждающего излучения. Показана возможность применения преобразованного излучения в спектроскопии комбинационного рассеяния.

Ключевые слова: непрерывная генерация, ВКР-лазер, стоксовы компоненты, твердотельный лазер.

Преобразование лазерного излучения в новые спектральные области является одним из наиболее важных применений ВКР. В отличие от других нелинейных методов, ВКР-преобразование позволяет осуществлять одновременную генерацию излучения на нескольких спектральных линиях с частотами, возрастающими или уменьшающимися относительно лазерной частоты, и перекрывать широкие спектральные области перестраиваемым или фиксированным по частоте излучением [1–3]. Число генерируемых компонент может достигать нескольких десятков [4]. Все эти результаты были получены при возбуждении ВКР импульсным лазерным излучением. Характерные закономерности протекания ВКР в импульсном режиме с учетом нестационарности процесса и немонохроматичности возбуждающего излучения описаны в классических работах С.А.Ахманова с сотр. [5, 6].

Получение ВКР-преобразования непрерывного лазерного излучения обычно рассматривается как нетривиальная задача, поскольку для достижения порога ВКР требуется высокая (до сотен киловатт) мощность, что для непрерывных лазеров проблематично. В последние годы отмечен значительный прогресс в достижении непрерывной ВКР-генерации за счет использования сверхвысокодобротных резонаторов [7], а также твердотельных сред с высокими коэффициентами комбинационного усиления и относительно высокодобротных резонаторов [8, 9]. Основное внимание в этих работах уделялось генерации излучения первой стоксовой компоненты в разных условиях и их оптимизации. Между тем получение генерации на частотах нескольких компонент ВКР также

представляет интерес, поскольку многочастотные источники могут найти широкие сферы применений.

Непрерывная генерация антистоксова излучения в ВКР-лазере на водороде была получена в [10]. Антистоксова генерация при ВКР обычно рассматривается, в том числе и в ВКР-лазере [11], как четырехфотонный параметрический процесс. В отличие от антистоксовой генерации, генерация высших стоксовых компонент может развиваться как по параметрическому, так и по каскадному механизму. В последнем случае выполнение условий синхронизма не осложняет картину генерации и позволяет реализовать стоксову генерацию высших порядков в резонаторе ВКР-лазера даже в условиях существенной дисперсии рассеивающей среды. Значительный прогресс в этом направлении достигнут в волоконных ВКР-лазерах [12]. Насколько нам известно из литературы, непрерывная генерация на частотах двух стоксовых компонент в ВКР-лазерах на кристаллах не рассматривалась.

В настоящей работе описаны результаты первых экспериментов по получению непрерывной генерации на частотах двух стоксовых компонент в твердотельном ВКР-лазере, возбуждаемом излучением аргонового лазера на длине волны $\lambda = 514.5$ нм. Для достижения генерации использовался подход, основанный на накоплении резонатором ВКР-лазера рассеянного излучения на длинах волн как первой, так и второй стоксовой компоненты.

Экспериментальная установка была подобна описанной в нашей работе [8]. Источником накачки служил аргоновый лазер (Spectra Physics, Model 2085), обеспечивавший мощность до 10 Вт на длине волны 514.5 нм. Ширина спектра многомодового лазерного излучения составляла около 0.1 см^{-1} . В поперечном сечении пучок аргонового лазера имел профиль, близкий к профилю TEM_{00} -моды.

Концентрический резонатор ВКР-лазера формировался двумя зеркалами с радиусами кривизны 105 мм, размещенными на расстоянии около 23 см друг от друга. Входное зеркало имело коэффициент отражения 99.44 % на $\lambda = 543.8$ нм (первая стоксова компонента) и 98.74 % на $\lambda = 576.7$ нм (вторая стоксова компонента); коэффициент пропускания на $\lambda = 514.5$ нм составлял 87.2 %. Коэф-

А.С.Грабчиков, В.А.Лисинецкий, В.А.Орлович. Институт физики им. Б.И.Степанова НАНБ, Белоруссия, 20072 Минск, просп. Независимости, 68; e-mail: asg@dragon.bas-net.by, v.orlovich@dragon.bas-net.by, Iva@dragon.bas-net.by
M.Schmitt, B.Kuestner, S.Schluucker, W.Kiefer. Institut für Physikalische Chemie, Universität Würzburg, Am Hubland, D-97074 Würzburg, Germany

Поступила в редакцию 11 декабря 2008 г., после доработки – 31 марта 2009 г.

коэффициенты отражения выходного зеркала были равны 99.6 %, 99.94 % и 99.85 % на 576.7, 543.8 нм и 514.5 нм соответственно. Фокусировка обеспечивала согласование мод резонатора и возбуждающего излучения.

В качестве комбинационно-активной среды использовался кристалл нитрата бария длиной 68 мм. Торцы кристалла были просветлены на длины волн накачки и стоксова излучения в диапазоне 490 – 580 нм. Выбор кристалла обуславливался высоким коэффициентом комбинационного усиления нитрата бария, составляющим 47 см/ГВт на $\lambda = 532$ нм [13]. Нитрат бария является изотропным кристаллом с кубической симметрией. Широкая область его пропускания (от 0.35 до 1.8 мкм) позволяет реализовывать ВКР-преобразование в видимой и ИК областях. Кристалл имел высокое оптическое качество. Частотный сдвиг наиболее активной в комбинационном рассеянии линии в нитрате бария равен 1047 см^{-1} , а ее спектральная ширина составляет около 0.4 см^{-1} . Спектральные характеристики выходного излучения ВКР-лазера регистрировались спектрометром SPEX 1404 с охлаждаемым жидким азотом ПЗС-приемником SDS 9-9000, СН270 (Photometrica Ltd). Временные характеристики выходного излучения измерялись с помощью фотодиодов и осциллографа Tektronics TDS 220 (100 МГц, 1 Гс/с), а его мощность – измерителем мощности лазерного излучения Moletron.

Появление ВКР-генерации определялось по возникновению в спектре выходного излучения линий, соответствующих излучению на частотах обеих стоксовых компонент. Характерный спектр выходного излучения представлен на рис.1. Наблюдаемые в спектре линии разделены частотными интервалами, соответствующими комбинационному сдвигу в нитрате бария (1047 см^{-1}).

Зависимости выходной мощности первой (P_{st1}) и второй (P_{st2}) стоксовых компонент ВКР-лазера от мощности возбуждающего излучения показаны на рис.2. Генерация первой стоксовой компоненты возникает при пороговой мощности накачки $P_p = 3.4$ Вт, затем имеет место медленный рост мощности P_{st1} , и при мощности возбуждения $P_p = 6.5$ Вт она достигает насыщения на уровне 5–6 мВт. Зависимость мощности P_{st2} от P_p имеет иной характер: генерация возникает при мощности накачки 3.67 Вт, а P_{st2} растет до 21.7 мВт без насыщения. Согласно оценкам, накопленные в резонаторе мощности первой и второй стоксовых компонент составили 20 и 11 Вт, что соответствует интенсивностям 260 и 140 кВт/см².

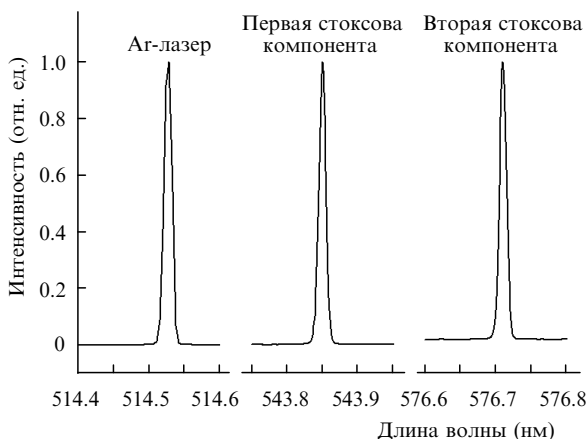


Рис.1. Выходной спектр ВКР-лазера. Амплитуды спектральных компонент приведены к единому уровню.

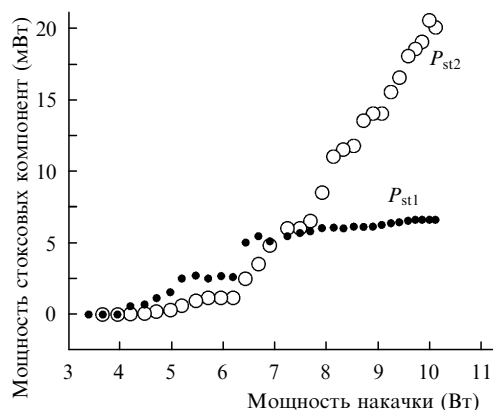


Рис.2. Зависимости мощностей первой и второй стоксовых компонент от мощности накачки.

Хорошо разделенные пороги генерации первой и второй стоксовых компонент (3.4 и 3.67 Вт) и отсутствие генерации конического излучения позволяют предположить, что в нашем эксперименте реализуется каскадный механизм ВКР-генерации. В этом случае излучение первой стоксовой компоненты служит возбуждающим для второй стоксовой компоненты, порог которой, соответственно, выше порога первой стоксовой компоненты.

Осциллограммы временного развития генерации обеих стоксовых компонент при максимальном уровне возбуждения показаны на рис.3 и 4. Для получения осциллограмм использовался механический модулятор лазерного пучка. Как видно из рис.3, поведение во времени сигнала первой стоксовой компоненты отличается в наших условиях от поведения сигнала накачки. Так, при длительности нарастания сигнала накачки около 1 мс фронт сигнала первой стоксовой компоненты на три порядка короче (около 2 мкс). Возникновение сигнала рассеянного излучения сопровождается сильными релаксационными осцилляциями излучения, наблюдавшимися ранее в непрерывном ВКР-лазере на водороде [14] и нитрате бария [8] при генерации излучения только первой стоксовой компоненты. Сигнал стоксова излучения не повторяет характерные флуктуации накачки. Различие во временном поведении сигналов первой стоксовой компоненты и накачки объясняется энергетическим балансом взаимодействующих волн, который, в частности, может приводить к стабилизации P_{st1} на уровне мощности, соответствующем порогу генерации второй стоксовой компо-

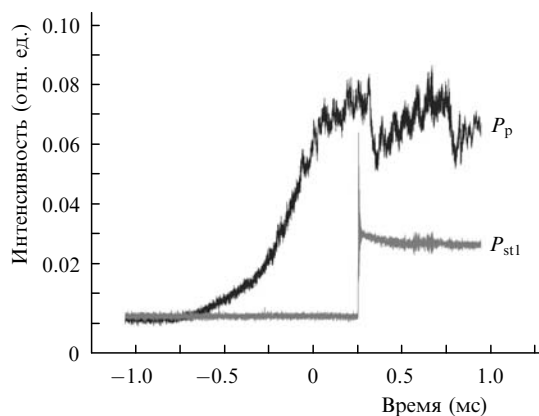


Рис.3. Осциллограммы типичного временного поведения излучения лазера накачки и первой стоксовой компоненты при максимальном уровне возбуждения (10 Вт).

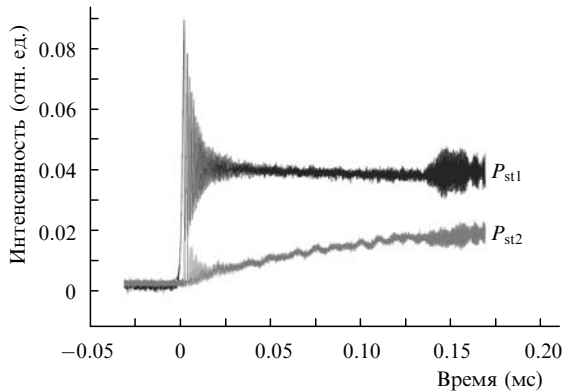


Рис. 4. Осциллограммы типичного временного поведения выходного излучения первой и второй стоксовых компонент при максимальном уровне возбуждения (10 Вт).

ненты. Взятое в качестве критерия стабильности отношение стандартного отклонения интенсивности к ее среднему значению на интервале ~ 100 мкс составило 4 % для сигнала аргонового лазера и 2 % для излучения первой стоксовой компоненты. Оценки получены для последней миллисекунды приведенных осциллограмм.

В отличие от рис. 3, представленные на рис. 4 осциллограммы развития генерации первой и второй стоксовых компонент демонстрируют практически одновременное возникновение релаксационных колебаний на обоих сигналах. Генерация первой стоксовой компоненты быстро выходит на стационарный уровень, а для выхода второй стоксовой компоненты требуется свыше 150 мкс, что, возможно, вызвано более высокими потерями резонатора на частоте ее генерации.

С целью демонстрации долговременной стабильности параметров генерации ВКР-лазера излучение обеих стоксовых компонент и аргонового лазера было использовано для измерения спектров спонтанного комбинационного рассеяния гематина. Как известно, гематин является слаборассеивающей средой, и для регистрации спектров КР этого вещества необходимо долговременное накопление сигнала. Каждый из полученных спектров, представленных на рис. 5, был получен при накоплении в течение 4 ч. Качество спектров подтверждает высокую стабильность параметров ВКР-генерации. Эти результаты также показывают, что ВКР-лазер, генерирующий на длинах волн излучения двух стоксовых компонент, совместно с аргоновым лазером может дать новую спектроскопическую информацию, обусловленную возможностью приближения возбуждающего излучения к резонансным условиям за счет изменения длины волны возбуждения.

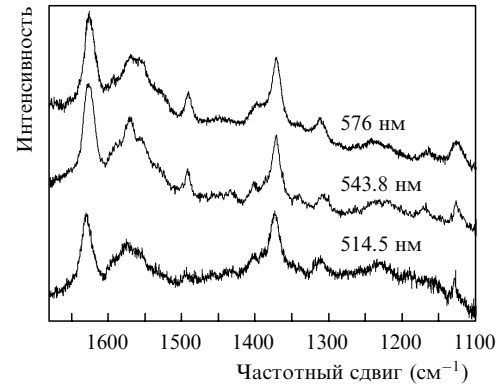


Рис. 5. Спектр комбинационного рассеяния гематина, полученный при возбуждении излучением ВКР-лазера и аргонового лазера.

Таким образом, мы продемонстрировали функционирование первого непрерывного твердотельного ВКР-лазера, генерирующего на частотах двух стоксовых компонент одновременно. Показано, что одновременное развитие генерации первой и второй стоксовых компонент повышает стабильность излучения первой стоксовой компоненты. Насколько нам известно, это первые результаты, демонстрирующие стабильность компонент ВКР-излучения, превышающую стабильность возбуждающего излучения.

1. Frey R., Pradere F. *Opt. Commun.*, **12**, 98 (1974).
2. Wilke V., Schmidt W. *Appl. Phys.*, **17**, 477 (1979).
3. Апанасевич П.А., Батище С.А., Ганжа В.А., Грабчиков А.С., Камач Ю.Э., Козловский Е.Н., Малевич Н.А., Мостовников В.А., Овчинников В.М., Орлович В.А. *Изв. АН СССР. Сер. физич.*, **47**, 1551 (1983).
4. Kawano H., Hirakawa Y., Imasaka T. *Appl. Phys. B*, **65**, 1 (1997).
5. Ахманов С.А., Драбович К.Н., Сухоруков А.П., Чиркин А.С. *ЖЭТФ*, **59**, 485 (1970).
6. Ахманов С.А., Дьяков Ю.Е., Павлов Л.И. *ЖЭТФ*, **66**, 520 (1974).
7. Brasseur J.K., Repasky K.S., Carlsten J.L. *Opt. Lett.*, **23**, 367 (1998).
8. Grabtchikov A.S., Lisinetskii V.A., Orlovich V.A., Schmitt M., Maksimenka R., Kiefer W. *Opt. Lett.*, **29**, 2524 (2004).
9. Demidovich A.A., Grabtchikov A.S., Lisinetskii V.A., Burakevich V.N., Orlovich V.A., Kiefer W. *Opt. Lett.*, **30**, 1701 (2005).
10. Brasseur J.K., Roos P.A., Carlsten J.L. *J. Opt. Soc. Am. B*, **17**, 1223 (2000).
11. Roos P.A., Meng L.S., Murphy S.K., Carlsten J.L. *J. Opt. Soc. Am. B*, **21**, 357 (2004).
12. Papernyi S., Karpov V., Clements W. *Optical Fiber Communication Conf., OSA Techn. Dig. Series* (Opt. Soc. Am., 2001, paper: WDD15).
13. Карпунин С.Н., Степанов А.И. *Квантовая электроника*, **13**, 1572 (1986).
14. Brasseur J.K., Roos P.A., Repasky K.S., and Carlsten J.L. *J. Opt. Soc. Am. B*, **16**, 1306 (1999).