

УДК 535.338.1

ОСОБЕННОСТИ ГЕНЕРАЦИИ ФЕМТОСЕКУНДНОГО СПЕКТРАЛЬНОГО СУПЕРКОНТИНУУМА В КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СРЕДАХ**С $\chi^{(2)}$ -НЕЛИНЕЙНОСТЬЮ**

С.С. Налегает, В.Г. Беспалов, С.Э. Путилин

Приведены результаты экспериментов по генерации суперконтинуума при возбуждении оптическими импульсами с центральной длиной волны 830 нм, длительностью 40–50 фс и энергией до 1,0–1,5 мДж. В кристалле DKDP и других кристаллах с нелинейностью $\chi^{(2)}$ зарегистрировано излучение суперконтинуума в области от 400 нм до 2200 нм, причем излучение в синей области (400–480 нм) и в ИК области (900–2200 нм) обусловлено в основном параметрическими процессами. Полученное излучение не уступает по ширине выходного спектра излучению генераторов суперконтинуума на основе микроструктурированных волокон.

Ключевые слова: фемтосекундные импульсы, нелинейность $\chi^{(2)}$, нелинейность $\chi^{(3)}$, генерация суперконтинуума, параметрическая генерация.

Введение

Генерация белого света, или генерация спектрального суперконтинуума (СК) [1], заключается в получении оптического излучения с непрерывным или иногда дискретным спектром, ширина которого составляет обычно не менее одной октавы (т.е. частоты фурье-компонент в спектре излучения отличаются в два раза), с использованием импульсных лазеров пико- и фемтосекундной длительности. Такое спектрально уширенное излучение, как правило, является результатом нелинейного оптического пространственно-временного преобразования поля сверхкоротких лазерных импульсов высокой интенсивности в диэлектрических средах [2].

Как правило, в генераторах СК используются преимущественно среды с большей нелинейностью $\chi^{(3)}$, однако при этом относительно малый вклад вносят параметрические процессы. Применение в качестве генераторов СК кристаллических сред, обладающих одновременно существенными нелинейностями $\chi^{(2)}$ и $\chi^{(3)}$, позволит увеличить вклад параметрических процессов и получить более широкий выходной спектр.

Генераторы СК в настоящее время применяются в экспериментах по «pump-probe» спектроскопии [3], в оптической метрологии [4], оптической когерентной томографии [5] и др. [1]. Расширение спектра СК очень важно для технологических целей, так как одна из возможных сфер использования генерации СК, это передача информации, в том числе по оптоволоконным линиям связи, где используется ИК диапазон длин волн (1300–1600 нм). Расширение спектра СК увеличивает диапазон частот и соответственно – количество каналов передачи информации, повышая, таким образом, общую скорость передачи [6].

Следует отметить, что планомерных исследований генерации белого света при использовании нелинейно-квадратичных кристаллических сред и импульсного излучения накачки высокой плотности мощности и фемтосекундной длительности, в том числе и возможности расширения в ИК область спектра, не проводилось.

Целью настоящей работы является определение оптимальных условий генерации сверхширокополосного спектрального СК в средах с нелинейностью $\chi^{(2)}$, обладающих также существенной нелинейностью $\chi^{(3)}$, а также выявление особенностей его излучения. В качестве сред с нелинейностью $\chi^{(2)}$ использовались образцы кристаллов DKDP, KDP и LiIO₃. Для сравнения были проведены измерения спектров излучения СК на образце кристалла LiF с кубическим типом решетки.

Методика проведения измерений и описание экспериментального макета

Кристаллы KDP и DKDP широко используются для генерации второй гармоники лазерного излучения, обладают высокой лазерной прочностью и достаточно высокими нелинейными коэффициентами, как $\chi^{(2)}$, так и $\chi^{(3)}$, одновременно [7]. Более высокая лучевая прочность позволила безопасно повысить плотность мощности излучения накачки (относительно других кристаллов – LiF и LiIO₃), а вместе с этим и поднять эффективность преобразования в СК.

Образцы LiF были добавлены в исследуемую группу в качестве объектов сравнения, по которым можно оценить вклад квадратично-нелинейных процессов при генерации СК, так как вследствие кубической centrosymmetric решетки все элементы тензора нелинейной восприимчивости второго порядка $\chi^{(2)}$ данного кристалла равны нулю.

Кристалл LiIO₃, также как и KDP или DKDP, используется для генерации второй гармоники и в параметрических генераторах, но его лучевая прочность заметно ниже, поэтому необходимо было

уменьшать плотность мощности лазерного излучения накачки в процессе экспериментов. Поэтому одной из задач исследования было выяснение влияния интенсивности накачки на ширину спектра СК.

Под оптимальными условиями генерации в работе понимается изменение условий фазировки различных компонент СК при варьировании угла распространения преломленного луча накачки в объеме исследуемого кристалла, что осуществлялось путем поворота кристалла в двух плоскостях относительно оси накачки.

Следует отметить, что выбранные для эксперимента образцы кристаллов KDP, DKDP и LiIO₃ были предназначены для генерации второй гармоники на длине волны 1,064 мкм, и для обеспечения синхронизма на центральной длине волны накачки $\lambda = 830$ нм их было необходимо повернуть на легко определяемый угол [7].

Характеристики фемтосекундной лазерной системы на кристаллах сапфира, активированных титаном, использовавшиеся в экспериментах, подробно описаны в [8]. Энергия и длительность одиночного импульса составляли соответственно 1,0–1,5 мДж и 40–50 фс, а средняя мощность лазерного излучения – 50–75 мВт (при частоте следования импульсов 50 Гц).

В экспериментальном макете (рис. 1) излучение накачки, приходящее слева, фокусируется линзой 1, за которой на некотором расстоянии от фокуса устанавливается исследуемый образец кристалла 3 на столике 2. Прошедшее сквозь образец излучение далее собирается линзой 4 и направляется на матовую пластинку 5, установленную в ее фокусе, после чего проходит несколько оптических фильтров 6 и попадает на вход спектрографа 7 «ASP-100» (диапазон измерений 0,19–1,1 мкм) или спектрографа «EPP2000-NIRX-SR-512» (0,9–2,3 мкм).

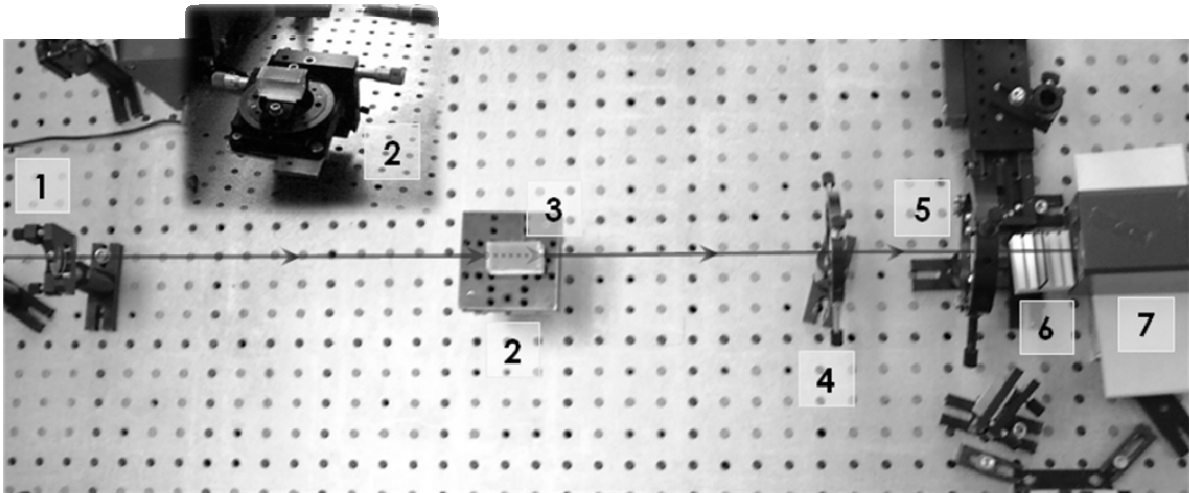


Рис. 1. Экспериментальный макет для генерации спектрального СК: 1, 4 – линзы; 2 – двухкоординатный столик-вращатель; 3 – исследуемый образец кристалла; 5 – матовая пластинка; 6 – светофильтры; 7 – спектрограф «ASP-100» (0,19–1,1 мкм) или «EPP2000-NIRX-SR-512» (0,9–2,3 мкм)

Данные со спектрографов в ходе экспериментов сохранялись в памяти персонального компьютера; для минимизации погрешностей при каждом эксперименте записывалось около сотни спектров генерации СК и спектров шумового сигнала. Для обработки результатов было разработано специальное программное обеспечение, позволяющее сократить время анализа записанных данных.

Результаты эксперимента

На рис. 2 представлены графики излучения спектрального СК при использовании кристалла DKDP для нескольких измеренных экспериментально углов отклонения преломленного пучка накачки относительно оптической оси кристалла. Цифрами и вертикальными линиями (со значениями длин волн) отмечены области спектра, в которых происходит процесс преобразования излучения (с отмеченными значениями длин волн) в излучение второй гармоники. При повороте кристалла изменяются условия генерации второй гармоники – фазовый синхронизм начинает выполняться для излучения на другой, смещенной (в зависимости от угла) частоте фурье-компоненты СК. На рис. 3 представлен график излучения спектрального СК для одного из углов отклонения в ИК диапазоне спектра. Аналогичные экспериментальные результаты были получены и с использованием кристалла KDP.

Суперконтинуум, полученный при генерации с использованием кристалла LiIO₃, достаточно заметно уступает выходному спектрально-уширенному излучению при использовании кристаллов KDP и DKDP как по общей ширине выходного спектра СК, так и по интенсивности в ближней ИК области

спектра, поскольку интенсивность накачки в данном случае была в 5–6 раз меньше, чем при использовании KDP и DKDP, из-за вероятности оптического пробоя поверхности кристалла.

Спектр генерации СК при использовании кристалла LiF также существенно уже, чем при использовании сред с выраженной квадратичной нелинейностью, как по общей ширине выходного спектра СК, так и по интенсивности в ближней ИК области спектра. Мощность излучения спектрального СК в ИК области более чем вдвое ниже, чем соответствующая мощность на выходе кристаллов KDP и DKDP, что объясняется происходящими в них процессами, основанными на $\chi^{(2)}$ -нелинейности, среди которых наибольший вклад имеют процессы параметрической генерации света, а именно – генерация разностной и суммарной частот. Более подробный анализ происходящих процессов будет представлен в следующей работе.

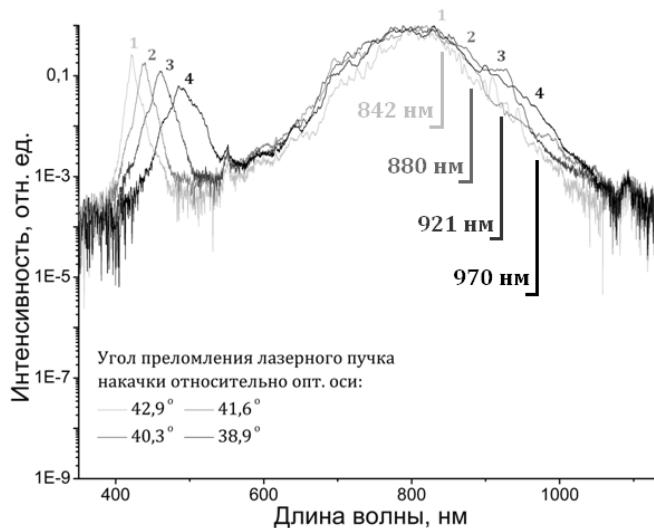


Рис. 2. Спектральные зависимости генерации СК от угла распространения преломленного пучка излучения накачки в объеме кристалла DKDP (энергия импульса накачки 1,0–1,5 мДж, длительность импульса 40–50 фс). Цифрами 1–4 отмечены длины волн, соответствующие генерации второй гармоники от соответствующих фурье-компонент СК

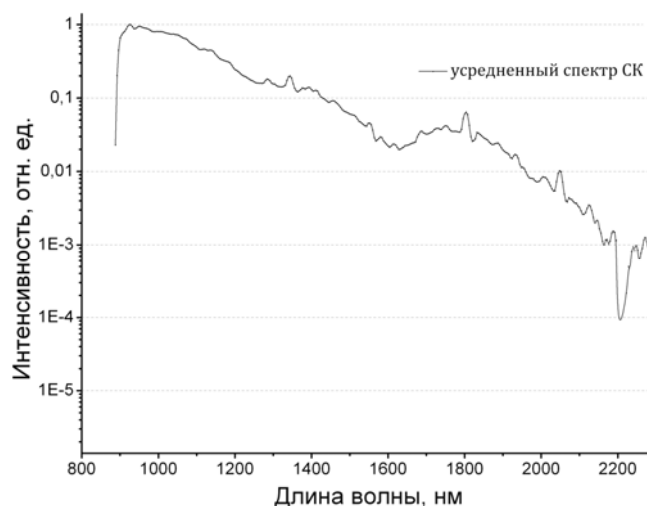


Рис. 3. Спектр генерации СК DKDP в ИК области спектра (энергия импульса накачки 1,0–1,5 мДж, длительность импульса 40–50 фс)

Заключение

Полученное экспериментально излучение суперконтинуума в средах с нелинейностью $\chi^{(2)}$ практически не уступает по ширине выходного спектра широко распространенным в настоящее время генераторам на основе оптических волокон различных типов. Следует отметить, что объемные нелинейно-квадратичные среды позволяют достаточно эффективно генерировать излучение суперконтинуума в синей (400–480 нм) и ИК (900–2200 нм) областях спектра, причем, изменяя угол падения накачки на кристалл, можно регулировать интенсивность суперконтинуума по спектру, выделяя отдельные спектральные полосы.

Использование в качестве сред для генерации кристаллов с квадратичной нелинейностью позволяет заметно расширить выходной спектр излучения (в том числе в коротковолновой области – за счет генерации второй гармоники), а также существенно повысить эффективность генерации спектрального суперконтинуума в ИК области спектра в сравнении со средами, у которых преобладает нелинейность, связанная с $\chi^{(3)}$. В связи с этим метод получения излучения сверхширокополосного спектрального суперконтинуума на основе нелинейных кристаллов $\chi^{(2)}$ имеет перспективы использования в областях современной науки и технологий, например, как источник излучения для оптической томографии, метрологии или «pump-probe» спектроскопии.

Литература

1. Alfano R.R. The Supercontinuum Laser Source: Fundamentals with Updated References. – N.Y.: Springer-Verlag, 2005. – 552 p.
2. Беспалов В.Г., Козлов С.А., Сутягин А.Н., Шполянский Ю.А. Сверхуширение спектра интенсивных фемтосекундных лазерных импульсов и их временное сжатие до одного колебания светового поля // Оптический журнал. – 1998. – Т. 65. – № 10. – С. 85–88.
3. Крылов В.Н., Беспалов В.Г., Стаселько Д.И., Лобанов С.А., Милогладов Э.В., Seyfang G. Спектральные особенности взаимодействия разночастотных фемтосекундных импульсов света в приграничных областях керровской среды // Оптика и спектроскопия. – 2005. – Т. 99. – № 5. – С. 853–858.
4. Багаев С.Н., Денисов В.И., Захарьяш В.Ф., Каширский А.В., Клементьев В.М., Кузнецов С.А., Корель И.И., Пивцов В.С. Фемтосекундные оптические часы // Квант. электроника. – 2004. – Т. 34. – № 12. – С. 1096–1100.
5. Гуров И.П. Оптическая когерентная томография: принципы, проблемы и перспективы // Проблемы когерентной и нелинейной оптики / Под ред. И.П. Гурова, С.А. Козлова. – СПб: СПбГУ ИТМО. – 2004. – С. 6–30.
6. Беспалов В.Г., Васильев В.Н., Козлов С.А., Шполянский Ю.А. Использование фемтосекундного суперконтинуума в системах сверхплотной передачи информации // Сборник статей «Оптические и лазерные технологии». – СПб: СПб ГИТМО (ТУ), 2001. – С. 214–219.
7. Дмитриев В.Г., Тарасов Л.В., Прикладная нелинейная оптика. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 512 с.
8. Беспалов В.Г., Киселев В.М., Кисляков И.М. и др. Антистоксов самосдвиг и уширение спектра излучения фемтосекундного лазера в сильно поглощающей среде // Оптика и спектроскопия. – 2009. – Т. 106. – № 4. – С. 670–679.

- Налегаев Сергей Сергеевич** – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, fioi@inbox.ru
- Беспалов Виктор Георгиевич** – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доктор физ.-мат. наук, профессор, victorbespaloff@gmail.com
- Путилин Сергей Эдуардович** – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат физ.-мат. наук, ст. научный сотрудник, SEPutilin@yandex.ru