

# Лазерный стенд для режима облучения мишени импульсами излучения с частотой следования 100 МГц на установке «Искра-5»

**В.И.Анненков, С.Г.Гаранин, В.А.Ерошенко, Н.В.Жидков, А.В.Зубков, С.В.Калипанов, Н.А.Калмыков, В.П.Коваленко, В.А.Кротов, С.Г.Лапин, С.П.Мартыненко, В.И.Панкратов, В.С.Файзуллин, В.А.Хрусталёв, Н.М.Худиков, В.С.Чеботарь**

*На установке «Искра-5» реализован режим работы, при котором на выходе установки получается последовательность нескольких десятков мощных лазерных импульсов субнаносекундной длительности, следующих друг за другом через 10 нс. Цуг лазерных импульсов имеет энергию до 300 Дж и число импульсов до 40 (по уровню интенсивности 0.15), длительность одиночного импульса в цуге составляет  $\sim 0.5$  нс. Приводятся результаты экспериментов по конверсии цуга лазерных импульсов в цуг рентгеновских импульсов. При облучении вольфрамовой мишени получен цуг рентгеновских импульсов с формой огибающей в спектральной полосе 0.18–0.28 кэВ, подобной форме огибающей цуга лазерных импульсов. Длительность одиночного импульса рентгеновского излучения в цуге равна длительности одиночного импульса лазерного излучения.*

**Ключевые слова:** мощная лазерная установка, цуг лазерных импульсов, конверсия лазерного излучения в рентгеновское.

## 1. Введение

Установка «Искра-5» представляет собой мощный двенадцатиканальный фотодиссоционный иодный лазер с длиной волны генерации 1.315 мкм [1] и ряд мишенных камер, оснащенных фокусирующей оптикой и средствами диагностики. Тематика проводимых на ней исследований по взаимодействию лазерного излучения с веществом весьма обширна [2–9]. Однако во всех проводимых ранее исследованиях лазер работал в режиме одиночного короткого импульса: мишень (или каждая из двух мишеней [8]) облучается одним лазерным импульсом, разность времен прихода импульсов от разных лазерных каналов к одной и той же мишени много меньше длительности самого лазерного импульса ( $\sim 0.5$  нс) и составляет  $\pm 50$  пс [10].

Однако для ряда исследований представляет интерес другой режим облучения, когда к мишени подводится последовательность нескольких десятков импульсов субнаносекундной длительности, следующих друг за другом с интервалом  $\sim 10$  нс. Мы его назвали режимом 100-мегагерцевого облучения мишени. Такой режим работы был реализован на установке «Искра-5». Он обеспечивается, прежде всего, задающим генератором (ЗГ), работающим в режиме активной синхронизации мод.

## 2. Задающий генератор лазерного стенда

В качестве ЗГ лазерного стенда для режима 100-мегагерцевого облучения мишени был приспособлен один

из двух штатных ЗГ [8], имеющихся на установке «Искра-5».

Штатный ЗГ установки «Искра-5» построен по схеме генератора с активной синхронизацией мод, осуществляемой путем внешней модуляции потерь резонатора акустооптическим модулятором, работающим в режиме стоячей волны. Резонатор ЗГ длиной 1.5 м образован глухим сферическим зеркалом с радиусом кривизны  $R \approx 5$  м и плоским зеркалом с коэффициентом отражения 50%. Диафрагма диаметром 3 мм, установленная возле сферического зеркала, обеспечивает генерацию основной поперечной моды резонатора. Акустооптический модулятор из кристаллического кварца (частота модуляции 50 МГц) расположен у плоского зеркала. Лазерная кювета с длиной активной части 500 мм имеет внутренний диаметр 10 мм. Накачка осуществляется с помощью ксеноновой полостной коаксиальной лампы, образованной лазерной кюветой и кварцевой трубой с внешним диаметром 25 мм. Окна лазерной кюветы, скошенные под углом Брюстера, обеспечивают линейную поляризацию излучения. Лампа запитывается от конденсатора ИК50-3 через низкоиндуктивный разрядник. Длительность первого полупериода тока накачки составляет 6 мкс. Затухание в контуре питания лампы накачки близко к критическому, логарифмический декремент затухания  $\delta \approx 2.8$  и практически не зависит от напряжения.

ЗГ генерирует цуг эквидистантных во времени световых импульсов, следующих друг за другом через 10 нс. Число импульсов в цуге, как правило, не превышает 12–15. Огибающая цуга импульсов имеет форму, близкую к гауссовой. Увеличение числа импульсов в цуге при штатной работе ЗГ является нецелесообразным, поскольку при этом уменьшилась бы энергия, содержащаяся в центральном импульсе цуга, который вырезается из цуга и направляется в цепочку усилителей установки. Момент появления генерации ЗГ в штатном режиме близок к моменту перехода разрядного тока в лампе накачки через нуль, т.е. цуг импульсов появляется примерно через 6 мкс после включения накачки. Расходимость излуче-

**В.И.Анненков, С.Г.Гаранин, В.А.Ерошенко, Н.В.Жидков, А.В.Зубков, С.В.Калипанов, Н.А.Калмыков, В.П.Коваленко, В.А.Кротов, С.Г.Лапин, С.П.Мартыненко, В.И.Панкратов, В.С.Файзуллин, В.А.Хрусталёв, 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: annenkov@iskra5.vniief.ru

Поступила в редакцию 27 октября 2008 г., после доработки – 8 апреля 2009 г.

ния, измеренная по распределению энергии в дальней зоне,  $\theta = 1.35$  мрад по уровню 0.82.

ЗГ работает в так называемом режиме включения усиления. Под включением усиления понимается следующий механизм. При большой скорости накачки активной среды, когда темп роста усиления сравним с темпом развития генерации, за время развития генерации успевает накопиться инверсная населенность, существенно превышающая пороговую. В результате генерируется мощный импульс, похожий на гигантский импульс режима модуляции добротности. Длительность импульса генерации в режиме включения усиления определяется в основном длиной резонатора, длиной активной среды и скоростью накачки [11]. Собственно говоря, этот механизм включения усиления и определяет длительность огибающей цуга импульсов, образующегося в результате активной синхронизации мод, а значит и число импульсов в нем. Поскольку длина резонатора имеющегося ЗГ уже такова, что импульсы цуга следуют друг за другом через требуемые 10 нс, а длина активной среды задана конструкцией резонатора, то единственным параметром, который мы можем варьировать для увеличения числа импульсов в цуге, является скорость накачки.

Для выявления тенденции влияния скорости накачки на параметры генерации было проведено математическое моделирование процесса генерации. При этом учитывалось, что при точной настройке периода модуляции добротности форма цуга импульсов с синхронизованными модами практически совпадает с формой импульса свободной генерации при открытом модуляторе, поскольку в момент прохождения импульсов цуга через модулятор он всегда находится в открытом состоянии [12]. Поэтому, если нас интересует только форма цуга, достаточно смоделировать режим свободной генерации.

В двухуровневом приближении система усредненных по длине резонатора скоростных уравнений для разности населенностей рабочих уровней  $N$  и плотности фотонов в резонаторе  $M$  может быть записана в виде

$$\dot{N} = -\frac{3}{2} \sigma N c M + H(t),$$

$$\dot{M} = (\mu \sigma N c - \tau^{-1}) M,$$

где  $\sigma$  – сечение вынужденного излучения;  $c$  – скорость света;  $\mu$  – коэффициент заполнения резонатора;  $\tau = 2L \times [c \ln(R_1 R_2)^{-1}]^{-1}$  – время жизни фотона в резонаторе;  $L$  – длина резонатора;  $R_1, R_2$  – коэффициенты отражения зеркал резонатора;  $H(t)$  – скорость накачки, которая в расчетах полагалась постоянной.

Считалось, что начальный момент времени соответствует моменту достижения порога генерации. В расчетах варьировалась скорость накачки. На рис.1 приведены результаты численного моделирования зависимостей длительности огибающей формируемого цуга (по уровню 0.5) и энергии первого генерируемого цуга от скорости накачки в генераторе со следующими входными параметрами:  $L = 1.5$  м,  $R_1 = 0.9$ ,  $R_2 = 0.5$ ,  $\mu = 0.33$ ,  $\sigma = 1.38 \times 10^{-19}$  см<sup>2</sup> (давление рабочей смеси, содержащей SF<sub>6</sub> в качестве буферного газа, 4 ата), при начальных условиях  $N = 0$ ,  $M = 10^{-10}$  см<sup>-3</sup>.

Зависимости, приведенные на рис.1, показывают, что заметное увеличение длительности импульса (огибающей цуга) генерации происходит лишь при самых малых скоростях накачки, что в условиях эксперимента соответ-

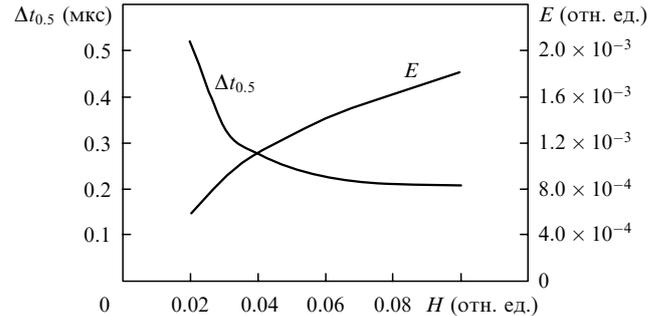


Рис.1. Расчетные зависимости длительности огибающей  $\Delta t_{0.5}$  и энергии  $E$  цуга импульсов генерации от скорости накачки  $H$ .

ствует небольшому превышению порога генерации. При уменьшении скорости накачки одновременно с удлинением импульса генерации наблюдается уменьшение его энергии. Таким образом, уменьшая скорость накачки, можно в определенных пределах удлинить цуг генерируемых импульсов.

Уменьшить скорость накачки можно за счет как уменьшения энергии накачки, вводимой в лампу, так и увеличения длительности накачки. Однако возможности уменьшения скорости накачки ограничены, поскольку большие времена развития генерации обуславливают возникновение оптических неоднородностей в генерирующем объеме, что приводит к ухудшению расходимости лазерного излучения [13]. Кроме того, при скорости накачки, приближающейся к пороговой, следует ожидать низкой воспроизводимости параметров генерируемого импульса. Проведенные исследования показали, что для лазерной кюветы диаметром 10 мм и при использовании гексафторида серы в качестве буферного газа расходимость излучения, по крайней мере в течение 9 мкс после начала накачки, не ухудшается.

Были исследованы две модификации штатного ЗГ. Первая модификация характеризовалась увеличением первого полупериода накачивающего тока до 9 мкс за счет изменения длины подводящего кабеля, вторая – увеличением полупериода до 18 мкс за счет изменения электрической емкости конденсатора накачки с одновременной установкой лазерной кюветы большего диаметра (20 мм).

В обоих случаях давление рабочей смеси (i-C<sub>3</sub>F<sub>7</sub>I: SF<sub>6</sub> = 1:45) в лазерной кювете составляло 4 ата, а длительность отдельного импульса в цуге была равна ~0.5 нс, что хорошо согласуется с расчетами [14]. Кроме того, система селекции одиночного импульса, используемая при штатной работе ЗГ, была заменена затвором Фарадея для оптической изоляции ЗГ от цепочки последующих усилителей.

Проведенные исследования показали принципиальную возможность получения цуга лазерных импульсов с числом импульсов в нем 58–60 по уровню 0.15 для первой модификации ЗГ и 90–100 для второй. Однако для получения цугов такой длительности приходилось поддерживать зарядное напряжение на конденсаторе накачки близким к пороговому. И, как следствие, небольшие изменения начальных условий (зачастую неконтролируемые) приводили к заметным изменениям как длительности генерируемого цуга, так и его энергии и времени появления, вплоть до срыва генерации.

При энергии же накачки, еще близкой к пороговой, но уже достаточной для надежного воспроизведения пара-

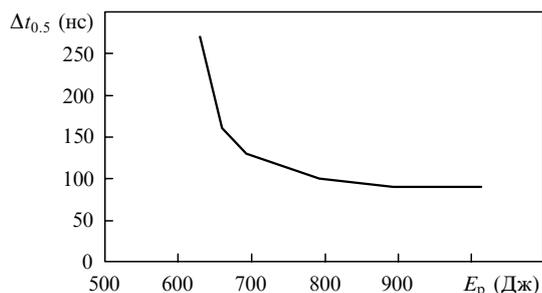


Рис.2. Экспериментальная зависимость длительности цуга импульсов генерации от энергии накачки.

метров генерируемого цуга от опыта к опыту, число импульсов в цуге составляет 25–30 для первой модификации ЗГ и 50–60 для второй. На рис.2 приведена экспериментальная зависимость длительности цуга от энергии накачки, которая однозначно определяет скорость накачки при ее фиксированной длительности. Из рис.1 и 2 видно, что результаты эксперимента неплохо согласуются с результатами численного моделирования.

### 3. Усиление цуга импульсов

Цуг импульсов, генерируемый ЗГ, усиливался в каскаде предварительного усиления (КПУ) и через систему передающих зеркал направлялся в один из каналов установки «Искра-5», описание которого приведено в [1, 10]. При проведении описываемых экспериментов усилительный канал включал в себя три усилителя: У1, У2, У4. Между усилителями помещались насыщающиеся поглотители на основе красителя 1067 с начальным пропусканием  $\sim 1\%$ . Краткие характеристики усилителей приведены в табл.1.

Табл.1. Параметры усилительной цепи установки «Искра-5».

Усилитель	Активная длина (м)	Размер рабочей апертуры (мм)	Энергоемкость батареи конденсаторов (кДж)	Состав рабочей смеси (общее давление 1 ата)
КПУ	0.9	16	15	25 Top i-C <sub>3</sub> F <sub>7</sub> I + SF <sub>6</sub>
У1	1	35	34	35 Top i-C <sub>3</sub> F <sub>7</sub> I + SF <sub>6</sub>
У2	2	80	100	15 Top i-C <sub>3</sub> F <sub>7</sub> I + Ar
У4	8	300 × 300	3400	2.5 Top i-C <sub>3</sub> F <sub>7</sub> I + 367 Top Ar + CO <sub>2</sub>

При проведении экспериментов на выходе канала получены цуги лазерных импульсов с энергией до 300 Дж и числом импульсов до 40 (по уровню 0.15), длительность одиночного импульса в цуге составляла  $\sim 0.5$  нс.

Для примера на рис.3 приведена осциллограмма цуга импульсов с энергией 170 Дж и числом импульсов 39 (по уровню 0.15).

Вследствие насыщения усиления при усилении цуга происходит его заметное «перекатывание» вперед. Так, при усилении в первом каскаде усиления (КПУ) с коэффициентом усиления по слабому сигналу  $\sim 1000$  время «перекатывания» составляло несколько десятков наносекунд.

### 4. Результаты экспериментов

В заключение приведем краткие результаты экспериментов по конверсии цуга лазерных импульсов в цуг

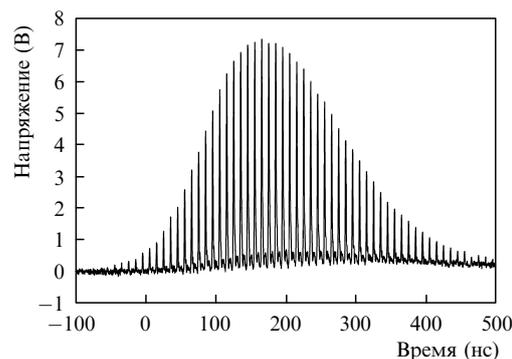


Рис.3. Осциллограмма цуга импульсов с энергией 170 Дж и числом импульсов 39 (по уровню 0.15).

рентгеновских импульсов. В этих экспериментах использовался только усилитель У1, а излучение фокусировалось на мишень из вольфрама. Интенсивность лазерного излучения составляла  $7 \times 10^9 - 1 \times 10^{11}$  Вт/см<sup>2</sup>. Цуг лазерных импульсов регистрировался фотодиодом типа Thorlabs SIR5-FC с полосой пропускания 5 ГГц. Рентгеновское излучение регистрировалось вакуумными рентгеновскими диодами (ВРД) с катодами из нержавеющей стали. ВРД были установлены за фильтрами, изготовленными из материалов, которые и определяли диапазон регистрации. Сигналы с датчиков измерялись осциллографом с полосой пропускания 6 ГГц.

На рис.4 и 5 приведены осциллограммы сигналов с датчиков, зарегистрированных в одном из экспериментов по конверсии лазерного излучения в рентгеновское. На рис.4 изображен цуг лазерных импульсов (28 импульсов по уровню 0.15). Длительность отдельного импульса в цуге  $\tau_{0,5} = 0.56 \pm 0.05$  нс, общая энергия цуга импульсов лазерного излучения  $E = 7.0 \pm 1.4$  Дж. На рис.5 приве-

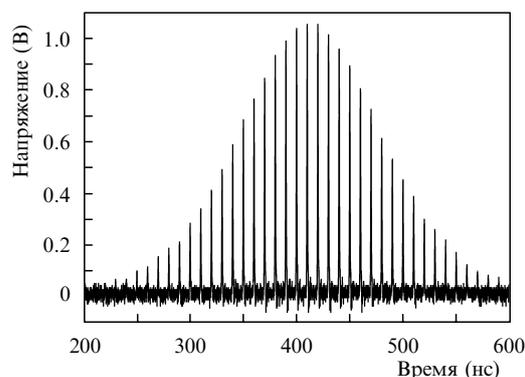


Рис.4. Осциллограмма цуга лазерных импульсов.

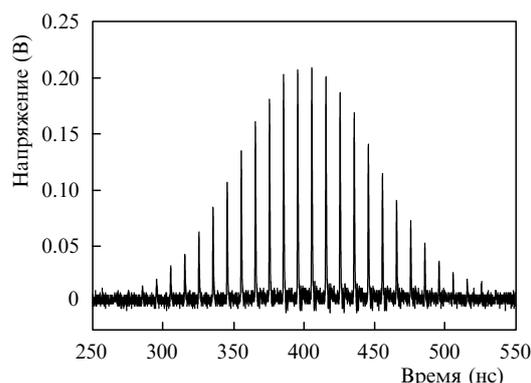


Рис.5. Осциллограмма цуга рентгеновских импульсов.

дена осциллограмма сигнала, зарегистрированного ВРД за фильтром из лавсана толщиной 1 мкм (диапазон регистрации 0.18–0.28 кэВ). Огибающая цуга рентгеновских импульсов сохраняет форму, подобную форме огибающей последовательности лазерных импульсов. Длительность отдельных рентгеновских импульсов  $\tau_{0.5} = 0.56 \pm 0.05$  нс, искажений формы импульсов в пределах цуга не зарегистрировано.

Таким образом, на установке «Искра-5» реализован режим 100-мегагерцевого облучения мишеней, при котором к мишени подводится последовательность из нескольких десятков импульсов субнаносекундной длительности, следующих друг за другом с интервалом 10 нс. Число импульсов в цуге по уровню 0.15 составляет 40. Общая энергия импульсов в цуге достигает 300 Дж. При облучении вольфрамовой мишени получен цуг рентгеновских импульсов с формой огибающей в спектральной полосе 0.18–0.28 кэВ, подобной форме огибающей цуга лазерных импульсов. Длительность одиночного импульса рентгеновского излучения в цуге равна длительности одиночного импульса лазерного излучения.

1. Анненков В.И., Багрецов В.А., Безуглов В.Г. и др. *Квантовая электроника*, **18** (5), 536 (1991).

2. Бессараб А.В., Гайдаш В.А., Долголева Г.В. и др. *ЖЭТФ*, **102** (6), 1800 (1992).
3. Абзаев Ф.М., Анненков В.И., Безуглов В.Г. и др. *Письма в ЖЭТФ*, **58** (1), 28 (1993).
4. Бельков С.А., Бессараб А.В., Винокуров О.А. и др. *Письма в ЖЭТФ*, **67** (3), 161 (1998).
5. Бельков С.А., Бессараб А.В., Веселов А.В. и др. *ЖЭТФ*, **114** (3), 837 (1998).
6. Bel'kov S.A., Abzaev F.M., Bessarab A.V., et al. *Laser Part. Beams*, **17** (4), 591 (1999).
7. Богуненко Ю.Д., Бессараб А.В., Бондаренко Г.А. и др. *Физика плазмы*, **31** (8), 765 (2005).
8. Анненков В.И., Безуглов В.Г., Бессараб А.В. и др. *Квантовая электроника*, **36** (6), 508 (2006).
9. Бессараб А.В., Гаранин С.Г., Мартыненко С.П. и др. *Докл. РАН*, **411** (5), 609 (2006).
10. Анненков В.И., Беспалов В.И., Бредихин В.И. и др. *Квантовая электроника*, **35** (11), 993 (2005).
11. Холла К., Компа К. В кн.: *Химические лазеры*. Под ред. Р.Гросса, Дж.Ботта (М.: Мир, 1980).
12. Baker Y.J., King T.A., McNaught W.G. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **12**, 997 (1979).
13. Бредерлов Г., Филл Э., Витте К. *Мощный йодный лазер* (М.: Атомиздат, 1985).
14. Kuizenga D.J. *IEEE J. Quantum Electron.*, **17** (9), 1694 (1981).