



УДК 621.373.826  
ББК 32.865

## НЕОДИМОВЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ РЕГЕНЕРАТИВНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ С ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИМ ЗАТВОРОМ<sup>1</sup>

*В.Н. Храмов, Э.И. Холманов, И.А. Диасамидзе*

Разработана мощная лазерная установка, генерирующая ультракороткие импульсы (УКИ) и работающая в режиме регенеративного усиления (РГУ). Лазерная усилительная система состояла из задающего лазера (инжектора) и усилителя. В качестве модулятора добротности лазера-усилителя использован электромеханический затвор (ЭМЗ). Основным его достоинством является отсутствие фоторефракции, которая проявляется в аналогичных усилителях с электрооптическим затвором. Приведены результаты экспериментальных исследований временных и энергетических характеристик такой лазерной усилительной системы.

**Ключевые слова:** ультракороткие лазерные импульсы, лазерные регенеративные усилители, модуляция добротности резонатора.

### Введение

Развитие лазерной техники дало возможность получать импульсы света с длительностями от миллисекунд до десятков фемтосекунд, с энергиями от наноджоулей до нескольких килоджоулей. Благодаря такому большому диапазону параметров лазеры со времени их открытия получили широкое распространение и используются во многих отраслях науки и техники.

Одной из задач лазерной физики является разработка лазерных установок, способных генерировать лазерные импульсы нано- и пикосекундного диапазона с энергией порядка единиц джоулей [3; 4].

Разработанные к настоящему времени лазерные усилительные системы имеют сходные структуры и состоят из задающего генератора (инжектора), устройства chirпирования импульсов, усилительного каскада и компрессора усиленных импульсов [6]. Чтобы достичь наибольшего усиления необходимо использовать лазер-усилитель с большой апертурой, иначе мощный оптический импульс, сконцентрированный на небольшую площадь, может повредить или разрушить элементы системы. Так как в режимах сверхрегенеративного и регенеративного усиления, как и в режиме гигантского импульса (ГИ), в усилителе необходимо задать начальную ненулевую инверсную заселенность активной среды, то возникают характерные для лазеров с широкой апертурой трудности с методами управления излучением. Основным различием между сверхрегенеративным усилителем (СРГУ) и

регенеративным (РГУ) является то, что в сверхрегенераторе усиление активной среды включается в момент прихода инжектируемого излучения от задающего лазера, поэтому здесь и не требуется достаточно точной электронной схемы сопряжения этих лазеров. В регенеративном усилителе с резким включением добротности резонатора лазера-усилителя необходимо инжектировать излучение задающего лазера до начала нелинейного этапа формирования собственной генерации усилителя, поэтому для правильной работы этих лазеров необходима очень точная электронная схема сопряжения, регулирующая момент инжекции излучения в усилитель с точностью до нескольких десятков наносекунд. Разработке и реализации такой системы и посвящена данная работа.

#### **Экспериментальная установка и методика исследования характеристик лазерного регенеративного усилителя с электромеханическим затвором**

Усилитель построен на базе мощного технологического лазера ГОС-1001 на неодимовом стекле. В качестве задающего использован лазер, работающий в режиме кратковременной резонансной модуляции потерь (КРМП) [2]. Для режима РГУ необходимо создать инверсную населенность в лазере-усилителе, а затем с резким открытием добротности резонатора усилителя впрыснуть излучение задающего КРМП-лазера. Таким образом, при изменении начальных условий лазер станет воспроизводить и усиливать захваченное излучение.

К достоинствам РГУ с электромеханическим затвором (ЭМЗ) можно отнести полное отсутствие фоторефракции [1; 5], что в свою очередь позволяет получать энергии до нескольких джоулей.

На рисунке 1 представлена общая схема экспериментальной установки.

Для правильного понимания принципа работы установки в режиме РГУ необходимо рассмотреть временную диаграмму процессов. Для запуска промышленного лазера ГОС-1001 в режиме РГУ с ЭМЗ необходим блок управления, он должен синхронизиро-

вать момент включения добротности резонатора, момент достижения активной средой максимума инверсии и момент впрыска в усилитель сформированного КРМП-импульса. Диаграмма синхронизации процессов для осуществления режима РГУ представлена на рисунке 2. На диаграмме обозначены:  $T1$  – время между импульсом с датчика оборотов ЭМЗ и включением добротности усилителя;  $T2$  – регулируемая внешняя задержка;  $T3$  – время, необходимое для достижения максимума инверсии усилителя после сигнала на поджиг ламп накачки;  $T4$  – время между сигналами, идущими на поджиги ламп накачки лазеров;  $T5$  – время, необходимое для достижения максимума инверсии в активных элементах КРМП-лазера;  $T6$  – задержка между моментами включения ламп накачки усилителя и включением ВЧ-генератора КРМП-лазера;  $T_n$  – время линейного этапа задающего КРМП-лазера.

Рассматривая эту диаграмму, мы должны иметь в виду физический смысл режима РГУ и его отличие от режима КРМП. Принципиально они почти не отличаются. Разница лишь в том, что в режиме КРМП осуществляется ВЧ-модуляция добротности резонатора во время линейного этапа развития генерации, а в режиме РГУ на этом участке подается заранее сформированный цуг УКИ. Достаточным условием для захвата является превышение энергией цуга УКИ величины, соответствующей энергии спонтанного шума на рассматриваемом участке генерации усилителя в режиме РГУ.

Данная установка способна работать и в режиме ГИ, для описания процесса образования ГИ нужно рассмотреть лишь первые шесть пунктов диаграммы.

На рисунке 3 представлен временной ход интенсивности УКИ задающего КРМП-лазера, а на рисунке 4 – осциллограмма цуга усиленных импульсов, подтверждающая воспроизведение цуга УКИ при усилении.

#### **Основные результаты**

Необходимым условием для правильной работы системы является согласование режимов частот резонатора задающего КРМП-лазера и резонатора регенеративного

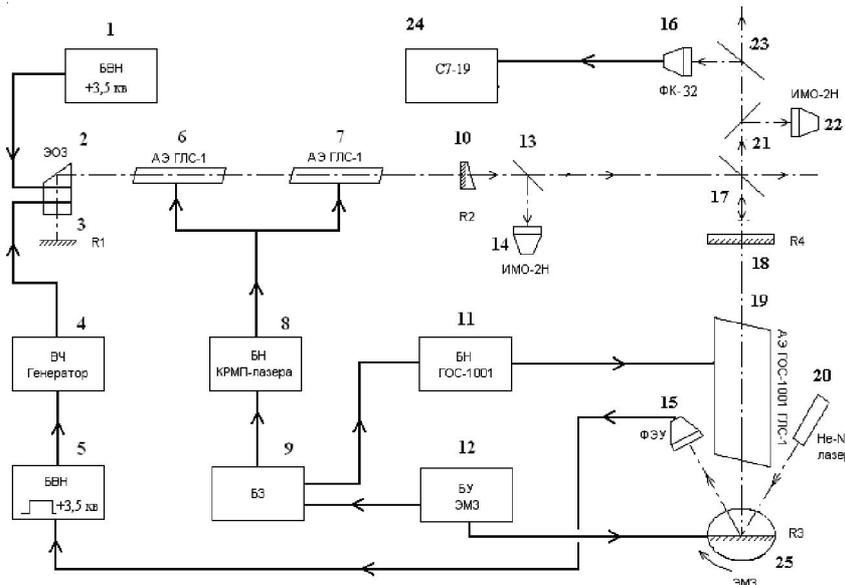


Рис. 1. Общая схема экспериментальной установки:

- 1 – блок высокого напряжения; 2 – электрооптический затвор; 3 – глухое зеркало ( $R = 99\%$ );  
 4 – ВЧ-генератор; 5 – высоковольтный блок, формирующий прямоугольный импульс; 6, 7 – активные элементы КРМП-лазера (неодимовое стекло марки ГЛС-1); 8 – блок управления задающего КРМП-лазера;  
 9 – блок задержек ( $R = 55\%$ ); 11 – блок накачки технологического лазера ГОС-1001;  
 12 – блок управления электромеханическим затвором (ЭМЗ); 13, 17, 21, 23 – светоделительные пластинки; 14, 22 – измеритель энергии ИМО-2Н; 15 – ФЭУ; 16 – ФК-32; 18 – выходное зеркало ( $R = 20\%$ );  
 19 – активный элемент лазера ГОС-1001 (неодимовое стекло марки ГЛС-1); 20 – He-Ne-лазер;  
 24 – скоростной осциллограф С7-19; 25 – ЭМЗ

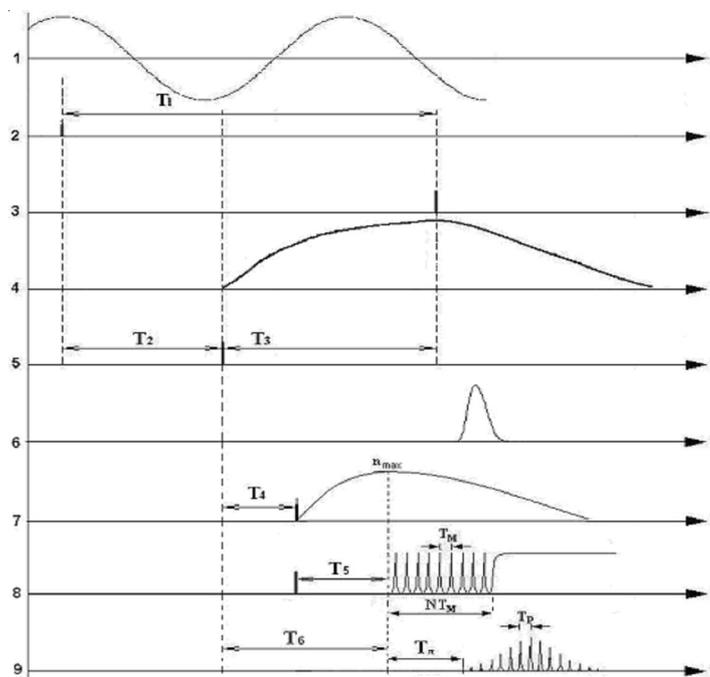


Рис. 2. Диаграмма временных процессов:

- 1 – сигнал с катушки датчика оборотов ЭМЗ; 2 – момент отключения двигателя ЭМЗ; 3 – момент включения добротности резонатора усилителя; 4 – инверсия населенности лазера-усилителя; 5 – импульс на поджиг ламп накачки усилителя; 6 – гигантский импульс на выходе лазера-усилителя при отсутствии инжекции;  
 7 – инверсная населенность в задающем КРМП-лазере; 8 – модуляционный сигнал на электрооптический затвор КРМП-лазера; 9 – цуг импульсов на выходе КРМП-лазера

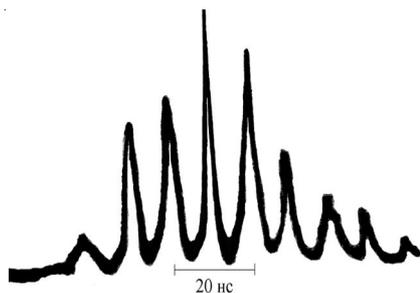


Рис. 3. Временной ход интенсивности УКИ задающего КРМП-лазера (длительность отдельного УКИ – 1–2 нс, энергия в цуге – 110 мДж)

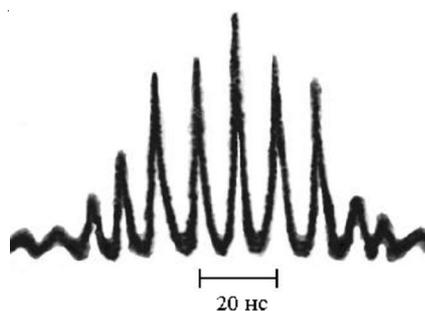


Рис. 4. Осциллограмма цуга усиленных импульсов (длительность отдельного УКИ – 1–2 нс, энергия в цуге – 4 Дж)

усилителя. На рисунке 5 представлена зависимость длительности одного импульса из цуга УКИ на выходе усилителя от плавного перемещения выходного зеркала резонатора усилителя при фиксированной оптической длине резонатора задающего лазера

Из рисунка 5 видно, что в области резонанса минимальная длительность одного УКИ составляет 2 нс.

Зависимость плотности мощности лазерной системы от перемещения выходного зеркала при диаметре апертуры излучения 25 мм и постоянной энергии излучения 4 Дж представлена на рисунке 6.

Рисунок 6 показывает, что в области резонанса плотность мощности максимальна и составляет  $3,2 \cdot 10^8$  Вт/см<sup>2</sup> при диаметре апертуры 25 мм на выходе регенеративного усилителя, а при фокусировке данного излучения собирающей линзой интенсивность возрастает примерно на пять порядков. Такой интен-

сивности достаточно для получения оптического пробоя в воздухе. Фотография оптического пробоя в воздухе в режиме фокусировки представлена на рисунке 7.

Этот результат позволяет использовать данную установку для лазерно-плазменных исследований. Экспериментально определен коэффициент усиления регенеративной системы с ЭМЗ. Излучение задающего КРМП-лазера максимально ослаблялось до порогового значения (10 нДж), ниже которого усилитель генерирует гигантский импульс (см. рис. 8), так как уровень спонтанного шума лазера-усилителя становится больше энергии впрыскиваемого УКИ, а типичная осциллограмма генерации системы в режиме РГУ при впрыске УКИ с энергией от 10 нДж до 10 мДж при постоянной энергии 4 Дж на выходе РГУ представлена на рисунке 4. В области резонанса коэффициент усиления по энергии составляет  $4 \cdot 10^8$ .

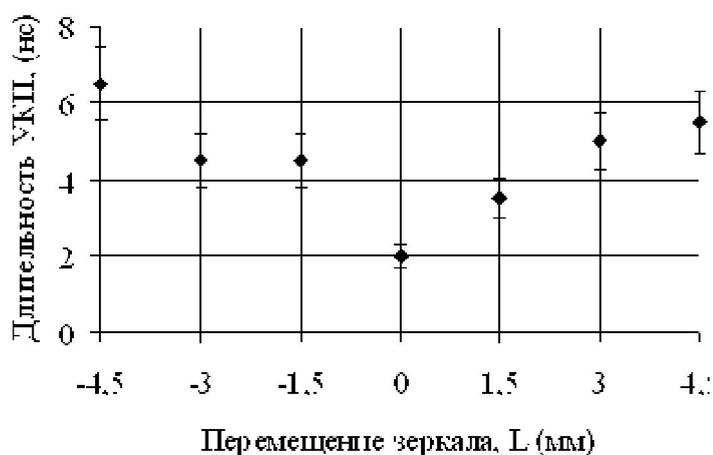


Рис. 5. График зависимости длительности одного импульса из цуга УКИ  $\tau_n$  (нс) от перемещения выходного зеркала резонатора  $\Delta L$  (мм) в режиме регенеративного усиления

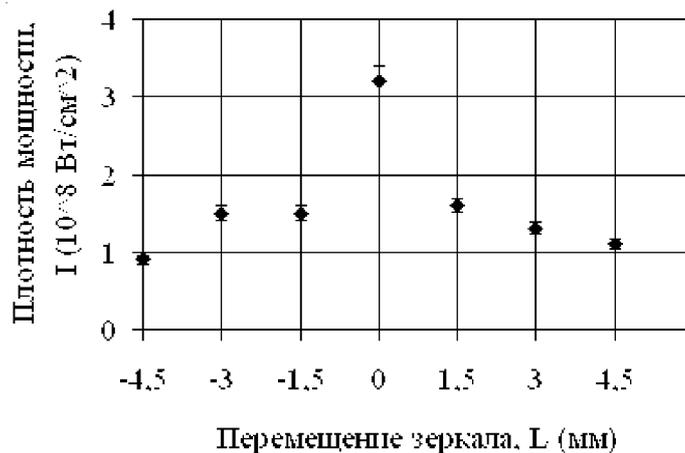


Рис. 6. Зависимость плотности мощности лазерной системы в РГУ от перемещения выходного зеркала резонатора  $\Delta L$  (мм)

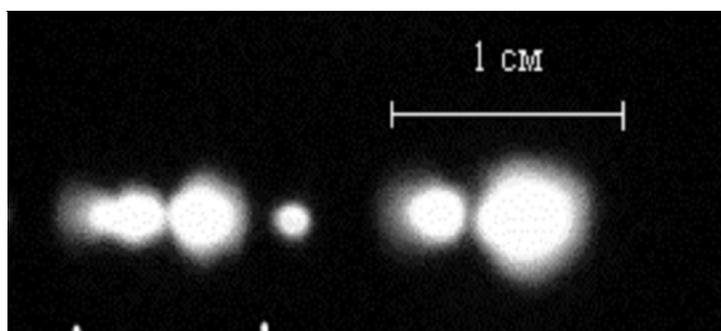


Рис. 7. Фотография лазерной плазмы в воздухе в режиме РГУ

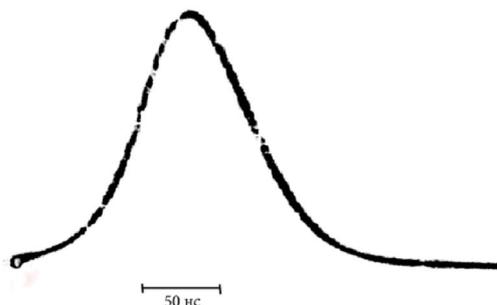


Рис. 8. Осциллограмма гигантского импульса лазера ГОС-1001 с электромеханическим затвором

### Выводы

Таким образом, в ходе работы была разработана лазерная усилительная система, работающая в режиме регенеративного усиления, предназначенная для лазерно-плазменных исследований. Продемонстрирована высокая плотность мощности данной системы, которая составляет  $3,2 \cdot 10^8$  Вт/см<sup>2</sup> без фокусировки. Эк-

спериментально определен коэффициент усиления регенеративного усилителя с электромеханическим затвором, равный  $4 \cdot 10^8$ .

### ПРИМЕЧАНИЯ

<sup>1</sup> Работа выполнена в рамках гранта 5-2011-МУ/ВолГУ Волгоградского государственного университета.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Аникеев, Б. В. О естественном ограничении энергии генерации в ООС-лазере за счет паразитного фоторефрактивного эффекта / Б. В. Аникеев, Н. В. Марусин, В. Н. Храмов // Лазеры. Измерения. Информация : тез. докл. конф., г. Санкт-Петербург, 23–24 июня 2004 г. / под ред. В. Е. Привалова. – СПб. : Балт. гос. техн. ун-т, 2004. – С. 33–34.

2. Аникеев, Б. В. Неодимовые лазеры с кратковременной периодической модуляцией потерь / Б. В. Аникеев, В. Н. Храмов, К. А. Левин // Квантовая электроника. – 1996. – Т. 23, № 1. – С. 59–61.

3. Высокоэффективные преусилители пикосекундных импульсов на неодимовом стекле и иттрий-

алюминиевом гранате / Р. Л. Ганеев [и др.] // Квантовая электроника. – 1996. – Т. 12. – С. 1065–1068.

4. Мак, А. Л. Оптика мощных твердотельных лазеров: проблемы реализации предельных возможностей / А. Л. Мак, В. Е. Яшин // Оптический журнал. – 1998. – Т. 65, № 12. – С. 39–50.

5. Марусин, Н. В. Исследование физических характеристик лазерной системы с электрооптической обратной связью : дис. ... канд. физ.-мат. наук / Николай Владимирович Марусин. – Волгоград : ВолГУ, 2005. – 113 с.

6. Тераватный фемтосекундный титан-сапфировый лазерный комплекс / А. А. Бабин [и др.] // Квантовая электроника. – 2001. – Т. 31, № 7. – С. 623–626.

**THE NEODYMIUM REGENERATIVE LASER AMPLIFIER  
WITH THE ELECTROMECHANICAL SHUTTER**

*V.N. Khramov, E.I. Kholmanov, I.A. Diasamidze*

The high-power laser setup generating ultrashort pulses (USP) and working in a mode of regenerative amplification (RGA) has been designed. The laser amplifying system has been composed of the master laser (injector) and the amplifier. As the Q-switch of the laser amplifier the electromechanical shutter (EMS) has been used. Its basic virtue is absence of a photorefraction which is exhibited in similar amplifiers with an electrooptical shutter. Results of experimental researches of time and energy performances of such laser amplifying system are given.

**Key words:** *ultrashort laser pulses, laser regenerative amplifiers, a Q-switching of the cavity.*