

Высокоэффективная генерация второй и третьей гармоник излучения фемтосекундного хром-форстеритового лазера в нелинейно-оптических кристаллах

В.М.Гордиенко, С.С.Гречин, А.А.Иванов, А.А.Подшивалов

Получена высокоэффективная генерация второй (эффективность преобразования $\eta_{2\omega} = 69\%$) и третьей ($\eta_{3\omega} = 26\%$) гармоник излучения хром-форстеритового лазера в фемтосекундном диапазоне длительностей. Показано, что при интенсивности накачки, большей 50 ГВт/см^2 ($\eta_{2\omega} = 60\%$) существенную роль начинает играть нелинейность третьего порядка, что приводит к ухудшению спектральных характеристик генерируемых гармоник.

Ключевые слова: генерация гармоник, фемтосекундное излучение.

Целью настоящей работы является изложение результатов исследования высокоэффективной генерации второй и третьей гармоник излучения импульсно-периодической фемтосекундной лазерной системы на хром-форстерите ($\text{Cr}^{3+}:\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ (Cr:F)), работающей на длине волны $\lambda = 1.24 \text{ мкм}$ при длительности генерируемых импульсов $\tau = 110 \text{ фс}$ и энергии импульса $E \sim 1 \text{ мДж}$. В проведенных экспериментах достигнута эффективность преобразования по энергии во вторую гармонику 69% , а в третью – 26% . Исследование проведено в широком диапазоне интенсивностей, включая режим насыщения, обусловленный влиянием нелинейности третьего порядка.

Высокоэффективное преобразование излучения Cr:F-лазера во вторую и третью гармоники актуально тем, что позволяет существенно повысить контраст фемтосекундных импульсов. Генерация второй гармоники (ГВГ) излучения фемтосекундного Cr:F-лазера может развиваться в условиях, близких к условию группового синхронизма взаимодействующих волн [1–3], что и обеспечивает возможность реализации режима высокоэффективного нелинейно-оптического преобразования. Увеличение интенсивности излучения накачки для достижения предельной эффективности преобразования приводит к тому, что становится существенным влияние эффектов, обусловленных нелинейностью третьего порядка $\chi^{(3)}$ [4]. Эти эффекты приводят, во-первых, к сбою фазы между генерируемыми волнами и, как следствие, к ограничению эффективности преобразования, а во-вторых, к деформации спектра генерируемого излучения. В [5] на кристалле LBO была получена ГВГ излучения фемтосекундного Cr:F-лазера ($\tau \sim 200 \text{ фс}$) с максимальной эффективностью преобразования $\eta_{2\omega} \sim 50\%$ в условиях, когда влияние нелинейности третьего порядка мало.

Выбор оптимального кристалла для генерации гармоник фемтосекундного излучения Cr:F-лазера может

быть осуществлен на основе анализа дисперсионных и нелинейных свойств кристаллов [3], который необходимо дополнить данными о кубической нелинейности $\chi^{(3)} \sim n_2$. В табл.1 для наиболее эффективных для каждого типа взаимодействия кристаллов приведены коэффициенты эффективной нелинейности d_{eff} , групповые длины L_{gr} ($\tau = 100 \text{ фс}$) и нормированные характеристические коэффициенты K [3], которые и определяли выбор оптимального кристалла. Из имеющихся в литературе данных о нелинейном коэффициенте n_2 выбраны значения, полученные на длинах волн, наиболее близких к длинам волн излучения Cr:F-лазера и его гармоник.

В эксперименте по ГВГ нами использовался кристалл LBO ($\varphi = 0$, $\theta = 87^\circ$) длиной 4 мм с антиотражающими покрытиями на обеих гранях. На рис.1 показана экспериментальная зависимость эффективности преобразования во вторую гармонику от интенсивности накачки. Максимальная эффективность преобразования 69% получена при интенсивности излучения накачки 180 ГВт/см^2 , однако при эффективности свыше 60% наблюдалось уширение спектра излучения второй гармоники, свидетельствующее о влиянии нелинейности третьего порядка (см. вставку на рис.1). На рис.1 приведены также рассчитанные теоретически с использованием спектральной модели [10] зависимости эффективности преобразования от интенсивности накачки без учета и с учетом влияния эффектов фазовой самомодуляции и кросс-модуляции. В расчете использовались следующие значения коэффициентов: $d_{\text{eff}} = 0.72 \text{ пм/В}$, $n_2(1240 \text{ нм}) = 10^{-16} \text{ см}^2/\text{Вт}$, $n_2(620 \text{ нм}) = 2 \times 10^{-16} \text{ см}^2/\text{Вт}$ [6].

Табл.1. Характеристики кристаллов, наиболее эффективных для генерации второй и третьей гармоник излучения Cr:F-лазера.

Гармоники излучения	Кристалл	d_{eff}^2/n^3 ($\text{пм}^2/\text{В}^2$)	L_{gr} (мм)	K	n_2 ($10^{-16} \text{ см}^2/\text{Вт}$)
вторая	LBO	0.23	10.6	1	2 (616 нм) [6]
	CDA	0.04	9.3	0.13	–
	DCDA	0.04	6.7	0.07	–
третья	BBO	0.41	2.3	8.3×10^{-2}	5.2 (400 нм) [7]
	LBO	0.24	1.0	9.3×10^{-3}	2 (616 нм)
	KDP	0.05	1.9	6.8×10^{-3}	2.8 (1064 нм) [8]
	KDP	0.05	1.9	6.8×10^{-3}	8.4 (400 нм) [9]

В.М.Гордиенко, С.С.Гречин, А.А.Подшивалов. Международный учебно-научный лазерный центр МГУ им. М.В.Ломоносова, Россия, 119992 Москва, Воробьевы горы; e-mail: gord@femtosrv.phys.msu.ru, grechin@psi.phys.msu.ru

А.А.Иванов. Центр фотохимии РАН, Россия, 117421 Москва, ул. Новаторов, 7а

Поступила в редакцию 7 апреля 2005 г.

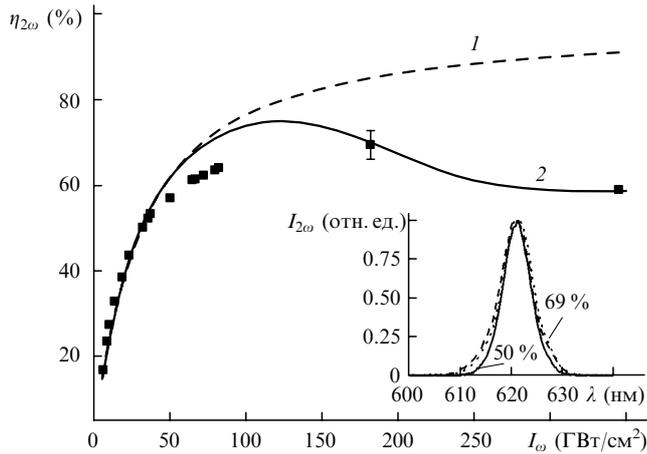


Рис.1. Зависимости эффективности ГВГ $\eta_{2\omega}$ от интенсивности накачки на основной частоте I_{ω} , полученные без учета (1) и с учетом (2) влияния эффекта фазовой самомодуляции и кросс-модуляции. На вставке – спектры импульса излучения второй гармоники при разных эффективностях преобразования.

Полученные данные свидетельствуют о том, что при интенсивности накачки свыше 50 ГВт/см^2 влияние эффектов, обусловленных нелинейностью третьего порядка, становится существенным и спектральные характеристики генерируемого излучения начинают ухудшаться. Таким образом, эффективность ГВГ излучения Cr:F -лазера $\eta_{2\omega} = 60\%$ является максимальной при условии сохранения характеристик генерируемого излучения. Измеренная кросс-корреляционным методом длительность импульса излучения второй гармоники равна $80 \pm 5 \text{ фс}$, что совпадает с рассчитанной длительностью импульса 85 фс . Это также подтверждает тот факт, что преобразование во вторую гармонику происходит в режиме, близком к режиму группового синхронизма.

Для генерации третьей гармоники (ГТГ) нами использовались кристаллы KDP ($\varphi = 45^\circ$, $\theta = 45^\circ$) и LBO ($\varphi = 0$, $\theta = 8^\circ$) длиной 1 мм без антиотражающих покрытий. На рис.2 показаны зависимости эффективности ГТГ от интенсивности основного излучения. Соотношение интенсивностей падающего на кристалл основного излучения и излучения второй гармоники изменялось от 1:1 до 1:2.

Для теоретического расчета использовались табличные данные для кристалла KDP ($d_{36} = 0.42 \text{ пм/В}$ [11] и $n_2 = 8.4 \times 10^{-16} \text{ см}^2/\text{Вт}$ [9]) и данные для кристалла LBO, полученные из анализа эксперимента по ГВГ. Теоретические результаты хорошо согласуются с экспериментальными.

Максимальная эффективность преобразования составила 26% для кристалла LBO и 24% для кристалла KDP (с учетом френелевского отражения ($\sim 4\%$) излучения от

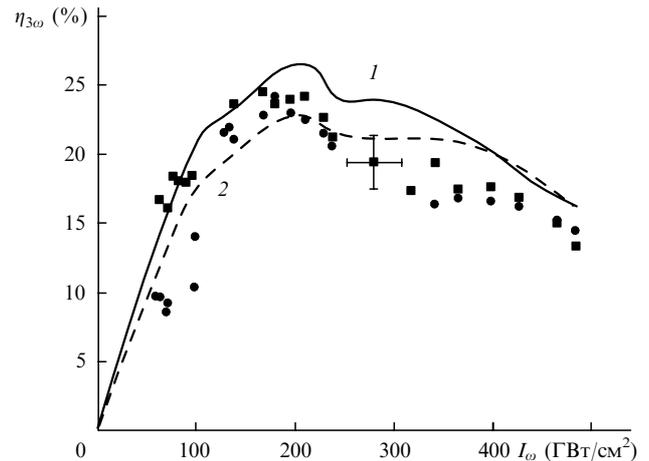


Рис.2. Зависимости эффективности ГТГ $\eta_{3\omega}$ от интенсивности накачки на основной частоте I_{ω} при преобразовании излучения в кристаллах LBO (1, ■) и KDP (2, ●). Точки – экспериментальные данные, кривые – результаты расчета с помощью спектральной модели.

каждой грани кристалла). При эффективности преобразования более 20% в кристалле LBO наблюдалось уширение спектра генерируемого излучения. Таким образом, эффективность ГТГ $\eta_{3\omega} = 20\%$ в кристалле LBO является максимальной при условии сохранения характеристик генерируемого излучения.

Работа частично поддержана грантами РФФИ № 03-02-16973а и 05-02-16476.

1. Лукашев А.А., Магницкий С.А., Прялкин В.И. *Изв. РАН. Сер. физич.*, **59** (12), 123 (1995).
2. Гордиенко В.М., Иванов А.А., Подшивалов А.А., Прялкин В.И. *Квантовая электроника*, **31**, 391 (2001).
3. Гречин С.С., Прялкин В.И. *Квантовая электроника*, **33**, 737 (2003).
4. Разумихина Т.Б., Телегин Л.С., Холодных А.И., Чиркин А.С. *Квантовая электроника*, **11**, 2026 (1984); Ахманов С.А., Дмитриев В.Г. *Вестник Моск. ун-та. Сер. Физика и астрономия*, № 3, 85 (1963).
5. Shcheslavskiy V., Petrov V., Noack F., Zhavoronkov N. *Appl. Phys. B*, **69**, 167 (1999).
6. Bayanov I.M., Gordienko V.M., Djidjoev M.S., Dyakov V.A., Magnitskii S.A., Pryalkin V.I., Tarasevitch A.P. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **1800**, 2 (1991).
7. Rodriguez G., Taylor A.J. *Opt. Lett.*, **23**, 858 (1998).
8. Kurnit N.A., Shimada T., Sorem M.S., Taylor A.J., Rodriguez G., Clement T.S., Fearn H., James D.F., Milonni P.W. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3047**, 387 (1997).
9. Aoyama M., Harimoto T., Ma J., Akahane Y., Yamakawa K. *Opt. Express*, **9** (11), 579 (2001).
10. Гречин С.С. *Квантовая электроника*, **35**, 257 (2005).
11. Dmitriev V.G., Gurzadyan G.G., Nikogosyan D.N. *Handbook of Nonlinear Optical Crystals* (Berlin: Springer-Verlag, 1999).