

УДК 621.373.7

Методика измерения энергетических и мощностных параметров паразитного лазерного излучения в схеме с прямым усилением чирпированного импульса*

Р. Ю. Костюнин, Г. С. Рогожников,
Н. Н. Рукавишников

Экспериментально (в зависимости от энергии накачки) исследован коэффициент усиления слабого (ненасыщающего) сигнала в активной среде из неодимового фосфатного стекла в однопроходном режиме работы регенеративного усилителя.

Исследовано пропускание затвора Поккельса № 2 РУ в закрытом состоянии.

Отработаны методики измерений и исследованы определяющие контраст излучения мощностные и энергетические характеристики паразитного лазерного излучения на выходе регенеративного усилителя лазерной установки тераваттного уровня мощности. Определен контраст сверхкороткого лазерного импульса на выходе регенеративного усилителя: энергетический – $K_E = 3 \cdot 10^4$, мощностный – $K_P = 4 \cdot 10^4$. Даны рекомендации на повышение контраста импульса до 10^5 .

Введение

Лазерные системы со сверхкороткой длительностью импульса излучения (10–1000 фс) являются уникальным инструментом для исследований в области физики высоких плотностей энергии. За счет короткой длительности импульса при весьма скромной его энергии (1–100 Дж) достигается высокий уровень выходной мощности (0,1–1 ПВт). При фокусировке лазерного пучка в малый размер ($\varnothing \sim 10$ мкм) интенсивность облучения мишени составляет $\sim 10^{19}$ – 10^{21} Вт/см² [1–3].

При высоких интенсивностях облучения мишени важной характеристикой лазерного импульса является контраст излучения (мощностный $K_P = P_{\text{имп}}/P_{\text{шум}}$, энергетический $= E_{\text{имп}}/E_{\text{шум}}$). Под «шумом» понимается любое световое излучение, упавшее на мишень до прихода основного импульса, которое может повредить или уничтожить мишень. Допустимый уровень контраста в облучательных экспериментах определяется типом мишени, а также энергией и интенсивностью лазерного импульса. Анализ литературных данных [4, 5] показывает, что при $I_{\text{миш}} \sim 10^{19}$ Вт/см² ($E_{\text{имп}} = 15$ Дж, $\tau_{\text{имп}} = 0,5$ пс, $\varnothing_{\text{фок}} = 10$ мкм) сохранность мишени обеспечивается при $K_P \geq 10^8$. Контраст по энергии должен превышать $K_E \geq 10^6$ – 10^7 .

* Доклад на 18-й Нижегород. сессии молодых ученых, 28–31 мая 2013 г.

Особенностью схем прямого усиления чирпированного импульса является наличие регенеративного усилителя (РУ), в котором происходит усиление слабого входного сигнала (доли наноджоуля) до десятков миллиджоулей. Источниками паразитного излучения в такой схеме являются:

- люминесценция активной среды РУ (мощность $P_{л}$, энергия $E_{л}$);
- люминесценция активной среды РУ, усиленная в его резонаторе и выведенная из резонатора перед основным импульсом (мощность $P_{ул}$, энергия $E_{ул}$);
- предимпульсы: импульсы от задающего генератора, прошедшие стретчер и сквозь закрытые затворы Погкельса РУ (мощность $P_{пр}$, энергии $E_{пр}$; импульсы, проходящие сквозь выходное зеркало РУ в момент отражения от него усиливаемого импульса (мощность $P_{пвз}$, энергия $E_{пвз}$).

Типичная временная диаграмма, показывающая структуру паразитного излучения, представлена на рис. 1.

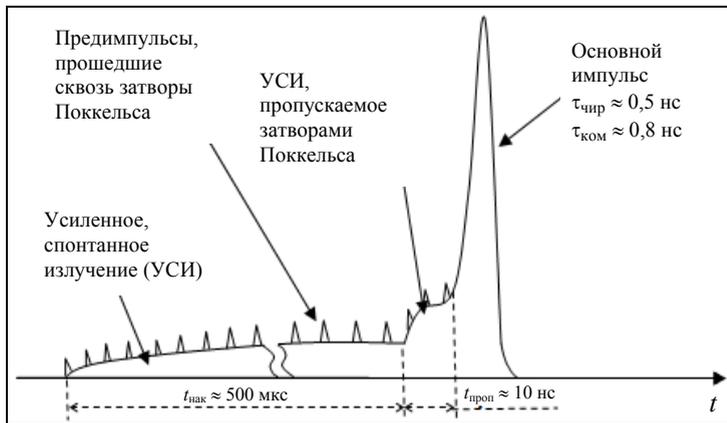


Рис. 1. Различные типы фонового излучения, возникающего при усилении чирпированного лазерного импульса

Целью работы являлась разработка и отладка методики по выявлению, измерению энергетических и мощностных параметров паразитного лазерного излучения на выходе РУ, оценка контраста сверхкороткого лазерного импульса созданной в РФЯЦ-ВНИИЭФ лазерной установки «ПИКО» тераваттного уровня мощности.

1. Схема установки, принцип работы

Схема установки «ПИКО» представлена на рис. 2. Основными элементами установки являются задающий генератор (ЗГ), стретчер, усилительные каскады и компрессор. Задающий генератор генерирует на длине волны $\lambda_0 = 1054$ нм непрерывную последовательность сверхкоротких импульсов длительностью 200 фс с частотой следования 100 МГц и средней мощностью 100 мВт. Импульсы проходят через стретчер, где растягиваются во времени до 1,5 нс. Из «гребенки» при помощи ЯП1 вырезается один импульс, который усиливается в РУ с долей наноджоуля до нескольких десятков миллиджоулей. В последующих усилительных каскадах происходит усиление до энергии в несколько джоулей, после чего усиленный чирпированный импульс сжимается во времени в компрессоре до длительности 800 фс и поступает в мишенную камеру.

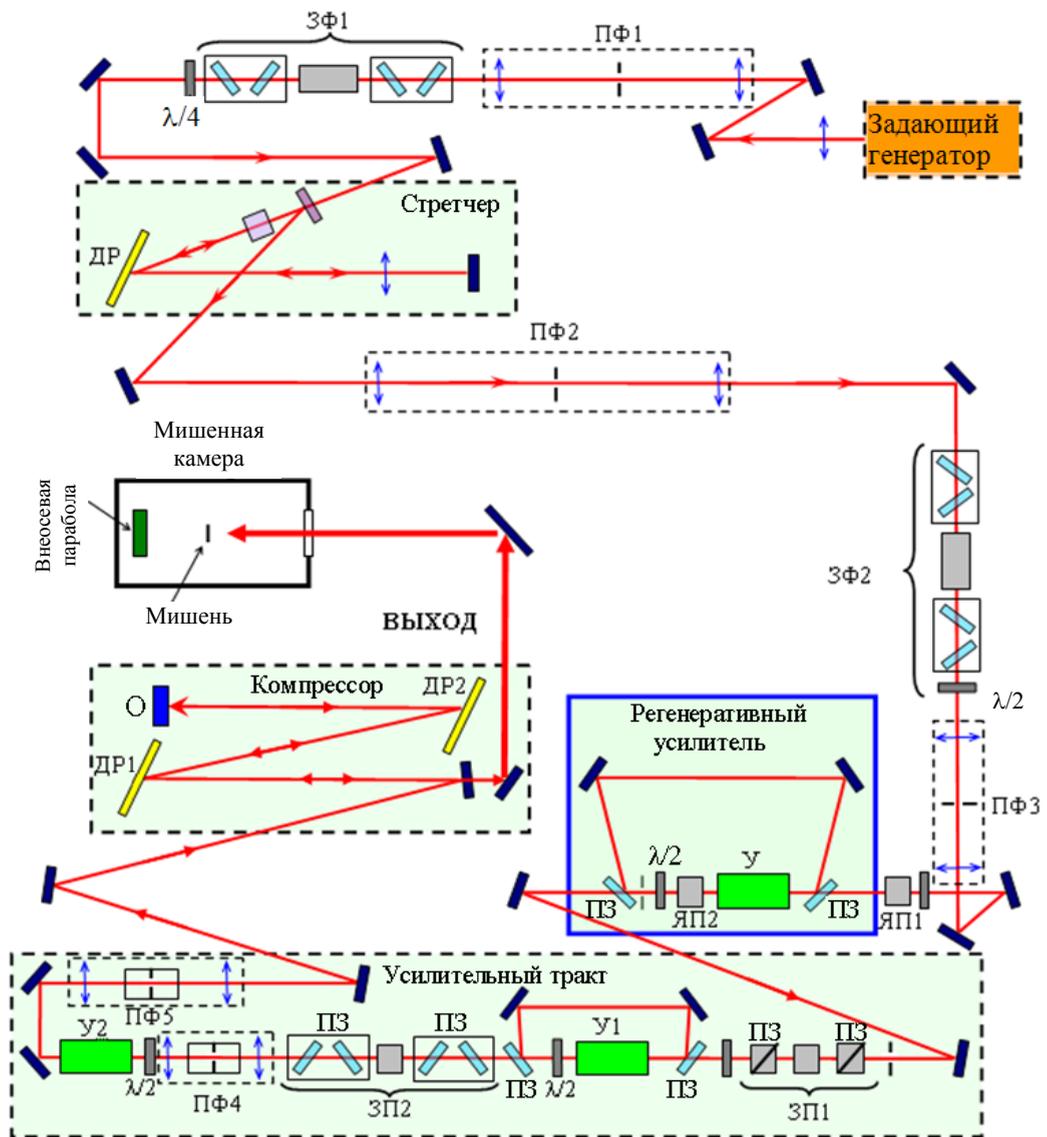


Рис. 2. Схема установки «ПИКО»: ПФ – угловые пространственные фильтры; ЗФ – затвор Фарадея; ДР – дифракционная решетка; ЯП – ячейки Поккельса; ПЗ – поляризационные зеркала; ЗП – затворы Поккельса; У – усилители; О – уголкового отражателя

2. Измерения коэффициента усиления регенеративного усилителя в однопроходном режиме

Одним из наиболее важных параметров РУ является коэффициент усиления активной среды. Он измерялся при различных значениях напряжения на конденсаторной батарее путем пропускания через усиливающую среду излучения непрерывного лазера LCS-DTL-322 на рабочей длине волны $\lambda = 1054$ нм параллельно оптической оси. Регистрация его энергетических характеристик после усиления производилась с использованием фотодиода ДФДМШ-70 и осциллографа.

В экспериментах коэффициент усиления слабого сигнала определялся как отношение максимального значения усиленного сигнала на фотодиоде к среднему значению сигнала на фотодиоде до начала усиления, определенного с помощью аппроксимации (табл. 1). Относительная погрешность измерений составляла $\delta_K = 0,75\%$. Максимум коэффициента усиления достигается через 500 мкс после начала накачки.

Таблица 1

Результаты обработки экспериментов по усилению излучения непрерывного лазера в активной среде РУ

U , кВ	$K_{0,max}$
3,00	$6,59 \pm 0,05$
3,25	$8,82 \pm 0,07$
3,50	$10,60 \pm 0,08$
3,75	$13,43 \pm 0,10$
4,00	$15,43 \pm 0,12$

Примечание: $K_{0,max}$ – коэффициент усиления слабого сигнала на проход в максимуме сигнала.

3. Исследование контраста затвора Поккельса

Для оценки энергетики импульсов ЗГ, которые прошли в РУ и выпускаются из него затвором Поккельса № 2, необходимо знать контраст затвора. Он определяется пропусканием затвора в закрытом состоянии. Пропускание измеряли с помощью CCD-камеры, на которую посылалось излучение непрерывного лазера LCS-DTL-322 на рабочей длине волны $\lambda = 1054$ нм. Регистрировалось время экспозиции камеры в двух постановах: ЗП открыт и ЗП закрыт. В обеих постановах время экспозиции бралось при одном и том же проценте насыщения элементов матрицы камеры. Отношение полученных времен в процентах показывает пропускание затвора – $2,52 \pm 0,04\%$. Значение контраста затвора, соответственно, составило 40. Относительная погрешность измерений $\delta_{T2} = 1,39\%$.

4. Исследования характеристик спонтанного излучения активной среды регенеративного усилителя

Одним из основных источников паразитного излучения в оптической схеме, включающей РУ, является люминесценция его активной среды. Исследования ее энергетических характеристик проводились при различных напряжениях на конденсаторной батарее. Регистрация осуществлялась с помощью откалиброванного фотодиода ФД-24К и осциллографа ($\tau_{ам} = 200$ нс). Схема измерений представлена на рис. 3.

Результат обработки одной из полученных осциллограмм представлен на рис. 4 и в табл. 2. Заметим, что рассчитывалась энергия той части люминесценции, которая успела выйти из резонатора до момента запуска, т. е. до усиленного импульса.

При многократном прохождении излучения внутри РУ происходит усиление как основного импульса, так и люминесценции, которая выводится из резонатора перед основным импульсом. Эта усиленная люминесценция также является существенной составной частью шумового излу-

чения. Измерение ее энергетических характеристик проводилось при напряжении на конденсаторной батарее 3,75 кВ по схеме рис. 3, ЯП № 2 была включена, оптический тракт резонатора не перекрывался.

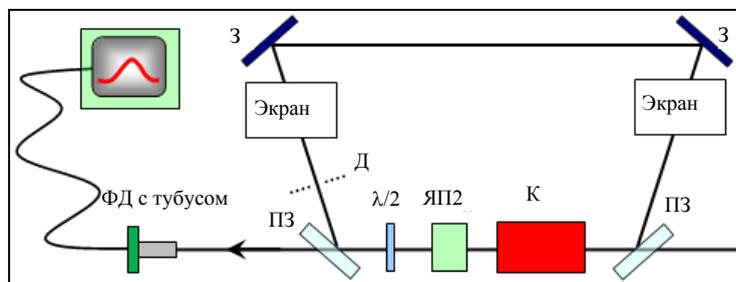


Рис. 3. Схема эксперимента по измерению люминесценции: ЯП2 – ячейка Поக்கельса; ПЗ – поляризационное зеркало; К – квантрон; ФД – фотодиод; Д – диафрагма

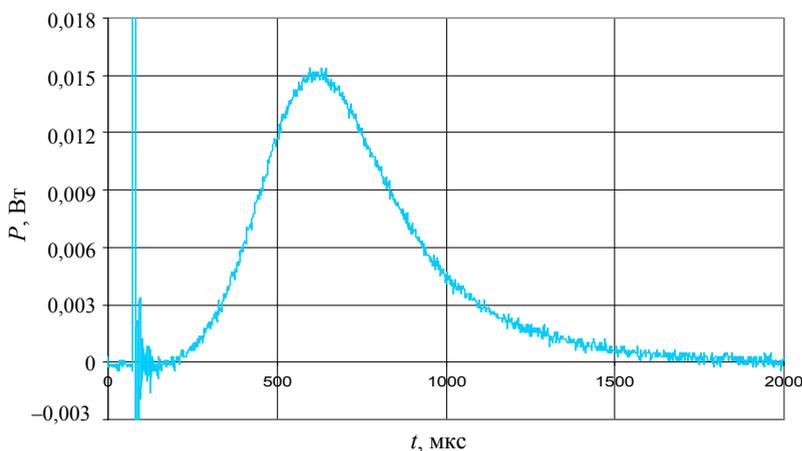


Рис. 4. Зависимость мощности люминесценции от времени при напряжении на конденсаторной батарее 3,25 кВ

Таблица 2

Результаты обработки экспериментальных данных по измерению мощности и энергии импульса люминесценции

U , кВ	$P_{л, \max}$, мВт	$E_{л}$, мкДж
3,00	11,0	3,0
3,25	15,3	4,2
3,50	19,4	4,9
3,75	24,5	6,5
4,00	30,6	7,7

Примечание: $P_{л, \max}$ – мощность люминесценции в максимуме коэффициента усиления.

На рис. 5 показана полученная зависимость мощности люминесценции от времени. Центральный пик на огибающей люминесценции как раз и является усиленной в резонаторе люминесценцией. Его мощность в максимуме составила 656 мВт, энергия – 6,56 нДж, длительность – 10 нс. На рис. 6 показана ее временная форма, измеренная аппаратурой с более высоким временным разрешением ($\tau_{ан} = 150$ пс).

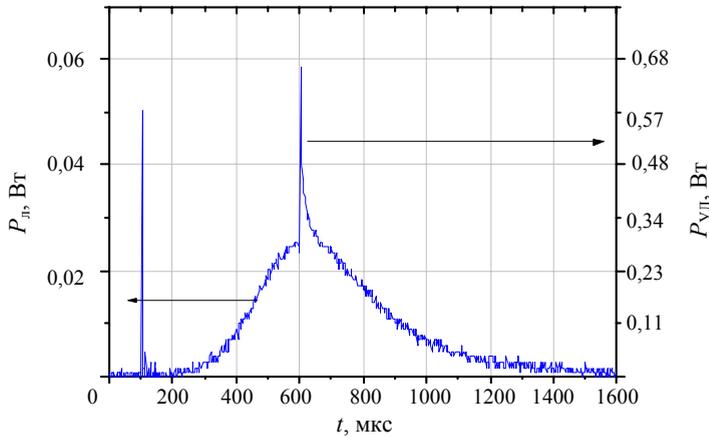


Рис. 5. Зависимость мощности усиленной люминесценции от времени при напряжении на конденсаторной батарее 3,75 кВ

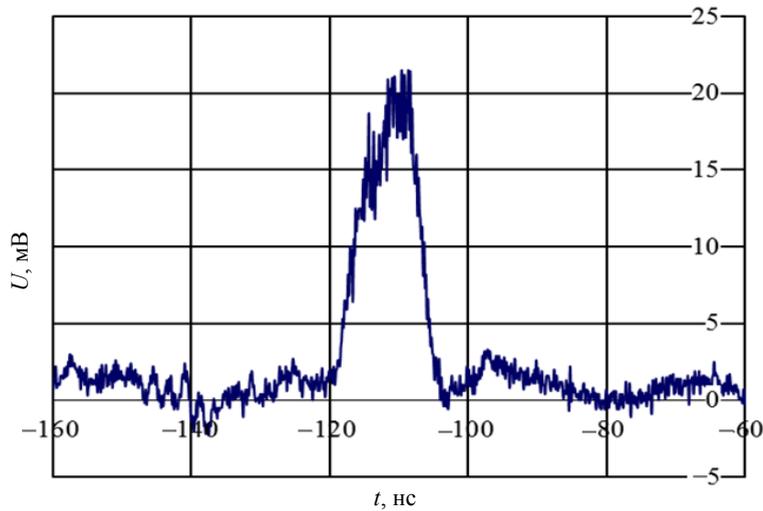


Рис. 6. Временная форма импульса усиленной в РУ люминесценции

5. Исследование параметров предимпульсов на выходе регенеративного усилителя

Как было установлено в п. 3, применяемые на данной лазерной установке затворы Поккельса пропускают в закрытом состоянии определенную часть падающего на них излучения ($T \approx 2,5\%$), что позволяет импульсам ЗГ проникать в регенеративный усилитель. Эти импульсы (так

называемые предимпульсы) усиливаются в активной среде и идут перед основным усиленным импульсом, также являясь существенной частью шумового излучения.

Регистрация энергетических параметров предимпульсов производилась в двух постановках: в присутствии излучения ЗГ и без него. То есть с закрытым ЗГ имеем только огибающую излучения люминесценции, а при открытом – огибающую излучения с небольшим подъемом от предимпульсов, пропорциональным их средней мощности. Была использована та же методика (измерительная аппаратура, схема измерений), что и при исследовании энергетических характеристик люминесценции активной среды РУ (п. 4). Измерения проводились при пяти значениях напряжения на конденсаторной батарее.

На рис. 7 представлен результат наложения осциллограмм излучений на выходе РУ в постановке 1 (излучение ЗГ открыто) и постановке 2 (излучение ЗГ закрыто) при напряжении на конденсаторной батарее 4 кВ. На рис. 8 представлена осциллограмма с более высоким временным разрешением ($\tau_{an} \approx 150$ пс), на которой видно, что прибавку к люминесценции дают именно предимпульсы. В табл. 3 приведены результаты обработки полученных осциллограмм.

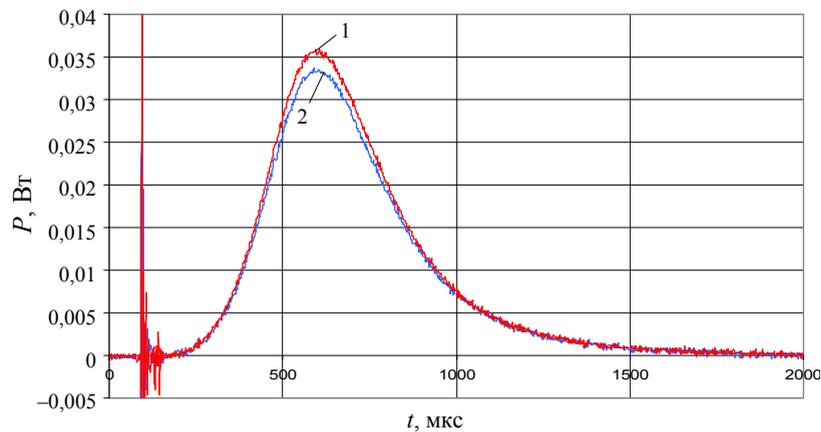


Рис. 7. Наложение осциллограмм излучений на выходе РУ при открытом (1) и закрытом (2) излучении задающего генератора

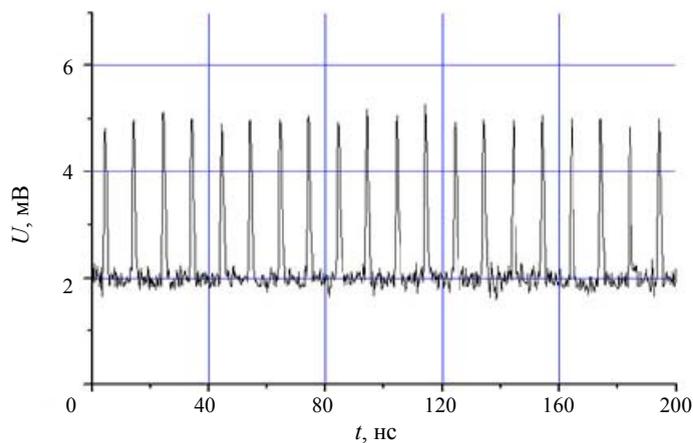


Рис. 8. Осциллограмма люминесценции и прошедших импульсов задающего генератора

Таблица 3

Результаты обработки осциллограмм опытов по исследованию параметров предимпульсов

U , кВ	$P_{л+имп}$, мВт	$P_{л}$, мВт	$P_{имп}$, мВт	$E_{л+имп}$, мкДж	$E_{л}$, мкДж	$E_{имп}$, мкДж
3,00	13,2	12,4	0,8	3,65	3,41	0,24
3,25	16,7	16,1	0,6	4,46	4,26	0,20
3,50	21,7	21,1	0,6	5,60	5,43	0,17
3,75	27,7	26,7	1,0	6,99	6,74	0,25
4,00	35,9	33,5	2,4	8,91	8,29	0,62

Кроме того, так как пропускание ЗП2 составляет 2,5 %, то при каждом проходе усиливаемого импульса по резонатору такая доля его энергии выходит из усилителя. Это второй вид предимпульсов, которые сильно влияют на контраст и учтены в зависимости от временного поведения коэффициента усиления при расчете контраста.

6. Определение контраста chirпированного импульса на выходе регенеративного усилителя

Как было показано в пп. 4, 5, основной вклад в паразитное излучение вносят:

- люминесценция активной среды РУ (мощность $P_{л}$, энергия $E_{л}$);
- люминесценция активной среды РУ, усиленная в его резонаторе и выведенная из резонатора в момент закрывания ЗП2 (мощность $P_{ул}$, энергия $E_{ул}$);
- предимпульсы: импульсы от задающего генератора, прошедшие стретчер и сквозь закрытые затворы Поккельса РУ (мощность $P_{пр}$, энергия $E_{пр}$); импульсы, проходящие сквозь выходное зеркало РУ в момент отражения от него усиливаемого импульса (мощность $P_{ПВЗ}$, энергия $E_{ПВЗ}$).

Используя полученные в предыдущих разделах экспериментальные результаты, рассчитаем мощный и энергетический контраст излучения на выходе РУ в случае его компрессии. Типичное значение энергии усиленного в РУ chirпированного импульса $E_{вых} = 20$ мДж, мощности $P_{вых} = 40$ мВт (длительность $\tau = 0,5$ нс).

Энергетический контраст определяется как отношение энергии импульса $E_{вых}$ к суммарной энергии паразитного (шумового) излучения $E_{шум}$:

$$K_E = \frac{E_{вых}}{E_{шум}} = \frac{E_{вых}}{E_{л} + E_{ул} + E_{пр} + E_{ПВЗ}} = 3 \cdot 10^2. \quad (1)$$

Следовательно, мощный контраст определяется как отношение мощности импульса $P_{вых}$ к мощности $P_{шум}$ той составляющей паразитного (шумового) излучения, которая имеет наибольшее значение (сжатый предимпульс 19 прохода $P_{19} = 62,5$ мВт):

$$K_P = \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_{\text{ШУМ}}} \approx K_{P,\text{КОМ}} = \frac{P_{\text{ВЫХ}} \frac{\tau_{\text{чир}}}{\tau_{\text{КОМ}}}}{P_{19} \frac{\tau_{\text{пр}}}{\tau_{\text{КОМ}}}} \approx \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_{19}} = 4 \cdot 10^2. \quad (2)$$

Однако, учитывая, что в тракте после РУ располагается затвор Поккельса с пропусканием $\sim 1\%$, значение энергетического контраста увеличивается до $3 \cdot 10^4$, а мощностного – до $4 \cdot 10^4$.

Чтобы проводить качественные эксперименты по облучению мишеней на уровне энергии $\approx 1\text{--}2$ Дж, необходимо повышение значений контраста импульса до $K_P = 10^5$ и $K_E = 10^5$. Для этого предлагается уменьшить пропускание затвора Поккельса № 2 в закрытом состоянии за счет применения оптических элементов высокого качества и установить дополнительный затвор Поккельса с окном пропускания 7 нс на выходе оконечного усилителя.

Заключение

В зависимости от энергии накачки экспериментально исследован коэффициент усиления слабого (ненасыщающего) сигнала в активной среде из неодимового фосфатного стекла в однопроходном режиме работы РУ. При штатном зарядном напряжении на конденсаторной батарее 3,75 кВ коэффициент усиления в максимуме составил $K = 13,4$.

Исследовано пропускание затвора Поккельса № 2 РУ в закрытом состоянии. Значения контраста составило 40.

Отработаны методики измерений и исследованы определяющие контраст излучения мощностные и энергетические характеристики паразитного лазерного излучения на выходе регенеративного усилителя лазерной установки тераваттного уровня мощности. На основании проведенных исследований определен контраст сверхкороткого лазерного импульса на выходе РУ: энергетический – $K_E = 3 \cdot 10^2$, мощностный – $K_P = 4 \cdot 10^2$. Произведена оценка контраста с учетом затвора Поккельса, располагающегося после РУ: значение энергетического контраста составило $K_E = 3 \cdot 10^4$, мощностного – $K_P = 4 \cdot 10^4$. Рекомендовано повысить контраст импульса до $\sim 10^5$ за счет применения оптических элементов высокого качества в затворе Поккельса № 2 и постановки затвора Поккельса на выходе установки.

Список литературы

1. Летохов В. С. Фемтосекундные лазерные импульсы: перспективы применения // Вестник РАН. 2002. Т. 72, № 9. С. 779–785.
2. Schwoerer H., Magill J. Lasers and nuclei. Applications of ultrahigh intensity lasers in nuclear science // Lect. Notes Phys. – Berlin – Heidelberg: Springer, 2006.
3. Фортгов В. Е. Экстремальные состояния вещества на Земле и в космосе // УФН. 2009. Т. 179, № 6. С. 653–687.
4. Kalashnikov M., Risse E., Schonagel H. ASE-temporal contrast of 10^{10} with a double CPA laser // Conferention CLEO-2005, presentation JFA6.

5. Albert O., Burgy F., Hamoniaux G. 10^{-10} temporal contrast femtosecond ultraintense lasers by cross-polarized wave generation // Opt. Lett. 2005. Vol. 30, N 8.

Measurement Technique of Energetic and Power Parameters of Background Laser Radiation in the Chirped Pulse Direct Amplification Scheme

R. U. Kostyunin, G. S. Rogozhnikov, N. N. Rukavishnikov

Experimental research of the gain of a weak (not saturating) signal depending on pump energy in the neodymium phosphate glass active medium of the single-pass regenerative amplifier has been carried out.

Transmission of the Pockels cell № 2 of the regenerative amplifier in the closed state has been investigated.

Measurement techniques have been fulfilled. Power and energy characteristics of the spurious laser radiation defining laser pulse contrast have been investigated on the output of the regenerative amplifier of the terawatt laser facility. We have obtained $3 \cdot 10^4$ energy contrast and $4 \cdot 10^4$ power contrast and have given recommendation to raise contrast to 10^5 .