

С. В. ГАГАРСКИЙ, В. В. КИЙКО, В. А. КОНДРАТЬЕВ,
А. Н. СЕРГЕЕВ, В. Ю. ХРАМОВ, В. Э. ЯКОБСОН

КОМПРЕССИЯ ИМПУЛЬСОВ МИКРОЧИП-ЛАЗЕРА С ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ ПРИ ВСТРЕЧНОМ ВКР-ПРЕОБРАЗОВАНИИ

Экспериментально исследован процесс обратного ВКР-преобразования излучения субнаносекундного микрочип-лазера с диодной накачкой и пассивной модуляцией добротности. В кристалле нитрата бария достигнута эффективность обратного ВКР-преобразования выше 50 % и коэффициент компрессии импульса во времени, равный 6,4. Предложена схема дополнительного усиления первой стоксовой компоненты при „кегельном“ режиме генерации излучения микрочип-лазера.

Ключевые слова: обратное ВКР-преобразование, микрочип-лазер, нелинейная оптика.

Введение. Лазерные импульсы пикосекундного диапазона нашли широкое распространение при микрообработке материалов, в научных исследованиях, дальнометрии, медицине и других областях благодаря обеспечению высокой степени локализации световой энергии в области взаимодействия. Наряду с лазерами с синхронизацией мод, которые имеют достаточно сложную конструкцию, перспективными источниками, позволяющими получать импульсы субнано- и пикосекундного диапазонов, являются микрочип-лазеры с диодной накачкой и пассивной модуляцией добротности [1—4]. Микрочип-лазер с пассивной модуляцией добротности представляет собой, как правило, композитную сборку, состоящую из активного лазерного элемента, пассивного затвора и, в некоторых случаях, дополнительных прозрачных теплоотводов и нелинейных преобразователей частоты. Эти элементы либо диффузно сварены между собой, либо соединены механически с минимальными воздушными зазорами. Зеркала резонатора наносятся на внешние торцы композитной сборки. Излучение накачки вводится через дихроичное глухое зеркало. Общая длина резонатора определяется суммарной длиной элементов и составляет, как правило, единицы миллиметров, что позволяет сравнительно легко получить одночастотный режим генерации.

Длительность импульса, генерируемого микрочип-лазером, определяется коэффициентом усиления активной среды, начальным пропусканием и временем релаксации пассивного затвора, оптической длиной и добротностью резонатора. Типичные значения длительностей импульса для коммерчески доступных микрочип-лазеров составляют сотни пикосекунд [5]. При использовании сверхтонких элементов достигаемая длительность одночастотных импульсов составляет десятки пикосекунд [6].

Дополнительное сокращение длительности генерируемых импульсов возможно путем их преобразования в различных внешних нелинейно-оптических устройствах. В частности, хорошо известно, что при использовании эффекта обратного вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР), помимо дискретного преобразования частоты излучения импульса лазера накачки, происходит временная компрессия импульса на комбинационной частоте с одновременным повышением пиковой мощности преобразованного импульса [7, 8]. Особый интерес для разработки компактных лазеров с ВКР-преобразованием представляют ВКР-конверторы на основе кристаллов [9, 10]. Максимальным инкрементом усиления среди наиболее известных конденсированных комбинационно-активных сред обладают кристаллы нитрата бария BaNO_3 (стоксов сдвиг 1047 см^{-1} , погонный инкремент усиления $g=47 \text{ см}^{-1}$ для длины волны накачки $\lambda_p = 532 \text{ нм}$, время дефазировки $T_2=25 \text{ пс}$). В настоящей статье представлены результаты

исследования процесса обратного ВКР-преобразования в кристаллах BaNO_3 излучения килогерцового $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}:\text{Cr}^{4+}$ -микрочип-лазера, реализующего различные режимы генерации.

Эксперимент и обсуждение результатов. В качестве источника излучения в экспериментальной установке (рис. 1) использовался микрочип-лазер на основе композитного элемента $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}:\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$. Импульсы накачки длительностью до 200 мкс доставлялись по оптическому волокну и объективом фокусировались в активную среду. В объективе располагался малоконтрастный поляризатор для излучения накачки, использование которого совместно с конструкцией крепления активного элемента позволяло задать фиксированную поляризацию излучения, генерируемого микрочип-лазером. Часть выходного пучка направлялась на скоростной фотоприемник для синхронизации со стрик-камерой VICA-03 с пикосекундным временным разрешением. Лазерное излучение на длине волны 1064 нм удваивалось по частоте в кристалле КТР. Излучение второй гармоники ($\lambda_p=532$ нм), выполняющее функцию накачки для ВКР-конвертора, фокусировалось линзой в комбинационно-активный кристалл RC_1 . Линии задержки 1 и 2 обеспечивали синхронизацию стрик-камеры с регистрируемым импульсом генерации и калибровку временной шкалы фоторегистратора.

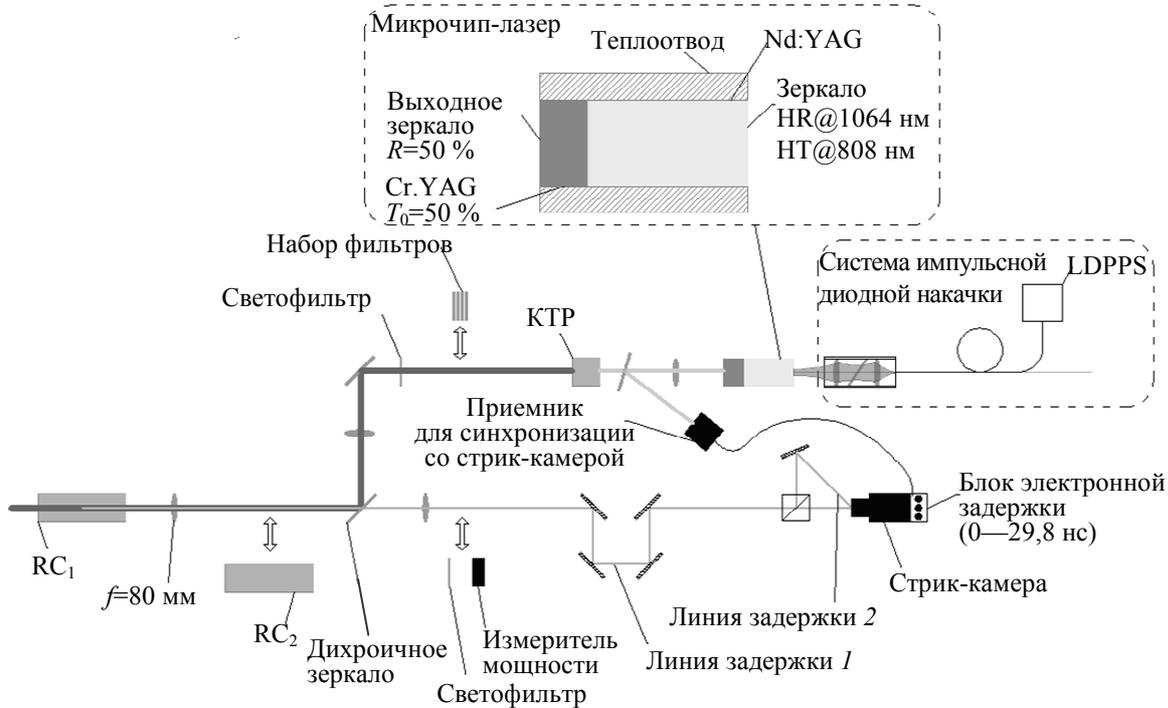


Рис. 1

В качестве ВКР-преобразователя использовался кристалл нитрата бария высокого оптического качества длиной 80 мм. Коэффициент линейной экстинкции (поглощение и рассеяние на неоднородностях) излучения накачки в кристалле не превышал $4 \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-1}$, а ориентация кристаллографических осей относительно плоскости поляризации излучения накачки обеспечивала минимум влияния нежелательных термоиндуцированных искажений, возникающих в области фокусировки в результате наличия квантового дефекта при ВКР-преобразовании. Параметры фокусировки выбирались исходя из сочетания, во-первых, условий, при которых обеспечивается преимущество встречного ВКР относительно попутного [10—12], и, во-вторых, максимально возможной частоты повторения импульсов при гарантированном отсутствии оптического пробоя в кристалле.

На первом этапе экспериментов исследовалось преобразование импульсов второй гармоники излучения микрочип-лазера, работающего в одномодовом одночастотном режиме генерации. Фотохронограмма импульса накачки для ВКР-преобразования с задержанным для калибровки по времени дубликатом и соответствующий профиль мощности $W_{2\omega}(t)$ показаны

на рис. 2, а. Измеренная длительность импульса составила 0,86 нс. Энергия импульса второй гармоники на входе в кристалл нитрата бария с учетом потерь на согласующей оптике достигала 50 мкДж. Близкое к дифракционному качество пучка накачки позволяло сравнительно легко реализовать условие эффективного обратного ВКР-преобразования $f_L/Z_f \sim 25$ для $f_L = 5 \dots 8$ см, здесь f_L — фокусное расстояние линзы, Z_f — параметр Когельника для пучка [11, 12]. Уровень интенсивности в перетяжке сфокусированного пучка в кристалле нитрата бария составил величину порядка 12 ГВт/см². Подавление попутного ВКР обеспечивалось истощением излучения накачки, обусловленным встречным ВКР в области каустики, а также выполнением условия синхронизма для 4-фотонного параметрического взаимодействия, которое существенно, впрочем, только для малых энергий импульса накачки [13]:

$$\frac{G}{\Delta k} \equiv \frac{gI}{k_s + k_a - 2k_p} \geq 1,$$

где g , G — погонный и полный (в пределах каустики на оси пучка) инкременты ВКР-усиления соответственно; Δk — волновая расстройка; I — интенсивность в каустике, усреднения по ее длине; k_s , k_a , k_p — волновые числа для стоксовой волны, антистоксовой волны и волны накачки соответственно.

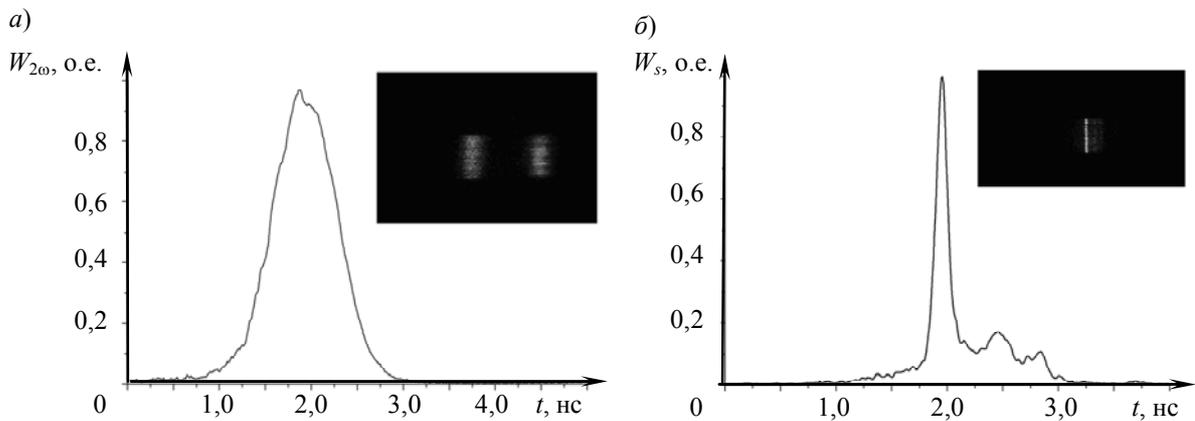


Рис. 2

Для указанных выше условий $G/\Delta k = 3,5$. Заметим, что выбранные условия фокусировки не являются оптимальными для получения максимального коэффициента сжатия, предельная оценка которого составляет 12—14. Эти условия определялись компромиссом при сочетании высоких значений коэффициентов преобразования с максимально достижимыми частотами повторения импульсов (до 1 КГц). Кроме того, в данных условиях практически не наблюдалась конкурирующая генерация второй стоксовой компоненты. Фотохронограмма импульса на длине волны первой стоксовой компоненты ($\lambda_{s1} = 564$ нм) и его временной профиль $W_s(t)$ приведены на рис. 2, б. Зависимость эффективности η встречного ВКР-преобразования от энергии E_p импульса накачки показана на рис. 3.

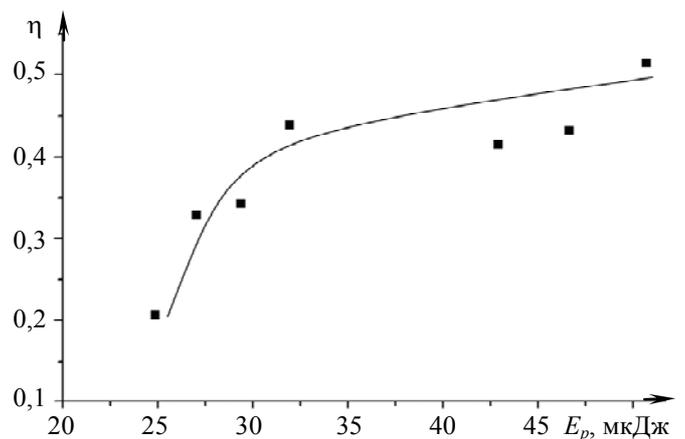


Рис. 3

Максимальная квантовая эффективность встречного ВКР-преобразования в первую стоксову компоненту была достигнута для импульсов накачки с энергией $E_p = 50$ мкДж и составила 53 %. Длительность стоксова импульса составила 0,135 нс, что соответствует коэффициенту компрессии 6,4. Как видно из фотохронограммы (см. рис. 2, б), в структуре стоксова импульса присутствует довольно

протяженная „хвостовая“ часть, содержащая до 50 % полной энергии при максимальном уровне используемой накачки. Такая временная структура хорошо согласуется с результатами расчетов, выполненных по модели, приведенной в работе [13]. В максимуме энергетического преобразования отношение пиковых мощностей импульса на длине волны λ_{s1} и импульса накачки составило 2,3.

Режим генерации излучения микрочип-лазера существенно зависит от соотношения поперечного размера прокачанной области активного элемента и диаметра основной моды резонатора, а также от поперечного распределения активных или диссипативных потерь в резонаторе. В случае равномерных потерь одномодовый режим реализуется при мощности накачки, соответствующей порогу генерации, и при небольшом превышении размера прокачанной области относительно размера основной моды.

При увеличении поперечного размера прокачанной области в активном элементе с одновременным увеличением энергии импульса накачки одномодовый режим генерации переходит в другой, так называемый „кегельный“ режим. При этом режиме в пространственно-временной структуре импульсов можно выделить первый „лидирующий“ субимпульс со спектром, соответствующим основной моде резонатора, а также один или более отстающих по времени субимпульсов, энергия которых определяется общим объемом прокачанной зоны активного элемента [4, 14]. Временной интервал между субимпульсами определяется конфигурацией резонатора и профилем распределения коэффициента усиления. Этот интервал может изменяться в пределах от полного перекрытия до значений, в несколько раз превышающих длительность отдельных субимпульсов. Особенность субимпульсов, связанных моментом начала просветления пассивного затвора, состоит в том, что они обладают практически одинаковой расходимостью. Увеличение расходимости пучка с изменением параметра M^2 для мод высшего порядка компенсируется увеличением его диаметра. Энергия второго „многомодового“ субимпульса может быть сравнима с энергией „лидирующего одномодового“ субимпульса и даже превышать ее, если импульс накачки имеет достаточную энергию. Условно импульсы с подобной пространственно-временной структурой можно назвать „кегель-импульсами“. Пример временного профиля $W(t)$, фотохронограмма (а) и поперечное распределение энергии $E(r)$ (б) кегель-импульса приведены на рис. 4.

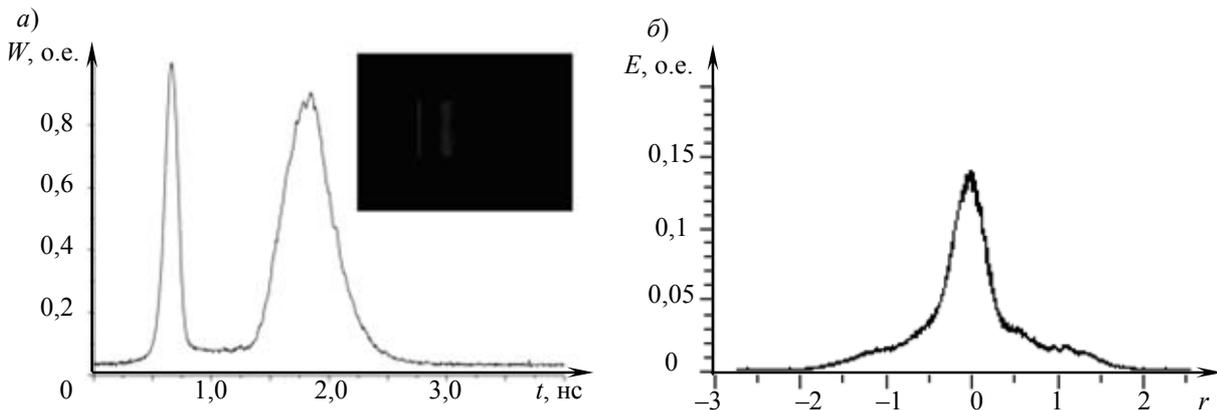


Рис. 4

Особый интерес представляет схема усиления стоксова импульса, инициированного „лидирующей“ частью кегель-импульса на фундаментальной частоте, в дополнительном комбинационно-активном кристалле, расположенном до фокусирующей линзы. Для этого в экспериментальную установку вносится дополнительный ВКР-активный кристалл RC_2 (см. рис. 1). Он располагается на расстоянии L_{opt} от кристалла RC_1 , которое определяется временным интервалом τ_d между субимпульсами:

$$L_{\text{opt}} \approx \frac{\tau_d c}{2},$$

где c — скорость света.

Диаметр входного пучка подбирается таким образом, чтобы величина полного инкремента ВКР-усиления в кристалле RC_2 была значительно ниже порога генерации стоксовой компоненты. Дифракционная расходимость нелинейно отраженного из объема кристалла RC_1 пучка на стоксовой частоте в условиях полного насыщения минимум в λ_{s1}/λ_p раз выше излучения накачки. Кроме того, диаметр этого пучка при обратном проходе может регулироваться уровнем насыщения усиления в кристалле RC_1 . Поэтому эффективное ВКР-усиление может проходить по всему объему кристалла RC_2 , заполненному многомодовым излучением накачки. Как известно, это практически не ухудшает качество усиливаемого пучка [8]. Для управления значением τ_d может быть использовано выходное зеркало с неравномерным профилем коэффициента отражения по поперечному сечению, например активное зеркало, представляющее собой интерферометр Фабри — Перо с неплоскими зеркалами [14].

Заключение. В результате проведенного исследования процесса обратного ВКР-преобразования излучения микрочип-лазера в кристалле нитрата бария впервые, насколько известно авторам, экспериментально показана возможность эффективного ВКР-преобразования во встречном направлении для импульсов с энергией на уровне нескольких десятков микроджоулей при частотах повторения импульсов до 1 кГц. При выбранных параметрах фокусировки максимально полученный коэффициент ВКР-преобразования в 1 стоксову компоненту в однокаскадной схеме составил более 50 %, а максимальный коэффициент временной компрессии — 6,4. Частота повторения импульсов ограничивалась лишь возникновением аберрированной тепловой линзы в микрочип-лазере. Предложена схема ВКР-преобразования с дополнительным усилением компрессированного стоксова импульса в поле второго субимпульса микрочип-лазера, работающего в „кегельном“ режиме генерации.

Результаты проведенных исследований могут быть использованы при разработке простых компактных лазеров, генерирующих пикосекундные импульсы миллиджоульного уровня с высокой частотой повторения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Molva E.* Microchip lasers and their applications in optical microsystems // *Optical Materials*. 1999. Vol. 11. P. 289—299.
2. *Zayhowski J. J.* Microchip lasers // *Optical Materials*. 1999. Vol. 11. P. 255—267.
3. *Zayhowski J. J.* Passively Q-switched Nd:YAG microchip lasers and applications // *J. of Alloys and Compounds*. 2000. Vol. 303—304. P. 393—400.
4. *Okhrimchuk A. G., Shestakov A. V.* The time and spatial dynamics of the YAG:Nd³⁺/YAG:Cr⁴⁺ microchip laser emission // *Proc. of SPIE*. 2007. Vol. 6610. P. 661002-1—661002-10.
5. Электронный ресурс: <<http://buyersguide.laserfocusworld.com/Search/specs/6692/diodepumped-solidstate-lasers-pulsed.html>>.
6. *Braun B., Kärtner F. X., Zhang G., Moser M., Keller U.* 56-ps passively Q-switched diode-pumped microchip laser // *Optics Letters*. 1997. Vol. 22, N 6. P. 381—383.
7. *Maier M., Kaiser W., Giordmaine J. A.* Backward stimulated Raman scattering. // *Physical Rev.* 1969. Vol. 177, N 2. P. 580—599.
8. *Грасюк А. З.* Генерация и усиление света на основе вынужденного рассеяния // *Тр. ФИАН им. П. Н. Лебедева*. 1974. Т. 76. С. 75—116.
9. *Zverev P. G., Basiev T. T., Prokhorov A. M.* Stimulated Raman scattering of laser radiation in Raman crystals // *Optical Materials*. 1999. Vol. 11. P. 335—352.

10. Карпунин С. Н., Яшин В. Е. Генерация и усиление излучения при ВКР в кристаллах // Квантовая электроника. 1984. Т. 11, № 10. С. 1992—1999.
11. Иванов В. Б., Мак А. А., Паперный С. Б., Серебряков В. А. Формирование пикосекундных импульсов при обратном ВКР // Там же. 1986. Т. 13, № 4. С. 857—861.
12. Горбунов В. А., Иванов В. Б., Паперный С. Б., Старцев В. П. Сжатие импульсов во времени при обратном вынужденном рассеянии // Изв. АН СССР. Сер. физическая. 1984. Т. 48, № 4. С. 1580—1590.
13. Zaporozhchenko R. G., Zakharova I. S., Kotaev G. G. Laser pulses shortening at transient backward SRS and forward scattering suppression // J. of Modern Optics. 1992. Vol. 39, N 4. P. 863—870.
14. Гагарский С. В., Кийко В. В., Кондратьев В. А., Подвязников В. А., Сергеев А. Н., Чевокин В. К. Управление временными характеристиками излучения $\text{ND}^{+3}:\text{YAG}:\text{CR}^{+4}$ -минилазера с использованием активной внутрирезонаторной оптики // Настоящий выпуск. С. 18—25.

Сведения об авторах

- Сергей Валерьевич Гагарский** — канд. физ.-мат. наук; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерной техники и биомедицинской оптики; E-mail: s.gagarsky@mail.ru
- Вадим Вениаминович Кийко** — канд. техн. наук; Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, кафедра мощных лазеров, Москва; E-mail: hkww@mail.ru
- Владимир Андреевич Кондратьев** — аспирант; Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, кафедра мощных лазеров, Москва; E-mail: vladkondr-88@mail.ru
- Андрей Николаевич Сергеев** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерной техники и биомедицинской оптики; E-mail: mg_phoenix@yahoo.com
- Валерий Юрьевич Храмов** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерной техники и биомедицинской оптики; заведующий кафедрой; E-mail: khramov@grv.ifmo.ru
- Виктор Эрнстович Яacobсон** — канд. физ.-мат. наук; ОАО «Научно-исследовательский и технологический институт оптического материаловедения Всероссийского научного центра „ГОИ им. С. И. Вавилова“», Санкт-Петербург; ведущий научный сотрудник; E-mail: Jacobson@goi.ru, jacobsonve@yandex.ru

Рекомендована кафедрой лазерной техники и биомедицинской оптики

Поступила в редакцию
26.04.13 г.