

Перевод йодного лазера "Искра-5" в режим работы на второй гармонике

В. И. Анненков, В. И. Беспалов*, В. И. Бредихин*, Л. М. Виноградский, В. А. Гайдаш, И. В. Галахов, С. Г. Гаранин, В. П. Ершов*, Н. В. Жидков, В. В. Зильберберг*, А. В. Зубков, С. В. Калипанов, В. А. Каргин, Г. А. Кириллов, В. П. Коваленко, Г. Г. Кочемасов, А. Г. Кравченко, В. А. Кротов, В. П. Лазарчук, С. Г. Лапин, В. М. Логинов*, С. Л. Логутенко, В. М. Муругов, В. А. Осин, В. И. Панкратов, М. Ю. Ромашов, А. В. Рядов, С. К. Соболев, И. И. Соломатин, Г. В. Тачаев, В. С. Файзуллин, В. А. Хрусталеv, Н. М. Худиков, В. С. Чеботарь

Сообщается о переводе йодного лазера "Искра-5" в режим облучения термоядерных мишеней излучением второй гармоники ($\lambda = 657,5$ нм). Модернизация лазера позволила получить суммарную энергию излучения второй гармоники с 12 каналов, равную 2,5 кДж, что соответствует мощности излучения 5 ТВт. Эффективность преобразования при использовании кристаллов DKDP с апертурой 35 см в экспериментах составила ~50%. Проведена серия 12-канальных экспериментов с облучением микромишеней излучением второй гармоники.

Процесс взаимодействия мощного лазерного излучения (ЛИ) с веществом при интенсивностях $I_{\text{las}}\lambda^2 \geq 10^{14}$ мкм²·Вт/см² (I_{las} – интенсивность лазерного излучения, λ – длина волны) является существенно нелинейным. Генерация быстрых электронов и ионов (см., напр., [1]), а также низкая эффективность классического тормозного поглощения приводят к снижению эффективности энергоклада ЛИ в лазерную микромишень. Это является причиной того, что на мощных лазерных установках, предназначенных для исследований физики лазерного термоядерного синтеза, облучение мишеней осуществляется второй или третьей гармоникой основного излучения.

© Квантовая электроника. 2005. Т. 35, № 11.

* Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород.

Мощная лазерная 12-канальная установка "Искра-5" [2], на которой, в основном, проводятся исследования мишеней непрямого облучения [3], была изначально спроектирована для исследований на первой гармонике йодного лазера ($\lambda_1 = 1315$ нм). Однако необходимость отработки методики исследований процессов, происходящих в термоядерных мишенях, в интересах создаваемой в РФЯЦ-ВНИИЭФ установки "Искра-6" потребовала перевода установки "Искра-5" в режим работы облучения мишеней излучением второй гармоники ($\lambda_2 = 657,5$ нм).

Вопрос эффективного преобразования мощного лазерного излучения во вторую гармонику (2ω) хорошо изучен как теоретически, так и экспериментально. Имеется большое количество публикаций по преобразованию во вторую гармонику излучения мощных неодимовых и йодных лазеров (см., напр., [4–7]). В частности на йодном лазере "Искра-4" показано [7], что для преобразования излучения во вторую гармонику необходимо использовать кристаллы DKDP, так как они прозрачны для рабочей длины волны 1315 нм, имеют большую лучевую прочность и могут быть выращены до большого размера.

Вместе с тем практическая реализация режима работы на второй гармонике для каждой конкретной лазерной установки имеет свои особенности. Поэтому при переводе лазера "Искра-5" в этот режим работы ($\lambda = 657,5$ нм) были проведены исследования параметров реального выходного излучения лазера и осуществлен выбор оптимальной оптической схемы для преобразования во вторую гармонику [8, 9]. В этих работах исследовались условия эффективного преобразования излучения (по схеме *оee*) при использовании кристаллов DKDP большой апертуры, полученных методом быстрого роста [10].

Кристаллы DKDP (рис. 1) с апертурой 35 см были выращены в ИПФ РАН (Нижний Новгород). Они имеют толщину 2 см, на обе грани нанесено покрытие "Розакор" для защиты от влажности, лучевая прочность которого равна ~ 3 Дж/см² при длительности импульса на основной частоте $\tau_{0,5} \sim 0,5$ нс.

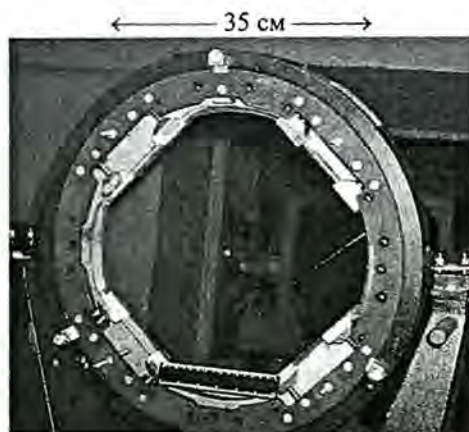


Рис. 1. Кристалл DKDP большой апертуры в юстировочной оправе

Для согласования апертуры применяемых кристаллов DKDP с апертурой выходного каскада усиления У4 последняя была уменьшена с 70 до 35 см. Оптическая схема канала после модернизации представлена на рис. 2. По сравнению с [2] расположение электроразрядных источников накачки усилителя У4м было изменено так, чтобы получить "чистую" апертуру квадратного сечения с размерами $\sim 30 \times 30$ см, согласованную с апертурой кристаллов DKDP. Уменьшение выходной апертуры достигается путем изменения телескопа, образованного линзами Л9–Л9'. Кроме то-

го, по сравнению с [2] из канала исключен каскад усиления У3, который находился между зеркалом ЗТ2 и линзой Л11. После модернизации лазера каждый канал позволяет получить в апертуре 35 см моноимпульс первой гармоники с энергией до 1 кДж, длительностью 0,3–0,8 нс, расходимостью 0,1 мрад и интегральной по пучку степенью деполяризации излучения на основной частоте ~ 5 %. Кристалл DKDP для преобразования излучения во вторую гармонику расположен на выходе канала. Необходимые для обеспечения фазового синхронизма углы наклона кристалла выставляются при помощи автоколлимационного теодолита 2Т2А с погрешностью не более 0,1 мрад.

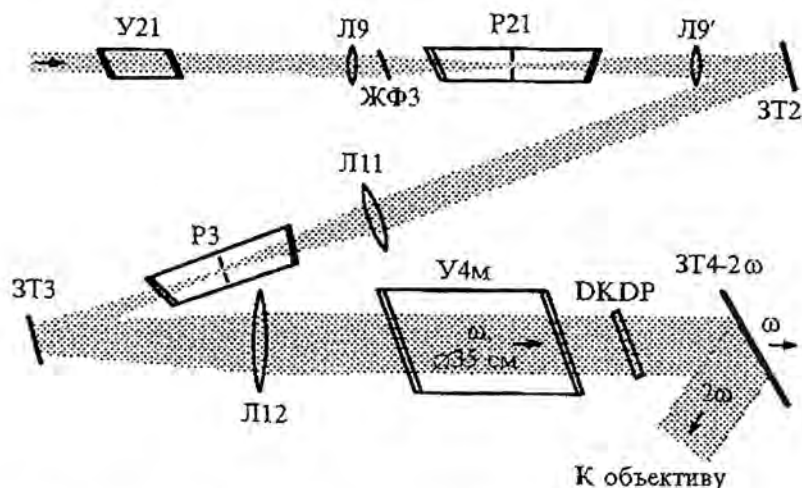


Рис. 2. Фрагмент оптической схемы одного канала установки "Искра-5" после перевода в режим работы на второй гармонике: У21, У4м – каскады усиления; ЖФ3 – жидкостной краситель; P21, P3 – пространственные фильтры; Л9, Л9', Л11 и Л12 – линзы; ЗТ2, ЗТ3 – поворотные зеркала; ЗТ4-2ω – селективное зеркало; DKDP – нелинейный кристалл-преобразователь

После модернизации лазера были проведены исследования эффективности преобразования излучения во вторую гармонику [8, 9], результаты которых приведены на рис. 3. Видно, что для используемых кристаллов DKDP максимальная эффективность достигается при интенсивности излучения на основной частоте 1–2 ГВт/см² и составляет около 60 %. При увеличении средней интенсивности накачки до ~ 3 ГВт/см² из-за деполяризации излучения происходит снижение эффективности преобразования до ~ 35 %. Это сопровождается изменением распределения излучения в ближней зоне на частоте 2ω – оно становится неоднородным (см. рис. 4, где приведены характерные распределения излучения в ближней зоне на частоте 2ω при разных интенсивностях накачки).

При дальнейших исследованиях мы использовали режим работы силовых каскадов У4м с энергией (на частоте ω) с одного канала ~ 500 Дж, что, в свою очередь, позволило получить с каждого канала энергию второй гармоники 200–250 Дж в импульсе длительностью примерно 0,5 нс (при одновременности прихода импульсов от разных каналов на мишень ± 0,1 нс).

ПЕРЕВОД ЙОДНОГО ЛАЗЕРА "ИСКРА-5" В РЕЖИМ РАБОТЫ НА ВТОРОЙ ГАРМОНИКЕ

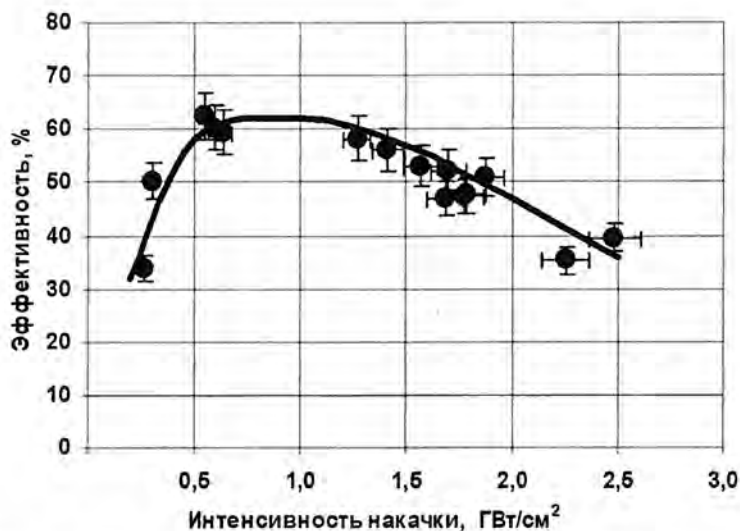


Рис. 3. Зависимости эффективности преобразования излучения во вторую гармонику от средней по времени интенсивности накачки, полученные на йодном лазере "Искра-5": ● — эксперимент; — — аппроксимация



Рис. 4. Характерные распределения интенсивности излучения с частотой 2ω в ближней зоне на выходе канала при разных интенсивностях накачки

Для введения излучения второй гармоники в камеру взаимодействия нами используются селективные зеркала ЗТ4- 2ω (рис. 2), отражающие преимущественно излучение с частотой 2ω ($R_{\omega} < 5\%$, $R_{2\omega} > 95\%$). Такая конструкция позволяет, с одной стороны, значительно уменьшить интенсивность излучения накачки на мишени и, с другой стороны, предотвратить возможное самовозбуждение усилителя У4м. Лучевая прочность покрытий составляет около 3 Дж/см^2 , что является вполне достаточным при их использовании в данной схеме.

По описанной схеме на установке "Искра-5" была проведена серия 4-канальных экспериментов со вводом излучения второй гармоники в камеру взаимодействия. При этом было обнаружено, что в находящихся в ней штатных зеркально-линзовых объективах при прохождении излучения с частотой 2ω разрушаются отражающие покрытия фокусирующих зеркал. Поэтому был рассчитан и изготовлен новый трехкомпонентный линзовый объектив с фокусным расстоянием $F = 1,6 \text{ м}$, состоящий из линзы Л13 старого объектива и двух дополнительных линз диаметром

30 см. Новый объектив позволяет получить для излучения на частоте 2ω диаметр пятна фокусировки ~ 150 мкм и имеет лучевую прочность просветляющего покрытия ~ 2 Дж/см².

После замены всех 12 объективов, на установке "Искра-5" была проведена серия экспериментов с облучением микромишени излучением второй гармоники всех 12 каналов с суммарной энергией 2,6 кДж. Средняя энергия с канала в этих экспериментах составила 220 ± 40 Дж, длительность излучения была равна $0,55 \pm 0,10$ нс, расходимость не превысила 0,1 мрад. Разновременность прихода лазерных импульсов на мишень составляла ± 50 пс. Более подробные результаты экспериментов будут опубликованы в ближайшее время.

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы.

– Модернизация оптической схемы установки "Искра-5" с целью ее перевода в режим работы на второй гармонике позволила получить в каждом канале пучок излучения на основной частоте с энергией до 1 кДж, расходимостью 0,1 мрад, степенью деполяризации 5 % и апертурой 35 см, согласованной с апертурой используемых кристаллов DKDP. Максимально возможная эффективность преобразования во вторую гармонику в условиях установки "Искра-5" для кристаллов DKDP толщиной 2 см была достигнута при интенсивности накачки около 1 ГВт/см² и составила ~ 60 %. Максимальная энергия излучения на второй гармонике, полученная с одного канала, равна 350 Дж при длительности импульса $\sim 0,3$ нс и 500 Дж при длительности $\sim 0,8$ нс.

– Модернизация фокусирующих объективов камеры взаимодействия позволила провести серию 12-канальных экспериментов со вводом в нее излучения второй гармоники с суммарной энергией на частоте 2ω около 2,5 кДж и интегральной длительностью $\sim 0,6$ нс при эффективности преобразования излучения во вторую гармонику ~ 50 %.

Список литературы

1. Lindl J. // Phys. Plasmas. 1995. Vol. 2. P. 3933.
2. Kirillov G. A., Murugov V. M., Punin V. T., Shemyakin V. I. // Laser Particle Beams. 1990. Vol. 8. P. 827.
3. Абзаев Ф.М. // Письма в ЖЭТФ. 1993. Т. 58, № 1. С. 28.
4. Бломберген Н. Нелинейная оптика. М.: Мир, 1966.
5. Бредерлов Г., Филл Э., Витте К. Мощный йодный лазер. М.: Энергоатомиздат, 1985.
6. Summers M. A., Williams J. D., Johnson B. C., Eimerl D. Report LLNL, UCRL 93766, Dec-1985.
7. Воронич И. Н., Зарецкий А. И., Кириллов Г. А. и др. // Изв. АН СССР. Сер. физич. 1988. Т. 52. С. 322.
8. Kovalenko V. P., Annenkov V. I., Gaidash V. A., Kirillov G. A. et al. XXVII Europ. Conf. on Laser Interaction with Matter ECLIM-2002. Moscow, 2002.
9. Kovalenko V. P., Gaidash V. A., Zhidkov N. V. et al. // Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng. 2003. Vol. 5479. P. 93.
10. Беспалов В. И., Бредихин В. И., Ершов В. П. и др. // Квантовая электроника. 1982. Т. 9, № 11. С. 2343.

Conversion of Iodine Laser "Iskra-5" for Operating at the Second Harmonic

V. I. Annenkov, V. I. Bepalov, V. I. Bredikhin, L. M. Vinogradski,
V. A. Gaidash, I. V. Galakhov, S. G. Garanin, V. P. Yershov, N. V. Zhidkov,
V. V. Zilberberg, A. V. Zubkov, S. V. Kalipanov, V. A. Kargin, G. A. Kirillov,
V. P. Kovalenko, G. G. Kochemasov, A. G. Kravchenko, V. A. Krotov,
V. P. Lazarchuk, S. G. Lapin, V. M. Loginov, S. L. Logutenko, V. M. Murugov,
V. A. Osin, V. I. Pankratov, M. Yu. Romashov, A. V. Ryadov, S. K. Sobolev,
I. I. Solomatin, G. V. Tachaev, V. S. Faizullin, V. A. Khrustalev, N. M. Khudikov,
V. S. Chebotar

This paper informs about conversion of iodine laser "Iskra-5" to expose thermal nuclear targets to the second harmonic radiation ($\lambda = 657.5$ nm). Owing to laser improvement 2ω radiation produced by 12 channels provided the total energy of 2.5 kJ, i. e. the radiation power of 5 TW. In the experiment DKDP crystals with the aperture of 35 cm provided the conversion efficiency of ~50 %. A set of 12-channel experiments to illuminate the microtargets to the second harmonic radiation has been carried out.