

УДК 621.373.8

## ПРЕДЕЛЬНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ЛАЗЕРОВ НА НЕОДИМОВОМ СТЕКЛЕ С АПЕРТУРОЙ ПУЧКА 45 И 60 ММ

*А. А. Кузьмин\**, *Е. А. Хазанов*, *А. А. Шайкин*

Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия

Исследована возможность увеличения энергии и частоты повторения импульсов лазера на неодимовом стекле с энергией импульса 220 Дж для накачки мощных титан-сапфировых усилителей импульсов с линейной модуляцией частоты. Экспериментально продемонстрирована устойчивая работа стержневых усилителей на неодимовом стекле с апертурой 45 мм при уровне упругих напряжений 40 % от порога разрушения активной среды. Частота повторения импульсов в этом режиме 1/30 Гц и является рекордом для импульсных лазерных усилителей с запасённой энергией более 100 Дж. Разработаны квантроны для стержневых активных элементов из стекла с неодимом диаметра 60 мм, позволяющие увеличить энергию выходного излучения лазера в 2 раза при сохранении тепловой нагрузки на активные элементы на том же уровне, что и в стержнях с диаметром 45 мм.

### ВВЕДЕНИЕ

Стержневые усилители из неодимового стекла с большой апертурой (порядка 100 мм) достаточно давно используются в лазерных системах килоджоульного класса [1–3]. В последнее время такие системы привлекают всё большее внимание в связи с появлением проектов по созданию мультитераваттных лазерных комплексов (как правило, с мощностью 10 ПВт) [4], неотъемлемой частью которых являются высокоэнергетичные лазеры на неодимовом стекле.

Низкая теплопроводность стекла и большое тепловыделение в активных элементах вследствие ламповой накачки ограничивают частоту повторения импульсов в этих системах до уровня нескольких импульсов в день, что обусловлено большим (несколько десятков минут) временем остывания активных элементов. Как следствие, в сверхмощных лазерах характерное время между импульсами составляет один час, что сильно ограничивает возможности их практического применения. Поэтому важной и актуальной задачей является увеличение частоты повторения импульсов в таких системах.

Принципиальным ограничивающим фактором при этом является разрушение активных элементов вследствие превышения порога допустимых упругих напряжений. Однако существует диапазон частот повторения импульсов, в котором порог разрушения не достигается, но накопление тепла от импульса к импульсу приводит к значительным искажениям поляризации и фазы излучения вследствие линейного расширения активных элементов, а также зависимости показателя преломления активной среды от температуры и фотоупругого эффекта, вызывающего появление двулучепреломления и, как следствие, деполяризации излучения даже в изначально изотропной среде. Впервые возможность использования усилителей из неодимового стекла с большой апертурой (до 100 мм) в таких импульсно-периодических режимах была продемонстрирована в работах [5–7], где также приведены экспериментальные результаты успешной компенсации тепловых эффектов. Отметим, что задача подавления термонаведённых поляризационных и фазовых искажений излучения значительно усложняется при увеличении апертуры активных элементов и энергии лазерного излучения. Так, например, в схеме компенсации деполяризации, основанной на установке вращателя поляризации на  $90^\circ$  между двумя идентичными активными

\* alexeyhsgap@yandex.ru

элементами [8], большую сложность представляет обеспечение эквивалентного режима нагрева и охлаждения активных элементов, а в методе подавления термонаведённой линзы при помощи обращения волнового фронта за счёт вынужденного рассеяния Манделъштама—Бриллюэна (ВРМБ) сфокусированного излучения ограничивающим фактором является пробой нелинейной среды. Несмотря на эти трудности, на основе проведённых исследований [5–7, 9] был создан импульсно-периодический лазер на неодимовом стекле с частотой повторения импульсов 0,02 Гц, энергией импульса 220 Дж, длительностью 30 нс и высоким оптическим качеством лазерного пучка [10]. В качестве основных силовых элементов были использованы стержневые усилители на неодимовом фосфатном стекле с апертурой 45 мм. Заметим, что относительно высокая частота повторения импульсов была достигнута за счёт использования сравнительно небольших (в диаметре) активных элементов. Для кардинального увеличения энергии генерируемого излучения очевидна необходимость использования усилителей с большей апертурой. Также они требуются при уменьшении длительности лазерных импульсов, что важно при создании источника накачки для параметрических лазерных комплексов [4]. Безусловно, максимальная частота повторения импульсов в усилителях с большей апертурой ниже, тем не менее при интервале между импульсами в несколько минут они также могут быть успешно использованы [6].

Целью данной работы является исследование возможностей увеличения средней мощности генерируемого излучения в созданном нами импульсно-периодическом лазере [10, 11]. Очевидное экстенсивное решение этой проблемы — увеличение числа лазерных каналов. Однако приведённые в данной работе результаты исследования показали, что даже для одного канала могут быть существенно увеличены как энергия импульса, так и частота повторения импульсов.

## 1. СХЕМА ЛАЗЕРА

На рис. 1а изображена реализованная нами схема лазера на неодимовом стекле, в которой была получена генерация импульсов высокого качества с энергией 220 Дж при частоте их повторения 0,02 Гц [10, 11]. Силовой каскад состоял из четырёх двухпроходных усилителей У45 (стержни с диаметром 45 мм и длиной накачиваемой части 250 мм; см. рис. 1б) и был изолирован от стартовой части изолятором Фарадея и кеплеровым телескопом с фокальной перетяжкой в воздухе, работавшим как плазменный затвор [11]. Для компенсации деполяризации излучения на каждом проходе использовались кварцевые вращатели поляризации на 90°. Зеркало на эффекте ВРМБ осуществляло обращение волнового фронта и препятствовало самовозбуждению усилителя. Вращатель Фарадея, установленный перед ВРМБ-кюветой, дополнительно уменьшал [12] за два прохода деполяризацию, некомпенсированную при помощи кварцевых вращателей, и обеспечивал развязку излучения на выходном поляризаторе.

В работе [7] представлены параметры разработанного нами усилителя со стержневым активным элементом из неодимового фосфатного стекла с диаметром 60 мм и длиной накачиваемой части 250 мм (У60; см. рис. 1б). Благодаря оптимизации системы накачки [13] и конфигурации геометрических параметров квантрона (лазерного усилителя) нам удалось значительно снизить тепловую нагрузку на стержень и в то же время сохранить высокий коэффициент усиления. Проведённый анализ [7] термонаведённых эффектов показал, что усилители У60 могут работать при той же самой частоте повторения импульсов, что и усилители У45, испытывая почти одинаковую тепловую нагрузку и запасая практически ту же энергию в единице объёма активной среды. Это означает, что полная запасённая энергия в усилителях У60 примерно в 1,7 раза больше, чем в усилителях У45, а тепловые эффекты находятся на том же уровне. В следующем разделе мы приводим результаты сравнения энергетических параметров уже созданного лазера [11] и лазера с новыми усилителями У60 вместо У45.

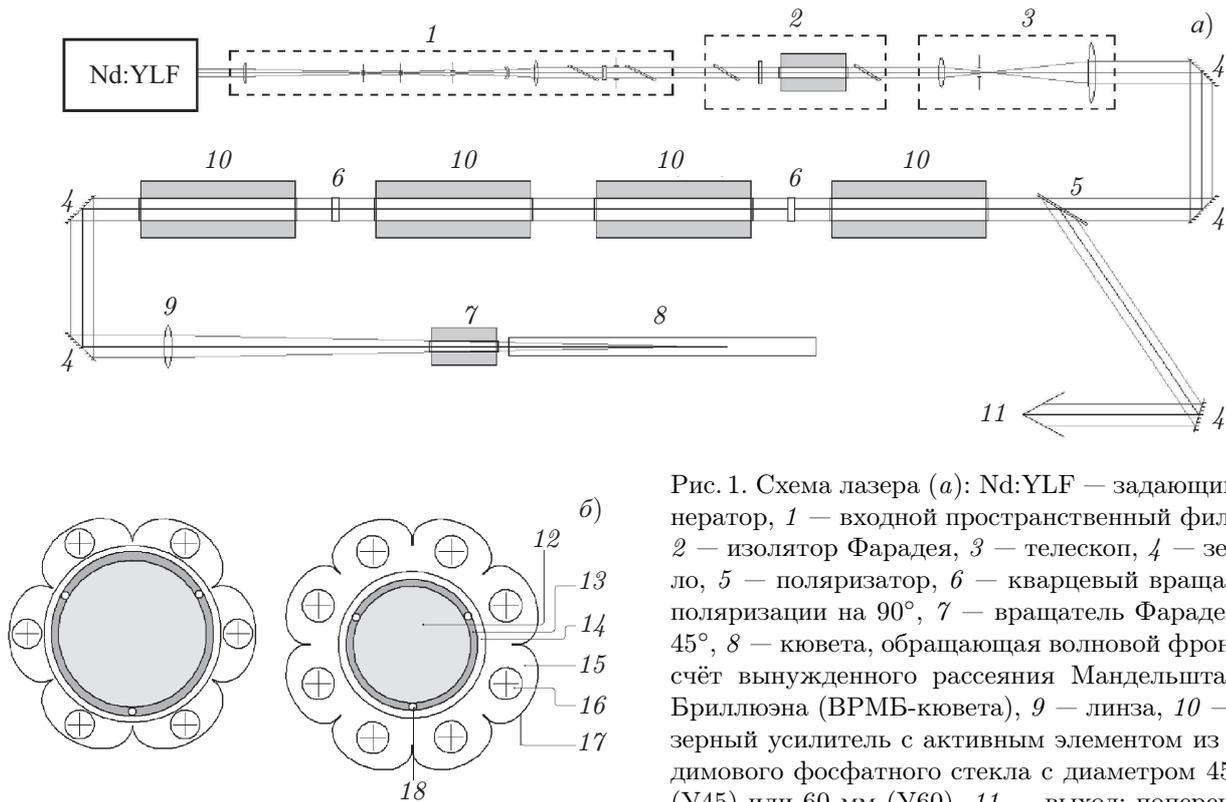


Рис. 1. Схема лазера (а): Nd:YLF — задающий генератор, 1 — входной пространственный фильтр, 2 — изолятор Фарадея, 3 — телескоп, 4 — зеркало, 5 — поляризатор, 6 — кварцевый вращатель поляризации на 90°, 7 — вращатель Фарадея на 45°, 8 — кювета, обращающая волновой фронт за счёт вынужденного рассеяния Манделъштата–Бриллюэна (ВРМБ-кювета), 9 — линза, 10 — лазерный усилитель с активным элементом из неодимового фосфатного стекла с диаметром 45 мм (У45) или 60 мм (У60), 11 — выход; поперечные сечения усилителей (б) У45 (слева) и У60 (справа): 12 — активный элемент, 13 — дистиллированная вода, 14 — кварцевая колба, 15 — воздушное пространство, 16 — лампа накачки, 17 — отражатель, 18 — штуцер для ввода (либо слива) воды

## 2. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛАЗЕРОВ С УСИЛИТЕЛЯМИ У45 И У60

Для расчётов мы использовали следующие предположения. Торцы активных элементов считались идеально просветлёнными. В соответствии с паспортными данными поглощение на длине волны лазерного излучения (1054 нм) в активной среде за один проход составляло 5 %. Плотность энергии насыщения неодимового стекла равна 3,5 Дж/см<sup>2</sup>. Характеристики усилителей У45 и У60, использованные при расчётах лазеров, приведены в табл. 1. Отметим, что в этой таблице указаны средние значения коэффициентов усиления, однако все расчёты проводились с учётом реальных распределений по апертуре, взятых из работ [6, 11].

Распределение интенсивности лазерного излучения на входе в силовой каскад задавалось в виде, близком к используемому в эксперименте:

$$I_{in}(t, r) = \begin{cases} I_0 \exp[-(2t/t_0)^2 \ln 2] \cos^2[\pi r^2/(2r_d^2)], & r \leq r_d; \\ 0, & r > r_d, \end{cases} \quad (1)$$

где  $t$  и  $r$  — время и радиальная координата соответственно,  $I_0$  — максимальная интенсивность,  $t_0 = 31,5$  нс — длительность импульса по полувысоте,  $2r_d$  — диаметр пучка по нулю поля (для лазера с усилителем У45 он полагался равным 43 мм, а для лазера с У60 58 мм). Интеграл

Таблица 1. Характеристики разработанных лазерных усилителей У45 и У60

Усилитель	У45	У60
Диаметр активного элемента, мм	45	60
Полная длина активного элемента, мм	320	320
Длина накачиваемой части активного элемента, мм	250	250
Внутренний диаметр колбы с водой, мм	48	95
Внешний диаметр колбы с водой, мм	54	100
Концентрация ионов $\text{Nd}^{3+}$ , $10^{19} \text{ см}^{-3}$	8,6	5,6
Марка ламп накачки	ИФП-5 000-2	ИФП-8 000
Число ламп накачки (см. рис. 1б)	6	8
Энергия накачки, кДж	15,0	36,5
Коэффициент усиления слабого сигнала, усреднённый по апертуре	6,0	6,5
Запасённая энергия, Дж	100	184

распада ( $B$ -интеграл) в каждом стержне рассчитывался по формуле

$$B = 2\pi\gamma_{\text{NL}}\lambda^{-1} \max_{r,t} \left( \int_0^L I dz \right) \quad (2)$$

и затем суммировался по всем активным элементам. Здесь  $L$  — длина стержня,  $I$  — интенсивность лазерного излучения,  $\lambda$  — длина волны излучения,  $\gamma_{\text{NL}}$  — коэффициент кубичной нелинейности неодимового стекла для линейно поляризованного излучения (он полагался равным  $3,2 \cdot 10^{-7} \text{ см}^2/\text{ГВт}$ ),  $z$  — продольная координата.

Зависимости энергии выходного излучения  $E_{\text{out}}$  и максимальной плотности энергии  $e_{\text{max}}$  от энергии импульса на входе в первый усилитель  $E_{\text{in}}$  приведены на рис. 2а. На рис. 2б изображены зависимости суммарного  $B$ -интеграла от  $E_{\text{in}}$ . В расчётах полагалось, что импульсы первого и второго проходов во всех усилителях во времени не перекрываются. Для этого необходимо достаточно большое расстояние между ВРМБ-куветой и ближайшим к ней активным элементом (см. рис. 1а). Для импульса с длительностью 31,5 нс это расстояние должно быть не менее 4,7 м. Несо-

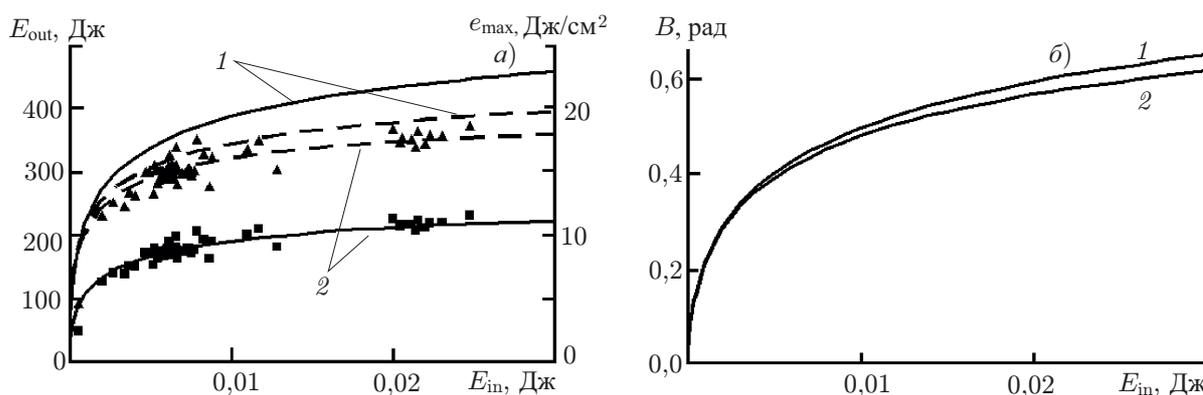


Рис. 2. Зависимости энергии выходного излучения  $E_{\text{out}}$  и максимальной плотности энергии  $e_{\text{max}}$  (а) и суммарного  $B$ -интеграла (б) от энергии входного излучения  $E_{\text{in}}$ . Кривые 1 и 2 соответствуют усилителям У60 и У45, символы  $\blacksquare$  и  $\blacktriangle$  — экспериментальным данным для  $E_{\text{out}}$  и  $e_{\text{max}}$  с У45, сплошные и штриховые линии на панели а —  $E_{\text{out}}$  и  $e_{\text{max}}$

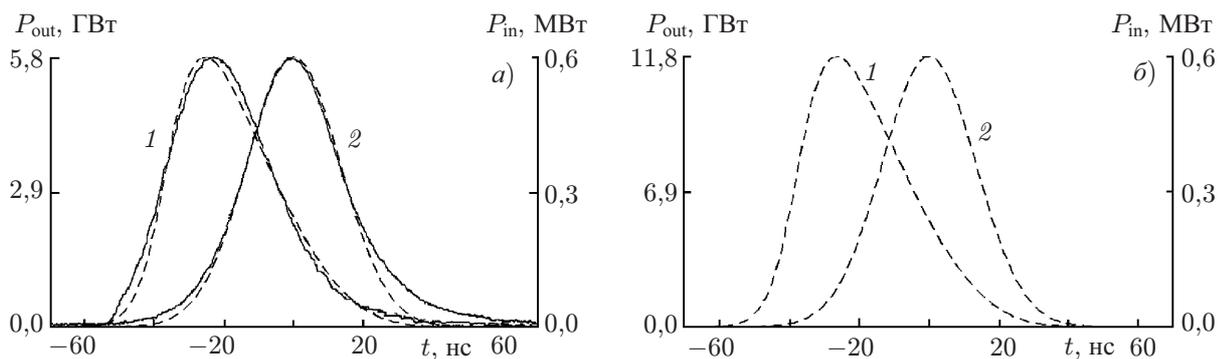


Рис. 3. Расчётные распределения мощности излучения в импульсах на входе ( $P_{in}$ ; линии 2) и на выходе ( $P_{out}$ ; линии 1) силового каскада, состоящего из четырёх двухпроходных усилителей У45 (а) либо У60 (б). Сплошные и штриховые линии соответствуют экспериментальным и теоретическим зависимостям

блюдение этого требования приводит к уменьшению на несколько процентов энергии выходного излучения и дополнительным искажениям формы импульса.

Максимальная плотность энергии излучения в рассмотренных лазерах (см. рис. 2а) более чем в 2,5 раза ниже порога оптического пробоя стекла, который для импульсов с длительностью 31,5 нс составляет около 55 Дж/см<sup>2</sup> [14]. Суммарный  $B$ -интеграл не превышает 1 рад (см. рис. 2б), что меньше экспериментального порога развития мелкомасштабной самофокусировочной неустойчивости (обычно полагают, что  $B$ -интеграл не должен превышать 3 рад [15–18]).

Известно, что кубическая нелинейность ухудшает точность методов компенсации деполяризации [19, 20]. При малых значениях  $B$ -интеграла интегральная степень деполяризации  $\gamma$  в схеме с двумя одинаковыми активными элементами и вращателем поляризации на 90° между ними пропорциональна  $B^2$  [19, 20]. Коэффициент пропорциональности зависит от параметра  $\delta_R$ , который определяет число радиальных вариаций степени деполяризации в апертуре усилителя и равен разности термонаведённых приращений фаз собственных волн на краю активного элемента [7]. В частности, в усилителях У45 и У60, работающих в режиме 30-секундного повторения импульсов,  $\delta_R$  составляет величину порядка  $7\pi$  (см. раздел 5), и из [19] следует, что  $\gamma[\%] \approx 2B^2$ . Следовательно, в рассмотренных случаях некомпенсированная из-за влияния кубической нелинейности степень деполяризации  $\gamma$  может составить лишь десятые доли процента, что меньше «холодного» (в отсутствие накачки) её значения ( $1 \div 2\%$ ), обычно наблюдаемого в экспериментах [7]. Таким образом, кубическая нелинейность в стекле существенно не влияет на компенсацию термонаведённой деполяризации в рассмотренных лазерах вплоть до частоты повторения импульсов 1/30 Гц.

На рис. 3 и 4 в качестве примера приведены формы импульса и пучка на выходе лазеров с усилителями У45 и У60 при  $E_{in} = 20$  мДж. Из рис. 3 видно, что из-за насыщения усиления передний фронт выходного импульса становится более крутым, а задний — затянутым. Искажение формы импульса приводит к его удлинению примерно на 10%. Максимум импульса смещается на 25–30 нс в сторону опережения. Как видно из рис. 4, на выходе лазера с усилителями У45 неоднородность пучков по поперечному сечению незначительна: она не превышает 10%. В то же время в лазере с усилителями У60 данная неоднородность составляет более 20%. Для устранения указанной неоднородности можно изменить форму пучка на входе в силовой каскад, увеличив скорость спада интенсивности от центра пучка к краю. В результате радиальное распределение интенсивности на выходе установки может стать достаточно пологим. Однако энергия в импульсе в этом случае станет приблизительно на 15–20% меньше.

Как видно из рис. 2–4, теоретические расчёты очень хорошо согласуются с экспериментальными

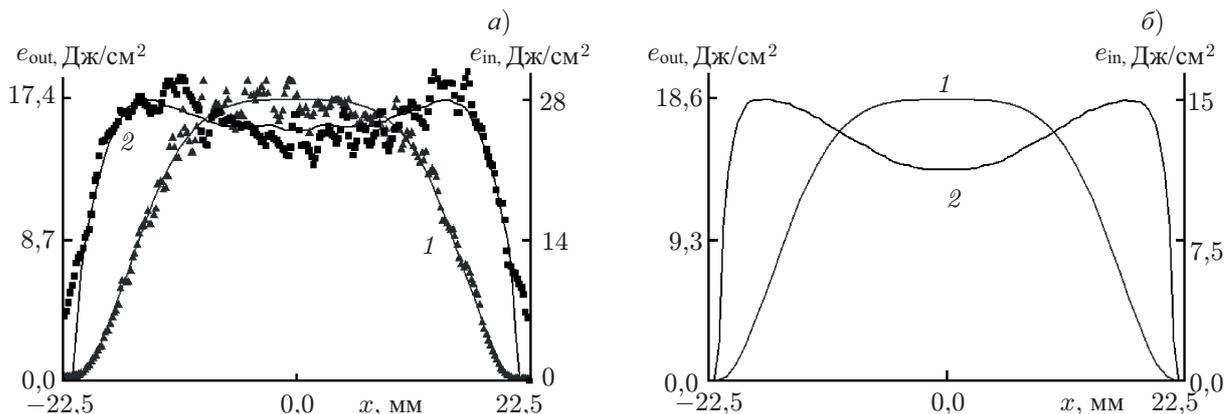


Рис. 4. Расчётные поперечные распределения плотности энергии в пучке на входе ( $e_{in}$ ; линия 1) и на выходе ( $e_{out}$ ; линия 2) силового каскада, состоящего из четырёх двухпроходных усилителей У45 (а) и четырёх двухпроходных усилителей У60 (б). Символы  $\blacktriangle$  и  $\blacksquare$  соответствуют экспериментальным данным для  $e_{in}$  и  $e_{out}$ , линии — теоретическим зависимостям

ми данными для усилителей У45, т. к. в модели учитываются все ключевые физические эффекты. Это позволяет утверждать, что расчёты для усилителей У60 также соответствуют реальности. Подводя итог сказанному, отметим, что в рассмотренном лазере с усилителями У60 может быть достигнута энергия 430÷450 Дж, что в 2 раза превосходит значение, экспериментально полученное в лазере с усилителями У45. Максимальная плотность энергии излучения для импульсов с длительностью 31,5 нс не превышает 20 Дж/см<sup>2</sup>, что ниже порога оптического пробоя в 2,5 раза. Суммарный  $B$ -интеграл меньше единицы, следовательно, мелкомасштабная самофокусирующая неустойчивость не развивается.

### 3. ОГРАНИЧЕНИЕ ЧИСЛА УСИЛИТЕЛЕЙ В КАНАЛЕ. РОЛЬ УСИЛЕННОГО СПОНТАННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В рассмотренных в данной работе двухпроходных лазерных усилителях коэффициент усиления по слабому сигналу за два прохода превышает  $10^6$ . В связи с этим очень важен вопрос об ограничении коэффициента усиления из-за усиленного спонтанного излучения (УСИ). Интенсивность УСИ  $I_{ASE}$  может быть оценена по формуле [21]

$$I_{ASE} = \frac{I_s \Omega}{4\pi^{3/2}} \sqrt{\frac{(G_{0\Sigma} - 1)^3}{G_{0\Sigma} \ln G_{0\Sigma}}}, \quad (3)$$

где  $I_s = e_s/\tau$  — интенсивность насыщения,  $e_s$  — плотность энергии насыщения (для неодимового стекла 3,5 Дж/см<sup>2</sup>),  $\tau$  — время жизни верхнего лазерного уровня,  $G_{0\Sigma}$  — суммарный коэффициент усиления по слабому сигналу,  $\Omega = \pi \times D^2 / (2L_{sum})^2$  — телесный угол, в пределах которого происходит усиление люминесценции,  $D$  —

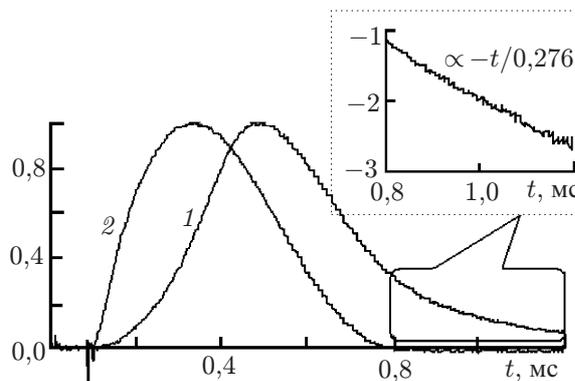


Рис. 5. Осциллограммы импульса люминесценции из активного элемента усилителя У45 (кривая 1) и импульса разрядного тока в лампах накачки (кривая 2), выраженные в относительных единицах. На врезке в логарифмическом масштабе показана часть осциллограммы импульса люминесценции

диаметр активных элементов, а  $L_{\text{sum}}$  — длина усилительного тракта. Мощность УСИ равна  $P_{\text{ASE}} = I_{\text{ASE}}\pi D^2/4$ .

Время жизни  $\tau$  может быть определено экспериментально по времени затухания люминесценции после окончания импульса накачки. На рис. 5 приведены измеренные осциллограммы импульса разрядного тока в лампах накачки усилителя У45 и импульса люминесценции. К моменту времени 0,8 мс разряд в лампах накачки прекращается и затухание импульса люминесценции определяется только релаксацией инверсии населённостей в активной среде. Время релаксации  $\tau \approx 276$  мкс, что согласуется с данными, приведёнными в работе [22].

Таблица 2. Оценка параметров усиленного спонтанного излучения

$N$	$D$ , мм	$L$ , м	$G_{0\Sigma}$	$P_{\text{ASE}}$ , кВт	$I_{\text{ASE}}/I_s$
4	45	4	$1,3 \cdot 10^3$	0,4	$2,2 \cdot 10^{-3}$
6	45	6	$4,7 \cdot 10^4$	5,7	0,03
8	45	8	$1,7 \cdot 10^6$	100	0,50
4	60	4	$1,8 \cdot 10^3$	1,8	$5 \cdot 10^{-3}$
6	60	6	$7,5 \cdot 10^4$	28	0,08
8	60	8	$3,2 \cdot 10^6$	590	1,60

только для четырёх усилителей У45 либо У60. При  $N = 8$  УСИ приведёт к значительному уменьшению инверсии населённостей и коэффициента усиления. Случай  $N = 6$  соответствует границе влияния УСИ. Кроме того, при  $N = 6$  существует опасность самовозбуждения усилителей из-за паразитных отражений, т. к. усиление за проход ( $G_{0\Sigma}$ ) очень велико. Подавить УСИ можно с помощью пространственных фильтров, расположенных между усилителями, однако это приведёт к значительному усложнению лазера и увеличит его размеры.

Таким образом, использование в одной схеме более четырёх последовательно расположенных усилителей У45 или У60 затруднено усиленным спонтанным излучением. С этой точки зрения выбранное число усилителей в лазере на рис. 1 мы считаем оптимальным.

#### 4. ПРЕДЕЛЬНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ЧАСТОТЫ ПОВТОРЕНИЯ ИМПУЛЬСОВ ДЛЯ УСИЛИТЕЛЕЙ У45 И У60

Частота повторения импульсов лазерной установки — один из основных параметров, определяющих удобство её использования. В [6, 7, 9, 23] мы приводили результаты исследования тепловых эффектов в активных стержнях из неодимового фосфатного стекла с апертурой до 150 мм при высокой частоте повторения импульсов накачки. При выборе максимальной частоты повторения импульсов накачки мы ограничивались уровнем термоупругой нагрузки на активный элемент в 20 % от порога разрушения. Однако следует отметить, что параметры разрушения активной среды, взятые нами из [22], были определены для достаточно малых образцов с диаметром 10 мм и длиной 130 мм при соблюдении определённых, регламентируемых стандартом [24], условий. Экстраполяция этих данных на стержни с большими размерами требует осторожности. В частности, значительно повышаются требования к равномерности отвода тепла с поверхности активного элемента, т. к. неравномерное охлаждение приводит к дополнительному увеличению градиентов температуры.

Охлаждение активного элемента в усилителе У45 (либо У60) осуществлялось при помощи тер-

В рассмотренных двухпроходных усилителях (см. рис. 1) благодаря пороговому характеру работы ВРМБ-зеркала УСИ развивается только за один проход, т. е. ограничения, связанные с УСИ, в двухпроходных усилителях такие же, как в однопроходных, что является важным преимуществом ВРМБ-зеркала. В этой связи рассмотрим  $N$  последовательно расположенных усилителей. Полагая, что на один усилитель приходится 1 м длины, из (3) оценим величины  $P_{\text{ASE}}$  и  $I_{\text{ASE}}$  (см. табл. 2).

Считается, что УСИ можно пренебречь, если  $I_{\text{ASE}}/I_s \ll 0,1$ . Следовательно, это возможно

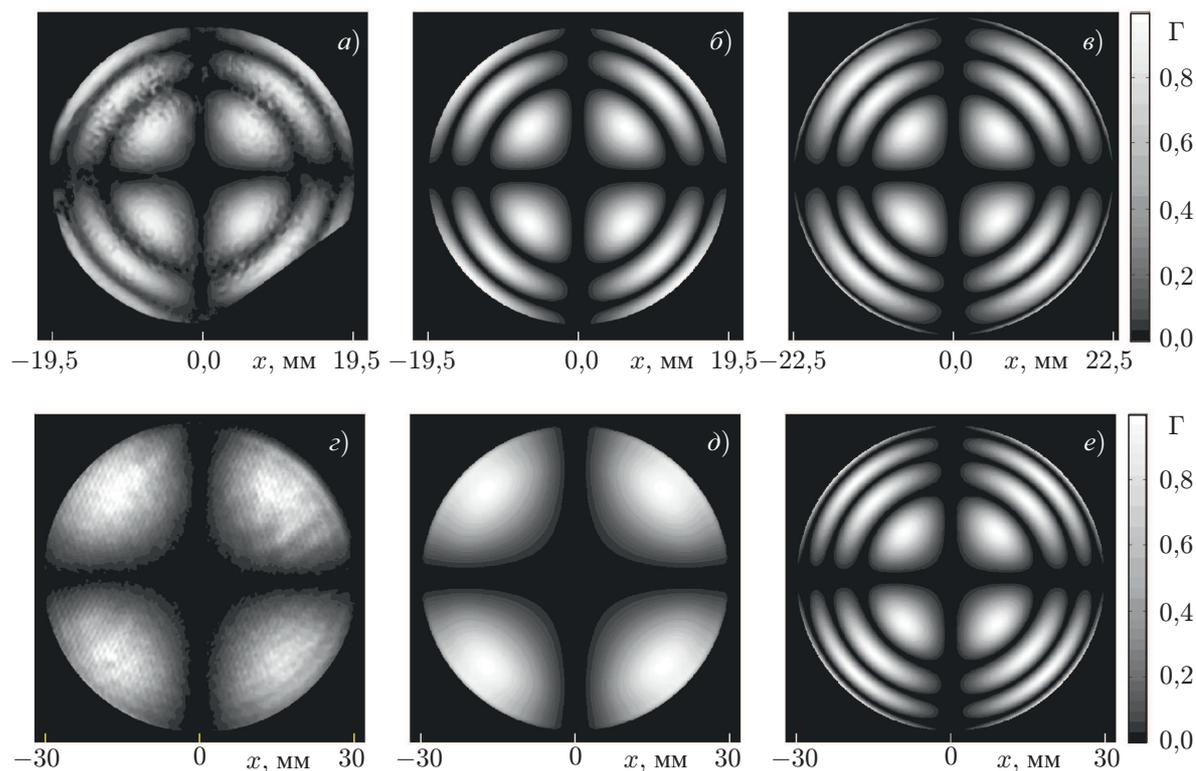


Рис. 6. Стационарные поперечные распределения степени деполяризации  $\Gamma$ : в усилителе У45 при периоде повторения импульсов накачки 30 с и энергии накачки 15 кДж (*a–в*); в усилителе У60 при периодах повторения импульсов накачки 2 мин (*з, д*) и 30 с (*е*) и энергии накачки 36,5 кДж (*a, з* — экспериментальные распределения; *б, в, д, е* — теоретические)

мостабилизированной ( $\pm 0,2^\circ\text{C}$ ) дистиллированной воды, которая поступала в колбу со стержнем через 3 равноудалённых друг от друга штуцера, расположенных на одном из торцов усилителя (см. рис. 1б). Слив воды осуществлялся с противоположного торца усилителя через 3 аналогичных выходных штуцера. Скорость протока воды составляла 1 л/мин, что соответствовало 15 циклам полной замены воды в колбе за 1 мин. На пути водного потока сразу после входных штуцеров и непосредственно перед выходными располагались перфорированные перегородки, обеспечивавшие перемешивание воды и гомогенизацию её потока вдоль образующей активного элемента. Благодаря такой конструкции нам удалось обеспечить стабильную работу усилителей в режиме термоупругой нагрузки лишь в 2,5 раза меньшей предела разрушения неодимового фосфатного стекла.

На рис. 6а, з представлены измеренные стационарные распределения степени деполяризации  $\Gamma$  (т.е. отношения интенсивности деполяризованной компоненты к полной интенсивности излучения на выходе активного элемента) в усилителях У45 и У60 в экспериментально реализованных импульсно-периодических режимах работы с периодами повторения импульсов накачки 30 с (для усилителя У45) и 2 мин (для усилителя У60). На рис. 6б, д изображены соответствующие условиям эксперимента теоретические распределения, которые хорошо совпадают с результатами измерений. Отметим, что для усилителя У45 экспериментальное распределение деполяризации охватывает не всю апертуру активного элемента, а лишь её часть. Это связано с тем, что пробный пучок (см. распределение величины  $e_{in}$  на рис. 4а) заполнял лишь центральную часть апертуры с диаметром 39 мм. На рис. 6в представлено соответствующее условиям эксперимента теоретическое распределение степени деполяризации по всей апертуре усилителя У45. Внутри круга

с диаметром 39 мм оно идентично распределению на рис. 6б.

Число радиальных вариаций степени деполяризации пропорционально величине максимальных упругих напряжений в стержне. В эксперименте (см. рис. 6а и з) упругие напряжения достигали величины 12 (У45) и 3 МПа (У60), или соответственно 40 и 10 % от порога разрушения, принятого нами равным 30 МПа [22]. Блок питания ламп в усилителе У60 [13] не позволял достичь более высокой частоты повторения импульсов накачки.

Мы на практике показали возможность устойчивой работы разработанных нами лазерных усилителей при уровне упругих напряжений 40 % от порога разрушения активной среды. Достигнутые нами значения частоты повторения импульсов накачки являются рекордными для импульсных лазерных усилителей с запасённой энергией 100 Дж.

На основе экспериментальных данных можно сделать вывод, что тепловая нагрузка на активный элемент усилителя У60 за один импульс накачки примерно равна тепловой нагрузке на активный элемент усилителя У45, поэтому усилитель У60 также способен работать в режиме 30-секундного периода повторения импульсов, испытывая при этом действие упругих напряжений порядка 40 % от порога разрушения. На рис. 6е представлено рассчитанное для такого режима работы стационарное распределение степени деполяризации. Оно практически не отличается от распределения на рис. 6в для усилителя У45, работающего при той же частоте повторения импульсов.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проанализирована возможность увеличения энергии и частоты повторения импульсов созданного нами [10, 11] лазера на неодимовом стекле. Показано, что энергия импульса может быть увеличена с 220 до 450 Дж. Экспериментально продемонстрирована устойчивая работа разработанных стержневых лазерных усилителей на неодимовом стекле с апертурой 45 мм при уровне упругих напряжений 40 % от порога разрушения активной среды, что отвечает частоте повторения импульсов 1/30 Гц и являются рекордом для импульсных лазерных усилителей с запасённой энергией более 100 Дж.

Показано, что применение разработанных нами стержневых усилителей на неодимовом фосфатном стекле с диаметром активных элементов 60 мм позволяет увеличить энергию выходного излучения лазера в 2 раза. При этом нам удалось сохранить тепловую нагрузку на активные элементы на том же уровне, что и в стержнях с диаметром 45 мм. Это позволяет использовать более мощные усилители с диаметром 60 мм при той же частоте повторения импульсов 1/30 Гц.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты 15-02-08099 и 16-32-60125), Министерства образования и науки Российской Федерации (проект 14.Z50.31.0007) и стипендиальной программы Президента Российской Федерации для молодых учёных и аспирантов, осуществляющих перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики (проект СП-703.2016.2).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баянов В. И., Крыжановский В. И., Серебряков В. А. и др. // Квантовая электроника. 1984. Т. 11, № 2. С. 310.
2. Баянов В. И., Бордачев Е. Г., Волынкин В. М. и др. // Квантовая электроника. 1986. Т. 13, № 9. С. 1891.

3. Мак А. А., Сомс Л. Н., Фромзель В. А., Яшин В. Е. Лазеры на неодимовом стекле. М.: Наука, 1990. 288 с.
4. Хазанов Е. А., Сергеев А. М. // Успехи физ. наук. 2008. Т. 178. С. 1006.
5. Кузьмин А. А., Лучинин Г. А., Потёмкин А. К. и др. // Квантовая электроника. 2009. Т. 39, № 10. С. 895.
6. Kuzmin A. A., Khazanov E. A., Shaykin A. A. // Optics Express. 2011. V. 19, No. 15. P. 14223.
7. Кузьмин А. А., Хазанов Е. А., Шайкин А. А. // Квантовая электроника. 2012. Т. 42, № 4. С. 283.
8. Scott W. C., de Wit M. // Applied Physics Letters. 1971. V. 18, No. 1. P. 3.
9. Kuzmin A. A., Silin D. E., Shaykin A. A., et al. // J. Optical Society of America B. 2012. V. 29, No. 6. P. 1152.
10. Кузьмин А. А., Кулагин О. В., Хазанов Е. А., Шайкин А. А. // Квантовая электроника. 2013. Т. 43, № 7. С. 597.
11. Kuzmin A. A., Khazanov E. A., Kulagin O. V., Shaykin A. A. // Optics Express. 2014. V. 22, No. 17. P. 20842.
12. Андреев Н. Ф., Бондаренко Н. Г., Еремина И. В. и др. // Квантовая электроника. 1991. Т. 18, № 10. С. 1154.
13. Потемкин А. К., Журин К. А., Кирсанов А. В. и др. // Квантовая электроника. 2011. Т. 41, № 6. С. 487.
14. Lowdermilk W. H., Milam D. // IEEE J. Quantum Electronics. 1981. V. 17, No. 12. P. 1888.
15. Bunkenberg J., Boles J., Brown D. C., et al. // IEEE J. Quantum Electronics. 1981. V. 17, No. 9. P. 1620.
16. Беспалов В. И., Таланов В. И. // Письма в ЖЭТФ. 1966. Т. 3, № 12. С. 471.
17. Speck D., Bliss E. S., Glaze J., et al. // IEEE J. Quantum Electronics. 1981. V. 17, No. 9. P. 1599.
18. Власов С. Н., Крыжановский В. П., Яшин В. Е. // Квантовая электроника. 1982. Т. 9, № 1. С. 14.
19. Kochetkova M. S., Martyanov M. A., Poteomkin A. K., Khazanov E. A. // Optics Express. 2010. V. 18, No. 12. P. 12839.
20. Kuzmina M. S., Martyanov M. A., Poteomkin A. K., et al. // Optics Express. 2011. V. 19, No. 22. P. 21977.
21. Silfvast W. T. Laser fundamentals. Cambridge: University Press, 2004. 642 p.
22. Авакянц Л. И., Бужинский И. М., Корягина Е. И., Суркова В. Ф. // Квантовая электроника. 1978. Т. 5, № 4. С. 725.
23. Шайкин А. А., Фокин А. П., Соловьев А. А. и др. // Квантовая электроника. 2014. Т. 44, № 5. С. 426.
24. ГОСТ 11103-64. Стекло неорганическое и стеклокерамические материалы. Метод определения термостойкости. М.: Госстандарт СССР, 1964.

Поступила в редакцию 6 ноября 2015 г.; принята в печать 25 августа 2016 г.

## ENERGY LIMITATIONS FOR NEODYMIUM GLASS LASERS WITH BEAM APERTURES OF 45 AND 60 MM

*A. A. Kuzmin, E. A. Khazanov, and A. A. Shaykin*

We study the possibility of increasing the pulse energy and repetition rate of the 220-J Nd:glass laser for pumping high-power Ti:Sapphire chirped pulse amplifiers. Stable operation of Nd:glass rod

amplifiers with an aperture of 45 mm for elastic stresses constituting 40% of the active medium damage threshold has been demonstrated experimentally. This regime corresponds to the pulse repetition rate 1/30 Hz and is a record one for pulsed laser amplifiers with stored energy exceeding 100 J. We have developed quantrons for Nd:glass rod active elements with an aperture of 60 mm, which permits a twofold increase in the output radiation energy with the same thermal load on the active elements as for rods 45 mm in diameter.