

Перевод иодного 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 иодного лазера «Искра-5» в режим облучения термоядерных мишеней излучением второй гармонике ($\lambda = 657.5$ нм). Модернизация лазера позволила получить суммарную энергию излучения второй гармонике 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 $\sim 50\%$. Проведена серия 12-канальных экспериментов с облучением микромишеней излучением второй гармонике.

Ключевые слова: иодный лазер, генерация второй гармонике, установка «Искра», взаимодействие мощного излучения с веществом.

Процесс взаимодействия мощного лазерного излучения (ЛИ) с веществом при интенсивностях $I_{\text{las}}\lambda^2 \geq 10^{14}$ мкм²·Вт·см⁻² (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 энерговыклада 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.

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 иодного 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 гармонике ($\lambda_2 = 657.5$ 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 иодных лазеров (см., напр., [4–7]). В частности на иодном лазере «Искра-4» показано [7], что для преобразования излучения во вторую гармонику необходимо использовать кристаллы DKDP, т.к. 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 ое) 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.

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 лин-

В.И.Анненков, Л.М.Виноградский, В.А.Гайдаш, И.В.Галахов, С.Г.Гаранин, Н.В.Жидков, 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, 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. Российский федеральный ядерный центр – ВНИИЭФ, Институт лазерно-физических исследований, Россия, Нижегородская обл., 607190 Саров, просп. Мира, 37; e-mail: kovalenko@iskra5.vniief.ru

В.И.Беспалов, В.И.Бредихин, В.П.Ершов, В.В.Зильберберг, В.М.Логинов. Институт прикладной физики РАН, Россия, 607190 Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46; e-mail: bredikh@appl.sci-nnov.ru

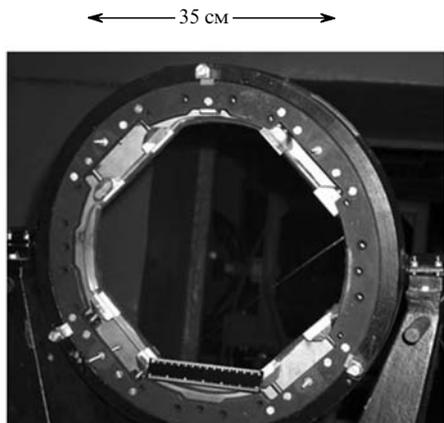


Рис. 1. Кристалл DKDP большой апертуры в юстировочной оправе.

зами Л9 – Л9'. Кроме того, 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.

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 ха-

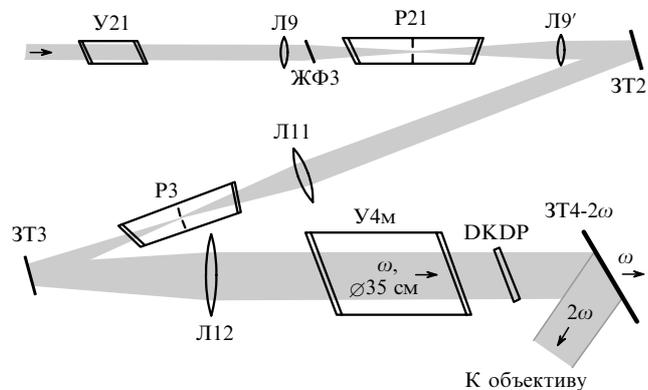


Рис. 2. Фрагмент оптической схемы одного канала установки «Искра-5» после перевода в режим работы на второй гармонике: У21, У4м – каскады усиления; ЖФ3 – жидкостной краситель; Р21, Р3 – пространственные фильтры; Л9, Л9', Л11 и Л12 – линзы; ЗТ2, ЗТ3 – поворотные зеркала; ЗТ4-2ω – селективное зеркало; DKDP – нелинейный кристалл-преобразователь.

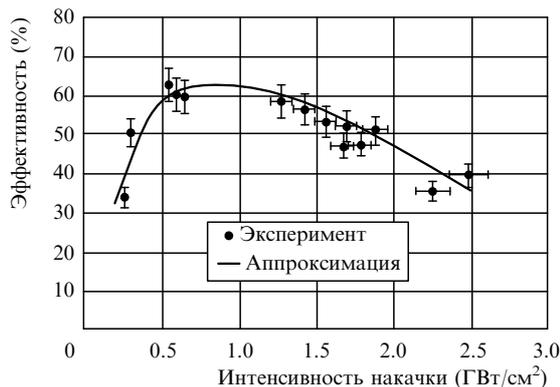


Рис. 3. Зависимости эффективности преобразования излучения во вторую гармонику от средней по времени интенсивности накачки, полученные на иодном лазере «Искра-5».

рактерные 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).

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/см², 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 $F = 1.6$ м, состоящий из линзы Л13 старого объектива и двух дополнительных

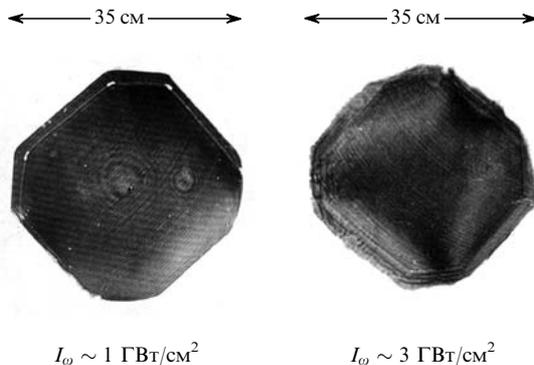


Рис. 4. Характерные распределения интенсивности излучения с частотой 2ω в ближней зоне на выходе канала при разных интенсивностях накачки.

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 ± 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.

Проведённые исследования позволяют сделать следующие выводы.

– Модернизация оптической схемы установки «Искра-5» с целью её 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 эне-

ргия излучения на второй гармонике, полученная с одного канала, равна 350 Дж при длительности импульса ~ 0.3 нс и 500 Дж при длительности ~ 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 ~ 0.6 нс при эффективности преобразования излучения во вторую гармонику ~ 50 %.

1. Lindl J. *Phys. Plasmas*, **2**, 3933 (1995).
2. Kirillov G.A., Murugov V.M., Punin V.T., Shemyakin V.I. *Laser Particle Beams*, **8**, 827 (1990).
3. Абзаев Ф.М. *Письма в ЖЭТФ*, **58** (1), 28 (1993).
4. Бломберген Н. *Нелинейная оптика* (М.: Мир, 1966).
5. Бредерлов Г., Филл Э., Витте К. *Мощный иодный 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.*, **52**, 322 (1988).
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.*, **5479**, 93 (2003).
10. Беспалов В.И., Бредихин В.И., Ершов В.П. и др. *Квантовая электроника*, **9** (11), 2343 (1982).