

УДК 621.373

## Определение пороговых условий прохождения ультракоротких импульсов излучения видимого диапазона в компрессоре из стекла

Н.Г. Иванов<sup>1</sup>, В.Ф. Лосев<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup> Институт сильноточной электроники СО РАН  
634055, г. Томск, пр. Академический, 2/3

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30

Поступила в редакцию 10.12.2015 г.

Приведены результаты измерений и расчетов параметров излучения с длиной волны  $\lambda = 475$  нм при его прохождении через компрессор из стекла. Показано, что существует три диапазона плотности энергии излучения, входящего в компрессор. Первым из них является диапазон слабых интенсивностей (плотность энергии 1–5 мДж/см<sup>2</sup>), при которых влияние нелинейности на параметры выходного пучка незначительно. Второй диапазон – диапазон умеренных интенсивностей (плотность энергии 5–10 мДж/см<sup>2</sup>) – характеризуется значительной потерей энергии при распространении выходного пучка. Несмотря на это, на выходе из компрессора регистрируется практически исходная длительность импульса – 57 фс. Для третьего диапазона повышенных интенсивностей (плотность энергии 20 мДж/см<sup>2</sup> и более) характерно полное разрушение пространственной структуры и спектрального состава выходного пучка.

*Ключевые слова:* лазерный пучок, фемтосекундный импульс, компрессор из стекла, керровская нелинейность, пространственное распределение излучения; laser beam, femtosecond pulse, glass compressor, Kerr nonlinearity, spatial radiation distribution.

### Введение

Одним из способов получения мощных фемтосекундных импульсов излучения видимого диапазона является использование гибридных лазерных систем на основе твердотельного фемтосекундного комплекса и газового усилителя [1–5]. В твердотельном стартовом комплексе происходит формирование фемтосекундного излучения с  $\lambda = 950$  нм, которое затем преобразуется во вторую гармонику в кристалле КДП. Перед входом в газовый усилитель импульс излучения растягивается до пикосекундной длительности в призмочном стретчере с отрицательным чирпом. На выходе усилителя импульс излучения сжимается до первоначальной фемтосекундной длительности с помощью компрессора в виде блока из стекла. Известно, что распространение ультракоротких импульсов (УКИ) излучения в твердом веществе может сопровождаться возникновением различных нелинейных явлений [6]. При определенных интенсивностях излучения эти явления могут существенно влиять на качество лазерного пучка после компрессии импульса.

В настоящей статье рассмотрены условия прохождения отрицательно чирпированного пикосекундного импульса излучения с длиной волны

475 нм через компрессор из стекла марок SBSL-7 и HPFS-7980-5F при различных входных интенсивностях.

### Схема экспериментов и методики

В экспериментах использовалось излучение стартового комплекса Start 480 с длиной волны  $\lambda = 950$  нм и длительностью импульса 50 фс [5]. Данное излучение ограничивалось диафрагмой диаметром 2 мм. На расстоянии 3 м от диафрагмы устанавливался кристалл КДП толщиной 2 мм, в котором осуществлялось преобразование излучения во вторую гармонику. На рис. 1 представлен профиль интенсивности преобразованного излучения. Видно, что пространственное распределение пучка близко к гауссовому. Типичная энергия во второй гармонике составляла 20 мкДж.

После КДП пучок проходил призмочный стретчер, где за счет отрицательной дисперсии его длительность импульса увеличивалась до 1,5–2 пс. Стретчер состоял из двух призм, установленных под углом Брюстера на определенном расстоянии друг от друга. Для снижения интенсивности пучка перед призмами он расширялся в зеркальном телескопе с увеличением  $M = 3$ . Излучение совершало два прохода через призмы, при этом входной и выходной пучки разводились по высоте. После стретчера излучение направлялось в компрессор.

\* Николай Георгиевич Иванов (ivanov.ng@sibmail.com);  
Валерий Федорович Лосев (losev@ogl.hcei.tsc.ru).

Компрессором служили две призмы из стекла марки SBSL-7 (эквивалент K8) или HPFS-7980-5F (эквивалент KY-1), установленные под углом Брюстера.

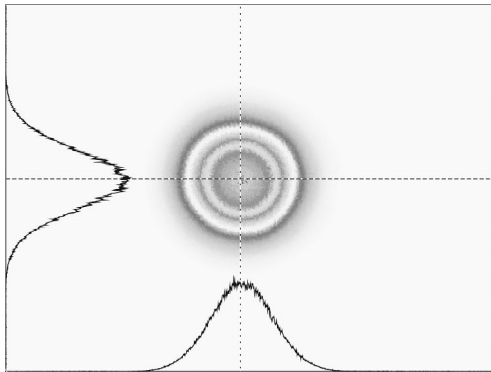


Рис. 1. Профиль интенсивности излучения второй гармоники после КДП

Общая толщина стекла составляла 30 см для стекла SBSL-7 и 50 см для стекла HPFS-7980-5F. Для того чтобы реализовать различные плотности энергии в пучке, проходящем компрессор, излучение перед ним фокусировалось с помощью сферического зеркала с фокусным расстоянием  $F = 324$  см. С изменением расстояния от фокальной перетяжки до компрессора изменялась интенсивность проходящего в нем излучения. Регистрация распределения интенсивности излучения, прошедшего компрессор, осуществлялась непосредственно за компрессором и на удалении 3,5 м от него (дальняя зона). Распределения измерялись с помощью профилометра Veam Gage с матрицей размером  $7,04 \times 5,28$  мм (размер пикселя 4,4 мкм). Энергия излучения измерялась с использованием измерителя лазерной энергии OPHIR.

Для регистрации спектрального состава излучения использовался спектрометр Avantes с разрешением 0,5 нм. Длительность импульса излучения регистрировалась с помощью автокоррелятора ASF-480 производства фирмы Avesta. Для проведения расчетов параметров излучения, прошедшего компрессор, использовалась стандартная программа Fresnel [7].

## Результаты экспериментов и расчетов

Из литературы известно, что стекла марки SBSL-7 и HPFS-7980-5F отличаются по своим нелинейным свойствам. Так, нелинейный коэффициент преломления  $\gamma$  для стекла SBSL-7 составляет  $3,2 \cdot 10^{-16}$  см<sup>2</sup>/Вт, а для стекла HPFS-7980-5F —  $3 \cdot 10^{-16}$  см<sup>2</sup>/Вт. Ширина запрещенной зоны для последнего составляет 9 эВ, для стекла SBSL-7 она равна 6 эВ, тем самым для него снижен порог многофотонной ионизации. По данным свойствам стекло марки HPFS-7980-5F более предпочтительно для использования в качестве материала компрессора. С другой стороны, линейный показатель преломления  $n_0$  в стекле SBSL-7 для  $\lambda = 475$  нм составляет 1,5232, а в стекле HPFS-7980-5F  $n_0 = 1,4638$ . Таким образом, для компрессии импульсов одинаковой длительности необходимо использовать большую толщину стекла HPFS-7980-5F, что увеличивает величину  $B$ -интеграла, определяющего степень нелинейности в среде.

Первоначально в наших экспериментах в компрессоре использовалось стекло марки SBSL-7. Замена его на стекло марки HPFS-7980-5F не внесла серьезного отличия в условия прохождения излучением компрессора. В целом, динамика изменения профиля интенсивности излучения, прошедшего компрессор, с ростом входной плотности энергии и интенсивности представлена на рис. 2.

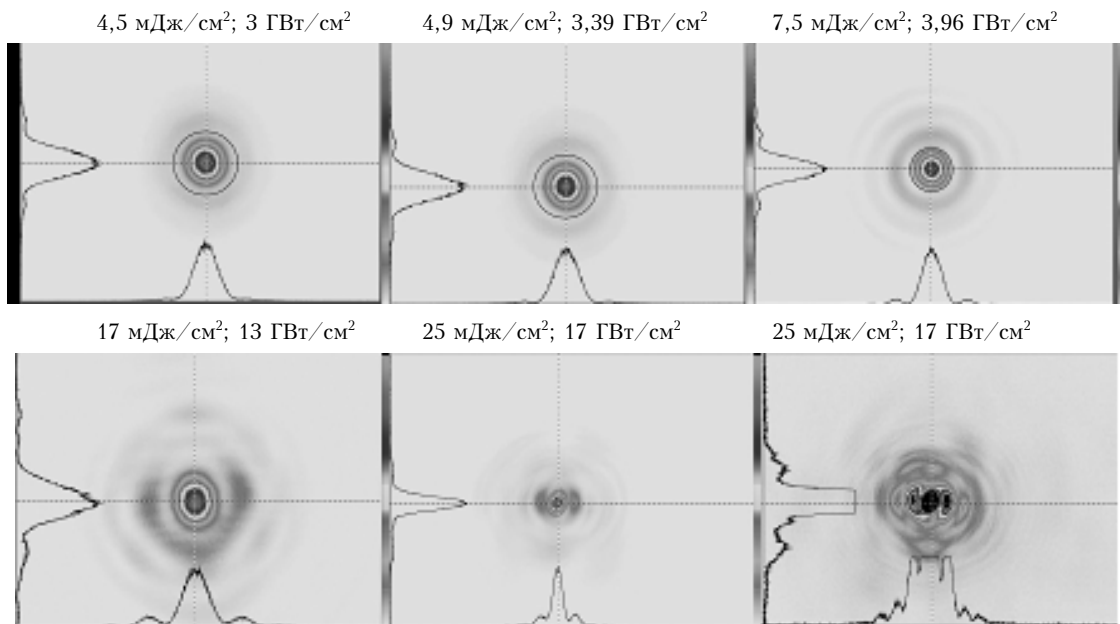


Рис. 2. Профили интенсивности излучения, вышедшего из компрессора из стекла марки SBSL-7, при различных плотностях энергии  $\epsilon$  (мДж/см<sup>2</sup>) и интенсивности  $I$  (ГВт/см<sup>2</sup>) входного пучка

При этом плотность энергии определялась исходя из измерений энергии и профиля излучения, входящего в компрессор. Входная мощность излучения рассчитывалась в программе Fresnel.

На рис. 3 представлено нормированное распределение  $x$  интенсивности излучения, прошедшего компрессор и зарегистрированного на удалении 3,5 м от него при различных плотностях энергии, интенсивности излучения, входящего в компрессор ( $\delta$  означает долю энергии в центральной части пучка (ядре) по уровню  $e^{-2}$  относительно всей энергии). Как видно из рис. 2 и 3, по мере роста интенсивности входного излучения вначале (при плотности энергии 4–5 мДж/см<sup>2</sup>) наблюдается самофокусировка выходного излучения, затем в нем появляется кольцевая структура, на которой в дальнейшем возникает азимутальная неоднородность. Доля энергии, содержащаяся в центральной части пучка, при этом существенно уменьшается. При входной интенсивности 17 ГВт/см<sup>2</sup> уже после первого прохода по призмам в ядре остается лишь пятая часть от входной энергии, остальная энергия содержится в широко расходящемся фоне.

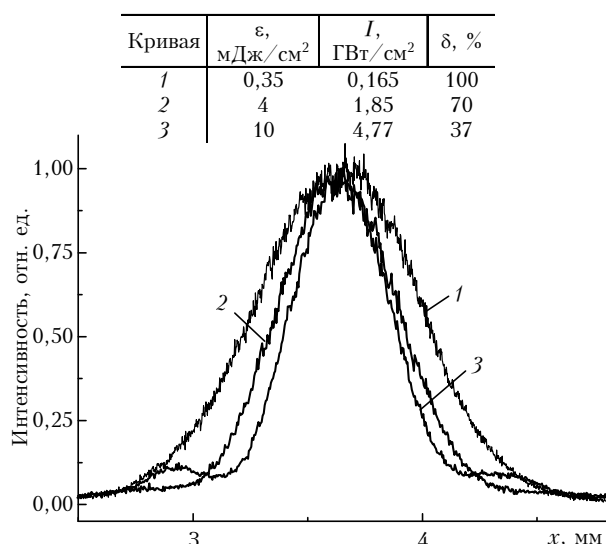
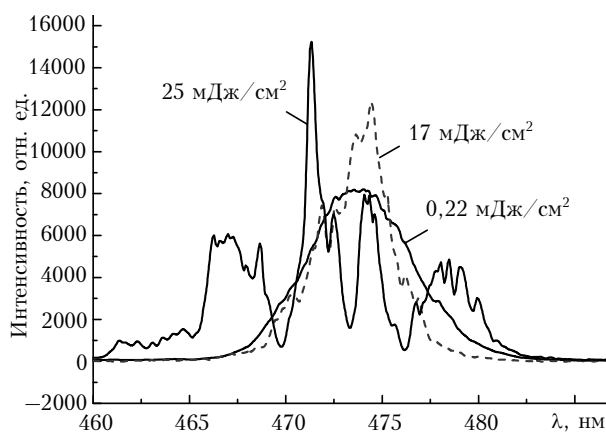


Рис. 3. Распределения интенсивности излучения, прошедшего компрессор из стекла HPFS-7980-5F, при различных плотностях энергии и мощности входного пучка

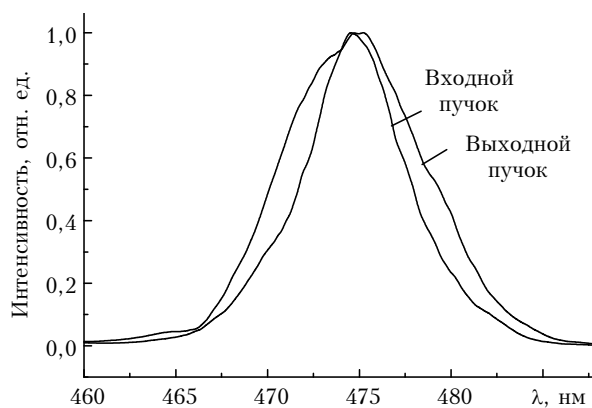
При малых плотностях энергии излучения (0,22 мДж/см<sup>2</sup>), входящего в компрессор, на его выходе регистрировалась исходная длительность импульса 47 фс. При плотности энергии входного излучения 10–5 мДж/см<sup>2</sup>, несмотря на значительные потери энергии в центральном ядре, после компрессора удавалось зарегистрировать практически исходную длительность импульса 57 фс. Однако стоит отметить, что для реализации этого необходимо было увеличить толщину стекла в компрессоре примерно на 10%. Появление дополнительной отрицательной дисперсии, наиболее вероятно, связано с наличием многофотонной ионизации в стекле.

На рис. 4 представлен спектральный состав выходного излучения в зависимости от плотности

энергии входного пучка. Видно, что при плотности энергии входного излучения 25 мДж/см<sup>2</sup> на спектре имеется глубокая модуляция. В этом случае невозможно говорить о восстановлении исходной длительности импульса излучения. Однако при плотности энергии входного излучения около 5 мДж/см<sup>2</sup> спектр на выходе из компрессора шире, чем на входе в него. В этом случае можно ожидать сокращения длительности выходного импульса излучения относительно исходного до 1,5 раза.



а



б

Рис. 4. Спектры излучения, прошедшего компрессор из стекла SBSL-7, при плотности энергии входного пучка 0,22; 17; 25 (а) и 5 мДж/см<sup>2</sup> (б)

С целью анализа процессов, происходящих с излучением при прохождении им стекла в компрессоре, нами производился расчет в программе Fresnel. С помощью этой программы, которая учитывает нелинейный показатель преломления среды, рассчитывалось прохождение излучением конечного участка компрессора. В расчетах закладывались следующие условия: толщина стекла (кварц) 5 см, входная длительность импульса 200 фс. Согласно нашим расчетам длительность излучения по мере прохождения им 5-см кварца должна составить 50 фс. Так как в программе Fresnel не учитывается сокращение длительности импульса излучения, проходящего стекло, усиление среды принималось равным 4, что дает равную с экспериментальной

выходную интенсивность. Плотность энергии входного излучения варьировалась изменением входной энергии при неизменном размере пучка. На рис. 5 представлены расчетные распределения выходного излучения на удалении 3,5 м от компрессора при различной входной энергии. В интеграле по времени рассчитанная картина близка к той, которая наблюдается в эксперименте. Необходимо отметить, что в момент максимума интенсивности излучения при энергии 0,2 мДж энергия пучка практически полностью переходит из центрального ядра в кольца. Причина такого поведения обусловлена появлением на фазе выходного излучения модуляции вследствие керровской нелинейности (рис. 5, б).

В таблице приведены параметры излучения, входящего в компрессор и вышедшего из него, в различных режимах. Размер входного пучка определялся по уровню интенсивности  $e^{-2}$ , исходя из измеренного профиля непосредственно перед компрессором. Плотность мощности излучения, вышедшего из стекла, и  $B$ -интеграл рассчитывались в программе Fresnel. В пятом режиме, при котором после компрессора была зафиксирована длительность 57 фс,  $B$ -интеграл составлял существенную величину. Кажущееся, на первый взгляд, противо-

речие может быть снято с учетом наличия многофотонной ионизации в стекле. Появление в среде свободных электронов приводит к отрицательной дисперсии, которая компенсирует положительную дисперсию, возникающую за счет эффекта Керра.

В наших экспериментах по усилению пикосекундного импульса излучения в XeF-усилителе и последующей его компрессии в стекле наблюдались большие потери энергии в пучке по мере его транспортировки после стекла. При этом средняя плотность энергии излучения, падающего на компрессор, составляла 5–6 мДж/см<sup>2</sup>. Уровень потерь в сильной мере зависел от однородности входящего в компрессор излучения и от однородности его стекла. Для определения требований к однородности излучения, проходящего стекло компрессора, в программе Fresnel производился расчет при следующих условиях. Пучок диаметром 3 см (супергаусс с показателем экспоненты  $m = 2$ ), длительностью импульса 200 фс, энергией 100 мДж приобретал амплитудную неоднородность с масштабом 10–15%, проходил кварц толщиной 5 см с увеличением интенсивности в 4 раза (эквивалентно уменьшению длительности импульса) и распространялся на расстояние 10 м.

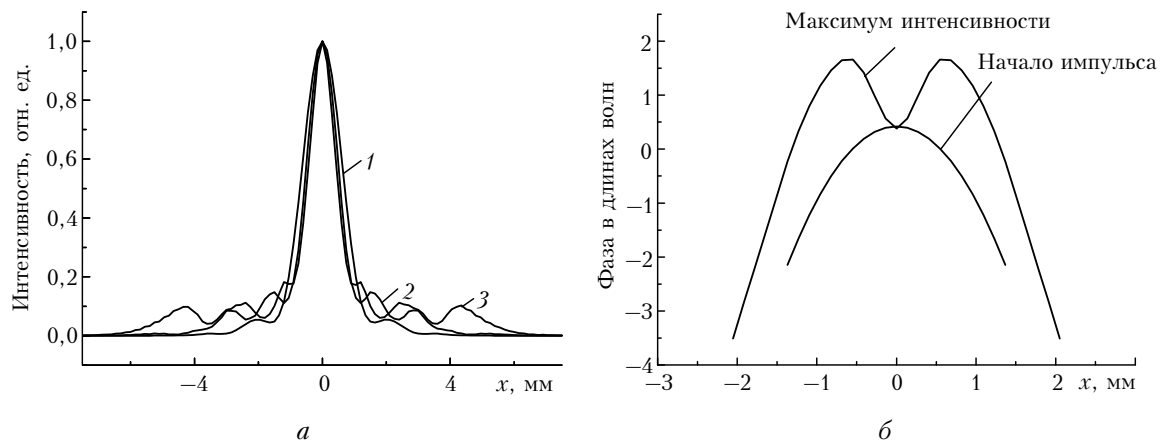


Рис. 5. Расчетные распределения интенсивности (а) и фазы (б) излучения, прошедшего стекло, при энергии входного пучка 20 (1), 50 (2, б), 0,2 мДж (3)

Параметры излучения, проходящего стекло SBSL-7

Параметр	Режим					
	1	2	3	4	5	6
Размер пучка, мм	4,5 × 5,3	1 × 0,97	0,94 × 0,93	1,07 × 0,71	0,57 × 0,45	0,35 × 0,5
Входная энергия, мДж	0,022	0,02	0,02	0,02	0,022	0,022
Входная плотность энергии, мДж/см <sup>2</sup>	0,23	4,5	4,9	7,5	17	25
Входная интенсивность, ГВт/см <sup>2</sup>	0,14	3	3,39	3,96	13	17
Расчетная выходная интенсивность, ГВт/см <sup>2</sup>	3,8	78	89	100	270	370
Доля энергии в ядре на выходе компрессора, %	91	64	64	46,9	42	22,3 (1 проход)
$B$ -интеграл на выходе, рад	0,43	9	10	12	34	48

Результаты расчетов (рис. 6) показали, что большая неоднородность в амплитуде за счет керровской нелинейности в стекле перерастает в существенную неоднородность в распределении фазы, которая, в свою очередь, приводит почти к 100%-й амплитудной неоднородности по мере распространения пучка.

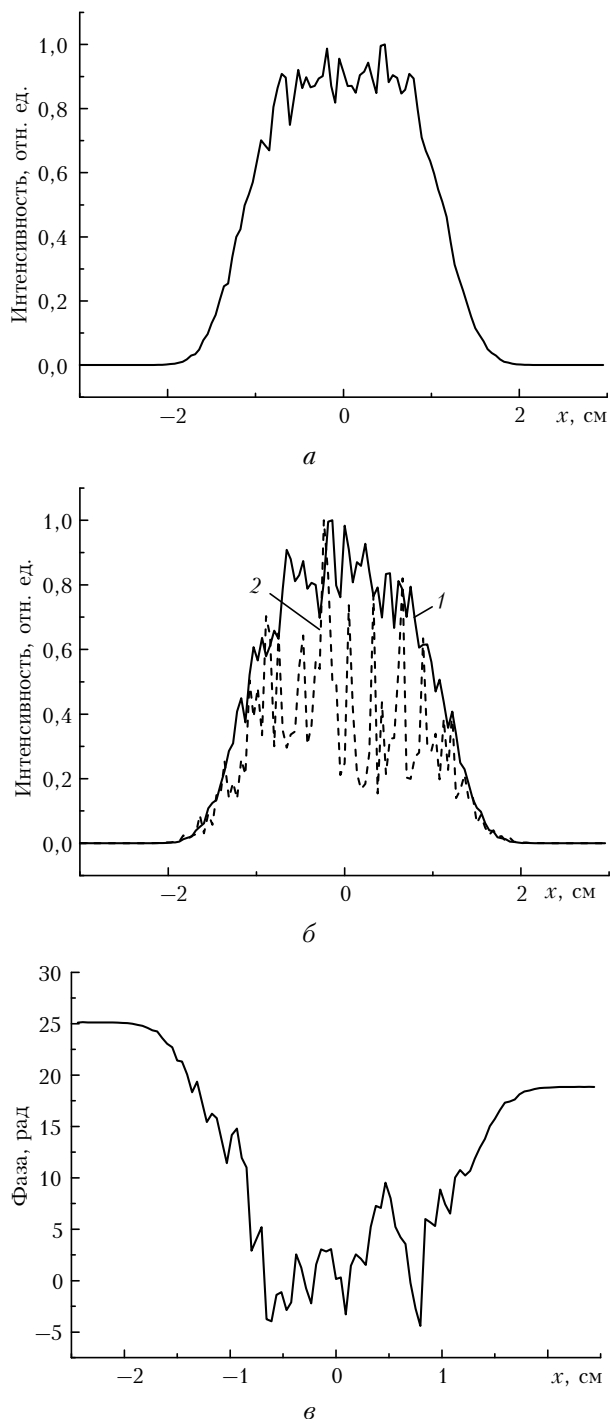


Рис. 6. Расчетные распределения интенсивности (а, б) и фазы (в) излучения, входящего в стекло (а) и прошедшего его (б, в). Кривая 1 отражает распределение интенсивности в отсутствие кварца в оптическом тракте, кривая 2 отражает распределение при его наличии

Кроме того, на расстоянии 50 м от компрессора в диаметре пучка 3 см остается лишь 3,5% от всей энергии. Заметим, что плотность энергии исходного излучения в нашем расчете составляла около 20 мДж/см<sup>2</sup>, что близко к критической плотности при проведении экспериментов с пучком малого диаметра. Снижение плотности входного излучения вдвое, согласно расчетам, уменьшает неоднородность в распределении пучка, транспортируемого на расстояние 10 м от компрессора. Тем не менее потери энергии, содержащейся в центральной части пучка, достигают при этом 50%. Влияние нелинейности в стекле остается даже при входной плотности 2–3 мДж/см<sup>2</sup>, однако в этом случае потери энергии несущественны.

### Заключение

Исходя из результатов экспериментов и проведенных расчетов, можно сказать, что при компрессии УКИ излучения на  $\lambda = 475$  нм в стекле существуют три диапазона плотности энергии (интенсивности) входного пучка. Первый из них — диапазон слабых интенсивностей (плотность энергии 1–5 мДж/см<sup>2</sup>), при которых влияние нелинейности на параметры выходного пучка незначительно. Второй — диапазон умеренных интенсивностей (плотность энергии 5–10 мДж/см<sup>2</sup>) — характеризуется значительной потерей энергии при распространении выходного пучка. Для третьего диапазона повышенных интенсивностей (плотность энергии 20 мДж/см<sup>2</sup> и более) характерно полное разрушение пространственной структуры и спектрального состава выходного пучка. В этом случае интенсивность излучения в стекле до момента «распада» пучка достигает 200 ГВт/см<sup>2</sup> и более. Филаментация УКИ излучения и как следствие потеря энергии в пучке большого диаметра, прошедшем стекло, также начинает серьезно сказываться при входных плотностях на уровне 15–20 мДж/см<sup>2</sup>.

1. Losev V., Alekseev S., Ivanov N., Kovalchuk B., Mikheev L., Mesyats G., Panchenko Yu., Ratakhin N., Yastremsky A. Development of a hybrid (solid state/gas) femtosecond laser system of multiterawatt peak power // Proc. SPIE. 2010. V. 7751. 775109 (5 p).
2. Alekseev С.В., Иванов Н.Г., Ковальчук Б.М., Лосев В.Ф., Месяц Г.А., Михеев Л.Д., Панченко Ю.Н., Ратахин Н.А., Ястремский А.Г. Тераваттная гибридная лазерная система ТНЦ-100 на базе фотодиссоционного XeF(C–A)-усилителя // Оптика атмосф. и океана. 2012. Т. 25, № 3. С. 221–225.
3. Alekseev S., Aristov A., Ivanov N., Kovalchuk B., Losev V., Mesyats G., Mikheev L., Panchenko Yu., Ratakhin N. Multiterawatt Femtosecond Laser System in the Visible with Photochemically Driven Xef(C–A) Boosting Amplifier // Laser Part. Beams. 2013. V. 31, N 1. P. 17–21.
4. Alekseev S., Aristov A., Ivanov N., Kovalchuk B., Losev V., Mesyats G., Mikheev L., Panchenko Yu., Ratakhin N. Multiterawatt femtosecond hybrid system based on a photodissociation XeF(C–A) amplifier in the visible range // Quantum Electron. 2012. V. 42, N 5. P. 377–378.

5. *Alekseev S., Aristov A., Grudtsyn Ya., Ivanov N., Kovalchuk B., Losev V., Mamaev S., Mesyats G., Mikheev L., Panchenko Yu., Polivin A., Stepanov S., Ratakhin N., Yalovoi V., Yastremskii A.* Visible-range hybrid femtosecond systems based on a XeF(C-A) amplifier: State of the art and prospects // *Quantum Electron.* 2013. V. 43, N 3. P. 190–200.
6. *Ахманов С.А., Вислоух В.А., Чиркин А.С.* Оптика фемтосекундных лазерных импульсов. М.: Наука, 1988. С. 67–170.
7. *Гаранин С.Г., Епатко И.В., Львов Л.В., Серов Р.В., Сухарев С.А.* Подавление самофокусировки в системе из двух нелинейных сред и пространственного фильтра // *Квант. электрон.* 2007. Т. 37, № 12. P. 1159–1165.

*N.G. Ivanov, V.F. Losev.* **The threshold conditions of ultrashort visible pulse propagation through glass.**

The results of measurement and calculation of parameters of radiation at  $\lambda = 475$  nm after compression in glass are presented. It is shown that there are three ranges of the energy density of the radiation entering to the compressor. In the first range of low intensity (energy density is 1–5 mJ/cm<sup>2</sup>), the influence of non-linearity on the output beam parameters is insignificant. The second range of moderate intensity (energy density is 5–10 mJ/cm<sup>2</sup>) is characterized by a significant loss of energy during the propagation of the output beam. The third range of increased intensities (energy density is 20 mJ/cm<sup>2</sup> or more) is characterized by a complete destruction of the spatial structure and the spectral composition of the output beam.